

文章编号 1004-924X(2015)05-1205-08

激光跟踪仪转镜倾斜误差的标定及修正

张滋黎*, 朱 涵, 周维虎

(中国科学院 光电研究院, 北京 100094)

摘要: 为了提高激光跟踪仪的测量精度, 分析了跟踪仪的几何结构误差, 重点研究了其转镜倾斜误差的标定和修正方法。利用矢量分析和坐标转换相结合的方法建立了跟踪仪转镜倾斜误差模型, 推导出了跟踪仪几何空间坐标修正公式, 并基于自准直仪、多面棱体和可调反射镜建立了高精度误差标定装置。利用标定装置分析了误差标定方法, 通过系统仿真研究了转镜倾斜误差对系统测角误差及最终坐标测量误差的影响。利用误差标定实验检测出的系统转镜倾斜误差约为 $4''$, 将其带入坐标修正公式, 并与修正前的坐标进行了对比分析。对比结果显示, 经误差修正后系统空间坐标测量误差可减小约 2×10^{-6} , 验证了转镜倾斜误差标定和误差修正方法的有效性, 表明利用该方法可在不改变系统硬件结构的基础上提高测量系统的测量精度。

关键词: 激光跟踪仪; 几何结构误差; 转镜倾斜误差; 误差修正; 最小二乘法

中图分类号: V556.7; TB922 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1205

Error calibration and correction of mirror tilt in laser trackers

ZHANG Zi-li*, ZHU Han, ZHOU Wei-hu

(Academy of Optical-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangzili@aoe.ac.cn

Abstract: To improve the measuring accuracy of laser trackers, the geometric errors of a tracker were analyzed, and the error calibration and error correction methods for a tilted mirror in the tracker were explored. An error model for the titled mirror was established based on vector analysis and coordinate transformation, and the error correction formulation for geometric space coordinate of the tracker was deduced. Then, a high precision error calibration device was built based on a multi-mirror polygon, an adjustable reflected mirror and autocollimators. The calibration device was used to analyze the error calibration method, and the system simulations were used to research the influence of mirror tilt error on angle and coordinate measurement errors. The error calibration test shows that the mirror tilt error is $4''$. The tested error was induced to the coordinate correction formulation, and the spatial length measurement errors of the system before and after correction were tested. The results indicate that the measuring error of the laser tracker decreases by about 2×10^{-6} , which shows that the error calculation and error correction methods are effective. The method improves the measuring accuracy without changing the hardware structure of the system.

Key words: laser tracker; geometric error; mirror tilt error; error correction; least square method

收稿日期: 2015-01-26; 修订日期: 2015-02-26.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 11404334); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2011YQ120022)

1 引言

激光跟踪仪是近几十年来发展起来的高精度大尺寸柔性坐标测量系统。该设备集激光测距技术、光栅测角技术、精密机械技术、自动控制技术和现代数值计算理论于一体,能够对目标进行实时跟踪和精确定位,具有测量精度高、测量范围大、可动态测量、便携等诸多优点,在航空航天、造船、轨道交通等工业测量与制造领域具有广泛的应用^[1-2]。

自激光跟踪仪问世以来,激光跟踪仪的误差机理和精度分析一直是国内外学者研究的焦点和热点。目前,这项研究大多关注仪器整机的性能评价和精度分析^[3-4],而针对跟踪仪单项几何角度误差对整机精度影响的研究相对较少。1999年, Loser 和 Kyle 等人深入分析了激光跟踪仪的误差源及几何误差模型,并利用长度测量和正倒镜测量法对各项误差进行了间接计算,但没有提出针对各单项几何误差的精确标定方法^[5]。2009年,美国国家计量院(NIST)的 Muralikrishnan 等人详细分析了跟踪仪的光机结构误差^[6],但采用的几何模型较简单且仅限于激光器随跟踪头运动的跟踪仪,其误差标定方法同样采用间接评定法,难以精确区分各项误差对整机精度的影响。2013年,西班牙萨拉戈萨大学的 Conte 等人针对激光跟踪仪的各项几何误差进行了机器人运动学分析^[7],但也仅限于无跟踪反射转镜的激光跟踪仪,且只停留在理论分析阶段,并未就模型进行仿真和具体实验。在国内,北京航空航天大学王亚伟博士对跟踪仪几何误差对测量精度的影响进行了建模和仿真^[8],但采用的模型均为简化的几何模型,缺乏对单项几何误差参数标定方法的研究。天津大学的林嘉睿博士巧妙地利用跟踪仪高精度的测距性能系统评价了其测角误差^[9],但并未分析跟踪仪自身的几何结构误差。本文分析了国内首台自主研发的激光跟踪仪的几何结构误差,重点研究了其反射转镜的倾斜误差。首次提出了基于矢量分析和坐标系转换的转镜倾斜误差模型,同时建立了一套完整的误差参数标定和修正方法,并通过实验验证了该方法的有效性。

2 激光跟踪仪的几何结构误差

激光跟踪仪由测距系统和测角系统两部分组成^[10]。其中,测距系统包括激光干涉测距系统和绝对测距系统;测角系统由二维精密转台和圆光栅编码器组成^[11]。如图 1 所示,激光器发出的激光束从跟踪仪底部出射,经跟踪仪转镜反射后指向靶球,光线经由靶球反射后返回到跟踪仪内部,反射光线经分光镜后到达位敏探测器(PSD)探测单元,通过 PSD 脱靶量计算出跟踪转镜的偏转角度,控制跟踪仪反射转镜转动使光束最终指向靶球中心,此时根据测距处理系统输出的测距值和圆光栅编码器输出的测角值即可计算得到靶球中心的空间位置坐标。

激光跟踪仪的轴系结构包括水平轴、垂直轴和激光光轴。理想状态下三轴的几何位置关系为:(1)水平轴与垂直轴正交;(2)激光光轴与垂直轴重合;(3)跟踪仪反射转镜(以下简称转镜)与水平轴共面。

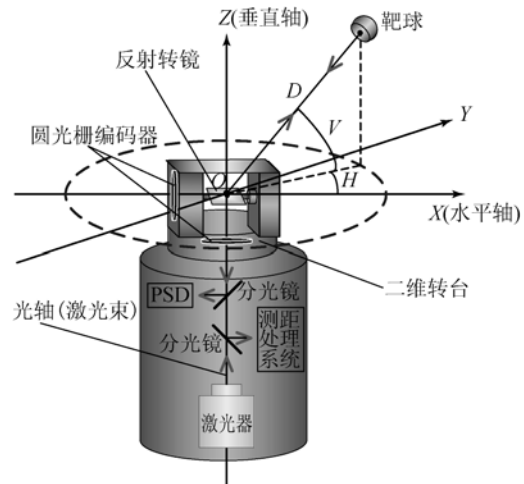


图 1 激光跟踪仪结构示意图

Fig. 1 Architecture of laser tracker

实际上,由于机械加工、安装调整等影响,轴系间不可能完全满足理想的设计要求,即存在系统几何结构误差。激光跟踪仪的几何结构误差包括转镜倾斜误差、转镜与横轴不共面误差、激光倾斜误差、激光平移误差、横轴倾斜误差、横竖轴不相交误差、垂直度盘指标差等。其中,转镜倾斜误差是引起跟踪仪测量误差的重要因素之一,因此

该误差的标定及修正对跟踪仪测量精度有着重要的影响。

3 跟踪仪转镜倾斜误差模型

激光跟踪仪转镜倾斜误差是指跟踪镜与水平轴不重合,即存在倾角 c ,如图 2 所示。

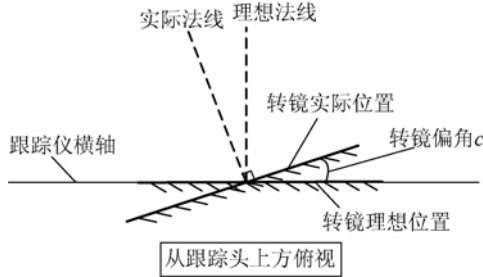


图 2 激光跟踪仪转镜倾斜误差示意图

Fig. 2 Schematic diagram of mirror tilt error

转镜倾斜引起出射激光偏转,从而影响最终的坐标测量精度。这里利用向量参数和旋转矩阵描述出射激光的空间状态,建立激光跟踪仪转镜的倾斜误差模型。如图 3 所示, X 轴为跟踪仪的水平轴, Z 轴为跟踪仪的垂直转轴。选取转镜位于 XOZ 平面时的位置为起始位置,跟踪仪的水平角为 H 、俯仰角为 V 时转镜的位置为最终位置。转镜从起始位置处经过一系列坐标转换后到达最终位置。

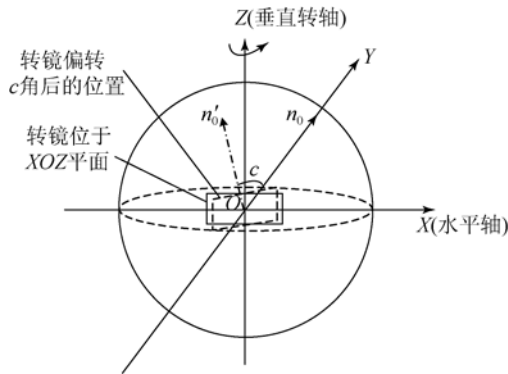


图 3 转镜倾斜误差模型

Fig. 3 Mirror tilt error model

转镜位于 XOZ 平面时法线 n_0 位于水平面上的 Y 轴,其矢量为:

$$n_0 = (0, 1, 0)^T. \quad (1)$$

由于存在转镜倾斜误差,实际起始法线 n'_0 相对于理想法线绕 Z 轴旋转了 c 角,则旋转矩阵为:

$$\mathbf{Rot}(Z, c) = \begin{bmatrix} \cos c & -\sin c & 0 \\ \sin c & \cos c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{Rot}(Z, c)$ 表示绕 Z 轴旋转 c 角的坐标转换矩阵。旋转后法线矢量为:

$$n'_0 = \mathbf{Rot}(Z, c) \cdot n_0 = (-\sin c \ \cos c \ 0)^T. \quad (3)$$

当测量目标的水平角测量值为 H ,垂直角测量值为 V 时,转镜法线 n 相当于起始法线 n'_0 先绕 X 轴旋转 $(V/2 - 45^\circ)$,再绕 Z 轴旋转 $(H - 90^\circ)$ 。设旋转矩阵分别为 $\mathbf{Rot}(X, (V/2 - 45^\circ))$ 和 $\mathbf{Rot}(Z, (H - 90^\circ))$,有:

$$\mathbf{Rot}(X, V_m) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos V_m & -\sin V_m \\ 0 & \sin V_m & \cos V_m \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{Rot}(Z, (H - 90^\circ)) = \begin{bmatrix} \cos(H - 90^\circ) & -\sin(H - 90^\circ) & 0 \\ \sin(H - 90^\circ) & \cos(H - 90^\circ) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中: $V_m = V/2 - 45^\circ$,即转镜法线矢量为:

$$n = \mathbf{Rot}(Z, H - 90^\circ) \cdot \mathbf{Rot}(X, V_m) \cdot n'_0 = \begin{bmatrix} -\sin H \cdot \sin c + \cos H \cdot \cos c \cdot \cos V_m \\ \cos H \cdot \sin c + \sin H \cdot \cos c \cdot \cos V_m \\ \cos c \cdot \sin V_m \end{bmatrix}. \quad (6)$$

设实际法线矢量 $n = (n_x, n_y, n_z)$,则有:

$$\begin{cases} n_x = -\sin H \sin c + \cos H \cos c \cos V_m \\ n_y = \cos H \sin c + \sin H \cos c \cos V_m \\ n_z = \cos c \sin V_m \end{cases}. \quad (7)$$

式(7)即为存在激光跟踪仪转镜倾斜角 c 时转镜法线矢量的表达式。跟踪仪转镜的倾斜误差直接影响跟踪镜的法线矢量,从而进一步影响跟踪仪的测量精度。

4 跟踪仪转镜倾斜误差修正

当跟踪仪转镜存在倾斜误差时,其法线矢量 n 的各分量如式(7)所示。跟踪镜的入射光线矢量可表示为 $b_i = (0, 0, 1)$,根据光线反射定律的矩阵表示方法,算得出射光线的矢量为:

$$b_o = N \cdot b_i, \quad (8)$$

$$N = \begin{bmatrix} 1-2n_x^2 & -2n_x n_y & -2n_x n_z \\ -2n_x n_y & 1-2n_y^2 & -2n_y n_z \\ -2n_x n_z & -2n_y n_z & 1-2n_z^2 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由入射光矢量 $\mathbf{b}_i = (0, 0, 1)$ 及式(7), 求解得:

$$\mathbf{b}_o = \begin{bmatrix} -2\cos c \sin V_m (-\sin H \sin c + \cos H \cos c \cos V_m) \\ -2\cos c \sin V_m (\cos H \sin c + \sin H \cos c \cos V_m) \\ 1 - 2\cos^2 c \sin^2 V_m \end{bmatrix}. \quad (10)$$

令出射光线 $\mathbf{b}_o = (b_x, b_y, b_z)$, 则测量目标的实际水平角度 H' 和俯仰角度 V' 分别为:

$$H' = \begin{cases} \arccos(b_x / \sqrt{b_x^2 + b_y^2}), & b_y \geq 0 \\ 2\pi - \arccos(b_x / \sqrt{b_x^2 + b_y^2}), & b_y \leq 0. \end{cases} \quad (11)$$

$$V' = \arctan(b_z / \sqrt{b_x^2 + b_y^2})$$

基于上述公式可由系统标称水平垂直角度 (H, V) 计算出跟踪仪实际的水平垂直角度值 (H', V') , 即跟踪仪的水平垂直角度修正值。系统水平角度测量误差 ΔH 和垂直角度测量误差 ΔV 为:

$$\begin{cases} \Delta H = H - H' \\ \Delta V = V - V' \end{cases}. \quad (12)$$

令跟踪仪测长值为 L , 则系统坐标测量标称值为:

$$\begin{cases} X = L \cos V \cos H \\ Y = L \cos V \sin H \\ Z = L \sin V \end{cases}. \quad (13)$$

同理, 根据跟踪仪水平垂直角修正值 (H', V') 可以得到系统修正的坐标测量值。

5 转镜倾斜误差参数标定

为了达到误差校准和修正的目的, 需要检测出误差参数, 并代入误差模型进行修正。本文针对自主研发的激光跟踪仪设计了转镜倾斜误差标定装置。在检测转镜倾斜误差之前, 跟踪仪的横竖轴已调节垂直。

5.1 转镜倾斜误差参数标定装置

激光跟踪仪转镜倾斜误差的校准装置主要由带端面反射镜的可调夹具, 多面棱体和两台光电自准直仪组成, 如图 4 所示。

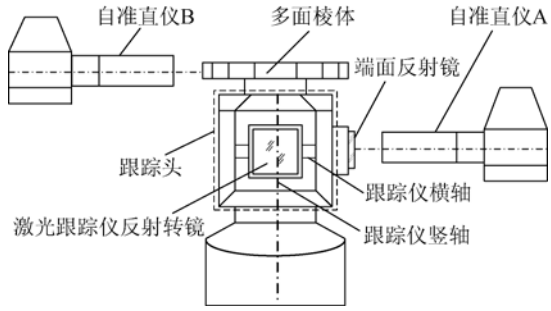


图 4 转镜倾斜误差标定装置示意图

Fig. 4 Configuration of mirror tilt error calibration device

带端面反射镜的可调夹具固定于跟踪仪横轴的一端, 利用可调夹具对端面反射镜的位置进行微调, 使其基本垂直于跟踪仪横轴^[12]。自准直仪 A 置于端面反射镜一侧, 用来实时检测端面反射镜的位置。当跟踪仪绕其垂直轴旋转 90° 后, 自准直仪 A 可检测位于横轴上的反射转镜的方位。通过端面反射镜和跟踪仪反射转镜相对自准直仪 A 的方位差, 即可计算出跟踪仪横轴和其反射转镜的角度。多面棱体置于激光跟踪头上并与跟踪仪竖轴同轴, 自准直仪 B 可实时监测多面棱体的位置。

5.2 转镜倾斜误差的参数标定过程

转镜倾斜误差的参数标定过程具体如下:

(1) 搭建实验装置, 调节多面棱体和自准直仪。为减小实验误差, 多面棱体的安装偏心小于 $20 \mu\text{m}$, 偏摆小于 $30''$ 。

(2) 根据自准直仪 A 的示数, 调节可调夹具使端面反射镜垂直于横轴。保持跟踪头水平方位不变, 控制横轴转动一周, 在俯仰角为 V_1, V_2, \dots, V_N ($0 \sim 360^\circ$ 每隔 15° 记录自准直仪读数) 时, 记录各个位置自准直仪 A 的二维读数, 分别记为 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}; y_{i1}, y_{i2}, \dots, y_{in}$ ($i \in [1, n]$)。调节端面反射镜直到 $x_{\max} - x_{\min} < 3''$ 且 $y_{\max} - y_{\min} < 3''$ 。记录此时自准直仪 A 的二维读数, 记作 X, Y 。在上述过程中, 自准直仪 B 实时监测多面棱体位置, 确保跟踪仪垂直轴无转动。

理想条件下, 自准直仪的视准轴应与跟踪仪横轴共线, 且端面反射镜垂直于横轴, 如图 5(a) 所示。由于实验装置的安装偏差、调节精度等原因, 无法调节装置至理想状态, 实际测量条件如图 5(b) 所示。故针对自准直仪 A 的二维读数 X, Y 分别进行数据拟合, 由拟合结果得到自准直仪视准轴与跟踪仪横轴间的角度。

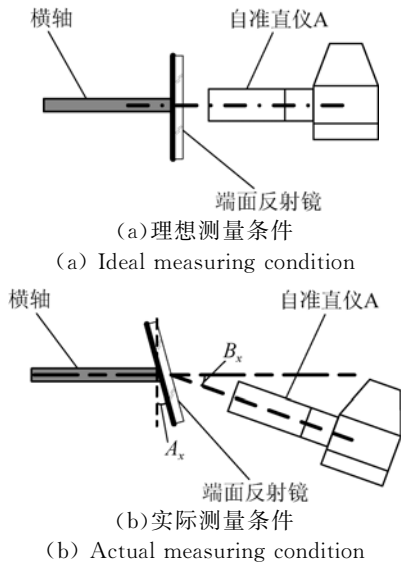


图5 跟踪仪横轴和自准直仪的位置关系

Fig. 5 Position between transit axis and autocollimator A

以自准直仪 A 的水平读数 $x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}$ 为例,在图 5(b)的测量条件下,数据拟合曲线为:

$$x(V) = A_x \sin(V + \varphi_x) + B_x, \quad (14)$$

其中: A_x 为端面反射镜的实际位置与理想位置的水平夹角; B_x 为自准直仪 A 的视准轴与横轴在水平方位的夹角,即端面反射镜垂直于横轴时自准直仪 A 的水平读数。

上式可展开为:

$$x(V) = A_x \cos \varphi_x \sin V + A_x \sin \varphi_x \cos V + B_x = B_x + a_x \sin V + b_x \cos V. \quad (15)$$

参数 a_x 和 b_x 分别为:

$$\begin{cases} a_x = A_x \cdot \cos \varphi_x \\ b_x = A_x \cdot \sin \varphi_x \end{cases} \quad (16)$$

利用多次测量数据可以得到矩阵:

$$\begin{bmatrix} x(0^\circ) \\ x(15^\circ) \\ x(30^\circ) \\ \vdots \\ x(345^\circ) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(0^\circ) & \cos(0^\circ) \\ 1 & \sin(15^\circ) & \cos(15^\circ) \\ 1 & \sin(30^\circ) & \cos(30^\circ) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \sin(345^\circ) & \cos(345^\circ) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_x \\ a_x \\ b_x \end{bmatrix}. \quad (17)$$

上式可简化为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{P}, \quad (18)$$

其中:

$$\mathbf{P} = [B_x \quad a_x \quad b_x]^T, \quad (19)$$

则可以得到:

$$\mathbf{P} = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-1} \cdot \mathbf{M}^T \mathbf{X}. \quad (20)$$

由向量 \mathbf{P} 可得到 B_x 。

(3)控制跟踪头水平转动 90° ,即调节跟踪头的位置,使多面棱体转动 90° 前后自准直仪 B 的读数不变。调节跟踪仪反射转镜的俯仰位置,使自准直仪的 Y 分量为 B_y ,即调整跟踪仪反射镜此时的俯仰位置与步骤 2 中端面反射镜的俯仰状态基本一致。记录此时自准直仪 A 的二维读数,分别记作 C_{xi}, C_{yi} 。为减小随机误差,取多次读数的平均值,记作 C_x, C_y 。

(4)根据上述实验数据,计算得到激光跟踪仪跟踪镜的倾斜误差为:

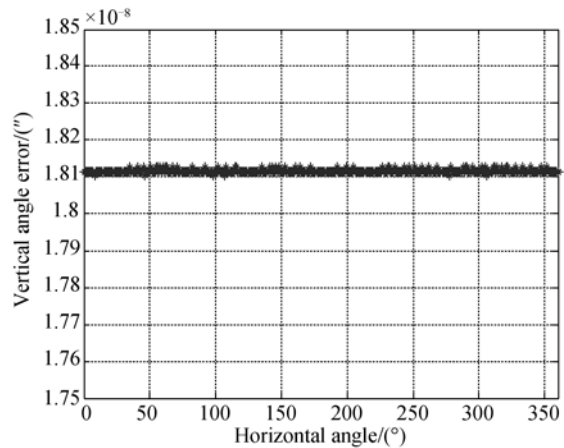
$$c = |C_x - B_x|. \quad (21)$$

6 仿真与实验

6.1 转镜倾斜误差对系统测量误差的影响

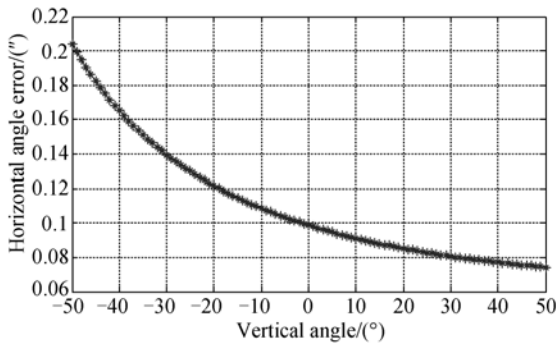
利用第 4 节所述的转镜倾斜误差修正公式,在转镜倾斜误差为 $4''$ 时,针对转镜倾斜误差对系统测角及坐标测量值的影响进行仿真。

图 6 是设定测距值为 5 m 时,转镜倾斜误差对各单项测角值及最终坐标测量值影响的测量曲线。图 6(a)为垂直角为 15° 时,随着水平角的变化倾斜误差对垂直角测量误差的影响。图 6(b)为水平角为 30° 时,随着垂直角的变化倾斜误差对水平角测量误差的影响。图 6(c)为水平角为 30° 时,坐标测量误差随俯仰角的变化曲线。图 6(d)为水平垂直角均不变,坐标测量误差随系统测距值的变化曲线。



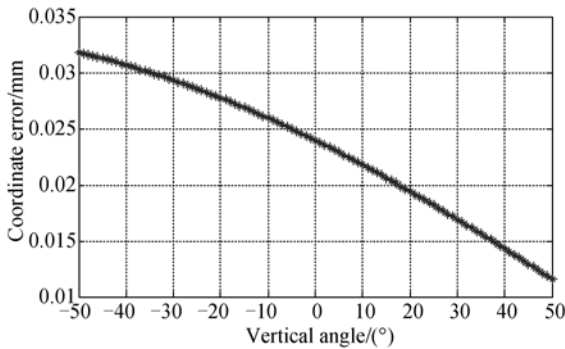
(a) 倾斜误差对垂直角测量误差的影响

(a) Influence of tilt errors on vertical angle measuring errors



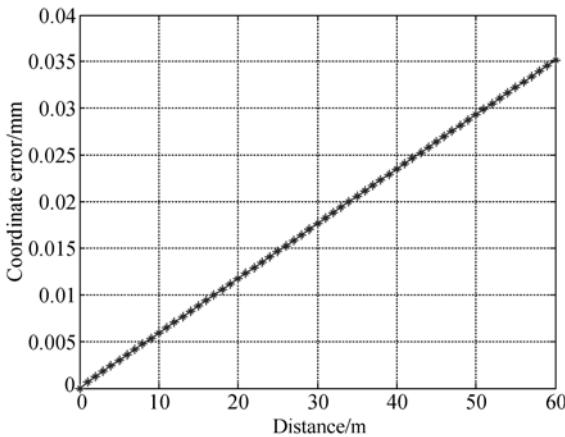
(b) 倾斜误差对水平角测量误差的影响

(b) Influence of tilt errors on horizontal angle measuring errors



(c) 倾斜误差对坐标测量误差的影响

(c) Influence of tilt errors on coordinate measuring errors



(d) 测量距离对转镜倾斜引起的坐标测量误差的影响

(d) Influence of measuring distance on measuring errors caused by mirror tilt

图 6 转镜倾斜误差对系统误差的影响

Fig. 6 Simulation of influence of mirror tilt errors on system measuring errors

由图 6 的仿真结果可知,转镜倾斜误差对垂直角测量值的影响非常小,在 $10^{-8}''$ 量级,可以忽略;但倾斜误差对水平角测量值的影响显著,且水平角测量误差随着垂直角的增大逐渐减小;倾斜误差对系统坐标测量值的影响显著,在测距值为

5 m,水平角为 15° 时,坐标测量误差可达 $12\sim 32\ \mu\text{m}$ 。在测距值和水平角不变的情况下,坐标测量误差随垂直角的增大而减小;在水平角和垂直角不变的情况下,系统坐标测量误差随测距值的增大而增大。

6.2 转镜倾斜误差参数标定实验

实验搭建的转镜倾斜误差标定装置如图 7 所示。

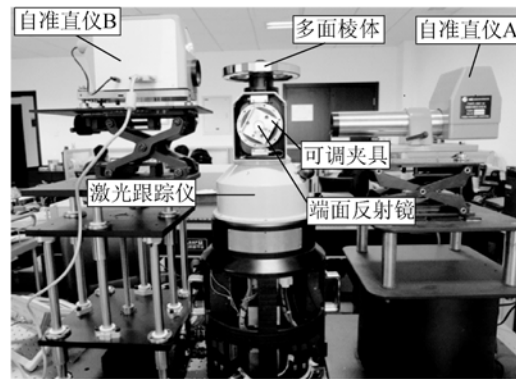


图 7 转镜倾斜误差标定装置

Fig. 7 Calibration setup for mirror tilt error

自准直仪 A 对准端面反射镜,水平轴每隔 15° 从 0° 旋转至 345° ,记录的自准直仪 A 读数如表 1 所示。

表 1 端面反射镜的位置测量值

Tab. 1 Readouts of additional reflected mirror positions by autocollimator A

| 序号 | 垂直角 /($^\circ$) | 自准直仪读数 /($''$) | 序号 | 垂直角 /($^\circ$) | 自准直仪读数 /($''$) |
|----|-------------------|------------------|----|-------------------|------------------|
| 1 | 0 | -3.80 | 13 | 0 | -2.14 |
| 2 | 15 | -3.90 | 14 | 195 | -1.29 |
| 3 | 30 | -2.07 | 15 | 210 | -3.33 |
| 4 | 45 | -0.38 | 16 | 225 | -2.75 |
| 5 | 60 | -1.94 | 17 | 240 | -1.28 |
| 6 | 75 | -0.38 | 18 | 255 | -2.32 |
| 7 | 90 | -0.91 | 19 | 270 | -1.32 |
| 8 | 105 | 0.11 | 20 | 285 | -1.97 |
| 9 | 120 | -1.18 | 21 | 300 | -0.42 |
| 10 | 135 | -1.83 | 22 | 315 | -2.64 |
| 11 | 150 | -1.46 | 23 | 330 | -3.54 |
| 12 | 165 | -0.85 | 24 | 345 | -4.02 |

由式(20)可以得到 $B_x = -2.02''$ 。跟踪仪旋转 90° 之后对检测值求平均得到 $C_x = 1.99''$ 。故求得转镜倾斜误差为 $4.01''$ 。

根据式(20), 令 $N = (M^T M)^{-1} \cdot M^T$, 则有:

$$NN^T = \begin{bmatrix} 0.0437 & -0.0010 & 0.0038 \\ -0.0010 & 0.0839 & -0.0020 \\ 0.0038 & -0.0020 & 0.0907 \end{bmatrix}$$

式(15)中忽略了轴系的倾角回转误差, 一般情况下精密轴系回转误差小于 $1''$, 表现为二次或上谐波误差, 此处将该误差视为自准直仪测量数据引入的不确定度, 则 B_x 的辨识不确定度为 $\sqrt{0.0437} \times 1'' = 0.2''$ 。 C_x 取 3 次测量读数的平均值, 则 C_x 的测量不确定度为 $1''/\sqrt{3} = 0.57''$ 。再根据误差合成原理和式(21)可得转镜倾斜误差的测量不确定度为 $\sqrt{0.2^2 + 0.57^2} = 0.6''$ 。

6.3 转镜倾斜误差修正实验

目前, 自主研制的激光跟踪仪干涉测距系统的测长精度为 7×10^{-6} , 码盘测角精度为 $1''$ 。利用 Renishaw 激光干涉仪构建空间长度基准, 将跟踪仪靶球和干涉仪测量反射镜安装于同一电控平移台上; 移动电控平移台至不同位置, 将激光跟踪仪得到的空间长度测量值与激光干涉仪的进行对比, 得到空间测长误差, 实验装置如图 8 所示。

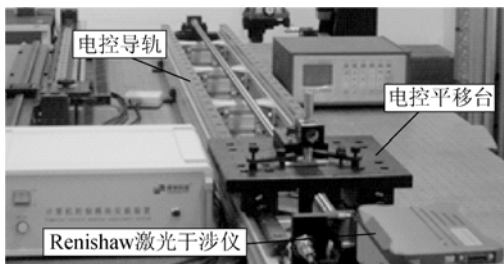


图 8 空间测长对比装置

Fig. 8 Setup of length measurement reference

实验采用 Renishaw XL80 激光干涉仪, 其线性测量精度为 $\pm 0.5 \times 10^{-6}$ 。电控导轨长约 2 m, 控制平移台步进 300 mm, 总行程为 1 800 mm。分别记录转镜倾斜误差修正前后系统的测量值, 如表 2 所示。

表 2 转镜倾斜误差修正前后的系统测量值

Tab. 2 Measurement results before and after compensation

| Renishaw 测长基准/mm | 跟踪仪测长值/mm | 补偿前/(°) | | 补偿后/(°) | |
|------------------|-------------|-----------|----------|-----------|----------|
| | | 水平角 | 垂直角 | 水平角 | 垂直角 |
| 0 | 2 783.199 0 | 93.265 9 | -8.511 8 | 93.278 9 | -8.512 0 |
| 299.966 3 | 2 959.165 2 | 98.142 0 | -8.005 8 | 98.155 0 | -8.006 2 |
| 600.013 4 | 3 153.853 5 | 102.436 0 | -7.510 5 | 102.448 9 | -7.510 9 |
| 900.051 2 | 3 364.000 3 | 106.204 9 | -7.041 1 | 106.217 7 | -7.041 6 |
| 1 200.073 7 | 3 586.892 2 | 109.512 3 | -6.604 1 | 109.525 0 | -6.604 6 |
| 1 500.080 9 | 3 820.344 3 | 112.419 1 | -6.200 1 | 112.431 9 | -6.200 7 |
| 1 800.083 3 | 4 062.618 9 | 114.979 6 | -5.830 1 | 114.992 3 | -5.830 7 |

由表 2 计算得到转镜倾斜误差修正前后系统的空间测长误差比对曲线, 如图 9 所示。

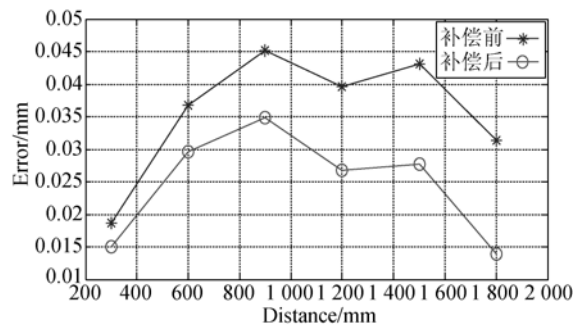


图 9 误差补偿前后测长误差对比

Fig. 9 Length measurement errors before and after compensation

由图 9 可知, 经转镜倾斜误差修正后激光跟踪仪的测长误差明显比修正前小。在各测量距离处求解相应空间测长误差并求平均值可得: 误差修正前系统的空间测长误差为 10^{-5} , 即空间单点坐标测量误差为 $10/\sqrt{2} = 7 \times 10^{-6}$; 误差修正后的空间测长误差为 7×10^{-6} , 即空间单点坐标的测量误差为 $7/\sqrt{2} = 5 \times 10^{-6}$ 。由此可知, 经误差修正后空间坐标的测量误差由 7×10^{-6} 减小到 5×10^{-6} 。

7 结 论

本文针对自主研制的激光跟踪仪的转镜倾斜误差, 提出了基于矢量分析和坐标转换的误差模型, 设计了转镜倾斜误差参数的标定方法, 并通过

搭建的误差标定装置对误差参数进行了精确标定。实验表明,经误差修正后跟踪仪测量系统的空间坐标测量误差由 7×10^{-6} 减小到 5×10^{-6} ,证

明了本文所述转镜倾斜误差标定和修正方法的有效性。该方法在不改变系统硬件结构的基础上提高了测量系统的测量精度。

参考文献:

- [1] ESTLER W T, EDMUNDSON K L, PEGGS G N, et al. Large-scale metrology: an update[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2002, 51(2): 587-609.
- [2] 叶声华, 郝继贵, 张滋黎, 等. 大空间坐标尺寸测量研究的现状与发展[J]. *计量学报*, 2008, 29(4A): 1-6.
YE SH H, ZHU J G, ZHANG Z L, et al. Status and development of large-scale coordinate measurement research [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2008, 29(4A): 1-6. (in Chinese)
- [3] 张福民, 曲兴华, 叶声华. 面向对象的大尺寸测量不确定度分析 [J]. *光学 精密工程*, 2008, 16(11): 2239-2243.
ZHANG F M, QU X H, YE SH H. Uncertainty estimation of large-scale measurement for special fitting task [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2239-2243. (in Chinese)
- [4] 周维虎, 丁蕾, 王亚伟, 等. 光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(4): 851-857.
ZHOU W H, DING L, WANG Y W, et al. Application of bundle adjustment to accuracy evaluation of laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 851-857. (in Chinese)
- [5] LOSER R, KYLE S. Alignment and field check procedures for the Leica laser tracker LTD 500 [R]. *Boeing Large Scale Optical Metrology Seminar, Seattle*, 1999: 1-4.
- [6] 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): 21-35.
- [7] CONTE J, SANTOLARIA J, MAJARENA A C, et al. Identification and kinematic calculation of laser tracker errors[C]. *The Manufacturing Engineering Society International Conference: MESIC*, 2013: 379-387.
- [8] 王亚伟. 空间目标光电跟踪测量系统关键技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2011.
WANG Y W. Key techniques of optoelectronic tracking measurement system for space target [D]. *Beijing: Beihang University*, 2011. (in Chinese)
- [9] 林嘉睿, 郝继贵, 张皓琳, 等. 激光跟踪仪测角误差的现场评价 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(2): 463-468.
LIN J R, ZHU J G, ZHANG H L, et al. Field evaluation of laser tracker angle measurement error [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(2): 463-468. (in Chinese)
- [10] ZHANG Z L, ZHOU W H, LAO D B, et al. Research and development of the laser tracker measurement system [C]. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation, Chengdu: ISPEMI*, 2012: 87593Z1-87593Z7.
- [11] 卢荣胜, 李万红, 劳达宝, 等. 激光跟踪仪测角误差补偿 [J]. *光学 精密工程*, 2014, 22(9): 2299-2305.
LUR SH, LI W H, LAO D B, et al. Angular error compensation for laser tracker [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9): 2299-2305. (in Chinese)
- [12] 王玉田. 三轴转台轴线垂直度的测试方法 [J]. *测绘技术*, 2014, 34(1): 42-52.
WANG Y T. The method of measuring perpendicularities of three-axis turntable [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2014, 34(1): 42-52. (in Chinese)

作者简介:



张滋黎(1983—),女,山西朔州人,博士,副研究员,2005年、2010年于天津大学分别获得学士、博士学位,主要从事精密测量、机器视觉及三维可视化方面的研究。E-mail: zhangzili@aoe.ac.cn



周维虎(1962—),男,安徽无为,人,研究员,博士生导师,1983年、2000年于合肥工业大学分别获得学士、博士学位,主要从事光电检测、大尺寸测量及飞秒测距等方面的研究。E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)