

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、水利与建筑工程领域 Top 10 工程研究前沿汇总见表 1.1.1，涉及结构工程、建筑学、地质工程、交通工程、市政工程、水利工程、城乡规划与风景园林、测绘工程等学科方向。其中，“在役道路、轨道与机场工程性能感知、评价及改扩建”“安全韧性导向的高密度城市人居环境空间优化”“城市水系统病原微生物风险识别与阻控”为专家提名前沿，其他为数据挖掘前沿。各前沿所涉及的核心论文自 2017 年至 2022 年的发表情况见表 1.1.2。

(1) 基于人工智能的结构损伤识别及性能预测

基于人工智能的结构损伤识别及性能预测旨在综合运用物联网、大数据、机器学习等前沿信息技术、方法和装备，融合结构静/动力响应及雷、视、声等传感器感知信息，建立可根据实时数据进行学习与强化的智能模型，实现在不同荷载和环境条件下的结构损伤与性能变化精准判别。开展基于人工智能的结构损伤识别及性能预测研究，实现对潜在损伤的及早发现并进行准确的性能预测，对工程结构全寿命周期的功能性、经济性、可靠性、安全性提升具有重要意义。主要研究方向包括：① 结构损伤检/监测的新传感装备研究；② 结构健康检/监测数据标准化与融合；③ 基于机器学习算法的结构损伤检测和定位；④ 数据驱动的结构性能预测方法；⑤ 物理信息融合的结构性能预测模型。未来主要发展趋势在于构建结构状态全息感知和智能诊断系统，提升结构损伤识别和性能预测模型在可解释性、泛化性、准确性等方面的能力，建立融合物理信息及知识驱动的学习模型，实现复杂场景下的结构损伤识别及性能预测模型的工程应用。

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	基于人工智能的结构损伤识别及性能预测	54	3 616	66.96	2020.6
2	城市更新中的减碳方法与技术	45	2 229	49.53	2020.0
3	巨型地质灾害链时空分布与智能化评估	109	6 081	55.79	2019.6
4	在役道路、轨道与机场工程性能感知、评价及改扩建	25	852	34.08	2019.9
5	结构与工程系统全寿命抗灾韧性	37	1 456	39.35	2020.8
6	城市污泥与垃圾共发酵高效资源化	73	3 012	41.26	2020.0
7	地下水资源量-水质-生态协同演变及可持续利用	72	5 307	73.71	2020.1
8	安全韧性导向的高密度城市人居环境空间优化	16	681	42.56	2020.3
9	城市水系统病原微生物风险识别与阻控	17	816	48.00	2019.4
10	高分辨率遥感目标智能检测	151	14 846	98.32	2020.2

表 1.1.2 土木、水利与建筑工程领域 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	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	基于人工智能的结构损伤识别及性能预测	1	3	8	9	19	14
2	城市更新中的减碳方法与技术	5	5	8	6	11	10
3	巨型地质灾害链时空分布与智能化评估	17	18	14	21	22	17
4	在役道路、轨道与机场工程性能感知、评价及改扩建	3	3	6	2	4	7
5	结构与工程系统全寿命抗灾韧性	1	2	5	6	4	19
6	城市污泥与垃圾共发酵高效资源化	1	1	2	1	6	2
7	地下水资源量-水质-生态协同演变及可持续利用	11	5	9	10	14	23
8	安全韧性导向的高密度城市人居环境空间优化	1	0	3	4	5	3
9	城市水系统病原微生物风险识别与阻隔	5	4	6	5	1	4
10	高分辨率遥感目标智能检测	11	15	18	38	29	40

从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 54，被引频次为 3 616，篇均被引频次为 66.96。

(2) 城市更新中的减碳方法与技术

城市更新中的减碳方法与技术主要是指将降低碳排放的策略与城市更新设计相结合，将碳减排的方法和技术引入针对不同城市要素的更新过程，从而显著促进城市的低碳发展和可持续性建设。主要研究方向包括：① 既有城区的能耗及微气候环境模拟；② 减碳目标下的城市更新设计方案优化和决策工具；③ 城市更新中减碳技术与建筑材料一体化及其建造技术创新；④ 统筹不同类型、不同规模的城市更新要素的碳减排技术集成设计。未来的发展趋势是融合建筑节能技术、新能源技术、地理信息科学、计算机与人工智能技术等多学科知识，促进城市更新要素与减碳技术的融合，开发数字平台进行多情境模拟、应用和监测反馈，有力支撑城市可持续有机更新。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 45，被引频次为 2 229，篇均被引频次为 49.53。

(3) 巨型地质灾害链时空分布与智能化评估

巨型地质灾害链是指某一地质灾害事件直接或间接诱发一种或多种次生灾害所形成的地质灾害系列。相较于单一地质灾害，巨型地质灾害链呈现出显著的不确定性、多种灾害相互依赖的复杂成灾机制，以及链式累积放大的巨灾效应。近年来，以中国川藏铁路为代表的高海拔寒区工程建设面临着巨型地质灾害链威胁，致灾规模高达数亿立方米，带来严重的人员伤亡和经济损失。准确预测巨型地质灾害链的时空分布并智能评估其灾害风险，是保障工程安全性、经济性和可持续性建设的关键。主要研究方向包括：① 复杂孕灾环境下地质灾害链时空发育分布特征与智能识别；② 地质灾害链成因机理与链生演化机制的动力学模型；③ 地质灾害链的韧性风险评估与防控结构优化方法；④ 超大尺度巨型地质灾害链的实时监测预警、智能化评估与防控决策响应。未来主要发展趋势在于巨型地质灾害链时空分布模式判别和灾变机理明晰，并在此基础上融合多源数据和智能算法预测地质灾害链的发展趋势、评估潜在的风险与影响，同时开发基于智能技术的地质灾害链实时监测与早期预警系统，构建超大尺度巨型地质灾害链智能化风险评估和防控决策体系。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 109，被引频次为 6 081，篇均被引频次为 55.79。

(4) 在役道路、轨道与机场工程性能感知、评价及改扩建

在役道路、轨道和机场工程性能感知、评价以及改扩建,是指对现有交通基础设施(如道路、铁路轨道和机场等),采用智能感知技术和综合评估方法,对其性能状况进行实时监测、评估和预测,以便根据不断增长的乘客和货物运输需求进行必要的改进与扩展,从而提高交通基础设施的安全性、可靠性和可持续性,以适应不断变化的交通环境和用户需求。与新建设施相比,在役道路、轨道与机场工程改扩建面临更加复杂的时间、空间和生态约束。主要研究方向包括:① 结构健康检/监测与评估,运用传感器技术、无损检测等手段进行实时监测和综合检测,捕捉潜在的结构病害,结合高效精准的评估技术预防事故的发生,提升结构与功能耐久性;② 交通荷载感知与优化,利用智能交通系统、大数据分析等手段,实时感知交通流量,提供精准的交通管理和调度,提高交通基础设施利用率;③ 运行环境评估与改进,对气候、地质等因素进行监测和分析,研究交通荷载与环境变化对结构的影响,优化交通基础设施的设计和维护策略,提高耐久性和适应性;④ 改扩建规划与设计,结合结构服役状态演变规律分析和性能感知评价结果,制定合理的设施改建和扩建计划,适应未来交通发展需求。未来的发展趋势将集中在以下方面:高精度智能化感知与评价;可持续性与环保低碳设计;综合性能优化算法与决策模型;数字化建设与工程管理。从2017年至2022年,核心论文篇数为25,被引频次为852,篇均被引频次为34.08。

(5) 结构与工程系统全寿命抗灾韧性

结构与工程系统全寿命抗灾韧性是指结构与工程系统在设计、建造、维护和拆除全寿命周期内面对自然灾害、人为灾害等的抗灾韧性的评估及提升。传统结构与工程系统的抗灾韧性研究主要考虑设计和建造阶段,对维护和拆除等阶段的关注较少。随着世界各国大量结构与工程系统进入存量发展阶段,既有结构与工程系统的抗灾韧性研究对于韧性城市建设具有重大社会意义和战略价值。主要研究方向包括:① 结构单体全寿命抗灾韧性评估及提升;② 建筑工程系统全寿命抗灾韧性评估及提升;③ 水、电、燃气、通信管网等生命线系统的抗灾韧性评估及提升;④ 考虑工程多系统全寿命抗灾韧性的韧性城市建设。未来主要发展趋势在于复杂巨系统下的全寿命灾变机理和韧性评估及提升,并在此基础上结合健康监测大数据和人工智能算法实现城市工程系统全寿命抗灾韧性的准确评估与大幅提升,同时加快城市工程系统韧性防灾的全寿命化和智慧化,提升城市工程系统抗灾安全,构建城市工程系统全寿命韧性防灾管控体系。从2017年至2022年,核心论文篇数为37,被引频次为1456,篇均被引频次为39.35。

(6) 城市污泥与垃圾共发酵高效资源化

城市污泥是城镇污水处理的必然产物,具有“污染”和“资源”的双重属性,污泥无害化处理和资源化利用是推动水污染防治领域减污降碳协同增效的关键举措。城市污泥与垃圾等有机废弃物的协同厌氧发酵处理可产生显著的经济效益和环境效益,有利于提高有机物降解效率和发酵系统稳定,大幅提升高值产品产量,是实现城市污泥无害化处理和高效资源利用的重要途径。主要研究方向包括:① 不同条件下城市污泥与垃圾共发酵机制与资源化效率;② 城市污泥与垃圾共发酵优化调控技术;③ 城市污泥与垃圾共发酵高值定向转化机制;④ 城市污泥与垃圾共发酵装备研发。未来主要发展趋势在于城市污泥与垃圾共发酵效率及能耗的影响因素逐步明晰,并在此基础上优化共发酵过程的资源化路径,强化共发酵过程新型清洁型生物燃料产量,进一步降低共发酵成本,构建城市污泥与垃圾共发酵高效资源化技术与装备体系。从2017年至2022年,核心论文篇数为73,被引频次为3012,篇均被引频次为41.26。

(7) 地下水资源量 - 水质 - 生态协同演变及可持续利用

地下水在保障城乡生活生产供水、支持经济社会发展和维系良好生态环境中发挥着不可替代的作用。地下水资源量 - 水质 - 生态协同演变是指地下水资源量、水质与生态地质环境效应之间的相互作用及变化,而地下水可持续利用旨在保证地下水资源能够满足人类社会及生态环境系统的长期稳定发展,避免出现过度开发所导致的生态地质环境问题与灾害。主要研究方向包括:① 地下水循环分布与污染物迁移转化理论研究;② 地下水监测 - 模拟 - 评价方法研究;③ 地下水超采防治与地下水污染修复技术研究;④ 地下水可持续开发利用及管控。未来主要发展趋势在于解决变化环境下地下水循环演化和物质能量迁移转化理论的难题,创建空 - 天 - 地一体化地下水监测 - 解译新技术,建立多尺度多过程地下水模拟预测与地下水资源量 - 水质 - 生态评价技术体系,研发地下水超采及次生灾害预警防控与治理保护关键技术,完成地下水污染溯源与生态修复关键技术攻坚,创新陆海多源地下水增储与可持续开发利用技术,提出不同场景下多目标优化管理技术体系与地下水资源调控战略策略。从 2017 年至 2022 年,核心论文篇数为 72,被引频次为 5 307,篇均被引频次为 73.71。

(8) 安全韧性导向的高密度城市人居环境空间优化

安全韧性导向的高密度城市人居环境是指在城乡规划和设计中,在高人口密度条件下创造既能安全防灾又能可持续发展的人居环境。不同于一般城市,高密度城市存在建成环境应灾风险高、安全隐患大、城市防灾应急系统设施脆弱、缺乏统筹、抗灾建筑性能弱、避难建筑标准低、建筑运维机制不健全等问题。近年来频繁发生极端气候事件,使高密度城市防灾体系面临严峻考验,因此关注高风险建筑、抗灾建筑和避灾建筑的典型灾害场景,增强城市韧性以便应对气候变化的巨大冲击,研究安全韧性导向的高密度城市人居环境多尺度空间优化具有重大意义。主要研究方向包括:① 高密度城市建筑规范的废改立;② 高密度城市建筑的动态监测与评估;③ 高密度城市建筑的韧性与可持续性优化设计;④ 高密度城市建筑存量更新与改造;⑤ 陆海统筹地区高密度城乡建成环境适灾优化。未来主要发展趋势将聚焦于高密度特大城市人居建成环境存量安全隐患和品质问题。通过对安全隐患与韧性应对能力进行研判,结合多尺度分析及预测特大城市建成环境的多元风险,借助深度学习、数据挖掘、数字孪生等方法,从安全韧性与可持续发展的角度优化高密度城市人居环境。从 2017 年至 2022 年,核心论文篇数为 16,被引频次为 681,篇均被引频次为 42.56。

(9) 城市水系统病原微生物风险识别与阻控

城市水环境与自然循环、人类生产活动密切相关,城市水系统中存在细菌、病毒等病原微生物的暴发传播风险,主要源自人畜粪便、垃圾、生活污水和医院污水等。病原微生物在城市水系统中的迁移与传播会导致流行性疾病的暴发,严重威胁着环境安全和公共健康。有效识别、阻控和深度削减城市水系统中的病原微生物、保障用水安全性是迫切需要解决的问题。主要研究方向包括:① 城市河/湖病原微生物具体种类、分布、传播规律、去除途径等基础数据的建库;② 水质监测与评价体系中病原微生物的快速识别、表征与风险评估;③ 常规消毒技术(氯系消毒剂、臭氧和紫外等)与联合消毒剂对病原微生物的灭活;④ 基于物理分离及吸附原理的新型膜分离技术和吸附剂研发;⑤ 微生物代谢技术,如活性污泥工艺、膜生物反应器(MBR)工艺等;⑥ 包括水源管控、水厂去除和管网保障的病原微生物风险综合管控技术体系。面向城市水系统生态安全,未来研究重点和挑战主要包括构建典型水系统抗性组/病原菌/致病病毒数据库、制定流域优控介水病原微生物清单、确立用于健康风险评估

的指示性病原微生物、研发典型介水病原微生物的高通量检测方法和配套设备、建立病原微生物综合管控控制技术体系等。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 17，被引频次为 816，篇均被引频次为 48.00。

(10) 高分辨率遥感目标智能检测

高分辨率遥感目标智能检测是借助知识工程、深度学习、逻辑推理、群体智能等人工智能新技术从高分辨率遥感图像中获取特定目标的类别和位置信息，在侦查、监视、预警、搜救等军民领域有广泛应用。当前的主要研究方向包括：① 通用目标智能检测方法，针对遥感图像目标检测中面临的类不平衡、背景复杂度高、目标多尺度变化、成像视角特殊、小/微目标检测等难题，研究通用的智能检测方法；② 特定目标智能检测方法，针对机场、建筑、飞机、舰船、车辆、云、海冰等具有重要价值的目标，发展专用的遥感图像目标智能检测方法。未来主要发展趋势将聚焦于小目标检测和多模态目标检测难题，不断优化目标智能检测模型，构建以知识为引导、算法为基础的智能高分遥感目标检测方法体系，进而推动遥感场景智能理解，为构建遥感影像智能解译系统提供支持。从 2017 年至 2022 年，核心论文篇数为 151，被引频次为 14 846，篇均被引频次为 98.32。

1.2 Top 3 工程研究前沿重点解读

1.2.1 基于人工智能的结构损伤识别及性能预测

土木工程结构的损伤危及其健康，并直接影响其安全性能及使用性能。传统的结构损伤识别及性能预测方法通常依赖于物理传感器和数学模型，而利用人工智能方法，可从大量多源多模态数据中提取复杂的损伤特征模式，析出结构性能表征的关键参数，并基于实时数据的自我学习和强化机制，实现对结构损伤的准确识别及性能预测。开展基于人工智能的结构损伤识别及性能预测研究，为结构健康监测、维护补强及性能提升提供科学依据，在降低基础设施运维成本、改进管理养护策略、辅助结构全寿命设计优化等方面均具有重要意义。

主要研究方向包括：

1) 结构损伤检 / 监测的新传感装备研究。基于视觉、声学、微波雷达、分布式光栅光纤、纳米材料传感等多种传感技术，实现各种场景不同尺度下的结构损伤定性感知和定量判定；集成研发面向结构损伤检 / 监测场景的新装备，结合分布式智能技术，建立并完善结构损伤检 / 监测技术体系，实现少人、自主、全量、高效的工程结构损伤识别。

2) 结构健康检 / 监测数据标准化与融合。结合人工智能算法设计与模型优化需要，建立结构检 / 监测数据“采、传、存、用”标准，运用知识图谱、贝叶斯网络、概率图模型等技术，实现多源数据跨尺度聚合，为结构损伤识别与性能预测提供高可用数据。

3) 基于机器学习算法的结构损伤检测和定位。利用深度学习、支持向量机、聚类算法等机器学习模型，通过对比学习、监督学习等方式，挖掘结构致损机理，构建具有结构特性表达能力的数字代理模型，结合环境输入和结构响应，实现结构损伤状态判定与定位。同时，考虑环境特征和结构特性，根据实时数据对模型进行强化学习与自主迭代，不断提升损伤识别准确性和可靠性。

4) 数据驱动的结构性能预测方法。针对工程结构性能的影响因素复杂且数据样本匮乏问题，建立有效

的特征提取和特征分析的前处理方法，压缩数据维度，并结合主动学习，强化学习及迁移学习等技术，设计数据驱动模型，提炼影响结构力学性能、防灾减灾韧性及全寿命周期性能的关键特性参数，构建针对不同性能表征的数据驱动预测方法。

5) 物理信息融合的结构性能预测模型。借助数据-知识-模型-智能算法的多元技术融合发展，将力学理论模型、专家领域先验知识与智能算法的优势充分结合，探索物理约束的机器学习新算法及模型，从而突破人工智能模型对数据样本的依赖性以及模型“黑箱”所致的可解释性差、工程泛化能力弱等瓶颈，提高模型对工程结构性能预测的准确性和实用性。

“基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”的核心论文有 54 篇（表 1.1.1），核心论文的篇均被引数为 66.96。核心论文产出排名前五的国家为越南、比利时、中国、韩国和美国（表 1.2.1），其中中国发表论文占比为 25.93%，是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引频次排名前五的国家为美国、阿尔及利亚、比利时、越南和日本，其中中国的篇均被引频次为 66.36，略低于平均水平。由图 1.2.1 可知，各主要产出国家间有较为密切的合作关系。

核心论文产出排名前五的机构为比利时的根特大学、越南的孙德胜大学、越南的胡志明市开放大学、中国的东南大学和越南的交通与通信大学（表 1.2.2）。发文量排在前三的机构合作较为频繁，研究方向主要聚焦在结构损伤识别的人工智能模型，基于多种算法解决结构健康监测中的反问题，即由结构刚度、频率、应变能等响应来识别结构损伤等方面，主要应用于层压复合材料结构，在实际桥梁工程结构中也有应用。由图 1.2.2 可知，各主要产出机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、越南、韩国和伊朗（表 1.2.3），施引核心论文产出排名前五的机构为中国的同济大学和东南大学、比利时的根特大学、越南的胡志明市开放大学和中国的哈尔滨工业大学（表 1.2.4）。根据论文的施引情况来看，排名前五的核心论文产出国家与排名前五的施引核心论文产出国家有所不同，说明该前沿受到了不同国家学者的普遍关注。

表 1.2.1 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”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	越南	22	40.74	1 607	73.05	2020.2
2	比利时	20	37.04	1 585	79.25	2020.0
3	中国	14	25.93	929	66.36	2020.9
4	韩国	14	25.93	913	65.21	2020.9
5	美国	10	18.52	1 041	104.10	2020.2
6	阿尔及利亚	10	18.52	900	90.00	2020.2
7	日本	6	11.11	430	71.67	2020.0
8	意大利	6	11.11	266	44.33	2020.2
9	加拿大	5	9.26	289	57.80	2021.2
10	印度	4	7.41	279	69.75	2021.2

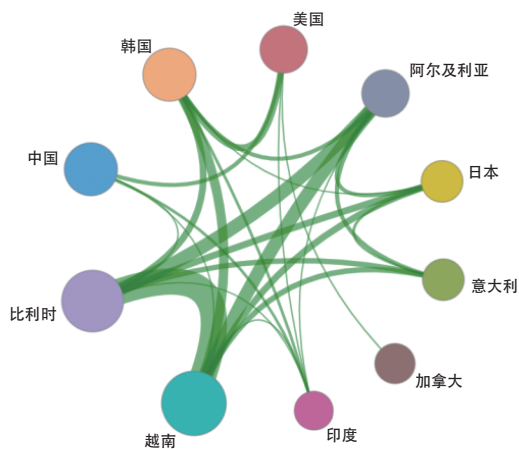


图 1.2.1 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.2 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”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	平均出版年
1	根特大学	20	37.04	1 585	79.25	2020.0
2	孙德胜大学	13	24.07	1 192	91.69	2019.5
3	胡志明市开放大学	8	14.81	500	62.50	2021.2
4	东南大学	8	14.81	380	47.50	2021.2
5	交通与通信大学	7	12.96	499	71.29	2020.0
6	长安大学	6	11.11	256	42.67	2021.3
7	加利福尼亚大学洛杉矶分校	4	7.41	393	98.25	2019.8
8	汉阳大学	4	7.41	351	87.75	2020.2
9	穆卢德马梅里大学	4	7.41	319	79.75	2020.5
10	同济大学	4	7.41	315	78.75	2020.5

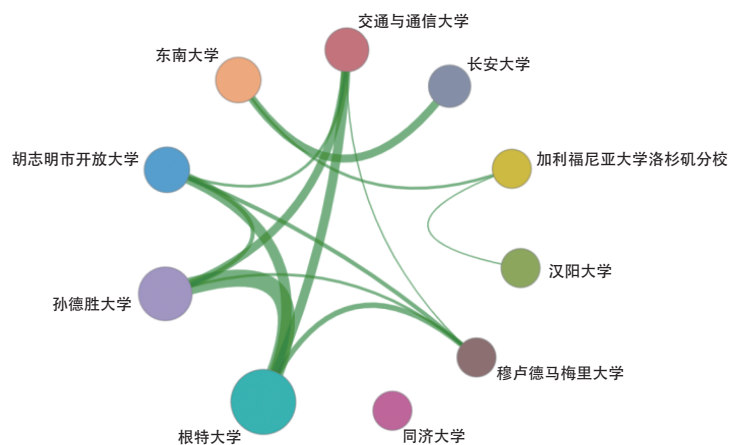


图 1.2.2 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.3 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”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	868	40.07	2021.7
2	美国	235	10.85	2021.5
3	越南	169	7.80	2021.4
4	韩国	144	6.65	2021.6
5	伊朗	142	6.56	2021.6
6	印度	138	6.37	2021.7
7	意大利	105	4.85	2021.7
8	澳大利亚	102	4.71	2021.7
9	加拿大	99	4.57	2021.7
10	沙特阿拉伯	87	4.02	2021.6

表 1.2.4 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”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	同济大学	95	17.66	2021.7
2	东南大学	87	16.17	2021.7
3	根特大学	74	13.75	2021.0
4	胡志明市开放大学	43	7.99	2021.7
5	哈尔滨工业大学	41	7.62	2021.8
6	香港理工大学	40	7.43	2021.9
7	孙德胜大学	36	6.69	2020.5
8	大连理工大学	33	6.13	2021.7
9	延世大学	31	5.76	2021.7
10	交通与通信大学	30	5.58	2020.8

综合以上统计数据，中国的施引核心论文占比远超核心论文占比，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。

未来 10 年，该前沿重点发展方向在于结构损伤状态全息感知体系构建、多模态大模型驱动的结构智能诊断系统建立，以及结构损伤识别及性能预测模型性能提升。一方面，依赖高集成度的一体化智能感知技术，结合多源多模态数据融合模型，显著提高损伤识别及性能预测可用数据容量与质量；另一方面，考虑结构多因素、多目标条件下的致损机理及性能演化过程，探索融合物理信息知识驱动“学习”新范式，从而实现结构损伤识别及性能预测模型在可解释性、泛化性、准确性等多方面的提升。该前沿研究成果可应用于既有结构的运营维护及新结构的设计建设中，具有巨大发展潜力及广泛的应用场景（图 1.2.3）。

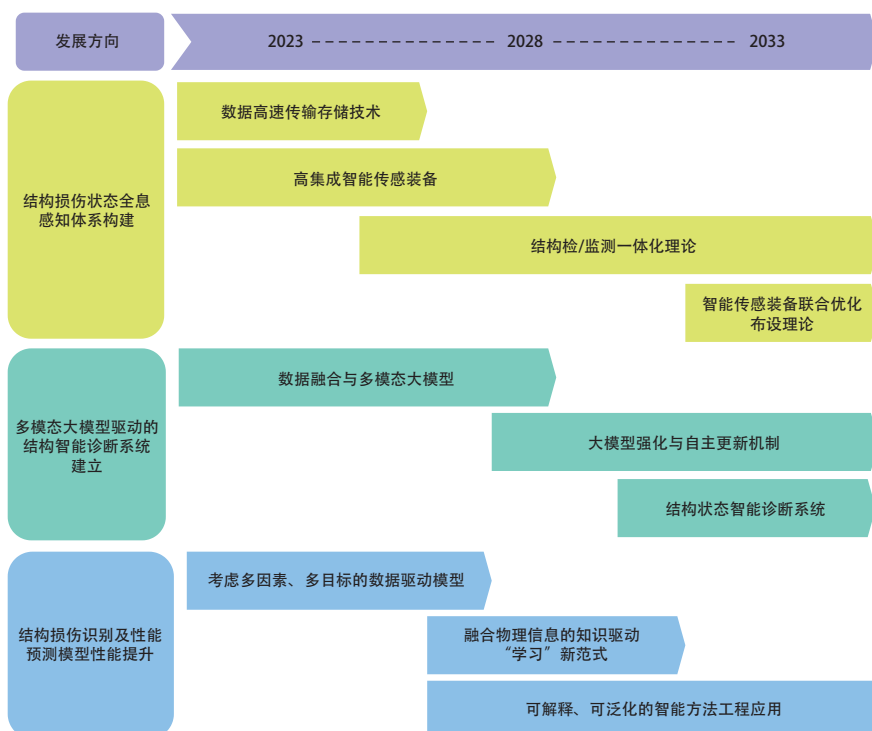


图 1.2.3 “基于人工智能的结构损伤识别及性能预测”工程研究前沿的发展路线

1.2.2 城市更新中的减碳方法与技术

城市更新作为优化整个城市系统物理条件、空间形态和功能的工具，对于改善高能耗、高碳排放的城市构成要素将发挥重要作用，为城市发展中的二氧化碳减排提供了关键的干预点。当前城市更新主要应用传统模式，城市更新对象与减碳技术的结合难度大、结合角度单一，数字化精度低，缺乏应用实例。因此，如何建立城市更新与多种碳减排技术的系统集成和协同机制，探索应用机器学习、遗传算法等技术优化设计和决策的方法，高性能建筑材料与减排技术一体化及其建造技术的创新等是这一研究前沿的关注点。

主要研究方向包括：

1) 既有城区的能耗及微气候环境模拟。基于提取的建筑大数据信息和相关标准规范，结合地理信息系统（GIS）和建筑能耗模拟工具，自动生成区域建筑能耗与碳排放模型，实现区域尺度的快速建模，并根据实测数据进行模型自动校准。

2) 减碳目标下的城市更新设计方案优化和决策工具。运用机器学习、大数据分析、遗传算法等先进技术和方法，构建用于情景模拟和低碳评估的系统与平台，识别不同城市更新措施的二氧化碳排放现状和减排潜力，通过多目标优化生成最适宜的城市更新方案。

3) 城市更新中减碳技术与建筑材料一体化及其建造技术创新。建筑业被认为是原材料和能源的主要消费者。在维护和翻新既有建筑与基础设施的过程中，实现高性能的建筑材料与减碳技术一体化及其建造技术创新，有利于解决建筑业面临的低能效和高碳排放的挑战。

4) 统筹不同类型、不同规模城市更新要素的碳减排技术集成设计。城市更新是一个全面而复杂的系统工程,除了对单个城市更新要素应用减排技术的深入研究外,还需要建立各个城市要素所利用的减排技术的耦合,包括能源、建筑、交通、废弃物处理、碳汇技术等方面。

“城市更新中的减碳方法与技术”的核心论文有45篇(表1.1.1),核心论文的篇均被引数为49.53。核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、英国、意大利和澳大利亚(表1.2.5),其中中国的核心论文占比为55.56%,是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引数排名前五的国家为中国、澳大利亚、美国、新加坡和以色列,其中中国的篇均被引频次为62.40,高于平均水平。由图1.2.4可知,核心论文数排名前十的国家间有较为密切的合作关系。

核心论文产出排名前五的机构为中国的中国矿业大学、华东师范大学、武汉大学、上海交通大学和上海理工大学(表1.2.6)。中国矿业大学的前沿方向主要包括:研究可再生能源发展、智慧城市政策、产业融合等领域对提升能源效率,减少碳排放、空气污染等的影响机制,并提供实证证据和政策见解。华东师范大学的前沿方向主要包括:研究多尺度视角下的CO₂时空变化,以及政府政策对生态效率的影响,为可行的CO₂减排政策提供科学依据。武汉大学的前沿方向主要包括:研究不同可再生能源的分布特征和部署潜力及其发电效率的影响机制,同时关注PM2.5、CO₂的时空分布特征及影响因素。由图1.2.5可知,各主要产出机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出排名前五的国家为中国、美国、英国、澳大利亚和意大利(表1.2.7),施引核心论文产出排名前五的机构为中国的中国科学院、中国矿业大学、重庆大学、武汉大学和清华大学(表1.2.8)。从施引情况来看,核心论文产出排名前五的国家其施引核心论文数也比较多,其中中国的核心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。

综合以上统计数据,在该前沿领域,与国外同行相比,中国学者具有一定的优势,并逐步发展到领先地位。

表 1.2.5 “城市更新中的减碳方法与技术”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	25	55.56	1 560	62.40	2020.3
2	美国	5	11.11	258	51.60	2021.2
3	英国	4	8.89	157	39.25	2021.0
4	意大利	4	8.89	65	16.25	2019.2
5	澳大利亚	3	6.67	171	57.00	2018.0
6	新加坡	3	6.67	130	43.33	2017.7
7	德国	3	6.67	122	40.67	2019.3
8	孟加拉国	3	6.67	98	32.67	2022.0
9	马来西亚	3	6.67	98	32.67	2022.0
10	以色列	2	4.44	84	42.00	2019.0

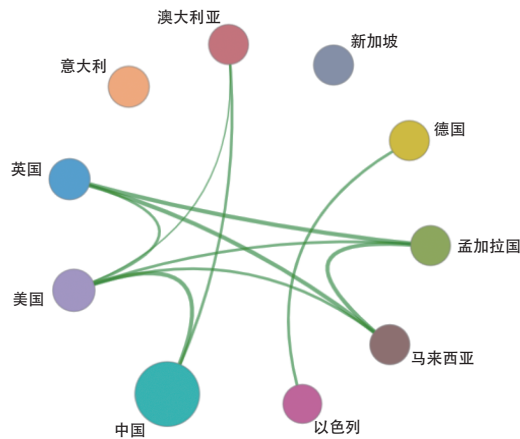


图 1.2.4 “城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.6 “城市更新中的减碳方法与技术”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	篇均被引频次	平均出版年
1	中国矿业大学	6	13.33	327	54.50	2021.7
2	华东师范大学	4	8.89	311	77.75	2018.2
3	武汉大学	4	8.89	244	61.00	2019.5
4	上海交通大学	4	8.89	212	53.00	2020.0
5	上海理工大学	4	8.89	212	53.00	2020.0
6	重庆大学	3	6.67	202	67.33	2021.3
7	河北工业大学	3	6.67	202	67.33	2021.3
8	慕尼黑工业大学	3	6.67	122	40.67	2019.3
9	库尔纳工程技术大学	3	6.67	98	32.67	2022.0
10	拉杰沙希工程科技大学	3	6.67	98	32.67	2022.0

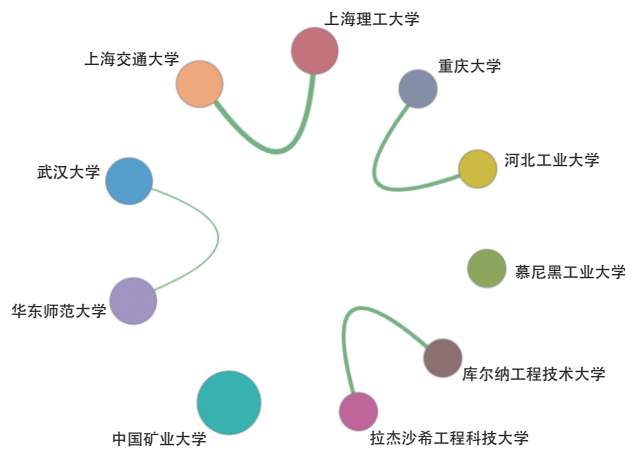


图 1.2.5 “城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.7 “城市更新中的减碳方法与技术”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	1 194	66.70	2021.5
2	美国	149	8.32	2021.3
3	英国	100	5.59	2021.5
4	澳大利亚	75	4.19	2021.3
5	意大利	59	3.30	2021.1
6	西班牙	43	2.40	2021.3
7	新加坡	37	2.07	2021.2
8	德国	36	2.01	2021.2
9	日本	33	1.84	2021.3
10	马来西亚	32	1.79	2021.6

表 1.2.8 “城市更新中的减碳方法与技术”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	中国科学院	126	23.25	2021.0
2	中国矿业大学	62	11.44	2021.8
3	重庆大学	60	11.07	2021.5
4	武汉大学	54	9.96	2021.1
5	清华大学	41	7.56	2021.2
6	中国地质大学	37	6.83	2021.2
7	天津大学	35	6.46	2021.5
8	北京师范大学	33	6.09	2020.8
9	山东大学	33	6.09	2021.2
10	上海交通大学	32	5.90	2020.9

“城市更新中的减碳方法与技术”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向为：城市更新中减碳新材料的开发和应用、新能源与建筑一体化技术、城市更新中低碳设计优化、碳减排技术集成、数字技术应用、碳减排效果验证等工作。具体而言，在能耗和碳排放模拟的构建与计算中，提高城市尺度建筑群碳排放精准核算和动态预测的准确性，并面向不同尺度的城市更新设计；在技术集成应用方面，促进城区和街区更新建设中单项碳减排工程技术更新迭代的同时，建立多系统耦合的城市更新碳减排技术集成；在开发低碳城市更新决策支持工具方面，建立综合多种减排技术的方案优化平台，并明确不同地区、不同发展阶段的“低碳”目标、指标和技术路线（图 1.2.6）。

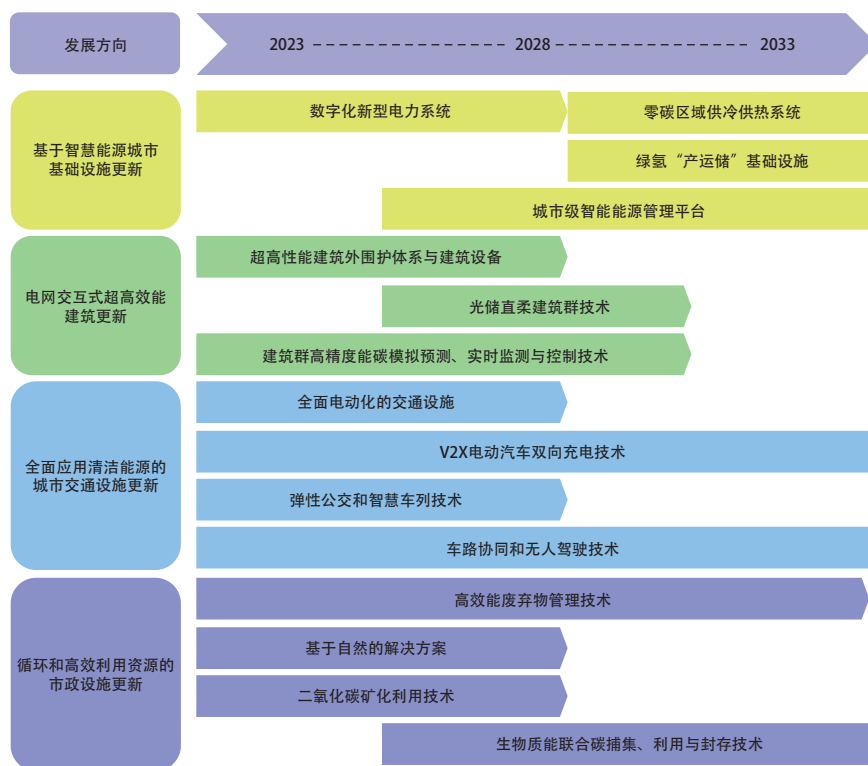


图 1.2.6 “城市更新中的减碳方法与技术”工程研究前沿的发展路线

1.2.3 巨型地质灾害链时空分布与智能化评估

全球巨型地质灾害链往往发生在高寒山区。随着建设规模的增加，世界范围内的重大工程建设逐渐向地质条件恶劣的高寒山区扩展，而复杂的地形地貌条件、密集的区域断裂带、频繁的强震活动等孕灾环境给工程建设与后期安全运营构成重大灾害风险。此外，高寒山区被视为全球气候变暖的“放大器”，近年来全球极端气候事件频发加速了巨型地质灾害链的发生，给重大工程建设、运营和管理带来了巨大挑战。研究巨型地质灾害链时空分布与智能化评估对确保安全生产、加快基础设施建设意义重大。

主要研究方向包括：

1) 复杂孕灾环境下地质灾害链时空发育分布特征与智能识别。地质灾害链往往发生于人迹罕至的高海拔山区，灾害隐蔽性强，基础数据缺乏且存在异质性。基于空、天、地、内多源综合遥感技术，结合多源异质数据解译算法，建立山区地质灾害链数据库，揭示地质灾害形成与复杂孕灾要素之间的关系，探明主要致灾因素，总结地质灾害链时空发育分布规律和灾害发育特征，结合机器学习图像识别技术建立不同类型地质灾害链早期识别标志，实现对地质灾害链潜在相互转化关键区段的智能识别。

2) 地质灾害链成因机理与链生演化机制研究的动力学模型构建。研究地震动、降雨、气温等复杂孕灾环境对不同类型灾害体内部孔隙水压、应力、强度以及力学性能的作用，从宏观的地质动力过程和微观的颗粒力学特征角度进行耦合研究，揭示地质灾害链在形成过程中的多相态（固态-液态）、多过程（流-堵-溃）灾变转化的临界力学条件，建立考虑滑坡运动演化过程中的宏观-细观-微观互联效应的多尺度耦合动力学模型。

3) 地质灾害链的韧性风险评估与防控结构优化方法建立。针对巨型地质灾害链的突发性、不确定性和

复杂属性,构建地质灾害链致灾范围的随机评估方法,结合人工智能算法开展大尺度时空的地质灾害链危险性预测和风险分区评价,采用帕累托改进实现高风险区段线路局部优化调整,进一步建立针对不同类型防护结构抗冲击性能评估的随机动力学方程,获取工程结构性能指标的随机动力响应规律,从概率密度函数层次精确表征工程结构的破坏概率和易损性,同时开展基于可恢复性思想的结构设计,从鲁棒性和可恢复性角度提出灾害韧性防控设计方案。

4) 超大尺度巨型地质灾害链的实时监测预警、智能化评估与防控决策响应。地质灾害链发生后往往会造成跨行政区域(国界、省界、县界)的超大尺度成灾,存在灾害评估滞后与风险管控难以智能化协同的问题。基于多源监测数据和动力学数值模拟结果更新智能算法的风险评价参数,建设多类型灾害过程融合的系列地质灾害链的智能化动态评估系统,形成规范,包括地质灾害链早期识别、调查评价、监测预警及风险区划等全过程的预警标准体系,并针对不同预警等级建立韧性风险防控措施。

“巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”的核心论文有 109 篇(表 1.1.1),核心论文的篇均被引数为 55.79。核心论文产出排名前五的国家为中国、澳大利亚、美国、意大利和英国(表 1.2.9),其中中国发表论文占比为 77.06%,是该前沿的主要研究国家之一。篇均被引数排名前五的国家为挪威、印度、越南、伊朗和澳大利亚,其中中国作者所发表的论文篇均被引数为 56.32,高于平均水平。由图 1.2.7 可知,核心论文数排名前十的国家间有较为密切的合作关系。

核心论文产出排名前五的机构为中国地质大学、成都理工大学、南昌大学、中国科学院和纽卡斯尔大学(表 1.2.10)。中国地质大学的研究方向聚焦在采用多源数据及人工智能方法等对滑坡位移预测进行研究,成都理工大学和南昌大学重点关注采用机器学习等方法对滑坡易发性进行预测。由图 1.2.8 可知,各机构间有一定的合作关系。

施引核心论文产出前五的国家为中国、美国、意大利、伊朗和印度(表 1.2.11),施引核心论文产出前五的机构为中国地质大学、中国科学院、成都理工大学、长安大学和维新大学(表 1.2.12)。从施引情况来看,核心论文产出排名前五的国家其施引核心论文数也比较多,其中中国的核心论文数和施引论文数

表 1.2.9 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”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	84	77.06	4 731	56.32	2019.7
2	澳大利亚	14	12.84	1 124	80.29	2019.2
3	美国	14	12.84	984	70.29	2019.6
4	意大利	13	11.93	913	70.23	2019.5
5	英国	6	5.50	273	45.50	2018.2
6	挪威	4	3.67	631	157.75	2018.2
7	伊朗	4	3.67	489	122.25	2020.2
8	印度	3	2.75	465	155.00	2019.7
9	越南	3	2.75	458	152.67	2020.0
10	法国	3	2.75	135	45.00	2019.7

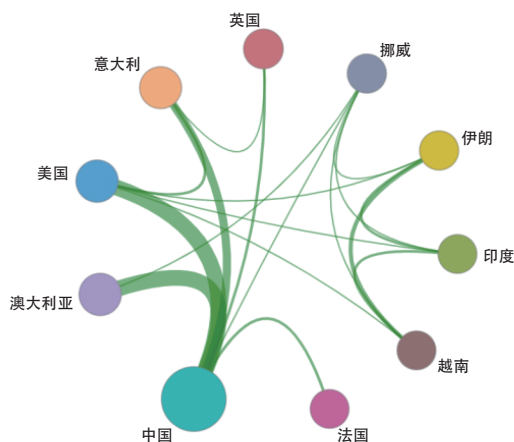


图 1.2.7 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿主要国家间的合作网络

表 1.2.10 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”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	平均出版年
1	中国地质大学	23	21.10	1901	82.65	2019.3
2	成都理工大学	15	13.76	819	54.60	2020.0
3	南昌大学	12	11.01	941	78.42	2019.7
4	中国科学院	12	11.01	548	45.67	2019.9
5	纽卡斯尔大学	11	10.09	996	90.55	2019.4
6	清华大学	9	8.26	295	32.78	2020.7
7	四川大学	5	4.59	293	58.60	2020.0
8	同济大学	5	4.59	201	40.20	2020.8
9	长安大学	5	4.59	92	18.40	2021.2
10	香港科技大学	4	3.67	155	38.75	2020.5

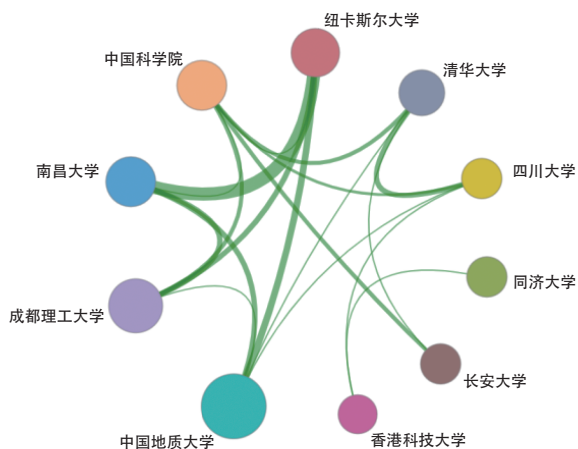


图 1.2.8 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿主要机构间的合作网络

表 1.2.11 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”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	2 588	54.11	2021.2
2	美国	358	7.48	2020.8
3	意大利	306	6.40	2020.9
4	伊朗	284	5.94	2020.7
5	印度	276	5.77	2021.3
6	英国	232	4.85	2020.9
7	越南	198	4.14	2020.5
8	澳大利亚	175	3.66	2020.8
9	德国	135	2.82	2020.8
10	加拿大	117	2.45	2020.8

表 1.2.12 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”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	中国地质大学	369	20.79	2020.9
2	中国科学院	350	19.72	2021.1
3	成都理工大学	253	14.25	2021.2
4	长安大学	129	7.27	2021.2
5	维新大学	108	6.08	2020.1
6	同济大学	104	5.86	2021.2
7	西南交通大学	103	5.80	2021.4
8	四川大学	94	5.30	2021.3
9	重庆大学	94	5.30	2021.3
10	武汉大学	89	5.01	2021.1

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。

综合以上统计数据，在该前沿领域，与国外同行相比，中国学者具有一定的优势，并逐步发展到领先地位。

未来 10 年，该前沿重点发展方向在于基于多源异构数据分析的地质灾害链时空发育特征和早期识别，多致灾因素下地质灾害链成因机理和链生演化机制分析，极端气候变化下地质灾害链的韧性风险评估与防控优化方法建立，以及推进超大尺度巨型地质灾害链的实时监测预警与智能化防灾决策系统开发。同时，在发展趋势上，该前沿将逐渐向量化、智能化、系统化发展。随着工程建设过程中面临的愈加恶劣的地质环境和运营过程中面临的愈加频繁的极端气候，该前沿研究成果将具有巨大发展潜力（图 1.2.9）。

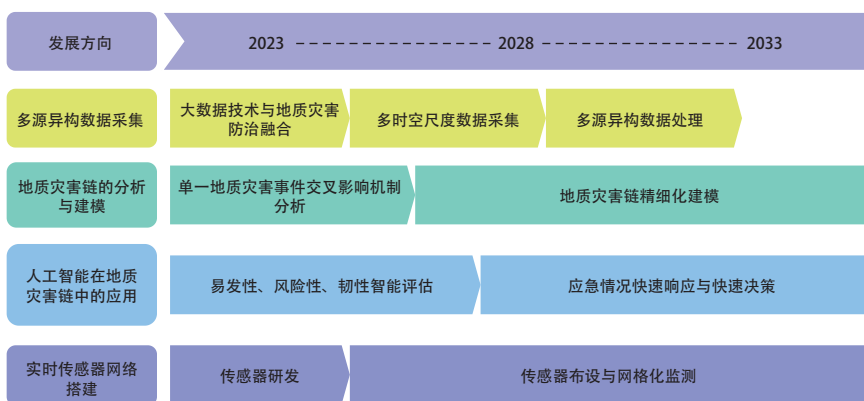


图 1.2.9 “巨型地质灾害链时空分布与智能化评估”工程研究前沿的发展路线

2 工程开发前沿

2.1 Top 10 工程开发前沿发展态势

土木、水利与建筑工程领域的 Top 10 工程开发前沿及统计数据见表 2.1.1，涉及市政工程、测绘工程、建筑学、城乡规划与风景园林、交通工程、水利工程、土木建筑材料、岩土及地下工程、结构工程等学科方向。其中，“排水管道漏损智能探测与修复技术”“毫米级全球和区域坐标框架建立技术”“极端环境下道路、轨道与机场工程建养技术”为专家提名前沿，其他为数据挖掘前沿。各前沿所涉及的专利自 2017 年至 2022 年的核心专利公开量见表 2.1.2。

(1) 排水管道漏损智能探测与修复技术

排水管道漏损已经成为制约雨水安全排放、污水全收集全处理的瓶颈之一。漏损智能探测与修复是指探测诊断评估管道结构性缺陷水平，开展低扰动、高质量和预防性修复，使管道安全高效运行。随着物联

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	排水管道漏损智能探测与修复技术	22	43	1.95	2020.8
2	毫米级全球和区域坐标框架建立技术	55	95	1.73	2020.3
3	城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系	19	122	6.42	2020.0
4	人工智能支持下的大型公共建筑空间策划生成技术	21	27	1.29	2021.1
5	极端环境下道路、轨道与机场工程建养技术	19	42	2.21	2020.4
6	复杂极端海底环境下的原位观测技术与装备	47	234	4.98	2019.8
7	多源固废制备负碳建筑材料技术	106	985	9.29	2019.5
8	复杂地质环境大深度快准钻探与感知技术	258	1 257	4.87	2019.3
9	装配式构件与模块化结构	286	1 694	5.92	2019.3
10	高标准农田智能灌排技术与装备	185	1 679	9.08	2019.4

表 2.1.2 土木、水利与建筑工程领域 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	2017	2018	2019	2020	2021	2022
1	排水管道漏损智能探测与修复技术	1	0	1	6	7	7
2	毫米级全球和区域坐标框架建立技术	6	2	6	16	8	17
3	城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系	3	1	3	4	2	6
4	人工智能支持下的大型公共建筑空间策划生成技术	1	0	4	0	3	13
5	极端环境下道路、轨道与机场工程建养技术	3	1	1	3	3	8
6	复杂极端海底环境下的原位观测技术与装备	7	8	3	8	10	11
7	多源固废制备负碳建筑材料技术	15	19	23	16	17	16
8	复杂地质环境大深度快准钻探与感知技术	47	42	53	51	42	23
9	装配式构件与模块化结构	37	57	52	72	65	3
10	高标准农田智能灌排技术与装备	35	28	33	36	27	26

网、大数据、云计算等技术发展，漏损探测将由周期性被动检测向常态化主动监测转变，为排水管道预防性修复提供支撑。主要技术方向包括：① 数字底座技术，即融合地理信息系统国产化和复杂介质条件下的精准测量技术；② 智能探测技术，即融合电磁和声波检测的隐患识别和结构健康监测技术；③ 智慧评估技术，即基于数据驱动与模型驱动的健康预测和自适应建模技术；④ 高效修复技术，即适应长距离输送、腐蚀环境和力学条件多变的修复材料，以及适用于大型、特大型管道的修复技术。未来发展趋势主要聚焦在精准量化探测技术、高强度高适应修复技术，以及基于移动互联网技术的探测和修复质量过程控制技术。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 22，被引频次为 43，平均被引频次为 1.95。

（2）毫米级全球和区域坐标框架建立技术

坐标框架是描述地球形状及变化、表达地球空间信息的基础，也是拓展人类活动、促进社会发展的关键地球空间信息基础设施。目前，最新的国际地球参考框架难以满足大范围或全球尺度毫米级地球系统动态变化监测的需求，研究建立毫米级坐标框架已成为该领域的开发前沿。当前发展的主要方向包括：① 精密空间大地测量数据处理技术，通过精细化数学模型确定最优的甚长基线干涉测量（VLBI）/ 卫星激光测距（SLR）/ 全球卫星导航系统（GNSS）/ 星基多普勒轨道和无线电定位组合系统（DORIS）数据处理策略，对全球基准站数据进行整网一致性重处理以消除或减弱技术类系统误差的影响，为毫米级坐标框架的建立提供更准确的输入数据；② 基准站非线性运动建模，针对地球物理效应造成的基准站非线性位移，融合环境负载、热膨胀及其他模型建立毫米级基准站地球物理运动模型，为实现毫米级坐标框架建立提供支持；③ 空间大地测量技术组合，综合利用 VLBI、SLR、GNSS、DORIS 等空间大地测量技术建立全球坐标框架；④ 地心运动建模，联合多种空间大地测量技术及地球物理模型反演地心运动，解决坐标框架原点定义与实现间的不一致问题，为地球动力学研究提供更高精度的地心参考框架。未来的发展趋势主要聚焦在精密空间大地测量数据处理技术、基准站非线性运动建模、空间大地测量技术组合、地心运动建模。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 55，被引频次为 95，平均被引频次为 1.73。

（3）城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系

如何保护和利用城市历史文化资源是全球关注的重要议题，涉及城市文化遗产、自然遗产和文化遗产的混合体以及文化景观等诸多工程开发领域。中国城市历史文化资源异常丰富，但在资源保护和利用领域仍存在着理论研究滞后、基础数据的系统性和完整性不足、新技术方法应用范围有限等问题。伴随着新一轮数字化技术的发展，全球范围内正将最新的智能化数字技术导入传统的历史文化资源保护与利用领域，提高资源保护工作的体系化、拓展历史文化资源利用的广度和深度。主要研发方向包括：① 城市历史文化资源的数据库构建技术；② 城市历史文化资源的智能化保护技术；③ 数字赋能的城市历史文化资源利用技术；④ 城市历史文化资源保护与利用的技术集成。未来重点发展方向为多源数据融合、风险监测感知、评估推演预警、空间规划响应、价值传播利用和规划技术集成。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 19，被引频次为 122，平均被引频次为 6.42。

（4）人工智能支持下的大型公共建筑空间策划生成技术

建筑空间策划生成技术面向大型复杂建筑工程加强全过程管控的迫切需求，利用人工智能前沿技术，整合建筑设计多专业、全流程数据，支持建筑空间策划的复杂决策，实现精准诊断—智能策划—整合设计闭环数据贯通，从而提升建筑设计决策科学性。该技术将有助于解决针对复杂建筑策划的智能化决策工具、空间绩效与人体感知数据的获取与关联、全寿期设计数据转换与衔接机制、前策划与后评估的内在映射机制等问题。主要技术方向包括：① 基于图拓扑的不确定、模糊复杂决策技术；② 空间环境客观评价与多维泛在人体感知信息耦合技术；③ 建筑全寿期智慧化整合设计技术；④ 贯穿前策划—后评估的智慧管控与全寿期前馈推演技术。未来重点发展方向：一是从建筑向城市全尺度空间扩展，从空间构图形式转向场所、空间网络，强调系统内部要素关联；二是从数据导向到数据驱动的演进，强化数据的动态性、联系性，为实现智能化建筑空间策划提供有力的数据支撑；三是从助力低维决策向破解高维复杂难题，以智能化为主要路径，进行大型建筑工程的前策划—后评估智能技术集成示范应用。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 21，被引频次为 27，平均被引频次为 1.29。

（5）极端环境下道路、轨道与机场工程建养技术

极端环境下的道路、轨道与机场工程建养技术的目标是应对极端气候、地质条件和自然灾害等极端环境挑战，采用先进的维护和养护技术，以确保道路、轨道和机场等基础设施在极端条件下拥有卓越的建设质量、高效的运营性能以及持久的使用寿命。该领域关注交通运输系统在高温多雨、严寒冻融、氯盐侵蚀等恶劣环境条件下的可靠性和稳定性，同时也注重交通运输系统在应对自然灾害如台风、地震、暴雨等情况的安全性。主要技术方向包括：① 极端环境适应性材料与结构设计，即研发新型材料和结构，以确保道路、轨道和机场设施在极端气候和地质条件下的稳定性与耐久性；② 智能化监测与维护，即利用传感器、监控系统等技术，实时监测施工阶段与运营阶段工程设施的状态，及早发现异常，确保工程高质量建造与安全稳定运行；③ 抗灾风险评估与预警，即运用数据分析和模拟技术，对极端环境中的自然灾害风险进行评估和预测，为防范应对提供科学依据；④ 紧急响应与恢复，即制定应急响应计划，建立快速恢复机制，确保在灾害发生后能够及时进行修复和恢复工作。未来发展方向包括：① 绿色可持续发展；② 数字化与智能化应用；③ 新材料与新工艺应用；④ 工程结构韧性提升。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 19，被引频次为 42，平均被引频次为 2.21。

(6) 复杂极端海底环境下的原位观测技术与装备

海底原位观测主要是对海底沉积物、地质环境、海底界面层等动态变化资料数据进行采集、分析及表达,可广泛应用于海洋灾害预警、海洋资源开发利用,以及海洋生态环境保护、治理和修复等。海底地质条件、海底水流、风暴潮和地震海啸等复杂极端海洋环境,除了造成海底沉积物、地质环境、海底界面层等发生剧烈变化外,还影响海底原位观测系统的安全性、观测数据的精确性和信息传输的稳定性。主要技术方向包括:① 研发适应复杂极端海底环境、用于各种观测目的的高精度、高稳定性、长寿命的自主观测仪器;② 研发适应复杂极端海底环境的安全可靠的自主移动观测平台,扩展观测的空间尺度;③ 研发广域实时信息传输与精确时间同步的信息传输系统,建设大时空尺度智能控制海底原位观测网;④ 研发高能量密度、长寿命、高安全储能系统,为体系化、协同化、智能化海底原位观测提供可靠能源动力支撑。从2017年至2022年,专利公开量为47,被引频次为234,平均被引频次为4.98。

(7) 多源固废制备负碳建筑材料技术

多源固废制备负碳建筑材料技术是指借助不同固废材料中钙、镁等碱土金属物相的碳化反应,制备具有负碳特征的建筑材料的技术。通过多源固废之间的理化协同,可实现材料的性能与制备工艺、能耗的优化。这一技术有助于建筑行业的碳减排与工业固废的资源化利用。该领域的主要技术方向包括:① 固废材料碳化反应活性的基本理论及提升方法;② 碳化反应过程、碳化产物晶型及微结构调控;③ 二氧化碳传输与固定效率的强化提升;④ 产品制备工艺与配套装备等。多源固废制备负碳建筑材料技术研发与应用的关键是如何平衡材料的性能与环境效能,未来发展方向包括:① 高性能多源固废体系的设计;② 碳化、水化等多反应机理的协同;③ 反应—传输过程的三维动态表征;④ 材料制备与工业流程的耦合;⑤ 产品性能与碳排放评价标准等。从2017年至2022年,专利公开量为106,被引频次为985,平均被引频次为9.29。

(8) 复杂地质环境大深度快准钻探与感知技术

快准钻探与感知技术是指应对在深部地下探测与工程建设中所面临的极端复杂地质条件,利用先进的钻探技术装备实现快速获取地下实物资料、探明地层情况的技术,通过传动、控制、传感器信息感知和数据融合处理等技术,感知设备状态、地层环境,精准判定各项参数,可靠执行指令动作,实现探测装备智能化、钻探过程规范化、钻孔质量可控化、事故提前预判化、工艺参数控制智能化和地层参数自评化,提升钻探工程获取地下实物资料与地层信息的效率。大深度复杂地质环境面临井下温度高、地层压力大、实施周期长、规程参数大等问题,导致钻探工程实施过程中存在钻探设备动力不足、井下机具服役寿命降低、钻孔轨迹控制困难、测井仪器高温易失效等问题。复杂地质环境大深度快准钻探与感知技术的主要技术方向包括:① 大深度智能化自动化钻井系统与钻具研发;② 多工艺高效高速钻进技术;③ 大深度复杂地层高效取芯技术;④ 水平定向钻探与孔内综合测试技术;⑤ 基于先进传感器的井内数据测传与智能钻进控制技术;⑥ 高温硬岩地层机具与仪器可靠性提升技术;⑦ 井下地层环境、钻探设备状态超前感知技术。未来的发展趋势是轻量化、全流程、自动化钻探技术装备升级,以及构建基于人工智能技术的井下外部环境多信息融合的超前智能感知测、传、控、钻井下闭环钻进技术。从2017年至2022年,专利公开量为258,被引频次为1257,平均被引频次为4.87。

（9）装配式构件与模块化结构

建筑工业化是传统建筑产业适应现代工业化生产方式的必然选择，目的是提升建造效率、节能降耗、实现建筑业高质量发展，主要特征为标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修和信息化管理等。装配式建筑是实现建筑工业化的有效途径之一，其核心是以工厂化生产的标准化预制构件为主，通过现场装配方式设计建造。因此，发展各类高效装配式建筑结构体系、装配式构件和相应建造技术对实现建筑工业化具有重要意义。主要技术方向包括：① 装配式建筑结构体系及其设计方法；② 不同集成度且适应工业化建造的装配式构件（含连接件）及其设计方法；③ 装配式构件工厂化预制技术及建筑体系装配技术；④ 装配式建筑一体化建造技术；⑤ 数字化智能建造技术。未来发展趋势上，体系开发将从传统钢混、钢、木结构建筑的高效拆分向基于高效部品的合理组合，即正向设计方向发展，同时装配式建造逻辑为建筑智能防灾、结构韧性提升等研究提供新空间；构件从传统一维构件向高集成度的二维、三维模块化单元发展，并通过标准化、系列化以适应建筑多样性要求；一体化建造将从单一建筑部品的结构-装饰、结构-功能、建筑-设备一体化等向建造全过程、全专业、全产业链的深度一体化发展；同时，建筑产品思维与数字孪生技术将为建造工业化、智能化提供更为广阔的技术支撑和研究空间。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 286，被引频次为 1 694，平均被引频次为 5.92。

（10）高标准农田智能灌排技术与装备

高标准农田智能灌排技术与装备是指在现代农业生产中，综合运用物联网、传感器、遥感、边缘计算、云计算、人工智能等技术对作物生长状况、农田水分状况、灌排渠系（管道）状态及环境因素进行多源多维感知与智能分析决策，并通过智能化装备对灌排过程进行精量控制与过程跟踪，以协调农田水分状况、提升水旱灾害应对能力，满足作物生长的同时降低人力成本、提高管理效率，实现高产高效。主要技术方向包括：① 农田作物的水与营养状态定量诊断与控污减排灌排决策支持技术；② 轻量化灌排系统多层级高性能测控终端装备研发；③ 具有自主学习能力和强时效性的农田灌排数字孪生系统；④ 基于高标准农田地力提升的灌排全局时空智能优化技术与协同调控模式。该前沿的发展趋势包括：① 突破传感器技术的局限，引入多样化感知手段，实现多源多模态数据的融合分析，为高标准农田系统提供更精确、全面的信息支持；② 通过数据-模型-知识的融合与交互增强提升农田决策科学性与可操作性；③ 加强灌排装备和系统的自主决策能力，增加设备的云边端计算能力和协同互联能力，通过数据共享和协作，提升整体精度和效率；④ 自主创新高标准农田灌排过程中新方法、新技术、新装备和新模式，实现在高标准农田中灌排无人化、智能化、轻量化和全链条化。从 2017 年至 2022 年，专利公开量为 185，被引频次为 1 679，平均被引频次为 9.08。

2.2 Top 3 工程开发前沿重点解读

2.2.1 排水管道漏损智能探测与修复技术

排水管道中雨水管道的渗漏，影响排水功能，污水管道的漏损，造成污水处理效率低下。排水管道漏损已经成为制约雨水实现安全排放、污水实现全收集全处理的主要瓶颈之一，引发土壤-地下水污染、污水冒溢等环境问题和道路塌陷等安全隐患。排水管道漏损智能探测与修复主要是指探测诊断评估雨水管渠、污水管道的结构性缺陷水平，针对性开展低扰动、高质量和预防性修复，使排水管道安全、

有效运行。由于排水管道隐蔽性强、分布面广、数量庞大、流态多变且内部环境恶劣，传统漏损探测技术存在适用条件窄、数据不系统、预判不及时等问题；而管道修复技术则面临降水修复难、开挖条件受限、标准化水平低等问题。随着物联网、大数据、云计算等新一代信息技术的发展，排水管道漏损探测将由周期性被动检测向常态化主动监测转变，提高探测的覆盖面和有效性，为排水管道预防性修复提供支撑。

“排水管道漏损智能探测与修复技术”的主要研发方向包括：

1) 数字底座技术。包括排水管道地理信息系统国产化技术、复杂介质条件下的流量和水质精准测量技术。

2) 智能探测技术。包括融合地质雷达、混凝土厚度检测、钢筋分布检测等方式的管道外部检测技术、融合电磁和声波检测的管道隐患识别技术、大口径长距离管道结构健康监测技术。

3) 智慧评估技术。包括基于数据驱动和模型驱动协同的管网服役演化分析算法、多元驱动和服役状态多源数据影响下排水管道失效预测技术、基于关键节点在线监测数据的城市排水管网系统快速自适应建模。

4) 高效修复技术。一是适应长距离输送、腐蚀环境和力学条件多变的修复材料，如以高强度快干注浆材料为核心的模铸管道修复技术；二是适用于大型和特大型管道的修复技术，如通过模块法内衬来提升结构性强度的修复技术等。

“排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿的核心专利有 22 件，平均被引频次为 1.95（表 2.1.1）。核心专利产出国家为中国（表 2.2.1），中国机构或个人所申请的专利占比达到了 100%，是该工程开发前沿的重点研究国家，平均被引频次为 1.95。

核心专利产出排名前五的机构为郑州大学、郑州安源工程技术有限公司、河海大学、南京水动力信息科技有限公司和广州市运通水务有限公司（表 2.2.2）。从排名前十的核心专利产出机构合作网络（图 2.2.1）来看，机构间的合作较为稀疏。

“排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向主要聚焦在精准量化探测技术、高强度高适应修复技术以及基于移动互联网技术的检测和修复质量过程控制技术。精准量化探测技术主要包括全景 / 激光量化探测技术，基于温度和压力的光纤渗漏探测技术，基于机械弹性波的管道剩余强度探测技术，基于超声波测厚法、红外摄像检测法、漏磁法、瞬态电磁法等管道剩余壁厚探测技术，以及基于测径器法、激光仪法、多传感器探测法等管道变形探测技术。高强度高适应修复技术主要聚焦新材料、新技术、新工艺和新设备的突破，拓宽修复的适用场景和修复质量，满足对排水管道腐蚀环境、狭长空间带水条件等情况的修复需求。基于移动互联网技术的检测和修复质量过程控制技术将以移动互联网技术应用为核心，提高检测和修复施工管理的效率，保障施工过程的质量以及数据的真实性（图 2.2.2）。

表 2.2.1 “排水管道漏损智能探测与修复技术”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	22	100.00	43	100.00	1.95

表 2.2.2 “排水管道漏损智能探测与修复技术”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	郑州大学	3	13.64	8	18.60	2.67
2	郑州安源工程技术有限公司	2	9.09	8	18.60	4.00
3	河海大学	1	4.55	9	20.93	9.00
4	南京水动力信息科技有限公司	1	4.55	9	20.93	9.00
5	广州市运通水务有限公司	1	4.55	5	11.63	5.00
6	深圳前海运通水务有限公司	1	4.55	5	11.63	5.00
7	河南爱比特科技有限公司	1	4.55	4	9.30	4.00
8	广州立信电子科技有限公司	1	4.55	3	6.98	3.00
9	华中科技大学	1	4.55	1	2.33	1.00
10	清远市清源施工安全检测有限公司	1	4.55	1	2.33	1.00

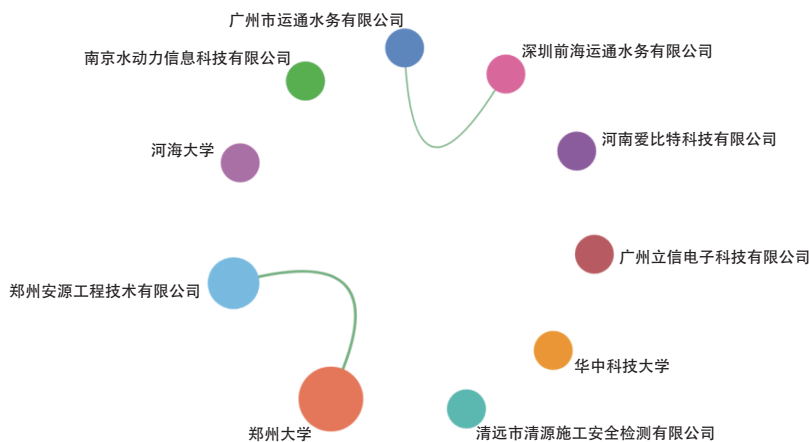


图 2.2.1 “排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿主要机构间的合作网络

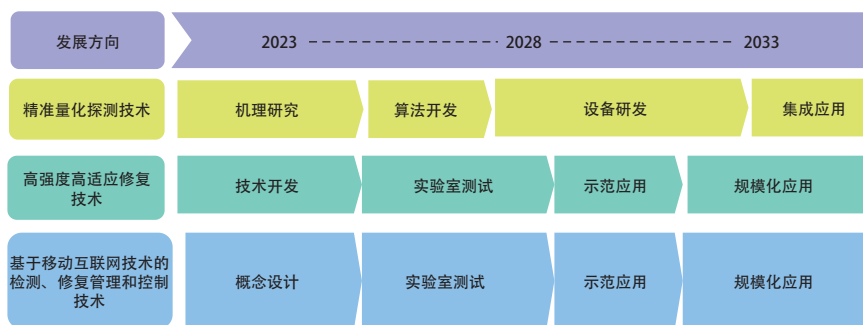


图 2.2.2 “排水管道漏损智能探测与修复技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.2 毫米级全球和区域坐标框架建立技术

坐标框架是描述地球形状及变化、表达地球空间信息的基础。它不仅能够为深空探测、城市建设、救灾减灾等提供基础数据，而且可以为开展全球变化探测与科学研究，如地球动力学反演，地震、气候及水文监测等，提供统一的高精度空间基准，是拓展人类活动、促进社会发展的关键地球空间信息基础设施。

现有国际地球参考框架难以满足大范围或全球尺度毫米级地球系统动态变化监测的需求，研究建立毫米级坐标框架已成为 21 世纪国际大地测量学界的学科目标和重要挑战。当前发展的主要方向包括：

1) 精密空间大地测量数据处理技术，通过精细化数学模型确定最优的甚长基线干涉测量 (VLBI) / 卫星激光测距 (SLR) / 全球卫星导航系统 (GNSS) / 星基多普勒轨道和无线电定位组合系统 (DORIS) 数据处理策略，对全球基准站数据进行整网一致性重处理以消除或减弱技术类系统误差的影响，为毫米级坐标框架的建立提供更准确的输入数据。

2) 基准站非线性运动建模，针对地球物理效应造成的基准站非线性位移，融合环境负载、热膨胀及其他模型建立毫米级基准站地球物理运动模型，为实现毫米级坐标框架建立提供支持。

3) 空间大地测量技术组合，综合利用 VLBI、SLR、GNSS、DORIS 等空间大地测量技术建立全球坐标框架。

4) 地心运动建模，联合多种空间大地测量技术及地球物理模型反演地心运动，解决坐标框架原点定义与实现间的不一致问题，为地球动力学研究提供更高精度的地心参考框架。

在该领域研究较为深入的机构有武汉大学、中国测绘科学研究院和中国科学院测量与地球物理研究所等。

“毫米级全球和区域坐标框架建立技术”工程开发前沿的核心专利有 55 件，平均被引频次为 1.73 (表 2.1.1)。核心专利公开量排名前三的国家为中国、俄罗斯和韩国 (表 2.2.3)，其中中国机构或个人所申请的专利占比达到了 83.64%，是该工程开发前沿的重点研究国家之一，平均被引频次为 1.85。

核心专利公开量排名前五的机构为西安应用光学研究所、中国人民解放军某部队、西北工业大学、千寻位置网络有限公司和中国电子科技集团公司 (表 2.2.4)。

“毫米级全球和区域坐标框架建立技术”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向为精密空间大地测量数据处理技术、基准站非线性运动建模、空间大地测量技术组合和地心运动建模 (图 2.2.3)。

表 2.2.3 “毫米级全球和区域坐标框架建立技术”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	46	83.64	85	89.47	1.85
2	俄罗斯	6	10.91	4	4.21	0.67
3	韩国	1	1.82	4	4.21	4.00
4	法国	1	1.82	2	2.11	2.00
5	波兰	1	1.82	0	0.00	0.00

表 2.2.4 “毫米级全球和区域坐标框架建立技术”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	西安应用光学研究所	4	7.27	16	16.84	4.00
2	中国人民解放军某部队	3	5.45	1	1.05	0.33
3	西北工业大学	2	3.64	6	6.32	3.00
4	千寻位置网络有限公司	2	3.64	5	5.26	2.50
5	中国电子科技集团公司	2	3.64	4	4.21	2.00
6	北京环境特性研究所	2	3.64	0	0.00	0.00
7	国家测绘地理信息局卫星测绘应用中心	1	1.82	12	12.63	12.00
8	武汉大学	1	1.82	5	5.26	5.00
9	北京航空航天大学	1	1.82	4	4.21	4.00
10	中国科学院电子学研究所	1	1.82	4	4.21	4.00

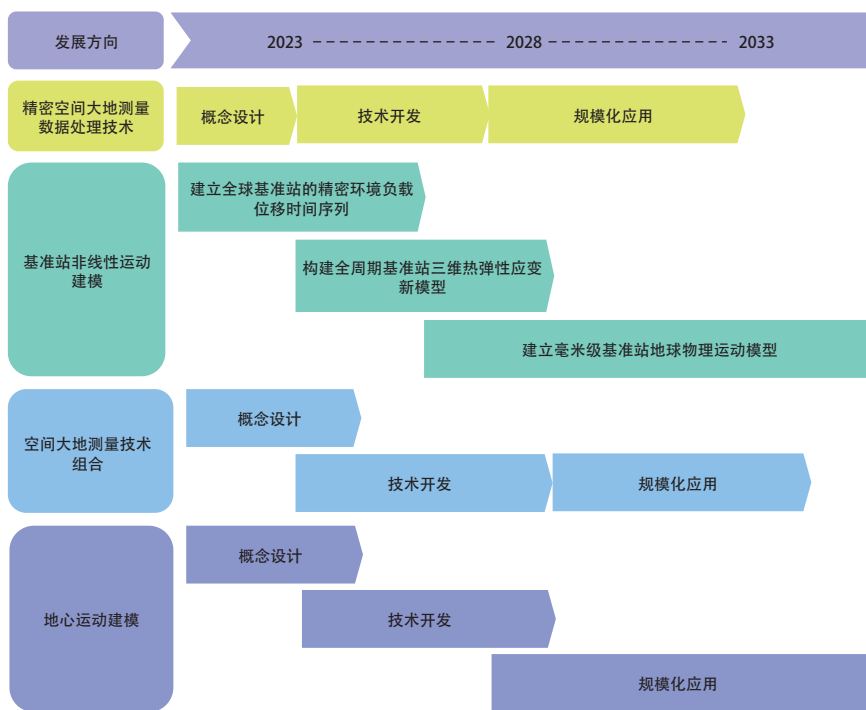


图 2.2.3 “毫米级全球和区域坐标框架建立技术”工程开发前沿的发展路线

2.2.3 城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系

城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系的核心在于通过数字技术赋能，实现保护与利用的协调统一，将静态被动的保护方式转变为动态积极的保护方式，充分发挥出历史文化资源对城市空间和社会

发展的重要价值。主要研发方向包括：

1) 城市历史文化资源的数据库构建技术。创建历史文化资源的数字化档案是实现整体性资源保护的基础性工作。既可为文化遗产的修复和保护提供支持，也是遗产价值传播利用的载体和统筹协调多种资源管理的需要。然而，历史文化资源类型多样，既有物质性遗产，也有非物质性遗产，前者还包括可移动文物、不可移动文物和历史名城等，并在空间尺度上存在明显差异。城市历史文化资源的多源异构数据融合和多尺度数据贯通等技术研发十分关键。

2) 城市历史文化资源的智能化保护技术。城市历史文化资源安全受自然风险（气候变化、自然灾害等）和人类活动（资源利用、开发建设等）的双重影响，数字技术为构建针对各类风险的“感知监测－动态评估－风险预警－措施响应”联动式、伴随式、智能化的主动保护机制提供了技术可行性。

3) 数字赋能的城市历史文化资源利用技术。城市历史文化资源的数字化不仅是为了保存各类资源的历史信息，同时也是资源利用和价值传播的重要手段。欧洲多国已开展数字博物馆建设，通过虚拟现实等技术开发加强互动体验，针对智能手机等终端进行应用开发，并将城市历史文化资源嫁接到电子游戏等新兴数字产业。

4) 城市历史文化资源保护与利用的技术集成：通过一体化技术集成，打通“数据库构建－风险评估响应－资源利用与价值传播”三大环节，实现数字技术赋能下的保护与利用相互促进。此外，城市历史文化资源保护与利用不应当是独立的技术体系，需要整合纳入国土空间资源保护与利用的技术体系，加强与其他城市资源管理的横向协调，以及国土空间各空间层级的纵向贯通，最终实现国土空间全域全要素全周期的统筹。

“城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”工程开发前沿的核心专利有 19 件，平均被引频次为 6.42（表 2.1.1）。核心专利的主要产出国家为中国、罗马尼亚和韩国（表 2.2.5），其中中国机构或个人所申请的专利占比达到了 78.95%，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 7.60。

核心专利产出排名前五的机构为中南大学、中国科学院遥感与数字地球研究所、中国地质大学（武汉）、鼎宸建设管理有限公司和韩国科学技术院（表 2.2.6）。

“城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”工程开发前沿未来 5~10 年的重点发展方向为多源数据融合、风险监测感知、评估推演预警、空间规划响应、价值传播利用和规划技术集成（图 2.2.4）。

表 2.2.5 “城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”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	15	78.95	114	93.44	7.60
2	罗马尼亚	3	15.79	0	0.00	0.00
3	韩国	1	5.26	8	6.56	8.00

表 2.2.6 “城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”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	中南大学	1	5.26	40	32.79	40.00
2	中国科学院遥感与数字地球研究所	1	5.26	35	28.69	35.00
3	中国地质大学（武汉）	1	5.26	11	9.02	11.00
4	鼎宸建设管理有限公司	1	5.26	11	9.02	11.00
5	韩国科学技术院	1	5.26	8	6.56	8.00
6	成都理工大学	1	5.26	6	4.92	6.00
7	中国科学院城市环境研究所	1	5.26	4	3.28	4.00
8	沈阳工业大学	1	5.26	3	2.46	3.00
9	苏州规划设计研究院股份有限公司	1	5.26	2	1.64	2.00
10	西安中科西光航天科技有限公司	1	5.26	2	1.64	2.00

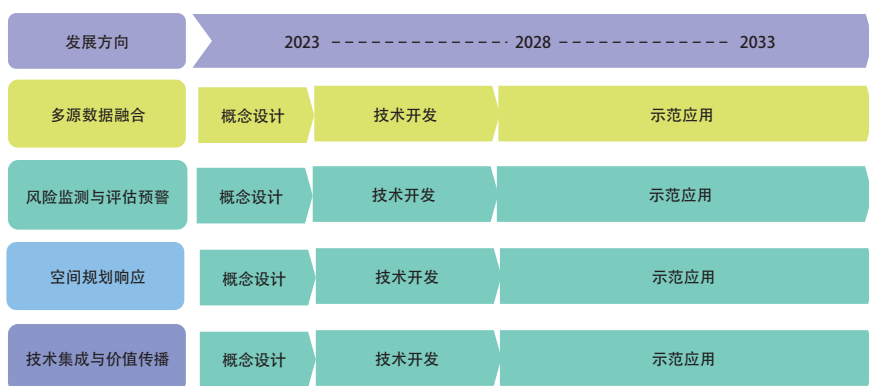


图 2.2.4 “城市历史文化资源保护与利用的数字化技术体系”工程开发前沿的发展路线

领域课题组成员

课题组组长：崔俊芝 聂建国 朱合华 顾祥林

专家组：

院士：

崔俊芝 欧进萍 王浩 杨永斌 张建云 刘加平¹ 缪昌文 李建成 杜彦良 郭仁忠 胡春宏
 钮新强 彭永臻 郑健龙 王复明 孔宪京 陈湘生 张建民 吴志强 岳清瑞 李华军 吕西林
 陈军 马军 冯夏庭 朱合华 杜修力 王明洋 刘加平² 郝洪 邢锋 童小华

¹ 西安建筑科技大学。

² 东南大学。

专家:

蔡春声 蔡奕 蔡永立 陈峻 陈鹏 陈庆 陈求稳 陈欣 陈永贵 成玉宁 樊健生
 范凌云 范悦 冯殿垒 高博 高军 高亮 葛耀君 顾冲时 郭劲松 郭容寰 韩杰
 贺鹏飞 贺瑞敏 黄介生 黄廷林 黄勇 贾良玖 姜超 蒋金洋 蒋正武 金君良 冷红
 李晨 李向锋 李益农 李早 李峥嵘 李质 林波荣 凌建明 刘超 刘翠善 刘芳
 刘合林 刘京 刘仁义 刘曙光 刘彦伶 鲁安东 钮心毅 彭晋卿 任伟新 邵益生 时蓓玲
 史才军 石铁矛 舒章康 苏平 孙剑 孙立军 孙智 谈广鸣 谭刚毅 田波 田莉
 汪芳 汪涵 汪洁琼 汪双杰 王爱杰 王本劲 王国庆 王晖 王建华 王兰 王伟
 王亚宜 王元战 王志伟 吴永发 伍法权 夏圣骥 肖飞鹏 谢辉 徐斌 徐峰 徐俊增
 严金秀 严宇 杨斌 杨大文 杨俊宴 杨柳 杨仲轩 姚俊兰 姚仰平 叶蔚 叶宇
 余钟波 禹海涛 袁烽 袁艳平 岳中琦 曾鹏 张辰 张锋 张云升 赵渺希 甄峰
 郑百林 郑刚 郑曦 周翔 周正正 庄晓莹 卓健

执笔组:

马军 庄惟敏 童小华 陈鹏 陈欣 程光华 崔冬瑾 范悦 丰成友 高亮 黄雨
 贾良玖 李晨 李元齐 刘超 刘芳 刘合林 刘彦伶 鲁春辉 倪化勇 潘玥 屈张
 宋殿兰 苏晶文 孙澄宇 汪涵 王本劲 王达磊 汪发武 王睿 王信 王元战 吴继修
 吴金生 伍江 肖飞鹏 肖扬 徐俊增 姚俊兰 曾鹏 张辰 张庆 赵云妹 郑方
 卓健