

文章编号 1004-924X(2012)07-1517-08

车载激光系统光束控制反射镜角位移测量装置

王恒坤^{1*}, 张国玉¹, 郭立红², 王兵², 韩旭东², 郭汝海²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 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:为了使快速控制反射镜(FSM)能在车载、舰载等运动环境下稳定工作,并具有很高的控制精度,研制了一套高精度角位移测量装置,该装置通过精确地提供反射镜摆角信息作为系统的反馈信号来实现伺服闭环控制。针对传统快速控制反射镜位置信息反馈传感器的精度低以及不适于动载环境等缺点,采用田字裂相信号提取方法设计了基于莫尔条纹计数测量原理的精密光栅,并通过计算机进行仿真分析设计了具有抗干扰能力和耐高低温变化的绝对零位信号,其对比度达0.25。对信号处理电路进行高度集成,实现了小型化。实验结果表明,反射镜角位移测量装置测量的反射镜角分辨率 $0.15''$,测角精度优于 $0.4''$,完全能满足机动式条件下,高能激光发射系统对FSM控制精度的要求。

关键词:车载激光武器;快速控制反射镜;光栅;光束控制;角位移测量

中图分类号:TH822;TH745 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1517

Angle displacement measurement device for fast-steering mirror in vehicular laser system

WANG Heng-kun^{1*}, ZHANG Guo-yu, GUO Li-hong, WANG-Bing,
HAN Xu-dong, GUO Ru-hai

(College of Opto-electronic Engineer, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China; Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: whengkun@tom.com

Abstract: To control of a Fast Steering Mirror(FSM) stably and precisely in the circumstances of vehicles and ships, a high precision device for angle displacement measurement was designed to provide the mirror sway angle information as a feedback signal to realize the servo closed loop control. As traditional detectors for the FSM are disadvantageous to high-precision work in the mobile circumstance, a precision grating based on the Moire fringe counting measurement principle was designed by using the Chinese characters Tian' splitting phase method. At the same time, the absolute zero point signal against jamming and temperature changing was designed through computer simulation and its contrast ratio was 0.25. Furthermore, in order to realize the miniature, the signal processing circuit was highly integrated. Experimental results indicate that the resolution of the measurement device is $0.15''$ and

收稿日期:2012-03-18;修订日期:2012-05-18.

基金项目:国家863高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA7031024G);吉林省自然科学基金资助项目(No. 201115123)

the angle precision is higher than $0.4''$. This device satisfies the requirements of angle measurement precision in the mobile condition for the high-energy laser projecting systems.

Key words: vehicle-borne laser weapon; Fast Steering Mirror (FSM); grating; beam control; angle displacement measurement

1 引言

激光技术是 20 世纪中期发展起来的一门高新技术,激光以其高功率输出、高光束质量、方向性强、单色性好、相干性好等特点^[1-2],被广泛应用于工业、农业、医疗、娱乐等诸多领域^[3]。

激光技术在军事上不但能提高现有常规武器的命中率,还能为军队提供新型的战术武器,从而极大地增强军队在现代战争中的作战能力,其主要应用于激光雷达、激光测距、激光制导导弹、航空航天、电子对抗等方面^[4-5]。作为完整的激光武器作战系统,要实现袭来目标的监视、侦察、捕获跟踪、瞄准以及依靠强激光对目标的关键部位造成破坏,必须使光束在一定时间间隔内稳定照射在目标点上^[6]。

车载战术高能激光武器的载车在行进时其车体在路面上的运动和振动会引起激光光束指向产生低频“抖动”,载车发动机和配套设备工作时也会产生振动,这些因素都会对光束稳定性产生影响^[7]从而干扰跟瞄效果。当然跟瞄不准确,会引起光斑尺寸扩大,降低强激光的远场能量密度从而降低对目标的破坏效果。为了提高激光武器跟踪系统的精度、稳定性和系统响应速度,通常采用复合轴跟踪系统,大惯量跟踪架先进行粗定位,子系统即快速控制反射镜进行精确跟踪^[8]。

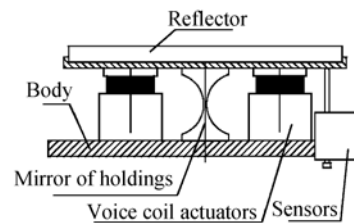
快速控制反射镜(FSM)的主要作用是稳定光学系统的光束指向,已经广泛应用于自适应光学、精密跟踪、光束控制及空间激光通信等领域^[9-10]。目前,对于快速控制反射镜的研究多针对地基光学设备的应用,有关快速反射镜在车载、机载、舰载等运动状态下,处于冲击和振动环境中高精度、高稳定、高工作带宽方面的研究鲜有文献报道^[11-12]。

为了得到高精度的 FSM 系统,需要精确地测量反射镜摆角并将其作为系统的位置反馈信息,进而实现伺服系统的闭环控制。快速控制反

射镜的测角装置,通常采用位置敏感器(PSD)和四象限光电探测器等元件。由于上述测量方式精度较低且易受到干扰,影响 FSM 系统的性能,本文设计了一套高精度角位移信息测量装置,该装置完全能满足车载、机载等运动环境下高能激光发射系统对 FSM 控制精度的要求。

2 FSM 角位移信息反馈原理

该快速控制反射镜安装在大惯量的激光发射系统的主光轴上,与发射系统的红外精跟踪探测器形成光闭合回路,实现对光轴的稳定控制。快速控制反射镜主要由驱动器、角度位置信息传感器、联接支撑机构、高精度反射镜以及伺服控制电路等几部分组成,图 1(a)和(b)分别为快速控制反射镜结构示意图和实物图。首先控制电路上电,通过功率级放大器使驱动器工作,推动反射



(a) 结构示意图

(a) Diagram of structural principle



(b) 实物图

(b) Picture of practical object

图 1 快速控制反射镜图

Fig. 1 Fast steering mirror

镜作小角度摆动,再由传感器将反射镜角度信息作为反馈信号传给控制电路形成闭环回路,从而使快速控制反射镜达到稳定状态,实现对光束指向和光束稳定的精确控制。

从目前对 FSM 研究的报道来看,角度或位置信息传感器普遍采用 PSD 和四象限光电探测器等元件,文献[13]指出对于上述光电测量元件,只有当参考光光斑位于探测器的中心附近时,才能实现较高的检测精度,当光斑远离探测器中心时,其光斑检测精度将下降,同时检测精度还受到参考光源品质和背景杂散光的影响,限制快速反射镜控制精度的提高。

为了使快速控制反射镜能够在车载、舰载等运动环境中稳定使用,并且在动态条件下仍具有很高的控制精度,反射镜角位置信息的反馈在 FSM 系统中起到关键性作用。因此,本文研制了一种角秒级的高精度角位移测量装置,测量原理如图 2 所示。

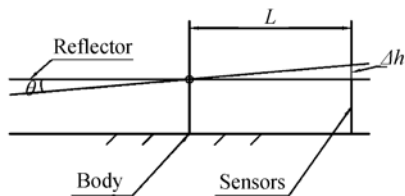


图 2 FSM 角位移测量原理图

Fig. 2 Measurement principle for FSM angle displacement

测量装置的探测点距反射镜回转中心距离为 L (设计中取 80 mm),当反射镜作微小角度 $\Delta\theta$ 摆动时,测量装置移动 Δh ,由公式(1)可以将测量装置的位移变化量转化为反射镜的角度变化量。

$$\Delta\theta = \arctan\left(\frac{\Delta h}{L}\right). \quad (1)$$

将角度变化量 $\Delta\theta$ 作为控制系统的反馈信号传给 FSM 控制系统的高速 DSP 处理电路,达到对快速反射镜的精度控制。

3 角位移测量装置设计

本文的角位移测量装置采用光栅莫尔条纹技术,具有高分辨率、高测量精度、抗干扰能力强以及高响应频率等优点。角位移测量装置主要包括光栅副和信号处理电路、发光组件、光电接收器、

接触探头等部分,结构如图 3 所示。

测量方式采用接触式测量,由发光组件发出红外光源准直照射在标尺光栅上,当反射镜发生小角度摆动时,接触探头会随反射镜发生微量移动,带动角位移测量装置主轴上的标尺光栅一起移动,与固定的指示光栅之间产生相对运动,出现明暗交错变化的莫尔条纹,位于指示光栅后面的光电接收器将接收的光信号转变成电信号,形成有规律的正弦信号和零位信号,这些电信号包含反射镜的角位移信息。

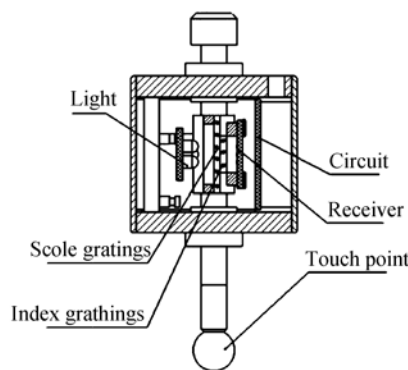


图 3 角位移测量装置结构图

Fig. 3 Structure of measurement device for angle displacement

3.1 光栅测量技术原理

将 2 块栅距相等的长光栅刻线面对面相叠合,并使 2 块光栅的栅线形成微小角度,当光栅相对移动 1 个栅距时,在与栅线垂直方向上的莫尔条纹也相应移过 1 个条纹间距,此时莫尔条纹方程为^[14]:

$$\omega = \frac{P}{\sqrt{2(1 - \cos \theta)}}, \quad (2)$$

式中: ω 为条纹宽度; P 为光栅栅距; θ 为 2 光栅叠合栅线夹角。

当莫尔条移过 1 个条纹间距时,光电信号变换 1 个周期,如果采用电子学插值细分方法将 1 个信号周期进行 n 份细分后,就等同于光栅栅距被细分 n 等份,则有单位栅距内的位移增量 $\Delta\omega = \omega/n$ 。当 2 光栅相对移动距离为 S 时,有如下公式:

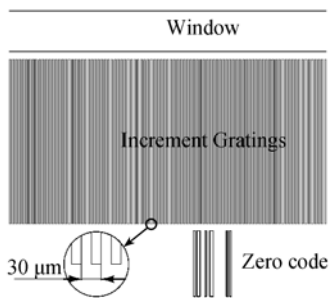
$$S = N \cdot \omega + m \cdot \Delta\omega, \quad (3)$$

式中: N 为光栅移过的莫尔条纹数目; m 为光栅移过的位移增量数。

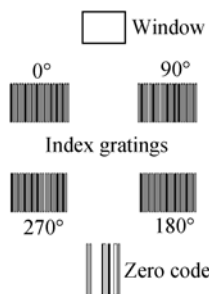
3.1.1 标尺光栅和指示光栅设计

标尺光栅是角位移测量装置的核心元件,提供长度测量基准。标尺光栅采用绝对零位编码和增量式光栅相结合的方式进行编排,增量式光栅用于提取原始测量信号及计数基准。图 4(a)为标尺光栅局部图案。光栅副之间的间隙量除了与光源的波长和发散角有关外,还与光栅栅距的平方成正比。栅距越大,光栅副的间隙也越大。但是测量的分辨率和测量精度也相应下降。因此,综合考虑 FSM 控制精度和分辨率的要求,设计中光栅栅距取 30 μm,这样在保证性能指标的同时,光栅副的间隙量也可以达到 0.13 mm 左右,避免了因外力使光栅副间隙变小而导致光栅磨损或破裂。

指示光栅与标尺光栅配合使用,组成光栅副,用来读取标尺光栅上的长度及零点位置信息。图 4(b)为该角位移测量装置的指示光栅图案,指示光栅窗口采用紧凑的“田”字裂相法设计,初始相位依次为 G0°、G90°、G180°和 G270°。所得的 4 路光电信号经处理电路差分放大后形成可供原始



(a) 标尺光栅
(a) Scale grating



(b) 指示光栅
(b) Index grating

图 4 标尺光栅和指示光栅图案

Fig. 4 Pattern of scale grating and index grating

脉冲计数及电子学细分的正余弦信号。零位编码信号与通光窗口中产生的恒定光电流,经过差分处理后获得抗干扰、耐高低温变化的零位信息。

3.1.2 绝对零位光栅设计

零位光栅是一种非等间隔和非等宽度的明暗相间的光栅,绝对零位信号是通过一组零光栅副提取到唯一的、信噪比很大的空间位置信号^[15-16]。

零位光栅刻线规律可以用一个序列表示,以标尺光栅的半个栅距作为零光栅刻线的单位线宽,一个单元线宽的透光亮线用“1”表示,一个单元线宽的不透光亮线用“0”表示。标尺光栅和指示光栅上的零位光栅的刻线规律为

$$\begin{aligned} \{a_i\} &= \{a_1, a_2, a_i, \dots, a_p\} \\ \{b_i\} &= \{b_1, b_2, b_i, \dots, b_p\}, \end{aligned}$$

式中: $a_i=0$ 或 $1, i=1, 2, \dots, p; b_i=0$ 或 $1, i=1, 2, \dots, p$ 。

零位光栅作用后亮线总单位宽度 S_h 可由序列 $\{a_i\}$ 和 $\{b_i\}$ 的相关函数表示

$$S_h = \sum_{i=1}^{p-h} a_i \times b_{(i+h)}, \quad (4)$$

式中: h 为标尺光栅上的零位光栅相对于指示光栅上的零位光栅移动的单位线宽数; P 为亮线数和暗线数的总和。

零位光栅设计的最佳结果是:达到亮线总单位宽度 S_h 的主极大值足够大,次极大值足够小。

根据系统所选用光电接收器的尺寸,确定零位光栅的总线宽数 p 。零位光栅的编码可以是多样的,对应相同的对比度值可以有多种编码方式,通过计算机将上述函数关系进行编程,设定好约束条件,由计算机随机产生光栅序列,编码的选定原则是亮线尽量多,并且信号对比度通常小于 0.33,可以获得优质的零位光栅提取信号。通

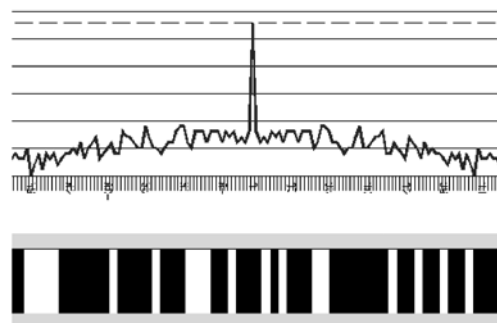


图 5 零位编码方式

Fig. 5 Form of zero code

过随机产生的几种零位光栅的编码形式。选用图 5 所示的零位光栅图案,理论上提取的零位信号的对比度可达到 0.25,满足系统使用要求。

3.2 信号处理电路

从图 6 可以看出,系统的信号处理电路由模拟信号放大整形,数据处理,数据输出模块和电源模块组成。由于结构空间限制,电路须小型化,要求电路集成度较高,数据处理电路选用 Silicon 公司生产的 8051F310 为硬件平台。

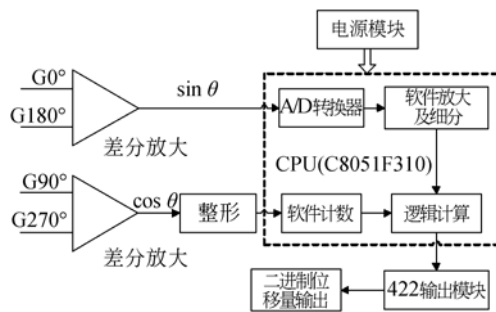


图 6 信号处理电路框图

Fig. 6 Blok diagram of signal processing circuit

当标尺光栅和指示光栅之间产生相对运动时,由光电接收元件接收到初始相位依次相差 90°的 G0°、G90°、G180°和 G270°4 路模拟信号。其中 G90°和 G270°两路经过差分放大形成余弦信号,再由比较器整形送入 CPU 的计数逻辑单元,对脉冲采用软件中断方式进行计数;与此同时 G0°和 G180°两路经过差分放大后得到正弦信号,再通过集成在 CPU 中的 A/D 转换器采集得到数字信息,由电子学插值细分获得细分码信息,之后与原始码计数脉冲一起通过 CPU 进行计数运算,得到二进制位移量信息,最后由通讯模块送出,作为伺服控制系统的位置环的反馈信息。

4 测量实验与结果

4.1 实验装置及原理

所研制的角位移测量装置实物如图 7 所示。系统的测量范围为±2.5 mm,光栅莫尔条纹信号提取后经软件进行 512 份细分,可达到 0.058 6 μm 的线分辨率,通过公式(1)的转化,实现对反射镜测量的角分辨率为 0.15"。

角位移测量装置的精度检测采用比较法。为



图 7 角位移测量装置实物

Fig. 7 Measurement device for angle displacement

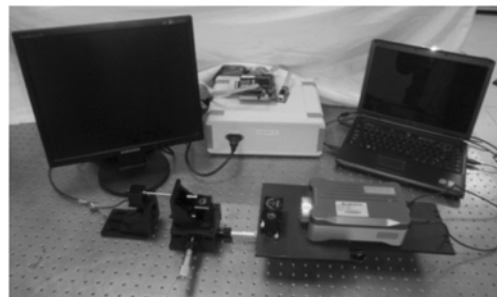


图 8 精度检测实验装置

Fig. 8 Experimental device for precision measurement

了实现对系统精度的准确测量,构建了如图 8 所示的检测装置,整个实验设备均放在具有隔离地基处理的气浮平台上,消除外界振动对系统精度标定的影响。实验中精密测量设备选用 RENISHAW 公司生产的 XL-80 型激光干涉仪,该设备采用激光干涉原理,线性测量精度为±0.5×10⁻⁶,分辨率为 1 nm。

激光干涉仪发出的准直激光经光学镜组,再通过与微动平台固定在一起的随动角锥棱镜组将激光反射回激光干涉仪,形成干涉激光,从而实现精确测量,其测量值定义为 ΔL₂。角位移测量系统的测量探头与微动平台紧密接触,并与微动平台一起移动,实现实时测量,测量值定义为 ΔL₁,测量数据通过电路处理系统显示在显示屏幕上。将位移测量系统的测量值与激光干涉仪的数值进行比较,相减得到的差值 ΔL 代入式(1)中,得到对反射镜的角位移变化量 Δθ。

4.2 结果分析

首先,角位移测量装置通电寻找到绝对零点

位置,此时将激光干涉仪也相应置零。调整微动平台使角位移测量装置按表 1 中 ΔL_1 列数据移动,同时记录激光干涉仪显示的相应数值,实验记录和处理的的数据如表 1 所示。

表 1 实验记录及处理数据表

Tab. 1 Experimental data of recording and processing

$\Delta L_1/\mu\text{m}$	$\Delta L_2/\mu\text{m}$	$\Delta L/\mu\text{m}$	$\Delta\theta/(\prime\prime)$
-1 000	-999.895	-0.105	-0.271
-800	-800.207	0.207	0.534
-600	-599.812	-0.188	-0.485
-400	-399.914	-0.086	-0.222
-200	-200.104	0.104	0.268
0	0.051	-0.051	-0.132
200	199.882	0.118	0.304
400	400.215	-0.215	-0.555
600	600.171	-0.171	-0.441
800	799.837	0.163	0.420
1 000	1 000.099	-0.099	-0.255

从图 9 的误差曲线分析可知,本装置在 ± 1 mm 范围内转化到反射镜转角范围为 $\pm 43'$,可实现误差 PV 值 $\leq 1''$ 。经计算,可得该系统测角精度均方根差 $\sigma \leq 0.4''$ 。

参考文献:

- [1] 郭汝海. 化学氧碘激光器(COIL)的研究进展[J]. 光机电信息, 2010, 27(5): 22-28.
GUO R H. Development review of chemical oxygen-iodine lasers (COIL) [J]. *OME Information*, 2010, 27(5): 22-28. (in Chinese)
- [2] 赵兴海,高扬,程永生. 激光点火技术综述[J]. 激光技术, 2007, 31(3): 306-310.
ZHAO X H, GAO Y, CHENG Y S. A summary of laser ignition technology [J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3): 306-310. (in Chinese)
- [3] 李元栋,华卫红,王红岩,等. 谱宽压窄大功率半导体激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展,

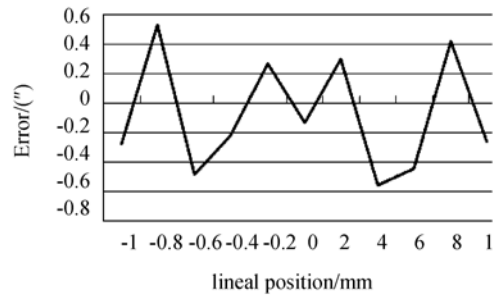


图 9 误差曲线图

Fig. 9 Curve of error

5 结 论

目前,国内外大多快速控制反射镜所用的位置信息反馈传感器其精度和抗干扰能力均不理想,致使 FSM 控制精度不高,影响了 FSM 在对精度要求较高系统中的应用。本文研制了一套高精度角位移测量装置,用于 FSM 系统。通过对莫尔条纹计数测量原理的分析,对指示光栅采用田字裂相法进行处理,与设计的精密标尺光栅配合使用提取信号。通过编程计算,确定了对比度达 0.25 的零位编码,在零位信号处理时与通光窗口中产生的恒定光电信号进行差分处理来获得抗干扰、耐高低温变化的零位信息。同时对信号处理电路进行高度集成,实现光栅测量系统小型化的新突破。实验表明,本装置有很高的测角精度 $\sigma \leq 0.4''$,完全能满足机动式高能激光发射系统对 FSM 控制精度的要求。

2010, 47(9): 91405-1-6.

Li Y D, HUA W H, WANG H Y, *et al.*. Research development of line width narrowing of high power diode Laser [J]. *Laser & Opto-electronics Progress*, 2010, 47(9): 91405-1-6. (in Chinese)

- [4] 吕明春,梁红卫. 高能激光武器及其技术发展[J]. 激光杂志, 2008, 29(1): 1-3.
LV M CH, LIANG W H. High energy laser weapons and the development of their technologies [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(1): 1-3. (in Chinese)
- [5] 任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(9): 62-69.
REN G G. Current situation and development trend of high energy laser weapon [J]. *Laser & Optoelec-*

- tronics Progress*, 2008,45(9):62-69. (in Chinese)
- [6] 郭劲. 战术激光武器系统若干关键技术分析及发展研究[J]. 光学精密工程, 1996,4(1):7-14.
GUO J. Key technology analyse and develop researching of the tactical laser weapon system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 1996,4(1):7-14. (in Chinese)
- [7] 黄勇, 侯海梅. 美国的战术高能激光武器[J]. 激光技术, 2002,26(4):273-276.
HUANG Y, HOU H M. The tactical high energy laser weapon of America[J]. *Laser Technology*, 2002,26(4):273-276. (in Chinese)
- [8] 王永辉, 郭劲. 快速转向反射镜系统的设计简介[J]. 长春理工大学学报, 2003,26(2):51-53.
WANG Y H, GUO J. The design of axial fast steering mirror and composite axial system[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2003, 26(2): 51-53. (in Chinese)
- [9] SUITEA M R, BURRISB H R, MOOREA C I, *et al.*. Fast steering mirror implementation for reduction of focal-spot wander in a long-distance free-space communication link [J]. *SPIE*, 2004, 5160:439-446.
- [10] WU X, CHEN S H, SHI B S, *et al.*. High-powered voice coil actuator for fast steering mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,50 (2):1-5.
- [11] 张立敏, 郭劲. 快速反射镜双 X-Y 轴控制的仿真研究[J]. 光学精密工程, 2005,13(8):142-147.
ZHANG L M, GUO J. Simulative research on dual x-y axis control of fast steering mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(8):142-147. (in Chinese)
- [12] 王红红, 陈方斌, 寿少峻, 等. 基于 FSM 的高精度光电复合轴跟踪系统的研究[J]. 应用光学, 2010, 31(6): 909-913.
WANG H H, CHEN F B, SHOU SH J, *et al.*. High precision photoelectric tracking system based on fast steering mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010,31(6): 909-913. (in Chinese)
- [13] 赵馨, 佟首峰, 姜会林. 四象限探测器的特性测试[J]. 光学精密工程, 2010,18(10):2164-2170.
ZHAO X, TONG SH F, JIANG H L. Experimental testing on characteristics of four-quadrant detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2164-2170. (in Chinese)
- [14] 盖竹秋, 程志峰, 钢圈反射式光栅信号的补偿[J]. 光学精密工程, 2011,19(12):2947-2953.
GAI ZH Q, CHENG ZH F. Compensation of signal for reflective grating engraved on steel ring[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2947-2953. (in Chinese)
- [15] 刘长顺, 王显军, 韩旭东, 等. 八矩阵小型绝对式光电编码器[J]. 光学精密工程, 2010,2(2):326-332.
LIU CH SH, WANG X J, HAN X D, *et al.*. Ultra miniature absolute optical encoders based on eight-matrix coding [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,2(2):326-332. (in Chinese)
- [16] 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. *Fine Measuring Technology for Optoelectronic Displacement* [M]. Chengdu: Science and Technology publishing in Sichuan, 2003. (in Chinese)

作者简介:



王恒坤(1977—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,副研究员,2003年于吉林大学获得硕士学位,主要从事光电对抗领域相关研究。E-mail: whengkun@tom.com



郭立红(1964—),女,吉林舒兰人,博士,研究员,博士生导师,主要从事激光对抗,计算机应用,天文惯导,星体自动化标校等方面的研究。E-mail: guolh@ciomp.ac.cn



王兵(1964—),男,吉林长春人,研究员,1986年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事光电对抗领域方面相关研究。E-mail: ylxas@sina.com



韩旭东(1975—)男,山东博兴人,副研究员,2001年、2007年于中科院研究生院分别获得硕士、博士学位,主要从事光机仪器总体设计。E-mail: hanxd@ciomp.ac.cn

导师简介:



郭汝海(1976—),男,辽宁大连人,博士,副研究员,2001年、2007年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事激光器设计及光束控制方面的研究。E-mail: hitgrh@163.com



张国玉(1962—),男,吉林松原人,博士,教授,博士生导师,主要从事空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的教学与研究工作。E-mail: zh_guoyu@yahoo.com.cn

●下期预告

中阶梯光栅光谱仪 CCD 相机的设计

潘明忠¹,刘玉娟^{1,2},陈少杰^{1,2},宋楠^{1,2},崔继承^{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 100049)

为了实现中阶梯光栅光谱仪的高精度谱图采集,设计了一种适用于自主研发的中阶梯光栅光谱仪原理样机的高性能面阵 CCD 相机。首先根据中阶梯光栅光谱仪的谱图特点和 CCD 芯片的特性,设计了面阵 CCD 相机的时序产生电路、驱动电路及数据采集处理电路,实现了面阵 CCD 相机低噪声、高灵敏度以及高动态范围。然后,利用 LabVIEW 编写了 CCD 相机测试软件。利用设计的面阵 CCD 相机对汞灯谱线进行了测试,结果表明:面阵 CCD 相机获取的二维谱图图像清晰、信噪比较高,经二维谱图还原后,可以得到标准的汞灯谱线,且该相机性能稳定、可靠,完全满足中阶梯光栅光谱仪原理样机的研制要求。