

电水平尺自动化监测技术在地铁结构变形中的应用

程胜一, 刘 飞

[上海勘察设计研究院(集团)股份有限公司, 上海市 200438]

摘 要: 冻结法下穿施工可能引起既有地铁结构产生形变, 进而影响地铁的运行安全。对此, 在分析电水平尺差异沉降测量原理的基础上, 构建了基于电水平尺的地铁结构沉降自动化监测系统, 并将其应用于某冻结法下穿既有地铁车站的工程实践中。监测结果表明, 电水平尺输出角度值与温度之间具有显著的线性相关性, 经过温度修正后, 监测精度得到显著提升。无论是单个电水平尺, 还是多点联测的尺链, 其沉降监测结果均与常规水准测量趋势一致, 且整体精度优于人工水准测量。通过人工水准附合差对电水平尺监测数据进行修正, 实现了对施工期间地铁结构沉降变形情况的准确掌握, 为类似的工程提供了有效的技术支撑。

关键词: 电水平尺; 自动化监测; 冻结法下穿; 温度修正; 地铁结构变形

中图分类号: P258

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)10-0320-05

Application of Automated Electro-Level Beam Monitoring Technology in Subway Structural Deformation

CHENG Shengyi, LIU Fei

[SGIDI Engineering Consulting (Group) Co., Ltd., ShangHai 200438, China]

Abstract: Close-range construction using the artificial ground freezing (AGF) method beneath existing subway structures may induce deformation, posing potential threats to operational safety. In response, this study analyzes the principle of differential settlement measurement using electro-level beam sensors and develops an automated monitoring system for subway structural settlement based on this technology. The system was applied in a practical engineering project involving AGF-based underpass construction beneath an operational subway station. Monitoring results revealed a significant linear correlation between electro-level output angle and temperature. After temperature correction, measurement accuracy was substantially improved. Whether using a single electro-level or a multi-point chain configuration, the monitoring results were consistent with conventional leveling trends and demonstrated higher precision than manual leveling. By applying closure correction from manual leveling, the electro-level data were further refined, enabling accurate tracking of structural settlement during construction. The system offers effective technical support for similar engineering applications.

Keywords: electro-level beam; automated monitoring; underpass construction with ground freezing; temperature correction; subway structure deformation

0 引 言

作为城市公共交通的重要组成部分, 地铁线路里程随着城市化进程的推进不断增加。截至2024年底, 我国内地共有 58 个城市开通运营城市轨道交通, 线路总计 362 条, 线路长度累计 12 168.77 km, 其中, 地铁线路长度为 9 281.37 km, 约占 76.27%^[1]。随

着地铁线路的不断增加, 新建隧道下穿既有地铁的施工案例也日益增多^[2-4]。施工过程中土体的扰动不可避免地会导致既有地铁结构产生变形, 对结构和运营安全产生不良影响^[5-7]。为了确保既有地铁隧道的安全运营, 在下穿施工过程中必须对地铁结构的变形情况, 尤其是沉降情况进行实时监测^[8-9]。

地铁隧道变形监测方法主要包括人工监测和自动化监测^[10]。传统的人工监测存在实时性差、人力成本高等不足。相较之下, 以智能全站仪、静力水准、激光扫描等为代表的自动化监测方法更具优势^[11]。如柏文锋^[12]利用智能全站仪展开地铁隧道自动化位移监测研究, 并对监测精度进行分析和验

收稿日期: 2025-03-31

作者简介: 程胜一(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事城市重大基础设施全生命周期测绘地信息技术研究与应用工作。

通信作者: 刘飞(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事自动化监测研究应用和低空遥感监测应用工作。电子信箱: 13916697003@163.com

证。刘新宇等^[13]利用静力水准自动测量技术,通过在地铁隧道布设静力水准仪,远程采集、实时获取监测点沉降数据,为施工期隧道的结构安全提供保障。成枢等^[14]利用移动式三维激光扫描技术,对运营地铁区间进行结构变形监测,对比结果显示,其精度满足工程要求。电水平尺通过测量电解质倾斜传感器的角度变化来计算沉降量,具有精度高、稳定性好、不易受外界环境影响等特点^[15-16],且可以实现连续自动监测,能够满足地铁隧道实时监测的需求。此外,相较于测量机器人、静力水准,其还具有精度高、安装灵活、受列车运营等振动影响复位快等优势,尤其适用于在下穿工程中直接对地铁道床进行高频实时监测。因此,本文在分析电水平尺工作原理的基础上,构建了地铁隧道电水平尺沉降自动化监测系统,并结合实际工程案例验证其应用效果,为类似工程提供参考和借鉴。

1 电水平尺的自动化沉降监测方法

1.1 电水平尺沉降监测原理

电水平尺最初仅作为机械量具,用来测量物体的倾斜度,后由土木工程师引入建筑工程领域,用于检测建筑结构的不均匀沉降情况。其最重要的核心部件为电解质倾斜传感器,通过电阻桥测量电解质液体倾角的变化量来输出传感器的倾斜度,电阻桥回路输出的电压值与传感器的倾斜度成比例。其角度测量灵敏度可达1",精度达3",且有着良好的稳定性,不易受到外界环境变化的影响。倾斜传感器通过搭配刚性金属梁,即构成了一支电水平尺,尺长一般为1~4 m。当用于地铁隧道沉降监测时,可将单支电水平尺用螺栓水平安装于地铁道床上,通过倾角传感器的角度变化来计算水平梁两端的差异沉降,从而获取道床的沉降量。也可以通过连接扣件,将多支电水平尺以首尾串联的形式沿地铁走向构成一个尺链,此时可对该范围内的沉降量进行监测。

将电水平尺安装在地铁道床结构上,多支电水平尺可构成一个尺链,道床结构的沉降会改变金属梁的倾角。如图1所示,利用电水平尺进行地铁结构沉降监测时,计算单支电水平尺差异沉降公式为

$$\Delta S_i = L \times (\sin \alpha_i - \sin \alpha_o) \tag{1}$$

式中: ΔS_i 为电水平尺两端点的差异沉降值,mm; L 为电水平尺的长度,mm; α_i 为第*i*次倾角; α_o 为初始倾角。

当构成一个尺链时,多支电水平尺的差异沉降量计算公式为

$$\Delta S_n = S_o + \sum_{i=1}^n [L_i \times (\sin \alpha_{i_t} - \sin \alpha_{i_o})] \tag{2}$$

式中: ΔS_n 为尺链中第*n*支电水平尺尾端点所在处的沉降值,mm; S_o 为起算水准测量修正值,mm; L_i 为尺链中第*i*支电水平尺的长度,mm; α_{i_t} 为尺链中第*i*支电水平尺第*t*次倾角; α_{i_o} 为尺链中第*i*支电水平尺的初始倾角。

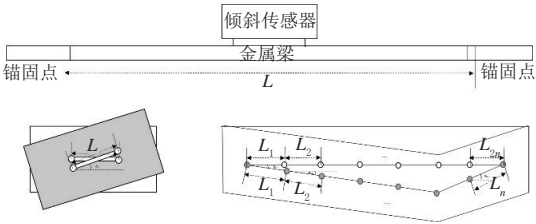


图1 电水平尺沉降监测工作原理示意图

1.2 电水平尺自动化沉降监测系统

为实现地铁道床沉降的自动化监测,本文提出基于电水平尺的监测系统。选用美国DGSi公司提供的电子水平倾角传感器,其具有量程小、精度高的特点,最小差异沉降探测灵敏度可达0.005 mm/m,具体性能参数如表1所示。用于安装倾角传感器的金属梁长度可选1 m或2 m,中间有传感器室,用于安置传感器,两端有支架,用于固定和多尺串联。在数据采集方面,首先采用CR1000数据记录器读取电子水平尺的数据,然后在数据采集终端通过串口通信协议,与CR1000数据记录器进行通信,实现数据自动采集。在数据传输方面,数据采集终端通过有线或无线的方式,将数据上传到路由器,再由路由器通过移动通信网络上传到服务器。在数据应用与管理方面,开发了支持电水平尺数据采集、数据处理和成果展示等功能的、B/S架构的监测平台,方便计算机端和移动端的访问。基于电水平尺的自动化沉降监测系统架构如图2所示。

表1 系统电子水平倾角传感器参数表

参数	数值
量程	±40'
分辨率	1"
重复性	±3"
工作温度	-20~+50℃
尺寸	125 mm×80 mm×59 mm

2 工程案例

某地铁线路工程设计下穿既有地铁线路车站,与既有线路形成T形通道换乘。区间与车站底板最小竖向净距约为2 m,由于既有线路车站围护结构采

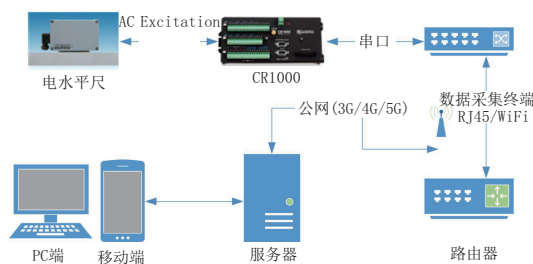


图2 电水平尺自动化沉降监测系统架构示意图

用800 mm厚的地下连续墙,盾构难以实现穿越。因此,对既有车站底板下的土体进行冻结加固,采用矿山暗挖,形成1次支护后凿除地下连续墙,盾构从支护体内穿越。整个穿越施工持续约18个月,为了保障施工期间既有地铁线路的安全,团队搭建了基于电水平尺的自动化沉降监测系统,对地铁结构进行连续监测。首先进行现场踏勘并对安装线进行放样,然后根据放样线安装金属梁、传感器及必要的连接线缆,最后初始化完成系统运行测试。项目共布设了30支电水平尺,监测断面依次命名为SD01~SD30。

2.1 角度数据与温度存在相关性

电水平尺的倾斜传感器输出为电压值。通过传感器各自率定表(标定温度 t_0)的多项式系数,可以计算得到倾斜传感器的角度值,进而计算得到尺端的差异沉降值:

$$\alpha' = C_5 \cdot X^5 + C_4 \cdot X^4 + C_3 \cdot X^3 + C_2 \cdot X^2 + C_1 \cdot X + C_0 \quad (3)$$

式中: α' 为计算得到的角度值,"; X 为传感器电压读数; $C_0 \sim C_5$ 为传感器在标定温度 t_0 下的拟合系数。

本项目在实施过程中发现,计算后的差异沉降(高差)与温度有显著的相关性。以SD01为例,高差影响最大达0.8 mm左右(见图3)。

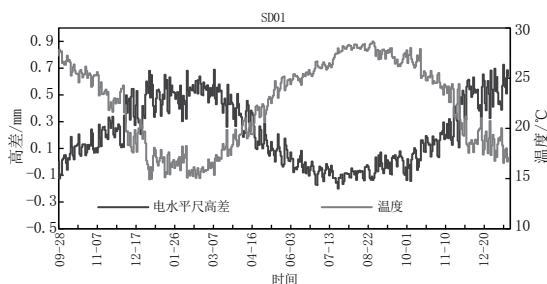


图3 电水平尺高差与温度的相关性

可见,当电水平尺应用于沉降监测数据采集时,外界环境温度 t 与传感器标定温度 t_0 不同,会对传感器输出的角度值产生影响,进而影响差异沉降。影响量级不容忽视,因此,需要建立温度修正模型,对各传感器输出的角度值进行温度修正。

2.2 角度数据温度修正方法

电水平尺的倾斜传感器输出角度值会受到温度

变化的影响,温度对其读数的影响不可忽视,需要对直接输出的角度值进行修正。由于每支传感器率定表中的多项式系数差异较大,且各传感器元器件对温度的敏感性不同,无法建立统一的温度修正模型,需要根据实测温度数据建立各电水平尺的温度修正模型。在自动化沉降监测系统搭建完成后、穿越施工开始前约3个月时间里,以人工水准测量该期间道床结构数据,如无明显变形趋势,则可认为该期间既有线路的道床结构处于稳定状态、无变形。利用此期间各传感器采集的数据及温度信息,拟合电水平尺的温度修正系数,每根电水平尺的数据采样间隔为10 min,采集共计12 240条数据。

首先分析电水平尺数据与温度之间的相关性。第一步,对角度和温度之间的正态分布进行检验,显示基本满足正态分布假设;第二步,计算30支电水平尺的角度值与温度变化值之间的皮尔逊系数,结果显示,大多数电水平尺的角度值与温度值的相关系数大于0.8,表明角度值与温度间呈现极强的线性相关性。

然后根据上述结论,对每支电水平尺的角度值与温差值进行线性回归分析,得到各电水平尺角度值的线性回归方程。

最后对残差和残差的置信区间进行分析,剔除每根电水平尺的异常数据后重新进行线性回归分析。最终建立每支电水平尺的线性温度修正模型:

$$\alpha = \alpha' - K \times (t - t_0) \quad (4)$$

式中: α 为经温度修正后的角度值,"; α' 为根据公式(3)计算得到的角度值; K 为温度影响系数,各传感器的温度影响系数一般不相同,通过实际测试拟合得到。

以SD01、SD02为例,电水平尺输出角度—温差线性回归拟合结果如图4所示。修正前、后的高差对比结果如图5所示。可以看出,单台电水平尺的高差呈现与温度的显著相关性,温度修正后,其与温度的相关性大幅减弱,更能反映真实变形情况。

以电水平尺重复性精度 $\pm 3''$,对30支电水平尺温度修正后的标准差分布进行统计,并与未进行温度修正的结果进行对比(见表2)。从表中可以看出,相较于未修正数据,经过温度修正后的电水平尺精度有了明显提升,约95%的电水平尺标准差精度在 $6''$ 以内,从侧面验证了该电水平尺重复性精度 $\pm 3''$ 是可靠的。

2.3 沉降监测数据对比

为验证电水平尺沉降监测的可靠性,定期采用人工水准测量对电水平尺变形数据进行复核测量。

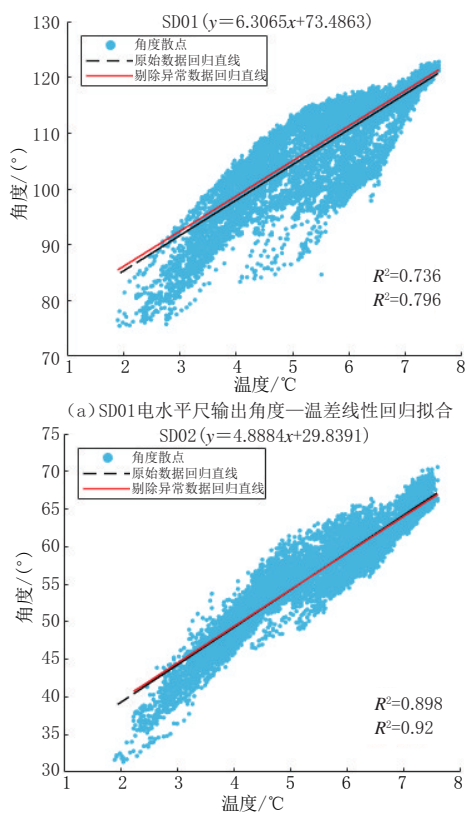


图4 电水平尺输出角度—温差线性回归拟合

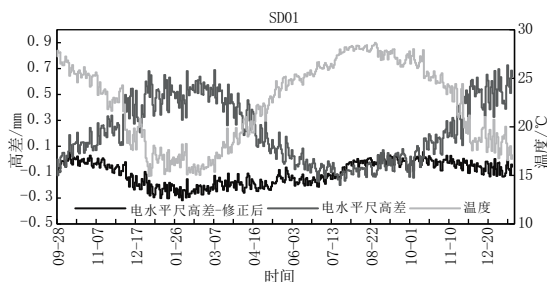


图5 电水平尺高差修正前、后对比

表2 温度修正前、后电水平尺读数标准差分布

标准差范围/(")	0~3	3~6	>6
温度修正前/支	15	11	4
温度修正后/支	21	7	2

在电水平尺附近的道床结构上拉1条大致与电水平尺平行的水平线,在每个螺栓孔对应水平线的位置埋设1个监测点,监测点选用统一规格的不锈钢标志,监测点顶部圆帽略高于道床面,共计布设31个人工对比监测点。根据施工历程,选取整个施工期间的电水平尺和人工测量数据进行对比分析。

30支电水平尺首尾串联构成尺链,对穿越区域的沉降变形情况进行监测。统计这期间定期人工水准附和差,以及尺链温度修正前、后附和差和环境温度数据,绘制附和差变化历时曲线(见图6)。从图中可以看出,尺链附和差在温度修正前呈现出与温度

的显著相关性,在温度修正后,其与温度的相关性大幅减弱,且将温度修正后的附和差与人工附和差进行对比,两者的趋势和变化量更加吻合。

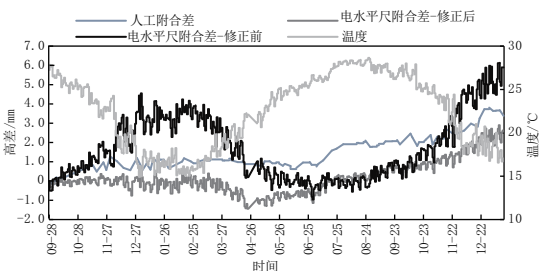


图6 尺链附和差与人工水准测量附和差变化历时图

2.4 工程应用效果

在一般的电水平尺沉降监测项目中,数据处理时,通常假定首尾两端固定不变,将尺链附和差的变化量以仪器台数(测站数)为权进行平差计算。然而,根据本项目中的人工水准复核数据,尺链的起、终点高程是变化的。忽视尺链起、终点的差异变形可能导致监测数据的部分失真,诱发“假报警”“不报警”等隐患。因此,将人工水准测量定期联测附和差纳入电水平尺平差模型进行处理,更能反映真实变形情况。本项目通过人工水准测量定期联测尺链起、终点,依据联测附和差修正电水平尺各测点的沉降变形数据。以SD14、SD17特征点为例,将人工水准测量定期联测附和差修正后的电水平尺累计变形数据,与对应的人工复核点累计变形数据进行比对。由图7可得,同断面电水平尺累计变形与人工累计变形在趋势和变形量上较为吻合,且电水平尺变形曲线更加平滑,间接验证了其监测精度更高。

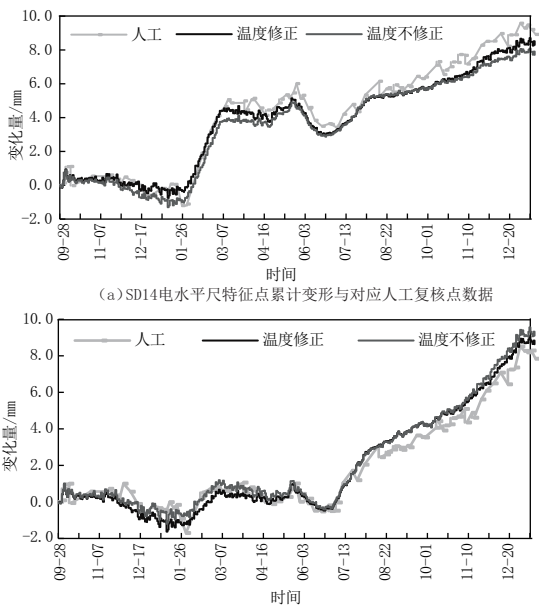


图7 电水平尺特征点累计变形与对应人工复核点数据历时图

本项目实施过程中,电水平尺数据处理方式:首先对单台电水平尺数据进行温度修正,然后采用人工水准测量定期联测尺链起、终点数据,以修正各电水平尺沉降点变形成果。施工期间的电水平尺特征点累计变形历时如图8所示。结果显示,电水平尺在整个监测历程中表现为先下沉后上抬,在此过程中最大下沉量达到约3 mm,最大上抬量达到约11 mm。受前期基坑施工等的影响,电水平尺正对施工及延伸范围内的测点均表现出轻微的下沉变形,在钻孔施工期间,延伸范围内的测点基本保持稳定,正对施工范围内的测点保持下沉趋势,至钻孔施工完成时,变形量达到-4 mm。在下行线开始加固后,监测范围内的测点表现出不同程度的上抬变形,其中,位于下行线加固中心区域的测点,其上抬变形最为明显。在下行线开挖施工前期,受到开挖泄压的影响,正对施工范围内的测点表现出下沉变形,随着上行线同步施工加固,正对范围内的测点又呈现出上抬变形,在后续上行线开挖施工期间,上抬变形速率有所减缓;在开挖施工全部结束后,正对范围内的测点保持上抬,直至持续性加固施工结束。

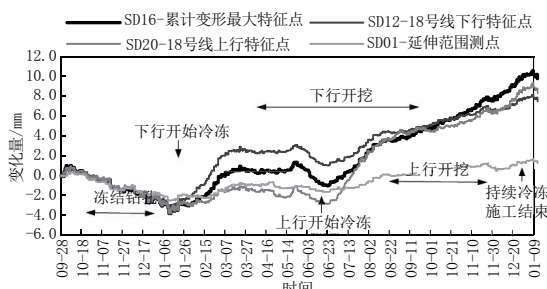


图8 电水平尺特征点累计变形历时图

3 结 语

电水平尺具有精度高、实时性强、安装灵活、受环境振动影响复位快等优势,在地铁结构监测尤其是道床沉降监测中的应用前景广阔。本文在电水平尺差异沉降测量原理的基础上,构建了自动化沉降监测系统,并将其应用于实际的地铁结构沉降监测项目中。主要得出以下结论。

一是电水平尺按各自率定表计算的角度值与温度依然存在强线性相关性,温度修正可明显提升电

水平尺的监测精度,但需针对各电水平尺单独拟合温度影响系数。温度修正后的数据重复性精度可以达到标称的 $\pm 3''$ 。

二是无论是单电水平尺还是尺链,其监测结果整体上与人工水准测量结果趋势一致,但其精度明显高于人工水准。

三是尺链起、终点的差异变形不可忽视,应将人工水准测量联测附合差纳入电水平尺平差模型进行处理,这样更能反映真实变形。

参考文献:

- [1] 侯秀芳,冯晨,燕汉民,等.2024年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J].都市快轨交通,2025,38(1):13-19.
- [2] 程龙,谭智鹏,皇甫深洲,等.黄土区地铁暗挖隧道密贴下穿既有车站变形控制措施研究[J].都市快轨交通,2025,38(1):120-128.
- [3] 姜腾,丁建军,麦海颖.盾构近距离下穿运营地铁风险控制技术研究:以广州轨道交通7号线西延顺德段工程为例[J].现代隧道技术,2024,61(增刊1):941-950.
- [4] 于全胜,刘颖,马小龙,等.软土地区盾构小角度下穿箱形隧道的变形与控制[J].铁道建筑,2024,64(8):100-105.
- [5] 张文龙,刘华,胡亚洲,等.淤泥填海地层盾构近距穿越既有隧道变形控制[J].铁道工程学报,2024,41(9):87-91,98.
- [6] 郭汝涛,赖登甲,李升连,等.考虑结构面蠕变特征的隧道围岩长期变形研究[J].安全与环境工程,2024,31(4):99-108.
- [7] 王彪,朱德勤,张硕,等.隧道变形自动化监控数据校验与应用分析[J].铁道建筑,2024,64(5):119-122.
- [8] 李秉强.黄土层隧道浅埋段地表沉降监测分析与施工关键技术研究[J].公路,2024,69(4):422-427.
- [9] 邓有为,李刚,辛怡,等.隧道围岩沉降自适应实时识别及测量[J].电子测量与仪器学报,2023,37(2):236-243.
- [10] 肖峰.隧道断面变形在线监测系统研制[D].成都:成都理工大学,2023.
- [11] 黑君森,王力,李昂.地铁变形监测研究现状综述[J].测绘通报,2024(2):39-44;79.
- [12] 柏文锋.基于智能全站仪的地铁隧道自动化监测精度分析及验证[J].测绘通报,2018(11):107-110.
- [13] 刘新宇,王勇,唐超.静力水准自动化测量技术应用于地铁隧道结构监测[J].测绘通报,2021(8):69-73.
- [14] 成枢,查天宇,黄小斌,等.移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用[J].测绘地理信息,2021,46(5):13-16.
- [15] 张超.电水平尺沉降自动化监测系统在隧道施工中的应用[J].建筑技术开发,2021,48(8):136-137.
- [16] 李伟强.目前基坑监测中常用自动化测量方法的比较分析[J].城市勘测,2018(2):152-156.