

柔性轴 FSM 控制技术综述

陈 娟^{1,2} 彭海峰³

(1. 长春工业大学 电气与电子学院, 吉林 长春 130012;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光电对抗部, 吉林 长春 130033;

3. 中国科技大学 光学仪器系, 安徽 合肥 230000)

【摘要】在复合轴光电跟踪系统中, 通过对快速反射镜 (FSM) 的控制实现了光束的更精确控制。本文分析了国内外几种柔性轴 FSM 的机械结构及性能, 具体介绍了应用较成熟的柔性轴 FSM 控制系统以及柔性轴系统设计的几项关键技术。

关 键 词: 复合轴; 快速反射镜; 柔性轴

1 引 言

光电跟踪系统往往采用旋转机架结构, 对于大口径望远镜等较笨重的光学系统, 直接进行快速捕获和精密跟踪极其困难, 单独转动反射镜视场有限, 如果将这两种结构结合起来, 即构成了复合轴控制系统。复合轴系统是在主跟踪架上装 1 个高低方位均可调的子反射镜, 用以控制发射与接收光轴的方向。子反射镜轴称为子轴, 主跟踪镜轴称为主轴, 主轴和子轴分别控制, 构成母子伺服系统。主伺服系统视场大、动态范围宽, 但频带较窄、跟踪精度差, 可以完成对目标的捕获和粗跟踪; 子伺服系统视场小、动态范围小, 但其频带宽、响应快、跟踪精度高, 可在粗跟踪的基础上完成精跟踪。

复合轴的子轴即快速反射镜, 采用反射镜面来精确控制光束方向。快速控制反射镜结构分为有轴系和柔性轴系 (也称无轴系) 2 种。柔性轴控制采

用一个多输入多输出的数字控制系统来控制视轴而不是机架。柔性控制要求在结构分析和控制系统分析之间建立一套严格的数学关系, 显然应用此项技术难度很大。本文将就柔性轴概念和原理及其在光电系统的应用进行阐述。

2 柔性轴概念

2.1 柔性轴

柔性轴又称无轴系, 以区分于有轴系, 即反射镜的运动没有固定的轴系, 所以可以称为无轴系或柔性轴系快速控制反射镜。

柔性轴控制系统实际上是一种伺服系统。它采用众多的伺服电机来分别驱动各部分的运动。这些电机是紧密联系的, 它们的驱动系统由不同层次的网络传输信号控制, 从而能在瞬间实现协作部分的同步运转。这些驱动设备及各种网络, 形成了一条“虚拟轴”, 取代了机械轴带动机器的同步运转。所以

柔性轴控制系统, 也称为电子轴控制系统。

相对于有轴的机械轴系统, 柔性轴控制系统具有精度高、灵活、噪音小、设计制造周期短、能耗低以及可以远程诊断等特点, 但因为采用了较多的模块控制, 所以故障排除较难。

2.2 基本原理

2.2.1 单驱动轴 FSM 控制系统

快速控制反射镜有一个单驱动轴的倾斜运动, 图 1 显示了其结构。柔性轴联接在支点和预载荷源之间, 来保持驱动器一端和镜座之间的平衡。柔性轴是基座的一部分。依靠材料 A, B, C 的热胀系数的不同, 反射镜的零点能够稳定在一个确定的温度范围内。由于温度变化的非线性, 不能实现全补偿。

图 2 所示结构具有良好的温度稳定结构, 2 个压电驱动器以差分的方式驱动, 形成了以零位置为对称的转角运动。反射镜的外壳、镜座和柔性部分在同一块金属上加工而成。

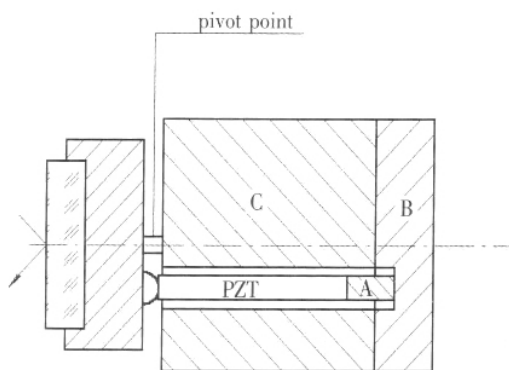


图 1 单驱动轴快速控制反射镜机械结构

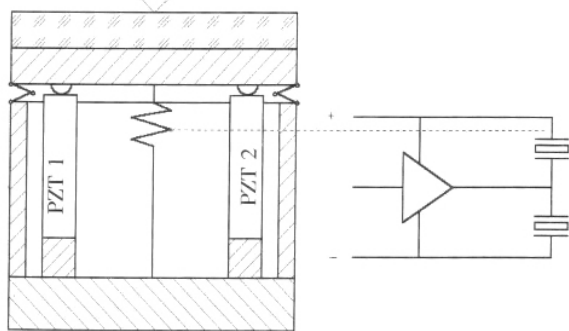


图 2 单驱动轴双驱动器 FSM 结构

2.2.2 双驱动轴快速控制反射镜结构

在单驱动轴反射镜结构基础上, 设计 2 驱动轴倾斜外加 1 轴直线运动的快速控制反射镜, 其结构如图 3 所示, 具有 2 个驱动器和 1 个固定的支点。这种反射镜由于结构不对称, 当接近机械谐振频率时, 旋转轴向着对称轴偏移, 会产生不利的影响, 如高频耦合或是两轴交叉。

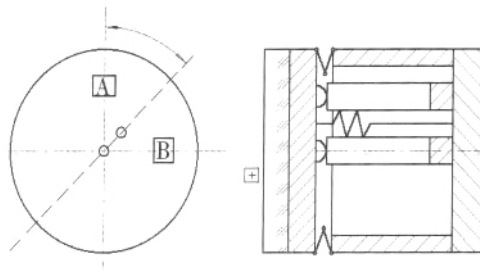


图 3 2 驱动轴快速控制反射镜

图 4 展示的是较稳定的对称结构。3 个驱动器对称分布在 1 个三角形上, 但完成 1 个运动, 必须经过 1 个座标变换, 每个驱动器才可以工作。

图 5 所示的结构不需要座标变换, 仅需 2 个半桥式放大器。由于 4 驱动器在机械上是过自由度的, 因此, 在加工和安装时需要非常高的精度。

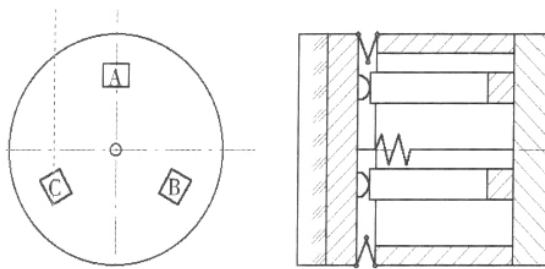


图 4 双驱动轴 3 驱动器反射镜

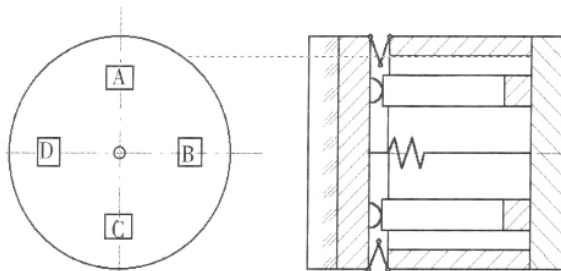


图 5 2 驱动轴 4 驱动器反射镜

3 国内外柔性轴应用研究概况

3.1 国内对柔性轴的研究和应用

3.1.1 二维高速控制镜的研究

图6为成都光电技术研究所研制的二维高速控制镜示意图。利用分辨率达到纳米量级的压电驱动器驱动1块反射镜,由于反射镜的惯量比机架小很多,因而可以大幅度提高谐振频率,与高帧频传感器相结合,就可以构成高精密的光学跟踪系统。压电驱动器在施加正负外电压时,能相应产生正负位移,故不需附加任何机械装置即可推动反射镜向正

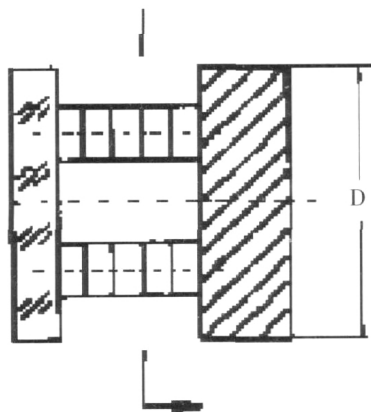


图6 FSM结构示意图

斜镜的口径和行程分别为 $\phi 175\text{ mm}$, ± 1 和 $\phi 140\text{ mm}$, ± 1 。

3.1.2 柔性轴控制FSM的研究

长春光机所研制的柔性轴控制的FSM系统如图7所示。柔性环结构由内、外2个柔性环片加上连接它们的柔性辐射筋组成。内、外2个柔性环片同心,

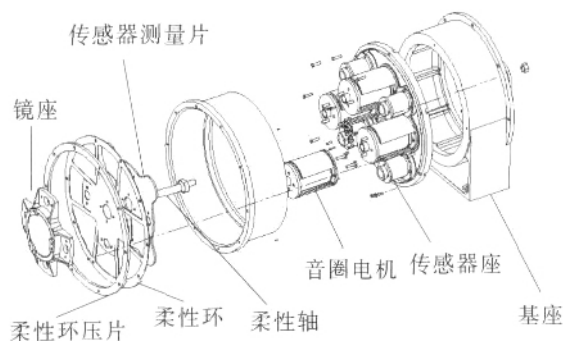
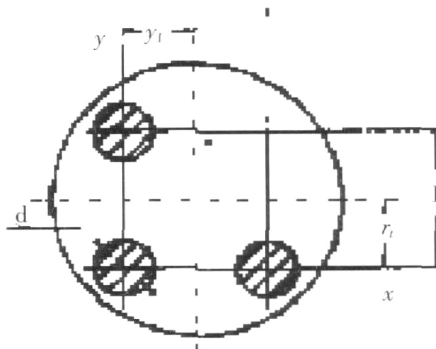


图7 FSM柔性机构分解示意图

反两个方向转动,完全消除了空行程,提高了相应速度和机械谐振频率。驱动器的分辨率为 $0.01\text{ }\mu\text{m}$,所以倾斜镜具有很高的角分辨率。在天文自适应光学系统中,采用了 $\phi 160\text{ mm}$, ± 1 的二维高速控制镜,对自然星体一类慢速目标实现了由大气湍流所造成的光斑抖动的跟踪误差校正,跟踪精度达到0.1。由它和高帧频电视构成的精跟踪系统与望远镜机架整体运动的粗跟踪系统组成复合轴跟踪系统对飞行目标的跟踪,精度达到2,在此基础上再加装倾斜镜和变形镜组成的自适应光学系统,对空中目标实现了0.2~0.3的跟踪精度。系统中使用的两种高速倾



在相互垂直的2个直径位置上,用柔性辐射筋将内、外2个柔性环片用螺钉固连起来,压环、柔性环结构的外环、环形基座,三者的直径相同,柔性环结构的外环落在环形基座的基座环沿上,压环压在柔性环结构的外环上,三者用螺钉固定。反射镜安装在反射镜座上,两者紧密配合,反射镜座安置在柔性环结构的内环上并用螺钉固定,在反射镜座的背面柔性环结构轴心位置与之固连,柔性轴的另一端与环形基座的底面固连,在柔性环结构中成90°分布的4根柔性辐射筋上安置1个带有微小转解运动的直线电机驱动器,使驱动器的支臂与柔性辐射筋固连,支臂与驱动器的转子固连,驱动器的定子与环形基座的底面固连。和驱动器相间分布设有4个测角元件,连接片固定在支臂上,测角元件的顶端与

连接片之间留有空隙，下端与环形基底的下部固连。

4个音圈驱动电机沿着X轴与Y轴互成90°均布在反射镜背面。电机的动圈固定在柔性环上，定子固定在基座上。音圈电机接收来自伺服系统的驱动信号，产生线位移，从而完成镜子的转角运动，由于系统用4个驱动器且对称布置，所以旋转轴X-Y不会产生移动，更不会混合。转角位置检测用4个固定于反射镜背面基座上的涡流位移非接触传感器，分成2路，对X轴与Y轴分别测量。

3.2 国外对柔性轴FSM的研究与应用

3.2.1 ESO 望远镜中 $\phi 100$ 快速FSM系统

该结构的设计思想是使用刚性的底座。大质量的反射镜在高动态运转中将产生很大的反作用力和倾斜动量，通过镜座系统，可以将它们转移到支撑

结构上。但如果这些力引起系统谐振，则须提供一定形式的补偿。图8中展示的镜座由铟钢材料制成，通过一个柔性夹片联接到基座上。图8中下部吊起的部分为质量补偿块，也通过1个柔性夹片联接到基座上。它靠2个压电驱动器A、B产生倾斜运动。每个驱动器分成2个运动部分，2部分同时运动。向上的部分倾斜反射镜，而同时向下的部分倾斜补偿块。因为同时调整镜子装置和补偿块，加在整个结构上的反作用力被消除了。反射镜的重心位置、镜座的重心位置与镜座回转中心位置不重合等将保留一些微小的残余力。对于正交的倾斜运动，2个压电驱动器一定要通过相同的坐标变换，以相同的或差动的方式来驱动。4个传感器互成90°角圆周排列在基座上来测量反射镜的位移运动。

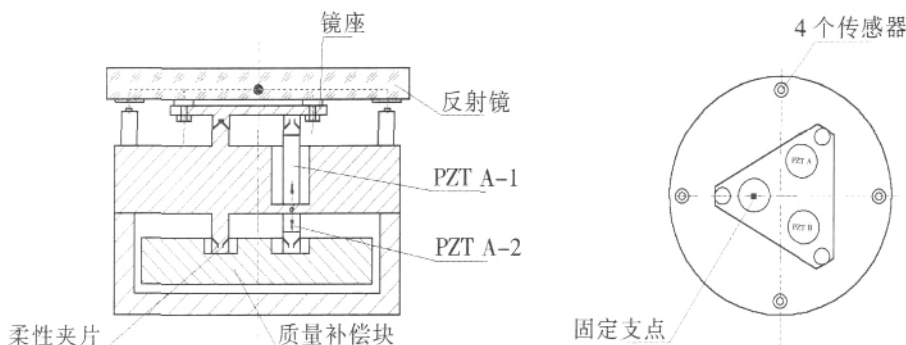


图8 ESO反射镜结构图

3.2.2 夏威夷2m望远镜的FSM系统

由于该系统中反射镜非常大，引起的反作用力和力矩需要进行补偿措施，所以在设计中反射镜及镜座的重心与回转中心在一条线上，驱动器的位置对称，如图9所示。

该FSM系统的特点是反射镜能够转动和复位，从而保持了它的定位和平行性。反射镜的尺寸要求3个驱动器每2个的安放点必须沿着反射镜的径向（半径方向）方向，避免了温度变化时反射镜的变形。通过调整反射镜的质量和反射镜的托架，使组合重心接近反射镜的背面，因此惯性力矩很小。在镜座的同一平面上安装了1个环形的柔性装置，具有非

常好的径向刚度，但因纵向切口而使轴向刚度较差。3个压电驱动器（A、B、C）以相同的方式驱动直线运动，或以差动方式驱动倾斜运动。补偿质量块安装在反射镜下面的底板上，靠三个压电驱动器（E、F、D）驱动，这3个压电驱动器与A、B、C3个驱动器一样互成120°角圆周分布。2组驱动器安装相反且作用力相反，产生平衡的力和动量，由独立的放大电路来驱动。夏威夷2m反射镜的结构如图9所示。

3.2.3 意大利自适应光学系统的FSM

意大利Thermo Trez公司为TNG自适应光学系统设计的FSM，采用了柔性机构，反射镜采用熔融

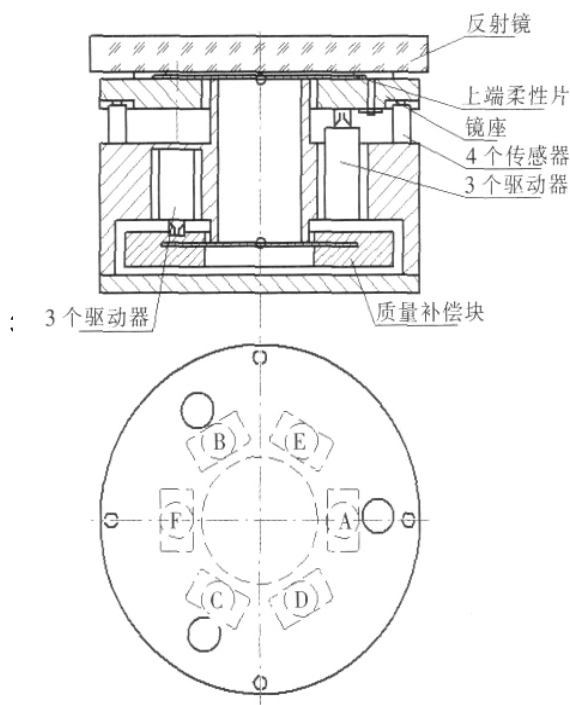


图9 夏威夷2 m反射镜结构图

石英, 直径 100 mm, 倾斜角 1 mrad, 驱动器采用音圈电机, 位置反馈采用电容式非接触位置传感器。

4 FSM 中柔性轴系统设计

柔性轴的最大特点是采用柔性支撑, 即采用柔性环与柔性轴组合结构。柔性轴控制系统设计的难点包括驱动元件的选择和结构的确定等。

4.1 驱动元件的选择

常用的驱动元件一般有直流直线电机 (音圈电机) 和压电陶瓷。直流直线电机的优点是行程大、调速性能好、启动转矩大; 驱动电压较低, 一般只有十几伏; 移动范围较大, 可达几毫米。缺点是响应频率较低, 用它构成的控制系统的频带都在 100 Hz 以下。FSM 对直流伺服电机的要求如下:

- (1) 尽可能高的响应频率, 亦即尽可能减小转子的转动惯量, 增大转矩-惯量比;
- (2) 良好的低速平稳性;
- (3) 尽可能宽的调速范围;
- (4) 机械特性的硬度 $\Delta T/\Delta n$ 的数值尽可能大;

(5) 换向器和电刷间的接触火花尽可能小, 以减小伺服噪声;

(6) 过载能力强。

压电陶瓷可以看成是一个给定刚度的弹性体, 其振动模型简化为一个等效刚度为 K 的弹簧上带有驱动器, 有效质量 m 的单自由度弹簧质量系统, 驱动器有效质量等于驱动器质量的 1/2; 特点是谐振频率较高, 响应频率可达几千赫, 用它驱动的系统频带可达几百赫, 控制电压为几百伏至千余伏, 负载力可达 4~5 kg, 移动范围为 $\pm 40 \sim 50 \mu\text{m}$, 但缺点是行程小且成本较高。对压电陶瓷的使用, 一般在子反射镜背面用 2~3 个压电陶瓷驱动镜面倾斜。压电陶瓷大多是用来驱动变形反射镜, 不仅响应快而且控制极其精确。目前, 国内外对压电陶瓷的应用都很广泛。

4.2 柔性轴机构的确定

柔性轴机构的确定也是重要的一环, 除了反射镜支撑结构, 快速控制反射镜结构还包括基座、镀膜反射镜、弹性元件和驱动器。支撑结构要保持反射镜在控制轴方向运动, 不因驱动力影响反射镜面形, 同时限制别的自由度。镜子直径决定了反射镜结构的大小, 在口径和行程一定的情况下, 提高倾斜镜的机构谐振频率仍有一定余地, 主要从减小运动部分惯性和提高驱动系统刚度 2 方面着手。因此从优化结构考虑, 提高谐振频率可以有以下几个途径:

(1) 减轻运动部件质量, 如采用轻质镜面和合理选择支点位置;

(2) 驱动器性能不仅影响跟踪范围, 而且影响结构的谐振频率, 加大驱动部分结构刚度, 如加大驱动器直径, 选用高灵敏度材料以减少驱动器长度, 角行程和需要扫描的加速度决定了驱动器的大小, 采用多驱动器结构和合理选择驱动器布局;

(3) 体积和重量决定了基座的设计, 基座必须考虑具有足够的刚度, 以便驱动器的反作用力不激发基座振动模式;

(4) 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。

5 结 论

柔性轴在国内还处于发展中, 其研究和应用

是一项系统的工程, 需要大量的理论分析和实验。本文通过对柔性轴 FSM 的机械结构以及应用较成熟的柔性轴 FSM 控制系统的分析介绍, 为相关领域的研究者提供了一定的技术支持。(No.11)

参考文献

- [1]马佳光.捕获跟踪与瞄准系统的基本技术问题 [J].光学工程, 1989, (3): 1- 42.
- [2]陈娟. 复合轴技术 [Z]. 长春光机所内部资料,2006.
- [3]傅承毓,姜凌涛,任戈,等.快速反射镜成像跟踪系统 [J]. 光电工程,1994, 21(3):1- 8.
- [4]江祥贤,杨玉珍,侯媛彬. 电气传动自动控制原理与设计 [M].北京: 北京工业大学出版社.
- [5]王毅,刘丽华,高伟志. 光电精密跟踪的双重复合轴伺服系统 [J].光学 精密工程, 1996,4(4):58- 61.
- [6]傅承毓,马佳光,叶步霞,等.复合轴控制系统应用研究 [J].光电工程,1998,25(4):1- 12.
- [7]王永辉.快速控制反射镜结构及其动态特性的研究[D].长春: 中国科学院研究生院, 2003.
- [8]彭绪金,马佳光.光电精密跟踪中的复合轴控制系统的实验和研究 [J].光电工程,1994, 21(5): 1- 9.
- [9]吴琼燕, 傅承毓, 王强, 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.
- [10]凌宁,陈东红,于继龙,等.大口径大角位移的两维高速倾斜反射镜 [J]. 量子电子学报, 1998, 15(2): 206.
- [11]李文军.复合轴光电跟踪系统控制策略的研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院, 2004.
- [13]杨驿军,凌宁.高速倾斜反射镜机械谐振频率的改善 [J].光电工程,1999, 26(2): 57.
- [14]叶露.主动调节刚性支撑薄膜型反射面面型调整机构的研究 [J].光学 精密工程, 2002, 10(2): 201- 204.