

# 图像式光电编码器高分辨力细分算法及误差分析

于 海, 万秋华, 赵长海, 梁立辉, 杜颖财

中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

**摘要** 为实现高分辨力角位移测量, 提出了一种基于线阵图像探测器的角度细分方法。为消除安装调试时图像探测器与圆心距离变化产生的影响, 提出了一种具有较强适应性的高分辨力细分算法; 建立了该细分算法的数学模型, 并进行了误差分析。根据实际应用, 建立了由码盘偏心和图像探测器安装角度引起误差的模型, 并分析许多因素对细分算法的影响; 根据误差分析结果, 给出了减小图像式光电编码器细分误差的建议。结果表明, 在码盘圆周刻划线数大于或等于 128 时, 细分算法的误差较小, 可以被忽略。研究结果可为研制小型图像式光电编码器提供理论依据。

**关键词** 测量; 信号处理; 图像式光电编码器; 高分辨力; 细分算法; 误差分析

**中图分类号** TP212 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0312001

## A High-Resolution Subdivision Algorithm for Photographic Encoders and Its Error Analysis

Yu Hai, Wan Qiuhua, Zhao Changhai, Liang Lihui, Du Yingcai

*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,  
Changchun, Jilin 130033, China*

**Abstract** In order to realize high resolution angular measurement, a subdivision method based on the photographic sensor is proposed. A more adaptable high-resolution subdivision algorithm is proposed to eliminate the subdivision error caused by the irregular distance between the photographic sensor and the grating center during installation and adjustment of the encoder. The mathematical model of the proposed subdivision algorithm is established, and the error of the method is analyzed. Based on practical working conditions, an error model which takes many aspects into consideration is built and the effect of various elements on the subdivision algorithm is analyzed. According to the error analysis results, how to reduce the subdivision error of photographic encoders is recommended. Experimental results show that the subdivision error can be ignored when the line number of circular grating is more than or equal to 128. The results can provide theoretical foundation for develop the miniature photographic encoder.

**Key words** measurement; signal processing; photographic encoder; high resolution; subdivision algorithm; error analysis

**OCIS codes** 120.3930; 040.5160; 120.4630

## 1 引 言

光电编码器是一种集光、机、电于一体的数字化角度测量装置。因其具有高分辨力、高精度、易于与计算机连接等优点, 被广泛应用于各行各业<sup>[1-4]</sup>。目前对于角位移测量的研究, 主要集中于小型化、轻量化、高分辨力和高精度等方面。目前, 各国研究单位陆续研制出高分辨力、高精度的光电编码器, 如: 德国 Heidenhain 公司研制了 27 位绝对式编码器<sup>[5]</sup>; 美国 Goddard 宇航中心于 2000 年研制了采用光学图像识别与处理技术的超高分辨力绝对式编码器<sup>[6]</sup>; 中国科学院光电技术研究所于 1996 年研制了 25 位绝对式光电轴角编码器<sup>[7]</sup>; 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制了分辨力达到 0.01" 的光电编码器<sup>[8]</sup>。这

收稿日期: 2016-09-27; 收到修改稿日期: 2016-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(51605465)

作者简介: 于 海(1987—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事光电位移精密测量技术方面的研究。

E-mail: yuhai5158@163.com

些成果都是在加大编码器码盘尺寸的基础上实现高分辨力角度测量的,小尺寸码盘实现高分辨力角度测量还存在较大难度。

随着数字图像处理技术的发展,将图像探测器应用在角度测量中,能够弥补传统角度测量方法很难在小尺寸码盘上实现更高分辨力的不足。在图像式光电编码器的研究中,美国<sup>[9-10]</sup>、日本<sup>[11]</sup>、西班牙<sup>[12]</sup>、韩国<sup>[13]</sup>、中国<sup>[14-15]</sup>等国家相继取得了一定的研究成果。但目前很少有对图像式光电编码器细分误差的详细分析。

为了实现小型图像式光电编码器高分辨力角位移测量,本文提出采用数据传输较少的线阵图像探测器实现对光栅码盘的图像识别的方法。该方法极大地降低了大量数据传输带来的数据处理延迟。在编码器工作时,码盘的图像通过光学放大映射到图像探测器上,采用数字图像处理方法识别码盘图案,进而实现译码。由于光栅码盘可以实现的编码位数有限,研究基于图像处理方法的高分辨力角度细分方法是实现高分辨力角度测量的有效手段。与传统基于叠栅条纹的误差分析方法<sup>[16]</sup>不同的是,本文研究的是基于线阵图像探测器的细分误差分析。

## 2 图像式光电编码器原理

图像式光电编码器是一种采用图像探测器识别光栅码盘的编码图案从而实现精确角度测量的角位移传感器。采用图像传感器代替传统的光电接收元件进行编码识别,并不需要狭缝(指示光栅)装调、放大电路调节等工序,在一定意义上减少了装调复杂度;同时,随着数字图像处理技术的发展,使用图像探测器能够较传统光电编码器实现更高的角度测量分辨力。图1为图像式光电编码器原理<sup>[17]</sup>。

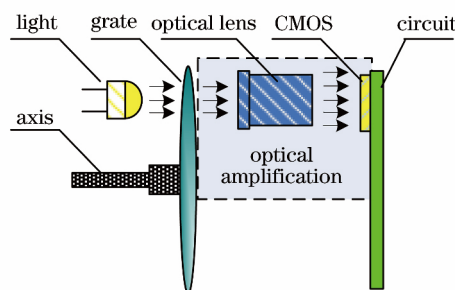


图1 图像式光电编码器原理

Fig. 1 Principle of photographic encoder

图像式光电编码器主要由主轴、光源、光栅码盘、光学透镜、图像探测器(CMOS)和数据处理电路组成。工作时,光源发出的光透过光栅码盘进入光学透镜;码盘的图案经过光学透镜放大映射在图像探测器上。当主轴带动码盘转动时,映射到图像探测器的图案也相应变化。数据处理电路通过处理图像探测器数据,识别码盘图案,进而实现对编码的译码和细分等。由于译码实现的测量分辨力有限,需要研究高倍角度细分算法实现高分辨力的角度测量。

## 3 高分辨力细分算法

### 3.1 细分算法模型建立

目前的研究是在码盘上划等间距的基准刻线,通过线阵图像探测器识别基准刻线位移,实现对相邻基准刻线夹角的角度细分。典型的基准刻线图案如图2所示。

图2中, $L_1$ 和 $L_2$ 分别是相邻的两个基准刻线的中心线, $L_3$ 为图像探测器的中心线, $L_4$ 为线阵图像探测器的采集线; $L_4$ 分别与 $L_2$ 和 $L_1$ 相交于B、C两点。由于码盘中的基准刻线具有一定的宽度,要采用质心算法来准确找到基准刻线在 $L_4$ 方向的中心点B。设 $P_i$ 为图像探测器在 $L_4$ 方向的第 $i$ 个像素点的像素值, $G_i$ 为第 $i$ 个像素点的位置值,那么B、C两点的位置为

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n P_i G_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (1)$$

式中 $n$ 为窗口大小。码盘旋转时,基准刻线会与图像探测器的水平方向存在一定夹角,使映射到 $L_4$ 方向的

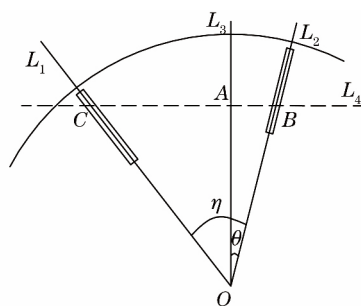


图 2 细分算法原理

Fig. 2 Principle of subdivision algorithm

基准线长度  $k$  随着码盘旋转而变化。由于(1)式包含了各像素点的明暗变化信息,可以计算亚像素级别的位置。设基准刻线的宽度为  $l$ ,则基准刻线在  $L_4$  方向长度为

$$k = \frac{l}{\cos \theta} \quad (2)$$

在计算基准刻线质心时,(1)式中的系数  $n \geq k$ 。根据图 2 所示,细分算法所测角度  $\theta$  为

$$\theta = \arctan(L_{AB}/L_{AO}), \quad (3)$$

式中  $L_{AB}$  和  $L_{AO}$  分别表示  $AB$ 、 $AO$  的长度。在实际应用中  $AO$  的长度会随着装调的不同而变化,因此固定长度  $AO$  来计算细分角度会带来很大的误差。为了消除来自装调的影响,以  $BC$  的长度为基准,通过计算  $BA$  与  $BC$  的比值得到细分的数值。设码盘圆周内刻划  $2^N$  条基准刻线,相邻基准刻线的夹角为  $\eta = 2\pi/2^N$ ,那么改进后的细分算法表达式为

$$\theta' = \frac{\eta \cdot L_{BA}}{L_{BC}}, \quad (4)$$

式中  $L_{BC} = U_B - U_C$ ,  $L_{BA} = U_B - U_A$ 。可以看出,(4)式具有算法简单、不受装调影响的优点。

### 3.2 细分算法可靠性分析

为分析(4)式细分模型的可靠性,分别对  $L_{BA}$  和  $L_{BC}$  进行推导。根据图 2 可知,

$$L_{BA} = L_{AO} \tan \theta, \quad L_{BC} = L_{BA} + L_{AC} = L_{AO} [\tan \theta + \tan(\eta - \theta)].$$

因此,(4)式可以表示为

$$\theta' = \eta \cdot \frac{\tan \theta}{\tan \theta + \tan(\eta - \theta)} = \eta \frac{(\tan \theta / \tan \eta) + \tan^2 \theta}{1 + \tan^2 \theta}, \quad \eta = 2\pi/2^N, \quad (5)$$

那么,(4)式的细分算法与实际角度的差  $\mu = (\theta' - \theta)(180^\circ/\pi)$  可以表示为

$$\mu = \left[ \eta \cdot \frac{(\tan \theta / \tan \eta) + \tan^2 \theta}{1 + \tan^2 \theta} - \theta \right] \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (6)$$

利用 Matlab 对(6)式进行仿真,结果如图 3 所示。图 3 中,分别取  $N=6, 7, 8$  对(6)式进行仿真计算。随着码盘刻划位数  $2^N$  增大,该细分算法的误差减小。可以看出,细分误差在  $0 \sim \eta$  角度范围内近似呈负正弦变化。当  $\theta=0, \eta/2, \eta$  时,  $|\mu_{\min}|=0$ ;当  $\theta$  在  $0.21\eta, 0.78\eta$  附近时,  $|\mu|$  达到最大。当  $N \geq 7$  时,码盘刻划位数

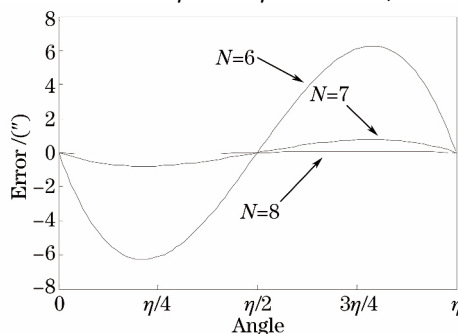


图 3 细分算法误差

Fig. 3 Subdivision algorithm error

### 4.1 码盘偏心

在安装光栅码盘过程中,难以避免地会使码盘与光电编码器主轴不同心,产生码盘偏心误差。偏心误差是码盘偏心造成的角度细分不准确而产生的误差。当存在码盘偏心时,码盘基准刻线与偏心的关系如图4所示。

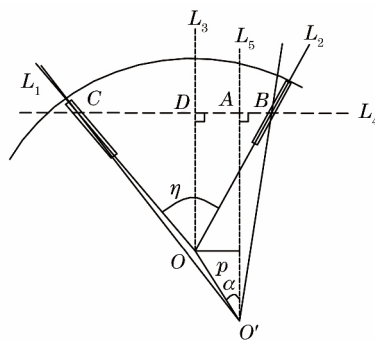


图 4 码盘偏心误差原理

图 4 中,  $L_1$  和  $L_2$  分别是码盘上相邻的一对基准刻线的中心线, 相交于码盘的圆心  $O$  点;  $L_3$  与  $L_5$  垂直于图像探测器的采集线  $L_4$ 。当存在偏心时, 码盘圆心  $O$  点与编码器主轴圆心  $O'$  点存在横向距离  $p$ ,  $OO'$  的连线与垂直方向夹角为  $\alpha$ ,  $\alpha$  随着码盘转动其变化范围为  $0 \sim 2\pi$ ;  $L_5$  是图像探测器中心线。此时, 按照 (4) 式的细分算法计算细分角度  $\theta_1 = \eta \cdot BA/BC$ , 理想状态下所计算得到的细分角度为  $\theta_2 = \eta \cdot BD/BC$ 。所以, 存在偏心时, 细分存在的误差为

$$\mu_1 = (\theta_1 - \theta_2) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = \frac{\eta(BA - BD)}{BC} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (7)$$

不难得到  $BA - BD = p \sin \alpha$ 。设图像探测器采集线距离圆心的距离  $AO'$  的长度为  $r$ , 那么有  $BC = (r - p \cos \alpha) \cdot (\tan \angle COD + \tan \angle DOB)$ 。

当  $N$  足够大时,  $BC$  的值变化非常小。设  $\tan \angle COD \approx \tan \angle DOB \approx \tan(\eta/2)$ , 则

$$BC = 2(r - p \cdot \cos \alpha) \cdot \tan \frac{\eta}{2}. \quad (8)$$

将(8)式代入(7)式,可得

$$\mu_1 = p \cdot \eta \cdot \frac{\sin \alpha}{2(r - p \cdot \cos \alpha) \cdot \tan(\eta/2)} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}. \quad (9)$$

(9)式中误差的变化趋势如图5所示。由图5可以看出,  $\mu_1$  随着  $\alpha$  在圆周内呈正弦变化。当  $\alpha=0, \pi, 2\pi$  时,  $|\mu_1|_{\min}=0$ ; 当  $\alpha=\pi/2, 3\pi/2$  时,  $|\mu_1|_{\max}=\frac{p \cdot \eta}{2r \cdot \tan(\eta/2)} \cdot \frac{180^\circ}{\pi}$ 。可以看出, 偏心误差随相邻基准刻线角度  $\eta$  的变大而变大, 随光栅码盘半径  $r$  的变大而减小。也就是说, 增加基准刻线数、增加码盘半径能够减小偏心误差。

#### 4.2 图像探测器安装角度

摄像头安装误差是指在装调图像式光电编码器时,图像探测器采集线中点与圆心的连线不垂直于图像探测器采集线而产生的误差。其原理如图 6 所示。

$L_5$  是发生偏差后的图像探测器的采集线,其中点  $A$  与圆心的连线  $AO$  不垂直于  $L_5$ ,偏差角度为  $\beta$ 。此时,细分算法的计算结果为  $\theta_3 = \eta \cdot B'A/B'C'$ 。设  $AO=r$ ,由图中可知,  $AB' \cdot \sin \angle AB'O = r \cdot \sin \theta$ ,

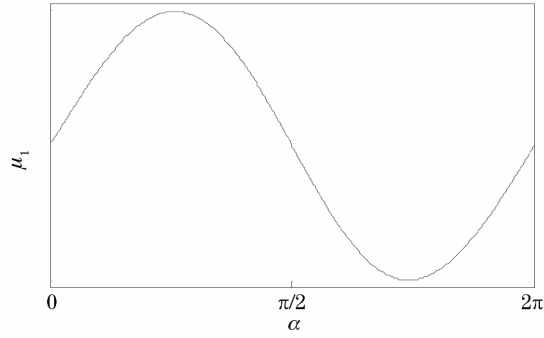


图 5 码盘偏心误差

Fig. 5 Eccentricity error

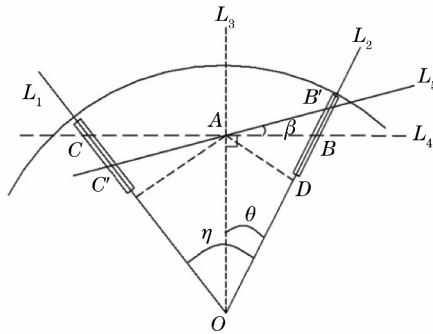


图 6 图像探测器安装角度误差原理

Fig. 6 Principle of photographic sensor angle error

$\angle AB'O = \pi/2 - \theta - \beta$ ,  $AB' = \frac{r \cdot \sin \theta}{\cos(\theta + \beta)}$ 。同理,求得  $AC' \cdot \sin \angle AC'O = r \cdot \sin(\eta - \theta)$ ,  $\angle AC'O = \pi/2 - (\eta - \theta) - \beta$ ,  $AC' = \frac{r \cdot \sin(\eta - \theta)}{\cos(\eta - \theta + \beta)}$ 。

所以,求得误差为

$$\mu_2 = \eta \left( \frac{AB'}{AC' + AB'} - \frac{AB}{AB + AC} \right) = \eta \left[ \frac{\frac{r \cdot \sin \theta}{\cos(\theta + \beta)}}{\frac{r \cdot \sin \theta}{\cos(\theta + \beta)} + \frac{r \cdot \sin(\eta - \theta)}{\cos(\eta - \theta + \beta)}} - \frac{r \cdot \frac{\sin \theta}{\cos \theta}}{\frac{r \cdot \sin \theta}{\cos \theta} + \frac{r \cdot \sin(\eta - \theta)}{\cos(\eta - \theta)}} \right] \cdot \frac{180^\circ}{\pi} =$$

$$\eta \cdot \frac{\sin 2\theta \cdot [\sin(2\eta - 2\theta + \beta) - \sin \beta] - \sin(2\eta - 2\theta) [\sin(2\theta + \beta) - \sin \beta]}{2 \sin \eta \cdot [2 \sin(\eta + \beta) + \sin(2\theta - \eta - \beta) - \sin(2\theta - \eta + \beta)]} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (10)$$

利用 Matlab 软件对(10)式进行仿真,结果如图 7 所示。

图 7(a)是取  $\beta = \pi/4$ ,  $N$  分别为 6, 7, 8 时的仿真结果。图 7(b)是  $N = 8$ ,  $\beta = \pi/4, \pi/40, \pi/100$  时的仿真结果。可以看出,  $N$  的取值越大,误差  $\mu_2$  越小。同时,当  $N$  不变时,  $\mu_2$  随着  $\beta$  的减小而减小。在实际调试中,

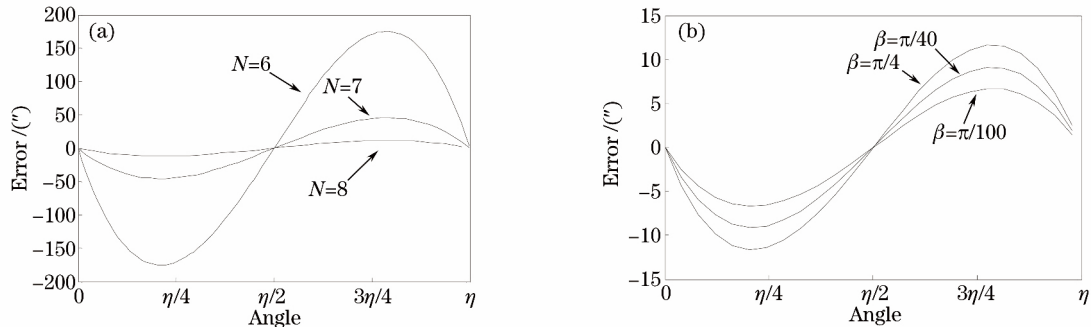


图 7 细分误差。(a)  $\beta = \pi/4$ ; (b)  $N = 8$

Fig. 7 Subdivision error. (a)  $\beta = \pi/4$ ; (b)  $N = 8$

当  $N$  足够大时,可以减小图像传感器安装角度造成的误差。

## 5 实 验

为验证误差分析的准确性,利用本课题组设计的小型图像式光电编码器进行实验。所设计的小型图像式光电编码器外径为 50 mm,采用的码盘直径为 38 mm,码道刻划直径为 35 mm;码盘圆周刻划 256 条基准刻线;所使用透镜放大倍数为 3.5 倍,所采用的图像探测器为 640 pixel 的线阵图像传感器。实验光电编码器如图 8 所示。

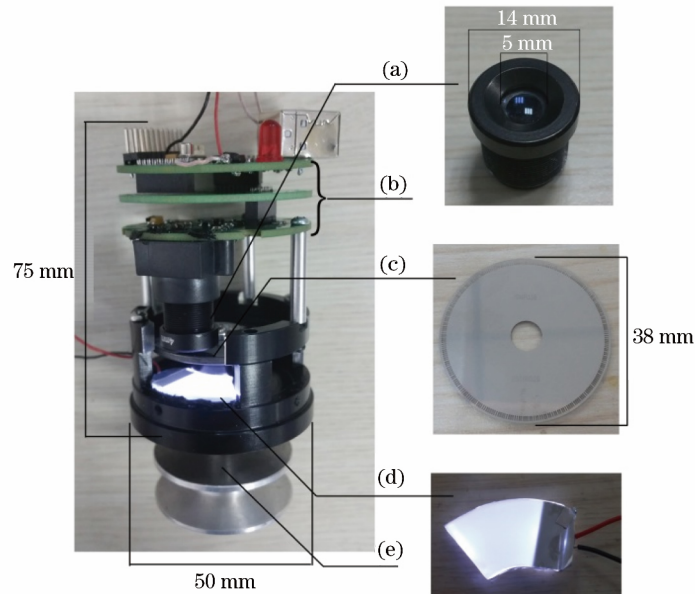


图 8 实验光电编码器。(a) 光学透镜;(b) 处理电路;(c) 码盘;(d) 光源;(e) 主轴

Fig. 8 Testing encoder. (a) Optical lens; (b) circuit; (c) code disc; (d) light source; (e) flange

### 5.1 细分算法测试实验

为了测试文中提出细分算法的性能,采集图像探测器的像素数据,并计算其细分数值。表 1 列出了第一次采集时图像探测器中心线(位置为 320)两侧的基准刻线的像素数值。经过(1)式的计算,表 1 中点  $A$  的质心位置为  $U_A=319.99$ ,点  $B$  的质心位置为  $U_B=375.40$ ;令细分倍数  $N=12$ , (4) 式计算得到的数值为 0.73,换算二进制为 0000 0000 0000。将编码器的主轴微转动,重新采集图像探测器的像素数据,如表 2 所示。经过计算,表 2 中点  $A$  的质心位置为  $U_A=319.98$ ,点  $B$  的质心位置为  $U_B=375.41$ ; (4) 式计算得到的数值为 1.48,换算二进制为 0000 0000 0001。

可以看出,该细分算法可以实现  $2^{12}$  分辨力的角度细分。同时,经过慢速转动观察,输出角度编码逐个且连续,不错码。

表 1 第一次采集数据

Table 1 Collected data for the 1<sup>st</sup> time

Reference line A		Reference line B	
No.	Pixel	No.	Pixel
306	0	362	0
307	91	363	86
308	163	364	246
309	186	365	244
310	167	366	173
311	169	367	177
312	170	368	177

续表 1

Reference line A		Reference line B	
No.	Pixel	No.	Pixel
313	170	369	177
314	170	370	177
315	170	371	177
316	170	372	176
317	170	373	176
318	169	374	176
319	169	375	176
320	169	376	177
321	169	377	177
322	169	378	177
323	169	379	178
324	168	380	178
325	168	381	178
326	168	382	178
327	168	383	179
328	168	384	178
329	167	385	174
330	161	386	255
331	246	387	195
332	154	388	82
333	55	389	0

表 2 第二次采集数据

Table 2 Collected data for the 2<sup>nd</sup> time

Reference line A		Reference line B	
No.	Pixel	No.	Pixel
306	0	362	0
307	90	363	87
308	174	364	250
309	186	365	236
310	168	366	173
311	169	367	177
312	171	368	177
313	171	369	177
314	172	370	176
315	171	371	177
316	171	372	177
317	171	373	176
318	170	374	177
319	170	375	177
320	170	376	177
321	169	377	177
322	169	378	177
323	169	379	178
324	168	380	178
325	168	381	179
326	168	382	179
327	168	383	180

Reference line A		Reference line B	
No.	Pixel	No.	Pixel
328	168	384	179
329	168	385	175
330	163	386	255
331	243	387	194
332	159	388	83
333	60	389	0

## 5.2 码盘偏心测试

在安装实验光电编码器码盘时,用显微镜观测到码盘偏心度约为  $2\ \mu\text{m}$ 。此时,调节图像探测器的角度几乎为零(可以忽略)。码盘半径为  $19\ \text{mm}$ ,圆周内基线刻线数量为  $2^8=256$ ,图像探测器与轴心距离  $r=17.5\ \text{mm}$ 。根据(9)式进行计算,偏心带来的误差最大值约为  $23.57''$ 。

采用分辨力为 23 位,精度优于  $1''$  的基准编码器对实验编码器进行误差检测。检测时,实验编码器主轴每转动  $15^\circ$  记录一次误差数据。结果如图 9 所示,可以看出,误差曲线呈正弦变化。其最大值在  $20''$  左右,与所计算的结果基本相近。

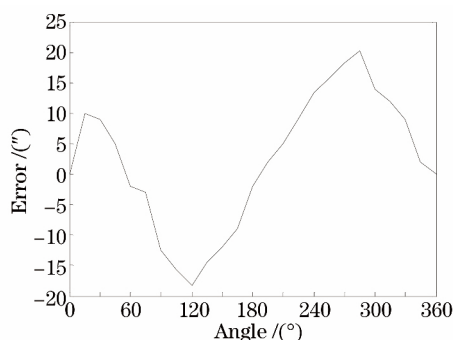


图 9 误差检测结果

Fig. 9 Error detection results

## 5.3 图像探测器安装角度测试

安装实验编码器的图像探测器时,令图像探测器存在一定角度,角度值约为  $\pi/8$ 。根据(10)式,图像探测器角度产生的误差大约为  $11.08''$ 。

同样采用 23 位基准编码器对实验光电编码器进行细分误差检测。由于实验编码器的分辨力是 20 位,实现全分辨力检测太过繁琐。所以在检测时,在同一个细分周期内,细分码值的高 5 位码值每变化一次记录一次误差数据,共记录 32 个误差数据。检测结果如图 10 所示。图 10 中误差曲线的最大值约为  $15''$ ,与计算得到的误差数值基本相近。

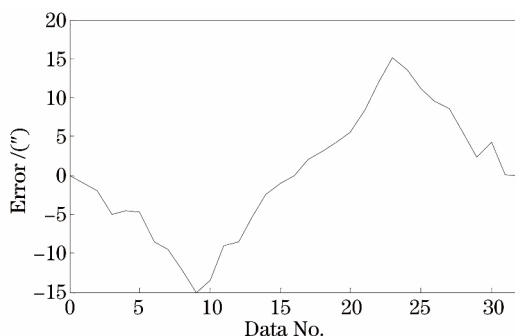


图 10 细分误差

Fig. 10 Subdivision error



## 6 结 论

为研制小型高分辨力图像式光电编码器,提出了一种基于线阵图像探测器的角度细分算法。该算法具有较强的适应性,并且不因码盘半径减小而降低细分准确度。经过误差分析发现,所提出算法在码盘圆周刻划线数大于或等于 128 时具有较小的细分误差,可以忽略。

根据所提出的细分算法,分析了码盘偏心、图像探测器安装角度对该细分算法误差的影响。经过分析发现,码盘偏心和图像探测器安装角度对测量误差的影响较大;为减小码盘偏心带来的误差影响,在尽可能保证装调正确的基础上,可以通过增加图像探测器与圆心之间的距离,以及增加基准刻线的刻划线数来减小误差;为减小图像探测器安装角度带来的误差,可以通过增加基准刻线数来减小误差。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao Yong, Shu 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.
- [2] Zhang Hongbo, Wan Qiuhua, Wang Shujie, *et al.* Installation error control of dynamic measurement for small photoelectric encoder[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(7): 1655-1660.  
张洪波, 万秋华, 王树洁, 等. 小型编码器动态精度检测的安装误差控制[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(7): 1655-1660.
- [3] Zhu Fan, Wu Yiming, Liu Changchun. Elimination influence of grating encoder's eccentricity and vibration to Moiré fringes signal by four reading heads[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(4): 0412008.  
朱 帆, 吴易明, 刘长春. 四读头法消除码盘偏心 and 振动对叠栅条纹相位测量的影响[J]. 光学学报, 2011, 31(4): 0412008.
- [4] Zuo Yang, Long Kehui, Liu Jinguo, *et al.* Analysis and processing of Moiré fringe signals based on non-uniform sampling[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(4): 1146-1152.  
左 洋, 龙科慧, 刘金国, 等. 非均匀采样莫尔条纹信号的分析与处理[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(4): 1146-1152.
- [5] Yu Hai, Wan Qiuhua, Du Yingcai, *et al.* Drive system of dynamic detection equipment for photoelectric encoders using space-vector torque combination[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(4): 165-173.  
于 海, 万秋华, 杜颖财, 等. 光电编码器动态检测转台的空间矢量力矩合成驱动系统[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(4): 165-173.
- [6] Mancini D, Cascone E, Schpni P. Ganlileo high-resolution encoder system[C]. SPIE, 1997, 3112: 328-334.
- [7] Tang Tianjin, Cao Xiangqun, Lin Bin. Developing current situation and the trend of photoelectric-angular encoder[J]. Optical Instruments, 2005, 27(1): 91-95.  
汤天瑾, 曹向群, 林 斌. 光电轴角编码器发展现状分析及展望[J]. 光学仪器, 2005, 27(1): 91-95.
- [8] Xiong Jingwu, Wan Qiuhua. A 23-bit absolute photo-electric rotary encoder[J]. Optics Machinery, 1990, 2: 52-60.  
熊经武, 万秋华. 二十三位绝对式光电轴角编码器[J]. 光学机械, 1990, 2: 52-60.
- [9] Leviton D B, Frey B J. Ultra-high resolution, absolute position sensors for cryostatic applications[C]. SPIE, 2003, 4850: 776-787.
- [10] Leviton D B, Garza M S. Recent advances and applications for NASA's new, ultra-high sensitivity, absolute, optical pattern recognition encoders[C]. SPIE, 2000, 4091: 375-384.
- [11] Sugiyam Y, Matsu Y, Toyod H, *et al.* A 3.2 kHz 14-bit optical absolute rotary encoder with a CMOS profile sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2008, 8(8): 1430-1436.
- [12] Tresanchez M, Pallejà T, Teixidó M, *et al.* Using the image acquisition capabilities of the optical mouse sensor to build an absolute rotary encoder[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 157(1): 161-167.
- [13] Kim J A, Kim J W, Kang C S, *et al.* Absolute angle measurement using a phase-encoded binary graduated disk[J]. Measurement, 2016, 80: 288-293.
- [14] Wang Yingnan, Yuan Bo, Ni Xuxiang. Subdivision technique of absolute angular encoder using array detector[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2011, 45(2): 370-374.  
王英男, 袁 波, 倪旭翔. 基于面阵探测器的绝对轴角编码器的细分技术[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(2): 370-374.
- [15] Liu E H, Su H B, Li H J. Single-ring absolute encoder[J]. Journal of Geomatics, 2002, 27(4): 30-32.

- [16] Yu Hai, Wan Qiuhua, Wang Shujie, *et al.* Dynamic errors analysis of small absolute photoelectric encoder[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0808004.  
于 海, 万秋华, 王树洁, 等. 小型绝对式光电轴角编码器动态误差分析[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0808004.
- [17] Du Yingcai, Song Lu, Wan Qiuhua, *et al.* Design of high resolution absolute code disk based on allegro image discriminate[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1112001.  
杜颖财, 宋 路, 万秋华, 等. 基于线阵图像传感器的高分辨力单圈绝对式编码方法[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1112001.