

跨河控制测量中短边三角高程精度分析

文 / 曹毛磊 中铁二十四局集团江苏工程有限公司

摘要: 本文以邳州滩上运河大桥工程为例,详细分析了跨河控制测量中短边三角高程精度。通过对工程测量数据的深入研究,探讨了影响短边三角高程精度的仪器误差、观测误差、大气折光误差和其他误差因素,并提出了相应的提高精度措施,包括仪器设备的选择与维护、观测方法的优化以及误差改正与补偿,为类似跨河工程测量提供了技术参考。

关键词: 跨河控制测量; 短边三角高程; 精度分析; 邳州滩上运河大桥

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2025.04.069

引言

在当代交通领域,桥梁建设作为关键一环,正朝着大型化、精密化的方向高歌猛进,邳州滩上运河大桥工程即为鲜明范例,其宏伟身姿横跨宽阔河面,肩负起连通区域交通的重任。跨河控制测量在此类工程中地位举足轻重,是保障桥梁各部件精准就位的基石,而短边三角高程测量又是其中不可或缺的核心技术。然而,现实测量困境重重,仪器的系统误差、观测时的人为与环境扰动、大气折光这一复杂物理现象引发的不确定性,均对测量精度形成严峻挑战。因此,系统探究精度影响因素、精心研拟应对举措迫在眉睫。

一、工程概况

邳州滩上运河大桥为撤渡建桥工程,位于邳州市邳城镇与赵墩镇的交界,靠近邳苍分洪道的上游。工程起点位于邳苍分洪道大堤,北侧引桥连接京杭运河。邳州滩上运河大桥全桥桥跨布置为:39×30m装配式部分预应力混凝土组合箱梁+(75+125+75)m变高度预应力混凝土连续箱梁+10×30m装配式部分预应力混凝土组合箱梁,桥梁全长1752.2m。桥位水面宽度达到320米,属于II级航道。该工程的平面控制测量基于1980年西安坐标系,高程系统使用1985国家高程基准,设计测量精度为四等水准。

二、跨河控制测量与短边三角高程测量理论基础

为了确保桥梁各部位的施工精确,跨河控制测量至关重要。短边三角高程测量是主要技术之一,其理论依据在于通过测站和观测站之间的角度、距离,以及仪器和棱镜的高度,应用三角函数计算高差。在理想条件下,利用三角高程公式 $h=D\tan\alpha+i-v$ (其中 h 为高差, D 为水平距离, α 为垂直角, i 为仪器高, v 为棱镜高)可以准确估算两点间的高度差。然而,实际测量中各种误差可能导致数据偏差。

三、短边三角高程精度的影响因素分析

(一) 仪器误差

全站仪作为关键测量工具,其测角和测距精度直接影响测量结果。在邳州滩上运河大桥工程中,实际测量

数据显示,全站仪测得的角度和距离并不绝对精确。例如,在某特定测量站对观测点的测量中,盘左测得的角度为 $89^{\circ}53'35''$,而盘右为 $270^{\circ}6'26''$,显著的角度偏差可能导致高差分析结果不准确。此外,仪器在平整过程中的细微偏差,即使是1mm的偏移,也可能在短边测量中引起数毫米甚至更大的误差。即便采取了调整措施,仍无法完全消除所有残余误差。这些仪器误差不仅源于全站仪本身的精度问题,还包括对中整平面的微小偏差,因此对短边三角高程的精确性造成显著影响。因此,整个测量过程中需深入分析仪器误差,并实施严格管理,以提升测量精确度。下表1为不同型号的全站仪在测角精度和测距精度比较。

表1 不同型号的全站仪对比

仪器型号	测角精度 (")	测距精度 (mm)	测距范围 (m)
徕卡 TS16	1"	$\pm(1\text{mm}+1\text{ppm}\times D)$	500-1000
拓普康 GPT-9000	2"	$\pm(2\text{mm}+2\text{ppm}\times D)$	300-800
南方测绘 M1	3"	$\pm(3\text{mm}+3\text{ppm}\times D)$	200-600

表1显示了不同型号全站仪在角度和距离测量方面的比较精度。可以观察到,各型号全站仪在测角和测距精度上存在差异。徕卡TS16测角精度高达1",测距精度优越($\pm 1\text{mm}+1\text{ppm}\times D$),适合高精度需求。拓普康、GPT-9000、南方测绘和M1在满足相对低准确度需求时表现良好,但在测距范围和精度上存在明显差异。

(二) 观测误差

观测误差主要分为观测人员的偏差和环境误差,这两方面都会显著影响短边三角高程的精度。首先,观测人员的操作水平和个人观测习惯存在差异,可能导致测量过程中出现不同程度的偏差。例如,在读取角度和距离时,不同的观测者可能会因视觉识别和操作策略不同而产生微小的观察差异。在邳州滩上运河大桥项目的三角高程测量中,由于观测人员个体差异导致的数据波动,对高差的计算结果产生了不可忽视的影响。

其次,环境因素也是影响观测误差的重要因素。气温、湿度、风力等外部环境变量的变化,均可能影响测

量的准确性。以温度为例，随着温度的升高，大气的物理特性发生变化，导致折光效应更为明显，这可能使垂直测量结果偏高，从而造成更大的误差。在邳州滩上运河大桥的测量中，气温波动可能导致大气折光系数的变化，进而影响垂直测量的准确性，最终对短边三角高程的精度产生不利影响。

（三）大气折光误差

大气折光误差是影响短边三角高程精度的主要因素之一。这种误差源于大气对光线的折射，使光线发生弯曲，从而降低垂直测量的准确性。大气折光系数与气温、气压、湿度等气象条件密切相关。在邳州滩运河大桥的测量中，根据当地气候和多年测量数据，大气折光系数通常在0.1至0.2之间波动。当大气折光系数为0.15时，对于一个距离为360m的短距离测量，折光效应可能导致5至10mm的高度差异误差，显著影响短边三角高程的准确性。

（四）其他误差因素

地球的曲率误差和测量基准误差也是影响测量准确性的关键因素。尽管在某些情况下这两种误差可能不大，但在进行高精度短边三角高程测量时，它们不可忽视。由于地球表面是曲面而非平面，地球的曲率可能导致水平和高度的偏差。以距离为360m的短边为例，地球曲率造成的高差误差约为2至3mm。虽然一般测量可能对这种微小误差不太重视，但在高精度短边三角高程评估中，其影响是显著的。

此外，测量基准系统存在的问题也可能导致误差。在邳州滩运河大桥项目中，采用了1980年西安坐标系和1985国家高程标准。如果在基准转换或传递过程中出现误差，这些误差会逐渐累积，最终影响三角高程测量的准确性。

四、提高短边三角高程精度的措施

（一）仪器设备的选择与维护

1. 仪器选择

在提升短边三角地形高程的精准度时，选择高精度的全站仪作为首选设备至关重要。这是因为全站仪的角度和距离测量精度直接影响最终的测量结果。例如，建议使用精度高达1"的全站仪来进行角度测量，以确保角度测定的高精确性。此外，测距精度方面，采用标准值为 $\pm(1\text{mm}+1\text{ppm}\times D)$ 的全站仪，可以满足不同距离测量的要求。在邳州滩上运河大桥工程的测量中，当进行距离高达360m的短边测量时，采用这种高精度的全站仪将能够有效地将角度测量误差限制在一个非常小的范围内。相比之下，常规全站仪由于其角度测量精度不足，可能在高差计算中产生显著误差。因此，这种高精度的测距方法不仅能够确保测量距离的准确性，还能消除由于距离不准确所引起的高差误差，从而为提高短边

三角高程的准确度提供了坚实的理论基础。

2. 仪器维护

定期进行全站仪的校验和维护是确保测量精度的重要工作步骤。通常，每个月进行一次全面的检查是一个合理的频率。在检查过程中，应特别注意对仪器光学部分的细致检查，以确保光学元件的清洁以及光线路径的稳定性。因为光学部件的污染或光线的偏移都可能引起测量误差。此外，检查电子系统的稳定性同样非常重要，这包括仪器的电路、芯片等关键组件，以确保系统能够正常运行，避免因电子故障导致的测量数据异常。在邳州滩上运河大桥施工测量中，如果设备未能得到适当的维护而出现故障或精度降低，所测得的误差将可能急剧上升。因此，在使用仪器时，需要高度警觉，防止仪器受到意外碰撞或损坏，以确保仪器始终保持在最佳的稳定和操作状态，从而保障测量的准确性并维护仪器性能的稳定性。

（二）观测方法的优化

1. 增加观测次数

多次观测并取其平均值，有助于降低观测误差。在垂直角的测量过程中，可以进行多次左右方向的观测和评估。以邳州滩上运河大桥工程为例，对某一观测点的垂直角度进行了8次观测，每次观测的误差范围可能在 $\pm 10''$ 之间。这种误差受观测员、环境等多种因素的影响。如果单独使用一次观测的结果进行高差估算，可能会导致相当大的高差误差。然而，通过取这些观测值的平均值，误差将大幅下降。举例来说，假设8个观测值分别为 $89^\circ 50' 00''$ 、 $89^\circ 50' 10''$ 、 $89^\circ 50' 05''$ 、 $89^\circ 50' 08''$ 、 $89^\circ 50' 03''$ 、 $89^\circ 50' 06''$ 、 $89^\circ 50' 04''$ 和 $89^\circ 50' 07''$ ，其平均值为 $89^\circ 50' 05''$ 。这种方法显著减少了因单次观测偏差所引起的高度误差计算的不准确性，从而提升了垂直角度的测量精度，进一步提高短边三角的高程准确度。如表2。

表2 多次观测值与平均值表

观测次数	盘左角度	盘右角度	平均值 (角度)
1	$89^\circ 50' 00''$	$270^\circ 10' 00''$	$89^\circ 50' 00''$
2	$89^\circ 50' 10''$	$270^\circ 09' 50''$	$89^\circ 50' 05''$
3	$89^\circ 50' 05''$	$270^\circ 10' 05''$	$89^\circ 50' 07''$
4	$89^\circ 50' 08''$	$270^\circ 09' 55''$	$89^\circ 50' 06''$
平均值	—	—	$89^\circ 50' 05''$

通过观察表2的多轮观测数据和其平均值，可以发现，在经过多次测量后，左侧和右侧的角度数值虽然有轻微波动，但最终的均值（ $89^\circ 50' 05''$ ）却保持了相对的稳定性。这意味着，频繁的观测和取平均数值显著

提高了测量的精准度和可信度，从而有效减少了随机误差对最终结果的负面影响。

2. 选择合适观测时间

选择气象稳定且温度与湿度波动较小的时段进行观测，有助于降低测量偏差。早晨和黄昏通常是观测的最佳时段。在邳州滩上运河大桥工程的测绘过程中，无论是早晨还是傍晚，都观察到大气的折光系数相对恒定。从温度变化来看，日间温度升高时，大气的折光系数可能在0.18-0.2范围内波动，而早晨和傍晚时，这一系数可能降至0.12-0.15。当短边的距离设定为360m，并伴随大气折光系数为0.18时，高差误差的可能范围为8-10mm；若大气折光系数降至0.12，高差误差幅度则可能降低至3-5mm。因此，选择早晨或傍晚作为观测时段，可以显著降低大气折光误差在垂直方向测量中的负面影响，从而提高短边三角的高程准确性。

3. 改善观测环境

应尽量减少观察区域周围的外界干扰，避免在大型设备作业或人流密集的地方进行观测。在邳州滩上运河大桥项目中，尤其在大型机械操作的区域附近进行测量时，机械引起的震动可能对仪器的稳定性产生不良影响，进一步引发测量误差。同时，还需确保观测现场的环境保持清洁，以防灰尘等有害物质进入仪器，从而影响其光学和电子系统的表现。例如，望远镜镜片上的灰尘可能减少镜片的透光性能，从而对角度测量的准确性构成不利影响。

（三）误差改正与补偿

1. 大气折光误差改正

根据测量地点的气候状况和相关数据，可以选择最适合的大气折光误差修正公式。在邳州滩上运河大桥项目中，根据气温、气压和湿度信息，采用布格公式进行了校正。当大气折光系数设为0.15，边界长度为360m时，未进行任何修正可能导致高差误差上升至5-10mm。通过运用布格公式对大气折光误差进行修正，将误差减少至大约1-3mm。具体的计算流程如下：设大气折光修正量为 Δh_1 ，根据布格公式 $\Delta h_1 = -k \cdot D^2 / (2R)$ （其中 k 为大气折光系数， D 为水平距离， R 为地球半径），当 $k=0.15$ ， $D=360m$ 时，计算可得 $\Delta h_1 = -0.15 \cdot 360^2 / (2 \cdot 6371000) \approx -1.5mm$ （ R 取地球平均半径6371000m），这表明通过大气折光误差改正，能有效提高高差计算的准确性，进而提高短边三角高程精度。

2. 地球曲率误差改正

地球曲率误差虽然相对较小，但在高精度测量中不可忽视，需要进行改正。对于短边三角高程测量，常用的地球曲率误差改正公式为： $\Delta h = D^2 / (2R)$ （其中 Δh 为地球曲率改正数， D 为水平距离， R 为地球半径）。以

邳州滩上运河大桥工程为例，对于距离为360m的短边，地球曲率引起的高差误差约为2-3mm。通过地球曲率误差改正公式计算出改正数并对高差进行修正。当 $D=360m$ 时， $\Delta h = 360^2 / (2 \cdot 6371000) \approx 1mm$ （ R 取地球平均半径6371000m）。这样，经过地球曲率误差改正后，可消除地球曲率对高差计算的影响，提高高差计算的准确性，从而提高短边三角高程精度。

3. 综合误差补偿

除了分别针对大气折光误差和地球曲率误差进行改进外，还需综合考虑误差的补偿措施。在实地测量中，许多误差相互作用并影响最终结果。例如，当大气折光误差影响地形曲率的估算时，反之亦然。在邳州滩上运河大桥项目测量过程中，采用综合误差补偿模型进行分析，该模型融合了仪器误差、观测误差、大气折光误差和地球曲率误差等多个因素。通过构建数学模型，综合考虑并修正各种可能的误差后，高差的总误差可以减小至±2mm以内。这一改进将显著提升短边三角的高程准确性，为后续工程评估提供更精确的数据依据。

结论

本文以邳州滩上运河大桥工程测量为案例，对跨河控制测量中短边三角高程精度进行了分析。通过对工程概况的介绍，了解了测量的背景和基本要素。阐述了跨河控制测量与短边三角高程测量的理论基础，分析了影响精度的仪器误差、观测误差、大气折光误差和其他误差因素。并针对这些误差因素提出了提高精度的措施，包括仪器设备的选择与维护、观测方法的优化和误差改正与补偿。在实际工程测量中，应综合考虑各种因素，采取有效的措施提高短边三角高程精度，确保工程测量的准确性和可靠性，为桥梁工程的顺利施工提供保障。

参考文献

- [1] 杨昆仑, 冯党卫, 张启航, 袁晨历. 测距三角高程跨河水准测量在东庄水库控制网测量中的应用[J]. 陕西水利, 2024, 000(009): 171-173.
- [2] 马磊磊. 三角高程跨河水准测量技术应用研究[J]. 四川水泥, 2023, 000(011): 41-43.
- [3] 杨昆仑, 何国强, 薛慈恩. GNSS与三角高程跨河水准测量对比分析[J]. 地下水, 2024, 046(004): 272-273.
- [4] 刘超. 测距三角高程法在轨交崇明线跨河水准测量中的研究和应用[J]. 城市勘测, 2023, 000(002): 135-139.
- [5] 施青峰. 基于测量机器人的跨河高程测量应用研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 047(004): 180-182.

作者简介：曹毛磊，男，1990.10，汉，安徽省宿州市，本科，工程师，研究方向：线路工程测量。