文章编号　1004-924X(2016)01-0126-08

机载刚性支撑式快速控制反射镜设计

徐新行[1,2*]，韩旭东[1]，王　兵[1]，王恒坤[1]，庄昕宇[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：设计了一款紧凑型刚性支撑式快速控制反射镜(FSM)，以适应机载运动平台的高振动、大冲击和高低温等恶劣工作环境。考虑机载 FSM 的工作需求，分别对 FSM 的支撑轴系、驱动元件和测角元件等进行设计与选择。针对刚性支撑轴系设计了轴系间隙调整机构，提高了 FSM 系统的轴系精度，进一步增大了 FSM 的承载能力；针对机载 FSM 研制了专用小尺寸微位移测量传感器，通过将 4 个传感器非轴线对称布置，并利用二次差分的方式实现反射镜位置的实时监测，进一步减小了 FSM 系统的体积，提高了它的测量精度。最后，对机载 FSM 的控制带宽和指向精度进行了实验检测。结果显示：所设计的 FSM 系统控制带宽约为 110 Hz，方位指向误差不超过 3.4″，俯仰指向误差不超过 3.8″，表明所设计的 FSM 控制系统稳定、响应速度快、指向精度高，满足机载运动平台的应用要求。

关　键　词：快速控制反射镜；刚性支撑；差分测量；控制带宽；指向精度
中图分类号：TH703　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20162401.0126

Design of fast steering mirror with rigid support structure for airborne platform

XU Xin-hang[1,2*], HAN Xu-dong[1], WANG Bing[1], WANG Heng-kun[1], ZHUANG Xin-yu[1]

(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: A compact Fast Steering Mirror (FSM) with a rigid support structure was designed for adapting to the great vibrancy, impact and high-low temperature conditions of an airborne platform. The support shafting, actuators, angle measurement elements of the FSM were designed and selected respectively on the basis of design requirements of the FSM. Then, a device to adjust shafting clearance was designed to improve shafting precision and provide additional supporting for mobile parts of the FSM. The special grating displacement sensors with small sizes were designed and four grating sensors were placed on the diagonal symmetrically to measure the position of the mirror by quadratic average of each measuring result, which reduces the volume of the FSM, improves its measuring precision, and removes the influence of clearance in the shaft direction on measuring

收稿日期：2015-03-27；**修订日期**：2015-04-20.
基金项目：吉林省自然科学基金资助项目(No. 201115123)；国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2011AA7031024G)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

results. Finally, the control bandwidth and pointing precision of the FSM for the airborne platform were tested, and the results show that the designed FSM offers the control bandwidth about 110 Hz, azimuth pointing error less than 3.4″ and the pitch pointing error less than 3.8″, which satisfies application requirements of vehicle platforms.

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

1　引　言

在光电跟瞄发射系统中，为了顺利实现对高速度、高加速度目标的精确跟踪与瞄准，在主跟踪架粗跟踪的基础上引入一套快速控制反射镜(Fast Steering Mirror，FSM)，构成复合轴系统是目前实现运动目标精密跟踪的一种有效手段[1-4]。同时，随着 FSM 向天文望远镜、自适应光学、激光通讯和精密加工等应用领域的进一步延伸，国内外针对高性能 FSM 的研究迅速成为热点[5-10]。

长期以来，关于 FSM 的研究主要集中于柔性无轴式结构[11-15]。此类 FSM 具有结构简单、无摩擦，响应速度快等优点，但它的承载能力和抗振动、冲击性能有限。在机载环境中，由飞机发动机和螺旋桨等引起的高频振动及飞机姿态急剧变化引起的冲击等干扰成为不可回避的问题。即使采用一定的减振手段，仍无法完全消除。为了适应机载平台的振动、冲击及苛刻的高低温环境，实现机载跟瞄发射系统角秒级的跟踪精度，航空应用领域对小体积、高精度、高环境适应性 FSM 的需求越来越迫切[16-18]。

本文设计了紧凑型刚性支撑式 FSM，其系统控制带宽约为 110 Hz，方位指向误差不超过 3.4″，俯仰指向误差不超过 3.8″，满足机载运动平台的应用要求。

2　机载刚性支撑式 FSM 的结构原理

图 1 所示为机载刚性支撑式 FSM 的结构原理图。在刚性支撑式 FSM 中，包括反射镜在内的运动部分通过球形铰链实现与静基座的刚性连接，使反射镜能够相对于安装基座进行万向旋转。这种结构相对于柔性无轴式 FSM，从结构原理上实现了机载 FSM 大的承载能力和抗振动、冲击性能。在驱动器方面，机载 FSM 选择工作行程大、响应速度快、环境适应性强的直线式音圈电机作为驱动元件。音圈电机主要包括线圈和磁座。由于线圈的重量约是磁座的 1/5，因此，为了减小 FSM 运动部分的惯量，提高系统的响应速度，装置选择线圈作为动子与镜座相连接，磁座作为定子与基座相连接。但线圈在工作过程中会大量发热，为了避免电机产生的热量直接传递给反射镜，影响镜面的导光质量，将机载 FSM 的运动镜座设计为“工”字形结构。

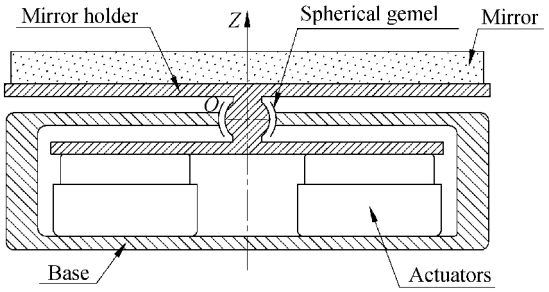

图 1　机载 FSM 的结构原理图

Fig. 1　Principle diagram of FSM for airborne platform

根据刚性支撑式 FSM 的结构原理及机载运动平台的应用需求，提出机载刚性支撑式 FSM 的主要性能指标如表 1 所示。

表 1　机载刚性支撑式 FSM 的性能指标要求

Tab. 1　Performing requirements of FSM for airborne platform

Items	Requirement
Optic diameter	≥ Φ40 mm
Maximum angular range	± 3′(X、Y axis)
Pointing error	<4″
Control bandwidth	≥ 100 Hz
Working Temperature	−40℃～+55℃

3　机载刚性支撑式 FSM 的设计实现

为了实现表 1 中机载 FSM 的小体积、高精

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

度、高低温等性能指标，分别从FSM的支撑轴系、驱动元件、测角元件等方面进行详细设计与选择。

3.1 支撑轴系

3.1.1 万向支撑轴系的设计

机载FSM的刚性支撑轴系主要通过一个关节轴承组建而成，轴承的几何球心即为FSM的回转中心。图2所示为滚动型关节轴承的结构外形及尺寸。经淬火研磨加工而成的轴承内、外环之间通过两排滚珠实现刚性连接，多点接触取代了普通关节轴承内、外球面的面面接触，大幅度降低了支撑轴系的摩擦阻力矩，使万向轴系的回转更加灵活，有利于FSM响应速度和控制精度的提高。此外，为了提高万向轴系的高低温适应性，关节轴承通过钢制轴承座与铝合金基座间接固定，且在轴承内部涂抹低温润滑脂，有效避免了回转轴系在低温状态下的抱死。

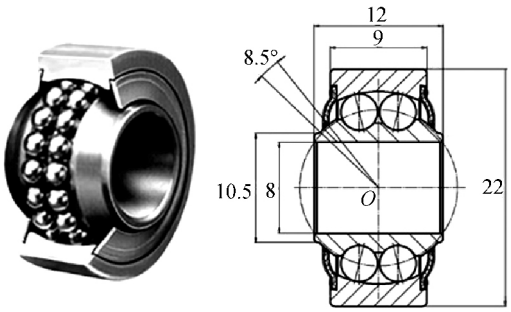

图2 滚动型关节轴承的结构外形及尺寸

Fig. 2 Photograph and size of gimbal bearing

3.1.2 万向支撑轴系间隙的调整

图3所示为万向支撑轴系间隙调整机构。主要由球面支撑座、滚珠、压缩弹簧和弹簧座等组成。完成装配后，在压缩弹簧的推力作用下，中心轴尾孔中的滚珠与球面支撑座的内球面始终相切，消除了万向轴系的轴向间隙。当FSM在驱动元件的推、拉作用下绕球心O回转时，滚珠也将绕中心O沿球面支撑座的球面轨道往复运动。为了避免运动干涉，球面座的内球面以关节轴承的回转中心O为球心。此外，由轴系间隙调整机构的结构原理可知：该机构在消除支撑轴系轴向间隙的同时，又为FSM的运动部分提供了二次刚性支撑，因此使机载FSM的承载能力与抗冲击、振动性能得到进一步提高。

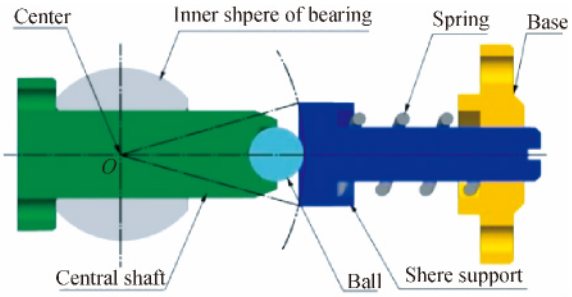

图3 轴系间隙调整机构的组成结构图

Fig. 3 Constitute of device for adjusting shafting clearance

3.2 驱动元件

3.2.1 音圈电机的选择

目前，FSM常用的驱动元件主要有压电陶瓷和音圈电机。其中，压电陶瓷凭借体积小、输出力大、响应速度快等优点被国内外FSM生产商广泛应用。但它的行程只有几微米到几十微米，而且存在磁滞现象，更大的弊端是压电陶瓷质地松脆，不能承受剪切应力，甚至安装过程中的轻微剪切都可能将其破坏。即便通过复杂的结构设计，实现陶瓷与基座、镜座连接时以及在FSM的工作过程中均不承受剪切应力，但机载运动平台因振动、冲击所产生的剪切应力仍难以避免。因此，机载FSM不宜选用压电陶瓷作为驱动元件。

音圈电机具有驱动电压低、行程大、环境适应性强（－40℃～＋70℃）等优点，被越来越多地应用于FSM的制作中。图4所示为所选择音圈电机的实物照片和结构尺寸。音圈电机的线圈位于磁座中，在通电状态下悬浮于磁座内。因此，当输出推拉运动时，电机的定子与动子之间无任何摩擦，并且允许动子相对于定子产生小角度倾斜（由于磁座与基座相固连，线圈与镜座相固连，因此当反射镜在镜座的带动下产生小角度输出时，线圈将产生相对于磁座的小角度偏转）。

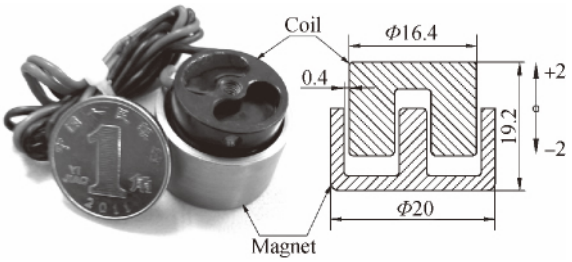

图4 直线式音圈电机的结构外形及尺寸

Fig. 4 Photograph and size of linear voice coil motor

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.2.2　音圈电机的排布

由于机载 FSM 的运动部分存在固定的回转中心，因此要实现反射镜绕 X 轴、Y 轴的二维偏转，每个轴线上至少需要 1 个驱动元件。采用 4 个音圈电机单轴双驱动的方式为 FSM 提供直线动力，位置排布如图 5 所示。不仅有利于将 FSM 运动部分的重心调整至轴系球心附近，使 FSM 的运动更为平稳，而且有利于保证小尺寸机载 FSM 足够大的驱动力矩。但单轴双驱动方式与固定的回转中心构成了超自度约束，这对机械加工、装调的精度及伺服系统的控制精度均提出了较高的要求。

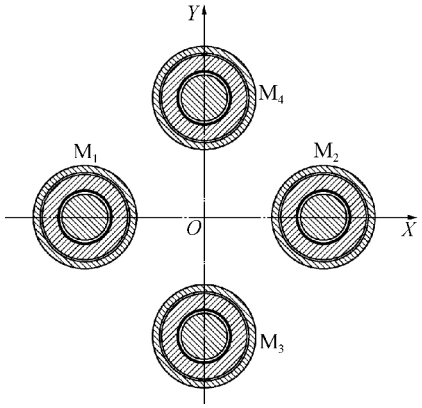

图 5　音圈电机的位置排布

Fig. 5　Position of voice coil motors

3.3　测角元件

由于机载 FSM 的高精度、快响应和优异环境适应性等需要，对测量元件提出了较高的要求。目前用于 FSM 的测量元件主要有：电涡流传感器、电容传感器、PSD 和四象限探测器等。其中，电涡流传感器结构简单、灵敏度高、抗干扰能力强，但测量精度有限，无法实现机载 FSM 的高精度；电容传感器测量精度高、响应速度快、探头体积小，但价格昂贵，并且存在严重的温度漂移现象，不适于在温度变化较大的环境下使用；PSD 与四象限探测器类似，均通过监测反射光线间接实现对反射镜位置状态的测量。但由于探测器的分辨力有限，必须与反射镜的距离拉得足够远，才能实现较高的测量精度。因此，所占的空间较大，不利于机载 FSM 的小型化和集成化。为了实现机载 FSM 的小体积、高性能和优异的环境适应性，针对机载 FSM 研制了专用型微位移测量传感器用于其偏转角度的监测。

3.3.1　微位移测量传感器的设计

图 6 所示为自行设计的专用型微位移测量传感器。该位移传感器采用单准直光源、高精度密珠滑轨、增量式光栅、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，尤其高精度密珠滑轨的采用，不仅大幅度减小了测量过程中的附加阻力，而且使光栅副的相对运动更加精准，从而从结构原理上保证了位移传感器的高精度和高分辨力。此外，光栅副通过窗口的引入、独特零位编码的设计及裂相法信号提取方式的采用，保证了微位移测量传感器的高低温使用性能。表 2 所示为该位移传感器的主要性能参数。该传感器具有体积小、行程大、精度高、响应快等优点，满足机载 FSM 对测量元件的应用要求。

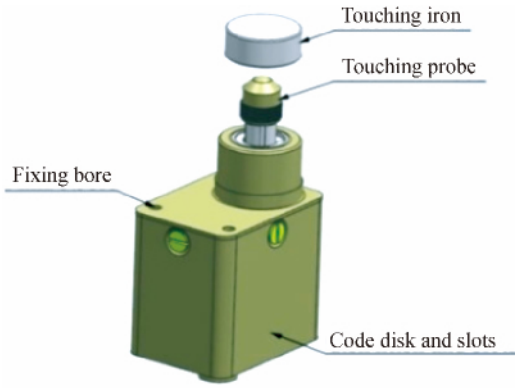

图 6　微位移测量传感器的结构组成

Fig. 6　Constitute of grating sensor for linear distance

表 2　微位移测量传感器的性能参数

Tab. 2　Performances of grating Sensor

No.	Items	Value
1	Size of main body	22 mm×16 mm×20 mm
2	Total stroke	±2.0 mm
3	Resonance frequency	1 200 Hz
4	Precision	>1 μm
5	Resolution	0.06 μm
6	Working Temperature	−40℃～+85℃

3.3.2　微位移测量传感器的排布

在传统 FSM 系统中，要实现两维方向的闭

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

环控制，至少需要2个传感器进行角度偏转信息的测量。为了消除反射镜因轴向位移带来的误差，进一步提高FSM的测量精度，也常采用每一维方向上对称布置2个传感器来实现反射镜在该方向上角位移的测量。在机载FSM中，如图7所示，采用4个驱动电机对称线上均匀布置4个微位移测量传感器来实现FSM两维方向上角度信息的测量。这种排布方式不仅使FSM的结构更加紧凑，而且反射镜在每个方向上的角位移均由4个微位移测量传感器通过差分间接获得，有利于机载FSM测量精度的提高。

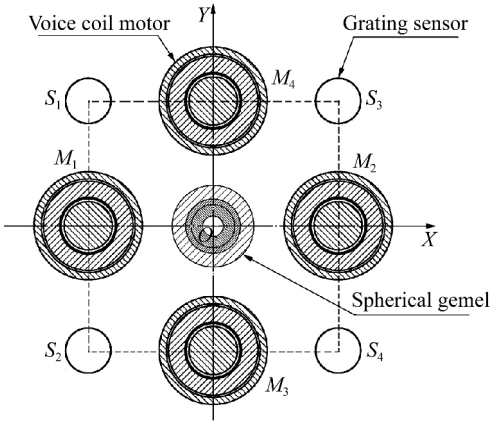

图7 微位移测量传感器的位置排布

Fig. 7 Position of grating sensors

在机载FSM中，采用4个微位移测量传感器进行差分式测量的原理如图8所示。当反射镜绕Y轴偏转时，首先将位移传感器S_1、S_2的测量结果取平均值，得到音圈电机M_1的位移量；将位移传感器S_3、S_4的测量结果取平均值，得到音圈电机M_2的位移量；再将电机M_1、M_2的运动位移取平均值，即可得到反射镜绕Y轴偏转的位移量，进而折算成角位移信息反馈给控制系统实现FSM绕Y轴回转角度的闭环控制；同理，当反射镜绕X轴偏转时，首先将位移传感器S_1、S_3的测量结果取平均值，得到音圈电机M_4的位移量；将位移传感器S_2、S_4的测量结果取平均值，得到音圈电机M_3的位移量；再将电机M_3、M_4的运动位移取平均值，即可得到反射镜绕X轴偏转的位移量，进而折算成角位移信息反馈给控制系统实现FSM绕X轴回转角度的闭环控制。

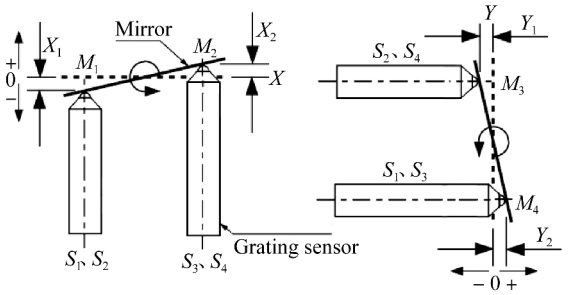

图8 4个位移传感器差分式测量的原理示意图

Fig. 8 Principle of average measure by 4 grating sensors

计算分析过程如下：

$$X_1=-\frac{s_1+s_2}{2}, \tag{1}$$

$$X_2=\frac{s_3+s_4}{2}, \tag{2}$$

$$X=\frac{X_1+X_2}{2}. \tag{3}$$

将式(1)、(2)代入式(3)可得：

$$X=\frac{-s_1-s_2+s_3+s_4}{4}. \tag{4}$$

同理可得：

$$Y=\frac{-s_2-s_4+s_1+s_3}{4}. \tag{5}$$

式中：X_1为FSM绕Y轴回转时左侧的位移量；X_2为FSM绕Y轴回转时右侧的位移量；X为FSM绕Y轴回转时位移量；Y_1为FSM绕X轴回转时上侧的位移量；Y_2为FSM绕X轴回转时下侧的位移量；Y为FSM绕X轴回转时位移量。

由式(4)、(5)可知，机载FSM在每个方向的位移量均是由4个位移传感器的测量结果求算术平均值获得。若每个传感器的单次测量误差为σ，则二次差分后，测量结果的标准差为：

$$\sigma_X=\sigma_Y=\frac{\sigma}{\sqrt{n}}=\frac{\sigma}{2}, \tag{6}$$

式中：σ_X为FSM绕Y轴回转时测量结果的标准差；σ_Y为FSM绕X轴回转时测量结果的标准差；σ为每个位移传感器的单次测量误差；n为测量次数。

根据式(6)的分析结果可知，FSM绕每个轴偏转的反馈信息均是由4个微位移测量传感器经两次差分获得，整体测量精度较单次测量提高1倍。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

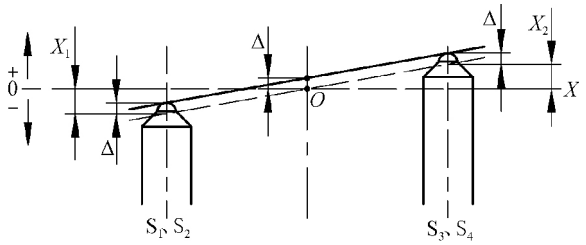

图 9　轴向间隙对测量结果的影响

Fig. 9　Influence of clearance in the shaft direction to measure result

当 FSM 支撑轴系存在轴向间隙时，如图 9 所示，对测量结果的计算分析为：

$$X_{\Delta 1}=X_1+\Delta, \tag{7}$$

$$X_{\Delta 2}=X_2-\Delta. \tag{8}$$

将式(7)、(8)代入式(3)可得：

$$X_{\Delta}=\frac{-s_1-s_2+s_3+s_4}{4}=X, \tag{9}$$

同理可得：

$$Y_{\Delta}=\frac{-s_2-s_4+s_1+s_3}{4}=Y, \tag{10}$$

式中：Δ 为机载刚性支撑式 FSM 存在的轴向间隙；$X_{\Delta 1}$ 为存在轴向间隙时 FSM 绕 Y 轴回转左侧的位移量；$X_{\Delta 2}$ 为存在轴向间隙时 FSM 绕 Y 轴回转右侧的位移量；X_{Δ} 为存在轴向间隙时 FSM 绕 Y 轴回转的位移量；Y_{Δ} 为存在轴向间隙时 FSM 绕 X 轴回转的位移量。

根据式(9)、(10)的计算结果可知，该位移传感器的排布方式消除了支撑轴系轴向间隙引起的测量误差，有效保证了 FSM 的工作精度。

3.4　结构总成

图 10 所示为机载 FSM 的机械结构组成(位移传感器的真实位置见图 7)，该型 FSM 主要通过1 个万向轴系实现运动部分与不动部分的刚性连接，通过轴系间隙调整机构消除万向轴系的轴向间隙，通过 4 个音圈电机为 FSM 的运动提供直线动力，通过 4 个微位移测量传感器实现反射镜的位置监测。其中，轴系间隙调整机构的设计、高精度位移传感器的研制以及差分式测量方法的使用，保证了机载 FSM 的指向精度；万向轴系大的承载能力、音圈电机优异的抗振性、冲击性能，以及微位移测量传感器强的高低温适应性，有效地保证了机载 FSM 优异的环境适应性。

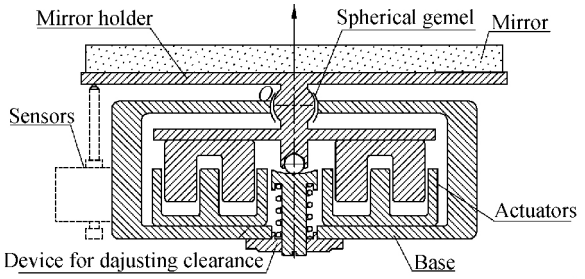

图 10　机载 FSM 的机械结构组成示意图

Fig. 10　Constitute of FSM for airborne platform

4　机载刚性支撑式 FSM 的实验检测

4.1　机载 FSM 控制带宽的测试

在完成机载 FSM 控制系统的组建后，采用不完全微分 PID 控制算法消除一阶谐振，得到系统的闭环幅频特性曲线如图 11 所示。机载 FSM 的闭环控制带宽约为 110 Hz，高于机载运动平台的需求指标，满足系统的设计要求。

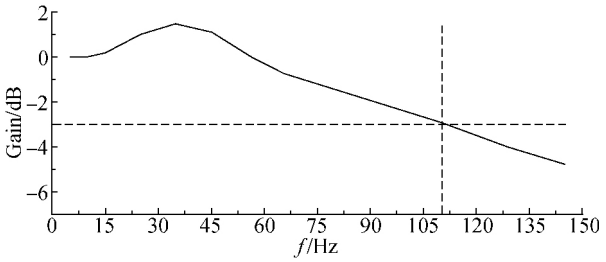

图 11　机载 FSM 的闭环幅频特性曲线

Fig. 11　Closed-loop amplitude-frequency curve

4.2　机载 FSM 指向精度的测试

室温条件下，对机载 FSM 的指向精度进行了实验检测。如图 12 所示，实验系统主要由测试平台、0.2″自准直仪、伺服控制箱、主控计算机和机载 FSM 装置等组成。其中，主控计算机和伺服控制箱用于控制机载 FSM 正常工作并根据需要将 FSM 设定于不同的指向位置，0.2″自准直仪用于监测 FSM 的实际指向位置。具体实验方法为：首先由主控计算机和伺服控制箱将 FSM 控制在某个指定位置，待工作稳定后，通过自准直仪测得 FSM 的实际位置，并与系统的设定位置进行对比分析，进而获得机载刚性支撑式 FSM 的指向精度。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

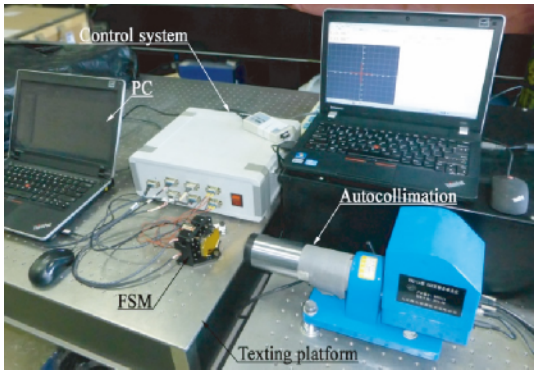

图 12 机载 FSM 指向精度的测试

Fig. 12 Experiment for measuring pointing precision of FSM

表 3 机载 FSM 指向精度的测试结果

Tab. 3 Measure results of FSM pointing precision

No.	Appointed position angle/(X,Y)	Actual position angle/(X,Y)	Pointing error /(Δ_X,Δ_Y)
1	(0,0)	(+0.4″,0″)	(+0.4″,0″)
2	(+69″,0)	(72.4″,+0.8″)	(+3.4″,0.8″)
3	(−69″,0)	(−66.2″,−1.0″)	(+2.8″,−1.0″)
4	(0,+69″)	(−0.8″,+72.8″)	(−0.8″,+3.8″)
5	(0,−69″)	(−0.6″,−72.4″)	(−0.6″,−3.4″)
6	(+69″,−69″)	(+66.8″,−66.0″)	(−2.2″,+3.0″)
7	(−69″,−69″)	(−71.8″,−66.6″)	(−2.8″,+2.4″)
8	(+69″,+69″)	(+67.0″,+66.4″)	(−2.0″,−2.6″)
9	(+69″,−69″)	(+72.0″,−72.2″)	(+3.0″,−3.2″)

实验数据及分析结果如表 3 所示。结果显示，机载 FSM 的指向误差方位不超过 3.4″、俯仰不超过 3.8″，满足系统的应用需求。

5 结 论

本文从机载运动平台的应用需求出发，以实现机载 FSM 的小体积、高性能和优异的环境适应性为目的，对 FSM 的支撑轴系、驱动元件、测角元件等进行了重点设计与选择。其中，滚动型关节轴承的应用，实现了 FSM 大的承载能力及低的摩擦阻力；轴系间隙调整机构的设计，不仅消除了轴向间隙，而且进一步增大了 FSM 的承载能力；专用型微位移传感器的研制及 4 个位移传感器非轴线布置、二次差分测量方式的采用，不仅使机载 FSM 的结构更加紧凑，而且有效提高了机载 FSM 的测量精度；最后，对机载 FSM 控制带宽及指向精度进行了检测，结果表明：所设计的 FSM 控制系统稳定、响应速度快、指向精度高，满足机载运动平台的应用要求。

参考文献：

[1] 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)

[2] ZHOU Q K, PINHAS B T, DAPENG F, *et al*.. Design of fast steering mirror systems for precision laser b eams steering [J]. *IEEE*, 2008.

[3] 吕春雷，佟首峰，宋延嵩. 机载光通信复合轴光路优化设计和跟瞄技术研究[J]. 光子学报，2012，4(6)：649-653.
LV CH L, TONG SH F, SONG Y S. Optical-path optimization design of compound axis and APT study of airborne laser communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 4(6): 649-653. (in Chinese)

[4] 周子云，高云国，邵帅，等. 采用柔性铰链的快速反射镜设计[J]. 光学 精密工程，2014，22(96)：1547-1554.
ZHOU Z Y, GAO Y G, SHAO SH, *et al*.. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(96): 1547-1554. (in Chinese)

[5] 王旭，王挺峰，王弟男，等. 无线光链路快速同步技术[J]. 中国光学，2014，7(4)：672-678.
WANG X, WANG T F, WANG D N, *et al*.. Rapid synchronization technology for wireless optical link [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 245-252.. (in Chinese)

[6] 李军健，何衡湘，林国珊. 基于扩张状态观测器的快速反射镜控制研究[J]. 激光与红外，2010，40(2)：200-204.
LI J J, HE H X, LIN G SH. Research on controlling fast steering mirror based on extended state observer [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(2): 200-204. (in Chinese)

[7] 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 technology for dynamic platform [J]. *Opt. Precision*

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Eng.，2014，22(1)：117-123.（in Chinese）

[8] 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）

[9] 王卫兵，王挺峰，郭劲. 星载光电捕获跟踪瞄准控制技术分析[J]. 中国光学，2014，7(6)：879-888.
WANG W B，WANG T F，GUO J. Analysis for opto-electrical acquisition tracking and pointing control technology on satellite [J]. *Chinese Optics*，2014，7(6)：879-888.（in Chinese）

[10] CHEN N H，BENJAMIN P，JOHN T W，*et al*.. Modeling and control of a fast steering mirror in imaging applications [J]. *IEEE*，2010，27-32.

[11] 彭树萍，于洪君，王伟国，等. 新型快速反射镜伺服系统设计[J]. 红外与激光工程，2014，43(5)：1610-1615.
PENG SH P，YU H J，WANG W G，*et al*.. Design of servo system for novel fast-steering mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*，2014，43(5)：1610-1615.（in Chinese）

[12] 贺小军，曲宏松，张贵祥，等. 扫描镜稳定度对 TDI CCD 测量精度的影响[J]. 中国光学，2014，7(4)：665-671.
HE X J，QU H S，ZHANG G X，*et al*.. Impact of scan mirror stability on TDI CCD system measure accuracy [J]. Chinese Optics，2014，7(4)：665-671.（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）

[14] 薛珮瑶，吴耀，冯茜，等. 大视场四象限探测光学系统设计[J]. 中国光学，2014，7(3)：462-468.
XUE P Y，WU Y，FENG Q，*et al*.. Design of the large field optical system for four-quadrant detecting [J]. *Chinese Optics*，2014，7(3)：462-468.（in Chinese）

[15] 杨东，毛耀，丁科，等. 模型参考算法在快速反射镜中的应用[J]. 红外与激光工程，2013，42(10)：2791-2796.
YANG D，MAO，Y，DING K，*et al*.. Application of model reference adaptive algorithm in fast-steering mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*. 2013，42(10)：2791-2796.（in Chinese）

[16] 田福庆，李克玉，王珏，等. 压电驱动快速反射镜的自适应反演滑模控制[J]. 强激光与粒子束，2014，26(1)：011011-1-5.
TIAN FU Q，LI K Y，WANG Y，*et al*.. Adaptive backstepping sliding mode control of fast steering mirror driven by piezoelectric actuator [J]. *High Power Laser and Particle Beams*，2014，26(1)：011011-1-5.（in Chinese）

[17] 施建华，伏思华，谢文科. 光栅光谱仪光谱响应误差校正[J]. 中国光学，2014，7(3)：483-490.
SHI J H，FU S H，XIE W K. Error correction of spectral response characteristic of grating spectrometer[J]. *Chinese Optics*，2014，7(3)：483-490.（in Chinese）

[18] 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 G，*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）

作者简介：

徐新行（1983－），男，河南周口人，博士，副研究员，2009 年于西北工业大学获得硕士学位，2015 年中国科学院大学获得博士学位，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）

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net