

doi:10.3788/gzxb20174602.0222003

空间 SiC 反射镜背部中心支撑特性

包奇红^{1,2}, 沙巍¹, 陈长征¹, 任建岳¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要:基于特定的轻量化形式和支撑结构,采用有限元方法研究了口径为 500 mm 的空间 SiC 反射镜的背部中心支撑特性.通过分析镜体结构参量对反射镜性能的影响,确定了最佳的支撑孔直径与反射镜口径的比例为 0.23,指出对不同口径的反射镜需通过优化确定最佳的背部形状,当重力沿径向作用时,增大支撑深度有利于提高面形准确度.支撑结构分析结果表明,柔性连接件底部螺栓圆半径是影响温变载荷工况下的面形准确度和反射镜组件的一阶固有频率的关键因素,要确定最佳的底部螺栓圆半径需综合考虑面形准确度和结构基频两方面的指标要求;背部中心支撑的反射镜面形准确度受外界装配应力的影响较小,且对柔性连接件切槽深度的变化不敏感;支撑长度主要影响结构的动态刚度,减小支撑长度能提高反射镜组件的一阶固有频率.最后确定了空间 SiC 反射镜背部中心支撑的最大适用口径为 750 mm,对口径小于 750 mm 的 SiC 反射镜在结构允许的前提下采用背部中心支撑均能满足设计要求.

关键词:空间光学;空间反射镜;有限元分析;背部中心支撑;支撑特性;适用口径

中图分类号:TP702; TH703

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)02-0222003-10

Characteristics of Rear Support in Centre for Space SiC Mirror

BAO Qi-hong^{1,2}, SHA Wei¹, CHEN Chang-zheng¹, REN Jian-yue¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Taking a SiC mirror with an aperture of 500mm for example, the supporting characteristic of rear support in centre was studied based on specific lightweight shape and supporting structure by using finite element analysis, and the effects of structural parameters on the performance were analyzed. The analyses point out that the optimal proportion of the diameter of support hole to the aperture of mirror is 0.23, the optimal rear shape of mirror with different aperture should be determined by using optimization method, and the surface accuracy can be improved by increasing the support depth when the gravity in radial direction. The analyses of supporting structure indicate that the radius of bolt circle at the bottom of the flexible connector is the key factor which has great influence on both the surface accuracy under the load case of temperature variation and the first order frequency of mirror subassembly, so it is considerable to weigh the requirement of surface accuracy and structural basic frequency when choosing the optimal value of the radius. The surface accuracy of the mirror supported by rear in centre is less affected by the assembling stress from outside and not sensitive to notch depth changing. The support length has a great influence on dynamic stiffness of the structure and its decrease will increase the first order frequency of mirror subassembly. Finally the maximum aperture of the space SiC mirror supported by rear in centre is intended to be 750 mm, which means that the mirror supported by rear in centre without of structural constraint can be satisfied with the referred requirement when its aperture is less than

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 863-2-5-1-13B)资助

第一作者:包奇红(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为空间相机光机结构设计. Email: qingtian@mail.ustc.edu.cn

导师(通讯作者):任建岳(1952-),男,研究员,博士,主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价. Email: renjy@ciomp.ac.cn

收稿日期:2016-07-19;录用日期:2016-09-18

<http://www.photon.ac.cn>

750 mm.

Key words: Space optics; Space mirror; Finite element analysis; Rear support in centre; Supporting characteristic; Applicative aperture

OCIS Codes: 220.0220; 120.4570; 120.6085; 130.6010

0 引言

反射镜的轻量化设计主要从材料选择、轻量化结构和支撑形式等方面综合考虑^[1]. 材料选择方面由于受材料工艺发展的限制,目前尚无可用的新型轻质且性能优异的反射镜材料^[2];而轻量化结构与支撑形式密切相关,要确定具体的轻量化结构,首先要选择具体的支撑形式.在光学遥感领域,对大口径反射镜多采用背部支撑和侧面支撑两种形式,支撑点的具体数目需依据反射镜的口径大小确定,口径越大,需要的支撑点数越多,对于更大口径的反射镜,甚至采用背部支撑与侧面支撑相结合的支撑形式,中心支撑则多用于小口径或中心开孔的反射镜^[3-4].日本的ASTRO-F望远镜^[5]主镜采用背部三个Bipod支撑,法国的Pleiades望远镜^[6]主镜采用3个Bipod侧边支撑,美国的Keck I望远镜^[7]的三镜则采用了背部支撑与侧面支撑相结合的支撑方式;国内陈洪达等^[8]对某同轴相机SiC主镜采用中心完全固定和背部法向固定的中心支撑方式,谭进国等^[9]研究了小型反射镜的中心支撑技术,朱俊青^[10]等采用集成参量化方法研究了长条形反射镜背部三支撑点的位置特性.

然而随着空间技术的不断进步,空间相机朝着高分辨率、宽覆盖的方向发展,致使反射镜口径和重量不断增大^[11].与此同时,轻小型遥感卫星对空间相机的重量和性能提出了更严苛的要求,使得传统的轻量化形式和背部或侧边多点支撑的方式难以满足超轻量化的要求^[12].与之相反,采用背部中心支撑的反射镜在轻量化方面具有明显优势,该支撑方式能较大程度地减小镜体及支撑结构的质量,是实现反射镜超轻量化的有效途径.

本文针对轻小卫星相机质量更轻、性能更好的设计要求,对空间反射镜提出一种基于背部中心支撑的轻量化结构形式.以500mm口径的SiC圆形镜为例,研究了空间反射镜的背部中心支撑特性,分析了反射镜及支撑结构的主要参量对反射镜性能的影响,在此基础上确定了背部中心支撑的最大适用口径.

1 反射镜结构分析

1.1 轻量化结构选择

以实体镜为研究对象研究空间反射镜的背部中心支撑特性,虽然能使所得结论适用于多种轻量化结构,但轻量化镜体与实体镜在力、热等性能方面必然存在一定差异,而空间用反射镜全都采用轻量化结构,因此为了使所得结论更加实用,本文直接以轻量化后的反射镜为研究对象,即先选择一种较佳的轻量化结构,然后基于该结构研究反射镜的背部中心支撑特性.以500mm口径的SiC圆形反射镜为研究对象,主要基于三点原因:500mm口径作为大、中口径的分界,具有一定的代表性;SiC是目前空间反射镜最常用的材料^[13];同等口径的空间长条镜可视为圆形镜的一部分.针对背部中心支撑形式,设计了三种不同的轻量化方案,如图1,图中方案1、2、3分别采用了直角三角形、曲边梯形和锐角三角形三种不同的轻量化孔形式.对三种方

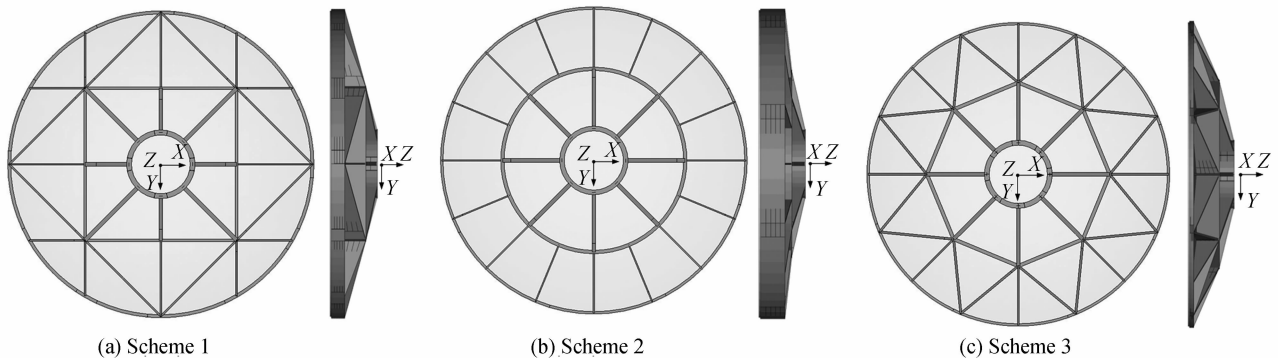


图1 反射镜轻量化方案

Fig. 1 Lightweight schemes of reflective mirror

案均采用变结构设计,即对不同区域的加强筋采用不同的高度和厚度,并采用多目标集成优化方法^[14]进行优化,即同时以镜体质量最小化和面形准确度最优化为目标,以得到综合品质最优的结果.从变结构和集成优化的结果看,背部中心支撑的反射镜,越靠近中心支撑孔的加强筋越厚越高,这种结构使镜体质量向支撑位置集中,因而有利于减小自重变形,提高面形准确度.三种设计方案的裸镜分析结果对比见表1,考虑到反

表1 轻量化方案对比

Table 1 Comparison of lightweight schemes

Scheme	M/kg	RMS _Y /nm	RMS _Z /nm	Integrated quality
1	5.56	2.704	2.483	28.3
2	6.01	2.647	2.655	27.2
3	5.25	3.126	1.949	30.3

射镜采用不同的装调方案时,重力作用的方向(径向或轴向)不同,对反射镜在径向和轴向两个方向的重力工况都进行考察,表中 RMS_Y 和 RMS_Z 分别代表反射镜在 Y 向(径向)和 Z 向(轴向)重力工况下的面形均方根值(Root-Mean-Square, RMS),RMS 值反映反射面波像差的大小,是衡量面形准确度的主要指标.综合品质(Integrated Quality, IQ)由镜体质量(M)和面形准确度(RMS_Y, RMS_Z)计算得出,是对轻量化方案的综合评价,其表达式为

$$IQ=100 \times \frac{1}{2M} + \frac{1}{4RMS_Y} + \frac{1}{4RMS_Z} \quad (1)$$

式中 1/2 和 1/4 分别为质量和面形准确度所占的权值,100 为放大系数.这里权值分配采用了均分原则,即镜体质量项(1/M)和面形准确度项(1/RMS)各占 1/2 的权值,其中面形准确度又包括两个方向的重力工况 RMS_Y 和 RMS_Z,继续均分则为 1/4.从对比结果可以看出方案 3 较方案 1、2 具有较小的质量和较高的 Z 向面形准确度,且其综合品质也最高.因此,选择锐角三角形轻量化孔方案(方案 3)作为较佳的轻量化结构形式,研究该轻量化反射镜的背部中心支撑特性将更具实用价值.

1.2 支撑孔直径分析

支撑孔直径是背部中心支撑的反射镜轻量化设计时首先要确定的结构参量,也是影响结构性能的关键参量之一,研究其对反射镜面形准确度的影响及确定最佳的支撑孔径与口径比对背部中心支撑的反射镜具有重要意义.以图 1(c)所示轻量化反射镜为初始模型,利用有限元软件中的 Hyper-Morph 功能模块对支撑孔直径进行缩放,可保证加强筋在缩放前后仍保持均匀分布.通过模型缩放,分析了支撑孔直径在 50~150 mm 范围内变化时对反射镜面形准确度的影响,结果见表 2,表中 Y、Z 分别表示 Y 向和 Z 向重力工况,重力工况下面形变化的峰谷值(Peak-to-Valley, PV)作为衡量面形准确度的另一指标,常用以考察反射面局部面形的好坏.面形准确度 PV 值和 RMS 值随支撑孔直径的变化趋势如图 2,可以看到 Y 向重力工况下,

表2 支撑孔直径分析结果

Table 2 Analysis results of the diameter of supporting hole

Diameter <i>d</i> /mm	Y		Z	
	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm
60	19.247	3.957	11.734	3.236
70	18.141	3.745	10.797	2.854
80	17.055	3.534	10.099	2.498
90	15.944	3.327	9.445	2.196
100	14.967	3.126	8.854	1.949
105	14.355	2.985	8.533	1.845
110	14.208	2.931	8.282	1.777
115	14.196	2.838	8.425	1.732
120	14.167	2.748	9.619	1.720
125	14.124	2.659	10.951	1.746
130	14.067	2.573	12.430	1.816
140	13.935	2.412	15.860	2.102
150	13.768	2.263	20.654	2.574

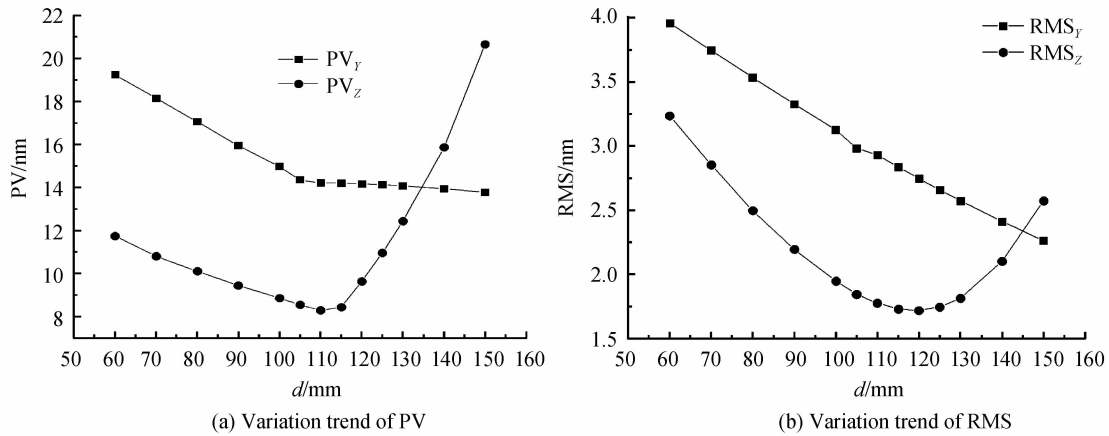


图2 面形准确度随支撑孔直径的变化趋势

Fig. 2 Variation trend of surface accuracy varying with the diameter of supporting hole

PV值和RMS值均随支撑孔直径的增大而逐渐减小,说明增大支撑孔直径有利于提高Y向重力工况下的面形准确度,其原因在于径向重力作用下,反射镜边缘因距离支撑位置较远而产生较大的自重变形,增大支撑孔直径缩短了这一距离从而减小了边缘变形;Z向重力工况下,面形变化的PV值和RMS值则呈现出先减小后增大的趋势,其原因在于支撑孔直径较小时,轻量化孔的内切圆半径较大导致其内部镜面在轴向重力作用下具有较大塌陷,而在支撑孔直径较大时,孔内镜面塌陷较大.还可以看到Z向重力工况下,面形PV值在 $d=110$ mm处具有最小值,RMS值在 $d=120$ mm处取得最小值,说明存在最佳的支撑孔直径使得反射镜在Z向重力工况下的面形准确度最高.根据以往经验,背部中心支撑的反射镜,支撑结构对其轴向重力变形影响较大,带组件分析时Z向重力工况下的面形准确度与裸镜分析结果相比会有较大程度下降,因此综合考虑Z向重力变形的PV和RMS两个面形准确度指标,确定最佳支撑孔直径为115 mm,最佳支撑孔口径比为0.23(115/500),这一比例使反射面相对于背部加强筋的质量分布更加均匀,从而获得较高的面形准确度,可作为其他口径的SiC圆形反射镜中心支撑孔直径取值的参考.

1.3 背部形状分析

集成优化过程中,反射镜的背部形状是由三个控制点的上下移动来控制,控制点的移动量用变量 h_1 、 h_2 和 h_3 表示,控制点之间线性过渡,如图3,其中点划线表示控制点的初始位置,规定控制点上移控制变量为正,反之为负.以支撑孔直径为115 mm的反射镜为研究对象,采用响应面方法^[15]分析各控制变量与反射镜面形准确度间的关系,采用完全四次多项式作为基函数,建立面形准确度PV和RMS关于各控制变量的近似模型,得到各变量对PV和RMS的帕累托贡献如图4,其中正值表示正效应,负值表示负效应.可以看到Y向和Z向重力工况下的面形准确度PV和RMS受各控制变量的影响情况各不相同,三个变量均对面型准确度的变化有较大的贡献,且各变量之间相互耦合(交叉项 $h_1 \cdot h_2$, $h_2 \cdot h_3$, $h_1 \cdot h_3$),说明面形准确度与背部形状之间的关系较为复杂,很难直接确定背部形状控制变量的最佳取值.因此对不同口径的反射镜,要确定最佳的背部形状,需通过集成优化的方法来确定背部形状变量的最佳取值.

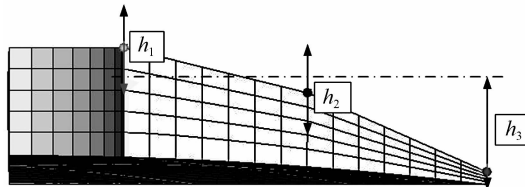


图3 反射镜背部形状控制变量示意图

Fig. 3 Control variables of the rear shape of mirror

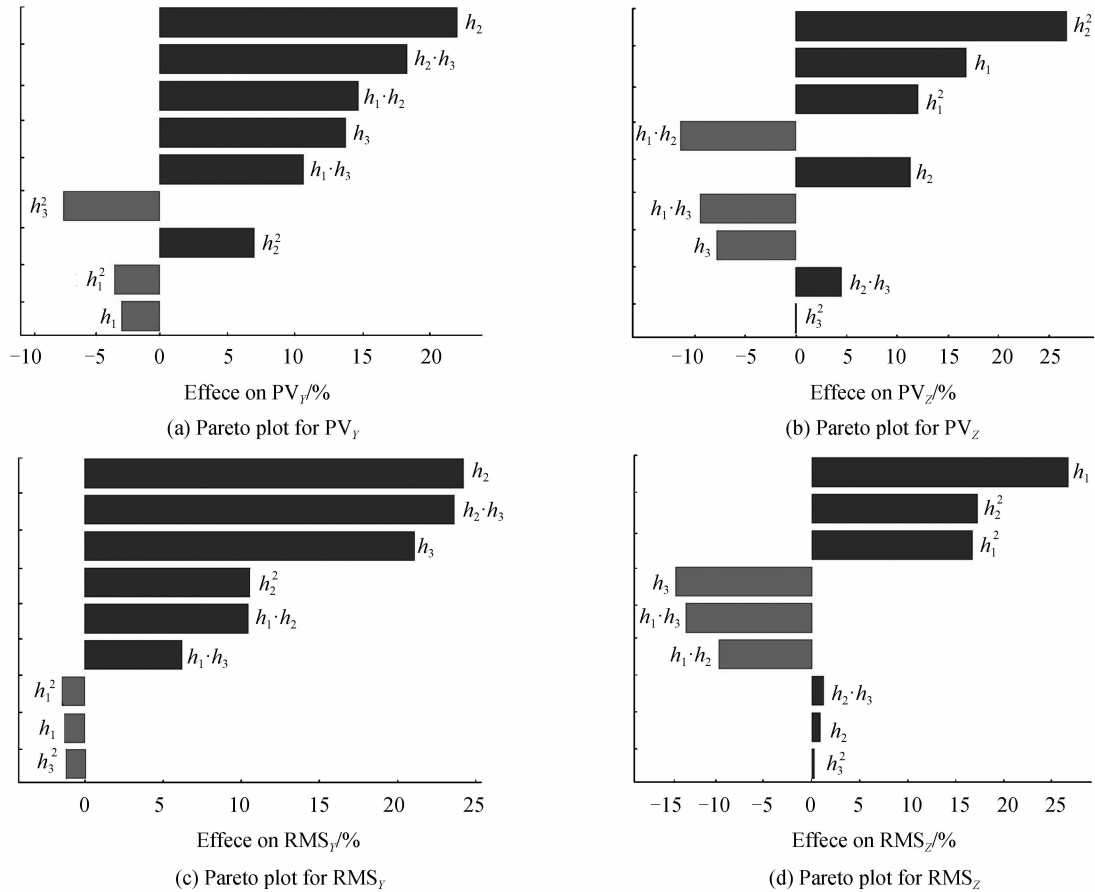


图 4 控制变量对面形准确度的帕累托贡献
Fig. 4 Pareto plot for surface accuracy varying with control variables

1.4 支撑深度分析

支撑深度是指从支撑孔顶部到支撑结构前端的距离,实际上是支撑孔与支撑结构的配合长度 h ,如图 5. 背部支撑的反射镜,当支撑深度较浅、支撑前端距离镜面较远致使反射镜重心远离支撑中性面时,在径向重力作用下反射镜会产生较大的倾覆力矩,从而降低面形准确度. 对多点柔性支撑的反射镜倾覆力矩的作用尤为明显,解决办法通常是增加加强筋或镜体的厚度,设计背部翻边等使反射镜的重心后移,缩小重心到支撑中性面的距离,从而减小甚至消除倾覆力矩的影响. 背部中心支撑的反射镜,由于受热载荷和外界作用力的影响较小^[16],在支撑结构设计时可适当增加柔性元件的刚度,能在一定程度上减小倾覆力矩对镜面面形的影响. 支撑深度分析旨在研究重力工况下的面形准确度随支撑深度变化的关系,以找出提高面形准确度的有

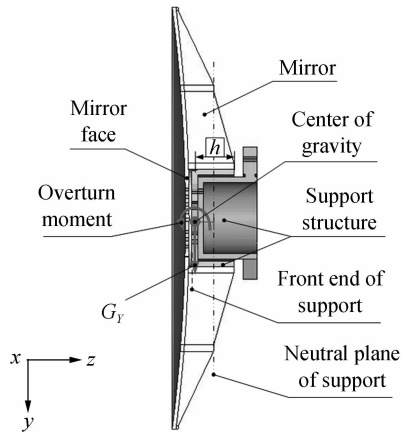


图 5 支撑深度分析示意图
Fig. 5 Schematic of support depth analysis

表 3 支撑深度分析结果
Table 3 Analysis results of the supporting depth

Depth h/mm	Y		Z	
	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm
30.0	35.180	7.137	18.963	4.772
32.5	32.986	6.599	18.885	4.791
35.0	30.684	6.047	18.791	4.806
37.5	28.265	5.480	18.688	4.821
40.0	25.711	4.900	18.571	4.838
42.5	23.067	4.308	18.439	4.855
45.0	20.346	3.706	18.283	4.880
47.5	17.301	3.097	18.093	4.922
50.0	13.803	2.489	18.064	4.988

效措施. 以支撑孔直径 115 mm 的反射镜(图 5)为研究对象, 该反射镜的背部船型结构使其重心远离支撑中性面, 反射镜在 Y 向重力作用下承受一定的倾覆力矩的作用. 分析支撑深度 h 在 30~50 mm 范围内变化时面形准确度的变化情况, 结果见表 3. PV 值和 RMS 值随 h 的变化趋势如图 6, 可以看到 Y 向重力工况的面形准确度对支撑深度的变化较为敏感, PV 值和 RMS 值均随支撑深度的增大而急剧减小, 其原因在于倾覆力矩对 Y 向自重变形的影响较大, 而当支撑深度增大时, 反射镜重心会越靠近支撑中性面, 使得倾覆力矩减小, 面形准确度得以提高. 因此适当增加支撑刚度和支撑深度有利于提高反射镜在 Y 向重力工况下的面形准确度. 在增加支撑刚度时要保证结构具有足够的柔性以缓解温度载荷和装配应力的影响, 在增加支撑深度时要在支撑前端与反射面之间留出一定的安全距离.

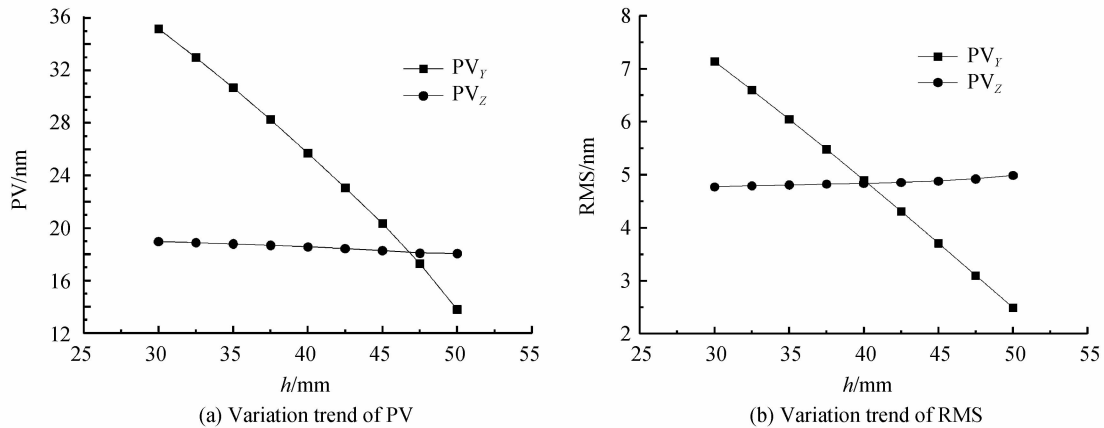


图 6 面形准确度随支撑深度的变化趋势

Fig. 6 Variation trend of surface accuracy varying with supporting depth

2 支撑结构分析

2.1 支撑结构设计

支撑结构对反射镜的影响主要体现在三个方面: 不同材料间线胀系数不匹配产生热应力影响面形准确度; 装调过程中因基准面平面度误差产生装配应力影响面形准确度; 支撑刚度在一定程度上决定了反射镜组件一阶固有频率的高低^[17]. 支撑结构分析旨在研究反射镜组件在温度载荷工况和装配应力工况下影响面形准确度的主要参量及其与结构基频的关系, 分析时需要针对具体的结构形式. 所设计的支撑结构如图 7, 其中柔性连接件为主要分析对象, 要分析的结构参量包括底部螺栓圆半径 r , 连接长度 l 和切槽深度 t . 支撑结构中锥套材料为殷钢(4J32S), 柔性连接件材料为钛合金(TC4), 背板材料为高体份(SiC/Al), 反射镜组件中所用材料的属性见表 4, 表中 CTE 表示材料的线膨胀系数(Coefficient of Thermal Expansivity, CET).

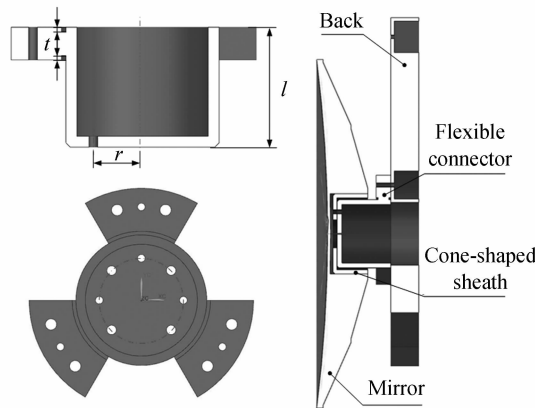


图 7 支撑结构分析示意图

Fig. 7 Schematic of supporting structure analysis

表 4 材料属性

Table 4 Properties of materials

Material	Density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Young's modulus/GPa	Poisson's ratio	CTE/($10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)
SiC	3.2	330	0.30	2.4
4J32S	8.9	141	0.25	2.4
TC4	4.4	114	0.34	9.1
SiC/Al	3.0	180	0.30	8.0

2.2 螺栓圆半径分析

从表 4 可以看到锥套与柔性连接件的材料线胀系数差异最大,当温度变化时,由于膨胀或收缩的程度不同,二者在螺栓连接孔处发生干涉,出现较大的热应力,进而影响面形准确度.螺栓孔的间距越大,干涉越明显,这种影响就越显著,因此可以预见参量 r 是影响温度载荷工况下面形准确度的关键参量,减小 r 将有利于提高面形准确度.表 5 为底部螺栓圆半径 r 的分析结果,其中 T 表示 4°C 均匀温升载荷工况.可以看到随着螺栓圆半径的逐步增大,PV 值和 RMS 值均随之增大,面形准确度逐渐降低.从表中数据还可以看到当 r 减小时反射镜组件的一阶固有频率随之降低,说明 r 也是影响结构动态刚度的关键参量,其原因在于螺栓连接可以近似等效于刚性杆连接,杆截面直径近似等效于螺栓圆直径,当 r 增大时相当于增大了连接杆的直径,因而提高了连接刚度.可见参量 r 的确定需要综合考虑结构基频和面形准确度两方面的指标要求,考虑到结构基频低、动态特性差是背部中心支撑的一大缺点,在保证面形准确度满足要求且结构允许的前提下尽量取较大的 r 值以提高结构的基频.

表 5 螺栓圆半径分析结果

Table 5 Analysis results of the radius of bolt circle

Radius r/mm	T		First order frequency/Hz
	PV/nm	RMS/nm	
20	16.415	2.809	114
21	18.251	3.079	119
22	20.213	3.412	124
23	22.296	3.758	129
24	24.508	4.137	134
25	26.850	4.550	139
26	29.322	5.001	144
27	31.931	5.494	150
28	34.678	6.030	155
29	37.565	6.615	160
30	40.591	7.252	166
31	43.757	7.946	171
32	47.068	8.702	177

2.3 切槽深度分析

虽然背部中心支撑的反射镜受外界作用的影响相对较小,但因在支撑结构设计阶段为了提高刚度而牺牲了结构的大部分柔性,大大降低了结构的卸载能力,因此分析装配应力对面形准确度的影响是十分必要的.装配应力是由于安装配合面存在加工误差致使各元件在接触面上产生相互拉压作用产生的.图 5 中锥套与反射镜采用胶结连接,可认为其连接不存在装配应力,锥套与柔性连接件的配合面较小,可保证较高的加工准确度,背板与机架连接的配合面虽然会有较大的加工误差,但产生装配应力的部位离反射镜较远,对镜面的影响不大.因此对面形准确度影响最大的是柔性连接件与背板配合面上产生的装配应力,柔性连接件上的切槽是为释放这一应力而设计的,切槽深度 t 与释放能力的大小有关.柔性连接件与背板共有三个配合面,分析时用其中一个面上螺栓孔处 Z 向 $10 \mu\text{m}$ 的强制节点位移来模拟该装配应力工况,分析结果见表 6,其中 S 代表装配应力工况,面形准确度 PV 和 RMS 随 t 变化的趋势如图 8.从分析结果看,镜面受外界装配应力的作用较小,面形准确度对参量 t 的变化并不敏感,从变化趋势看,随着切槽深度的增加,PV 和 RMS 均呈现出先减小后增大的趋势,其原因在于当切槽较浅时,随着切槽深度的增加,柔性连接件的柔性增大,卸载能力随之增强,当切槽过深时,柔性连接件反而会因变形过大而产生较大的局部应力对镜面造成不利影响.

由于 PV 值和 RMS 值已经很小,对参量 t 的变化也不敏感,且当 $t=0$ 时,装配应力工况下的面形准确度 PV 值和 RMS 值分别为 11.898 nm 和 2.697 nm,仍能满足面形要求,因此为了增加支撑刚度,可不对柔性连接件进行切槽处理.

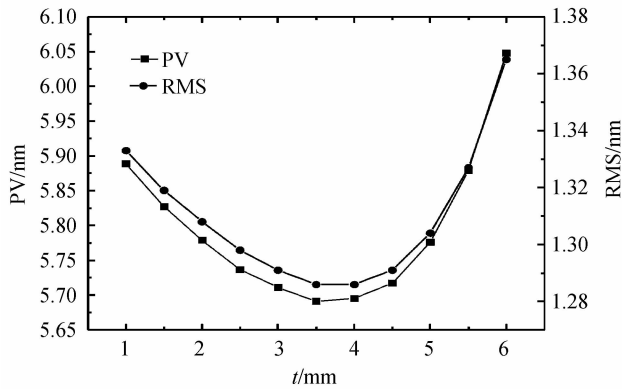


图 8 面形准确度变化趋势
Fig. 8 Variation trend of surface accuracy

表 6 切槽深度分析结果

Table 6 Analysis results of notch depth

Radius r/mm	S		First order frequency/Hz
	PV/nm	RMS/nm	
1.0	5.889	1.333	180
1.5	5.827	1.319	179
2.0	5.779	1.308	178
2.5	5.737	1.298	177
3.0	5.711	1.291	176
3.5	5.691	1.286	175
4.0	5.695	1.286	174
4.5	5.717	1.291	173
5.0	5.776	1.304	171
5.5	5.879	1.327	168
6.0	6.048	1.365	165

2.4 支撑长度分析

背部中心支撑形式类似于一段悬臂梁结构,反射镜安装于梁的悬臂端.当支撑长度增加时悬臂变长,在自重作用下悬臂端挠度增大,反射镜在 Y 向重力作用下的镜面刚体位移和偏转都会随之增大.支撑长度分析主要研究柔性连接件长度 l 对反射镜在 Y 向重力作用下镜面刚体位移和偏转角度的影响以及 l 与结构基频的关系.表 7 的分析结果表明采用较小的支撑长度可以减小反射镜在 Y 向重力作用下的镜面偏移和偏转,同时能提高结构的一阶固有频率,即较小的支撑长度有利于提高结构的动、静态刚度.

表 7 支撑长度分析结果

Table 7 Analysis results of supporting length

Length l/mm	Y		First order frequency/Hz
	$\delta/\mu m$	$\theta/(\prime)$	
60	1.567	3.472	180
65	1.786	3.811	179
70	2.020	4.148	177
75	2.270	4.483	175
80	2.535	4.819	174
85	2.817	5.154	172
90	3.116	5.491	170

3 背部中心支撑的最大适用口径

背部中心支撑的最大适用口径既受反射镜的轻量化形式和支撑结构等因素的影响,还与反射镜的具体设计要求有关.本文设计要求反射镜在 1G 重力工况和 4℃ 均匀温升载荷工况下面形变化的 PV 值小于 $\lambda/10$ ($\lambda=632.8$ nm),RMS 值小于 $\lambda/50$,反射镜组件的一阶固有频率不低于 100 Hz.以该设计要求为准,讨论采用本文所述轻量化形式和支撑结构的 SiC 反射镜背部中心支撑的最大适用口径问题.以 500 mm 口径的 SiC 反射镜为研究对象,依据参量分析的结果对各参量进行合理的取值,得到综合性能最佳的有限元仿真模型如图 9,各参量的取值见表 8.通过对仿真模型按不同比例放大得到更大口径的反射镜模型,仿真分析反射镜的各项性能指标见表 9.可以看到随着口径的增大,反射镜的面形准确度和组件的一阶固有频率都在降低,当口径达到 790 mm 时,反射镜 Z 向重力工况的面形准确度 RMS 值和 4℃ 均匀温升载荷工况的面形准确度 PV 值均已接近设计要求的极限,而反射镜组件的一阶固有频率则刚好能满足设计要求.考虑到仿真分析与工程实际存在一定的误差以及需为后续设计留出一定的余量,最终确定背部中心支撑的最大适用口径为 750 mm,而对于口径小于 750 mm 的 SiC 反射镜,在结构允许的前提下采用背部中心支撑可以满足设计要求.

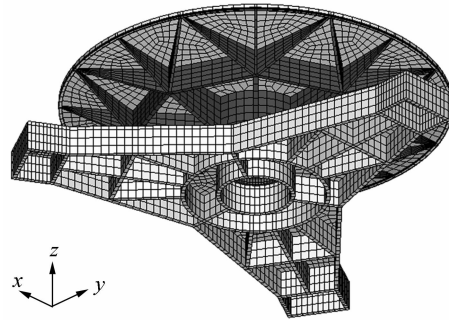
图 9 $\Phi 500$ mm 反射镜模型Fig. 9 The model of $\Phi 500$ mm mirror

表 8 结构参数的取值

Table 8 Values of structure parameters

Parameter	d	h	r	t	l
Value/mm	115	45	28	0	65

表 9 不同口径反射镜的仿真结果

Table 9 Simulation results of different aperture mirrors

Scale ratio	Aperture of mirror/mm	Y		Z		T		First order frequency/Hz
		RMS/nm	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	RMS/nm	PV/nm	
1.00	500	3.210	16.676	4.128	14.766	6.010	34.567	158
1.20	600	3.425	19.979	6.005	21.414	7.199	41.491	132
1.40	700	3.507	22.388	8.276	29.426	8.372	48.426	113
1.50	750	3.688	22.816	9.568	33.969	8.951	51.895	106
1.58	790	4.868	27.945	10.680	37.867	9.408	54.664	100
1.60	800	5.289	29.374	10.970	38.881	9.521	55.354	99

4 结论

本文基于特定的轻量化形式和支撑结构,以 500 mm 口径的 SiC 反射镜为例,研究了空间 SiC 圆形反射镜的背部中心支撑特性.首先分析了反射镜支撑孔直径、背部形状和支撑深度与反射镜面形准确度的关系.分析指出支撑孔直径与反射镜口径的最佳比例为 0.23,这一比例使反射镜在 Y 和 Z 向重力工况下的综合面形准确度最高;背部形状对面形准确度的影响规律较为复杂,各控制参量之间相互耦合,设计时可通过集成优化的方法确定各参量的最佳取值;支撑深度主要影响 Y 向重力工况下的面形准确度,增大支撑深度有利于提高该工况下的面形准确度.其次设计了适用于背部中心支撑的柔性支撑结构,重点分析了柔性连接件底部螺栓圆半径、切槽深度和支撑长度对反射镜组件性能的影响.结果表明底部螺栓圆半径对温变载荷作用下的面形准确度和反射镜组件的一阶固有频率都有较大影响,底部螺栓圆半径的选取需综合考虑面形准确度和结构基频两个指标要求;面形准确度受外界装配应力的影响较小,且对切槽深度的变化不敏感;支撑长度主要影响结构的动态刚度,减小支撑长度能提高反射镜组件的一阶固有频率.最后针对设计要求,确定了采用本文所述的轻量化形式和支撑结构的 SiC 反射镜背部中心支撑的最大适用口径为 750 mm,指出对口径小于 750 mm 的 SiC 反射镜在结构允许的前提下采用背部中心支撑能满足设计要求.

参考文献

- [1] XU Hong, GUAN Ying-jun. Structure design of 1 m diameter space mirror component of space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(6): 1488-1495.
徐宏, 关英俊. 空间相机 1m 口径反射镜组件结构设计[J]. *光学精密工程*, 2013, **21**(6): 1488-1495.
- [2] WANG Yong-jie, XIE Yong-jie, MA Zhen, et al. Research progress of new space mirror materials[J]. *Materials Review A*, 2016, **30**(4): 143-153.
王永杰, 解永杰, 马臻, 等. 空间反射镜材料研究进展[J]. *材料导报 A*, 2016, **30**(4): 143-153.
- [3] FENG Zheng-sen, WANG Guo-min. Optimization analysis of primary mirror in large aperture telescope based on workbench[C]. SPIE, 2015, **9678**: 96780Y.
- [4] ZHANG Li-min, WANG Fu-guo, AN Qi-chang, et al. Application of bipod to supporting structure of minitype reflector[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(2): 438-443.

- 张丽敏, 王富国, 安其昌, 等. Bipod 柔性结构在小型反射镜支撑中的应用[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(2):438-443.
- [5] KANEDA H, ONAKA T, NAKAGAWA T, *et al.* Cryogenic optical performance of the ASTRO-F SiC telescope[J]. *Applied Optics*, 2005, **44**(32): 6823-6832.
- [6] CHAN Chia-Yen, HUANG Bo-kai, YOU Zhen-ting, *et al.* Optimization study on the primary mirror lightweight on a remote sensing instrument[C]. SPIE, 2015, **9524**: 95240T.
- [7] PROCHASKA J X, RATLIFF C, CABAK J, *et al.* Detailed design of a deployable tertiary mirror for the Keck I telescope[C]. SPIE, 2016, **9910**: 99102I.
- [8] CHEN Hong-da, CHEN Yong-he, SHI Ting-ting, *et al.* Lightweight and mounting design for primary in space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(2):535-540.
陈洪达, 陈永和, 史婷婷, 等. 空间反射镜的轻量化及支撑结构设计研究[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(2):535-540.
- [9] TAN Jin-guo, HE Xin, FU Liang-liang. Support technique in centre of minitype reflector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, **39**(6):1070-1074.
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.
- [10] ZHU Jun-qing, SHA Wei, CHEN Chang-zheng, *et al.* Position layout of rear three point mounting for space rectangular mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(9):2562-2569.
朱俊清, 沙巍, 陈长征, 等. 空间长条形反射镜背部三支撑点的设置[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(9):2562-2569.
- [11] ZHU Jun-qing, SHA Wei, CHEN Chang-zheng, *et al.* Frequency response of imaging quality by mirco-vibration for large-aperture space-borne telescope[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, **24**(5):1118-1127.
朱俊青, 沙巍, 陈长征, 等. 大口径空间相机像质的为振动频率响应计算[J]. 光学精密工程, 2016, **24**(5):1118-1127.
- [12] CHEN Yong-he, CHEN Hong-da, FU Yu-tian. Optical design of small-sized camera in visible for micro-satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(7):2087-2029.
陈永和, 陈洪达, 傅雨田. 适用于微小卫星平台的小型可见光相机设计[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(7):2087-2029.
- [13] YUAN Jian, REN Jian-yue. Improvement and optimization of lightweight structure for SiC reflective mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(8):0812004.
袁健, 任建岳. 碳化硅反射镜轻量化结构的改进与优化[J]. 光子学报, 2015, **44**(8):0812004.
- [14] YUAN Jian, SHA Wei, CHEN Chang-zheng, *et al.* Integrated optimization design of rectangular reflective mirror[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2015, **42**(6):85-89.
袁健, 沙巍, 陈长征, 等. 长条形反射镜的集成优化设计[J]. 光电工程, 2015, **42**(6):85-89.
- [15] WANG Shu-xin, LI Jing-lin, ZHANG Fan, *et al.* Optimization of large aperture space reflector based on RSM[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, **42**(S2):291-297.
王书新, 李景林, 张帆, 等. 响应面模型的大口径空间反射镜优化[J]. 红外与激光工程, 2013, **42**(S2):291-297.
- [16] XIN Hong-wei. Design and analysis on the flexible structure of the optical reflector[J]. *OME Information*, 2010, **27**(7):51-55.
辛宏伟. 小型轻质长条反射镜挠性支撑方案研究[J]. 光机电信息, 2010, **27**(7):51-55.
- [17] XU hong, GUAN Ying-jun. Structural design of large aperture SiC mirror subassembly[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(S):83-88.
徐宏, 关英俊. 大口径 SiC 轻量化反射镜组件的结构设计[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(S):83-88.