

## 基于空间位置的增量式光电编码器误差检测系统

卢新然<sup>1,2</sup>, 宋路<sup>1</sup>, 万秋华<sup>2</sup>, 于海<sup>2</sup>, 刘小树<sup>2,3</sup>

(1. 长春理工大学电子信息工程学院, 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;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 增量式光电编码器输出信号的正交性和均匀性是其重要技术指标之一, 对增量式光电编码器的精度检测是编码器研制和生产过程中的重要环节。传统信号质量的检测是基于时间位置进行检测的, 其检测准确度受转速均匀度影响, 在高速、变速转动下对增量式光电编码器的动态性能检测并不准确。提出了一种基于空间位置的信号质量检测方法, 并设计了相应的检测系统。检测系统采用直流无刷电机带动高精度角脉冲发生器和被检增量式编码器同轴旋转, 并采集高精度角脉冲发生器在被检增量式编码器输出信号边沿时刻的数值, 进行误差计算。该检测系统极大地减小了由于转速不均匀造成的测量不准确度。运用该检测系统对输出脉冲周期数为 32 400 的增量式编码器进行检测, 并与时间位置检测法进行对比实验。实验结果表明: 该检测系统检测结果不受电机转速变化的影响, 可有效地提高检测精度及检测效率, 能够实现动态检测。该系统的研制为批量生产增量式光电编码器提供了极大的便捷。

**关键词:** 增量式编码器; 误差; 均匀性; 正交性

**中图分类号:** TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1017011

## Error measurement system of incremental photoelectric encoder based on space position

Lu Xinran<sup>1,2</sup>, Song Lu<sup>1</sup>, Wan Qiuhua<sup>2</sup>, Yu Hai<sup>2</sup>, Liu Xiaoshu<sup>2,3</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering,

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China;

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

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The uniformity and orthogonality are important technical indicators of photoelectric incremental encoders' performance. The precision measuring of incremental encoders is an important link in development and manufacture of encoders. Traditional measurement of signal quality is based on time position and varied from the uniformity of rotating speed. The dynamic performance testing is incorrect with high speed and variable speed rotation. A testing method based on angle was proposed and corresponding system was established. The measured incremental encoder and a high-precision angular

收稿日期: 2017-02-10; 修订日期: 2017-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(51605465)

作者简介: 卢新然(1978-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事角度测量及光电信号处理技术方面的研究。

Email: luxinrancimp@aliyun.com

导师简介: 宋路(1952-), 女, 博士生导师, 主要从事光通信与信息处理技术方面的研究。Email: usong@126.com

impulse generator were installed and rotated synchronously with a brushless DC motor; when measured incremental encoder output a signal edge, collected the data of the high precision angular generator and calculated the error. The detection error of the proposed system caused by uneven shaft rotating speed of the encoder shaft was greatly reduced. Measurements were carried out through encoders with periodical impulse output number 32 400, and was contrasted to the experiment based on time. The experimental results show that the system is free of the impacts of varying speed of driving motor, and is capable of improving the accuracy and efficiency of the incremental encoders testing. It was the proposed system that brings the batch production with great convenience.

**Key words:** incremental encoder; error; uniformity; orthogonality

## 0 引言

高分辨力光电轴角编码器是一种集光、机、电为一体的精密数字测角装置。光电编码器利用光栅和码盘的相对位移产生莫尔条纹信号,同过光电转换、数字信号处理等将角位移转换成数字信号输出。通过与计算机相连可以实现角位移、角速度和角加速度以及其他物理量的测量<sup>[1-2]</sup>。光电轴角编码器具有精度高、测量范围广、抗干扰能力强等优点,在工业、科技、国防、航天等领域应用广泛<sup>[3]</sup>。

光电编码器按码盘类型可分为增量式和绝对式两种类型<sup>[4-6]</sup>。增量式光电编码器码盘刻划均匀分布的栅线,对应的每个分辨率区间会输出一个方波信号,因此广泛应用于测速领域<sup>[7]</sup>。随着增量式编码器应用领域越来越广泛,在批量生产光电编码器的过程中,需要对其精度进行检测。因此,急需开展简单有效,且准确度高的检测方法研究。

目前对增量式编码器的检测主要是对其输出方波信号均匀性和正交性的检测<sup>[8]</sup>。文中针对现有检测方法的不足,提出一种改进的检测算法,并设计了相应的自动检测系统。该检测系统可实现增量式光电编码器输出信号均匀性、正交性的检测。系统具有检测周期短,检测便捷等优点,且检测结果不受被检编码器主轴转速变化的影响。

## 1 传统基于时间位置的检测原理

光电编码器中的光电转换系统主要由发光管、码盘、狭缝和接收元件组成。其中,码盘和狭缝组成一对光栅副。光电编码器转动时,通过机械轴带动码盘转动,发光管发出的光透过狭缝和码盘组成的光栅副,形成莫尔条纹<sup>[9]</sup>。

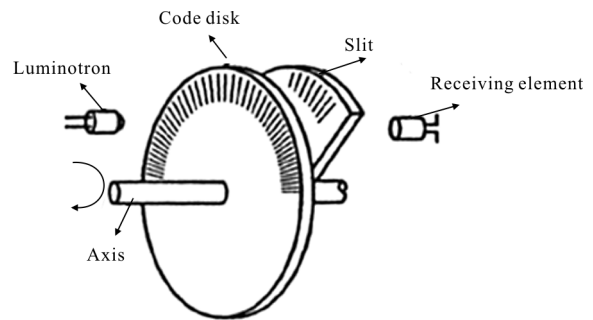


图 1 编码器原理图

Fig.1 Principle of encoder

利用狭缝裂相方案获得 4 路精码信号莫尔条纹信号分为:

$$\begin{cases} u_1 = C_1 + A_1 \sin \theta \\ u_2 = C_2 + A_2 \sin(\theta + \pi/2) \\ u_3 = C_3 + A_3 \sin(\theta + \pi) \\ u_4 = C_4 + A_4 \sin(\theta + 3\pi/2) \end{cases} \quad (1)$$

每两路信号之间相位相差  $\pi/2$ , 其中  $C_1 \sim C_4$  分别是 4 路信号直流偏移量<sup>[10-11]</sup>,  $A_1 \sim A_4$  分别是 4 路信号的幅值。通过对这 4 路进行倍频处理,可以提高编码器的分辨率和精度。

经过倍频处理后,增量式光电编码器主轴每旋转一周会输出固定数量的脉冲  $A$  和  $B$ 。编码器正转时,  $A$  信号超前于  $B$  信号  $1/4$  周期的相位;反转时,  $B$  信号超前于  $A$  信号  $1/4$  周期的相位,旋转时的输出波形如图 2 所示。

由于增量式光电编码器一般都是作为伺服系统中的速度反馈元件使用,其输出方波信号的质量,直接影响着伺服系统的控制精度。

在增量式编码器出厂前,对其精度的检测大多是通过检测其输出方波信号  $A$ 、 $B$  的正交性和均匀

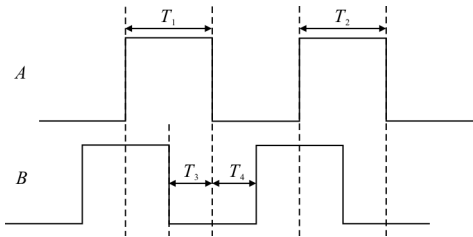


图 2 增量式编码器输出信号  
Fig.2 Output signal of incremental encoder

性实现的。其中正交性是用来评价方波信号 A 与 B 的相位偏差程度的指标；均匀性是用来评价方波信号占空比偏差程度的指标。由图 2 中可知,  $T_1$ 、 $T_2$  分别是方波信号 A 中相邻两个周期的波峰的时间;  $T_3$ 、 $T_4$  是方波信号 B 波谷分别与方波信号 A 的波峰和波谷交错的时间, 那么根据均匀性和正交性的特点, 在评估增量式光电编码器信号质量时, 采用公式(2)和公式(3)进行计算。

$$J = \frac{2 \times |T_1 - T_2|}{T_1 + T_2} \times 100\% \quad (2)$$

$$Y = \frac{|T_3 - (T_3 + T_4)/2|}{(T_3 + T_4)/2} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $J$  为均匀性百分比;  $Y$  为正交性百分比。

通常正交性和均匀性的检测, 只在找到编码器旋转一周内  $J$  和  $Y$  的最大值, 即为被检编码器的检测结果。

可以看出, 公式(2)、(3)通过时间位置值进行计算的, 当被检编码器主轴转速不均匀时, 会造成计算的不准确。

## 2 基于空间位置的检测方法

为了避免检测中编码器主轴转速不均匀对检测结果造成的影响, 以及提高检测精度和效率, 提出一种基于空间位置的检测算法, 其原理如图 3 所示。

图 3 中,  $\varphi_j (j=1, 2, \dots, 6)$  为被检增量式编码器输出信号边沿时刻的空间位置数值, 经过计算可以得到:

$$m_1 = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (4)$$

$$m_2 = \varphi_6 - \varphi_5 \quad (5)$$

$$m_3 = \varphi_2 - \varphi_3 \quad (6)$$

$$m_4 = \varphi_4 - \varphi_4 \quad (7)$$

将其代入公式(1)、(2)可得:

$$J = \frac{2 \times |m_1 - m_2|}{m_1 + m_2} \quad (8)$$

$$Y = \frac{|m_4 - (m_3 + m_4)/2|}{(m_3 + m_4)/2} \quad (9)$$

可以看出,  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$  的数值不受转速变化的影响, 因此在计算正交性和均匀性时, 更加准确。

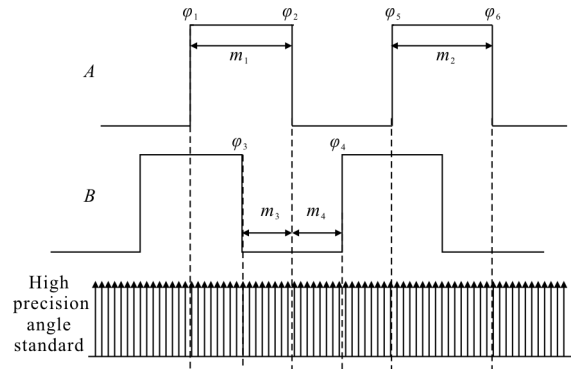


图 3 基于角度的检测方法

Fig.3 Measurement method based on angle

## 3 基于空间位置的检测系统设计

基于空间位置的检测系统由直流无刷电机、联轴节、高精度角脉冲发生器、被检编码器、数据采集处理系统、电机驱动系统、LCD 液晶及计算机等组成, 如图 4 所示。

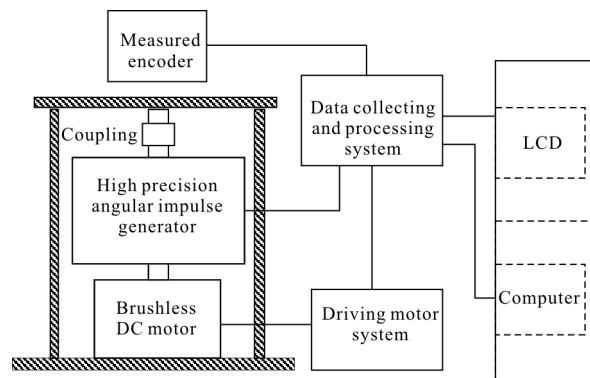


图 4 高精度检测系统结构图

Fig.4 Structure diagram of the high precision measuring system

图 4 中, 空间位置数值由高精度角脉冲发生器输出, 其分辨力为  $0.7''$ , 精度优于  $2''$ 。由于高精度角脉冲发生器的分辨力和精度远远高于被检编码器, 可以胜任检测任务; 电机转速固定在  $90 \text{ r/min}$ 。

其工作原理为, 在电机驱动系统的驱动下, 直流无刷电机带动高精度角脉冲发生器和被检增量式光

电编码器做同轴转动；数据采集处理系统采集高精度角脉冲发生器在被检增量式编码器边沿时刻的脉冲数,进行误差计算,将检测结果传送到 LCD 液晶上进行显示,并送至计算机中作进一步处理与分析。数据采集处理系统由 FPGA 处理芯片、RAM 存储器、LCD 液晶显示和计算器组成。如图 5 所示。

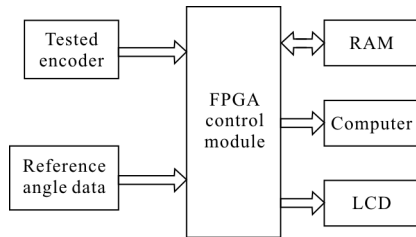


图 5 数据采集处理系统图

Fig.5 Structure diagram of the data collecting and processing system

FPGA 芯片采用 60 MHz 的采用频率分别对角脉冲发生器和被检编码器的数值进行采集,并计算均匀性和正交性的数值;同时将每周期的计算数值存储在 RAM 中。以被检编码器每 100 个方波周期为一组,每计算一组均匀性和正交性数值后,进行一次结果比较,并保留最大值。当完成被检编码器一个圆周的数据计算后,将每组数据的最大值传输到计算机中进行显示和分析。

### 4 系统误差分析

检测系统误差主要来源于三种误差:同轴误差、高精度角脉冲发生器误差、数据采集误差。

#### (1) 同轴误差

采用千分尺平均测量同轴误差 15 次,测量结果如表 1 所示。

表 1 同轴误差(单位:mm)

Fig.1 Errors of coaxial(Unit:mm)

No.	Error	No.	Error
0	0	8	-0.008
1	-0.002	9	-0.009
2	-0.004	10	-0.002
3	-0.01	11	0
4	-0.012	12	0.002
5	-0.013	13	0.003
6	-0.011	14	0.001
7	-0.009	15	0

对表 1 中误差数据求均方差后得到同轴误差为 0.005 5 mm,同轴误差很小,满足检测要求。所以同轴度引起的误差  $\sigma_1 \approx 0''$ 。

#### (2) 高精度角脉冲发生器误差

空间位置数值由高精度角脉冲发生器输出,其分辨力为 0.7",精度优于  $\sigma_2 \approx 2''$ 。

#### (3) 数据采集误差

系统采用 60 MHz 时钟频率进行采样,检测系统最大转速为 90 r/min,数据采集误差  $\sigma_3$  为:

$$\sigma_3 = \frac{90 \times 360 \times 3600}{60 \times 10^6 \times 60}'' = 0.0324''$$

#### (4) 误差合成

根据误差合成公式,总体误差  $\sigma$  如公式(10)所示:

$$\sigma = \sqrt{\sum_1^3 (a_i \sigma_i)^2 + 2 \sum_{1 \leq i < j \leq 3} \rho_{ij} a_i a_j \sigma_i \sigma_j} \quad (10)$$

式中: $a_i$ 为误差传播系数; $\rho_{ij}$ 为误差相关系数。该系统中令  $a_i=0$ ,由于各误差互不相关,即  $\rho_{ij}=0$ ,那么总体误差为:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2} \approx 2''$$

在实际检测中,要求检测装置的精度  $\eta$  至少高于被检编码器精度  $\eta'$  的 3 倍,因此本系统可以实现对测角精度不优于 6"的被检编码器的检测。

### 5 实验结果

采用该检测系统分别对中科院长春光学精密机械与物理研究所生产的某型号增量式光电编码器进行检测,该编码器外径为 92 mm,工作温度 -40~+60 °C,旋转一周输出 32 400 个周期方波信号,分辨力为 10"。

#### 5.1 匀速、变速检测实验

检测系统每采集 100 个被检编码器输出方波周期取一个最大值,并将每组数据的最大值上传到计算机中。被检编码器每旋转一个圆周,共得到 324 个均匀性和正交性的最大值数据。

分别令检测系统在匀速、变加速、变减速状态下进行转动,其检测结果如图 6~8 所示。

分别对匀速、变加速和变减速状态下的检测数值做均方差,用以计算检测结果的数值浮动。经过计

算,匀速状态下的均方差为:均匀性 1.91,正交性 1.30;变加速状态下的均方差为:均匀性 1.96,正交性 1.29;变减速状态下的均方差为:均匀性 1.84,正交性 1.30。

可以看出,匀速、变加速和变减速状态下,对该编码器的检测结果的影响非常小。

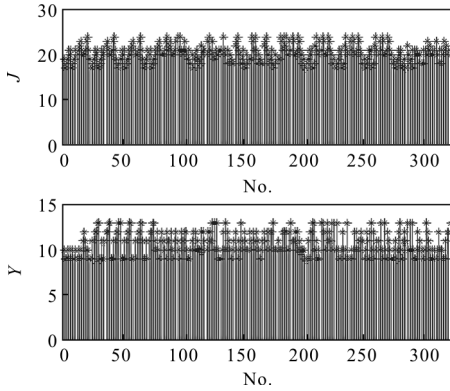


图 6 匀速状态下检测结果

Fig.6 Measurement result in uniform velocity

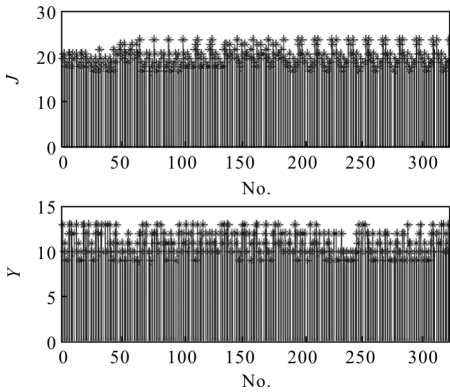


图 7 变加速状态下检测结果

Fig.7 Measurement result in varying acceleration

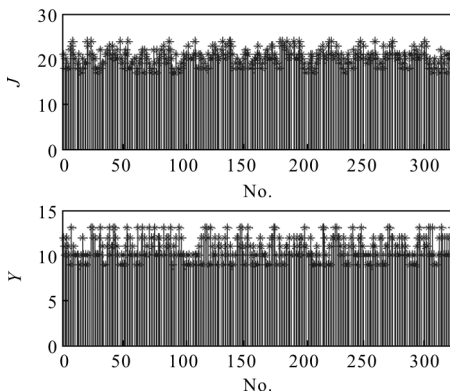


图 8 变减速状态下检测结果

Fig.8 Measurement result in varying deceleration

### 5.2 匀速对比检测实验

采用文中设计的检测系统检测,无论在匀速还

是变速状态下,检测出的圆周内方波信号均匀性、正交性的最大值都为 24%和 13%。

为了实现检测结果的对比,用示波器采用基于时间的检测方法对上述某型号编码器进行检测。检测时,令被检编码器匀速转动,使用示波器每次锁存 10 个方波周期的信号,并手动计算方波信号的均匀性和正交性。共进行 8 次锁存,其检测结果如表 2 所示。

表 2 匀速下示波器检测结果

Tab.2 Result of oscilloscope's measurement in uniform velocity

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
J	23%	22%	14%	13%	24%	12%	22%	21%
Y	11%	8%	10%	5%	13%	11%	11%	6%

由表 2 中,均匀性最大值为 24%,正交性最大值为 13%,与检测系统的检测结果基本一致。

### 5.3 变速对比检测实验

为了对比变速状态下传统基于时间位置检测方法与文中提出基于空间位置检测方法的检测结果,用示波器采用基于时间的检测方法对上述某型号编码器分别在加速和减速状态下进行检测,检测结果如表 3~4 所示。

表 3 变加速下示波器检测结果

Tab.3 Result of oscilloscope's measurement in varying acceleration

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
J	25%	27%	15%	17%	26%	13%	24%	17%
Y	12%	15%	13%	15%	13%	14%	14%	16%

表 4 变减速下示波器检测结果

Tab.4 Result of oscilloscope's measurement in varying deceleration

No.	1	2	3	4	5	6	7	8
J	27%	26%	24%	23%	18%	19%	27%	22%
Y	13%	18%	16%	15%	12%	13%	12%	16%

可以看出,在变速状态下,传统基于时间位置检测方法的检测结果明显偏大,与基于空间位置检测方法的结果 24%、13%偏离很大。因此,在变速状态

下,基于空间位置检测方法更准确。

## 6 结 论

文中提出了一种基于空间位置的增量式光电编码器误差检测方法,并设计检测系统。该系统采用高精度角度脉冲发生器提供空间位置数值,采用FPGA芯片实现对数据的采集并发送到计算机中,能够简单、快捷、准确的实现对被检编码器输出方波信号质量的检测。该系统的检测结果受被检编码器转速的影响很小,较传统检测方法具有更高的检测准确度。该系统的研制,为批量生产增量式光电编码器极大的提供了便捷。

### 参考文献:

- [1] Yu Hai, Wan Qiuhua, Du Yingcai, et al. Drive system of photoelectric encoder dynamic detection equipment using space-vector torque combination [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(4):165-173. (in Chinese)  
于海, 万秋华, 杜颖财, 等. 光电编码器动态检测转台的空间矢量力矩合成驱动系统 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(4): 165-173.
- [2] Zhu Yifeng, Mu Yining, Yu Lintao. Method of grating angle detection using slit light battery [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3396-3400. (in Chinese)  
朱一峰, 母一宁, 于林韬. 狭缝光电池的栅角检测方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(12): 3396-3400.
- [3] Yu Hai, Wan Qiuhua, Lu Xinran, et al. Calibration for dynamic measurement precision of platform for photoelectric encoder's measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 23(11): 87-92. (in Chinese)  
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, 23(11): 87-92.
- [4] Sun Shuhong, Zhao Changhai, Wan Qiuhua, et al. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 600-606. (in Chinese)  
孙树红, 赵长海, 万秋华, 等. 小型光电编码器自动检测系
- 统[J]. *中国光学*, 2013, 6(4): 600-606.
- [5] Yu Hai, Wan Qiuhua, Wang Shujie, et al. Error detection development of photoelectric encoders [J]. *Optoelectronic Technology*, 2013, 33(3): 145-150. (in Chinese)  
于海, 万秋华, 王树洁, 等. 光电轴角编码器误差检测技术的发展动态[J]. *光电子技术*, 2013, 33(3): 145-150.
- [6] Chen Bin, Zhang Hongsheng. Coding modes of photoelectric shaft encoders and their developing trend [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2 (2): 126-133. (in Chinese)  
陈斌, 张红胜. 光电轴角编码器的编码方式及其发展趋势[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(2): 126-133.
- [7] Dong Lili, Xiong Jingwu. Development of photoelectric tetary encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2000, 8 (2):198-202. (in Chinese)  
董莉莉, 熊经武. 光电轴角编码器的发展动态[J]. *光学精密工程*, 2000, 8(2): 198-202.
- [8] Du Yingcai, Wang Xijun, Wang Shujie. The auto-detection system of incremental encoder [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 11(11): 993-998. (in Chinese)  
杜颖财, 王希军, 王树洁. 增量式编码器自动检测系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2012, 11(11): 993-998.
- [9] Yu Hai, Wan Qiuhua, Wang Shujie, et al. Dynamic errors analysis of small absolute photoelectric encoder [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(8): 0808004. (in Chinese)  
于海, 万秋华, 王树洁, 等. 小型绝对式光电轴角编码器动态误差分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(8): 0808004.
- [10] Ye Shengxiang. Optoelectronic Displacement Precision Measurement Technology [M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Press, 2003. (in Chinese)  
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.
- [11] Yu Hai, Wan Qiuhua, Liang Lihui, et al. Dynamic code error detection system of photoelectric encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 0917002. (in Chinese)  
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): 0917002.