文章编号 1674-2915(2009)01-0126-08

光电轴角编码器的编码方式及其发展趋势

陈 赟,张红胜
(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:光电轴角编码器是以码盘或计量圆光栅为核心元件的测角传感器。近年来,为满足光电轴角编码器小型化、智能化、集成化,特别是小型化的要求,各国在缩小光电轴角编码器的尺寸方面做了大量的研究工作,尤其是对编码方式的研究。本文主要介绍了目前光电轴角编码器的编码方式及编码原理,在对现有编码方式详细解读的基础上对制约光电轴角编码器快速小型化的因素进行了分析,认为影响编码方式成功实施的主要因素是发光和接收元件的尺寸。文中展望了光电轴角编码器编码方式的发展趋势,提出编码方式多样化和码道数量少量化有助于缩小光电编码器尺寸,加速其小型化的发展。

关 键 词:光电轴角编码器;编码方式;编码原理
中图分类号:TP212.14; TN762 **文献标识码**:A

Coding modes of photoelectric shaft encoders and their developing trend

CHEN Yun, ZHANG Hong-sheng

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

Abstract: The photoelectric shaft encoder is a sensor to measure angles based on a code disc or a metrological grating disc. Recently, to meet the requirements of miniaturization, intelligence, integration of the photoelectric shaft encoders, a lot of research work are developed to reduce the sizes of photoelectric shaft encoders in many countries, especially in research on the coding modes. In this paper, the coding modes and coding theory are introduced. Then, based on explaining the coding modes in detail, the restricted factors of miniaturizing photoelectric shaft encoders are analyzed. The results indicate that effect factors on coding modes are the sizes of luminescent and receive elements. Finally, it discusses the developing trend of the coding modes of photoelectric shaft encoders and suggests that the variety of coding modes and miniaturization of code lines will be conductive to minimize the sizes of encoders and speed up the development of photoelectric shaft encoders.

Key words: photoelectric shaft encoder; coding mode; coding theory

---

收稿日期:2009-01-11;**修订日期**:2009-03-13
基金项目:中国科学院"优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金"资助项目(No. 076131G070)

1　引　言

光电轴角编码器又称光电角位移传感器,是集光、机、电于一体的一种数字测角装置[1~4]。与其它同类用途的传感器相比,光电轴角编码器具有分辨率高、精度高、测量范围广、易于维护等优点,因此,被广泛应用于航空航天、自动控制和高精度闭环调速系统等诸多领域。随着科技的发展,上述领域对微型传感器的需求越来越迫切,要求光电轴角编码逐步向智能化、集成化、高精度、高可靠性,特别是向小型化方向发展。因此,国内外光电轴角编码器的厂家和研发机构为缩小光电轴角编码器尺寸做了大量的研发工作,而编码方式是缩小光电编码器尺寸最为显著的方法之一,本文详细介绍了光电轴角编码器目前使用的编码方式及其原理,并对其发展趋势进行了分析。

2　光电轴角编码器的编码方式

光电轴角编码器分类是按照其核心元件—码盘或圆光栅盘图案的编码方式来定义的,目前的编码方式有如下几种。

2.1　增量式编码方式

增量式编码由等间隔的刻线组成,对应每一个分辨率区间,可输出一个增量脉冲,计数器相对于基准位置(零位)对输出脉冲进行累加计数,正转则加,反转则减,如图 1 所示。该种编码方式之所以称为增量式编码方式是因为它无法给出光电轴角编码器转过的绝对位置,只是相对零点的累计位置。因此其优点是编码简单,易于实现光电轴角编码器的小型化;缺点是受环境因素影响较大,如突然断电或干扰后容易造成数据丢失或增加,出现误差,并具有积累现象[5,6]。它是目前增量式光电轴角编码器的主要编码方式。

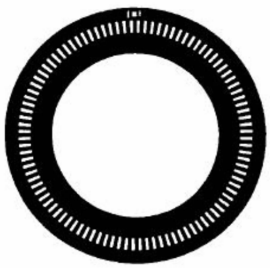

图 1　增量式编码

Fig. 1　Incremental coding

2.2　自然二进制编码方式

自然二进制编码按照位数进行编码,即将一个圆周分成 2^n 等份,2 的方次数 n 称为码盘的位数,显然位数 n 越大,每一个等份的角度值越小,编码器的精度也就越高,见图 2。该种编码方式的优点是组成的图案直观,无需转换,可以直接读出转角大小;缺点是容易错码,即读数时易产生粗大误差[7]。它是早期绝对式光电轴角编码器的一种编码方式,目前已经很少使用。

图 2　自然二进制码编码

Fig. 2　Binary coding

2.3　周期二进制编码方式

周期二进制编码也称循环码、反射码、格雷码,是由自然二进制码转换而得[8]。该种编码方式的特点为:

(1)第一圈和第二圈均刻一条线,相位错开 $\pi/2$;

(2)第三圈起每圈刻线数为 2^{n-2};

(3)第 n 圈码道的亮区中心位于第 $n+1$ 圈码道的暗区中心,如图 3 所示。

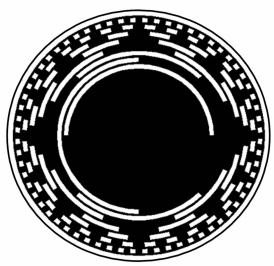

图 3　周期二进制编码

Fig. 3　Period coding

该种编码方式的优点是读数时不会产生粗大误差;缺点是不便于阅读也无法直接运算,因此必须将它译成自然二进制码。它是目前绝对式光电轴角编码器中应用最广泛的一种编码。

2.4 二—十进制编码方式

二—十进制编码是在10以内采用二进制,满10后向相邻高位进位。在这个系统中既有二进制,又有十进制,故称二—十进制,如图4为二—十进制图案展开图。由该图可知,在二—十进制中码道的刻划是以20为一个周期的,也就是说,A_2、A_3、A_4、A_5 4条码道完成一个循环需要转过20个数,另外,码道的线周期不一致。二—十进制码型还有其它形式,如8421码、余三码等[9],在此不一一列举。

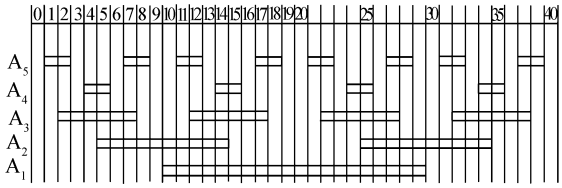

图4 二—十进制编码

Fig. 4 Binary-algorithm coding

该种编码方式的优点是符合人们的日常习惯,缺点是译码不方便。

2.5 六十进制编码方式

六十进制编码是按照角度进位的方式进行编码的,因此也称度、分、秒进制码,该方式只用于特殊场合。

2.6 矩阵式编码方式

矩阵式编码是将整个圆周分成若干个扇形区间,每个区间刻有不同位数的码道,即把若干位排列在同一码道上,然后用若干个读数头读取矩阵编排的电信号,经矩阵译码处理成与传统编码盘相同的二进制循环周期码[10]。目前常用的矩阵式编码方式为四矩阵式,即把四位刻在同一圈上,如图5所示。该种编码方式的优点是大大减少了码道圈数,可实现绝对式光电轴角编码器的小型化。缺点是安装偏心和轴晃动造成码道间的圈间位置误差量要比传统编码盘大得多,处理电路比较复杂,增加了装调难度。该种编码方式的缺点在长时间的应用中得到了解决,而其优点又是上述5种编码方式无法比拟的,所以,它是目前绝对式光电轴角编码器应用最广的一种编码方式,80%以上的绝对式光电轴角编码器都是采用矩阵式编码方式。

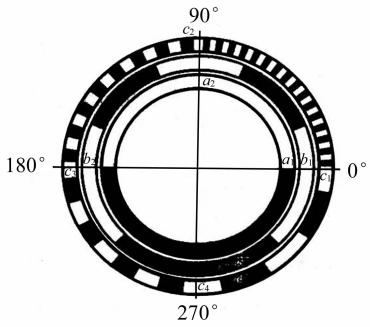

图5 矩阵式编码

Fig. 5 Matrix coding

2.7 准绝对式编码方式

准绝对式编码由循环码道和索引码道组成,循环码道仍然由一系列均匀交错的遮光和透光光栅线条组成;索引码道则由与每一对透光/遮光栅线位置对应的透光或遮光的窗口组成,连续的几个窗口类似于条形码,它们共同构成对某一位置的编码,即位置编码的各有效位是沿圆周(切向)连续地分布于同一索引码道内的[11],如图6所示。该种编码方式的译码是在索引码道上沿圆周方向放置多个光电探测器,通过位置编码自身的序号和循环码道上输出的信号,把读取的信号串联在一起决定其位置。优点是减少了码道数,降低了刻划难度,可实现光电轴角编码器的小型化;缺点是必须经过自引导过程才能获得第一个位置编码。

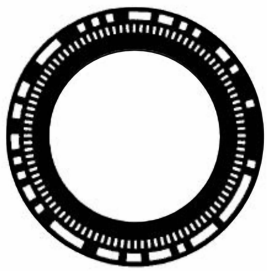

图6 准绝对式编码

Fig. 6 Virtual absolute coding

和它相似的编码方式还有串行编码方式[12],在此不做详述。

2.8　伪随机码编码方式[13,14]

伪随机码编码是根据 ROM 储存原理进行编码的,即把表 1 中 N_1、N_2、N_3任意一列(如 N_1)刻制到码盘上,形成码道 A_1,码宽为 45°,另一条码道 A_2,是一条 8 脉冲增量码道,如图 7 所示。N_{11}、N_{12}、N_{13}代表 3 个检测头(狭缝),为了避免读码错

表 1　ROM 输入输出的对应关系

Tab. 1　Relation of input and output of ROM

码盘位置	N_1	N_2	N_3	ROM
0°	0	0	0	000
90°	0	0	1	001
135°	0	1	1	010
180°	1	1	1	011
225°	1	1	0	100
270°	1	0	1	101
315°	0	1	0	110
360°	1	0	0	111

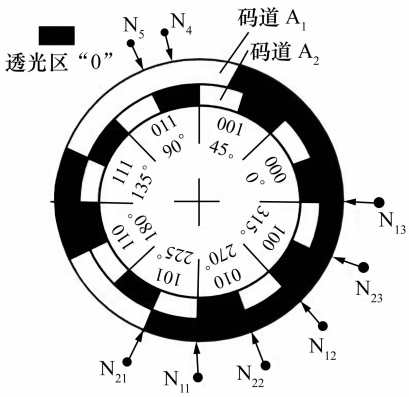

图 7　伪随机码编码

Fig. 7　Coding of pseudorandom code

误,在与 N_{11}、N_{12}、N_{13}对应相差 90°相位差的位置上再放置一组狭缝 N_{21}、N_{22}、N_{23}。狭缝 N_4、N_5对码道 A_2进行读取,产生低 2 位。当 N_4为 0 时,N_{11}、N_{12}、N_{13}读取的正好是码道 1 上亮码或暗码的中间 22.5°的部分,不会读到转换点,所以 N_{11}、N_{12}、N_{13}的值作为 ROM 的地址输入。当 N_4为 1 时,取 N_{21}、N_{22}、N_{23}的值作为 ROM 的地址输入。按照表 1 ROM 和角度的对应关系,便可以给出光电轴角编码器旋转的角位置。理论上讲这种编码无论多少位需要的码道只有 2 到 3 条,因此可以减小码盘外径,制造出更小巧的编码器。但随着位数的增加,需要的读数头或狭缝也成倍地增加,增加了结构的复杂程度,因此,很少用于高位数光电轴角编码器中。

2.9　游标式编码方式[15,16]

游标式编码是依据游标卡尺的原理进行编码的,即在码盘上刻有 2 ~ 3 圈码道,码道之间依次错开一定的相位,如图 8 所示,外圈刻有 n 条线条,次外圈刻有 $n-m$ 条线条,里圈刻有 $n-m-1$ 条线条。它是通过对着码道放置两个相位差为 π 的 PDA(Photodiode Array)来提取光电信号,通过译码确定光电轴角编码器的角位置。该种编码方式是日本东京的 Yokogawa 电子公司研制的。

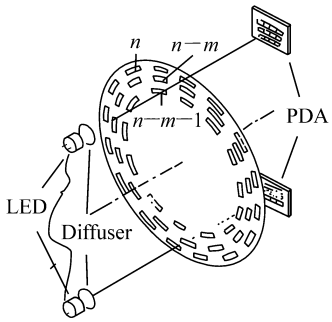

图 8　游标式编码

Fig. 8　Vernier-type coding

2.10　M 码编码方式[17]

M 码编码是由日本的今井基胜提出的,把通过径向获取的位置方式改为切向,如图 9 所示。M 码与二进制码一样,当绝对位置相邻两位变化时,读出数据可能同时两位或两位以上发生变化,产生粗大误差。为了克服粗大误差,在码盘上又

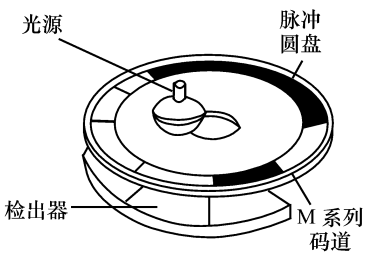

图 9　M 码编码

Fig. 9　M-code coding

刻了一圈与M码相同脉冲数等间隔的增量码道，和准绝对式编码方式类似。M码虽然提出了刻制一条码道的编码方法，却增加了辅助码道，整体结构没有得到简化，所以该编码方法没有脱离传统的编码思路。

2.11 多圈绝对式M码编码方式[18,19]

多圈绝对式M码编码是在M码编码方式的原理上结合增量式编码方式进行编码的，它由3~5圈以上码道组成，其中最外圈或最里圈是两圈位数相同的M码，提供绝对位置数据；次外圈为起始码道，即零位（3圈M码没有该码道）；第三圈和第四圈分别为宽度相等的刻线，起到细分的作用，如图10所示。

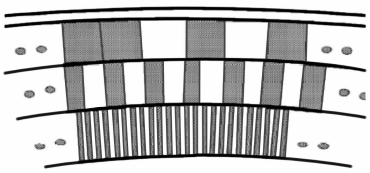

图10 多圈绝对式M码编码

Fig. 10 Coding of multitrack M-code

2.12 简码编码方式

简码编码是在Gray码和M系列绝对码的基础上通过数理统计的方式进行编码的[20]，它由基码（包括滚动码和质码）组成，基码的位置分布具有对称性，基码和质码的个数按照下述公式得出：

$$\begin{aligned} &n\text{为偶数时：}K_{\text{Fundamental code}}=(2^n-2^{n/2})/n,\\ &n\text{为奇数时：}K_{\text{Fundamental code}}=2^n/n, \end{aligned} \tag{1}$$

n为位数；K取正整数，余数作为质码的个数。

根据式（1）可以编制任意2^n简码数据表，根据数据数据表做出的同阶2^n简码的码盘图案，如图11所示。该种编码方式可以极大地缩小光电轴角编码器的尺寸，但由该编码刻制的码盘构成的编码器仍需要和狭缝盘配合提取信号，而且简码位数决定狭缝盘上的狭缝数和光电接收元件数，因此无法制作高位数的编码器。

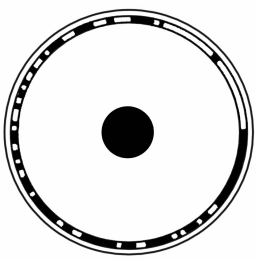

图11 简码编码

Fig. 11 Coding of simple absolute code

2.13 图像编码方式

图像编码方式由基准线（长竖直线）、位数码（中间两行）和行标志（最底的一行）组成[21]，如图12所示。它是根据图像识别的原理进行编制的，即位数按照行和每行所包含的位数决定，图12中有两行位码，每行4位，即该图形为8位。刻线间隔及大小由CCD尺寸、光学系统放大倍数和光电轴角编码器的分辨率决定。该种编码方式的解码是借助图像处理芯片与软件共同完成的，在美国航天局中得到应用，是一种不同于传统编码的一种编码方式。

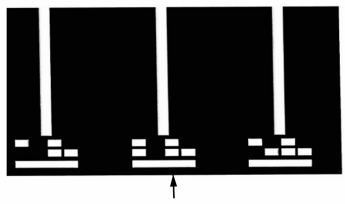

图12 图像编码

Fig. 12 Image coding

2.14 单圈绝对式编码方式[22,23]

单圈绝对式编码方式也称为单道绝对式[24]或位移连续编码[25]，其基本编码原理基本相同，即编码由位数等长的0,1组成。它的任何一个编码的后继编码可视为其前趋编码平移一位后再补一个“1”或“0”，对于具有n位的单圈绝对式编码，在相邻两个编码中有连续$n-1$位是相同的，其编码原则是在整个编码序列中不得有重码。通过相关的算法由某种高级计算机语言生成由“0”和“1”组成的排列，然后按照排列刻制码盘。该种编码方式是把传统绝对式的径向排列转变成切向排列来决定角度绝对位置，通过CCD等图像芯片及相关的解码算法给出角位移信息。

2.15 距离码编码方式

距离码编码由一圈增量式编码和一圈标记不同角距离的距离码组成，是介于绝对式和增量式

之间的一种编码方式,如图 13 所示。外圈为增量式码道,提取出来的信号用于电子学细分;内圈为若干个间距不等的参考标记点,即距离码。距离码的位置在整个圆周是唯一的,通过移动扫描任意相邻的两个距离码,系统即可识别出绝对位置。该种编码方式的优点是码道数少,缺点是识别绝对位置仍需转动一个小角度,即没有起到完全绝对式编码的作用。

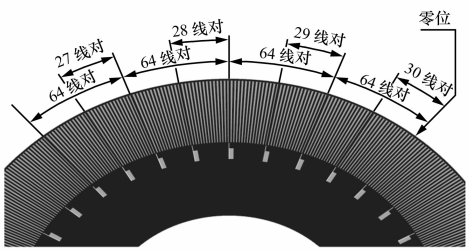

图 13　距离码编码方式

Fig. 13　Coding of distance-code

3　编码方式的发展趋势

随着国防、自动控制等行业的发展,对光电轴角编码器的小型化、智能化、集成化特别是小型化的要求越来越迫切,而制约光电轴角编码器小型化的因素有多种,编码方式是其中一个主要因素,为此,各国本行业的厂家和研发机构都做了大量的研究工作,如上述提及的游标码、图像码以及未作详解的 Heidenhain 距离码等。笔者认为,影响编码方式成功实施的主要因素是发光和接收元件的尺寸。因为,随着半导体行业的快速发展,光刻行业得到了迅猛的提升,45 nm 线宽已是目前光刻线条的主流,但现在码盘、光栅盘线条宽度在 10 μm 以上,究其原因主要是和发光和接收元件的尺寸有关,特别是接收元件的尺寸。若发光和接收元件的尺寸缩小 2 倍,则码道的长度和码道与码道之间的间隔也随之缩小相同的倍数,这样,同样位数的码盘的尺寸便可以大幅度地缩小;另外,若发光和接收元件的尺寸大幅度缩小了,占目前绝对式光电轴角编码器 80% 以上的矩阵式编码方式便可以由目前的四码道一圈发展到八码道一圈甚至更多,这样码道数量便可成倍数地缩小,对促进新型的编码方式发展起到推进作用,最终达到 S 缩小编码器尺寸的目的。日本的编码方式之所以多样化,譬如 M 码、多圈 M 码、单圈绝对式码、游标码、准绝对式码等,主要原因之一是因为日本的集成化程度较高,能把接收元件按特定排列集成化(简称光电探测器),光信号通过集成的光电探测器后便可以把原始信号直接转变成传统的四路信号进行后续电处理,如游标码的 PDA,多圈 M 码特制的光电探测器,都为该种编码的成功运用起到至关重要的作用,从而使日本的编码器小型化始终走在世界的前列。

通过上述分析还可以看出,增量式编码方式没有太大的变化,把增量式和绝对式相结合也是其发展的一种趋势;而绝对式编码方式则由传统的位数和圈数成正比逐渐向单圈或两圈发展。总之,为了缩小光电轴角编码器的尺寸,编码方式多样化,码道数量少量化是今后光电轴角编码器编码方式的发展趋势。

4　结束语

上述编码方式中,在目前光电轴角编码器中得到广泛应用的是增量式、循环码及矩阵式编码方式;游标式、多圈 M 码、单圈绝对式、图像码、距离码、准绝对式等新型编码方式已在国外相关行业中得到了应用,而国内应用于工程中的只有距离码和准绝对式编码方式,绝对简码、单圈绝对式、伪绝对式等只是作为相关文献出现过,未见应用在工程中的相关文献或报道。通过对现有编码方式的原理及其优缺点进行详细介绍,对其发展趋势给予分析,为国内从事光电轴角编码器的同行提供一定的参考,旨在缩短和国外的差距。

参考文献:

[1]　贝治发,丁林辉. 绝对式智能多圈编码器[J]. 光学 精密工程,1995,3(4):32-36.
BEI ZH F,DING L H. A intelligent multi-turn absolute angle encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*,1995,3(4):32-36. (in Chinese)

[2]　董莉莉,熊经武,万秋华. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学 精密工程,2000,8(2):198-202.

DONG L L, XIONG J W, WAN Q H. Development of photoelectric rotary encoders[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 198-202. (in Chinese)

[3] 孔智勇,赵红颖,熊文卓,等. 采用衍射、干涉技术提高光电轴角编码器的测角精度和分辨率[J]. 光学 精密工程, 2001, 9(3): 260-264.
KONG Z Y, ZHAO H Y, XIONG W Z, *et al.*. Improving angle-measuring precision and resolution of photoelectric rotary encoders using diffraction interference technology[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2001, 9(3): 260-264. (in Chinese)

[4] 佘琳,冯长有,丁林辉. 两步法测量编码器测角误差[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(1): 66-70.
SHE L, FENG CH Y, DING L H. Measurement of encoder errors with two-step method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(1): 66-70. (in Chinese)

[5] 徐洲,胡晓东,罗长洲,等. 增量式轴角编码器的电子细分及零位处理[J]. 光子学报, 2002, 31(1): 1497-1500.
XU ZH, HU X D, LUO CH ZH, *et al.*. The electronic multiplication and interpolation of incremental optical encoder with reference mark[J]. *Acta Photonic Sinica*, 2002, 31(12): 1497-1500. (in Chinese)

[6] 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): 90-95.
TANG T J, CAO X Q, LIN B. Developing current situation and the trend of photoelectric - angular encoder[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(1): 90-95. (in Chinese)

[7] 马宏. 精密刻划工艺[M]. 北京:兵器工业出版社, 1994.
MA H. *Precise Photolithographic Technics*[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1994. (in Chinese)

[8] 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.
YE SH X. *Photoelectronics Displacement Precise Measurement Technique*[M]. Chengdu: Sichuan Technology Press, 2003. (in Chinese)

[9] 宋光爱, 姚博文. 余三反射循环码盘式 A/D 变换器的编程法[J]. 农田水利与小水电, 1990, (5): 8-11.
SONG G A, YAO B W. Program method of remainder three reflection cycle code A/D convertor[J]. *Fram Irrigation Works, Water and Electricity*, 1990, (5): 8-11. (in Chinese)

[10] 曹振夫. 小型绝对式矩阵编码器[J]. 光学机械, 1985, 5: 65-70.
CAO ZH F. Mircro absolute matrix encoder[J]. *Optics and Machine*, 1985, 5: 65-70. (in Chinese)

[11] 罗长洲,陈良益,孙岩,等. 一种新型光学编码器[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(1): 104-108.
LUO CH ZH, CHEN L Y, SUN Y, *et al.*. A new optical encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(1): 104-108. (in Chinese)

[12] 邱成,朱衡君. 绝对式光学编码器串行编码方法的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 723-725.
QIU CH, ZHU H J. Research on serial encoding method for an absolute optical encoder[J]. *Optical Technique*, 2006, 32(5): 723-725. (in Chinese)

[13] 罗世魁,王国强,王继新,等. 伪随机码在绝对式光电轴角编码器中的应用[J]. 光学 精密工程, 2003, 11(6): 596-601.
LUO SH K, WANG G Q, WANG J X, *et al.*. Application of pseudorandom code in absolute photoelectric angle encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 596-601. (in Chinese)

[14] PETRIU E M. Absolute-type position transducers using a pseudorandom encoding[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1987, 36(4), 950-955.

[15] UEDA T, KOHSAKA F, IINO T, *et al.*. Optical absolute encoder using spatial filter[J]. *SPIE*, 1987, 814: 217-221.

[16] KOHSAKA F, Iino T, KAZAMI K, *et al.*. Multiturn absolute encoder using spatial filter[J]. *JSME International J.*, 1990, 33(1): 94-99.

[17] 今井基胜. 光学式ロータリ エンコータの最新动向[J]. センサ技术, 1990, 7: 26-30.

[18] MATSUZOE Y, TSUJI N, NAKAYAMA T, *et al.*. High-performance absolute rotary encoder using multitrack and M-code [J]. *Opt. Eng.*, 2003, 42(1): 124-131.

[19] MATSUZOE T, NAKAYAMA T, TSUJI N, *et al.*. High performance absolute optical encoder using M-code[J]. *SPIE*, 2001, 4564: 280-289.

[20] 郁有文,常健. 绝对码编码器中一种新型的编码方法[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4):541-544.
YU Y W,CHANG J. A modern coding way of absolute encoder[J]. *Chinese J. Sci. Instrument*,2004,25(4):541-544. (in Chinese)

[21] LEVITON D B. Image processing for new optical pattern recognition encoders[J]. *SPIE*,2000,4113:32-40.

[22] 陈赟,孙成浦,何惠阳. 单圈绝对式码盘编码方法的研究[J]. 光子学报,2006,35(3):460-463.
CHEN Y,SUN CH P,HE H Y. Research on the encoding method of single ring absolute code disc[J]. *Acta Photonic Sinica*,2006,35(3):460-463. (in Chinese)

[23] 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.
SU H B,LIU E H. Research on single-ring absolute encoder and its applications[J]. *Opt. Precision Eng.*,2002,10(1):74-78. (in Chinese)

[24] 杨俊志. 单码道绝对式角度编码器的编码及解码原理[J]. 仪器仪表学报,2004,25(4)增:139-141.
YANG J ZH. New coding and demodulation method for absolute single-track encoder[J]. *Chinese J. Sci. Instrument*,2004,25(4):139-141. (in Chinese)

[25] 郑洪,林昌东. 位移连续编码原理的研究及应用[J]. 计量学报,2003,24(1):29-31.
ZHENG H,LIN CH D. Research and application of theory for shift sequence code[J]. *Acta Metrological Sinica*,2003,24(1):29-31. (in Chinese)

作者简介:陈　赟(1976—),男,山东郓城人,博士,副研究员,主要从事码盘、光栅盘的精密刻划、镀膜和检测方面的工作和研究。E-mail:tutorye@163.com。