

基于自准直仪的测角传感器实时在位校准方法

张文颖^{1,2}, 朱浩然^{3*}, 李美萱^{1,2}, 郭泽萱^{1,2}, 郭明^{1,2}

¹吉林工程技术师范学院量子信息技术交叉学科研究院, 吉林 长春 130052;

²吉林省量子信息技术工程实验室, 吉林 长春 130052;

³长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 提出了一种基于自准直仪的在位校准方法。基于圆周封闭原则和傅里叶级数的性质,建立了测量值与理想值之间的函数关系,利用理想刻线位置 and 实际刻线位置的偏差,获得了校准曲线,详细推导和分析了校准原理,搭建了校准测角系统,并进行了实验验证。实验结果表明,单读数头测角传感器原始测角误差为 734.8",校准后误差为 2.4",且校准效果优于常用的谐波补偿方法,校准系统的重复性优于 0.13"。在位校准方法能够有效减小测角误差,且方法简单,校准效率高。

关键词 测量; 实时校准; 角度传感器; 角度测量; 误差分析

中图分类号 P204

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0404005

Real-Time In-Situ Calibration for Angle Measuring Sensor Based on Autocollimator

Zhang Wenying^{1,2}, Zhu Haoran^{3*}, Li Meixuan^{1,2}, Guo Zexuan^{1,2}, Guo Ming^{1,2}

¹Institute for Interdisciplinary Quantum Information Technology, Jilin Engineering Normal University, Changchun, Jilin 130052, China;

²Jilin Engineering Laboratory for Quantum Information Technology, Changchun, Jilin 130052, China;

³School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract An in-situ calibration method based on the autocollimator is proposed. Based on the principle of circumferential closure and the nature of Fourier series, this paper establishes the functional relationship between the measured value and the ideal value. Using the deviation between the ideal scribing position and the actual scribing position, we obtain the calibration curves. The calibration principle is deduced and analyzed in detail. The calibration angle measurement system is built and verified by experiments. The experimental results show that the original angle measurement error of the single readhead angle measurement sensor is 734.8", and the error after calibration is 2.4", and the calibration effect is better than that of the commonly used harmonic compensation method. The repeatability of the calibration system is better than 0.13". The in-situ calibration method can effectively reduce the angle measurement error, and the method is simple and the calibration efficiency is high.

Key words measurement; real-time calibration; angle transducer; angle measurement; error analysis

OCIS codes 120.3930; 150.1488; 130.6010

1 引 言

测角传感器在机械制造、测试计量和精密仪器等领域具有广泛的应用,测角传感器的技术和性能体现了国家科技水平,测角传感器的性能是由测角

精度决定的,所以需要采用适当的方法提升测角精度。

扩大光栅盘的尺寸、增加读数头个数和误差补偿是提高测角传感器测角精度的常用办法^[1]。扩大光栅盘的尺寸会增大体积重量,即会降低旋转设备

收稿日期: 2018-11-20; 修回日期: 2018-12-10; 录用日期: 2018-12-29

基金项目: 2018 年度博士科研启动经费项目(BSKJ201827)

* E-mail: zwyzyw8866@163.com

的可靠性和便携性,提高成本,这会严重影响系统性能和产品质量^[2];而增加读数头个数会受到相邻读数头最小间距的限制;误差补偿方法是应用较广泛的提高测角精度的方法^[3]。德国联邦物理研究院提出了一种 Ernst 补偿模型,在特定装置上利用全自动模式对角度值进行检定,系统的测量不确定度为 $\pm 0.01''$ ^[4]。英国国家物理实验室(NPL)利用精度较高的机械系统与采集系统实现了系统误差补偿,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内的测量不确定度为 $0.05''$;但设备成本较高,结构复杂,较难在工程现场使用^[5]。Masuda 等^[6]提出了一种测角传感器自动校准系统,这套系统包括 6 个读数头,能够实现系统校准,但是系统的安装较复杂,6 个读数头的间距必须相等,被校准系统的误差组成中不能含有偶次项误差。北京航空航天大学对实际测量曲线与理想测量曲线进行了差分处理,并进行了傅里叶分析与最小二乘法处理,利用精密匀速转台实现了单读数头误差补偿,其原始误差为 $\pm 100''$,标定后精度达到 $\pm 10''$ ^[7]。这种校准方法简单,且可操作性强,但是其对转台工作过程中的稳定性要求较高。中国计量科学研究院提出了一种基于等分平均原理的校准方法,在圆光栅上均匀分布 8 个读数头,测角精度为 $0.03''$ 。该系统对刻划误差和安装要求较高,能在实验室作为基准装置使用,但在工程应用中不易实现^[8]。

本文基于圆周封闭原则和傅里叶级数的性质,详细推导和分析校准原理。通过实时获取光栅刻线的理想位置和实际位置的偏差,获得校准曲线。提出一种实时在位校准方法,可对一定的随机误差和随时间变化的系统误差进行校准。实验结果表明,该校准方法能有效抑制测角误差,校准效果优于谐波补偿方法,校准效率高并具有很好的重复性,可为研制更高精度测角传感器提供理论基础。

2 测角传感器工作原理

标尺光栅与指示光栅共同构成测角传感器,图 1 为测角传感器示意图。测角传感器工作时,转轴与标尺光栅一同转动,但指示光栅位置不变。经过标尺光栅和指示光栅的光相干涉产生叠栅条纹,根据叠栅条纹移动的数量完成对圆光栅的角度测量。图 2 所示为叠栅条纹,标尺光栅的栅距和指示光栅的线宽相等,假设忽略光栅衍射现象,根据透光与遮光原理可知,通过两块光栅间的相对转动形成一个光能量分布^[9]。然而在实际应用时,因为光栅的衍射作用、刻划误差、指示光栅的间隙与标尺光栅等因

素,光能量实际分布为一个近似的正弦函数。在实际应用时,利用统计叠栅条纹平移数量的总和实现对角位移量的测量。

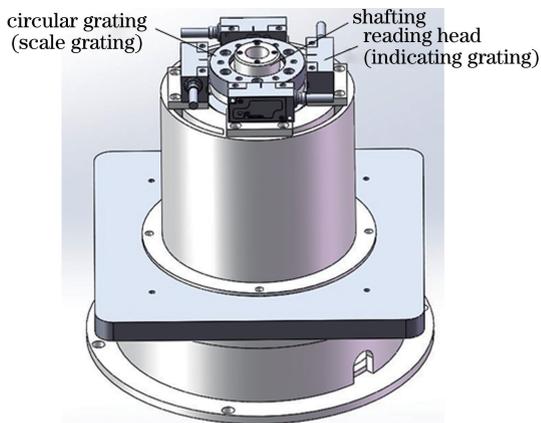


图 1 测角传感器

Fig. 1 Angle measuring sensor

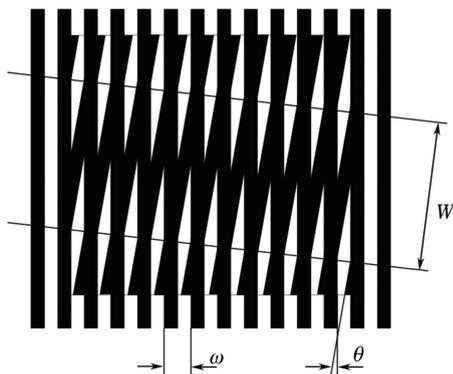


图 2 叠栅条纹图形

Fig. 2 Moire fringe pattern

由于叠栅条纹宽度 W 、栅距 ω 和栅线角 θ 间存在如下关系:

$$W = \frac{\omega}{\sin \theta} \approx \frac{\omega}{\theta}, \quad (1)$$

式中: W 的单位为 mm, ω 的单位为 μm , θ 的单位为 rad。指示光栅与标尺光栅有相对旋转时,根据叠栅条纹平移的数目 N 就可获得光栅旋转的距离 s :

$$s = N\omega \approx N \times W\theta. \quad (2)$$

如果圆光栅半径为 r ,则光栅转动角度值 β 可表示为

$$\beta = s/r \approx N \times W\theta/r. \quad (3)$$

3 测角误差分析

测角系统中不同误差的表现形式不同,且性质不同,为了提高测角系统的测量精度,需要对测角系统的误差进行有针对性的补偿。在刻划圆光栅环上的栅线时,实际栅线位置与理想栅线位置存在偏差,

即刻划误差^[10]。作为引起读数头误差因素中最为关键的一项,光电信号误差的本质为在插值操作中信号的非正交、不等幅和直流电平漂移所产生的非线性误差^[11]。假设两路信号的幅度是 b 和 c ,且两者不等,则最大插补误差可以表示为

$$\Delta\xi_v \approx \pm 1/2 \times [(c/b) - 1]. \quad (4)$$

测角传感器的安装误差主要是安装偏心和倾斜。装配间隙等会导致圆光栅几何中心和装配后的旋转中心不重叠,其和轴系运动是导致偏心误差的主要因素。安装误差导致的光栅环偏心和倾斜是测角系统中误差的主要来源,偏心误差是导致测角系统误差的主要因素,通常占测角系统误差的 50% 以上。圆光栅理想旋转中心是 O ,半径为 R ,偏心量为 e ,以 O 为原点,偏心方向为 X 轴,建立如图 3 所示的直角坐标系 XOY 。令 O' 点为圆光栅实际旋转中心, A' 为圆光栅理想位置上的点, A 为圆光栅实际运动轨迹上的点, B 为圆光栅实际运动轨迹上一点,设 $\angle AOB = \theta$,因为偏心造成圆光栅上的点与圆光栅理想旋转中心 O 的距离周期性变化^[12],所以可以利用圆光栅转过的弧长 L 和角度 θ 之间的关系分析偏心误差。设 A 点坐标为 (x, y) ,则有

$$(x - e)^2 + y^2 = R^2, \quad (5)$$

所以有

$$L = R\theta + e \cdot \sin \theta = [\theta \quad \sin \theta] \begin{bmatrix} R \\ e \end{bmatrix}, \quad (6)$$

偏心导致的角度误差为

$$\Delta\theta = \frac{L}{R} - \theta = \frac{e \cdot \sin \theta}{R}. \quad (7)$$

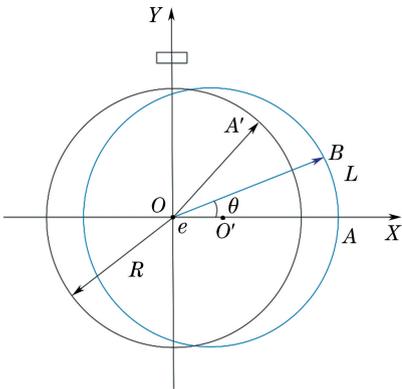


图 3 圆光栅偏心示意图

Fig. 3 Circular grating eccentricity diagram

图 4 所示为安装导致的倾斜误差,圆光栅和转轴截面间的倾斜夹角用 $\Delta\theta_p$ 表示。当转轴真实旋转的角度值是 β 时,测角传感器采集到的数据为 θ ,则由安装倾斜引入的误差 δ_p 可表示为

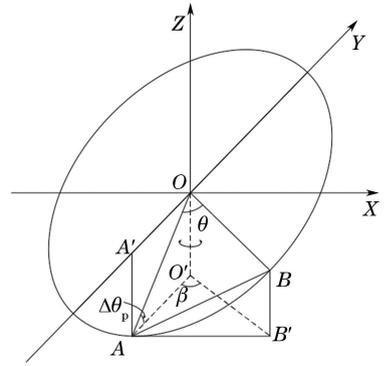


图 4 安装倾斜误差示意图

Fig. 4 Installation tilt error diagram

$$\delta_p = \theta - \beta = -\frac{1}{4} \sin^2 \Delta\theta_p \sin 2\theta. \quad (8)$$

轴系晃动主要包括轴系径向跳动与轴系倾斜。轴系径向跳动与由光栅安装偏心导致的误差类似。轴系倾斜使固定于轴系上的圆光栅发生倾斜,其对测量精度的影响与安装导致的倾斜类似^[13]。

4 校准原理

由于在一个圆周内首尾相连的间隔误差的总数是 0(也就是说 0° 和 360° 为同一个位置),可以利用自封闭特性对测角传感器进行校准^[14]。在圆光栅的周围等角度间隔分布多个读数头,读数头的序号用 $r(r=1, 2, \dots, R_G)$ 表示,其中 R_G 表示分布的读数头总个数,圆光栅的刻线序号表示为 $l(l=1, 2, \dots, L_G)$,其中 L_G 为圆光栅的总刻线数。圆光栅理想的刻线位置应是在圆周上等间隔地刻划 L_G 条线,但是,光栅环的安装误差、刻划误差和读数头的细分误差等,使得读数头实际测得的刻线位置与理想刻线位置有一定的偏差,如图 5 所示,给出了为理想刻线位置和实际刻线位置之间偏差的关系,用 b_l 表示第 l 条刻线的实际位置与理想刻线位置的偏差。

由于圆光栅的栅线数远大于多面棱体的面数,所以多面棱体的每个面的中心垂直方向上都对应一条光栅刻线。所以可以用多面棱体结合自准直仪测得的角度 β_i 表示多面棱体第 i 面对应光栅刻线的理想刻线位置。正 n 面棱体第 i 面的偏差用 m_i 表示。当多面棱体的第一个面对准水平角度为 0° 的位置时,自准直仪示数是 p_1 。沿多面棱体的工作面增加或减少的方向转动轴系,令多面棱体的第 i 个工作面对准自准直仪,自准直仪的示数记为 p_i 。将第一个工作面间的实际工作角度对应的正多面棱体第 i 个工作面记为 $\alpha_{i,1}$:

$$\alpha_{i,1} = 2\pi(i - 1)/n \pm m_i. \quad (9)$$

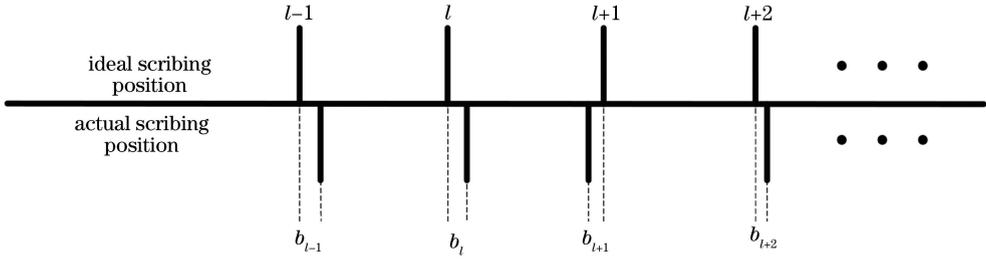


图 5 光栅栅线位置偏差示意图

Fig. 5 Schematic of grating grid line position deviation

若正多面棱体工作面 i 转动过程中面数的变化趋势和测得角度值的变化趋势相同,则(9)式中的符号取十号,变化趋势相反则取一号。令多面棱体结合自准直仪获得的值作为棱体第 i 面对应光栅刻线 j 的理想位置,可用 β_j 表示:

$$\beta_j = \alpha_{i,j} \pm (p_i - p_j). \quad (10)$$

假如棱体的第一个面对应第一条光栅刻线,则第二个面对应第 L_G/n 条刻线。当棱体的第 i 面对应光栅时,即可获得第 $(L_G \times i)/n$ 条刻线的理想位置。则第 l 条刻线的实际位置与理想刻线位置的偏差 b_l 即为读数头的角度信号 g_l 与由自准直仪和棱体获得的理想位置值 β_l 之差:

$$b_l = g_l \pm \beta_l. \quad (11)$$

当自准直仪显示的角度变化的趋势和读数头角度信号的变化趋势相同时,(11)式中的符号取一号,变化趋势相反则取十号。

由于光栅不同刻线的刻划误差差异很小,所以当棱体第 i 面对应光栅刻线时,每条刻线的理想位置都可用 β_i 表示。当第一个读数头检测到第 l 条刻线位置时,第 r 个读数头会检测到第 $(r-1) \cdot L_G/R_G + l$ 条刻线;当第一个读数头检测到第 $l + L_G/n$ 条刻线位置时,第 r 个读数头会检测到第 $(r-1) \cdot L_G/R_G + (l + L_G/n)$ 条刻线。图 6 所示为读数头和刻线之间的位置关系图。

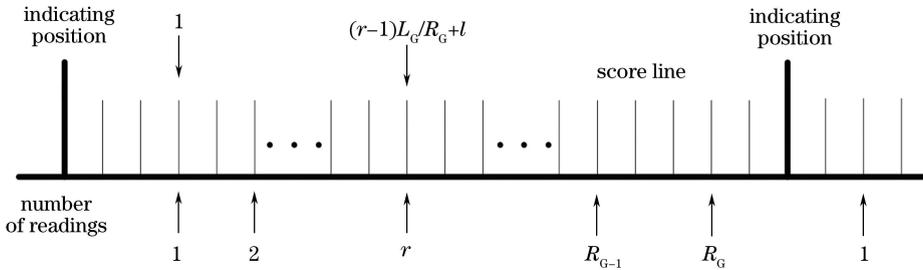


图 6 读数头和刻线之间的位置关系

Fig. 6 Positional relationship between readhead and score line

由于圆光栅的刻线较多,所以当第一个读数头检测到第 l 条刻线的位置时,其他读数头也几乎同时检测到相对应的其他刻线。图 7 为读数头输出示意图。当第一个读数头检测到第 l 条刻线位置时,第 r 个读数头检测到的刻线偏差可用 $B_{l,r}$ 表示:

$$B_{l,r} = b_{(r-1)L_G/R_G+l}. \quad (12)$$

第一个读数头和第 r 个读数头之间的刻线偏差,也就是第一条刻线和第 $(r-1)L_G/R_G + l$ 条刻线的实际位置与理想位置的偏差值 $\chi_{l,r}$ 可表示为

$$\chi_{l,r} = B_{l,1} - B_{l,r} = b_l - b_{(r-1)L_G/R_G+l}, \quad (13)$$

这些值的平均值 ϵ_l 可表示为

$$\epsilon_l = \frac{1}{R_G} \sum_{r=1}^{R_G} \chi_{l,r} =$$

$$b_l - \frac{1}{R_G} [b_l + b_{2L_G/R_G+l} + \dots + b_{(r-1)L_G/R_G+l}]. \quad (14)$$

(14)式表示任意一个周期为 2π 的曲线可由傅里叶级数表示,并且同一时刻相移为 $2\pi/d$ 的 d 条曲线的平均值代表了原始曲线的 d 阶傅里叶分量的整数倍的总和。(14)式左边平均值 ϵ_l 等于 b_l 减去每个相移为 $2\pi/R_G$ 的 R_G 条曲线的平均值。所以,通过分析由 R_G 个读数头测得的角度信号,即可获得 b_l 的校准曲线。

图 8 所示为校准装置与校准原理图。将圆光栅固定于旋转轴系上,在圆光栅上布置多个读数头;将多面棱体放置于圆光栅测角系统上,与自准直仪配合使用,多面棱体与自准直仪相结合用于获得多面

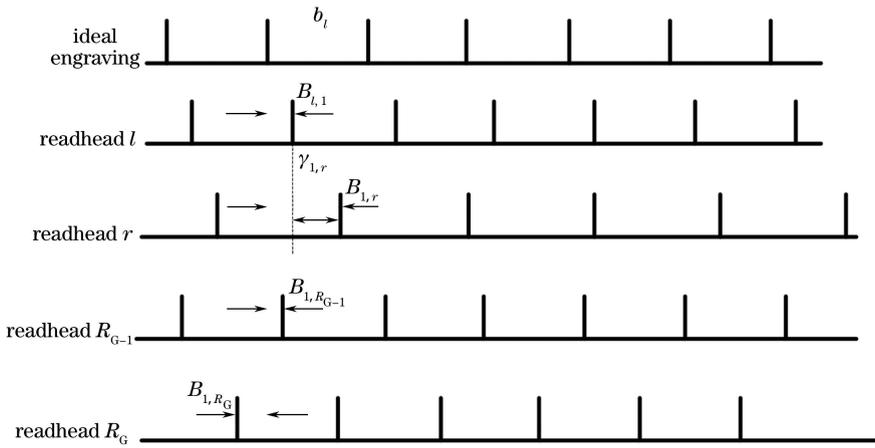


图 7 读数头输出示意图

Fig. 7 Readhead output schematic

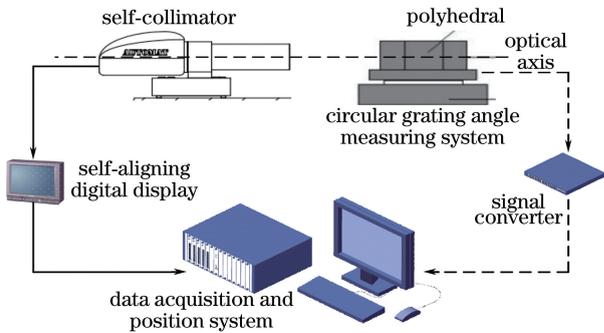


图 8 校准装置与原理示意图

Fig. 8 Calibration device and principle diagram

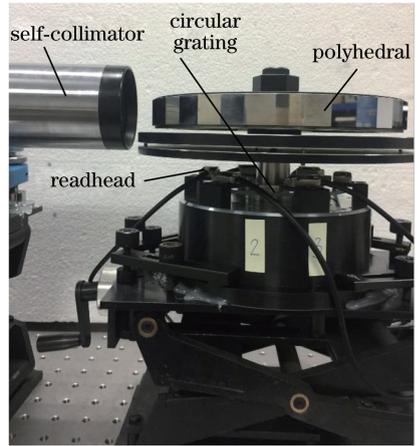


图 9 系统实物图

Fig. 9 System physical map

棱体所在面对应的理想刻线位置,此时每个读数头测得各自的实际刻线位置并输出信号,通过信号转换器传输给同步数据采集处理系统,数据采集处理系统利用各个读数头相对于理想刻线位置的偏差和的平均值,获得被校准读数头在此位置处的校准值。转动多面棱体,获得多面棱体下一面对应刻线的理想位置,同时,每个读数头也可测得相应刻线的实际位置,棱体转动 360° ,利用理想刻线位置和实际位置的刻线偏差,可获得被校准读数头的校准曲线。

5 校准实验

5.1 校准方法验证

为了验证基于自准直仪的在位校准方法的有效性,搭建如图 9 所示的测角传感器校准系统。实验选用美国 MicroE 公司的 M3000 型号的读数头和 R10851-HD 圆光栅。多面棱体选择二等 23 面棱体,工作面和基准面之间的垂直度为 $20''$ 。自准直仪选用九江精达有限责任公司 CSZ-1A 型电荷耦合器件 (CCD) 双轴自准直仪,有效分辨率为 $0.01''$,显

示误差为 $\pm 0.5''$,经过校准后精度优于 $\pm 0.1''$ 。

图 10 所示为选用 23 面棱体进行校准实验获得的误差曲线,由误差曲线可知,在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 的测量范围内,峰峰值为 $-631.1''$ 和 $103.7''$,测角误差为 $734.8''$ 。采用校准方法补偿后,峰峰值为 $-1.4''$ 和 $1.0''$,补偿后的误差为 $2.4''$,可有效减小测角误差。

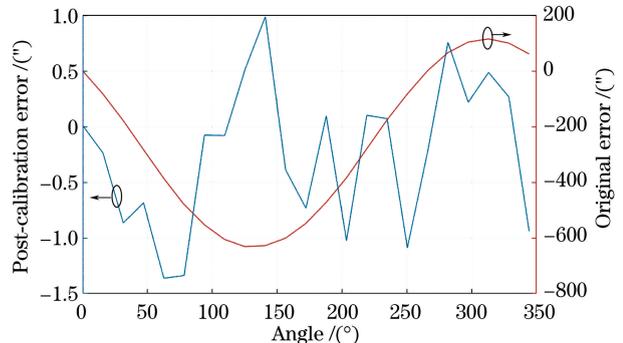


图 10 原始误差曲线和校准后误差曲线

Fig. 10 Original error curve and post-calibration error curve

5.2 对比实验

为了验证在位校准方法的效果,将其与采用传统的谐波补偿方法校准后的效果进行对比。利用相同的实验系统,由于36面棱体能整数倍等分圆周角,23面棱体不能整数倍等分圆周角,且36面棱体标定的数据量较23面棱体标定的数据量多,所以更换23面棱体为36面棱体,结合自准直仪进行多次实验,获得补偿曲线,利用补偿曲线对23面棱体获得的数据进行谐波补偿^[14],图11所示为采用谐波补偿方法补偿后的误差曲线,测角误差为3.5";采用本研究提出的校准方法对相同的测量数据进行校准,校准后的误差为2.4"。在位校准方法对误差的抑制效果优于谐波补偿方法,且无需更换多面棱体,操作简单,校准效率高。

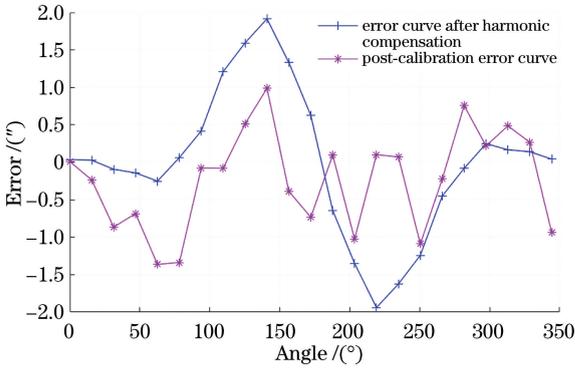


图 11 误差曲线

Fig. 11 Error curves

5.3 重复性实验

在重复性条件下,利用校准系统连续进行 n' 次独立测量,得到结果 $y_{i'}$ ($i'=1, 2, \dots, n'$) 的重复性 $s(y_{i'})$ 为

$$s(y_{i'}) = \sqrt{\frac{\sum_{i'=1}^{n'} (y_{i'} - \bar{y})^2}{n' - 1}} \quad (15)$$

式中: $y_{i'}$ 表示在当前位置第 i' 次偏差, \bar{y} 表示 n' 次测量偏差的平均值。

在相同的实验条件下,采用相同的测角传感器多次进行校准实验,验证校准系统的重复性,图12所示为多次校准后获得的误差曲线。获得所有测量位置 $\max[s(y_{i'})]=0.13''$ 。

在相同的实验条件下,扩大测量范围,在 $0^\circ \sim 1440^\circ$ 内,获得的连续误差校准后曲线如图13所示。由图13可知,在较大测量范围内,所提方法具有较好的校准效果。

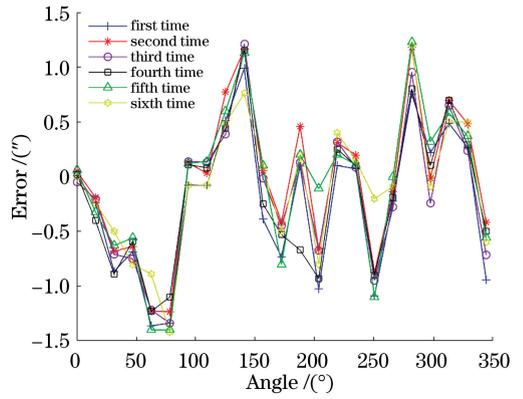


图 12 重复性误差曲线

Fig. 12 Repeatability error curves

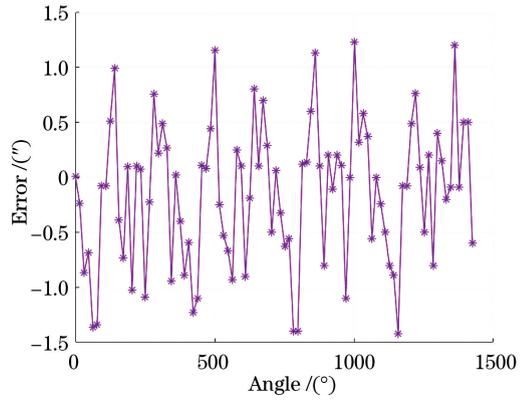


图 13 大范围连续误差曲线

Fig. 13 Wide range continuous error curve

5.4 误差分析

在进行校准时,选取 R10851-HD 圆光栅,光栅栅距为 $20 \mu\text{m}$,有效半径为 52.1 mm ,刻划误差为 $2''$,传感器电子细分误差为 $0.5''$ 。由于安装导致圆光栅中心与轴系存在 $e=35 \mu\text{m}$ 的偏心量,利用(7)式,当 $\sin \theta = \pm 1$ 时,最大偏心误差为

$$\Delta \theta = \frac{L}{R} - \theta = \frac{e \cdot \sin \theta}{R} = 138.5'' \quad (16)$$

由此可知,安装光栅时导致的偏心现象是测角误差产生的主要因素。由于角分辨率为 $0.013''$,叠栅条纹间距为 0.15 mm ,光栅在安装和轴系旋转过程中产生的倾斜量为 $7 \mu\text{m}$,所以光栅环的倾斜角为 $0.45''$,代入(8)式,可得最大安装倾斜误差为

$$\delta_p = \theta - \beta = -\frac{1}{4} \sin^2(\Delta \theta_p) \sin 2\theta = 0.056'' \quad (17)$$

6 结 论

本研究提出了一种基于自准直仪的实时在位校准方法,基于圆周封闭原则和傅里叶级数的性质,通

过实时获得理想刻线位置和实际刻线位置的偏差,利用每个读数头相对于理想刻线位置的偏差,获得校准曲线。搭建了校准实验系统,进行了校准实验和校准效果对比实验。实验结果表明,单读数头测角传感器原始测角误差为 $734.8''$,校准后误差为 $2.4''$,采用谐波补偿方法补偿后的测角误差为 $3.5''$,校准系统的重复性优于 $0.13''$ 。在位校准方法能有效抑制测角误差,在相同的环境下,补偿效果优于谐波补偿方法,且操作简单,校准效率高,对测角传感器补偿算法的研究具有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] Wu Y L, Wan H J. A calibration algorithm of angle measuring error based on coordinate transformation [J]. *Electronic Science and Technology*, 2016, 29(9): 45-47, 51.
吴一龙, 万红进. 一种基于坐标变换的测角误差校正算法[J]. *电子科技*, 2016, 29(9): 45-47, 51.
- [2] Zhang L, Xiang Y. Correction algorithm of systemic errors in grating lateral-shearing interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0804008.
张璐, 向阳. 光栅横向剪切干涉仪系统误差的校正方法[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0804008.
- [3] Geckeler R D, Just A. A shearing-based method for the simultaneous calibration of angle measuring devices[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(10): 105009.
- [4] Probst R. Self-calibration of divided circles on the basis of a prime factor algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19(1): 015101.
- [5] Palmer E W. Goniometer with continuously rotating gratings for use as an angle standard [J]. *Precision Engineer*. 1988, 10(3): 147-152
- [6] Masuda T, Kajitani M. An automatic calibration system for angular encoders [J]. *Precision Engineering*, 1989, 11(2): 95-100.
- [7] Zhang J J, Zhang Z Y, Liu J C. Novel method of calibrating the angle-measurement error of resolver [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(1): 149-153.
张京娟, 张仲毅, 刘俊成. 一种新型的旋转变压器测角误差标定技术[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(1): 149-153.
- [8] Huang Y, Xue Z, He Y W. Comparison between angle interferometer and angle encoder during calibration of autocollimator [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9446: 944624.
- [9] Zhai Z S, Cheng Z, Zhang Y H, *et al.* Optical analysis of Moiré fringes of concentric-circle gratings [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(7): 070501.
翟中生, 程壮, 张艳红, 等. 同心圆光栅莫尔条纹的光学分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(7): 070501.
- [10] Liu S. Installation and alignment of circular grating encoder [J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2018, 47(4): 46-48.
刘帅. 圆光栅编码器安装与对准[J]. *电子工业专用设备*, 2018, 47(4): 46-48.
- [11] Ai C G, Chu M, Sun H X, *et al.* Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2479-2484.
艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2479-2484.
- [12] Li H X, Zhang R, Han F T. Error testing and compensation of an inductosyn-based angular measurement system [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2016, 56(6): 611-616.
李海霞, 张嵘, 韩丰田. 感应同步器测角系统误差测试及补偿[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2016, 56(6): 611-616.
- [13] Wang X J. Correction of angle measuring errors for large telescopes [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(9): 2446-2451.
王显军. 大型望远镜测角系统误差的修正[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2446-2451.
- [14] Zhao R J, Ma W L. Improving the accuracy of new-type encoders using error harmonic compensation [J]. *Instrumentation Customer*, 2009, 16(3): 69-71.
赵人杰, 马文礼. 利用误差谐波补偿法提高金属圆光栅测角精度[J]. *仪器仪表用户*, 2009, 16(3): 69-71.