

# 地铁隧道内静力水准观测的精度分析

付和宽

(上海岩土工程勘察设计研究院有限公司, 上海 200438)

**摘要** 在轨道交通保护区内的重大、危险项目的施工过程中, 需要实时了解地铁结构变形情况。静力水准测量是地铁隧道结构自动化垂直位移测量的重要手段。目前, 国内对静力水准在地铁隧道内观测精度方面的研究较少。本文通过对布设在地铁隧道内部的静力水准仪进行遥控测量, 对采集的观测数据进行整理分析, 研究地铁隧道内静力水准的观测精度以及地铁列车运营导致容器内液面震动对观测精度的影响, 为类似自动化观测精度分析、观测数据取舍以及变形观测数据可靠性分析提供参考依据。

**关键词** 静力水准 观测精度 中误差 地铁隧道

中图分类号: TU196

文献标识码: B

文章编号: 1672- 4097(2011) 01- 0043- 04

## 1 引言

轨道交通的重要作用毋庸置疑, 上海市运营的轨道交通总长达到 420 km, 一旦轨道交通出现问题会带来一系列的社会问题。随着城市发展, 轨道交通沿线附近的开发、建设工程越来越多, 如何减少周边施工对轨道交通结构的影响, 一直是工程界研究的重要课题。上海申通地铁公司也成立了专门的监护部门, 负责轨道交通结构的监测、保护。该公司对轨道交通结构的监测提出了极高要求。

静力水准测量是地铁结构自动化垂直位移监测的重要手段之一。但由于在地铁运营时间段, 列车以一定的时间间隔在隧道内运行, 对位于地铁隧道内部的静力水准仪的测量精度会产生较大影响。

地铁列车在隧道内以一定速度通过静力水准监测点时, 对监测点的影响主要有以下三种情况。

### 1.1 仪器内部空气压强的变化

由于列车运行使得隧道内部空气流动, 导致静力水准容器内空气压强有降低的趋势, 最终使得液面呈上升趋势。

### 1.2 列车震动影响

列车车厢位于监测点附近时, 使得监测点下沉, 导致静力水准容器内液面上升; 列车远离监测点后, 监测点上抬, 导致导致静力水准容器内液面下降。列车瞬间通过会使容器液面产生上下震动。

### 1.3 基准点的影响

列车经过基准点时, 对基准点造成以上 A、B 两种影响, 会传递给监测点相反的作用。

## 2 项目概况

通过在已运营的地铁隧道内布设一定数量的静力水准仪, 按照一定的采样频率采集液面变形数据, 定量分析列车运行对静力水准观测精度的影响。在上海轨道交通 4 号线蓝村路站~ 塘桥站区间下行线 XK10+ 358~ XK10+ 525 的隧道内部, 按照约 6 m 的间距, 布设 26 个静力水准自动化监测点, 编号 RJ01~ RJ26。考虑数据起算, 设置一个基准点, 编号 RJ00。由于隧道起伏较大, 且仪器安装要求在一个水平面上, 在现场增设 5 个转点: RJ05-1、RJ12-1、RJ16-1、RJ20-1、RJ23-1。采用 RJ20 型电容式静力水准仪进行观测, 总计安装 32 台。隧道结构为单圆盾构隧道, 隧道设计内直径 5.5 m。静力水准仪相关参数如下:

测量范围( fs) mm	20
分辨率 mm/ 字	0.01
精度 mm	$\leq 0.5\% f_s (\pm 0.1 \text{ mm})$
环境温度( °C)	- 20 °C ~ + 60 °C
湿度环境(相对湿度)	0 ~ 100%

## 3 多管路、多台静力水准观测精度分析

### 3.1 列车正常运营段静力水准观测精度分析

受到仪器制造工艺及软件设计限制, RJ 型电容式静力水准仪模块控制自动测量的最短时间间隔为 1 分钟, 单台仪器连续测量状态下的最短时间间隔为 3 秒~ 4 秒。为了准确测量地铁列车运行对静力水准观测的影响程度, 在列车运营期间, 无线遥

测安装在地铁隧道内的静力水准仪,从 2010 年 03 月 18 日 11:22 至 13:56 按照 1 分钟一次的采样间隔,共计测量了 154 分钟,得到 154 组观测数据。对这些观测数据进行统计,分析列车运行对静力水准观测的影响。

### 3.1.1 液面稳定时间

每台仪器分别以观测数据的平均值作为初始值,进行计算得到每一台仪器液面波动的分钟曲线图如下:

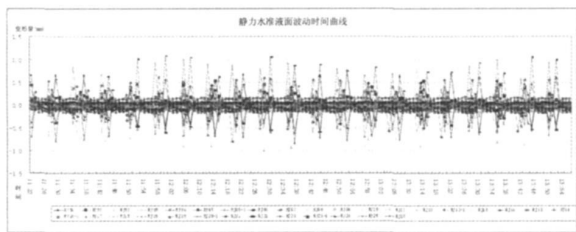


图 1 整个系统仪器液面波动时间曲线(时间单位为时:分)

从图 1 可以看出,每条曲线的峰值在不同的时间点出现,即不同仪器的向上、向下波动缺少一致性,而且峰值的大小也不一致。每台仪器的采集时间不同以及每次经过列车的载重、速度不同会导致上述现象。导致仪器不是在同一时刻采集的原因主要有:①目前电容式静力水准仪制作工艺及数据

采集技术的限制,单台静力水准仪最短测量间隔为 3 秒~4 秒之间,平均 3.7551 秒;②一般情况下,当测量命令发出后,同一个模块控制的 8 台仪器且按序测量,单模块一次测量周期最短约为 32 秒;③液面瞬间震动的频率较高,同一模块的 8 台仪器分别测量时,液面的状态可能是处于最低~最高的任一位置。

为了便于分析,将 11:29 至 12:29 一个小时的液面状态的时间曲线按照不同设计管路整理成图。

可以看出,波动频率与地铁列车通过的频率明显相对应,每条曲线的峰值、平值、谷值基本上都是以 7~8 分钟的间隔有规律的出现,频率与 4 号线列车的间隔时间 7~8 分钟基本一致。曲线峰值、谷值持续的时间约为 2~4 分钟,可以得出,列车运行对静力水准液面造成震动,液面恢复的时间最短约 2 分钟就恢复平静状态。

### 3.1.2 静力水准观测精度

#### (1) 液面波动范围

将观测数据的最大值减去最小值可以得到每台仪器液面的最大振幅(波动范围),每次波动的最大振幅取平均值,得到每台仪器液面的平均振幅,计算得到如下表 1。

表 1 液面波动幅度统计表

点号	RJ00	RJ01	RJ02	RJ03	RJ04	RJ05	RJ05-1	RJ06
平均振幅(mm)	0.45	0.26	0.84	0.35	0.34	0.42	0.23	0.19
最大振幅(mm)	0.74	0.57	1.17	0.49	0.56	0.96	0.63	0.36
点号	RJ07	RJ08	RJ09	RJ10	RJ11	RJ12	RJ12-1	RJ13
平均振幅(mm)	0.12	0.36	0.17	0.20	0.28	0.65	0.64	0.24
最大振幅(mm)	0.34	0.55	0.37	0.55	0.42	0.86	0.82	0.91
点号	RJ14	RJ15	RJ16	RJ16-1	RJ17	RJ18	RJ19	RJ20
平均振幅(mm)	0.33	0.19	0.62	0.23	0.53	0.82	0.37	0.26
最大振幅(mm)	0.58	0.43	0.95	0.45	0.91	1.19	1.32	0.88
点号	RJ20-1	RJ21	RJ22	RJ23	RJ23-1	RJ24	RJ25	RJ26
平均振幅(mm)	0.41	0.88	0.49	0.27	0.32	0.66	0.16	0.77
最大振幅(mm)	1.12	1.34	1.47	0.96	0.67	1.03	0.53	0.98

由表 1 可以得到,在实验的观测时间内 32 台仪器的振幅范围是 0.34 mm~1.47 mm,总体平均振幅达到 0.41 mm。

#### (2) 包含列车震动影响的观测中误差

根据中误差计算公式 
$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}$$
, 计算得到每一台静力水准仪观测数据的中误差如下。

表 2 包含列车震动影响的单台仪器观测中误差

序号	1	2	3	4	5	6	7	8
点号	RJ00	RJ01	RJ02	RJ03	RJ04	RJ05	RJ05-1	RJ06
总体偏差(mm)	0.15	0.09	0.29	0.12	0.12	0.14	0.09	0.06
序号	9	10	11	12	13	14	15	16
点号	RJ07	RJ08	RJ09	RJ10	RJ11	RJ12	RJ12-1	RJ13
总体偏差(mm)	0.05	0.12	0.06	0.08	0.09	0.22	0.22	0.10
序号	17	18	19	20	21	22	23	24
点号	RJ14	RJ15	RJ16	RJ16-1	RJ17	RJ18	RJ19	RJ20
总体偏差(mm)	0.11	0.06	0.21	0.08	0.18	0.28	0.14	0.12
序号	25	26	27	28	29	30	31	32
点号	RJ20-1	RJ21	RJ22	RJ23	RJ23-1	RJ24	RJ25	RJ26
总体偏差(mm)	0.15	0.31	0.18	0.12	0.12	0.23	0.07	0.27

由表 2 中数据可以得到观测中误差变化范围  $\pm 0.045 \text{ mm} \sim \pm 0.312 \text{ mm}$ , 平均为  $0.145 \text{ mm}$ 。

### (3) 有、无列车通过两个阶段的观测精度

将液面波动时间内的数据剔除, 可以计算得出

每一台静力水准仪平段(无列车通过)观测中误差。只对波动时间内观测数据进行统计, 得到每一台静力水准仪波动段(列车通过)观测中误差。如下表 3。

表 3 液面平段及波段观测中误差

点号	RJ00	RJ01	RJ02	RJ03	RJ04	RJ05	RJ05-1	RJ06
平段测量中误差(mm)	0.037	0.010	0.016	0.013	0.014	0.017	0.018	0.016
波段测量中误差(mm)	0.178	0.137	0.382	0.171	0.169	0.199	0.128	0.080
点号	RJ07	RJ08	RJ09	RJ10	RJ11	RJ12	RJ12-1	RJ13
平段测量中误差(mm)	0.016	0.015	0.011	0.011	0.037	0.021	0.025	0.018
波段测量中误差(mm)	0.057	0.153	0.073	0.107	0.111	0.265	0.246	0.128
点号	RJ14	RJ15	RJ16	RJ16-1	RJ17	RJ18	RJ19	RJ20
平段测量中误差(mm)	0.010	0.020	0.024	0.016	0.022	0.025	0.017	0.024
波段测量中误差(mm)	0.141	0.088	0.236	0.100	0.242	0.374	0.217	0.183
点号	RJ20-1	RJ21	RJ22	RJ23	RJ23-1	RJ24	RJ25	RJ26
平段测量中误差(mm)	0.018	0.018	0.011	0.016	0.015	0.012	0.012	0.019
波段测量中误差(mm)	0.197	0.376	0.238	0.159	0.126	0.273	0.074	0.299

对表 3 中 32 台仪器的平段中误差进行统计, 得到中误差范围  $\pm 0.010 \text{ mm} \sim \pm 0.037 \text{ mm}$ , 平均为  $\pm 0.018 \text{ mm}$ 。

对表 3 中 32 台仪器的波段中误差进行统计, 得到中误差范围  $\pm 0.057 \text{ mm} \sim \pm 0.382 \text{ mm}$ , 平均为  $\pm 0.185 \text{ mm}$ 。

### 3.2 列车停运时间段静力水准观测

一般, 轨道交通 4 号线该段隧道内每天从晚上 23:30 到次日凌晨 3:30 没有列车通过。在列车停止运行时间, 无线遥测安装在地铁隧道内的静力水准仪, 从 2010 年 4 月 8 日 0:00 至 00:45 按照 1 分钟一次的采样间隔, 共计测量了 45 分钟, 得到 45 组观测数据。对这些观测数据进行统计, 分析静力水

准观测精度。把每台仪器分别以观测数据的平均值作为初始值, 进行计算得到每一台仪器液面波动的分钟曲线图如下:

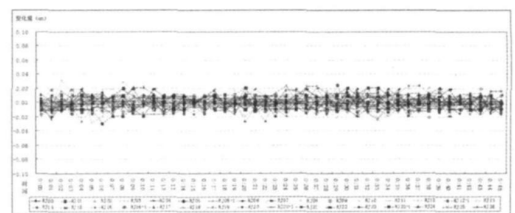


图 2 (时间单位为时:分)

从图 2 可以看出, 在地铁列车停运后, 静力水准观测值变化在很小的范围内波动。

每一台静力水准仪观测的中误差如下:

表 4 列车停运段静力水准观测精度统计表

点号	RJ00	RJ01	RJ02	RJ03	RJ04	RJ05	RJ05-1	RJ06
观测中误差(mm)	0.0079	0.00769	0.00737	0.00612	0.00734	0.00914	0.00983	0.00859
点号	RJ07	RJ08	RJ09	RJ10	RJ11	RJ12	RJ12-1	RJ13
观测中误差(mm)	0.00718	0.00792	0.0083	0.00794	0.01122	0.00846	0.00861	0.01047
点号	RJ14	RJ15	RJ16	RJ16-1	RJ17	RJ18	RJ19	RJ20
观测中误差(mm)	0.0069	0.00588	0.01193	0.00751	0.00782	0.00714	0.00691	0.00701
点号	RJ20-1	RJ21	RJ22	RJ23	RJ23-1	RJ24	RJ25	RJ26
观测中误差(mm)	0.00876	0.0071	0.00798	0.00804	0.01096	0.00965	0.00852	0.00886

由表 4 中数据可以得到观测中误差变化范围  $\pm 0.006 \text{ mm} \sim \pm 0.012 \text{ mm}$ , 平均为  $\pm 0.008 \text{ mm}$ 。

#### 4 单台静力水准仪观测精度分析

为了进一步验证液面波动与列车通过的规律及液面稳定时间, 我们对 RJ22 号仪器进行了从 2010 年 4 月 9 日 9 点 57 分 37 秒到 10 点 10 分 19 秒, 共计测量了 198 次。该点液面波动秒曲线如下。

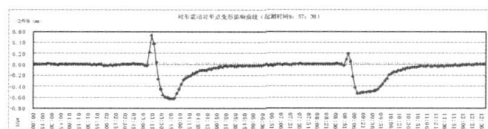


图 3 (时间单位为分:秒)

从图 3 中得出, 液面波动峰值间隔为 5 分 44 秒, 短于前面数据推算的列车运营间隔(约 7~8 分), 主要原因是: 本次测量是在早高峰时间, 地铁公司加密了列车运行间隔。另外, 两次峰值的振幅不一致, 估计与列车载客量及运行速度有关。

第一个波动从 3 分 4 秒~ 5 分 11 秒用时 2 分 07 秒, 波动范围  $-0.63 \text{ mm} \sim 0.53 \text{ mm}$ , 振幅  $1.16 \text{ mm}$ ; 第二个波动从 8 分 47 秒~ 10 分 55 秒用时 2 分 08 秒, 波动范围  $-0.53 \text{ mm} \sim 0.19 \text{ mm}$ , 振幅  $0.72 \text{ mm}$ 。由此也可以得出与上文分析相近的结论: 液面稳定时间为

2 分 7 秒。

对所有观测数据进行统计, 计算得到总体观测中误差  $\pm 0.18 \text{ mm}$ 。将波动数据剔除, 计算得出平段观测中误差为  $\pm 0.016 \text{ mm}$ 。只对波动观测数据进行计算得到, 波动段观测中误差为  $\pm 0.245 \text{ mm}$ 。与上文的分析结果相近。

#### 5 结论

经过上述分析, 可以得到以下结论:

(1) 地铁隧道内列车通过后, 静力水准液面稳定的最短时间约为 2 分钟。

(2) 地铁隧道内列车按照约 7 分钟的间隔有规律的通过观测点时, 多个列车运行周期的静力水准观测总体平均中误差约为  $\pm 0.2 \text{ mm}$ , 最大约为  $\pm 0.3 \text{ mm}$ 。

(3) 地铁隧道内列车按照约 7 分钟的间隔有规律的通过观测点时, 剔除波动观测数据后平段观测数据的中误差小于  $\pm 0.1 \text{ mm}$ , 平均约为  $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。表明剔除列车震动引起的观测数据后, 静力水准观测精度很高。

(4) 地铁隧道内列车通过观测点时, 观测数据波动最大达到  $1.5 \text{ mm}$ , 观测值平均中误差约为  $\pm 0.2 \text{ mm}$ 。

(5) 列车停运后, 静力水准观测总体平均观测中误差约为  $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。

### Observational Accuracy Analysis of Hydrostatic Leveling in Subway Tunnel

FU He-kuan

(Shanghai Geotechnical Investigation & Design Institute Co., Ltd, Shanghai 200438, China)

**Abstract** It is required to know that in the process of important and dangerous projects of traffic protected area, the subway structure deformation must to be understand. Hydrostatic leveling is an important method in automatic vertical movement measurement of subway tunnel structure. At present, in our country, the research about observational accuracy analysis of hydrostatic leveling in subway tunnel is lack. This paper presents the research about observational accuracy analysis of hydrostatic leveling in subway tunnel and the observational accuracy analysis is influence during trains running by remote ensuring hydrostatic level which is set up in subway tunnel and data analyzed. It provide a reference for observational accuracy analysis of automatic measuring, measured data choices and reliability analysis of deformation data.

**Key words** hydrostatic leveling; observational accuracy analysis; mean square error; subway tunnel