

光学设计

快速反射镜测试系统研究

王 凯 ,高学鹏

(中国电子科技集团公司光电研究院 ,天津 300308)

摘 要 :构建了快速反射镜静态性能测试系统 ,对系统组成和测试方法进行了描述。对系统的重要组成部分扰动快反镜进行了较详细的设计 ,并对其非线性误差修正方法加以说明。定量分析了系统误差的来源 ,通过系统设计可消除系统误差的影响。

关键词 :快速反射镜 ;非线性误差 ;系统误差

中图分类号 :O432.2

文献标识码 :A

文章编号 :1673-1255(2017)-03-0001-05

Research on Testing System of Fast Steering Mirror

WANG Kai, GAO Xue-peng

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: A static and dynamic performance testing system of fast steering mirror (FSM) is constructed. The composition of the system and testing methods are introduced. And the parts of the system are described. The sources of system errors are analyzed quantitatively. The influence of system errors can be eliminated through system design. The disturber FSM as an important part of the system is designed in detail. The layout methods of sensors and motors of the system are discussed to optimize structure design in order to make a more compact structure. The nonlinear error correction method is given to improve the control accuracy. The results show that the system can make the static and dynamic performances tests of the FSM within 70 Hz bandwidth.

Key words: fast steering mirror (FSM); nonlinear error; system error

快速反射镜以其系统集成度高、转动惯量小、动态性能高等优点,广泛应用于天文望远镜、激光通讯、图像稳定、自适应光学和复合轴精密跟瞄等领域;然而,其转动范围小、控制带宽高等特点,给系统调试和性能测试带来很大挑战,快速反射镜测试系统可为其提供针对性的调试和测试环境,为其调试和性能测试提供便利。

1 快速反射镜测试系统组成

快速反射镜测试系统由激光束准直发射单元、高精度扰动快反镜、高速光斑采集单元、数据处理

显示设备、三维可调光学组件和光学平台等组成,如图1所示。

1.1 激光束准直发射单元

激光束准直发射单元主要功能为提供参考成像激光,经反射镜反射后,成像在接收光学系统中,激光束准直发射单元的一个重要部分是光源,光源的发光强度、光强稳定性及光源的发热量等特性对于仪器的测量距离和测量精度都有很大影响,因此选择合适的光源是很重要的。光源的热量对仪器漂移的影响极大。普通的白炽灯,发热量太大,根本无法使用(折算成四小时漂移四十几秒)。激光二极管单

色性太好,易产生干涉,也不好。氦氖激光器是研制成功的第一种激光器,也是最常用的一种,功率一般约为数毫瓦,连续发光。由于单色性好,相干长度可达数十米以致数百米,束散角 1 mrad 。激光器发射激光后要加装4倍扩束系统,以减小激光束散角到 0.25 mrad ,减小激光到靶光斑大小。

氦氖激光器相对于半导体激光器的主要优点在于:

- (1)优质的光束质量;
- (2)良好的功率稳定性;
- (3)激光参数(波长、光斑直径、发散角、光斑能量分布)一致性好。

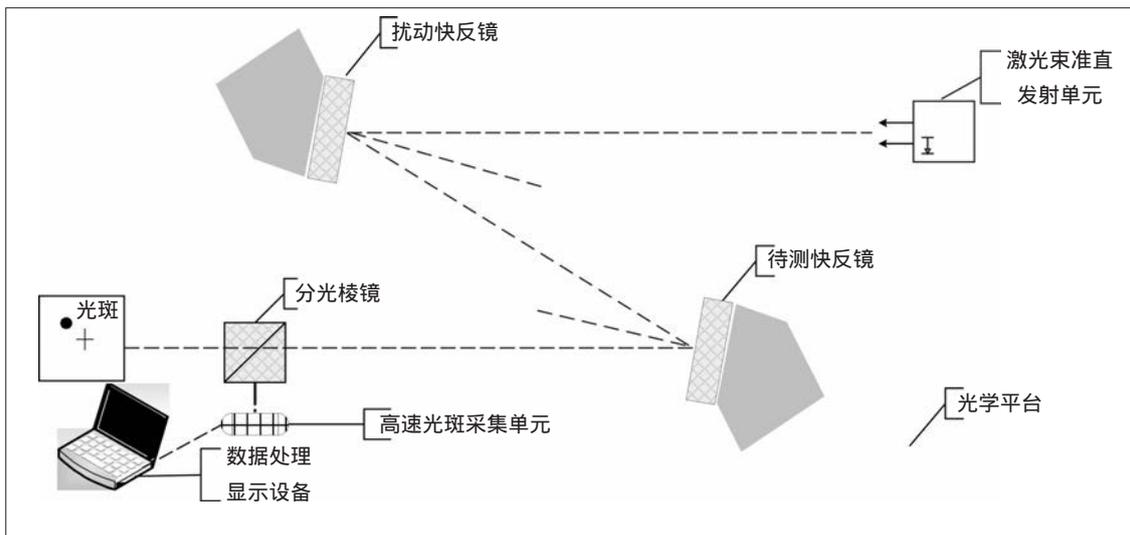


图1 快速反射镜组成框图

1.2 高速光斑采集单元

高速光斑采集单元由PSD位置探测器和信号处理板组成。其主要功能为获取激光采样光斑位置信息,计算和处理后把脱靶量信息以高速率传输给校正快速反射镜进行光闭环控制。

PSD可对入射到其光敏面的光功率中心位置进行探测,具有响应时间短、位置分辨率高、光谱响应范围大等优点。PSD作为高精度位移测量时,应当注意选择稳定性好的光源,光源强度太弱,扰动太大不能准确定位,太强又会使器件饱和而不能正常工作。减少光强对测量精度的影响,一是控制光源输出功率的稳定性,再者就是进行光路设计,使到达测量靶面的光强满足要求。

PSD位置探测器可对靶面光斑响应带宽可达几百千赫兹,而且其探测精度可达亚微米,当光束由分光棱镜分束后入射到PSD探测器探测面上形成光斑,其对探测光束角度的变化分辨率可达亚角秒。高速光斑采集单元中PSD探测器探测面有光功率限制,其最大可接收光功率密度为 1.5 W/cm^2 。

信号处理板由高精模数转换模块、RS-422接口

电路和DSP28335处理器等组成,可实现对PSD位置信号的采集和处理,并把计算得到的脱靶量数据信息通过422串口传输给被测快反镜和数据处理显示设备。

1.3 数据处理显示设备

数据处理显示设备为一台安装模拟视频采集卡和标准串口的便携式工控机,模拟光斑实时运动轨迹并在显示器上予以可视化显示。

1.4 高精度扰动快反镜

高精度扰动快反镜由快反镜台体和伺服控制单元组成。快反镜台体由驱动单元、位移传感器、反射镜组成,伺服控制单元由伺服控制模块、驱动控制模块、电源模块组成。

快速反射镜驱动单元以压电陶瓷驱动器(PZT)和音圈电机驱动器(VCA)为主;压电陶瓷驱动器利用逆压电效应的原理,当可调整的高压信号作用到压电陶瓷上,可产生响应的微位移运动。PZT有高频响、高载荷、无磁场等优点,但存在行程小、有迟

滞和蠕变特性的等缺点。音圈电机是基于洛伦兹力原理制造的一种直接驱动电机,主要由磁钢、线圈、运动体及簧片等组成。当改变线圈电流的强弱与极性时,线圈体在磁钢的作用下作直线往复运动。它具有运动行程大、无滞后、速度快、无传动间隙等优点,但因为其惯量大、谐振频率较低、高频处的相位裕度有限,因此给高速控制带宽系统的设计带来困难。测试系统要具有对大角度快速反射镜系统测试能力,因此,选用音圈电机作为扰动快反镜的驱动器。

目前可供选择的位移传感器有直线光栅、电阻式位移传感器、电涡流传感器等;直线光栅是以精密光栅为测量基准,集光、机、电于一体的数字化测距装置。它具有测量精度高、分辨能力大、抗干扰能力强等优点,但由于采用滑动接触杆接触式测量方式,其容易引进接触测量误差,长时间使用会产生接触点磨损,影响绝对精度;电阻式位移传感器具有线性好、精度高、稳定性好、体积小、工艺成熟、成本低及检测电路简单等优点,而且比较适合集成在微动机构上,便于实现结构紧凑的定位系统,从而实现机构、驱动、检测一体化设计,其主要缺点是灵敏系数小,受粘贴过程中的手工作业质量影响,容易出现长期漂移和质量不稳定;电涡流传感器实现了非接触测量,具有精度高、分辨率高、频响高等优点,不仅适合静态测量,更适合于动态测量。

电涡流传感器安装位置有以下几种:

(1)安装在转动轴线上,如图2所示。S代表电涡流传感器;A代表音圈电机。

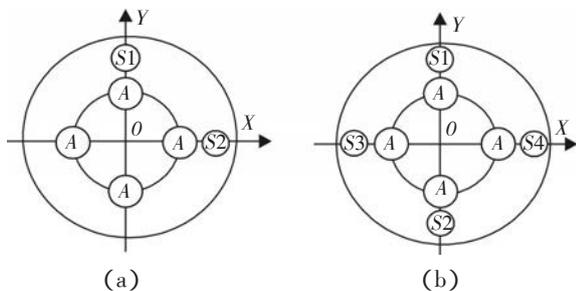


图2 电涡流传感器安装在转动轴线上示意图

图2a中电涡流传感器安装在旋转轴线上,音圈电机外侧,①测量值为 S_1 ,②测量值为 S_2 ,快反镜绕 X 轴旋转角度 X ,快反镜绕 Y 轴旋转角度 Y 。

电涡流传感器和快反镜旋转角度之间有如下

关系

$$\begin{aligned} X &= k_1 S_1 \\ Y &= k_2 S_2 \end{aligned} \quad (1)$$

其中, k_1, k_2 为已知固定值。

图2b中在快反镜一个旋转轴上对称安装两个电涡流传感器,①测量值为 S_1 ,②测量值为 S_2 ,③测量值为 S_3 ,④测量值为 S_4 ,快反镜绕 X 轴旋转角度 X ,快反镜绕 Y 轴旋转角度 Y 。

电涡流传感器和快反镜旋转角度之间有如下关系

$$\begin{aligned} X &= k_1(S_1 - S_2)/2 \\ Y &= k_2(S_3 - S_4)/2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, k_1, k_2 为已知固定值。

(2)安装在与旋转轴 45° 交叉线上

如图3所示,有4个可供选择的安装位置,快反镜镜面中心有支柱固定即在空间中坐标中心 O 点是确定的,根据不在一条直线上的三点确定一个平面,只需要除①④和②③之外的任意两个电涡流传感器即可完成快反镜两轴转动角度测量。

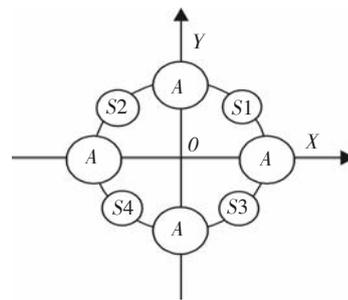


图3 电涡流传感器安装在交叉线上示意图

例如,在①②两个位置安装电涡流传感器,①测量值为 S_1 ,②测量值为 S_2 ,快反镜绕 X 轴旋转角度 X ,快反镜绕 Y 轴旋转角度 Y 。

电涡流传感器和快反镜旋转角度之间有如下关系

$$\begin{aligned} X &= k_1(S_1 + S_2)/2 \\ Y &= k_2(S_1 - S_2)/2 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, k_1, k_2 为已知固定值。

由上述分析可知,图3安装方式电涡流传感器直接对快反镜旋转角度进行测量,但这种音圈电机和电涡流传感器串联排列方式不能充分利用空间,必然会增加快反镜整体尺寸;图3安装方式使快反镜整体更加紧凑,在同等空间要求下,留给音圈电机空间更大,电机驱动力更强,有助于快反镜动态

性能提升,而且用两个传感器进行测量加以简单解算就可得到快反镜旋转角度。

扰动快反镜台体结构图如图4所示。其采用四路音圈电机驱动方式,两个音圈电机组成一组,通过正负推拉运动完成轴向的角度偏转。

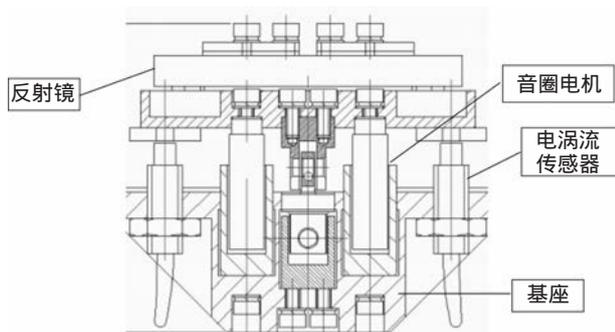


图4 扰动快反镜台体结构图

扰动快反镜开环特性如图5所示。一阶谐振在5 Hz左右,100 Hz后有多个谐振,到13 Hz其相角裕度已经明显不够。

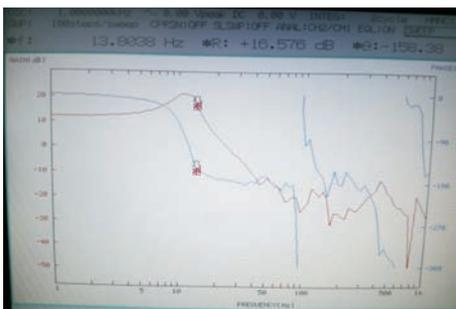


图5 扰动快反镜开环特性图

用自抗扰算法对快反镜进行闭环校正,其闭环特性如图6所示。72 Hz开始有谐振,但其相角裕度还很大,通过提高增益,可进一步改善性能。

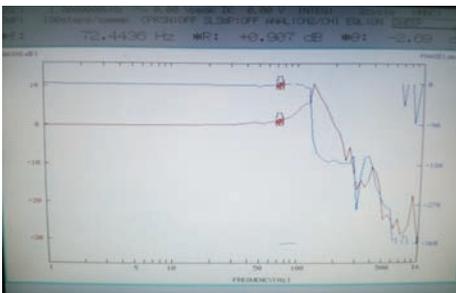


图6 扰动快反镜闭环特性图

非线性误差校正原理如图7所示。

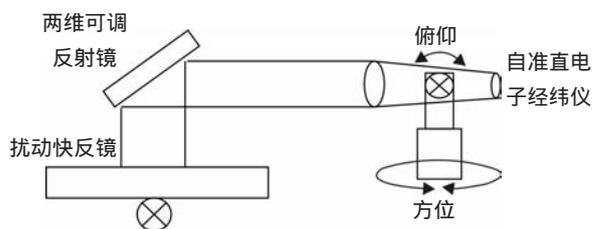


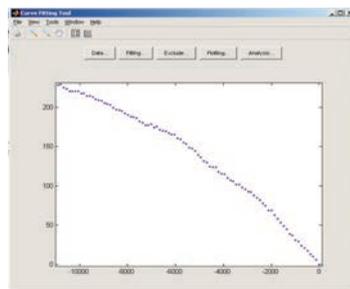
图7 非线性误差校正实验图

将两维可调反射镜和自准直电子经纬仪或平行光管固定在光学平台上,将快反镜闭环到零位。调整快反镜、固定反射镜和自准直电子经纬仪的角度,使它们处于自准直状态,然后将自准直经纬仪的方位和俯仰锁死。旋转快反镜对应自准直电子经纬仪俯仰轴的旋转轴,使其在有效转动范围内来回转动,微调两维可调反射镜使其方位读数不变,即将快反镜旋转轴与自准直经纬仪旋转轴调整为同轴。以取点方式记录快反镜角度和自准直电子经纬仪读取角度,然后计算误差曲线,对误差曲线进行拟合后补偿到快反镜角度中。非线性误差校正的精度取决于测量仪器的精度和取点点数。

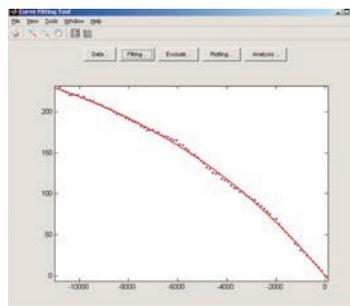
误差曲线拟合公式为

$$y = p_1 \times x^4 + p_2 \times x^3 + p_3 \times x^2 + p_4 \times x^1 + p_5 \quad (4)$$

在Matalab中对误差数据进行处理,采用上式对误差曲线进行拟合,图8a为非线性误差数据图,图8b红色曲线为拟合曲线。



(a)非线性误差图



(b)误差曲线拟合图

图8 非线性误差图和误差拟合图

拟合参数为: $p_1 = -1.189 1e^{-015}$; $p_2 = -6.828 9e^{-011}$; $p_3 = -2.002 9e^{-006}$; $p_4 = -0.035 96$; $p_5 = -0.260 3$ 。

把上述误差曲线补偿到位置回路中后,扰动快反镜定位精度可小于4"。

2 待测快反镜测试方法

2.1 静态精度测试

待测快反镜静态精度测试方法:将待测快反镜安装在快反镜测试系统光路中,将快反镜闭环到零位,调整其位置,使其与高速光斑采集单元中PSD同轴,并使数据处理设备中读数尽量小,然后把当前读数作为零位,通过控制指令控制待测快反镜调转一定角度,读取数据处理设备中数据,两个数据相减即为待测快反镜静态精度误差。

2.2 动态特性测试

待测快反镜动态特性测试方法:待测快反镜给定指标速度、加速度、校正范围可等效成正弦位置曲线,把此曲线作为给定输入到扰动快反镜,产生光束扰动,待测快反镜对光路进行闭环控制,读取数据处理设备中误差数据,此误差即为待测快反镜动态校正误差。

3 系统误差分析

快反镜旋转中心离镜面旋转中心有一定距离 h ,快反镜以其旋转中心转动一定角度 α 时,其反射光线在旋转角度 α 的同时会产生的位移量 m ,由于高速光斑采集单元中探测元件为位移探测器PSD,其探测到的变化量无法区分光束角度和光束位移。如果光束位移过大,则会影响到被测快反镜闭环精度测试。图9为光线经扰动快反镜反射后到达PSD的等效光路图。

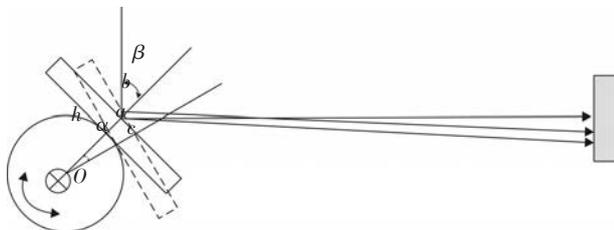


图9 快速反射镜测试系统等效光路图

图中 o 为扰动快反镜旋转中心, a 点为旋转前光线反射点, b 点为旋转后光线反射点, a 点与 b 点之间距离即为光线平移量 m 。

光线初始入射角为 β ,从扰动快反镜到PSD探测面光程为 n ,计算可得光线平移对应的角度误差为

$$\left(\frac{h}{\cos\alpha} - h\right)/(n\cos\beta) \quad (5)$$

式中, $h < 20$ mm, $\alpha < 1^\circ$, $n > 2$ m, $\beta < 45^\circ$,由此计算其最大误差为0.2"。

4 结论

通过对快反镜测试系统进行合理设计,可将系统误差控制在可接收范围内,对快反镜测试系统测试精度无影响;快反镜动态指标测试取决于扰动快反镜动态性能。本系统可对带宽70 Hz内快反镜进行动态、静态性能测试。

参考文献

- [1] 王永辉.快速控制反射镜结构及其动态特性的研究[D].长春:中科院长春光机所,2004.
- [2] 王红红,陈方斌,寿少峻.基于FSM的高精度光电复合轴跟踪系统研究[J].应用光学,2010,31(6):909-919.
- [3] 万敏,张家如.快速倾斜反射镜镜跟踪系统[J].激光与红外,1999,29(3):145-147.
- [4] 胡浩军,马佳光,王强,等.快速控制反射镜系统中的传递函数辨识[J].光电工程,2005,32(7):1-3.
- [5] 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):10-11.
- [6] 吴琼雁,王强,彭起,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.
- [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] 朱衡,陈东红.提高高速倾斜镜应用带宽的方法[J].光电工程,2009,36(7):60-63.
- [9] 韩京清.自抗扰控制器及其应用[J].控制与决策,1998,13(1):120-126.
- [10] 韩京清,王伟.跟踪微分器[J].系统科学与数学,1994,14(2):177-183.