

文章编号 1004-924X(2006)01-0043-05

# 自由空间光通信 ATP 系统中精瞄偏转镜的设计

邵 兵<sup>1</sup>, 孙立宁<sup>1</sup>, 曲东升<sup>1</sup>, 王建国<sup>2</sup>, 秦昌<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 机器人研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 博实精密测控有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 二维精瞄偏转镜是自由空间光通信中捕获、跟踪和瞄准(ATP)系统的关键组成部分,对偏转镜进行了机构设计和有限元模态分析,偏转镜采用压电陶瓷驱动器驱动,采用柔性铰链传动。研制了集驱动、检测、主控模块为一体的数字式精密定位控制器,在实验室构建了两套测试系统,对偏转镜的频率和静态性能进行了测试,并着重介绍了频率的两种测量方法及其优缺点分析。仿真和测试结果表明,偏转镜的频率约为 1.5 kHz,转角范围约为 $\pm 2$  mrad,精度约为  $1 \mu\text{rad}$ ,分辨率约为  $0.1 \mu\text{rad}$ 。

**关键词:** 自由空间光通信;捕获、跟踪、瞄准系统;精瞄偏转镜

**中图分类号:** TN929.13 **文献标识码:** A

## Design of fine pointing tip / tilt mirror of ATP system for free space optical communication

SHAO Bing<sup>1</sup>, SUN Li-ning<sup>1</sup>, QU Dong-sheng<sup>1</sup>, WANG Jian-guo<sup>2</sup>, QIN Chang<sup>2</sup>

(1. Robot Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. BoShi Precision Measure&Control Co., Ltd., Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The two-dimensional fine pointing tip/tilt mirror is a key component of the acquisition, tracking and pointing(ATP) system for free space optical communication. The mechanical design and model analysis was made to the tip/tilt mirror driven by the piezoelectric actuator and transmitted by the flexure hinge. The digital precise position controller was developed, which consisted of driving module, measuring module and control module. The test system was developed in laboratory, and the frequency and static performance of tip/tilt mirror were tested. Two measuring methods of the frequency were particularly introduced. The testing results indicate that the frequency of the tip/tilt mirror is about 1.5 kHz, the rational degree range is about  $\pm 2$  mrad, the precision is about  $1 \mu\text{rad}$  and the resolution is about  $0.1 \mu\text{rad}$ .

**Key words:** free space optical communication; ATP system; fine pointing tip/tilt mirror

收稿日期:2005-11-22;修订日期:2005-12-04.

基金项目:本项目获得国家 863 计划 701 主题资助,项目名称:高速轻型激光链路终端研制项目。

## 1 引言

自由空间激光通信具有通信容量大、抗电磁干扰能力强、保密性好等优点,是卫星大容量通信的最佳解决方案之一,但由于激光光束窄、发散角小,在传输过程中受到大气散射、折射、湍流等很多因素的影响,加上卫星平台的振动等因素,会造成激光光束偏离目标。解决此问题的关键技术,快速精瞄偏转镜作为在目标和接收器之间控制光束方向的反射镜装置已广泛应用在激光通信的光学系统中。由于精瞄偏转镜具有谐振频率高、响应速度快、跟踪精度高等优点,可与大惯量、大行程机架结构的主系统共同构成复合轴跟踪系统,用于校正主系统的跟踪误差,提高跟踪精度<sup>[1-11]</sup>。

## 2 精瞄偏转镜机构设计

### 2.1 柔性铰链结构分析<sup>[12-13]</sup>

精瞄偏转镜采用平行板柔性铰链传动,结构如图 1 所示:

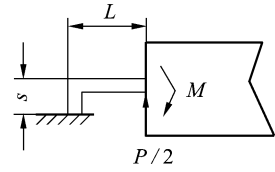
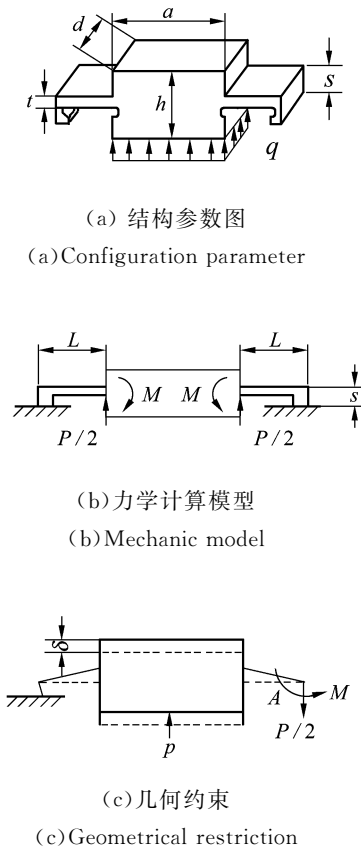


图 1 平行板柔性铰链机构简图

Fig. 1 Institution scheme of parallel plate

图 1(a)为平行板柔性铰链机构结构参数图,图 1(b)为其力学计算模型,由于  $h \gg t$ ,所以可把中部的长方块( $a, b, h$ )视为刚体,即长方块在分布力  $q$  的作用下,只发生平动而不发生弯曲,如图 1(c)所示。由公式推导可得到驱动力与位移的模型为:

$$\delta = \frac{PL^3}{2Ebt^3}, \quad (1)$$

式中,  $E$  为材料的弹性模量。

### 2.2 精瞄偏转镜机构设计

用于精瞄准机构的压电陶瓷驱动的二维偏转镜采用两块内置电阻应变片式传感器压电陶瓷,压电陶瓷分别分布在两条偏转轴上,且到两偏转轴交点的距离相等。两条相互垂直的偏转轴是由两个相互垂直的柔性铰链机构形成的,如图 2 所示。当一块压电陶瓷输出位移时,将使工作台产生一定的偏转。通过压电陶瓷驱动柔性铰链杠杆结构,实现了工作台偏转,并保证了运动平稳、无间隙、无机械摩擦、高位移分辨率。

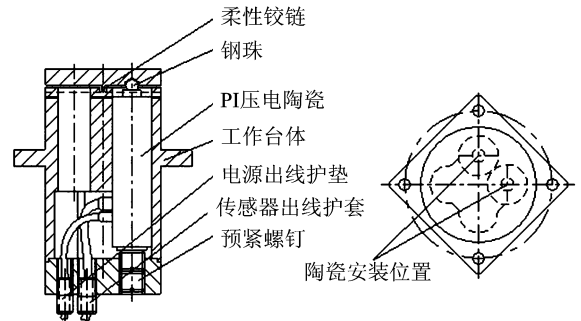


图 2 精瞄偏转镜结构图

Fig. 2 Structure drawing of fine pointing tip/tilt mirror

利用有限元分析软件,建立快速精瞄偏转镜壳体的有限元模型,进行模态分析,分别得到了偏

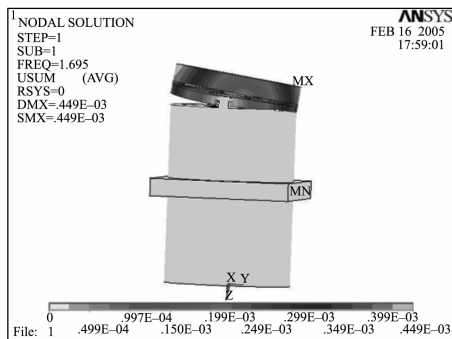


图 3 精瞄偏转镜绕 Y 轴转动模态分析图

Fig. 3 Model analysis drawing of fine pointing tip/tilt mirror around the Y axis

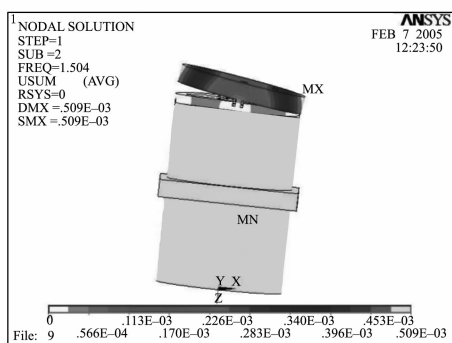


图 4 精瞄偏转镜绕 X 轴转动模态分析图

Fig. 4 Model analysis drawing of fine pointing tip/tilt mirror around the axis X

转镜绕 Y 轴和 X 轴转动的固有频率及相应模态振型,如图 3、图 4 所示,计算的频率值分别为 1.69 kHz 和 1.504 kHz。

### 3 精瞄偏转镜测试系统

#### 3.1 数字式精密定位控制器

采用自行研制的数字式精密定位控制器控制精瞄偏转镜。控制器采用模块化设计,将压电陶瓷驱动模块、微位移检测模块、主控模块集成为一体,通过驱动模块驱动压电陶瓷,由传感模块对传感器反馈信号进行检测处理,处理结果通过控制总线提供给主控模块进行计算、分析,由以 DSP 为核心的主控模块对系统进行精密控制。控制器采用可靠的电路优化及抗干扰设计,保证了高稳定性及极低的静态纹波。测试表明控制器的控制精度达到量程的 0.1%,输出电压静态纹波 <10 mV,输出电压稳定性 <0.05%/8 h,能够满

足系统要求。

#### 3.2 频率测试

频率测试系统如图 5 所示,采用如下两种方法测量精瞄偏转镜的频率。

方法一由信号发生器发生正弦波信号,由控制器的模拟输入端口输入控制偏转镜运动。由激光测振仪将探测激光垂直发射到偏转镜的镜面上,并将检测到的信号发送到示波器上。逐渐增大信号发生器发生的正弦波信号的频率,同时通过示波器观察波形是否失真。测试得到当信号发生器的正弦波信号频率增大到约 1.5 kHz 时,信号出现失真,如图 6 所示。

方法二采用敲击法测量偏转镜的固有频率。使用小橡皮棒敲击偏转镜,使偏转镜自身产生震荡,由激光测振仪将探测激光垂直射到偏转镜的镜面上,并将检测到的信号发送到示波器上。使用示波器的快速傅里叶分析(FFT)模块捕捉偏转镜的振动波形,可以测量得到偏转镜的固有频率约为 1.46 kHz。

对比有限元分析及两种实测结果,可以看出分析值与实测值存在一定误差,产生误差的原因如下:进行有限元分析所采用的偏转镜模型只是机构壳体,不包括压电陶瓷驱动器;用方法一测量频率值,需要判断波形是否失真,有一定的判断误差;用方法二测量频率值,由于偏转镜需固定在支架上,所以敲击的位置不同,测得的频率值也会有轻微变化。

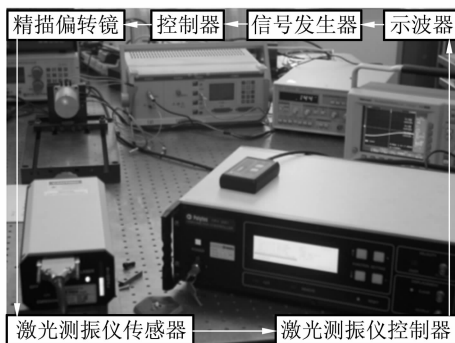


图 5 精瞄偏转镜频率测试系统图

Fig. 5 Drawing of fine pointing tip/tilt mirror frequency test system

#### 3.3 静态性能测试

用激光干涉仪测量偏转镜的转角范围、分辨率和精度。测量系统如图 7 所示,测量原理图如

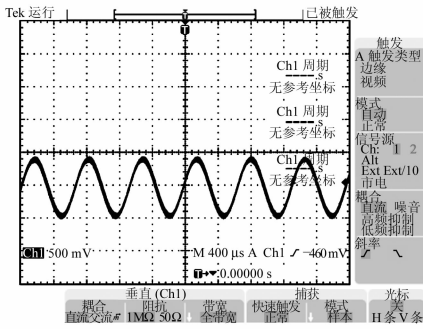


图 6 激光测振仪输出信号

Fig. 6 Signal from laser vibrometer

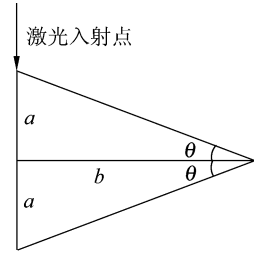


图 8 测量原理图

Fig. 8 Drawing of measuring principle

用激光干涉仪测得的绕 X、Y 轴转动的转角范围、偏转精度和分辨率如表 1 所示：

表 1 测量结果

Tab. 1 Measuring results

	转角范围	精度	分辨率
绕 X 轴	±2 mrad	1 μrad	0.1 μrad
绕 Y 轴	±2 mrad	1.2 μrad	0.2 μrad

图 8 所示,其方程式为:

$$\tan \theta = a/b, \quad (2)$$

$$\theta = \arctan (a/b). \quad (3)$$

式中: a—激光干涉仪的测量结果

b—激光入射点和偏转轴的距离

θ—偏转角

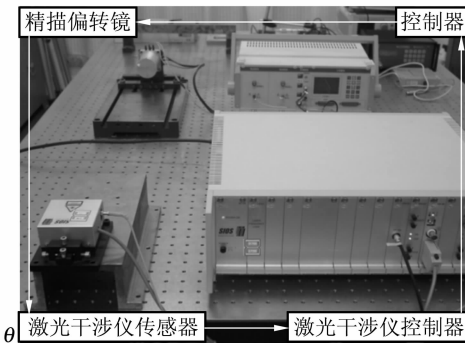


图 7 精瞄偏转镜静态性能测试系统图

Fig. 7 Drawing of fine pointing tip/tilt mirror static performance test system

## 4 结 论

介绍了用于空间激光通信的二维精瞄偏转镜,采用压电陶瓷驱动器驱动,采用柔性铰链传动,进行了机构设计和性能测试,测试结果表明偏转镜能够基本满足 ATP 系统的需要。考虑到星上的高频振动对星间激光链路的影响,偏转镜的动态性能还需进一步改善。

## 参考文献:

- [1] AOKI K, KURODA H. Wide and fine pointing mechanism with flexible supports for optical inter-satellite communication[J]. *SPIE*, 1999, 3615:222-229.
- [2] KEIZO I, YOSHIO K. Ultra high speed optical beam steering by optical phased array antenna[J]. *SPIE*, 1996, 2699:210-217.
- [3] NILSSON O. Fundamental limits and possibilities for future telecommunications [J]. *IEEE Communications Magazine*. 2001, 39(5):164-167.
- [4] CHAN V W S. Optical space communications [J]. *IEEE J Quantum Electron*. 2002, 6(6) : 959-975.
- [5] MECHERLE S G, HORSTEIN M. Comparison of radio frequency and optical architectures for deep - space communications via a relay satellite [J]. *SPIE*, 1994, 2123 : 36-53.
- [6] YOSHINORI A, MORIO T, MASAHIRO T, et al. Preliminary result on laser communication experiment using ETS -V[J]. *SPIE*, 1995, 2381:151-158.
- [7] LESH J R, DEPAULA R. Overview of NASA R&D in optical communications[J]. *SPIE*. 1995, 2381:4-11.

- [8] OPPENHAUSER G, WITTING M, POPESCE A. The European SILEX project and other advanced concepts for optical space communications [J]. *SPIE*, 1991, 1522:2-13.
- [9] FLETCHER G D, HICKS T R, LAURENT B. The SILEX optical interorbit link experiment [J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1991, 3(6):273-279.
- [10] POPESCU A F, FURCH B. Status of the European developments for laser intersatellite communications [J]. *SPIE*, 1993, 1866:10-20.
- [11] NIKULIN V V, MOUNIR B, SKORMIN V A, *et al.* Modeling of the tracking system communication systems [J]. *SPIE*, 2001, 4272:72-82.
- [12] 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. SUN L N, SUN SH Y, QU D SH, *et al.* Micro-drive positioning system based on PZT and its control [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(1):55-59. (in Chinese)
- [13] 刘品宽, 孙立宁, 曲东升, 等. 新型二维纳米级微动工作台的动力学分析 [J]. *光学 精密工程*, 2002, 10(2):143-147. LIU P K, SUN L N, QU D SH. Dynamic analysis on a novel nanopositioning stage driven by PZT [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(2):143-147. (in Chinese)

**作者简介:**邵兵(1976—),男,黑龙江人,讲师,主要研究方向为微驱动机器人技术。

孙立宁(1964—),男,黑龙江人,教授,博士生导师,主要研究方向为机器人技术、微驱动技术、微操作技术,现任哈尔滨工业大学机器人研究所所长。