

文章编号 1004-924X(2013)12-3169-07

大口径反射镜组件的温度适应性

刘 巨*, 董得义, 辛宏伟, 李志来, 张学军, 崔 抗

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:考虑温度适应性是大口径反射镜组件设计过程中的重要因素,本文研究了温度影响空间相机大口径反射镜组件的机理,讨论了进行温度适应性分析与试验的必要性。结合其设计流程,总结了大口径反射镜组件温度适应性分析的方法。采用有限元方法,建立了研究对象的物理模型,进行了结构-热耦合的优化设计,确定了最终设计状态。对优化设计结果进行了在轨状态及地面检测状态的温度适应性分析。结果显示:在轨工作状态下的温度适应范围为 $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差适应范围为 X 向 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 Y 向 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 Z 向 $7\text{ }^{\circ}\text{C}$;地面检测试验状态温度适应范围为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差适应范围为 X 向 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 Y 向 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 Z 向 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在实验室进行了组件均匀温变的温度适应性试验,并与相应分析结果进行对比,结果表明: $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 内PV值误差优于 4% ,RMS值误差优于 7% 。

关键词:空间相机;大口径反射镜;热弹理论;温度适应性

中图分类号:V447.3;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132112.3169

Temperature adaptation of large aperture mirror assembly

LIU Ju*, DONG De-yi, XIN Hong-wei, LI Zhi-lai, ZHANG Xue-jun, CUI Kang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: yanwuqiu@yahoo.com.cn

Abstract: As the temperature adaptation effects the design process of a large aperture mirror assembly seriously, this paper researches the influence mechanism of temperature on the large aperture mirror assembly and discusses the necessity of temperature adaptation analysis and test. With the design flow of the large aperture mirror assembly given, the temperature adaptation analysis method is summarized. The physical calculation model of the large aperture mirror assembly is constructed by Finite Element Method(FEM). The final design status is confirmed after structural-thermal optimization. The temperature adaptation of the optimal design is analyzed in the orbit environment and on the ground environment. The results indicate that the temperature adaptation in the orbit environment is at the range of $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the temperature distribution demands are $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ in X, Y, Z directions, respectively. Moreover, the temperature adaptation on the ground environment is at the range of $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the temperature distribution demands are $4\text{ }^{\circ}\text{C}$, $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ in X, Y, Z directions, respectively. The temperature adaptation test of temperature uniform change for the assemblies is performed, and compared with the test results of the corresponding analysis results. It shows that

收稿日期:2012-12-11;修订日期:2013-01-15.

基金项目:国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA70220107)

the PV value error is in 4% and the RMS value error is in 7% within a $\pm 5^\circ\text{C}$ temperature range.

Key words: space camera; large aperture mirror; thermal-elastic theory; temperature adaptation

1 引言

随着空间对地观测领域的不断发展,空间相机研制技术得到了长足的进步。近年来,长焦距、高分辨率成为空间相机的一个主要发展方向,为实现技术指标,往往采用大口径反射镜。

增大反射镜尺寸,除了增大加工难度外,反射镜及其组件整体设计的难度也大大增加了。要考虑的设计因素不仅有轻量化、支撑等力学方面的因素,还要考虑温度适应性的问题。对于大口径反射镜组件轻量化和支撑结构设计,国内很多研究单位已经做过较为全面的研究工作^[1-4],但在温度环境对大口径反射镜组件的影响方面,均未做出系统的研究。

本文结合某空间相机大口径反射镜组件,分析了温度对其影响的机理;结合其设计流程,总结了组件温度适应性分析的方法;采用有限元分析方法,进行了多轮优化设计并确定了最终设计状态;对优化设计结果进行了地面检测状态及在轨状态的温度适应性分析;在实验室进行了组件均匀温变的温度适应性试验。与相应分析结果对比,一致性较好。

2 温度对大口径反射镜组件的影响机理

2.1 某大口径反射镜组件介绍

某空间相机采用离轴三反形式光学系统,主反射镜组件形式如图 1 所示,镜体尺寸为 1 m 量级,采用背部支撑方式与反射镜背板连接,支撑件采用镶嵌锥套与柔性铰链组合的方式,是典型的大口径反射镜组件。

反射镜温度适应性分析及试验与地面检测方向密不可分。根据整机地面装调检测方案,主反射镜组件地面装调检测方向为图 1 中 +Y 垂直向上方向。

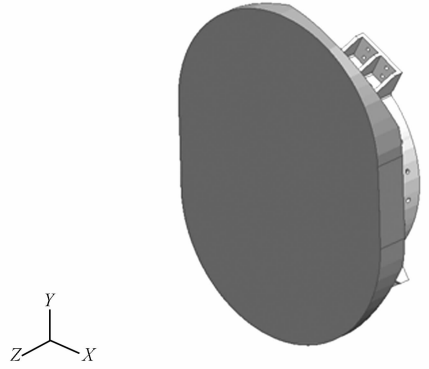


图 1 大口径反射镜组件 3D 示意图

Fig. 1 3D model of large aperture mirror assembly

2.2 热弹理论^[5-8]

物体各部分发生温度变化时,会由于热变形产生线应变。如果物体由于约束或各部分温度变化不均匀,热变形不能自由进行时,在物体中就会产生热应力。应力与应变之间的关系由固体物理方程表述:

$$\begin{cases} \sigma_x = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_x - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \sigma_y = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_y - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \sigma_z = \zeta(\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) + 2G\epsilon_z - (3\zeta + 2G)\alpha T \\ \tau_{xy} = G\gamma_{xy}; \tau_{yz} = G\gamma_{yz}; \tau_{zx} = G\gamma_{zx} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为正应力, $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$ 为正应变, $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为切应力, $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 为切应变, $\zeta = E\mu / [(1+\mu)(1-2\mu)]$, $G = E/2(1+\mu)$, α 为热膨胀系数, E 为拉伸弹性模量, G 为剪切弹性模量, μ 为泊松比。

应变和位移之间的关系由固体几何方程表述:

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}; \epsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}; \epsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \\ \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \\ \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: u 为位移。

力的平衡状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y = 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + F_z = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: F 为作用在微元上的外力。

边界条件有 3 种:

- 1) 应力边界条件: 给出边界上的应力情况;
- 2) 位移边界条件: 给出边界上的位移情况;
- 3) 混合边界条件: 给出一部分边界的应力情况和一部分边界的位移情况。

由物理方程、几何方程和力的平衡方程构成了准静态的热弹性方程组, 给出了物体内部应力、应变和位移之间关系的普遍规律。热弹性方程组和初始条件、边界条件一起, 构成了热弹性问题的完整模型。

对于复杂系统, 求出上述方程组的解析解是不现实的, 目前大多使用有限元法进行求解。

2.3 温度对大口径反射镜组件的影响分析

对于本文中大口径反射镜组件, 一方面由于反射镜组件内、外部都存在非线性连接设计作为约束, 温度变化时必然会产生热变形与热应力, 从而引起组件刚体位移和反射镜镜面面形畸变。另一方面, 由于组件尺寸较大, 温度变化引起的线应变也相对较大, 实际产生的热变形量也就越大, 更容易引起光学指标超差。

组件连接形式如图 2 所示, 反射镜内部先粘接镶嵌锥套, 再通过柔性铰链连接在支撑背板上。当组件所处温度环境发生变化时, 柔性铰链能够消除大部分由反射镜体与支撑背板的温差产生的热应力, 使温度对反射镜波前变化的影响基本表现为刚体位移。对于反射镜体, 柔性铰链并不能消除镜体自身产生的内应力, 由于镜体背部的镶嵌件粘接约束, 所以温度变化必然引起镜体产生热变形, 但其对波前变化的影响主要表现为面形畸变。

在实际工作中, 必须量化温度对反射镜组件的影响才能确定反射镜组件的工作温度和温差的范围(即组件热控指标要求), 从而保证不影响整个空间相机的成像质量。因此, 对于如本文中的

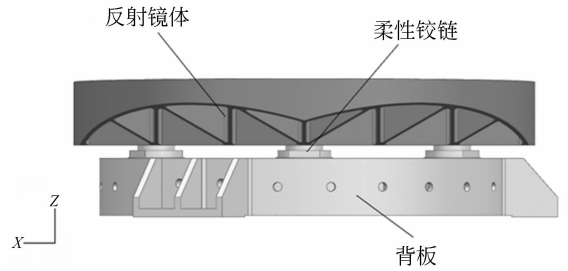


图 2 大口径反射镜组件连接形式

Fig. 2 Interior joint form of large aperture mirror assembly

大口径反射镜组件, 在设计阶段进行温度适应性分析, 得出组件温度、温差适应范围, 在工程化阶段进行温度适应性验证试验是十分必要的。

3 温度适应性分析

如前所述, 对于复杂系统, 一般都采用有限元法进行热弹性分析, 本文也不例外。根据热弹理论, 热弹性分析与结构分析须共用分析模型, 因此, 组件的温度适应性分析与结构设计及优化过程密不可分。其分析流程如图 3 所示。

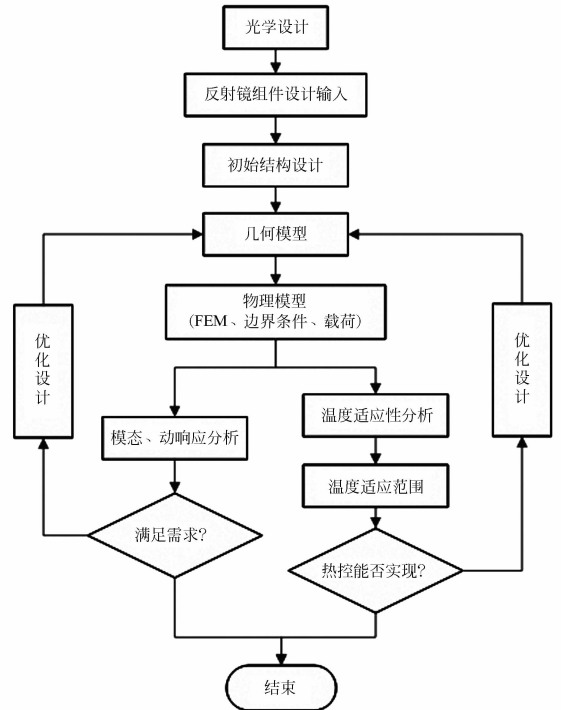


图 3 大口径反射镜组件设计流程

Fig. 3 Design flow of large aperture mirror assembly

分析工具采用有限元分析软件进行,有限元网格要能够反映出影响组件结构特性的因素(如加工圆角、柔性铰链柔性槽的半径等),使温度、重力等载荷作用下应力、应变计算更加精确。分析判据以反射镜组件的刚体位移和镜面面形畸变不超差为准,刚体位移和镜面面形畸变经过光学设计,对各反射镜组件进行合理的误差分配后给出。

温度适应性分析的内容主要有两方面:一是均匀温变分析,即均匀变化的温度水平对组件位置及面形的影响;二是均匀温差响应分析,即在指定方向的均匀变化温度场作用下组件位置及面形的响应。两方面分析内容都分两种情况进行分析,即在轨工作状态(无重力场)和地面测试状态(重力场作用)。优化设计对象主要有柔性铰链、反射镜支撑位置与轻量化形式、反射镜背板轻量化形式,优化目标是在满足结构强度、刚度需求的同时使组件具有更大的温度适应范围。

本文对研究对象进行了细致的有限元网格划分,并进行了合理的物理属性赋值、边界条件施加。经过多轮分析及优化,确定了整个组件较为理想的结构形式,最终分析模型如图 4 所示。以此状态进行了温度适应性分析,分析工况有两个,即在轨无重力工况和地面测试状态工况,分析结果见表 1~表 4。这里需要说明,地面测试状态工况的分析为温度场与重力场的耦合分析,重力场施加方向与组件实际地面检测重力方向一致,即图 1 中所示 -Y 方向。

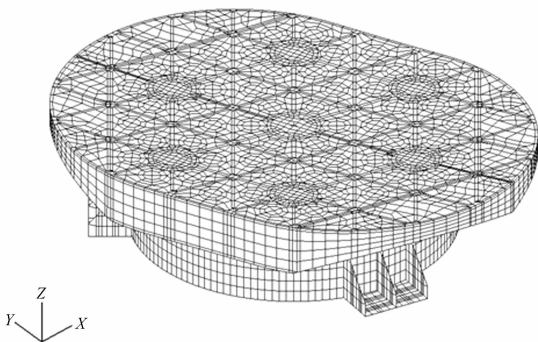


图 4 某大口径反射镜组件有限元模型

Fig. 4 FEM model of the large aperture mirror assembly

表 1 无重力场均匀温变分析结果

Tab. 1 Even temperature change analysis results with no gravity

温度环境	面形变化		角位移			线位移		
	PV	RMS	R/($''$)			T/(μm)		
	(nm)	(nm)	x	y	z	x	y	z
设计指标	63.0	15.0	3	3	20	20	80	
1℃温变	15.2	2.9	0.001	0.09	光 0.3	-0.05	-2.5	
2℃温变	30.4	5.8	0.002	0.18	轴 0.6	-0.1	-5.0	
3℃温变	45.6	8.7	0.003	0.27	方 0.9	-0.15	-7.5	
4℃温变	60.8	11.4	0.004	0.36	向 1.2	-0.2	-10	
5℃温变	79.0	14.5	0.005	0.45	1.5	-0.25	-12.5	

表 2 -Y 向 1g 重力场作用均匀温变分析结果

Tab. 2 Even temperature change analysis results with 1g gravity in -Y direction

温度环境	面形变化		角位移			线位移		
	PV	RMS	R/($''$)			T/(μm)		
	(nm)	(nm)	x	y	z	x	y	z
设计指标	63.0	15.0	3	3	20	20	80	
1℃温变+重力	46.7	8.6	-0.12	0.09	光 0.3	-5.6	-2.5	
2℃温变+重力	52.6	10.0	-0.18	0.18	轴 0.6	-5.6	-5.0	
3℃温变+重力	61.5	11.9	-0.24	0.27	方 0.9	-5.6	-7.5	
4℃温变+重力	72.2	14.0	-0.30	0.37	向 1.2	-5.6	-10	
5℃温变+重力	86.5	16.6	-0.36	0.45	1.5	-5.6	-12.5	

表 3 无重力场均匀温差响应分析结果

Tab. 3 Even different in temperature response analysis results with no gravity

温度环境	面形变化		角位移			线位移		
	PV	RMS	R/($''$)			T/(μm)		
	(nm)	(nm)	x	y	z	x	y	z
设计指标	63.0	15.0	3	3	20	20	80	
X 向	1℃温差	11.2	2.0	0.4	0.1	-0.1	0.2	0.6
	2℃温差	22.4	4.0	0.8	0.2	-0.2	0.4	1.2
	3℃温差	33.7	5.9	1.2	0.3	-0.3	0.6	1.8
	4℃温差	44.8	8.0	1.6	0.4	-0.4	0.8	2.4
	5℃温差	56.0	10.0	2.0	0.5	-0.5	1.0	3.0
Y 向	6℃温差	67.2	12.0	2.4	0.6	光-0.6	1.2	3.6
	1℃温差	14.0	2.2	0.13	0.73	轴 0.23	-0.08	0.4
	2℃温差	28.0	4.4	0.26	1.46	方 0.46	-0.16	0.8
	3℃温差	42.1	6.6	0.4	2.2	向 0.7	-0.24	1.2
	4℃温差	56.0	8.8	0.53	2.93	0.93	-0.32	1.6
Z 向	5℃温差	70.0	11.0	0.66	3.66	1.16	-0.40	2.0
	1℃温差	9.0	1.9	0.4	-0.03	0.03	2.9	1.7
	2℃温差	18.0	3.8	0.8	-0.06	0.06	5.8	3.4
	3℃温差	27.0	5.7	1.2	-0.1	0.1	8.7	5.1
	4℃温差	36.0	7.6	1.6	-0.12	0.12	11.6	6.8
	5℃温差	45.0	9.5	2.0	-0.15	0.15	14.5	8.5
	6℃温差	54.0	11.4	2.4	-0.18	0.18	17.4	10.2
7℃温差	63.0	13.3	2.8	-0.21	0.21	20.3	11.9	

表 4 -Y 向 1g 重力场均匀温差响应分析结果

Tab. 4 Even different in temperature response analysis results with 1g gravity in -Y direction

温度环境	面形变化		角位移			线位移		
	PV	RMS	R/(")			T/(μm)		
	(nm)	(nm)	x	y	z	x	y	z
设计指标	63.0	15.0	3	3	20	20	80	
1℃温差+重力	45.6	8.3	0.3	0.1	0.2	-5.4	0.6	
X 2℃温差+重力	49.6	9.0	0.7	0.2	0.1	-5.2	1.2	
向 3℃温差+重力	55.6	10.0	1.1	0.3	0.0	-5.0	1.8	
4℃温差+重力	62.9	11.4	1.5	0.4	-0.1	-4.8	2.4	
1℃温差+重力	46.4	8.4	0.0	0.73	0.5	-5.6	0.4	-光 轴 方 向
Y 2℃温差+重力	52.3	9.2	0.2	1.46	0.8	-5.7	0.8	
3℃温差+重力	61.0	10.4	0.3	2.2	1.0	-5.7	1.2	
4℃温差+重力	71.3	12.0	0.4	2.93	1.2	-6.8	1.6	
1℃温差+重力	45.1	8.3	0.3	-0.03	0.3	-2.7	1.7	
Z 2℃温差+重力	47.7	8.8	0.7	-0.06	0.4	0.2	3.4	
向 3℃温差+重力	51.8	9.6	1.1	-0.1	0.4	3.1	5.1	
4℃温差+重力	57.0	10.6	1.5	-0.12	0.4	6.0	6.8	

由计算数据得出结论:

a) 在轨工作状态下,反射镜组件温度适应范围为 $T_0 \pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_0 为装调后无应力状态温度),温差适应范围为 X 向 5 °C 温差, Y 向 4 °C 温差, Z 向 7 °C 温差;

b) 地面测试状态下,反射镜组件温度适应范围为 $T_0 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ (T_0 为装调后无应力状态温度),温差适应范围为 X 向 4 °C 温差, Y 向 3 °C 温差, Z 向 4 °C 温差。

c) 可以认为,反射镜组件地面检测状态温度要求高于在轨工作状态的温度要求,组件满足 b) 中的温度要求就能满足 a) 中的温度要求。

从上述数据中还可以看出,温度变化引起光学指标超差主要来自于面形变化产生的影响,刚体位移变化相对指标要求要小得多。这说明了柔性支撑能消减温度变化对反射镜组件的影响,而不能消减反射镜体本身产生的面形畸变。

4 温度适应性试验

在实验室进行了反射镜组件的均匀温变的温度适应性实验。组件按图 1 所示方向置于隔振平台上,检测设备为 4D 干涉仪。组件检测状态如图 5 所示。在 17.5 °C、20 °C、22 °C 分别进行了反

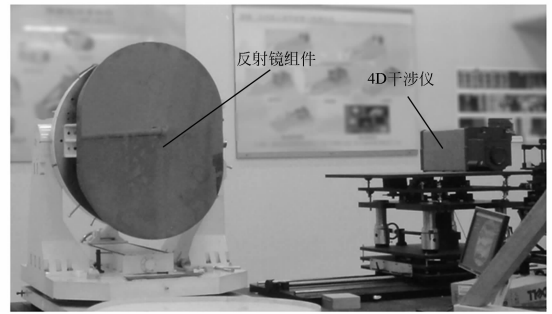


图 5 某大口径反射镜组件检测状态

Fig. 5 Optical testing of the large aperture mirror assembly

射镜面形检测,干涉图如图 6 所示, PV 值与 RMS 值见表 5。

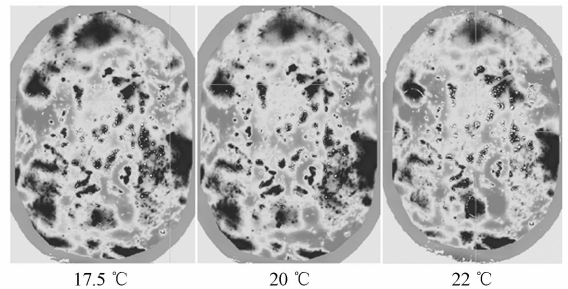


图 6 均匀温变检测干涉图

Fig. 6 Interference pattern of even temperature change optical testing

表 5 均匀温变检测结果

Tab. 5 Even temperature change optical testing results

温度水平/°C	PV/nm	RMS/nm
17.5	57.2	10.8
20	42.1	7.8
22	52.7	9.9

对地面检测状态温度适应性分析结果(表 2)

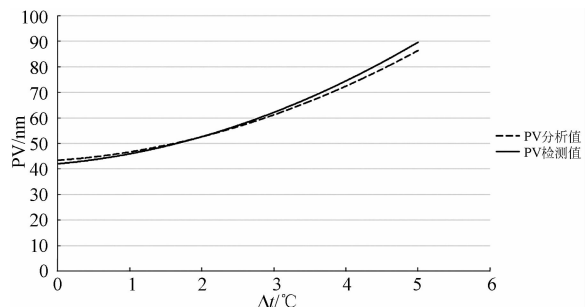


图 7 均匀温变温度适应性分析与检测结果 PV 值对比
Fig. 7 PV value contrasting between even temperature change analysis and optical testing

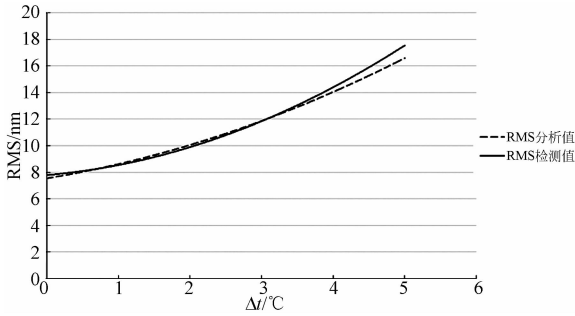


图 8 均匀温变温度适应性分析与检测结果 RMS 值对比

Fig. 8 RMS value contrasting between even temperature change analysis and optical testing

及实际检测结果(表 5)分别进行拟合,形成曲线对比如图 7、图 8 所示,结果表明,±5 °C 内 PV 值与 RMS 值符合程度良好, PV 值误差优于 4%, RMS 值误差优于 7%。

参考文献:

- [1] 宫辉, 连华东. 大口径 SiC 反射镜背部筋板布局设计研究[J]. 航天返回与遥感, 2009, 30(2): 56-61. GONG H, LIAN H D. Study on design of back ribs of large aperture SiC mirror [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009, 30(2): 56-61. (in Chinese)
- [2] 陈晓丽, 王彬, 杨秉新. 大口径超轻型反射镜定位和支撑方案研究[J]. 航天返回与遥感, 2010, 31(3): 15-20. CHEN X L, WANG B, YANG B X. Study of positioning and mounting scheme of large aperture ultralight space reflector [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2010, 31(3): 15-20. (in Chinese)
- [3] 闫勇, 王栋, 金光. 大口径 SiC 反射镜组件研制技术[J]. 光电工程, 2010, 37(6): 108-112. YAN Y, WANG D, JIN G. Design and fabrication technology of large aperture SiC mirror assembly [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(6): 108-112. (in Chinese)
- [4] 傅学农, 陈晓娟. 大口径反射镜组件设计及稳定性研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 179-183.

5 结 论

本文讨论了温度对大口径反射镜组件影响的机理,分析了在设计阶段进行温度适应性分析,在工程化阶段进行温度适应性试验的必要性。根据总结出的大口径反射镜组件温度适应性分析方法,对某大口径反射镜组件进行了多轮优化设计,并确定最终设计状态。对组件最终优化设计结果进行了在轨工作状态及地面检测试验状态的温度适应性分析,得出在轨工作状态下的温度适应范围为±4 °C,温差适应范围为 X 向 5 °C、Y 向 4 °C、Z 向 7 °C;地面检测试验状态温度适应范围为±3 °C,温差适应范围为 X 向 4 °C、Y 向 3 °C、Z 向 4 °C。在实验室进行了均匀温变的温度适应性试验,分析结果与之对比,±5 °C 内 PV 值与 RMS 值符合程度良好, PV 值误差优于 4%, RMS 值误差优于 7%。

FU X N, CHEN X J. Design of large aperture mirror support and its stability [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2):179-183. (in Chinese)

- [5] DAWSON T. *Theory and Practice of Solid Mechanics* [M]. Berlin:Springer, 1976.
- [6] 黄克智, 黄永刚. 固体本构关系[M]. 北京:清华大学出版社, 1999. HUANG K ZH, HUANG Y G. *Solid Constitutive Relationship* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese)
- [7] 王瑁成, 邵敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京:清华大学出版社, 1997. WANG M CH, SHAO M. *Essential Theory and Numerical Analysis of the Finite Element Method* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese)
- [8] 李斌成, 曾昭信, 何舜华. 光热变形理论中热弹性方程的解[J]. 电子科技大学学报, 1992, 21(5): 524-529. LI B CH, ZENG ZH X, HE SH H. A solution to thermo-elastic equation relevant to photo thermal deformation in solids [J]. *Journal of UEST of China*, 1992, 21(5):524-529. (in Chinese)

作者简介:



刘 巨(1974—),男,吉林省吉林市人,2005 年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,副研究员,主要从事空间光学仪器热设计、热分析、热试验等方面的研究。E-mail: yanwuqiu@yahoo.com.cn



董得义(1979—),男,天津人,博士研究生,助理研究员,2002 年、2005 年于北京工业大学获学士、硕士学位,主要从事空间光学遥感器结构工程分析、优化设计、力学试验等方面的研究。E-mail: s200201029@163.com



辛宏伟(1970—),男,吉林长春人,研究员,硕士生导师,主要从事空间相机光机结构优化设计研究。E-mail: xinhw-ciomp@sina.com



李志来(1965—),男,吉林镇赉人,研究员,1986 年于吉林工学院获得学士学位,主要从事空间光学遥感器结构设计及精密机械方面的研究。E-mail: li-zl2004@sohu.com



张学军(1968—),男,吉林长春人,博士,研究员,主要从事先进光学制造技术研究。E-mail: zxj@ciomp.ac.cn



崔 抗(1985—),男,辽宁盘锦人,2011 年于浙江大学获得硕士学位,研究实习员,主要从事空间光学遥感器热控设计、热试验等方面的研究。E-mail: cui-kang1985@126.com

(版权所有 未经许可 不得转载)