

文章编号 1004-924X(2025)17-2704-14

长角融合空间坐标测量系统误差建模和标定

曲灏辰¹, 王娜², 李东伟³, 许谦², 邓蛟鹏³, 古丽加依娜·哈再孜汗²,
张新盼³, 吴腾飞^{1*}, 史慎东¹, 郝继贵¹

(1. 天津大学精密测试技术及仪器全国重点实验室, 天津 300072;

2. 中国科学院新疆天文台, 新疆乌鲁木齐 830011;

3. 中国电子科技集团公司第三十九研究所, 陕西西安 710065)

摘要:面向航空、航天等高端装备制造和大型射电望远镜等大科学装置建造、运行过程中多目标、自主并行测量需求, 针对前期研究所提出的长角融合空间坐标测量系统, 完善了几何结构误差模型, 提出了一种基于自适应加权优化算法的高精度控制场标定方法, 实现了长角融合空间坐标测量系统误差参数精准标定。室内标定实验24个标定点的点位坐标平均偏差为0.0981 mm, 接近单次测量仿真的理论平均偏差值。室外天文观测环境下10个观测点的点位坐标测量标准差优于0.021 mm, 反射面切向位移最大比对偏差为0.022 mm, 重力方向位移最大比对偏差为0.040 mm。实验结果表明, 本文方法有效标定了长角融合坐标测量系统的误差参数, 满足实时天文观测对主动面形精度控制的需求。

关键词:坐标测量; 误差建模; 误差标定; 多目标

中图分类号: TH74 文献标识码: A

doi: 10.37188/OPE.20253317.2704 CSTR: 32169.14.OPE.20253317.2704

Modeling and calibration of system errors in distance-angle fusion spatial coordinate measurement

QU Haochen¹, WANG Na², LI Dongwei³, XU Qian², DENG Jiaopeng³, KAZEZKHAN Guljaina²,
ZHANG Xinpan³, WU Tengfei^{1*}, SHI Shendong¹, ZHU Jigui¹

(1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University,
Tianjin 300072, China;

2. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

3. The 39th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,
Xi'an 710065, China)

* Corresponding author, E-mail: wtf@tju.edu.cn

Abstract: Facing multi-objective, autonomous, parallel measurement demands in the manufacturing of high-end equipment (e.g., aviation and aerospace) and the construction and operation of large scientific facilities (e.g., large radio telescopes), improvements are presented for the distance-angle fusion spatial coordinate measurement system previously proposed. The geometric-structure error model has been refined,

收稿日期: 2025-05-13; 修订日期: 2025-06-04.

基金项目: 新疆维吾尔自治区“天山创新团队”资助项目(No. 2024D14003); 国家自然科学基金资助项目(No. 52127810, No. 52275539, No. 52205572); 天津市科技计划资助项目(No. N24ZXZSS00300)

and a high-precision control-field calibration method based on an adaptive weighted optimization algorithm is introduced. Precise calibration of the system's error parameters was achieved. In indoor calibration experiments, the average deviation of coordinates across 24 calibration points was 0.098 1 mm, closely matching the theoretical average deviation from single-measurement simulation. In outdoor astronomical observation conditions, the standard deviation of point-position measurements for 10 observation points was better than 0.021 mm, the maximum tangential displacement comparison deviation of the reflective surface was 0.022 mm, and the maximum gravitational-direction displacement deviation was 0.040 mm. These results demonstrate that the proposed method effectively calibrates the error parameters of the distance-angle fusion coordinate measurement system and satisfies the real-time control requirements for active surface shape accuracy in astronomical observations.

Key words: coordinate measurement; error modeling; error calibration; multi-objective

1 引 言

空间三维坐标测量是刻画物体外形结构、描述物体位姿状态及相互关系的最基本、最常用的方法,也是机械制造保证产品质量、进行工艺控制的重要手段^[1-3]。以激光跟踪仪为代表的球坐标系测量系统,已成为航空、航天等高端装备制造和大型射电望远镜等大科学装置建造、运行过程应用数量最多、范围最广的标准测量仪器^[4-7]。激光跟踪仪基于高精度二维转台的长度、角度关联设计,测量时跟踪机构只能保持瞄准单一目标进行点对点测量,在进行多目标测量任务时只能通过大量人工干预转移光束实现目标切换,无法满足多目标、快节奏、高度自动化的测量需求^[8-9]。视觉测量和光电扫描角度测量能够提供多目标并行测量能力,通过测量节点组建分布式测量网络^[10]实现高精度多目标、快速同步测量,但在应用中需要考虑测量节点优化布局问题和网络结构的稳定性问题。对于装备制造和大装置建造现场,复杂现场环境往往会限制测量节点的最优化布局,影响测量精度;机械振动等外界干扰也会降低测量网络的稳定性,导致测量数据发生漂移。在保证坐标测量精度的同时,赋予仪器多目标、快速、自主测量的能力,一直是制造及相关领域研究、应用人员长期关注的热点和难点。

球坐标系测量系统具备统一、稳定的坐标系,在装备制造和大装置建造现场具备良好的适应性和通用性,对于复杂现场环境可以有效

保证测量精度和重复性。考虑到视觉测量和光电扫描测角的并行测量能力,研究人员围绕着如何在球坐标系测量系统中引入多目标并行测量功能开展了一系列研究。Leica激光跟踪仪开发了“Power Lock”技术^[11],引入视觉测量技术实现了一定视场范围内单个目标的自动引导测量。基于光电扫描多角度后方交会原理可以并行测量多个目标,与激光跟踪仪组建测量网络,提供目标方位信息实现了激光跟踪仪自主测量^[12]。上述研究通过视觉测量技术和光电扫描测角技术引入冗余的观测信息,一定程度上提升了激光跟踪仪的自主引导测量能力,但未改变其通过跟瞄机构实现长角关联的逐点测量模式,测量系统仍不具备多目标、并行测量能力。为此,天津大学郝继贵^[13]提出了一种基于长角数据融合的空间三维坐标测量方法,采用光电扫描测角技术实现空间多目标二维方位角度并行测量,通过二维正交转镜引导测距光束实现多目标长度测量,最终基于长度、角度多参数非正交约束模型实现空间坐标重建,从而实现多目标并行、自主感知空间坐标测量。该方法采用长度、角度多参数约束模型取代经典球坐标模型,用纯计算方法取代复杂精密的跟瞄实体结构,因此约束模型的精度直接影响坐标测量精度,系统误差精确建模及标定是保证测量精度的关键。经典激光跟踪测量系统误差模型可分为小误差线性近似模型^[14-15]和运动学坐标融合模型^[16-18]。误差标定主要可归纳为三类方法:几何约束法、单误差标定法以及网络标定方

法^[19-23]。上述研究为典型的球坐标系测量系统结构误差建模和标定提供了解决方案,但由于长角融合测量融合了光电扫描测角和激光跟踪测距,所以无法直接应用于测量系统的误差建模和误差标定。针对上述问题,杨朔等建立了长角融合坐标测量系统简化几何结构误差模型,基于高精度控制网络对部分误差参数进行了标定^[24]。

针对长角融合空间坐标测量系统误差建模和标定问题,本文建立了长度、角度多参数约束空间坐标重建模型,开展几何结构误差运动学建模和基于精密控制场网络的结构误差标定方法的研究,完善了几何结构误差来源,优化了高精度控制场标定迭代算法,系统标定了长角融合空间坐标测量系统误差参数。

2 工作原理

长角融合空间坐标测量系统,由光电扫描测角坐标系和激光跟踪测距坐标系组成,其工作原理如图 1 所示。在测角坐标系中, Z_s 轴逆时针匀速旋转带动两个倾斜的光平面扫描整个测量空间,理想情况下,两光平面均经过原点 O_s ,且与 Z_s 轴夹角设计为 $\pm 45^\circ$ 。当光平面 1 扫过目标点时,可得到光平面 1 从初始位置到目标点的旋转角度,记录角度为 θ_1 ;同理,当光平面 2 扫过同一

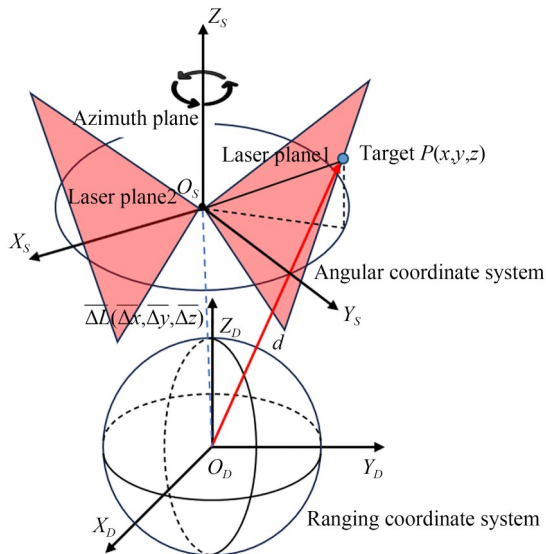


图 1 测量系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of measurement system

目标点时,记录从初始位置到目标点的旋转角度为 θ_2 。此时,经旋转得到的对应的平面方程的法向量为:

$$n_1 = \begin{bmatrix} n_{11} \cos \theta_1 - n_{12} \sin \theta_1 \\ n_{11} \sin \theta_1 + n_{12} \cos \theta_1 \\ n_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$n_2 = \begin{bmatrix} n_{21} \cos \theta_2 - n_{22} \sin \theta_2 \\ n_{21} \sin \theta_2 + n_{22} \cos \theta_2 \\ n_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{bmatrix}$$

式中: $N_1 = [n_{11}, n_{12}, n_{13}]^T$ 为光平面 1 初始法向量, $N_2 = [n_{21}, n_{22}, n_{23}]^T$ 为光平面 2 初始法向量。

此时经旋转扫过的两倾斜光平面在测角坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 下交会出一条直线,交会方程为:

$$\begin{cases} a_1x + b_1y + c_1z = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z = 0 \end{cases} \quad (2)$$

在测距坐标系中,二维正交旋转中心原点 O_D 发射测距激光指向目标 P , Z_D 轴为方位旋转轴, X_D 轴指向水平方向, Y_D 轴与 X_D 轴、 Z_D 轴正交,经激光测距得到 O_D 与 P 之间的长度为测距值 d 。

通过两坐标系之间的相对位置关系 $\Delta L(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$,建立测角坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 与测距坐标系 $O_D-X_DY_DZ_D$ 之间的联系,将测角数据 θ_1, θ_2 与测距数据 d 在坐标系 $O_s-X_sY_sZ_s$ 下完成空间坐标重建。长角融合测量系统坐标 (x, y, z) 输出如下:

$$\left[\begin{array}{l} d = \sqrt{(x - \Delta x)^2 + (y - \Delta y)^2 + (z - \Delta z)^2} \\ a_1x + b_1y + c_1z = 0 \\ a_2x + b_2y + c_2z = 0 \end{array} \right] \Rightarrow \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 几何结构误差模型

在光电扫描测角坐标系中,由于激光器的安装误差,光平面 1 和 2 的倾斜角度往往不符合设计值,其出射原点也不重合。如图 2 所示,设光平面 1 的出射点为 O_s ,则光平面 2 的出射点沿 Z_s 轴偏移距离为 Δd ,称为光平面截距误差。因此,初

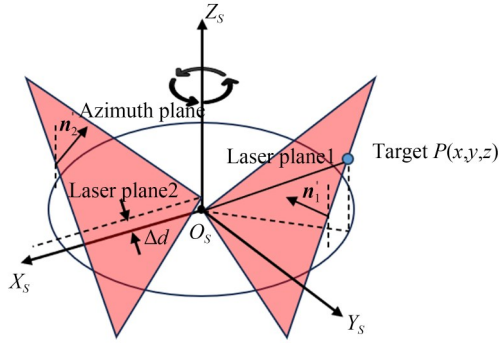


图 2 光电扫描测角误差模型

Fig. 2 Photoelectric scanning angle measurement error model

始光平面方程修订为:

$$\begin{cases} n_{11}x + n_{12}y + n_{13}z = 0 \\ n_{21}x + n_{22}y + n_{23}z + \Delta d = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中:光平面法向量参数 $N_1 = [n_{11}, n_{12}, n_{13}]^T$, $N_2 = [n_{21}, n_{22}, n_{23}]^T$ 与 Δd 需标定得出。通过式(1)得出两个光平面旋转到目标点 P 时刻的平面法向量: $n'_1 = [a'_1, b'_1, c'_1]$, $n'_2 = [a'_2, b'_2, c'_2]$, 再通过式(2)与式(3)得出球坐标系下经过目标 P 的两光平面方程:

$$\begin{cases} a'_1x + b'_1y + c'_1z = 0 \\ a'_2x + b'_2y + c'_2z + \Delta d = 0 \end{cases} \quad (5)$$

激光跟踪测距坐标系是由二维正交转镜和测距光束构成的球坐标测量系,其结构误差如图 3 所示,包括初始距离误差 d_0 、对准偏移误差(水平轴偏移 e 、镜面偏移 f 、入射光束偏移 O_{1x}, O_{1y})、对准倾斜误差(镜面倾斜 c 、水平轴倾斜 i 、入射光束倾斜 I_x, I_y)以及圆光栅安装误差(圆光栅偏心 E_x, E_y, K_x, K_y 、圆光栅倾斜 $E_{2x}, E_{2y}, K_{2x}, K_{2y}$)。初始距离误差 d_0 为激光测距零点至转镜中心 O_D 的

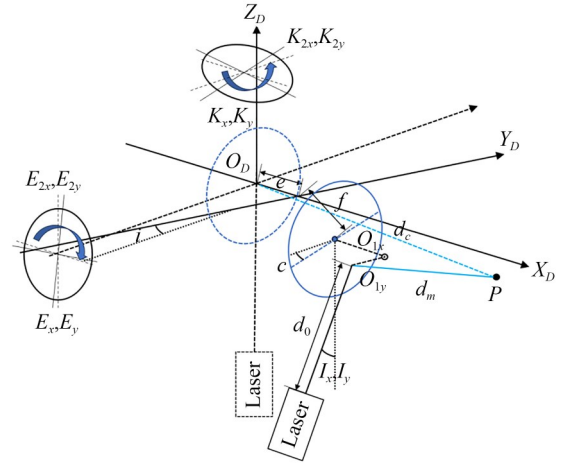


图 3 激光跟踪测距球坐标系结构误差模型

Fig. 3 Structural error model of spherical coordinate system for laser tracking and ranging

距离;水平轴偏移 e 为水平轴在正交位置的偏移;入射光束倾斜 I_x, I_y 为激光入射至转镜后与转镜中心的偏移;镜面倾斜 c 为转镜与水平轴间的角度倾斜;水平轴倾斜 i 为水平轴在正交位置的角度倾斜;圆光栅偏心误差 E_x, E_y, K_x, K_y 与倾斜误差 $E_{2x}, E_{2y}, K_{2x}, K_{2y}$ 为圆光栅安装误差经傅里叶级数展开后的一阶与二阶谐波误差,更高阶谐波对应的安装误差因影响过小可忽略。其中,直接影响测距值 d_m 的结构误差参数包括初始距离误差 d_0 、水平轴偏移 e 以及镜面偏移 f , 得出测距修正值 d_c :

$$d_c = d_m - d_0 - 2\sin\left(\frac{v_m}{2}\right)\left(e \cos\left(\frac{v_m}{2}\right) + f\right). \quad (6)$$

此外,球坐标系下的方位角 h_c 和俯仰角 v_c 的修正值为:

$$\begin{cases} h_c = h_m + \frac{1}{\sin(v_m)} \left[I_x \cos(h_m) - I_y \sin(h_m) + \frac{O_{1x} \cos(h_m) - O_{1y} \sin(h_m) + O_{2y}}{d_m} \right] - \\ \frac{i \sin\left(\frac{v_m}{2}\right) + c}{\cos\left(\frac{v_m}{2}\right)} + E_x \sin(h_m) - E_y \cos(h_m) + E_{2x} \sin(2h_m) - E_{2y} \cos(2h_m) \\ v_c = v_m - \left[I_x \sin(h_m) + I_y \cos(h_m) \right] - \frac{O_{1x} \sin(h_m) - O_{1y} \cos(h_m) + O_{2y}}{d_m} - \\ \cos\left(\frac{v_m}{2}\right) \left[\frac{2}{d_m} \left(e \cos\left(\frac{v_m}{2}\right) + f \right) + K_x \right] + K_y \sin\left(\frac{v_m}{2}\right) - K_{2x} \sin(v_m) + K_{2y} \cos(v_m) \end{cases} \quad (7)$$

由式(3)可知,考虑结构误差的长角融合空间坐标测量系统的坐标补正值 $P_c(x_c, y_c, z_c)$ 为:

$$\begin{cases} d_c = \sqrt{(x_c - \Delta x)^2 + (y_c - \Delta y)^2 + (z_c - \Delta z)^2} \\ a'_1 x_c + b'_1 y_c + c'_1 z_c = 0 \\ a'_2 x_c + b'_2 y_c + c'_2 z_c + \Delta d = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

4 标定方法

如图4所示,本文采用控制场网络标定方法,通过固定标定点形成点位约束,分别建立光电扫描测角光平面参数目标函数、测距相关球坐标系结构误差目标函数和长角坐标系相对位置关系目标函数;使用激光跟踪仪采集控制场的基准数据,结合光电扫描测角数据和激光跟踪测距数据,通过自适应加权最小二乘算法求解目标函数;计算修正后的光平面方程与测距值,结合修正后的光平面方程和测距值以及激光跟踪仪基准数据求解长角坐标系相对位置关系。

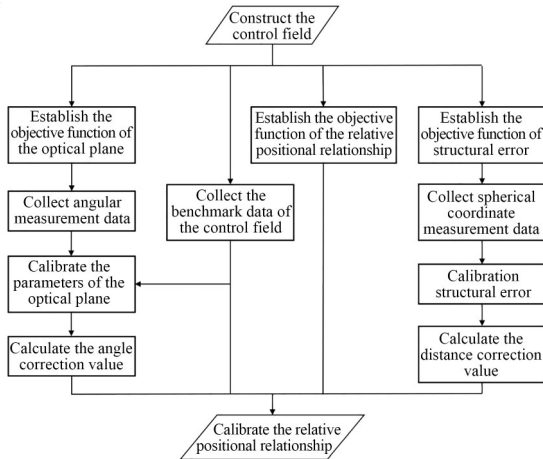


图4 长角融合系统标定流程

Fig. 4 Calibration process of distance-angle fusion system

控制场构建方法如图5所示,标定空间中设有 n 个标定点、1个激光跟踪仪站位和 m 个长角融合空间坐标测量系统站位。激光跟踪仪测量 n 个标定点的空间坐标,作为控制场基准坐标,记作 $P_{r,j}(x_{r,j}, y_{r,j}, z_{r,j}), 1 \leq j \leq n$ 。

长角融合空间坐标测量系统在站位1获取扫

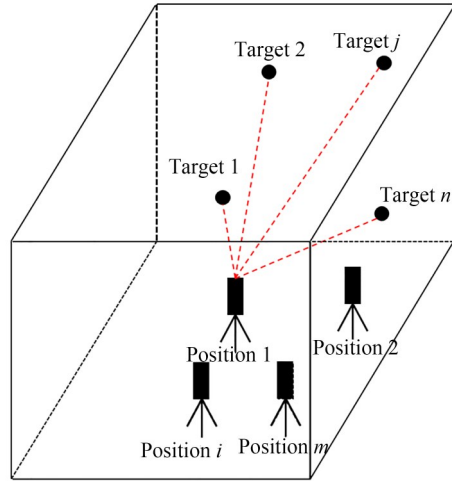


图5 控制场网络示意图

Fig. 5 Schematic diagram of control field network

过 n 个标定点的角度,通过式(5)光平面修正得到两光平面方程记作 $A_{1,j}(P_j)=0, A_{2,j}(P_j)=0$ 。控制场基准坐标 $P_{r,j}(x_{r,j}, y_{r,j}, z_{r,j})$ 经坐标系位姿变换参数 $(R_s, T_s)^T$ 变换到站位1坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 下,记为 $P_{rs,j}(x_{rs,j}, y_{rs,j}, z_{rs,j})$ 。将变换后基准坐标 $P_{rs,j}(x_{rs,j}, y_{rs,j}, z_{rs,j})$ 与两光平面方程建立等式关系,转化为非线性最小二乘问题求解,由此建立优化目标函数:

$$F_s = \min \left\{ \sum_{j=1}^n \left[\left(W_{\theta_1,j} \cdot A_{1,j}(P_{rs,j}) \right)^2 + \left(W_{\theta_2,j} \cdot A_{2,j}(P_{rs,j}) \right)^2 \right] \right\}, \quad (9)$$

其中: W_j 为目标点测量数据的实时权重值,通过计算通过各分量的标准差 σ_j 的倒数确定,表示为:

$$W_j = \frac{1}{\sigma_j^2}. \quad (10)$$

此时权重直接反映分量的可靠性,赋予高稳定性数据更高权重并减少异常值或低质量数据的干扰,并且权重 W_j 在每一次优化后重新计算标准差,用于更新下一次迭代的权重,以保证每次迭代中权重的可靠性。待标定位姿变换参数定义为 $(R_s, T_s)^T = [\alpha_{x,0}, \beta_{y,0}, \gamma_{z,0}, t_{x,0}, t_{y,0}, t_{z,0}]^T$ 。由 n 个标定点建立 $2n$ 个方程,待求光平面参数7个,坐标系位姿变换参数6个,方程组满足 $2n > 13$ 可求解。通过迭代应用 Levenberg-Marquardt 算法对优化目标式(8)进行多次求解,当权重分配趋

于稳定时终止迭代,最终标定出式(4)中光平面参数。

在激光跟踪测距球坐标系结构误差模型中,初始距离误差 d_0 、水平轴偏移 e 、镜面偏移 f 不仅直接影响测距值 d ,还与球坐标方位角 h 和俯仰角 v 相关。为保证标定精度,引入 h 和 v ,对图3误差模型中所有参数进行标定。实际标定中采用多站位联合标定方法,将站位1下的理论球坐标值 (d_{1j}, h_{1j}, v_{1j}) 经坐标系位姿变换参数 $(R_i, T_i)^T$ 变换至各站位下,变换后球坐标理论上即为该站位下的球坐标,由此转化为非线性最小二乘问题求解,并建立优化目标函数:

$$F_D = \min \left\{ \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left[(W_{d,ij} \cdot e_{d,ij})^2 + (W_{h,ij} \cdot e_{h,ij})^2 + (W_{v,ij} \cdot e_{v,ij})^2 \right] \right\}, \quad (11)$$

其中:权重 W 的计算方法同式(10),通过计算球坐标标准差的倒数确定; $(e_{d,ij}, e_{h,ij}, e_{v,ij})$ 为坐标变换误差,即站位1变换至各站位的理论坐标 $R_i \cdot (d_{1j}, h_{1j}, v_{1j}) + T_i$ 与各站位下坐标补正值 $(d_{c,ij}, h_{c,ij}, v_{c,ij})$ 的差值。待标定位姿变换参数定义为 $(R_i, T_i)^T = [\alpha_{x,i}, \beta_{y,i}, \gamma_{z,i}, t_{x,i}, t_{y,i}, t_{z,i}]^T$,对于 m 个站位,由 n 个标定点点可建立 $3n(m-1)$ 个约束方程,待求结构误差参数为17个,位姿变换参数为 $6(m-1)$ 个,当满足 $3n(m-1) \geq 17 + 6(m-1)$ 时即可求解。同样采用Levenberg-Marquardt算法对式(11)进行迭代求解,逐步更新参数值,并监测权重变化,当满足权重收敛时终止计算,标定出图3中17项结构误差参数,从而计算出站位1下距离补正值 $d_{c,1j}$ 。

标定相对位置关系时,将 $P_{rs,j}(x_{rs,j}, y_{rs,j}, z_{rs,j})$ 与长角融合空间坐标测量系统站位1下的坐标补正值 $P_{c,1j}(x_{c,1j}, y_{c,1j}, z_{c,1j})$ 建立等式,转化为非线性最小二乘问题求解。建立优化目标函数:

$$F_{\Delta L} = \min \left\{ \sum_{j=1}^n \left[(W_{x,j} \cdot (x_{rs,j} - x_{c,1j}))^2 + (W_{y,j} \cdot (y_{rs,j} - y_{c,1j}))^2 + (W_{z,j} \cdot (z_{rs,j} - z_{c,1j}))^2 \right] \right\}, \quad (12)$$

其中:待标定参数 $\Delta L(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 因在笛卡尔坐标系中单位权重相等,因此式(12)中权重 W 固定为1; $P_{c,1j}(x_{c,1j}, y_{c,1j}, z_{c,1j})$ 由式(8)得到。由 n 个标

定点建立 $3n$ 个方程,待求相对位置关系参数3个,当满足测角、测距标定条件时,标定点数量 $n > 1$ 即可求解。利用Levenberg-Marquardt算法的优化特性,在式(12)的多次迭代求解中动态调整权重,当权重收敛时停止迭代,标定出相对位置关系 $\Delta L(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ 。

5 仿真与实验

5.1 仿真分析

设计仿真实验,对本文标定方法进行分析验证。仿真中,系统测量精度与实际情况一致,如表1所示,控制场布局如图6所示。在 $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的空间中每隔 10 m 设置一个标定点点,从而均匀分布出27个标定点点,并设立4处站位。站位1所在位置视为坐标原点,其与控制场中心(即点14)的位置关系为 $(-0.1\text{ m}, 0.1\text{ m}, -0.1\text{ m})$,站位2位于坐标系 $(3\text{ m}, 6\text{ m}, 0\text{ m})$ 处,站位3位于坐标系 $(-2\text{ m}, -3\text{ m}, -5\text{ m})$ 处,站位4位于坐标系 $(5\text{ m}, -3\text{ m}, 6\text{ m})$ 处,激光跟踪

表1 长角融合坐标测量系统测距和测角精度

Tab.1 Distance and angle measurement accuracy of distance-angle fusion coordinate measurement system

System accuracy	Set values	units
Ranging accuracy σ_d	3	μm
Rotating mirror accuracy σ_h, σ_v	2, 2	arcsec
Angle measurement accuracy $\sigma_{\theta_1}, \sigma_{\theta_2}$	0.5, 0.5	arcsec

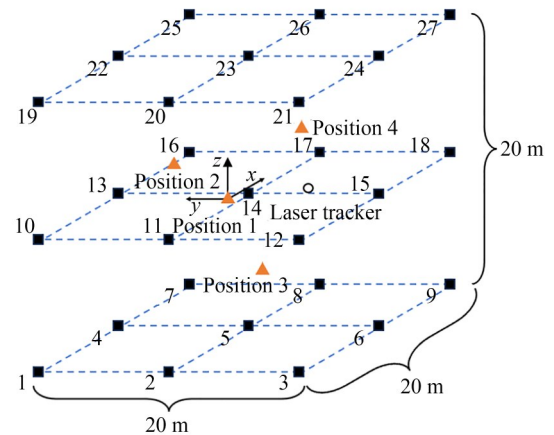


图6 仿真控制场布局

Fig. 6 Simulate layout of control field

仪位于坐标系(0.1 m, -1 m, 0.2 m)处。

对测角光平面方程参数、测距相关结构误差以及相对位置关系进行标定,分别对比无加权优化算法、加权优化算法和自适应加权优化算法的标定结果,经蒙特卡洛 100 次仿真标定结果如表 2 所示。由表 2 中可知,3 种优化算法对光平面法向量参数标定效果相近,标定误差低于 0.1%。在标定平面截距误差 Δd 时,3 种优化算法的标定误差都较大,其中自适应加权优化算法误差最

小。标定测距相关结构误差时,无加权优化算法标定误差最大达设定值的 43.5%,加权优化算法标定误差可降低至设定值的 9.1%,而自适应加权优化算法标定误差不超过设定值的 5%。根据式(12)标定相对位置关系,使用各算法标定的光平面方程参数与测距相关结构误差,权重固定为 1,采用自适应加权优化算法结果的标定精度相比无加权优化与加权优化算法提高了 50% 以上。

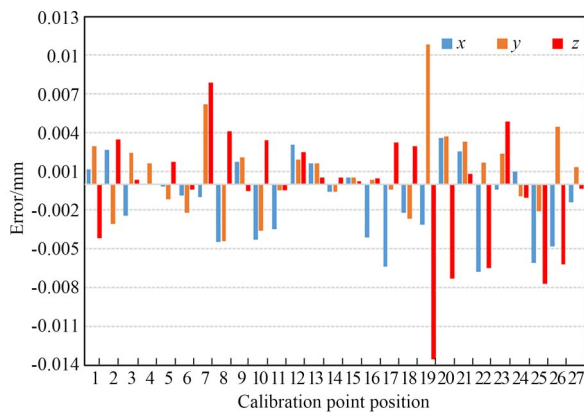
表 2 仿真标定结果

Tab. 2 Simulation calibration result

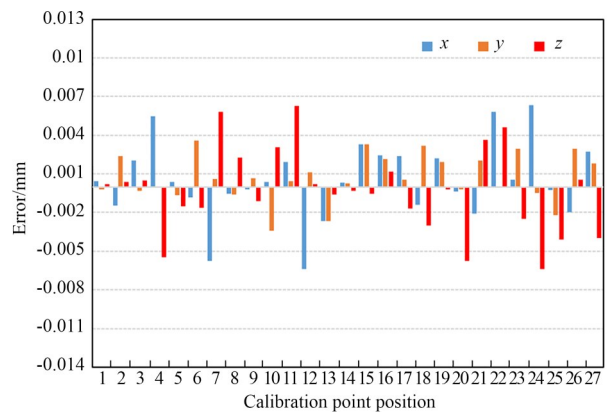
Parameters	Set values	Calibration error		
		No weighted optimization	Weighted optimization	Adaptive weighted optimization
n_{11}, n_{12}, n_{13}	0, 0.707 1, 0.707 1	0, 0.000 4, -0.000 4	0, 0.000 3, -0.000 3	0, 0.000 3, -0.000 3
$n_{21}, n_{22}, n_{23}, \Delta d$	0.707 1, 0, 0.707 1, 0	-0.000 2, -0.000 1, -0.000 6, 2.505 5	-0.000 3, -0.000 5, -0.000 9, 1.483 3	-0.000 3, -0.000 2, -0.000 8, 0.700 3
Initial distance error d_0 /mm	1 000	-0.118 4	0.016 2	-0.004 8
Transit axis offset e /mm	0.1	-0.040 2	0.009 1	-0.008 9
Mirror offset f /mm	0.2	0.087 0	-0.017 9	0.008 9
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ /mm	0, 0, -200	-0.002 9, -0.004 3, 0.004 3	0.001 8, 0.002 5, 0.002 9	-0.001 4, -0.001 2, 0.001 8

采用表 2 的标定结果,根据式(5)~式(7)分别采用 3 种优化算法计算标定点三维坐标并分析误差。如图 7(a)~7(c)所示,对于 (x, y, z) 单轴坐标,无权重优化算法三轴最大误差为 0.007, 0.010, 0.014 mm,加权优化算法降低至 0.006, 0.004, 0.006 mm,自适应加权算法进一步降低

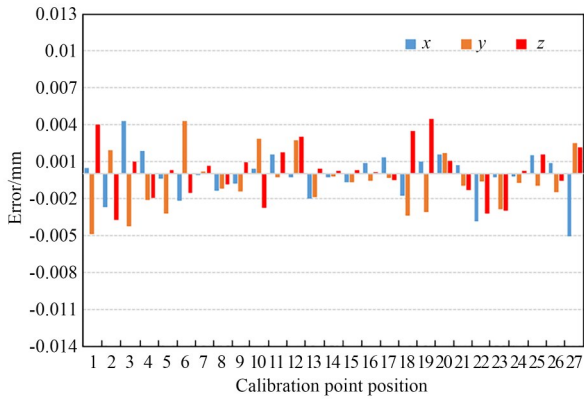
至 0.005, 0.004, 0.004 mm,且 80% 样本的坐标误差控制小于 0.003 mm。如图 7(d)所示,对于 27 个标定点三轴合成坐标的点位偏差,自适应加权算法的表现最优,其最大误差为 0.053 mm,相比无权重算法和加权算法分别降低了 25.0% 和 13.9%。同时,自适应加权算法的平均误差降至



(a) Weightless optimization algorithm

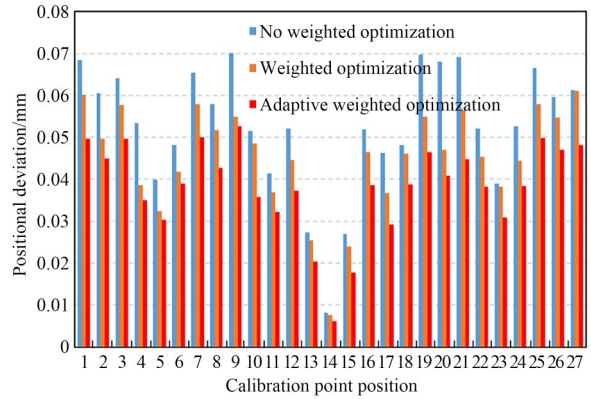


(b) Weighted optimization algorithm



(c) 自适应加权优化算法

(c) Adaptive weighted optimization algorithm



(d) 各优化算法点位误差

(d) Point position errors of each optimization algorithm

图 7 不同算法优化的仿真结果

Fig. 7 Simulation results of each algorithm optimization

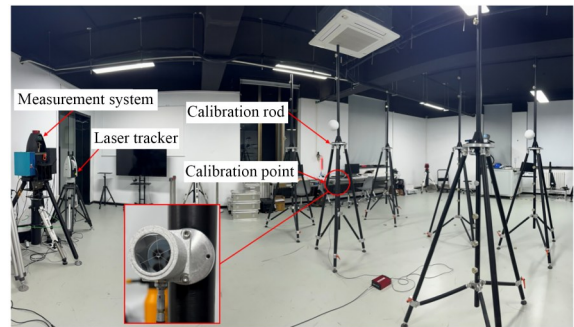
0.038 mm, 相比无权重算法的 0.053 mm 和加权算法的 0.045 mm, 降幅分别达 27.2% 和 15.6%, 明显更优。

5.2 标定实验

长角融合空间坐标测量系统如图 8 所示, 由测站和测靶组成。测站由光电扫描测角模块 $O_S-X_S Y_S Z_S$ 与激光跟踪测距模块 $O_D-X_D Y_D Z_D$ 组成; 测靶由反射棱镜和光电接收器组成, 反射棱镜中心精密开孔, 并在该孔位嵌入光电接收器。上述设计利用反射棱镜实现激光测距功能, 光电接收器同步捕获扫描测角信号, 实现长角信号并行处理。通过精密调心保证反射棱镜顶点与光电探测靶面中心精确重合, 确保坐标测量精度。实验中环境温度稳定在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 附近, 标定空间中空气折射率基本一致, 从而确保达到表 1 所列测角精度, 并按照环境温度计算空气折射率, 对激光跟踪测

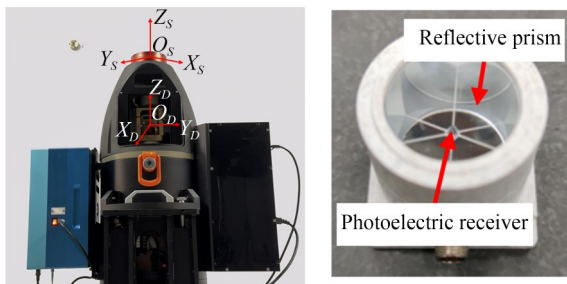
距进行了校正, 保证标定所用测距和测角数据精度。

如图 9 所示, 控制场布置在 $5\text{ m}\times 8\text{ m}\times 3\text{ m}$



(a) 实验场景

(a) Experimental scene



(a) 测站

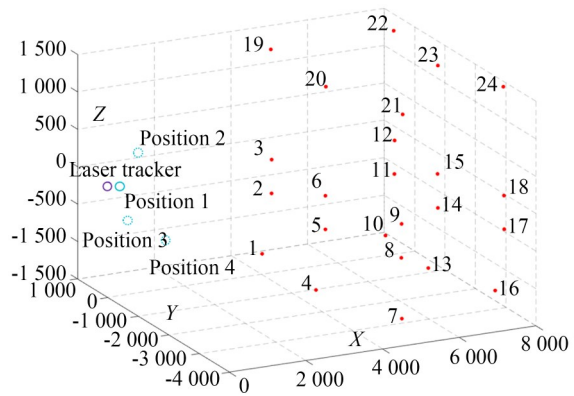
(a) Measuring instrument

(b) 测靶

(b) Target measurement

图 8 长角融合空间坐标测量系统

Fig. 8 Distance-angle fusion spatial coordinate measurement system



(b) 控制场示意图

(b) Schematic diagram of control field

图 9 实验控制场布局

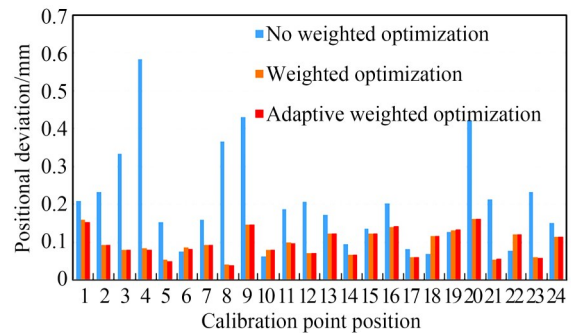
Fig. 9 Layout of experimental control field

的空间内,在 Y 方向约 4 m 和 8 m 处各设两组标定杆,每组各 3 个标定杆沿 X 轴分布,两杆之间间隔约 2.5 m。在 Z 方向 3 m 范围内,每根标定杆均匀配置 4 个刚性底座,间隔约 1 m,用于固定测靶,因此控制场内共计 24 个标定点。长角融合坐标测量系统布置 4 个测站位于 Y 方向起始位置附近,沿 X 方向大致间隔 1 m 分布,在 Y 方向上有 ± 0.5 m 的差异,在 Z 方向上有 ± 0.3 m 的差异,Leica AT960 激光跟踪仪固定安装在站位 1 的邻近区域。

在上述控制场布局下,对长角融合坐标测量系统的测角光平面方程参数、测距相关结构误差以及相对位置关系进行标定,分别采用无加权优化算法、加权优化算法、自适应加权优化算法,标定结果如表 3 所示。

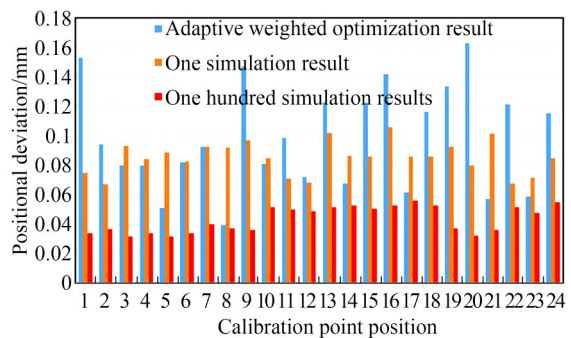
根据式(5)~式(7)对长角融合坐标测量系统误差模型进行修正,计算 24 个标定点的坐标,并与激光跟踪仪基准坐标进行比对,采用 3 种优化算法的三轴合成坐标点位偏差如图 10(a)所示。采用无权重优化算法进行标定,其最大点位偏差为 0.583 mm,平均点位偏差为 0.208 mm;采用加权优化算法可显著降低点位偏差,其最大点位偏差和平均点位偏差分别为 0.163 mm 和 0.099 mm;采用自适应加权优化算法的标定点位偏差最小,最大点位偏差和平均点位偏差略低于加权优化算法,分别为 0.163 mm 和 0.098 mm,在 24 个标定点中有 22 个点偏差小于 0.150 mm。

与激光跟踪仪基准坐标进行比对,会引入激光跟踪仪的测量误差,为进一步分析评价文本标



(a) 三种优化算法与激光跟踪仪的比对结果

(a) Comparison results of three optimization algorithms with the laser tracker



(b) 自适应加权优化算法的仿真和实验比对结果

(b) Simulation and experimental comparison results of the adaptive weighted optimization algorithm

图 10 24 个标定点的点位偏差

Fig. 10 Point position deviations of 24 calibration points

定方法,仿真构建图 9(b)所示实验用控制场,对长角融合标定过程进行单次仿真和蒙特卡洛 100 次仿真,并与采用图 10(a)中自适应加权优化算法实验标定结果进行比对,如图 10(b)所示。单次仿真平均点位偏差为 0.085 mm,100 次蒙特卡洛仿真平均点位偏差可降至 0.043 mm。单次仿

表 3 实际参数标定结果

Tab. 3 Calibration results of actual parameters

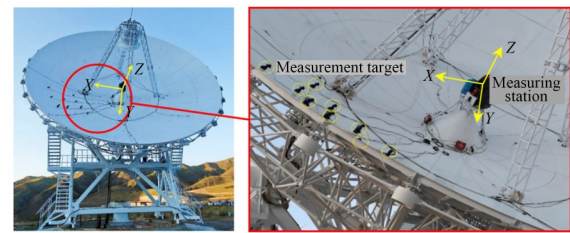
Parameters	No weighted optimization	Weighted optimization	Adaptive weighted optimization
n_{11}, n_{12}, n_{13}	0, 0.816 2, 0.577 8	0, 0.816 2, 0.577 8	0, 0.816 2, 0.577 8
$n_{21}, n_{22}, n_{23}, \Delta d$	0.816 2, 0.002 6, 0.697 9, 0.743 5	0.816 2, 0.002 6, 0.697 9, 0.753 0	0.816 2, 0.002 6, 0.697 9, 0.752 5
Initial distance error d_0 /mm	2 292.345 1	2 311.286 3	2 308.713 4
Transit axis offset e /mm	15.090 8	2.742 3	1.634 1
Mirror offset f /mm	9.128 0	-0.832 3	1.792 4
$\Delta x, \Delta y, \Delta z$ /mm	-5.048 3, -4.406 8, -206.327 5	0.845 1, 0.389 0, -199.170 6	0.812 5, 0.371 5, -201.038 5

真平均偏差因受到表 1 所示角度和长度测量不确定度的影响,存在随机误差干扰,因此低于 100 次蒙特卡洛仿真结果。实验中自适应加权优化算法的平均偏差为 0.098 mm,低于 100 次蒙特卡洛仿真平均偏差。这是因为实验所得点位偏差为单次标定的结果,与单次仿真相似,也受到角度和长度测量不确定度的影响。此外,控制场基准坐标也会引入激光跟踪仪的测量误差,导致标定误差。实验中自适应加权优化算法平均偏差已经接近单次仿真的平均点位偏差,实验与仿真结果基本一致,证明本文方法可以有效标定长角融合坐标测量系统的误差参数。

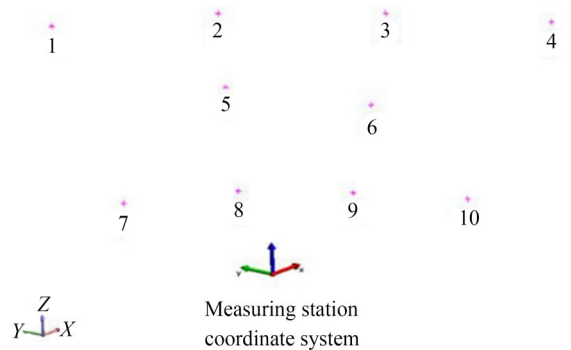
5.3 射电望远镜面形测量应用验证

新疆奇台 110 m 口径射电望远镜(QiTai radio Telescope, QTT)全向可动,工作波段覆盖 150 MHz~115 GHz,具有高灵敏度、大可视天区、款频率覆盖的特点,建成后在国际上可全面提升从厘米到 3 mm 波段的观测能力^[25]。QTT 为格里高利抛物面天线,通过约 2 000 块面板拼接构成 110 m 口径的主动反射面。本文研究的长角融合坐标测量系统具备多目标、快速、自主测量的能力,提供快速面形测量技术,对反射面 500 余观测点位坐标进行实时测量,通过面板促动器实时调整面形,实现主动反射面面形的闭环控制,及时修正重力、日照、风荷造成的形变,满足高频观测 0.3 mm 的面形精度要求。如图 11 所示,在室内进行了长角融合坐标测量系统几何结构误差标定实验,完成误差模型的修正后,测量系统在新疆天文台奇台观测站 13 m 缩比天线上进行了面形测量应用验证实验,分别进行工况适应性测试、测量重复性实验、位移测量实验和天线仰角变形测试。测站架设在馈源正上方,10 个测靶位于 4 个子午面(“2+3+3+2”布局)、3 个不同距离处,测量水平角范围约为 35°、俯仰角范围约为 15°(单方向)。

在上午、正午(强光)、晚间(暗环境)3 个不同时间段和不同天线仰角情况下循环测量 10 个测靶坐标,评估长角融合坐标测量系统在不同温度、光照、空气扰动和倾斜等环境下的适应性,结果表明,测量系统在不同工况下均能正常工作。在天线仰角为 90°(朝天)的条件下,长角融合坐标测量系统循环测量 10 个测靶坐标 20 次,每次



(a) 13 m 缩比天线
(a) 13 m scale antenna



(b) 测站坐标系与观测点位位置关系
(b) Positional relationship between the coordinate system of the station and the observation point

图 11 奇台 13 m 缩比天线测试

Fig. 11 Test of 13 m scaled antenna in Qitai

循环测量时间约为 28 s。10 个靶标(x, y, z)单轴坐标的测量标准差优于 0.014 mm,三轴合成坐标测量标准差优于 0.021 mm。测靶安装有精密位移台,分别沿反射面重力方向和切向方向移动 0.5, 1 和 2 mm。测量测靶移动前后坐标值,计算出靶标位移测量值,并与位移台千分尺读数进行精度比对。切向位移的最大比对偏差为 0.022 mm,重力方向位移的最大比对偏差为 0.040 mm。如图 12 所示,坐标测量重复精度高于 QTT 所需面形精度一个数量级,位移测量精度远高于 0.3 mm 的面形精度要求,满足 QTT 实时天文观测对主动面形精度控制的需求。上述测量结果包含了温度改变(约 5~45 °C)导致的误差模型补偿精度降低的影响,可见本文误差模型和标定方法对温度变化具有较好的稳定性。后续计划开展测量系统多级温度控制设计,确保不同温度下的误差模型补偿精度,进一步提升坐标测量精度。

将天线仰角分别调为 90°(朝天),75°,60°,45°和 30°,长角融合坐标测量系统和天线同步旋转,

测站和测靶坐标关系保持不变。如图 13,对于 7~10 号测靶观测点,测站坐标系 X 轴向变化 0.073 mm、Y 轴向变化 0.591 mm、Z 轴向变化 0.305 mm,主要变形为 Y 轴向(近似天线俯仰方向),坐标的变化趋势一致,变形量与仰角变化近

似呈线性关系。该测试实现了不同仰角下天线反射面的实时测量,观测结果与理论仿真分析的天线仰角变形结论基本一致。上述实验测试结果表明,长角融合坐标测量系统满足 QTT 实时天文观测对主动面面形精度控制的需求。

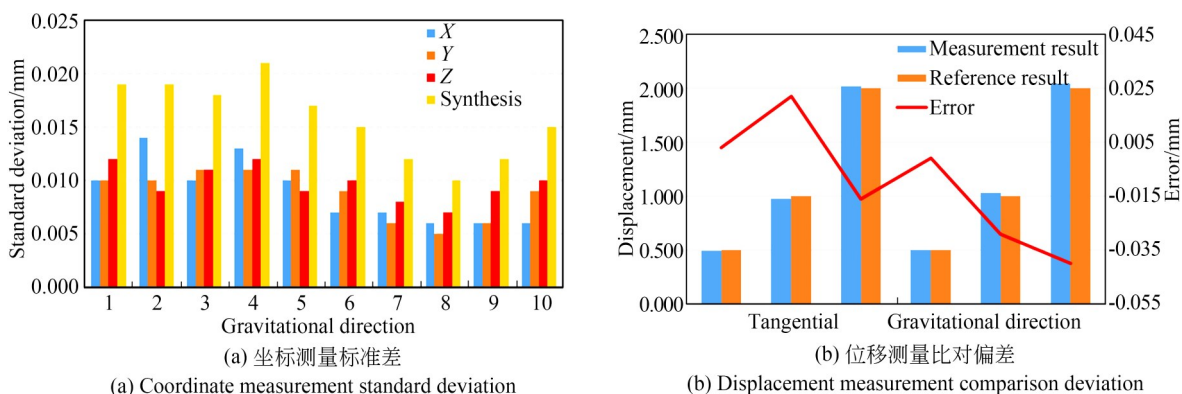


图 12 测量精度评估

Fig. 12 Evaluation of measurement accuracy

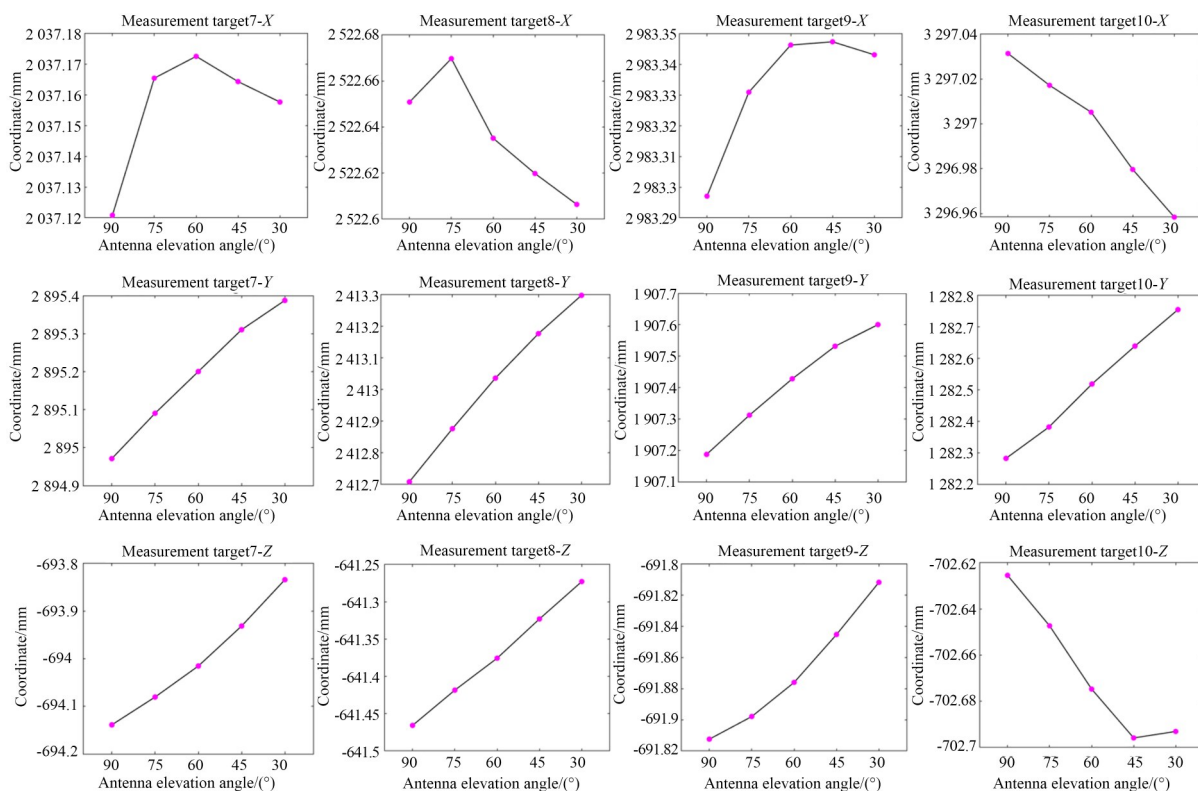


图 13 天线仰角变形测试结果

Fig. 13 Test results of antenna elevation angle deformation

6 结 论

针对长角融合空间坐标测量系统,本文系统分析了光电扫描测角坐标系和激光跟踪测距坐标系的几何结构误差项,建立了长角融合空间坐标测量系统几何结构误差运动学模型,采用自适应加权优化算法提升了精密控制场网络标定精度,实现了长角融合空间坐标测量系统误差参数的系统标定。与激光跟踪仪进行对比,本文方法标定的 24 个点位坐标平均偏差接近单次仿真的平均点位偏差,实验与理论仿真结果基本一致,表明本文方法可以有效标定长角融合坐标测量系统的误差参数。在室外天文观测环境下,10 个观测点单轴坐标的测量标准差优于 0.014 mm,点位坐标测量标准差优于 0.021 mm,望远镜反射面切向位移的最大比对偏差为 0.022 mm,重力方向位移的最大比对偏差为 0.040 mm,表明长角融合空间坐标测量系

统满足实时天文观测对主动面面形精度控制的需求。

作者贡献声明:

曲灏辰:标定方法提出,数据处理和初稿撰写;

王 娜:测试指标提出;

李东伟:验证方案提出;

许 谦:验证实验设计;

邓皎鹏:实验方案论证;

古丽加依娜·哈再孜汗:实验数据分析;

张新盼:实验数据处理;

吴腾飞:测量样机设计,数据分析和论文修改;

史慎东:优化算法提出,实验设计和数据分析;

郝继贵:测量方法提出,项目管理。

参考文献:

- [1] SCHMITT R H, PETEREK M, MORSE E, *et al.* Advances in large-scale metrology-review and future trends [J]. *CIRP Annals*, 2016, 65 (2) : 643-665.
- [2] 杜福洲,文科. 大尺寸精密测量技术及其应用[J]. *航空制造技术*, 2016, 59(11): 16-24.
DU F ZH, WEN K. Large-scale precision measurement technology and its application [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(11): 16-24. (in Chinese)
- [3] 李广云,范百兴. 精密工程测量技术及其发展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1742-1751.
LI G Y, FAN B X. The development of precise engineering surveying technology [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10) : 1742-1751. (in Chinese)
- [4] GAI Y H, ZHANG J W, GUO J M, *et al.* Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurement system of laser trackers in aircraft assembly[J]. *Measurement*, 2020, 165: 108144.
- [5] 王博,董登峰,周维虎,等. 面向激光跟踪仪跟踪恢复的合作目标视觉检测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(2): 271-282.
WANG B, DONG D F, ZHOU W H, *et al.* Visual detection of targetball for laser tracker target tracking recovery[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(2): 271-282. (in Chinese)
- [6] 赵一鸣,李艳华,商雅楠,等. 激光雷达的应用及发展趋势[J]. *遥测遥控*, 2014, 35(5): 4-22.
ZHAO Y M, LI Y H, SHANG Y N, *et al.* Application and development direction of lidar [J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, 35(5): 4-22. (in Chinese)
- [7] DONG Y K, ZHU Z D, TIAN X N, *et al.* Frequency-modulated continuous-wave LIDAR and 3D imaging by using linear frequency modulation based on injection locking[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(8): 2275-2280.
- [8] DENG Z P, LI S G, HUANG X. Uncertainties evaluation of coordinate transformation parameters in the large-scale measurement for aircraft assembly [J]. *Sensor Review*, 2018, 38(4): 542-550.

- [9] ZENG Q, LI S G, HUANG X. Configuration optimization of the feature-oriented reference system in large component assembly [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 113(3): 673-687.
- [10] 杨凌辉. 基于光电扫描的大尺度空间坐标测量定位技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
YANG L H. *Research on Large-Scale Space Coordinate Measurement Location Technology Based on Optical Scanning*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010. (in Chinese)
- [11] SHAO M W, WEI Z Z, HU M J, *et al.* Calibration method for a vision guiding-based laser-tracking measurement system[J]. *Measurement Science and Technology*, 2015, 26(8): 085009.
- [12] MOELLER C, SCHMIDT H C, KOCH P, *et al.* Real time pose control of an industrial robotic system for machining of large scale components in aerospace industry using laser tracker system [J]. *SAE International Journal of Aerospace*, 2017, 10(2): 100-108.
- [13] LIU Z X, ZHU J G, YANG L H, *et al.* A single-station multi-tasking 3D coordinate measurement method for large-scale metrology based on rotary-laser scanning[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(10): 105004.
- [14] KYLE S, LOSER R. Alignment and field check procedures for the Leica Laser Tracker LTD 500 [C]. *Boeing Large Scale Optical Metrology Seminar*, Seattle, WA, USA, 1998.
- [15] MURALIKRISHNAN B, SAWYER D, BLACKBURN C, *et al.* ASME B89. 4. 19 performance evaluation tests and geometric misalignments in laser trackers[J]. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 2009, 114(1): 21.
- [16] HUGHES B, FORBES A, LEWIS A, *et al.* Laser tracker error determination using a network measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(4): 045103.
- [17] 张和君, 马俊杰, 张军. 激光跟踪仪多参数误差模型与标定[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(9): 20-30.
- ZHANG H J, MA J J, ZHANG J. Multi parameter error model and calibration of laser tracker[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(9): 20-30. (in Chinese)
- [18] CHEN X P, LIU Y Y, XU Y, *et al.* Kinematic calibration of a laser tracker based on nonlinear optimization of a refined geometric error model [J]. *Measurement*, 2022, 191: 110672.
- [19] 李杏华. 激光跟踪系统的设计[D]. 天津: 天津大学, 2003.
LI X H. *Design of a Laser Tracking System*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003. (in Chinese)
- [20] Motaghehi S. *Self Calibration of Laser Tracking Measurement System With Planer Constraint*[D]. Florida: College of Engineering, Florida Atlantic University, 1999.
- [21] CONTE J, MAJARENA A C, AGUADO S, *et al.* Calibration strategies of laser trackers based on network measurements[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 83(5): 1161-1170.
- [22] 张亚娟. 单站式激光跟踪坐标测量系统研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
ZHANG Y J. *Stand Alone Laser Tracking System* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [23] 王瑞妍. 激光跟踪仪误差理论与校准技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2022.
WANG R Y. *Research on Error Theory and Calibration Technology of Laser Tracker*[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2022. (in Chinese)
- [24] 杨翔, 韩野, 杨凌辉, 等. 基于长度角度并行传感的多目标位姿测量[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(5): 728-740.
- YANG SH, HAN Y, YANG L H, *et al.* Multi-target pose measurement method based on distance and angle parallel measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(5): 728-740. (in Chinese)
- [25] 王娜. 新疆奇台 110 米射电望远镜[J]. *中国科*

学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44(8): 783-794.
WANG N. Xinjiang Qitai 110 m radio telescope

[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2014, 44(8): 783-794. (in Chinese)

作者简介:



曲灏辰(2000—),男,天津人,硕士研究生,2022年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事大尺寸测量方面的研究。E-mail:quhaochen@tju.edu.cn

通讯作者:



吴腾飞(1985—),男,博士,副教授,2013年于天津大学获得博士学位,主要从事激光及光电测试技术方面的研究。E-mail:wtf@tju.edu.cn