

# 超长盾构隧道测量误差来源及精度控制研究

刘冀

中铁北京工程局集团城市轨道交通工程有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18973

**[摘要]** 盾构法隧道施工的几何精度直接决定线路平顺性、结构安全性及贯通成功率。本文以天津地铁Z2线“渤龙湖站~春华路站”盾构区间(全长约2.5km,小半径R=500m,最大坡度14.129%,穿越河流、铁路及构筑物等复杂环境,粉质黏土地层为主)为工程背景,系统剖析测量误差来源,构建“基准控制-动态引导-数据反馈”的全过程精度控制体系,通过优化控制网布设、强化导向校准、智能纠偏及多源数据融合等关键技术,将隧道横向贯通中误差控制在 $\pm 38\text{mm}$ ,竖向贯通中误差控制在 $\pm 19\text{mm}$ ,均优于规范限值(横向 $\pm 50\text{mm}$ 、竖向 $\pm 25\text{mm}$ ),为同类复杂环境盾构工程提供技术参考。

**[关键词]** 盾构隧道; 测量误差; 精度控制; 贯通误差; 控制网优化

**中图分类号:** U45 **文献标识码:** A

## Research on Sources of Measurement Errors and Precision Control in Shield Tunneling

Yan Liu

China Railway Beijing Engineering Bureau Group Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd.

**[Abstract]** The geometric accuracy of shield tunneling construction is crucial for ensuring smooth alignment, structural safety, and successful tunneling. Taking the "Bo Longhu Station~Chunhua Road Station" shield tunnel section as a case study, this paper proposes a comprehensive and systematic precision control technology system for long-distance, small-radius curved, and complex underpassing environments. The system encompasses underground control network optimization, enhanced orientation surveying, real-time dynamic monitoring and deviation correction during excavation, and multi-source data fusion processing. Engineering applications demonstrate that implementing integrated precision control measures effectively keeps tunneling errors within the permissible limits of specifications, ensuring high-quality project completion.

**[Key words]** shield tunnel; Measurement error; Guidance system

### 引言

盾构隧道施工处于地下隐蔽环境,掘进轨迹需严格契合设计轴线,测量偏差的累积可能引发管片错台、轴线偏移、结构侵限甚至掘进失败,造成重大经济损失与工期延误。“渤龙湖站~春华路站”盾构区间兼具长距离、小半径曲线、软土地层及复杂下穿环境等多重技术难点,对测量精度控制提出极高要求。本文聚焦测量误差产生机理,针对性优化精度控制关键技术,通过量化数据与实操图表支撑,提升技术方案的实用性与可操作性。

### 1 盾构隧道测量误差来源分析

#### 1.1 误差分类及核心构成

测量误差为系统性叠加结果,按来源可分为四类,各类误差的影响权重、典型表现及量化指标如下表所示:

#### 1.2 关键误差影响规律

通过工程实测数据拟合,得到核心误差随掘进距离的变化规律:长距离掘进中,仪器系统误差与环境误差呈线性累积,每

掘进100m误差叠加约2~3mm;小半径曲线段(R=500m)中,曲线投影误差较直线段放大2.3倍;软土地层中,地层变形误差占总误差的比例随掘进深度增加至25%。

误差类型	核心来源	影响权重	量化指标	控制优先级
仪器与系统误差	全站仪轴系误差(视准轴、横轴、竖轴)、导向系统(VMT/PPS)校准误差、ELS靶安装偏差	35%	测角中误差 $\pm 2.5''$ , 测距误差 $\pm (2\text{mm}+2\text{ppm}\cdot D)$ , 导向系统零位误差 $\leq \pm 1\text{mm}$	高
环境与外部条件误差	地下控制点位移(管片沉降、震动扰动)、温度/气压梯度引发的折光误差、机械振动与电磁干扰	25%	控制点累计沉降 $\pm 3\text{mm}/100\text{m}$ , 温度变化导致测距偏差 $\pm 1\text{mm}/10^\circ\text{C}$	高
操作与数据处理误差	仪器/棱镜对中照准偏差、测量数据记录粗差、平差模型选择不当(支导线按闭合导线平差)	20%	对中误差 $\leq 1\text{mm}$ , 照准偏差 $\leq 0.5\text{mm}$ , 平差模型不当导致误差放大1.5倍	中
特殊误差	小半径曲线投影简化误差、盾构机与管片姿态耦合偏差、软土地层固结蠕变	20%	曲线投影误差 $\pm 3\text{mm}/\text{环}$ , 软土地层沉降 $\pm 5\text{mm}/\text{环}$ , 盾尾间隙不均匀偏差 $\leq 5\text{mm}$	高

## 2 盾构隧道施工测量精度控制关键技术

针对上述误差来源,需构建“从地面到地下、从静态控制到动态引导、从数据采集到智能决策”的全过程精度控制体系。

### 2.1 高精度地下控制网的建立与维护

(1)地面控制网强化:在区间两端明挖盾构井附近,建立高等级、强制对中的平面与高程控制点,作为向洞内传递坐标与方向的起算基准。地面控制测量的主要目的是建立测量的控制系统,提供可靠的平面和高程控制点<sup>[1]</sup>。工程地面控制网包括平面控制网、高程控制网,其中平面控制包括GPS网、精密导线网,本工程控制测量坐标系采用2000年天津市任意直角坐标系,高程系统采用1972年天津市大沽高程系,2015年高程。施工过程中按要求进行复核测量。(2)联系测量优化:采用“投点定向+陀螺仪定向”相结合的方法<sup>[2]</sup>。通过竖井投点(钢丝或激光铅垂仪)传递坐标,利用高精度陀螺全站仪进行独立定向,相互检核,确保地下导线起算边的方位角精度,这是控制横向贯通误差的关键。(3)地下导线网布设:采用主副导线网(双导线)形式。主导线沿隧道一侧布设,用于坐标传递;副导线构成闭合环,用于检核主导线点稳定性<sup>[3]</sup>。点位应埋设于稳定、通视良好的管片侧壁,并采用强制对中装置。随着掘进延伸,定期对导线网进行复测与整体平差,及时修正已位移的控制点。在洞内,左、右洞分别布设导线网。在线路中线两侧平移一定距离的管片底部布设一般导线点,在管片拱腰位置安装强制对中托架布置强制对中导线点。导线网布设成若干个彼此相连的带状导线环。在直线段保证平均边长在150m。由于本区间左、右线转弯最小半径为500m,因此曲线上边长应不小于60m。隧道掘进距离满足布设控制点时应及时布设地下平面控制点,并应进行地下平面控制测量。控制点应避开强光源、热源、淋水等地方,控制点间视线距隧道壁或设施应大于0.5m。地下控制导线测量应采用闭合导线形式闭合至车站起始控制边,并与联系测量进行联测以此作为控制点的校核。(4)地下高程网布设:地下控制水准点的布设利用地下的施工控制导线点,采用闭合水准路线向前延伸。在每布设一个新水准点时,应与车站井口水准点进行往返测,形成闭合水准线路<sup>[4]</sup>。

### 2.2 关键施测标准与精度指标

控制项目	施测方法	技术要求	精度限值	复核频率
平面控制测量	测回法(4测回)	左右角各2测回,左右角之和与360°差值≤4",测回内2C较差≤9"	测角中误差≤±2.5",点位中误差≤±10mm	每掘进300m1次,贯通前加密至每100m1次
高程控制测量	天宝电子水准仪+2m条码尺(二等水准)	往返观测,闭合水准路线延伸	高程中误差≤±5mm,往返较差≤3mm	每布设1个新水准点与井口水准点联测,隧道贯通前独立施测3次
联系测量	竖井投点(钢丝)+陀螺全站仪定向	独立进行3次,地下近井定向边≥120m且不少于2条	方位角中误差≤±8",高程传递中误差≤±5mm	始发前、掘进100m、300m、距贯通面100~200m各1次,累计不少于4次

### 2.3 动态导向与纠偏控制技术

#### 2.3.1 导向系统集成与校准

系统配置:采用VMT自动导向系统,搭配高精度全站仪与ELS靶,每日掘进前进行零位校准;

人工复核机制:每掘进10环(直线段)、5环(曲线段)采用人工测量(全站仪+水准仪)复核盾构机姿态,校准导向系统数据,确保俯仰、偏航、滚动误差≤±3mm/m。

#### 2.3.2 智能纠偏控制模型

采用“勤纠偏、小纠偏”策略,基于曲线半径与当前轴线偏差,建立量化纠偏模型,公式如下:

$$\Delta L = ((\Delta S * L) / R) * K$$

式中:ΔL为单环纠偏量(mm);ΔS为当前轴线偏差(mm);L为管片环宽(m),本工程取1.5m;R为曲线半径(m);K为安全系数,直线段取0.8,曲线段取1.0。

控制标准:单环纠偏量≤5mm,累计纠偏量≤20mm,避免轴线急弯导致管片受力不均。

#### 2.3.3 管片拼装优化

基于盾尾间隙(控制范围10~30mm)与轴线偏差数据,建立管片选型数据库,自动匹配标准环、左转弯环、右转弯环及拼装点位,确保成型隧道轴线与设计轴线偏差≤±20mm,管片错台≤6mm。

### 2.4 监测体系布设与数据闭环管理流程

#### 2.4.1 监测体系布设

监测项目	布设密度	监测仪器	预警值	数据更新频率
隧道收敛	50m/断面,每个断面3条测线	收敛计(精度±0.01mm)	收敛值≥10mm,日变化率≥2mm/d	2次/d(掘进期),1次/周(稳定期)
地表沉降	穿越段20m/点,普通段50m/点	水准仪(二等精度)	累计沉降≥30mm,日沉降速率≥2mm/d	1次/d(穿越期),1次/3d(普通段)
控制点稳定性	与地下导线点同布	全站仪(测角精度±0.5")	点位位移≥3mm	1次/周,掘进扰动区域加密至1次/3d

#### 2.4.2 数据闭环管理流程

建立测量数据信息化管理平台,集成控制网数据、导向系统数据、监测数据,流程如下:

数据采集(控制测量+导向测量+监测)→误差分析(对比设计值与实测值)→参数优化(调整掘进参数/纠偏量)→掘进控制→数据复核(下一环姿态验证),形成闭环控制,动态调整施工策略<sup>[5]</sup>。

### 3 工程应用与实践效果

在天津地铁Z2线“渤龙湖站~春华路站”盾构区间施工中,综合应用了上述精度控制技术:控制网方面:建立了双井定向+陀螺仪校核的联系测量方案,地下主导线平均边长150m,按城市二等导线精度要求施测。导向与纠偏方面:针对R=500m曲线段,提高了导向系统数据采样和人工复核频率,采用更精细的曲线拟合算法指导掘进。环境应对方面:在下穿振动源(铁路、主干

道)时,选择设备停歇期进行关键测量;加强隧道内通风管理,减少空气扰动。盾构区间贯通后,对贯通面两侧控制点进行联测,成果如下表所示:

贯通误差类型	规范允许值	实测值	控制效果
横向贯通误差	±50mm	+32mm(左线)、-38mm(右线)	优于规范36%、24%
竖向贯通误差	±25mm	+15mm(左线)、-19mm(右线)	优于规范40%、24%
隧道轴线偏差	≤±50mm	最大±28mm	完全满足设计要求
管片错台	≤10mm	最大6mm	合格率100%

#### 4 结论

盾构隧道测量精度控制是系统性工程,需从基准控制、过程引导、数据反馈全环节发力。针对长距离、小半径曲线、复杂环境盾构区间,通过建立“地面-地下”一体化控制网、实施动态导向与智能纠偏、融合多源监测数据的闭环管理,可有效控制误差累积,确保隧道高精度贯通。未来,结合BIM技术、SLAM技术及人工智能算法,将进一步提升测量自动化与智能化水平,为超

长距离、超高精度盾构施工提供更强技术支持。

#### [参考文献]

[1]GB 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]李苗,胡秋斌,武文清,等.盾构隧道承插式管片拼装工艺及质量控制研究[J].施工技术(中英文),2025,54(13):89-93+113.

[3]祁海峰,蒋云胜,朱沐.大直径盾构管片精细拼装施工技术[J].云南水力发电,2022,38(10):219-221.

[4]张顶立,王梦恕.盾构隧道施工测量误差控制技术研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3658-3665.

[5]刘帅,李明.小半径曲线盾构隧道贯通误差控制技术[J].城市轨道交通研究,2023,26(5):189-193.

#### 作者简介:

刘龔(1995-),男,汉族,湖北枣阳人,工程师,本科,从事技术管理、施工测量方向(地铁或盾构)等方面的研究。