

## 圆光栅测角传感器在线自校准系统研制与实验

张文颖<sup>1</sup>, 劳达宝<sup>2,3</sup>, 周维虎<sup>\*1,2,3</sup>, 朱浩然<sup>4</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 中国科学院光电研究院, 北京 100094;  
3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**为了解决测角系统在实际应用中的在线校准问题, 设计了一种圆光栅测角传感器在线自校准系统。基于圆封闭原则和傅里叶级数的性质, 建立了测量值与单读数头误差之间的关系, 实现单读数头自校准。该自校准系统由读数头、玻璃圆光栅、单轴转台和多通道采集控制系统组成。实验结果表明, 测角传感器自校准系统的单读数头测量精度为 $\pm 5.90''$ , 接近于借助外部参考标准的谐波补偿方法后的精度, 系统测量重复性小于 $0.76''$ 。自校准测量系统可实现圆光栅测角传感器在线校准的同时, 满足了精密测量领域对精度和可靠性的要求。

**关键词:** 角度传感器; 圆光栅; 自校准

**中图分类号:** TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0117004

## Development and experiment of online self-calibration system for circular grating angle sensor

Zhang Wenying<sup>1</sup>, Lao Dabao<sup>2,3</sup>, Zhou Weihu<sup>\*1,2,3</sup>, Zhu Haoran<sup>1</sup>

(1. College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;  
2. Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;  
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;  
4. School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** In order to solve the online calibration problem of the angle measuring system in practical application, an online self-calibration system of circular grating angle sensor was designed. Based on the principle of round closure and Fourier series, the relationship between the measured value and the error of single reading head was established, and the single reading head self-calibration was realized. The self-calibration system consisted of a reading head, a glass circle grating, a single-axis turntable and a multi-channel acquisition control system. The experimental result shows that the accuracy of the single reading head of the self-calibration system is  $\pm 5.90''$ , which is close to the accuracy of the harmonic compensation method with external reference standard, the measuring repeatability is less than  $0.76''$ . Self-calibrated measurement system could realize the online calibration of circular grating angle measuring system, which meets the requirement of precision and reliability in precision measurement field.

**Key words:** angle sensor; circular grating; self-calibration

收稿日期: 2017-06-10; 修订日期: 2017-08-18

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项 (2016YFF0100700); 青岛市光电智库联合基金 (GDZK-2017-05)

作者简介: 张文颖(1988-), 女, 博士生, 主要从事光电测量与精密仪器方面的研究。Email: zwyzywy8866@163.com

导师简介: 周维虎(1962-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电系统总体设计与集成测试、飞秒激光测量、光电精密测量与大尺寸几何量计量测试技术方面的研究。Email: zhouweihu@aoe.ac.cn

## 0 引言

高精度测角传感器是具有战略意义的核心关键部件,其制造技术和性能质量体现了国家科技水平,西方国家在高精度测角传感器及其相关产品方面一直对国内实施限制。随着测角传感器广泛地应用,将测角传感器与棱体和自准直仪构成的角度标准进行校准已经不能满足特定环境的需求。所以,不依赖高精度外部参考标准、可以适应工业工程现场的恶劣环境并且在线操作的自校准方法迫切需求。

近年来,测角传感器的自校准技术在国内外有所研究。北京航空航天大学通过精密匀速转台,利用实际与理想测量曲线的差分,实现对单读数头的自校准,由于其严重依赖匀速转台的转速稳定性,很难在实际工业工程现场取得较好的校准效果。合肥工业大学和重庆理工大学借助机械上转位锁死装置,通过对同一个传感器在转位移相前、后的两组标定数据,进行傅里叶变换实现多读数头的自校准,但其对操作要求较高<sup>[1]</sup>。加拿大不列颠哥伦比亚大学和美国麻省理工学院,利用轴系动态自由响应特性,通过测量转过单位空间角位移所用的时间,实现刻划误差的自校准<sup>[2]</sup>。德国联邦物理研究院(PTB)提出了一种多读数头非均匀分布的标定模型(Ernst模型),通过采集各个读数头的读数值,分析处理各阶误差分量,得到自校准结果,但需要不同读数头在同一位置的测量误差保证一致<sup>[3-4]</sup>。

文中结合圆封闭原则和傅里叶级数的性质,提出了传感器自校准方法,设计了固定光栅与读数头的单轴转台和多通道采集控制系统。实验结果表明,测角传感器自校准系统的单读数头测量精度为±5.90",接近于借助外部参考标准的谐波补偿方法后的精度,系统测量重复性小于0.76"。圆光栅测角传感器在线自校准系统适应性好、无需外部计量标准、自动化程度高。

## 1 圆光栅传感器自校准原理

圆光栅上等间隔的分布 k 个读数头,圆光栅转动一定角度,转动的角度值可任意选取,可小至系统的分辨率,读数头输出的角度值  $B_i$  表示为:

$$B_i = \theta + G_i \quad (1)$$

式中: $i=1,2,\dots,k$  为读数头的序号; $\theta$  为偏移角度的真值; $G_i$  为该位置的误差。由于单读数头的测量真值不可知,其误差就无法测量<sup>[5]</sup>。第 i 个读数头相对于第一个读数头的误差为:

$$G_{k_i-k_1} = B_{k_i}(\theta) - B_{k_1}(\theta) = \theta_i + G_{k_i}(\theta) - \theta_1 - G_{k_1}(\theta) \quad (2)$$

对 k 个读数头误差的差值取平均值,则:

$$T_k(\theta) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k B_{k_i}(\theta) - B_{k_1}(\theta) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k G_{k_i}(\theta) + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \varphi_{1-i} - G_{k_1}(\theta) \quad (3)$$

令  $\varphi_{1-i} = \theta_i - \theta_1$ ,由于圆周封闭原则可得<sup>[6]</sup>:

$$\sum_{i=1}^k \varphi_{1-i} = 0$$

由傅里叶级数的性质可知<sup>[7]</sup>,当读数头系统误差不包含 k 的整数倍频次谐波成分,或这些谐波成分非常小,则上式可近似表示为:

$$G_{k_i}(\theta) \approx T_k(\theta) \quad (4)$$

所以,单个读数头的误差值可用其他读数头相对于这一读数头误差差值的平均值表示。码盘转动一周,获得整个圆周内的误差曲线,实现单读数头测角传感器的自校准。为了提高校准效果,采用多组读数头组合布局的形式,其中一个读数头为多组读数头的公共读数头,利用多组读数头获得的偏差曲线,实现对公共读数头的校准。假如 m 组读数头均匀分布于圆光栅上,校准方法的误差抑制能力为:

$$P = \prod_{j=1}^m \eta_j \quad (5)$$

式中: $\eta_j$  为 j 组传感器的个数,测角系统的误差可以用谐波来表示,由多读数头的原理,校准方法可抑制除了  $P \times k_m (k=1,2,3,\dots)$  阶数以外的所有误差,实现单读数头测角传感器的自校准。

## 2 圆光栅传感器自校准系统

### 2.1 自校准系统结构

如图 1 所示,自校准系统采用具有 2、3 个传感器的两组传感器安装于刻度盘上,利用 4 个传感器获得的校准曲线校准公共传感器。采用如图 1 所示的布局方式,误差抑制能力为: $P=2 \times 3=6$ ,可以抑制除了  $6 \times k_m (m=1,2,3,\dots)$  以外的所有误差,即可以抑制 6 的整数倍阶数以外的所有谐波对测角误差的影响。

如图 2 所示,单轴转台用于固定圆光栅和读数头。

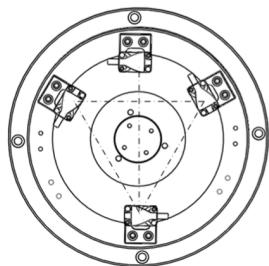


图 1 自校准读数头布局图

Fig.1 Self-calibrated reading head layout

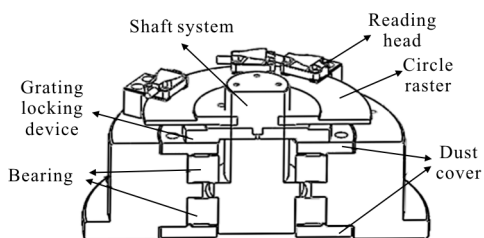


图 2 单轴转台示意图

Fig.2 Single-axis turntable schematic

### 2.2 自校准硬件系统组成

圆光栅、读数头和细分盒是自校准系统的硬件组成部分。电机带动圆光栅转动时,光栅根据莫尔条纹现象产生干涉<sup>[8]</sup>,读数头将光信号转化为电信号并送给细分盒进行处理,细分盒将脉冲信号多倍细分后输出 RS422 差分电平信号。为了正确采集脉冲数据,采用美信公司的 RS422 协议芯片 MAX3096 来匹配细分盒送出的 RS422 差分电平信号,完成脉冲信号从双端差分到单端标准信号的转换。此外,在作为接收终端的 MAX3096 芯片的正负管脚上分别接入上拉与下拉电阻、且正负管脚间用 100 Ω 的终端电阻进行阻抗匹配,从而保证了信号的质量。图 3 为数据采集单元框图。

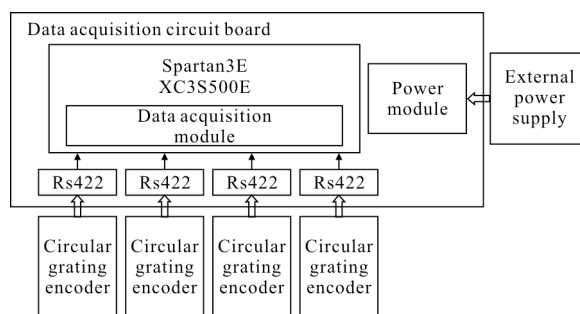


图 3 数据采集单元框图

Fig.3 Data acquisition unit block diagram

### 2.3 自校准系统软件设计

高频滤波功能和细分辨向计数功能是采集模块的主要组成部分。高频滤波功能是消除高频干扰脉冲对系统计数的影响,保证计数的准确性;细分辨向计数主要完成对圆光栅信号的四倍频,完成辨向和计数的功能<sup>[9]</sup>。图 4 为功能模块原理图。

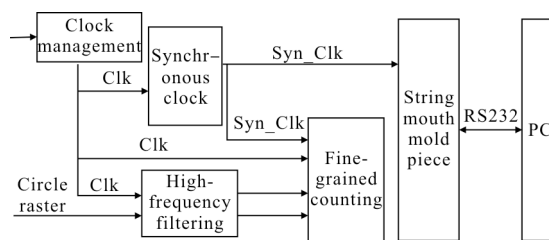


图 4 功能模块原理框图

Fig.4 Function module block diagram

由于高频干扰所产生的脉冲频率一般都远高于圆光栅正常工作时所输出的脉冲频率,因此采用了一种高频数字计数滤波方法:在已知系统最高转速的情况下,根据所使用圆光栅的刻线数,计算出最高转速下圆光栅输出的脉冲频率,并以此频率为临界点,将频率高于这个临界点的脉冲视为干扰脉冲滤除,如图 5 所示。

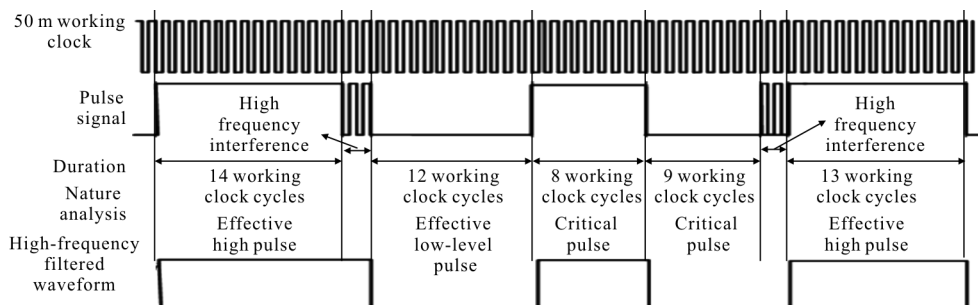


图 5 高频滤波功能原理图

Fig.5 High frequency filter function schematic diagram

根据增量式光电编码器的工作原理<sup>[10]</sup>,圆光栅输出的是 A 和 B 两路相差 90°的脉冲信号。当圆光栅正转时,A 相信号超前 B 相信号 90°;反转时,B 相信号超前 A 相信号 90°,图 6 为正反转波形图。根据这一特性,采用状态比较法,利用 A 相和 B 相信号的特点来判断编码器的转动方向,并同步完成四倍频和脉冲计数操作。

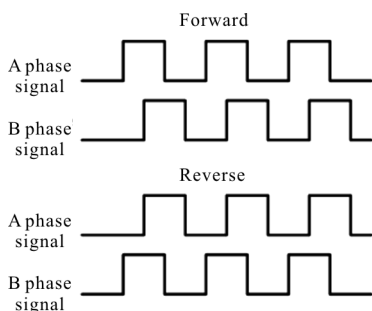


图 6 圆光栅正反转波形图

Fig.6 Circular grating positive and negative waveforms

利用 Labview 初始化采集通道,使程序采集波特率和采集卡波特率相同,打开采集通道,为采集数据做准备;接受采集卡的数据,将数据暂存于缓存区;对缓存区的数据进行数据处理,运用算法降低测量数据误差,将数据保存在缓存区,并记录数据采集次数,循环执行此步骤,记录每次所转的角度值;输出缓存区数据,保存为文本文件。

### 3 自校准实验与结果

#### 3.1 自校准实验系统

圆光栅测角传感器自校准系统如图 7 所示, MicroE 的 R10851-HD 圆光栅固定于单轴转台上,安装后光栅的轴向跳动量和径向跳动量小于 10 μm。4 个 M3000 读数头按自校准布局方式分布于圆光栅上方,安装时,要确保光栅旋转一周,与传感器配合使用的细分盒上的指示灯显示正常。由控制系统控制电机带动转台做回转运动,端面光栅随转台同步回转,同步测量、记录转台转过的角位移,将测量结果通过串行通信发送到上位机,上位机根据自校准算法对测量结果进行处理,获得校准后的角度值。在测量时为了等分度间隔取值,在圆光栅上通过转接件放置多面棱体,结合自准直仪可将圆周等分,也可方便地将自校准的效果与传统谐波补偿方法作对比。

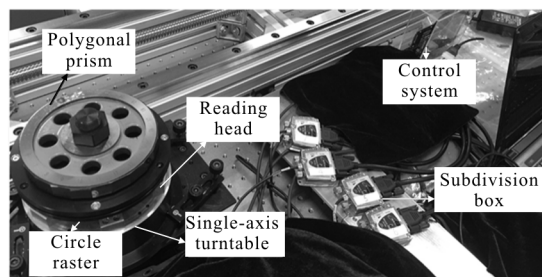


图 7 自校准系统图

Fig.7 Self-calibration system diagram

#### 3.2 自校准实验

自校准测角系统中的传感器采用图 1 所示的布局方式,利用 23 面棱体,整周等间隔取点,采集 23 个数据,公共读数头的误差曲线如图 8 所示,峰峰值为 -631"和 117",误差为 748";利用四个读数头测得数据,采用自校准方法校准公共读数头后,峰峰值为 -2.65"和 3.25",测角误差为 5.90"。采用自校准方法,在不依赖其他外界标准的条件下,测角误差抑制效果明显。

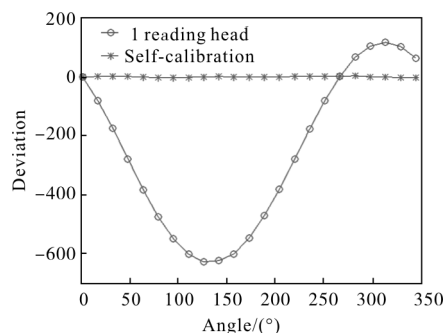


图 8 测量误差与自校准误差对比图

Fig.8 Comparison of measurement error and self-calibration error

#### 3.3 对比实验

为了验证自校准系统的校准效果,将其与传统的谐波补偿标定方法作对比。采用与自校准实验相同的实验系统,利用 36 面棱体结合自准直仪对 23 面棱体测量数据通过谐波补偿的方法对误差进行标定。在不同时间、实验装置重新调整的情况下,采集到 5 组误差数据,分别进行谐波函数拟合,求出幅值和相位,建立误差谐波补偿模型,补偿后公共读数头的误差曲线如图 9 所示,其误差的峰峰值为 -88.9"和 86.7",测角误差为 175.6";采用自校准方法校准公共读数头后,峰峰值为 -2.65"和 3.25",测角误差为 5.90"。采用自校准局部方式,自校准方法对误差的抑制效果优于利用外部参考的谐波补偿方法。

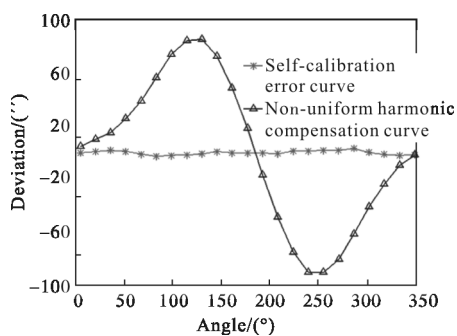


图 9 自校准与非均匀谐波补偿误差曲线图

Fig.9 Self-calibration and non-uniform harmonic compensation error graphs

读数头采用自校准布局方式,谐波补偿效果不明显,通过对公共读数头测角误差曲线的分析,可知偏心是导致误差的主要因素。由于对径布局能够有效减小偏心对测角误差的影响,变换读数头的布局方式,将四个读数头均匀分布于码盘上,通过 36 面棱体和 23 面棱体各获得 5 组测角数据,运用 36 面棱体的测角数据对 23 面棱体测得的数据进行谐波补偿。如图 10 所示补偿后的公共读数头的误差曲线可知,峰峰值为  $-1.95''$  和  $1.92''$ ,测角误差为  $3.87''$ ;采用自校准方法校准公共读数头后,测角误差为  $5.90''$ 。所以,自校准方法的校准效果近似于采用相同读数头均匀布局,使用高精度外部参考基准的传统标定方法的标定效果。

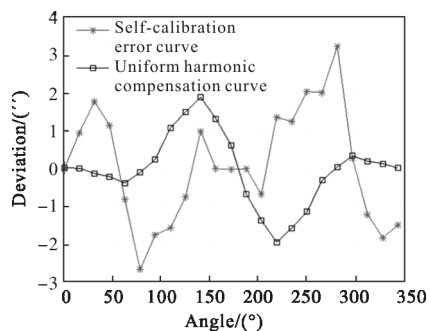


图 10 自校准与均匀谐波补偿误差曲线图

Fig.10 Self-calibration and uniform harmonic compensation error graphs

### 3.4 自校准系统重复性实验

在重复性条件下,利用自校准系统进行连续  $n$  次独立重复测量,得到测量结果  $y_i (i=1,2,\dots,n)$  的重复性  $S(y_i)$  为:

$$S(y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}}$$

式中:  $y_i$  为在当前位置第  $i$  次的偏差;  $\bar{y}$  为  $n$  次测量偏差的平均值<sup>[11]</sup>。

文中利用自校准系统进行了 6 次独立重复实验,误差曲线如图 11 所示。自校准系统的重复性曲线如图 12 所示。获得所有测量位置  $\max(S(y_i))=0.76''$ 。

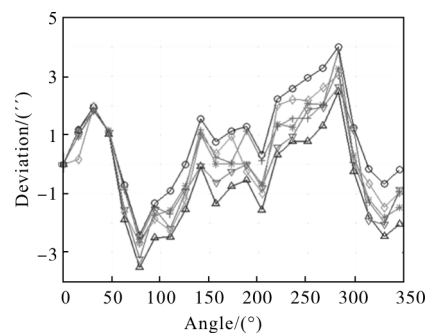


图 11 6 次校准偏差曲线

Fig.11 6 calibrated deviation curve

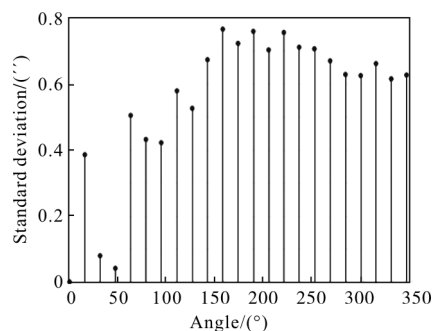


图 12 重复性曲线

Fig.12 Repeatability curve

### 3.5 自校准系统稳定性实验

稳定性是评价测角系统的重要指标<sup>[12]</sup>,文中以一周为间隔,利用自校准系统进行了 4 次测量,误差曲线如图 13 所示,每组测量数据算术平均值为

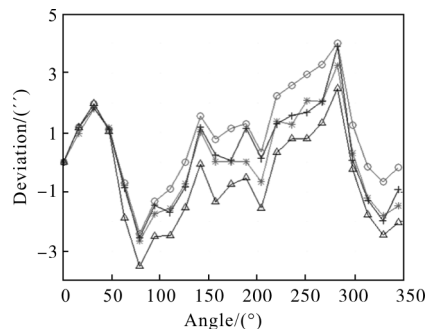


图 13 稳定性测量误差曲线

Fig.13 Stability measuring error curve

$y_i (i=1,2,4), \max(y_i) - \min(y_i) = 2.16''$ , 自校准测量系统的稳定性为  $2.16''$ 。

#### 4 结 论

针对圆光栅角位移传感器产业化面临的标定问题, 文中利用圆封闭原则和傅里叶级数的性质, 建立多组测量值与单读数头误差之间的关系, 获得校准曲线, 实现对自实现单读数头测角传感器的自校准; 设计了自校准系统的机械结构和电路硬件和软件系统, 并进行了自校准实验和对比实验。实验结果表明, 采用自校准方法校准后, 单读数头测角传感器的测角误差为  $5.90''$ , 系统测量重复性小于  $0.76''$ , 自校准测量系统的稳定性为  $2.16''$ 。自校准系统适应性好、无需外部计量标准、具有较高的应用价值, 为研制小型化高精度测角传感器奠定了基础。

#### 参 考 文 献:

- [1] Tsukasa Watanabe, Hiroyuki Fujimoto, Tadashi Masuda, et al. Self-calibratable rotary encoder [J]. *Journal of Physics, Conference Series*, 2005, 13: 240-245.
- [2] Ralf D Geckeler, Alfred Link, Michael Krause, et al. Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders[J]. *Meas Sci Technol*, 2014, 25: 1384-1394.
- [3] Watanabe T, Fujimoto, Nakayamak, et al. Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]//*SPIE Recent Developments in Traceable Dimensional Measurement*, 2003: 400-409.
- [4] Angelika Taubner, Hans-Jürgen von Martens. Measurement of angular accelerations, angular velocities and rotation angles by grating interferometry [J]. *Measurement*, 1998, 24: 21-32.
- [5] Probst R. Self-calibration of divided circles on the basis of prime factor algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19: 1-11.
- [6] Ralf D Geckeler, Andreas Fricke, Clemens Elster. Calibration of angle encoders using transfer functions [J]. *Measurement and Science Technology*, 2006, 17: 2811-2818.
- [7] Just A, Krause M, Probst R, et al. Calibration of high-resolution electronic autocollimators against an angle comparator[J]. *Metrologia*, 2003, 40: 288.
- [8] Wang Xianjun. Reflection photoelectric encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 12(24): 3066-3071.
- [9] Jong Ahn Kim, Jae Wan Kim, Chu Shik Kang, et al. Precision angle comparator using self-calibration of scale errors based on the equal-division-averaged method [J]. *Macro Scale Proceedings*, 2011, 24(9): 389-397.
- [10] Dong Dengfeng, Zhou Weihu, Ji Rongyi, et al. Design of precise tracking system of laser tracker [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 2(24): 309-3018. (in Chinese)
- [11] Guo Jingbin, Cao Hongyan, Wang Kexin, et al. Study on verification and compensation of indexing errors for turntable [J]. *China Mechanical Engineering*, 2014, 25(7): 895-899. (in Chinese)
- [12] Orton P A, Poliakoff J F, Hatiris E, et al. Automatic self-calibration of an incremental motion encoder [C]//*IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2001: 1614-1618.