

双塔双索面高塔斜拉桥施工测量技术研究

陈稳鹏

(中交一航局城市交通工程有限公司)

摘要: 随着社会发展和技术迭代,精密测量技术是保障大型工程施工质量的关键支撑。以张铁沟特大桥为案例,为解决高塔斜拉桥施工中因结构扭曲、大气折射及西北地区温差大、风力强引发的测量偏差问题,采用并优化三维相对基准法,在更多时段实现高精度测设,有效规避测量偏差。提出的方案能够提升高塔斜拉桥施工测量精度,成果可为类似大型桥梁施工提供实践经验,拓展精密测量技术应用价值。

关键词: 精密测量;双塔斜拉桥;三维相对基准法;精度优化

0 引言

索导管作为斜拉索与主梁、索塔的关键连接构件,其空间位置精度直接决定斜拉索的受力状态与桥梁整体的结构安全。若索导管定位偏差超出规范允许范围,易导致斜拉索安装困难、局部应力集中,长期运营中可能引发索体疲劳损伤、导管锈蚀等隐患,严重威胁桥梁使用寿命与通行安全。

高塔斜拉桥索导管的空定位是施工控制的关键环节。目前,全站仪三维坐标法是国内斜拉桥索导管测量定位的主流方法之一^[1]。该方法的精度主要受限于仪器自身的测量误差。由于索导管测量通常在近地面层进行,大量工程实践表明,地球大气层(特别是近地面大气)折射的影响显著制约观测结果。在测量仪器高度发展的背景下,大气折射已成为限制仪器精度发挥的关键因素。斜拉桥索塔高度大,相对跨度较大、结构线形明显,索塔日照效应显著,拉索钢结构安装精度受索塔变形影响大。在大型高塔柱桥梁的精密工程测量中,有效解决大气折射影响和塔柱自身形变问题已成为保障测量精度的核心挑战。

针对上述挑战,张铁沟特大桥对主塔测量提出了系统性的解决思路:强化关键构件(如钢锚梁、锚拉板)的系统性验收,从源头保障吊装前的构件质量问题;实施逐级控制策略,通过对控制网、上塔柱以及钢锚梁等核心构件进行多级精密控制,解决施测难度大、精度要求高等关键问题。

1 工程概况

张铁沟特大桥主塔高 190.314 m,桥梁长 698 m,是西北地区目前最高的双塔双索面半漂浮体

系高塔斜拉桥。主塔采用变截面设计,由 7 个圆弧段组成,为钢混组合梁。上塔柱截面采用矩形断面,上塔柱桥塔横桥向为 5.0 m 宽,顺桥向宽 8.0 m。下塔柱由分离式箱型断面渐变为整体式箱型断面,横桥向随着高度变化,顺桥向宽度为 8 m。

2 关键结构件验收

2.1 钢锚梁验收精度控制

锚拉板和钢锚梁分别位于上塔柱和梁端位置上,是整个桥梁测量控制核心,测量定位精度要求高^[2]。为避免拉索与管口发生碰撞,规范要求调整后的索导管顶(底)口的三维坐标偏差不得超过 5 mm,索导管中心线的空间方位偏差不得超过 0.5°^[3]。

全站仪的精度在很大程度上取决于其轴系误差的改正功能,如锚拉板、钢锚梁等高精度构件定位^[4]。配备性能稳定、观测精度高的徕卡 TS16 全站仪(1 mm+1.5 ppm)进行定位施测,确保测量的精度。

2.2 出厂验收测量

钢锚梁作为一种钢结构构件。因其固有特性,导致离开制造厂后,基础属性(如锚固点间的距离以及钢锚梁自身的高度、宽度、长度等)难以调整。关键基础属性(钢锚梁锚点坐标允许偏差为 ± 2 mm,加劲板间距 S_1 、 S_2 允许偏差为 ± 3 mm,旁弯 ≤ 3 mm 等)必须在出厂前验收,以确保其符合设计规范要求。

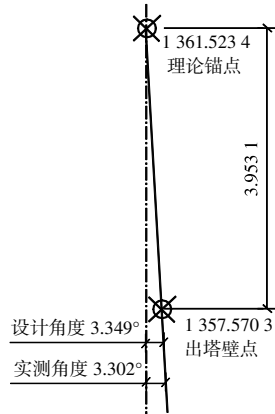
2.3 进场验收测量

钢锚梁出场验收完成后,运输至现场进行存放。在此期间,钢锚梁会因为运输过程中的各种因素以及两地温度、湿度差异产生微小的形变。

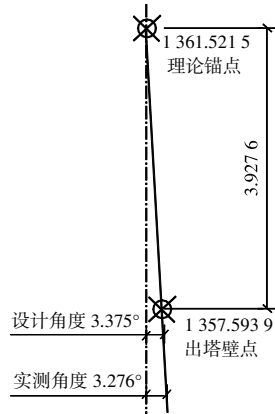
钢锚梁运抵现场后在吊装前需进行精度验收测量。

为确保进场测量的准确性，配备徕卡 TS16 全站仪，采用图形检核法与编程计算检核法对钢锚梁进场验收测量。针对钢锚梁的关键点位精确测定，保证测量数据的精确度和可靠性。

1) 图形检核法：钢锚梁为大尺寸钢构，仅



(a) 左幅钢锚梁边跨侧竖向示意图



(b) 左幅钢锚梁中跨侧竖向示意图

图 1 绘图检核(m)

2) 编程计算检核：为提高施测效率，助力施工进度推进，结合钢构特点研究，提出编程计算检核法，快速高效验收测量，指导施工。该方法在数据采集(表 1)后可快速准确计算出钢锚梁的偏差。

表 1 检核数据对比表

钢锚梁		纵向				横向	
型号	方向	实测高度/m	设计角度/(°)	实测角度/(°)	距离差值/mm	角度差值/(°)	距离差值/mm
D5GML 1-左幅	边跨	3.935 1	68.672	68.577	8.0	0.047	3.2
	中跨	3.927 6	68.523	68.338	5.0	0.099	6.8

3 逐级控制

3.1 独立控制网控制

张铁沟特大桥是一座大跨度双塔双索面的高

塔斜拉桥，为凭单一测站难以全面地测量其关键点位，进场验收测量采用固定后视点后方交会的方法统一坐标系测量结构物关键点位坐标，并绘制相对位置关系图，见图 1。通过将实测位置关系与设计图纸进行对比分析，计算出具体的偏差值，并分析调整量。

塔斜拉桥，为确保施工精度，布设独立控制网进行精确施测控制。该地区冬季平均气温为-15~5℃，历史冻土层最厚可达 86 cm。加密网布设时要确保埋设深度超过冻土层避免受扰动影响，本项目在布设加密独立网时定位桩长度选定为 1.1 m，采用强制对中墩测设，确保基准点稳固性。

根据设计交桩资料和 JTG/T 3650-02-2019《特大跨径公路桥梁施工测量规范》对特大桥进行同精度内插加密独立控制网测设^[5]。采用 GPS 与导线网联合测设方案：施工区域周边同精度内插 GPS 控制点，构建独立控制网基础框架，再结合导线网进行局部高精度加密测设，发挥 GPS 大范围定位与导线网灵活精确的优势。对导线网进行优化(见图 2)，采用附和与闭合导线相结合的双导线解算检核模式减少误差积累，通过一点一方向平差优化数据，显著提升精度与稳定性。同时，

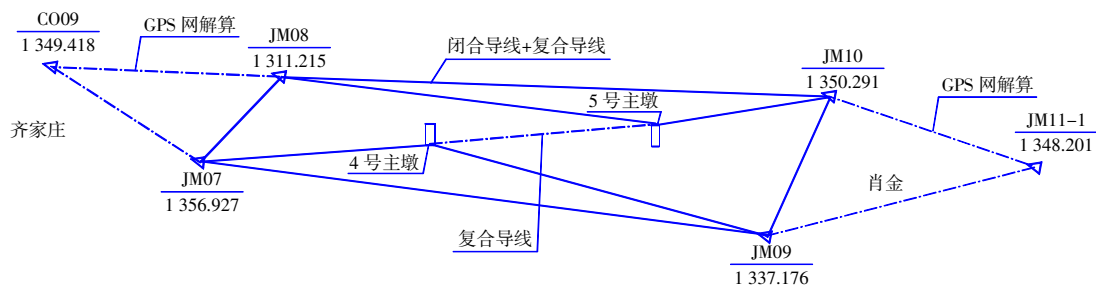


图 2 张铁沟特大桥独立控制网示意图

控制点布设选择通视良好、温度、湿度及电磁场等环境干扰因素小的地段，进一步确保控制网作为测量基准的稳定性。

在导线测量时，为保证张铁沟特大桥独立网的施测精度，用双测站对向观测方法，降低地球曲率和大气折光差影响，运用多测回方法测设，保障控制点的精度。独立控制网每半年复测一次。

3.2 核心构件控制

3.2.1 三维相对基准法

张铁沟特大桥为高塔斜拉桥，受日照、温度的影响索塔自身产生扭转现象，随索塔升高扭转现象会更严重。为提高施工效率、保障施工精度，用三维相对基准法对索塔进行测量定位。与传统方法相比，其具有精度高、效率高等特点。

三维相对基准法旨在消除索塔因日照及温度变化所引起的变形，提升测量精度。斜拉桥的下横梁以下部分由于形变量较上塔柱较小，拟被视为稳定区域，而中上塔柱则被视为变形区域。为提高测量精度，在变形区域(即中上塔柱)内设置基准点，在索塔进行周期性摆动时，内置基准点与其保持一致，形变情况能够准确映射出索塔的变形状态。采用相对基准点为参照的三维相对基准法，确保放样点与相对基准点之间的相对位置

关系保持一致。即便索塔处于形变状态，该方法也能保证放样点在平衡位置下的精确定位。

3.2.2 施测方法

以张铁沟特大桥为例，在主塔上塔柱部分，按照每 18 m 的间隔设置一个基准面，并在每个基准面上均布设 2 个监测点，以下横梁为第一个基准面(DM1)开始分别布设了 DM1、DM2、DM3 和 DM4。在施测的过程中，以距离放样点位最近的监测面作为基准，进行相应的数据改正。

索塔在夜间不受光照的影响，气温波动较小，相对白天其变形量小，通过徕卡 TS16 全站仪进行大气改正将索塔模拟解算至无形变的状态，可得到相对基准点的准确坐标。

3.2.3 钢锚梁安装环境分析

安装测量定位过程是钢锚梁整体测量工作中核心环节，精度要求高、施测控制技术难度大。为确保钢锚梁安装定位工作顺利实施，对庆阳市西峰区 2014—2024 年间月平均气温的历史数据进行分析。以 2022 年 5—9 月温差气压差变化(图 3)为例，月平均气温稳定维持在 10~22 ℃之间，气温环境稳定。平均温差不超过 2 ℃，大气压变化不超过 300 Pa，湿度在 20%以内，温度、湿度、气压等环境因素变化较小。

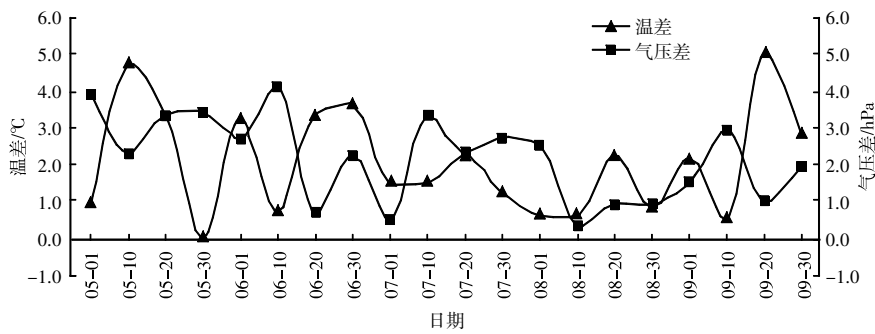


图 3 2022 年西峰区 5—9 月温差气压差变化

基于图 3 气温分析，深入研究该时段每日温差变化。以表 2 为例，22:00—翌日 6:00 时段内的温差变化较为平稳，平均温差不超过 2 ℃，大气压变化不超过 300 Pa，湿度在 20%以内。温度、

湿度、气压等环境因素变化较小，降低了环境误差对钢锚梁吊装定位的影响，适宜现场施工作业。6:00—8:00 为日出时段，光照、温度、湿度、气压波动较大，不适宜进行钢锚梁测量作业。

表 2 24 h 温度、气压、湿度表

项目	时刻											
	20:00	22:00	0:00	2:00	4:00	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00
温度/℃	25.2	22.6	21.3	19.6	18.1	18	20.7	24.9	25.7	26.2	24.6	23.5
气压/hPa	881.3	882.7	883.1	882.7	882.9	883.1	884.2	884.6	885.2	885	884.7	884.7
湿度/%	30	41	55	65	70	74	65	54	50	54	62	70

3.2.4 方法优化

在实际操作中，对 DM1、DM2、DM3 和 DM4 平台每 2 h 为间隔进行数据回归改正分析。由此可知夜晚 22:00—翌日 6:00 环境相对稳定，以 DM1 为例，在此时段进行平面改正，改正误差见表 3。

表 3 不同时段下平面改正误差

改正 误差	时刻								
	6:00	8:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00
ΔX	0	1	2.0	3.0	5.0	3.0	2.0	1.0	0
ΔY	0	0	1.0	1.0	3.0	2.0	1.0	1.0	1
ΔS	0	1	2.2	3.2	5.8	3.6	2.2	1.4	1

黄土高原地区地势高耸，空气相对稀薄，植被覆盖较为稀疏。黄土高原的升温主要依赖日照作用，在日照充足的白天升温幅度较大，气温较高。夜晚空气稀薄，大气的保温效果减弱，降温迅速，昼夜温差大。以斜拉桥为代表的高塔结构，在西北黄土高原地区的扭曲变形现象尤为显著。

三维相对基准法在施测过程中需注意以下问题：

1) 在设置相对基准点时，当放样点与相对基准点处于同一高度时，可进行误差修正；对于不在同一基准面上的放样点，仅进行相似改正。相对基准面可依据上塔柱的高度规划布设，尽可能减小相似改正误差。

2) 避免在温度变化较大和阳光强烈的时段测量放样。

3) 施工阶段选择同型号仪器设备、保持精度类型一致，稳定可靠。

4) 测量定位精度要求高的工序选择在温度、湿度变化不大的环境时段进行。

3.2.5 平面与高程精度分析

采用三维相对基准法和三维极坐标法进行主塔测控，在施测过程中每个主塔基准面选用 2 个相对基准点进行联合测控，有效地解决了单一基准点测控扭曲变形问题。

开展相对基准变形改正作业时，选定相对基准点作为观测时的后视参照点。进行差分改正与高程面投影改正，极坐标法对塔柱固定点的坐标进行高精度测算。计算得出的坐标值与前期精密测量坐标值进行差值比较，判定环境等外界因素影响的塔柱形变量。其它点位测量放样时，依据该形变量实施相应的变量修正，精准获取待测点

的最终坐标值。具体实施步骤如下：

三维相对基准法的计算公式为：

$$\begin{cases} X_1=X_0+D_1\times\cos H_F \\ Y_1=Y_0+D_1\times\sin H_F \\ Z_1=Z_0+D_1\times\sin \alpha_1-D_0\times\sin \alpha_0+Q_0-Q_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中： (X, Y) 为索塔的平面坐标； (X_0, Y_0) 为索塔平稳状态的平面坐标； (X_1, Y_1) 为索塔形变状态下进行修正后的平面坐标； Z_0 为相对基准点高程； Z_1 为修正后的相对基准点高程； D_0 为索塔平稳状态下差分后平距； D_1 为索塔形变状态下差分后平距； Q 为棱镜高； Q_0 为索塔平稳状态下棱镜高； Q_1 为索塔形变状态下棱镜高； α 为竖直角； α_0 为索塔平稳状态下竖直角； α_1 为索塔形变状态下竖直角； H_F 为方位角。

根据线性误差传播定律，对式(1)进行全微分可得三维基准法精度估算公式：

$$\begin{cases} m_{X_1}^2=\cos^2 H_F \times m_{D_1}^2 + D_1^2 \times \sin^2 H_F \times \left(\frac{m_{H_F}}{\rho}\right)^2 \\ m_{Y_1}^2=\sin^2 H_F \times m_{D_1}^2 + D_1^2 \times \cos^2 H_F \times \left(\frac{m_{H_F}}{\rho}\right)^2 \\ m_{Z_1}^2=2 \times (\sin^2 \alpha \times m_{D_1}^2 + D_1^2 \times \cos \alpha \times \left(\frac{m_{\alpha}}{\rho}\right)^2 + m_Q^2) \end{cases} \quad (2)$$

式中： ρ 为估算值常量。取三角高程后视与前视竖直角近似相等，高程精度估算可用平均值。当平均温差不超过 2℃，大气压变化不超过 300 Pa，湿度在 20%以内，根据张铁沟特大桥的实际情况取 $m_{H_F}=\pm 1''$ ， $m_a=\pm 1''$ ， $\alpha\approx 20^\circ$ ， $m_Q=\pm 1\text{ mm}$ 。

取差分改正的测距中误差为 $\pm 1\text{ mm}$ ，估算精度 $m_{\text{平面}}=\sqrt{m_X^2+m_Y^2}\approx\pm 2.6\text{ mm}$ 。符合规范要求。为进一步减小累积误差，测量工作时避免在环境因素影响明显的时间段进行。

全站仪三角高程法是近年来全站仪普及后广泛运用的方法，利用三角高程的原理进行测量，便捷性和精确性是其它方法无法比拟的。考虑到黄土高原的特殊性，三角高程测量受折光系数的影响较大。假定计算折光差与真实折光差相差 0.1，在 500 m 的距离，三角高程测量大气折光影响在 $\pm 4\text{ mm}$ ，精密测量时，测量时间跨度大，折光差累计影响误差显著。

随着全站仪的发展，三维极坐标法也逐渐成为主流测量方法之一，P 点相对测站点的三维坐标为：

$$\begin{cases} X=S \cdot \sin \theta \cdot \cos \alpha \\ Y=S \cdot \sin \theta \cdot \sin \alpha \\ H=S \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

原理如图4所示，O为测站点，P为放样点。全站仪安置在O点，在P点安置反射镜，仪器测定P点相对测站点的斜距 S 、天顶距 H 和水平方向角 α ，竖直方向角 θ 。

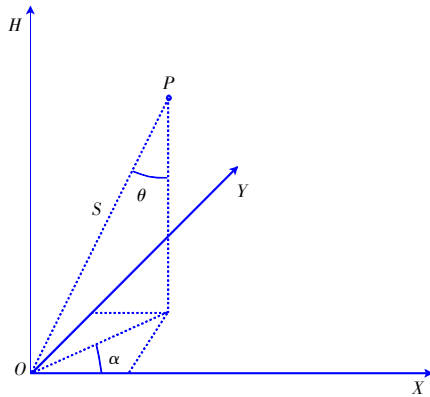


图4 三维极坐标法原理图

按照测量理论，由式(3)计算式可求得三维坐标法放样精度为：

$$\begin{cases} m_x^2 = m_s^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \alpha + S^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos^2 \alpha \cdot m_0^2 / \rho^2 + \\ S^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \alpha \cdot m_\alpha^2 / \rho^2 \\ m_y^2 = m_s^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \alpha + S^2 \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin^2 \alpha \cdot m_0^2 / \rho^2 + \\ S^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \alpha \cdot m_\alpha^2 / \rho^2 \\ m_H^2 = m_s^2 \cdot \cos^2 \theta + S^2 \cdot \sin^2 \theta \cdot m_0^2 / \rho^2 \end{cases} \quad (4)$$

根据有关文献的理论分析，采用精度为 $m_0=$ $m_\alpha=3''$ 、 $m_s=3 \text{ mm}+3 \text{ ppm}$ 的全站仪，当测站至放样点的距离小于280 m时， m_x 、 m_y 、 m_H 的精度可高

于 $\pm 5 \text{ mm}$ 。

实际测量中，为了克服大气折光的影响，提高定位精度与可靠性，采用多个后视点，选用符合精度要求的全站仪(本文选用徕卡TS16全站仪)进行高程测量，可有效削弱大气折光等环境因素引发的测量误差，同时显著提升高程测量结果的可靠性与数据可信度。

4 结语

本文通过独立控制网的测设为张铁沟特大桥的精度奠定了坚实的基础，研究三维相对基准法、全站仪三角高程法和三维极坐标法等多种测量技术，对双塔双索面半漂浮体系钢混组合梁斜拉桥的施工测量进行了深入分析。通过计算和校正，成功地控制了塔柱变形量，提高了测量精度，确保了钢锚梁安装的精确性。此外，针对西北地区的特殊环境，优化了测量作业时间，有效降低了大气折光等环境因素对测量精度的影响。随着测量技术不断进步和创新，斜拉桥等大型桥梁工程的施工测量将会有更多高效、精确的方法被开发和应用。

参考文献：

- [1] 梅文胜,韩国明,张正禄.斜拉桥索塔三维相对基准定位方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2007(2):168-171,187.
- [2] 兰其平,程海琴.武汉二七长江大桥桥塔索道管精密定位方法[J].桥梁建设,2012,42(1):14-18.
- [3] GB 50026—2007,工程测量规范[S].
- [4] 李景刚.独塔斜拉桥索塔施工测量关键技术研究[D].济南:山东大学,2010.
- [5] 吴迪军,熊伟,张建军.桥梁施工平面控制网必要精度的研究[J].地理空间信息,2008,6(6):100-102.