

文章编号 1004-924X(2007)11-1745-04

# 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法

熊文卓<sup>1</sup>,孔智勇<sup>2</sup>,张 炜<sup>3</sup>

(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. 北京华盟荣丰科技有限公司, 北京 100083; 3. 总装沈阳军代局驻长春地区军代室, 吉林 长春 130033)

**摘要:**高精度光电轴角编码器中的细分是误差的主要来源,而细分误差中莫尔条纹光电信号的正交性偏差影响最大。采用相量校正方法对正交性偏差进行校正,实现电路简单,校正效果十分明显。以正弦信号为基准信号,而将余弦信号分解为 $0^\circ$ 和 $90^\circ$ 两个正交分量, $0^\circ$ 分量就是产生正交性误差的原因,通过补偿掉该分量,即可基本消除正交性误差。为进一步减小细分误差,通过精密调节,使余弦信号的幅值与正弦信号严格相等,将正弦及其反相信号与余弦信号分别相量相加可得到严格正交的两个新相量,从而消除正交性误差。实验结果表明,经精密相位校正后,正交性偏差从 $1''$ 降低到 $0.1''$ 左右。

**关键词:**轴角编码器;细分误差;正交性偏差

**中图分类号:**TP212.14 **文献标识码:**A

## Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder

XIONG Wen-zhuo, KONG Zhi-yong, ZHANG Wei

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Beijing Hamrofeit Technology Co. Ltd., Beijing 100083, China*; 3. *Military Agency of General Armament Department in Changchun, Changchun 130033, China*)

**Abstract:** The error of photoelectric rotary encoder mainly comes from interpolation. The quartering deviation of Moiré fringe of a rotary encoder is the most important part in interpolation error. The two methods of precise phase correcting are designed. Those correcting circuits are simple and efficient. The sine signal of encoder is regarded as phase reference( $0^\circ$ ), the cosine signal can be separated into  $0^\circ$  and  $90^\circ$  vectors. The quartering deviation is created by  $0^\circ$  vector mainly. In this paper, the cosine signal is quartered to sine signal through compensating the  $0^\circ$  vector of cosine to reduce the quartering deviation. If the lower error is needed, the two signals, sine signal and inverting signal of sine, and cosine signal can be created, then the two signals can become quartering seriously though adjusting the value of cosine equal to sine signal. The experimental results show that the interpolation error is reduced from  $1''$  to  $0.1''$  after the precise phase correction.

**Key words:** rotary encoder; interpolation error; quartering deviation

收稿日期:2007-04-12;修订日期:2007-07-13.

基金项目:国防军工技改资助项目(No. C0ZS04S)

## 1 引言

进入 21 世纪以来,随着航空航天技术的飞速发展,对光电轴角编码器的分辨率、精度的要求越来越高。德国 Heidenhain 公司为意大利伽里略望远镜研制的增量式光电轴角编码器<sup>[1]</sup>,经细分和四读数头平差后,测角精度 RMS 已达到  $0.036''$ ,分辨率为  $0.01''$ ,是当今世界上精度最高的光电轴角编码器。美国 NASA Goddard 宇航中心(NASA Goddard Space Flight Center)最新研制成功的超高分辨率绝对式光电轴角编码器<sup>[2-3]</sup>,采用图形识别技术将基准信号的周期再细分 10 000 份,也获得了  $0.01''$  的高分辨率,并广泛应用于航天领域。

由于光栅刻制、编码器装调等工艺缺陷造成光栅形成的莫尔条纹光电信号不纯,并引起了细分误差,制约了计量光栅高倍细分的实现,也影响了光电轴角编码器的分辨率和精度的进一步提高。在以往研制的高精度编码器中,细分是误差的主要来源,而细分误差中莫尔条纹光电信号的正交性偏差影响最大<sup>[4-6]</sup>。

本文介绍了采用相量校正消除正交性误差的方法,电路实现简单,细分精度提高明显。

## 2 相量校正原理和实现电路

在采用计量光栅测量位移的一些高分辨率高精度装置中,对于已经采用细光栅(例如  $100 \sim 200$  lp/mm)的系统,再用单纯依靠使用更细的光栅的方法来提高测量分辨率是很难实现的,而采用电子学细分(内插)是行之有效的办法。

在精密位移测量装置中一般采用四只光敏元件将莫尔条纹信息转换成对应的光电位移信号,以取得相位互差  $1/4$  周期的一组四相光电信号系统。由于工艺的缺陷,光电信号中存在直流偏移、不等幅、相位误差和信号畸变等产生误差的因素,四相信号由不同的直流分量、不等的幅值和初始相位的基波和各次谐波组成。

假定四相信号拾取条件相同,四只光敏元件性能参数一致,并忽略原始信号中各次谐波的影响,经差分处理后,用相对值表示振幅,则四相莫尔条纹光电信号可用二相正、余弦信号表示:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \sin \theta \\ u_2 &= \cos \theta \end{aligned} \right\}. \quad (1)$$

这是理想的两相正交信号系统,倍频细分的软硬件设计都是以此为依据。当实际信号有差异,就会使编码器产生细分误差。

当实际信号中仅含有正交性偏差  $\Delta\theta$ ,且幅度不等时,光位移信号可用相量表示为:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= A \angle \theta \\ \dot{U}_2 &= B \angle (\theta + \frac{\pi}{2} + \Delta\theta) \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

若  $\dot{U}_3$  由  $\dot{U}_1$  反相得出,则

$$\dot{U}_3 = A \angle (\theta + \pi).$$

显然要得到与  $\dot{U}_1$  正交的相量  $\dot{U}_5$ ,可通过  $\dot{U}_2$  叠加  $\dot{U}_4$  实现。为了简化电路,充分利用已有的  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_3$  信号,可令  $\dot{U}_4$  平行于  $\dot{U}_1$ ,即  $\dot{U}_4$  由  $\dot{U}_1$  与  $\dot{U}_3$  之差产生。 $\dot{U}_2$  与  $\dot{U}_4$  合成得到  $\dot{U}_5$ , $\dot{U}_5$  与  $\dot{U}_1$  正交。校正原理见图 1,实现电路见图 2。 $\dot{U}_1$  经反相器产生  $\dot{U}_3$ ,调节  $W_1$  输出  $\dot{U}_4$ 。当  $\Delta\theta > 0$  时,调节  $W_1$ ,偏向  $\dot{U}_1$ ;反之,偏向  $\dot{U}_3$ 。调节  $W_2$  改变  $\dot{U}_5$  的幅值,使其幅值与  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_3$  相等。经过简单电路处理后, $\dot{U}_5$  与  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_3$  正交,且幅值相等,基本上消除了正交性偏差  $\Delta\theta$  的影响,是供电子学细分的较好的信号。

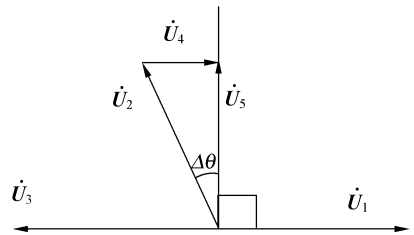


图 1 正交性偏差相量校正方法原理示意图

Fig. 1 Diagram of phase correction of quartering deviation

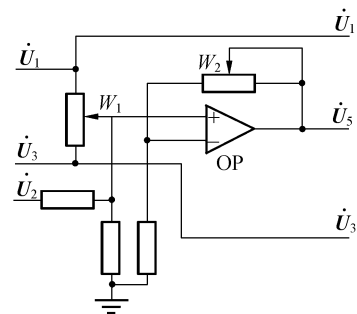


图 2 正交性偏差相量校正方法实现电路

Fig. 2 Schematic circuit diagram of phase correction for quartering deviation

在电路调试时,一般通过示波器观测李沙育图进行正交性校正的调整,精度可以达到  $2^\circ \sim 3^\circ$  相角左右。但如果要进一步提高电子学细分精度,受示波器显示误差和人眼分辨能力的制约,上述调试方法将难以保证获得更高的调整精度。

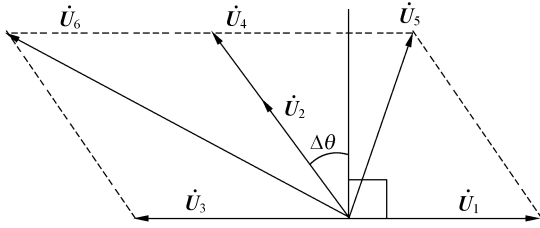


图 3 精密相位校正原理图

Fig. 3 Principle of precision phase correction of quartering deviation

本课题研制的超高精度绝对式光电轴角编码器<sup>[5]</sup>,其细分份数要达到  $2^{13}$  以上,分辨率优于  $0.01''$ ,靠观测示波器的李沙育图将无法满精度要求,必须采用更精密的相位校正方法,其校正原理如图 3 所示。其中:

$$\dot{U}_1 = A \angle \theta,$$

$$\dot{U}_2 = B \angle (\theta + \frac{\pi}{2} + \Delta\theta),$$

为原始信号。 $\dot{U}_3$  由  $\dot{U}_1$  反相得到。 $\dot{U}_4$  为  $\dot{U}_2$  乘以系数  $k$  后的值,通过改变系数  $k$ ,来保证  $\dot{U}_4$  的幅值与  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_3$  相等。

$$\dot{U}_3 = A \angle (\theta + \pi),$$

$$\dot{U}_4 = A \angle (\theta + \frac{\pi}{2} + \Delta\theta) = k \dot{U}_2.$$

$\dot{U}_5$  为  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_4$  的矢量和, $\dot{U}_6$  为  $\dot{U}_3$  和  $\dot{U}_4$  的矢量和。因为  $\dot{U}_1$  与  $\dot{U}_3$  反相,相位差始终保持为  $\pi$ ,当  $\dot{U}_4$  的幅值与  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_3$  相等时, $\dot{U}_5$  和  $\dot{U}_6$  分别为  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_4$  和  $\dot{U}_4$ 、 $\dot{U}_3$  的角平分线。因此,只要调整系数  $k$ ,使  $\dot{U}_4$  幅值与  $\dot{U}_1$  和  $\dot{U}_3$  相等就可以保证  $\dot{U}_5$  与  $\dot{U}_6$  正交。幅值测量的精度比通过示波器观察李沙育波形要高得多。该方法只要求  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_3$  和  $\dot{U}_4$  等幅,即可保证光电信号的正交性。采用高精度的电压表或电桥可以较容易地精密测量其幅值,调节后的不等幅误差将优于  $0.1\%$ 。原始光电信号采集时,光栅的透过率在不同角位置其变化趋势相似,因此上述的校正方法具有一定的自补偿功能,可获得高精度的正交信号。该方法实现电路简单,实用电路如图 4 所示。放大器 1 的放大倍数通过电位计  $W_1$  进行调节,使其输出

信号  $\dot{U}_4$  的幅值与  $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_3$  相等,调试的灵敏度应满足与  $\dot{U}_1$  的幅值差  $< 0.1\%$ ,这样可保证  $\dot{U}_5$  与  $\dot{U}_6$  严格正交,再通过调节电位计  $W_2$ ,使  $\dot{U}_5$  与  $\dot{U}_6$  幅值相等。这是提供高插补系数、高精度细分的理想的正交光电信号。图 5 是正交性校正前后的李沙育图。

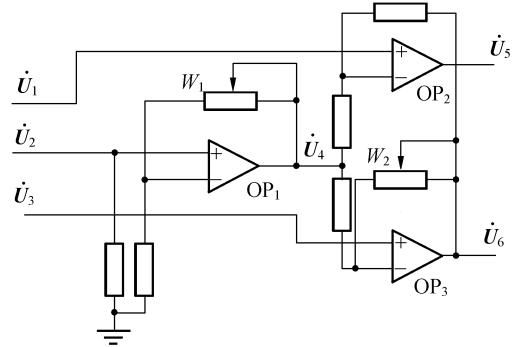
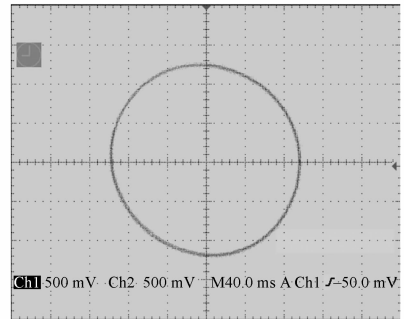


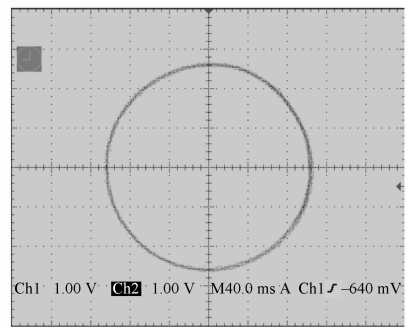
图 4 精密相位校正电路原理图

Fig. 4 Circuit diagram of precision phase correction of quartering deviation



(a) 未经校正的光电信号李沙育图

(a) Lishayu graph of uncorrected photoelectrical signals



(b) 校正后的光电信号李沙育图

(b) Lishayu graph of corrected photoelectrical signals

图 5 校正前后的李沙育图

Fig. 5 Lishayu graphs of uncorrected and corrected photoelectrical signals

### 3 实验结果

某 25 位绝对式光电轴角编码器<sup>[6]</sup>的码盘最精细光栅码道周期为  $360^\circ/2^{14} = 79.1''$ , 每个光栅周期细分 2 048 份, 未采用正交性校正, 其细分误差分布如图 6 所示。一个光栅周期内, 共均分 32 个点, 代表一个光栅周期内不同的角度, 经测量后拟合出细分误差曲线, 细分误差最大值在光栅周期  $\frac{\pi}{2}$ 、 $\frac{3\pi}{2}$  处(码值为 8 和 24), 为  $1''$  左右, 说明该编码器莫尔条纹信号正交性不佳, 是影响细分误差的主要因素。

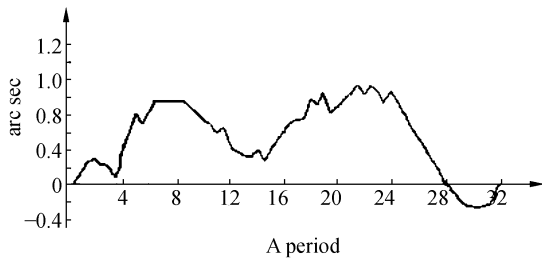


图 6 25 位绝对式光电轴角编码器细分误差

Fig. 6 Curve of interpolation error without phase correction

图 7 是某超高精度编码器采用正交精密相量校正后的细分误差分布图。它与图 6 中的编码器

码盘光栅周期相同, 所采用的精度检测方法基本一致。在光栅周期  $\pi/2$ (8 点),  $3\pi/2$ (24 点) 处, 误差很小, 仅为前者的  $1/10$ ( $0.1''$  左右), 正交性偏差的校正效果十分明显。

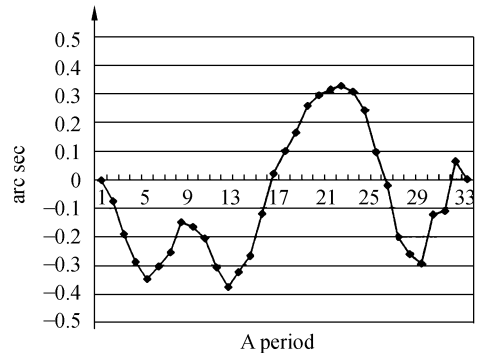


图 7 采用精密正交相量校正后细分误差曲线

Fig. 7 Curve of interpolation error after precision phase correction

### 4 结 论

采用相量校正方法对编码器莫尔条纹光电信号进行校正, 实现电路简单, 校正效果明显。试验结果表明, 经精密相位校正后, 正交性偏差从  $1''$  降低到  $0.1''$  左右。相量校正方法还可应用于其他高精度的角度和长度测量领域, 如长光栅尺、容栅、感应同步器等。

### 参考文献:

- [1] MANCINI D, CASCON E, SCHIPNI P. Galileo high-resolution encoder system [J]. *SPIE*, 1997, 3112: 328-334.
- [2] LEVITON D B, KIRK J, LOBSINGER L. Ultra-high resolution Cartesian absolute optical encoder [J]. *SPIE*, 2003, 5190: 111-121.
- [3] 董丽丽, 熊经武. 光电轴角编码器的发展动态 [J]. *光学 精密工程*, 2000, 8(2): 198-202.  
DONG L L, XIONG J W. Development of photoelectric rotary encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 198-202. (in Chinese)
- [4] 熊经武, 王勇臣. 莫尔条纹乘法倍频 [J]. *仪器仪表学报*, 1984, 5(2): 179-188.  
XIONG J W, WANG Y CH. The frequency multiplication of the moire fringe using analog multipliers [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1984, 5(2): 179-188. (in Chinese)
- [5] 孔智勇. 提高绝对式光电轴角编码器精度和分辨力的方法的研究 [D]. 中科院博士论文, 2003.  
KONG ZH Y. *Study on techniques of increasing the accuracy and resolution for the absolute photoelectricity rotary encoder* [D]. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)
- [6] 耿丽红, 曹学东. 高分辨力光电轴角编码器分辨力和精度的检测 [J]. *工具技术*, 1996, 30(9): 36-38.  
GENG L H, CAO X D. The verification of accuracy and resolution for high-resolution photoelectric rotary and angle encoders [J]. *Tool Engineering*, 1996, 30(9): 36-38. (in Chinese)

作者简介: 熊文卓(1967—), 男, 吉林长春人, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所副研究员, 主要研究方向为光电位移传感器和光电仪器。E-mail: carlx@163.com