

doi:10.3788/gzxb20154408.0812004

碳化硅反射镜轻量化结构的改进与优化

袁健^{1,2}, 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 100049)

摘要: 为了提高碳化硅反射镜的成像质量, 针对反射镜传统的轻量化结构提出了改进形式及相应的优化方法. 提出轻量化反射镜的变筋厚设计方案, 分别基于几何位置与传力路径对轻量化筋进行分组, 成像质量与传统结构相比明显提高, 指出具有不同拓扑关系的轻量化筋在增强镜体刚度的过程中所起到的作用不同. 对反射镜背部的筋板结构进行修剪, 改善了远离支撑孔处面形的局部塌陷. 针对改进后的反射镜建立集成优化模型, 使用多岛遗传算法确定了反射镜中各结构参数的最佳组合. 仿真结果表明, 基于传力路径的分组改进方案经优化后的性能相比传统结构经优化所得的结果, 面形准确度提高了 33.2%, 重量下降了 11.7%.

关键词: 空间光学; 变筋厚设计; 集成优化设计; 拓扑关系; 多岛遗传算法

中图分类号: TP391.7

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)08-0812004-6

Improvement and Optimization of Lightweight Structure for SiC Reflective Mirror

YUAN Jian^{1,2}, 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: In order to improve imaging quality of SiC reflective mirror, an improved scheme of traditional lightweight mirror and the corresponding optimization method were proposed. The scheme of variable rib thickness design for lightweight mirror was brought forward. Lightweight ribs were divided into different groups based on geometry position and force transferring route respectively, both schemes with grouping performed better than traditional structure in imaging quality, indicating that lightweight ribs with different topology relation played different roles in enhancing the stiffness of lightweight mirror. The ribs on the back of mirror were trimmed in order to improve local distortion in areas away from supporting holes. The integrated optimization model based on improved structure was built, using Multi-island Generic Algorithm to find the best combination of all the structure parameters. The simulation results show that after optimization, the grouping scheme based on force transferring route overmatches traditional design, with surface quality improved by 33.2%, and mass decreased by 11.7%.

Key words: Space optics; Variable rib thickness design; Integrated optimization design; Topology relationship; Multi-island Generic Algorithm(MIGA)

OCIS Codes: 120.6085; 280.4788; 120.4570

0 引言

随着空间技术的不断发展, 空间相机在大地测绘、

资源探测、导航定位、国防侦查等领域发挥的作用越来越大^[1-2]. 为了满足高分辨率、大视场的观测需求, 长焦距、大口径成为现代空间相机的方向发展^[3-7], 主要光

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: 袁健(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为空间相机光机结构设计. Email: jyuan@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传感器的研制和性能评价. Email: renjy@ciomp.ac.cn

收稿日期: 2015-03-24; 录用日期: 2015-05-06

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

学元件及结构件的尺寸不断增大,整机的重量不断提高.在现代空间相机的光机结构中,轻质反射镜是全反射式光学系统中的关键部件,其性能的好坏直接影响到传感器的成像质量^[3,8-9].

现代遥感器中应用的反射镜普遍采用轻量化方法来设计,旨在减轻镜体质量,降低发射成本和支撑结构设计难度的同时,尽量控制光学表面自重变形、提高结构比刚度^[10].在传统轻量化结构的基础上,根据实际光学系统的装配特点和相关元件的制造工艺水平,对轻质反射镜的结构进行改良和优化是现代空间相机研制过程中的重要环节.张媛媛等设计了一种剖面为船型且无外环的口径为 $\Phi 510$ mm的超轻量化反射镜^[11];刘书田等研究了针对具有筋板式结构的大口径反射镜的拓扑优化设计方法^[12];夏瑜等采用碳纤维增强复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)设计了具有准各向同性的反射镜,并对其铺层进行了优化^[13];胡海飞等提出了大口径反射镜的分析驱动设计方法,将优化算法与有限元分析相结合,简化了光机结构设计的过程^[14].相关研究均将反射镜的轻量化筋做统一化处理.本文分析了具有不同拓扑关系的轻量化筋在加强镜体刚度过程中的作用,通过对筋分组以及修剪背部筋板结构的方式,结合集成优化方法,确定了

全部结构参量的最佳组合,提升反射镜的成像质量.

1 轻量化反射镜的初始结构

制造反射镜的材料、轻量化孔的形状、支撑方案以及镜体的轻量化形式等因素均会影响到反射镜的刚度^[3,9-10,15-16].为了保证反射镜在重力载荷和温度载荷作用下均具有良好的光学性能,要求用来制造反射镜的材料具有比刚度高、热稳定性好的特点,空间相机中常用的光学材料及其物理属性如表 1.碳化硅(Silicon Carbide, SiC)不仅综合品质高,而且可加工性良好,能够保证反射镜形状和尺寸的稳定性,通过研磨、抛光可获得较高的表面质量,是目前制造反射镜的首选材料^[17].轻量化孔的形状主要有三角形、正方形、扇形、蜂窝形和复合型等,其中三角形轻量化孔网格效应较小,且轻量化率适中,目前反射镜多采用三角形孔结构.中、小口径的反射镜采用的支撑方案以背部三点支撑最多,具体需根据整机结构结合经验公式来确定.镜体的轻量化形式主要有开放式、半封闭式、封闭式等形式,其刚度依次增大,加工难度和成本也随之提高.本文所讨论的反射镜,其口径为 $\Phi 510$ mm,材料采用 SiC,轻量化孔为三角形,支撑方案采用背部三点支撑,轻量化形式为开放式,其初始结构如图 1(a).

表 1 常见反射镜材料的物理属性

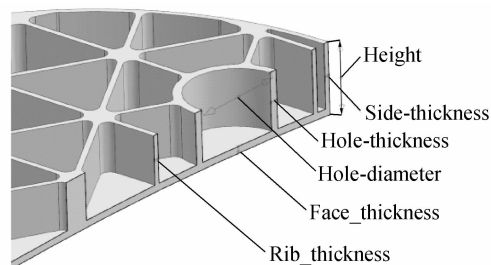
Table 1 Physical properties of common materials for reflective mirror

Material	SiC	Si	Be	Zerodur	Al	FS
Density ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	3 200	2 330	1 850	2 530	2 700	2 190
Young's modulus E /GPa	400	131	287	91	68	72
Thermal conductivity λ ($\text{W} \cdot \text{mK}^{-1}$)	155	137	216	1.64	167	1.4
Thermal expansivity α /($\times 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$)	2.4	2.6	11.4	0.05	22.5	0.5
E/ρ /($\times 10^6$ m)	125	56.2	155	36	25.2	32.9
λ/α /($\times 10^{-6}$ m/W)	64.6	52.7	18.9	32.8	7.42	2.8
$(\lambda/\alpha) \cdot (E/\rho)$	8 073	2 962	2 939	1 180	187	92

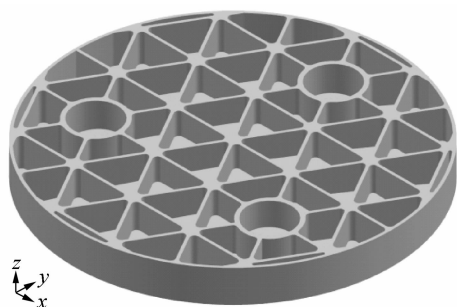
2 反射镜的改进形式

2.1 轻量化反射镜的变筋厚设计

当圆形反射镜的口径确定后,轻量化反射镜待确定的结构参量主要包括镜体高度、反射面厚、外壁厚、支撑孔壁厚及内径和轻量化筋厚等,如图 1(b).在反



(b) Schematic of structural parameters



(a) Geometry model

图 1 轻量化反射镜初始结构

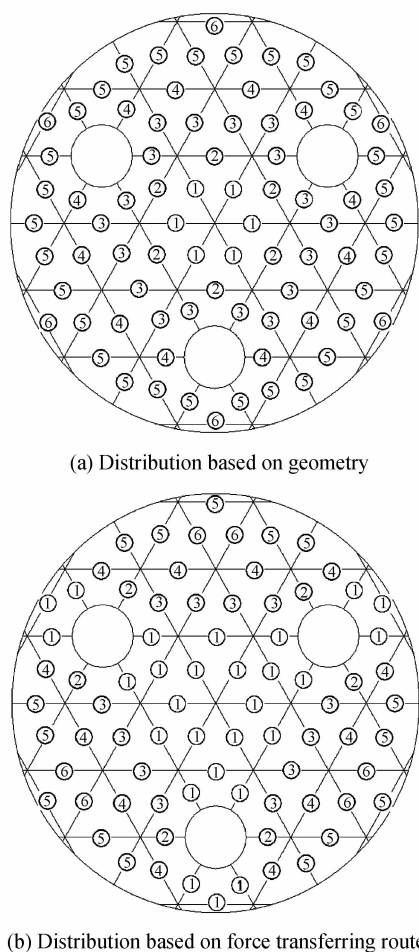
Fig. 1 Original structure of lightweight reflective mirror
射镜的传统设计中,通常将全部的轻量化筋按统一的厚度处理,且取值离散化,这样既可以降低设计难度,又考虑到了当时 SiC 镜坯制造工艺的限制,能够满足中、小口径反射镜的设计要求.但该方法中,筋的厚度由主要传力路径上的筋厚决定,而该厚度对于非主要

变形区域的轻量化筋来说太厚,从而导致局部镜体质量的冗余,增加镜体总重,自重变形随之增大,进而降低光学表面的面形准确度.这一问题在大口径 SiC 反射镜的研制过程中体现的尤其明显.

因此,本文将轻质反射镜中的轻量化筋按照一定的规则进行分组,使得不同组轻量化筋的厚度不同,通过拓展设计变量、增加设计自由度的方法,来改善反射面的面形准确度.

2.1.1 轻量化筋分组方案

讨论的反射镜具有中心对称结构,可以按照各组筋与圆心之间的距离,即几何位置,将轻量化筋分组,如图 2(a).也可以根据在特定的载荷与约束条件下的传力路径对轻量化筋分组.对于采用背部三点支撑方案的较大口径 SiC 圆形反射镜而言,在其加工和装调的过程中,光轴竖直时,即 z 向工况下,自重变形最大,因此,在设计和优化时主要考虑这一工况即可.为了揭示该工况下的传力路径,需要对原始的结构模型进行拓扑优化,其结果如图 3,图中的深色部分代表此处承担的载荷较多.根据以上结果,对轻量化筋进行分组,结果如图 2(b).



(a) Distribution based on geometry

(b) Distribution based on force transferring route

图 2 轻量化筋分组示意图

Fig. 2 Schematic of distribution of lightweight ribs

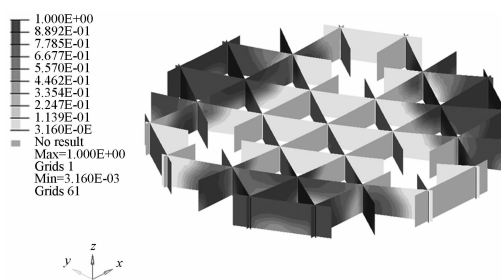


图 3 拓扑优化效果图

Fig. 3 Results of topology optimization

2.1.2 仿真结果比较

以轻量化筋的厚度作为设计变量,对传统方案和两种分组方案分别进行优化.其中,各方案中轻量化筋厚度的初始值均为 4 mm,变化范围 3~8 mm,其它结构参量保持不变,包括镜体高度 50 mm、反射面厚 5 mm,外壁厚 4 mm,支撑孔直径 75 mm,支撑孔壁厚 6 mm.

在两分组方案中,将轻量化筋分为 6 组,各组筋的厚度相互独立.在相同约束和目标函数的设置下,各方案经优化后得到的结果见表 2.从表中可见,优化后,按几何位置对筋分组 (RMS=12.304 nm, Mass=9.57 kg) 和按传力路径对筋分组 (RMS=12.028 nm, Mass=9.49 kg) 得到的两种结构,其面形质量较传统方案 (RMS=14.781 nm) 分别提升了约 16.7% 和 18.6%,质量较传统方案 (Mass=12.25 kg) 分别减小了 21.9% 和 22.5%,说明两种变筋厚改进设计均可以在减小镜体质量的同时,明显改善反射面面形准确度.分析其原因主要有两个方面:1) 反射镜的局部刚度与相应位置的筋结构参量直接相关,特定工况下,具有不同拓扑关系的轻量化筋在加强反射镜刚度的过程中所起到的作用不同,因此可以通过调整、协调不同位置轻量化筋的厚度来改善反射镜局部的比刚度,进而提高整个反射面的面形准确度;2) 两种分组方案虽然依据不同,但都将单一的轻量化筋厚度转化成一组新的变量,增加了设计问题的自由度,极大地扩展了设计问题的解空间,从而得到优于传统结构的设计.

表 2 优化结果

Table 2 Results of optimization

Design scheme	No distribution	Distribution based on geometry position	Distribution based on force transferring route
Rib_1/mm		7.38	3.95
Rib_2/mm		6.8	7.3
Rib_3/mm		7.19	7.65
Rib_4/mm	7.84	7.22	7.98
Rib_5/mm		3.03	3.16
Rib_6/mm		3.08	3.38
Mass/kg	12.25	9.57	9.49
RMS/nm	14.781	12.304	12.028

2.2 反射镜背部的修剪

以基于传力路径对筋分组并经优化后得到的结构

为例,在光轴竖直的工况下,得到变形后反射面的节点数据,经拟合后如图4(a).从图中可以发现距离支撑孔较远的位置,局部的塌陷变形较大,这是因为这些区域受支撑孔处约束反力的影响较小,而受局部自身重力的影响较大.针对这一现象,可以考虑降低镜体背部边缘附近的轻量化筋和外壁高度.结合 SiC 反射镜的制造工艺,尽量减少棱角的产生,可以用平面沿着某轻量化筋进行切割,对镜体作出的改进如图4(b).确定待修剪高度(Trim_height)时,需要考虑多个设计变量之间的相互作用,应将修剪高度和轻量化筋厚度等结构参量当做变量,一同进行优化.

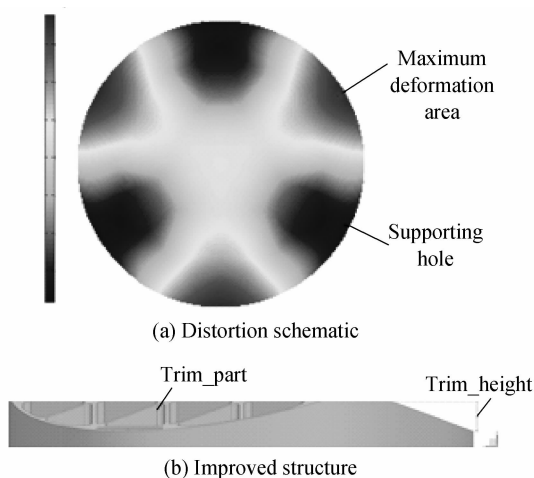


图4 反射镜的改进形式

Fig. 4 Improved structure of reflective mirror

3 集成优化设计

3.1 集成优化设计问题

轻量化反射镜的各结构参量对光学表面面形质量的影响不能简单叠加,各参量之间彼此耦合使得轻量

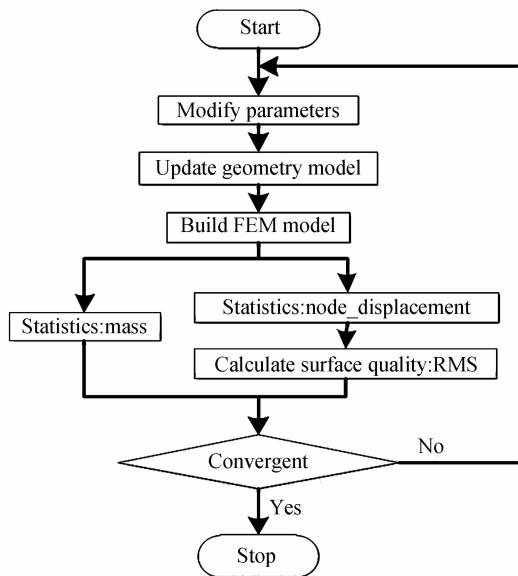


图5 集成优化设计流程

Fig. 5 Schematic of integrated optimization design

化反射镜优化设计问题的解空间非常复杂.传统的反射镜设计方法是结合经验公式,对各参量的典型取值、组合进行试算,不断尝试直至满足要求.这样做一方面设计效率极低,另一方面,很可能陷入局部最优解,而忽略全局最优解.本文采用集成优化设计的方法^[18],将几何建模、网格划分、有限元分析、面形拟合等环节集成在一起,如图5.该方法不仅避免了人为修改结构参量,节约了时间成本,设计效率高,而且可以通过选取合适的算法,在复杂设计空间内寻得全局最优解.

3.2 集成优化的设置

选取基于传力路径对轻量化筋分组后的结构作为集成优化设计的初始结构,设计变量包括反射面厚度(Face_thickness)、外壁厚(Side_thickness)、轻量化筋厚(Rib_1~Rib_6)、支撑孔壁厚(Hole_thickness)及内径(Hole_diameter)、镜体高度(Height)、修剪高度(Trim_height).优化过程中,以镜体质量作为约束,以反射面的面形质量均方根作为目标函数.采用多岛遗传算法(Multi-island Genetic Algorithm, MIGA)求解集成优化设计问题^[19-20].该算法模拟自然选择的机制,将各变量不同水平的组合编码成基因组,经交叉、变异和迁移后形成新样本,从中评价并选择适应度较高,即对应目标函数值更优的样本,不断探索直至获得全局最优解.该方法适应性强、计算效率高,适用于此类解空间十分复杂的设计问题.

3.3 设计结果

各设计变量的初始值、取值范围及最终的优化结果见表3,迭代计算过程如图6.从优化结果看,各组轻量化筋的厚度差异很大,其中最小的仅有3.12 mm,最大的为7.81 mm.

传统结构(未对筋分组、未做修剪)与改进设计方案分别经集成优化后所得到的设计结果见表4.按3.2节中对优化问题所做的设置,当反射面面形最优,即

表3 设计变量和设计结果(单位:毫米)

Table 3 Design variables and design results(unit:mm)

Variable	Domain	Original	Optimized
Face_thickness	[3,8]	5	4.01
Side_thickness	[3,8]	4	5.52
Hole_thickness	[4,10]	6	9.57
Hole_diameter	[68,83]	75	80.25
Trim_height	[0,80]	0	79.92
Height	[50,100]	60	99.8
Rib_1	[3,8]	4	3.54
Rib_2	[3,8]	4	7.26
Rib_3	[3,8]	4	7.81
Rib_4	[3,8]	4	7.72
Rib_5	[3,8]	4	3.12
Rib_6	[3,8]	4	4.74

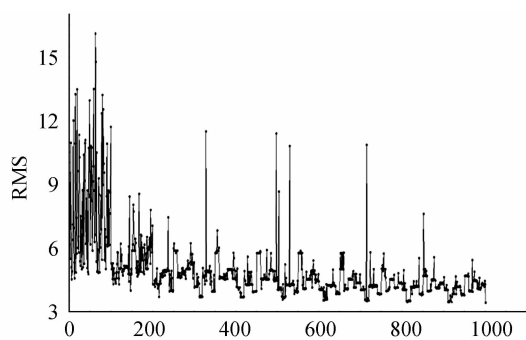


图6 集成优化设计问题求解过程

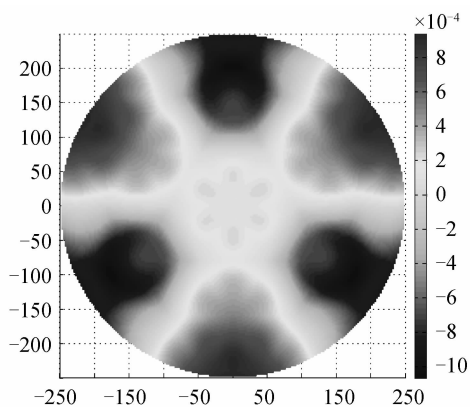
Fig. 6 Solution process of integrated optimization design problem

RMS值最小时,改进设计方案的镜体质量为 15.84 kg, RMS 仅为 3.423 nm,远远小于 $\lambda / 50$ (取工作波长 λ 为 632.8 nm) 的设计要求;与传统结构(RMS=5.123 nm, MASS=17.94 kg)相比,不仅面形准确度提高了 33.2%,而且镜体质量下降了 11.7%。在光轴竖直工况下,二者拟合后面形如图7。在改进方案中,节点最

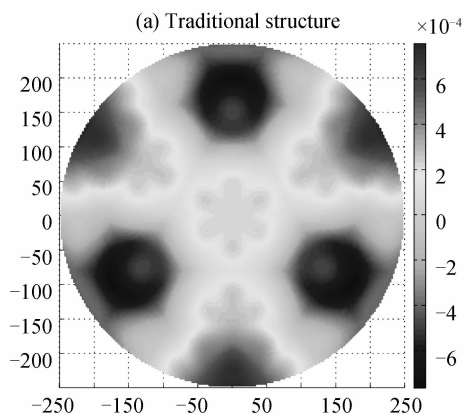
表4 传统结构与改进设计间的比较

Table 4 Comparison between traditional structure and improved design

Parameter	PV/nm	RMS/nm	Mass/kg
Traditional	49.257	5.123	17.94
Improved	14.824	3.423	15.84
Improvement_rate	69.9%	33.2%	11.7%



(a) Traditional structure



(b) Improved structure

图7 反射面的曲面拟合结果对比

Fig. 7 Comparison of surface fitting results of reflective surface

大位移量减小,且反射面整体变形更加均匀,距支撑孔较远处的面形塌陷得到改善.这说明虽然筋板结构中某些部位的厚度变薄了,镜体质量也有所减轻,但反射镜整体的刚度得到了提升.

4 结论

本文在轻质反射镜传统轻量化结构的基础上,研究了轻量化筋的厚度对反射镜面形质量的影响,指出具有不同拓扑关系的轻量化筋在增强反射镜镜体刚度的过程中起到的作用不同,进而可以通过对筋分组,并增加设计变量来提高反射镜的面形质量.通过对反射镜背部的筋板结构进行修剪,可以改善三点支撑反射镜远离支撑孔的边缘部分塌陷变形较严重的现象.采用集成优化设计的方法,以基于传力路径对筋分组的设计方案为初始结构,利用多岛遗传算法对该设计问题进行全空间的寻优求解,最终得到反射镜的 RMS 值仅为 3.423 nm,质量为 15.84 kg,不仅满足设计要求,而且远优于传统结构经优化后的结果.表明本文针对轻质反射镜提出的变筋厚设计方案和筋板结构改进设计是有效的,且通过集成优化设计的方法,可以很好地解决轻质反射镜的全局优化设计问题.

参考文献

- [1] WANG Xiao-kun. Optical design of a high resolution space camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(1): 0122001.
王孝坤.一种高分辨力空间相机的光学设计[J]. *光学学报*, 2015, **35**(1): 0122001.
- [2] WALKER D D, BEAUCAMP A T H, BINGHAM R G, *et al.* The precessions process for efficient production of aspheric optics for large telescopes and their instrumentation [C]. *SPIE*, 2003, **4842**: 73-84.
- [3] 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.
- [4] DUAN Xue-ting, ZHOU Ren-kui, WU Meng-yuan, *et al.* Distortion alignment method for center shaft supporting large aperture mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(S): 95-98.
段学霆,周仁魁,吴萌源,等.中心轴支撑大口径反射镜面形装调控制方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(S): 95-98.
- [5] QI Guang, WANG Shu-xin, LI Jing-lin. Design of high volume fraction SiC/Al composite mirror in space remote sensor[J]. *Chinese Optics*, 2015, **8**(1): 99-106.
齐光,王书新,李景林.空间遥感器高体份 SiC/Al 复合材料反射镜组件设计[J]. *中国光学*, 2015, **8**(1): 99-106.
- [6] CHEN Rong-li, ZHAO Xin-min, XIE Yong-jie, *et al.* Engineering analysis on high resolution space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 267-271.
陈荣利,赵信民,解永杰,等.高分辨率空间相机的工程分析[J]. *光子学报*, 2005, **34**(2): 267-271.
- [7] WANG Hong-juan, WANG Wei, WANG Xin, *et al.* Space camera image degradation induced by satellite micro-vibration [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1212-1217.
王红娟,王炜,王欣,等.航天器微振动对空间相机像质的影响

- [J]. 光子学报, 2013, **42**(10): 1212-1217.
- [8] LI Zong-xuan, CHEN Xue, ZHANG Lei, *et al.* Design of Cartwheel flexural support for a large aperture space mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(6): 0622003.
李宗轩, 陈雪, 张雷, 等. 大口径空间反射镜 Cartwheel 型柔性支撑设计[J]. 光学学报, 2014, **34**(6): 0622003.
- [9] CHEN Hong-da, CHEN Yong-he, SHI Ting-ting, *et al.* Lightweight and mounting design for primary mirror 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设计研究[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(2): 535-540.
- [10] ZHAO Ru-cheng, BAO Jian-xun. Investigation and application of large scale lightweight SiC mirror[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(4): 552-558.
赵汝成, 包建勋. 大口径轻质 SiC 反射镜的研究与应用[J]. 中国光学, 2014, **7**(4): 552-558.
- [11] ZHANG Yuan-yuan, JING Wei, CHENG Yun-tao, *et al.* Design and finite element analysis of $\Phi 510$ mm SiC ultralightweight mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(8): 1718-1724.
张媛媛, 敬畏, 程云涛, 等. $\Phi 510$ mm SiC 超轻量化反射镜的设计与有限元仿真[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(8): 1718-1724.
- [12] LIU Shu-tian, HU Rui, ZHOU Ping, *et al.* Topologic optimization for configuration design of web-skin-type ground structure based large-aperture space mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(7): 1803-1810.
刘书田, 胡瑞, 周平, 等. 基于筋板式基结构的大口径空间反射镜构型设计的拓扑优化方法[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(7): 1803-1810.
- [13] XIA Yu, ZENG Chun-mei, GUO Pei-ji, *et al.* Lay-up design of quasi-isotropic CFRP mirror for active forming [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(7): 1885-1892.
夏瑜, 曾春梅, 郭培基, 等. 主动成形准各向同性 CFRP 复合材料反射镜的铺层设计[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(7): 1885-1892.
- [14] HU Hai-fei, GUAN Ying-jun, ZHAO Si-hong, *et al.* Analysis led design and optimization for large aperture mirror [J]. *Journal of System Simulation*, 2013, **25**(5): 990-994.
胡海飞, 关英俊, 赵思宏, 等. 大口径反射镜分析驱动设计与优化[J]. 系统仿真学报, 2013, **25**(5): 990-994.
- [15] ZHANG Ge. Gelcasting process of 1.5m SiC ceramic green body[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(12): 2989-2993.
张舸. 1.5m 量级 SiC 陶瓷素坯凝胶注模成型工艺[J]. 光学精密工程, 2013, **21**(12): 2989-2993.
- [16] YODER P R. 光机系统设计[M]. 周海宪, 程云芳译. 北京: 机械工业出版社, 2008: 418-448.
- [17] SHEN Zhen-feng, GAO Jin-song, CHEN Hong, *et al.* Performance and reliability evaluation for the surface modification of space used silicon carbide mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **38**(9): 2353-2358.
申振峰, 高劲松, 陈红, 等. 空间用 SiC 反射镜表面改性的性能和可靠性评估[J]. 光子学报, 2009, **38**(9): 2353-2358.
- [18] ZHOU Chen, WANG Zhi-jin, ZHI Jiao-yang. Aerodynamic optimization design of adaptive airfoil leading edge based on Isight[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2014, **48**(8): 1122-1126.
周晨, 王志瑾, 支骄杨. 基于 Isight 的自适应翼型前缘气动优化设计[J]. 上海交通大学学报, 2014, **48**(8): 1122-1126.
- [19] FENG Yong, XU Zhen-qin. Comprehensive optimization of initial perturbation of a rocket system with multi-island genetic algorithms [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, **33**(9): 168-172.
冯勇, 徐振钦. 基于多岛遗传算法的火箭炮初始扰动综合优化分析[J]. 振动与冲击, 2014, **33**(9): 168-172.
- [20] PANG Yong-jie, WANG Ya-xing, YANG Zhuo-yi, *et al.* Direct route drag calculation and shape optimization of Myring shape axisymmetric revolution body [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, **35**(9): 1093-1098.
庞永杰, 王亚兴, 杨卓懿, 等. Myring 型回转体直航阻力计算及艇型优化[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, **35**(9): 1093-1098.