

3 m 口径空间反射镜的参数优化

王小勇,张博文,郭崇岭,刘 湃

(北京空间机电研究所,北京 100094)

摘 要:重力作用下的面形精度是空间反射镜性能的重要方面。以重力作用下的面形 RMS 为目标函数,基于反射镜结构和支撑点分布的参数化模型对某 3 m 口径空间反射镜进行了优化。首先,利用经典理论公式确定了支撑点数量和位置,进行了反射镜结构初步设计;其次,根据反射镜轻量化特征和支撑系统运动学设计建立了反射镜结构和支撑点分布的参数化模型;最后,采用 Isight 软件实现反射镜优化的过程集成和流程自动化,研究了重力作用下面形精度与各参数间的关系。结果表明,优化后反射镜面形 RMS 值为 86.7 nm,相比初步设计的 259.4 nm 减小了 66.6%,满足了项目指标要求。所提出的优化方法结合了支撑系统运动学模型,为采用相似轻量化结构和支撑方案的大口径反射镜优化提供了一种全面、高效的新思路。

关键词:空间反射镜; 大口径; 支撑点位置; 参数优化

中图分类号: TH751.1; V474.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S118002

Parameter optimization of 3 m aperture space-based mirror

Wang Xiaoyong, Zhang Bowen, Guo Chongling, Liu Pai

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

Abstract: Surface shape accuracy under gravity is an important aspect of space-based mirror performance. A 3 m aperture space-based mirror was optimized based on the parametric model of mirror structure and support point distribution, taking the surface shape RMS under the action of gravity as the object function. Firstly, the number and location of the support points were determined by using the classical theoretical formula, and the structure of the mirror was designed preliminarily. Secondly, according to the lightweight characteristics of the mirror and the kinematics design of the support system, the parameterized model of the mirror structure and the support points' distribution was established. Finally, the process integration and process automation of mirror component optimization were realized by using Isight software, and the relationship between the shape accuracy under gravity and various parameters was studied. The results show that the RMS value of the optimized mirror is 86.7 nm, which is 66.6% less than that of the preliminary design 259.4 nm, and meets the requirements of the project. The proposed optimization method combines with the kinematic model of the support system, and provides a comprehensive and efficient new approach for the optimization of large aperture mirrors with similar lightweight structure and support schemes.

Key words: space-based mirror; large aperture; support points location; parameter optimization

收稿日期:2018-12-13; 修订日期:2019-01-24

基金项目:国家重点研发计划(2016YFB0500802)

作者简介:王小勇(1972-),男,研究员,博士生导师,博士,主要从事大口径空间光学遥感以及视轴稳定控制方面的研究。

Email:w8320@126.com

0 引言

随着观测任务对分辨率要求的提高,空间光学传感器的口径不断增大,紧逼运载火箭的最大发射能力。大口径空间反射镜不仅带来反射镜组件质量的增大,而且对重力、温度等载荷的影响也更加敏感。反射镜组件性能的优劣直接决定了成像能力的优劣。根据大口径反射镜地面装调检测和在轨运行的各项要求,对反射镜及其支撑结构进行设计和优化,保证反射镜在不同载荷环境中面形精度始终满足设计需要,是空间光学传感器研制的核心问题之一。

国际上大口径空间望远镜的发展很快,从哈勃望远镜的 2.4 m、Herschel 望远镜、SPICA 望远镜的 3.5 m,到 ATLAST 项目(有 8、9.2、16 m 等多种方案)^[1-2],已经有多个在轨应用和立项研制的项目。我国在 2 m 以上大口径单体反射镜空间应用方面仍处于落后的地位,近年来随着“十二五”计划的实施和“十三五”计划逐步展开,结合地基望远镜和地面设备的工作成果,对大口径空间反射镜进行了卓有成效的研究工作。张东阁研究了反向传播神经网络在反射镜支撑位置优化上的应用,开发了代理模型和专用工具箱^[3];王书新应用响应面近似模型对反射镜面形精度与支撑点位置的关系进行了比较研究^[4];王克军提出了一种结合经验设计、拓扑优化和尺寸参数优化的设计方法,并取得了较好的实用效果^[5];William R. Arnold 等在 NASA 赞助下开发了专用反射镜设计软件^[6-7],可用于近地和空间遥感反射镜的快速设计以及支撑数量和位置的自动优化。

大口径空间反射镜通常需要采用多点支撑设计,支撑点的位置分布对反射镜面形精度具有十分重要的影响。文中以某型号大型空间光学设施 $\Phi 3\ 000\ \text{mm}$ 大口径主反射镜为研究对象。光学系统设计对主反射镜提出在装调检测过程中重力作用下面形精度达到 $PV \leq \lambda, RMS \leq \lambda/5 (\lambda=632.8\ \text{nm})$ 的要求。针对该指标要求,文中设计了 18 点背部 WhiffleTree 支撑系统,对光轴方向重力作用下的面形精度与支撑点位置的关系进行了研究。在反射镜初步设计基础上,建立了基于 Isight 软件的反射镜参数模型优化流程,集成了参数更新、结构仿真、面形拟合的运算过程,研究了反射镜结构与支撑点位置的优化问题。

1 反射镜支撑构型设计

1.1 支撑点数量与位置

空间相机光机结构的约束限制了主反射镜需采用背部支撑。Hall 研究了圆形反射镜在自重作用下的镜面变形与最少支撑点个数的关系,给出经验公式^[8]:

$$N = \left(\frac{1.5r^2}{t} \right) \left(\frac{\rho}{E\delta} \right)^{0.5} \quad (1)$$

式中: N 为最少支撑点数量; r 为反射镜半径; t 为反射镜厚度; ρ 为反射镜材料密度; E 为材料弹性模量; δ 为反射镜允许的 PV 值。根据这一公式, $N \approx 16$,考虑到反射镜的高指标要求和支撑构型的特点,支撑点数量确定为 18 个。支撑系统可以设计成典型的 WhiffleTree 支撑系统,如图 1 所示,根据 Hindle 的公式, $R_1=0.144, D=432\ \text{mm}, R_0=0.408, D=1\ 224\ \text{mm}$ 。

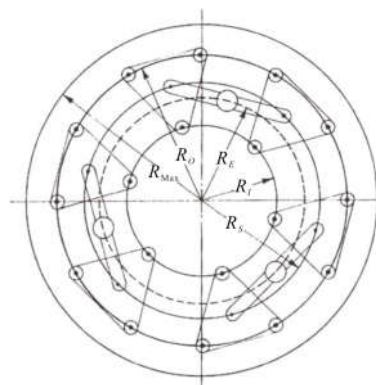


图 1 支撑点位置分布

Fig.1 Support points location layout

1.2 支撑系统自由度分配

反射镜支撑的设计原则之一是支撑系统为静定或准静定的^[9]。在静定支撑条件下,反射镜受到 6 个不同自由度的约束,反射镜的状态有唯一解。如果增加更多约束,支撑条件由静定变为超静定,方程组的解也从唯一解变成无穷解。这意味着反射镜的状态可以在解空间中任意变化,无法准确地预示和解释其在力、热载荷作用下的表现。自由度的合理分配是 WhiffleTree 支撑实现静定要求的关键。

考虑以反射镜机械轴的 Z 轴的圆柱坐标系,反射镜的 6 个自由度即为沿 R, T, Z 的 3 个移动自由度以及绕 R, T, Z 的 3 个转动自由度。WhiffleTree 支撑系统由 3 点扩展而来,包括 3 套相同的子支撑结

构。每套子支撑结构提供对反射镜的 Z 向、T 向 2 个约束就能够满足静定要求。对于 18 点 WhiffleTree 支撑系统，每套子支撑先由 1 个 1 级支撑点扩展为 2 个 2 级支撑点，进一步每个 2 级支撑点扩展为 3 个 3 级支撑点，如图 2 所示。每个 1 级支撑点提供了 Z 向、T 向两个约束，两个 2 级支撑点也应分别约束 Z 向、T 向两个自由度。但此时会额外引入绕两点连线的中垂线的转动约束，需要在 1 级支撑点处设计对这个自由度的释放。进一步每个 2 级自由度扩展为 3 个 3 级支撑点。根据对称性可设计内圈的 3 级支撑点约束 Z、T 两个自由度，外圈的 2 个 3 级支撑点只约束 Z。此时会额外引入对两个绕 R、T 轴转动的约束。于是在对应的 2 级支撑点处需要设计两自由度释放。这样每套 6 点子支撑系统实现了严格遵循运动学原则的支撑点扩展。

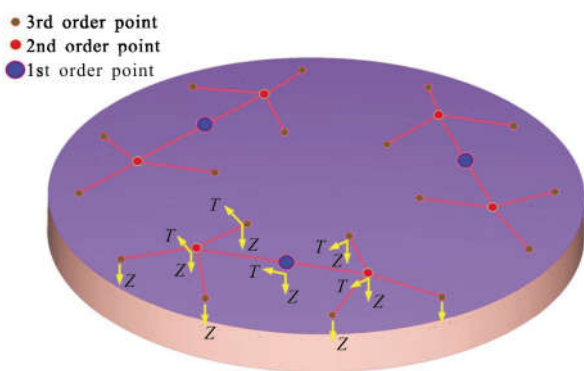


图 2 支撑点的自由度分配

Fig.2 Degree of freedom arrangement of the support points

2 反射镜初步设计

反射镜采用 ULE 材料。ULE 具有优异的热稳定性，并且能够通过高温熔接、封接等工艺制成封闭式结构^[10]，这是 SiC、微晶等材料所不具备的。轻量化形式采用了六边形蜂窝夹芯结构。

考虑支撑点应位于反射镜六边形格板的交点处，并且按照 Hindle 公式计算结果分布，同时结合 ULE 反射镜设计经验和工艺水平，完成了反射镜的初步设计。反射镜呈三等分中心对称，每个 120°分块内部又呈镜像对称结构。总厚度 H 、三角形加密层高度 h 、六边形格子尺寸 d 、面板厚度 t_m 、底板厚度 t_d 、外环厚度 t_w 、六边形格板厚度 t_h 的取值和反射镜质量见表 1。

表 1 反射镜初步设计参数

Tab.1 Initial design parameter of mirror

Parameter	Value
H/mm	260
d/mm	107
t_m/mm	7
t_d/mm	6
t_w/mm	5
t_h/mm	2.5
Mass/kg	440

根据以上设计参数建立反射镜有限元模型，进行光轴方向重力作用的仿真分析，去除偏移和倾斜后的反射镜面形拟合结果如图 3 所示， $PV=1.681\lambda$ ， $RMS=0.410\lambda$ 。可见初步设计的面形精度远大于设计指标要求，因此必须对反射镜结构和支撑点位置进行优化。

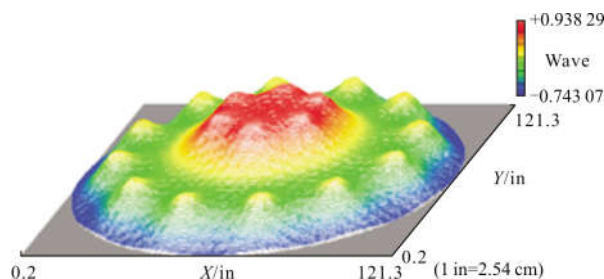


图 3 去除偏移和倾斜的面形误差云图

Fig.3 Surface error contour by removing piston and tilt

3 反射镜优化问题描述

六边形轻量化设计的反射镜的夹芯层可以看作是由图 4 所示的单胞结构阵列得到，与面板、底板和

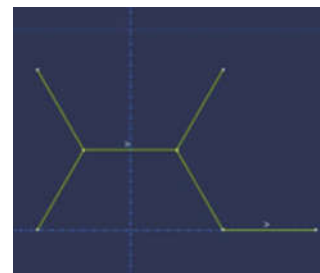


图 4 蜂窝夹芯层的单胞结构

Fig.4 Unit cell of the hexagon core

外环做布尔运算后就形成了反射镜的模型。反射镜结构由于具有严格的规律性，可以使用面板球面半径 R_m 、底板球面半径 R_d 、外环直径 D 与表 1 中的参数共 9 个参数来描述。其中 R_m 、 R_d 和 D 都是结构设计按照光学设计要求确定的固定值。

根据 WhiffleTree 支撑系统自由度分配，支撑系统可以抽象为刚性零件与理想铰链构成的理论模型，此时支撑系统模型可以通过一组支撑点位置分布参数描述。对于文中 18 点 WhiffleTree 支撑系统，支撑点布置于反射镜底板上，具有中心对称性镜像对称性，可以用图 5 所示的 $N_1 \sim N_3$ 3 个点所对应的 $R_1 \sim R_3$ 和 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ 共 6 个参数来描述。 $R_1 \sim R_3$ 和 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ 分别为 $N_1 \sim N_3$ 各个点所在的位置与反射镜圆心的距离以及各个点与反射镜中心线所成的夹角。进一步的，由于支撑点必须位于六边形格板交点， $R_1 \sim R_3$ 和 $\alpha_1 \sim \alpha_3$ 的取值并不是连续的，而是与单胞结构的阵列数相关的离散点，可以用横竖两个方向的阵列数 $m_1 \sim m_3$ 、 $n_1 \sim n_3$ 与六角形尺寸 d 的乘积代替。

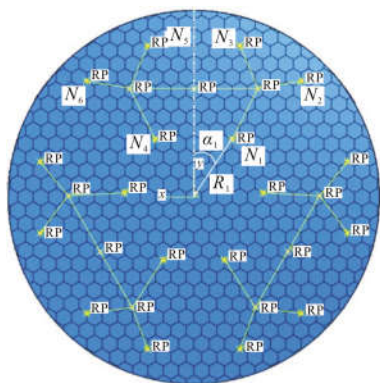


图 5 支撑系统参数

Fig.5 Support system parameters

以重力作用下面形误差 RMS 最小为优化目标，则反射镜优化问题的数学描述为：

$$RMS = \min(f(H, h, d, t_w, t_m, t_d, t_h, \dots, m_1, m_2, m_3, n_1, n_2, n_3)) \quad (2)$$

根据结构设计约束和加工工艺水平可以确定各个参数的取值范围，见表 2。此外反射镜还受到质量不超过 450 kg、第一阶自然频率不低于 100 Hz、3 个方向 10 g 过载下的反射镜第一主应力不超过 3 MPa 等约束。

表 2 设计变量取值范围

Tab.2 Ranges of design variables

Parameter/mm	Down limit	Up limit
H	240	280
d	100	150
t_m	6	-
t_d	6	-
t_w	4.5	-
t_h	2.5	-

4 反射镜优化

根据反射镜的优化问题描述，建立了基于 Isight 软件的优化流程，如图 6 所示。优化流程中集成了 Abaqus、Excel、Sigfit 等软件，共同完成从输入参数到目标函数 RMS 的仿真分析。在每次仿真过程中，首先通过 Excel 表格根据输入参数计算得到反射镜参数化建模所需的数据，然后映射到 Abaqus 的运行脚本 py 文件中；其次运行 Abaqus 进行有限元分析得到镜面在重力作用下的变形结果 ODB 文件，由 Sigfit 软件读取并拟合面形，给出目标函数 RMS 值。图 7 为单次仿真数据传递示意图。

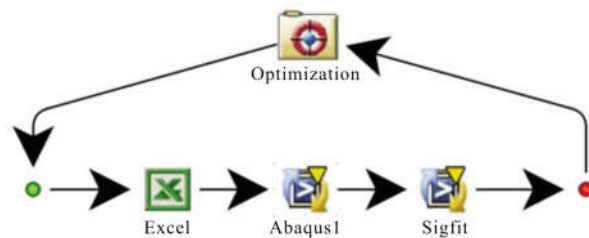


图 6 优化流程图

Fig.6 Optimization flowchart

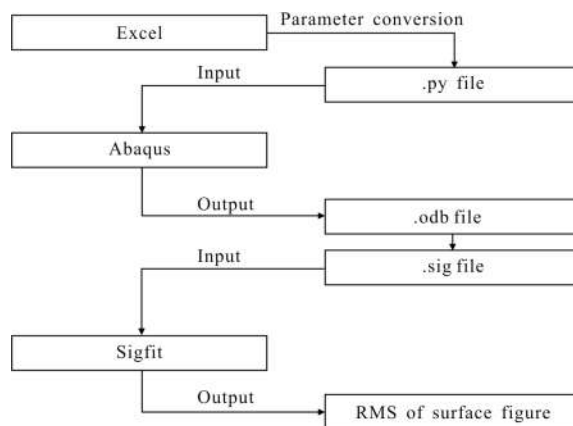


图 7 单次仿真流程图

Fig.7 Single simulation flowchart

使用优化拉丁超立方算法进行试验设计分析,得到各设计变量在设计空间对面形 RMS 的影响帕累托图如图 8 所示。可以看出:

(1) 支撑点分布参数对重力面形的影响要远大于各个反射镜结构参数。这一点显示出引入支撑点分布参数对于获得反射镜结构的最优设计具有十分突出的价值。

(2) 镜体面板厚度和底板厚度对目标函数都是负影响,也即厚度的增大会导致面形 RMS 增大,说明减小面板底板的厚度是有利的。但是这两个厚度值受到加工工艺限制。

(3) 各个反射镜结构参数中六边形边长 d 的灵敏度最高,底板厚度 t_d 灵敏度最低。

(4) 分布半径越小的支撑点对目标函数的影响越显著,分布半径相当的支撑点对目标函数的影响也相当。这与直观推断是相符的。

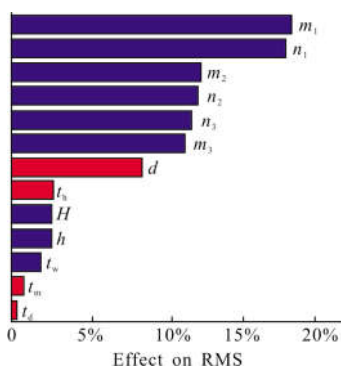


图 8 Pareto 图

Fig.8 Pareto diagram

根据试验设计数据设置优化起点,使用多岛遗传算法进行优化求解。多岛遗传算法在遗传算法基础上增加了“岛”(即子种群)和迁移的概念,通过对代表个体的基因进行选择、交叉、变异、迁移、淘汰等操作,模拟进化过程,进而获得最优解。多岛遗传算法能够有效地提高运算速度,并且保留了遗传多样性,有利于避免早熟现象,适合应用于反射镜优化这类设计空间大、设计变量相互关系复杂,同时具有多峰可能的优化问题。

最终找到的最优解 RMS 值为 0.137λ ,相比初始设计 0.410λ 提升了 66.6%,不仅满足了设计指标的要求,而且为支撑结构具体设计留出较充足的余量。经验证,质量、频率和强度等约束条件均满足。表 3

为优化结果数据。图 9 为优化后的去除偏移和倾斜的反射镜面形云图。

表 3 反射镜最终优化结果

Tab.3 Final results of mirror optimization

Parameter	Value
H/mm	273
d/mm	125
t_m/mm	6
t_d/mm	6
t_w/mm	5.5
t_h/mm	3.1
R_1/mm	569
R_2/mm	1 283
R_3/mm	1 283
$\alpha_1/(\circ)$	33.7
$\alpha_2/(\circ)$	43
$\alpha_3/(\circ)$	17
Mass/kg	449.5

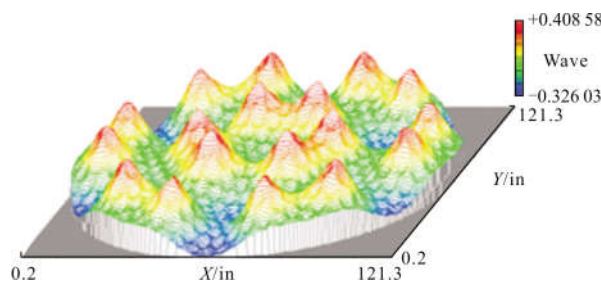


图 9 去除偏移和倾斜的优化后面形误差云图

Fig.9 Surface error contour after optimization by removing piston and tilt

5 结论

针对 3 m 口径空间反射镜的重力作用下面形的高指标要求,文中进行了运动学支撑系统的构型设计。在此基础上完成了反射镜的初步设计和基于参数模型的优化设计。优化分析应用 Isight 软件实现了过程集成和流程自动化。优化过程考虑了反射镜结构和支撑点分布两部分参数形成的设计空间。试验设计的结果表明,支撑点分布参数的引入对于反射镜设计最优解的获取具有十分显著的作用。最终的优化结果相比初步设计,实现面形精度 RMS 减小

66.6%, 满足了设计指标的要求。所提出的反射镜结构和支撑点位置的优化方法为采用类似轻量化结构和支撑方案的大口径反射镜优化提供了一种全面、高效的新思路。

参考文献:

- [1] Oegerle W R, Feinberg L D, Purves L R, et al. ATLAST-9.2 m: a large-aperture deployable space telescope[C]//SPIE, 2010, 7731: 77312M.
- [2] Li Zongxuan, Jin Guang, Zhang Lei, et al. Overview and outlook of monolithic primary mirror of spaceborne telescope with 3.5 m aperture[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 532-541. (in Chinese)
李宗轩, 金光, 张雷, 等. 3.5 m 口径空间望远镜单块式主镜技术展望[J]. *中国光学*, 2014, 7(4): 532-541.
- [3] Zhang Dongge, Zhuo Renshan, Li Yaobin. Surrogate models based optimization methods for the axial support points of the primary mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 409-414. (in Chinese)
张东阁, 卓仁善, 李耀彬. 反射镜轴向支撑位置优化的代理模型方法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 409-414.
- [4] Wang Shuxin, Li Jinglin, Zhang Fan, et al. Optimization of large aperture space reflector based on RSM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S2): 291-297. (in Chinese)
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.
- [5] Wang Kejun, Xuan Ming, Dong Jihong, et al. Design method of reflector component structure of space remote sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(11): 1113001. (in Chinese)
王克军, 宣明, 董吉洪, 等. 空间遥感器反射镜组件结构设计方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(11): 1113001.
- [6] Willian R Arnold, Matthew Fitzgerald, Rubin Jaca Rosa, et al. Next generation lightweight mirror modeling software[C]//SPIE, 2013, 8836: 883601.
- [7] Arnold W R, Bevan R M, Stahl H P. Integration of mirror design with suspension system using NASA's new mirror modeling software[C]//SPIE, 2013, 8836: 88360J.
- [8] Yoder P R. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, translated. Beijing: China Machine Press, 2008. (in Chinese)
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.
- [9] Zhang Bowen, Wang Xiaoyong, Zhao Ye, et al. Progress on support technique of space-based large aperture mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1113001. (in Chinese)
张博文, 王小勇, 赵野, 等. 天基大口径反射镜支撑技术的发展[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1113001.
- [10] Liu Tao, Zhou Yiming, Jiang Yuesong. Research and application of foreign space mirror materials [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2013, 34 (5): 90-99. (in Chinese)
刘韬, 周一鸣, 江月松. 国外空间反射镜材料及应用分析[J]. *航天返回与遥感*, 2013, 34(5): 90-99.