

文章编号 1004-924X(2016)增-0169-06

小型伪随机绝对式光电编码器芯片

殷景志, 余芝帅, 彭 灿, 慕雨松, 常玉春*

(吉林大学 电子科学与工程学院 集成光电子学国家重点联合实验室, 吉林 长春 130012)

摘要:为了解决传统绝对式编码器体积大和精度低的问题,设计了一种基于 M 码伪随机序列的绝对式编码器芯片。在综合考虑各种绝对式编码方式优缺点的前提下,提出采用单圈 M 码道的设计,避免了传统的多圈绝对式编码器码道数目较多、尺寸较大的缺点,有利于绝对式编码器的小型化。接着,采用 M 码道与增量式精码道相配合的方式,利用芯片内部 ADC 对精码进行细分,在尽量避免外部噪声的前提下,将编码器的分辨率提高到 19 bit。最后,针对编码器的细分误差,采用基于径向神经网络的误差补偿算法,可以将编码器的细分误差降低 2 至 3 倍,有效提高了编码器的系统精度。仿真结果表明校正后系统的标准偏差为 $8.4''$ 。该绝对式编码器体积小、精度高、可靠性高,具有一定的工程应用价值。

关键词:光电编码器;绝对式编码器;芯片;细分误差;伪随机编码;误差补偿

中图分类号:TP212.1;TP762 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162413.0169

Application of pseudo-random code in miniature absolute encoder chip

YIN Jing-zhi, YU Zhi-shuai, PENG Can, MU Yu-song, CHANG Yu-chun*

(State Key Laboratory on Integrated Optoelectronics, College of Electronic Science & Engineering, Jilin University, Changchun 1300012, China)

* Corresponding author, E-mail: changyc@jlu.edu.cn

Abstract: To solve the problem of large volume and low precision for traditional absolute encoder, an absolute encoder chip based on the M-code pseudo-random binary sequence was designed. With overall consideration of advantages and disadvantages of absolute encoding mode, the sing M-code track was designed for avoiding the multi-track and large size of the traditional multi-loop absolute encoder track, thus realizing the miniaturization of absolute encoders. Subjected to the interpolation of the internal ACD, the combination of the M-code channel with the incremental precise-code channel can highly improve the resolution of the absolute encoder to 19 bit with a rather low external noise. Finally, an error compensation algorithm based on the neural-network were adopted to reduce the subdivision error by twice or three times, thus the system precision of the encoder was greatly improved. After compensation, the standard deviation of the encoder system is $8.4''$. The absolute encoder can basi-

收稿日期:2016-05-28;修订日期:2016-06-18.

基金项目:中国国家自然科学基金资助项目(No. 61274023);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(No. NCET-12-0236);吉林省发展和改革委员会资助项目(No. 2015Y041);吉林大学研究生创新研究计划资助项目(No. 450060523254)

cally meet the requirements for small volume, high precision and high reliability, with certain engineering application values.

Key words: photoelectric encoder; absolute encoder; chip; subdivided error; pseudo-random coding; error compensation

1 引言

光电编码器是一种软硬件结合且集光、机、电系统于一体的高精度测角装置,具有分辨率高、体积小、维护简单、无接触测量等优点,因此在自动化、国防科技、航空航天等领域得到越来越多的应用。根据原理,光电编码器可以分为增量式和绝对式两种。其中,绝对式编码器可以在工作的任意时刻输出绝对位置码,具有无累积误差和掉电后信息不丢失的特点,因此在精确控制和测量领域,成为增量式编码器无法替代的选择^[1-4]。近些年,航空科技领域和高精密工业对高端传感器的要求不断提高,编码器技术正朝着高分辨率、高精度、小型化、标准化、高速处理的方向发展。在编码器专用芯片研制和生产领域,德国的海德汉公司与美国的安华高公司达到了全球领先水平,其产品种类及参数均达到业界最高。海德汉公司生产的增量与绝对式混合的编码器达到 27 位,分辨力为 $0.01''$,精度为 $0.036''\text{RMS}$,远超同类产品。而国内对于高端绝对式编码技术的研究起步则相对较晚,一些技术瓶颈尚待突破,如新型的编解码算法、光电转换效率较低等问题^[5-7]。近年来,由于 M 序列伪随机码在数理统计和实现上的优势,使其成为国内外单码道绝对式编码技术的研究热点之一,也成为国内高端绝对式编码器发展的方向之一。

为了有效地减小绝对式编码器的体积,提高编码器的精度,本文提出的新型伪随机绝对式编码器的设计^[8]。采用了单圈伪随机 M 码道的设计,有效规避了传统绝对式编码器的码道数目较多、体积较大的缺点。同时采用 M 码道与增量式精码道相配合的工作方式,配合 ADC 细分和误差校正算法,可以大幅提高绝对式编码器的分辨率和精度,使编码器的分辨率达到 19 bit,标准偏差值减小到 $8.4''$ 。

2 M 码编码器原理

2.1 编码器系统构成

如图 1 所示,绝对式编码器由光源及准直系统、光栅码盘、光电接收及处理器件构成。其中,绝对式编码器原理主要体现在码盘光栅和光电接收器件的特殊设计上。本设计采用了自行设计的基于 M 序列的光栅码道,以及对应的光电二极管阵列,以实现伪随机式绝对编码原理^[9-10]。

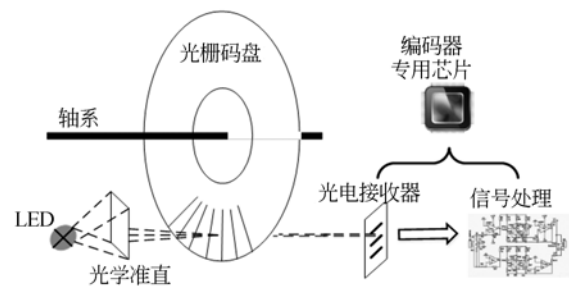


图 1 光电编码器结构

Fig.1 Schematic diagram of photoelectric encoder system

2.2 M 序列伪随机码生成方法

伪随机 M 序列的产生源于线性反馈移位寄存器^[11],其工作原理如图 2 所示:移位寄存器反馈的状态值经加法器进行模 2 相加得到状态值 a_n ,然后将 a_n 送入 a_{n-1} 作为下一状态值,当前状态依次向右平移一位,将当前的状态值 a_0 输出。

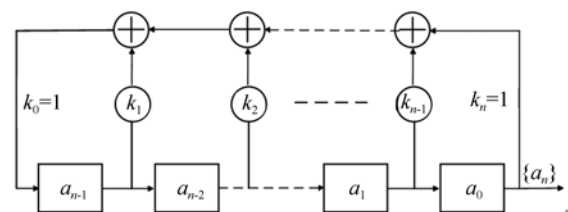


图 2 线性反馈移位寄存器

Fig.2 Linear feedback shift register

其中反馈逻辑函数为:

$$a_n = f(a_0, a_1, \dots, a_{n-1}) = \sum_{i=1}^n k_i a_{n-i} = k_1 a_{n-1} \oplus k_2 a_{n-2} \oplus \dots \oplus k_{n-1} a_1 \oplus k_n a_0, \quad (1)$$

其中: a_n 为输出序列值, k_i 为系数。

定义一个多项式表示 k_i 的取值, 也称为线性反馈移位寄存器的特征多项式, 即:

$$\beta(x) = \sum_{i=0}^n k_i x^i = k_0 + k_1 x + k_2 x^2 + \dots + k_n x^n, \quad (2)$$

其中 x^i 仅指明系数 k_i 的值, 本身无实际意义。

由式(2)可知, 当给定特征多项式 $\beta(x) = 0$, 就确定了系统 $k_1, k_2 \dots k_n$ 的数值, 并推导出伪随机 M 序列 $\{a_n\}$ 。本文利用 MATLAB 数学软件求 M 序列, 来实现 10 bit 的 M 编码, 选取的本源多项式为式(3), 得到 1 023 位二进制 M 序列: 000000000110...1111101101。

$$1 + x^2 + x^3 + x^4 + x^5 + x^6 + x^8 + x^9 + x^{10}. \quad (3)$$

利用式(4)中的自相关函数的计算公式, 对得到的 M 序列求自相关函数, 得到在 0, 1 023, 2 046 处自相关函数取最大值, 其余为 0, 自相关函数的图像如图 3 所示。证明了得到的 M 序列周期为 1 023, 具有良好的自相关性, 连续的 10 bit 的 M 码在整个周期上是唯一的^[12], 符合绝对编码要求, 又因为 M 码在整个圆周上拥有最大周期性, 所以编码效率最高。

$$R_x[n] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N x[k]x[k+n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k]x[k+n], \quad (4)$$

其中: $R_x[n]$ 为自相关函数, $x[k]$ 为第 k 组数据, N 为序列长度。

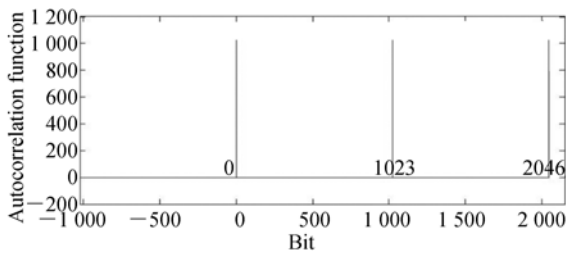


图 3 M 序列自相关函数

Fig. 3 M-code autocorrelation function

2.3 M 码编码原理设计

M 码编码的基本原理为: 利用 M 序列的遍历特性, 将此序列沿轴向刻画在码盘上, 即对圆周上的角度值进行了唯一编码, 对测量得到的 M 码解码还原即可得到位置信息。M 码的位数越高, 其分辨率也越高, 本文采用 10 位 M 编码。

如图 4 所示, M 码道二极管阵列由 100 个独立的光电二极管组成, 每个二极管的光电流可以被独立读出^[13]。将光电二极管得到的信号进行二值化处理, 在任意时刻可以读出 100 位二进制 M 信号。增量式二极管阵列共 4 块, 采用 2×2 矩阵排列, 每部分二极管之间并联, 当码盘转动时, 4 部分可以产生 4 路相位相差 90° 的正弦信号。

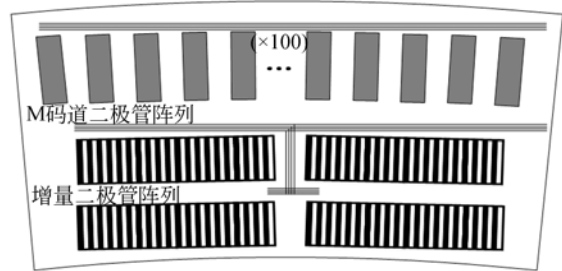


图 4 二极管阵列示意图

Fig. 4 Enlargement of photodiode array

如图 5 所示, 由 M-Code 二极管阵列得到的 100 位二进制信号, 每 5 位组成 1 个编码单元。在一个编码单元内, 通过表决电路确定一位二进制编码值, 最终得到 2 个 10 位的 M 码。任意时刻, 得到的 M 码为 M_n 与 M_{n+10} , 即两码在 M 序列中相差 10 位, 由此实现位置码的相互校验。

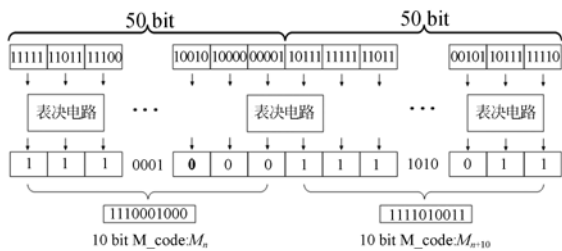


图 5 M 编码原理

Fig. 5 Principle of M coding

3 芯片设计及实现

编码器系统架构如图 6 所示,共包含编码器芯片系统和基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array,FPGA)的信号采集和处理系统。两系统协同工作,实现绝对式编码,本文主要介绍芯片的设计。

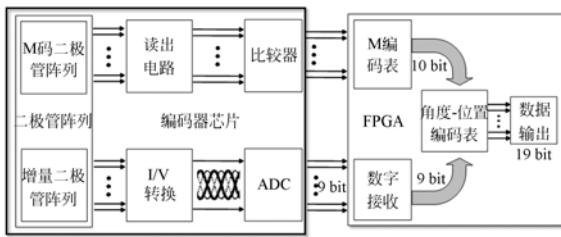


图 6 编码器系统架构
Fig. 6 Architecture of encoder system

编码器芯片内部主要产生两条信号链路:M 码信号链路和增量信号链路。在 M 码信号链路中,M 码光电二极管阵列产生 100 路光电流信号,经过 M 码读出电路,将信号进行 I/V 转换并放大,再经由比较模块得到 10 bit 的 M 编码,最终送入后续 FPGA 模块进行处理。在增量信号链路中,4 组并联的光电二极管阵列产生高质量的正弦信号,经过 I/V 转换,最终由 ADC 进行模数转换,得到 9 bit 的细分码。

按照设计,一位 M 码与一个正弦周期相等,故在 FPGA 处理系统中,细分位数可以与 M 码分辨率直接相加,如图 7 所示。M 码编码表存储在 FPGA 内部的 SRAM 中,将 10 bit M 码作为地址,可以寻址出 10 bit 的 M 位置码,再与 9 bit 的细分码首尾相接,即最终可得到 19 bit 的绝对位置码输出。

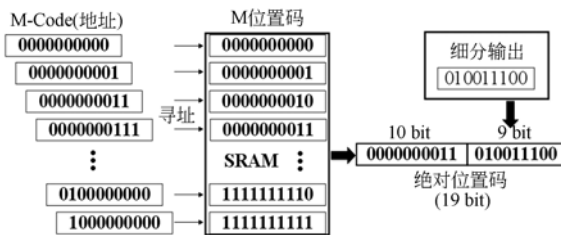


图 7 绝对位置码生成原理
Fig. 7 Generation diagram of absolute position code

图 8 为芯片整体版图,该芯片基于 $0.35 \mu\text{m}$ CMOS 工艺,尺寸为 $5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 。图中芯片正在流片(Tape Out)。

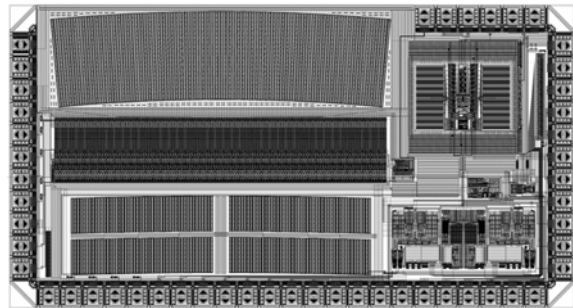


图 8 芯片版图
Fig. 8 Layout of encoder chip

4 实验与结果

4.1 仿真结果

图 9 为增量式二极管阵列产生正余弦信号的波形图,实线为输出正弦波形,虚线为标准正弦。可以看出,增量式二极管阵列产生的波形与标准正弦波形基本重合,正弦性较好,受噪声干扰较少,适合被 ADC 进行细分处理。

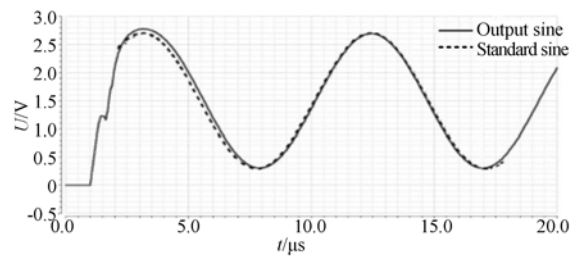


图 9 增量式二极管输出波形
Fig. 9 Sinusoidal waves generated by incremental photodiode

正弦信号经过 9 bit ADC 细分后,细分码串行输出,如图 10 所示,其中 $D_Code_{(n)}$ 为 011101010, $D_Code_{(n+1)}$ 为 100000111。由于 ADC 采样频率远大于正弦信号频率,所以在任意时刻,ADC 都能将采集到的模拟信号及时转化为 9 bit 细分码。

4.2 仿真误差分析及校正

经过分析,在此编码器系统中,影响精度的最

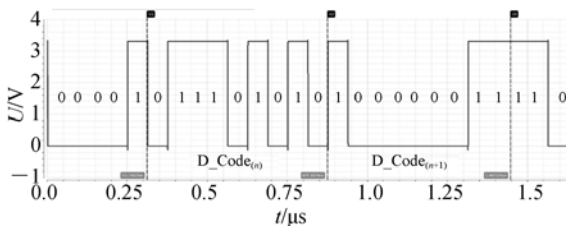


图 10 串行输出的细分码
Fig. 10 Interpolation codes

主要因素为细分误差: 即正弦信号经 ADC 转换后产生的误差。这种误差的主要来源于增量二极管产生的正弦信号和标准正弦信号之间的波形偏差, 见图 9。为了提高编码器的精度, 本文采用基于径向基函数网络的误差补偿方法来实现编码器细分误差的补偿。根据仿真结果, 在一个正弦周期内, 编码器的细分误差分布如表 1 所示。

表 1 编码器细分误差数据
Tab. 1 Interpolation errors of the encoder

测量		测量结果		测量		测量结果	
次数	角度/(°)	误差/(")	次数	角度/(°)	误差/(")	次数	角度/(°)
1	0	12	13	180	11		
2	15	23	14	195	45		
3	30	34	15	210	22		
4	45	8	16	225	35		
5	60	-12	17	240	26		
6	75	-9	18	255	19		
7	90	27	19	270	17		
8	105	44	20	285	28		
9	120	65	21	300	39		
10	135	22	22	315	7		
11	150	-18	23	330	-15		
12	165	-26	24	345	11		

图 11 为误差校正前后的细分误差分布图, 虚线为补偿前的误差曲线, 实线为补偿后的误差曲线。可以看出, 经过误差补偿后, 编码器的细分误

差波动曲线更加平缓, 峰值误差由 65" ~ -26", 减小到 18.4" ~ -19.9"。

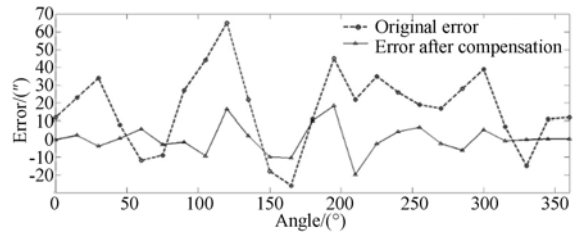


图 11 补偿前后细分误差曲线
Fig. 11 Distribution curves of interpolation error

通过贝塞尔公式(5)评估校正结果, 经公式计算标准偏差由补偿前的 22" 减小到 8.4"。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (5)$$

其中: \bar{x} 为样本误差的平均值; x_i 为第 i 组测试样本; n 为测试样本总数。

5 结 论

本文设计了一种基于 M 序列的伪随机绝对式编码器系统。该系统根据 M 序列伪随机编码原理, 采用绝对码式道与增量式精码道相结合的方式, 克服了传统绝对式编码器的缺点。采用集成化芯片设计, 将编码器的信号产生电路和细分电路集成在一块芯片中, 降低了外部噪声的干扰并缩小了系统尺寸。这种设计在减小编码器尺寸的同时, 可将分辨率提高到 19 bit。最后基于径向基神经网络进行了误差补偿。结果显示, 标准偏差由 22" 减小到 8.4", 提高了编码器的精度。由此表明, 本系统设计达到了绝对式编码器小型化和高精度的目标, 可以满足工业上对高性能绝对式编码器的要求。

参考文献:

[1] 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.
ZUO Y, LONG K H, LIU J G, et al.. Analysis

and processing of Morie fringe signals based on non-uniform sampling [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4): 1146-1152. (in Chinese)
[2] YE G, FAN S, LIU H, et al.. Design of a precise and robust linearized converter for optical encoders using a ratiometric technique [J]. *Measurement Sci-*

- ence and Technology, 2014, 25(12): 125003.
- [3] 高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1):213-219.
GAO X, WAN Q H, ZHAO CH H, et al.. Real-time compensation of orthogonality deviation for Moire fringe photoelectric signal [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):213-219. (in Chinese)
- [4] WU J, ZHOU T, YUAN B, et al.. Absolute angular encoder based on optical diffraction [C]. *International Conference on Optical Instruments and Technology*, 2015, 2015: 962304-962304.
- [5] 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): 979-987.
YU H, WAN Q H, DU Y C, et al.. Drive system of dynamic detection equipment for photoelectric encoders using space-vector torque combination [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 979-987. (in Chinese)
- [6] WATANABE T, KON M, NABESHIMA N, et al.. An angle encoder for super-high resolution and super-high accuracy using SelfA [J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25 (6): 065002.
- [7] LANGE S, RIEDMILLER M. Deep auto-encoder neural networks in reinforcement learning [C]. *Neural Networks (IJCNN), The 2010 International Joint Conference on IEEE*, 2010: 1-8.
- [8] 王显军. 大型望远镜测角系统误差的修正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9):2446-2451.
WANG X J. Correction of angle measuring errors for large telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2446-2451. (in Chinese)
- [9] ANISIMOV A G, PANTYUSHIN A V, LASHMANOV O U, et al.. Absolute scale-based imaging position encoder with submicron accuracy [J]. *SPIE*, 2013, 8788: 87882T-87882T-5.
- [10] WANG H, WANG J, CHEN B, et al.. Absolute optical imaging position encoder [J]. *Measurement*, 2015, 67: 42-50.
- [11] IWAI H, MITSUI K. Development of a measuring method for motion accuracy of NC machine tools using links and rotary encoders [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009, 49(1): 99-108.
- [12] 王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2):379-386.
WANG X J. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2):379-386. (in Chinese)
- [13] JOHNSON N, MOHAN K J, JANSON K E, et al.. Optimization of incremental optical encoder pulse processing [C]. *Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s), 2013 International Multi-Conference on.*, IEEE, 2013: 769-773.

作者简介:



殷景志(1960—),女,黑龙江哈尔滨人,教授,博士生导师,1982、1987、2002年于吉林大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事半导体光电材料与器件的研究。E-mail: yjz886666@163.com

通讯作者:



常玉春(1973—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,1995、1998、2002年于吉林大学分别获得学士、硕士和博士学位,现为吉林大学电子科学与工程学院微电子系主任,主要从事集成电路方面的研究。E-mail: changyc@jlu.edu.cn