

# Analysis of Error Mechanism and Precision Control Methods for Short-Side Construction Traverse Transfer in Deep Subway Excavations

Wenping Huang

China National Testing & Inspection Holding Group Shanghai Co., Ltd., Shanghai, 201203, China

## Abstract

During the vertical transfer of construction measurement control networks in deep subway excavations, continuous short-side traverses are frequently formed due to confined spatial constraints. This paper provides an in-depth revelation of the “geometric amplification mechanism” of centering errors on angular measurement precision in short-side environments, and identifies a critical precision sensitivity inflection point at a side length of 30m through simulated calculations. To address the rapid accumulation of azimuth and positional errors inherent in short-side traverses, a precision control system is proposed, centered on a high-precision forced centering system combined with multi-round observations via surveying robots and rigorous adjustment. Engineering practical verification demonstrates that under extreme conditions with an average side length of only 21m, this strategy achieves a relative total closure error of 1/89364 and constrains the positional error of the weakest point within . The research findings effectively suppress the non-linear accumulation of short-side errors and provide a standardized technical reference for similar precision contact measurements in deep foundation pits.

## Keywords

Deep Subway Excavation; Short-Side Traverse; Error Mechanism; Precision Control; Traverse Transfer; Construction Surveying

# 地铁深基坑短边施工导线传递误差机理分析与精度控制方法研究

黄文平

国检测试控股集团上海有限公司, 中国 · 上海 201203

## 摘要

地铁深基坑施工测量控制网在向坑底竖向传递过程中, 受狭窄空间限制极易形成连续短边导线。本文深入揭示了短边环境下对中误差对测角精度的“几何放大机理”, 并通过模拟计算明确了30m 边长的精度敏感度拐点。针对短边导线易导致方位角与点位误差快速累积的问题, 提出了以精密强制对中系统为核心, 结合测量机器人多测回观测及严密平差的精度控制体系。工程实例验证表明, 在平均边长仅21m的极端工况下, 该策略使导线全长相对闭合差达到1/89364, 最弱点位中误差控制在以内。研究成果有效抑制了短边误差的非线性累积, 为类似深基坑精密联系测量提供了标准化的技术依据。

## 关键词

地铁深基坑; 短边导线; 误差机理; 精度控制; 导线传递; 施工测量

## 1 引言

城市轨道交通工程作为重要的基础设施建设, 其施工质量与安全对城市发展至关重要。地铁深基坑工程是城市轨道交通建设中的关键环节, 通常涉及大开挖深度、多层混凝土支撑和复杂的地下环境, 这对基坑施工控制测量提出了极高的精度和可靠性要求<sup>[1-2]</sup>。施工控制网是所有后续结构物定位、隧道联络贯通以及结构物形变监测的共同基准, 其精度直接

决定了整个工程的最终质量。然而, 在将地面高等级控制网通过联系测量引至深基坑底部工作面时, 受限于狭小的工作空间、密集的混凝土支撑结构以及转入隧道正线联络通道的需要, 短边导线的布设成为一种不可避免的测量形态。短边导线极易受到对中误差、测角误差和环境因素的综合影响, 导致方位角传递精度急剧下降, 造成终点坐标累积误差远超规范允许范围, 严重威胁施工安全和工程贯通质量<sup>[3]</sup>。

## 2 短边导线传递模型与误差机理分析

### 2.1 深基坑控制网布设与导线传递模型

地铁深基坑施工控制测量首先需要将地面高等级平面

【作者简介】黄文平(1989—), 男, 中国江西抚州人, 本科, 从事工程测量、监测、检测研究。

控制网精确传递至基坑底部各作业面。这一过程通常通过竖井或基坑壁上的联系测量实现，常用的方法包括光束投影法、铅直定向法或导线传递法等。无论采用何种方法，最终在基坑底部形成的施工控制网必须满足《城市轨道交通工程测量规范》中规定的精度等级要求。通常要求其点位平面中误差小于±5mm，高程中误差小于±3mm，全长相对闭合差达到1/50000甚至更高。

在基坑底部，由于混凝土支撑、围护墙以及施工作业面的限制，控制点之间的通视条件往往较差，且点位间距被压缩，极易形成短边甚至超短边导线。

## 2.2 短边导线误差的几何放大机理分析

在地铁深基坑短边导线测量中，由于边长大幅减小，常规测量中相对次要的仪器对中误差的影响被剧烈放大，成为制约控制网精度的决定性因素<sup>[4]</sup>。测站点对中误差是指仪器中心轴线与测站点中心标志之间的水平距离误差。根据误差传播定律，测站或目标点的对中偏差 $e$ 对方向值的影响程度与边长 $S$ 成反比。其引起的方向误差 $m_\rho$ （秒）可表示为：

$$m_\rho = \pm \frac{e}{S} \cdot \rho \quad (1)$$

其中， $\rho=206265''$ 。在导线测量中，内角是由后视与前视两个方向共同确定的，若测站对中误差为 $e$ ，其引起的测角中误差 $m_{\beta e}$ 为：

$$m_{\beta e} = \pm \frac{\sqrt{2} \cdot e}{S} \cdot \rho \quad (2)$$

根据图1的模拟计算曲线可以发现，导线测角精度对中对误差的敏感度存在明显的“空间拐点”。当边长 $S>50\text{m}$ 时，常规对中与强制对中方式对精度的贡献差异尚在可控范围内；但当 $S$ 缩减至30m以下时，由对中偏差引起的测角中误差呈指数级跳升。以本项目平均边长21m的极端环境为例：若采用常规对中（取 $e=1.0\text{mm}$ ），仅对中一项引入的测角中误差就高达9.8"，远超0.5"级仪器的标称精度；而通过精密强制对中系统（取 $e=0.3\text{mm}$ ），可将其压低至2.9"。由此可见，在深基坑联系测量中，由于几何构网强度的先天不足，强制对中系统已不再是“可选项”，而是消减几何放大效应、确保起始方位角传递精度的物理基础。

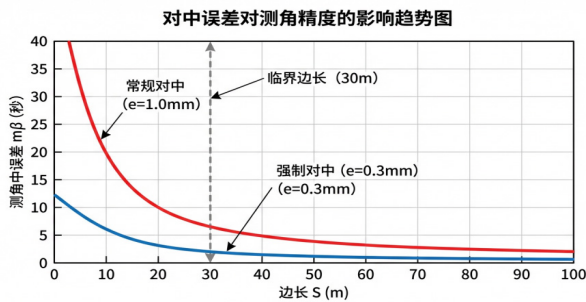


图1 测站对中误差与边长的几何关系示意图

## 2.3 测角误差与距离误差的累积影响

在短边导线中，被几何放大后的测角中误差 $m_{\beta e}$ 会随着

导线段数的增加而不断累积，最终导致终点坐标产生较大的偏差<sup>[5]</sup>。

除了测角误差，距离测量误差 $m_D$ 对短边导线精度的削弱作用同样不可忽视。全站仪测距误差通常表示为 $m_D = \pm(a + b \cdot D)$ ，其中 $a$ 为固定误差， $b$ 为比例误差。在短边（15m~35m）观测中，比例误差的影响微乎其微，而固定误差 $a$ 成为测距误差的主要来源，导致边长的相对中误差（ $m_D/D$ ）显著增大，进而降低了导线全长的相对精度。

## 3 短边导线高精度控制方法与实施

### 3.1 基础控制技术优化与仪器保障

针对短边导线传递误差的几何放大机理，基础控制技术的优化和高精度仪器的选用是保障测量精度的首要环节，其目标是最大限度地减小各项误差的源头值 $m_c$ 、 $m_\beta$ 和 $m_D$ 。首先，必须采用精度极高的强制对中（Forced Centering）技术，这是减小对中误差 $m_c$ 对测角精度几何放大效应的关键。作业时，应确保仪器、觇标和棱镜使用同一套高精度基座和载物台互换，将互换误差控制在±0.3mm甚至更优的水平。其次，仪器应选用测角精度在1"或0.5"、测距精度在±(1mm+1ppm)的高精度全站仪，并严格检定和校正仪器加常数，以消除固定误差对短边相对精度的影响。最后，观测程序应严格优化，采用不少于4测回的高精度测回法和正倒镜观测，同时选择环境稳定时段观测，并采用稳固的测墩或加重三脚架，实时监测基座稳定性，以减小偶然误差和外部环境的影响。本项目引入了具备ATR（自动目标照准）功能的测量机器人。在短距离观测时，人工肉眼照准容易受调焦误差和视差影响，而测量机器人通过相位检测和激光束中心对准技术，能够实现秒级精度的稳定照准，有效抵消了短边工况下因频繁调焦产生的视准轴偏斜，进一步提高了角度观测的重复性与可靠性。

### 3.2 高精度方位角辅助定向策略

短边导线中，由对中误差放大的测角误差 $m_\beta$ 导致的方位角累积误差 $M_{\alpha n}$ 是影响终点坐标精度的决定性因素。为了切断这种累积传递，必须引入高精度独立定向方法对导线进行辅助定向或强制校正，以隔离和消减方位角误差<sup>[6]</sup>。

#### 3.2.1 陀螺全站仪定向技术

为控制深基坑短边导线在传递过程中的方位角误差，可采用高精度（如优于±5"）陀螺全站仪进行定向。其核心手段包括：对长边或关键短边进行陀螺定向以直接获取真方位角；通过观测长边建立强制闭合方位角，约束误差累积；以及在超长或转折密集的导线中，每隔若干段设置陀螺定向点，实行分段定向，从而将整体导线分解为若干误差可控的短子段，实现定向误差的有效隔离与控制。

#### 3.2.2 组合测量与平差

将陀螺定向、传统导线测量和侧方交会等多种观测数据进行组合平差。在平差模型中，将陀螺定向提供的精确方位角作为观测值引入并赋予高权重，用于整体约束和优化

网形，从而最大限度地提高深基坑控制网的整体精度和可靠性。

## 4 工程实例应用与精度验证

### 4.1 工程概况与导线网布设

本项目选取福州市城市轨道交通4号线一期工程第1标段土建4工区（东街口站、省立医院站）的深基坑施工控制测量作为应用实例。

车站主体结构采用多层混凝土支撑围护，基坑内部净空狭窄，通视条件极差，且施工作业频繁。根据《城市轨道交通工程测量规范》要求，基坑底部施工控制网的平面点位中误差需控制在mm以内，以指导后续的隧道开挖和结构安装。

为满足深基坑内复杂环境下的精度和工期要求，基坑底部控制网以连接地面引测点的导线为主。由于密集的混凝土支撑限制，导线边长被压缩至15m~35m范围，形成了典型的连续短边导线。导线由高精度工作基点（如4J02、4J06）作为起算点，通过一系列短边转点（如4S15,4S14,...）向工作面传递坐标和方位角。这种布设方案极易受到对中误差几何放大的影响，因此需要应用高精度控

制策略保障其精度。

### 4.2 施工观测实施与精度分析

本项目短边导线测量方案的核心在于强制对中与优化观测程序相结合，以从根本上消除对中误差对测角精度的几何放大影响。

#### 4.2.1 核心控制方法实施与优化观测程序

根据第2.2节的误差机理分析，本工程短边导线测量的核心挑战是对中误差的几何放大效应。因此，为确保精度，本项目采用了第3.1节所阐述的基础控制技术优化策略作为主导方案。该方案的核心在于高精度强制对中与多测回优化观测程序相结合，从根本上将对中误差 $m_c$ 降至最低水平（ $\leq \pm 0.3\text{mm}$ ），从而有效抑制了测角精度 $m_\beta$ 的几何放大。虽然第3.2节提出的几何观测法和陀螺定向亦是高精度控制手段，但考虑到基坑内部混凝土支撑密集、作业面流动性大等因素，本项目主要依赖于最可靠、最高效的强制对中法来保障短边导线的精度。

#### 4.2.2 导线闭合差计算与相对精度

选取连接4J02至4J06的工作导线段进行闭合差计算与精度验证。该附合导线总长 $\sum D$ 约105.45米，包含5个短边导线段，平均边长约21米。

表1 深基坑短边导线核心控制方法实施要点

实施环节	核心技术/设备	目的与具体要求
仪器选用	0.5"/(1mm+1ppm) 高精度全站仪（如徕卡 TS30）	保障仪器自身具备极高精度，减小测角和测距的基本误差。
对中技术	高精度强制对中基座（互换误差 $\leq \pm 0.3\text{mm}$ ）	确保仪器、棱镜互换时，中心在同一垂直线上，最大限度消除对中误差 $m_c$ 对短边测角精度的几何放大。
观测程序	高精度测回法，4测回，正倒镜观测，归零差不超 $\pm 2'$	充分消除盘差、视准轴误差和照准误差，并通过多测回取平均提高精度。

表2 深基坑短边导线闭合差与相对精度

项目	符号	理论要求	观测成果	精度分析
导线总长	$\sum D$	-	105.450m	-
X方向闭合差	$f_x$	-	-0.55mm	满足要求
Y方向闭合差	$f_y$	-	+1.05mm	满足要求
平面闭合差	$f_s = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$	-	1.18mm	远小于 $\pm 5\text{mm}$
导线全长相对闭合差	$K = \sum D / f_s$	$\leq 1/50000$	1/89364	达到高精度要求
方位角闭合差	$f_\beta$	$\leq \pm 10'' \sqrt{n}$	-4.5''	满足要求

#### 4.2.3 导线闭合差计算与相对精度

将表2中的观测数据输入平差软件进行严格的坐标平差处理，对导线中各点的点位精度进行评估。导线中点（4S14）作为导线传递中精度最弱的点，其坐标平差后点位中误差 $M_p = \pm 1.8\text{mm}$ ，高程测量采用精密水准测量，最终高程闭合差为 $f_h = 0.8\text{mm}$ ，高程相对闭合差达到1/130000。

数据分析表明，在本工程平均边长仅为21m的极端短边工况下，通过严格落实“高精度强制对中+测量机器人

多测回观测”的组合策略，导线全长相对闭合差K依然达到了1/89364，远优于规范要求的1/50000。平差后最弱点4S14的点位中误差为 $\pm 1.8\text{mm}$ ，证明该控制策略成功抑制了对中误差在短边环境下的几何放大效应，切断了误差的非线性累积路径。平差后点位中误差 $M_p$ 最大值为 $\pm 1.8\text{mm}$ ，显著低于规范要求的 $\pm 5\text{mm}$ 。这证明通过第3.1节提出的高精度强制对中策略，成功抑制了短边导线中对中误差对测角精度的几何放大效应，保证了深基坑控制网的高精度要求。

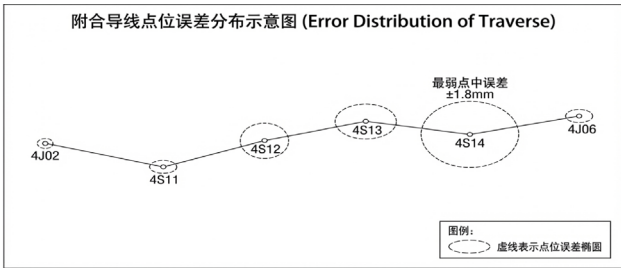


图2 附合导线点位误差分布示意图

## 5 结语

本文针对深基坑环境下短边导线测量精度控制的难题，通过理论分析与工程实例验证，明确了误差产生的核心机理并提出了针对性的控制策略。主要结论如下：

(1) 明确了误差累积的几何放大机理。在地铁深基坑15m~35m的连续短边环境下，测站对中误差对测角精度的负面影响呈指数级增长。当边长小于30m这一“敏感拐点”时，对中误差将取代照准误差成为制约控制网精度的核心瓶颈。

(2) 验证了强制对中系统的“压舱石”作用。实践证明，采用互换误差 $\leq \pm 0.3\text{mm}$ 的精密强制对中系统，配合测量机器人多测回优化观测程序，能从源头有效抑制对中误差的几

何放大效应，实现误差的物理隔离与消减。

(3) 平差结果证明了策略的有效性。在本工程平均边长21m的极端条件下，实测导线全长相对闭合差优于1/89000，最弱点4S14点位中误差仅为 $\pm 1.8\text{mm}$ 。同时，对于超长或复杂转折导线，配合高精度方位角辅助定向（如陀螺定向）是确保精度的“最后一道防线”。

综上所述，本文提出的控制方法体系为深基坑狭窄空间的精密测量提供了标准化参考，保障了地下施工控制网的高精度与可靠性。

## 参考文献

- [1] 魏本现.广州地铁二号线海珠广场站深基坑施工测量[J].测绘通报,2001(3):25-26.
- [2] 林良岱.基坑工程施工期间地铁隧道监测技术方案研究[J].建筑工程,2012(3):88.
- [3] 寇晓航,廉敏杰.影响井下等级导线测量精度主要因素分析及测量方法探讨[J].中国矿业,2009,18(3):95-98.
- [4] 郝照庆.井下导线短边测量误差分析[J].科技咨询导报,2007(23):15.
- [5] 杨珠琼,吴辉.基于测量机器人的导线测量系统研究与应用[J].工程勘察,2025(7):79-82.
- [6] 郭平,段太生,李学仕,等.多公共转点侧方交会超短边导线测量技术[J].测绘通报,2017,12(增刊2):111-115.