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，涉及结构工程、土木建筑材料、交通工程、建筑学、暖通空调、市政工程、测绘工程和水利工程等学科方向。其中，“基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”“风－浪－流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”“基于大数据的城市空间分析和优化方法”“面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论”“地下工程的动力灾变跨尺度预测”是非纯数据挖掘前沿，为专家提名前沿或者是基于数据挖掘前沿凝练而成的前沿。“纳米改性土木工程材料”“减缓城市热岛效应的规划原理”“道路、轨道材料与结构的性能演变及耐久性设计原理”“极端水文事件的形成机理与演变规律”和“深部能源开采灾变效应与力学行为调控”是数据挖掘前沿。

各个前沿所涉及的核心论文自 2014 年至 2019 年的逐年发表情况见表 1.1.2。

1.1.1　基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知

综合感知是实现智慧城市和智慧流域的重要基础。在智慧城市和智慧流域中，无处不在的智能传感器对物理城市与物理流域实现全面、综合的感知，并实时感测城市运行和流域管理的核心系统，把数字城市、数字流域与物理城市、物理流域无缝连接起来，进而利用云计算等技术对实时感知获得的地理时空大数据进行即时处理，为用户提供智能化服务。当前的主要研究内容有：①智慧城市与智慧流域综合感知基础体系的构建方法，实现监测资源大规模互联互通和多源异构感知资源协同；②基于综合感知基础体系的城市与流域综合感知方法；③智慧城市与智慧流域地理时空大数据的集成管理与实时分析方法。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数

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	基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知	36	924	25.67	2017.0
2	风－浪－流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理	40	1271	31.78	2016.3
3	基于大数据的城市空间分析和优化方法	58	2461	42.43	2017.1
4	面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论	544	16 740	30.77	2016.6
5	地下工程的动力灾变跨尺度预测	93	2297	24.70	2017.5
6	纳米改性土木工程材料	74	3995	53.99	2017.2
7	减缓城市热岛效应的规划原理	188	6975	37.10	2016.9
8	道路、轨道材料与结构的性能演变及耐久性设计原理	56	1584	28.29	2017.5
9	极端水文事件的形成机理与演变规律	238	9287	39.02	2016.5
10	深部能源开采灾变效应与力学行为调控	105	3319	31.61	2017.3

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	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知	2	5	5	10	8	6
2	风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理	11	5	4	6	8	6
3	基于大数据的城市空间分析和优化方法	5	5	4	20	12	12
4	面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论	69	97	88	102	92	96
5	地下工程的动力灾变跨尺度预测	6	7	6	19	24	31
6	纳米改性土木工程材料	3	6	11	19	20	15
7	减缓城市热岛效应的规划原理	21	23	30	44	29	41
8	道路、轨道材料与结构的性能演变及耐久性设计原理	6	3	5	5	16	21
9	极端水文事件的形成机理与演变规律	26	46	46	41	50	29
10	深部能源开采灾变效应与力学行为调控	5	14	10	22	27	27

为 36，被引频次为 924，篇均被引频次为 25.67。

1.1.2　风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理

海港码头、防波堤、采油平台、海底管线、跨海桥隧、海上风电基础等海洋工程结构运行环境恶劣，安全风险大。在风、浪、流和地震等作用下，海床地基土体内孔隙水压力增加、有效应力降低，导致海床地基土体出现强度弱化、液化问题；同时波流作用使海床地基出现冲刷破坏。此外，动力荷载作用产生的结构运动也会引起海床地基内孔隙水压力和有效应力的变化，使海床地基承载力问题更加复杂。在风、浪、流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理，是海洋工程结构安全性和耐久性有待解决的关键问题。需研究解决的主要问题包括：①在波浪、地震及结构运动等不同周期循环荷载作用下，不同海床地基土体（碎石、砂土和软黏土等）的强度弱化、液化机理及其演化规律；②考虑循环荷载作用下海床地基土体强度弱化、液化、液化后超孔压消散固结及再次液化过程的弹塑性本构模型；③在波浪、水流作用下，考虑渗流效应的不同海床地基（碎石、砂土和软黏土等）冲刷模型；④动力作用 – 海工结构 – 海床地基系统非线性动力分析的耦合数值模型及有效数值模拟方法；⑤动力作用 – 海工结构 – 海床地基系统承载特性研究的物理模型试验基础理论和试验技术。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 40，被引频次为 1271，篇均被引频次为 31.78。

1.1.3　基于大数据的城市空间分析和优化方法

互联网技术发展衍生的手机信令、公交刷卡、社交网站签到等地理位置大数据带来了城市空间分析方法的变革。与传统数据相比，具有大样本、高精度、长时间记录的优势，可动态、精准地记录城市各类活动的时空信息，为人们观察、认知城市空间及其发展趋势提供了新途径。基于大数据的城市空间分析和优化是当下与未来城市研究的前沿领域。相关研究机构主要集中在美国、英国、欧洲等发达国家或地区以及以中国为代表的快速发展中国家和地区。西方发达国家拥有完善的科研体系和良好的研究基础；而以中国为代表的发展中国家拥有庞大的时空感知数据源、日新月异的感知途径和场

景以及良好的软硬件基础。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 58，被引频次为 2461，篇均被引频次为 42.43。

1.1.4　面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论

面向适应性热舒适与室内空气品质营造的通风理论是指利用自然通风和人体热适应，营造具有良好空气品质并平衡节能舒适的室内环境设计理论和方法。主要研究方向包括：建筑环境中人体热适应性形成生理学和心理学机理，环境暴露经历产生的热适应对热舒适影响及预测模型，自然通风环境和被动式建筑环境中通风量计算及空气品质评估，自然通风环境和被动式建筑环境设计理论等。该前沿一直保持着相当高的活跃度，研究者在全球各气候区开展了大量的现场调查，丰富和完善了适应性热舒适理论，更合理的表达在自然通风建筑中的人体热舒适，使用自然通风、人工气流、个性化热舒适装备在特定时间和空间上替代传统的空调采暖设备，从而减少建筑对传统能源的依赖，实现人与自然的和谐发展。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 544，被引频次为 16 740，篇均被引频次为 30.77。

1.1.5　地下工程的动力灾变跨尺度预测

目前地下工程建设规模宏大、所处环境介质复杂，面临着强地震、活动断裂带、地震液化等灾害的威胁，对岩土和地下工程防灾减灾科学技术提出了严峻的挑战。地下工程的动力灾变跨尺度预测是指交叉融合岩土地震工程学、结构动力学、多尺度科学等学科，构建基于宏观、细观等多个空间尺度和时间效应尺度的多尺度动力分析模型，揭示强震作用下地下工程的整体宏观动力响应特征和细观损伤动态演化机理，实现对高烈度区、不利场地条件下地下工程动力灾变全过程的跨尺度预测，为提升地下结构的防灾减灾水平提供科学依据和技术支撑。其主要研究方向包括：长大隧道纵向抗震设计理论、大规模非线性地震响应多尺度分析方法、强震非一致空间效应物理实验模拟、复杂变刚度地下结构动力响应分析、液化场地 / 穿越活动断裂带等不利场地条件下地下工程动力灾变模拟等。未来发展趋势包括加强对地下工程强震灾变机制及设计对策的研究，加强对地下结构抗减震技术及抗震构造措施的研究工作，形成合理统一的抗震性能概念设计。此外，如何将抗震减震措施优化组合，并使其适应复杂不利地质条件下地下工程的地震响应特性仍是当前亟待解决的主要问题之一。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 93，被引频次为 2297，篇均被引频次为 24.70。

1.1.6　纳米改性土木工程材料

现代土木工程对混凝土材料提出了更高的要求，传统意义上混凝土宏观结构复合与单一性能提升，很难满足此目标。基于多尺度理论指导下纳米层面的微观结构调控、功能优化提升是混凝土材料自我提升的可行性道路之一。通过纳米材料掺杂，形成胶凝材料的纳米尺度优化，实现水泥微观结构调控。掺杂有机官能基团分子，实现与水泥材料的化学配位与杂化；或加入非反应性纳米粒子，调节实现水泥水化产物凝胶分子结构；或引入表面活性纳米粒子，与水泥凝胶间搭建具有高延展性的纳米桥。通过水泥凝胶纳米尺度的优化与调控，实现低纳米粒子掺量下显著提高混凝土韧性和耐久性的目标。通过纳米材料引入，赋予或拓展传统混凝土材料无法拥有的性能，实现混凝土功能优化提升。通过纳米掺杂或表面涂覆，形成混凝土材料如导电性、自清洁性等特性；亦可通过压电等纳米粒子添加，实现混凝土材料自感知的能力；或通过修复功能纳米粒子设计，实现混凝土物理 / 化学的修复功能。通过纳米材料引入，实现混凝土材料的功能化提升，确保其满足现代土木工程对结构 – 功能一体化的苛刻要求。通过理论分析和仿真模拟方法的引入，实

现纳米改性混凝土的理性设计。综合运用计算化学等手段，建立混凝土微观结构的纳米优化策略；通过大数据分子模型的指导，解析纳米粒子对混凝土材料的影响规律。实现高性能、多功能纳米改性混凝土的顶层设计和理性掺杂。以理论分析和数值模拟指导的纳米改性混凝土材料设计，结合先进的纳米颗粒分散技术；实现水泥胶凝材料微结构调控，赋予混凝土材料功能化特征；是纳米改性混凝土材料发展趋势。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 74，被引频次为 3995，篇均被引频次为 53.99。

1.1.7 减缓城市热岛效应的规划原理

城市发展出现市区地表和冠层气温明显较邻近乡村地区高的现象，称为城市热岛效应。热岛效应受城市形态、下垫面、大气污染和人为热等诸多因素影响。在全球气候变化背景下，热岛效应进一步加剧了热浪等异常天气现象及城市人群呼吸性困难、中暑等健康风险，对城市气候及人体舒适度产生不利影响，健康舒适导向的城市规划与设计研究受到高度重视。应对城市热岛及微气候的研究课题涉及建筑、规划与景观领域，主要技术措施的问题通常划分为宏观尺度和微观尺度进行探讨。宏观尺度的研究包括：基于土地利用及开发强度的城市风廊道规划分析方法，基于高分辨率遥感技术的热岛效应定量研究，地理信息系统的减缓城市热岛的绿地生态规划。微观尺度的研究包括：应用风热模拟计算流体动力学（CFD）技术优化城市空间规划与建筑设计研究，公园绿地与城市街道的树木景观设计对于人体舒适度与热风险改善。城市街区网格精细度的温热环境研究方法，解决宏观尺度与微观尺度的分辨率降尺度的关键技术。其他城市热岛应用层面研究包含：可持续城市发展的城市气候战略和创新，热风险管理的城市形态与绿化设计，城市开发强度对于污染扩散与城市群能耗的影响与预测等。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 188，被引频次为 6975，篇均被引频次为 37.10。

1.1.8 道路、轨道材料与结构的性能演变及耐久性设计原理

道路材料与结构的性能演变及耐久性设计原理是指道路材料与结构在服役期间承受交通荷载与环境因素的反复作用，引起其内部损伤逐渐累积、服役功能逐渐退化，基于对损伤累积及功能退化规律的揭示，开展道路材料性能提升、结构组合优化的研究，建立道路耐久性设计的理论与方法。主要研究方向包括：采用多尺度的理论分析、数值模拟以及室内外试验的方法，揭示道路材料与结构的性能演化规律，客观表征道路材料与结构的服役行为；采用材料改性技术，提高道路材料的耐久性；考虑道路材料与结构的实际工作条件与拉压特性不同的本质特征，采用更加精准的结构设计方法提高道路耐久性设计的精度；通过道路长期性能的研究，提出更加科学的道路结构设计模型；通过耐久性道路的结构优化，以及采用科学的预防性养护技术，提高道路的使用寿命。未来发展趋势包括：基于道路长期性能跟踪观测以及加速加载试验，揭示多因素耦合作用下道路材料与结构的性能演变规律；开发高效材料改性技术，以提升道路材料的力学特性以及胶结料与矿料之间的界面黏结特性；针对道路材料与结构的实际服役行为，建立道路材料力学指标与道路结构力学响应预测的协调性分析方法及一体化设计方法。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 56，被引频次为 1584，篇均被引频次为 28.29。

1.1.9 极端水文事件的形成机理与演变规律

极端水文事件是指在特定地区和一定时间尺度内，发生的水文要素明显偏离常态均值的水文事件，其发生的概率较小但具有较强的破坏作用。极端水文事件是一个多维的非线性系统，受气候、下垫面、人类活动等多种因素的影响和制约，其形成机理十分复杂。近年来，全球气候变化导致极端水文事件发生的强度与频率呈现加剧的趋势，随之增加的水旱灾害风险正成为人类生存所面临的重大挑战。全

球变化背景下极端水文事件的形成机理与演变规律是当前研究的热点与难点问题。主要研究方向包括：①气候－植被－水文－人类活动相互作用对极端水文事件的影响机理；②自然气候变率和人类活动影响下极端水文事件演变的检测、归因与未来趋势预测；③变化环境下气候－水文双向耦合模型与多尺度极端水文过程模拟；④极端水文事件的风险评估、多维调控与综合应对。未来主要发展趋势为：基于全要素立体监测与科学实验、多源数据融合与同化、物理模型与人工智能集合模拟等新技术，从气候、水文、地理、管理等多学科交叉的视角，系统开展复杂环境下的极端水文事件形成机理与演变规律研究。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 238，被引频次为 9287，篇均被引频次为 39.02。

1.1.10　深部能源开采灾变效应与力学行为调控

人类社会的快速发展对能源的需求日益增长，伴随着各种工程技术体系的进步和完善，能源开采正逐步向地球的深部发展。近年来页岩气、干热岩、煤层气、可燃冰等非常规资源的开发在全世界范围内掀起了一股热潮。然而深部地层岩体处于一个高温高应力的复杂地质环境中，其力学行为比浅层的岩体更为复杂，受影响的因素也更多。深部岩体在流－固－热－化学的共同耦合作用下，其破坏强度、变形机理、渗透特征等一系列重要的参数均难以用传统的理论来解释。与此同时，近年来在深部能源开采过程中遇到了岩爆、诱发地震、软岩大变形、复杂地层井壁失稳等一系列的灾变问题，其灾变机理需要进一步的探究。因此，为了更好地研究深部能源开采灾变效应以实现对深部岩体力学行为的调控，需要重点关注以下几方面的研究内容：①复杂裂隙岩体的多场耦合作用机理；②深地动力灾害发生机理、过程和评价；③深部岩体物理力学特性、变形与破坏特征；④深地复杂构造对岩体物理力学特性的影响。从 2014 年至 2019 年，核心论文篇数为 105，被引频次为 3319，篇均被引频次为 31.61。

1.2　Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1　基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知

综合感知是实现智慧城市和智慧流域的重要基础。在智慧城市和智慧流域中，无处不在的智能传感器对物理城市与物理流域实现全面、综合的感知，并实时感测城市运行和流域管理的核心系统，把数字城市、数字流域与物理城市、物理流域无缝连接起来，进而利用云计算等技术对实时感知获得的地理时空大数据进行即时处理并提供智能化服务，实现数字城市与数字流域的智能化。随着智慧城市与智慧流域的发展，城市感知和流域感知已经从行业孤立的在线感知逐步发展为多网融合的综合感知。

当前，该前沿的主要研究课题有：

（1）智慧城市与智慧流域综合感知基础体系的构建方法包括：①城市与流域监测资源大规模互联互通的新技术，如海量传感器组网通信、异构传感器接入、传感网资源管理、传感网服务组合、流式数据挖掘分析和地理信息互操作等技术；②多源异构感知资源协同的新方法，如传感器信息建模、观测能力评价、协同监测、点面观测数据融合和按需聚焦服务等方法。

（2）基于综合感知基础体系的城市与流域综合感知方法包括：①多尺度综合感知指标、共性技术与标准体系，城市群和流域地表要素空间无缝感知方法；②多尺度智能光场视频成像与分析方法；③精细场景时空感知与在线监测方法；④城市与流域多尺度综合感知服务方法。

（3）智慧城市与智慧流域地理时空大数据的集成管理与实时分析包括：①多源实时地理信息的集成表达方法；②实时地理信息的融合组织方法；

③实时地理信息的弹性服务方法；④地理时空大数据的深度挖掘方法。

基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知的核心论文数为36篇（见表1.1.1），核心论文的篇均被引频次为25.67。核心论文产出排名前5的国家为中国、美国、马来西亚、伊朗和澳大利亚（见表1.2.1），其中中国发表论文占比为27.78%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前5的国家为韩国、美国、土耳其、马来西亚和瑞士，其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为19.80，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10的核心论文产出国家合作网络（见图1.2.1）来看，论文数量排名前10的国家之间有较为密切的合作关系。

根据核心论文的产出机构情况（见表1.2.2），该前沿排名前5的产出机构为中国科学院、中国水利水电研究院、土耳其Canik Basari大学、马来西亚国民大学和中国香港大学。排名前两名的机构分别为中国科学院与中国水利水电科学研究院。这两个机构的前沿科学领域主要是将人工智能等技术与传统水文方法相结合，用于城市洪涝预警及流域突发洪水预报等方面，以达到实现延长预见期、提高

表1.2.1 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	10	27.78%	198	19.80	2017.4
2	美国	6	16.67%	299	49.83	2016.7
3	马来西亚	5	13.89%	234	46.80	2017.0
4	伊朗	5	13.89%	124	24.80	2017.2
5	澳大利亚	5	13.89%	111	22.20	2017.2
6	英国	4	11.11%	59	14.75	2018.2
7	土耳其	3	8.33%	148	49.33	2016.0
8	韩国	2	5.56%	148	74.00	2016.0
9	瑞士	2	5.56%	72	36.00	2016.0
10	伊拉克	2	5.56%	64	32.00	2018.0

表1.2.2 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国科学院	中国	3	8.33%	98	32.67	2018.0
2	中国水利水电研究院	中国	3	8.33%	38	12.67	2017.0
3	Canik Basari大学	土耳其	2	5.56%	140	70.00	2015.5
4	马来西亚国民大学	马来西亚	2	5.56%	68	34.00	2017.0
5	香港大学	中国	2	5.56%	54	27.00	2015.5
6	德黑兰大学	伊朗	2	5.56%	52	26.00	2016.5
7	拉齐大学	伊朗	2	5.56%	49	24.50	2018.5
8	南昆士兰大学	澳大利亚	2	5.56%	47	23.50	2018.0
9	伊斯兰阿扎德大学	伊朗	2	5.56%	39	19.50	2018.5
10	华中科技大学	中国	2	5.56%	38	19.00	2018.5

预报精度等目的。从排名前 10 的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.2）来看，各机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出前 5 的国家为中国、伊朗、美国、越南和澳大利亚（见表 1.2.3），施引核心论文产出前 5 的机构为越南的孙德盛大学、越南的维新大学、伊朗的德黑兰大学、伊朗的大不里士大学和澳大利亚的南昆士兰大学（见表 1.2.4）。

根据论文的施引情况来看，核心论文产出国排名前 5 的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 1，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。

综合以上统计数据，在“基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”研究前沿，与国外同行相比，中国学者略具优势，并逐步发展到领先地位。建议中国政府继续加大对这一研究领域的支持力度，加快向世界领先水平发展。

1.2.2　风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理

海港码头、防波堤、采油平台、海底管线、跨

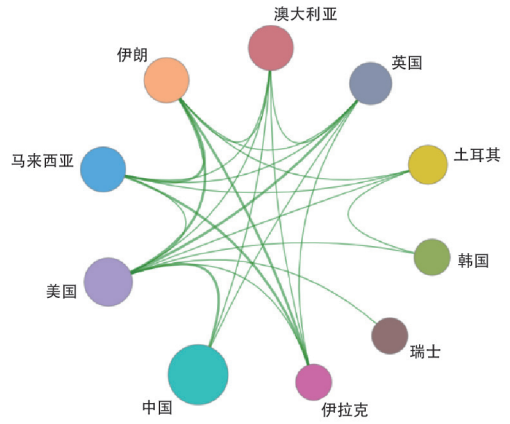

图 1.2.1　“基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿主要国家间的合作网络

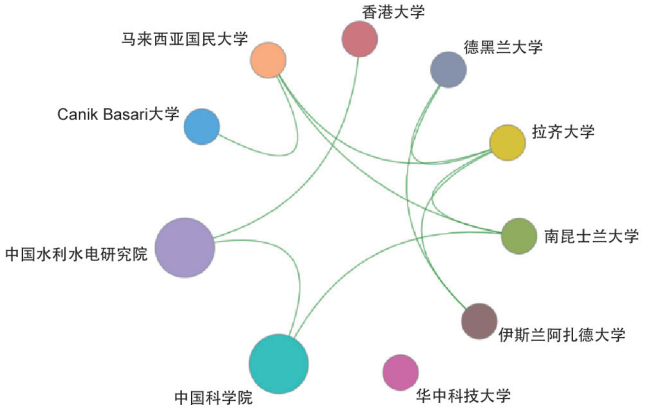

图 1.2.2　“基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3　“基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	258	24.86%	2018.7
2	伊朗	165	15.90%	2018.8
3	美国	151	14.55%	2018.4
4	越南	84	8.09%	2019.3
5	澳大利亚	73	7.03%	2018.8
6	印度	63	6.07%	2018.5
7	韩国	62	5.97%	2018.5
8	土耳其	50	4.82%	2018.3
9	马来西亚	47	4.53%	2018.6
10	加拿大	46	4.43%	2018.7

表 1.2.4 “基于地理时空大数据的智慧城市与智慧流域综合感知”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	孙德盛大学	越南	63	17.36%	2019.2
2	维新大学	越南	47	12.95%	2019.5
3	德黑兰大学	伊朗	40	11.02%	2018.3
4	大不里士大学	伊朗	33	9.09%	2018.8
5	南昆士兰大学	澳大利亚	31	8.54%	2018.4
6	中国科学院	中国	27	7.44%	2018.3
6	华中科技大学	中国	27	7.44%	2018.7
8	加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校	美国	25	6.89%	2018.0
8	河海大学	中国	25	6.89%	2019.0
10	伊利亚州立大学	格鲁吉亚	23	6.34%	2019.1

海桥隧、海上风电基础等海洋工程结构运行环境恶劣，安全风险大。在风、浪、流和地震等作用下，海床地基土体内孔隙水压力增加、有效应力降低，导致海床地基土体出现强度弱化、液化问题；同时波流作用也会使海床地基出现冲刷破坏。此外，动力荷载作用产生的结构运动也会引起海床地基内孔隙水压力和有效应力的变化，使海床地基承载力问题更加复杂。在风、浪、流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理，是海洋工程结构安全性和耐久性有待解决的关键问题。

海床地基的动力响应及其与结构的耦合作用是风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统耦合响应的核心问题。关于海床地基响应模型，主要有拉普拉斯方程、扩散方程和 Biot 固结方程三类。拉普拉斯方程和扩散方程均假设土骨架不可变形，孔隙流体分别考虑为不可压缩和可压缩，这两类模型均没有考虑土骨架与孔隙流体的耦合作用。Biot 固结方程假设土骨架可变形，孔隙流体可压缩，流体运动满足达西定律，并且考虑了固液相加速度。Biot 固结模型可考虑土骨架与孔隙流体的耦合作用，但海床土的本构主要限定在弹性范围。关于风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应问题，大都将各种动力作用作为荷载施加在结构上，没有考虑动力作用下海床地基的响应效应。

需研究解决的主要问题包括以下几方面：

（1）在波浪、地震及结构运动等不同周期循环荷载作用下，不同海床地基土体（碎石、砂土和软黏土等）的强度弱化、液化机理及其演化规律。

（2）考虑循环荷载作用下海床地基土体（碎石、砂土和软黏土等）强度弱化、液化、液化后超孔压消散固结及再次液化过程的弹塑性本构模型。

（3）在波浪、水流作用下，考虑渗流效应的不同海床地基（碎石、砂土和软黏土等）冲刷模型。

（4）动力作用 – 海工结构 – 海床地基系统非线性动力分析的耦合数值模型及有效数值模拟方法。

（5）动力作用 – 海工结构 – 海床地基系统承载特性研究的物理模型试验基础理论和试验技术。

风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理的核心论文数为 40 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 31.78。核心论文产出排名前 5 的国家为中国、澳大利亚、丹麦、英国和荷兰（见表 1.2.5），其中中国发表论文比例为 57.50%，是该前沿的最主要研究国家之一。篇均被引频次排名前 5 的国家为荷兰、美国、丹麦、英国和墨西哥，其中中国作者所发表的论文

篇均被引频次为 26.87，说明中国学者在该前沿的研究工作也逐步受到了关注。从排名前 10 的核心论文产出国家合作网络（见图 1.2.3）来看，中国、澳大利亚和英国间的合作相对频繁。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.6），该前沿排名前 5 的产出机构为澳大利亚的格里菲斯大学、丹麦技术大学、中国的河海大学、中国科学院和中国的上海交通大学。近年来，澳大利亚格里菲斯大学相关研究人员在波浪、水流作用下海床地基动力响应方面开展了深入系统的研究工作，丹麦技术大学相关研究人员主要在波浪、水流作用下海底管线和直立桩周围海床冲刷方面开展了一些研究工作。从排名前 10 的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.4）来看，产出机构之间有着较为密切的合作关系。

施引核心论文产出前 5 的国家为中国、英国、澳大利亚、挪威和美国（见表 1.2.7），施引核心论文产出前 5 的机构为中国的河海大学、中国的上海交通大学、澳大利亚的格里菲斯大学、丹麦技术大学和中国海洋大学（见表 1.2.8）。根据论文的

表 1.2.5　“风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	23	57.50%	618	26.87	2016.7
2	澳大利亚	19	47.50%	491	25.84	2016.8
3	丹麦	12	30.00%	458	38.17	2015.7
4	英国	10	25.00%	350	35.00	2016.5
5	荷兰	5	12.50%	230	46.00	2014.8
6	比利时	3	7.50%	80	26.67	2017.7
7	美国	2	5.00%	79	39.50	2014.0
8	土耳其	2	5.00%	33	16.50	2017.0
9	墨西哥	1	2.50%	28	28.00	2016.0
10	挪威	1	2.50%	17	17.00	2018.0

表 1.2.6　“风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	格里菲斯大学	澳大利亚	16	40.00%	411	25.69	2016.8
2	丹麦技术大学	丹麦	12	30.00%	458	38.17	2015.7
3	河海大学	中国	10	25.00%	224	22.40	2017.6
4	中国科学院	中国	7	17.50%	241	34.43	2015.6
5	上海交通大学	中国	7	17.50%	185	26.43	2016.6
6	荷兰三角洲研究院	荷兰	5	12.50%	230	46.00	2014.8
7	布拉德福德大学	英国	5	12.50%	125	25.00	2017.6
8	浙江大学	中国	3	7.50%	54	18.00	2018.7
9	宁波大学	中国	3	7.50%	52	17.33	2017.7
10	邓迪大学	英国	2	5.00%	86	43.00	2014.5

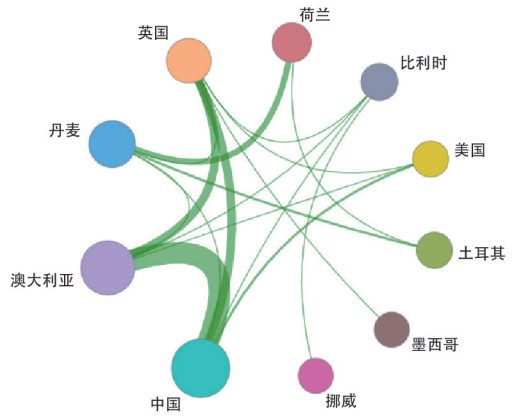

图 1.2.3 “风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿主要国家间的合作网络

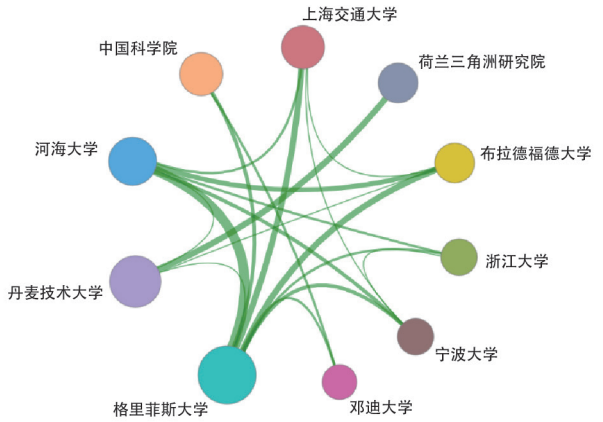

图 1.2.4 “风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	327	38.97%	2018.3
2	英国	109	12.99%	2018.0
3	澳大利亚	101	12.04%	2017.7
4	挪威	68	8.10%	2018.3
5	美国	62	7.39%	2018.2
6	丹麦	61	7.27%	2017.6
7	荷兰	27	3.22%	2016.7
8	意大利	25	2.98%	2018.5
9	法国	20	2.38%	2018.3
10	西班牙	20	2.38%	2017.7

表 1.2.8 “风 – 浪 – 流和地震作用下海洋工程结构与海床地基系统的耦合响应机理”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	河海大学	中国	70	17.07%	2018.4
2	上海交通大学	中国	60	14.63%	2017.8
3	格里菲斯大学	澳大利亚	52	12.68%	2017.9
4	丹麦技术大学	丹麦	41	10.00%	2017.4
5	中国海洋大学	中国	37	9.02%	2018.2
6	西澳大学	澳大利亚	32	7.80%	2017.3
7	中国科学院	中国	30	7.32%	2017.4
8	浙江大学	中国	26	6.34%	2018.6
9	大连理工大学	中国	24	5.85%	2017.8
10	挪威科技大学	挪威	20	4.88%	2018.2

施引情况来看，核心论文产出国排名前 5 的国家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 1，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　基于大数据的城市空间分析和优化方法

互联网技术发展衍生的手机信令、公交刷卡、社交网站签到等地理位置大数据带来了城市空间分析方法的变革。与传统数据相比，具有大样本、高精度、长时间记录的优势，可动态、精准地记录城市各类活动的时空信息，为人们观察、认知城市空间及其发展趋势提供了新途径。基于大数据的城市空间分析和优化是当下与未来城市研究的前沿领域。

迄今为止，三个方面的城市研究得到了发展。一是基于居民活动更深入地认识城市各个系统要素的时空分布与结构性特征，提升对居住、就业、公共服务、交通网络等系统要素运行状态的感知能力；此类研究最先得到发展，成果丰硕。二是对城市空间的问题进行识别与绩效评估，活动反映了人们对空间的实际利用情况，基于此，从效率、公平等价值观出发，对通勤行为与职住关系、人口分布与公共服务供给等空间问题进行研判；此类研究最终面向城市空间优化，但目前处于问题识别与优化技术方法的探索阶段，研究成果与优化应用存在差距。三是基于海量数据挖掘城市空间的发展规律，对未来城市发展的趋势进行推演，综合、动态地理解城市这一复杂系统，并推动城市空间研究的理论发展；此类研究尚处于起步阶段，但却是未来的研究核心。

大数据为城市科学研究带来了契机，在对城市各个系统时空特征深入认识的基础上，面向应用的空间问题识别与优化技术方法是当前研究重点；最终目标是建立智慧化的城市运行系统，并实现城市科学研究的理论创新。

相关研究机构主要集中在美国、英国、欧洲等发达国家或地区以及以中国为代表的快速发展中国家和地区。西方发达国家拥有完善的科研体系和良好的研究基础；而以中国为代表的发展中国家拥有庞大的时空感知数据源、日新月异的感知途径和场景以及良好的软硬件基础。

国际领军的机构包括：美国麻省理工学院（媒体实验室等）；英国伦敦大学学院（高级空间分析中心、动态城市实验室等）、瑞士苏黎世高工 ETH、英国图灵实验室、ETH- 新加坡未来城市实验室、谷歌公司、推特、微软公司等；国内领先的机构如同济大学（长三角协同创新中心）、中国科学院大学、清华大学、北京大学、阿里巴巴集团、腾讯、华为技术有限公司、京东世纪贸易有限公司等。

高等院校基于传统学科优势，如城乡规划学、地理学、地理信息科学等优势迅速发展智慧城市背景下的地理时空大数据理论与方法研究，不仅领先所在地区领跑全球相关研究。企业机构依托自身海量数据、存储与计算优势也不断完善相关工程研究落地与应用场景搭建，成为相关科研的补充力量。

相关方向的国际合作频繁、模式多样。主要类型包括但不限于：多高校 – 政府 – 企业 – 行业协会多主体合作（如长三角城市群智能规划协同创新中心）、跨高校合作（如英国图灵实验室等）、行业机构 – 企业横向合作（如中规院·阿里巴巴未来城市实验室）。

基于大数据的城市空间分析和优化方法的核心论文数为 58 篇（见表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 42.43。核心论文产出排名前 5 的国家为中国、美国、挪威、澳大利亚和英国（见表 1.2.9）。其中中国发表论文占比为 41.38%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前 5 的国家为英国、瑞士、新加坡、挪威和美国。其中中国作者所发表的论文篇均被引频次为 49.54，略高于平均水平。从排名前 10 的核心论文产出国家合作网络（见图 1.2.5）来看，国际间有较为密切的合作关系，

尤其是美国和中国之间。

根据核心论文的产出机构情况（见表 1.2.10），该前沿排名前 5 的产出机构为中国的武汉大学、挪威科技大学、中国的中山大学、中国的北京大学和美国的亚利桑那州立大学。武汉大学前沿领域集中在大数据应用于空间分析，特别是城市结构与规律属性表征、计算与再认识方向成果显著。挪威科技大学的主要研究领域则集中在环境感知、物联网以及相关技术支持下的城市化议题。从排名前 10 的核心论文产出机构合作网络（见图 1.2.6）来看，除了挪威科技大学外，其他机构之间有一定的合作。

施引核心论文产出前 5 的国家为中国、美国、英国、西班牙和澳大利亚（见表 1.2.11），施引核心论文产出前 5 的机构为中国科学院、中国的武汉大学、美国的麻省理工学院、中国的中山大学和中国的北京大学（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 5 的国家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 1，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。

表 1.2.9 “基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出国家

序号	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	中国	24	41.38%	1189	49.54	2017.4
2	美国	14	24.14%	856	61.14	2016.5
3	挪威	6	10.34%	425	70.83	2017.0
4	澳大利亚	6	10.34%	110	18.33	2018.0
5	英国	5	8.62%	704	140.80	2015.2
6	荷兰	5	8.62%	106	21.20	2017.4
7	西班牙	4	6.90%	215	53.75	2016.2
8	日本	4	6.90%	158	39.50	2016.5
9	瑞士	3	5.17%	244	81.33	2014.7
10	新加坡	3	5.17%	217	72.33	2016.3

表 1.2.10 “基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿中核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	核心论文数	论文比例	被引频次	篇均被引频次	平均出版年
1	武汉大学	中国	5	8.62%	180	36.00	2017.4
2	挪威科技大学	挪威	4	6.90%	333	83.25	2017.5
3	中山大学	中国	4	6.90%	183	45.75	2017.2
4	北京大学	中国	3	5.17%	172	57.33	2016.3
5	亚利桑那州立大学	美国	3	5.17%	114	38.00	2015.3
6	德克萨斯州立大学	美国	3	5.17%	67	22.33	2017.0
7	中国科学院	中国	3	5.17%	49	16.33	2017.7
8	伦敦大学学院	英国	2	3.45%	593	296.50	2014.0
9	庆北大学	韩国	2	3.45%	237	118.50	2016.5
10	南洋理工大学	新加坡	2	3.45%	199	99.50	2016.0

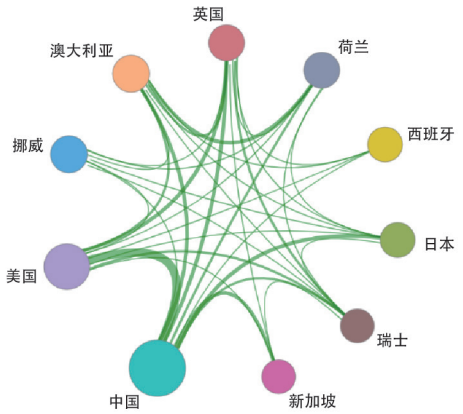

图 1.2.5　“基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿主要国家间的合作网络

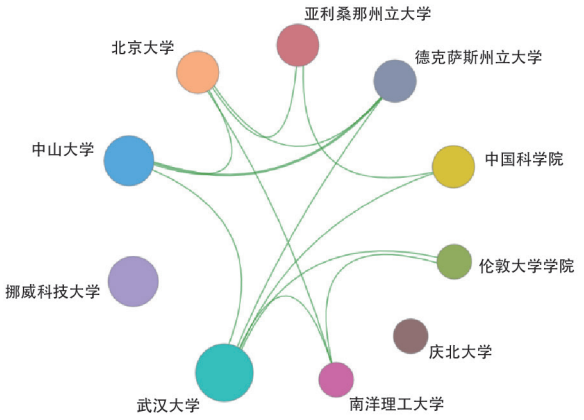

图 1.2.6　“基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11　“基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出国家

序号	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国	842	35.56%	2018.4
2	美国	510	21.54%	2018.1
3	英国	208	8.78%	2018.2
4	西班牙	144	6.08%	2018.2
5	澳大利亚	131	5.53%	2018.2
6	意大利	129	5.45%	2018.0
7	法国	114	4.81%	2018.1
8	德国	78	3.29%	2018.1
9	日本	74	3.13%	2017.9
10	加拿大	70	2.96%	2018.1

表 1.2.12 “基于大数据的城市空间分析和优化方法”工程研究前沿中施引核心论文的主要产出机构

序号	机构	国家	施引核心论文数	施引核心论文比例	平均施引年
1	中国科学院	中国	101	19.77%	2018.0
2	武汉大学	中国	79	15.46%	2018.5
3	麻省理工学院	美国	45	8.81%	2017.5
4	中山大学	中国	42	8.22%	2018.5
4	北京大学	中国	42	8.22%	2018.3
6	中国科学院大学	中国	39	7.63%	2018.3
7	浙江大学	中国	35	6.85%	2018.5
8	清华大学	中国	33	6.46%	2018.4
9	微软亚洲研究院	美国	32	6.26%	2016.4
10	西安电子科技大学	中国	32	6.26%	2018.1

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、城乡规划与风景园林、交通工程、岩土及地下工程、桥梁工程、土木建筑材料、市政工程、水利工程、测绘工程等学科方向。其中，“应对突发公共卫生事件的规划与设计技术”“水利工程隐患深水探测与处理技术”“城市信息模型（CIM）技术”“极端环境下水泥基材料性能及微结构调控技术”“可调控超高性能混凝土设计”“城市给排水管网漏损监控与原位修复技术和装备”和“对地观测与地理空间信息区块链处理技术”是非纯数据挖掘前沿，为专家提名前沿或者基于数据挖掘前沿凝练而成的前沿。“极端条件下地下工程智能建造技术与装备”“地震可恢复功能结构体系设计与建造技术”“高速列车精确定位与安全导航技术”是数据挖掘前沿。各个前沿所涉及的专利自 2014 年至 2019 年的逐年施引专利数见表 2.1.2。

2.1.1 应对突发公共卫生事件的规划与设计技术

城市发展影响着传染性疾病的传染源接触、传播方式和过程、易感人群规模等方面，这些影响都在城市空间中通过生态过程和社会过程得以实现。因此，城市规划与设计能够在从空间干预角度应对突发公共卫生事件方面起到重要作用。目前尚未有完全针对突发公共卫生事件而研发的规划与设计技术，但是包括土地使用及城市生态辨识、城市三维物质空间与环境模型建构、环境污染监测与评估等既有技术能够在隔离传染源和切断传播途径方面起到一定作用。这些技术方法在传染性疾病针对性、揭示传播机制、提供精准预测，以及规划设计适用性等方面的作用或能力仍需提升。另外，为了提高城市空间应对突发公共卫生事件的能力、更好地促进健康城市的规划与建设，制定更为科学合理的规划和设计策略，仍有待在基于大数据的居民时空出行及交通组织分析、公共健康单元综合建构，以及基于社会公平的健康设施综合空间布局三方面进行技术研发拓展。随着 COVID-19 的全球流行，城市空间的“健康性”将受到更为广泛关注，应对突发公共卫生事件的规划与设计技术亟待进一步研发与应用检验，以更好促进健康城市的规划与建设。从 2014 年至 2019 年，专利公开量为 38，被引频次为 22，平均被引频次为 0.58。

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	被引频次	平均被引频次	平均公开年
1	应对突发公共卫生事件的规划与设计技术	38	22	0.58	2017.4
2	极端条件下地下工程智能建造技术与装备	274	578	2.11	2017.5
3	水利工程隐患深水探测与处理技术	90	181	2.01	2016.8
4	地震可恢复功能结构体系设计与建造技术	509	1711	3.36	2016.2
5	城市信息模型（CIM）技术	150	418	2.79	2017.0
6	极端环境下水泥基材料性能及微结构调控技术	473	977	2.07	2016.5
7	可调控超高性能混凝土设计	15	17	1.13	2017.1
8	高速列车精确定位与安全导航技术	24	84	3.50	2017.0
9	城市给排水管网漏损监控与原位修复技术和装备	177	233	1.32	2017.1
10	对地观测与地理空间信息区块链处理技术	10	34	3.40	2018.8

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

序号	前沿名称	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年
1	应对突发公共卫生事件的规划与设计技术	2	5	3	7	8	13
2	极端条件下地下工程智能建造技术与装备	15	20	31	50	76	82
3	水利工程隐患深水探测与处理技术	14	17	7	11	21	20
4	地震可恢复功能结构体系设计与建造技术	54	57	79	90	85	95
5	城市信息模型（CIM）技术	8	15	19	29	38	33
6	极端环境下水泥基材料性能及微结构调控技术	62	46	77	80	87	87
7	可调控超高性能混凝土设计	2	2	3	0	1	7
8	高速列车精确定位与安全导航技术	3	1	1	2	3	12
9	城市给排水管网漏损监控与原位修复技术和装备	13	13	34	28	30	53
10	对地观测与地理空间信息区块链处理技术	0	0	0	1	0	9

2.1.2　极端条件下地下工程智能建造技术与装备

极端条件下地下工程智能建造技术与装备是指在高海拔、高地温、高地应力、高水压等极端自然环境或极端复杂地质条件下，通过数字化与智能化的设计、生产加工、施工与运营维护技术研发，以及自动化与智能化装备研制，实现极端条件下地下工程的快速、工业化、少人甚至无人建造。极端自然环境下，人员和装备耐受限度、机械设备工作效率急剧下降，生态环境保护要求也极为苛刻；极端复杂地质条件下，极易发生链式地质灾害，引发重大事故。通过极端条件地下工程智能建造技术基础理论、关键核心技术和人机协调、自主学习的智能装备研发，可大幅提升极端条件下的工业化建造能力，实现快速、少人甚至无人建造。其主要研究方向包括：①地下工程采集－设计－施工一体化智能建造基础理论；②数字化设计基础平台和集成系统、智能化的设计体系；③数字化和智能化的衬砌结构生产加工；④极端条件下地质灾害预报、智能化施工控制和工程质量监测检测；⑤极端条件下人机协调、自主学习的智能装备；⑥极端条件下地下工程在线监控、智能诊断和自动化维护。目前地下工程智能建造技术与装备的发展重点是研究形成地

下工程智能建造基础理论、开发极端条件下地质灾害预报技术和研制极端条件下的智能建造装备。从2014年至2019年，专利公开量为274，被引频次为578，平均被引频次为2.11。

2.1.3 水利工程隐患深水探测与处理技术

水利工程是调控水资源时空分布、优化水资源配置的重要工程措施，也是江河防洪工程体系的重要组成部分。由于水利工程结构老化和性能劣化加剧，变化环境影响，加之地震、地质灾害等，险情时有发生。隐患深水探测与处理技术已成为本领域大力发展的前沿技术之一。其核心是水下检测设备、潜水技术与水下作业技术等。深水探测技术主要包括水下渗漏检测、水下结构缺陷检测、金属结构检测及水下勘查技术等；技术设备指用于水下工程的运载、检测与施工等专用装备，主要包括有人潜水技术及其装备、载人潜水器、无人潜水(水下机器人)及水下检测、清理、切割、焊接等水下专用装备等；水下隐患处理技术主要包括渗漏处理、结构加固与缺陷处理、金属结构防腐处理及有关施工技术，此外，工程运行和加固施工时还需经常对泄输水建筑物等进行水下检查与清淤、闸门封堵等处理技术。其开发重点主要包括深水复杂条件下水利工程隐患探测装备研发、深水环境水下探测与作业高精度定位技术、低能见度环境下高分辨力解析技术、深水环境修补加固材料与工艺等。水利工程隐患深水探测与处理技术将是确保水利工程长效安全的重要保障，服务于水库大坝、水闸与堤防工程、长距离引调水工程等，具有广阔的发展前景。从2014年至2019年，专利公开量为90，被引频次为181，平均被引频次为2.01。

2.1.4 地震可恢复功能结构体系设计与建造技术

工程结构是组成抗震韧性城市的最重要基本元素，抗震韧性城市建设要求工程结构不仅具有抵御地震、防止破坏的能力，而且应具有震后的可恢复能力。地震可恢复功能结构（Earthquake-resilient Structure）也称为抗震韧性结构，其将传统体系的材料非线性问题转化为可恢复功能结构的几何非线性问题，形成强震下损伤可控、弹塑性变形集中，具有更大的变形能力和更小残余变形的可恢复功能新体系。地震可恢复功能结构体系主要包括三大类：设置摇摆构件的结构体系、自复位结构体系、设置可更换构件的结构体系。目前，围绕地震可恢复功能结构体系设计与建造的开发前沿主要集中在：质量－刚度－阻尼协同的地震可恢复功能新体系，地震四水准设防目标与多性能指标，地震可恢复功能结构直接基于位移设计方法，非结构构件防震韧性提升技术，地震可恢复功能结构快速建造与震后恢复技术。从2014年至2019年，专利公开量为509，被引频次为1711，平均被引频次为3.36。

2.1.5 城市信息模型（CIM）技术

城市信息模型（CIM）是在建筑信息模型（BIM）基础之上向城市级进化而来的数字平台。其特征是将微观建筑信息模型BIM、宏观地理空间数据（GIS）、物联网数据（IoT）进行融合，基于多尺度在数字空间构建成能够全景展现真实城市的三维城市空间模型与城市信息的有机综合体。以GIS展示空间属性，以BIM反映最基本的精细单元构造特征，以IoT实时感知城市运行态势，实现覆盖更广的地上、地表、地下的数据模型和信息的集成融合。它不仅具有三维仿真的可视化表达能力，还承载了随时随地可获取的有关城市全方位要素的属性信息。CIM具有可感知、可分析、可共享、能判断、会计算的能力，可模拟城市运行，仿真城市管理规则，评估城市的发展决策。在信息化的基础之上综合应用人工智能（AI）、大数据分析、高精度城市三维仿真等多项智能技术支持城市规划、建设和治理的智能化。CIM是智慧城市建设与精细化综合管理的基础和中枢。从2014年至2019年，专

利公开量为 150，被引频次为 418，平均被引频次为 2.79。

2.1.6　极端环境下水泥基材料性能及微结构调控技术

工程结构的极端服役环境包括超低温、极高温、强腐蚀、强辐射、强磁场、超高压、高真空及复杂荷载等多类复杂环境。这类极端环境作用可对正常服役的水泥基材料性能造成显著的劣化后果，严重威胁工程结构的安全性。随着人类探索领域的拓展延伸以及现代建造技术的不断发展，世界主要国家对极端环境工程建设的需求逐渐增加，极端环境下水泥基材料具有广阔的应用前景。因此，有必要针对极端环境下水泥基材料力学性能与耐久性能演变规律开展研究。水泥基材料的微结构与其性能密切相关，针对特定的极端服役环境，基于水泥基材料性能需求，发展水泥基材料共性微结构调控技术，是提高其极端环境服役安全性及寿命的有效手段。为此，需利用先进测试表征手段并结合计算机模拟技术从多尺度角度研究极端环境下水泥基材料微结构特征演变，揭示其深层次劣化损伤机理，而后从原材料优化筛选、配合比优化设计、微结构构建设计等角度提出相应的多尺度复合结构调控技术。针对不同极端环境下的结构性能需求，重点着眼于发展水泥基材料水化进程及水化产物时空分布调控、水化硅酸钙微纳性状设计、孔结构优化、界面过渡区结构增强等几类微结构调控技术。从 2014 年至 2019 年，专利公开量为 473，被引频次为 977，平均被引频次为 2.07。

2.1.7　可调控超高性能混凝土设计

超高性能混凝土（UHPC）是近 20 年发展起来的最具创新性的一种水泥复合基材料。它的设计和制备主要基于颗粒最紧密堆积理论，通过减小孔隙率、改善微观结构、增加匀质性、提高韧性获得。相较于普通水泥基材料，UHPC 具有超高强度、高韧性和优异的耐久性，能很好满足土木工程轻量化、高层化、大跨化和高耐久化的需求，在桥梁工程、抗爆结构、薄壁结构、建筑装饰、海洋工程、修复和加固工程等领域具有广泛的应用前景。通过调控超高性能混凝土的组分设计和制备工艺，可以调控它的一些重要性能，包括韧性、抗冲磨性、弹性模量、修复相容性、电阻率等，最终实现它在土木工程领域中的不同应用。在充分认识 UHPC 材料和微观结构特性的前提下，根据工程需求，定能实现它在不同工程领域的广泛精准应用，显著提高结构的安全性、使用寿命和社会可持续性。从 2014 年至 2019 年，专利公开量为 15，被引频次为 17，平均被引频次为 1.13。

2.1.8　高速列车精确定位与安全导航技术

中国铁路已进入高速时代，增加高速列车运行密度、提高运输效率并保障运输安全具有重要意义。高速列车精确定位与安全导航技术是确保高速铁路运输安全与效率的首要技术手段。该技术利用多传感器融合方法对列车实时位置、速度、加速度及姿态信息进行可靠的精确测量，以保障高速列车的安全导航和移动闭塞。高速列车精确定位与安全导航技术首先需要保证精确性和实时性。由于高速列车的周边环境复杂多变，使用全球导航卫星系统、惯性导航系统、车载测速雷达、车轮速度编码器或应答信标等单一传感器，无法保证列车的精确定位在全域范围都具有足够的时空分辨率。比如全球导航卫星系统在峡谷地区精度无法保障，在隧道内甚至无法定位；惯性导航系统的定位误差随时间累积；应答信标定位的空间分辨率不足。为使列车在全域范围的定位精度均满足要求，首先，需要选择观测精度和采样率足够高的传感器，例如网络实时动态（RTK）定位可达厘米级精度，其次，需要上述多种传感器在统一时空参考框架下进行联合观测，最关键的是需要有效的数据融合处理方法，比如卡尔曼滤波及其衍生方法。该技术还要满足可靠性。可

靠性需要冗余的通信通道和观测信息提供基础保障，运用观测异常探测方法识别传感器故障和粗差，通过状态异常探测方法感知列车位置、速度、加速度和姿态的异常跳变，利用抗差估计等方法可靠解算列车的上述精确状态信息。未来该领域的重点研究方向有：高动态多传感器深组合精确定位、高速列车弹性定位导航授时（PNT）、高动态多传感器观测及状态异常探测及处理等方向。从2014年至2019年，专利公开量为24，被引频次为84，平均被引频次为3.5。

2.1.9 城市给排水管网漏损监控与原位修复技术和装备

管网漏损监控与原位修复技术旨在通过较强的时效性和高效的实时监测技术和设备缩短漏损的平均持续时间，从而避免相应的经济损失和社会危害。基于数据采集与监视控制系统（SCADA）提供的城市给水管网压力、流量实时监测数据，可从数据驱动和模型驱动两方面建立面向管网漏损问题的全流程诊断体系，进行漏损识别、定位、修复技术的全方位技术研究。其中，基于数据驱动的漏损监控技术主要问题在于如何基于一定数量与质量的管网历史监测数据进行高精度漏损诊断；而基于稳态或瞬态的模型驱动的漏损监控技术则主要面临水力模型校核、监测点优化布局、监控区域内监测值诊断特征提取等难点。随着物联网和人工智能技术的飞速发展，耦合数据驱动模型技术与高效的漏损检测设备开发是今后发展的趋势。排水管网的漏损监控技术受限于监控设备应用维护困难、液位与流量数据采集不稳定、水力模型精度低等因素，该项技术发展仍处于起步阶段，前沿关键科学问题包括漏损监控设备研发、基于监测数据统计分析的漏损识别与定位技术、高精度水力模型构建与校核等。原位修复技术需配合管道修复配套机具装备，主要包括局部及井口修复、聚烯烃材料为主体的修复、原位固化修复、液体凝固材料的修复技术。其中，非开挖修复技术因其显著的经济、社会效益逐渐受到重视。从2014年至2019年，专利公开量为177，被引频次为233，平均被引频次为1.32。

2.1.10 对地观测与地理空间信息区块链处理技术

对地观测与地理空间信息区块链处理技术是测绘工程领域的开发前沿之一，它面向对地观测数据与地理空间信息的分布式处理需求，采用块链式数据结构、分布式节点共识算法、加密数据传输与访问技术、智能合约数据操作方式等区块链核心技术为对地观测数据与地理空间信息提供了一种新的分布式处理基础架构与计算范式。当前发展的主要方向包括：①基于区块链技术的对地观测遥感数据共享技术，以防止对遥感影像的非法篡改、传播并实现对遥感影像的控制使用；②基于区块链技术的用户参与型地理空间信息生成与更新技术；③基于区块链技术的分布式地理信息服务系统，为汽车、无人机等交通工具提供位置服务。从2014年至2019年，专利公开量为10，被引频次为34，平均被引频次为3.4。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 应对突发公共卫生事件的规划与设计技术

随着城市化的不断推进，生态环境的变化和人口高密度聚集极大提高了城市中传染性疾病的发生和传播可能。其中，土地利用变化、城市热岛效应和食物生产特征改变等生态影响过程，以及人口、物质建成环境、生活方式等变化所带来的社会影响过程共同决定了传染性疾病的流行。城市规划与设计能够在从空间干预角度起到包括隔离传染源、切断传播途径和保护易感人群等关键性作用。

虽然目前尚未有完全针对突发公共卫生事件而研发的规划与设计技术，但是包括土地使用及城市生态辨识、城市三维物质空间与环境模型建构、环境污染监测与评估等既有技术能够在隔离传染源和

切断传播途径方面起到一定作用。但总体而言，这些技术方法的适用性有待进一步探索，应对突发公共卫生事件的分析针对性以及规划设计干预的科学性有待提升。具体而言：

（1）土地使用及城市生态辨识技术。目前已形成了基于数据采集和归类、分析与总结，以及存储和监控的城市土地使用与生态要素辨识系统。该类技术能够为识别传染性疾病病原体可能存在的区域提供线索，但精准度和预测能力不足。未来有必要从历史演变视角，采用机器学习方法分析土地使用的演变过程，并结合生态学分析方法，共同揭示由于城市扩展和生态环境变化可能造成的病原体接触风险影响，预测突发公共卫生事件发生风险。

（2）城市三维物质空间与环境模型建构技术。当下已有针对城市整体或特定空间对象（如校园）的三维空间虚拟建构技术，能够清晰地展现多时相、多层次的城市空间形态和环境特征，并为相关城市活动或工程的管控（如旅游导览、市政工程、火灾预警）提供基础支持。这一技术也能够为传染病的传播特征研究和空间阻断方案的制定提供重要基础。

（3）环境污染监测与评估技术。目前相关分析技术重点关注土壤、水体和空气污染等方面，多由检测或识别、分析、评估、预警等几个模块组成。未来的技术研发还需纳入对传染病健康风险重点场所（如医院、超市、活禽交易市场、交通枢纽）的考虑，综合多维因素的交互影响，共同为空间规划和设计提供积极思路。

另外，为了提高城市空间应对突发公共卫生事件的能力、更好地促进健康城市的规划与建设，制定更为科学合理的规划和设计策略，还有待在三方面进行技术研发拓展：①基于大数据的居民时空出行及交通组织分析技术，这将为不同交通组织管理模式下疾病的传播扩散模式进行预测，进而为提出城市防疫分区策略提供支持；②公共健康单元综合建构技术，以“15 min 社区生活圈”为基础，形成“平疫结合”的社区功能节点；③基于社会公平的健康设施综合空间布局技术，强调对传染病易感人群（如老人、儿童）的关注，健康设施的配置考虑向这部分人群合理倾斜。

“应对突发公共卫生事件的规划与设计技术”工程开发前沿的核心专利公开量为 38 篇，平均被引频次为 0.58（见表 2.1.1），排名前 3 的国家或地区为中国、韩国、日本（见表 2.2.1），申请专利量最多的国家为中国，占比达到了 86.84%，平均被引频次为 0.52，是该工程开发前沿的重点研究国家之一。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.2），该前沿排名前 5 的产出机构为韩国的 GEOTWO 公司、中国的西安科技大学、中国的三亚中科遥感研究所、中国石油天然气集团公司和中国的安徽科技学院。GEOTWO 公司是一家韩国的地理信息技术公司，其研发重点之一是关于城市土地使用监测和评估的技术；西安科技大学聚焦于土地使用监测和城市碳排放测量相关技术的开发；三亚中科遥感研究所关注于绿色植被的净初级生产力测度，开发的关键技术多基于遥感数据和机器学习算法；中国石油天然气集团公司聚焦石油开发和运输领域，开发了石油气长输管道可能造成的环境影响风险进行评估技术，为相关事故对生态环境的影响提供了一套有效评价方法；安徽科技学院研发的相关专利技术也主要针对土地利用状态，能够仿真模拟土地利用的格局演替。虽然这些机构所研发的技术未直接针对应急性突发公共卫生事件，但是能对规划与设计的干预提供一定技术基础，并为未来相关分析方法和技术工具的研发提供思路与参考。

2.2.2　极端条件下地下工程智能建造技术与装备

极端自然环境下，人员和装备耐受限度、机械设备工作效率急剧下降，生态环境保护要求也极为苛刻；极端复杂地质条件下，极易发生链式地质灾

表 2.2.1 “应对突发公共卫生事件的规划与设计技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

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	中国	33	86.84%	17	77.27%	0.52
2	韩国	4	10.53%	5	22.73%	1.25
3	日本	1	2.63%	0	0.00%	0.00

表 2.2.2 “应对突发公共卫生事件的规划与设计技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	韩国 GEOTWO 公司	韩国	2	5.26%	5	22.73%	2.5
2	西安科技大学	中国	2	5.26%	5	22.73%	2.5
3	三亚中科遥感研究所	中国	1	2.63%	3	13.64%	3.0
4	中国石油天然气集团公司	中国	1	2.63%	2	9.09%	2.0
5	安徽科技学院	中国	1	2.63%	2	9.09%	2.0
6	广州地理研究所	中国	1	2.63%	1	4.55%	1.0
7	全日空航空公司	韩国	1	2.63%	0	0.00%	0.0
8	安徽川佰科技有限公司	中国	1	2.63%	0	0.00%	0.0
9	安徽环境科学研究院	中国	1	2.63%	0	0.00%	0.0
10	中国科学院地理科学与资源研究所	中国	1	2.63%	0	0.00%	0.0

害，引发重大事故。以川藏铁路、公路为例，工程隧道占比高、埋深大，穿越多条极活跃断裂带，高地应力、岩爆及软岩大变形问题异常突出，滑坡、落石和泥石流风险极高；海拔落差极大，高原地区冬季气温极低，地温非常高，沿线生态环境敏感脆弱，因而在建造过程中智能建造技术与装备的需求十分迫切。“进藏高速公路智能建造及工程健康保障技术”列为中国科协 2020 年十大工程技术难题之一。

通过极端条件下地下工程智能建造技术与装备研发，有助于形成覆盖设计、生产加工、施工与装备、运营维护等全产业链融合一体的智能建造产业体系，催生新产业、新业态、新模式，为地下工程跨领域、全方位、多层次的产业深度融合提供支撑。

当前全球地下工程行业发展态势良好，但仍存在标准化、信息化、智能化水平偏低等问题，与先进建造方式相比还有很大差距。随着新一轮科技革命和产业变革向纵深发展，以人工智能、大数据、物联网和 5G 等为代表的新一代信息技术加速向地下工程行业全面融合渗透。目前，极端条件下地下工程智能建造技术与装备的研究方向有：

（1）建造方法，传统的新奥法、新意法等是一种在地质信息不完备条件下首先半经验半理论设计、再在施工过程中不断监测与调整的动态反馈式建造方法，随着地下工程新型感知、数据传输、BIM/GIS 和信息集成等技术的发展，建造方法正在向“采集－设计－施工”一体化、智能化方向发展。

（2）设计体系，包括基于 BIM/GIS 的数字化设计体系和全过程信息集成平台，实现设计、制造、施工协同，并与运营维护一体化。

（3）生产加工，包括推进工艺流程数字化和机器人应用，实现地下工程衬砌结构生产数字化和智能化，实现少人甚至无人工厂。

（4）智能施工，包括极端条件下地下工程地质灾害智能预报和控制研究，推动灾害防控的精细探测和智能控制；作业现场信息智能采集与反馈、自动立体感知与定位、数字孪生平台、专家远程诊断、工程质量智能检测与控制，实现隧道施工自动化，减少现场人员数量和工作量。

（5）智能装备，包括人机协调和自主学习的智能装备、智能施工机器人和自动作业类脑控制器，极端条件下风险环境感知和精准作业控制的机器人化装备、高可靠智能互联装备、全类别地质环境风险识别处理的智能互联装备，实现提高装备的性能、效率和智能化程度。

（6）智能运维，包括极端条件下地下工程运行环境和结构健康的在线监控、结构服役性能智能诊断和智能维护，事故预防及救援，以及灾害预警与控制。

“极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿的核心专利为274篇，平均被引频次为2.11（见表2.1.1），排名前3的国家为中国、美国、加拿大（见表2.2.3）。中国机构或个人所申请的专利占比达到了91.97%，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为1.62。从核心专利产出国家之间的合作网络（见图2.2.1）来看，各个国家之间合作较少。

根据核心专利的产出机构情况（见表2.2.4），该前沿排名前5的产出机构为中国中铁股份有限公司、中国矿业大学（北京）、中国交通建设股份有限公司、中国的国家电网有限公司和中国的山东大学。从核心专利产出机构排名前10的合作网络（见图2.2.2）来看，机构之间合作较少。

2.2.3　水利工程隐患深水探测与处理技术

深水探测与作业技术的研发起源并大规模应用于海洋工程领域，传统工业强国在此类装备的研发和工业化生产方面技术领先。水利工程深水探测与水下作业、修复等技术应用环境与海洋环境差异较大，海洋环境适用的水下探测与修补加固作业技术引进后无法简单移植应用，需根据水库大坝的特殊水域环境和边界条件进行改进及研发创新。水下机器人（ROV）作为人类探索深海环境的主要工具之一，在海洋资源开发、深海科学探测等方面发挥了重要作用，一直以来受到各国重视。近年来，水下机器人目前主要应用于水库搜查、大坝探测、安全检查等方面。因水库环境的特殊性，水利行业目前应用的以观察级水下机器人为主。

结构异常渗漏是水利工程运行中面临的常见病害，现有的水利工程水下渗漏检测定位技术多为试验性应用，准确性不高，应用受到限制，是目前水利工程检测技术研究的首要技术难点。人工潜水作业是水下修复加固难以替代的手段，常规空气潜水最大作业水深仅为60 m，无法满足水利工程的大深度水下作业；虽然最先进的常规人工潜水已能实

表2.2.3　“极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

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	中国	252	91.97%	408	70.59%	1.62
2	美国	15	5.47%	170	29.41%	11.33
3	加拿大	2	0.73%	11	1.90%	5.50
4	巴西	1	0.36%	0	0.00%	0.00
5	日本	1	0.36%	0	0.00%	0.00
6	韩国	1	0.36%	0	0.00%	0.00
7	沙特阿拉伯	1	0.36%	0	0.00%	0.00

表 2.2.4 “极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿的主要产出机构

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	中铁股份有限公司	中国	19	6.93%	16	2.77%	0.84
2	中国矿业大学（北京）	中国	9	3.28%	12	2.08%	1.33
3	中国交通建设股份有限公司	中国	7	2.55%	7	1.21%	1.00
4	国家电网有限公司	中国	6	2.19%	6	1.04%	1.00
5	山东大学	中国	5	1.82%	12	2.08%	2.40
6	中国矿业大学（徐州）	中国	5	1.82%	10	1.73%	2.00
7	东南大学	中国	4	1.46%	16	2.77%	4.00
8	中国煤炭科工集团有限公司	中国	4	1.46%	5	0.87%	1.25
9	长安大学	中国	4	1.46%	3	0.52%	0.75
10	同济大学	中国	3	1.09%	12	2.08%	4.00

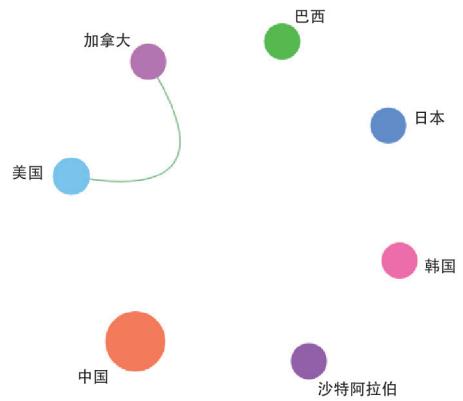

图 2.2.1 “极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿的主要国家间合作网络

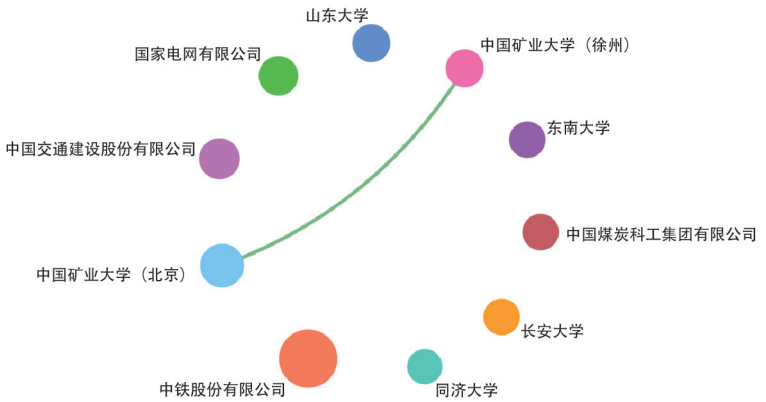

图 2.2.2 “极端条件下地下工程智能建造技术与装备”工程开发前沿的主要机构间合作网络

现百米级深水环境水下检测与作业，但人工作业效率低、成本高、风险大；超过 120 m 的常规人工潜水作业由于效率及成本不具备实用价值且须改用饱和潜水技术，目前仅在瑞士一座高坝中进行了试验，适应性的装备技术亟待突破。利用水下机器人、载人潜水器等深水作业平台开发能满足多种水下工程需求的无人作业技术，或开发潜水作业效率更高、成本与安全风险更低的适用水利工程特殊水域环境的专用饱和潜水技术，已成为优先发展方向。深水、高水头、高流速环境下施工作业难度大、效率低、成本高，水下灌浆和修复材料适用性差、工艺复杂、质量难以保障，必将影响修复效果。故根据深水环境特殊条件和用途，研发方便水下施工、质量可靠、经济合理的新型水下修补材料及施工工艺，是亟待开发的前沿重点。水利工程长期运行后或遭遇突发灾害情况下带来的深水坝前淤积问题给水下结构检测、保养维护及闸门检修和启闭运行带来极大困难，国内外现有清淤和疏浚装备和技术主要适用于水深较浅的宽阔水域泥沙或小粒径骨料清理，对作业环境狭窄的坝前闸门、流道口等区域的复杂淤积物难以有效施展，故有必要研发适用于 100 m 级以上水深、满足狭小空间运行、能清理层（沉）积复杂淤积物的多功能清淤装备和技术，确保水利工程长效安全运行。

“水利工程隐患深水探测与处理技术”工程开发前沿的核心专利 90 篇，平均被引频次为 2.01（见表 2.1.1），排名前 5 的国家为中国、美国、巴西、英国、挪威（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 90%，在专利数量方面比重较大，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为 2.21。

根据核心专利的产出机构情况（见表 2.2.6），该前沿排名前 5 的产出机构为中国电力建设集团有限公司、中国海洋石油集团有限公司和中国的上海库克莱生态科技有限公司、中国的浙江省水利河口研究院和中国的山东大学。上述核心专利产出机构排名来看，中国电建集团是中国唯一提供水利电力工程及基础设施规划、勘测设计、咨询监理、建设管理、投资运营为一体的综合性建设集团，已将“水利工程隐患深水探测与处理技术”作为其核心技术。中国海洋石油总公司已将深水探测与作业技术的研发大规模应用于海洋工程领域。

表 2.2.5　“水利工程隐患深水探测与处理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出国家

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	中国	81	90.00%	179	98.90%	2.21
2	美国	2	2.22%	0	0.00%	0.00
3	巴西	2	2.22%	0	0.00%	0.00
4	英国	1	1.11%	1	0.55%	1.00
5	挪威	1	1.11%	1	0.55%	1.00
6	日本	1	1.11%	0	0.00%	0.00
7	墨西哥	1	1.11%	0	0.00%	0.00

表 2.2.6 “水利工程隐患深水探测与处理技术”工程开发前沿中核心专利的主要产出机构

序号	机构	国家	公开量	公开量比例	被引数	被引数比例	平均被引数
1	中国电力建设集团有限公司	中国	4	4.44%	6	3.31%	1.5
2	中国海洋石油集团有限公司	中国	3	3.33%	3	1.66%	1.5
3	上海库克莱生态科技有限公司	中国	2	2.22%	8	4.42%	4.0
4	浙江水利河口研究院	中国	2	2.22%	6	3.31%	3.0
5	山东大学	中国	2	2.22%	3	1.66%	1.5
6	中国交通建设股份有限公司	中国	2	2.22%	1	0.55%	0.5
7	上海海洋大学	中国	2	2.22%	0	0.00%	0.0
8	河海大学	中国	2	2.22%	0	0.00%	0.0
9	广东茂名金阳热带海珍养殖有限公司	中国	1	1.11%	14	7.73%	14.0
10	广东梅县梅雁矿业有限公司	中国	1	1.11%	12	6.63%	12.0

领域课题组人员

课题组组长：崔俊芝　张建云　陈以一

课题组成员：

院士：

江　亿　欧进萍　王　浩　杨永斌　张建云
刘加平　缪昌文　杜彦良　钮新强　彭永臻
郑健龙　王建国　孔宪京　陈湘生　张建民
吴志强　岳清瑞　彭建兵　张喜刚　马　军
冯夏庭　李术才

专家：

艾剑良　蔡春声　蔡　奕　陈　鹏　陈　庆
陈求稳　陈　欣　陈以一　陈志光　戴晓虎
董必钦　董楠楠　樊健生　高　军　高　亮
葛耀君　顾冲时　韩继红　韩　杰　胡春宏
黄介生　贾良玖　蒋金洋　蒋正武　焦文玲
金君良　李安桂　李　晨　凌建明　刘　芳
刘飞香　刘加平　刘　京　刘曙光　刘廷玺
刘志勇　穆兴民　潘海啸　庞　磊　钱　锋
邵益生　史才军　舒章康　孙　剑　孙立军
孙　智　谈广鸣　谭忆秋　谭　峥　唐辉明
童小华　汪双杰　王爱杰　王发洲　王华宁
王国庆　王建华　王　伟　王亚宜　王元战
夏圣骥　肖飞鹏　杨大文　杨　敏　杨仲轩
姚俊兰　叶　蔚　张　锋　张尚武　张　松
张　旭　郑百林　郑　刚　仲　政　周伟国
周　翔　朱合华　朱　能　朱若霖　庄晓莹
周宏俊

执笔组成员：

郑健龙　吴志强　鲍振鑫　曹布阳　陈　鹏
陈　庆　董必钦　顾冲时　郝蔚祺　蒋希冀
李晓军　刘　芳　刘飞香　吕松涛　沈　尧
史才军　孙立军　陶　涛　王　德　王国庆
王　兰　王元战　吴泽媚　向　衍　谢俊民
姚俊兰　叶　蔚　禹海涛　张丰收　周乐韬
周　翔　周　颖