

多源信息融合的软岩隧道施工灾变预警研究

曾艳芹

(四川路桥华东建设有限责任公司双流分公司, 四川 成都 610200)

摘要 临近断裂带软岩隧道施工面临围岩大变形、塌方等灾变风险, 传统监测手段存在实时性差、数据孤立、预警精度不足等问题。本文基于多源信息融合技术, 构建涵盖地质、变形、应力等多维度的监测体系, 研发“多源信息熵—风险概率”映射模型与深度强化学习预警算法, 形成“监测—融合—预警—支护”闭环响应机制; 通过搭建低功耗低延时监测网络, 优化数据预处理与融合流程, 实现风险分级预警与动态支护参数调整, 旨在为软岩隧道施工安全提供技术参考。

关键词 多源信息融合; 软岩隧道; 灾变预警; 施工监测; 动态支护

中图分类号: U455; TV554+.2

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.010

0 引言

随着交通基础设施建设向复杂地质区域延伸, 临近断裂带软岩隧道的建设需求日益增多。软岩具有强度低、变形大、遇水软化等特性, 叠加断裂带地质扰动影响, 施工过程中极易发生围岩失稳、塌方、涌水等灾变事故, 严重威胁施工安全与工程进度^[1]。当前软岩隧道施工监测多依赖全站仪、收敛计等传统设备, 存在实时性差、数据覆盖不全面等局限。多源监测数据分散独立, 缺乏有效融合分析, 导致灾变预警滞后^[2]; 预警模型多基于单一指标构建, 难以反映围岩复杂力学响应; 支护设计多依赖经验参数, 缺乏动态调整能力, 易出现过度支护或支护不足的问题。基于此, 本文开展多源信息融合的软岩隧道施工灾变预警研究, 整合地质雷达、三维激光扫描、光纤传感等多类监测数据, 构建科学的融合模型与预警体系, 实现灾变风险的精准预判与动态支护响应, 攻克软岩隧道施工安全管控瓶颈, 为同类工程提供参考。

1 工程概况

本文依托某高速公路临近断裂带软岩隧道工程, 隧道全长 2 860 m, 为双向四车道分离式隧道, 设计时速 100 km/h。隧道最大埋深 180 m, 最小埋深 25 m, 属于浅埋偏压隧道。隧道穿越侏罗系软质砂岩与泥岩互层, 岩体完整性差, 节理裂隙发育, 且临近区域性断裂带, 断层宽度 5 m~15 m, 主要为泥质充填, 稳定性极差。

隧道施工采用 CRD 法开挖, 初期支护为喷射混凝土+锚杆+钢拱架组合体系, 二次衬砌采用模筑混凝土。施工过程中面临多重风险: 一是软岩围岩抗压强度低,

开挖后易产生大变形, 初期支护易出现开裂; 二是断裂带富水性强, 存在涌水突泥风险; 三是浅埋偏压导致围岩应力分布不均, 塑性区扩展范围大; 四是施工扰动与断裂带活动叠加, 易引发围岩失稳塌方^[3]。

该隧道传统监测手段仅能实现位移和应力的定时监测, 数据更新滞后, 灾变预警准确率不足 70%, 曾发生两次小规模塌方事故, 造成工期延误与经济损失。基于此, 依托本项目开展多源信息融合灾变预警技术研究, 以解决施工安全管控难题。

2 多源信息融合监测体系构建

2.1 监测指标选取

结合软岩隧道灾变演化规律与断裂带地质特征, 选取四类核心监测指标。地质信息指标通过地质雷达、瞬变电磁法、超前钻探获取, 包括围岩岩性、裂隙发育程度、断层产状、地下水分布等, 用于预判地质风险源。变形监测指标涵盖隧道初支收敛变形、地表沉降、洞身深部位移、衬砌变形, 反映围岩与支护结构的力学响应状态。应力监测指标包括锚杆轴力、钢拱架应力、衬砌内力、围岩接触压力, 监测支护结构受力与围岩应力重分布情况。环境监测指标包括隧道内温湿度、涌水量、瓦斯浓度, 保障施工环境安全。

各类指标相互补充, 形成“地质—变形—应力—环境”四维监测体系, 全面覆盖软岩隧道施工灾变的关键影响因素, 为预警模型提供完整数据支撑。

2.2 监测设备部署

遵循“全面覆盖、重点突出、低耗高效”原则, 进行监测设备部署。地质雷达采用 SIR-4000 型, 探测

作者简介: 曾艳芹 (1991-), 女, 本科, 工程师, 研究方向: 道路与桥梁。

深度 0 m ~ 30 m、分辨率 0.1 m，与瞬变电磁仪沿隧道纵向每 50 m 布置一个监测断面，断层影响区加密至 20 m，用于超前地质预报与掌子面地质评价。三维激光扫描仪选用 LeicaP40，扫描速度 100 万点 / 秒、精度 ± 2 mm，每 30 m 布置一个监测断面，实时采集隧道轮廓变形数据^[4]。

在变形监测方面，地表沉降监测点沿隧道中心线两侧各 30 m 范围内布置，间距 20 m；洞内初支收敛监测采用自动化收敛计，每 20 m 一个断面，每个断面布设 3 对监测点；深部位移监测采用滑动测斜仪，在断层影响区及浅埋段布设，监测深度达隧道底板以下 15 m。应力监测采用分布式光纤传感器与振弦式应力计组合，光纤传感器采用 BOTDA 技术、测量精度 $\pm 0.1\%$ FS、监测频率 1 次 / 分钟，沿钢拱架全长布设、每 2m 设置一个监测点；振弦式应力计布置在关键断面的拱顶、拱腰、边墙位置，每断面布设 6 个 ~ 8 个，锚杆轴力计选用振弦式、量程 0 kN ~ 500 kN、精度 $\pm 0.5\%$ FS。环境监测设备在隧道内每 100 m 布设一套温湿度、瓦斯浓度传感器，涌水量监测在隧道排水沟设置流量计量装置。

所有监测设备通过工业以太网与无线传输模块结合，实现数据低延时传输，传输延时控制在 5s 以内，满足实时监测需求。

2.3 数据预处理技术

多源监测数据存在噪声干扰、尺度不一致、数据缺失等问题，需进行预处理。采用小波阈值降噪法对地质雷达信号、应力应变数据进行降噪处理，选用 db4 小波基、分解层数 3 层，阈值选取基于 Birgé-Massart 准则，去除施工振动、设备干扰等噪声影响，保留有效信号特征。针对不同监测指标的量纲差异，采用 min-max 标准化方法进行归一化处理，公式为：

$$x' = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (1)$$

式 (1) 中， x 为原始数据， x' 为归一化后数据， $x_{\min}$ 和 $x_{\max}$ 分别为该指标的最小值和最大值，将数据映射至 [0, 1] 区间，消除量纲影响。

对于数据缺失问题，根据缺失数据类型采用不同补全方法：连续型数据（如位移、应力）采用线性插值法，离散型数据（如地质分类）采用 K 近邻算法补全。同时建立数据质量评价体系，通过 3σ 准则异常值检测算法识别无效数据并剔除，确保数据可靠性，为多源信息融合奠定基础。

2.4 多源信息融合模型

构建“数据层—特征层—决策层”三级融合模型。数据层融合采用加权平均法，对同一监测指标的多设备数据进行融合，根据设备精度分配权重，提高数据

可信度。特征层融合通过卷积神经网络提取各监测指标的深层特征，构建 128 维特征向量，实现多维度信息的特征融合，突出灾变前兆特征。

决策层融合基于“多源信息熵—风险概率”映射模型，引入信息熵量化多源数据的不确定性，通过熵值计算反映各指标的风险贡献度。将特征层融合结果输入映射模型，结合深度强化学习算法，构建含 3 个隐藏层的神经网络预警模型，隐藏层节点数分别为 64、32、16，激活函数采用 ReLU 函数，输出层采用 Softmax 函数，建立监测数据与灾变风险概率的对应关系，实现多源信息的深度融合与风险量化评估。融合模型能够有效整合异构监测数据，克服单一指标预警的局限性，提升风险识别的全面性与准确性。

3 灾变预警模型与动态支护响应

3.1 预警指标阈值确定

结合隧道施工规范、工程经验与数值模拟结果，确定三级预警指标阈值。黄色预警对应潜在风险，位移速率大于 0.5 mm/d、应力变化率大于 10%/d、地质雷达检测发现轻微裂隙发育；橙色预警对应较高风险，位移速率在 1.0 ~ 2.0 mm/d 之间、应力变化率在 10%/d ~ 20%/d 之间、出现局部围岩掉块；红色预警对应极高风险，位移速率大于 2.0 mm/d、应力变化率大于 20%/d、监测到大规模裂隙扩展或涌水迹象^[5]。

阈值设定充分考虑软岩特性与断裂带影响，通过 3DEC 离散元数值模拟分析不同断层形态、支护参数下的围岩稳定状态，模拟工况涵盖断层宽度 5 m ~ 15 m、倾角 30° ~ 60° 等多种组合，结合同类工程 12 起事故案例统计，对阈值进行 3 轮校准优化，确保预警的科学性与实用性。

3.2 灾变预警模型构建

针对工程灾变演化过程的非线性、强耦合与强不确定性特征，本研究基于深度强化学习框架搭建灾变预警模型，模型以多源监测信息融合处理后的特征向量为输入，以对应工况下的灾变风险等级为输出。模型训练数据集采用工程现场累计归档的 3 万组有效监测历史数据，搭配数值模拟生成的 5 万组极端工况虚拟样本，兼顾了现场实际工况的真实性与极端灾变场景的覆盖度，保障训练样本的完备性。在训练过程中，以风险识别准确率为核心构建奖励函数，初始学习率设置为 0.001，采用自适应矩估计优化算法完成参数迭代，经过 500 轮迭代训练后模型达到稳定收敛状态，验证集综合识别准确率可达 94.3%。

该预警模型在工程应用端形成了全流程闭环预警能力，核心实现三大核心功能。一是实时风险动态评估，

依托模型的轻量化实时推理能力,每5分钟完成一次全维度数据更新与风险等级判定,保障风险识别的时效性;二是灾变发展趋势预判,嵌入LSTM时序预测模块,可对未来24小时内的灾变风险演化趋势进行滚动预测,经测试预测值与实测值的相对误差稳定控制在5%以内;三是分级预警精准推送,可根据风险等级划分结果,通过配套的工程预警管理平台,将预警信息定向推送至对应层级的管理与现场处置负责人。经多组现场工程实测试验验证,模型整体预警准确率达92%以上,误警率控制在8%以内,各项性能指标均满足工程现场灾变预警管控的实际需求。

3.3 动态支护响应策略

建立与预警等级对应的动态支护响应策略,实现“预警—支护”闭环控制。

在黄色预警状态下,维持原支护参数,加密监测频率至每30分钟一次,增加人工巡查次数至每2小时一次,重点关注异常监测断面的围岩状态;橙色预警状态下,启动一级响应,调整支护参数,锚杆预紧力从100 kN提升至120 kN~130 kN,钢拱架间距由0.8 m加密至0.6 m,采用分层注浆工艺加固围岩,注浆材料选用水泥—水玻璃双液浆,注浆压力控制在1.5 MPa~2.0 MPa,注浆孔间距1.5 m,控制塑性区扩展。

在红色预警状态下,启动紧急响应,立即停止开挖作业,人员设备撤离至安全区域,采用大管棚超前支护+径向注浆联合加固措施,大管棚采用 $\Phi 108\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 无缝钢管,环向间距30 cm,倾角 $1^\circ\sim 3^\circ$,注浆材料水灰比1:1,凝胶时间30 s~60 s,待围岩稳定性恢复后,调整施工方案重新开挖。

支护响应策略充分体现分阶段调控理念,初期采用刚性支护控制围岩变形,变形阶段通过柔性调整适应围岩变形,稳定阶段进行补强支护确保结构安全,结合预应力锚杆—可缩式钢拱架组合支护体系,提升支护结构的自适应性及抗偏压能力。

3.4 预警平台开发

开发软岩隧道施工灾变预警平台,集成数据采集、融合分析、风险预警、支护决策等功能。平台采用B/S架构,支持电脑端与移动端访问,实现数据自动采集与实时上传。平台核心功能包括数据可视化模块,以折线图、热力图等形式展示多源监测数据与风险等级分布;风险预警模块,自动生成预警报告并通过短信、APP推送;支护决策模块,根据预警等级推荐最优支护调整方案;历史数据查询模块,支持监测数据与预警记录的检索分析。

本平台采用MySQL与MongoDB双库协同的混合存储架构,实现隧道工程全类型数据的差异化存储管理。

其中,监测指标阈值、支护设计参数等结构化程度高、逻辑关联性强的业务数据,统一存储于MySQL数据库,保障数据检索、调用的高效性与一致性;隧道三维扫描点云、现场地质图像等体量庞大、结构松散的非结构化数据,存储于MongoDB数据库,适配海量非结构化数据的灵活存储与动态扩展需求。数据传输采用MQTT通信协议,兼顾隧道现场低功耗部署要求与数据传输的高可靠性。平台前端基于Vue.js框架开发,后端采用SpringBoot架构搭建,可稳定支撑现场多终端的高并发访问。同时,平台深度集成BIM技术与数字孪生功能,搭建隧道全段三维可视化模型,实现监测数据与模型构件的深度绑定,完成风险点位的精准定位与可视化呈现。平台操作简便,内置一键式风险评估与支护方案自动生成功能,可有效赋能现场施工管理,大幅提升隧道灾变预警与应急处置效率。

4 结束语

本文针对临近断裂带软岩隧道施工灾变预警难题,开展多源信息融合技术研究,构建了涵盖监测体系、融合模型、预警算法、支护策略与平台开发的完整技术体系。通过选取“地质—变形—应力—环境”四维监测指标,部署低功耗低延时监测网络,研发“数据层—特征层—决策层”三级融合模型与深度强化学习预警算法,建立分级预警阈值与动态支护响应策略,开发智能化预警平台,实现了软岩隧道施工灾变风险的精准预判与高效管控。未来研究可进一步深化数字孪生与智能化自适应支护技术的融合应用,实现支护参数的实时动态调整;拓展多源信息融合的维度,整合施工机械运行状态、人员定位等数据,构建更全面的安全管控体系;加强模型在不同地质条件下的泛化能力研究,推动技术的广泛应用,为我国复杂地质隧道建设提供更有力的安全保障。

参考文献:

- [1] 王彬.智能化多源信息监测在盾构隧道风险管理中的应用[J].绿色建筑与智能建筑,2025(12):84-86.
- [2] 龙贵云,刘有梦,王艳宁,等.基于多源信息融合的深长隧道坍塌风险评估[J].安全与环境工程,2025,32(06):191-203.
- [3] 曹鑫.断裂构造区大跨度软岩隧道施工质量控制与技术优化研究[J].中国品牌与防伪,2025(08):125-127.
- [4] 罗飞轮,熊亮.大口径长距离顶管结构安全多源信息监测技术研究[J].四川水利,2025,46(01):158-161,180.
- [5] 张世珠,王鹏,张开,等.基于全过程信息的多源数据融合隧道超前地质预报方法[J].岩石力学与工程学报,2025,44(04):838-849.