

水利发电机转子几何形位检测的 激光跟踪仪整体平差法

杨小龙¹, 吴涛¹, 成传诗¹, 谢湘军¹, 叶祥友¹, 李冲², 李玉杰², 孙晨磊², 徐福乾²

(1. 中国长江电力股份有限公司检修厂, 湖北 宜昌 443000; 2. 郑州信大先进技术研究院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对激光跟踪仪单站测量受视场限制, 难以满足转子形位检测需求的难题, 目前多采用基于公共点转换的转站测量方法。但该方法存在误差累积, 制约了整体测量精度。为解决上述问题, 引入边角网整体平差技术, 直接使用角度与距离观测值参与平差, 并基于先验误差进行合理赋权, 从而避免了坐标转换引入的误差积累。实验结果表明, 整体平差法的点位距离反算值与观测值差值的均方根(RMS)为 $4.15\ \mu\text{m}$ 。与传统的公共点转换法相比, 该方法具有显著的精度优势, 为大型水利发电机转子几何形位的精密检测提供了一种可靠的解决方案。

关键词:水利发电机转子; 几何形位检测; 误差累积; 整体平差法; 激光跟踪仪

中图分类号: P258

文献标志码: A

Overall adjustment method of laser trackers for geometric shape and position detection in hydroelectric generator rotors

YANG Xiaolong¹, WU Tao¹, CHENG Chuanshi¹, XIE Xiangjun¹,
YE Xiangyou¹, LI Chong², LI Yujie², SUN Chenlei², XU Fuqian²

(1. Maintenance Plant, China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China;

2. Zhengzhou Xinda Institute of Advanced Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To address the issue that single-station measurements using laser trackers limited by the field of view cannot meet the requirements for rotor shape and position detection, current methods often employ the station-transfer measurement approach based on common points transformation. However, these methods suffer from error accumulation, which restricts the overall measurement accuracy. To overcome these limitations, an overall adjustment technique based on an angle-distance network was introduced. This method incorporated angle and distance observations into the adjustment process directly and assigned appropriate weights based on prior error models, thereby avoiding the error accumulation inherent in coordinate transformation. Experimental results show that the root mean square (RMS) deviation between the recalculated point-to-point distances and the observed values using the overall adjustment method is $4.15\ \mu\text{m}$. Compared with traditional common points transformation methods, the proposed method demonstrates significant accuracy advantages and provides a reliable solution for high precision geometric shape and position detection of large hydroelectric generator rotors.

Key words: hydroelectric generator rotor; geometric shape and position inspection; error accumulation; overall adjustment method; laser tracker

水轮发电机组中的转子是将机械能转换为电能的关键部件。转子的圆度直接影响到空气间隙的均匀

收稿日期: 2025-11-13

基金项目: 中国长江电力股份有限公司科研项目(2324020032)。

作者简介: 杨小龙(1988—), 男, 湖北松滋人, 高级工程师, 硕士, 主要从事水轮发电机组故障诊断及检修研究。

吴涛(1974—), 男, 湖北天门人, 高级工程师, 主要从事水轮发电机组故障诊断及检修研究, 本文通信作者。

E-mail: 1767471791@qq.com

性,进而对机组的稳定运行产生重要影响^[1]。水轮发电机组安装测量要求机组中心或圆度的测量误差应小于 0.03 mm^[2]。该精度要求需置于工业大尺寸测量的背景下进行考量,可被界定为工业测量范畴^[3]。激光跟踪仪作为工业测量领域的常用设备,在大角度不整平状态下即可开展工作,广泛应用于精密测量领域^[4-5]。以徕卡 AT930 型激光跟踪仪为例,采用基于重心基准的三维测边网平差模型进行多站位组网观测,可获得微米级点位精度^[6]。

激光跟踪仪凭借高精度测量能力在大型设备精密安装和检测中发挥关键作用,成为水电建设领域不可或缺的测量工具。李林伟等^[7]利用激光跟踪仪建立统一的三维控制网,提升了水轮发电机组安装的精度、效率和可靠性。王献奇等^[8]在向家坝水电站的机组安装工程中,利用激光跟踪仪在机坑内建立高精度三维控制网,完成了发电机组的安装。刘宇鉴等^[9]将激光跟踪仪运用到乌东德水电站机组安装工程中,验证了激光跟踪仪多次转站测量方法相较于内径千分尺、百分表、测圆架、重锤线等机械式测量方法具有精度高、效率高、可靠性高等优势。然而,上述激光跟踪仪测量方法实现测区全覆盖的核心前提是,在测量现场布设稳定的高精度三维控制网或通过布设站间公共点,实现不同测站间的数据拼接与统一。在实际工程中,随着水轮发电机转子尺寸的不断增大,对测量效率和精度的要求也日益提高。现有激光跟踪仪测量方法在部分特定场地中,由于控制点布设条件受限或点位稳定性得不到保障,致使其实施难度增大。

以我国某大型水利工程的水轮发电机组为例,其转子外径达 18.5 m,受其尺寸和检修厂内部条件等因素的制约,无法在场地布设高精度三维控制网,需采用基于公共点三维坐标转换的多次转站测量方法进行检测。基于公共点三维坐标转换的多次转站测量方法通过相邻测站观测不少于 3 个公共点来解算测站转换参数,进而实现多站测量数据融合。该方法基于公共点坐标计算转换参数,其误差传递模型存在固有缺陷,致使转站误差在测量网络中传播与积累,最终造成测量链末端的精度严重损失,无法满足转子检测的高精度要求^[10-11]。

针对此类特殊工况,本研究引入激光跟踪仪边角网整体平差法,以各测站角度、距离原始观测值参与平差,并依据其先验精度进行合理定权,从而在原理上避免了传统转站测量方法的误差累积问题。

1 基于公共点转换的转子检测方法

1.1 三维坐标转换原理

激光跟踪仪测站坐标系相对全局测量坐标系的位姿关系,可通过一个由旋转参数与平移参数构成的刚体变换模型精确描述。设第 i 个激光跟踪仪测站所对应的测站坐标系相对于全局测量坐标系的旋转参数为 (Rx_i, Ry_i, Rz_i) , 平移参数(仪器中心在全局坐标系中的空间位置)为 (X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}) , $i=1, 2, \dots, m$ 。若第 j 个目标点在第 i 个测站坐标系下的坐标为 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) , 在全局测量坐标系下的坐标为 (X_j, Y_j, Z_j) , $j=1, 2, \dots, n$, 则两者满足如下转换关系:

$$\begin{bmatrix} X_{ij} \\ Y_{ij} \\ Z_{ij} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} a_{i1} & b_{i1} & c_{i1} \\ a_{i2} & b_{i2} & c_{i2} \\ a_{i3} & b_{i3} & c_{i3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_j - X_{0i} \\ Y_j - Y_{0i} \\ Z_j - Z_{0i} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: k 为尺度因子; $a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}$ 为第 i 个测站旋转参数 (Rx_i, Ry_i, Rz_i) 的函数。

$$\begin{cases} a_{i1} = \cos Ry_i \cdot \cos Rz_i, \\ a_{i2} = -\cos Ry_i \cdot \sin Rz_i, \\ a_{i3} = \sin Ry_i, \\ b_{i1} = \sin Rx_i \cdot \sin Ry_i \cdot \cos Rz_i + \cos Rx_i \cdot \sin Rz_i, \\ b_{i2} = -\sin Rx_i \cdot \sin Ry_i \cdot \sin Rz_i + \cos Rx_i \cdot \cos Rz_i, \\ b_{i3} = -\sin Rx_i \cdot \cos Ry_i, \\ c_{i1} = -\cos Rx_i \cdot \sin Ry_i \cdot \cos Rz_i + \sin Rx_i \cdot \sin Rz_i, \\ c_{i2} = \cos Rx_i \cdot \sin Ry_i \cdot \sin Rz_i + \sin Rx_i \cdot \cos Rz_i, \\ c_{i3} = \cos Rx_i \cdot \cos Ry_i. \end{cases} \quad (2)$$

1.2 公共点转换检测方法

以 SXXX 大型水利发电机转子检测为例,如图 1 所示,围绕该转子构建一个由 m ($m \geq 5$) 个测站组成的激光跟踪仪测量网络,相邻测站通过 n ($n \geq 3$) 个公共点进行联接。

以首次转站为例,测站 L1(坐标系 O -XYZ, 设为全局坐标系)与测站 L2(坐标系 O' - $X'Y'Z'$)对站间公共点进行观测。两坐标系间的转换关系可由七参数模型描述,即全局测量坐标系 O -XYZ 先平移(X_0, Y_0, Z_0),再旋转($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$),最后缩放 k 倍后,即可转换到 O' - $X'Y'Z'$ 坐标系。参照式(1)的坐标转换原理则有:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: k 为尺度因子; $a_1, a_2, \dots, c_3$ 为旋转参数($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)的函数,其具体计算式与式(2)类似。

对式(3)进行线性化即可得到:

$$\begin{cases} dX' = (a_1 dX_0' - b_1 dY_0 - c_1 dZ_0 + d_1 d\epsilon_x + e_1 d\epsilon_y + f_1 d\epsilon_z)k + g_1 dk, \\ dY' = (a_2 dX_0' - b_2 dY_0 - c_2 dZ_0 + d_2 d\epsilon_x + e_2 d\epsilon_y + f_2 d\epsilon_z)k + g_2 dk, \\ dZ' = (a_3 dX_0' - b_3 dY_0 - c_3 dZ_0 + d_3 d\epsilon_x + e_3 d\epsilon_y + f_3 d\epsilon_z)k + g_3 dk. \end{cases} \quad (4)$$

式中, $d_1, d_2, d_3, e_1, e_2, e_3, f_1, f_2, f_3, g_1, g_2, g_3$ 为各微分项的系数。

构造如下函数:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix} = 0. \quad (5)$$

对第 i 个公共点,可列出方程:

$$\mathbf{v}_i = \mathbf{a}_i^T dt + \mathbf{F}_i. \quad (6)$$

式中:

$$\mathbf{a}_i = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial t} \bigg|_{X'=X'_i, Y'=Y'_i, Z'=Z'_i},$$

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \end{bmatrix} - k \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i - X_0 \\ Y_i - Y_0 \\ Z_i - Z_0 \end{bmatrix}.$$

式(6)写成矩阵形式为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} dt + \mathbf{F}. \quad (7)$$

在该误差方程中,待求的未知参数为两坐标系间的 7 个转换参数,即平移量(X_0, Y_0, Z_0)、旋转角($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)与尺度因子 k 。当公共点数量不少于 3 个时,方程数多于未知数的数目,此时在给定初始近似值后,即可通过最小二乘迭代算法求解该转换参数。

坐标系转换参数的求解精度高度依赖于公共点的选取策略,其影响因素包括公共点坐标的测量精度、公共点的数量及空间分布结构。①转换参数的精度主要由公共点坐标的测量精度决定,即各测站对公共点的测量精度对转换参数的求解精度具有决定性影响^[12]。②公共点的数量对转换参数的求解精度具有显著影响。理论上,两个空间直角坐标系的转换至少需要 3 个公共点。工程实践中,公共点数量通常控制在 3~6,公共点过少会降低解算强度,而公共点过多会增加冗余,不但对精度提升贡献有限,而且会增加计算复杂度。③公共点的空间分布结构对转换参数的求解精度具有一定影响^[13]。在实际工程中,常面临

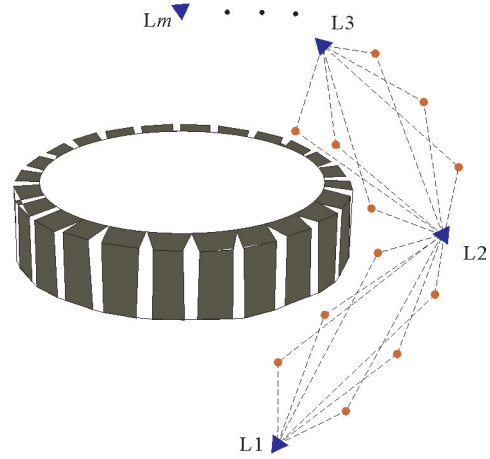


图 1 基于公共点转换的转子检测示意图

Fig. 1 Schematic diagram of rotor detection based on common points transformation

公共点分布密集或与待测区域距离过远等问题。理想情况下,转换参数的解算精度与公共点所构成的空间几何强度呈正相关关系。若公共点分布过于集中,则会降低解算稳定性;而分布均匀、覆盖范围广的公共点构型能够有效增强几何强度,从而提高参数求解的准确性与可靠性。

在转站测量中,各相邻测站间的坐标转换参数均可通过上述方法独立求解。依次确定所有相邻测站间的变换关系后,可通过复合变换方式,将每一局部测站的观测数据逐级传递至初始测站所定义的全局测量坐标系中,从而构建完整、统一的转子几何形位检测模型,最终实现全局坐标系下转子几何形位的完整检测与分析。该转站方法的本质是一个串联的多级坐标变换系统。其中,每个站位的坐标系转换均不可避免地引入公共点的测量误差、公共点的空间分布结构缺陷以及算法拟合残差等局部误差。这些局部误差在逐级传递时不具备抵消性,而是遵循误差传播规律,后续变换环节将累积并放大前序环节的误差。这种误差的定向传递与放大效应,是导致其整体测量精度受限的根本原因。

2 基于边角网平差的转子检测方法

针对传统公共点转换方法在测站传递过程中存在的误差逐级累积等问题,本研究提出边角网整体平差方法,直接使用角度与距离观测值参与整体平差,并基于先验误差进行合理赋权,从而避免了公共点坐标转换方法存在的转站误差逐级累积、测量精度严重依赖公共点数量与空间分布等固有局限。如图 2 所示,本次实验采用 AT960 激光跟踪仪构建测量系统,在测量空间中布设 m 个测站和 n 个定向点。设第 i 个测站对第 j 个定向点的角度和距离观测值为 $(Hz_{ij}, V_{ij}, S_{ij})$, 每个测站均对尽可能多的定向点进行角度和距离观测,从而构建一个以角度和距离为观测量的空间三维边角网。

如图 3 所示,第 i 个测站对第 j 个定向点的角度和距离观测值为 $(Hz_{ij}, V_{ij}, S_{ij})$, 第 j 个定向点在第 i 个测站的测站坐标系 $O_i-X_iY_iZ_i$ 中的坐标为 (X_{ij}, Y_{ij}, Z_{ij}) 。

定向点三维坐标值与角度观测量的关系为:

$$Hz_{ij} = 2\pi - \arctan \frac{Y_{ij}}{X_{ij}}, \quad (8)$$

$$V_{ij} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{Z_{ij}}{\sqrt{X_{ij}^2 + Y_{ij}^2}}. \quad (9)$$

式(8)和式(9)中定向点坐标是测站坐标系中的坐标,通过式(1)的坐标转换模型可转至全局测量坐标系中,则有:

$$Hz_{ij} = 2\pi - \arctan \frac{-\sin R_{Z_i} \cdot (X_j - X_{O_i}) + \cos R_{Z_i} \cdot (Y_j - Y_{O_i})}{\cos R_{Z_i} \cdot (X_j - X_{O_i}) + \sin R_{Z_i} \cdot (Y_j - Y_{O_i})}, \quad (10)$$

$$V_{ij} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{Z_j - Z_{O_i}}{\sqrt{[\cos R_{Z_i} \cdot (X_j - X_{O_i}) + \sin R_{Z_i} \cdot (Y_j - Y_{O_i})]^2 + [-\sin R_{Z_i} \cdot (X_j - X_{O_i}) + \cos R_{Z_i} \cdot (Y_j - Y_{O_i})]^2}}. \quad (11)$$

定向点三维坐标值与距离观测量的函数关系为:

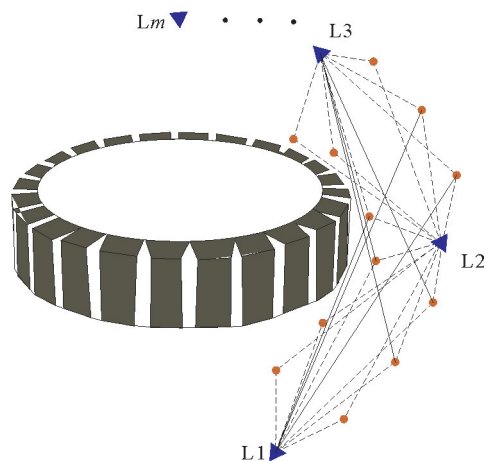


图 2 基于边角网平差的转子检测示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rotor detection based on angle-distance network adjustment

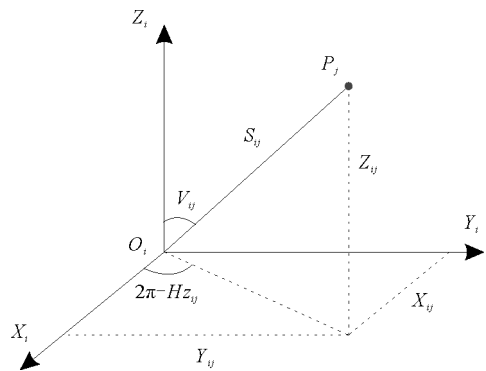


图 3 点坐标与观测值关系示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the relationship between point coordinates and observed values

$$S_{ij} = \sqrt{(X_j - X_i)^2 + (Y_j - Y_i)^2 + (Z_j - Z_i)^2}。 \quad (12)$$

将式(10)~(12)线性化,按泰勒级数展开并保留一次项,得到观测值的误差方程为:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \cdot \delta \mathbf{X} - \mathbf{l}。 \quad (13)$$

式中: $\mathbf{V} = [V_{ij}^H \ V_{ij}^V \ V_{ij}^S]$ 是观测值的残差向量, $\mathbf{A}$ 为系数矩阵, $\delta \mathbf{X}$ 是各参数残余值向量, $\mathbf{l}$ 为常数项向量。

设观测值权阵为 $\mathbf{P}$,由最小二乘原理解得未知参数残余值为:

$$\delta \mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}。 \quad (14)$$

设参数初始值为 $\mathbf{X}_0$, $\mathbf{X}_0$ 加上残余值 $\delta \mathbf{X}$ 即可得到参数平差值。该模型以激光跟踪仪采集的角度与距离观测值为基本观测量,直接参与整体平差计算,并依据其先验测量精度进行合理定权,从而在数据处理层面规避了传统方法因公共点坐标转换而引入的系统误差与误差传播累积问题。

3 多次转站测量的合成误差预计与分析

以SXXX转子检测为例,如图4所示,其半径为9 m,对应周长57 m。采用激光跟踪仪实施多站测量时,需在转子外围预留安全操作空间,测站布设半径不小于5 m,形成总长88 m的环形测量路径。基于现场测量覆盖需求,布设6个测站即可实现转子全圆周测量,此时平均站间距为15 m。在该布设方案下,激光跟踪仪对公共点的最短观测距离为7 m。考虑到公共点布设存在一定现场随机性,实际作业中应遵循空间均匀分布原则,确保各测站对公共点的观测距离普遍控制在10 m范围内,以保障角度与距离观测值的整体精度和可靠性。

基于上述分析,以徕卡AT960型激光跟踪仪为例,在单站测量模式下,其公共点的测量误差主要来源于测角与测距两个分量。若以10 m这一典型观测距离为例进行分析,根据仪器标称精度 $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m})$ 计算公共点的测量误差:

$$m_1 = \pm(15 + 6 \times 10) \mu\text{m} = \pm 75 \mu\text{m}。 \quad (15)$$

当相邻测站间布设的公共点测量不少于5个且图形分布良好时,基于最小二乘原理的坐标系转换精度可得到有效控制。此时,转换参数解的稳定性显著提升,通过误差传播定律分析,相邻测站间的坐标转换误差可量化为:

$$m_2 = \pm \frac{m_1}{\sqrt{2}} = \pm 53 \mu\text{m}。 \quad (16)$$

在多次转站测量过程中,随着转站次数的增加,其转换误差会随转站次数的增加而累积。假设各站间的转换误差相互独立,完成5次连续转站后,根据误差传播定律,总转换误差可表示为:

$$m_3 = \pm \sqrt{5} m_2 = \pm 119 \mu\text{m}。 \quad (17)$$

在各测站对转子分别完成测量工作后,需利用已求取的坐标转换参数,将各测站坐标系下的观测数据统一归算至全局测量坐标系中,进而对转子的几何形位参数进行整体解算。

根据转站测量方案的布设几何关系估算,激光跟踪仪各测站与转子理论轴线间的平均距离为5 m。若进一步考虑转子本体高度及特征点的轴向分布,实际观测路径长度将有所增加,典型观测距离为6 m。在此条件下,测站对转子特征点的单点测量误差可根据仪器标称精度 $\pm(15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m}/\text{m})$ 进行估算:

$$m_4 = \pm(15 + 6 \times 6) \mu\text{m} = \pm 51 \mu\text{m}。 \quad (18)$$

在多次转站测量体系中,最终的合成测量误差主要由转站转换误差与单站点位观测误差两类相互独立的误差源共同构成。基于误差传播定律,全局测量坐标系下任意被测点的测量误差可表示为:

$$m_5 = \pm \sqrt{m_3^2 + m_4^2} = \pm 129 \mu\text{m}。 \quad (19)$$

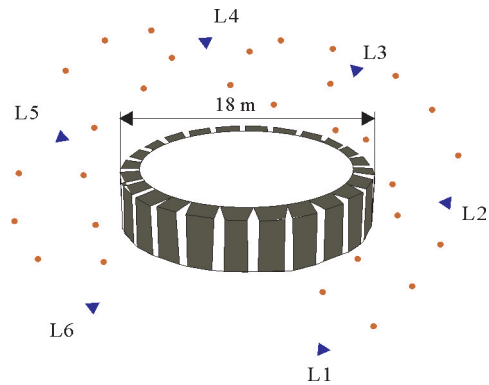


图4 转子检测示意图

Fig. 4 Schematic diagram of rotor detection

基于上述分析可知,在公共点空间分布均匀、图形结构强度理想的条件下,多次转站测量过程的合成误差可控制在 $\pm 129\ \mu\text{m}$ 量级。然而,实际检测过程中常因现场空间遮蔽、设备可达性等限制,导致公共点布设难以满足最优几何构型要求。一旦公共点分布集中或共面程度较高,将引起坐标转换模型的病态性问题,显著放大转站过程中的误差传播效应,致使实际转换误差远超前述理论估值,最终难以满足大型精密部件对测量精度的严格要求。

4 工程案例分析与验证

为系统验证基于公共点三维坐标转换的多次转站测量方法存在的误差累积效应及其导致的测量精度衰减问题,本研究设计了以下实验方案:以 XX 大型工件为检测对象,在其测量空间内按最优观测原则布设 6 个激光跟踪仪测站,通过全站覆盖式观测获取所有待检目标点的完整坐标数据。该布设方式可有效模拟多站接力测量场景,为分析转站次数与末端测量精度的量化关系提供完备的数据基础。

4.1 传统公共点转换法的实测精度分析

为构建具有充足多余观测量的观测体系,确保整体精度,本研究要求每个测站对尽可能多的公共点进行观测。在完成数据预处理并剔除观测精度较差的公共点后,最终保证任意相邻测站间保留 6 个符合精度要求的公共点用于坐标转换参数解算。经优化筛选后所采用的转站公共点点位编号如表 1 所示。

由于激光跟踪仪具备优异的测距精度,可认为第一测站的测量误差主要来源于测角误差^[14]。而后续各测站的观测数据需通过公共点转换方法统一至全局测量坐标系,其综合精度同时受到测角误差与坐标转换误差的共同影响。为量化评估转换误差对测量结果的影响程度,本研究以点位的原始斜距观测值 S 为基准,将其与通过坐标转换后反算得到的距离 D 进行比较,通过分析距离差值 Δ 系统评估转换误差的传播效应,具体结果如表 2 所示。

表 1 转站公共点

Table 1 Common points for station transfer

相邻测站	公共点点位编号
L1~L2	1、2、3、4、5、6
L2~L3	7、8、9、10、11、12
L3~L4	13、14、15、16、17、18
L4~L5	19、20、21、22、23、24
L5~L6	25、26、27、28、29、30

表 2 公共点转换法各点长度差值

Table 2 Length discrepancies of points using the method of common points transformation

点号	D/mm	S/mm	$\Delta/\mu\text{m}$	点号	D/mm	S/mm	$\Delta/\mu\text{m}$
1	*** 54.614	*** 54.654	-40	16	*** 44.921	*** 44.938	-17
2	*** 34.730	*** 34.734	-4	17	*** 63.653	*** 63.691	-38
3	*** 96.827	*** 96.820	7	18	*** 25.497	*** 25.533	-36
4	*** 55.683	*** 55.691	-8	19	*** 75.808	*** 75.775	33
5	*** 71.132	*** 71.115	17	20	*** 4.929	*** 4.886	43
6	*** 46.481	*** 46.465	16	21	*** 0.854	*** 0.878	-24
7	*** 92.698	*** 92.725	-27	22	*** 43.435	*** 43.438	-3
8	*** 91.725	*** 91.754	-29	23	*** 21.911	*** 21.959	-48
9	*** 36.778	*** 36.727	51	24	*** 35.766	*** 35.848	-82
10	*** 03.735	*** 03.711	24	25	*** 13.681	*** 13.778	-97
11	*** 93.929	*** 93.900	29	26	*** 6.811	*** 6.933	-122
12	*** 99.010	*** 98.992	18	27	*** 4.404	*** 4.440	-36
13	*** 72.898	*** 72.891	7	28	*** 66.908	*** 66.861	47
14	*** 35.674	*** 35.695	-21	29	*** 09.848	*** 09.838	10
15	*** 02.146	*** 02.214	-68	30	*** 83.741	*** 83.732	9

为进一步量化分析转站次数对测量精度的影响机制,本研究按转站次序对公共点转换误差进行分组

评估。以第1次转站为例,以转换前公共点的原始斜距观测值 S 为基准,将其与通过坐标转换后反算得到的距离 D 进行比较,据此评估坐标转换过程对首次转站精度的影响程度。为验证转换模型的可靠性,将第2次转站使用的公共点作为第1次转站的独立检核点,通过对比分析其转换前后的一致性,系统验证转站精度,结果如图5和表3所示。根据上述实验结果可以得出,公共点组及检核点组因转换误差引起的斜距观测值 S 与反算距离 D 之间的均方根误差(root mean square error, RMSE)随转站次数的增加呈系统性扩大趋势。这一现象符合三维坐标转换中误差随转站过程逐级累积的理论预期,充分验证了转站测量中误差传播的累积效应。

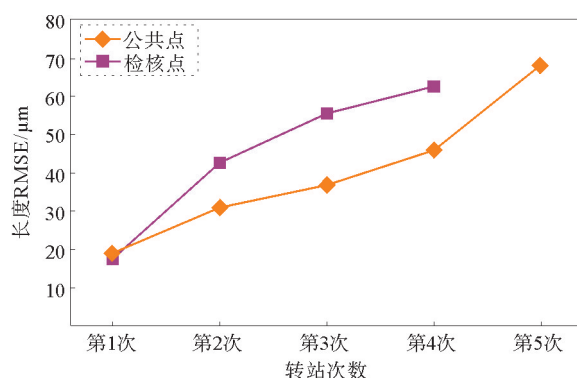


图5 公共点转换法分组结果

Fig. 5 Grouping results of common points transformation

表3 公共点转换法分组结果统计表

Table 3 Grouping results statistics for common points transformation μm

转站次数	公共点长度 RMSE	检核点长度 RMSE
第1次	19.5	18.0
第2次	31.1	42.6
第3次	36.8	55.6
第4次	45.9	62.6
第5次	68.3	—

4.2 边角网平差法的实测精度分析

基于边角网观测值进行整网平差,各测站的位置参数和旋转参数均以测站 L_1 的测站坐标系为基准,测站 L_1 的测站坐标系即为全局测量坐标系。边角网平差法点位解算结果如表4所示。各点位残差在 X 、 Y 、 Z 坐标分量的均方根及残差分别为 X_{RMS} 、 Y_{RMS} 、 Z_{RMS} 、 P_{RMS} ,其中 X_{RMS} 最大值 0.282 mm,最小值 0.005 mm,平均值 0.036 mm; Y_{RMS} 最大值 0.119 mm,最小值 0.007 mm,平均值 0.038 mm; Z_{RMS} 最大值 0.462 mm,最小值 0.021 mm,平均值 0.097 mm。

表4 边角网平差点位解算结果

Table 4 Adjusted point coordinate results from the angle-distance network

点号	X_{RMS}/mm	Y_{RMS}/mm	Z_{RMS}/mm	P_{RMS}/mm	D/mm	S/mm	$\Delta/\mu\text{m}$
1	0.012	0.008	0.050	0.052	*** 54.652	*** 54.654	-2
2	0.013	0.012	0.119	0.121	*** 34.731	*** 34.734	-3
3	0.009	0.007	0.066	0.067	*** 96.822	*** 96.820	2
4	0.028	0.024	0.041	0.055	*** 55.693	*** 55.691	2
5	0.027	0.036	0.065	0.079	*** 71.113	*** 71.115	-2
6	0.008	0.009	0.037	0.039	*** 46.469	*** 46.465	4
7	0.021	0.049	0.021	0.057	*** 92.725	*** 92.725	0
8	0.030	0.062	0.068	0.097	*** 91.758	*** 91.754	4
9	0.009	0.014	0.051	0.054	*** 36.727	*** 36.727	0
10	0.017	0.030	0.070	0.078	*** 03.713	*** 03.711	2
11	0.026	0.035	0.035	0.056	*** 93.898	*** 93.900	-2
12	0.037	0.043	0.043	0.071	*** 98.981	*** 98.992	-11
13	0.080	0.119	0.061	0.156	*** 72.898	*** 72.891	7
14	0.044	0.098	0.165	0.197	*** 35.703	*** 35.695	8
15	0.051	0.102	0.108	0.158	*** 02.219	*** 02.214	5
16	0.014	0.023	0.082	0.086	*** 44.945	*** 44.938	7

续表 4

点号	X_{RMS}/mm	Y_{RMS}/mm	Z_{RMS}/mm	P_{RMS}/mm	D/mm	S/mm	$\Delta/\mu\text{m}$
17	0.039	0.058	0.064	0.094	*** 63.693	*** 63.691	2
18	0.016	0.050	0.042	0.067	*** 25.529	*** 25.533	-4
19	0.008	0.013	0.120	0.121	*** 75.774	*** 75.775	-1
20	0.009	0.012	0.159	0.160	*** 4.887	*** 4.886	1
21	0.005	0.016	0.190	0.190	*** 0.878	*** 0.878	0
22	0.057	0.036	0.090	0.113	*** 43.436	*** 43.438	-2
23	0.060	0.034	0.166	0.180	*** 21.955	*** 21.959	-4
24	0.079	0.042	0.194	0.214	*** 35.844	*** 35.848	-4
25	0.019	0.014	0.058	0.062	*** 13.775	*** 13.778	-3
26	0.022	0.023	0.052	0.061	*** 6.932	*** 6.933	-1
27	0.005	0.013	0.071	0.072	*** 4.438	*** 4.440	-2
28	0.028	0.019	0.070	0.077	*** 66.861	*** 66.861	0
29	0.021	0.047	0.097	0.110	*** 09.834	*** 09.838	-4
30	0.282	0.091	0.462	0.549	*** 83.728	*** 83.732	-4

进一步,由各点位坐标分量残差计算得到的 P_{RMS} 最大为 0.549 mm,最小为 0.039 mm,平均为 0.116 mm。点位反算距离 D 与斜距观测值 S 的差值 Δ 绝对值最大为 11 μm ,最小为 0,均方根误差(RMSE)为 4.15 μm 。结果表明,解算结果与原始观测数据具有高度的一致性。

4.3 两种方法精度对比与讨论

公共点坐标转换得到的各点长度差值和边角网整体平差解算得到的各点长度差值对比如图 6 所示。由图 6 可以看出,边角网整体平差解算的精度优于传统的公共点坐标转换,且实验结果揭示了二者在误差特性与精度保障机制上的本质差异。公共点坐标转换采用逐站递推转换,其转换误差在转站过程中形成误差传播链,导致后续测站的坐标成果累积了前序测站的定位误差,致使精度沿转换路径衰减;而边角网整体平差则基于测角与测距的先验误差进行定权,在统一的全局坐标系下进行整体平差,从而有效抑制了误差的级联传播,实现对整个测量网形精度的整体控制与优化,确保了网形内所有点位精度的一致性。因此,边角网整体平差法在保障全局测量精度与避免误差累积方面,更具显著优势。

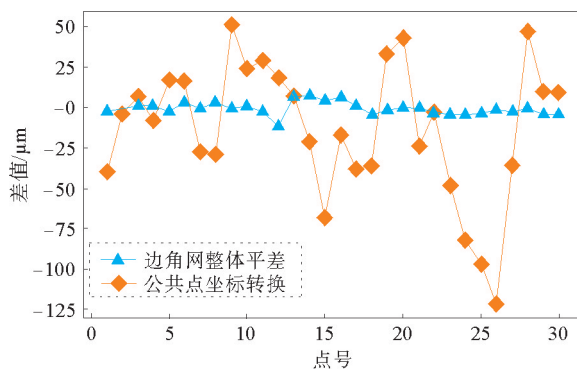


图 6 两种方法各点长度差值对比图

Fig. 6 Comparison of point-to-point length differences between the two methods

5 结论

针对传统的基于公共点转换的激光跟踪仪多次转站方法存在误差积累,致使测量链末端的精度严重损失而无法满足水轮发电机转子高精度检测的问题,本研究提出一种基于边角网整体平差解算的转子精密检测方法。通过 XX 大型工件的工程测试研究,得出以下主要结论:

- 1) 本研究采用的基于边角网整体平差解算的转子精密检测方法相对于传统公共点三维坐标转换方法规避了逐站坐标转换环节,消除了转站误差逐站累积的问题。该方法的核心在于直接利用角度、距离等原始观测值参与整体平差,并依据其先验精度进行合理定权,规避了传统方法的误差累积问题。
- 2) 实际工程案例验证表明,边角网整体平差的点位距离反算值与观测值差值的 RMS 为 4.15 μm ,与传统的公共点转换方法相比,具有显著的精度优势。
- 3) 该研究成果为大型水利发电机转子等必须依赖多次设站的大型精密检测任务提供了一种可靠的

解决方案。同时发现,当前的观测值定权策略仍存在优化空间,后续将对此问题开展进一步研究,以期在更为复杂的精密检测场景中发挥效能。

参考文献:

- [1] 武玉才,范轩杰,纪璇,等.水轮发电机转子不圆度诱发的定子铁心振动特性研究[J].中国电机工程学报,2025,45(1):342-352.
WU Yucui, FAN Xuanjie, JI Xuan, et al. Study on vibration characteristics of stator core induced by rotor non-roundness in hydro-generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 342-352.
- [2] 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会.水轮发电机组安装技术规范:GB/T 8564—2023[S].北京:中国标准出版社,2023.
- [3] 冯文灏.工业测量方法及其选用的基本原则[J].武汉大学学报(信息科学版),2001,26(4):331-336.
FENG Wenhao. Methods for industrial measurement and basic principles of their choice[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(4): 331-336.
- [4] 段童虎,范百兴,黄赫,等.激光跟踪仪大角度不整平测量精度分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(1):1-9.
DUAN Tonghu, FAN Baixing, HUANG He, et al. Measurement accuracy analysis of laser tracker at large tilt angles[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(1): 1-9.
- [5] SAHU R K. A review on application of laser tracker in precision positioning metrology of particle accelerators[J]. Precision Engineering, 2021, 71: 232-249.
- [6] 刘硕,刘光博,刘尚国.利用重心基准的激光跟踪三维测边网平差[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(6):20-27.
LIU Shuo, LIU Guangbo, LIU Shangguo. Adjustment of 3-D laser tracking network based on barycenter datum[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2021, 40(6): 20-27.
- [7] 李林伟,朱罗平,孟鹏.激光精密测量技术在大型水轮发电机组安装中的应用[J].水电能源科学,2016,34(11):156-159.
LI Linwei, ZHU Luoping, MENG Peng. Application of laser precision measurement technique in installation of large hydraulic turbine generator set[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(11): 156-159.
- [8] 王献奇,张翠萍.激光跟踪测量在大型水轮发电机组安装工程中的应用[J].水电与新能源,2017(2):22-25.
WANG Xianqi, ZHANG Cuiping. Application of the laser tracking measurement technology in the installation of large-scale hydro-turbine generator unit[J]. Hydropower and New Energy, 2017(2): 22-25.
- [9] 刘宇鉴,蒋华平,陈佳睿.激光跟踪仪在乌东德机组安装工程中的应用[J].水力发电学报,2022,41(5):12-20.
LIU Yujian, JIANG Huaping, CHEN Jiarui. Application of laser tracker to Wudongde hydraulic turbine generator units installation[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(5): 12-20.
- [10] 罗涛,齐志军,王巍,等.适用于激光跟踪仪转站的改进平差方法[J].中国激光,2024,51(2):68-75.
LUO Tao, QI Zhijun, WANG Wei, et al. Improved adjustment method applied in transformation of laser tracker[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(2): 68-75.
- [11] 王小龙,康玲,董岚,等.加速器准直控制网数据处理误差累积研究[J].核技术,2021,44(9):25-33.
WANG Xiaolong, KANG Ling, DONG Lan, et al. Data processing error accumulation of accelerator alignment control network[J]. Nuclear Techniques, 2021, 44(9): 25-33.
- [12] KUTOGLU H S, AYAN T. The role of common point distribution in obtaining reliable parameters for coordinate transformation[J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 176(2): 751-758.
- [13] 刘忠贺,李宗春,何华.兼顾位置分布及测量精度的坐标转换公共点优选方法[J].光学精密工程,2024,32(24):3632-3643.
LIU Zhonghe, LI Zongchun, HE Hua. An optimization method for selecting common points considering position distribution and measuring precision in coordinate transformation[J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(24): 3632-3643.
- [14] 刘硕,刘光博,刘尚国,等.激光跟踪仪的测量误差解析与精度仿真[J].测绘工程,2021,30(6):21-26.
LIU Shuo, LIU Guangbo, LIU Shangguo, et al. Measurement error analysis and accuracy simulation of laser tracker[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2021, 30(6): 21-26.

(责任编辑:高丽华)