

文章编号 1004-924X(2012)08-1718-07

Φ510 mm SiC 超轻量化反射镜的设计与有限元分析

张媛媛*, 敬 畏, 程云涛, 胡桂涛, 方敬忠
(中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

摘要:针对 Φ510 mm SiC 超轻量化反射镜的研制, 提出了一剖面为船型、内部为正三角形、面板加密呈正六边形的轻量化结构。当设计重量为 1.85 kg 时, 通过调整各个结构参数与另外两种相同重量的轻量化结构进行了比较。结果表明, 在同样背部 6 点支撑作用下, 该超轻量化结构在光轴指向天顶时由自重引起的面形(RMS)具有较大优势。利用 Patran\Nastran 有限元软件模拟计算了该超轻量化反射镜在光轴水平状态下的自重镜面变形, 并对其进行了热力学及动力学特性分析。分析结果显示, 该超轻量化反射镜各项指标均能满足使用要求。最终, 根据设计结果试制加工了一块镜坯, 初步加工后的重量约为 2.2 kg, 面密度约为 10.8 kg/m², 已达到目前 SiC 超轻量化反射镜的先进水平。

关键词:超轻量化反射镜; 碳化硅反射镜; 反应烧结; Patran\Nastran

中图分类号: TH703 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122008.1718

Design and finite element analysis of Φ510 mm SiC ultra-lightweight mirror

ZHANG Yuan-yuan*, JING Wei, CHENG Yun-tao, HU Gui-tao, FANG Jing-zhong

(*Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

* *Corresponding author, E-mail: pinkoliver@sina.com*

Abstract: To develop a Φ510 mm SiC ultra-lightweight mirror, this paper proposes an ultra-lightweight structure with a section in ship form, an internal structure in regular-triangle, and a face plate reinforced with regular-hexagon. When the design weight is 1.85 kg, the structure performance is compared with those of other two lightweight structures with the same weight by adjusting all structure parameters. It is shown that in the same 6 point supportings on mirror backs, this ultra-lightweight structure owns absolute advantages in the gravitational deformation of mirror surface (RMS) as comparing with other two structures when the optical axis is pointed to the zenith. Furthermore, Patran\Nastran finite element software is used to simulate and calculate the gravitational deformation of the mirror surface when the axis is pointed to the horizon, and its thermodynamic and dynamical characteristics are analyzed. The results present that all performance indexes of this ultra-lightweight mirror meet requirements of applications. Finally, according to the design, a mirror blank with a weight about 2.2 kg and surface density about 10.8 kg/m² is fabricated. With excellent performance,

收稿日期: 2012-02-16; 修订日期: 2012-03-23.

基金项目: 中国科学院光电技术研究所前沿部署项目(No. C09K007)

it has been up to the today's advanced level in the SiC ultra-lightweight mirror field.

Key words: ultra-lightweight mirror; SiC mirror; reaction bonding; Patran\Nastran

1 引 言

随着科学技术的进步,人类探索太空的欲望越来越强,从空间观察太空,可以排除大气扰动等因素的干扰,故大型空间光学系统的发展得到了广泛关注。主镜作为大型光学系统的主要部件,不仅直接影响系统的光学质量,也是构成系统重力的主要部分,因此对它进行超轻量化是一项重要的技术研究,也是反射镜的发展趋势。

SiC 材料作为制作空间反射镜的备选材料之一,因无毒、比刚度大、热传导性能好等特点已逐步应用到空间光学系统中^[1]。美国、俄罗斯、德国、法国等国家从 20 世纪 80 年代初开始研究 SiC 材料,90 年代用 SiC 制作反射镜,并将其应用在光学系统温度变化大的领域,如高能激光器反射镜和空间低温反射镜,这使 SiC 镜坯在制作、研磨和抛光方面取得了实质性的进展^[2-3]。我国在该领域的研究起步较晚,受机械加工、光学加工水平的限制,在大尺寸、超轻量化方面与国外的发展水平相比仍有相当的差距。目前,国内参与大尺寸轻型 SiC 反射镜研究的单位主要有:中科院上海硅酸盐研究所,中科院长春光学精密机械与物理研究所、中科院光电技术研究所、哈尔滨工业大学等,并均取得了一定的研究进展^[4-6]。

有限元分析技术作为一种辅助性手段,可以解决众多领域的大型科学和工程计算难题,其应用范围也越来越广。本文用有限元分析技术对超轻量化 SiC 主反射镜进行了必要的工程应用分析,在支撑结构对面形的影响,温度稳态、瞬态热分析,发射环境模拟等方面得到了一系列的成果,对今后的工程实践具有重要的指导意义。

2 超轻 SiC 反射镜结构设计

SiC 反射镜的制备方法不同将导致其物理性能参数的差异,中科院光电所利用反应烧结法(Reactive Bonded, RB)制备 SiC 反射镜,经标准、规范的力学测试后得到 RB-SiC 材料的物理、力

学、热性能参数,如表 1 所示。

表 1 RB-SiC 材料各项性能参数

Tab. 1 Performance parameters for RB-SiC

性能参数	数值
材料	RB-SiC
弹性模量	340 GPa
泊松比	0.17
密度	2 830 kg/m ³
热膨胀系数 (室温 0~40 °C)	2.5×10 ⁻⁶ /°C
热传导系数	155 W/m°C
抗弯强度	399 MPa
断裂韧性	3.08 MPa/m ²
比热	670 Ws/kg·K

为了获得超轻量化反射镜,对目前广泛应用的背部开口式和对称夹芯式两种结构进行比较,尽管在结构刚性方面,前者相对较差,但在减重率方面却有非常大的优势。参考目前国内外已经研制成功的 SiC 反射镜的超轻结构,对一口径为 Φ510 mm 的 SiC 进行超轻量化结构设计,要求其质量小于 2 kg,如图 1~2 所示,各结构参数如下:

- 口径:Φ510 mm;
- 中心孔:Φ95 mm;
- 球面半径:1 500 mm;
- 球心坐标:(0,0,1 538.17 mm)z 为光轴;
- 镜体厚度:50 mm;
- 面板厚:2 mm;
- 内环厚:2 mm;
- 三角形边长:155.8 mm,筋厚:1.8 mm;
- 六边形边长:90 mm,筋厚:2 mm,高度:6 mm;
- 6 个圆柱形支撑筒内径:Φ26 mm,壁厚:2 mm;
- 设计质量:1.85 kg;
- 面密度:9.1 kg/m²。

反射镜在地面的优质面形是空间相机研制成功的保证之一。通过合理的结构设计,模拟反射镜在一定支撑结构下,研究自身重力对面形的影

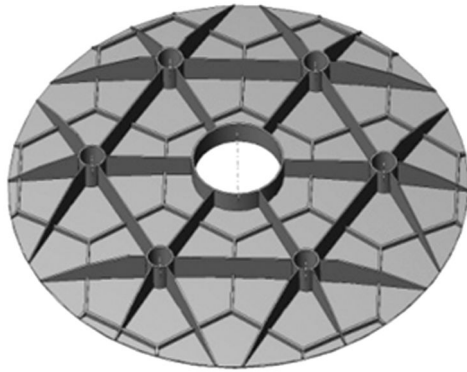


图 1 $\Phi 510$ mm SiC 反射镜背部轻量化结构

Fig. 1 Lightweight structure in back of $\Phi 510$ mm SiC mirror

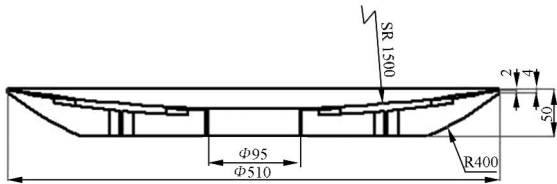


图 2 “船型”半剖视图

Fig. 2 Ship type of half-sectional view

响是很有必要的。

在自重作用下影响反射镜面形的因素除了材料性能、轻量化结构、径厚比等因素外,支撑结构的优化选择也是一个重要环节。目前在较小口径反射镜的支撑结构中,以 3 点支撑最为简单,应用也比较广泛^[7-9]。此块口径为 510 mm 的 SiC 反射镜用以进行可见光观测,波长 $\lambda=632.8$ nm,相对于红外望远镜来说,对面形的要求比较高,故在支撑结构的选择上应重点考虑其对面形的影响。通过对图 1 模型 3 点支撑下的自重变形分析可知,在 3 点支撑结构下,镜面的自重变形 RMS =

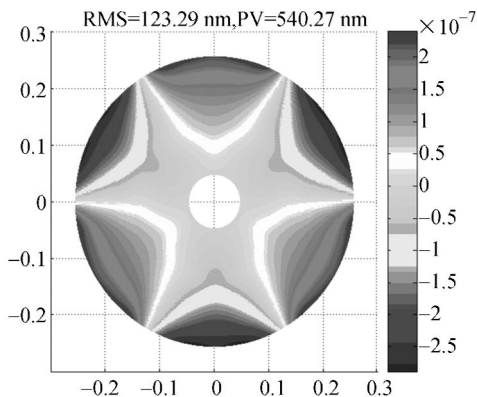
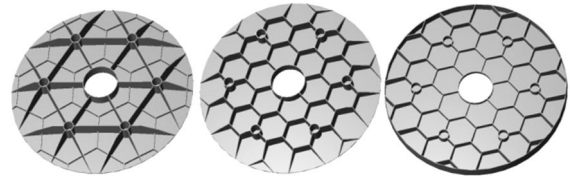


图 3 3 点支撑下的面形 RMS=123.3 nm

Fig. 3 Surface shape RMS = 123.3 nm under 3 points supportings

123.3 nm,云图如图 3 所示,远远不能满足空间光学系统对主反射镜面形的要求,对 3 点支撑的两脚架(bi-pod)结构反向应用即可实现 6 点支撑,而不会增加镜体支撑机构的质量,故本文对该反射镜设计了 6 点支撑结构,如图 1 所示。

为了得到最佳结构,对比 3 种相同质量的 SiC 超轻反射镜结构,如图 4 所示。3 种轻量化结构的反射镜质量均为 1.85kg,其中结构 I 和结构 II 的外部形状相同,而结构 III 是目前广泛应用的 SiC 平背型轻量化结构,外环能起到提高反射镜整体刚性的作用。



(a) 结构 I (b) 结构 II (c) 结构 III

(a) Structure I (b) Structure II (c) Structure III

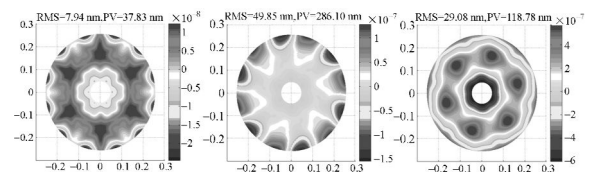
图 4 质量均为 1.85 kg 的 3 种轻量化结构

Fig. 4 Three lightweight structures with same weight of 1.85 kg

3 有限元分析

3.1 静力学分析(自重对面形的影响)

利用 Patran\Nastran 有限元软件对文中提出的 3 种轻量化结构 SiC 反射镜进行模拟分析。计算光轴天顶指向时,反射镜在 6 点支撑下的自重镜面变形情况,3 种结构的面形结果如图 5 所示。将面形数据进行 Zernike 多项式拟合,去除倾斜项和离焦项后的面形结果分别为:结构 I 的面形 RMS=7.9 nm;结构 II 的面形 RMS=49.9 nm;结构 III 的面形 RMS=29.1 nm。



(a) 结构 I (b) 结构 II (c) 结构 III

(a) Structure I (b) Structure II (c) Structure III

图 5 光轴天顶指向时 3 种轻量化结构的面形结果云图

Fig. 5 Cloud charts of surface shape results for 3 lightweight structures as axis zenith pointing

通过比较可以看出,当限定超轻反射镜的质量为 1.85 kg 和光轴天顶指向时,结构 I 在镜面的自重变形上具有明显优势,故制备超轻量化 SiC 反射镜的最佳结构为加强筋形式的轻量化结构。

然后,进一步对结构在光轴水平指向时自重引起的面形变化进行模拟分析。建立有限元模型如图 6 所示,镜体背部 6 点支撑,光轴水平指向时的自重镜面变形 RMS=7.8 nm,结果云图如图 7 所示。

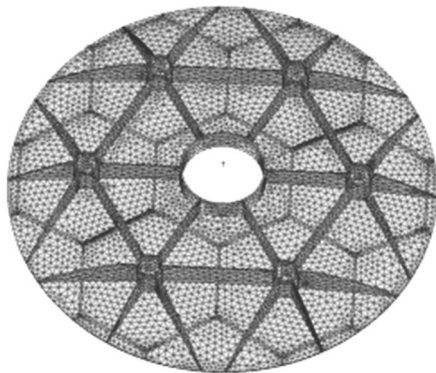


图 6 有限元模型

Fig. 6 Finite element model

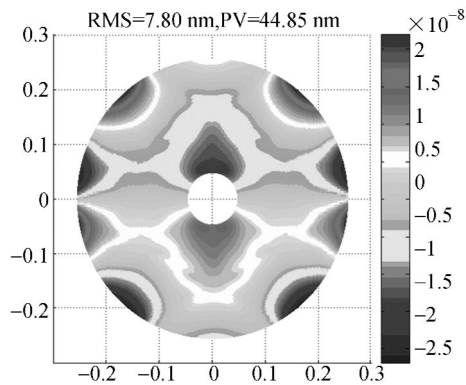


图 7 光轴水平指向时的面形结果云图

Fig. 7 Cloud chart of surface shape result as axis horizon pointing

通过仿真分析计算得出,在图 3 所示的 3 种结构中,结构 I 在光轴天顶指向和光轴水平指向两种状态下,反射镜背部 6 点支撑,在自身重力作用下,镜面面形变化小,能满足整个光学系统设计阶段的指标要求($RMS \leq \lambda/80$)。

3.2 主镜热特性分析

主镜在太空中受到热辐射作用会产生自身温度的变化,而受温度的影响镜体会产生“塌边效

应”,并且镜体内部存在的温度梯度将引起反射面焦距的变化,从而影响成像质量。因此,对主镜进行热特性分析极有必要。

设定镜体初始温度为 20 °C,计算在 25 °C 环境中使用时反射面变形情况,如图 8 所示。反射面原始曲率半径 $R_0=1\ 500\ \text{mm}$,对变形后的反射面数据进行最小二乘法拟合可以得出:反射面曲率半径为 $R=1\ 500.02\ \text{mm}$ 。温度升高 5 °C 后,反射面曲率半径的变化 $\Delta R=0.02\ \text{mm}$ 。变形后反射面原始数据面形 RMS=105 nm,通过去除倾斜、离焦像差后得到的面形 RMS=0.6 nm,则整个光学系统要具有调焦功能。

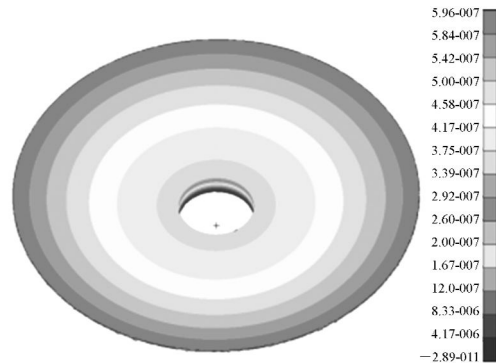
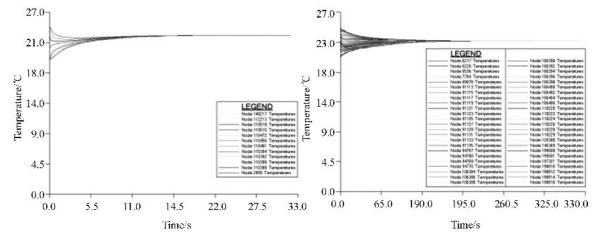


图 8 反射面受温度影响变形图

Fig. 8 Reflecting surface deformation diagram under influence temperature

RB-SiC 材料的热传导系数远远大于玻璃材料(约 100 倍),在主镜内部和外界存在温度差时能尽快地趋于平衡状态。本文对主镜分别在轴向和径向存在温度梯度时,镜体温度随时间变化并逐渐趋于平衡的过程进行了研究。

当主镜反射面为 25 °C,底面为 20 °C,轴向存在 5 °C 温度梯度时,对镜体内部沿轴向分布的若干节点进行随机采样,研究了其趋于平衡状态时的温



(a) 轴向 5 °C 温差

(b) 径向 5 °C 温差

(a) With axial difference of 5 °C (b) With radial difference of 5 °C

图 9 主镜瞬态温度场分析

Fig. 9 Thermal transient analysis of primary mirror

度变化。图 9(a)所示为采样点处温度随时间的变化曲线,分析结果显示:当经历时间大约为 22 s 时,镜体内部采样点的温度趋于一致,约为 23.7 °C。

当主镜外周为 25 °C、内环处为 20 °C,径向存在 5 °C 温度梯度时,对镜体内部沿径向分布的若干节点进行随机采样,研究其趋于平衡状态时的温度变化。图 9(b)所示为采样点处温度随时间的变化曲线,分析结果显示:当经历时间大约为 200 s 时,镜体内部采样点的温度趋于一致,约为 22.7 °C。

3.3 主镜动力学特性分析

在发射过程中,主镜需承受一定运载动力载荷,为了避免造成永久变形,一定要保证主镜具有足够的刚度。对主镜进行不同程度的振动试验成为验证其结构稳定性的必要手段之一,而在主镜的结构设计阶段,通过有限元软件对振动环境进行模拟分析既经济又高效,可作为考核标准之一。

自由模态分析:通过对主镜自由状态下的模态分析可知,前 6 阶为刚体频率近似为 0,第 7 阶频率为 356 Hz,满足刚度要求,其振型如图 10 所示。

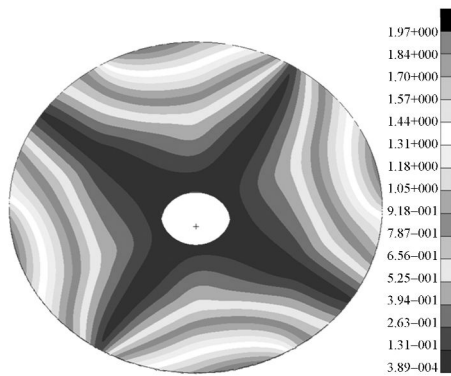


图 10 频率为 356 Hz 时的振型

Fig. 10 Vibration mode with frequency of 356 Hz

随机振动分析:发射过程中产生随机振动激励的频率大约为 20~2 000 Hz。模拟随机振动环境,功率谱密度见表 2,PSD 曲线见图 11。

表 2 功率谱密度

Tab. 2 Power spectrum density (PSD)

频率/Hz	功率谱密度
20~190	+3 dB/oct
190~500	0.06 g ² /Hz
500~750	0.045
750~2000	-9 dB/oct

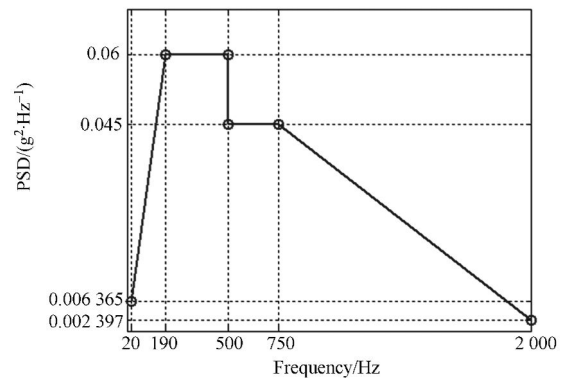
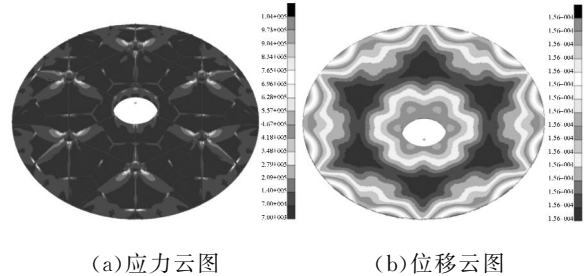


图 11 功率谱密度曲线

Fig. 11 Curve of PSD

随机振动分析得出的最大应力、最大位移均为统计意义上的结果,1 σ 的概率为 68.5%,2 σ 的概率为 95.5%,3 σ 的概率为 99.7%。云图如图 12 所示,其中最大应力 3 σ =3.12 MPa,远远小于材料的断裂强度。光轴方向最大位移 3 σ =0.47 mm。



(a) 应力云图 (b) 位移云图

(a) Cloud chart of stress (b) Cloud chart of displacement

图 12 随机振动结果云图

Fig. 12 Cloud charts of random vibration results

通过有限元仿真技术对优选的超轻量化镜坯结构进行了自重变形、热力学、动力学特性分析,结果均能满足设计要求。根据设计结构,SiC 超轻量化反射镜镜坯的制备应用反应烧结(RB)法,

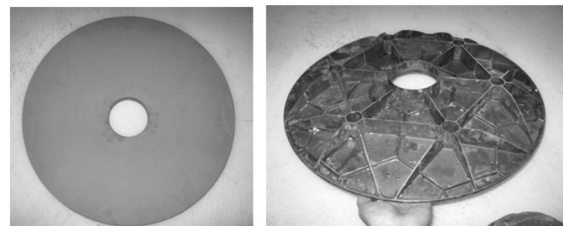


图 13 初步加工后的 Φ 50 mm SiC 超轻量化镜坯

Fig. 13 Φ 50mm SiC ultra-lightweight mirror after preliminary machining

经过初步机械加工后,镜坯质量约为2.2 kg,面密度达10.8 kg/m²,如图13所示。目前,对该块反射镜的进一步精密机械加工正在进行中。

4 结 论

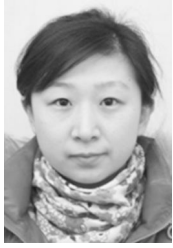
结合近年来空间光学的发展趋势,本文以研制超轻量化SiC反射镜为目标进行了试制性研究,设计并对比了3种SiC超轻量化反射镜结构,通过进行有限元模拟分析得出,优选的SiC超轻量化结构反射镜在背部6点支撑下,光轴竖直状态的自重面形RMS=5.9 nm,光轴水平状态的自重面形RMS=6.0 nm,满足可见光的使用要求,相比其他两种结构具有较大的优势。

通过热力学分析可知,温度变化5℃后,镜面的曲率半径发生了变化,通过去除平移、倾斜、离焦等相差后,镜面面形得以改善并能够满足使用要求,且整个光学系统要求具有调焦功能。

参考文献:

- [1] 杨秉新. 空间相机用碳化硅(SiC)反射镜的研究[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(1):15-18.
YANG B X. Research of SiC reflection mirror for space camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(1):15-18. (in Chinese)
- [2] HADAWAY J B, ENG R, STAHL H P, *et al.*. Cryogenic performance of lightweight SiC and C/SiC mirrors[J]. *SPIE*, 2004, 5487:1018-1029.
- [3] EALEY M A, WELLMAN J A. Highly adaptive integrated meniscus primary mirrors[J]. *SPIE*, 2004, 5166:165-171.
- [4] 唐裕霞, 张舸. 大口径碳化硅轻质反射镜镜坯制造技术的研究进展[J]. 光学技术, 2007, 22(4):510-518.
TANG Y X, ZHANG G. The development of fabrication techniques in large scale light-weighted SiC mirror blank[J]. *Optical Technique*, 2007, 22(4):510-518. (in Chinese)
- [5] 张舸, 赵文兴. 轻型反射镜镜体结构参数的分析[J]. 光学精密工程, 2006, 1:48-53.
- [6] ZHANG G, ZHAO W X. Analysis on structural parameters of light-weighted mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 1:48-53. (in Chinese)
- [7] 张剑寒, 张宇民, 韩杰才, 等. 空间用碳化硅反射镜的设计制造与测试[J]. 光学精密工程, 2006, 2:179-184.
ZHANG J H, ZHANG Y M, HAN J C, *et al.*. Design, fabrication and testing of space-borne SiC mirror[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 2:179-184. (in Chinese)
- [8] ERICKSON E F, HONAKER M A, BRIVKALNS C A, *et al.*. Backup secondary mirror and mechanism for SOFIA[J]. *SPIE*, 2004, 5489:1012.
- [9] SUANUMA M, IMAI T, KATAYAMA H, *et al.*. Optical testing of lightweight large all-C/SiC optics[C]. *International Conference on Space Optics*, 2010.
- [10] HIDEHIRO K, TAKAO N, TAKASHI O, *et al.*. Development of lightweight SiC mirrors for the space infrared telescope for cosmology and astrophysics (SPICA) mission[J]. *SPIE*, 2007, 6666:6666071-9.

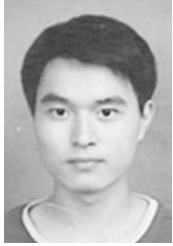
作者简介:



张媛媛(1981—),女,河北唐山人,助理研究员,2004年、2007年于燕山大学分别获得学士、硕士学位,主要从事反射镜轻量化结构设计、仿真计算及模拟分析的相关研究。E-mail: pinkoliver@sina.com



胡桂涛(1982—),男,河北邯郸人,助理研究员,2006年于河北科技大学获得学士学位,2008年于中南大学获得硕士学位,主要从事光学轻量化、结构设计等方面的研究。E-mail: 15882089633@126.com



敬 畏(1984—),男,四川南部人,助理研究员,2006年、2008年于天津大学分别获得学士、硕士学位,主要从事碳化硅反射镜材料、碳化硅基复合材料的相关研究。E-mail: awerrrior@gmail.com



方敬忠(1955—),男,四川成都人,研究员,1982年毕业于武汉工业大学无机材料工程专业,主要从事材料合成与材料物理学研究。E-mail: fjzh@ioe.ac.cn



程云涛(1980—),男,河南新乡人,助理研究员,2003年于郑州大学获得学士学位,2006年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事反射镜轻量化结构设计、仿真计算及模拟分析的相关研究。E-mail: cheng_yt@163.com

● 下期预告

同态滤波法抑制离轴数字全息零级项

杨 勇¹,薛东旭¹,盖 琦^{2*},吴永丽¹,马忠洪¹

(1. 南开大学 现代光学研究所 光学信息技术科学教育部重点实验室,天津 300071;

2. 天津理工大学 中环信息学院,天津 300380)

针对离轴数字全息领域内,数字全息图受到记录器件像元尺寸大小的限制,离轴角度较小,数字再现时存在再现像受到零级项串扰的问题,本文提出一种在离轴数字全息领域抑制零级项的方法。基于图像灰度可以由图像照度及表面反射率共同决定的原理,将全息图看作入射分量和反射分量的乘积,利用入射分量变化缓慢集中在低频段,反射分量反映图像细节集中在高频段的特性,用同态滤波的方法处理数字全息图。设计了同态滤波器,其上下限分别为 0.001 和 1,滤波器直径为 300 pixel。实现了对衍射距离 34 cm 菲涅尔数字全息图的零级项的抑制,并对重构出的物光对比度进行了增强。增强物体细节信息,处理速度快,计算过程简单,实验结果验证了本文所提方法的可行性。