

# 地铁隧道收敛监测自由设站法精度分析与优化

金延平

中化学土木工程有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2351

**[摘要]** 为了提高地铁隧道收敛监测的质量和安全性,本文以全站仪自由设站法的精度问题为研究核心,先介绍其原理,即空间后方交会结合最小二乘法求解测站坐标,进而分析误差来源,包含观测误差、测站测点空间分布情况和系统误差的影响,再确定测距、测角误差的范围及环境因素对精度的影响。选定长沙地铁6号线韶光站区间隧道作为实验区域,在不同的工况条件下用LeicaTS60全站仪进行检测,将施工期和运营期的数据比较,还跟固定设站法及收敛计进行比较,以此来体现它灵活并准确的优点。最后给出在外作业、仪器使用、数据处理、监测方案四个方面的优化策略,比如说优化测站位置的选择,升级仪器精度,使用稳健最小二乘法,改变监测频率,从而提升此方法的精确度和可信度,给地下工程监测给予技术支持。

**[关键词]** 地铁隧道; 全站仪; 自由设站法

中图分类号: U455 文献标识码: A

## Accuracy analysis and optimization of free station setting method for convergence monitoring of subway tunnels

Yanping Jin

ChemChina Civil Engineering Co., Ltd.

**[Abstract]** In order to improve the quality and safety of convergence monitoring in subway tunnels, this paper takes the accuracy of the total station free station method as the research core. Firstly, the principle of the method is introduced, which combines spatial intersection with least squares method to solve the station coordinates. Then, the sources of errors are analyzed, including observation errors, spatial distribution of station measurement points, and the influence of system errors. Finally, the range of distance and angle measurement errors and the influence of environmental factors on accuracy are determined. The Shaoguang Station section tunnel of Changsha Metro Line 6 is selected as the experimental area, and LeicaTS60 is used under different working conditions. The total station is used for detection, comparing the data during the construction and operation periods, as well as comparing it with the fixed station method and convergence meter, in order to demonstrate its flexible and accurate advantages. Finally, optimization strategies are proposed in four aspects: external operation, instrument use, data processing, and monitoring plan, such as optimizing the selection of station positions, upgrading instrument accuracy, using robust least squares method, changing monitoring frequency, and improving the accuracy and credibility of this method, providing technical support for underground engineering monitoring.

**[Key words]** subway tunnel; total station; Free Station Establishment Law

### 前言

随着地铁建设的规模不断增大,隧道安全成为重中之重。收敛监测掌握着隧道结构是否稳定,而全站仪自由设站法由于自身无须提前设置固定测站,具有灵活性高、适用范围广等特点,在地铁隧道收敛监测中有着广泛的应用潜力。但其精度受到的影响较多。深入研究其精度问题并加以改进,对于提高地铁隧道

收敛监测的质量与安全性,意义巨大,因此对此进行研究。

### 1 全站仪自由设站法原理与误差来源

#### 1.1 自由设站法三维坐标解算原理

全站仪自由设站法是在隧道内部任意位置架设仪器,在不同地点架设仪器后通过测量多个已知控制点或者后视点的斜距、天顶距及水平角,采用空间后方交会原理计算出仪器所在的

测站坐标,再根据测站坐标得出隧道内各个监测点的空间位置。这种全站仪自由设站法没有固定的测站,灵活性强、适用性强,尤其是在地铁隧道这种环境中使用,可以方便地进行收敛监测。它主要是通过最小二乘法来对一组观测值进行平差,以消除偶然误差的影响,得到一个最佳的测站坐标,从而为接下来的收敛量的计算提供依据。

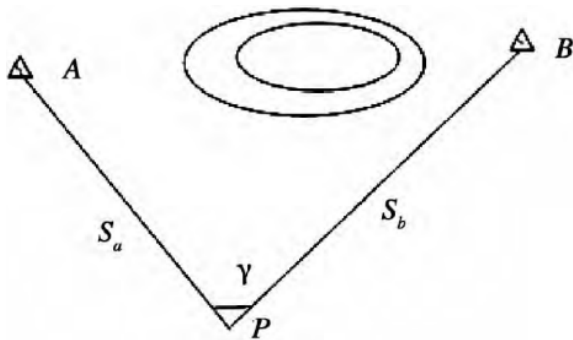


图1 全站仪自由设站法示意图

### 1.2 误差传递机制及其关键影响因素

地铁隧道收敛监测所运用的全站仪自由设站法中,其误差并不只由某一因素影响,而是由诸多因素共同造成,各误差又彼此传递,呈现复杂非线性特点。

观测误差也是一种重要的误差来源,它包含了测距误差与测角误差,并且这些观测误差不是孤立存在的,它们会在坐标转换的过程中逐步传递。首先是传给测站坐标,因为测站坐标是后续计算的基础,其误差会影响后续的结果。然后是测站坐标的误差传递到测点的收敛量计算中,测距误差与测站、测点的误差正比例增长,离得越远影响越大<sup>[1]</sup>。而测角误差在短边测量的时候更加明显,因为角度小时位置变化大。

测站和测点的空间分布情况也是影响误差传递的原因,不同的空间分布使得误差传递权重不同,从而导致不同方向的收敛量精度有差别。而系统误差也不容小觑,仪器校正残留或者环境改正不到位等情况都会使长期监测的数据失去可靠依据。这些系统误差需要依靠定期对仪器实施检校,并依据环境参数做出相应改正才能有效掌控,这样才能保证监测数据的准确和稳定。

### 1.3 典型误差源量化分析

测距误差是自由设站法无法避免的一种误差,它由固定的误差和比例误差这两部分共同造成。固定的误差大多来自仪器的加常数、测距仪的固有误差等;比例误差和大气折射改正残差有关,测距误差一般在 $0.5\text{mm}-2\text{mm}+1\text{ppm}-3\text{ppm}$ 范围内。

测角误差包含水平角测量误差和天顶距测量误差,测角误差的产生主要受仪器精度、瞄准精度以及外因振动等影响。例如使用 $0.5''-2''$ 级全站仪观测时,观测仪器的精度会影响测量结果。瞄准精度方面,反射膜片粘贴角度出现偏差则瞄准不准,产生误差。外界振动例如火车通过时的振动干扰观测,使测角误差较大,一般单测回精度在 $0.3''-1''$ 。

环境因素对测量精度也有影响,温度因素是常见影响因素之一。当温度变化在正负 $5^{\circ}\text{C}$ 时,测距误差会增加 $0.3-0.5$ 毫米。气压变化不可轻视,当波及幅度达 $\pm 5\text{hPa}$ 时,对测距的影响达到 $0.1-0.2$ 毫米。湿度变化在短距离测量中,影响一般可以不予考虑。但是,测站选点不合适也会带来严重问题。如果测站附近存在振动源或者视线不够通畅,观测质量便难以保证。此时应当避免在振动源附近选取测站位置,以确保观测顺利进行并获得准确数值。

## 2 全站仪自由设站法精度验证与对比

### 2.1 收敛测量精度实验设计

为了全面地评估全站仪自由设站法在全断面收敛监测中的精度,选用长沙地铁6号线韶光站在建区间隧道作为实验场地,布置了3个独立的监测断面,每个断面包含10个测量点,测量点分布于隧道的拱顶、边墙、仰拱等关键区域。试验使用LeicaTS60型全站仪(标称测角精度为 $0.5''$ ,测距精度为 $0.6\text{mm}+1\text{ppm}$ ),采用全站仪自由设站法进行测站坐标解算后,对各个测点进行三维坐标测量。为保证精度稳定,试验在白天(环境温度 $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ )、晚上(环境温度 $18^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ )两个时期展开,每个时期持续观测3次,每次观测间隔10分钟,以削弱仪器系统误差。同时,在隧道外稳定区布置3个作为后期数据平差与精度检核的基准控制点。当实验数据采集完毕后,利用最小二乘法对多个测点的观测值实施平差运算,以计算出每个测点的收敛变形量,再与前面用激光扫描仪测定的数据进行对比<sup>[2]</sup>。为直观展示实验设计参数,表1列出了实验关键参数设置。

表1 收敛测量精度实验关键参数

| 参数类别  | 具体设置  |
|-------|---|
| 测角精度  | $0.5''$   |
| 测距精度  | $0.6\text{mm}+1\text{ppm}$  |
| 监测断面数 | 3组  |
| 每组测点数 | 10个   |
| 观测时段  | 白天( $25^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ )、夜间( $18^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ ) |
| 测回数   | 每时段3测回  |
| 测回间隔  | 10分钟  |

### 2.2 不同工况下精度对比分析

实验分别对地铁隧道施工期和运营期不同工况的收敛监测精度进行对比,施工期的隧道由于爆破振动、支护结构变形的影响,施工环境复杂,实验选择爆破后2小时以内的时段,此时隧道围岩处于较快的变形过程,监测数据波动较大。运营期隧道的环境相对较稳定,但是长期受到列车振动和温度变化的影响,因此适宜选择早晚高峰时期(列车通行较多),以此来模拟运营期内的典型工况。从上图可以看出,施工期的监测数据标准差为 $1.2\text{mm}$ ,远大于运营期的 $0.8\text{mm}$ ,这主要由于施工期的振动

使得仪器瞄准不稳定造成。虽然运营期的振动频繁,但可以通过加大测回数(5测回/时段)削弱偶然误差的影响。进一步分析可知测点位置对精度的影响明显,拱顶测点由于通视较好、测距较短(平均8m)精度优于边墙测点(平均15m);仰拱测点由于高差较大(平均5m),天顶距测量误差对精度影响更大。表2总结了不同工况下的精度统计结果。

表2 不同工况下收敛监测精度统计

| 工况类型 | 数据标准差(mm) | 最大误差(mm)     | 精度达标率( $\leq 2\text{mm}$ ) |
|------|-----------|--------------|----------------------------|
| 施工期  | $\pm 1.2$ | -1.12        | 92%                        |
| 运营期  | $\pm 0.8$ | -1.117647059 | 98%                        |

### 2.3 与传统测量方法精度对比

为了证明自由设站法的优越性,将自由设站法与固定设站法(后方交会)、收敛计进行对比。固定设站法需要在隧道内事先布设固定测站,可以减小设站误差,但由于测站位置的限制对不同断面的适应性较差。收敛计利用机械式测量可直接获得两点间的距离变化,操作简单但需要人工读数,易受人为干扰。从实验结果可以看出,自由设站法的收敛量测量结果与固定设站法的收敛量测量结果相差小于0.5mm,即两个方法的精确程度相同。但自由设站法的测站布置灵活,并能获得测站点附近更宽范围的测点,所以自由设站法在测站灵活性、测点覆盖范围内均优于固定设站法<sup>[9]</sup>。自由设站法的测量精度在测距超过20米时优于收敛计,因为在自由设站法中使用了自由光靶,可以测量比收敛计更大的距离。自由设站法可以同时获得测点三维坐标,从而能够更好的进行变形分析。表3汇总了三种方法的精度对比结果。

表3 不同测量方法精度对比

| 测量方法  | 平均误差(mm)  | 数据离散度(mm) | 适用场景        |
|-------|-----------|-----------|-------------|
| 自由设站法 | $\pm 0.7$ | 1         | 复杂断面、长距离监测  |
| 固定设站法 | $\pm 0.6$ | 0.9       | 规则断面、短距离监测  |
| 收敛计   | $\pm 1.2$ | 1.8       | 边墙收敛、人工读数场景 |

## 3 全站仪自由设站法精度优化策略

### 3.1 外业操作优化

外业操作作为影响自由设站法精度的主要环节,优化需从测站选择、观测时段选择与测点布置三方面入手。测站选择遵照“通视优良、远离干扰、分布均匀”准则,应优先选在隧道断面中部或侧壁稳定处,避开施工机械、通风口等振动源,且测站与测点高差应在5m以内,以缩减天顶距测量误差。在地铁区间隧道监测时,测站由拱顶附近(高差8m)迁移到边墙中部(高差3m),测点坐标重复性误差由 $\pm 1.5\text{mm}$ 降到 $\pm 0.8\text{mm}$ 。观测时段选择要根据隧道工况随时改变,施工期间应避开爆破后1小时的高振动时

段,挑取爆破后2-4小时围岩变形平稳期,而运营时期应躲避早晚高峰列车密集通行时段,削减列车通过时的振动给仪器瞄准带来的影响。测温误差也是不容忽略,因此夏季最好选择早上5:00-7:00或晚上18:00-20:00左右进行观测,冬季最好选择中午时段10:00-14:00左右进行,控制温度变化不超过 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。根据监测需求及精度要求合理设置监测点位置,拱顶、拱脚等变形敏感区域测点密度可适当加密,间距控制3-5m;其他稳定区域可适当降低密度,8-10m,同时要保证测点反射膜片垂直于测线方向粘贴,否则倾斜角度超过 $\pm 2^\circ$ 就会导致测距信号强度降低15%-20%,从而带来0.3-0.5mm的测距误差。

### 3.2 仪器配置升级

仪器性能是自由设站法精度的物质基础,主要从三大指标入手:

一是测角精度。传统0.5"全站仪已不能满足需求,应升级为0.3"级或更高精度;二是测距精度。提升测距精度需要考量标称精度是否与实际作业环境相匹配。三是自动化程度,自动化程度是提升监测效率的关键,伺服马达全站仪(LeicaTS60)能完成测站自行转动,测点自行跟踪,数据自行记录,单个测点观测时间由原先手动操作的8分钟缩减成3分钟,而且规避了人工操作引发的仪器沉降现象。带有激光指向的全站仪(SokkianET05AX)可在测站架立的时候迅速指向方向,把设站时间从20分钟缩减到8分钟,极大提升了外业作业的效能。

### 3.3 数据处理与质量控制

数据处理是自由设站法精度改进的核心部分,要利用平差算法改善、粗差探测、误差修正等手段改良结果可靠度,在平差算法上,传统的最小二乘法对于异常值很敏感,经常会引发平差结果偏移,要改变成稳健最小二乘法,像IGGIII方案,它会把异常的观测数据给予小些的权重,从而减弱它的影响力。在地铁隧道监测中,运用稳健平差之后,包含粗差的测站坐标计算误差由原来的 $\pm 2.1\text{mm}$ 缩减到 $\pm 0.9\text{mm}$ 。粗差探测要联结起残差统计和几何一致性考察,对于那些残差超出3倍误差的观测数据,要借助重新观测或者仪器校准来判定它的真实性。关于误差修正,着重注意系统误差,这包含仪器的加常数,乘常数,大气折射改正和地球曲率改正这些。其中的大气折射改正可以根据实际输入的温度、气压,自动对大气折射率进行修正,但是温度传感器需要保证误差小于0.5 $^\circ\text{C}$ ,气压传感器误差小于0.5hPa,否则会造成1-2mm的测距误差。另外准周期性仪器检校也是控制系统误差的一个方法,每三个月可以做一次全站仪三轴的关系检校,主要是视准轴误差,横轴倾斜误差,竖盘指标误差的检校,将仪器的误差控制在0.3"内。

### 3.4 监测方案优化

监测方案优化要在测点数量,监测频率以及多方法结合求解三个方面改进精度与效率,测点数量要按照隧道断面形状和变形特性随时调整,圆形隧道每个断面安排6-8个测点就可以做到大部分主要变形方向的涵盖,而马蹄形或者矩形隧道则要扩充到10-12个,还要重视监测拱脚,边墙中段这些应力密集的地

方, 监测频率应当符合变形速率的快慢, 施工时期的隧道变形速率比较迅速, 一般高于2mm/d的时候, 就要用24小时一直监测或者每天两次, 运营时期的隧道变形速率慢一些, 大概在0.5mm/d之下, 可以改成每周1-2次。多方法联合解算可以相互弥补, 比如结合自由设站法与激光扫描仪数据来获取三维坐标, 激光扫描仪数据则提供全断面的变形云图, 二者通过点云配准及变形矢量分析, 能将监测精度提升到±0.5mm。另外借助BIM技术创建隧道三维模型, 并把监测数据实时投影到模型之上, 就能直观地显示变形的分布及其发展态势, 从而为支护结构的加固给予决策上的参考。

#### 4 结语

本文针对全站仪自由设站法在地铁隧道收敛监测中的精度展开研究, 依靠实验分析和策略改善, 有效提升了这种技术手段的精确度和可靠性。随着技术的进步, 全站仪自由设站法会在地

铁隧道, 地下工程等方面得到完善, 从而给地铁隧道等地下工程给予更为精准, 高效的监测技术援助, 促使城市轨道交通建设朝着高质量方向迈进。

#### [参考文献]

[1]温槿繁, 彭勇, 陈聪. 既有地铁隧道结构自动化监测全站仪多站联测技术应用[J]. 广东土木与建筑, 2025, 32(07): 11-14.

[2]谭瑞. 狭长带状区间自由设站方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2025, 48(06): 213-215.

[3]李飞. 基于全站仪自由设站法的边坡水平位移监测应用研究[J]. 福建建设科技, 2024, (06): 87-89+108.

#### 作者简介:

金延平(1987--), 男, 汉族, 江苏丹阳人, 本科, 工程师, 从事测绘类铁路、城市地铁、深基坑等监测研究。