

光电轴角编码器莫尔条纹误差信号补偿

高旭¹, 万秋华², 李金环¹, 王玉婷¹, 逢仁山¹

(1. 东北师范大学 物理学院, 吉林 长春 130024;

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: 为保证光电轴角编码器在恶劣工作环境下的细分精度, 提出一种基于 Hilbert-Huang 变换的误差补偿方法。针对编码器系统受正弦振动引起的测角故障, 提出一种莫尔条纹误差信号的数学模型; 采用经验模态分解算法, 获取误差信号的本征模态函数, 分别对本征模态函数进行希尔伯特变换解调分析, 提取包含干扰特征的莫尔条纹信号; 同时, 基于光电轴角编码器的精码信号方波信息, 获取精码信号的基波时域频率; 提取与基波时域频率匹配的本征模态函数包络分量。以 24 位光电轴角编码器为实验对象, 实验结果表明: 编码器莫尔条纹信号动态细分误差峰值由约 200" 降低到 1.54" 左右, 细分精度明显提高。

关键词: 几何光学; 光栅条纹; Hilbert-Huang 变换; 补偿

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)02-0647-07

Photoelectric shaft encoder error of moire fringe signal compensation

Gao Xu¹, Wan Qiu-hua², Li Jin-huan¹, Wang Yu-ting¹, Pang Ren-shan¹

(1. School of Physics, Northeast Normal University, Changchun 130024, China;

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

Abstract: In order to ensure the subdivision accuracy of photoelectric rotary encoder in the harsh working conditions, an error compensation method based on HHT (Hilbert-Huang Transform) was proposed. To solve the angle measurement malfunction of encoder system caused by sine vibration, a mathematical model of Moire fringe error signal was proposed according to the malfunction form of encoder mechanical system. EMD (Empirical Mode Decomposition) algorithm was used to get the intrinsic mode function of the error signal. The intrinsic mode function was demodulated and analyzed using Hilbert transform. Moire fringe signal including the malfunction characteristics was extracted. Meanwhile, the fundamental wave time domain frequency of the precise code signal was obtained based on the precise code signal square wave information of the photoelectric rotary encoder. The IMF function envelope components matching with the fundamental wave time domain frequency were extracted. A 24-bit photoelectric rotary encoder was selected as the experimental object. The experimental results show that

收稿日期: 2014-06-05; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介: 高旭(1987-), 女, 博士, 主要从事光电位移精密测量技术的研究。Email: gaoux19870513@163.com

the dynamic subdivision error peak value of the Moire fringe signal is reduced from 200" to 1.54" and the subdivision accuracy improved significantly.

Key words: geometric optics; grating fringe; Hilbert-Huang transform; compensation

0 引言

光电轴角编码器,又称光电角位置传感器,是一种集光、机、电为一体的数字测角装置。随着光学加工、机械加工、电子学倍频技术的迅速发展,其已经成为光电位移精密测量领域的典型测角传感器^[1]。随着航空航天技术对空中目标快速瞄准、精确定位的需求,研制高精度、高分辨力的光电轴角编码器已经成为国内外相关单位的研究热点,尤其要保证编码器在恶劣工作环境下的测角精度更成为现阶段亟待解决的重点与难点^[2-3]。空间环境的湿度、温度及元器件老化等因素影响编码器光电器件的特性,导致提取的精码莫尔条纹光电信号质量变差,使信号质量的稳定性、等幅性、正交性及正弦性指标不合格,进而影响信号细分精度。精码信号的细分精度是影响编码器测角精度的关键因素,因此,补偿莫尔条纹光电信号的细分误差对于提高光电编码器在恶劣工作环境下的测角精度具有重要意义^[4-9]。

近年来,国内外多家研究单位主要针对莫尔条纹光电信号质量的各个特性指标开展补偿研究,对编码器系统在振动冲击环境下提取纯净莫尔条纹信号的方法研究较少。空间环境对编码器测角精度的影响不仅体现在莫尔条纹光电信号质量指标的不合格,还体现在编码器系统受到外界大气湍流、冲击、震荡等因素导致的编码器光栅盘破裂、轴系受损、联轴节精度变差、光电器件移动等。后者情况的发生,不仅会导致编码器测角精度变差,更会使编码器输出乱码或不能正常工作。由此,文中针对编码器系统受空间环境正弦振动冲击造成的测角故障,提出一种莫尔条纹误差信号的数学模型。基于模型,考虑运用非平稳信号处理理论对包含干扰信号特征的调制信号进行解调,并进一步提高信号的频率分辨率,以提取纯净的莫尔条纹信号。传统的信号分析方法基于傅里叶变换理论,由于它存在不能同时兼顾时域和频域分辨力的局限性,不适合对频率随时间变化的非线性、非平稳信号的处理与分析。

在非平稳信号特征提取方面,Eorden E. Huang 等人提出的经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)处理方法摒弃了加窗的思想,避免了由加窗造成的频谱泄露,与傅里叶变换、小波变换相比,更能够表达信号的最本质特征^[10-11]。EMD方法可以按照信号局部相邻极值对应的时间差(特征尺度),自适应地将信号分解成若干个本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)。

文中基于莫尔条纹误差信号的数学模型,通过实际采集编码器在正弦振动条件下的光电信号数据,利用经验模态分解(EMD)方法对误差信号进行分解;对分解得到的各阶 IMF 函数进行 Hilbert 变换解调分析,通过对信号包络的提取,观察误差信号的特征;最后,对解调后的信号进行频谱分析,为了获取更精确的频谱,可以采用校正算法对频谱进行校正^[12-13],进一步提取与精码莫尔条纹信号基波频率相匹配的 IMF 函数分量,并以该分量的包络作为基准细分信号。对编码器精码正余弦信号分别采用上述的方法进行处理,实现了编码器受正弦振动影响时光电信号的误差补偿,提高了光电编码器在恶劣工作环境下的细分精度。

1 误差信号模型的建立

光电编码器以高精度计量光栅为检测元件,通过光电转换,将轴的机械角位移信息转换成相应的数字代码。码盘和狭缝等计量光栅作为编码器的薄弱部分,由于其制作材料的限制,导致应用设备在恶劣工作环境下或振动冲击大的场合,码盘会出现划伤、破裂、沾污等问题;而编码器旋转机械轴系是高精度光电编码器的重要环节,也是薄弱部分,当编码器机械传动系统受到正弦振动干扰时,可能会发生故障并产生周期性的脉冲冲击;同时,编码器的光电器件也会因外界的振动冲击而产生位置移动,它们都会导致莫尔条纹信号被调制,使编码器输出的角度乱码。

因此,以单路精码信号为例,根据莫尔条纹信号

的数学模型及编码器系统受正弦振动干扰导致莫尔条纹信号被调制的现象,可建立一种莫尔条纹误差信号数学模型,如公式(1)所示:

$$u_{\sin}(\theta)=Ag[f(\theta)]g\cos(\omega_f t) \quad (1)$$

式中: ω_f 表示干扰信号的载波角频率; A 表示干扰信号的幅值; $f(\theta)$ 表示莫尔条纹信号的基本形式,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莫尔条纹光电信号可以用傅里叶级数的展开式表示,则实际的单路莫尔条纹信号可以表示为:

$$f(\theta)=A_0+A_1\sin(\theta+c_1)+L+A_i\sin(i\theta+c_i) \quad (2)$$

也可以表示为:

$$f(t)=A_0+A_1\sin(\omega t+c_1)+L+A_i\sin(i\omega t+c_i) \quad (3)$$

式中: ω 为精码信号的基波角频率。因此,只要解调出莫尔条纹特征信号,则可以实现编码器在振动冲击期间的信号误差补偿,进而保证编码器在恶劣工作环境下的细分精度,维护应用设备的正常工作。

2 Hilbert-Huang 变换原理

Hilbert-Huang 变换是美国国家宇航局的 N.E. Huang 等人于 1998 年提出的一种新型的时频分析方法,该方法首先利用经验模态分解算法,把复杂的信号序列分解成有限个本征模态函数;然后对各个本征模态函数进行 Hilbert 变换,构造出信号的时间-频率-能量谱,即 Hilbert 谱,是一种更具适应性的时频局部化分析方法。

2.1 经验模态分解原理

任何复杂的信号都是由简单、相互独立的信号分量组成,采用适当的处理方法必然能够将各个独立信号分量分离出来,EMD 方法不同于小波变换等其他处理方法,它不需要预先设置基函数,在分解过程中,基函数直接从信号本身产生,可以将信号从高频到低频分离出各阶本征模态函数(IMF),这些 IMF 直接反映了信号的各个频率构成和特性,为信号特征提取做准备。

IMF 是满足单分量信号物理解释的一类信号,它必须满足下面两个条件:

(1) 在整个信号长度上,极值点和过零点的数目必须相等或者至多只相差一个;(2) 在任意时刻,由局部极大值点定义的上包络线和由局部极小值点定义的下包络线的平均值为零。

对任意实信号 $s(t)$ 进行 EMD 分解的步骤为:

(1) 找出信号的局部极大值点和极小值点,将所有极大值点和极小值点分别用 3 次样条的曲线连接起来,形成信号 $s(t)$ 的上下包络线;(2) 计算上下包络线的平均值曲线,记作 $m_1(t)$,求出 $s_1(t)=s(t)-m_1(t)$;(3) 判断 $s_1(t)$ 是否满足 IMF 的模态条件,若满足,则 $s_1(t)$ 就是实信号的第 1 个 IMF 分量;若不满足,则将 $s_1(t)$ 作为原始实信号重复以上 2 个步骤,计算上下包络的平均值曲线,记作 $m_{11}(t)$,进一步计算 $s_{11}(t)=s_1(t)-m_{11}(t)$,继续判断其是否满足 IMF 条件,若不满足,则继续重复以上步骤,直到计算至 $s_{1k}(t)=s_{1(k-1)}(t)-m_{1k}(t)$ 满足 IMF 条件,进而得到第 1 个 IMF 分量 $c_1=s_{1k}$;(4) 用 $x(t)$ 减去 c_1 ,得到残余项 $r_1=s(t)-c_1$;(5) 判断残余项是否为单调函数或已达到最大分解次数,若满足则停止分解;否则将 r_1 作为原始信号按照步骤(1)~(4)进行逐层分解,以此类推,得到 n 个 IMF 分量 r_1, r_2, \dots, r_n 和一个残余项 $r_n(t)$ 。

当算法进行到步骤(3)时,可能会出现 $s_{1k}(t)$ 一直不满足 IMF 的模态条件,可通过公式(4)设立门限值 sd 的大小来实现:

$$sd = \int \frac{|s_{i+1}(t)-s_i(t)|}{s_i^2(t)} dt \quad (4)$$

一般门限值取为 0.2~0.3,当 sd 小于门限值时,筛分过程就停止。因此,经过 EMD 分解,实信号 $s(t)$ 变为残差和一系列模态之和,可以表示为:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n(t) \quad (5)$$

2.2 希尔伯特变换(Hilbert)原理

对于实信号 $s(t)$,它的 Hilbert 变换定义为:

$$\hat{s}(t) = H[s(t)] = \frac{1}{\pi} \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\int_{-\infty}^{-\delta} \frac{s(t-\tau)}{\tau} d\tau + \int_{\delta}^{\infty} \frac{s(t-\tau)}{\tau} d\tau \right] \quad (6)$$

即:

$$\hat{s}(t) = \frac{1}{\pi} \text{P.V.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(t-\tau)}{\tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \text{P.V.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (7)$$

式中:P.V.表示取积分的主值。Hilbert 变换相当于将信号通过一个滤波器,该滤波器脉冲响应为 $g(t) = \frac{1}{\pi t}$,

其频率响应为:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt = -j \text{sgn}(\omega) = \begin{cases} -j, & \omega > 0 \\ j, & \omega \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

可见,信号经 Hilbert 变换后,其振幅谱不变,相位谱相差 90° 。由此,可以构造实信号 $s(t)$ 对应的解

析信号 $z(t)$, 可以表示为:

$$z(t) = s(t) + j\hat{s}(t) = a(t)e^{j\varphi(t)} \quad (9)$$

则信号 $s(t)$ 的包络可以表示为:

$$a(t) = |z(t)| = \sqrt{s^2(t) + \hat{s}^2(t)} \quad (10)$$

因此, Hilbert 变换是一种将时域实信号变为时域解析信号的方法。其变换后所得解析信号(复数)的实部是实信号本身, 虚部是实信号的 Hilbert 变换, 而解析信号的幅值便是实信号的包络。

3 补偿方法

由第 2 节可知, 当光电编码器系统突然受到空间环境的正弦振动干扰时, 莫尔条纹信号也将受到干扰并被调制。文中采用基于 Hilbert-Huang 变换的方法对调制信号进行分解处理, 实现编码器莫尔条纹信号在振动冲击环境条件下的误差补偿。

3.1 编码器精码信号基波频率计算原理

参考文献[14]提出采用编码器粗码的方波信息, 根据最低位粗码与精码间的线对数比例来计算精码信号的基波频率。受编码器码盘刻划误差的影响, 精码线对与粗码线对的对应关系在实际刻划时存在较大误差, 通常情况下, 在编码器数据处理系统中粗码还需要精码对其进行校正, 才能正确输出角度编码。因此, 利用参考文献[14]的方法来求取精码信号基波频率是不准确的。

文中利用编码器精码信号经过放大、比较后生成的方波信息来计算精码信号基波频率。当前高精度光电编码器数据处理系统均采用 TI 公司生产的 DSP2812 芯片作为核心处理器, 其精码信号数据处理系统框图如图 1 所示。

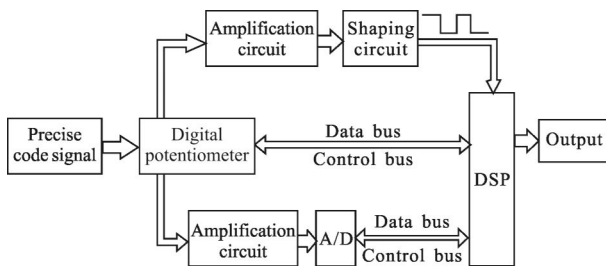


图 1 精码信号数据处理系统框图

Fig.1 Diagram of the precise code signal processing system

因此, 设编码器精码光栅节距为 p , 数据处理系统中的 DSP 处理器晶振为 f , 则编码器精码信号基

波频率求取过程如下:

Step1: 计算编码器运行一个光栅周期的时间 T 。当 DSP 捕获到单路精码信号的方波两个上升沿时产生中断, 设捕获单元两级的堆栈中定时器的值在中断前后分别为 n_1 、 n_2 , 则编码器运行一个光栅周期的时间为 $T = \frac{n_2 - n_1}{f}$ 。

Step2: 计算编码器机械系统在该精码周期内的转动速度 v 。则根据精码光栅节距 p , 利用公式(11)直接求取转速 v 。通常情况下, 采用 3 个光栅周期内计算的速度平均值作为编码器转速的计算值。

$$v = \frac{p}{T} = \frac{pgf}{n_2 - n_1} \quad (11)$$

Step3: 根据编码器转速计算编码器精码信号基波频率 f^* 以及信号采样频率 f_{sample} 。令每个光栅周期内采样 64 个点, 则其计算原理如公式(12)、公式(13)所示。

$$f^* = \frac{1}{T} = \frac{f}{n_2 - n_1} \quad (12)$$

$$f_{\text{sample}} = \frac{64}{T} = \frac{64gf}{n_2 - n_1} \quad (13)$$

3.2 补偿算法原理

根据莫尔条纹误差信号模型, 采用基于 Hilbert-Huang 变换的信号处理方法对采集的周期莫尔条纹调制信号进行处理, 其具体处理过程如下:

Step1: 对采集的周期莫尔条纹调制信号进行 EMD 分解, 获取系列 IMF 函数及余项序列;

Step2: 对各个 IMF 函数进行希尔伯特变换, 并构建解析信号求取包络(即: 莫尔条纹光电信号)。解调出的各个莫尔条纹信号中均包含干扰信号特征, 如果精码莫尔条纹信号没有受到外界干扰, 则包络线为一直线, 否则表示信号受到干扰而变得不纯净;

Step3: 比较解调出来的各个莫尔条纹信号频谱, 选取与精码信号基波频率 f^* 对应的 IMF 函数包络, 以此作为基准的细分信号。鉴于编码器光电信号本身包含若干个谐波分量, 该过程对莫尔条纹信号的正弦性偏差也做了进一步的修正。同时, 当编码器系统突然受到外界正弦振动影响时, 精码信号基波频率 f^* 使用编码器受干扰前的最后一个频率计算结果。

4 实验及数据分析

以 24 位光电轴角编码器为实验对象, 当编码器

在最大转速 50(°)/s 的情况下,24 位绝对式光电编码器转过一个精码周期的时间为 440 μs,在此时间内采样 64 个点,编码器数据处理系统完全可以满足。

将编码器放在振动台上,其实验台的振动频率范围为 5~200 Hz,位移为 30 mm,加速度为 1.5 g,振动方向沿着垂直编码器主轴的方向,扫描时间为 12 min,扫描 1 次。令编码器在低速下平稳工作,按照前述条件做振动试验检查编码器进位,发现编码器输出角度乱码。同时,以一个光栅周期为例,在编码器任意位置采集一个光栅周期的莫尔条纹信号进行分析,将 64 个采样位置处的细分正切值与标准信号的细分正切值进行比较,计算该振动条件下的细分误差^[15],如图 2 所示。

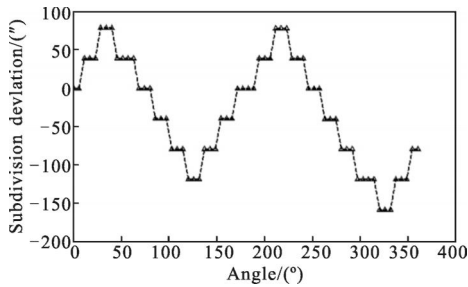


图 2 补偿前的动态细分误差
Fig.2 Uncompensated dynamic subdivision error

根据 3.1 节精码信号基波频率计算原理,测得编码器精码信号的基波频率约为 10.2 Hz,自适应采集 10 个光栅周期的精码正弦信号。对采集的周期莫尔条纹余弦信号进行 EMD 分解,获得系列 IMF 函数,结果如图 3 所示。为了对误差信号进行去噪分析,取 IMF1 函数进行解调分析,解调结果如图 4 所示。

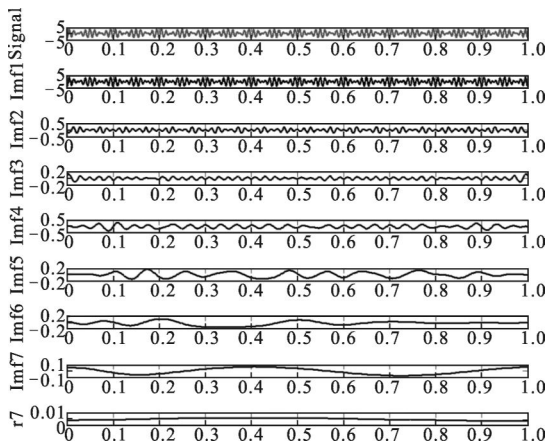


图 3 系列 IMF 函数
Fig.3 A set of IMF functions

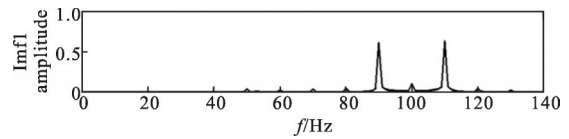


图 4 IMF1 函数解调分析

Fig.4 Demodulation and analysis of the first IMF function

可以看出,信号的模态分量出现了调制现象,被频率约为 100 Hz 的载波信号进行了调制,也可以看出信号中存在少量谐波成分。同时,鉴于信号在 EMD 分解过程中,由于 EMD 方法本身的插值误差使信号产生小部分的分数阶谐波成分,其幅值较小,可以忽略。

因此,各个 IMF 函数均包含干扰信息,对所有的 IMF 函数进行希尔伯特变换解调,选取与基波频率相匹配的 IMF 函数包络值作为基准细分信号数据,如图 5、6 所示。

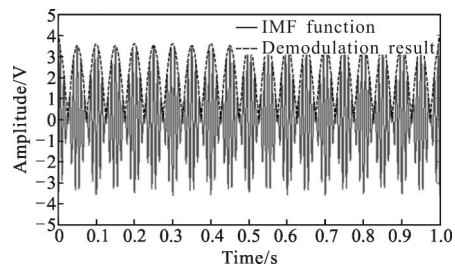


图 5 IMF 函数解调示意图

Fig.5 Demodulation of the IMF function

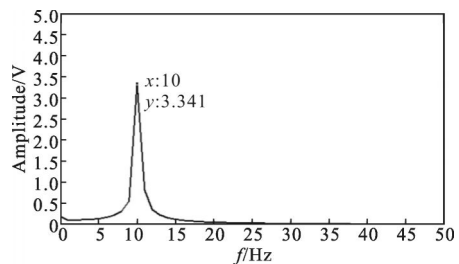


图 6 IMF 函数解调频谱示意图

Fig.6 Demodulation frequency spectrum of the IMF function

可以发现,IMF 函数解调后的频谱没有与基波频率绝对符合,这是由于频谱泄露导致的,可以应用相关算法对频谱进行校正^[13]。同理,对正弦信号也做上述处理。为验证补偿效果,以补偿前采集的光栅周期信号为例,检测其补偿后的动态细分误差^[16],检测结果如图 7 所示。

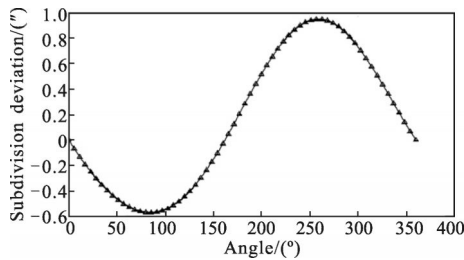


图 7 补偿后的动态细分误差曲线

Fig.7 Compensated dynamic subdivision error

可见,受到正弦振动的莫尔条纹信号动态细分误差峰值可达 $+200''$;补偿后的信号动态细分误差明显降低,误差峰值约为 $+1.54''$ 左右,细分精度明显提高。同时,从补偿后的细分误差曲线形式可以看出,莫尔条纹信号中含有部分直流电平漂移分量。在实际应用中,若任何一阶 IMF 函数解调后的包络值与编码器莫尔条纹信号质量指标不符,则认为编码器出现故障,需对其进行补偿处理。

5 结论

文中针对编码器系统常常受到正弦振动冲击导致测角精度变差的问题,提出一种莫尔条纹误差信号的数学模型,设计了一种基于 Hilbert-Huang 变换的信号细分误差补偿方法。根据 EMD 模态分解原理,将编码器光电信号分解为若干个 IMF 模态函数;将它们纷纷通过希尔伯特变换解调出误差信号的包络;由解调后的信号频谱,寻找与编码器精码光电信号基波频率相匹配的 IMF 函数;最后,使用该 IMF 函数解调的包络值作为基准细分信号数据。采用该方法,以 24 位光电轴角编码器为实验对象,通过振动冲击试验,以一个光栅周期的光电信号为例,应用文中方法对补偿前后的编码器动态细分误差进行检测,其莫尔条纹信号细分误差峰值由约 $+200''$ 左右降低到 $+1.54''$ 左右。可见,该方法实现了莫尔条纹信号细分误差的补偿,并提高了编码器的细分精度,同时能够保证编码器系统突然受到正弦振动冲击时的测角精度。该方法还可用于快速、精确的诊断光电轴角编码器机械系统故障。

参考文献:

[1] Wang Shuai, Wang Jianli, Chen Tao, et al. Application of the nonlinear tracking-differentiator in velocity estimation on

optical encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 849-853. (in Chinese)

王帅,王建立,陈涛,等.非线性跟踪微分器在光电编码器测速中的应用[J].*红外与激光工程*,2009,38(5):849-853.

[2] Gao Xu, Wan Qiuhua, Yang Shouwang, et al. Improved PSO algorithm for improving the subdivision accuracy of photoelectric rotary encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(6): 320-323. (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):320-323.

[3] Hong Xi, Xu Zhijun. Application of RBF for error compensation in optical encoders [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 87-89. (in Chinese)

洪喜,续志军.径向基网络在编码器误差补偿中的应用[J].*红外与激光工程*,2008,37(4):87-89.

[4] 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.

[5] Dario Mancini, Annalina Auricchio, Massimo Brescia, et al. Encoder system design: strategies for error compensation[C]// SPIE, 2008, 3351: 380-386.

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

[7] Tsukasa Watanabe, Hiroyuki Fujimoto, Kan Nakayama, et al. Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]//SPIE, 2003, 5190: 400-409.

[8] 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.

[9] Zhu Fan, Wu Yiming, Liu Changchun. Eliminating influence of grating encoder's eccentricity and vibration to moiré fringes signal by four reading heads [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4):0412008, 1-7. (in Chinese)

朱帆,吴易明,刘长春.四读头法消除码盘偏心和振动对叠栅条纹相位测量的影响[J].*光学学报*,2011,31(4):0412008,1-7.

[10] Jiao Hongwei, Qin Shiqiao, Wang Shengshu, et al. Three-dimensional imaging lidar signal denoising method based on empirical mode decomposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011,

- 31(12)1211004: 1-5. (in Chinese)
- 焦宏伟, 秦石乔, 王省书, 等. 基于经验模态分解的三维成像激光雷达信号去噪方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(12) 1211004: 1-5.
- [11] Chen Xinglin, Liu Yang, Lv Hengyi. Wavelet processing based intelligent fault diagnosis of spacial photoelectrical encoders [J]. *J Huazhong Univ of Sci & Tech (Natural Science Edition)*, 2010, 38(4): 79-82. (in Chinese)
- 陈兴林, 刘杨, 吕恒毅. 采用小波处理的空间光电编码器智能故障诊断[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(4): 79-82.
- [12] Duan Huming, Qin Shuren, Li Ning. A Review on discrete spectrum correction method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2007, 26(11): 138-145. (in Chinese)
- 段虎明, 秦树人, 李宁. 离散频谱的校正方法综述[J]. 振动与冲击, 2007, 26(11): 138-145.
- [13] Zhang Dexiang, Wu Xiaopei, Lv Zhao, et al. Endpoint detection of speech signal based on empirical mode decomposition and Teager kurtosis [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(3): 493-499. (in Chinese)
- 张德祥, 吴小培, 吕钊, 等. 基于经验模态分解和 Teager 峭度的语音端点检测 [J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(3): 493-499.
- [14] Liu Yang, Lv Hengyi, Wang Yan, et al. Compensation method of Moire fringe sinusoidal deviation in satellite optical communication coarse pointing system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(8): 1735-1740. (in Chinese)
- 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.
- [15] Zhao Changhai. The research of measure method of dynamic interpolation errors of high precision photoelectric encoder [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- 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, 2008.