

长区间隧道平面控制测量技术研究

王幼鹏^{1*}, 徐顺明^{2#}

¹广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州

²广州地铁集团有限公司, 广东 广州

收稿日期: 2023年6月7日; 录用日期: 2023年6月27日; 发布日期: 2023年7月11日

摘要

地下隧道施工平面控制测量对于隧道准确贯通及运营安全起着至关重要的作用, 长区间隧道则为精密工程控制测量增添了不小难度。本文以广州地铁首条单向掘进超4 km的盾构隧道为例, 通过分析大量观测数据, 确定平面测量误差的主要来源, 并探讨了长区间隧道平面控制测量减少误差、提高平面控制精度的方法, 为后续类似工程提供了有效借鉴。

关键词

长区间隧道, 平面控制测量, 测量误差, 优化措施

Research on Horizontal Control Measurement Technology for Long Interval Tunnels

Youpeng Wang^{1*}, Shunming Xu^{2#}

¹Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

²Guangzhou Metro Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong

Received: Jun. 7th, 2023; accepted: Jun. 27th, 2023; published: Jul. 11th, 2023

Abstract

The plane control measurement of underground tunnel construction plays a crucial role in accurate tunnel penetration and operational safety, while long interval tunnels add considerable dif-

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 王幼鹏, 徐顺明. 长区间隧道平面控制测量技术研究[J]. 土木工程, 2023, 12(7): 927-932.

DOI: 10.12677/hjce.2023.127105

faculty to precision engineering control measurement. This article takes the first shield tunnel of Guangzhou Metro with a one-way excavation exceeding 4 km as an example. By analyzing a large amount of observation data, the main sources of plane measurement errors are determined, and methods for reducing errors and improving plane control accuracy in long interval tunnel plane control measurement are explored, providing effective reference for similar projects in the future.

Keywords

Long Interval Tunnel, Horizontal Control Measurement, Measurement Error, Optimization Measures

Copyright © 2023 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

近年来,随着粤港澳大湾区城市轨道交通及城际铁路快速发展,长区间成为了互联互通的新趋势。长久以来,地下隧道施工平面控制测量对于隧道准确贯通及运营安全起着至关重要的作用,在轨道交通取得快速发展及高质量工程要求的大环境下,长区间隧道为控制测量带来了新的挑战。

关于地下工程的控制测量工作,国内已开展了一系列研究。胡玉祥等[1]对地铁测量中联系测量和地下导线测量两个重要环节进行了误差分析和精度预估。魏成等[2]通过模拟地下导线测量的不同布网方案,评估了不同方案对横向贯通误差的影响。曹华生[3]和潘正风等[4]研究了地面控制点的布设方法。冯仲科[5]分析了加测陀螺方位角对贯通误差的影响。这些研究对提高长区间隧道测量精度起到了很好的指导作用。吴敬奎等[6]优化了隧道横向贯通误差的推算方法,但缺少对实际工程数据的研究,对于指导实践还存在一定的提升空间。

由于仪器设备固有精度产生的系统误差以及测量人员观测、对点等造成的偶尔误差在实际控制测量中不可避免,并且地下隧道控制测量所涉及的近井导线测设、始发井联系测量、隧道内导线延伸等工作产生测量误差会不断累积,最终会对隧道的贯通效果造成严重影响。而确保隧道工程的相向施工中线在贯通面上的贯通误差不大于 100 mm,是保证隧道的准确贯通的底线。

本文以广州地铁首条单向掘进超 4 km 的盾构隧道为背景,通过大量观测数据,探讨了长区间隧道平面控制测量中减少误差、提高精度的方法,为后续类似工程提供借鉴。

2. 工程概况

广州市轨道交通二十二号线作为市域快线,采用最高运营时速达 160 km/h 的八节编组市域 D 型列车,时速快意味着对全线测量精度一致性要求高。该工程某区间左线长度 4040.184 m,右线长度 4046.421 m,隧道埋深 11.3~26.9 m,具有长距离、深埋深的特点。盾构机沿兴业大道至西向东单向掘进,先后下穿胜石涌、钟二涌、钟二村民宅建筑群、广明高速祈福隧道、市广路,地质情况较为复杂。

3. 平面控制测量方法研究

控制测量包括平面控制测量和高程控制测量[7],已有隧道贯通测量结果表明,竖向贯通误差容易控制[8],因此横向贯通误差成为工程质量控制的关键。本文考虑长区间隧道测量的难点,通过优化平面控

制测量方法减小测量误差, 对保证工程质量安全及精准贯通有重要的作用。

3.1. 近井导线测设

地面近井导线精度决定了地下基线边的精度, 对隧道贯通精度有着至关重要的影响, 也是长区间隧道控制测量的基础。影响地面导线精度的因素主要有仪器设备精度、外业观测、点位布设等。

3.1.1. 仪器设备及导线观测

本项目使用 Leica TS60 测量机器人(标称精度为 $0.5''$, $0.6 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$)配合专业自动测量软件进行观测, 观测测回数设置为 6 测回, 观测过程中若有超限差现象, 仪器会自动重新观测, 保证数据质量。由于地面近井导线采用固定线路, 观测结束后对历次的观测数据进行对比分析, 以提高导线精度。

3.1.2. 点位布设

因为每站的测量误差是相对固定的, 对于长区间隧道, 适当增加主控导线点的点间距, 减少地面主控导线的测站数, 有利于提高导线的精度, 为地下盾构掘进提供更加准确的方位。地面主控导线点延线路方向上布设, 有益于减少联系测量阶段钢丝观测误差。

该区间线路周边多荒地与高大树木, 还有少量群众自建房, 为地面近井导线控制网的布设带来了很大的困难。经过多番现场踏勘、点位比选, 导线相邻边长严格按不超过 1:2 的比例控制, 最终确定地面主控导线的点位。地面近井导线控制网网型选用附和导线形式, 布设示意图见图 1。为减少对中误差, 近井点选择布设强制对中观测台, 其他控制点采用三联脚架法观测。埋点、观测严格按精密导线网测量标准执行。

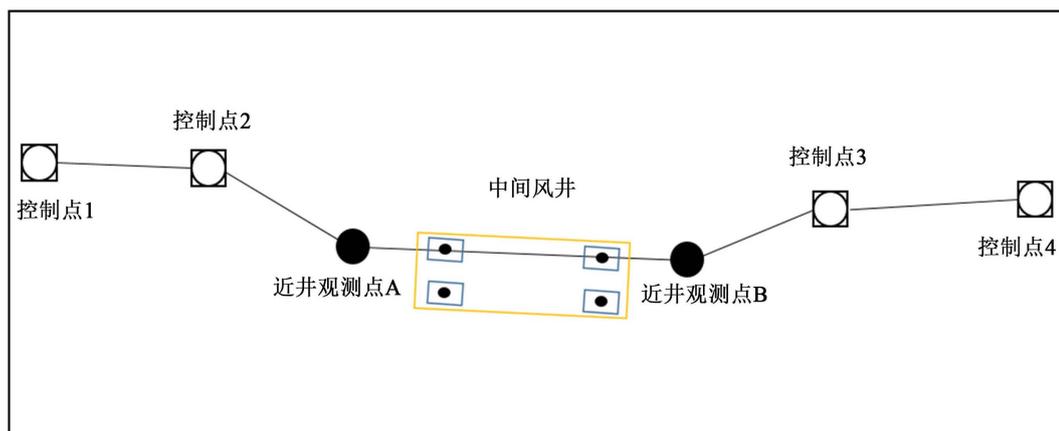


Figure 1. Schematic diagram of surface near-well layout

图 1. 地面近井布设示意图

3.2. 始发井联系测量

3.2.1. 基线边设置

左、右线基线边点位布设时, 需满足点位可交叉通视的条件, 方便左右线基线边的联测, 增加多余观测。由于始发井为 $130 \text{ m} \times 31.8 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的矩形基坑, 盾构始发联系测量时, 基线边长度不足 90 m , 本区间采用主副基线边相互检核的方式提高精度; 在隧道掘进至 $150\sim 200 \text{ m}$ 时及时更换长基线边, 更换后的基线边长约 140 m , 基线边方位角精度理论上可提高 $3''$ 以上(取对中误差为 2 mm), 坐标精度可提高 64.8 mm , 详见表 1。

Table 1. Baseline edge setting error table
表 1. 基线边设置误差表

| 基线边长度(m) | 对中误差引起的方位角误差(″) | 方位角误差引起的贯通面坐标误差(mm) | 备注 |
|----------|-----------------|---------------------|--------------------------------|
| 90 | 9.2 | 180.5 | 按最不利情况下推算, 区间长度取 4046.421 m 计算 |
| 140 | 5.9 | 115.7 | |

3.2.2. 联系测量

结合现场综合考虑, 选用两井定向法对基坑内基线边进行定向测量, 示意见图 2。联系测量时, 选用 Φ0.3 mm 钢丝搭配 10 kg 重锤, 测前对钢丝、重锤的悬挂进行检查, 确保无误。为确保精度, 采用微动钢丝的方法独立测量三次, 最终取三次数据均值作为基线边的最终成果, 精度理论上可提高 $\sqrt{3}$ 倍。

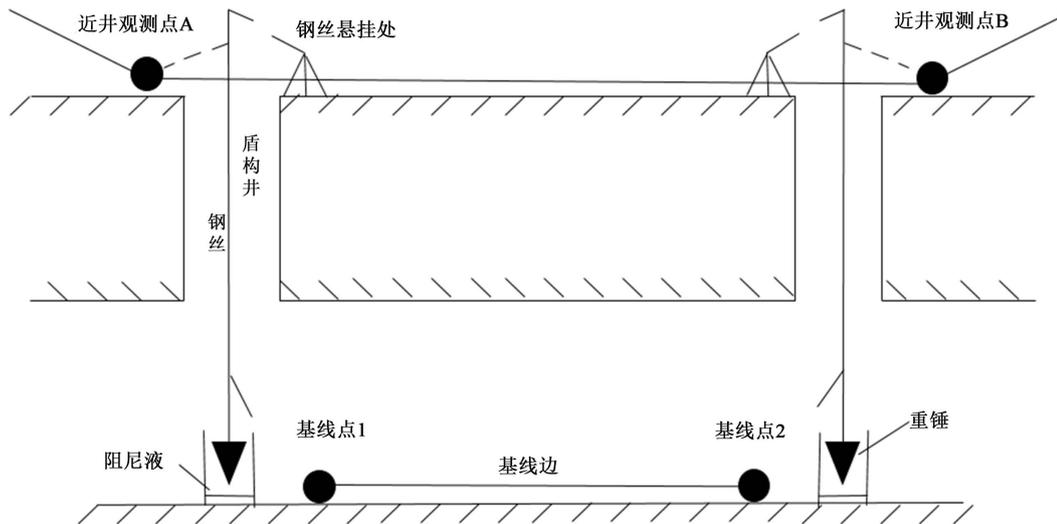


Figure 2. Schematic diagram of orientation of two wells
图 2. 两井定向示意图

3.3. 隧道内导线延伸

3.3.1. 洞内点位布设

隧道内延伸导线布设严格按精密导线网布点要求进行。考虑到隧道内导线延伸精度, 结合该区间隧道内径 3.85 m, 且曲线半径大、整体坡度较小, 洞内通视条件较好的特点, 可适当减少测站数, 洞内导线点之间的点间距可由 150 m 适当放宽至 300~350 m, 且尽可能等边长布设, 根据横向贯通误差公式 $m_{\square}^2 = \left(\frac{m_{\beta}}{\rho}\right)^2 S^2 n(n+1)(2n+1)/6$ [9] (其中 m_{β} 为导线测角中误差, 取 2.5″, S 为导线平均边长, n 为边数, ρ 取 206,265), 如表 2 所示, 通过减少测站数、增加导线边长的方式, 经推算, 理论上横向贯通精度可提高 35.5 mm~43.1 mm。

此外, 点位布设还考虑了旁折光影响和位置是否有利于保护, 并需要避开大功率设备的干扰。延伸导线按双导线网布设, 每八条边形成闭合环, 以增加多余观测、增加网型强度。

本区间隧道单向掘进超 4 km, 在导线边长 300~350 m 的情况下, 总测站数亦不少于 11 站, 按照常规单站对中误差 2 mm 计算, 在最不利情况下最终对中误差累积会超过 22 mm, 对隧道贯通精度影响很

大。为尽量减少对中误差对贯通精度的影响, 该区间隧道内主控导线点位采用强制对中观测台, 强制对中观测台对中精度理论可达 0.05 mm, 累积对中误差最多可降低 21 mm。

Table 2. The relationship between the wire side length and the lateral penetration error
表 2. 导线边长与横向贯通误差的关系

| 区间长度 L (m) | 导线边长 S (m) | 边数 n (条) | 横向贯通误差 $m_{横}$ (mm) |
|---------------|---------------|-------------|------------------------|
| 4046.421 m | 150 | 27 | 151.3 |
| | 300 | 14 | 115.8 |
| | 350 | 12 | 108.2 |

3.3.2. 延伸导线观测

洞内延伸导线的观测, 采用与地面近井导线相同的人员、仪器设备配置, 最大限度保证洞内导线测量质量稳定。每次导线延伸数据采集完, 旋即进行内业与上次相同测站边角数据比较, 对有变化的测站数据作处理分析, 对有问题的测站及时组织复测, 确保数据正确无误。

3.4. 陀螺定向测量

陀螺定向测量是长区间隧道检核坐标方位的重要手段。洞内延伸导线为单定向导线, 缺少可检核的条件, 随着隧道掘进长度的不断增加, 导线测角误差会不断地积累, 越靠近贯通面附近控制点精度越差。在本区间测量人员使用中船重工 AGT-5 (标称精度为 5") 的高精度陀螺全站仪, 分别在隧道掘进至 800 m、1600 m、2400 m、3200 m 和贯通前 150~200 m 时, 选取当时靠近贯通面的地下导线边进行陀螺定向。通过加测陀螺定向, 隧道内原单定向导线与加测的陀螺定向边构成多条方向附合导线, 有效减少因导线长度增加导致方位角误差不断累积的问题, 为洞内延伸导线提供方位检核条件。

3.5. 钻孔投点

本区间影响隧道贯通最大的难点是区间长度太长, 在向洞内长距离导线延伸过程中缺少对坐标、方位的校核条件, 导致测量误差积累却无法发现。加测陀螺定向边虽然能为导线方位角提供校核, 但无法为控制点坐标提供校准, 通过大两井定向法可以修正隧道内控制点坐标。

3.5.1. 钻孔位置选择

受原矿山法隧道钻孔投点法启发并结合现场施工情况及地面状况, 本区间选择在 5#联络通道对应的地面位置打孔, 该位置位于隧道内 1.5 km 处, 埋深约 18 m, 对应地面点位于车辆稀少的道路旁, 方便钻孔作业, 且该位置在隧道联络通道处, 左、右线可共用该钻孔, 减少了一次钻孔作业, 为工程节约了时间与钻孔成本。

3.5.2. 大两井定向

打孔完成后, 该钻孔与始发井悬吊钢丝形成大两井定向, 钻孔位置地面导线与始发井地面导线连接组成新的附合导线, 保证了钻孔位置地面导线精度, 地下部分与隧道内延伸导线网连接。

该方法将钻孔位置地面坐标, 通过悬吊钢丝的方法直接引测至隧道内控制点, 使该控制点与始发井基线边形成附合导线, 网结构见图 3。本工程使用经严密平差后的洞内控制点坐标指导后续隧道掘进工作, 通过严密平差, 隧道内控制点坐标最大修正近 30 mm。

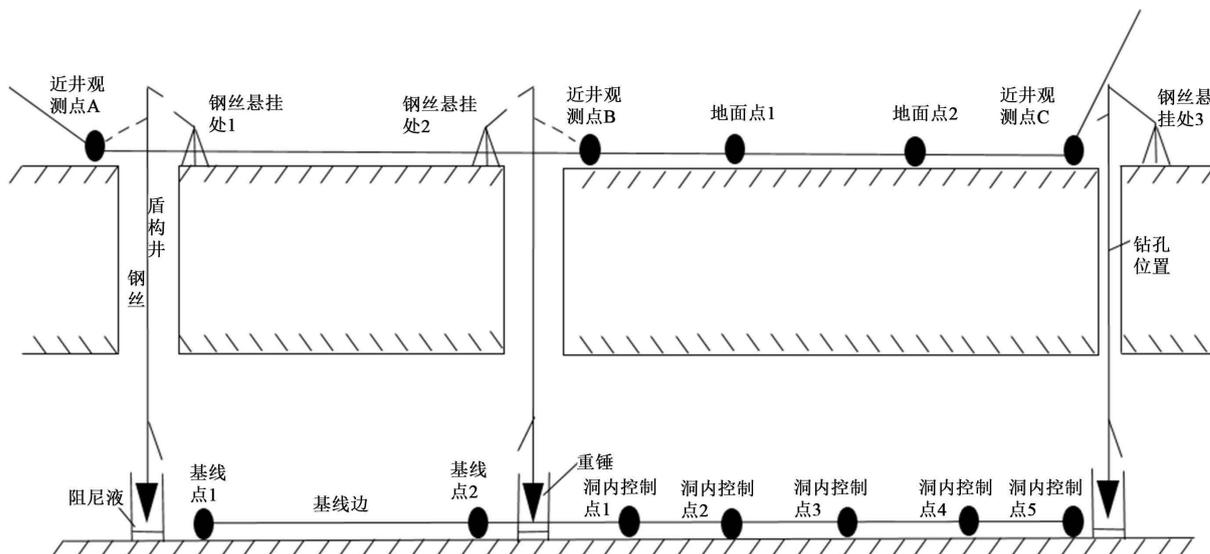


Figure 3. Orientation schematic diagram of Daliang well

图 3. 大两井定向示意图

4. 结语

地下隧道长区间精密控制测量对于工程顺利贯通及安全运营起着至关重要的作用, 促进了国家高质量发展。本文通过研究平面测量误差的主要来源, 结合广州市某地铁区间测量案例, 提出多项提高测量精度的措施, 并分析了这些措施对于降低误差的作用, 建立了一套行之有效的降低测量误差的技术体系, 对确保隧道精准贯通、提高工程质量具有重要的意义。

参考文献

- [1] 胡玉祥, 张洪德, 王智, 等. 地铁隧道竖井间贯通测量误差分析与应用研究[J]. 城市勘测, 2017(6): 126-130.
- [2] 魏成, 花向红, 唐琨, 等. 地下导线测量对隧道横向贯通误差影响研究[J]. 测绘地理信息, 2013(1): 11-13.
- [3] 曹华生. 浅谈 GPS 和精密导线在轨道交通控制测量中的应用[J]. 北京测绘, 2014(6): 44-47+39.
- [4] 潘正风, 徐立, 肖进丽. 高速铁路平面控制测量的探讨[J]. 铁道勘察, 2005, 31(5): 1-3.
- [5] 冯仲科. 地下贯通工程测量方案的优化理论和方法[J]. 测绘学报, 1996, 25(4): 303-308.
- [6] 吴敬奎, 方秀友, 王文龙. 长距离隧道控制测量与精度分析[J]. 江西建材, 2022, 287(12): 88-90.
- [7] 孔祥元, 郭际明, 刘宗泉. 大地测量学基础. 第 2 版[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2010.
- [8] 王启善. 特长距离高精度巷道贯通测量方案设计及其精度分析[J]. 煤矿安全, 2011, 42(3): 135-138.
- [9] 本社. GB/T50228-2011 工程测量基本术语标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2012.