

### 一种自适应安装的高精度图像式角位移测量装置

于海 万秋华 孙莹 卢新然 贾兴丹

#### A high precision image angular displacement measurement device with self-adaptive installation

YU Hai, WAN Qiu-hua, SUN Ying, LU Xin-ran, JIA Xing-dan

引用本文:

于海, 万秋华, 孙莹, 卢新然, 贾兴丹. 一种自适应安装的高精度图像式角位移测量装置[J]. *中国光学*, 2020, 13(3): 510-516. doi: 10.3788/CO.2019-0107

YU Hai, WAN Qiu-hua, SUN Ying, LU Xin-ran, JIA Xing-dan. A high precision image angular displacement measurement device with self-adaptive installation[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 510-516. doi: 10.3788/CO.2019-0107

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/CO.2019-0107>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于小波神经网络的光纤陀螺误差补偿方法

A fiber optic gyro error compensation method based on wavelet neural network

中国光学. 2018, 11(6): 1024 <https://doi.org/10.3788/CO.20181106.1024>

#### Seya-Namioka单色仪中光栅曲率半径误差的影响及补偿

Effect and compensate of grating curvature radius error in Seya-Namioka monochromator

中国光学. 2018, 11(4): 623 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0623>

#### 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统

Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating

中国光学. 2017, 10(1): 39 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0039>

#### 多尺度窗口的自适应透射率修复交通图像去雾方法

A traffic image dehaze method based on adaptive transmittance estimation with multi-scale window

中国光学. 2019, 12(6): 1311 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1311>

#### 光栅精密位移测量技术发展综述

Development of grating-based precise displacement measurement technology

中国光学. 2019, 12(4): 741 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0741>

#### 动态测量的高光谱图像压缩感知

Hyperspectral image compression sensing based on dynamic measurement

中国光学. 2018, 11(4): 550 <https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0550>

# 一种自适应安装的高精度图像式角位移测量装置

于海<sup>1\*</sup>, 万秋华<sup>1</sup>, 孙莹<sup>1</sup>, 卢新然<sup>1</sup>, 贾兴丹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**采用图像探测器的角位移测量技术可实现高精度高分辨力角位移测量。为提高角位移测量装置的鲁棒性, 本文设计了一种自适应安装的高精度图像式角位移测量装置。其装调过程非常简便, 且可以保证在标定光栅存在偏心时具有高分辨力和高精度测量输出。首先, 提出了基于双线阵图像传感器的测角装置设计原理, 并设计了单圈绝对式标定光栅。然后, 采用基于质心算法的高分辨力细分算法进行细分, 并采用双线阵图像传感器对测角误差进行误差补偿。最后, 设计实验装置测试自适应安装的性能。实验结果表明, 当标定光栅的偏心度在 $\pm 1$  mm以内时, 所设计装置可以实现高精度和高分辨力的角位移测量。本文所设计的装置可以在标定光栅存在 $\pm 1$  mm的安装偏心时保证输出精度, 为小型角位移测量装置适应性的提高给出了解决方案。

**关键词:**角位移测量; 误差补偿; 双图像探测器; 自适应安装

中图分类号: TP212 文献标志码: A doi: 10.3788/CO.2019-0107

## A high precision image angular displacement measurement device with self-adaptive installation

YU Hai<sup>1\*</sup>, WAN Qiu-hua<sup>1</sup>, SUN Ying<sup>1</sup>, LU Xin-ran<sup>1</sup>, JIA Xing-dan<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: yuhai@ciomp.ac.cn*

**Abstract:** The angular displacement measurement technology based on image detector is a hot research to realize high-precision and high-resolution angular displacement measurement. In order to improve the robustness of the angular displacement measuring devices, a high precision image displacement measurement device with self-adaptive installation techniques is designed in this paper. The installation and adjustment processes are very simple, and high resolution and high precision measurement output can be guaranteed in

收稿日期: 2019-05-17; 修订日期: 2019-07-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51605465); 吉林省科技发展计划资助项目(No. 20180520184JH)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51605465); Science and Technology Development Programme of Jilin Province (No. 20180520184JH)

the presence of eccentricity in the calibration grating. Firstly, the angle measurement device using dual linear imaging sensors is proposed and a single-ring absolute grating is designed. Then, a high-resolution subdivision algorithm based on a centroid algorithm is used to subdivide the image, and dual linear image sensors are used to compensate for the angle measurement error. Finally, an experimental device is designed to test the performance of the adaptive installation. Experiments show that when the eccentricity of the grating is within  $\pm 1$  mm, the designed device can achieve highly precise angular displacement measurements with high resolution. The device designed in this paper guarantee the output accuracy when the grating has an installation eccentricity of  $\pm 1$  mm, which lays a foundation for improving the adaptability of small angular displacement measuring devices.

**Key words:** angular displacement measurement; error compensation; dual image sensors; self-adaptive installation

## 1 引言

高精角位移测量技术是一种通过光电转换、数字化处理等方式将主轴转动角度转换为数字角度的技术。因其具有高分辨力、高精度、易于与计算机连接等优点,被广泛应用于各行各业<sup>[1-3]</sup>。目前对于角位移测量技术的研究,主要集中于小型化、高分辨力和高精度等方面。传统角位移测量技术大多采用莫尔条纹光电信号进行角位移细分,该方法所能实现的测角分辨力和精度有限,而且在使用小尺寸光栅码盘时很难达到较高的测量分辨力和精度。

随着数字图像处理技术的发展,图像式角位移测量技术已经成为热门研究课题。图像式角位移测量是一种采用图像传感器对标定光栅上的基准标线进行识别,通过算法测量转角位移的技术。由于采用像素灰度值代替传统莫尔条纹光电信号,在小体积内更容易实现高分辨力和高精度的测量。查阅相关文献,美国、日本、中国等国家相继在图像式角位移测量技术的研究中取得了一定的成果<sup>[4-11]</sup>。在前期研究中,本文作者提出了一种线阵图像传感器的角位移测量方法<sup>[12]</sup>。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,具有较传统测量技术更高的测量性能。由于采用了线阵图像传感器,极大地提高了图像式角位移测量的频响;同时,根据图像识别的优势,减小了传统莫尔条纹测

量方法中由于光电信号偏离理想状态而带来的误差<sup>[13]</sup>。

在前期研究中,作者经过总结归纳出以下几点问题:

(1)采用成像透镜放大成像虽然有利于实现高分辨力,但是受安装复杂、温度变化、振动冲击、成像离焦等因素的影响,制约着图像式角位移测量装置的生产应用;

(2)标定光栅偏心度的精确调节,直接影响着角位移测量的精度和生产速度。

为精简装调复杂度,提高角位移测量装置的容错性能,本文在研制图像式角位移测量装置的基础上,设计了一种基于双图像探测器的自适应角位移测量装置。首先,提出了基于光栅投影成像的角位移测量模型,并采用M序列编码方式设计了标定光栅。然后,采用基于质心算法的高分辨力细分算法实现角位移细分,并基于双图像传感器实现自适应误差补偿。最后,设计实验装置进行测试。该装置不需要成像透镜,其结构简单、测量精度高,可以满足高精度角位移测量输出,为批量生产角位移产品提供了技术基础。

## 2 自适应的角位移测量原理

为实现无透镜成像,本文采用光栅投影的方法实现图像采集。采用平行光源照射标定光栅,将光栅的投影映射到图像传感器上,其光路原理如图1所示。

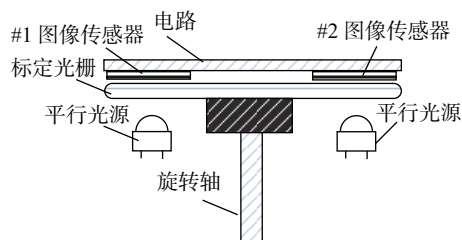


图 1 测量光路原理图

Fig. 1 Principle diagram of measuring optical path

图 1 中测量光路包括旋转轴、标定光栅、平行光源、#1 图像传感器、#2 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实现成像; 处理电路接收到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。

为实现成像, 需保证图像传感器与标定光栅的距离较小(本文设计为 0.2 mm)。同时, 为实现高精度自适应角位移测量, 在#1 图像传感器的对径位置加入#2 图像传感器, 两图像传感器以电路板为中心对称分布, 夹角为 180°。

### 2.1 标定光栅设计

为适应线阵图像传感器, 设计了单圈绝对式标定光栅。图 1 中的标定光栅包含有 256 条基准标线。为实现编码, 所刻划的基准标线分为“宽基准标线”和“窄基准标线”, 分别代表编码元“0”和“1”。编码元采用  $M$  序列伪随机码的编码方式, 即每一个编码元都是由前 8 个编码元之间的异或计算得到。设第  $i$  个码元为  $m_i$ , 那么  $m_i$  可以通过式 (1) 进行计算:

$$m_i = m_{i-1} \oplus m_{i-2} \oplus m_{i-3}, \quad (1)$$

式中, “ $\oplus$ ”表示异或运算。设初始值  $\{m_1, m_2, \dots, m_8\} = \{0, 0, \dots, 0, 1\}$ , 通过式 (1) 共得到  $2^8$  个编码元。令相邻的 8 个码元  $\{m_i, m_{i+1}, \dots, m_{i+7}\}$  为一组编码值, 其对应的译码值就是  $i$ 。将这些编码元对应的“宽、窄基准标线”按照等间隔等半径位置刻划到圆光栅上, 形成了 8 位标定光栅。

某组编码元的原理图, 如图 2 所示。图 2 中包含有“宽”、“窄”基准标线的若干个编码元, 图像传感器识别区域的 8 个编码元组成的编码值为  $\{1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0\}$ 。通过查表, 就可以得到译码

值。当标定光栅转动时, 每移动一位编码元, 就可以形成一组新的编码值, 进而实现绝对式编码。

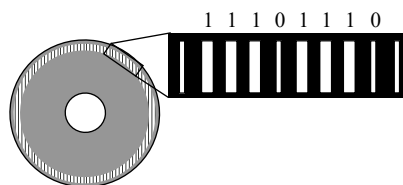


图 2 单圈编码原理图

Fig. 2 Coding principle of single ring

### 2.2 自适应高分辨力角位移细分算法

为实现高分辨力的角位移测量, 本文采用一种基于质心的角位移细分算法, 即在相邻的基准标线之间进一步实现角位移细分计算, 实现较译码计算更高的角位移测量。图 3 为标定光栅细分区域示意图。

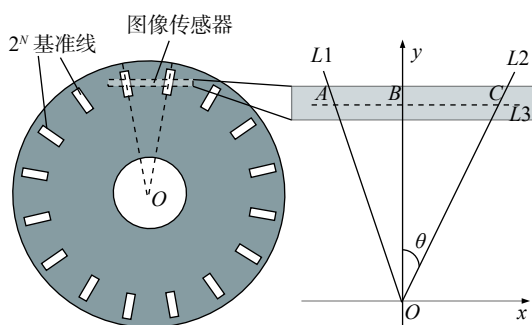


图 3 角位移细分原理

Fig. 3 Angle subdivision principle

图 3 中,  $O$  为光栅圆心,  $y$  轴为预设的图像传感器的中心位置,  $x$  轴为像素位置坐标轴。设相邻的两条基准刻线分别为  $L_1$  和  $L_2$ ,  $A$  和  $C$  分别是  $L_1$  和  $L_2$  刻线的质心。以光栅圆心为原点建立坐标系。本设计中, 标定光栅圆周内包含有 256 条基准标线, 相邻的基准标线之间的夹角较小, 根据小角度近似,  $\angle AOC \approx AC$ ,  $\angle BOC \approx BC$ 。那么图中角度  $\theta$  与两基准标线夹角的比值可以计算为<sup>[14]</sup>:

$$\theta = 2^m \cdot \frac{BC}{AC}, \quad (2)$$

式中,  $2^m$  是角位移测量时的细分量化值。

$A$  点和  $C$  点的质心计算方法, 如式 (3) 所示。

$$A(C) = \frac{\sum_{j \in N} j \cdot p_j}{\sum_{j \in N} p_j}, \quad (3)$$

式中,  $N$  为某一基准标线的像素范围,  $j$  为像素的位置,  $p_j$  为第  $j$  个像素点的灰度值。由于质心算法得到的是亚像素级结果, 因此, 将式 (3) 代入式 (2) 就可以得到高分辨力的角位移细分结果。同时, 所能实现的细分倍数越大 ( $2^m$  的值), 实现的测量分辨率越高。

### 2.3 自适应角度识别

由于采用的是线阵图像传感器, 为匹配 256 线的标定光栅, 需要保证图像传感器随时能够采集到 8 个编码元的灰度值图像。因此, 在角度识别时, 首先将识别 8 位编码元的“宽”和“窄”, 得到当前的一组编码值。然后通过查表, 得到该编码值的译码值。

在实现译码后, 对 8 个基准标线中间的两个标线进行细分运算, 得到细分值。将译码值与细分值连在一起 (译码值为高 8 位, 细分值为低  $m$  位), 实现高分辨力的角位移测量。

由于该角度算法只需要图像传感器对着光栅投影就可以实现角度计算, 进而省去了传统角位移测量装置中的“波形调节”、“读数头位置调节”等步骤, 实现了自适应安装。

### 2.4 自适应误差补偿

为实现标定光栅安装偏心度的自适应调整, 消除标定光栅安装偏心的影响。在 #1 图像传感器的对径位置增加了 #2 图像传感器, 其安装位置如图 4 所示。

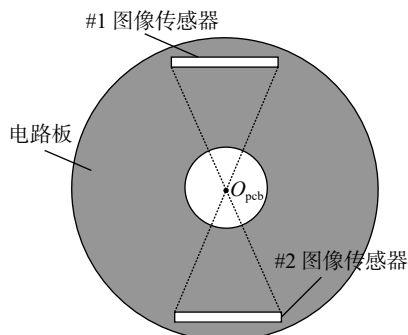


图 4 图像传感器安装位置原理图

Fig. 4 Principle diagram of image sensor installation position

图 4 中两图像传感器以电路板圆心  $O_{pcb}$  为中心旋转对称。#2 图像传感器所进行的运算与 #1 传感器的运算完全相同。设 #1 传感器计算得到的角度值为  $B_1$ , #2 图像传感器计算得到的角度值为  $B_2$ , 那么根据前期研究可知, 当存在偏心误差  $\alpha$  时, #1 图像传感器的角度值为  $B_1 = \alpha_0 + \alpha$ , #2 图像传感器的角度值将变为  $B_2 = \alpha_0 - \alpha + 180^\circ$  ( $\alpha_0$  为真实角度值)。因此, 存在偏心时的真实角度值可以通过式 (4) 进行计算,

$$\alpha_0 = \frac{B_1 + (B_2 - 180^\circ)}{2}. \quad (4)$$

## 3 鲁棒性能分析

### 3.1 标定光栅存在偏心时的鲁棒性能

当标定光栅存在安装偏心时, 随着标定光栅的转动, 只要光栅上的基准标线能够投影到图像传感器上, 就可以实现角位移测量。

同时, 本文在使用双图像传感器时, #1 和 #2 图像传感器各自计算出一组角位移数据。这样当偏心误差较大时也能实现比较接近真实值的角度测量, 实现较大范围的补偿。

因此, 为适应更大的偏心度, 设计上使图像传感器的有效感光面积大于标定光栅上 8 条基准标线的范围; 同时增加基准标线的长度, 以满足一般情况下的偏心范围。

### 3.2 读数头安装位置的鲁棒性能

本文的设计中, 双图像传感器被固定在圆形 PCB 电路板中。PCB 电路板靠螺丝定位孔固定, 使 PCB 的圆心  $O_{pcb}$  与旋转中心尽量重合。采用自适应的角位移测量算法时, 只要保证光栅的投影能够映射到图像传感器上, 就可以实现角位移测量及有效输出。螺丝定位精度对误差补偿的影响较小, 可满足设计要求。

## 4 实验

所设计的角位移测量装置实物图如图 5 所示。

图 5 中, 线阵图像传感器的像元大小为  $12.7 \mu\text{m}$ , 像素范围为  $1 \text{ pixel} \times 320 \text{ pixel}$ , 两线阵图像传感器的直线距离为  $35 \text{ mm}$ ; 所设计的标定光

栅直径为  $\Phi 38\text{ mm}$ , 角位移测量装置的外径为  $\Phi 50\text{ mm}$ ; 平行光源由  $460\text{ nm}$  波长的蓝光 LED 点光源配合凸透镜产生; 所使用的轴承为日本进口的某型号的高性能轴承。

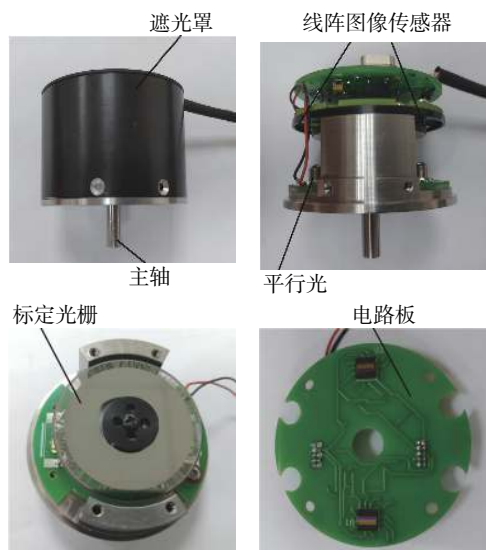


图 5 角位移测量装置

Fig. 5 Angle measurement device

#### 4.1 自适应角度输出测试

为验证所提出的角位移测量算法的自适应性能, 使标定光栅与主轴存在  $\pm 1\text{ mm}$  的偏心(对于本设备, 偏心超过  $1\text{ mm}$  将超出图像识别范围)。

令式 (2) 中的  $2^m=2^{13}$ , 以实现 13 倍的角位移细分。因此, 所设计的角位移测量装置输出角度为 21 位, 其分辨力为  $0.62''$ 。旋转角位移测量装置的主轴, 观测输出角度值, 可见其输出数值变化有序; 主轴静止时, 角度值稳定不变。可见, 本实验装置 21 位输出代码有效。

采用文献 [15] 和 [16] 中设计的“误码检测装置”对本文输出的角度信息进行误差检测。根据上述文献可知, 当旋转主轴时, 检测曲线出现“上下跳变”即可判断出现“误码”。实验时, 缓慢旋转主轴, “误码检测装置”中的曲线, 如图 6 所示。

经过多次测试, “检测曲线”中均未出现“上下跳变”情况, 表明本文设计的角位移测量装置输出正确, 圆周内无“误码”。

实验表明, 本文设计的角位移测量装置输出正确, 其分辨力可以达到  $0.62''$ (21 位)。



图 6 文献 [15] 装置的分辨力检测曲线

Fig. 6 Detection curve of the device in reference [15]

#### 4.2 自适应误差补偿测试

当标定光栅的偏心度为  $\pm 1\text{ mm}$  时, 安装上带有双图像传感器的 PCB 电路板, 采用高精度角度基准(精度为  $1''$ , 分辨力为 24 位)对该装置进行精度测试, 测试原理如图 7 所示。

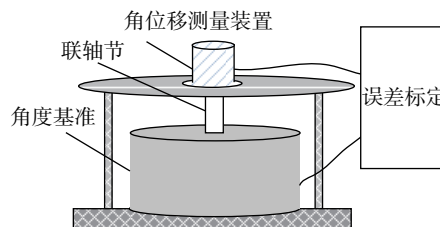


图 7 精度测试原理

Fig. 7 Principle of precision test

测试时, 将所设计的角位移测量装置与角度基准通过联轴节同轴连接, 并在被测装置的“零位”清零。然后, 被测装置每转动  $15^\circ$  时, 记录下角度基准的数值, 并将基准角度与被测角度做差值, 得到此位置的测角误差。测试得到的误差结果如表 1 所示。

表 1 标定误差结果 ( $''$ )

Tab. 1 Results of calibration error ( $''$ )

Angles/ $^\circ$	Errors	Angles/ $^\circ$	Errors	Angles/ $^\circ$	Errors
0	0	120	-28.1	240	-25.1
15	13.5	135	0.8	255	-2.1
30	6.9	150	-1.5	270	-11.2
45	-21.4	165	-2.0	285	12.3
60	-26.6	180	-6.1	300	-11.3
75	-17.2	195	5.6	315	16
90	-19.7	210	0.8	330	25.1
105	-12.2	225	-22	345	32.7

计算出表 1 中误差的标准差为  $\sigma=16.42''$ 。

为验证自适应误差补偿的有效性,只采用图5中的单侧图像传感器进行角位移测量。在仅存在 $\pm 1$  mm 偏心的情况下,只采用单头进行测量的误差对比结果如图8所示。

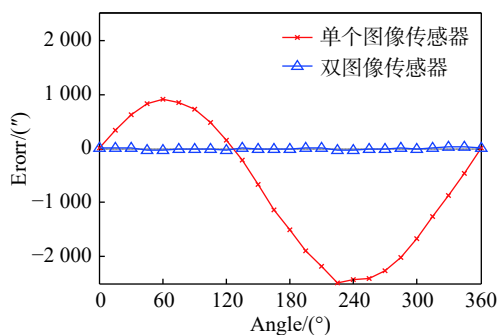


图8 单双图像传感器的误差对比

Fig. 8 Comparison of measurement error by single- and dual- sensors

从图8可以看出,受偏心影响,单读数头的角位移测量结果存在的误差较大。其误差绝对值最大达到了2403",标准差为 $\sigma=1201.18$ ",而本文设计装置采用的双读数头方法可以有效实现自适应误差补偿。

#### 4.3 自适应安装测试

为验证自适应性能,将该角位移测量装置的标定光栅拆下,并重新“随机粗略”地安装光栅,即肉眼对准标定光栅,通过多次调整,足可以使对准光栅偏心度在 $\pm 1$  mm 以内。

分别对标定光栅进行了3次重新安装,每一次安装后都观测角度输出。观测发现,其角度输出均未出现“误码”。

每一次完成安装后均进行一次误差测试,

#### 参考文献:

- [1] 董莉莉,熊经武,万秋华.光电轴角编码器的发展动态[J].光学精密工程,2000,8(2):198-202.  
DONG L L, XIONG J W, WAN Q H. Development of photoelectric rotary encoders[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8(2): 198-202. (in Chinese)
- [2] 叶盛祥.光电位移精密测量技术[M].乌鲁木齐:新疆科技卫生出版社,2003.  
YE SH X. *Optoelectronic Displacement Precision Measurement Technology*[M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 熊经武,万秋华.二十三位绝对式光电轴角编码器[J].光学机械,1990(2):52-60.  
XIONG J W, WAN Q H. A 23-bit absolute photo-electric rotary encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1990(2): 52-60. (in Chinese)

3次的误差曲线如图9所示。其标准差 $\sigma$ 分别为16.87",15.15",15.35"。

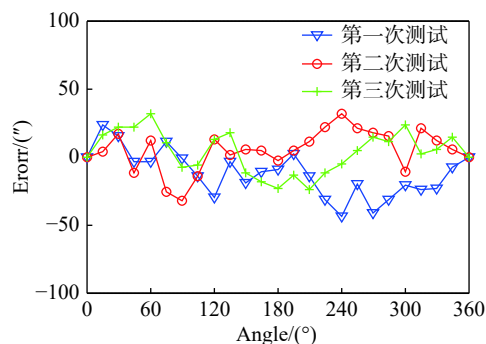


图9 实验装置的3次检测结果

Fig. 9 Results of three tests on experimental equipment

由图9可以看出,3次误差检测结果的标准差都在17"以内。因此,所设计的角位移测量装置,可以在存在偏心的状态下,保证较好的精度输出。

## 5 结 论

本文设计了一种基于双图像传感器的高精度自适应角位移测量装置。其对于安装误差的鲁棒性能较强,能够适应 $\pm 1$  mm 以内的偏心安装公差,并实现具有较高分辨力和精度的角位移测量。

本文首先提出了基于双图像传感器的角位移测量机理;然后,对其鲁棒性能进行了分析;最后,对该装置进行了分辨力和精度测试。实验结果表明,在标定光栅存在 $\pm 1$  mm 以内偏心的情况下,该装置仍能保证较高的分辨力和精度输出。

- [4] LEVITON D B, FREY B. Ultra-high resolution, absolute position sensors for cryostatic applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4850: 776-787.
- [5] LEVITON D B, GARZA M S. Recent advances and applications of NASA's new, ultrahigh-sensitivity absolute optical pattern recognition encoders[J]. *Proceedings of SPIE*, 2000, 4091: 375-384.
- [6] BAJIĆ J S, STUPAR D Z, DAKIĆ 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.
- [7] SUGIYAMA Y, MATSUI Y, TOYODA H, *et al.*. A 3.2 kHz, 14-bit optical absolute rotary encoder with a CMOS profile sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008, 8(8): 1430-1436.
- [8] TRESANCHEZ M, PALLEJÀ T, TEIXIDÓ M, *et al.*. Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 157(1): 161-167.
- [9] 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.
- [10] WANG Y N, YAUN B, NI X X. Subdivision technique of absolute angular encoder using array detector[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2011, 45(2): 370-374.
- [11] 齐荔荔, 万秋华. 图像式光电编码器的测角技术及其硬件实现[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0412001.  
QI L L, WAN Q H. Angle-measurement technology of an optical pattern rotary encoder and its hardware implementation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0412001. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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): 0312001.  
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): 0312001. (in Chinese)
- [15] 赵长海, 万秋华, 孙莹. 光电轴角编码器的误码检测系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 26(5): 463-468.  
ZHAO CH H, WAN Q H, SUN Y. Code error detection system for photoelectric shaft encoder[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(5): 463-468. (in Chinese)
- [16] 于海, 万秋华, 梁立辉, 等. 光电编码器的动态误码检测系统[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 0917001.  
YU H, WAN Q H, LIANG L H, *et al.*. Dynamic code error detection system of photoelectric encoder[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0917001. (in Chinese)

#### 作者简介:



于海(1987—),男,吉林敦化人,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机械电子工程专业获得工学博士学位,目前主要从事光电位移精密测量技术的研究。E-mail: yuhai@ciomp.ac.cn