

文章编号 1004-924X(2009)01-0052-06

双读数系统的航天级绝对式光电编码器设计

万秋华^{1,2}, 孙莹^{1,2}, 王树洁¹, 余容红¹, 卢新然¹, 梁立辉^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 为了有效地减小航天相机的体积, 减轻其重量并满足冷备份要求, 设计了双读数系统的航天级绝对式光电编码器。根据航天相机的要求, 对绝对式光学码盘进行了小型化设计; 根据码盘的特点, 研制了双读数狭缝盘及读数系统; 最后, 对设计的双读数系统的航天级绝对式光电编码器进行了精度检测。实验结果表明: 双读数系统的航天级绝对式光电编码器外形尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 、重量为 150 g、分辨力为 $20''$ 、精度 $\sigma \leq 30''$ 。本编码器具有读数系统冷备份功能, 且体积小、重量轻、抗干扰能力强, 可满足航天相机的要求。

关键词: 航天级光电编码器; 绝对式码盘; 双读数系统; 小型化

中图分类号: TP212.12 **文献标识码:** A

Design for spaceborne absolute photoelectric encoder of dual numerical system

WAN Qiu-hua^{1,2}, SUN Ying^{1,2}, WANG Shu-jie¹, SHE Rong-hong¹, LU Xin-ran¹, LIANG Li-hui^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

Abstract: In order to minimize volume, lighten the weight of a spaceflight camera effectively and satisfy the requirement of cold copy, the design for spaceborne absolute photoelectric encoder of dual numerical system is put forward in this paper. Based on the requirements of the spaceflight camera, the miniaturization design is applied to absolute optical code disc; Then, a dual numerical reading slit disc and a numerical reading system are developed according to the characteristic of code disc; finally, the precision test is implemented on the spaceborne absolute photoelectric encoder with dual numerical reading system. The experimental result shows that the photoelectric encoder in outline dimension of $\phi 50 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$, weight of 150 g can offer its resolution of $20''$ and precision lower than $30''$. The encoder has the function of cold copy for numerical reading system, and shows its advantages of small volume, light weight and high resistance, which can meet the requirements of spaceflight camera.

Key words: spaceborne photoelectric encoder; absolute code disc; dual numerical system; miniaturization

收稿日期: 2008-08-06; 修订日期: 2008-09-17.

基金项目: 国家重大工程项目

1 引言

光电编码器是集光、机、电为一体的数字化位移测量装置。由于它结构简单、分辨力高、精度高、易形成绝对代码,因此被广泛应用于国防、工业和科技领域的动态测量和实时控制系统中^[1]。

通常情况下,测控系统主体仪器的每个轴系上只安装一个光电编码器,且每台光电编码器只有一组读数系统。然而在空间技术的环境中,星载的光电跟踪、观测、瞄准设备,对主体仪器工作的可靠性要求非常高,对所用的光电编码器的光电转换电路要求冷备份。以往采用两台光电编码器实现冷备份功能,需要在主体仪器的每个轴系上安装两台光电编码器,这样会占据主体仪器的很大空间。长春光机所研制的航天相机中采用 4 台外形尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 、重量为 100 g 的小型绝对式光电编码器来完成调焦、偏流角的测量,其中两台编码器互为冷备份。因此,光电编码器的小型化需求日益迫切^[2-3]。

为了有效地减小航天相机的体积、减轻其重量并满足冷备份要求,本文设计了具有双读数系统的航天级绝对式光电编码器。在一台编码器上实现发光管、接收管等光电转换电路的冷备份,既可减少主体仪器的光机结构、有效地减轻仪器的重量,又能保证主体仪器的工作可靠性。实验证明,双读数系统的航天级绝对式光电编码器具有读数系统冷备份功能,比两台小型绝对式光电编码器的体积小、重量轻、且满足航天相机的要求。

2 双读数系统的航天级绝对式光电编码器的组成及工作原理

双读数系统的航天级绝对式光电编码器结构原理如图 1 所示,它包括:主发光管、码盘、双读数狭缝盘、主光电接收管、主轴、主处理电路、备发光管、备光电接收管、备处理电路。

主编码器工作时,码盘随主轴旋转,主发光管发出的光经码盘、双读数狭缝盘照射到主光电接收管上,主光电接收管产生的光电信号实时送入编码器主处理电路,主处理电路将主光电信号

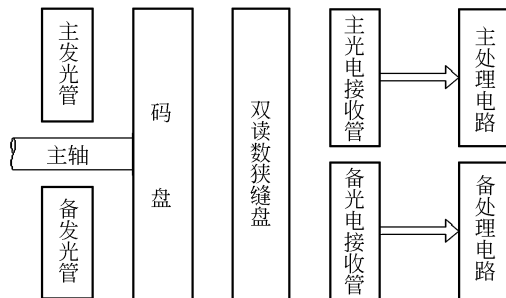


图 1 编码器结构原理框图

Fig. 1 Principle block diagram of encoder structure

处理成 16 bit 自然二进制角度代码输出。

备编码器工作时,码盘随主轴旋转,备发光管发出的光经码盘、双读数狭缝盘照射到备光电接收管上,备光电接收管产生光电信号实时送入编码器备处理电路,备处理电路将备光电信号处理成 16 bit 自然二进制角度代码输出。

主编码器工作时,备编码器不通电工作;备编码器工作时,主编码器不通电工作;主、备编码器互为冷备份。

3 双读数系统的航天级绝对式光电编码器设计

3.1 码盘的小型化设计

双读数系统的航天级绝对式光电编码器的码盘码道按矩阵式编码原理排列。矩阵式编码的特点是码道圈数少,编码器的直径较小^[4]。为了进一步缩小码盘的直径,设计中将码道及隔离圈的刻划中径减小,码道和隔离圈的径向宽度缩小到 1 mm。为避免各接收元件之间串光,码道设计采用错位排列,其对应狭缝及光电接收管也错位排列。错位排列的矩阵码道展开图如图 2 所示。

错位排列的矩阵式码盘如图 3 所示。码道共分 5 圈,从里到外依次为 A、B、C、D、G 圈。A 圈在 $180 \sim 360^\circ$ 区间内通光,为第 1 位和第 2 位,即 A1 和 A2; B 圈的零点在 A 圈零点的 11.25° 处。B 圈在 $0 \sim 180^\circ$ 刻第 3 位 A3,即在半周内有一条通光区;在 $180 \sim 360^\circ$ 刻第 4 位 A4,即在半周内有两通光区。C 圈的零点在 A 圈零点的 348.75° 处。C 圈刻有 4 位不同的码道, $0 \sim 90^\circ$ 刻

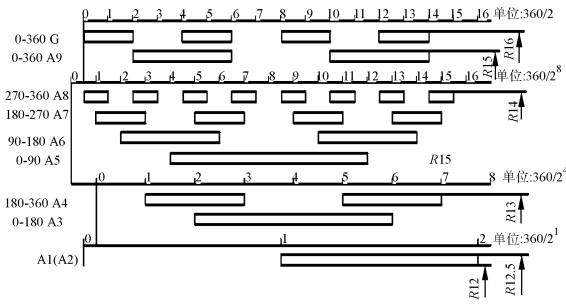


图 2 错位排列的矩阵码道展开图

Fig. 2 Spread diagram of matrix code track in dislocation array

第 5 位 A5,在这一扇形区内刻 2 条通光区;在 90~180°刻第 6 位 A6,在这一扇形区内刻 4 条通光区;在 180~270°刻第 7 位 A7,在这一扇形区内刻 8 条通光区;在 270~360°刻第 8 位 A8,在这一扇形区内刻 16 条通光区;D 圈为精粗校正码道,刻有 128 个通光区;G 圈为精码码道,刻有 256 个通光区,作为细码码道。

码盘的基底材料采用 K9 光学玻璃,码盘的外径为 $\phi 39$ mm,码盘采用光刻、复制的方法制备。

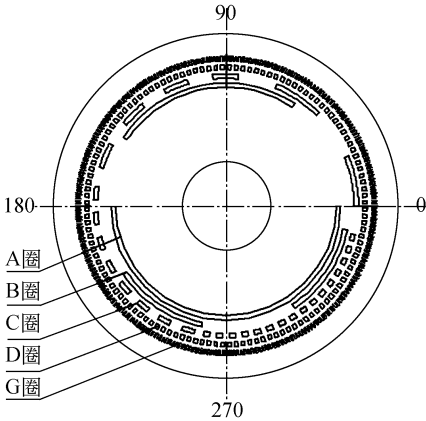


图 3 错位排列的矩阵式码盘图

Fig. 3 Diagram of matrix code disc in dislocation array

3.2 双读数狭缝盘及读数系统设计

双读数系统的航天级绝对式光电编码器的读数头由 26 个光电接收管组成,分为 a 组和 b 组。双读数头的位置分布如图 4 所示。

a 组读数头由 a_1 、 a_3 、 a_5 、 a_2 、 a_6 、 a_{G0} 、 a_{G90} 、 a_4 、 a_7 、 a_9 、 a_8 、 a_{G180} 、 a_{G270} 等光电接收管组成。

在 A 圈设置两个读数头 a_1 及 a_2 ,当码盘顺

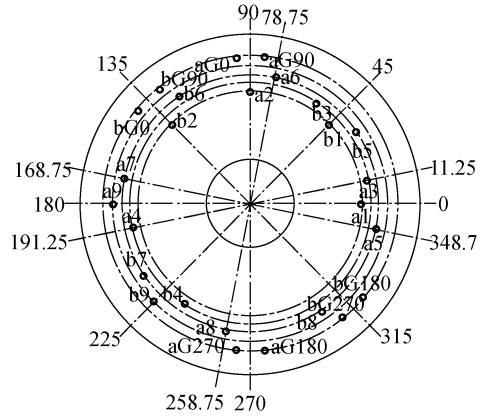


图 4 读数头位置分布图

Fig. 4 Position distributions of numerical reading heads

时针转动时,读数头 a_1 及读数头 a_2 取出两个光电信号 A_1 和 A_2 ,这两路信号即作为第 1 位和第 2 位码道。

在 B 圈设置两个读数头 a_3 及 a_4 ,当码盘顺时针转动时,读数头 a_3 首先扫描 A_3 ,后扫描 A_4 ;而读数头 a_4 则首先扫描 A_4 ,后扫描 A_3 。

在 C 圈中设置 4 个读数头 a_5 、 a_6 、 a_7 、 a_8 ,当码盘顺时针转动时,读数头 a_5 将先扫过 A_5 ,然后依次扫过 A_6 、 A_7 、 A_8 ;与此同时 a_6 将依次扫过 A_6 、 A_7 、 A_8 、 A_5 ; a_7 将依次扫过 A_7 、 A_8 、 A_5 、 A_6 ; a_8 依次扫过 A_8 、 A_5 、 A_6 、 A_7 。

读数头在不同象限输出不同的信息,矩阵码表如表 1 所示。

表 1 矩阵码表

Tab. 1 Table of matrix code

	0°~90°	90°~180°	180°~270°	270°~360°
a_1			A_1	A_1
a_2		A_2	A_2	
a_3	A_3	A_3	A_4	A_4
a_4	A_4	A_4	A_3	A_3
a_5	A_5	A_6	A_7	A_8
a_6	A_6	A_7	A_8	A_5
a_7	A_7	A_8	A_5	A_6
a_8	A_8	A_5	A_6	A_7

b 组读数头与 a 组相差 45°。a 组、b 组各自独立工作。a 组与 b 组互为备份。

b 组读数头由 b_1 、 b_3 、 b_5 、 b_2 、 b_6 、 b_{G0} 、 b_{G90} 、

b4、b7、b9、b8、bG180、bG270 等光电接收管组成。

b 组读数头输出信号的译码方法与 a 组相同。

双读数狭缝盘如图 5 所示。

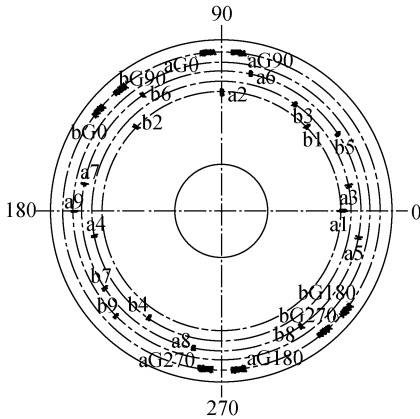


图 5 双读数狭缝盘图

Fig. 5 Diagram of dual numerical reading slit disc

双读数狭缝盘基底材料采用 K9 光学玻璃,狭缝盘直径与码盘直径一致为 $\phi 39$ mm,狭缝盘的圈数与码盘的圈数相同,每个通光区的位置与读数头的位置相对应;精码狭缝宽度为 $20 \mu\text{m}$,粗码狭缝宽度为 $50 \mu\text{m}$ 。狭缝盘采用光刻、复制的方法制备。

3.3 编码器机械结构设计

编码器机械结构由轴系、码盘、双读数狭缝盘、发光管、光电接收管等部件组成。轴系由主轴、轴承套和轴承构成。编码器机械结构如图 6 所示。码盘与主轴端面粘接,当主轴转动时,带动码盘转动。双读数狭缝盘与狭缝架固定,同时也与轴套固定。编码器主轴与相机轴配合,编码器

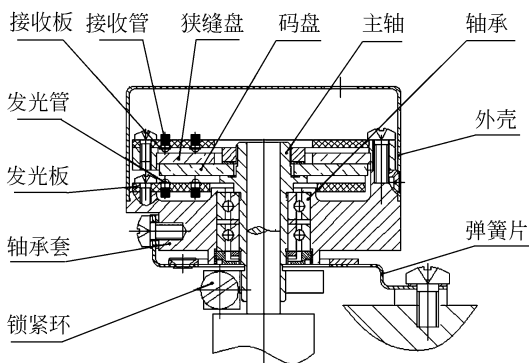


图 6 编码器机械结构图

Fig. 6 Mechanical structure of encoder

轴端设计为弹性锁紧机构,将相机轴锁紧。轴套作为编码器的主体部分通过弹性片与相机主体弹性联结。轴系径向跳动 <0.003 mm,轴端面跳动 <0.003 mm。轴承选择深沟球轴承 628/6-P4,做防冷焊处理。编码器外形尺寸为 $\phi 50$ mm \times 32 mm。

3.4 处理电路设计

新研制的双读数系统的航天级绝对式光电编码器同时具有主份、备份功能,采用两台就可完成航天相机调焦、偏流角测量及备份的功能。编码器主份处理电路采用一套单片机系统完成调焦、偏流编码器的数据处理,减小了电路的体积。主份处理电路和备份处理电路完全相同。

编码器子系统由调焦编码器(主、备)、偏流编码器(主、备)、主份处理电路、备份处理电路组成。编码器子系统组成原理框图如图 7 所示。

调焦编码器和偏流编码器的主份处理电路在同一块电路板上,由粗码放大、整形、输入/输出接口、精码放大、模/数转换器、单片机、程序存储器、串行接口等部分组成;主份处理电路采用一个单片机控制,将调焦编码器和偏流编码器的主份信号经过精码细分、粗码译码、精粗校正后,转换成 16 bit 自然二进制角度代码,再经串行接口电路传送给相机主控制器。

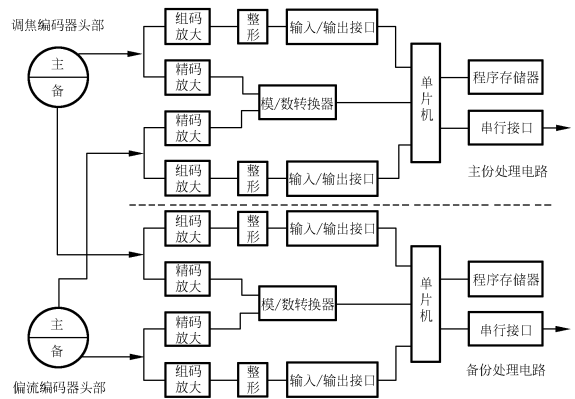


图 7 编码器子系统组成原理框图

Fig. 7 Principle block diagram of encoder subsystem

调焦编码器和偏流编码器的备份处理电路在同一块电路板上,由粗码放大、整形、输入/输出接口、精码放大、模/数转换器、单片机、程序存储器、串行接口等部分组成;备份处理电路工作原理与主份相同。备份处理电路将备调焦编码器和备偏流编码器角度代码传送给相机备控制器。

处理电路中所用的电子器件为航天级器件;主份、备份供电电源隔离;COMS 器件进行防拴锁处理;主份与备份电路采取防潜通措施。

4 精度检测

编码器的精度检测装置如图 8 所示,检测编码器是一台精度为 2" 的 23 bit 绝对式光电编码器,作为角度基准。

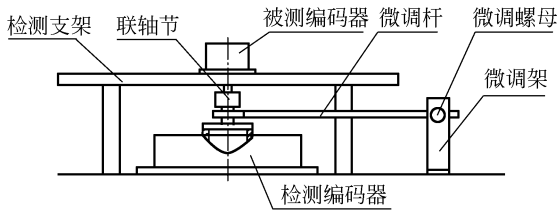


图 8 编码器精度检测装置原理图

Fig. 8 Principle of precision test equipment for encoder

检测采用比较法,将被测编码器与检测编码器相同位置的角度值进行比较,求出两者的差值,

表 2 编码器精度测量结果(单位:角秒)

Tab. 2 Results of precision measurement of encoder(Unit: ")

测量位置	主编码器误差值	备编码器误差值
0	0	0
30	10	-20
60	-30	-50
90	15	10
120	0	-30
150	-40	-20
180	10	20
210	-10	-15
240	-20	-60
270	10	25
300	10	-10
330	-20	-60
0	0	0

参考文献:

- [1] 董莉莉,熊经武. 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. Development of photoelectric rotary encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2): 198-202. (in Chinese)

记为该角度的误差值^[5-7]。全周 0°~360°范围内,每隔 30°测 1 个点,共 13 个点,按(1)式求出标准偏差。主(备)编码器精度测量结果如表 2 所示。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n-1}} \quad (1)$$

编码器误差分布如图 9 所示,系列 1 为主编码器误差分布曲线, $\sigma_{\text{main}} \approx 17.38''$, $\delta_{\text{main max}} = 15''$, $\delta_{\text{main min}} = -40''$; 系列 2 为备编码器误差分布曲线, $\sigma_{\text{spare}} \approx 27.29''$, $\delta_{\text{spare max}} = 25''$, $\delta_{\text{spare min}} = -60''$ 。

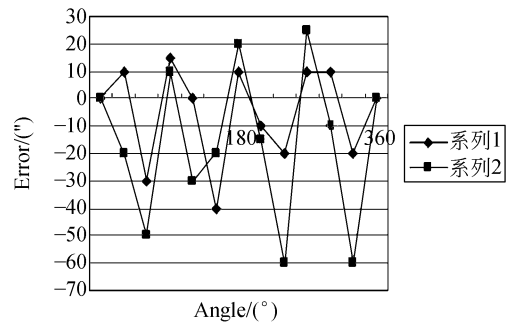


图 9 编码器误差分布图

Fig. 9 Error distribution of encoder

5 结论

双读数系统的航天级绝对式光电编码器具有冷备份功能,且体积小、重量轻、抗干扰能力强。实验结果表明:双读数系统的航天级绝对式光电编码器外形尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$ 、重量为 150 g、分辨力为 20"、精度为 $\sigma \leq 30''$ 。该编码器可实现航天相机的调焦、偏流角的测量,满足航天相机的要求,并能有效地减小相机的体积,减轻其重量。本编码器还可应用于其它航天仪器设备中,完成位移量的测量与控制。

- [2] EVITON I D B, KIRK J, LOBSINGER I. Ultra-high resolution Cartesian absolute optical encoder [J]. *SPIE*, 2003, 5190: 111-121.
[3] 熊文卓,孔智勇,张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 11: 1745-1748.
XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase

correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,11: 1745-1748. (in Chinese)

[4] 曹振夫. 小型绝对式矩阵编码器[J]. 光学机械, 1995,5:65-70.

CAO ZH F. Micro absolute matrix encoder [J]. *Optics and Fine Mechanics*, 1995,5:65-70. (in Chinese)

[5] 余琳,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)

[6] 邓方,陈杰,陈文颀,等. 一种高精度的光电编码器

检测方法及其装置[J]. 北京理工大学学报, 2007,27 (11):977-980.

DENG F, CHEN J, CHEN W J, *et al.*. A high precision test method and apparatus for photoelectric encoder[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2007, 27 (11): 977-980,1008. (in Chinese)

[7] 洪喜,续志军,杨宁. 基于径向基函数网络的光电编码器误差补偿法[J]. 光学精密工程, 2008,16(4): 598-604.

HONG X, XU ZH J, YANG N. Error compensation of optical encoder based on RBF network method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(4):598-604. (in Chinese)

作者简介:



万秋华(1962—),女,吉林长春人,研究员,博士,主要从事光电位移精密测量及高精度光电编码器等方面的研究。
E-mail: wanqh@ciomp.ac.cn

孙莹(1982—),女,吉林敦化人,博士研究生,主要从事光电位移转换技术及光电编码器的研究。E-mail: sun96ying@163.com

王树洁(1963—),女,吉林长春人,大学,高级工程师,主要从事光电位移转换技术及光电编码器的研究。

余容红(1957—),女,吉林长春人,大专学历,高级实验师,主要从事电子仪器方面的研究。E-mail: ciomp2002@yahoo.com.cn

卢欣然(1978—),男,辽宁本溪人,硕士研究生,助理研究员,主要从事光电位移转换技术及光电编码器的研究。E-mail: luxinrancomp@yahoo.com.cn

梁立辉(1980—),男,吉林舒兰人,博士研究生,助理研究员,主要从事光电位移转换技术及光电编码器的研究。E-mail: leungleehuei@126.com

●下期预告

基于涂料性能参数的红外隐身技术

陈 翱,张 健,王艳武,杨 立

(海军工程大学 船舶与动力学院动力工程系,湖北 武汉 430033)

根据数值传热学的方法模拟出目标表面温度分布,并分析了隐身涂料的性能参数(短波吸收率 α_s 、长波吸收率 α_l 与表面发射率 ϵ_t)对目标表面温度的影响;最后,模拟出这些性能参数对红外探测系统作用距离的影响。分析结果表明:三种性能参数均会对目标表面温度产生影响。 α_s 、 α_l 与表面温度成正比, ϵ_t 与表面温度成反比,影响幅度可达 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 左右;探测系统作用距离与背景温度、气象条件、探测器性能等多种因素相关,根据实际情况调整涂料性能参数可使作用距离最小。基本满足红外隐身涂料设计、选型与使用方面的实际需求。