

隧道变形自动化监测系统与工程应用

夏国志¹, 史宁强¹, 夏贤冲¹, 刘大刚²

[1. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司, 重庆市 401120; 2. 西南交通大学, 四川 成都 610031]

摘要: 隧道变形是评价隧道围岩及支护结构安全状态最直接、最客观的指标, 受隧道开挖及支护应力状态转化及施工时空效应影响, 隧道变形往往呈现出复杂的特性, 研发可反映隧道变形真实形态, 兼具安全、可靠、便捷、经济的监测方法与技术对保障隧道修建安全具有重要现实意义。在梳理和分析隧道变形监测技术现状基础上, 以隧道变形自动化监测系统为重点, 阐述了监测系统的工作原理、监测系统核心关键技术、监测系统平台功能等内容, 并通过我国西部某典型隧道现场应用与对比验证, 表明监测系统变形测试结果与全站仪技术测试结果吻合度良好、精度可靠, 而在变形监测的时空连续性方面则更具优势。

关键词: 隧道变形; 自动化监测技术; 工程应用

中图分类号: U456

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)09-0030-03

Automated Monitoring System for Tunnel Deformation and Its Engineering Application

XIA Guozhi¹, SHI Ningqiang¹, XIA Xianchong¹, LIU Dagang²

[1. T.Y. Lin International Engineering Consulting (China) Co., Ltd., Chongqing 401120, China; 2. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China]

Abstract: Tunnel deformation is the most direct and objective indicator for evaluating the safety status of tunnel surrounding rock and support structures. Affected by the stress state transformation of tunnel excavation and support as well as the spatio-temporal effect of construction, the tunnel deformation often presents complex characteristics. The research and development can reflect the true form of tunnel deformation. The monitoring methods and technologies that are safe, reliable, convenient and economical have significant practical significance for ensuring the safety of tunnel construction. Based on the review and analysis of the current status of tunnel deformation monitoring technology, focusing on the automatic monitoring system for tunnel deformation, the working principle, core key technologies and platform functions of the monitoring system are set forth. Through the field application and comparative verification of a typical tunnel in western China, it is shown that the deformation test results of the monitoring system are in good agreement with the total station technology test results with reliable accuracy, and have more advantages in the spatiotemporal continuity of deformation monitoring.

Keywords: tunnel deformation; automated monitoring technology; engineering application

0 引言

隧道在开挖支护过程中, 围岩和支护结构随着应力状态的转化, 将会发生持续性变形现象, 当应力或变形超过某一特定阈值时, 则会诱发围岩失稳、结构开裂等隧道安全问题^[1], 因此, 通过对围岩和支护结构应力或变形状态开展持续性监测, 可实时掌握围岩和支护结构应力或变形分布特征及其演变趋势, 对及时发现围岩或支护结构潜在安全隐患、科学

指导工程设计和施工均具有重要意义。

从工程实践来看, 应力的监测通常需要在围岩或支护结构内部布设大量的专业传感器, 往往代价较高、且耗时费力, 在规模化实施中具有一定的局限性; 相比之下, 变形监测可在围岩或支护结构表面开展, 具有代价较低、操作简便、易于规模化实施等特点, 因此国内外隧道在监测工作中均将变形监测视为重点, 并将其作为监控量测项目中的必测项目进行实施^[2]。

但需要指出的是, 隧道施工过程中, 洞内环境往往比较复杂, 工程对高效施工的需求往往也较高, 鉴于此, 积极研发并采用安全、可靠、便捷、经济的隧道

收稿日期: 2025-04-22

基金项目: 重庆市建设科技计划项目(城科字 2020 第 3-13 号)

作者简介: 夏国志(1980—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事轨道交通、隧道、岩土等设计管理工作。

变形监测方法与技术就显得尤为必要。

1 隧道变形监测技术现状分析

隧道变形监测作为隧道监控量测的重要组成部分,自新奥法隧道建造理念问世以来,即受到工程界人士的关注与重视,时至今日,已成为隧道工程领域不可或缺的技术手段之一。

纵观隧道变形监测技术的发展历程,其技术发展主要表现出以下 3 方面特点:一是为满足测量工

作安全需求,由接触测量方式向非接触测量方式发展;二是为满足变形真实形态的测量需求,由点式测量向线式、面式测量发展;三是为满足测量便捷性、少人化的需求,由人工测量向自动化、智能化测量发展。特别是近些年来,随着测量仪器、信息传感、计算机等领域技术的发展与应用,隧道变形监测技术也呈现出多元化的特点^[3]。

作者梳理了现阶段主要的变形监测技术方式^[4-7],各监测技术特征详见表 1。

表 1 隧道主要变形监测技术及其特点

技术方式	测量原理	技术特征	测量精度	应用现状
收敛计技术	机械或电测原理	目标点相对位移;点式接触量测;耗时费力、安全性差;费用低廉	亚毫米级	逐渐淘汰
全站仪技术	基于角度、距离的坐标转换原理	目标点三维坐标;点式非接触量测;人工测量为主、自动化需配置专业测量系统;费用适中	亚毫米级	主流监测方式
三维激光扫描技术	激光测距原理	目标点三维坐标;面式非接触量测;点云数据量较大,分析耗时;费用较高	毫米级,高端仪器达亚毫米级	发展趋势强劲
数字图像处理技术	近景摄影测量原理	目标点三维坐标;面式非接触量测;成像质量受洞内环境影响较大;费用低廉	受环境影响较大,理想环境可达亚毫米级	主要用于室内试验,现场应用较少
光纤光栅传感技术	物理变形与光信号响应特性原理	目标点相对位移;多点分布式非接触量测;布设耗时费力;费用较高	亚毫米级	主要用于长期监测

由表 1 可知,现阶段各变形监测技术在测量精度方面,总体来说均可满足亚毫米级的高精度变形测量需求,但从测量的便捷性、代价性等方面则表现出较大差异,因此,选取何种或积极发展安全、可靠、便捷、经济的隧道变形监测技术仍是值得研讨的问题。

2 隧道变形自动化监测系统

2.1 监测系统工作原理

隧道变形自动化监测系统主要基于机器视觉-结构光的测量原理,即利用隧道断面结构光图像处理技术,对不同时刻隧道断面结构光变形进行分析,进而实现隧道全断面及多断面整体变形的实时监测。

该系统由基准终端、测量终端和测量主站构成,终端可发射强环境适应性的红外结构光,可在洞内形成结构光带,其中基准终端布设在隧道稳定区域,作为变形监测的基准参考体系,测量终端布设在隧道变形区域,用于断面变形测量;主站可自动采集结构光图像,且可对结构光带变形开展自动化分析计算,从而获知洞内各监测断面的真实变形状态。为便于操作,终端及主站采用可移动布设方式,可布设于隧道两侧底部高约 1.5 m 位置处^[8]。系统工作原理及布设示意图 1。

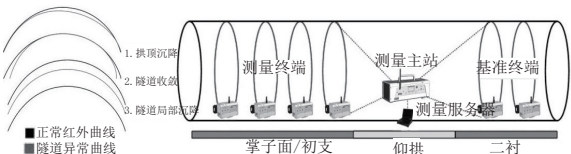


图 1 隧道变形自动化监测系统工作原理示意

2.2 监测系统关键技术

(1)亚毫米级隧道整体变形感知技术

为获取高精度的隧道整体变形值,系统采用相机畸变矫正-图像超分辨率分割-结构光中心线精准提取-多断面整体变形综合分析的关键技术路径进行实施。

相机畸变矫正是对主站中内置的测量相机进行标定,获取相机内参数和畸变参数,并根据标定的参数对原始图像进行矫正处理,减少因相机畸变所致的原始图像误差;图像超分辨率分割主要利用改进的 PSPNet 图像分割网络实现图像的超分辨率处理和结构光区域与背景区域的分割,降低因相机分辨率不足所造成的误差;结构光中心线提取采用重心法,即利用 OSTU 法计算结构光区域像素灰度平均阈值 T ,将阈值与结构光每一个像素点灰度值进行比较,寻找大于阈值 T 的像素及坐标,并进行加权平均得到光线中心坐标;多断面整体变形分析则基于各断面光心线数据,通过分析各光心线变形分布特征及其在整体变形中的权重,进而计算整体变形值大小。

(2) 终端振动智能识别与诊断技术

为解决变形测量过程中测量终端、基准终端等因异常振动所致的变形值失真问题,系统开发了基于卷积神经网络的振动智能识别与诊断技术,即通过构建结构光中心线无变形、振动异常变形、正常变形三类数据集,开展卷积神经网络模型训练分析,利用模型权重参数差异对振动进行智能识别与诊断。

(3) 变形预警值自适应学习技术

为解决不同状态围岩或支护变形合理预警问题,利用回归类人工智能算法,开发了变形预警值自适应学习技术。即以隧道开挖断面尺寸、围岩等级、变形量、变形速率、变形趋势等作为特征值,以安全预警等级作为目标值,通过模型的数据学习、训练与优化,建立变形预警智能分析模型,据此可实现基于施工状态特征的变形预警自适应学习,提升变形预警的精准性,见图2。

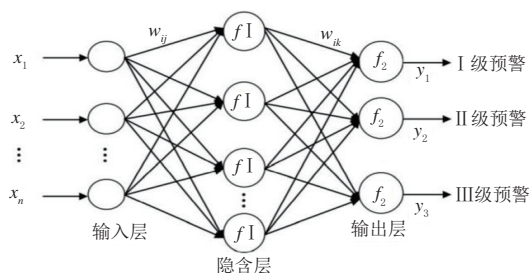


图2 隧道变形预警自适应学习原理

2.3 监测系统功能构成

为便于现场应用分析,开发了隧道变形自动化监测系统,具备变形信息自动采集、变形值实时计算、变形趋势自动分析、变形预警反馈、变形数据历史查询及导出等核心功能,系统平台界面见图3。



图3 隧道变形自动化监测系统界面

3 隧道变形自动化监测系统工程应用与验证

为检验隧道变形自动化监测系统工作的可靠性,在我国西部某隧道施工工区现场开展了系统应用与验证工作。试验选取V级围岩段落,试验段总长约150 m,共布设测试断面13个,试验中监测系统测试数据每10 min测取1次,累计获取测试断面变形数据12 223条,平均每个试验断面测试数据940条;

同时采用全站仪开展测试,用于比较分析2种方式的差异。典型断面测试对比结果见图4。

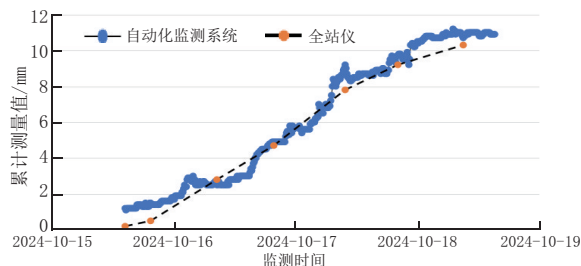


图4 典型断面拱顶沉降累计值测试结果对比图

由图4可知,系统监测值与全站仪监测值吻合度良好。经分析,两者间监测值最大差值为3.3 mm,最小差值为0.3 mm,差值均值为0.8 mm,差值方差为1.57,相关系数为0.92,表明了监测系统的可靠性和有效性。

4 结 语

(1)隧道变形是评价隧道围岩与支护结构安全性的关键性指标,采用安全、可靠、便捷、经济的隧道变形监测方法与技术是当代隧道建造对变形监测提出的本质要求。

(2)隧道变形自动化监测系统基于机器视觉-结构光原理,利用图像处理、人工智能等技术,可实现隧道整体变形高精度分析、异常变形智能诊断、变形预警自适应学习等核心功能,可为隧道变形的高精度时空连续监测以及安全管控提供有效的技术支持。

(3)通过隧道变形自动化监测系统现场应用与对比验证,系统变形监测精度与全站仪技术持平,在形监测的时空连续性方面则更具优势。

参考文献:

- [1] 关宝树.隧道工程施工要点集[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [2] JTG/T 3660—2020,公路隧道施工技术规范[S].
- [3] 姜兴阁.论变形监测技术的现状与发展趋势[J].矿山测量,2012(4):7-10.
- [4] 杨松林,刘维宁,师红云,等.全站仪自由设站隧道围岩变形非接触监测理论和方法的研究[J].土木工程学报,2006,39(4):100-104.
- [5] 张明栋,王水清.基于移动式三维激光扫描系统在隧道变形监测中的应用[J].经纬天地,2024(5):86-90.
- [6] 徐杨青,孙杰,吴伟进,等.基于激光雷达数据的隧道变形监测方法评估[J].地理空间信息,2019,17(2):1-5.
- [7] 陈丽佳.基于光纤光栅传感技术的电力隧道变形监测数据处理与精度分析[J].测绘地理信息,2020,45(5):48-50.
- [8] 董山川.隧道围岩变形自动监测系统在施工中的应用[J].工程质量,2025,43(2):72-75.