

小型光电编码器细分误差补偿法

孙莹 万秋华 余容红

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 提出了一种基于图形拟合的小型光电编码器细分误差补偿的新方法。首先, 采用分段函数法建立莫尔条纹三角波光电信号波形方程; 然后, 采用回归分析理论、可决系数方法, 研究了所建三角波图形与实际光电信号图形的拟合程度, 建立了莫尔条纹三角波图形拟合优度检验方法; 最后, 建立了细分误差补偿数学模型, 给出了新的莫尔条纹细分计算公式, 实现对细分误差的综合补偿。运用本方法对 16 位小型光电编码器进行细分误差补偿处理, 经实际测试细分误差峰峰值由 79" 减小到 27.5"。实际结果表明: 研究的细分误差补偿方法, 可提高光电编码器的细分精度, 对于研制小型高精度光电编码器具有重要意义。

关键词: 光电编码器; 图形拟合; 细分误差; 补偿; 三角波

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

Interpolation error compensation of the minitype photoelectrical encoder

Sun Ying Wan Qiuhua She Ronghong

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

Abstract: The new method for interpolation error compensation of the minitype photoelectrical encoder based on figure fitting is presented. Firstly, the triangular wave photoelectric signal equation of moire fringe is established with the subsection function; secondly, the fitting level is researched between the triangular wave graph and the practical photoelectrical signal graph with the regression analysis and coefficient of determination, and the fitting merit test method of the triangular wave graph is put forward; finally, the mode of interpolation error compensation and interpolation formula of moire fringe are established, which realize the comprehensive compensation of the interpolation error. The moire fringe interpolation error compensation is applied in a 16-bits minitype photoelectrical encoder. After testing, the peak-to-peak value of interpolation error has reduced to the 27.5" from 79". The experiment result shows: the interpolation error compensation method can improve the interpolation precision of photoelectrical encoder, and it is significant for the research of high-precision minitype photoelectrical encoder.

Keywords: photoelectrical encoder; figure fitting; interpolation errors; compensation; triangular wave

1 引言

光电编码器是一种以高精度计量圆光栅为位移基准、以光栅莫尔条纹技术为基础、将空间角位移转换为数字信息的精密数字角度传感器, 因其具有分辨率高、测量范围广、使用可靠、易于维护等优点, 广泛应用于光电经纬仪、数控机床、工业、生物科学等自动化测量和控制领域^[1-5]。在航天项目研制中, 对光电编码器不仅要求它的体积小、重量轻, 而且还要求它的精度高、分辨力高。因此, 研制出

体积小、精度高的光电编码器对于提高航天仪器整体性能具有重要意义。

提高光电编码器精度的方法除了通过提高光栅自身精度^[6-8]外, 广泛采用的是误差修正的方法。目前, 国内外许多科研院所开展了光电编码器误差修正方法的研究, 如美国天文台提出了Heidenhain型编码器自适应周期误差补偿方法^[9], 韩国LG公司提出了应用移相光栅补偿编码器相位误差的方法^[10], 华中科技大学提出了采用椭圆拟合法补偿相位误差^[11], 长春光机所提出了一种基于径向基函

本文于 2011 年 4 月收到。

数网络的光电编码器误差补偿技术^[12]等。但是上述编码器误差修正方法仍然存在一些问题,如仅修正了直流电平漂移、基波信号幅值不等、正交性偏差产生的细分误差,对高次谐波的影响还没有有效的修正方法;误差的修正需要更高精密的仪器作为测量基础;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等等。

由于细分误差是影响光电编码器精度的主要因素,本文开展了小型光电编码器细分误差补偿方法研究。通过对小型光电编码器莫尔条纹信号特点及细分误差源进行分析、研究,采用图形拟合法得到了莫尔条纹光电信号波形方程,建立细分误差补偿数学模型,给出了新的莫尔条纹细分计算公式,实现了对小型光电编码器细分误差的补偿。

2 莫尔条纹三角波光电信号波形方程的求解算法

细分误差产生的直接原因是光电编码器精码莫尔条纹信号相对于标准信号的波形偏差。要实现对细分误差的补偿,首先要计算出莫尔条纹光电信号的波形方程。本文研究的莫尔条纹三角波光电信号波形方程的求解算法,主要是采用分段函数建立莫尔条纹光电信号波形的数学模型。通过设置分段函数波形参数,建立偏离标准三角波的各种波形方程,用得到波形方程的 Lissajous 图形拟合实际光电信号的 Lissajous 图形,拟合精度满足要求后,用创建的分段函数代表实际的莫尔条纹光电信号的波形方程,为进行细分误差补偿建立基础。

2.1 分段函数法建立莫尔条纹三角波光电信号波形方程

2.1.1 标准三角波光电信号波形方程

光栅按其栅距大小可分为粗光栅和细光栅。粗光栅莫尔条纹信号的形成可用几何的遮光阴影原理解释,形成的莫尔条纹信号为近似三角波;细光栅莫尔条纹信号的形成不仅是不透光刻线的遮光作用,还涉及各级衍射光束间的干涉现象,形成的莫尔条纹信号为近似正弦波。小型光电编码器的莫尔条纹信号为近似三角波。

由于信号波形可以由数值函数表示,而数值函数可以由分段函数创建,因此,可以利用创建的分段函数代表三角波莫尔条纹光电信号的波形方程。归一化后的标准三角波的信号波形如图 1 所示,标

准的三角波信号可由式(1)分段函数表示。

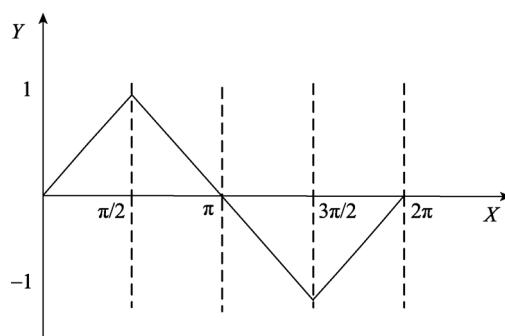


图 1 标准三角波

Fig. 1 Stanard triangular wave

$$y = \begin{cases} \frac{2}{\pi}x, & 0 \leq x \leq \pi/2 \\ -\frac{2}{\pi}(x - \pi/2) + 1, & \pi/2 < x < 3\pi/2 \\ \frac{2}{\pi}(x - 2\pi), & 3\pi/2 \leq x \leq 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

根据傅里叶级数定义,可将式(1)所示的函数展开为式(2)表示的傅里叶级数。

$$y \approx 0.811 \sin x - 0.09 \sin 3x + 0.032 \sin 5x - 0.017 \sin 7x + 0.01 \sin 9x \quad (2)$$

由式(2)可知,标准的三角波莫尔条纹光电信号仅含有奇次谐波。

实际上由于莫尔条纹光电信号存在剩余的直流电平、信号基波幅度不等、信号不正交性、信号含有偶次谐波等因素的影响,实际的信号波形会偏离理想的信号波形。

2.1.2 近似三角波光电信号波形方程

经过观察测量及实验验证,一个周期的近似三角波莫尔条纹光电信号波形可以由直线和抛物线分段组成,如图 2 所示。

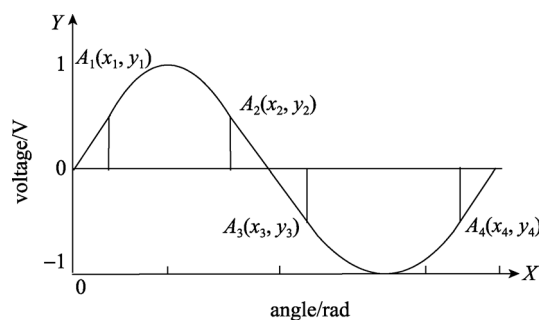


图 2 近似三角波莫尔条纹光电信号

Fig. 2 Moire fringe photoelectric signal of the approximate triangle wave

假设仅含有偶次谐波的三角波莫尔条纹光电信号波形方程为 $f(\theta)$, 光电信号顶抛物线的顶点相对于 $\pi/2$ 偏移 m , 底抛物线的顶点相对于 $3\pi/2$ 偏移 n 时, 波形方程可用式(3)表示。

$$y = \begin{cases} k_1(x-x_1)+y_1, 0 \leq x < x_1 \\ \frac{(x-\pi/2+m)^2}{-2r_1}+1, x_1 \leq x \leq x_2 \\ k_{23}(x-x_2)+y_2, x_2 < x < x_3 \\ \frac{(x-3\pi/2+n)^2}{2r_2}-1, x_3 \leq x \leq x_4 \\ k_4(x-x_4)+y_4, x_4 < x \leq 2\pi \end{cases} \quad (3)$$

式中: (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) 为直线和抛物线切点坐标; k_1, k_{23}, k_4 为切点斜率; r_1 为顶抛物线曲率半径, r_2 为底抛物线曲率半径, m 为顶点相对于 $\pi/2$ 的偏移量, n 为顶点相对于 $3\pi/2$ 的偏移量。

那么既含有偶次谐波分量又含有直流电平及非等幅误差的光电信号波形方程如式(4)所示。

$$y = Af(\theta) + u_0 \quad (4)$$

式中: A 为信号基波幅值, u_0 为信号直流电平偏移量。经计算得, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) , (x_4, y_4) , k_1, k_{23}, k_4 均为关于 r_1, r_2, m, n 的方程, 因此, 只要知道 r_1, r_2, m, n, A, u_0 的值, 便可得到三角波莫尔条纹光电信号的波形方程。

2.2 Lissajous 图形拟合

编码器在实际应用时通常是带有一定加速度的非匀速运动, 此时采集到的莫尔条纹信号是以时间为参变量的幅值信息, 假设 $0^\circ(\text{Sin})$ 信号为 x , $90^\circ(\text{Cos})$ 信号为 y , 则两路信号的波形方程可由式(5)表示; 而编码器输出的是以角度为自变量的幅值信息, 因此, 此时的信号波形不能代表真实的莫尔条纹信号波形。根据 Lissajous 图形成原理, 式(5)所示的两路信号可以形成式(6)所示的 Lissajous 图, 式(6)函数与时间无关, 仅与 x, y 两路信号的幅值有关。因此, 可以应用 2.1 节的方法, 通过建立两路信号波形方程来拟合实际采集的两路莫尔条纹信号形成的 Lissajous 图, 求解实际的莫尔条纹光电信号波形方程。

$$\begin{cases} x = f(t) \\ y = g(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$y = f(x) \quad (6)$$

2.3 拟合优度检验

为了检验各实测值与 Lissajous 拟合曲线的接近

程度(拟合优度), 需要进行拟合优度的检验^[13-14]。

图 3 所示为实际观测的两路近似三角波莫尔条纹光电信号的 Lissajous 图。从图中可以看出, Lissajous 图的 4 个象限中的散点均分布在某条直线附近, 因此, 可以认为在每个象限内 x 与 y 的关系符合一元线性回归模型。

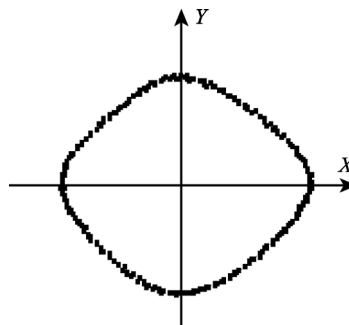


图 3 两路近似三角波莫尔条纹光电信号的 Lissajous 图

Fig. 3 Lissajou graph of two approximate triangle wave Moire fringe signals

估计的一元线性回归方程为:

$$\hat{y} = \hat{a} + \hat{b}x \quad (7)$$

Lissajous 拟合曲线方程(回归方程)建立后, 还必须对其进行检验。可决系数是对估计的回归方程拟合程度优劣的度量。对因变量 y 取值的离差进行分析后得到总平方和 TSS :

$$TSS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8)$$

式中: $\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$ 为回归平方和 ESS , $\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$ 为残差平方和 RSS 。即:

$$TSS = ESS + RSS \quad (9)$$

可决系数 R^2 为:

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS} \quad (10)$$

R^2 越大, 表明回归平方和占总平方和的比例越大, 回归线与各观测点越接近, 回归模型的拟合程度就越高。反之, R^2 越接近 0, 则回归模型的拟合程度越差。

2.4 莫尔条纹三角波光电信号波形方程求解

由上述章节, 为了确立实际莫尔条纹光电信号的波形方程, 首先, 采集实际的两路相位差为 90° 的三角波莫尔条纹光电信号, 得到这两路信号的

Lissajous 图形;其次,通过设置波形参数得到不同的分段函数,建立偏离标准三角波的各种波形方程,用得到的波形绘制 Lissajous 图形,并与实际光电信号的 Lissajous 图形进行拟合,得到 Lissajous 拟合曲线;然后,对拟合结果进行优度检验来验证曲线拟合的效果是否满足精度要求;最后用创建的分段函数代表实际的莫尔条纹光电信号的波形方程。莫尔条纹光电信号波形方程求解流程图如图 4 所示。

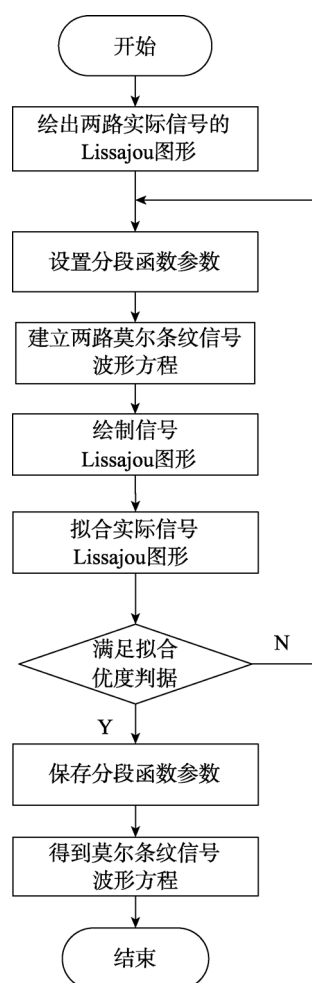


图 4 莫尔条纹三角波光电信号波形方程求解流程图

Fig. 4 Flow diagram of Moiré fringe triangle wave signals equation

3 莫尔条纹三角波细分误差补偿模型的建立

3.1 莫尔条纹三角波细分方法

为了实现微机软件细分,通常采用的方法是构

建两路信号的合成函数 $f(\theta)$, 合成函数值与细分角度值一一对应。这样既可以减小振幅波动对光电信号质量的影响,同时合成函数中又隐含着确定的细分角度值。当编码器输出的莫尔条纹光电信号为标准三角波时,波形如图 5 所示。用于细分的两路莫尔条纹光电信号在第一象限的波形方程如式(11)所示:

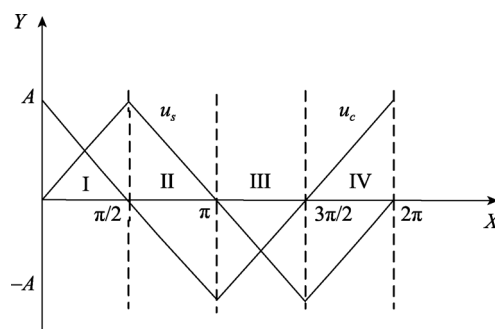


图 5 标准三角波

Fig. 5 Stanard triangular wave

$$\begin{cases} u_s = A \frac{2}{\pi} \theta_0 \\ u_c = A(1 - \frac{2}{\pi} \theta_0) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $0 \leq \theta_0 \leq \pi/2$, 式(11)中的两式相除得合成函数 $f(\theta_0)$:

$$f(\theta_0) = \frac{u_s}{u_c} = \frac{\theta_0}{\pi/2 - \theta_0} \quad (12)$$

求得式(12)反函数为:

$$\theta_0 = f^{-1}(\theta_0) = \frac{\pi/2}{1 + 1/f(\theta_0)} = \frac{\pi/2}{1 + u_c/u_s} \quad (13)$$

若将 2π 细分 N 份, 则 N 代表总份数, T_n 代表某一相角 θ_0 对应的细分值, 则有:

$$T_n = (N/2\pi) \cdot \theta_0 = (N/2\pi) \frac{\pi/2}{1 + 1/f(\theta_0)} \quad (14)$$

其中: $0 < \theta_0 \leq 2\pi$ 。

u_s, u_c 的正负与各象限的对应关系如表 1 所示。

表 1 u_s, u_c 的正负与各象限的对应关系

Table 1 Relation between the plus-minus of u_s, u_c and quadrant

函数	象限			
	I	II	III	IV
u_s	+	+	-	-
u_c	+	-	-	+

根据 u_s, u_c 的正负便能判断出 θ_0 所在象限, 确定象限细分常数, 并根据图形的对称性及坐标变换

原理, 可将二、三、四象限按照第一象限的方法处理。因此, 只要得到第一象限某角度值对应的细分值, 就可以得到其他象限某角度对应的细分值。

3.2 莫尔条纹三角波细分误差补偿模型

莫尔条纹三角波光电信号细分误差是实际细分值与理论细分值之间的差值。用相位差来表示细分误差为:

$$\Delta\theta = \theta' - \theta_0 \tag{15}$$

式中: θ' 表示实际细分值, θ_0 表示理论细分值。

莫尔条纹信号的质量是决定细分误差的最主要因素。光栅副间距、光栅黑白比、装配精度、码盘偏心等都会影响到莫尔条纹信号的质量, 使得莫尔条纹信号不是理想波形。

计算三角波细分值时, 首先按照式(13)得到函数值, 然后根据式(14)求得该函数值对应的细分值。

对于标准的两路莫尔条纹光电信号, 按照式(13)三角波细分值求解方法, 得到 θ_0 值。

实际上由于各种因素的影响, 两路莫尔条纹信号不是理想的三角波信号, 而是含有偏差的两路莫尔条纹信号可以由式(16)表示:

$$\begin{cases} u_s' = g_1(\theta') \\ u_c' = g_2(\theta') \end{cases} \tag{16}$$

按照式(15), 得到 θ' :

$$\theta' = \frac{\pi/2}{1 + u_c'/u_s'} \tag{17}$$

则细分误差补偿模型为:

$$\theta = \theta' - \Delta\theta \tag{18}$$

式中: θ 为误差补偿后的细分值。

4 实验验证

4.1 波形方程求解算法实验验证

实验用某 16 位小型光电编码器, 外形尺寸为 $\phi 40\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ 。精码道由 256 对线/周的光栅码道构成, 每对线对应转角 1.41° , 精码道经电子学细分 256 份后, 编码器具有 $20''$ 的分辨力。

采集两路相位差为 90° 的精码信号, 设为 u_s 、 u_c 。两路近似三角波精码光电信号及其 Lissajous 图形分别如图 6、图 7 所示, 其中 T 为 16 位小型光电编码器的精码细分周期, 即 $T=1.41^\circ$ 。

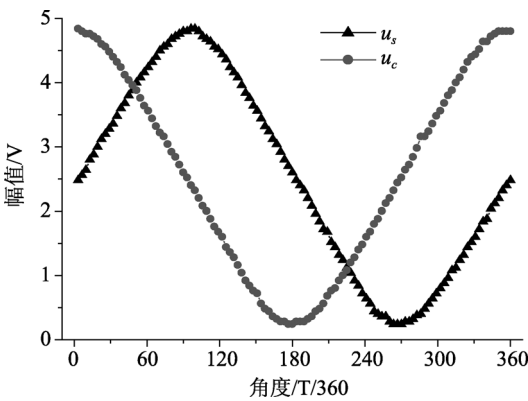


图 6 两路近似三角波的精码光电信号
Fig. 6 Precision code photoelectric signals of two approximate triangle wave

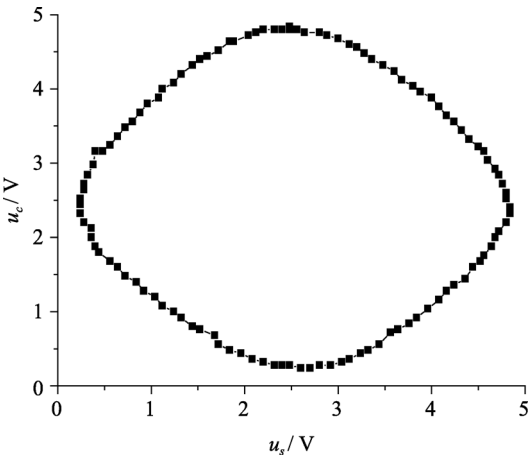


图 7 两路近似三角波精码光电信号的 Lissajous 图形

Fig. 7 Lissajou graph of two approximate triangle wave precision code photoelectric signals

两路近似三角波信号波形参数如表 2 所示, 实际信号与拟合信号的 Lissajous 图形如图 8 所示。

表 2 两路近似三角波信号波形参数		
Table 2 Parameters of two approximate triangle wave		
波形参数	信号	
	0°信号	90°信号
顶曲率半径(r_1)	0.739 8	0.767 2
底曲率半径(r_2)	0.685	0.794 6
顶点偏移量	0.017 45	0
底点偏移量	0	0
剩余直流电平	0.02	0.01
幅值系数	1	1
相位差	91°	

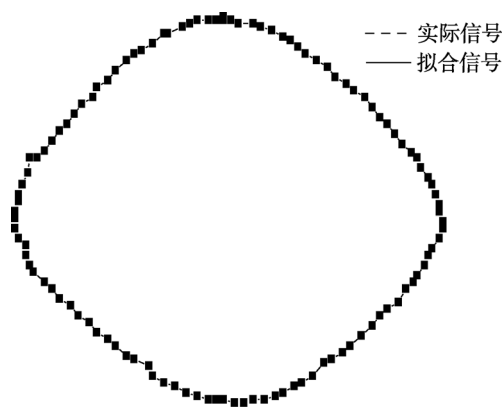


图 8 实际信号与拟合信号的 Lissajous 图形

Fig. 8 Lissajou graph of the practical signal and the fitting signal

为了检验实际信号 Lissajous 图与 Lissajous 拟合曲线的接近程度, 进行拟合优度的检验。将实际 Lissajous 图与拟合的 Lissajous 图展开成 (x_i, y_i) 、 $(x_i, \hat{y}_i)$ 关系, 经计算得: $RSS=0.062\ 5$, $ESS=25.604$, $TSS=RSS+ESS=25.666\ 5$ 。

可决系数 R^2 :

$$R^2 = \frac{ESS}{TSS} = 1 - \frac{RSS}{TSS} = 0.997\ 6$$

由于可决系数 R^2 达 0.997 6, 近似等于 1, 表明实际信号与拟合信号非常接近, 因此依据表 2 所示的波形参数得到的分段函数, 可以代表实际的莫尔条纹光电信号波形方程。

4.2 细分误差补偿实验验证

用 23 位高精度绝对式光电编码器作为角度基准, 测量 16 位编码器补偿前后的细分误差, 检测装置如图 9 所示。

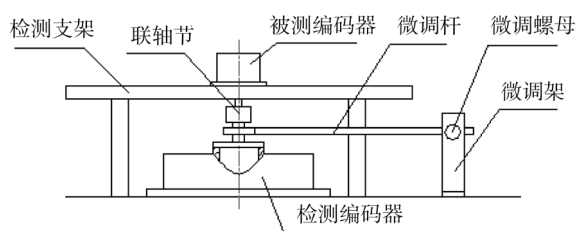


图 9 编码器细分误差检测装置原理图

Fig. 9 Diagram of interpolation error test equipment

通过被测编码器与检测编码器相同位置的角度值进行比较的方法, 求出两者的差值, 计为该角度的误差值^[15]。每个精码周期细分 256 份, 在一个细分周期内共测 64 个点。

编码器细分误差补偿前后的误差曲线如图 10 所示。

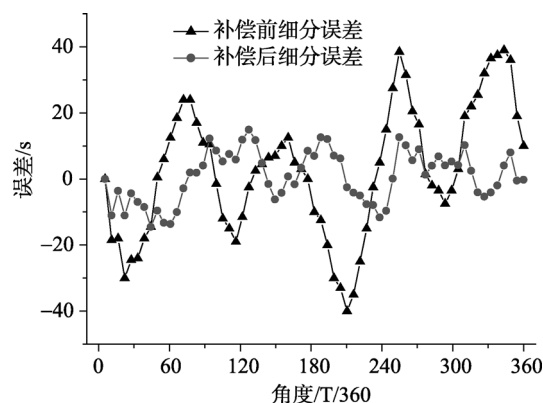


图 10 编码器细分误差补偿前后的误差曲线

Fig. 10 Error curve for interpolation error compensation

补偿前的细分误差中, 最大误差为: 39", 最小误差为: -40", 峰峰值误差为: 79"; 补偿后细分误差中, 最大误差为: 14.9", 最小误差为: -12.6", 峰峰值误差为: 27.5"。

5 结 论

本文分析了小型光电编码器莫尔条纹信号质量对细分误差的影响, 提出采用分段函数法建立莫尔条纹三角波光电信号波形方程, 为实现小型光电编码器细分误差补偿奠定了基础。

采用回归分析理论、可决系数方法, 研究了所建三角波图形与实际光电信号图形的拟合程度, 建立了莫尔条纹三角波图形拟合优度检验方法。

提出了莫尔条纹三角波光电信号细分误差补偿方法, 实现了对三角波光电信号细分误差的综合补偿, 有效提高了小型光电编码器的精度。

对某 16 位小型光电编码器的实际莫尔条纹光电信号进行细分误差补偿, 经实际测试细分误差峰峰值由 79"减小到 27.5"。实际结果表明: 本文研究的三角波细分误差补偿方法可提高小型光电编码器的细分精度, 对于研制高精度的小型级光电编码器具有重要意义。

参考文献:

- [1] 叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003.

- YE SH X. Accurate measurement about photoelectric shift[M]. Chengdu: Science and Technology Press, 2003.
- [2] MATSUZOE Y, NOBUHIKO T. Breadboard system and techniques to optimize the optical system of an encoder[J]. Optical Engineering, 2001, 40(2): 283-288.
- [3] 赵长海, 万秋华, 王树洁, 等. 21 位光电编码器数据处理系统[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(6): 569-573.
- ZHAO CH H, WAN Q H, WANG SH J, et al. Data processing system of 21 bit photoelectric encoder[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(6): 569-573.
- [4] 吴永芝, 余容红, 李兴红, 等. 光电信号参数的动态提取方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(5): 69-73.
- WU Y ZH, SHE R H, LI X H, et al. Dynamic extracting method of photoelectric signal parameters[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 23(5): 69-73.
- [5] 卢新然, 万秋华, 杜颖财, 等. 星载高精度小圈绝对式编码器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(9): 848-852.
- LU X R, WAN Q H, DU Y C, et al. Design of satellite mounting high precision minitype multi-turn absolute photoelectric encoder. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2009, 24(9): 848-852.
- [6] MATSUZOE Y, YOSHIKAWA T. High-performance absolute rotary encoder using muhitrack and M-code[J]. Opt. Eng., 2003, 42(1): 124-130.
- [7] 罗长洲, 陈良益, 孙岩, 等. 一种新型光学编码器[J]. 光学精密工程, 2003, 11(1): 104-108.
- LUO CH ZH, CHEN L Y, SUN Y, et al. A new optical encoder[J]. Opt. Precision Eng., 2003, 11(1): 104-108.
- [8] MATSUZOE Y, KOIZUMI K, SAITOH T. Optimizing design of high-resolution optical encoder using a point-source light-emitting diode with slits[J]. Opt. Eng., 2005, 44(1): 013609-1-013609-6.
- [9] MICHAEL W, VICTOR K, GERMAN S. Adaptive periodic error correction for heidenhain tape encoders[J]. SPIE, 2008, 7012: 70123N.
- [10] SONG J H, KIM K C, KIM S H, YOON K K. A new error compensation method in linear encoder using phase shifted grating[J]. SPIE, 1999, 3740: 124-127.
- [11] 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.
- [12] 洪喜, 续志军, 杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 598-604.
- HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network method[J]. Opt. Precision Eng., 2008, 16(4): 598-604.
- [13] 朱建平, 孙小素. 应用统计学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- ZHU J P, SUN X S. Application statistics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [14] 李忠范, 高文森. 数理统计与随机过程[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2000.
- LI ZH F, GAO W S. Mathematical statistics and random process[M]. Changchun: Jilin University Press, 2000.
- [15] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- FEI Y T. Errors theory and data processing[M]. Beijing: Mechanics and Industry Press, 2003.

作者简介:

孙莹: 1982 年出生, 2005 年于长春理工大学获得学士学位, 2010 年于长春光机所获得博士学位, 现为长春光机所助理研究员, 主要研究方向为光电位移精密测量及光电编码器等。

E-mail: sun96ying@163.com

Sun Ying: born in 1982, got BS in Changchun University of science and technology and PhD in Changchun institute of optics, fine mechanics and physics, and is assistant professor in Changchun institute of optics, fine mechanics and physics now. Her present research interests include photoelectrical displacement precision measurement and photoelectrical encoder and so on.