

自动化监测系统在长大隧道施工中的应用

马永峰, 连捷, 徐文星, 卫海龙, 屈朝辉

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要: 为了解决传统监控量测作业时间长、操作繁琐、误差大、监测间隔时间长、结果反馈时效性差等导致软岩大变形这类高风险隧道无法保障预警结果及时性的问题, 采用隧道自动化监控量测技术开展围岩变形数据的实时采集、分析、传输和自动报警, 实现隧道监控量测项目管理的自动化和信息化, 为施工管理人员进行施工或支护状态研判、保障隧道施工安全提供准确的数据支持。以某在建铁路隧道自动化监测技术的应用为例, 对监测数据进行自动化采集与分析, 并与全站仪得到的监测数据对比。结果表明, 自动化监测系统可以及时准确监测隧道围岩结构变化情况, 测量精度达到毫米级, 满足设计规范要求, 且与全站仪测量法相比, 减少了人员投入, 降低了监控量测的成本, 提高了经济效益。

关键词: 自动化监测; 长大隧道; 监测实施; TCMS

0 引言

为确保隧道施工和运营安全, 需高效、准确地对围岩变化情况及支护结构的工作状态进行量测、分析, 及时获取围岩支护结构的受力、结构变形等状态信息, 及时发现险情和事故隐患, 分析结构变化趋势, 调整优化支护设计, 以指导安全施工、科学施工和智能维护^[1]。隧道围岩施工与监测既关系到施工人员的生命安全, 也关系到施工与运营的高效管理, 一直是隧道设计、建设、监理、维护等各方关注的重中之重, 也是国家交通强国战略中智慧建造、安全建造、绿色建造的重点内容。国内外现有的监测技术方法已经在隧道的安全施工和运营发挥了重要的作用, 但仍存在用时长、不能实时监测、监测范围小、作业风险高、劳动强度大、人为因素影响多、数据分析价值缺失等痛点, 难以及时发现变形并发布预警, 缺少深度数据的价值分析。

监测技术的飞速发展, 正推动隧道监控量测向自动化观测、数据智能化管理、报警信息实时传送方向演进。在长大山岭隧道施工过程中, 自动化监测技术是针对隧道建设过程中全站仪监测方式存在诸多痛点, 而研制的隧道围岩变形的全自动、实时监测系统, 在仰拱和下台阶开挖等高风险工序中, 通过获取初期支护的累计位移和较短时间内的位移速率等数据判断初期支护的状态, 即时调整施工的工法和参数, 将初期支护结构的变形控制在安全施工允许的范围内, 从而降低施

工风险。

1 自动化监测系统的组成和变形计算原理

1.1 系统组成

自动化监测系统(TCMS)由测量主站、测量从站(测量从站和测量主站功能相同, 可以起到补充数据的作用)、测量终端、参考终端、测量服务器和软件平台组成。在仰拱填充施工完成区域安装测量主站, 在掌子面和初支区安装测量终端, 并在二衬稳定区域安装参考终端, 作为测量基准。系统组成如图1所示。通过主站对多监测断面的观测分析, 结合参照坐标, 达到对围岩形变实时监测的目的, 精度达到 ± 1.0 mm以内, 符合Q/CR 9218—2024《铁路隧道监控量测技术规程》中4.6.1测试精度0.5~1 mm的要求。对于掌子面或被台车遮挡区域, 安装级联测量从站, 可有偿或无线级联。

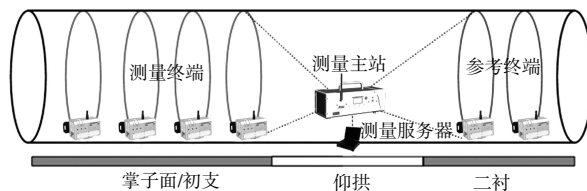


图1 隧道自动化监测系统组成示意图

1.2 变形计算原理

测量断面的终端可以发射覆盖隧道全断面的红色光, 识别算法定位结构光区域及其边缘。首先通过自适应阈值处理方式定位结构光区域, 利用深度学习分割网络识别区域内线结构光边缘,

分割网络优选语义分割模型。线结构光的光线在图像中有一定宽度，需提取线结构光曲线中心线代表结构光每个坐标点的位置，采用重心法进行光线中心提取，在预设的结构光区域内使用 OSTU 法^[2]计算阈值 T ，然后将阈值与结构光每个像素点灰度值进行比较，寻找大于阈值 T 的像素及坐标，进行加权平均得到光线中心坐标^[2]：

$$V = \frac{\sum_{i=0}^M f_i \cdot v_i}{\sum_{i=0}^M f_i}$$

式中： V 为光线中心坐标； i 为结构光点编号； f_i 为大于阈值 T 的结构光点像素的灰度值； v_i 为所有大于阈值 T 的结构光点的像素坐标； M 为大于阈值 T 的像素个数。

得到结构光心位置后即可进行前后比对，因被监测断面常位于结构不稳定区域，监测终端本身存在位置变动的可能，为消除监测终端自身位移的影响，系统设计具备圆形靶点光源的终端，通过计算圆形靶点中心水平和竖直方向位移，获取终端自身位移量，并在计算隧道截面变形时予以补偿。隧道数据处理单元监测隧道结构状态，判断是否发生隧道单截面沉降、收敛，多截面整体沉降等病害。

2 工程应用

2.1 工程概况

西北某隧道位于青海省黄南藏族自治州同仁县和尖扎县境内，隧道进口端位于同仁县保安镇古浪堤村边，隆务河左岸，出口位于尖扎县当顺乡境内，起讫里程 DK440+570—DK454+045，正线长度 13 492.62 m，为单洞双线隧道。隧道进口高程 2 114.164 7 m，隧道出口高程 2 052.872 6 m。隧道内设人字坡，进口段位于竖曲线上，竖曲线最低点位于 DK440+670 处。进口左线 3 325.050 1 m 位于半径为 4 000 m 的右偏曲线上，出口左线 1 690.988 4 m 位于半径为 9 000 m 的右偏曲线上，其余均位于直线上。

在复杂地质隧道中，由于全站仪监测频率低下难以满足围岩动态变化监测需求，为隧道施工增加安全风险。TCMS 是为克服新建隧道中全站仪监测频率不足、间隔时间长、数据连续性差、监测点被破坏概率大等因素而研制的。在仰拱和下台阶开挖等高风险工序中，通过获取初期支护的累计位移和较短时间内的位移速率等数据判断初期支护的状态，及时调整施工的工法和参数，

将初期支护结构的变形始终控制在安全范围内，降低施工风险。

2.2 点位布设

系统自 2023 年 8 月 24 日开始部署于隧道出口，共安装 1 台主站、10 台终端、1 台测量服务器。截至 2023 年 10 月 24 日，共测量数据 19 954 条。共监测 17 个断面：IV 级围岩占 15 个断面，V 级围岩 2 个断面。

3 隧道自动化监测应用

3.1 监测目的

在铁路隧道施工时，必须严格遵循《铁路隧道监控量测技术规程》以及设计文件要求。监控量测涵盖必测项目与选测项目，是保障隧道施工安全的重要防线。每次测量完成后，将相关数据及时上传至铁路管理平台，便于统一管理与分析。铁路隧道施工中，监控量测应达到以下目的：为二次衬砌施工提供合理的施作时间；验证施工过程中设计参数的合理性；为掌子面作业人员的安全保障提供数据支持；为设计优化及设计变更提供数据支持；结合地质情况和现场施工工况分析变形规律；分析各隧道掌子面的安全状态；对安全管理基准(变形速率和累计变化量)进行分析评估，并对预留变形量提出调整建议，分析各类预警采取的主要工程措施及其控制变形的效果^[3]。

3.2 监控量测控制指标

根据监控量测规范及设计要求，本工程隧道监控量测控制指标如表 1 所示。

表 1 位移管理等级表

围岩级别	mm		
	正常(绿色)	预警二级(黄色)	预警一级(红色)
III	<40	40~80	>80
IV	<50	50~100	>100
V、VI	<75	75~150	>150

注：不包括高地应力软岩和膨胀岩隧道。

3.3 监测周期及频率

周边位移和拱顶下沉的量测频率主要根据规范、位移速度和量测断面距开挖面距离确定，按照监控量测距开挖面的距离确定的监控量测频率为：距开挖面(0~1) B (B 为开挖宽度)，量测的频率为 2 次/d；距开挖面(1~2) B ，量测的频率为 1 次/d；距开挖面(2~5) B ，量测的频率为 2~3 d/次；距开挖面 $>5B$ ，量测的频率为 7 d/次。按位移速度确定的监控量测频率为： >5 mm/d 时量测的频率为 2 次/d；1~5 mm/d 时量测的频率为 1 次/d；0.2~

1 mm/d 时量测的频率为 2~3 d/次, <0.2 mm/d 时量测的频率为 7 d/次^[4]。

3.4 数据统计

系统运行期间,测量监测断面的拱顶变形量、周边收敛 SL01—SL02(上台阶左侧为 SL01,右侧为 SL02)和周边收敛 SL03—SL04(下台阶左侧

为 SL03,右侧为 SL04),测量频次为 20 min/次,24 h 连续观测单断面数据量最多为 900 条。2023 年 8 月 24 日—10 月 17 日,共测量数据 28 464 条,其中每个断面测量数据平均约 1 700 条,单断面连续观测时长平均为 5~7 d。测量数据统计如表 2 所示。

表 2 DK453+635—DK453+595 测量情况汇总表

监测点里程	测量周期	周期内测量次数/次	拱顶累计沉降/mm	周边收敛 SL01—SL02 累计值/mm	周边收敛 SL03—SL04 累计值/mm
DK453+635	9月15日—9月22日	837	3.4	3.1	0.8
DK453+625	9月22日—10月17日	2 256	4.7	3.9	1.9
DK453+615	9月22日—9月28日、 9月30日—10月17日	2 367	6.4	1.3	5.8
DK453+605	9月26日—10月17日	1 809	3.4	0.9	-0.6
DK453+595	9月26日—10月17日	1 814	11.1	5.9	9.3

注:拱顶正值代表下沉,负值代表上升;周边收敛 SL01—SL02、SL03—SL04:正值代表净空值减小,负值代表净空值增大。

DK453+595—DK453+635 测量情况:TCMS 测量的累计沉降、沉降速率均小于报警阈值,经与全站仪比监测数据合格。

3.5 数据分析

在全站仪测量日报中提取出与 TCMS 监测点位相同的拱顶、SL01—SL02 的多次测量值,对其单次变形量和累计变形量进行统计分析。以下以断面 DK453+635 为例,分析 2 种测量方式数据趋势及相关性。2023 年 9 月 15 日—9 月 22 日期间,TCMS 测量 837 次,全站仪测量 8 次。TCMS 和全

站仪重合时间为 8 d,TCMS 测量次数为全站仪测量次数的 104 倍。

1) 拱顶沉降

TCMS 和全站仪相同时间内的监测数据对比如图 2 所示。从图 2 中可以看出,TCMS 监测值与全站仪监测值趋势相似。在相同的测量时间内,TCMS 监测值与全站仪监测值最大差值为 1.8 mm,最小差值为 0.4 mm,差值均值为 0.5 mm。差值均值符合《铁路隧道监控量测技术规程》中 4.6.1 测试精度 0.5~1 mm 的要求。

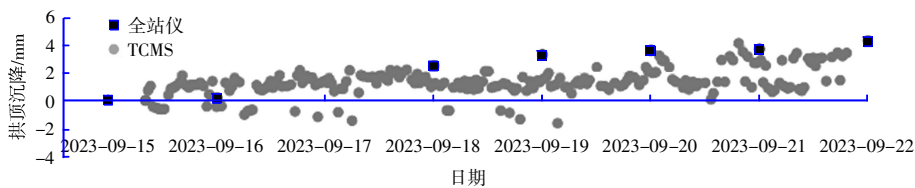


图 2 拱顶沉降的 TCMS 和全站仪监测数据对比

2) 周边收敛(SL01—SL02)

TCMS 和全站仪相同时间内的监测数据对比如图 3 所示。从图 3 中可以看出,TCMS 监测值

与全站仪监测值趋势相似。在相同的测量时间内,TCMS 监测值与全站仪监测值最大差值为 2.2 mm,最小差值为 0.1 mm,差值均值为 0.5 mm。

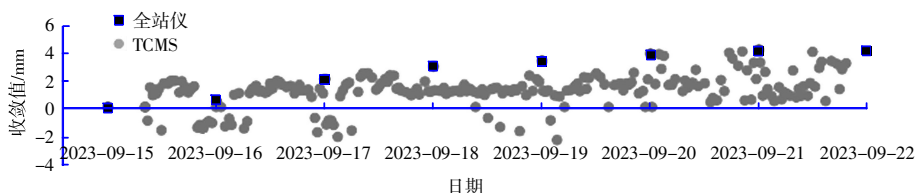


图 3 SL01—SL02 周边收敛的 TCMS 和全站仪监测数据对比

差值均值符合《铁路隧道监控量测技术规程》中 4.6.1 测试精度 0.5~1 mm 的要求。

4 应用成果

通过提取 2023 年 8 月 24 日—10 月 7 日全站仪监测日报中与 TCMS 监测点位相同的拱顶、SL01—SL02 的多次测量值,对单次变形量、累计变形量和数据趋势进行统计分析。分析结果显示,TCMS 和全站仪相同时间内的拱顶沉降、周边收敛(SL01—SL02)测量值曲线和预测值曲线趋势相符合。量测精度及量测频率满足铁路隧道监控量测技术规程要求。在该时间段内,TCMS 自动化监控量测系统量测次数为 38 次,全站仪监控量测次数为 8 次,在此期间补全了全站仪数据。

5 结语

本文分析了传统监控技术的局限性,引入自动化监测技术应用于隧道监控量测,该技术具备实时智能监测、侧壁安装无需登高安装反光棱镜、对施工影响小等优点。自动化监测系统在西北某

隧道进行了应用,将系统的测量数据与全站仪测量的数据对比分析表明,二者趋势吻合,自动化系统测量频次更高、且需要的测量人员更少,为隧道工程效果分析提供了丰富的数据,提高了经济效益,实时监测和报警可有效减少施工风险。下一步进行系统优化和智能化升级,以适应瓦斯、高地温隧道等更复杂的环境。随着科技发展,自动化监测系统将在隧道施工中更加重要,推动监控技术向更高智能化和精准化方向发展。

参考文献:

- [1] 刘青. 福祿岭隧道监控量测与分析研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
- [2] 夏宝前,王列伟,石峥映,等. 隧道围岩结构变形自动监测系统开发与应用[J]. 铁路技术创新,2022(3):48-53.
- [3] 王文坡. 成兰铁路某隧道围岩变形时空效应及支护参数优化——以 D5K219+080—D5K219+140 段为例[D]. 成都:成都理工大学,2018.
- [4] 张爽,刘庆新,胡力耀,等. 广巴高速某隧道不同岩性围岩变形特征分析[J]. 现代隧道技术,2011(1):17-21.