

单轴半蝶形柔性铰链在快速反射镜中的设计与应用

赵磊 柳秋兴 胡博 王虎 梁亮 卢恒

Design and application of bi-axial half-butterfly flexure hinges in fast steering mirrors

Zhao Lei, Liu Qiuxing, Hu Bo, Wang Hu, Liang Liang, Lu Heng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210118>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

万向柔性铰链连接快速反射镜的设计与仿真

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

红外与激光工程. 2019, 48(2): 218002–0218002(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0218002>

快速反射镜椭圆弧柔性铰链多目标优化设计

Multi-objective optimal design of elliptic flexible hinge in fast steering mirror

红外与激光工程. 2021, 50(4): 20200286–1–20200286–9 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200286>

两轴柔性支承快速反射镜结构控制一体化设计

Integrative design of structure control for two-axis fast steering mirror with flexible support

红外与激光工程. 2020, 49(7): 20190479–1–20190479–8 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190479>

空间相机快速反射镜的两轴柔性支撑结构设计

Design of two-axis flexible support structure for fast steering mirror in space cameras

红外与激光工程. 2019, 48(12): 1214005–1214005(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1214005>

柔性支撑快速反射镜伺服机构的参数辨识

Servo mechanism parameter identification of fast steering mirror based on flexible supports

红外与激光工程. 2021, 50(5): 20200303–1–20200303–11 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200303>

星载红外探测器快速反射镜控制系统设计

Design of control system for fast steering mirror of infrared detector based on satellite

红外与激光工程. 2017, 46(9): 904005–0904005(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0904005>

单轴半蝶形柔性铰链在快速反射镜中的设计与应用

赵磊, 柳秋兴, 胡博, 王虎, 梁亮, 卢恒

(西安应用光学研究所, 陕西西安 710065)

摘要: 针对提高激光武器系统光束指向控制稳定精度的战术需求, 设计了一款适用于光束指向快速反射镜的单轴半蝶形柔性铰链。首先, 根据快速反射镜系统运动形式及功能需求, 推演单轴半蝶形柔性铰链的物理模型; 然后, 采用基于卡氏第二定理的卡氏法简化并求解数学模型, 并优化模型参数; 最后进行有限元仿真与实验测试, 并对单轴半蝶形柔性铰链机械谐振频率的理论计算、仿真分析以及实验测试结果进行分析比较。实验结果表明: 单轴半蝶形柔性铰链工作方向机械谐振频率为 165.29 Hz, 满足设计指标要求。理论计算与实验测试结果相差 1.3%, 有限元仿真与实验测试结果相差 3.2%。从而证明了单轴半蝶形柔性铰链结构形式合理, 数学建模准确, 为提高激光武器系统光束指向控制稳定精度提供了有力的支撑。

关键词: 激光武器; 单轴半蝶形柔性铰链; 卡氏第二定理; 快速反射镜; 光束指向控制

中图分类号: TP273; TH703 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210118

Design and application of bi-axial half-butterfly flexure hinges in fast steering mirrors

Zhao Lei, Liu Qiuxing, Hu Bo, Wang Hu, Liang Liang, Lu Heng

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

Abstract: A bi-axial half-butterfly flexure hinge for an fast steering mirror (FSM) was presented to adapt high stability accuracy of beam-pointing control performance in laser weapon systems. According to the requirements of reciprocating movements and high bandwidth provided for the FSM, the solid model of the bi-axial half-butterfly flexure hinge was designed. By applying Castigliano's displacement theorem, the numerical model was simplified and deduced. Furthermore, to quantify the numerical model, natural frequencies of the finite-element analysis and experiments were carried out, of which the results were compared with the analytic solutions. The experiment results show that the in-plane natural frequency is 165.29 Hz. The comparison shows that the error between numerical analytic and experimentation is 1.3%, and the error between FEA and experimentation is 3.2%. It is proven that the bi-axial half-butterfly flexure hinge is an appropriate structure as a guide mechanism for an FSM system.

Key words: laser weapon; bi-axial half-butterfly flexure hinge; Castigliano's displacement theorem; fast steering mirror; beam steering control

收稿日期: 2021-02-22; 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 国防预研基金

作者简介: 赵磊, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事精密机械设计及光电系统总体技术方面的研究。

0 引言

快速反射镜 (Fast Steering Mirror, FSM) 作为光束指向精密控制核心器件, 以其结构紧凑、稳定精度高^[1]、控制带宽高^[2]、响应速度快等特点, 广泛应用于光学系统的粗精复合轴稳定跟踪、光束指向控制^[3]、空间光通信以及高清成像校正等领域^[4]。尤其在激光武器系统中, 快速反射镜能够有效地提高光束指向控制的稳定精度^[5-6]。

常见的快速反射镜系统主要由反射镜单元、柔性支承单元、驱动单元、位置反馈单元、以及刚性支承单元等五个部分组成。其中, 柔性支承单元能够将反射镜的直线运动转化为绕其回转中心的旋转运动, 进而高频调整反射镜姿态, 对激光光束指向进行高精度稳定控制, 是快速反射镜系统的关键器件。在柔性支承方式的选择上, 主流快速反射镜无一例外的选择了柔性铰链作为柔性支承单元。这是由于刚性支承具有非线性摩擦、机械磨损以及弹性空回等缺点, 一方面很难达到较高的位置精度; 另一方面增加了系统伺服控制的难度。相较而言, 从物理特性方面分析, 柔性铰链具有无磨损、无机械摩擦、无装配误差、加工简单、运动精度高等特点, 能够保证在其弹性范围内线性工作, 并且可以通过工艺加工保证其长久的使用寿命, 因此能够广泛地应用于精密光机系统中^[7-8]。

国际上众多研究机构进行了相关技术探索, 研制出多款高性能柔性铰链^[9-10]。其中, 单轴蝶形柔性铰链利用分布柔度实现铰链的集中形变, 由于其结构紧凑、弹性形变量大以及寄生中心漂移小等特点, 具有极高的物理参考价值与性能提升潜力, 然而在理论分析与工程实践应用过程中仍然面临着几个亟待解决的问题: (1) 单轴蝶形柔性铰链回转中心不与反射镜回转中心重合, 会导致出射光路发生平移, 进而影响快速反射镜的指向精度^[11]; (2) 对柔性铰链运动过程中复合挠度以及复合转动惯量的求解, 过多依赖于铰链自身结构形式。然而经典力学建模方法在求解串、并联组合铰链过程中显得冗余繁杂, 因此需要寻求一种更为准确、有效的建模方法; (3) 柔性铰链从其功能需求分析, 在工作方向上应具有一定的柔性, 保证反射镜的高频往复运动; 在其非工作方向上应具有较高的刚度, 进而提高快速反射镜的光轴稳定性。因此,

需要通过结构优化与材料匹配等方式获得高质量柔性传递的能力。

基于以上分析结果及面临的问题, 文中提出一种适用于快速反射镜系统的单轴半蝶形柔性铰链。该铰链采用集中式设计理念, 回转中心与反射镜回转中心一致。其结构形式在平面自由度上对称并联分布, 以其紧凑的物理构成以及高效的弹性回复能力为快速反射镜在单自由度上的高速往复运动提供可靠支承。接着采用基于卡氏第二定理的卡氏法求解柔性铰链的数学模型, 并优化模型, 最后进行仿真分析及实验测试。

1 物理模型推演

1.1 自由度分析

文中所设计的柔性铰链适用于激光武器系统中的快速反射镜, 能够对折转光路中激光光束进行高频稳定的指向控制。如图 1 所示, 激光光源出射光束经过两个垂直分布的单轴快速反射镜折转, 再通过会聚物镜, 最终精确落靶目标。其中, 两个单轴快速反射镜能够分别为光学系统提供向 X、Y 向两个自由度的光路控制, 依靠其自身高精度、高分辨率特性实现激光武器系统的微弧级精确目标毁伤能力。

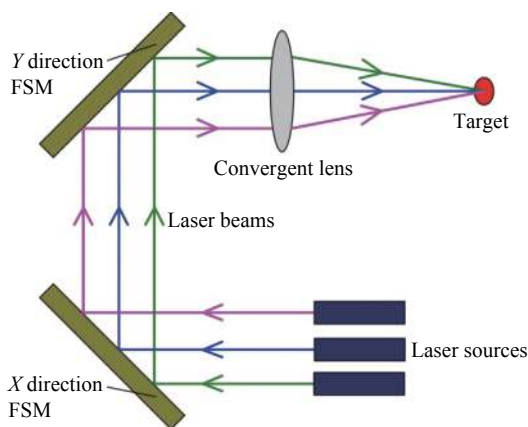


图 1 快速反射镜对激光光束的指向控制

Fig.1 Beam pointing control by FSMs

基于以上需求分析, 每一个单轴快速反射镜需要一个单轴柔性铰链, 通过其自身的弯曲形变将驱动载荷传递至反射镜体, 为反射镜的高频往复运动提供柔性支承。从功能特性上讲, 单轴蝶形柔性铰链在其弹性形变范围内线性运动, 工作方向柔性高, 非工作方

向刚度大,能够满足快速反射镜的使用需求^[12]。

1.2 蝶形柔性铰链

单轴蝶形柔性铰链使用多簧片构型,其形变是由一个或多个簧片共同完成,利用分布柔度来实现集中形变。图 2 所示为一款单轴蝶形柔性铰链,与传统的缺口形柔性铰链相比,蝶形柔性铰链拥有较大的变形范围。在其柔性环节设计过程中,通过折叠柔性支撑杆的方式增加柔性单元的长度,同时减少柔性部分的厚度,进而得到结构稳定性高、抗疲劳性强的铰链形式^[13]。

然而这种单轴蝶形柔性铰链应用于快速反射镜系统中存在一个弊端,那就是铰链的回转中心与快速反射镜的回转中心不一致。如图 3 所示,单轴蝶形柔性铰链在外部载荷作用下发生弯曲形变,带动反射镜

绕铰链回转中心旋转运动。单轴蝶形柔性铰链由于其对称分布的结构形式,能够保证其回转中心稳定可靠^[14]。然而反射镜回转中心将随着蝶形柔性铰链的运动端发生偏移,这样的运动状态势必会导致出射光路发生平移,进而影响快速反射镜的指向精度。

1.3 半蝶形柔性铰链

为了保证柔性铰链回转中心与反射镜回转中心保持一致,文中提出将单轴蝶形柔性铰链进行拆分设计,获得一种单轴半蝶形柔性铰链,如图 4 所示。该铰链底部与基座可靠固定,顶部与反射镜刚性连接。结构形式上只保留单轴蝶形柔性铰链的下半部分,使得铰链回转中心与反射镜回转中心重合。这样既能够保证柔性铰链具有较高的柔度,又能够保证其稳定的运动精度^[15]。

由单轴半蝶形柔性铰链作为柔性支承的单轴快速反射镜装配如图 5 所示。可以看出,反射镜与刚性基座之间依靠单轴半蝶形柔性铰链可靠连接,四个驱动音圈电机呈“十字”分布,为反射镜提供工作方向的



图 2 一款蝶形柔性铰链

Fig.2 A butterfly flexure hinge

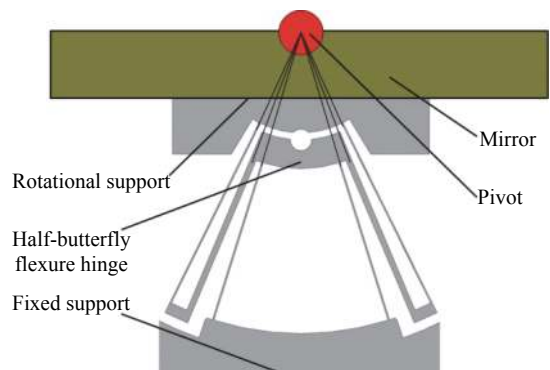


图 4 回转中心设计

Fig.4 Pivot structure design

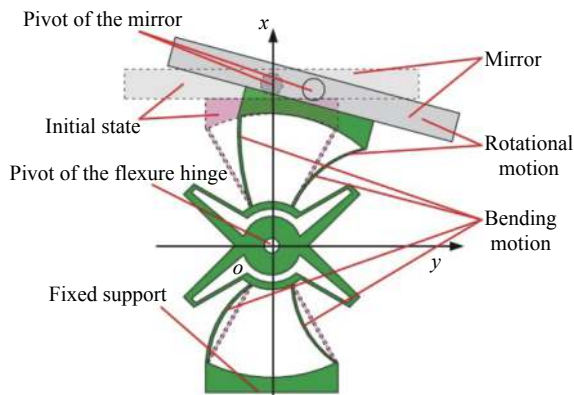


图 3 光路指向精度影响分析

Fig.3 Beam pointing accuracy effect analysis

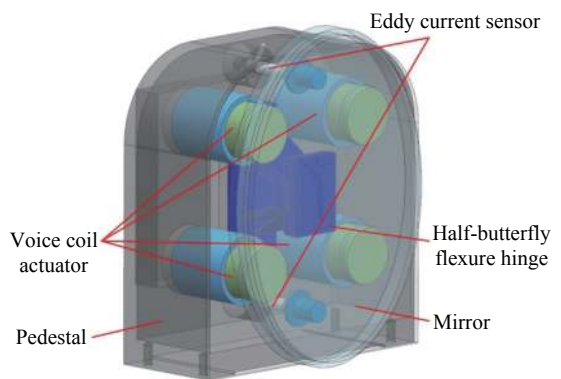


图 5 快速反射镜系统组成图

Fig.5 Structure of an FSM system

高效往复运动能力,两个电涡流传感器位于工作方向轴线上,为快速反射镜提供角度位置反馈数据。在激光武器系统中,两个单轴快速反射镜空间垂直放置,不仅能够完成激光光束的 180°折转,有效节省系统横向空间布局,而且能够组合实现两自由度光束偏移,进而提高激光光束的指向控制精度。

2 卡氏法求解数学模型

2.1 卡氏法在柔性铰链建模中的应用

将单轴半蝶形柔性铰链物理特性纳入快速反射镜系统指标体系中,主要包括四个方面:(1)柔性铰链产生预期旋转角度的能力;(2)对寄生载荷的敏感能力;(3)运动精度;(4)疲劳条件下的应力水平^[16]。这些指标均与柔性铰链的柔度有关,因此推导柔度数学模型成为了柔性铰链设计分析的重点问题。

文中采用基于卡氏第二定理的卡氏法对单轴半蝶形柔性铰链的柔度数学模型进行求解。意大利工程师 Alberto Castigliano 在 1879 年最早总结得出:当一主体被任何载荷作用而产生弹性变形时,在加载方向上产生的形变量等于应变能对载荷的偏导数,称作卡氏第二定理,采用卡氏第二定理对柔性机构建模分析的方法称为卡氏法^[17]。

文中设计的单轴半蝶形柔性铰链中,每一个单独的柔性单元均为矩形截面。对于每一个矩形截面柔性铰链,其一端固定在基座上,另一端在受到外界载荷作用下发生形变,完成位置、能量传递过程。该柔性铰链的受力简化示意图如图 6 所示。

图中, O 点为铰链受力端面,共有六个自由度受力载荷,分别是两个弯矩 M_y 、 M_z ;两个剪切应力 F_y 、 F_z ;

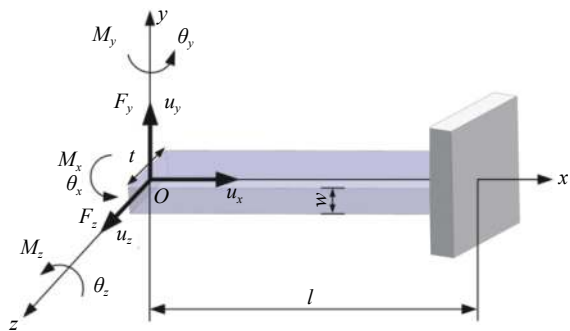


图 6 万向柔性铰链剖面及弯曲形变示意图

Fig.6 Sectional view and flexural strain schematic diagram of the universal flexure hinge

F_z ;一个轴向应力 F_x 和一个扭转力矩 M_x 。相应的产生六个自由度的运动:三个线性位移 u_x 、 u_y 、 u_z 及三个角度旋转 θ_x 、 θ_y 、 θ_z 。

对于矩形截面柔性铰链而言,只有工作方向上的三个载荷 M_z 、 F_y 、 F_x 对柔性铰链的运动产生影响,为柔性铰链提供有效形变驱动,在这里称为高效载荷。而非工作方向上的三个载荷 M_y 、 F_z 、 M_x 对柔性铰链影响甚微,在这里称为低效载荷。低效载荷主要产生于缺陷性设计、额外载荷影响以及加工装调水平。高效载荷驱动柔性铰链产生的柔度称为高效柔度,同理,低效载荷驱动柔性铰链产生的柔度称为低效柔度。因此,在设计过程中应尽量增加高效柔度,降低低效柔度。根据卡氏第二定理,矩形截面柔性铰链的载荷-形变量关系可表示为:

$$\begin{Bmatrix} \{u^{he}\} \\ \{u^{le}\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [C^{he}] & 0 \\ 0 & [C^{le}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{L^{he}\} \\ \{L^{le}\} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中,柔性铰链柔度 C 可以分为高效(表示为 he)柔度 C^{he} 和低效(表示为 le)柔度 C^{le} 。分别表示为:

$$[C^{he}] = \begin{bmatrix} C_{x,F_x} & 0 & 0 \\ 0 & C_{y,F_y} & C_{y,M_z} \\ 0 & C_{\theta_z,F_y} & C_{\theta_z,M_z} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[C^{le}] = \begin{bmatrix} C_{z,F_z} & C_{z,M_y} \\ C_{\theta_y,F_z} & C_{\theta_y,M_y} \end{bmatrix} \quad (3)$$

如图 6 所示,用 l 表示矩形截面柔性铰链的长度, t 表示宽度, w 表示厚度。设 E 为材料的弹性模量, G 为剪切模量,公式 (2)、(3) 的分割柔度可以表示为:

$$\begin{bmatrix} C_{x,F_x} \\ C_{y,F_y} \\ C_{y,M_z} \\ C_{\theta_z,M_z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{Ew} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{6}{5Gw} & \frac{12}{Ew} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12}{Ew} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{12}{Ew} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int_0^l \frac{dx}{t} \\ \int_0^l \frac{x^2 dx}{t^3} \\ \int_0^l \frac{xdx}{t^3} \\ \int_0^l \frac{dx}{t^3} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} C_{z,F} \\ C_{z,M_y} \\ C_{\theta_y,M_y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12}{Ew^3} & 0 & \frac{6}{5Gw} \\ 0 & \frac{12}{Ew^3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12}{Ew^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int_0^l \frac{x^2 dx}{t} \\ \int_0^l \frac{xdx}{t} \\ \int_0^l \frac{dx}{t} \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 模型简化及推导

如图 7 所示,单轴半蝶形柔性铰链由左象限与右

象限对称并联组合而成,而左象限与右象限分别由三个矩形柔性铰链串联组合而成,分别记为 R_{h1} 、 R_{h2} 、 R_{h3} 、 R_{h4} 、 R_{h5} 以及 R_{h6} 。以左象限为例进行分析,其主要柔性单元为 R_{h1} 、 R_{h2} 及 R_{h3} 。根据卡氏第二定理, R_{h1} 与 R_{h3} 为高效柔性单元, R_{h2} 为低效柔性单元。因此,在建模过程中应重点分析高效柔度对机构柔性机构的影响,同时忽略低效柔度,进而有效地简化数学模型。

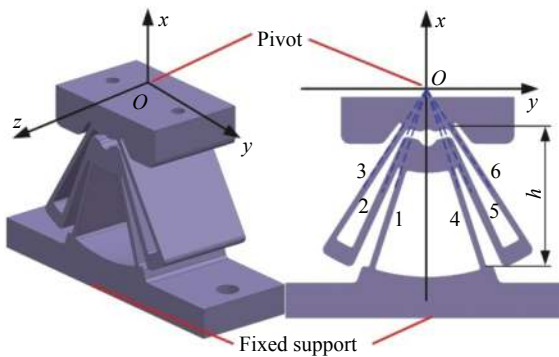


图 7 铰链柔性单元分解图

Fig.7 Exploded view of flexure hinge units

图 8 所示为左象限高效柔性铰链结构参数特征, R_{h1} 的长度为 l_1 , 与 x 轴的夹角为 φ_1 , R_{h3} 的长度为 l_3 , 与 x 轴的夹角为 φ_3 , R_{h1} 与 R_{h3} 的宽度均为 t , 厚度均为 w 。

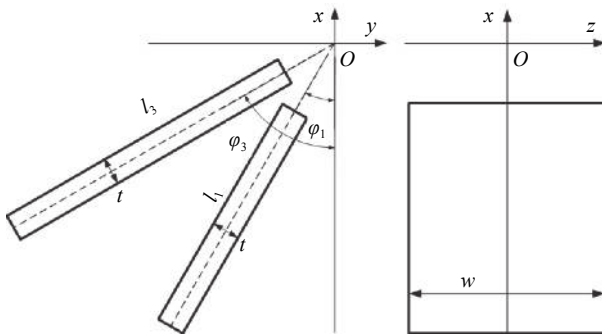


图 8 高效蝶形柔性铰链结构简化图

Fig.8 Simplified structure diagram of in-plane butterfly flexure hinge units

设两个单轴对称柔性铰链的柔度分别为 C_1 、 C_2 , 将两个单轴对称柔性铰链串联, 获得串联组合柔度 C_{se} , 将两个单轴对称柔性铰链并联, 获得并联组合柔度 C_{co} 。分别表示为:

$$C_{se} = C_1 + C_2 \quad (6)$$

$$C_{co} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (7)$$

将左象限的总柔度记为 C_l , 根据卡氏第二定律, 忽略低效柔性单元 R_{h2} 。将公式 (6) 代入公式 (4) 中, 可得高效柔性单元 R_{h1} 与 R_{h3} 的串联组合柔度 C_l 为:

$$C_l = \frac{12(l_1 \cos^4 \varphi_1 + l_3 \cos^4 \varphi_3)}{Ewt^3} \quad (8)$$

下面推导单轴半蝶形柔性铰链左、右两象限的并联总柔度 C_h , 其受力分析如图 9 所示。设左象限柔性单元为 L_l , 与固定端面连接点为 p , 与运动端面连接点为 p' , 与 x 轴夹角为 ψ ; 右象限柔性单元为 L_r , 与固定端面连接点为 q , 与运动端面连接点为 q' , 与 x 轴夹角为 $-\psi$ 。

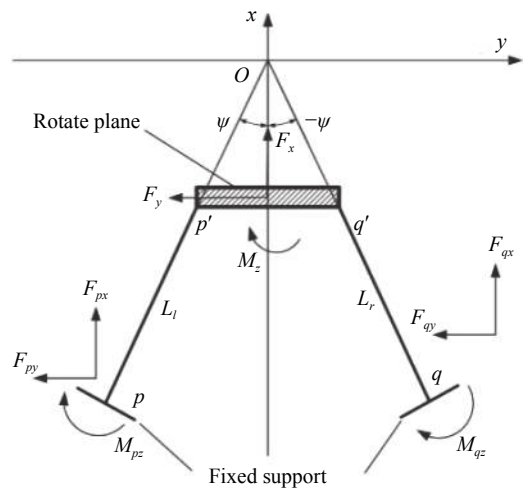


图 9 并联柔性结构端点受力示意图

Fig.9 Stress diagram of the parallel flexible structure fixed support

以 p 点为例进行分析, 柔性铰链在 p 点受到的外部高效载荷有三个, 分别是沿 x 轴的作用力 F_{px} 、沿 y 轴的作用力 F_{py} 、以及绕 p 点的力矩 M_{pz} 。可以确定的是, p 点在柔性铰链运动过程中没有发生位移。同理, q 点在作用力 F_{qx} 、 F_{qy} 、力矩 M_{qz} 的作用下也没有发生任何位移。根据卡氏第二定理, 对连接点 p 、 q 进行“零位移分析”, 设柔性铰链的总应变能为 U , 在外界载荷 F_x 、 F_y 、 M_z 作用下, 其形变量 x 、 y , 旋转角度 θ 可以表示为:

$$\begin{cases} u_x = \frac{\partial U}{\partial F_x} = 0 \\ u_y = \frac{\partial U}{\partial F_y} = 0 \\ \theta_z = \frac{\partial U}{\partial M_z} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

设右象限柔性铰链柔度为 C_r , 将公式 (9) 代入公式 (6) 可以得出:

$$\begin{cases} C_h = C_l \cos \psi - C_r \sin(-\psi) \\ C_h = C_l \sin \psi + C_r \cos(-\psi) \end{cases} \quad (10)$$

其中, ψ 可以近似的表示为:

$$\psi = \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} \quad (11)$$

求解公式 (10), 得:

$$\begin{cases} C_l = C_r \\ C_h = \frac{1}{(\cos \psi + \sin \psi)} C_l \end{cases} \quad (12)$$

将公式 (8) 代入公式 (12), 可以得到单轴半蝶形柔性铰链的柔度 C_h 为:

$$C_h = \frac{12(l_1 \cos^4 \varphi_1 + l_3 \cos^4 \varphi_3)}{(\cos \psi + \sin \psi) E w t^3} \quad (13)$$

由公式 (13) 可以看出, 增加矩形铰链单元的长度、减小其宽度与厚度都能够有效地增加单轴半蝶形柔性铰链的柔度。

2.3 模型优化及机械谐振频率分析

为了获得更优物理特性, 对单轴半蝶形柔性铰链模型进行优化。文中所采用的优化策略是: 在获取最优机械谐振频率的前提下优化柔性单元的尺寸参数。下面分析单轴半蝶形柔性铰链的机械谐振频率。

为了避免共振, 在快速反射镜的工作方向上, 其机械谐振频率应小于伺服控制带宽的一半; 在非工作方向上, 其机械谐振频率应高于伺服控制带宽 $\sqrt{2}$ 倍^[18]。

单轴半蝶形柔性铰链是快速反射镜的唯一柔性单元, 因此, 其柔度也就是快速反射镜的柔度^[19]。如图 7 所示, 其工作方向是绕 z 轴的旋转运动, 非工作方向主要包括沿 y 轴、 z 轴以及 x 轴的平移。为了满足激光光束指向控制稳定精度要求, 所设计的快速反射镜的伺服工作带宽应满足 $f_s \geq 400$ Hz, 设 f_{in} 为快速反射镜工作方向的机械谐振频率, f_{out} 为非工作方向的机械谐振频率。基于以上分析结果, 单轴半蝶形柔性铰链的机械谐振频率设计指标要求为:

$$\begin{cases} f_{in} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{C_h J_z}} \leq \frac{f_s}{2} = 200 \text{ Hz} \\ f_{out} \geq \sqrt{2} f_s = 565.5 \text{ Hz} \end{cases} \quad (14)$$

式中: J_z 为单轴半蝶形柔性铰链绕 z 轴的转动惯量。

下面通过拓扑优化的方式获得单轴半蝶形柔性铰链优化模型参数。结合快速反射镜系统所处工作环境因素, 以 160 Hz 作为拟定目标, 力求优化柔性单元参数。首先模拟绕 z 轴顺时针旋转时的优化过程, 此时右象限的柔性单元为优化对象, 拓扑优化仿真结果如图 10 所示。

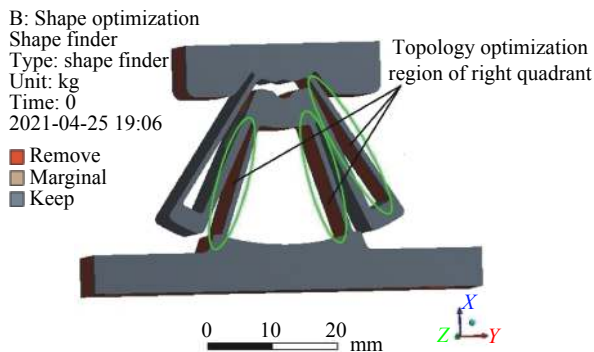


图 10 右象限拓扑优化结果

Fig.10 Topology optimization result of right quadrant

模拟绕 z 轴逆时针旋转时的优化过程, 此时左象限的柔性单元为优化对象, 拓扑优化仿真结果如图 11 所示。

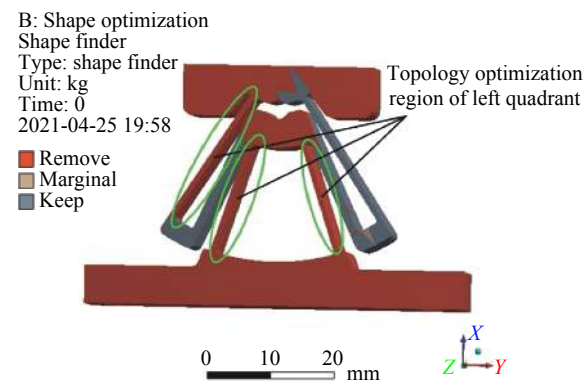


图 11 左象限拓扑优化结果

Fig.11 Topology optimization result of right quadrant

可以看出, 结合图 10 及图 11 拓扑优化结果, 并参照图 7 柔性单元的分解图, 为了获得更优的机械谐振频率, 应减小 R_{h1} 、 R_{h3} 、 R_{h4} 、 R_{h6} 的厚度, 这样的拓扑优化结果也与 2.3 节的分析结果相吻合。经过反复迭代优化并对参数进行取整, 最终得到单轴半蝶形柔性铰链柔性单元参数为:

$$R_{h1} = R_{h3} = R_{h4} = R_{h6} = 0.5 \text{ mm} \quad (15)$$

在明确所有关键参数后对所设计的单轴半蝶形柔性铰链进行零件加工。经过线切割加工等程序制作的单轴半蝶形柔性铰链实物如图 12 所示。

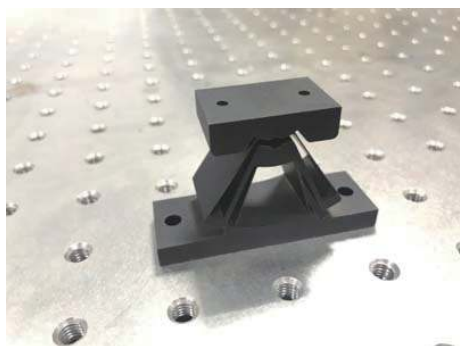


图 12 单轴半蝶形柔性铰链实物图

Fig.12 Photograph of a bi-axial half-butterfly flexure hinge

计算单轴半蝶形柔性铰链的机械谐振频率,表 1 所示为单轴半蝶形柔性铰链的主要结构参数,所选材料为钛合金,这是由于钛合金密度适中、线膨胀系数较小,导热系数较低,是柔性铰链的优选材料^[20],其弹性模量为 110 GPa。

表 1 单轴半蝶形柔性铰链主要参数

Tab.1 Main parameters of a bi-axial half-butterfly flexure hinge

Parameters	Characteristics
Section length l_1/mm	18
Section length l_3/mm	23
Section width t/mm	0.5
Section thickness w/mm	20
Angle $\varphi_1/(\text{°})$	15
Angle $\varphi_2/(\text{°})$	30
Modulus of elasticity E/GPa	110
Moment of inertia $J_z/\text{kg}\cdot\text{m}^2$	1.67×10^{-5}

表 2 单轴半蝶形柔性铰链材料参数

Tab.2 Material parameters of a bi-axial half-butterfly flexure hinge

Material	Density, $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	Modulus of elasticity, E/GPa	Poisson's ratio, ν
Titanium alloy	4.5	110	0.34

结合表 1 参数取值,并将公式 (11)、(13) 代入公式 (14) 中,可得单轴半蝶形柔性铰链工作方向上的机械谐振频率为:

$$f_{in} = 163.13 \text{ Hz} \leq 200 \text{ Hz} \quad (16)$$

可以看出,机械谐振频率的计算结果略高于 160 Hz 的拟定目标,且满足设计指标要求。

3 仿真及实验

3.1 有限元分析

为验证卡氏法求解单轴半蝶形柔性铰链的机械谐振频率理论计算结果,采用有限元仿真方法进行检验。首先确认铰链的材料参数,然后对环境影响的扰动因素进行分析。快速反射镜的使用环境具有温控环节,能够将腔内温度控制在 $(25\pm 3) \text{ °C}$,因此在约束条件中,将环境温度设定为恒定 25 °C ,并给予 3 °C 的温度变化区间。在此基础上对三维模型进行转化以及网格划分,最后施加边界约束条件,对铰链的机械谐振频率进行仿真。单轴半蝶形柔性铰链参数如表 2 所示。

单轴半蝶形柔性铰链前四阶模态频率和模态振型如图 13 所示。可以看出,第 1 阶振型为绕 Z 轴旋转,第 2 阶振型为沿 Y 轴平移,第 3 阶振型为沿 Z 轴平移,第 4 阶振型为沿 X 轴平移。

表 3 所示为单轴半蝶形柔性铰链前四阶模态及振型结果,其中一阶仿真结果为工作方向上的机械谐振频率,与公式 (15) 计算结果相差 1.89%;后三阶仿真结果为非工作方向上的机械谐振频率。可以看出,以上仿真结果均满足公式 (14) 设计指标要求。

可以看出,理论计算与有限元仿真分析结果有一定的误差,主要来源于柔性单元关键部位网格划分不够细致,导致转动惯量的理论值与仿真结果存在一定的偏差。然而这种偏差可以通过系统伺服控制设计进行补偿,因此对快速反射镜系统的性能影响较小^[21]。

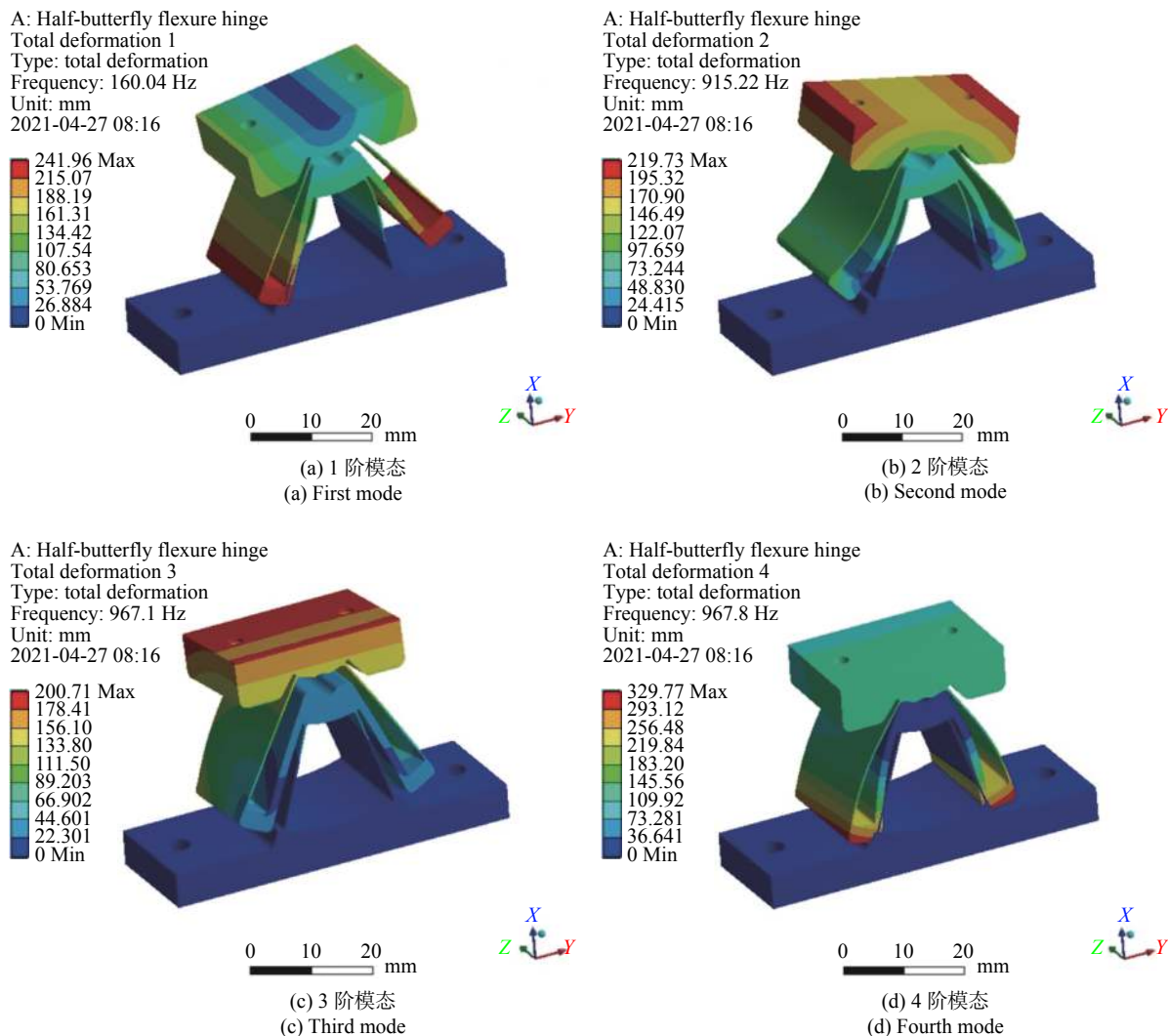


图 13 模态仿真结果

Fig.13 Simulation results of modals

表 3 半蝶形柔性铰链各阶模态频率及模态振型

Tab.3 Modal frequencies and modal shapes of the half-butterfly flexure hinge

Modal order	Modal frequency/Hz	Modal shape
1	160.04	Rotate around Z
2	915.22	Y direction
3	967.10	Z direction
4	967.80	X direction

3.2 实验测试

搭建实验平台,对快速反射镜系统进行伺服开环幅频特性进行测试,主要由光学隔震平台、快速反射镜、快速反射镜控制器(FSM控制器)、自准直仪、扫频仪以及稳压电源等组成,如图14所示。首先将自

准直仪与快速反射镜共同架设于光学隔震平台上,并保证其基准一致。然后将扫频仪与FSM控制器连接,设定为在一定频率范围内进行正弦波频率扫描,稳压电源能够为FSM控制器提供低纹波稳定电源输入。扫频仪与快速反射镜正弦振荡运动进行幅值和相对比,幅度特性曲线的第一个峰值对应的频率就是快速反射镜在该自由度的机械谐振频率。此外,自准直仪能够检测以单轴半蝶形柔性铰链连接快速反射镜的重复定位精度。

反射镜绕Z轴旋转的开环幅频、相频特性测试结果分别如图15(a)、(b)所示,可以看出,单轴半蝶形柔性铰链Z轴机械谐振频率为165.29 Hz。同时,当快速反射镜停止工作时观察自准直仪显示器,十字分划

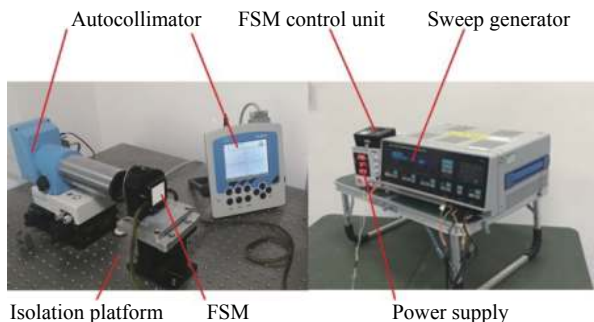


图 14 实验测试图

Fig.14 Photograph of the test system

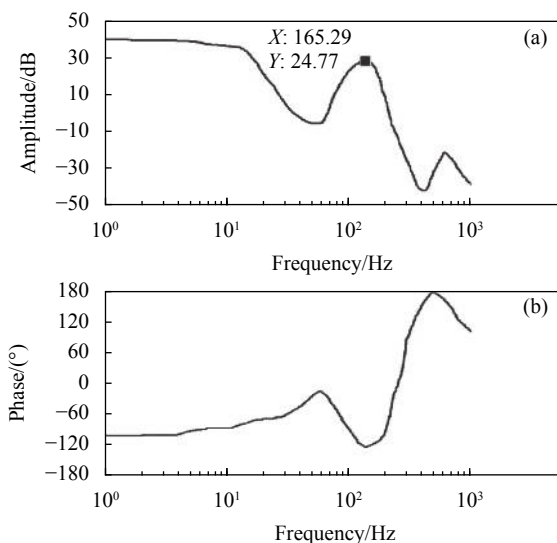


图 15 Z 轴开环幅频特性曲线图

Fig.15 Open loop amplitude frequency response curve of Z axis

与实验前相比未发生明显变化,说明单轴半蝶形柔性铰链连接的快速反射镜具有良好的重复定位精度。

3.3 结果分析

将单轴半蝶形柔性铰链工作方向机械谐振频率的理论计算、有限元仿真结果与实验测试结果对比分析,如表 4 所示。可以看出,Z 轴机械谐振频率的理

表 4 谐振频率的理论计算、仿真分析与实验测试结果分析

Tab.4 Natural frequency verification with the FEM and experiments

Freedom		Z axis
Natural frequency/Hz	Experiments	165.29
	Analytic	163.13
	Finite-element analysis	160.04
Error	Analytic	1.3%
	Finite-element analysis	3.2%

论计算、有限元仿真结果与实验测试结果分别相差 1.3% 与 3.2%,并且均满足公式 (14) 设计指标要求。

4 结 论

文中提出了一种适用于快速反射镜系统的单轴半蝶形柔性铰链。采用卡氏法对该铰链进行数学建模,并对模型参数进行拓扑优化,最后对其机械谐振频率进行仿真及实验测试。结果表明:单轴半蝶形柔性铰链机械谐振频率的理论计算与实验测试结果相差 1.3%,有限元仿真与实验测试结果相差 3.2%。理论计算、仿真分析与实验测试十分吻合,说明文中采用卡氏法求解的数学模型比较准确。同时,单轴半蝶形柔性铰链的机械谐振频率能够满足快速反射镜系统指标要求,为快速反射镜高速往复运动提供高效支撑,进而有效地提高了激光武器光束指向控制的稳定精度。

下一步计划拓展应用范围,将单自由度铰链形式扩展为两个自由度,实现四个单轴半蝶形柔性铰链两两平面并联,然后再进行空间并联组合,形成两轴集中式半蝶形柔性铰链,目前正在设计与优化之中。

参考文献:

- [1] Xu Feifei, Ji Ming, Xie Jing, et al. Application of FSM in high accuracy line-of-sight stabilization system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(1): 9-13. (in Chinese)
- [2] Wang Fuchao, Wang Yutang, Tian Dapeng. Perfect tracking control for fast-steering mirror driven by voice coil motor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1997-2006. (in Chinese)
- [3] Fang Chu. Design and research on fast steering mirror system used in beam steering control devices[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2017. (in Chinese)
- [4] Zheng Xintao, Huang Hai, Li Weipeng. A modified active disturbance rejection control for fast steering mirror in aerospace application [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1509(1): 012028.
- [5] Lu Xiaodong, Wu Tianze, Zhou Jun, et al. Compound image stabilization for coupled disturbance in ship-borne imaging system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(5): 1291-1299. (in Chinese)
- [6] Tian Jing, Yang Wenshu, Peng Zhenming, et al. Inertial sensor-

- based multiloop control of fast steering mirror for line of sight stabilization [J]. *Optical Engineering*, 2017, 55(11): 111602.
- [7] Zhang Furui, Ruan Ping, Han Junfeng. Application and optimum design of flexible shaft in satellite optical communication [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0818001. (in Chinese)
- [8] Li Yongzhen, Bi Shusheng, Zhao Hongzhe, et al. Influence of vertical Loads on quasi-constant rotational stiffness of the cross-spring flexure pivot [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(3): 1-7. (in Chinese)
- [9] Simona Noveanu, Daniel Lates, Lacramioara Fusaru, et al. A new compliant microgripper and study for flexure hinges shapes [J]. *Procedia Manufacturing*, 2020, 46: 517-524.
- [10] Zhang Chen, Song Yun, Kornel F Ehmann. Design and experimental investigation of a parallel flexure hinge [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2020, 30(8): 085008.
- [11] Liu Ming, Li Zhenwei, Li Xiang, et al. Flexible design and thermal stability analysis of reflector assembly of space-based laser ranging load [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2020, 40(6): 1118-1124. (in Chinese)
- [12] Zhao Lei, Wang Hu, Duan Wenbo, et al. Design and analysis of a bi-axial centralized butterfly flexure hinge for fast steering mirrors [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2020, 6(4): 048003.
- [13] Shan Yunxiao, Chen Changzheng, Liu Lei, et al. Design and analysis of flexure hinge by finite element method [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(2): 146-151. (in Chinese)
- [14] Wang Chenzhong, Hu Zhongwen, Chen Yi, et al. Structural design optimization of space gravitational wave telescope primary mirror system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(7): 20190469. (in Chinese)
- [15] Nicolae Lobontiu, Matt Cullin. In-plane elastic response of two-segment circular-axis symmetric notch flexure hinges: The right circular design [J]. *Precision Engineering*, 2013, 37(3): 542-555.
- [16] Paros J M, Weisbord L. How to design flexure hinges [J]. *Machine Design*, 1965, 37: 151-156.
- [17] Nicolae Lobontiu, Jesse Wight-Crask, Collette Kawagley. Straight-axis folded flexure hinges: In-plane elastic response [J]. *Precision Engineering*, 2019, 57: 54-63.
- [18] Danial Joseph Kluk. An advanced fast steering mirror for optical communication[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2007.
- [19] Zhao Lei, Ji Ming, Wang Jia, et al. Design and simulation of fast steering mirrors connected by universal flexure hinges [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0218002. (in Chinese)
- [20] 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)
- [21] Li Lin, Yan Changxiang, Tian Haiying, et al. Design and analysis of image rotation compensation mechanism based on flexible hinge [J]. *Journal of University of Jinan (Science and Technology)*, 2021, 35(2): 95-101. (in Chinese)