

光电编码器动态误差评估系统

周子云¹, 于海²

(1. 吉林建筑大学 土木工程学院, 吉林 长春 130118 ;

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: 在批量生产小型光电编码器的过程中, 出厂检验不仅要检测光电编码器动态误差, 也要对不达标编码器进行误差溯源及修正。在实现对光电编码器高、低转速下的动态误差检测的同时, 需要快速的定位光电编码器动态误差超标的原因, 使生产者能够根据误差超标原因对编码器进行调校。为此, 提出了光电编码器检测方法, 设计了小型光电编码器动态误差检测及评估系统。首先, 从低、中、高频率方面对光电编码器误差组成分析, 明确了各频率误差的产生原因; 然后, 提出了采用 AR 模型谱估计法对动态误差进行评估的方法, 并根据误差评估结果给出误差产生因素判定; 最后, 设计了小型光电编码器动态误差评估系统, 实现了对光电编码器的动态误差检测, 并给出误差评估结果。所设计的检测系统工作转速范围为 0.5~8 r/s, 检测精度优于 2", 误差评估系统能够清晰的显示出动态误差在各频率下的均方值, 使生产者能够轻易地找到不达标编码器的调校方法。该系统准确可靠、显示直观, 为批量生产光电编码器提供了简单有效的检测评估手段。

关键词: 现代谱估计; 动态误差; 误差评估; 光电编码器

中图分类号: TP274+.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0617002

Estimation system for dynamic errors of photoelectric encoder

Zhou Ziyun¹, Yu Hai²

(1. School of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China;

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

Abstract: During the quantity production of small size photoelectric encoders, not only the encoder dynamic error must be detected in factory inspection, the error of non-standard encoder must also be traced and corrected. In the process of the dynamic error detection of photoelectric encoder in high speed and low speed, the reason caused excessive dynamic error of photoelectric encoder must be quickly found out, so that the encoder can be adjusted according to the reason of excessive error. The measurement and estimation system for dynamic errors of photoelectric encoder was designed by proposing a measurement and estimation method. Firstly, by the analysis on dynamic error of photoelectric encoder, the theory of dynamic error component was proposed. Secondly, the estimation method of dynamic error based on AR model spectrum estimation was proposed, and error criterions were proposed by error estimation. Thirdly, the measurement and estimation system for dynamic errors

收稿日期: 2016-10-05; 修订日期: 2016-11-15

基金项目: 国家自然科学基金(51605465)

作者简介: 周子云(1987-), 女, 讲师, 博士, 主要从事光机结构设计及光电设备检测技术方面的研究。Email: zhouziyun719@163.com

通讯作者: 于海(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事光电位移精密测量方面的研究。Email: yuhai5158@163.com

of photoelectric encoder was designed, error detection and estimation were achieved by this system. The speed range of this system is 0.5–8 r/s, measurement precision is 2"; the system can clearly display the mean square of errors in every frequency, this result can offer evidence for producer to reduce the error of encoder. The system was exact and reliable, and provides straight forward and effective measurement method for producer.

Key words: modern spectrum estimation; dynamic error; error estimation; photoelectric encoder

0 引言

随着现代科学技术的飞速发展以及航空航天技术的进步,各个研究单位对光电编码器的精度要求越来越高^[1–3]。与此同时,光电编码器的动态性能越来越得到重视。不仅要求光电编码器能够实时输出角度位置信息,同时还要求光电编码器在角速度、角加速度作用下保精度输出数据^[4–7]。

在批量生产光电编码器的过程中,出厂前需要对动、静态精度进行检测,并根据检测结果对检验“超标”的产品进行改善,从而达到光电编码器的批量精度控制。传统对光电编码器误差的评估方法多是基于统计理论的均值和均方差计算,这种方法能够给出具体的精度评估数值,是目前对误差评估的主要方法。但是使用该方法对检测结果进行评估,不能分析出影响编码器精度的具体因素,从而不能给生产者提供一个确切的调校方案。因此研究一种能够准确快速分离出误差分量,对不达标编码器进行调校的方法,是批量控制光电编码器精度的关键。

谱估计也叫功率谱估计,是描述信号均方值与频率分布的一种方法,采用观测到的 N 个样本数据对误差进行谱密度的估计叫做谱估计^[8–9]。谱估计分为两大类:传统谱估计和现代谱估计。传统谱估计在描述谱时,其波动的数字特征具有方差性能较差、分辨率较低等缺点^[10–11]。传统谱估计无法在谱密度定义中获得求取均值和极限的计算,造成了方差性能较差;在周期图传统谱估计中,其假设估计区域以外的数据全为零,使得估计的分辨率较低;在自相关传统谱估计法中,假设延迟窗口以外的自相关函数全为零,使得谱估计结果偏离理想要求。现代谱估计方法是为解决以上缺点而提出的,现代谱估计是在传统谱估计的基础上进行优化改善的方法,它能够较理想的描述随机信号在单位频率内均方值大小。

文中结合所提出的光电编码器误差评估方法,在分析了动态误差特征的基础上,设计了小型光电编码器动态误差评估系统。该系统能够准确的实现 0.5~8 r/s 转速下,小型光电编码器动态误差的评估。根据评估结果,可以很快的找到改善“不合格”光电编码器精度的方法。该系统为研究光电编码器动态性能提供了有效的方法。

1 光电编码器误差分析

光电编码器误差主要由低频误差、中频误差和高频误差组成。

低频误差主要是由于光电编码器装调过程中产生的固有误差引起的。低频误差在圆周范围内呈现 1 次或 2 次周期变化。其中,影响较大的因素是码盘偏心。

光电编码器的高频误差主要是由于莫尔条纹信号偏离理想状态,使光电编码器细分不准确引起的。高频误差在圆周内的变化频率是光电编码器精码道刻划数 h 的整数倍数。引起莫尔条纹信号偏离理想状态的因素有很多,主要包括:(1) 电路放大倍数调节不当引起的莫尔条纹信号幅度、直流分量偏差;(2) 光电编码器狭缝装调偏差引起的莫尔条纹信号相位偏差;(3) 码盘与狭缝间距过大或过小引起的莫尔条纹信号谐波分量过多等。

在光电编码器误差中,中频误差分量主要是由于编码器轴系晃动导致的综合因素引起的。一般情况下,当编码器轴系精度较差时,会在高转速时出现轴系晃动加剧的情况,从而加大编码器的误差。

综上所述,光电编码器动态误差可以分解为低频、中频和高频误差分量,引起各误差分量的因素各有不同。编码器各频率分量的误差影响因素主要如表 1 所示。在分析光电编码器误差的同时,根据不同频率误差的出现频率,可以分析出其主要的影响因

素,进而对光电编码器进行调节,修正误差。

表 1 误差分析
Tab.1 Errors analysis

Error frequency	Frequency in one circle	Influence factors
Low frequency errors	1	Code disk eccentricity
Mid-frequency errors	Between low frequency and high-frequency	Shafting shaking
High-frequency errors	Extractive code in one circle	Moire fringe deviates from the ideal state

2 动态误差评估方法

2.1 误差评估原理

从误差传输方面考虑,光电编码器的动态误差可以看作是由多个误差传输系统组成的,如图 1 所示。

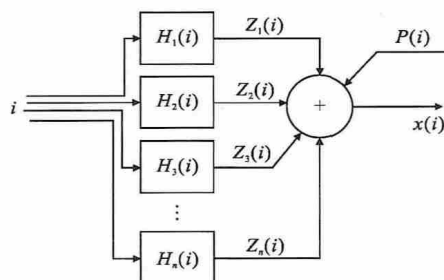


图 1 光电编码器误差传输系统

Fig.1 Transmission system of photoelectric encoder's error

其中, $P(i)$ 为系统误差,随机误差 $Z_k(i)$ 是由子误差传输系统 $H_k(i)$ 产生的。为此需要寻找一种新的评估方法,对动态误差分量进行评估,能够掌握各误差分量对总误差的影响,同时减小编码器误差、提高精度提供依据。

对于光电编码器的动态误差,由于它的振幅和相位是随机的,不能采用傅里叶变换求出它的频谱图,但是可以采用随机信号的均方值来表示信号在不同频率内的强度。为了既能描述动态误差频域上的分布,又能体现出频率分量权重,更加直观高效率的对光电编码器动态误差进行评估,文中采用现代谱估计方法对动态误差进行评估。谱估计能够将光电编码器的动态误差转换为各频率分量的误差均方

值。通过分析各频率分量的均方值,可以轻易的找到低、中、高频误差分量对整体误差的影响,进而为调节光电编码器提供依据。

2.2 现代谱估计原理

将某次检测到的动态误差数据 $x(n)$,看成由某个输入序列为 $u(n)$ 的系统的相应输出。将动态误差的传输系统看成是离散系统,那么按照离散系统的通式^[12-13],其系统函数可以写成:

$$H(z)=\frac{A(z)}{B(z)}=\frac{\sum_{k=0}^q b_k z^{-k}}{1+\sum_{k=1}^p a_k z^{-k}}, q \leq p \quad (1)$$

其差分方程为:

$$x(n)=-\sum_{k=1}^p a_k x(n-k)+\sum_{k=0}^q b_k u(n-k) \quad (2)$$

式中: $A(z)$ 为输出 $x(n)$ 的系统函数; $B(z)$ 为输入 $u(n)$ 的系统函数。 a_k 为后向系数,称为 AR 系数; p 为后向模型阶次; b_k 为前向系数,称为 MA 系数; q 为后向模型阶次。公式(2)中的模型称为 ARMA 模型。

当 $b_0=1, q=0$ 时,公式(4)变为:

$$x(n)=-\sum_{k=1}^p a_k x(n-k)+u(n) \quad (3)$$

公式(3)称为 p 阶自回归模型,即 AR(p)模型,其传递函数可以表示为:

$$H_{AR}(Z)=\frac{1}{A(z)}=\frac{1}{1+\sum_{k=1}^p a_k z^{-k}} \quad (4)$$

一般情况下,模型的输入数据是不能观测到的。在已知模型参数或频响的条件下,为了求得模型输出功率谱的估值,最简单的方法就是假设输入 $u(n)$ 为零均值,方差为 σ^2 的白噪声序列^[14],那么,AR(p)模型的谱估计可以表示为:

$$S_{xx}=\frac{\sigma^2}{|A(e^{j\omega})|^2}=\frac{\sigma^2}{\left|1+\sum_{k=1}^p a_k e^{-j\omega k}\right|^2} \quad (5)$$

采用公式(7)对动态误差进行谱估计,可以得到各频率下,动态误差的均方值强度。为改进光电编码器测角精度提供依据。

2.3 谱估计的误差评估结果判定原理

应用谱估计可以得到光电编码器动态误差的功率谱,进而分析出各频率误差的均方值。在对误差评估结果进行判定时,提出了根据各频率误差功率谱

峰的大小来判断误差均方值较大的误差所在频率范围,并根据表 1 中的分析结果,得出影响各频率误差的主要因素,判断被检光电编码器误差较大的主要原因:

- (1) 若低频误差谱峰较大,判定码盘偏心较大;
- (2) 若中频误差谱峰较大,判定被检编码轴系晃动较大;
- (3) 若高频误差谱峰较大,判定莫尔条纹信号偏离理想位置。

根据以上三条判定方法,可以对光电编码器误差产生原因进行判定。

3 实验验证

3.1 动态误差评估系统建立

为实现对光电编码器的动态误差评估,动态误差评估系统需要完成以下两部分工作:(1) 对被测光电编码器动态误差检测;(2) 对动态误差检测结果进行自动评估并显示在软件中。

光电编码器动态误差评估系统是采用对比检测法,能够实现高转速下对小型光电编码器的误差检测,其原理如图 2 所示。评估系统控制软件由 VC++ 软件编写,界面如图 3 所示。

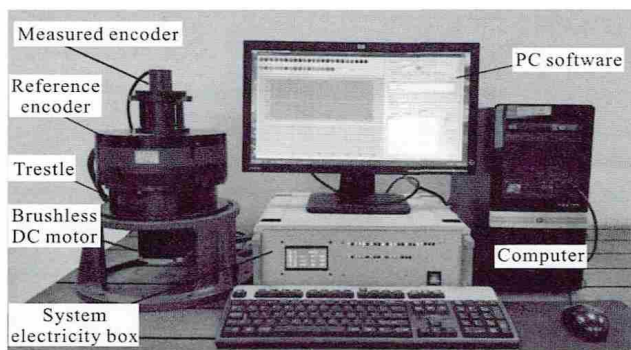


图 2 小型光电编码器动态误差评估系统构成

Fig.2 Structure of dynamic error estimation system for small size photoelectric encoder

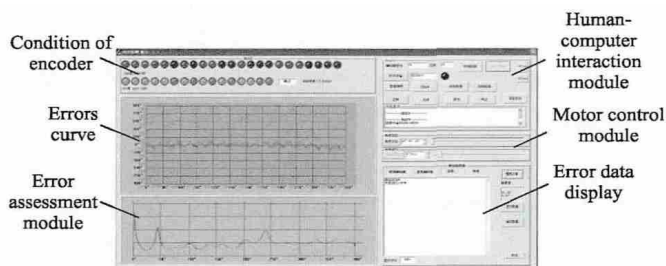


图 3 计算机软件界面

Fig.3 PC software

评估系统的角度基准为 20 位高分辨率、高实时性、高精度编码器,其精度优于 $0.6''$,能够胜任对小型光电编码器的检测工作。检测系统采用大力矩无刷直流电机实现对光电编码器的转动控制。其工作速度范围为 $0 \sim 8 \text{ r/s}$,检测精度优于 $2''$ 。目前,该装置已正式投入光电编码器的生产研制过程中。

软件能够实时显示被检编码器和基准编码器的角度位置,同时将检测到的误差曲线以坐标形式显示软件上;在检测完毕后,软件会计算误差的均方根作为被检编码器的精度衡量指标,其计算公式如公式(6)所示:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6)$$

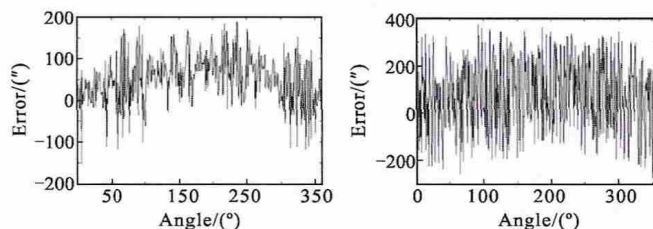
式中: $\bar{x}$ 为所检测到的所有误差的平均值; x_i 为第 i 次检测的结果; n 为一周内检测的点数。

同时,动态误差检测结束后,软件将根据公式(5)对动态误差进行评估,并将评估结果显示在“图 3 误差评估模块”中。

3.2 检测与评估实验

选取某 15 位、外径 $\Phi 40 \text{ mm}$ 、精码码道刻划数为 $k=128$ 的光电编码器进行实验。该型号编码器的出厂条件为:在转速 0.5 r/s 时,精度满足 $\sigma < 50''$;转速 8 r/s 时,精度满足 $\sigma < 1000''$, σ 按照公式(8)计算。

利用文中设计的误差检测系统对某光电编码器进行出厂检测测试,根据出厂检验要求,在转速 0.5 r/s 和 8 r/s 时分别对该编码器进行检测。检测时,编码器匀速转动状态下,在圆周内等间隔取 360 个误差采样点,其检测结果如图 4 所示。



(a) 转速 0.5 r/s 误差
(b) 转速 8 r/s 误差
(a) Errors speed of 0.5 r/s
(b) Errors speed of 8 r/s

图 4 检测结果

Fig.4 Result of measurement

检测结果为:转速为 0.5 r/s 时,精度值为 $59.52''$;转速为 8 r/s 时,精度值为 $1601.42''$ 。根据出

厂标准,该编码器精度不合格。

系统软件中对该编码器动态误差的评估结果如图 5 所示。

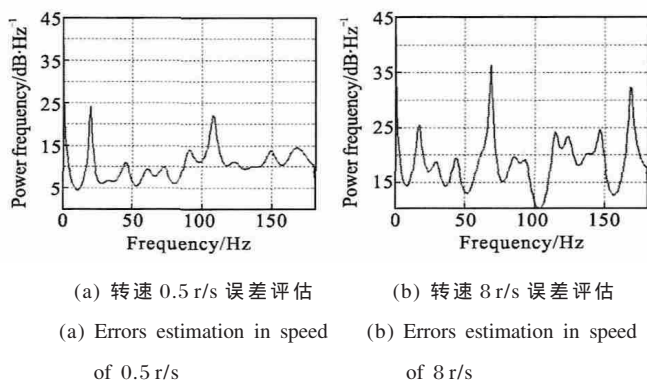


图 5 谱估计结果

Fig.5 Spectrum estimations of result

因为该编码器码盘圆周刻划精码道数为 $k=128$ 。在判定评估结果时,取频率高于 128 的误差时为高频误差,频率在 0 附近的误差为低频误差。

图 5(a)中可以看出,转速为 0.5 r/s 时,谱估计中有三个明显的谱峰,分别属于低频误差分量和中频误差分量。其意义为:频率为 1 的误差均方值为 42;频率为 20 的误差均方值为 24;频率为 108 的误差均方值为 22。

图 5(b)转速为 8 r/s 时,对比 0.5 r/s 的谱估计图像,频率为 1 的误差均方值为 42;频率为 17 的误差均方值为 25;频率为 68 的误差均方值为 36;频率为 168 的误差均方值为 32。可以看出高频误差分量明显增加,中频误差分量在 8 r/s 转速下变的很大。

图 5 中的评估结果可以看出:

(1) 在低转速下,低频误差是影响光电编码器误差的主要因素。查询表 1 可知,该误差是由于装调编码器时,码盘偏心较大的原因造成的。

(2) 在高转速时,光电编码器的光电元件幅频特性引起的莫尔条纹信号的偏差,使高频误差分量增加;轴系晃动的加大使中频误差分量变大。

根据评估结果可以得出该编码器误差超标的主要原因为:

(1) 编码器码盘偏心较大;(2) 高转速时轴系晃动较大;(3) 高速时电子元件幅频响应。

3.3 调试后检测验证

根据误差评估的结论,该编码器误差不合格的

原因主要是:码盘偏心较大、轴系晃动较大和高速时电子元件幅频响应。其中调校编码器时并不能改变编码器电子元件的幅频响应,因此本实验主要重新装调了该编码器的码盘并对轴系进行调整。

重新检测后,该编码器的动态误差曲线如图 6 所示。

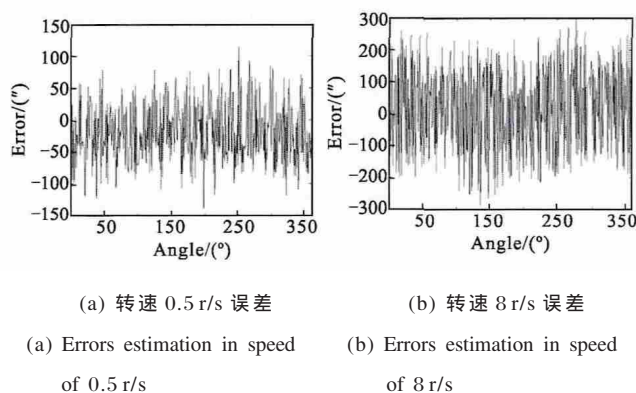


图 6 改善后的误差

Fig.6 Error after improvement

图中转速为 0.5 r/s 时的精度值为 $48.31''$,转速为 8 r/s 时的精度值为 $539.94''$,满足出厂条件。

图 7 为评估系统对改进后编码器的评估结果。

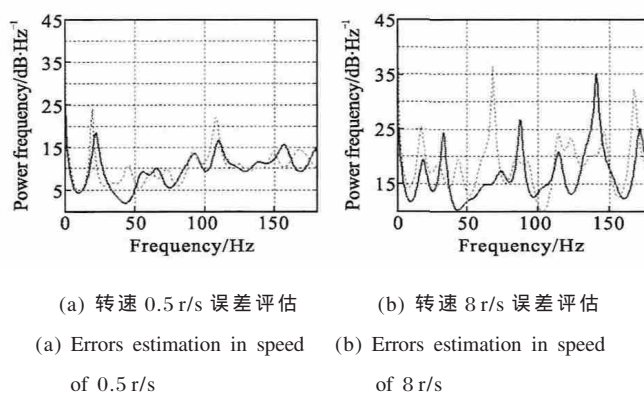


图 7 改善后的评估结果

Fig.7 Assessment after improvement

图 7 中实线、虚线分别为改善后、改善前编码器的谱估计曲线。

可以看出,经过改善后该编码器高转速下还是存在较高的高频误差分量。该编码器在低速下的低频分量误差影响明显降低了;高速下该编码器低频和中频误差分量都得到改善。

因此可以看出,所设计的误差评估系统,在批量生产光电编码器的过程中,起到了重要的作用。

4 结 论

文中为了在批量生产光电编码器时严格控制光电编码器动态精度,并提高检测效率,设计了小型光电编码器动态误差评估系统。通过对某编码器的检测评估及改善实验,验证了该系统的准确性和实用性。

所设计的小型光电编码器动态误差评估系统,在批量生产小型光电编码器的过程中具有重要的意义:

(1) 动态误差评估系统实现了对光电编码器在高转速下的误差检测,实现了传统检测系统不能实现的动态检测功能,具有检测便捷、迅速、准确等优点;

(2) 动态误差评估系统能够克服传统编码器检测系统制造成本贵、检测过程复杂、检测点数少、手动操作精度低等缺点;

(3) 该系统采用现代谱估计对光电编码器误差进行评估,能够在动态检测结束后立刻显示出被测光电编码器动态误差的评估结果,为批量生产光电编码器提供了改善误差的依据,对提高检测效率,保证光电编码器精度具有重要的意义;

(4) 评估系统能够为生产者提供明确的误差产生来源及其对总体误差的影响程度,使控制误差精度更具有针对性。

综上,文中设计的光电编码器动态误差评估系统,在批量生产光电编码器的过程中具有重要的使用价值。

参考文献:

- [1] Kao Chingfen, Huang Hunglin, Lu Shenghua. Optical encoder based on Fractional-Talbot effect using two-dimensional phase grating [J]. *Optics Communications*, 2010, 283 (9): 1950-1955.
- [2] Ioan Iov Incze, Csaba Szabó, Mária Imecs. Incremental encoder in electrical drives: modeling and simulation [J]. *Computational Intelligence in Engineering*, 2010, SCI313: 287-300.
- [3] Andrey G A, Anton V P, Oleg U L, et al. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy[C]// SPIE, 2013, 8788: 8788T.
- [4] Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)
王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.
- [5] 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.
- [6] Wu Hongsheng, Zeng Qifeng, Qiao Dong, et al. Filtering method of improving quality of grating moiré fringe [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1944-1949. (in Chinese)
吴宏圣, 曾琪峰, 乔栋, 等. 提高光栅莫尔条纹信号质量的滤波方法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1944-1949.
- [7] Wang Xianjun. Circuit design for high integrated photoelectric encoder base on SOC single chip [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(5): 1082-1087. (in Chinese)
王显军. 基于 SOC 单片机的高集成度光电编码器电路设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1082-1087.
- [8] Hüseyin Akcay. Spectral estimation in frequency-domain by subspace techniques [J]. *Signal Processing*, 2014, 101: 204-217.
- [9] Hüseyin Akcay. Subspace-based spectrum estimation in frequency-domain by regularized nuclear norm minimization [J]. *Signal Processing*, 2014, 99: 69-85.
- [10] Francisco Díaz-Pérez, Evelyn García-Nietob, Antonio Ros. Best estimation of spectrum profiles for diagnosing femoral [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2014, 36: 233-238.
- [11] 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. 小型绝对式光电编码器动态误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0808004.
- [12] Fei Yetai. Theory of Error and Data Processing [M]. Beijing: Machine Press, 2000: 195-200. (in Chinese)
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 195-200.
- [13] Cheng Peiqing. Digital Signal Processing Course [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 224-225. (in Chinese)
程培青. 数字信号处理教程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 224-225.
- [14] Wang Fujie, Pan Hongxia. Analysis and selection of several power spectrum estimation functions in MATLAB [J]. *Electronic Product Reliability and Environmental Testing*, 2009, 27(6): 28-31. (in Chinese)
王福杰, 潘宏侠. MATLAB 中几种功率谱估计函数的比较分析与选择[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(6): 28-31.
- [15] Du Liping. Research of source noise identification based on the modern spectrum estimation [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2007. (in Chinese)
杜丽萍. 现代谱估计在噪声源识别中的应用[D]. 长春: 东北师范大学, 2007.