

航天级反射式光电编码器信号处理系统设计

韩庆阳, 陈 赟, 张红胜, 高胜英, 张 晰

(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: 为了满足航天级光电编码器的小型化、高精度和高可靠性要求, 设计了反射式光电编码器的信号处理系统。首先, 概述航天级反射式光电编码器信号处理系统的总体设计, 然后, 给出粗码与精码的处理方法, 并将数据处理集成到主系统 FPGA 中, 减小尺寸, 同时处理电路具备主、备冷备份的功能, 提高电路可靠性; 最后, 通过自准直光管和 23 面体检测精度。结果表明: 应用该信号处理系统的反射式光电编码器分辨力为 $0.3''$ (22 位), 精度主编码器 $\sigma=2.22''$ ($3\sigma=6.65''$), 备编码器 $\sigma=2.69''$ ($3\sigma=8.07''$)。该系统已经在工程系统中应用, 满足航天设备的技术要求。

关键词: 光电编码器; 反射式; FPGA; 信号处理

中图分类号: TP212.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S117010

Design of signal processing system for spaceborne reflection photoelectric encoder

Han Qingyang, Chen Yun, Zhang Hongsheng, Gao Shengying, Zhang Xi

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

Abstract: In order to satisfy the miniaturization, high accuracy and high reliability of spaceborne reflection photoelectric encoder, the signal processing system was designed. Firstly, the overall design of the signal process system spaceborne reflection photoelectric encoder was represented. Then, methods of processing precise code and coarse code were given, and the data processing system was integrated into main system which used FPGA, the size was decreased, at the same time the electric circuit was cold backup to improve the reliability. Finally, 23 surfaces polyhedron and autocollimation were used to test the accuracy. The experiment results show that the resolution is $0.3''$ (22 bit), the primary precision was $\sigma=2.22''$ ($3\sigma=6.65''$), the standby precision is $\sigma=2.69''$ ($3\sigma=8.07''$), by using this signal processing system. By applying to practical projects, the processing system had satisfied the technique requirement of the spaceborne equipment.

Key words: photoelectric encoder; reflection; FPGA; signal processing

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2018-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(51605465); 吉林省科技发展规划(20180520184JH)

作者简介: 韩庆阳(1988-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事光电角位移精密测量和信号处理方面的研究。

Email: lanbohesky@126.com

0 引言

光电编码器是以高精度计量圆光栅为检测元件,将空间角度位置信息转换成数字信息的测量装置^[1-5]。它集光、机、电于一体,具有结构简单、精度高、分辨力高、环境适应力强和易于集成等优点,因此被广泛应用于国防、工业和其他科技领域的实时测量控制系统中^[5-10]。

光电编码器从光电信号的读取方式上可分为透射式和反射式两类。反射式光电编码器是基于衍射的原理,比透射式的环境适应力强,稳定性高,更能满足空间技术环境的要求。因此,研制航天级反射式光电编码器,设计信号处理系统,为了提高系统的可靠性和小型化低功耗,与整个系统共用一个 FPGA 处理器,只需主系统 FPGA 分配出若干 IO 和 IP 核资源给编码器系统。这样即节省编码器处理器电路,同时又不需要编码器系统与主系统之间的通信,提高可靠性。采用准绝对式的编码方式,比增量式的寻找基准零点效率高;与绝对式相比码盘图案面积减小,编码器体积随之减小。编码器冷热备份,满足航天可靠性要求。在码盘对径方向上放置探头,减小误差,提高精度。

文中编码器的探头尺寸 20 mm×20 mm,分辨力为 0.3°,主系统的 FPGA 使用 Xilinx 公司的 Virtex5 系列 FPGA,经测量该编码器精度为主编码器 3σ=6.36°,备编码器 3σ=8.07°,满足航天级编码器的精度要求。

1 航天级反射式光电编码器信号处理系统设计

1.1 原理及系统组成

反射式光电编码器利用干涉扫描原理^[11-12]:当单色平面波垂直照射光栅时,会在光栅后的衍射区内的某些特定距离出现该单色光周期几何像,这种现象称为泰伯效应。正弦光的衍射振幅分布 $E(x, y)$, 计算公式如:

$$E(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{-i\lambda\pi z \left(\frac{1}{l}\right)^2} \cos\left(2\pi \frac{1}{l} x\right) \quad (1)$$

与光栅振幅透射系数 $t(x, y)$, 计算公式为:

$$t(x, y) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(2\pi \frac{1}{l} x\right) \quad (2)$$

相差 D 为一个与位置有关的因子,称为泰伯距离,如公式(3)所示:

$$D = \frac{2ml^2}{\lambda} (m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \quad (3)$$

式中: x, y 为正弦光分布的坐标; z 为正弦光副场分布与光栅的距离; l 为光栅的线条宽度; λ 为入射波长; D 为接收器与码盘之间的距离。

当 $m=0, l=40 \mu\text{m}, \lambda=0.9 \mu\text{m}$ 时, $D=1.066 \text{ mm}$ 。在此距离处光栅传感器可获得与栅距等周期的正弦信号。故本设计,探头与码盘之间的距离为 1 mm,码盘的刻线线宽为 40 μm 。

文中设计包括双读数探头及其对径探头和处理电路部分,探头和处理电路具备主、备冷备份的功能。其系统原理图如图 1 所示。

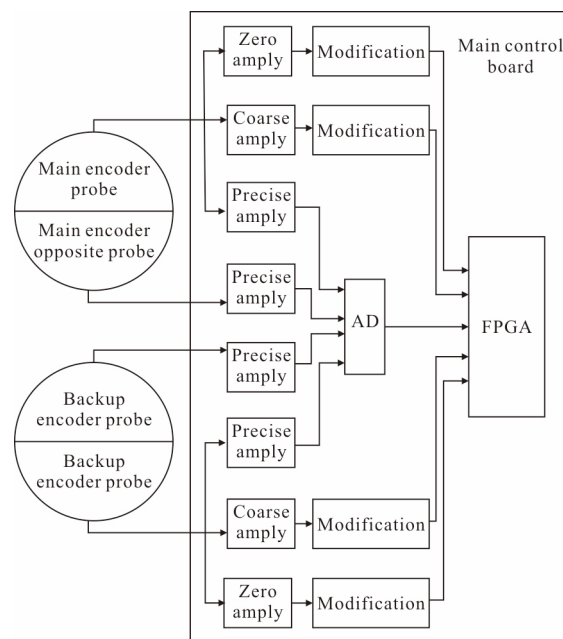


图 1 反射式光电编码器信号处理系统原理图

Fig.1 Block diagram of signal processing system for reflection photoelectric encoder

编码器的探头即:主编码器探头、主编码器对径探头、备编码器探头和备编码器对径探头,分别制作在四块线路板上,处理电路与主系统制作在同一块线路板上。探头测量得到的四个相位正弦信号经放大整形送给 FPGA,同时由 12 位模数转换后给 FPGA;零位信号则只需放大整形后送入 FPGA。FPGA 进行粗码计数和精码细分等运算,得到数字

角度信息。图 2 为该系统的软件处理流程图。

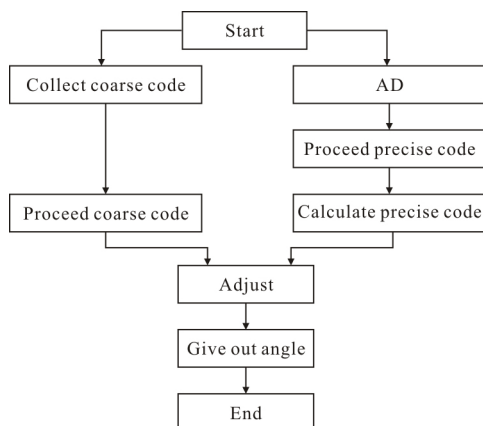


图 2 反射式光电编码器软件处理流程图

Fig.2 Software flow chart of signal processing for reflection photoelectric encoder

软件处理包括粗码和精码两个部分，其中精码处理完对粗码处理结果校正，得到输出给主系统的角度信息。

1.2 精码处理方法

在计量光栅和机械制造装调精度确定的情况下，对精码细分运算能够获得更高的分辨力及精度。因此，要对精码信号的进行处理，以保证其质量，提高细分精度和分辨力。该设计计量光栅的原始刻线为 4 096，分辨力为 12 位，想达到 22 位即 0.3" 分辨力，需要细分 10 位。由反射式探头得到四个相位的精码，其表达式为：

$$\begin{cases} u_0 = C_0 + A_0 \sin \theta \\ u_{90} = C_{90} + A_{90} \sin \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) \\ u_{180} = C_{180} + A_{180} \sin (\theta + \pi) \\ u_{270} = C_{270} + A_{270} \sin \left(\theta + \frac{3\pi}{2} \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中： C_0 、 C_{90} 、 C_{180} 、 C_{270} 为四路信号的直流偏移量； A_0 、 A_{90} 、 A_{180} 、 A_{270} 为四路信号的幅值。对精码 sin(cos 与其处理方法一致) 选用 LM158 差分放大器进行处理电路如图 3 所示。

通过调节 V_{ref} 和电阻 R1、R2、R3、R4 使得 sin 和 cos 幅值和直流偏量一致，即如公式(5)所示：

$$\begin{cases} u_{\sin} = C + A \sin \theta \\ u_{\cos} = C + A \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中： C 为直流偏移量； A 为信号幅值。由公式(5)可

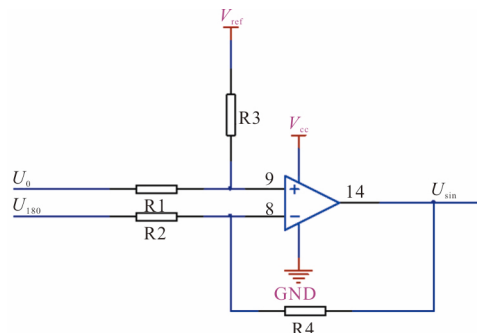


图 3 反射式光电编码器精码处理电路

Fig.3 Circuit for precise code processing of reflection photoelectric encoder

知，经差分放大电路调整，两路精码信号的直流偏移量和幅值相等，有利于细分精度的提高。将调整后的信号，送入 AD，FPGA 通过 AD 获得精码信号后，进行细分，软件流程图如图 4 所示。

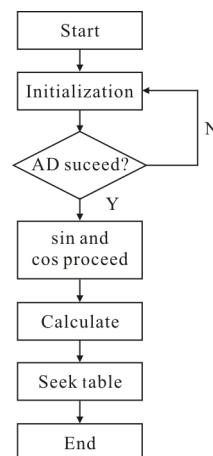


图 4 反射式光电编码器精码处理软件流程图

Fig.4 Software flow chart for precise code of reflection photoelectric encoder

1.3 粗码处理方法

1.3.1 多参考点编码原理

文中设计采用多参考点即准绝对式的编码方式，在 4 096 条线中插入 64 个参考点，插入的原则是：相邻两个参考点之间角距离不相等，这样测得两个参考点之间的距离，就能获得绝对位置。图 5 为多参考点计量光栅局部放大图。

由图 5 可知，测得参考点 1 和参考点 2 之间的距离(或者参考点 2 和参考点 3 之间的距离，参考点 3 和参考点 4 之间的距离)，就能够确定编码器的绝对位置。该设计编码器最大转即可找到绝对位置，寻

零效率大为提高。

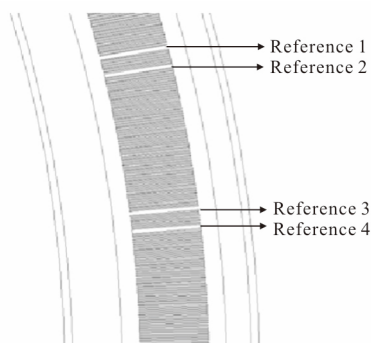


图 5 多参考点计量光栅局部放大图

Fig.5 Local enlarged image of measuring grating with multiple reference points

1.3.2 粗码信号处理方法

探头输出的四个相位精码和零位信号经过放大整形电路后,进入 FPGA, FPGA 对其进行计数和查表等运算得到编码器的粗码。软件处理流程图如图 6 所示。

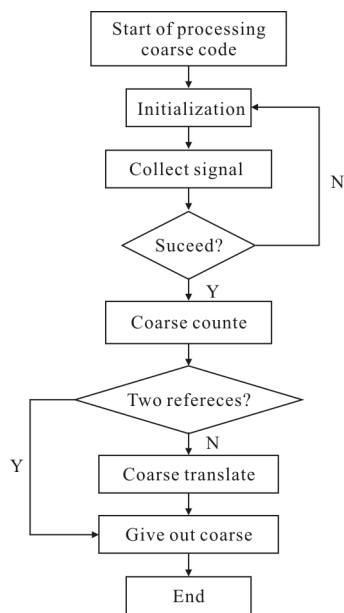


图 6 反射式光电编码器粗码软件处理流程图

Fig.6 Software flow chart of coarse code software processing for reflection photoelectric encoder

1.4 小型化和可靠性设计

文中设计探头尺寸仅为 20 mm×20 mm,与主系统共用一个 FPGA,无需通信芯片,角度信息直接送给主 FPGA,节省编码器系统的 CPU 和通信电路板空间,防止由于通信造成的可靠性问题。选用小

封装的元器件,如 AD 转换芯片,选用 tlv2548,是一款低功耗 8 通道 12 位串行 AD,封装尺寸只有 9 mm×9 mm,与具有相同通道数的并行 AD 相比,封装尺寸小。线路板的布线布局符合航天标准,所有的电子元件均选用航天级器件,保证系统的可靠性和稳定性。使用屏蔽线缆防止探头到主系统线路板信号传输时受到干扰,同时所有的线路板均放在密闭的镁铝合金盒体内,盒体接地,屏蔽静电和电磁干扰。

该编码器与整机一起做环境试验,包括温度试验、冲击振动试验、湿度试验和辐照试验等,试验严格按照航天级设备的环境试验要求进行。在试验过程中实时监测设备的运行状况,结果表明:该编码器未产生误码或者错码的情况,满足航天级设备的可靠性要求。

2 航天级反射式光电编码器精度分析

航天级反射式光电编码器的误差由码盘制造误差、轴系晃动及码盘偏心误差、细分误差、量化误差和检测误差组成,是各部分误差综合作用的结果。其中,码盘制造误差、轴系晃动及码盘偏心误差和细分误差,被称作光电编码器的三大误差。

2.1 码盘制造误差

码盘是由码盘刻划机在镀有金属的玻璃上刻划制造出来的,码盘刻划时的分度误差和刻划机的轴系误差等引起的误差统称为码盘制造误差。该编码器的码盘误差在置信系数 $t_1 = \frac{1}{\sqrt{3}}$ 时为 20"。用两个读数头可以消除部分误差,消除后的误差为: $\delta_2 = 10''$ 。

2.2 轴系晃动及码盘偏心误差

编码器轴系径向晃动和码盘安装偏心最高可达 1 μm,码盘精码道的刻划半径为 $R=25$ mm,则最大的角误差为: $\delta_2 = \arcsin\left(\frac{e}{R}\right) = 8.25''$, 置信系数为: $t_2 =$

$$\frac{1}{\sqrt{3}}。$$

2.3 细分误差

细分误差是指一个光栅栅距内各细分点位置偏离标准位置的偏差,光电编码器中的光、机、电所有零件的误差及性能变化、环境条件等都对它有影响,是一种综合误差。该编码器的细分误差最大为: $\delta_2 = 40''$,由多项误差合成,置信系数为: $t_3 = \frac{1}{\sqrt{3}}$ 。

2.4 量化误差

量化误差是指:把一个联系的圆周变量转换成 2^n 个不连续的角度值, 由这个模拟数值构成的误差即为量化误差。

22 位光电编码器的分辨力为 $\zeta = \frac{360^\circ}{2^{22}} = 0.309''$,

则最大量化误差为: $\partial_4 = \frac{\pm \zeta}{2} = \frac{360^\circ}{2^{23}} = \pm 0.154''$, 置信系

数为 $t_4 = \frac{1}{\sqrt{3}}$ 。

2.5 检测误差

检验误差是由检验设备安装及检验装置本身的误差引起的。该系统采用自准直光管和 23 面体检测精度, 通过连接工装与 23 面体同轴连接, 自准直光管本身的精度为 $0.1''$ 。此项误差最大为 $\partial_5 = 1''$, 置信

系数为 $t_5 = \frac{1}{\sqrt{3}}$ 。

2.6 合成误差

编码器的最终误差是上述 5 种误差的合成, 该

编码器的最大合成误差为: $\partial_{\text{总}} = \sqrt{\sum_{i=1}^5 t_i^2 \partial_i^2} = 14.02''$ 。

3 精度检测及结果分析

3.1 精度检测

采用九江精达检测技术研究所研制的精度 $0.1''$ 自准直光管和 23 面体检测反射式光电编码器精度, 如图 7 所示。

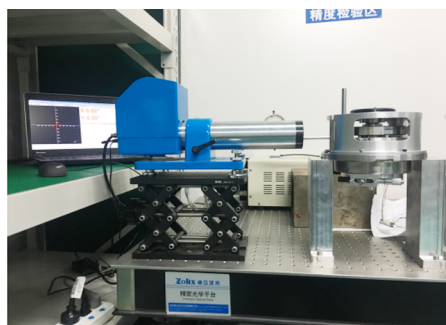


图 7 反射式编码器检测装置

Fig.7 Measurement device of reflection photoelectric encoder

23 面体相邻两个面与分别自准直光管垂直时编码器转过的角度为 $\frac{360^\circ}{23}$ 。首先, 调整编码器使其角度显示为 0, 此时再调整自准直光管的光轴与 23 面

体的第一面垂直, 即自准直光管的读数为零, 当与第 n 垂直时, 理论上转过的角度为:

$$\theta = (n-1) \times \left(\frac{360^\circ}{23} \right) \quad (6)$$

此时光电编码器显示的读数 θ' 与 θ 之差即为此位置处的误差。但是在实际测量中, 编码器的转动比较好操作, 故将编码器转到 $(n-1) \times \left(\frac{360^\circ}{23} \right)$ 位置处, 此时自准直光管的误差即为编码器在此处的误差。最后, 最终误差还要将编码器的分辨率误差和 23 面体的修正误差考虑进去。检测得到的精度如表 1 所示。

表 1 反射式编码器精度检测结果

Tab.1 Results of reflection photoelectric encoder's precision test

Measuring position	Primary/(")	Standby/(")
1	0	0
2	-2.5	1.5
3	-4.2	2.0
4	-3.4	5.9
5	-1.9	6.1
6	0.8	7.3
7	2.0	2.6
8	2.8	2.4
9	2.0	1.7
10	1.9	1.7
11	3.5	0.4
12	0.4	0.5
13	-1.6	0.8
14	-2.0	2.3
15	-2.1	5.3
16	-0.1	7.2
17	0.5	7.5
18	3.7	6.0
19	2.1	3.0
20	1.2	-0.8
21	1.1	1.3
22	0.8	0.4
23	-0.1	-0.7

图 8 为主编码器和备编码器的误差曲线。

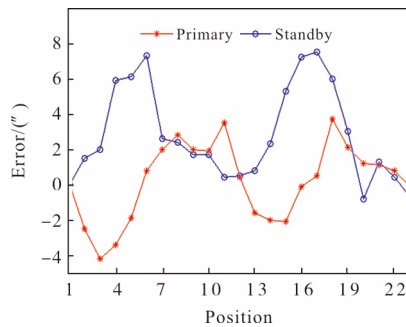


图 8 反射式编码器误差曲线图

Fig.8 Error curve graph of reflection photoelectric encoder

由表1和图8可知,主编码器:误差最大值为 $3.7''$,最小为 $-4.2''$,峰峰值为 $7.9''$,均方差为 $6.65''$;备编码器:误差最大值为 $7.5''$,最小为 $-0.8''$,峰峰值为 $8.3''$,均方差为 $8.07''$,满足设计要求。

3.2 结果分析

由上面的检测结果可知:主编码器和备编码器的峰峰值及误差曲线存在差异。

其原因在于:其一,在两次检测时,由检验人员在安装检验系统时引入的检验误差;其二,该系统的检验采用的是静态测量的方法,主编码器和备编码器测量的23个点不完全重合,编码器的轴系在这些检测位置的轴系误差也不相同,所以主备编码器的检测精度曲线及峰峰值不一致。

下一步可以研制动态检测光电编码器精度的设备,用来检验航天级光电编码器精度。

4 结 论

为反射式光电编码器设计的信号处理系统,具有冷备份的功能,与主系统共用一个FPGA,减小体积,增强可靠性。实验结果表明:探头尺寸 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$,该系统分辨力为 $0.3''$,精度:主编码器 $3\sigma=6.65''$,备编码器 $3\sigma=8.07''$ 。实际应用表明:该系统满足航天设备的可靠性、小型化和抗干扰能力的要求。

参考文献:

- [1] Ye Shengxiang. Accurate Measurement About Photoelectric Shift[M]. Chengdu: Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [2] Han Xudong, Xu Xinhang, Liu Changshun, et al. Absolute optical angle encoder used for laser communication terminal on satellite platform [J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 24(10): 2424–2431. (in Chinese)
- [3] Liu Changshun, Wang Xianjun, Han Xudong, et al. Ultra miniature absolute optical encoder based on eight-matrix coding [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(2): 326–333. (in Chinese)
- [4] Yang Shouwang, Liang Lihui, Wang Shujie. Photoelectrical encoder IP core design [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2014, 37(9): 113–116. (in Chinese)
- [5] Sun Ying, Wan Qiuhua, Wang Shujie, et al. Design of signal process system for spaceborne photoelectric encoder [J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(5): 1182–1188. (in Chinese)
- [6] Zhao Changhai, Wan Qiuhua, Liang Lihui, et al. The small high-precision spaceborne photoelectric encoder[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2015, 29(8): 1225–1230. (in Chinese)
- [7] Du Yingcai, Wang Xijun, Wang Shujie, et al. Auto-detection system of incremental encoder [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2012, 26(11): 993–998. (in Chinese)
- [8] Yu Hai, Wan Qiuhua, Liang Lihui, et al. Dynamic code error detection system of photoelectric encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 09170021. (in Chinese)
- [9] Yu Hai, Wan Qiuhua, Lu Xinran, et al. Calibration of dynamic precision for measurement platform of photoelectric encoder[J]. *Opt Precision Eng*, 2016, 11(11): 2699–2704. (in Chinese)
- [10] Wang Yuanyuan, Wan Qiuhua, Liang Lihui, et al. Miniature absolute metal photoelectric code disc [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2013(6): 20–23. (in Chinese)
- [11] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [12] Wang Xianjun. Reflection photoelectric encoder [J]. *Opt Precision Eng*, 2013, 21(12): 3066–3071. (in Chinese)