

# 基于线阵图像传感器的高分辨力单圈绝对式编码方法

杜颖财<sup>1,2</sup> 宋路<sup>1</sup> 万秋华<sup>2</sup> 于海<sup>2</sup>

<sup>1</sup>长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

<sup>2</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

**摘要** 为了提高测角分辨力, 缩小码盘尺寸, 并克服传统图像式编码器译码速度慢等缺点, 提出了一种单圈绝对式高分辨力编码技术。通过分析码盘刻线与分辨力之间的关系, 提出了绝对式单圈移位码编码方法; 采用准直光源照射和线阵图像探测器识别的方法实现单圈码盘的译码方式; 根据所提出的方法, 设计了高分辨力码盘及译码电路。实验采用直径 38 mm、刻划有 10 位编码的单圈码道, 成功实现了 10 位编码的译码。该编码方式较传统采用面阵图像探测器的编码方法具有更快的响应频率。

**关键词** 测量; 高分辨力; 编码方式; 图像识别; 码盘

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1112001

## High Resolution Absolute Code Disk Based on Linear Array Image Sensor

Du Yingcai<sup>1,2</sup> Song Lu<sup>1</sup> Wan Qiu-hua<sup>2</sup> Yu Hai<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

<sup>2</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

**Abstract** A high resolution single circle absolute coding technique is proposed to improve angle measure resolution, reduce disk dimensions, and overcome the shortcoming of low speed in traditional image encoder. The single circle absolute coding method is proposed by analyzing the relationship between disk reticle and resolution, a decoding method is proposed by using collimation light source and linear array image sensors, and the high resolution disk and decoding circuit are designed based on the proposed method. In the experiment, the diameter of single circle disk is 38 mm, the digit is 10, and the decoding of 10 bits coding is achieved. The proposed method has faster response frequency than the traditional coding method with the array image detector.

**Key words** measurement; high resolution; coding scheme; image identification; disk

**OCIS codes** 120.3930; 120.0280; 040.5160

## 1 引 言

光电编码器是一种集光、机、电于一体的数字角度位置传感器, 它以高精度、高分辨力、测量范围广、易于维护、使用可靠等优点, 广泛应用于光电经纬仪、雷达、航空航天、机器人、数控机床、指挥仪和高精度闭环调速系统等领域<sup>[1-4]</sup>。在航天、军事、工业等对器件的体积、重量有着严格要求的领域, 不仅要减小光电编码器外径尺寸和重量, 还要提高光电编码器的分辨力和精度<sup>[5]</sup>。在缩小码盘的同时, 提高光电编码器的分辨力和测角精度是目前的研究热门。

为实现小型光电编码器的高分辨力角度测量, 采用图像探测器实现光电码盘译码较传统光电探测方式

收稿日期: 2016-05-25; 收到修改稿日期: 2016-06-22

基金项目: 国家自然科学基金(51605465)

作者简介: 杜颖财(1976—), 男, 博士研究生, 主要从事角度测量及光电信号处理技术方面的研究。

E-mail: yedu@163.com

导师简介: 宋路(1952—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信与信息处理技术方面的研究。

E-mail: usong@126.com

具有更大的优势。近两年来,国外对适用于图像式光电编码器的编码方式进行了一系列的研究。美国 NASA 研制出刻划有基准线和二进制码元的码盘,采用 CCD 图像探测器接收码盘的图案,并识别二进制码元作为粗码<sup>[6-7]</sup>;2008 年,日本 Hamamatsu 公司设计了基于面阵探测器的二进制绝对式编码码盘<sup>[8]</sup>;2014 年,美国 Novi Sad 大学科学技术学院提出了基于色彩识别的角度位置测量方式,并设计出具有渐变颜色的码盘<sup>[9]</sup>;西班牙 Lleida 大学利用光电鼠标内部的 CMOS 传感器获得图像信息,对二位编码码盘进行识别<sup>[10]</sup>;2015 年,韩国 Standards and Science 研究所提出了一种使用移相编码码盘的绝对式角度测量方法<sup>[11]</sup>,采用该方法分别设计了 10 位和 13 位的码盘,并对测角误差进行了误差补偿。国内对适用于图像式光电编码器的编码方式也进行了一系列的研究。王英男等<sup>[12]</sup>提出了区位标记法编码方式;2012 年,谈颖皓<sup>[13]</sup>采用单圈绝对值编码方式实现了绝对轴角编码技术;2013 年,齐荔荔<sup>[14]</sup>基于图像识别法设计了一种刻划有二进制标识及基准识别线的码盘。综上,国内外基于图像识别法研究的编码技术具有以下特点:1)在研究基于图像识别方法的编码技术时,大多都忽略了数据采集的响应频率,使光电编码器响应频率慢;2)各研究单位所采用的码盘尺寸较大,不适合小型高分辨力编码的研究。

为提高图像式光电编码器的测角分辨力,减少数据采集时间提高响应频率,本文研究了一种高分辨力单圈绝对式编码方式。该编码方式基于最大周期 M 序列设计实现,充分利用码盘的空间,能够在小尺寸码盘上实现较高分辨力的编码;同时,采用准直光源照射码盘,线阵图像探测器实现对码盘的图像识别,能够实现高分辨力快速译码。采用该编码方式,在直径 38 mm 的码盘设计了刻划 10 位编码的单圈码道,并成功实现了 10 位编码的快速译码。该编码方式的实施,为研究小型高分辨力图像式编码器提供了重要的基础。

## 2 高分辨力单圈编码原理

### 2.1 单圈码道编码分辨力分析

为提高小尺寸码盘的测角分辨力,传统编码方式会在码盘单圈内刻划更多的刻线。过多的刻线会产生两方面的影响:1)过于细小的码盘刻线会使光通量不足,造成编码器不能正常译码;2)码盘刻线过于密集会使相邻码道之间互相干扰,产生串码,并且不利于高分辨力角度细分。最大限度的减小刻线密度,是设计小尺寸高分辨力码盘的准则。

设单圈码道最外圈刻划直径为  $D$ ,一组码值的长度为  $L$ ,每位码道宽度为  $\alpha$ ,编码位数为  $n$ ,那么传统码盘的分辨力  $\theta$  为

$$\theta = 360/2^n, \quad (1)$$

由于码道长度  $L = n\alpha$ ,所以

$$\theta = \frac{180}{\pi} \cdot \frac{\pi D}{L}. \quad (2)$$

由(1)~(2)式可以推导得出

$$n = \frac{2D}{\alpha/2^n}. \quad (3)$$

可以看出,当码盘直径  $D$  一定时,传统码盘的编码位数与  $\alpha/2^n$  成反比。每增加一位编码,码道宽度将减小 50%。由于  $L = \pi D/2^n$ ,传统编码方式需要在长度为  $L$  的码盘范围内刻划  $n$  位码道,那么全周码盘上共需要刻划  $n \cdot 2^n$  个有效识别码道。这种编码方式使码道刻划密度增加,不利于高分辨力编码。

### 2.2 高分辨力单圈编码原理

根据(3)式可知,目前限制码盘编码分辨力的主要因素是长度  $L$  内刻划  $n$  位的码道。因此,本文提出一种减小有效识别码道总数量的编码方式。设  $X_1, X_2, \dots, X_n$  是不全为 0 的  $n$  位二元的各位数值,当码盘转动一个码元位置时, $n$  位二进制经过移位形成新的码值,码盘读出的数值由  $X_1, X_2, \dots, X_n$  变为  $X_2, X_3, \dots, X_n, X_{n+1}$ 。每一位二进制  $X_i$  的生成原理图如图 1 所示。

图中算子  $\oplus$  表示异或运算, $n$  位二元的每一位码值都是由前 8 位码值的运算得到的; $X_i$  是第  $i$  位码值(0 或是 1);系数  $a$  取 0 或 1,系数  $a_n$  总是 1。图 1 中, $X_i$  的生成多项式为

$$X_i = a_1 X_{i-1} + a_2 X_{i-2} + \dots + a_n X_{i-n}, \quad (5)$$

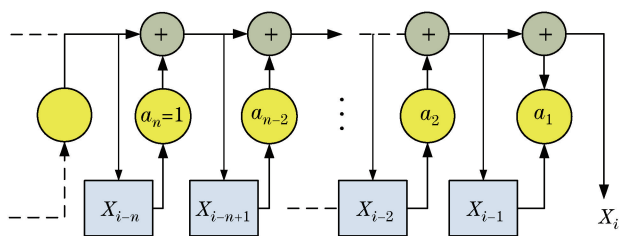


图 1 码值生成原理图

Fig. 1 Principle of code value generation

其适当选取系数  $a_1 \sim a_n$ , 可以使  $X_i$  具有  $2^{n-1}$  的最长循环周期。

在选取系数时, 令  $X_1, X_2, \dots, X_n$  初始值为  $\{0, 0, 0, \dots, 0, 1\}$ , 利用 Matlab 软件依次计算  $a_1 \sim a_n$  每种取值所获得编码数的周期。当周期数为  $2^{n-1}$  时, 则停止计算。经过计算, 8 位最长周期的生成多项式为

$$X_i = X_{i-1} \oplus X_{i-2} \oplus X_{i-3} \oplus X_{i-8} \quad (6)$$

9 位最长周期的生成多项式为

$$X_i = X_{i-3} \oplus X_{i-9} \quad (7)$$

10 位最长周期的生成多项式为

$$X_i = X_{i-2} \oplus X_{i-10} \quad (8)$$

该编码方式的每一组有效码值范围内既包含本组码值的信息, 也包含相邻的两组码值的译码信息。采用该编码方式, 全周码盘上共需要刻划  $2^n$  个有效识别码道, 远远小于传统编码方式的  $n \cdot 2^n$  个有效识别码道。因此, 采用该编码方式能够在小尺寸码盘上实现高分辨力编码。

### 3 编码方式实现

#### 3.1 码盘设计

根据(8)式的计算, 在外径为 38 mm 的码盘上设计了 10 位单圈绝对式码道, 其整体图案如图 2 所示。

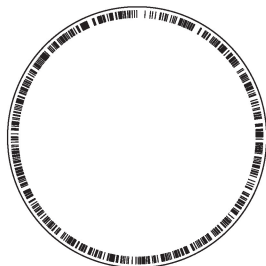


图 2 10 位单圈码道

Fig. 2 10 bits single circle disk

将部分码道放大, 如图 3 所示。

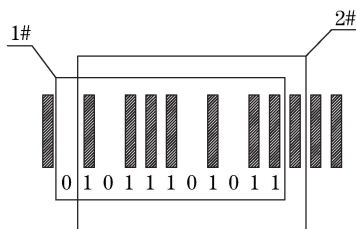


图 3 10 位码道局部放大图

Fig. 3 Partial enlarged detail of 10 bits code disk

图 3 中, 1# 矩形框中的码道读数为 01011101011, 当码盘旋转一个分辨力时, 图像探测器所接收到的图像为 2# 矩形框中的码道, 其读数变为 10111010111。根据查表可以得出码道读数所代表的相应码值。

### 3.2 译码原理

为识别码盘编码图案,采用线阵图像探测器对码盘图像进行识别。然后,对像元数据的灰度值进行二值化处理,即可得到码盘图像响应位置的亮、暗信息,继而得出码盘读数。

由于码盘上的一组有效识别码的长度小于图像探测器的长度,因此使用光学透镜对码盘图像进行放大。一组有效识别码的长度为  $L$ , 单个识别码的长度为  $\alpha$ , 那么图像探测器至少需要探测到  $(L + \alpha)$  长度的码盘图案才能保证完整识别一组编码读数。设光学透镜放大倍数为  $A$  倍, 图像探测器的单个像元长度为  $l$ , 共有  $m$  个像元点, 那么关系为

$$(L + \alpha)A < ml. \tag{9}$$

采用码盘直径为 38 mm 的码盘刻划 10 位的编码图案时,  $L + \alpha = 11\alpha = 11\pi D/2^n$ 。本文中  $D = 38$  mm, 透镜放大倍数  $A = 3.5$ ,  $(L + \alpha)A = 4.49$  mm。因此译码所选用的线阵图像探测器的有效图像识别区域长度应大于 4.49 mm。本文译码选用的线阵图像传感器为 DYNAMAX 公司生产的 RPLIS2K-EX 线阵图像传感器芯片, 其有效图像识别区域长度为 8.192 mm, 可以胜任译码工作。

译码实施方案如图 4 所示。

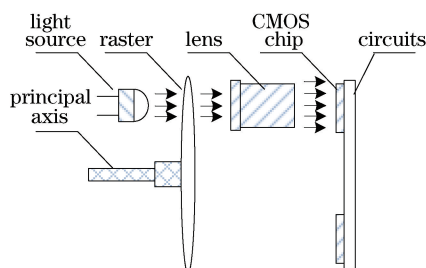


图 4 译码原理图

Fig. 4 Principle of decoding

平行光源发出准直光照射码盘, 码盘图像被 CMOS 图像传感器接收并送入数据处理电路进行译码处理。由于采用线阵图像传感器, 图像采集所需处理的数据量非常小, 所以译码响应速度较快。

码盘刻划编码的译码表是相对应编码而定制的。每一个编码值都对应一个译码值, 并且当码值发生移位时, 译码值也将相应的加 1 或减 1。本文定制的 10 位编码值的部分译码表如图 1 所示。表 1 中, 每个序号的编码值是由前序号的编码值向右移 1 位, 并用(8)式计算得到的  $X_i$  补位得到。译码值是相应序号的 10 位二进制代码。

表 1 部分译码表

Table 1 Partial table of decoding

No.	Coding	Decoding
0	000000000	000000000
1	100000000	000000001
⋮	⋮	⋮
878	111111101	110110110
879	011111110	110110111
880	101111111	1101110000
881	010111111	1101110001
882	001011111	1101110010
883	000101111	1101110011
884	000010111	1101110100
885	000001011	1101110101
886	100000101	1101110110
887	010000010	1101110111
⋮	⋮	⋮
1022	000000010	111111110
1023	000000001	111111111

## 4 实 验

### 4.1 图像采集实验

实验采用 Cortex-M7 内核的 ARM 芯片 STM32F746 作为主控芯片对图像传感器像元数据进行采集, 所搭建的实验平台如图 5 所示。图中 1 为法兰, 2 为码盘, 3 为光学透镜, 4 为图像传感器, 5 为译码算法实现电路。

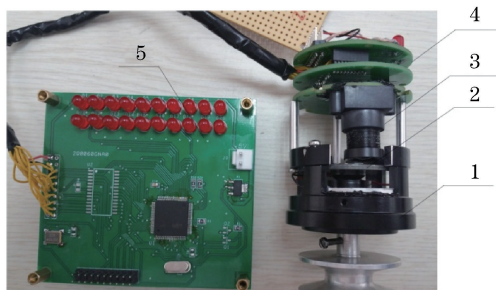


图 5 译码实验平台

Fig. 5 Decoding experimental platform

采用图像传感器对 10 位码盘进行图像采集, 得到的灰度值如图 6 所示。

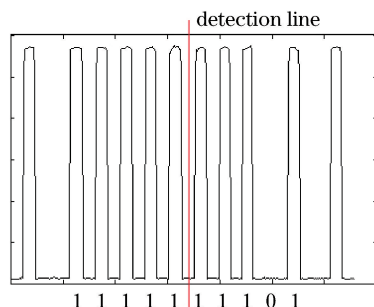


图 6 采集数据灰度值

Fig. 6 Gray level of data

图中竖线表示 COMS 芯片的中心检测线。译码时, 首先将灰度值取二值化; 然后以检测线为中心点, 无论中线检测线是否落在透光码道位置上, 都向左侧寻找第一个透光码道的右侧边缘位置; 最后, 以此边缘位置为起点, 根据灰度值变化左右各识别 5 位编码。由于每次译码都以中心检测线左侧透光码道的右边缘为起点, 所以不会造成译码错误。由图 6 可知, 当前码盘读数为 1111111101。查询表 1 中的译码表可知, 当前译码值为 1101101110。多次旋转码盘, 对译码进位正确。

### 4.2 对码盘图案进行改进

目前光电编码器会对测量角度值进行细分, 进而得到精码提高测角分辨率。因此, 对所设计码盘进行改进, 在相邻的有效识别码之间, 加入细分基准刻划线。图 3 所示的码盘图案加入细分基准刻划线后如图 7 所示。

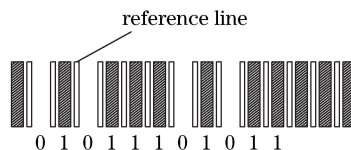


图 7 改进后的码盘图案

Fig. 7 Disk pattern after improvement

采用加入基准线后的码盘进行译码实验, 所采集到的灰度值如图 8 所示。

从图 8 中可以看出, 基准线的长度要小于编码刻线, 因此在译码的过程中可以将基准线忽略。图 8 中的读数值为 1111111101, 译码值为 1101101110。

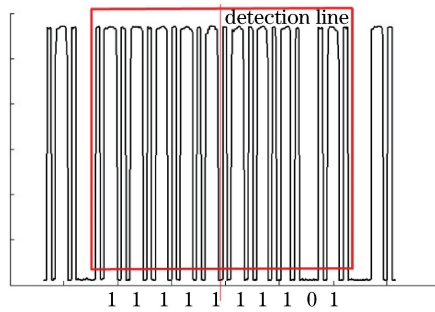


图 8 改进后采集数据灰度值  
Fig. 8 Gray level after improvement

为验证基准线是否能够实现角度细分,采用质心算法分别计算检测线两侧的基准线的质心  $Y_1$  和  $Y_2$ ,表示为

$$Y = \frac{\sum_{i=1}^n P_i G_i}{\sum_{i=1}^n P_i}, \quad (10)$$

式中  $P_i$  为第  $i$  个像元点的像元值,  $G_i$  为第  $i$  个像元点的位置值,  $n$  为窗口大小。识别  $Y_1$  和  $Y_2$  的位移,实现对角度的亚像元级细分,细分得到的数值表示为

$$\beta = \frac{2^m (Y_1 - O)}{Y_1 + Y_2}, \quad (11)$$

式中  $O$  是检测线所在的位置,  $2^m$  是细分倍数。本文中取  $m = 10$ , 并且成功实现了 1024 倍的角度细分。编码码盘刻划 10 位码值(粗码), 角度细分实现了 1024 倍细分(精码), 所以共实现了 20 位的测角分辨力。

为实现精码和粗码的衔接,将中心检测线左侧第一个精码码道的右边缘作为起点,左、右各识别一条精码码道,并求两条精码码道的质心,两条精码码道分别标号为 1# 和 2#;判断其中靠右侧 2# 精码码道的质心在中心检测线的左侧还是右侧。如果在右侧,则以 1# 码道的右边缘作为起点开始译码;如果在左侧,那么将继续向右寻找第三条精码码道 3#,并以 2# 精码码道的右边缘作为起点开始译码。

### 4.3 检测实验

采用 24 位、精度为  $1''$  的高精度基准编码器对所设计的实验光电编码器进行对比误差检测,检测结果如表 2 所示。

表 2 检测误差  
Table 2 Detection error

Angle/(°)	Error/(")
0	0
30	5.5
60	-15.2
90	17.6
120	10.4
150	40
180	42.5
210	39
240	43
270	28
300	13.6
330	7.1
360	0

表中误差的均方差为  $19.04''$ 。检测结果表明,所设计码盘可以显示较高的分辨力和角度测量精度。



## 5 结 论

为研制高分辨力小型绝对式光电编码器,提出了基于线性图像探测器的高分辨力绝对式编码方式。该编码方式在实现高分辨力编码的同时,减小了码盘刻线密度,缩小了码盘尺寸,为研制图像式高分辨力光电编码器提供了基础。

为验证该编码方式,提出了码盘编码理论并对其进行了分析;提出了基于最大周期数  $M$  序列的高分辨力绝对式编码方式;提出了基于该编码方式的译码方式,并进行了译码实验。在实验过程中,为配合光电编码器的精码细分需求,对该编码方式的码盘进行了改进。实验结果表明,该编码方式能够在小尺寸码盘上实现较高分辨力的编码,同时采用线阵图像探测器能够准确地实现译码。该编码方式的提出为图像式光电编码器的研制提供了重要的依据。

## 参 考 文 献

- 1 Kao C, Huang H, Lu S. Optical encoder based on Fractional-Talbot effect using two-dimensional phase grating[J]. Optics Communications, 2010, 283(9): 1950-1955.
- 2 Feng Yingqiao, Wan Qihua, Sun Ying, *et al.* High resolution interpolation techniques of small photoelectric encoder[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42 (7): 1825-1829.  
冯英翘, 万秋华, 孙莹, 等. 小型光电编码器的高分辨力细分技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1825-1829.
- 3 Ye Shengxiang. Optoelectronic displacement precision measurement technology [M]. Urumqi: Xinjiang Science and Technology Health Press, 2003.  
叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 乌鲁木齐: 新疆科技卫生出版社, 2003.
- 4 Hane K, Endo T, Ishimori M, *et al.* Integration of grating-image-type encoder using Si micromachining[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2002, 97-98: 139-146.
- 5 Wu Hongsheng, Zeng Qifeng, Qiao Dong, *et al.* Filtering method of improving quality of grating Moiré fringe[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(8): 1944-1949.  
吴宏圣, 曾琪峰, 乔栋, 等. 提高光栅莫尔条纹信号质量的滤波方法[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1944-1949.
- 6 Leviton D B, Frey B. Ultra-high resolution, absolute position sensors for cry static applications[C]. SPIE, 2003, 4850: 776-787.
- 7 Leviton D B, Garza M S. Recent advances and applications for NASA's new, ultra-high sensitivity, absolute, optical pattern recognition encoders[C]. SPIE, 4091: 375-384.
- 8 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.
- 9 Bajića J S, Stupara D Z, Dakićb B M, *et al.* An absolute rotary position sensor based on cylindrical coordinate color space transformation[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 213: 27-34.
- 10 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.
- 11 Kim J, Kim J W, Kang C, *et al.* Absolute angle measurement using a phase-encoded binary graduated disk [J]. Measurement, 2016, 80: 288-293.
- 12 Wang Yingnan, Yuan Bo, Ni Xuxiang. Subdivision technique of absolute angular encoder using array detector[J]. Journal of Chinese Zhejiang University, 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, 2011, 45(2): 370-374.
- 13 Tan Yinghao. The absolute angular encoder technique using linear detector[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.  
谈颖皓. 基于线阵探测器的绝对轴角编码器技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- 14 Qi Lili. The principle research on small optical pattern rotary encoder with highresolution [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.  
齐荔荔. 小型高分辨力图像式光电编码器原理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.