

基于遗传算法的光栅信号辨识与偏差补偿研究

杨华晖^{1,2} 冯伟利³ 刘福²

¹军械工程学院导弹工程系, 河北 石家庄 050003

²军械技术研究所评估中心, 河北 石家庄 050003

³北京航天计量测试技术研究所光电仪器研究室, 北京 100076

摘要 为减小圆光栅测量过程中叠栅条纹信号的细分误差,提出了一种对叠栅条纹采样信号进行参数辨识与偏差补偿的方法。该方法运用遗传算法参数辨识理论,不受信号模型参数初值选取影响,寻优特性和适用性良好,使复现的信号模型较好地拟合原始采样信号。信号采样实验中控制光栅匀速转动,采样两个栅距内的周期信号,其次对采样得到的离散数据进行频谱分析,建立光栅信号的数学模型,进而通过遗传算法对引起细分误差的信号参数进行识别并对细分误差进行数值补偿。实验结果表明,遗传算法对构建的信号模型参数辨识准确;对比补偿前后李萨如图形,验证了该方法对叠栅条纹信号正弦性误差具有良好的补偿效果;检测单个栅距内的细分误差,补偿前后误差值由 10.65"减小到 3.31"。该方法适用于光栅编码器等位移测量系统,保证测量精度和可靠性。

关键词 测量; 叠栅条纹; 细分误差; 遗传算法; 参数识别; 频谱分析

中图分类号 TP391.4; TH71 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.121201

Identification and Deviation Compensation Research for Grating Signals Based on Genetic Algorithm

Yang Huahui^{1,2} Feng Weili³ Liu Fu²

¹Department of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

²Assessment Center, Ordnance Technological Research Institute, Shijiazhuang, Hebei 050003, China

³Laboratory of Optoelectronic Apparatus, Beijing Aerospace Institute for Metrology and Measurement Technology, Beijing 100076, China

Abstract In order to eliminate the subdivision error of moiré fringe signals in the circular grating measurement process, a parameter identification and deviation compensation method for grating sampled signal is proposed. The method is based on the parameter identification theory of the genetic algorithm and cannot be affected by initial signal model parameters with characteristics of optimization and applicability. The regenerated signal model can fit the original signal well. The periodic signals between two grating pitches are sampled with grating rotating at a constant speed in sampling experiments. From the sampled discrete data, the frequency spectra are obtained and analyzed for establishing the mathematical model of grating signals. The parameters which cause the subdivision error are identified by using the genetic algorithm to compensate the subdivision error. The experimental results show that the parameters of signal model constructed by genetic algorithm are identified accurately. The sine deviation of moiré fringe signals is compensated by comparing the Lissajous figures with and without compensation. The subdivision error detected in one grating pitch decreases from 10.65" to 3.31". This method can actually be used in grating encoder system and other displacement measuring systems, which ensures the measurement accuracy and reliability.

Key words measurement; grating moiré fringe; subdivision error; genetic algorithm; parameter identification; spectral distribution

收稿日期: 2016-07-29; **收到修改稿日期:** 2016-08-11; **网络出版日期:** 2016-11-30

基金项目: 军工计量科研项目(J032008A005)

作者简介: 杨华晖(1992—),男,硕士研究生,主要从事装备计量检定方面的研究。E-mail: yanghuahui1992@163.com

导师简介: 刘福(1961—),男,硕士,高级工程师,硕士生导师,主要从事现代计量技术方面的研究。

E-mail: vip850522@163.com

OCIS codes 120.4120; 120.5050

1 引言

光栅编码器是用于角度、长度等几何量计量的精密传感器,具有数字化测量、适用范围广、抗干扰性和可靠性等优点,在仿真测试转台、目标跟踪设备以及各种校准标定系统中得到广泛应用^[1-2]。未来随着制导半实物仿真研究、惯性测试设备校准需求的增加和目标跟踪技术的发展,光栅测量技术以其精度高、实时响应快的优点将有更好的发展前景。

叠栅条纹信号细分技术是其实现精密测量的基础,提高光栅输出的两路正弦和余弦信号的质量可以有效减小细分误差。但在光栅实际输出的精码叠栅条纹信号中,由于系统受到刻线不均匀、光栅透光质量差和光电转换效果的影响,叠栅条纹信号中会存在直流电平、高频噪声、幅值不等、波形畸变、相位偏移等引起的误差成分,如果不对采样数据进行滤波处理,则严重影响叠栅条纹信号数字化细分精度^[3-4]。

为提高光栅测量精度和信号质量,国内外对补偿光栅编码器的细分误差方法进行了深入研究^[5-6]。特别是中国科学院长春光学精密机械与物理研究所采用多种方法对其研制的绝对式编码器的细分误差进行补偿,其基本思路是运用不同算法对构建的叠栅条纹信号模型进行质量评估和偏差修正。最小二乘法曲线拟合可以对非均匀采样的叠栅条纹信号进行重构,有效地分析和处理变频信号产生的动态细分误差^[7];傅里叶变换算法可求取波形信号参数,通过去除信号模型中质量影响因素提高光栅尺的细分精度^[8-9],具有测量速度快、原理简单等特点;经验模态分解(EMD)算法通过提取与基波时域频率匹配的本征模态函数包络分量,抑制原始信号的谐波分量,可有效改善光栅信号质量,其测速稳定性高,抗干扰能力强^[10-12];牛顿迭代法可将光栅精码采样信号修正至标准正余弦信号,其过程不需要高精度仪器作为参考,主要用于小型光电编码器处理电路^[13-14];高分辨率数字电位计实时补偿法通过综合误差补偿模型,结合数字信号处理(DSP)和复杂可编程逻辑装置(CPLD)建立自动补偿系统,具有补偿精度高、自动化修正等特点^[15-16];粒子群参数辨识方法对波形方程中待定参量进行辨识,进而通过辨识模型补偿编码器细分误差,具有可靠性高、环境适应性强、实时响应快和补偿精度高等优点^[17]。综上所述,运用优化算法实现信号模型的参数辨识,可以较好地满足光栅测量中高分辨率和快速响应的要求,其次本文实验圆光栅主要配合精密轴系和伺服电机工作在匀速转动状态,因此提出了一种利用离散傅里叶变换(DTFT)对该型圆光栅采样信号进行频谱分析,进而通过遗传算法(GA)对构建的信号模型进行参数辨识的补偿方法。GA是模拟生物种群在自然环境中的遗传、进化过程的一种自适应全局优化概率搜索算法,已经在参数辨识的工程实践中得到广泛应用^[18-19]。

2 信号模型的建立

2.1 采样信号的离散傅里叶变换

实验中通过采样得到的某路圆光栅叠栅条纹信号为时间间隔相等的离散数据,取某段时间内的采样数据作为整个时间轴上的非周期离散序列进行DTFT变换方式为

$$X[\exp(j\omega)] = \sum_{n=0}^N x(n) \cdot \exp(-j\omega n), \quad (1)$$

式中 $x(n)$ 为采样序列实数值, N 为序列长度, ω 为角频率, $X[\exp(j\omega)]$ 为变换得到的关于 ω 的连续周期函数,周期为 2π 。由于实验中圆光栅转动通过精密轴系受步进电机控制,因此取光栅匀速转动过程中近两个信号周期的实际采样点作为离散序列 $x(n)$,每个周期采样点数 $N=42$ 。

如图1所示,采样得到的离散时间序列的包络线为正弦波,但由于信号中混叠了噪声成分采样序列明显发生了漂移和畸变。运用Matlab软件对采样得到的离散时间信号做DTFT,观察采样信号的频谱密度,如图2所示。

2.2 误差信号模型

由采样离散序列进行DTFT得到的图2可以看出, $\omega=0.05$ 处频谱密度为峰值,即为一次谐波含量的位置,靠近 $\omega=0$ 处和其他高次谐波位置频谱密度仍存在局部最大值,因此判断该型号圆光栅编码器经光电元件转换后含有直流偏差和高次谐波分量。高次谐波分量主要是由圆光栅随主轴轴系径向晃动、轴向跳动以

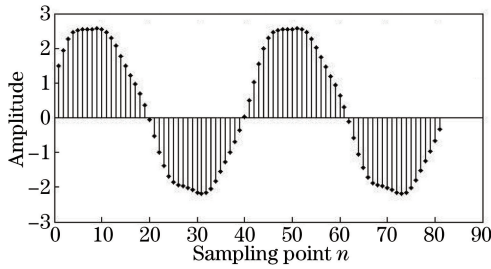


图1 采样信号的离散序列

Fig. 1 Discrete series of sampling data

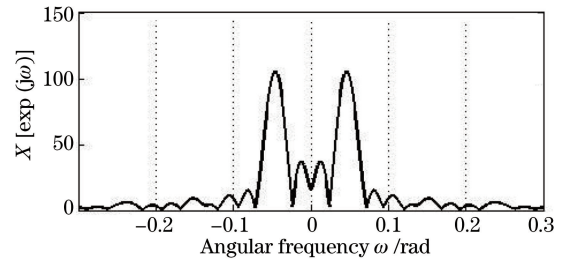


图2 离散序列的 DTFT

Fig. 2 DTFT of discrete series

及电机驱动误差的影响引起,直流漂移分量主要是由光栅本身透光量不均匀引起,两类误差因素都会对光栅细分精度造成影响。

进一步分析图2所示频谱密度图形可知,始信号波形中干扰多为二次、三次和五次谐波分量,即 $\omega = 0.2$ 处分量较小,不予考虑。因此构建信号模型对采样得到序列进行补偿^[17]。信号模型的表达式为

$$\begin{cases} y_{\sin} = A_0 + A_1 \sin(\omega + \theta_1) + \sum_{n=2,3,5} A_n \sin(n\omega + \theta_n) \\ y_{\cos} = B_0 + B_1 \sin(\omega + \varphi_1) + \sum_{n=2,3,5} B_n \sin(n\omega + \varphi_n) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 A_0 、 B_0 表示直流电平漂移偏差, A_1 、 B_1 表示幅值不等偏差, θ_1 、 φ_1 表示相位不等偏差,谐波分量 $A_n \sin(n\omega + \theta_n)$ 、 $B_n \cos(n\omega + \varphi_n)$ 表示正弦性偏差。根据叠栅条纹细分原理,则在一个光栅栅距内的细分角度的系统误差表达式为

$$\Delta\phi = \arctan \frac{y_{\sin}}{y_{\cos}} - \arctan \frac{\sin \omega}{\cos \omega}. \quad (3)$$

通过上述分析可知,要实现光栅信号补偿,可以通过求解引起细分误差的 A_n 、 θ_n 、 B_n 、 φ_n ,对采样数据进行补偿,使其更加接近理想信号波形,从而通过提高采样信号质量的方法减小细分误差。

3 遗传算法与参数辨识

3.1 遗传算法优化原理

上述建立的信号模型中待辨识参数有 A_n 、 θ_n 、 B_n 、 φ_n 共4种,但不同信号参数都有相对确定的取值范围。本文拟采用多变量优化和全局搜索的遗传算法进行辨识^[18]。

遗传算法是借鉴进化生物学中遗传、突变、杂交以及自然选择等规律演变而来的搜索启发式算法,其操作主要包括三个基本算子:选择、交叉、变异^[19]。选择是再生的过程,直接把优化的个体遗传到下一代,常用的有轮盘赌选法、随机遍历抽样法等;交叉是重组过程,将父代个体部分替换组成新个体;变异是个体基因值变动,概率较低。算法寻优过程如下:

- 1) 确定问题实际参数集,对参数进行编码;
- 2) 初始化种群,定义适应度函数;
- 3) 评价群体,计算目标函数,进行适应度调整;
- 4) 遗传操作,产生新的群体;
- 5) 重复执行步骤3)和4),直到满足停止规则。

3.2 信号模型的参数辨识过程

由建立的信号模型可知, A_n 、 θ_n 、 B_n 、 φ_n 为待求的模型参数值,因此该仿真模型可以通过遗传算法优化求解的方法,逐步缩小信号模型仿真值与实际信号采样值之间的误差取值,即 y_{\sin} 、 y_{\cos} 的辨识输出值以最佳结果逼近采样数据。

- 1) 目标函数。设 y_{\sin} 信号模型被辨识的参数表示为 \hat{a}_0 、 \hat{a}_i 、 $\hat{\theta}_i$,则由此确定的仿真值 \hat{y}_{\sin} 可以表示为

$$\hat{y}_{\sin} = f(\hat{a}_0, \hat{a}_i, \hat{\theta}_i), i = 1, 2, 3, 5, \quad (4)$$

式中描述的的信号模型参数值 $a_0, \hat{a}_i, \hat{\theta}_i$ 可由采样获得的该路光栅信号的 N 个采样序列实值 y_{\sin} 来确定。目标函数 J_{\sin} 值有最小值时,该圆光栅叠栅条纹信号建立的信号模型仿真值 \hat{y}_{\sin} 和实验采样实值 y_{\sin} 之间的偏差最小,因此该遗传算法的辨识问题可以描述为求函数 J_{\sin} 的最小值问题。辨识参数范围可根据高次谐波和直流分量占基波分量的大小确定,一般不超过基波幅值的 15%,相位参数范围取 $0 \sim 2\pi$ 。函数 J_{\sin} 可表达为

$$J_{\sin} = \sum_{n=1}^N (y_{\sin} - \hat{y}_{\sin})^2 \quad (5)$$

2) 适应度函数。遗传算法中适应度函数一般由目标函数映射而得,且函数设计主要满足单指、连续、非负以及计算量小、通用性强等特点。该模型中适应度函数采用目标函数倒数形式定义为^[18]

$$F_{\sin} = \frac{\epsilon_2}{J_{\sin} + \epsilon_1} \quad (6)$$

式中 ϵ_1 是为了防止发生溢出设置的常量, ϵ_2 是变换系数,防止 F_{\sin} 计算值过大,实际取值 $\epsilon_1 = 0.001, \epsilon_2 = 0.2$ 。

3) 编码、遗传算子和初始种群。选用二进制编码方式将待辨识参数设置为 9 个基因段的染色体,该编码方式简单易行,符合最小字符集的编码规则。选择算子采用“轮赌盘”选择方法,即以个体的适应度值与种群的适应度值来确定选择的概率;交叉概率 $P_c = 0.9$ 增大个体更新概率;变异概率 $P_m = 0.02$ 使算法保持局部搜索能力。初始种群规模 $M = 60$,可以较好地兼顾收敛速度和优化效果。

4) 终止条件。以终止代数和适应度误差作为算法结束条件,设定终止代数为 100,适应度误差为 0.01,上述条件满足任何一个都会停止优化计算。

3.3 辨识结果与模型验证

由上述采样得到的圆叠栅条纹 y_{\sin} 路输出序列值 $x(n)$,对该路信号模型进行参数辨识。运用 Matlab 软件编程对采样得到的离散信号值进行优化计算,其优化跟踪曲线如图 3 所示,得到的 9 个参数的辨识结果如表 1 所示。

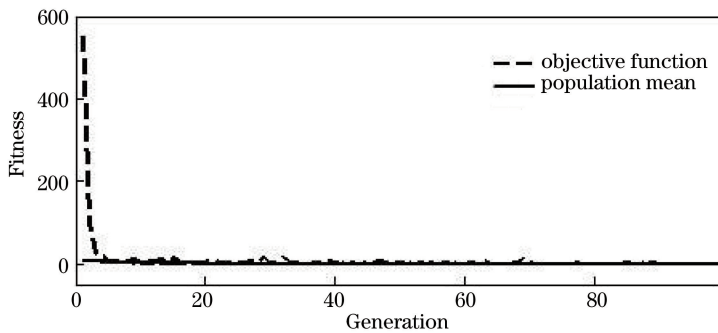


图 3 遗传算法优化跟踪曲线

Fig. 3 Optimal tracking curve of GA

表 1 信号模型参数辨识结果

Table 1 Parameter identification results of signal model

Parameter of signal model	Parameter range	Identified value
a_0	-1.0-1.0	0.1891
a_1	0-3.0	2.4952
θ_1	0-6.3	0.4491
a_2	-0.5-0.5	-0.1032
θ_2	0-6.3	0.6955
a_3	-0.3-0.3	0.1518
θ_3	0-6.3	0.7935
a_5	-0.5-0.5	-0.1154
θ_5	0-6.3	0.3031

由于该型圆光栅输出信号并不存在真实可靠的模型参数值,因此无法用模型参数辨识值和参数真值间误差考察其辨识结果。为较直观地验证辨识结果的正确性,取辨识结果构成的 \hat{y}_{\sin} 函数曲线与采样值进行拟合,仿真结果如图 4 所示。信号采样实验中采样序列总数 $M=83$,为量化辨识结果的准确性,取辨识模型的仿真输出值 \hat{y}_{\sin} 与采样实值 y_{\sin} 间最大误差值,如表 2 所示。

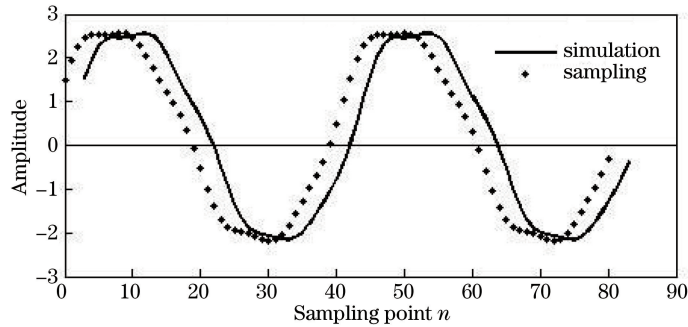


图 4 辨识曲线与采样值

Fig. 4 Identified curve and sampling data

表 2 辨识输出值与采样实值

Table 2 Identified output and sampling real value

Sequential value N	Sampling real value /V	Simulation value /V	Error /%
11	2.726	2.722	0.15
32	-2.290	-2.293	0.13
54	2.717	2.714	0.11
75	-2.253	-2.257	0.18

由图 4 和表 2 可以看出, y_{\sin} 路信号模型参数辨识结果与采样实验得到的离散序列 $x(n)$ 拟合较好,辨识模型输出结果与采样实值相对误差不超过 0.18%,因此该模型辨识结果既可以作为拟合曲线对信号质量做评估,也可由此构建光栅细分误差补偿模型实现对细分误差的补偿。

4 补偿结果和实验验证

4.1 辨识结果对信号质量的补偿

以某型圆光栅传感器为实验对象,刻线条数 8600 lp/cycle,通过伺服电机控制转轴使光栅传感器保持在低转速情况下,对两路光栅信号进行等间隔采样,单个栅距内采样点 $N=42$ 。运用上述叠栅条纹信号建模和参数识别方法,对采样离散点进行 DTFT 变换分析,对信号模型进行求解。通过解算出的信号模型,对采样离散点进行数值补偿,自动补偿原理为

$$\begin{cases} Y_{\sin} = y_{\sin} - \left[\hat{A}_0 + \sum_{n=2,3,5} \hat{A}_n \sin(n\omega + \hat{\theta}_n) \right] \\ Y_{\cos} = y_{\cos} - \left[\hat{B}_0 + \sum_{n=2,3,5} \hat{B}_n \sin(n\omega + \hat{\varphi}_n) \right] \end{cases}, \quad (7)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{N \cdot T}, \quad (8)$$

式中 y_{\sin} 、 y_{\cos} 表示采样点初始采样值, \hat{A}_n 、 \hat{B}_n 、 $\hat{\theta}_n$ 、 $\hat{\varphi}_n$ 为建立的信号模型参数辨识结果, Y_{\sin} 、 Y_{\cos} 表示采样点补偿后数值, ω 为信号的基波角频率,由光栅系统设定的采样时间 T 可以求出,如(8)式所示。

该数值补偿方法可有效消除原始采样信号中的直流漂移误差、高次谐波误差和相位不等误差。为便于观察,作出补偿前后两路信号的李萨如图形,如图 5、6 所示。从图中可以看出,修正后的采样数据提高了正弦性和正交性,信号的李萨如图形接近标准圆曲线。

图 7 为算法补偿后两路光栅信号的实值曲线,也可以看出信号曲线平滑过渡,无异常点出现,曲线接近理想波形,信号质量得到明显改善。

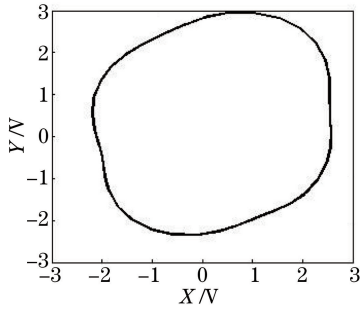


图 5 补偿前李萨如图形

Fig. 5 Lissajous figure before compensation

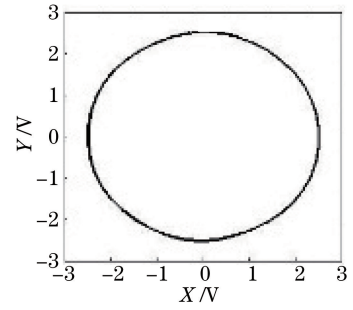


图 6 补偿后李萨如图形

Fig. 6 Lissajous figure after compensation

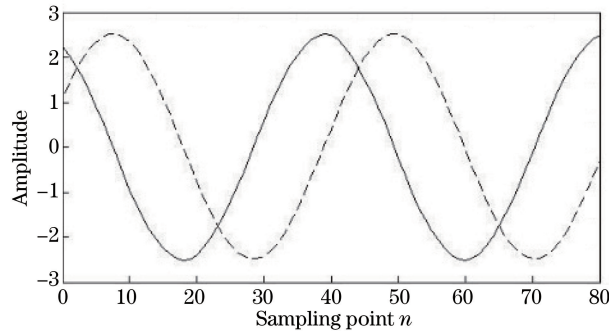


图 7 补偿后两路光栅信号

Fig. 7 Two grating signals after compensation

4.2 辨识结果对细分误差的修正

由于叠栅条纹需要转换为两路正交的编码信号后才能进行细分计数,因此细分误差检测实验采用在一个信号周期内检测细分计数值的方法,将补偿前后的离散采样数据输入数字细分电路,在不同位置测量细分电路的细分角度值,计算补偿前后采样信号的细分误差,得到误差对比曲线如图 8 所示。该型圆光栅单个光栅栅距对应角度值为 $150.70''$,通过计算可得,补偿前的栅距内细分误差峰值为 $10.65''$,补偿后误差峰值减小到 $3.31''$,细分精度得到改善,保证了光栅测量的稳定性。

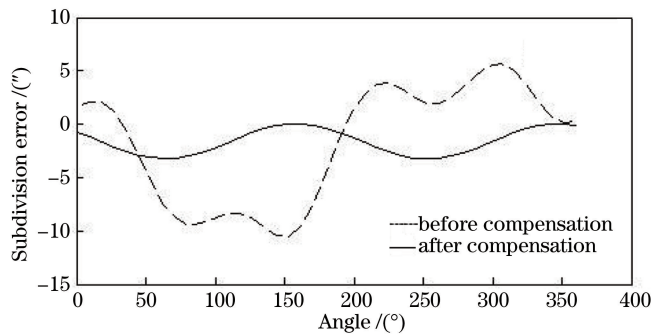


图 8 补偿前后检测的细分误差

Fig. 8 Subdivision error detected before and after compensation

5 结 论

主要针对光栅编码器叠栅条纹的信号模型辨识和偏差补偿进行研究,提出了一种基于遗传算法的信号模型参数辨识和离散数值补偿方法。对叠栅条纹采样得到的离散序列进行 DTFT 变换,依据频谱图建立光栅信号的数学模型;其次用遗传算法的求解信号模型,通过采样数据建立目标函数和适应度函数,对信号模型中的 A_n 、 θ_n 、 B_n 、 φ_n 进行优化求解,并与原始采样数据进行拟合比较,对比模型的仿真输出值 y_{sim} 与采样实值 y_{sin} 间最大误差值验证辨识模型的准确性;最后利用信号模型对采样数据进行数值补偿,对比补偿前后李

萨如图验证对提高信号质量的良好效果,并在一个信号周期内检测补偿前后细分角度值,对比补偿前后细分误差验证该方法对提高光栅细分精度的有效性。该方法还可以适用于光栅尺、感应同步器等其他位移测量领域。

参 考 文 献

- 1 Bai Pujun, Xue Na, Liu Songtao, *et al.* Angular calibration method of precision rotating platform based on laser tracker [J]. Journal of South China University of Technology, 2016, 44(1): 100-107.
白普俊, 薛娜, 刘松涛, 等. 基于激光追踪仪的精密转台角度标定方法 [J]. 华南理工大学学报, 2016, 44(1): 100-107.
- 2 Fu Min, Zhu Ge, Zheng Fangyan, *et al.* Dynamic displacement measurement method research of linear CCD based on timing delay [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0212003.
付敏, 朱革, 郑方燕, 等. 基于时序推延的线阵 CCD 动态位移测量方法研究 [J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0212003.
- 3 Chang Li, Sun Mingjie, Xu Hui, *et al.* Noise processing to improve CCD acquisition quality of grating moiré fringe [J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(1): 82-85.
常丽, 孙明杰, 许会, 等. 提高光栅莫尔条纹 CCD 采集质量的噪声处理 [J]. 仪表技术与传感器, 2013(1): 82-85.
- 4 Mu Yining, Li Ping, Yu Lintao, *et al.* Relative self-adaptive filtering method applied to incremental optoelectric encoder [J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(10): 1452-1458.
母一宁, 李平, 于林韬, 等. 应用于增量式光电编码器的相关自适应滤波方法 [J]. 光子学报, 2011, 40(10): 1452-1458.
- 5 Lu X D, Trumper D L. Self-calibration of on-axis rotary encoders [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2007, 56(1): 499-504.
- 6 Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [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.
- 7 Zuo Yang, Long Kehui, Liu Jinguo, *et al.* Analysis and processing of moiré fringe signals based on non-uniform sampling [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(4): 1146-1152.
左洋, 龙科慧, 刘金国, 等. 非均匀采样莫尔条纹信号的分析与处理 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1146-1152.
- 8 Zuo Yang, Long Kehui, Liu Bing, *et al.* Method of analysis based on quality of moiré fringe signals for high precision optical encoder [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 260-265.
左洋, 龙科慧, 刘兵, 等. 高精度光电编码器莫尔条纹信号质量分析方法 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 260-265.
- 9 Qiao Dong, Xu Zhijun, Wu Hongsheng, *et al.* A method for compensating interpolation error of absolute linear encoder [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112008.
乔栋, 续志军, 吴宏圣, 等. 绝对式光栅尺细分误差补偿方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112008.
- 10 Gao Xu, Wan Qiuhua, Li Jinhuan, *et al.* Photoelectric shaft encoder error of moiré fringe signal compensation [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(2): 647-653.
高旭, 万秋华, 李金环, 等. 光电轴角编码器莫尔条纹误差信号补偿 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(2): 647-653.
- 11 Wang Yazhou, Wan Qiuhua, Du Yingcai, *et al.* Velocity measurement method based on signal moiré fringe [J]. Chinese Optics, 2015, 8(6): 1044-1050.
王亚洲, 万秋华, 杜颖财, 等. 光电编码器单莫尔条纹测速方法 [J]. 中国光学, 2015, 8(6): 1044-1050.
- 12 Liu Yang, Lü Hengyi, Wang Yan, *et al.* Compensation method moiré fringe sinusoidal deviation in satellite optical communication coarse pointing system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1735-1740.
刘杨, 吕恒毅, 王岩, 等. 光通信粗瞄系统莫尔条纹信号正弦性补偿方法 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 1735-1740.
- 13 Feng Yingqiao, Wan Qiuhua. Interpolation error calibration method of small photoelectric encoders [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(6): 1374-1379.
冯英翘, 万秋华. 小型光电编码器细分误差校正方法 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(6): 1374-1379.
- 14 Feng Yingqiao, Wan Qiuhua, Sun Ying, *et al.* Interpolation error correction of moiré fringe photoelectric signals in the

- approximate form of triangle wave[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812001.
- 冯英翘, 万秋华, 孙莹, 等. 近似三角波莫尔条纹光电信号的细分误差修正[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812001.
- 15 Gao Xu, Wan Qihua, Lu Xinran, *et al.* Automatic compensation system for moiré fringe photoelectric signal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0217002.
- 高旭, 万秋华, 卢新然, 等. 莫尔条纹光电信号自动补偿系统[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0217002.
- 16 Gao Xu, Li Junfeng, Zhang Shumei, *et al.* Real-time compensation of subdivision error for moiré fringe photoelectric signal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3013-3018.
- 高旭, 李俊锋, 张淑梅, 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): 3013-3018.
- 17 Gao Xu, Wan Qihua, Lu Xinran, *et al.* Automatic compensation of sine deviation for grating fringe photoelectric signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0712001.
- 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.
- 18 Yuan Weijie, Liu Guijie, Zhu Shaofeng. Identification method of hydrodynamic parameters of autonomous underwater vehicle based on genetic algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(11): 96-100.
- 袁伟杰, 刘贵杰, 朱绍锋. 基于遗传算法的自治水下机器人水动力参数辨识方法[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(11): 96-100.
- 19 Liu Yongqiang, Yang Shaopu, Liao Yingying, *et al.* Parameter identification of Bouc-Wen model for MR damper based on genetic algorithm[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(7): 261-265.
- 刘永强, 杨绍普, 廖英英, 等. 基于遗传算法的磁流变阻尼器 Bouc-Wen 模型参数辨识[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(7): 261-265.