全球工程前沿

2019

中国工程院战略咨询中心
Center for Strategic Studies, CAE

高等教育出版社

Clarivate Analytics | 科睿唯安

全球工程前沿
Engineering Fronts

目录

引言 1

第一章　研究方法 2
1　工程研究前沿的产生 2
1.1　论文数据的获取与预处理 2
1.2　文献聚类主题的获取和筛选 3
1.3　专家研判 4
2　工程开发前沿的产生 4
2.1　工程开发热点的遴选 4
2.2　专利地图的获取和解读 4
2.3　专家提名与研判 5
3　术语解释 5

第二章　领域报告 6
一、机械与运载工程 6
1　工程研究前沿 6
1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势 6
1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读 9
2　工程开发前沿 15
2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势 15
2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读 21

二、信息与电子工程 29
1　工程研究前沿 29
1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势 29
1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读 33
2　工程开发前沿 41
2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势 41
2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读 45

三、化工、冶金与材料工程 51
1　工程研究前沿 51
1.1　Top 11 工程研究前沿发展态势 51
1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读 55
2　工程开发前沿 62
2.1　Top 12 工程开发前沿发展态势 62
2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读 66

四、能源与矿业工程 73
1　工程研究前沿 73
1.1　Top 12 工程研究前沿发展态势 73
1.2　Top 4 工程研究前沿重点解读 78
2　工程开发前沿 87
2.1　Top 12 工程开发前沿发展态势 87
2.2　Top 4 工程开发前沿重点解读 94

五、土木、水利与建筑工程 103
1　工程研究前沿 103

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 103
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 107
2 工程开发前沿 114
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 114
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 120

六、环境与轻纺工程 127
1 工程研究前沿 127
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 127
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 131
2 工程开发前沿 138
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 138
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 143

七、农业 150
1 工程研究前沿 150
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 150
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 153
2 工程开发前沿 161
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 161
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 165

八、医药卫生 171
1 工程研究前沿 171
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 171
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 176
2 工程开发前沿 185
2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势 185
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 189

九、工程管理 199
1 工程研究前沿 199
1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势 199
1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读 203
2 工程开发前沿 214
2.1 Top 10 工程开发前沿及发展态势 214
2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读 218

总体组成员 226

引言

工程科技是改变世界的重要力量，工程前沿是工程科技未来方向的重要指引。把握全球工程科技大势，瞄准世界工程科技前沿，大力推动科技跨越发展，已成为全球各国的战略选择。2017 年起，中国工程院联合科睿唯安公司、高等教育出版社有限公司组织开展了“全球工程前沿”研究项目，期望能汇集工程科技人才的智慧，在论文和专利数据挖掘的基础上，研判全球工程研究前沿和工程开发前沿，为人类应对全球挑战、实现可持续发展提供行动参考。

2019 年度全球工程前沿研究继续依托中国工程院 9 个学部及“1+9+1”系列期刊，以数据分析为基础，以专家研判为依据，遵从定量分析与定性研究相结合、数据挖掘与专家论证相佐证、工程研究前沿与工程开发前沿并重的原则，凝练获得 93 个全球工程研究前沿和 94 个全球工程开发前沿，并分别重点解读 28 项工程研究前沿和 28 项工程开发前沿。

为切实提高全球工程前沿预判的科学性，2019 年度项目在前两年项目实践的基础上，增加了从需求拉动的角度提名前沿，并在数据对接、数据分析、专家研判三个阶段均设置了三轮专家与数据深度交互、迭代研判的环节，提升了数据挖掘、数据研判的准确性，增加了从需求角度研判前沿的力度，提升了研判的专业性、学术性，有效避免了唯论文、唯专利、唯数据指标的不足。

本报告由两部分组成，第一章对研究采用的数据和方法进行说明；第二章包括机械与运载工程、信息与电子工程、化工冶金与材料工程、能源与矿业工程、土木水利与建筑工程、环境与轻纺工程、农业、医药卫生和工程管理 9 个领域分报告，对每个领域的工程研究前沿和工程开发前沿进行描述和分析，并对重点前沿进行详细解读。

第一章　研究方法

2019 年度全球工程前沿在以专家为核心、数据为支撑的原则下，采用专家与数据多轮交互、迭代遴选研判的方法，实现了专家主观研判与数据客观分析的深度融合，共遴选出 2019 年度 93 个全球工程研究前沿和 94 个全球工程开发前沿，并按发展前景、受关注程度等原则筛选出重点解读的 28 个工程研究前沿和 28 个工程开发前沿。9 个领域组的前沿数量分布如表 1.1 所示。

在具体研究方法流程上分为数据对接、数据分析和专家研判三个阶段。数据对接阶段主要通过领域专家和图书情报专家的交互，明确数据挖掘的范围；数据分析阶段主要通过聚类方法获得基于数据的研究热点和专利地图，并通过专家研读获得工程热点；专家研判主要通过专家研讨、问卷调查等方法确定最终前沿。同时，为弥补数据挖掘中因算法局限性或数据滞后所导致的研究前沿性不足的问题，鼓励领域专家对照数据分析结果查漏补缺，提名前沿。具体实施流程如图 1.1 所示，其中绿色部分以数据分析为主，紫色部分以专家研判为主。

1　工程研究前沿的产生

本报告中，工程研究前沿的基础素材主要来自以下两种途径：一是科睿唯安基于 Web of Science 核心合集的 SCI 期刊论文和会议论文数据，通过共被引聚类方法获得文献聚类主题；二是专家提名备选工程研究前沿。两种途径获得的前沿经过专家论证、提炼得到备选工程研究前沿，再经过问卷调查和多轮专家研讨，遴选得出每个领域 10 个左右工程研究前沿。

1.1　论文数据的获取与预处理

科睿唯安将 Web of Science 学科与中国工程院 9 个学部领域进行匹配映射，获得每个领域对应的期刊和会议列表，经过领域专家修正与补充，确定 9 个领域数据分析的数据源为 10 817 本期刊和 24 330 个会议列表。此外，对于《Science》等 70 本综合学科的期刊，采用单篇文章归类的方法，即根据期刊内单篇文章的参考文献主要归属的学科来分配这篇文章的学科领域。在此基础上，检索得

表 1.1　9 个领域的前沿数量分布

领域	工程研究前沿 / 个	工程开发前沿 / 个
机械与运载工程	10	10
信息与电子工程	10	10
化工、冶金与材料工程	11	12
能源与矿业工程	12	12
土木、水利和建筑工程	10	10
环境与轻纺工程	10	10
农业	10	10
医药卫生	10	10
工程管理	10	10
合计	93	94

到发表于 2013—2018 年的上述期刊论文和会议论文，被引用次数截至 2019 年 2 月。

对于各个领域，科睿唯安综合考虑期刊与会议差别、出版年等因素，对上述文献列表进行检索和数据挖掘，将期刊与会议论文分开筛选，筛选出其中被引频次位于前 10% 的高影响力论文，作为研究热点分析的原始数据集。如表 1.1.1 所示。

1.2 文献聚类主题的获取和筛选

通过对上述的数据集中 9 个领域前 10% 的高被引论文进行共被引聚类分析，得到 9 个领域的全部文献聚类主题。对于出版年在 2017—2018 年的聚类主题，按照核心论文的数量、总被引频次、常被引论文占比依次筛选，获得 25 个不相似的文献聚类主题；对于出版年在 2017 年之前的聚类主题，按照核心论文数量、总被引频次、核心出版物平均出版年份、常被引论文占比依次进行筛选，提取出 35 个不相似的文献聚类主题。其中各领域聚类主题如有交叉，则递补不交叉的聚类主题。此外，对于没有聚类主题覆盖的学科按关键词进

图 1.1 全球工程前沿研究实施流程图

表 1.1.1 各领域对应的期刊、会议数量及其前 10% 高被引的论文数

序号	领域	期刊数 / 本	会议数 / 个	高被引论文数 / 篇
1	机械与运载工程	457	1768	38 676
2	信息与电子工程	986	9632	109 507
3	化工、冶金与材料工程	1128	2313	219 081
4	能源与矿业工程	226	785	440 641
5	土木、水利与建筑工程	359	512	28 384
6	环境与轻纺工程	1003	605	93 524
7	农业	1575	975	105 523
8	医药卫生	4328	7059	392 142
9	工程管理	755	681	32 927

行定制挖掘。最终得到 9 个领域 806 个文献聚类主题（见表 1.2.1）。

1.3　专家研判

专家提名研究前沿是数据挖掘方法的重要补充。在数据对接阶段，9 个领域的专家提出研究前沿问题，图书情报专家将前沿问题转化为数据挖掘的检索式，这是作为分析数据源的重要组成部分。在数据分析阶段，针对没有文献聚类主题覆盖的学科，领域专家提供关键词、代表性论文或代表性期刊，用于支撑科睿唯安进行定制检索。在专家研判阶段，领域专家对照科睿唯安提供的文献聚类结果进行查漏补缺，对于未出现在数据挖掘结果中而专家认为重要的前沿进行第二轮提名，图书情报专家提供数据支撑。最终，领域专家对数据挖掘和专家提名的工程研究前沿素材进行归并、修订和提炼，而后经过网络问卷调查、院士问卷调查和多轮会议研讨，遴选出 93 个工程研究前沿。

2　工程开发前沿的产生

2.1　工程开发热点的遴选

工程开发前沿的基础素材主要来自以下两种途径，一是主要以科睿唯安公司的 Derwent Innovation 专利数据库为原始数据，通过建立德温特专利分类号与中国工程院学部专业划分体系的映射关系，获得分析的基础数据，而后对 9 个领域 53 个学科组被引频次位于前 10 000 的高影响力专利进行主题聚类，获得 53 张专利地图，领域专家从专利地图中解读出备选工程开发前沿，其中工程管理领域作为单独的学科组进行分析；二是专家提名或小同行专利分析备选工程开发前沿。两种方式获得的备选开发前沿通过问卷调查和多场研讨，最终获得每个领域 10 个左右工程开发前沿。

2.2　专利地图的获取和解读

科睿唯安建立德温特手工代码与中国工程院学部专业划分标准体系的匹配关系，初步确定 9 个领域的专利数据检索范围及检索策略。领域专家通过对德温特手工代码删减、增补和完善，确定 53 个学科组的专利检索式。专利检索时间范围为 2013—2018 年，专利引用时间截至 2019 年 2 月。

通过 Derwent Innovation 专利平台检索，综合考虑年均被引频次和技术覆盖宽度指标，筛选获得每个学科组对应的前 10 000 个高被引的专利家族。利用专利文本间的语义相似度，获得 53 张能快速直观呈现工程开发技术分布的 ThemeScape 专利地图。

表 1.2.1　各领域共被引聚类结果统计

序号	领域	聚类主题数 / 个	前 10% 高被引论文数 / 篇	备选工程研究热点数 / 个
1	机械与运载工程	6720	29 960	138
2	信息与电子工程	16 816	76 015	67
3	化工、冶金与材料工程	26 563	116 361	68
4	能源与矿业工程	10 624	47 860	100
5	土木、水利与建筑工程	5 594	25 867	115
6	环境与轻纺工程	18 486	80 850	90
7	农业	7663	33 909	81
8	医药卫生	46 264	203 487	63
9	工程管理	4240	18 321	84

各领域专家在图书情报专家辅助下，从专利地图提炼技术开发前沿、归并相似前沿、确定开发前沿名称，得到每个学科组的备选工程开发前沿。同时，为避免专利数据挖掘中单纯以数字指标衡量前沿性，领域组专家尤其注重专利地图中低频次、相关性较差的专利解读力度。

2.3 专家提名与研判

为弥补数据挖掘中因算法局限性或数据滞后所导致的开发前沿性不足问题，鼓励领域专家查漏补缺，提名开发前沿。在数据对接阶段，领域专家提出开发前沿关键词与描述，图书情报专家将前沿转化为专利检索式，并作为数据源的重要组成部分。在数据分析阶段，挖掘被统计数据埋没的冷门、偏门、小同行前沿，纠正专利地图偏差。在专家研判阶段，领域专家对于未出现在数据挖掘结果中而专家认为重要的前沿进行第二轮提名，图书情报专家提供数据支撑。最终，领域专家对数据挖掘和专家提名的工程开发前沿素材进行归并、修订和提炼，共获取候选开发前沿 351 个，而后经过网络问卷调查、院士问卷调查和多轮会议研讨，遴选出 94 个工程开发前沿。

3 术语解释

前沿：全球工程前沿研究中的“前沿”是指具有前瞻性、先导性和探索性，对工程科技未来发展有重大影响和引领作用的主要方向，是培育工程学科技创新能力的重要指南。

文献（论文）：包括 Web of Science 中经过同行评议的公开发布的研究型期刊论文、综述和会议论文。

高影响力论文：指被引频次在同出版年、同学科论文中排名前 10% 的论文。

文献聚类主题：对高影响力论文进行共被引聚类分析获得的一系列主题和关键词的组合。

核心论文：工程研究前沿相关联的高影响力论文。

施引核心论文：指引用核心论文文献的集合。

平均出版年：指对该文献聚类主题中所有文献的出版年取平均数。

引文速度：引文速度是一定时间内衡量累计被引频次增长速度的指标。在本研究中，每一篇文献的引文速度是从发表的月份开始，记录每个月的累计被引频次。

常被引论文：指引文速度排名前 10% 的论文。

专利地图: 通过分析专利文献中的语义相似度，将相关技术的专利聚集在一起，并以地图形式可视化展现，是形象地反映某一行业或技术领域整体面貌的主题全景图。

技术覆盖宽度：指每一篇专利被分入的不同德温特手工代码的数量。该指标可以体现每件专利的技术覆盖广度。

中国工程院学部专业划分标准体系：包含中国工程科学技术（含农、医）的 9 个学部所涵盖的 53 个专业学科，按照《中国工程院院士增选学部专业划分标准（试行）》确定。

第二章　领域报告

一、机械与运载工程

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

机械与运载工程领域（以下简称机械领域）所研判的 Top 10 工程研究前沿涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（见表 1.1.1）。其中，“高能固态锂电池”“超声速流中的减阻减热研究”“高性能微纳生物传感器”“车联网信息安全与隐私保护”“空间系留机器人自适应目标捕获控制”“基于可再生能源 / 燃料电池的混合动力系统”是传统研究的深入，“基于工业物联网的智能制造”“多机器人系统的协同控制”“基于拓扑优化和增材制造的设计与制造一体化”“智能电网的资源调度和风险评估”是新兴前沿。2013—2018 年的论文逐年发表情况见表 1.1.2，“基于可再生能源 / 燃料电池的混合动力系统”和“多机器人系统的协同控制”是近年来论文发表增速最显著的方向。

（1）基于工业物联网的智能制造

工业物联网通过制造资源的网络互联、数据互通和系统互操作，实现制造资源的合理配置、制造过程的按需执行、制造工艺的持续优化和制造环境的快速适应，从而构建创新服务驱动的智能制造体系。当前相关研究体现在三个维度：一是智能产品全生命周期的智能感知和迭代优化，包括传感器、射频识别器等手段的感知设计、生产、物流、销售、服务等产业链海量数据并处理；二是制造系统层级的泛在连通和精准控制，包括设备层、控制层、车间层、企业层和供应链协同层的传感装置，分布式控制系统、制造执行系统、企业资源计划系统和产业链不同企业协同研发等；三是制造系统智能功能的数字建模和实时分析，包括要素协同、系统集成、信息融合和新兴业态，比如智能产品的个性化定制和预测性维修等。这些研究面临着互联互通技术和协议的复杂多样、应用实施的深度和广度各不相同、

表 1.1.1　机械领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	基于工业物联网的智能制造	21	460	21.90	2017.1
2	高能固态锂电池	26	828	31.85	2015.4
3	超声速流中的减阻减热研究	48	983	20.48	2016.3
4	多机器人系统的协同控制	23	764	33.22	2017.1
5	高性能微纳生物传感器	45	1478	32.84	2016.6
6	车联网信息安全与隐私保护	17	617	36.29	2015.6
7	基于拓扑优化和增材制造的设计与制造一体化	5	86	17.20	2017.0
8	空间系留机器人自适应目标捕获控制	34	779	22.91	2015.5
9	基于可再生能源 / 燃料电池的混合动力系统	47	1179	25.09	2016.7
10	智能电网的资源调度和风险评估	18	689	38.28	2016.5

表 1.1.2　机械领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	基于工业物联网的智能制造	0	0	0	3	13	5
2	高能固态锂电池	3	7	2	8	4	2
3	超声速流中的减阻减热研究	3	5	5	10	14	11
4	多机器人系统的协同控制	0	2	1	0	10	10
5	高性能微纳生物传感器	2	2	5	4	23	9
6	车联网信息安全与隐私保护	2	2	2	6	5	0
7	基于拓扑优化和增材制造的设计与制造一体化	0	0	1	0	2	2
8	空间系留机器人自适应目标捕获控制	2	6	5	14	7	0
9	基于可再生能源 / 燃料电池的混合动力系统	0	1	3	16	17	10
10	智能电网的资源调度和风险评估	0	0	3	5	8	2

网络和数据安全的隐患众多等挑战，为此，近年来 5G 新型移动网络、人 – 信息 – 物理系统、软件定义网络、边缘计算、数字孪生等技术成为基于工业物联网的智能制造研究前沿和发展趋势。

（2）高能固态锂电池

目前广泛使用的液态锂电池在能量密度、安全性等关键指标上已接近理论或工程极限，必须发展新型储能模式才能满足未来发展的需求。固态电池采用固态电解质替代传统有机小分子液态电解质，从而在能量密度、安全性和循环寿命等方面具有潜在优势，被认为是最具颠覆性影响的下一代化学电源。固态电池前沿技术主要涉及到表 / 界面传质、匹配性关键材料、低界面阻抗制备技术、全寿命周期性能演化机理等前沿科学问题。表 / 界面传质与界面阻抗是影响固态电池技术的关键，未来主要是针对界面阻抗问题开发原位分析与表征技术；高比能匹配性关键材料包括高容量 / 高电压正极材料、高性能固态电解质以及高容量金属锂负极，是现阶段需要重点关注的领域；设计与材料匹配性的微界面、低阻抗制备工艺是解决量产化的关键；全寿命周期内电池性能衰减机理、材料体系演化途径等是固态电池健康状态评估与预测的关键。进一步开发基于长寿命固态电解质的固态金属 – 空气电池将会是电化学电源器件研究的终极目标，其理论容量接近燃油比能密度，因而将会是未来研究的重点和发展趋势。

（3）超声速流中的减阻减热研究

超声速流中的减阻减热主要针对固体表面与气体或等离子体相对运动速度马赫数 3 以上的流动进行研究，这类流动主要发生于高超声速飞行器、航天器再入大气层、高空高速侦察机或喷气式发动机的喷管内流等情形，这类情形经常伴随着强烈的气动加热、空气电离、激波、燃烧等问题。理论上通常牵涉等离子体流动、激波、稀薄空气动力学、复杂流动情形下的传热等问题，用现有的使用较广的基于 Navier-Stokes 方程的数值仿真方法只能勉强模拟以上问题，还需要强化研究基于蒙特卡洛直接模拟法和 Fokker-Planck 方程的方法，真实实验方法要进一步发展高速高温风洞及可耐受高温高冲击力的传感技术。目前主要使用在飞行器前端增加针状物、逆向喷流、边界层内喷流、等离子体边界层控制、激光能量沉积、飞行器底部排气、在表面制备烧蚀牺牲层、在内表面制备隔热层等方法来实现超声速流中的减阻减热，对在复杂曲面制造射流孔及供气系统、实验技术和数值仿真技术都提出了很高要求。

（4）多机器人系统的协同控制

多机器人系统由一系列交互机器人组成，各个机器人之间通过通信、协调、调度、合作和控制等

方式表达系统的结构，功能和行为特性，表现出高度协调的集群动力学行为，完成单个机器人难以完成的复杂工作。由于计算机科学，人工智能和自动化科学等学科的交叉渗透发展，多机器人系统已成为工程控制学科的前沿问题，在解决实际问题的过程中具有很强的鲁棒性和可靠性。传统的多机器人生产系统通常采用集中控制结构，难以适应小批量、多品种的生产方式，缺乏敏捷制造的能力；随着制造业向大型、复杂、动态和开放的方向发展，其复杂作业往往需要多个机器人协同工作，因此亟需研究具有更好的顺应性、一致性和优化性能的多机器人系统。

（5）高性能微纳生物传感器

微纳生物传感器技术是生化信息检测的重要方向，融合生物、电子、纳米等高新技术，正在向小型便携、实时快速、高灵敏、集成化和低成本方向发展，在医学诊疗、食品分析、环境检测等领域具有重要应用。高性能微纳生物传感器主要发展方向包括免疫传感器、表面等离子体共振生物传感器、真菌毒素超痕量传感检测、肿瘤生物标志物检测等。目前生物传感器在真菌毒素检测、肿瘤细胞检测等应用中面临着灵敏度、选择性不足的问题，迫切需要开发超痕量高选择性微纳生物传感器件。基于具有优异生物兼容性的新型纳米材料如金属硫化物量子点、纳米复合材料、氧化石墨烯、二维纳米材料等开发超痕量高选择性微纳传感器，可以极大提升器件的灵敏度、响应速度和选择性，因而成为了该领域的研究重点和发展趋势。

（6）车联网信息安全与隐私保护

车联网是无线通信技术与现代汽车工业结合产生的一种新型智能系统，其融合了大数据、云计算、人工智能等先进技术，在道路规划、资源调度、改善交通等方面做出了巨大贡献。但是，由于车联网具有网络规模庞大、通信环境开放、移动轨迹可预判等特点，使得其极易遭受攻击从而引发系统崩溃与隐私泄露等一系列安全问题。因此，保障车联网系统与数据安全受到了学术界与汽车工业界的广泛关注。在安全通信研究方面，由于基于公开密钥基础设施（PKI）的数字签名通信开销大，聚合签名与周期性证书忽略等方案的提出使得验证效率与通信效率得以提升；在身份隐私保护研究方面，匿名认证、共享证书、群签名等方案的提出可减少使用唯一证书的车辆数目，从而增强用户隐私；在位置隐私保护方面，k– 匿名、混合区、群导航等方案的提出可混淆车辆位置信息，使得位置服务器无法区分真实请求，从而加强位置隐私保护。以上科研进展有效提升了车联网的通信效率与安全性。然而，在无人驾驶技术高速发展的今天，车联网将面临更复杂的网络环境与更庞大的数据处理量，其信息安全与隐私保护研究任重道远。

（7）基于拓扑优化和增材制造的设计与制造一体化

拓扑优化与增材制造是近年来发展的先进设计与制造新方法、新技术，是传统设计与制造模式的重大革新，两者的有机融合代表了以“性能优先”为宗旨的创新研制模式发展趋势，成为引领我国高端装备设计制造一体化技术发展的重要学术研究前沿。目前拓扑优化与增材制造的结合大多是尝试采用增材制造加工拓扑优化设计样件的串行模式，而直接面向增材制造的拓扑优化设计方法研究仍然较为有限。一方面，大量增材制造构件仍然沿用基于铸造、钣金、机械加工等传统工艺要求而进行设计，难以充分发挥增材制造的优势与潜力；另一方面，现有拓扑优化方法未从多材料、多尺度、多组件集成的整体角度考虑结构的性能设计，在设计中较少考虑增材制造工艺约束，特别是增材制造工艺约束对设计构型的影响，使得现有结构设计制造串行模式不可避免地牺牲了结构性能。目前已开展的研究虽然已取得初步成效，但仍未能从材料 – 结构 – 工艺一体化的深度上揭示其设计原理，所蕴含的增材制造材料结构力学行为建模、工艺约束影响机理、复杂整体结构拓扑优化设

计、设计工具开发和应用构成了增材制造与结构创新设计融合的瓶颈难题。

（8）空间系留机器人自适应目标捕获控制

随着人类太空探索事业的不断发展，失效或退役的航天器逐年增加，轨道垃圾也不断累积，因此利用机器人进行空间目标捕获以达到清理轨道垃圾的目的，正在逐渐成为当前航天技术研究的前沿之一。空间系留机器人是主动进行目标捕获和拖曳的有效解决方案，尤其适用于对复杂运动的大型空间碎片进行捕获。由于空间系留机器人在对目标进行捕获和拖曳时，容易与目标发生冲击、碰撞、摆动或翻滚等动力学行为，为克服这些行为带来的影响，空间系留机器人需要做到灵巧、轻便，并具有成本效益。在微重力或真空环境下，空间系留机器人技术的关键在于基于视觉的姿态测量技术和协调控制系统。为保证空间系留机器人在太空运行的可靠性，对其目标捕获过程中的碰撞分析、动力学演化及其控制设计都具有重要意义。

（9）基于可再生能源 / 燃料电池的混合动力系统

传统内燃机汽车的普及在给人们带来方便舒适的现代生活的同时，也带来了严重的环境污染和能源危机。为了有效地应对能源和环境问题，各国都在大力开展绿色能源以及可再生能源的应用和研究。基于可再生能源 / 燃料电池的混合动力系统以其无污染、零排放等性能优势逐渐成为汽车领域的研究前沿之一。可再生能源 / 燃料电池的运行温度范围广、功率密度高、稳定性好。因此，可再生能源 / 燃料电池是未来解决能源和环境问题的首选动力源。目前，一般采用主、辅能量源共同供电的多能源动力系统结构。由于混合动力系统多样，控制复杂，且可再生能源 / 燃料电池本身动态性能较弱，研究混合动力系统结构及其优化，并选用合理的控制策略以恰当分配各能量源的功率是目前混合动力系统研究的核心问题。

（10）智能电网的资源调度与风险评估

智能电网是以物理电网为基础，将现代先进传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网。通过集成应用分布式智能、宽带通信以及自动控制系统，可保证电网各成员之间的无缝连接与实时互动，使电网更加可靠安全、经济高效、环境友好。建立智能电网的关键技术包括坚强、灵活电网结构的建立；可再生能源和分布式能源的接入；开放式电力信息通信系统的集成以及高效应急调度中心网络的构建等。随着人类社会对电力依赖程度的加重，电力系统规模不断扩大，电网运行的潜在风险也越来越多，资源调度任务变得更加复杂且繁重，针对智能电网开发新型资源调度与风险评估方法，提升电力系统的弹性、安全性与可靠性，已成为该领域的研究前沿和发展趋势。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 基于工业物联网的智能制造

为应对新工业革命下的全球竞争，“德国工业 4.0”“美国先进制造”“中国制造 2025”“英国工业 2050”“日本再兴战略”等国家发展战略将智能制造列为制造业未来发展的重要方向。作为智能制造的关键使能技术，工业物联网研究已经全面渗透到了智能制造的各个领域，包括制造领域实体间的互联互通技术与方法、制造领域中数据信息建模与流动、制造领域创新应用模式和制造资源优化配置研究等。当前基于工业物联网的智能制造研究前沿和发展趋势，主要从三个维度（生命周期、系统层级和智能功能）、六个方向（智能感知、泛在连通、精准控制、数字建模、实时分析和迭代优化）上展开，积累了大量的理论方法及工程实践。

在维度上，当前生命周期维度研究工业物联网

在系统架构生命周期的所有环节的应用，包括设计、生产、物流、销售、服务等一系列相互联系的价值创造活动组成的链式集合，侧重企业之间的协同互联；系统层级维度研究工业物联网在设备层、控制层、车间层、企业层和供应链协同层的应用，偏重企业内部的互联互通；智能功能维度研究工业物联网在要素协同、系统集成、信息融合和新兴业态中的应用，偏重制造到服务的转型，以及新的业务形态，比如产品预测性维修等。在方向上，当前工业物联网的智能感知研究，探索高效利用传感器、射频识别等感知手段获取产品全生命周期内的不同维度的信息数据方法；泛在连通研究制造资源数据的互联互通方法，包括机器与机器、机器与人、机器与环境之间的互联互通技术；数字建模研究制造资源到数字空间的映射，包括工业物联网下生产过程全要素的抽象建模；实时分析研究制造资源数据的直观化和可视化分析，探究工业资源状态在虚拟空间和现实空间的内在联系；精准控制研究工业物联网下制造资源精准的信息交互和无间隙协作；迭代优化研究工业物联网体系的自我学习与提升方法，探究制造资源、制造过程、制造工艺和制造环境的优化配置。

尽管基于工业物联网的智能制造在三个维度和各个方向取得重要进展，但仍面临着互联互通技术和协议的复杂多样、应用实施的深度和广度各不相同、网络和数据安全隐患众多等问题和挑战。近年来，人－信息－物理系统、5G 新型移动、网络软件定义网络、边缘计算、数字孪生等得到了广泛的重视，包括三元体系与框架，大带宽、低时延和大连接通信，自动化和可编程网络，设备端本地计算，虚拟数字空间和物理设备空间映射等。

“基于工业物联网的智能制造”工程研究前沿中核心论文发表量排在前三的国家 / 地区分别为中国（7）、德国（6）、瑞典（6）和意大利（6），篇均被引频次排在前三的国家 / 地区为德国（38）、巴西（28）和法国（23.75），见表 1.2.1。在发文量 Top 10 国家 / 地区中，中国、瑞典和瑞士合作较多，见图 1.2.1。核心论文发文量排在前三的机构分别为 ABB Corp Res（4）、Beijing Univ Posts & Telecommun（3）、Tsinghua Univ（3） 和 Univ Padua（3），篇均被引频次排在前三的机构分别为 Asea Brown Boveri Corp Res（34）、Cisco Syst（34）和 Ctr Commun Syst Res（34），见表 1.2.2，在发文量 Top 10 机构中 ABB Corp Res、Beijing Univ Posts & Telecommun 和 Tsinghua Univ 间合作较多，见图 1.2.2。施引核心论文发文量排在前三的国家 / 地

表 1.2.1　“基于工业物联网的智能制造”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	7	33.33%	97	21.09%	13.86
2	Germany	6	28.57%	228	49.57%	38.00
3	Sweden	6	28.57%	106	23.04%	17.67
4	Italy	6	28.57%	76	16.52%	12.67
5	USA	5	23.81%	70	15.22%	14.00
6	Switzerland	4	19.05%	68	14.78%	17.00
7	France	4	19.05%	95	20.65%	23.75
8	Canada	3	14.29%	66	14.35%	22.00
9	Brazil	2	9.52%	56	12.17%	28.00
10	South Korea	2	9.52%	22	4.78%	11.00

表 1.2.2 “基于工业物联网的智能制造”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	ABB Corp Res	4	19.05%	39	8.48%	9.75
2	Beijing Univ Posts & Telecommun	3	14.29%	49	10.65%	16.33
3	Tsinghua Univ	3	14.29%	49	10.65%	16.33
4	Univ Padua	3	14.29%	43	9.35%	14.33
5	City Univ Hong Kong	2	9.52%	39	8.48%	19.50
6	KTH	2	9.52%	44	9.57%	22.00
7	Royal Inst Technol	2	9.52%	14	3.04%	7.00
8	Asea Brown Boveri Corp Res	1	4.76%	34	7.39%	34.00
9	Cisco Syst	1	4.76%	34	7.39%	34.00
10	Ctr Commun Syst Res	1	4.76%	34	7.39%	34.00

图 1.2.1 “基于工业物联网的智能制造”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

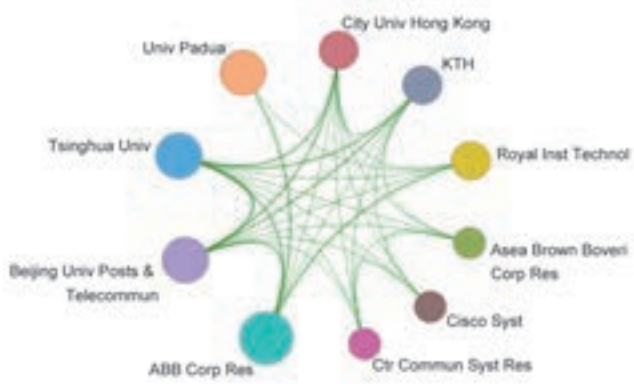

图 1.2.2 “基于工业物联网的智能制造”工程研究前沿主要机构间的合作网络

区分别为中国（71）、意大利（61）和美国（52），见表 1.2.3。施引核心论文的主要产出机构分别为 ABB Corp Res（12）、Natl Res Council Italy（11）、Univ Fed Santa Catarina（7）和 Univ Padua（7），见表 1.2.4。

1.2.2 高能固态锂电池

液态电解质锂电池受限于材料体系和器件结构模式，在能量密度、安全性、循环寿命等关键指标上已接近理论值或工程极限，进一步通过材料或工艺改良很难在关键性能上获得大幅度的提升。因此，必须发展新型储能材料和与之匹配的器件结构才能从根本上满足未来高比能的需求。液态电解质因采用易燃、易降解的小分子有机溶剂，在电化学反应过程中产生副反应从而引发系列连锁反应而导致电池性能衰减。固态电池采用固态电解质替代传统有机小分子液态电解质，有效避免小分子副反应的同时匹配高电压正极，且能选用更紧凑的结构模式，从而在能量密度、安全性和循环寿命等方面具有巨大优势，被认为是最具潜力的下一代高比能电化学电源。

尽管固态电池具有良好的潜在优势，要实现固态电池的产业化还面临几个主要的挑战。首先是高性能固态电解质，要满足倍率条件下的高离子传导率，也要满足制备工艺中的温和工艺条件以避免对微结构的破坏；基于人工智能材料基因组与机器学

表 1.2.3　“基于工业物联网的智能制造”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	71	18.88%	2017.8
2	Italy	61	16.22%	2017.6
3	USA	52	13.83%	2018.0
4	Germany	47	12.50%	2017.7
5	Sweden	27	7.18%	2017.7
6	UK	22	5.85%	2017.9
7	Brazil	22	5.85%	2017.9
8	South Korea	20	5.32%	2017.7
9	Spain	20	5.32%	2017.8
10	France	19	5.05%	2017.6

表 1.2.4　“基于工业物联网的智能制造”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	ABB Corp Res	12	15.79%	2017.7
2	Natl Res Council Italy	11	14.47%	2017.4
3	Univ Fed Santa Catarina	7	9.21%	2017.9
4	Univ Padua	7	9.21%	2017.3
5	KTH Royal Inst Technol	6	7.89%	2017.8
6	Beijing Univ Posts & Telecommun	6	7.89%	2017.8
7	Berlin Sch Econ & Law	6	7.89%	2017.3
8	Old Dominion Univ	6	7.89%	2018.2
9	National Institute of Standards and Technology	5	6.58%	2017.6
10	Univ Texas Dallas	5	6.58%	2018.4

习的前沿技术为高性能固态电解质材料的设计、开发提供了高效途径，从而摒弃传统试错模式下的材料开发，将会极大地促进固态电池的产业化发展。另一个挑战主要涉及到与材料匹配的制备技术，以表 / 界面传质与界面阻抗为核心的关键工艺与装备，材料体系、结构工艺的改变必定需要系统性的改变来匹配制造工艺，一体化、卷对卷制备工艺是现阶段重点关注的工程技术方向。另外一个瓶颈是全寿命周期性能演化规律及其机理尚不明确，实况下全寿命周期的监测耗时太长（>10 年），给演化机理的研究带来巨大挑战；具有大数据分析和深度学习能力的人工技术的应用将会解决全寿命周期内的电池性能衰减机理、材料体系演化途径。

固态电池在一定程度上能满足高比能要求，但是基于固态电解质材料的金属 – 空气电池理论容量（11 430 Wh/kg）接近燃油比能密度，将会是电化学电源器件研究的终极目标，因而是未来研究的前沿和发展趋势。针对固态金属 – 空气电池的研究主要面临空气正极副反应的抑制、金属负极稳定化以及循环性能的提升，关键科学与工程化前沿涉及到催化机理研究、空气电池结构设计、成组与电源管理等，未来在关键材料体系、工程与工艺等方面将

是关注的重点。

“高能固态锂电池”工程研究前沿中核心论文发表量排在前三的国家/地区分别为印度（20）、斯洛文尼亚（5）、美国（2）和匈牙利（2），篇均被引频次排在前三的国家/地区为斯洛文尼亚（39.20）、印度（30.35）和美国（28），见表 1.2.5。在发文国家/地区中，印度和匈牙利间合作较多，见图 1.2.3。核心论文发文量排在前三的机构分别为 Inst Chem Technol（17）、Univ Ljubljana（5）和 Jozef Stefan Inst（3），篇均被引频次排在前三的机构分别为 Jozef Stefan Int Postgrad Sch（55.50）、Jozef Stefan Inst（49.67）和 Univ Ljubljana（39.20），见表 1.2.6，在发文机构中 Univ Ljubljana、Jozef Stefan Inst 和 Jozef Stefan Int Postgrad Sch 间合作较多，见图 1.2.4。

施引核心论文发文量排在前三的国家/地区分别为中国（113）、印度（100）、马来西亚（30）和意大利（30），见表 1.2.7。施引核心论文的主要产出机构分别为 Inst Chem Technol（50）、Univ Ljubljana（16）、Chinese Acad Sci（13） 和 Univ Malaya（13），见表 1.2.8。

1.2.3 超声速流中的减阻减热研究

现阶段对于超声速流中的问题大都使用基于 Navier-Stokes 方程的数值仿真方法进行理论研究，由于缺乏相对成熟的软件系统，很少使用基于蒙特卡洛直接模拟法和 Fokker-Planck 方程的方法，但是只有使用上述方法才能更好地模拟稀薄空气条件、激波和有等离子体的情形。现有的高超风洞已经可以较好地进行相关的实验，并提供了较成熟的非接触式测试技术，但是缺乏可耐受 1000 ℃高温和高冲击力的传感技术进行接触式测试，难以对很

表 1.2.5 “高能固态锂电池”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家/地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	India	20	76.92%	607	73.31%	30.35
2	Slovenia	5	19.23%	196	23.67%	39.20
3	USA	2	7.69%	56	6.76%	28.00
4	Hungary	2	7.69%	48	5.80%	24.00
5	China	1	3.85%	25	3.02%	25.00

表 1.2.6 “高能固态锂电池”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Inst Chem Technol	17	65.38%	528	63.77%	31.06
2	Univ Ljubljana	5	19.23%	196	23.67%	39.20
3	Jozef Stefan Inst	3	11.54%	149	18.00%	49.67
4	Jozef Stefan Int Postgrad Sch	2	7.69%	111	13.41%	55.50
5	Univ West Hungary	2	7.69%	48	5.80%	24.00
6	Malaviya Natl Inst Technol	2	7.69%	39	4.71%	19.50
7	Ecol Engn Inst Ltd	1	3.85%	29	3.50%	29.00
8	FJP CCN Domzale Kamnik Doo	1	3.85%	29	3.50%	29.00
9	Clarkson Univ	1	3.85%	31	3.74%	31.00
10	Ecosphere Energy Serv LLC	1	3.85%	31	3.74%	31.00

多流动传热细节进行有效测试，研究基于氮化硅、蓝宝石、铂合金等材质的可耐受高温的传感器有望解决这类问题，对传感系统本身的隔热、制冷技术也提出了很高要求。

图 1.2.3 “高能固态锂电池”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

针对高超声速飞行器、航天器再入大气层的问题，气流速度可达马赫数 6 以上，伴随着强烈的气动加热、空气电离、气动载荷等问题，而且主要在超高空、临近空间等位置，空气稀薄，理论上很难再用基于 Navier-Stokes 方程的数值仿真方法进行理论分析。在飞行器前端增加针状物因其容易被烧蚀而淡出研究重点，目前主要使用优化气动外形、在表面制备烧蚀牺牲层、在内表面制备隔热层等方法进行隔热，已经开展研究逆向喷流、等离子体边界层控制、激光能量沉积、飞行器底部排气等方法进行减阻甚至附带减热。

针对高空高速侦察机这类问题，气流速度一般在马赫数 2.5~6，有较强的气动加热，一般不会发

图 1.2.4 “高能固态锂电池”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “高能固态锂电池”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	113	27.49%	2017.0
2	India	100	24.33%	2016.7
3	Malaysia	30	7.30%	2016.7
4	Italy	30	7.30%	2016.6
5	Iran	29	7.06%	2016.9
6	Slovenia	22	5.35%	2016.2
7	USA	19	4.62%	2017.1
8	South Korea	19	4.62%	2016.6
9	Spain	18	4.38%	2016.4
10	Poland	16	3.89%	2017.6

表 1.2.8 “高能固态锂电池”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Inst Chem Technol	50	33.56%	2016.5
2	Univ Ljubljana	16	10.74%	2016.1
3	Chinese Acad Sci	13	8.72%	2017.4
4	Univ Malaya	13	8.72%	2016.5
5	Jozef Stefan Inst	10	6.71%	2015.7
6	Univ Chinese Acad Sci	9	6.04%	2017.1
7	Natl Res Council of Italy	8	5.37%	2017.6
8	Harbin Inst Technol	8	5.37%	2016.6
9	Natl Inst Technol	8	5.37%	2017.3
10	Korea Adv Inst Sci & Technol	7	4.70%	2016.3

生严重的空气电离，飞行高度一般在 30 000 m 以下，属于满足连续介质条件的环境，基本可以用基于 Navier-Stokes 方程的数值仿真方法进行理论分析。可以通过在飞行器前端增加针状物进行减阻，在内表面制备隔热层等方法进行隔热。

针对喷气式发动机的喷管内流的问题，尤其是涡喷和冲压发动机，喷管扩张后的气流速度一般可达马赫数 2.5 以上，温度经常可达 1400 ℃以上，空气基本完全等离子体化，热交换极其强烈，需要利用基于 Fokker-Planck 方程的方法进行理论分析。现阶段主要研究集中于该情形下的减热方面，包括在表面制备烧蚀牺牲层、在内表面制备隔热层和边界层内喷流等方法进行热防护等，也有研究开始探索表面微结构和喷流控制流动进行减阻，进一步提高发动机效率。

“超声速流中的减阻减热研究”工程研究前沿中核心论文发表量排在前三的国家 / 地区分别为中国（34）、伊朗（10）、英国（3）和阿塞拜疆（3），篇均被引频次排在前三的国家 / 地区为伊朗（29.50）、澳大利亚（20）和中国（19.15），见表 1.2.9。在发文量 Top 10 国家 / 地区中，中国、英国和阿塞拜疆间合作较多，见图 1.2.5。核心论文发文量排在前三的机构分别为 Natl Univ Def Technol（29）、Babol Noshirvani Univ Technol（5）和 Islamic Azad Univ（5），篇均被引频次排在前三的机构分别为 Babol Univ Technol（40）、Islamic Azad Univ（35.80）和 Isfahan Univ Technol（35.50），见表 1.2.10，在发文量 Top 10 机构中 Islamic Azad Univ 和 Babol Noshirvani Univ Technol 间合作较多，见图 1.2.6。施引核心论文发文量排在前 3 的国家 / 地区分别为中国（174）、伊朗（36）和印度（22），见表 1.2.11。施引核心论文的主要产出机构分别为 Natl Univ Def Technol（89）、Harbin Inst Technol（27）、Khazar Univ（15），见表 1.2.12。

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

机械与运载工程领域的 Top 10 工程开发前沿涉及机械工程、船舶与海洋工程、航空宇航科学技术、兵器科学与技术、动力及电气设备工程与技术、交通运输工程等学科方向（见表 2.1.1）。其中，“临近空间高超声速飞行器推进系统”“高效燃气涡轮发动机设计与制造技术”“波浪能发电与能量收集”“新型高效氢燃料电池”“船舶电力推进系统”“飞行器电磁隐身超材料开发与应用”是传

表 1.2.9　“超声速流中的减阻减热研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	34	70.83%	651	66.23%	19.15
2	Iran	10	20.83%	295	30.01%	29.50
3	UK	3	6.25%	30	3.05%	10.00
4	Azerbaijan	3	6.25%	29	2.95%	9.67
5	India	1	2.08%	15	1.53%	15.00
6	Japan	1	2.08%	7	0.71%	7.00
7	Australia	1	2.08%	20	2.03%	20.00
8	Pakistan	1	2.08%	8	0.81%	8.00
9	USA	1	2.08%	10	1.02%	10.00
10	Russia	1	2.08%	7	0.71%	7.00

表 1.2.10　“超声速流中的减阻减热研究”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Natl Univ Def Technol	29	60.42%	601	61.14%	20.72
2	Babol Noshirvani Univ Technol	5	10.42%	170	17.29%	34.00
3	Islamic Azad Univ	5	10.42%	179	18.21%	35.80
4	Khazar Univ	3	6.25%	29	2.95%	9.67
5	Babol Univ Technol	2	4.17%	80	8.14%	40.00
6	Isfahan Univ Technol	2	4.17%	71	7.22%	35.50
7	Nanjing Univ Aeronaut & Astronaut	2	4.17%	21	2.14%	10.50
8	Chinese Aerodynam Res & Dev Ctr	2	4.17%	13	1.32%	6.50
9	Amirkabir Univ Technol	2	4.17%	15	1.53%	7.50
10	Indian Inst Space Sci & Technol	1	2.08%	15	1.53%	15.00

图 1.2.5　“超声速流中的减阻减热研究”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

统研究的深入，“基于深度学习的人机智能交互系统”“生物 3D 打印制造技术”“面向无人驾驶的视觉传感与识别”“反小型无人机系统”是新兴前沿。上述各个前沿所涉及的 2013—2018 年的逐年核心专利公开量见表 2.1.2，“基于深度学习的人机智能交互系统”“面向无人驾驶的视觉传感与识别”是近年来专利公开量增速最显著的方向。

（1）临近空间高超声速飞行器推进系统

临近空间高超声速飞行器是指主要工作于临近空间区域（距地面 20~100 km）、飞行马赫数超过

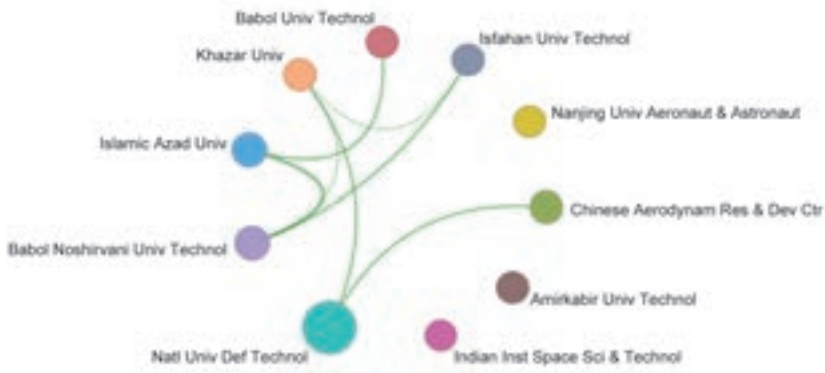

图 1.2.6 “超声速流中的减阻减热研究”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “超声速流中的减阻减热研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	174	62.37%	2017.1
2	Iran	36	12.90%	2017.0
3	India	22	7.89%	2017.3
4	Azerbaijan	15	5.38%	2018.0
5	UK	9	3.23%	2017.4
6	France	7	2.51%	2018.0
7	Russia	4	1.43%	2017.3
8	USA	4	1.43%	2017.8
9	Sweden	3	1.08%	2017.7
10	Australia	3	1.08%	2017.7

表 1.2.12 “超声速流中的减阻减热研究”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Natl Univ Def Technol	89	39.73%	2016.6
2	Harbin Inst Technol	27	12.05%	2017.5
3	Khazar Univ	15	6.70%	2018.0
4	Babol Noshirvani Univ Technol	14	6.25%	2016.7
5	Beihang Univ	13	5.80%	2017.5
6	Nanjing Univ Aeronaut & Astronaut	13	5.80%	2017.8
7	Islamic Azad Univ	12	5.36%	2016.8
8	Northwestern Polytech Univ	11	4.91%	2017.9
9	Isfahan Univ Technol	11	4.91%	2017.0
10	Babol Univ Technol	10	4.46%	2017.3

5 以上的一类高速飞行器，具有快响应、强突防、灵活机动等特点，是大国竞相发展的战略领域。国际上临近空间高超声速飞行器开发前沿主要包括高超声速巡航飞行器、水平起降高超声速飞机、两级入轨重复使用空天飞行器三个重点方向，而需要重点解决的共性基础与技术问题包括：飞行器总体设计与多学科优化、宽域高升阻比气动布局、高超声速推进、飞行器 / 推进系统一体化、结构热防护与能量管理、多功能结构设计优化、先进高动态控制等。在这些关键技术中，推进技术具有决定性作用，是前沿开发领域。首先，以高超声速燃烧为基础、拓展吸气式工作边界的超高速吸气式推进技术是前沿方向，需要解决超高速气流下的燃烧组织、能量转化问题；多动力热力循环组合与匹配优化、循环工作模态转换是新型空天组合推进技术迈向实用的研究重点和关键前提，是世界各国目前研究的前沿；宽域高效组合工作能力是基础支撑，需要融合热力循环优化、先进燃烧组织、过流部件流动控制、结构轻量化、余度控制等进行全速域综合效率提升。

（2）基于深度学习的人机智能交互系统

人机交互研究系统与用户之间的交互关系，其中系统可以是机器，也可以是程序化的系统和软件。

表 2.1.1　机械领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	临近空间高超声速飞行器推进系统	217	338	1.56	2015.8
2	基于深度学习的人机智能交互系统	603	1214	2.01	2017.3
3	生物 3D 打印制造技术	195	363	1.86	2016.7
4	高效燃气涡轮发动机设计与制造技术	765	2878	3.76	2015.4
5	面向无人驾驶的视觉传感与识别	348	1745	5.01	2016.8
6	波浪能发电与能量收集	147	214	1.46	2015.6
7	反小型无人机系统	121	523	4.32	2016.8
8	新型高效氢燃料电池	1464	1918	1.31	2015.5
9	船舶电力推进系统	141	176	1.25	2015.7
10	飞行器电磁隐身超材料开发与应用	242	348	1.44	2015.9

表 2.1.2　机械领域 Top 10 工程开发前沿逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	临近空间高超声速飞行器推进系统	25	42	25	43	33	49
2	基于深度学习的人机智能交互系统	16	14	23	48	130	372
3	生物 3D 打印制造技术	3	6	29	41	55	61
4	高效燃气涡轮发动机设计与制造技术	123	160	112	148	112	110
5	面向无人驾驶的视觉传感与识别	8	15	33	57	112	123
6	波浪能发电与能量收集	28	26	15	20	21	37
7	反小型无人机系统	4	7	11	11	43	45
8	新型高效氢燃料电池	253	257	216	208	263	267
9	船舶电力推进系统	21	24	16	21	39	20
10	飞行器电磁隐身超材料开发与应用	26	40	32	34	53	57

近年来，人机交互利用深度学习等人工智能技术，研究具有多模态输入输出的新一代智能交互系统，能够接收并处理外设指令、文字、语音、手势、表情、注视等多种输入/输出文本、图形、语音、手势、表情等多种信息，实现更加智能、更加自然的交互。尽管深度学习在语音识别、图像识别与分割、机器翻译等领域取得了显著的成果，远远超过以前的相关技术，但基于深度学习的人机智能交互系统尚有许多艰巨的难题亟需解决，比如语音中句法的模糊性、单词的边界界定、词义的歧义性，图像具有多物体、多目标、前景和背景具有依赖关系，深度学习算法训练方式（单节点多 GPU、多节点多 GPU 等），以及训练过程中的大量能耗等。在未来的人机交互系统中，深度学习依然是领域的前沿内容，同时也是其中的重点和难点。

（3）生物 3D 打印制造技术

随着近年来科学技术的迅猛发展，生命组织制造及其功能再生成为人类探索的前瞻方向，制造技术与生物医学融合正在展示其巨大的科技引领作用和未来产业价值。本方向的技术含义是采用 3D 打印技术，按照生物体的结构与功能需要，制造类生命体组织，支撑生物医学的发展。近期《Science》杂志封面报道，美国研究团队提出一项具有里程碑意义的发明：一个由水凝胶 3D 打印而成的肺模型，它具有与人体血管、气管结构相同的网络结构，能够像肺部一样朝周围的血管输送氧气，完成“呼吸”过程，这就体现了制造技术向具有呼吸运动和传输功能的制造技术发展的趋势。以色列科学家也打印出可以跳动的人工心脏。脑科学一直是科技研究的热点，人脑具有非逻辑的思考能力，具有计算机无法实现的功能，也是人类创新的物质基础。通过认识脑细胞间的关系，进而培育和再生脑组织去发展类脑计算机，有望实现以极低的物质代谢成本产生巨大的创新和运算能力。本方向的主要研究包括以下技术方向：①复杂结构器官的制造：重点解决人体功能性器官的研究，例如心脏组织，解决组织与神经信号的协调机制，使构建的组织从简单的力学支撑组织向具有神经调控的功能组织发展，进而解决 3D 打印组织与人体宿主组织的融合共生，最终实现人体器官的再生与功能重建；②类脑组织制造：脑组织中的神经元功能与信号发生和交换是形成思维功能的基础，其内部细胞的排列及它们在皮质各层内的类型和密度是大脑皮质分区功能的基础，从“认识脑”到“创造脑”是发展类脑计算机的方向，在体外对脑组织进行形态和功能构建取决于对目标功能部位所对应的神经元类型、构筑结构及神经元组合的仿生设计和精确制造，是生物类脑功能 3D 打印发展的前瞻性方向；③生物能转化组织：探索人体的能量和电能的形成与释放机理，构建人工肌肉和生物电池，提供高效率的能量释放机制，形成软体组织的能量转化与释放器件，发展更为高效的能量集成与释放器件；④生物机械共生体：现有机器存在着能量转化效率低、灵活性低等局限，用活体肌肉组织或细胞驱动的生物共生机器发展具有高能量转化效率、本质安全性、运动灵活性的多自由度柔性类生命机器人。建立耦合生命体和机械体的类生命机器人多细胞/多材料复合制造方法，为柔性类生命机器人提供一种从运动功能需求出发、可重复、可定制的快速制造新途径。

（4）高效燃气涡轮发动机设计与制造技术

燃气涡轮发动机，尤其是航空发动机，因其对材料、设计与制造的苛刻要求，被誉为“工业皇冠上的明珠”，一直处在工程开发的前沿，新技术不断涌现。为提升燃气涡轮发动机的各项性能，其设计与制造技术的开发前沿主要体现在以下几个方面：①叶片的设计与制造，包括低展弦比叶片、空心叶片、树脂基与陶瓷基复合材料叶片、单晶叶片、铸冷叶片、超冷叶片等；②叶盘和叶环的设计与制造，包括粉末高温合金涡轮盘，钛合金整体叶盘与整体叶环、空心双辐板涡轮盘、热等静压成型、超

塑性等温锻造、高低压涡轮对转技术等；③低排放燃烧室技术，包括贫油直混（LDM）、贫油预混预蒸发（LPP）、部分蒸发和快速混合（PERM）、贫油直喷（LDI）和多点喷射贫油直喷（MP-LDI）等；④涂层设计与制造，包括热障陶瓷涂层和耐磨涂层；⑤复杂结构增材制造与设计一体化，如燃油控制装置复杂壳体结构、喷油嘴等。

（5）面向无人驾驶的视觉传感与识别

无人驾驶技术可以分为三大模块：感知、决策和控制。其中，环境感知技术是实现完全无人驾驶的关键，也是如今限制无人驾驶汽车发展的主要因素之一。目前无人驾驶汽车对周围目标的感知与识别主要依靠激光雷达与视觉相机。基于视觉的环境感知系统相比于雷达等具有更加丰富的图像信息。单目相机信息量小，运算速度较快，但是图像单一，场景深度信息缺失。双目立体视觉结构相对简单，受光照等影响较小并且提供场景信息更加丰富，可以对路况信息进行识别，受到国内外学者的青睐。近年来，由于计算机硬件技术的迅猛发展，作为双目视觉三维重建核心的立体匹配算法实时性空前提高，已经能够达到实际应用的需求。此外，对图像的分析处理是视觉识别的关键，这一功能通常由卷积神经网络实现。根据采集的图像信息智能地识别交通场景和预测交通状况，能够有效降低交通事故的发生及伤害。因此，越来越多的研究机构和高校致力于研究基于视觉的辅助驾驶与无人驾驶系统。

（6）波浪能发电与能量收集

波浪能作为一种可再生清洁能源，具有能量密度高和分布面广等特点，其开发和利用将对解决能源危机、环境污染和气候变化等问题发挥巨大的作用。科学界对于波浪能的研究主要集中在两方面：一是对波浪能储量和时空分布进行有效评估，以便为波浪能电站的建站选址和波浪能转换装置的设计提供有效的指导；二是对波浪能转换即发电装置的设计、开发和实验。目前，国内外波浪能发电方法依据原理主要分为振荡浮子式、越浪式、振荡水柱式和软囊式等。其中，离岸振荡浮子式相比于其他装置，具有结构简单、造价成本低、选址灵活、便于运输维护且效率较高的优点，是当今波浪能发电的主流技术。但由于海洋环境复杂多变，波浪能本身的不稳定、储量大、分布广和利用难等特点，应用于海洋之中的波浪能转换装置还易受到海洋灾害性气候的侵袭，波浪能资源在能量转换及能量收集等方面，尚有诸多艰巨的难题亟需解决，比如深化非线性波的研究、优化波浪能装置设计、提升波浪能装置响应速度和转换效率、提高波浪能装置稳定性和可靠性、降低制造和安装维护成本等。

（7）反小型无人机系统

近年来，随着信息、控制、通信等领域技术的不断进步，无人机在民用及军事领域都得到了广泛应用。但随之而来的问题是“黑飞”无人机对公共安全甚至国家安全造成了严重威胁，因此加快无人机反制技术的研发已迫在眉睫。目前，主流反无人机技术体系主要包括无人机识别技术和无人机拦截技术。前者主要包括地面目视侦察技术、雷达探测跟踪技术、空中预警技术和卫星侦察技术，以实现无人机的探测跟踪与预警，并精准定位无人机。后者主要包括基于地面火力和高能激光武器的毁伤抓捕技术、基于电子对抗的干扰阻断技术，和基于光电、雷达等监测技术并借助数据链干扰技术的监测控制类技术。干扰阻断类技术虽然操作简单、成本较低且部分系统便于携带，但电磁干扰手段对环境要求高，易受空间其他电磁信号的影响。毁伤抓捕技术虽适用于复杂环境，但系统复杂且价格昂贵，且会造成无人机永久损毁，不利于调查取证。干扰阻断技术对不利用外部通信控制的无人机，压制效果较差。为满足复杂环境中无人机的高效识别与捕获，未来反无人机技术的发展应朝着以下两个方向发展：①便携式、智能跟踪技术的发展；②多手段、多层次防御体系的构建。

（8）新型高效氢燃料电池

在能源短缺与环境污染的双重压力下，世界各国对绿色高效能源技术的发展愈加重视。氢燃料电池以氢气作为燃料，通过化学反应将氢气中的化学能转化为电能，因具有清洁无污染和高能量转换效率等优点而受到广泛关注，但仍面临制氢成本高、储氢技术不成熟、输氢体系不完善等问题。新型高效氢燃料电池技术已成为新能源领域大力发展的核心前沿技术之一。其开发重点主要包括氢燃料电池核心材料、先进氢燃料电池电堆、关键辅助系统零部件、高性能氢燃料电池系统、混合型燃料电池动力系统、制氢、运氢、储氢以及加氢基础设施建设等方面。碳能源向氢能源转变将是未来能源转型的大趋势，氢燃料电池也将从新能源汽车、分布式发电等各个领域实现价值，具有广阔的发展前景。

（9）船舶电力推进系统

船舶电力推进系统一般由电站和电站管理系统、配电系统、调速控制系统、推进电动机、监控系统和螺旋桨等组成，由推进电动机驱动螺旋桨等驱动器实现船舶的推进，广泛应用于大型油轮、水面战舰、工程船舶和潜艇等各类船舶。主要技术方向涉及发电技术、推进电机技术、谐波抑制技术、电子自动化、大功率储能技术、供配电技术、推进器技术和电机控制等技术。同时，面向船舶电力推进系统的建模与仿真分析技术，也成为提升船舶电力推进系统综合性能的重要手段之一。目前船舶电力推进系统的主要发展趋势为：以交流电力推进装置取代直流电力推进剂和交直流电力推进装置，发展超导电力推进，发展潜艇燃料电池推进系统取代铅酸电池，开发适合大功率要求的诸如磁流体推进器、喷水推进器等高效推进器，以及发展综合全电力推进系统。

（10）飞行器电磁隐身超材料开发与应用

超材料是一种由亚波长结构单元作为基本单元构成的特种复合材料，通过对材料关键物理尺寸进行有序结构设计，使其获得常规材料不具备的超常物理性质。传统的飞行器隐身原理是通过改变雷达波反射或吸收雷达波来进行隐身，而超材料可以通过改变波的传播路线，使波发生弯曲，以达到绕射传播的目的进而实现隐身，从而为雷达隐身吸波材料的研究提供了一个全新的思路。飞行器电磁隐身超材料的开发需要满足“薄、轻、宽、强”的要求，即厚度薄、重量轻、可实现宽频段（覆盖雷电波段与红外波段）吸收、具有良好的耐冲击性与耐腐蚀性，此外要易于维护。尽管目前针对飞行器电磁隐身超材料的研究已取得了一些进展与突破，但仍存在隐身频段有限、增重大、工艺复杂、难以批量化制造等问题。针对这些问题，飞行器电磁隐身超材料的研究主要集中在以下几个方向：①宽频超材料吸波结构的设计与开发；②新型可调谐有源超材料隐身技术；③新型柔性电磁隐身超材料的设计与开发；④ 3D 打印电磁隐身超材料。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 临近空间高超声速飞行器推进系统

（1）超高速吸气式推进系统

当前，亚声速、超声速等相对低速阶段的动力推进技术发展已较为成熟，以冲压发动机为代表的马赫数 6~7 以下高超声速吸气式推进技术也在不断发展、成熟。因此发展面向更高马赫数、空天飞行需求的超高速吸气式推进技术成为重要前沿方向之一，也是空天组合推进向更高速度、更宽速域发展的必然选择。当飞行马赫数越来越高时（如飞行马赫数超过 10 时），经过进气道压缩后的燃烧室入口的马赫数也相应增加，甚至超过马赫数 5 以上，即达到了所谓高超声速燃烧。因此在极高速度条件下，燃烧组织、能量释放成为超高速吸气式推进系

统面临的首要技术难点。目前美国、澳大利亚在这方面开展诸多探索性研究与验证，2004 年美国国家航空航天局主导完成的 X-43A 第二次飞行试验，在国际上率先实现了飞行马赫数 10 的超高速吸气式超燃冲压发动机燃烧、推进系统验证，之后美国、澳大利亚联合开展 HyShot、HyFire、HyCAUSE 等研究性飞行试验验证计划，重点开展飞行马赫数 8~12 超高速流动、燃烧基础研究，在超高速吸气式推进系统验证方面取得突出进展。为了解决燃料空气混合的困难、充分利用预混激波诱导燃烧的优点，发动机前体燃料注入又被重新重视，即所谓激波诱导燃烧冲压发动机（SHCramjet），成为未来研究的前沿之一。

（2）宽域组合循环推进系统

未来水平起降高超声速飞机、空天飞行器的突出特点就是飞行马赫数、飞行高度范围极为宽广，涵盖亚 – 跨 – 超 – 高超声速工作阶段，大大超出现有传统动力推进系统的工作能力范围。因此，组合循环推进成为必然选择，一是解决宽域工作能力问题，二是实现全速域高性能工作。目前，在传统动力基础上已发展有火箭基组合循环推进、涡轮基组合循环推进两大类组合循环推进系统方案，但面向实际应用需求仍面临性能、工程实现或任务适用性等方面的难题。从动力组成、热力循环优化出发，探索宽适应性、高性能的新型空天组合循环推进系统方案仍然是研究前沿，基于涡轮、冲压、火箭的三组合循环推进系统是重要的发展方向。近几年来，美国 Aerojet 针对性提出了基于涡轮、冲压、火箭的 Trijet 三组合循环推进方案，采用引射火箭冲压通道解决宽速域工作、模态转换接力问题；英国反应发动机公司提出了融合涡轮、火箭、冲压特征的协同吸气式火箭发动机（SABRE）方案，以深度预冷技术为核心，实现宽域组合循环动力。面向实用开发研制需求，当前空天组合推进系统需要重点解决热力循环匹配优化与系统集成、动力模态转换等关键问题。

（3）爆震组合推进技术

基于燃料燃烧的化学能量释放、转换，对于推进系统是十分重要的过程，燃烧有爆燃、爆震两种模式。传统航空航天动力推进装置均基于爆燃燃烧模式，已发展到相当成熟的阶段，大幅提高燃烧性能、推进效率已变得十分困难。爆震燃烧是与激波紧密耦合的超声速燃烧波，与传统发动机缓燃或爆燃不同，是具有自压缩性质的、近似等容燃烧方式，热效率远高于等压燃烧系统。基于爆震燃烧模式有望突破现有能量循环效率瓶颈，成为具有更高性能、新型推进技术的必然选择。目前爆震燃烧模式主要聚焦在爆震燃烧组织方式上，国际上相应地提出了脉冲爆震发动机、连续爆震发动机、驻定爆震发动机，并开展了大量基础理论研究与实验验证，逐渐加深了人们对爆震现象、机理的认识，爆震燃烧越来越多从理论研究层次走向实际应用，其中连续旋转爆震燃烧方式最具潜力与优势，有望带来空天推进的颠覆性、跨越式发展。目前，掌握连续爆震燃烧传播机理机制、组织稳定可控的爆震燃烧是需要解决的核心关键问题，同时爆震燃烧模式在涡轮、冲压、火箭等传统动力类型上应用及组合循环集成是面向空天组合推进的发展重点。

“临近空间高超声速飞行器推进系统”工程开发前沿中核心专利公开量排在前三位的国家 / 地区分别为中国（100）、美国（51）和俄罗斯（40），篇均被引频次排在前三位的国家 / 地区分别为美国（3.43）、加拿大（2.75）和中国（1.53），见表 2.2.1。在公开量 Top 10 国家 / 地区中，美国和中国、加拿大有合作，见图 2.2.1。核心专利公开量排在前三位的机构分别为 UNUA（15）、UYXI（8）和 BOEI（7），见表 2.2.2。从目前样本数据看，专利主要产出机构间基本不存在合作，见图 2.2.2。我国公开的与“临近空间高超声速飞行器推进系统”工程开发前沿相关的核心专利达 100 项，排名第一。

表 2.2.1 “临近空间高超声速飞行器推进系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	100	46.08%	153	45.27%	1.53
2	USA	51	23.50%	175	51.78%	3.43
3	Russia	40	18.43%	8	2.37%	0.20
4	South Korea	6	2.76%	1	0.30%	0.17
5	Canada	4	1.84%	11	3.25%	2.75
6	India	4	1.84%	0	0.00%	0.00
7	France	3	1.38%	2	0.59%	0.67
8	Germany	3	1.38%	1	0.30%	0.33
9	Brazil	2	0.92%	1	0.30%	0.50
10	Japan	2	0.92%	1	0.30%	0.50

表 2.2.2 “临近空间高超声速飞行器推进系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	UNUA	15	6.91%	40	11.83%	2.67
2	UYXI	8	3.69%	16	4.73%	2.00
3	BOEI	7	3.23%	20	5.92%	2.86
4	UNBA	5	2.30%	7	2.07%	1.40
5	UNDT	5	2.30%	6	1.78%	1.20
6	BEIT	5	2.30%	2	0.59%	0.40
7	ADCF	4	1.84%	13	3.85%	3.25
8	CAMH	4	1.84%	8	2.37%	2.00
9	UNAC	4	1.84%	5	1.48%	1.25
10	CAER	4	1.84%	3	0.89%	0.75

注：UNUA 表示 Nanjing Aeronautics & Astronautics Univ；UYXI 表示 Xiamen Univ；BOEI 表示 Boeing Co.；UNBA 表示 Beihang Univ；UNDT 表示 National Defence Univ of PLA；BEIT 表示 Beijing Inst Technology；ADCF 表示 Advanced Ceramic Fibers LLC；CAMH 表示 Chinese Acad Sci Inst Mechanics；UNAC 表示 United Technologies Corp.；CAER 表示 China Acad Space Technology。

图 2.2.1 “临近空间高超声速飞行器推进系统”工程开发前沿主要产出国家 / 地区间的合作网络

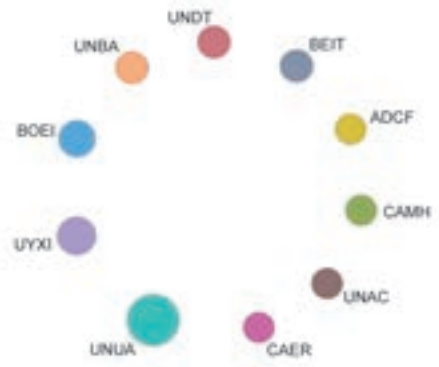

图 2.2.2 “临近空间高超声速飞行器推进系统”工程开发前沿主要产出机构间的合作网络

2.2.2　基于深度学习的人机智能交互系统

人机智能交互系统接收并处理外设指令、文字、语音、手势、表情、注视等多种输入 / 输出文本、图形、语音、手势、表情等信息，实现更加智能、更加自然的交互。近年来，人机智能交互系统逐渐应用于多个领域，如车载导航系统的语音识别技术，可穿戴式计算机、隐身技术、浸入式游戏等领域的动作识别技术，虚拟现实、遥控机器人及远程医疗等领域的触觉交互技术，呼叫路由、家庭自动化及语音拨号等场合的语音识别技术，针对有语言障碍人士的无声语音识别技术，针对广告、网站、产品目录、杂志效用测试的眼动跟踪技术，针对有语言和行动障碍人士开发的基于脑电波的人机界面技术等。然而，人机智能系统依然存在诸多问题，如基于视觉的手势识别率低、实时性差，基于图像的多目标识别和分割准确率低，针对海量大数据的模型训练周期长、训练能耗高等问题，需要研究各种算法来改善精度和效率。

深度学习算法在数据挖掘、图像识别与分割、机器翻译、自然语言处理、多媒体学习、语音识别、推荐和个性化技术等领域都取得了显著的成果，解决了大量、复杂的模式识别难题，促使人工智能相关技术取得了极大的进步，远远超越了已有相关技术。因此，基于深度学习的人机智能交互系统成为人机智能交互的领域前沿，同时也是其重点。但是，基于深度学习的人机智能交互系统尚有许多难题亟需解决，如语音中句法的模糊性、单词的边界界定、词义的歧义性，图像具有多物体、多目标、前景和背景具有依赖关系，深度学习算法训练方式（单节点多 GPU、多节点多 GPU 等）以及训练过程中的大量能耗等。未来的研究将从应用领域的问题出发，改进现有深度学习模型，研究新的深度学习框架，达到更高的识别精度和速度，最终实现让机器能够实时处理信息，像人一样具有分析学习能力，能够准确分析文字、图像和声音等数据。

“基于深度学习的人机智能交互系统”工程开发前沿中核心专利公开量排在前三位的国家 / 地区分别为美国（231）、中国（225）和韩国（57），篇均被引频次排在前三位的国家 / 地区分别为加拿大（4.9）、美国（4.31）和印度（2.45），见表 2.2.3。在公开量 Top 10 国家 / 地区中，美国和中国、加拿大合作较多，见图 2.2.3。核心专利公开量排在前三位的机构分别为 IBMC（28）、YLIT（13）和 SMSU（10），见表 2.2.4。从目前样本数据看，专利主要产出机构间基本不存在合作，见图 2.2.4。

表 2.2.3　“基于深度学习的人机智能交互系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	231	38.31%	995	81.96%	4.31
2	China	225	37.31%	91	7.50%	0.40
3	South Korea	57	9.45%	19	1.57%	0.33
4	Japan	26	4.31%	7	0.58%	0.27
5	India	20	3.32%	49	4.04%	2.45
6	Canada	10	1.66%	49	4.04%	4.90
7	Germany	5	0.83%	0	0.00%	0.00
8	Israel	4	0.66%	3	0.25%	0.75
9	Ireland	4	0.66%	0	0.00%	0.00
10	Australia	3	0.50%	0	0.00%	0.00

我国公开的与“基于深度学习的人机智能交互系统”工程开发前沿相关的核心专利有225项，排名第二，公开较多的大陆机构为YLIT。

2.2.3 生物3D打印制造技术

生物组织的制造使得人类从木材、金属、硅材料向生命体材料发展。在这个过程中需要建立功能引导变革新进步的新产品，在研究中围绕以下方向开展工作。

（1）基于功能的生命体结构设计制造

在认识生命体自我生长特性的基础上，发展基于细胞/基因尺度的单元原始态与生长过程的结构与功能设计理论。突破现有的以结构设计和力学功能为主的机械设计理论，向结构、驱动、功能共生和演变的设计方法发展。需要认识细胞和基因在其自繁衍和自我复制过程中的规律，利用该规律，设计原始状态细胞的组成和结构，使得生命单元生长功能在随时间和功能的演变在设计中得以体现。具有可降解、工程强度及在一定环境下可活化、可生长的结构体的材料、制造工艺与工程控制研究。

（2）3D打印的生命单元调控方法与活性保持

在3D打印中，生命体单元是进行组织生长与发育的基础，有机的细胞或基因的有机组合是后期

表2.2.4 “基于深度学习的人机智能交互系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	IBMC	28	4.64%	67	5.52%	2.39
2	YLIT	13	2.16%	0	0.00%	0.00
3	SMSU	10	1.66%	10	0.82%	1.00
4	MICT	8	1.33%	8	0.66%	1.00
5	EBAY	6	1.00%	1	0.08%	0.17
6	INEI	6	1.00%	1	0.08%	0.17
7	AMAZ	5	0.83%	68	5.60%	13.60
8	PURS	5	0.83%	6	0.49%	1.20
9	BOAI	5	0.83%	3	0.25%	0.60
10	DRTC	5	0.83%	0	0.00%	0.00

注：IBMC 表示 Int Business Machines Corp.；YLIT 表示 Sichuan Yonglian Information Technology；SMSU 表示 Samsung Electronics Co., Ltd.；MICT 表示 Microsoft Corp.；EBAY 表示 Ebay Inc.；INEI 表示 Beijing Tianyuan Innovation Technology；AMAZ 表示 Amazon Technologies Inc.；PURS 表示 Pure Storage Inc.；BOAI 表示 Bonsai Ai Inc.；DRTC 表示 Dalian Roiland Technology Co., Ltd.。

图2.2.3 “基于深度学习的人机智能交互系统”工程开发前沿主要产出国家/地区间的合作网络

图2.2.4 “基于深度学习的人机智能交互系统”工程开发前沿主要产出机构间的合作网络

功能呈现的核心，制造中需要进行单细胞和基因的微纳尺度的生命单元的堆积，需要研究其堆积的原理以及相互间的作用关系，通过调节细胞之间的关系，为生长和功能再生提供三维结构和时变功能调控能力。3D 打印的最大难点是生命体的应用，保证生命体的活性是基本保障，因此，生命体的制造需要与其适应的培养环境，包括培养液的更新、氧气与二氧化碳等气氛环境的调控，形成生物环境与打印工艺的复合。

（3）功能形成机理与构件功能形成

3D 打印的初始结构与功能需要在特定环境下发展形成最终功能，这其中需要对功能的形成与设计制造的关系进行认识和发展。为形成这些功能，需要认识功能与多细胞体系随时间发展而变化的规律，包括细胞互联和相互作用的关系，通过细胞之间的作用，形成的能量（肌细胞）释放或者信息（神经元）传递功能，为利用这些功能向具有多功能的器件发展提供基础。

（4）多功能器件或组织的制造与功能评价

基于以上设计、制造和原理的认识，以特定的器官或生物器件为目标，进行系统的结构设计与功能生长设计，认识在生命体单元的发展中，需要研究调控 3D 打印的细胞或基因组合，控制打印过程中的工艺对生命体的损伤，调控形成的器官或器件所具有的功能以及在细胞生长中所进行的干预和导向。需要认识 3D 打印与功能形成的关系，对功能的评价和测定，形成生命体单元 – 功能设计 – 无损伤打印 – 功能生成的研究体系，为制备具有生命体的器官和器件提供技术。

（5）类脑的设计与制造

人工智能的深度学习是按照模型猜想、数据训练及不断的学习积累，甚至采用了生物遗传算法来实现其功能的，恰如飞机实现了鸟类的飞翔。将来，类脑是采用 3D 打印方法把生物芯片植入再造的器官或者人造脑中，或者学习人脑神经元的随机互联来制造功能强大的生物芯片，或者采用基因手段来完全仿制一个具有生物活性的大脑，实现人造大脑与人体原器官及若干人造器官的信息收集、决策控制与驱动等都是有待研究和创新的领域。

“基于 3D 打印的生物组织再生技术”工程开发前沿中核心专利公开量排在前三位的国家 / 地区分别为中国（143）、美国（28）和韩国（6），篇均被引频次排在前三位的国家 / 地区分别为瑞典（21.5）、美国（3.11）和日本（1.25），见表 2.2.5。在公开量 Top 10 国家 / 地区中，美国和瑞典，英国和意大利之间存在合作，见图 2.2.5。核心专利公开量排在前三位的机构分别为 UYXJ（6）、UYQI（5）和 UYJI（4），见表 2.2.6。从目前样本数据看，专利主要产出机构之间基本不存在合作，见图 2.2.6。我国公开的与“基于 3D 打印的生物组织再生技术”工程开发前沿相关的核心专利有 143 项，公开较多的大陆机构为 XPCB 和 USWH。

表 2.2.5 “基于 3D 打印的生物组织再生技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	143	73.33%	177	48.76%	1.24
2	USA	28	14.36%	87	23.97%	3.11
3	South Korea	6	3.08%	0	0.00%	0.00
4	Japan	4	2.05%	5	1.38%	1.25
5	Taiwan of China	3	1.54%	3	0.83%	1.00
6	Sweden	2	1.03%	43	11.85%	21.50
7	Germany	2	1.03%	3	0.83%	1.50
8	Italy	2	1.03%	1	0.28%	0.50
9	UK	2	1.03%	0	0.00%	0.00
10	India	2	1.03%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6 “基于 3D 打印的生物组织再生技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	UYXJ	6	3.08%	11	3.03%	1.83
2	UYQI	5	2.56%	3	0.83%	0.60
3	UYJI	4	2.05%	40	11.02%	10.00
4	EBAY	4	2.05%	26	7.16%	6.50
5	CAAT	4	2.05%	6	1.65%	1.50
6	UYZH	4	2.05%	6	1.65%	1.50
7	XPCB	4	2.05%	5	1.38%	1.25
8	USWH	4	2.05%	4	1.10%	1.00
9	UYPO	4	2.05%	0	0.00%	0.00
10	UYBC	3	1.54%	6	1.65%	2.00

注：UYXJ 表示 Xi’an Jiaotong Univ；UYQI 表示 Tsinghua Univ；UYJI 表示 Jilin Univ；EBAY 表示 Ebay Inc；CAAT 表示 Shenzhen Inst Advanced Technology；UYZH 表示 Zhejiang Univ；XPCB 表示 Xi’an Particle Cloud Biotechnology Co., Ltd.；USWH 表示 Sichuan Univ West China Hospital；UYPO 表示 Postech Acad-Ind Found；UYBC 表示 Beijing Chem Technology Univ。

图 2.2.5 “基于 3D 打印的生物组织再生技术”工程开发前沿主要产出国家 / 地区间的合作网络

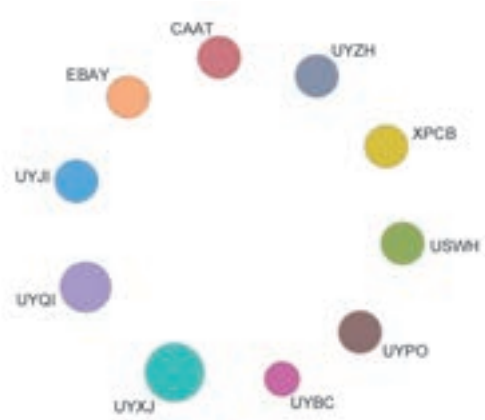

图 2.2.6 “基于 3D 打印的生物组织再生技术”工程开发前沿主要产出机构间的合作网络

领域课题组人员

课题组组长：段正澄　郭东明

课题组成员：

陈懋章　范本尧　樊会涛　顾国彪　关　杰
顾诵芬　黄先祥　金东寒　李　骏　李　明
刘友梅　钱清泉　邱志明　孙逢春　谭建荣
唐任远　王　浚　王振国　杨华勇　曾广商
张立同　赵　煦　史铁林　姬　学　李淼鑫

执笔组成员：

沈卫明　史彦军　曹元成　苑伟政　何　洋
李仁府　高　亮　李涤尘　夏　奇　夏　凉
陈修国　詹小斌　陈惜曦　龚　渤　谭先华
李俊杰　龚　渤　王　勐　刘智勇　孙　博
谷洪刚　石雅婷

二、信息与电子工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向（见表 1.1.1）。其中，“面向光互联、光计算及光传感的硅基集成光子器件”“面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术”“人工微纳结构对光及电磁场的调控”基于科睿唯安高被引聚类得出；“类脑智能”来自美国、欧盟、中国等 8 个国家或地区近两年自然科学基金资助项目主题聚类分析；“新一代神经网络及其应用”基于 SciVal 主题显著度分析得出；“天地一体化组网”“脑成像技术”“感知 – 通信 – 计算 – 控制协同融合理论与方法”“混合增强智能”“量子化精密计量 / 测量技术与相关理论”由专家补充。

2013—2018 年，各前沿涉及的核心论文发表情况见表 1.1.2，其中，“新一代神经网络及其应用”核心论文发表数量增速最为显著。

（1）类脑智能

人工智能已成为新一轮科技革命和产业变革的核心驱动力。与当前以算法为核心的人工智能技术路线不同，类脑智能试图借鉴、模仿进而超越生物大脑的感知和认知功能，是实现通用人工智能（强人工智能）这一终极目标的重要技术途径之一。

类脑智能的技术路线主要分为两种：自顶向下的功能模拟路线，自底向上的结构仿真路线。两者既针锋相对，又密不可分。功能模拟以认知科学为基础，借鉴大脑认知机理来设计新的人工智能模型，但由于揭示认知机理极端困难，因此突破时间难以预测。结构仿真以神经科学为基础，通过精细仿真生物神经元、突触和神经环路，试图构造出逼近生物神经系统的装置，再通过刺激训练产生类似功能，预计在数十年内会渐次突破。

近年来，大脑观测、解析技术与仪器快速进步，神经科学和认知科学快速发展，各国纷纷推出“脑计划”，如果蝇脑解析取得突破，人脑精细解析有望在 20 年内实现。与此同时，精细仿真生物神经

表 1.1.1 信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	类脑智能	337	19 232	57.07	2014.3
2	天地一体化组网	122	6424	52.66	2015.0
3	脑成像技术	941	64 743	68.80	2014.2
4	感知 – 通信 – 计算 – 控制协同融合理论与方法	26	2057	79.12	2014.7
5	混合增强智能	472	20 783	44.03	2014.5
6	面向光互联、光计算及光传感的硅基集成光子器件	45	4020	89.33	2014.9
7	面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术	655	49 476	75.54	2015.7
8	人工微纳结构对光及电磁场的调控	51	5602	109.84	2014.6
9	量子化精密计量 / 测量技术与相关理论	30	2973	99.10	2014.6
10	新一代神经网络及其应用	679	38 644	56.91	2016.0

表 1.1.2　信息与电子工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	类脑智能	119	102	56	40	14	6
2	天地一体化组网	25	26	25	24	14	8
3	脑成像技术	337	266	192	99	41	6
4	感知 – 通信 – 计算 – 控制协同融合理论与方法	6	8	5	2	4	1
5	混合增强智能	136	129	98	66	34	9
6	面向光互联、光计算及光传感的硅基集成光子器件	6	14	13	6	3	3
7	面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术	38	88	138	202	157	32
8	人工微纳结构对光及电磁场的调控	13	13	11	9	5	0
9	量子化精密计量 / 测量技术与相关理论	10	5	7	5	0	3
10	新一代神经网络及其应用	56	47	126	169	203	78

元和神经突触的功能器件纷纷出现，首台能够精细仿真人类大脑的机器有望于 2022 年建成，结构仿真和功能模拟有望实现快速对接和互动，从而显著加速类脑智能的发展。

（2）天地一体化组网

天地一体化网络作为基础设施，以地面网络为基础、空间网络为延伸，可实现互联网、移动通信网络、空间网络的互联互通，向天基、空基、陆基、海基等各类用户活动提供信息保障。针对天地一体化网络规模庞大，拓扑结构呈现立体多层次化、高度异构性，业务种类繁多的特点，天地一体化组网研究需设计结构清晰、功能简洁、易于高效实现的网络体系结构，使网络既能适应通信技术的快速发展与变化，又能支持层出不穷的新型应用。

国外在天地一体化网络领域侧重于对卫星 – 地面网络的研究，天基系统由传统高轨星座向中低轨星座发展，建立市场化投融资与经营、建造新型工厂并批量制造的发展模式。我国在这一领域的研究起步较晚，受限于全球建站和频率轨位资源，在组网技术上面临挑战，亟需利用航空航天工业和互联网产业的技术基础，积极介入并运营好这一新兴市场。

立足基础和现状，我国未来天地一体化组网的主要研究方向为：地 / 海 / 空 / 天一体化的组网架构设计，适用于大规模、高异构性的空间网络协议族研究，高动态轻量级移动性切换机制研究，多维网络资源协同管理控制技术研究。

（3）脑成像技术

脑结构错综复杂，包含上千亿个神经元，彼此之间又有着百万亿个连接。时至今日，脑的核心功能，如情绪和情感等，仍然是未解的难题。这是攻克严重危害人类身心健康的神经系统重大疾病的关键，也将为发展类脑计算系统和器件、突破传统计算机架构的束缚提供重要依据，决定着未来人工智能的深度发展方向。

自 16 世纪末显微镜发明以来，每次显微成像技术的突破都给生命科学研究带来里程碑式的发展。近年来，脑成像技术在成像的分辨率、速度、深度和视场 4 个方面均取得重大进步。针对脑环路多尺度特性的新型脑成像技术，将为国家“脑计划”在多个层面上解析脑环路结构与功能提供关键引领和支撑，主要研究方向包括：发展高通量三维结构与功能成像和样品处理新技术，以及图像数据处理分析新方法，实现以细胞级分辨率对不同生物全脑神经元类型、连接与活动的快速定量解析；发展大范围、深穿透度的在体高分辨光学成像等新技术，

实现清醒和自由活动动物神经活动的高时空分辨解析；发展光电关联等超微成像新技术，实现对神经突触等亚细胞结构的超微解析和定量表征。未来进一步提高活体脑成像的成像深度，开展神经环路的高速高分辨三维重构，探索精准脑结构和功能成像，既是脑成像技术的发展趋势，也是当前国际研究的难点和重点之一。

（4）感知－通信－计算－控制协同融合理论与方法

未来大规模物联网节点的感知、通信和计算能力高度集成，所有节点都将参与数据获取、加工、传输和反馈；同时这些过程深度耦合，使得未来网络的节点模型、流量模型、控制模型将发生明显改变；网络中信息的演变将呈现新规律，并进一步促使未来网络架构出现革命性演变，形成所谓的感知－通信－计算－控制协同融合网络。当前，感知－通信－计算－控制协同融合网络的基础理论基本上处于空白状态，迫切需要研究和突破。

重点针对未来规模化网络的复杂场景和需求，研究和探索能有效衡量网络性能的本质信息度量和综合指标体系，建立感知－通信－计算－控制协同融合网络的新型信息论模型与高效分析方法；突破未来网络在感知、通信、计算和控制过程深度耦合以及在网络资源受限、状态空间巨大且动态变化等复杂条件下的信息演变规律和渐进极限性能，揭示网络信息瓶颈与网络智能的形成和演进规律；建立后香农时代信息理论体系，为未来大规模物联网提供理论技术支撑。

（5）混合增强智能

人工智能的远期目标是制造能够像人类一样学习与思考的机器。智能机器已成为人类的伴随者，人与智能机器的交互、混合是未来社会的发展形态。但是人类面临的许多问题具有不确定性、脆弱性和开放性，任何智能程度的机器都无法完全取代人类，这就需要将人的作用或人的认知模型引入人工智能系统，形成混合增强智能形态，这种形态是人工智能或机器智能可行的、重要的成长模式。

在新一轮科技革命与产业变革推动下，人工智能正快速应用于各个产业，并深度渗入组织运营与管理过程，为组织生态带来颠覆性变革。组织人与智能机器实现价值互惠与价值共创将成为最优发展模式，人机混合增强智能是支撑这种发展模式的核心关键技术。

混合增强智能正沿着两条技术路线发展：人在回路的混合增强智能，受脑和神经科学启发的混合增强智能。前者重点研究如何把人的作用引入智能系统计算模型，形成提升智能水平的反馈回路；后者研究重点是构建受脑启发的认知计算模型和自主学习。

目前混合增强智能发展迅速。体现人在回路混合增强智能的“以人为本”的人工智能研究，在金融、医疗、管理等领域大量应用。脑科学、神经科学与人工智能正在不断交叉并相互促进，新型认知计算模型、支撑认知计算的混合计算架构也不断涌现。不难发现，混合增强智能作为新一代人工智能的特征日趋明显，已成为人工智能新的引领方向。

（6）面向光互联、光计算及光传感的硅基集成光子器件

硅光子技术是基于硅和硅基衬底材料（如SiGe/Si、SOI），通过与现有互补金属氧化物半导体（CMOS）兼容的工艺进行光子器件和光电器件的开发和集成，利用这些器件对光子进行处理和操纵，从而实现光互联、光计算及光传感等功能。硅光子技术结合了集成电路（IC）技术的超大规模、超高精度制造的特性和光子技术超高速率、超低功耗的优势，属于战略前沿方向。

各类硅基集成光子器件是硅光子技术的核心基础和前提，包括硅基光发射器、硅基光探测器、硅基调制器、硅基光波导器件等。①硅基光发射器用于产生光波作为信息载体，如硅基发光二极管和硅基激光器，目前研究集中于基于硅基掺杂与缺陷调

控的高效发光机理、新型发光纳米材料的集成和调控等。②硅基光探测器用于接收光信号并转换为电信号，然后传输给计算单元，目前研究集中于提高探测灵敏度、降低暗电流和提高带宽等。③硅基调制器用于将计算单元产生的电信号加载到光波上，目前研究集中在提高调制速率、降低插损和提高调制深度。④硅基光波导器件是光传输的通道，包括路由器、波分复用器和偏振复用器等，目前研究集中在设计和制备新型结构以提高信息传输的容量。

（7）面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术

大规模天线无线传输技术是 5G 区别于现有其他无线通信系统的核心技术之一。大规模天线无线传输系统是指基站配置数量非常多（通常几十到几百根，高出现有系统 1~2 个数量级）的天线，在同一时频资源上服务若干个用户。在多小区、时分双工情况下，各基站配置无限数量天线的极端工况时，大规模天线无线传输系统具有一些与单小区、有限数量天线工况的不同特征。在天线配置方式上，可以集中配置在一个基站上，形成集中式大规模天线无线传输系统；也可以分布式地配置在多个节点上，形成分布式大规模天线无线传输系统。

大规模天线无线传输技术的收益有：①空间分辨率与现有多输入多输出（MIMO）技术相比显著增强，能深度挖掘空间维度资源，使得网络中多个用户可在同一时频资源上利用空间自由度与基站同时通信，在无需增加基站密度和带宽的条件下大幅度提高频谱效率；②可将波束集中在很窄范围内，大幅度降低干扰；③可大幅降低发射功率，提高功率效率；④当天线数量足够多时，最简单的线性预编码和线性检测器性能趋于最优，且噪声和不相关干扰都可忽略不计。

为充分挖掘大规模天线无线传输的潜在技术优势，5G 采用匹配实际应用场景的信道模型，分析其对信道容量的影响。在实际信道模型、适度导频开销、可接受的实现复杂度情况下，研究可达的频谱效率、功率效率，并深入研究最优的无线传输、信道信息获取、多用户共享空间无线资源的联合资源调配等方法。目前已经商业部署的 6 GHz 以下（Sub-6 GHz）5G 基站普遍采用 64 根天线配置，后续为进一步提升效率和改善覆盖，Sub-6 GHz 5G 演进和 5G 毫米波系统有望采用 256 根甚至更多天线。

（8）人工微纳结构对光及电磁场的调控

电磁场超构材料是由一系列尺寸在亚波长结构单元设计出来的具有特定电磁响应的人工复合材料，在光波段和红外波段可由人工微纳结构组成。电磁场超构材料具有超常规的电磁物理特性，可对电磁场进行高效调控，引发一系列重要潜在应用，如完美成像、超构透镜、隐身斗篷等。近 10 年来，超常媒质和人工微纳结构对光以及电磁场的调控，两次被《Science》评选为年度十大科学进展。

经过十多年发展，电磁场超构材料研究已成为涵盖多个分支、概念日益丰富的独立学科，不再局限于固体物理、材料科学、力学、应用电磁学和光电子学，而是作为电磁波和光波调控的重要技术手段，引发了信息技术、国防工业、新能源技术、微纳加工技术等领域的重大变革。目前，主要国家的政府层面、学术界、工业界均对这种人工微纳结构的研发和制备给予高度重视，美国国防部支持开展了超构人工微纳结构研究计划，将其列入“六大颠覆性基础研究领域”；欧洲高额资助了 50 多位该领域顶尖科学家和相关实验室开展集中技术攻关方式的研究；日本即使在经济低迷的情况下，仍高额资助了至少两个人工超构微纳结构的技术研究课题；大型半导体研发与制造公司 Intel、AMD 和 IBM 等也纷纷成立联合基金，资助这类课题的技术研发。

（9）量子化精密计量 / 测量技术与相关理论

2019 年 5 月 20 日起，国际单位制（SI）的 7 个基本单位均启用了基于基本物理常数的新定义，单位秒（s）、米（m）、千克（kg）、安培（A）、开尔文（K）、摩尔（mol）、坎德拉（cd）将分

别使用基本物理常数来定义：铯 133 原子不受干扰的基态超精细能级跃迁频率（$\Delta\nu_{cs}$）、真空中光速（c）、普朗克常数（h）、基本电荷（e）、玻尔兹曼常数（k）、阿伏伽德罗常数（N_A）、频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射的光视效能（K_{cd}）。SI 新定义将确保未来 SI 制的持续稳定性，为诸多新技术包括量子技术的发展奠定坚实根基。

基于上述新 SI 单位的量子化精密测量技术方兴未艾。利用量子系统、量子现象或量子特性对物理量展开精密测量，优势体现为极高灵敏度及准确性，在磁场及电场测量、时频测量、温度测量等领域已得到应用。未来，随着量子理论与技术进步，量子化精密计量 / 测量朝着扁平化、极低噪声以及极高准确度的方向发展，逐渐渗透并改变传统测量理论与方法，在微观与宏观层面均实现极高准确度和精密度的测量。

（10）新一代神经网络及其应用

受生物脑研究启发，人工神经网络（ANN）以从输入到输出的非线性映射模拟神经元的输入 – 输出变换为标志，成为一种经典机器学习方法。新一代神经网络的快速发展主要得益于深度学习神经网络理论的突破。深度神经网络的主要研究方向包括：神经网络学习理论（如泛化能力和正则化方法）、监督 / 无监督深度神经网络、卷积神经网络、序列神经网络、注意力模型、神经网络压缩和加速、神经网络结构自动搜索以及新型神经网络模型（如记忆神经网络、生成对抗神经网络和深度强化学习神经网络），主要应用于数据表示学习、计算机视觉、模式识别、语音识别和合成、自然语言处理、机器人等人工智能相关领域。

深度神经网络因其在图像分类、语音识别和机器翻译等应用中取得的巨大性能提升，得到工业界高度关注。当前神经网络也面临着学习策略自主性不高、训练资源需求高、动态开放环境适应性差、隐私安全防护等级低等重大挑战。推动新一代神经网络研究的发展趋势包括并不限于：构建基于脑认知的神经网络模型，深度神经网络的可解释性，小样本和元学习的神经网络模型，神经网络的对抗博弈与安全性。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 类脑智能

类脑智能研究工作可以追溯到 20 世纪 80 年代美国诺贝尔奖获得者杰拉尔德·艾德曼提出并研制的系列“仿脑机”和加州理工学院卡弗·米德教授开创的“神经形态工程”。2000 年以来，发达国家相继启动神经形态计算系统研制。2015 年 10 月美国能源部组织了“神经形态计算：从材料到架构”主题研讨会。2016 年，3 台大型神经形态计算系统相继上线运行：德国海德堡大学的 BrainScaleS 系统、英国曼彻斯特大学的 SpiNNaker 系统和美国 IBM 公司基于 TrueNorth 芯片构造的系统。类似系统还包括斯坦福大学的 Neurogrid、英国阿尔斯特大学的 Si elegans 以及 Intel 公司近年来主推的 Loihi 神经形态芯片与系统。据 2017 年 5 月综述论文“A Survey of Neuromorphic Computing and Neural Networks in Hardware”统计，从 1985 年开始，神经形态技术相关的论文数量快速增长，累计 2682 篇，表明类脑系统工程技术实现是类脑智能方向发展的主力。

我国在类脑智能方面的相关研究超过 10 年。2015 年 9 月，北京市启动实施“脑科学研究”专项，“脑认知与类脑计算”作为两大任务之一，从理论基础研究、类脑计算机研制和类脑智能应用 3 个层次布局了 9 方面任务，包括：大脑结构解析平台、认知功能模拟平台、神经形态器件、类脑处理器、机器学习芯片、类脑计算机、视听感知、自主学习和自然会话。专项调动了本地区脑科学研究力量协同攻关重大共性技术，取得了重要进展，例如：清华大学施路平团队提出了类脑混合计算范式架构，开发了“天机”系列类脑芯片，成果 2019 年作为

封面文章发表在《Nature》；北京大学黄铁军团队对灵长类视网膜进行高精度解析仿真，提出模拟视网膜机理的仿生视频脉冲编码模型，2018 年研制成功脉冲阵列式超速全时仿视网膜芯片，“超速”人眼千倍。国家级研究层面，2016 年以来“脑科学与类脑智能”重大科技项目实施方案正式编制，预计不久将会启动。2018 年科技部发布“科技创新 2030——新一代人工智能”重大项目指南，明确将神经形态技术和芯片列为重要研究方向。

“类脑智能”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区分布情况见表 1.2.1。美国脑科学研究基础雄厚，类脑智能研究也在学术机构和企业界全面展开，核心论文数量和被引频次均占全球一半以上。英国核心论文占全球近 20%，德国、加拿大和荷兰各占 10% 左右，我国和瑞典、西班牙、意大利各占 5% 左右。我国的国际合作对象主要是美国与加拿大，其他国家之间的相互合作比较均衡（见图 1.2.1）。核心论文产出机构也比较集中（见表 1.2.2 和图 1.2.2），达到 10 篇的机构中，除了脑科学研究重镇瑞典卡罗琳斯卡学院外，均为脑科学与人工智能领域著名大学，如哈佛大学、耶鲁大学、麦吉尔大学、牛津大学、斯坦福大学、爱丁堡大学、剑桥大学和多伦多大学。施引核心论文数量方面（见表 1.2.3），美国占比超过 1/3，英国

表 1.2.1　“类脑智能”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	169	50.15%	10 431	54.24%	61.72
2	UK	64	18.99%	4337	22.55%	67.77
3	Germany	40	11.87%	1871	9.73%	46.78
4	Canada	39	11.57%	2568	13.35%	65.85
5	Netherlands	30	8.90%	2313	12.03%	77.10
6	Australia	21	6.23%	1553	8.08%	73.95
7	China	21	6.23%	1133	5.89%	53.95
8	Sweden	17	5.04%	837	4.35%	49.24
9	Spain	17	5.04%	765	3.98%	45.00
10	Italy	16	4.75%	1398	7.27%	87.38

表 1.2.2　“类脑智能”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	17	5.04%	1037	5.39%	61.00
2	Yale Univ	13	3.86%	1099	5.71%	84.54
3	McGill Univ	13	3.86%	834	4.34%	64.15
4	Univ Oxford	13	3.86%	1316	6.84%	101.23
5	Stanford Univ	13	3.86%	918	4.77%	70.62
6	Univ Edinburgh	13	3.86%	588	3.06%	45.23
7	Univ Toronto	10	2.97%	767	3.99%	76.70
8	Univ Cambridge	10	2.97%	623	3.24%	62.30
9	Karolinska Inst	10	2.97%	487	2.53%	48.70
10	Univ Minnesota	9	2.67%	1010	5.25%	112.22

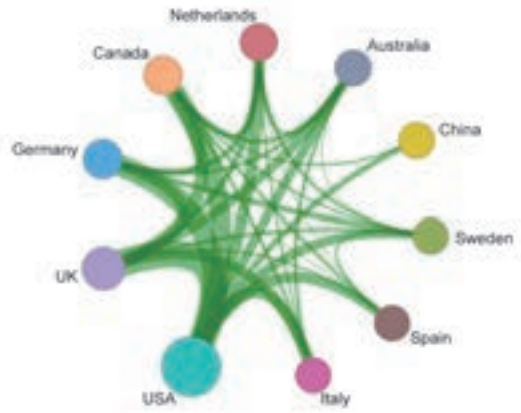

图 1.2.1 “类脑智能”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

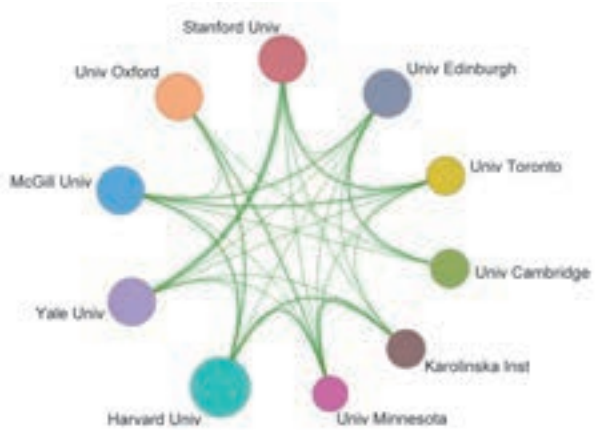

图 1.2.2 “类脑智能”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “类脑智能”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	6725	35.51%	2016.8
2	UK	2382	12.58%	2016.9
3	China	1899	10.03%	2017.2
4	Germany	1680	8.87%	2016.8
5	Canada	1344	7.10%	2017.0
6	Australia	1017	5.37%	2017.0
7	Netherlands	983	5.19%	2016.9
8	Italy	909	4.80%	2017.0
9	France	735	3.88%	2016.8
10	Spain	679	3.59%	2016.9

和我国超过 10%，其他与产出国分布基本相当，表明我国在类脑智能领域追赶势头明显。排名前 10 位的施引核心论文产出机构中，6 家来自美国（见表 1.2.4）。

1.2.2 天地一体化组网

针对天地一体化网络规模庞大、拓扑结构呈现立体多层次化和高度异构性、业务种类繁多的特点，设计出一套结构清晰、功能简洁、易于高效实现的网络体系结构，这是天地一体化网络技术研究需要解决的首要问题。目前世界上主要国家和地区的发展重点为：美国致力于商用天地一体化网络的大规模建设，如 Starlink 大规模制造并发射低成本低轨卫星、Google Loon 项目推进到商业化阶段；欧盟致力于卫星 – 地面网络与 5G 网络融合，重点研究与网络功能虚拟化 / 软件定义网络（SDN/NFV）的结合，H2020 计划中的多个项目已建成原型；我国已设立天地一体化信息网络重大工程，启动低轨卫星网络建设计划。

天地一体化组网技术研究主要围绕以下几个方向开展。

（1）地 / 海 / 空 / 天一体化的组网架构设计

天地一体化网络的基础设施分为高轨卫星、低轨卫星、高空飞行器、海上移动设备和地面设备等。

表 1.2.4　“类脑智能”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Harvard Med Sch	396	11.79%	2017.6
2	Univ Toronto	362	10.78%	2016.9
3	Univ Coll London	314	9.35%	2016.8
4	Stanford Univ	313	9.32%	2016.7
5	Kings Coll London	307	9.14%	2016.8
6	Univ Oxford	306	9.11%	2016.8
7	Univ Penn	300	8.93%	2017.1
8	Harvard Univ	298	8.87%	2015.9
9	Yale Univ	264	7.86%	2016.9
10	Univ Cambridge	249	7.42%	2017.0

这些设施在覆盖范围、传输时延、带宽成本、容量、频率等方面各有优缺点。协调利用各类设备优势特征组成复合协同网络，充分运用 SDN 等网络领域新技术，提升系统可控性、高效承载各类业务，这是天地一体化组网架构设计的关键内容。

（2）适用于大规模、高异构性的空间网络协议族

天地一体化组网方面已经提出国际空间数据系统咨询委员会（CCSDS）、延迟容忍网络（DTN）、快照、互联网协议（IP）等多种网络协议。面向航天器可采用 CCSDS 协议，间歇性连接情况下可采用 DTN 协议，规律性运动情况下可采用快照协议，地表用户可采用 IP 协议实现宽带组网应用，最新研究提出将内容中心网络协议（CCN）用于该领域。空间网络协议族还需要进一步丰富内容并适配天地一体化网络的具体场景。

（3）高动态轻量级移动性切换机制

针对所构建的网络节点特别是低轨卫星高动态运动、面向用户的多星多波束频繁切换等特点，重点开展高动态轻量级的移动性切换机制研究，有效降低网间移动切换时的时延、解决数据丢失问题，在空间网络资源受限的情况下提高网络移动性切换效能。

（4）多维网络资源协同管理控制技术

面向天基网络与地面网络的融合需求，将 SDN/NFV 等技术应用于天地一体化网络，实现多维网络资源虚拟化切片和服务质量保障、应用驱动的网络控制、按需网络资源调度等关键技术的突破以及安全可靠的网络管理，达到卫星互联网与地面互联网高效管控与互联互通的目标。

天地一体化组网工程研究前沿的核心论文排名前 3 位的是美国、中国和德国（见表 1.2.5）。从核心论文主要产出机构（见表 1.2.6）来看，排名前 3 位的机构为东南大学、CALTECH 和清华大学。从主要国家 / 地区间合作网络（见图 1.2.3）来看，相关国家 / 地区均有密切合作。从主要机构间合作网络（见图 1.2.4）来看，东南大学和解放军理工大学间合作关系较为密切。从施引核心论文的主要产出国家或地区统计结果（见表 1.2.7）来看，中国、美国和德国名列前 3，其中中国以 1753 篇论文居榜首，所占比例达 26.93%。从施引核心论文的主要产出机构（表 1.2.8）来看，排名前 3 的机构为中国科学院、美国 NASA 和北京邮电大学。

1.2.3　脑成像技术

我们正在亲历一场关于脑 – 智自然观的革命

表 1.2.5 “天地一体化组网”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	47	38.52%	2141	33.33%	45.55
2	China	27	22.13%	1256	19.55%	46.52
3	Germany	27	22.13%	994	15.47%	36.81
4	France	23	18.85%	1540	23.97%	66.96
5	Italy	19	15.57%	972	15.13%	51.16
6	UK	19	15.57%	768	11.96%	40.42
7	Australia	18	14.75%	801	12.47%	44.50
8	Canada	15	12.30%	770	11.99%	51.33
9	Netherlands	12	9.84%	562	8.75%	46.83
10	Switzerland	9	7.38%	413	6.43%	45.89

表 1.2.6 “天地一体化组网”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Southeast Univ	8	6.56%	309	4.81%	38.63
2	CALTECH	7	5.74%	296	4.61%	42.29
3	Tsinghua Univ	7	5.74%	274	4.27%	39.14
4	NASA	6	4.92%	435	6.77%	72.50
5	Army Engineering Univ of PLA	6	4.92%	259	4.03%	43.17
6	Max Planck Inst Biogeochem	6	4.92%	171	2.66%	28.50
7	Chinese Acad Sci	5	4.10%	380	5.92%	76.00
8	ETH	5	4.10%	232	3.61%	46.40
9	Univ Calif Berkeley	5	4.10%	237	3.69%	47.40
10	Univ Texas Austin	5	4.10%	249	3.88%	49.80

注：CALTECH 表示 California Institute of Technology；NASA 表示 National Aeronautics and Space Administration；ETH 表示 Swiss Federal Institute of Technology Zurich。

图 1.2.3 “天地一体化组网”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

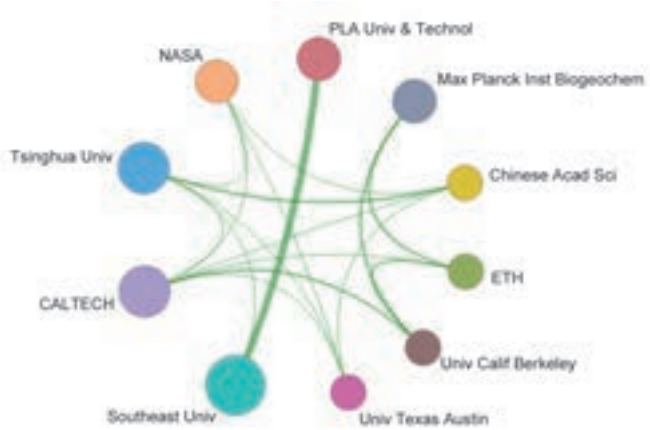

图 1.2.4 “天地一体化组网”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7　“天地一体化组网”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	1753	26.93%	2017.5
2	USA	1428	21.94%	2017.2
3	Germany	560	8.60%	2017.1
4	UK	536	8.23%	2017.5
5	France	431	6.62%	2017.2
6	Italy	411	6.31%	2016.9
7	Canada	398	6.11%	2017.4
8	Australia	308	4.73%	2017.3
9	Spain	260	3.99%	2017.2
10	India	217	3.33%	2017.3

表 1.2.8　“天地一体化组网”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	367	26.14%	2017.3
2	NASA	144	10.26%	2016.9
3	Beijing Univ Posts & Telecommun	143	10.19%	2017.0
4	Univ Chinese Acad Sci	131	9.33%	2017.5
5	Tsinghua Univ	122	8.69%	2017.5
6	Caltech	112	7.98%	2016.8
7	Univ Maryland	86	6.13%	2017.2
8	Southeast Univ	81	5.77%	2017.3
9	Beijing Normal Univ	77	5.48%	2017.3
10	Wuhan Univ	72	5.13%	2017.6

性转变。鉴于脑科学研究在科学、经济、社会和军事领域的重大价值，发达国家纷纷抢占脑与认知科技的战略制高点。美国、欧盟和日本先后出台了“脑计划”，力图取得重大突破，为未来人工智能深度发展提供关键基础，并推动类脑智能与脑机融合为基础的新兴产业变革性发展。

脑科学研究具有科学前沿和综合交叉的双重特征，脑成像技术是深入解析脑功能联结组的有效手段。深入解析脑功能联结组，实质上是对大脑工作原理的反向工程破译，在此基础上有望发展出基于大脑的构造和线路原理的新型计算系统，突破现代计算机和人工智能应对复杂问题的技术瓶颈，构建具有自组织和自我深度学习能力乃至新型类神经人工智能系统。

近年来，脑科学基础研究发展迅猛，人工智能、脑机接口技术方兴未艾，脑科学研究已迈入黄金时期。随着脑科学研究的逐步深入，科学家在脑成像技术方面提出了更高目标，重点探索如何将脑组织结构的宏观、介观与微观有机融合，绘制脑功能连接图谱，以系统性把握脑组织的结构与功能，开发并优化光、声、电、磁遗传学等非入侵性工具应用于神经与精神疾病。脑成像技术的主要发展方向为：

①高分辨率的大脑结构解析方法和技术，包括高通量三维结构、功能成像与样品处理新技术，图像数据处理分析新方法，用于实现以细胞分辨率对不同物种全脑神经元类型、联结与活动的快速定量解析；②大范围、深穿透度的在体高分辨光学成像等新技术，用于实现清醒和自由活动动物神经活动的高时空分辨率解析；③光电关联等超微成像新技术，用于实现对神经突触等亚细胞结构的超微解析和定量表征。

“脑成像技术”工程研究前沿的核心论文方面（见表 1.2.9），排名前 3 位的是美国、英国和德国。核心论文主要产出机构方面（见表 1.2.10），排名前 3 位的是哈佛大学、伦敦国王学院和斯坦福大学。主要国家或地区间的合作网络方面（见图 1.2.5），相关国家或地区之间均存在非常密切的合作关系。主要机构间的合作网络方面（见图 1.2.6），相关机构间存在紧密合作关系。施引核心论文主要产出国家或地区统计方面（见表 1.2.11），美国、中国和英国排列前 3 名，中国以 6423 篇论文排名第 2，占比 11.77%。施引核心论文主要产出机构方面（见表 1.2.12），哈佛医学院、伦敦大学学院和多伦多大学位列前 3 名。

表 1.2.9 “脑成像技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	561	59.62%	41 453	64.03%	73.89
2	UK	174	18.49%	14 613	22.57%	83.98
3	Germany	117	12.43%	9494	14.66%	81.15
4	Canada	80	8.50%	7192	11.11%	89.90
5	Netherlands	73	7.76%	7700	11.89%	105.48
6	China	67	7.12%	6081	9.39%	90.76
7	France	55	5.84%	4512	6.97%	82.04
8	Italy	46	4.89%	4930	7.61%	107.17
9	Switzerland	42	4.46%	3520	5.44%	83.81
10	Australia	41	4.36%	3141	4.85%	76.61

表 1.2.10 “脑成像技术”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	75	7.97%	6817	10.53%	90.89
2	Kings Coll London	42	4.46%	2308	3.56%	54.95
3	Stanford Univ	41	4.36%	3277	5.06%	79.93
4	Univ Penn	40	4.25%	3235	5.00%	80.88
5	Univ Coll London	35	3.72%	4082	6.30%	116.63
6	Yale Univ	34	3.61%	2668	4.12%	78.47
7	Univ Calif Los Angeles	34	3.61%	3173	4.90%	93.32
8	Univ Toronto	31	3.29%	2661	4.11%	85.84
9	Univ Oxford	29	3.08%	3720	5.75%	128.28
10	Massachusetts Gen Hosp	29	3.08%	2953	4.56%	101.83

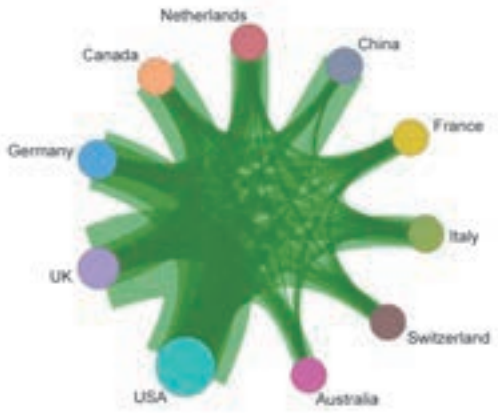

图 1.2.5　“脑成像技术”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

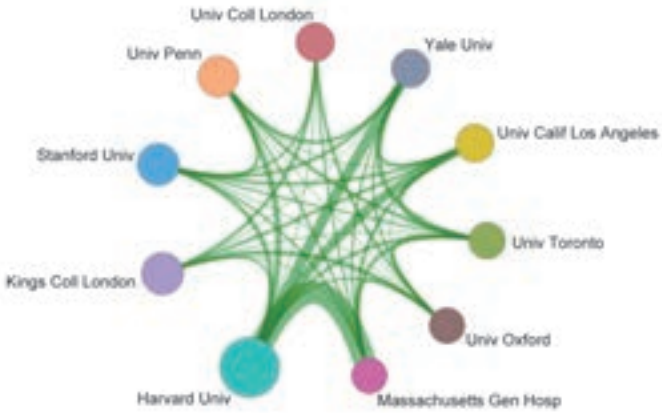

图 1.2.6　“脑成像技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“脑成像技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	20 120	36.88%	2016.8
2	China	6423	11.77%	2017.1
3	UK	5800	10.63%	2016.8
4	Germany	5221	9.57%	2016.8
5	Canada	3455	6.33%	2016.9
6	Netherlands	2799	5.13%	2016.8
7	Italy	2637	4.83%	2016.9
8	France	2532	4.64%	2016.8
9	Australia	2156	3.95%	2016.9
10	Switzerland	1755	3.22%	2016.8

表 1.2.12　“脑成像技术”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Harvard Med Sch	1300	12.68%	2017.6
2	Univ Coll London	1106	10.79%	2016.9
3	Univ Toronto	996	9.72%	2016.8
4	Kings Coll London	976	9.52%	2016.6
5	Stanford Univ	948	9.25%	2016.7
6	Harvard Univ	894	8.72%	2015.6
7	Univ Penn	873	8.52%	2017.0
8	Chinese Acad Sci	823	8.03%	2017.0
9	Univ Oxford	811	7.91%	2016.8
10	Univ Calif San Francisco	766	7.47%	2016.8

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿涉及电子科学与技术、光学工程与技术、仪器科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与技术等学科方向（见表 2.1.1）。其中，“图像视频分析识别系统与技术”“基于微纳电子技术的传感器开发”“手术机器人技术”基于科睿唯安专利地图分析得出，其余 7 项为专家推荐。各开发前沿涉及的核心专利 2013—2018 年公开情况见表 2.1.2。

（1）毫米波高速通信技术

毫米波高速通信技术是指利用毫米波频段频谱资源实现高速信息传输的通信方式。毫米波的频率范围为 26.5~300 GHz，对应的波长范围为 1~10 mm。利用这一频段丰富的频谱资源，信息传输速率可达 Gbps 甚至 Tbps 量级。一方面，毫米波与太赫兹集成电路的电性能随着频率升高而下降，成本随着频率升高而升高；另一方面，在相同增益情况下，天线及无源元件尺寸随着频率升高而减小；此外，利用空间分割特性，可大幅度提高频率复用率。工业和信息化部已将 24.75~27.5 GHz 和

表 2.1.1 信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	毫米波高速通信技术	293	4246	14.49	2015.4
2	超精密仪器技术及智能化	186	237	1.27	2015.7
3	图像视频分析识别系统与技术	227	18 350	80.84	2014.1
4	基于微纳电子技术的传感器开发	213	382	1.79	2015.9
5	手术机器人技术	286	44 560	155.80	2014.5
6	高能效人工智能芯片技术	184	256	1.39	2016.8
7	基于石墨烯等纳米新材料的传感器单元及测量技术	221	918	4.15	2015.3
8	柔性可穿戴光电子器件应用技术	48	356	7.42	2016.4
9	物联网安全检测技术	48	36	0.75	2016.8
10	基于合成孔径雷达的图像处理、目标识别以及特征学习	329	882	2.68	2016.0

表 2.1.2 信息与电子工程领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	毫米波高速通信技术	21	18	26	40	52	90
2	超精密仪器技术及智能化	18	20	31	34	35	38
3	图像视频分析识别系统与技术	89	71	35	28	4	0
4	基于微纳电子技术的传感器开发	35	22	28	26	49	53
5	手术机器人技术	80	87	45	53	16	5
6	高能效人工智能芯片技术	3	3	4	13	36	81
7	基于石墨烯等纳米新材料的传感器单元及测量技术	14	22	31	27	41	40
8	柔性可穿戴光电子器件应用技术	0	2	2	14	15	13
9	物联网安全检测技术	1	2	4	7	18	16
10	基于合成孔径雷达的图像处理、目标识别与特征学习	15	36	70	62	63	75

37~42.5 GHz 这两个毫米波频段确定为 5G 实验频段。作为毫米波高速通信系统的核心技术，大规模 MIMO 系统利用大规模天线阵列调控电磁波，进行波束成形，能够有效提高系统的通信容量和速率。这也给毫米波通信技术带来挑战，包括：基站和终端架构、多通道芯片、器件封装、系统空口测量（OTA）等。毫米波通信系统发展趋势包括实现高数据吞吐率、系统一体化集成等。

（2）超精密仪器技术及智能化

测量仪器一般是指在认识世界过程中，为取得目标物某些属性值而进行衡量所需要的第三方标准或工具。超精密仪器是指测量仪器中精度水平最高、对科学前沿研究和技术前沿开发起到引领和支撑作用的最尖端仪器。超精密仪器主要技术方向包括：尖端科学探索仪器技术（引力波探测、新原理显微镜等）、生产中的工程测量仪器技术（动态测量、超精密激光测量、工业透射测量等）、生物医疗仪器技术（高分辨率生物显微镜、冷冻电镜等）、计量及测量基标准技术等。随着信息技术蓬勃发展，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术兴起，超精密仪器技术在进一步提升测量精度和多参量同时测量基础上，呈现集成化、信息化、网络化和智能化的发展趋势。

（3）图像视频分析识别系统与技术

图像视频分析识别系统主要基于图像视频等信息，利用各类具备学习能力的智能算法，完成特定的分析、识别、统计和预测等任务。通过融合图像处理、计算机视觉、模式识别、人工智能和自动控制等方面的先进理念和技术，并伴随着网络、通信和边缘计算等技术的迅速发展，图像视频分析识别系统与技术趋于成熟，广泛应用于无人零售、互联网内容监管、安防、交通和体育赛事，在医疗、无人驾驶、增强现实等方向的应用也初露端倪。

深度学习背景下的图像视频分析识别技术的发展方向有：开发具有更强计算能力和更低功耗的边缘计算设备，降低终端摄像头与中心节点之间的通信需求；进一步提升各类采集设备分辨率，提高其在光照不理想情况下的图像采集质量；基于性能不断加强的图形处理器（GPU）等硬件设备，提升高清视频实时分析能力；发展更为有效的人工智能大数据分析技术，严格控制虚警（假阳性）率，不断提升数据分析准确性和效率；通过引入地理信息系统（GIS）等标准信息，建立更加完善、自动化程度更高的跨摄像头分析识别技术。

（4）基于微纳电子技术的传感器开发

传感器是能感受被测量并按照确定的函数关系转换成可用输出信号的器件或装置。随着以数字化、网络化和智能化为核心的电子信息技术时代到来，传感器技术也在向高性能、多功能、微型化、集成化、智能化方向发展，还要求成本低、寿命长、性能稳定。以集成电路技术为代表的微纳电子技术，具有批量加工微米或纳米尺度电子器件的能力，汇聚和融合微电子、微机械、化学、生物医学、纳米技术等多学科研究成果，可为传感器的微型化、集成化、智能化以及批量化生产提供有效解决途径，从而使微纳传感器在工业物联网、消费电子、生物医学、汽车、机器人、航天、军事等领域应用更加广泛。例如，①基于片上系统技术的智能传感器，具有实现物联网中局部节点的计算功能，将原始数据实时转化为行动，实现快速响应和规避网络延迟；②作为人机交互的重要接口，触觉传感器能够收集人体和局部环境的力学特性信息，与微纳电子技术融合后，使其可穿戴性、生物兼容性、机械耐久性不断改进；③通过汲取生物系统的优点，基于微纳电子技术研制的新型仿生类传感器不断涌现，如仿生电子鼻、电子眼、电子舌和电子耳等集成传感器；④气体传感器是智能识别系统的关键组成，而采用了比表面积大的低维纳米材料的气体传感器在灵敏度、快速响应、恢复特性方面具有独特优势；⑤前沿微纳电子机械技术的引入，可实现生物医学传感器的微型化、集成化和自动化，使测量和控制更加精确，甚至可达到分子和原子水平。

值得指出的是，微纳机电系统传感器能将特征尺度为微米或纳米的机械、电子、光学等功能结构集成为一体，显著提高传感器的微小型化、智能化、多功能化水平，有着巨大应用价值和广阔市场前景。微纳机电系统传感器研究具有多学科交叉和多样化特征，多种基础科学、工程和技术问题交错耦合，相关研究重点是专用集成微型仪器、微传感器阵列、多传感器组合等。

（5）手术机器人技术

手术机器人技术是以空间定位、快速计算、人工智能、3D 数字化医疗影像、先进机器人等现代科技为基础，面向医疗手术的一种机器人技术，通常由人机交互与显示、医学图像、系统软件、机器人装置、定位装置等功能模块构成。手术机器人主要研究方向有：人机交互协作控制技术，面向远程操作的临场感技术与虚拟现实技术，3D 数字化医疗影像技术，面向医疗的多传感器信息融合技术，能够完成灵巧、精细操作的机器人机构设计，面向医疗的空间跟踪定位、实时标定及配准技术等。

手术机器人具有增强手术灵巧性，提高操作精确性、稳定性、安全性等显著优势，能在人体腔道、骨盆、血管密集的解剖结构中完成精细的手术操作，有利于人体器官的重建和恢复。目前，手术机器人在骨科、牙科、外科、神经科、眼科等多个医疗专业得到应用，但存在便携性差、费用高、需要借助医生操控、缺乏诊治疾病和临床决策能力等不足。主要发展趋势是研发小型化、轻型化、低成本的通用手术机器人，以及能够独立完成诊治疾病、临床决策、操控的自主手术机器人。

（6）高能效人工智能芯片技术

人工智能芯片是执行人工神经网络和机器学习等人工智能算法的集成电路芯片。作为支撑人工智能的硬件基础，这种芯片为智能处理提供强大的计算能力，成为推动人工智能进步和发展的核心技术。随着物联网、自动驾驶、可穿戴设备、移动计算等边缘计算领域智能应用的爆发，摩尔定律下的芯片性能提升趋缓、冯·诺依曼架构难以满足新兴人工智能算法需求等不足日益凸显，如何提高人工智能芯片的处理能效成为制约拓展应用和普及的瓶颈问题。

目前，经过软硬件优化的通用人工智能芯片、基于细粒度可重构技术的现场可编程逻辑门阵列（FPGA）主要面向云端应用，同时支持训练和推理，但由于功耗高而难以满足高能效的处理需求。正在发展中的高能效人工智能芯片包括：①针对人工智能算法进行专门硬件加速的专用芯片，这是当前的主流形式，根据电路实现方式不同又细分为数字人工智能芯片、数模混合人工智能芯片、基于忆阻器等新型器件的人工智能芯片、光学人工智能芯片；②基于生物脑启发的神经形态计算芯片，具有高度仿生、低功耗、低延时的优势。相关研究未来发展方向有：基于近存储 / 存储内计算的人工智能芯片、软件定义硬件的人工智能芯片、基于新型存储器的人工智能芯片等。

（7）基于石墨烯等纳米新材料的传感器单元及测量技术

纳米材料是指尺寸小于 100 nm 的超小颗粒构成的零维、一维、二维材料或由基本单元构成的三维材料的总称，包括富勒烯、碳纳米管、石墨烯等。纳米材料具备独特的物理化学性质，表现出一系列特别的光学、磁学、力学、电学以及催化性能，在传感器领域展现了良好的应用前景，受到广泛关注。石墨烯作为一种独特的六边形蜂窝网状结构二维晶体，具有超大的比表面积、优异的导电性、超高的机械强度、易于功能化、良好的透光性等优点。由其制成的传感单元，每个原子与感应环境充分接触，由此改变其物理属性，用来测量磁场、压力、光信号和分子材料等，可应用于物理传感、化学传感、生物传感等领域。基于石墨烯材料的电化学生物传感作为结合生物和信息的前沿交叉技术，可用来测量生命体中化学小分子，如一氧化氮（NO）、过

氧化氢（H_2O_2）、多巴胺、脱氧核糖核酸 / 核糖核酸（DNA/RNA）等，也可用来测量蛋白质大分子和生物细胞等，有望在生物科学和医疗健康领域产生深远影响。相关技术的研究重点是提高石墨烯传感器的精度和灵敏度，优化传感器的体积和结构，尽快实现医疗应用。

（8）柔性可穿戴光电子器件应用技术

柔性可穿戴光电子是将具有电源供给、信号传输、物质传感与检测、数据读取、成像显示等单种或多种功能的光电子器件集成在柔性基板上的新兴应用技术。相关研究涉及机械力学、光电子器件、数值模拟、柔性材料、半导体加工、印刷压印、增材制造、系统集成、信号传感、信号处理等多个学科方向。与传统光电子器件相比，柔性可穿戴光电子器件最大的特性就是突破传统硬性脆性材料的机械束缚，超轻、超薄，具有较大灵活性，能够在弯曲、折叠、压缩或拉伸等各种机械改变状态下维持正常光电性能。这类器件在光电子皮肤、智能机器人传感、可穿戴可植入生理监测与治疗等领域应用潜力巨大。

为适应人工智能与信息物联网时代对柔性可穿戴设备的新型需求，未来研究的重点方向有：优化材料选择和机械结构设计，实现光电子器件的超高柔韧性；研究具有可拓展性的多功能器件阵列形式，实现大面积范围内的高分辨、高灵敏、快速响应的多维信号（如方向、应力、温度、湿度、生物化学物质等）检测；发展柔性电子与光子器件的系统化集成技术，实现柔性可穿戴光电子器件的自供电、自发光以及信号的无线传输和实时解读；研究具有生物相容性甚至可降解的可植入可穿戴柔性光电子器件，探索在疾病诊断与治疗、理疗康复等生命健康领域的应用；开发制备柔性光电子器件的新工艺，实现低成本大规模制造。

（9）物联网安全检测技术

物联网是实现“万物互联”的核心和关键，现已广泛应用于能源、交通、海洋、空天等领域的感知和监控，但其安全防御机制普遍比较薄弱，给各类关键基础设施带来很大隐患。物联网安全检测技术对物联网中各类软硬件设备、系统安全状态进行获取和评估，以发现物联网的隐含风险，为进一步安全加固和防御提供支持。

物联网安全检测主要技术方向有：物联网节点操作系统与应用软件安全监测，物联网协议与通信接口安全脆弱性分析，物联网芯片安全监测，物联网安全远程监测预警技术。随着高级持续威胁等新型攻击方式的出现，针对物联网的威胁日益复杂化和泛化，物联网威胁情报感知与共享、全网安全态势感知作为未来发展重点，将为防御各类新型攻击提供有力保障和支持。此外，物联网安全检测的标准化也是重要研究方向。

（10）基于合成孔径雷达的图像处理、目标识别与特征学习

合成孔径雷达（SAR）作为微波成像雷达，具有全天时、全天候、多波段、多极化、强穿透等优点，广泛应用于民用和军用领域。随着 SAR 数据获取能力提升，相应的图像解译技术受到高度重视，衍生出 SAR 图像处理、目标识别和特征学习等诸多热点课题。SAR 图像处理目的是增强目标并弱化背景，包括降噪、增强、校正、配准、分割等环节。目标特征学习用于整合、提炼 SAR 图像的有效信息，将图像数值转化为特征矢量，代表性方法有主分量分析、核主分量分析和非负矩阵分解等。目标识别利用 SAR 图像的幅度、相位、纹理、极化等目标特征，构造分类器来区分不同类型或相似目标，代表性方法有基于模板匹配、基于模式分类、基于稀疏表示和基于深度学习等。

相关发展趋势有：多源图像综合利用，应用 SAR 参数可变和多系统协同可获得多幅图像，综合处理能够有效提高应用性能；多尺度处理，充分提取目标特征，为分类器提供更多的判决依据；深度学习方法，整合预处理和特征提取，由端到端的架构实现很高的识别精度；任务驱动型设计，自顶而下、统筹目标识别过程，形成一体化数据处理链路。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 毫米波高速通信技术

5G 毫米波通信系统网络设备主要包括基站（BS）和核心网（N）。BS 主要包括有源阵列天线单元（AAU）和基带单元（BBU）。其中，AAU 通常为天线、射频与基带预处理一体化集成形态，并采用大规模 MIMO 技术克服较高的路径损耗，终端主要采用分组相控阵。目前，5G 毫米波 AAU 一般采用较大规模天线阵列（如 256 根），用于提高传输速率和系统容量，其中多通道、高性能一体化射频集成技术被广泛采用。针对毫米波终端，考虑体积、能耗、成本的约束，架构一般采用较小规模的天线阵列（如 4 根），且天线和射频芯片的一体化集成以毫米波前端模组形式出现。毫米波多通道高集成度芯片成为技术攻关方向，拟在同一块芯片上集成多个射频收发通道，进而减小体积、成本和功耗，由此支持毫米波基站和终端的小型化。为提高毫米波系统性能，对封装技术提出严格要求，发展以封装天线为代表的先进技术来实现天线和射频多通道芯片的一体化集成。此外，高集成度给评估系统性能带来挑战，传统的指标测试失效，基于空口的测量技术应运而生。相应的测量标准、测量设备和测量方法正在深入研究。

毫米波高速通信技术对 5G/6G、下一代无线互联网、空 / 天 / 海 / 地一体化卫星通信网络等领域产生关键使能作用，成为未来电子通讯产业的核心支撑技术，也是世界各国长期战略扶持和重点发展的领域。全球机构重点研究开发 50 GHz 以下频谱资源，主要国家均对频谱划分提出相关建议，正在积极推进毫米波通信技术研究和产业布局。目前，本方向专利公开量有 293 项（见表 2.1.1），呈逐年递增趋势（见表 2.1.2），美国、中国和日本排列前 3 位（见表 2.2.1）。核心专利主要产出机构（见表 2.2.2）方面，美国的 ITLC、QCOM 和日本的 MATU 排名前 3 位。国家或地区间合作网络（见图 2.2.1）集中在中国、美国、俄罗斯、瑞典等。主要机构间的合作并不密切（见图 2.2.2）。

综上，毫米波高速通信技术在全球逐步形成了包括工艺代工、器件研制、芯片设计、封装测量、系统集成在内的较为完整的产业链。我国已有相关技术积累和产业基础，应从战略高度重视该领域的基础研究、核心技术研发与产业发展，进一步加强整合能力。

2.2.2 超精密仪器技术及智能化

超精密仪器技术是指测量仪器中精度最高、能力最强、对科学前沿研究和技术前沿开发起到引领

表 2.2.1 “毫米波高速通信技术”核心专利主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	117	39.93%	3392	79.89%	28.99
2	China	80	27.30%	100	2.36%	1.25
3	Japan	49	16.72%	288	6.78%	5.88
4	South Korea	30	10.24%	236	5.56%	7.87
5	Russia	8	2.73%	731	17.22%	91.38
6	Israel	7	2.39%	18	0.42%	2.57
7	Germany	3	1.02%	4	0.09%	1.33
8	Netherlands	2	0.68%	19	0.45%	9.50
9	Taiwan of China	2	0.68%	7	0.16%	3.50
10	Sweden	2	0.68%	4	0.09%	2.00

表 2.2.2　“毫米波高速通信技术”核心专利主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	ITLC	USA	34	11.60%	1501	35.35%	44.15
2	QCOM	USA	28	9.56%	610	14.37%	21.79
3	MATU	Japan	17	5.80%	27	0.64%	1.59
4	SMSU	South Korea	13	4.44%	185	4.36%	14.23
5	SONY	Japan	12	4.10%	296	6.97%	24.67
6	HUAW	China	12	4.10%	18	0.42%	1.50
7	BDCO	USA	8	2.73%	268	6.31%	33.50
8	GLDS	South Korea	8	2.73%	10	0.24%	1.25
9	IBMC	USA	6	2.05%	9	0.21%	1.50
10	APPY	USA	5	1.71%	160	3.77%	32.00

注：ITLC 表示 Intel Corporation；QCOM 表示 Qualcomm Inc.；MATU 表示 Panasonic Corp.；SMSU 表示 Samsung Electronics Co., Ltd.,；SONY 表示 Sony Corp；HUAW 表示 Huawei Technologies Co., Ltd.；BDCO 表示 Broadcom Corp.；GLDS 表示 LG Electronics Inc.；IBMC 表示 International Business Machines Corp.；APPY 表示 Apple Inc.。

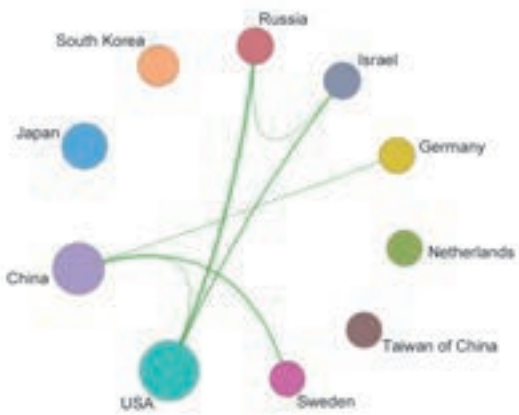

图 2.2.1　“毫米波高速通信技术”主要国家 / 地区间合作网络

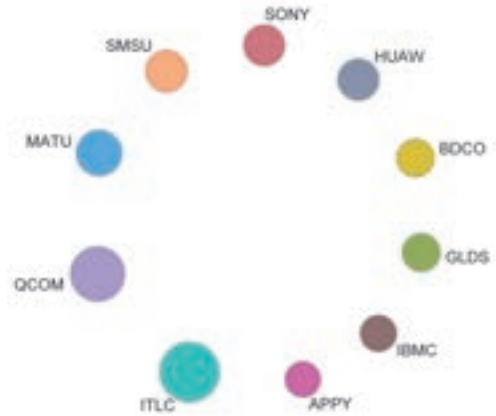

图 2.2.2　“毫米波高速通信技术”主要机构间合作网络

和支撑作用的一类高精尖仪器技术。一个国家仪器技术的发展水平往往标志着这个国家的创新能力、科学技术发展水平及核心竞争能力。世界科技强国都是仪器强国。超精密仪器技术是构建国家测量体系、引领科学探索、实现技术创新的必备手段，也是支撑精准医疗和高端装备制造业高质量发展不可或缺的手段。

超精密仪器一直引领着世界科学探索和尖端工业的发展。截至 2018 年，诺贝尔奖总数为 374 项，其中约 72% 的物理学奖、81% 的化学奖、95% 的生理学或医学奖都是借助相关尖端仪器完成的。超精密仪器呈现精密化、集成化、网络化和智能化等发展趋势。

（1）新原理仪器的研发。不断提高仪器精度是仪器科学追求的永恒目标，基于新原理的仪器研发是未来仪器精度水平进步的关键，不仅能够提升现有测量参量的精度水平，亦可实现对新参量的测量。例如，扫描隧道显微镜的发明使人类第一次能够实时观察单个原子在物质表面的排列状态和表面电子行为有关的物化性质，使测量分辨率提升到原

子级水平，对表面科学、材料科学、生命科学领域研究起到重大推动作用。当前新原理超精密仪器不断被开发，如 X 射线三维显微镜，可在不破坏检测对象的情况下，实现对其内部结构的高分辨率成像；扫描电子显微镜也出现高通量化、飞秒级超快时间分辨率、原位观测等趋势。

（2）计量基标准技术趋向量子化。复现和保存国际单位制 SI 中基本单位的经典方法是使用实物基准，而实物基准具有稳定性不高、难以准确复制等缺点。量子化计量基准具有小型化和芯片化的优势，可以直接嵌入超精密仪器与装备中，可实现实时校准，使仪器与装备的精度水平达到最优，显著提高装备制造效率。未来发展重点方向还包括对基本物理常数（如牛顿万有引力常数、普朗克常数、阿伏加德罗常数、玻尔兹曼常数等）和基本物理量（如质量、电压、电流等）的更高精度计量。

（3）测量仪器朝着网络化、智能化方向发展。随着人工智能、云计算、大数据技术、移动互联网技术及产业链的日趋完善，仪器技术的未来发展将从功能化向智能化方向转变，从单一参数测量仪器向复合式多参数测量仪器转变。这些新型智能化超精密仪器将在宇宙开发、深海探测、环境监测以及生物工程众多领域发挥重要作用。

本方向核心专利共有 186 项（见表 2.2.3），中国、日本和中国台湾排名前 3 位。从核心专利主要产出机构（见表 2.2.4）来看，排名前 3 的机构为 CNNU、BEIT、CHAV。主要国家或地区间研究相对独立（见图 2.2.3），主要机构间合作关系不够密切（见图 2.2.4）。

2.2.3 图像视频分析识别系统与技术

随着智能手机和高清摄像头的普及、各类短视频网站和直播平台的爆发，越来越多视频数据需要快速准确处理和分类。根据互联网公开数据，中国智能手机数量已达 13 亿人次，视频监控摄像头已超过 2 亿个，海量视频数据的高效分析需求成为驱动图像视频分析识别技术快速发展的首要推动力。

图像视频分析识别的核心技术可分为 3 个层次：①特征提取，②目标检测、分割、识别、检索，③目标跟踪、场景理解、视频摘要、行为检测与识别、多摄像头信息融合等。第 1 层次技术较为底层，早期主要使用人工设计的特征提取算法，如方向梯度直方图（HOG）、尺度不变特征变换（SIFT）、局部二值模式（LBP）、哈尔特征（Harr）等方法；近年来，随着深度神经网络特别是卷积神经网络的发展，显式的特征提取过程已被“端到端”的神经网络取代。第 2 层次技术更多针对单幅图像分析，

表 2.2.3 “超精密仪器技术及智能化”核心专利主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	173	93.01%	206	86.92%	1.19
2	Japan	4	2.15%	6	2.53%	1.50
3	Taiwan of China	3	1.61%	1	0.42%	0.33
4	Germany	2	1.08%	3	1.27%	1.50
5	South Korea	2	1.08%	3	1.27%	1.50
6	Switzerland	1	0.54%	18	7.59%	18.00
7	USA	1	0.54%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4　“超精密仪器技术及智能化”核心专利主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	CNNU	China	6	3.23%	5	2.11%	0.83
2	BEIT	China	4	2.15%	13	5.49%	3.25
3	CHAV	China	4	2.15%	3	1.27%	0.75
4	SGCC	China	4	2.15%	1	0.42%	0.25
5	UNBA	China	3	1.61%	7	2.95%	2.33
6	HAIT	China	3	1.61%	0	0.00%	0.00
7	MITO	Japan	2	1.08%	7	2.95%	3.50
8	HIMTT	China	2	1.08%	6	2.53%	3.00
9	UYBT	China	2	1.08%	5	2.11%	2.50
10	CAER	China	2	1.08%	4	1.69%	2.00

注：CNNU 表示 China National Nuclear Corp.；BEIT 表示 Beijing Institute of Technology；CHAV 表示 China Aviation Industry Corp.；SGCC 表示 State Grid Corporation of China；UNBA 表示 Beihang University；HAIT 表示 Harbin Institute of Technology；MITO 表示 Mitsubishi Heavy Ind Co., Ltd.；HIMTT 表示 Hunan Inst Measuring & Testing Technolog；UYBT 表示 Beijing University of Technology；CAER 表示 China Aerospace Science and Technology Corp.。

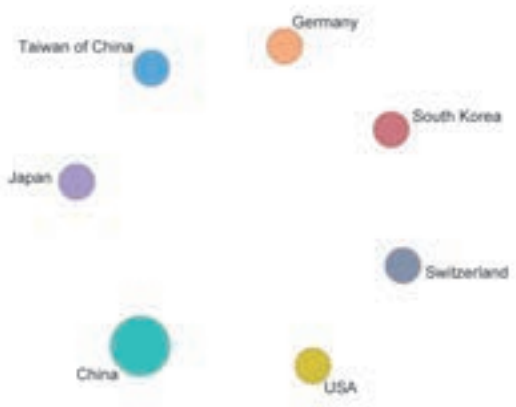

图 2.2.3　“超精密仪器技术及智能化”主要国家 / 地区间合作网络

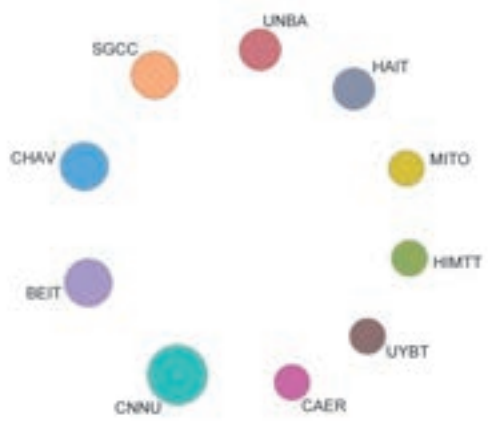

图 2.2.4　“超精密仪器技术及智能化”主要机构间合作网络

同样随着深度神经网络发展，上述任务大多可以在分类识别网络基础上，对部分网络结构进行修改即可实现。第 3 层次技术，需要对一路甚至多路视频进行综合分析，在单帧图像分析基础上，结合诸如空间、语音、摄像头相对位置等信息，完成更为抽象和复杂的分析识别任务。

图像视频分析识别系统根据任务不同也可分为 3 个层次：描述性分析、预测性分析和回顾性分析。描述性分析重点在于分析当前图像视频中关键目标、人物、场景的状态，目前大部分图像视频分析识别系统都处于这一层次，但是更高层次的分析依赖于精准的描述性分析。预测性分析根据当前图像视频状态对未来短时间或一段时间内关键目标、人物、场景的状态进行预测。回顾性分析根据当前图

像视频状态（一般为异常状态）推断之前有哪些图像视频与当前（异常）状态相关。

本方向核心专利主要产出国家或地区、主要产出机构、主要国家或地区间合作网络及主要机构间合作网络分别见表2.2.5、表2.2.6、图2.2.5和图2.2.6。核心专利公开量和被引数排前3位的是美国、日本和以色列，其中美国在专利公开量和被引数方面均占据绝对领先地位。国家和地区间的合作网络也是以美国为中心，以美国与日本和欧洲国家的合作为主。中国在公开量和被引数两项指标均占据第8位。核心专利主要产出机构排名前3位的是HONE、PELI和GOOG，但不同机构之间合作较少。

表2.2.5 “图像视频分析识别系统与技术”核心专利主要产出国家/地区

序号	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	173	76.21%	15 338	83.59%	88.66
2	Japan	25	11.01%	1441	7.85%	57.64
3	Israel	8	3.52%	488	2.66%	61.00
4	Netherlands	5	2.20%	282	1.54%	56.40
5	France	4	1.76%	424	2.31%	106.00
6	UK	4	1.76%	361	1.97%	90.25
7	South Korea	4	1.76%	265	1.44%	66.25
8	China	4	1.76%	200	1.09%	50.00
9	India	3	1.32%	174	0.95%	58.00
10	Germany	2	0.88%	125	0.68%	62.50

表2.2.6 “图像视频分析识别系统与技术”核心专利主要产出机构

序号	机构	国家/地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	HONE	USA	28	12.33%	6261	34.12%	223.61
2	PELI	USA	15	6.61%	1091	5.95%	72.73
3	GOOG	USA	9	3.96%	531	2.89%	59.00
4	FOTO	Ireland	8	3.52%	585	3.19%	73.13
5	SONY	Japan	8	3.52%	436	2.38%	54.50
6	APPY	USA	7	3.08%	428	2.33%	61.14
7	ADOB	USA	6	2.64%	595	3.24%	99.17
8	MITK	USA	6	2.64%	376	2.05%	62.67
9	MICT	USA	6	2.64%	366	1.99%	61.00
10	AMAZ	USA	6	2.64%	254	1.38%	42.33

注：HONE 表示 Honeywell International Inc.；PELI 表示 Pelican Imaging Corp.；GOOG 表示 Google Inc.； FOTO 表示 Fotonation Ltd.； ADOB 表示 Adobe Systems Inc.；MITK 表示 Mitek Systems Inc.；MICT 表示 Microsoft Corp.；AMAZ 表示 Amazon Technologies Inc.。

图 2.2.5　“图像视频分析识别系统与技术”主要国家 / 地区间合作网络

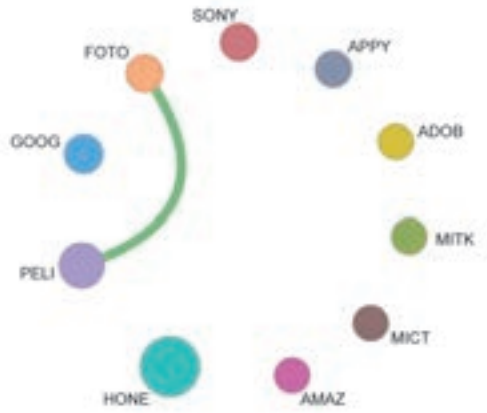

图 2.2.6　“图像视频分析识别系统与技术”主要机构间合作网络

领域课题组成员

课题组组长：潘云鹤　卢锡城

课题组副组长：谭久彬　吕跃广　陈　杰

专家组

院士专家：

第一组：谭久彬　庄松林　李天初　张广军　姜会林　刘泽金

第二组：吕跃广　段宝岩　吴曼青　陈志杰　余少华　丁文华

第三组：陈　杰　潘云鹤　卢锡城　赵沩平　柴天佑　费爱国　吴建平

副组长助理：陆振刚　车吉斌　孙　健

其他专家（按姓氏拼音排序）：

白　洋　陈金宝　陈　麟　陈晓明　崔　勇　付　俊　韩亚洪　郝　翔　黄　进　江　天　金仲和　李东升　李天成　刘雷波　刘　伟　刘显著　斯　科　孙秉珍　陶　金　王　丹　伍　军　徐　杨　徐志伟　张　川　朱亦鸣　朱永文　庄　伟

工作组

学术指导：吴朝晖　鲁东明　吴　飞

图情专家：杨未强　刘书雷　耿国桐　陈振英　梁江海　霍凝坤　吴　集　杨　筱　李　乾　史　尘　叶文莹　李　红　周云平　王凯飞

联络员：王成俊　王　兵　张　佳

秘　书：翟自洋　胡晓女　杨未强

执笔组（按姓氏拼音排序）：

白　洋　韩亚洪　洪　伟　黄铁军　江　天　金仲和　李浩宇　李天初　梁江海　林宏焘　刘　江　刘雷波　浦　剑　仇成伟　斯　科　谭久彬　王海明　伍　军　徐华平　薛建儒　余　超　张朝阳　庄　伟

三、化工、冶金与材料工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 11 工程研究前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 11 工程研究前沿涉及能源、材料、化学和生物技术学科方向等（见表 1.1.1 和表 1.1.2）。其中，“可再生能源系统”“膜生物反应器及膜污染防控技术”“多孔有机材料在 CO_2 捕集中的应用”是基于科睿唯安提供的核心论文数聚类得出，另外的 8 个研究前沿为专家提出。

从表 1.1.1 可以看出，“可再生能源系统”和“人工智能设计催化剂”的平均出版年为 2016 年，“膜生物反应器及膜污染防控技术”的平均出版年是 2015 年年底，这 3 个研究领域相对来说是更新兴的方向。尤其是“人工智能设计催化剂”呈现出近年来核心论文增加的趋势（见表 1.1.2），虽然其引用并不高（见表 1.1.1），但仍然说明此研究方向的前沿性。“生物质催化转化”和“多孔有机材料在 CO_2 捕集中的应用”篇均被引频次超过 90 次，是更热门的研究方向。

（1）可再生能源系统

可再生能源是指“从持续不断补充的自然过程中得到的能量”。以风能、太阳能、生物质能、水力能、地热能、海洋能等为代表的可再生能源系统，是实现清洁、低碳、安全、高效的能源系统的关键。近年来，尽管可再生能源系统发展迅速，但其成本较高、可靠性较差，以及不同系统间协同作用有待加强等问题，仍将是全球能源转型的关键挑战。

目前对可再生能源系统的研究是以能源的高效清洁利用为目标，并期望在生产、运输、分配、转化、存储、消费等全生命周期视角下实现不同种类的可再生能源的最优化协调。总体上，相关研究热点可分为以下 4 类：①从宏观层面提出可再生能源系统的发展策略与路径；②从微观层面提升可再生能源系统的（经济性、可靠性、有效性等）技术表现；

表 1.1.1 化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	可再生能源系统	26	1232	47.38	2016.2
2	高温合金	500	16 602	33.20	2014.6
3	材料生命周期工程	240	18 703	77.93	2014.8
4	人工智能设计催化剂	50	352	7.04	2016.7
5	航天航空用高性能 C/C 复合材料	139	4482	32.24	2014.7
6	膜生物反应器及膜污染防控技术	38	1401	36.87	2015.9
7	生物质催化转化	110	10 116	91.96	2014.3
8	化学生物技术	226	19 594	86.70	2014.4
9	多孔有机材料在 CO_2 捕集中的应用	80	7663	95.79	2014.8
10	高性能分离净化吸附 – 催化材料开发	84	6539	77.85	2014.8
11	温和条件人工固氮	80	4873	60.91	2014.9

表 1.1.2　化工、冶金与材料工程领域 Top 11 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	可再生能源系统	1	3	5	4	8	5
2	高温合金	126	115	139	73	38	9
3	材料生命周期工程	57	61	47	42	23	10
4	人工智能设计催化剂	2	4	5	10	10	14
5	航天航空用高性能 C/C 复合材料	36	26	35	33	7	2
6	膜生物反应器及膜污染防控技术	6	4	4	6	8	10
7	生物质催化转化	27	44	26	12	0	1
8	化学生物技术	73	61	43	40	8	1
9	多孔有机材料在 CO_2 捕集中的应用	18	22	13	14	12	1
10	高性能分离净化吸附－催化材料开发	14	23	22	15	9	1
11	温和条件人工固氮	21	18	16	5	10	10

③从能源生产角度探索不同类型（可再生、传统）能源之间的优化整合；④从能源消费角度研究基于可再生能源的能源、工业、交通等产业发展。

（2）高温合金

高温合金是指以铁、镍、钴为基，能在 600℃以上的高温及一定应力作用下长期工作的一类金属材料，具有优异的高温强度，良好的抗氧化和抗热腐蚀性能，良好的疲劳性能、断裂韧性等综合性能，且合金化程度较高，又被称为“超合金”。高温合金可广泛应用到电力、船舰、汽车、冶金、玻璃制造、原子能等工业领域，是制造航空航天发动机热端部件的关键材料，在先进的航空发动机中，高温合金占发动机总重量的 40%~60% 以上，被誉为“先进发动机的基石”，已成为决定发动机技术发展进程的关键因素。当前高温合金领域的研究重点包括新型合金的研制、合金材料的表面处理、焊接工艺等方向。特别是近年来新型航空发动机研制的需求和高温合金应用领域的拓展，对高温合金使用性能提出了更高的要求，从而加速了新型高温合金的研制。

（3）材料生命周期工程

材料生命周期工程以生态设计为主导，以满足性能要求、节约资源、保护环境为目标，将毒害替代、绿色工艺规划、清洁生产、资源循环等技术与理论应用到材料与产品的全生命周期中，系统优化全产业链条的性能、成本与环境表现。材料生态设计是有望缓解资源匮乏和环境污染问题的重要途径，在产品设计阶段充分考虑资源和环境问题，从源头节能治污；在此基础上，利用生命周期工程降低甚至消除材料与产品在全产业链条的各个环节中对环境的负面影响。

目前，材料生命周期工程已发展为由材料科学、制造科学和环境科学等多学科交叉的国际重要科学研究前沿领域，其研究方向主要包括材料生态设计理论与方法、材料生命周期评价理论与方法、材料环境负荷评价数据库与分析软件开发以及材料生命周期工程中的循环回收技术等。

未来应进一步加强生命周期工程在材料领域的推广和应用，建立以生态设计技术为指导、生命周期评价技术为标尺、生命周期优化技术为工具的生态环境材料产业绿色化发展模式，逐渐缓和目前材料生产与资源环境间的巨大矛盾，实现材料领域的可持续发展，全面满足生态文明建设对材料的需求。

（4）人工智能设计催化剂

人工智能是指利用算法和软件包构建人工神经网络，继而依托人工神经网络实现机器学习的过程。从机器学习角度看，待解决的所有问题可被分为两类，第一类问题被称为聚类，第二类问题叫做回归。因此，利用机器学习研究催化领域的问题，首先需要明确目标问题的种类；其次，研究人员需要并构建人工神经网络。神经网络中的神经元数量对于机器学习的精度具有较大影响，因此需要设立测试组对机器学习的结果进行检验，以防过度拟合或欠拟合。待研究人员获得可靠的人工神经网络后，它即可被用于预测一些简单体系的催化效果。此时，催化剂的活性一般只受到 1~2 个底物在其表面的吸附能的影响。因此，多组一一对应的吸附能与催化剂活性就成为机器学习的训练组。尽管机器学习在催化剂设计领域取得了一定成功，但是尚未有课题组使用它进行文献挖掘工作和与催化问题相关的图像分析（例如红外图谱）。这也是该热点未来的发展方向。

（5）航天航空用高性能 C/C 复合材料

C/C 复合材料是指以连续碳纤维为增强相，以碳材料为基体组成的复合材料，具有低比重、高比强、高比模、低热膨胀系数、耐烧蚀、抗热冲击等一系列优异性能，作为火箭机翼前缘、前锥、火箭喷嘴和再入飞行器及空天飞行器热防护材料具有其他材料难以比拟的优势。近年来随着航空航天领域的快速发展，对长时间耐高温抗氧化 C/C 复合材料提出迫切需求。提高 C/C 复合材料抗氧化的方法主要有材料改性和涂层防护两种，其中发展高温长寿命抗氧化涂层是 C/C 复合材料主要研究热点之一。C/C 复合材料由于生产周期长、制备成本高、批量生产困难等因素，使得 C/C 复合材料的应用限制在航空航天和军事等特殊领域。研发新的制备工艺进而缩短制备周期和降低生产成本是新型 C/C 复合材料发展的紧迫需求。

（6）膜生物反应器及膜污染防控技术

膜生物反应器（Membrane Bio-Reactor，MBR）是一种由膜分离与生物处理相结合的新型废水处理技术。目前研究最多、应用也最为广泛的膜生物反应器是固液分离型膜 / 生物反应器，即采用分离膜取代传统活性污泥过程中二次沉淀池，实现了高效膜分离技术与传统活性污泥法的有机结合。得益于分离膜对微生物和大分子有机物的高效截留作用，反应器内可获得较高的生物浓度和有机物氧化效率。与传统活性污泥法相比，膜生物反应器系统具有出水水质高、污泥产量少、占地面积小、工艺运行成本低等显著优势，应用前景广阔，已成为目前国内外学者高度重视的废水处理技术。不过，由于膜反应器内的膜与混合溶液直接接触，在物理、化学或生物作用下混合溶液中的颗粒物、溶质大分子等不可避免地在分离膜表面或膜孔内吸附、沉积，造成膜孔堵塞，引起膜渗透通量降低、跨膜压差升高等现象。膜污染是制约膜生物反应器广泛应用的主要问题之一，其防控技术和膜再生方法研究具有重要意义，研究内容主要集中在膜材料与表面性质、污染物种类及工艺条件等方面。

（7）生物质催化转化

生物质是指利用大气、水、土壤等通过光合作用而产生的各种有机体的总称，是自然界最主要的有机可再生碳资源。因具有来源广泛、储量丰富、碳中性等特点，生物质资源被广泛应用于合成燃料以及制备多种精细化学品，是一条极具潜力的石化资源替代路线。生物质催化转化是实现其高效利用的有效手段，目前主要研究的代表性生物质资源为木质纤维素（包括纤维素、半纤维素和木质素）、油脂、糖、微藻等。糖和纤维素等组分可以催化转化为低碳醇和平台化合物类产物，木质素经催化转化可制备芳香烃、芳香醛（羧酸）、酚类和烷烃燃料等产品，油脂可用于催化转化制备生物柴油，这些都是目前生物质催化转化的重要研究方向。由于生物质成分复杂，预处理、反应转化和分离提纯过程难度较大，因此，发展经济绿色的分离过程和催化体系是今后的发展趋势。此外，实现生物质多种

组分的完全利用，生产更高附加值的 H_2、燃料和高碳化学品也是促进生物质高值化利用的发展目标。

（8）化学生物技术

化学生物技术利用化学方法调控天然或工程化细胞的生长、代谢和生产行为，应用于生物制造、生物能源和生物医药等领域。细胞响应介入的化学分子或信号，重构胞内代谢网络和生理过程，可产生有益的生物学表型，如产物积累、副产物降低甚至抗逆性提升等。化学小分子可作用于转录、翻译和酶催化等不同层次，扰动胞内大分子合成及物质和能量代谢，最终导致表型差异。在基因工程和基因组编辑方法构建出基因型稳定细胞的基础上，采用化学生物技术可获得更宽泛的表型空间，不仅在工程应用领域具有重要意义，而且可丰富对生命活动运行机制的科学认识。特别地，将非生源的化学物质及来自传统石油化工的分子引入代谢网络，通过生物转化合成有用的产品，是当前化学生物技术研究非常活跃的方向，将持续产生具有重要创新性的成果。

（9）多孔有机材料在 CO_2 捕集中的应用

近年来，二氧化碳在大气中的浓度极速增加，随之带来的温室效应问题严重威胁着人类社会的可持续发展。因此，开发经济有效环保的技术、材料对有效捕集 CO_2 缓解温室效应问题显得尤为重要。CO_2 的捕集主要包括燃烧前捕集（H_2/CO_2 分离）、燃烧后捕集（CO_2/N_2 分离）和富氧燃料燃烧捕集（CO_2/H_2O 分离）。目前，工业上广泛应用的氨吸收捕集二氧化碳技术存在一系列问题，如再生能耗大，污染环境等。相比于氨吸收技术，利用多孔有机材料进行 CO_2 的吸附分离不仅能耗低、操作简单，而且易于再生吸附剂。新型多孔有机材料如金属有机骨架材料（MOFs），多孔有机聚合物（POPs）因其比表面积高，结构可调，可重复利用等优点在 CO_2 捕集方面表现出较好的应用前景。一般来说，CO_2 容量、选择性、物理化学稳定性以及生产 / 再利用成本是衡量多孔有机材料二氧化碳捕集性能的 4 个常用指标。在 MOFs/POPs 合成前或合成后对其进行亲 CO_2 基团修饰可以提高其 CO_2 容量和选择性。利用这种方法，科学家们已经开发出高 CO_2 吸附能的 MOFs/POPs 材料并且一些 MOFs 材料可以被大规模合成。未来的研究应该集中在如何提高这些多孔有机材料在工业应用条件下（如含 H_2O，CO, NO_x，SO_x 的混合气）的稳定性以及如何降低这些材料的生产成本。攻克了这些难题，我们相信有机多孔材料有望成为下一代在工业上应用的 CO_2 捕集材料。

（10）高性能分离净化吸附 – 催化材料开发

挥发性有机物（VOCs）会造成光化学烟雾、温室效应、臭氧层破坏、危害人体健康等一系列问题，已经严重威胁到人类的生存发展。就 VOCs 治理技术而言，吸附分离法技术成熟、能耗小、处理效率高，催化燃烧技术具有处理量大、无二次污染、易处理易燃易爆气体等优点。以上两种高效废气治理技术的关键在于吸附剂和催化剂的开发，高性能分离净化吸附 – 催化材料开发是实现化工过程节能减排的关键。对于 VOCs 的吸附剂，活性炭材料以及分子筛等已经被工业广泛应用，具有选择性吸附、吸附量大、易脱附等性能是高性能吸附剂开发的目标。贵金属催化剂是目前工业上应用较多的燃烧催化剂，然而贵金属易烧结、耐热性差、价格昂贵等缺点使其发展受到了一定的限制，价格低廉、稳定性好、更具广谱性的燃烧催化剂的开发是催化燃烧领域急需解决的问题。

高性能分离净化吸附 – 催化材料开发需要考虑以下问题：①开发高效吸附剂 / 催化剂需要理解 VOCs 与吸附剂 / 催化剂之间的相互作用，通过表征技术和计算模拟建立对结构 – 活性关系的更深入的了解；②对存在 VOCs 混合物、水蒸气以及 SO_x 和 NO_x 等情况进行系统研究，以模拟真实的 VOCs 排放环境；③可以考虑同时具备高效吸附剂与催化剂作用的双功能材料的开发，即尾气中低浓度的

VOCs 可以经过材料上吸附位点选择性吸附浓缩后再通过材料上的催化氧化活性位点将其完全除去。

（11）温和条件人工固氮

人工固氮反应是将空气中的氮气转化为农业和工业普遍应用的氮化学品的过程，对于工农业发展具有深远的影响。近百年来，工业合成氨是最重要的工业高效固氮过程，但存在能耗大（占全球近 1.4% 的能源消耗）、污染高（占全球近 1.6% 的 CO_2 排放）等问题。生物固氮酶、光催化和电催化方法固氮可在温和条件下将 N_2 还原为 NH_3，原料水和氮气来源广泛，被认为是一种环境友好的化学固氮方法，对确保人类社会可持续发展，缓解全球所面临的能源和环境等方面的危机有着重要的意义。高效氮还原催化剂和反应工艺的设计研发是目前该领域面临的关键挑战，也是目前国内外学者广泛研究的重点。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 可再生能源系统

未来社会最大的挑战之一是推动能源的可持续性生产与消费革命，而可再生能源系统则是实现可持续性能源体系的核心。近年来，对于以风能、太阳能、生物质能等为代表的可再生能源系统的研究愈发受到关注，并形成了如下 4 项研究热点：第一，宏观上重在讨论能否以及如何利用可再生能源实现整个能源体系的去碳化。例如，以丹麦为代表的欧盟国家提出了以可再生能源最大限度的代替传统能源的能源转型长期计划；而为实现清洁、低碳、安全、高效的能源系统新愿景，我国则需在终端用能部门大力推行以风、光为代表的可再生能源，在以工业、交通为代表的终端消费中进一步提升能率，并着力于分布式可再生能源系统的发展。第二，对于可再生能源的大规模利用，其自身的技术进步仍是关键。因此，提升现有系统对可再生能源的转化 / 利用效率，强化可再生能源系统的成本竞争力、开发更高效的储能技术以增强可再生能源系统的可靠性等技术层面的诉求仍将是今后的研究热点。第三，鉴于未来的新能源情景将涵盖从可再生能源到传统能源的多种能源形式，因此，以可再生能源为基础的多能源系统协同规划与运行优化将是未来的研究重点。例如，根据不同能源特点构建多能源互补系统、在混合能源系统中提升新能源的利用率等研究。第四，可再生能源系统提供了将可持续能源嵌入传统能源、工业、以及交通等行业的机会。其中，可再生能源与制氢系统的融合发展仍将是研究主线，它既拓展了可再生能源的消纳渠道，也实现了绿色制氢过程；进一步，基于可再生能源的氢能可被利用到除电力行业之外的多个领域，如：① 将氢能源作为连接冷、热、电能等不同形式能源的桥梁，以实现跨能源网络的协同作用与优化运行；②将绿色氢作为工业用气来促进工业系统的低碳化发展，如为炼化、冶金、化工等行业提供高效原料、还原剂以及热源等；③利用可再生氢能源实现运输部门的去碳化，即通过再生能源 – 氢能源 – 燃料电池 – 新能源汽车的结合，从全生命周期角度构建可持续的运输系统。

2013 年以来，“可再生能源系统”焦点核心论文的主要产出国家（或地区）及机构分别见表 1.2.1 和表 1.2.2，其中，主要核心论文产出国家前三名为丹麦、德国和芬兰，分别占到论文发表量的 61.54%、42.31% 和 19.23%；而奥尔堡大学与奥胡斯大学是贡献最大的研究机构。如图 1.2.1 所示，在相关研究的国家或地区中，丹麦和德国的合作关系最好，德国 – 芬兰、丹麦 – 美国之间的合作网络也较为发达。而图 1.2.2 表明，各研究机构间最积极的合作来自于奥胡斯大学、法兰克福高等研究院与法兰克福歌德大学。根据表 1.2.3，焦点核心论文施引国排名前三的是德国，丹麦和美国；而表 1.2.4 表明，奥尔堡大学、拉彭兰塔理工大学和奥胡斯大学是对焦点核心论文引用最多的三大研究机构。

表 1.2.1 “可再生能源系统”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Denmark	16	61.54%	944	76.62%	59.00
2	Germany	11	42.31%	594	48.21%	54.00
3	Finland	5	19.23%	161	13.07%	32.20
4	USA	4	15.38%	307	24.92%	76.75
5	Australia	3	11.54%	72	5.84%	24.00
6	Pakistan	1	3.85%	8	0.65%	8.00
7	Spain	1	3.85%	36	2.92%	36.00
8	Croatia	1	3.85%	11	0.89%	11.00
9	Netherlands	1	3.85%	13	1.06%	13.00
10	South Africa	1	3.85%	13	1.06%	13.00

表 1.2.2 “可再生能源系统”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Aalborg Univ	8	30.77%	433	35.15%	54.13
2	Aarhus Univ	7	26.92%	315	25.57%	45.00
3	Lappeenranta Univ Technol	5	19.23%	161	13.07%	32.20
4	Frankfurt Inst Adv Studies	4	15.38%	83	6.74%	20.75
5	Goethe Univ Frankfurt	3	11.54%	214	17.37%	71.33
6	Stanford Univ	2	7.69%	80	6.49%	40.00
7	Australian Natl Univ	2	7.69%	41	3.33%	20.50
8	Karlsruhe Inst Technol	2	7.69%	20	1.62%	10.00
9	Forschungszentrum Julich	1	3.85%	6	0.49%	6.00
10	Rhein Westfal TH Aachen	1	3.85%	6	0.49%	6.00

图 1.2.1 “可再生能源系统”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

1.2.2　高温合金

高温合金是 20 世纪 30 年代发展起来的一种金属材料，最早被英国、德国、美国等国家应用于航空工业。第二次世界大战后，航空工业迅猛发展，对高温合金的性能提出了更高的要求，各国也加紧了研究高温合金新技术的步伐。随着高温部件应用的日益增多，高温合金的应用也随之拓展到舰船、火力发电、核能、化工、冶金、玻璃制造等领域。

高温合金材料成分十分复杂，含有铬、铝等活泼元素，在氧化或热腐蚀环境中表现为化学不稳定，同时机加工制成的零件表面留下加工硬化和残

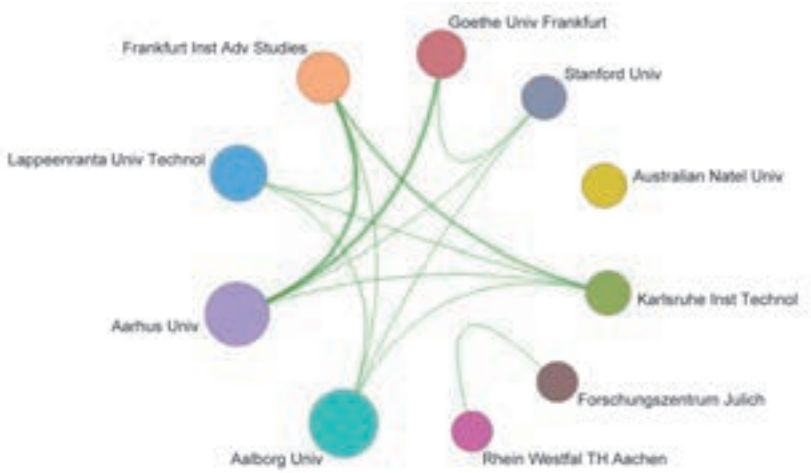

图 1.2.2 “可再生能源系统”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “可再生能源系统”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Germany	132	16.92%	2017.0
2	Denmark	121	15.51%	2017.0
3	USA	120	15.38%	2016.3
4	China	77	9.87%	2017.4
5	Finland	65	8.33%	2017.3
6	UK	57	7.31%	2017.0
7	Italy	53	6.79%	2017.4
8	Australia	47	6.03%	2016.9
9	Spain	38	4.87%	2017.1
10	Switzerland	35	4.49%	2017.1

表 1.2.4 “可再生能源系统”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Aalborg Univ	52	19.40%	2017.3
2	Lappeenranta Univ Technol	46	17.16%	2017.3
3	Aarhus Univ	39	14.55%	2016.8
4	Stanford Univ	23	8.58%	2015.3
5	Tech Univ Denmark	21	7.84%	2016.4
6	Univ Zagreb	18	6.72%	2016.8
7	Forschungszentrum Julich	16	5.97%	2017.5
8	Univ Sydney	14	5.22%	2016.6
9	Karlsruhe Inst Technol	14	5.22%	2017.4
10	Frankfurt Inst Adv Studies	13	4.85%	2017.1

余应力等缺陷，为材料的化学性能和力学性能带来十分不利的影响。由于合金化程度高，高温合金材料极易产生成分偏析，这种偏析对铸造高温合金和变形高温合金的组织与性能都有重大影响。高温合金的这些特点决定了它区别于普通金属材料的加工工艺。高温合金按制备工艺主要包括铸造高温合金（等轴晶铸造高温合金、定向凝固柱晶高温合金和单晶高温合金）、变形高温合金和粉末高温合金。

合金理论的进步与生产工艺技术不断改善和革新促进了高温合金的发展，通过合金强化＋工艺强化来不断结合提高合金的材料性能。合金强化包括合金固溶强化、第二相强化剂晶界强化等；工艺强化包括改善冶炼、凝固结晶、热加工、热处理及表面处理等环节改善合金组织结构等。高温合金材料制备技术与工艺仍处于不断的进步和创新中。比如，冶炼工艺采用了真空感应＋电渣重熔＋真空自耗熔炼三联工艺，真空自耗熔炼采用了先进熔炼控制方法等；通过定向凝固柱晶合金和单晶合金工艺技术提高材料的高温强度；采用粉末冶金方法减少合金元素的偏析和提高材料强度等。此外，氧化物弥散强化高温合金、金属间化合物高温材料也在不断发展和创新中。

2013 年以来，“高温合金”前沿核心论文的主要产出国家或地区及机构分别见表 1.2.5 和表 1.2.6，主要国家或地区及机构间的合作情况分别见图 1.2.3 和图 1.2.4，施引核心论文的主要产出国家或地区及机构分别见表 1.2.7 和表 1.2.8。

高温合金主要核心论文产出国家或地区前四名分别为中国、美国、德国和英国。其中，中国产出核心论文占比为 40.20%，排名第 2 的美国核心论文占比为 20.60%，德国和英国的核心论文比例均超过 10%。篇均被引频次排名前四的国家或地区为瑞典、日本、中国和英国。美国与德国之间的合作最多，其次是中国与美国，美国、中国与英国也多有合作，法国、加拿大与美国的合作也较多。由此可见，中国、美国、德国、英国、法国、加拿大等国较为注重该领域国家或地区间的合作。高温合金研究方向核心论文产出数量最多的机构分别是中国科学院、中南大学、西北工业大学，核心论文产出数均等于或超过 28 篇。施引核心论文产生最多的国家是中国，施引核心论文比例达到 46.93%，美国的施引核心论文比例为 16.54%。根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前四的国家或地区施引核心论文数也比较多，其中中国施引论文数排名第 1，说明中国学者对该前沿的研究动态保持密切的关注和跟踪。施引核心论文产出最多的机构

表 1.2.5　“高温合金”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	201	40.20%	7174	43.21%	35.69
2	USA	103	20.60%	3269	19.69%	31.74
3	Germany	62	12.40%	1955	11.78%	31.53
4	UK	53	10.60%	1824	10.99%	34.42
5	India	30	6.00%	875	5.27%	29.17
6	France	28	5.60%	725	4.37%	25.89
7	Canada	27	5.40%	881	5.31%	32.63
8	South Korea	16	3.20%	457	2.75%	28.56
9	Sweden	14	2.80%	628	3.78%	44.86
10	Japan	13	2.60%	480	2.89%	36.92

表 1.2.6 “高温合金”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Chinese Acad Sci	39	7.80%	984	5.93%	25.23
2	Cent S Univ	33	6.60%	1862	11.22%	56.42
3	Northwestern Polytech Univ	28	5.60%	912	5.49%	32.57
4	State Key Lab High Performance Complex Mfg	28	5.60%	1701	10.25%	60.75
5	Univ Erlangen Nurnberg	20	4.00%	641	3.86%	32.05
6	Univ Birmingham	14	2.80%	602	3.63%	43.00
7	Harbin Inst Technol	14	2.80%	521	3.14%	37.21
8	Ruhr Univ Bochum	13	2.60%	376	2.26%	28.92
9	Univ Oxford	13	2.60%	384	2.31%	29.54
10	Max Planck Inst Eisenforsch GmbH	12	2.40%	362	2.18%	30.17

图 1.2.3 “高温合金”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

是中国科学院，施引核心论文比例超过 20%。西北工业大学、北京科技大学的施引核心论文比例均超过 10%。通过以上的数据分析可知，中国和美国在高温合金的核心论文产出及施引数量均处在世界前列，中国机构的施引核心论文数量较多。

1.2.3 材料生命周期工程

面对日益严重的资源匮乏和环境污染问题，追求材料、资源与环境的协调统一，实现可持续发展已经成为全球共识。材料生命周期工程被认为是有效缓解资源匮乏和环境污染的重要途径，因此进入

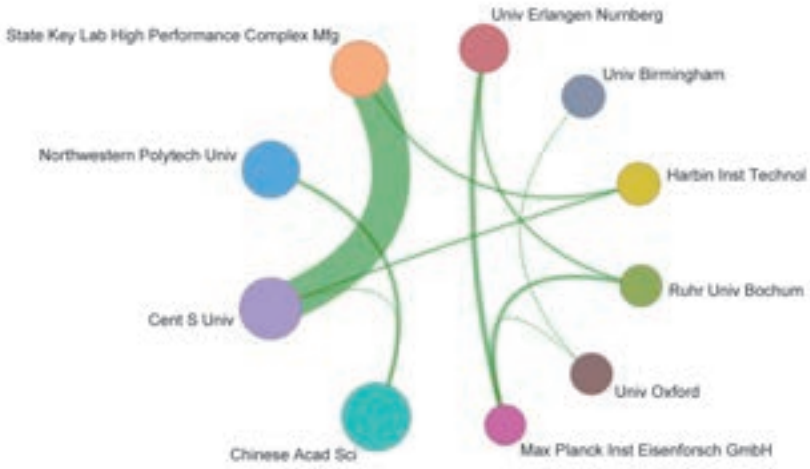

图 1.2.4 “高温合金”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7　“高温合金”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	4652	46.93%	2017.1
2	USA	1639	16.54%	2017.0
3	India	623	6.29%	2017.3
4	Germany	583	5.88%	2017.0
5	UK	555	5.60%	2017.0
6	South Korea	369	3.72%	2017.0
7	France	345	3.48%	2016.9
8	Japan	334	3.37%	2017.0
9	Iran	307	3.10%	2017.1
10	Canada	289	2.92%	2016.8

表 1.2.8　“高温合金”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	591	20.61%	2017.0
2	Northwestern Polytech Univ	418	14.58%	2017.1
3	Univ Sci & Technol Beijing	307	10.71%	2017.0
4	Cent S Univ	273	9.52%	2017.1
5	Harbin Inst Technol	263	9.17%	2017.1
6	Tsinghua Univ	205	7.15%	2016.8
7	Beihang Univ	202	7.05%	2017.0
8	Shanghai Jiao Tong Univ	171	5.96%	2017.0
9	Oak Ridge Natl Lab	148	5.16%	2017.1
10	Northeastern Univ	147	5.13%	2017.4

21 世纪以来，生命周期工程研究逐渐引起各国重视并得到了广泛发展。材料生命周期工程要求材料设计面向生命周期全过程，在对材料的使用性能、资源消耗和环境性能进行量化分析的基础上，追求全产业链条的最优化，并通过在材料制造、管理、回收等环节中持续地进行技术革新与工艺参数优化，有效降低材料产品全生命周期的环境影响。目前，材料生命周期工程的研究方向主要包括材料生态设计理论与方法、材料生命周期评价理论与方法、材料环境负荷评价数据库与分析软件开发以及材料生命周期工程中的循环回收技术等。

2013—2018 年“材料生命周期工程”研究前沿核心论文的主要产出国家 / 地区及机构分别见表 1.2.9 和 1.2.10。从表 1.2.9 可以看出，美国和意大利是“材料生命周期工程”核心论文的主要产出国，其核心论文占比分别为 19.17% 和 12.08%，英国以 11.67% 的比例排名第 3。其中，丹麦理工大学以发表论文 3.33% 的比例位居主要产出机构第 1，见表 1.2.10。图 1.2.5 是该领域主要国家 / 地区间的合作网络，可以看出中国与美国之间的合作最多。中国科学院与诺丁汉大学、卡塔尼亚大学与米兰理工大学之间有一定合作，见图 1.2.6。中国

表 1.2.9 “材料生命周期工程”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	46	19.17%	2923	15.63%	63.54
2	Italy	29	12.08%	2002	10.70%	69.03
3	UK	28	11.67%	3683	19.69%	131.54
4	China	22	9.17%	1623	8.68%	73.77
5	Spain	21	8.75%	1401	7.49%	66.71
6	Netherlands	12	5.00%	1478	7.90%	123.17
7	Switzerland	12	5.00%	539	2.88%	44.92
8	Belgium	11	4.58%	1415	7.57%	128.64
9	Germany	11	4.58%	1343	7.18%	122.09
10	Portugal	11	4.58%	861	4.60%	78.27

表 1.2.10 “材料生命周期工程”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Tech Univ Denmark	8	3.33%	512	2.74%	64.00
2	Univ Lleida	5	2.08%	516	2.76%	103.20
3	Univ Perugia	5	2.08%	368	1.97%	73.60
4	Univ Catania	5	2.08%	197	1.05%	39.40
5	Univ Nottingham	5	2.08%	195	1.04%	39.00
6	Delft Univ Technol	4	1.67%	1033	5.52%	258.25
7	Univ Coimbra	4	1.67%	492	2.63%	123.00
8	Chinese Acad Sci	4	1.67%	172	0.92%	43.00
9	Politecn Milan	4	1.67%	150	0.80%	37.50
10	Univ Pittsburgh	3	1.25%	208	1.11%	69.33

图 1.2.5 “材料生命周期工程”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

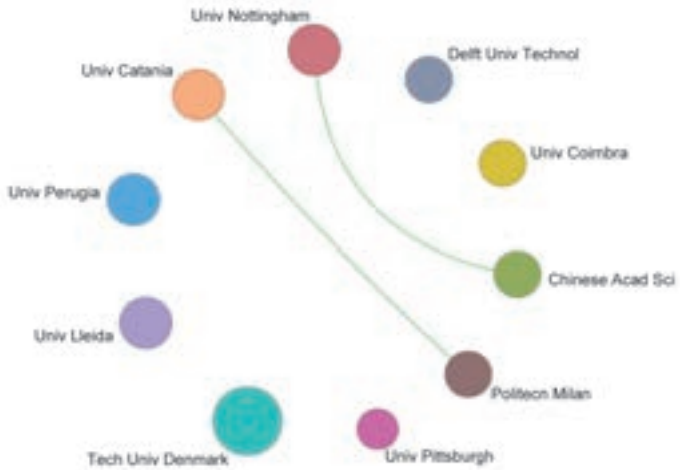

图 1.2.6 “材料生命周期工程”工程研究前沿主要机构间的合作网络

和美国分别以施引核心论文 30.08% 和 16.81% 位居施引核心论文的主要产出国家 / 地区的排名第 1 和第 2，见表 1.2.11。从表 1.2.12 可以看出，排名前 3 的施引论文主要产出机构分别为中国科学院、清华大学和中国科学院大学，其施引论文比例分别为 26.32%、12.42% 和 9.87%。

2　工程开发前沿

2.1　Top 12 工程开发前沿发展态势

化工、冶金与材料工程领域组研判得到的 Top 12 工程开发前沿见表 2.1.1。其中，“人工智能与化工过程深度结合”“高分子材料的生物基替代”“微反应系统开发”“可穿戴柔性电子器件”“生物质炼制化学品及材料”“国防重大需求先进结构功能一体化陶瓷材料关键制备技术”“智能仿生自修复涂层技术”是基于科睿唯安提供的核心专利数据聚类得出，另外的 5 个开发前沿为专家提出。各开发前沿自 2013 年至 2018 年的逐年核心专利公开量见表 2.1.2。

入选工程开发前沿的“人工智能与化工过程深度结合”和“计算机辅助的材料‘靶向’功能设计”（见表 2.1.1），以及入选工程研究前沿的“人工

表 1.2.11　“材料生命周期工程”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	3864	30.08%	2017.5
2	USA	2160	16.81%	2017.2
3	Italy	1052	8.19%	2017.2
4	UK	1004	7.82%	2017.3
5	Spain	919	7.15%	2017.3
6	Germany	852	6.63%	2017.3
7	France	677	5.27%	2017.2
8	India	631	4.91%	2017.5
9	Australia	624	4.86%	2017.5
10	South Korea	582	4.53%	2017.6

表 1.2.12　“材料生命周期工程”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	464	26.32%	2017.5
2	Tsinghua Univ	219	12.42%	2017.3
3	Univ Chinese Acad Sci	174	9.87%	2017.6
4	Tech Univ Denmark	133	7.54%	2016.9
5	Katholieke Univ Leuven	129	7.32%	2016.9
6	Hong Kong Polytech Univ	127	7.20%	2017.6
7	Natl Univ Singapore	117	6.64%	2017.1
8	Zhejiang Univ	109	6.18%	2017.6
9	Shanghai Jiao Tong Univ	100	5.67%	2017.6
10	Univ Sci & Technol China	97	5.50%	2017.7

智能设计催化剂”（见表 1.1.1），均涉及到计算机信息工程和化学工程的结合，意味着化学工程向智能化转型。

（1）人工智能与化工过程深度结合

随着现代化工生产过程大型化、精细化和复杂化的发展趋势，传统的设计、运行以及控制工具逐渐无法满足现代化工生产、安全、经济以及环保等要求，大量的研究都在致力于将人工智能技术应用于化工过程的各个阶段。化学工程学科的发展为化工生产提供了重要的理论基础，目前人工智能在工程领域的研究方向主要包含两个方面：化工生产过程的问题抽象和化工专用人工智能技术的发展。按照研究对象的尺度由小到大的顺序，目前主要研究热点集中在以下几个方面：催化剂开发、设备检测

表 2.1.1　化工、冶金与材料工程领域 Top 12 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	人工智能与化工过程深度结合	506	1326	2.62	2015.9
2	高分子材料的生物基替代	859	3331	3.88	2014.5
3	军用难熔金属材料	491	2398	4.88	2014.3
4	微反应系统开发	442	3660	8.28	2014.3
5	可穿戴柔性电子器件	696	4374	6.28	2014.9
6	煤转化制化学品	669	4655	6.96	2014.1
7	计算机辅助的材料“靶向”功能设计	664	7642	11.51	2014.9
8	极端服役环境下性能与服役行为检测与表征技术	325	4091	12.59	2012.7
9	生物质炼制化学品及材料	368	1341	3.64	2014.5
10	国防重大需求先进结构功能一体化陶瓷材料关键制备技术	1016	3793	3.73	2014.4
11	智能仿生自修复涂层技术	474	1437	3.03	2015.7
12	可反复循环生物降解高分子材料	947	10 767	11.37	2013.7

表 2.1.2　化工、冶金与材料工程领域 Top 12 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	人工智能与化工过程深度结合	60	79	64	93	93	117
2	高分子材料的生物基替代	223	210	226	138	60	2
3	军用难熔金属材料	71	67	45	63	66	79
4	微反应系统开发	146	133	85	58	17	3
5	可穿戴柔性电子器件	148	138	157	126	102	25
6	煤转化制化学品	229	210	151	73	6	0
7	计算机辅助的材料“靶向”功能设计	108	191	144	117	82	22
8	极端服役环境下性能与服役行为检测与表征技术	41	32	24	23	27	39
9	生物质炼制化学品及材料	101	98	95	51	19	4
10	国防重大需求先进结构功能一体化陶瓷材料关键制备技术	309	287	220	155	41	4
11	智能仿生自修复涂层技术	75	70	66	80	91	92
12	可反复循环生物降解高分子材料	114	135	104	110	124	107

与诊断、数字孪生、工艺过程监测与预警和资源与能源管理优化。

（2）高分子材料的生物基替代

以塑料、橡胶、纤维等为代表的高分子材料使用量巨大，其发展速度与应用范围已超过传统的金属材料和无机材料，成为工业、农业、国防、科技和日常生活等领域不可或缺的重要材料。然而，目前绝大多数高分子材料的原料源于不可再生的石化资源（石油、煤炭和天然气），其可持续发展面临严峻的挑战。如何从高分子材料的原料可持续性出发，发展符合可持续发展目标的新型高分子材料是目前世界各国学者和工业界普遍关注的问题。

高分子材料的生物基替代就是以源于自然界动植物等可再生资源为合成原料，替代原有的石油基原料。目前主要研究热点集中在以下几个方面：①从价格低廉的生物基单体出发，开发可适应于高分子材料工业化规模生产的新型绿色聚合反应体系，合成结构可控、性能优异的生物基高分子材料；②由微生物通过各种碳源发酵制备不同结构和性能的聚羟基烷酸酯类聚合物；③直接以淀粉、纤维素、甲壳素以及各种农林废弃物为原料，通过化学物理改性制备生物基高分子材料。未来的发展重点是如何降低生物基高分子材料的价格、提升其综合性能，使更多的生物基高分子材料获得大规模工业应用。

（3）军用难熔金属材料

军用难熔金属材料一般指熔点在2000℃以上的金属及其合金，例如W、Mo、Ta、Nb等金属材料，因其具有高熔点、低热膨胀系数、低蒸气压、良好的抗液态金属腐蚀性及优异的高温强度等特殊物理化学性能，被广泛用于航空航天、电子电器、武器装备、核能系统等重要领域。

随着这些高科技领域的不断发展，对高性能难熔金属材料的需求越来越广泛，主要围绕极端条件下使用难熔金属材料的强韧化及高性能化开展大量的研究工作。W的熔点高达3420℃且其热中子捕获截面较小，被选为最有希望的国际热核聚变堆中第一壁及偏滤器候选材料，但是其低温脆性及高温氧化性限制了应用，因此W及其合金的强韧化及高性能化是各国研究的重点。此外，难熔金属材料的粉末制备与增材制造紧密结合是拥有巨大发展潜力的研究方向，有望解决多年来传统粉末冶金产业的瓶颈问题，制备复杂形状或极端条件下使用的3D打印难熔金属产品，满足高端制造业、航空航天、国防等战略需求。

（4）微反应系统开发

微化学工程与技术是化学工程领域新的学科方向和前沿，它着重研究特征尺度在微尺度范围内（＜亚毫米）的过程特征和规律。由于微反应系统的通道特征尺度微细化、低反应物持有量和模块化结构，因此具有优异的传热传质性能、安全性好、过程易于控制和直接放大等特点，可显著提高快速强放热反应过程的安全性和生产效率，并快速推进实验室成果的实用化进程；在医药、农药、含能材料等精细化工，以及高分子、石油化工、生物化工、医疗检测和微纳材料合成等领域将有广阔应用前景。微反应过程优化设计和工程化的系统设备亟待开发，包括微反应器结构优化设计、反应工艺开发、过程智能控制、系统集成和微反应设备制造等，涉及微尺度下传递过程机理、传递－反应耦合机制、微结构元件优化、过程安全控制策略、并行放大规律和系统集成与优化等方面。通过微反应技术可实现化工过程强化、过程安全和节能减排，对我国传统化工产业升级、改善化工过程安全和环境保护有重要意义。

（5）可穿戴柔性电子器件

可穿戴柔性电子器件一般是指能够直接或者间接与皮肤接触并且具有机械柔性的电子器件。为了适应不同的工作环境以及人体对设备形变的要求，柔性可穿戴电子器件往往需要具有较大的机械灵活性，但是与此同时高技术难度同样限制了可穿戴柔性电子器件的发展。一是可穿戴柔性电子器件在不损伤本身电子性能的基础上要求的良好的伸展性与

弯曲性，这对电路材料提出了更高的要求；二是目前柔性电子的制备条件和性能与传统电子还具有一定的差距。目前，柔性可穿戴电子器件的研究应用体现在人类生活的方方面面，研究内容主要集中在电子皮肤、可穿戴生理监测治疗装置、柔性导电织物、薄膜晶体管和透明薄膜柔性门电路等。

（6）煤转化制化学品

以石油为原料的化工产业体系为国民经济的发展提供了重要支撑。然而，我国石油对外依存度已超过 70%，用于生产烯烃和芳烃的轻馏分对外依存度更高，对能源安全提出了严峻挑战。基于我国能源资源禀赋的特点，清洁高效地优化利用煤炭资源已成为解决环境问题并支撑经济社会高质量快速发展的重要一环。煤转化制化学品是现代煤化工发展的主要方向，可以弥补石油资源不足及其所造成的石油化工结构性缺陷。以煤制烯烃、煤制乙二醇和煤制油为代表的现代煤化工技术取得突破，打通了煤经合成气 / 甲醇生产清洁燃料和化学品的途径。进一步采用创新技术推进煤制化学品技术的开发和应用，突破煤制烯烃、煤制芳烃、煤制含氧化合物等技术瓶颈，降低生产过程能耗、提高过程经济性具有重要的现实意义和技术经济价值。

煤转化制化学品和石油化工所涉及的技术路线和化学反应体系不同，但二者的总体目标具有一致性。为了避免二者形成竞争的局面，积极探索煤制化学品和石油制化学品在原料、技术等方面的耦合互补，促进其与发电、生物质能等协调发展，提升资源能源利用效率，保障产业稳定可持续发展已成为新的发展方向。

（7）计算机辅助的材料“靶向”功能设计

传统的材料开发，往往要经过不断地重复试错的过程，不仅会浪费大量人力物力，而且需要较长的开发周期。计算机分子模拟技术不仅能提供定性的描述，而且能模拟出分子体系的一些结构与性能的定量结果，其大体涵盖基于量子力学的模拟和基于统计力学的模拟两个方面。借助计算机技术和理论计算方法，材料研究的模式也逐渐由传统的“经验指导实验”向“理论预测、实验验证”的方向转变。特别是针对大量样本而发展起来的高通量计算筛选技术，可以明显地加快优异材料的发现。在新材料的研发过程中，高通量筛选、大数据、高性能计算机的开发为材料“靶向”功能的设计提供了可能。

（8）极端服役环境下性能与服役行为检测与表征技术

先进结构陶瓷材料多用于高温结构部件，其实际应用环境极为苛刻。要想精确体现材料在极端环境下的服役行为，材料所处的检测环境应尽量模拟实际服役环境，而现有相关检测与表征环境一般与实际环境相差较大，测试条件与测试技术有待进一步完善。目前在先进结构材料基础性能、极端或苛刻环境下的服役性能与行为检测表征的基础上，加强对部件或构件级别的性能检测与评估，实现对材料和构件实施性能考核和服役行为研究。推进重大典型产品的研发过程及其产业化，为本行业提供统一的检测标准规范等，都是本行业的重要发展趋势，也是先进结构陶瓷材料走向广泛应用的关键所在。

（9）生物质炼制化学品及材料

生物炼制是以生物质可再生资源为原料生产能源与化工产品的新兴工业模式，是将生物质可持续地转化成能源、化学品和材料的过程集成，涉及食品、饲料、造纸、纺织、化工、能源等许多重要的工业领域。生物炼制可以实现对可再生生物质资源的深度加工和循环利用，理论上多数传统石油化工产品均可由生物炼制过程获得。与此同时，由于其原料的可再生性和与众多生物过程的结合，生物炼制过程可明显降低工业过程能耗、空气污染和水污染，符合当前社会绿色发展理念要求。因此，生物炼制材料及化学品具有广阔的发展空间。

（10）国防重大需求先进结构功能一体化陶瓷材料关键制备技术

随着航空航天等高新技术的发展，对先进陶瓷材料的结构和功能特性有了更高的要求，结构功能

一体化已成为其在高新技术领域应用的关键。然而陶瓷材料具有不易成型、韧性较差、较难加工等缺陷，因此结构功能一体化复杂陶瓷构件的制造技术，是行业发展的难点所在。当前，国防高端装备对高性能和形状复杂特种陶瓷材料与构件有着迫切需求，突破高性能复杂形状精密部件近净尺寸低成本绿色快速成型关键技术，建立可靠性评价标准及寿命预测模型，攻克以多功能陶瓷纤维复合膜、耐高温耐腐蚀轻质高强多孔陶瓷和高导热陶瓷基板等为代表的典型产品工程化制备技术难关，实现产业化示范，能够有效提升我国典型先进陶瓷材料的研发水平与核心竞争力，为国家重大工程和战略性新兴产业发展提供支撑。

（11）智能仿生自修复涂层技术

智能仿生自修复涂层技术是泛指将源于医学和生物学的自愈合能力用于材料科学领域，即一般指涂层在产生裂缝后能够自动修复。自修复涂料的原理有很多，比如在聚合物基体中引入微胶囊形成愈合剂与引发剂，当在外力条件下产生裂缝后，嵌在其中的微胶囊被撕裂，之后引发聚合反应，将裂缝处重新黏合修补好。同时杂化的有机－无机纳米组成可作为细胞壁来组装形成微型管路，涂层一旦受损便能自发修复愈合。目前研究内容的重点主要集中于 PET 涂层，汽车漆面涂层，手机后盖涂层以及一些橡胶材料。

（12）可反复循环生物降解高分子材料

高分子材料使用量巨大、在国民经济的各个领域均起着不可替代的重要作用。然而绝大部分的高分子材料在废弃后化学性能稳定，难以自然降解，目前主要通过焚烧、土地填埋等方式处理，仅有少量进入回收渠道；另一方面，进入回收渠道的高分子废弃物通常采用物理加工的方式再利用，这种方法虽然相对较为简单，但回收再加工过程会使得产品性能迅速恶化，难以达到多次循环利用，最终仍然只能废弃。随着人类社会对高分子材料依赖程度的不断加深，大量产生的高分子废弃物衍生出了严峻的环境污染和资源浪费等问题，例如白色污染、海洋微塑料、石油危机等，已经成为制约人类社会可持续发展的重大阻碍。

开发既可与传统高分子材料性能相媲美，废弃后可降解，且同时可反复循环利用的新一代高分子材料，已成为科学界和产业界共同关注的重要课题。对于适合回收的情况，这类材料可在一定条件下高效裂解为单体，实现可反复多次循环利用；而对于不适合回收的场合，则可以在土壤、水体等自然环境中无害化降解为水和二氧化碳等小分子，从而为资源与环境等日益紧迫的全球性问题提供一种新颖、全面且有效的解决方案。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　人工智能与化工过程深度结合

随着资源、能源、安全和环保的约束越来越高，传统的设计、生产和管控等方法无法满足现代化工工业高质量发展的要求。人工智能技术在人机博弈、机器视觉等方面的成功应用为化工生产过程的转型发展提供了借鉴，“智能＋化工”必将推动化工过程生产、管理和营销的变革，提升行业核心创新力和竞争力。

人工智能在化工生产中的工程研究方向目前包含两个方面：化工生产过程的问题抽象和化工专用人工智能技术的发展。前者主要研究如何从化工生产过程中抽象出满足已有人工智能技术的问题种类，并进一步利用成熟的人工智能技术进行处理，后者主要研究如何在目前已有技术的基础上，结合化工过程的专有特点，进一步开发出适用于化工过程的智能算法和软件，这两个方面是未来人工智能技术在化工过程深度应用中需要关注的基础研发方向和主要工程问题。

当前，人工智能在化工过程中的应用已成为学术界的重要研究热点，主要有：①催化剂开发。催化剂开发过程需要大量实验数据和专业知识的结

合，人工智能技术能有效融合大数据和专业知识，加快催化剂、小分子设计和开发速度。通过预测小分子活性结合位点，进行合成路线规划和逆向分子设计，改变传统设计实验方式，提高开发效率。②设备检测与故障诊断。动设备在运行过程中会产生大量的振动、声音、图像、电流等信号，利用基于大数据处理和知识推理的人工智能算法建立模型，实时监控动设备的运行过程，提前预测动设备故障的发生。③数字孪生。采用工业大数据、人工智能技术，融合过程机理知识，建立能表征化工生产过程运行状态的模型，以可视化的方式实现化工生产过程的平行制造，并在此基础上实现化工生产过程的工艺优化、运行优化和管理决策。④生产过程优化控制与预警。工业大数据、人工智能技术为化工生产过程全流程多目标协同优化控制与运行状态预警提供了新的方法，将提升复杂化工生产过程安全、平稳和高效生产的能力。⑤资源与能源管理优化。基于工业互联网、大数据及知识型工作自动化构建人机合作、知识驱动的生产计划智能决策系统，实现需求驱动和融合装置运行特性的生产计划优化，进行资源和能源等生产要素的优化配置。

从表 2.2.1 可以看出，人工智能在化工应用方面的核心专利主要来自美国和中国，日本和韩国的核心专利紧随其后；欧洲几个国家，如德国、瑞典、瑞士和法国等，也是相关专利的重要发布国家。结合图 2.2.1 可以看出，美国和欧洲等国的合作较多，而中国仅和美国有相关合作。但从表 2.2.2 和图 2.2.2 来看，核心专利的主要产出 Top 10 的机构主要来自美国，但即使这样，机构之间并没有相关合作。

2.2.2 高分子材料的生物基替代

进入 21 世纪以来，高分子材料广泛使用带来的环境污染、资源浪费以及对石化资源依赖性强等问题引起了国内外研究者和工业界的广泛关注。利用源于自然界动植物等可再生生物质制备生物基高分子材料不仅可以有效解决资源与能源安全问题，同时还可以缓解由碳排放快速增加带来的环境与气候问题。高分子材料的生物基替代的关键问题是生物质来源单体的大规模制备、高效聚合反应、生物基高分子性能的提升、降低生物合成高分子材料的成本等。当前已经有包括聚乳酸、聚羟基烷酸酯聚合物等在内的生物基高分子材料工业化产品，但是存在产量低、价格高、某些性能无法和石油基高分子相媲美的问题，因此研发具有高性价比、性能达到或部分超过石油基产品的生物基高分子材料是未来生物基高分子的重要发展方向。

表 2.2.1 “人工智能与化工过程深度结合”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	165	32.61%	640	48.27%	3.88
2	China	131	25.89%	235	17.72%	1.79
3	Japan	64	12.65%	79	5.96%	1.23
4	South Korea	45	8.89%	22	1.66%	0.49
5	Germany	22	4.35%	15	1.13%	0.68
6	Sweden	14	2.77%	47	3.54%	3.36
7	Taiwan of China	14	2.77%	15	1.13%	1.07
8	Switzerland	12	2.37%	24	1.81%	2.00
9	France	9	1.78%	8	0.60%	0.89
10	Israel	8	1.58%	26	1.96%	3.25

表 2.2.2 “人工智能与化工过程深度结合”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	KLAT	美国	12	2.37%	44	3.32%	3.67
2	GENE	美国	10	1.98%	37	2.79%	3.70
3	SKFK	瑞典	9	1.78%	37	2.79%	4.11
4	BOEI	美国	8	1.58%	25	1.89%	3.13
5	FICO	美国	7	1.38%	23	1.73%	3.29
6	DANH	美国	6	1.19%	52	3.92%	8.67
7	ASHF	英国	6	1.19%	19	1.43%	3.17
8	HONE	美国	5	0.99%	32	2.41%	6.40
9	UNAC	美国	5	0.99%	22	1.66%	4.40
10	SIEI	德国	5	0.99%	4	0.30%	0.80

注：KLAT 表示 KLA-Tencor Corp.；GENE 表示 General Electric Co.；SKFK 表示 SKF AB；BOEI 表示 Boeing Co.；FICO 表示 Fisher Controls International, Co., Ltd.；DANH 表示 HACH Co.；ASHF 表示 Ashford Tech Software Inc.；HONE 表示 Honeywell Int. Inc.；UNAC 表示 United Technologies Corp.；SIEI 表示 Siemens AG。

图 2.2.1 “人工智能与化工过程深度结合”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

图 2.2.2 “人工智能与化工过程深度结合”工程开发前沿的主要机构间合作网络

2013 年以来，“高分子材料的生物基替代”核心专利主要产出国及机构分别见表 2.2.3 和表 2.2.4，主要国家或地区及机构间的合作情况见图 2.2.3。生物基高分子材料的研究主要集中在利用生物质来源的单体制备聚合物、用生物发酵法制备高分子、以淀粉、纤维素、甲壳素以及各种农林废弃物为原料，通过化学物理改性制备生物基高分子材料等方面。核心专利产出国家或地区前三名为中国、美国和日本。中国核心专利占比为 68.34%，被引数比例高达 59.95%，排名第二的美国核心专利占比为 10.24%，被引数比例为 19.63%，日本核心专利占比也为 10.24%，但是被引数比例（9.07%）低于美国。美国和其他国家的合作最为广泛，合作的国家有日本、荷兰、英国、德国。此外，德国与瑞士、日本和美国之间存在合作，但是中国、奥地利、法国与其他国家都没有合作。中国的中国石油天然气集团、中国科学院长春应用化学研究所、美国陶氏化学、韩国 LG 公司、沙特基础化工、美国埃克森美孚等机构都拥有生物基高分子的核心专利，其中中国石油天然气集团拥有最多的核心专利。

表 2.2.3 “高分子材料的生物基替代”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	587	68.34%	1997	59.95%	3.40
2	USA	88	10.24%	654	19.63%	7.43
3	Japan	88	10.24%	302	9.07%	3.43
4	South Korea	40	4.66%	140	4.20%	3.50
5	Germany	22	2.56%	96	2.88%	4.36
6	Switzerland	8	0.93%	34	1.02%	4.25
7	France	7	0.81%	32	0.96%	4.57
8	Netherlands	6	0.70%	41	1.23%	6.83
9	UK	4	0.47%	38	1.14%	9.50
10	Austria	4	0.47%	31	0.93%	7.75

表 2.2.4 “高分子材料的生物基替代”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	SNPC	中国	11	1.28%	48	1.44%	4.36
2	DOWC	美国	9	1.05%	76	2.28%	8.44
3	BADI	德国	9	1.05%	49	1.47%	5.44
4	CAAC	中国	8	0.93%	24	0.72%	3.00
5	TORA	日本	8	0.93%	13	0.39%	1.63
6	GLDS	韩国	7	0.81%	78	2.34%	11.14
7	ASAH	日本	6	0.70%	32	0.96%	5.33
8	SABI	美国	5	0.58%	39	1.17%	7.80
9	CPCH	美国	5	0.58%	31	0.93%	6.20
10	ESSO	美国	5	0.58%	30	0.90%	6.00

注：SNPC 表示 China Petroleum & Chem Corp；DOWC 表示 Dow Global Technologies LLC；BADI 表示 BASF SE； CAAC 表示 Chinese Acad. Sci., Changchun Inst. Appl. Chem. Inst.；TORA 表示 Toray Industries, Inc.；GLDS 表示 LG Chem. Co., Ltd.；ASAH 表示 Asahi Kasei Chem. Co.；SABI 表示 SABIC Global Technologies B.V.； CPCH 表示 Chevron Phillips Chem Co., LP；ESSO 表示 Exxonmobil Chem Patents Co., Ltd.。

2.2.3 军用难熔金属材料

军用难熔金属材料一般指熔点在 2000℃以上的金属及其合金，例如 W、Mo、Ta、Nb 等，因其高熔点、优异的高温力学性能及独特的物理化学性能，被广泛用于航空航天、电子电器、武器装备、核能系统等重要领域。鉴于难熔金属材料的重要战略地位，美国、日本、欧盟等均将其作为重要战略物资进行储备。伴随高科技领域的不断发展及服役环境的极端化，对高性能难熔金属材料的需求越来越广泛。目前，军用难熔金属材料的研究主要围绕极端条件下使用难熔金属材料的强韧化及高性能化等开展。难熔金属材料的强韧化途径包括元素掺杂、强塑性变形及弥散强化，旨在通过细化晶粒或引入第二相弥散颗粒来改善其低温脆性及高温抗氧化性。随着 3D 打印这种先进制造技术的发展，将难熔金属材料的粉末制备与增材制造紧密结合是拥有巨大发展潜力的研究方向，有望解决多年来传统粉末冶金产业的瓶颈问题，制备复杂形状或极端条

件下使用的高性能 3D 打印难熔金属产品，满足高端制造业、航空航天、国防等战略需求。

表 2.2.5 和 2.2.6 分别是“军用难熔金属材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区和主要产出机构。从表 2.2.5 可以看出，中国和日本分别位居该领域核心专利主要产出国家 / 地区的第一和第二，其核心专利公开量比例分别为 59.47% 和 23.63%。尽管中国在“军用难熔金属材料”工程开发前沿的核心专利公开量位居全球第一，但是其核心专利平均被引数较低，只有 1.17。位居“军用难熔金属材料”工程开发前沿中核心专利前三位的主要产出机构分别是日本的 HOOL、中国的 CQRZ 和日本的 NIHA，其核心专利公开量比例分别为 6.31%、3.05% 和 2.85%，见表 2.2.6。图 2.2.5 为“军用难熔金属材料”工程开发前沿的主要产出国家 / 地区之间的合作网络。可以看出，日本和德国之间有一定合作项目，其次美国和德国也有合作，但其他国家之间显示没有合作。图 2.2.6 为核心专利主要产出机构之间的合作网络图，其中德国的 CMTL 和日本的 NIPA 之间的合作最为密切，其次日本的 HOOL 与日本的 YAWA、德国的 HENK 之间也有较多的合作。

图 2.2.3 “高分子材料的生物基替代”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

图 2.2.4 “高分子材料的生物基替代”工程开发前沿的主要机构间合作网络

表 2.2.5 “军用难熔金属材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	292	59.47%	343	14.30%	1.17
2	Japan	116	23.63%	1309	54.59%	11.28
3	USA	20	4.07%	282	11.76%	14.10
4	South Korea	18	3.67%	10	0.42%	0.56
5	Germany	13	2.65%	230	9.59%	17.69
6	Switzerland	5	1.02%	36	1.50%	7.20
7	France	5	1.02%	24	1.00%	4.80
8	Taiwan of China	4	0.81%	1	0.04%	0.25
9	Sweden	3	0.61%	118	4.92%	39.33
10	Brazil	3	0.61%	21	0.88%	7.00

表 2.2.6 “军用难熔金属材料”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	HOOL	日本	31	6.31%	512	21.35%	16.52
2	CQRZ	中国	15	3.05%	14	0.58%	0.93
3	NIHA	日本	14	2.85%	41	1.71%	2.93
4	YAWA	日本	10	2.04%	127	5.30%	12.70
5	CMTL	德国	9	1.83%	240	10.01%	26.67
6	NIPA	日本	9	1.83%	206	8.59%	22.89
7	ANSH	中国	8	1.63%	18	0.75%	2.25
8	KUNS	中国	6	1.22%	20	0.83%	3.33
9	SHAO	中国	5	1.02%	2	0.08%	0.40
10	HENK	德国	4	0.81%	78	3.25%	19.50

注：HOOL 表示 Nihon Parkerizing Co., Ltd.；CQRZ 表示 Chongqing Runze Pharm. Co., Ltd.；NIHA 表示 JX Nippon Mining & Metals Corp.；YAWA 表示 Nippon Steel & Sumitomo Metal Corp.；CMTL 表示 Chemetall GmbH；NIPA 表示 Nippon Paint Co., Ltd.；ANSH 表示 Pangang Group Panzhihua Iron & Steel Research Institute Co., Ltd.；KUNS 表示 Kunshan Qiaorui Metal Prod. Co., Ltd.；SHAO 表示 Shaoxing Wancheng Metal Sheet Co., Ltd.；HENK 表示 Henkel AG & Co KGaA。

图 2.2.5 “军用难熔金属材料”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

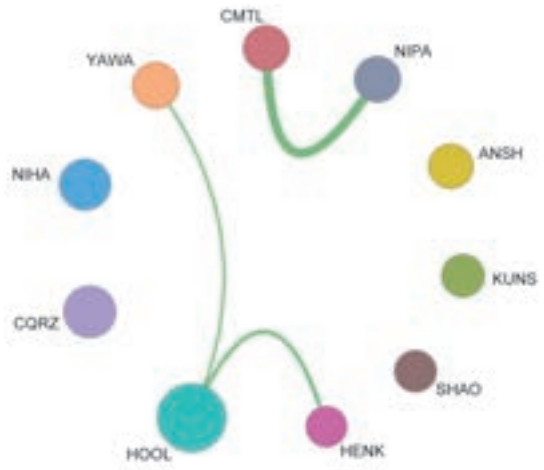

图 2.2.6 “军用难熔金属材料”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组组长 / 副组长：

组长：王静康　刘炯天

副组长：

李言荣　刘中民　毛新平　聂祚仁　谭天伟　周　玉　屈凌波　元英进

课题组成员：

陈必强　刘兴钊　席晓丽　杨治华　姚昌国
叶　茂　蔡　的　李达鑫　王　曼　王　静
王景涛　程路丽　高彦静　黄耀东　孙秀良
朱晓文

执笔组成员：

蔡　的　陈光文　丁　亚　郭潇佳　黄耀东
康国栋　李达鑫　李金哲　柳　林　单美霞
王　丹　王　曼　王　萌　汪秀丽　王　峰
徐　迪　姚昌国　朱晓文

致谢人员：

宝钢股份中央研究院武汉分院

王　媛　辜海芳　孙　竹

北京工业大学

刘　宇　马立文　文胜平　杨建参

北京化工大学

刘晶晶　张会丽　张卫东

大连化学物理研究所

刘慧芳　马怀军　祁　育　孙　剑　王　胜
谢　峰　赵宗保　朱何俊　朱雪峰

电子科技大学

蒋书文　颜　璟　闫裔超　张万里　朱　斌

哈尔滨工业大学

李　倩　牛　波　邱宝付

四川大学

陈思翀　王玉忠

天津大学

李艳妮　乔建军　杨祖国

四、能源与矿业工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 12 工程研究前沿发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top 12 工程研究前沿见表 1.1.1，涵盖了能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程 4 个学科。其中新兴前沿包括“与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”“光催化和光电催化分解水制氢研究”“大数据和人工智能与电网的耦合方法研究”“全固态高能量密度锂电池和快速充电锂电池”“油气田地质－工程－地面一体化中的大数据应用方法”，传统深入研究包括“核电站严重事故特性及预防与缓解措施”“关键金属富集机制”“超高温高压钻井液研究”“深部金属矿开采过程中多场耦合致灾机理”，融合交叉学科前沿包括“人工智能与油藏预测机制”“煤炭与油气安全高效智能化开采理论”“先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”既属于新兴前沿又属于颠覆性前沿。

各个工程研究前沿所涉及的核心论文在 2013—2018 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

（1）与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法

可再生能源包括水能、风能、太阳能、生物质能、地热等，其大规模高效利用是全球能源和环境可持续发展的必然选择和重要保障。受限于资源状况和技术发展水平，风能、太阳能和水能最具发展前景而发电是最有效的利用方式，但风力和太阳能发电的一个显著缺点是发电输出功率受环境和气候因素的影响，具有很大的波动性、随机性和间歇性。保证发电系统连续、稳定地输出质量合格的电力是可再生能源大规模接入电网的基础和关键，构建风、光、水、火和储能相结合的可再生能源系统是解决这一问题的重要途径，是全球电力发展的趋势。

表 1.1.1 能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法	210	8856	42.17	2015.9
2	先进核燃料和相关材料损伤机理及验证	106	1064	10.04	2016.8
3	人工智能与油藏预测机制	44	244	5.55	2015.8
4	煤炭与油气安全高效智能化开采理论	17	62	3.65	2016.2
5	光催化和光电催化分解水制氢研究	25	1023	40.92	2017.6
6	大数据和人工智能与电网的耦合方法研究	397	3180	8.01	2016.1
7	全固态高能量密度锂电池和快速充电锂电池	73	3806	52.14	2016.3
8	核电站严重事故特性及预防与缓解措施	209	7518	35.97	2014.3
9	油气田地质－工程－地面一体化中的大数据应用方法	11	185	16.82	2015.8
10	关键金属富集机制	243	6785	27.92	2014.6
11	超高温高压钻井液研究	111	1005	9.05	2016.0
12	深部金属矿开采过程中多场耦合致灾机理	142	762	5.37	2015.8

表 1.1.2　能源与矿业工程领域 Top 12 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法	30	17	31	38	49	45
2	先进核燃料和相关材料损伤机理及验证	0	5	15	15	31	40
3	人工智能与油藏预测机制	8	8	2	5	9	12
4	煤炭与油气安全高效智能化开采理论	2	3	0	1	6	5
5	光催化和光电催化分解水制氢研究	0	0	0	2	7	16
6	大数据和人工智能与电网的耦合方法研究	23	40	74	85	80	95
7	全固态高能量密度锂电池和快速充电锂电池	6	7	9	11	14	26
8	核电站严重事故特性及预防与缓解措施	66	62	41	32	7	1
9	油气田地质－工程－地面一体化中的大数据应用方法	1	0	2	6	1	1
10	关键金属富集机制	63	63	54	42	17	4
11	超高温高压钻井液研究	14	15	13	17	18	34
12	深部金属矿开采过程中多场耦合致灾机理	26	18	18	20	23	37

储能技术是将能量吸收储存一段时间，然后再可控地释放的一种能源利用技术，分为机械储能、电气储能、电化学储能、热储能和化学储能五大类。具有高能量密度和高功率密度性能的高密度储能方法才能对电网进行调峰和调频，是可再生能源大规模高效利用的关键，是储能技术的研究热点。

新兴前沿包括：低成本、高性能的单一类别的高储能密度储能方法；与可再生能源能耦合使用的多元高密度储能方法；满足可再生能源发、输、配、用各环节不同需求的多元高密度储能方法；基于风、光、水、火和高密度储能相结合互补的可再生能源电力供应系统等。

（2）先进核燃料和相关材料损伤机理及验证

核燃料包容了大部分的放射性物质，是核电厂阻止放射性物质释放的第一道防线，因此国际社会在开发先进核燃料的同时，也在大力开展核燃料与相关材料的损伤机理的研究。目前，针对当前压水堆燃料的损伤机理的研究重点主要集中于以下几方面：功率瞬态下燃料与包壳间相互作用，大破口失水事故下包壳失稳氧化、燃料碎片化和移位等行为，干法贮存下乏燃料包壳性能退化等。为了解释宏观上的燃料与材料行为，各研究机构在材料学上开展各类微观研究，掌握不同材料在各类腐蚀环境、中子辐照、温度场与应力场等条件下的材料行为，并结合分子动力学的方法，对先进核燃料与相关材料的损伤机理进行预测、评估与验证。

（3）人工智能与油藏预测机制

随着人工智能的发展，其在石油领域也已经开始逐渐渗透，将人工智能应用到油藏预测中，可解决油田勘探开发中存在的各种瓶颈和难题，但人工智能在石油工业中的应用处于探索起步阶段。此项预测机制旨在对油藏预测过程中获得的海量数据，如地质数据、地质力学数据、油藏数据、工程数据、经济数据等进行储存、分析，运用大数据做高精度地质建模、高效油藏数值模拟，并对地下油藏进行比较精确的描述。最终把所有数据集成在一个统一平台上，从数据和模型两个层面进行油藏预测，帮助我们进行科学、合理的决策。总之随着时代创新和技术更新，唯有在传统石油工程技术知识及人工智能相结合的基础上，实现创造力及创意思维的战略整合，才可以主动适应和赢得未来的石油工业发展。

（4）煤炭与油气安全高效智能化开采理论

智能感知、智能决策和自动控制（执行）是智

能化开采的三要素。安全高效智能开采区别于一般自动化开采的显著特点是设备具有自主学习和自主决策功能，具备自感知、自控制、自修正的能力。具备这样能力的智能化综采系统才能充分的响应生产环境变化、实现真正意义上的智能化开采，实现有限条件下的无人开采目标。

煤炭智能化开采关键技术包括薄煤层和较薄煤层智能化开采、厚煤层大采高和超大采高智能化开采、特厚煤层综放开采智能化技术。发展趋势是未来全面推进综采智能化技术，实现有限无人化开采目标和机器人流态化开采的无人化目标。

随着油气勘探开发逐渐向非常规、低渗透、深层、深水等复杂油气领域发展，油气开采在安全、经济和效率等方面面临难题和挑战。因此，亟需加快大数据、人工智能、信息工程、井下控制工程学等跨界融合，建立完善的安全高效智能化开采理论体系，实现油气资源开采全过程的超前探测、闭环调控、实时预警和智能决策，推动油气资源的安全经济高效开采进程，为实现我国复杂油气开采重大突破提供重要支撑。油气安全高效智能化开采理论主要涉及油气藏表征、井下工况感知、参数闭环调控和方案智能决策。其中，油气藏表征主要是对储层油气流动特征进行描述，其研究趋势是油藏要素精细刻画、三维地质动态建模、地质模型实时修正和重构理论等；井下工况感知主要是对井下条件进行识别、诊断和风险预警，其研究趋势是井下监测装置响应机理、井内风险自动诊断和预警理论等；参数闭环调控主要是利用井下和地面信息的双向传输建立闭环实时调控，其研究趋势是海量数据双向高效实时传输、井下控制参数闭环优化理论等；方案智能决策主要是利用油气田开采大数据，通过人工智能等对开采方案进行实时优化，其研究趋势是基于大数据和人工智能的油气开采方案动态优化、海量数据智能流动、融合与自我净化理论等。

（5）光催化和光电催化分解水制氢研究

当半导体催化剂受到光照射后，其位于价带上的电子由于获得外部的光能发生跃迁从而产生自由电子，同时在原有的价带位置处相应的产生带正电的空穴。由于光生电子和空穴分别具有还原能力和氧化能力，能够使水分解为氢气和氧气，这种催化反应被称为光催化制氢反应。除此之外，利用外加偏压促使光生载流子定向迁移从而提高产氢效率的方法，被称之为光电催化制氢。光催化和光电催化在未来实现可持续太阳能制氢中具有巨大发展潜力。

光催化及光电催化制氢效率的主要制约因素包括光吸收率、光生载流子分离效率以及催化反应动力学等因素。当前，其研究主要集中在如下几方面：能带调控策略、异质结构、晶面调控、光阴 / 阳极半导体材料改性等。寻找高效光催化剂，开发新型廉价稳定的催化材料体系和反应体系等也成为了研究的热点。最近，选择匹配的催化剂进行光催化制氢的同时实现水中污染物的降解也受到广泛关注。

（6）大数据和人工智能与电网的耦合方法研究

大数据是数量巨大、结构复杂、类型众多的数据构成的数据集合，以数据分析为核心，内容涵盖数据预处理、数据融合、数据存储和数据处理，具有高容量、快速性、多样性和价值密度低的特点。人工智能广义上是指能够以人类智能的方式做出反应的智能机器，以深度学习为代表的机器学习是实现人工智能的方法。大数据和人工智能与电网的耦合是数据、自主知识学习和应用场景的深度融合，是应对电网日益复杂化和不确定性加剧的有效途径。

目前的主要研究方向包括：考虑时空相关性的可再生能源发电功率预测；自动挖掘提取电网稳定评估和紧急控制的关键特征；电网智能分析与决策；电网故障智能诊断与辨识；海量负荷数据分类与预测；电力用户行为分析等。

新兴前沿为：更先进、更智能的分析方法的开发与平台建设，以及更深入、更核心的领域应用。

在分析方法的开发和平台建设方面，引入成熟、高效、先进的大数据分析与人工智能方法，集成现有的分析平台从而逐步建成用于处理电网领域业务的人工智能集成系统平台；在领域应用方面，结合电网需求加以适当改造人工智能方法，增强算法的适用性以增加耦合深度，并将应用扩展至电网安全稳定分析与控制、电网调度运行等核心领域，增加耦合广度。

（7）全固态高能量密度锂电池和快速充电锂电池

全固态锂电池是一种使用固态电极材料和固态电解质材料、不含有任何液体的锂电池。它具有安全性高、能量密度高、循环寿命长、工作温度范围宽、电化学窗口宽、结构灵活、对环境友好、有望实现快速充电等特点，是最具潜力的电化学储能装置，受到广泛的关注。

全固态锂电池的优势和挑战均来源于固态电解质。固态电解质需要满足比较苛刻的性能要求，包括①高锂离子电导率（Li^+ 迁移数接近 1，室温电导率 $>10^{-4}$ S/cm）；②优异的热稳定性、化学稳定性和良好的力学性能；③低原料成本、容易合成。在目前已开发的固态电解质中，聚合物电解质的热稳定性和力学性能欠佳；硫化物的电导率接近甚至超过有机电解液，但化学稳定性较低；氧化物稳定性好，成本低，能实现规模化制备，但电导率较低。目前尚未有一种固态电解质可以满足全部的要求，是全固态锂电池发展的瓶颈，也是目前材料研究的热点。此外，固态电解质 / 电极界面的接触问题直接影响到锂离子在电池内的传导，对电池性能、尤其是充电速率有决定性影响，因此也对电池的制备工艺提出了较高的要求。

全固态锂电池是实现高能量密度和快速充电的关键技术，我国仍需在关键材料、结构设计以及制备工艺上进行突破，早日实现市场渗透。

（8）核电站严重事故特性及预防与缓解措施

核电站严重事故是指事故严重性超过设计基准事故，并造成堆芯明显恶化，甚至熔化，并且相应的安全设施失效可能导致大量放射性物质释放的事故过程，是核电站超设计基准事故的一部分。事故过程分为三个阶段：堆芯熔化解体、压力容器失效、安全壳失效。

压水堆核电站防止核裂变产物外泄，依赖于设置的三道屏障，分别为燃料包壳、一回路压力边界和安全壳。当发生堆芯熔化等严重事故时，事故的缓解和处理主要集中在缓解堆芯损伤和保证第三道屏障（安全壳）的功能，减少放射性物质向环境的释放。

在核电厂严重事故缓解措施设计中需要考虑实际消除的堆芯损伤严重。事故工况主要包括：①直接安全壳加热；②大规模蒸汽爆炸；③氢气爆炸；④安全壳热量导出丧失；⑤熔融物 – 混凝土相互作用。

研究方向：首先要研究堆芯熔融机理，通过开展堆芯熔融物在堆内迁移以及堆外迁移的主要进程和现象研究，优化完善事故预防与缓解的工程技术措施，包括堆内熔融物滞留技术、堆芯熔融物捕集器和消氢技术等；然后开展保障安全壳完整性研究，包括安全壳失效概率计算、源项去除等预防及缓解措施，应对安全壳隔离失效、安全壳旁路和安全壳早期失效和其他导致安全壳包容功能失效的事故序列；采取确定论和概率论方法并开发严重事故分析方法和软件工具，验证能否实现消除大规模释放。

（9）油气田地质 – 工程 – 地面一体化中的大数据应用方法

油气勘探开发过程中，甜点区域已经慢慢减少，迫使各大石油公司实行降本增效，成本管控上要求更加严格，而大数据在一定程度上可以弥补理论上的缺陷，油气田地质 – 工程 – 地面一体化中的大数据应用方法就是在这个背景下提出来的。基于大数据方法，结合模式识别技术，对钻井、测井、录井、试油、压裂酸化、测试、地面等大量实际作业数据和历史数据开展多尺度数据挖掘，提高经济效益和

社会效益。通过研究整合地质、工程、地面等全流程数据，进行大数据采集、处理与存储、云计算、交换与共享，最终应用于战略分析与决策。即通过建立一体化数据库，运用现有基本成熟的数据挖掘方法进行规律分析、因次分析、关联分析以及经验相关式的统计回归，进而指导实际油田的生产实践。同时，该应用需要新管理模式才能具有更强的决策力、洞察发现力和流程优化能力。总之，该方法是油气田科学勘探开发的必需技术，可以使数据更快、更有效地转化为信息，快速发现油气，降低生产成本，必将为各大油气田带来新的活力，推动油气田开发的信息化和智能化发展。

（10）关键金属富集机制

关键金属，又称战略性金属，通常指稀有、稀土、稀散金属和铂族元素等，是发展现代高端精密制造业、低碳绿色能源科技和未来新兴产业必不可少的原料。部分关键金属是我国的优势矿种，例如，我国供应了世界所需稀土元素总量的95%，钨总量的84%和钪总量的53%；而锰、铌、铍、镍、钴、铬和铂族元素等是我国紧缺的关键金属矿产，可能会对我国高端制造业和新兴产业的发展造成“卡脖子”的制约。近年来欧美发达国家加大了对关键战略性金属元素富集机制和成矿规律的研究，鼓励并启动了一系列针对关键金属资源的勘查项目。关键金属成矿通常具有分散性、低品位、吨位小和难以选冶的特征；可以单独形成低品位矿床，但通常是以伴生产物的形式与主要成矿元素共生；矿化不连续，矿体难以控制；矿化成因和富集机制不明，与之相关的成矿富集理论亟待构建。因此，应加强探索低丰度关键金属元素的富集过程与成矿机制，剖析关键金属元素微观尺度的赋存形式和宏观尺度的分布规律，厘清导致关键金属成矿的地质－物理－化学（生物）过程的耦合因素，寻找关键金属矿床新类型，扩增关键金属矿产资源储量，以保障我国对紧缺和优势关键矿产资源的供应，为实现“中国制造2025”战略性目标提供原料物质储备。

（11）超高温高压钻井液研究

钻井液是钻井工程的血液，为钻井过程中清除井底岩屑、冷却钻井工具、控制地层压力等提供重要支撑，其性能是关系到钻井成败的关键。目前，随着能源需求逐年增加，地球深部勘探开发已成为必然趋势，尤其是深层超深层、海洋油气及新能源如干热岩等。井内超高温高压环境对钻井液性能提出严峻挑战，甚至会导致钻井液性能急剧恶化，造成各种井下复杂事故。因此，亟需研究超高温高压钻井液，优化钻井液抗高温和抗高压性能，建立超高温高压水基钻井液、超高温高压油基钻井液、超高温高压合成基钻井液体系，确保深部地层安全高效钻井。其中，超高温高压水基钻井液的研究包括：开展新单体合成与转化；研制抗盐高温高压降滤失剂、降黏剂、抑制剂、润滑剂、封堵剂和井壁稳定剂等；研制抗高温增稠剂和高温高压降滤失剂。超高温高压油基钻井液的研究包括：研制超高温高效乳化剂、增黏剂、降滤失剂、絮凝剂等油基钻井液处理剂；研制高性能提黏切剂和表面活性剂；研制新型可逆乳化钻井液体系；形成系统的流变性控制方法。超高温高压合成基钻井液的研究包括：研制新型低成本合成基材料；研制适用于合成基钻井液的乳化剂、流型调节剂、增黏剂和絮凝剂等。

（12）深部金属矿开采过程中多场耦合致灾机理

针对深部金属矿开采面临着“三高一扰动”，即：高地应力、高渗透压、高温和强开采扰动的复杂环境，探索深部金属矿开采应力场、渗流场、温度场和化学场的多场耦合规律，揭示多场耦合环境下深部岩爆、软岩大变形等深部金属矿灾害的孕育、演化与发生机制，为实现深部金属矿灾害的超前预测与调控奠定基础。

研究方向包括：研发深部应力、渗流、温度、化学等多场环境识别传感器和快速检测手段，精准识别深部开采多场耦合环境；研制多场耦合作用力学试验系统，探明多场耦合作用下岩体力学行为；

开发多场环境智能反演和动态监测分析技术，基于有限测试数据推演开采区域多场环境；探明深部开采多场耦合致灾机理，开发多场耦合下采动灾害数值模拟软件，发展多场耦合环境岩体控制理论与技术。

依托现有研究基础，未来聚焦“深部多场耦合环境精准智能识别技术”“深部多场耦合力学试验系统”“多场环境智能推演和动态监测分析技术”和“深部开采多场耦合致灾机理与岩体控制技术”等关键领域，实现创新性理论发展和装备水平突破。

1.2　Top 4 工程研究前沿重点解读

1.2.1　与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法

（1）概念阐述与关键技术

可再生能源包括水能、风能、太阳能、生物质能、地热能等，其大规模高效利用是全球能源和环境可持续发展的必然选择和重要保障。基于资源状况和技术发展水平，利用水能、风能和太阳能发电最为现实，前景最为广阔。但风力和太阳能发电的一个显著缺点是发电输出功率受环境和气候因素的影响，具有很大的波动性、随机性和间歇性，这种质量不合格的电力不能大规模直接接入电网。

储能技术是将能量吸收储存一段时间，然后再可控地释放的一种能源利用技术。按照储存介质的不同，储能技术可以分为机械储能、电气储能、电化学储能、热储能和化学储能五大类。机械储能主要包括抽水蓄能、压缩空气储能和飞轮储能等；电气储能主要包括超级电容器储能和超导储能等；电化学储能包括各类电池；热储能是将电能以显热、相变热或者化学热的形式存储在隔热容器的介质中，而后根据需要再转化为电能或者直接以热能的形式加以利用；化学储能主要是指利用电能制氢或者合成天然气、氨等二次能源载体。储能密度用以衡量单位质量或者单位体积的储能设备的储能能力，又分为能量密度和功率密度。前者对应所储能量的多少，后者对应储存和释放能量的快慢。具有高能量密度和高功率密度性能的高密度储能方法才能对电网进行调峰和调频，是可再生能源大规模高效利用的关键。其发展方向包括：同时具有高能量密度和高功率密度的性能单一储能方法，以及采用多种储能方法相结合的多元高密度储能。

（2）发展状况与未来发展趋势

可再生能源发电和储能技术在全球发展迅速。截至 2018 年年底，全球可再生能源发电总装机容量为 2351 GW，其中水电为 1172 GW，风能为 564 GW，太阳能为 480 GW，生物质能为 121 GW，地热能为 539 GW；全球已投运储能项目的累计装机规模为 180.9 GW，同比增长 3%，其中抽水蓄能为 170.7 GW，占比 94%；电化学储能达 4.89 GW，同比增长 66.3%，其中锂离子电池所占比重达 86%，其次是钠硫电池和铅蓄电池的占比均为 6%。2018 年，全球可再生能源新增装机容量为 171 GW，同比增长 7.9%，其中太阳能为 94 GW，风电为 49 GW，水电为 21 GW，新增发电量的 2/3 均来自可再生能源；全球新增投运储能项目的装机规模为 5.5 GW，其中电化学储能的新增投运规模最大，为 3.5 GW，同比增长 288%。

我国是可再生能源发电和储能技术发展最迅速的国家。截至 2018 年年底，全国可再生能源发电装机容量为 728.96 GW，占全国总装机容量的 38.4%，其中水电为 352.26 GW，占比 18.5%，风电为 184 GW，占比 9.7%，光伏为 174 GW，占比 9%；我国已投运储能项目的累计装机规模为 31.2 GW，同比增长 8%，其中抽水蓄能约为 30.0 GW，占比 96%，同比增长 5%，其次是电化学储能和熔融盐储热，分别为 1.01 GW 和 0.22 GW，同比分别增长 159% 和 1000%。2018 年，全国新增可再生能源装机容量为 44.26 GW，新增投运储能项目的装机规模为 2.3 GW，其中电化学储能的新增投运规模最大，为 0.6 GW，同比增长 414%。

构建风、光、水、火和储能相结合的发电系统是解决再生能源发电的不连续、不稳定问题的重要途径。我国近期成功地开展多个大规模可再生能源并网技术示范应用。在青海建立了全球最大的水光互补电站，将 850 MW 光伏电站作为“虚拟水电机组”接入水电站，通过水轮机组的快速调节，将光伏电源平滑稳定地送入电网。在吉林两个风电场分别实现了储能系统融合蓄热式电锅炉快速跟踪弃风功率运行，以及风电和储能系统的联合运行示范。

总的来说，迄今为止国内外单一的大规模储能技术只有抽水蓄能和压缩空气储能相对成熟，但二者都受地理条件制约，在役的压缩空气储能还需要燃烧化石燃料提供热源。其他储能技术的可靠性、使用寿命、成本及应用能力都有待突破，制约了可再生能源的高效大规模利用。将可再生能源发电技术与多元高密度储能相耦合不仅可以将可再生能源大规模接入电网，而且能够满足智能电网亟需的灵活性调峰要求。

新兴前沿包括：低成本、高性能的单一类别的高储能密度储能方法；与可再生能源能耦合使用的多元高密度储能方法；满足可再生能源发、输、配、用各环节不同需求的多元高密度储能方法；基于风、光、水、火和高密度储能相结合互补的可再生能源电力供应系统等。

（3）重点研究国家 / 地区和机构及其合作情况分析

根据表 1.2.1 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的国家为中国、美国、印度和英国。其中，中国和美国占据前两位，核心论文比例分别为 39.05% 和 20.95%。印度和英国的核心论文比例皆为 9.05%。

根据表 1.2.2 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的机构为中国科学院、上海交通大学、中国科学院大学、马来西亚大学彭亨分校和清华大学。根据图 1.2.1 可知，较为注重该工程研究前沿国家或者地区间合作的有中国、美国、英国、澳大利亚和西班牙等。中国发表的核心论文数最多，与中国合作发表论文的主要国家有美国、英国、澳大利亚和日本。美国发表的核心论文其次，与美国合作发表论文的主要国家有中国、西班牙、澳大利亚和加拿大。

根据图 1.2.2 可知，中国科学院和中国科学院大学有紧密合作、中国科学院和清华大学有合作、MIT 和 Pacific NW Natl Lab 有合作。

表 1.2.3 显示，施引核心论文数产出最多的国

表 1.2.1 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	82	39.05%	1929	21.78%	23.52
2	USA	44	20.95%	4388	49.55%	99.73
3	India	19	9.05%	476	5.37%	25.05
4	UK	19	9.05%	681	7.69%	35.84
5	Australia	16	7.62%	1001	11.30%	62.56
6	Germany	12	5.71%	337	3.81%	28.08
7	Canada	11	5.24%	212	2.39%	19.27
8	Spain	10	4.76%	367	4.14%	36.70
9	South Korea	9	4.29%	125	1.41%	13.89
10	Japan	7	3.33%	113	1.28%	16.14

表 1.2.2　“与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Chinese Acad Sci	11	5.24%	219	2.47%	19.91
2	Shanghai Jiao Tong Univ	7	3.33%	63	0.71%	9.00
3	Univ Chinese Acad Sci	6	2.86%	110	1.24%	18.33
4	Univ Malaysia Pahang	5	2.38%	136	1.54%	27.20
5	Tsinghua Univ	5	2.38%	83	0.94%	16.60
6	Indian Inst Technol	4	1.90%	112	1.26%	28.00
7	Univ Wollongong	4	1.90%	85	0.96%	21.25
8	Pacific NW Natl Lab	3	1.43%	692	7.81%	230.67
9	MIT	3	1.43%	572	6.46%	190.67
10	Stanford Univ	3	1.43%	753	8.50%	251.00

图 1.2.1 “与可再能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

图 1.2.2 “与可再能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

家是中国，施引核心论文比例为 45.38%，其次是美国，施引核心论文比例为 17.98%。德国和韩国的施引核心论文比例也超过 5%。

表 1.2.4 中，施引核心论文数产出最多的机构是中国科学院，施引核心论文比例为 27.65%，其次是中国科学院大学，施引核心论文比例为 10.28%，其后的是清华大学和中国科技大学，施引核心论文比例分别为 9.51% 和 8.11%。

通过上述数据分析可知，中国和美国在“与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿的核心论文产出及施引数量处在世界前列，中国科学院和中国数所大学等机构的核心论文产出及施引数量位于世界前茅。

1.2.2　先进核燃料和相关材料损伤机理及验证

核燃料包容了大部分的放射性物质，是核电厂阻止放射性物质释放的第一道防线，因此国际社会在开发先进核燃料的同时，也在大力开展核燃料与相关材料的损伤机理的研究。

目前，根据已有的工程经验与材料辐照行为，已经能够较好的预测与评估现有的压水堆燃料在稳定运行条件下的包壳腐蚀、应力应变、裂变气体释放等行为，因此，当前国际上的研究重点主要集中在核电厂瞬态与事故场景下的材料损伤与失效机理研究方面。其中，功率瞬态下燃料与包壳间相互作用效应（Pellet-Cladding Interaction，PCI）涉及到包壳的初始微小裂纹在腐蚀性裂变气体气氛的作用

表 1.2.3 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	4173	45.38%	2017.3
2	USA	1653	17.98%	2016.8
3	Germany	631	6.86%	2016.9
4	South Korea	558	6.07%	2017.0
5	Australia	417	4.53%	2017.2
6	UK	342	3.72%	2017.0
7	India	342	3.72%	2017.5
8	Japan	336	3.65%	2016.9
9	Singapore	273	2.97%	2016.9
10	Canada	249	2.71%	2016.9

表 1.2.4 “与可再生能源耦合使用的多元高密度储能方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	573	27.65%	2017.2
2	Univ Chinese Acad Sci	213	10.28%	2017.5
3	Tsinghua Univ	197	9.51%	2017.1
4	Univ Sci & Technol China	168	8.11%	2017.4
5	Univ Munster	159	7.67%	2016.4
6	Huazhong Univ Sci & Technol	137	6.61%	2017.0
7	Nanyang Technol Univ	135	6.52%	2016.9
8	Cent S Univ	133	6.42%	2017.3
9	Forschungszentrum Julich	128	6.18%	2017.5
10	Tianjin Univ	117	5.65%	2017.3

下，由于燃料的挤压而不断扩展进而引起包壳失效。目前核电厂失水事故（Loss of Coolant Accident，LOCA）研究除了对包壳的失稳氧化特别关注之外，还要关注能够深刻影响该事故后果的燃料本身在事故过程中发生的碎片化和移位等行为。除了上述的堆内损伤机理与失效行为外，压水堆乏燃料干法贮存过程中乏燃料包壳的材料性能退化机理，包括氢化物重取向、延迟氢化开裂等，与干法贮存乏燃料安全性紧密相关，因此也是目前国际社会的重点研究方向。

先进核燃料与相关材料的损伤与失效行为的分析与机理研究，主要结合宏观与微观的多尺度研究分析来开展。宏观上是指开展各类实验，包括各类材料性能试验、离子辐照试验、再制棒（re-fabricated rod）试验等，来获取材料在特定场景下的行为。微观则是指采用各类微观结构、形貌及成分分析工具，如金相显微镜、扫描电镜、透视电镜等，对材料内部的缺陷、位错、相变、偏析等材料表征进行研究，从而解释宏观上的材料行为。

为了更好地实现多尺度下材料行为与机理的统一，国际上多个国家均在分子动力学范畴上开展辐照条件下先进核燃料与相关材料损伤机理的研究，

并建立相关模型来预测材料的辐照行为。

根据表 1.2.5 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的国家是美国、中国、韩国、瑞典、英国。其中，美国占据第一位，其核心论文比例达到 64.15%；中国核心论文比例超过 10%。

由表 1.2.6 可知，该研究方向的核心论文产出数量较多的机构是 Oak Ridge Natl Lab，Idaho Natl Lab，核心论文产出数均等于或超过 10 篇。

根据图 1.2.3 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的有中国、美国、英国、德国、捷克、法国、韩国、瑞典。中国的发表论文数量较多，主要是与美国和瑞典进行合作发表。

根据图 1.2.4 可知，Oak Ridge Natl Lab，Idaho Natl Lab，Penn State Univ，Los Alamos Natl Lab 和 Westinghouse Elect Co，Univ Wisconsin 有合作。

表 1.2.7 中，施引核心论文产出最多的国家是美国，施引核心论文比例达到 37.44%，中国达到 26.99%，韩国达到 10.92%。

表 1.2.8 中，施引核心论文产出最多的机构是 Oak Ridge Natl Lab，施引核心论文比例达到 29.03%，Korea Atom Energy Res Inst 的施引核心论文比例达到 10.26%。

表 1.2.5　“先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	68	64.15%	751	70.58%	11.04
2	China	12	11.32%	55	5.17%	4.58
3	South Korea	10	9.43%	150	14.10%	15.00
4	Sweden	6	5.66%	40	3.76%	6.67
5	UK	6	5.66%	38	3.57%	6.33
6	Japan	3	2.83%	44	4.14%	14.67
7	France	3	2.83%	24	2.26%	8.00
8	Germany	3	2.83%	20	1.88%	6.67
9	The Czech Republic	3	2.83%	13	1.22%	4.33
10	Poland	2	1.89%	1	0.09%	0.50

表 1.2.6　“先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Oak Ridge Natl Lab	22	20.75%	328	30.83%	14.91
2	Idaho Natl Lab	10	9.43%	88	8.27%	8.80
3	Penn State Univ	7	6.60%	124	11.65%	17.71
4	Los Alamos Natl Lab	7	6.60%	53	4.98%	7.57
5	MIT	7	6.60%	47	4.42%	6.71
6	Korea Atom Energy Res Inst	6	5.66%	131	12.31%	21.83
7	Westinghouse Elect Co.	6	5.66%	108	10.15%	18.00
8	GE Global Res	6	5.66%	7	0.66%	1.17
9	Univ Wisconsin	4	3.77%	21	1.97%	5.25
10	Gen Atom Co.	3	2.83%	96	9.02%	32.00

图 1.2.3 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

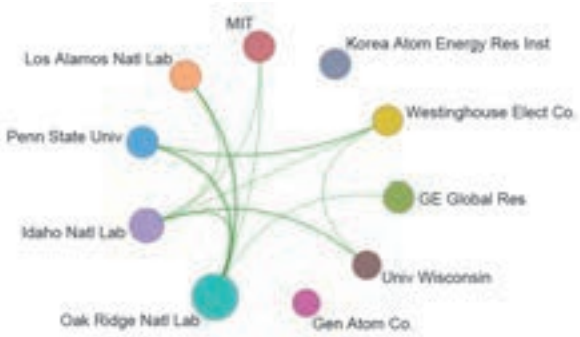

图 1.2.4 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	240	37.44%	2017.7
2	China	173	26.99%	2018.2
3	South Korea	70	10.92%	2017.6
4	UK	39	6.08%	2018.2
5	Germany	26	4.06%	2018.1
6	Sweden	22	3.43%	2017.9
7	Japan	21	3.28%	2018.0
8	Russia	18	2.81%	2018.3
9	France	13	2.03%	2018.4
10	Canada	11	1.72%	2018.4

表 1.2.8 “先进核燃料和相关材料损伤机理及验证”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Oak Ridge Natl Lab	99	29.03%	2017.5
2	Korea Atom Energy Res Inst	35	10.26%	2017.5
3	Idaho Natl Lab	33	9.68%	2017.8
4	Los Alamos Natl Lab	31	9.09%	2018.2
5	Univ Wisconsin	25	7.33%	2017.8
6	Chinese Acad Sci	25	7.33%	2018.5
7	Univ Tennessee	21	6.16%	2018.1
8	Penn State Univ	19	5.57%	2017.6
9	Nucl Power Inst China	19	5.57%	2018.4
10	MIT	17	4.99%	2018.0

通过以上数据分析可知，美国、中国在先进核燃料和相关材料损伤机理及验证技术的核心论文产出及施引数量处在世界前列，美国研究机构的施引核心论文数量较多。

1.2.3　人工智能与油藏预测机制

人工智能技术与油田融合可能会解决油田勘探开发中存在的各种瓶颈以及面临的新难题，推进人工智能技术在老油田以及油田工业的转化应用已经势在必行。人工智能对油藏预测最大的启示是在不明确油藏模式和规律的前提下，依靠海量可靠的数据和深度学习算法，得出准确的预测效果。油藏预测过程中涉及大量数据，包括地质数据、地质力学数据、油藏数据、工程数据、经济数据等。但由于数据尺度和分辨率不均，空间密度差异大，时间频率差异大，且绝大多数解释数据都是间接获得，因此不确定性极强。运用大数据做高精度地质建模、高效油藏数值模拟，运用无结构网格、动态模拟技术等，对地下油藏进行比较精确的描述。最终把所有数据全部集成在一个统一平台上，从数据和模型两个层面帮助我们做决策。通过量化和可视化的三维模型呈现油气田勘探开发全生命周期的所有测量数据及规律；通过人工智能算法，在不断丰富的数据驱动下，实现模型持续更新，使得模型的不确定性不断降低，从而帮助我们在充分考虑所有数据及规律的基础上，自动做出最科学、合理的预测和决策。即通过一系列智能化工具、设备和方法，对油藏的多种数据进行深度学习和认知分析，找到油气富集区。但人工智能技术在油藏预测应用中仍处于理论设想阶段，需要在战略研究上明确方向、在关键技术上实施突破和落地，这是我国实现油气勘探开发技术更新换代的关键。希望该应用能够让大数据人工智能技术与油气勘探开发领域的发展齐头并进，从而把蕴藏在地下的更多油气资源开采出来，以满足国家日益增长的能源需求。

相关核心论文发表和引用主要出自伊朗、沙特阿拉伯、美国、中国等国家（见表 1.2.9 和表 1.2.11），主要机构包括伊朗石油工业大学、法赫德国王石油与矿物大学、伊斯兰阿扎德大学、阿米尔卡比尔大学技术学院等（见表 1.2.10 和表 1.2.12）。国家如澳大利亚和美国，澳大利亚和伊朗，沙特阿拉伯和埃及，沙特阿拉伯和马来西亚之间分别具有合作关系，机构如伊斯兰阿扎德大学和伊朗石油工业大学，伊斯兰阿扎德大学和南十字大学之间分别开展了交流合作（见图 1.2.5 和图 1.2.6）。

1.2.4　煤炭与油气安全高效智能化开采理论

（1）煤炭安全高效智能化开采理论

煤炭安全高效智能化开采目前还处于初级阶段，正进入技术创新发展的关键阶段，需要对工作面采高、支护系统与围岩智能耦合群组自适应控制、

表 1.2.9　“人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Iran	19	43.18%	140	57.38%	7.37
2	Saudi Arabia	10	22.73%	57	23.36%	5.70
3	USA	5	11.36%	9	3.69%	1.80
4	Canada	4	9.09%	18	7.38%	4.50
5	Australia	4	9.09%	6	2.46%	1.50
6	China	3	6.82%	11	4.51%	3.67
7	Egypt	3	6.82%	18	7.38%	6.00
8	Algeria	2	4.55%	7	2.87%	3.50
9	France	2	4.55%	7	2.87%	3.50
10	Malaysia	1	2.27%	14	5.74%	14.00

表 1.2.10 “人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Petr Univ Technol	9	20.45%	89	36.48%	9.89
2	King Fahd Univ Petr & Minerals	9	20.45%	56	22.95%	6.22
3	Islamic Azad Univ	7	15.91%	83	34.02%	11.86
4	Amirkabir Univ Technol	3	6.82%	35	14.34%	11.67
5	Univ Alberta	3	6.82%	12	4.92%	4.00
6	Southern Cross Univ	3	6.82%	5	2.05%	1.67
7	Univ Tehran	2	4.55%	20	8.20%	10.00
8	Nexen Energy ULC	2	4.55%	11	4.51%	5.50
9	Univ MHamed Bougara	2	4.55%	7	2.87%	3.50
10	Univ Rennes 1	2	4.55%	7	2.87%	3.50

表 1.2.11 “人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Iran	76	31.93%	2016.8
2	China	40	16.81%	2017.6
3	Saudi Arabia	27	11.34%	2017.7
4	USA	20	8.40%	2017.4
5	Canada	19	7.98%	2017.5
6	Australia	16	6.72%	2015.9
7	India	11	4.62%	2017.2
8	France	8	3.36%	2016.6
9	South Korea	7	2.94%	2017.4
10	Malaysia	7	2.94%	2017.1

图 1. 2. 5“人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

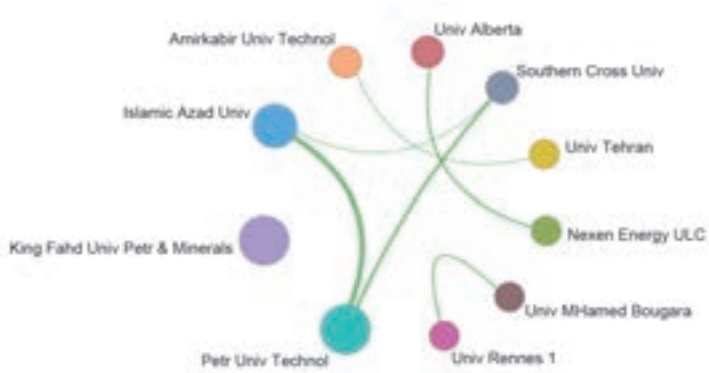

图 1.2.6“人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.12　“人工智能与油藏预测机制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Petr Univ Technol	31	21.83%	2015.7
2	King Fahd Univ Petr & Minerals	21	14.79%	2017.7
3	Amirkabir Univ Technol	19	13.38%	2017.6
4	Islamic Azad Univ	17	11.97%	2016.1
5	Univ Tehran	13	9.15%	2017.4
6	Shahrood Univ Technol	8	5.63%	2018.5
7	Southwest Petr Univ	8	5.63%	2017.4
8	So Cross Univ	7	4.93%	2015.4
9	Tsinghua Univ	6	4.23%	2017.3
10	China Univ Petr	6	4.23%	2017.7

工作面直线度智能导航、系统多信息融合协同、超前支护及辅助作业的智能化等技术进行攻关研发，通过解决综合机械化设备的环境参数自主感知实现开采行为的自主调控，进而实现智能化开采技术升级。随着综采智能化发展，其战略地位越来越突出，智能开采是智慧煤矿的核心系统之一，精准开采也将远程可控的少人无人智能化开采作为重要支撑。当前，许多煤炭企业把握技术发展的新趋势，大力实施开采技术装备升级，为智能化综采技术提供了重要机遇，也面临着对其认识不足等现实问题。

煤炭安全高效智能化开采的主要研究方向包括“透明开采”技术、液压支架群组与围岩的智能耦合自适应控制、采煤机智能调高控制、基于系统多信息融合的协同控制技术、超前支护及辅助作业的智能化控制。

（2）油气安全高效智能化开采理论

随着油气勘探开发逐渐向非常规、低渗透、深层、深水等复杂油气领域发展，油气开采在安全、经济和效率等方面面临一系列难题和挑战，因此，亟需加快大数据、人工智能、信息工程、井下控制工程学等的跨界融合，建立完善的安全高效智能化开采理论体系，实现油气资源开采全过程的超前探测、闭环调控、实时预警和智能决策，从而推动油气资源的安全经济高效开采进程，为实现我国复杂油气开采重大突破提供重要支撑。

油气安全高效智能化开采理论主要涉及油气藏表征、井下工况感知、参数闭环调控和方案智能决策。其中，油气藏表征主要是对油气藏在全周期生产过程中油气流动特征进行描述和评价，为油气开采调控提供基础参考。目前，Texas A & M 基于物探大数据开展了关于油气储层多尺度解释的研究。壳牌公司建立了三维透明储层，可以用于实时交互分析。井下工况感知主要是对井下条件进行识别、诊断和风险预警，为油气安全开采提供有力支撑。目前，BP 公司开展了井下安全生产的风险一体化控制研究。中国石油化工集团有限公司初步建立了较完善的风险判识和分级管理机制。参数闭环调控主要是将井下数据传输至地面，利用地面专家系统对井内工况进行动态分析，然后向井下发出控制指令调整井内参数，如此往复循环，利用信息的双向传输形成闭环实时调控，为油气经济高效生产奠定重要基础。目前，斯伦贝谢、中石油等公司基于井下温度、压力、流量等实时数据，初步建立了较完善的油气开采装置的参数自动调控机制。方案智能决策主要是利用油气田开采大数据，通过人工智能等对油气田全生命周期开采方案进行实时优化，为

我国向智慧油田迈进提供关键支撑。目前，壳牌公司基于多维海量数据，初步实现了上百口生产井和注水井开发方案的智能管理。但是我国在该领域的研究尚处于发展初期。

油气藏表征的主要研究趋势是油藏要素精细刻画、三维地质动态建模、地质模型实时修正和重构理论等。井下工况感知的主要研究趋势是井下监测装置响应机理、井内风险自动诊断和预警理论等。参数闭环调控的主要研究趋势是海量数据双向高效实时传输，井下控制参数闭环优化理论等。方案智能决策的主要研究趋势是基于大数据和人工智能的油气开采方案动态优化、海量数据智能流动、融合与自我净化理论等。

（3）重点研究国家 / 地区和机构及其合作情况分析

根据表 1.2.13 可知，煤炭与油气安全高效智能化开采理论研究方向的核心论文产出数量较多的国家是中国、美国、沙特阿拉伯，其他国家核心论文比例均低于 10%。其中，中国核心论文比例超过 50%。根据表 1.2.14 可知，该研究方向的核心论文产出数量最多的机构是西安石油大学，比例超过 10%，其他机构核心论文产出比例均为 6% 左右。

根据图 1.2.7 可知，较为注重该领域国家或地区间合作的是美国和沙特阿拉伯。其中美国与中国、法国具有合作关系，合作发表的核心论文数量也最多。沙特阿拉伯和巴基斯坦、马来西亚具有合作关系。其他国家或地区之间尚未开展合作研究。根据图 1.2.8 可知，机构之间的合作研究主要集中在 Ocean Univ China、Qingdao Natl Lab Marine Sci & Technol、SINOPEC Res Inst Petr Explorat & Dev、Shandong Univ、Shandong Univ Sci & Technol、Shandong Zhengyuan Construct Engn，均和 4 所机构具有合作关系。但是核心论文发表最多的西安石油大学尚未与其他机构进行合作研究。

根据表 1.2.15 可知，该研究方向的施引核心论文产出数量较多的国家是中国、沙特阿拉伯、加拿大和英国。其中，中国施引核心论文比例超过 30%，其他国家中除沙特阿拉伯外施引核心论文比例均低于 10%。由表 1.2.16 可知，该研究方向的施引核心论文产出数量最多的机构分别是 King Fahd Univ Petr & Minerals、China Univ Petr、Univ Alberta 和 Southwest Petr Univ，施引核心论文比例均超过 10%，平均施引年为 2017 年和 2018 年。

2 工程开发前沿

2.1 Top 12 工程开发前沿发展态势

能源与矿业工程领域研判的 Top 12 工程开发

表 1.2.13 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	10	58.82%	25	40.32%	2.50
2	USA	3	17.65%	11	17.74%	3.67
3	Saudi Arabia	2	11.76%	21	33.87%	10.50
4	Iran	1	5.88%	2	3.23%	2.00
5	France	1	5.88%	7	11.29%	7.00
6	Norway	1	5.88%	0	0.00%	0.00
7	Canada	1	5.88%	7	11.29%	7.00
8	Malaysia	1	5.88%	12	19.35%	12.00
9	Pakistan	1	5.88%	9	14.52%	9.00

表 1.2.14　“煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Xi’an Shiyou Univ	2	11.76%	0	0.00%	0.00
2	Ocean Univ China	1	5.88%	1	1.61%	1.00
3	Qingdao Natl Lab Marine Sci & Technol	1	5.88%	1	1.61%	1.00
4	SINOPEC Res Inst Petr Explorat & Dev	1	5.88%	1	1.61%	1.00
5	Shandong Univ	1	5.88%	1	1.61%	1.00
6	Shandong Univ Sci & Technol	1	5.88%	1	1.61%	1.00
7	Shandong Zhengyuan Construct Engn	1	5.88%	1	1.61%	1.00
8	Univ Southern Calif	1	5.88%	0	0.00%	0.00
9	Birjand Univ Technol	1	5.88%	2	3.23%	2.00
10	Univ Tehran Med Sci	1	5.88%	2	3.23%	2.00

图 1.2.7　“煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

前沿见表2.1.1，涵盖了能源和电气科学技术与工程、核科学技术与工程、地质资源科学技术与工程、矿业科学技术与工程4个学科。其中新兴前沿包括“高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术”“煤炭高效转化和超低污染排放控制技术”“可再生能源制氢及储运一体化技术”“智能一体化模块式浮动堆技术”。传统深入研究包括“基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”“海洋地震勘探的地震信号获取和处理技术”“新型压裂技术、装备与压裂液、支撑剂及添加剂的开发”“深部金属矿开采灾害超前预警系统开发”。“核能高温制氢及氦气透平发电技术”是颠覆性前沿技术，融合交叉学科前沿包括“煤炭安全智能精准开采技术”“基于无线传感器网络的油田综合数字生态管理系统”。“数字化、智能化核电站及反应堆技术”既属于颠覆性前沿又属于融合交叉学科前沿。

图 1.2.8　“煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.15 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	23	32.39%	2018.1
2	Saudi Arabia	11	15.49%	2017.5
3	Canada	7	9.86%	2018.4
4	UK	7	9.86%	2018.0
5	USA	5	7.04%	2017.6
6	Malaysia	4	5.63%	2017.3
7	Iran	4	5.63%	2018.0
8	India	3	4.23%	2019.0
9	Tunisia	3	4.23%	2017.0
10	Egypt	2	2.82%	2018.5

表 1.2.16 “煤炭与油气安全高效智能化开采理论”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	King Fahd Univ Petr & Minerals	7	18.92%	2017.3
2	China Univ Petr	7	18.92%	2017.4
3	Univ Alberta	4	10.81%	2018.3
4	Southwest Petr Univ	4	10.81%	2018.5
5	China Univ Petr East China	3	8.11%	2018.7
6	Saudi Arabian Oil Co.	2	5.41%	2017.0
7	Univ Malaysia Sarawak	2	5.41%	2017.0
8	Texas A&M Univ	2	5.41%	2018.0
9	Digital Res Ctr Sfax CRNS	2	5.41%	2017.0
10	Higher Inst Comp Sci & Multimedia Sfax	2	5.41%	2017.0

各个工程开发前沿所涉及的核心专利在 2013 年至 2018 年间的逐年公开量见表 2.1.2。

（1）高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术

和传统的燃油汽车相比，电动汽车是指动力能源系统全部由动力电池 + 电机构成的汽车。而混合动力汽车是指兼具发动机与驱动电机双动力系统的汽车。电动汽车具有温室效应气体（Greenhouse Gas，GHG）排放小、能耗低、噪音小等优点，但和传统的燃油汽车比较则普遍存在充电时间长、有效行驶里程短、动力电池寿命低等不足之处。混动汽车则同时兼具燃油汽车与电动汽车的优势，比燃油车油耗更低、污染更小，同时由于其双储能优势，相较于纯电动汽车具有快速充能与更远行驶距离的优势，但其结构较燃油汽车更为复杂，成本也普遍较高。动力电池对电动 / 混合动力汽车均有重要影响。常用的动力电池主要包括磷酸铁锂电池和三元锂电池。近年来，电动 / 混合动力汽车以及动力电池技术的重要研究方向包括：先进动力总成、能量管理、高级辅助驾驶、自动驾驶、电池快充与寿命、电池材料与体系、电池模型与管理控制等。未来依托于人工智能、大数据、智能交通系统以

表 2.1.1　能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术	290	11 923	41.11	2014.1
2	核能高温制氢及氦气透平发电技术	196	418	2.13	2014.9
3	基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统	69	861	12.48	2014.5
4	煤炭安全智能精准开采技术	119	198	1.66	2016.3
5	煤炭高效转化和超低污染排放控制技术	316	704	2.23	2015.5
6	可再生能源制氢及储运一体化技术	277	1715	6.19	2014.7
7	数字化、智能化核电站及反应堆技术	390	1130	2.90	2014.9
8	智能一体化模块式浮动堆技术	160	556	3.48	2015.2
9	基于无线传感器网络的油田综合数字生态管理系统	237	2968	12.52	2014.2
10	海洋地震勘探的地震信号获取和处理技术	205	2253	10.99	2014.3
11	新型压裂技术、装备与压裂液、支撑剂及添加剂的开发	225	3872	17.21	2014.1
12	深部金属矿开采灾害超前预警系统开发	38	31	0.82	2016.2

表 2.1.2　能源与矿业工程领域 Top 12 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术	124	69	53	33	11	0
2	核能高温制氢及氦气透平发电技术	20	16	12	28	49	32
3	基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统	16	21	17	11	4	0
4	煤炭安全智能精准开采技术	9	6	11	28	31	31
5	煤炭高效转化和超低污染排放控制技术	18	33	79	66	47	55
6	可再生能源制氢及储运一体化技术	25	23	35	48	40	48
7	数字化、智能化核电站及反应堆技术	51	74	44	45	57	73
8	智能一体化模块式浮动堆技术	18	19	20	37	35	19
9	基于无线传感器网络的油田综合数字生态管理系统	88	71	37	32	9	0
10	海洋地震勘探的地震信号获取和处理技术	67	65	31	31	11	0
11	新型压裂技术、装备与压裂液、支撑剂及添加剂的开发	78	79	44	20	4	0
12	深部金属矿开采灾害超前预警系统开发	6	2	5	3	9	13

及 5G 数据传输技术等相关研究的快速发展带来的优势，电动 / 混合动力汽车以及动力电池管理控制技术将进一步获得更大的研究进展。而研究电池新材料、新体系，进一步提高动力电池的能量密度、功率密度、安全性、循环寿命、充电性能、高 / 低温性能等，发展新一代的车用动力电池（如固态锂离子电池、锂空气燃料电池、锂硫电池等），仍将是动力电池研究和开发的重点。

（2）核能高温制氢及氦气透平发电技术

核能制氢就是利用核反应堆产生的热作为一次能源，从含氢元素的物质水或化石燃料制备氢气。在核能制取氢气的技术路线中，核热辅助的烃类重整利用高温气冷堆的工艺热代替常规技术中的热源，可部分减少化石燃料的使用，也相应减少部分

CO_2 排放。利用核能发电再经常规电解制氢，是已成熟技术的结合，但从一次能源转化为氢能的效率较低。在一些压水堆发电能力过剩、需要消纳或者特殊应用的场景中，可利用电解制氢实现储能或者供给需要氢气的场合。要实现核能到氢能的高效转化，必须部分或全部利用以反应堆提供的工艺热，减少热–电转换过程中的效率损失。目前研发的主流核能制氢技术包括热化学循环（碘硫循环和混合硫循环）和高温蒸汽电解。

高温堆气体透平直接循环发电建立在闭式布雷登循环的理论基础上，将气体透平与模块式高温气冷堆相结合，利用高温堆产生的高温气体直接推动气体透平做功，进行核能高效发电。氦气透平直接循环发电的效率可以达到 50% 以上。

（3）基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统

随着微地震监测技术理论研究的成熟，目前微地震监测技术广泛应用于低渗油田的水力压裂改造的裂缝勘探，能够实现储层压裂裂缝监测、注水注气后的油藏驱动实时监测，在油田勘探开发中具有重要的意义。传统的微地震定位所采用的反演方法耗费大量的时间和人力资源，定位精度难以满足要求，基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统应运而生。该系统经过模型试算和对实际数据的应用，对微地震事件进行有效分类可以得到组成裂缝带的各个小裂缝和微小裂缝的形态、展布，结合时间等信息，可以得到每条裂缝的发育及延伸情况。进一步判断水力压裂的效果、缝网系统形成情况、是否可以提高自然产能等，以实现最大的开发效果。总之，这种处理方法和系统可以对压裂过程中的微地震数据连续采集记录并实现实时处理和形象化解释，有效地优化压裂方案，提供油气藏资源评价和钻井位置图，达到增产和指导油气田开发的目的。

（4）煤炭安全智能精准开采技术

煤炭安全智能精准开采技术是指基于透明空间地球物理和多物理场耦合，以智能感知、智能控制、物联网、大数据、云计算等作支撑，具有风险判识、监控预警等处置功能，能够实现时空上准确安全可靠的智能少人（无人）安全精准开采的新模式、新方法、新装备。目前主要的研究方向包括：创新具有透视功能的地球物理科学，智能新型感知与多网融合传输方法与技术装备，动态复杂多场多参量信息挖掘分析与融合处理技术，基于大数据云技术的精准开采理论模型，多场耦合复合灾害预警，远程可控的少人（无人）精准开采技术与装备，救灾通信、人员定位及灾情侦测技术与装备和基于云技术的智能矿山建设，这些研究方向为实现“互联网+”科学开采的未来少人（无人）采矿提出了技术路径。聚焦矿业智能少人（无人）安全开采，进一步加大矿业科技创新力度，力争到 2020 年矿业安全智能精准开采取得阶段性突破，到 2035 年基本实现矿业安全智能精准开采，到 2050 年全面实现矿业精准开采，以矿业开采全面实现高科技产业改造升级，助推中国能源科技强国梦。

（5）煤炭高效转化和超低污染排放控制技术

煤炭转化有两种方式：一种以煤炭为原料，通过煤化工过程将煤炭转化为具有高价值的化学产品、化工原料或其他形式的燃料；另一种以煤炭为燃料，通过燃烧等过程将煤炭中的化学能转化为热能或者电能。

高效转化和超低污染排放控制的要求覆盖煤炭利用全生命周期，包括煤炭加工、煤炭转化和废弃物利用。新兴前沿包括：动力用煤的高效降尘、脱硫和省水选煤技术，以及煤炭超净分选新工艺等煤炭加工技术；高效、超低污染的煤气化、煤液化、煤制天然气、煤制化学品和低阶煤热解等以煤为原料的煤炭转化技术；包括三超（超高参数、超低排放、超超临界）锅炉技术、炉内超低污染物排放燃烧技术、与可再生能源和储能相耦合的高灵活性燃煤发电技术、低成本和无二次污染的先进烟气净化技术、高效低污染民用煤燃烧技术、高可靠性整体煤气化联合循环技术、煤基超临界 CO_2 联合循环发电技术、

煤基高温燃料电池技术、煤基富氧燃烧技术以及其他先进 CO_2 捕集与封存技术等以煤为燃料的煤炭转化技术；此外，还包括燃煤灰渣与脱硫灰渣无害化利用技术、SCR 脱硝催化剂的高效再生和无害处置技术等废弃物利用技术。

（6）可再生能源制氢及储运一体化技术

氢能被广泛地认为是未来最具发展前景的清洁能源，其能量密度高、来源广泛、零排放。供氢系统结合质子交换膜燃料电池技术是目前最有潜力替代汽车内燃机动力系统的清洁能源技术。但当前超过 95% 的氢气属于二次能源，来源于化石燃料的生产加工，仍算不上完全的清洁能源。此外，氢气的高效安全储运也是限制氢能应用的瓶颈问题。因此，利用可再生能源（如风、光、水能）制氢并实现储运一体化可以有效解决以上这些问题，具体体现在以下两个方面：

1）可再生能源制氢。在风能与水电资源富集的区域，可将大量无法上网的弃风电与弃水电通过电解制氢的方法将能量转化为化学能存储在氢气中。在阳光充足的地域，可以采用直接光制氢，并结合光电、光热效应用于分解水制氢，将光能转化为氢气的能量。

2）氢气的储运一体化。由于氢气的密度小、沸点低、难压缩，氢气的储运一直是氢气应用的一大难题。相比传统的高压气态储氢以及低温液态储氢，固态储氢可以达到高的储氢容量和高安全性的目的，是未来的重要发展方向之一。特别是近年来镁基储氢材料的开发使得高容量安全储运氢气成为可能，其储氢量可达 7.6wt% 且廉价易得。采用镁基固态储氢材料的长管拖车，其单车储氢量可达 1.2~1.5 t，是传统长管储氢拖车的 3~4 倍。通过在资源丰富地区利用可再生能源制氢，将过剩能量转化为氢气的化学能，再通过安全高效储氢媒介进行一体化建设，实现氢气的绿色生产、大规模储运以及应用，将成为未来氢能利用的必经之路，如图 2.1.1 所示。

（7）数字化、智能化核电站及反应堆技术

信息技术的飞速发展，使得设计本身的数字化和智能化成为可能，也使得核电研发、设计、验证、制造、建造、调试和运行的数字化体系成为目前的前沿方向。通过使核电全周期、全产业链的数据在数字化平台上交互共享，大幅提高核电各环节的效率和可靠性，进一步在此平台基础上实现核电技术的迭代升级。

核电领域智能化发展分为三个阶段。第一阶段是基础建设，智能化一定要立足在数字化的基础上，从智能仪表和智能控制器采用到核电站全数字仪控系统建立，国内除了早期的几个核电站外，其他大部分核电站都已经数字化。第二阶段是人工智能架构的建立，利用“互联网 +”建立大数据系统，开发数字核电站并开发应用虚拟现实（VR）技术，其中数字核电站包括两类，一类是虚拟的三维数字化核电站，用于安装维护检修，另一类是动态的，实时展示核电站的各种参数和状态。第三阶段是核电人工智能应用开发，包括操作指导、事故处理指导、核电站设备系统智能维护、高放射性区域不可达地区的应用机器人或者机器人系统维修。这三个阶段不是相互割裂的，而是交叉发展的，使得我们的数字化、信息化慢慢成熟发展起来，逐步实现智能化，这是当前国际上的热点，也是占领技术和科学制高点的一项关键工作。

（8）智能一体化模块式浮动堆技术

智能一体化模块式浮动堆技术一般是指单堆热功率在 1000 MW（电功率 300 MW）以下的反应堆，具有无碳排放、容量小、选址灵活、建设投资小、建造周期短、系统设备能在工厂组装和便于运输，且可通过模块化设计建造升级和改善经济性等特点。小堆属于军民两用技术，既可作为军用动力应用于舰船动力、边防建设，又可以用于国民经济建设领域（如居民供电、破冰船、城市供热、工业工艺供热和海水淡化），在军民领域应用前景广阔。

突破小型智能堆关键设计技术、重大试验验证

图 2.1.1　可再生能源制氢及储运一体化技术示意图

技术、关键设备改进设计和制造技术，形成一批具有完全自主知识产权的先进小型智能堆技术。在模块化设计、固有安全性、智能控制与经济性等方面取得全面突破，开发供热、供电、热电联产、海水淡化与特殊用途的小型堆核电技术。具体开展一体化反应堆总体设计与布置共性关键技术研究，长寿期、不含硼堆芯设计共性关键技术研究，模块化设计共性关键技术研究，智能设计共性关键技术研究，全数字化智能仪控系统、多堆控制共性关键技术研究，支持安全评审的共性关键技术研究，研制小型屏蔽泵、小型钢安全壳、直流蒸汽发生器、内置蒸汽稳压器等关键设备。

（9）基于无线传感器网络的油田综合数字生态管理系统

基于无线传感器网络技术的油田综合数字生态管理系统通过创新技术和管理理念，建立全油田统一的生产管理、综合研究的数字化管理平台，可以显著提升生产工艺过程的实时监控水平。无线传感器网络融合了传感器技术、嵌入式计算技术、无线通信技术及分布式信息处理技术，具有多学科高度交叉、技术高度集成的特点，它是物联网技术的核心和基础。无线传感器网络系统的硬件电路分为数据采集、路由节点、网关节点以及监控中心电路等，软件主要由无线通信网络软件的子系统与监控中心管理软件的子系统组成。无线传感器网络所采集的各类数据，通过无线网络传输到控制中心后，经过相应软件处理后存储，并完成动态信息自动录入、复杂数据的查询、分析和挖掘功能，自动生成数据报表。传感器采集节点的灵活与网络的稳定应用保证了油井监控的可信赖性，有助于油井作业效率的提高和网络运行成本的降低，促进了油田生产的自动化与信息化发展。

（10）海洋地震勘探的地震信号获取和处理技术

随着海洋油气勘探逐步转向深部油气层、高速屏蔽层下油气储层和复杂构造油气田等领域，为适应新勘探形势下地震资料精确成像的要求，海洋地震采集技术得到了创新和发展，在激发方式上，从平面震源发展到多层震源、立体震源；在接收方式上，从水平电缆发展到上下缆和斜缆（变深度电缆），从单一的压力型检波器电缆发展到速度和压力组合的双检波器电缆；在海洋三维勘探中，从直

线航线的窄方位角采集发展到环形宽方位角采集。这些新地震采集技术方法的应用，有效地克服了海洋地震勘探的不足，增加了地震原始信号的低频能量、拓宽了地震频带，提高了深部有效反射信号信噪比和成像效果，满足了复杂油气田勘探、开发的需求。同时由于地震勘探时所采集到的地震资料中包含的噪声将增多，因此需要对其进行数字处理，从中提取有用信息，从而为地震勘探的地质解释提供可靠的资料，其中信号降噪便是数字处理中尤为重要的一步，它被用于从地震资料中提取有用信息，提高地震资料的信噪比。

（11）新型压裂技术、装备与压裂液、支撑剂及添加剂的开发

压裂是实现油气增产、提高经济效益的关键工程手段，其主要是通过地面高压装置将压裂液泵入油气储层产生裂缝，随后利用支撑剂将裂缝支撑，使其形成永久性裂缝，从而提高储层渗透性，为实现增产增效提供重要支撑。随着油气藏勘探开发复杂程度的日益加深，传统压裂存在压裂效率低，压裂效果不理想等挑战，严重制约了复杂油气资源的经济高效开采，亟需探索新型压裂技术，研究前沿装备与压裂液，开发高性能支撑剂及添加剂，推动复杂油气资源的高效开采。新型压裂技术可以达到增大储层改造体积和裂缝复杂指数的目的，如无限级压裂、无水压裂、重复压裂、高端压裂、同步压裂、拉链式压裂、选择性压裂及工厂化压裂等。先进压裂装备，如超高压大功率压裂机组、大功率压裂车、大功率压裂泵、可完全溶解的多级压裂系统、无限级压裂滑套、可完全降解的压裂桥塞、复合压裂塞等，可以满足高泵压、低污染、远程操作、降本增效等目的。高性能压裂液和支撑剂，如耐高温压裂液体系、软粒子压裂液、超高温储层速溶压裂液、抗高温黏弹性表面活性剂基压裂液、复合压裂液体系、低密度支撑剂、新型功能性环保支撑剂等，可以达到减少对储层污染、减少漏失、有良好的悬浮性的目的。

（12）深部金属矿开采灾害超前预警系统开发

针对复杂多场环境下深部金属矿开采灾害，开发致灾信号超前获取、灾害孕育智能分析、灾害发生超前预警、潜在灾害动态规避的成套预警系统，实现对深部金属矿开采灾害信息的智能分析与动态调控，极大地提高深部资源开发的安全性与效率。

研究方向包括：金属矿多场耦合环境下开采地压多元动态监测与分析理论；深部强卸荷作用诱发岩爆的时滞性特征与预测预报方法；深部灾害孕育演化过程特征动态拾取与实时预测模型；基于大数据的深部采动信息智能研判与灾害预警；深部采动灾害信号与类型的智能关联机制；深部开采灾害时空预测与动态调控的集成智能系统。

聚焦“深部开采灾害信息精准与实时拾取”“灾害信号智能分析与孕育过程研判”和“多场耦合下采动灾害超前预测与动态处置”，实现深部开采灾害超前预判、超前预警与超前处置，进一步推动深部矿产资源安全、绿色和高效开采。

2.2　Top 4 工程开发前沿重点解读

2.2.1　高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术

（1）概念阐述与关键技术

电动 / 混合动力汽车是新能源汽车领域的一个重要组成部分。当前，能源枯竭的危机以及环境污染的压力成为全球通病，而电动 / 混合动力汽车的高效率、低污染的特点为其带来了新的发展机遇。包括我国在内的各个国家都加大了在该领域的研发和投资力度，力求掌握其核心技术。电动汽车的动力系统部分采用的是动力电池（高压）+ 驱动电机的方式。由于电机在整体工作范围内都具有较高的效率，所以电动汽车一般为直驱方式，也有增加传动变速箱进行多档位调节的形式。混合动力汽车由于具有内燃机（燃油）与电机（耗电）两套储能和驱动系统，其结构较为复杂，模式也更加多样化。根据电机相对于传统动力系统的位置，可以将混动

方案分为 P0~P5 几个大类。动力电池由早期的铅酸蓄电池到镍氢电池再到现如今的锂电池，其性能有了长足的发展。目前常用的动力电池一般为锂离子电池，主要包括磷酸铁锂电池和三元材料锂电池。

（2）发展现状与未来发展趋势

2013—2018 年，我国的新能源汽车的销售量分别为：1.76 万辆、7.47 万辆、33.1 万辆、50.7 万辆、77.7 万辆、125.6 万辆。2018 年全年我国新能源汽车产销分别为 127 万辆和 125.6 万辆，比上年同期分别增长 59.9% 和 61.7%。其中纯电动汽车产销分别为 98.6 万辆和 98.4 万辆，比上年同期分别增长 47.9% 和 50.8%; 插电式混合动力汽车产销分别为 28.3 万辆和 27.1 万辆，比上年同期分别增长 122% 和 118%。根据预测，国内新能源汽车的销量将在 2020 年超过 200 万辆，未来销量的年同比增速将超过 40%。

电动 / 混合动力汽车的研究重点除了稳步推进传统的能量优化与管理、动力耦合等研究方向的同时，逐步向智能联网、智能驾驶、智能出行等进阶研究方向发力。基于人 – 车 – 路协同管理的理念，在优化车辆动力配置，丰富能量管理的基础上，将其纳入到智能城市网络架构中进行综合控制，将整车性能由单车优化的模式扩展到城市整体出行面的级别。同时基于联网与深度学习算法的高级辅助驾驶与自动驾驶等技术也成为未来的主要发展趋势。动力电池的研究主要集中在能量密度、安全性以及快充等方向。其中固态电池具有轻（能量密度高）、薄（电解液 / 质更少）、安全、柔性、电化学窗口宽、循环寿命长等优点，正逐渐受到越来越多的重视。除此之外，基于大数据与机器学习等算法的研究也为动力电池的状态预测、参数估计、动态管理等提供有力的支持。

（3）重点研究国家 / 地区和机构及其合作情况分析

根据表 2.2.1 可知，该方向的核心专利产出数量较多的国家是美国、中国以及日本。其中美国的占比达到 50%，中国和日本的占比分别为 16.21% 和 15.86%。

由表 2.2.2 可知，该研究方向核心专利产出数量较多的机构分别是 FORD、TOYT、GENK、HYMR。

根据图 2.2.1 可知，比较重视该领域国家或地区间合作的有美国、韩国、日本、加拿大、德国、以色列以及瑞士。其中美国拥有的合作国家数最多，它与韩国、日本、加拿大以及德国均有合作，而以色列与瑞士之间合作最多。

表 2.2.1 “高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	145	50.00%	6514	54.63%	44.92
2	China	47	16.21%	1290	10.82%	27.45
3	Japan	46	15.86%	1688	14.16%	36.70
4	South Korea	24	8.28%	1032	8.66%	43.00
5	Germany	13	4.48%	605	5.07%	46.54
6	Switzerland	6	2.07%	261	2.19%	43.50
7	Israel	5	1.72%	231	1.94%	46.20
8	UK	3	1.03%	96	0.81%	32.00
9	Canada	2	0.69%	122	1.02%	61.00
10	Sweden	2	0.69%	111	0.93%	55.50

根据图 2.2.2 可知，所有机构中仅 HYMR 与 GLDS 之间存在合作，其他机构之间均不存在合作。

2.2.2　核能高温制氢及氦气透平发电技术

（1）核能制氢

氢是重要的工业原料，也是未来理想的二次能源或能源载体。氢作为二次能源便于储存和运输，且可以直接作为燃料使用。除传统的合成氨、合成甲醇、石油精炼外，氢气在氢冶金、煤液化以及燃料电池汽车等领域都能够得到大规模利用。核能制氢是一种高效、清洁的大规模制氢方法，可在未来氢气大规模供应方面扮演重要角色。以核能制氢为核心的高温堆工艺热综合利用（氢、电、热联合供应）将对我国多个工业行业的技术革命提供重要支撑，在产品升级换代、降低污染、减少碳排放等方面发挥重要作用。

核能制氢的构想始于 20 世纪 70 年代。石油危机之后，热化学循环相关的研究较多，核能制氢的国际合作也比较活跃。在第四代反应堆国际研讨会（GIF）上，探讨了氢生产、海水淡化、热利用等核能非电利用，并制定了利用核能产氢的研究开发计划，其中高温气冷堆系统设置了制氢项目管理部，

表 2.2.2　“高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	FORD	23	7.93%	808	6.78%	35.13
2	TOYT	12	4.14%	433	3.63%	36.08
3	GENK	10	3.45%	549	4.60%	54.90
4	HYMR	10	3.45%	403	3.38%	40.30
5	GOOG	9	3.10%	573	4.81%	63.67
6	QCOM	8	2.76%	446	3.74%	55.75
7	TESM	6	2.07%	418	3.51%	69.67
8	GLDS	6	2.07%	199	1.67%	33.17
9	GENE	6	2.07%	197	1.65%	32.83
10	BETT	5	1.72%	231	1.94%	46.20

注：FORD 表示 Ford Global Technologies LLC；TOYT 表示 TOYOTA Motor Corp.；GENK 表示 General Motors Corp.；HYMR 表示 Hyundai Motor Co., Ltd.；GOOG 表示 Google Inc.；QCOM 表示 Qualcomm Inc.；TESM 表示 Tesla Motors Inc.；GLDS 表示 LG Chem Ltd.；GENE 表示 General Electric Co.；BETT 表示 Better Place Gmbh。

图 2.2.1　“高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

图 2.2.2　“高效电动 / 混合动力汽车和动力电池技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

国际原子能机构（IAEA）设置了核能制氢经济性相关的协调项目，有十多个国家共同参与进行核能制氢技术经济的评价。

从核能制氢技术的特点和优势可见，高温气冷堆制氢适合对氢气集中式、大规模、无排放的应用场景，因此所选择的与高温气冷堆耦合的制氢技术也应该具有这些特点。核能发电－电解是最成熟的技术，可在剩余核电的消纳或特殊场景下利用小型堆电解制氢。核能辅助的化石燃料重整可用核热作为替代热源，节省部分化石燃料并部分降低排放。例如，如果采用高温堆工艺热辅助的天然气重整技术制氢，可以节省约 30% 用作热源的天然气，降低 30% 的 CO_2 排放。该技术可作为近期核能制氢的过渡技术，在反应堆与制氢厂耦合、核氢安全性研究与许可证申请、核能制氢技术经济评价等方面进行探索和推进。

从远期来看，热化学循环与高温蒸汽电解以高温气冷堆的高温工艺热为热源，以水为制氢原料，可完全消除制氢过程的碳排放，是更具发展前景的核能制氢技术。核能制氢技术的发展路线必须考虑以下因素：技术特性（包括产氢能力、产品氢气纯度、终端用户、废物管理）、成本（氢气价格、技术经济评价假设的适用性、研发费用等）、风险（技术发展现状与成熟度、研发风险）等。

（2）高温气冷堆氦气透平直接循环发电

高温堆气体透平直接循环发电建立在闭式布雷顿循环的理论基础上，将气体透平与模块式高温气冷堆相结合，利用高温堆产生的高温气体直接推动气体透平做功，进行核能高效发电。氦气透平直接循环发电的效率可以达到 50% 以上。

电氦气透平压气机组是氦气透平直接循环发电系统的核心部件，氦气条件下的透平压气机组研制在国际上目前尚无成功先例，而电磁轴承又是高温气冷堆氦气透平发电系统的关键技术之一。由于高温气冷堆的堆芯出口温度可以达到 900℃以上，因此压力壳结、透平叶片等能够耐高温高压的结构和部件材料也是高温堆气体透平直接循环发电的关键技术之一。

目前国外针对氦气透平直接循环的研究主要集中在以下几个项目：美国和俄罗斯合作开发的 GT-MHR 计划和日本的 GTHTR300 计划，其堆芯出口温度均为 850℃，均采用闭式氦气透平直接循环，透平叶片采用镍基合金，不设置叶片冷却，但是至今为止还停留在研究设计阶段；南非的 PBMR 计划起初设计堆芯出口温度为 900℃的氦气透平直接循环，之后由于财政等方面的问题迫使项目终止。我国清华大学则以 HTR-10GT 项目计划，开展商用高温气冷堆氦气透平发电关键技术研究，包括商用高温气冷堆氦气透平发电厂方案设计，氦气透平基本特性研究，大型板翅式换热器的工程试验研究和大型电磁轴承的工程试验研究等内容。目前，国内第一台氦气压气机单级样机试验装置已经建立并进行了大量试验。用于工程验证试验的大型重载柔性转子电磁轴承试验台架也已建造完毕，工程实验正在进行中。

在高温气冷堆领域，具有固有安全性的模块式高温气冷堆是一个先进的反应堆堆型，氦气透平直接循环发电则是一个理想的能量转换技术方案。以模块式高温气冷堆和氦气透平循环为基础发展起来的超高温气冷堆概念，被当今国际社会认为是第四代核能系统中有竞争力的候选方案之一。从远期来看，随着超高温气冷堆技术的发展和氦气透平直接循环关键技术和部件的突破，氦气透平直接循环发电技术将得到广阔的发展和应用。在此基础上如果采用氦气直接透平和蒸汽透平联合的发电方式，则可以进一步提高其发电效率。

（3）重点研究国家 / 地区和机构及其合作情况分析

根据表 2.2.3 可知，该研究方向的核心专利产出数量较多的国家是中国、日本、韩国。其中，中国占据第一位，核心专利比例超过 75%。

由表 2.2.4 可知，该研究方向的核心专利产出

数量较多的机构分别是 UYQI、HRBE、CNNU。

根据图 2.2.3 可知，国际间无合作，但是 GIF 组织内的合作在图中没有反映。

根据图 2.2.4 可知，UYQI、CNNU、CHHN 之间有合作。

通过以上数据分析可知，中国、日本和韩国在核能高温制氢技术的核心专利产出处于世界前列。

2.2.3　基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统

微地震监测技术是水力压裂中监测裂缝发育情况的有效地震方法，目前普遍应用于各大油气田的开发、规划，裂缝不仅决定了注水效果，而且控制了层系的划分和注采井网的布置，直接决定了油田开发的效果。但在实际应用中仍存在诸多问题，开展微地震震源机制反演及裂缝解释和成像技术非常关键，为油藏描述提供有效的信息。研究方向包括：利用目标区域的数据信息进行裂缝扩展模拟，获得压裂裂缝的形态分布信息；利用目标区域的微地震监测数据反演压裂引起的微地震事件，获得压裂裂缝的强度范围；根据所述形态分布信息和所述强度范围得到压裂相分布模型；并且通过对目标数据体中的每个体积单元，根据检波器的接收信号恢复原始信号；计算各体

表 2.2.3　“核能高温制氢及氦气透平发电技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	148	75.51%	181	43.30%	1.22
2	Japan	23	11.73%	94	22.49%	4.09
3	South Korea	12	6.12%	91	21.77%	7.58
4	USA	10	5.10%	44	10.53%	4.40
5	France	1	0.51%	8	1.91%	8.00
6	Germany	1	0.51%	0	0.00%	0.00
7	India	1	0.51%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4　“核能高温制氢及氦气透平发电技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	UYQI	36	18.37%	105	25.12%	2.92
2	HRBE	15	7.65%	5	1.20%	0.33
3	CNNU	14	7.14%	9	2.15%	0.64
4	CHHN	13	6.63%	9	2.15%	0.69
5	JAAT	7	3.57%	3	0.72%	0.43
6	USHS	7	3.57%	1	0.24%	0.14
7	KAER	5	2.55%	23	5.50%	4.60
8	SUZH	5	2.55%	0	0.00%	0.00
9	KOAD	4	2.04%	2	0.48%	0.50
10	XENE	4	2.04%	0	0.00%	0.00

注：UYQI 表示 Univ Tsinghua；HRBE 表示 Harbin Electric Co., Ltd.；CNNU 表示 China National Nuclear Corporation；CHHN 表示 China Huaneng Group Corp.；JAAT 表示 Japan Atomic Energy Agency；USHS 表示 Univ Shanghai Sci & Technology；KAER 表示 Korea Atomic Energy Res Inst；SUZH 表示 Suzhou Hailu Heavy Ind Co., Ltd.；KOAD 表示 Korea Adv. Inst. Sci. & Technology；XENE 表示 X-Energy LLC。

积单元的能量，形成四维成像结果并输出，通过压裂相分布模型得到多尺度压裂裂缝模型。这项技术既体现了裂缝本身的形态和方位特征，又考虑微地震反演的裂缝分布范围及强度信息，能够更准确地表征水力压裂裂缝的空间分布，还能反映出各个时刻裂缝的变化过程。总之，基于微地震检测的裂缝形态处理方法和系统可以对压裂过程中的微地震数据连续采集记录并实现实时处理和形象化解释，有效地优化压裂方案，提供油气藏资源评价和钻井位置图，达到增产和指导油气田开发的目的。

该前沿中核心专利的主要产出国家和地区为美国、加拿大、法国、荷兰和中国（见表 2.2.5），主要产出机构是 SLMB，HALL 和 PRAD（见表 2.2.6），这些国家和机构之间已开展合作交流（见图 2.2.5 和图 2.2.6）。

2.2.4 煤炭安全智能精准开采技术

（1）概述与重要性

煤炭精准开采是以透明空间地球物理和多物理场耦合为基础，以少人（无人）开采技术和安全开采技术为支撑，实现煤炭开采零死亡；以数字化、信息化为重要手段，将不同地质条件的煤炭开采扰动影响、致灾因素、开采引发生态环境破坏等统筹考虑，在时空上实现准确高效的煤炭无人（少人）智能开采与灾害防控一体化的未来采矿新模式，实现煤炭连续开采、资源回收率达国际领先水平。煤炭精准开采对提高煤炭安全开采技术水平、资源开

图 2.2.3 “核能高温制氢及氦气透平发电技术”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

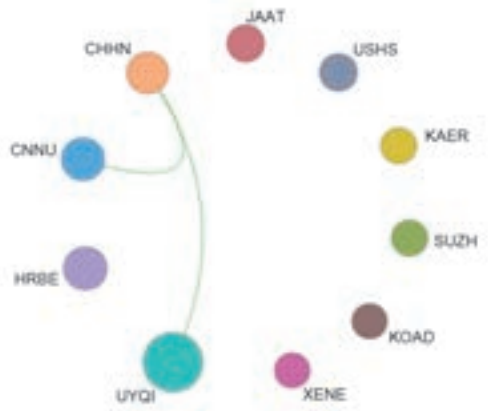

图 2.2.4 “核能高温制氢及氦气透平发电技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

表 2.2.5 “基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	57	82.61%	707	82.11%	12.40
2	Canada	13	18.84%	220	25.55%	16.92
3	France	10	14.49%	189	21.95%	18.90
4	Netherlands	10	14.49%	189	21.95%	18.90
5	China	5	7.25%	88	10.22%	17.60
6	Russia	2	2.90%	16	1.86%	8.00
7	UK	1	1.45%	28	3.25%	28.00
8	Germany	1	1.45%	9	1.05%	9.00

表 2.2.6　“基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	SLMB	20	28.99%	289	33.57%	14.45
2	HALL	16	23.19%	192	22.30%	12.00
3	PRAD	14	20.29%	255	29.62%	18.21
4	BAKO	5	7.25%	42	4.88%	8.40
5	UYPE	2	2.90%	45	5.23%	22.50
6	CARB	2	2.90%	39	4.53%	19.50
7	TEXA	2	2.90%	22	2.56%	11.00
8	LGNE	2	2.90%	19	2.21%	9.50
9	CONO	2	2.90%	18	2.09%	9.00
10	TATN	2	2.90%	16	1.86%	8.00

注：SLMB 表示 Schlumberger Ltd.；HALL 表示 Halliburton Co.；PRAD 表示 Prad Res. & Dev. Ltd.；BAKO 表示 Baker Hughes Inc.；UYPE 表示 Univ China Petroleum；CARB 表示 Carbo Ceramics Inc.；TEXA 表示 Univ Texas System；LGNE 表示 Logined BV；CONO 表示 Conocophillips Co.；TATN 表示 TATNEFT。

图 2.2.5　“基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

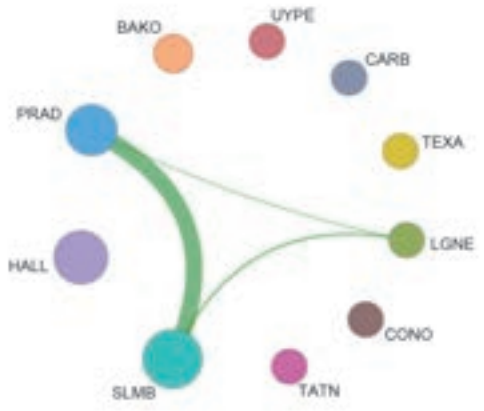

图 2.2.6　“基于微地震监测的裂缝形态处理方法和系统”工程开发前沿的主要机构间合作网络

发效率及实现煤炭工业由劳动密集型向具有高科技特点的技术密集型转变意义重大。

煤炭安全智能精准开采技术需要解决以下科学问题：①煤炭开采多场动态信息（如应力、应变、位移、裂隙、渗流等）的数字化定量；②采场及开采扰动区多源信息采集、传感、传输；③基于大数据云技术的多源海量动态信息评估与筛选机制；④基于大数据的多相多场耦合灾变理论研究；⑤深度感知灾害前兆信息智能仿真与控制；⑥矿井灾害风险预警；⑦矿井灾害应急救援关键技术及装备。

（2）历史现状与趋势

纵观国际采矿史，矿难发生的致灾机理和地质情况不清、灾害威胁不明、重大技术难题没有解决等是导致事故的主要原因。要想从根本上破解煤矿安全高效生产难题，煤炭工业须由劳动密集型升级

为技术密集型，创新发展成为具有高科技特点的新产业、新业态、新模式，走智能、少人（无人）、安全的开采之路。第 3 次工业革命势头强劲，信息化技术日新月异，给采矿业由传统的经验型、定性决策为主向精准型、定量智能决策转变提供了又一次创新、发展的机遇以及挑战，为实现智能少人（无人）的煤炭科学开采提供了可能。

（3）重点研究国家 / 地区和机构及其合作情况分析

根据表 2.2.7 可知，煤炭安全智能精准开采技术的核心专利主要产出国家是中国和澳大利亚。其中，中国核心专利公开量比例超过 98%，且平均被引频次明显高于澳大利亚。

由表 2.2.8 可知，煤炭安全智能精准开采技术核心专利产出数量最多的机构分别是 UYMB、UYMT、CHLY，核心专利产出比例均超过 5%。

根据图 2.2.7 可知，较为注重该领域研究的国家间无合作。

由图 2.2.8 可知，有合作关系的机构有 CHLY 和 HUAI，UYMT 和 UYMB。

表 2.2.7 “煤炭安全智能精准开采技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	China	117	98.32%	198	100%	1.69
2	Australia	2	1.68%	0	0%	0.00

表 2.2.8 “煤炭安全智能精准开采技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	UYMB	24	20.17%	13	6.57%	0.54
2	UYMT	8	6.72%	40	20.20%	5.00
3	CHLY	6	5.04%	23	11.62%	3.83
4	UYCQ	5	4.20%	27	13.64%	5.40
5	ULNT	5	4.20%	2	1.01%	0.40
6	UYXS	5	4.20%	2	1.01%	0.40
7	UYHP	4	3.36%	5	2.53%	1.25
8	UYLG	3	2.52%	16	8.08%	5.33
9	UNBS	3	2.52%	7	3.54%	2.33
10	HUAI	3	2.52%	3	1.52%	1.00

注：UYMB 表示 Univ China Mining & Technology Beijing；UYMT 表示 Univ China Mining & Technology Xuzhou；CHLY 表示 China Coal Technology & Eng Group；UYCQ 表示 Univ Chongqing；ULNT 表示 Univ Liaoning Technical；UYXS 表示 Univ Xi’an Sci & Technology；UYHP 表示 Univ Henan Polytechnic；UYLG 表示 Univ Anhui Sci & Technology；UNBS 表示 Univ Beijing Sci & Technology；HUAI 表示 Huaibei Mining Ind Group Co.，Ltd.。

图 2.2.7 “煤炭安全智能精准开采技术”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

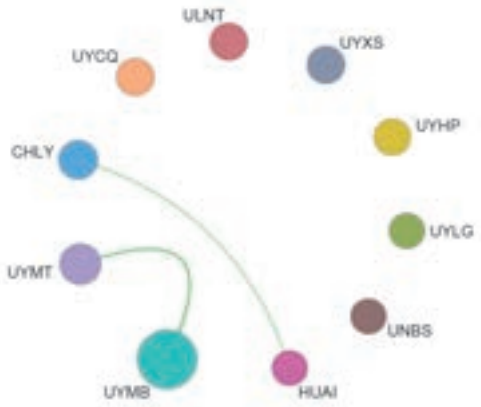

图 2.2.8 “煤炭安全智能精准开采技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组组长：翁史烈　倪维斗　彭苏萍　顾大钊

课题组副组长：黄　震　巨永林　刘　静

工作组办公室：

能源与矿业工程学部办公室：宗玉生　解光辉

《Frontiers in Energy》期刊编辑部：

刘瑞芹　黄冬苹

图书情报人员：陈天天　于夏薇

课题组成员：

能源和电气科学技术与工程学科组：

组　长：翁史烈　岳光溪

秘书长：巨永林　张　海

参加人：

程　林　胡　伟　林　今　刘　峰　罗海云

上官文峰　吴文传　杨　林　张　扬　章俊良

邹建新

执笔人：胡　伟　上官文峰　杨　林　张　海

章俊良　邹建新

核科学技术与工程学科组：

组　长：叶奇蓁　李建刚

秘书长：苏　罡　高　翔

参加人：江小川　元一单　马如冰　郭　强

周红波　张　涛　李云屹　郭　晴　孙晓龙

郭英华

执笔人：江小川　周红波　郭英华　郭　晴

苏　罡

地质资源科学技术与工程学科组：

组　长：毛景文　赵文智

秘书长：张国生　刘　敏

参加人：谢桂青　袁顺达　洪　为　王淑芳

王　坤　梁　坤　黄金亮

执笔人：洪　为　王淑芳　王　坤　梁　坤

黄金亮

矿业科学技术与工程学科组：

组　长：袁　亮　李根生

秘书长：张　农　吴爱祥　周福宝　宋先知

参加人：尹升华　江丙友　孙金声　黄中伟

王海柱　冯晓巍　梁东旭　吴冬梅

执笔人：尹升华　江丙友　孙金声　黄中伟

王海柱　冯晓巍　梁东旭

五、土木、水利与建筑工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及了结构工程、建筑设计及其理论、土木工程材料、城市规划、桥梁工程、地下与隧道工程、水工结构工程、摄影测量与航天测量、水文学与水资源、交通规划等学科方向。其中，“极端地震作用下高坝抗震安全评价理论与方法”为专家提名前沿，其余前沿基于科睿唯安提供的论文共被引聚类分析获得并经专家研判确认。各个前沿所涉及的核心论文 2013—2018 年的逐年发表量见表 1.1.2。

（1）结构长期性能演化机理与控制

结构长期性能演化机理与控制是指考虑结构服役期间所遭受的各类荷载和环境作用，基于对引起损伤退化的内在理化机理的揭示，开展针对性的加固修复，实现结构性能退化的有效控制。在荷载和环境长期作用下，土木工程结构性能会发生退化，该退化过程受控于内在的微观理化机理。通过掌握上述引起结构性能退化的内在理化机理，采取针对性的阻断技术，可实现对结构长期性能的有效控制。其主要研究方向包括：荷载和环境作用下结构性能演化的理化机理研究、基于纤维增强材料的结构性能退化控制技术、基于其他特种材料的结构性能退化控制技术等。清晰揭示和把握结构性能演化的内在理化机理有助于经济合理的性能退化控制技术的采用。目前多采用基于对工程材料理化特性的检测、监测数据，建立结构长期性能的评估和预测模型。在此基础上，基于纤维增强树脂基复合材料（FRP）和纤维增强水泥基复合材料（FRCM）开展结构性能提升和加固修复是重点研究方向。同时也有部分基于形状记忆合金（SMA）、自愈混凝土、沥青以及新一代结构钢等新技术的结构性能控制研究。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 72，被引频次为 1707，篇均被引频次为 23.71。

（2）基于全寿命周期的绿色建筑设计方法

基于全寿命周期的绿色建筑设计方法是指从建

表 1.1.1 土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	结构长期性能演化机理与控制	72	1707	23.71	2015.9
2	基于全寿命周期的绿色建筑设计方法	184	7442	40.45	2015.6
3	水泥基材料的纳米改性和纤维复合	75	2137	28.49	2015.6
4	应对城市热岛效应的城市设计与规划	154	6033	39.18	2015.7
5	大跨桥梁运营智能监测与检测	102	2530	24.80	2014.7
6	城市与水下隧道全寿命期变形预测和控制	113	2895	25.62	2016.7
7	极端地震作用下高坝抗震安全评价理论与方法	14	274	19.57	2015.6
8	基于深度学习的多源卫星遥感影像时空融合	40	1989	49.73	2015.4
9	流域洪水的精细化预测及灾情的快速评估	36	1571	43.64	2016.2
10	新型多模式混合交通流建模理论与方法	186	5524	29.70	2015.7

表 1.1.2　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	结构长期性能演化机理与控制	7	11	11	11	16	16
2	基于全寿命周期的绿色建筑设计方法	19	36	38	27	38	26
3	水泥基材料的纳米改性和纤维复合	9	15	11	11	19	10
4	应对城市热岛效应的城市设计与规划	20	23	20	35	30	26
5	大跨桥梁运营智能监测与检测	32	21	17	14	10	8
6	城市与水下隧道全寿命期变形预测和控制	7	8	13	11	16	58
7	极端地震作用下高坝抗震安全评价理论与方法	2	3	2	2	2	3
8	基于深度学习的多源卫星遥感影像时空融合	6	8	7	7	6	6
9	流域洪水的精细化预测及灾情的快速评估	3	2	8	4	9	10
10	新型多模式混合交通流建模理论与方法	19	24	40	37	37	29

筑材料和设备的生产、运输、使用到建筑设计、建造、运行和拆除的全寿命周期维度来开展建筑的绿色化设计，实现节约能源、土地、水和材料资源，保护环境，减少污染，为人们提供健康、适用、高效的使用空间，最大限度地实现人与自然和谐共生的高质量建筑的设计理论和方法。其主要研究方向包括与地域文脉相结合的建筑空间和性能整体优化设计方法，可再生可循环地域材料的开发及利用，全寿命期建筑材料、设备的含能和碳排放基础数据库开发，相关性能设计优化模拟软件工具的开发等。未来发展趋势包括在智慧、健康、以人为本的绿色建筑新内涵前提下，从单体到城区尺度的多专业全过程群协同设计新方法、人工智能辅助优化设计、性能导向的数字化设计，健康建筑 / 智慧建筑设计，主被动一体化的设备末端设计和新材料的开发应用等。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 184，被引频次为 7442，篇均被引频次为 40.45。

（3）水泥基材料的纳米改性和纤维复合

水泥基材料的纳米改性和纤维复合是指通过掺入纳米材料和纤维材料对水泥基材料水化硬化特性、力学性能和耐久性能进行调控。目前，纤维水泥基复合材料的研究包括单一纤维水泥基复合和混杂纤维水泥基复合，常用的纤维可分为人造纤维和自然植物纤维。其中，人造纤维主要有钢纤维、玻璃纤维、聚丙烯纤维等，自然植物纤维则包括棉纤维、麻纤维等。相较于普通水泥基材料，纤维水泥基复合材料抗拉强度高、韧性强、不易开裂，具有良好的抗渗、抗冻以及抗腐蚀性能，更好地满足了现代建筑工业对水泥基材料功能化的需求。同时，自然植物纤维的应用提高了水泥基材料的环境价值，更加符合可持续发展的基本理念。随着纳米技术的飞速发展，水泥基材料的纳米改性也受到了广泛关注。水泥基材料改性中通常采用粒径小于 100 nm 的纳米材料，根据材料成分可分为纳米矿粉、纳米金属粉和纳米氧化物。水泥基材料纳米改性的研究主要集中在纳米改性水泥基材料制备、纳米改性机理和改性水泥基材料性能的研究。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 75，被引频次为 2137，篇均被引频次为 28.49。

（4）应对城市热岛效应的城市设计与规划

全球城市总面积约占地球表面积的 2%，但其消耗了世界约 3/4 的总能源。在城市发展中，出现的市区地表和冠层气温明显较附近地区高的现象，称为城市热岛效应。热岛效应受城市下垫面、大气污染和人为热等诸多因素影响。在全球气候变化的

背景下，热岛效应进一步加剧了热浪等异常天气现象出现的频率，对城市微气候产生不利影响。热岛效应增加城市人群呼吸性困难、中暑等健康风险，甚至提高因高温引发的死亡率，是全球共同面临的难题。缓解城市热岛效应对保障人群生活质量、维持城市可持续发展具有重大意义。应对城市热岛效应的主要技术措施涉及建筑、交通、绿化植被等方面的规划与设计。目前主要研究方向包括：城市建筑群能耗预测、诊断模型及优化，基于高分辨率遥感技术的热岛效应定量研究，城市绿地冷岛效应及空间设计优化，超大、特大城市热岛效应及综合缓解技术等。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 154，被引频次为 6033，篇均被引频次为 39.18。

（5）大跨桥梁运营智能监测与检测

在桥梁运营过程中，与人流、车流、环境风、地脉动、波浪等运营期荷载相互作用会发生结构局部塑性、损伤、疲劳、开裂、失稳等退化行为，桥梁运营智能监测与检测是指采用智能传感手段监测结构响应和损伤状态，并据此分析和预测结构进一步的退化行为和运营寿命，为结构的安全耐久运营管理服务。其主要研究方向包括：桥梁智能传感原理及技术、结构损伤状态识别方法、桥梁退行特征灾变预警分析、桥梁剩余寿命预测等。其中，桥梁智能传感方面现主要研究压电阻抗、全球定位系统（GPS）、合成孔径雷达（SAR）干涉测量、声发射、近景摄影等智能传感手段监控桥梁运营过程中应变、加速度、位移等响应和结构物理状态；结构损伤识别方面主要研究采用小波变换（WT）、希尔伯特黄变换（HHT）、卡尔曼滤波（KF）、最小二乘法（LS）等信号处理方法和神经网络、模糊推理、遗传算法、深度学习等智能推理方法对结构损伤位置、程度的识别和评定；桥梁退行特征灾变预警分析主要研究桥梁承受不同荷载时，结构非线性、非定常退行行为的主要特征和灾变预警方法；桥梁剩余寿命预测主要研究带伤结构的局部损伤扩展行为，并预测桥梁失效模式和剩余寿命。本研究主要发展趋势由定止、定常、线性损伤状态的传感监测识别向退行型、非定常、非线性的退化过程的传感监测分析发展，更切实地为结构运营监测控制管理服务。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 102，被引频次为 2530，篇均被引频次为 24.80。

（6）城市与水下隧道全寿命期变形预测和控制

城市与水下隧道是基础设施的关键组成部分，随着大量的城市与水下隧道建成并投入运营，对运营期的变形和安全控制提出了更高的要求。城市与水下隧道全寿命期变形预测和控制是针对隧道长期使用性能、结构安全性能与耐久性能提出的概念，其主要研究方向包括：循环荷载作用下地层长期变形特性、隧道材料及结构在服役期性能演化规律、隧道全寿命变形监测数据挖掘和数据分析、隧道全寿命健康评估与服役性能评价、隧道全寿命变形快速检测技术与智能控制方法等。相比于传统的隧道结构，城市与水下隧道环境更为敏感并且使用条件更为苛刻。为了确保城市与水下隧道的健康服役与长期安全，必须开发变形及病害快速检测技术，及时掌握隧道结构的服役现状，综合考虑各种因素环境与隧道结构相互作用，采用理论分析、实验与长期监测相结合的方法，建立健康评估与服役性能评价方法，构建全寿命变形智能预测和控制体系。其中，隧道全寿命变形大数据的快速检测技术和智能分析将成为今后重要发展方向。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 113，被引频次为 2895，篇均被引频次为 25.62。

（7）极端地震作用下高坝抗震安全评价理论与方法

高坝大库是开发和治理河川径流，实现水资源与水能资源综合利用的必要基础设施工程。一旦破坏失事，库水失控下泄将严重危害下游人民生命财产安全。因此，极端地震作用下高坝的安全性受到广泛的关注。为了合理评价极端地震作用下高坝的

抗震安全性，需要研究坝址地震动参数、坝体和基岩材料动力特性、坝体－地基－库水系统地震响应、安全评价准则等四方面的问题。目前的发展趋势为：地震危险性分析由概率方法向与直接数值模拟方法并行的方向发展，高坝地震响应由线弹性分析向非线性大变形分析方法发展，坝体和地基材料动态力学特性由宏观向细观力学方法发展，安全评价由传统单一安全系数方法向基于风险的决策方法发展。前沿关键科学技术问题包括：震源破裂－地震波传播－高坝响应的全过程数值模拟方法，坝体与地基材料的宏细观动力破坏机理，高坝－地基体系的极限抗震能力，高土石坝强震变形稳定性，梯级高坝枢纽地震－地质－洪水灾害链形成机制与演化规律，综合经济投入、工程设计与灾害损失的风险评价方法，高坝实时健康监测、震害快速评估与应急救灾技术等。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 14，被引频次为 274，篇均被引频次为 19.57。

（8）基于深度学习的多源卫星遥感影像时空融合

高时－空分辨率遥感影像可以提供快速准确的地物变化信息，在土地利用变化检测、灾害救援决策等领域有着广泛的应用和需求。然而，由于传感器硬件条件的限制，难以直接获取同时具有高时间分辨率、高空间分辨率的遥感影像。时空融合技术可以在不改变现有观测条件的情况下，对来自不同传感器、不同尺度、不同时相下的遥感影像数据进行时空融合处理，产生同时具有高空间分辨率和高时间分辨率的数据，缓解遥感数据的“时空矛盾”。近年来，由于深度网络训练技术为高－低分影像映射关系的建立提供了理论支持，而多传感器遥感影像数据为网络学习过程提供了完备的数据基础，使得深度学习遥感影像时空融合技术成为遥感对地观测领域的研究前沿之一。其主要研究方向包括：①深度学习时空融合框架的构建，包括时空卷积神经网络、对抗生成深度神经网络、深度残差学习网络、深度密集连接网络等；②视觉感知时空损失函数的构建，包括弹性网损失函数、时空联合结构相似损失函数、时空信息残差损失函数等。主要发展趋势为：耦合遥感物理过程的深度学习融合框架、顾及大尺度场景变化的深度学习时空融合技术、基于深度学习的时－空－谱一体化融合理论与方法。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 40，被引频次为 1989，篇均被引频次为 49.73。

（9）流域洪水的精细化预测及灾情的快速评估

流域洪水精细化预测及灾情快速评估是指基于高精度气象、地貌、地形、地物、工程和社会经济数据，采用气象、水文、水动力学、损失评估模型和遥感技术等，精准、快速分析模拟流域洪水运动过程和洪灾损失与影响，为洪水风险管理与应急响应提供信息支撑。近年来，随着计算机技术、数值分析技术、信息技术的发展以及洪水致灾机理研究的深入，使得流域洪水进行精细化预测和灾情快速评估成为可能。当前技术的发展趋势为：多源数据融合的高分辨率气象数值预报，基于物理机理的水文预报模型，全域分布式水动力模拟模型，气象－水文－水动力模型耦合的流域一体化洪水模拟，全类型资产洪水损失评估模型，人工智能预报预测评估方法及模型，流域洪水应对桌面推演等。前沿关键科学技术问题包括：高精度短临暴雨预报方法，非结构网格的 GPU 高性能加速模拟技术，基于遥感数据的模型参数提取及灾情快速评估方法，水动力学模型实时校正技术，地表－地下水交换机理，堤坝溃决机理及发展过程模拟，承灾体脆弱性、洪水全要素（水深、流速、历时、携带物）－资产损失关系、洪水间接损失和影响评估方法，人工智能技术应用等。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 36，被引频次为 1571，篇均被引频次为 43.64。

（10）新型多模式混合交通流建模理论与方法

智能网联汽车（ICV）是未来交通的发展趋势，ICV 与人工驾驶车辆“人机混驾”将在道路运行中

持续相当长的阶段。由于 ICV 在个体信息获取、感知能力、反应时间、交互行为等方面与传统人工驾驶车辆存在显著差异，且 ICV 车辆本身的自动化 / 网联化的水平和程度也存在差异，因此道路交通流运行将呈现新的特征。探究混入 ICV 的新型混合道路交通流建模理论与仿真方法，解析其对道路通行能力的影响机制是当前学术界研究的热点和难点。重点研究方向包括：①考虑人为因素的异质驾驶行为建模，ICV 充分理解人工驾驶车辆意图和行为并采取拟人化的交互行为是保证混合交通流运行安全和效率的关键，因此面向智能网联环境，更有必要深入研究人为因素对人类驾驶行为异质性的影响；②融入信息要素的驾驶行为建模，“信息”是智能网联环境区别于传统交通流环境的核心，不同的信息类型（如说明性信息 / 建议性信息 / 执行性信息等）、信息内容、信息发布形式，以及驾驶主体的信息协同层级（如协作意愿、协作程度）将对驾驶行为产生不同程度的影响，因此新型多模式交通流建模中必须融入信息要素的影响；③ ICV 与人工驾驶车辆交互的多场景多车协同实验方法。现实环境下难以在短期内获得 ICV 与人工驾驶车辆交互的基础数据，有限的单车测试数据无法获得全场景交互样本，因此，有必要研究搭建多场景多车协同的实验平台，从而快速获取全场景海量交互行为特征数据，支撑新型混合交通流建模、仿真与实验验证。2013—2018 年，该前沿相关的核心论文篇数为 186，被引频次为 5524，篇均被引频次为 29.70。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 结构长期性能演化机理与控制

土木工程结构在使用期内由于外荷载和环境等因素的影响不可避免地会出现长期性能退化，为掌握结构全寿命周期的性能，需要对结构的内在损伤演化机理开展研究。目前，国内外学者针对混凝土结构、钢结构和砌体结构等正在开展大量的长期性能演化规律研究。

由于对结构长期性能演化机理和规律的认识不足，土木工程结构面临越来越严重的耐久性和使用寿命问题，大量结构过早衰退，威胁结构安全并浪费社会资源。目前，主要从物理、化学等微细观角度，对工程材料（钢筋、混凝土、钢材等）在荷载和环境作用下的内在劣化机理开展研究，并基于理论模型建立考虑关键参数的结构长期性能演化规律预测模型。在此基础上，对损伤严重的土木工程结构开展性能修复和加固研究，提升结构全寿命可靠度，实现对结构性能的有效控制。

目前，结构长期性能演化机理与控制的研究方向有：

（1）基于对工程材料长期性能的检测、监测数据，建立针对结构长期性能的评估和预测模型。包括氯离子侵蚀速率模型、钢材锈蚀损伤在线监测方法、基于可靠性评估优化检查和维护方案等。

（2）基于纤维增强树脂基复合材料（FRP）和纤维增强水泥基复合材料（FRCM）开展结构性能提升和控制。包括 FRP 外贴、内嵌、增强系列加固技术。利用 FRCM 对混凝土、砌体结构的抗弯、抗剪和抗震性能的系列加固控制技术等。

（3）基于形状记忆合金（SMA）、自愈混凝土、沥青以及新一代结构钢等新技术的结构性能控制研究。包括纳米材料改性混凝土，SMA 加固钢结构和混凝土结构、超耐候钢材技术等。

结构长期性能演化机理与控制的核心论文共有 72 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 23.71。核心论文产出排名前五的国家 / 地区为意大利、美国、希腊、中国和瑞士（见表 1.2.1），其中中国发表论文占比为 9.72%，是该前沿的主要研究国家 / 地区之一。篇均被引数排名前五的国家 / 地区为西班牙、美国、希腊、意大利和中国，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 22.00，说明中国学者在该前沿的研究工作还有进一步上升的空间。从排名前十的核心论文产出国家 / 地区合作

网络（见图 1.2.1）来看，除印度之外，论文数量排名前十的国家/地区之间有较为密切的合作关系，尤其是美国和意大利。

根据核心论文的机构产出情况来看（见表 1.2.2），该前沿排名前五的产出机构为意大利的帕多瓦大学、希腊的佩特雷大学、意大利的博洛尼亚大学、美国的密苏里科技大学和美国的迈阿密大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.2）来看，机构间的合作较为密切。

施引核心论文产出前五的国家/地区为意大利、中国、美国、英国和澳大利亚（见表 1.2.3），施引核心论文产出前五的机构为美国的理海大学、意大利的博洛尼亚大学、意大利的米兰理工大学、意大利的帕多瓦大学和美国的密苏里科技大学（见表 1.2.4）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出排名前五的国家/地区施引核心论文数也比较多，其中中国发表核心论文数排名第四，施引论文数排名第二，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

1.2.2　基于全寿命周期的绿色建筑设计方法

近年来，由于社会和经济发展、科学技术的进

表 1.2.1　“结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家/地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Italy	29	40.28%	813	47.63%	28.03
2	USA	18	25.00%	560	32.81%	31.11
3	Greece	9	12.50%	257	15.06%	28.56
4	China	7	9.72%	154	9.02%	22.00
5	Switzerland	5	6.94%	102	5.98%	20.40
6	Canada	4	5.56%	75	4.39%	18.75
7	India	4	5.56%	23	1.35%	5.75
8	Spain	4	5.56%	146	8.55%	36.50
9	Australia	3	4.17%	45	2.64%	15.00
10	Iran	3	4.17%	52	3.05%	17.33

表 1.2.2　“结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	University of Padua	9	12.50%	314	18.39%	34.89
2	University of Patras	8	11.11%	250	14.65%	31.25
3	University of Bologna	7	9.72%	175	10.25%	25.00
4	Missouri University of Science & Technology	7	9.72%	194	11.37%	27.71
5	University of Miami	6	8.33%	153	8.96%	25.50
6	Polytechnic University of Milan	5	6.94%	130	7.62%	26.00
7	Qatar University	3	4.17%	28	1.64%	9.33
8	University of Nottingham	3	4.17%	50	2.93%	16.67
9	Roma Tre University	3	4.17%	133	7.79%	44.33
10	University of Naples Federico II	3	4.17%	75	4.39%	25.00

图 1.2.1 “结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

步以及人民更加追求生活品质，对绿色建筑的需求已经从“量的增加”转换为“以人为本”意义上的“质的提升”，这直接推动绿色建筑的内涵从原有的“资源节约”拓展至“安全耐久”“健康舒适”“生活便利”以及“环境宜居”。因此，未来需要研究将安全、健康、舒适、便利、宜居、可感知等指标，纳入到绿色建筑的各个阶段并给出全寿命周期整体评价。信息、能源和材料新技术的发展带来了本领域关键技术突破的可能。为此，未来本领域技术发展的趋势包括在智慧、健康、以人为本的绿色建筑新内涵前提下，从单体到城区尺度的多专业全过程

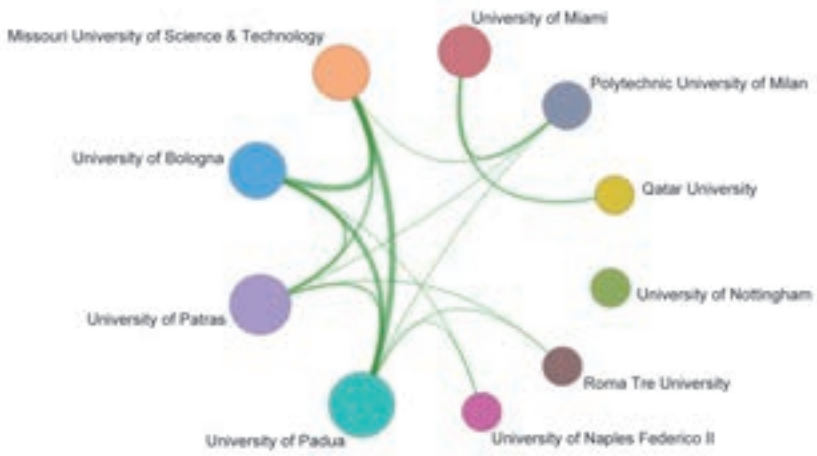

图 1.2.2 “结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Italy	256	24.50%	2017.2
2	China	238	22.78%	2017.8
3	USA	181	17.32%	2017.1
4	UK	62	5.93%	2017.3
5	Australia	56	5.36%	2017.9
6	Iran	46	4.40%	2017.6
7	Poland	45	4.31%	2017.2
8	Portugal	42	4.02%	2017.5
9	Spain	41	3.92%	2017.1
10	Greece	39	3.73%	2017.3

表 1.2.4　“结构长期性能演化机理与控制”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Lehigh University	48	14.50%	2016.9
2	University of Bologna	40	12.08%	2017.2
3	Polytechnic University of Milan	33	9.97%	2016.8
4	University of Padua	31	9.37%	2016.7
5	Missouri University of Science & Technology	29	8.76%	2017.5
6	Roma Tre University	26	7.86%	2016.5
7	Universidade do Minho	26	7.86%	2017.1
8	University of Patras	26	7.86%	2017.1
9	University of Naples Federico II	26	7.86%	2017.5
10	University of Calabria	23	6.95%	2017.0

群协同设计新方法，人工智能辅助优化设计，性能导向的数字化设计，健康建筑 / 智慧建筑设计，主被动一体化的设备末端设计和新材料的开发应用等。

国内在此领域研究较多的包括清华大学、西安建筑科技大学、重庆大学、浙江大学以及中国建筑科学研究院等，国外较为活跃的研究机构包括美国劳伦斯·伯克利国家实验室、澳大利亚墨尔本大学、新加坡国立大学、意大利佩鲁贾大学等。此外还有较多的国际建筑设计软件企业和建筑设计公司如 Revit、日建设计等关注此研究领域。研究产出包括国际期刊论文、数据库、软件工具和产品专利等。

基于全寿命周期的绿色建筑设计方法的核心论文共有 184 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 40.45。核心论文产出排名前五的国家 / 地区为中国、美国、澳大利亚、意大利和英国（见表 1.2.5），其中中国发表论文占比为 22.83%，是该前沿的主要研究国家 / 地区之一。篇均被引数排名前五的国家 / 地区为中国、西班牙、美国、澳大利亚和瑞士，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 63.36，高于平均水平。说明中国学者在该前沿的研究工作受到了较多的关注。从排名前十的核心论文产出国家 / 地区合作网络（见图 1.2.3）来看，中国与澳大利亚间的合作相对频繁。

根据核心论文的机构产出情况来看（见表 1.2.6），该前沿排名前五的产出机构为中国的香港理工大学、新加坡国立大学、中国的重庆大学、中国的香港城市大学和澳大利亚的墨尔本大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.4）来看，同一国家 / 地区内机构有所合作，但不同国家 / 地区机构之间合作较少。

施引核心论文产出前五的国家 / 地区为中国、美国、英国、澳大利亚和意大利（见表 1.2.7），施引核心论文产出前五的机构为中国的香港理工大学、中国的清华大学、中国的重庆大学、中国科学院和新加坡国立大学（见表 1.2.8）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前五的国家 / 地区施引核心论文数也比较多，其中中国的发表论文数和施引论文数均排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

1.2.3　水泥基材料的纳米改性和纤维复合

随着人民生活水平的不断提高和城市化进程的逐步推进，工程结构向着优质、耐久、环保、美观的方向发展，这就要求进一步改善现有建筑材料性能。水泥基材料的纤维复合可通过纤维的桥连作用阻止裂纹发展，改善水泥基材料的抗裂性能。随着

表 1.2.5 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	42	22.83%	2661	35.76%	63.36
2	USA	27	14.67%	1331	17.89%	49.30
3	Australia	25	13.59%	1130	15.18%	45.20
4	Italy	15	8.15%	394	5.29%	26.27
5	UK	14	7.61%	398	5.35%	28.43
6	Singapore	10	5.43%	224	3.01%	22.40
7	Spain	9	4.89%	556	7.47%	61.78
8	Switzerland	9	4.89%	372	5.00%	41.33
9	Norway	9	4.89%	209	2.81%	23.22
10	Germany	8	4.35%	244	3.28%	30.50

表 1.2.6 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Hong Kong Polytechnic University	18	9.78%	1021	13.72%	56.72
2	National University of Singapore	8	4.35%	205	2.75%	25.63
3	Chongqing University	7	3.80%	279	3.75%	39.86
4	City University of Hong Kong	5	2.72%	756	10.16%	151.20
5	The University of Melbourne	5	2.72%	186	2.50%	37.20
6	Central Queensland University	5	2.72%	163	2.19%	32.60
7	University of Perugia	4	2.17%	255	3.43%	63.75
8	Norwegian University of Science and Technology	4	2.17%	134	1.80%	33.50
9	Yonsei University	4	2.17%	124	1.67%	31.00
10	Swiss Fed Inst Technol	4	2.17%	94	1.26%	23.50

图 1.2.3 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

纳米技术的进步，纳米材料也成为一种性能优良的水泥改性材料。纳米材料的掺入使得水泥基材料水化反应进程加速、密实度提高，进而材料强度、耐久性均有所改善。

水泥材料的纳米改性和纤维复合的主要研究方向有：

（1）混杂纤维复合水泥基材料的制备与性能调控。早期水泥基材料的纤维复合主要是单一纤维复合。随着研究的深入，混杂纤维复合水泥基材料受到更为广泛的关注。混杂纤维复合是指采用两种或两种以上不同本构、不同尺寸、不同功能的纤维

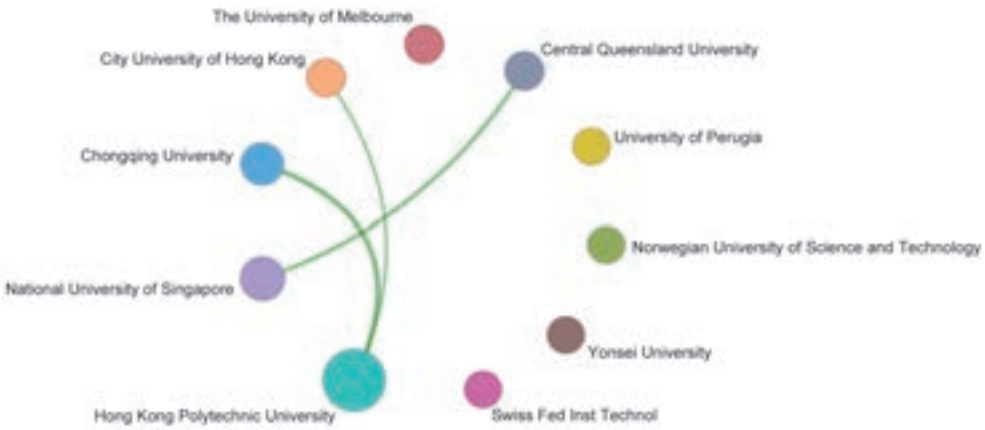

图 1.2.4 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	1429	28.43%	2017.4
2	USA	766	15.24%	2017.0
3	UK	518	10.31%	2017.1
4	Australia	502	9.99%	2017.1
5	Italy	471	9.37%	2016.9
6	Spain	333	6.63%	2017.1
7	Germany	235	4.68%	2017.2
8	Canada	205	4.08%	2017.4
9	South Korea	201	4.00%	2017.1
10	France	195	3.88%	2016.8

表 1.2.8 “基于全寿命周期的绿色建筑设计方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Hong Kong Polytechnic University	208	21.73%	2017.3
2	Tsinghua University	104	10.87%	2017.6
3	Chongqing University	94	9.82%	2017.5
4	Chinese Academy of Sciences	81	8.46%	2017.2
5	National University of Singapore	78	8.15%	2017.2
6	City University of Hong Kong	71	7.42%	2016.4
7	Tongji University	67	7.00%	2017.4
8	Yonsei University	66	6.90%	2016.4
9	Shenzhen University	66	6.90%	2017.3
10	University of Perugia	61	6.37%	2016.3

进行水泥基材料的增强。混杂纤维复合技术提高了水泥基材料综合性能，同时有效降低复合材料成本，使得纤维复合水泥基材料更具工程实际价值。

（2）植物纤维复合水泥基材料高性能化与多功能化。植物纤维具有高比强度、高比模量、低密度、吸引隔热、坚韧耐磨等优势，是一种生态环保、价格低廉的可再生资源。当前，植物纤维复合水泥基材料的研究主要集中在纤维表面改性处理和多层次多尺度阻裂效果两方面。同时，研究者对植物纤维复合水泥复合材料阻燃、吸声、隔热、抗振等性能的研究正逐步开展起来。

（3）改性用纳米材料及纳米改性水泥基材料的制备。水泥基材料改性常用的纳米材料有纳米 $CaCO_3$、碳纳米管、纳米 TiO_2、氧化石墨烯、纳米高岭土、纳米黏土等。纳米材料的分散是水泥基材料纳米改性技术的关键问题之一，常用的分散方法包括官能团化处理、表面活性剂包裹、聚合物包裹、超声波分散和机械搅拌分散等。纳米改性技术可有效提高水泥基材料的抗压强度、抗折强度以及耐久性能，但对水泥基材料流变性却具有不利影响。因此，纳米材料种类与用量、水泥基材料用水量、减水剂种类与用量的相互关系也是当前研究的重点之一。

（4）纳米改性水泥基材料微观结构与纳米改性机理。纳米材料可促进水泥水化反应，提高水泥基材料早期强度；另外，纳米颗粒具有的成核效应改善了 CSH 凝胶的取向性，使得水化产物更加密实；同时，纳米材料对水泥基材料中的微小孔隙具有填充作用，进一步降低了水泥基材料的孔隙率，使得材料密实度增加。特别地，根据市场需求，采用部分纳米材料进行改性可使得水泥材料具有其他功能性，如碳纳米管改性水泥基材料具有导电性和压敏性、纳米 TiO_2 改性水泥基材料具有自清洁性能等。

水泥基材料的纳米改性和纤维复合的核心论文共有 75 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 28.49。核心论文产出排名前五的国家 / 地区为意大利、美国、中国、希腊和西班牙（见表 1.2.9）。其中中国发表论文占比为 17.33%，是该前沿的主要研究国家 / 地区之一。篇均被引数排名前五的国家 / 地区为西班牙、巴西、澳大利亚、中国和美国。其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 30.62，略高于平均水平。从排名前十的核心论文产出国家 / 地区合作网络（见图 1.2.5）来看，有较为密切的合作关系，尤其是美国和意大利之间。

根据核心论文的机构产出情况来看（见

表 1.2.9 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Italy	24	32.00%	672	31.45%	28.00
2	USA	22	29.33%	639	29.90%	29.05
3	China	13	17.33%	398	18.62%	30.62
4	Greece	9	12.00%	257	12.03%	28.56
5	Spain	5	6.67%	194	9.08%	38.80
6	Australia	4	5.33%	133	6.22%	33.25
7	Brazil	3	4.00%	102	4.77%	34.00
8	Canada	3	4.00%	51	2.39%	17.00
9	UK	3	4.00%	50	2.34%	16.67
10	Qatar	3	4.00%	28	1.31%	9.33

表 1.2.10），该前沿排名前五的产出机构为希腊的佩特雷大学、意大利的帕多瓦大学、美国的密苏里科技大学、意大利的博洛尼亚大学和美国的迈阿密大学。从排名前十的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.6）来看，有些机构之间合作较为频繁。

施引核心论文产出前五的国家 / 地区为中国、意大利、美国、澳大利亚和英国（见表 1.2.11），施引核心论文产出前五的机构为美国的密苏里科技大学、意大利的博洛尼亚大学、新加坡国立大学、意大利的米兰理工大学和意大利的帕多瓦大学（见表 1.2.12）。根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前五的国家 / 地区施引核心论文数也比较多，其中，中国发表核心论文数排名第三，施引论文数排名第一，说明中国学者对该前沿的研究动态保持比较密切的关注和跟踪。

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势

土木、水利和建筑工程领域的 Top 10 工程开发前沿及统计数据见表 2.1.1，上述前沿涉及了结构工程、交通规划、水文学与水资源、市政工程、建筑设计及其理论、地下与隧道工程、土木工程材料、大地测量与测量工程等学科方向。其中，“城

表 1.2.10　“水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	University of Patras	8	10.67%	250	11.70%	31.25
2	University of Padua	8	10.67%	302	14.13%	37.75
3	Missouri University of Science & Technology	8	10.67%	239	11.18%	29.88
4	University of Bologna	7	9.33%	175	8.19%	25.00
5	University of Miami	5	6.67%	120	5.62%	24.00
6	Polytechnic University of Milan	4	5.33%	95	4.45%	23.75
7	Roma Tre University	3	4.00%	133	6.22%	44.33
8	University of Hartford	3	4.00%	144	6.74%	48.00
9	University of Nottingham	3	4.00%	50	2.34%	16.67
10	Hong Kong University of Science & Technology	3	4.00%	44	2.06%	14.67

图 1.2.5　“水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

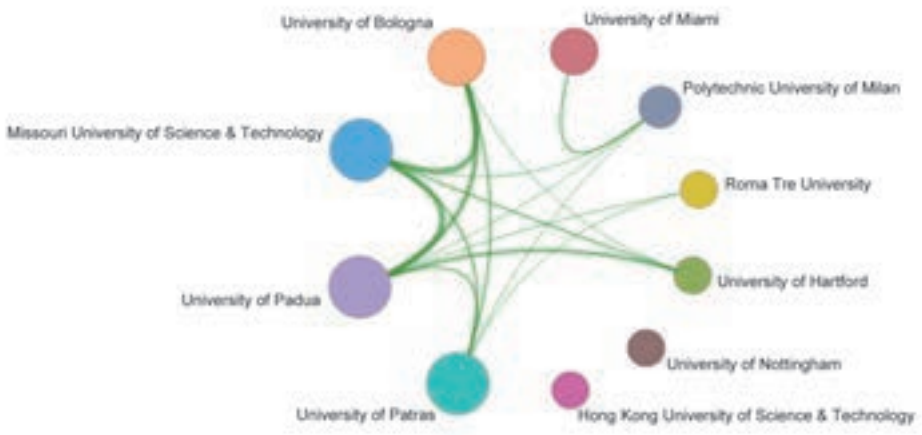

图 1.2.6 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	459	33.73%	2017.5
2	Italy	227	16.68%	2017.2
3	USA	172	12.64%	2017.4
4	Australia	82	6.03%	2017.5
5	UK	71	5.22%	2017.6
6	Iran	64	4.70%	2017.8
7	India	63	4.63%	2017.8
8	Brazil	63	4.63%	2016.9
9	South Korea	55	4.04%	2017.7
10	Portugal	54	3.97%	2017.4

表 1.2.12 “水泥基材料的纳米改性和纤维复合”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Missouri University of Science & Technology	43	12.72%	2017.5
2	University of Bologna	40	11.83%	2017.2
3	National University of Singapore	36	10.65%	2016.4
4	Polytechnic University of Milan	30	8.88%	2017.2
5	University of Padua	29	8.58%	2016.6
6	Southeast University	29	8.58%	2017.9
7	University of Minho	28	8.28%	2017.0
8	Beijing University of Technology	27	7.99%	2017.0
9	Roma Tre University	26	7.69%	2016.5
10	University of Patras	25	7.40%	2017.1

市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”“生态住区与生态修复技术”“海洋测量装备”为专家提名前沿，其余前沿基于科睿唯安专利地图分析解读获得并经专家研判确认。各个前沿所涉及的专利2013—2018 年的逐年公开量见表 2.1.2。

（1）既有结构加固、修复和改造技术

既有结构修复、加固和改造技术是指针对结构在服役过程中面临的功能改变、荷载增大、损伤累积、性能退化、风貌丧失等问题，为保障结构安全、提升建筑功能乃至维持文化特征所采用的各类技术。在荷载与环境长期作用下，既有结构会发生损伤累积、性能退化与风貌丧失；在突发荷载作用下，既有结构可能发生性能突降；为了适应新的使用需求，可能需要对结构进行改造；随着社会经济与技术的进步，早期结构不能满足现有设计标准要求，导致大量既有结构需要修复、加固和改造。既有结构修复、加固和改造技术主要研究方向包括材料层面上的耐久性修复和损伤修复，构件层面上的性能提升，结构层面上的抗震加固与结构改造。材料层面上的耐久性修复和损伤修复主要包括碳化混凝土再碱化、混凝土中氯离子抽离、历史建筑围护材料的保护性修复、开裂混凝土的自修复等。构件层面

表 2.1.1　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	既有结构加固、修复和改造技术	2852	1819	0.64	2015.98
2	城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术	1087	1725	1.59	2016.04
3	河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术	506	4463	8.82	2015.45
4	基于资源化及能源回收的污水可持续处理技术	590	2933	4.97	2015.35
5	生态住区与生态修复技术	3717	3250	0.87	2015.71
6	装配式钢结构标准化建造技术	1552	4195	2.70	2016.00
7	超级隧道高效安全掘进及智能装备	70	167	2.39	2015.61
8	3D 打印建筑用水泥基材料	104	682	6.56	2016.52
9	地下空间开发抢险与快速修复技术	1853	2245	1.21	2015.83
10	海洋测量装备	606	2054	3.39	2015.55

表 2.1.2　土木、水利与建筑工程领域 Top 10 工程开发前沿专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	既有结构加固、修复和改造技术	344	367	380	428	591	742
2	城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术	139	95	148	186	239	280
3	河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术	53	82	126	107	105	33
4	基于资源化及能源回收的污水可持续处理技术	68	120	150	111	71	70
5	生态住区与生态修复技术	413	534	763	702	631	674
6	装配式钢结构标准化建造技术	85	158	238	329	399	305
7	超级隧道高效安全掘进及智能装备	8	9	13	13	12	13
8	3D 打印建筑用水泥基材料	2	11	13	14	33	31
9	地下空间开发抢险与快速修复技术	209	237	349	315	351	392
10	海洋测量装备	81	121	94	111	93	106

上的性能提升指不同荷载作用下不同构件及节点的加固。结构层面上的抗震加固与结构改造多通过加强结构整体性能、提高结构抗震能力、改变结构体系或施加减隔震措施减轻上部结构的地震作用来实现。在维持建筑特征的基础上，提升传统木结构、砌体结构等历史建筑的抗震性能，日前成为一大研究前沿。随着新材料的发展，纤维增强复合材料、石墨烯、水泥基复合材料、形状记忆合金等在既有结构修复、加固和改造中的应用日益增加。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 2852，引用量为 1819，平均被引数为 0.64。

（2）城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术

城市群是人口居住和就业创业的城镇密集区，是国家新型城镇化的主体形态，也是支撑全国经济增长、促进区域协调发展、参与国际竞争合作的重要平台。不同于城市内部以通勤为主体的交通，城市群交通具有空间跨行政边界、目的需求多元叠合的特征。城市群功能结构 – 交通出行需求 – 交通网络与服务，三者之间多重互动反馈效应是城市群综合交通规划与安全管理的核心主线。为了支撑高效、安全、经济的客货运输，依托信息化、定量化手段科学布局城市群综合交通设施网络，制定智能化运营组织与服务策略。目前，围绕城市群综合交通规划系统及安全智能管理的技术前沿主要集中在：城市群空间结构与交通联系强度互馈解析，城市群复合交通走廊集约布局技术，城市群一站式客货运组织方法，城市群交通网络级联抗毁性评估与修复技术，城市群综合交通主动安全智能管理系统。2013—2018，该前沿相关的专利公开量为 1087，引用量为 1725，平均被引数为 1.59。

（3）河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术

进入 21 世纪以来，各国在加强立法的同时更加注重对水生态系统的保护，加快了对水生态环境的监测、评价和修复技术研发的步伐。河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术为最值得瞩目的新兴发展技术之一。伴随着信息技术和人工智能技术的高速发展，利用无人艇和无人飞行器的各种自动采集、自动水质监测系统，以及自主导航水面清洁机器人等技术开发呈现压倒态势。运用各种新兴监测技术并整合高精度的水文、水质和生态模型系统构建技术体系是未来河湖海及地下水环境监测与预警技术开发的方向，也有利于实现对修复效果的模拟和预期。就修复技术开发的趋势而言，发达国家已经从污染控制逐步转向以预防为主的应对策略，更加注重源头减污、保护栖息地和恢复生态系统功能。中国目前还主要集中于对地表水和地下水的污染治理层面。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 506，引用量为 4463，平均被引数为 8.82。

（4）基于资源化及能源回收的污水可持续处理技术

基于资源化和能源回收的污水可持续处理技术是在污水达标处理或深度净化过程中，同步回收水中蕴含的资源物质（如氮、磷、金属等）或能源（如氢、甲烷、电等）物质的技术。可持续处理技术旨在有效推动低能耗和低（零）排放新型工艺或绿色工艺的发展，亦旨在推动污水处理系统资源（能源）内部 / 外部循环利用“碳中和”模式的发展。重点发展以下技术：①污水 / 污泥资源梯级回收技术，即依据污水特征和资源属性，发展有机碳源、氮 / 磷、金属、再生水等多元资源梯级回收技术体系；②水处理过程资源 / 能源内部循环利用技术，即发展污水内部生物合成碳源（胞外聚合物、胞内聚合多糖等）原位转化与深度利用技术、剩余污泥资源化技术（如高温热水解、低温裂解、等离子熔融等）、污水 / 污泥厌氧产能与热电联产技术等；③可再生能源或低能量驱动的污水能源自给处理技术，即发展系列绿色材料 / 能源驱动技术，如微藻光合系统回收氮 / 磷营养资源、弱电生物催化产能、基于先进光（电）催化膜材料的污染物深度处理等；④低能耗 / 低药耗非常规污水脱氮技术，即发展厌

氧氨氧化、全程氨氧化、部分亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮、硫自养反硝化脱氮等可持续处理技术，发展倒置 A2O、多级 AO 等改进型低碳污水处理（碳中和）工艺；⑤污水厂人工智能与节能降耗技术，即发展基于大数据分析的精确调控技术（如微气泡曝气、节能水泵调控等）和智能管网监测系统，实现污水处理的资源和能源优化利用与低碳运行管理。2013—2018 年，专利公开量为 590，引用量为 2933，平均被引数为 4.97。

（5）生态住区与生态修复技术

随着城市化进程不断加速，在高度聚集的城镇住区推行生态化改造成为必然。大量的既有住区因生态环境受损而降低了人居环境品质。在这种情况下，需要通过住区的要素、空间、能源与物质再生等途径，运用被动节能技术方法，遵循“生态优先、整体优先与环境优先”原则，建立完整的生态修复技术体系。具体生态修复策略包括绿化整合、水体循环、基面渗透与场地重塑等。生态住区与生态修复技术的研究内容包括：①高密度住区环境的生态受损、退化现状及其生态修复技术应用状况，涉及生态受损与退化程度、城镇住区生态修复力等；②高密度住区环境生态修复技术的工程问题与技术方法，涉及高密度空间环境修复的关键技术、气候响应的生态修复方法等。其研究指向在于形成生态住区体系，构建资源节约、环境友好的人居环境。住区环境生态修复是目前国内外高度关注的基础性生态工程问题，将提供系统化的城镇住区环境修复原理、技术方法和设计策略，建立以气候响应为基础的高密度住区生态修复设计策略，弥补在城镇旧城改造中的生态评价与策略体系的空白，健全生态化城镇创新体系的建设。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 3717，引用量为 3250，平均被引数为 0.87。

（6）装配式钢结构标准化建造技术

装配式钢结构是以钢部件构成结构系统，通过工业化建造方式与采用预制部品部件的外围护系统、内装系统、设备与管线系统进行集成而形成的建筑，或与采用预制部品部件的其他附属系统进行集成而形成的桥梁、构筑物等土木工程基础设施的总称。装配式钢结构标准化建造是基于土木工程全寿命期的可持续性指导思想，对装配式钢结构建筑或基础设施开展标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理和智能化应用，从而实现建造对象的整体性能和品质提升，建造效率的显著提高，现场人工的大幅减少和节能减排。装配式钢结构标准化建造技术应以建造对象的功能为核心，应用系统集成的方法统筹策划、设计、生产、运输、施工和运维，实现全过程协同，具体包含：①按照通用化、模数化、标准化的要求，以少规格、多组合的设计原则实现产品的系列化和多样化；②减少现场焊接和湿作业，发展全螺栓免焊连接、装配式墙板和楼板、装配式耗能减震技术，提升装配效率；③建立完善的生产质量管理体系，提高部品部件的工厂化制造精度；④综合协调各专业制定相互协同的装配式施工组织方案，提高劳动效率；⑤内装系统与其他系统进行一体化设计和协同施工；⑥运用 BIM 信息化技术实现全专业、全过程的信息化管理；⑦采用人工智能和物联网等技术实现智能化应用，提升安全、便利、舒适和环保等性能。随着建筑工业化的深入发展，未来的发展趋势是通过建筑、土木、计算机、机械、电信、材料、管理等多学科的深度交叉与合作研发实现技术创新和建造品质提升。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 1552，引用量为 4195，平均被引数为 2.7。

（7）超级隧道高效安全掘进及智能装备

超级隧道一般指具有特大工程规模（长度超过 15 km 或截面最大尺寸超过 15 m）的隧道工程。世界范围内目前最长隧道超过 50 km，隧道截面尺寸超过 20 m。超级隧道工程多用于穿越范围巨大且环境复杂的山脉或水域，建设和运维过程面临着

极大的技术难题与挑战。其主要技术方向包括超复杂环境深部地质水文信息精细化探测与动态反馈，超大规模隧道荷载及结构动态设计方法，超长、超深埋隧道新型智能材料与结构形式，高应力、高地温、高水压环境下的隧道施工新技术与装备，复杂环境超长距离隧道安全预警与智能施工装备，超深埋隧道建造运维期防水控水新技术与装备，超长隧道安全与服役性能智能感知、维护技术与装备，超长、超深埋隧道运营安全与智慧防灾救援技术，超长、超深埋隧道建造全过程动态风险管理与监控等。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 70，引用量为 167，平均被引数为 2.39。

（8）3D 打印建筑用水泥基材料

近年来，3D 打印建筑施工技术在自动化建筑领域引起极大关注，其中 3D 打印建筑用水泥基材料成为关注的开发前沿。3D 打印建筑用水泥基材料是指满足 3D 打印性能要求的应用于 3D 打印建筑施工的水泥基材料。目前 3D 打印建筑用水泥基材料主要技术方向包括可打印性能调控，层间黏结性能强化，以及高强高韧性化研究等。3D 打印建筑用水泥基材料可打印性能调控及其机理研究是构建 3D 打印建筑用水泥基材料设计体系、实现建筑打印成型及应用的关键。层间黏结性能强化及其机理研究是 3D 打印建筑构件及建筑安全性的关键。高强高韧性的 3D 打印建筑用水泥基材料的开发，是实现 3D 打印建筑无筋化应用的有效手段。未来，对长寿命 3D 打印建筑用水泥基材料的研发，3D 打印建筑用水泥基材料环境敏感性研究，以及 3D 打印建筑用水泥基材料在极端环境中的性能演化发展规律及机理研究是重要技术发展方向。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 104，引用量为 682，平均被引数为 6.56。

（9）地下空间开发抢险与快速修复技术

地下空间在建造和运营期间，受地层条件和地下结构内外环境条件的影响，险情时有发生。尽管地下空间开发与养护技术多种多样，综合而言，地下空间开发引起的险情主要表现为渗漏水、地下结构失稳，以及地下空间开发引起地层变形过大进而影响环境安全。其中，地下水是引起地下结构发生险情最主要、最常见的因素。地下空间开发中的抢险与快速修复在控制地下结构本身稳定的同时，必须对地层进行加固，地层稳定是保证地下结构长期稳定的基础。在抢险过程中地下结构的稳定目前常用的有效手段主要为注浆、破损修复和结构补强。地层的加固则可以通过地层注浆、锚杆加固等方式实现。对于地下水渗漏的控制，探明渗漏位置和快速注浆止水仍是目前最为有效的技术手段。由于地下空间开发的环境和地质条件越来越复杂，运营地下空间结构的不断老化，在地下空间开发和利用过程中安全风险巨大，提高地下空间开发抢险和快速修复技术迫在眉睫，而快速高强加固新材料，适合在地下空间有限条件下的加固智能新设备则是实现地下空间开发抢险与快速修复的关键。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 1853，引用量为 2245，平均被引数为 1.21。

（10）海洋测量装备

海洋测量装备是测绘工程领域的开发前沿之一，为开展海洋地理空间要素测量工作提供了基础性支撑条件。海洋测量装备包括面向海底地形测量、海洋重力测量、海洋磁力测量、海洋地震测量等不同测量任务的专业测量仪器设备和搭载这些仪器设备的海洋测量平台。近年来，海洋测量平台从传统的船载平台向航天、航空、地面、水面、水下五位一体的多样化立体数据获取平台体系演化，自主水下航行器、无人水面飞行器、无人船以及与平台有关的定位导航设备、拖曳装置等附属设备是其中主要的技术方向，专利成果丰富。而对于专业测量仪器，新型传感器及其控制和数据处理技术是目前的主要技术方向，例如从单探头发展到多探头的地球物理传感器阵列和拖曳式海洋阵列传感器的几何形状控制方法等。2013—2018 年，该前沿相关的专利公开量为 606，引用量为 2054，平

均被引数为 3.39。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　既有结构加固、修复和改造技术

在 20 世纪中期，由于工业化迅猛发展，各国进行了大规模的基础设施建设。基础设施在服役过程中可能遭受突发的或短暂的灾害性作用，如地震、火、风、爆炸等，灾后损失巨大。20 世纪以来，全球地震害事件频发，造成了严重的结构破坏和重大的人员伤亡。既有结构建造年代各异、结构形式多样、抗震性能不一。在研究不同建造年代、不同结构类型、不同材料种类的既有结构抗震性能提升的同时，还有必要对震损结构的修复、加固和改造技术进行系统研究。

在荷载与环境长期作用下，既有结构的性能不可避免会因材料劣化、钢筋 / 钢材锈蚀、损伤累积等影响而逐渐退化。在开展耐久性劣化、开裂损伤材料（包括砖砌体、木材、混凝土、钢材）修复技术的同时，构件和结构层面的修复、加固、改造也应考虑材料劣化和损伤的特点。

不同于一般的既有结构，历史建筑细部特征、空间形态的合理保护与结构修复、加固、改造之间往往存在冲突或矛盾，材料层面上的相容性修复、构件层面上的可恢复性加固、结构层面上基于体系的可调控加固改造尚缺乏深入系统的研究。

目前，既有结构修复、加固和改造技术的研究方向有：

（1）材料修复，包括碳化混凝土、氯离子侵蚀混凝土、风化砖砌体、腐朽木材、锈蚀钢筋 / 钢材的修复，以及开裂混凝土、钢材、砖砌体、木材的修复，特别是开裂混凝土自修复技术近年来得到了迅速发展。

（2）构件加固，正在从静力荷载到疲劳荷载、冲击或爆炸作用，从无损构件到损伤构件，从短期性能向长期性能，从确定性向随机性发展。

（3）结构层面上的抗震加固与结构改造，一般采用提高结构抗震能力或通过施加减隔震措施减轻上部结构的地震作用展开。前者多采用包括加强结构整体性能、改变结构体系、提供受力构件承载能力、增强节点刚度等方法，而后者多采用设置隔震装置、安装阻尼器、屈曲约束支撑等进行。

（4）历史建筑修缮维护技术的发展，包括石灰、汉白玉、生土墙和砖石等典型历史建筑材料的相容性修复，传统木结构、砌体结构的构件、节点的修复加固，以及基于体系的结构加固理论与方法等。

（5）随着材料科学的发展，许多高性能新材料如纤维增强复合材料、石墨烯、水泥基复合材料、形状记忆合金等为研究人员所认识，并应用到结构修复、加固和改造技术中。

既有结构加固、修复和改造技术的专利共有 2852 项，平均被引数为 0.64（见表 2.1.1），排名前五的国家 / 地区为中国、日本、韩国、俄罗斯和美国（见表 2.2.1），申请专利量最多的国家为中国，占比达到了 59.71%，是该工程开发前沿的主要研究国家 / 地区之一。其中中国作者所发表的专利平均被引数为 0.73，略高于平均水平，说明中国学者在该开发前沿的研究工作也逐步受到关注。从专利产出排名前十的国家 / 地区之间的合作网络（见图 2.2.1）来看，国家 / 地区之间暂无合作。

根据专利的机构产出情况来看（见表 2.2.2），该前沿排名前五的产出机构为中国建筑集团有限公司、日本的 Takenaka Komuten KK、日本清水建设株式会社、日本的 Taisei Constr Co., Ltd. 和中国的洛阳理工学院。从专利产出机构排名前十的合作网络（见图 2.2.2）来看，机构之间合作较少。

2.2.2　城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术

城市群是人口居住和就业创业的城镇密集区，是国家新型城镇化的主体形态，也是支撑全国经济

表 2.2.1 “既有结构加固、修复和改造技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	1703	59.71%	1248	68.61%	0.73
2	Japan	570	19.99%	248	13.63%	0.44
3	South Korea	323	11.33%	113	6.21%	0.35
4	Russia	59	2.07%	24	1.32%	0.41
5	USA	45	1.58%	100	5.50%	2.22
6	Germany	22	0.77%	11	0.60%	0.50
7	Colombia	11	0.39%	3	0.16%	0.27
8	Italy	9	0.32%	11	0.60%	1.22
9	France	9	0.32%	6	0.33%	0.67
10	Poland	9	0.32%	2	0.11%	0.22

表 2.2.2 “既有结构加固、修复和改造技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	CSCE	China	62	2.17%	68	3.74%	1.10
2	TKEN	Japan	53	1.86%	15	0.82%	0.28
3	SHMC	Japan	40	1.40%	13	0.71%	0.33
4	TAKJ	Japan	38	1.33%	15	0.82%	0.39
5	LUOY	China	27	0.95%	21	1.15%	0.78
6	DWHO	Japan	23	0.81%	6	0.33%	0.26
7	UYSE	China	22	0.77%	29	1.59%	1.32
8	SHCG	China	22	0.77%	26	1.43%	1.18
9	CMEG	China	22	0.77%	12	0.66%	0.55
10	RFJI	Japan	21	0.74%	7	0.38%	0.33

注：CSCE 表示 China State Construction Engineering Corporation；TKEN 表示 Takenaka Komuten KK；SHMC 表示 Shimizu Constr Co., Ltd.；TAKJ 表示 Taisei Constr Co., Ltd.；LUOY 表示 Luoyang Institute of Science and Technology；DWHO 表示 Daiwa House Industry Co., Ltd.；UYSE 表示 Southeast University；SHCG 表示 Shanghai Construction Group Co., Ltd.；CMEG 表示 China Metallurgical Group Corporation；RFJI 表示 Retrofitting Japan Inst。

增长、促进区域协调发展、参与国际竞争合作的重要平台。不同于城市内部以通勤为主体的交通，城市群交通具有空间跨行政边界、目的需求多元叠合的特征。城市群功能结构 – 交通出行需求 – 交通网络与服务，三者之间多重互动反馈效应是城市群综合交通规划与安全管理的核心主线。

为了支撑高效、安全、经济的客货运输，应依托信息化、定量化手段科学布局城市群综合交通设施网络，制定智能化运营组织与服务策略。

目前，围绕城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术的前沿主要集中在五大方向：

（1）城市群空间结构与交通联系强度互馈解析。基于流空间思想，利用城市间客货运以及基于位置的人口迁徙、夜间灯光等多源大数据，采取空间分析和社会网络分析方法，揭示城市群各城市间人口流动联系，识别城市群空间尺度与结构。

（2）城市群复合交通走廊集约布局技术。根据城市群空间联系强度界定客货运交通走廊等级。

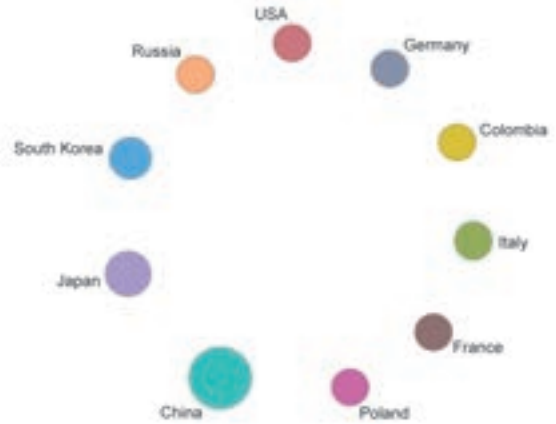

图 2.2.1 “既有结构加固、修复和改造技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

图 2.2.2 “既有结构加固、修复和改造技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

在交通走廊内，将道路、轨道等骨干设施，公路客运、铁路客运等运输组织方式进行协同整合，建设多通道、多方式、多运营模式的复合型走廊，推动客货运集约化、协同化。

（3）城市群一站式客货运组织方法。利用大数据、云计算、移动互联网等信息技术手段，将基础设施（走廊、枢纽）与运营组织高效整合，促进供需信息直通，构建城市群范围内“一票到底”的客运服务体系和“一单到底”的货运服务体系。

（4）城市群交通网络级联抗毁性评估与修复技术。构建城市群复合交通网络级联失效模型，给出网络抗毁性评估标准。利用最优化、模拟仿真等技术手段，识别网络中关键通道与节点，形成面向不同破坏场景的通道与节点能力修复方法，提高城市群交通系统韧性。

（5）城市群综合交通主动安全智能管理系统。研发综合交通运输网络中各类运行风险的全息监测、前置辨识技术与装备，构建运行风险主动预警和动态防控技术体系，建立运行风险管控知识图谱和多模式、跨媒体预警信息发布技术，开展城市群综合交通网络及重点交通对象的精细化安全管理。

城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术的相关专利共有 1087 项，平均被引数为 1.59（见表 2.1.1），排名前五的国家 / 地区为中国、韩国、美国、日本和印度（见表 2.2.3）。中国机构或个人所申请的专利占比达到了 91.17%，在专利数量方面所占比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引数为 1.48。从专利产出国家 / 地区之间的合作网络（见图 2.2.3）来看，国家 / 地区之间合作较少。

根据专利的机构产出情况来看（见表 2.2.4），该前沿排名前五的产出机构为中国的东南大学、中国的吉林大学、中国的江苏理工学院、中国的杭州普乐科技有限公司和中国的安徽达尔智能控制系统股份有限公司。从专利产出机构排名前十的合作网络（见图 2.2.4）来看，机构之间暂无合作。

2.2.3　河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术

从 20 世纪 80 年代中期开始，基于对大规模城市化和工业化后遗症的反思，各国开始加大对河湖海与地下水修复工程技术的研发，为了实现精准治理修复也同步加大了对监测和评价技术的开发。欧盟于 2000 年颁布的水框架指令（WFD）经实践检验被证明是全球管理水资源的成功典范。欧盟关于水资源管理的法律从 20 世纪注重保护公共用水质量和调控污染源，到 21 世纪初注重水资源综合管

表 2.2.3 “城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	991	91.17%	1468	85.10%	1.48
2	South Korea	29	2.67%	21	1.22%	0.72
3	USA	19	1.75%	121	7.01%	6.37
4	Japan	11	1.01%	8	0.46%	0.73
5	India	8	0.74%	14	0.81%	1.75
6	Russia	5	0.46%	0	0.00%	0.00
7	Germany	4	0.37%	2	0.12%	0.50
8	Netherlands	3	0.28%	49	2.84%	16.33
9	Australia	2	0.18%	13	0.75%	6.50
10	Canada	2	0.18%	3	0.17%	1.50

表 2.2.4 “城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	UYSE	China	10	0.92%	32	1.86%	3.20
2	UYJI	China	10	0.92%	14	0.81%	1.40
3	JIAA	China	9	0.83%	2	0.12%	0.22
4	HZPT	China	8	0.74%	8	0.46%	1.00
5	ADIC	China	8	0.74%	7	0.41%	0.88
6	ZTEC	China	7	0.64%	27	1.57%	3.86
7	SHCG	China	7	0.64%	10	0.58%	1.43
8	UCHA	China	6	0.55%	10	0.58%	1.67
9	WBDI	China	5	0.46%	27	1.57%	5.40
10	UYQI	China	5	0.46%	24	1.39%	4.80

注：UYSE 表示 Southeast University；UYJI 表示 Jilin University；JIAA 表示 Jiangsu University of Technology；HZPT 表示 Hangzhou Pule Technology Co., Ltd.；ADIC 表示 Anhui Dar Intelligent Control System Stock Co., Ltd.；ZTEC 表示 Zte Corporation；SHCG 表示 Shanghai Urban Traffic Design Institute Co., Ltd.；UCHA 表示 Chang’an University；WBDI 表示 Wuxi Big Dipper Information Technology；UYQI 表示 Tsinghua University。

理，2010 年开始已经向注重绩效转变，更加注重对水生态系统的保护，将欧盟水环境中的鱼类和其他水生生物比喻成象征水状态的金丝雀和欧盟人民及产业实实在在的福祉。日本于 1997 年对《河川法》实施了再次修订，将保护水生态与保障水资源和防灾整合成一个完整的对策体系。2015 年 9 月联合国可持续发展峰会上正式通过的 17 个可持续发展目标也重点涵盖了生态系统和对水下生物保护的内容。由此可见，进入 21 世纪之后欧美日等发达国家都更加注重对水生态环境的监测、评价和修复技术的研发，对全球水生态环境的治理与保护发挥了引领作用。

监测是通过连续的调查和观测把握现状和变化趋势；评价则更加注重开发各种高效的评价模型系统，并运用各种监测数据对可能的变化趋势进行模拟预测和影响评估，有助于理解无法直接看到的表象背后各种复杂过程的规律，并据此制定行之有效的环境管理策略，整合高精度的水文、水质和生态

图 2.2.3 “城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

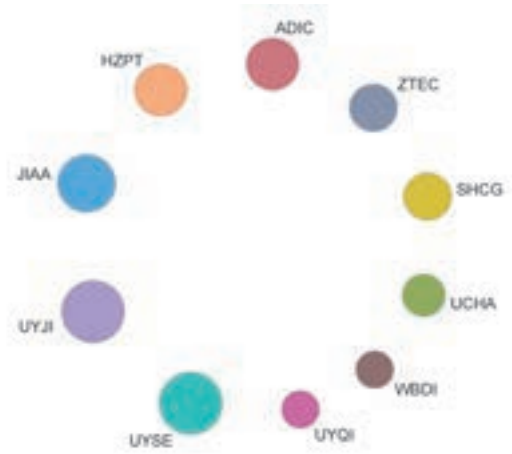

图 2.2.4 “城市群综合交通规划系统及安全智能管理技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

模型系统，还有利于实现对修复效果的模拟和预期；修复是应用各种工程手段对受损的水环境进行修复。由于人工修复往往需要大量的资源和时间，因此在充分考虑环境容量和自然恢复潜力的基础上制定适宜而有序的修复计划尤为重要。

就技术开发的趋势而言，发达国家已经从污染控制逐步转向以预防为主的应对策略，对于污染源调控则尽量利用自然恢复等生态工法，并通过构建绿色基础设施等方式实现源头减污、保护栖息地和和恢复生态功能的目标。中国目前还主要集中于对地表水和地下水的污染治理层面，但伴随着信息技术和人工智能技术的高速发展，开发利用无人艇和无人飞行器的自动测量、自动采集、自动水质监测系统，浮藻自动滤净与清理系统、自主导航水面垃圾清理及水面清洁机器人等方面的技术开发层出不穷，显现出与发达国家并跑的态势。

河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术的相关专利共有 506 项，平均被引数为 8.82（见表 2.1.1）。排名前五的国家 / 地区为中国、美国、韩国、日本和法国（见表 2.2.5），其中中国机构或个人所申请的专利占比达到了 91.11%，在专利数量方面所占比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一。中国专利的平均被引数为 6.62，表明中国专利技术越来越受到关注。此外，对国际专利占比也进行了分析，结果表明中国专利的平均被引数为 28.75，仅低于美国的 81.79，明显高于韩国和日本等发达国家，表明中国的国际竞争实力和对自主知识产权的保护意识在增强。从专利产出国家或地区之间的合作网络（见图 2.2.5）来看，国家或地区之间暂无合作。

表 2.2.6 列出了该前沿排名前五的专利产出机构，分别为中国的河海大学、中国的苏州飞驰环保科技股份有限公司、中国的深圳市大疆创新科技有限公司、中国的浙江海洋大学和中国的天津大学。从中国专利排名前十的主要产出机构占比看，高校科研院所与企业基本平分秋色，表明中国企业在生态文明战略大背景下对该领域的技术开发有较强的自主创新意识。从专利产出机构排名前十的合作网络（见图 2.2.6）来看，机构之间暂无合作。

表 2.2.5 “河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	461	91.11%	3051	68.36%	6.62
2	USA	22	4.35%	1196	26.80%	54.36
3	South Korea	6	1.19%	36	0.81%	6.00
4	Japan	3	0.59%	48	1.08%	16.00
5	France	3	0.59%	40	0.90%	13.33
6	Denmark	2	0.40%	28	0.63%	14.00
7	Canada	2	0.40%	22	0.49%	11.00
8	Russia	2	0.40%	6	0.13%	3.00
9	Germany	1	0.20%	18	0.40%	18.00
10	Netherlands	1	0.20%	8	0.18%	8.00

表 2.2.6 “河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	UYHO	China	11	2.17%	61	1.37%	5.55
2	SFET	China	11	2.17%	52	1.17%	4.73
3	DJII	China	9	1.78%	257	5.76%	28.56
4	UYZO	China	7	1.38%	40	0.90%	5.71
5	UTIJ	China	6	1.19%	57	1.28%	9.50
6	CNPW	China	6	1.19%	19	0.43%	3.17
7	WDMM	China	6	1.19%	7	0.16%	1.17
8	CRHK	China	5	0.99%	41	0.92%	8.20
9	UYCR	China	5	0.99%	22	0.49%	4.40
10	UQDT	China	4	0.79%	52	1.17%	13.00

注：UYHO 表示 Hohai University；SFET 表示 Suzhou Feichi Environmental Technology Co., Ltd.；DJII 表示 Sz Dji Technology Co., Ltd.；UYZO 表示 Zhejiang Ocean University；UTIJ 表示 Tianjin University；CNPW 表示 Powerchina Water Environment Management Technology Co., Ltd.；WDMM 表示 Wuxi Dagong Machine Mfg Co., Ltd.；CRHK 表示 Chinese Research Academy of Environmental Sciences；UYCR 表示 China Three Gorges University；UQDT 表示 Univ Qingdao Technological。

图 2.2.5 “河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

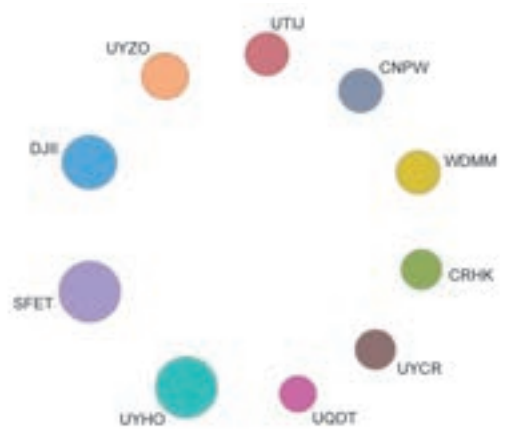

图 2.2.6 “河湖海与地下水生态水环境监测与修复技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组组长：崔俊芝　张建云　陈以一

专家组：

江　亿　欧进萍　杨永斌　缪昌文　杜彦良
陈政清　陈湘生　邓铭江　孔宪京　岳清瑞
陈玉丽　池明　范　峰　冯守中　何　川
华旭刚　黄冬梅　姜益强　李安桂　李　惠
梁　恒　林波荣　刘飞香　梅世龙　牛荻涛
潘海啸　潘　鹏　乔丕忠　任　刚　沈　迪
沈果毅　时蓓玲　宋德萱　孙立军　谈广鸣
王爱杰　王　信　王元战　汪双杰　夏圣骥
闫　利　杨大文　杨仲轩　曾　滨　张　鹏
张　松　郑　机　朱若霖

工作组：

蔡　奕　陈　鹏　陈　庆　陈　欣　葛耀君
顾祥林　贺月香　黄文锐　贾良玖　蒋正武
凌建明　李　晨　李　岩　刘　芳　刘曙光
孙　剑　孙　智　谭　峥　童小华　王华宁
王　伟　王亚宜　吴宇清　夏四清　肖飞鹏
许晓青　姚俊兰　叶　蔚　叶　宇　张尚武
张　旭　赵宪忠　周　翔　周新刚　朱合华
朱兴一　庄晓莹

执笔组：

刘加平　陈　鹏　陈　庆　方　成　董志强
李建华　李晓军　林波荣　刘　芳　宋德萱
孙　剑　孙　智　谭　峥　王爱杰　王进廷
王　伟　王艳艳　王　怡　吴　刚　武　威
向立云　肖建庄　闫　利　姚俊兰　叶　蔚
余倩倩　俞　茜　张大伟　张冬梅　张伟平

六、环境与轻纺工程

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

环境与轻纺工程领域（以下简称环境领域）所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 1.1.1，涉及了环境科学工程、气象科学工程、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程以及轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各个前沿自 2013 年至 2018 年的逐年核心论文发表情况见表 1.1.2。

（1）纳米复合材料在废水处理中的应用

随着社会经济的发展，大量污水排放至环境中，对水环境造成破坏，极大地威胁了生态环境和人类健康。因此有效地处理水体中的污染物是环境领域的重要研究课题。传统的水处理方法虽然在实际应用中取得了一定的效果，但是也存在能耗高、效率低、产生二次污染等弊端。随着科学技术的进步，许多新材料开始应用于水处理中。纳米材料由于具有比表面积大、活性位点多等优越性能，被认为是处理众多污染物的良好试剂。纳米光催化技术、纳滤膜技术、纳米还原性技术以及纳米吸附性技术在水处理领域都取得了一定的成就。相比于单一组成的纳米材料，多种纳米材料复合而成的纳米复合材料通常具有更优越的性能，可以通过对原材料、各组分分布以及工艺条件等方面的设计，实现各组分的优势互补，最大限度地发挥优势。因此，纳米复合材料应用于废水处理必将对未来的环境保护以及可持续发展产生巨大的作用，具有广阔的应用前景。

（2）高效海水淡化技术

海水淡化即利用海水脱盐生产淡水，是实现水资源利用的开源增量技术，可以增加淡水总量。发展高效海水淡化技术，对于缓解沿海缺水地区和海岛水资源短缺，促进内陆地区苦咸水和微咸水淡化利用、优化用水结构、保障水资源持续利用具有重要意义。目前如何提高海水淡化的效率，降低能耗及成本，提高适用范围是高效海水淡化面临的难点问题。现在所用的海水淡化方法有海水冻结法、电渗析法、蒸馏法、反渗透法以及离子交换法等，目前应用反渗透膜法及蒸馏法较为主流。大型热法及

表 1.1.1　环境与轻纺领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究热点	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	纳米复合材料在废水处理中的应用	69	5402	78.29	2015.4
2	高效海水淡化技术	43	3689	85.79	2014.9
3	土壤污染对作物代谢的影响	37	2105	56.89	2014.2
4	抗生素耐药基因环境污染与控制	32	807	25.22	2016.0
5	气候变化与生态环境	1400	303 709	216.94	2014.0
6	冬季严重雾霾	192	4613	24.03	2016.8
7	海洋微塑料污染的监控与防治	115	18 840	163.83	2014.6
8	食品中有害物快速筛查与智能判别新技术	10	514	51.40	2014.8
9	高效油水分离材料的制备与应用	17	1598	94.00	2015.2
10	生物质能源	130	11 108	85.45	2014.5

表 1.1.2　环境与轻纺领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文发表数

序号	工程研究热点	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	纳米复合材料在废水处理中的应用	6	14	17	16	12	4
2	高效海水淡化技术	12	7	8	6	9	1
3	土壤污染对作物代谢的影响	14	9	8	4	1	1
4	抗生素耐药基因环境污染与控制	3	3	4	5	14	3
5	气候变化与生态环境	587	391	267	112	34	9
6	冬季严重雾霾	4	8	18	32	63	67
7	海洋微塑料污染的监控与防治	19	39	32	17	8	0
8	食品中有害物快速筛查与智能判别新技术	3	2	1	2	2	0
9	高效油水分离材料的制备与应用	0	5	6	4	2	0
10	生物质能源	39	38	22	19	10	2

膜法海水淡化、大型海水循环冷却等关键技术，反渗透海水淡化膜组件、高压泵、能量回收等关键部件和热法海水淡化的核心部件是海水高效淡化研究的热点。开发利用电厂余热以及核能、风能、海洋能和太阳能等可再生能源进行海水淡化的技术也是人们关注的重点。积极研究开发海水淡化取水、预处理、淡化水后处理、浓盐水综合利用和排放处置等各环节的工程技术和成套装置是今后海水高效淡化技术发展的方向。

（3）土壤污染对作物代谢的影响

土壤是植物生长发育的基础。土壤供给植物正常生长发育所需要的水、肥、气、热，这些基本性质都能通过直接或间接的途径影响植物的生长发育。土壤中有害物质过多，超过土壤的自净能力，引起土壤的组成、结构和功能发生变化，就是土壤污染。土壤污染对作物代谢的影响研究目前主要集中在以下几个方面：一是重金属等无机污染物通过破坏作物根系的正常吸收和代谢功能，通常同植物体内酶系统作用有关。如 Cd 胁迫下，作物的根系对水分和养分的吸收减弱，细胞膜通透性增强，细胞内可溶性物质外渗，细胞内酶的活性剂代谢受到阻碍。二是污染物影响作物正常生理功能，三氯乙醛能破坏植物细胞原生质的极性结构和分化功能，使细胞和核的分裂产生紊乱，形成病态组织，阻碍正常的生长发育，甚至导致植物死亡。三是土壤中病源微生物进入作物中，阻断正常代谢通路，造成相关的病害，如细菌引起的青枯病、腐烂病，真菌引起的黑穗病、根肿病等。

（4）抗生素耐药基因环境污染与控制

抗生素经使用通过生活污水、畜禽 / 水产养殖废水、医院废水、制药废水等多种途径进入环境，造成水环境和土壤环境抗生素污染。抗生素残留对环境细菌产生选择性压力，促进耐药性和耐药基因产生。抗生素耐药基因（ARG）被认为是一种新兴的环境污染物。耐药基因的广泛传播和扩散可能严重降低抗生素的疗效，对公众健康、生态系统健康构成风险，引起了全球范围的高度重视。污水处理系统为耐药基因在细菌间的传播扩散创造了良好场所，是环境耐药基因污染的重要源头。常规的污水处理工艺对耐药基因的去除程度有限，并且生物处理单元的活性污泥相比污水集中了更多耐药基因，污水处理系统中分离出来的细菌大多具有多重耐药性。

该研究前沿热点论文主要聚焦于混凝沉淀、过滤、膜处理、加氯消毒、紫外线消毒、臭氧氧化、UV/H_2O_2、光催化、光芬顿等不同污水处理工艺对

耐药基因的去除性能的研究。沉淀等工艺一般通过将耐药基因从污水中沉降到污泥中实现水中耐药基因浓度的降低，并未真正消除耐药基因；各类高级氧化工艺对耐药基因有明显的去除作用，可通过破坏耐药基因结构降低其环境风险，但处理效果与剂量和作用时间密切相关，例如有研究报道了低剂量的加氯或紫外线处理后耐药水平反而有所升高。由此，针对医院、制药厂、养殖场等源头废水开展耐药基因深度去除技术及机理研究十分必要。目前，该前沿研究主要聚焦于土壤和水环境，大气环境中的耐药基因研究较少。加强环境中耐药基因污染特征、迁移传播规律和控制技术研究具有重要意义。

（5）气候变化与生态环境

气候变化是指较长时期的气候演变，包括各种时间尺度的气候演变，气候变化的影响也体现在许多方面，每年有成千上万的人们因为气候变化而死亡，同时也使得人类生存的生态环境受到很大的影响。气候变化不仅只是引起全球平均地表温度的升高和全球变暖，气候变化引起灾难的数量和严重程度都有所增加。这些灾难包括干旱、沙尘暴、洪水、热浪、飓风、热带风暴、龙卷风和野火。

近年来，气候变化对生态环境的影响受到全球各个国家的重视，因此，在生态文明建设布局中要考虑气候变化的影响，如建立包含经济社会发展特点及生态福祉功能的气候承载力评估框架，以城镇化气候效应、区域大气污染治理、流域生态环境、脆弱区保护等为重点研究领域，为国家重大战略政策制定提供科技支撑。

我国在不同的规划中也需进一步考虑完善重点生态功能区、生态环境敏感区和脆弱区等区域生态气象观测布局，提升对森林、草原、荒漠、湿地等生态区域的气象监测能力，建立生态气象灾害预测预警系统，加强极端气候事件、大气污染、水土流失与土地荒漠化等生态安全事件的气象预警。强化生态气象评估和生态安全气象保障，推进气候资源精细化评估和规划。

（6）冬季严重雾霾

雾霾是发生在大气近地面层中的一种灾害天气，由于雾霾天气发生时大气能见度降低，会对社会经济以及人民生活产生重要的影响；同时，雾霾天气发生时大气气溶胶聚集在大气近地层，使得大气污染增强，空气质量下降，会对人体健康造成重要危害。研究表明，雾和霾的长期变化趋势与人类活动和气候变化具有密切的联系，城市的扩张以及与其相关联的热岛效应的增强，可以使雾的发生频次在城区呈减少趋势，而在郊区呈增加趋势，城区浓雾发生频次的减少趋势除了与城市加热的增强趋势有关外，也与悬浮颗粒物的减少趋势有关。

中国雾日数有明显的季节和年代际变化，冬季最多、春季最少；在 20 世纪 70 到 90 年代较多，20 世纪 90 年代以后减少；而霾日数自 2001 年以来急剧增长。中国雾日数减少趋势的产生，与冬季日最低温度的升高以及相对湿度的减小趋势有关；霾日数的增加与人类活动导致的大气污染物排放量的增加趋势以及平均风速的减少趋势有密切的联系。另外，霾的变化趋势与经济活动的区域分布密切相关，在经济比较发达的中国东部和南部，霾日具有增加的趋势，而在经济相对滞后的东北和西北地区，霾日出现减少趋势。

关于中国雾霾天气的发生与气象因子之间的联系，已有研究主要集中在雾霾长期变化趋势与气象因子变化趋势之间的关系和局地气象条件与雾的生消演变过程以及与霾天气的联系上。同时，为防止雾霾天气的发生，国家制定了多种管控和环保措施，使得雾霾日逐渐减少。

（7）海洋微塑料污染的监控与防治

微塑料污染是近年备受关注的新兴全球性海洋环境问题。微塑料（粒径一般小于 5 mm）在包括极地在内的几乎所有海洋栖息地均有检出。其通常吸附有其他化学污染物且易被海洋生物摄食，可随食物链迁移富集，具有生态毒害效应。微塑料标准

化监测手段正趋于完善，环境样品经密度分离、消化后进行目视检测并结合傅里叶变换红外光谱或拉曼光谱分析是被广泛接受和使用的微塑料定性定量研究方法。基于规范可靠的检测技术，微塑料在海洋中的源汇过程与生态风险机制是世界研究者关注的热点科学问题；此外，纳米级微塑料可能具有更显著的生理生态毒性，对其高效监测的方法目前仍不完备。

微塑料污染的防治主要在政策立法和技术研发两个层面展开。在监管层面，政府管控强制回收塑料品资源化再利用，禁止在日化产品中添加微塑料颗粒等举措可有效减控塑料排放；在技术层面，聚乳酸等可生物降解的塑料制品可替代一部分传统塑料制品，高活力塑料降解生物（酶）等温和分解技术瓶颈的突破有望助力实现污染区域的环境修复。

（8）食品中有害物快速筛查与智能判别新技术

食品中外源和内源危害物种类繁多，有很多物质结构复杂，而且在食品加工过程中还会发生复杂的化学变化，其产物具有很大的不确定性，因此快速筛查和智能判别对于食品安全危害物的有效控制有着十分重要的意义。目前随着高分辨质谱等一系列新型分析仪器的应用以及检测数据的信息化分析手段的不断发展，为未知有害物的快速筛查提供了非常有力的技术平台，开发快速筛查和智能判别技术，解决未知有害物的快速定性和定量是需要持续创新的重要技术需求。

（9）高效油水分离材料的制备与应用

含油工业废水和生活污水的不断排放及海上溢油事故的频繁发生形成了大量的油水混合物，造成了严重的资源浪费、生态环境污染和经济损失，发展油水分离技术具有重要的实际意义和应用价值。水体中油类污染物的存在会隔绝水体与空气的交换以及阳光的正常入射，对水体的生态环境造成致命的伤害，而且石油中含有大量致突变和致癌的毒烃类化合物，它们会通过水生动植物摄入食物链传递而最终富集在人体内，严重威胁人类健康。因此，水体油污染是一项迫切需要解决的全球性问题。当油污进入水体后，其会形成浮油、分散油、乳化油和溶解油四种类型的油水混合物，其中浮油和分散油因其粒径较大而易于聚结成连续的油层，通过传统的吸附、沉降和机械撇油等方法可以较容易去除；而对于较稳定的乳化油和溶解油的分离，传统的破乳技术例如沉降法、生物法、超 / 微滤膜分离法等，虽然能够获得一定的分离效果，但是仍然存在能耗高、处理效率低的不足。目前世界各国都将油水分离技术作为研究重点，该领域的主要研究方向集中在纤维基高效油水分离膜的制备、新型高效油水分离材料的合成、超浸润油水分离体系的构建、陶瓷基 / 生物基油水分离材料的开发等方面。

（10）生物质能源

人类社会对能源的需求不断增长，但作为主要能量供给的化石能源日益紧缺。与此同时，因化石能源过度开发和利用带来的环境问题也日益突出。因此，开发新型可再生清洁能源成为人类社会实现可持续发展的首要选择。生物质能源是太阳能以化学能形式储存在生物质中的能量形式，即以生物质为载体的能量。生物质能源作为一种新型可再生能源，与传统化石能源相比具有资源丰富、可再生、低污染、安全等特点。通过对生物质能源的有效利用，可在满足能源需求的同时减少环境污染，因而生物质能源在改善能源供给结构方面具有巨大潜力。

发展生物质能源的关键核心是如何清洁、高效地利用生物质能源。目前，利用生物质能源的主要方式包括①生物质能发电：农林生物质发电、沼气发电、垃圾发电；②生物质供气：沼气、生物质气化气；③生物质固体燃料：将农林生物质制备成成型燃料；④生物质液体燃料：生物乙醇、生物柴油。然而，生物质能源的利用仍然存在诸多问题。未来，将扩大生物质能源在电力、供热和交通等领域的使

用规模，并进一步发展新型的生物质能源利用技术。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 纳米复合材料在废水处理中的应用

随着社会经济的发展，大量污染物排放至环境中，引发众多环境问题，如大气、土壤和水污染。大量未处理或处理不达标的污水直接排放，造成水环境的剧烈破坏，导致水质恶化、水质型缺水问题日益突出。水体中污染物种类繁多，常见污染物包括重金属、悬浮物、细菌病毒、放射性核素和有机染料等，由于水体中污染物的高毒、稳定性和难降解等特性，对生态环境和人类健康构成了极大威胁。因此，有效处理水体中的污染物成为环境领域的重要研究课题。

传统的水处理方法如吸附法、混凝法、活性污泥法等在实际应用中确实取得了一定的效果，但随着时间的推移显示出了各自的弊端，如处理效率低、成本高、能耗高、产生二次污染等。随着科学技术的进步，水处理技术的的革新已不仅仅局限于传统处理工艺技术方面的发展，许多新材料开始应用于水处理中，使得水处理技术迅速发展。其中纳米材料作为尖端材料的代表，以其比表面积大、活性位点多等优越性能以及广阔的发展空间引人注目，被认为是处理众多污染物的良好试剂。纳米光催化技术、纳滤膜技术、纳米还原性技术以及纳米吸附性技术在水处理领域都取得了一定的成就。

相比于单一组成的纳米材料，多种纳米材料复合而成的纳米复合材料在污染物去除方面通常具有更优越的性能，纳米复合材料在保持原组分性能的情况下，还可能会因为复合而产生原组分所不具备的新性能。此外，复合材料可以通过对原材料、各组分分布以及工艺条件等方面的设计，实现各组分的优势互补，最大限度地发挥优势。

随着纳米技术研究的不断深入、人们对环境的日益重视以及对水质要求的提高，纳米技术及材料在环境保护领域尤其是水处理方面的应用也会越来越广泛，纳米复合材料应用于废水处理必将对未来的环境保护以及可持续发展产生巨大的作用，具有广阔的应用前景。

“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区如表 1.2.1 所示。中国以 43 篇核心论文数、62.32% 论文比例居于第 1 位，表明众多的中国专家学者致力于该前沿的研究，该前沿在中国是重要且热门的研究课题。虽然中国在核心论文的“被引频次”方面仍位于第 1 位，但是美国在“篇均被引频次”方面高出中国近一倍，表明美国在该研究前沿的研究成果居于世

表 1.2.1 “纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	中国	43	62.32%	3329	77.42
2	美国	8	11.59%	1098	137.25
3	马来西亚	6	8.70%	416	69.33
4	印度	4	5.80%	263	65.75
5	伊朗	3	4.35%	209	69.67
6	沙特阿拉伯	3	4.35%	206	68.67
7	韩国	2	2.90%	135	67.50
8	意大利	2	2.90%	127	63.50
9	土耳其	2	2.90%	116	58.00
10	新加坡	2	2.90%	128	64.00

界前列，核心论文被引用较多。在核心论文的前十个主要产出国家 / 地区中，发展中国家占较高比例，反映出目前发展中国家受水环境污染的问题更为严重。

“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构如表 1.2.2 所示。湖南大学在“核心论文数”“论文比例”以及“被引频次”方面均以较大优势居于第 1 位。而在“篇均被引频次”方面，篇均被引超过 100 次的机构排名由高到低依次为中南大学、湖南大学、福州大学和华南理工大学，这一结果在一定程度上反映出中南大学在该研究前沿具有较高的实力和水平。

“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络如图 1.2.1 所示。中国、美国、马来西亚、伊朗和沙特阿拉伯与其他国家 / 地区的合作相对较多，其中中国与美国的合作最为密切，其次是与沙特阿拉伯。

“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿主要机构间的合作网络如图 1.2.2 所示。总体来看主要机构之间合作较少，湖南大学与中南大学、中国科学院与燕山大学有较为紧密的合作。此外，华南理工大学与中南大学、湖南大学，马来西亚工艺大学与南阳理工大学也存在合作关系。

“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区如表 1.2.3 所示。中国的“施引核心论文数”和“施

表 1.2.2　“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	湖南大学	9	13.04%	1064	118.22
2	华南理工大学	5	7.25%	531	106.20
3	中国科学院	5	7.25%	391	78.20
4	燕山大学	5	7.25%	450	90.00
5	中南大学	3	4.35%	470	156.67
6	马来西亚国民大学	3	4.35%	253	84.33
7	马来西亚工艺大学	3	4.35%	163	54.00
8	福州大学	2	2.90%	228	114.00
9	武汉理工大学	2	2.90%	169	84.50
10	南洋理工大学	2	2.90%	128	64.00

图 1.2.1　“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

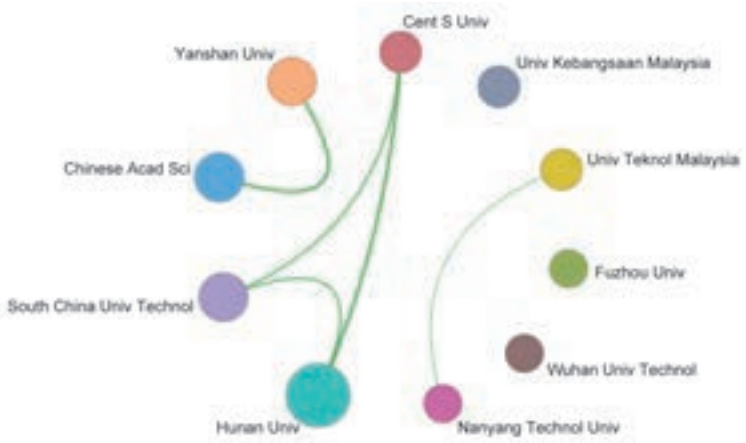

图 1.2.2 “纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	2726	55.95%	2017.5
2	美国	441	9.05%	2017.3
3	印度	423	8.68%	2017.5
4	伊朗	370	7.59%	2017.4
5	韩国	204	4.19%	2017.4
6	马来西亚	153	3.14%	2017.2
7	澳大利亚	141	2.89%	2017.3
8	沙特阿拉伯	140	2.87%	2017.1
9	新加坡	100	2.05%	2017.4
10	加拿大	88	1.81%	2017.5

引核心论文比例”均远超其他国家 / 地区，位居第 1 位。前十的国家 / 地区的“平均施引年”均为 2017 年。

“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构如表 1.2.4 所示。湖南大学和中国科学院的“施引核心论文数”和“施引核心论文比例”明显高于其他机构，分别位于第 1 位和第 2 位，两所机构之间差距较小。前十的机构“平均施引年”均为 2017 年。

1.2.2 气候变化与生态环境

气候变化不仅只是引起全球平均地表温度的升高和全球变暖，气候变化的影响也体现在许多方面，每年有成千上万的人们因为气候变化而死亡，同时也使得人类生存的生态环境受到很大的影响。气候变化对生态环境的影响受到全球各个国家的重视，中国也指出在生态文明建设布局中要考虑气候变化的影响。

为了解气候变化对全球各个方面的影响，政府间气候变化专门委员会已经发布了 5 次气候变化评估报告，包括气候变化的科学事实、影响和适应及减缓三个部分。同时，不定期发布气候变化对不同领域的影响评估报告，2019 年发布了《生物多样性和生态系统服务全球评估》报告、《气候变化与

表 1.2.4　“纳米复合材料在废水处理中的应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	湖南大学	280	23.53%	2017.8
2	中国科学院	273	22.94%	2017.5
3	中南大学	96	8.07%	2017.7
4	江苏大学	81	6.81%	2017.5
5	中国科学院大学	75	6.30%	2017.8
6	伊斯兰阿扎德大学	71	5.97%	2017.2
7	哈尔滨工业大学	70	5.88%	2017.5
8	华南理工大学	69	5.80%	2017.9
9	马来西亚工艺大学	59	4.96%	2017.3
10	天津大学	59	4.96%	2017.3

土地特别报告》以及《关于气候变化中海洋与冰冻圈特别报告》。《气候变化与土地特别报告》显示，更好的土地管理有助于应对气候变化，随着人口增加和气候变化对植被的负面影响增加，土地必须保持生产力以维持粮食安全。《关于气候变化中海洋与冰冻圈特别报告》旨在评估气候变化将如何影响海洋和海洋生物，以及水以固态形式存在的地区，例如极地或高山地区，还评估了气候变化对世界各地社区的影响，以及为实现更可持续的未来而适应气候变化的选择。报告中评估的知识概述了世界各地的人们当前经受的以及未来后代将面临的气候相关风险和挑战，提出了对无法避免的各种变化的适应方案、管控相关风险的方案以及为可持续未来打造复原力的方案。

目前该领域的研究除了气候变化对土地和海洋冰冻圈的影响外，在建立包含经济社会发展特点及生态福祉功能的气候承载力评估、城镇化气候效应、区域大气污染治理、流域生态环境、脆弱区保护等方面的研究也正在开展。

表 1.2.5 是该工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区，可以发现无论是论文比例还是被引频次比例，美国均排名第 1，其他国家与美国有不小的差距，说明美国在这方面具有较大的研究优势。我国在这方面核心论文数相对较少，排在第 6 位。在主要产出国家或地区合作网络中（见图 1.2.3），各个国家都与美国有着广泛的合作，且多个国家之间也合作频繁。

表 1.2.6 是该工程研究前沿中核心论文的主要产出机构，核心论文数排名第 1 的机构在中国。根据主要机构间合作网络（见图 1.2.4）可以看出，Chinese Acad Sci 与 NOAA、Columbia Univ、Natl Ctr Atmospher Res 等 9 个机构间都有合作关系，且这 10 各机构之间的合作也很密切。

在施引核心论文的国家或地区排名中，中国排名第 5，与排名第 1 的美国仍有不小的差距（见表 1.2.7）；中国科学院在施引核心论文的机构排名中位列第 1（见表 1.2.8）。

由此可以看出，美国在“气候变化与生态环境”的研究上不仅领先于全球，而且和其他国家有着密切的合作，但中国科学院在该领域的研究机构中也处于领先的地位，应继续保持该前沿的相关研究状态。

1.2.3　高效油水分离材料的制备与应用

含油工业废水和生活污水的不断排放及海上溢油事故的频繁发生形成了大量的油水混合物，造成

表 1.2.5 “气候变化与生态环境”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	847	60.50%	190 153	62.61%	224.50
2	UK	455	32.50%	108 554	35.74%	238.58
3	Australia	311	22.21%	76 281	25.12%	245.28
4	Germany	299	21.36%	75 125	24.74%	251.25
5	France	252	18.00%	60 795	20.02%	241.25
6	China	224	16.00%	50 343	16.58%	224.75
7	Canada	217	15.50%	54 853	18.06%	252.78
8	Netherlands	207	14.79%	53 571	17.64%	258.80
9	Switzerland	177	12.64%	46 432	15.29%	262.33
10	Sweden	143	10.21%	36 842	12.13%	257.64

表 1.2.6 “气候变化与生态环境”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Chinese Acad Sci	100	7.14%	22 942	7.55%	229.42
2	NOAA	93	6.64%	19 773	6.51%	212.61
3	Columbia Univ	80	5.71%	20 041	6.60%	250.51
4	Natl Ctr Atmospher Res	71	5.07%	16 546	5.45%	233.04
5	NASA	71	5.07%	15 969	5.26%	224.92
6	Univ Maryland	69	4.93%	18 395	6.06%	266.59
7	Univ Washington	64	4.57%	16 506	5.43%	257.91
8	Univ Exeter	63	4.50%	14 846	4.89%	235.65
9	Univ Calif Berkeley	62	4.43%	14 244	4.69%	229.74
10	Univ Colorado	61	4.36%	15 725	5.18%	257.79

注：NOAA 表示 National Oceanic and Atmospheric Administration US Department of Commerce；NASA 表示 National Aeronautics and Space Administration。

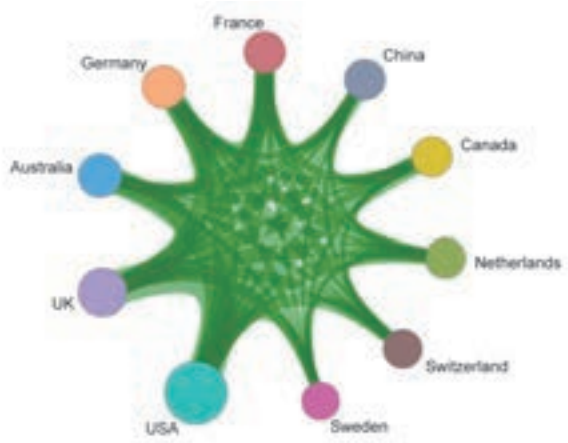

图 1.2.3 “气候变化与生态环境”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

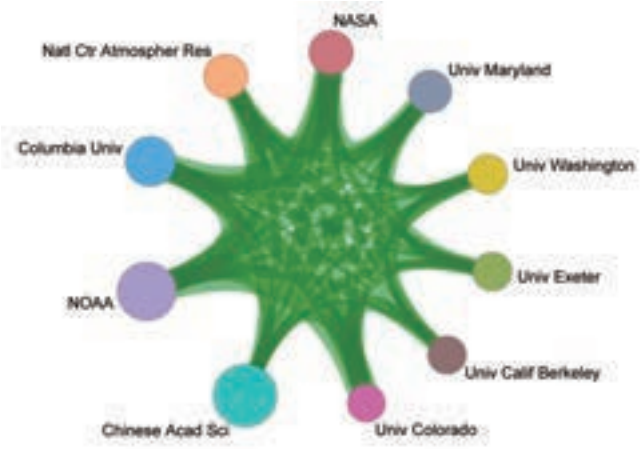

图 1.2.4 “气候变化与生态环境”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7　“气候变化与生态环境”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	997	25.02%	2014.8
2	UK	530	13.30%	2014.9
3	Germany	377	9.46%	2014.9
4	Australia	365	9.16%	2015.0
5	China	343	8.61%	2015.3
6	France	287	7.20%	2014.9
7	Canada	261	6.55%	2015.0
8	Netherlands	256	6.42%	2015.1
9	Switzerland	220	5.52%	2015.0
10	Spain	181	4.54%	2015.1

表 1.2.8　“气候变化与生态环境”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	110	11.98%	2015.1
2	Univ Calif Berkeley	91	9.91%	2014.8
3	Stanford Univ	87	9.48%	2015.1
4	Univ Washington	87	9.48%	2015.4
5	Univ Oxford	86	9.37%	2015.5
6	Univ Colorado	82	8.93%	2015.1
7	Columbia Univ	81	8.82%	2015.1
8	NOAA	81	8.82%	2014.5
9	Univ Maryland	72	7.84%	2015.2
10	Harvard Univ	71	7.73%	2015.5

了严重的资源浪费、生态环境污染和经济损失，发展油水分离技术具有重要的实际意义和应用价值。水体中油类污染物的存在会隔绝水体与空气的交换以及阳光的正常入射，对水体的生态环境造成致命的伤害，而且石油中含有大量致突变和致癌的毒烃类化合物，它们会通过水生动植物摄入食物链传递而最终富集在人体内，严重威胁人类健康。因此，水体油污染是一项迫切需要解决的全球性问题。当油污进入水体后，其会形成浮油、分散油、乳化油和溶解油四种类型的油水混合物，其中浮油和分散油因其粒径较大而易于聚结成连续的油层，通过传统的吸附、沉降和机械撇油等方法可以较容易去除；而对于较稳定的乳化油和溶解油的分离，传统的破乳技术例如沉降法、生物法、超 / 微滤膜分离法等，虽能够获得一定的分离效果，但是仍然存在能耗高、处理效率低的不足。目前世界各国都将油水分离技术作为研究重点，该领域的主要研究方向集中在纤维基高效油水分离膜的制备、新型高效油水分离材料的合成、超浸润油水分离体系的构建、陶瓷基 / 生物基油水分离材料的开发等方面。

通过对“高效油水分离材料的制备与应用”研究前沿核心论文的解读发现，该研究前沿下核心论

文篇均被引频次高达 94.00 次（见表 1.1.1）。其中，该研究前沿主要研究地区为中国、新加坡和美国，其中中国发表的核心论文数占全球所有地区的 64.71%，篇均被引频次 92.45 次，占据领跑地位（见表 1.2.9）；新加坡、美国、沙特阿拉伯在该领域合作较为密切，而中国在该领域具有较强的独立研发能力（见图 1.2.5）。在产出机构方面，新加坡国立大学（Natl Univ Singapore）、东华大学（Donghua Univ）、东北林业大学（Northeast Forestry Univ）占据核心论文发表数量前三位，篇均被引频次前三位的机构则是南阳理工大学（Nanyang Technol Univ）、东华大学（Donghua Univ）、上海交通

表 1.2.9 “高效油水分离材料的制备与应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	China	11	64.71%	1017	92.45
2	Singapore	4	23.53%	448	112.00
3	USA	3	17.65%	212	70.67
4	Saudi Arabia	1	5.88%	84	84.00
5	Japan	1	5.88%	58	58.00

表 1.2.10 “高效油水分离材料的制备与应用”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次
1	Natl Univ Singapore	3	17.65%	206	68.67
2	Donghua Univ	2	11.76%	363	181.50
3	Northeast Forestry Univ	2	11.76%	172	86.00
4	Nanyang Technol Univ	1	5.88%	242	242.00
5	Shanghai Jiao Tong Univ	1	5.88%	100	100.00
6	King Abdullah Univ Sci & Technol	1	5.88%	84	84.00
7	Kraton Polymers LLC	1	5.88%	84	84.00
8	Univ Akron	1	5.88%	75	75.00
9	China Univ Petr	1	5.88%	72	72.00
10	Natl Engn & Technol Res Ctr Wood Based Resources	1	5.88%	70	70.00

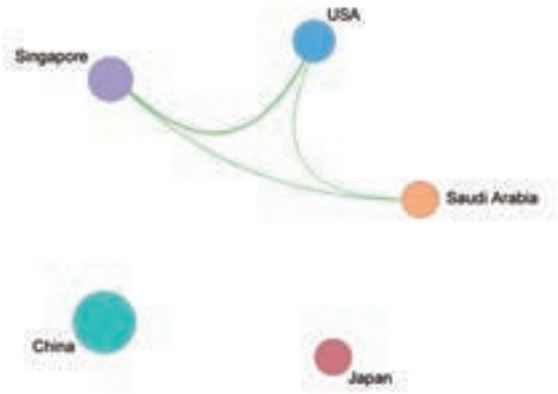

图 1.2.5 “高效油水分离材料的制备与应用”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

大学（Shanghai Jiao Tong Univ）（见表 1.2.10）；主要研发机构更倾向于独立研发，只有 Natl Univ Singapore、King Abdullah Univ Sci & Technol、Kraton Polymers LLC 三家机构进行过合作研发（见图 1.2.6）。

从施引核心论文的前十国家或地区及研究机构排名来看，中国、美国、新加坡、加拿大等国对该研究前沿的关注度较高，特别是中国的研究机构在前十中占据了 9 位（见表 1.2.11 及表 1.2.12）。

综上所述，我国在高效油水分离材料的制备与应用研究领域处于领跑地位，但是地区合作较少，建议继续加大在该前沿的合作研究投入，带动世界相关研究水平的加速发展。

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿发展态势

环境领域组所研判的 Top 10 工程开发前沿见表 2.1.1，前沿涉及了环境科学工程、气象科学工程、海洋科学工程、食品科学工程、纺织科学工程以及轻工科学工程 6 个学科方向。其中，各工程开发前沿自 2013 年至 2018 年的逐年核心专利公开量见

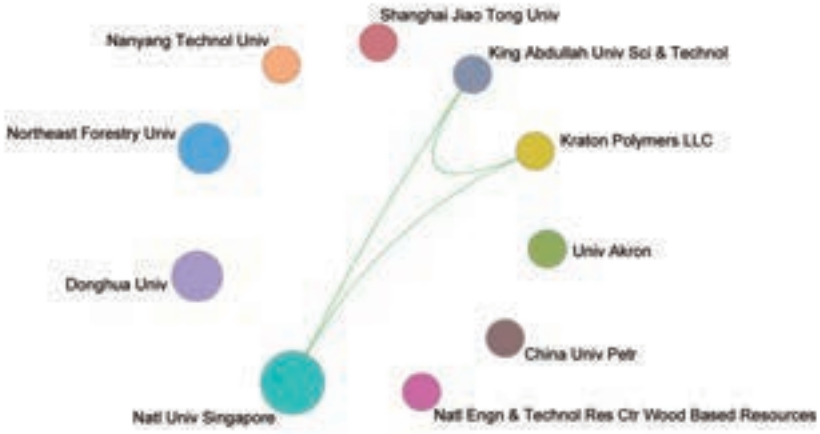

图 1.2.6 “高效油水分离材料的制备与应用”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “高效油水分离材料的制备与应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	918	66.96%	2017.5
2	USA	115	8.39%	2017.5
3	Singapore	57	4.16%	2016.9
4	Canada	48	3.50%	2017.8
5	India	46	3.36%	2017.6
6	Japan	38	2.77%	2017.2
7	South Korea	36	2.63%	2017.1
8	Saudi Arabia	31	2.26%	2016.8
9	Australia	30	2.19%	2016.9
10	UK	26	1.90%	2017.5

表 1.2.12 “高效油水分离材料的制备与应用”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	116	24.89%	2017.3
2	Donghua Univ	66	14.16%	2016.9
3	Univ Chinese Acad Sci	46	9.87%	2017.3
4	South China Univ Technol	40	8.58%	2017.7
5	Hubei Univ	31	6.65%	2017.3
6	Harbin Inst Technol	30	6.44%	2017.5
7	Natl Univ Singapore	30	6.44%	2016.3
8	Jiangsu Univ	30	6.44%	2017.9
9	Soochow Univ	27	5.79%	2017.5
10	Zhejiang Univ	26	5.58%	2017.0

表 2.1.1 环境领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	多技术协同土壤污染修复	1119	1170	1.05	2016.6
2	用于污水处理的复合微生物活菌制剂	117	92	0.79	2016.7
3	环境纳米催化材料	1000	5022	5.02	2015.5
4	膜分离材料与工艺开发	47	158	3.36	2014.4
5	智能化天气预报技术	744	5376	7.23	2015.8
6	海洋能高效综合利用技术	1258	8690	6.91	2015.5
7	海洋环境立体观测技术	1301	3103	2.39	2016.1
8	食源性致病微生物快速精准检测技术	1000	17 494	17.49	2012.9
9	纤维基 3D 打印技术	3147	12 351	3.92	2016.4
10	生物质能源转化技术	1000	19 943	19.94	2012.8

表 2.1.2 环境领域 Top 10 工程开发前沿的逐年核心专利公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	多技术协同土壤污染修复	32	72	111	200	235	444
2	用于污水处理的复合微生物活菌制剂	2	4	16	23	32	40
3	环境纳米催化材料	51	61	60	118	252	305
4	膜分离材料与工艺开发	2	11	2	10	5	7
5	智能化天气预报技术	53	51	84	152	139	206
6	海洋能高效综合利用技术	190	213	198	270	217	170
7	海洋环境立体观测技术	132	138	158	240	293	340
8	食源性致病微生物快速精准检测技术	82	93	98	122	99	140
9	纤维基 3D 打印技术	99	155	379	559	863	1008
10	生物质能源转化技术	134	144	100	95	65	27

表 2.1.2。

（1）多技术协同土壤污染修复

近年来我国土壤污染与环境风险问题日益凸显，部分地区土壤污染严重，污染类型多样，呈现新－老污染物并存、无机－有机污染复合、多介质（土壤－水）污染等特性，传统单一修复治理技术无法很好进行土壤污染修复。因此，亟需发展多技术协同土壤污染修复技术。

传统土壤修复技术包括物理修复、化学修复和生物修复，存在污染物类型或修复时间 / 成本局限性。多技术协同土壤修复体系如化学氧化协同微生物降解有机污染物、气相抽提－热脱附组合修复技术、洗脱－强化微生物修复组合技术，相比单一处理技术能更好的适应不同类型复合污染物处置，同时能处置多介质如土壤－地下水污染。近年来多技术协同土壤污染技术迅速发展，专利数由 2013 年的 32 项上升到 2018 年的 444 项，呈逐年提升状态，修复技术逐渐从单一污染物的处理向多种污染物及重金属－有机物复合污染处理转变，异位、固定式修复装备向原位、自动化、智能化装备转变，污染物去除向过程调控－末端治理联合调控转变。

我国在多技术协同土壤污染修复方面尚缺乏集成的一体化技术与装备，原创技术少。同时，缺乏针对特殊高风险污染场地如电子拆解垃圾场地、高浓度石油污染土壤场地等的集成修复技术示范。模块化、自动化、智能型的高效联合修复一体化技术与装备仍是未来需要发展的重点。

（2）用于污水处理的复合微生物活菌制剂

复合微生物菌剂一般是由多种不同类型且具有降解污染物功能的微生物组成，是一种互利共存的混合生物体，通过微生物的生长代谢将污染物逐渐降解，从而达到净化污水的目的。微生物菌剂中菌种的获取途径主要有以下几种：①直接向菌种保藏机构购买；②从自然环境中筛选野生型菌种；③利用基因工程手段对微生物的降解性能进行改造或构建；④通过驯化，诱导出微生物的特定代谢途径，从而获得降解特定化合物的菌种。相比于传统的污水处理技术，微生物菌剂可以直接投加到污水中，不需要任何额外的设备或工艺，具有操作方便、经济高效、应用范围广、无二次污染等明显优势，已被应用于工业、农业、医药和畜牧业等污水处理过程。虽然有很多微生物菌剂处理污水的相关研究成果和专利，但是，国内的微生物菌剂研发仍存在产品种类分散、产品处理效果受环境因素影响等问题，因此还需要进一步研究特异高效且价格低廉的具有本土特色的复合微生物菌剂，并且使产品使用规范化，避免滥用错用造成经济损失及生态平衡失调。

（3）环境纳米催化材料

纳米材料指至少某一维度的尺寸在 1~100 nm 范围的材料。纳米金属氧化物、纳米贵金属、纳米碳材料等众多纳米材料因具有高比表面积和反应活性，在催化污染物降解转化等方面具有巨大的优势，成为环境催化材料开发的热点。该开发前沿主要包括以下方向：①纳米光催化材料，尤其是可见光响应型纳米材料，用于降解甲醛等气态污染物及水中染料等污染物；②三元催化纳米材料，用于将机动车尾气中的 CO、烃类和 NO_x 等有害气体通过氧化还原转化为 CO_2、N_2 和水；③大气污染控制催化材料，用于烟气处理等；④水处理纳米催化材料，用于催化臭氧氧化、芬顿氧化等；⑤电催化纳米材料，用于催化产氢等。开发的材料种类主要包括：稀土纳米催化材料、铋系纳米催化材料、过渡金属氧化物纳米催化材料、石墨相氮化碳复合材料、石墨烯复合材料、量子点催化材料、磁性纳米催化材料等。

为解决纳米催化材料工程应用操作困难的应用瓶颈问题，普遍采用适宜的大尺寸多孔载体将纳米颗粒固定化制备复合材料。根据不同的应用场景，载体还需满足耐高温、耐氧化等稳定性要求，应用较成熟的载体包括蜂窝陶瓷、多孔瓷球、陶粒等。发展新型多孔载体－纳米颗粒复合技术，发挥载体除支撑作用以外的如污染物预富集、纳米颗粒催化

活性调控等功效具有重要意义。

（4）膜分离材料与工艺开发

膜分离技术广泛应用于水处理领域，主要用于工业污水再生利用、市政污水处理、市政饮用水处理、海水淡化等。影响膜分离技术能效的关键在于膜材料和工艺，未来膜分离技术发展热点和前沿主要集中在高性能膜材料及膜组件研发、膜分离工艺及反应器开发与优化。

膜材料研发：我国目前在超滤、微滤、纳滤和离子交换等技术涉及的聚合物膜材料研发生产方面已有一定的技术基础和产业规模，但在气体膜、液膜、高选择性纳滤和反渗透膜等领域相对薄弱。我国在用于海水淡化和浓盐水减排零排的反渗透膜方面，其特殊离子脱除、温度敏感性、吨制水能耗、长期运行稳定性等与国外产品仍存在差距。纳米新材料复合技术、两相界面精细控制技术、低流阻技术是解决上述问题，缩短差距的关键。此外，对膜分离技术来说，水质特征的多样化要求膜材料具备广谱耐污染性，因此混合基质膜材料和新型结构设计膜材料方面的研究正逐步得到重视，成为近几年膜材料研发的热点之一。

膜组件研发：低压 / 超低压抗污染膜组件研发是主要方向，目的在于提高膜组件的处理能力和使用寿命，解决阻塞膜污染问题。对此，膜组件制备工艺的开发和优化成为热点，通过改造涂布方式，研发在线检测技术，研发自动卷膜机等硬件设施可提升膜组件的分离性能、均一性和稳定性。除膜组件研发外，我国膜分离系统和组件相关的泵、阀、能量回收器、压力容器等关键零部件也亟待摆脱对进口的依赖，形成自有技术和产品。

膜分离工艺优化：随着近年工业水回用和浓盐水减排要求及标准的不断提升，膜系统集成耦合和减排零排技术对膜工艺提出了低耗高效需求。例如连续微滤 / 连续超滤（CMF/CUF）+ 反渗透耦合工艺，在海水淡化和污水回用领域具有应用优势和潜力。CMF/CUF 过程无需加入絮凝剂、杀菌剂和余氯脱除剂等药剂即可改进后续反渗透进水水质，具有延长反渗透膜使用寿命，提高系统回收率，减少设备占地面积和操作费用，降低劳动强度，实现自动化控制等优点。厌氧膜生物反应器在低耗高效处理高浓度有机废水和市政污水方面具有很好的应用前景，如何控制膜污染并规模化的工程应用是未来的研究重点。

（5）智能化天气预报技术

天气预报是预测科学，不可能实现 100% 的精准。天气预报的本质是根据已知的气象条件，用超级计算器进行海量数据计算，但计算结果与真实天气状况之间不可避免存在偏差。把天气预报得更准确，就是一个不断缩小计算结果与真实情况差距的过程，这是现实世界中的难题。天气预报主要依赖于大数据，涉及到不同时间和空间上的海量数据，正是人工智能非常好的应用场景。一方面，充足的气象大数据为人工智能技术的进步提供了支撑；另一方面，人工智能技术的应用，将有力推动天气预报数据计算结果精准度和计算速度的提升，使得“天气预报越来越准”。人工智能为天气预报提供了一种解决难题的新思路。日前，日本一研究团队利用深度学习技术，开发了新的高精度识别方法，可以识别出西北太平洋台风高发季热带低气压发生一周前的特征，从而为台风的产生提供判定依据。人工智能提前一周预测台风，瞬间引起了巨大关注。人工智能算法把超级计算机的预报结果尽可能地、自动地、不用人工干预地修正到与实际观测数据更接近，可以达到“天气预报越来越准”的终极目标。

在人工智能领域，算力、算法、数据缺一不可。气象部门的高性能计算机为智能化天气预报的开展奠定了基础。

（6）海洋能高效综合利用技术

海洋能指依附在海水中的可再生能源，海洋通过各种物理过程接收、储存和散发能量，这些能量以潮汐能、波浪能、海洋温差能、海洋盐差能、海流能等形式存在于海洋之中。海洋能的利用是指利

用一定的方法、设备把各种海洋能转换成电能或其他可利用形式的能。由于海洋能具有可再生性和不污染环境等优点，因此是一种亟待开发的具有战略意义的新能源。

目前，海洋能高效综合利用技术领域的热点和主要研究方向包括：国际潮汐能技术、国际潮流能技术、国际波浪能技术、国际温差能技术、国际洋流能技术与盐差能技术。

各种海洋能的蕴藏量是巨大的，据初步估计，我国海洋能理论装机容量的总和超过 20 亿 kW，是 2007 年我国电力总装机容量的三倍，开发利用潜力巨大。海洋能产业已经初现雏形，海洋能发电装置装机成本已呈现快速下降的趋势，加快了海洋能技术产业化的步伐。

（7）海洋环境立体观测技术

海洋环境立体观测技术是指用于研究海洋环境动态变化的设备和技术，包括卫星和飞机、水面调查观测船、水面锚系浮标、水下潜标、漂流浮标、水下移动观测平台、海底观测平台、岸基台站观测等平台及其传感器系统和数据传输网络等，实时或准实时获取各种海洋环境信息，实现海洋环境立体观测。海洋环境立体观测技术发展是未来海洋科技发展的关键之一。

目前，海洋环境立体监测技术领域的热点和主要研究方向包括：卫星遥感海洋环境观测的多参数、宽范围、实时化、立体化；传感器及探测装备的小型化、智能化、标准化、产业化；海洋组网观测的全球化、层次化、综合化与智慧化。

当今，国际上已经有相对比较成熟的全球计划框架，我国也开展了建设国家综合海洋观测网的规划。长远来看，面向海洋活动需求，以海洋信息服务为中心，多平台组成的自适应海洋环境立体观测网络仍然是海洋环境立体观测技术的主要发展方向。

（8）食源性致病微生物快速精准检测技术

随着我国食品消费模式的变化，食源性致病微生物风险逐渐增加，是未来我国食品安全的主要风险因素。食源性致病菌的快速检测一直是微生物风险控制的难题。现有的检测技术主要是基于分子生物学技术发展起来的，如脉冲场凝胶电泳、环介导等温扩增技术等，但是由于使用条件相对苛刻，使得这些方法在应用方面受到限制。目前亟需发展非分子生物检测技术，开发适合于在线快速定性的食源性致病菌控制技术，以有效保障食品消费安全。

（9）纤维基 3D 打印技术

3D 打印技术是以数字模型文件为基础，添加打印墨水，从线到面，从面到体的一体化快速成型技术，可以个性化定制所需的形状。纤维基 3D 打印技术就是以纤维基材料为原料制备打印墨水，通过 3D 打印技术定制我们所需的样品结构。因 3D 打印技术所打印的是交织的纤维状结构，一般为微米级，可以实现从微观到宏观的结构调控，所以适合做一些特殊的编织结构。目前，纤维基 3D 打印的主要技术方向是智能可穿戴纺织品、柔性电子元件、高性能复合材料等。人体生物信号的采集与监测、一体化定制电子器件以及通过取向实现对材料的增强作用都是其主要的应用方向。采用复合型墨水进行打印，实现多组分的打印同时赋予样品独特的性能将会是未来的一个趋势。因其应用领域的广泛性和先进性，纤维基 3D 打印技术的发展令人期待。

（10）生物质能源转化技术

煤、石油、天然气等化石能源不可再生，且其使用过程中存在污染排放等环境问题，因此开发新型的绿色能源是人类社会未来解决能源需求和环境问题需要突破的重大关键技术。生物质能源在绿色能源的开发中占有重要地位，是未来可能替代化石能源的主要可再生清洁能源之一。

生物质能源转化主要是利用生物化学法、物理法、热化学法等技术将生物质能源转化为二次能源，其二次能源的形式包括：热量或电力、固体燃料（木炭或成型燃料）、液体燃料（生物柴油、甲醇、乙

醇、植物油等）和气态燃料（氢气、生物质燃气和沼气）等。生物质的种类繁多，因此适用于不同类型生物质能源转化利用的技术不同，而当前生物质能源转化利用技术在实用性和经济性方面仍存在诸多挑战。因此，开发经济、高效的生物质能源转化技术，推动生物质能源的产业化发展，是今后相当一段时间内该领域的重要研究方向。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 多技术协同土壤污染修复

土壤污染通常具有区域性、复合性、多介质性等污染特征。传统物理、化学和生物修复技术存在污染物类型、修复时间或成本等局限性，难以高效、经济、绿色解决复合土壤污染修复问题，为此，多技术协同土壤污染修复技术应运而生。当前多技术协同土壤污染修复专利主要分为四部分：集热脱附、气相抽提、淋洗、氧化一体化处置设备的设计、固化 / 稳化 – 降解新材料（专性微生物菌剂、生物炭、纳米材料、生物质 – 矿物等复合材料）联合修复技术、土壤修复装置的改良与能量优化（电、微波、太阳能、等离子体）、化学修复 – 微生物 / 植物协同修复。

近几年来，我国土壤修复产业迅速发展，研发投入在全世界名列前茅，多技术协同土壤污染修复技术不断创新。如表 2.2.1 所示，近 5 年来的 1119 项土壤有机污染修复治理技术的核心专利中，我国公开量高达 998 项，占所有公开专利的 73.16%。其次为日本和韩国，公开量分别为 40 项和 33 项，我国多技术协同土壤污染修复专利总量远高于日本、美国等发达国家。

从被引频次上看（见表 2.2.1），我国专利篇均被引频次仅为 0.86，远低于美国、日本等发达国家，多技术协同土壤污染修复技术原创仍较少，创新不足，影响力不够；从专利相关度来看（见图 2.2.1），美国与日本的关联度较强，而我国与其他发达国家间没有合作关系；从专利内容上看，美国日本等发达国家专利主要集中于源头调控处置、修复材料再生等末端治理技术，而我国集中于化学 – 生物联合修复中降解新材料的开发及一体化修复设备的研制，发达国家一体化修复技术与装备开发已较为成熟，而我国仍处于探索阶段。加强国际交流协作，开发具有自主知识产权，基于源头、过程调控 – 末端治理的集成式一体化修复技术与装备体系势在必行。

从排名前十的核心专利产出机构看（见表 2.2.2），均为我国机构，且大部分为公司，标志着多技术协同土壤污染修复技术市场化已逐渐趋于成熟。排名

表 2.2.1 “多技术协同土壤污染修复”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	数量	比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	998	89.19%	856	73.16%	0.86
2	Japan	40	3.57%	186	15.90%	4.65
3	South Korea	33	2.95%	22	1.88%	0.67
4	USA	16	1.43%	41	3.50%	2.56
5	Taiwan of China	9	0.80%	0	0.00%	0.00
6	Canada	6	0.54%	5	0.43%	0.83
7	Russia	6	0.54%	0	0.00%	0.00
8	Belgium	2	0.18%	48	4.10%	24.00
9	Australia	2	0.18%	24	2.05%	12.00

第 1 的为江苏盖亚环境科技股份有限公司（GSJY），主要进行原位及异位土壤修复设备、土壤修复专用药剂开发；排名第 2、第 5 为成都圣灵生物科技有限公司（CDSL）和江苏世邦生物工程科技有限公司（JSSB），主要从事土壤修复微生物菌剂及材料研究；排名第 3、4 为青岛理工大学（UNQT）和湖南农业大学（UYAG），专利公开量分别为 10 项和 7 项，主要研究高风险石油污染场地以及重金属–有机物复合污染土壤的修复技术、生物炭–植物联合修复技术。

图 2.2.2 显示本焦点专利技术主要产出高校及企业间没有研发合作关系，产业化程度较低，针对多技术协同土壤污染修复的产–学–研合作仍有很大空间。公开专利主要集中于化学–生物联合修复中微生物菌剂及新材料的开发，仍然缺乏关于一体化技术与装备的研制。值得一提的是，科技信息公

表 2.2.2 “多技术协同土壤污染修复”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	JSGY	21	1.88%	21	1.79%	1.00
2	CDSL	11	0.98%	8	0.68%	0.73
3	UNQT	10	0.89%	4	0.34%	0.40
4	UYAG	7	0.63%	14	1.20%	2.00
5	JSSB	7	0.63%	0	0.00%	0.00
6	SHGI	6	0.54%	6	0.51%	1.00
7	HSFH	6	0.54%	2	0.17%	0.33
8	ZZSQ	6	0.54%	0	0.00%	0.00
9	CAGS	5	0.45%	14	1.20%	2.80
10	UYHD	5	0.45%	14	1.20%	2.80

注：JSGY 表示 Jiangsu Gaiya Environmental Sci. & Techno.; CDSL 表示 Chengdu Shengling Biotechnology Co., Ltd.; UNQT 表示 Univ. Qingdao Technological; UYAG 表示 Hunan Agricultural University; JSSB 表示 Jiangsu Shibang Bioengineering Technology; SHGI 表示 Shanghai Geotechnical Investigation; HSFH 表示 Hanshan Fenghua Supply &Marketing Co., Ltd.; ZZSQ 表示 Zhengzhou Souqu Information Technology; CAGS 表示 Shandong Academy of Agricultural Sciences Agri-food Institute; UYHD 表示 Univ. North China Electric Power。

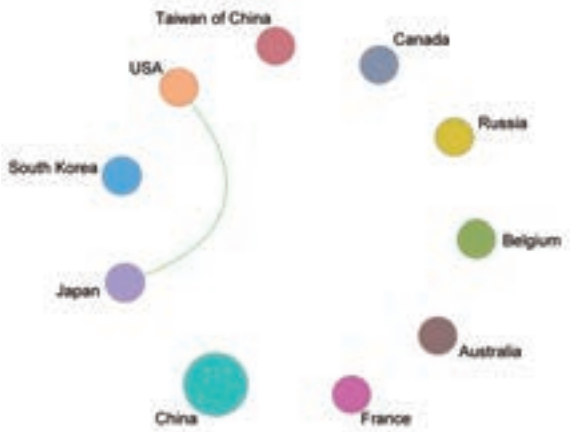

图 2.2.1 “多技术协同土壤污染修复”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

图 2.2.2 “多技术协同土壤污染修复”工程开发前沿的主要机构间合作网络

司开始进军土壤修复行业，主要集中在土壤修复装备中芯片及进程化操作开发，标志着我国土壤修复行业已经逐步迈向模块化、自动化及智能化。

2.2.2 海洋能高效综合利用技术

海洋能是指依附在海水中的可再生能源，包括：潮汐能、波浪能、海洋温差能、海洋盐差能和海流能等，更广义的海洋能源还包括海洋上空的风能、海洋表面的太阳能以及海洋生物质能等。按储存形式又可分为机械能、热能和化学能。海洋能具有蕴藏量大、可持续利用、绿色清洁等特点，是全球应对化石能源短缺以及气候变暖，发展清洁能源、调整能源结构的重要选择之一。

根据国际可再生能源署（IRENA）发布的研究报告（2014 年 8 月），国际潮汐能技术是海洋能技术中最为成熟的技术，其技术程度（TRL）达到 9 级（商业化运行阶段）；国际潮流能 TRL 达 7~8 级（全比例样机实海况测试阶段）；国际波浪能 TRL 达 6~7 级（工程样机实海况测试阶段）；国际温差能 TRL 达 5~6 级（实海况测试阶段）；国际洋流能技术与盐差能 TRL 达 4~5 级（实验室技术验证阶段）。

海洋能产业已现雏形，国际海洋能产业相关机构已达 2500 余家；海洋能发电装置装机成本已呈现快速下降的趋势，加快了海洋能技术产业化的步伐。当前国际海洋能技术尚未进入规模化应用阶段，为赶超国际先进水平，我们应紧抓“建设海洋强国”与“建设 21 世纪海上丝绸之路”战略机遇，通过示范工程的稳定运行带动技术发展，加速海洋能产业培育，为大规模海岛开发和深远海开发提供有效的能源保障。

海洋能蕴藏量巨大，其估算总量约有 750 亿 kW，其中波浪能为 700 亿 kW，温差能为 20 亿 kW，海流能为 10 亿 kW，盐度差能为 10 亿 kW。据初步估计，我国近海风能、潮汐能、波浪能、潮流能、盐差能及南海温差能理论装机容量的总和超过 20 亿 kW，是 2007 年我国电力总装机容量的三倍，开发利用潜力巨大。

表 2.2.3 是“海洋能高效综合利用技术”核心专利的主要产出国家 / 地区。我国在核心专利公开量上排名第二，与排名第一的日本差距不大。但是，我国公开专利的平均被引数却是前十国家里最少的，被引数比例仅占 1.21%，与排名第一的美国有不小的差距。这也从侧面说明我国在该领域虽然拥有不少的核心专利，但是专利缺乏创新，影响力不足。我国在该领域的技术水平仍有待提高。从“海

表 2.2.3 “海洋能高效综合利用技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	Japan	233	18.52%	1330	15.30%	5.71
2	China	202	16.06%	105	1.21%	0.52
3	South Korea	199	15.82%	116	1.33%	0.58
4	USA	164	13.04%	2517	28.96%	15.35
5	UK	104	8.27%	1761	20.26%	16.93
6	Germany	88	7.00%	1089	12.53%	12.38
7	France	45	3.58%	266	3.06%	5.91
8	Norway	43	3.42%	419	4.82%	9.74
9	Ireland	20	1.59%	272	3.13%	13.60
10	Sweden	20	1.59%	87	1.00%	4.35

洋能高效综合利用技术”工程开发前沿国家间的合作网络图（见图 2.2.3）可看出，平均被引数排名靠前的美国、英国和德国都和两个国家存在合作关系，而中国仅与美国存在合作关系。

表 2.2.4 为核心专利主要产出机构，其中排名前三的机构分别为：GENE（116）、SIEI（48）和 RORO（29），它们均为欧美的机构。我国的“Wuxi Jintianyang Laser Electronic Co., Ltd.”机构排在第 8 位，但是专利的被引数仅为 5，是前 10 中最少的。图 2.2.4 给出了该开发前沿各个机构机构间的合作网络图，可以看出该开发前沿在各个机构或者企业间之间的研发合作关系很弱，只有 GENE 和 CONV 存在合作关系，而这两家机构的专利被引数量也是排名最前的。这说明我们应该进一步加强和其他国家、机构间的交流合作，才能进一步提升我国在这一领域的创新能力。

2.2.3　食物性致病微生物快速精准检测技术

随着食品供应体系的发展，直接进入家庭的食品半成品乃至即食食品消费量快速增长，微生物安全

表 2.2.4 “海洋能高效综合利用技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数	平均被引数
1	GENE	116	9.22%	2442	28.10%	21.05	21.05
2	SIEI	48	3.82%	766	8.81%	15.96	15.96
3	RORO	29	2.31%	161	1.85%	5.55	5.55
4	SMSU	28	2.23%	28	0.32%	1.00	1.00
5	DEWO	25	1.99%	6	0.07%	0.24	0.24
6	CONV	22	1.75%	806	9.28%	36.64	36.64
7	CATE	21	1.67%	57	0.66%	2.71	2.71
8	JLEC	20	1.59%	5	0.06%	0.25	0.25
9	OPEN	19	1.51%	283	3.26%	14.89	14.89
10	NIDE	19	1.51%	118	1.36%	6.21	6.21

注：GENE 表示 General Electric Company; SIEI 表示 Siemens Aktiengesellschaft; RORO 表示 Rolls Royce Holdings PLC; SMSU 表示 SAMSUNG Heavy Industries Ltd.；DEWO 表示 Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.；CONV 表示 Converteam Technology Ltd.；CATE 表示 Caterpillar Inc.；JLEC 表示 Wuxi Jintianyang Laser Electronic Co., Ltd.；OPEN 表示 Openhydro Group Ltd.；NIDE 表示 NEC Corporation。

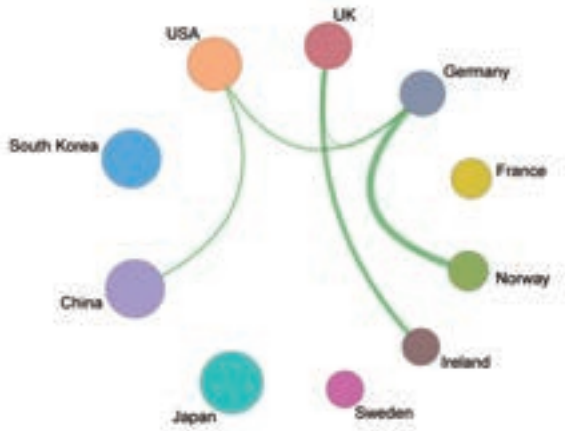

图 2.2.3 “海洋能高效综合利用技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

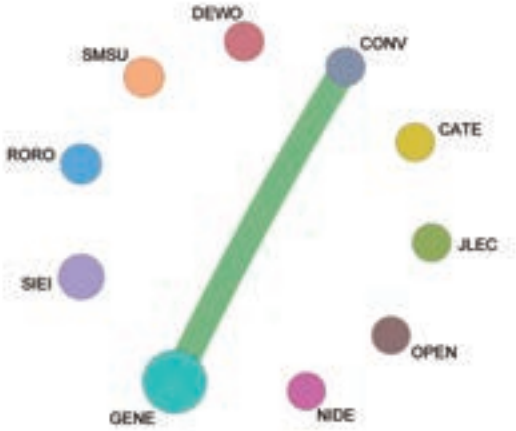

图 2.2.4 “海洋能高效综合利用技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

风险也越来越高，如经过初步加工的肉食、蔬菜等半成品和干酪、沙拉等即食食品，最大的危害风险往往来自于食源性致病微生物。因此食源性致病微生物成为国际食品安全关注的重点，食源性致病微生物鉴定与检测技术在食品安全检测中所占比重越来越大。

食源性微生物的快速精确鉴定和检测是预防与控制人类食源性疾病的最有效方法。目前针对食源性致病微生物的检测主要基于增菌培养与生理生化鉴定相结合的方法（食品微生物学检验国家标准GB4789），这些方法具有准确性高的优势，因此是目前国内微生物检测的“金标准”，被用来作为最终结果的判定方法。然而，培养结合生理生化鉴定方法具有检测时间长、工作量大、检测通量低等问题，同时基于培养与生化鉴定方法只能检测到活性较高的微生物，而对于活的但不可培养的微生物（VBNC）无法检测到，而 VBNC 微生物在合适的条件下可以恢复活性、并在食品中快速增殖，从而带来安全风险。食源性病原体的传统微生物检测和鉴定方法越来越不能满足现代食品工业对安全检测的要求。因此，研发高灵敏度、高通量、快捷的致病菌快速检测技术势在必行。

从国际范围来看，目前的快速检测方法由于准确性、稳定性方面的问题，仍然只能用于食品样品的初步筛查，国内外针对致病微生物仍没有行之有效的快速检测方法。从公开专利来看，专利公开量最多的是美国，其次是中国、日本和韩国（见表 2.2.5）。如果在该领域能够率先开发出稳定、准确、灵敏的快速检测，将在提高食品安全水平、促进食品产业发展、推动进出口贸易等方面占据优势。

食源性致病菌快速检测未来的发展趋势主要包括缩短检测单种致病菌的时间和多个样品同时检测两个方向。为了平衡时效性、灵敏度和准确性等方面的需求，将不同检测技术联合使用也是目前研究的热点。在诸多新型食源性致病微生物快检技术中，恒温扩增检测技术和免疫检测技术将成为未来主要的发展方向。

表 2.2.5 列出了“食源性致病菌快速精准检测技术”核心专利的主要产出国，其中美国公开 491 项，排名第 1；中国公开 127 项，排名第 2；日本和韩国分别公开 95 项和 66 项，位列第 3 和第 4。由此可见，中国的核心专利数量与美国虽有差距，但仍远高于其他国家，说明我国在食源致病菌精准检测技术这一领域已具备研发基础。但是，我国专利的平均被引频次位列最低，仅为 1.09，远低于美国（27.76），荷兰（16.54）和德国（14.27）等发达

表 2.2.5“食源性致病微生物快速精准检测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	USA	491	49.10%	13 628	77.90%	27.76
2	China	127	12.70%	139	0.79%	1.09
3	Japan	95	9.50%	1180	6.75%	12.42
4	South Korea	66	6.60%	260	1.49%	3.94
5	France	36	3.60%	298	1.70%	8.28
6	Germany	33	3.30%	471	2.69%	14.27
7	Canada	31	3.10%	390	2.23%	12.58
8	UK	24	2.40%	136	0.78%	5.67
9	Switzerland	23	2.30%	254	1.45%	11.04
10	Netherlands	13	1.30%	215	1.23%	16.54

国家。这一现象说明我国虽有不小的专利基数，但在技术的原创性、创新性和影响力等方面与发达国家仍有较大差距。

从图 2.2.5 可以看出，大多数发达国家之间在“食源性致病菌快速精准检测技术”领域均有频繁密切的合作关系。美国与除韩国以外的其他国家均建立了牢固的合作伙伴关系。瑞士也与欧洲、北美许多国家建立了强大的合作互赢网络。在这 10 个国家中，中国仅与美国存在合作。我国亟待加强国际交流，寻求更为广阔的国际合作机会。

表 2.2.6 为“食源性致病菌快速精准检测技术”核心专利的主要产出机构，其中排名前三的机构分别为“REGC”（25 项）、“HOFF”（22 项）和“MASI”（15 项）。图 2.2.6 给出了致力于研究“食源性致病菌快速精准检测技术”主要机构之间的协作网络关系图，可以看出该领域的各个机构、企业之间已经存在一定的合作关系。“REGC”与“MASI”和“CALY”存在最为紧密的合作，其中“REGC”和“MASI”的专利数排名前 3，这表明机构间合作对技术创新和企业发展具有促进作用。鉴于此，我国应该进一步深化机构间合作，提升我国在“食源性致病菌快速精准检测技术”领域的科研水平和创新能力，从而更好地促进该领域企业的繁荣稳定发展。

表 2.2.6　“食源性致病微生物快速精准检测技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引频次	被引频次比例	平均被引频次
1	REGC	25	2.50%	613	3.50%	24.52
2	HOFF	22	2.20%	242	1.38%	11.00
3	MASI	15	1.50%	61	0.35%	4.07
4	CNRS	15	1.50%	49	0.28%	3.27
5	TEXA	12	1.20%	75	0.43%	6.25
6	CALY	11	1.10%	568	3.25%	51.64
7	STRD	11	1.10%	161	0.92%	14.64
8	UYJO	10	1.00%	234	1.34%	23.40
9	UPEN	9	0.90%	301	1.72%	33.44
10	HARD	9	0.90%	69	0.39%	7.67

注：REGC 表示 Univ California; HOFF 表示 Hoffmann La Roche & Co AG F; MASI 表示 Massachusetts Inst Technology; CNRS 表示 Cent Nat Rech Sci; TEXA 表示 Univ Texas Tech System; CALY 表示 Caly Technologies; STRD 表示 Univ Leland Stanford Junior; UYJO 表示 Univ Johns Hopkins; UPEN 表示 Univ Pennsylvania; HARD 表示 Harvard College。

图 2.2.5 “食源性致病微生物快速精准检测技”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

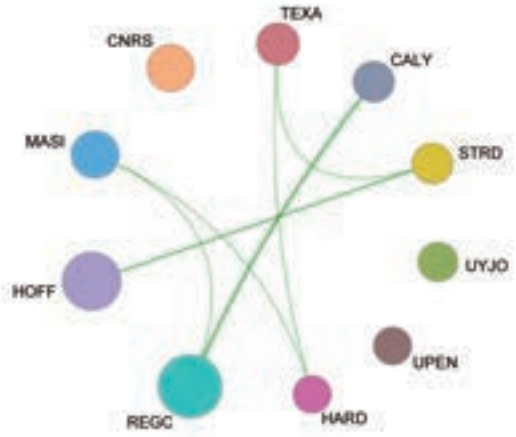

图 2.2.6 “食源性致病微生物快速精准检测技”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

领域课题组组长： 郝吉明　曲久辉

专家组：

贺克斌　魏复盛　张全兴　杨志峰　张远航
吴丰昌　朱利中　潘德炉　丁一汇　徐祥德
侯保荣　张　偲　蒋兴伟　孙宝国　庞国芳
孙晋良　俞建勇　陈克复　石　碧　瞿金平
岳国君　陈　坚

工作组：

黄　霞　鲁　玺　胡承志　王　旭　许人骥
胡　敏　裴元生　陈宝梁　潘丙才　席北斗
徐　影　宋亚芳　白　雁　马秀敏　李　洁
王　静　覃小红　黄　鑫

办公室：

王小文　朱建军　张向谊　张　姣　郑文江
张海超　穆智蕊　郑　竞

执笔组：

黄　霞　鲁　玺　席北斗　姜永海　贾永锋
潘丙才　单　超　胡承志　吴　言　王　旭
许人骥　盛雅琪　陈雪晴　胡淑雅　徐　影
宋亚芳　石　英　白　雁　李　洁　马秀敏
杨　键　王知泓　马　峥　孙宝国　王　静
王　硕　王俊平　王学利　覃小红　李发学
毛志平　李　俊　张琳萍　王碧佳　张弘楠
权震震　黄　鑫　李会芳　柯　乐　王毓嘉

七、农业

1　工程研究前沿

1.1　Top 10 工程研究前沿发展态势

农业领域工程研究前沿 Top 10 主要分为 3 类：①传统深入研究前沿，包括植物保护学科的植物免疫调控机理、资源生态学科的气候变化对农业生态的影响、资源生态学科的生物多样性与生态系统服务、水产科学学科的人工诱导产卵繁殖、资源生态学科的全球气候变化与作物生产；②新兴研究前沿，包括作物科学学科的作物基因组选择育种、动物科学的动物疫病发病机理及防控、农业工程学科的智能生物工厂、林业科学学科的林业高光谱遥感监测；③颠覆性研究前沿，如农业生物工程的农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑。

每类研究前沿的支撑核心论文数分布不均，平均约 30 篇，篇均被引约 40 次，集中在 2015—2017 年出版（见表 1.1.1），变化规律不明显（见表 1.1.2）。其中，人工诱导产卵繁殖发表论文有逐年上升趋势。数据同时表明，前沿论文中常被引论文比例不超过 30%，专利引用的论文数量极少。

（1）农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑

属于农业生物工程学科，是颠覆性研究前沿。基因组编辑技术是通过核酸内切酶特异切割脱氧核糖核酸（DNA）靶位点，产生 DNA 双链断裂，诱导 DNA 的损伤修复，从而实现对基因组的定向编辑。CRISPR-Cas9 技术是一种准确、高效、便捷的生物基因编辑技术。CRISPR 是存在于古细菌基因组中有规律、成簇、间隔短回文的重复序列，主要依赖 Cas9 核心蛋白，在核糖核酸（RNA）的介导下，识别目标序列进行切割造成 DNA 的双链断裂，修复时可为生物机体提供特异性免疫保护机制，以抵抗外来质粒、病毒等遗传物质的入侵。CRISPR-Cas9 解决了生物常规育种需要进行多代杂交、所需时间长的问题，可以定向加快育种进程。

（2）动物疫病发病机理及防控

属于农业生物工程和动物医学学科，是新兴研究前沿。动物疫病是指动物传染病和寄生虫病等，对人与动物危害严重，需要采取紧急、严厉的强制

表 1.1.1　农业领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑	42	3261	77.64	2015.6
2	动物疫病发病机理及防控	11	153	13.91	2017.3
3	作物基因组选择育种	6	174	29.00	2017.3
4	智能生物工厂	26	547	21.04	2015.8
5	植物免疫调控机理	43	1265	29.42	2015.8
6	气候变化对农业生态的影响	11	795	72.27	2016.1
7	生物多样性与生态系统服务	35	1356	38.74	2015.9
8	人工诱导产卵繁殖	44	704	16.00	2016.5
9	全球气候变化与作物生产	85	2298	27.04	2015.5
10	林业高光谱遥感监测	15	937	62.47	2015.5

表 1.1.2　农业领域 Top 10 工程研究前沿逐年核心论文数

序号	工程研究前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑	1	5	14	12	8	2
2	动物疫病发病机理及防控	0	0	0	2	4	5
3	作物基因组选择育种	0	0	0	0	4	2
4	智能生物工厂	3	4	3	5	3	4
5	植物免疫调控机理	7	5	8	1	12	10
6	气候变化对农业生态的影响	1	1	2	2	2	3
7	生物多样性与生态系统服务	6	4	2	3	14	6
8	人工诱导产卵繁殖	1	2	6	10	14	11
9	全球气候变化与作物生产	10	11	22	18	19	5
10	林业高光谱遥感监测	1	4	3	3	1	3

措施进行防控。目前全球发现的动物传染病共有 250 多种，近一半是人畜共患病，对人类健康、畜牧业安全生产、畜产品安全和公共卫生造成重大危害。一般根据生物信息特征，采用计算机技术来研究生物数据，即利用生物信息学来收集、处理和分析病原体的基因组信息，通过基因组对比确定疫病病原的蛋白质结构，针对导致疫病发作的分子特性开发新的药物以提高疗效。随着经济全球化的发展，人员、商品、牲畜的流动日益频繁，一些区域流行病逐渐演变成世界性疾病，公共卫生状况堪忧。如 1986 年英国首次暴发的疯牛病，已经扩散到日本、欧洲、加拿大等 20 多个国家和地区。考虑其外部性和公共性，各方高度重视动物疫病，采取了必要的防控策略。考虑到动物疫病防控是影响畜牧业健康发展的重要因素，动物出生之后就要从饲料、饲养环境、免疫等各方面来防止疾病的发生，实现健康养殖的目标。健康养殖是从源头保障动物产品安全，重点考虑畜禽健康、产品安全和环境保护。

（3）作物基因组选择育种

属于作物科学学科，是新兴研究前沿。自 20 世纪 80 年代以来，分子生物学的迅猛发展为基于分子遗传标记进行辅助育种提供了可能，即标记辅助选择（MAS）。MAS 具有准确性高、不受性别限制、快速提高有利基因筛选频率或清除有害基因、能够早期选种等优点，然而受限于数量性状基因组（QTL）定位研究结果之间难以相互验证、定位区间过大、QTL 估计效应偏高，MAS 在作物育种的应用受到很大限制。为了克服利用少量标记进行选择的不足，将功能基因组研究的最新成果和先进的单核苷酸多态性（SNP）芯片技术相结合，Meuwissen 等提出利用覆盖全基因组的高密度遗传标记计算个体的基因组估计育种值（GEBV）方法。与传统基于系谱信息的估计育种值（EBV）相比，GEBV 通常能获得更高的估计准确性，实现的估计育种值称为基因组育种值，在此基础上进行选种则称为基因组选择育种（GSB）。GSB 的具体操作过程为：①建立参考群体，其中的个体都有已知的表型和基因型，通过合适的统计模型估计出每个 SNP 或不同染色体片段的效应值；②对候选群体中的个体进行基因分型，利用参考群体中估计得到的 SNP 效应值来计算候选群体中每个个体的 GEBV；③根据 GEBV 排名对个体进行选留，待选留个体完成性能测定后，这些个体又可以被放入参考群体，用于重新估计 SNP 的效应值，如此反复。随着商业化高密度 SNP 芯片的普及和测序价格的下降，GSB 已较大规模应用于农业动植物的育种实践。

（4）智能生物工厂

属于农业工程学科，是新兴研究前沿。以大数据、人工智能为代表的“智能革命”深刻改变了生物工程的内涵和外延，在作物生产、大分子设计、合成生物学、微化工等领域均取得变革性成果。设施农业是在环境相对可控条件下，采用工程技术手段进行植物高效生产的一种现代农业方式。在“智能革命”大环境下出现的智能生物工厂成为设施农业的前沿发展方向。智能设施农业包括设施种植、设施养殖和设施食用菌等。在设施种植、养殖业由自动化向高级智能化转变的过程中，环境与生物信息采集与监测（如设施环境因子、生物生产生长过程）、智能化系统控制平台、生物（如作物、菌类或养殖品种）管理模型、智能光源、智能饲喂、采摘机器人以及基于物联网的农产品质量溯源系统等的开发将是未来的技术研发核心。此外，智能生物工厂利用动物干细胞制造出来的“人造肉”也将逐步端上大众的餐桌。

（5）植物免疫调控机理

属于植物保护科学学科，是传统深入研究前沿。植物的抗病性分为抗侵染、抗扩展、诱导抗性、结构抗性、生化抗性、过敏性坏死反应和系统获得性抗性等。植物在自然环境中会受到多种病原物的威胁，植物表层作为第一道防线能阻止病原物的进入，表现出非寄主抗性。当致病菌成功侵入植物内部，植物的天然免疫系统将启动工作，其免疫调控机理分为4个阶段：①病原微生物保守成分（PAMPs）触发的免疫反应（PTI）途径，植物的识别受体（PRRs）能识别病原物表面的相关模式分子；②病原微生物分泌效应因子抑制PTI途径使植物对病原菌敏感；③富含亮氨酸重复单位的受体激酶（NB-LRR）蛋白特异性识别效应因子触发的免疫反应（ETI）；④植物在自然选择的压力下抗病基因产生新的R蛋白，引起病原微生物感染位点处的细胞死亡，表现出超敏反应（HR）。植物HR能有效阻碍病原微生物（特别是那些靠吸器获取细胞养分的寄生虫）的生长，而且反应通常不会超出被病原微生物感染的区域。

（6）气候变化对农业生态的影响

属于农业资源科学学科，是传统深入研究前沿。大气中CO_2浓度升高、气温升高及降水量的变化等是全球气候变化对农业生态系统影响最为重要的生态因子。CO_2浓度升高将促进作物光合产物流向根系，从而提高农田生态系统地下部分对碳的固定以及植物根系对水分的吸收，农田生态系统的初级生产力将有所增加。土壤有机碳的增加可为土壤微生物提供更多的可降解底物，增强了土壤的呼吸作用。气温升高导致的全球气候变暖，意味着外界向农业生态系统输入了更多的能量，将导致农业生态系统结构和功能的变化。气候变化通过影响作物的生理过程和种间相互作用，可以逐步改变物种的遗传特性，进而影响农业生态系统的种类组成、结构和功能。降水量的改变、全球海平面的上升也会直接或间接影响农业生态系统的功能。

（7）生物多样性与生态系统服务

属于农业资源科学学科，是传统深入研究前沿。生物多样性是指所有存在于陆地、海洋及其他水生生态系统中的动物、植物和微生物等生命体之间的变异性和多样性，以及生态系统各组成部分之间的复杂生态过程，包括物种多样性、生态环境多样性、营养方式多样性、生命周期多样性和遗传多样性等。生物多样性对于保护自然资源具有重要贡献。生态系统服务是指人类从各种生态系统中获得的所有利益，由生态系统的支持功能、供给功能、文化功能、调节功能及其相互作用构成。生态系统的生物、物理学结构和过程体现出生态系统结构与功能特征，其稳定性保证了生态系统服务的持续供给。全球范围内关键生态系统服务趋于减少，使人类社会面临巨大的威胁。利用生态恢复工程对退化的生态系统服务和生物多样性进行修复，对于缓解人类环境压

力具有积极意义。

（8）人工诱导产卵繁殖

属于水产科学学科，是传统深入研究前沿。大多数鱼虾类的生殖活动都有季节性，只有少数是常年连续产卵的，且生殖周期的精确时间性能够保证所产出幼苗获得适宜的生存条件。温度、光周期、降雨和食物等环境因子对调节鱼虾类的生殖周期尤为重要。鱼虾类的感觉器官可以把这些环境因子变化的信息传送到脑，使下丘脑分泌促性腺激素释放激素（GnRH）和其他一些神经内分泌因子，激发脑垂体分泌促性腺激素（GtH），刺激性腺产生性类固醇激素，从而促使性腺发育成熟与排出精子和卵子。由外界环境因子启动的鱼虾类周期性生殖生理活动是由一系列神经内分泌激素调控的，起主要作用的是促性腺激素。人工诱导产卵繁殖的方法主要有：①环境胁迫方法，生活环境发生较大改变时（如干旱、洪涝、高温酷暑和冰冻严寒），小龙虾以种族延续、繁殖需求为生存第一要素，繁殖性能会发生改变，表现为环境胁迫下的早繁、多繁现象；②使用高效、低成本无副作用的新型催产剂，如GnRH 类似物（LHRH-A 或 sGnRHA）和多巴胺 D-2 型受体拮抗剂（DOM）组成的高活性鱼类催产剂。

（9）全球气候变化与作物生产

属于农业资源科学学科，是传统深入研究前沿。自 1990 年联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）第一次气候变化科学评估报告问世以来，研究未来气候变化情景下作物产量成为评价未来气候变化对农业影响的重要内容，据此可以了解土壤生产潜力和粮食安全保障能力。全球气候变化带来的温度升高、大气 CO_2 浓度增加等现象对作物产量的影响需要在长时间尺度上进行评价。为研究全球气候变化对作物生产的影响，学者提出生态系统功能模型、作物生长模型、净初级生产力模型、大气模型、生物地理化学模型、生态模型等一系列模型。其中，基于作物生长模型研究气候变化对作物产量形成、生长发育的影响评估以及作物区域气候适应性等内容得到了广泛开展。利用作物生长模型进行数值模拟和预测研究是目前定量化研究气候变化对农业生产影响的主要手段，可以确定历史气候变化对农作物的影响规律、分析作物品种更替适应气候变化的机制。

（10）林业高光谱遥感监测

属于林业科学学科，是新兴研究前沿。高光谱遥感技术是以极其狭窄的电磁波段从地面获取地物连续光谱信息的一种新技术，高光谱影像具图谱合一、光谱分辨率极高的独特优势。作为在电磁波谱的中红外区、可见光、近红外、紫外区域获得大量连续且极窄的图像数据技术，高光谱遥感主要应用于：①森林火灾监测，考虑所探测的地表温度是否异常及该处地被物等因素是否可燃等因素，结合常规遥感数据，可对森林火灾的发生地点及燃烧后果进行定性和定量分析；②森林病虫害监测，在森林遭受病虫害侵袭时，叶绿素含量通常会降低，叶绿素吸收带的强度衰减，导致整体可见光的反射率增加，这种变化信息可从遥感影像上提取，进而为防范病虫灾害提供参照标准；③森林资源变化监测，对林地变化进行监控，对林地进行生态学评价，对森林类型以及树种进行细分。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑

基因组编辑技术是连续多年的全球性研究前沿，2012 年《Science》将之列入年度十大科学进展，2014 年《Nature Methods》将之列入过去 10 年间对生物学研究最有影响力的 10 项研究方法。基因组编辑技术通过核酸内切酶特异切割 DNA 靶位点，产生 DNA 双链断裂，诱导 DNA 的损伤修复，从而实现对基因组的定向编辑。它解决了常规育种需要进行多代杂交、所需时间长的问题，可以加快育种进程；但是由于人为加速突变效率、改变作物自然的进化过程，相应增加了基因组编辑植物

的环境安全和食用安全风险。基因编辑技术已经发展更新了 4 代：ZFNs 编辑技术、TALENs 编辑技术、MGN 编辑技术和 CRISPR-Cas9 系统。CRISPR-Cas9 作为一种准确、高效、便捷的生物基因组编辑工具，原理是外源基因组中称为前间区序列邻近基序（PAM）的三个保守核苷酸 NGG（N 可以为任何核苷酸）可以被向导 RNA（sgRNA）识别，sgRNA 引导 Cas9 蛋白在 PAM 上游切割；断链的 DNA 进行非同源末端连接修复时，会导致插入缺失效应，进而造成基因的移码突变而达到基因敲除的目的。由于 CRISPR 的 sgRNA 只需 20 多个核苷酸的序列就能识别 PAM 基序，并且 Cas9 蛋白单聚体就能发挥作用，CRISPR-Cas9 系统相对于其他几种基因编辑工具而言，操作更加简便，敲除效率更高，编辑更加精准，可以显著降低脱靶概率，被广泛应用于包括重要动植物在内的生物基因编辑。

国家或地区的核心论文分布方面（见表 1.2.1），数量从高到低首先是中国和美国，其次是德国和日本。被引次数排序为中国、美国和德国。研究机构分布方面（见表 1.2.2），中国科学院以 7 篇核心论文数与美国明尼苏达大学并列榜首，中国科学院的被引次数也高居榜首。国家或地区间的合作网络方面（见图 1.2.1），国家间的研究合作较为普遍，以中国和美国之间合作最为紧密，美国和英国也有明显的合作关系。产出主要机构间的合作网络方面（见图 1.2.2），中国科学院与中国科学院大学合作紧密，其他各机构间也存在一定的合作关系。施引核心论文的主要产出国家或地区以中国和美国为主，施引核心论文比例也远远高于其他国家或地区（见表 1.2.3）。施引核心论文的主要产出机构方面（见表 1.2.4），中国占据 6 位，且前 5 位机构均来自中国。这些机构施引核心论文的平均施引年为 2017 年，普遍晚于其他机构，表现出强劲的发展势头。

超过 40 余篇核心论文被引频次大于 200 次，多数为综述性文章。2014 年《Cell》发表的“Development and applications of CRISPR-Cas9 for genome engineering”论文被引频次达 1700 次，充分说明 CRISPR-Cas9 系统在生物基因编辑中的引领者地位。CRISPR-Cas9 技术不但在拟南芥、酵母、鼠、人和果蝇等模式生物中广泛应用，而且已成功在经济动物如牛、猪和羊，重要农作物如小麦、高粱、水稻和玉米等物种中实现了定点基因编辑。中国科学院、中国农业科学院和华中农业大学等机构在农作物的遗传改良方面进展显著，中国农业大学等机构则在经济动物的基因编辑方面居于领先地位。

表 1.2.1　“农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	China	17	40.48%	1437	44.07%	84.53
2	USA	17	40.48%	1399	42.90%	82.29
3	Japan	5	11.90%	156	4.78%	31.20
4	Germany	5	11.90%	455	13.95%	91.00
5	South Korea	3	7.14%	171	5.24%	57.00
6	Italy	2	4.76%	99	3.04%	49.50
7	UK	2	4.76%	219	6.72%	109.50
8	Sweden	1	2.38%	47	1.44%	47.00
9	Mexico	1	2.38%	17	0.52%	17.00
10	Philippines	1	2.38%	17	0.52%	17.00

表 1.2.2 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Univ Minnesota	7	16.67%	486	14.90%	69.43
2	Chinese Acad Sci	7	16.67%	688	21.10%	98.29
3	Karlsruhe Inst Technol	4	9.52%	395	12.11%	98.75
4	Yokohama City Univ	4	9.52%	116	3.56%	29.00
5	Chinese Acad Agr Sci	4	9.52%	176	5.40%	44.00
6	Seoul Natl Univ	3	7.14%	171	5.24%	57.00
7	Natl Agr & Food Res Org	3	7.14%	77	2.36%	25.67
8	Univ Chinese Acad Sci	3	7.14%	218	6.69%	72.67
9	Inst for Basic Sci Korea	2	4.76%	111	3.40%	55.50
10	Univ Elect Sci & Technol China	2	4.76%	195	5.98%	97.50

图 1.2.1 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

图 1.2.2 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	419	30.17%	2017.2
2	USA	388	27.93%	2016.9
3	Germany	104	7.49%	2016.7
4	UK	93	6.70%	2017.1
5	Japan	78	5.62%	2017.0
6	India	70	5.04%	2017.2
7	Australia	68	4.90%	2017.4
8	France	58	4.18%	2017.2
9	Italy	43	3.10%	2017.0
10	Netherlands	34	2.45%	2017.6

表 1.2.4　“农业生物 CRISPR-Cas9 基因编辑”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	100	23.15%	2017.1
2	Chinese Acad Agr Sci	65	15.05%	2017.3
3	Huazhong Agr Univ	52	12.04%	2017.3
4	Univ Chinese Acad Sci	43	9.95%	2017.3
5	China Agr Univ	34	7.87%	2017.3
6	Univ Minnesota	30	6.94%	2016.4
7	Karlsruhe Inst Technol	24	5.56%	2016.3
8	Iowa State Univ	23	5.32%	2016.8
9	Univ Calif Davis	21	4.86%	2017.0
10	South China Agr Univ	20	4.63%	2016.9

1.2.2　动物疫病发病机理及防控

常见动物疫病有：口蹄疫、非洲猪瘟、牛传染性胸膜肺炎（牛肺疫）、牛海绵状脑病（疯牛病）、蓝舌病、高致病性禽流感等。从传染病疫情的整体形势来看，按照传播途径可以分为接触型传染病和非接触型传染病。从单个传染病疫情的时间阶段来看，重大传染病属于典型的突发事件，一般具有发生、发展、演化、衰退的生命周期。按照传染病流行的特点，可以将重大传染病的生命周期分为潜伏期、扩散期、暴发期和终结期 4 个阶段。重大传染病在经过长时间潜伏之后，感染动物并产生症状，疫情开始扩散，在短时间内呈现出大规模暴发的态势，一般直接采取扑杀消毒措施控制疫情。没有新病例出现时，传染病依次进入衰退期、终结期。

传染病的传播必须具备 3 个条件：传染源、传播途径和易感种群。传染源是指受传染病病原体感染的人或动植物，病原体不仅能在传染源体内生存和繁殖，还能借助传染源的移动向外界散布。传播途径是指病原体从传染源体内排出后感染人或动物的过程，不管是接触型传染病还是非接触型传染病，病原体都需要通过一定的介质传播才能感染动物。非洲猪瘟（ASF）是由非洲猪瘟病毒（ASFV）引起的一种广泛出血性高度接触性疫病，猪病死率可达 100%。ASF 自 1921 年首次报道后，主要流行于撒哈拉以南的非洲地区。2007 年格鲁吉亚暴发 ASF，随后疫情迅速蔓延至整个高加索地区和俄罗斯。2014 年 ASF 传入东欧大部分国家并初步呈现出扩大流行趋势。2018 年 8 月，中国开始暴发 ASF。世界动物卫生组织（OIE）将 ASF 列为必须通报的动物疫病，而目前尚无商业化 ASF 免疫疫苗。牛海绵状脑病（BSE）又称疯牛病（CMD），是一种以大脑灰质出现海绵状病变为主要特征的慢性致死性的神经系统退行性疾病，主要致病因子是朊蛋白（Prion）——一种具有“自我复制”能力和传染性的蛋白质。禽类流行性病毒（AIV）是一种主要流行于禽类的急性传染病，也可感染人类，被 OIE 定为甲类传染病。动物疫病的防控，本质上取决于免疫疫苗的研发和大批量生产应用。亚单位疫苗、核酸疫苗、病毒活载体疫苗的保护效力一般偏低，基因缺失疫苗才可以提供完全保护，这是目前各国疫苗研发的首要目标。

核心论文发表的国家或地区分布方面，主要是巴西、美国、德国和中国，被引次数占优的是德国和美国（见表 1.2.5）。研究机构分布方面，美国 Iowa State Univ、德国 Boehringer Ingelheim Vetmed Inc 产出的核心论文及被引次数较多（见表 1.2.6）。

主要国家或地区间的合作网络方面，美国和巴西有较为紧密的相互合作关系（见图 1.2.3），中国在该研究方向上表现一般。主要机构间的合作网络方面分为两个阵营，美国和巴西的机构间合作紧密，德国和波兰的机构间合作紧密（见图 1.2.4）。施引核心论文的主要产出国家或地区主要是中国、德国和巴西，且平均施引年较晚，表现出较强的研发后劲（见表 1.2.7 和表 1.2.8）。

1.2.3 作物基因组选择育种

作物基因组选择育种是结合了功能基因组研究最新成果与国际先进的 SNP 芯片技术，构建服务于作物育种的一种基因组技术工具。利用这种方法在实验室检测作物的种子或幼苗，准确鉴定并筛选带有优良基因的个体，预测作物在田间的性状表现，使育种过程更具目的性和针对性，从而精准挑选聚合多个优良基因位点、性状表现潜力突出的植株培育作物新品种，实现育种过程的科学控制，为最终实现“设计育种”提供手段。作物基因组育种芯片在种质资源多样性分析、基因鉴定、基因定位、育种材料基因型选择、品种基因指纹检测等方面均可发挥重要作用。

通过设计特定的作物训练群体收集基因型数据、表型数据以及与之相关的环境因子（地域差异、试验处理和季节等），使用特定的模型算法构建训练模型，通过训练模型来计算个体的育种值或

表 1.2.5 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Brazil	3	27.27%	18	11.76%	6.00
2	USA	3	27.27%	45	29.41%	15.00
3	Germany	3	27.27%	52	33.99%	17.33
4	China	2	18.18%	16	10.46%	8.00
5	Spain	1	9.09%	9	5.88%	9.00
6	Austria	1	9.09%	24	15.69%	24.00
7	Poland	1	9.09%	3	1.96%	3.00

表 1.2.6 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Iowa State Univ	3	27.27%	45	29.41%	15.00
2	Boehringer Ingelheim Vetmed Inc	2	18.18%	40	26.14%	20.00
3	Sao Paulo State Univ Unesp	2	18.18%	11	7.19%	5.50
4	Vet Resources Inc	2	18.18%	11	7.19%	5.50
5	Univ Vet Med	2	18.18%	37	24.18%	18.50
6	Generalitat Catalunya	1	9.09%	9	5.88%	9.00
7	Inst Agrifood Res Tech	1	9.09%	9	5.88%	9.00
8	Univ Alabama Birmingham	1	9.09%	9	5.88%	9.00
9	Univ Autonoma Barcelona	1	9.09%	9	5.88%	9.00
10	Traunkreis Vet Clin	1	9.09%	24	15.69%	24.00

图 1.2.3 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

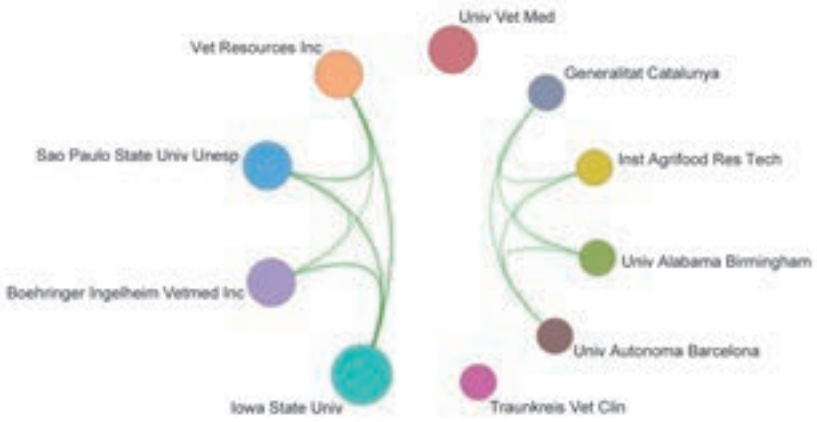

图 1.2.4 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	14	25.93%	2018.0
2	Germany	12	22.22%	2017.3
3	Brazil	10	18.52%	2017.9
4	USA	5	9.26%	2017.6
5	Spain	4	7.41%	2017.8
6	Italy	2	3.70%	2017.5
7	Austria	2	3.70%	2017.0
8	Netherlands	2	3.70%	2017.0
9	Serbia	1	1.85%	2017.0
10	Taiwan of China	1	1.85%	2017.0

者每个标记对性状的贡献值，以及待测群体中预测的表型值。采用预测值与实际值的皮尔逊相关系数来表征模型精度。但基于训练群体构建的模型常常对测试群体的预测效果不佳，可能存在着过拟合现象。为了增强模型的预测能力、筛选优化的模型参数，需要使用交叉验证的方式对模型的实际预测能力进行评估，进而通过测试群体提供的基因型数据和环境因子等信息对所有可能的组合目标性状进行预测，以达到预测和筛选的目的。

核心论文的国家或地区分布方面（见表 1.2.9），主要是德国、美国和荷兰，被引次数前 3 位与之一致。研究机构分布方面（见表 1.2.10），荷兰 Wageningen Univ & Res、美国 Univ Calif Davis 和法国 Univ Paris Saclay 并列榜首。国家或地区间的合作网络方面（见图 1.2.5），国家之间的研究合作较为普遍，以德国、美国、荷兰和法国的合作最为紧密。产出主要机构间的合作网络方面（见图 1.2.6），各机构间均有一定的合作关系。施引核心论文的主要产出国家或地区以美国和中国为主（见表 1.2.11）。施引核心论文的主要产出机构方面（见表 1.2.12），中国科学院遥遥领先，相关论文的平均施引年为 2017 年。

表 1.2.8 “动物疫病发病机理及防控”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Univ Vet Med	9	22.50%	2017.2
2	South China Agr Univ	6	15.00%	2017.7
3	Univ Vet Med Hannover	4	10.00%	2018.0
4	Sao Paulo State Univ Unesp	4	10.00%	2018.0
5	Univ Med Ctr Hamburg Eppendorf	3	7.50%	2017.3
6	Univ Autonoma Barcelona	3	7.50%	2017.7
7	Iowa State Univ	3	7.50%	2017.7
8	Heinrich Pette Inst	2	5.00%	2016.5
9	German Ctr Infect Res	2	5.00%	2018.5
10	Generalitat Catalunya	2	5.00%	2017.5

表 1.2.9 “作物基因组选择育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Germany	4	66.67%	152	87.36%	38.00
2	USA	4	66.67%	132	75.86%	33.00
3	Netherlands	3	50.00%	115	66.09%	38.33
4	France	3	50.00%	47	27.01%	15.67
5	Australia	1	16.67%	85	48.85%	85.00
6	Saudi Arabia	1	16.67%	85	48.85%	85.00
7	Israel	1	16.67%	19	10.92%	19.00
8	Austria	1	16.67%	11	6.32%	11.00
9	Norway	1	16.67%	11	6.32%	11.00

表 1.2.10　“作物基因组选择育种”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引次数	被引数比例	篇均被引数
1	Wageningen Univ & Res	2	33.33%	96	55.17%	48.00
2	Univ Calif Davis	2	33.33%	30	17.24%	15.00
3	Univ Paris Sac lay	2	33.33%	36	20.69%	18.00
4	Brigham Young Univ	1	16.67%	85	48.85%	85.00
5	Christian Albrechts Univ Kiel	1	16.67%	85	48.85%	85.00
6	King Abdullah Univ Sci Tech	1	16.67%	85	48.85%	85.00
7	Univ Melbourne	1	16.67%	85	48.85%	85.00
8	Wageningen UR	1	16.67%	85	48.85%	85.00
9	Washington State Univ	1	16.67%	85	48.85%	85.00
10	Commissariat Energie Atom & Energies Alternat	1	16.67%	19	10.92%	19.00

图 1.2.5　“作物基因组选择育种”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

图 1.2.6　“作物基因组选择育种”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “作物基因组选择育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	50	29.59%	2017.9
2	China	31	18.34%	2017.9
3	Australia	19	11.24%	2018.0
4	Germany	16	9.47%	2017.9
5	UK	12	7.10%	2018.1
6	France	9	5.33%	2017.9
7	Saudi Arabia	7	4.14%	2018.0
8	Netherlands	7	4.14%	2018.1
9	Denmark	6	3.55%	2017.5
10	South Korea	6	3.55%	2018.0

表 1.2.12 “作物基因组选择育种”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Chinese Acad Sci	12	21.43%	2017.9
2	Univ Copenhagen	5	8.93%	2017.4
3	Univ Illinois	5	8.93%	2017.8
4	Univ Calif Davis	5	8.93%	2017.6
5	Univ Paris Saclay	5	8.93%	2017.8
6	J Craig Venter Inst	4	7.14%	2018.0
7	Univ Tasmania	4	7.14%	2018.0
8	King Abdullah Univ Sci & Technol	4	7.14%	2017.8
9	Donald Danforth Plant Sci Ctr	4	7.14%	2018.0
10	Michigan State Univ	4	7.14%	2017.8

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

农业领域工程开发前沿 Top 10 主要分为 3 类：①颠覆性开发前沿，如农业生物工程学科的农业生物基因编辑技术；②新兴开发前沿，包括资源生态科学学科的土壤重金属污染防治、农业工程学科的智能农业装备、林业科学学科的林产物生物质利用、作物科学学科的作物 DNA 序列与基因组分析；③传统深入开发前沿，包括植物保护学科的绿色植保技术、动物科学学科的动物健康管理系统、作物科学学科的作物杂交新品种选育、作物科学学科的精准栽培技术、水产科学学科的苗种高效培育。

本领域专利的年度公开量一般为 100 ~ 300 项，平均被引数 10 ~ 20 次，专利平均公开年集中在 2014 年（见表 2.1.1）。其中，农业生物基因编辑技术的逐年施引专利数与其他项目相反，在 2017 年前呈快速上升趋势（见表 2.1.2）。

（1）绿色植保技术

属于植物保护科学学科，是传统深入开发前沿。农药污染是指：过量使用农药以及不恰当地选择农药品种和施用时间，造成农产品中农药的超标残留，

表 2.1.1　农业领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	绿色植保技术	225	3129	13.91	2014.8
2	农业生物基因编辑技术	198	3301	16.67	2015.9
3	土壤重金属污染防治	178	1927	10.83	2014.4
4	智能农业装备	106	1382	13.04	2014.7
5	林产物生物质利用	122	1343	11.01	2014.4
6	动物健康管理系统	121	2517	20.8	2014.5
7	苗种高效培育	131	689	5.26	2014.2
8	作物杂交新品种选育	269	4330	16.1	2014.5
9	精准栽培技术	102	1659	16.26	2014.3
10	作物 DNA 序列与基因组分析	246	5158	20.97	2014.6

表 2.1.2　农业领域 Top 10 工程开发前沿的逐年施引专利数

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	绿色植保技术	59	50	32	45	35	4
2	农业生物基因编辑技术	8	19	37	63	70	1
3	土壤重金属污染防治	48	46	56	20	7	1
4	智能农业装备	25	22	28	19	11	1
5	林产物生物质利用	36	38	27	11	10	0
6	动物健康管理系统	41	28	20	20	11	1
7	苗种高效培育	42	36	44	9	0	0
8	作物杂交新品种选育	75	61	65	50	17	1
9	精准栽培技术	41	24	17	11	7	2
10	作物 DNA 序列与基因组分析	65	67	50	39	21	4

对人类的健康造成严重威胁；消灭害虫的一些捕食性、寄生性天敌，使自然界害虫与天敌间失去平衡，造成害虫猖獗，也消灭了传粉的昆虫而使作物产量受到影响；过量的农药经过降雨、农田渗滤和排水等进入土壤和水体，破坏生态系统。此外，病虫害对化学农药也会产生抗药性。绿色防控技术（GCT）综合利用生物防治、物理防治、农业防治、科学用药等技术来预防和治理农作物病虫害，是一种环境友好型农业技术。

（2）农业生物基因编辑技术

属于生物工程学科，是颠覆性开发前沿。基因编辑技术是一种能够对生物体的基因组及其转录产物进行定点修饰或者修改的技术。进入 21 世纪，基因组编辑技术得到迅猛发展，ZFNs、TALENs、MGN 和 CRISPR-Cas9 4 种新型基因组编辑系统先后诞生。基因组编辑技术能够精确靶向修饰生物体基因组特定位点、人为改造生物遗传信息，特别是 2013 年开发的 CRISPR-Cas9 系统，操作更加简便、成本较低，具有更高的效率和打靶准确率，在生物基础研究、基因治疗、遗传改造等领域展现了巨大的潜力。由于 TALENs 和 CRISPR-Cas9 潜在的巨大应用价值，2012 年和 2013 年分别被《Science》

评为年度十大科学突破之一。

（3）土壤重金属污染防治

属于资源生态科学学科，是近年的新兴开发前沿。农作物重金属污染直接影响农业生产和粮食安全，危及人类生存环境，已经成为当今世界面临的重大生态环境问题。重金属是指密度大于 4.5 g/cm^3 的金属元素，主要包括铅（Pb）、镉（Cd）、汞（Hg）、铬（Cr）、类金属砷（As）等。重金属污染是指由重金属或其化合物造成的环境污染，主要由采矿、废气排放、污水灌溉和使用重金属超标制品等人为因素所致。农田重金属污染本身具有较强的隐蔽性，且重金属毒性大、化学行为和生态效应复杂、在土壤中存留时间长，可经农作物吸收、代谢进入食物链，或迁移进入水体、大气环境，对人类生存和可持续发展构成极大威胁。土壤重金属污染防治对作物的生长发育、产量和品质及生理生化代谢途径等均会产生一定的影响。有关重金属污染修复的技术主要有两种类型：直接清除重金属污染的土壤；改变土壤中重金属的存在形态，降低其活性、迁移性和生物可利用性。有关土壤重金属污染的修复方法主要分为物理修复、化学修复、电化修复以及生物修复等。鉴于农田重金属污染对生态环境与食品安全的破坏及其对农业发展的制约，也是环境科学等相关领域广泛关注、重点研究的前沿问题。

（4）智能农业装备

属于农业工程学科，是新兴开发前沿。智能农业装备集现代信息与通信技术、计算机网络技术、智能控制与检测技术，以及先进制造技术于一体，是传统农机制造业升级改造、实现农业生产过程自动化和智能化的重要工具。智能农业装备配备的中央处理器芯片和各种传感器，能够实时监控农机自身状态、作业状态和作业环境，根据采集的信息及时调整工作状态，对装备其他功能进行智能化控制，实现农业生产和管理的智能化、标准化，成为国际高端农业装备制造业发展的重要方向。装备有各种传感器、机器视觉系统（立体视觉系统）、全球定位系统（GPS）的联合收获装备，不仅可实现作物含水量与区域产量等参数实时传送，形成作物产量图，为处方农作提供技术支撑；还可实现多机协同作业中的协同控制，包括收获机粮仓无线电载荷控制以及可控制推送速度的粮食推送控制器、联合收获机脱粒机构与集粮箱性能的改进等。未来智能农业装备研究的主要方向有：智能装备数字化设计与仿真系统，智能装备测试平台，微机电系统（MEMS）农业传感器，农业机器人（尤其是自主劳作机器人），无人机，智能导航控制技术，融合物联网、大数据、云计算与云服务等先进技术的智能装备设计。

（5）林产物生物质利用

属于林业科学学科，是新兴开发前沿。林业生物质能利用原料有：①以生物质固体燃料为主，来源于林业加工如板材、造纸等产业的废弃物；②结合生物质能源产业发展布局建立能源林基地，培育生长速度快、热值高、含油率高的林业生物质林，保障原料生产和供给。生物质能源开发技术集中在气化、压缩燃料、燃烧发电、生产燃料乙醇以及生物柴油 5 个方面。其中，生物质气化燃料及生物质压缩成型技术已趋成熟，属于传统研究内容；高效直燃发电被认为是最可行的生物质利用方式，成为未来重要发展方向。

（6）动物健康管理系统

属于动物科学学科，是传统深入开发前沿。动物健康养殖是动物健康、动物生产性能提升、动物产品安全的保证。动物健康管理是促进动物健康的重要环节，包括：对动物的健康状况进行监测，对动物的健康状况进行评估，及时发现动物存在的非健康状态，在育种、营养、疾病、环境及生产等角度寻求解决影响动物健康的因素。在动物养殖工作的各个环节，利用现有理论和数据，结合知识发现和数据挖掘的方法，建立科学合理的动物健康管理系统，主要涉及健康评估标准、健康促进方法、疾病诊断知识、疾病防治方法、兽药配伍知识、动物兽药使用标准等。目前，动物生产及动物产品的溯

源信息化管理系统发展迅速。通过对动物养殖过程中各环节的网络通信、二维条码、射频识别（RFID）、嵌入式设备、智能卡、数据库等技术运用，把生产场地、生产过程、饲料配方、免疫、屠宰检疫及商品流通各个环节串联起来，全程记录并跟踪动物及动物产品的主要业务数据，实现从耳标生产、配发，到动物饲养、流通，再到动物屠宰、动物产品销售的全程监管追溯管理。5G 物联网的应用，有助于进一步完善规模养殖的动物健康管理及产品服务系统。

（7）苗种高效培育

属于水产科学学科，是传统深入开发前沿。发展海洋鱼类的增殖和养殖是海洋鱼类资源的合理开发利用与持续性发展的根本措施和策略。水产类苗种高效培育，除了做好培育前的准备工作、合理放养苗种、注重饲养方法及做好日常管理外，采用最新生物技术方法已成为苗种高效培育的开发前沿。新技术重在诱导海洋鱼类性腺发育成熟和改善卵子质量、排卵与产卵、提早性成熟和性别转换，调控海洋养殖鱼类在全年都能性腺发育成熟和产卵、改善幼苗培育与提高成活率及生长率、采用基因工程技术生产各种促进鱼类生殖与生长的激素与神经肽等。具体包括：目标品种的全基因组精细图谱绘制、性别控制技术、三倍体规模化制种技术及建立单性精子库等技术。利用高雌性苗种制种技术、高产抗病良种培育技术、性别控制和杂交育种技术等培育水产新品种。

（8）作物杂交新品种选育

属于作物科学学科，是传统深入开发前沿。作物自交系是指一个单株经连续自交后，所获得的性状整齐一致的后代。通过高配合力自交系之间杂交获得的杂种优势，一直是大幅提高作物单产、改良作物品质、提高作物抗逆性、增加作物适应性的重要途径。随着细胞生物学和分子生物学的飞速发展，关于亲本的选择，除了考虑其农艺性状优势互补、亲缘关系远近及配合力、遗传力和抗性外，还利用基因组原位杂交、分子标记等技术对亲本进行筛选。利用基因组中与目标基因紧密连锁的可跟踪检测的分子标记（如 RFLPs、RAPDs、AFLPs、SSRs 和 SNPs 等）结合基因组测序技术，可以提高亲本材料重组筛选的效率。从分子水平上对目标性状加以探究和利用，提高了对育种值预测的准确性及杂种优势的效应。杂种优势利用的基础研究主要方向有：①如何利用种质资源最大限度的开发和利用杂种优势；②对杂种优势群进行深入研究，在分子水平上鉴定杂种优势群；③筛选与产量因素相关的杂种优势形成 QTL；④研究杂种优势的适宜遗传群体。

（9）精准栽培技术

属于作物科学学科，是传统深入开发前沿。传统的农业发展主要靠人力，时间长、耗费多、效率低。随着科技发展，精准栽培技术产生并逐渐发展，将农业带入数字和信息时代，加快作物栽培过程，节省人力物力，成为 21 世纪农业的重要发展方向。智能化精准栽培技术体系，通过建立精准栽培物联网系统，实时、全程周期化比对来获取监测参数，对大数据、样本的特征节点视频进行监视；建立精准栽培控制的参数模型，利用监测与控制设备的实时传感监测和过程控制参数迭代，构建智能专家系统能力，实现智能化精准栽培的目的。作物精准栽培物联网系统主要由现场基础设施、设备监测与控制、数据传输与存储、计算机云平台应用管理 4 部分组成。采用精准栽培技术实现智慧农业场景下的农业生产，可以有效降低劳动强度、提高生产效率、提升作物的质量和产量。

（10）作物 DNA 序列与基因组分析

属于农业生物工程学科，是新兴开发前沿。作物 DNA 序列与基因组分析是实现作物转基因工程育种、基因组选择育种以及分子设计育种的基础性研究工作，常用的技术是 DNA 微阵列、大规模平行测序（MPSS）、基因表达系列分析（SAGE）、表达序列标签文库测序技术数字表达谱（DGE）。不断进化的基因组分析方法，有利于作物分子育种

技术的快速发展。对转基因新品种进行检测，利用现代生物技术，将人们期望的目标基因，经过人工分离、重组后，导入并整合到生物体的基因组中，从而改善生物原有的性状或赋予其新的优良性状。除了转入新的外源基因外，还可以通过转基因技术对生物体基因的加工、敲除、屏蔽等方式改变生物体的遗传特性，获得人们希望得到的性状。对基因表达谱进行深入分析，也有利于揭示杂种优势形成的分子机理。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 绿色植保技术

植物保护技术向绿色、环保、安全的方向发展。绿色植保技术创新体系包括：生态综合防控技术，生物防控措施，新型植物免疫调控剂，绿色农药的研发、管理和应用等。具体内容如下：①生态调控技术，主要从宏观角度采取措施，如选育和推广抗病虫品种、优化作物布局、培育健康种苗、改善水肥管理等，结合农田生态工程、果园生草覆盖、作物间套种、天敌诱集带等生物多样性调控与自然天敌保护利用等技术，改造病虫害发生源头及孳生环境，人为增强自然控害能力和作物抗病虫能力。②生物防治技术，加强赤眼蜂、捕食螨、绿僵菌、白僵菌、微孢子虫、苏云金杆菌（BT）、蜡质芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌、核型多角体病毒（NPV）等的防治技术研究，以及牧鸡牧鸭、稻虾稻鸭共育等成熟技术的应用；开发以虫治虫、以螨治螨、以菌治虫、以菌治菌等生物防治关键技术；发展植物源农药、农用抗生素、植物诱抗剂等生物生化制剂应用技术。③理化诱控技术，采用昆虫信息素（性引诱剂和聚集素）、杀虫灯、诱虫板（黄板和蓝板）防治蔬菜、果树和茶树的农作物害虫，积极开发和推广应用植物诱控、食饵诱杀、防虫网阻隔和银灰膜驱避害虫等理化诱控技术。④科学用药技术，重视高效、低毒、低残留、环保型农药的研发；大力推广高效、低毒、低残留、环境友好型农药；优化集成农药的轮换使用、交替使用、精准使用和安全使用等配套技术；加强农药抗药性监测与治理；普及规范使用农药的知识，严格遵守农药安全使用间隔期。

相关专利的公开量以日本、德国、美国、中国和瑞士为主。日本专利的被引数超过德国、美国、中国和瑞士之和，其单项专利的平均被引数达20.54，约是其他国家或地区的 1 倍（见表 2.2.1）。核心产出机构是德国 Bayer Cropscience AG 公司，

表 2.2.1 “绿色植保技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	Japan	74	32.89%	1520	48.58%	20.54
2	Germany	58	25.78%	578	18.47%	9.97
3	USA	40	17.78%	438	14.00%	10.95
4	China	32	14.22%	318	10.16%	9.94
5	Switzerland	15	6.67%	139	4.44%	9.27
6	UK	3	1.33%	123	3.93%	41.00
7	France	2	0.89%	23	0.74%	11.50
8	Netherlands	2	0.89%	12	0.38%	6.00
9	India	1	0.44%	12	0.38%	12.00
10	Belgium	1	0.44%	7	0.22%	7.00

其他产出机构分布在日本、美国和中国（见表 2.2.2）。除日本和英国之外，其他国家或地区之间存在一定的合作开发关系（见图 2.2.1），机构间的合作相对较少（见图 2.2.2）。

2.2.2　农业生物基因编辑技术

基因编辑技术能够对生物体的基因组及其转录产物进行定点修饰或者修改，通过限制性核酸酶对基因组特定位点进行切割，产生 DNA 双链断裂（DSB）。DSB 经细胞内 DNA 的主要修复机制非同源末端连接（NHEJ）或同源重组（HDR）后实现靶基因的遗传学修饰。NHEJ 是真核生物基因组的主要修复机制，不需要或仅需有限的同源序列即可将断开的 DNA 游离末端重新缝合，常伴随着核苷酸的插入或缺失（indels）并形成编码区移码突变，继而敲除内源基因。在同源片段存在的情况下，DSB 处发生 HDR 的概率大幅提高，通过将同源 DNA 置换或重组至 DSB 以恢复或修改遗传信

表 2.2.2　“绿色植保技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	FARB	Germany	52	23.11%	530	16.94%	10.19
2	SUMO	Japan	24	10.67%	748	23.91%	31.17
3	DOWC	USA	24	10.67%	340	10.87%	14.17
4	SYGN	Switzerland	16	7.11%	252	8.05%	15.75
5	NIPY	Japan	16	7.11%	201	6.42%	12.56
6	NISC	Japan	13	5.78%	349	11.15%	26.85
7	BADI	Germany	8	3.56%	68	2.17%	8.50
8	SNCM	China	7	3.11%	52	1.66%	7.43
9	NIPS	Japan	7	3.11%	46	1.47%	6.57
10	SNFI	China	5	2.22%	35	1.12%	7.00

注：FARB 表示 Bayer Cropscience AG；SUMO 表示 Sumitomo Chem Co., Ltd.；DOWC 表示 Dow Agrosciences LLC；SYGN 表示 Syngenta Participations AG；NIPY 表示 Nihon Nohyaku Co., Ltd.；NISC 表示 Nissan Chemical Ind Ltd.；BADI 表示 BASF SE；SNCM 表示 Sinochem Agro Co., Ltd.；NIPS 表示 Nippon Soda Co., Ltd.；SNFI 表示 Merial Inc.。

图 2.2.1　“绿色植保技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

图 2.2.2　“绿色植保技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

息，实现基因定点编辑或敲入。NHEJ 和 HDR 都依赖于 DSB 的产生，然而基因组中自然发生 DSB 的频率极低，因此如何诱导特定基因位点产生 DSB 成为对动植物进行基因编辑所面临的主要问题。ZFNs、TALENs、MEG 和 CRISPR-Cas9 系统等新型基因组编辑技术可以靶向切割基因组，产生 DSB，继而激发细胞的 NHEJ 或 HDR 修复，实现多种生物基因组的高效而精确的编辑。

相关专利的公开量以美国和中国的数量居多（见表 2.2.3 和表 2.2.4），而美国的专利被引数占据绝对优势。立陶宛、德国、法国、瑞士和英国虽然公开量较少，但被引数比例较高。美国专利的单项平均被引达 23 次，是中国的 3 倍。美国和瑞士之间相对合作紧密（见图 2.2.3）。核心专利的主要产出机构方面，美国哈佛大学、麻省理工学院和 BROAD 研究所的专利数位列前 3 名，并且 3 个机构间具有较为紧密的合作关系（见图 2.2.4）。由于能对生物体内源基因进行精确靶向修饰，

表 2.2.3 “农业生物基因编辑技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	90	45.45%	2095	63.47%	23.28
2	China	79	39.90%	623	18.87%	7.89
3	Germany	6	3.03%	104	3.15%	17.33
4	Japan	5	2.53%	40	1.21%	8.00
5	France	4	2.02%	94	2.85%	23.50
6	Switzerland	4	2.02%	74	2.24%	18.50
7	Lithuania	3	1.52%	331	10.03%	110.33
8	South Korea	3	1.52%	37	1.12%	12.33
9	UK	2	1.01%	69	2.09%	34.50
10	Netherlands	2	1.01%	24	0.73%	12.00

表 2.2.4 “农业生物基因编辑技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	HARD	USA	17	8.59%	475	14.39%	27.94
2	MASI	USA	10	5.05%	501	15.18%	50.10
3	BROD	USA	7	3.54%	451	13.66%	64.43
4	SPHS	China	7	3.54%	55	1.67%	7.86
5	REGC	USA	6	3.03%	94	2.85%	15.67
6	AGIL	USA	5	2.53%	54	1.64%	10.80
7	CARI	USA	4	2.02%	169	5.12%	42.25
8	ALNY	USA	4	2.02%	74	2.24%	18.50
9	UCAG	China	4	2.02%	53	1.61%	13.25
10	WHED	USA	4	2.02%	47	1.42%	11.75

注：HARD 表示 Harvard College；MASI 表示 Massachusetts Inst Technology；BROD 表示 Broad Inst Inc；SPHS 表示 2nd Peoples Hospital Shenzhen；REGC 表示 Univ California；AGIL 表示 Agilent Technologies Inc；CARI 表示 Caribou Biosciences Inc；ALNY 表示 Alnylam Pharmaceuticals Inc；UCAG 表示 Univ China Agricultural；WHED 表示 Whitehead Biomedical Inst。

图 2.2.3　“农业生物基因编辑技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

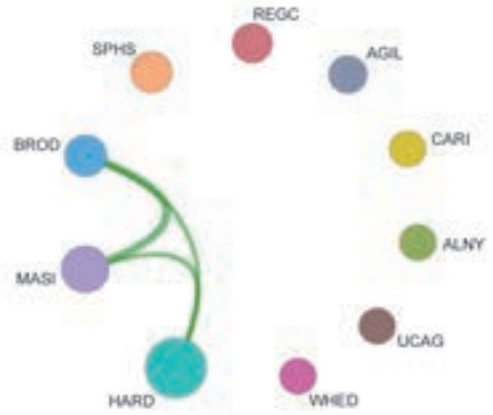

图 2.2.4　“农业生物基因编辑技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

CRISPR-Cas9 申请专利数已远大于 ZFNs、TALENs 和 MEG 系统，相关专利申请目前以应用为主。在动物改良和农作物研究领域中国的专利数成长较快，其中，中国农业大学在动物育种相关的基因编辑技术方面专利数较多，着重于猪羊牛等动物疾病模型的开发利用；中国科学院遗传与发育生物学研究所和中国农业科学院等机构则在农作物遗传育种方面申请的专利数较多。

2.2.3　土壤重金属污染防治

土壤重金属污染直接影响作物的生长发育、进而影响作物的产量形成和农产品品质。土壤重金属污染具有污染物在土壤中移动性差、滞留时间长、隐蔽、不可逆转等特点，可通过农作物进入人类食物链，严重影响食品安全并危及人类健康。关于土壤重金属的污染治理技术主要涉及生物修复、物理修复、化学修复以及各种技术的联合修复等方法。

随着填埋操作的监管以及相关费用的增加，异位修复技术的改进以及与原位修复技术的结合运用改变了原来的污染修复方式。归纳起来，有关重金属污染修复的技术主要有两种类型：直接清除重金属污染的土壤；改变土壤中重金属的存在形态，降低其活性、迁移性和生物可利用性。具体可分为：①原位稳定化技术，如原位化学钝化、微生物吸附及植物固定等；②工程修复技术，如植物修复、客土、深翻稀释及土壤淋洗修复等；③农艺调控措施，如水肥管理、调节土壤 pH、间套作措施等；④植物阻控技术，如叶面生理阻控、低吸收作物品种应用、基因工程、种植结构调整等。

美国、欧盟、日本和中国等多个国家和地区在土壤重金属污染修复技术研发方面进行了积极部署与研究。①日本开展的与土壤污染修复相关的研究项目主要分布在土壤重金属污染的测定方法、土壤修复技术（化学修复、生物修复）、土壤修复机理和土壤污染的环境评估方面；②韩国为了应对日益严重的重金属污染问题，加大了土壤淋洗和电动修复技术的研发；③中国台湾地区近年来多采用原位组合、复合修复技术；④美国在污染场地修复技术应用领域居于世界领先地位，应用较多的是原位土壤气体抽提（SVE）技术、异位固化 / 稳定化技术、异位焚烧处理技术；⑤欧盟最常见土壤修复技术是

污染土壤的挖掘和填埋。

相关专利的公开量方面，共有 7 个国家拥有专利，中国占绝对多数，美国和日本也有一定比例（见表 2.2.5）。中国专利项目的公开量虽然多，但平均被引数约为美国的一半。核心专利的主要产出机构方面，中国江苏上田环境修复有限公司表现不俗，其他国家各机构公开的专利数则较为分散（见表 2.2.6）。国家或地区间合作网络及机构间合作网络方面，基本不存在合作开发的相关专利（见图 2.2.5 和图 2.2.6）。

表 2.2.5 “土壤重金属污染防治”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	154	86.52%	1592	82.62%	10.34
2	USA	12	6.74%	226	11.73%	18.83
3	Japan	7	3.93%	69	3.58%	9.86
4	South Korea	2	1.12%	12	0.62%	6.00
5	Australia	1	0.56%	14	0.73%	14.00
6	Italy	1	0.56%	8	0.42%	8.00
7	Netherlands	1	0.56%	6	0.31%	6.00

表 2.2.6 “土壤重金属污染防治”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	CAEM	China	4	2.25%	46	2.39%	11.50
2	USCU	China	3	1.69%	56	2.91%	18.67
3	JIAN	China	3	1.69%	52	2.70%	17.33
4	UYJN	China	3	1.69%	42	2.18%	14.00
5	UYHD	China	3	1.69%	40	2.08%	13.33
6	CRSM	China	3	1.69%	35	1.82%	11.67
7	UYGU	China	3	1.69%	34	1.76%	11.33
8	USJT	China	3	1.69%	33	1.71%	11.00
9	UYHU	China	3	1.69%	24	1.25%	8.00
10	CHAN	China	2	1.12%	33	1.71%	16.50

注：CAEM 表示 Res Center for Eco-Environmental Sciences CAS；USCU 表示 Univ Sichuan；JIAN 表示 Jiangsu Suntime Environmental Remediation Co., Ltd.；UYJN 表示 Univ Jiangnan；UYHD 表示 Univ North China Elec Power；CRSM 表示 Inst of Rock & Soil Mech CAS；UYGU 表示 Univ Guangxi；USJT 表示 Univ Shanghai Jiaotong；UYHU 表示 Univ Huna；CHAN 表示 Changsha Hasky Environmental Protection。

图 2.2.5　“土壤重金属污染防治”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

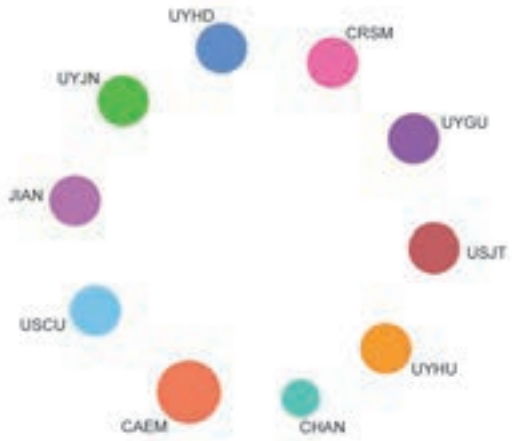

图 2.2.6　“土壤重金属污染防治”工程开发前沿主要机构间的合作网络

领域课题组成员

领域课题组：

康绍忠　张福锁　赵要风　李　隆　黄海涛
缴　旭　梁真真　闻丹岩　许建香　袁文业
李晨英　师丽娟　刘子瑜　刘迎春　吕晓梅
杨爱东　王　岩　秦　梅　邢　璐　赵　杰
姚银坤　李云舟

执笔组：

康绍忠　张福锁　袁文业　李晨英　师丽娟
许建香　赵　杰　刘迎春　吕晓梅　杨爱东
王　岩　秦　梅　邢　璐

八、医药卫生

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

医药卫生领域组所研判的 Top 10 工程研究前沿见表 1.1.1，上述前沿涉及了基础医学、临床医学、医学信息学与生物医学工程、药学等学科方向。包括“人工智能在生物医药的应用研究”“肠道微生态和稳态免疫”“脑科学的神经计算和类脑智能研究”“类器官芯片及其生物医学应用研究”“肿瘤免疫治疗”“个体化肿瘤治疗疫苗”“干细胞在再生医学中的应用研究”“肿瘤微环境代谢异质性与相互作用”“单细胞测序与疾病诊断”以及“3D 打印技术在再生医学的应用研究”。各个前沿所涉及的核心论文 2014—2018 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

（1）人工智能在生物医药的应用研究

人工智能是一种用于模拟和延展人类智能的理论、方法、技术及应用的技术科学。人工智能在生物医药的应用研究，是运用人工智能技术，开展医学数据（包括影像、图谱、病历及其他医学传感信息）驱动下的健康筛查与预警、疾病诊断与治疗、康复训练与评估、医疗服务与管理、药物筛选与评估、基因测序与表型等典型生物医药领域的精准、智能、安全应用研究。概括起来共有六个方面：①健康筛查与预警主要涉及疾病筛查、慢病管理、穿戴式健康监测等；②疾病诊断与治疗主要涉及病灶自动识别、治疗智能决策、疗效科学评估、机器人辅助手术及远程手术等；③康复训练与评估主要涉及认知障碍康复、失能和残疾人康复、机器人护理、智能假肢与矫形器（含外骨骼辅具）等；④医疗服务与管理主要涉及电子病历管理、智能自动送药、医学物联网服务等；⑤药物筛选与评估主要涉及药物靶点确认、药物筛选、药物有效性测试、药物安全性评估与不良反应数据管理等；⑥基因测序与表型主要涉及基因筛查、基因组测序、基因编辑、个体化精准医疗等。人工智能在生物医药的应用研究，正在变革现代生物医药的发展途径和应用方法。一方面，实现了疾病的发病机理、精准诊断、安全

表 1.1.1 医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	人工智能在生物医药的应用研究	670	33 946	50.67	2015.4
2	肠道微生态和稳态免疫	63	7550	119.84	2015.1
3	脑科学的神经计算和类脑智能研究	300	21 173	70.58	2015.3
4	类器官芯片及其生物医学应用研究	20	2111	105.55	2016.2
5	肿瘤免疫治疗	610	159 484	261.45	2015.4
6	个体化肿瘤治疗疫苗	139	12 063	86.78	2016.1
7	干细胞在再生医学中的应用研究	957	62 555	65.37	2014.9
8	肿瘤微环境代谢异质性与相互作用	123	10 501	85.37	2015.4
9	单细胞测序与疾病诊断	32	6782	211.94	2015.6
10	3D 打印技术在再生医学的应用研究	208	14 259	68.55	2015.4

表 1.1.2　医药卫生领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	人工智能在生物医药的应用研究	222	165	135	102	46
2	肠道微生态和稳态免疫	27	12	17	6	1
3	脑科学的神经计算和类脑智能研究	98	80	60	48	14
4	类器官芯片及其生物医学应用研究	1	3	10	4	2
5	肿瘤免疫治疗	189	157	127	99	38
6	个体化肿瘤治疗疫苗	9	32	49	34	15
7	干细胞在再生医学中的应用研究	414	276	181	81	5
8	肿瘤微环境代谢异质性与相互作用	36	29	36	19	3
9	单细胞测序与疾病诊断	9	8	5	7	3
10	3D 打印技术在再生医学的应用研究	35	84	58	30	1

治疗和科学评估的全过程智能化管理，显著提升了医师的工作效率，缓解了医师短缺的困境，提升了诊断与治疗的精准性，促进优质医疗资源的优化配置；另一方面，实现了健康的实时监测与预警，医学物联网和医疗健康硬件快速发展，穿戴式健康产业进入快速迭代期。总体来看，人工智能在生物医药的应用研究，正在通过弥补人类能力短板的智能辅助形式，推动医疗技术进入一个新的时代，促进医疗健康进入量化分析、个体化规划以及实时监控的新阶段。

（2）肠道微生态和稳态免疫

人体微生态重要生理作用的发现，颠覆了人类对于健康和生命过程的认知。近年来大量研究发现，人类体表和体腔存在数目庞大（超 10^{14} 个，干重约占人体总重的 1%~2%）且结构复杂（包括细菌、古细菌、真菌和病毒等）的微生物群落，定植于胃肠道、口腔、皮肤、泌尿生殖道等，它们所编码的基因数量是人体自身基因数量的 50~100 倍，相当于人体的“第二个基因组”，包含重要的遗传信息。这些微生物与其生存环境构成人体微生态，在人类生命过程中提供必不可少的生理功能，是宿主消化吸收、免疫反应、物质能量代谢的重要维持者，进而直接或间接调控肝脏、消化系统、免疫系统、神经系统和大脑等器官功能，影响人体发育、生长和衰老。这颠覆了“人类作为单一物种行使功能的传统概念”，开创了人体作为超级生物体、与携带微生物互利共生的新纪元。

约 80% 的人体微生物定值在肠道，形成肠道微生态，在疾病中的关键作用正在引发疾病预警、预防、诊断、治疗和康复的全链条重大变革。近年来，大量研究表明，肠道微生态在感染、肝病、代谢性疾病、自身免疫病、肿瘤、大脑和神经精神系统等疾病中具有关键作用，已经成为攻克重大疾病发病机制难题的突破口。肠道微生态研究发现的重要病因微生物以及疾病发生前的微生态结构变化，揭开了疾病预防和预警的新篇章。基于肠道微生态变化的新型诊断方法，不但将成为不明原因感染诊断、新突发感染等难以确诊疾病的必备诊断工具，而且也将是甄别和预测同一疾病中难以区别的复杂病程（如肝硬化和肝癌）的关键手段。慢性疾病绝大多数与免疫炎症相关，肠道是机体最大的免疫器官，免疫细胞的分布及炎症因子的产生可以通过直接或间接与肠道微生物及其代谢产物接触而影响慢性疾病的发生发展。肠道微生物的代谢产物也已证明可以影响肠道的相关炎症信号的表达调控通路。因此在微生物组与慢性疾病的研究中，阐明免疫系

统与肠道微生物及微生物代谢的相互作用对于通过微生物组来预防、干预及治疗慢性疾病具有重大意义。大多数口服和注射药物的疗效，甚至于治疗成败都与肠道微生态的组成和功能密切相关，开展相关的评估并在此基础上开展精准治疗，对于提高疾病治疗效果和节省医疗费用都具有巨大的意义。调控肠道微生态不但可以直接治疗或辅助治疗感染、肝病、代谢性疾病、自身免疫病和肿瘤等疾病，而且能够改善大多数疾病发生发展和治疗中造成的微生态破坏及其相应的健康损害、促进康复。

（3）脑科学的神经计算和类脑智能研究

脑科学的神经计算和类脑智能研究属于神经科学与数学等多学科交叉领域，是指综合运用数学、计算机科学、神经科学、生物学、物理科学、认知心理学、社会与行为科学以及工程学等众多理论方法和分析工具，对跨时空多尺度海量数据，包括遗传、神经元、脑影像、大规模认知功能和环境等，通过定量分析、计算模型和构建受脑启发的随机计算方法，深入研究神经系统的原理和动力学，破译大脑信息处理与神经编码的原理，解码大脑工作原理，同时，在上述研究基础上，通过信息技术予以参照、模拟和逆向工程，模拟大脑高级认知功能机理，发展类脑智能算法，形成以“类脑智能引领人工智能发展”为标志的新一代人工智能通用模型与算法、类脑芯片器件和类脑智能各类工程技术应用等新型研究领域。

脑科学的神经计算和类脑智能研究包含两个方向：一方面涵盖了对大脑运算本质的神经生物学研究；另一方面，通过计算方法解码大脑智能原理，创建新的智能技术，将广泛覆盖人工智能相关的各个领域。目前，以深度学习为代表的人工智能技术正在加快改变社会生产和消费方式，由其衍生的科技产品和模式，已经在互联网业务、软件、电子商务、云计算、医疗、工业制作等领域获得初步应用。以制造业为例，智能化浪潮正在加快全球制造业的变革，突出代表为德国的“工业 4.0”，通过智能算法、芯片设备的介入，推动整个生产制造过程具备自我感知、自我学习、自我优化能力，日趋开放协同、柔性化、个性化。德勤发布的一项最新人工智能报告称，到 2025 年，全球人工智能市场规模将达到 6 万亿美元。而以类脑智能研究为引领的下一代人工智能技术蕴藏着重大机遇，一旦突破可能将颠覆传统的医疗、消费、城市管理、工业制造等各行各业，催生新的产业爆发点和增长点，产生巨大的经济效益和社会效应。同时，在军事安全、信息数据安全、生物安全、情报分析等一系列重要战略领域都将产生重大影响。

（4）类器官芯片及其生物医学应用研究

类器官芯片是近年来出现的一种体外三维细胞培养方法，其主要目标是在微流控芯片上将具有干细胞潜能的细胞培养形成细胞团，模拟、研究并控制细胞在体外培养过程中的自我更新、自我组装等生物学行为，进而表现出与来源组织相似的空间结构，并在芯片上再现器官的部分关键功能，从而实现药物筛选评价、遗传疾病建模、细胞治疗等多领域的应用。类器官芯片的研究在国际上虽然尚处于初步阶段，但是由于其具有多器官集成以及高仿真人体功能等潜力，被认为是促进转化医学发展的催化剂，受到了国际上的高度重视。其关键科学问题包括类器官细胞来源的拓展、共培养体系的探索（如类器官与间充质结构、血管和免疫细胞）、细胞外基质代替物的研究、芯片的类器官结构设计、芯片内微环境的控制和类器官多功能 / 多器官芯片的开发等方面。目前，欧美的研究机构及生物技术公司已在进行相关技术的研发及推广应用，他们控制了这类技术的重要专利。美国食品药品监督管理局（FDA）已经宣布将在实验中对器官芯片和动物模型获得的实验数据进行比较，以验证用器官芯片模型取代动物模型进行新药研发的可行性。作为构建未来新药评价体系的重要发展趋势，器官芯片对于支撑我国创新药物研发以及转化医学的发展具有重大战略意义。尽管类器官芯片的研究已取得了显著

进展，但在解决建立更符合人体生理的芯片系统、实现多器官的功能关联及协同，以及实现芯片标准化和集成传感检测等方面仍面临挑战，这也将成为类器官芯片未来研发的重点。

（5）肿瘤免疫治疗

肿瘤免疫治疗是通过重新启动肿瘤特异性免疫应答，恢复机体正常的抗肿瘤免疫系统活性，从而控制与清除肿瘤的一种治疗方法。当前，肿瘤免疫治疗临床研发主要包括免疫检查点抑制剂、过继性免疫细胞疗法和肿瘤新抗原疫苗。其中，以抗PD-1/PD-L1 为代表的免疫检查点抑制剂相关治疗的应用最为广泛，其关键科学问题包括：①免疫治疗严重不良反应和超速进展机制仍不明确；②免疫治疗效果的预测指标尚未建立；③联合治疗进一步提高疗效的探讨；④免疫治疗的耐药机制及解决方案的解析。免疫治疗成为继手术，放疗和化疗之后一种重要的新型治疗方法。2017 年美国临床肿瘤学会发布的年度进展报告主题为“精准与联合：免疫治疗 2.0”，标志着免疫治疗的 2.0 时代的到来。2018 年诺贝尔生理学或医学奖授予两名免疫疗法先驱 James Allison 教授和 Tasuku Honjo 教授，以表彰他们关于肿瘤免疫治疗的开拓性研究。免疫治疗 2.0 具有三大特点，包括适应证不断扩大，寻找精准受益人群，联合治疗趋势明显。目前，肿瘤免疫治疗在黑色素瘤、肺癌、结直肠癌等恶性肿瘤的治疗中都已经取得重大突破。这种疗法同时联合手术、放疗、化疗等治疗手段可以明显提高恶性肿瘤患者的存活率，在实践中呈现出常规放化疗方法无可比拟的优势。目前我国已建立起相对完善的肿瘤免疫药物研发体系，多个国产原研免疫检查点抑制剂已经上市，在多个肿瘤免疫领域原研药物的临床研究处于国际并跑、或者领跑的阶段。

（6）个体化肿瘤治疗疫苗

个体化肿瘤治疗疫苗是基于肿瘤新抗原的治疗性疫苗。新抗原是肿瘤细胞基因突变产生的非自体抗原，没有经过中枢免疫耐受，具有较强的免疫原性，其接入肿瘤患者体内，可以克服肿瘤引起的免疫抑制，激活患者自身肿瘤特异性免疫细胞，从而达到控制或者清除肿瘤的目的。由于肿瘤细胞基因突变是特异性的，每个患者的新抗原都不同，基于新抗原的肿瘤治疗性疫苗是一种个体化精准医疗。个体化肿瘤治疗疫苗的关键技术是发现和筛选新抗原，其核心是用于预测新抗原和人类白细胞抗原（HLA）结合力的算法。肿瘤治疗性疫苗的研究已有近 20 年历史，早期基于肿瘤相关抗原（TAA）的肿瘤治疗性疫苗由于机体存在免疫耐受等原因，导致无法有效刺激免疫系统识别和杀伤肿瘤细胞而纷纷失败。最近由于高通量测序技术和生物信息学的发展，研究人员已能够系统地发现肿瘤新抗原。2017 年 7 月，《Science》同期发表了两项独立的一期临床试验结果，两个研究团队利用高通量测序技术找到肿瘤细胞由于快速分裂发生特异性突变的基因，利用特定算法筛选到与 HLA 结合力强的靶标，构建出多肽或 mRNA 疫苗进行免疫治疗并取得了良好的临床效果，引起了极大关注。目前国内已有多家研发机构和企业布局个体化肿瘤治疗性疫苗。未来个体化肿瘤治疗性疫苗的发展方向主要在于加深对肿瘤免疫机制认识、优化筛选新抗原的算法、发展临床前肿瘤模型、缩短疫苗生产周期和发展结合疗法等。

（7）干细胞在再生医学中的应用研究

再生医学的目的在于修复病变或缺损的细胞、组织或器官，主要依赖于种子细胞，尤其是干细胞。干细胞是一类具有自我更新能力和多项分化潜能的细胞，当前在再生医学领域，其按功能划分主要包括两大类：一是多能性干细胞，包括胚胎干细胞和诱导性多能干细胞；二是成体干细胞，包括造血干细胞、间充质干细胞和神经干细胞等。其关键科学问题包括多能性干细胞高效分化为靶向功能性细胞、不同干细胞针对特定组织或器官损伤治疗的疗

效评价、干细胞联合生物材料构建三维组织、激活体内干细胞参与组织再生、干细胞联合基因治疗针对遗传性等疾病进行治疗的安全性和有效性、获得用于临床治疗且质量可控的大量干细胞以及干细胞应用相关技术标准、伦理和管理政策的滞后等。基于干细胞治疗的再生医学的发展有可能为医学的发展带来新的革命，并为传统医疗方法无法治疗或治愈的疾病带来新的希望，例如脊髓损伤、糖尿病、帕金森症、心血管疾病以及恶性和非恶性血液系统疾病等。近年来，我国在干细胞基础研究领域取得了令人瞩目的成绩，然而在干细胞临床应用以及产业转化方向仍旧不足。进一步激活科研院所、医疗机构和医药企业之间合作，政府政策制定部门推动干细胞产业布局，将会是推动干细胞在再生医学领域中应用向前迈进的关键之举。

（8）肿瘤微环境代谢异质性与相互作用

肿瘤微环境代谢异质性是指由肿瘤细胞、间质细胞和细胞外基质等共同构成的局部环境的代谢不均匀性及其复杂性，具有低氧、低 pH 和局部营养缺乏等特点。肿瘤细胞与微环境中的细胞成分（成纤维细胞，免疫和炎性细胞和血管内皮细胞等）和非细胞成分（包括细胞外基质、细胞因子、补体等）发生相互作用，协同促进肿瘤发生发展。关键科学问题包括肿瘤代谢重塑与细胞内信号转导之间的相互调控、代谢物作为肿瘤细胞内信号分子的机制与作用、肿瘤细胞与微环境中细胞特别是炎症免疫细胞间的代谢串话与调控、全身不同组织器官代谢和局部肿瘤微环境之间的交互作用。肿瘤代谢不局限于有氧糖酵解，而是涵盖多种代谢的异常。此外，线粒体在其中也发挥重要作用。癌基因和抑癌基因的突变导致信号通路异常活化，广泛调控细胞代谢网络，因此基于遗传背景的营养 / 代谢干预是肿瘤防治研究的重点。代谢物作为信号分子被感知，并通过其感受器进一步转递信号是近年的研究热点，绝大多数的代谢物其感知机制仍未知。而关键代谢酶如 IDH1/IDH2 的突变获得新酶活，产生致癌代谢物及其靶向药物的开发取得了突破。肿瘤微环境中，成纤维细胞和炎症免疫细胞的代谢特点及作用机制也被不断阐释。此外，肠道菌群在其中也起着重要作用。我国关于代谢应激（氧、能量、代谢物等的匮乏）和肿瘤细胞发生发展有较深入的研究，但肿瘤微环境的代谢异质性研究才起步，日益受到关注。此外，代谢物作为信号分子和代谢干预肿瘤微环境来早期防治肿瘤有一定的进展。

（9）单细胞测序与疾病诊断

基于单细胞测序的疾病诊断指通过对单个或是少量细胞的基因组、转录组或表观组进行测序、分析，进而进行疾病诊断及指导治疗策略的技术。适用于细胞量较少（如生殖细胞及早期胚胎、循环肿瘤细胞）以及组织细胞异质性较大（如卵巢或子宫组织、肿瘤组织）情况下的精确诊断及用药指导。其关键科学问题在于解决目前疾病诊断能力不足及疾病分型不够精确的问题，以实现精准预防及疾病治疗的目的。随着经济水平的发展，人类对健康生活的需求日益强烈。近年来，测序技术不断发展，进而推动遗传疾病、代谢疾病、癌症等相关研究不断深入，带动了相关科学研究和医学的重大进步。目前，国际上对于单细胞测序用于疾病诊断，主要集中在胚胎植入前遗传学检测、癌症的分型及后续用药指导等方面。在胚胎植入前遗传学检测方面，提高遗传疾病的诊断能力，对单基因遗传病及染色体遗传病家庭进行胚胎植入前阻断，帮助其获得健康的后代仍旧是主要方向；国际上正在进行的“人类细胞图谱计划”对于遗传及代谢疾病的诊断也具有重要意义；在癌症分型方面，可利用单细胞基因组测序、转录组测序、甲基化组测序等不同的手段，解析肿瘤异质性，实现精准分型，从而指导其精准用药。同时在癌症的发展过程中，可以持续追踪不同细胞的基因表达变化，监测癌症发展。单细胞测序技术在肿瘤免疫微环境及免疫治疗方面可实现对

药物和治疗方案的选择。在我国，由于人口基数大，遗传疾病及癌症发生个体数量众多。对于遗传疾病，目前仅有40%左右的遗传疾病可被诊断并进一步进行胚胎植入前遗传学阻断；在癌症方面，目前中国肿瘤基因图谱计划已逐步启动，致力于描绘中国人群癌症分子图谱，对中国人群癌症治疗及预后提供有效指导，并且利用单细胞测序技术进行的多项临床研究正在开展中。

（10）3D打印技术在再生医学的应用研究

3D打印技术在再生医学的应用研究是指利用3D打印技术制备出与患者生理结构和功能相匹配的组织或器官，从而达到替代和重建器官功能的目的。3D打印技术在临床上已广泛应用于制备各种医学模型、康复医疗器械、个性化植入物等。但是距离制备具有完整解剖结构及生理功能的组织和器官，尚需解决诸多关键性问题，主要包括含生物信息的三维模型构建、安全稳定的生物墨水开发、高分辨率及高打印效率的生物3D打印技术与设备研发、打印的组织器官营养供应、存活与功能的保持等。随着相关技术的发展，3D打印在再生医学领域已经经历了从单种细胞打印到多种细胞打印、并逐步向组织和类器官打印迈进。已有研究者尝试使用脱细胞基质材料等制备新型生物打印墨水，结合高速度、高精度性能的新型3D打印技术与设备，已经在实验室初步实现了血管网络、心脏、肺等生物组织或器官的3D打印。此外，已经有角膜和皮肤等3D打印组织产品进入临床试验阶段，为3D生物打印技术用于再生医学研究与应用方面迈出了前几步。应紧跟这一趋势，争取在近期内有所超越和创新。应特别在生物墨水、生物纸、新型生物打印技术、材料、设备的研发、活体生物反应器的技术设计与应用等方面加快步伐。随着进一步的研究与发展，3D打印技术应提供具有适当解剖结构、力学性能、生物学功能的个性化再生医学产品，从而真正实现组织与器官在结构与功能上的精准再生，为再生医学的发展提供足够的物质和理论保证。

1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1　人工智能在生物医药的应用研究

人工智能是一种用于模拟和延展人类智能的理论、方法、技术及应用的技术科学。人工智能在生物医药的应用研究，是运用人工智能技术，开展医学数据（包括影像、图谱、病历及其他医学传感信息）驱动下的健康筛查与预警、疾病诊断与治疗、康复训练与评估、医疗服务与管理、药物筛选与评估、基因测序与表型等典型生物医药领域的精准、智能、安全应用研究。概括起来共有六个方面：①健康筛查与预警主要涉及疾病筛查、慢病管理、穿戴式健康监测等；②疾病诊断与治疗主要涉及病灶自动识别、治疗智能决策、疗效科学评估、机器人辅助手术及远程手术等；③康复训练与评估主要涉及认知障碍康复、失能和残疾人康复、机器人护理、智能假肢与矫形器（含外骨骼辅具）等；④医疗服务与管理主要涉及电子病历管理、智能自动送药、医学物联网服务等；⑤药物筛选与评估主要涉及药物靶点确认、药物筛选、药物有效性测试、药物安全性评估与不良反应数据管理等；⑥基因测序与表型主要涉及基因筛查、基因组测序、基因编辑、个体化精准医疗等。

人工智能在生物医药的应用研究，正在变革现代生物医药的发展途径和应用方法。一方面，实现了疾病的发病机理、精准诊断、安全治疗和科学评估的全过程智能化管理，显著提升了医师的工作效率，缓解了医师短缺的困境，提升了诊断与治疗的精准性，促进优质医疗资源的优化配置；另一方面，实现了健康的实时监测与预警，医学物联网和医疗健康硬件快速发展，穿戴式健康产业进入快速迭代期。总体来看，人工智能在生物医药的应用研究，正在通过弥补人类能力的短板的智能辅助形式，推动医疗技术进入一个新的时代，促进医疗健康进入量化分析、个体化规划以及实时监控的新阶段。

人工智能在生物医药的应用研究，所面对的关键科学问题如下：①建立有效的医学数据管理框架，实现多源多模医学数据的规范化采集和安全分级管理；②设计新的算法或网络来实现小数据集或者有限数据集的无监督学习；③整合人工智能方法和传统方法，在实现智能诊疗的同时，确保诊疗过程的安全性；④确定和提升医生在人工智能介入过程中的作用，实现临床有效的人机智能协作；⑤制定人工智能相关的医学数据伦理管理措施和法律监督机制，确保患者以及医生的医学隐私和个人信息安全。

目前国际上研究的前沿分支领域包括：①肿瘤诊断：通过深度学习等方法将定量化诊断、疾病预后有机结合，已用于肺癌、宫颈癌、乳腺癌、胃肠癌、鼻咽癌、皮肤癌等疾病的病理诊断，可用于影像筛查，降低误诊率、降低人力成本。②慢病管理：利用深度神经网络和模糊控制等方法，开展阿尔茨海默症分类、高血压管理、糖尿病识别（糖尿病分型、糖尿病性视网膜病变等并发疾病筛查）等，实现慢病的及时预警和有效管理。③基因工程：整合患者病理样本特征提取和基因组测序数据，采用基因筛查、基因组测序和基因编辑等手段，实现疾病预测和检测，进而结合临床指南和循证医学开展个性化治疗。④智能手术：智能机器人技术已经在腔镜外科、骨科、神经外科、整形外科等领域得到了应用，其中美国的达芬奇软组织腔镜机器人和中国自主研发的天玑硬组织机器人在国内得到了较为广泛的应用；北京积水潭医院田伟教授带领医工企团队研发的天玑机器人是中国最早获得国家III类医疗器械注册证的医疗机器人产品，已在国内获得广泛临床应用；人工智能技术开始用于手术路径的自动规划、机器人运动的自主决策、手术效果的自动评估等；5G技术的出现，将进一步促进远程医疗（特别是远程手术）的快速发展。目前中国在骨科机器人领域5G的临床研究走在世界前列，实现了同时远程控制2~3台异地机器人手术的新里程；同时也在积极探索达芬奇等软组织机器人的远程控制技术，已经在动物实验上取得一定成功，下一步急需解决的是影像与机器人控制时延不一致的难题。⑤智能康复：将虚拟现实、智能机器人联合人工智能技术应用于残障康复，出现了智能假肢、康复训练机器人、外骨骼辅具和矫形器、陪护机器人、智能床椅、虚拟现实康复系统、电子人工喉等智能康护设备的研发极为迅速，但是实际用于患者还有一定距离。⑥药物研发：人工智能技术已经在药物靶点确认、药物筛选、药物安全性评估、药物有效性测试、数据收集等方面得到了广泛应用，并开始用于中医药的药理学评估，应用前景非常广阔。

人工智能在生物医药的市场需求巨大，近年来每年以40%的速度在增长。美国是消费主体，中国、欧洲等紧随其后。总体上发展趋势是：人工智能在生物医药的应用，正在从病理诊断向临床治疗发展；人工智能与机器人、5G通信等前沿技术的融合，正在变革现代治疗理念和手段；人工智能在药物研发和基因工程中的应用正在成为热点；将人工智能与传统中医药相结合，开始受到重视。

人工智能在生物医药的应用研究，核心论文产出排名前十位的国家分别来自北美、欧洲和亚洲，其中：美国、中国和英国位居前3位（见表1.2.1），其中：美国占比为52.24%，遥遥领先；中国和英国的占比均超过了10%。各个国家的核心论文篇均被引频次都没有超过70，显示该领域处在一个技术创新极度活跃、应用方法快速迭代的阶段。美国处在主导地位，引领该领域的全球发展方向。从核心论文产出国的合作网络来看，核心论文数量排名前十的国家之间都有着密切的合作关系（见图1.2.1）。

“人工智能在生物医药的应用研究”核心论文发文量排在前十位的机构中，有8个来自美国，另外2个来自亚洲，其中排列前3位的是：美国哈佛大学（Harvard University）、美国斯坦福大学（Stanford University）和韩国高丽大学（Korea University），

中国科学院（Chinese Academy of Sciences）的发文量排在第 6 位（见表 1.2.2）。从核心论文产出机构排名前十的合作网络图来看，机构之间都有合作关系（见图 1.2.2）。

综合以上统计分析结果，对于“人工智能在生物医药的应用研究”，我国目前在应用层面处于与国际并跑的阶段，但在技术研发上仍整体处在跟跑的阶段，建议：①进一步拓展人工智能技术在疾病诊断、慢病预测和健康监测中的应用范围，惠及更大的人群范围；②持续推进人工智能技术在手术、康复、养老等典型医疗机器人应用领域的应用，实现安全、高效、自然的人机智能协作；③强化人工智能技术在药物，特别是中医药领域的应用（如药理学、疗效评测等），加速创新药物研发及试验过程；④强化人工智能领域基础技术和源头技术的创新研究，包括关键电子器件和关键机电零部件的研发；⑤加强医工复合型人才的培养，解决临床需求与工程开发易出现脱节的问题；⑥建立国际化的开放创新平台和合作机制，实现教育资源和科研资源的最大利用。

1.2.2　肠道微生态和稳态免疫

人体微生态重要生理作用的发现，颠覆了人类对于健康和生命过程的认知。近年来大量研究发现，

表 1.2.1　“人工智能在生物医药的应用研究”研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	350	52.24%	19 780	58.27%	56.51
2	China	100	14.93%	4496	13.24%	44.96
3	UK	75	11.19%	3966	11.68%	52.88
4	Germany	58	8.66%	3181	9.37%	54.84
5	Italy	56	8.36%	2215	6.53%	39.55
6	Canada	51	7.61%	3004	8.85%	58.90
7	Netherlands	34	5.07%	2271	6.69%	66.79
8	South Korea	34	5.07%	1764	5.20%	51.88
9	Australia	32	4.78%	1145	3.37%	35.78
10	Spain	31	4.63%	1325	3.90%	42.74

表 1.2. 2　“人工智能在生物医药的应用研究”研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	59	8.81%	3714	10.94%	62.95
2	Stanford Univ	27	4.03%	2406	7.09%	89.11
3	Korea Univ	23	3.43%	1390	4.09%	60.43
4	Univ N Carolina	23	3.43%	1493	4.40%	64.91
5	Columbia Univ	17	2.54%	943	2.78%	55.47
6	Chinese Acad Sci	17	2.54%	793	2.34%	46.65
7	Johns Hopkins Univ	16	2.39%	665	1.96%	41.56
8	Univ Calif San Diego	15	2.24%	786	2.32%	52.40
9	Univ Washington	15	2.24%	742	2.19%	49.47
10	Univ Penn	14	2.09%	1117	3.29%	79.79

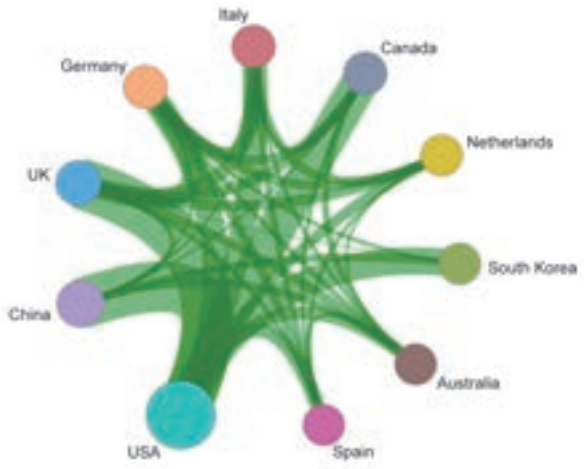

图 1.2.1 “人工智能在生物医药的应用研究”研究前沿的主要国家或地区间合作网络

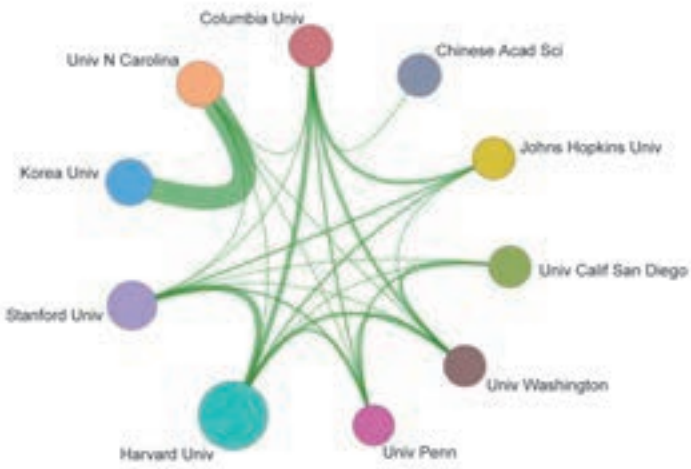

图 1.2.2 “人工智能在生物医药的应用研究”研究前沿的主要机构间合作网络

人类体表和体腔存在数目庞大（超 10^{14} 个，干重约占人体总重的 1%~2%）且结构复杂（包括细菌、古细菌、真菌和病毒等）的微生物群落，定植于胃肠道、口腔、皮肤、泌尿生殖道等，它们所编码的基因数量是人体自身基因数量的 50~100 倍，相当于人体的“第二个基因组”，包含重要的遗传信息。这些微生物与其生存环境构成人体微生态，在人类生命过程中提供必不可少的生理功能，是宿主消化吸收、免疫反应、物质能量代谢的重要维持者，进而直接或间接调控肝脏、消化系统、免疫系统、神经系统和大脑等器官功能，影响人体发育、生长和衰老。这颠覆了“人类作为单一物种行使功能的传统概念”，开创了人体作为超级生物体、与携带微生物互利共生的新纪元。

约 80% 的人体微生物定值在肠道，形成肠道微生态，在疾病中的关键作用正在引发疾病预警、预防、诊断、治疗和康复的全链条重大变革。近年来，大量研究表明，肠道微生态在感染、肝病、代谢性疾病、自身免疫病、肿瘤、大脑和神经精神系统等疾病中具有关键作用，已经成为攻克重大疾病发病机制难题的突破口。肠道微生态研究发现的重要病因微生物以及疾病发生前的微生态结构变化，揭开了疾病预防和预警的新篇章。基于肠道微生态变化的新型诊断方法，不但将成为不明原因感染诊断、新突发感染等难以确诊疾病的必备诊断工具，而且也将是甄别和预测同一疾病中难以区别的复杂病程（如肝硬化和肝癌）的关键手段。慢性疾病绝大多数与免疫炎症相关，肠道是机体最大的免疫器官，免疫细胞的分布及炎症因子的产生可以通过直接或间接与肠道微生物及其代谢产物接触而影响慢性疾病的发生发展。肠道微生物的代谢产物也已证明可以影响肠道的相关炎症信号的表达调控通路。因此在微生物组与慢性疾病的研究中，阐明免疫系统与肠道微生物及微生物代谢的相互作用对于通过微生物组来预防、干预及治疗慢性疾病具有重大意义。大多数口服和注射药物的疗效，甚至于治疗成败都与肠道微生态的组成和功能密切相关，开展相关的评估并在此基础上开展精准治疗，对于提高疾病治疗效果和节省医疗费用都具有巨大的意义。调控肠道微生态不但可以直接治疗或辅助治疗感染、肝病、代谢性疾病、自身免疫病和肿瘤等疾病，而且能够改善大多数疾病发生发展和治疗中造成的微生态破坏及其相应的健康损害、促进康复。

目前肠道微生态和稳态免疫研究所面对的关键

科学问题是：从肠道微生态与人体共生及致病机理角度，高度集成现代医学、生物学和信息科学的理论基础和技术手段，深入揭示肠道微生态的结构功能及其动态变化机制；系统解析肠道微生态在免疫发育、成熟和衰老中的作用与机制；进一步阐释在感染、肝病、代谢性疾病、肿瘤等重要病理过程中的肠道微生态与肠道免疫相互作用的网络机制；解析肠道微生态在药物代谢中的作用，及其在微生物耐药发生发展中的机制；提升人类对肠道微生态与健康的认知水平。总体上发展趋势是：由肠道内单一微生物免疫调控机理研究，转向肠道微生态对宿主免疫稳态建立、维持、调控和修复中的作用和机制，以及其在健康促进和疾病防治中的作用。研究前沿包括：①肠道微生态与免疫系统共发育共进化的规律；②肠道微生态调控免疫稳态在宿主健康促进中的作用和分子机理；③肠道微生态失衡、肠道免疫稳态破坏和疾病发生发展的因果关系和机制；④肠道微生态影响疾病治疗效果的免疫学机理及临床应用。⑤基于肠道微生态变化和免疫稳态变化的疾病预警、诊断和预后分析；⑥调控肠道微生态和免疫稳态促进健康和防治疾病新药物、新策略和新方法研究。

在“肠道微生态和稳态免疫”研究中，核心论文发表位于前3位的国家分别是美国、法国和中国。其中中国发表论文占比为14.29%，是该前沿的主要研究国家之一（见表1.2.3）。从核心论文产出国的合作网络来看，核心论文数量排名前十的国家之间都有合作关系（见图1.2.3）。

“肠道微生态和稳态免疫”核心论文发文量排在前十位的机构中，排列前三位的来自美国和比利时，分别是：美国哈佛大学（Harvard University）、美国密歇根大学（Univ Michigan）和比利时鲁汶大学（Catholic Univ Louvain）（见表1.2.4）。从核心论文产出机构排名前十的合作网络图来看，部分机构间存在合作关系（见图1.2.4）。

综合以上统计分析结果，对于“肠道微生态和稳态免疫”研究前沿，我国目前处于与国外同类研究并跑的态势，提出如下建议。

（1）整合现有多学科优势，巩固和发展肠道微生态和稳态免疫基础研究的底蕴，深入开发研究，打下良好基础。通过“产学研联动”“国际化合作”来推动相关研究。

（2）发挥我们传统医学的优势，从而避免我国的后发劣势，在和西方国家齐头并进赛跑的过程中，还能找出一条由中国特色的肠道微生态和稳态免疫的发展研究方向，从而在战略高度和战术上不

表1.2.3　“肠道微生态和稳态免疫”研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	34	53.97%	4062	53.80%	119.47
2	France	9	14.29%	1367	18.11%	151.89
3	China	9	14.29%	801	10.61%	89.00
4	Germany	5	7.94%	636	8.42%	127.20
5	Belgium	5	7.94%	807	10.69%	161.40
6	Canada	5	7.94%	407	5.39%	81.40
7	Japan	4	6.35%	556	7.36%	139.00
8	UK	4	6.35%	441	5.84%	110.25
9	Sweden	4	6.35%	549	7.27%	137.25
10	Switzerland	4	6.35%	457	6.05%	114.25

图 1.2.3 “肠道微生态和稳态免疫” 研究前沿的主要国家或地区间合作网络

落后于西方国家的发展路径。

（3）在发展策略上，既要鼓励各个学科合作，又要给各个学科和团队充分的自主性和能动性，开发科研人员的热情和主动性，从而以灵活和积极进取的态势走出中国肠道微生态和稳态免疫的新篇章。在中长期战略目标的框架下，不断调整研究发展的短期目标。

（4）组织建立我国的肠道微生态和稳态免疫数据标准，包括检验、分析和计算各方面。由政府组织建立专门机构，对我国微生态研究资源进行协调和整合，搭建各领域研究协作的平台，搭建国家

表 1.2.4 “肠道微生态和稳态免疫”研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Harvard Univ	5	7.94%	732	9.70%	146.40
2	Univ Michigan	4	6.35%	587	7.77%	146.75
3	Catholic Univ Louvain	4	6.35%	706	9.35%	176.50
4	Emory Univ	4	6.35%	252	3.34%	63.00
5	RIKEN	3	4.76%	504	6.68%	168.00
6	INSERM	3	4.76%	550	7.28%	183.33
7	INRA	3	4.76%	216	2.86%	72.00
8	Washington Univ	2	3.17%	406	5.38%	203.00
9	Cent Queensland Univ	2	3.17%	322	4.26%	161.00
10	Monash Univ	2	3.17%	322	4.26%	161.00

注：RIKEN 表示 Institute of Physical and Chemical Research；INSERM 表示 Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale；INRA 表示 Institut National de la Recherche Agronomique。

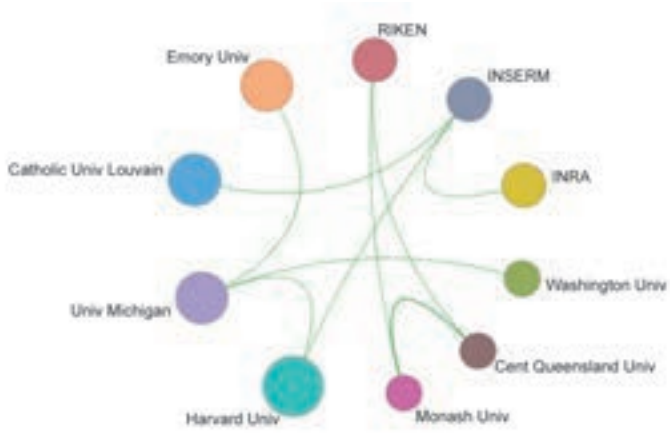

图 1.2.4 “肠道微生态和稳态免疫”研究前沿的主要机构间合作网络

层面的数据平台，实现数据共享。

（5）制定相关政策，指定肠道微生态和稳态免疫研究领域的企业参与各阶段研究，并予以政策扶持，将研究成果进行转化和推广。

1.2.3　脑科学的神经计算和类脑智能研究

脑科学的神经计算和类脑智能研究属于神经科学与数学等多学科交叉领域，是指综合运用数学、计算机科学、神经科学、生物学、物理科学、认知心理学、社会与行为科学以及工程学等众多理论方法和分析工具，对跨时空多尺度海量数据，包括遗传、神经元、脑影像、大规模认知功能和环境等，通过定量分析、计算模型和构建受脑启发的随机计算方法，深入研究神经系统的原理和动力学，破译大脑信息处理与神经编码的原理，解码大脑工作原理，同时，在上述研究基础上，通过信息技术予以参照、模拟和逆向工程，模拟大脑高级认知功能机理，发展类脑智能算法，形成以“类脑智能引领人工智能发展”为标志的新一代人工智能通用模型与算法、类脑芯片器件和类脑智能各类工程技术应用等新型研究领域。

脑科学的神经计算和类脑智能研究包含两个方向：一方面涵盖了对大脑运算本质的神经生物学研究；另一方面，通过计算方法解码大脑智能原理，创建新的智能技术，将广泛覆盖人工智能相关的各个领域。目前，以深度学习为代表的人工智能技术正在加快改变社会生产和消费方式，由其衍生的科技产品和模式，已经在互联网业务、软件、电子商务、云计算、医疗、工业制作等领域获得初步应用。以制造业为例，智能化浪潮正在加快全球制造业的变革，突出代表为德国的“工业 4.0”，通过智能算法、芯片设备的介入，推动整个生产制造过程具备自我感知、自我学习、自我优化能力，日趋开放协同、柔性化、个性化。德勤发布的一项最新人工智能报告称，到 2025 年，全球人工智能市场规模将达到 6 万亿美元。而以类脑智能研究为引领的下一代人工智能技术蕴藏着重大机遇，一旦突破可能将颠覆传统的医疗、消费、城市管理、工业制造等各行各业，催生新的产业爆发点和增长点，产生巨大的经济效益和社会效应。同时，在军事安全、信息数据安全、生物安全、情报分析等一系列重要战略领域都将产生重大影响。

脑科学的神经计算和类脑智能研究最早始于人工智能特别是人工神经网络与计算神经科学相关领域研究的最初阶段。其先驱包括：20 世纪 40 年代至 60 年代，David Marr 提出计算视觉理论，McCullc 与 Pitts 提出神经元模型，Donld Hebb 提出 Hebb 学习律，Rosenblatt 提出感知机概念，图灵提出计算智能；20 世纪 70 年代至 80 年代，David Marr 提出计算视觉理论，甘力俊一在神经网络数学基础、Hopfield 提出“计算能量函数”。脑科学与数学领域专家，加之计算机与信息技术的融合、相互促进，共同促使（人工）神经网络技术两次爆发。然而近 30 年，以神经网络为代表的人工智能技术的发展，缺乏这两个领域的深度参与。

脑科学的神经计算和类脑智能研究涉及的领域包括神经科学、脑科学与人工智能研究领域，其外沿覆盖数学、计算机科学、信息、（纳）微电子，与认知科学、心理学、神经内外科临床与基础医学等。其关键科学问题，一是大脑信息、认知、意识、心理、记忆等所有智能相关机制与原理的探索：如何解析脑功能相关的神经环路结构和神经信息处理机制？对神经元如何编码、转导和储存神经信息有较清楚的理解，但是尚不了解这些神经元的特性是如何通过局部环路和长程环路产生？环路中的神经信息如何产生感知觉、情绪、思维、抉择、意识、语言等各种脑认知功能？二是发展“类人脑”的智能系统新的相关理论、方法与技术：包括智能模型、计算构架、芯片技术等，以及在相关应用领域的应用技术。

脑科学的神经计算和类脑智能的研究前沿包括：一是神经系统结构和功能、神经系统紊乱的机制、神经系统使用的计算策略、神经系统正常或患病状态的机制和过程；二是发展类脑智能算法，包括利用介观数据同化方法，构建全脑模块化计算模型。基于全脑模块化计算模型，界定与解析各模块对应脑区及脑区间的功能。发展认证脑信息编码原理的数学理论。利用 Hilbert 再生核方法发展监督学习、无监督学习和半监督习的数学理论。发展时空非时齐理论，用于分析与处理实时、多模块、具有输入的随机场等。

2013 年，美国推出“推进创新神经技术脑研究计划”，总投入约 30 亿美元，除了由国立卫生研究院承担的传统脑疾病和医学研究之外，还新增了由能源部承担的新型检测成像方法研究（发挥大科学装置优势）、国防部高级研究项目局承担的类脑智能研究方向等。美国情报高级研究计划署（IARPA）目前主要资助“大脑皮层网络的机器智能”的基础研究，旨在逆向大脑的运算法则，彻底改变机器学习，同时利用对大脑表征、转换和学习规则的深入研究和理解，来创造能力更强的类脑机器学习算法。DARPA 在 2018—2020 财年，通过新设项目和延续项目，致力于第三代人工智能基础研究，旨在通过机器学习和推理、自然语言理解、建模仿真、人机融合等方面的研究，突破人工智能基础理论及核心技术。2017 年 4 月 26 日，美军成立“算法战”跨职能小组，并启动“专家工程”，进行“算法战”相关概念、技术及应用研究，旨在推进人工智能、大数据、机器学习等前沿技术的军事应用，维持美军的技术和作战优势。欧盟也于 2013 年推出了以“模拟脑”为中心的脑计划。

在“脑科学的神经极端和类脑智能研究”研究前沿核心论文产出国排名前十位中，美国处于明显领先位置，占比为 47.33%，排名第一。德国和中国核心论文数分别位列第二和第三位，占比分别为 17.67% 和 14.00%。中国在这一领域的研究工作，正在从跟跑阶段向领跑阶段发展。“脑科学的神经计算和类脑智能研究”研究前沿的核心论文篇均被引频次分布在 55.40~84.53（见表 1.2.5），中国核心论文篇均被引频次为 66.05，说明中国学者在该前沿的研究工作的影响力还有较大提升空间。从核心论文产出国的合作网络来看，核心论文数量排名前十的国家之间都在一定范围内有合作关系，其中美国与其他 9 个国家都有合作论文产出，显示目前美国在此研究领域的实力和影响力；与中国合作的国家主要有美国、德国、英国、日本、意大利和瑞士（见图 1.2.5）。

在“脑科学的神经计算和类脑智能研究”核

表 1.2.5 “脑科学的神经计算和类脑智能研究”研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	142	47.33%	10 394	49.09%	73.20
2	Germany	53	17.67%	2936	13.87%	55.40
3	China	42	14.00%	2774	13.10%	66.05
4	UK	34	11.33%	2874	13.57%	84.53
5	Switzerland	26	8.67%	2093	9.89%	80.50
6	Italy	24	8.00%	1610	7.60%	67.08
7	France	22	7.33%	1156	5.46%	52.55
8	Canada	20	6.67%	1469	6.94%	73.45
9	South Korea	13	4.33%	965	4.56%	74.23
10	Japan	13	4.33%	797	3.76%	61.31

图 1.2.5　“脑科学的神经计算和类脑智能研究”研究前沿的主要国家或地区间合作网络

心论文发文量排名前十位的机构中，排列前三位的机构来自美国和德国，分别是美国斯坦福大学（Stanford Univ）、美国哈佛大学（Harvard Univ）和德国蒂宾根大学（Univ Tubingen）；中国科学院（Chinese Acad Sci）的发文量排在第 4 位（见表 1.2.6）。从核心论文产出机构排名前十的合作网络图看，机构间部分有合作（见图 1.2.6）。

综合以上统计分析结果，对于“脑科学的神经计算和类脑智能研究”研究前沿，我国目前处于与国外同类研究并跑的态势，但与发达国家相比，我国仍存在研究队伍体量较小、国际影响力有限等问

表 1.2.6　“脑科学的神经计算和类脑智能研究”研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Stanford Univ	18	6.00%	1627	7.68%	90.39
2	Harvard Univ	18	6.00%	1632	7.71%	90.67
3	Univ Tubingen	12	4.00%	534	2.52%	44.50
4	Chinese Acad Sci	10	3.33%	589	2.78%	58.90
5	Univ Oxford	9	3.00%	920	4.35%	102.22
6	Univ Zurich	9	3.00%	783	3.70%	87.00
7	Univ Toronto	9	3.00%	583	2.75%	64.78
8	Univ Coll London	8	2.67%	919	4.34%	114.88
9	Univ Calif San Diego	8	2.67%	681	3.22%	85.13
10	Korea Univ	8	2.67%	624	2.95%	78.00

图 1.2.6　“脑科学的神经计算和类脑智能研究”研究前沿的主要机构间合作网络

题，特别是基于多学科交叉、多领域跨界的融合性研究不够，制约了该领域的重大攻关和成果突破。建议：①加强多学科人才的培养和引进，利用资金、科研设施、人员待遇等方面的优势，吸引和培养一批跨学科人才，包括认知神经科学领域、类脑计算领域、人工智能领域等方面的高精尖专家；②进一步促进全球科技合作，促进数学、物理、脑科学、计算机等多学科专家日常紧密融合，深度对话合作的机制；③加快布局瞄准脑科学的神经计算和类脑人工智能研究前沿领域，整合全国的力量，开展协同创新和集中攻关，力争在的一些关键性根本问题上赢得先机；④通过对类脑技术的应用场景和未来的技术发展趋势进行预判和分析，开展伦理、数据安全、数据共享以及监管政策研究，制定相关法律法规，为类脑技术的应用保驾护航。

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

医药卫生学部研判的 Top 10 工程开发前沿见表 2.1.1，涉及基础医学、临床医学、药学、医学信息学与生物医学工程和公共卫生与预防医学等学科方向。其中“智能辅助诊断技术”“脑机接口技术”“人源化动物模型技术”是新兴开发前沿，“肿瘤免疫治疗技术”“基因编辑技术”“基于基因组学大数据疾病预测与干预技术”“智能可穿戴健康辅助设备”“基于干细胞的组织重建与器官重塑技术”“单细胞分析技术”组织再生修复材料”是传统研究的深入。各个前沿所涉及的专利 2013—2018 年的逐年施引专利数，见表 2.1.2。

（1）肿瘤免疫治疗技术

肿瘤免疫治疗是应用免疫学的原理和方法，通过激发和增强机体抗肿瘤免疫应答来治疗癌症的一类方法。肿瘤免疫疗法主要包括癌症疫苗、特异性单克隆抗体靶向疗法、细胞因子疗法、免疫检查点抑制剂和过继性细胞疗法等。肿瘤免疫治疗在过去 10 年的临床医学转化中发展迅速，其应用已经挽救了大量晚期癌症患者的生命，显著改善患者生存质量并延长生存期，成为治愈晚期癌症的新希望。同时对当代医学技术的发展和医疗卫生系统的改革具有重大推动作用，已经对各国社会福利与医疗体系的可持续发展产生深远影响。肿瘤免疫治疗起源于 1893 年首例肿瘤疫苗的问世，到 20 世纪 90 年代，以白介素-2（IL-2）为代表的细胞因子疗法和单克隆抗体靶向疗法给肿瘤免疫治疗带来曙光。2013 年《Science》将肿瘤免疫疗法评为十大科学突破之首。

表 2.1.1 医药卫生领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	肿瘤免疫治疗技术	5145	16 846	3.27	2016.6
2	智能辅助诊断技术	14 975	46 454	3.10	2016.2
3	基因编辑技术	2965	16 363	5.52	2016.7
4	基于基因组学大数据疾病预测与干预技术	11 529	36 476	3.16	2015.9
5	脑机接口技术	5060	13 702	2.71	2015.9
6	智能可穿戴健康辅助设备	5918	25 699	4.34	2016.4
7	基于干细胞的组织重建与器官重塑技术	1720	3747	2.18	2015.7
8	人源化动物模型技术	757	1900	2.51	2015.9
9	单细胞分析技术	2500	6669	2.67	2015.9
10	组织再生修复材料	5591	16 273	2.91	2015.7

表 2.1.2　医药卫生领域 Top 10 工程开发前沿的逐年施引专利数

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	肿瘤免疫治疗技术	274	384	470	886	1379	1752
2	智能辅助诊断技术	1237	1702	1930	2509	3164	4433
3	基因编辑技术	108	185	301	500	806	1065
4	基于基因组学大数据疾病预测与干预技术	1470	1547	1689	1943	2329	2551
5	脑机接口技术	513	635	745	918	1120	1129
6	智能可穿戴健康辅助设备	229	507	762	1241	1550	1629
7	基于干细胞的组织重建与器官重塑技术	267	278	236	260	360	319
8	人源化动物模型技术	89	112	98	123	145	190
9	单细胞分析技术	289	321	329	388	525	648
10	组织再生修复材料	852	913	748	925	1062	1091

近 5 年来，以免疫检查点抑制剂和嵌合抗原受体 T 细胞免疫疗法（CAR-T）为代表的肿瘤免疫疗法在多种癌症的治疗中都取得了重大突破，也促进了其他肿瘤免疫疗法的蓬勃发展。目前，肿瘤免疫治疗成为继外科手术、放疗、化疗之后第四类已被证明具有显著临床疗效及优势的肿瘤治疗手段。

（2）智能辅助诊断技术

智能辅助诊断是指由计算机在临床诊断中提供辅助病情分析，帮助医生更充分地利用多方面信息，提升诊断质量和诊疗效率。智能辅助诊断技术的应用不仅可以缓解当前医疗资源的不足，而且还会有力地推动医疗体系改革，有助于医疗领域逐步形成新的战略性新型业态。智能辅助诊断技术起源于 20 世纪 50 年代后期，主要经历了三个发展阶段：首先是以知识工程为主的医疗知识梳理、构建与积累阶段；然后是以集传统机器学习与特征工程于一体的浅层语义学习与推理的发展阶段；第三阶段是以海量医疗数据和深度学习方法为典型特征的医疗诊断决策推理自主学习。目前智能辅助诊断技术正处于由第二向第三阶段跨越发展时期。智能辅助诊断技术研发拟解决的关键技术问题主要包括：医疗知识的表征学习问题、基于诊疗思路的复杂推理模型构建问题、智能辅助诊断结果的泛化问题以及智能诊断模型的生物学可解释性问题等。近年来，世界各国在医学人工智能领域的投资呈现出快速上涨的态势，国内的智能辅助诊断相关行业也迅速崛起，2017 年行业产值已经达到 130 亿元以上，增长 40.7%；2018 年有望突破 200 亿元。目前国内外科技巨头都加紧在智能辅助诊断技术领域进行布局，以 IBM、谷歌和西门子为代表的国外科技公司在智能辅助诊断领域深耕多年，积累了大量的发明专利，形成了一定的技术壁垒；国内的腾讯、联影智能、科大讯飞等高技术企业近几年也在多个关键方向上取得了重要突破，逐步形成了适应我国国情的智能辅助诊断技术的发展道路。

（3）基因编辑技术

基因编辑是指对基因组中的特定 DNA 片段进行敲除、加入、替换操作。目前，基因编辑技术已广泛应用于动物模型的构建、新药靶点的筛选、动植物育种等方面，并逐步从实验室走入临床，应用于抗病毒治疗、CAR-T 细胞治疗、血液疾病治疗等。从 1994 年第一代巨型核酸酶技术出现，到第二代锌指核酸酶（ZFNS）和转录激活样效应因子核酸酶（TALEN）技术普及，基因编辑技术经历了不算漫长但效率和精准度都异常艰难的 20 年。2012 年，第三代基因编辑技术 CRISPR/Cas 问世，

为基因编辑带来了质的飞越。目前基因编辑技术已经可以简易、高效地在活细胞内对基因组单个位点或多个位点进行编辑。同时，以 CRISPR/Cas 技术为基础发展起来的其他相关技术，如基因激活、基因抑制、RNA 编辑、表观遗传编辑、单碱基编辑等，为生物学研究、疾病发生、发展机制研究及疾病治疗提供了强有力的工具。基因编辑研发拟解决的关键技术问题包括：编辑工具本身效率和精准度提升以及基因编辑体系高效递送的问题，扩大编辑窗口问题，脱靶风险评估和开发新一代高精准度、零脱靶风险的基因编辑工具问题，编辑工具应用于实际工作特别是临床中的操作问题，寻找 RNA 编辑工具等问题。从 2012 年 CRISPR/Cas 被发现以来，基因编辑领域如同打开了阀门一般，科学研究领域的文章呈井喷式发表，它有巨大的市场应用前景，特别是在临床应用领域。

（4）基于基因组学大数据疾病预测与干预技术

基因组学大数据是以人类基因组、转录组、表观组和代谢组数据为代表的多层次、高维度数据。近年来，二代和三代测序技术的快速发展使得基因组学大数据呈爆发式增长并为疾病的研究带来新的机遇和挑战。一方面，基因组学大数据能够帮助理解复杂疾病的发病原因，推动疾病的预防和干预。另一方面，基因组学大数据的复杂性使得其向临床的转化发展缓慢。在疾病预测方面，相对于传统的生理生化检测，利用基因组学大数据预测疾病具有早、准、无创等优势，如血液 cfDNA 的检测能够帮助医生筛选出早期癌症。在疾病干预过程中，基因组学大数据能够提高用药和治疗的准确度，对不同患者基因组学大数据的分析有助于个性化医疗的实施。然而，基因组学大数据大规模应用于临床还需要解决三个问题。首先，人们对基因组学大数据的理解还不够深入，对于特定疾病发病的关键基因及其作用方式还需进一步验证。其次，测序技术尚不成熟，用于疾病检测的芯片较少。最后，适用于基因组学大数据临床应用的法律法规还未制定完善，特别是基因组学大数据的存放和获取等问题亟需解决。以表观组为例，虽然目前已有数千篇研究报道疾病相关的表观组改变，但获得 FDA 认可的可用于治疗的表观药物仅有四种。中国作为人口大国，在基因组学大数据的研究方面具有巨大优势，目前已开展了众多针对中国人群的基因组学大数据研究。然而国内对于基因组学大数据的研究还存在若干瓶颈，如测序技术、仪器、试剂等严重依赖美国，为解决数据集中管理共享问题的国家基因组大数据中心刚刚成立。未来，随着测序技术的发展和研究的深入，基因组学大数据将会在疾病的预测和干预中发挥越来越重要的作用。

（5）脑机接口技术

脑机接口（BCI），是一种通过检测中枢神经系统活动并将其转化为人工输出，来替代、修复、增强、补充或者改善中枢神经系统的正常输出，从而改变中枢神经系统与内外环境之间的交互作用的技术。脑机接口技术通过置于头皮或颅内的电极等传感器采集脑神经活动信号，经过信号处理、特征提取、模式识别等过程，可获知人的控制意图、认知或心理状态、神经系统疾病状态等信息，为运动、语言等功能残缺的患者提供新的控制、交流通道或康复手段，也可为健康人群提供更多信息输出通道。随着脑电信号采集技术与信号处理技术的发展成熟，脑机接口技术已逐渐走入临床应用，在诸如中风、注意力缺陷等脑损伤或其他神经系统疾病患者的临床康复中表现出色，为高位截瘫、肌萎缩性侧索硬化症等运动功能障碍患者提供新的运动功能替代方案，为情绪、疲劳、意识状态等的检测和识别提供客观指标。因其在军用和民用领域的广阔前景，我国和欧美发达国家均高度重视对脑机接口技术研究的投入，近年来陆续出现了一系列技术初创公司，并陆续实现技术突破、推出新型产品，基于脑机接口技术的临床康复和日常应用产品已形成一定规模，并且其市场规模持续高速增长。高

空间分辨率的脑神经电、磁信号采集技术、信号分析技术的智能化、高集成度软硬件平台的开发，将是促进脑机接口技术突破的关键，脑机接口技术与材料科学、纳米技术、机器人技术、人工智能技术的深度融合，将为众多神经系统疾病的诊断和康复带来新希望，也将促使脑机接口技术真正成为一种人人可用的人脑与计算机之间高性能信息交互的通道，在未来军用和民用领域都将产生巨大效益。

（6）智能可穿戴健康辅助设备

智能可穿戴健康辅助设备是指能对人体的生理指标进行感知、记录、分析、调控、干预，甚至帮助治疗疾病、维护健康的可穿戴设备。随着电子信息技术的不断发展，智能可穿戴健康辅助设备经历了由附属于智能手机应用的 1.0 时代，到独立通信、智能运行的 2.0 时代，再到以边缘计算、个人数据服务为基础的 3.0 新时代。随着大众健康观念的提升及边缘计算、云计算、大数据、人工智能技术的进一步发展、智能可穿戴健康辅助设备已进入快速成长期，其智能化操作，随时随地监测、预防、治疗疾病的特性为亚健康人群、老年群体以及职业病、慢性疾病和高危人群提供了长期治疗、及时预警的可能。据预测，到 2020 年前后全球可穿戴设备将达到 60 亿美元的市场规模，可穿戴设备数目也将比上一年增长 15.3%，达到 19 850 万台。随着电子设备硬件运算能力、软件算法性能的不断发展，现代医学疾病谱的不断完善，以及国家政策对发展新型穿戴式医疗设备的大力扶持，未来智能可穿戴检测设备将会蓬勃发展：产品功能更加聚焦，个人数据更加完善，用户体验更加良好，远程医疗更加普及，在显著降低医疗成本的同时，提升医疗的普及程度、覆盖范围与专业化水准，最终达到疾病预防的目的，从而推进大众健康。

（7）基于干细胞的组织重建与器官重塑技术

基于干细胞的组织重建与器官重塑技术是指以干细胞为重要元素与生物材料、组织微环境要素、3D 生物打印等组织工程构建技术为一体的制备仿生组织与器官的生物医学工程技术。其涉及到的关键技术问题有：具有靶组织器官功能的干细胞或干细胞源的功能细胞；生物力学性适可，生物相融性良好的可降解材料；适应组织再生的血供、因子、细胞基质等组织微环境要素；先进的 3D 生物打印等相关构建技术。该技术的发展将进一步推动人类对生命发育过程、正常组织器官功能维持、疾病发生与发展、组织器官再生与功能重建的深入探索与认识；并从多维度模拟并仿生制备组织与器官，从成分仿生、结构仿生，到功能重建，实现组织器官重建，实现从基础向人体应用的转化；为人类健康提供新技术、新方法与新产品；为提升与改善患者生活质量、延长健康寿命提供可行性途径；为组织工程与再生医学新兴产业发展提供强大的支撑。

（8）人源化动物模型技术

人源化动物模型技术是指在实验动物体内实现特定人类细胞或组织器官的长期稳定生长与分化，可用于高度模拟人类组织器官的生理功能和相关疾病的发生发展过程，为疾病的相关基础和防治等研究提供重要支持。其关键技术问题包括新型人源化动物模型的构建技术、受体实验动物资源库的发展、模型标准化体系的建立、模型规模化构建与应用技术等方面。人源化动物模型可在尽可能接近于人体自然的状态下实现对人类重要疾病过程的多维度多模态模拟，并开展相关新型药物或者防治方法的筛选与评价研究，特别是在具有严格人类种属特异性的疾病或病原体研究中具有不可替代的优越性。目前，人源化动物模型技术在国内外均受到高度关注与重视，相关技术和新型模型发展十分迅速。近年来已在多种单组织或器官的人源化动物模型上取得较大进展，已成功构建了多种重要人类病原体与疾病的人源化动物模型，并在相关新型药物和治疗方法的基础与应用研究中发挥了重要作用。后续将以人类干细胞和新型模式动物研究为基础，以细胞体内诱导分化技术和器官重建技术为突破口，发展高

效的同时具有多种同源组织器官和免疫系统的新型人源化动物模型，研制包括重要感染性疾病、恶性肿瘤、自身免疫性疾病等的新型人源化感染与疾病动物模型。同时，将逐步实现人源化动物模型的标准化，并建立规模化的构建与应用技术体系。我国目前已在该领域建立了良好的发展基础，根据目标需求和依托优势资源建立了多种人源化动物模型，具备较强的持续发展能力。

（9）单细胞分析技术

单细胞分析技术指的是研究单个细胞基因组、转录组、蛋白质组、代谢组的一系列组学技术，是定义细胞类型、状态、分化轨迹，细胞相互作用最直接有效的手段。自2009年以来，基于高通量测序、质谱流式细胞、单分子成像等技术领域的飞速发展，单细胞分析实现了从一个细胞的转录组分析拓展到同时对几万个甚至上百万个细胞进行转录组、基因组、代谢中间产物、细胞表面抗原分子等多层面组学分析。这些技术突破使得绘制人类与各种模式生物体内所有细胞图谱成为可能。迄今为止，2016年启动的国际间合作的人类细胞图谱计划已初步完成构建免疫系统、神经系统、表皮等多种器官组织里的单细胞图谱，为发现和定义正常与疾病细胞的类型提供了重要参考图谱。同时，世界上多个实验室对于生殖发育早期阶段、肿瘤、患者治疗过程的单细胞研究成果，正在不断更新我们对发育和疾病中细胞动态分化与克隆演变过程的理解。随着高通量测序成本持续降低、单分子质谱与成像技术处理方法的完善、针对单细胞组学数据的新型分析工具的开发与应用，单细胞分析技术将逐步从生物学基础研究推向临床转化研究。在未来的10年里，单细胞分析技术有望推动构建人类所有重大疾病细胞图谱，深化对个体内病变细胞类型、数量以及对药物敏感异质性的认识，从而成为临床精确诊断、个性化治疗和靶向治疗的重要基础。

（10）组织再生修复材料

组织再生修复材料是指能通过材料本身的理化性质，或通过负载细胞、生长因子、药物等，对组织器官再生以及功能修复起到重要作用的生物材料。目前，组织再生修复材料设计与制备思路包括恢复缺损区域外形和结构，模拟组织生长发育生理微环境，精确调控组织再生进程、实现宿主与材料相互反应等。组织再生修复材料体现了材料学、生物学、医学及先进制造技术等多领域交叉学科的发展。目前组织再生修复材料已成功应用于皮肤、血管、角膜、骨、软骨以及口腔软、硬组织等缺损的再生修复中。此外，结合数字医学技术和3D打印技术，组织再生修复材料还可用于缺损的个性化精准治疗。利用组织再生材料构建微组织、类器官或器官芯片，除用于组织再生外，还可用于发育学的研究和药物筛选等临床药理学的研究。由于人口老龄化等原因，各种人体组织和器官损伤等功能缺失或残障的人口数量与日俱增，单纯依靠传统的治疗模式难以解决组织和器官缺损修复等诸多问题，使得组织再生修复材料的市场需求不断增加。据预测，全球再生医学的市场规模将从2018年的100.7亿美元，增长到2025年的489.7亿美元，复合年增长率为25.4%。作为再生医学的重要组成部分，组织再生修复材料具有极大的发展空间。现在组织再生修复材料研发面临一些瓶颈问题亟待突破，例如材料诱导性能不足，组织再生过程缓慢；组织器官结构和功能的复杂性及大块组织器官再生的限制；机体状态的差异等。因此，提升材料诱导活性、构建大块复杂组织器官功能化再生材料、综合实现个性化再生需求等是本领域研究的发展趋势。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 肿瘤免疫治疗技术

肿瘤免疫治疗是应用免疫学的原理和方法，通过激发和增强机体抗肿瘤免疫应答来治疗癌症的一类方法。肿瘤免疫疗法主要包括癌症疫苗、特异性单克隆抗体靶向疗法、细胞因子疗法、免疫检查点

抑制剂和过继性细胞疗法等。肿瘤免疫治疗在过去十年的临床医学转化中发展迅速，其应用已经挽救了大量晚期癌症患者的生命，显著改善患者生存质量并延长生存期，成为治愈晚期癌症的新希望。同时对当代医学技术的发展和医疗卫生系统的改革具有重大推动作用，已经对各国社会福利与医疗体系的可持续发展产生深远影响。肿瘤免疫治疗起源于1893年首例肿瘤疫苗的问世，到20世纪90年代，以白介素-2（IL-2）为代表的细胞因子疗法和单克隆抗体靶向疗法给肿瘤免疫治疗带来曙光。2013年《Science》将肿瘤免疫疗法评为十大科学突破之首。近5年来，以免疫检查点抑制剂和嵌合抗原受体T细胞免疫疗法（CAR-T）为代表的肿瘤免疫疗法在多种癌症的治疗中都取得了重大突破，也促进了其他肿瘤免疫疗法的蓬勃发展。目前，肿瘤免疫治疗成为继外科手术、放疗、化疗之后第四类已被证明具有显著临床疗效及优势的肿瘤治疗手段。

肿瘤免疫治疗拟解决的关键技术问题主要包括：寻找肿瘤特异性靶标问题，研究肿瘤免疫逃逸机制及其对策问题，克服实体肿瘤微环境和异质性问题，生物标志物鉴定和应用问题，研发更持久有效的免疫疗法问题，改善免疫疗法安全性问题，开发新的肿瘤免疫疗法及联合治疗技术问题。肿瘤患者数量逐年增加，市场需求非常巨大。肿瘤免疫疗法作为一种革命性地改变癌症治疗标准和理念的新兴产业，全球市场增长迅速。2016年全球肿瘤免疫疗法的市场规模达619亿美元，伴随着市场需求的不断上升，其市场规模不断增加，预计到2021年将增长至1200亿美元，年复合增长率保持在14%以上。随着肿瘤免疫疗法的飞速发展，全球肿瘤免疫治疗药物数目将持续增加，参与肿瘤免疫疗法项目的研发机构与企业数目不断增长，中国科研机构研发水平与世界逐渐接轨，在全球肿瘤免疫疗法研发项目排名中崭露头角。2013—2018年在肿瘤免疫治疗技术开发前沿的专利中，中国申请数量占比达到了18.51%，在专利数量方面仅次于美国，是在生物医药该细分领域的前沿进行重点布局国家之一，但专利被引用总量及平均被引频次和美国差距较大，专利质量有较大的提高空间。肿瘤免疫治疗目前国际上研究的热点领域包括：①癌症疫苗：利用含有肿瘤特异性抗原或肿瘤相关抗原的活性物质和处理后的肿瘤细胞等来诱发患者自身特异性免疫应答，克服免疫抑制状态来抑制肿瘤生长的主动免疫治疗方法。②特异性单克隆抗体靶向疗法：针对肿瘤特异性抗原设计合成的单克隆抗体通过修饰肿瘤细胞信号级联或肿瘤–基质相互作用直接杀伤肿瘤细胞，也可通过抗体依赖性细胞毒性（ADCC）效应和补体依赖性细胞毒性（CDC）作用等效应机制特异性杀伤肿瘤细胞。③细胞因子疗法：通过具有多种生物活性的细胞因子发挥直接的抗肿瘤作用或间接增强抗肿瘤免疫应答。如肿瘤坏死因子α（TNF-α）和白介素6（IL-6）直接影响肿瘤细胞的生长和存活。IL-2和干扰素α（IFN-α）促进T细胞和自然杀伤（NK）细胞的生长和活化。④免疫检查点抑制剂：利用免疫检查点分子的特异性抗体阻断免疫抑制信号（如PD-1/PD-L1，CTLA-4等），激活免疫细胞识别并持久杀伤肿瘤细胞。⑤过继性细胞疗法：从肿瘤患者体内分离免疫活性细胞，在体外进行扩增和功能鉴定后回输给患者，达到直接杀伤肿瘤细胞或激发机体的免疫应答杀伤肿瘤细胞的目的。目前具有代表性的过继性细胞疗法CAR-T是利用基因工程技术修饰T细胞，使之能够以非MHC限制性的方式特异性地识别肿瘤细胞并直接进行高效杀伤，具有精准、靶向、持久的癌症治疗作用。近年来全球肿瘤发病率不断上升，我国是全球肿瘤患者人数最多的国家，且肿瘤发病率和死亡率仍在持续走高，据Global Oncology Trend 2019报道，2018年中国的肿瘤治疗市场规模高达约90亿美元，年增长达11.1%。肿瘤免疫疗法的快速发展挽救了大量癌症患者的生命，改善生存质量，甚至使患者回归工作岗位，减轻整体社会负担，促进经济发展，具有巨大的经济价值和深远

的社会价值。随着近年来中国在肿瘤免疫治疗领域相关创新药政策的推进及研发力度的增强，越来越多的科研机构和医药企业涌入该行业市场，尤其在过继性细胞疗法新兴领域进行了重点布局，目前我国肿瘤免疫治疗开发整体水平正处在不断攀升并实现巨大飞跃的大好时机。相信未来，在我国肿瘤免疫治疗领域已取得的良好成果基础之上，充分发挥我国临床样本资源优势，优化资源配置，通过产学研医的合作交流与基因组学、蛋白质组学、系统生物学等前沿学科紧密结合，紧跟应用免疫学研究的前沿趋势，有望打破国际垄断和技术封锁，在免疫治疗领域的全球竞争中确立我国的产业领先地位，最终为促进医疗健康事业的发展做出贡献。

2013—2018 年“肿瘤免疫治疗技术”开发前沿的专利，排名前 3 的国家或地区为美国、中国、德国，其中中国申请人的专利占比达到了 18.51%，在专利数量方面仅次于美国，是该工程开发前沿的重点布局国家之一，但平均被引频次仅为 1.72（见表 2.2.1），证明专利质量尚有提高空间。从专利产出的国家之间的合作网络（见图 2.2.1）来看，美国和瑞士、中国、英国以及德国合作较为密切。

专利产出排名前 3 的机构分别是德克萨斯大学系统（The Board of Regents of the university of Texas System）、美国丹娜法伯癌症研究所（Dana-Farber Cancer Institute Inc.）和百时美施贵宝公司（Bristol-Myers Squibb Company）（见表 2.2.2）。而从主要机构间的合作网络（见图 2.2.2）来看，诺华公司（Novartis AG）和宾夕法尼亚大学（The Trustees of the university of Pennsylvania）之间、罗氏公司（F. Hoffmann-LA Roche AG）和基因泰克公司（Genentech Inc.）之间存在长期合作关系。

2013—2018 年“肿瘤免疫治疗技术”开发前沿中热点领域“单克隆抗体靶向疗法”和“过继性细胞疗法”的专利数量比重较大，并且逐年攀升。中国申请人在“单克隆抗体靶向疗法”中申请的专利占比达到了 15.76%，美国申请的专利占比为 60.39%。中国申请人在“过继性细胞疗法”中的专利数量占比达到了 34.54%，在专利数量方面仅次于美国 44.13%。2018 年，中国申请人在“过继性细胞疗法”中的专利数量占比达到了 36.50%，美国申请的专利占比为 43.10%（见图 2.2.3），说明中国在过继性细胞疗法新兴领域进行了重点布局，在专利数量方面具有赶超美国的态势。

综合以上统计分析结果，在“肿瘤免疫治疗技术”开发前沿领域，我国目前处于与国外同类专利跟跑的态势，在专利数量方面比重较大，是该领域

表 2.2.1 “肿瘤免疫治疗技术”开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	2786	55.50%	11 927	71.27%	4.28
2	China	929	18.51%	1596	9.54%	1.72
3	Germany	266	5.30%	1321	7.89%	4.97
4	UK	198	3.94%	554	3.31%	2.80
5	Switzerland	189	3.76%	1829	10.93%	9.68
6	Japan	178	3.55%	234	1.40%	1.31
7	France	163	3.25%	765	4.57%	4.69
8	Canada	81	1.61%	230	1.37%	2.84
9	Israel	78	1.55%	159	0.95%	2.04
10	Australia	71	1.41%	50	0.30%	0.70

表 2.2.2　“肿瘤免疫治疗技术”开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	TEXA	113	2.25%	405	2.42%	3.58
2	DAND	100	1.99%	725	4.33%	7.25
3	BRIM	89	1.77%	896	5.35%	10.07
4	USSH	88	1.75%	287	1.71%	3.26
5	NOVS	87	1.73%	1280	7.65%	14.71
6	UPEN	83	1.65%	1324	7.91%	15.95
7	HOFF	77	1.53%	689	4.12%	8.95
8	IMMA	67	1.33%	215	1.28%	3.21
9	GETH	65	1.29%	570	3.41%	8.77
10	SLOK	59	1.18%	367	2.19%	6.22

注：TEXA 表示 The Board of Regents of the university of Texas System；DAND 表示 Dana-Farber Cancer Institute Inc.；BRIM 表示 Bristol-Myers Squibb Company；USSH 表示 The United States of America as represented by the Secretary department of Health & Human Service；NOVS 表示 Novartis AG；UPEN 表示 The Trustees of the university of Pennsylvania；HOFF 表示 F. Hoffmann-LA Roche AG；IMMA 表示 Immatics Biotechnologies Gmbh；GETH 表示 Genentech Inc.；SLOK 表示 Memorial Sloan Kettering Cancer Center。

图 2.2.1　“肿瘤免疫治疗技术”开发前沿的主要国家或地区间合作网络

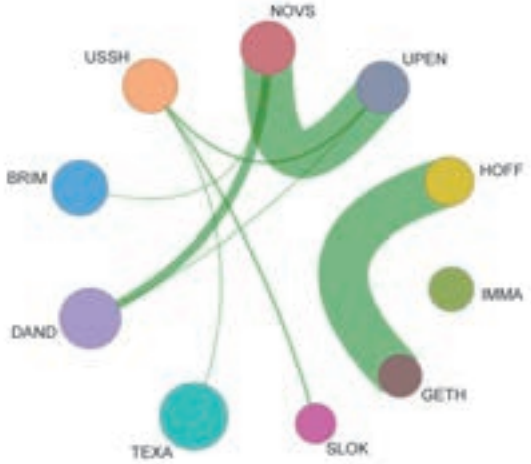

图 2.2.2　“肿瘤免疫治疗技术”开发前沿的主要机构间合作网络

专利的重点布局国家之一。

2.2.2　智能辅助诊断技术

智能辅助诊断是指由计算机在临床诊断中提供辅助病情分析，帮助医生更充分地利用多方面信息，提升诊断质量和诊疗效率。智能辅助诊断技术的应用不仅可以缓解当前医疗资源的不足，而且还会有力地推动医疗体系改革，有助于医疗领域逐步形成新的战略性新型业态。智能辅助诊断技术起源于 20 世纪 50 年代后期，主要经历了三个发展阶段：首先是以知识工程为主的医疗知识梳理、构建与积累阶段；然后是以集传统机器学习与特征工程于一体的浅层语义学习与推理的发展阶段；第三阶段是以海量医疗数据和深度学习方法为典型特征的医疗诊断决策推理自主学习。目前智能辅助诊断技术正处于由第二向第三阶段跨越发展时期。

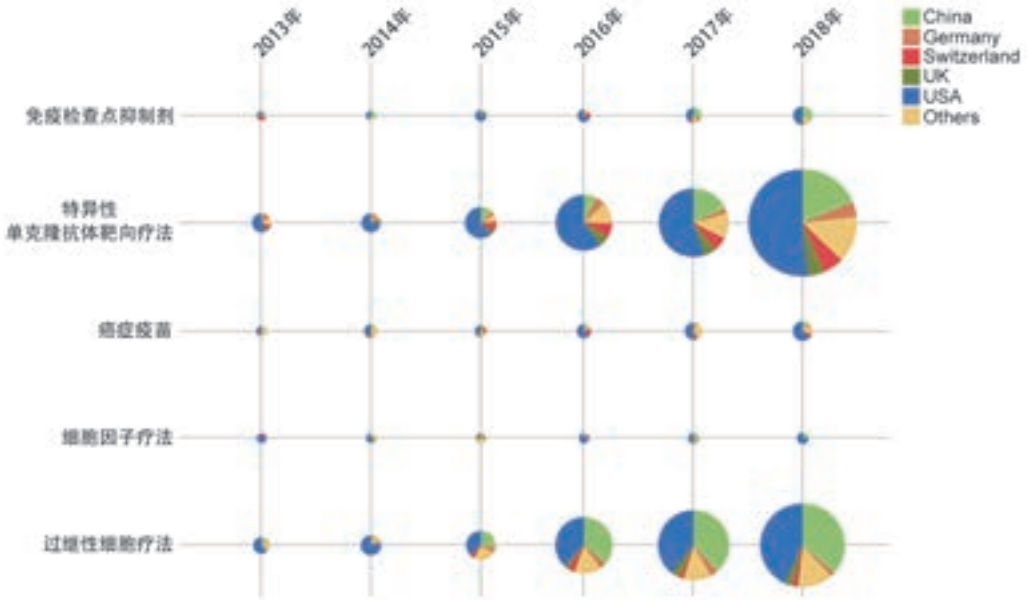

图 2.2.3 “肿瘤免疫治疗技术”开发前沿中热点领域专利的主要产出国家或地区

智能辅助诊断技术研发拟解决的关键技术问题主要包括：医疗知识的表征学习问题、基于诊疗思路的复杂推理模型构建问题、智能辅助诊断结果的泛化问题以及智能诊断模型的生物学可解释性问题等。近年来，世界各国在医学人工智能领域的投资呈现出快速上涨的态势，国内的智能辅助诊断相关行业也迅速崛起，2017 年行业产值已经达到 130 亿元以上，增长 40.7%；2018 年有望突破 200 亿元。目前国内外科技巨头都加紧在智能辅助诊断技术领域进行布局，以 IBM、谷歌和西门子为代表的国外科技公司在智能辅助诊断领域深耕多年，积累了大量的发明专利，形成了一定的技术壁垒；国内的腾讯、联影智能、科大讯飞等高技术企业近几年也在多个关键方向上取得了重要突破，逐步形成了适应我国国情的智能辅助诊断技术的发展道路。

2013—2018 年，从“智能辅助诊断技术”前沿发明专利的申请情况来看，美国、中国和日本占据了专利申请量的前三名，其中中国申请的专利占比达到了 25.01%，是该工程开发前沿的重点布局国家之一，但平均被引频次仅为 0.93，远低于美日等发达国家，反映出我国的专利质量和基础研究尚待进一步提升。目前智能辅助诊断技术发展的几个热点方向主要包括：①面向医学大数据的深度学习底层数学模型：构建数学模型是建立智能辅助诊断技术的基础，医疗数据所描述的分子、细胞、组织、器官通常具有多维度属性，研究深度学习底层数据模型可以作为一个接口把多维度的数据连接起来，进而揭示数据的本质属性以及背后的逻辑关系。②影像组学智能分析：利用人工智能技术，全方位处理 X 射线、CT、核磁共振、正电子断层扫描、超声、病理等全模态的影像数据，为医生提供全栈式的智能辅助决策，从而有效提高医生诊疗效率和诊断精度。③基因组学智能诊断：利用智能分析方法解码癌症等重大疾病背后的基因信息，通过开发基于人工智能的辅助决策系统，从海量基因数据中分析出癌细胞的生物标记物，进而对癌细胞在体内的活动进行跟踪和预测。④体征监测及智能分析：将智能分析算法集成到随身穿戴设备的持续、即时和跟踪监测中，构建深度学习网络模型对心电图、连续血糖等体征数据进行分析，不仅可以在第

一时间对潜在的疾病进行预警，而且还能够为后续的诊断提供重要的参考依据。⑤临床数据智能辅助决策：开发基于人工智能的临床数据管理平台，将临床数据结构化、模型化，并结合数据挖掘等智能分析方法，监控临床治疗体征，评估诊断方法，可视化数据结果，从而将临床决策规划嵌入到临床治疗过程中，进而指导医生的医疗行为。⑥智能辅诊自然语言处理：主要研究人工智能技术处理及运用自然语言，为患者进行症状分析，并提供就诊建议、导诊和导医决策、电子病历的录入等个性化的医疗服务，从而提升就诊效率、提高病历质量。⑦医学人工智能专用芯片：医学人工智能专用芯片是智能辅助诊断技术实际应用的算力保障，不仅需要适应专业医疗场景下对实时性的要求，而且还需要充分支持医学诊断所涉及的各型深度学习算法的加速与优化，从而提供更加快速、更加准确的医学诊断。⑧医疗辅助机器人，是一个交叉领域，不仅涉及智能辅助诊断技术，包括对病灶的自动识别、诊断和决策，而且还涉及机器人、生物材料以及无线传输等高精尖技术，通过这些技术的有机融合，推动胶囊机器人、手术机器人等高端医疗装备的升级发展。随着人工智能的迅速发展，人工智能在医疗场景中的技术积累愈发成熟，智能辅助诊断作为这一领域的典型技术受到了国际社会的广泛关注。尤其在我国，由于具有医疗大数据的独特优势，为智能辅助诊断技术的发展提供了基础条件。然而，各个医院之间由于存在信息系统不匹配，导致“信息孤岛”现象非常明显，与此同时医疗数据的标准化、结构化严重不足造成了有用的医疗数据非常匮乏，这些现状都严重制约了智能辅助诊断技术的发展。虽然目前已开发的面向各种疾病的智能辅助诊断系统都宣称具有较高的诊断精度，但是距离实际应用还存在一定差距。各企业或高校、科研院所在开发智能诊断模型时都是建立在自备的有限数据库基础之上，而实际应用场景往往更加复杂，因此在未得到大规模临床检验证实之前均无实用价值可言。但随着业界与医院合作的日趋紧密，未来有望建立多中心的智能辅助诊断临床验证开放平台，将会为智能辅助诊断技术的临床应用创建有利的条件。另一方面，智能辅助诊断技术对医疗责任的辨识带来诸多障碍，特别是在判定医疗过失中的责任范围，需要完善智能辅助诊断相关的法律法规，明确医疗责任主体，清晰权责范围。当前，我国借助对人工智能国家级开放平台的建立汇聚了众多医学人工智能领域的高端人才，加快推进智能辅助诊断技术朝着更深层次的跨学科方向发展，努力应对未来的技术挑战。

“智能辅助诊断技术”工程开发前沿的专利排名前 3 的国家为美国、中国和日本，其中中国作者申请的专利占比达到了 25.01%，在专利数量方面仅次于美国，是该工程开发前沿的重点布局国家之一，但平均被引频次仅为 0.93（见表 2.2.3），远低于其他国家，证明专利质量尚待提升。从专利产出的国家之间的合作网络（见图 2.2.4）来看，美国和德国、加拿大合作较为密切。专利产出排名前 3 的机构分别是美国火山公司（Volcano Corporation），美国国际商业机器公司（International Business Machines Corporation）和德国西门子公司（SIEMENS AG）（见表 2.2.4）。从主要机构间的合作网络（见图 2.2.5）来看，西门子公司（SIEMENS AG）和 Cerner 创新公司（Cerner Innovation Inc.）之间存在合作关系。

2.2.3　基因编辑技术

基因编辑是指对基因组中的特定 DNA 片段进行敲除、加入、替换操作。目前，基因编辑技术已广泛应用于动物模型的构建、新药靶点的筛选、动植物育种等方面，并逐步从实验室走入临床，应用于抗病毒治疗、CAR-T 细胞治疗、血液疾病治疗等。从 1994 年第一代巨型核酸酶技术出现，到第二代锌指核酸酶（ZFNS）和转录激活样效应因子核酸酶（TALEN）技术普及，基因编辑技术经历

表 2.2.3 “智能辅助诊断技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	6556	43.78%	33 029	71.10%	5.04
2	China	3745	25.01%	3485	7.50%	0.93
3	Japan	967	6.46%	2047	4.41%	2.12
4	South Korea	868	5.80%	1073	2.31%	1.24
5	Germany	541	3.61%	1500	3.23%	2.77
6	Netherlands	488	3.26%	1041	2.24%	2.13
7	Canada	297	1.98%	1244	2.68%	4.19
8	Israel	209	1.40%	920	1.98%	4.40
9	Taiwan of China	193	1.29%	318	0.68%	1.65
10	France	190	1.27%	330	0.71%	1.74

表 2.2.4 “智能辅助诊断技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	PHIG	465	3.11%	1101	2.37%	2.37
2	IBMC	352	2.35%	478	1.03%	1.36
3	SIEI	318	2.12%	1257	2.71%	3.95
4	SMSU	204	1.36%	582	1.25%	2.85
5	HEAR	198	1.32%	793	1.71%	4.01
6	GENE	130	0.87%	327	0.70%	2.52
7	BSCI	112	0.75%	319	0.69%	2.85
8	MEDT	95	0.63%	519	1.12%	5.46
9	UBIO	88	0.59%	343	0.74%	3.90
10	CRNR	79	0.53%	213	0.46%	2.70

注：PHIG 表示 Volcano Corporation；IBMC 表示 International Business Machines Corporation；SIEI 表示 SIEMENS AG；SMSU 表示 Samsung Electronics Co., Ltd.；HEAR 表示 HeartFlow Inc.；GENE 表示 General Electric Company；BSCI 表示 Boston Scientific Scimed Inc.；MEDT 表示 Medtronic MiniMed Inc.；UBIO 表示 uBiome Inc.；CRNR 表示 Cerner Innovation Inc.。

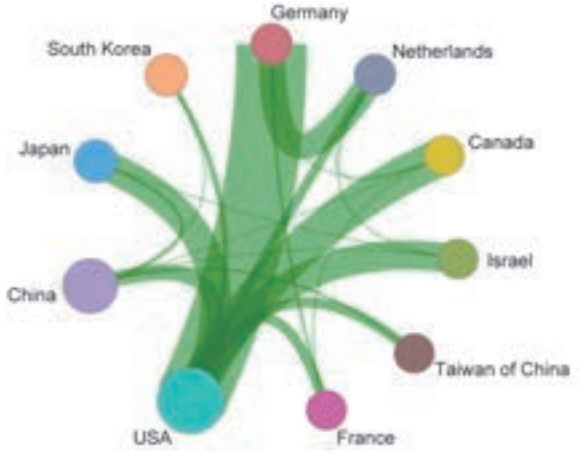

图 2.2.4 “智能辅助诊断技术”工程开发前沿主要国家或地区间的合作网络

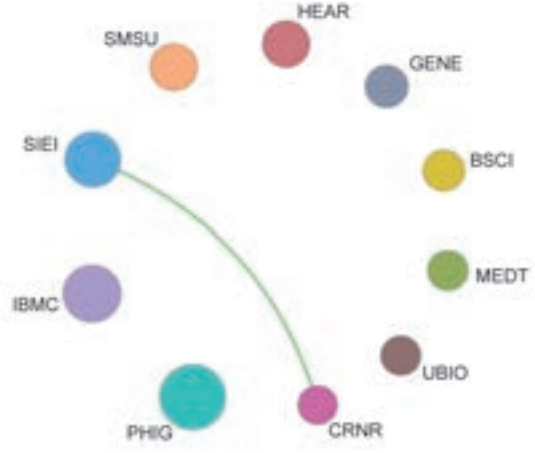

图 2.2.5 “智能辅助诊断技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

了不算漫长但效率和精准度都异常艰难的 20 年。2012 年，第三代基因编辑技术 CRISPR/Cas 问世，为基因编辑带来了质的飞越。目前基因编辑技术已经可以简易、高效地在活细胞内对基因组单个位点或多个位点进行编辑。同时，以 CRISPR/Cas 技术为基础发展起来的其他相关技术，如基因激活、基因抑制、RNA 编辑、表观遗传编辑、单碱基编辑等，为生物学研究、疾病发生、发展机制研究及疾病治疗提供了强有力的工具。

基因编辑研发拟解决的关键技术问题包括：编辑工具本身效率和精准度提升以及基因编辑体系高效递送的问题，扩大编辑窗口问题，脱靶风险评估和开发新一代高精准度、零脱靶风险的基因编辑工具问题，编辑工具应用于实际工作特别是临床中的操作问题，寻找 RNA 编辑工具等问题。从 2012 年 CRISPR/Cas 被发现以来，基因编辑领域如同打开了阀门一般，科学研究领域的文章呈井喷式发表，它有巨大的市场应用前景，特别是在临床应用领域。与之相应的是专利技术申请数量攀升。全球“基因编辑技术”工程开发前沿的专利，排名前 3 的国家或地区为美国、中国、西班牙，其中中国专利占比达到了 28.23%，在专利数量方面仅次于美国，是该工程开发前沿的重点布局国家之一（见表 2.2.5）。从各国家之间的合作网络（见图 2.2.6）来看，美国和瑞士合作较为密切。值得一提的是“基因编辑技术”的核心技术专利，特别是最早期的一批基础核心专利在欧美国家中，这也是中国在该领域的专利数量不低，但平均被引频次仅为 2.14（见表 2.2.5），在 Top 10 产出国家中专利平均被引数排名第 7，专利质量有待加强的客观原因之一。专利产出排名前 3 的机构分别是哈佛大学（Harvard College）、麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology）和博德研究所（The Broad Institute Inc.）（见表 2.2.6）。从主要机构间的合作网络（见图 2.2.7）来看，排名前 3 的机构之间存在密切的合作关系。综合以上统计分析结果，“基因编辑技术”开发前沿我国目前处于与国外同类专利跟跑的态势，在专利数量方面比重较大，是该开发前沿的重点国家之一。

“基因编辑技术”目前在国际上的发展热点领域包括：①对单碱基突变疾病的治疗：基因编辑技术可以在分子水平对目的 DNA 的缺陷进行修正，从而治疗因 DNA 突变造成的疾病。该方法可以选择将病毒包被的基因编辑体系递送到致病位点，在局部区域内对疾病进行在体基因治疗，如遗传性失明、耳聋等。对于非局部病变疾病，可通过体外对病人细胞进行基因编辑，再将编辑后的细胞回输病人体内，如地中海贫血病。②癌症治疗，在体外结合 CAR-T 技术，对病人本身细胞进行基因编辑，制备靶向患者肿瘤的杀伤性 T 细胞，将该类 T 细胞重新回输患者体内，从而治疗癌症。③表观遗传疾病治疗及体内转分化治疗，如利用 CRISPR/dCas9 技术，对在体细胞进行打开或关闭表观遗传印记操作从而治疗表观遗传疾病。如对在体细胞进行基因激活有望将神经胶质细胞转分化为神经细胞从而治疗神经退行性疾病。④临床诊断试剂盒开发，利用 Cas 可以靶向特定核酸功能，再辅以可见信号级联放大体系，CRISPR/Cas 系统可以从患者样本中检测到微量病源核酸序列。⑤新药靶点筛选，利用 CRISPR/Cas 系统可高通量筛选性能，从而开发出疾病新药。⑥动物模型构建，利用 CRISPR/Cas9 可高效率地制备动物模型，无论是小型模式生物果蝇、线虫、大小鼠还是大动物非人灵长类猴子都可以达到前所未有的效率和准确性，为科学研究或者临床试验提供有力工具。⑦动植物育种，对动物和植物进行基因编辑，获得预期性状亲本，为农业和畜牧业提供优良种子。“基因编辑技术”广阔的应用前景将会助力未来世界的发展，特别是医疗卫生行业，随着人口老龄化加剧，疾病人群随之攀升，基因治疗需求缺口巨大，基因药必将是各个国家争

相进入的蓝海市场。虽然中国在“基因编辑技术”专利申请中属于跟跑态势，专利数量比重较大，但是基础核心专利在欧美国家中，我们要开发新药必将运用到基础技术，也必将承担高额的专利费用；中国基因治疗产业不健全，基因治疗概念在国外已经有几十年的积累，虽然我国的基础科学研究已经接近欧美科学家水平，但是在中国基因治疗产业才刚刚开始，先天经验和社会政策配套不到位；基因编辑本身的脱靶问题成为阻碍基因治疗甚至整个“基因编辑技术”领域发展的绊脚石。如实地检测基因编辑脱靶效应以及获得高精度的编辑工具是全世界该领域专家的共同目标。

表 2.2.5 “基因编辑技术”工程开发前沿中专利的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	USA	1433	48.33%	12 651	77.31%	8.83
2	China	837	28.23%	1789	10.93%	2.14
3	Spain	142	4.79%	28	0.17%	0.20
4	Switzerland	90	3.04%	651	3.98%	7.23
5	France	80	2.70%	669	4.09%	8.36
6	South Korea	79	2.66%	145	0.89%	1.84
7	Japan	68	2.29%	139	0.85%	2.04
8	Germany	55	1.85%	203	1.24%	3.69
9	UK	49	1.65%	203	1.24%	4.14
10	Canada	38	1.28%	120	0.73%	3.16

表 2.2.6 “基因编辑技术”工程开发前沿中专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	HARD	144	4.86%	2696	16.48%	18.72
2	MASI	133	4.49%	4066	24.85%	30.57
3	BROD	97	3.27%	3619	22.12%	37.31
4	REGC	79	2.66%	510	3.12%	6.46
5	SAGM	47	1.59%	672	4.11%	14.30
6	EDIT	44	1.48%	521	3.18%	11.84
7	GEHO	42	1.42%	531	3.25%	12.64
8	CECT	33	1.11%	542	3.31%	16.42
9	CRIS	33	1.11%	131	0.80%	3.97
10	STRD	31	1.05%	121	0.74%	3.90

注：HARD 表示 Harvard College；MASI 表示 Massachusetts Institute of Technology；BROD 表示 The Broad Institute Inc.；REGC 表示 The Regents of the University of California；SAGM 表示 Sangamo Therapeutics Inc.；EDIT 表示 Editas Medicine Inc.；GEHO 表示 The General Hospital Corporation；CECT 表示 Cellectis；CRIS 表示 CRISPR Therapeutics AG；STRD 表示 The Board of Trustees of the Leland Stanford Junior University。

图 2.2.6　“基因编辑技术”工程开发前沿的主要国家或地区间合作网络

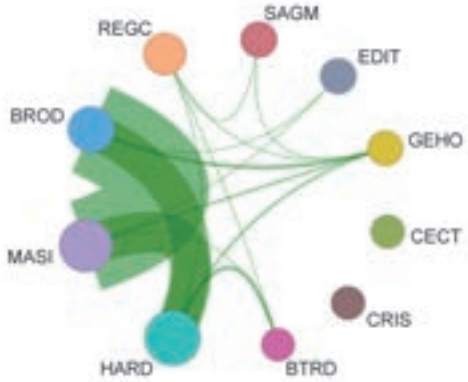

图 2.2.7　“基因编辑技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组组长：陈赛娟　张伯礼

院士专家组：

顾晓松　黄璐琦　李　松　李兆申　孙颖浩
田志刚　徐建国　张志愿　董家鸿

其他专家组：

周荣斌　郭德银　易　凡　刘　兵　杨　辉
周大旺　程　功　廖　专　邹文斌　王月英
施　健　肖建如　蒋建新　王林辉　肖　亮
金　钢　盛　湲　李汉忠　郑加生　王海峰
徐　駸　白　果　卢金星　秦成峰　秦　川
张建中　周冬生　程训佳　宋宏彬　夏宁邵
李振军　赵冬梅　程　通　钟　武　周辛波
冯健男　欧阳昭连　韩倩倩　蒋　青　顾忠泽
尧德中　郑海荣　李路明　徐　来　肖小河
郭兰萍　高　月　杨洪军　张卫东　段金廒
萧　伟　李海燕　李建生　王拥军　毛静远
王保和　王泓午　黄宇虹　樊官伟　张　晗
杨　静

工作组：

张文韬　赵西路　奚晓东　严晓昱　陈银银
代雨婷　乔　妞

文献情报组：

仇晓春　邓珮雯　吴　慧　樊　嵘　寇建德
刘　洁　陶　磊　江洪波　陈大明　陆　娇
毛开云　范月蕾　袁银池

领域前沿报告执笔专家：

研究前沿：

田　伟　韩晓光　李兰娟　冯建峰　谢小华
许　丽　赵远锦　周彩存　夏宁邵　程　林
雷群英　乔　杰　戴尅戎

开发前沿：

范晓虎　郑海荣　杨　辉　鲍一明　明　东
田晓华　顾晓松　夏宁邵　刘　峰　蒋欣泉

九、工程管理

1 工程研究前沿

1.1 Top 10 工程研究前沿发展态势

在工程管理领域，全球工程研究前沿集中于以下10个部分，分别是工业4.0下的可持续发展研究、机器视觉驱动的施工管理、基础设施系统韧性、大数据在远程健康监测系统的应用、高速铁路网络对城市发展的影响、共享社会经济路径描述及其扩展、建筑信息模型与安全管理、能源互联网分析研究、“一带一路”下的物流贸易和海运管理、用于能源交易的区块链联盟研究，其核心论文情况如表1.1.1和表1.1.2所示。其中工业4.0下的可持续发展研究、机器视觉驱动的施工管理、基础设施系统韧性为重点解读的前沿，后文会详细对其目前发展态势以及未来趋势进行解读。

（1）工业4.0下的可持续发展研究

工业4.0是德国首先提出的面向未来发展的制造业发展战略，本质是工业生产的数字化，即通过充分利用信息通信技术和信息物理系统（Cyber-Physical System）相结合的手段，推动传统制造业向智能化转型。它被认为是继蒸汽机的应用、电力广泛应用的大规模化生产和基于电子信息技术的自动化生产等三次工业革命后，以生产高度数字化、网络化、机器自组织为标志的第四次工业革命。工业4.0的核心目标是智能制造，核心特征是互联，代表了全新的“互联网＋制造业”智能生产模式，是新一代信息通信技术与工业生产制造技术的交互镶嵌，虚拟世界与现实世界的智能结合，体现了人机关系的深刻变革以及网络化和社会化组织模式的演进。工业4.0的推进，带来了产量及效率的快速提升、生产及人力成本的大幅降低，也对传统工程管理的生产方式、价值链体系、产业形态、商业模式以及管理升级提出了全新的要求。特别是随着平台技术的成熟，以及基于工业场景的应用日益丰富，不同应用之间的互操作成为瓶颈，提供与平台对应的生态能力，建立完整的应用生态和商业生态成为

表1.1.1 工程管理领域Top 10工程研究前沿

序号	工程研究前沿	核心论文数	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	工业4.0下的可持续发展研究	22	486	22.09	2017.2
2	机器视觉驱动的施工管理	17	424	24.94	2016.6
3	基础设施系统韧性	28	691	24.68	2017.3
4	大数据在远程健康监测系统的应用	33	703	21.30	2016.1
5	高速铁路网络对城市发展的影响	34	771	22.68	2015.4
6	共享社会经济路径描述及其扩展	20	789	39.45	2016.6
7	建筑信息模型与安全管理	8	100	12.50	2017.1
8	能源互联网分析研究	6	143	23.83	2017.0
9	“一带一路”下的物流、贸易和海运管理	9	107	11.89	2017.6
10	用于能源交易的区块链联盟研究	5	108	21.60	2017.6

表 1.1.2　工程管理领域 Top 10 工程研究前沿核心论文逐年发表数

序号	工程研究前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	工业 4.0 下的可持续发展研究	0	0	1	4	7	10
2	机器视觉驱动的施工管理	0	0	0	9	6	2
3	基础设施系统韧性	0	0	0	0	21	7
4	大数据在远程健康监测系统的应用	4	2	5	4	11	7
5	高速铁路网络对城市发展的影响	2	8	9	7	6	2
6	共享社会经济路径描述及其扩展	2	8	9	7	6	2
7	建筑信息模型与安全管理	0	0	0	1	5	2
8	能源互联网分析研究	0	0	1	1	1	3
9	“一带一路”下的物流、贸易和海运管理	0	0	0	2	0	7
10	用于能源交易的区块链联盟研究	0	0	0	0	2	3

下一阶段的关键。全球范围内掀起的工业 4.0 大潮，预示着未来制造业将回归各国战略重心，成为全球经济稳定增长的重要引擎，并将影响国际产业分工与价值分配，重构全球化格局。

（2）机器视觉驱动的施工管理

机器视觉是用计算机实现人的视觉功能——对客观世界三维场景进行感知、识别和理解，实现对数字图像的采集、处理、分析。相较于传感技术（例如无线射频识别技术（RFID）、全球定位系统（GPS）和超宽带（UWB）），机器视觉可以提供更加丰富的图像和视频信息，并且不需要佩戴传感器。随着摄像设备的发展和深度学习算法的成熟，机器视觉在建筑领域也被广泛应用，主要集中于施工过程中的安全监测、生产力分析以及大型基础设施（道路、桥梁、隧道等）缺陷检测，其中基于机器视觉的施工过程中风险识别和监测是研究热点。传统施工依赖周期性的人工巡检，巡检过程耗时耗力且不能实现全天性的监控，而基于机器视觉的自动化监控能更好地提高安全管理。目前机器视觉研究往往依赖于利用算法提取特征信息，而未能实现语义较高程度的场景理解。此外，由于深度学习算法往往需要大量的数据训练模型，因此公开图形数据库的缺乏，也极大地制约了机器视觉技术的进一步发展。

（3）基础设施系统韧性

基础设施系统是指为社会生产与居民生活提供基本服务的工程设施网络，包括电力、天然气、交通、给排水与通信等系统。近年来，这些系统因自然灾害、气候变化、快速城镇化等因素引起的故障风险逐年增加；同时，这些系统相互关联，使得单个系统内部的故障会在不同系统之间扩散与蔓延，造成多个系统同时受损，严重影响城市乃至整个国家的经济和人民生活。在过去的十年间，许多国家或地区，如美国、欧洲、加拿大、澳大利亚等均提出了基础设施系统保护计划。韧性的基础设施系统，即系统灾后仍能维持一定的基本功能且能快速恢复正常功能，已成为许多国家积极建设的目标；如何评估、提升基础设施系统韧性等关键科学问题是目前城市规划、土木工程、工业工程等多学科交叉的国际前沿研究热点。

（4）大数据在远程健康监测系统的应用

随着信息技术迭代发展，远程健康监测系统正在成为卫生健康领域信息化建设高地。对偏远地区或山区的普通居民，尤其患者来说，远程健康监测系统提高了卫生服务地理和经济可及性，使主治医生能够实时分析服务对象的医疗及健康数据，在节约卫生经费前提下输出高质量服务。在医疗健康领

域，大数据技术的应用正在成为卫生发展共识，健康及医疗大数据是一座永不枯竭的金矿，必将为卫生健康服务高质量发展提供新动能。一般来说，远程健康监控系统主要包括健康信息的采集模块、处理健康信息的监护终端模块以及远程医疗服务平台模块，其中数据采集和传输是整个系统的关键。随着 5G 技术运用，远程健康监测系统将面临更大发展机遇，建立基于云端的区域健康大数据平台，通过远程健康监测系统可实现医院、医生、家庭及患者、医疗设备间的交互和连通，为患者提供更精准的诊断建议和更优的个性化治疗方案，实现用户健康管理闭环，直接助力基层卫生机构开展智能医疗健康管理服务。目前，健康大数据应用还处于探索阶段，远程健康监测系统也很不成熟，研究难点和热点主要包括健康数据智能化集成、健康大数据平台构建、健康管理闭环建设、基于多医疗机构数据交互和健康数据挖掘技术等。

（5）高速铁路网络对城市发展的影响

近年来，以中国为典型国家的高速铁路建设取得了巨大发展，对城市社会经济及空间结构产生显著的影响，给城市可持续发展带来新机遇与新挑战。研究表明，快速便捷的高铁网络，可以促进城市间经济要素往来、优化地理空间布局、重构城市空间联系、带动城市群增长。从全球范围看，现有研究从交通可达性、连通性、站点选取等角度，阐释高铁与城市内及城市间空间结构的内在联系；立足经济结构、人口流动、环境保护、居民行为等维度，揭示高铁对城市发展及城市化质量的作用机理；评估高铁与航空等交通工具的替代效应，分析不同交通方式的交互界面，建构便捷高效的城市内外交通运输体系。除此之外，现有研究也给出值得关注的要点：优化高铁网络促进城市转型发展；优化高铁布局助力城市均衡建设；完善高铁建设引导城市良性竞争；规避城市量化增长及短期利益导向下的高铁发展模式；在大数据及人工智能背景下利用部门力量联合开发综合运营系统，实现高铁、航空、普通铁路等的无缝对接；在高铁选址与设计中融入城市发展战略，增强高铁站点的选择、设计、建设与城市当地的生态环境、经济环境、社会文化环境的有机联系。

（6）共享社会经济路径描述及其扩展

共享社会经济路径（SSP）是土地利用 – 生态环境 – 气候变化大系统研究的新情景框架，其可以描述未来社会的发展趋势，揭示气候变化与社会经济要素之间的相互关系及内在逻辑。SSP 框架考虑了建立未来社会经济情景的 6 个关键要素：人口、人类发展、经济和生活方式、政策和体制、技术、环境和自然资源，包括 5 种路径，即可持续路径（SSP1），中间路径（SSP2），区域竞争路径（SSP3），不均衡路径（SSP4）和化石燃料为主发展路径（SSP5）。当前国内外学者依据共享社会经济路径框架情景，综合使用人口 – 发展 – 环境分析（PDE）模型、柯布 – 道格拉斯（Cobb-Douglas）经济预测模型、综合评估模型（IAM）、可计算一般均衡（CGE）模型、全球经济模型（GLOBIOM 和 IMPACT）、全球变化评估模型（GCAM）和未来土地利用模拟模型（FLUS）等多种模型在全球不同尺度范围内进行人口、经济、能源、温室气体排放、城市化水平等不同方面的预测研究及其驱动因素分析。基于土地资源利用为载体研究共享社会经济路径多因素耦合机制，分析不同路径下土地的动态变化，是近几年研究的热点。共享社会经济路径是气候变化研究领域建立的新情景框架的一部分，旨在为气候变化影响、风险、适应和减缓研究提供基础数据，为未来社会经济发展提供不同路径，并为相关气候变化对策和措施的选择，实现可持续发展提供参考依据。

（7）建筑信息模型与安全管理

重大安全事故与伤害防范越发成为各行业关注的焦点，工程施工行业因其职业健康安全形式严峻致其管理一直是世界性关注的难题。随着人工智能与信息通信技术的发展，探索分析信息通信技术及

智能方法在建筑设计、工程设计与施工服务行业尤其是安全管理中的应用，是当前研究的前沿。建筑信息模型（Building Information Modeling，BIM）被认为是当前提升安全管理效果最具价值方法之一，BIM 技术方法以设计、施工到运营协调中的项目过程信息为基础，从而可构建安全管理相关的完整数字化集成过程流程（过程可视、模拟优化、交互协同等）。随着 BIM 技术方法在工程行业应用的不断推进，呈现出 BIM+ 其他技术方法，如：与 RFID、GIS 等定位技术，VR、AR、眼动仪技术以及云计算、机器视觉方法等；并在安全管理相关问题上进一步深入的特点。当前，建筑信息模型与安全管理研究热点中的关键问题为：建筑信息模型自动安全审查方法、3D-nD 工程安全仿真与模拟分析方法、集成其他技术与建筑信息模型的安全管理信息控制方法、基于图像数据的工程安全风险场景解析方法等。建筑信息模型推动了数据驱动的管理范式和技术方法转变，研究建筑信息模型等技术方法对工程建设过程中信息统一、可视、共享、交付、集成、运算等特点对工程全过程安全管理问题的影响特点、变化规律及控制要求等科学问题，对当前建设工程项目全生命周期安全建造与管理有着重要的意义。

（8）能源互联网分析研究

随着对能源市场化和绿色经济发展模式的重视，社会发展的可持续性对能源系统在能源安全、环境污染、气候变化等方面的表现提出了更高的要求。能源互联网作为崭新的产业形式，是推动能源革命、提高能源利用效率的重要途径。能源互联网是以电力为核心的能源系统和以电子信息技术为基础的互联网深度融合的新型能源系统，同时实现了两个层面的互联，即多能流物理互联和能源资源透明化的数据互联。虽然能源互联网的定义还在不断完善，但是其凭借对可再生能源网络、天然气网络、交通网络等系统的紧密耦合，已经成为当前国际科学研究和产业发展的新焦点。目前，能源互联网的技术创新研究热点包括总体架构与标准体系建设，组网与互操作模型构建，建模仿真与分析技术开发，运行与控制装备研制，安全防护体系建设等方面。能源互联网的系统性和复杂性较高，需要统一的规划和顶层设计。在未来，能源互联网需要在能源类型、使用者、标准和接口方面更加开放，开发更丰富的应用，实现多能源互联和多用户互联。随着科学技术的成熟和相关政策的完善，未来能源互联网将在能源生产、传输、消费、存储、转换等能源交易供应链的各个节点发挥重要作用。

（9）“一带一路”下的物流、贸易和海运管理

我国逐渐走入世界舞台中心，顺势而为发起共建“一带一路”倡议。随着“一带一路”建设的纵深推进，物流通道的基础战略意义得以表达，它作为沿线地区的经济纽带实现了区域经济的协同发展。“一带一路”倡议顺应世界经济发展规律得以迅速成长，但也对物流风险管理提出了挑战。“一带一路”物流通道是交通强国战略实现的重要组成部分，为提升我国物流产业的影响力与竞争力，提升行业标准成为区域标准甚至国际标准，推动物流标准的国际化研究是未来的发展方向；不仅如此，物流行业也应完善人才的供应链建设，以对接国际组织和匹配沿线国家为核心，着手建立组织型人才与技术性人才培养体系，将人才外输渠道建设纳入研究重点，动态对标国际需求实现人才供应链创新发展是今后的研究方向。物流通道不仅是物资流通，还承载着我国经贸对外发展的机遇，构建“交通－经贸”走廊模式将是重要方向，以“物流、经贸、产业”的协同创新发展为目标，如何实现国内外廊道经济的闭环发展？在战略执行层面，陆海新通道的桥接作用已凸显，借助通信发展推动大数据与物联网的深入应用，打造“数据供应链”实现综合优化是未来可行的方向。另外，地缘政治、汇率、生态等诸多因素对“一带一路”倡议形成威胁，如何通过表征变动预警风险发生，在快速响应的决策体系下实现“一带一路”下的物流、贸易和海运风险管理。

（10）用于能源交易的区块链联盟研究

随着商业社会的演进，以第三方机构为核心的中心化交易组织架构暴露出隐私泄露、成本过高和所有权不明三方面的问题。计算机技术的发展使分布式数据库成为去中心化的关键。区块链是一种分布式的数据管理方式，将管理交易参与者的方式从集中管控转变为分布式协同。多方共享机制使众参与者形成区块链联盟，每个联盟都能够访问、维护、共享数据库。对数据库更新者信任信息的审计跟踪，提升了交易和信息共享的安全性。随着绿色经济、共享经济的发展，能源企业的传统业务模式不再适应当代低碳化经济格局的需求，以能源企业和能源用户为主导的能源变革应运而生。能源部门应用区块链技术是为了提供一种分布式的能源系统，使能源供应合同可以直接在生产者和消费者之间传递。区块链技术和能源部门的结合衍生出丰富的能源交易的应用，如将区块链技术用于能源企业资本管理、能源用户购能管理、能源网络供应链管理、可再生能源发电管理、能源共享管理等。区块链技术在为能源部门的资本运作和交易管理开拓更多渠道的同时，如何提高区块链的计算能力、存储能力、处理能力，以及明确跨行业的开放标准等，对于推动区块链技术在能源领域的深度商业应用具有重要意义，也是未来的重要研究方向。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 工业 4.0 下的可持续发展研究

从研究主题来看，工业 4.0 下工程可持续发展研究主要聚焦全球工业发展战略、体系框架与关键技术、与循环经济耦合、建筑工业化 4 个典型领域。

（1）全球工业发展战略

工业 4.0 概念最早于 2013 年由德国联邦教研部与联邦经济技术部提出，旨在提高德国工业的竞争力。工业 4.0 的提出在全球范围内引发了新一轮的工业转型竞赛，各个国家纷纷提出了各自的“再工业化”战略，在大数据革命、云计算、移动互联时代背景下，实现对企业进行智能化、工业化相结合的改进升级，突破世界现有生产力增长瓶颈。

美国公布了“先进制造业国家战略计划”（National Strategic Plan for Advanced Manufacturing），并提出“工业互联网”，通过机器互联、软件及大数据分析，提升生产效率，创造数字工业的未来。英国推出“英国工业 2050 战略”（Future of Manufacturing），聚焦高价值制造业，通过个性化的低成本产品、生产重新分配和制造价值链的数字化提振制造业来带动社会经济可持续发展。欧盟发起了“未来工厂”计划（Factory of Future），支持先进生产技术的研究、开发与创新，并进一步推出“单一数字市场”战略，提高数字商品和服务的易用性，培育繁荣数字网络和服务的环境，打造具备长期增长潜力的欧洲数字经济和数字社会。日本制定了“第五期科学技术基本计划”（The 5th Science and Technology Basic Plan），是通过网络空间和现实空间的融合，创造出新的产业与服务，致力于打造全新的“超智能社会”。中国颁布了“中国制造 2025”，加快新一代信息技术与制造业深度融合，推进智能制造，强化工业基础能力，提高综合集成水平，促进产业转型升级。全球工业发展战略研究主要基于政策研究视角，涵盖了各个国家“再工业化”战略的核心理念、异同比较、战略选择与路径优化、实施方法、支持体系、开放合作、管理变革、对国家以及全球社会经济的可持续发展影响等主要议题。

（2）工业 4.0 的体系框架、关键技术与发展变革

工业 4.0 是一项复杂而重大的系统工程，有不同的对象和主体。其对象既包括工业领域不同标准下的工艺、流程和自动化；也包括信息、通信和互联网技术等。工业 4.0 参考架构模型（RAMI4.0，Reference Architecture Model Industrie 4.0）从产品

生命周期 / 价值链、全层级工业系统和信息物理系统能力等级三个维度，分别对工业 4.0 进行多角度描述。RAMI4.0 明确了新的标准和技术框架，为企业部署新的基础设施、应用新的技术、形成新的标准指明方向。工业 4.0 的体系框架明确了由集中式控制向分散式增强型控制的基本模式转变，目标是建立一个高度灵活的个性化和数字化的产品与服务的生产模式。

目前工业 4.0 的发展主要集中于四大方面：①基于智能化、网络化生产系统以及网络化分布式生产设施的“智能工厂”；②利用生产物流管理、人机互动以及 3D 打印技术等新兴技术的“智能生产”；③通过物联网、物流网和互联网整合需求和服务匹配的“智能物流”；④集成多方面信息技术应用，以客户需求为目的跨平台、多元化的“智能服务”。其关键技术主要包括工业物联网、云计算、工业大数据、工业机器人、3D 打印、知识工作自动化、工业网络安全、虚拟现实和人工智能等领域。工业 4.0 成功实施还涉及三个密切相关的行动领域——数字主权、互操作性和可持续性。数字主权是市场参与者的自主决策和参与公平竞争自由，主要考虑数字基础设施、安全性和技术进步。互操作性是不同利益相关者通过灵活联网来构建敏捷的价值网络，是工业 4.0 中数字业务流程的核心要素，主要考虑标准和集成、监管框架、分布式系统和人工智能。可持续性涵盖了经济、环境和社会的可持续性，主要涉及良好的就业和教育、社会参与、气候变迁。

（3）工业 4.0 与循环经济耦合

工业 4.0 的发展正在重构传统的经济系统，智能化技术的广泛应用能使经济系统更便捷、和谐地融入到自然生态系统的物质循环过程之中，实现经济活动的生态化。典型的工业 4.0 与循环经济耦合模型有基于 ReSOLVE 框架（Regenerate，Share，Optimise，Loop，Virtualise，Exchange）的发展模式。其主要步骤有 5 项：①面向 ReSOLVE 的策略选择；②确定合适的工业 4.0 核心技术；③可持续运营管理（Sustainable Operations Management，SOM）决策采纳；④推进供应链合作；⑤制定绩效指标和可实现的目标。其核心是整合并优化基于设计的方法与基于流程的方法，实现整个产品生命周期中材料的循环利用，使得工业 4.0 成为循环经济关键使能因素。工业 4.0 与循环经济耦合涉及了技术层面、社会层面及商业范式层面的变革。重要研究问题包括工业 4.0 背景下的循环经济评价体系、生产者责任延伸制度、绿色供应链、无废城市、源头控制解决方案、污染物过程控制、良性干扰方法、生态关键链接技术等。

（4）建筑工业 4.0

作为工业 4.0 行业细分下的重要板块，建筑工业化在工程管理领域受到了特别关注。建筑工业 4.0 是建筑产业的信息化和工业化，体现了传统建筑行业人工的操作方式向建筑自动化转变，由集中式控制向分散式增强型控制治理模式转变，面向高度灵活的个性化和数字化的建筑产品与服务的生产模式转变。工业 4.0 背景下的建筑工业化的本质是通过数据流动自动化技术，从规模经济转向范围经济，以同质化规模化的成本，构建出异质化定制化的建筑产业。目标是通过技术链整合、产业链再造、价值链提升，实现建筑产品节能、环保、全生命周期价值最大化的可持续发展。建筑工业 4.0 的可持续研究有两个重要主题：BIM（Building Information Modeling）和装配式建筑。作为建筑业的核心技术平台，BIM 与工业 4.0 核心技术的融合将推动建筑业的颠覆性革命。BIM 提供了准确的建筑信息、连续的数字记录和协同工作平台，保障了建筑全生命周期的精致化、智能化、绿色化管理。装配式建筑是建造方式的变革式创新，通过标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用，实现建筑产业的可持续发展。重要的研究问题涵盖了政策扶持机制、管理模式、多元化治理、设计技术体系、绿色关键技术及集成技术、协同创新网络、人力资源培育等。

工业 4.0 下工程可持续发展领域的研究目前还处于起步阶段。

从发表的核心论文数量来看，近三年快速增加。核心论文数量排名前 3 的国家 / 地区分别为：德国、美国、法国（见表 1.2.1）。篇均被引频次排名前 3 的国家 / 地区分别是：瑞典、德国、巴西（见表 1.2.1）。从核心论文产出国的合作网络图（见图 1.2.1）来看，还没有构成较为紧密的合作网络，但是出现了初步的区域特征，美国和亚洲国家之间有合作关系，而德国、法国以及巴西之间出现了合作关系。核心论文数量排名前 3 的机构分别为：柏林工业大学（Tech Univ Berlin）、弗里德里希亚历山大大学（Friedrich Alexander Univ Erlangen Nurnberg）、蒙彼利埃高等商学院（Montpellier Business Sch）（见表 1.2.2）。从核心论文产出机构的合作网络图（见图 1.2.2）来看，还没有构成较为紧密的合作网络，但同样出现了初步的区域特征，与国家 / 地区的分布一致。在这方面，中国还处于跟跑地位。

工业 4.0 下的可持续发展领域施引核心论文数量排名前 3 的国家 / 地区分别为：美国、德国、中国（见表 1.2.3）。施引核心论文的主要产出机构包括约翰内斯堡大学（Univ Johannesburg）、里斯

表 1.2.1 “工业 4.0 下的可持续发展”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Germany	6	27.27%	195	40.12%	32.50
2	USA	4	18.18%	50	10.29%	12.50
3	France	4	18.18%	85	17.49%	21.25
4	Brazil	3	13.64%	75	15.43%	25.00
5	China	2	9.09%	17	3.50%	8.50
6	South Korea	2	9.09%	22	4.53%	11.00
7	Japan	1	4.55%	7	1.44%	7.00
8	Italy	1	4.55%	4	0.82%	4.00
9	Spain	1	4.55%	3	0.62%	3.00
10	Sweden	1	4.55%	33	6.79%	33.00

表 1.2.2 “工业 4.0 下的可持续发展”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Tech Univ Berlin	2	9.09%	97	19.96%	48.50
2	Friedrich Alexander Univ Erlangen Nurnberg	2	9.09%	30	6.17%	15.00
3	Montpellier Business Sch	2	9.09%	22	4.53%	11.00
4	Beijing Inst Technol	1	4.55%	7	1.44%	7.00
5	Doshisha Univ	1	4.55%	7	1.44%	7.00
6	Univ Texas Dallas	1	4.55%	7	1.44%	7.00
7	UFSCar Fed Univ Sao Carlos	1	4.55%	14	2.88%	14.00
8	Sapienza Univ Rome	1	4.55%	4	0.82%	4.00
9	Univ Tuscia Viterbo	1	4.55%	4	0.82%	4.00
10	Fraunhofer Inst Reliabil & Microintegrat	1	4.55%	10	2.06%	10.00

图 1.2.1　“工业 4.0 下的可持续发展”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

图 1.2.2　“工业 4.0 下的可持续发展”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3　“工业 4.0 下的可持续发展”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	USA	42	15.27%	2018.0
2	Germany	39	14.18%	2017.7
3	China	37	13.45%	2017.8
4	Italy	32	11.64%	2017.9
5	UK	27	9.82%	2017.9
6	France	22	8.00%	2017.7
7	Brazil	21	7.64%	2017.8
8	Spain	17	6.18%	2017.5
9	Portugal	14	5.09%	2017.5
10	Russia	12	4.36%	2017.6

本新大学（Univ Nova Lisboa）、柏林经济法律大学（Berlin Sch Econ & Law）等等（见表 1.2.4）。

1.2.2 机器视觉驱动的施工管理

随着信号处理理论和计算机技术的发展，人们开始尝试使用摄像机获得周围环境图像，并将其转化为数字信号，使得计算机可以通过一幅或者多幅图像来提取环境信息，其主要任务分为图像处理，模式分类和场景分析。机器视觉系统在工业界中被大量使用，列入自动化生产线中的产品检测，人脸识别，医学图像自动理解等。机器视觉在建筑行业的应用成为人们关注的新课题，它可以提高建筑领域的自动化水平。下面主要对机器视觉在建筑领域的主流算法，热点研究问题以及研究现状进行进一步的讨论。

（1）机器视觉主流算法

机器视觉的重要一步是目标物体检测，即从图像中识别出特定目标。目标检测的算法众多，主要可以分为两种：浅层次机器学习和深度学习。前者主要的算法有方向梯度直方图（HOG）、光流直方图（HOF）、支持向量机（SVM）、近邻分类等，但这些方法需要人工的创建特征，这个过程较为耗时，且难以兼顾检测精度和计算效率。此外，施工现场普遍存在的不确定性和不断变化的施工场景会影响图像中的特征提取，例如视点方差，尺度方差，类内方差或背景杂波，导致物体检测精度降低。作为一种端到端学习方法，深度学习具有强大的特征表示能力和较高的学习精度，是目前建筑行业机器学习研究中的主流算法，例如单次多盒检测器（SSD）、单次目标检测器（YOLO）、卷积神经网络（CNN）。其中 CNN 是深度学习算法的基本元素，包括多重卷积层、整流线性单元、池化层以及全连接层。卷积神经网络的出现，使得机器视觉在目标检测中取得较大的提升。基于卷积神经网络，各自算法也逐步被开发出来，例如 RNN，Fast R-CNN, Mask R-CNN 等。

（2）基于机器视觉的施工安全管理

建筑行业是高危行业之一，极易引发安全事故和人员伤亡。如何利用机器视觉，实现施工过程的自动化安全监管，及时发现施工过程中的不安全行为或不安全状态，并及时反馈给管理人员是一大研究热点。

研究内容分为物体检测，物体追踪和动作识别。其中物体检测是物体追踪和动作识别的前提，需要对图像进行分割，提取特征，然后利用深度学习算法对特征进行分类。物体追踪研究旨在提高项目实体位置估计的精度，相较于传感器技术，它的覆盖范围更广，且可以实现多目标物体的追踪，也不需

表 1.2.4 “工业 4.0 下的可持续发展”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Univ Johannesburg	6	10.34%	2017.8
2	Univ Nova Lisboa	6	10.34%	2017.7
3	Berlin Sch Econ & Law	6	10.34%	2017.3
4	Univ Fed Santa Catarina	6	10.34%	2017.8
5	Norwegian Univ Sci & Technol	6	10.34%	2017.2
6	Worcester Polytech Inst	5	8.62%	2018.0
7	Seoul Natl Univ	5	8.62%	2017.6
8	Friedrich Alexander Univ Erlangen Nurnberg	5	8.62%	2018.2
9	Old Dominion Univ	5	8.62%	2018.0
10	Kyonggi Univ	4	6.90%	2017.5

要安置介入式传感器。动作识别旨在从图像中提取工人或者机械的运动信息，依赖于图像特征的提取和分类。

（3）基于机器视觉的生产力分析

生产力分析旨在避免因施工中出现的等待、闲置、过度运输等问题而导致的效率低下。研究主要集中于两方面：①项目的施工进度跟踪，分析进度偏差；②项目运行过程中工人或设备的使用效率测量，以进行有效的管理，达到最大的运营效率。生产力分析需要对建筑施工场地实时数据进行收集，并将这些数据转化为生产力信息，例如工作顺序和持续时间等。随着摄像技术在工地的普及应用，利用机器视觉技术对记录的图像和视频进行生产力自动分析得到了广泛的关注。

（4）基于机器视觉的缺陷检测

缺陷检测旨在检查基础设施构件上存在的缺陷和破坏（开裂、剥落、缺陷接缝、腐蚀、凹坑等），以及缺陷的大小（数量、宽度、长度等），有助于辅助投资规划，并分配有限的维修和保养资源，是确保基础设施满足其服务性能的主要手段。基于机器视觉的缺陷检测主要涉及图像处理技术，如模板匹配、直方图变换、背景减法、滤波等以及特征分类。研究对象主要集中于混凝土桥梁、隧道、管道以及沥青路面等基础设施。但是目前桥梁的图像和视频数据采集未完全实现自动化，图片质量因相机姿态、距离、环境条件而异，如何实现复杂几何部位的缺陷检测依旧是一个难题；对于隧道和管道，图片中光照条件差、背景图案和对比度不规则、数据质量低是目前存在的主要问题；对于沥青路面，如何在实时环境下对路面缺陷进行全面、自动化的检测和分类依旧是一个难题。

（5）发展现状和未来趋势

目前，机器视觉作为一种实现施工管理自动化的手段，被广泛的应用于建筑各个环节，例如安全监测、生产力分析、缺陷检测等。但是其发展过程中，依旧存在一些亟待解决的问题。

第一，深度学习算法需要依赖大量的数据训练模型，但是目前依旧缺乏可以公开使用的数据集，这极大的阻碍了机器视觉的发展。第二，目前机器视觉的研究局限于某一特定的行为或场景，例如工人是否佩戴安全帽等，但实际应用往往需要监测多种任务和风险。第三，机器视觉驱动下的安全监测往往基于特征提取，而未能实现一个语义程度较高的场景理解。随着施工风险定义逐步复杂，机器视觉需要集成规范知识，提高场景理解能力和风险推理能力。本体作为一种领域知识的规范化表达，可以将文本规范知识和专家经验等处理为计算机可读模式，因此如何有效的集成本体和机器视觉，使得本体能够有效的为计算机视觉的图像理解提高背景和先验知识是未来的一个研究趋势。

从发表的核心论文数量来看，核心论文数量排名前 3 的国家分别为中国、美国、澳大利亚（见表 1.2.5）。篇均被引频次排名前 3 的国家 / 地区分别是：美国、波兰和中国（见表 1.2.5）。从核心论文产出国合作网络图（见图 1.2.3）来看，还没有构成较为紧密的合作网络，美国与德国之间、中国与澳大利亚之间已有合作关系。核心论文数量排名前 3 的机构分别为：华中科技大学（Huazhong Univ Sci & Technol）、哥伦比亚大学（Columbia Univ）、香港理工大学（Hong Kong Polytech Univ）（见表 1.2.6）。从核心论文产出机构的合作网络图（见图 1.2.4）来看，还没有构成较为紧密的合作网络，但同样出现了初步的区域特征。

机器视觉驱动的施工管理领域施引核心论文数量排名前 3 的国家 / 地区分别为：中国、美国、韩国（见表 1.2.7）。施引核心论文数量排名前 3 的机构分别为：华中科技大学（Huazhong Univ Sci & Technol）、香港理工大学（Hong Kong Polytech Univ）、同济大学（Tongji Univ）（见表 1.2.8）。

1.2.3　基础设施系统韧性

“韧性”（Resilience）一词起源于拉丁语

表 1.2.5 “机器视觉驱动的施工管理”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	China	7	41.18%	172	40.57%	24.57
2	USA	6	35.29%	169	39.86%	28.17
3	Australia	2	11.76%	49	11.56%	24.50
4	Canada	2	11.76%	38	8.96%	19.00
5	Poland	1	5.88%	26	6.13%	26.00
6	Germany	1	5.88%	19	4.48%	19.00
7	South Korea	1	5.88%	19	4.48%	19.00

表 1.2.6 “机器视觉驱动的施工管理”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Huazhong Univ Sci & Technol	3	17.65%	75	17.69%	25.00
2	Columbia Univ	2	11.76%	87	20.52%	43.50
3	Hong Kong Polytech Univ	2	11.76%	48	11.32%	24.00
4	Univ Nottingham Ningbo	1	5.88%	30	7.08%	30.00
5	Univ Michigan	1	5.88%	28	6.60%	28.00
6	Curtin Univ	1	5.88%	27	6.37%	27.00
7	Hubei Engn Res Ctr Virtual Safe & Automated Const	1	5.88%	27	6.37%	27.00
8	Tongji Univ	1	5.88%	26	6.13%	26.00
9	AGH Univ Sci & Technol	1	5.88%	26	6.13%	26.00
10	Queensland Univ Technol	1	5.88%	22	5.19%	22.00

图 1.2.3 “机器视觉驱动的施工管理”工程研究前沿主要国家 / 地区间的合作网络

“Resilio”，本意是“回复到原始状态”。加拿大生态学家 Holling 教授首次将韧性思想应用于系统生态学，用以定义生态系统的稳态特征。随后，韧性思想被应用于不同学科领域，包括工程韧性、经济韧性与基础设施系统韧性等领域。基础设施系统韧性可以理解为系统灾后仍能维持一定的基本功能且能快速恢复正常功能的综合能力。由于基础设施系统维系城市的社会和经济功能，是城市大动脉，所以韧性的基础设施系统是实现韧性城市的核心与关键。

下面主要对基础设施系统的韧性评估与提升进行更加深度的分析，然后总结基础设施系统韧性研

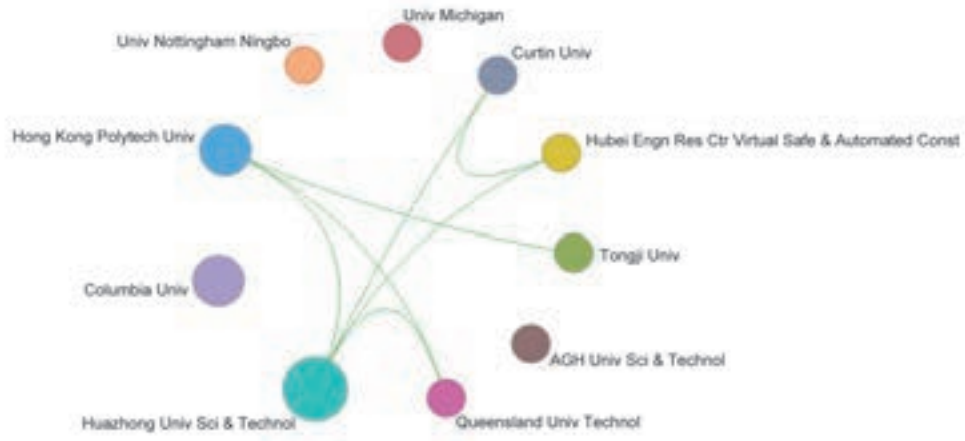

图 1.2.4 “机器视觉驱动的施工管理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “机器视觉驱动的施工管理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	128	36.26%	2018.1
2	USA	80	22.66%	2017.9
3	South Korea	32	9.07%	2017.9
4	UK	29	8.22%	2018.0
5	Australia	26	7.37%	2018.1
6	Canada	16	4.53%	2017.8
7	Spain	15	4.25%	2018.1
8	Germany	10	2.83%	2017.6
9	Italy	7	1.98%	2017.9
10	Turkey	5	1.42%	2017.8

表 1.2.8 “机器视觉驱动的施工管理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Huazhong Univ Sci & Technol	21	16.28%	2018.2
2	Hong Kong Polytech Univ	19	14.73%	2018.2
3	Tongji Univ	17	13.18%	2018.1
4	Curtin Univ	15	11.63%	2018.1
5	Harbin Inst Technol	11	8.53%	2018.4
6	Columbia Univ	9	6.98%	2017.0
7	Dalian Univ Technol	8	6.20%	2017.9
8	Zhejiang Univ	8	6.20%	2017.4
9	Cent S Univ	8	6.20%	2018.3
10	Yonsei Univ	7	5.43%	2017.7

究的未来发展趋势。

（1）基础设施系统韧性评估研究

尽管韧性存在不同定义，但是当评估基础设施系统韧性时，文献中的韧性指标几乎都是基于系统在灾害事件下的实际功能曲线以及在无灾害情形下的期望功能曲线而提出的。事件之前，系统正常运行，功能指标为 100%；事件发生时，可能存在一个故障产生与蔓延过程，直到功能指标降到到最低值；事件之后，系统破坏状况被评估并逐步修复，恢复后的系统功能指标可能小于、等于或大于事件之前 100%。基于实际功能变化曲线与期望功能曲线，学者们提出了各种韧性指标以及相应的韧性评估方法。基础设施系统韧性评估的研究热点主要包括：面向多灾害的基础设施系统韧性评估，考虑系统关联性的基础设施系统韧性评估，基础设施系统韧性目标的设定，基础设施系统韧性评估模型的验证与测试系统的构建。

（2）基础设施系统韧性提升研究

定义、评估基础设施系统韧性的主要目的之一是为了研究如何提高系统的韧性。为了提升基础设施系统的韧性，许多国家的基础设施保护计划文件给出了一系列管理或政策方面的策略，比如优化防灾及恢复资源配置，制定灾害保险政策激励及灾后用地规划方案，促进不同系统之间的合作与信息共享，增强韧性意识与文化，提升领导力，丰富管理者应对大型灾害的经验、重视关联性等。对于工程技术类韧性提升策略，比如加固系统组件、调整系统结构、配置冗余系统等，在预算有限的情况下，韧性提升问题可以建模为一个多阶段动态优化问题。基础设施系统韧性提升的研究热点主要包括：基础设施系统的组织韧性提升，基于全生命周期的基础设施系统韧性提升，多阶段韧性提升优化模型的高效求解算法，韧性驱动的基础设施系统灾后恢复决策优化，考虑建筑群落功能相关性的耦合基础设施系统韧性提升。

（3）发展现状与未来发展趋势

美国国家科学基金资助了一系列基础设施系统韧性研究的项目，比如韧性且可持续的基础设施、韧性的关联基础设施系统与过程等；美国国家标准与技术研究院（NIST）于 2016 年发布了城市韧性规划导则，并资助 Colorado State University 成立了“基于风险的城市韧性规划”研究中心（美国 10 所高校参与），其中基础设施系统韧性是研究与规划的重点；美国应急管理司（FEMA）开发了 HAZUS 与 FEMA P58 软件，以分析美国不同城市基础设施系统应对洪水、飓风与地震灾害的风险，经济损失以及恢复时间。牛津大学负责的英国基础设施转型研究联盟研究了关联的基础设施系统应对洪水灾害的韧性提升措施；欧盟 FP7 资助的 SYNER-G 项目研究了基础设施系统应对地震灾害的脆弱性与韧性；欧盟联合研究中心开发了基础设施系统灾后恢复过程与韧性提升决策的软件。中国国家自然科学基金委员会于 2015 年发布英中联合基金：提升中国地震易发区域应对自然灾害的韧性；2017 年发布了应急项目：安全韧性雄安新区构建的理论方法与策略研究；2018 年在哈尔滨召开了第 204 期双清论坛，讨论了抗震韧性城市建设的关键前沿基础科学问题，其中基础设施系统韧性是讨论的重点。综合当前研究现状，未来的发展趋势主要包括：多灾害（尤其是涉及气候变化的多灾害）耦合作用下的韧性评估与提升、系统之间以及系统与环境之间的关联性建模与验证、大规模系统韧性提升优化的高效求解算法等。

“基础设施系统韧性”工程研究前沿中的核心论文数量排名前 3 的国家 / 地区分别为美国、中国、英国（见表 1.2.9），篇均被引频次排名前 3 的国家 / 地区分别为丹麦、以色列、英国（见表 1.2.9）。从核心论文产出国家 / 地区合作网络图（见图 1.2.5）来看，在排名前 10 的国家 / 地区中，美国、中国、英国、澳大利亚和希腊之间的合作较多。

图 1.2.5 “基础设施系统韧性”工程研究前沿主要国家或地区间的合作网络

核心论文数量排名前 3 的机构分别为曼彻斯特大学（Univ Manchester）、墨尔本大学（Univ Melbourne）、香港城市大学（City Univ Hong Kong）（见表 1.2.10），从核心论文产出机构合作网络图（见图 1.2.6）来看，在核心论文发表数量排名前 10 的机构中，曼彻斯特大学、墨尔本大学、雅典国立理工大学和纽卡斯尔大学之间的合作较多。

根据表 1.2.11 可以看出，中国的施引核心论文数量排名第 1，处于领跑地位。同时根据表 1.2.12 可以看出，处于领跑前沿的机构是上海交通大学和清华大学。

表 1.2.9 “基础设施系统韧性”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	USA	11	39.29%	282	40.81%	25.64
2	China	9	32.14%	230	33.29%	25.56
3	UK	8	28.57%	229	33.14%	28.63
4	Australia	6	21.43%	167	24.17%	27.83
5	Greece	3	10.71%	68	9.84%	22.67
6	Switzerland	2	7.14%	52	7.53%	26.00
7	Germany	2	7.14%	42	6.08%	21.00
8	Denmark	1	3.57%	38	5.50%	38.00
9	Israel	1	3.57%	38	5.50%	38.00
10	Norway	1	3.57%	28	4.05%	28.00

表 1.2.10 “基础设施系统韧性”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	核心论文数	论文比例	被引频次	被引频次比例	篇均被引频次
1	Univ Manchester	4	14.29%	121	17.51%	30.25
2	Univ Melbourne	3	10.71%	86	12.45%	28.67
3	City Univ Hong Kong	3	10.71%	59	8.54%	19.67
4	Lehigh Univ	2	7.14%	64	9.26%	32.00
5	Newcastle Univ	2	7.14%	57	8.25%	28.50
6	Natl Tech Univ Athens	2	7.14%	53	7.67%	26.50
7	Huazhong Univ Sci & Technol	2	7.14%	27	3.91%	13.50
8	Univ Michigan	1	3.57%	69	9.99%	69.00
9	Univ Bath	1	3.57%	44	6.37%	44.00
10	Xi’an Jiaotong Univ	1	3.57%	44	6.37%	44.00

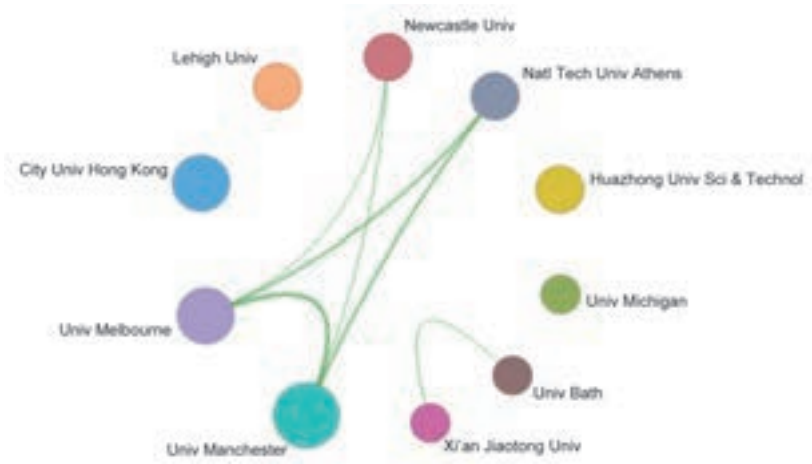

图 1.2.6 “基础设施系统韧性”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “基础设施系统韧性”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家或地区

序号	国家 / 地区	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	China	191	31.41%	2018.4
2	USA	166	27.30%	2018.3
3	UK	49	8.06%	2018.5
4	Australia	43	7.07%	2018.3
5	Italy	41	6.74%	2018.3
6	Germany	26	4.28%	2018.2
7	Iran	23	3.78%	2018.3
8	France	20	3.29%	2018.2
9	Spain	18	2.96%	2018.5
10	South Korea	16	2.63%	2018.3

表 1.2.12 “基础设施系统韧性”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	Shanghai Jiao Tong Univ	22	17.60%	2018.2
2	Tsinghua Univ	14	11.20%	2018.4
3	RMIT Univ	12	9.60%	2018.3
4	Swinburne Univ Technol	12	9.60%	2018.0
5	Hong Kong Polytech Univ	10	8.00%	2018.2
6	Univ Hong Kong	10	8.00%	2018.6
7	Huazhong Univ Sci & Technol	10	8.00%	2018.0
8	City Univ Hong Kong	9	7.20%	2018.1
9	Univ Calif Berkeley	9	7.20%	2018.6
10	Lehigh Univ	9	7.20%	2018.0

2　工程开发前沿

2.1　Top 10 工程开发前沿及发展态势

在工程管理领域中，全球工程开发前沿集中于以下 10 个部分，分别是面向工程管理的可视化技术、面向工程安全的预警技术与方法、面向工程管理的物联网技术开发、智慧物流、风险评估与管理系统、车辆信息与资源共享系统、智能医疗健康管理、基于云计算的集成管理方法与技术、基于可穿戴设备的管理方法和技术、面向智能制造的质量工程技术。其核心专利情况如表 2.1.1 和表 2.1.2 所示。这 10 个工程开发前沿集中包含了机械、运输、医学、建筑、电子等众多学科。其中面向工程管理的可视化技术、面向工程安全的预警技术与方法、面向工程管理的物联网技术开发为重点解读的前沿，后文将详细对其目前发展态势以及未来趋势进行解读。

（1）面向工程管理的可视化技术

可视化技术是指以计算机图像技术为基础，通过计算机生成对人体视觉刺激的图形，以便人们接受、理解原始数据、信息的技术方法。目前，可视化技术展示出了广阔的应用前景，可以将其用于工程安全、进度管理、人机交互等方面。随着深度学

表 2.1.1　工程管理领域 Top 10 工程开发前沿

序号	工程开发前沿	公开量	引用量	平均被引数	平均公开年
1	面向工程管理的可视化技术	14	80	5.71	2014.9
2	面向工程安全的预警技术与方法	16	59	3.69	2015.3
3	面向工程管理的物联网技术开发	17	55	3.24	2015.5
4	智慧物流	26	118	4.54	2014.9
5	风险评估与管理系统	22	164	7.45	2014.2
6	车辆信息与资源共享系统	11	36	3.27	2015.6
7	智能医疗健康管理	23	174	7.57	2014.7
8	基于云计算的集成管理方法与技术	31	189	6.10	2014.8
9	基于可穿戴设备的管理方法和技术	6	46	7.67	2015.2
10	面向智能制造的质量工程技术	26	98	3.77	2014.9

表 2.1.2　工程管理领域 Top 10 工程开发前沿核心专利逐年公开量

序号	工程开发前沿	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
1	面向工程管理的可视化技术	0	6	4	4	0	0
2	面向工程安全的预警技术与方法	5	0	0	8	3	0
3	面向工程管理的物联网技术开发	0	3	5	6	3	0
4	智慧物流	2	8	8	8	0	0
5	风险评估与管理系统	6	10	1	5	0	0
6	车辆信息与资源共享系统	1	1	3	3	2	1
7	智能医疗健康管理	2	7	11	1	2	0
8	基于云计算的集成管理方法与技术	5	8	9	7	2	0
9	基于可穿戴设备的管理方法和技术	0	1	3	2	0	0
10	面向智能制造的质量工程技术	2	8	8	8	0	0

习等人工智能技术的兴起，使得可视化技术的研究与应用成为新兴学术研究热点，并被认为是又一个革命性的信息技术。但是，在实际工程管理应用中，工程数据类型多源异构、数据量大且信息碎片化等，因此无法充分发挥可视化技术服务于工程管理的优点。制约可视化技术在工程管理应用的一个关键瓶颈是可拓展性问题。并行计算和深度学习、5G、物联网等人工智能技术能够更准确、更高效、更智能地感知、计算和分析海量工程大数据，以支持实时的可视化与交互操作。因此，未来如何将大规模并行计算方法、超级计算机和人工智能技术结合，使得可视化系统更加智能化，以及如何将当前有价值的可视化方法与人机交互技术提升和扩展到工程管理领域，将是未来研究的两大发展趋势。

（2）面向工程安全的预警技术与方法

工程涉及建设工程、工业工程、矿山工程、交通工程、环境工程等，而工程安全则是各类工程活动的基本前提和保障。目前，工程安全问题依然严峻，也正得到各工程行业专业人士和管理者的高度关注。针对如何提升工程安全水平，传统工程安全管理以安全培训、标准化流程作业、现场巡察与监督等方式进行。尽管这在某种程度上预防了安全事故的发生，提高了安全管理水平，但安全成效并不显著。新兴信息技术和数据分析技术的快速发展为工程安全问题解决提供了新的思考方向，集成物联网、传感器、云计算、可视化、机器视觉、大数据等技术的工程安全管控方法、技术与装置正在不断涌现。然而，为了有效管控工程安全问题，一方面要考虑现场安全监测与预警的实时性，另一方面要考虑支撑安全管理决策的数据获得性。因此，未来工程安全管控既需要开发并融合多种信息技术，提高安全预警的实时性和有效性，又需要开发适用的工程数据获取技术，以支撑管理者对安全管理的长效决策，从而形成系统有效的工程安全管控方案。

（3）面向工程管理的物联网技术开发

物联网（Internet of Things）技术是通过一系列的信息传感设备，按照约定的相关数字协议，将一切有关物品与互联网连接起来，进行信息交换和通信，以实现智能识别、定位、跟踪、监控和管理的一种互联网技术。物联网技术在医药物流、智能农业、车辆综合管理、钢铁仓储等领域中得到广泛运用。面向工程管理的物联网技术需适应工地复杂多样环境和工程要素动态变化的要求，能处理数量种类繁多的传感器和巨量的通信数据。从工程物联网技术架构看：基于 EPC global 标准、基于泛在传感网（USN）和基于 M2M 物联网三种主流架构方式已经比较成熟。其关键技术构成包括：智能感知技术、高可靠安全传输技术、综合应用技术和公共技术。系统开发的核心模块包括：射频通信模块、网络传输模块、存储模块、数据分析模块等。

面向工程管理的物联网技术开发主要解决了工程信息的采集方式和信息传输方式。通过 RFID 标签、传感设备、二维码、视频监控等感知技术，将工程施工现场的材料、设备和人员信息采集并传输到信息系统后台，实现对监控对象的基本信息、位置信息、运输状态信息跟踪。国内外工程物联网在桥梁、超高层结构健康监测、地铁工程施工人员定位、工程环境监控、物料计划及跟踪、施工机械设备运行动态监控等方面均有成功案例。物联网技术开发前沿方面涉及：巨量感知数据压缩技术、三维视频智能分析技术、物联网与 BIM 集成技术、基于物联网的大数据分析技术、物联网与 5G 移动通信技术等。

（4）智慧物流

在智慧物流领域，管理者面对着庞大的物流运输网络和复杂的业务流程，各个物流活动都通过互联网或物联网紧密相连，部分物流操作已实现高度的自动化，管理者做决策必须依靠海量的数据和智能的优化算法。物流企业集中度越来越高，头部物流企业的规模越来越大，并且业务的种类、运输的模式越来越多样化，这必然导致企业的物流运输网络变得越来越庞大，业务流程和信息系统变得越来

越复杂。物流活动已无法离开互联网，并且开始逐渐向物联网发展，即将到来的 5G 也势必会融入到物流企业的经营活动中去。随着智能电话的普及，图像、视频采集设备及各种类型传感器的大规模应用，与物流相关的数据在近年内呈爆炸式地增长，如何挖掘这些数据潜在的价值是当前的研究热点。许多物流企业已经开始使用工业机器人（包括无人机、无人车）取代工人来执行分拣、包装、搬运及派送等操作，如何设计、部署及科学地使用这些自动化设备也是目前研究前沿。依靠工人的经验来做决策早已不适用于现代物流企业了，传统的物流优化技术也不适应智慧物流的新环境，因此我们必须研究数据驱动的智能优化技术来武装企业的决策大脑，在需求预测、网络设计、运输规划、库存管理、仓库运作、人员排班等方面研究出一系列的新理论和新方法。

（5）风险评估与管理系统

风险评估与管理系统是指利用各类风险评估方法，对采集的基础数据进行存储、分析、识别和评估风险，进而实现风险控制的管理信息系统。其主要功能模块包括：数据采集模块、储存模块、风险分析处理模块和风险预警－控制模块。从系统设计层次结构上看一般分为：基础设施服务层、数据服务层、支持服务层、应用程序服务层和用户层。系统运作过程一般包括：采用传统的数据录入或硬件传感器采样形式进行数据收集工作，并进行结构化/半结构化储存，再调用风险评估算法对数据进行分析处理，评估风险发生概率并划分风险等级，最后提出针对性的解决措施并将相关信息推送给管理者。目前在化工生产、供水、发电、机器设备管理、医疗资源分配、商业交易等方面有着广泛的应用。

在工程管理领域，面向工程全寿命周期的风险评估与管理一直是研究的重点。特别对于建筑施工现场的安全风险评估与管理，研究热点转向现场监测数据的实时自动采集、监控视频图像的智能解析，借助后台的风险评估规则（包含发生概率阈值、风险分级规则等），对安全风险进行实时感知和评价，及时的进行风险预警和控制。目前主流的定量分析方法包括：失效模式与后果分析（FMEA）、危险与可操作性分析（HAZOP）、事故树风险分析法（FTA）、改进区间 AHP 和多因素权重矩阵分析法等。未来的风险评估与管理系统将整合工程物联网、云服务平台、工程大数据、数据融合、数据挖掘方法、群体智能算法等，向集成化、数字化和智能化发展。

（6）车辆信息与资源共享系统

车辆信息与资源共享系统是指参与车辆共享的主体通过各种协调机制，实现信息与资源的有效流动，以满足需求方对车辆的稀缺性，实现车辆共享的一种资源利用方式。车辆信息与资源共享系统提供了一种新的出行方式，在交通拥堵问题严重影响人们生活质量的现阶段，展示出了广阔的应用场景，可缓解交通拥堵给城市出行带来的不便，降低用户出行成本。作为一种新的资源共享理念，车辆信息与资源共享系统的研究与开发已经进入快速发展阶段，世界各国纷纷进行相关装置研发和技术更新。该项技术至少包括一个共享单元和一个送达单元，它们之间被相互可通信地连接。共享单元包括一个共享策略生成模块和一个选择模块，送达单元包括一个送达模块，它们之间依据一定的规则进行通信。制约车辆信息与资源共享系统发展和广泛应用的关键技术是接受预约请求过程中的车辆分配优化算法，该优化算法常依托于一个预定处理器执行，其目的是快速向用户呈现预约结果，降低车辆共享服务的操作成本。高效率的车辆信息与资源分配优化算法是未来实现车辆共享的基础，不仅可以降低系统运行成本，更可以提高用户满意度，所以是促进该方向发展最为方便和可行的途径。

（7）智能医疗健康管理

随着第三次卫生革命到来，医疗健康管理服务已经成为卫生系统的以健康为中心的主导策略。所谓医疗健康管理是指对个体及人群的影响健康因

素及作用过程和健康结果进行全生命周期、全流程和全方位的干预管理过程，旨在提升个体和群体的健康水平和生命质量。随着互联网技术的发展，医疗健康管理服务不再局限于医患面对面的交流，也不再受时间、地域、方式的限制，服务对象完全可以通过信息化和智能化技术来及时了解健康状况并获得相应的健康指导及干预。目前，区域健康大数据平台正在逐步建立，在循证医学指导下，通过深度学习和机器学习，人工智能在医学影像、临床决策支持、语音识别、病理学等众多领域取得了初步成功，也使得从线上到线下（Online-to-Offline，O2O）的智能医疗健康管理成为医疗卫生服务发展的新趋势。但目前智能医疗健康管理还处于初级阶段，线上与线下缺乏有机结合，也缺乏根据服务对象的实际情况及时调整健康管理方案的能力，导致健康管理效果不理想。随着5G技术加持，可穿戴健康设备、远程诊疗、远程影像等智能医疗元素加入，将进一步催生智能医疗健康管理走向成熟。

（8）基于云计算的集成管理方法与技术

云计算是一种通过网络统一组织和灵活调用各种信息和通信技术（ICT）信息资源，实现大规模计算的信息处理方式，通过这种方式共享的软硬件资源和信息可以按需提供给用户的计算机和其他设备。目前已形成存储云、医疗云、金融云、教育云等，在金融、政务、工业、医疗等领域展示出了极其广阔的应用前景。云计算具有虚拟性、可扩展性、高灵活性、高可靠性和高性价比等特点，在不久的将来，云计算将与人工智能融合，形成“ABC”的“人工智能＋大数据＋云计算”模式，布局到多行业的多个应用场景之中。

对各种数据、资源实施有效整合是云计算动态资源管理的基本功能，而云数据管理技术则是实现云计算的关键。基于云计算的数据管理技术，主要包括GFS技术（文件数据管理）、MapReduce技术（集群并行运算）、BigTable技术（数据管理系统）、Dynamo技术（数据存储平台），通过云端共享数据资源，提供不同资源不同层次的服务，涉及基础设施即服务（IaaS）、软件即服务（SaaS）、平台即服务（PaaS），其中PaaS将是云计算的终极目标。在云数据集成管理方面，云计算具有强大的分布式存储与运算能力，可对海量数据进行特定的检索和分析，通过大规模数据集成管理，实现各类异构数据、服务资源的有效整合，为虚拟化计算资源、互联网构建应用程序、商托管和管理软件应用程序提供服务。

（9）基于可穿戴设备的管理方法和技术

可穿戴设备主要是指具有局部计算功能和可穿戴特性的便携式设备，能够对人体的生理状况、运动模式及所处环境进行感知，通过与各类终端（手机、云端等）的数据交互，可以实现持续性的个人健康监测与管理、区域性的居民健康与生活资讯管理等。目前，可穿戴设备的发展迅速，产品形态多样（手表、眼镜、衣服、配饰等），交互方式丰富（触摸、手势、语音等），已被市场广泛认同。可穿戴设备在给我们的日常生活带来极大转变的同时，新的问题和挑战也逐步显现。可穿戴设备搜集并记录了大量的个人生理、日常活动和周边环境的数据，针对这些数据的智能化处理、整合与管理方法，一方面要能够及时地、动态地向佩戴者提供准确的健康信息，包括有效的运动锻炼方法、预先的紧急状态警报等，另一方面要避免对佩戴者生活偏好、行为习惯等个人隐私信息的泄露和侵犯。伴随可穿戴设备种类和数量的井喷，增强可穿戴设备与智能终端、中央服务器之间的安全通信，提高可穿戴设备与佩戴者的自然交互，发展基于可穿戴设备人性化、智能化的管理方法和技术，提供多场景、多层次服务体验，对实现提升全民健康状况、提高人民生活水平都具有重大意义。

（10）面向智能制造的质量工程技术

随着各种机器人、智能传感器、嵌入式芯片、边缘计算设备等的广泛应用，以及互联网/物联网、

大数据、人工智能、云计算、3D 打印等技术的飞速发展，制造系统正逐步向智能化演变。智能制造是基于新一代信息通信技术与先进制造技术的深度融合，能够实现对人、机、物的实时状态的全面感知，对海量异构的工业现场数据进行智能分析并处理，推动制造业向基于工业大数据分析与应用智能化的产品需求、设计、制造、销售及服务的转型。许多建立在传统数理统计基础上的质量管控方法不适用于数据实时采集（高维度、高频率）和高度定制（小批量甚至单件）的智能制造系统。面向智能制造的质量工程研究旨在解决智能制造环境下产品设计、过程监控和制造服务中的质量管控问题。重点技术方向包括基于智能传感技术的产品使用和消费者偏好大数据的采集、用户画像；面向个性化需求的产品和工艺集成设计质量保证模式与方法；基于实时、高维、异构大数据融合的工艺参数优化技术；面向高频、高维和小批量的过程质量监控技术；基于生产过程参数大数据、产品质量大数据和设备状态大数据的质量诊断技术；基于新一代信息技术（特别是区块链）的供应链质量溯源技术；装备产品服役过程中基于大数据的运行状态监控、远程故障诊断和设备预防管理技术等。展望未来，面向智能制造的质量工程技术要与现代信息技术和大数据技术相融合，统计学习方法将成为智能制造质量工程技术的主要工具。

2.2　Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1　面向工程管理的可视化技术

“可视化”源于英文“Visualization”，其词义是：“将不可见的、不能表达的或抽象的一些东西、转变为可以看到的或者大脑可以想象的图形图像”。1986 年，自科学计算可视化（Visualization in Scientific Computing）的概念被提出，可视化技术被列为一项独立的重大计算机技术。可视化技术是一门交叉学科，涵盖了众多研究领域，如计算机图形学、计算机视觉、人机交互等技术。可视化技术使隐含于数据中不可见的现象成为可见，更好的分析、理解、挖掘数据中的规律。深度学习等人工智能技术的兴起，促进了可视化技术的发展，使得可视化技术在工程管理中的研究与应用成为新兴学术研究热点，并被认为是用于工程管理的又一个革命性信息技术。

在实际工程管理应用中，工程数据类型多源异构、数据量大且信息碎片化等，因此无法充分发挥可视化技术的优点服务于工程管理。制约可视化技术在工程管理应用的一个关键瓶颈是可拓展性问题。从专利分析来看，面向工程管理可视化技术主要包括：计算机视觉、增强现实与虚拟现实、建筑信息模型（Building Information Model, BIM）、地理信息系统（Geographic Information System, GIS）、图可视化技术。

（1）计算机视觉

计算机视觉是一个跨学科的科学领域，主要解决如何利用计算模型从图像或多维数据中获得高层次信息建立人工智能系统。从工程角度来看，计算机视觉主要为了自动完成人类视觉系统可以完成的任务。虽然机器视觉能够自动地检测和理解图片中信息用于工程管理，例如，施工现场工人不安全行为识别等，但存在实时性低、准确率低等问题，不能满足复杂、大场景下的工程需求。并行计算、深度学习等人工智能技术能够更准确、更高效、更智能地分析和处理图形中数据，使得机器视觉更好的服务于工程管理。

（2）增强现实（AR）与虚拟现实（VR）

AR 指通过电脑技术，将虚拟的信息应用到真实世界，真实的环境和虚拟的物体实时地叠加到了同一个画面或空间。VR 是一种计算机生成的人工模拟过程或一些现实生活情境或环境的再现，旨在通过赋予用户体验模拟现实的感觉来沉浸用户。目前，关于 AR 和 VR 在实际工程管理中的应用还处于初期阶段，这主要是由于在实际应用中存在众多

挑战，例如，VR 与 AR 使用不方便，无法实时处理大量数据，容易受到外界环境干扰等。深度学习、5G 等人工智能技术与 VR 和 AR 结合，有望实现数据的实时采集与分析。

（3）建筑信息模型（BIM）

建筑信息模型是一种数字化三维建筑物信息模型，包含了建筑物从设计、施工、运维各个阶段的信息，且 BIM 具有计算、协同、共享和可视化等功能，可以通过数字化技术来实现建筑信息的集成。虽然 BIM 能推动建筑业从粗放式管理到精细化管理模式转变，但是，当前的 BIM 软件适用性不强，计算能力不足，且没有实现全寿命周期的无缝管理，这是未来需要重点关注和解决的问题。

（4）地理信息系统（GIS）

GIS 是计算机科学、地理学、测量学、地图学等多学科交叉的技术，目前还没有统一的定义。但是，实际工程管理中涉及的信息具有海量异构等大数据特点，为现在的地理信息系统带来了新的挑战。

（5）图可视化技术

图可视化技术是指应用图形理论存储实体之间的关系信息，经典的是基于节点和边的可视化。对于海量工程大数据，如何在有限的空间中对节点和边进行可视化，将是需要解决的难点和重点。除了对静态的网络拓扑关系进行可视化，工程大数据往往具有时间动态演化，因此，如何对动态网络的特征进行可视化，也是未来需要重点研究和关注的内容。

从发表专利的数量来看，专利数量排名前二的国家 / 地区分别为：中国和美国（见表 2.2.1）。平均被引数排名前三的国家 / 地区分别是：美国、韩国、中国（见表 2.2.1）。从专利产出国家 / 地区的合作网络图（见图 2.2.1）来看，还没有构成较为紧密的合作网络。专利数量排名前二的机构分别为：国家电网有限公司（SGCC）、国际商用机器公司（IBMC）（见表 2.2.2），从专利产出机构的合作网络图（见图 2.2.2）来看，还没有构成较为紧密的合作网络，江西九江电网（Jiangxi Jiujiang Power Supply Co）与国家电网有限公司（State Grid Corporation of China）出现了合作，中国设计集团有限公司（China Design Group Co., Ltd.）与江苏交通规划设计院（Jiangsu Transportation Planning & Design）有合作等。

2.2.2 面向工程安全的预警技术与方法

工程作为人类认识世界、改造世界的基础活动，从古至今一直不断衍化和深化。在此过程中，安全问题一直伴随着工程而存在。安全监测与预警是预防工程安全事故的有效手段，即通过安全隐患或事故成因的识别、状态的分析和安全程度的判别，及时为工程管理者提供安全预警信息，以有效降低安全事故发生的可能性或避免事故发生。然而，近年来随着工程规模的增大和复杂程度的提高，工程安全问题尤其突出。以建设工程为例，近 5 年仅房屋市政工程生产安全事故数就达 3000 起，事故死亡人数达 3600 人，且整体呈上升趋势。这不仅带来了巨大的经济损失，也导致了巨大的社会损失。在

表 2.2.1 “面向工程管理的可视化技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	6	42.86%	34	42.50%	5.67
2	USA	5	35.71%	34	42.50%	6.80
3	South Korea	1	7.14%	6	7.50%	6.00
4	Denmark	1	7.14%	4	5.00%	4.00
5	Japan	1	7.14%	2	2.50%	2.00

表 2.2.2 “面向工程管理可视化技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	State Grid Corporation of China	3	21.43%	18	22.50%	6.0
2	International Business Machines Machines Corporation	2	14.29%	11	13.75%	5.5
3	Boeing Co. (THE)	1	7.14%	13	16.25%	13.0
4	Jiangxi Jiujiang Power Supply Co.	1	7.14%	9	11.25%	9.0
5	China Design Group Co., Ltd.	1	7.14%	8	10.00%	8.0
6	Jiangsu Transportation Planning & Design	1	7.14%	8	10.00%	8.0
7	Purepredictive Inc.	1	7.14%	8	10.00%	8.0
8	Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology	1	7.14%	6	7.50%	6.0
9	Changzhou Agriculture and Aquatic Products Quality Supervision and Inspection Testing Center	1	7.14%	4	5.00%	4.0
10	Changzhou Rongrui Information Automation Co., Ltd.	1	7.14%	4	5.00%	4.0

图 2.2.1 “面向工程管理的可视化技术”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

国家安全发展战略的大背景下，需要结合各类工程的特点进一步研发适用的工程安全预警方法与技术，提高工程安全的整体水平。

当前，面向工程安全的预警方法与技术主要以新兴信息技术为支撑，结合具体工程活动的独特性形成相应的安全预警方法、技术或装置。主要包括：基于物联网或传感器的安全预警技术、基于机器视觉的安全预警技术和基于移动终端的安全预警技术等。基于物联网或传感器的安全预警技术是通过集成应用各类传感器和网络设施（有线或无线）实时自动收集、传输工程安全相关数据，并结合数据分析方法和预警机制进行安全风险实时分析、判别与预警的技术。基于机器视觉的安全预警技术是采用图像或视频分析方法或技术对工程安全相关图像或视频进行快速自动处理与安全要素提取，进而对安全风险进行判别与预警的技术。而基于移动终端的安全预警技术是通过人工的方式获取工程安全相关数据，识别并上报工程存在的安全隐患，进而进行安全风险综合判别与预警的技术。考虑到工程环境的差异性和各技术的优劣势，在工程实践中通常集成应用这些安全预警技术。

（1）基于物联网或传感器的安全预警技术

基于物联网或传感器的安全预警技术术涉及多类传感器，如温度、湿度、压力、气体、光、声、应力、应变、位移、位置、身份标识等的传感器，其中常用的位置传感器包括 UWB、RFID、Beacon、GPS 等，身份标识传感器包括 RFID、UWB、Beacon、NFC 二维码等。常用于环境工程安全监测与预警（如空气质量、地质环境等）、建设工程安全监测与预警（如深基坑、主体结构、临边洞口等）、交通工程安全监测与预警（如危险物品运输车辆管理等）、矿山工程安全监测与预警（如

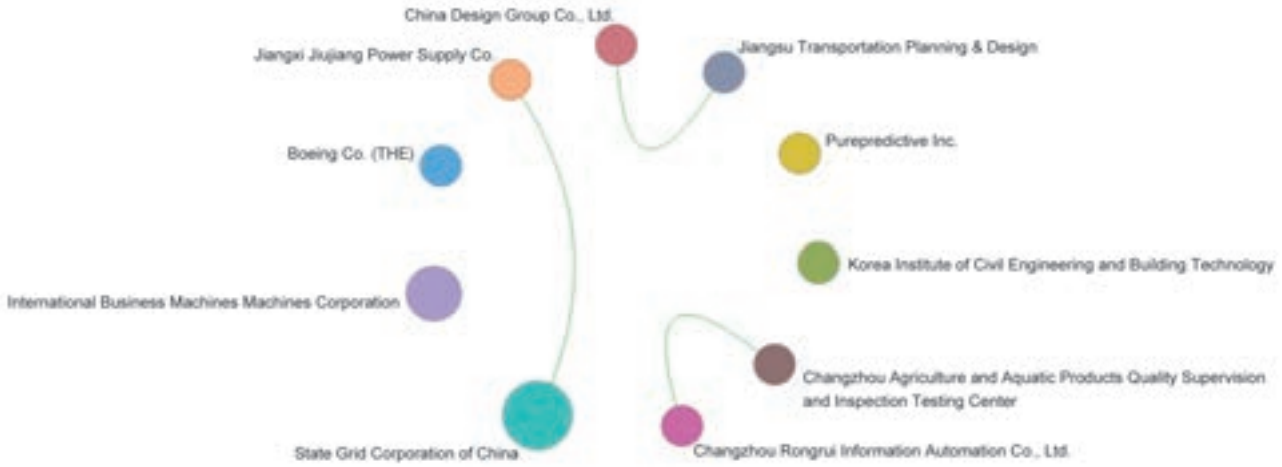

图 2.2.2 “面向工程管理的可视化技术”工程开发前沿的主要机构间合作网络

危险地质、危险气体等）等。然而，由于工程环境的复杂性，传感器信号传输易受现场环境影响，致使其精度波动较大。

（2）基于机器视觉的安全预警技术

基于机器视觉的安全预警技术依赖于工程现场的视像采集设备，如相机、3D 扫描仪、雷达、无人机、卫星、航拍设备等，以及图像处理技术，如背景减除法、滑动检测窗口、梯度直方图、支持向量机、K 最近邻法、CNN、LSTM 等。常用于建设工程安全监测与预警（如工人行为、危险区域等）、环境工程安全监测与预警（如山体滑坡、洪水等）、交通工程安全监测与预警（如货物安全检测等）等。然而，该类技术受现场光线、视线、动态性等影响较大，同时还受限于算法和计算设备的性能。

（3）基于移动终端的安全预警技术

基于移动终端的安全预警技术得益于移动终端设备（如智能手机、智能平板、智能手环等）以及微信、APP 等小程序开发技术的快速发展。常用于建设工程安全监测与预警（如现场安全隐患或风险因素等）、环境工程安全监测与预警（如自然灾害、人为灾害等）、矿山工程安全监测与预警（如现场安全隐患或风险因素等）等。该类技术适用面较广，但受限于人工检测与上报相关数据，致使数据覆盖面较窄或不全面。

国内外在工程安全预警方法与技术研发方面呈现以下几个趋势。①支撑技术多元化。随着传感器技术、图像处理技术、通信技术等的不断完善与性能提升，安全预警支撑技术正趋于多元化，而由于各技术适用环境的差异性，预警技术正趋于集成化。②预警方式自动化。随着数据自动获取、传输与处理技术能力的提升，安全判别与预警正趋于自动化。③应用领域普及化。随着安全预警技术能力（包括精度）的提升，工程应用领域正得到不断深化。此外，随着安全数据的不断积累和大数据分析技术的持续发展，工程安全管理决策正由主观决策趋于数据支持决策。

“面向工程安全的预警技术与方法”工程开发前沿中核心专利产出数量排名前 3 的国家 / 地区分别是中国、美国、韩国，其中中国产出的核心专利数量为 10 篇，处于绝对领跑地位（见表 2.2.3）。我国在该领域产出的核心专利最多的机构为中国扬子电力有限公司（China Yangtze Power Co., Ltd.），公开的专利有 2 篇，平均被引数为 8（见表 2.2.4）。

其中，中国扬子电力有限公司和清华大学之间出现了合作。从专利产出国的合作网络图（见图 2.2.3）和专利产出机构的合作网络图（见图 2.2.4）来看，目前还没有构成较为紧密的合作网络。

表 2.2.3 “面向工程安全的预警技术与方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家 / 地区	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	10	16.95%	33	55.93%	3.3
2	USA	2	3.39%	13	22.03%	6.5
3	South Korea	2	3.39%	10	16.95%	5.0
4	France	1	1.69%	1	1.69%	1.0
5	Japan	1	1.69%	2	3.39%	2.0

表 2.2.4 “面向工程安全的预警技术与方法”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China Yangtze Power Co., Ltd.	2	12.50%	16	27.12%	8
2	Jubix	1	6.25%	9	15.25%	9
3	Fluor Corp.	1	6.25%	9	15.25%	9
4	Tsinghua University	1	6.25%	6	10.17%	6
5	Wuhan Shuzhen Information Integration	1	6.25%	5	8.47%	5
6	Verizon Communications Inc.	1	6.25%	4	6.78%	4
7	Chongqing Hehang Internet Things Technol	1	6.25%	3	5.08%	3
8	Nanjing Xuean Network Technology Co., Ltd.	1	6.25%	3	5.08%	3
9	NTT Docomo Inc.	1	6.25%	2	3.39%	2
10	Hangzhou Hikvision Digital Technology Co., Ltd.	1	6.25%	2	3.39%	2

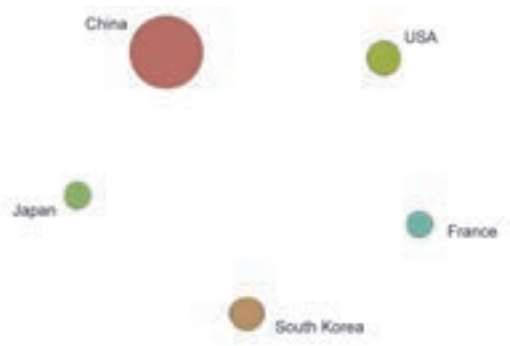

图 2.2.3 “面向工程安全的预警技术与方法”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

2.2.3　面向工程管理的物联网技术开发

物联网（Internet of Things）技术是通过一系列的信息传感设备，按照约定的相关数字协议，将一切有关物品与互联网连接起来，进行信息交换和通信，以实现智能识别、定位、跟踪、监控和管理的一种互联网技术。将面向工程管理的物联网定义为工程物联网，以区别于应用于制造业的工业物联网。工程物联网技术需适应工地复杂多样环境和工程要素的动态变化的要求，能处理数量种类繁多的传感器和巨量的通信数据。工程物联网技术体系架构较成熟，关键解决数据感知、传输及管理应用问题。国内外面向工程管理的物联网技术开发均有成功的案例，未来的技术向着集成化、标准化、智能化发展。

工程物联网技术开发涉及现代传感器技术、嵌入式计算机技术、分布式信息处理技术、现代网络及无线通信技术等多个领域。关键技术体系可分为四个层次：感知技术层、网络技术层、应用技术层和公共技术层。

（1）智能感知技术

工程物联网主要是利用射频识别（RFID 标签）、二维码、各类传感器、视频监控等感知、捕获、测

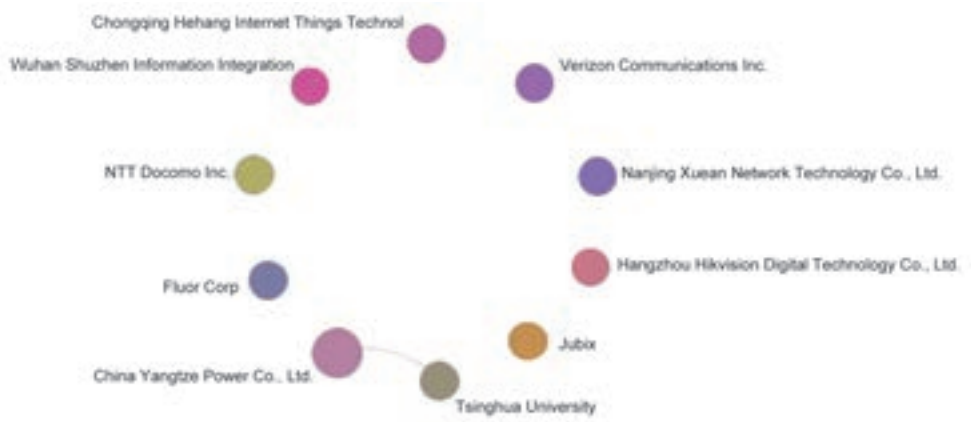

图 2.2.4 “面向工程安全的预警技术与方法”工程开发前沿的主要机构间合作网络

量技术实时地对监控对象进行信息采集和获取。RFID 标签与 RFID 读写器间的通信一般封装为中间件供系统开发调用。复杂工程环境下传感器种类众多（包含应力、应变、温度、水位等），人员、材料、设备标识的 RFID 标签数量大，智能感知技术需解决传感器的供电、电磁屏蔽、巨量通信数据等问题。

（2）高可靠的安全传输技术

该技术实现把感知信息无障碍、高可靠性、高安全性地进行短距离传输、自组织 LAN 网和广域网传输。工程物联网把传感器网络与移动通信技术和互联网技术相融合。复杂工程环境下为提高数据传输效率，需根据传感器的类型和管理要求，设置不同的采样频率和传输时间间隔，对于人员、设备的移动轨迹监控，同样需要满足数据采集、传输和监控指令反馈的技术要求。

（3）综合应用技术

工程物联网应用可分为监控型（桥梁健康状况监控）、查询型（人员身份识别）、控制型（设备移动轨迹控制）等。综合应用技术包含用于支撑跨行业、跨应用、跨系统之间的信息协同、共享、互通的通用技术，通过部署 ONS 服务器、PML 服务器和 EPS/IS 服务器建立一个应用支持平台子层，实现技术层隔离；在之上构筑应用服务子层面向智能交通、智能建造、智能物流，提供行业应用。

（4）公共技术

公共技术包括数据解析、数据安全、网络管理和服务质量（QoS）等具有普遍意义的技术，这些技术应用于工程物联网各个技术层次。

物联网技术的概念起源于 1999 年美国麻省理工学院（MIT）的 Auto-ID 研究中心提出的将网络无线射频识别（RFID）技术应用到日常物品，从而实现智能化识别和管理。2005 年，国际电信联盟（ITU）正式提出了“物联网”的概念，并在《ITU Internet reports 2005——the Internet of things》报告中介绍了物联网的特征以及未来的机遇与挑战，表达了在未来物联网能够将任何时间和地点的任何物体联系起来，传感器技术、智能终端技术将会有深入的研究和发展空间。2008 年，IBM 提出“智慧地球”的概念，将传感器设备安装到物体上，从而普遍连接形成网络。2009 年欧盟委员会发布了物联网战略，介绍了 20 年物联网的发展趋势，同年，温家宝同志在视察微纳传感器工程技术研发中心并发表重要讲话，自此物联网技术在我国正式拉开了帷幕。物联网技术在医药物流、智能农业、车辆综合管理、钢铁仓储等领域中得到广泛运用。

工程物联网是数据感知、传输、分析和决策控制的关键性技术。工程物联网对工程建造过程中的各种工程要素（包括“人、机、料、法、

环、品”）实现泛在感知、互联及监控。国外工程物联网在建造领域应用方面具有较成熟的经验。例如：日本明石海峡大桥、法国米约大桥、挪威阿斯克桥等都建立了桥梁结构健康监测物联网系统；瑞士圣格达基线隧道构建了由 2600 km 电缆、20 万个传感器以及 7 万数据节点组成的自动监控物联网平台。

我国工程物联网在桥梁、超高层结构健康监测以及地铁工程施工中人员定位、工程环境监控等方面均有应用案例。特别是在建筑工程施工领域应用比较广泛。例如：对塔吊、电梯、脚手架等机械设备内部应力、振动频率、温度、变形等参量变化进行测量和传输，实现对施工机械设备的运行情况动态监控；通过构件上 RFID 标签信息读取，获得构件的位移、变形、裂缝等数值，利用 RFID 定位技术快速找到危险构件，及时进行加固、修复；利用 BIM 技术和工程物联网技术的结合，根据时间、部位、工序等维度进行统计，制定详细的物料采购计划，并对物料批次标注 RFID 标签来控制物料的进出场时间和质量状况。

从工程物联网技术架构看：基于 EPC global 标准、基于泛在传感网（USN）和基于 M2M 物联网三种主流架构方式已经比较成熟。未来的物联网将会向几个重点方向发展：巨量感知数据压缩技术、三维视频智能分析技术、物联网与 BIM 集成技术、基于物联网的大数据分析技术、物联网与 5G 移动通信技术等。从我国工程物联网技术发展看：面向全寿命周期工程物联网集成技术；支持边缘计算和云计算协同的工程物联网体系架构设计理论；宽覆盖、超链接、低功耗、低成本组网技术等将成为今后的研究方向。

从发表专利的数量来看，中国处于领跑地位（见表 2.2.5），主要产出机构的核心专利公开量均为 1 篇（见表 2.2.6）。此外，从图 2.2.5 和图 2.2.6 中可以看出，各国及各机构之间还未形成较为紧密的合作网络。

表 2.2.5　“面向工程管理的物联网技术开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家 / 地区

序号	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	China	17	100%	55	100%	3.24

表 2.2.6　“面向工程管理的物联网技术开发”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	Beijing Qingda Tianyan View Control	1	5.88%	9	16.36%	9
2	Chongqing Shengxin Technology Co., Ltd.	1	5.88%	6	10.91%	6
3	Hefei Caixiang Information Technology Co.	1	5.88%	6	10.91%	6
4	Shanghai Renywell Technology Co., Ltd.	1	5.88%	5	9.09%	5
5	Guangzhou Baosteel Southern Trade Co., Ltd.	1	5.88%	4	7.27%	4
6	Qingdao Lianggu Wireless Technology Co.	1	5.88%	4	7.27%	4
7	Guizhou Normal University	1	5.88%	4	7.27%	4
8	Chengdu Gips Energy Technology Co., Ltd.	1	5.88%	3	5.45%	3
9	Chengdu Chuangshi Technology Co., Ltd.	1	5.88%	2	3.64%	2
10	Zhejiang China Tobacco Industrial Co., Ltd.	1	5.88%	2	3.64%	2

图 2.2.5 “面向工程管理的物联网技术开发”工程开发前沿的主要国家 / 地区间合作网络

图 2.2.6 “面向工程管理的物联网技术开发”工程开发前沿的主要机构间合作网络

领域课题组人员

课题组组长：

丁烈云　何继善　胡文瑞　向　巧

专家组成员：

丁烈云　何继善　胡文瑞　向　巧　陈晓红
曹耀峰　柴洪峰　陈清泉　傅志寰　刘人怀
陆佑楣　栾恩杰　凌　文　孙永福　邵安林
王　安　王基铭　王礼恒　王陇德　汪应洛
王玉普　王众托　薛　澜　许庆瑞　徐寿波
杨善林　殷瑞钰　袁晴棠　朱高峰　郑静晨
赵晓哲　Mirosław SKIBNIEWSKI
Peter E. D. LOVE　毕　军　蔡　莉　陈　劲
丁进良　杜文莉　方东平　高自友　胡祥培
华中生　黄季焜　黄　伟　江志斌　李　恒
李永奎　李　政　刘晓君　骆汉宾　任　宏
唐加福　唐立新　王红卫　王慧敏　王孟钧
王先甲　王要武　魏一鸣　吴德胜　吴建军
吴启迪　杨　海　叶　强　曾赛星　周建平

工作组成员：

王红卫　骆汉宾　钟波涛　李　勇　贺　领
裘露婷　王晓波

办公组成员：

聂淑琴　常军乾　郑文江　穆智蕊　乔晓燕

执笔组成员：

丁烈云　王红卫　骆汉宾　钟波涛　李　恒
何　桢　郭红领　王　科　镇　璐　欧阳敏
叶堃晖　刘军安　林　瀚　李红波　余宏亮
秦　虎　郭　健　张永成　董　超　方伟立
吴海涛　贺　领　裘露婷　王晓波

总体组成员

项目组长： 陈建峰

项目组成员：

段正澄　郭东明　潘云鹤　卢锡城　王静康　刘炯天　翁史烈　倪维斗
彭苏萍　顾大钊　崔俊芝　张建云　陈以一　郝吉明　曲久辉　康绍忠
张福锁　陈赛娟　张伯礼　丁烈云　何继善　胡文瑞　向　巧　韩　筠
吴　向　周炜星　吉久明　蔡　方　蒋志强　张卫东　高彦静　王　丹
郑文江　穆智蕊　刘晶晶

综合组执笔：

郑文江　穆智蕊　周炜星　吉久明　蔡　方　蒋志强　高彦静

数据支持：

科睿唯安（Clarivate Analytics）

工作组：

组　长： 安耀辉　焦　栋　韩　筠

副组长： 吴　向　延建林　丁　宁　周　源　郑文江

成　员：

姬　学　王成俊　王爱红　宗玉生　张　松　王小文　黄海涛　张文韬
聂淑琴　赵西路　闻丹岩　杨　波　穆智蕊　陈冰玉

致谢：

感谢高等教育出版社有限公司、科睿唯安公司、中国工程院院刊（系列）编辑部、中国工程院战略咨询中心、中国工程科技知识中心、中国工程院各学部和学部办公室、华东理工大学、北京化工大学、华中科技大学、浙江大学、国防科技大学、天津大学、上海交通大学、同济大学、清华大学、中国农业大学、《中国工程科学》杂志社的大力支持！

全球工程前沿
Engineering Fronts

- 机械与运载工程
- 信息与电子工程
- 化工、冶金与材料工程
- 能源与矿业工程
- 土木、水利与建筑工程
- 环境与轻纺工程
- 农业
- 医药卫生
- 工程管理