

DOI: 10.3969/j.issn.1009-9492.2022.05.019

王健, 张美君, 虞林瑶, 等. 卡塞格林系统结构与仿真 [J]. 机电工程技术, 2022, 51 (05): 84-86.

卡塞格林系统结构与仿真

王 健, 张美君, 虞林瑶, 张宇鹏, 李永刚

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 13000)

摘要: 卡塞格林系统常用于航空航天和军事装备的光电设备中。在卡塞格林系统中, 主镜面形决定了整个光学系统成像质量。随着光电行业的发展, 要求光学系统质量小, 性能高, 而系统的质量与刚度相互矛盾, 既要降低系统质量, 又要保证系统抵抗温度变化导致的面形变化。主镜系统优化前的质量是 3.6 kg, 反射面 RMS 是 $1/33 \lambda$ 。使用光机热集成仿真分析的方法, 分析主镜系统对温度的敏感程度。每升高 (或下降) 5°C , 主镜反射面 RMS 值变化 2.5 nm。根据分析结果优化主镜结构和主镜支撑结构, 由三点支撑结构改为中心支撑结构, 优化后的系统质量是 3.1 kg, 反射面 RMS 是 $1/35 \lambda$ 。分析优化后的主镜系统对温度的敏感程度, 每升高 (或下降) 5°C , 主镜反射面 RMS 值变化 3.9 nm, 这种微小变化对成像质量无影响。实现降低系统质量和保证成像质量的目标。

关键词: 卡塞格林系统; 光机热集成仿真; 光机结构设计; 面形拟合

中图分类号: TH122

文献标志码: A

文章编号: 1009-9492 (2022) 05-0084-03

Cassegrain System Structural Design and Simulation

Wang Jian, Zhang Meijun, Yu Linyao, Zhang Yupeng, Li Yonggang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 13000, China)

Abstract: Cassegrain system is often used in photoelectric equipment of aerospace and military equipment. In Cassegrain system, the shape of the main mirror determines the imaging quality of the whole optical system. With the development of photoelectric industry, the optical system is required to have small quality and high performance, and the quality and stiffness of the system are contradictory. It is necessary to reduce the system quality and ensure that the system can resist the surface shape change caused by temperature change. The mass of the primary mirror system before optimization was 3.6 kg and the RMS of the reflecting surface was $1/33 \lambda$. The sensitivity of the primary mirror system to temperature was analyzed by using the method of optical mechanical thermal integration simulation analysis. The RMS value of the reflecting surface of the main mirror changed by 2.5 nm every 5°C increase (or decrease). According to the analysis results, the main mirror structure and the main mirror support structure were optimized, and the three-point support structure was changed to the central support structure. The optimized system mass was 3.1 kg and the reflecting surface RMS was $1/35 \lambda$. The sensitivity of the optimized primary mirror system to temperature was analyzed. The RMS value of the primary mirror reflector changes by 3.9 nm every 5°C rise (or fall), which had no impact on the imaging quality. The design achieves the goal of reducing system quality and ensuring imaging quality.

Key words: Cassegrain system; opto-mechanical thermal integration simulation; opto-mechanical structure design; surface fitting

0 引言

随着国防军工的各个领域提出的要求不断提高, 卡塞格林系统已经广泛应用于光电平台中。卡塞格林系统与透射式系统相比, 其优势是大口径、长焦距、多波段。卡塞格林光学系统口径大, 接近衍射极限, 需要高超的装调技术及能适应复杂环境的结构支撑保证光学系统成像质量, 主镜装调难度及主镜支撑结构件的设计难度最高^[1-3]。传统的光学结构单独仿真不准确, 这是因为光学仿真中没有包括结构变形所产生的偏移、偏心和倾斜^[4]。现阶段, 主要分析重力因素对主镜面形的影响, 极少分析温度变化对主镜面形的影响^[5]。光学镜片和结构件具有不同的热膨胀系数和杨氏模量, 主镜反射面会产生刚

体位移、表面变形等变化, 从而光轴发生偏移并使成像质量降低。光电平台是一个密闭的平台, 内部存在大量的电子元器件, 电子元器件工作时产生大量的热, 热量无法及时散失导致主镜系统温度升高, 主镜面形发生变化。光电平台应用在太空或高空环境, 平台受到功率限制, 热控系统无法使平台内部温度维持在 20°C , 主镜面形也会受到影响。因此, 光机设计时必须考虑温度因素。减小温度变化对主镜面形的影响, 需要设计主镜结构和主镜支撑结构。结构设计完成后仿真分析, 分析温升 (或温降) 对主镜面形的影响, 评价是否对成像质量产生影响。再次优化结构, 进行对温度的敏感度分析。最终实现降低系统质量和保证成像质量的目标。

收稿日期: 2022-03-10

本文使用光机热集成仿真分析的方法,每温升(或温降)5℃设置一个边界条件,汇总各个边界条件的分析结果,分析一个三点支撑的主镜系统对温度的敏感程度。根据分析结果对系统内主镜结构和支撑件结构优化,改变主镜材料,改变支撑方式,实现减小系统质量的目标。分析新系统对温度的敏感程度,评价是否满足光电平台像质要求。最终使系统更适用于严苛的航空航天环境。

1 卡塞格林系统的光机结构

卡塞格林系统是一个两镜系统,一个是凹面的主镜,另一个是凸面的次镜。平行光经过主镜和次镜的反射汇聚到焦平面处^[9]。由于主镜口径大,主镜面形易受到外界环境因素的影响。因此,设计衬套和柔节支撑主镜,呈三点排布。如图1所示,主镜系统由大口径反射镜、嵌套、柔节和背板等组成。主镜使用碳化硅材料,原因是碳化硅材料有比刚度大、热变形系数小、尺寸稳定、强度高的优点。嵌套由强度较高、热稳定性好的殷钢材料制成。其余零件是由机械性能强、密度低的钛合金制成。嵌套和主镜之间是以胶粘的方式连接,嵌套与柔节之间是螺栓连接,衬套和柔节以螺栓连接的方式连接到背板上,最后整体与主镜室相连。系统总质量为3.6 kg。20℃主镜安装后的波相差1/33λ,如图2所示。

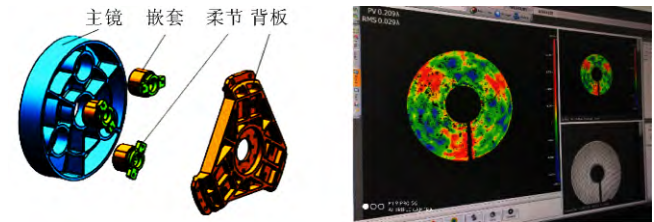


图1 主镜及其支撑件

Fig.1 Primary mirror and its support

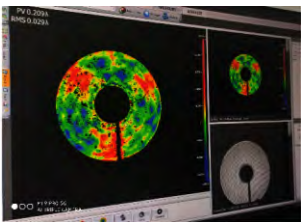


图2 主镜检测图

Fig.2 Primary mirror inspection map

2 卡塞格林系统对温度敏感程度分析

本文研究卡塞格林系统对温度的敏感程度,其流程如图3所示,本文基于光机热集成分析的方法,分析5~35℃范围内主镜表面形变量。基于Zernike多项式拟合主镜面形变化,记录以20℃为中心每温升(或温降)5℃主镜面型变化情况。



图3 卡塞格林系统对温度的敏感程度分析流程

Fig.3 Flow chart of temperature sensitivity analysis of Cassegrain system

2.1 光机热集成有限元仿真分析

光机热集成分析方法是一种结合了光学、机械、热学各学科设计分析为一体的方法,是一种高度系统化、集成化的设计方法。

本文使用HyperMesh对模型(除主镜室外)进行抽中面处理,相应部件划分网格,并赋予各个中面厚度,网格大小和类型、材料属性如表1所示,网格划分结果如图4所示。以节点耦合的方式模拟胶粘连接,使用MPC约束模拟螺栓连接。加载5~35℃的温度载荷,间隔5℃。设置惯性释放卡片,增加虚约束保证分析结果的可靠性^[7-10]。温度载荷为35℃时整体结构有限元分析结果,如图5所示。主镜部件有限元分析结果如图6所示。提取主镜反射面有限元分析结果用于面形分析。

表1 各个部件材料及网格属性

Tab.1 The material and mesh properties of all parts

部件	材料	网格属性	网格大小/mm
主镜	碳化硅	PSOLID	2
衬套	殷钢	PSOLID	2
柔节	钛合金	PSOLID	2
背板	钛合金	PSOLID	≤5
主镜室	钛合金	PSOLID	≤5

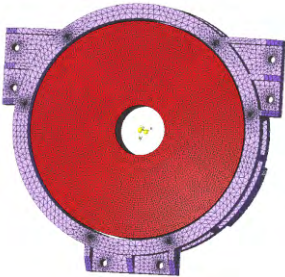


图4 网格划分结果

Fig.4 The result of meshing

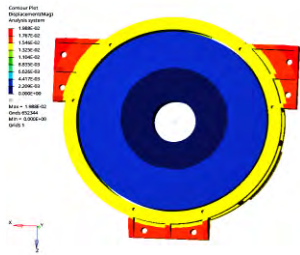


图5 35℃时整体结构有限元分析结果

Fig.5 Finite element analysis results of overall structure at 35℃

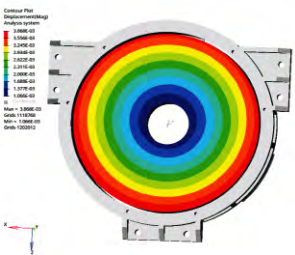


图6 35℃时主镜部件有限元分析结果

Fig.6 Finite element analysis results of primary mirror at 35℃

2.2 面形拟合分析

在拟合光学面形前需要计算光学表面刚体运动。一组网格节点表示的光学曲面,表面的刚体运动包括3个

平移量 (T_x, T_y, T_z) 和3个倾斜量 (R_x, R_y, R_z)。由于光学元件在6个方向的刚体运动, 在一个给定节点 (x_i, y_i, z_i) 产生的节点刚体位移 ($d_{x_i}, d_{y_i}, d_{z_i}$), 可由式 (1) 表示:

$$\begin{cases} d_{x_i} = T_x + z_i R_y - y_i R_z \\ d_{y_i} = T_y - z_i R_x - x_i R_z \\ d_{z_i} = T_z + y_i R_x - x_i R_y \end{cases} \quad (1)$$

带有位移信息的节点拟合光学曲面, 其波相差通常使用 Zernike 多项式描述^[11-12]。

$$Z(\rho, \varphi) = \sum_n \sum_m (R_n^m(\rho) \cos(m\varphi) + R_n^m(\rho) \sin(m\varphi)) \quad (2)$$

式中: m 和 n 为非负整数; φ 为方位角; ρ 为径向距离, 值域 (0, 1);

$$R_n^m(\rho) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)! \rho^{n-2k}}{k! \left(\frac{n-m}{2} - k\right)! \left(\frac{n+m}{2} - k\right)!} \circ$$

本文基于 Zernike 多项式和主镜反射面节点变形拟合主镜反射面面形, 面形拟合时需要移除离焦量。温度载荷为 35 °C 时主镜反射面面形拟合结果如图 7 所示。拟合结果中深色的 3 点代表柔节处产生的像散, 与实际装调结果相符。

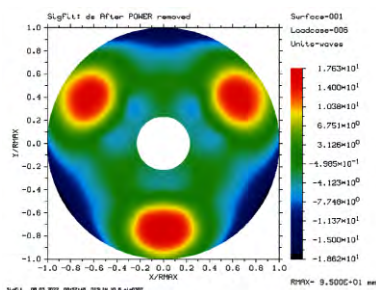


图7 35 °C 时主镜面形拟合结果

Fig.7 The fitting result of the primary mirror surface at 35 °C

各个温度载荷下的主镜反射面面形均方根值 (RMS) 及各个方向的位移和倾斜量如表 2 所示。以 20 °C 为中心, 每升高 (或下降) 5 °C, RMS 值变化约 2.5 nm。

表2 各个温度载荷的主镜反射面面形均方根值 (RMS)

Tab.2 The RMS of the surface of the primary mirror reflection surface for each temperature load

温度 / °C	RMS / nm	平移量 / nm			倾斜量 / $\times 10^{-2}$ (")		
		T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z
5 (35)	7.37	13.64	117.37	570.86	6.72	0.23	6.06
10 (30)	4.92	9.09	78.25	380.58	4.48	0.15	4.05
15 (25)	2.45	4.55	39.12	190.29	2.24	0.076	2.02

3 卡塞格林系统优化设计

小于 $\phi 300$ mm 口径的主镜不必使用三点支撑, 中心

支撑的方式可以完全满足要求, 如图 8 所示。综合考虑材料的机械性能和经济合理性, 有针对性地选择结构材料。主镜材料改为硅。虽然硅的力学性能稍微弱于碳化硅, 但是也满足使用要求。另外, 硅具有热稳定性好、加工周期短、密度低的特点。主镜支撑方式改为中心支撑, 主镜的结构也做出相应改变, 取消衬套, 直接使用殷钢材料的柔节, 直接与主镜以胶粘的形式连接。其他零件的材料和连接方式不变。优化后系统总质量 3.1 kg, 20 °C 主镜安装后的波相差 $1/35 \lambda$, 如图 9 所示。

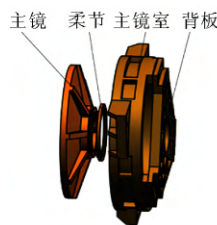


图8 优化后的系统结构

Fig.8 Optimized system structure

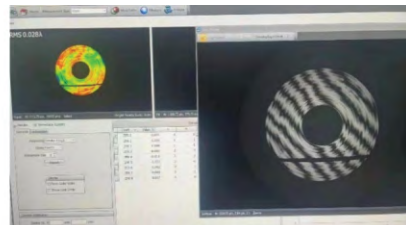


图9 优化后的主镜检测图

Fig.9 The optimized primary mirror detection map

对新模型进行光机热集成分析。主镜和柔节划分 2 mm 大小的网格, 属性为 SOLID。其他零件划分小于 5 mm 的网格, 属性为 SOLID。加载 5~35 °C 的温度载荷, 间隔 5 °C。设置惯性释放卡片, 增加虚约束。温度载荷为 35 °C 时有限元分析结果, 如图 10 所示。主镜部件有限元分析结果如图 11 所示。温度载荷为 35 °C 时主镜反射面面形拟合结果如图 12 所示。

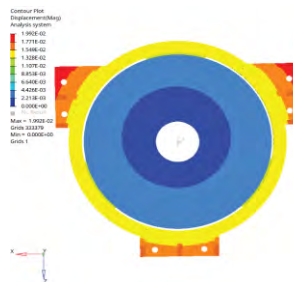


图10 35 °C 时优化后整体结构有限元分析结果

Fig.10 Finite element analysis results of overall structure after optimization at 35 °C

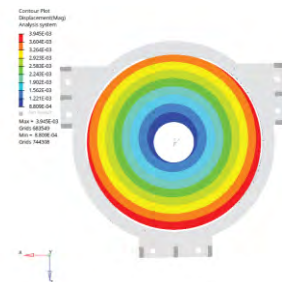


图11 35 °C 时优化后主镜部件有限元分析结果

Fig.11 Finite element analysis results of the primary mirror after optimization at 35 °C

各个温度载荷下的主镜反射面面形均方根值 (RMS) 及各个方向的刚体位移和旋转量, 如表 3 所示。以 20 °C 为中心, 每升高 (或下降) 5 °C, RMS 值变化约 3.9 nm。与优化前相比较, 系统结构对温度的敏感程度略微提高, 但是对成像质量无明显影响。

4 结束语

本文对卡塞格林系统中的主镜结构进行了结构优化及仿真。使用光机热集成仿真分析的方法, 分析卡塞格

(下转第 97 页)

Science, 1988(34):1221-1230.

- [2] Herbers, Jörg, Hromkovic, et al. Models and Algorithms for Ground Staff Scheduling on Airports[J]. Rwth Aachen, 2005.
- [3] Raik Stollitz. Operational workforce planning for check-in counters at airports[J]. Elsevier India Pvt Ltd., 2010, 46(3):414-425.
- [4] Lishun Zeng, Mingyu Zhao, Yangfan Liu. Airport ground workforce planning with hierarchical skills: a new formulation and branch-and-price approach[J]. Springer US, 2017(8): 245 - 258.
- [5] 胡修武, 王瑞程, 王秀利. 呼叫中心坐席人员可加班的优化排班问题[J]. 系统工程, 2019, 37(5):139-149.
- [6] 胡修武, 王瑞程, 王秀利. 考虑班种约束的呼叫中心排班优化模型与算法[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(2):51-58.
- [7] Bard J F, Purnomo H W. Preference scheduling for nurses using column generation[J]. European Journal of Operational Research, 2005 (2):510-534.
- [8] 艾杰. 基于分支定界算法的护士排班模型研究[J]. 科学技术与

工程, 2012, 12(13):3074-3077.

- [9] 杨琨, 刘玉欣, 杨之涛, 等. 面向高度时变不确定患者需求的急诊医生周排班方法研究[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(3):171-178.
- [10] 李献忠, 徐瑞华. 基于时间耗费的城市轨道交通乘务排班优化[J]. 铁道学报, 2007, 29(1):21-25.
- [11] 张增勇, 毛保华, 杜鹏, 等. 基于惩罚费用的城市轨道交通乘务排班优化模型与算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014(2): 117-124.
- [12] 丰富, 陈绍宽, 杜鹏. 考虑时间均衡度的城市轨道交通乘务排班计划优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(6): 164-170.

第一作者简介: 罗 军 (1984-), 男, 湖南衡阳人, 硕士, 高级工程师, 研究领域为信息系统软件研发, 已发论文3篇。
※通讯作者简介: 张家华 (1996-), 男, 四川达州人, 硕士研究生, 研究领域为运筹优化。 (编辑: 刁少华)

(上接第86页)

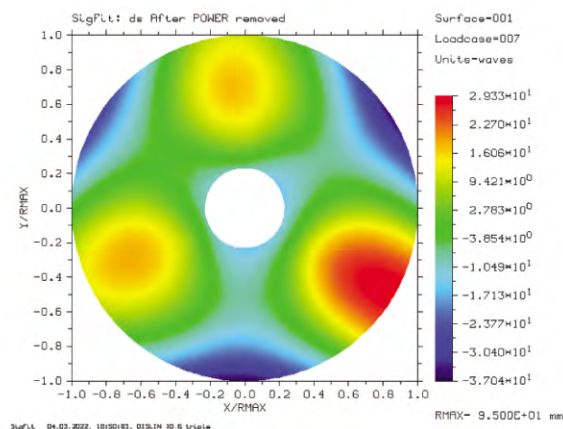


图12 35 °C时优化后主镜反射面面形拟合结果

Fig.12 Surface fitting results of the primary mirror reflecting surface after optimization at 35 °C

表3 各个温度载荷的主镜反射面面形均方根值 (RMS) (优化后)

Tab.3 The RMS of primary mirror reflector surface for each temperature load

温度 /℃	RMS / nm	刚体平移量 /nm			刚体旋转量 / $\times 10^{-2}$ (")		
		T_x	T_y	T_z	R_x	R_y	R_z
5 (35)	11.70	15.39	183.80	87.62	2.35	33.08	5.15
10 (30)	7.80	10.26	122.50	58.41	1.57	22.04	3.43
15 (25)	3.90	5.13	61.25	29.21	0.78	11.02	1.72

林系统对温度的敏感程度。每温升 (或温降) 5 °C, 主镜反射面 RMS 变化了 2.5 nm。根据分析结果优化主镜结构和主镜支撑结构, 改变主镜材料, 改变支撑结构, 降低了 0.5 kg 的系统质量。分析优化后的卡塞格林系统对温度的敏感程度, 优化后的主镜反射面每温升 (或温降) 5 °C, RMS 变化了 3.9 nm。虽然系统结构对温度的敏感程度略微提高, 但是对成像质量没有重大影响。实现了既保持系统对温度的敏感程度, 又减轻质量的目标。

参考文献:

- [1] 许映杰, 赵琦, 李金鹏, 等. 大口径标准平面镜主动校正仿真分析[J]. 激光与红外, 2019, 49(2):222-229.
- [2] 曹宇泽. 大口径望远镜的像差检测技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2019.
- [3] 邹营营. 基于卡塞格林光学系统的红外目标模拟器技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [4] 姜宏佳. 大尺寸离轴反射式相机的仿真集成分析方法[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(1):78-86.
- [5] 马宏川, 范宏波, 林宇, 等. 热像仪光机热集成分析综述[J]. 红外技术, 2019, 41(2):134-141.
- [6] 李伟艳, 吕群波, 刘扬阳, 等. 基于低体分 SiC/Al 主镜框的空间相机主支撑结构热特性分析与验证[J]. 光子学报, 2021, 50(4):215-225.
- [7] 李诚良. 基于光机热集成分析的空间低温红外光谱仪研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- [8] 姜东旭. 机载相机非球面光学系统光机热集成分析与研究[D]. 长春: 长春工业大学, 2020.
- [9] 吴斌, 王谭, 张卫国, 等. 耦合场作用下光机系统成像质量分析研究[J]. 电光与控制, 2018, 25(9):71-74.
- [10] 汪宝旭, 伍凡, 蒋世磊, 等. 卡式红外光学系统光机分析及结构优化[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7):1872-1878.
- [11] 王琦臻, 张耕, 梁秋群, 等. 高斯型激光束在圆孔衍射过程中的光束畸变[J]. 光电子·激光, 2020, 31(7):731-737.
- [12] 郑臻荣, 孙旭涛, 缪盈盈, 等. 应用泽尼克多项式自由曲面的成像物镜设计[J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(12):2202-2206.

作者简介:

王 健 (1995-), 男, 硕士研究生, 实习研究员, 研究领域为光机系统仿真分析, 已发表论文2篇。
 张美君 (1987-), 男, 博士, 助理研究员, 研究领域为光机系统设计, 已发表论文4篇。
 虞林瑶 (1987-), 男, 博士, 副研究员, 研究领域为光学设计, 已发表论文4篇。 (编辑: 刁少华)