

文章编号 1004-924X(2014)06-1547-08

采用柔性铰链的快速反射镜设计

周子云^{1,2}, 高云国^{1*}, 邵 帅¹, 薛向尧¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要:根据激光发射系统对快速反射镜发射方向精度的需求,提出了一种新型快速反射镜设计方案。该方案以柔性铰链为运动传递元件,采用直线音圈电机驱动,并用高精度光栅测微仪实现位置闭环控制。首先,介绍了反射镜工作原理及驱动方式,选择了系统的驱动元件和测角元件,并对柔性铰链结构进行设计。在研究其刚度特性的基础上,采用序列二次规划法优化了铰链关键尺寸。然后,建立了驱动组件的简化模型,并利用理论公式和有限元分析软件分别计算驱动组件的转角精度。最后,使用测角元件及自准直平行光管测量了快速反射镜的转角精度。实验结果表明:所设计的快速反射镜装置工作稳定、结构可靠,对发射光束的控制精度能达到 0.95",满足激光发射系统实时控制光束发射方向的精度要求。

关键词:快速反射镜;音圈电机;柔性铰链;传动精度

中图分类号:TN248;TP273 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142206.1547

Design of fast steering mirror using flexible hinge

ZHOU Zi-yun^{1,2}, GAO Yun-guo^{1*}, SHAO Shuai¹, XUE Xiang-yao¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*
** Corresponding author, E-mail: gaoyunguo@163.com*

Abstract: A new design scheme for fast steering mirrors was proposed according to the requirements of a laser launching system for emission accuracy. A flexible hinge was used in two-shaft fast steering mirror structure as the moving transmission device, a linear voice coil motor was as a driving component and a high precision optical grating micrometer was taken to implement the position closed control. The operational principle and drive mode of the fast steering mirror were introduced, and the drive components and an angle measuring device were selected. Then, the structure of the flexible hinge was designed. On the basis of researching the stiffness characteristics of the straight beam flexible hinge, sequential quadratic programming algorithm was used to optimize the critical dimensions of the hinge. Furthermore, a simplified model of the drive components was established, and theoretical models and finite element analysis software were used to calculate and verify the transmission accuracy

收稿日期:2013-12-07;修订日期:2014-01-25.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所三期创新工程资助项目(No. 057X22C050)

of the drive assembly. Finally, angle measurement components and autocollimation were used in the measurement of the rotation accuracy of the fast steering mirror. The experimental results show that the mechanical structure of the fast steering mirror is stable, reliable, and the beam control precision can reach to $0.95''$, satisfying the precision requirements of real-time control of the transmission direction in the laser launch system.

Key words: fast steering mirror; voice coil motor; flexible hinge; transmission accuracy

1 引言

随着激光发射系统的发射功率不断提高,对精确控制高能激光束发射方向的要求也越来越高。快速控制反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)是可以快速转动反射镜实时控制光束方向的装置,它通过调整反射镜的角度达到控制激光束发射方向的目的,以体积小、结构紧凑、速度快、精度高、带宽高等优点被广泛应用于天文望远镜、激光通讯、图像稳定、复合轴精密跟踪、瞄准等光学系统中,已成为激光发射系统中进行光束方向控制的关键部件之一^[1-3]。

近年来,欧美国家采用了全柔性机构设计概念,将柔性机构与音圈电机或压电陶瓷驱动相结合,设计出了一系列柔性轴 FSM 系统:德国 PI 公司研制了多种规格用于不同领域的快速反射镜,是微驱动领域的先驱;此外,英国 Queensgate 公司,美国 Ball Aerospace & Technology 公司,意大利 Thermo Trez 公司等也在此领域进行了深入研究,研制出一系列不同参数的快速反射镜。这类产品的主要优点是高精度、高模态和长寿命,但由于相关的理论研究尚不成熟,此类机械装置均无法突破行程较小的限制,能承载的反射镜口径及质量等都较低。国内如成都光电技术研究所,西安 205 研究所,哈尔滨工业大学等研制出的两轴系及柔性轴快速反射镜均已广泛应用于实际工程项目中。但框架式快速反射镜驱动运动复杂,所需力矩较大;柔性轴快速反射镜在国内的研究起步较晚,虽已发表了很多高水平学术论文,但转化为工程方法的应用还有待探索研究^[4-6]。

本文综合了高精度机械轴系与柔性轴系的特点,设计了一种以柔性铰链为运动传递元件的快速反射镜,采用直线音圈电机作驱动元件,高精度光栅测微仪实现位置闭环控制,具有结构简单、通光口径大、所需驱动力小、行程大、控制精度高等

优点,可满足工程上对快速反射镜行程及控制精度等方面的性能要求。

2 快速反射镜结构设计

2.1 机械结构设计及工作原理

以下述技术要求设计了快速反射镜系统:通光口径 $\Phi 140$ mm,转角 $\pm 30'$,定位精度 $1''$ 。快速反射镜结构主要由支撑基座、内框架、外框架、反射镜、驱动元件、运动传递元件以及测角元件组成,其结构如图 1 所示。

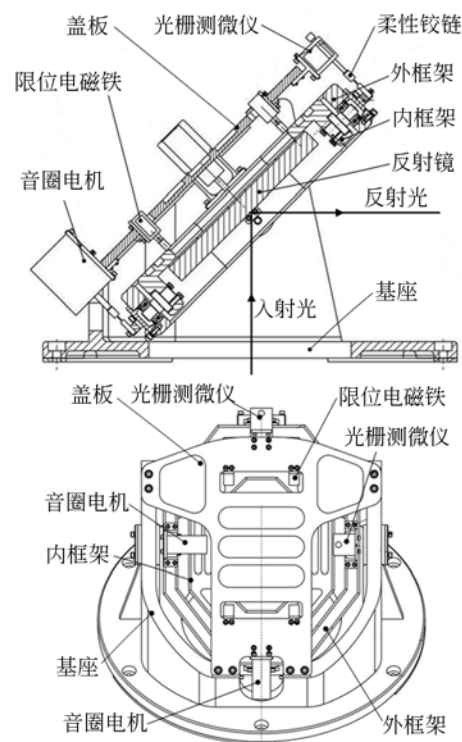


图 1 快速反射镜结构图

Fig. 1 Framework of Fast Steering Mirror(FSM)

驱动元件及测角元件成组对称分布,分别对内框架及外框架的转角变化进行实时监测。当光

束方向有偏差时,驱动元件接收到来自伺服系统的驱动信号,对转动框架产生驱动力矩,推动反射镜转动,同时,测角元件将测得偏差进行比较,实时修正反射镜位置,从而实现对外发射光束的快速调整。

2.2 驱动元件及驱动方式

快速反射镜常用驱动元件有压电陶瓷和音圈电机。压电陶瓷的谐振频率较高,但所需驱动电压高,成本高,可驱动行程较小,且随着行程的增大,产生的累积误差也增大。音圈电机的行程比压电陶瓷高出2个数量级,调速性能好、启动转矩大、驱动电压小,对环境的适应性强,缺点是响应频率低,由它构成的控制系统带宽都在100 Hz以下^[7-9]。由于二者行程上的巨大差异,本文选用SMAC的直线音圈电机作为驱动元件,连续输出力为3 N,峰值驱动力为12 N,通过系统机械结构的优化及伺服系统的补偿来弥补响应频率低对系统造成的影响。

传统的两轴系快速反射镜多采用驱动转轴的方式控制反射镜转动,这种驱动方法需要克服的结构转动惯量及摩擦力矩较大,对反射镜转角测量产生的误差也较大。因此,采用直线音圈电机驱动框架边缘转动的直接驱动方式。音圈电机的伸缩杆通过柔性铰链连接在框架上。电机的运动方式为直线,而框架产生的运动为转动,为了避免干涉,增加了柔性铰链在反射镜工作方向提供柔顺度,即增加了1个自由度^[4]。

2.3 角度检测元件

内外框架的角度转动量均采用自主研发的光栅测微仪进行测量,该装置具有测量精度高、响应频率高、抗干扰能力强、体积小等优点,测量分辨率优于 $0.06 \mu\text{m}^{[10]}$,相应的角度分辨率可达 $0.1''$ 。在FSM系统中,2个光栅测微仪与2个直线音圈电机相对于轴线对称分布,通过柔性铰链直接连接在内、外框架上,将角度变化转变为光栅尺测量头的直线距离,不增大摩擦力矩,有效减小了测量误差,大大提高了系统的控制精度和可靠性。

3 柔性铰链结构

3.1 结构形式的设计

柔性铰链利用弹性变形及其自回复的特性,可以消除传动过程中的空程和机械摩擦,获得较

高的位移分辨率。目前常用的柔性铰链主要有圆弧形柔性铰链和直梁形柔性铰链。圆弧形柔性铰链虽然运动精度略高,但转动范围相对较小。所以选择直梁形柔性铰链作为运动传递元件^[11-13]。

3.2 刚度分析

对柔性铰链进行单元特性分析是设计铰链各关键尺寸的基础。直梁形柔性铰链的主要结构尺寸有铰链宽度 b ,铰链高度 h ,铰链最小厚度 t ,倒圆角半径 R 和直梁部分长度 l 。其模型如图2所示。

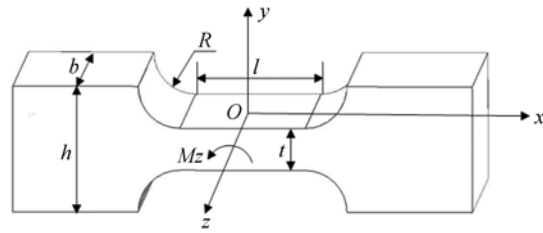


图2 直梁形柔性铰链模型

Fig. 2 Model of straight beam flexible hinge

由材料力学可知,柔性铰链弯曲时微小段中性面曲率为:

$$\frac{1}{\rho x} = \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_z}{EI_z(x)}, \quad (1)$$

式中: M_z 为力矩; E 为铰链弹性模量; $I_z(x)$ 为截面对转动中心 z 轴的惯性矩。

$$I_{z1}(x) = \frac{ba^3}{12} = \frac{bt^3}{12}, \quad (2)$$

$$I_{z2}(x) = \frac{ba^3}{12} = \frac{b(t+2R-2R\cos\theta)^3}{12}. \quad (3)$$

在力矩 M_z 作用下柔性铰链转角 α_z 为:

$$\alpha_z = \frac{dy}{dx} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} \frac{12M_z}{Ebt^3} dx + \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{12M_z R \cos\theta}{Eb(t+2R-2R\cos\theta)^3} d\theta = \frac{12M_z}{Ebt^3} l + \frac{12M_z}{EbR^2} f, \quad (4)$$

$$\text{令 } f = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \frac{\cos\theta}{\left(\frac{t}{R} + 2 - 2\cos\theta\right)^3} d\theta = \frac{12\beta^4(2\beta+1)}{(4\beta+1)^{\frac{5}{2}}} \arctan \sqrt{4\beta+1} + \frac{2\beta^3(6\beta^2+4\beta+1)}{(4\beta+1)^2(2\beta+1)}, \quad (5)$$

式中: $\beta = \frac{R}{t}$ 。柔性铰链转动刚度计算公式为:

$$K = \frac{M_z}{\alpha_z} = \frac{Ebt^3 R^2}{12lR^2 + 12ft^3}. \quad (6)$$

3.3 柔性铰链关键尺寸的确定

柔性铰链的几何尺寸是影响柔性铰链性能的关键因素。为了提高快速反射镜组件的调整精度,需要对柔性铰链关键尺寸进行优化设计。以最小厚度 t ,倒角半径 R ,直梁部分长度 l 和铰链宽度 b 为设计变量,以增强铰链变形能力—即刚度最小化为优化目标,用序列二次规划(SQP)算法进行优化计算:

$$\min K = \frac{Ebt^3 R^2}{12lR^2 + 12ft^3}, \quad (7)$$

$$\{x\} = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}^T = \{t, R, l, b\}^T. \quad (8)$$

在弯矩 M_z 作用下,柔性铰链的最小厚度部分会产生最大的弯曲应力 σ_{\max} ,且 σ_{\max} 应满足:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] = \frac{\sigma_s}{n_s}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{6M_z}{bt^2}, \quad (10)$$

式中: W_z 为抗弯截面系数, σ_s 为铰链材料的屈服强度。取安全系数 $n_s = 2$, $M_z = 0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。选择 65 Mn 为柔性铰链材料,其弹性模量 $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$,屈服强度 $\sigma_s = 4.3 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

结合快速反射镜系统对柔性铰链结构尺寸上下限取值范围的设计要求,直梁形柔性铰链优化设计的数学模型为:

$$\begin{cases} \min K(x) = \frac{Ex_4 x_1^3 x_2^2}{12x_3 x_2^2 + 12f(x_1, x_2) x_1^3} \\ s. t. \quad 300 \mu\text{m} \leq x_1 \leq 2000 \mu\text{m} \\ \quad 800 \mu\text{m} \leq x_2 \leq 5000 \mu\text{m} \\ \quad 800 \mu\text{m} \leq x_3 \leq 12000 \mu\text{m} \\ \quad 10000 \mu\text{m} \leq x_4 \leq 20000 \mu\text{m} \\ \quad x_1 + 2x_2 \leq 8000 \mu\text{m} \\ \quad \frac{6 \times 0.2}{x_4 x_1^2} \leq 2.15 \times 10^{-10} \end{cases} \quad (11)$$

采用 Matlab 优化工具箱中的 fmincon 函数对上述数学模型进行优化,结果如表 1 所示。

表 1 柔性铰链优化结果

Tab.1 Optimization results of flexure hinges

设计变量	初始值	优化结果
$t/\mu\text{m}$	1 000	713
$R/\mu\text{m}$	3 000	3 643
$l/\mu\text{m}$	9 000	10 000
$b/\mu\text{m}$	2 000	10 978
$K/(\text{Nm} \cdot \text{rad}^{-1})$	31.9	5.87

为了方便加工,对优化结果进行调整,最小厚度 $t = 0.7 \text{ mm}$,倒角半径 $R = 3.5 \text{ mm}$,直梁长度 $l = 10 \text{ mm}$,铰链宽度 $b = 12 \text{ mm}$ 。由式(10),铰链最大弯曲应力为:

$$\sigma_{\max} = \frac{6M_z}{bt^2} = 2.04 \times 10^8 \text{ N/m}^2 \leq [\sigma], \quad (12)$$

满足应力许用要求。

柔性铰链转角刚度为:

$$K = \frac{Ebt^3 R^2}{12lR^2 + 12ft^3} = 6.1 \text{ N} \cdot \text{m/rad}. \quad (13)$$

4 运动传递精度分析

设计的柔性铰链用于音圈电机与框架的驱动组件中,通过电机-柔性铰链机构,实现了平动-转动的运动传递。分析计算时合理假设如下:(1)驱动组件运动时,仅柔性铰链的柔性部分产生弹性变形,其余均视作刚体;(2)柔性铰链仅产生绕回转中心的转角变形,无伸缩及其他变形。

驱动组件和理想位移如图 3,4 所示。

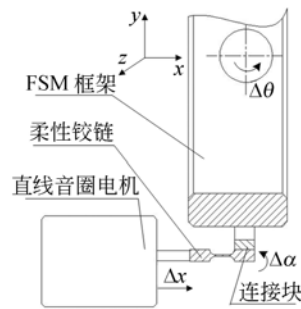


图 3 驱动组件示意图

Fig.3 Diagram of drive subassembly

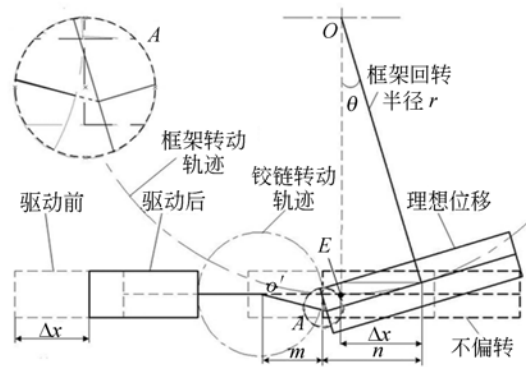


图 4 理想驱动组件位移

Fig.4 Ideal displacement of drive subassembly

铰链与框架连接部分为刚体,运动过程中始终保持与框架垂直。直线电机驱动柔性铰链移动时,若系统无传动误差,则快速反射镜产生转角 θ ,铰链处于理想位置:

$$\Delta x = r \sin \theta, \quad (14)$$

由图 4 中的局部放大图 A,铰链柔性部分绕回转中心产生转角变形,无法将铰链刚性部分推至理想位置,故组件运动的实际位移如图 5 所示。

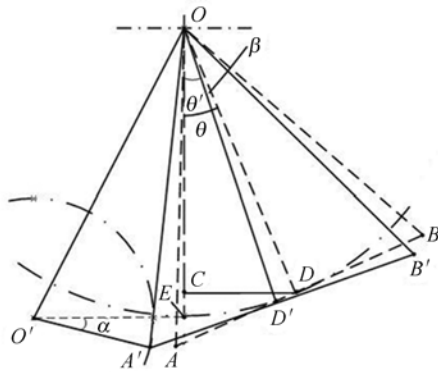


图 5 实际驱动组件位移

Fig. 5 Actual displacement of drive subassembly

当铰链移动 Δx 时, $AB-OD$ 为组件理想转动位置,框架转角为 θ ; $A'B'-OD'$ 为组件实际转动位置,框架转角为 θ' 。

$$\text{转角误差 } \beta = \theta - \theta', \quad (15)$$

$$\text{而 } \theta' = \angle D'OA' - \angle COA', \quad (16)$$

$$\angle COA' = \angle COO' - \angle A'OO'. \quad (17)$$

由结构几何参数和图 4 图 5 中的位置关系得:

$$\begin{cases} OE = OD = OD' = r \\ AB = A'B' = 2n \\ O'A' = m = \frac{l}{2} + R \\ O'E = m + n - \Delta x \\ \Delta x = r \sin \theta \end{cases} \quad (18)$$

由三角函数公式及余弦定理,将式(16)~(18)代入式(15),可得到框架转角与转角误差 β 的关系:

$$\beta = \theta - \arctan \frac{n}{r} + \arctan \frac{s}{r} - \arccos \frac{s^2 + r^2 + n^2 + r^2 - m^2}{2 \sqrt{s^2 + r^2} \sqrt{n^2 + r^2}}, \quad (19)$$

式中: $s = m + n - r \sin \theta$ 。

此时铰链转角:

$$\alpha = \arccos \frac{s^2 + r^2 + m^2 - (n^2 + r^2)}{2 \sqrt{s^2 + r^2} \cdot m} - \arctan \frac{r}{s}. \quad (20)$$

为了验证理论分析的正确性,利用有限元软件 MSC. Patran 对驱动组件进行仿真分析。

柔性铰链主要尺寸取优化值,刚性部分 $n = 3 \text{ mm}$,俯仰轴回转半径 $r = 106 \text{ mm}$,方位轴回转半径 $r = 181.5 \text{ mm}$,设计要求反射镜转角 θ 为 $\pm 30'$ 。载荷工况为:框架回转中心施加绕 Z 轴的旋转自由度;在柔性铰链左端加载 X 轴方向位移 $\Delta x = r \sin \theta$,仿真结果如图 6 所示。

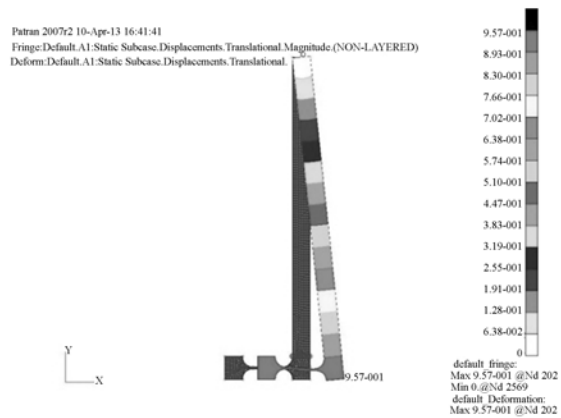


图 6 驱动组件有限元分析图

Fig. 6 Finite element analysis diagram of drive sub-assembly

有限元分析结果无法直接得到转角值,因此,分别记录在 Δx 作用下的 D' 点位移坐标和 A' 点位移坐标,位移与回转半径的比值近似为偏转角数值。经计算,方位、俯仰轴系的转角误差 β 与驱动角度 θ 的关系分别如图 7,8 所示。

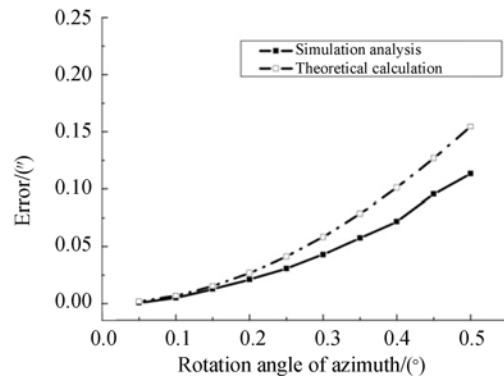


图 7 方位轴转角误差

Fig. 7 Rotation errors of azimuth

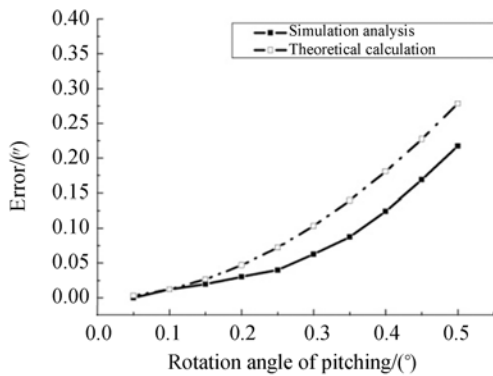


图 8 俯仰轴转角误差
Fig. 8 Rotation errors of pitching

反射镜在行程内运动时,误差值随着转动角度的增大而增大,当反射镜俯仰轴系达最大转角时误差达到最大值 0.27”。分析结果与理论值的最大偏差为 25.7%,这是由于仿真过程中,柔性铰链除了产生绕回转中心的转动之外,还产生了其他寄生运动。

方位、俯仰轴系的铰链转角 α 与驱动角度 θ 的关系如图 9,10 所示。

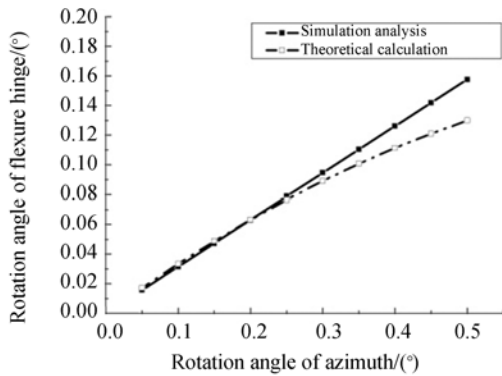


图 9 方位轴铰链转角
Fig. 9 Flexure hinge angle of azimuth

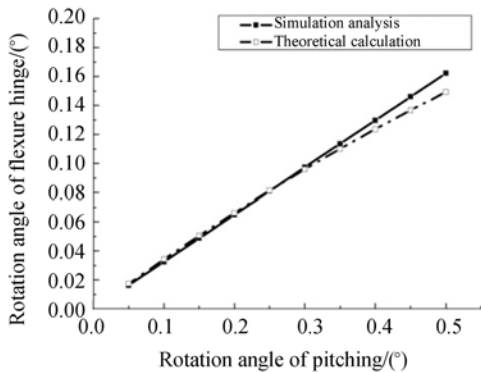


图 10 俯仰轴铰链转角
Fig. 10 Flexure hinge angle of pitching

当反射镜俯仰轴系达最大转角时,柔性铰链角位移达到最大值 $\alpha = \pm 0.16^\circ = \pm 2.79 \text{ mrad}$ 。有限元分析结果与理论值的最大偏差为 14.3%。

使柔性铰链产生最大角位移的驱动力:

$$F = \frac{K \cdot \alpha}{m + n} = 1.48 \text{ N.} \quad (21)$$

5 实验和结果

5.1 快速反射镜实验原理及系统组成

快速反射镜采用的驱动器为 SMAC 的直线音圈电机 LCA-25-010,行程为 10 mm,峰值驱动力为 12 N;角度检测元件为自主研发的光栅测微仪,测量范围 $\pm 2.5 \text{ mm}$,测量分辨率优于 0.1”。通过基于 DSP 的电控系统驱动音圈电机进行推拉工作,用反馈元件光栅测微仪对框架转角进行数据采集,同时用自准直平行光管对镜面转角进行测量。平行光管量程及分辨率可调,最小分辨率可达 0.01”。快速反射镜系统和实验平台如图 11、12 所示。

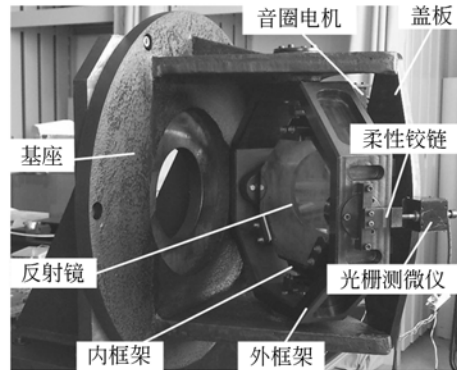


图 11 快速反射镜实验装配图
Fig. 11 Assemble of FSMs



图 12 快速反射镜测试平台
Fig. 12 Test platform of FSMs

5.2 实验结果

在室温条件下,分别对快速反射镜方位轴和俯仰轴的转角精度进行了测量^[14]。音圈电机推动方位轴在 $\pm 30'$ 内旋转,用光栅测微仪记录旋转角度,每隔 $20''$ 用自准直平行光管记录一次反射镜转角,由于平行光管量程限制,累计读数30次,测得角度误差如图13所示。

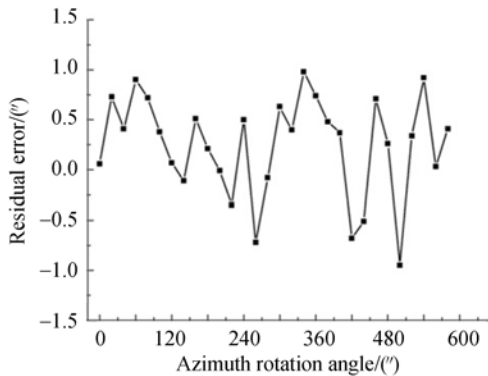


图13 方位轴角度偏移误差

Fig. 13 Angle residual errors of azimuth

将方位轴复位,旋转俯仰轴,用光栅测微仪记录旋转角度,每隔 $20''$ 用自准直平行光管记录一次反射镜转角,累计读数30次,测得角度误差如图14所示。

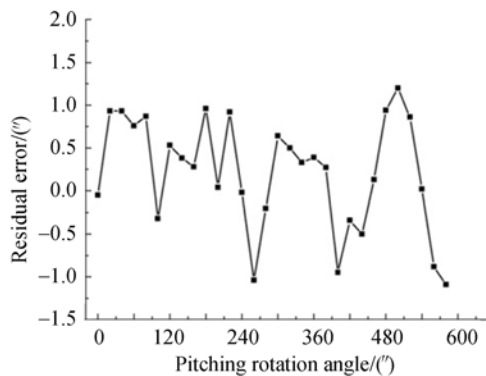


图14 俯仰轴角度偏移误差

Fig. 14 Angle residual errors of pitching

在快速反射镜满行程内的不同转角位置依次进行测量,对方位轴及俯仰轴分别重复进行20组

参考文献:

- [1] LONEY G C. Design of a high bandwidth steering mirror for space-based optical communications [J]. SPIE, 1991, 1543: 225-235.

实验。

由贝塞尔(Bessel)公式:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-1}}, \quad (22)$$

式中: δ_i 为测量误差。将实验得到的误差值代入式(22)进行处理,可得方位轴角度的标准偏差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{600} \delta_i^2}{600-1}} = \sqrt{\frac{194.62}{599}} = 0.57'', \quad (23)$$

俯仰角度的标准偏差:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{600} \delta_i^2}{600-1}} = \sqrt{\frac{345.98}{599}} = 0.76''. \quad (24)$$

方位轴及俯仰轴的实验结果均大于理论值及仿真结果,快速反射镜系统在加工制造的一些环节引入了其它误差。根据误差合成公式:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}, \quad (25)$$

得到快反镜对转角的控制精度可达 $0.95''$,满足激光发射系统中对光束发射方向进行实时控制的精度要求。

6 结 论

根据激光发射系统对快速反射镜发射方向高精度控制的需求,以有轴系为基本结构,提出了基于直线音圈电机驱动控制,柔性铰链为传动元件的一种新型快速反射镜的设计方法。解决了传统有轴系快速反射镜所需驱动力矩较大,控制精度不高的问题。理论计算、仿真分析及实验验证证实了该快速反射镜装置具有通光口径大、转角范围广、所需驱动力小、控制精度高、结构简单等优点,且所设计柔性铰链的结构形式易于加工。实验结果表明:该装置对光束控制的调整精度可达 $0.95''$ 以内,满足激光发射系统中对快速反射镜的精度要求。本文所提出的结构已应用于某大型激光发射系统中。

- [2] HIGGS J C. Overview of the ABL-firepond active-tracking and compensation facility [J]. SPUE, 1998, 3381: 14-18.
- [3] ULANDER K. Two-axis Beam Steering Mirror

- Control system for Precision Pointing and Tracking Applications* [D]. Master Degree Thesis: Lawrence Livermore National Laboratory, 2006.
- [4] 黑沫, 鲁亚飞, 张智勇, 等. 基于动力学模型的快速反射镜设计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(1): 53-61.
HEI M, LU Y F, ZHANG ZH Y, *et al.*. Design of fast steering mirror based on dynamic model[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1): 53-61. (in Chinese)
- [5] 鲁亚飞. 快速反射镜机械结构特性设计问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学. 2009.
LU Y F. *Research on Fast Steering Mirror system* [D]. Changsha: National University of Defense Technology. 2009 (in Chinese)
- [6] 徐飞飞, 纪明, 赵创社. 快速偏转反射镜研究现状及关键技术[J]. 应用光学, 2010, 31(5): 847-850.
XU F F, JI M, ZHAO CH SH. Status of Fast Steering Mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(5): 847-850. (in Chinese)
- [7] 王恒坤, 张国玉, 郭立红, 等. 高精度动载体激光发射系统光束控制反射镜[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 336-341.
WANG H K, ZHANG G Y, GUO L H, *et al.*. High performance fast-steering mirror for beam control of vehicular high energy laser system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 336-341. (in Chinese)
- [8] 刘万里, 王占奎, 曲兴华, 等. 激光跟踪测量系统跟踪转镜的误差分析[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 585-590.
LIU W L, WANG ZH K, QU X H, *et al.*. Error analysis of tracking mirror for laser tracker system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 585-590. (in Chinese)
- [9] 邵帅, 高云国, 郭劲, 等. 二维快速控制水冷反射镜装置设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 493-498.
SHAO SH, GAO Y G, GUO J, *et al.*. Design of two-dimensional fast-steering cooling mirror equipment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 493-498. (in Chinese)
- [10] 韩旭东, 徐新行, 王兵, 等. 快速反射镜系统用光栅测微仪[J]. 光电工程, 2011, 38(10): 115-119.
HAN X D, XU X H, WANG B, *et al.*. Grating sensor for linear distance used in fast-steering mirror [J]. *Opt-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 115-119. (in Chinese)
- [11] 杨春辉. 直梁形柔性铰链结构参数对其刚度性能影响的分析[J]. 机械传动, 2010, 34(9): 17-19.
YANG CH H. Analysis of the influence of straight beam flexible hinge structure parameter on the stiffness [J]. *Mechanical Transmission*, 2010, 34(9): 17-19. (in Chinese)
- [12] 刘庆玲, 翁海珊, 邱丽芳, 等. 新型单边直圆椭圆混合柔性铰链的柔度计算及其性能分析[J]. 工程力学, 2010, 27(10): 52-56.
LIU Q L, WENG H SH, QIU L F, *et al.*. Compliances calculation and behavior analysis of the half right circular-elliptical hybrid flexure hinge [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(10): 52-56. (in Chinese)
- [13] 谭进国, 何欣, 付亮亮. 小型反射镜中心支撑技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(6): 1070-1074.
TAN J G, HE X, FU L L. Support technique in centre of minitype reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering.*, 2010, 39(6): 1070-1074. (in Chinese)
- [14] 潘高峰, 张景旭, 陈娟. 一种共光路自动对准系统[J]. 中国激光, 2008, 35(10): 1500-1504.
PAN G F, ZHANG J X, CHEN J. Common path auto-alignment system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(10): 1500-1504. (in Chinese)

作者简介:



周子云(1987—), 女, 江苏沛县人, 博士研究生, 2009年于江苏大学获得学士学位, 主要从事光学精密机械机构设计方面的研究。E-mail: zhouziyunciomp@163.com

导师简介:



高云国(1955—), 男, 山东乳山人, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电仪器总体设计方面的研究。E-mail: gaoyunguo@163.com