

文章编号 1004-924X(2024)05-0635-08

基于二维混合式位置编码的高精度测角

赵会宁^{1,2*}, 闻 杰^{1,2}, 夏豪杰^{1,2*}

- (1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
2. 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对具有精密旋转轴系类的高端制造装备或精密测量仪器,其旋转角度采用传统圆光栅难以消除偏心误差对测量角度精度的影响,提出了一种基于二维混合式位置编码的旋转角度高精度测量方法。该测角系统由一个二维混合式位置编码盘、两个 CCD 相机和远心镜头组成,二维混合式位置编码盘被固定在精密旋转轴系上以获得其旋转角度。然后,建立了测角模型并从数学上证明了测角精度与安装偏心无关。利用多齿分度台对已提出测角系统精度进行检测,测量角度误差在 $\pm 1''$ 。最后,利用已提出测量方法对直驱转台的角度定位精度进行测量,角度定位误差在 $\pm 5''$ 内。与传统圆光栅测角相比,该方法不需要考虑安装偏心误差对测角精度的影响,具有稳定性好、使用简单等特点,可用于角度定位误差的检测。

关 键 词:二维混合式位置编码;偏心误差;旋转角度;多齿分度台

中图分类号:TH712 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243205.0635

High-precision angle measurement based on two-dimensional hybrid position encoding

ZHAO Huining^{1,2*}, WEN Jie^{1,2}, XIA Haojie^{1,2*}

- (1. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: hnzhaoh@mail.hfut.edu.cn; hjxia@hfut.edu.cn

Abstract: For high-end manufacturing equipment or precision measurement instruments featuring precision rotating shafting, traditional circular grating struggles to negate the impact of eccentricity error on angle measurement accuracy. This paper introduces a highly precise method for measuring rotation angles utilizing two-dimensional hybrid position coding. Initially, the system comprises a two-dimensional hybrid position coding disk, two CCD cameras, and a telecentric lens. This assembly is attached to a precision rotating shaft to capture its rotation angle. Subsequently, an angle measurement model is developed, mathematically verifying that measurement accuracy remains unaffected by installation eccentricity. The method's accuracy is validated using a multi-tooth indexing table, confirming that angle measurement error is confined to within $\pm 1''$. Furthermore, when applied to assess the angle positioning accuracy of a direct drive turntable,

收稿日期:2023-10-07;修订日期:2023-11-01.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2022YFF0705702);国家自然科学基金资助项目(No. 51805139, No. 51975180)

ble, the method achieves an angle positioning error within $\pm 5''$. Unlike traditional circular grating measurements, this approach eliminates the need to account for the impact of eccentricity error on accuracy, offering robustness and simplicity in application. Thus, it proves effective for detecting angle positioning errors.

Key words: two-dimensional hybrid position coding; eccentricity error; rotation angle; multi-tooth indexing table

1 引言

角度传感器作为一种旋转角度测量的核心关键器件,已广泛应用于航空航天、汽车制造、半导体、高端智能装备和精密测量仪器等领域。含有精密旋转轴系类的高端制造装备或精密测量仪器,如高端机床^[1]、多轴精密转台、机器人^[2]、激光跟踪仪^[3]和关节臂式坐标测量机^[4]等,均需要角度传感器获取精密旋转轴系的旋转角度。但在实际安装过程中,难以保证角度传感器和精密旋转轴系的中心轴线完全重合,存在安装偏心,直接影响精密旋转轴系的测角精度,进一步影响高端制造装备或精密测量仪器的精度。因此,为了减少角度传感器安装偏心误差对测角精度的影响,研究焦点主要集中在以下三个方面:(1)采用光电自准直仪结合多面棱体或更高精度的角度传感器提供角度标准量,以修正精密旋转轴系上角度传感器的安装偏心误差^[5-9],但当精密旋转轴系使用的外部条件发生改变时,精密旋转轴系的测角精度也会发生变化^[10-11]。(2)通过角度传感器安装偏心自校准方法开展角度传感器安装偏心误差修正,主要方法有 PFD (Prime Factor Division Method)^[12], SelfA Method^[13], VEDA (Virtual Equal Division Averaged Method)^[14], EDA (Equal Division Averaged Method)^[15], TDR (Time-measurement Dynamic Reversal Method)^[16], 传递函数法^[17-18]和其他圆光栅安装偏心误差自校准方法^[19-21]。(3)从角度测量原理出发,研制具有安装偏心误差实时测量功能的角度传感器,艾华等利用衍射光干涉原理提取高密度圆光栅位移信息并获其安装偏心误差,以提高圆光栅的测角精度^[22];Hopp 等在传统圆光栅盘上增加一条衍射结构的码道,以实现其安装偏心误差的实时测量和补偿^[23];Li 和 Zhao 等研制了具有圆光栅安装偏心自动检测功能的编码器,实现其安装偏心误

差的实时测量和补偿^[24-25];Yu 等采用单图像探测器实现绝对式圆光栅偏心误差的测量和补偿^[26]。尽管上述方法均能很好地修正角度传感器的安装偏心误差,但无法从原理上消除角度传感器安装偏心误差对测角精度的影响。

为了解决上述问题,本文提出了一种基于二维混合式位置编码和双目相机实现旋转角度高精度测量方法,能够从原理上消除传统角度传感器安装偏心对测角精度的影响。

2 测量原理

2.1 二维混合式位置编码原理

二维混合式位置编码盘是由绝对码道与增量码道组合生成的混合式位置编码,以实现二维位置检测。绝对码道是由伪随机 M 序列和二进制码序列组合生成的绝对位置编码。其中,伪随机 M 序列作为该二维混合式位置编码的奇数项,二进制码序列作为偶数项,且二者的循环位数相同。满足该条件的 M 序列和二进制序列合并生成新的序列 b_i ($0 \leq i \leq n-1$),并利用等式(1)对 b_i 序列做组合变换。

$$c_i = b_{i-h} \oplus d_0 c_{i-h} \oplus d_1 c_{i-h+1} \oplus d_2 c_{i-h+2} \oplus \cdots \oplus d_{h-1} c_{i-1}, \quad (1)$$

式中: $\oplus$ 表示位异或运算; $h \leq i \leq n$; $c_0, c_1, \cdots, c_{h-1}$ 为初始序列; $d_0 = 1, d_1, d_2, \cdots, d_{h-1}$ 为 0 或 1, $d_1, d_2, \cdots, d_{h-1}$ 中有且仅有 1 个奇数。通过式(1)计算出表示绝对码道的编码序列^[27]。但采用上述编码序列展开依次排列时,对相机视场要求较大进而影响测量速度。为解决该问题,对上述编码布置方式进行优化,采用棋盘格码作为增量码,将绝对码与增量码组合形成新的二维混合式位置编码^[28]。二维混合式位置编码如图 1 所示,混合式编码块包含 4 个基本单

元,即X单元、Y单元和两个细分单元。其中,X和Y单元表示混合式编码盘上的绝对码道,由式(1)生成的编码序列并分别按照规定顺序放置在X和Y的子单元中(1~65)。为了确保后续解码是否正确,分别在X和Y的子单元66放置奇偶校验位,X和Y的其余子单元(67~73)为空,默认设置为1,其中1对应子单元为白色;0则对应子单元为黑色。为了区分X和Y单元的编码序列,分别设置3个定位区域: A_1 、 A_2 和 A_3 定义X坐标的有效区域; B_1 、 B_2 和 B_3 定义Y坐标的有效区域。细分单元为黑白相间的棋盘格,表示混合式编码盘上的增量码道,用于二维位置的精确定位以及图像亚像素细分,以提高定位精度。

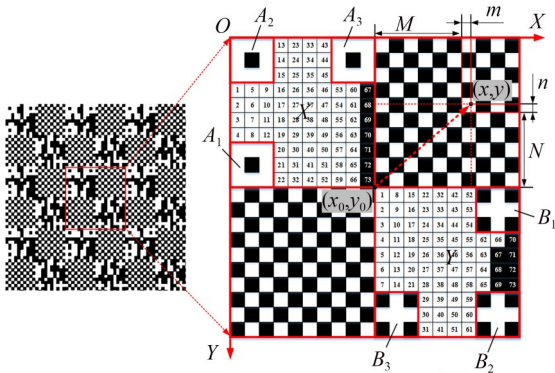


图1 二维混合式位置编码^[28]

Fig. 1 Two-dimensional hybrid position coding disk^[28]

2.2 二维混合式位置解码原理

获取码盘中的编码信息,并利用上述编码原理进行相应的解码,可以得到绝对位置值。使用CCD相机采集编码图像,对该图像进行处理,从中提取出当前图案所对应的二进制编码序列,对绝对位置值进行解码。具体步骤如图2所示。

图像采集往往会受到各种噪声的干扰,容易造成边缘检测不准确进而影响定位精度。因此需要先对图像进行滤波,并在识别编码前对图像进行二值化处理。通过识别定位区域可以区分X和Y单元,提取相应的二进制编码序列;然后对奇偶检验,判别解码是否正确,若正确,则对编码序列进行解码,得到该编码序列的二维位置值 (x_0, y_0) ,为编码块的中心点。在实际采集的图像

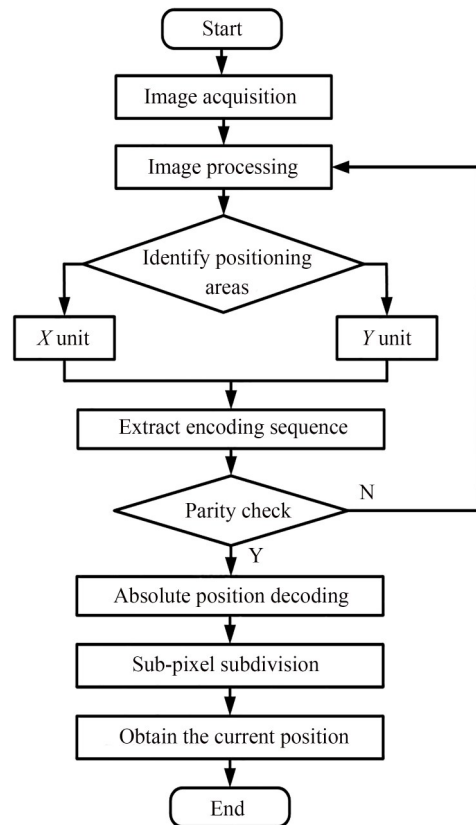


图2 解码流程

Fig. 2 Flow chart of decoding

中往往存在不完整的解码区域,该区域由多个完整子单元和一个不完整的子单元构成,不完整的子单元即为待细分的对象。根据相机像素尺寸和二维编码盘实际尺寸的对应关系,一个子单元对应 C 个像素,通过对解码区域中不完整的子单元进行细分,得到一个不完整码元和多个完整码元。其中一个完整码元对应一个像素值,通过对不完整码元进行亚像素细分,基于双边模型^[29]提取行和列的亚像素轮廓,得到X和Y方向上的非整数像素 $(m$ 和 $n)$,如图1所示。再结合编码序列的位置 (x_0, y_0) ,可以获取当前二维绝对位置 (x, y) ,即:

$$\begin{cases} x = x_0 \times K \times l \pm (M \times C + m) \times \frac{l}{C} \\ y = y_0 \times K \times l \pm (N \times C + n) \times \frac{l}{C} \end{cases}, (2)$$

式中: M 和 N 分别表示X和Y轴方向编码块上任意一点与中心点之间的完整子单元个数;根据码盘刻化尺寸,一个子单元的尺寸为 $l \times l$;一个编码

块由 $K \times K$ 个子单元构成;以图 1 中点 (x, y) 为例,在 X 轴方向上的值大于编码中心点 (x_0, y_0) ,使用“+”;在 Y 轴方向上的值小于点 (x_0, y_0) ,使用“-”。

3 基于二维混合式编码的测角原理

根据上述编码和解码原理,设计了一种基于二维混合式位置编码盘的角度测量系统。测角系统原理如图 3 所示,该系统主要由图像采集模块、精密旋转轴系、二维混合式位置编码盘和光源控制器组成。将二维混合式位置编码盘固定在精密旋转轴系上,使用两个固定的图像采集模块采集编码图像,该模块由 CCD 相机、点光源和远镜头组成;并利用光源控制器调整光源亮度,以便获取清晰的二维编码图像。根据解码原理对采集图像进行解码,由式(2)可以得到在二维混合式位置编码盘上两个位置点坐标值分别为 (x_1, y_1) 和 (x_2, y_2) 。利用这两个位置点的坐标即得到编码盘的旋转角度,具体的角度测量原理和数学分析如图 4 所示。在二维混合式位置编码盘的原点处有一个坐标系 XOY ,该坐标系的 X 和 Y 轴系与码盘图案对齐,由于编码盘固定在精密旋转轴系上,该坐标系会随着轴系的旋转而发生变化。而精密旋转轴系的旋转又是围绕着旋转轴运动的,在旋转轴 R 处指定一个参考坐标系 $X_r O_r Y_r$,此时编码盘上任意一点都可以在该参考系下表示。设定另一个参考系框架 $X_s O_s Y_s$,该参考系框架与码盘原点坐标系在初始状态下重合,且固定不动,并设定旋转轴 R 处参考坐标系 $X_r O_r Y_r$ 是由参考系框架 $X_s O_s Y_s$ 经过平移变换

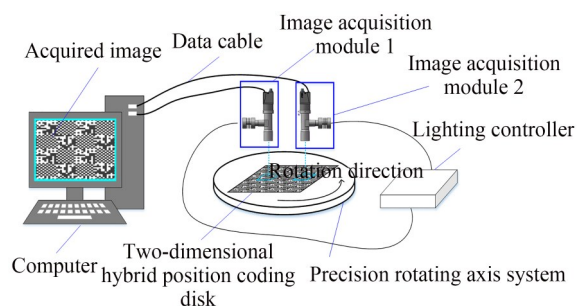


图 3 基于二维混合式位置编码的测角系统原理

Fig. 3 Schematic diagram of measuring angle system based on two-dimensional hybrid position encoding

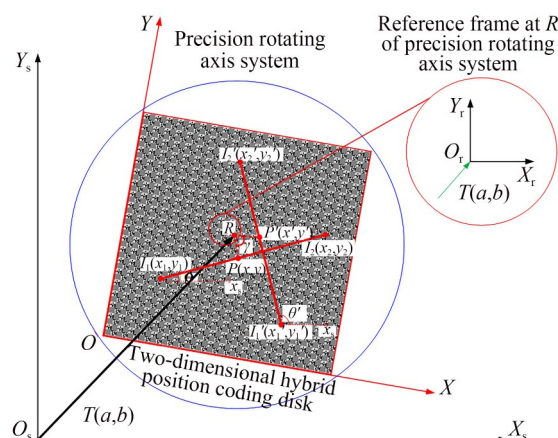


图 4 基于二维混合式位置编码的测角原理

Fig. 4 Schematic diagram of measuring angle based on two-dimensional hybrid position encoding

$T(a, b)$ 得到的。其中,转台的角度位置为编码盘上两个位置点的连线与固定参考系框架 X_s 轴系的夹角 θ ,如下:

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right). \quad (3)$$

为便于表示精密旋转轴系的旋转角度,设两个位置点连线的中点为 P ,旋转角度即为点 P 围绕精密旋转轴系的旋转中心 R 旋转到 P' 之间的夹角 γ 。

通过对采集图像的解码,得到位置点 I_1 和 I_2 在编码盘下的坐标 $I_1(x_1, y_1)$ 和 $I_2(x_2, y_2)$ 。当精密旋转轴系旋转 γ 角度时,图像采集模块 1 和 2 采集的位置点变为 $I_1'(x_1', y_1')$ 和 $I_2'(x_2', y_2')$,得到 I_1, I_2, I_1' 和 I_2' 之间的关系如下:

$$\begin{cases} x_1' = x_1 \cdot \cos \gamma - y_1 \cdot \sin \gamma - a \\ x_2' = x_2 \cdot \cos \gamma - y_2 \cdot \sin \gamma - a \\ y_1' = x_1 \cdot \sin \gamma + y_1 \cdot \cos \gamma - b \\ y_2' = x_2 \cdot \sin \gamma + y_2 \cdot \cos \gamma - b \end{cases}. \quad (4)$$

当精密旋转轴系旋转 γ 角度后,角度测量值如下:

$$\theta' = \arctan\left(\frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'}\right). \quad (5)$$

将式(4)代入式(5),得到:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{y_2' - y_1'}{x_2' - x_1'}\right) - \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) = \theta' - \theta. \quad (6)$$

通过利用二维混合式位置编码的特性,可以获得编码盘上任意一点的位置值。当精密旋转轴系旋转一定角度时,编码盘上的位置点也会随之发生变化,然后利用旋转前后位置点的坐标值,就可以得到精密旋转轴系所旋转的角度。该方法的优点在于当二维混合式位置编码盘安装在精密旋转轴系上时,不用保证二者之间的中心对齐,即该方法不受偏心误差的影响。上述推导从数学理论上证明该方法的测角精度仅取决于位置精度,与二维混合式位置编码盘中心是否与精密旋转轴系中心重合无关。

4 实验

根据上述角度测量原理,搭建了对应的测角系统,如图5所示。该系统主要由图像采集模块、二维混合式位置编码盘和精密旋转轴系组成,其中图像采集模块由CCD相机、点光源和远心镜头构成,该镜头为1.5倍放大倍率,采集的图像像素尺寸为 $3\,088 \times 2\,064$ 。二维混合式位置编码通过光刻掩膜刻划而成,刻划精度为 $\pm 0.2\,\mu\text{m}$;每个子单元的尺寸设计为 $40\,\mu\text{m} \times 40\,\mu\text{m}$,一个编码块由 20×20 个子单元构成;在编码盘区域内由多个编码块排列组成,该区域的尺寸为 $112\,\text{mm} \times 112\,\text{mm}$,可以满足在精密旋转轴系旋转过程中图像采集模块对编码盘上任意位置点编码图像的采集。依据上述子单元刻化尺寸和数量,得到该编码块的分辨率为 $0.1\,\mu\text{m}$,两个图像采集模块之间的距离为 $80\,\text{mm}$,角位移测量分辨率可以达到 $0.3''$ 。在进行编码图像采集前,调整远心

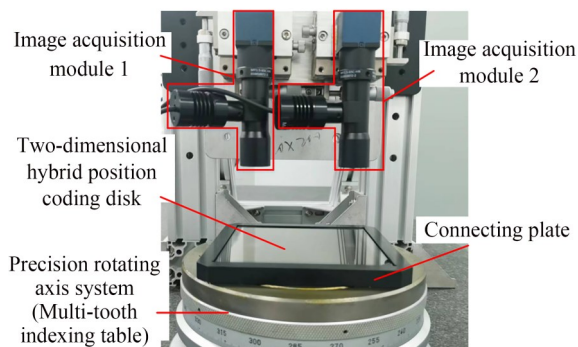


图5 基于二维混合式位置编码的测角误差测量系统

Fig.5 Measurement system of measuring angle error based on two-dimensional hybrid position encoding

镜头与编码盘之间的距离和点光源的亮度,以保证在CCD相机中成像且图像的亮度分布均匀。利用连接板将二维混合式位置编码盘固定在精密旋转轴系上,通过图像采集模块对二维混合式位置编码图像进行采集和解码,得到位置点的坐标值,获得旋转角度值。

4.1 测角系统误差测量实验

为评估上述测角系统的测量精度,精密旋转轴系采用准确度等级为0的多齿分度台来提供角度标准量,与该系统测量的角度进行对比。将二维混合式位置编码盘通过连接板固定在多齿分度台上,通过调整多齿分度台角度实现二维混合式位置编码盘的精确旋转。由于该多齿分度台以完整 15° 刻度划分,实验时选择以 15° 为间隔调整一次多齿分度台刻度,利用两个图像采集模块采集一组值,一周 360° 共采集24组数据,且每组值重复采集5次,利用该方法计算旋转角度,与多齿分度台提供的角度标准量进行比对,进一步得到测角误差曲线,如图6所示。通过实验结果可以看出,使用该方法的测角误差在 $\pm 1''$ 以内。

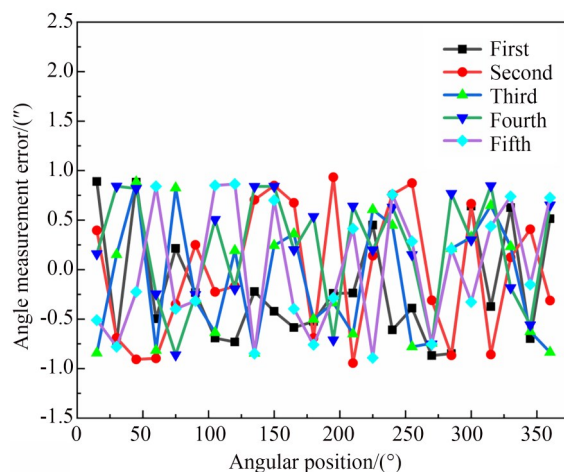


图6 所提出方法与多齿分度台之间的测角误差曲线

Fig.6 Error curves of angle measurement between proposed method and multi-tooth indexing table

4.2 直驱转台角度位置误差评估实验

利用已提出方法对直驱转台的角度定位误差进行检测,实验系统如图7所示。将多齿分度台更换为角度定位误差为 $5''$ 的直驱转台,将二维混合式位置编码盘通过连接板固定在直驱转台上,采用与4.1节的相同方式,以 15° 为间隔采集

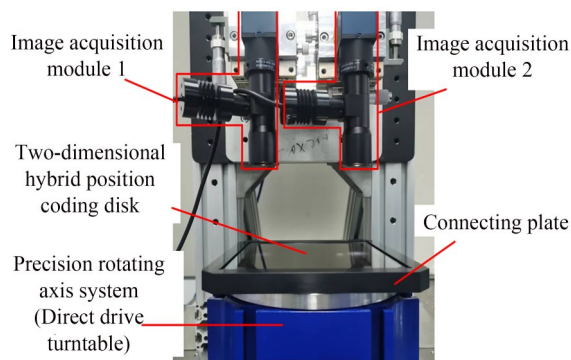


图7 基于二维混合式位置编码的直驱转台角度定位误差测量系统

Fig. 7 Measurement system of direct drive turntable angle positioning error based on two-dimensional hybrid position encoding

一组值,每组值重复采集5次,用已提出方法计算旋转角度,并与直驱转台的旋转角度进行对比,得到直驱转台的角度定位误差曲线如图8所示,角度定位误差在 $\pm 5''$ 以内。

5 结 论

针对传统圆光栅安装偏心误差直接影响含有精密轴系的仪器或者高端制造装备精度,本文在利用二维混合式位置编码实现平面位置测量的基础上,提出了一种基于二维混合式位置编码

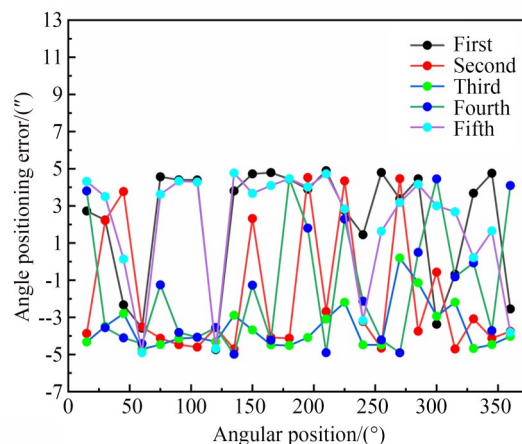


图8 基于本文方法的直驱转台角度定位误差测量曲线

Fig. 8 Measurement curves of angle positioning error of direct drive turntable based on proposed method

的高精度测角方法。该方法采用两个图像采集模块和二维混合式位置编码盘测量精密旋转轴系的旋转角度,并从数学上证明其测角精度仅取决于位置精度,而与二维混合式位置编码盘中心是否与精密旋转轴系中心重合无关。利用0级多齿分度台对其测角精度进行评估,在整周范围内,本文方法的测角精度在 $\pm 1''$ 以内。利用本文方法对直驱转台角度定位误差进行测量,角度定位误差在 $\pm 5''$ 以内。实验结果充分证明了该方法的有效性,也为精密旋转轴系测角误差的测量提供了参考。

参考文献:

- [1] GAO W, IBARAKI S, DONMEZ M A, *et al.* Machine tool calibration: Measurement, modeling, and compensation of machine tool errors[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2023, 187(2): 104017.
- [2] IBARAKI S, FUKUDA K, ALAM M M, *et al.* Novel six-axis robot kinematic model with axis-to-axis crosstalk [J]. *CIRP Annals*, 2021, 70(1): 411-414.
- [3] MURALIKRISHNAN B, PHILLIPS S, SAWYER D. Laser trackers for large-scale dimensional metrology: a review [J]. *Precision Engineering*, 2016, 44: 13-28.
- [4] 于连栋, 赵会宁. 关节类坐标测量机关键技术及进展[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(8): 1879-1888.

- [5] 于海, 万秋华, 赵长海, 等. 基于后验误差拟合的角位移测量误差补偿[J]. *光学 精密工程*, 2019, 27(1): 51-57.
- [6] 宋宇飞, 毛庆洲, 周昊, 等. 圆光栅角度传感器偏心误差的分析与补偿[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(12): 76-86.
- YU L D, ZHAO H N. Key technologies and advances of articulated coordinate measuring machines [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(8): 1879-1888. (in Chinese)
- YU H, WAN Q H, ZHAO CH H, *et al.* Error-compensation of angular displacement measurement based on posteriori error fitting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(1): 51-57. (in Chinese)
- SONG Y F, MAO Q Z, ZHOU H, *et al.* Analysis and compensation of the eccentricity error of circular grating angle sensors [J]. *Chinese Journal of Sci-*

- tific Instrument, 2022, 43(12): 76-86. (in Chinese)
- [7] 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.
WANG X J. Correction of angle measuring errors for large telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2446-2451. (in Chinese)
- [8] 劳达宝, 周维虎, 李万红, 等. 基于遗传算法的柱面光栅测角技术研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(7): 2182-2188.
LAO D B, ZHOU W H, LI W H, *et al.* Cylindrical grating angle measurement technology based on genetic algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(7): 2182-2188. (in Chinese)
- [9] 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.
LU R 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)
- [10] 于连栋, 鲍文慧, 赵会宁, 等. 新型圆光栅测角误差补偿方法及其应用[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1719-1726.
YU L D, BAO W H, ZHAO H N, *et al.* Application and novel angle measurement error compensation method of circular gratings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1719-1726. (in Chinese)
- [11] 侯嘉, 薛梓, 黄垚, 等. 变载荷对转台测角偏差的影响量化研究[J]. 计量学报, 2018, 39(S1): 33-37.
HOU J, XUE Z, HUANG Y, *et al.* Influence of varying load on angle measurement deviation of rotary table and self calibration comprehension [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018, 39(S1): 33-37. (in Chinese)
- [12] PROBST R, WITTEKOPF R, KRAUSE M, *et al.* The new PTB angle comparator [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(7): 1059-1066.
- [13] WATANABE T, KON M, NABESHIMA N, *et al.* An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6): 065002.
- [14] ISHII N, TANIGUCHI K, YAMAZAKI K, *et al.* Super-accurate angular encoder system with multi-detecting heads using VEDA method [J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 2018, 84(8): 717-723.
- [15] KIM J A, KIM J W, KANG C S, *et al.* Calibration of angle artifacts and instruments using a high precision angle generator [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2013, 14(3): 367-371.
- [16] LU X D, GRAETZ R, AMIN-SHAHIDI D, *et al.* On-axis self-calibration of angle encoders [J]. *CIRP Annals*, 2010, 59(1): 529-534.
- [17] GECKELER R D, LINK A, KRAUSE M, *et al.* Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(5): 055003.
- [18] JIAO Y, DONG Z G, DING Y, *et al.* Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders [J]. *Measurement Science and Technology*, 2017, 28(10): 105013.
- [19] CRAMER P G. Self-compensating angular encoder: US20110282612[P]. 2011-11-17.
- [20] 张文颖, 劳达宝, 周维虎, 等. 基于多头读数布局的圆光栅自校准方法研究[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0812001.
ZHANG W Y, LAO D B, ZHOU W H, *et al.* Self-calibration method based on multi-head reading layout [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(8): 0812001. (in Chinese)
- [21] GOU L, PENG D L, CHEN X H, *et al.* A self-calibration method for angular displacement sensor working in harsh environments [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(8): 3033-3040.
- [22] 艾华, 戴岑. 圆光栅衍射光干涉偏心测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(S1): 128-132.
AI H, DAI C. Eccentric measuring approach of circular grating by diffracted light interference [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(S1): 128-132. (in Chinese)
- [23] HOPP D, PRUSS C, OSTEN W. Device and method for optically compensating for the measuring track decentralization in rotation angle sensors: US9068862[P]. 2015-06-30.
- [24] LI X, YE G Y, LIU H Z, *et al.* A novel optical rotary encoder with eccentricity self-detection ability [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(11): 115005.
- [25] ZHAO G B, YE G Y, WU Z Z, *et al.* On-line angle self-correction strategy based on a cobweb-structured grating scale [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(5): 055001.

- [26] YU H, WAN Q H, LU X R, *et al.* Error-correct arithmetic for angular displacement measurement with single linear image detector[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(5): 054108.
- [27] 夏豪杰, 吴晓婷, 张海铖. 基于伪随机编码的绝对式平面位移测量方法研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(12): 39-46.
- XIA H J, WU X T, ZHANG H CH. Absolute displacement measurement method with pseudo-random code[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(12): 39-46. (in Chinese)
- [28] ZHAO H N, NIU R R, FAN M Y, *et al.* 2D absolute position measurement based on the hybrid encoding method[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2023, 94(2): 025101.
- ZHAO H N, NIU R R, FAN M Y, *et al.* 2D absolute position measurement based on the hybrid encoding method[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2023, 94(2): 025101.
- [29] LIU W H, ZHANG Y M, YU X H. A novel sub-pixel industrial chip detection method based on the dual-edge model for surface mount equipment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2023, 19(1): 232-242.

作者简介:



赵会宁(1987—),男,河南兰考人,副教授,2011年于中原工学院获得学士学位,2014年、2018年于合肥工业大学分别获得硕士和博士学位,主要研究方向为仪器精度理论及应用、坐标测量技术。E-mail: hnzhaoh@mail.hfut.edu.cn

通讯作者:



夏豪杰(1979—),男,安徽宿州人,教授,2006年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为光电精密测量技术、微纳测控系统、仪器精度理论及精密仪器的设计。E-mail: hxia@mail.hfut.edu.cn