

# 基于坐标旋转数字计算算法的小型光电编码器细分

冯英翘<sup>1,2</sup> 万秋华<sup>1</sup> 宋超<sup>1,2</sup> 孙莹<sup>1</sup> 赵长海<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为在不增加体积的前提下提高小型光电编码器精度,分析了计算法细分误差产生的原因,提出了基于坐标旋转数字计算(CORDIC)算法的光电编码器精码信号新细分法,利用简单的移位和加法操作可实现对采集到的正交码盘精码信号直接细分求相位,避免了查“细分表”引入的细分误差。对细分算法进行了分析与优化,使算法在取得合适精度的同时提高了运算速度。运用研究的细分法对某 16 位小型光电编码器精码信号进行 256 份细分时,比利用计算法细分时编码器的均方根误差减小了一半。实验结果表明,研究的新细分法可直接对光电编码器精码信号进行高精度细分,对于研制小型化、高精度光电编码器具有重要意义。

**关键词** 光栅; 光电编码器; 细分误差; 坐标旋转数字计算算法; 精度

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0205001

## Interpolation of Small Photoelectric Encoder Based on Coordinate Rotation Digital Computer Algorithm

Feng Yingqiao<sup>1,2</sup> Wan Qiuhua<sup>1</sup> Song Chao<sup>1,2</sup> Sun Ying<sup>1</sup> Zhao Changhai<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** To improve the accuracy of small photoelectric encoders without increasing the size, the reason how interpolation errors are generated by the calculation method is analyzed. A new photoelectric encoder fine signals interpolation method based on coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm is proposed, and it can make use of simple shifting and addition operations to directly interpolate acquired quadrature fine signals and resolve the phases, which can get rid of interpolation errors caused by looking up in the interpolation table. The algorithm is analyzed and improved finally, and the calculation speed is proved while maintaining appropriate accuracy. Moire fringe signals from a 16-bit small photoelectric encoder are interpolated into 256 parts with the suggested algorithm, and the root mean square error is decreased by a half compared to the calculation method. Experimental result shows that the new interpolation method can be directly applied to high-accuracy interpolation of moire fringe signals. It may play an important role in the further research and development of small and high-accuracy photoelectric encoders.

**Key words** gratings; photoelectric encoder; interpolation error; coordinate rotation digital computer algorithm; accuracy

**OCIS codes** 120.3930; 120.5050; 120.4120; 050.2770; 050.1950

## 1 引言

光电轴角编码器又称光电角位移传感器,是集

光、机、电于一体的数字化角度测量装置,是测量角位移、角速度、角加速度的重要工具<sup>[1]</sup>,因其具有智

收稿日期: 2013-05-30; 收到修改稿日期: 2013-06-25

基金项目: 中国科学院知识创新领域前沿项目

作者简介: 冯英翘(1986—),女,博士研究生,主要从事光电位移精密测量技术方面的研究。

E-mail: fengyingqiao\_6562@163.com

导师简介: 万秋华(1962—),女,博士,研究员,主要从事光电位移精密测量技术及编码器方面的研究。

E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn(通信联系人)

能化、无接触测量、使用可靠、易于维护等优点被广泛应用于国防、工业等领域的精密测量和实时控制系统中。随着航空航天技术的飞速发展,编码器的高分辨率、高精度、小型化、轻型化是国内外研究的热点<sup>[2-3]</sup>。

开展新式编码器的研究和进行电子学细分是实现编码器高分辨力的主要途径。文献[4-5]阐述的基于电荷耦合器件(CCD)技术的新式图像式编码器是未来发展的趋势,但还处于探索研发阶段,技术尚未成熟,工作的稳定性和环境的适应性需进一步提高。计算法电子学细分是在不增加体积的前提下提高编码器分辨力的最有效方法,该方法借助了采集到的码盘精码信号是正弦波或者三角波的性质,以构造含有相位信息函数的方式对不足一个周期的精码信号进行细分<sup>[6]</sup>。受码盘刻划水平和安装工艺的影响,随着细分份数的提高,精码信号中的噪声导致信号偏离标准的正弦波或三角波,严重影响了计算法细分的精度,使高倍数细分失效。国内外专家学者开展了各种校正码盘精码信号的方法研究,德国Heidenhain公司生产的编码器采用了多读数头平差和全周系统误差修正的方法<sup>[7]</sup>,实现了提高编码器精度的目的,但需增加硬件电路,不利于编码器的小型化。印度的Kaul等<sup>[8]</sup>采用傅里叶变换理论对信号中的谐波成分进行分析,能够实现对信号中低次谐波误差的补偿,但利用高精度转台对测角误差进行离散标定的手段,不适合编码器工作现场的实时校正。文献[9]采用人工智能神经网络的方法对信号的非线性进行校正,校正过程利用高精度检测仪器作为基准,需要采集大量的先验数据用于网络训练。文献[10-12]分别针对编码器码盘精码采样信号中的偏心误差、正弦性误差、正交性误差进行校正,这些方法仅对信号中存在的某项或某几项误差分量进行了校正。

综上所述,现有提高编码器分辨率、减小体积的方法仍然存在一些问题:一方面新技术尚未成熟,应用受到限制;另一方面算法复杂,不能实时处理,大多数需要在实验室的条件下完成,不利于工作现场的应用。本文从现有计算法细分原理出发,分析细分误差产生的原因,提出一种通过偏摆一系列固定角度来逼近所求精码采样信号相位信息的新细分法,即基于坐标旋转数字计算(CORDIC)算法的细分法。该方法利用简单的移位和加法运算可直接求出码盘精码信号 Lissajous 图形上任意一点的绝对相位,避免了信号中存在的直流电平、幅值误差、相

位误差、波形畸变等不理想成份导致查“细分表”引入的细分误差,并针对CORDIC细分算法存在速度与精度的矛盾问题,对算法进行了分析与优化,当迭代次数超过特定值时,可利用移位计算代替旋转的固定角度,同时可以对角度的旋转方向进行预测,在满足精度要求的前提下,提高了算法的运算速度。

## 2 细分的相关理论

计算法细分是目前应用最广泛的软件细分法,具有细分倍数高、不增加硬件电路的优点。计算法细分的原理是利用两路标准正余弦信号构造函数来实现角度求解的<sup>[13]</sup>。理想的光电编码器码盘精码信号分别为

$$\begin{cases} u_s(\theta) = A \sin \theta \\ u_c(\theta) = A \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中  $A$  为信号的幅值,  $\theta$  为所求相位角。将两路采样信号相除,构造正切函数  $f(\theta)$ , 则  $f(\theta)$  中包含确定的相位信息,  $\theta$  的计算公式为

$$\theta = f^{-1}(\theta) = \arctan \frac{\sin \theta}{\cos \theta} = \arctan \frac{u_s(\theta)}{u_c(\theta)} \quad (2)$$

该算法程序用查表来实现,将标准正切函数存储于“细分表”中,细分计算码盘精码相位时,通过查找“细分表”求出两路采样信号比值所对应的角度信息。

实际采集到的码盘精码光电信号受到码盘刻划精度、轴系精度、安装工艺、系统噪声、电路处理方案的影响,会偏离理想的正(余)弦信号,由傅里叶变换理论可知,实际的码盘精码信号可以用傅里叶级数形式表示为<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} u'_s(\theta) = A_0 + A_1 \sin \theta + \sum_{i=2}^{\infty} A_i \sin(i\theta + \varphi_{ia}) \\ u'_c(\alpha) = B_0 + B_1 \cos \alpha + \sum_{i=2}^{\infty} B_i \cos(i\alpha + \varphi_{ib}) \end{cases} \quad (3)$$

式中  $A_0$ 、 $B_0$  表示信号中存在直流电平误差,  $A_1$ 、 $B_1$  为基波幅值误差,  $\sum_{i=2}^{\infty} A_i \sin(i\theta + \varphi_{ia})$ 、 $\sum_{i=2}^{\infty} B_i \cos(i\alpha + \varphi_{ib})$  表示信号的波形畸变,即高次谐波误差,  $\theta$  与  $\alpha$  表示两路信号间存在正交性误差。通过计算法细分上述两路码盘精码信号时,必然引入细分误差  $\Delta\theta$ :

$$\Delta\theta = \arctan \frac{u'_s(\theta)}{u'_c(\alpha)} - \arctan \theta \quad (4)$$

(4)式表明,计算法细分误差来源于查询“细分表”的

过程,即实际两路精码采样信号与理想正弦信号不等,导致查表错误产生的细分误差。综上所述,如果不改变查“细分表”的细分过程,计算法细分得到的角度信息一定会含有误差,而且随着细分份数的增加,采样信号中的噪声对细分结果的影响越来越大,直至细分法失效。

### 3 基于CORDIC算法的细分

#### 3.1 CORDIC算法原理

CORDIC算法<sup>[15]</sup>是一种数值逼近的方法,是通过一系列固定角度的不断偏摆来逼近所求角度的。如图1所示,笛卡儿坐标平面内向量 $\mathbf{A}(x_a, y_a)$ 旋转 $\theta$ 角度后到达向量 $\mathbf{B}(x_b, y_b)$ 位置,根据坐标变换规律有

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = \cos \theta \begin{bmatrix} 1 & -\tan \theta \\ \tan \theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix}. \quad (5)$$

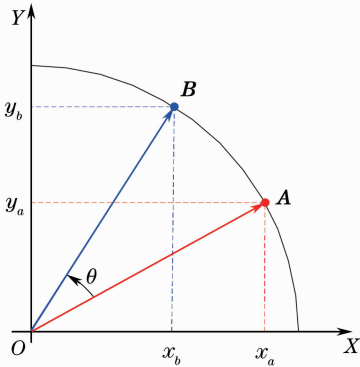


图1 笛卡儿坐标系向量旋转

Fig. 1 Vector rotation in the Cartesian coordinate system  
将旋转角 $\theta$ 分解为 $N$ 个小旋转角 $\theta_i$ 之和,令 $\theta_i$ 为

$$\theta_i = \arctan 2^{-i}, \quad (6)$$

则 $\tan \theta_i = 2^{-i}$ ,第 $i$ 步旋转可表示成

$$\begin{bmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \end{bmatrix} = \cos \theta_i \begin{bmatrix} 1 & -S_i \times 2^{-i} \\ S_i \times 2^{-i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

式中 $S_i$ 为符号函数,当 $\theta_i$ 顺时针方向旋转时 $S_i = -1$ , $\theta_i$ 逆时针方向旋转时 $S_i = 1$ 。所求旋转角度 $\theta$ 可以表示为

$$\theta = \sum_{i=0}^{N-1} S_i \cdot \theta_i. \quad (8)$$

#### 3.2 基于CORDIC算法的细分

实际的小型光电编码器两路正交码盘精码信号组成的Lissajous图形如图2所示。

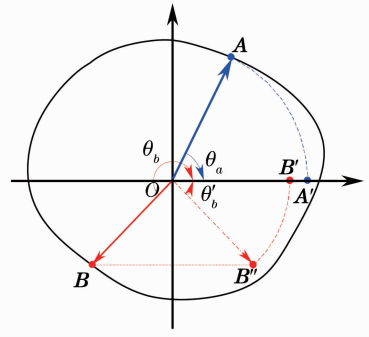


图2 正交精码信号Lissajous图形细分

Fig. 2 Interpolation of quadrature fine signals in the Lissajous figure form

为提高编码器的分辨力,需对不足一个周期的码盘精码信号进行细分<sup>[16]</sup>,提取相位信息,即对两路正交的精码信号组成的Lissajous图形中任意一点 $\mathbf{A}$ 求相位 $\theta_a$ 。由图2可知 $\theta_a$ 为向量 $\mathbf{OA}$ 旋转至 $X$ 轴 $\mathbf{OA}'$ 所经过的角度。将 $\mathbf{A}(x_a, y_a)$ 代入(7)式中,经过 $N$ 次旋转后得到 $\mathbf{A}'(x'_a, x'_b)$ :

$$\begin{bmatrix} x'_a \\ y'_b \end{bmatrix} = \left( \prod_{i=0}^{N-1} \cos \theta_i \right) \begin{bmatrix} 1 & -S_i \times 2^{-i} \\ S_i \times 2^{-i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} \times K \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & -S_i \times 2^{-i} \\ S_i \times 2^{-i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_a \\ y'_b \end{bmatrix},$$

式中每次角度的旋转方向 $S_i$ 通过判断前一次迭代结果 $y'_b$ 求出,当 $y'_b > 0$ 时,迭代角度顺时针旋转,即 $S_i = -1$ ,当 $y'_b < 0$ 时,迭代角度逆时针旋转,即 $S_i = 1$ 。当 $|y'_b| \leq \epsilon$ 时( $\epsilon$ 为给定允许误差),认为向量 $\mathbf{OA}$ 已经旋转至 $x$ 轴 $\mathbf{OA}'$ ,迭代终止。式中除 $K$ 外的计算可通过移位和加法求出,当 $N$ 很小时,可在上位机中计算出 $K$ ,置于存储表中,每次旋转计算时,可通过查表简化计算,当 $N \rightarrow \infty$ 时, $K$ 趋于定值:

$$K = \left( \prod_{i=0}^{N-1} \cos \theta_i \right) = \left( \prod_{i=0}^{N-1} \frac{1}{\sqrt{1 + 2^{-2i}}} \right) \approx 0.607253. \quad (10)$$

将迭代终止时的 $N$ 代入(8)式,即可求出相角 $\theta_a$ 。由于第 $i$ 次旋转的角度 $\theta_i$ 大小固定,也可将 $\theta_i$ 提前算出置于存储表中。表1为存储表中 $K$ 与 $\theta_i$ 的值。

从表1可知,基于CORDIC算法细分的收敛范围为 $-99.7^\circ \leq \theta \leq 99.7^\circ$ ,而光电编码器精码细分需对全周进行,因此在细分计算前需对采样信号进行调整,当采样点处于第二、三象限时,可将其镜像变换至第一、第四象限中,利用基于CORDIC算法细分后再对结果调整系数即可求得全周的细分角度信息。如求解图2中 $B$ 点的相位信息 $\theta_b$ ,可先将 $B$ 点镜

像至  $B'$  求出细分角  $\theta'_b$ , 然后通过  $\theta_b = \theta'_b + \pi$  求出  $B$  采样点的相位。

表 1  $K$  与  $\theta_i$  存储表  
Table 1 Storage of  $K$  and  $\theta_i$

$i$	$\theta_i / (^\circ)$	$K$
0	45.0000000000	0.707106781
1	26.5550511771	0.632455532
2	14.0362434679	0.613571991
3	7.1250163489	0.608833912
4	3.5763343750	0.607648256
5	1.7899106082	0.607351770
6	0.8951737102	0.607277644
7	0.4476141709	0.607259112
8	0.2238105004	0.607254479
9	0.1119056771	0.607253321
10	0.0559528919	0.607253031
11	0.0279764526	0.607252959
12	0.0139882271	0.607252941

### 3.3 算法分析与优化

分析基于 CORDIC 细分算法求解相位角  $\theta$  的过程, 实质是求每次旋转角  $\theta_i$  和旋转方向  $S_i$  的过程, 随着系统对算法精度要求的提高, 查询只读存储器 (ROM) 求  $\theta_i$  的次数和迭代求  $S_i$  的计算都会相应增加, 不但需要大量的只读存储器 (ROM) 空间存储  $\theta_i$  和  $K$  值, 而且严重影响了算法的运算速度。为协调算法的运算速度与精度的关系, 对算法进行了改进, 通过旋转角度  $\theta_i$  的近似和旋转方向  $S_i$  的预测, 来保证在取得合适精度的同时, 提高算法的运算速度。

#### 3.3.1 旋转角度值的近似

基于 CORDIC 的细分算法, 将每次旋转的角度  $\theta_i$  置于存储表中, 频繁地查表求  $\theta_i$  的过程影响了算法速度。易知用移位计算代替查表将会有效提高算法的运算速度。将 (6) 式的  $\theta_i$  进行 Taylor 展开:

$$\theta_i = \arctan 2^{-i} = 2^{-i} - \frac{2^{-3i}}{3} + \frac{2^{-5i}}{5} - \frac{2^{-7i}}{7} + \frac{2^{-9i}}{9} - \frac{2^{-11i}}{11} + \dots, \quad (11)$$

则

$$2^{-i} - \theta_i = \frac{2^{-3i}}{3} - \frac{2^{-5i}}{5} + \frac{2^{-7i}}{7} - \frac{2^{-9i}}{9} + \frac{2^{-11i}}{11} - \dots < \frac{2^{-3i}}{3}. \quad (12)$$

对  $M$  位精度的细分算法, 当  $\frac{2^{-3i}}{3} \leq 2^{-M}$  时, 有  $2^{-i} \approx \arctan 2^{-i}$ , 此时用  $2^{-i}$  代替  $\arctan 2^{-i}$  产生的误差可以忽略不计, 而  $2^{-i}$  可通过简单的移位计算求出, 可

有效提高算法的运算速度。由  $\frac{2^{-3i}}{3} \leq 2^{-M} \Rightarrow i \geq \frac{M - \lg 3}{3}$ , 考虑到迭代次数只能取正整数, 令

$\left[ \frac{M - \lg 3}{3} \right]$  为大于等于  $\frac{M - \lg 3}{3}$  的最小整数, 即

$$0 \leq \left[ \frac{M - \lg 3}{3} \right] - \frac{M - \lg 3}{3} < 1. \quad (13)$$

综上所述,  $M$  位精度的细分算法, 当迭代次数  $i < \left[ \frac{M - \lg 3}{3} \right]$  时, 用查存储表法求解  $\theta_i$ , 当迭代次数  $i \geq \left[ \frac{M - \lg 3}{3} \right]$  时, 可用  $2^{-i}$  代替  $\arctan 2^{-i}$ , 即用移位计算代替查表法求解  $\theta_i$ , 来提高算法的运算速度。

#### 3.3.2 旋转方向的预测

基于 CORDIC 的细分算法, 角度的旋转方向  $S_i$  在角度的迭代过程中求得, 随着算法精度的提高, 迭代次数的增加影响了算法的运算速度。如果能够对角度的旋转方向进行预测, 避免通过迭代求解  $S_i$ , 将是提高算法运算速度的有效手段。当算法精度要求为  $M$  时, 用二进制位  $[b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{M-1} \ b_M]$  表示所求角度  $\theta$ , 即

$$\theta = \sum_{j=1}^M b_j \cdot 2^{-j}, \quad b_j \in \{0, 1\}, \quad (14)$$

将 (14) 式分解为

$$\theta = \sum_{j=1}^M 2^{-j-1} + \sum_{j=1}^M (2b_j - 1) 2^{-j-1} = \frac{1 - 2^{-M}}{2} + \sum_{j=1}^M (2b_j - 1) 2^{-j-1}. \quad (15)$$

随着算法精度的提高, 即  $M$  的增大,  $\frac{1 - 2^{-M}}{2} \rightarrow \frac{1}{2}$ , 令  $j + 1 = l$ , 并将旋转角度  $\theta_i$  查表与迭代求解的分界点  $\left[ \frac{M - \lg 3}{3} \right]$  代入 (15) 式, 则  $\theta$  为

$$\theta = \frac{1}{2} + \sum_{l=2}^{[(M - \lg 3)/3] - 1} (2b_{l-1} - 1) 2^{-l} + \sum_{l=[(M - \lg 3)/3]}^{M+1} (2b_{l-1} - 1) 2^{-l}. \quad (16)$$

由前述分析可知, 当算法的迭代次数  $i \geq \left[ \frac{M - \lg 3}{3} \right]$  时, 可利用移位计算代替查表求  $\theta_i$ , 分析

(16) 式中项  $\sum_{l=[(M - \lg 3)/3]}^{M+1} (2b_{l-1} - 1) 2^{-l}$  易知,  $2b_{l-1} - 1$  即为迭代角度  $\theta_i = 2^{-i}$  的旋转方向

$$S_i = 2b_{l-1} - 1, \quad S_i \in \{-1, 1\}, \quad (17)$$

式中  $b_{l-1}$  表示已旋转角度二进制码的最低位, 当

$b_{i-1} = 0$  时,  $S_i = -1$ , 表示下次角度的旋转方向为顺时针, 当  $b_{i-1} = 1$  时,  $S_i = 1$ , 下次角度的旋转方向为逆时针。

### 3.3.3 算法优化总结

经前两节分析, 对于  $M$  位精度的细分算法, 当迭代次数  $i \geq \lceil \frac{M-1}{3} \rceil$  时, 不但可以用移位计算  $2^{-i}$  代替  $\arctan 2^{-i}$ , 角度的旋转方向也可以通过已经旋转角度二进制码的最低位进行预测。如当系统精度  $M = 8$  时, 细分算法优化前根据(9)、(10)式可知, 每次迭代需要两次查表( $\theta_i$  与  $K$ )、两次乘法、两次移位、三次加法。算法优化后,  $\lceil \frac{M-1}{3} \rceil = 3$ ,  $i < 3$  时每次迭代需要两次查表( $\theta_i$  与  $K$ )、两次乘法、两次移位、三次加法, 当  $i \geq 3$  时, 每次迭代过程仅需一次加法、一次移位即可。由此可见上述优化措施不但节省了系统的存储资源, 而且在保证算法合适精度的同时, 有效地提高了算法的运算速度。

## 4 实验

实验对中国科学院长春光学精密机械与物理研究所生产的某型号 16 位小型绝对式光电编码器进行测试, 编码器外形尺寸为  $\phi 40 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ , 8 位粗码, 码盘精码道由 256 lp/cycle 的矩形光栅刻线构成, 每个精码周期  $T = 1.41^\circ$ 。实验采用对比法, 将 23 位高精度基准编码器(检测精度  $2''$ )与被测编码器同轴连接, 记录相同转角位置的差值, 即为该位置处 16 位小型光电编码器的误差, 检测平台如图 3 所示。

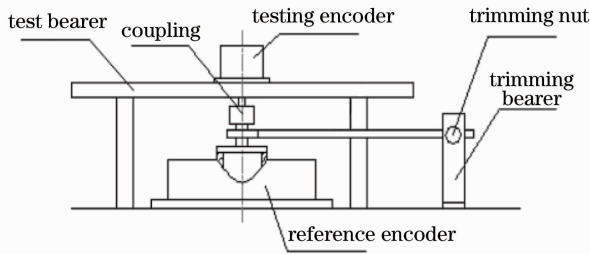


图 3 编码器误差检测原理图

Fig. 3 Diagram of error test equipment

分别利用原始算法细分和基于 CORDIC 算法的细分对该实验用小型光电编码器精码信号进行 256 份细分处理。记录两种细分方式下编码器的细分误差, 如图 4 所示, 图中  $T$  为一个细分周期。从图中可以看出, 利用计算法细分时, 细分误差的最大值为  $30''$ , 最小值为  $-70''$ , 峰谷值误差为  $100''$ , 利用基于 CORDIC 算法的细分法时, 细分误差最大值为

$20''$ , 最小值为  $-40''$ , 峰谷值误差为  $60''$ 。基于 CORDIC 算法细分比计算法细分峰谷值误差减小了  $40''$ , 但由于受到系统存储位宽、精度要求、检测手段等因素的综合影响, 细分法中允许了一定量误差的存在。

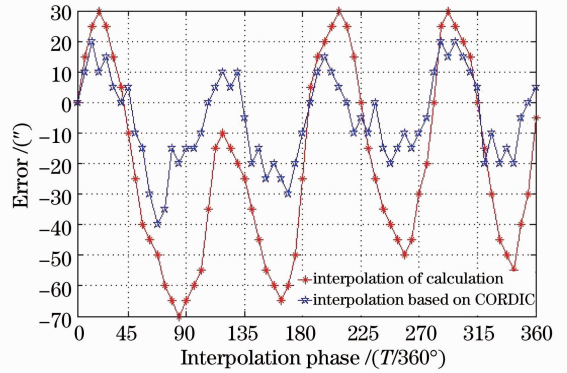


图 4 两种细分方式的编码器细分误差对比  
Fig. 4 Comparison of photoelectric encoder's interpolation errors

检测在两种细分方式下的编码器精度, 误差分布如图 5 所示。计算法细分时编码器的峰值误差为  $-100'' \sim 45''$ , 均方根误差  $\sigma_1 = 38.9''$ , 基于 CORDIC 算法细分时编码器的峰值误差为  $-55'' \sim 10''$ , 均方根误差为  $\sigma_2 = 19.3''$ , 由此可知, 利用 CORDIC 算法细分时比利用计算法细分时编码器的均方根误差减小了一半多。

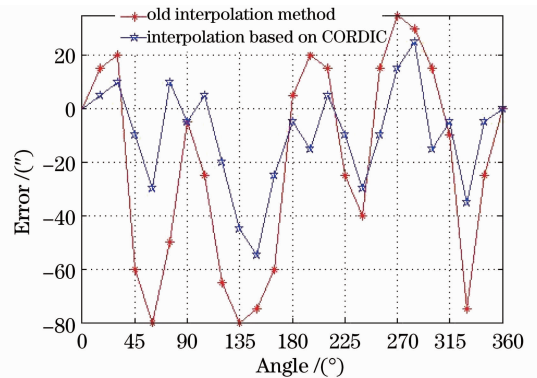


图 5 两种细分方式下编码器精度对比  
Fig. 5 Comparison of photoelectric encoder's accuracy

## 5 结论

分析了小型光电编码器码盘精码信号计算法细分的误差来源, 设计了一种基于 CORDIC 算法的新细分方法, 该方法利用简单的移位和加法操作可直接求出两路码盘精码采样信号的相位信息, 避免了查“细分表”引进的细分误差。针对算法中存在的精度和速度之间的矛盾, 对算法进行了优化处理, 在满

足精度的同时提高了运算速度。

实验结果表明,设计的基于CORDIC算法的细分方法能够在小型光电编码器不增加体积的前提下实现有效细分,并且细分后编码器的精度比用计算方法细分时提高了1倍。该细分方法可应用于绝对式和增量式编码器中,对编码器精度的提高和小型化具有重要意义。

### 参 考 文 献

- 1 Ye Shengxiang. Accurate Measurement about Photoelectric Shift [M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003.  
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.
- 2 Zhao Yong, Su Xianyu, Zhang Qican. Phase subdivision of absolute coding grating and application in displacement measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0812005.  
赵勇, 苏显渝, 张启灿. 绝对编码光栅的相位细分及其在位移测量中的应用[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0812005.
- 3 Jesus Lopez, Mariano Artes. A new methodology for vibration error compensation of optical encoders [J]. Sensors, 2012, 12(4): 4918—4933.
- 4 Qi Lili, Wan Qiuhua. Angle-measurement technology of an optical pattern rotary encoder and its hardware implementation [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0412001.  
齐荔荔, 万秋华. 图像式光电编码器的测角技术及其硬件实现[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0412001.
- 5 M Tresanchez, T Palleja, M Teixido, *et al.*. Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder [J]. Sensor Actuat A-Phys, 2010, 157(1): 161—167.
- 6 Wang Xianjun. Error and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(2): 379—386.  
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.
- 7 Michael Warner, Victor Krabbendam, German Schumacher. Adaptive periodic error correction for Heidenhain tape encoder [C]. SPIE, 2008, 7012: 70123N.
- 8 S K Kaul, A K Tickoo, R Koul, *et al.*. Improving the accuracy of low-cost resolver-based encoder using harmonic analysis [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research, 2008, 586(2): 345—355.
- 9 V K Dhar, A K Tickoo, S K Kaul, *et al.*. Artificial neural network-based error compensation procedure for low-cost encoders [J]. Meas Sci & Technol, 2010, 21(1): 015112.
- 10 Zhu Fan, Wu Yiming, Liu Changchun. Eliminating influence of grating encoders' eccentricity and vibration to moire fringes signal by four reading heads [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412008.  
朱帆, 吴易明, 刘长春. 四读数头法消除码盘偏心和震动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412008.
- 11 Liu Yang, Lü Hengyi, Wang Yan, *et al.*. Compensation method of moire fringe sinusoidal deviation in satellite optical communication coarse pointing system [J]. Chinese J Scientific Instrument, 2012, 33(8): 1735—1740.  
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.
- 12 Lü Mengjun, Guo Qi, Lü Yinxiao, *et al.*. Signal phase error compensation of moire fringe [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(7): 1694—1700.  
吕孟军, 郭琪, 吕印晓, 等. 莫尔条纹信号相位误差补偿[J]. 光学精密工程, 2009, 17(7): 1694—1700.
- 13 Sun Ying, Wan Qiuhua, She Ronghong. Interpolation error compensation of the minitype photoelectrical encoder [J]. J Electronic Measurement and Instrument, 2011, 25(7): 605—611.  
孙莹, 万秋华, 余容红. 小型光电编码器细分误差补偿法[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(7): 605—611.
- 14 Li Tianze, Yang Shulian. Fourier analysis of moire stripe produced by double-grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 1997, 34(3): 8—11.  
李田泽, 杨淑连. 双光栅莫尔条纹的傅里叶分析[J]. 激光与光电子学进展, 1997, 34(3): 8—11.
- 15 Peng Bo, Yang Zhihui, Ma Huilian, *et al.*. Digitalization of the detection circuit for resonator fiber optic gyro based on the phase modulation spectroscopy technique [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(6): 1480—1483.  
彭博, 杨志怀, 马慧莲, 等. 基于调相谱技术的谐振式光纤陀螺检测电路数字化研究[J]. 中国激光, 2009, 36(6): 1480—1483.
- 16 Lu Shaowu, Tang Xiaoqi, Ma Zelong, *et al.*. Application of CORDIC algorithm in subdivision of grating moire fringe [J]. Process Automation Instrumentation, 2010, 31(5): 23—25.  
卢少武, 唐小琦, 马泽龙, 等. CORDIC算法在光栅莫尔条纹细分中的应用[J]. 自动化仪表, 2010, 31(5): 23—25.

栏目编辑: 何卓铭