

文章编号 1004-924X(2015)06-1688-07

## 提高万向轴系式快速反射镜指向精度的装置

徐新行<sup>1,2\*</sup>, 刘廷霞<sup>1</sup>, 时 魁<sup>1</sup>, 薛向尧<sup>1</sup>, 王 兵<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:**为了减小万向轴系式快速反射镜(FSM)的轴向间隙,改善 FSM 系统的指向精度,设计了一种轴系间隙消除装置。在明确万向轴系式 FSM 结构原理的基础上,分析了 FSM 系统指向误差的来源。然后,设计了轴系间隙消除装置,计算了压缩弹簧预紧力并对它的结构参数进行了设定。最后,针对是否装有轴系间隙消除装置的 FSM 系统的指向精度进行了对比测试。结果表明:该轴系间隙消除装置能够有效改善 FSM 系统的指向精度,使其在方位方向提高约 4.4 倍,俯仰方向提高约 3.3 倍。此外,在刚性支撑轴系基础上设计的弹性轴向间隙消除装置,不仅改善了万向轴系式 FSM 的指向精度,还为系统的运动部分提供了二次刚性支撑,从而进一步提高了 FSM 的承载能力。

**关键词:**快速控制反射镜;万向轴系;轴向间隙;指向精度

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152306.1688

## Device for improving pointing precision of fast steering mirror with spherical gemel

XU Xin-hang<sup>1,2\*</sup>, LIU Ting-xia<sup>1</sup>, SHI Kui<sup>1</sup>, XUE Xiang-yao<sup>1</sup>, WANG Bing<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: xxh123321xxh@163.com

**Abstract:** To reduce the axial clearance of a Fast Steering Mirror (FSM) with a spherical gemel and to improve its pointing precision, a device for removing the axial clearance was designed. The structure principle of the FSM with spherical gemel was analyzed and the error sources influencing the pointing precision of FSM were discussed. Then, the device for removing axial clearance was designed, the compress force of a spring was confirmed and its structure parameters were set. Finally, the pointing precisions of FSMs with and without the device for removing axial clearance were tested respectively. The results show that the device for removing axial clearance is very helpful to improve the pointing precision of FSM with spherical gemel, and the azimuth pointing precision has been improved about 4.4 times, the pitching pointing precision has been improved about 3.3 times. The designed flexure device for removing axial clearance not only improves the pointing precision of the FSM but also provides a rigid supporting for the FSM system, so that the carrying capacity of the FSM is increased further.

**Key words:** fast steering mirror; spherical gemel; axial clearance; pointing precision

**收稿日期:**2014-03-18; **修订日期:**2014-05-18.

**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)

## 1 引言

快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)是通过精确控制平面反射镜的位置,进而精确控制光束传播方向的光学装置。它具有响应速度快、指向精度和角度分辨力高等突出优点<sup>[1-4]</sup>。不足之处是:FSM的工作范围十分有限,常需要与大转角的主跟踪架构成复合轴系统<sup>[5-7]</sup>。随着国内外对 FSM 研究的深入,它的应用领域不断拓宽,目前已被广泛应用于天文望远镜、激光通信、自适应光学和精密跟瞄等领域<sup>[8-12]</sup>。

在车载光电跟瞄系统中,FSM 不仅要实现角秒级的跟踪精度,而且要具备行进中跟瞄的功能,因此,来自载车平台的高振动、大冲击等外部干扰成了不可避免的问题。为了使车载 FSM 具有较大的承载能力和优异的环境适应性,有学者研制了一种中心采用关节轴承的万向轴系,用以实现 FSM 运动部分与不动部分之间的刚性连接<sup>[13-15]</sup>。此种轴承的内外环之间具有一层聚四氟乙烯衬垫,它不仅有效地消除了轴承内外环之间的轴向间隙,而且具有良好的自润滑功能,使轴系精度得到明显改善,工作噪声得到抑制。但这层衬垫大大增加了 FSM 支撑轴系的摩擦阻力矩,严重影响了 FSM 的工作性能、使用寿命和宽温适应性。为了克服这些技术缺陷,尤其是减小轴承内外环之间的摩擦阻力,增大轴系转动的灵活性,研究人员提出采用一种内外环之间嵌有铜合金的关节轴承。然而此种轴承固有的装配间隙会使内环的回转轴心不稳定,进而导致 FSM 回转部分的运动轨迹不唯一,从而严重限制了系统指向精度的提高。本文针对此类 FSM,设计了一种轴向间隙消除装置,该装置既能消除系统轴向间隙,又为 FSM 的运动部分提供了二次刚性支撑,进一步提高了万向轴式 FSM 的承载能力和环境适应性。

## 2 FSM 的结构组成及指向误差分析

### 2.1 万向轴式 FSM 的结构组成及原理

图 1 为万向轴式 FSM 的结构组成及原理图。由图 1 可知,该型 FSM 主要由平面反射镜、“工”字型反射镜座(含摇板)、万向轴系、支撑基座、直线驱动器和测角传感器 6 部分组成。其中,

平面反射镜和“工”字型镜座为系统的运动部分,支撑基座为系统的不动部分,运动部分与不动部分之间通过万向轴系实现刚性连接,从原理上保证了 FSM 足够的承载能力和优异的抗干扰性能。为了使两维 FSM 具有高响应、高精度和高分辨力的功能,本研究选用 4 个直线式音圈电机(包括磁座与线圈两部分)为系统提供直线动力,每一维方向上 2 个;选用 2 个高性能光栅测微仪间接测量平面反射镜的偏转角度,每一维方向上 1 个;选择音圈电机的磁座与反射镜座固连作为定子、线圈与支撑基座固连作为定子,以便于调节 FSM 运动部分的重心;合理选择摇板的材料与尺寸,以实现 FSM 运动部分的质心与回转球心重合,从而确保 FSM 运动部分的受力状态良好,以延长轴系的使用寿命,提高 FSM 的控制精度和工作稳定性;测角传感器固连在支撑基座上,测量探头与反射镜座相接触,用以实时监测反射镜的回转角度。

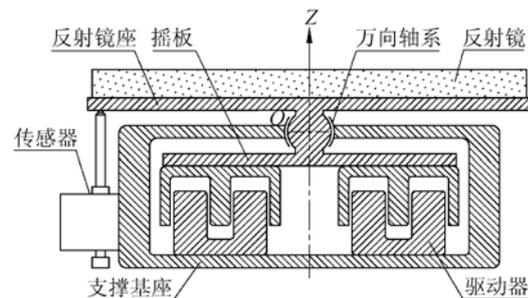


图 1 万向轴式 FSM 的结构原理图

Fig. 1 Structure diagram of FSM with spherical gemel

### 2.2 万向轴式 FSM 的指向误差分析

本研究选择直线位移传感器对平面反射镜的偏转角度进行间接实时测量,进而对 FSM 系统的输出角度进行闭环控制,测量原理如图 2 所示。

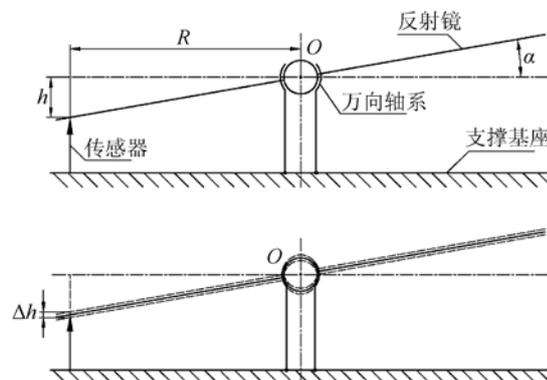


图 2 万向轴式 FSM 的误差来源

Fig. 2 Error source of FSM with spherical gemel

由图 2 可知:FSM 的输出角度  $\alpha$  与光栅测微仪的输出增量  $h$  存在如下关系:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{R}\right), \quad (1)$$

其中:  $R$  为光栅测微仪的测量触点到回转中心  $O$  的投影距离。由式(1)可知:在光栅测微仪性能指标一定的情况下,  $R$  越大,系统的测量精度越高。在图 1 所示的万向轴系式 FSM 中,由于轴承本身存在固有的装配间隙,致使 FSM 运动部分的回转球心  $O$  在工作过程中产生  $\Delta h$  的轴向晃动,如图 2 所示。这将直接影响光栅测微仪的测量结果,进而导致 FSM 的偏转角度产生  $\Delta\alpha$  的输出误差,其相互关系如下:

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{h+\Delta h}{R}\right) - \arctan\left(\frac{h}{R}\right) = \arctan\left(\frac{R \cdot \Delta h}{R^2 + h^2 + h \cdot \Delta h}\right). \quad (2)$$

由式(2)可知: $\Delta\alpha$  随着  $h$  的增大而减小,随着  $\Delta h$  的增大而增大,因此可得:

$$\Delta\alpha_{\max} = \arctan\left(\frac{\Delta h_{\max}}{R}\right). \quad (3)$$

本研究选用高精度等级的关节轴承,其固有轴向间隙: $\Delta h_{\max} = 0.01 \text{ mm}$ ;FSM 系统中测角传感器触点到回转球心  $O$  的投影距离  $R = 80 \text{ mm}$ ,代入式(3)可得: $\Delta\alpha_{\max} = 25.8''$ 。

根据以上计算结果可知:由于 FSM 轴向晃动误差源  $\Delta h$  的存在,系统将产生  $\Delta\alpha$  的偏转误差( $\Delta\alpha_{\max} = 25.8''$ )。当需要对 20 km 以外的目标进行瞄准时,发射光束最大将产生  $2\Delta\alpha$ ( $\approx 51.6''$ )的指向偏差,即约 5.0 m 的位置偏差,远大于车载光电跟瞄系统允许的跟瞄误差。因此,为了使车载光电跟瞄系统具有足够的瞄准精度,设计相应的轴系间隙消除装置对此类 FSM 的指向精度进行改善十分必要。

### 3 轴系间隙消除装置的设计

#### 3.1 轴系间隙消除装置的结构组成及原理

图 3 为轴系间隙消除装置的结构原理图及实物照片。由图 3 可知,该轴系间隙消除装置主要由滚珠、球面座、压缩弹簧和弹簧座等 4 部分组成。其中,滚珠位于万向轴系芯轴的尾孔中,并可

在其中自由回转。完成 FSM 系统的装调后,球面座的内球面在压缩弹簧的弹力作用下,始终与滚珠的外球面相内切。为了保证轴系间隙消除装置在消除轴向间隙时不干涉 FSM 运动部分的万向回转,球面座的内球面以万向轴系的回转中心  $O$  为球心,以球面座与滚珠内切点  $T$  到回转中心  $O$  的距离为半径。

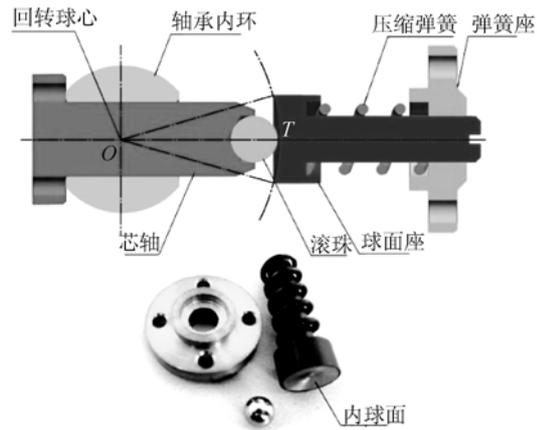


图 3 轴系间隙消除装置的结构组成及实物照片  
Fig. 3 Structure of axial clearance removing device and its entity photo

图 4 为装有轴系间隙消除装置的 FSM 的组成结构图。由图 4 可知,轴系间隙消除装置不仅消除了万向轴系的轴向间隙,使系统的回转中心更为稳定,而且为 FSM 系统的运动部分提供了二次刚性支撑,进一步提高了万向轴系式 FSM 的承载能力及其对振动、冲击等恶劣工作环境的适应性。

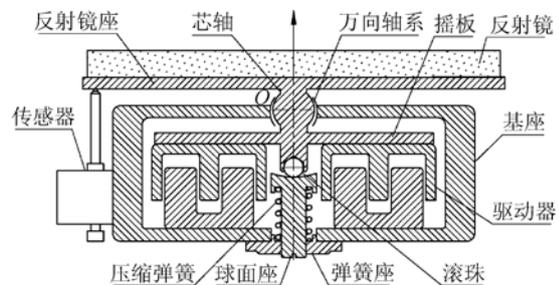


图 4 装有轴系间隙消除装置的 FSM 结构组成  
Fig. 4 Composing of FSM with axial clearance removing device

#### 3.2 压缩弹簧预紧力计算及结构参数设计

压缩弹簧作为轴系间隙消除装置的核心部件

之一,其安装预紧力是否适当将直接影响万向轴系式 FSM 的工作性能。若预紧力过小,轴系间隙消除装置将无法彻底消除万向轴系的轴向间隙,从而无法最大程度地改善 FSM 的指向精度;若预紧力过大,轴系间隙消除装置将大幅度增加万向轴系的摩擦阻力矩,进而降低 FSM 支撑轴系的灵活性。因此,针对研究的万向轴系式 FSM 的结构参数,设计合理的压缩弹簧,并确定适中的压缩量十分关键。图 5 为万向轴系式 FSM 运动部分的受力分析简图。在 FSM 正常工作过程中,系统的运动部分在方位、俯仰两个方向上均受两个音圈电机的推、拉作用,即一对力偶实现反射镜的两维偏转,驱动电机对系统的运动部分并不产生轴向力。因此,压缩弹簧只需克服 FSM 运动部分与轴承外环之间的摩擦阻力  $F$  即可彻底消除万向轴系的轴向间隙。

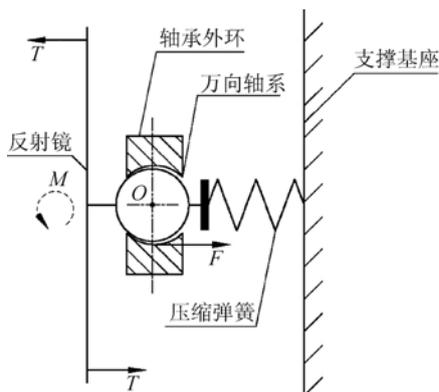


图 5 万向轴系式 FSM 运动部分的受力分析简图  
Fig. 5 Force analysis of movable parts of FSM with spherical gemel

综上所述,在能够克服轴承内外环间摩擦阻力的前提下,压缩弹簧预紧力设计得越小越好,因为这样既消除了万向轴系的轴向间隙,又不会过分增加轴系回转的摩擦阻力。具体计算如下:

$$F = mg \cdot f \tag{4}$$

式中: $m$  为 FSM 运动部分的质量,  $m = 2.5 \text{ kg}$ ;  $f$  为轴承内外环之间的摩擦系数,  $f = 0.15$ ,  $g$  取  $9.8 \text{ m/s}^2$ ,则由式(4)可得压缩弹簧的预紧力:  $F = 3.67 \text{ N}$ 。

根据万向轴系式 FSM 系统的结构特点及空间体积,设计了压缩弹簧,其结构参数如图 6 所示。

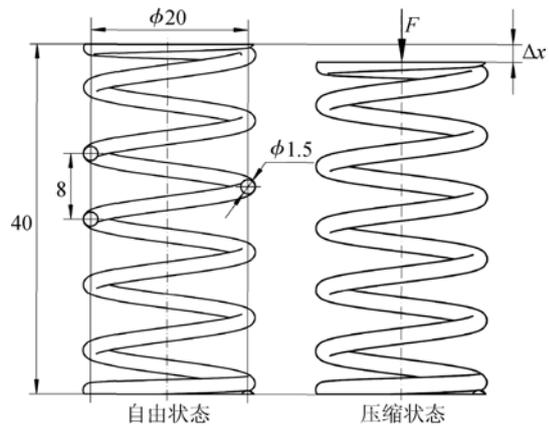


图 6 压缩弹簧的结构参数

Fig. 6 Structure parameters of spring

压缩弹簧采用 65 Mn 弹簧钢绕制而成,其劲度系数  $K$  可由下式获得:

$$K = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot D^3 \cdot n} \tag{5}$$

其中: $G$  为 65 Mn 弹簧钢的剪切模量,  $G = 78.5 \text{ GPa}$ ;  $d$  为弹簧钢丝的线径,  $d = 1.5 \text{ mm}$ ;  $D$  为压缩弹簧的中径,  $D = 20 \text{ mm}$ ;  $n$  为压缩弹簧的有效圈数,  $n = 5$ 。代入式(5)可得弹簧的劲度系数,  $K = 1\,242 \text{ N/m}$ 。

由胡克定律  $F = K \cdot \Delta x$  可得压缩弹簧变形量的计算公式:

$$\Delta x = \frac{F}{K} = \frac{3.67}{1\,242} = 0.003 \text{ m} \tag{6}$$

#### 4 FSM 指向精度的实验测试

室温条件下,对有、无轴系间隙消除装置的万向轴系式 FSM 进行了指向精度对比测试。如图 7 所示,实验系统主要由光学测试平台、0.2"自准直仪、FSM 装置、伺服控制箱和测试计算机等组成。其中,伺服控制箱用于驱动 FSM 系统正常工作,测试计算机用于设定 FSM 的指向位置并实时显示系统中方位、俯仰编码器的值,0.2"自准直仪用于监测 FSM 的实际指向位置。具体的测试方法为:首先由测试计算机和伺服控制箱将未装轴系间隙消除装置的 FSM 控制在某个指定位置,并通过测试计算机监测方位、俯仰编码器的数值。待 FSM 工作稳定后(即:FSM 的设定值与编

码器的显示值一致时),通过 0.2"自准直仪测得 FSM 的实际位置,进而与系统的设定位置进行对比,获得未装有轴系间隙消除装置 FSM 的指向精度。然后,将轴系间隙消除装置装入 FSM 系统中,采用同样的测试方法获得装有轴系间隙消除装置 FSM 的指向精度。实验数据及分析结果如表 1 和图 8 所示。测试结果显示:未装轴系间隙消除装置 FSM 的方位误差不超过 8.8"、俯仰误差不超过 7.2",而装有轴系间隙消除装置的 FSM 的方位误差不超过 2.0"、俯仰误差不超过 2.2"。因此,所设计的轴系间隙消除装置对提高万向轴式 FSM 系统的指向精度非常有效(方位方向精度约提高了 4.4 倍,俯仰方向精度约提高了 3.3 倍)。可能受 FSM 运动部分重力的影响,该装置对 FSM 方位方向指向精度的改善更为明显。

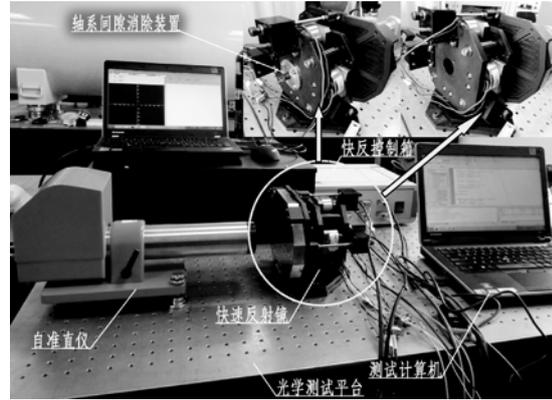


图 7 FSM 系统指向精度测试实验

Fig. 7 Experimental set-up for measuring pointing precision of FSMs

表 1 FSM 系统指向精度的测试结果

Tab. 1 Measurement results on pointing precision of FSM system

序号	FSM 的设定位置/(X,Y)	未装轴系间隙消除装置的快速反射镜		装有轴系间隙消除装置的快速反射镜	
		实际指向位置/(X,Y)	指向误差/(ΔX,ΔY)	实际指向位置/(X,Y)	指向误差/(ΔX,ΔY)
1	(-44", -44")	(-52.8", -51.2")	(-8.8", -7.2")	(-46.0", -46.2")	(-2.0", -2.2")
2	(-33", +33")	(-40.6", +39.4")	(-7.6", +6.4")	(-34.8", +31.2")	(-1.8", -1.8")
3	(-22", -11")	(-28.2", -5.6")	(-6.2", +5.4")	(-23.4", -9.4")	(-1.4", +1.6")
4	(-11", +11")	(-5.6", 5.8")	(+5.4", -5.2")	(-10.2", +9.8")	(+0.8", -1.2")
5	(0,0)	(+4.4", -4.0")	(+4.4", -4.0")	(-0.4", +0.6")	(+0.4", +0.6")
6	(+11", -33")	(+5.2", -39.0")	(-5.8", -6.0")	(12.2", -34.6")	(+1.2", -1.6")
7	(+22", -22")	(+16.0", -27.6")	(-6.0", -5.6")	(23.6", -23.6")	(+1.6", -1.6")
8	(+33", +22")	(+39.8", +16.2")	(+6.8", -5.8")	(31.4", +20.0")	(-1.6", -2.0")
9	(+44", +44")	(+52.2", +50.8")	(+8.2", +6.8")	(+45.8", 42.2")	(+1.8", -1.8")

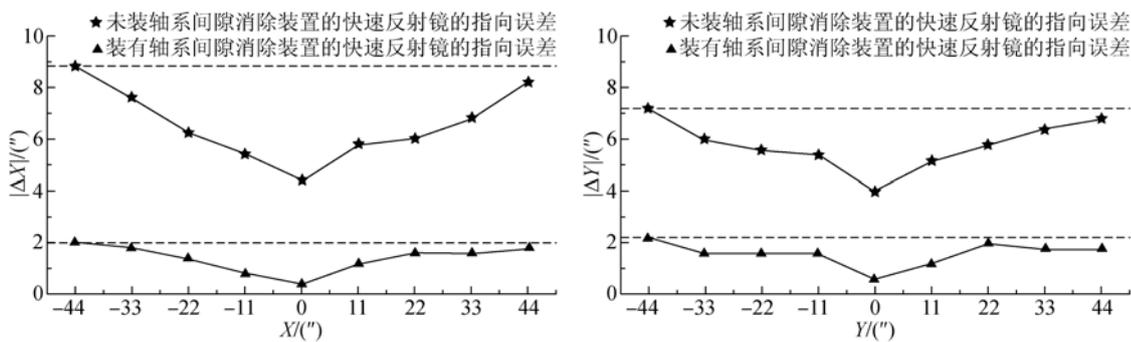


图 8 FSM 系统指向精度的分析结果

Fig. 8 Analyzed results on pointing precision of FSMs

## 5 结 论

本文针对小阻尼万向轴系式 FSM 的结构特点和功能缺陷,在详细分析了万向轴系式 FSM 误差来源的基础上,设计了一种弹性的轴系间隙消除装置,并进行了压缩弹簧预紧力的计算及结构参数设定。最后,针对是否装有轴系间隙消除装置的 FSM 系统的指向精度进行了对比测试。

### 参考文献:

- [1] MOKBEL H F, WAN Y, LV Q Y, *et al.*. Research on the mechanical design of two-axis fast steering mirror for optical beam guidance [C]. *Proceedings of the 1st International Conference on Mechanical Engineering and Material Science*, 2012.
- [2] 张丽敏,王帅,杨飞,等. PZT 驱动快速控制反射镜的设计与试验 [J]. *机电工程*, 2013, 30(7): 783-787.
- ZHANG L M, WANG SH, YANG F, *et al.*. Design and test of fast steering mirror driven by PZT actuator [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2013, 30(7):783-787. (in Chinese)
- [3] LANE J K. *Control of a MEMS fast steering mirror for laser applications* [D]. Massachusetts: Massachusetts Insititute of Technology, 2012(5).
- [4] 马佳光,唐涛. 复合轴精密跟踪技术的应用与发展 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1):218-227.
- MA J G, TANG T. Review of compound axis servomechanism tracking control technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1):218-227. (in Chinese)
- [5] 丁科,黄永梅,马佳光,等. 快速反射镜的误差自适应前馈复合控制 [J]. *中国激光*, 2011, 38(7): 0705007:1-6.
- DING K, HUANG Y M, MA J M, *et al.*. Error adaptive feed-forward composite control of fast-steering-mirror [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(7):0705007:1-6. (in Chinese)
- [6] 徐诚,黄大庆. 无人机光电侦测平台目标定位误差分析 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(10): 2265-2270.
- XU CH, HUANG D Q. Error analysis for target localization with unmanned aerial vehicle electro-optical detection platform [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013, 34(10):2265-2270. (in Chinese)
- [7] HAWE L E II. *Control of a fast steering mirror for laser-based satellite communication* [D]. Massachusetts: Massachusetts Insititute of Technology, 2006.
- [8] 唐涛,王涛,黄永梅,等. 具有延迟特性的 FSM 系统中 PI-PI 控制器 [J]. *光电工程*, 2013, 40(5): 1-5.
- TANG T, WANG T, HUANG Y M, *et al.*. PI-PI controller for the time delay control system of FSM [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(5):1-5. (in Chinese)
- [9] 王建立,刘欣悦. 智能光学的概念及发展 [J]. *中国光学*, 2013, 6(4):437-448.
- WANG J L, LIU X Y. Concept and development of smart optics [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4):437-448. (in Chinese)
- [10] 黑沫,鲁亚飞,张智永,等. 基于动力学模型的快速反射镜设计 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(1): 53-60.
- HEI M, LU Y F, ZHANG ZH Y, *et al.*. Design of fast steering mirror based on dynamic model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):53-60. (in Chinese)
- [11] KUANG J M, ZHANG S. Control of fast steering mirror system based on the CCD with low frame frequency [J]. *Journal of Sichuan Normal University: Natural Science*, 2012, 35(6): 857-862.
- [12] 孙辉. 机载光电平台目标定位与误差分析 [J]. *中国光学*, 2013, 6(6):912-918.
- SUN H. Target localization and error analysis of airborne electro-optical platform [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):912-918. (in Chinese)
- [13] 徐新行,高云国,杨洪波,等. 车载大口径刚性支撑式快速反射镜 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1):117-123.
- XU X H, GAO Y G, YANG H B, *et al.*. Large-diameter fast steering mirror on rigid support tech-

- nology for dynamic platform [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1):117-123. (in Chinese)
- [14] 李磊, 严洁, 阮友田. 车载激光测绘系统的标定[J]. *中国光学*, 2013, 6(3):353-358.
- LI L, YAN J, RUAN Y T. Calibration of vehicle-borne laser mapping systems [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3):353-358. (in Chinese)
- [15] 邵璐, 叶景峰, 胡志云. 快速响应反射镜主动减振技术 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(3):734-738.
- SHAO J, YE J F, HU ZH Y. Technology of active damping based on fast-response mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3):734-738. (in Chinese)

作者简介:



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

(版权所有 未经许可 不得转载)