

城市轨道交通贯通测量关键技术与精度控制研究

李宇航

合肥市轨道交通集团有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i7.8998

[摘要] 本文系统梳理地面平面与高程控制网布设、竖井两井定向、钢尺高程传递、地下导线加陀螺定向联合测量全套工艺流程，从误差传播理论出发，逐项拆解贯通平面、高程误差来源，建立量化误差预计计算公式，配套全流程精度管控措施，研究总结的成套测量、平差、纠偏技术可为同类城市核心区长距离地铁隧道贯通工程提供标准化技术参考，具备较强工程应用价值。

[关键词] 城市轨道交通；盾构隧道；贯通测量；陀螺定向；两井定向

Research on Key Technologies and Precision Control for Urban Rail Transit Tunneling Surveys

Li Yuhang

Hefei Rail Transit Group Co., Ltd.

[Abstract] This paper systematically outlines the complete workflow for integrated surveying techniques—including ground plane and elevation control network layout, directional measurement of vertical shafts, steel tape elevation transfer, and combined surveying using underground traverse lines with gyroscopic orientation. Starting from error propagation theory, it analyzes the sources of errors in tunneling planes and elevations item by item, establishes quantitative error prediction formulas, and implements comprehensive precision control measures throughout the process. The developed integrated approach for surveying, adjustment, and correction provides standardized technical guidance for long-distance subway tunneling projects in urban core areas, demonstrating significant practical engineering value.

[Key words] Urban rail transit; Shield tunneling; Through-tunnel surveying; Gyroscopic orientation; Dual-borehole orientation

1 引言

1.1 研究背景与工程需求

城市核心区施工环境极大提升贯通测量难度：其一，地面建筑物密集，高层荷载引发地表不均匀沉降，地面控制点易发生位移；其二，地下管线纵横交错，竖井开挖尺寸受限，多数工作竖井净宽不足6m，钢丝投点、仪器架设空间狭小，观测视线遮挡严重；其三，软土、淤泥质土层分布广泛，地下水丰富，竖井井壁渗水、空气对流会加剧竖井联系测量观测误差；其四，城区电磁干扰、车辆震动频繁，GNSS静态观测、地下全站仪测角均会受外部环境扰动。

依据国标 GB/T50308—2017 明确规定：盾构隧道单向掘进长度大于1000m时，横向贯通中误差允许值 ± 50 mm，高程贯通中误差允许值 ± 30 mm；当区间长度超过2000m，仅依靠地下支导线测量难以满足精度要求，必须引入陀螺全站仪定向、多次竖井联系测量等辅助手段控制误差累积^[1]。

1.2 研究内容与技术路线

第一，系统梳理贯通测量三级基准体系：地面D/E级GNSS平面控制、二等高程控制网布设与观测标准；竖井两井定向、长钢尺高程传递详细操作流程；地下精密导线+间隔陀螺定向观测、数据平差方法。第二，基于误差传播定律分层推导地面、竖井、地下测量分项误差计算公式，量化各工序对最终贯通偏差的贡献占比，给出长隧道误差预判方法。第三，针对仪器、观测环境、数据处理三大维度提出全过程精度管控方案，明确超限数据重测、掘进中途校核的节点要求。第四，依托某地铁3号线盾构区间工程开展实测，对比传统测量与本文集成测量方案的贯通成果，验证技术体系可靠性，总结工程实操要点。

技术路线：规范条文研读→测量工序拆解→误差理论建模→成套控制技术设计→实体工程实测验证→成果对比分析→结论与发展展望。

2 城市轨道交通贯通测量三级基准技术体系

2.1 地面平面与高程控制网布设及观测

2.1.1 平面 GNSS 控制网

地铁线路整体首级平面控制采用 D 级 GNSS 网，依托城市现有 C 级基础控制点作为起算点；每个车站、施工竖井周边加密布设 E 级 GNSS 加密点，构成区间二级控制基准。点位布设遵循四项原则：（1）点位远离高层建筑、高压线、大型工程机械，卫星观测截止高度角 $\geq 15^\circ$ ，避免多路径效应；（2）控制点浇筑强制对中混凝土墩，埋设不锈钢测量标芯，顶部加盖保护井，防止车辆碾压、施工扰动；（3）相邻加密点间距控制 500~800m，两座竖井间至少布设 2 个 E 级点，保证竖井定向时有两组独立地面起算坐标；（4）点位布设在稳定原状土层或永久建筑墙体，避开回填土、基坑沉降区域，每年复测 1 次，雨季、基坑开挖后增加复测频次^[2]。

2.1.2 二等高程控制网

高程统一采用城市 1985 国家高程基准，全线布设二等水准路线，串联所有车站、竖井平面控制点。观测仪器选用 DS1 精密水准仪配套钢瓦条码水准尺，观测模式执行奇偶站交替法。所有竖井井口设置 2 个永久性高程基准点，两点高差相互校核；竖井开挖、降水施工完成后必须复测高程网，消除地表沉降带来的高程系统偏移，保证高程向下传递基准统一。

2.2 竖井联系测量（平面两井定向+高程钢尺传递）

城区地铁竖井普遍深度 20~45m，单竖井一井定向钢丝偏摆、风流扰动带来方位误差较大，区间存在两座施工竖井时，统一采用两井定向法作为平面联系测量核心手段。

2.2.1 两井定向操作流程

（1）投点准备：每座竖井悬挂 2 根 $\phi 0.3$ mm 高强度碳素钢丝，下端悬挂 10 kg 铅锤，铅锤完全浸入机油阻尼桶，降低空气对流造成的钢丝晃动；两根钢丝水平间距不小于 1.2m，增大地下观测角度提升图形强度。

（2）地面观测：在井口布设全站仪，分别测量两根钢丝地面坐标，同步观测钢丝连线方位，独立观测 3 测回，测回坐标差值小于 2 mm 方可取用。

（3）地下观测：隧道内架设全站仪，观测两竖井共 4 根钢丝构成无定向导线，导线点全部设置强制对中支架，消除对中误差。

（4）数据平差：采用无定向导线平差模型求解地下导线起算坐标与方位，规范要求两次独立定向方位角较差不得大于 16"，超出限值需重新投点观测。

（5）掘进关键节点强制复测：隧道掘进至 100m、300m、距贯通面 200m 三个节点，各完整开展一次两井定向，更新地下导线起算基准，及时修正前期累积误差。

2.2.2 竖井高程传递测量

竖井深度小于 50m 采用经检定 30m/50m 钢瓦长钢尺传递高程，操作要点：钢尺上端井口仪器固定，下端连接标准拉力重锤；井口、井下两台水准仪同步读取钢尺上下端读数，独立观测 3 测回，每测回变动仪器高度。数据处理必须加入三项改正：

钢尺尺长改正、温度改正、钢尺自重拉伸改正。井深大于 50m 条件下优先采用光电测距高程传递，降低钢尺自重变形系统误差，测回间高差较差控制在 3 mm 以内。

2.3 地下洞内导线与陀螺定向联合测量

地下导线是隧道掘进实时导向依据，纯支导线随掘进距离延长，角度误差持续累积，长区间必须间隔布设陀螺定向边约束方位误差。

（1）导线布设标准：洞内每 50m 设置临时中线点，每 300m 埋设强制对中永久导线点，点号统一编号记录；导线观测采用三架法，减少仪器、觇标对中重复误差，每站 6 测回测角，边长往返观测。

（2）陀螺定向间隔设置：单向掘进每 300m 布设一条陀螺校核边，陀螺仪器采用逆转点法观测，每条边观测 5 个逆转点求取平均方位，单次定向中误差 $\leq 8''$ ；同一陀螺边前后两次定向方位较差 $\leq 12''$ ，否则重测。

（3）多源数据联合平差：将地面 GNSS 基准、两井定向坐标、多条陀螺方位成果共同导入科傻测量平差系统，构建地面-地下一体化平差模型，消除分段测量带来的基准断层，输出统一中线坐标指导盾构机掘进。

3 贯通测量误差来源分析与误差预计计算

3.1 贯通误差分项来源

横向贯通误差是控制核心，总误差由三大分项误差叠加而成：地面控制测量误差 M1、竖井联系测量误差 M2、地下洞内导线测量误差 M3；高程贯通误差同理分为地面水准误差、竖井钢尺传递误差、洞内水准测量误差。

（1）地面控制误差：GNSS 基线观测残余误差、精密导线测角测距误差、地表沉降导致控制点位移，该部分占总横向误差 15%~20%；

（2）竖井联系测量误差：钢丝风流摆动投点偏差、井下观测视线短带来测角误差、钢尺传递温度不均系统偏差，占总误差 25%~30%；

（3）地下导线累积误差：洞内潮湿粉尘降低观测精度、长导线角度误差持续传递，是贯通偏差最主要来源，占总误差 50%以上；陀螺定向可直接截断角度误差传导，因此长隧道必须加密陀螺边^[3]。

3.2 横向贯通误差预计公式

依据误差传播定律，隧道两端相向掘进总横向贯通中误差计算公式：（1）总地面导线产生贯通误差： $M_1 = \pm m_B \rho_{L1} \sum R x^2$ （式中： m_B 地面导线测角中误差； L_1 地面线路总长； ρ 弧度换算常数 206265"； $R x$ 各导线点至贯通面垂直力臂）。（2）两井定向引起贯通误差： $M_2 = m_{\alpha 12} + m_{\alpha 22} \rho_{L2}$ ， $m_{\alpha 12}$ 、 $m_{\alpha 22}$ 分别为两座竖井定向方位中误差， L_2 竖井至贯通面距离。（3）地下导线角度累积误差：无陀螺约束纯导线： $M_3 = \pm m_B \rho_{L3} 6n(n+1)(2n+1)$ 增设陀螺定向边后，每段导线独立截断误差， M_3 数值降低 40%~60%。

工程开工前依据区间长度、导线测站数完成误差预判,若计算总中误差接近 50mm 规范限值,提前增加陀螺定向频次、提升导线观测测回数,优化测量方案。

3.3 全流程精度控制配套措施

3.3.1 仪器设备管控

所有测量仪器每年送计量院强制检定,全站仪测角 2"、测距 1 mm+1ppm;陀螺全站仪定向精度 $\leq 5''$;水准仪 i 角不得大于 15"。井下观测前擦拭仪器镜头,配备防潮保护套,避免水汽附着产生读数误差。

3.3.2 现场观测环境管控

地面 GNSS、导线观测避开正午高温、大风天气;竖井观测选择凌晨无风时段,井口围挡挡风布减少钢丝摆动;洞内观测提前开启通风除尘,视线长度控制在 150m 以内,避开盾构机掘进震动时段作业。

3.3.3 数据处理管控

所有原始观测记录手写存档,不得事后涂改;测角、测距、水准超限值数据全部现场重测,禁止软件人为剔除正常观测值;平差完成输出中线坐标后,双人交叉复核坐标计算书,防止输入性计算错误。

4 工程实例应用与成果对比

4.1 工程概况

国内某城市轨道交通 4 号线某盾构区间,采用土压平衡盾构施工。区间上方为城市主干道,沿线分布 6 栋 18~26 层居民楼,地下存在 DN1200 雨水、DN800 燃气综合管线;场地地层上部为杂填土、淤泥质黏土,地下水位埋深 3.2m,设置工作竖井、接收竖井各 1 座,竖井净尺寸 5.5m×6m,竖井深度 36m。规范要求区间横向贯通允许中误差 ± 50 mm,高程贯通允许中误差 ± 30 mm。本工程同步设置对比试验:左线采用传统测量方案(仅开工、贯通前各 1 次两井定向,无中途陀螺校核);右线采用 GNSS+两井定向+每 300m 陀螺定向集成测量体系,最终对比两条隧道贯通实测偏差。

4.2 本工程测量方案实施

(1) 地面控制:全线布设 8 个 E 级 GNSS 加密点,二等水准路线总长 4.8 km,竖井井口浇筑强制对中墩;

(2) 竖井联系测量:两次完整两井定向,高程采用 50m 钢瓦钢尺传递,完成温度、自重改正;

(3) 右线洞内测量:每 300m 埋设永久导线点,共布设 7 条陀螺定向校核边,掘进 100m、300m、2100m 节点重新定向更新中线;左线仅起点、终点两次定向,全程无陀螺约束。

4.3 贯通实测结果与分析

(1) 左线传统方案:横向贯通闭合差 47 mm,高程闭合差 29 mm;横向误差接近规范 50 mm 限值,掘进中段导线方位累积误差达 38",盾构掘进过程中多次出现中线小幅偏移,现场频繁人工调整掘进姿态,施工效率偏低。

(2) 右线优化集成方案:横向贯通闭合差 28 mm,高程闭合差 22 mm,两项偏差均远优于规范允许限值;7 次陀螺定向有效切断角度误差传导,全线最大方位累积误差仅 14",盾构沿设计中线平稳掘进,无大规模姿态纠偏操作。

(3) 成果对比可见,增加间隔陀螺定向、多节点竖井复测的成套技术,可将横向贯通误差降低约 40%,大幅降低隧道管片偏位、后期调线调坡工作量,区间节约纠偏工期 12 天,减少管片破损、二次注浆施工成本。实测数据验证了本文贯通测量技术体系在城区长盾构区间的实用性与高精度优势。

5 结论与行业发展展望

5.1 主要研究结论

(1) 城市核心区软土地层、狭小竖井盾构隧道贯通测量建立“地面高精度 GNSS 基准—两井竖井传递—洞内导线加陀螺分段约束”三级基准传递体系,单一导线测量无法满足 2 km 级长区间精度要求;

(2) 地下导线角度累积误差是横向贯通偏差主导因素,每 300m 增设陀螺定向边可有效截断误差传导,配合掘进中途三次强制定向复测,能将贯通偏差控制在规范限值一半以内;

(3) 贯通误差可通过误差传播公式提前量化预判,项目开工前完成误差预计,可针对性调整观测测回、陀螺布设密度,从源头规避贯通超限风险;

(4) 完整的仪器检定、现场环境控制、双人复核平差数据全流程管控,可消除人为、设备、环境带来的系统误差,保障测量成果稳定可靠。

5.2 技术发展展望

(1) BIM+测量一体化应用:将地面控制、竖井、洞内导线全部坐标录入隧道 BIM 模型,实现中线偏差实时可视化,盾构掘进偏差自动预警;

(2) 惯性导航融合测量:小型惯性测量单元搭配全站仪,实现井下无通视条件下连续定位,进一步减少人工导线观测工作量;

(3) 自动化智能监测:竖井、洞内布设自动监测棱镜,远程实时采集控制点位移数据,自动更新隧道中线,降低现场人工测量劳动强度;

(4) 标准化测量软件开发:整合两井定向平差、陀螺方位改正、贯通误差预计计算模块,实现原始观测数据一键平差输出成果,提升测量内业效率。

[参考文献]

[1]住房和城乡建设部.GB/T 50308—2017 城市轨道交通工程测量规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

[2]国家市场监督管理总局.GB 50026—2007 工程测量规范[S].北京:中国计划出版社,2007.

[3]费先明.城市轨道交通长隧道贯通误差分析与测量方法应用[J].城市勘测,2021,(6)139-142.