

隧道工程安全监控量测数据分析与安全管理应用

崔毅 白佳伦 丁亚鑫

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 陕西 西安 710100

摘要：安全监控量测作为隧道信息化施工的核心环节，通过实时采集围岩与支护结构的变形、应力、位移等关键参数，为风险预警与动态设计提供数据支撑。本文系统阐述了隧道工程安全监控量测的基本原理、常用方法及技术体系，重点探讨了监控量测数据的处理流程、分析模型（包括传统统计方法、时间序列分析、机器学习算法等）及其在围岩稳定性判别、支护结构安全性评估中的应用。在此基础上，深入剖析了监控量测数据如何驱动隧道施工过程中的动态风险管理、应急预案制定与优化决策。最后，文章展望了大数据、人工智能、数字孪生等新兴技术在提升隧道工程安全管理水平方面的广阔前景，旨在为构建更加智能、高效、可靠的隧道工程安全管理体系提供理论参考与实践指导。

关键词：隧道工程；安全监控量测；数据分析；风险管理；信息化施工；智能预警

引言

隧道工程是现代交通网络关键，建设质量与安全关乎国家经济和社会安全。我国建成秦岭终南山公路隧道等世界级工程，彰显技术实力。但隧道施工面临高地应力、软弱破碎围岩等复杂地质灾害挑战，安全事故会造成巨大损失和人员伤亡。传统隧道施工管理模式依赖经验判断和静态设计，难应对动态地质条件。“新奥法”理念中的“监测-反馈-修正”闭环控制机制应运而生，安全监控量测是实现该机制的关键，能为工程师提供决策依据。21世纪，信息技术发展给隧道工程安全管理带来变革。传感器、物联网等技术融合，让监控量测数据处理更高效智能。如何从海量数据中挖掘规律、实现精准预警和主动管理，是当前研究与实践的难点。本文旨在梳理安全监控量测数据分析方法体系，探讨其安全管理应用路径，为提升隧道工程本质安全水平提供思路。

1 隧道工程安全监控量测体系概述

1.1 监控量测的目的与意义

隧道工程安全监控量测的根本目的在于掌握围岩和支护结构在施工全过程中的真实状态，验证设计参数的合理性，指导现场施工，并及时发现潜在的安全隐患。其意义首先体现在对施工安全的保障上，通过实时监测可提前识别围岩失稳或支护失效的征兆，为应急处置争取宝贵时间。其次，量测数据能够有效支撑动态设计，使工程师根据围岩实际响应对锚杆长度、喷射混凝土厚度等支护参数进行科学调整，避免过度或不足支护。此外，监控结果还能指导施工组织节奏，例如确定二次衬砌的最佳施作时机，从而在确保结构安全的前提下优化工期安排。更为长远的是，系统积累的量测数据构成了

宝贵的工程知识库，可为未来类似地质条件下的隧道设计与施工提供重要参考，推动行业技术进步。

1.2 主要监控量测项目与方法

依据《铁路隧道监控量测技术规程》（Q/CR9218）和《公路隧道施工技术细则》（JTG/TF60）等相关规范，隧道监控量测通常划分为必测项目与选测项目。必测项目是所有隧道工程的基础性监测内容，涵盖洞内外观察、拱顶下沉、净空收敛及地表沉降。其中，洞内外观察通过目视或影像记录开挖面地质特征、支护表面裂缝及渗漏水情况；拱顶下沉与净空收敛分别利用精密水准仪、全站仪或收敛计监测隧道竖向与横向变形；地表沉降则在隧道上方布设观测点，用于评估施工对地面建筑物的影响^[1]。选测项目则更具针对性，常用于地质条件复杂或安全等级要求高的隧道，包括围岩内部位移、锚杆轴力、钢架内力、围岩压力以及爆破振动等。这些项目通过埋设多点位移计、钢筋计、应变计和压力盒等专用传感器，深入揭示围岩与支护结构间的相互作用机理，为精细化安全管控提供数据支撑。

1.3 现代监控量测技术的发展

近年来，自动化、智能化的监控量测技术得到广泛应用。例如，基于全站仪的自动测量机器人（AMR）可以实现无人值守的24小时连续监测；光纤光栅（FBG）传感技术具有抗电磁干扰、分布式测量的优点，可嵌入结构内部进行长期健康监测；三维激光扫描（LiDAR）技术能够快速获取隧道断面的高精度点云数据，实现变形的全场、非接触式测量。这些技术极大地提升了数据采集的效率、精度和覆盖范围，为后续的深度数据分析奠定了坚实基础。

2 监控量测数据的处理与分析方法

2.1 数据预处理

原始监控量测数据往往受到仪器误差、环境干扰或人为操作等因素影响,包含噪声、异常值乃至缺失片段,必须经过系统化的预处理才能用于可靠分析。数据清洗是首要步骤,旨在识别并剔除由设备故障或记录失误导致的明显离群点。随后,为抑制高频随机波动、凸显数据内在趋势,常采用移动平均法或Savitzky-Golay滤波器进行平滑处理。对于因通信中断等原因造成的少量数据缺失,则需借助线性插值、样条插值或基于时间序列模型的预测方法进行合理填补,以保证数据序列的完整性与时序连续性,为后续建模分析提供高质量输入。

2.2 传统数据分析方法

在隧道工程实践中,位移-时间曲线分析是最直观且广泛应用的传统方法。通过绘制拱顶下沉或净空收敛随时间演变的曲线,工程师能够清晰把握变形的发展趋势与稳定特征。相关规范通常以变形速率为关键判据,例如当拱顶下沉速率连续多日低于某一阈值(如0.5mm/d),且累计变形量达到预测总量的80%以上时,可判定围岩趋于稳定^[2]。为进一步量化预测,常采用指数函数、对数函数或双曲函数等经验模型对位移-时间序列进行回归拟合,其中双曲函数因其良好的物理意义和拟合效果而备受青睐。对于数据样本较少、信息不完备的初期监测阶段,灰色系统理论中的GM(1,1)模型则展现出独特优势,能够有效进行短期变形预测,为早期风险判断提供支持。

2.3 先进数据分析与智能预警模型

面对复杂地质条件下非线性、强耦合的变形行为,传统方法在预测精度与风险识别能力上逐渐显现出局限性。为此,时间序列分析与机器学习等先进方法被引入监控数据分析领域。ARIMA模型能够有效捕捉位移序列的自相关结构与趋势成分,适用于平稳化处理后的数据预测。在机器学习范畴内,支持向量机(SVM)在小样本场景下表现出色,可用于构建高维非线性映射的预测模型或安全状态分类器;人工神经网络,特别是长短期记忆网络(LSTM),则凭借其对于长期时序依赖关系的强大建模能力,在处理具有记忆效应的隧道变形数据时展现出卓越性能。此外,结合三维激光扫描获取的点云数据,卷积神经网络(CNN)等深度学习模型可自动识别衬砌表面的裂缝、剥落等结构性病害,实现从宏观变形到微观损伤的全方位智能诊断。这些先进模型通过融合多源信息、学习复杂模式,显著提升了预警的前瞻性与决策的科学性。

3 监控量测数据在安全管理中的应用

3.1 围岩稳定性动态判识与分级

围岩稳定性是隧道安全的基础,而其变化具有高度时空异质性。传统的围岩分级主要依据前期地质勘察资料,在施工过程中往往存在滞后性与不确定性。监控量测通过布设拱顶下沉、周边收敛、地表沉降等位移监测点,持续获取变形速率与累计变形量等关键指标,为围岩稳定性提供了动态、量化的评估依据。工程实践中,通常设定多级预警阈值(如黄色、橙色、红色三级),分别对应“关注”“预警”“危险”三种状态^[3]。例如,当某断面拱顶下沉速率连续3天超过2mm/d,或累计变形达到设计允许值的80%,系统即自动触发黄色预警;若变形速率进一步加剧至5mm/d以上,则升级为红色预警,需立即停工排查。这种基于实测数据的动态判识方法,有效克服了静态地质资料无法反映开挖扰动后围岩真实响应的局限。更进一步,若将监控数据与地质雷达(GPR)、TSP超前地质预报等手段融合,可构建“预报—开挖—监测—修正”的闭环反馈机制。例如,在穿越软弱夹层前,超前预报提示可能存在富水破碎带,施工中若监测数据显示变形异常加速,则可及时修正前方未开挖段的围岩级别,并调整支护参数(如增加钢架间距加密、提升喷射混凝土强度等级等),从而实现施工方案与围岩实际状态的动态匹配,显著降低突水、塌方等突发性地质灾害风险。

3.2 支护结构安全性评估

初期支护是隧道施工期的主要承载结构,其工作状态直接决定整体安全。监控量测不仅关注围岩变形,还通过内力监测(如锚杆轴力计、钢架应变片、土压力盒等)获取支护构件的受力信息,为结构安全性提供直接证据。例如,某隧道段钢架内力监测值在开挖后第5天起持续上升,7天内由设计值的60%攀升至95%,逼近材料屈服极限。结合同期收敛数据发现该区域净空收敛速率同步加快,初步判断围岩荷载远超预期,或存在局部支护薄弱环节(如锁脚锚杆失效、喷层开裂等)。此时,必须立即暂停开挖,组织结构工程师与地质专家联合诊断,并采取增设临时横撑、补打系统锚杆、注浆加固围岩等应急措施。此类基于实测内力的评估方法,使支护结构安全管理从“凭经验猜测”转向“用数据说话”,极大提升了风险识别的精准度与处置的时效性。此外,长期监测数据还可用于反演围岩物理力学参数,校核数值模拟模型,为后续类似工程提供宝贵经验数据库。

3.3 动态风险管理与应急预案

隧道施工风险具有动态演化特征,静态风险清单难

以覆盖全过程。监控量测数据为动态风险管理提供了实时输入。项目安全管理部门可依据每周或每循环的量测分析报告,滚动更新风险清单,重新评定各风险点等级,并动态调整管控策略。典型场景如隧道穿越城市密集区或既有铁路下方时,地表沉降控制极为严格。若监测显示某监测点沉降速率由 0.5mm/d 骤增至 3mm/d ,且影响范围扩大,则预示围岩自稳能力急剧下降,可能引发地表开裂甚至建筑物倾斜^[4]。此时应立即启动专项应急预案:一方面加强超前支护(如施作大管棚、小导管注浆形成加固拱),另一方面严格控制单循环进尺(如由 1.5m 减至 0.75m),同时将监测频率由每日1次提升至每2小时1次,并预置抢险队伍、注浆设备及应急物资于现场待命。这种以实时数据为触发条件的响应机制,确保了安全管理措施始终与工程实际风险水平同步,真正实现了“风险可知、可控、可防”。

3.4 施工决策优化

监控量测数据不仅是安全屏障,更是科学决策的依据。其中最具代表性的应用是二次衬砌施作时机的确定。二次衬砌作为永久结构,其施作时间直接影响结构安全与经济性。过早施作,围岩变形尚未收敛,后期变形将转化为附加荷载作用于衬砌,易导致混凝土开裂;过晚施作,则使初期支护长期处于高应力状态,增加失稳风险。通过综合分析拱顶下沉与净空收敛的时间-变形曲线,工程师可识别“收敛-稳定”阶段:当变形速率连续5~7天小于 0.5mm/d ,且累计变形达到预计最终值的85%以上,即可判定围岩趋于稳定。在此临界窗口期施作二衬,既能有效分担围岩压力,又可避免结构损伤。某山区高速公路隧道项目正是依据此原则,将二衬施作时

间由原计划的30天优化至22天,既保障了结构安全,又缩短了工期,节约成本约120万元。此外,监控数据还可用于优化爆破参数、调整开挖工法、验证支护效果等,全面支撑精细化施工管理。

4 结语

本文探讨了隧道工程安全监控量测数据分析与安全管理应用。安全监控量测是信息化施工基础,其数据是评估围岩和支护结构安全的直接客观依据。数据分析方法从传统位移-时间曲线分析发展到智能预测体系,提升了风险预警精度与时效性。将监控数据融入安全管理全流程,能构建闭环、主动、高效的安全管理体系,提升工程本质安全水平。未来,隧道工程安全监控与管理将与新一代信息技术深度融合、更趋智能。数字孪生技术可构建隧道全生命周期虚拟映射体,提供安全态势感知与应急演练平台。大数据与大模型结合,能打通多源数据壁垒,实现智能推理与辅助决策。边缘计算与5G/6G通信技术部署,可满足极端安全需求。以数据为核心、智能为引擎的隧道工程安全新范式正加速形成。

参考文献

- [1]孙陆海.隧道工程监控量测项目施工技术研究[J].工程建设与设计,2025,(10):173-175.
- [2]程诗琰.隧道工程监控量测技术分析[J].交通科技与管理,2025,6(09):88-90.
- [3]许俊伟,刘永胜,吴达,等.隧道与地下工程监控量测技术的发展与展望[J].测绘地理信息,2023,48(03):7-13.
- [4]郭开文.公路工程隧道施工监控量测技术应用研究[J].城市建筑,2020,17(29):150-151.