

万向柔性铰链连接快速反射镜的设计与仿真

赵磊, 纪明, 王佳, 赵振海, 王虎

(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 在高能激光武器系统中, 快速反射镜作为光束指向控制的核心器件, 对提高毁伤效能起到关键作用。针对扩展高能激光武器系统光束指向范围的战术需求, 设计了一种万向柔性铰链连接快速反射镜系统。研究了各组成单元对快速反射镜系统性能的影响因素, 分析了单自由度单音圈电机驱动反射镜设计方案的可行性。在此基础上给出了音圈电机和光栅测微仪的设计依据, 进行参数设计, 推导了万向柔性铰链的柔度表达方程, 并验证了万向柔性铰链的弯曲强度。仿真结果表明, 快速反射镜系统具有 $\pm 3.3^\circ$ 的运动行程, 一阶谐振频率达到了 231.04 Hz, 满足了大行程、高带宽的设计要求。

关键词: 高能激光; 快速反射镜; 光束指向控制; 万向柔性铰链

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0218002

Design and simulation of fast steering mirrors connected by universal flexure hinges

Zhao Lei, Ji Ming, Wang Jia, Zhao Zhenhai, Wang Hu

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: In high energy laser weapon systems, as core devices of beam steering control, fast steering mirrors play a key role in improving damage efficiency. In order to enhance the optical direction range in high energy laser weapon system, a fast steering mirror connected by a universal flexure hinge was designed. The influence factor of each component unit in the fast steering mirror was studied, and the feasibility of a mirror driven by every single voice coil actuator in every single degree of freedom was analyzed. On this foundation, the design basis of the voice coil actuator and the optical grating micrometer was proposed, and the parameters were designed, the flexibility expression equation of the fast steering mirror connected by a universal flexure hinge was deduced, then the bending strength of the universal flexure hinge was verified. The results show that the movement stroke can reach to $\pm 3.3^\circ$ and the first resonance frequency can reach to 231.04 Hz in the fast steering mirror system, which satisfies the requirements of long stroke and high bandwidth.

Key words: high energy laser; fast steering mirror; beam steering control; universal flexure hinge

收稿日期: 2018-09-07; 修订日期: 2018-10-12

作者简介: 赵磊(1984-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事光电系统总体设计方面的研究。Email: chrisjoto@163.com

导师简介: 纪明(1958-), 男, 研究员, 硕士, 主要从事光电系统总体设计和瞄准线稳定技术设计等方面的研究。

Email: jiming205@163.com

0 引言

高能激光武器能够在短时间内以极高能量对目标进行毁伤打击,具有精度高、毁伤能力强、效费比高等特点,成为世界各军事强国的研究重点^[1]。在提升高能激光武器指向精度方面,快速反射镜(Fast Steering Mirror, FSM)系统展现出卓越的技术优势^[2]。这种全柔性快速反射镜,能够有效地补偿伺服外框架的残余误差,提高武器系统对目标的精确跟瞄能力^[3]。然而高能激光武器系统负载通常较重,外框架伺服控制系统隔离平台扰动后的剩余残差较大,因此面对具有高速摆脱、大机动突防等能力的威胁目标时,需要快速反射镜具有更大的运动范围以及更高的机械带宽,以保证武器系统的光束指向精度,满足武器系统目标精确打击大角度高速调转的技术需求^[4]。

国内相关高校、研究所均涉足快速反射镜研究,其中多家单位已经完成样机研制与性能验证^[5]。中国科学院长春光学精密机械与物理研究所周子云等人设计的快速反射镜系统^[6],外框架轴系的轴承座固定在基座上,镶嵌着反射镜的内框架轴系安装在外框架上。其优点在于反射镜内外框架基本无耦合,因此可以分别对其进行控制,该快速反射镜的运动行程约为 $\pm 0.5^\circ$ 。华中科技大学吴鑫设计的快速反射镜系统^[7],主要由主反射镜系统、音圈电机(Voice Coil Actuator, VCA)、主壳、反射角探测系统、底壳组成。此方案的优点在于四个音圈电机对称分布,驱动结构均匀稳定,同时反射镜无框架,减少了结构的体积与重量,该快速反射镜的运动行程约为 $\pm 1^\circ$ 。国防科技大学鲁亚飞设计的两轴快速反射镜系统^[8],该系统充分考虑了结构的几何对称性和质量对称性,采用无框架反射镜结构设计。系统的优点在于音圈电机直接驱动反射镜运动,提高了驱动效能,同时使用柔性支承作为反射镜与基座的连接部件,解决了反射镜偏转带来的弯曲形变问题,该快速反射镜的运动行程约为 $\pm 0.1^\circ$ 。以上快速反射镜系统设计均将重点放在了指向精度研究上,在运动行程方面并未表现出明显的优势。

文中基于以上研究与对比分析,开展了万向柔性铰链连接快速反射镜系统的研究工作。设计特点

是基座与反射镜中心采用万向柔性铰链连接,反射镜回转中心集中,工作方向柔度较大,因此能够为快速反射镜提供更大的运动范围。文章首先提出了万向柔性铰链连接的快速反射镜设计方案,其次探索了单自由度单音圈电机驱动快速反射镜的可行性,接着分析了驱动单元以及位置反馈单元的设计思路,推算了万向柔性铰链所受外力与角位移之间的函数关系式,并对万向柔性铰链的设计强度进行了验证。最后通过有限元分析的方式对快速反射镜系统的受力运动状态进行仿真分析,获得满足设计指标要求的大运动行程、高机械带宽的快速反射镜系统。

1 快速反射镜设计过程

1.1 结构设计及工作原理

快速反射镜系统放置于高能激光光束发射光源与接收端之间,对激光光路起到精级调整的作用,能够有效地修正光轴光路^[9]。万向柔性铰链连接快速反射镜系统结构形式如图1所示,每一个自由度采用一个音圈电机作为驱动单元,另一端采用光栅测微仪作为位置反馈单元,音圈电机、光栅测微仪通过单轴柔性铰链与反射镜连接,反射镜中心与支撑盖板通过万向柔性铰链连接,实现反射镜在两个自由度的精确旋转运动。

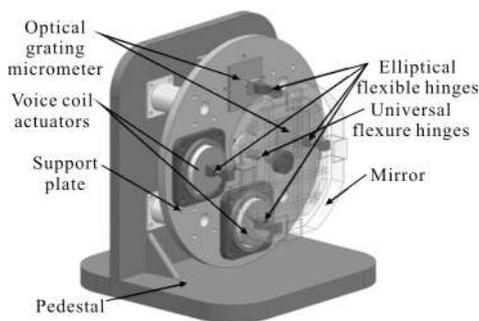


图1 快速反射镜系统组成图

Fig.1 Structure of a FSM system

1.2 驱动单元与位置反馈单元排布方式分析

对于两轴快速反射镜而言,目前世界范围内主流的驱动形式为双自由度四音圈电机对称驱动^[10-11]。这样的设计能够带来平衡的受力环境以及成倍的驱动能力,但双音圈电机在结构上是超自由度的,这对于快速反射镜的加工、装配精度提出了很高的要求,双音圈电机伺服同步控制也极难实现^[12]。同时,由于体

积受限,位置反馈单元无法与驱动单元同轴安装,这使得系统稳定精度受到一定程度的影响^[13]。

文中提出一种双自由度双音圈电机驱动的快速反射镜系统,驱动单元与位置反馈单元等尺寸对称分布在每一个自由度上。该设计一方面能够减少驱动单元数量,以最小的驱动力推动反射镜高速运动;另一方面位置反馈单元与驱动单元等尺寸对称分布,能够将位置信息精确地反馈给驱动单元,无需进行任何比例变换。驱动单元与位置反馈单元分布如图 2 所示。

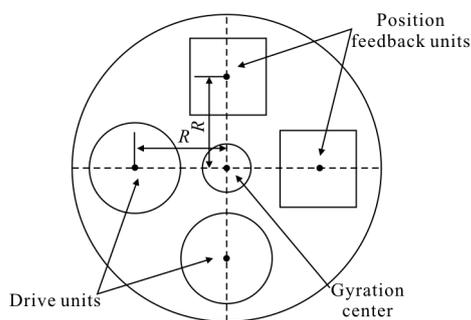


图 2 驱动单元分布示意图

Fig.2 Distribution schematic diagram of driving units

1.3 音圈电机参数设计

音圈电机是一种特殊形式的直线驱动电机,具有体积小、高加速、高速、响应快以及结构简单等特点^[14]。其工作原理是:通电线圈在磁场中受安培力而产生往复运动,力的大小与外加驱动电压成比例。在文中设计中,音圈电机作为快速反射镜唯一的驱动单元,能够在几十伏的驱动电压下,满足几百赫兹宽带的快速反射镜系统。文中设计的音圈电机指标参数如表 1 所示。

表 1 音圈电机指标参数设计结果

Tab.1 Design results of the parameters of a VCA

Parameter	Characteristic
Mass/kg	≤ 0.5
Volume/mm	$\Phi 40 \times 40$
Stoke/mm	≥ 3
Accuracy/ μm	≤ 5
Acceleration/g	≥ 10
Continuous thrust/ $\text{N} \cdot \text{A}^{-1}$	20
Settling time/ms	≤ 10

1.4 光栅测微仪参数设计

光栅测微仪是一种接触式线位移测量元件,是以精密光栅为测量基准的数字化测距装置。其工作原理是:单准直光源发出准直光,经光栅副调制后形成光学莫尔条纹,由光电探测元件接收后输出光电流,并经过数字电路处理,获取最终的位移测量信息^[15]。在文中设计中,光栅测微仪作为位置反馈单元,在响应速度与测量精度指标上均能满足快速反射镜系统要求。文中设计的光栅测微仪参数如表 2 所示。

表 2 光栅测微仪指标参数设计结果

Tab.2 Design results of the parameters of a optical grating micrometer

Parameter	Characteristic
Volume/mm	$20 \times 30 \times 40$
Stoke/mm	≥ 3
Accuracy/ μm	≤ 5
Resolution/ μm	≤ 0.3
Response frequency/Hz	≥ 50

2 万向柔性铰链设计分析

2.1 结构设计

万向柔性铰链与基座连接端为固定端,在快速反射镜系统工作过程中不作任何运动,也不发生轴向形变,起到连接基座与铰链固定端,稳定系统回转中心的作用。铰链与反射镜连接端为运动端,在快速反射镜系统工作过程中随反射镜运动,起到限定反射镜零位,分配各自由度运动的作用。由于万向柔性铰链在其运动端截面为椭圆状,这决定了铰链在 z 轴任意方向上的单位弯曲量都是相同的。其剖面及其弯曲形变示意图如图 3 所示,当反射镜在外力作用下绕任一自由度偏转一个角度 α 时,万向柔性铰链的固定端保持相对静止,而运动端随反射镜一起旋转,旋转角度为 α 。在这个过程中,铰链的柔性单元由于运动端与固定端之间的相对位移而产生弯曲形变,这个弯曲形变为反射镜在其偏转角度范围内提供任意方向的运动支持。当外力去除后,铰链的柔性单元在回复力的作用下恢复原始状态。

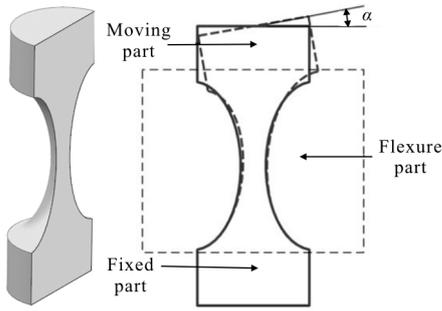


图 3 万向柔性铰链剖面及弯曲形变示意图

Fig.3 Sectional view and flexural strain schematic diagram of the universal flexure hinge

2.2 柔度计算

对于万向柔性铰链而言,需要一定的刚度,保证在非工作方向上尽量不发生形变;同时需要一定的柔度,使其在工作方向上发生微小形变,支持反射镜在多个方向的旋转^[16]。柔度是刚度的逆,刚度的损失会带来柔度的增加,因此铰链设计应具有适当的刚度和柔度^[17]。柔度的定义为单位载荷作用下机械结构中产生的变形,可表示为:

$$c_{M_z} = \frac{\alpha_z}{M_z} \quad (1)$$

如图 4 所示,对万向柔性铰链进行受力分析,在 x, y, z 方向上分别受到三个作用力 F_x, F_y, F_z , 以及三个弯矩 M_x, M_y, M_z 的作用。坐标原点为 O' , 椭圆长半轴为 a , 切口距中心距离为 a_r , 短半轴为 b , 椭圆最小切割直径为 t , 端面直径为 D 。设其弯曲回转中心为 O'' , 在离心角 θ 处取微元 $d\theta$, 可以得出椭圆截面直径:

$$h(\theta) = 2b - 2b\cos\theta + t \quad (2)$$

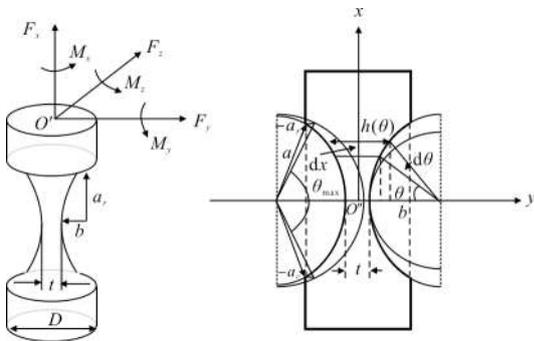


图 4 万向柔性铰链受力分析示意图

Fig.4 Force analysis schematic diagram of the universal flexure hinge

将椭圆短半轴 b 与最小切割直径 t 的比值设为

$s, s = b/t$, 并设:

$$s(\theta) = \frac{h(\theta)}{t} = 2s - 2s\cos\theta + 1 \quad (3)$$

$$h(\theta) = t \times s(\theta) \quad (4)$$

X 向距离可表示为 $x = a\sin\theta$, 对其微分, 可得:

$$dx = a\cos\theta d\theta \quad (5)$$

其中, θ 取值范围是 $[-\theta_{\max/2}, \theta_{\max/2}]$ 。

对万向柔性铰链工作状态进行分析, 当铰链随反射镜旋转而发生弯曲时, 绕 z 轴弯曲特性关系到快速反射镜系统最大工作范围、系统带宽、精度指标, 其柔度与刚度特性极为重要^[18]。在横向弯曲时, 剪力 F_s 对变形的影响很小, 可以忽略不计, 以下推算铰链在力矩 M_z 作用下, 沿 z 轴弯曲角形变量公式。

万向柔性铰链弯曲时中性面 x 向微小距离 dx 的曲率半径为:

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{M_z}{EI_z(x)} \quad (6)$$

式中: E 为材料的弹性模量; $I_z(x)$ 为 dx 截面的惯性矩, 由于截面 dx 为圆形, 因此 $I_z(x)$ 表达式为:

$$I_z(x) = \frac{\pi h(x)^4}{64} \quad (7)$$

对于椭圆上任一点 (x, y) , 曲率表示为:

$$\frac{1}{\rho(x)} = \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

对于铰链微小形变处, 挠曲线比较平滑, 上式分母可化简为 1。因此:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M_z}{EI_z(x)} \quad (9)$$

因此转角 α_z 的表达式为:

$$\alpha_z = \frac{dy}{dx} = \int \frac{d^2 y}{dx^2} dx + C = \int \frac{M_z}{EI_z(x)} dx + C = \int \frac{64M_z}{E\pi[h(\theta)]^4} dx + C \quad (10)$$

式中: 常数 C 与椭圆切口位置有关, 如图 4 所示, 两端切口 $-a_r, a_r$ 在积分区间 $[-\theta_{\max/2}, \theta_{\max/2}]$ 相对 y 轴对称, 因此 $C=0$ 。化简 α_z 表达式:

$$\alpha_z = \int_{-\frac{\theta_{\max}}{2}}^{\frac{\theta_{\max}}{2}} \frac{64M_z a \cos\theta}{E\pi[h(\theta)]^4} d\theta = \frac{M_z \times 64 a}{\pi E t^4} \int_{-\frac{\theta_{\max}}{2}}^{\frac{\theta_{\max}}{2}} \frac{\cos\theta}{[s(\theta)]^4} d\theta \quad (11)$$

因此,万向柔性铰链柔度可表示为:

$$c_{M_z}^{\theta_z} = \frac{\alpha_z}{M_z} = \frac{64\alpha}{\pi Et^4} \int_{-\frac{\theta_{\max}}{2}}^{\frac{\theta_{\max}}{2}} \frac{\cos\theta}{[s(\theta)]^4} d\theta \quad (12)$$

同理,力 F_y 也会引起铰链绕 z 轴弯曲变形,弯矩函数为:

$$M_z^{F_y} = (\alpha_r - \alpha \sin\theta) F_y \quad (13)$$

公式(12)表示当外加力矩为 M_z 时,万向柔性铰链的受力弯曲角度 α_z ,此时的 α_z 同时代表了反射镜绕轴旋转角度。这为探索驱动力与快速反射镜角位移之间的关系打下理论基础。

2.3 弯曲正应力计算

万向柔性铰链为快速反射镜提供稳定的回转中心,需保证受力发生弯曲变形后,能够恢复到初始状态。也就是说,在其最小切割直径 t 截面处发生弯曲时的最大正应力应小于其材料的许用弯曲正应力。

截面上的最大正应力 σ_{\max} 可表示为:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} y_{\max}}{I_z} \quad (14)$$

式中: M_{\max} 为音圈电机推力在万向柔性铰链上产生的最大弯矩; y_{\max} 为最大弯矩与中性轴的距离; I_z 为 z 轴抗弯惯性矩。

M_{\max} 发生在最小切割直径 t 处,由图 4 可知,此时 $\theta=0$ 。 F_z 为音圈电机的持续推力,根据公式(13),可表示为:

$$M_{\max} = a_r F_z \quad (15)$$

最小切割截面是直径为 t 的圆形, $y_{\max}=t/2$ 。 I_z 可表示为:

$$I_z = \frac{\pi t^4}{64} \quad (16)$$

将公式(14)代入公式(15)、(16)可表示为:

$$\sigma_{\max} = \frac{32a_r F_z}{\pi t^3} \quad (17)$$

根据设计结果, $a_r=9.5$ mm, $t=2.1$ mm, $F_z=10$ N,求解 $\sigma_{\max}=156.31$ MPa。

该设计中万向柔性铰链材料为钛合金,其许用弯曲正应力为 $[\sigma]=550$ MPa,与 σ_{\max} 比较,可以得出 $\sigma_{\max}<[\sigma]$ 。

因此,万向柔性铰链在快速反射镜系统工作过程中,最大弯曲正应力小于材料的许用正应力,结构

强度满足设计要求。

3 有限元仿真分析

通过以上对快速反射镜系统各组成单元工作方式的分析,文中基于以下系统需求进行设计:通光口径 ≥ 100 mm,运动行程 $\geq \pm 2^\circ$,机械带宽 ≥ 200 Hz。下面进行有限元仿真验证。

该设计过程中的一个关键问题在于柔性支撑是否具备足够的抗弯曲能力。万向柔性铰链既能承受反射镜偏转时的弯曲变形,不发生断裂现象;又能够在反射镜回到零位时,恢复原有形状。

3.1 静力学分析

对于单自由度,将 F_z 作用于单轴柔性铰链底端,万向柔性铰链底端固定,对反射镜及柔性支撑进行有限元分析,其系统位移仿真结果如图 5 所示。

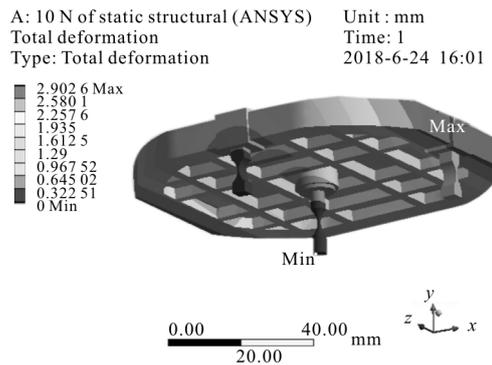


图 5 $F_y=10$ N 状态下位移仿真结果

Fig.5 Simulation results of displacement in $F_y=10$ N state

由图5可以看出,反射镜在驱动力作用下绕回转中心发生扭转运动,最大位移为 $d_{\max}=2.9$ mm,反射镜偏转角度为:

$$\theta_1 = \arcsin \frac{2.9}{50} = 3.3^\circ \quad (18)$$

反射镜运动行程为 $\pm 3.3^\circ$,大于 $\pm 2^\circ$ 的设计指标,因此满足设计要求。而万向柔性铰链中心最大偏移为 $D_{\max}=0.014$ mm $\ll d_{\max}$,可以认为反射镜绕万向柔性铰链回转中心做有限行程往复旋转运动。

单独对万向柔性铰链应力进行分析,其应力云图如图 6 所示。对其结果进行分析,万向柔性铰链最大弯曲应力在对称中心的最小截面上,其大小为 $\sigma_{1\max}=152.12$ MPa,与理论计算结果的相对误差为 2.69%,验证了分析结果的准确性。

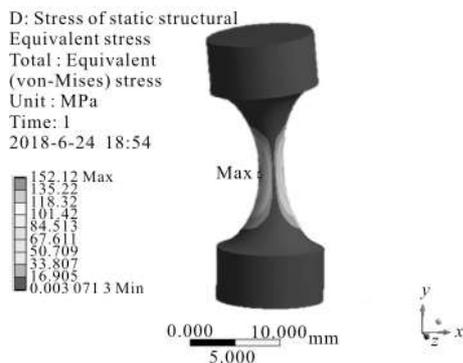


图 6 万向柔性铰链应力云图

Fig.6 Stress plot of the universal flexure hinge

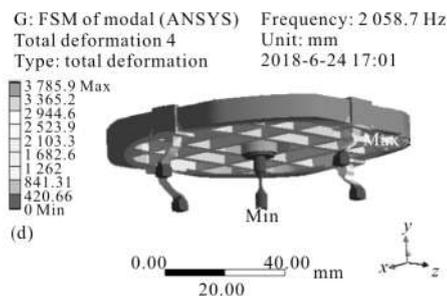


图 7 模态仿真结果

Fig.7 Simulation results of modals

表 3 快速反射镜各阶模态频率及模态振型

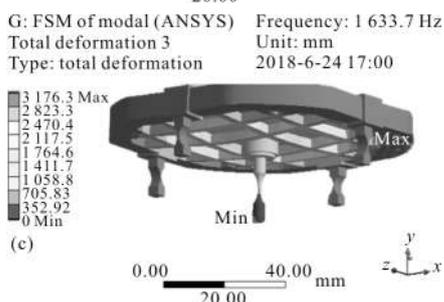
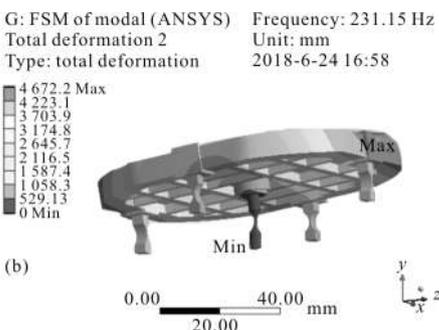
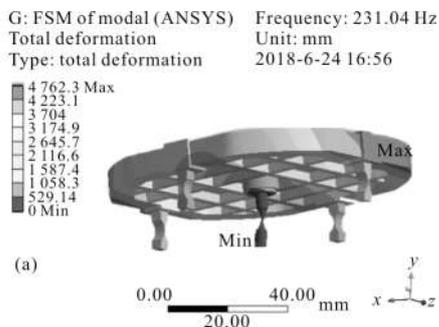
Tab.3 Modal frequencies and modal shapes of the FSM

Modal order	Modal frequency/Hz	Modal shape
1	231.04	x direction
2	231.15	z direction
3	1 633.70	y direction
4	2 058.70	Rotate around y

3.2 模态分析

对快速反射镜系统进行模态分析, 前四阶模态频率及模态振型如图 7 所示。

模态仿真结果如表 3 所示, 可以看出, 快速反射镜系统的一、二阶模态频率分别为 231.04 Hz 和 231.15 Hz, 均大于 200 Hz 的设计指标, 因此满足设计要求。



4 结论

文中针对扩展高能激光光束指向范围需求, 提出了一种万向柔性铰链连接的快速反射镜系统。对其结构形式进行了分析与设计, 探讨了驱动单元与位置反馈单元的分布形式, 通过理论研究、公式推导以及仿真分析方式验证了该快速反射镜系统的可行性, 并对万向柔性铰链的结构强度进行了验证。最终得出以下结论: 该快速反射镜系统具有结构形式简单、回转中心稳定、运动行程大、机械带宽高等特点, 能够有效增加高能激光光束指向范围。

参考文献:

[1] Wang Pei, Li Yanjun, Tian Jin. Simulation system and analysis of airborne laser weapon [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(7): 1238-1242. (in Chinese)

[2] Du Yanlu, Ding Yalin, Xu Yongsan, et al. Analysis of LOS pointing and rate compensation for two-axis FSM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46 (9): 0918001. (in Chinese)

[3] Liu Wei, Yao Kainan, Huang Danian, et al. Performance evaluation of coherent free space optical communications with a double-stage fast-steering-mirror adaptive

- optics system depending on the Greenwood frequency [J]. *Optical Society of America*, 2016, 24(12): 13288–13302.
- [4] Ji Ming. Simulation and error analysis of mirror stabilized system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2000, 21(5): 19–22. (in Chinese)
- [5] Yang Jianli, Qi Yuan, Yang Xiaoqiang, et al. Flexible support structure design of lightweight thin reflector [J]. *Journal of Applied Optics*, 2017, 38(5): 815–819. (in Chinese)
- [6] Zhou Ziyun, Gao Yunguo, Shao Shuai, et al. Design of fast steering mirror using flexible hinge [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 22(6): 1548–1554. (in Chinese)
- [7] Wu Xin. Research on high-performance fast steering mirror [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- [8] Lu Yafei, Fan Dapeng, Fan Shixun, et al. Design of two axis elastic support for fast steering mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(12): 2574–2582. (in Chinese)
- [9] Jean-Francois Daigle, Dominik Pudo, Francis Theberge, et al. Laser safety evaluation for high-energy laser interaction with solids [J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(2): 1–7.
- [10] Fang Chu. Design and research on fast steering mirror system used in beam steering control devices [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences In Partial Fulfillment of the Requirement, 2017. (in Chinese)
- [11] Sun Chongshang. Research on the scanning image motion compensation technology based on fast steering mirrors with high precision and wide frequency range [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences in Partial Fulfillment of the Requirement, 2016. (in Chinese)
- [12] Xu Xinhang, Yang Hongbo, Wang Bing, et al. Research on key technology of fast-steering mirror [J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(10): 1095–1103. (in Chinese)
- [13] Li Quanchao, Li Lei, Tan Songnian, et al. Design and analysis for large aperture primary aluminum mirror[J]. *Journal of Applied Optics*, 2016, 37(3): 337–341. (in Chinese)
- [14] Long Yongjun, Wei Xiaohui, Wang Chunlei, et al. Modeling and design of a normal stress electromagnetic actuator with linear characteristics for fast steering mirror[J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 054102.
- [15] Han Xudong, Xu Xinhang, Wang Bing, et al. Grating Sensor for linear distance used in fast-steering mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(10): 115–119. (in Chinese)
- [16] Nie Pin. Study on elliptical arc flexure hinge and its application in Micro Electro-Mechanical System [D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (in Chinese)
- [17] Adil Han Orta, Evren Samer, Cetin Yilmaz. Topologically optimized flexure hinge based XY stage [J]. *Smart Sensors, Actuators, and MEMS VIII*, 2017, 10246: 1024607.
- [18] Tan Jinguo, He Xin, Fu Liangliang. Support technique in centre of minitype reflector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1070–1074. (in Chinese)