

Error Analysis for Measurement on Vertical Deformation of Existing Subway by Hydrostatic Leveling Sensor

Fei Liu^{1,2}, Meide He^{1,2}, Lianshi Wu³

¹Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing

²Beijing No. 3 Detection Department Co., Ltd. of Construction Engineering Quality, Beijing

³Beijing Institute of Water, Beijing

Email: liufeidada2012@163.com

Received: Feb. 19th, 2020; accepted: Mar. 5th, 2020; published: Mar. 12th, 2020

Abstract

As a kind of high-precision measurement instrument, the hydrostatic leveling sensor system is widely used in measurement on the displacement of existing subway. However, the train operation has an impact on the monitoring results. In order to make better use of hydrostatic leveling sensor system, combined with the engineering practice, the hydrostatic leveling sensor system is employed for 24 hours monitoring of existing subway. Based on the analysis of data, the error of measurement on vertical deformation of existing subway by hydrostatic leveling sensor is discussed and the selection method of data is introduced.

Keywords

Hydrostatic Leveling Sensor, Existing Subway, Vertical Deformation, Error Analysis

利用静力水准测量运营地铁竖向变形误差分析

柳 飞^{1,2}, 贺美德^{1,2}, 吴炼石³

¹北京市市政工程研究院, 北京

²北京市建设工程质量第三检测所有限责任公司, 北京

³北京市水利规划设计研究院, 北京

Email: liufeidada2012@163.com

收稿日期: 2020年2月19日; 录用日期: 2020年3月5日; 发布日期: 2020年3月12日

摘 要

静力水准作为一种高精度的高程测量仪器在既有地铁的变形监测中应用广泛。但是列车运行会对静力水

准的监测结果产生影响。为了更好的利用静力水准这一监测手段，本文结合工程实际，利用高精度静力水准仪对地铁隧道状况进行24小时实时监测，通过分析数据，探讨静力水准测量运营地铁竖向变形的误差，提出静力水准监测数据的选取方法，以确保既有地铁变形监测数据的准确性。

关键词

静力水准，既有地铁，竖向变形，误差分析

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

静力水准作为一种高精度的高程测量仪器，由于其精度高、安装方便，可实施实时监测，监测频率灵活多变，测点之间不需要通视等优点，特别适用于人工无法实施测量的各种狭小空间和恶劣环境的变形测量，因此在工程中有着广泛的应用[1]。

目前的静力水准仪的工作原理均为连通器原理[2] [3] [4]。一个可以自由流动的静止液面上各个点的重力影响是相同的，或者说液面是等高的。当承放容器的两点高程发生了变化 ΔH ，则两容器的液面刻度线就会发生变化。读取两容器液面的刻画线，则可计算得出两者高差，将其中一个测点设置在变形影响范围之外的区域，即将此测点设置为基准点，即可知道其他监测点的高程变化量。对于既有地铁工程，由于其自身的运营特性和巨大的社会影响，经常需要实时监控地铁自身的变形情况，而静力水准系统不会对地铁的正常运营产生影响，且能实现全天 24 小时实时监测，因此静力水准监测系统在既有地铁的变形监测中应用广泛。但是列车运行产生的振动、隧道风等因素均会对静力水准的监测结果产生影响[5] [6] [7]。使静力水准的监测结果产生偏差。为了更好的利用静力水准这一监测手段，本文结合工程实际，对静力水准测量运营地铁竖向变形的误差进行探讨，提出静力水准监测数据的选取方法，以确保既有地铁变形监测数据的准确性。

2. 工程概况

在既有运营地铁中，选取长度为 26.4 m 的盾构隧道(共 22 环管片)，为增加数据样本，在监测区段布设 9 个监测点，如图 1 所示，中间每隔一环布设一个静力水准监测点，两端间隔 3~4 环管片布设。静力水准仪安装在盾构隧道结构侧壁，如图 2 所示。根据列车运营时间，晚间 0:00 至凌晨 5:00，为列车停运时间段，其他时间为列车的运营时间段，期间列车的发车间隔为 7~10 分钟。利用高精度静力水准仪对地铁隧道状况进行 24 小时监控，每 10 分钟采集一次数据。

3. 结果分析

图 3 为 9 个静力水准监测点从上午 9:00~第二天 9:00，一天 24 小时隧道结构变形图。如图所示，静力水准的监测数据在整个监测过程中一直处于波动状态，即使在 0:00~5:00 列车停运期间，数据依然处于波动的状态。但是列车运营期间的监测数据的波动幅值明显更大，且即使在列车运营期间，监测数据的波动幅值也并不相同。根据图 3 中静力水准 24 小时隧道结构竖向变形监测数据的波动状态，可将静力水准实时监测数据分为三类：停运期间的数据、运营期间的波动数据和运营期间的稳定数据。

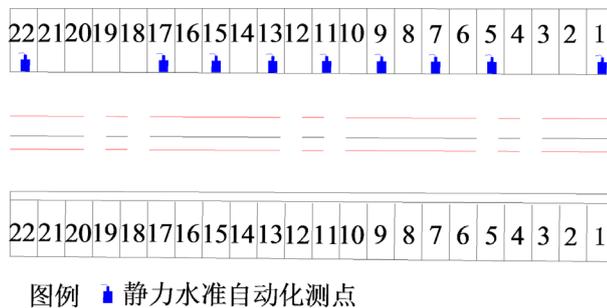


Figure 1. Plan view of position of hydrostatic leveling sensors
图 1. 静力水准自动化监测布置图



Figure 2. Hydrostatic leveling sensor on tunnel
图 2. 隧道结构静力水准仪

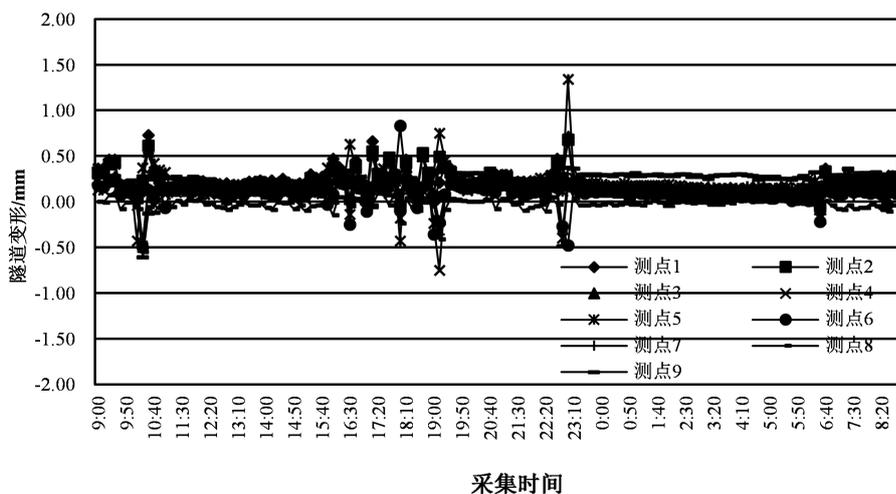


Figure 3. Curves monitoring by hydrostatic leveling sensor in 24 h
图 3. 静力水准 24 h 监测数据图

3.1. 停运期间的数据分析

根据地铁运营的特点,在晚间 0:00 至凌晨 5:00,列车停运,这一时段静力水准仪受到的外界扰动最小。将图 3 中的 0:00~5:00 时间段内的两个相邻的数据采集时间点的监测数据相减,得到停运期间监测数据波动图,如图 4 所示。在这一时段,静力水准测量得到的监测数据虽然也处于波动状态,但是,数据相对比较平稳,数据波动幅值基本全部集中于 $-0.04\sim 0.04$ mm 这一区间范围内。由于数据样本较多,可对这一时间段的数据波动情况进行统计分析,如图 5 所示,在列车停运期间,监测数据的波动值,绝对值大

于 0.04 mm 的占 2%，绝对值大于 0.03 mm 的数值占 6%，数值大于 0.02 mm 的数值占 13%，因此数值小于等于 0.02 mm 的数值占 87%。综上所述，在列车停运期间，监测数据的波动区间为 $-0.02\sim 0.02$ mm。即在没有干扰的情况下，静力水准监测数据的波动幅值为 0.02 mm。

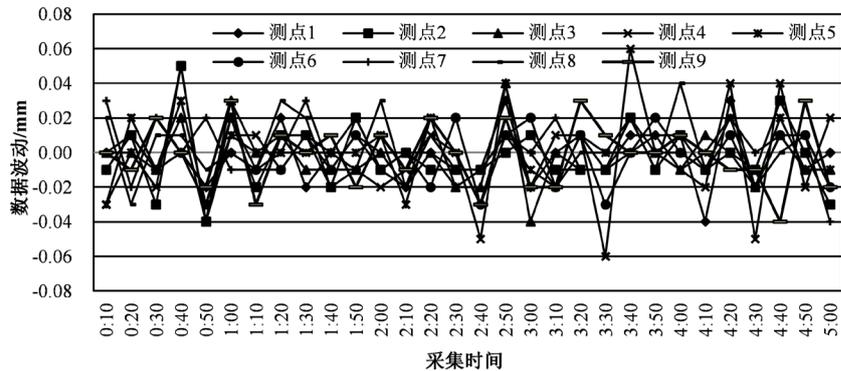


Figure 4. Curves monitoring by hydrostatic level sensor during train shutdown
图 4. 停运期间的监测数据波动图

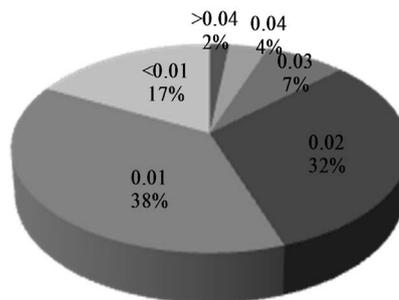


Figure 5. Data statistics during train shutdown
图 5. 停运期间的监测数据波动范围统计图

3.2. 运营期间的波动数据

如图 2 所示，除去列车停运的 5 个小时，其他时间列车一直处于运营状态。在地铁列车运营期间，静力水准的监测数据相较于停运期间波动更大。但运营期间不同时间段的监测数据波动幅值并不相同。根据其不同的波动幅值，可将运营期间的监测数据分为：运营期间的波动数据和运营期间的稳定数据。

如图所示，监测数据的波动区间的时间段主要有四个：6:00~7:00、8:00~11:00、15:00~20:00 和 22:00~23:00。与其他时间段相比，这四个时间段内，数据波动程度明显加大，这与列车的运行速度、发车频率、载容量和数据传输的时间点等因素有关。图 6~9 为四个时间段的监测数据波动图，分析这四个时段的数据，有以下几个特点：

1) 所有 9 个监测点的数据波动规律基本一致。因为监测段的范围只有 26.4 m，相比于列车的长度，这段监测范围较小，根据列车的运行速度，列车全长通过所有测点的时间小于 1 分钟，可以认为列车通过所有测点的时间基本相同，因此，所有 9 个监测点的数据变化规律基本一致。

2) 对比这四个波动区间，其数据波动具有一定的规律性，数据的变化规律基本相同。分析四个波动时间段的监测数据，出现峰值的频率一般是 30 min。例如，16:30~17:00 之间，数值在 16:30 的时候处于正常的状态，在 16:40 达到峰值，在 16:50 处开始下降，在 17:00 的时候恢复原值。其他波动区间也可观察到相同的数据变化规律。因此，在列车运营期间，一个波动周期大约为 30 min。

3) 对于运营期四个波动区间,其波动幅值并不尽相同,6:00~7:00 的数据的波动范围为-0.3~0.4 mm,是停运时间段的 20 倍。8:00~11:00 这一时段数据较多,对其进行统计分析,绝对值小于 0.1 mm 的数据只占 63%,远小于相对稳定时的数据占比。小于 0.2 mm 的占 84%。数据波动最大范围可达到-0.8~0.8 mm。是停运时间段的 40 倍。15:00~20:00 时间段的数据波动较为剧烈,在这一时间段,波动绝对值小于 0.1 mm 的数据仅占 42%,而大于 0.4 mm 的数据则为 10%。波动范围最大也为-0.8~0.8 mm,基本是停运时间段的 40 倍。地铁运营期间的第四个波动时段 22:00~23:00,这个波动区间的波动范围较大,在-0.5~1.2 mm 之间,从 22:00~22:40 期间,数据波动较轻,波动范围集中于-0.2~0.2 mm,从 22:50 的时候,数据出现较大变化,波动范围增大到-0.5~0.5 mm,甚至个别数据的波动范围达到 ± 1.2 mm,为停运时间段的 60 倍。

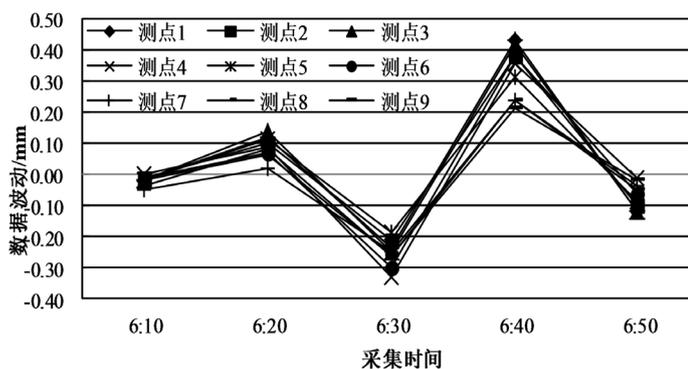


Figure 6. Curves monitoring by hydrostatic level sensor from 6:00 to 7:00

图 6. 6:00~7:00 的监测数据波动图

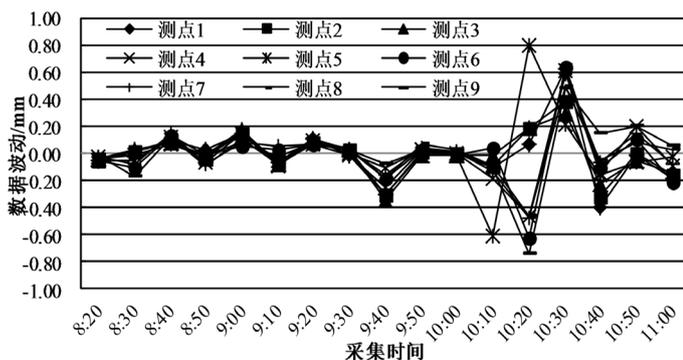


Figure 7. Curves monitoring by hydrostatic level sensor from 8:00 to 11:00

图 7. 8:00~11:00 的监测数据波动图

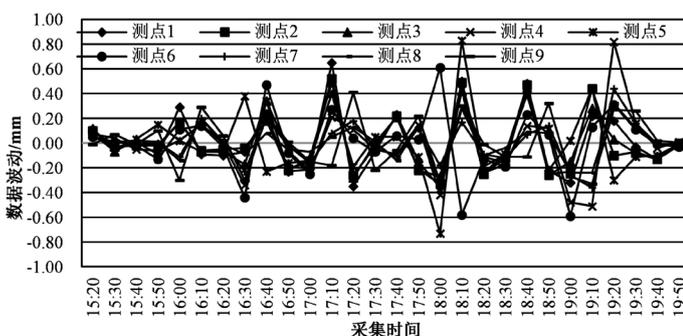


Figure 8. Curves monitoring by hydrostatic level sensor from 15:00 to 20:00

图 8. 15:00~20:00 的监测数据波动图

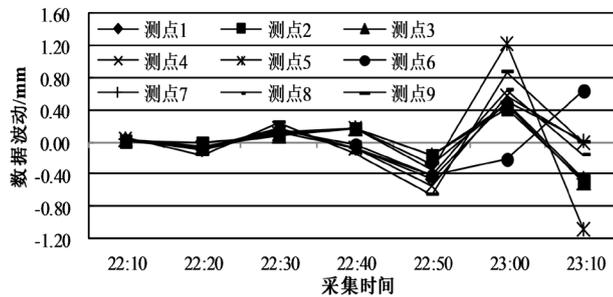


Figure 9. Curves monitoring by hydrostatic level sensor from 22:00 to 23:00
图 9. 22:00~23:00 的监测数据波动图

3.3. 运营期间的稳定数据

与波动较大的数据相比，地铁运营期间有三个相对稳定的时间区段，分别为 7:00~8:00、11:00~15:00 和 20:00~22:00。在这三个时间段内，静力水准的监测数据与上述波动区间的监测数据相比，其数据波动幅度较小，在地铁运营期间，属于较为稳定的监测数据。

图 10~12 分别为上述三个时段的监测数据波动图。如图所示，在这三个时间段，数据的变化规律与运营期波动数据的变化规律基本一致，数据的波动周期也为 30 min，即在 30 min 内监测数据出现峰值，并恢复原值。但是与其相邻的波动区间的数据相比，其幅值明显减小。对于 7:00~8:00 这一时段，波动范围为-0.1~0.1 mm，为停运时间段的 5 倍。11:00~15:00 这一时段，波动范围也为-0.1~0.1 mm，为停运时间段的 5 倍。20:00~22:00 这一时段，波动大部分在-0.1~0.1 mm 范围内，仅有 21:00 和 21:10 两个时间点的监测数据超出范围。

这三个时段数据的波动幅度虽大于列车停运期间的数据波动幅度，但是与运营期间的波动数据相比仅为其波动幅值的 1/8~1/4，较为稳定。

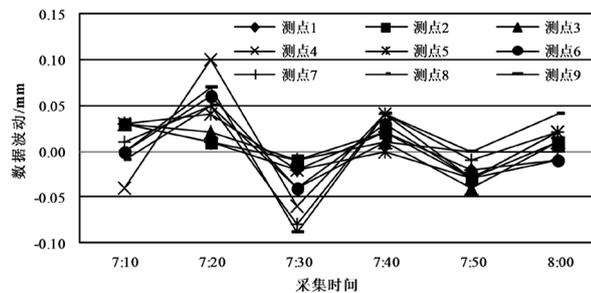


Figure 10. Curves monitoring by hydrostatic level sensor from 7:00 to 8:00
图 10. 7:00~8:00 的监测数据波动图

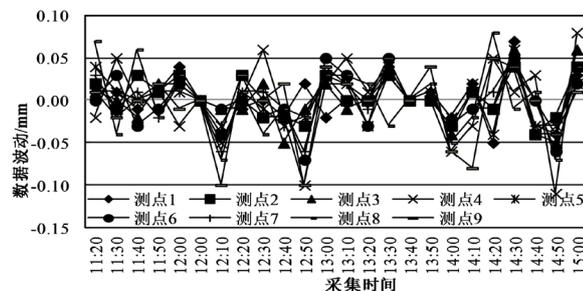


Figure 11. Curves monitoring by hydrostatic level sensor from 11:00 to 15:00
图 11. 11:00~15:00 的监测数据波动图

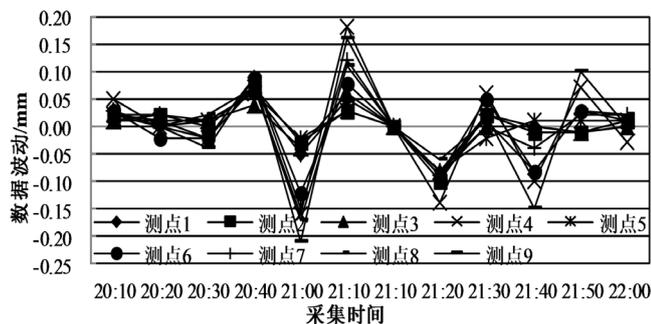


Figure 12. Curves monitoring by hydrostatic level sensor from 20:00 to 22:00
图 12. 20:00~22:00 的监测数据波动图

综上所述，由于静力水准本身的特性，在利用其进行既有地铁的变形监测时，无论是列车停运期间还是运营期间，其监测数据均处于波动状态，尤其是列车运营期间，数据的波动范围可达到停运数据的 40 甚至 60 倍。因此在选取监测数据时，应采取选择时间区段而不是时间点的方式，观察监测数据在列车运营期间的波动规律，包括其波动周期和波动幅值，以列车停运后相对稳定的数据为基准，选取几个波动周期，若监测数据均在波动幅值范围内，则数据没有变化，若在这段时间内大部分数据超过其波动幅值的范围，则应考虑数据发生变化。

4. 结论

利用高精度静力水准仪对既有运营地铁的隧道变形状况进行 24 小时监控，通过数据分析，得到如下结论：

1) 根据静力水准 24 小时隧道结构竖向变形监测数据的波动状态，可将其监测数据分为三类：停运期间的数据、运营期间的波动数据和运营期间的稳定数据。

2) 列车停运期间，静力水准测量得到的监测数据也处于波动状态，但波动幅值较小，仅为 0.02 mm，监测数据较为稳定。

3) 本工程中，列车运营期间有四个波动较大的时间段，其数据的变化规律基本相同，出现峰值的频率一般是 30 min。但波动幅值不同，为停运期间数据波动幅值得 20~40 倍，有时可达到 60 倍。地铁运营期间有三个相对稳定的时间区段，期间监测数据的波动幅值为停运期间的 5 倍，为波动时段的 1/8~1/4，相对稳定。

4) 采用静力水准监测既有地铁竖向变形，应采取选择时间区段而不是时间点的方式，观察几个波动周期的数据，识别监测数据的波动规律，以列车停运后相对稳定的数据为基准，若监测数据均在波动幅值范围内，则数据没有变化，若在这段时间内大部分数据超过其波动幅值的范围，则应考虑数据发生变化。

基金项目

北京市财政专项经费资助项目。

参考文献

- [1] 何晓业. 静力水准系统的最新发展及应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2010.
- [2] Parker, D.H., Radcliff, B. and Shelton, J.W. (2005) Advances in Hydrostatic Leveling with the NPH6, and Suggestions for Further Enhancements. *Precision Engineering*, **29**, 367-374. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.11.001>
- [3] Rice, W.P., Fenandez, E.G., Jarog, D. and Jensen, A. (2000) A Comparison of Hydrostatic Leveling Methods in Invasive Pressure Monitoring. *Critical Care Nurse*, **20**, 20-30. <https://doi.org/10.4037/ccn2000.20.6.20>

- [4] Pellissier, P. (1994) Pellissier Model H5-Portable Hydrostatic Level/Tiltmeter. Technical Report 116, GBT Memo Series.
- [5] 张建坤, 陈昌彦, 白朝旭, 徐国双, 郑瑶. 影响静力水准监测质量的关键技术问题探讨[J]. 工程勘察, 2012, 40(9): 73-82.
- [6] 孙泽信, 张书丰, 刘宁. 静力水准仪在运营期地铁隧道变形监测中的应用及分析[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 203-208.
- [7] 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.