

文章编号 1004-924X(2012)12-0336-06

高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜

王恒坤^{1*}, 张国玉¹, 郭立红², 刘廷霞², 王 兵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:设计了一种适于车载等运动环境下的快速控制反射镜,用于在具有振动和冲击的工作环境下控制激光发射系统的激光光束稳定及其精确校准。根据某光学系统的性能指标要求,阐述了用于高能激光的平面反射镜的物理性能以及控制反射镜负载应有的机械特性。采用大行程的音圈电机作为控制反射镜的驱动器,并设计了精度高、抗干扰能力强的角位移测量装置作为控制反射镜的位置传感器。对所采用的4个音圈电机和4个角位移测量装置进行了合理布局,既降低了系统的转动惯量又提高了系统的可靠性和环境适应性。实验结果表明:该快速控制反射镜的定位精度优于1.4",满足高能激光发射系统对控制反射镜的精度要求。

关键词:光束控制;快速控制反射镜;激光发射系统;动载体;音圈电机

中图分类号:TH745;TN243 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132102.0336

High performance fast-steering mirror for beam control of vehicular high energy laser system

WANG Heng-kun^{1*}, ZHANG Guo-yu¹, GUO Li-hong², LIU Ting-xia², WANG Bing², GUO Ru-hai²

(1. College of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

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

Abstract: A Fast Steering Mirror (FSM) suitable for motion environments was designed to control the laser beam stabilization and its accurate alignment for a laser projecting system in the vibration and shocking. According to the requirement of performance of the optical system, the necessary physical and mechanical characteristics of the FSM were presented for the reflecting mirror of a high energy laser. The voice coil actuators with large travels were used as the drivers of the FSM, and angle displacement measuring devices with high precision and anti-jamming ability were taken as the position sensors of the FSM. The four voice coil actuators and four angle position measuring devices were reasonably arranged to decrease the inertial moment of the system and also to improve the reliability and condition adaptability. The experimental result shows that the positioning accuracy of FSM is better than 1.4", which satisfies the precision requirement of the laser projecting system for the FSM.

收稿日期:2012-10-18;修订日期:2012-12-03.

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)

Key words: beam control; Fast Steering Mirror (FSM); laser projecting system; motion carrier; voice coil actuator

1 引言

随着红外和微电子技术的发展及其在军事上的应用,现代战场出现了具有优异性能的光电制导武器和光电侦察告警等设备^[1-2],对重要的军事目标和设施构成了严重的威胁,而高能激光武器是实现光电对抗防御的有效手段^[3]。对于运动载体的激光发射系统,其载体受到环境的振动和冲击时会对激光光束的稳定性产生影响,从而使激光在远场的光斑扩大,降低对目标的破坏或干扰效果。

快速控制反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)是一种工作在光源或接收器与目标之间用于调整和稳定光学系统视轴或光束指向的重要部件^[4],已经广泛应用于天文望远镜、自适应光学和空间激光通信等重要领域^[5-7]。在激光发射系统中,结合引入小惯量、高精度和响应速度快的FSM与大惯量、带宽窄、响应慢且跟踪范围大的主框架,可以有效提高激光发射系统的光束稳定精度,增强其精确打击能力。

根据研究报告,目前对FSM的研究主要是以固定基座或实验室的光学设备中的应用为主^[8]。虽然FSM的谐振频率很高,但其通光孔径和转角范围都较小,并且对其在动载体条件下的工作性能研究也较少^[9-10]。

本文结合FSM在某光学系统中的使用环境和性能要求,对FSM的反射镜、支承结构形式、驱动器元件、位置反馈传感器等关键技术进行研究,设计了一种适用于车载等运动环境且具有较高精度的快速控制反射镜系统。该FSM的成功研制也将为运动条件下光束指向控制或视轴稳定方面的研究提供一定的参考价值。

2 FSM的性能要求

快速控制反射镜设计的最终目的是使其指标满足光学系统的性能需要。所以从使用角度,FSM的设计主要考虑以下几点性能指标:反射镜有效通光孔径和面形精度以及抗强激光损伤能

力、转角范围、定位精度、伺服带宽、响应时间等。表1为某光学系统对FSM的性能指标要求。

表1 FSM系统性能指标

Tab.1 Performance requirement of FSM

Parameter	Requirement
Degrees of freedom	2 dimension
Clear aperture	143 mm×202 mm
Dynamic range/(′)	±30
Positioning accuracy/(″)	≤2

3 FSM系统设计

3.1 反射镜设计

由于FSM在高速激光环境下工作,平面反射镜直接与被控制光束接触。因此,对于反射镜基底材料的选择,除需考虑材料的抗强激光损伤能力外,还需要选择对激光吸收少且热导率高的材料,以避免反射镜被强激光损伤或因吸收能量发热而引起的镜面变形^[11]。同时,平面反射镜又是FSM的主要负载,其转动惯量的大小对提高FSM谐振频率至关重要。在保证反射镜具有足够刚度和面形精度的前提下,对其进行轻量化设计是非常必要的。

为了使平面反射镜同时满足机械性能和光学性能的要求,材料的选择必须注意以下几点:(1)热物理性能,较低的综合热性能比值,选用低膨胀系数、导热性能良好的材料;(2)力学性能,选用高弹性模量、低密度的材料,有利于反射镜的轻量化;(3)光学加工性能,基底材料必须能适应光学面形的加工要求或者能经受光学镀膜的工艺条件与膜层牢固结合。(4)对材料的微观结构、缺陷及晶向等因素也要重点考虑。

表2列出了几种常用反射镜基底材料的属性^[12]。微晶玻璃材料虽然性能优异,但是缺少金属反射镜设计的灵活性。在特殊领域光学设备中,通常选用刚度与质量比较高的材料,如铍和碳化硅。

表 2 几种常用反射镜材料的属性

Tab. 2 Properties of several traditional materials for mirrors

Material	Density $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	Elastic modulus E/GPa	Poisson ratio M	Coefficient expansion $\alpha/10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$	Thermal conductivity $\kappa/\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
Zerodur	2.53	92	0.24	-0.09	1.6
Tu1	8.94	117	0.32	16.7	392
Al	2.70	68	0.33	22.5	176
RB-SiC	3.04	330	0.25	2.4	108.6
Beryllium	1.85	287	0.25	11.3	216

从表 2 可以看出,铍和碳化硅的刚度是微晶玻璃材料和其它金属材料的 4~6 倍。但是这两种材料的价格相对昂贵,所以本文选择了价格低和性能优异的铝合金作为基底材料,通过有限元分析对反射镜进行了轻量化设计。为了满足抗高能激光的损伤阈值,镜面根据使用的光谱要求进行镀金膜处理,对中长波激光的反射率可达 98% 以上。

3.2 驱动器的选择

驱动器是 FSM 的重要部件,它决定 FSM 的结构形式、响应频率、负载的尺寸和重量等因素。目前,技术比较成熟用作 FSM 的驱动器的主要是压电陶瓷 (Piezoelectric Ceramics, PZT) 和音圈电机 (Voice coil actuator, VCA) [13]。

压电陶瓷驱动存在行程小、位移非线性、响应滞后、要求驱动电压高等缺点。音圈电机与之相比,驱动电压只有几十伏,行程却是 PZT 的上千倍,同时还具有无动态响应滞后、响应频率高等优点 [14]。为了满足 FSM 系统的大转角范围和大承载的要求,同时考虑到载车受环境影响的振动频率不高(一般在 50 Hz 以下)。因此,选用了大行程的直线式音圈电机作为 FSM 系统的驱动元件。

系统采用 4 个音圈电机作为驱动器,以转动支点为中心均匀排布在反射镜镜座的背部,对径 2 个音圈电机为一对,组成力偶以推/拉的形式驱动反射镜。音圈电机主要由永磁体和线圈组成,磁体质量远大于线圈(一般为 3~5 倍)。因此,为了减小音圈电机运动部分的转动惯量,提高系统谐振频率,采用音圈电机的线圈与镜座相连,磁体与基座紧固。

3.3 位置信息反馈元件

国内外检测 FSM 位置的元件大多采用位置敏感器 (PSD)、四象限光电探测器等元件,在使用

中要引入参考光源。由于受到参考光品质、器件本身精度的限制和抗干扰能力差等因素的影响,快速反射镜的控制精度一般不高。

为了精确测量反射镜的摆角信息,研制了一种角秒级的高精度角位移测量装置。对反射镜的测量原理如图 1 所示,测量装置的探测点距反射镜回转中心距离为 L ,当反射镜作微小角度 $\Delta\theta$ 摆动时,测量装置移动 Δh ,式(1)可以将测量装置位移变化量转换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 控制系统的高速数字处理电路,实现对快速反射镜的伺服闭环控制。

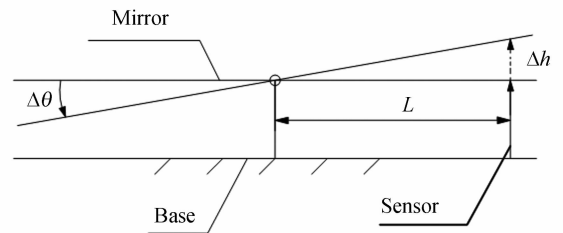


图 1 FSM 角位移测量原理图

Fig. 1 Measurement principle for FSM angle displacement

角位移测量装置实物如图 2 所示,装置的线位移分辨率为 $0.0586 \mu\text{m}$,通过式(1)计算转换,可实现对反射镜的角度测量分辨率为 $0.15''$ 。

该装置为接触式测量,采用 4 个位置信息反馈元件并且正交排布,信号提取时用对径 2 个元件的测量值进行差分处理,取平均值作为此方向的反馈信号。这种测量方法具有以下优点:(1)可以对测量误差具有平差效应。(2)可以消除由于系统膨胀系数不匹配对反射镜测量精度的影响。(3)提高了系统的可靠性。如果其中一个不能正常工作,另一个可以单独工作。(4)可以减小

惯性力导致的控制误差。此外,该测量装置还具有结构紧凑、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。

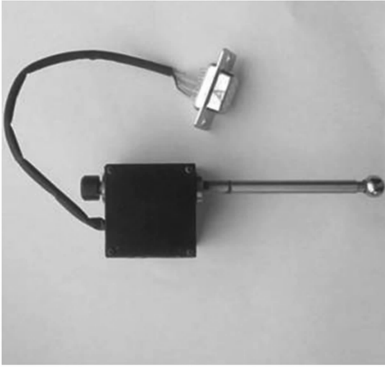


图 2 角位移测量装置实物

Fig. 2 Measurement device for angle displacement

3.4 机械结构设计

载车工作的路况恶劣,使 FSM 不但会受到振动的干扰,还会有一定的冲击。所以 FSM 的设计以工作稳定、可靠、环境适应性强为原则,反射镜支撑采用有轴形式的刚性结构。如图 3 所示,FSM 系统主要由反射镜、镜座、刚性轴系、音圈电机、位置信息反馈元件、惯性力补偿块、基座等部分组成。反射镜与镜座的安装采用三点固定、三点辅助锁紧的方式,可以提高镜体在摆动时的稳定性,有效地减少了因安装产生的应力,降低了环境温度变化对反射镜面形精度的影响。

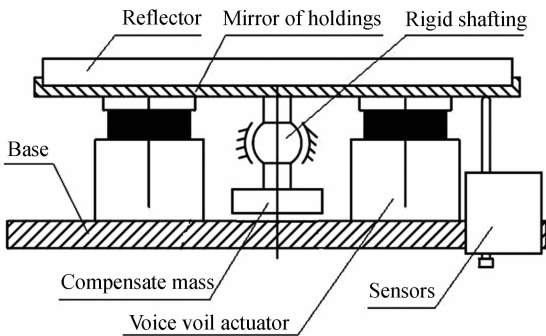


图 3 FSM 结构组成图

Fig. 3 Diagram of FSM structure

在图 3 标有质量块的位置,加入适当的补偿块,调整转动体的质心位置,使质心尽量与转动支点重合以提高音圈电机的控制能力。

为了减少系统的整体质量以及增强温度特性

的匹配,基座材料也选择铝合金材料。运用有限元分析,优化基座结构形式,降低其质量。同时既要保证有足够的刚度,以免驱动器的反作用力激发基座的一阶振动模态,又要使其有较强的承载能力。

4 测试实验与结果分析

4.1 实验装置

FSM 的定位精度是衡量其性能的重要指标。因此,本次测试实验主要考察 FSM 的定位精度。实验前,首先为 FSM 设计了一套基于数字 DSP 控制伺服系统,实验电路主要包括 DSP 控制器、功率放大器、通讯模块、控制显示器等部分组成。图 4 为快速控制反射镜实物照片。

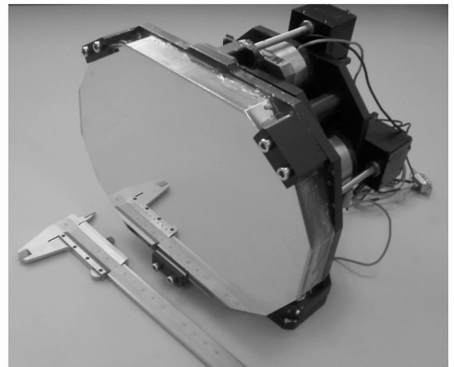


图 4 快速控制反射实物图

Fig. 4 Practical object of FSM

检测采用比较法。构建了如图 5 所示的检测系统,整个实验设备均放在具有隔离地基处理的气浮平台上,以消除外界振动对系统精度标定的

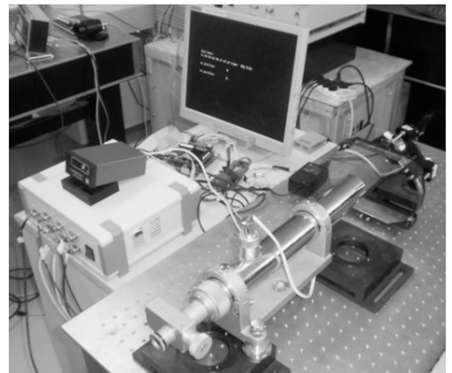


图 5 定位精度检测实验系统

Fig. 5 Experimental system for precision measurement

影响。实验中精密测量设备选用数字显示自准直仪,其测量精度均方根差 $\sigma \leq 0.1''$ 。

4.2 结果分析

首先将 FSM 基座固定在平台上,连接好伺服控制电路,系统上电。FSM 寻找位置反馈元件的绝对零位后锁定,系统进入闭环稳定状态。此时修正自准直仪高低角和方位角使其十字丝像调整到视场合适位置,将自准直仪的数字显示系统置零。驱动 FSM 使平面反射镜摆动微小角度,然后重新回到初始位置,待系统稳定后,记录自准直仪相应的显示值,重复操作多次,形成表 3 所列的实验记录数据。

表 3 实验数据记录表

Tab. 3 Experimental data of recording

Times	Error/($''$)
1	-0.4
2	1.73
3	-0.4
4	-1.52
5	1.34
6	-0.17
7	-1.24
8	-0.96
9	0.58

在实验测试中,通常采用多次测量平均值近似地表示为系统的真值,一般用均方根误差作为测量误差的评定方法。如果测试经过 n 次测量,设 θ_i 为每次的测量值, $\bar{\theta}$ 为测量数据的平均值,则测量的均方根误差 σ 可表式为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_i^n (\theta_i - \bar{\theta})^2}{n-1}} \quad (2)$$

将表 3 中的实验数据代入式(2)中计算,可得快速控制反射镜系统的定位精度均方根误差 σ 优于 $1.4''$ 。

5 结 论

根据实际光学系统的性能指标要求,本文采用了铝基底材料表面镀金膜的反射镜,同时进行了轻量化设计,达到了即满足抗强激光损伤能力又实现降低负载转动惯量的目的。选用大行程的音圈电机作为驱动配合刚性轴系以及优化的结构设计形式的 FSM,具有大角度、精度高、承载能力强、抗干扰等优点。不但实现了对车载光学设备的动态和静态光束稳定控制,还具有对光束方向动态修正功能。实验证明,该快速控制反射镜的定位精度优于 $1.4''$,能够满足机动式高能激光发射系统在具有冲击和振动的恶劣环境下正常工作。

参考文献:

- [1] 段锦,王光腾,景文博. 激光远场能量密度分布测试系统的实现[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9):62-69.
DUAN J, WANG G T, JING W B. Laser far field energy density distribution measurement system [J]. *Laser & Opto electronics Progress*, 2011, 48(9):62-69. (in Chinese)
- [2] 郭汝海,王兵. 光电对抗技术研究进展[J]. 光机电信息, 2011, 28(7):21-25.
GUO R H, WANG B. Development of optical counter measure technique [J]. *OME Information*, 2011, 28(7): 21-25. (in Chinese)
- [3] JOHN T S, CONRAD N. A fast steering tertiary mirror for the SOAR telescope [C]. *SPIE*, 2004, 5495:340-347.
- [4] KAPLAN D L. Fast steering mirror performance

- measurements [C]. *SPIE*, 2004, 1920:138-149.
- [5] YAO B D, HOU Z H, TAN F. Design and application of fast steering mirror based on GMM [C]. *SPIE*, 8192, 819246(1-7).
- [6] WU X, CHEN S H, SHI B Y. High powered voice coil actuator for fast steering mirror [J]. *Optical engineering*, 2011, 50(2):023002(1-5).
- [7] 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(增刊):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(supp):142-147. (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] 曹阳,赵明富.自由空间光通信中快速偏转镜的自适应控制研究[J].光电子技术,2011,31(1):24-27.
CAO Y,ZHAO M F. Self-adaptive control research of fast steering mirror for free space optical communication [J]. *Optoelectronic Technology*, 2011, 31(1):24-27. (in Chinese)
- [10] 鲁亚飞,范大鹏,范世珣.快速控制反射镜两轴柔性支撑设计[J].光学精密工程,2010,18(12):2574-2582.
LU Y F, FAN D P, FAN SH X. Design of two axis elastic for fast steering mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12):2574-2582. (in Chinese)
- [11] 王恒坤,王兵,庄昕宇,等.多波段高功率激光扩束系统设计[J].强激光与粒子束,2011,(23)7:1785-1788.
WANG H K, WANG B, ZHUANG X Y, et al.. Multi-band expand system for high power lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7):1785-1788. (in Chinese)
- [12] 闫勇,金光. RB-SiC 反射镜的材料制备、表面改性及非球面加工[J].光学精密工程 2011,19(8):1751-1756.
YAN Y, JIN G. Material preparation, surface modification and aspheric processing of RB-SiC mirrors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(8):1751-1756. (in Chinese)
- [13] SUITEA M R, BURRIS B 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 [C]. *SPIE*, 2004, 5160:439-446.
- [14] 吴琼雁,王强,彭起.音圈电机驱动的快速控制反射镜高带宽控制[J].光电工程,2004,31(8):15-18.
WU Q Y, WANG Q, PENG Q. Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(8):15-18.

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方面的研究。E-mail: whengkun@tom.com



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



刘廷霞(1973-),女,吉林抚松人,博士,副研究员,2002年于吉林工学院获得硕士学位,2005年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电设备精密控制及其算法方面的研究。Email: liutingxia2001@sohu.com



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

导师简介:



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。E-mail: zhguoyu@yahoo.com.cn



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、天文惯导和星体自动化标校等方面的研究。E-mail: guolh@ciomp.ac.cn