

文章编号 1004-924X(2020)05-1038-08

图像式角位移测量的光栅偏心度监测系统

王亚洲^{1*}, 于海², 易进¹, 张士伟¹, 韦宗喜¹

(1. 长光卫星技术有限公司, 吉林 长春 130000;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 图像式角位移测量装置中, 光栅的安装偏心标定结果直接影响着角位移测量的精度。为此, 本文设计了一种用于调试图像式角位移测量装置光栅偏心度的系统。首先, 根据图像式角位移测量机理, 提出了基于线阵图像传感器的标定光栅偏心度监测原理; 然后, 在图像传感器上建立了偏心调试监测信号的模型, 并提出存在偏心时偏心监测信号的变化机理; 最后, 对某型号角位移测量装置进行了实验, 并给出了调试建议。实验表明, 经过调节误差均方差由 $1\ 017''$ 降低到 $12.8''$ 。本文设计的偏心监测系统能够实现对标定光栅的高精度安装调试, 提高了图像式角位移测量装置的批量生产效率。

关键词: 角位移测量; 标定光栅调试; 偏心误差; 监测系统

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202805.1038

Grating eccentricity monitoring system for image-based angular displacement measurement

WANG Ya-zhou^{1*}, YU Hai², YI Jin¹, ZHANG Shi-wei¹, WEI Zong-xi¹

(1. Changguang Satellite Technology Co., Changchun 130000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: wangyazhou791@163.com

Abstract: In an image-based angular displacement measuring device, the installation eccentricity of the calibration grating directly affects the accuracy of angular displacement measurements. In this paper, a system for debugging the eccentricity of the grating in the angular displacement measuring device was designed. First, according to the mechanism of image-based angular displacement measurement, a method for monitoring the eccentricity of the calibration grating was proposed utilizing a linear array image sensor. A model of the eccentricity monitoring signal on the image sensor was subsequently established, and a mechanism for changing the signal was determined. Finally, an experiment on a certain type of angular displacement measurement device was carried out and debugging suggestions were provided. The experiment demonstrates that the adjustment reduces the root mean square error from $1\ 017''$ to $12.8''$. The eccentricity monitoring system designed in this paper can achieve installation and debugging of the calibration grating with high

收稿日期: 2019-12-27; 修订日期: 2020-01-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51605465); 吉林省重大科技攻关项目 (No. 20170201006GX)

precision, and improve the efficiency of mass production of image-based angular displacement measurement devices.

Key words: angular displacement measurement; grating debugging; eccentricity error; monitoring system

1 引言

随着航空航天、工业制造等领域的飞速发展,各行业对数字化转角位移的要求越来越高^[1-2]。传统角位移测量技术采用标定光栅与指示光栅的相对运动产生莫尔条纹信号,通过对莫尔条纹信号的相位信息进行计算,得到较高分辨力的转角位移信息^[3]。但是,传统莫尔条纹测量技术的测量分辨率和测角精度受制于标定光栅尺寸,在小型化设备里已经达到了瓶颈,迫切需要研制小型化高分辨力和高精度的角位移测量技术。

图像式角位移测量技术是一种采用图像传感器对标定光栅上的标线进行识别,通过算法实现对转角位移进行测量的技术^[4]。由于采用像素灰度值代替传统莫尔条纹光电信号,在小体积内图像式角位移测量技术更容易实现高分辨力和高精度的测量。近年来国内外相继开展了相关研究。2014年,美国诺维萨德大学的 J. Baji 等提出了一种基于色彩识别的位移测量方式,对涂有均匀变化颜色的码盘进行转角测量,能够实现转角识别^[5]。2015年,韩国标准与科学研究所的 J. Kim 等采用移相编码方式配合微图像检测系统,实现了13位的测量分辨率^[6]。2012年,浙江大学的谈颖皓等研究了基于线阵探测器的编码技术,在直径为40 mm的圆光栅上实现了16位的测量分辨率^[7]。2013年,南京理工大学的孟宏蕊采用线阵 CCD 芯片和单圈绝对式码盘,在直径为79 mm的码盘上实现了1"的分辨率^[8]。2019年,南京航空航天大学的袁鹏飞等提出了一种具有鲁棒性的高精度细分算法,能够实现对小型污渍的抗干扰,其角度测量精度达到1.9"^[9]。

不过上述文献中,对于标定光栅偏心率调节方式的研究较少。根据前期研究可知,标定光栅的偏心和线阵图像传感器的安装角度是影响测量精度的两个重要因素^[10]。为调节标定光栅的偏心率,传统方法是采用电子显微镜对准标定光栅上的基准标线,旋转标定光栅时,通过调节使所有

基准标线都处于同一半径内。这种方法受人眼读取的限制,只能粗略地调节标定光栅。而且,在批量生产时,采用电子显微镜对每一台设备都进行调节会极大地拖慢生产效率。与此同时,若将传统测量技术中采用的“对径读数^[11-12]”法实现对偏心误差的消减,其效果仍然受读数头摆放位置的影响。

减少标定光栅偏心率是提高角位移测量的重要手段。在前期研究中,本课题组提出了一种线阵图像传感器的角位移测量方法^[13-15]。该方法直接采用图像传感器对标定光栅上的基准标线进行识别,而不需要指示光栅的配合,实现了较传统测量技术更高的性能。在此基础上,本文提出了一种适用于图像式角位移测量技术的安装调试系统。首先,根据图像式角位移测量机理,提出了基于线阵图像传感器的标定光栅偏心率监测原理;然后,在图像传感器上建立了调试监测信号的模型,并分析了标定光栅存在偏心时以及光栅存在污渍时监测信号的变化;最后,对某型号角位移测量装置进行了实验,并给出了调试建议。实验表明,本文设计的监测系统能够高精度地实现对图像式角位移测量装置的安装调试,提高了图像式角位移测量装置的生产效率。

2 测量原理

图像式角位移测量原理如图1所示。该系统包括旋转轴、标定光栅、平行光源、线阵图像传感器和处理电路。工作时,主轴带动标定光栅转动;平行光源发出的平行光透过标定光栅上的基准刻线,投影到线阵图像传感器上;处理电路接收图像传感器的图像信息,经过“译码”和“细分”计算,得出当前的绝对转角位移^[15]。

标定光栅上的基准标线按照 M 序列伪随机码的编码方式,在光栅的圆周内等间隔、等半径的刻划有2"条径向的基准刻线(基准刻线透光)。图2为刻划有24条基准标线的标定光栅示意图。当标定光栅存在偏心误差时,光栅的圆心 O' 将偏

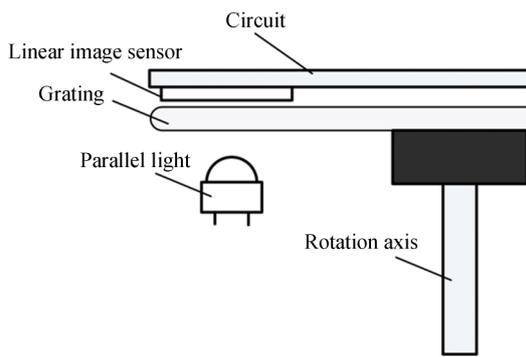


图 1 图像式角位移测量系统光路

Fig. 1 Optical path of image-based angular measuring system

离旋转轴的圆心 O 。偏心量的横向分量为 a , 纵向分量为 b 。根据前期的测量方法, 标定光栅的偏心会影响角位移测量的准确度。因此, 在安装调试光栅时, 需要尽量地减小标定光栅的偏心度。

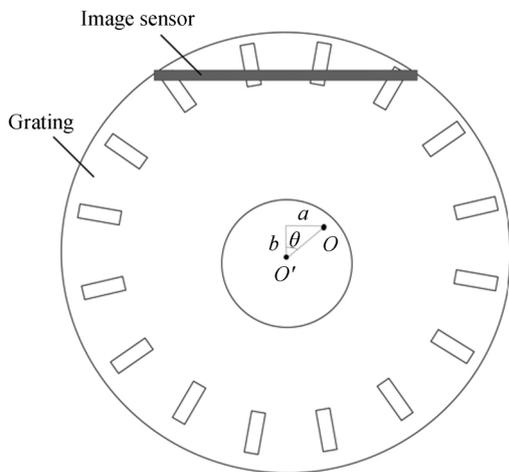


图 2 偏心度影响机理

Fig. 2 Principle for effect of eccentricity on accuracy

3 监测原理

3.1 监测信号模型建立

安装标定光栅时为监测光栅偏心度, 本文提出在图像传感器的图像中设置监测信号, 进而实现对安装调试进行监控的方法。设标定光栅上的基准标线数量为 2^n , 监测信号设置原理如图 3 所示。

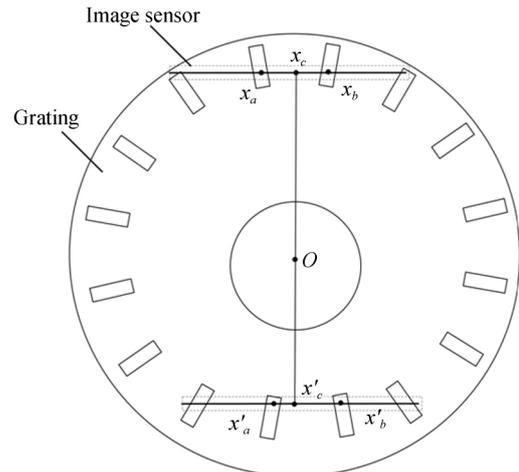


图 3 监测信号设置原理

Fig. 3 Principal for detection signal setting

图 3 中, 以圆光栅的圆心为对称, 分别放置两个图像传感器。设两个传感器的视野中心点分别为 x_c 和 x'_c 。采用式(1)计算 x_c 和 x'_c 两侧的标线的质心, 分别表示为 x_a, x_b 和 x'_a, x'_b 。

$$x_i(x'_i) = \frac{\sum_{x \in N} x \cdot p(x)}{\sum_{x \in N} x} \quad (1)$$

式中: i 取 a, b, x 表示图像传感器中像素点的位置, $p(x)$ 表示第 x 个像素点的灰度值, N 表示相应的基准标线的范围。

图像传感器的视野中心点 x_c 与相邻的标线之间的距离分别为 $x_c - x_a$ 和 $x_b - x_c$; x'_c 与最近的基准标线之间的距离分别为 $x'_c - x'_a$ 和 $x'_b - x'_c$ 。为得到周期变化的监测信号, 设置监测信号 A_1 为 $x_c - x_a$ 和 $x_b - x_c$ 中的较小数值, A_2 为 $x'_c - x'_a$ 和 $x'_b - x'_c$ 中的较小数值, 那么 A_1 和 A_2 的模型如下:

$$A_1 = \begin{cases} 2^m \cdot \frac{x_c - x_a}{x_b - x_a}, & (x_c - x_a) < (x_b - x_c) \\ 2^m \cdot \frac{x_b - x_c}{x_b - x_a}, & (x_c - x_a) \geq (x_b - x_c) \end{cases} \quad (2)$$

$$A_2 = \begin{cases} 2^m \cdot \frac{x'_c - x'_a}{x'_b - x'_a}, & (x'_c - x'_a) < (x'_b - x'_c) \\ 2^m \cdot \frac{x'_b - x'_c}{x'_b - x'_a}, & (x'_c - x'_a) \geq (x'_b - x'_c) \end{cases} \quad (3)$$

式中 2^m 是对监测信号的量化数值。

标定光栅旋转一周时,监测信号 A_1 和 A_2 的周期分别为 $x_b - x_a$ 和 $x'_b - x'_a$ 。当标定光栅不存在偏心时, A_1 和 A_2 的周期 $x_b - x_a$ 和 $x'_b - x'_a$ 不会发生变化。因此, A_1 和 A_2 信号之间的相位差保持不变。

3.2 光栅偏心监测原理

当标定光栅偏心度为 e 时,如图 4 所示。

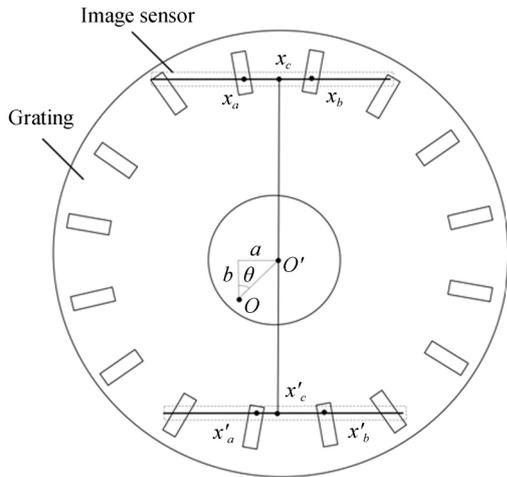


图 4 光栅偏心监测原理

Fig. 4 Principle for grating eccentricity monitoring

存在偏心时,圆光栅的圆心由 O 点偏移到 O' 点,此时设光栅偏心方向与垂直方向的夹角为 θ ,偏心在水平方向产生的偏移量为:

$$a = e \cdot \sin \theta. \quad (4)$$

此时 A_1 和 A_2 的数值为:

$$A'_1 = \begin{cases} 2^m \cdot \frac{x_c - x_a - a}{x_b - x_a}, & (x_c - x_a) < (x_b - x_c) \\ 2^m \cdot \frac{x_b - x_c + a}{x_b - x_a}, & (x_c - x_a) \geq (x_b - x_c) \end{cases}, \quad (5)$$

$$A'_2 = \begin{cases} 2^m \cdot \frac{x'_c - x'_a + a}{x'_b - x'_a}, & (x'_c - x'_a) < (x'_b - x'_c) \\ 2^m \cdot \frac{x'_b - x'_c - a}{x'_b - x'_a}, & (x'_c - x'_a) \geq (x'_b - x'_c) \end{cases}. \quad (6)$$

A'_1 和 A'_2 的相位差发生变化,其变化数为 ΔA 个周期,如式(7)所示:

$$\Delta A = 2a = 2^m \cdot \left(\frac{e \cdot \sin \theta}{x_b - x_a} + \frac{e \cdot \sin \theta}{x'_b - x'_a} \right). \quad (7)$$

由于存在偏移量,监测信号 A'_1 和 A'_2 之间的相位差发生变化。当 $\theta = \pi/2$ 和 $3\pi/2$ 时,相位差

达到最大;当 $\theta = 0$ 和 2π 时,相位差 ΔA 最小为 0。

4 系统设计

根据上述理论设计了监测系统,其原理如图 5 所示。

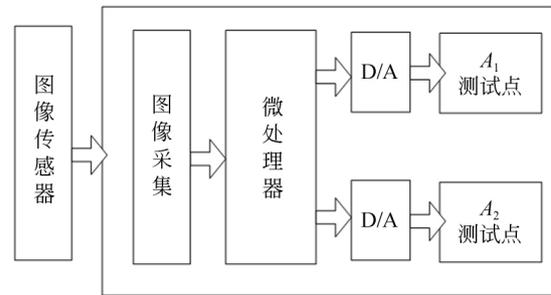


图 5 角位移监测系统原理

Fig. 5 Schematic of angular displacement detection system

线阵图像传感器输出的像素数据被图像采集模块所采集,并送入微处理器中;微处理器对线阵图像传感器采集的数据进行图像识别算法,计算出 A_1 和 A_2 的数值;D/A 转换器负责将 A_1 和 A_2 的数值转化为模拟信号,并通过测试点输出。所设计的系统电路如图 6 所示。

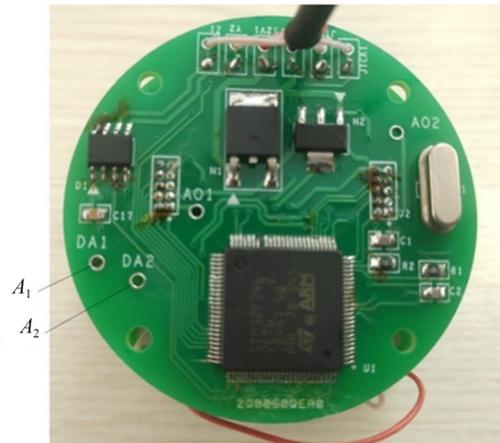


图 6 角位移监测系统电路

Fig. 6 Circuit of angular displacement detection system

监测系统以 STM32F746 为主控芯片设计;线阵图像传感器为某型号高解析度线阵 CCD,其像素为 1×320 pixel,像素尺寸为 $12.7 \mu\text{m}$ 。线阵 CCD 输出的模拟信号经过主控芯片的 A/D 引脚采集,变为数字像素信号。A/D 采集引脚为

STM32F746 芯片的 PA0 和 PA1。D/A 转换器为芯片的 PA4 和 PA5 引脚。工作时, A/D 转换引脚 PA0、PA1 将按照线阵 CCD 的时钟对像素信息进行模数转换, 并存储到 RAM 中; STM32F746 芯片的内核会对存储图像进行计算, 然后通过 PA4 和 PA5 的 D/A 输出, 进而提供监测信号 A_1 和 A_2 。

5 实验

5.1 偏心调节

实验采用中科院长春光机所设计的某型号图像式光电编码器。该编码器所使用的标定光栅直径为 38 mm, 工作时直接将图像传感器贴近标定光栅, 通过图像处理算法实现角位移测量。首先, 人工粗略地将光栅安装在主轴上, 并将设计的监测系统固定在光栅之上。线阵图像传感器尽量接近于标定光栅, 实现投影成像, 如图 7 所示。

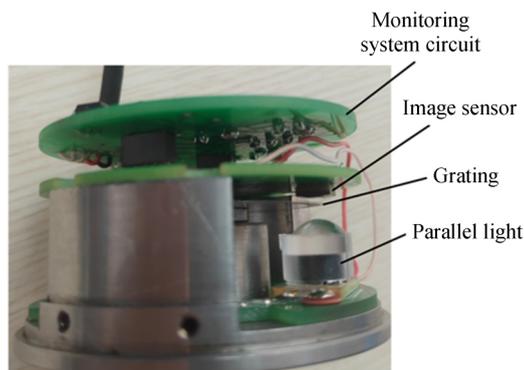


图 7 角位移测量实验装置

Fig. 7 Experiment device for angular measurement

采用示波器观测 A_1 和 A_2 信号, 观察其 $x-y$ 的合成波形。转动主轴, 在圆周内间隔 $\pi/2$ 的 4 个位置进行测量, 以初始测量位置为相位 0 点, 测得四个位置的合成波形如图 8(a)~8(d) 所示。

由于光栅只进行了粗略地安装和标定, 必然存在偏心。从图 8 中的 4 个合成波形可以看出, A_1 和 A_2 之间存在变化的相位差, 并且随着圆光栅的转动, 相位差不断发生变化。

根据合成波形对标定光栅的偏心进行调节。旋转主轴, 使 A_1 和 A_2 的相位差达到最大值, 进而在水平于线阵图像传感器的方向 ($\theta = \pi/2$) 调节标

定光栅的位置。重复多次, 直到 A_1 和 A_2 的相位差保持不变, 此时的合成波形如图 9 所示。

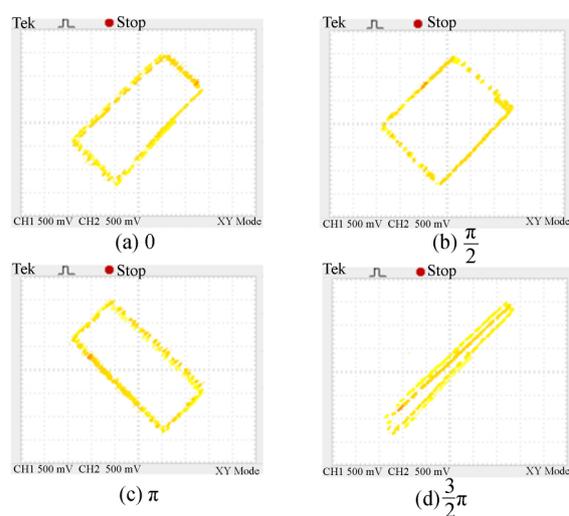


图 8 四个位置处的监测信号波形

Fig. 8 Monitoring signal waveforms at four locations

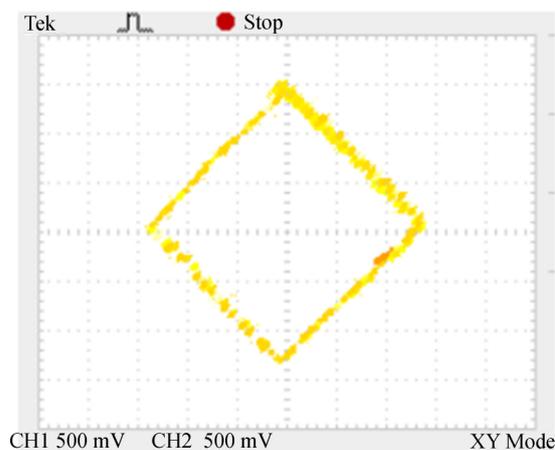


图 9 精确调节后的监测信号

Fig. 9 Monitoring signal after precise adjustment

为验证偏心调节是否精确, 采用电子显微镜对标定光栅进行观测, 旋转主轴一周时, 标定光栅上所有的基准标线都精确地处于同一半径处, 光栅调节较为精确。

5.2 精度测试

经过偏心调整后, 对角位移测量实验装置进行精度测试, 采用 24 多面棱体配合平行光管进行误差测试, 每隔 15° 角进行一次误差采样, 检测结果如表 1 所示。

表 1 测角误差
Tab. 1 Errors of angular measurement

Angle/(°)	Error/(")	Angle/(°)	Error/(")
0	0	195	14.2
15	12.7	210	6.5
30	11.2	225	-12.6
45	-11.2	240	-25.4
60	-11.6	255	-14.6
75	-17.2	270	8.9
90	-15.3	285	17.4
105	-15.6	300	5.4
120	-25.6	315	-14.2
135	-14.1	330	5.6
150	-3.5	345	2.1
165	5.6	360	0
180	8.9	RMS	12.8

经过计算,表 1 中误差的均方差为 12.8"。根据前期研究,偏心引起的误差在圆周内呈现 1 次谐波变化。为分析偏心误差的权重,将圆周内的 0°~360°映射到 0~2π,并采用一次谐波函数对误差数据进行拟合。设拟合函数为: $y = a_0 + a_1 \sin(x + a_2)$, ($x = 0 \sim 2\pi$), 采用最小二乘法对表 1 中的数据进行拟合,得到: $a_0 = -3.397$, $a_1 = -6.671$, $a_2 = 5.895$ 。拟合曲线与误差曲线如图 10 所示。

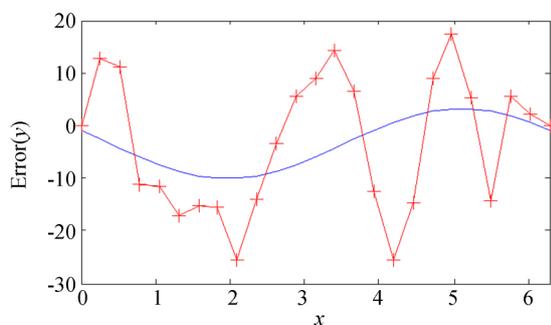


图 10 角位移测试误差曲线

Fig. 10 Error curves for angular measurement

根据图 10 可知,一次谐波误差的幅度为 $a_1 = -6.671$ 。由此表明,采用监测系统进行偏心

调试后,偏心误差的幅度为 $-6.671''$ 。对于直径为 38 mm 的标定光栅,该偏心误差幅度较小,可以满足测量要求。

5.3 对比实验

对偏心调试前系统的精度进行测试。偏心调节前后的误差曲线如图 11 所示。调节前误差均方差为 1017", 调节后误差均方差为 12.8"。由此可知,偏心监测方法的效果明显,调节效果较好。

此外,采用传统方法中的“显微镜调节法”对本文的实验装置进行偏心调节,并测试精度。经过“显微镜调节”和本文的监测系统调节后的误差曲线如图 12 所示。

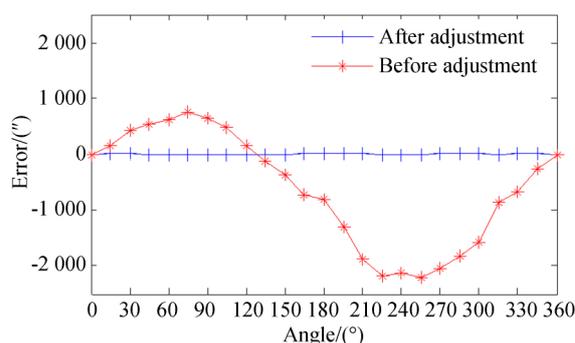


图 11 偏心调节前后的测角误差对比

Fig. 11 Comparison of angular measured errors before and after eccentricity adjustment

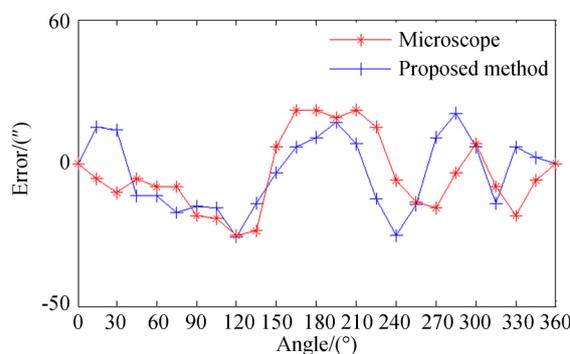


图 12 不同偏心调节方法的测角误差对比

Fig. 12 Comparison of angular errors with different eccentricity adjustment methods

经过计算,采用显微镜调节偏心后的误差均方差为 13.24", 而本文提出的调节方法的均方差为 12.8", 效果更好。

6 结 论

本文提出了一种图像式角位移测量装置的光栅监测系统。首先,建立了基于线阵图像传感器标定光栅偏心度的监测光路;然后,在图像传感器上建立了偏心调试监测信号模型;分析了标定光

栅存在偏心时偏心监测信号的变化;最后,在某型号角位移测量装置上进行了实验,经过调节后测角装置的误差均方差由 $1017''$ 降低到 $12.8''$,验证了系统的实用性。实验表明,采用本文设计的偏心监测系统,能够实现标定光栅的高精度安装调试,并有效提高图像式角位移测量装置的生产效率。

参考文献:

- [1] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003:4-7.
YE SH X. *Optoelectronic Displacement Precision Measurement Technology* [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 吕强, 李文昊, 巴音贺希格, 等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 39-50.
LÜ Q, LI W H, BAYINHEXIGE, *et al.*. Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 39-50. (in Chinese)
- [3] 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.
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)
- [4] 贾兴丹, 万秋华, 于海, 等. 图像式角位移测量技术研究进展与展望[J]. 激光与红外, 2019, 49(6): 650-657.
JIA X D, WAN Q H, YU H, *et al.*. The progress and prospect of angular displacement measurement technology [J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(6): 650-657. (in Chinese)
- [5] BAJIC J S, STUPAR D Z, DAKIC B M, *et al.*. An absolute rotary position sensor based on cylindrical coordinate color space transformation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 213: 27-34.
- [6] KIM J A, KIM J W, KANG C S, *et al.*. Absolute angle measurement using a phase-encoded binary graduated disk [J]. *Measurement*, 2016, 80: 288-293.
- [7] 谈颖皓, 袁波, 孟子博. 基于线阵探测器的单圈绝对轴角编码器[J]. 光子学报, 2011, 40(12): 1771-1775.
TAN Y H, YUAN B, MENG Z B. A single-track absolute angular encoder using the linear detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(12): 1771-1775. (in Chinese)
- [8] 孟宏蕊. 测距仪与电子经纬仪的集成应用及关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
MENG H R. *Study on Integrated Application of Rangefinder and Electronic Theodolite and Key Technologies* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] YUAN P F, HUANG D Q, LEI Z K, *et al.*. An anti-spot, high-precision subdivision algorithm for linear CCD based single-track absolute encoder [J]. *Measurement*, 2019, 137: 143-154.
- [10] YU H, WAN Q H, LU X R, *et al.*. Small-size, high-resolution angular displacement measurement technology based on an imaging detector [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(3): 755-760.
- [11] YU H, JIA X D, WAN Q H, *et al.*. High-resolution angular measurement arithmetic based on pixel interpolations [J]. *Measurement*, 2020, 149: 106948.
- [12] YU H, WAN Q H, LU X R, *et al.*. A robust sub-pixel subdivision algorithm for image-type angular displacement measurement [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 234-238.
- [13] 于海, 万秋华, 赵长海, 等. 图像式光电编码器高分辨力细分算法及误差分析[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 205-214.
YU H, WAN Q H, ZHAO CH H, *et al.*. A high-resolution subdivision algorithm for photographic encoders and its error analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 205-214. (in Chinese)
- [14] 朱帆, 吴易明, 刘长春. 四读头法消除码盘偏心和振动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 146-152.
ZHU F, WU Y M, LIU CH CH. Eliminating in-

fluence of grating encoder's eccentricity and vibration to Moiré fringes signal by four reading heads [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 146-152. (in Chinese)

[15] YU H, WAN Q H, YING S, *et al.*. High precision angular measurement via dual imaging detectors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(17): 7308-7312.

作者简介:



王亚洲(1990—),男,山东枣庄人,硕士,工程师,2016年于中国科学院长春光机所获得硕士学位,主要从事卫星测试设备的研发工作。E-mail: wangyazhou791@163.com



于海(1987—),男,博士,副研究员,2009年于东北电力大学获得学士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电位移精密测量技术的研究。E-mail: yuhai5158@163.com