

文章编号 1004-924X(2014)01-0117-08

## 车载大口径刚性支撑式快速反射镜

徐新行<sup>1,2\*</sup>, 高云国<sup>1</sup>, 杨洪波<sup>1</sup>, 王 兵<sup>1</sup>, 韩旭东<sup>1</sup>

(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:**为了适应车载平台恶劣的工作环境,设计了一种大口径刚性支撑式快速反射镜。针对车载跟瞄转台对快速反射镜的应用需求选择音圈电机为驱动器,并分别设计了快速反射镜系统的平面反射镜、驱动器、支撑基座、测量元件和机械结构。然后,应用有限元分析方法,有效地实现了平面反射镜的轻量化及支撑基座的模态分析。快速反射镜通过球型铰链实现其运动部分与不动部分的连接,主要载荷通过铰链由支撑基座间接承载,从而有效地保障了大口径快速反射镜的承载能力和环境适应性。最后,组建了伺服控制系统,并对控制带宽和指向精度进行了测试。结果显示:所设计的车载大口径快速反射镜带宽达 67 Hz,方位指向精度为 1.0",俯仰指向精度为 1.1",表明控制系统稳定实用,满足车载平台的应用要求。

**关键词:**快速反射镜;刚性支撑;控制带宽;指向精度

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142201.0117

## Large-diameter fast steering mirror on rigid support technology for dynamic platform

XU Xin-hang<sup>1,2\*</sup>, GAO Yun-guo<sup>1</sup>, YANG Hong-bo, WANG Bing<sup>1</sup>, HAN Xu-dong<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: xhx123321.xhx@163.com*

**Abstract:** To adapting to the execrable working conditions of a dynamic platform, a large-diameter Fast Steering Mirror(FSM) with a rigid support structure was designed. Firstly, the lightweight reflector, actuators, angle measurement elements, and the support structure of FSM system were designed and selected on the basis of the applied requirement of a vehicle theodolite for FSMs respectively. Then, the reflector was lightweighted and the mode of support base was analyzed by finite element method. The moving parts of the FSM were connected with static parts by a spherical hinge and its main loads were carried out by the support base through the hinge indirectly. The design allows the FSM to bear large loads and to be suitable for the poor working conditions. Finally, the control system of FSM was constituted, and its control bandwidth and pointing precision were tested. The test

收稿日期:2013-03-18;修订日期:2013-04-12.

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)

result shows that the control bandwidth is 67 Hz, moreover, its pointing precisions for azimuth and pitching are  $1.0''$ , and  $1.1''$ , respectively. These data prove that the control system is stable and practical and can satisfy application requirements of vehicle platforms.

**Key words:** Fast Steering Mirror(FSM); rigid support; control bandwidth; pointing precision

## 1 引言

二维快速反射镜具有精确控制光束指向、稳定光束成像质量和补偿大气抖动及平台振动引起的光束偏转等功能,已经被广泛应用于自适应光学、复合轴精密跟踪、远程激光通讯和激光精密加工等领域<sup>[1-3]</sup>。随着光电技术的飞速发展和快速反射镜应用领域的不断拓宽,对大口径、高承载、高适应性快速反射镜的需求越来越迫切。

在车载平台系统中,发射光束必须克服来自载车平台的振动、冲击等外界干扰,准确实现对目标的捕获与精密跟踪。目前,国内外针对快速反射镜的研究主要集中于柔性无轴式结构<sup>[4-6]</sup>。此类快速反射镜的突出优点是:结构简单,工作稳定性好,响应速度快。但它的致命缺陷是:包括反射镜在内的载荷主要由柔性弹片支撑,系统的承载能力相当有限。多年来,为了提高柔性无轴式快速反射镜的承载能力,国内外学者针对柔性弹片的结构形式进行了一系列研究工作,并设计出各种各样的柔性支撑结构,在一定程度上改善了快速反射镜的承载能力<sup>[7-8]</sup>。尽管如此,这种柔性无轴式快速反射镜面对高振动、高冲击等恶劣的工作环境时,工作精度与可靠性仍会大幅度下降,甚至失效。

为了适应移动平台高振动、大冲击等恶劣的工作条件,本文设计了一种用于车载平台的大口径刚性支撑式快速反射镜。它通过球型铰链实现快速反射镜的运动部分与不动部分的连接,主要载荷通过铰链由支撑基座间接承载,从根本上实现了快速反射镜大的承载能力和优异的环境适应性,更适用于车载、机载和舰载等动态工作环境下使用。

## 2 快速反射镜的工作原理与设计要求

图 1 为新型刚性支撑式快速反射镜的结构原理图。如图所示,该快速反射镜装置主要由平面反射镜、支撑基座、球型铰链、音圈电机和光栅测微仪 5 部分组成。其中,平面反射镜和音圈电机的磁座

组成了快速反射镜的运动部分,支撑基座和音圈电机的线圈组成了快速反射镜的不动部分,运动部分与不动部分之间通过一个球形铰链刚性连接。平面反射镜在 4 个音圈电机的推/拉作用下,实现二维偏转。4 个光栅测微仪用于间接测量平面反射镜的偏转角度,进而实现系统的闭环控制。

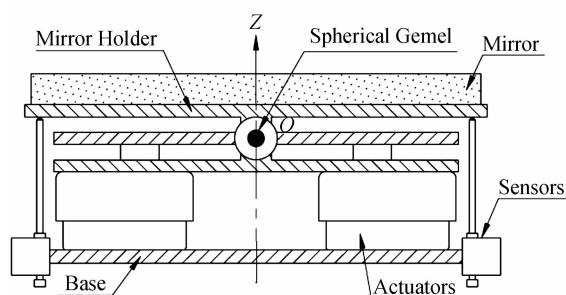


图 1 车载刚性支撑式快速反射镜的结构原理图

Fig. 1 Principle diagram of the FSM for dynamic platform

表 1 列出了车载平台系统所需快速反射镜的性能指标。

表 1 快速反射镜系统的性能指标要求

Tab. 1 Performance requirements of the FSM system

Item	Requirement
Optic diameter	$> \Phi 140 \text{ mm}$
RMS	$< \lambda/25 (\lambda = 632.8 \text{ nm})$
Maximum angular range	$\pm 5' (X, Y \text{ axes})$
Resonance frequency	$> 100 \text{ Hz}$
Pointing precision	$> 2''$
Control bandwidth	$> 50 \text{ Hz}$

## 3 快速反射镜的设计与实现

目前国内外针对快速反射镜的具体研究工作主要集中在以下 6 个方面:(1)平面反射镜的轻量化设计;(2)高性能驱动器的选择;(3)高分辨力、高测量精度检测元件的设计;(4)高刚度支撑基座的优化设计;(5)刚性或柔性连接方式的设计;(6)稳定可靠的控制算法的设计<sup>[9]</sup>。本文即针对此 6

个方面,并结合车载平台的应用需求,对新型大口径刚性支撑式快速反射镜系统展开了设计。

### 3.1 反射镜的轻量化设计

平面反射镜作为快速反射镜系统的主要载荷与有效工作元件,其重量的大小直接影响系统的响应速度,其面形精度的优劣直接影响系统的导光质量。因此,在保证反射镜具有足够的动静态强度、刚度的前提下,最大程度地对其进行轻量化十分必要。反射镜的轻量化途径包括两个方面:一是选择优良的镜坯材料;二是选择有效的轻量化结构,并确定最佳的结构参数<sup>[10-11]</sup>。

在快速反射镜系统中,常用的反射镜材料主要有铝 Lc9、铍 I-70-H 和 SiC 等。其中,铝价格低廉、机械加工性能好,但机械强度有限,多用于面形精度要求不高的场合;铍虽然比刚度高(约为铝的 6 倍),但具毒性且价格昂贵,在许多国家已被限量使用。因此,本文选用比刚度与铍相当,且耐热性能更加优异的 SiC 作为镜坯材料。

目前,常用的反射镜轻量化结构形式主要有:背面开槽式、拱形式和蜂窝式 3 种<sup>[11]</sup>,如图 2 所示。其中,拱形式结构加工方便,轻量化率高,但装夹方式局限性较大;而蜂窝式结构虽然具有更高的轻量化率(高达 70% 以上),但制造工艺复杂且价格昂贵。因此,本文选择轻量化率与拱形式相当,且更易加工装夹的背部开槽式结构,对平面反射镜进行减重设计。

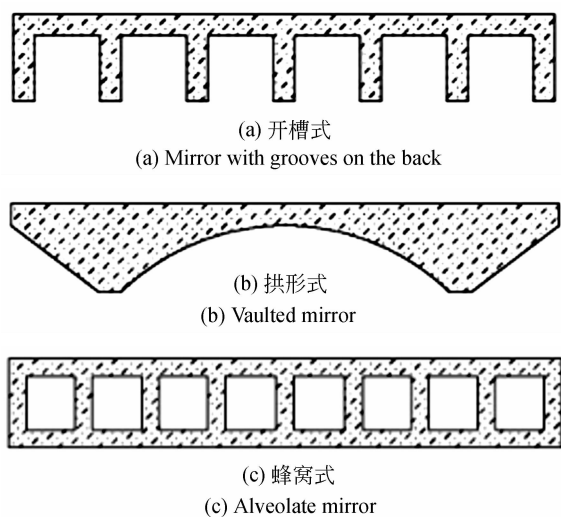


图 2 轻量化反射镜的主要结构形式

Fig. 2 Main structure types of lightweight mirror

根据系统的设计要求,所制备的平面反射镜几何尺寸为 210 mm×145 mm×20 mm。为了获得最优的轻量化结构参数,针对不同筋宽、不同镜面厚度的轻量化模型进行了有限元分析计算。图 3 为平面反射镜的有限元分析模型。如图所示,模型共包括 28 074 个 Nodes, 21 111 个 Elements,受重力、三点支撑预紧力等边界条件约束。分析结果显示:反射镜筋宽越大,镜体的刚度越好,但筋宽增大到一定程度时,反射镜刚度的改善程度减小。反射镜镜面越厚,镜体内应力、自重变形越大。根据反射镜的设计要求和有限元分析结果,本文采用 SiC 材料制备了筋宽为 4 mm,镜面厚为 4 mm 的平面反射镜,镜体轻量化率达 55%。图 4 为所设计的轻量化反射镜在工作状态下的变形分布云图,如图所示,反射镜工作镜面区域最大变形量约为 24.3 nm ( $< \lambda/25, \lambda = 632.8$  nm),满足系统的设计要求。

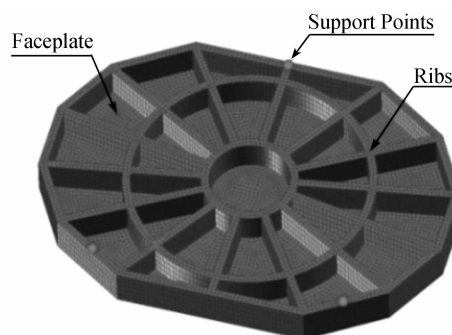


图 3 平面反射镜的有限元分析模型

Fig. 3 Finite element model of lightweight mirror

最后,采用 Zygo 干涉仪对完成加工、抛光、镀膜及装配的反射镜中心工作区域进行实际检测,其面形精度约为  $\lambda/30$ ,满足系统的使用要求。

### 3.2 高性能驱动器的选择

由于快速反射镜系统一般具有高分辨力、高响应频率等特点,因此,对驱动元件的分辨力、响应速度等提出了极高的要求。目前,用于快速反射镜系统的驱动器主要有压电陶瓷和音圈电机 2 类。其中,压电陶瓷具有驱动力大、分辨力高、响应速度快等优点,且能够与应变片组合实现对自身伸缩长度的实时测量,顺应了快速反射镜系统驱动传感一体化、小型化的发展趋势。然而,此种驱动器所需要的驱动电压较高,行程却十分有限(只有几十微米),且抗冲击、振动能力极差,因此,

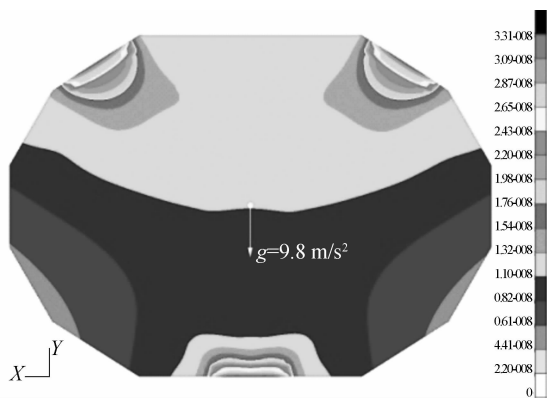


图 4 反射镜镜面变形分布云图

Fig. 4 Deformation distribution map of reflecting surface

其应用领域一直受限。多年来,国内外研究人员针对此问题也做了大量的研究工作。一方面,通过巧妙的机械结构设计实现压电陶瓷行程的放大;另一方面,通过改变驱动器的使用方式,提高压电陶瓷的抗剪切、冲击能力<sup>[5]</sup>。图 5 为法国 CEDRAT 公司生产的压电陶瓷驱动型快速反射镜的原理及实物图。如图所示,在该快速反射镜系统的 PZT 驱动单元中,“棱形”框架的设计,不仅大幅度增加了驱动单元的行程,而且使驱动器的抗冲击振动、抗剪切性能(相对于轴向驱动的应用方式)得到了明显改善。

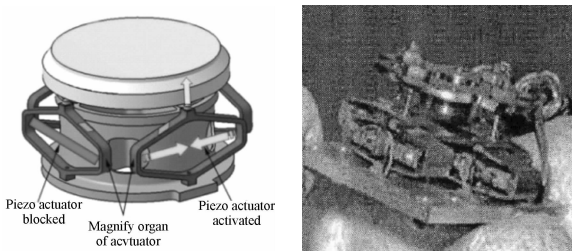


图 5 压电陶瓷驱动的快速反射镜

Fig. 5 FSM driven by piezoelectric actuators

音圈电机自从问世以来,凭借其高响应、大行程等突出优点一直都倍受关注。一方面,它的驱动电压只有几伏到几十伏(较压电陶瓷低一到两个数量级),但行程却是压电陶瓷的成百上千倍<sup>[12]</sup>。另一方面,它优异的环境适应性和强大的抗干扰性能,实现了快速反射镜系统在工程领域,甚至高冲击、高振动的车载平台系统中的应用。图 6 为所选择音圈电机的实物照片及结构尺寸图。

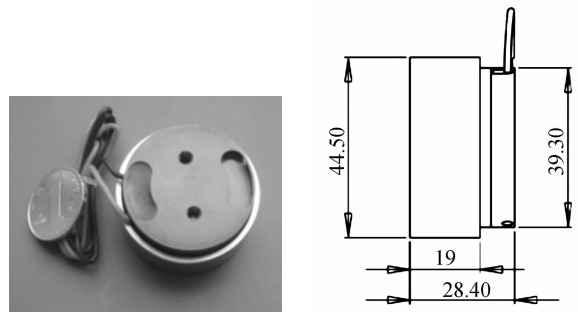


图 6 直线式音圈电机及其结构尺寸

Fig. 6 Photograph of voice coil actuator and its sizes

### 3.3 高性能测量元件的设计

在快速反射镜系统中,由测量元件对平面反射镜的位置进行实时测量,以实现快速反射镜偏转角度的精确闭环控制。因此,测量元件的性能直接决定了快速反射镜系统的整体性能。

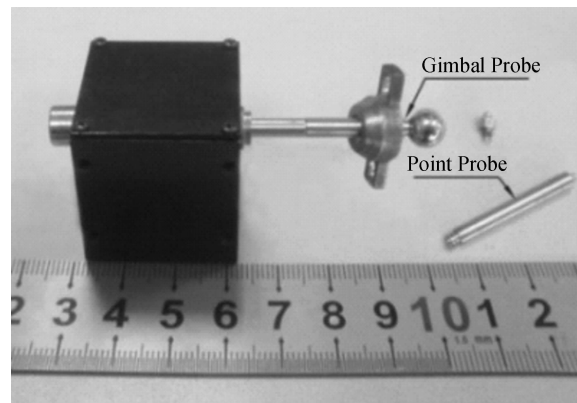


图 7 光栅测微仪的实物照片

Fig. 7 Photograph of grating sensor

图 7 是自行设计的专用型光栅测微仪的实物照片。本文采用小型精密滑轨、增量式光栅、单准直光源、贴片式光电三极管阵列接收器相结合的技术实现微位移的精确快速测量,并直接提供数字量测量信息和绝对零点,从原理上保证了测微仪高精度、高分辨力、高响应的使用性能<sup>[13]</sup>。表 2 列出了光栅测微仪的性能参数。由表可知:所设计的光栅测微仪具有体积小、行程大、精度高、响应快等突出优点,且对应于所设计快速反射镜的角度分辨力达  $0.2''$ ,远高于该系统的设计精度。此外,为了提高光栅测微仪的环境适应性,在点接触式测量探头的基础上设计了万向球面副式测量探头,从结构形式上保证了接触式测量的可靠实现,更适于车载、机载、舰载等恶劣的环境下使用。

表 2 光栅测微仪的性能参数  
Tab. 2 Performance of grating sensor

No.	Items	Value
1	Size of main body	30 mm×30 mm×30 mm
2	Total stroke	±2.5 mm
3	Resonance frequency	1 000 Hz
4	Precision	>2 μm
5	Resolution	0.06 μm
6	Measurement mode	Contact measurement

二维快速反射镜系统至少需要 2 个光栅测微仪来实现系统的闭环控制。本文为了进一步提高系统的测量精度,消除反射镜因轴向位移带来的指向误差,在每一维方向上各布置 2 个测微仪来实现平面反射镜在该方向上的角度测量,保证了该系统较高的工作精度。

### 3.4 高刚度支撑基座的设计

快速反射镜装置各结构元件均通过支撑基座进行集成与连接,基座不仅为快速反射镜提供支撑平台,而且为测量元件提供安装基准。此外,快速反射镜系统与车载平台的连接也必须通过支撑基座来实现。因此,支撑基座的设计非常关键,它必须具有足够的结构刚度,以致在快速反射镜工作过程中驱动器的反作用力不会激发系统产生谐振。

图 8(a)为支撑基座的有限元网格划分结果。如图所示,模型共包括 8 372 个 Nodes,4 163 个 Elements。分体式支撑基座主要由轴系支撑座和电机支撑板 2 部分组成,并通过轴系支撑座上的 4 个支柱进行刚性连接。图 8(b)为支撑基座的 1 阶、2 阶谐振频率分析结果。由图可知:支撑基座的 1 阶模态为 442.64 Hz,2 阶模态为 1 243 Hz,均远大于快速反射镜系统要求的谐振频率。因此,支撑基座的设计结果满足系统要求。

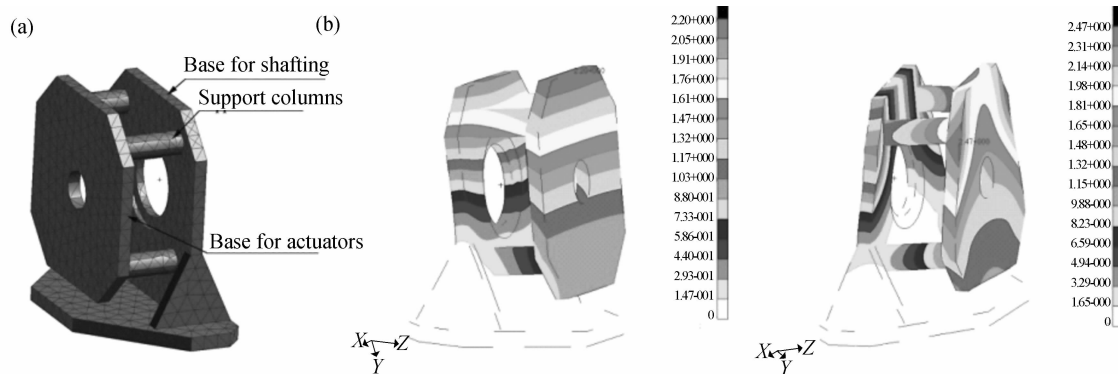


图 8 支撑基座的有限元模型及模态分析结果

Fig. 8 Finite element model and analyzed results of support base

### 3.5 机械结构的设计

图 9 为车载大口径快速反射镜的结构原理

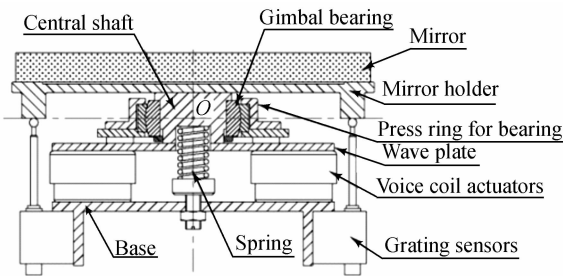


图 9 车载大口径快速反射镜系统的组成结构图

Fig. 9 Constituent structure of the large-diameter FSM

图。如图所示,系统主要由平面反射镜、反射镜座、中心轴、轴承(包括内环和外环)、轴承压环、摇板、音圈电机(包括磁座和线圈)、支撑基座、压缩弹簧和光栅测微仪组成。其中,平面反射镜、反射镜座、中心轴、轴承内环、摇板和音圈电机的磁座组成了快速反射镜装置的运动部分,如图 10 所示。轴承外环、轴承压环、音圈电机的线圈和支撑基座组成了快速反射镜装置的不动部分。压缩弹簧位于运动部分与不动部分之间,用于消除轴承间隙,光栅测微仪固连在支撑基座上,用于实时测量平面反射镜的位置。图 11 为所研制的车载大口径快速反射镜的实物照片,其方位、俯仰方向的

最大行程为±6′,满足系统的设计要求。

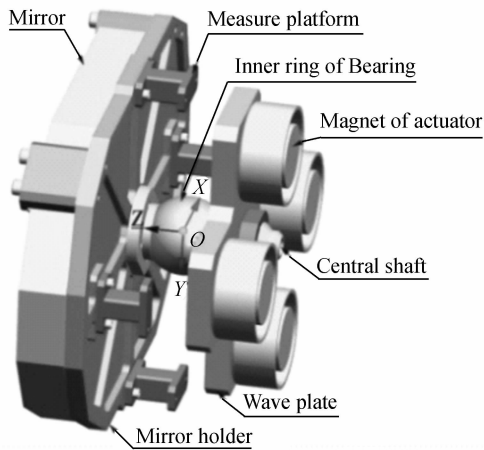


图 10 快速反射镜装置运动部分的三维结构图  
Fig. 10 Mobile parts of the large-diameter FSM

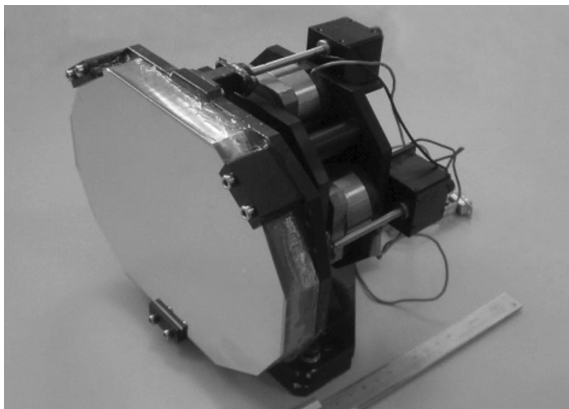


图 11 车载大口径快速反射镜的实物照片  
Fig. 11 Photograph of the large-diameter FSM

#### 4 控制系统组建及快速反射镜检测

快速反射镜的控制系统由方位、俯仰 2 套相互独立又相互关联的跟踪系统组成,每套系统的组成结构基本相同,均采用以速度反馈为内回路、位置反馈为外回路的双闭环系统。其中,快速反射镜控制系统的位置反馈由光栅测微仪直接提供,速度反馈则通过数字控制器对光栅测微仪的输出值差分得到。图 12 为快速反射镜控制系统的组成结构图。如图所示,整个系统主要由数字控制器、功率驱动单元和光栅测微仪 3 部分组成。其中,数字控制器主要由 DSP 板来实现;功率驱动单元由电源、驱动电路、智能型 IGBT 模块和音

圈电机等组成。

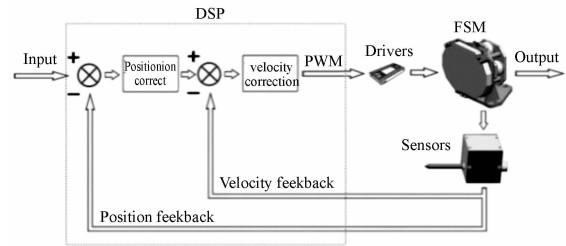


图 12 伺服控制系统的组成结构图  
Fig. 12 Diagram of servo control system

根据图 12 组建了快速反射镜装置的伺服控制系统,并对系统的闭环控制带宽进行了实验测试,如图 13 所示。图 14 为快速反射镜控制系统的闭环幅频特性曲线。由图可知:系统的闭环控制带宽约为 67 Hz,满足系统的设计要求。

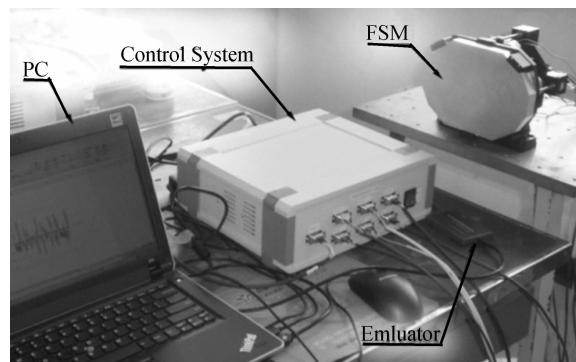


图 13 快速反射镜系统控制带宽的测试  
Fig. 13 Test device for band-width of control system

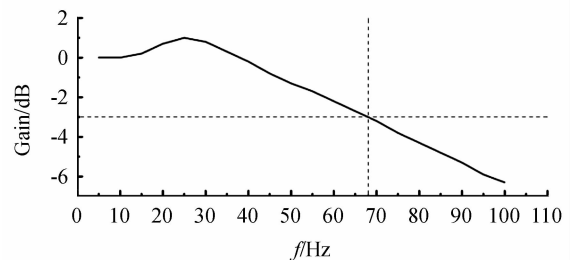


图 14 控制系统的闭环幅频特性曲线  
Fig. 14 Closed-loop amplitude-frequency characteristic curve of control system

最后,采用高精度平行光管(精度为 0.2′,分辨力为 0.001′)对快速反射镜系统的指向精度进行检测,结果显示:系统的方位指向精度约为 1.0′,俯仰指向精度约为 1.1′,满足系统的设计及使用要求。

## 5 结 论

本文从快速反射镜的应用需求出发,结合车载平台恶劣的工作环境,对系统的平面反射镜、驱动器、支撑基座、测量元件和机械结构等进行了详

细设计与选择,并最终组建了系统的伺服控制单元。对快速反射镜的测试结果显示:所设计的车载大口径快速反射镜控制带宽和指向精度均满足车载平台的应用需求。该型快速反射镜的研制成功,为车载、机载、舰载等动态移动平台中光束的精密控制提供了一种新选择。

### 参考文献:

- [1] CHO M, CORREDOR A, DRIBUSCH C, *et al.*. Performance prediction of the fast steering secondary mirror for the giant magellan telescope [J]. *SPIE*, 2012, 844424:1-13.
- [2] 高明辉,郑玉权,王志宏.天基激光武器系统的发展[J]. *中国光学*, 2013, 6(6):810-817.  
GAO M H, ZHENG Y Q, WANG Z H. Development of space-based laser weapon systems [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):810-817. (in Chinese)
- [3] 徐飞飞,纪明,解静,等. FSM 在高精度瞄准线稳定系统中的应用研究 [J]. *应用光学*, 2012, 33(1):9-13.  
XU F F, JI M, XIE J, *et al.*. Application of FSM in high accuracy line-of-sight stabilization system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1):9-13. (in Chinese)
- [4] 丁科,黄永梅,马佳光,等.抑制光束抖动的快速反射镜复合控制[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(9):1991-1997.  
DING K, HUANG Y M, MA J G, *et al.*. Composite control of fast-steering-mirror for beam jitter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9):1991-1997. (in Chinese)
- [5] 吴鑫.高性能快速控制反射镜研究[D].武汉:华中科技大学, 2012.  
WU X. *Research on high-performance fast steering mirror* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [6] YAO B D, HOU Z H, TAN F F, *et al.*. Design and Application of Fast Steering Mirror based on GMM [J]. *SPIE*, 2011, 819246:1-7.
- [7] MICHAEL J O, WILLIAM B. Fast steering mirror: *United States*, US8128246B1[P]. 2012.
- [8] DANICL J K. *An advanced fast steering mirror for optical communication* [D]. USA: Mechanical Engineering Northwestern University, 2007.
- [9] 鲁亚飞.快速反射镜机械结构特性设计问题研究[D].长沙:国防科技大学, 2009.  
LU Y F. *Research on fast/fine steering mirror system* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese)
- [10] 康健,宣斌,谢京江.表面改性碳化硅基底反射镜加工技术现状[J]. *中国光学*, 2013, 6(6):824-833.  
KANG J, XUAN B, XIE J J. Manufacture technology status of surface modified silicon carbide mirrors [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):824-833. (in Chinese)
- [11] 徐新行,王兵,乔健,等.快速反射镜系统中平面反射镜的轻量化设计[J]. *中国光学*, 2012, 5(1):35-41.  
XU X H, WANG B, QIAO J, *et al.*. Lightweight design of mirror in fast-steering mirror system [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1):35-41. (in Chinese)
- [12] 吴琼雁,王强,彭起,等.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, *et al.*. Wide bandwidth control of fast-steering mirror driven by voice coil motor [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, 31(8):15-18. (in Chinese)
- [13] 韩旭东,徐新行,王兵,等.快速反射镜系统用光栅测微仪[J]. *光电工程*, 2011, 38(10):151-155.  
HAN X D, XU X H, WANG B, *et al.*. Grating sensor for linear distance used in fast-steering mirror [J]. *Opto-Electronic*, 2011, 38(10):151-155. (in Chinese)

## 作者简介:



徐新行(1983- ),男,河南沈丘人,博士研究生,助理研究员,2009年于西北工业大学获得硕士学位,主要从事光学精密仪器的设计与研究。E-mail: xxh123321xxh@163.com

## 导师简介:



杨洪波(1963- ),男,黑龙江龙江人,研究员,博士生导师,1991年于长春光机所获得硕士学位,研究员,博士生导师,主要从事光机电集成计算机仿真技术。E-mail: yang-hb@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)