

文章编号 1004-924X(2019)01-0051-07

## 基于后验误差拟合的角位移测量误差补偿

于海\*, 万秋华, 赵长海, 卢新然, 杜颖财

(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:**在航天、军事、工业这些对器件的体积有着严格要求的领域,光电编码器不仅要求减小外径尺寸和重量,更要提高其测量精度。本文以光电编码器误差补偿方法为研究对象,基于后验误差拟合方法确定误差模型参数,从而实现对小电编码器深度误差补偿。分析了影响光电编码器测角误差的主要因素,建立了长周期误差和短周期误差模型。然后,采用后验误差拟合算法实现了对误差模型参数的确定,提出误差补偿算法;最后,对某一小型光电编码器进行实验,验证了所提出误差补偿算法的性能。某型号光电编码器补偿前的精度为 22.48",补偿后的精度为 5.82"。实验表明,采用后验误差补偿方法可以不考虑误差影响因素的大小,直接对编码器进行误差补偿,具有效率高、补偿准确等优点,极大地提高了批量生产时光电编码器产品的精度。

**关键词:**光电编码器;后验误差拟合;误差补偿;长周期误差;短周期误差

**中图分类号:**TP212.12;TN762 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20192701.0051

## Error-compensation of angular displacement measurement based on posteriori error fitting

YU Hai\*, WAN Qiu-hua, ZHAO Chang-hai, LU Xin-ran, DU Ying-cai

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

\* Corresponding author, E-mail: yuhai5158@163.com

**Abstract:** In the aerospace, military, and industrial fields, which have strict requirements on the volumes of devices, photoelectric encoders require not only a reduction in the size and weight of the outer diameter, but also improvements in the measurement accuracy. In this study, an error compensation method for photoelectric encoders was investigated. The error model parameters were determined based on a posteriori error-fitting method, and then depth error compensation was performed for a small photoelectric encoder. First, the main factors that affect the angle measurement error of the photoelectric encoder were analyzed, and the long-and short-period error models were established. Then, a posteriori error-fitting error compensation algorithm was proposed. Finally, a small photoelectric encoder was tested to verify the performance of the proposed error compensation algorithm. The test results demonstrate that the proposed posteriori error-fitting compensation method can significantly reduce the angle measurement error of the photoelectric encoder. We utilized an encoder to

收稿日期:2018-03-19;修订日期:2018-05-07.

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

verify this method. The accuracy before compensation is  $22.48''$ , and that after compensation is  $5.82''$ . This approach employs a posteriori error compensation method, which can directly compensate the encoder error without considering the sizes of the error factors, and possesses the advantages of high efficiency and accurate compensation. The product precision is considerably improved when the photoelectric encoder is mass produced.

**Key words:** photoelectric encoder; posteriori error fitting; error-compensation; long period error; short period error

## 1 引言

光电编码器是一种广泛应用于航空航天、工业自动化、高精度闭环调速系统等领域的转角测量装置<sup>[1-2]</sup>。在航天、军事、工业这些对器件的体积、重量有着严格要求的领域,光电编码器不仅要减小外径尺寸和重量,更要提高分辨率和精度。在缩小码盘的同时,提高光电编码器的分辨率和测角精度成为目前的研究热门<sup>[3-6]</sup>。

光电编码器所使用的光栅码盘尺寸是限制光电编码器测角精度的主要因素。为提高测角精度,传统光电编码器需要加大码盘尺寸和增加编码器体积。近几年来,国内外相继在高精度编码器的研究上取得了一定的进展。德国 Heidenhain 公司的绝对式编码器的精度可达  $0.036''$ <sup>[8]</sup>。美国 Goddard 宇航中心 2000 年研制成功的采用光学图像识别与处理技术的超高分辨力绝对式编码器<sup>[9]</sup>。成都光电所 1996 年研制的 25 位绝对式光电轴角编码器,精度可达  $0.71''$ <sup>[10]</sup>。长春光机所在高精度、高分辨力光电轴角编码器的研制中,采用 12 位 A/D 转换器,软件、硬件相结合,实现莫尔条纹 8 192 细分,精度达到  $0.51''$ <sup>[11]</sup>。这些成果都是在加大码盘尺寸的基础上实现的。

为实现小型光电编码器的高精度角位移测量,需要研究误差补偿方法。针对光电编码器的误差补偿,美国天文台提出了自适应周期误差补偿方法<sup>[12]</sup>;新加坡 K. K. Tan 等人提出利用径向基函数在线校正编码器信号的方法<sup>[13]</sup>;加拿大 X. D. Lu 等人提出了用于实现编码器自动校正的 TDR (Time-measurement Dynamic Reversal) 法<sup>[14]</sup>;日本产业技术综合研究所提出了 EDA (Equal-Division-Averaged) 编码器自校正方法<sup>[15]</sup>。

根据前期研究可知,光电编码器的误差分为

短周期误差和长周期误差。近几年来,在短周期误差补偿方面,天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室提出对信号中存在的非正交误差、不等幅误差及直流偏移误差进行修正的方法<sup>[16]</sup>;华中科技大学提出对信号相位差进行误差补偿的方法<sup>[17]</sup>;合肥工业大学费业泰等人通过提高对信号的细分算法进行误差补偿<sup>[18]</sup>;长春光机所洪喜等人提出通过对编码器角度误差的频谱分析,采用几个不同频率的正弦函数拟合误差曲线实现补偿的方法<sup>[19]</sup>。目前,国内外对短周期误差补偿技术已有一定的研究基础,但是大多停留在理论研究阶段,距离实际应用还有一段距离。

此外,国内对编码器长周期误差的修正多采用增加读数头的方法。如长春光机所杨进堂等人采用 10 个读数头来修正角度基准中的长周期误差<sup>[20]</sup>;西安光机所朱帆等人提出采用四读数头来消除码盘偏心和振动对莫尔条纹精度测量的影响<sup>[21]</sup>。不过,多读数头法增加了制造成本和复杂度,不适合低成本小型化的编码器产品。

本文以光电编码器误差补偿方法为研究对象,基于后验误差拟合方法确定误差模型参数,进而实现对小型光电编码器的深度误差补偿。该误差补偿方法性能稳定,大幅减小了光电编码器的测角误差。

## 2 光电编码器误差模型建立

### 2.1 工作原理

光电编码器的工作原理如图 1 所示,光源照射到标定光栅码盘后,透过指示光栅进入光电转换模块,通过对光信号的处理计算实现角度识别和角度细分。

光栅码盘上刻划用于角度识别的刻线,其中用于角度细分的是  $h$  周期的等间距精码刻线。根

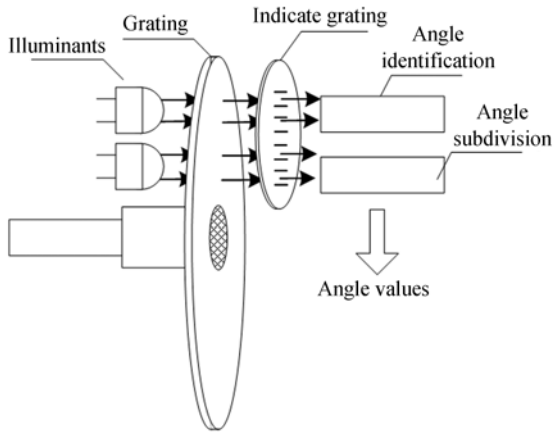


图 1 光电编码器的工作原理

Fig. 1 Principle of photoelectric encoder

据前期工作,光电编码器的角位移测量误差主要包括长周期误差和短周期误差。长周期误差是由于光栅码盘的偏心误差引起的,短周期误差是由于角度细分引起的。

### 2.2 长周期误差模型

根据前期研究,光电编码器的长周期在圆周内(360°)近似为 1 次正弦谐波,短周期误差近似为多次正弦谐波的叠加<sup>[22-23]</sup>。设  $\theta$  为光电编码器输出的角度值,那么在圆周内长周期误差可以表示为:

$$E_1(\theta) = A \cdot \sin\left[\frac{\pi}{180} \cdot \theta + \varphi\right], \quad (1)$$

其中:  $E_1$  为长周期误差,  $A$  为长周期误差的波动幅度,  $\varphi$  为长周期误差模型的相位。式(1)中长周期误差为影响光电编码器的主要误差。对于每个被标定编码器,需要分别确定其长周期误差的系数集合  $\{A, \varphi\}$ , 才能确定其长周期误差模型。

### 2.3 短周期误差模型

短周期误差发生在精码刻线周期内。在圆周内,光栅码盘上刻划有  $h$  对精码码道,那么每个精码周期上的短周期误差变化趋势是一样的。

为方便建立模型,将每个精码刻线周期映射到  $2\pi$  范围内,设  $\alpha$  为映射后的弧度值,则有:

$$\alpha = 2\pi \cdot \left[ \frac{\theta}{360/h} - N \right], \quad (2)$$

式中:  $N$  表示从编码器“零”位到  $\theta$  角度处的精码周期数量。一般情况下,  $\alpha$  与角度细分数相对应。

在精码周期范围内,短周期误差由多次谐波

组成,其误差模型为:

$$E_2(\alpha) = B_1 \sin(\alpha + \beta_1) + B_2 \sin(2\alpha + \beta_2) + B_3 \sin(3\alpha + \beta_3) + \dots, \quad (3)$$

其中:  $B_1, B_2, B_3$  分别为 1 次、2 次、3 次误差幅值,  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  为相位。为确定短周期误差的模型,所需要确定的参数集为  $\{B_1, B_2, B_3, \dots, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots\}$ 。

## 3 基于后验拟合的误差模型参数确定

后验拟合就是不需要知道光电编码器误差影响因素大小,直接采用算法确定其模型参数。为确定式(1)与式(3)中的参数集合,本文采用高精度角度基准对被测光电编码器进行有限点的误差标定。标定原理如图 2 所示。

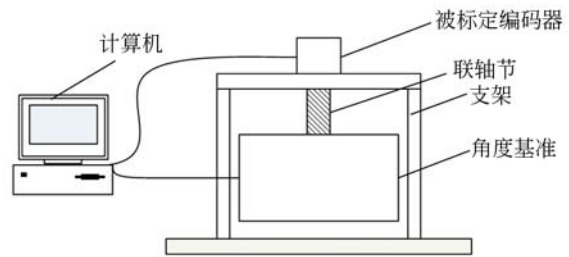


图 2 后验标定原理图

Fig. 2 Principle of posteriori calibration

被标定编码器通过弹性联轴节与角度基准同轴连接;计算机通过比较角度基准与被标定编码器输出角度的差值,得到被标定编码器的测量误差。角度基准的分辨力和精度高于被标定编码器 2 倍以上。为实现精确的误差标定,本文拟采用精度优于  $2''$  的角度基准。同时,为满足采样定理,误差采样点数应该大于误差模型变化频率的 2 倍。

在确定长周期误差模型参数时,在圆周内均匀采集  $n$  个误差采样点  $f_1(i)$ ,采用最小二乘法对式(1)进行拟合,取采样点与误差模型平方差的最小值,得到:

$$F_{\min} = \sum_{i=1}^n \left[ E_1\left(\frac{2\pi \cdot i}{n}\right) - f_1(i) \right]^2. \quad (4)$$

当式(4)中  $F$  值达到最小时,即可得到需要确定的参数  $\{A, \varphi\}$ 。为此,取  $F$  对  $A$  和  $\varphi$  的偏导数,并令其值等于零,得到:

$$\frac{\partial F}{\partial A} = 2 \sum_{i=1}^n \left[ E_1 \left( 2\pi \cdot \frac{i}{n} \right) - f_1(i) \right] \cdot \sin \left( \frac{2\pi}{n} \cdot i + \varphi \right) = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \varphi} = 2 \sum_{i=1}^n \left[ E_1 \left( 2\pi \cdot \frac{i}{n} \right) - f_1(i) \right] \cdot \text{Acos} \left( \frac{2\pi}{n} \cdot i + \varphi \right) = 0. \quad (6)$$

通过解式(5)和式(6)的方程组,即可得到系数解  $\{A, \varphi\}$ 。

在确定短周期误差模型参数时,需要在精确周期范围内采集  $m$  个误差采样点  $f_2(i)$ 。然后采用最小二乘法对式(3)进行拟合,得到:

$$G_{\min} = \sum_{i=1}^m \left[ E_2 \left( 2\pi \cdot \frac{i}{m} \right) - f_2(i) \right]^2, \quad (7)$$

式中  $E_2 \left( 2\pi \cdot \frac{i}{m} \right)$  为第  $i$  个采样点处的误差模型。求取满足  $G$  的最小系数解,即可得到  $\{B_1, B_2, B_3, \dots, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots\}$ 。

最终,补偿后的角度输出为:

$$\theta' = \theta - E_1(\theta) - E_2(\alpha). \quad (8)$$

## 4 实 验

采用某型号小型光电编码器进行实验,如图 3 所示。该编码器外径为 35 mm,分辨率为 21 位,其光栅码盘圆周内刻划有  $h=1024$  周期精码刻线。

该编码器采用对径读数头时,其误差精度为

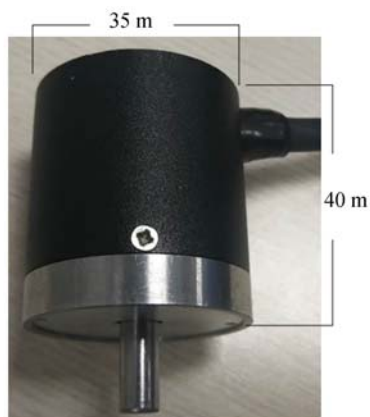


图 3 被标定编码器

Fig. 3 Calibrated encoder

(均方差)  $16.7''$ 。为测试误差补偿效果,将该编码器改为单边读数头方式,经过测试其误差精度(均方差)为  $22.48''$ (见图 5)。

如图 4 所示,标定设备包括被测编码器、角度基准、支架、无刷直流电机、数据处理电箱、误差显示软件和计算机。其中,角度基准分辨率为 23 位,静态测角误差的均方差小于  $2''$ 。

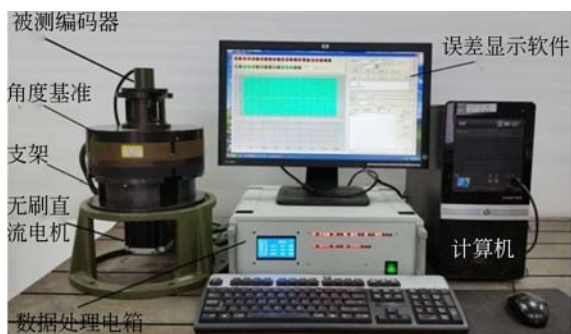


图 4 误差标定系统

Fig. 4 Error calibration system

### 4.1 长周期误差补偿实验

采用图 4 中的设备标定实验编码器圆周内的误差,每隔  $15^\circ$  角度记录一次误差,共有  $n=25$  个采样点,误差采样值如图 5 所示,误差均方差为  $22.48''$ 。

采用式(1)对图 5 中的误差进行后验拟合,得到其误差模型为:

$$E_1 = 34 \cdot \sin \left( \frac{\pi}{180} \cdot \theta + 6.74 \right). \quad (9)$$

采用式(9)对被标定编码器进行长周期误差补偿,并重新对补偿后的编码器进行检测,其误差如图 6 所示。

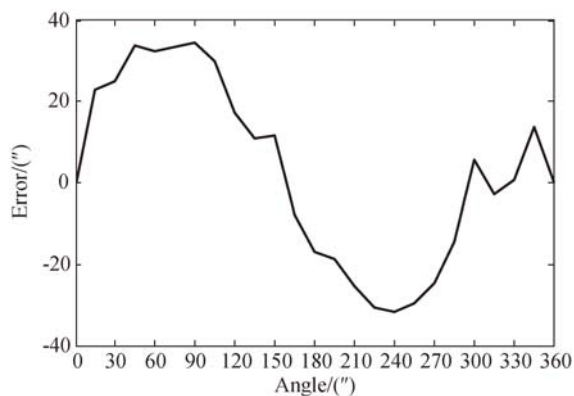


图 5 长周期误差采样曲线

Fig. 5 Sampling curve of long period error

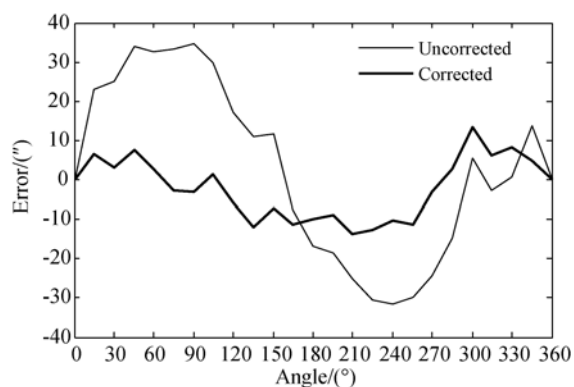


图 6 长周期误差补偿对比

Fig. 6 Contrast of long period error before and after correction

图 6 中,补偿后的误差均方差为  $7.79''$ ,可以看出长周期误差的补偿效果明显。

#### 4.2 短周期误差补偿实验

经过长周期误差补偿后,采用图 4 中的设备再次对被标定光电编码器进行短周期误差采样。实验时,在单个精码周期内取  $m=32$  个误差采样点,其误差曲线如图 7 所示,误差均方差为  $7.73''$ 。

为减少运算量,忽略式(3)短周期误差模型中高于 3 次谐波的分量。那么,采用图 7 中的误差采样点进行拟合,确定参数,式(3)变为:

$$E_2 = -9.73 \cdot \sin(\alpha - 0.36) - 0.91 \cdot \sin(2\alpha + 0.57) - 0.46 \cdot \sin(3\alpha - 0.04). \quad (10)$$

采用式(10)对被标定编码器进行误差补偿,然后再次在精码周期内检测 32 个误差采样点。作为对比,短周期误差补偿前后的细分误差如图 8 所示。

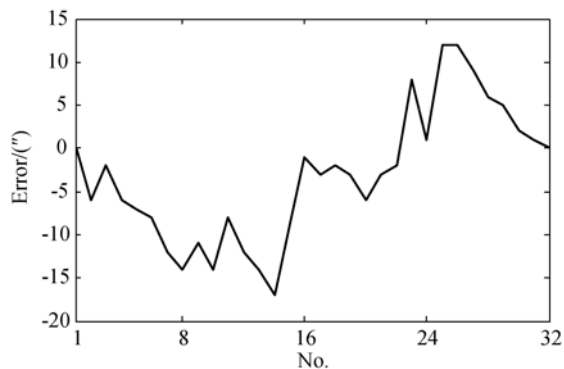


图 7 短周期误差采样曲线

Fig. 7 Sampling curve of short period error

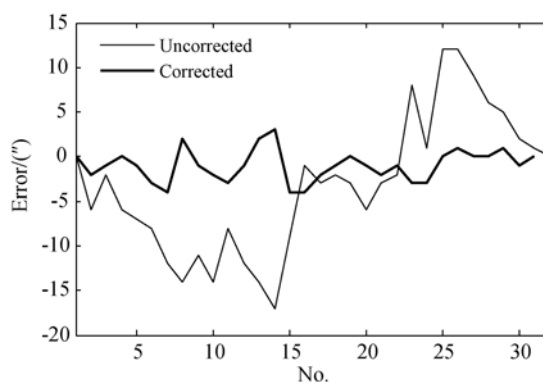


图 8 短周期误差补偿对比

Fig. 8 Contrast of short period error before and after correction

图 8 中,补偿后的细分误差均方差为  $1.77''$ ,可以看出,短周期误差得到了有效的补偿。

#### 4.3 误差检测实验

对误差补偿后的光电编码器进行全周误差检测,并与未补偿前的误差进行对比,结果如图 9 所示。

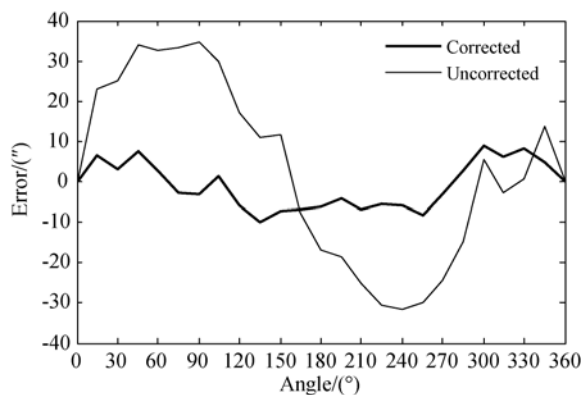


图 9 整体误差补偿

Fig. 9 Integral error correction

从图 9 中可以看出,误差补偿后光电编码器的测角误差明显变小,误差均方差为  $5.82''$ 。

#### 4.4 对比分析

根据 4.1 节的实验结果,在不采用对径读数头时,长周期误差补偿前后的精度分别为  $7.79''$  和  $16.7''$ 。可以看出,本文提出的长周期误差比对径读数头误差补偿方法更有效。

同时,本文 4.3 节的最终实验结果优于以往发表的误差补偿方法的实验数值。

## 5 结 论

为了提高批量生产时光电编码器产品的测角精度,本文提出了一种基于后验误差拟合的角位移测量误差补偿方法。首先,建立了长周期误差和短周期误差模型,指出误差模型中所

需要确定的参数集合。然后,采用后验误差拟合方法确定误差模型参数,并提出误差补偿算法。最后,对某一小型光电编码器进行实验,测试表明,补偿前的精度为 22.48",补偿后的精度为 5.82"。该方法极大提高了光电编码器的测角精度,具有标定简单,易于实现,效率高,补偿准确等优点。

### 参考文献:

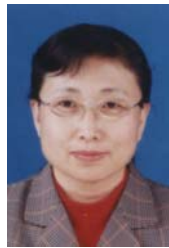
- [1] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.  
YE SH X. *Accurate Measurement About Photoelectric Shift*[M]. Chengdu: Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 吕强, 李文昊, 巴音贺希格, 等. 基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 39-50.  
LÜ Q, LI W H, BAYINHESHIG, *et al.*. Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(1): 39-50. (in Chinese)
- [3] 董静, 万秋华, 于海, 等. 小型绝对式光电编码器误码自动检测系统[J]. 中国光学, 2016, 9(6): 695-703.  
DONG J, WAN Q H, YU H, *et al.*. Automatic detection system of fault code for small size absolute photoelectric encoder[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6): 695-703. (in Chinese)
- [4] 张洪波, 万秋华, 王树洁, 等. 小型编码器动态精度检测的安装误差控制[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1655-1660.  
ZHANG H B, WAN Q H, WANG SH J, *et al.*. Installation error control of dynamic measurement for small photoelectric encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1655-1660. (in Chinese)
- [5] 于海, 万秋华, 卢新然, 等. 光电编码器误差检测转台的动态精度标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2699-2704.  
YU H, WAN Q H, LU X R, *et al.*. Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2699-2704. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 198-202. (in Chinese)
- [9] DARIO M, ENRICO C, GANLILEO P S. High-resolution encoder system [J]. *SPIE*, 1997, 3112: 328-334.
- [10] 汤天瑾, 曹向群, 林斌. 光电轴角编码器发展现状分析及展望[J]. 光学仪器, 2005, 27(1): 91-95.  
TANG T J, CAO X Q, LIN B. Developing current situation and the trend of photoelectric-angular encoder [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(1): 91-95. (in Chinese)
- [11] 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 photoelectric rotary encoder[J]. *Optical Mechanical*, 1990, 2: 52-60. (in Chinese)
- [12] WARNER M, KRABBENDAM V, SCHUMACHER G. Adaptive periodic error correction for Heidenhain tape encoders[C]. *Ground-based and Airborne Telescopes II. International Society for Optics and Photonics*, 2008: 70123N-70123N-8.
- [13] TAN K K, TANG K Z. Adaptive online correction and interpolation of quadrature encoder signals using radial basis functions [J]. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 2005, 13(3): 370-377.
- [14] LU X D, TRUMPER D L. Self-calibration of on-axis rotary encoders [J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2007, 56(1): 499-504.
- [15] WATANABE T, FUJIMOTO H, NAKAYAMA K,

- et al.* Automatic high-precision calibration system for angle encoder[J]. *Recent Developments in Traceable Dimensional Measurements*, 2001: 267-274.
- [16] 齐永岳, 赵美蓉, 林玉池. 提高激光干涉测量系统精度的方法与途径[J]. *天津大学学报*, 2006, 39(8): 989-993.
- QI Y Y, ZHAO M R, LIN Y CH. Methods of improving accuracy of laser interferometry system [J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(8): 989-993. (in Chinese)
- [17] 王选择, 郭军, 谢铁邦. 精密衍射光栅信号的椭圆拟合与细分校正算法[J]. *工具技术*, 2003, 37(12): 47-49.
- WANG X Z, GUO J, XIE T J. Ellipse fit algorithm and subdivision revision method of precision diffraction grating [J]. *Tool Engineering*, 2003, 37(12): 47-49. (in Chinese)
- [18] 刘文文, 费业泰. 高精度的光栅信号细分算法[J]. *应用科学学报*, 1999, 17(1): 70-74.
- LIU W W, FEI Y T. High precision subdivision algorithm for grating signal [J]. *Journal of Applied Sciences*, 1999, 17(1): 70-74. (in Chinese)
- [19] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(4): 598-604.
- HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 598-604. (in Chinese)
- [20] 杨进堂. “角度基准”中系统误差的修正[J]. *光学精密工程*, 1997, 5(1): 142-146.
- YANG J T. Revision of systematic error of angle standard [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(1): 142-146. (in Chinese)
- [21] 朱帆, 吴易明, 刘长春. 四读头法消除码盘偏心 and 振动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0412008.
- ZHU F, WU Y M, LIU CH CH. Eliminating influence of grating encoder's eccentricity and vibration to Moiré fringes signal by four reading heads [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0412008. (in Chinese)
- [22] 于海, 万秋华, 王树洁, 等. 小型绝对式光电编码器动态误差分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0808004.
- YU H, WAN Q H, WANG SH J, *et al.*. Dynamic errors analysis of small absolute photoelectric encoder [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0808004. (in Chinese)
- [23] 于海, 万秋华, 赵长海, 等. 图像式光电编码器高分辨率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.*. High-resolution subdivision arithmetic and error analyses of photographic encoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312001. (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获得博士学位,目前主要从事光电位移精密测量技术、数字全息显微技术的研究。E-mail: yuhai5158@163.com



万秋华(1962—),女,吉林长春人,研究员,1984年于长春光机学院获得学士学位,2009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,目前主要从事光电位移精密测量技术及高精度光电轴角编码器等方面的研究。E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn

(本栏目编辑:曹金)