莫尔条纹光电信号自动补偿系统

高 旭[1],万秋华[2],卢新然[2],杜颖财[2],陈 伟[1,2]

(1. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022;
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:为了保证高精度光电编码器在恶劣工作环境下的精确测量,建立一种基于高分辨力数字电位计+DSP+CPLD 的莫尔条纹光电信号自动补偿系统。首先,介绍了自动补偿系统的工作原理及构成,并设计了系统使用过程中的工作模式;融合莫尔条纹信号各个偏差的补偿算法,建立了光电信号细分误差的综合补偿模型;然后,具体阐述了系统的硬件设计、相关软件设计,并分析了补偿系统自身存在的系统误差;最后,以 24 位光电编码器为实验对象,对该补偿系统进行测试分析,实验结果表明:自动补偿系统可实现编码器精码信号直流电平漂移、等幅性偏差、正交性偏差及二次、三次、五次谐波偏差的综合补偿,可使实际的静态细分误差减小 0.61″。该系统可用在编码器的工作现场,实现莫尔条纹信号细分误差的自动修正。

关键词:高精度光电编码器; 莫尔条纹光电信号; 细分误差; 自动; 补偿系统

中图分类号:TP394.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201645.0217002

Automatic compensation system for Moire fringe photoelectric signal

Gao Xu[1], Wan Qiuhua[2], Lu Xinran[2], Du Yingcai[2], Chen Wei[1,2]

(1. School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to ensure the measurement accuracy of precise photoelectric encoders in harsh working environment, a kind of automatic compensation system based on the high-resolution digital potentiometer, DSP and CPLD for the Moire fringe photoelectric signal was established. Firstly, the principle and composition of automatic compensation system was introduced. Meanwhile, the compensation algorithms for the components of Moire fringe signal deviation was integrated. And the compensation model for photoelectric signal subdivision error was established. The system hardware design and software design were expounded. The system error of the compensation system was further analyzed. A 24 bit photoelectric encoder was selected as the experimental object to analyze and test the compensation system. The experimental results show that DC level drift, amplitude deviation, orthogonality deviation, and the second, third and fifth harmonic deviation are simultaneously compensated. The actually static subdivision error is reduced to 0.61″. The compensation system can realize the automatic correction of

收稿日期:2015-06-10; **修订日期**:2015-07-13

基金项目:国家自然科学基金(51505078)

作者简介:高旭(1987-),女,讲师,博士,主要从事光电位移精密测量技术方面的研究。Email:gaox19870513@163.com

Moire fringe signal subdivision error in the working state.

Key words: high precision photoelectric encoder; Moire fringe photoelectric signal; subdivision error; automatic; compensation system

0 引 言

随着跟瞄武器装备跟踪精度、卫星导航系统定位精度的提高，研制适用于复杂工作条件下的高精度、高分辨力绝对式光电编码器成为军事工业领域亟待解决的难点。编码器细分精度是影响测角精度的关键因素，而编码器自身的设计误差以及环境条件引起的使用误差等因素，直接引起莫尔条纹信号质量产生偏差，降低细分精度。为了改善细分精度，通常需要工作人员到现场进行调试解决，耗费人力、物力，同时影响应用系统工作进程。因此，研制可实际应用于工作现场的莫尔条纹信号自动补偿系统在高精度工程编码器研究领域显得尤为迫切[1-2]。

纵观国内外相关研究机构，如美国天文台、日本先进工业科学技术研究所、韩国 LG 公司以及国内的天津大学、中国科学院光电所等单位提出的各种补偿方法[3-10]，除了优化编码器的机械结构设计外，主要从光、电两方面展开。针对编码器系统在实际运行中同时含有的正弦性偏差、直流漂移、幅值偏差、正交性偏差以及四种偏差随主轴旋转发生动态变化的情况，笔者曾从电信号偏差事前处理的角度，提出了基于 Hilbert 变换的莫尔条纹光电信号正交性偏差自动补偿算法，基于粒子群优化算法的正弦性偏差自动补偿算法和基于高分辨力数字电位计的直流电平漂移、等幅性偏差的自动补偿方法[11-14]。

根据编码器专门的数据处理条件，文中进一步采用系统集成技术思想，将编码器信号译码处理模块化、嵌入信号误差补偿算法，建立了一种基于高分辨力数字电位计+DSP+CPLD 的莫尔条纹光电信号自动补偿系统，并设计了系统实现自动补偿处理功能的具体过程。该系统采用多头读数提取各个位置的精码莫尔条纹信号，当编码器精码光电信号出现偏差或者测量产生误码时，其自动补偿系统可作为编码器的后备数据处理系统或信号故障诊断系统开始启动，进而智能地保证编码器在工作现场的测角精度。同时将该补偿处理系统嵌入到编码器光机结构内，做到真正的机电一体。

1 自动补偿系统的设计

1.1 补偿系统的构成及工作原理

引入莫尔条纹光电信号自动补偿系统设计的高精度编码器，其系统改进结构如图 1 所示。编码器综合系统主要由光机结构和光电信号自动补偿处理系统两部分组成。

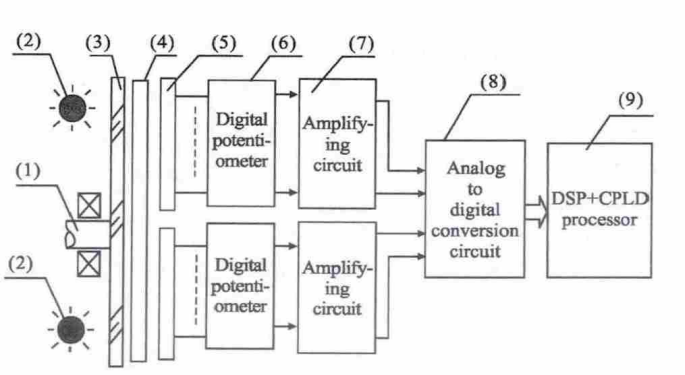


图 1 高精度编码器改进的结构原理框图

Fig.1 Improved structure principle for high precision encoder

编码器光机结构包括：(1)主轴及固定结构，(2)发光管，(3)码盘，(4)读数狭缝组件，(5)光电接收管；自动补偿系统包括：(6)数字电位计，(7)放大电路，(8)模数转换电路，(9)DSP+CPLD 处理系统。

自动补偿系统由信号采集、接收信号监控信息、补偿处理、角度代码输出等部分组成。信号采集部分完成对精码莫尔条纹信号的自适应采集，进而获得等角度间隔的空域信号；编码器原始数据处理系统根据离散傅里叶变换理论对莫尔条纹信号采取定期监测与编码器通电工作前监测的方式，对信号进行频谱分析，监控信号质量指标，而补偿系统接收监控信息；补偿处理部分则对莫尔条纹信号偏差进行自动补偿，进而实现编码器角度信息的准确输出。

补偿处理系统由于进行莫尔条纹信号各偏差补偿算法的运算，同时为减小编码器接口、代码输出形式等变化，且方便与伺服控制系统间的信息传输，选用 TI 公司推出的 TMS320F28335 浮点型 DSP 处理

器；采用 ADI 公司生产的 AD5254 型数字电位计代替原始数据处理系统中的机械电位器作为精码信号光电流/电压转换元件；选用 Xinlinx 公司生产的 XC95144 型 CPLD 芯片控制 AD7865 转换器对精码莫尔条纹信号进行采集，并完成粗码译码及精粗码的校正等逻辑处理。

当编码器莫尔条纹信号质量出现偏差、角度测量出现误码时，启动自动补偿系统，光电接收管将产生的光电流信号经数字电位计送入放大电路后，再送入模数转换电路转换成数字信号，然后由处理系统采集数字信号并处理成自然二进制角度代码。

1.2 系统自适应采样设计

所提出的莫尔条纹信号各偏差自动补偿算法的实现前提大多是依赖于编码器精码周期光电信号的自适应采样，则首先需要测量编码器的旋转速度。补偿系统采用 DSP28335 的捕获功能，利用编码器的精码方波信息来测量转速，根据速度的测量信息，自适应改变 A/D 转换器的采样频率。当编码器平稳工作时，连续采集 2~4 个光栅周期的莫尔条纹信号便可以获得等角度间隔的位置信号。

由于编码器在伺服系统中工作时旋转速度不一，而捕获法适合在低速稳定的状态下使用，因此当编码器旋转运动的加速度过大时，不适宜对精码光电信号进行采集分析。一般情况下，编码器旋转相对加速度的阈值通常取为 0.2%。利用连续两个光栅周期的方波信号沿计算捕获模块 FIFO 中的值，若两个光栅周期的速度值测量差大于 0.2%，则继续采用精码方波沿获取捕获信息，至相对加速度值稳定在 0.2%内时连续自适应采集光栅周期信号。

设精码光栅刻划周期为 d，编码器移动一个光栅周期的时间为 T、平均速度为 v，DSP 主频 f_0 为 150 Hz，每个周期采集 64 个点，其系统自适应采样原理如图 2 所示。

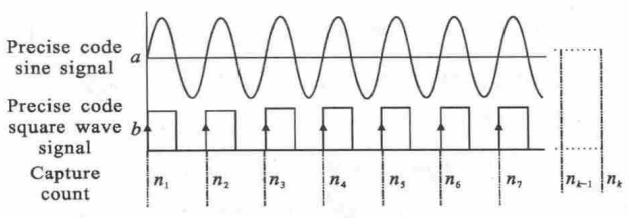


图 2 系统自适应采样原理

Fig.2 System adaptive sampling principle

则编码器旋转速度可由公式(1)计算，采样频率可由公式(2)计算。

$$v=d/T=d\cdot f_0/(n_k-n_{k-1}) \tag{1}$$

$$f_{sample}=64/T=64\cdot v/d=64\cdot f_0/(n_k-n_{k-1}) \tag{2}$$

2 自动补偿处理的具体实现

2.1 莫尔条纹信号细分误差综合补偿模型的建立

所提出的莫尔条纹光电信号自动补偿方法是针对不同偏差分别提出的，其自动补偿模型也是分别推导的，那么针对特定偏差建立的补偿模型仅在特定条件下才具有意义，与实际输出的莫尔条纹信号存在偏差。同时光电信号模型的各个波形参数对细分误差都有影响，各个参数之间有的相互独立、互不相关，有的相互影响、变化复杂。

由于实际输出的莫尔条纹信号不可能是理想的正余弦信号，信号中会同时存在直流电平漂移 $A_0(B_0)$、基波等幅性偏差 $A_1(B_1)$、基波正交性偏差 $c_1(d_1)$及正弦性偏差 $A_i\sin(i\theta+c_i)(B_i\sin(i\theta+d_i))$，经差分后的实际正交莫尔条纹信号表示为：

$$\begin{cases}u_{sin}(\theta)=A_0+A_1\sin(\theta+c_1)+\cdots+A_i\sin(i\theta+c_i)\\ u_{cos}(\theta)=B_0+B_1\cos(\theta+d_1)+\cdots+B_i\sin(i\theta+d_i)\end{cases} \tag{3}$$

理想情况下，输出的两路正交细分信号分别为：

$$\begin{cases}x_{sin}(\theta)=A\sin\theta\\ y_{cos}(\theta)=A\cos\theta\end{cases} \tag{4}$$

式中：θ 为理论上的旋转角度；A 为振幅。

按照莫尔条纹信号细分误差计算原理，在一个精码光栅栅距内，莫尔条纹信号的角度误差为实际细分角 θ' 与理想细分角 θ 的差，即：

$$\Delta\theta=\theta'-\theta=\arctan\frac{u_{sin}(\theta)}{u_{cos}(\theta)}-\arctan\frac{x_{sin}(\theta)}{y_{cos}(\theta)} \tag{5}$$

可见，实际周期莫尔条纹信号产生的细分误差为角度 θ 的高阶函数。从空域角度分析，各个光栅周期内的精码莫尔条纹信号偏差大小不同，但细分误差总体变化的周期与光栅节距相同。根据细分误差计算公式，可得莫尔条纹信号细分误差综合补偿模型：

$$\theta=\theta'-\Delta\theta \tag{6}$$

对于研制高精度编码器而言，细分误差主要以直流电平漂移、等幅性偏差、正交性偏差以及二次、三次、五次谐波的正弦性偏差为主。通过细分误差的计算结果，利用综合补偿模型可对所有偏差进行综

合补偿,获得补偿后的细分角 θ。

2.2 自动补偿处理的软件设计

补偿处理软件包括等角度间隔莫尔条纹空域信号的获取、信号质量的监控、信号偏差的判别、信号的补偿等四个部分。自动补偿系统根据编码器实际应用场合,在莫尔条纹信号监测期间,使编码器稳速运转,自适应采集莫尔条纹空域信号,选择八个周期的莫尔条纹信号数据,即:512 点,计算其傅里叶变换,数据处理系统对信号进行频谱分析。根据信号质量的技术指标监控信号质量,同时编码器对信号误码率也进行监测。补偿系统接收监测结果,判断信号偏差的主要成分,融合各个偏差的自动补偿算法后对信号偏差进行综合自动补偿。

图 3 是莫尔条纹光电信号自动补偿系统的软件算法的框图。

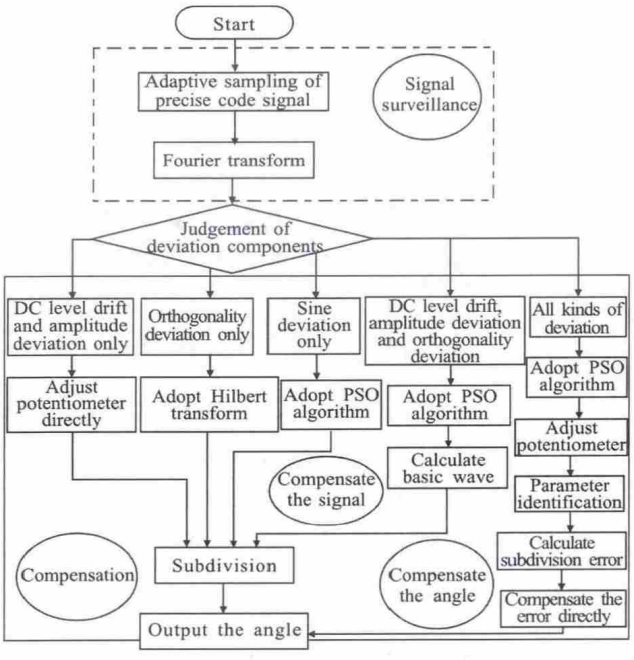


图 3 自动补偿系统的软件算法框图

Fig.3 Software algorithm of automatic compensation system

3 自动补偿系统的误差分析

自动补偿系统的误差 ε 主要由两部分组成:系统采集误差 ε_1、ε_2 和补偿方法 ε_3 误差组成。

3.1 系统采集误差

自动补偿系统自适应采集的有效过程是在编码器旋转速度稳定的情况下进行的,如图 4 所示。其编码器的稳速过程可以通过电机等伺服系统辅助控制。当前后两次测量的速度值之差与前一次速度值的比小于 0.2%时,以与第一个周期精码信号速度匹配的采样频率采集第二个波形数据。此时,系统采集误差的最大误差 ε_1 为 0.1%。

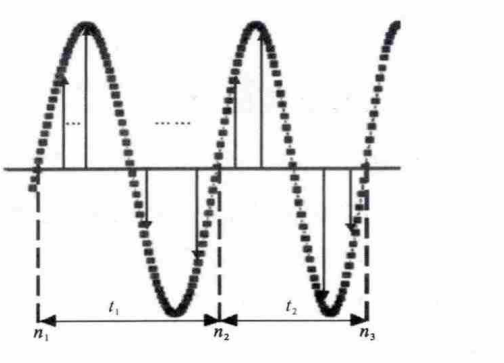


图 4 采集的两个精码正弦信号波形

Fig.4 Two sampled sine signal waveform of the precise code

补偿系统采集精码数据的精度是细分误差补偿的关键,而影响采集精度的核心器件是 A/D 转换器。影响 AD7865 转换精度的因素有输入信号电压范围及信噪比、芯片内部 2.5 V 基准电源的准确性等。对于 24 位绝对式编码器,由于信号幅值范围为−5~+5 V,每个细分分辨力对应的幅值约为30 mV。补偿系统输入信号电压范围设为±5 V,基准电源的采集误差大约在 5 mV 内,则在满量程的情况下采集精度为 0.1%,满足编码器分辨力幅值要求。

由此,补偿系统相对满量程的采集误差 ε_2 为 0.1%。

3.2 补偿方法误差

自动补偿系统在运行过程中,采用基于改进粒子群算法的莫尔条纹信号正弦性偏差的自动补偿算法,针对 24 位高精度编码器单一读数头,例 270°位置和 180°位置对应莫尔条纹信号的正弦性偏差,仅补偿了三次、五次的奇次谐波分量或者二次、三次的谐波分量,对于四次和高于五次的谐波分量忽略不计。这种方法的处理本身就构成了自动补偿系统自身的系统误差。

经计算,180°位置的细分误差最大峰值为 0.347″[2],有 $0.347/T<0.4\%T$,则补偿方法引起的系统误差 ε_3 最大值为 0.4%。

3.3 补偿系统的误差

综上所述,系统误差 ε 最大值为:

$$\varepsilon=\sqrt{\varepsilon_1^2+\varepsilon_2^2+\varepsilon_3^2}\approx\sqrt{0.1\%^2+0.1\%^2+0.4\%^2}\approx0.42\%$$

因此，根据分析验证获得的细分误差峰值进行推理，上述结果表征了自动补偿系统自身的系统误差，且细分误差小于精码莫尔条纹信号周期的 4‰。这也说明自动补偿系统的系统误差满足莫尔条纹信号细分误差补偿精度的要求[15]。

4 实验验证与误差分析

4.1 实验环境

将编码器精码光电信号输出端与自动补偿系统连接，利用偏差补偿算法，系统对其直流电平漂移、等幅性偏差、正交性偏差、以及含有二次、三次、五次谐波的正弦性偏差进行统一修正。

实验所用的 24 位绝对式编码器为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制，码盘刻有四条精码道，相位互差 90°，最外圈精码道由 16384 对线构成，刻划周期约为 79.1″。其分辨力为 0.077″，精度为≤1″。

编码器细分精度利用莫尔条纹信号细分误差的峰值大小来检测评价。文中采用光学多面体和光电自准直仪检测 24 位光电编码器补偿前后的静态细分误差，高精度光电编码器的实验环境如图 5 所示。

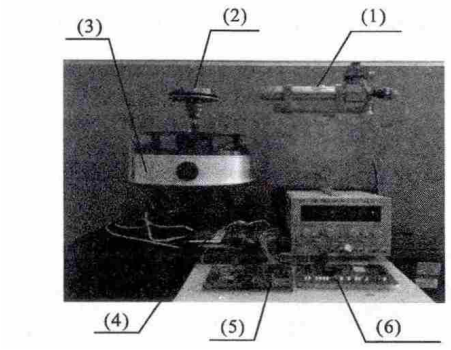


图 5 高精度光电编码器的实验环境

Fig.5 Experimental environment of high precision photoelectric encoder

细分误差检测装置由：(1) 0.2 s 自准直仪、(2) 24 面光学多面体、(3) 24 位高精度绝对式光电编码器、(4) 辅助补偿系统调试的电路板、(5) 莫尔条纹光电信号自动补偿系统板、(6) 编码器角度代码输出的显示灯排等组成。

测量操作时，将光电自准直仪的轴线与多面体的一个面垂直，首先令装置调零，采集编码器细分周期的零点位置，调节自准直仪旋钮刻度至零；然后缓慢旋转编码器，利用显示灯排的精码细分位，每隔四个分辨力测量一个角度点，记录自准直仪的值和编码器显示的值，两者之差即为编码器信号的细分误差。

4.2 实验结果及数据分析

由于高精度编码器采用四读数头设计，其中 0° 位置与 180° 位置为对径、90° 位置与 270° 位置为对径，因此选择在读数头 180°、270° 位置各测量一个细分周期。其补偿前后的静态细分误差检测结果如图 6、7 所示。

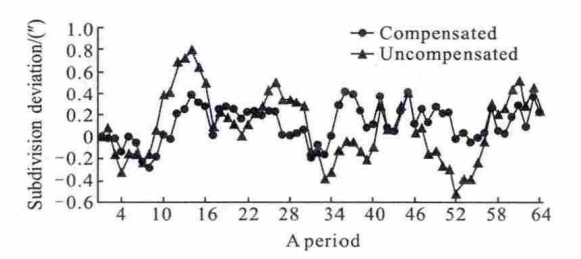


图 6 180° 位置静态细分误差补偿前后的检测曲线

Fig.6 Uncompensated and compensated test curves of static subdivision error at 180°

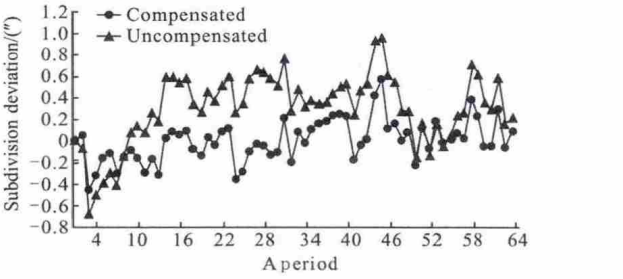


图 7 270° 位置静态细分误差补偿前后的检测曲线

Fig.7 Uncompensated and compensated test curves of static subdivision error at 270°

可见，在 180° 位置，补偿前细分误差最大值为 +0.8″，最小值为 −0.51″，峰值误差为 +1.31″；补偿后细分误差最大值为 +0.41″，最小值为 −0.28″，峰值误差为 +0.69″，峰值误差减小为 0.62″。

在 270° 位置，补偿前细分误差最大值为 +0.96″，最小值为 −0.68″，峰值误差为 +1.64″；补偿后细分误差最大值为 +0.57″，最小值为 −0.46″，峰值误差为 +1.03″，峰值误差减小为 0.61″，细分精度明显提高。

此外，利用细分误差检测装置检测细分误差时还含有装置的系统误差和读数的随机误差。

5 结 论

针对莫尔条纹光电信号的质量指标，文中在提

出各个偏差补偿算法的基础上建立了光电信号细分误差的综合补偿模型,并设计了自动补偿系统;明确了该系统在编码器研制、工作过程中所起的作用及使用场合;且详细介绍了补偿系统的构成及相关的软硬件设计;进一步阐述了系统的工作原理及自动补偿处理的具体实现过程。最后以 24 位高精度编码器为实验对象,通过对读数头位置莫尔条纹信号静态细分误差的检测,补偿系统自动实现了编码器精码信号直流电平漂移、等幅性偏差、正交性偏差及二次、三次、五次谐波偏差的综合补偿,可使实际的静态细分误差减小 0.61″。该系统的应用,可有效地提高编码器的细分精度、环境适应性和智能性。

参考文献:

[1] Ye Shengxiang. Accurate Measurement about Photoelectric Shift [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
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.

[2] Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoder [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.

[3] Heydemann L M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers [J]. ***Applied Optics***, 1981, 20(3): 3382-3384.

[4] Michael Warner, Victor Krabbendam, German Schumacher. Adaptive periodic error correction for heidenhain tape encoders[C]//SPIE, 2008, 7012: 70123N.

[5] Yuji Matsuzoe, Nobuhiko Tsuji, Toru Yoshizawa. Error dispersion algorithms to improve angle precision for an encoder [J]. ***Optical Engineering***, 2002, 41(9): 2282-2289.

[6] Tan K K, Zhou Huixing, Lee Tong heng. New interpolation method for quadrature encoder signals [J]. ***IEEE***, 2002, 51 (5): 1073-1079.

[7] Yu Hai, Wan Qiuhua, Wang Shujie, et al. High-precision real-time angle reference in dynamic measurement of photoelectric encoder[J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(3): 447-455. (in Chinese)
于海, 万秋华, 王树洁, 等. 编码器动态检测系统高实时性高精度角度基准设计[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 447-455.

[8] Dong Jing, Wan Qiuhua, Zhao Changhai, et al. Current situation and prospect of fault diagnosis for photoelectric encoder[J]. ***Chinese Optics***, 2015, 8(5): 755-767. (in Chinese)
董静, 万秋华, 赵长海, 等. 光电编码器故障诊断技术研究现状与展望[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 755-767.

[9] Hong Xi, Xu Zhijun, Yang Ning. Error compensation of optical encoder based on RBF network [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2008, 16(4): 598-604. (in Chinese)
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.

[10] Gao Xu, Wan Qiuhua, Wang Shujie, et al. Development of signal compensation technology for photoelectric rotary encoder[J]. ***Optoelectronic Technology***, 2013, 33(2): 131-136. (in Chinese)
高旭, 万秋华, 王树洁, 等. 光电轴角编码器信号补偿技术的研究进展[J]. 光电子技术, 2013, 33(2): 131-136.

[11] Gao Xu, Wan Qiuhua, Zhao Changhai, et al. Real-time compensation of subdivision error for the moire fringe photoelectric signal [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(11): 1-5. (in Chinese)
高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号细分误差的实时补偿[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 1-5.

[12] Gao Xu, Wan Qiuhua, Zhao Changhai, et al. Real-time compensation of orthogonality deviation for the Moire fringe photoelectric signal [J]. ***Optics and Precision Engineering***, 2014, 22(1): 227-234. (in Chinese)
高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(1): 227-234.

[13] Gao Xu, Wan Qiuhua, Lu Xinran, et al. Automatic compensation of sine deviation for grating fringe photoelectric signal [J]. ***Acta Optica Sinica***, 2013, 33 (7): 0712001-1-6. (in Chinese)
高旭, 万秋华, 卢新然, 等. 光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712001: 1-6.

[14] Gao Xu, Wan Qiuhua, Yang Shouwang, et al. The improved PSO algorithms for improving the subdivision accuracy of the photoelectric rotary encoder [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2013, 42(6): 1508-1513. (in Chinese)
高旭, 万秋华, 杨守旺, 等. 提高光电轴角编码器细分精度的改进粒子群算法 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(6): 1508-1513.

[15] Fei Yetai. Error Theory and Data Processing [M]. 4th ed. Beijing: China Mechine Press, 2000. (in Chinese)
费业泰. 误差理论与数据处理 [M]. 第 4 版. 北京: 机械工业出版社, 2000.