

·光电系统·

## 柔性轴承有轴系快速反射镜结构设计

印 铁

(东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000)

**摘 要:**快速反射镜是自适应光学中重要的光学元件,比较了有轴系和无轴系快速反射镜两种结构形式的性能,分析了不同的工作特点和应用特征,在此基础上设计了一种新的有轴系快速控制反射镜结构。轴系利用柔性轴承无摩擦、转角大的特点,通过分析计算提出了适用的参数,选择了相应的柔性轴承。该设计结合了有轴系和无轴系快速反射镜的优点,提出了一种具有发展前景的快速反射镜结构。

**关键词:**有轴系快速反射镜;柔性轴承

中图分类号: TH741

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2012)03-0022-04

## Structure Design of Shafting Fast Steering Mirror with Flexible Bearing

YIN Tie

(Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China)

**Abstract:** The fast steering mirror is an important optical component of adaptive optics, the structure properties of shafting fast steering mirror and no-shafting fast steering mirror are compared, the difference working and application characteristics are analyzed, a new structure of fast steering mirror is designed on this basis. The flexible bearing has the characteristics of no friction and big angle, the shafting uses these characteristics. The applicable parameters are proposed and the relative flexible bearing is selected by analyzing and calculating. The design combines the advantages of shafting fast steering mirror and no-shafting fast steering mirror, a structure of the fast steering mirror which has a development prospect is proposed.

**Key words:** shafting fast steering mirror; flexible bearing

快速反射镜(以下简称FSM)是自适应光学中重要的能动光学元件,它既可以用来在自适应光学系统中校正光路中的倾斜误差,也可以用来稳定光束线的指向,同时还可以用来在光学精密仪器中作为快速跟踪的关键器件<sup>[1]</sup>。它与大惯量机架结构的主轴系统共同构成复合轴跟踪系统,它的性能直接决定了跟踪系统的指向精度,因此提高它的误差抑制带宽,对整个系统的性能具有重要的意义<sup>[2]</sup>。FSM机械系统的设计主要满足光学系统的需要。镜子直径决定反射镜结构的大小,角行程和需要扫描的加速度决定了驱动器的大小,反射镜除了保证面形精度以外,还应尽量减小质量,以提高结构谐振频率<sup>[3]</sup>。驱动器性能不仅影响跟踪范围,而且影响结构谐振频率,要求

其负载能力强、作用范围大、刚度高等<sup>[4]</sup>。

### 1 FSM结构类型

FSM结构包括有轴结构系和无轴系结构。一种为X-Y轴框架形式,也称为有轴系结构;另一种为柔性轴形式,或者称为无轴系形式,其特点是没有机械轴承制运动物体的6个自由度、几个角度具有很好的柔性,而且该结构没有摩擦力矩<sup>[5]</sup>。

#### 1.1 有轴系FSM结构类型

有轴系FSM结构由反射镜及机械支承组件、驱动器、测角元件等部件组成。采用的是X-Y轴系内

收稿日期: 2011-03-25

作者简介: 印铁(1967-),男,辽宁营口人,高级工程师,主要从事电子设备结构设计方面的研究。

外框架结构,外框架轴系的轴承座固定在基板上,镶嵌着反射镜的内框架轴系安装在外框架上。

这种结构已经有样机模型,其与传统的转台有类似之处,内、外框架的两维转角运动的驱动执行元件是力矩电机。子反射镜转角位置由光电自准测角仪实时检测,测角仪在高低和方位两个转角方向上各安装一套,完成二维角位置检测。内、外框架的两维转角运动的测速元件是直流测速机。该结构存在的主要问题是,结构的惯量大、摩擦力矩大<sup>[6]</sup>。

## 1.2 无轴系FSM结构类型

无轴系FSM结构,即FSM结构的运动没有固定的轴系,所以可以称为无轴系或柔性轴系FSM<sup>[7]</sup>。无轴系FSM利用音圈电机或分辨率达到纳米量级的压电驱动器驱动,其惯性比传统机架小很多,可大幅度提高谐振频率,与高灵敏度、高响应速度的传感器相结合,就可以构成高精度的光学跟踪系统,大大提高系统的跟踪带宽和响应速度,同时又有极高的角度分辨能力。

大多数的柔性支承结构为柔性铰链单元、柔性板单元和柔性轴单元。柔性板单元和柔性轴单元有一个共同的缺陷,即其结构本身无法保证转动中心的稳定性,随着力矩的变化,转动中心会有较大的偏移,这会严重地影响快速反射镜系统的工作精度。

柔性铰链单元支承结构由于柔性铰链集中柔度的特点,具有回转中心稳定的优点<sup>[8]</sup>。

## 2 柔性有轴系FSM结构设计

综上所述,有轴系和无轴系FSM结构各有其优、缺点,设计的一种柔性有轴系FSM采用柔性轴承支承轴系,具有位置固定的回转中心,同时可消除摩擦、间隙的影响,综合了有轴系FSM和无轴系FSM结构的优点,可作为FSM结构的一种新发展。

### 2.1 结构设计要求

FSM系统对柔性支承的设计要求是:在FSM的工作方向上具有较低的刚度,在FSM系统的非工作方向上具有较高的刚度,具有稳定的转动中心,具有较小的机械滞后特性。

柔性支承的总体要求中,前两点是进行柔性支承结构设计的主要参考。具有稳定的转动中和较小机械滞后特性是实现反射镜高精度回转的重要保证<sup>[8]</sup>。

## 2.2 结构设计

### 2.2.1 结构组成

柔性有轴系FSM结构采用四音圈电机驱动,通过呈正交分布的两对驱动器的对镜架或框架的推拉作用,来实现对反射镜的倾斜控制,以柔性轴承与镜架连接构成 $X-X$ 转动轴系,以柔性轴承与框架连接构成 $Y-Y$ 转动轴系。此二维轴系可限制镜体在 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个个方向上的平移以及绕 $Z-Z$ 轴转动。结构组成如图1~图3所示。

这种结构与上述柔性铰链单元支承结构有相似之处,不同的是柔性有轴系FSM结构轴系采用标准柔性轴承,充分利用了柔性轴承的优势,体现了一种

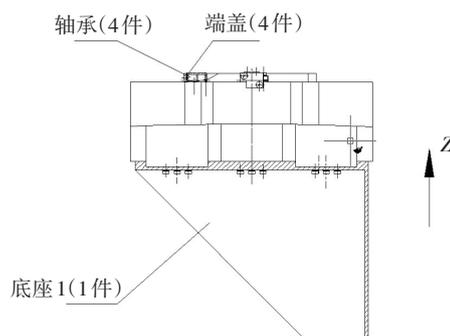


图1 FSM主视图

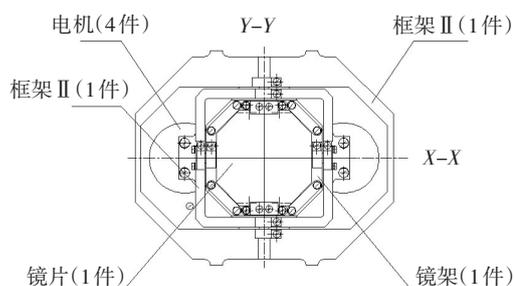


图2 FSM俯视图

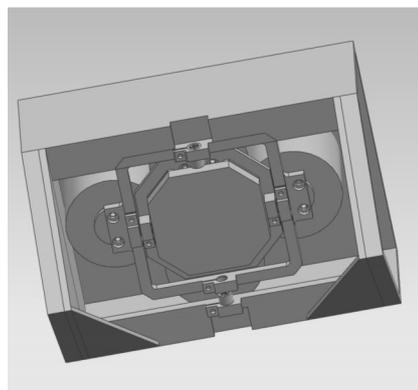


图3 FSM轴测图

新的设计思路。

### 2.2.2 柔性轴承的选用

伺服系统的基本要求为精度高、动态响应快、稳定性好；系统精度为系统输出转动量实际值与要求值差值，与运动件间隙有关，一般有轴系快速反射镜采用普通轴承与框架构成轴系，而普通轴承无论滚动还是滑动轴承转动时都有摩擦和间隙存在，摩擦和间隙的非线性会导致系统的爬行、振荡等不稳定行为，对系统精度也有不利影响。在本方案中采用柔性轴承，由柔性轴承两端分别与固定件（如图2框架Ⅱ）、转动件（如图2镜架）连接，连接方式如图1、图2所示，将轴承套入机体（一端有豁口），以螺钉压紧豁口处，以螺纹预紧力保证轴承与机体之间存在足够的静摩擦力，使轴承与机体之间无相对移动，保证了转动中心的稳定性；反射镜转动时，只发生柔性轴承的弹性变形，不存在摩擦和间隙，在轴承转动这一环节上消除了这些不利影响，同时柔性轴承无摩擦，弹性良好适应快速反射镜的动态要求；此外柔性轴承的弹性范围相对反射镜转动范围要大得多，可以减小电机过载等不利因素，提高系统稳定性。柔性轴承结构如图4所示。

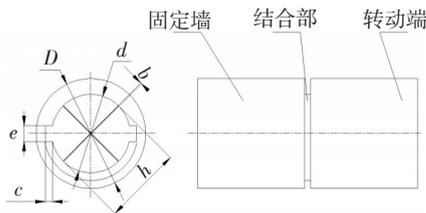


图4 柔性轴承结构图

### 2.3 轴系设计及分析

轴系的设计从快速反射镜系统工作带宽要求出发，首先确定系统低阶机械谐振频率要求，并以此得到轴系各向刚度要求。

轴系受到径向载荷时（主要是振动），轴承转动端与镜片连接部分在径向载荷作用下对结合部产生弯矩，在弯矩作用下镜体会以结合部为支点在Z方向上产生平移趋势，这种平移会引起反射镜位置变动，影响系统精度，应该避免这种平移或者将其限制在精度允许范围内。

在通电状态下，可由电机提供的推力将其平衡，避免镜体在Z方向方向平移，因此选择电机时应考虑这

方面负载能力。在不通电状态下，反射镜位置在受力后平移，应靠轴承本身的弹性复位，选择轴承时必须分析其受力状态。

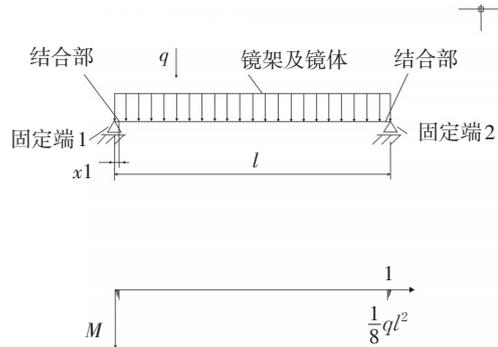


图5 柔性轴承受力状态图

柔性轴承结构如图4所示，柔性轴承结合部为轴系动、静两部分分界处；所示轴系受力状态可近似由图5表示，载荷 $q$ 来自于镜架及镜片在高频振动时其质量与振动加速度的乘积，由于镜架和镜片为质量可近似于均匀分布的刚性整体，镜架及镜片重心在其中心处；由于其为刚性整体，在载荷作用下变形极小，可近似为没有变形，因此柔性轴承结合部为实际受力变形最大处。此处弯矩由下式计算

$$M = ma \frac{l}{2} = \frac{mal}{2} \quad (1)$$

式中， $m$ 为镜架及镜片质量； $a$ 为最大振动加速度； $l$ 为镜体重心与轴承结合部距离。由图4可计算出柔性轴承结合部的惯性矩为

$$J_1 = \int_0^{\frac{d}{2} \cos 45^\circ} z^2 \frac{d}{\cos 45^\circ} dz ;$$

$$J_2 = \frac{\pi}{64} [D^4 - (d-2c)^4] = \frac{\sqrt{2}}{48} d^4 + \frac{\pi}{64} D^4 - \frac{\pi}{64} (d-2c)^4$$

$$J = J_1 + J_2 = \int_0^{\frac{d}{2} \cos 45^\circ} z^2 \frac{d}{\cos 45^\circ} dz +$$

$$\frac{\pi}{64} [D^4 - (d-2c)^4] = \frac{\sqrt{2}}{48} d^4 + \frac{\pi}{64} D^4 - \frac{\pi}{64} (d-2c)^4$$

(2)

$$d\theta = \frac{M ds}{EJ} \quad \theta = \int_0^{x_1} \frac{M(x)}{EJ} ds \quad (3)$$

式中， $\theta$ 为轴系受力后轴承结合处角变量。由式(2)、式(3)得出，在设计环节应对转动体实现减重设计，同时选择尺寸足够大的轴承，以便尽量减小 $\theta$ 值，既可在通电状态下减小电机的推力，又可在不通电状态下较快实现复位。

轴系围绕Y-Y轴和Z-Z轴转动方向为工作方向，

在这一方向上,既要实现转动体在转角范围内转动自如,又要保证系统有足够的刚度以提高系统的谐振频率;扭转刚度为

$$J_k = J_{k1} + J_{k2} + J_{k3} + J_{k4} \approx \frac{1}{3}hb^3 + \frac{1}{3}hb^3 + \frac{\pi D^4}{32} - \frac{\pi d^4}{32} - \frac{1}{3}ac^3 - \frac{1}{3}ac^3 = \frac{2}{3}hb^3 + \frac{\pi D^4}{32} - \frac{\pi d^4}{32} - \frac{2}{3}ac^3 \quad (4)$$

由式(4)得出, $h$ 、 $b$ 越大,扭转刚度越大。根据设计要求选用参数合适的柔性轴承可在不通电状态下较快实现复位,保证在FSM系统的非工作方向上具有较高的刚度。

### 3 柔性有轴系FSM实际应用

在应用中,柔性有轴系FSM与位置敏感探测器(PSD)构成闭环系统,采用二极管激光器提供试验光源,系统工作范围 $\pm 3$  mrad,相位带宽40 Hz,柔性有轴系FSM经试验满足了系统工作要求。现有设计系统工作范围和谐振频率还不够,为提高系统性能指标,在结构设计上应进一步改进:选用动、静子间隙更大的电机增大工作范围,设计吸振性更好的支架作为柔性有轴系FSM的工作平台增加系统刚度以提高系统的谐振频率。

### 4 结 论

分析几种有轴系和无轴系FSM结构不同的工作

特点和应用特征,在此基础上设计了一种新的有轴系快速控制反射镜结构,与无轴系FSM结构相比,保证了转动中心的稳定性;与其他有轴系FSM结构相比,消除了摩擦、间隙对系统性能的不利影响,在FSM的工作方向上具有较低的刚度,在FSM系统的非工作方向上具有较高的刚度;在实际应用中满足了系统对结构设计的要求,通过改进设计可进一步提高系统性能指标。

### 参考文献

- [1] 邓耀初,贾建援,陈贵敏,等.振动环境下的快速反射镜精跟踪系统[J].激光与红外,2008,38(1):11-13.
- [2] 王强,陈科,傅承毓.基于闭环特性的音圈电机驱动快速反射镜控制[J].光电工程,2005,32(2):9-11,18.
- [3] 屈玉宝,丛龙洋.稳像振镜系统的设计[J].光电技术应用,2010,25(6):25-26,30.
- [4] 王永辉,郭劲.快速反射镜系统的设计简介[J].长春理工大学学报,2003,26(2):51-53.
- [5] 张丽敏,郭劲,陈娟.快速反射镜机械结构研究综述[J].研究生论坛,2005(3):21-24.
- [6] 吴光华,李君兴,刘建辉,等.有轴系子系统结构与控制[J].长春理工大学学报,2004,27(4):116-118.
- [7] 陈娟,彭海峰.柔性轴FSM控制技术综述[J].光机电研究论坛,2008(2):43-48.
- [8] 鲁亚飞,范大鹏,范世珣,等.快速反射镜两轴柔性支承设计[J].光学精密工程,2010,18(12):2574-2582.

### 《光电技术应用》期刊网站简介

《光电技术应用》期刊网站的网址为: <http://www.gdjsy.com>。网站设有:期刊介绍、资质荣誉、编委会、版权声明、征稿简则、征订启事、联系方式等栏目。通过上述栏目,作者与读者可对期刊基本情况和编辑部工作有进一步的了解。

为方便作者投稿,网站设立了期刊的投稿指南及论文格式模板。投稿指南从文章的题名、摘要、引言、结语、参考文献等几个部分提出对所投稿件(文章)的要求、编写方法、应注意的问题等,供作者参考。论文格式模板以本刊一篇已发表的文章为例,对刊载文章的体例、格式及部分基本要求进行了较为详细的说明(采用红色说明文字),以节省文章编辑修改时间,提高录用的时效。《光电技术应用》期刊的电子邮箱为: [nloe@vip.163.com](mailto:nloe@vip.163.com)。热诚欢迎广大作者踊跃投稿。