

# 静力水准仪在运营期地铁隧道变形监测中的应用及分析

孙泽信<sup>1</sup> 张书丰<sup>2</sup> 刘 宁<sup>1</sup>

(1 江苏省交通规划设计院股份有限公司,南京 211100;2 南京地铁集团有限公司,南京 210005)

**摘 要** 文章论述了静力水准仪基本工作原理及其在运营期地铁隧道内变形监测精度的影响因素;结合某项目基坑施工期间运营地铁区间静力水准仪系统监测实例,对列车停运和正常运行情况下静力水准仪的监测精度进行了对比,分析了列车运行对监测精度的影响。同时,采用与人工监测数据相对比的方法对静力水准仪系统的可靠性进行了验证。结果表明,静力水准仪自动化监测系统能够满足运营期地铁隧道实时变形监测精度要求,具有较高的应用价值。

**关键词** 静力水准仪 运营地铁区间 监测精度

**中图分类号**: U456.3 **文献标识码**: A

随着城市轨道交通的不断发展,运营期的地铁线路越来越多,在给人们生活带来便利的同时也大大促进了地铁沿线及周边的开发,但在地铁周边建设过程中,存在着诸多近、大、深基坑,在这些基坑施工过程中,势必会造成运营期地铁隧道变形,严重影响地铁的结构及运行安全。因此,如何实时监控地铁结构变形,信息化指导基坑施工对确保运营期地铁隧道安全很有必要<sup>[1]</sup>。受地铁运营时间限制,常规人工沉降监测已无法满足地铁结构变形对实时化、高效化的要求,而静力水准仪自动化沉降监测系统以实时化、自动化、高效化及高精度等特点具有较好应用前景<sup>[2]</sup>。

本文从静力水准仪基本原理出发,在对静力水准仪监测精度影响因素分析的基础上,结合某基坑段地铁运营期隧道变形监测实例进行了监测分析。

## 1 静力水准仪基本原理

静力水准仪采用连通管原理,用传感器测量每个测点内液面的相对变化,通过计算求得各点相对于基点的相对沉降量,并与基准点相比较即可求得测点的绝对沉降量,如图1所示<sup>[3-5]</sup>。

从图1可以看出,任何一个测点都可以看作与

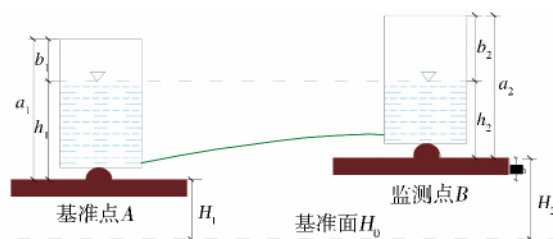


图1 静力水准仪测量原理示意

Fig.1 Principle of measurement with a hydrostatic level gauge

基准点直接相连,基准点A与测点B相对于基准面 $H_0$ 的高程分别为 $H_1, H_2$ ,由连通管原理可得所有容器内的液面相同,则:

$$H_1 + h_1 = H_2 + h_2 \quad (1)$$

$$a_1 = h_1 + b_1 \quad (2)$$

$$a_2 = h_2 + b_2 \quad (3)$$

式中: $a_1, a_2$ 在仪器安装后为固定值; $b_1, b_2$ 为历次测量值。

将式(2)、式(3)代入式(1),可得:

$$H_2 = H_1 + (a_1 - a_2) - (b_1 - b_2) \quad (4)$$

则监测点B点第*i*次沉降量为:

修改稿返回日期:2014-03-11

作者简介:孙泽信(1983-)男,硕士研究生,工程师,主要从事结构安全监测及精密工程测量研究,E-mail:271258150@qq.com.

$$\begin{aligned}\Delta H_{i2} &= H_{i2} - H_{02} \\ &= H_1 + (a_1 - a_2) - (b_{i1} - b_{i2}) - [H_1 + (a_1 - a_2) - (b_{01} - b_{02})] \\ &= (b_{01} - b_{02}) - (b_{i1} - b_{i2})\end{aligned}\quad (5)$$

据此, 只要用传感器测得任意时刻监测点容器内液面相对于该点顶面安装高程的距离  $b_{i1}, b_{i2}$ , 即可求得该时刻监测点  $B$  相对于基准点  $A$  的高程变化量, 亦即为监测点  $B$  点在该时刻的累计沉降量。

## 2 静力水准仪监测精度影响因素分析

根据静力水准仪相关参数可知, 静力水准仪在不受外界条件干扰情况下监测精度可达到 0.1 mm。但在实际监测过程中, 受列车运营影响, 会导致仪器内气压变化、仪器产生震动; 同时监测基准点布设在隧道内, 基准点也会产生震动和变形, 这些因素都会直接影响静力水准仪的监测精度<sup>[6,7]</sup>。因此, 在进行静力水准仪系统监测数据分析时有必要对相关影响进行分析, 并结合地铁运营时刻, 设定合理的监测频率, 从而有效降低地铁运营产生影响, 提高监测精度, 确保静力水准仪系统的可靠性。

## 3 实例分析

### 3.1 工程概况

某项目基坑总占地面积为 16 200 m<sup>2</sup>, 由主楼、商业裙房及地下室组成, 结构高度 195 m, 位于地铁某区间南侧, 其基坑围护结构外边线距地铁区间最近距离约为 11.4 m, 对应地铁线路长度约为 163 m, 基坑开挖深度最深约为 22 m, 比对应段隧道顶部低约为 13.5 m。

### 3.2 监测实施

考虑到该基坑施工过程中对地铁隧道结构变形影响, 沉降监测采用静力水准仪系统进行监测。基坑对应段每 10 m 布设一个监测点, 同时两端各外扩 40 m, 布设 2 个监测点, 区间上下行共计布设 44 个监测点。基准点布设在远离变形影响区域外附近的地铁车站。静力水准仪监测点布设如图 2 所示。

数据采集时, 4 台数据采集器串联组网。控制计算机与数据采集器采用无线移动 DTU 的 GPRS 通读方式。观测期间使用专用的采集软件进行数据的采集<sup>[8-10]</sup>。控制测试系统结构如图 3 所示, 静力水准仪参数指标如表 1 所示。

### 3.3 监测数据分析

为了准确评估列车运行对静力水准仪观测精度

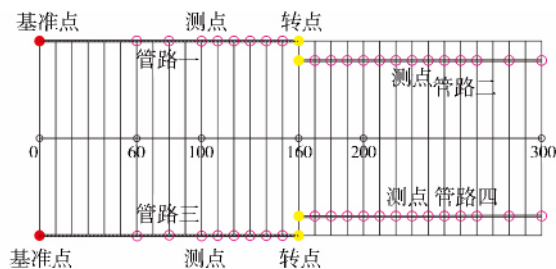


图 2 静力水准仪监测布点示意(单位:cm)

Fig.2 Layout of monitoring points for the hydrostatic level gauge

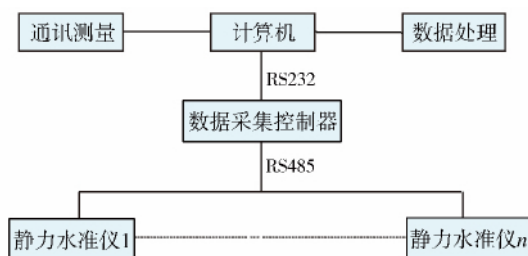


图 3 控制测试系统结构示意图

Fig.3 Structure of the control test system

表 1 静力水准仪参数

Table 1 Parameters of the hydrostatic level gauge

测量范围/mm	25
分辨率/(%) F·S	≤0.05
精度/mm	≤±0.1
环境温度/(℃)	-20~30
湿度环境(相对湿度)/(%)	0~100

的影响程度, 分别对列车停运及正常运行时间段内观测数据进行精度分析。观测频率为 9 min/次, 观测周期为一个工作日, 即 00:00:00~23:59:59。然后对观测数据进行统计, 分析列车正常运行及列车停运时静力水准仪的观测精度。

#### 3.3.1 列车停运期间

以列车停运时间段内观测数据的平均值作为真值, 分析各台静力水准仪观测数据的波动情况。列车停运时静力水准仪观测数据变化曲线如图 4 所示。

经计算, 列车停运时各静力水准仪观测值中误差统计如表 2 所示。

从图 4 可以看出, 列车停运时, 静力水准仪观测数据波动最大为 0.12 mm, 最小为 0.00 mm, 所有波动均集中在 -0.12~+0.10 mm 之间, 且大部分观测数据波动集中在 0.00 mm 处。从表 2 可以看出, 所统计

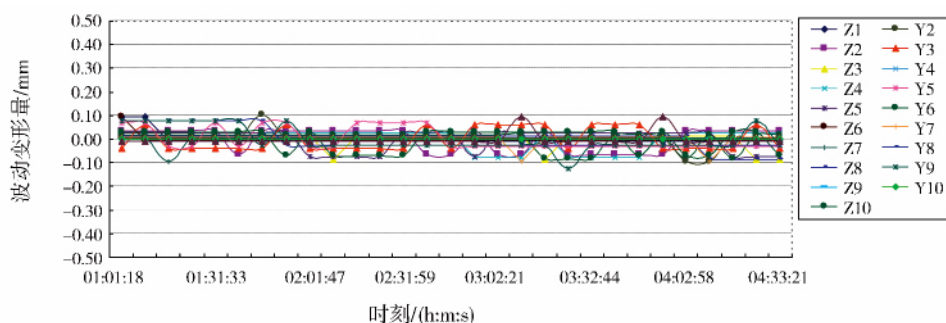


图4 列车停运时静力水准仪观测数据变化曲线

Fig.4 Curves of the data observed by hydrostatic level gauge during train shutdown

表2 列车停运时静力水准仪观测值中误差统计

Table 2 Statistics of the RMSE of data observed by the hydrostatic level gauge during the train shutdown

点名	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
中误差/mm	±0.03	±0.05	±0.04	±0.04	±0.05	±0.02	±0.02	±0.04	±0.01	±0.04
点名	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
中误差/mm	±0.03	±0.05	±0.01	±0.05	±0.05	±0.03	±0.04	±0.05	±0.01	±0.03

静力水准仪观测值中误差均小于 $\pm 0.05$  mm。由于仪器标定精度为 $\pm 0.10$  mm,因此其能够满足监测精度要求。

### 3.3.2 列车正常运行期间

以列车正常运行时间段内观测数据的平均值作为真值,分析各台静力水准仪观测数据的波动情况。列车正常运行时静力水准仪观测数据变化曲线如图5所示。

经计算,列车正常运行时各静力水准仪观测值中误差统计如表3所示。

从图5可以看出,列车正常运行时,静力水准仪观测数据大部分呈周期性波动,波动最大为1.38 mm,最小为0.00 mm,所有波动均集中在 $-0.50 \sim 0.50$  mm之间,且大部分观测数据波动集中在0.00 mm处;从表3中可以看出,所统计静力水准仪观测值中误差最大为 $\pm 0.47$  mm,最小为 $\pm 0.08$  mm,均小

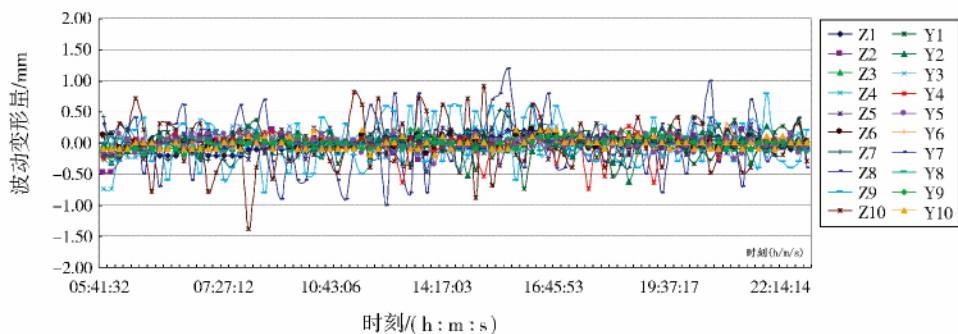


图5 列车运行时静力水准仪观测数据变化曲线

Fig.5 Curves of the data observed by the hydrostatic level gauge during train operation

表3 列车正常运行时静力水准仪观测值中误差统计

Table 3 Statistics of the RMSE of data observed by the hydrostatic level gauge during train operation

点名	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10
中误差/mm	±0.12	±0.11	±0.09	±0.16	±0.15	±0.08	±0.16	±0.47	±0.36	±0.42
点名	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10
中误差/mm	±0.21	±0.14	±0.17	±0.18	±0.10	±0.09	±0.11	±0.09	±0.08	±0.09

于 $\pm 0.50$  mm,高于仪器标定精度 $\pm 0.10$  mm,但能够满足监测 $\pm 1.00$  mm 精度要求。

### 3.3.3 静力水准仪系统与人工沉降监测数据对比分析

为了进一步验证静力水准仪系统观测的可靠性,采用人工沉降监测与静力水准仪系统相结合的手段进行监测。监测作业自2012年9月1日开始,至2013年3月31日结束。静力水准仪监测数据选用列车停运时观测数据,静力水准仪监测和人工监测数据及对比曲线如图6~图11所示。

以人工观测值作为真值,各监测点静力水准仪

观测中误差统计如表4所示。

从图6、图7可以看出,各监测点人工监测数据与静力水准仪监测数据随时间变化趋势相同,变化量基本一致;从图8可以看出各监测点人工监测成果与静力水准仪监测成果差异值最大为1.4 mm,最小为0.0 mm,且绝大部分差异值均在1.0 mm以内,表明静力水准仪监测相对于人工监测能够满足变形精度 $\pm 1.0$  mm 要求;从变化量较大的Z11,Z12和Z13三个监测点的人工监测与静力水准仪监测对比曲线(图9~图11)可以看出,3个监测点的人工监测

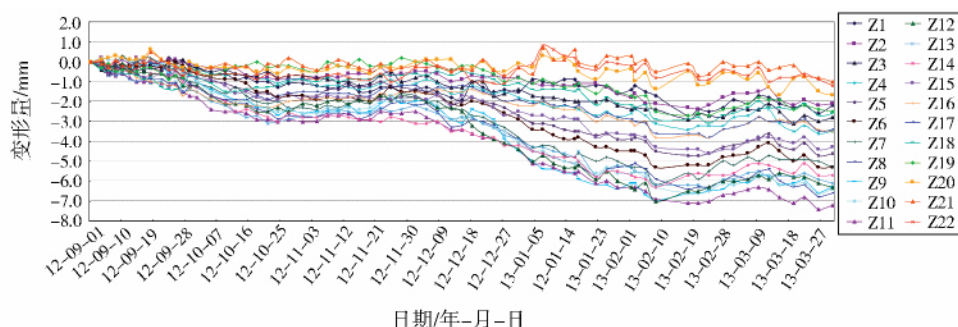


图6 静力水准仪监测数据变化曲线

Fig.6 Curves of data observed by the hydrostatic level gauge

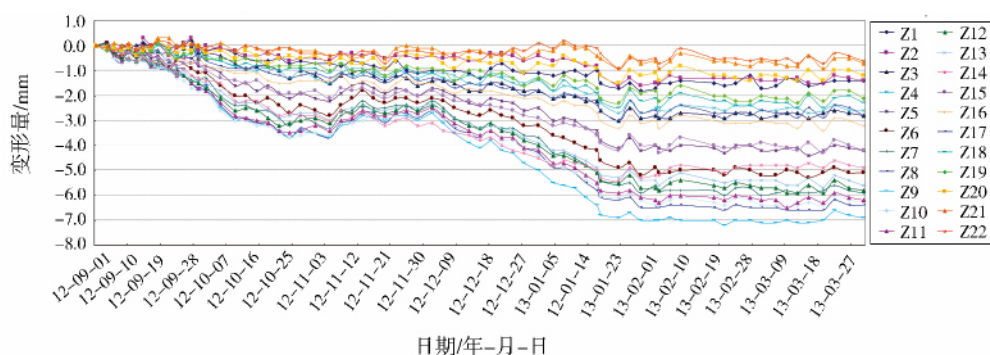


图7 人工监测数据变化曲线

Fig.7 Curves of the manual monitoring data

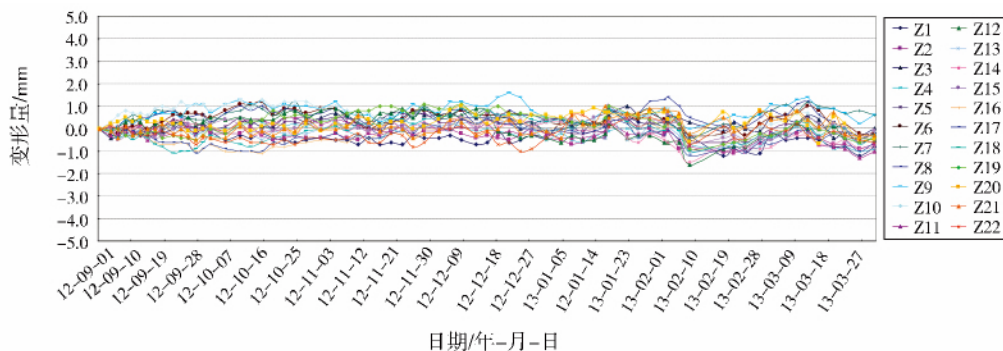


图8 监测点人工监测与静力水准仪监测成果对比曲线

Fig.8 Correlation curves of the data recorded by manual monitoring and by the hydrostatic level gauge



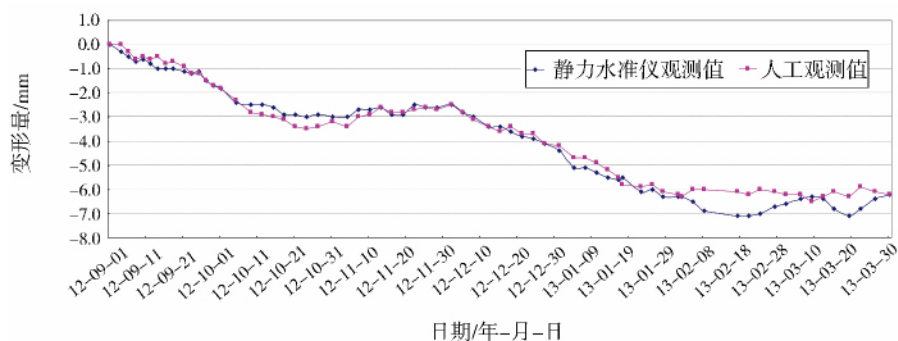


图9 监测点 Z11 人工监测与静力水准仪监测成果对比曲线

Fig.9 Correlation curves of the data monitored at Z11 manually and by the hydrostatic level gauge

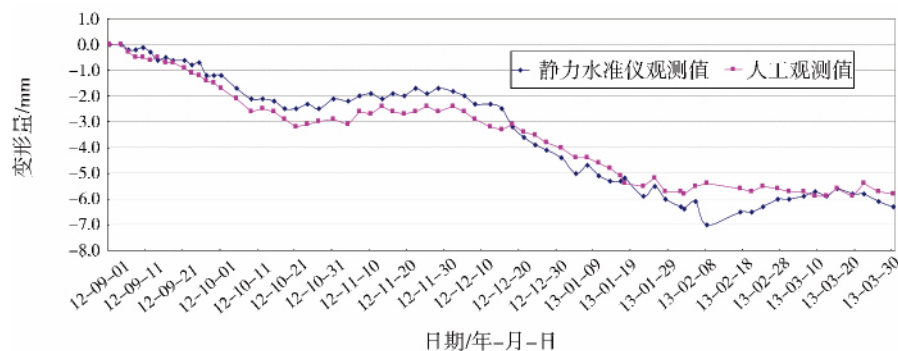


图 10 监测点 Z12 人工监测与静力水准仪监测成果对比曲线

Fig.10 Correlation curves of the data monitored at point Z12 manually and by the hydrostatic level gauge



图 11 监测点 Z13 人工监测与静力水准仪监测成果对比曲线

Fig.11 Correlation curves of the data monitored at Z13 manually and by the hydrostatic level gauge

表 4 静力水准仪观测值中误差统计

Table 4 Statistics of the RMSE of data observed by hydrostatic level gauge

点名	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8	Z9	Z10	Z11
中误差/mm	±0.5	±0.4	±0.4	±0.4	±0.3	±0.6	±0.6	±0.7	±0.8	±0.8	±0.4
点名/mm	Z12	Z13	Z14	Z15	Z16	Z17	Z18	Z19	Z20	Z21	Z22
中误差/mm	±0.5	±0.3	±0.4	±0.3	±0.5	±0.5	±0.5	±0.6	±0.5	±0.4	±0.4

数据与静力水准仪监测数据差异较小,吻合状态良好,两者基本一致。

从表 4 可以看出,以人工观测值作为真值,各监测点静力水准仪观测值中误差最大为±0.8 mm,最

小为 $\pm 0.3$  mm,均小于 $\pm 1.0$  mm 监测精度要求。

## 4 结 论

(1) 通过对比分析列车停运及列车正常运行情况下静力水准仪监测地铁结构变形精度可知,在列车停运时较列车正常运行时静力水准仪具有更高的精度,且均能满足变形监测精度要求。

(2) 从静力水准仪监测数据与人工监测数据的对比分析可知,两者观测结果基本保持一直,变形状态吻合良好,进一步验证了静力水准仪监测系统在运营地铁监测中的应用可靠性。

(3) 采用静力水准仪监测运营期地铁结构变形,具有实时化、自动化、高效化、高精度等特点,具有较好的应用价值。

## 参考文献

## References

- [1] 魏 纲,李 钢,苏勤卫.基坑工程对运营地铁隧道影响的实测分析[J].现代隧道技术,2014,51(1): 179-185  
Wei Gang, Li Gang, Su Qinwei. Analysis of the Influence of Foundation Pit Construction on an Operating Metro Tunnel Based on Field Measurement [J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 179-185
- [2] 何晓业.静力水准仪系统的最新发展及应用[M].安徽:中国科学技术大学出版社,2010  
He Xiaoye. Latest Development and Application of Hydrostatic Levelling System [M]. Anhui: Press of University of Science and Technology of China, 2010
- [3] David H. Parker, Bill Radcliff, John W. Shelton. Advances in Hydrostatic Leveling with the NPH6, and Suggestions for Further Enhancements [J]. Precision Engineering, 2005. 129(7):367-374
- [4] W.P. Rice, E.G. Fernandez, D. Jarog, A. Jensen. A Comparison of Hydrostatic Leveling Methods in Invasive Pressure Monitoring [J].Critical Care Nurse,2000, 20(6):20-30
- [5] P. Pellissier. Pellissier Model H5-Portable Hydrostatic Level/Tiltmeter[R].Technical Report 116, GBT Memo Series; 1994
- [6] Kivioja L.A., Friedsam H., Penicka M. New Hydrostatic Leveling System Developed for the Advanced Photon Source[A]Proceedings of the Fifth International Workshop on Accelerator Alignment[C]. 1997
- [7] 戴贵爽,徐进军.流体静力水准测量系统精度分析与应用[J].地理空间信息,2010,8(6):142-145  
Dai Guishuang, Xu Jinjun. Precision and Application of Hydrostatic Leveling System [J]. Geospatial Information, 2010, 08(6):142-145
- [8] Matheny P., Radcliff B. Hydrostatic Level Operation[R]. Technical Report L0472, The National Radio Astronomy Observatory; 1998
- [9] 白韶红.静力水准仪在北京城铁变形监测中的应用[J].中国仪器仪表,2003,(11):34-36  
Bai Shaohong. The Application of Static Force Level on Monitoring the Urban Railway of Beijing [J]. China Instrumentation, 2003, (11):34-36
- [10] 陶建伟,唐继明.自动化实时监测技术在地铁穿越工程中的应用[J].工程勘察,2009,(s2):583-587  
Tao Jianwei, Tang Jiming. Application of Automatic Real-time Monitoring Techniques in Metro Engineering [J]. Engineering Investigation, 2009,(S2):583-587

# Application and Analysis of Hydrostatic Level Gauges in Deformation Monitoring of Subway Tunnels During Operation

Sun Zexin<sup>1</sup> Zhang Shufeng<sup>2</sup> Liu Ning<sup>1</sup>

(1 Jiangsu Province Communications Planning and Design Institute Limited Company, Nanjing 211100; 2 Nanjing Metro Group Co. Ltd., Nanjing 210005)

**Abstract** This paper states the basic operation principles of a hydrostatic level gauge and the factors influencing monitoring accuracy in a subway tunnel during operation. Combined with a monitoring case of a hydrostatic leveling system in an operational metro tunnel during construction of a foundation pit, the monitoring accuracy of the hydrostatic level gauge during a train shutdown is contrasted with that of train normal operation in order to analyze the influence of train operation on monitoring accuracy. Meanwhile, the reliability of the hydrostatic level system is verified by comparison with the manual monitoring data. The results show that the automatic monitoring system can meet the requirements of real-time monitoring accuracy for subway tunnel deformation during operation.

**Keywords** Hydrostatic level gauge; Metro tunnel; Monitoring accuracy