

反射镜片高度对快反镜测量误差的影响及补偿<sup>\*</sup>陈 炜<sup>1</sup> 孔建寿<sup>1</sup> 刘宗凯<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学自动化院 南京 210094; 2. 南京理工大学先进发射协同创新中心 南京 210094)

**摘 要:**在高精度光电跟瞄系统中,快速反射镜(fast steering mirror,FSM)是精跟踪通道中的核心元件,能够实现转动角亚微弧度的分辨率。测量误差直接影响到跟瞄系统的控制精度,其中,FSM 镜片反射面高度对误差的影响显著,在实际跟踪控制中必须予以补偿与校正。以某型搭载快速反射镜的实验转台测量模型(测量精度为 $\pm 50 \mu\text{rad}$ )为基础,理论推导了反射镜片反射面高度引起的误差模型,并利用系统辨识的最小二乘估计算法求出误差特性参数,进行误差补偿。实验结果表明,经过补偿后的镜片高度对误差的影响缩小到 $\pm 2 \mu\text{rad}$ 。

**关键词:**快速反射镜; 误差模型; 最小二乘估计算法; 误差补偿

**中图分类号:** TM935.2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 413.15

## Effect and compensation of the reflector lens' height on the measurement error of fast steering mirror

Chen Wei<sup>1</sup> Kong Jianshou<sup>1</sup> Liu Zongkai<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Advanced Launch Collaborative Innovation Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094,China)

**Abstract:** In the high-precision electro-optical tracking and pointing system, fast steering mirror is the core component in the fine channel. It can realize the resolution of the rotation angle of sub micro radian. The measurement error has a direct influence on the control precision of the pointing and tracking system, in which the height of the FSM reflector lens affects the error significantly, and it must be compensated and corrected in the precision tracking control. Based on the measurement model of one type of turntable equipped with a fast steering mirror of which measuring accuracy is about  $\pm 20 \mu\text{rad}$ , the error model induced by the reflector lens' height is deduced and using the least squares estimation algorithm of system identification to extract the error characteristic parameters. The experimental results show that the influence of lens' height on the error is reduced to  $\pm 2 \mu\text{rad}$ .

**Keywords:** fast steering mirror; error model; least squares estimation algorithm; error compensation

## 0 引 言

随着光电跟踪系统的日趋成熟,对跟瞄精度的要求越来越高,快速反射镜系统能够实现转动角亚微弧度的分辨率,因而被广泛应用于高精度跟瞄系统中<sup>[1-3]</sup>。

在目前已有的研究成果中,文献[4]采用二元线性插值的重心法进行光斑中心定位并分析了其测量误差,得出的测量误差小于 7.55%;文献[5]推导了基于粗跟踪控制误差的一级精跟踪系统误差抑制带宽设计方法,得出的测量误差约为 6.4%;文献[6]设计了一种干扰观测器结合

PID 的闭环控制算法来减小测量误差,系统鲁棒性更强。尽管有许多针对快反镜机械结构及其误差补偿的设计方案,但是在实际误差分析过程中,却忽略了反射镜片高度对测量精度的影响<sup>[4-8]</sup>,因此在已有的研究基础上,测量精度还有待进一步提高。

针对以上问题,本文分析了 FSM 镜片反射面高度对实际跟踪误差的影响,并给出了相应的补偿方案。该方案能够有效地应用于不同测试环境下,适当调整 FSM 镜片反射面高度,满足系统鲁棒性的要求,并提高了系统的测量精度。

收稿日期:2017-08

<sup>\*</sup> 基金项目:南京理工大学自由探索基金项目(30915011336)、江苏省青年基金项目(BK20140792)、“基于粗精两级控制结构的高能激光束指向控制控制系统研究”项目资助

### 1 工作原理及问题提出

本文所研究的 FSM 采用压电堆叠驱动的方式,反射镜与双轴柔性偏转机构、压电元件组合结构<sup>[8]</sup>,如图 1 所示,通过给定信号驱动压电元件动作的形式来实现镜面方向角与俯仰角的偏转<sup>[9-10]</sup>。

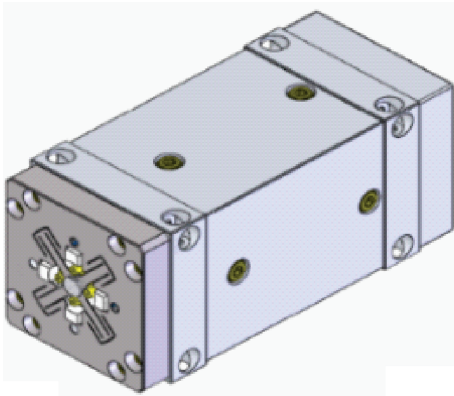


图 1 双轴柔性偏转机构与压电元件组合结构

某型搭载 FSM 的随动实验转台俯视图及侧视图如图 2 所示。图 2(a)中 X、Y 轴为标定的快反镜反射光轴,透光孔的尺寸决定了 FSM 能够跟踪目标范围的大小,在进行实际目标跟踪时,首先调整转台方向(俯仰)位姿,使目标处于 FSM 系统能够跟踪到的范围内,在图 2(b)中所示位置放置一个 CCD 负责采集目标脱靶量信息<sup>[11-13]</sup>,转换成电信号,驱动转台偏转,得到误差信息驱动 4 个音圈电机快速调整镜片偏转角度,使光束跟踪到目标位置。L 为 CCD 到靶面的距离,D 为反射镜片中心与 XY 轴心之间的距离。

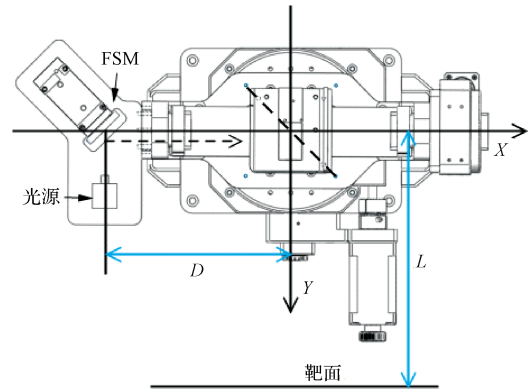
将模型简化,如图 3 所示,出厂标定的测量轴线受到镜片反射面高度 d 的影响,在跟踪靶面目标时,与实际的反射轴线之间存在误差 x,其误差值与 FSM 实时偏摆的角度紧密相关,影响了系统实际跟踪精度,故本文需要对其误差特性进行分析。

### 2 误差分析

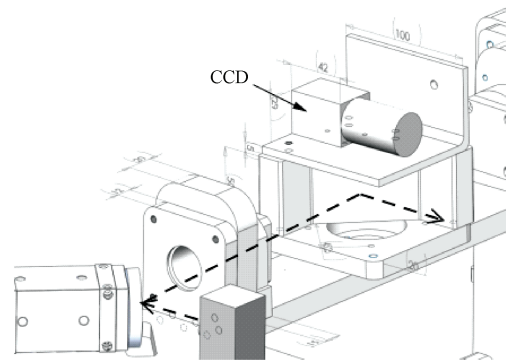
假设 CCD 采集到靶面上目标方向位(高低位)位置  $\Delta x$ ,相应地,快反镜转动角度  $\Delta\theta$  来使光束追踪到目标位置,如图 4 所示,不考虑转台加工与安装误差的影响,可推得如下方程:

$$\Delta x = (L + D)\tan 2\Delta\theta - \frac{d}{\cos(\pi/4 + \Delta\theta)} \quad (1)$$

考虑镜片反射面高度 d 对精度的影响,建立误差测量模型,设快反镜实际所需要的偏转角为  $\beta = \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \end{bmatrix}$ ,而快反镜系统控制转动的偏转角  $\alpha = \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \end{bmatrix}$ ,根据式(1)推算,二者之间的关系为:



(a) 俯视图



(b) 侧视图

图 2 FSM 转台测量模型

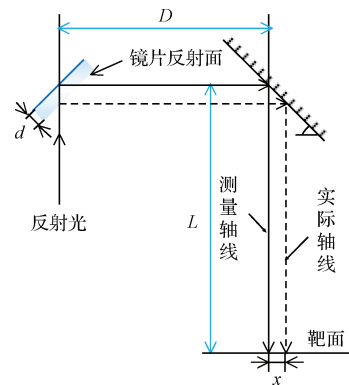


图 3 转台测量模型原理

$$\beta = \alpha - \frac{\tan^{-1} \frac{d}{L \cdot \cos(\beta + \pi/4)}}{2} \quad (2)$$

式中:L 为 CCD 到靶面的距离,由式(2),d 单位为 mm,实际需要的偏转角与系统测得的偏转角之间的误差模型可近似为下列方程:

$$\beta = \alpha - k_1 \tan^{-1} k_2 d \quad (3)$$

进一步近似为一元线性方程:

$$\theta = \beta - \alpha = a \cdot d + b \quad (4)$$

式中:a 和 |b| 为待测的补偿系数,θ 为角度的误差量。

通过扫频仪所获得的快反镜传递函数为:

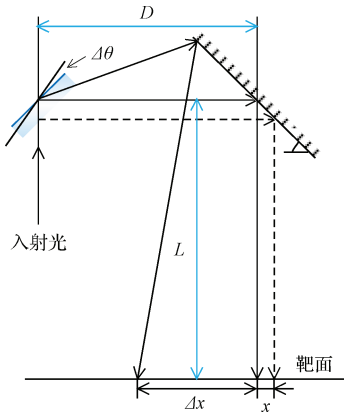


图4 FSM目标跟踪模型

$$W(s) = \frac{1}{(0.0036s + 1)(0.00000253s^2 + 0.0022s + 1)} \quad (5)$$

### 3 最小二乘估计算法

首先,从式(4)可知,有两个待求误差模型参数,测量两组以上不同镜片高度下的误差数据<sup>[14-15]</sup>,就可采用最小

二乘算法求取出待求参数。假设不同高度  $d$  对应误差量  $\theta_i$ ,构造如下方程:

$$Q(a,b) = \sum_{i=1}^n [\theta_i - (a \cdot d_i + b)]^2 \quad (6)$$

使  $Q(a,b)$  最小,即为最小二乘法的思想,此时  $a$  和  $b$  应满足:

$$\frac{\partial Q}{\partial a} = 2 \sum_{i=1}^n [\theta_i - (a \cdot d_i + b)] \cdot (-d_i) = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial b} = 2 \sum_{i=1}^n [\theta_i - (a \cdot d_i + b)] = 0 \quad (8)$$

整理式(7)、(8)得到:

$$|a| = \frac{\sum_{i=1}^n |d_i - \bar{d}| |\theta_i - \bar{\theta}|}{\sum_{i=1}^n |d_i - \bar{d}|^2} \quad (9)$$

$$|b| = |\bar{\theta}| - a \cdot |\bar{d}| \quad (10)$$

式中:  $|\bar{\theta}|$  和  $|\bar{d}|$  分别表示  $|\theta_i|$ 、 $|d_i|$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ ) 的均值。

### 4 补偿算法仿真分析

为了验证算法的有效性,利用 MATLAB 对实验数据进行仿真,评估性能,仿真框图如图 5 所示。

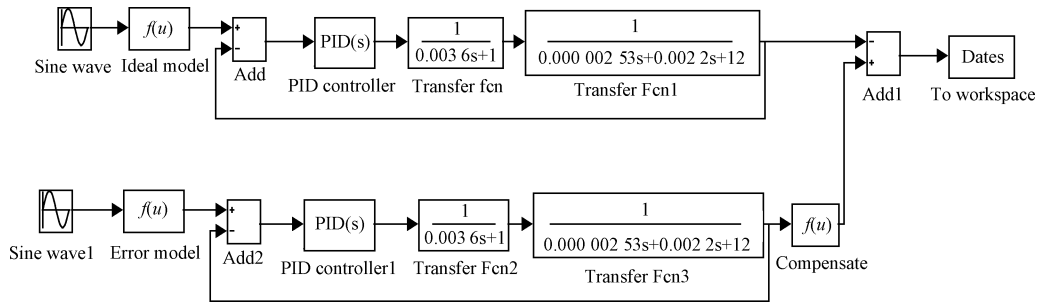


图5 系统误差模型仿真框图

将  $d$  分别设置为 4 mm、8 mm 和 12 mm,输入为正弦信号  $f(t)=0.5\sin t$ ,测得相对应的角度误差数据,将得到的数据根据式(9)、(10)通过 MATLAB 进行仿真编程,计算得到式(4)的补偿系数,其中  $a=0.0140$ ,  $|b|=-1.7328e^{-6}$ 。

加入补偿环节,然后使系统处于  $d=5\text{ mm}$ 、 $10\text{ mm}$ 、 $15\text{ mm}$  情况下,分别测量补偿前与补偿后的角度误差,由图 5 仿真得到的数据绘制成曲线如图 6~8 所示。

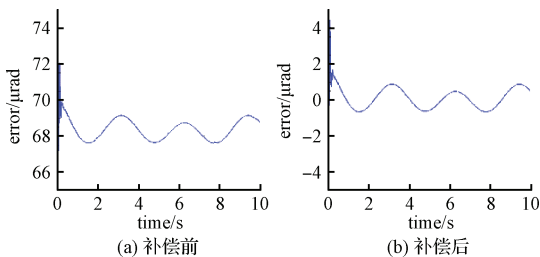


图6  $d=5\text{ mm}$  时,角度误差曲线

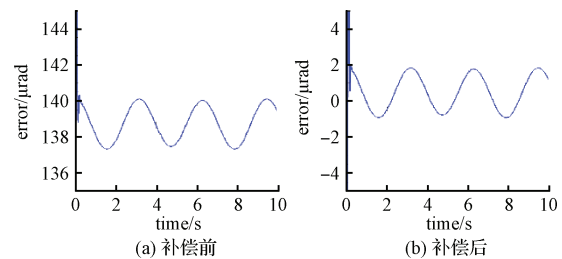


图7  $d=10\text{ mm}$  时,的角度误差曲线

从图中可以看到,  $d=5\text{ mm}$  时,补偿前由  $d$  引起的 FSM 偏转角度误差约为  $70\ \mu\text{rad}$ ;  $d=10\text{ mm}$  时,误差约为  $140\ \mu\text{rad}$ ;  $d=15\text{ mm}$  时,误差约为  $210\ \mu\text{rad}$ 。误差值  $\theta$  与  $d$  近似成线性关系,符合简化的误差模型。加入补偿环节后,误差值较补偿前能够缩小到系统控制精度的 5% 以内,达到  $\pm 2\ \mu\text{rad}$ ,符合精度要求,进一步证明了补偿模型的有效性。

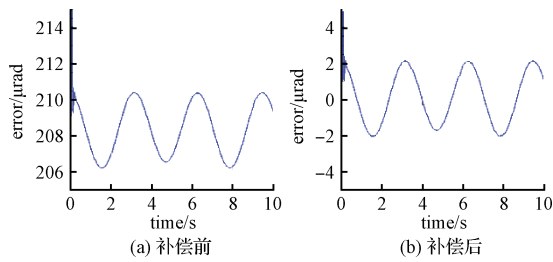


图8  $d=15\text{ mm}$  时,角度误差曲线

## 5 结论

本文所讨论的FSM镜片反射面高度对误差的影响经过量化分析表明,其对于FSM系统角跟踪精度存在显著地影响。系统仿真结果表明,镜片高度 $d$ 造成的误差远超过相应的精度要求,不可忽略,针对镜片高度 $d$ 引起的误差提出的补偿策略,仿真结果显示,镜片反射面高度对误差的影响明显减小,达到 $\pm 2\ \mu\text{rad}$ ,验证了补偿策略的有效性。根据不同镜片高度对应的系统鲁棒性不同,本文的研究使得FSM能够更好地应用于高精度跟瞄系统精通道内。同时,本文所提出的补偿方案对于其他类似结构的FSM系统同样具有普遍意义。由于本文在分析过程中没有考虑CCD安放的位姿误差,所以误差模型还有待进一步改善与修正。

## 参考文献

[1] 孙长喜,黄鲲. 美国高能激光武器发展概述[J]. 国防科技, 2006(12): 6-9.  
 [2] HILKERT J M. Inertially stabilized platform technology concepts and principles[J]. IEEE Control Systems, 2008, 28(1): 26-46.  
 [3] 王帅,吴庆林,张斌. 用于快速反射镜的压电陶瓷驱动系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(7): 6-10.  
 [4] 夏蕾. 高精度激光合束及光轴指向控制技术研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.

[5] 杨晓霞,孟浩然,张斌. 大型光电系统精跟踪带宽设计方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1382-1388.  
 [6] 王中石,王福超. 基于ARM的快速反射镜鲁棒控制系统设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2015, 35(5): 74-78.  
 [7] 刘绍锦,王志乾,王春霞. 舰船间水平间距及舷偏角测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(4): 483-488.  
 [8] 敬子建,徐明龙,田征. 一种新型压电驱动快速控制反射镜[J]. 空间电子技术, 2016, 13(3): 50-53.  
 [9] 温新,周云飞,穆海华,等. 激光测量几何误差补偿算法[J]. 机械设计与制造, 2011(9): 46-48.  
 [10] 刘君,穆海华,孙业业,等. 激光干涉测量中的误差分析与补偿[J]. 机床与液压, 2006(9): 181-184.  
 [11] 徐新行,王恒坤,韩旭东. 机载小型化快速反射镜用微米位移测量传感器设计[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(9): 1937-1944.  
 [12] KÖNING R, FLÜGGE J, BOSSE H. A method for the in situ determination of Abbe errors and their correction[J]. Measurement Science and Technology, 2007, 18(2): 476-476.  
 [13] 崔龙,黄海. 高稳定精密跟瞄机构设计与仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(12): 1462-1465.  
 [14] 蔡洪,孙文利,马建明. 惯组动态测试台误差分析及附加运动补偿算法[J]. 国防科技大学学报, 2014, 36(5): 58-65.  
 [15] 赵国荣,嵇绍康,杨飞,等. 磁场信号检测误差分析及补偿算法[J]. 系统仿真技术, 2012, 8(2): 153-157.

## 作者简介

陈炜,硕士研究生,主要研究方向为自动检测理论及技术。

E-mail: 465355002@qq.com