

# 精密光路偏转及焦距调整机构的发展

朱华征, 范大鹏, 张智永, 范世珣  
(国防科技大学机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:**介绍了压电陶瓷和音圈电机在精密光路偏转和焦距调整机构的原理和发展状况;分析了偏转与调焦机构的主要结构形式、驱动特点及其在精密偏转与调焦机构中的应用前景;指出了需要进一步开展研究的关键技术。

**关键词:**快速反射镜;偏转机构;压电陶瓷;调焦机构;直线电机

**中图分类号:** O435      **文献标识码:** A

## Development of precise light beam steering and focusing equipments

ZHU Hua-zheng, FAN Da-peng, ZHANG Zhi-yong, FAN Shi-xun  
(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Requirements for the principals and development of precise light beam steering and focus equipments which use piezoelectric or voice coil actuators. The optical system structure of solar simulator as well as its designing method, process and key technology are illustrated in detail. The similar analysis is carried out in the designs of high orbit and low orbit earth simulators.

**Key words:** fast steering mirror; steering equipments; piezoelectric actuators; focusing equipments; linear motor

### 1 引言

在精密光学设备的研制过程中,需要高精度的光束指向控制机构和高频光路调整机构,同时,为了补偿地面振动和其他干扰因素对光路产生的影响,也需要对快速反射镜进行微调<sup>[1-12]</sup>。基于压电陶瓷和音圈电机的微位移执行机构近年来得到了深入的研究,并在超精加工等纳米定位领域等到了广泛的应用<sup>[13-15]</sup>;基于压电陶瓷和音圈电机的快速精密旋转机构的研究和应用也逐渐成为国内外关注的热点之一,国外已经有性能优良但价格昂贵的产品出现。

传统的精密调焦机构采用滚珠丝杠、蜗轮蜗杆或是凸轮等机械传动方式,传动精度、最大运行速度和最大运行加速度都受到了一定的限制,系统的可靠性和可维修性均存在不足<sup>[16-21]</sup>。直线电机直接驱动机构不需要用机械辅助方法将旋转运动转化为直线运动,因此简化了系统的结构,从而避免了由于中间环节的弹性变形、间隙、磨损和发热等因素带来的运动误差。其最明显的优点是响应快,可达到

瞬时的高加速度和减速度<sup>[22-26]</sup>。但是直线电机的成本较高、发热较严重、组成的控制系统比较复杂,且存在隔磁和防磁问题,所以其应用受到了一定的限制。

### 2 精密光路调整和稳定机构的发展现状

根据致动器类型,用于精密光路调整和稳定的微定位机构可分为六大类:压电陶瓷致动器、音圈电机、磁致伸缩致动器、形状记忆合金致动器、电致伸缩致动器、静电致动器。国内外研究现状表明,目前用于角度快速调整的精密偏转微定位机构,以压电陶瓷致动和音圈电机致动为主。以下分别介绍以压电陶瓷和音圈电机为致动器的用于角度快速调整的精密偏转机构的研究情况。

#### 2.1 基于压电陶瓷致动的快速精密偏转机构

当对压电晶体施加一电场时,晶体会产生形变,

**作者简介:**朱华征(1978-),男,博士生,主要从事精密光电跟踪平台的测控技术研究。E-mail:zhz5945@sina.com.cn

**收稿日期:**2009-04-16; **修订日期:**2009-06-05

这种现象称为逆压电效应。压电陶瓷致动器就是利用了逆压电效应的原理,当可调整的高压信号作用到压电陶瓷上,可以产生相应的微位移运动,避免了机械结构造成的误差。与音圈电机比较,压电陶瓷致动器有结构简单、体积小、分辨率高、高频响、高载荷、无磁场等优点,但存在行程小、有迟滞、蠕变特性等缺点。

随着需求的发展和技术的进步,研究者提出了基于压电陶瓷直线位移驱动机构实现微角位移的概念,并进行了广泛的研究,在图像和视线稳定、光束控制、对准和切换、光束稳定和振动隔离、大存储量设备(CD、DVD)测试和制造等一系列场合得到了成功的应用。其中,在深空星间激光通信、星载或机载光电侦察等领域的应用尤为突出。

从偏转轴的数目来说,快速压电偏转机构有单轴和多轴之分,其差别在于使用1个、2个或多个压电陶瓷线位移驱动器。从本质上说,利用压电陶瓷线位移驱动器实现角度偏转的原理比较简单,其核心问题在于机械结构的设计、最终实现角度偏转的精度、可控性以及带宽,如德国 Physik Instruments 公司的一款高速压电两轴偏转平台 S-340,具有 2 mrad 的偏转范围、亚  $\mu\text{rad}$  的偏转精度以及 900 Hz 的共振频率。下面以三个压电陶瓷线位移驱动器实现两轴偏转和轴向位移为例,说明该类快速偏转机构的原理,图 1 是三个压电驱动器安装位置的示意图。

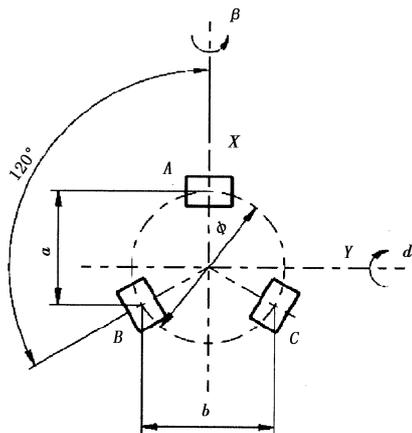


图 1 压电三角驱动器原理图

其中,三个压电陶瓷驱动器呈等腰三角形分布( $a$  表示该等腰三角形的高, $b$  表示其底边长度), $A, B, C$  分别表示三个压电陶瓷驱动器的线位移, $\alpha, \beta$  分别表示两个垂直轴方向的偏转角度, $z$  表示轴向的位移,则:

$$\alpha = \frac{2A - (B + C)}{2a}, \beta = \frac{B - C}{b}, z = \frac{A + B + C}{3}$$

在实际使用中,精确控制每个压电驱动器的电压,就可以得到不同的偏转角度。

德国 PI 公司是微驱动领域的先驱,研制了多规格、应用于不同领域的压电陶瓷致动器及精密定位系统。图 2 为 PI 公司研制的应用于光学领域的系列偏转工作台。



图 2 德国 Physik Instrument 公司的偏转工作台

美国洛克希德-马丁空间系统公司先进技术中心研制了一款高带宽、框架式的快速反射镜(Fast Steering Mirror/FSM)设备,用以支承直径 50 mm 的反射镜,并提供高达 2.7 kHz 的偏转和直线运动带宽,其稳态直线运动精度为 0.1 nm,稳态偏转运动精度为  $4 \times 10^{-9}$  rad。图 3 所示为整个 FSM 装置的原理图和使用弹簧预紧接口部分的透视图<sup>[8]</sup>。

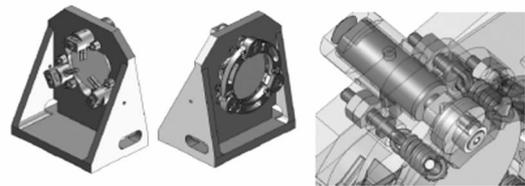


图 3 FSM 装置的原理图 and 接口部分的透视图

Francisc 等人把该 FSM 的研制分成了 3 个部分:活动部件、静止部件和接口部分,通过有限元分析工具得出了表面变形情况和应力分析结果,并介绍了装配情况。

英国 Queensgate 设备公司也研制出压电陶瓷驱动的快速偏转工作台和控制器等系列产品,如图 4 所示。工作台偏转范围大于 2 mrad,分辨率为亚微弧度,固有频率高于 1 kHz,应用在激光束精密调整和光学图像跳动修正等领域。



图 4 英国 Queensgate 公司的压电偏转工作台

德国的 MRC Systems 股份有限公司研制了压电陶瓷驱动的光线准直系统,如图 5 所示。此系统用来补偿因为光学部件的振动、冲击及其他波动而导致的激光发射光束偏差,快速偏转镜由压电陶瓷致动,最大偏转角度为 2 mrad,固有频率为 300 Hz。闭环控制器持续监测激光光束的出射偏差并驱动快速

偏转镜将激光光束调整并稳定到期望位置。



图5 德国 MRC Systems 公司的压电偏转工作台

哈尔滨工业大学研制的用于激光星间通信终端的定位系统由粗精两级定位系统组成,粗瞄准系统承担大负载、大范围、低精度、低频率的转动;精瞄微定位系统承担小负载、小范围、高精度、高频率的转动,使用压电陶瓷作为致动器。精瞄微定位系统包括精瞄控制器、压电陶瓷驱动模块、精瞄偏转镜和电阻应变式检测模块,其工作原理是:精瞄控制器接收到控制器发出的精瞄偏转镜绝对位置目标指令,同时将其转换为压电陶瓷的位移指令,控制压电陶瓷驱动模块分别驱动四支压电陶瓷运动。压电陶瓷环形分布,两两在同一条轴线,两条轴线相互垂直,同一轴线的两根压电陶瓷分别采用推/拉的工作方式使镜体绕另一轴偏转。通过每支压电陶瓷内置的电压-应变式传感器实时采集压电陶瓷的位移信息,经过检测转换电路处理后发送到精瞄控制器形成闭环精确控制<sup>[28]</sup>。

## 2.2 基于音圈电机致动的快速精密偏转机构

音圈电机音圈电机(voice coil actuator, VCA)是基于洛仑兹力原理制造的一种直接驱动电机,它具有运动行程大、无滞后、速度快、体积小、驱动电压低、无传动间隙等优点。

针对远红外和亚毫米空间观测器 HERSCHEL 中制冷焦平面光路调整的需要,Oliver Krause 等人使用两个挠性转轴和一个直线电机,实现了一个 32 mm × 26 mm 的反射镜调整装置,在 0° ~ 4.1° 的范围内实现了 ±1 arcmin 的精度,系统结构如图 6 所示<sup>[10]</sup>。

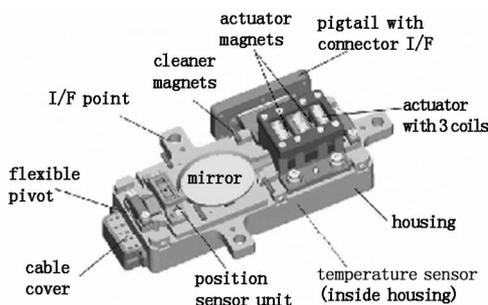


图6 PACS 光路调整装置的结构图

BAE SYSTEM 公司开发了不同尺寸和配置的快速偏转镜,如图 7 所示的偏转镜由两对音圈电机驱动,两对差动位置传感器检测角度,并由两路数字控制器进行闭环伺服控制,偏转镜分辨率小于 1 μrad,固有频率达到 700 Hz,加速度达到 6000 rad/s<sup>2</sup>。



图7 音圈电机驱动快速反射镜

美国 Ball Aerospace & Technology 公司研制了由音圈电机驱动的两轴快速偏转镜系列产品,偏转镜可以实现跟踪、扫描、瞄准、光束稳定和准直等功能,广泛应用于工业测量仪表、天文学、激光通信、成像系统等领域。偏转范围为 ±1 mrad。图 8 为其研制的两自由度精密定位偏转镜。

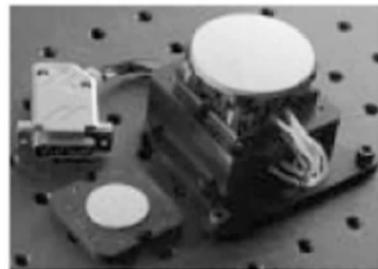


图8 两自由度快速反射镜

瑞士联邦工业大学设计了由音圈电机驱动的快速偏转激光扫描机构,机构包括镜面、音圈电机、支撑系统、位置测量系统。图 9 为内置位置传感器的扫描机构<sup>[29]</sup>。

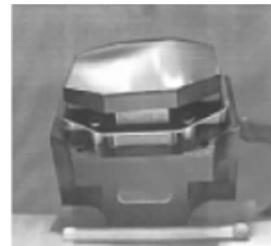


图9 音圈电机致动扫描机构及其爆破图

日本 NEC 公司开发的音圈电机驱动的大行程精瞄装置(Wide-range fine pointing mechanism, WFPM)。WFPM 的偏转范围高达 ±4°,瞄准精度为 1 μrad,响应频率为 1.2 kHz。图 10 为精瞄装置的实物图<sup>[11]</sup>。

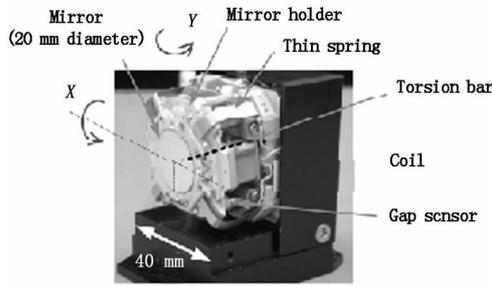


图 10 大行程精瞄装置

中科院长春光学精密机械与物理研究所研制了快速控制反射镜,反射镜与大惯量机架结构的主系统共同构成复合轴跟踪系统,用于精密跟踪瞄准和稳定光束。反射镜由测量片、反射镜、反射镜座、柔性环结构、压环、支臂、连接片、音圈电机、柔性轴、基座等组成,结构示意图如图 11 所示。反射镜的最大转角范围为  $\pm 4$  mrad 谐振频率为 143.75 Hz<sup>[30]</sup>。

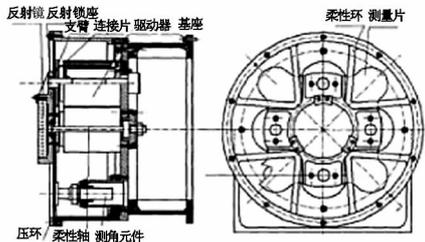


图 11 复合轴跟踪快速反射镜

### 3 快速精密调焦机构的发展现状

在调焦机构中,可以采用的调焦方式有很多。比如:螺纹传动;蜗轮、蜗杆传动;丝杠、螺母传动以及凸轮传动。其中螺纹传动的调焦方式结构简单,但对机械装配要求高,需要对调焦轮和调焦镜筒进行对研,以达到最佳的传动效果;蜗轮、蜗杆传动调焦方式更适用于微调机构,其优点是可以产生大的传动比,而且具有自锁功能,缺点是体积较大;丝杠、螺母传动的调焦方式的优点是结构简单,体积小、质量轻,缺点是结构装配繁琐,装配精度要求高;凸轮传动的调焦方式的优点是结构和装配工艺简单,工作可靠,缺点凸轮曲线加工要求高。以上各种传动的调焦方式都曾经应用在不同的工程项目中。

#### 3.1 典型的精密调焦机构分析

##### 3.1.1 某柔性铰链调焦机构分析

胡淞<sup>[16]</sup>等介绍一种用于分步重复光刻机上的亚微米曝光系统的柔性铰链调焦机构,如图 12 所示,该机构采用无内摩擦、无间隙、高分辨力的柔性铰链平行四边形平动机构作导向。为了获得高分

辨力的 Z 向位移,选用了高转速的恒速电机,通过大传动比的行星齿轮减速器减速,其角位移经过小螺距的精密丝杠螺母机构转化为水平的线位移,再经过杠杆机构缩小,最后经过小角度倾斜的柔性铰链平行四边形平动机构将水平位移进一步缩小并转化为 Z 向位移。实验证明这种机构得到了 20 nm 的分辨力、200  $\mu$ m 的行程和小于 1 arcsec 的导向精度。

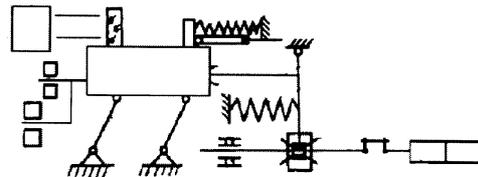


图 12 某重复光刻机调焦机构示意图

##### 3.1.2 某空间望远镜成像器调焦机构分析

黄江<sup>[19]</sup>、岳建如<sup>[20]</sup>等人根据空间太阳望远镜成像调焦的要求,设计了一种成像调焦机构,该机构使用步进电机驱动滚珠丝杠,丝杠通过连接杆和转向关节带动内筒,内筒的移动轨道为直线轴承。为解决由于导轨和滚珠丝杠存在直线误差造成的装配超静定的问题,文献在丝杠和内筒间设计了水平连接杆件、垂直连接杆件和转换关节连接机构,通过转换关节小范围内的转动来调节丝杠和内筒间存在的平行度误差。图 13 和图 14 所示分别为该调焦机构及其改进机构的原理和模型。

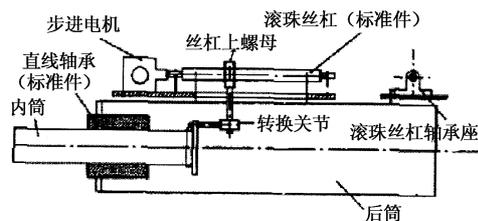


图 13 成像镜调焦机构原理示意图

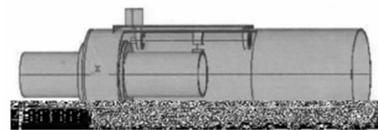


图 14 修正后调焦机构整体示意图

##### 3.1.3 某长焦距红外系统调焦机构分析

黄和平<sup>[21]</sup>等人针对某大口径、长焦距红外系统调焦机构的设计需要,设计了采用双凸轮曲线传动方式的调焦机构,为了增加设备的可靠性,结构上增加了电机和电机驱动控制电路保护机构。调焦机构如图 15 所示。

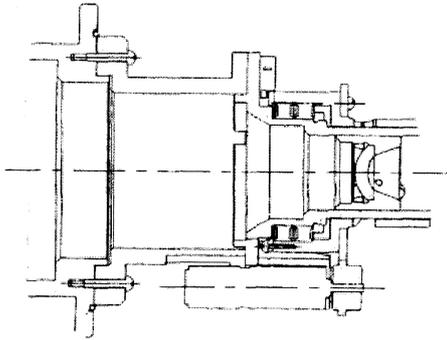


图15 某长焦距红外系统调焦机构简图

### 3.1.4 某激光直写设备粗精两极调焦机构分析

熊木地<sup>[16]</sup>等人针对某二元光学激光直写设备的需要,分析了由电机与压电陶瓷构成的大范围二级调焦伺服系统的工作原理,即第一级为粗调调速,主要解决速度问题及大范围定位;第二级为微调装置,主要解决定位精度问题,采用压电陶瓷与微步驱动的步进电机构成的二级机构作为调焦伺服系统的执行器件。

### 3.2 基于直线电机直接驱动的调焦机构

直线电机是一种能将电能直接转化为直线运动机械能而不需要任何中间转换机构的传动装置,与传统传动方式相比,具有结构简单、无接触、刚度高、噪声低、速度和加速度快、精度高等许多优势。随着调焦机构的发展,对调焦伺服系统的速度、加速度和精度均提出了新的要求,直线电机直接驱动系统是调焦机构的理想传动方式之一,在解决好直线电机本身存在的问题的基础上,设计基于直线电机直接驱动的新型调焦机构,不失为一个可行的方案。

## 4 关键技术

综上所述,在精密光路调整和调焦机构中,压电陶瓷致动器和音圈电机等直线电机驱动器获得了较为广泛的应用,但在国内开展这方面研究的单位还不是很多,程度还不够深入。通过调研和总结,可以认为在该类机构中存在以下关键技术:

(1)精密光路调整和调焦机构结构设计及分析技术:由于该类机构的特殊性,在进行设计时,需要更加优化其结构,进一步降低质量、拓宽最大行程,提高固有频率,同时必须保证其分辨力。对该类机构的动力学特性的研究也必须借助新的理论和新的工具来进行。

(2)精密微定位机构驱动技术:随着压电陶瓷致动器和直线电机在微定位系统中的日益广泛应用,该类装置的驱动技术也得到越来越多的重视。世界各国都竞相开展对压电陶瓷驱动技术的研究。要达到纳米级的定位精度,压电陶瓷驱动系统要满

足高分辨率和高精度的基本要求。同时,随着人们对于精密定位的快速性能的要求越来越高,对压电陶瓷驱动系统的动态特性也提出了更高的要求。

(3)精密微定位机构检测技术:微定位检测技术是精密偏转装置中的关键技术之一。通常,微定位的检测手段主要有以下几种:电阻应变式位移传感器;电容式位移传感器;电感式位移传感器;光栅、容栅式传感器;激光干涉测量法等。对于需要进行光路稳定的系统来说,所使用的陀螺的信号处理技术也非常关键,必须解决陀螺的零位噪声和漂移问题,才能获得准确的反馈信号。

(4)精密光路调整和调焦机构控制技术:压电陶瓷由于其复杂的工作机理,存在着迟滞、位移非线性和蠕变三个固有的压电误差,给压电陶瓷的控制带来困难。PID闭环控制方法虽然能够满足准确性的要求,但无法解决稳定性与准确性的矛盾。采用智能控制与PID控制相结合的控制方法可以有效解决稳定性与准确性的矛盾,又能增强系统对不确定因素的适应性。直线电机组成的控制系统比较复杂,传统的控制方法所能达到的性能有限,必须对鲁棒控制等先进的控制方法进行充分的研究,方能达到很好的控制效果。值得说明的是半实物仿真技术的发展为控制系统调试提供了有效的手段,将会得到越来越多的应用。

## 5 结束语

文章针对精密光路调整和调焦机构的研制需要,介绍了国内外精密偏转机构的原理和产品研究情况,重点介绍了压电陶瓷致动器和音圈电机致动器在精密偏转机构中的应用;概述了典型光学调焦机构的类型和主要优缺点。分析了该类机构设计中的关键技术,指出了下一步的研究重点。

## 参考文献:

- [1] Allan Gibson. Laser pointing technology [J]. SPIE, 2000, 4034: 165 - 174.
- [2] 刘泽金,舒柏宏,王永仲,等. 高能激光束自动对准和稳定系统的结构设计[J]. 光学技术, 1999, (1): 19 - 20.
- [3] Aokik, Kuroda H. Wide and fine pointing mechanism with flexible supports for optical inter-satellite communication [J]. SPIE, 1999, 3615: 222 - 229.
- [4] 邵兵,孙立宁,曲东升,等. 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计[J]. 光学·精密工程, 2006, 14 (1): 43 - 47.
- [5] 曾华林,左日方,谢福增. 空间光通信 ATP 系统的研究[J]. 光学技术, 2005, 31 (1): 93 - 95.

- [6] Douglas A Harvison, Bruce Hardy. Precision pointing mechanism for laser communication mission [J]. SPIE, 2807:142 - 147.
- [7] Keizo I, Yoshio K. Ultra high speed optical beam steering by optical phased array antenna [J]. SPIE, 1996, 2699: 210 - 217.
- [8] Francisc M Tapos, Derek J Edinger, Timothy R Hilby, et al. High bandwidth fast steering mirror [J]. SPIE, 2005, 5877:1 - 14.
- [9] Jan R Nijenhuis, Peter Giesen, Francoise Delplancke. Two axes fully elastic pointing mechanism at microarcsec resolution [J]. SPIE, 2004, 5528:1 - 35.
- [10] Kazuhiko Aoki, Yoshiho Yanagita, Hidehiko Kuroda, et al. Wide-range fine pointing mechanism for free-space laser communications [J]. SPIE, 5160:495 - 506.
- [11] Oliver Krause, Dietrich Lemke, Ralph Hofferbert, et al. The cold focal plane chopper of Herschel's Pacs instrument [J]. SPIE, 2006, 6273:1 - 12.
- [12] Tetsu Yamamoto, Takaharu Ueda, Daisuke Ogata, et al. Secondary mirror chopping system for large infrared telescope [J]. SPIE, 1991, 1619:34 - 43.
- [13] 孙立宁, 孙绍云, 曲东升. 基于 PZT 的微驱动定位系统及控制方法的研究 [J]. 光学·精密工程, 2004, 12 (1):55 - 59.
- [14] 孙立宁, 荣伟彬, 曲东升, 等. 基于微操作的大行程高分辨率旋转微驱动器的研究 [J]. 光学·精密工程, 2001, 9(3):513 - 518.
- [15] 刘建芳, 杨树臣, 杨志刚, 等. 新型压电精密步进旋转驱动器研究 [J]. 光学·精密工程, 2006, 14 (4): 595 - 601.
- [16] 胡淞, 姚汉民. 高分辨力高导向精度柔性铰链调焦机构 [J]. 光电工程, 1998, 25(3):23 - 26.
- [17] 熊木地, 肖文礼, 邢忠宝. 激光直写设备调焦伺服控制系统的研究 [J]. 光学·精密工程, 2000, 8(1):79 - 82.
- [18] 刘伟, 张景和. 用于激光直写设备的纳米分辨力调焦伺服机构 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(3): 310 - 312.
- [19] 黄江, 吴开成, 关富玲. 空间太阳望远镜成像镜调焦机构设计与分析 [J]. 工程设计学报, 2003, 10(5): 341 - 344.
- [20] 岳建如, 关富玲, 杨玉龙. 空间望远镜成像透镜调焦机构改进设计与分析 [J]. 空间科学学报, 2003, 23(2): 155 - 160.
- [21] 黄和平, 夏寅辉, 安成斌, 等. 大口径、长焦距红外系统调焦机构设计 [J]. 激光与红外, 2005, 35(10): 745 - 747.
- [22] Ki-Hyun Kim, Young-Man Choi, Dae-Gab Gweon, et al. Design of decoupled dual servo stage with voice coil motor and linear motor for XY long stroke ultra-precision scanning system [J]. SPIE, 2005, 6040:1 - 6.
- [23] Oohira, F Iwase, M Matsui, et al. A self-hold and precisely controllable optical cross-connect switches using ultrasonic micro motors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2004, 551 - 557.
- [24] 李圣怡, 戴一帆. 超精加工机床及其最新技术发展 [J]. 国防科技大学学报, 2000, 22(2):95 - 98.
- [25] 李圣怡, 黄长征, 王贵林. 微位移机构研究 [J]. 航空精密制造技术, 2000, 36(4):5 - 9.
- [26] 范大鹏, 尹自强, 郑子文. 直线电机在精密加工中的应用 [J]. 制造技术与机床, 1997, 5:33 - 35.
- [27] 张翊诚, 杨正新, 李小弟, 等. 直线电机在机床上的应用与展望 [J]. 微特电机, 2001, 29(3):29 - 31.
- [28] 邵兵. 激光星间通信终端微定位系统关键技术的研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
- [29] M Hafez, T C Sidler. Design, simulations and experimental investigations of a compact single mirror tip/tilt laser scanner [J]. Mechatronics, 2000, 10:741 - 760.
- [30] 王永辉. 快速控制反射镜结构及其动态特性的研究 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.