

地铁隧道施工多源监测数据融合及隐患识别分析

江南, 李宝国, 王珽睿

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710000

DOI:10.61369/UAID.2026030025

摘 要 : 地铁隧道施工属于地下隐蔽工程, 具有复杂多变的施工环境以及多种扰动源等影响因素, 其安全性非常差, 并且传统单一数据监测手段存在片面性、时效性以及滞后性等问题。分析了当前存在的多源数据监测与隐患识别中存在的碎片化采集数据问题、数据融合精度偏低问题、识别信息滞后性和系统化不完善问题, 针对施工中存在的问题提出相对应优化措施, 以实现提高对地铁隧道施工过程中的隐患精确识别与及时性识别, 为施工过程中的安全防护和提前预知提供相应技术保障, 使得在整个过程中都能够安全稳定进行。

关 键 词 : 地铁隧道; 施工监测; 多源数据融合; 隐患识别; 安全管控

Integration of Multi-Source Monitoring Data and Analysis for Hazard Identification In Subway Tunnel Construction

Jiang Nan, Li Baoguo, Wang Tingrui

Power China Northwest Engineering Corporation Limited., Xi'an, Shanxi 710000

Abstract : Subway tunnel construction constitutes an underground concealed project characterized by complex and variable construction environments along with multiple disturbance factors, resulting in significant safety challenges. Traditional single-data monitoring approaches exhibit limitations such as partiality, timeliness issues, and delayed response capabilities. This study analyzes existing problems in multi-source data monitoring and hazard identification, including fragmented data collection, insufficient data fusion accuracy, delayed identification information, and inadequate system integration. Corresponding optimization measures are proposed to enhance the precision and timeliness of hazard detection during subway tunnel construction, providing technical support for safety protection and early risk prediction, thereby ensuring safe and stable progress throughout the entire project.

Keywords : subway tunnel; construction monitoring; multi-source data fusion; hazard identification; safety management

引言

伴随着城市轨道交通建设的高速发展, 地铁隧道施工越来越向深覆土、大跨、近距离穿越建筑物及复杂水文地质方向发展, 在施工过程中极易受围岩扰动、地下水渗流以及机械施工等不利因素的影响而引发坍塌、沉降和涌水事故, 严重威胁施工人员的生命安全和工程的建设质量。监测作为保证地铁隧道施工安全性的重要措施, 现阶段常用的监测方式有多种监测设备如位移、应力、水文和环境等产生的庞杂且类型众多的数据。长久以来大多施工现场使用的是单一地对数据进行单独分析的形式使得各类监测数据之间无法有效结合从而导致数据资源得不到有效地发挥以及不能够及时地发现小的安全隐患进而可能会导致巨大的安全事故。在此情况下有效地将多源监测数据充分融合形成精准、高效的隐患识别机制成为地铁隧道在施工过程中保证其安全性的关键突破口并有着提高工程施工的智能化以及精细化管理的巨大意义。

一、地铁隧道施工多源监测数据融合及隐患识别概述

(一) 多源监测数据的主要类型

监测数据包括施工过程中隧道围岩、支护结构及环境三大方面的数据, 来源于各个方面。其中一是围岩状态监测数据, 主要

有监控量测的围岩收敛值、拱顶下沉、围岩松动圈等数据, 直接体现了地下岩石在受干扰后的稳定性情况。二是支护结构监测数据, 其中包括量测钢架应力和锚杆轴力, 以及由传感器测定混凝土应变变量测, 支护沉降等数据能直观反映初期支护和二次衬砌受力状况。它较好地反映了支护结构的承载稳定性能。三是水文地

质监测数据，诸如地下水位监控，孔隙水压观测以及围岩渗流等资料是监控地下水水质诱发因素。地下水则是造成隧道涌水、突泥，以及软化隧道围岩的关键^[1]。四是环境监测资料，诸如隧道上方地表沉降，周边构筑物如房屋建筑物和地下管线变形，特别是倾斜率监测等，用以控制施工影响对环境设施的影响程度。

（二）多源监测数据融合的内涵

多源监测数据融合不是简单叠加各类监测数据，而是将不同监测设备、不同性质的监测数据进行规范的数据处理、相关分析和深层整合，消除各类监测数据之间的界限，使多类数据相互补充、相互标定、综合分析。相比传统单一监测数据，数据融合技术能有效克服单一监测的不足，例如围岩变形监测仅体现形状变化，应力监测反映结构受力本质，而通过融合二者数据可以精确判定该变形为正常施工影响或异常隐患存在，为识别提供完整准确的基础数据支持^[2]。

二、地铁隧道施工多源监测数据融合及隐患识别存在的问题

（一）监测数据采集分散化，标准化水平偏低

目前大多数地铁隧道监测工作较为分散、独立，制约了数据融合工作的开展。首先在施工现场，监测仪器的种类繁多，各不同品牌的监测设备的数据采集率不统一、存储格式不一致，并且有部分为人工间断性测量，有部分为自动实时监测，数据时序不一致，数据混乱，不利于对数据进行联合分析处理；其次监测点布置不够科学，一些施工单位仅设置少量的围岩变形监测点，忽视了诸如水文监测、管线应力应变等辅助性监测点位，数据结构残缺^[3]。最后，在现场采集中缺乏规范控制措施，在施工过程中受扬尘、机械设备振动和天气等因素影响，采集到大量的无效或失真数据，不经过及时的筛选和剔除将直接影响后续数据融合结果以及安全隐患分析的结果。

（二）数据融合技术浅层化，数据利用率低

大多数施工单位还只是简单使用多源数据，不能够做到真正的深度融合。大多数施工现场仅针对不同的监测数据进行分别统计、简单比较，并未进行系统化、耦合性分析判断。如发现隧道拱顶下沉超限时，只单独分析变形数据，并未结合围岩应力变化、地下水变化以及施工掘进相关参数等因素综合分析判断，不能够准确地找到沉降发生原因的具体问题，难以确定是受掘进扰动、还是地下水的影响或支护施工不足等造成的问题。同时大部分项目也并没有专业的数据融合模型进行分析，仅依赖人的经验来分析数据，不能挖掘监测数据中蕴含的规律，大量的有效监测数据被搁置一旁，“数据预测”“预警”价值无从体现，整体上数据利用价值极低^[4]。

（三）隐患识别不及时，预警信息不准确

滞后且预警不精准是目前施工安全监控的主要短板。首先，隐患识别方式较为落后，现有体系主要依靠设置固定的阈值，监测数据只有在超过此阈值时才告警，对于逐渐增长、小幅度震荡的数据难以判断其形成的安全隐患，许多重大的安全隐患在其渐

变阶段难以及时发现^[5]。其次，对安全隐患分级不够完整，不能针对多源融合数据分析结果对其安全等级进一步划分，导致存在过度警告、无效警告、警告不足的现象共存的情况，小幅震荡数据频繁发出警告容易麻痹管理人员，而具有隐蔽性强、成长性缓慢等特点的严重安全隐患不易识别。同时对隐患的识别缺少与现场施工作业的联动性，告警信息产生后没有快速地溯源并分析，并作出快速处理，告警与现场管控脱节。

（四）专业治理体系不健全，人员技术素质差

完善的管控机制和专业的人员队伍是实现多源数据融合、智能化隐患识别的基础，但目前施工现场普遍缺乏相关的制度建设及能力欠缺的问题。制度缺失：多数施工项目的监测制度无法满足多源监测的管理需求，对于数据采集、数据处理、数据融合、数据分析研判及预警等各个监测阶段未形成相应的岗位职责，并且各阶段的流程混乱、无序化，易造成数据丢失现象、分析滞后问题以及延迟性的处置等一系列问题发生。专业人员的能力水平参差不齐：现场的监测人员通常仅仅能够熟练掌握设备的基础操作，而对于如何对收集到的数据进行相关统计学分析以及多源数据融合与数据分析等工作尚缺乏必要的经验及专业技术。同时技术人员缺少足够的实践锻炼，对于监测所得的数据是否适于施工现场的应用条件，以及对其真实性还无法做出准确判断，因此其得出的数据分析报告也难以符合现场实际情况和实际工况要求^[6]。

三、提升地铁隧道工程多源监测融合及隐患识别的对策

（一）规范数据采集标准，构建一体化数据采集系统

地铁隧道施工中常用的掘进工法有很多，主要包括明挖法、盾构掘进、暗挖法以及矿山法等。针对数据碎片化、非标准化问题从源头上规范采集行为，为数据融合提供保障。一是统一监测技术标准根据地铁隧道施工地质条件和施工工艺以及周围环境等要求，统一监测点的设置标准、采集频率、采集格式和采集精度，更换老旧的监测设备，确保各类监测仪器在相同的数据采集模式下实现数据输出标准化^[7]。二是合理布设监测点按照全方位、全覆盖的要求，在围岩、支护、水文、周边环境等方面补齐薄弱环节的监测点位，消除监测盲区，确保采集的数据能够全面反映实际情况。三是强化原始数据预处理指定专人对采集数据进行筛选、降噪与纠错，及时剔除因外部环境影响、设备等因素造成的失真数据，并统一不同时间点及不同类型的测量值的度量标准，从而保证了原始数据质量，深度数据融合有了可靠基础^[8]。

（二）加强多源数据融合，发挥数据挖掘效能

改变单个数据的孤立分析现状，促进多种监测数据分析融合，挖掘数据背后蕴含的信息。一方面，建立多源数据关联分析体系。突破简单的对比模式，针对影响隧道施工的主要风险进行分析，结合变形监测、应力监测、水文监测及施工参数等建立相关关系，使得不同类别的监测信息可以相互结合，将围岩沉降信息与地下水位、支护应力信息结合起来具体分析产生沉降问题的原因（是自然下沉？还是施工干扰沉降？抑或地质沉降风险）等等，另一方面

引入轻量化数据融合分析模型。考虑到地铁盾构隧道工程的实际需求,对施工现场的需要进行了考虑,构建简易且高效的数据分析方法对动态、大量的监测信息进行趋势、关联以及规律的探索 and 寻找,从而有效找到在变化过程中数据呈现的变化异常现象,由“数据统计”到“判断”过渡,提升数据利用率^[9]。

（三）健全隐患预判方法，精准超前预警

设计合理的识别逻辑，建立全方位的多层次智能化的隐患预警体系，保证预警不滞后，精准预警。首先，设置合理的判断标准。改变单一阈值判定方法，结合数据融合结果对数据进行阈值预警和趋势预警。数据超出阈值时，可以发出预警。对于在数据小范围缓慢变化的趋势下产生的隐患也可以提前发现，做出预警。其次，划分出合理的风险等级。根据异常数据、发展趋势以及影响区域，将隐患划分为一般性、较大性、重大性的施工风险。并对不同类型的施工问题采取不同程度的应对处理方式。这样不仅避免了没有效果的无效报警，也能解决不必要的过度预警^[10]。最后，形成一个闭环的管理体系。通过预警接收，查找隐患点位置，检查核实后对施工进行整改和处理，并且复查复核消除隐患，实现一个有效的闭环。

（四）健全管控保障机制，加强人才支撑

健全的制度、专业的人员保障数据融合及识别工作的实施。在制度方面，按照项目施工需求制定了监测多源数据管理及分析研判和隐患预警处理的专项管理制度，在岗位责任上明确了技术人员、监测人员和管理人员的具体职责，在工作要求方面制定了数据采集与处理、数据分析与预警、隐患整改等工作标准，在工

作执行上保证了各项工作的有序性和规范性，杜绝随意性。在专业人员方面，针对项目实际对相关数据处理及隐患预警的相关技术培训作为常态化的培训项目开展，主要对相关人员就多源监测数据融合分析及精确识灾、隐患预警与处理以及设备维护与管理等方面进行重点培训，并结合日常施工实际情况开展技术交底、定期复盘等机制，将施工过程中存在的异常数据情况以及相关识灾案例进行总结学习，通过积累现场识灾方面的经验不断提高整个项目安全管理团队的专业能力，进而能够更好地实现对隧道安全防控的长效机制。

四、结语

风险预控和隐患前期治理是地铁隧道工程安全施工控制的关键，通过多源数据监测融合分析能够有效弥补传统监测与管控中的缺陷并精准发现隐患。基于目前对地铁隧道工程中监测数据不标准收集、融合程度偏低及发现隐患不足等问题严重影响了对地铁隧道工程施工的安全性把控。因此在后续的施工管理过程中需要结合实际，从完善监测数据标准、增强融合深度、改进发现机制、完善机制保障四个角度切入，全面激活监测数据功能价值，全方位、高精度地开展前瞻性隐患以及安全保障措施，并规避了在建设地铁隧道的过程中可能面临的各类风险，使工程顺利安全实施。确保能够高质量完成地铁隧道工程，并为城市轨道交通在工程中的相关施工安全管控问题提供相应依据。

参考文献

[1]李文秋.地铁盾构空推过暗挖隧道施工常见问题与关键技术[J].四川建材,2025,51(8):152-155.
[2]廖鹏,黄琦,李国潜,等.隧道施工地表隆沉效应三维模型试验研究[J].铁道勘察,2025,51(4):147-153.
[3]周安琦,王士民,陈发达,等.城市浅埋岩溶地层溶腔位置对地铁隧道施工力学影响的模型试验[J].城市轨道交通研究,2025,28(7):57-65.
[4]王子辰.基于结构方程模型的地铁隧道施工安全影响因素分析[J].散装水泥,2025,(3):40-42.
[5]王贞杰,罗小颖.地铁盾构隧道施工中净距叠线掘进施工工艺[J].城市建筑空间,2025,32(S1):328-329.
[6]曾晨.隧道施工扰动下含空洞地层地表沉降规律分析[J].结构工程师,2025,41(6):193-203.
[7]沈梦思.地铁隧道施工中控制测量误差分析与优化方法研究[J].中国高新科技,2025,(23):108-110.
[8]王辰宇.地铁隧道施工对周边地下管线的影响及安全保护措施[J].江西建材,2025,(10):361-363.
[9]李晨,张凯,吕杨,等.双线盾构地铁隧道施工对桩基变形的影响分析[J].施工技术(中英文),2025,54(17):101-105.
[10]石卫,王志清,刘高阳,等.盾构隧道施工对临近砖石古塔的影响研究[J].水利与建筑工程学报,2025,23(4):84-93.