

## 莫尔条纹光电信号细分误差的实时补偿

高 旭<sup>1,2</sup>, 李俊峰<sup>3</sup>, 张淑梅<sup>1</sup>, 万秋华<sup>1</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. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所  
光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 为了保证高精度光电轴角编码器在恶劣工作条件下的细分精度, 设计了基于高分辨率数字电位计的实时补偿处理系统。依据莫尔条纹光电信号的数学模型, 说明了由信号等幅性偏差和直流电平漂移引起的细分误差的空间分布特征, 并得出误差规律及计算公式, 从编码器的光机装调、码盘均匀性、光敏元件调试等制作环节出发, 指出了编码器光电信号细分误差的根本特性; 受高精度光电编码器分辨力的约束, 从编码器光敏元件输出莫尔条纹信号的形式出发, 构建了分辨率为  $0.1\Omega$  的数字电位计查找表; 并设计了实时补偿的关键算法。以 23 位光电编码器为实验对象, 在  $-40\sim 60\text{ }^\circ\text{C}$  条件下对补偿处理系统测试, 实验结果表明: 直流漂移  $\leq 1.2\%$ , 等幅性  $\leq 2\%$ , 且自动补偿时间约为 3 s, 满足编码器分辨力 ( $0.154''$ ) 和工作实时性的要求。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:** 高精度光电编码器; 数字电位计; 细分误差; 实时补偿

**中图分类号:** TP394.1   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)11-3013-06

## Real-time compensation of subdivision error for Moire fringe photoelectric signal

Gao Xu<sup>1,2</sup>, Li Junfeng<sup>3</sup>, Zhang Shumei<sup>1</sup>, Wan Qihua<sup>1</sup>

- (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;  
3. Key Laboratory of Optics System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** In order to ensure the interpolation precision of the high precision photoelectric rotary encoder in the harsh working conditions, the real-time compensation processing system based on digital potentiometer was designed. On the basis of Moire fringe photoelectric signal mathematical model, the spatial distribution of the subdivision error due to signal amplitude deviation and DC drift was revealed. Error discipline and calculation formula was obtained. From several production aspects, such as encoder opto-mechanical alignment, uniformity of the code disk and photosensitive element debugging,

收稿日期: 2013-03-10; 修订日期: 2013-04-11

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, 博士生, 主要从事光电信号精密测量技术的研究。Email: gaox19870513@163.com

导师简介: 万秋华(1962-), 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事光电信号精密测量技术方面的研究。Email: wangqh@ciomp.ac.cn

fundamental characteristic of the encoder photoelectric signal subdivision error was pointed out. The resolution of high precision photoelectric encoder was constrained. From the Moire fringe signal form outputted by encoder photosensitive element, digital potentiometer look-up table with 0.1  $\Omega$  resolution was constructed and key algorithm of real-time compensation was designed. A 23 bit encoder was selected as the experimental object and the compensation processing system was tested at -40-60  $^{\circ}\text{C}$ . The experimental results showed that the DC drift was less than 1.2% and amplitude difference was less than 2% and the automatic compensation time was about 3 s. It can meet the encoder resolution (0.154") and real-time requirements. The method can be applied in the encoder system and improve the environmental adaptability and angle measurement reliability.

**Key words:** high precision photoelectric encoder; digital potentiometer; subdivision error; real-time compensation

## 0 引言

光电精密跟踪技术的发展,对高精度光电编码器在恶劣工作环境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,其中,信号的等幅性偏差和直流漂移是细分误差的主要来源,误差变化频率取决于编码器的轴向速率,当误差频谱在伺服系统带宽内时,细分误差直接影响系统精度,实时补偿信号的细分误差显得尤为必要<sup>[1-3]</sup>。

Heydemann 首次提出基于最小二乘拟合法的莫尔条纹信号补偿技术<sup>[4]</sup>,国内外业界人士纷纷在 Heydemann 补偿模型的基础上进行算法的不断改进与优化,如美国天文台提出海德汉磁编码器周期误差补偿方法<sup>[5]</sup>,国内华中科技大学、合肥工业大学、天津大学等提出以 Heydemann 模型为基础的光栅信号细分误差修正方法<sup>[6-9]</sup>等。此类算法的运算非常缓慢,无法匹配角度输出的响应时间,且无法准确求解补偿模型中的待定参数。后来,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所洪喜等人又提出一种基于径向基函数网络模型的编码器误差修正技术<sup>[10-11]</sup>,解决了非线性误差对系统的影响;浙江大学高贯斌等人还提出一种基于粒子群算法的误差补偿及参数辨识方法<sup>[12]</sup>,解决了关节角度编码器低精度的问题,但此类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,不能适应工作现场及工作环境的变化。此外,业界人士从器件的温度特性方面着手,也开展了系列补偿方案研究,如发光二极管和光电

三极管配对法、热敏电阻补偿法等,但由于温度特性的变化复杂,不能完全匹配,而未能在实际中得到广泛应用。

随着数字化可控器件的飞速发展,应用可控增益放大器或数字电位计来补偿编码器信号细分误差的方法也不断涌现<sup>[13]</sup>,受元件分辨力和精度的影响,它们大多都应用在小精度低精度的编码器中。文中提出一种基于高分辨率数字电位计的高精度光电编码器细分误差实时补偿方法,该方法能够匹配编码器角度输出的响应时间,不需要大的静态补偿查找表和频繁校准,使系统实现了在无人环境下编码器信号等幅性偏差及直流漂移的实时补偿与在线修正。

## 1 细分误差分析

基于莫尔条纹信号产生机理,23 位光电编码器实际输出的光能量分布是一个近似的正弦波,因此,高精度光电轴角编码器理想莫尔条纹光电信号可定义为:

$$u_{\sin} = A \sin \theta \quad u_{\cos} = A \cos \theta \quad (1)$$

式中:  $A$  为信号的幅值;  $\theta$  为理论上的转角。其细分原理是利用两路正弦细分信号来完成角度求解,即:

$$\theta = \arctan(A \sin \theta / A \cos \theta) \quad (2)$$

设编码器两路光电信号仅含有直流电平偏移,其模型可定义为:

$$u_{\sin}(\theta) = u_{a0} + u_{a1} \sin \theta, \quad u_{\cos}(\theta) = u_{b0} + u_{b1} \cos(\theta) \quad (3)$$

设基波幅值为 1 V,当直流电平在 [-0.1 V, 0.1 V] 之间变化时,由此产生的细分误差为:

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

其误差曲线如图 1 所示。

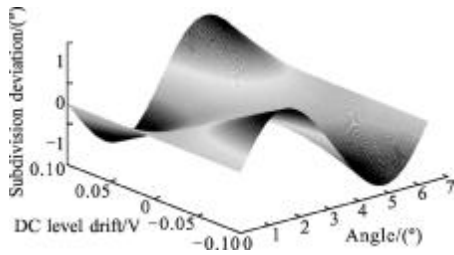


图 1 直流电平漂移引起的细分误差曲线图

Fig.1 Curve of subdivision error caused by DC level drift

当只考虑莫尔条纹光电信号等幅性的影响时, 设编码器两路光电信号为:

$$u_{\sin}(\theta)=u_{a1}\sin\theta, u_{\cos}(\theta)=k*u_{a1}\cos(\theta) \quad (5)$$

式中:k 为幅值比, 设  $k \in [1-10\%, 1+10\%]$  时, 由此产生的细分误差如图 2 所示。

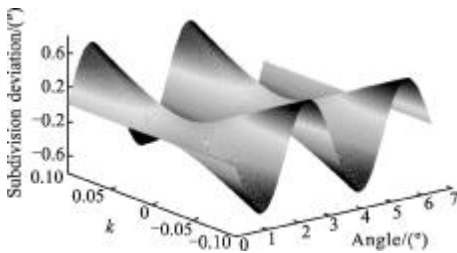


图 2 等幅性偏差引起的细分误差曲线

Fig.2 Curve of subdivision error caused by equal-amplitude error

综上, 由图 1 可以看出, 由直流电平引起的细分误差曲线为正弦曲线, 周期与莫尔条纹信号细分周期 T 相同, 当信号的直流电平变化为基波幅值的 ±10% 时, 引起的最大细分误差为 ±8T/360。若编码器的细分周期为 80" 时, 引起的最大细分误差为 1.78"。同理, 由图 2 可以看出, 由等幅性偏差引起的细分误差曲线也为正弦曲线, 周期为 T/2, 当信号中含有 ±10% 的等幅性偏差时, 引起的最大细分误差为 ±3T/360, 即 0.67"。

从编码器的光机装调、码盘刻划均匀性、光敏元件调试等各个制作环节进行分析, 编码器光机装调偏差、光电信号参数调整偏差, 会引起两路精码信号产生直流电平漂移和幅度不等, 由此产生的细分误差是与码盘转角无关的系统误差, 当结构参数、装调精度及光电信号参数调整精度达到一定程度时很难再减小; 码盘的均匀性及黑白比也会引起信号出现偏差, 由此产生的细分误差是与码盘转角有关的交

变系统误差, 在码盘制作后不能消除; 光敏元件的非线性、噪声、温度系数不匹配及处理电路噪声等, 也会引起信号出现偏差, 由此产生随机的细分误差。因此, 消除、补偿由光电信号直流漂移和幅度不等产生的细分误差, 会有效地提高编码器的细分精度。

## 2 实时性的具体实现

### 2.1 补偿原理

文中使用中国科学院长春光学精密机械与物理研究所生产的 23 位光电轴角编码器, 其分辨力为 0.154", 精度为 ≤1", 最精细光栅码道刻划周期约为 7.91", 在一个精码周期内细分 512 份。

图 3 为实时补偿系统原理图。将编码器从精码道对应光敏元件送出的四相光电流信号 C0°、C90°、C180°、C270°通过数字电位计, 再经差分放大(此处处理电路的放大倍数为 16 倍)送入 A/D 转换器。文中选用 TI 公司生产的 TMS320F2812 作为核心处理器、MAXIM 公司生产的 MAX125 作为数据采集芯片、使用美国 ADI 公司生产的低功耗, 2 线串行总线 (I2C 总线) 接口数字电位计 AD5254, 其总阻值为 1 kΩ、256 抽头, 分辨率为 3.92 Ω/抽头。

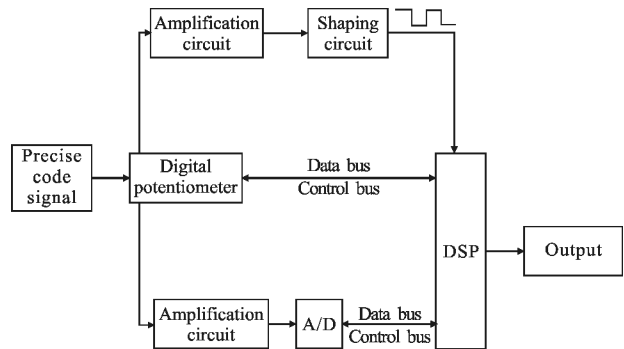


图 3 补偿处理系统原理图

Fig.3 Diagram of compensation processing system

其系统数据采集示意图如图 4 所示, 运用 DSP 快速灵活的数据处理和 控制能力, 利用精码正弦信号 a 经整形电路输出的方波信号 b 沿, 控制 A/D 转换器, 保证精码正弦信号 a 在一个光栅周期内的采点。

同时, 实时监控求取信号幅值, 并根据采集求取的不合格信号, 程控数字电位计, 同理, 余弦信号 c 采取同样的处理方法, 至两路精码信号等幅性偏差和直流漂移量满足理想范围时, 再进行细分处理。

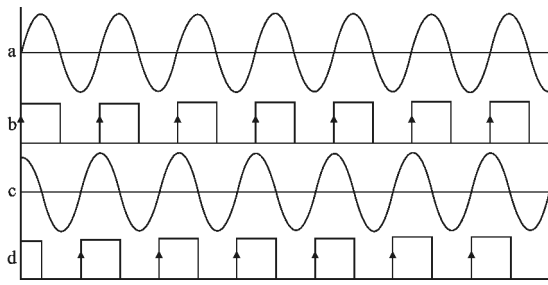


图 4 信号采集示意图

Fig.4 Diagram of precise code signal acquisition

### 2.2 高分辨率数字电位计的设计

此编码器的头部输出光电流约为 1 mA，通过 2.1 节所述，可见： $3.92 \Omega$  的阻值分辨率不足以精确满足此编码器分辨力下的调制。另外，由于数字电位计本身含有内阻且器件本身数字控制的精确性，都会使理论误差增大，在实际使用过程中更是无法满足高精度光电编码器的精度要求。因此，从编码器光敏元件输出莫尔条纹信号的形式出发，为实现高分辨率的电位计，采取数字电位计内部的四组 RDAC 电路两两并联的方法来实现，如图 5 所示。

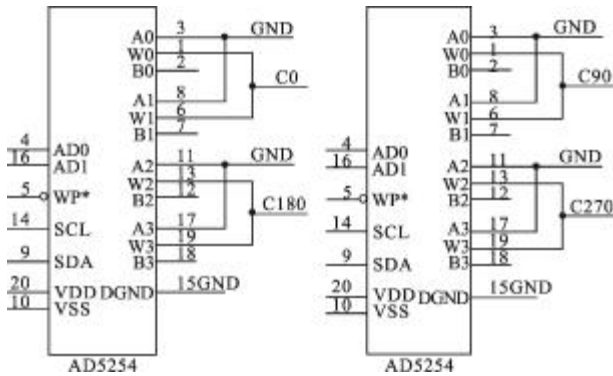


图 5 并联电路及精码信号连接图

Fig.5 Connection diagram of parallel circuit and precise code signal

由于每个 RDAC 电路的电阻都有三个端点，其中 A0、A1、A2、A3 为输出电阻的低端，B0、B1、B2、B3 为输出电阻的高端，W0、W1、W2 和 W3 为数控滑动端。将两个 RDAC 中电阻的 A0、A1 与 W0、W1 端并联、两个 RDAC 中电阻的 A2、A3 与 W2、W3 端并联，相当于一个 AD5254 电位计的四个对外引出端，精码信号 C0°、C90°、C180°、C270° 对应与端子连接。

通常情况下，调试此 23 位编码器精码信号的电位计阻值范围大约在  $300 \Omega \sim 500 \Omega$  左右。通过图 5 的硬件并联后，数字电位计的阻值分辨率可达到  $2 \Omega/\text{抽头}$ 。

在此基础上，采用穷举法在 VC 平台上编写分辨率为  $0.1 \Omega$  的高精度数字电位计阻值查找表，

其查找表建立的程序框图如图 6 所示。

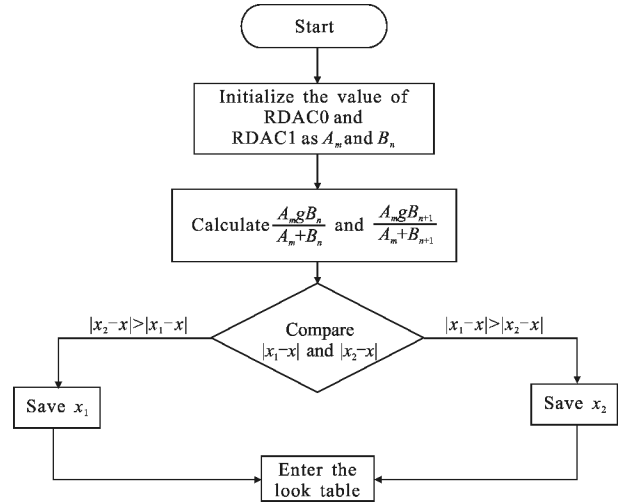


图 6 建立查找表的程序框图

Fig.6 Program flow diagram of establishment of the lookup table

这里，设  $x_1 = \frac{A_m - B_n}{A_m + B_n}$ ， $x_2 = \frac{A_m - B_{n+1}}{A_m + B_{n+1}}$ ，进入查找表的理想值为  $x$ 。

### 2.3 关键算法设计

系统软件按模块化设计，主要由信号采集模块、偏差求取模块和补偿模块等组成。其主程序框图如图 7 所示。

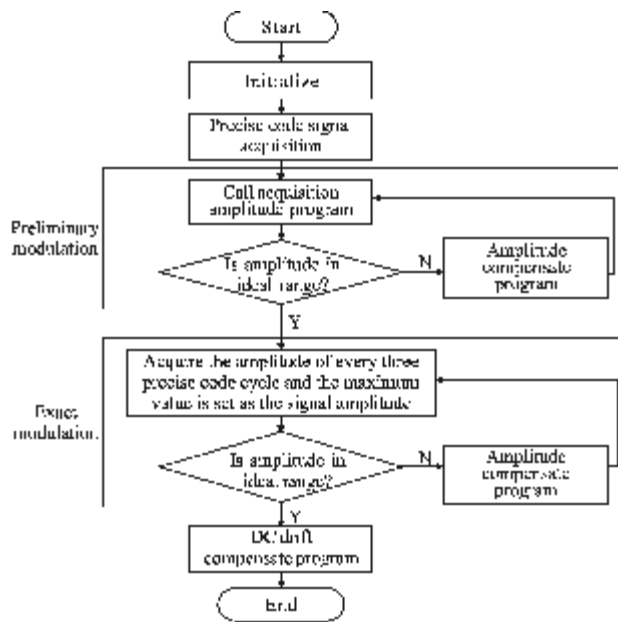


图 7 主程序流程图

Fig.7 Flow chart of main program

当编码器在最大转速 50(°)/s 的情况下,23 位绝对式光电编码器所转过一个精码周期的时间为 440 μs,在此时间内采样 50~100 个点,MAX125 转换器都可以满足。

文中采用逐点比较法求取精码信号的幅值,如图 8 所示。

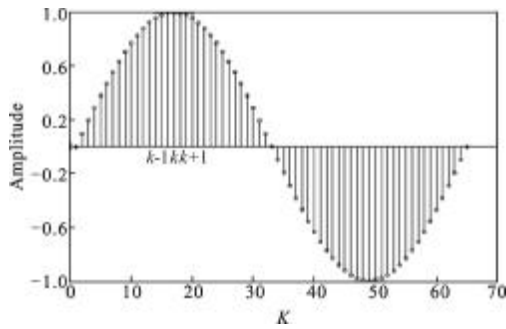


图 8 逐点比较法示意图

Fig.8 Schematic diagram of point-by-point comparison method

通过对信号连续采样、比较,当第 k 个采样点的幅值 f(k)满足公式(6)时:

$$f(k-1) < f(k) > f(k+1) \quad (6)$$

则认为 f(k)即为精码信号的波峰值 f<sub>max</sub>,同理,可求得波谷值 f<sub>min</sub>最后由公式(7)可求得直流电平量。

$$v = \frac{f_{max} - f_{min}}{2} + f_{min} \quad (7)$$

补偿算法是设计的关键,设此编码器信号理想幅值为 f,其允许的波动范围为 ±1.2%,实际采集信号幅值为 f<sub>1</sub>,数字电位计的初始值为 r<sub>1</sub>,为满足 f=f<sub>1</sub>,即采用逐点比较法,若 f<sub>1</sub>>f,则减小数字电位计值,反之,增大数字电位计值。为了提高补偿效率,文中采用另一种设计方案:设数字电位计的理想阻值为 r<sub>2</sub>,则有:

$$f/f_1 = r_2/r_1, r_2 = r_1 * (f/f_1) \quad (8)$$

其中 r<sub>2</sub>=r\*+e,这里的 r\*表示阻值的整数部分,e表示阻值的小数部分,同时,e≈k\*0.1Ω,将计算出的 r\*值直接赋给数字电位计,完成幅值的粗调,而通过 k 值的大小直接查询数字电位计的查找表完成幅值的精调。

### 3 实验及误差分析

#### 3.1 高低温环境实验

将补偿处理系统应用到 23 位绝对式光电编码

器中,在高低温环境下,测试系统性能。

图 9 为常温 20℃环境下实验,精码信号自动调幅波形图。

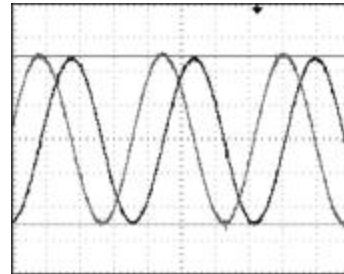


图 9 精码信号实时补偿波形

Fig.9 Waveform of precise code signal real-time compensation

图 10 为在高温 60℃环境下,使用普通电位计和使用数字电位计,精码信号波形比较图。

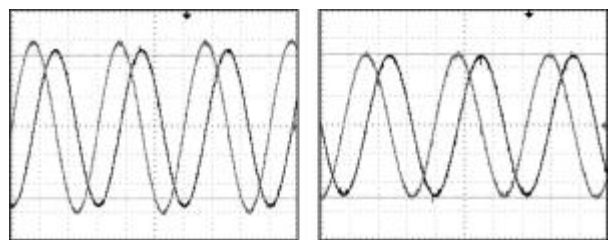


图 10 精码信号实时补偿前后波形(60℃)

Fig.10 Front and back waveform of precise code signal real-time compensation(60℃)

图 11 为在低温 40℃环境下,使用普通电位计和使用数字电位计,精码信号波形比较图。

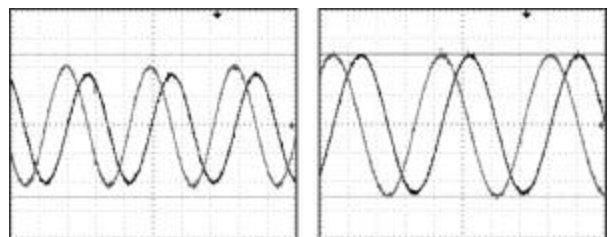


图 11 精码信号实时补偿前后波形(-40℃)

Fig.11 Front and back waveform of precise code signal real-time compensation(-40℃)

实验结果表明:在 -40~60℃条件下,对补偿处理系统进行测试,通过补偿前后的波形比较,证明该补偿系统性能良好,且补偿时间大约为 3s,满足编码器实际工作要求。

#### 3.2 误差分析

采用幅度细分法,具体分析等幅性偏差对测角精

度的影响。如图 12 所示,  $w$  为理想情况下区间  $[0, \pi/4]$  内的细分曲线,  $w'$  为幅值不等时的细分曲线。  $w'$  相对于  $w$  的相位偏移程度不等, 在右顶点时偏移为  $\Delta\theta$ , 显而易见,  $\max\Delta\varphi < \Delta\theta$ 。

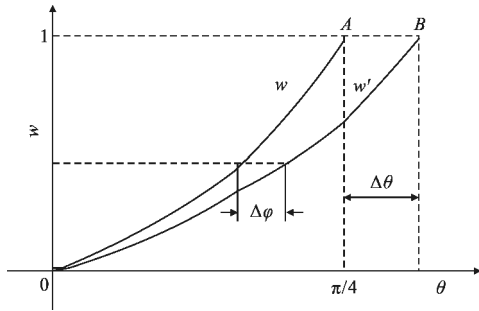


图 12 等幅性偏差示意图

Fig.12 Schematic of equal-amplitude error

根据精码信号差分后的数学模型为:

$$u_1(\theta) = A \sin \theta, u_2(\theta) = (1 + \xi) A \cos \theta \quad (9)$$

式中:  $\xi$  为幅值不等百分量。若满足公式(8), 则:

$$A \sin \theta = (1 + \xi) A \cos \theta \quad (10)$$

则  $\theta = \arctan(1 + \xi)$ , 故相位偏移  $w$  的最大值为:

$$\Delta\theta_{\max} = \arctan(1 + \xi) - \pi/4 \quad (11)$$

这里设  $\xi = 2\%$ , 那么实际测角误差  $\Delta_1$  为:

$$\Delta_1 = 1/2\pi \Delta\theta_{\max} T = 0.124'' \quad (12)$$

同理, 文中直流漂移波动设为  $\pm 1.2\%$ , 则引起的测角误差为:

$$\Delta_2 = \frac{0.012 * 79.1''}{2\pi} = 0.151'' \quad (13)$$

可见, 设计指标满足系统设计要求。

## 4 结论

针对莫尔条纹光电信号等幅性偏差和稳定性偏差, 文中设计了基于数字电位计的实时补偿处理系统及关键算法, 可实际应用于编码器系统, 具有补偿精度高、补偿效率高、成本低、电路复杂度小等优点, 能够在无人环境下实现信号细分误差的智能补偿与在线修正。以 23 位光电编码器为实验对象, 通过在  $-40 \sim 60^\circ\text{C}$  条件下对补偿处理系统测试, 实验结果表明: 直流漂移  $\leq 1.2\%$ , 等幅性  $\leq 2\%$ , 且自动补偿时间约为 3 s, 满足编码器分辨力和工作实时性的要求。有效解决了编码器在恶劣工作环境下受信号等幅性偏差和直流漂移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、环境适应性和测角

可靠性。此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:

- [1] Gao Xu, Wan Qihua, 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)
- [2] Wang Shuai, Wang Jianli, Chen Tao. Application of the nonlinear tracking-differentiator in velocity estimation on optical encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 849-853. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] Heydemann, Peter L M. Determination and correction of quadrature fringe measurement errors in interferometers [J]. *Applied Optics*, 1981, 20(3): 3382-3384.
- [5] Michael Warner, Victor Krabbendam, German Schumacher. Adaptive periodic error correction for heidenhain tape encoders [C]//SPIE, 2008, 7012: 70123N.
- [6] Yuji Matsuzoe, Toru Yoshizawa. Error dispersion algorithms to improve angle precision for an encoder [C]//SPIE, 2002, 41(9): 2282-2289.
- [7] Tan K K, Huixing X Zhou. New interpolation method for quadrature encoder signals [J]. *IEEE*, 2002, 51(5): 1073-1079.
- [8] Wang Xuanze, Guo Jun, Xie Tiebang. Ellipse fit algorithm and subdivision revision method of precision diffraction grating [J]. *Tool Technology*, 2003, 37(12): 47-49. (in Chinese)
- [9] Qi Yongyue, Zhao Meirong, Lin Yuchi. Methods of improving accuracy of laser interferometry [J]. *Journal of Tianjin University*, 2006, 39(8): 899-993. (in Chinese)
- [10] 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. (in Chinese)
- [11] Hong Xi, Xu Zhijun. Application of RBF for error compensation in optical encoders [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 37(5): 87-89. (in Chinese)
- [12] Gao Guanbin, Wang Wei, Lin Keng. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1766-1772. (in Chinese)
- [13] Zhu Chengjun, Long Kehui. Research on the method of signal amplitude automatic compensation for photoelectric encoder [J]. *Technology of Measure*, 2009, 28(9): 6-9. (in Chinese)