

大口径空间反射镜的重力卸载优化方法

孙熠璇, 罗世魁, 高超, 陈芳, 宗肖颖, 杜建祥, 刘子嘉, 白杰

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 针对某 $\Phi 1550$ mm 口径高轻量化反射镜在轨面形误差 RMS 优于 $1/50\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm) 的高精度要求, 为模拟在轨失重状态, 降低反射镜光轴水平状态面形检测时重力的影响, 对反射镜进行了多点主动支撑式重力卸载参数优化。首先, 在反射镜分区的基础上, 提出了卸载力大小、支撑点数量及轴向初始位置的确定原则; 随后, 建立反射镜的有限元模型, 以重力与卸载力共同作用下主镜面形 RMS 优于 0.002λ 为目标, 以卸载力轴向位置为参数进行仿真优化, 通过对参数的影响规律分析总结出快速优化要点, 实现优化过程的简化; 最终使重力引起的面形误差 RMS 值减小至 0.00145λ 。将优化后参数应用于反射镜光轴水平状态的面形检测中, 测得绕轴 0° 、 120° 、 240° 时面形 RMS 分别为 0.0157λ 、 0.0161λ 及 0.0159λ , 且面形分布较为一致, 说明经卸载后重力对面形的影响被有效消除。所提出的重力卸载优化方法灵活高效, 为实现大口径反射镜的高精度光学加工及在轨使用提供保障。

关键词: 空间反射镜; 大口径; 重力卸载; 面形优化

中图分类号: V474.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200103

Optimization method for large-aperture space mirror's gravity unload

Sun Yixuan, Luo Shikui, Gao Chao, Chen Fang, Zong Xiaoying, Du Jianxiang, Liu Zijia, Bai Jie

(Beijing Institute of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: A $\Phi 1550$ mm aperture space mirror's surface figure RMS was required to be superior to $1/50\lambda$ ($\lambda=632.8$ nm) under the zero-gravity orbit environment. In order to simulate the state of weightlessness and reduce the influence of gravity in the mirror's surface figure test with horizontal optic axis, the mirror was actively supported by multiple forces to unload the gravity and the forces' parameters were optimized. Firstly, the principle to determine the value, the number of support points and the initial axial position of each unload force was proposed based on dividing the mirror into blocks. Secondly, with the optimization goal of the mirror's surface figure RMS be superior to 0.002λ under the function of gravity along with all unload forces, a structural FEM model was established. Taking the positions of all unload forces along the optic axis as optimal variables, influences on target were analyzed and quick optimization points were concluded to simplify the optimization. Finally, the mirror's surface figure RMS when unloaded was found minimal of 0.00145λ . Putting the parameters of the optimization result into use of the surface figure test of the mirror with horizontal optic axis, it turned out that when the mirror revolved around the optic axis 0° , 120° and 240° , the surface figure RMS were 0.0157λ , 0.0161λ and 0.0159λ respectively and the figures were consistent, which proved that the gravity impact was eliminated effectively. The optimization method for gravity unload is flexible and efficient which guarantee the large-aperture mirror's high-precision machining and space mission.

Key words: space mirror; large aperture; gravity unload; surface figure optimization

0 引言

随着空间高分辨率相机在地球资源观测、灾害监测等领域的应用需求发展,光学遥感相机的分辨率已达到亚米级,国外如美国 DigitalGlobe 公司商用遥感卫星 WorldView 系列,星下点全色像元分辨率达到 0.3 m,国内如“高景一号”、“吉林一号”等商业遥感载荷,星下点全色像元分辨率已分别优于 0.5 m、0.72 m^[1-2]。空间光学遥感相机正朝着高分辨率、轻型化和商业化的方向发展,作为关键元件,大口径高精度反射镜的研制是一项关键技术^[3-4]。

针对商业化的应用需求,大口径反射镜轻量化程度越高越好,而如何保证反射镜面形的天地一致性,是大口径反射镜研制过程中的难点之一^[5]。中小口径反射镜加工检测时常采用的 V 形支撑、侧面支撑、中心支撑、背面支撑或吊带支撑等传统的被动支撑方式,应用于大口径反射镜时,其重力变形对面形的影响较大,难以满足检测要求,通常不被 1 m 以上口径的高精度反射镜所采用。当前大口径反射镜的地面检测主要采取两种技术路线:一种是光轴水平检测,利用反射镜径向刚度数倍于轴向刚度的特点,直接采用飞行支撑,通过对支撑的布置设计或参数优化使重力对面形的影响可以接受,如王克军等^[6]设计的 2 m 口径的 SiC 反射镜,面密度 103.8 kg/m²,采用背部 18 点加周向 12 点结合的支撑方式,仿真得到重力引起的面形 RMS 为 4.3 nm (约 0.0068λ),郭疆等^[7]研制了采用背部三点膜片式柔性支撑结构的 1.5 m 口径主镜组件,反射镜面密度 89.8 kg/m²,仿真得到重力引起的面形 RMS 为 4.5 nm (约 0.0071λ);另一种路线是光轴竖直检测,反射镜背部采用专用支撑工装提供离散的重力卸载,以尽可能消除重力对面形检测结果的影响,镜面加工完成后再将反射镜转移到飞行支撑上,该方法被广泛采用^[8-12],典型实例如美国著名的哈勃望远镜主镜,口径 2.4 m,面密度 180 kg/m²,设计采用背部 134 点的重力卸载主动支撑,通过精确控制各点卸载力^[8],最终实现重力变形下 RMS 值优于 6.4 nm (约 0.0101λ)。对比两种路线,前者属被动支撑方式,易于工程实施,然而当反射镜口径更大、轻量化程度更高或面形精度指标更高时,其应用存在局限性;后者通过重力卸载能够实现更高的地面检测精度,但是

其重力方向刚度弱,面形对卸载力的变化很敏感,不易控制,且切换飞行支撑后无法继续卸载。

文中提出了一种应用于高轻量化大口径反射镜光轴水平状态检测的高精度重力卸载优化方法,对三点静定约束下的镜体实施多点主动卸载,详细分析了卸载力作用位置对面形的影响规律,总结出卸载参数的快速优化要点。将优化结果成功应用于某 Φ1 550 mm 口径高轻量化反射镜的地面面形检测,数据显示,卸载后重力对面形的影响小于 0.001λ。该方法具有高效、适应性广的优点。

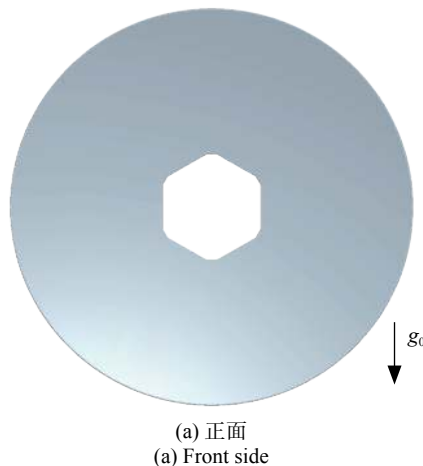
1 重力卸载方案概述

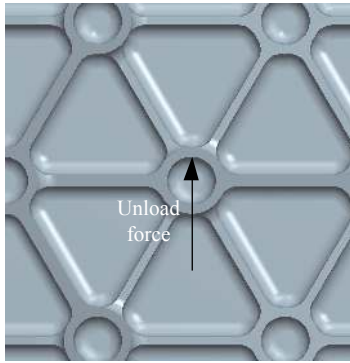
某可见光相机主反射镜为凹非球面刚性单体镜,如图 1(a) 所示,口径 Φ1 550 mm,镜坯选用高比刚度、热稳定性好的 SiC 材料。反射镜绕光轴对称六等分,每六分之一内部呈镜像对称,背部采用全开放的三角形减轻槽设计,加强筋交汇处布有圆孔,可用于零件支撑或卸载,如图 1(b) 所示,反射镜设计质量 122.7 kg,面密度仅 69 kg/m²。

设反射镜等效厚度为 t_A ,由公式 (1) 表示:

$$t_A = \frac{\rho_s S_A}{\rho S_A} \quad (1)$$

式中: ρ_s 为反射镜面密度; ρ 为材料密度; S_A 为口径面积。因此,当反射镜口径及材料确定时,面密度越小,代表等效厚度越小,此时反射镜轴向刚度较低,光轴竖直状态自重作用下变形也就越大,面形对卸载力的变化也更为敏感。所研究反射镜轻量化程度高,面密度较小,为尽量避免光轴方向刚度差对面形的不利影





(b) 背面局部
(b) Local of the back side

图 1 $\Phi 1550$ mm SiC 反射镜模型

Fig.1 Model of $\Phi 1550$ mm SiC mirror

响,采用光轴水平状态进行重力卸载,重力加速度 g_0 方向如图 1 所示。

1.1 卸载力分布及大小

一般情况下,卸载力分布密度越大,重力对反射镜面形的影响越小,但工程实施难度也就越大。因此,在既保证面形卸载精度又尽量简化实施的前提下,根据一定的原则(文中不予详述)将镜体在面内划分为 18 种规格共计 192 个分区,各规格以 1~18 依次编号,在每个分区内选定一个轻量化结构孔作为卸载力的作用位置,如图 1(b) 所示,卸载力大小等于分区重力,形成对反射镜的分布式多点主动支撑,不同规格分区的数量及卸载力大小见表 1。

表 1 不同规格分区的数量及卸载力大小

Tab.1 Quantity and unload force of different mass blocks

Block number i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Unload force F_i/N	8.69	10.76	9.40	9.17	8.48	6.19	5.54	5.39	4.22	4.01	3.89	3.70	4.27	5.38	10.44	4.44	3.98	3.36
Quantity N_i	12												6					

1.2 卸载力支点数量

各质量分区的卸载力作用于反射镜卸载孔内壁,在满足面形精度要求的前提下,支点数量应尽量少,以降低工程实施难度。将单个质量分区抽象为独立的柱体,柱体长度与分区的厚度正相关,将支撑点放置在重心位置,受力状态如图 2 所示,卸载力 F 与重力 G 大小相等,显然,离支撑点越远的截面,挠度及转角越大。分区厚度增加时,镜面变形加剧,当厚度超过一定限时,单点支撑无法获得好的面形,此时应增加支撑点,减小镜面变形。

各质量分区背部的筋高度不一,根据公式(2)计算各分区的等效镜体厚度 H_i :

$$H_i = V_{ri}/S_{ri} + h \quad (2)$$

式中: V_{ri} 为编号为 i 的质量分区立筋部分的体积; S_{ri} 为该分区筋截面沿光轴方向的投影面积; h 为镜面面板厚度。根据公式(2)得到各分区等效镜体厚度 H_i 值,最大值 H_2 为 163 mm,最小值 H_{14} 为 39 mm,文中取最大值的 1/2 (81.5 mm) 作为划分单、双点支撑方式的厚度界限,得到表 2 中所示的 8 种双点支撑分区

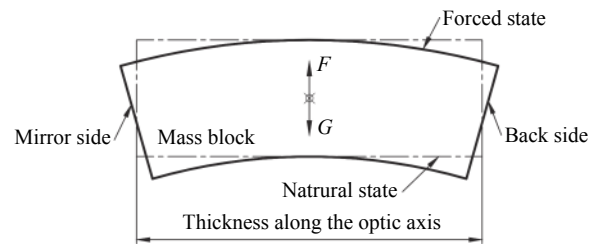


图 2 单点支撑状态受力与变形

Fig.2 Forced state and deformation in single-point supporting

表 2 不同质量分区的等效镜体厚度

Tab.2 Equivalent thickness of different mass blocks

		Double-point supporting blocks								
Block number i		1	2	3	4	5	6	7	15	
Equivalent thickness H_i/mm		128	163	146	148	136	99	87	160	
		Single-point supporting blocks								
Block number i	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18
Equivalent thickness H_i/mm	44	69	64	63	59	42	39	73	63	50

及 10 种单点支撑分区, 总计产生 282 个卸载力支点。

1.3 卸载力轴向位置

卸载力在光轴方向的位置直接决定了重力矩的大小进而影响镜面变形, 因此将其作为重力卸载待优化参数。以卸载合力与重力轴向位置相同为原则进行初值设定, 针对单点支撑分区, 卸载力 F_i 轴向位置过重心; 针对双点支撑分区, 如图 3 所示, 沿重心所在平面将分区划分为前、后两部分子区, 再根据各子区的重心位置确定支撑分力 F_{i1} 、 F_{i2} 的大小及位置, 且 F_{i1} 、 F_{i2} 的相对位置不再改变。

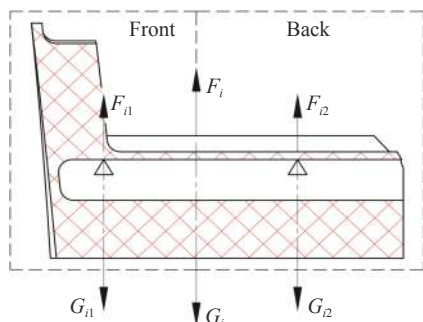


图 3 编号为 i 的双点支撑分区支点位置

Fig.3 Positions of the forces for double-point supporting block i

2 卸载点位置优化分析

根据光学系统设计指标, 反射镜在轨工作状态面形 RMS 应优于 $1/50\lambda$, 其中分配给重力影响的误差仅为其中的十分之一。以反射镜光轴水平状态重力及卸载力共同作用下面形误差 RMS 小于 0.002λ 为优化目标, 采用有限元仿真分析的方法对卸载点在光轴方向的分布位置进行优化。

2.1 初始模型分析

在 HyperMesh 中建立反射镜有限元模型, 用四面体二阶实体单元划分网格, 材料为 SiC, 弹性模量 350 GPa, 泊松比 0.14, 密度 3.12 g/cm^3 。以反射镜光轴从背面指向镜面为 +X 轴, 重力方向为 -Z 轴, 根据右手定则建立分析坐标系。反射镜光轴水平状态放置, 在各初始位置加载集中力进行重力卸载, 全部卸载力的合力大小与反射镜重力相等。将反射镜 $\Phi 1100 \text{ mm}$ 分布圆上等间隔的三点, 参照图 4 所示圆心- rtz 柱坐

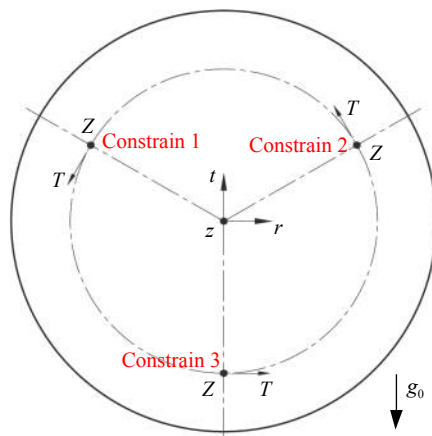


图 4 反射镜卸载状态位移约束

Fig.4 Mirror's displacement constraint when unloaded

标系约束切向 T 及轴向 Z 两方向自由度, 实现三点静定支撑。

设镜体质量分区 i 的卸载合力 F_i 从初始位置沿 +X 轴移动 T_i (i 取前述分区编号 1, 2, ..., 18), 作为文中规划的 18 个相互独立的面形优化参数。

以各分区重心位置为原点, 根据 1.4 节, 所有卸载点位移初始值为 $T_i=0$, 计算得到反射镜 X 向位移云图如图 5 所示, 剔除倾斜、偏移及整体变形后 (文中所列出反射镜整体面形均以该方式计算) 得到反射镜面形 PV 值为 0.0724λ , RMS 值为 0.0137λ , 远不满足 RMS 优于 0.002λ 的要求。

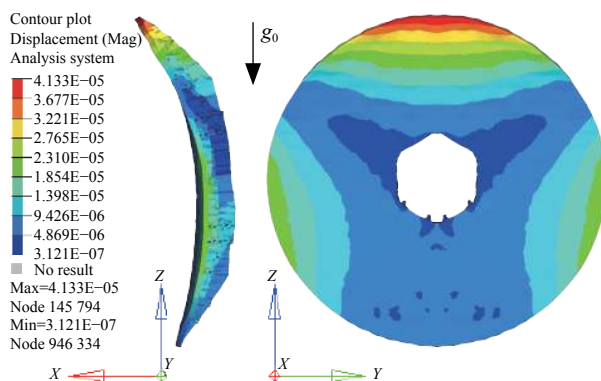


图 5 $T_i = 0$ 时反射镜 X 向位移云图

Fig.5 Contour plot of the mirror's X displacement ($T_i = 0$)

2.2 初步优化

由于初始状态反射镜变形整体呈“低头”状态, 根据经验判断, 应使 T_i 增大以形成反向力矩, 因此在结构极限范围内, 计算不同分区的 T_i 单独变化对面形 RMS 的影响, 结果如图 6(a) 所示。从图中可以看出,

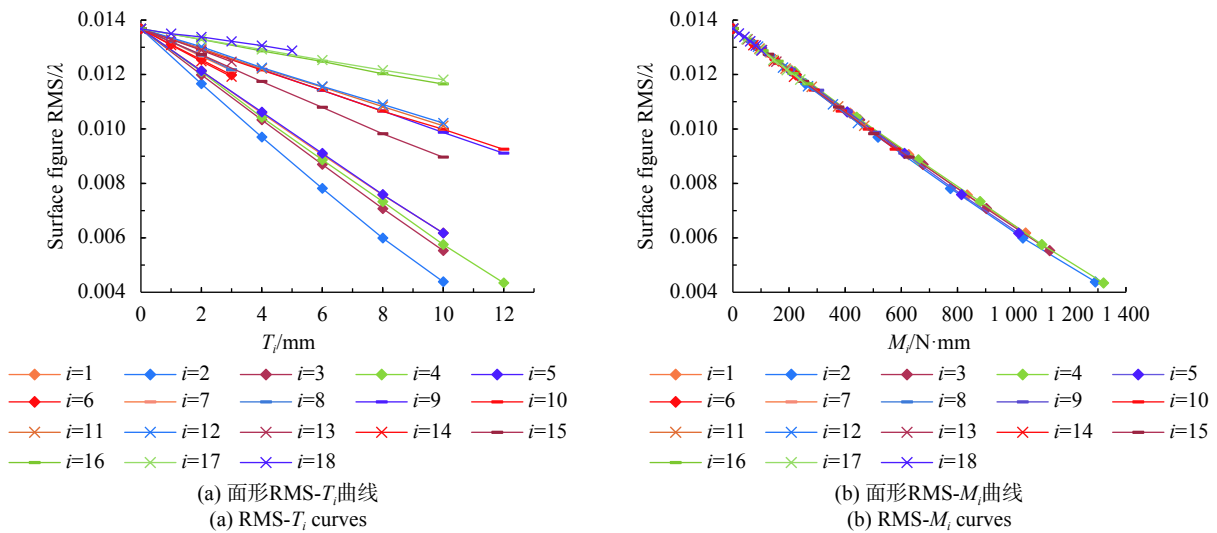


图 6 面形 RMS 的参数影响曲线

Fig.6 Influence of parameters on the surface figure RMS

面形误差对各分区 T_i 的敏感程度不同, 其中, T_2 对应的面形 RMS 下降最快, T_{18} 对应的面形 RMS 下降最慢, 与此相应, 18 种镜体分区中卸载力最大的是 $F_2=10.76$ N, 最小的是 $F_{18}=3.36$ N。

分析这一现象发现, $T_1 \sim T_{18}$ 虽相互独立, 但其变化归根结底是通过改变重力与卸载力的合力矩而影响镜面变形, 因此 $T_1 \sim T_{18}$ 对面形 RMS 的影响应具有一定的相关性规律, 找出该规律有助于降低优化参数维度, 简化优化过程。

现引入中间参数 M_i , 设 M_i 为所有编号为 i 的质量分区所受的合力矩, 则有 $M_i = F_i \times T_i \times N_i$, 其中 F_i 为分区 i 的卸载合力, N_i 为分区 i 的数量。计算得到如图 6(b) 所示的面形 RMS- M_i 曲线, 图中各曲线基本重合, 说明不同编号 M_i 对反射镜面形的影响基本一致。在此基础上, 生成多组 $T_1 \sim T_{18}$ 不同取值的参数组合进行面形分析计算, 得到与 RMS- M_i 基本重合的变化曲线。由此说明, 反射镜面形 RMS 受总力矩和 $\sum M_i$ 的单一影响。

由于当 $\sum M_i$ 相同时, 面形不因 $T_1 \sim T_{18}$ 取值不同而变化, 因此可简化为令所有 $T_i = T$ 进行迭代计算, 得到如图 7 所示的面形 RMS- T 曲线, 当 $T=1.43$ mm 时, 面形 RMS 值最小 (0.0024λ), 将此初步优化所获得的最优状态记为 S1。

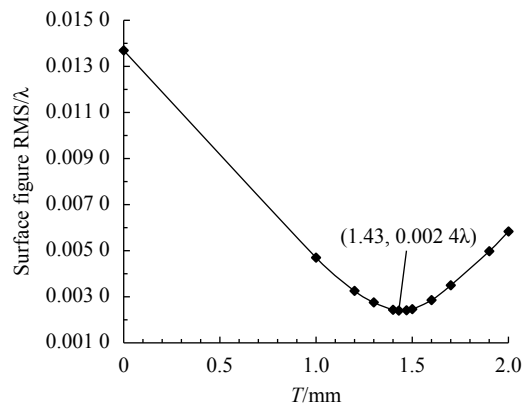


图 7 面形 RMS- T 曲线

Fig.7 RMS- T curves

2.3 二次优化

根据 S1 状态结果, 反射镜面形 RMS 达到 0.0024λ, 相比初始状态下 0.0137λ 降低了约 83%, 但仍不满足优于 0.002λ 的要求, 因此还需要进一步优化。反射镜 S1 状态 X 向位移云图如图 8 所示, 可以看出反射镜下方两侧局部有凸出的红色区域, 将镜面上、下半分别计算相对镜面整体拟合面的 RMS 误差, 上半部为 0.0022λ, 下半部为 0.0026λ, 说明上、下半镜的面形对相同的卸载力位置反应不同。

将位于反射镜上、下半部的卸载点位移按不同取值进行计算, 设所有位于上半侧的卸载力位移 T_U 均取相同值 T_U , 所有位于下半侧的均取相同值 T_D , S1 状态时, $T_U = T_D = 1.43$ mm。由于 S1 状态的面形已接近

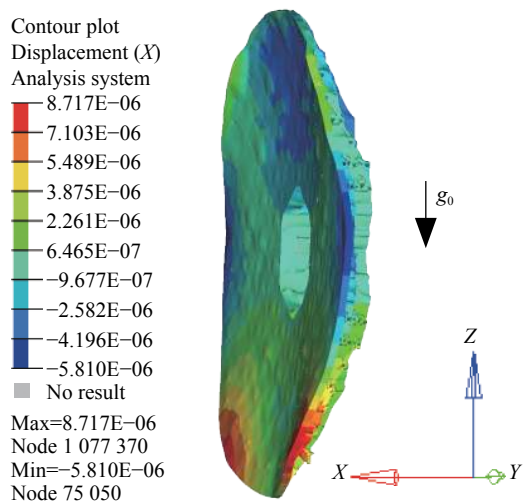


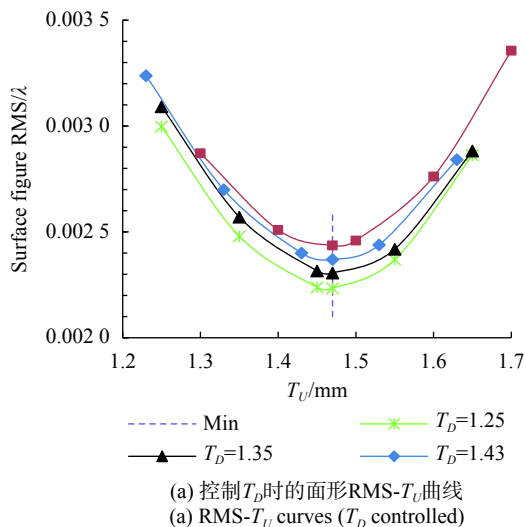
图 8 $T=1.43$ mm 时反射镜 X 向位移云图

Fig.8 Contour plot of the mirror's X displacement ($T=1.43$ mm)

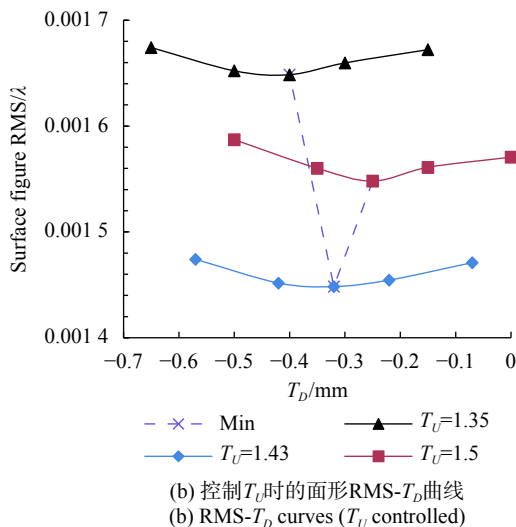
目标值,故二次优化在其附近进行参数搜索取值。

通过仿真可知,保持 $T_D=1.43$ mm 不变, $T_U=1.47$ mm 时面形最优,改变 T_D 的值,得到一组 RMS- T_U 曲线,如图 9(a) 所示,随着 T_D 的减小,面形 RMS 最优值也递减,而对应的 T_U 值基本不变。据此趋势预测:随着 T_D 继续减小,面形 RMS 最优值也会进一步减小直至满足要求,且此时对应的 T_U 值在 1.47 mm 附近。

同样,先保持 $T_U=1.43$ mm 不变,改变 T_D 求得面形最优值,再改变 T_U 值得到一组 RMS- T_D 曲线,如图 9(b) 所示, $T_U=1.43$ mm 时,面形 RMS 最优值出现谷值 0.00145λ,与预测相符,此时 $T_D=-0.32$ mm。记此二次优化结果为 S2 状态,相比 S1 状态面形 RMS 值降低了 39.6%,且满足目标 0.002λ 的要求,为文中优化的最终结果。



(a) 控制 T_D 时的面形 RMS- T_U 曲线
(a) RMS- T_U curves (T_D controlled)



(b) 控制 T_U 时的面形 RMS- T_D 曲线
(b) RMS- T_D curves (T_U controlled)

图 9 面形 RMS 的 T_U 、 T_D 影响曲线

Fig.9 Influence curves of T_U and T_D on the surface RMS

2.4 重力卸载面形优化结果

S2 状态下,所有位于反射镜上半部的卸载力沿 +X 向平移 1.43 mm,所有位于反射镜下半部的卸载力沿 -X 向平移 0.32 mm。此时剔除平移、倾斜及整体缩放后的面形误差云图如图 10 所示, PV 值为 0.0117λ, RMS 值为 0.0014λ,其中上半部相对整体拟合面误差 RMS 值为 0.0017λ,下半部为 0.001λ。

3 分析与验证

3.1 要点分析

根据第 1、2 节,总结出大口径反射镜光轴水平状

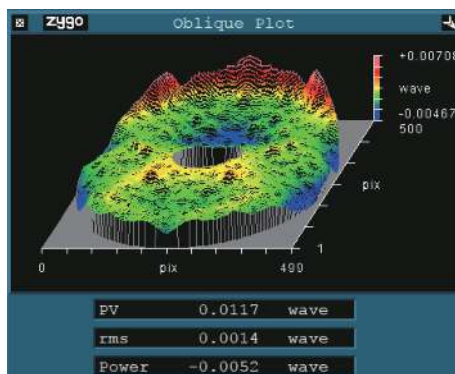


图 10 S2 状态反射镜面形误差云图

Fig.10 Contour plot of the mirror's surface error of S2 state

态下,以重力对面形 RMS 的影响最小为目标进行重力卸载参数优化的要点:(1)反射镜各质量分区内,以与重力相等为原则确定卸载力的大小,以等效厚度值确定支点数量,以卸载合力轴向位置过重心为原则,确定支撑点位置初始值;(2)以卸载力的轴向位移为参数进行仿真优化;(3)卸载力位置变化本质上通过改变反射镜合力矩而影响面形,初步优化时可将参数降至一维,即所有位移取相同值进行迭代;(4)若仍未满足指标要求,可增加优化参数进行二次优化:将位于反射镜上、下半部的卸载力位移分取不同值,上部位移对面形影响较大,初步优化已基本达到最优取值,可仅改变下部位移进行迭代计算。

对相同口径结构相似的多个反射镜采用同样的方式进行重力卸载优化,均证明了该方法可准确、快速地确定大口径反射镜的面形检测卸载方案,且能极大地加速优化过程,适用于其他类似大口径反射镜的重力卸载。

3.2 验证方法

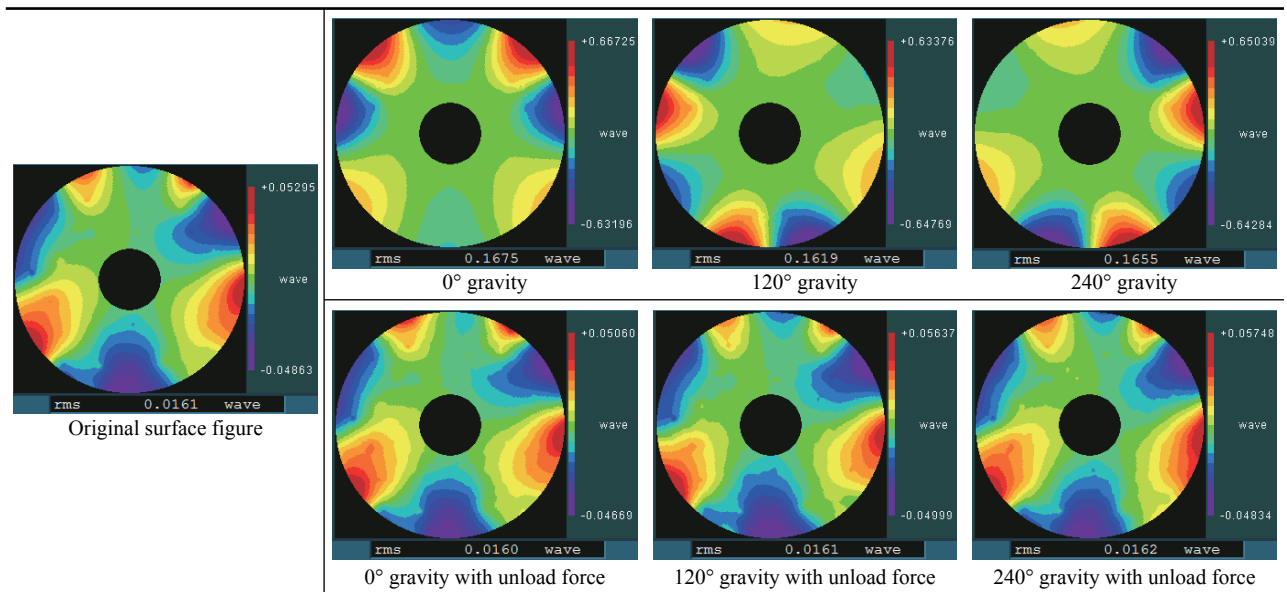
对某 $\phi 1550$ mm 口径高轻量化 SiC 反射镜进行

重力卸载优化设计,根据反射镜的实际尺寸和质量进行模型及卸载参数修正,再将重力卸载单元按设计的支撑位置和卸载力大小进行安装调试,应用于反射镜光轴水平背部三点静定支撑的面形检测中。

由于反射镜静定支撑结构采用弱约束设计,强度不足以支撑镜体自重,因此无法对反射镜不卸载状态进行面形检测来作出直接对比。假定反射镜原始面形为随机生成的 RMS 误差约为 $1/60\lambda$ 的面形,通过有限元方法分别计算其绕光轴旋转 0° 、 120° 及 240° 时受重力及卸载力作用下的面形,得到如表 3 所示结果(表中面形均处理为同一结构方位)。可以看出,反射镜受重力作用不卸载时,面形主要呈现重力影响分量,三方位 RMS 误差大幅偏离原始面形,波动量 0.0056λ ,且误差云图出现明显方位差异,而将反射镜按文中参数进行重力卸载后,三方位面形分布及 RMS 误差均接近原始面形,且其间仅波动 0.0002λ 。因此,通过对比反射镜三个旋转对称方位的面形分布及 RMS 误差对卸载效果进行间接验证。

表 3 三方位重力及卸载力作用下反射镜面形图

Tab.3 Surface figure of the mirror with gravity unloaded or not in 3 directions



3.3 实验结果

采用 Zygo 干涉仪对反射镜绕光轴三个方位 (0° 、 120° 及 240°) 下的面形分别进行检测,结果如图 11 所示。 0° 方位面形 RMS 为 0.0157λ , 120° 方位面形

RMS 为 0.0161λ , 240° 方位面形 RMS 为 0.0159λ , 差异小于 0.001λ ,且未出现仿真结果中重力导致的旋转大像散,说明该方法卸载后重力对反射镜面形的影响基本消除,实际卸载状态接近设计效果,保证了反射镜

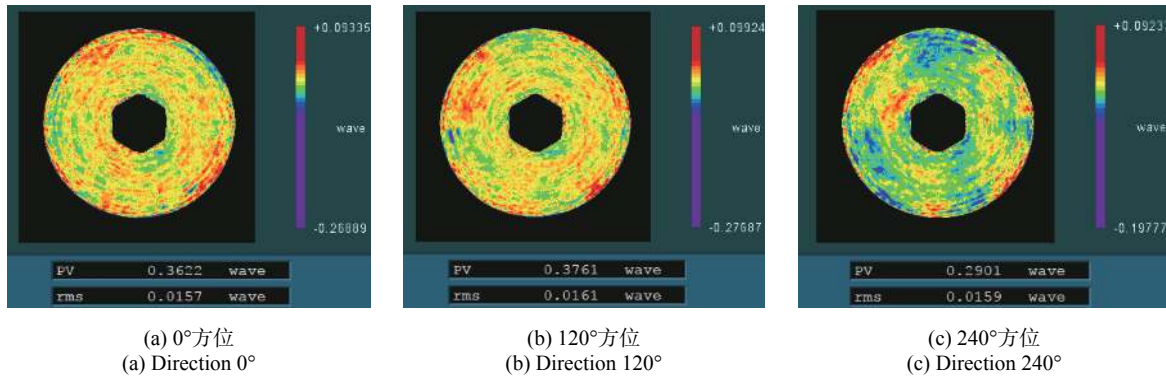


图 11 反射镜三方位实测面形图

Fig.11 Contour plot of surface error in 3 directions

满足优于 $1/50\lambda$ 的使用要求。

4 结 论

文中针对某 $\Phi 1550$ mm 口径高轻量化 SiC 反射镜的地面面形检测问题提出了一种光轴水平状态下的重力卸载优化方法, 具体阐述了卸载力相关参数(固定参数及优化参数)的确定方法, 依据有限元仿真结果分析并总结了卸载力位置对重力作用下面形 RMS 的影响规律及快速优化要点, 最终使面形 RMS 减小至 0.00145λ , 满足优于 0.002λ 的要求。将优化后参数应用于反射镜的地面检测, 得到三个绕光轴旋转对称方位下的面形 RMS 均优于要求的 $1/50\lambda$, 且三者之间差异小于 0.001λ , 面形分布较为一致, 证明了优化结果的有效性。该方法可高效实现大口径反射镜的高精度重力卸载优化, 为其他大口径反射镜在工程应用中的高精度面形测定提供参考。

参考文献:

[1] Lu Gang, Gao Lei, Wang Yanmin. Evaluation and analysis on multiple fusion methods for GJ-1 satellite imagery [J]. *Remote Sensing Information*, 2018, 33(6): 124-131. (in Chinese)
 卢刚, 高磊, 王彦敏. 高景一号影像多方法融合效果评价分析[J]. *遥感信息*, 2018, 33(6): 124-131.

[2] Xu Wei, Jin Guang, Wang Jiaqi. Optical imaging technology of JL-1 lightweight high resolution multispectral remote sensing satellite [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(8): 1969-1978. (in Chinese)
 徐伟, 金光, 王家骥. 吉林一号轻型高分辨率遥感卫星光学成像技术[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(8): 1969-1978.

[3] Wang Xiaoyong, Zhang Bowen, Guo Chongling, et al.

Parameter optimization of 3 m aperture space-based mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(S1): S118002. (in Chinese)
 王小勇, 张博文, 郭崇岭, 等. 3 m口径空间反射镜的参数优化[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(S1): S118002.

[4] Li Shenhua, Guan Yingjun, Xin Hongwei, et al. Lightweight design and flexible support of large diameter mirror in space camera [J]. *Laser and Infrared*, 2017, 47(11): 1422-1427. (in Chinese)
 李慎华, 关英俊, 辛宏伟, 等. 大口径空间反射镜轻量化设计及其柔性支撑[J]. *激光与红外*, 2017, 47(11): 1422-1427.

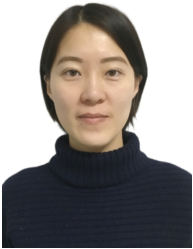
[5] Dong Deyi, Pang Xinyuan, Zhang Xuejun, et al. Key technology in developing of metrology mount for large aperture monolithic space-based mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(10): 2165-2179. (in Chinese)
 董得义, 庞新源, 张学军, 等. 空间大口径单体反射镜计量卸荷支撑研制中的关键技术[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(10): 2165-2179.

[6] Wang Kejun, Dong Jihong. Structural design of $\Phi 2$ m-level large-diameter SiC reflector used in space remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0718005. (in Chinese)
 王克军, 董吉洪. 空间遥感器2 m量级大口径SiC反射镜镜坯结构设计[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(7): 0718005.

[7] Guo Jiang, Zhu Lei, Zhao Ji, et al. Design and optimize of high tolerance support structure for large aperture space mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(5): 1138-1147. (in Chinese)
 郭疆, 朱磊, 赵继, 等. 大口径空间反射镜大容差支撑结构与优化[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(5): 1138-1147.

[8] Montagino L A. Test and evaluation of the Hubble Space Telescope 2.4-meter primary mirror[C]//SPIE, 1985, 571: 182-

- 190.
- [9] Besuner R W, Chow K P, Kendrick S E. Selective reinforcement of a 2 m-class lightweight mirror for horizontal beam optical testing[C]//SPIE, 2008, 7018: 701816.
- [10] Takao N, Hiroshi S, Takashi O, et al. The next-generation infrared astronomy mission SPICA under the new framework[C]//SPIE, 2014, 9143: 914311.
- [11] Zhang Long, Ye Lu, Zhang Jinping, et al. Gravity and support error separation of 1.2 m lightweight space mirror [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(7): 0722002. (in Chinese)
张珑, 叶璐, 张金平, 等. 1.2 m轻量化空间反射镜的重力支撑变形分离[J]. *光子学报*, 2018, 47(7): 0722002.
- [12] Hu Haifei, Zhao Hongwei, Liu Zhenyu, et al. Hydrostatic support system for in-situ optical testing of a 4 m aperture SiC mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(10): 2607-2613. (in Chinese)
胡海飞, 赵宏伟, 刘振宇, 等. 4 m口径SiC反射镜原位检测用静压支撑系统[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(10): 2607-2613.



第一作者简介: 孙熠璇 (1990-), 女, 工程师, 2012年、2014年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士学位, 主要从事航天遥感器光机结构设计及性能分析方面的研究。Email: sundae90@126.com