

激光通信一体化 SiC/Al 摆镜支撑参数优化

李小明, 王隆铭, 朱国帅

(长春理工大学空间光电技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130022)

摘要: 在组网“一对多”激光通信系统中,为了减小安装面平面度误差对反射镜面形的影响,保证组网“一对多”激光通信用伺服摆镜安装后的面形精度,对一体化 SiC/Al 摆镜支撑参数开展了理论分析,分析了各支撑参数对摆镜面形精度的影响规律。然后采用有限元分析优化设计了支撑参数,确定了支撑点位置和安装面平面度精度的要求。对采用优化设计参数后的摆镜面形精度测试表明,在加工面形为 PV 值优于 $53\text{ nm}(\lambda/12)$, RMS 值优于 $10\text{ nm}(\lambda/60)$ 的前提下,并在 $(20\pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$ 温度载荷作用下,摆镜安装后的面形精度 PV 值优于 $210\text{ nm}(\lambda/3)$, RMS 值优于 $60\text{ nm}(\lambda/10)$ 。同时,摆镜与安装基座由相同材料制作,这有效减小温度变化负载对面形精度的影响,完全满足组网“一对多”激光通信用伺服摆镜面形的精度指标要求。

关键词: 一体化摆镜; 面形误差; 支撑参数; 有限元分析; 组网激光通信

中图分类号: TN929.13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210143

Optimization for support parameters of integration SiC/Al tilt-mirror used for laser communication

Li Xiaoming, Wang Longming, Zhu Guoshuai

(National and Local Joint Engineering Research Center of Space and Optoelectronics Technology,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In the "one-point to multiple-points" network laser communication system, in order to reduce the effect of flatness error of mounting surface plane on surface shape accuracy of reflective mirror, make sure the surface shape accuracy of the servo tilt-mirror for the "one-point to multiple-points" network laser communication, the theory analysis of support parameters of integration SiC/Al tilt-mirror was proposed. The effect rule of each parameters on the tilt-mirror surface shape accuracy was analyzed. The support parameters were designed optimally by finite element analysis, and the support point position and the flatness accuracy requirement of the mounting surface plane were defined. The test of surfaces shape accuracy of tilt-mirror using the design parameters after optimization shows that under the premise that the peak and valley (PV) value of the processed surface is better than $53\text{ nm}(\lambda/12)$, and the root mean square (RMS) value is better than $10\text{ nm}(\lambda/60)$, with a temperature load of $(20\pm 5)\text{ }^\circ\text{C}$, the tilt-mirror is installed, the PV value of the its surface shape accuracy is better than $210\text{ nm}(\lambda/3)$, and the RMS value is better than $60\text{ nm}(\lambda/10)$. In addition, the tilt-mirror and the mounting base are made of the same material, which effectively reduces the influence of the temperature change load on the surface shape accuracy. It meets the indicator requirement of servo tilt-mirror surface shape accuracy of the "one-point to multiple-points" network laser communication system.

收稿日期:2021-03-09; 修订日期:2021-05-10

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(91338116);吉林省科技发展计划项目(20210201021GX)

作者简介:李小明,男,助理研究员,博士,主要从事精密光机结构分析与优化方面的研究。

Key words: integrated tilt-mirror; surface shape error; support parameters; finite element analysis; network laser communication

0 引言

激光通信采用激光作为载体在空间传递信息,具有通信带宽高、天线增益大、体积功耗小、抗干扰能力强等优点,可以解决现有微波通信速率低的不足,满足大容量信息实时传输的需求。由于激光通信束散角较小,两通信终端光轴必须高精度对准,这造成激光通信目前只能实现一点对一点的“点对点”激光通信,无法进行一点同时对多点的“一对多”组网通信。所以“一对多”组网激光通信技术具有重要的作用和研究意义,其可实现全光通信网络,推动激光通信在空间信息网络和小卫星群中的应用^[1-2]。

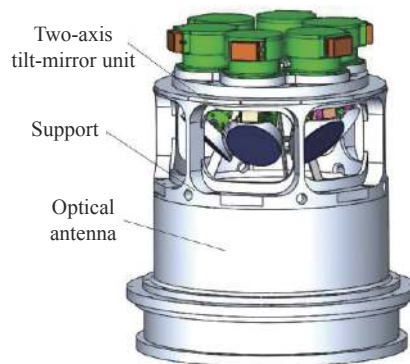
在某“一对多”组网激光通信天线室内原理演示系统中,结合旋转抛物面原理,采用多面具有光轴调整功能的伺服摆镜协同工作,各摆镜可独立工作,与目标单位建立链路,两相邻摆镜也可协同工作,增大工作范围,因此“一对多”激光通信天线可在一定范围内同时与多个目标建立激光链路,实现同一天线同时与多个目标进行激光通信^[3-4]。二维摆镜组件是“一对多”激光通信天线的核心部件,设计时采用了 SiC/Al 新型材料,一方面减小结构质量,另一方面也方便实现摆镜和安装镜座的无热化设计,减小温度变化对摆镜面形的影响。摆镜进行了一体化设计,摆镜组件只有镜体和安装座两个部分,轴系安装座同时也是俯仰轴系结构部件,以此减少了结构件数量和连接环节,提高摆镜面形稳定性。为减小摆镜组件体积,增大光学利用率,采用与镜体一体的安装基板与伺服轴系连接,有效减小了摆镜组件结构尺寸和镜面到转动中心的距离。由于摆镜设计为异形结构,造成摆镜上的安装基板与轴系安装座侧面连接,俯仰轴系沉入镜体内部,这样安装基板安装面无法与轴系配合研磨加工。由于机械加工误差的存在,安装后配合面的平面度误差会产生安装应力,应力将影响摆镜反射面面形精度,造成面形严重下降,无法满足设计要求。所以必须对组网激光通信天线一体化跟瞄摆镜安装时的支撑参数进行分析优化,分析安装点配合面平面度误差对摆镜面形的影响,同时对安装点进行优化设计,降低应力影响,在机械加工精度允许的前提下保

证摆镜面形。

1 “一体化”SiC/Al 伺服摆镜

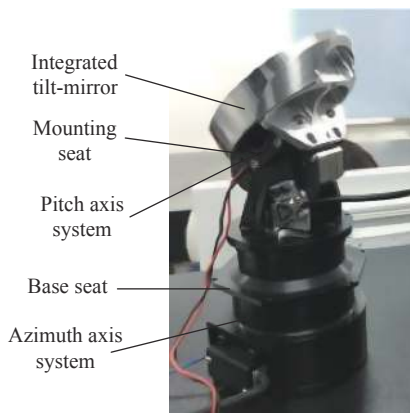
“一对多”组网激光通信光学天线设计为以抛物面为基底的多摆镜拼接结构,每一块摆镜由一个伺服执行机构控制,完成目标的稳定跟踪和通信。来自不同轨道的信号光束以不同入射角照射到多摆镜拼接光学天线上,工作范围与入射光角度匹配的摆镜对目标进行跟踪,保证通信光进入光学天线后,顺利进入后续子光路中完成激光通信^[5-6]。天线示意图如图 1(a)所示,二维摆镜组件如图 1(b)所示。

根据光学设计要求,摆镜安装后在 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ 的温度载荷作用下面形精度满足 PV 值优于 $210\text{ nm}(\lambda/3)$,



(a) “一对多”激光通信天线

(a) “One-point to multiple-points” laser communication antenna



(b) 二维摆镜组件

(b) Two-axis tilt-mirror unit

图 1 “一对多”激光通信天线及二维摆镜组件

Fig.1 “One-point to multiple-points” laser communication antenna and two-axis tilt-mirror unit

RMS 值优于 60 nm($\lambda/10$) 的指标要求 (检测波长 $\lambda=632.8$ nm)。

为了减小温变载荷对摆镜面形精度的影响, 摆镜材料选用了热稳定性好、比刚度高、加工性优良的新型材料铝基碳化硅 (SiC/Al) 一体化设计, 同时轴系安装座也采用相同材料减小材料线胀系数不配的影响, SiC/Al 材料属性如表 1 所示。根据结构和光学设计要求, 摆镜外形尺寸设计为 100 mm×80 mm 的椭圆反

射镜。反射镜设计时径厚比通常取 5~8, 保证加工和使用时镜体具有足够的刚度^[7-8]; 摆镜镜体厚度设计为 20 mm, 镜面厚度 8 mm, 背部采用轻量化设计, 减轻镜体质量。为减小转动时反射面的偏心距, 摆镜采用与镜体一体加工的安装基板与轴系安装座侧面连接, 俯仰轴系沉入镜体内部, 减小旋转轴与反射面的距离, 为此, 摆镜背部留取 30 mm×30 mm×54 mm 的轴座安装空间, 摆镜三维模型如图 2 所示。

表 1 材料属性

Tab.1 Material properties

Material	Elastic modulus/ GPa	Density/ g·cm ⁻³	Specific stiffness	Thermal conductivity/ W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	Linear expansion coefficient/10 ⁻⁶ K ⁻¹	Thermal stability
SiC	310	2.92	106	158	2.64	60
SiC/Al	235	3.03	78	230	7.8	29
Crystoe and neoparies	90.6	2.53	36	1.64	0.05	33
Steel(45)	200	7.81	26	48.1	11.59	4
Aluminium	68.2	2.68	25	167	23.6	7
Titanium alloy(TC4)	109	4.44	25	7.8	8.9	0.88

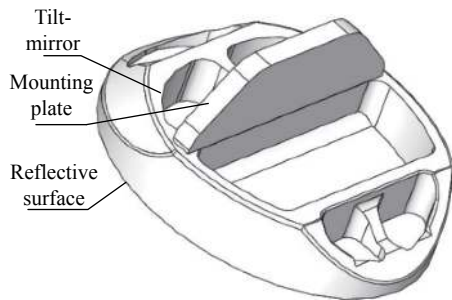


图 2 摆镜示意图

Fig.2 Schematic diagram of tilt-mirror

2 支撑参数对摆镜的影响

2.1 固有频率分析

为了保证支撑基板支撑点的平面性, 提高平面度加工精度, 支撑基板采用三点支撑方案, 由于摆镜为对称结构, 所以通过沿安装基板中心线对称的等腰三角形排布的 A、B、C 三个螺钉孔安装在俯仰轴系上, 安装点与镜体底面距离为 h , 顶点高 a , 底边长 b , 摆镜安装点布局如图 3 所示。

设摆镜安装基板为一均质等截面悬臂梁, 镜体为其一端的集中质量为 M 的载荷, 基板的单位长度质量为 m , 则根据材料力学可知, 摆镜镜体端在垂直镜面方向上的挠度 z 为^[9]:

$$z = \frac{Mgh^3}{3E_I} \quad (1)$$

式中: $E_I = \frac{E}{1-\mu^2}$ 为板条梁相当弹性模量, $E=200$ GPa 为 SiC/Al 材料弹性模量, $\mu=0.3$ 为材料泊松比; $I = \frac{t^3}{12}$ 为板梁的断面惯性矩, $t=10$ mm 为安装面厚度。安装基板上任意位置与安装点 BC 距离 x 处的截面挠度 z_0 为:

$$z_0 = \frac{3hx^2 - x^3}{2h^3} z \quad (2)$$

在发生振动时 z, z_0 均为变量, 则有

$$z_0' = \frac{3hx^2 - x^3}{2h^3} z' \quad (3)$$

根据计算固有频率的能量法有:

$$T = \frac{1}{2} \int_0^h m dx z_0'^2 = \frac{1}{2} m \left(\frac{z'}{2h^3} \right)^2 \int_0^h (3hx^2 - x^3)^2 dx + \frac{1}{2} \times \frac{33}{140} m h z^2 \quad (4)$$

式中: T 为梁具有的最大势能。由上式可知基板截面等效梁的质量为:

$$m_{ch} = \frac{33}{140} m h \quad (5)$$

所以一体化摆镜简化模型的等效质量为:

$$M_{eq} = M + m_{eq} = M + \frac{33}{140}mhy \quad (6)$$

式中： M 为镜体质量， $M=436\text{ g}$ 。系统的固有频率 P_n 为：

$$P_n = \sqrt{\frac{3E_l I}{\left(M + \frac{33}{140}mh\right)h^3}} \quad (7)$$

图 4 为支撑点高度 h 和系统固有频率 P_n 间的关系，由分析可见，支撑点 BC 与镜体间的距离 h 越小，则支撑后摆镜的固有频率越高。

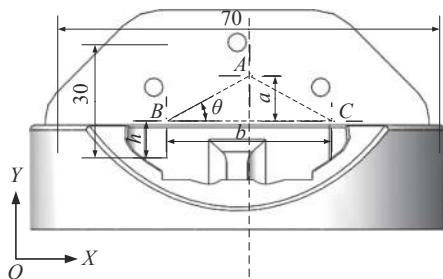


图 3 摆镜安装点布局

Fig.3 Layout of mounting points of tilt-mirror

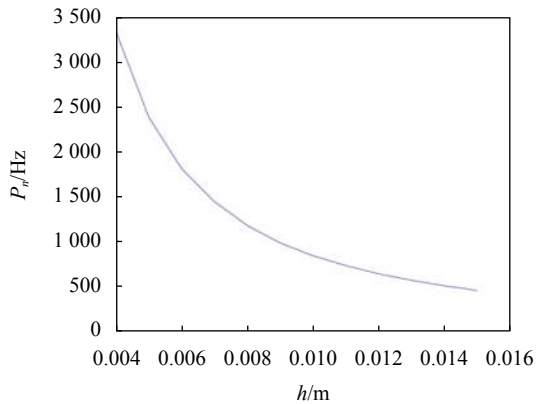


图 4 固有频率 P_n 与支撑点高度 h 的关系

Fig.4 Relationship between the natural frequency P_n and the height of the support point h

2.2 面形误差

安装座在安装点处设计为面小凸台，有利于减小与基板间的接触面积，保证接触面间的平面度，减小接触不平对面形精度的影响。忽略凸台面积将摆镜安装简化为 A 、 B 、 C 三点固定，设研磨后摆镜安装面的平面度最大误差为 p_{max} ，相当于理想平面 ABC 在某一点处有垂直于平面距离为 p_{max} 的强制位移（沉陷），在螺钉的作用下其余两点保持不动且不可旋转，所以

摆镜安装面会产生一定的内应力和变形，并随着基板和镜体传递到反射面，造成摆镜面形精度下降。将摆镜安装面等效为一矩形平板， A 、 B 、 C 分别为板的三个顶点，点 O 为矩形的第四个顶点， $OB = OC = R = \frac{\sqrt{2}b}{2}$ ， $OB \perp OC$ ，同时建立坐标系 $Oxyz$ ，如图 5 所示。

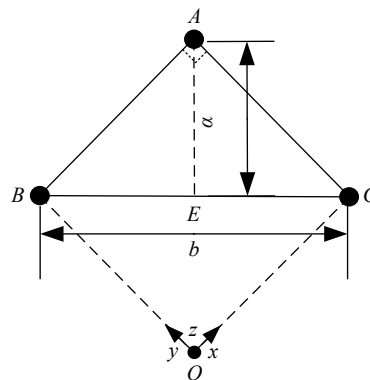


图 5 安装点简化模型

Fig.5 Amplified model of mounting points

将经过 A 点并垂直于 BC 的安装板截面等效为一悬臂板条梁，则 A 点的作用反力 F 和强制位移 p_{max} 的关系为^[10]：

$$F = \frac{3E_l I p_{max}}{\beta} \quad (8)$$

式中： l 为等效界面梁长度。由于基板变形较小，属于刚性板，边 BO 和 CO 为固定边，其边界条件为^[11]：

$$\begin{cases} (\omega)_x = 0, \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right)_{x=0} = 0 \\ (\omega)_y = 0, \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right)_{y=0} = 0 \end{cases} \quad (9)$$

边 AB 和 AC 为自由边， $AB = AC = R$ ，其边界条件为：

$$\begin{cases} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2}\right)_{x=R} = 0 \\ \left[\frac{\partial^3 \omega}{\partial x^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial x \partial y^2}\right]_{x=R} = 0 \\ \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}\right)_{y=R} = 0 \\ \left[\frac{\partial^3 \omega}{\partial y^3} + (2-\mu) \frac{\partial^3 \omega}{\partial x^2 \partial y}\right]_{y=R} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

设安装面的挠度方程为 $\omega(x, y) = kxy$ ，其中 k 为一常数，明显可见挠度方程满足上述边界条件，当 A 点作

用集中载荷 F 时, 有:

$$-F = F_{RAB} + F_{RAC} = (M_{yx})_A + (M_{xy})_A = 2(M_{xy})_A = -2E_l I (1-\mu) \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right)_{x=y=s} \quad (11)$$

由公式 (11) 可解:

$$k = \frac{F}{2E_l I (1-\mu)} \quad (12)$$

所以

$$\omega(x, y) = \frac{F}{2E_l I (1-\mu)} xy \quad (13)$$

根据双端支撑简支梁的挠度方程有:

$$E_l I \omega = \frac{-F l^3}{24} \quad (14)$$

l 为边 AE 长度, BC 中点 E 的等效载荷为:

$$F_E = -\frac{3E_l I p_{\max}^2 R^2}{(1-\mu) l^6} = -\frac{3E_l I p_{\max}^2 b^2}{2(1-\mu) l^6} \quad (15)$$

当点 B 和 C 固定 A 产生强制位移时: $l = a$, 当点 A 和 B (或 C) 固定点 C (或 B) 处产生强制位移时: $l = b$ 。所

以由公式 (15) 可见, 当 $a < b$ 时, A 点处产生的沉陷对摆镜的影响要比 $B(C)$ 点严重。由图 5 安装点简化模型尺寸可知: 安装板宽度远大于高度, 安装点设计时 a 必然小于 b , 所以 A 点沉陷将产生更大的影响。

3 支撑点参数优化设计

由以上分析可知: 支撑点距镜体距离 h 减小会增加摆镜安装后的固有频率, 但会增大安装面平面度误差对面形精度的影响; 支撑点间的距离 a 和 b 会影响安装面平面度误差引起的应力大小, 增大支撑点底边 b 、增加点高 a 有利于减小应力。由于摆镜镜体结构比较复杂, 支撑点参数变化对摆镜面形精度的影响不易计算, 为此采用有限元分析对支撑点参数进行了优化分析。考虑安装孔与基板边沿要留取足够的安全余量保证结构强度, 同时预留安装螺钉头的空间尺寸, 设计时要求安装孔距边沿最小距离为 5 mm, 所以取 $30 \text{ mm} < b < 60 \text{ mm}$, $5 \text{ mm} < a < 15 \text{ mm}$, $a+h=20 \text{ mm}$, A 点产生 $5 \mu\text{m}$ 位移时对 a 和 b 变化对摆镜面形影响进行了分析, 分析结果如表 2 所示。

表 2 不同支撑点时摆镜面形 PV 值 (RMS 值)

Tab.2 Surface shape PV(RMS) value of tilt-mirror at different support point positions

b/mm	a/mm			
	5	8	12	15
30	527.1(105.4)	351.4(81.2)	253.0(63.2)	234.2(57.8)
35	332.9(79.1)	253.0(70.8)	225.9(52.7)	234.2(52.6)
40	275.4(70.3)	225.9(58.5)	186.0(45.2)	197.6(48.7)
45	243.3(63.2)	210.8(57.1)	197.6(53.2)	204.0(52.7)
50	253.4(57.5)	234.2(58.8)	218.1(52.4)	210.8(54.1)
55	287.5(71.4)	253.0(63.3)	225.9(52.8)	218.1(57.5)
60	332.9(80.1)	301.2(70.2)	243.3(57.5)	225.9(48.7)

分析可见, 当 $a=12 \text{ mm}$, $b=40 \text{ mm}$ 时, A 点沉陷对摆镜影响最小, 摆镜面形误差 PV 值为 186 nm, RMS 值为 45.2 nm, 此时 $h=8 \text{ mm}$ 。在此支撑参数下分析安装面平面度误差 p_{\max} 对面形误差的影响, 分析结果如图 6 所示。

摆镜安装后的面形精度由加工后的面形精度和安装引起的面形误差共同决定, 面形 PV 值和 RMS 值按两者的均方根计算。摆镜设计要求加工后 PV 值优于 $53 \text{ nm} (\lambda/12)$, RMS 值优于 $10 \text{ nm} (\lambda/60)$, 要保证安装

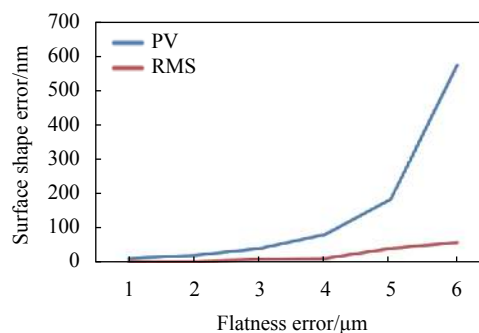


图 6 不同平面度误差下摆镜面形变化

Fig.6 Surface shape of tilt-mirror at different flatness errors

后面形 PV 值优于 $210\text{ nm}(\lambda/3)$, RMS 值优于 $60\text{ nm}(\lambda/10)$ 。这就要求安装产生的面形误差 PV 值小于 200 nm , RMS 值小于 55 nm , 所以配合面研磨精度要优于 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。当 $a=12\text{ mm}$, $b=40\text{ mm}$, $h=8\text{ mm}$, 此时有限元分析表明摆镜一阶固有频率 1460 Hz , 分析结果如图 7 所示。

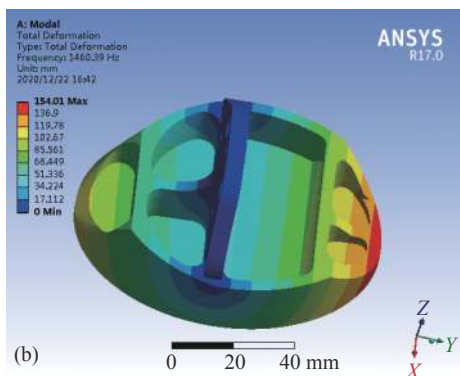
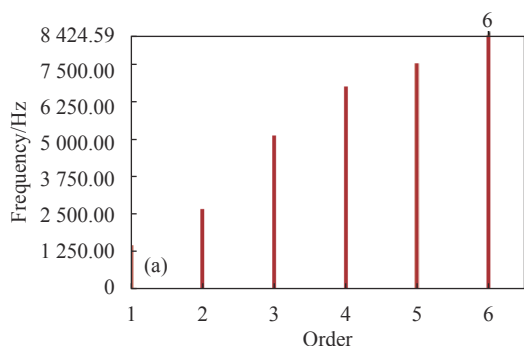


图 7 摆镜模态仿真结果。(a) 各阶谐振频率;(b) 一阶谐振频率振幅
Fig.7 Simulation result of tilt-mirror modal. (a) Resonant frequency of each order; (b) Mode shape of first-order resonance frequency

当摆镜与安装座间安装面平面度误差设为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 时,摆镜面形仿真结果如图 8(a) 所示;摆镜面形 PV 值为

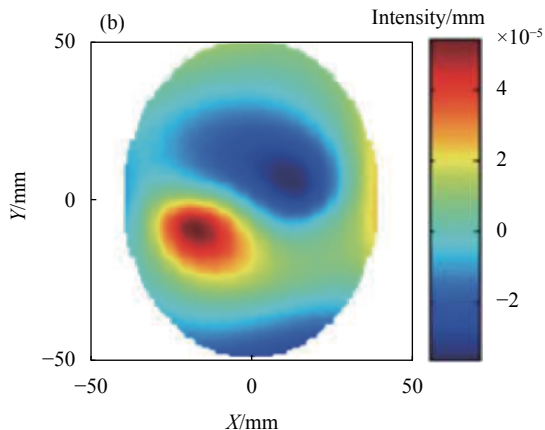
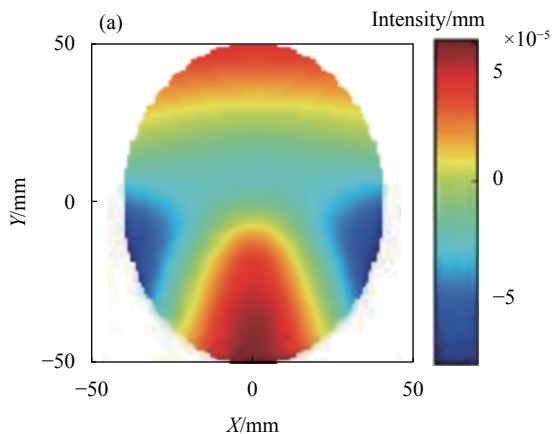


图 8 摆镜面形变化仿真云图。(a) $3\text{ }\mu\text{m}$ 安装面误差时摆镜面形变化;(b) $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温升载荷下摆镜面形变化
Fig.8 Simulation cloud image of tilt-mirror surface shape change. (a) Surface shape change of the tilt-mirror when the mounting surface error is $3\text{ }\mu\text{m}$; (b) Surface shape change of the tilt-mirror under $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperature rise load

186 nm , RMS 值为 45.2 nm , 摆镜受 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温变载荷作用时面形变化云图如图 8(b) 所示, PV 值为 82.6 nm , RMS 值为 27.9 nm , 由分析可见, 摆镜满足面形精度要求, 但安装面误差对其面形精度产生较大的影响。

4 实验与测试

图 9 为加工后的摆镜和安装座实物图。在安装

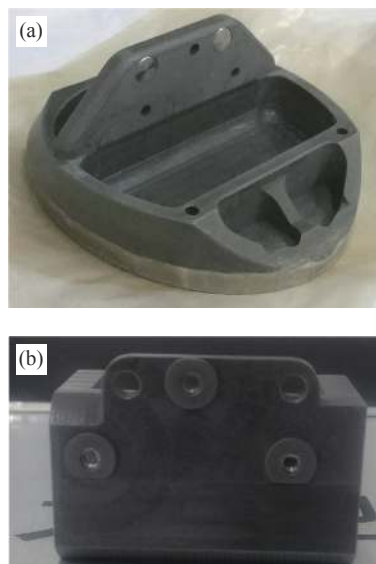


图 9 摆镜及安装座实物图。(a) 摆镜实物图;(b) 安装座实物图
Fig.9 Physical drawing of tilt-mirror and mounting seat. (a) Physical drawing of tilt-mirror; (b) Physical drawing of mounting seat

前,首先采用三坐标测量机对摆镜和镜座安装面平面度进行测量,测试结果如图 10 所示,由图可见:摆镜与安装座间的安装面平面度最大误差约为 $3.7 \mu\text{m}$,略大于设计值,受加工能力限制,不易再进一步提高。

使用 ZYGO 干涉仪分别在螺钉安装后和 5°C 温升载荷条件下对摆镜安装后的面形精度进行检测,结果如图 11 所示。实验结果表明,安装后在安装面平面度误差影响下,摆镜面形误差 PV 值为 $0.315\lambda(199.3 \text{ nm})$, RMS 值优于 $0.055\lambda(34.8 \text{ nm})$,在 5°C 温升载荷下满足 PV 值为 $0.325\lambda(205.6 \text{ nm})$, RMS 值优于 $0.085\lambda(53.78 \text{ nm})$,满足 PV 值优于 $210 \text{ nm}(\lambda/3)$, RMS 值优于 $60 \text{ nm}(\lambda/10)$ 的指标要求,但设计余量较小。

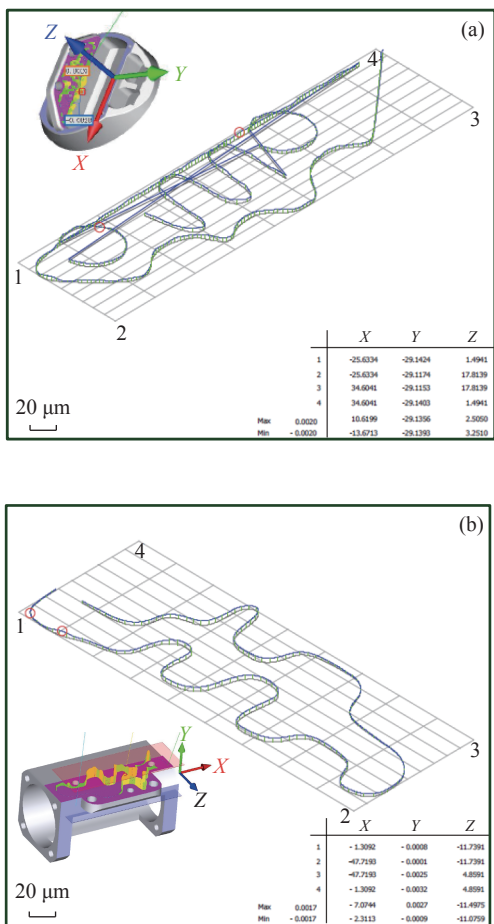


图 10 摆镜及镜座安装面平面度检测结果。(a) 摆镜安装面平面度检测;(b) 镜座安装面平面度检测

Fig.10 Test result of flatness of tilt-mirror and mirror seat mounting surface. (a) Flatness detection of tilt-mirror mounting surface; (b) Flatness detection of mirror seat mounting surface

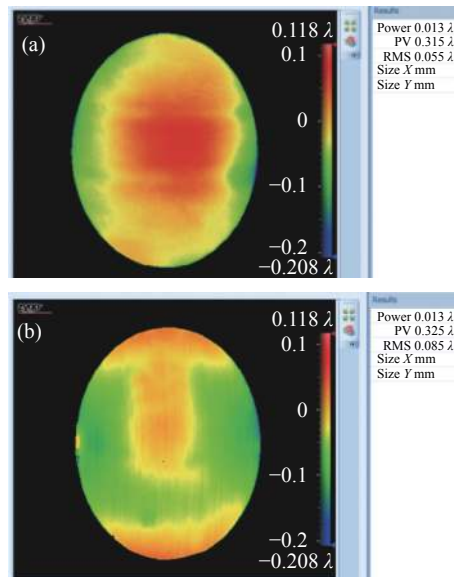


图 11 摆镜面形误差检测结果。(a) 安装后摆镜面形误差检测结果;(b) 5°C 温升载荷下摆镜面形误差检测结果

Fig.11 Test result of tilt-mirror surface shape error. (a) Test result of tilt-mirror surface shape error after installation; (b) Test result of tilt-mirror surface shape error under 5°C temperature rise load

5 结 论

文中针对组网“一对多”激光通信用 SiC/Al 一体化伺服摆镜支撑点参数进行了理论分析与研究,通过优化设计,确定了支撑点位置、安装面平面度和研磨精度要求,有效改善了摆镜面形精度。分析和实验测试表明,采用文中优化设计的支撑点参数的摆镜一阶固有频率为 1460 Hz ,在环境温度 $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ 范围内,形误差满足 PV 值优于 $210 \text{ nm}(\lambda/3)$, RMS 值优于 $60 \text{ nm}(\lambda/10)$ 的面形指标要求,能够满足组网“一对多”激光通信天线对摆镜的面形精度要求。由测试实验结果可见,由于摆镜和安装座采用同种材料,有效减小了温变载荷对面形精度的影响,但安装面平面度误差对摆镜面形精度的影响较大,对面形破坏比较严重,同时提高安装面平面度较为困难、成本较高,难于再进一步提高摆镜面形精度。

参考文献:

[1] Jiang Huilin, Tong Shoufeng. The Technologies and Systems of Space Laser Communication[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 9-22. (in Chinese)

[2] Song Yansong, Chang Shuai, Tong Shoufeng, et al. Feature

- analysis of aeronautical laser communication system and airborne laser communication experiment [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1206004. (in Chinese)
- [3] Zhang Tao, Fu Qiang, Li Yahong, et al. Design of confocal reflection optical antenna of multi-platform network laser communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(10): 1022006. (in Chinese)
- [4] Zheng Yang, Fu Yuegang, Hu Yuan, et al. Research on four mirror dynamic alignment based on space laser communication link networks [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(1): 0105001. (in Chinese)
- [5] Jiang Huilin, Jiang Lun, Song Yansong, et al. Research of optical and APT technology in one-point to multi-point simultaneous space laser communication system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(4): 0405008. (in Chinese)
- [6] Li Xiang, Zhang Lizhong, Li Xiaoming, et al. Design of compact tip-tilt mirror assembly in multi-node laser communication antennas [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0906003. (in Chinese)
- [7] Qi Guang, Wang Shuxin, Li Jinglin. Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 99-106. (in Chinese)
- [8] Yoder Jr P R. Opto-mechanical Systems Design[M]. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2005: 396-398.
- [9] Jia Qifen, Liu Xijun. Mechanical and Structural Vibration[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 2011: 10-12. (in Chinese)
- [10] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 176-185.
- [11] 徐芝纶. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 6-12.