

文章编号 1004-924X(2013)07-1803-08

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

刘书田^{1*}, 胡 瑞¹, 周 平², 董志刚², 康仁科²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要:针对大口径空间光学反射镜对轻量化的需求,提出了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。该方法利用基结构拓扑优化的思想,将反射镜初始设计域限定为筋板式的反射镜基结构,通过各筋板的有无描述结构构型的变化。首先,借鉴连续体结构拓扑优化的思想,以壳单元离散筋板结构,以加筋板各单元的相对密度为设计变量(通过相对密度取 1 或 0,描述该单元所在区域的筋板是否存在),以光轴竖直工况下镜面面形误差为设计约束,镜体的质量最小为优化目标,建立了镜体结构构型设计的拓扑优化模型;然后,以拓扑优化所得构型为基础,提取并形成结构概念构型;最后,采用有限元法进行动静刚度分析与光学性能分析,并对结构进行修正,形成性能更好、满足要求的反射镜轻量化结构创新构型。文中的设计实例得到的反射镜镜面面形误差 PV 值小于 $\lambda/10$, RMS 值小于 $\lambda/40$, 第一阶自振频率大于 1 000 Hz,轻量化率达到 86.0%。得到的结果验证了本文方法的有效性。

关键词:大口径空间望远镜;反射镜;构型设计;轻量化设计;拓扑优化;筋板式基结构

中图分类号:TH743 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132107.1803

Topologic optimization for configuration design of web-skin-type ground structure based large-aperture space mirror

LIU Shu-tian^{1*}, HU Rui¹, ZHOU Ping², DONG Zhi-gang², KANG Ren-ke²

(1. *State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;*

2. *Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)*

** Corresponding author, E-mail: stliu@dlut.edu.cn*

Abstract: For the requirements of the mirror in a large-aperture spaceborne telescope for lightweight, a web-skin-typed ground structure based topology optimization method was presented for the configuration design of large-aperture mirror. Based on the idea of topology optimization, the ground structure in this method was restricted to be a web-skin-type structure composed of a surface (skin) stiffened by webs, and the change of the configuration was described by whether webs or parts of the

收稿日期:2013-01-05;修订日期:2013-02-25.

基金项目:国家 973 重点基础发展计划资助项目(No. 2011CB013201, No. 2011CB610304);国家自然科学基金资助项目(No. 11172052)

webs were deleted from the ground structure or not. Firstly, the web-skin-type ground structure was discretized with shell elements, the relative densities of all the elements on the webs were taken as design variables (the relative density was taken as 1 or 0 to describe whether the webs or parts of webs were kept or not). Then, by using optical aberration of the mirror in the load case of vertical optical axis as a design restraint, and the total weight of the structure as an optimized target, a topology optimization model was established. Furthermore, the concept configuration based on the structure obtained by topology optimization was extracted. Finally, the dynamic and static stiffnesses and optical performance of the mirror were analyzed using the finite element method, the mirror configuration was modified, and a lightweight mirror structural innovation configuration was obtained. It shows that the optical aberration PV and RMS of the mirror obtained by the design example are less than $\lambda/10$ and $\lambda/40$, respectively, the fundamental frequency is greater than 1 000 Hz and the lightweight ratio reaches 86.0%. The results demonstrate the validity of the proposed approach properly.

Key words: large-aperture spaceborne telescope; mirror; configuration design; lightweight design; topology optimization; web-skin-type ground structure

1 引 言

研制大口径的空间光学反射镜是提高空间光学系统分辨能力的途径之一,但口径的增加势必造成重力变化,从而引起的镜面变形的增大,造成成像质量的下降。另外,系统的质量也直接影响光学系统的发射成本。因此,镜体结构轻量化设计方法对确保大口径空间反射镜的光学成像质量和降低发射成本十分重要,已成为大型空间光学系统设计的关键技术之一。

反射镜轻量化的主要途径^[1]包括选用轻量化材料,以及进行反射镜轻量化设计,获得更高效的结构构型。在轻量化材料选取方面,由于 SiC 材料与传统的微晶玻璃、金属铍等反射镜基底材料相比,具有密度低、比刚度大、热膨胀系数小、导热性好、抗辐照性和抗热振性好、无形态滞后现象、强度和硬度适当等优异物理和机械特性,已经成为空间反射镜体的首选材料之一^[2-6]。

镜体的轻量化设计多采用对比优选的方法。郭喜庆等^[7]和俞天野等^[8]采用有限元等数值分析方法,通过分析对比不同轻量化结构的刚度、热稳定性和轻量化率等,确定了一种最优的轻量化结构。在这些工作中,通过分析比较可在已有的结构形式中获得一种较优的轻量化设计方案,但受轻量化传统结构形式的制约,在轻量化率方面还没有大的突破。

为了获得轻量化率更高、性能更优的反射镜结构构型,需要研究新的设计理论和方法。拓扑优化能够获得结构的拓扑形式,是概念设计阶段结构新构型设计的有效方法,并在许多领域有重要的应用^[9]。因此,拓扑优化方法在反射镜轻量化结构构型设计中有很好的应用前景。目前国内外学者尝试了在镜体结构的轻量化设计中应用拓扑优化技术。如 Park 等人^[10]基于三维实体镜体,以实体单元密度为设计变量,利用拓扑优化技术设计了第一块轻型反射镜,其反射镜轻量化率达到 78%。国内长春光机所在理论上也做了一些初步尝试,获得了比常规反射镜结构更轻的结构^[11-12]。反射镜结构设计的理想构型将是性能优异且易于加工制备的筋板式结构,而基于三维实体模型的拓扑优化不仅计算量大,而且往往会出现的一些现有技术无法加工的镜体构型,很难获得目前加工技术较为成熟的加筋形式镜体结构,因此需要研究一个能获得加筋形式镜体构型的反射镜拓扑优化方法。

桁架结构拓扑优化常采用“基结构法”^[13],即以基结构作为初始设计,利用优化算法优化结构形式,通过删除构件尺寸(例如,桁架结构杆截面面积等)为 0 的单元或基于某些准则删除或恢复某些构件来实现结构拓扑的变更。受这种骨架类结构拓扑优化方法的启发,在对反射镜做拓扑优化时,可以将现有的设计域离散为一个筋板式的结构。基于这样的初始设计域做拓扑优化,通过

优化决定每块板筋的有或无来实现反射镜结构拓扑的改变,有望获得一个筋板式的具有可制造性的反射镜轻量化结构。根据这个思想,本文提出一种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,并通过设计实验验证了方法的有效性和可行性。

2 反射镜拓扑优化模型

2.1 基结构形式

本文选择一种镜面背部已经布置了加筋板的传统轻量化镜体结构作反射镜基结构。对于传统的大口径反射镜轻量化结构形式,已经有很多学者做了相当多的研究,常见的轻量化孔结构形式主要有三角形、扇形、六边形、四边形和圆形等。其中扇形轻量化孔一般应用于带有中心孔的圆形反射镜的轻量化。圆形轻量化孔可以看成是六边形轻量化孔的简化。在保持相同的几何尺寸的情况下,三角形轻量化孔形式的面形精度要优于六边形和四边形孔,刚度更高,但其质量也较大,轻量化率要略低于后两者。六边形或圆形轻量化孔形式,主要是用于半封闭式的结构形式,四边形轻量化孔更适合用于镜体周边支撑的结构形式^[14]。因此,针对背部开放式以及采用背部支撑的情况,综合考虑各种轻量化孔的性能,本文选择三角形轻量化孔形式的筋板式反射镜作为基结构。

2.2 设计变量

以上述筋板式基结构为基础,结构构型的变化可由各筋板或部分筋板的有无来描述。根据连续体结构拓扑优化的思想,将各筋板采用有限单元离散,每个单元引进一材料的有无描述因子 ρ ,通过因子取1或0描述该单元区域是否存在材料。根据拓扑优化的SIMP方法,单元的材料属性取为所选材料为基体的多孔材料,并将其相对密度选为材料的描述因子;单元的材料性质(例如弹性模量)可表述为:

$$E_e = (\rho_e)^p E^0, V_e^s = \rho_e V^e, e = 1, 2, \dots, Nele, \quad (1)$$

其中: $Nele$ 表示单元总数, ρ_e 、 E_e 和 V_e^s 分别表示第 e 个单元的材料密度、弹性模量和实心材料的体积(或面积)。 E^0 为给定材料($\rho=1$ 时)的弹性模量, V^e 为第 e 个单元的体积(或面积), p 为惩罚因子。惩罚因子 p 取为大于1的实数,本文取

为3。

由式(1)可知, ρ_e 等于1或0分别表示该单元的材料取为所选取的材料或空材料(表述无材料)。因此,结构的构型可由各单元的材料指示数(材料相对密度)描述,构型设计问题的设计变量可表示成:

$$X = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{Nele})^T. \quad (2)$$

2.3 优化问题的数学模型

反射镜结构构型设计的目标是在满足镜面面形误差的条件下,最小化材料用量。此时设计的目标函数可取为反射镜体的总重量,其定义为:

$$f(X) = \sum_{e=1}^{Nele} \rho_e V_e. \quad (3)$$

反射镜镜面面形误差通常采用PV(镜面相对于理想面形的峰和谷值之差)和RMS(面形均方差)两个光学指标描述。镜面的偏差包括加工误差以及工作环境变化引起的作用荷载变化造成的镜面变形。本文主要考虑在地面加工状态以及空间(微重力)工作状态的重力荷载变化引起的镜面变形造成的面形差。此时,PV和RMS分别定义为:

$$PV = \max\{U_1, U_2, \dots, U_{N_s}\} - \min\{U_1, U_2, \dots, U_{N_s}\}$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} U_n^2}, \quad (4)$$

其中: U_n 表示镜面上单元节点在沿光轴方向的自重荷载作用下的位移, N_s 为镜面上的节点总数。

对于高精度的光学镜面,PV值与RMS值会存在一个倍数关系,随着PV值的减小,RMS值一般也会降低^[15]。因此在优化问题的数学模型中,为了提高计算效率,本文仅选择PV值的上限作为设计约束,RMS值通过有限元分析求得的数据计算后再来校核。

为使优化设计出反射镜结构在周向具有一定的对称性,根据结构对称模式的不同,可以对模型施加不同的模式组约束。对设计空间施加模式组约束后,即使是在网格、边界条件不对称的模型中也可以强制生成非常接近于对称的结果。本文研究的圆盘反射镜,需要施加周向循环对称的模式组约束,约束方程为:

$$D_k(x) = 0, \quad (5)$$

式中: $D_k(X)$ 表示第 k 组单元之间的对称关系。

本文定义的筋板式基结构由一定厚度的镜面板(壳)、背部加筋板和支持孔组成。镜面板(壳)

和支撑孔是根据实际需求预先确定的。因此,在优化设计过程中镜面板(壳)和支撑孔区域为非设计区。非设计区域通过令材料的相对密度为 1 实现。

镜体的拓扑优化数学模型可描述为:

$$\begin{aligned} & \text{Find } X = (\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{Nele})^T \\ & \text{Minimize } f(X) = \sum_{e=1}^{Nele} \rho_e V_e \\ & \text{Subject to} \\ & PV = \max\{U_1, U_2, \dots, U_{Ns}\} - \\ & \quad \min\{U_1, U_2, \dots, U_{Ns}\} \leq \bar{U} \\ & D_k(X) = 0 \\ & 0 < \rho_{\min} \leq \rho(x) \leq 1 \end{aligned} \quad (6)$$

式中: \bar{U} 为镜面面型误差 PV 值的约束上限值, ρ_{\min} 是为了避免优化过程中出现刚度阵奇异而设定的单元相对密度下限值(通常取 0.001)。

镜面结构的位移由下式表示的有限元法方程获得:

$$\mathbf{K}(X)\mathbf{U} = \mathbf{F}(X), \quad (7)$$

其中: \mathbf{K} 、 \mathbf{U} 、 \mathbf{F} 分别为结构整体的刚度阵、位移向量和载荷向量。外力向量为沿光轴方向的重力荷载向量。因为重力荷载与结构构型相关,即荷载依赖于设计变量。因此,式(6)表示的镜面构型设计优化问题为一个设计相关荷载作用下的结构拓扑优化问题。

3 新构型的提取

本文借助 OptiStruct 软件采用序列近似凸规划法求解拓扑优化问题(6)。新构型的提取将基于拓扑优化结果中各单元的相对密度进行材料的去除。材料去除过程由人机交互完成。

对于筋板式的反射镜结构,拓扑优化的结果会出现每块加筋板上都呈现不同的材料分布,其中单元密度接近为 0 的区域可能会出现在加筋板的内侧、中间和外侧部分。但考虑到反射镜在加工制造过程中的可制造性约束,不宜在加筋板内部形成孔洞,因此对于只在内侧或中间区域出现单元密度接近为 0 而在外侧单元密度仍为 1 的加筋板上的材料都将予以保留,所去除的材料只是位于加筋板上偏于镜体背部一侧的那部分材料。同时,为了避免在加工过程中反射镜镜面出现由于抛光压力而产生的“网格效应”,减少镜面的局部变形,可以在对加筋板上的材料进行优化去除

的时候保留一定的高度。此外,为使优化设计出的反射镜结构在几何上具有一定的规则性,将主要采取拉伸或旋转切除的方式来切除材料。

按照上述方式提取出的反射镜结构构型之后,对反射镜结构进行动静刚度分析与光学性能分析,并将各项性能与反射镜的设计要求进行比较,若满足要求,则优化结束,若不满足,则可以在所得到的反射镜构型的基础上再进行一轮优化,如图 1 所示,为此优化方法的流程图,根据此迭代规则,直至满足对反射镜各性能的要求,所得到的即为设计出的反射镜结构新构型。

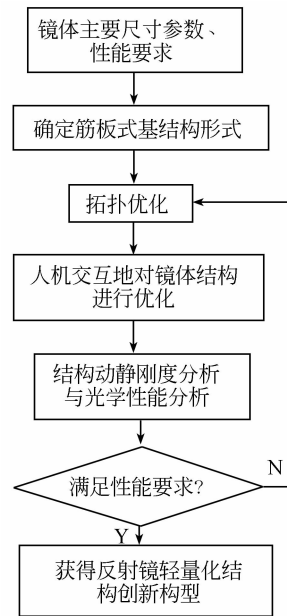


图 1 优化方法流程图

Fig. 1 Flowchart of optimization method

4 设计实例

作为实例题,设计了一大口径空间光学反射镜的背部支撑结构形式,以使反射镜在光轴方向重力荷载变化工况下的面形误差满足: $PV \leq 1/10\lambda$, $RMS \leq 1/40\lambda$, 其中 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$; 镜体轻量化率达到 85%; 动静刚度要求: 第一阶自振频率大于 1 000 Hz。镜体口径为 2 020 mm, 镜体外边缘厚度 300 mm, 其反射面形为球面, 镜面曲率半径为 9 981 mm, 选用 SiC 作为镜体材料, SiC 的材料参数为: 弹性模量 420 GPa, 泊松比 0.17, 密度 3.16 g/cm^3 。实体镜质量为 2 692.3 kg。

4.1 初始筋板式基结构

选择综合性能较好的三角形孔加筋形式的轻量化镜体作为初始的筋板式反射镜基结构。镜面背部为开放式,采用背部九点支撑的方式,镜体几何模型如图 2(a、b)所示,其主要几何参数见表 1,其中: t_f 为镜面板厚度, t_w 为加筋板厚度, a 为三角形加筋孔边长, d_1 、 d_2 分别为内、外支撑孔中心到镜体中心的距离, D 为支撑孔口径, t_h 为支撑孔壁厚, α 为内、外支撑孔中心与镜体中心连线之间的夹角。基结构镜体的质量为 556.0 kg,相对实体镜(2 692.3 kg),其轻量化率为 79.3%。

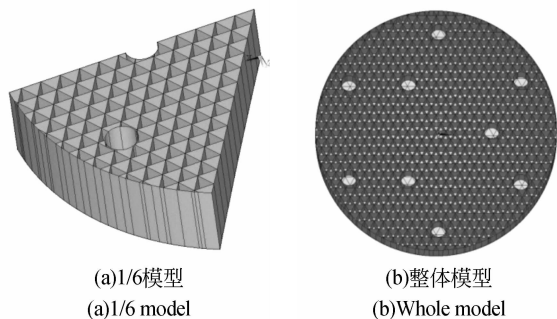


图 2 (a、b)基结构的几何模型
Fig. 2 Geometric models of the ground structure

镜面板与加筋板采用线性壳单元来离散,有限元模型如图 3 所示。采用有限元法对反射镜基结构进行静力和模态分析,结果表明,在光轴竖直的工况下,镜体由于自重产生的镜面面形的 PV 和 RMS 值分别为 80.1 nm 和 19.8 nm,镜面变形如图 4 所示(彩图见期刊电子版);镜体的一阶自振频率为 1 913.4 Hz;由对反射镜基结构的分析结果可知,传统的轻量化结构形式可以接近对镜体刚度的要求,但轻量化程度还远远不够。

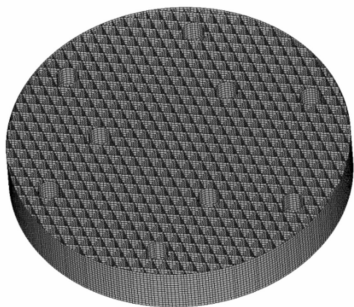


图 3 基结构有限元模型
Fig. 3 FEM model of the ground structure

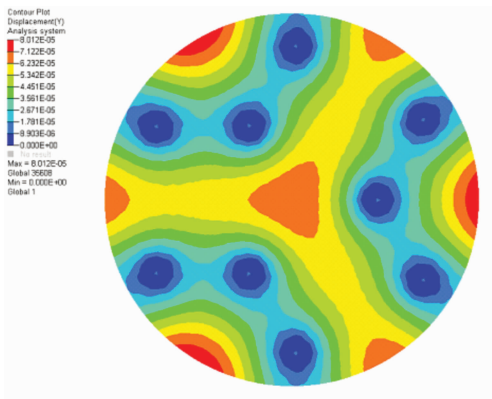


图 4 基结构镜面变形图
Fig. 4 Deformation of ground mirror surface

表 1 镜体的主要几何参数

Tab. 1 Primary geometric parameters of the mirror

尺寸	t_f	t_w	a	d_1	d_2	D	t_h	α
	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/mm	/($^\circ$)
参数值	5	4	80	465	831.6	130	20	31.25

4.2 拓扑优化结果与新构型

采用优化软件 Optistruct 求解优化问题(6),经过 490 迭代(目标函数的迭代历史见图 5 所示,其中后 440 步到 490 步迭代曲线在图中放大显示),获得了镜体的拓扑优化结果,如图 6(a)、(b)所示(彩图见期刊电子版)。图中红色表示密度为 1 的单元,是需要保留的部分,蓝色表示色密度接近为 0 的单元,是可以去除的材料。

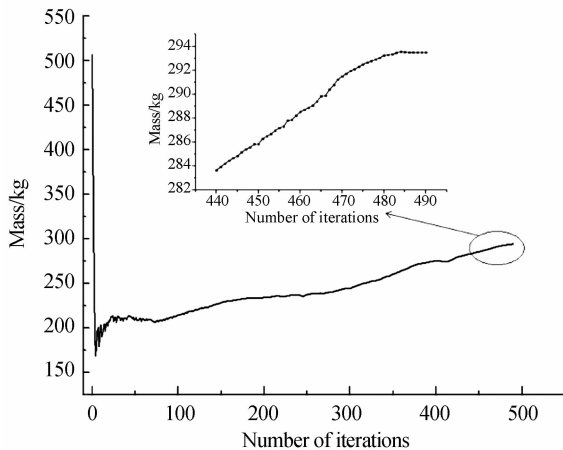


图 5 优化迭代历史
Fig. 5 Iteration history of optimization

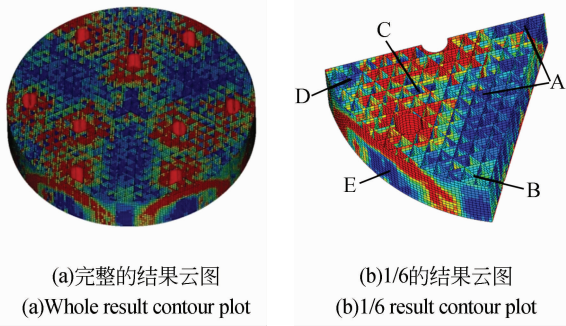


图 6 基结构的拓扑优化结果云图

Fig. 6 Topology optimization result contour plots of ground structure

在拓扑优化结果中,将蓝色低密度单元比较集中的部分标识为 A、B、C、D、E 区域,如图 6(b)所示。考虑到镜体的可制造性约束,不宜在加筋板内部形成孔洞,因此对于如 E 区域所示的位于加筋板内部、靠近镜面部分的这一类低密度单元,将予以保留,优化改进措施是减少 A、B、C、D 区域位于加筋板外侧、靠近镜面背部的低密度单元处的材料。

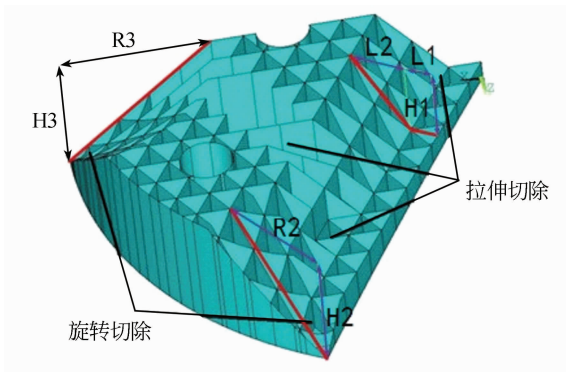


图 7 优化改进措施示意图

Fig. 7 Improvement measures

另外,为了使设计出的镜体在几何结构上具有一定规则性,将主要采用拉伸和旋转切除的方式来改进镜体材料的分布,具体切除方式如图 7 所示(彩图见期刊电子版),对 A、B 区域利用一个水平面和一个斜平面来拉伸切除,对 C 区域利用与前面相同高度的水平面拉伸切除,对 B、D 区域分别用一个旋转锥面来切除,所使用的拉伸平面与旋转锥面的母线在图 7 中用红线标识,切除面详细尺寸参数如表 2 所示。其中 H1、L1 分别是水平面距镜面背部的高度,L2

为斜平面的宽度,H2、R2 分别为 B 区域旋转锥面的高度和半径,H3、R3 分别为 D 区域旋转锥面的高度和半径。优化后镜体的几何模型如图 8 所示。

表 2 切除面尺寸参数

Tab. 2 Size parameters of cutting surface

尺寸	H1	L1	L2	H2	R2	H3	R3
参数值 /mm	200	69.3	138.6	300	306.1	300	370

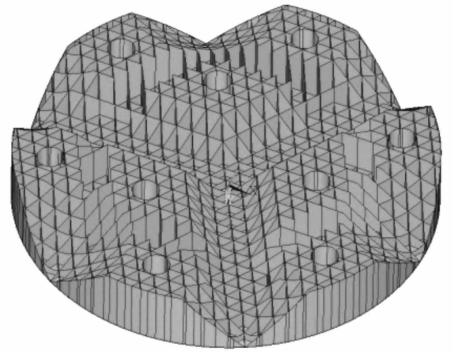


图 8 优化后得到镜体几何模型

Fig. 8 Geometric model of optimized mirror

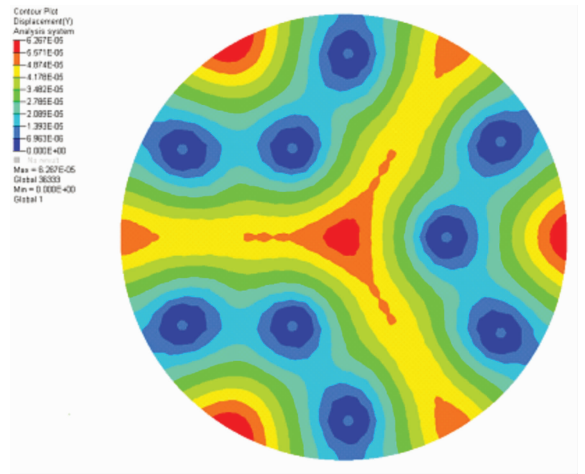


图 9 优化后镜面变形图

Fig. 9 Deformatin of optimized mirror surface

利用有限元法对图 8 所示的优化后的模型进行分析,在光轴垂直的工况下,通过静力分析得到镜体由于自重产生的镜面变形如图 9 所示(彩图

见期刊电子版),计算得到改进优化后镜面面形的PV值、RMS值分别为62.7 nm和15.6 nm,满足了误差要求, $PV \leq 1/10\lambda$, $RMS \leq 1/40\lambda$,其中 $\lambda = 632.8$ nm;通过模态分析得到主镜的第一阶自振频率为2 268.5 Hz,满足动态刚度要求;镜体质量378.0 kg,与实体镜相比,轻量化率为86.0%。

与基结构相比,PV值和RMS值分别降低了17.4 nm和4.2 nm,第一阶自振频率提高了355.1 Hz,满足反射镜设计的性能要求;镜体质量减少了178.0 kg,减轻了基结构32.0%的质量,实现了很好的轻量化。

参考文献:

- [1] 国绍文,王武义,张广玉,等.空间光学系统反射镜轻量化技术综述[J].光学仪器,2005,27(4):78-82.
GUO SH W, WANG W Y, ZHANG G Y, et al.. Lightweight mirror technology for space optical systems [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(4): 78-82. (in Chinese)
- [2] 马文礼,沈忙作.碳化硅轻型反射镜技术[J].光学精密工程,1999,7(2):8-12.
MA W L, SHEN M Z. Weightlight SiC mirror technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1999, 7(2): 8-12. (in Chinese)
- [3] 邓清,肖鹏,熊翔.碳化硅轻型反射镜的研究进展[J].材料导报,2007,21(2):5-9.
DENG Q, XIAO P, XIONG X. Development of lightweight silicon carbide mirror [J]. *Materials Review*, 2007, 21(2): 5-9. (in Chinese)
- [4] 吴清文.空间相机中主镜的轻量化技术及其应用[J].光学精密工程,1997,5(6):69-80.
WU Q W. Light-weight technology and its application of primary mirror in space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1997, 5(6): 69-80. (in Chinese)
- [5] 王富国,杨洪波,赵文兴,等.1.2 m SiC主镜轻量化设计与分析[J].光学精密工程,2009,17(1):85-91.
WANG F G, YANG H B, ZHAO W X, et al.. Lightweight design and analysis of a 1.2m SiC primary mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1): 85-91. (in Chinese)
- [6] 张学军,李志来,张忠玉.基于SiC材料的空间相

5 结论

本文研究了大口径空间反射镜构型设计,提出了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。采用该方法完成了一大口径空间反射镜轻量化构型的设计,其面形误差的PV值和RMS值分别降低到62.7 nm和15.6 nm,小于所要求 $1/10\lambda$ 和 $1/40\lambda$;第一阶自振频率达到2 268.5 Hz;相对于实心镜体,其轻量化率达到了86.0%。设计实例说明,本文提出的设计方法有效可行。

- 机非球面反射镜结构设计 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 577-582.
ZHANG X J, LI ZH L, ZHANG ZH Y. Space telescope aspherical mirror structure design based on SiC material [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 577-582. (in Chinese)
- [7] 郭喜庆,王悦勇.大口径反射镜几种轻量化孔结构形式的分析[J].光学精密工程,2000,8(6):518-521.
GUO X Q, WANG Y Y. Analysis of structural forms of lightweight hole for heavy-caliber mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(6): 518-521. (in Chinese)
- [8] 俞天野,贾建军.大口径主反射镜的轻量化方案设计[J].红外,2007(8):6-10.
YU T Y, JIA J J. Light weight design of large-diameter mirror [J]. *Infrared*, 2007(8): 6-10. (in Chinese)
- [9] 左孔天.连续体结构拓扑优化理论与应用研究 [D]:武汉:华中科技大学,2004.
ZUO K T. *Research of theory and application about topology optimization of continuum structure* [D]: Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [10] PARK K S, LEE J H, YOUN S K. Lightweight mirror design method using topology optimization [J]. *Optical Engineering*, 2005, 44(5): 053002-6.
- [11] 李延伟,杨洪波,耿麒先,等.大口径主反射镜轻量化结构拓扑优化设计方法[J].光学技术,2008,34(2):236-238.
LI Y W, YANG H B, GENG Q X, et al.. Large-

aperture lightweight primary mirror design method using topology optimization [J]. *Optical Technique*, 2008, 34(2): 236-238. (in Chinese)

- [12] 沙巍, 陈长征, 张星祥, 等. 空间反射镜轻量化结构的拓扑优化设计[J]. *光电工程*, 2009, 36(4): 35-9.

SHA W, CHEN CH ZH, ZHANG X X, *et al.*. Topological lightweight design of space mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(4): 35-9. (in Chinese)

- [13] DORN W S, GOMORY R E, GREENBERG H J. Automatic design of optimal structures [J]. *Journal de mecanique*, 1964, 3(6): 25-52.

- [14] 闫勇, 金光, 杨洪波. 空间反射镜结构轻量化设计[J]. *红外与激光工程*, 2008(1): 97-101.

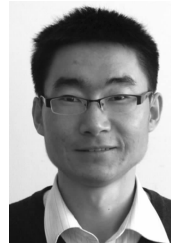
YAN Y, JIN G, YANG H B. Lightweight structural design of space mirror [J]. *Infrared and laser engineering*, 2008(1): 97-101. (in Chinese)

- [15] YODER Jr PR. *Opto-mechanical Systems Design [M]*. CRC, 2005.

作者简介:



刘书田(1962—),男,山东寿光人,教授,博士生导师,1982年于大连理工大学获得学士学位,1987年于武汉工业大学获得硕士学位,1994年于大连理工大学获得博士学位,主要从事结构与多学科优化设计方面的研究。E-mail: stliu@dlut.edu.cn



董志刚(1980—),男,内蒙古赤峰人,博士,讲师,2002年于大连理工大学获学士学位,2010年于大连理工大学获博士学位,主要从事为超精密加工技术方面的研究。E-mail: zgd@dlut.edu.cn



胡瑞(1989—),男,湖北荆州人,硕士研究生,2011年于武汉理工大学获得学士学位,主要从事空间反射镜结构优化设计方面的研究。E-mail: 707756049@qq.com



康仁科(1962—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,分别于1984年、1987年和1999年于西北工业大学获得学士、硕士和博士学位,主要从事超精密加工与特种加工技术方面的研究。E-mail: Kangrk@dlut.edu.cn



周平(1980—),男,浙江宁波人,博士,讲师,2003年于大连理工大学获得学士学位,2009年于大连理工大学获得博士学位,主要从事超精密加工技术和表面功能结构设计制造方面的研究。E-mail: pzhou@dlut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)