

深基坑平面坐标的同轴支架传递方法研究及应用

陈志恒, 王天运

(中交一航局第一工程有限公司, 天津 300456)

摘要: 为解决深基坑平面坐标传递中传统方法操作复杂、精度难以保证、环境适配性差的工程难题, 提出一种基于同轴支架的深基坑平面坐标传递创新、简便方法。通过设计高强度铝合同轴支架, 集成棱镜基座、垂准钢丝与反射片构建“物理基准-光学校验”双重传递机制, 制定标准化的装置安装与测量流程; 结合误差传播理论对该方法进行精度定量估算, 并以顺德伦桂路工程深基坑为工程背景开展现场实测验证。结果表明, 该方法在 30 m 深基坑中平面坐标传递理论综合中误差约 ± 2.7 mm, 工程实测的 10 个基坑侧壁检查点平面坐标差值 ΔX 、 ΔY 均控制在 ± 3 mm 内, 实测综合中误差约 2.9 mm, 满足 GB/T 50308—2017《城市轨道交通工程测量规范》精度要求。研究证明, 该方法操作简便、成本可控、精度可靠, 有效突破了传统坐标传递方法的技术瓶颈, 为复杂深基坑施工测量的平面坐标传递提供了低成本、高可靠性的技术方案, 对工程实践具有重要参考价值。

关键词: 深基坑; 坐标传递; 同轴支架; 施工测量

中图分类号: U6; U655.4 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)05-0052-05

doi: 10.7640/zggwjs202605008

Research and application of coaxial support transfer method for plane coordinates in deep foundation pits

CHEN Zhi-heng, WANG Tian-yun

(No.1 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: To address the engineering challenges of complex operation, difficult precision guarantee and poor environmental adaptability of traditional methods in the plane coordinate transfer of deep foundation pits, an innovative and simplified method for the plane coordinate transfer of deep foundation pits based on coaxial supports was proposed. A high-strength aluminum alloy coaxial support was designed to integrate the prism base, plumb wire and reflector, thereby constructing a dual transfer mechanism of "physical datum-optical verification", and standardized procedures for device installation and measurement were formulated. The precision of the method was quantitatively estimated based on the error propagation theory, and field measurement verification was carried out with the deep foundation pit of the Shunde Lungui Road Project as the engineering background. The results show that the theoretical comprehensive mean error of plane coordinate transfer of this method in a 30 m deep foundation pit is about ± 2.7 mm, the plane coordinate differences ΔX and ΔY of 10 inspection points on the side wall of the foundation pit measured in the project are all controlled within ± 3 mm, and the measured comprehensive mean error is about 2.9 mm, which meets the precision requirements specified in GB/T 50308—2017 *Code for Urban Rail Transit Engineering Survey*. The research proves that this method features simple operation, controllable cost and reliable accuracy, which effectively breaks through the technical bottlenecks of traditional coordinate transfer methods. It provides a low-cost and high-reliability technical scheme for the plane coordinate transfer in the construction survey of complex deep foundation pits and has important reference value for engineering practice.

Key words: deep foundation pits; coordinate transmission; coaxial support; construction surveying

0 引言

随着城市化进程的加速推进,超高层建筑、地下轨道交通等大型基础设施建设项目不断涌现,深基坑工程规模与深度持续刷新纪录。精确的平面坐标传递是保障基坑支护结构精准施工、地下结构与地上建筑无缝衔接的关键,直接影响工程安全与施工质量。目前深基坑平面坐标传递的传统方法存在一定的技术缺陷:一井定向法需通过联系三角形法传递坐标^[1],操作繁琐且井筒内的测量装置无法长期布设,易影响后续施工;两井定向法虽提升了测量精度,但对竖井间距与通视条件要求严苛,测量周期长、人力成本高^[2];全站仪自由设站法易受基坑内通视条件、大气折光及仪器对中误差的影响,精度稳定性差;GNSS技术则因基坑内信号遮挡与多路径效应完全失效。

针对传统方法的共性问题,研发一种基于同轴支架的深基坑平面坐标传递新方法,通过创新同轴支架的结构设计优化坐标传递物理基准,结合标准化测量流程构建高精度传递体系,从误差源控制、测量流程优化两方面提升坐标传递的精度与实操性。本文系统阐述该方法的原理与实施流程,通过误差传播理论开展精度估算,并结合工程实例完成现场验证,旨在为深基坑工程平面坐标传递提供新的技术思路,推动深基坑施工测量技术的发展。

1 原理介绍

1.1 同轴支架结构设计原理

同轴支架为整个坐标传递装置的核心载体,采用高强度铝合金材料制作,确保在复杂施工环境下具备卓越的稳定性与抗变形能力,不易产生晃动和变形,保持稳定。支架设计为上下同轴结构,顶部安装全站仪棱镜基座,用于固定全站仪棱镜;下方设置悬挂装置,用于钢丝、铅锤的垂直悬吊;铅锤浸入下方阻尼液内,可使铅锤在外界扰动后迅速恢复稳定,有效抑制摆动误差,实现棱镜中心与支架轴线同轴,同轴度偏差建议 $\leq 0.5\text{ mm}$,保证全站仪棱镜中心与下方悬挂钢丝处于同一铅垂线上,使得通过导线测量解算出的棱镜坐标,可近似认为是同轴支架下钢丝的坐标,为后续利用钢丝进行坐标传递奠定基础。

1.2 坐标传递原理

1) 地面测量

在地面控制点上设站,使用全站仪通过导线

测量的方式观测同轴支架顶部的全站仪棱镜,利用全站仪的边角测量功能测量水平角、垂直角和斜距等观测值。根据导线测量的平差计算方法,解算出同轴支架顶部棱镜的平面坐标 (X_p, Y_p) 。由于同轴支架的特性,此时认为棱镜坐标即为同轴支架下钢丝在地面坐标系中的坐标。

2) 坑底传递

在基坑底合适位置设站,使用全站仪观测悬挂在同轴支架下钢丝上的反射片。通过测量反射片的水平角、垂直角和斜距,结合已知的钢丝在地面坐标系中的坐标,利用极坐标法或后方交会法等测量计算方法,即可将坐标传递至基坑底,从而实现地面与基坑底之间的坐标转换。同轴支架法平面坐标传递原理见图1。

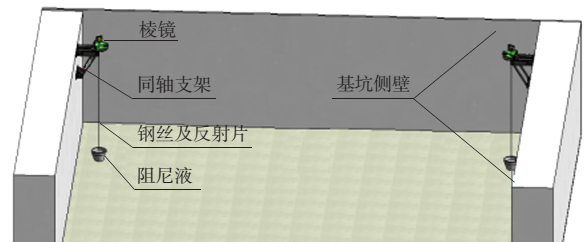


图1 同轴支架平面坐标传递示意图

Fig. 1 Schematic diagram of plane coordinate transfer with coaxial support

2 平面坐标传递

2.1 装置安装

在基坑边选择合适的位置安装同轴支架,支架安装应牢固稳定,可采用预埋件或膨胀螺栓等方式将支架固定在基坑边缘的稳定结构上,可通过调节丝杆配合水平靠尺方式将支架调成水平状态,误差控制在极小范围内,以保证同轴精度。

在支架顶部安装全站仪棱镜基座,并将棱镜牢固安装在基座上,精平。检查棱镜的安装是否稳固,棱镜镜面是否清洁,确保测量信号的准确接收与发射。

在支架下方悬挂钢丝,钢丝应选用强度高、柔韧性好且直径均匀的材料,以减少因钢丝自身特性带来的测量误差。在钢丝底部悬挂15 kg铅锤,确保钢丝处于垂直绷紧状态。将铅锤浸入阻尼液内,其作用是减小铅锤在外界干扰下的摆动,使钢丝保持稳定的垂直状态,提高测量精度。

在钢丝上合适位置粘贴反射片,反射片应粘贴牢固、平整,且反射面应朝向基坑底测量方向,确保基坑底全站仪能够清晰观测到反射片信号,

保证反射信号强度。

2.2 地面导线测量

在已知地面控制点上安置全站仪，进行仪器对中、整平操作，确保仪器处于准确的测量状态。按照导线测量的规范要求，依次观测同轴支架顶部的全站仪棱镜，测量水平角、垂直角和斜距等观测值。为提高测量精度，可进行多测回观测，并记录每次观测数据。观测完成后，采用专业的

测量平差软件，对观测数据进行平差计算，解算出棱镜的平面坐标，即得到同轴支架下钢丝在地面坐标系中的坐标。

根据 GB 50026—2020《工程测量标准》^[3]三等导线精度及技术指标施测，主要技术指标如表 1—表 2 所示。地面导线测量采用闭合导线形式，导线测量方法在类似地下工程中已有成熟应用经验^[4]。

表 1 三等导线网主要精度指标

Table 1 Main accuracy indicators of the third-order traverse network

等级	导线长度/km	平均边长/km	测角中误差/ (")	测距中误差/mm	测距相对中误差	1"级仪器测回数	方位角闭合差/ (")	导线全长相对闭合差
三等	14	3	1.8	20	1/150 000	6	$3.6\sqrt{n}$	$\leq 1/55\ 000$

注：n 为测站数。

表 2 三等导线网水平方向观测技术要求

Table 2 Technical requirements for horizontal direction observation of the third-order traverse network

等级	仪器精度等级	光学测微器 2 次重合度数之差/ (")	半测回归零差/ (")	一测回内 2C 互差/ (")	同一方向值各测回较差/ (")
三等	1"级仪器	1	6	9	6

2.3 基坑底坐标传递

在基坑底任意点位置设站，全站仪观测钢丝反射片，采用后方交会法进行坐标解算^[5]，同时测量基坑底已知检查点的坐标进行精度校核，根据 GB/T 50308—2017《城市轨道交通工程测量规范》^[6]，若坐标差值 ΔX 、 ΔY 均 $\leq \pm 3$ mm，则可以认为坐标传递合格。

在基坑底选择合适的位置设站，安置全站仪并进行对中、整平。使用全站仪观测悬挂在同轴支架下钢丝上的反射片，利用极坐标法或后方交会法等测量计算方法，通过全站仪内置程序或专业测量软件，计算出基坑底测站点的坐标，从而完成坐标从地面到基坑底的传递。在传递过程中，可通过测量多个已知坐标的检查点进行精度校核，确保坐标传递的准确性。

3 精度分析

3.1 误差来源分析

1) 系统误差：包括全站仪的轴系误差(视准轴误差、横轴误差、竖轴误差)、棱镜常数误差、钢丝垂曲误差。

2) 偶然误差：主要来源于观测过程中的瞄准误差、读数误差、外界环境引起的信号抖动误差。在风速 2 m/s 条件下，钢丝摆动导致的瞄准误差可

达 $\pm 10''$ 。

3) 环境误差：测量过程中，外界环境因素如风力、温度变化、大气折光等会影响测量精度。风力会导致钢丝和铅锤摆动，使观测目标不稳定；温度变化会引起钢丝的热胀冷缩，改变其长度和位置；大气折光会使光线传播路径发生弯曲，影响全站仪的观测角度和距离。

4) 人为误差：测量人员的操作技能和经验水平对测量结果也有重要影响。如仪器的对中、整平操作不精确，观测数据的记录和计算偏差等，都可能导致测量误差的产生。

3.2 精度估算

坑底点位精度由地面导线精度和坑底钢丝垂直度偏差引起的平面位移共同决定，基于误差传播定律，对平面坐标传递精度进行定量估算。设地面导线测量解算的棱镜坐标中误差为 m_p ，基坑底观测反射片的测角中误差为 m_β ，测距中误差为 m_s ，钢丝垂直度偏差引起的平面位移中误差为 m_v ，基坑深度为 D ，则基坑底坐标传递的综合中误差 $m_{x,y}$ 可表示为：

$$m_{x,y} = \sqrt{m_p^2 + \left(\frac{m_\beta}{\rho} \times D\right)^2 + m_s^2 + m_v^2} \quad (1)$$

式中： ρ 为弧度秒值， $\rho=206\ 265''$ 。

已知地面导线测量精度满足三等导线要求, 取棱镜坐标中误差 $m_p = \pm 2 \text{ mm}$; 基坑底观测采用 $1''$ 级全站仪, 取测角中误差 $m_\beta = 2''$, 取测距中误差 $m_s = 2 \text{ mm}$, 取基坑深度 $D = 30 \text{ m}$; 钢丝垂直度偏差在 30 m 深度内控制在 $\pm 2 \text{ mm}$ 以内, 即 $m_v = \pm 2 \text{ mm}$ 。代入式(1)可得: $m_{X,Y} \approx \pm 2.7 \text{ mm}$ 。

根据精度估算结果表明, 该方法在深度 30 m 基坑中可实现平面坐标传递中误差 $\leq \pm 3 \text{ mm}$, 满足深基坑施工测量的精度要求。

4 工程应用

4.1 工程概况

顺德伦桂路项目位于佛山市顺德区, 沉管对接端深基坑里程为 $K12+185 \sim K12+223$, 冠梁顶标高 $+3.5 \text{ m}$, 基坑开挖底标高为 $-15.326 \sim -18.587 \text{ m}$, 开挖深度为 $18.826 \sim 22.087 \text{ m}$ 。北岸沉管对接端位于左岸堤围路迎水侧河滩地, 沉管对接端宽为 48.9 m , 轴线长度为 38 m , 基坑内采用钢筋混凝土支撑+钢支撑方案, 共布置 5 道支撑。第 1 道支撑采用 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 钢筋混凝土水平斜撑, 第 2 道—第 3 道支撑采用 $\phi 800$ 钢支撑, 每 8 m 沿横向均布 2 道格构柱, 用以钢支撑的连接, 第 4 道撑采用 $1400 \text{ mm} \times 1200 \text{ mm}$ 钢筋混凝土水平斜撑, 第 5 道撑采用 $1000 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ 钢筋混凝土水平斜撑。深基坑平面形式见图 2。

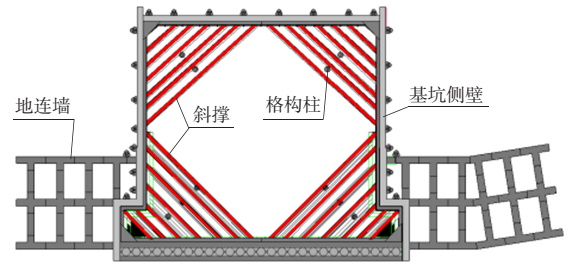


图 2 深基坑平面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deep foundation pit plane

4.2 精度验证

1) 按照上述实施方法, 在基坑边合适位置安装同轴支架, 完成全站仪棱镜、钢丝、铅锤、阻尼液和反射片的安装与调试工作, 严格按照安装流程进行装置安装与校准。

2) 地面导线测量。

3) 基坑底分阶段进行坐标传递, 每次传递后在基坑侧壁上做好 10 个检查点, 测量并记录平面坐标, 用于下一次坐标传递复核使用。

4) 在基坑底设站, 使用同一台全站仪观测钢丝上的反射片, 同样进行多测回观测, 并利用已知的钢丝坐标, 通过自由设站法计算出基坑底测站点的坐标。

5) 对基坑侧壁上做好的 10 个检查点进行平面坐标测量, 实测坐标差值统计如表 3 所示。

表 3 基坑侧壁检查点坐标差值统计表

Table 3 Statistical table of coordinate differences of check points on the sidewall of deep foundation pit

校核点编号	第 i 次传递标记检查点坐标		第 $i+1$ 次传递复核检查点坐标		$\Delta X/\text{mm}$	$\Delta Y/\text{mm}$
	X/m	Y/m	X/m	Y/m		
1	721 291.711 2	2 540 210.302 5	721 291.713 5	2 540 210.300 7	+2.3	-1.8
2	721 279.418 2	2 540 207.245 2	721 279.416 7	2 540 207.247 3	-1.5	+2.1
3	721 278.333 6	2 540 205.251 4	721 278.336 3	2 540 205.250 5	+2.7	-0.9
4	721 282.052 0	2 540 192.669 3	721 282.049 5	2 540 192.670 6	-2.5	+1.3
5	721 285.770 5	2 540 180.087 1	721 285.772 2	2 540 180.084 7	+1.7	-2.4
6	721 288.920 3	2 540 178.373 7	721 288.919 5	2 540 178.376 5	-0.8	+2.8
7	721 301.504 4	2 540 182.090 5	721 301.507 3	2 540 182.089 0	+2.9	-1.5
8	721 314.088 6	2 540 185.807 3	721 314.087 4	2 540 185.810 0	-1.2	+2.7
9	721 315.170 5	2 540 187.796 3	721 315.171 9	2 540 187.793 8	+1.4	-2.5
10	721 311.099 4	2 540 199.757 5	721 311.097 3	2 540 199.759 4	-2.1	+1.9

统计结果显示, 10 个检查点的平面坐标差值 ΔX 、 ΔY 均控制在 $\pm 3 \text{ mm}$ 以内, 所有检查点的坐标差值均 $\leq \pm 3 \text{ mm}$, 满足精度要求。平面坐标差值的中误差 m_x , m_y 为:

$$m_x = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta X^2}{m}} \approx \pm 2.0 \text{ mm}$$

$$m_y = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta Y^2}{m}} \approx \pm 2.1 \text{ mm}$$

$$m_{X,Y} = \sqrt{m_x^2 + m_y^2} = 2.9 \text{ mm}$$

式中: m 为参与计算的点数。

工程实例验证结果表明, 基于同轴支架的深基坑平面坐标传递方法在实际工程中具有良好的

精度可靠性，能够满足深基坑施工测量的高精度要求。

5 结语

针对深基坑平面坐标传递传统方法的技术缺陷，本文提出了基于同轴支架的深基坑平面坐标传递方法，通过结构设计、原理分析、精度估算与工程验证，得出以下研究结论：

1) 本方法通过同轴支架构建“物理基准-光学校验”双重传递机制，实现了棱镜与钢丝的铅垂同轴，从物理源头上减小了坐标传递的系统误差，30 m 深基坑理论综合中误差约±2.7 mm，工程实测综合中误差约±2.9 mm，均满足相关规范的精度要求。

2) 本方法制定了标准化的装置安装与测量流程，操作简便、可重复性强，且仅依托常规 1"级全站仪与简易同轴支架实施，无需购置昂贵专用设备，大幅降低了深基坑坐标传递的施工成本。

3) 工程实例验证表明，本方法可有效适配施工场地狭窄、通视条件差的深基坑工程，突破了传统方法的环境与场地限制，为复杂深基坑施工测量提供了可靠的技术方案。

本方法的应用受基坑深度、场地条件与环境因素制约，适用于 30 m 及以下、基坑边缘有稳定安装点位、坑底与反射片通视良好的深基坑工程；且对装置安装精度与测量人员操作技能有一定要求，风力过大、温度剧烈变化的环境会影响测量精度。后续研究可从两方面开展优化：1) 优化同轴支架的结构设计，增加防护与自动调平功能，提升装置的环境适应性；2) 研究环境误差补偿模

型，量化风力、温度对测量精度的影响，通过算法修正进一步提升坐标传递精度。本方法兼具工程实用性与技术创新性，具有良好的推广应用价值，可为同类深基坑工程的平面坐标传递提供参考。

参考文献：

[1] 陈方敏. 吊钢丝联系三角形法在隧道测量大型深竖井定向中的应用[J]. 城市勘测, 2010(2): 135-137.
CHEN Fang-min. Application of long wire-connection triangle method in large shaft orientation of Qing Chaosha original water tunnel crossing the Yangtze River of Shanghai[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2010(2): 135-137.

[2] 纪万坤. 平面联系测量在天津地铁长盾构区间中的应用[J]. 城市勘测, 2019(2): 160-163, 167.
JI Wan-kun. Application of orientation survey in long shield zone of Tianjin subway[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2019(2): 160-163, 167.

[3] GB 50026—2020, 工程测量标准[S].
GB 50026—2020, Code for engineering surveying[S].

[4] 王智福, 彭成, 何光滔. 精密导线测量在深圳地铁九号线的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(4): 583-586.
WANG Zhi-fu, PENG Cheng, HE Guang-tao. The application of precise traverse measurement of line No.9 to Shenzhen subway[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(4): 583-586.

[5] 张立艳. 一种地铁车站深基坑短距离投点方法[J]. 山西建筑, 2020, 46(1): 161-162.
ZHANG Li-yan. A short-range projection point method for deep foundation pits of subway stations[J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(1): 161-162.

[6] GB/T 50308—2017, 城市轨道交通工程测量规范[S].
GB/T 50308—2017, Code for urban rail transit engineering survey[S].

