

音圈电机驱动型快速控制反射镜机械结构研究

徐新行¹, 王兵¹, 庄昕宇¹, 陈宁¹, 李莹²

(1.中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 2.吉林大学 管理学院, 长春 130022)

摘要:针对音圈电机驱动型快速控制反射镜(简称“快反”,下同)系统,阐述了直线式和回转式音圈电机的结构组成、功能特性以及用于快反系统的关键技术。分析了目前快反系统常用结构形式(X-Y框架式和柔性无轴式)的组成和工作原理;在对比传统型快反系统机械结构优缺点的基础上,提出了新型球面副支撑式结构。新型结构既无复杂轴系,又实现了刚性支撑,转角范围大、承载能力强,且对振动、冲击、回转等工作环境具有较强的适应性。

关键词:球面副支撑;快速控制反射镜;机械结构;音圈电机

中图分类号:HT745.1

文献标识码:A

文章编号:1672-9870(2011)01-0049-04

Research on Mechanical Structure of Fast-steering Mirror Driven by Voice Coil Actuators

XU Xinhang¹, WANG Bing¹, ZHUANG Xinyu¹, CHEN Ning¹, LI Ying²

(1.Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033;
2.School of Management, Jilin University, Changchun 130022)

Abstract: Aim to fast-steering mirror system driven by voice coil actuators, structure composing, function characteristics of linear and rotary voice coil actuators and key technology on that voice coil actuators are used in fast-steering mirrors system were expatiated. Ordinary structure of fast-steering mirror system at presently, composing and principle of the X-Y frame structure and flexure axial structure without shafts were analyzed particularly. Basis on contrast advantages and disadvantages of traditional mechanical structure for fast-steering mirror system, the new support structure with spherical pair of fast-steering mirror system was designed. The new structure what is no complex shafts as well as joined rigidly has great carrying capacity and angular range. Furthermore, it has great adaptability to vibrate, impact and rotate.

Key words: spherical pair support; fast-steering mirror; mechanical structure; voice coil actuator

快速控制反射镜作为光学系统中的关键性器件,已在自适应光学、精密跟踪、目标指向、光束控制及光通信等领域得到广泛应用^[1-3]。其主要功能是实现平面反射镜的快速、高频转动,进而达到及时调整光束倾斜误差、校正光路传播方向和稳定光束的目的。其特点是反射镜转角范围小,通常为分秒级,但要求系统的响应速度和控制带宽非常高,一般为几十赫兹到上千赫兹^[4]。

目前,对于响应速度要求较高的快反系统大多采用压电陶瓷进行驱动。利用压电陶瓷的高频响应特性,系统的响应频率可以达到上千赫兹。但压电

陶瓷的行程很小,只有几十微米,而所需的驱动电压却高达几百伏。与之相对,音圈电机的驱动电压只有十几伏,行程却是压电陶瓷的成百上千倍。而且音圈电机自身的响应频率也很高,再通过系统机械结构的优化及伺服控制系统的补偿,系统的响应速度也能达到上百赫兹^[5]。因此,音圈电机已逐渐成为快反系统的首选驱动元件之一。

在快反系统中,结构形式直接决定了系统的谐振频率和负载能力^[6,7],进而影响快速控制反射镜口径与响应速度的提高。本文针对音圈电机驱动型快反系统,对各种常用结构形式进行了对比分析,

收稿日期:2010-09-05

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(057X22C050)

作者简介:徐新行(1983-),男,硕士,助理研究员,主要从事现代光机结构等相关方面的设计与研究, E-mail:xxh123321xxh@163.com.

并根据现有机械结构的不足,提出了新型的刚性承载方式,为大口径、高负载型快速控制反射镜的发展提供了一种新思路。

1 音圈电机驱动器分析

音圈电机驱动器主要分为直线式和回转式两种,分别提供直线型和圆弧型的运动形式,具有高加速度、高速度、高频响、高精度的特点^[8]。这两种运动形式均可用于快反系统,实现平面反射镜的高频、快速转动。

1.1 直线式音圈电机

图1为直线式音圈电机的结构示意图,如图所示,这种音圈电机主要由线圈、永久磁铁及各自的支撑件组成,通过调节线圈中电流的幅值、频率和方向,即可实现电机精确的伸缩运动。其中,线圈与磁体相互分离,之间存在必要的工作间隙(用于快反系统的直线式音圈电机,工作间隙约为0.6~0.8mm)。由于此工作间隙的存在,一方面,避免了线圈与磁体之间的摩擦和碰撞;另一方面,使得磁铁与线圈之间在径向方向上无相互约束。即二者在进行相对直线运动时,允许有一定的相对转动,从而实现平面反射镜的小角度偏转。

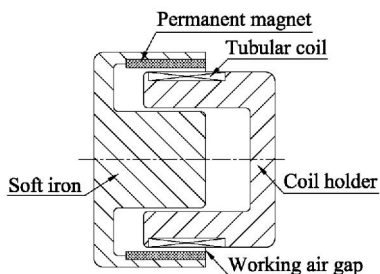


图1 直线式音圈电机示意图
Fig.1 Linear voice coil actuator

在快反系统中,一般选择线圈与平面反射镜相连、磁铁固定式的结构。主要是因为磁铁的质量较大,一般为线圈的3-5倍。如此布置,可以大幅度减小运动件的转动惯量,对提高系统的谐振频率非常有利。不足是:线圈输电线处于运动状态,易出现断路现象。此外,线圈易发热,并将热量直接传递给平面反射镜,而反射镜的面形对温度较为敏感,因此,限制了系统的长时间连续工作。

图2为快反系统中直线式音圈电机的排布方式及反射镜受力情况示意图。如图2(a)所示,音圈电机通常采用对称的排布方式,即通过两对电机的推拉运动实现平面反射镜绕轴线(X轴或Y轴)的旋

转。如图2(b)所示,反射镜在一对力偶的作用下进行旋转,受力情况较好。若采用非对称的布置方式,如图2(c)所示,反射镜在一个推(或拉)力作用下转动的同时,会在中心支点处产生一个附加力,从而引起反射镜的整体轴向位移,最终造成测角误差,影响系统的总体工作精度。而采用3个音圈电机圆周均布的快反系统,在控制平面反射镜实现二维偏转时需要进行必要的坐标变换,增加了控制系统的负担^[7]。

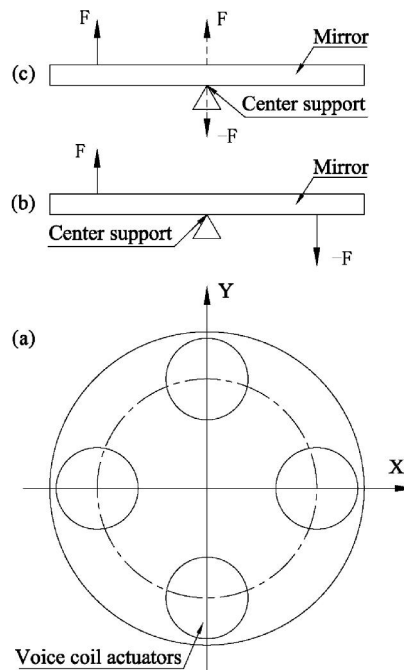


图2 直线式音圈电机排布及反射镜受力情况示意图
Fig.2 Location of four voice coil actuators and force act on mirror

1.2 回转式音圈电机

图3为回转式音圈电机的组成结构示意图,此类音圈电机与传统电机相同,采用轴/球轴承作为引导系统。所提供的弧型运动光滑平稳,且无需换向装置,目前已成为了快速响应、有限角激励系统中的首选驱动元件^[8]。在快反系统中,该型音圈电机主要用于X-Y轴框架式结构,并采用角度测量传感器对反射镜体的转角直接测量,有利于系统控制精度的提高。

2 快速控制反射镜机械结构分析

目前研究最多的快反系统结构形式主要有两种:一种是X-Y轴框架式,也称为有轴式结构,内外框架分别绕两相互正交的轴线转动,实现平面反射镜的二维偏转,如图4、图5所示;另一种是柔

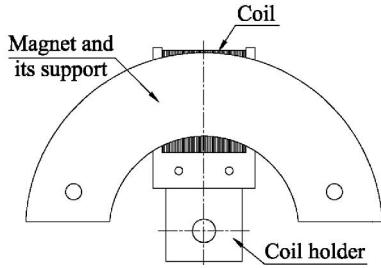


图 3 回转式音圈电机示意图

Fig.3 Rotary voice coil actuator

性无轴式结构, 主要利用弹性元件的挠性工作, 其结构组成如图 6 所示。

2.1 X-Y 轴框架式快速控制反射镜

X-Y 轴框架式快反系统主要包括: 基座、内外框架、平面反射镜、音圈电机和转角测量传感器等。外框架轴系安装在基座上, 固连有平面反射镜的内框架轴系安装在外框架上。内外框架的旋转既可以选用直线式音圈电机驱动^[9](如图 4 所示), 也可以选用回转式音圈电机驱动^[10](如图 5 所示)。这种结构的优点是结构刚度好、承载能力强, 且转角范围大, 尤其是以回转式音圈电机为驱动元件的快反系统。缺点是对轴系的精度要求较高, 系统的转动惯量和摩擦力矩偏大, 不利于谐振频率的提高; 而且此结构的体积偏大, 受空间限制严重。

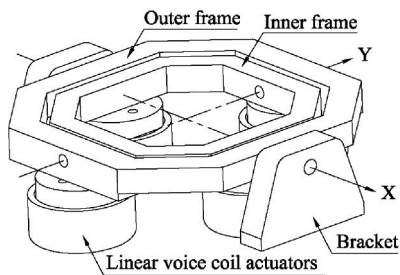


图 4 直线式音圈电机驱动型框架式结构

Fig.4 X-Y frame structure driven by linear voice coil actuators

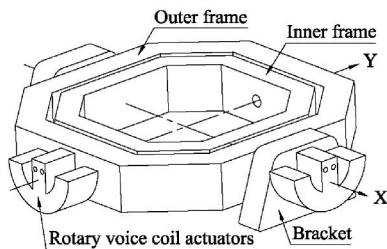


图 5 回转式音圈电机驱动型框架结构

Fig.5 X-Y frame structure driven by rotary voice coil actuators

2.2 柔性无轴式快速控制反射镜

柔性无轴式快反系统主要由平面反射镜、镜托、弹性元件、音圈电机、基座及位移测量传感器等组成, 如图 6 所示。它的优势是: 结构简单, 无摩擦阻力矩, 响应速度快, 但对弹性元件的要求高。即要求弹性元件在期望运动方向上具有足够的柔性, 而在限制运动的方向上具有足够的刚度^[11]。因此, 系统工作时平面反射镜的运动形式较为复杂(在产生转角运动的同时会产生微小的线位移), 不适用于在振动、冲击、回转等恶劣的工作条件下使用。此外, 这种结构形式的快反系统转角范围小、承载能力有限, 更适于小口径、轻量型的反射镜体。

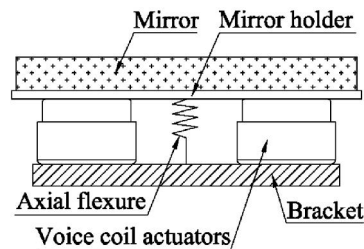


图 6 柔性无轴式结构

Fig.6 Flexible axis structure without shafts

2.3 球面副式快速控制反射镜

针对传统型快反系统结构形式的不足, 本文提出了新型球面副式支撑结构。

如图 7 所示, 球面副式快反系统主要包括: 平面反射镜、外球面镜托、内球面镜框、滚珠、音圈电机、支撑弹簧、基座及位移测量传感器等。其中, 镜托的外侧表面和镜框的内侧表面均为球面的一部分, 之间通过高精度滚珠实现刚性连接, 同球心装配。因此, 固连有平面反射镜的镜托即可借此球面副在镜框中万向旋转。在正交分布的 4 个音圈电机的推拉力作用下, 实现反射镜的二维偏转。4 个位移测量传感器如图 7 所示对称布置, 每 2 个传感器完成绕一个轴线旋转偏转角的测量, 减小了反射镜因轴向位移造成的测量误差。

本文提出的快反系统结构简单、可靠实用, 既没有复杂的轴系, 又实现了刚性承载, 并且对振动冲击、回转等恶劣的工作环境具有较强的适应性。尽管系统的转动惯量和摩擦阻力矩偏大, 结构的谐振频率偏低。但对于响应速度要求不高, 工作条件恶劣的光学系统, 此结构具有较大发展空间。

3 结论

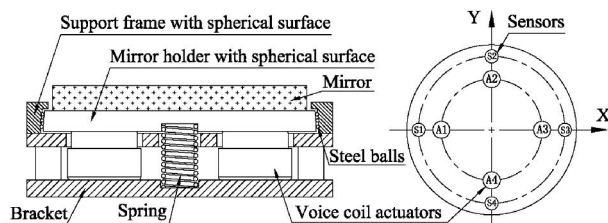


图7 球面副支撑式结构及其电机传感器分布示意图

Fig.7 Diagram of the structure with spherical pair and location of voice coil actuators and sensors

(1) 音圈电机凭借自身高速度、高频响、高精度的特点,在工程应用领域,正逐步成为快反系统的首选驱动元件之一。

(2) X-Y 框架式快反系统承载能力强、转角范围大,但轴系结构复杂,转动惯量、摩擦阻力矩和体积较大,系统谐振频率不高。

(3) 柔性无轴式快反系统结构简单、响应速度快,是目前国内外发展的主流结构,但承载能力和对工作环境的适应能力有限。

(4) 新型球面副支撑式快反系统,既无复杂轴系结构,又实现了刚性承载,并且对振动冲击、回转等恶劣工作环境具有较强的适应性,为新型快速控制反射镜的发展提供了一种新思路。

参考文献

[1] Tao T ,Yongmei H ,Chengyu F et al. Acceleration feed-

back of a CCD-based tracking loop for fast steering mirror [J]. Optical Engineering ,2009 ,48(1): 013001.

- [2] Felix E ,Morgan Steven R ,Wasson A et al. Large high performance fast steering mirrors with FPGA-embedded controls [J] .SPIE ,2009 ,7466(74660H):1-10.
- [3] 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 .
- [4] Francisc M T ,Derek J E ,Timothy R. Hilby et al. High bandwidth fast steering mirror [J] .SPIE ,2005 ,5877 (587707):01-14.
- [5] 凌宁 ,陈东红 ,于继龙 ,等 .大口径大角位移的两维高速压电倾斜反射镜[J] .量子电子学报 ,1998 ,15(2): 206-211 .
- [6] 王志臣 ,张艳辉 ,乔兵 .望远镜跟踪架结构形式及测量原理浅析[J] .长春理工大学学报 ,2010 ,33(1):18-21 .
- [7] 张丽敏 ,郭劲 ,陈娟 .快速反射镜机械结构研究综述[J] .光机电信息 ,2005(3):21-24 .
- [8] 张大卫 ,冯晓梅 .音圈电机的技术原理[J] .中北大学学报 :自然科学版 ,2006 ,27(3):224-228 .
- [9] John D W ,Tyler M. A. Fast steering mirror[P] .United States Patent ,Patent No. : UA 6856437 B2
- [10] 邵帅 ,高云国 ,郭劲 ,等 .二维快速控制水冷反射镜装置设计[J] .光学精密工程 ,2009 ,17(3):493-498 .
- [11] Michael S ,Gerald R ,Mehrdad K et al .Design Considerations for Fast Steering Mirrors (FSMs)[J] .SPIE , 2002 ,4773:63-73.