

文章编号:1004-4213(2011)12-1771-5

基于线阵探测器的单圈绝对轴角编码器

谈颖皓,袁波,孟子博

(浙江大学 现代光学仪器重点实验室;国家光学仪器工程技术研究中心,杭州 310027)

摘 要:为了解决轴角编码器尺寸与角度分辨率之间的矛盾,同时提高编码器的响应频率,提出了一种基于线阵探测器的单圈绝对式光电轴角编码器.该编码器使用了一种新型单圈绝对式编码盘,整个码盘只有一个码道,粗码被直接刻在这个单圈的码道上,码盘图像经光学放大后被线阵探测器接收.利用 FPGA 控制电路将数据传送至计算机,并对数据进行译码处理,分别利用图像处理技术读取粗码和利用像素细分技术获得细码,两者相结合得到角度信息.通过该技术设计一个码盘直径为 40 mm 的绝对式轴角编码器,其分辨率为 15 位.

关键词:绝对轴角编码器;单圈;像素细分;线阵探测器

中图分类号:TH741.2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114012.1771

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^[1].它具有结构简单、体积小、分辨率高、非接触、稳定可靠等优点,广泛应用于各种雷达、地炮指挥仪、光电经纬仪、数控机床、机器人、遥感、船舶航海等领域.根据编码方式的不同,传统的轴角编码器可以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、掉电后无须重新标定、无累积误差等优点,因而在实际应用中更为广泛的需求.

传统的绝对式轴角编码器编码盘尺寸和分辨率是一对矛盾^[2].分辨率越高意味着码盘上一个圆周内刻线数越多,刻线宽度就会越细,过细的刻线一方面可能形成衍射现象,不利于信号的读取;另一方面,对译码的要求也更高.为了解决现有绝对式轴角编码器存在的问题,已有的研究从编码方式^[3]、探测器件、硬件处理电路等方面对其进行了改进,比如:用单圈格雷码^[4]、矩阵编码^[5]等取代传统的多圈格雷码;用单个探测器逐位读数取代多个探测器^[6],用面阵探测器取代一般的单通道探测器^[7];基于数字信息处理器(Digital Signal Processing, DSP)^[8]、单片机^[9]设计硬件电路等.

本文设计了一种基于线阵探测器的单圈绝对式

轴角编码系统.它使用了全新的单圈绝对式编码盘,利用线阵探测器接收经过成像透镜放大的码盘图像.采用硬件电路实时获取和传输数据,最终由计算机对数据进行处理和译码并输出角度信息.本系统具有结构简单、尺寸小、分辨率高、响应频率高的特点.

1 系统结构

编码器的总体结构如图 1.它由光学子系统和信号处理子系统两部分组成.光学子系统包括光源、码盘、成像透镜和线阵探测器,码盘被光源照明,其图像经透镜放大后成像在线阵探测器上,线阵探测器像素行方向与码盘切向方向一致.信号处理子系

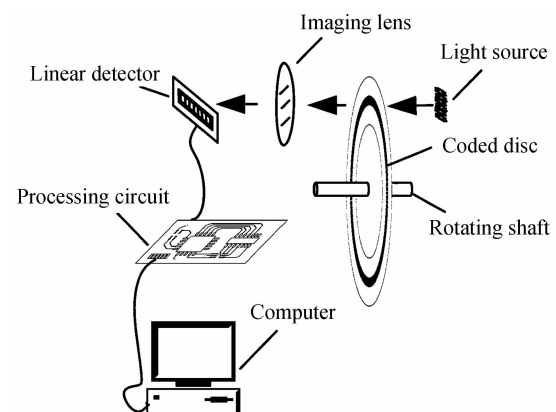


图 1 系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the system

基金项目:浙江省自然科学基金(No. Y1090391)资助

第一作者:谈颖皓(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为光电检测. Email: tanzju@163.com

导师(通讯作者):袁波(1978-),男,副研究员,主要研究方向为光电检测及图像处理. Email: yuanbo@zju.edu.cn

收稿日期:2011-08-17;修回日期:2010-08-30

统包括硬件电路和计算机,硬件电路接收探测器获得的码盘信号,并将其传输至计算机,最后通过译码输出角度信息.角度信息由粗码和细码两部分构成:粗码直接刻在码盘上,通过对线阵探测器检测到的数据分析可以获得;细码则利用线阵探测器的像素对粗码位置进行细分获得.

2 角度测量原理及分辨率

2.1 角度测量原理

角度信息由粗码和细码两部分组成.粗码直接刻在码盘的单圈码道上,它包含 n 个码元,每个码元为透光(1)或遮光(0)状态.这样通过读取码盘切向上一组粗码就可以得到一串二进制数据,假设所获得的二进制码对应的十进制值为 N ,则粗码读数为(注:本文中角度均以度为单位)

$$\theta' = \frac{360}{2^n} N \quad (1)$$

获得粗码信息后,再利用线阵探测器像素的空间均匀性实施细分,获得细码.如图2,线阵探测器所成像既要保证码盘转动到任意位置时,系统都能获得粗码信息,又要有利于像素细分,故线阵探测器所成像的大小等于一组单元码宽度的两倍为最佳.

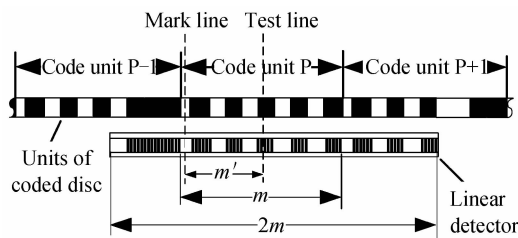


图2 细分原理

Fig. 2 Principle of subdivision

假设一组单元码所占的像素数为 m 个像素,用单元码上的标志线来表征粗码所在位置,它相对于线阵探测器上的检测线的偏离为 m' 个像素,则细码的读数为

$$\theta'' = \frac{360}{2^n} \frac{m'}{m} \quad (2)$$

故最终的测量角度可表示为

$$\theta = \theta' + \theta'' = \frac{360}{2^n} \left(N + \frac{m'}{m} \right) \quad (3)$$

2.2 分辨率分析

由式(3)可知编码器角度分辨率为

$$\delta = \frac{360}{2^n} \frac{1}{m} \quad (4)$$

根据像素细分原理^[2],细分是在粗码的基础上利用线阵探测器像素的空间均匀性进一步提高分辨率,而从式(4)中也可以看出,粗码的位数越多以及一组粗码在线阵探测器上所占像素数越多,角度分

辨率越高.但是,上述角度分辨率没有涉及到任何硬件参量,本文通过分析可以得到一个更具实际意义的分辨率公式.

假设 n 位编码盘单圈码道直径为 D ,它被分为 2^n 个区域,即 2^n 组单元码,每组单元码的宽度为

$$L = \frac{\pi D}{2^n} \quad (5)$$

图3为光学子系统结构放大图,码盘的局部图像经过成像透镜放大,被线阵探测器接收.码盘上一

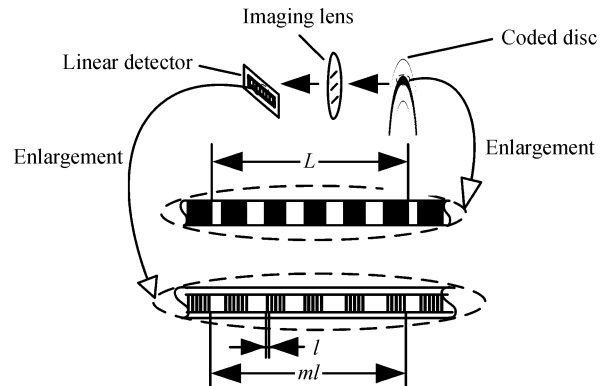


图3 单元码尺寸与线阵探测器像元尺寸的关系

Fig. 3 Relationship between the sizes of the code unit and the linear detector pixel

组宽度为 L 的单元码,经过成像透镜放大 Γ 倍,在线阵探测器上所占的像素数为 m 个,线阵探测器像元宽度为 l ,故 m 、 L 、 Γ 、 l 之间满足关系

$$L\Gamma = lm \quad (6)$$

由式(4)~(6)可得,角度分辨率与系统硬件参量的关系为

$$\delta = 360l / \pi D \Gamma \quad (7)$$

由式(7)可知,减小像元尺寸、提高成像透镜放大率和增大码盘尺寸均能提高编码器分辨率.但是,应该注意的是,这种改善是有限制的.

1) 像元尺寸 l 受到线阵探测器工艺限制,根据目前的工艺,像元尺寸可以达到几个微米;

2) 单圈码直径 D 受编码器机械结构尺寸的限制,为了保证编码器的小尺寸,码盘直径一般设计为几十毫米;

3) 成像透镜放大率由编码盘、成像透镜和线阵探测器三者之间的物象位置关系决定.当线阵探测器像元尺寸和码盘直径一定时,过大的放大倍率会使成像到线阵探测器上的码盘局部图像过大,导致无法获取一组完整的单元码,从而无法解析出角度信息.在实际的系统设计中,成像透镜焦距和系统机械尺寸对放大率也是有影响的.

3 码盘

根据角度测量原理,提出了适用于本系统的单

圈绝对式码盘的设计方案^[10],如图4。 n 位码盘在沿圆周方向等分成 2^n 组单元码,每组单元码由粗码和标识码组成,粗码携带有角度信息,它包括 n 个码元,每个码元有透光和遮光两种可能的状态,分别代表二进制码的“1”和“0”,粗码的编码方式有多种选择,如自然二进制码、格雷码、伪随机码等。标识码一方面用于区分相邻两组不同的编码,另一方面用于像素细分,它可以设计为不同的形式,如不同的点阵、符号或字母。图4中标识码选用了宽度不同于粗码码元宽度的1位透光码来表征。通常为了更好地地区分标识码和粗码,可以考虑在标识码和粗码之间加入遮光的分隔线。假设粗码、分隔线、粗码角宽度分别为 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ,则三者满足

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 360/2^n$$

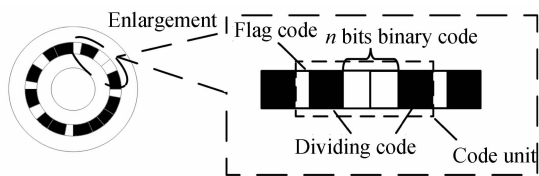
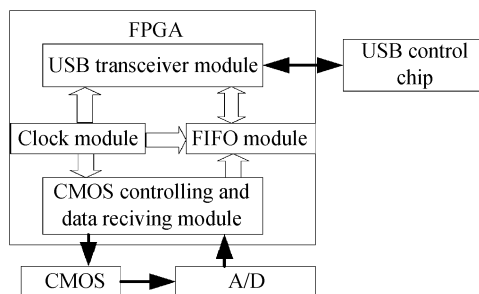


图4 码盘局部示意图

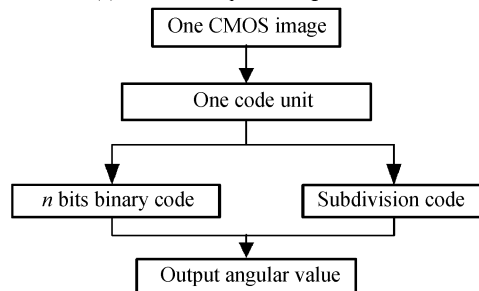
Fig. 4 Schematic diagram of the partial coded disc

4 硬件电路及软件设计

硬件结构如图5(a),主要由线阵CMOS、A/D转换、FPGA、USB控制芯片几个部分组成,其中,



(a) Structure of processing circuit



(b) Flow diagram of angular computation

图5 硬件电路结构图和软件流程图

Fig. 5 Structure of processing circuit and flow diagram of angular computation

FPGA内部由时钟模块、CMOS控制及数据接收模块、FIFO模块、USB收发模块几个部分组成:

1)时钟模块,它将输入的晶振时钟通过分频和

倍频,产生其他几个模块工作所需要得时钟频率。

2)CMOS控制及数据接收模块,它一方面用于产生驱动CMOS工作所需的控制信号及时钟信号并传送给CMOS,从而驱动CMOS在指定的模式下正常工作,另一方面用于接收经过CMOS的反馈信号和A/D转换后的CMOS数据。

3)FIFO模块,它用来缓存将要发送到上位机的CMOS数据,之所以要使用FIFO模块来缓存数据,这是因为从CMOS读取数据的速率与通过USB发送数据的速率不同,如果不进行缓存可能造成数据丢失或传输错误。

4)USB收发模块,它通过USB与上位机进行数据交换。

通过硬件电路获得来自CMOS的图像数据并将数据传输到上位机后,再用基于计算机软件来读取粗码和解调细码并最终获得角度信息。软件处理流程如图5(b)所示,上位机软件接收到由下位机传送来的一帧图像数据后,利用标识码获得一组完整的二值编码数据,对二值编码数据进行解码直接获得粗码信息,再利用像素细分得到细码信息,最后将粗码和细码相结合获得角度信息。需要注意的是,为了确保粗码识别和细分,应使线阵CMOS所检测到的码盘图像至少包含一组完整单元码。

5 编码器的性能分析

根据前文所提出的基于线阵探测器的单圈绝对式轴角编码技术,构建了一个如图6所示的实用的绝对式轴角编码器。光源选用高亮度红色LED,其峰值波长为625 nm;线阵探测器选用线阵CMOS(Hamamatsu公司,型号为S9227),像元宽度12.5 μm ,像素数为512个,响应速度最快9 750 lines/s;成像透镜采用三片式组合透镜结构,焦距3.92 mm,相对孔径1:2.8,透镜外形直径3.5 mm,在50 pl/mm

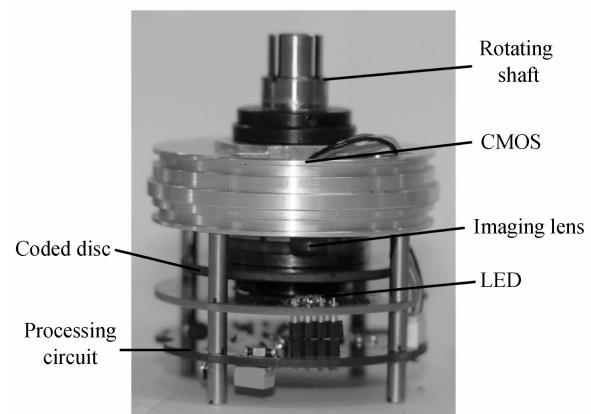


图6 编码器实验装置图

Fig. 6 Experimental setup of encoder

处的MTF值大于0.7(分辨率满足传感器的分辨率要求).编码器的码盘和信号处理子系统具体情况为:

1)码盘:通过刻蚀玻璃基底上的金属铬层制作而成,其直径为40 mm.单元码直接刻在码盘的单圈圆周上,由1组粗码和1位标识码组成,粗码采用7位自然二进制编码,每位码元角宽度为 $17'15''$,标识码的角宽度为 $8'$,标识码和粗码之间有角宽度为 $20'$ 的分隔线,可以容易得出每组单元码的角宽度为 $168'45''$.根据所选线阵探测器和所设计编码盘尺寸,可以估算出光学系统最佳放大率约为3.2倍.

2)信号处理子系统:硬件电路选取FPGA作为主控芯片,型号为EP2C5T144(Altera公司),用Quartus II软件进行编程设计,实现各模块功能,将从CMOS采集到的图像数据发送到计算机.选用Microsoft visual C#进行软件设计,对接收到的数据进行分析处理,绘制出波形图,按照角度测量原理,译码得到角度结果,并予以显示.

在上述硬件参量条件下,对轴角编码系统的可行性和可靠性进行实验验证.测量所用的软件界面如图7(a)所示,包括角度测量控制、角度结果显示和信号波形图,角度测量控制由按钮“接收数据”来实现;角度结果显示在文本框中,以度分秒的形式表示;信号波形图显示在图像框中,它由一串二值化数据绘制而成.在某一角度位置处所获得的信号波形如图7(b)所示,F为标识码中心所在位置,I为分隔线中心所在位置, A_7-A_1 和 B_7-B_1 为相邻两组粗码,从图中可以直接读出, A_7-A_1 粗码为“0111001”, B_7-B_1 粗码为“0111010”,由此可见,本系统对于粗码的检测是完全可靠的.在获得粗码以后,对A单元码

进行细分,选取最左边的标识码的中心像素作为A单元码标志线所在位置,与线阵探测器上固定的单像素检测线相结合解出细码为 $-2^{\circ}5'10''$,从而得到角度结果为 $158^{\circ}13'35''$.

根据本系统所选硬件参量计算可得,理论角度分辨率约为 0.011° (即约为 $40''$),相当于15位编码盘的分辨率.另外,本系统具有较高的响应频率,所选CMOS响应速度最快为9 750 lines/s,USB的传输速度可达到10 MByte/s以上,FPGA的处理速度和计算机软件处理速度均远大于CMOS的响应速度,由此可知系统的响应频率理论最高可达9.75 kHz.但是在实验中,受到各因素的影响,实际的响应频率会小于该理论值.

6 结论

本文设计了一种基于线阵探测器的单圈绝对轴角编码器.它使用了一种全新的单圈绝对式编码盘,运用线阵CMOS接收经过成像透镜放大的码盘图像.基于FPGA的硬件电路将CMOS探测到的码盘图像传送至计算机进行译码处理,获取角度信息.本系统在缩小码盘尺寸的同时提高了角度分辨率,在使用7位绝对式编码盘的基础上运用像素细分技术将编码器分辨率提高到15位,达到了系统小型化、高分辨率的目的.另外,采用线阵CMOS作为光电探测器,在确保正确译码情况下,理论的最高响应频率可达9.75 kHz.

在不改变编码盘及成像系统的条件下,编码器分辨率的进一步提高可采用亚像素细分技术,这也是进一步研究的一个主要方面.

参考文献

- [1] CHEN Yun, ZHAO Xing-guo. Research single-ring absolute photoelectric shaft encoder[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 230-233.
陈贇, 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] WANG Ying-nan, YUAN Bo, NI Xu-xiang. 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.
- [3] CHEN Yun, ZHANG Hong-sheng. Coding modes of photoelectric shaft encoders and their developing trend[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(2): 126-133.
陈贇, 张红胜. 光电轴角编码器的编码方式及其发展趋势[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(2): 126-133.
- [4] XIONG Wen-zhuo, YAN Long-jun, CHU Guang-sheng, et al. Research of metal single-track absolute rotary encoder[J]. *China Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(10): 318-321.

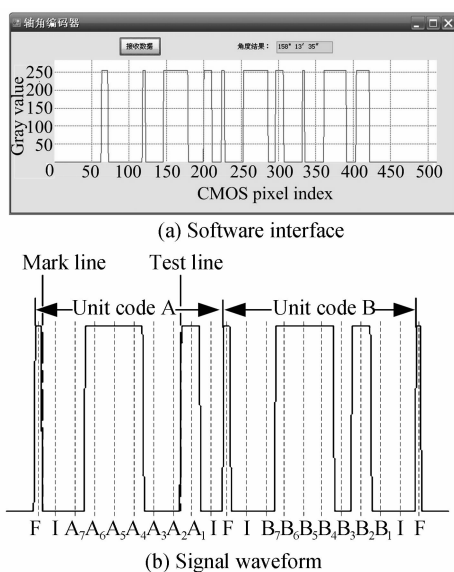


图7 软件界面图和信号波形图

Fig. 7 Software interface and signal waveform

- 熊文卓, 严龙军, 楚广生, 等. 金属盘单码道绝对式轴角编码器的研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, **30**(10): 318-321.
- [5] ZHAO Zhi-wei, CHEN Yun. A new type of absolute shaft photoelectric encoder based on metal code disc[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, **23**(5): 656-659.
- 赵志巍, 陈贲. 一种基于金属码盘的新型绝对式光电轴角编码器[J]. 传感技术学报, 2010, **23**(5): 656-659.
- [6] QIU Cheng, ZHU Heng-jun. Absolute optical encoder with single code detector based on the serial encoding method[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(2): 262-265.
- 邱成, 朱衡君. 采用单读码器件的串行编码绝对式光学编码器[J]. 光学技术, 2007, **33**(2): 262-265.
- [7] SUGIYAMA Y, MATSUI Y, TOYODA 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.
- [8] CHEN Xing-lin, LIU Yang, LÜ Heng-yi. Research on new decode method of photoelectrical encoder[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, **29**(2): 19-21.
- 陈兴林, 刘杨, 吕恒毅. 一种新型光电轴角编码器译码方法研究[J]. 传感器与微系统, 2010, **29**(2): 19-21.
- [9] SUN Ying, WAN Qiu-hua, WANG Shu-jie, *et al.* Design of signal process system for spaceborne photoelectric encoder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(5): 1182-1188.
- 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.
- [10] XIONG Jin-wang, JIA Ping, LIU Jing-hong, *et al.* Research on coding for photoelectric shaft encoder based on image sensor[J]. *Measurement and Control Technology*, 2009, **28**(12): 6-9.
- 熊金旺, 贾平, 刘晶红, 等. 利用图像传感器的光电轴角编码器编码研究[J]. 测控技术, 2009, **28**(12): 6-9.

A Single-track Absolute Angular Encoder Using the Linear Detector

TAN Ying-hao, YUAN Bo, MENG Zi-bo

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation; CNERC for Optical Instrument, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between the disc size and resolution, and to attain the high response speed, a new photoelectric absolute angular encoder is proposed based on a single-track coded disc and a linear detector. A new single-track absolute coded disc is used in the encoder. The encoded units are directly carved on one track. The image of coded disc is magnified by the imaging lens, and received by the linear detector. The FPGA control circuit sends the data of image to the computer for data processing. An integrated 7 bits binary code is obtained by image processing and the subdivision code unit is gained by pixel subdivision technique respectively, which are both contributed to the angular information. An absolute angular encoder, which contains a diameter of 40 millimeter code disc, is designed based on the technique. Its resolution can reach 15 bit.

Key words: Absolute angular encoder; Single-track; Pixel subdivision; Linear detector