

## 单圈绝对式光电轴编码器译码技术

苏小刚<sup>1,2</sup>, 胡晓东<sup>1\*</sup>, 肖茂森<sup>1</sup>, 张晓东<sup>1</sup>

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 单圈绝对式编码器相比于增量式编码器及传统的绝对式编码器有独特的优势, 其关键技术在于译码系统的设计及译码算法的研究。为了提高单圈绝对式编码器集成度、响应速度及精度, 设计了译码系统, 该系统采用线阵 CCD 作为码盘图像光电转换装置, 并利用 FPGA 实现电路控制及译码算法。同时提出了新的译码算法, 该算法一方面将 CCD 输出信号二值化后的电平信号高电平计数, 判断组合得到粗码信息; 另一方面应用质心法进行细分定位, 通过计算条纹质心与虚拟中心的偏差得到细分角度值。最后, 通过两者结合得到角度信息。基于该系统研制的经纬仪样机精度达到 2"。

**关键词:** 绝对轴角编码器; 单圈; 译码; 线阵 CCD; 质心法

**中图分类号:** TN762 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0411007

## Decoding techniques of single-ring absolute photoelectric shaft encoder

Su Xiaogang<sup>1,2</sup>, Hu Xiaodong<sup>1\*</sup>, Xiao Maosen<sup>1</sup>, Zhang Xiaodong<sup>1</sup>

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In comparison with incremental and traditional absolute encoder, the single-ring absolute encoder processes more advantage. And the research of decoding system and algorithm are essential to the single-ring absolute encoder. In order to improve single-ring absolute photoelectric encoder's circuit integration, response speed and accuracy, a decoding system was designed in this paper. Linear CCD was used in this system as the disc image receiving and photoelectric conversion device which also provided the basement of subdivision algorithm. And FPGA was used to achieve circuit control and decoding algorithm. A new decoding algorithm was also proposed in this paper. On the one hand, the coding information was achieved by counting high electrical level of the binaryzation signal of CCD's output. Coding information was obtained by recognition of the disc image and combination of 12-bits coding number. On the other hand, precise value was obtained by calculating the shifting between the centroid of image and virtual center. The centroid of stripe was calculated based on CCD centroid location algorithm.

收稿日期: 2016-08-05; 修订日期: 2016-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(11404387); 西部之光项目(Y329451213, Y429681213)

作者简介: 苏小刚(1990-), 男, 硕士生, 主要从事单圈绝对式编码器方面的研究。Email: sxghoney@qq.com

导师简介: 胡晓东(1964-), 男, 研究员, 硕士生导师, 主要从事光电精密测量技术方面的研究。Email: hxd@opt.ac.cn

Finally, the value of angle was precisely received from combination of these two values. A prototype of theodolite was developed based on this single-ring absolute encoder decoding system and can reach the accuracy of 2".

**Key words:** absolute photoelectric encoder; single-ring; decoding; linear CCD; centroid algorithm

## 0 引言

光电轴角编码器是一种采用光电技术,将角位置、角位移及角速度等物理量转换成数字电信号的精密角度传感器<sup>[1-2]</sup>。它具有结构简单、分辨率高、体积小、非接触、稳定可靠等优点,广泛应用于光电经纬仪、雷达、地炮指挥仪等领域<sup>[3]</sup>。译码系统是光电轴角编码器的重要组成部分,它决定了整个编码器的响应速度、集成度及精度,而且码盘的刻画误差及轴系带来的误差都可以由译码系统修正。译码系统除了需要稳定的光源及易于数据处理的光电传感器外,其关键的技术是译码算法的设计与实现,译码算法决定了编码器数据处理搭载的平台、响应时间以及精度能达到的程度。根据编码方式不同,轴角编码器可分为增量式和绝对式两种,相比于增量式,绝对式轴角编码器具有抗干扰能力强、无累积误差、掉电后无需重新标定等优点。相比于传统的编码器,单圈绝对式编码器码盘尺寸小、译码简单,更符合高集成度、高精度、高稳定性的发展趋势,因而在实际应用中有更广阔的发展前景<sup>[4-5]</sup>。

现阶段对译码技术的研究仅停留在理论研究,还没有文献明确示出译码技术在实际应用中能达到的精度,或是只研究了分辨率低、精度低的低位数单圈绝对式编码器<sup>[6-7]</sup>,或是编码器基于 DSP 和单片机实现,硬件电路复杂<sup>[8-9]</sup>。从市场已有的由单圈绝对式轴角编码器制备的经纬仪及全站仪等设备来看,国内苏一光最新生产的 HTS322R15 全站仪,采用单圈绝对式码盘,精度为 2",但是电路采用 DSP+单片机进行控制与信号处理,硬件电路复杂,集成度低;国外 Leica 公司最新生产的 TS60 全站仪,精度可达 0.5",该仪器在译码的基础上还采用了四重轴系补偿等先进的机械技术,将精度提高到国际先进水平,但出于知识产权保护因素,其译码的技术细节不能被查到。

文中利用直径为 78 mm、1 080 分的 12 位单圈绝

对式码盘基于线阵 CCD 及 FPGA 硬件电路设计了光电轴角编码器系统。该系统没有复杂的光学系统,将 CCD 输出的离散信号直接进行采样处理,且硬件电路简单,集成度高,有利于小型化设计。同时,文中提出了一种新的译码算法,包括粗码识别算法及基于质心法的 CCD 细分定位算法,该算法从效率上看,易于由硬件描述语言实现,降低了响应时间。从精度来看,利用该系统研制的经纬仪样机精度达到 2",达到了市场应用需求,该译码技术达到国内领先水平。

## 1 系统结构

编码器的总体结构如图 1 所示,它由光学系统和控制、信号处理系统两部分组成。光学系统包括 LED 光源、码盘及线阵 CCD。系统没有成像透镜等复杂的光学部件,结构简单。

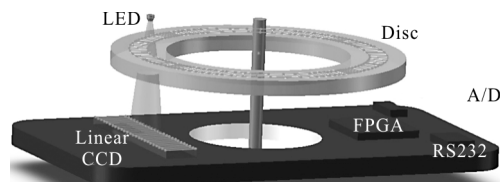


图 1 系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the system

光源透过码盘将图像成在线阵 CCD 上,线阵 CCD 像素行方向与码盘切向方向一致。控制及信号处理系统基于 FPGA 设计,完成了线阵 CCD 及 A/D 转换器的驱动,CCD 输出各像元的光电转换电压信号,该离散电压信号由 A/D 转换为数字量,由硬件描述语言实现译码算法,硬件电路设计简单,响应速度快,测量结果由串口传到计算机上显示。

## 2 译码原理

单圈绝对式编码器由粗码识别和精码算法组成。其中,粗码识别由码盘映射在 CCD 上的图像信息提取判断获得,精码则利用 CCD 细分定位算法计

算条纹的中心位置, 计算该中心与虚拟中心的偏移量即可得到精码角度值。通过两者结合可以得到精确的角度信息。

### 2.1 粗码识别

粗码直接刻画在码盘的单圈码道上, 单圈绝对式码盘如图 2 所示。

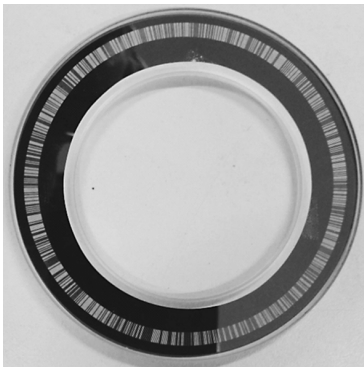


图 2 单圈绝对式码盘

Fig.2 Single-ring absolute code disc

每组编码包括 12 个码元, 每个码元为宽条纹透光(1)和窄条纹透光(0)状态, 一圈有 1 080 组不同的 12 位编码, 对应 1 080 个绝对位置。码元之间由遮光区域相隔, 每个码元条纹中心等分码盘, 同理每个遮光区域中心同样等分码盘。

宽窄条纹在 CCD 上的映射如图 3 所示, 宽条纹透光区域所占像素数大于窄条纹所占像素数, 选取合适的阈值  $T$  对 CCD 图像进行二值化分割<sup>[10]</sup>。经二值化后的波形如图 4 所示, 可见宽条纹高电平占空比较大, 可对高电平计数确定宽窄条纹信息。

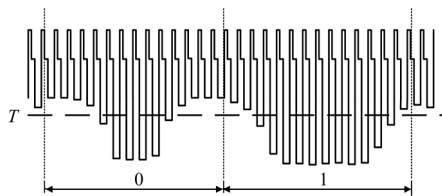


图 3 码盘在 CCD 上的映射图像

Fig.3 Mapped image of the code disc on CCD

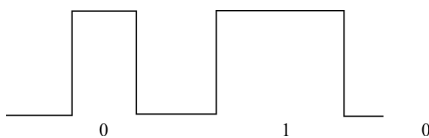


图 4 二值化后的波形图

Fig.4 Waveform after binaryzation

设计程序流程图如图 5 所示。设置使能信号确

定需识别的码值在 CCD 上的位置, 当使能信号为低电平, 二值化后的信号 SIG 下降沿计数。

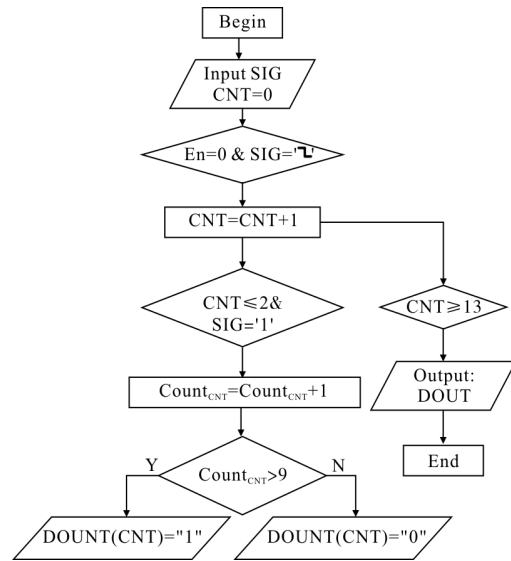


图 5 码值识别软件流程图

Fig.5 Flow diagram of code recognition software

当计数值为 1 时, 对此时的高电平对应的像元数计数, 由宽窄条纹对应像元数统计, 选取宽窄条纹所占像元数的中间值为阈值, 当高电平所占像元数大于 9 时条纹被识别为宽条纹, 对应码值为“1”, 否则被识别为窄条纹, 对应码值为“0”。信号 SIG 下降沿表明此次计数结束, 码值判断输出, 计数加 1 判断第 2 位的码值, 由此组合 12 次输出的码值信息可得到 12 位编码 DOUT。将 DOUT 作为地址和其对应的位置编号信息  $N$  存入 ROM 中, 得到编码值之后通过寻址计算得到粗码角度值为:

$$\theta_1 = N \times \frac{1\ 296\ 000''}{1\ 080} = N \times 1\ 200'' \quad (1)$$

### 2.2 细分算法

由于该系统采用 CCD 作为光电传感器, 所以单圈绝对式编码器细分技术的研究就是对 CCD 细分技术的创新应用。CCD 细分分为硬件细分与软件细分, 由于硬件细分电路复杂庞大以及各种软件细分方法的发展, 软件细分逐渐成为 CCD 细分的发展趋势。另外, CCD 软件细分可分为边缘细分检测及细分定位<sup>[11]</sup>。边缘细分检测基本思想是将离散的 CCD 输出信号经过插值拟合成连续信号, 再通过计算导数确定边缘, 此方法需要一定的数据量或更小尺寸的 CCD 像元, 且计算复杂。所以该系统采用基于质心法定位细分算法用于计算每个条纹的

中心。

2.2.1 质心法

质心法是一种 CCD 细分定位算法,在单狭缝光斑细分定位中有广泛的应用,线阵与面阵的光电传感器都可以用此方法做细分定位<sup>[12]</sup>。由于 CCD 输出信号存在背景噪声及暗电流噪声,文中采用带阈值的质心法,带阈值的质心法计算公式如下:

$$X = \frac{\sum_{i=m}^n (u_i - T)x_i}{\sum_{i=m}^n (u_i - T)} \quad (2)$$

式中:  $u_i$  为第  $i$  个像元的灰度值;  $x_i$  为第  $i$  个像元的位置信息;  $T$  为阈值。带阈值的质心法相当于将原图像与二值化阈值相减,然后对相减后图像求质心。该算法保证了高精度与测量的连续性。

2.2.2 基于质心法的细分算法

根据单圈绝对式编码器的编码原理,每个位置对应绝对的角度值,可假设每个码值的虚拟中心,如图 6 所示。图中 Center1 与 Center2 为两个相邻条纹的虚拟中心,实心点代表条纹的质心位置,  $L$  表示一个码值映射到线阵 CCD 上所占的像元数,同时相当于两个质心之间的像元数。  $L$  与装配的光学系统有关,  $L$  可以通过相邻两个条纹的质心差计算:

$$L = x_3 - x_2 \quad (3)$$

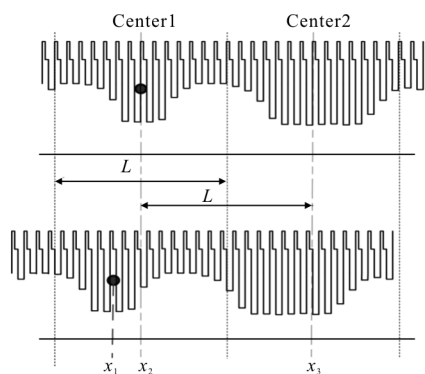


图 6 细分算法示意图

Fig.6 Subdivision diagram of division algorithm

则每个像元代表的角度为:

$$\theta_3 = \frac{1 \ 200''}{L} = \frac{1 \ 200''}{x_3 - x_2} \quad (4)$$

当质心与虚拟中心重合时  $x_1 - x_2$ , 输出角度即为粗码识别输出的角度值,当质心与虚拟中心有相位差时,细分角度为:

$$\theta_2 = (x_2 - x_1) \theta_3 = \frac{1 \ 200''(x_2 - x_1)}{x_3 - x_2} \quad (5)$$

由于条纹的质心相对于虚拟中心会出现偏左或偏右的情况,所以可正可负。由此可得系统输出角度值为:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 = (N + \frac{x_2 - x_1}{x_3 - x_2}) \times 1 \ 200'' \quad (6)$$

3 单圈绝对式经纬仪样机

单圈绝对式编码器应用广泛,文中基于所设计的译码系统研制出光电经纬仪样机,并进行了精度测量。

3.1 样机结构

应用单圈绝对式编码器研制的经纬仪如图 7 所示,该样机沿用原经纬仪的轴系系统码盘安装在水平位置,LED 光源安装在码盘下方,线阵 CCD 位于码盘上方,信号处理电路装配在经纬仪侧面。同时为了消除同轴度带来的误差,样机在 180°对称位置装配了双读头译码系统。

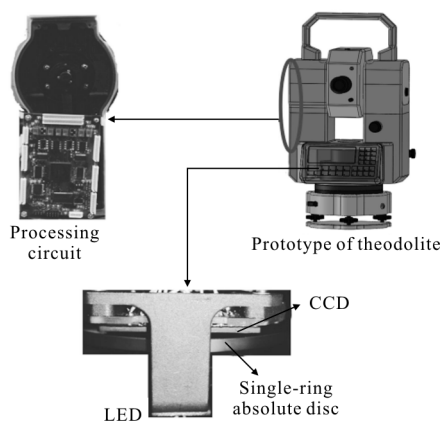


图 7 应用文中系统的经纬仪样机

Fig.7 Prototype of theodolite based on this paper system

3.2 精度测量

利用最大分度误差为 0.2'' 的 23 面体多齿分度台进行精度检测。该分度台齿数为 552,为 23 与 24 的乘积,即将非整分度与整分度结合,因此分度角具有度分秒各类型角度信息,可用于检定综合误差,常用作经纬仪检定。测量角度由表 1 所示。

表中分度误差为受检点的经纬仪读出值与标准值的差值。残差表示分度误差累计量,由 JJG100-2003 仪器精度综合评定指标中公式(7)所得。其中  $\delta_i$  为第  $i$  组残差,  $v_i$  为第  $i$  组分度误差。

表 1 精度测量数据

Tab.1 Precision measurement data

Standard angle	Measuring angle	Indexing error	Residual
0°0'0.0"	0°0'0.0"	0.0"	0.0"
15°39'7.8"	15°39'7"	-0.8"	-0.4"
31°18'15.7"	31°18'14"	-1.7"	-0.9"
46°57'23.5"	46°57'24"	0.5"	1.0"
62°36'31.3"	62°36'33"	1.7"	1.8"
78°15'39.1"	78°15'39"	-0.1"	0.0"
93°54'47.0"	93°54'44"	-3.0"	-2.5"
109°33'54.8"	109°33'55"	0.2"	0.6"
125°13'2.6"	125°13'0"	-2.6"	-2.0"
140°52'10.4"	140°52'10"	-0.4"	0.2"
156°31'18.3"	156°31'18"	-0.3"	0.3"
172°10'26.1"	172°10'30"	3.9"	4.1"
187°49'33.9"	187°49'33"	-0.9"	-0.6"
203°28'41.7"	203°28'40"	-1.7"	-1.3"
219°7'49.6"	219°7'49"	-0.6"	-0.2"
234°46'57.4"	234°46'57"	-0.4"	0.0"
250°26'5.2"	250°26'7"	1.8"	2.1"
266°5'13.0"	266°5'9"	-4.0"	-3.5"
281°44'20.9"	281°44'21"	0.1"	0.5"
297°23'28.7"	297°23'28"	-0.7"	-0.2"
313°2'36.5"	313°2'33"	-3.5"	-2.9"
328°41'44.4"	328°41'41"	-3.4"	-2.7"
344°20'52.2"	344°20'50"	-2.2"	-1.4"
0°0'0.0"	0°0'2"	-	-

$$\delta_i = v_i - \sum_{j=1}^{j=i} v_j / i \quad (7)$$

分度误差及残差的分布如图 8 所示。一组数据包括 23 个点角度的测量值,最大残差为 4.1",只有 5 个点残差超出±2"。

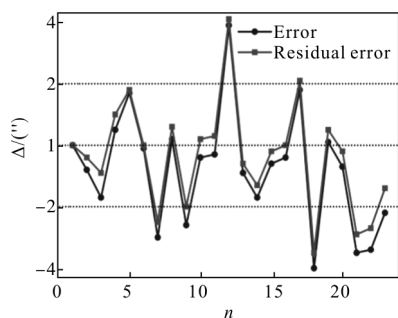


图 8 分度误差与残差分布图

Fig.8 Indexing error and residual error scatter diagram

标准偏差由公式(8)计算得到。

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_{i=1}^{i=22} \delta_i^2 / 22} \quad (8)$$

其中,  $\delta_i$  为第  $i$  组残差, 计算得到标准偏差为 1.8", 电子经纬仪的精度等级以仪器的一测回标准偏差划分, 标准偏差为 1.8" 时可认定精度达到级。

### 4 结论

文中设计了一种单圈绝对式轴角编码器译码系统, 该系统采用线阵 CCD 作为码盘图像接收及光电转换装置, 同时利用 FPGA 控制电路实现译码算法, 实现了较短的响应时间。另外文中提出了新的译码算法, 并应用质心法进行细分定位。利用该系统研制的经纬仪样机精度达到。该样机的研制对打破技术垄断, 建立拥有自主知识产权的产品有着重要的意义, 并为之后提高单圈绝对式轴角编码器的各项指标提供了技术基础, 可通过对该译码系统的改进及其他系统新技术的应用提高精度等各方面指标。总的来说, 文中为单圈绝对式轴角编码器工程化提供了硬件及算法基础, 并提供了经纬仪样机设计方案, 经精度测试已达到市场需求精度。长远来看, 该系统具有深入的研究价值和广泛的应用价值。

### 参考文献:

[1] Chen Yun, Zhao Xingguo. Research single-ring absolute photoelectric shaft encoder[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(2): 230-233. (in Chinese)  
陈赞, 赵兴国. 单圈绝对式光电轴角编码器的研究 [J]. 光子学报, 2008, 37(2): 230-233.

[2] Su Haibing, Liu Enhai. Research on single-ring absolute encoder and its applications [J]. *Optics and Precision Engineer*, 2002, 10(1): 74-78. (in Chinese)  
苏海冰, 刘恩海. 单圈绝对式编码器的研制[J]. 光学精密工程, 2002, 10(1): 74-78.

[3] Tan Yinghao, Yuan Bo, Meng Zibo. A single-track absolute angular encoder using the linear detector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(12): 1771-1175. (in Chinese)  
谭颖浩, 袁波, 孟子博. 基于线阵探测器的单圈绝对轴角编码器[J]. 光子学报, 2011, 40(12): 1771-1175.

[4] Dong Jing, Wan Qiuhua, Zhao Changhai, et al. Current situation and prospect of fault diagnosis for photoelectric

- encoder[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 755–767. (in Chinese)
- 董静, 万秋华, 赵长海, 等. 光电编码器故障诊断技术研究现状与展望[J]. 中国光学, 2015, 8(5): 755–767.
- [5] 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. (in Chinese)
- 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.
- [6] 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. (in Chinese).
- 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.
- [7] Sun Shuhong, Zhao Changhai, Wan Qihua, et al. Automatic detection system for miniature photoelectrical encoder [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 600–606. (in Chinese)
- 孙树红, 赵长海, 万秋华, 等. 小型光电编码器自动检测系统[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 600–606.
- [8] Sun Ying, Wan Qihua, Wang Shujie, et al. Design of signal process system for spaceborne photoelectric encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1182–1188. (in Chinese)
- 孙莹, 万秋华, 王树洁, 等. 航天级光电编码器的信号处理系统设计[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(5): 1182–1188.
- [9] Sun Shuhong, Liang Lihui, Wan Qihua. Automatic detection system for photoelectric encoder based on DSP [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2536–2539. (in Chinese)
- 孙树红, 梁立辉, 万秋华. 基于 DSP 的光电编码器自动检测系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(9): 2536–2539.
- [10] Howe N R. Document binaryzation with automatic parameter tuning[J]. *International Journal on Document Analysis and Recognition*, 2013, 16(3): 247–253.
- [11] Anisimov A G, Pantyushin A V, Lashmanov O U, et al. Absolute scale –based imaging position encoder with submicron accuracy[C]//Proceedings of SPIE, 2013, 8788(1): 87882T.
- [12] Liu Libo, Zhao Hui, Zhang Haibo, et al. Research on spot subdivided locating method in laser triangulation measurement [J]. *Computer Measurement & Control*, 2008, 16(10): 1396–1398. (in Chinese)
- 刘立波, 赵辉, 张海波, 等. 激光三角测距中光斑细分定位方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(10): 1396–1398.