

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107349

圆光栅测角系统示值误差分析与补偿*

李昶丽^{1,2}, 薛梓², 黄焱², 朱维斌¹, 邹伟²

(1. 中国计量大学 杭州 310018; 2. 中国计量科学研究院 北京 100029)

摘要:首先针对引起圆光栅测角系统示值误差的主要来源(光栅盘的偏心及倾斜)进行理论研究,同时提出光栅盘与转动轴的同轴安装方法;利用中国计量科学研究院的全圆连续角度标准装置(测量不确定度为 $0.05''$)对待测圆光栅测角系统直接进行溯源性测试,避免了圆光栅安装过程和间接溯源性测试(多面棱体和光电自准直仪配合校准)过程中引入的仪器误差;其次利用谐波理论分析偏心和倾斜以及其它阶次误差在频谱中的分布;最后针对安装偏心和倾斜造成的误差,进行谐波补偿。实验结果表明,测角系统的示值误差从补偿前的 $100''$ 减小到了 $10''$,有效消除了光栅盘安装偏心、倾斜造成的稳定可复现的误差谐波成分。

关键词: 偏心;倾斜;示值误差;谐波补偿法

中图分类号: TB922 TH71 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Indication error analysis and compensation of circular grating angle measurement system

Li Gali^{1,2}, Xue Zi², Huang Yao², Zhu Weibin¹, Zou Wei²

(1. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China; 2. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Firstly the indication error main source of the angle measurement system of circular grating (eccentricity and tilt of grating disk) is studied theoretically, and the coaxial installation method of grating disk and rotating shaft is proposed. The continuous full circle angle standard device in NIM (the measurement uncertainty is $0.05''$) is used to directly perform traceability test of the measured circular grating angle measuring system, which avoids the instrument errors introduced in the installation process of the circular grating and the indirect traceability test process (the calibration using combined polyhedral prism and photoelectric autocollimator). Secondly, the distribution of eccentricity, tilt and other order errors in the spectrum is analyzed using harmonic theory. Finally, the harmonic compensation is carried out for the errors caused by installation eccentricity and tilt. The experiment results show that the angle indication error of the angle measurement system is reduced from $100''$ before compensation to $10''$ after compensation, which effectively eliminates the stable and repeatable error harmonic components caused by the installation eccentricity and tilt of grating disk.

Keywords: eccentricity; tilt; indication error; harmonic compensation method

0 引言

用圆光栅做成的角度测量器件具有精度高、重复性好及体积小等优点被广泛应用于航空航天等高精度角度测量的仪器设备中。圆光栅的示值误差是圆光栅的示值与对应的输入量的真值之差,它是圆光栅最主要的计量

特性之一。

但其测角精度因受光栅盘机械加工和安装过程影响,在测角精度要求为角秒级或亚角秒级场合下,不能达到其标称精度。通常情况下,采用提高单个读数头测角精度或多读数头结构提高系统精度^[1-3],但同时也导致成本增加及安装难度提高^[4]。误差补偿是提高测角精度的有效方法^[5-7]。李凯等^[8]基于蒙特卡洛法提高了圆光

收稿日期:2021-01-08 Received Date: 2021-01-08

* 基金项目:国家自然科学基金重点项目(51935004)资助

栅测量精度;朱应时等^[9]采用十头平均和裂相差分,通过抑制长周期分度误差提高测角精度;艾晨光等^[10]通过双读数头信号的相位差检测出圆光栅偏心方向和偏心距,以获得由偏心引起的测角误差补偿项并对其修正,修正后的测量精度提高了近 5 倍;娄云鸽等^[11]利用双读数头数字信号求平均值法有效提高了转台测角精度;高贯斌等^[12]通过基于径向基函数(radial basis function, RBF)神经网络算法,使得圆光栅的测角精度提高了约两个数量级。

上述方案都是针对光栅盘安装调试后的示值误差进行抑制或者补偿。通常情况下,光栅盘的安装偏心 and 倾斜造成的测角误差约占示值误差的 60% 以上,而在实际测量过程中,光栅盘的安装造成的示值误差可以达到几千角秒甚至几度,在这种情况下,其他的误差(电子细分误差和刻线误差等)在示值误差中所占比例很小,圆光栅的示值误差主要来源于光栅盘的安装误差,同时也不可避免的引入间接溯源(多面棱体和光电自准直仪配合校准)过程中新的安装误差,增加误差分离难度,限制了测角精度的提升。

针对上述存在的问题,本文采用中国计量科学研究院的全圆连续角度标准装置对待测圆光栅测角系统进行直接溯源;为了有效降低圆光栅示值误差^[13-14],首先研究圆光栅系统测角误差来源^[15-17],并主要针对光栅盘安装过程中的偏心、倾斜导致的测角误差^[18-20]进行深入研究,提出光栅盘与转动轴同轴安装方法,其次根据其在频谱中的分布,提出利用谐波补偿法将偏心、倾斜导致的稳定可重复的误差作为补偿项,有效提高了圆光栅测角精度。

1 圆光栅示值误差来源

圆光栅测角系统的示值误差主要由系统误差、随机误差组成。

1.1 随机误差

圆光栅测角系统中随机误差主要体现为轴系跳动,且这种轴系跳动具有随机和非重复性。轴系跳动会导致光栅盘中心和旋转轴中心偏离,因此,轴系跳动和偏心产生的测角偏差作用机理相似。轴系跳动误差引起的测角偏差可以表示为:

$$\Delta\theta = 412 \cdot \frac{e}{D} (") \quad (1)$$

式中: D 是光栅盘的直径(mm), e_{\max} 是全圆内各角位置径向跳动的极差值, $e=e_{\max}/2$ 是刻度盘的偏心值(μm)。通常情况下,轴系跳动相较安装偏心来说,其产生的示值误差可以忽略不计^[15]。

1.2 系统误差

系统误差包括光栅盘的刻线误差、电子细分误差和安装误差。

1) 刻线误差、电子细分误差

由于光栅盘上栅线刻划不均匀导致栅线实际和理想位置存在偏差,即为刻线误差。电子细分误差来源于光栅莫尔条纹信号失真,本质为电子细分中信号的非正交、直流电平漂移、不等幅等产生的非线性误差。刻线误差表现为中、低阶周期误差,电子细分误差表现为高阶周期误差^[21]。

2) 安装误差

由于光栅盘机械加工和安装过程中实际位置与理想位置存在偏差以及读数头的安装系统自身引起的角位置偏差,从而引入测角偏差。安装误差主要包括:偏心误差和倾斜误差。

偏心是指光栅盘的中心和旋转轴的运动中心不重合,偏心误差是导致圆光栅测角示值误差的主要因素,通常占测角系统误差的 60% 以上^[22]。图 1 所示为圆光栅偏心示意图,圆光栅理想位置旋转中心为 O 点,半径是 R ,实际转过的角度为 θ ,光栅实测角度是 θ' 。

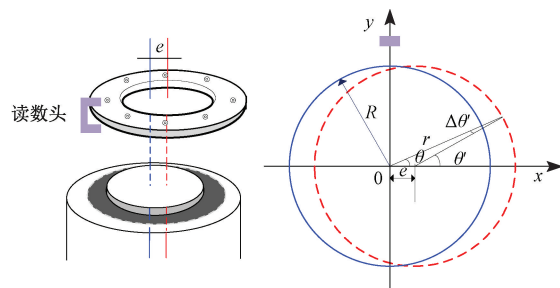


图 1 圆光栅偏心示意图

Fig. 1 Schematic diagram of circular grating eccentricity

偏心产生的测角误差^[21]为:

$$\Delta\theta = \theta' - \theta = \frac{e}{R} \sin\theta \quad (2)$$

由(2)式得偏心会导致测量半径的变化,将产生一周变化一次的测角误差,在误差频谱中表现为一次谐波。

倾斜是指光栅盘与旋转轴不垂直,光栅盘倾斜导致光栅旋转时形成的莫尔条纹的明暗变化次数和宽度都发生变化,导致的是二次谐波误差^[23],如图 2 所示为光栅盘安装倾斜示意图。

指示光栅和标尺光栅的栅线角为 ϕ ,光栅盘半径是 r ,光栅盘的倾斜角为 φ ,光栅盘倾斜导致的角度误差为:

$$\Delta\beta = \pm \phi \sin\varphi \quad (3)$$

光栅盘倾斜产生的测角误差一周变化两次,在频谱中表现为二阶谐波。

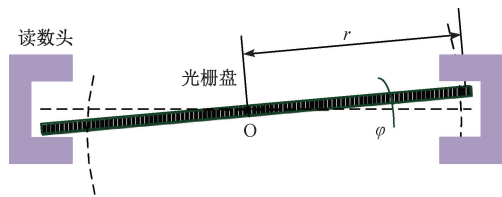


图 2 圆光栅倾斜示意图

Fig. 2 Schematic diagram of circular grating tilt

2 实 验

校准实验在温控室内的隔振平台上完成,房间温度控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$,湿度 (30~75)%,室内无显著气流扰动和振动。实验装置如图 3 所示,实验系统由全国连续角度标准装置和待测圆光栅组成。

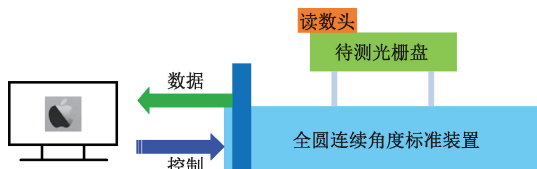


图 3 实验装置

Fig. 3 The experiment device

实验实物图如图 4 所示,全圆连续角度标准装置的测量不确定度为 0.05”。

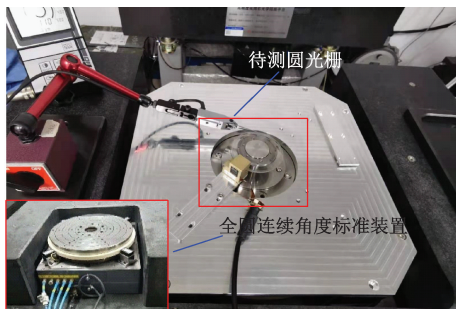


图 4 校准系统实物图

Fig. 4 The photo of the calibration system

待测圆光栅如图 5 所示,该系统主要由读数头和光栅盘组成,读数头是由 Micro-E 公司生产的高精度透射式编码器,光栅盘的刻线的分辨力达到 15.8”,电子细分分辨力为 0.001”。

为避免圆光栅测角示值误差存在较大的 1 阶误差成分,安装圆光栅系统时对光栅盘进行了同轴调节,调节过程如图 6 所示。

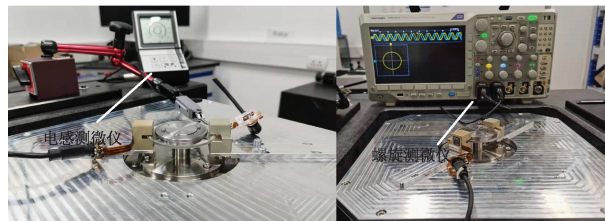
调节步骤:

机械同轴:光栅盘的 0° 、 180° 、 90° 、 270° 位置上,电感



图 5 待测圆光栅测角系统

Fig. 5 Angle measurement system of circular grating to be measured



(a) 机械同轴 (a) Mechanical coaxial adjustment (b) 电子同轴 (b) Electronic coaxial adjustment

图 6 同轴调节示意图

Fig. 6 Schematic diagram of coaxial adjustment

测微仪的示数变化范围在 $2\ \mu\text{m}$ 以内。

电子同轴:用示波器观察对径安装的两个读数头同路信号的相位差,通过调节光栅盘,使得两路信号的相位差在 $1/2$ 周期内。

3 谐波补偿法

圆光栅测角示值误差主要有长周期、中周期和短周期误差,分度误差主要是中、长周期误差,细分误差主要是短周期误差。

3.1 分度误差

校准光栅盘的范围为 $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$,步距为 10° ,校准结果如图 7 所示。单个读数头的示值误差约为 $100''$,近似于正弦曲线,明显看出示值误差主要由一次谐波组成^[21],其来源于光栅盘的安装偏心。

对圆光栅测角系统示值误差进行谐波分析,得到测角误差的谐波阶次分布如图 8 所示。由谐波分析明显看出 1 阶成分约占测角示值误差的 85%,其主要来源于光栅盘偏心;2 阶成分约占测角示值误差的 6%,主要来源于光栅盘倾斜;3 阶和 4 阶误差成分分别占测角示值误差的 4%,其主要来源于光栅盘安装误差和随机误差等^[21];高于 4 阶误差成分在圆光栅测角示值误差中所占比例很小。影响圆光栅测角示值误差的主要因素是光栅

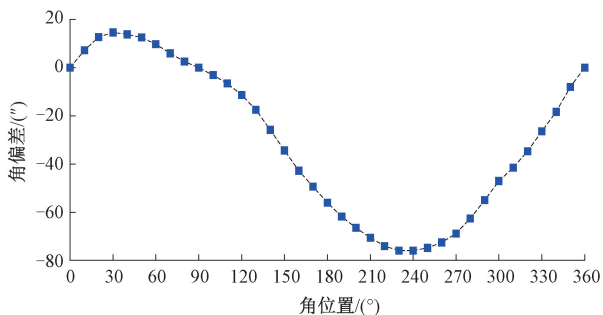


图 7 圆光栅分度误差

Fig. 7 Dividing error of circular grating

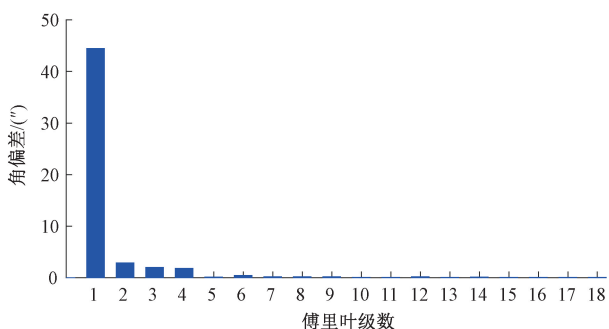


图 8 圆光栅分度误差周期性成分

Fig. 8 Periodic component of dividing error of circular grating

盘的安装,因此,消除安装误差是减小示值误差最有效的方法。

重复 10 次测量,得到的圆光栅测角的示值误差曲线如图 9 所示。

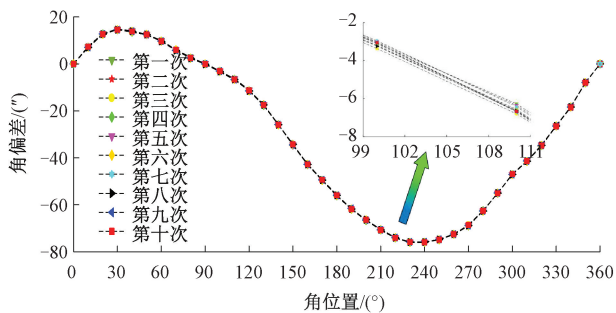


图 9 10 次分度误差曲线

Fig. 9 10th dividing error curves

分度误差的测量重复性的标准偏差用贝塞尔公式表示为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (d_i - d)^2}{n - 1}} \tag{4}$$

式中: σ 为标准偏差; n 为测量次数; d_i 为测量示值误差; d 为 10 次测量示值误差的平均值。

10 次测量结果标准偏差如图 10 所示,其值优于 0.2",较圆光栅测角示值误差小两个数量级,因此,可认为示值误差稳定可复现。

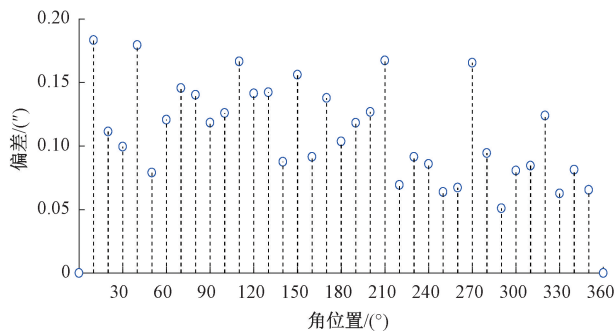


图 10 10 次分度误差的标准偏差

Fig. 10 Standard deviation of 10th dividing error

3.2 细分误差

通常情况下,待测圆光栅的示值误差主要来源于安装过程中造成的低阶误差。由于校准实验采样点数的限制,只能得到前 18 阶误差谐波成分,为验证高阶误差对于圆光栅测角的影响,在±1 000"小角度范围,采用 10"步距对待测圆光栅进行校准,结果如图 11 所示。在±1 000"范围内,圆光栅的细分误差在±0.3"内,因此高阶误差比偏心误差小 3 个数量级。

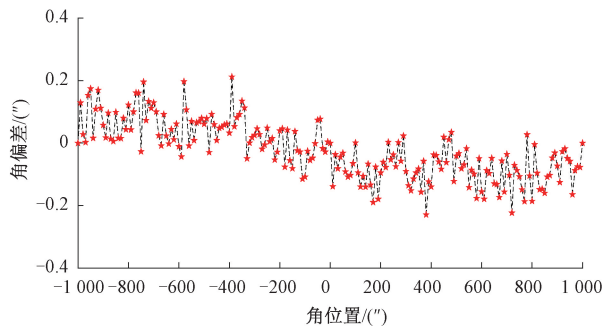


图 11 圆光栅细分误差曲线

Fig. 11 Subdivision error curve of circular grating

对圆光栅测角系统细分误差进行谐波分析,如图 12 所示。谐波分析结果表明高阶次的误差成分均小于 0.02",因此,可认为高次谐波误差在示值误差中所占比例很小。

0~1 000"范围内,步距为 10",对圆光栅测角示值误差进行 5 次重复性测量如图 13 所示。

5 次细分误差的标准偏差如图 14 所示,其值优于 0.12"。

校准结果表明,圆光栅测角示值误差主要分布在低阶次,高阶误差对示值误差的影响很小。因此,补偿安装偏心 and 倾斜造成的误差可以有效减小了圆光栅测角系统的示值误差。

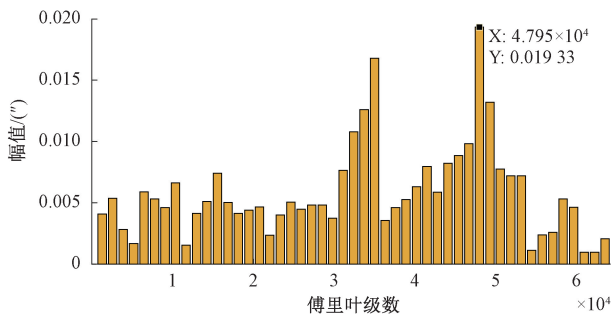


图 12 圆光栅细分误差周期性成分

Fig. 12 Periodic component of the subdivision error of circular grating

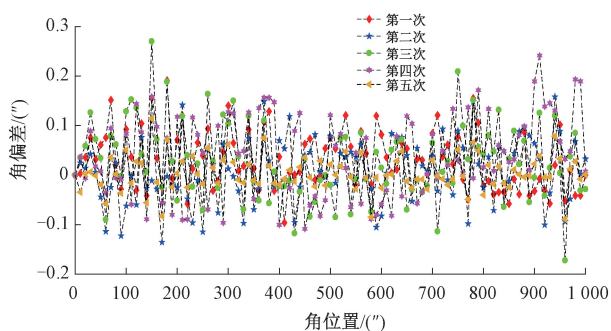


图 13 5 次细分误差曲线

Fig. 13 5th subdivision error curve

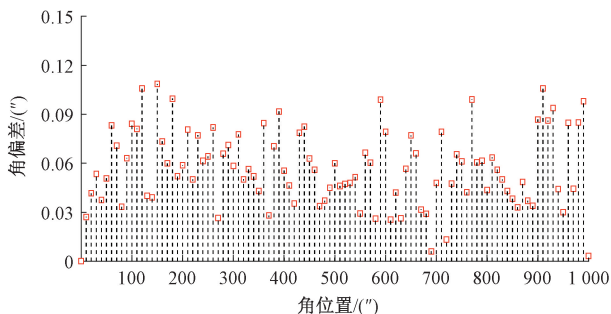


图 14 5 次细分误差的标准偏差

Fig. 14 Standard deviation of 5th subdivision error

3.3 误差补偿

对单读数头 10 次测量结果分别作傅里叶变换,得到 1,2 阶误差成分对应幅值大小如表 1 所示。比较表 1 中各组数据的误差幅值,1 阶误差幅值稳定在 44.5",2 阶误差幅值稳定在 2.9",可知 1,2 阶谐波幅值不随时间变化,且稳定可复现。

1,2 阶对应的 10 次测量结果的误差变化曲线如图 15 所示,1,2 阶误差成分对应的幅值变化范围分别在 0.1"/0.05"内,可以看出圆光栅安装的偏、倾斜引起的误差在 0°~360° 范围内圆光栅测角示值误差幅值变化

表 1 1、2 阶谐波误差的幅值

Table 1 Amplitudes of 1st and 2nd order harmonic errors

测量次数	1 阶(″)	2 阶(″)
1	44.48	2.87
2	44.53	2.88
3	44.40	2.86
4	44.50	2.84
5	44.49	2.84
6	44.49	2.88
7	44.48	2.90
8	44.42	2.91
9	44.43	2.88
10	44.46	2.86

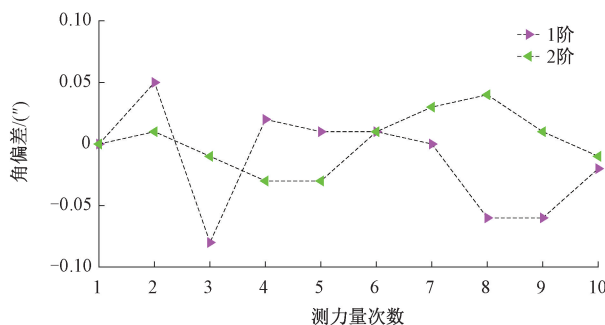


图 15 i 阶示值误差幅值变化曲线

Fig. 15 Change curves of ith-order indication error amplitude

很小,可认为是重复可复现的误差。因此,可将 1,2 阶谐波成分作为误差补偿项。

补偿后的圆光栅测角示值误差曲线如图 16 所示,补偿后的误差在 ±5" 内。

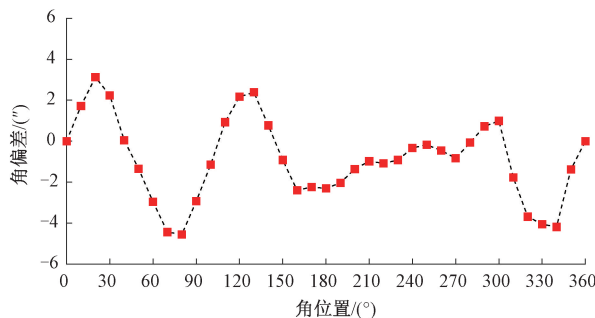


图 16 补偿后示值误差曲线

Fig. 16 Indication error curve after compensation

补偿前后圆光栅测角示值误差曲线对比如图 17 所示,补偿后的示值误差从 100" 减小到 10",圆光栅测角示值误差减小了 10 倍左右。

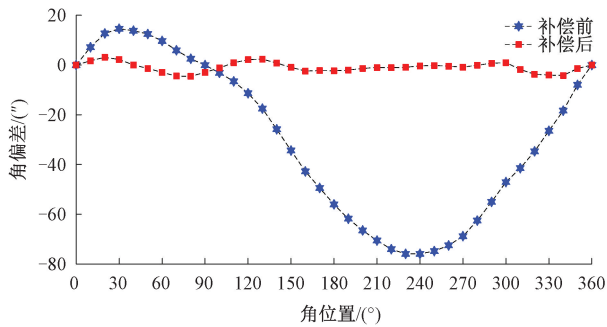


图 17 补偿前后示值误差曲线对比图

Fig. 17 Comparison diagram of indication error curves before and after compensation

4 结 论

本文首先分析了影响圆光栅测角系统示值误差的来源,并针对示值误差中影响较大的偏心、倾斜误差进行理论分析,对光栅盘进行同轴安装调试。利用中国计量科学研究院的全圆连续角度标准装置对待测圆光栅系统直接溯源,根据误差数据的谐波特性,将光栅盘偏心、倾斜的谐波成分作为误差补偿项,从而消除圆光栅示值误差中稳定的可重复性误差源。实验结果表明,补偿后的圆光栅的示值误差从 $100''$ 减小到 $10''$,有效减小了圆光栅测角系统的示值误差。

参考文献

- [1] 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): 352-358.
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): 352-358.
- [2] JIAO Y, DONG Z, DING Y, et al. Optimal arrangements of scanning heads for self-calibration of angle encoders [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(10), DOI:10.1088/1361-6501/aa8545.
- [3] 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.
- [4] 乔丹, 薛梓, 黄垚, 等. 等分多读数头位置偏差对测角误差的影响研究 [J]. 计量学报, 2017, 38(6): 676-680.
QIAO D, XUE Z, HUANG Y, et al. Study on influence of position deviation of multi-reading heads of equal average on angular measurement [J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(6): 676-680.
- [5] 李强. 基于多读数头的光栅短周期误差消减技术 [D]. 西安:西安工业大学, 2019.
LI Q. Grating short period error reduction technology based on multi reading-heads [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019.
- [6] 任曦, 杜升平, 陈科, 等. 圆光栅编码器测角误差源及频谱分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 171-178.
REN X, DU SH P, CHEN K, et al. Error source and spectrum analysis for angle measurement for circular grating encoder [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171-178.
- [7] 朱嘉齐, 章家岩, 冯旭刚. 柔性臂测量机的圆光栅偏心参数标定算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 1-7.
ZHU J Q, ZHANG J Y, FENG X G. Calibration algorithm of circular grating eccentricity parameters of flexible arm measuring machine [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 1-7.
- [8] 李凯, 袁峰. 基于蒙特卡洛法的圆光栅测角误差分析与补偿 [J]. 光电子激光, 2014, 25(7): 1381-1388.
LI K, YUAN F. Measuring angle's error analysis and compensation of circular grating sensor based on Monte Carlo method [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2014, 25(7): 1381-1388.
- [9] 朱应时, 杨进堂. 圆光栅的高精度高质量莫尔条纹信号的研究 [J]. 计量学报, 1995(4): 280-285+96.
ZHU Y SH, YANG J T. Research on high precision and high quality moire fringe signal of circular grating [J]. Acta Metrologica Sinica, 1995(4): 280-285+296.
- [10] 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.
AI CH G, ZH M, S 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.
- [11] 娄云鸽, 严隽藩, 陈伟伟. 提高测角精度的双读数头转台设计 [J]. 机械制造, 2015, 53(1): 17-19.
LOU Y G, YAN J F, CHEN W W. Design of double reading head turntable for improving angle measurement accuracy [J]. Machinery, 2015, 53(1): 17-19.
- [12] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 基于 RBF 神经网络的关节转角误差补偿 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(12): 20-24.
GAO G B, WANG W, LIN K, et al. Error compensation

- of Joint angle based on RBF neural network [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(12): 20-24.
- [13] 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]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1719-1726.
- [14] 杨贵杰, 崔乃政, 孙力, 等. Error analysis for integrated tracking angle measuring system [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(6): 703-706.
YANG G J, CUI N ZH, SUN L, et al. Error analysis for integrated tracking angle measuring system [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(6): 703-706.
- [15] HUANG Y, XUE Z, HUANG M, et al. The NIM continuous full circle angle standard [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(7): 74013.
- [16] 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.
ZHAO R J, MA W L. Improving the accuracy of the new-type error harmonic compensation [J]. Instrumentation, 2009, 16(3): 69-71.
- [17] WATANABE T, FUJIMOTO H, NAKAYAMA K, et al. Automatic high-precision calibration system for angle encoder [C]. Lasers in Metrology & Art Conservation International Society for Optics and Photonics, 2001.
- [18] HOU J, XUE Z, HUANG Y, et al. Effect of varying load on angle measurement deviation of rotary table [C]. 10th International Symposium on Precision Engineering Measurement and Instrumentation, 2019.
- [19] 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): 128-32.
AI H, DAI C. Eccentric measuring approach of circular grating by diffracted light interference [J]. China Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(S1): 128-132.
- [20] 冯超鹏, 祝连庆, 潘志康, 等. 一种新的圆光栅偏心参数自标定方法 [J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2459-2464.
FENG CH P, ZHU L Q, PAN ZH K, et al. New self-calibration method of circular grating eccentric parameters [J]. Chinese Journal of scientific instrument, 2016, 37(11): 2459-2464.
- [21] 周彬彬. 高精度圆光栅测角系统误差补偿技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
ZHOU B B. Research on error compensation technology for high accuracy circle gratings angle-measurement system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [22] 张文颖, 朱浩然. 圆光栅测角系统误差分析与修正 [J]. 应用光学, 2019, 40(3): 399-403.
ZHANG W Y, ZHU H R. Error analysis and correction of circular grating angle measurement system [J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(3): 399-403.
- [23] 王宝玉. 谐波分析法在测角误差分离中的应用 [J]. 光学工程, 1983(3): 52-56.
WANG B Y. Application of harmonic analysis in angle measurement error separation, [J]. Opto-Electronic Engineering, 1983(3): 52-56.

作者简介



李茆丽, 2018 年于兰州理工大学获得学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为角度计量。

E-mail: lgl1938475456@163.com

Li Gali received bachelor degree from Lanzhou University of Technology in 2018.

Now, she is studying for master degree in China Jiliang University. Her main research direction is angular metrology.



黄焱 (通信作者), 2004 年于北京工业大学获得学士学位, 2007 年于北京工业大学获得硕士学位, 现为中国计量科学研究院高级工程师, 主要研究方向为角度计量。

E-mail: huangyao@nim.ac.cn

Huang Yao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2004, received his M. Sc. degree from Beijing University of Technology in 2007, now, he is a senior engineer at National Institute of Metrology, China. His main research direction is angular metrology.