

光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿

高 旭^{1,2} 万秋华¹ 卢新然¹ 孙 莹¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为了提高光电轴角编码器的细分精度, 提出一种光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿方法, 依据编码器精码转换的方波信息实现精码信号的自适应采样, 完成光电编码器精码时域信号向等间隔空域信号的转换; 通过实际采集 24 位光电编码器周期光栅条纹光电信号, 并对其离散幅值序列做频谱分析, 揭示了高精度光电编码器信号正弦性偏差的主要谐波成分并建立波形方程; 根据光栅条纹光电信号的数学模型及幅值细分原理, 建立了信号细分误差的补偿模型; 采用粒子群优化算法辨识波形方程中的 7 个待定参量, 并对信号进行修正。应用细分误差补偿模型对补偿前后的细分误差进行分析, 结果表明, 编码器光电信号的细分误差峰值由 0.923" 降低到 0.316"。该方法可实际应用于编码器系统, 能够提高编码器的环境适应性和测角可靠性。

关键词 几何光学; 光栅条纹; 正弦性偏差; 粒子群算法; 自动补偿

中图分类号 TP394.1; TH691.9 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0712001

Automatic Compensation of Sine Deviation for Grating Fringe Photoelectric Signal

Gao Xu^{1,2} Wan Qiuhua¹ Lu Xinran¹ Sun Ying¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to improve the subdivision accuracy of photoelectric rotary encoder, the method of automatic compensation of sine deviation for the grating fringe photoelectric signal is proposed. According to square wave information from precise code conversion, adaptive sampling of precise code signal is realized. The transformation process of precise code time domain signal to equal interval spatial domain signal is completed. Periodic grating fringe photoelectric signal of 24 bit photoelectric encoder is actually collected and frequency spectral analysis of discrete amplitude sequence for photoelectric signal is completed. The main harmonic components of sine deviation for high precision photoelectric encoder signal are revealed and waveform equation is established. Based on the mathematical model of grating fringe photoelectric signal and amplitude subdivision principle, compensation model of subdivision error is established. Seven undefined parameters of signal model are identified using particle swarm optimization (PSO) and the signal is corrected. Uncompensated and compensated subdivision error are analyzed using subdivision error compensation model. The experimental results show that the peak value of subdivision error is reduced from 0.923" to 0.316". This method can actually be used in encoder system, which improves environmental adaptability and angle measurement reliability of the encoder.

Key words geometric optics; grating fringe; compensation of sine deviation; particle swarm optimization; automatic compensation

OCIS codes 130.6010; 050.2770; 120.4640

收稿日期: 2012-12-07; 收到修改稿日期: 2013-02-21

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目资助课题。

作者简介: 高 旭(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事光电位移精密测量技术方面的研究。

E-mail: gaox19870513@163.com

导师简介: 万秋华(1962—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电位移精密测量技术方面的研究。

E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn(通信联系人)

1 引言

航空航天技术的发展对高精度光电编码器在恶劣工作条件下的稳定性及测角精度提出更高的要求。空间环境的温度、湿度变化及元器件老化等因素直接影响光电信号的质量^[1,2],其中光栅条纹信号细分误差是影响测角精度的主要因素之一,而正弦性偏差对编码器细分精度的影响较大,自动补偿信号的正弦性偏差对提高光电编码器的测角精度具有重要意义^[3,4]。

近年来,国内外多家研究单位开展了光栅条纹光电信号细分误差补偿的研究,大多都是从光栅条纹光电信号的直流偏移误差、等幅性误差、正交性偏差着手^[5,6],对信号正弦性偏差有效的自动补偿方案研究较少。其中海德汉公司为美国伽利略望远镜研制的编码器,采用了多读数头平差和全周系统误差的修正^[7,8],测角系统精度达到 $0.036''$,其细分精度指标为 $1\% \sim 2\%$;日本先进工业科学技术国际研究所研制的自动高精度编码器标校系统也是采用了全周精确标校后进行系统误差的修正^[9,10],标校精度达 $\pm 0.05''$;Tan等^[11]采用李萨如图形映射的方法来间接减小正弦性偏差对细分误差的影响,但是当信号中含有谐波成分影响时,运用李萨如图形观察法不能准确反映出信号的质量;印度Kaul等^[12]通过高精度旋转台对16位光电编码器的测角误差进行离散标定,采用傅里叶级数的展开式来描述其测角误差曲线,提出基于傅里叶变换理论的谐波分析法,实现10次以内谐波的误差补偿;国内天津大学采用空间滤波的方法,利用正弦指示光栅来消除光电信号的正弦性偏差,改善了光栅条纹信号的质量^[13];中国科学院长春光学精密机械与物理研究所洪喜等^[14]提出一种基于径向基函数的误差修正技术,建立一种具有良好学习能力和泛化能力的神经

网络,提高了编码器系统的测量精度。

目前,现有的光栅条纹光电信号正弦性偏差补偿方案,一方面由于算法复杂、运行缓慢,无法匹配编码器角度输出的响应时间,另一方面,大多数方法属于编码器工作的后期处理,只能在实验室的条件下进行,不能实现工作现场及工作环境变化的自动补偿。本文提出一种光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿方法,来减小由正弦性偏差对细分精度的影响。随着对光栅条纹信号直流漂移误差、等幅性偏差、正交性偏差三种偏差补偿技术的成熟,假设信号中只存在正弦性偏差,基于光栅条纹光电信号的数学模型及编码器信号采集的离散幅值序列,分析信号频谱成分并建立波形方程,采用粒子群优化算法对非线性波形方程进行优化求解,辨识波形参数,最后实现光栅条纹信号正弦性偏差的自动补偿。此法在不增加外部处理电路的情况下,具有补偿算法运算量小、执行效率高、补偿精度高等优点,能够在无人环境下实现信号正弦性偏差的智能补偿与在线自动修正。

2 自动补偿原理

理想光栅条纹光电信号的细分原理是利用两路正弦细分信号来完成角度求解。理想的光栅条纹光电信号分别为

$$u_a(\theta) = A \sin \theta, \quad u_b(\theta) = A \cos \theta, \quad (1)$$

式中 A 为信号的幅值, θ 为转角理论值,其角度 θ 计算公式为

$$\theta = \arctan \left[\frac{u_a(\theta)}{u_b(\theta)} \right]. \quad (2)$$

由傅里叶变换理论可知,高精度光电编码器实际输出的周期光栅条纹光电信号可用傅里叶级数的展开式表示:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega_1 t) + b_1 \sin(\omega_1 t) + a_2 \cos(2\omega_1 t) + b_2 \sin(2\omega_1 t) + \cdots + a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t) + \cdots = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)], \quad (3)$$

则实际的两路光栅条纹光电信号可以表示为

$$u_{\sin}(\theta) = A_0 + A_1 \sin(\theta + c_1) + \cdots + A_i \sin(i\theta + c_i), \quad u_{\cos}(\theta) = B_0 + B_1 \sin(\theta + d_1) + \cdots + B_i \sin(i\theta + d_i), \quad (4)$$

根据光电信号的细分原理,则细分误差 $\Delta\theta$ 为

$$\Delta\theta = \arctan \left[\frac{u_{\sin}(\theta)}{u_{\cos}(\theta)} \right] - \theta, \quad (5)$$

那么,编码器光电信号细分误差的补偿模型为

$$\theta = \arctan \left[\frac{u_{\sin}(\theta)}{u_{\cos}(\theta)} \right] - \Delta\theta. \quad (6)$$

因此,求出(4)式中的各项波形参数,就可以通过(6)式实现光栅条纹光电信号正弦性偏差的补偿。

3 自动补偿的实现

3.1 等间隔空域信号的获取

以中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制的24位绝对式光电轴角编码器为实验对象,其码盘刻有4条精码道,4条码道相位互差 90° ,每条精码道由16384 lp/circle的光栅码道构成,每对线对应转角 $79.1''$,在一个精码周期内细分1024份,分辨力为 $0.078''$ 。而实际输出的光栅条纹光电信号为近似的正弦波。

当编码器匀速转动时,编码器光电信号处理系统采集的信号为等间隔的角位置数据,但是在实际的工作现场,编码器无法做到理想的匀速,那么实际采集的光栅条纹信号为非等间隔的时域信号,为了对光电信号进行频谱分析,需要将实际采集的幅值序列向等间隔的空域信号转换。

利用光电编码器精码转换的方波信号计算编码器的转动速率,然后自适应改变精码信号的采样频率。设处理器计算得到编码器精码信号的转动速率为 ω circle/s,则精码信号采样频率 f_{sample} 为

$$f_{\text{sample}} = n\omega, \quad (7)$$

式中 n 为一个光栅周期内的采样点数, n 取值64。由编码器数据处理软件依据转速自适应调整采样频率,对精码正弦信号实施同步采样,实现了等间隔角位置信号的获取。

3.2 波形方程的建立

基于傅里叶变换理论,对此24位编码器的精码周期信号做频谱分析^[15,16],以精码正弦信号为例,如图1所示。

可见,高精度光电编码器光栅条纹光电信号经过差分放大、对径相加处理后,三次、五次谐波分量为主要误差分量,高于五次的谐波含量很小,可以忽

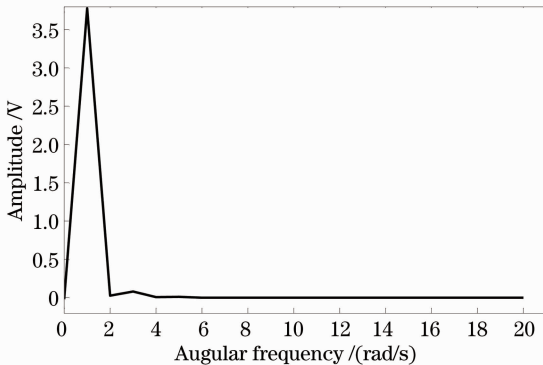


图1 精码正弦信号频谱分析图

Fig. 1 Frequency spectrum analysis of precise code sine signal

略不计,信息的丢失也不会对信号的质量有影响。

因此,编码器光电信号波形方程可设为

$$u_{\sin}(\theta) = A_0 + A_1 \sin(\theta + c_1) + A_3 \sin(3\theta + c_3) + A_5 \sin(5\theta + c_5), \quad (8)$$

$$u_{\cos}(\theta) = B_0 + B_1 \sin(\theta + d_1) + B_3 \sin(3\theta + d_3) + B_5 \sin(5\theta + d_5). \quad (9)$$

由(8)、(9)式可知,对于每个转角 θ 都对应一个信号幅度 $u_{\sin}(\theta)$ [或 $u_{\cos}(\theta)$],且信号波形方程中分别含有7个待定参数,为消除、补偿信号中的三次、五次误差分量,必须分别求出这7个参数,才能确定光电信号的波形方程,最后使用(8)、(9)式对编码器精码信号进行在线补偿,以提高编码器光电信号的细分精度。

3.3 基于粒子群算法的波形参数辨识

在测量数据处理中,针对非线性模型广泛使用非线性最小二乘法估计参数理论,(8)、(9)式的非线性模型可记为

$$u = f(\theta, \alpha), \quad (10)$$

式中 u 为输出, θ 为输入, α 为参量(即波形方程中的7个未知参数)。每个光栅周期内实际采集的信号数据为 $(\theta_1, u_1), (\theta_2, u_2), \dots, (\theta_{64}, u_{64})$,以信号的误差平方和最小作为估计参数的代价函数:

$$e = \min \left\{ \sum_{k=1}^N [u_k - f(\theta_k, \alpha)]^2 \right\}. \quad (11)$$

鉴于高斯-牛顿迭代类等估参算法依附初始值的特点,研究了基于群体智能全局优化技术的粒子群算法(PSO)^[17~19]。该算法是Poli等^[20]受鸟类捕食原理启发而提出的一种进化算法,模拟鸟群捕食行为,通过个体间的相互协作使群体达到最优。粒子群由一群粒子组成,每个粒子代表7维未知参量 α 的一个候选解,所有的粒子都有一个由代价函数(11)式决定的适应值,每个粒子还有一个速度决定它们飞翔的方向和距离。PSO初始化为一群随机粒子,即所有粒子的初始速度和位置(未知参量的解)随机产生,然后粒子们通过迭代不断地追随当前的最优粒子在解空间中搜索最优解。

在迭代过程中,粒子通过跟踪两个“优化极值”来更新自己,第一个极值是粒子自身找到的最佳位置(迭代历史中使代价函数值最小的一组参量值),这个极值称为个体优化极值,记为 $p_{\text{best}} = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{i7})$;另一个极值是整个群体目前找到的最佳位置,这个极值称为全局优化极值,记为 $g_{\text{best}} = (g_{i1}, g_{i2}, g_{i3}, \dots, g_{i7})$ 。对每一代个体,在找到这两个最优值时,粒子根据(12)、(13)式更新自身的速度和位置:

$$v_{id}(k+1) = \omega v_{id}(k) + c_1 r_1 [p_{id} - x_{id}(k)] + c_2 r_2 [g_{id} - x_{id}(k)], \quad (12)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1), \quad (13)$$

式中 k 为迭代序号; r_1, r_2 通常为 $[0, 1]$ 区间内的两个相互独立且均匀分布的随机数, 即 $r_1, r_2 \sim U(0, 1)$; $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}, x_{i5}, x_{i6}, x_{i7}) = (A_{i,0}, A_{i,1}, c_{i,1}, A_{i,3}, c_{i,3}, A_{i,5}, c_{i,5})$ 为粒子 i 的位置, 分别表示编码器光电信号波形(8)、(9)式中的 7 个参数; $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, v_{i4}, v_{i5}, v_{i6}, v_{i7})$ 为粒子 i 当前速度, 速度 v 的取值范围为 $v \in [-1, 1.8]$, 其在迭代过程中动态变化公式为

$$v = \begin{cases} v_{\max}, & v > v_{\max} \\ v_{\min}, & v < v_{\min} \end{cases} \quad (14)$$

式中 c_1 为粒子自身加速度权重系数, c_2 为全局加速度权重系数, 分别用来调节粒子朝着 p_{ibest} 和 g_{best} 方向移动的速度, 一般在 $0 \sim 2$ 之间取值; ω 为惯性权重, 是该算法中非常重要的参数, 较大的惯性权值有利于跳出局部最小点, 而较小的惯性权值有利于算法收敛。采用惯性权重自适应群体优化极值和迭代次数的动态改进策略, 其变化范围 $\omega \in [0.4, 0.9]$ 。预先设定粒子 i 的位置 x_i 与当前迭代中群体优化极值 g_{id} 距离的两个参量: l_{\max} 与 l_{\min} , 惯性权重 ω 的设置随着距离参数 l 和迭代次数的变化而动态变化, 其公式为

$$\omega = \begin{cases} \omega_{\min}, & l < l_{\min} \\ \omega_{\max} - \frac{(l - l_{\min})(\omega_{\max} - \omega_{\min})k}{(l_{\max} - l_{\min})k_{\max}}, & l_{\min} < l < l_{\max} \\ \omega_{\max}, & l > l_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

根据粒子群优化算法原理, 以(11)式为代价函数, 以实际信号采样值作为适应值, 对信号波形方程

中的参数进行辨识。当达到最大迭代次数 N 或前后相邻两次迭代计算的群体最优极值间的均方误差 ϵ 在一定范围内时, 输出波形参数的辨识结果为 g_{best} , 即使所有角度下信号平方误差之和最小的这组参量值。其参数辨识程序的流程图如图 2 所示。

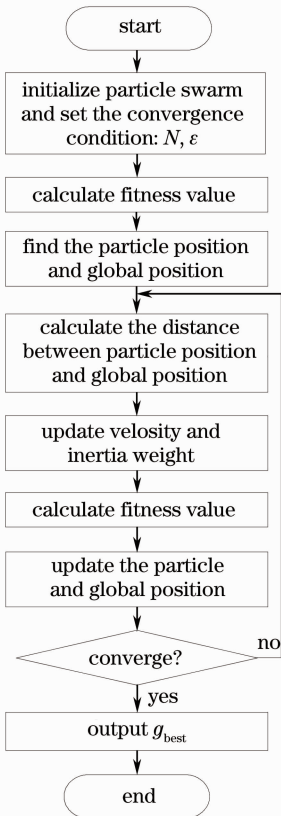


图 2 粒子群优化算法流程图

Fig. 2 Flowchart of PSO algorithm

4 实验及数据分析

4.1 波形参数辨识

以 24 位光电编码器为实验对象, 利用上述的粒子群优化算法, 以待定参数为粒子位置坐标, 以信号误差平方和的最小函数作为代价函数, 分别对编码器光电信号波形方程中的待定参数进行辨识, 以实际采集的一个光栅周期的精码正余弦信号数据为例, 通过计算, 给出一组波形参数的辨识结果, 其辨识结果如表 1 所示。

4.2 误差补偿及数据分析

信号的波形参数确定之后, 可以直接对周期光栅条纹光电信号进行补偿, 消除三次和五次奇次谐波, 进而实现编码器光电信号细分误差的自动补偿。为验证补偿效果, 在一个细分周期内共测量 64 个点, 对编码器光电信号补偿前后的细分精度进行检测^[21], 动态细分误差检测结果如图 3 所示。

可见, 补偿前的光栅条纹光电信号细分误差最大值为 $+0.449''$, 最小值为 $-0.474''$, 峰值误差为 $0.923''$; 补偿后的光电信号细分误差明显降低, 误差

表1 信号模型参数辨识结果

Table 1 Identification results of signal model parameters

Parameter	$A_0(B_0) / V$	$A_1(B_1) / V$	$c_1(d_1) / \text{rad}$	$A_3(B_3) / V$	$c_3(d_3) / \text{rad}$	$A_5(B_5) / V$	$c_5(d_5) / \text{rad}$
Sine signal	-0.0179	3.7763	0.026	-0.0796	3.2261	0.0109	0.4688
Cosine signal	-0.0642	-3.7346	1.5902	0.079	8.0719	-0.01	2.0662

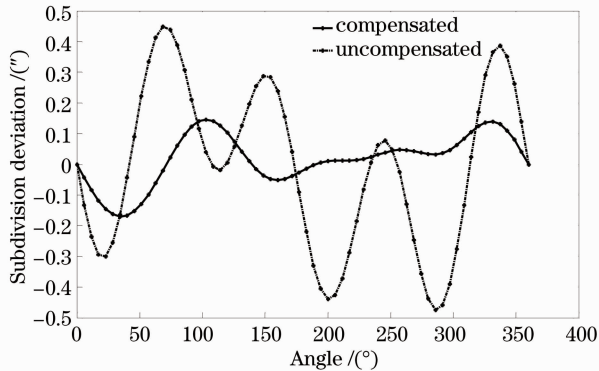


图3 补偿前后的动态细分误差曲线

Fig. 3 Uncompensated and compensated dynamic subdivision error

最大值为 $+0.146''$ ，最小值为 $-0.17''$ ，峰值误差为 $0.316''$ ，细分精度明显提高。

5 结 论

针对光栅条纹电信号的正弦性偏差，提出一种基于粒子群优化算法的自动补偿方法。以24位光电轴角编码器为实验对象，利用傅里叶变换理论，说明了高精度光电编码器光栅条纹信号正弦性偏差的主要谐波成分并建立信号波形方程，基于编码器信号实际采集数据，采用粒子群优化算法对模型参数进行辨识，并应用参数辨识结果实现编码器精码信号奇次谐波的补偿。对补偿前后的动态细分误差进行分析，实验结果表明：采用此补偿方法，光栅条纹电信号的细分误差峰值由 $0.923''$ 降低到 $0.316''$ 。此方法实现了电信号正弦性偏差的自动补偿，有效解决了编码器在恶劣工作环境下受信号正弦性偏差交变影响而导致的工作稳定性问题，保证了编码器的细分精度，提高了编码器的空间适应性和测角可靠性。此方法还可以应用于磁编码器、光栅尺等其他高精度的位移测量领域。

参 考 文 献

- Cui Desheng, Guo Weiling, Cui Bifeng *et al.*. Preparation and temperature-variation properties of high color rendering index LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0123005
- 崔德胜, 郭伟玲, 崔碧峰等. 高显色LED的制备及其变温特性[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0123005
- Zhang Jiangfeng, Cao Xuedong, Wu Shibin *et al.*. Temperature effect on high precision measurement of refractive index

- homogeneity of optical glass [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(1): 011203
- 张建锋, 曹学东, 吴时彬等. 温度对高精度光学玻璃折射率均匀性检测的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, **49**(1): 011203
- Ye Shengxiang. Accurate Measurement about Photoelectric Shift [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003
- 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
- Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(2): 379~386
- 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
- Long Kehui, Yang Shouwang, He Jinqi *et al.*. Temperature characteristics and compensation of photoelectrical encoder [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 320~323
- 龙科慧, 杨守旺, 何金琪等. 光电编码器温度特性分析与补偿方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 320~323
- Lü Hengyi, Liu Yang, Wang Yandong *et al.*. Intelligent compensation method of Moire fringe orthogonality deviation[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2010, **31**(9): 2075~2080
- 吕恒毅, 刘杨, 王延东等. 叠栅条纹正交偏差的智能补偿方法[J]. *仪器仪表学报*, 2010, **31**(9): 2075~2080
- Dario Mancini, Annalina Auricchio, Massimo Brescia *et al.*. Encoder system design: strategies for error compensation[C]. *SPIE*, 2008, **3351**: 380~386
- Michael Warner, Victor Krabbendam, German Schumacher. Adaptive periodic error correction for heidenhain tape encoders [C]. *SPIE*, 2008, **7012**: 70123N
- Tsukasa Watanabe, Hiroyuki Fujimoto, Kan Nakayama *et al.*. Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]. *SPIE*, 2001, **4401**: 267~274
- Yuji Matsuzoe, Nobuhiko Tsuji. Error dispersion algorithms to improve angle precision for an encoder [J]. *Opt. Eng.*, 2002, **41**(9): 2282~2289
- K. K. Tan, H. X. Zhou *et al.*. New interpolation method for quadrature encoder signals [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2002, **51**(5): 1073~1079
- S. K. Kaul, A. K. Tickoo, R. Koul *et al.*. Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoders using harmonic analysis [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2008, **586**(2): 345~355
- Chunhai Wang, Guoxiong Zhang, Shangqi Guo *et al.*. Auto correction of interpolation errors in optical encoders[C]. *SPIE*, 2002, **2718**: 439~447
- 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
- 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
- Chen Liang, Yang Jibin, Zhang Xiongwei. Coordinate Measuring Machine[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008
- 陈亮, 杨吉斌, 张雄伟. 信号处理算法的实时DSP实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2008
- Xiao Yanshan, Cao Yiping, Wu Yingchun *et al.*. Gamma nonlinearity correction based on Fourier spectrum analysis for phase measuring profilometry [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(12): 1212004

- 肖焱山, 曹益平, 武迎春等. 基于傅里叶频谱分析的相位测量轮廓术系统 Gamma 非线性校正方法[J]. 光学学报, 2012, **32**(12): 1212004
- 17 W. S. Lee, Y. T. Chen, T. H. Wu. Optimization for ice-storage air-conditioning system using particle swarm algorithm [J]. *Applied Energy*, 2009, **86**(9): 1589~1595
- 18 R. C. Eberhart, Y. H. Shi. Particle swarm optimization: developments, applications and resources[C]. Soul: Congress on Evolutionary Computation 2001, 2001, **1**: 81~86
- 19 Wei Fuya, Liu Hongwu, Fu Chunlin. Reconstruction of fiber grating parameters from reflectivity using quantum particle swarm optimization algorithm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205004
- 韦芙芽, 刘洪武, 付春林. 基于量子粒子群优化算法的光纤光栅参数重构[J]. 中国激光, 2011, **38**(2): 0205004
- 20 Riccardo Poli, James Kennedy, Tim Blackwell. Particle swarm optimization: an overview [J]. *Swarm Intelligence*, 2007, **1**(1): 33~57
- 21 Zhao Changhai. The Research of Measure Method of Dynamic Interpolation Errors of High Precision Photoelectric Encoder[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2008
- 赵长海. 高精度光电编码器动态细分误差的测量方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2008

栏目编辑: 何卓铭