

航天级双读数多圈绝对式光电编码器设计

左洋^{1,2} 龙科慧¹ 周磊¹ 刘金国¹ 乔克¹

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中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用多圈光电编码器具有体积小、量程大以及数字量输出等优点,设计了基于双读数系统的航天级多圈绝对式光电编码器。根据航天相机的精度要求,采用精度高、分辨率高的绝对式矩阵玻璃码盘作为一级码盘完成角度测量;根据电机转动的计数要求,采用重量轻、体积小的绝对式矩阵金属码盘作为二级码盘完成对一级码盘的转动圈数计数;其具有的双狭缝及双读数系统可实现信号处理电路冷备份。按照鉴定级航天产品要求,通过热学环境实验和力学环境实验对编码器性能进行了验证。实验结果表明,所设计的编码器精度范围为 $\pm 100''$ 内、分辨率为 $80''$ 、测量圈数为16圈、外形尺寸为 $\phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 、重量为270 g,稳定性高、可靠性强,且满足高分辨率航天设备设计指标。

关键词 传感器; 航天相机; 调焦机构; 多圈编码器; 冷备份; 高分辨率

中图分类号 TP212.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP52.022801

Design for Spaceborne Multi-Turn Photoelectric Encoder of Dual Numerical System

Zuo Yang^{1,2} Long Kehui¹ Zhou Lei¹ Liu Jinguo¹ Qiao Ke¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract According to the requirements of high-resolution spaceborne camera focusing mechanism, a dual readings multi-turn absolute encoder is designed. Accuracy and high-resolution glass plate is the first level absolute matrix optical code disc; metal plate with light weight and small size is the second level absolute matrix optical code disc which completes the count of the number of first level disc turns; double slit and double reading system to meet the circuit cold backup. The encoder can offer that resolution of $80''$, accuracy between $\pm 100''$, cylinder number is 16, its dimensions for $\phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$, weight of 270 g. According to the requirements of identified spaceborne product, the function of encoder is verified through kinds of experiments. The experimental result shows that the encoder is stable, reliable and satisfies for the requirement of high-resolution spaceborne focusing mechanism.

Key words sensors; spaceborne camera; focusing mechanism; multi-turn encoder; cold copy; high-resolution

OCIS codes 280.4788; 280.4991; 120.0280

1 引言

光电编码器是一种角度传感器,具有精度高、体积小、重量轻等优点,通过精密机械装联,可将角位移量转换成线位移量,有效地缩小机械结构的尺寸,因而被应用于航天相机调焦机构中,作为位置反馈元件测量相机的焦面位置^[1-3]。

随着我国航天科技的飞速发展,对航天相机的成像能力、分辨率要求越来越高,调焦范围加大,使得原

收稿日期: 2014-06-29; 收到修改稿日期: 2014-07-08; 网络出版日期: 2015-01-15

基金项目: 总装备部“十一五”计划重点型号项目、国家自然科学基金(61108066)

作者简介: 左洋(1987—),男,博士研究生,主要从事光电角位移传感器应用技术方面的研究。

E-mail: zuoyang_1987@163.com

导师简介: 龙科慧(1958—),女,研究员,博士生导师,主要从事空间遥感器成像技术方面的研究。

E-mail: long_kh@163.com

有的单圈双读数编码器不能满足测量要求,而多圈单读数编码器不能实现电路系统的冷备份,降低了航天设备的可靠性,如果采用两台编码器互为冷备份,则增加相机调焦机构的体积。

本文介绍了一种基于双读数系统的航天级多圈绝对式光电编码器,编码器一级码盘沿用已有技术,在直径为 $\phi 38 \text{ mm}$ 的码盘上采用错位排列码道设计,二级码盘选用绝对式矩阵金属码盘完成一级码盘转动圈数计数,以双狭缝及双读数实现电路系统冷备份,确保航天设备的工作可靠性,该编码器按照航天产品要求分别在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所通过了热环境实验和力学环境实验,在北京某所通过了冲击实验和离心加速度实验,编码器外形尺寸为 $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 、重量为 270 g ,与已有的航天级单圈双读数编码器相比体积与重量略有增加。

2 双读数多圈编码器设计

多圈编码器由一、二级两个编码器组成,一级编码器用于 360° 范围内的精密测量,二级编码器用于记录一级编码器转动圈数,两者通过一定速比的精密齿轮相连。

设计要求:

- 1) 测角精度范围在 $\pm 100''$ 内;
- 2) 测量圈数大于 2 圈;
- 3) 满足航天可靠性要求。

设计原则:在确保技术指标的前提下,尽量使结构紧凑,体积小、重量轻、可靠性高。

2.1 双读数多圈编码器的组成和工作原理

多圈编码器结构原理如图 1 所示,它包括主轴 1、连接法兰 2、内置连轴器 3、一级发光板 4、一级码盘 5、一级狭缝 6、一级接收板 7、齿轮副支撑板 8、二级轴及主备份信号数据处理系统 9、二级码盘 13、二级狭缝 12、二级接收板 11、二级发光板 10。

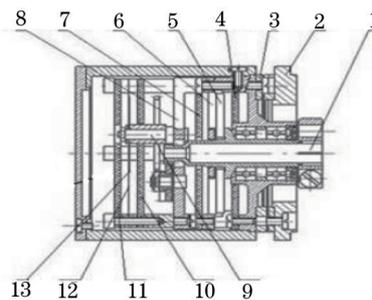


图 1 编码器结构图

Fig.1 Structure of encoder

编码器工作时,一级码盘随主轴旋转,一级发光管发出的光经一级码盘和一级狭缝照射到一级接收管上,支撑板上与一级主轴连接的精密齿轮带动二级轴旋转,二级发光管发出的光经二级码盘和二级狭缝照射到二级接收管。两套码盘的光电输出信号经主、备份信号数据处理电路后共同组成一组完整的 18 位自然二进制代码输出,其中高 4 位表示主轴旋转的圈数,低 14 位表示主轴 360° 内的旋转角度^[4]。

主、备编码器互为冷备份,即当主份编码器工作时,备份编码器不通电;反之亦然。

2.2 编码器的轴系设计

轴系由主轴、轴承套和轴承构成。由于组成轴系的零件表面形状误差,相互位置误差等因素的影响,主轴在回转的过程中,其回转中心将与理想轴线产生偏差,而影响编码器精度的主要原因是一级轴系的径向晃动和端面跳动^[5-6]。

径向晃动产生的角度误差:

$$\Delta\alpha = \frac{e}{r}\rho \sin\theta, \quad (1)$$

式中 e 为轴系的径向跳动量, r 为码盘刻划半径, ρ 为常数, θ 为跳动方向与测量点的方位夹角。

端面跳动产生的误差:

$$\Delta\varphi = \frac{\tan r \times \Delta h}{R} \rho, \quad (2)$$

式中 r 为光线倾斜角度, Δh 为光栅端面跳动量, R 为光栅半径。

由此可见,当端面跳动量和径向晃动量很大时,其产生的误差将影响编码器的精度。编码器一级码盘刻划半径为 14 mm,轴系加工装调结果应满足径向晃动误差 $\Delta\alpha \leq 10''$,端面跳动误差 $\Delta\varphi \leq 2''$ 。轴头径向晃动重复性小于等于 0.001 mm;端面跳动小于等于 0.002 mm;轴向窜动小于等于 0.005 mm。

编码器采用滚动轴承轴系,优点是结构简单,装调方便,摩擦力矩小,磨损小,对温度变化不敏感,具有互换性,维护修理比较简单。轴和轴套选用具有中等强度和韧性、膨胀系数小、膨胀系数相近的材料。轴选用 1Cr18Ni9Ti,轴套选用 40Cr,轴承选用深沟球轴承,型号 628/6-P4。轴和轴套与轴承尺寸配合,轴承需涂低挥发航天级润滑脂处理。

2.3 码盘和狭缝设计

2.3.1 一级码盘和狭缝设计

一级码盘和狭缝沿用了原有技术。图 2(a)为一级矩阵码盘示意图,采用错位排列码道设计,内四圈粗码道包含了 A1-A9 粗码信息,外圈精码道可获取 0、90、180、270 精码信号,通过幅值细分可得到 A10-A14 精码信息。

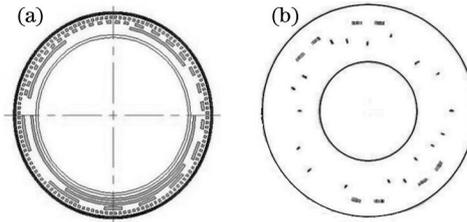


图 2 一级码盘与一级狭缝图。(a) 一级码盘; (b) 一级狭缝盘

Fig.2 Diagram of the first level code and slit disc. (a) First level code disc; (b) first level slit disc

一级狭缝盘设计与码盘对应的错位排列双狭缝图案,如图 2(b)所示。双狭缝图案由两套独立的单狭缝图案在角度位置上相差 135° 叠加而成。两组狭缝分别对应主份发光接收管和备份发光接收管。一级码盘随主轴转动时,光信号经过一级码盘和一级狭缝的调制后,通过一级接收板转换为表示 $0^\circ \sim 360^\circ$ 角度位置信息的电信号。

一级码盘和一级狭缝盘的基底材料均为 2 mm 厚的 K9 光学玻璃,其透光率高、硬度强。狭缝图案均采用镀铬、光刻、复制的方法制备^[7]。

2.3.2 二级码盘和狭缝设计

编码器的测量圈数由二级码盘决定。考虑到齿轮啮合时齿间的间隙及校正范围,若校正码道的线周期较小,无法起到校正的作用,从而出现错码,测量不精确,若校正码道的线周期较长,二级码盘的位数就较少。为了提高编码器的工作可靠性,需要根据调焦机构的要求及结构尺寸合理选择二级码盘位数^[8]。本编码器采用 5 位矩阵码盘,高 4 位为圈数测量码道,最低位为校正码道,最大测量圈数为 16 圈,满足航天相机的调焦范围,也为增大调焦行程留有余量。

为了减小编码器整体重量与体积,拟选用金属材料作为二级码盘的基底。金属盘的特点是耐冲击、振动,轻、薄,温度特性差,刻划难等,适用于分辨率低的小型编码器中。常用的金属码盘有铝、铜和不锈钢(1Cr18Ni9Ti)等,厚度为 0.1 ~ 0.3 mm,表 1 为 3 种材料对照表^[9]。为了使主、备份发光元件和接收元件位置分散放置,摆放灵活,二级码盘的外径尺寸设计为 $\phi 22$ mm。考虑到刚度、强度、外型尺寸、加工难易程度等多种因素,码盘与狭缝选用 0.3 mm 厚的 1Cr18Ni9Ti 型不锈钢。为防止码盘旋转时边缘振颤,码盘与狭缝产生摩擦,设计时将码盘与狭缝的间距拉大至 0.5 mm。由于二者的基底材料刚度大、材料相同、变形量相同,当编码器在不同环境下工作时,对光电信号的影响小。

表1 金属材料对照表

Table 1 Comparison of metal material

Metal material	Strength of extension /(MN/m^2)	Yield strength /(MN/m^2)	Hardness /HB
Al	175~470	≥ 195	60~120
Cu	245~440	≤ 200	90~420
Stainless steel	≥ 550	≥ 200	≤ 187

二级码盘如图3(a)所示,码道分为3圈,A圈 $0^\circ\sim 180^\circ$ 透光,为第一位和第二位,B圈为第三位和第四位,C圈为校正位,码道宽度为0.5 mm。

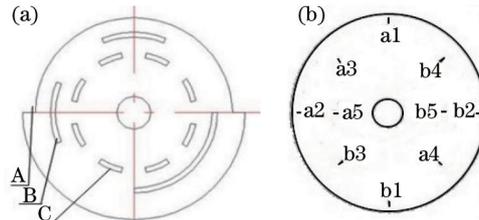


图3 二级码盘与二级狭缝图。(a) 二级码盘;(b) 二级狭缝

Fig.3 Diagram of the second level code and slit disc. (a) Second matrix code disc; (b) second slit disc

选择合理的狭缝宽度使编码器在各种使用条件下不错码,并兼顾粗码光电信号幅值是粗码设计的主要内容。二级狭缝如图3(b)所示,狭缝宽度为0.1 mm,刻画有两组互成 135° 的狭缝。狭缝与光电管一一对应,主份光电管包括a1,a2,a3,a4,a5,备份光电管包括b1,b2,b3,b4,b5。它们分别表示5位矩阵码的第一位到第五位,a1、a2、b1、b2对应二级码盘的A圈码道,a3、a4、b3、b4对应B圈码道,a5、b5对应C圈码道。当主轴转动 360° 时,二级主轴转动二级码盘的一个分辨率,二级接收板输出表示主轴旋转圈数的电信号。

2.3.3 一级码盘与二级码盘的连接

如图4所示,一级码盘与主轴连接,当主轴旋转时带动一级码盘转动,通过支撑板上的精密齿轮系带动二级码盘旋转。在结构设计中采用10:20,10:20,8:32的3组齿轮作为齿轮系结构,形成1:2,1:2,1:4的3级齿轮传动,保证传动的精度,控制齿轮组的空回量以及一、二级编码器间角度的衔接和校正范围。

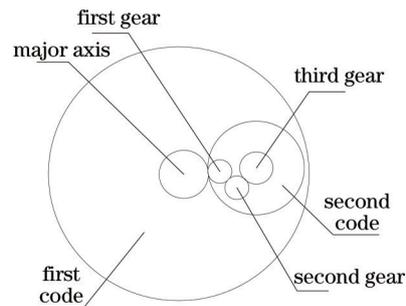


图4 两级码盘连接图

Fig.4 Connection of code disc

当主轴转动并即将进入第 N 圈时,由于加工和装调等原因,二级主轴可能未到 N 圈或已进入 N 圈计数,此时,通过判断一级接收板输出高两位信号与二级接收板输出的低一位信号组成的校正码,能够对二级接收板输出的圈数信息进行软件校正,这样降低了加工及装调的复杂程度。

3 编码器的精度分析

光电轴角编码器系统误差主要包括长周期误差、细分误差。

长周期误差属于系统误差,包括:1) 码盘刻线分度误差 $\Delta\Psi_1$;2) 码盘安装偏心及轴系晃动引起的刻线位置误差 $\Delta\Psi_2$;3) 照明光线倾斜与码盘端跳组合引起的刻线位置附加误差 $\Delta\Psi_3$ ^[10]。

细分误差属于随机误差,包括:1) 两路细分模拟信号($A\sin\theta$ 、 $A\cos\theta$)幅值不等引起的误差 $\Delta\Psi_4$;2) 剩余直流分量产生的误差 $\Delta\Psi_5$;3) 信号非正交性引起的误差 $\Delta\Psi_6$ ^[11-12]。

由于各项误差分布形式极其复杂,在研究其误差分布形式时将其近似看成正态分布。各误差相互独立、互不相关,在实际应用中常用方和根法合成误差,此法得到的误差极限值比较接近实际情况。

双读数多圈绝对式编码器的设计指标是:码盘精码道刻划中径 $D=26.8\text{ mm}$;最高刻线数 $N=512$;刻线长度 $L=0.16\text{ mm}$ 。

机械加工、安装、调试要求:偏心量 $e<0.001\text{ mm}$;码盘端跳 $\Delta G<0.002\text{ mm}$;照明光线倾角 $\gamma<2^\circ$ 。

电信号调整要求:放大后的精码信号 $A\sin\theta$ 、 $A\cos\theta$ 幅值 $A=2.5\text{ V}$,两信号幅值不等 $\Delta A<100\text{ mV}$;剩余直流分量 $\Delta U_0<100\text{ mV}$;信号不正交 $\phi=3^\circ$ 。

计算得出各项误差极值列于表2中。

表2 编码器主要误差
Table 2 Main error of encoder

$\Delta\Psi_{1\text{ max}}$	$\Delta\Psi_{2\text{ max}}$	$\Delta\Psi_{3\text{ max}}$	$\Delta\Psi_{4\text{ max}}$	$\Delta\Psi_{6\text{ max}}$	$\Delta\Psi_{6\text{ max}}$
7.69"	15.27"	1.92"	8.05"	16.14"	14.08"

根据方和根法误差合成(3)式得出 $\sigma=28.63''$

$$\sigma = \sqrt{\Delta\psi_1^2 + \Delta\psi_2^2 + \Delta\psi_3^2 + \Delta\psi_4^2 + \Delta\psi_5^2 + \Delta\psi_6^2}. \quad (3)$$

由于各项误差为正态分布,因此预计编码器峰值误差为 $\pm 3\sigma$ (即 $\pm 85.89''$),在编码器精度范围 $\pm 100''$ 内。

4 实验检测

为验证双读数多圈光电编码器性能指标,按照航天产品较为苛刻的实验条件——鉴定级产品实验要求,在中国科学院长春光学精密机械与物理研究所环境实验站和北京某所对编码器进行热、力学实验。

热环境实验包括热循环实验和热真空实验^[13]。

热循环实验条件为:

- 1) 环境压力:常压;
- 2) 实验温度:高温 $70\text{ }^\circ\text{C}$,低温 $-35\text{ }^\circ\text{C}$;
- 3) 循环次数:25.5次;
- 4) 温度速率:平均升降温度速率为 $(3\sim 5)\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$,最小不低于 $1\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

热真空实验条件为:

- 1) 环境压力:小于等于 $1.3\times 10^{-3}\text{ pa}$;
- 2) 实验温度:高温 $70\text{ }^\circ\text{C}$,低温 $-35\text{ }^\circ\text{C}$;
- 3) 循环次数:6.5次;

热环境实验中在每个循环的高低温各保温 4 h ,在开始保温的 2 h 后,对编码器通电进行检查,编码器输出数据进位正常,无错码出现。说明码盘与狭缝盘没有出现变形和移位现象,两级码盘控制齿轮吻合没有出现错位卡死现象,轴系转动均匀。

力学环境实验包括正弦振动实验,随机振动实验,加速度实验,冲击实验^[14]。

正弦振动实验条件如表3。

表3 正弦振动实验条件
Table 3 Requirements of sine vibration test

Direction	Frequency range /Hz	acceleration/amplitude 0~P/(g/mm)	
		Identification /mm	Acceptance /mm
X,Y,Z	10~20	5	3.3
	20~40	8.0	5.3
	40~80	12.0	8.0
	80~100	5.0	3.3
Scan rate /(oct/min)		Each direction 2	Each direction 4

随机振动实验条件如表4。

表4 随机振动实验条件

Table 4 Requirements of random vibration test

	Identification	Acceptance
10~100 Hz	+3 dB/oct	+3 dB/oct
100~600 Hz	0.078 dB/oct	0.035 dB/oct
600~2000 Hz	-9 dB/oct	-9 dB/oct
Acceleration	8.1 grms	5.4 grms
Time /s	120	60
Direction	X、Y、Z	X、Y、Z

加速度实验条件为：

- 1) $a(x)=a(y)=a(z)=8g$;
- 2) 实验时间：达到最大后保持 2 min；
- 3) 加载速率：不大于(0.5~1.0) g/s。

冲击实验条件如表 5。

表5 冲击实验条件

Table 5 Requirements of shock test

Frequency range /Hz	Identification ($Q=10$) /(dB/cot)
100~500	+6
500~ ≥ 3000	600
Direction	X、Y、Z
Loading times	3

经正弦振动实验,随机振动实验,加速度实验,冲击实验等力学实验后,对编码器进行测试,输出的二进制数据进位正常,无错码出现。实验表明两级码盘没有损坏,两级轴系连接正常。

表 6 为实验前后主备份编码器精度检测结果。

表6 精度测量结果

Table 6 Results of precision measurement

Position /($^{\circ}$)	Before experiment				After experiment			
	Major /($''$)		Minor /($''$)		Major /($''$)		Minor /($''$)	
	Forward	Rverse	Forward	Rverse	Forward	Rverse	Forward	Rverse
0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	-25	-25	+30	+35	-30	-10	+40	+25
60	-50	-45	+10	-10	-65	-55	+25	+10
90	+25	+20	+15	+15	+10	+5	+30	+35
120	+20	+15	+35	+30	+35	+25	+50	+40
150	-50	-40	-20	-50	-70	-50	-40	-65
180	+30	+35	-25	-20	+50	+45	-15	-30
210	+30	+35	+25	+30	+40	+50	+15	+20
240	-35	-30	-55	-60	-15	-20	-65	-75
270	+35	+30	-15	-20	+20	+40	-30	-30
300	-5	-10	+30	+25	-15	-25	+15	+15
330	-50	-45	-10	-10	-35	-30	-25	-20

编码器主份读数系统最大误差值为+50'',最小误差值为-70'';备份读数系统最大误差值为+50'',最小误差值-75''。正反向检测角度误差重复性较好,并满足编码器精度范围在 $\pm 100''$ 内的要求,一级码盘数据与二级码盘数据连接吻合,进位正常。检测结果证明了经过热、力学环境实验后编码器仍能达到航天级产品设计要求,稳定性强,可靠性高。

4 结 论

基于双读数系统的航天级多圈绝对式光电编码器相对于传统的单圈双读数编码器,增加了一套光栅测量系统,采用高精度齿轮机构将两套光栅测量系统互联,通过软件校正保证两套测量系统的无缝连接,降低了齿轮加工及装调难度。两套光栅测量系统中均具有主、备份双组读数,符合航天高分辨率相机调焦机构行程大、高可靠性的要求。

参 考 文 献

- 1 Wan Qihua, Sun Ying, Wang Shujie, *et al.*. The design for spaceborne absolute photoelectric encoder of dual numerical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(1): 52-57.
万秋华, 孙莹, 王树洁, 等. 双读数系统的航天级绝对式光电编码器设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1): 52-57.
- 2 I D B Eviton, J Kirk, I Lobsinger. Ultra-high resolution Cartesian absolute optical encoder[C]. *SPIE*, 2003, 5190: 111-121.
- 3 Kong Zhiyong, Ai Hua, Xiong Jingwu. The matrix photoelectric rotary encoder using the self imagery technique of grating[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2002, 23(1): 3-55.
孔智勇, 艾华, 熊经武. 采用光栅自成像技术的小型绝对式矩阵编码器[J]. *仪器仪表学报*, 2002, 23(1): 3-55.
- 4 Zhao Zhiwei. Development of an absolute three axes linkage multiloop encoder[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 32(1): 8-10.
赵志巍. 一种绝对式三轴联动多圈编码器的研制[J]. *长春理工大学学报: 自然科学版*, 2009, 32(1): 8-10.
- 5 Zhang Shiyi, Han Xudong, Ai Hua. Application of multi-turn photoelectric rotary encoder in length measurement[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(z1): 76-80.
张世轶, 韩旭东, 艾华. 多圈光电轴角编码器在直线位移测量中的应用[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(z1): 76-80.
- 6 Zhao Bo. Absolute type three grades combined photoelectric shaft encoder[J]. *Control & Automation*, 2008, 24(5): 12-14.
赵波. 绝对式三级组合光电轴角编码器[J]. *微计算机信息*, 2008, 24(5): 12-14.
- 7 D Mancini, E Cascone, P Schipani. Galileo high-resolution encoder system[C]. *SPIE*, 1997. 328-334.
- 8 Wei Huilin, Yang Yunqi, Lü Jihong, *et al.*. Application of ISP device in multi-turn type absolute encoder[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(6): 21-23.
魏慧林, 杨云歧, 吕继红, 等. ISP器件在多圈绝对式编码器中的应用[J]. *光电工程*, 2003, 30(6): 21-23.
- 9 Zhao Zhiwei, 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, 陈赟. 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.
- 10 Luo Changzhou, Sun Yan, Gao Liming, *et al.*. Theoretical analysis on phase of Moiré fringes' signal affected by shaft eccentricity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(8): 1013-1016.
罗长洲, 孙岩, 高立民, 等. 码盘偏心对叠栅条纹信号相位影响的理论分析[J]. *光学学报*, 2003, 23(8): 1013-1016.
- 11 Chu Xingchun, Lü Haibao, Zhao Shanghong. Investigation of high precision subdivision method for fringes based on fast Fourier transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(12): 2179-2183.
楚兴春, 吕海宝, 赵尚弘. 基于傅里叶变换的高精度条纹细分方法[J]. *光学学报*, 2007, 27(12): 2179-2183.
- 12 Zhao Yong, Su Xianyu, Zhang Qichan. Phase subdivision of absolute coding grating and application in displacement measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812005.
赵勇, 苏显渝, 张启灿. 绝对编码光栅的相位细分及其在位移测量中的应用[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0812005.
- 13 Jia Xuezhi, Wang Dong, Zhang Lei, *et al.*. Optimizing design and precision experiment of focusing mechanism in lightweight space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(8): 1824-1831.
贾学志, 王栋, 张雷, 等. 轻型空间相机调焦机构的优化设计与精度试验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(8): 1824-1831.
- 14 Chen Dingyue. Research on environment vibration experiment upon optical precision spaceflight apparatus during transportation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(7): 711-714.
陈丁跃. 光学精密航天仪器运载中的环境振动试验研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(7): 711-714.

栏目编辑: 张浩佳