

# 复杂地质条件下地下工程施工的智能监测技术应用研究

魏 星

(天津盛发管道工程有限公司, 天津 300450)

**摘 要** 复杂的施工环境给地下工程建设带来了围岩塌方、涌水突泥以及周边地质灾害群发连带效应等问题, 如何保障施工安全是关键, 而对工程进行准确有效的监测是其重要途径之一。然而, 常规的监测手段无法实现对复杂环境下工程监测信息的快速响应及早期预警的要求。智能监测技术是基于高精度传感器、物联网、大数据分析等先进科学技术, 具有强环境适应性、实时感知、智能预判等特点。基于此, 本文结合复杂地质条件核心要素及危险源的特点对智能监测技术的适用性进行探讨, 总结关键适用技术的应用注意事项, 分析目前存在的应用难点, 并提出有效的改进措施, 以期为促进智能化监控量测技术在复杂地质条件下岩土工程中的应用提供参考。

**关键词** 复杂地质; 地下工程; 施工安全; 智能监测; 风险管控

**中图分类号**: TP2; TU94

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.011

## 0 引言

近些年, 智能监测技术凭借其自动化、智能化、高精度的核心优势, 逐步成为破解复杂地质监测难题的重要手段。但复杂地质条件对智能监测技术的环境适应性、数据可靠性、预警精准性提出了更高要求, 现有技术应用仍存在适配性不足、技术融合不深入等问题。因此, 深入研究复杂地质条件下智能监测技术的应用逻辑与实践路径, 破解技术应用瓶颈, 对于提升复杂地质地下工程施工安全管理水平、推动地下工程建设高质量发展具有重要的现实意义。

## 1 复杂地质条件核心特征与智能监测适配性要求

### 1.1 复杂地质条件核心特征

复杂地质条件涵盖多种不利地质类型的叠加与组合, 核心特征主要体现在三个方面: 一是地质构造破碎化, 多存在断层、破碎带、节理密集区等, 围岩完整性差、稳定性极低, 易发生坍塌、剥落等灾害; 二是水文条件复杂化, 地下水赋存状态多变, 存在潜水、承压水等多种类型, 易引发涌突水、突泥等风险, 且地下水活动会进一步加剧围岩失稳; 三是力学性质差异化, 不同区域围岩力学参数差异大, 变形规律复杂且非线性特征显著, 增加了风险预判难度; 四是环境干扰多元化, 施工区域易受地下应力场变化、周边水体渗透等因素影响, 进一步放大施工安全风险<sup>[1]</sup>。

### 1.2 复杂地质对智能监测的适配性要求

针对复杂地质条件的核心特征, 智能监测技术需满足四项核心适配要求: 一是强环境适应性, 监测设备需耐受高湿度、高水压、强振动、粉尘污染等复杂环境, 确保在极端条件下稳定运行; 二是高监测精度与灵敏度, 能够精准捕捉复杂地质条件下围岩微小变形、应力突变等早期风险信号, 避免因监测精度不足导致风险漏判; 三是实时动态响应, 具备快速数据采集与传输能力, 及时跟踪地质条件与施工状态变化, 为风险预警预留充足处置时间; 四是多源数据融合分析能力, 能够整合地质勘察、施工参数、水文监测等多维度数据, 实现对复杂风险的综合研判与精准预判。

## 2 复杂地质条件下地下工程智能监测核心技术应用实践

### 2.1 高精度抗干扰传感技术应用

传感器作为复杂环境下岩土工程智能化监测的关键组成部分之一, 决定了监测结果的准确性和对潜在危险的识别能力, 所以提高传感器在恶劣环境下的稳定性和提升传感器测量准确性至关重要。根据复杂的工程地质条件的不同特点来选择合适的传感器类型以及布置方法。针对岩溶、高水压等地质条件对设备环境适应性强的要求, 优先采用具有较强环境适应能力的抗干扰传感技术, 该类技术可抵抗潮湿、高压、腐

**作者简介**: 魏星(1983-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 复杂地质下工程施工技术和安全体系保障。

蚀等环境影响,保证对围岩变形、应力、渗压等重要指标采集的准确性及可靠性。针对破碎带、软岩等易出现大变形的地质情况,应优先选用大范围、高精度传感器,并采用合理的埋置方法,尽可能减少开挖活动对仪器的影响,从而实现整个围岩位移过程的有效监控。对于采空区等极为不稳定的地点,宜采取密集型分布式布置形成三维传感体系,确保风险区全面覆盖,不漏掉重要的风险点<sup>[2]</sup>。另外,针对传感器在恶劣环境下的随机故障现象,应设计传感器数据补偿功能以及采用传感器冗余技术以保证传感器采集信息的准确性,从而保障后期风险评估的质量。

## 2.2 稳定高效的传输技术适配

由于地下环境具有地质情况复杂、空间狭小、信号遮挡严重以及施工扰动大等特点,严重影响了数据的可靠传输,如何实现可靠的数据传输是实现智能监测的重要保障。根据地质特点设计相应的传输方式来解决数据传输问题。对于一些深埋地下的项目或者信号屏蔽非常严重的场所,单线传输方式无法保证信息传输的稳定性,应该采取“光纤传输+无线传输”的两种传输方式,通过光纤传输的大带宽、高稳定的特性来确保主要数据的有效传输,而无线传输则起到一个辅助的作用,从而避免出现由于光纤断裂而导致的信息丢失现象的发生。对于涌突水风险较大的区域来说,传输设备及传输线路的防水性非常重要,应使用全防水密封型的传输设备以及传输线路来增强传输系统对水的抵抗能力,防止由于被水浸泡而造成传输系统的故障。同时,为了提高系统的反应速度,可以利用边缘计算的方式,在地下的施工现场将收集到的原始信息先进行一次预处理,过滤无效信息、排除噪声数据,在减轻后续的数据传输压力及处理负荷的同时,保证重要风险信号能够及时上传并触发预警响应机制,为风险处置赢得时间窗口期。

## 2.3 多源数据融合与智能预警技术应用

由于影响地下工程的风险因素较多,在复杂的地质环境下,很难从某一单一的数据中准确地判断出地下工程所处的实际风险状态,这就需要利用大数据分析及综合预测系统来辅助地下工程施工中的风险识别以及预警工作。在大数据分析方面,首先要搭建一个综合性数据库,收集包括地质信息、工程测量资料、地下水资料、天气预报资料等相关数据。其次,对数据进行预处理工作,如清洗、归一化处理等操作,去除异构数据中的格式不统一性及冗余性等问题,提高数据质量,为下一步融合打下坚实的基础。运用机器学习以及深度学习的方法挖掘多种数据之间的关系,

并建立适合于复杂地质条件下的风险预测模型,达到超前预测预报围岩失稳、涌突水等关键性风险的目的。由于不同类型的复杂地质风险发育演化的机理不尽相同,因此应制定不同的临界值及相应的预警级别,并根据地质状况的变化及时更新预警指标,避免出现固定的临界值引起的预警失误或者预警不及时的情况发生。其次,在提高预警结果可视化的方面,建立可视化预警系统,实现动态监测成果与隧道三维地质模型的叠加显示,直观反映危险区的空间位置及演化情况,辅助领导层及时了解险情程度,并作出合理判断<sup>[3]</sup>。

## 2.4 动态自适应监测系统优化

在复杂地层中,开挖隧道的地质条件以及开挖状态是时刻变化着的,并非一成不变,在此情况下制定的监测措施也无法满足其变化的要求,所以需建立一种能够自我调节的监测体系,从而对监测工作进行合理安排并不断提升监测质量。根据实际监测信息提供的反馈,灵活调整监测点布置密度及监测频次,在风险高值区增加监测点、提高监测频率以保证对风险演化过程的有效把握;在安全稳定区间可以适当减少监测量级,实现监测效率的最大化。形成监测系统定期复测机制,配合地质超前预报取得的新地质资料,动态修正监测模型及预警指标,提高监测系统对于地质条件变化的适应能力,并加强监测系统与施工管理系统之间的融合,将施工机械设备状态、人员位置等数据纳入其中,形成联动机制,在监测系统出现风险提示时可以自动触发施工机械停工、人员疏散等一系列应对策略,大大提高风险处理的安全性和速度性,“测—警—处”一体化管理闭环。

## 3 复杂地质条件下智能监测技术应用的挑战

### 3.1 极端地质环境下技术适配性仍存在短板

面对超深地下工程、高水压岩溶、强地震活动区等极端复杂地质条件,现有监测仪器仪表的环境适应性尚不充分,容易造成传感器失准、电缆断裂等故障。另外,极端地质环境下地层参数变化机理复杂多变,现有风险预报方法不能涵盖所有复杂情况,造成预警准确率不高,个别项目还存在误预警、漏预警的情况。

### 3.2 多源数据融合与共享机制不完善

地质勘察、施工、监理、设计等多个主体的数据分别储存在不同的平台中,并且这些数据格式不统一、标准不一致,很难进行有效的融合分析;同时数据没有共享机制,在多个主体间存在着信息壁垒,使得地质数据、施工数据及监测数据不能很好地联系起来,影响风险综合研判能力的提高。另外,一些监测数据还存在隐私和安全性担忧,不利于数据共享工作的开展。

### 3.3 技术成本与专业运维能力不足

智能监测技术适合于复杂地层的高精度智能化监测仪器及系统的开发投入大,在同类型的工程中相比监测费用明显上升,对小型项目而言是一笔沉重的投资负担。另外,针对复杂地层的监测系统维护也需要掌握地质勘探学、传感学、信息处理学等方面知识的综合性人才,目前业内缺乏相关综合人才,造成一些项目监测系统维护管理不够到位,仪器标定不及时、数据异常不能及时处理,影响监测系统的正常运转及使用效果等问题。

### 3.4 标准规范与技术体系不健全

目前,对复杂地质条件下的智能监测技术应用相关标准的研究制定工作相对缺乏,没有形成一套统一的智能监测设备选用标准、监测点布置标准、预警值设定标准,造成各项目的监测方案不尽相同,监测数据不具备较高的可比性和通用性;智能监测技术与复杂地质勘察、施工工艺相互融合的机制不完善,缺少统一的技术应用指引,技术应用不规范、不科学。

## 4 复杂地质条件下智能监测技术优化应用策略

### 4.1 强化核心技术研发,提升极端环境适配性

加大复杂特殊环境下智能监测核心研发力度,重点攻克高强度传感器、抗干扰通信终端等技术难题,提高设备抗高压、防震动、耐高低温性能及寿命;开展地质力学与智能分析融合研究,建立不同类型复杂地质条件下的专属风险预警模型,提高预警准确率。

### 4.2 构建统一数据融合共享平台,打破信息壁垒

搭建跨主体、跨部门统一的数据融合共享平台,形成统一的标准数据格式、标准数据接口及数据共享方式,实现地质勘察、施工、监测、监理等各类数据的一体化存储、共享利用;应用数据安全加密技术确保数据共享的安全性、保密性,避免对数据共享产生顾虑。基于该平台进行多元数据分析,研究分析数据之间的联系性,强化风险的综合性判断。加强监测数据与其他施工管理平台、应急管理平台的数据融合,实现数据化的智能施工及风险处理<sup>[4]</sup>。

### 4.3 优化成本管控,加强专业运维体系建设

通过技术创新与规模化应用降低监测成本,加大国产化高精度监测设备研发与推广力度,减少对进口设备的依赖,提升设备性价比。针对不同规模、不同地质复杂程度的项目,设计差异化监测方案,在保障核心风险监测效果的前提下,合理优化监测点布设与设备配置,控制成本投入。加强专业运维体系建设,建立专业化运维团队,定期开展设备检修、校准、系统升级等工作。

通过校企合作、职业培训等方式,培养具备跨学科知识的复合型运维人才,提升行业整体运维能力。同时,推广远程运维技术,降低现场运维成本与安全风险。

### 4.4 完善标准规范体系,推动技术规范化应用

加快推进复杂地质条件下智能监测技术应用标准规范的制定与完善,明确不同复杂地质类型的监测设备选型标准、监测点布置原则、数据采集精度要求、预警阈值设定方法、系统建设与验收规范等内容,为技术应用提供统一指导<sup>[5]</sup>。构建技术应用评价体系,开展复杂地质条件下的智能监测技术应用效果评价工作,规范并引导技术应用标准;加大行业间沟通力度,分享典型项目的智能监测技术应用成果,形成技术交流平台,实现先进技术和经验的传播及共享,促进智能监测技术在复杂地质地下工程中的广泛应用。

## 5 结束语

在复杂地质条件下,地下工程施工安全风险高、管控难度大。智能监测技术作为精准感知风险、有效防控灾害的主要手段,应用价值和重要性日益突出。针对复杂地质条件下的破碎化、水文复杂、力学差异大等关键特征,智能监测技术应具有强环境适应性、高精度性、实时响应等关键能力,基于高精度抗干扰传感技术、稳定传输技术和多源数据融合分析技术,形成风险监测闭环链路。当前,复杂地质条件下智能监测技术应用仍面临极端环境适配性不足、数据共享机制不完善、成本与运维压力大、标准规范不健全等挑战。未来,需通过强化核心技术研发、构建统一数据共享平台、优化成本管控与运维体系、完善标准规范等多维度发力,提升智能监测技术对复杂地质条件的适配性与应用效果。相信随着技术的不断创新与体系的逐步完善,智能监测技术将在复杂地质地下工程施工中发挥更大作用,为提升工程施工安全水平、推动地下工程建设高质量发展提供坚实的技术保障。

## 参考文献:

- [1] 詹立敏.建筑基坑工程施工智能监测技术应用探析[J].张江科技评论,2025(03):50-52.
- [2] 姜晓冬.铁路施工中的智能监测技术及其在高铁项目中的应用[J].山西建筑,2025,51(01):121-124.
- [3] 尹春维.智能化监测在建筑结构安全施工中的应用研究[J].广东建材,2024,40(12):167-169.
- [4] 周丽平.智能全站仪在建筑工程变形监测中的应用[J].经纬天地,2024(01):36-39.
- [5] 吴瑜灵,王远利.BIM-IoT技术在轨道交通工程智能化施工中的应用研究[J].广东土木与建筑,2024,31(02):20-24.