

文章编号 1004-924X(2014)01-0213-07

莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿

高旭^{1,2}, 万秋华^{1*}, 赵长海¹, 孙莹¹, 杨守旺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精度, 提出了一种实时补偿莫尔条纹光电信号正交性偏差的方法。利用希尔伯特变换原理, 构造了同频光电信号正交性偏差的动态测量算法。根据莫尔条纹光电信号的数学模型, 揭示了由正交性偏差引起的细分误差的空间分布特征并建立角度补偿模型。鉴于编码器的实际工作特点, 采用同步处理方式, 在补偿光电信号的同时动态更新了角度代码补偿查找表; 通过细分查找表的切换, 实现信号正交性偏差的实时补偿。采用该方法对存在约 18° 正交性偏差的 23 位光电编码器进行了补偿处理, 结果显示: 补偿后的编码器的细分误差峰值由 $4.79''$ 降低到 $1.26''$ 。该方法可实际应用于编码器系统, 能够提高编码器的细分精度、环境适应性和可靠性。

关键词: 光电轴角编码器; 莫尔条纹; 正交性偏差; 希尔伯特变换; 实时补偿

中图分类号: TP212.14; O436.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142201.0213

Real-time compensation of orthogonality deviation for Moire fringe photoelectric signal

GAO Xu^{1,2}, WAN Qiu-hua^{1*}, ZHAO Chang-hai¹, SUN Ying¹, YANG Shou-wang¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

** Corresponding author, E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn*

Abstract: A method to compensate the orthogonality deviation of the Moire fringe photoelectric signal was proposed to improve the accuracy of a photoelectric rotary encoder. Based on Hilbert transform theory, a dynamic measurement algorithm for the orthogonality deviation of same frequency photoelectric signal was constructed. In the light of the mathematical model for Moire fringe photoelectric signal, the influence of orthogonality deviation on subdivision precision was analyzed and an angle compensation model was set up. According to the working principle of the encoder, a synchronous processing mode was adopted to compensate the photoelectric signal and update dynamically the lookup table for angle codes simultaneously; by the switching of subdivision lookup table, the orthogonality deviation for the photoelectric signal was compensated in real time. Finally, a 23-bit photoelectric encoder with 18° orthogonality deviation was compensated using this method. Experimental results show that the peak value of subdivision error of the encoder has reduced from $4.79''$ to $1.26''$ after

收稿日期: 2013-09-16; 修订日期: 2013-10-25.

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目

compensation. This method can actually be used in an encoder system and it can improve the subdivision accuracy, environmental adaptability and the reliability of encoders.

Key words: photoelectric rotary encoder; Moire fringe; orthogonality deviation; Hilbert transform; real-time compensation

1 引言

随着航空航天技术的发展,对高精度光电编码器在恶劣环境下的工作稳定性及测角精度提出了更高的要求。莫尔条纹光电信号细分误差是影响测角精度的主要因素之一^[1-2],而正交性偏差对细分精度的影响最大,因此,动态补偿信号的正交性偏差对提高光电编码器的细分精度具有重要意义^[3]。

近年来,国内外多家研究单位开展了对莫尔条纹光电信号正交性偏差补偿的研究。韩国 LG 公司提出应用移相光栅补偿编码器相位误差^[4],这种硬件补偿方法能够补偿编码器工作中由于光栅盘倾斜而导致的正交偏差,但不能补偿由于编码器光敏元件特性变化所导致的光电信号参数调整引起的正交偏差;长春光机所熊文卓等采用相量校正方法对正交性误差进行校正^[5],但该方法需要人工手动调试。国内一些研究单位还提出使用相关函数法、傅里叶变换法等对信号正交性偏差进行测量^[6-7],然后利用测量结果仅能对光电信号进行补偿。哈尔滨工业大学吕恒毅等通过比较两种测量方法的精度,选用相关函数法对编码器各个精码周期的正交性偏差进行测量后,再对光电信号实施智能补偿,该方法在补偿工作进行时,系统需要长时间等待偏差的测量结果,从而导致编码器当前输出的角位置不准确,缺乏实时性,且受测量方法计算精度和信号基波幅值不一致等因素的限制。也有很多人提出关于正交性偏差的软件补偿方法^[8-13],这些方法一方面依赖人工装调和外部硬件补偿电路,另一方面根据最小二乘法拟合对待定参数进行不收敛估计或者使用神经网络、粒子群等算法对参数进行长时间学习补偿。由于这些方法都是基于时域内的补偿,当工作环境发生变化时,无法实现光电编码器工作现场的实时补偿。

本文提出一种光电信号补偿及细分查找表切换同步处理的实时补偿方法,并设计了一种基于 Hilbert 变换的正交性偏差动态测量算法,提高了

信号正交性偏差的动态测量精度。Hilbert 变换是信号处理中常见的一种方法,很早就成功应用到信号的瞬时频率测量方面,但鲜有将其应用到莫尔条纹光电信号正交性偏差的测量方面的报道。本文根据编码器相邻光栅周期内正交性偏差的差异较小的实际工作特点,利用当前周期正交性偏差的测量结果,实现了相邻周期莫尔条纹光电信号正交性的补偿;同时,设计了补偿细分查找表的算法,对当前误差周期内的角度代码进行补偿。该方法能够应用于编码器系统,在不增加外部处理电路的情况下提高编码器在恶劣工作环境下的细分精度,使系统在无人环境下实现信号正交性偏差的在线修正,提高了编码器的环境适应性和可靠性。

2 正交性偏差分析

理想的莫尔条纹光电信号细分原理是利用两路正弦细分信号来完成角度求解,它们分别为:

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

其中: A 为信号的幅值, θ 为理论上的转角,其角度 θ 计算公式为:

$$\theta = \arctan\left(\frac{A \sin \theta}{A \cos \theta}\right). \quad (2)$$

设两路精码信号正交性偏差为 $\Delta\theta$,即:

$$u_{\sin}(\theta) = A \sin \theta, u_{\cos}(\theta) = A \cos(\theta + \Delta\theta), \quad (3)$$

则根据光电信号的细分原理,其细分误差 $\delta(\theta)$ 为:

$$\delta(\theta) = \arctan\left(\frac{u_{\sin}(\theta)}{u_{\cos}(\theta)}\right) - \theta. \quad (4)$$

设幅值 $A=1$,当 $\Delta\theta \in [-10^\circ, 10^\circ]$ 时,其细分误差曲线如图 1 所示。

由图 1 可见,由正交性偏差产生的细分误差曲线为正弦曲线,周期为 $T/2$ (T 为编码器信号的细分周期),当信号中含有 $\pm 10^\circ$ 的正交性偏差时,引起的最大细分误差为 $\pm(10T/360)$,若编码器的细分周期为 $80''$,则最大细分误差为 $\pm 2.22''$ 。

因此,通过对正交性偏差产生的细分误差进行补偿,可以有效地提高编码器的细分精度,进而提高光电轴角编码器的测角精度。

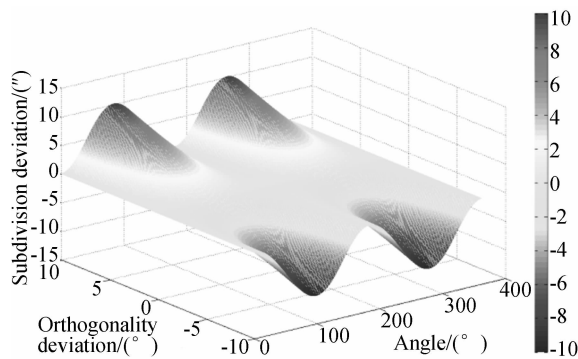


图 1 正交性偏差导致的细分误差曲面

Fig. 1 Subdivision error curve caused by orthogonality deviation

3 实时补偿原理

在实际的编码器测量系统中,编码器工作时,读数狭缝盘不动,码盘随着主轴一起转动,主轴每转过一个栅距角,莫尔条纹相应移过一个间距,则光电元件会发出一个信号,由此便实现了对输入角位移量的转换。

从编码器的实际工作特点出发,光电信号正交性偏差的实时补偿包括对光栅当前工作周期内角度代码的补偿以及对下一个相邻光栅周期内光电信号正交性的补偿。其中,光电信号正交性的补偿又包括测量和补偿两个过程。图 2 为实时补偿的流程图。

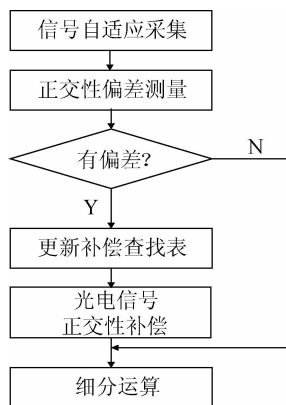


图 2 信号正交性偏差补偿流程图

Fig. 2 Flowchart of compensation for signal orthogonality deviation

在实际补偿过程中,建立两套角度代码细分查找表:常态查找表和补偿查找表。当环境变化导致测量出现误差时,对当前光栅周期精码信号使用补偿查找表;同时,依据精码转换的方波信号计算编码器转速^[14],再通过自适应采样获得等间隔的角位置信号,基于 Hilbert 变换动态测量正交性偏差的计算原理,利用当前采集的精码周期信号计算出信号正交性偏差值,并对下一个精码周期信号进行逐点实时补偿。连续循环补偿,直至测量误差在允许偏差范围内,编码器光电信号处理系统切换使用常态细分查找表。

4 基于 Hilbert 变换的正交性偏差测量

4.1 Hilbert 变换原理

设有实信号 $s(t)$, 它的 Hilbert 变换记作 $\hat{s}(t)$, 并定义为: $\hat{s}(t) = s(t) \times (1/\pi t)$ 。可见 Hilbert 变换是实信号的一种时域滤波^[15], 该滤波器脉冲响应为 $g(t) = \frac{1}{\pi t}$, 其频率响应为:

$$G(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) e^{-j\omega t} dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\cos \omega t - j \sin \omega t}{t} dt = -j \text{sng}(\omega)$$

$$\text{其中: } \text{sng}(\omega) = \begin{cases} -1, & \omega < 0 \\ 0, & \omega = 0 \\ 1, & \omega > 0 \end{cases}$$

由频域卷积定理, $\hat{s}(t)$ 的频域形式为:

$$\hat{S}(\omega) = S(\omega)G(\omega) = -j \text{sng}(\omega)S(\omega) \quad (5)$$

即:

$$\begin{aligned} \arg \hat{S}(\omega) &= \arg S(\omega) + \arg G(\omega) \\ &= \begin{cases} \arg S(\omega) + 90^\circ & (\omega < 0) \\ \arg S(\omega) - 90^\circ & (\omega > 0) \end{cases} \end{aligned}$$

因此,信号经 Hilbert 变换后,其振幅谱不变,相位谱相差 90° 。

由于快速傅里叶变换 (FFT) 的计算方便, Hilbert 变换多采用频域算法实现,取实信号 $s(t)$ 的 N 个离散值并做傅里叶变换,得到信号的频域表示:

$$S(k) (k = 0, 1, \dots, N-1),$$

构造新的频谱:

$$X(k) = \begin{cases} S(k), k = 0 \\ 2S(k), k = 1, 2, \dots, N/2 - 1. \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

计算 $x(n) = \text{IFFT}[X(k)]$ 。其中:IFFT 为 FFT 的反变换,则: $\text{Im}\{x(n)\}$ 为原始信号 $s(t)$ 的 Hilbert 变换。

4.2 正交性偏差的动态测量原理

Hilbert 变换对信号有 90° 相移,利用这一特性,构造正交性偏差的动态测量算法。设编码器差分后的两路精码同频光电信号为:

$$u_{\sin}(\theta) = A\sin(\theta + \varphi_1), u_{\cos}(\theta) = B\sin(\theta + \varphi_2). \quad (7)$$

首先,将信号 $u_{\sin}(\theta)$ 和 $u_{\cos}(\theta)$ 做归一化处理得:

$$u'_{\sin}(\theta) = \sin(\theta + \varphi_1), u'_{\cos}(\theta) = \sin(\theta + \varphi_2), \quad (8)$$

再对 $u'_{\sin}(\theta)$ 和 $u'_{\cos}(\theta)$ 信号做 Hilbert 变换,可得:

$$u_1(\theta) = -\cos(\theta + \varphi_1), u_2(\theta) = -\cos(\theta + \varphi_2), \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可求出精码信号相位差 $\Delta\varphi$,即:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \arctan\left[\frac{u'_{\sin}(\theta) \cdot u_2(\theta) - u'_{\cos}(\theta) \cdot u_1(\theta)}{u'_{\sin}(\theta) \cdot u'_{\cos}(\theta) + u_1(\theta) \cdot u_2(\theta)}\right]. \quad (10)$$

那么,正交性偏差 $\Delta\theta$ 为 $\Delta\varphi - \frac{\pi}{2}$ 。

鉴于本文方法与以往测量方法原理有差异,有必要在同样的条件下,将本文的测量方法与文献[6]中相关函数法、傅里叶变换法的测量原理误

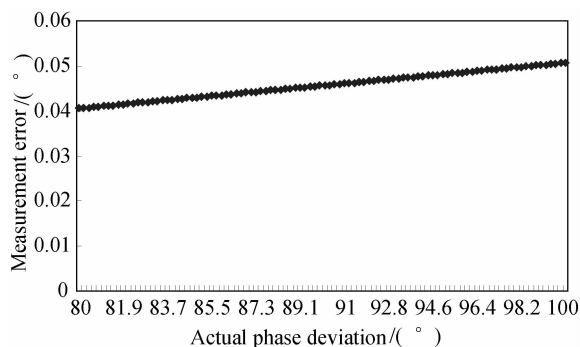


图 3 基于 Hilbert 变换的测量方法误差

Fig. 3 Measurement principle error based on Hilbert transformation

差做比较。当光电信号采样点数为 100,且实际相位差 $\Delta\varphi \in [80^\circ, 100^\circ]$ 的域内时,对信号相位差进行测量。可得相关函数法的测量原理误差为 $\epsilon_{\text{CORR}} \in [-0.1^\circ, 0.1^\circ]$,傅里叶变换法的测量原理误差为 $\epsilon_{\text{FFT}} \in [-0.2^\circ, 0.2^\circ]$ [7]。在同样的条件下,采用基于 Hilbert 变换的测量方法对信号相位差进行测量,其测量原理误差如图 3 所示。

由图 3 可知,基于 Hilbert 变换的测量方法原理误差为 $|\epsilon_{\text{H}}| \in [0.04^\circ, 0.05^\circ]$ 。因此,本文测量方法有效保证了信号正交性偏差的精确测量,而且实现了光电信号正交性偏差在编码器实际工作中的动态测量。

5 正交性偏差实时补偿的实现

5.1 莫尔条纹光电信号正交性的补偿

由式(1)、式(3)分析可知,理论上,理想余弦信号应为:

$$u_{\cos}(\theta) = A\cos\theta. \quad (11)$$

根据 $\cos(\theta + \Delta\theta)$ 的泰勒展开式:

$$\cos(\theta + \Delta\theta) = \cos\theta - \sin\theta \times \Delta\theta - \cos\theta/2 \times \Delta\theta^2 + \dots, \quad (12)$$

这里取泰勒展开的一阶式,可得到余弦信号的补偿公式:

$$\cos(\theta + \Delta\theta) = \cos\theta - \sin\theta \times \Delta\theta. \quad (13)$$

此时的截断误差为 $\epsilon < (-\cos\theta/2) \times \Delta\theta^2$,可见,补偿量为 $\sin\theta \times \Delta\theta$,记为 Δm ,其补偿前后的精码信号示意图如图 4 所示。在细分计算之前,以正弦信号为基准,对余弦信号进行补偿,从而使编码器精码光电信号正交,以实现莫尔条纹光电信号正交性偏差的补偿。

5.2 补偿查找表建立

由式(3)可得:

$$\frac{u_{\cos}(\theta)}{u_{\sin}(\theta)} = \cot\theta \cdot \cos\Delta\theta - \sin\Delta\theta, \quad (14)$$

则光电信号角度补偿模型为:

$$\theta = \text{arccot}\left(\frac{u_{\cos}(\theta)}{u_{\sin}(\theta) \cdot \cos\Delta\theta} + \tan\Delta\theta\right). \quad (15)$$

通过第 4 节中介绍的测量方法,可以获得编码器光电信号的正交性偏差 $\Delta\theta$,根据角度补偿模型(15),建立补偿查找表的更新公式,如表 1 所示。这里记: $G = \frac{u_{\cos}(\theta)}{u_{\sin}(\theta) \cdot \cos\Delta\theta}$, $C = \text{arccot}(G + \tan\Delta\theta)$ 。

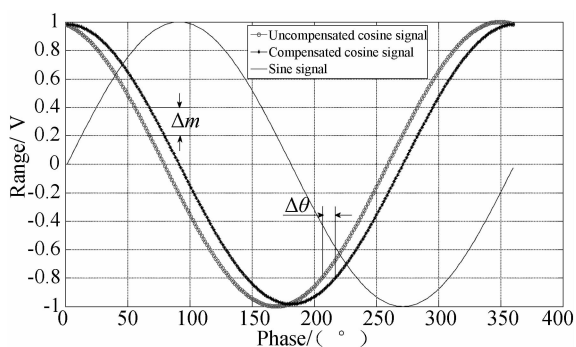


图 4 补偿前后信号示意图

Fig. 4 Schematic of signal before and after compensations

表 1 补偿查找表更新公式

Tab. 1 Updating formula of compensation lookup table

象 限	θ 的计算公式
1	$\theta=C$
2	$\begin{cases} \text{当 } G > \tan\Delta\theta , \theta=\pi+C \\ \text{当 } G = \tan\Delta\theta , \theta=\pi/2 \\ \text{当 } G < \tan\Delta\theta , \theta=C \end{cases}$
3	$\theta=\pi+C$
4	$\begin{cases} \text{当 } G > \tan\Delta\theta , \theta=2\pi+C \\ \text{当 } G = \tan\Delta\theta , \theta=3\pi/2 \\ \text{当 } G < \tan\Delta\theta , \theta=\pi+C \end{cases}$

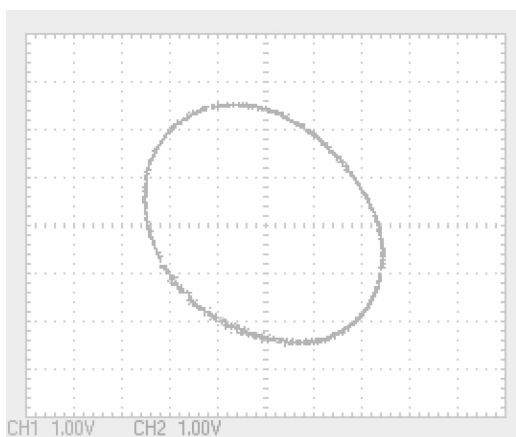


图 5 原始信号的李沙育图

Fig. 5 Lissajous figure of original signal

6 实验及数据分析

以 23 位绝对式光电编码器为实验对象,其最精细光栅码道刻划周期约为 $80''$,在一个光栅周期(也称“细分周期”)内自适应采样 64 个点,每个点代表一个光栅周期内不同的角度值。

在编码器的研制中,通常使用示波器观察编码器精码莫尔条纹信号合成的李沙育图形^[16]来对信号的正交性偏差进行定性检测。当信号未经过补偿时,编码器精码原始信号李沙育图如图 5 所示。由图 5 可知,李沙育图明显为椭圆形,根据本文所述的正交性偏差测量原理,计算得到编码器精码原始信号的正交性偏差为 17.84° (约 18°)。

按照本文所述的补偿原理,对当前误差周期内的光电信号在细分时切换使用补偿查找表,完成当前光栅周期内对应角度代码的修正,其补偿前后的细分查找表曲线如图 6 所示。

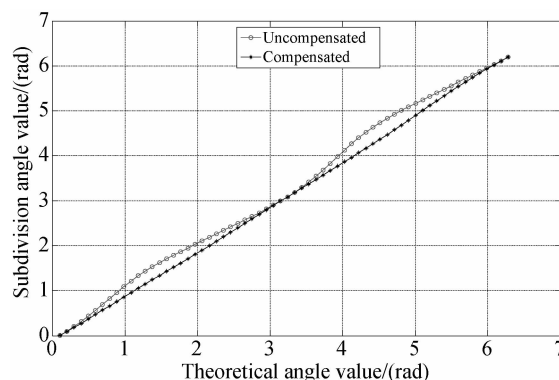


图 6 补偿前后信号细分查找表曲线

Fig. 6 Subdivision curve of signal before and after compensations

可见,在未经补偿时,当前周期的误差信号使用常态细分查找表,信号的角度细分点连线为曲线,且在 $\pi/2, 3\pi/2$ 附近弯曲最大,其中, $\pi/2$ 细分点对应的细分值为 1.79 rad, $3\pi/2$ 细分点对应的细分值为 5.01 rad;经过补偿,对当前周期内的误差信号使用补偿细分表,信号的角度细分点连线为直线,在 $\pi/2, 3\pi/2$ 附近,正交性偏差明显降低,其中, $\pi/2$ 细分点对应的细分值为 1.52 rad, $3\pi/2$ 细分点对应的细分值为 4.68 rad。

同时,根据光电信号补偿模型(13),利用当前

周期误差信号测得的正交性偏差值,对下一周期信号进行正交性补偿,其补偿后的信号李沙育图如图 7 所示。由图 7 可见,李沙育图图形近似为圆形,光电信号的正交性明显得到改善。对补偿后

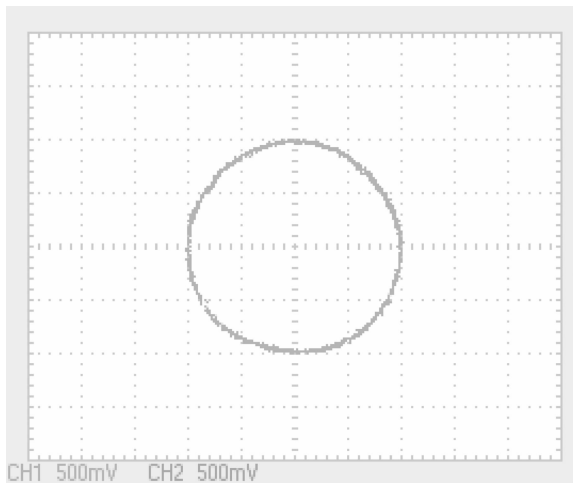


图 7 补偿后的信号李沙育图

Fig. 7 Lissajous figure of signal after compensation

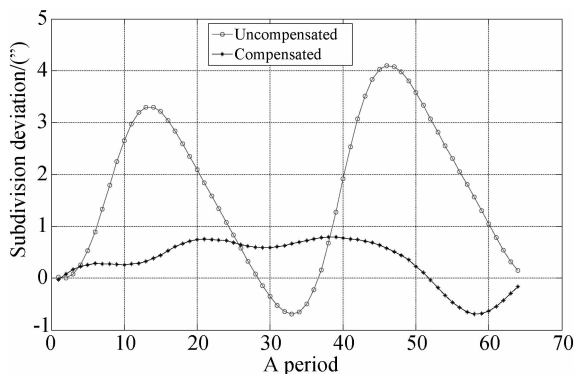


图 8 补偿前后信号细分误差曲线

Fig. 8 Subdivision error curves of signal before and after compensations

的编码器光电信号正交性偏差进行测量,计算其大小为 -0.83° 。将 23 位光电编码器的每个精码周期细分为 512 份,在一个细分周期内共测量 64 个点,对编码器细分精度进行检测^[14],得到补偿前后的细分误差曲线,如图 8 所示。

由图 8 可见,细分误差最大值出现在细分周期的 $\pi/2$ (14 点)、 $3\pi/2$ (46 点)附近,补偿前细分误差最大值为 $+4.1''$,最小值为 $-0.69''$,峰值误差为 $4.79''$,补偿后细分误差明显降低,误差最大值为 $+0.58''$,最小值为 $-0.68''$,峰值误差为 $1.26''$,细分精度明显提高。

7 结 论

针对莫尔条纹光电信号的正交性偏差,本文提出一种光电信号补偿及细分查找表切换同步处理的实时补偿方法,并设计了一种基于 Hilbert 变换的正交性偏差动态测量算法来提高光电信号正交性偏差的动态测量精度。此方法能够在无人环境下实现信号正交性偏差的智能补偿与在线修正,具有补偿精度高、效率高、不增加外部处理电路、不受基波幅值不一致等因素影响等优点,可实际应用于编码器系统。实验结果表明:对存在约为 18° 正交性偏差的编码器采用本文的补偿方法进行处理,补偿效果明显,编码器的细分误差峰值由 $4.79''$ 降低到 $1.26''$ 。该方法有效解决了编码器在恶劣工作环境下受信号正交性偏差交变影响而导致的工作稳定性问题,提高了编码器的细分精度、环境适应性和可靠性。此方法还可以应用于磁编码器、光栅尺等其他高精度位移测量领域。

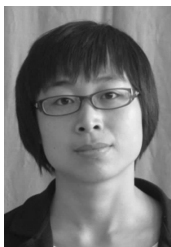
参考文献:

- [1] 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.
WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)
- [2] 王显军. 基于 SOC 单片机的高集成度光电编码器处理电路设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.

- WANG X J. Circuit design for high integrated photoelectric encoder base on SOC singlechip [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 379-386. (in Chinese)
- [3] 左洋, 龙科慧, 乔克, 等. 航天编码器调试系统显示功能设计[J]. 液晶与显示, 2012, 27(6): 795-799.
ZUO Y, LONG K H, QIAO K, *et al.*. Design of display function in debugging system of space encoder [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(6): 795-799. (in Chinese)
- [4] SONG J H, KIM K CH, KIM S H, *et al.*. A new

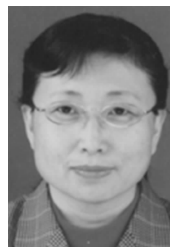
- error compensation method in linear encoder using phase shifted grating [J]. *SPIE*, 1999, 3740: 124-127.
- [5] 熊文卓,孔智勇,张炜. 光电轴角编码器光电信号正交偏差的相量校正方法[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(11):1745-1748.
XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1745-1748. (in Chinese)
- [6] 罗刚,熊文卓. 光电轴角编码器光电信号正交偏差的测量和补偿方法[J]. *传感技术学报*, 2008, 11(21):1853-1857.
LUO G, XIONG W Z H. A method to measure and offset quartering deviation of encoder [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2008, 11(21): 1853-1857. (in Chinese)
- [7] 吕恒毅,刘杨,王延东,等. 莫尔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.
LV H Y, LIU Y, WANG Y D, et al. Intelligent compensation method of Moire fringe orthogonality deviation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(9): 2075-2080. (in Chinese)
- [8] WARNER M, KRABBENDAM V, SCHUMACHER G. Adaptive Periodic Error Correction for Heidenhain Tape Encoders [J]. *SPIE*, 2008, 7012:70123
- [9] GREGORCIC P, POZAR T, MOZINA J. Phase-shift error in quadrature-detection-based interferometers [J]. *SPIE*, 2010, 7726:77260X.
- [10] MERRY R, REN'E V D M, STEINBUCH M, et al. Error modeling and improved position estimation for optical incremental encoders by means of time stamping [J]. *American Control Conference*, 2007, 18(4): 3570- 3575.
- [11] 吕孟军,郭琪,吕印晓. 莫尔条纹信号相位误差补偿[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(7):1694-1700.
LV M J, GUO Q, LV Y X. Signal phase error compensation of Moire fringe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(7): 1694-1700. (in Chinese)
- [12] 王选择,郭军,谢铁帮. 精密衍射光栅信号的椭圆拟合与细分校正算法[J]. *工具技术*, 2003, 37(12): 47-49.
WANG X Z, GUO J, XIE T B. Ellipse fit algorithm and subdivision revision method of precision diffraction grating [J]. *Tool Technology*, 2003, 37(12): 47-49. (in Chinese)
- [13] 高贯斌,王文,林铿,等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1766-1772.
GAO G B, WANG W, LIN K. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1766-1772. (in Chinese)
- [14] 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.
ZHAO CH H. *The research of measure method of dynamic interpolation errors of high precision photoelectric encoder* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [15] 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.
CHEN L, YANG J B, ZHANG X W. *Real-time DSP Achievement of Signal Processing Algorithm* [J]. Beijing: Electronics Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [16] 许志涛,龙科慧,刘金国,等. 基于C8051F340和Labview的编码器调试系统设计[J]. *液晶与显示*, 2011, 26(6):789-794.
XU ZH T, LONG K H, LIU J G, et al. Design of encoder signal debugging system based on C8051F340 and Labview [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, 26(6): 789-794. (in Chinese)

作者简介:



高旭(1987—),女,黑龙江青冈人,博士,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事光电位移精密测量技术的研究。E-mail: gaox19870513@163.com

导师简介:



万秋华(1962—),女,吉林长春人,研究员,博士生导师,工学博士,主要从事光电位移精密测量技术及高精度光电轴角编码器等方面的研究。E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn