TMA 空间相机性能稳定性的全状态分析与测试

张星祥,任建岳

(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:光学系统波像差是空间相机的关键成像性能指标,其稳定性决定了成像质量的稳定性。针对大视场 TMA 空间相机研制过程和在轨成像时重力和温度变化状态,用有限元方法分析反射镜位置公差、面形等尺寸稳定性,结合反射镜的加工面形,计算光学系统波像差,分析成像性能稳定性的变化;采用实验室多方向重力(水平、悬挂、向上、向下等)和 $20\pm4^{\circ}$ 环境调温状态模拟测试,系统波像差平均在 $\lambda/14.7\sim\lambda/12.4$ 之间,单个视场最低为 $\lambda/11$ 。波像差的分析数据与测试结果趋势一致,各状态平均误差范围为-0.012 6 $\lambda\sim0.003$ 1 λ ,最大单点误差为 -0.023λ ;在不同状态下的传函复合测试结果都达0.21 以上,相对变化小于-4.8%。该方法作为分析、验证系统成像稳定性有效便捷的手段,应用到大视场 TMA 空间相机的研制中,指导设计、分析薄弱环节,通过全状态的分析和测试,说明大视场 TMA 空间相机具有良好稳定的成像性能。

关键词: TMA 空间相机; 成像性能; 稳定性; 分析; 测试

中图分类号: TP706; V447*.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)09-2996-09

Analysis and testing on imaging-performance stability of TMA space camera at various states

Zhang Xingxiang, Ren Jianyue

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

Abstract: Stability of wavefront aberration (WFA) has great impacts on imaging quality of space camera, which is a major performance index for those. With regard to possible gravity orientation and temperature range of space camera in manufacture and orbit, the mirror's tolerances and profile errors were calculated through FEA, and WFA was calculated by optical software using those. By simulating multi-orientation gravity states and adjusting environment temperature $20\pm4^{\circ}$ in laboratory, WFA of the space camera was measured and tested, the average result changed from $\lambda/14.7$ to $\lambda/12.4$ at all states, the worst was $\lambda/11$ for single field. The testing data was nearly in accord with the calculate value, the mean range were -0.012 $6\lambda-0.003$ 1λ , the max difference error was -0.023λ . Moreover, the MTF to was tested validate the system stability, the result achieved 0.21, there were only 4.8% errors at choosing states. The method can be used to inspect and confirm the imaging performance stability, which has been used in

收稿日期:2014-01-11; 修订日期:2014-02-16

wide-field TMA space camera, guiding design and finding week point, through analysis and testing, the data well illustrated the performance stability at all states.

Key words: TMA space camera; imaging performance; stability; analysis; test

0 引 言

空间相机光学系统波像差(wavefront aberration, WFA)是通过描述目标光线经过空间相机光学系统后 实际波面与理想波面的偏离程度, 是反映空间相机 整体成像性能的关键指标。光学系统波像差在重力、 温度变化下会发生改变,直接影响空间相机成像质 量,尤其是广泛应用的大视场三反射镜消像散(Three-Mirror Anastigmatism, TMA) 空间相机[1-2],波像差随 着视场增大会随之变大,稳定性会下降。空间相机在 轨运行的寿命、成像要求和任务性质决定了其必须具 有在严酷空间环境下稳定的、可靠的系统性能。空间 相机需要经过从静态的光学装校集成、力学、环境例 行试验和长途运输,到动态的高过载与冲击入轨发 射,以及入轨运行的微重力和真空环境,空间相机所 处状态会有很大变化,加上轨道热环境和电磁辐射, 会引起反射镜面形微小变化和镜面之间的微小相对 位移,造成成像质量下降。把空间相机在重力和热环 境下反射镜的相对位置变化和反射镜自身面形变化 称作反射镜的尺寸稳定性[3],尺寸稳定性用公差描述; 把反射镜的相对位置变化和反射镜自身面形变化所 引起的系统波像差变化称作空间相机的系统成像性 能稳定性。系统成像性能稳定性通常用系统波像差 WFA 变化来描述,或用系统乃奎斯特频率处传递函 数(Modulation Transfer Function, MTF)变化来描述。

空间相机有限元分析主要针对反射镜面形稳定

性,较少考虑反射镜之间的位置误差,在良好支撑情况下位置变化对系统性能影响要大于面形变化,只考虑面形的分析结果不能有效地指导相机后期的结构设计、光学装调和热控布局;目前空间相机系统性能测试往往只在一个特定状态下装调测试[4-7],如 Hubble、Quick Bird、3S、EO-1 等也是单状态测试,不能全面反映和预估空间相机在多种状态下的成像性能稳定性,虽然保证了光学设计的公差要求,却没有反映实际的成像稳定裕度和性能。具有结构不对称、长条反射镜、视场大等特性的大视场 TMA 空间相机,对成像性能稳定性的全状态分析和测试就很重要。

1 成像性能稳定性的全状态分析

1.1 TMA 系统像差特性

反射式光学系统有五种像差:球差、彗差、像差、场曲和畸变,没有色差。系统波像差可用若干个单项式表示,也可表示为具有球差A、彗差B、像散C、场曲D和畸变E系数的多项式和 $^{(8)}$,x、y为出瞳坐标。 $W(x,y)=A(x^2+y^2)^2+By(x^2+y^2)+C(x^2+3y^2)+D(x^2+y^2)+Ey$

反射系统像差系数的具体表达形式,在参考文献[9]中有推导,在此不作详述。空间应用的大视场TMA 光学系统,成像物距 s_1 可视为无限远,则物距倒数为 v_1 =1/ s_1 =0; 主镜像放大系数 τ_1 =1- v_1 × t_1 =1,孔径光阑在次镜上,通过推导人瞳距为 t_1 =- d_1 / Ω_1 。将参考文献[9]中像差公式经过推导和简化,应用于大视场 TMA 光学系统的像差系数表示为:

$$\begin{split} & \left[A = c_{1}^{^{3}} \Delta \delta_{1} - \Omega_{1}^{^{4}} c_{2}^{^{3}} \Delta \delta_{2} + \Omega_{1}^{^{4}} \Omega_{2}^{^{4}} c_{2}^{^{3}} \Delta \delta_{3} \right. \\ & B = \frac{-d_{1}}{\Omega_{1}} A - \frac{1}{4} \Omega_{1}^{^{2}} \Omega_{2}^{^{2}} v_{3}^{^{'2}} - \Omega_{1}^{^{3}} d_{1} c_{2}^{^{3}} \Delta \delta_{2} + \Omega_{1}^{^{2}} \Omega_{2}^{^{3}} (\Omega_{1} \Omega_{2} d_{1} - d_{2}) c_{3}^{^{3}} \Delta \delta_{3} \\ & C = \frac{-d_{1}}{\Omega_{1}} B - \frac{1}{2} \Omega_{2} v_{3}^{^{'2}} (\Omega_{1} \Omega_{2} d_{1} - 2 d_{2}) + v_{3}^{^{'}} - 2 \Omega_{2}^{^{2}} d_{2} (\Omega_{1} \Omega_{2} d_{1} - d_{2}) c_{3}^{^{3}} \Delta \delta_{3} \\ & D = \frac{C}{2} - c_{1} + c_{2} - c_{3} \end{split}$$

式中: c_1 、 c_2 、 c_3 为 TMA 的主、次、三镜曲率; $\Delta \delta_1$ 、 $\Delta \delta_2$ 、 $\Delta \delta_3$ 为主、次、三镜非球面偏差,其变化量相当于反射镜面形变化; d_1 、 d_2 为反射镜的两个镜间隔; Ω_1 = h_2/h_1 ,

 $\Omega_2 = h_3/h_2$ 为成像光线在反射镜上的投影高比; $v_3 = 1/s_3$ 为后工作距的倒数。由于TMA 系统畸变系数 E 过于复杂,畸变只影响像高,不影响系统波像差测试,在

此不做考虑。

大视场 TMA 空间相机光学系统如图 1 所示,共有四个反射镜,其中主镜、次镜、三镜构成成像系统 $[^{2-3]}$,平面折叠镜只用于转折光路,几乎不影响成像性能,在文中的分析中不予考虑。从中心视场向边缘视场变化时,成像光线在主次三镜上的投影高也相应变化,相当于 Ω_1 减小和 Ω_2 增大,则球差系数 A、彗差系数 B、像散系数 C 和场曲系数 D 都将变大。即使校正完好的 TMA 系统,波像差也随着视场变化而逐步变大,表 1 为大视场 TMA 光学系统设计出瞳波像差,边缘视场明显大于中心视场。

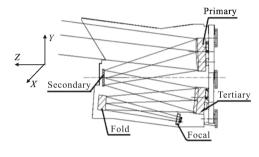


图 1 大视场 TMA 相机

Fig.1 Optical system of wide field TMA space camera

表 1 大视场 TMA 空间相机设计出瞳波像差(λ) Tab.1 Pupil WFA of TMA optical system(λ)

Field	-1	-0.7	-0.5	0	+0.5	+0.7	+1
RMS	0.042	0.033	0.028	0.022	0.028	0.033	0.042

TMA 系统的反射镜面形变化时,即非球面偏差 $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$ 、 $\Delta\delta_2$ 的都会变大,像差系数也变大,使得波像差 W(x,y)变大;当反射镜的倾角、位移的变化,也都会引起成像光线镜间隔 d_1 、 d_2 、投影高 Ω_1 、 Ω_2 的变化,也就引起波像差的变化,特别是反射镜倾角,易逐级放大,增大像差,导致成像光束与中心光线存在较大偏离,也使得波像差 W(x,y)变大,造成成像质量下降,有的甚至不能正确成像。

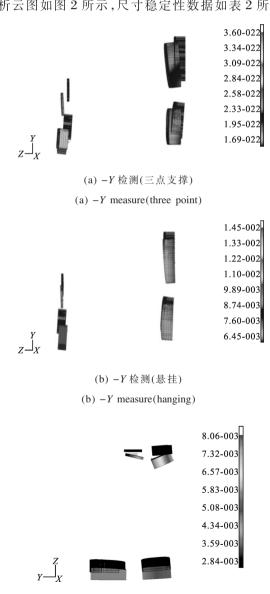
1.2 尺寸稳定性的有限元分析

如图 1 所示的大视场 TMA 空间相机的主镜和三镜为长条形反射镜,采用背部三点支撑^[10],圆形次镜采用环形支撑方案^[11],框架为整体式结构。

在相机研制和应用中存在-Z、+Z和-Y三向重力的多种支撑状态:(1)实验室放置、检测、装调的重力-Y方向状态,相机三点支撑;(2)外场成像和热光

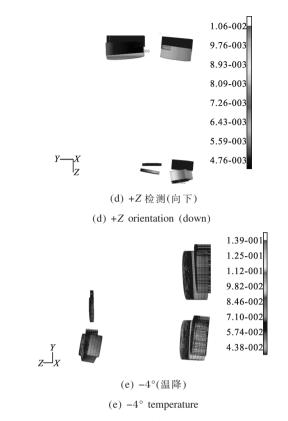
学试验的-Y悬挂状态,相机由底部的法兰悬挂连接;(3)运输、力学试验的-Z方向状态和-Z方向的整星安装、测试、发射状态,相机开口向上,底部法兰联接;(4)在轨运行的重力释放的+Z方向状态,相机开口向下。以及相机可能的温度状态:(5)反射镜加工时 22°±1°状态;(6) 外场 18°~24°成像状态和存储状态;(7) 试验室 20°±1°装调测试状态;(8) 热光学试验和在轨 20°±4°指标要求。

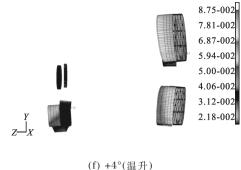
由于支撑结构材料的限制,必然存在自身刚度和热胀冷缩的材料特性,产生变形和局部应力。用有限元分析计算反射镜位置、面形变化和尺寸稳定性,分析云图如图 2 所示,尺寸稳定性数据如表 2 所示。



(c) -Z 检测(向上)

(c) -Z orientation (up)





(1) +4 (鱼开)

(f) +4° temperature

图 2 反射镜尺寸稳定性分析图

Fig.2 Mirror dimension stability of FEA

表 2 中的尺寸稳定性基本都能满足设计指标 (index)的要求,温度变化对尺寸稳定性的影响要大于重力方向变化的影响;在重力状态中,-Y(o)三点支的状态公差最大,其他三种公差相当;正向温变和负向温变引起的尺寸稳定性变化呈非对称现象,负向变化大于正向。主镜面形最易受到影响,其他反射镜面形都能达到 \(\lambda/50\) 以上。但反射镜尺寸稳定性变

表 2 尺寸稳定性分析数据(位移单位: \(\mu\mathbf{m}\),转角单位:("))

Tab.2 Analysis data of mirror dimension stability(displacement unit: µm, angle unit: ("))

		Index	-Y(three point)	− <i>Y</i> (hanging)	+Z(down)	-Z(up)	-4°	-2°	+2°	+4°
	PM/Z	200	19.92	0.27	4.27	-4.42	39.86	19.93	-11.72	-23.43
	PM/X	50	-10.01	-0.13	0.04	0.34	5.41	2.705	-2.37	-4.74
	PM/Y	75	-14.37	-6.50	0.62	-0.61	-48.75	-24.38	11.32	22.64
	PM/α	10	-6.49	-1.49	-0.11	0.08	5.03	2.515	-5.98	-11.95
	PM/β	10	2.58	0.0	0.01	-0.01	-1.58	-0.79	0.68	1.36
	SM/Z	100	15.83	0.71	3.44	-3.48	-9.08	-4.54	11.13	22.26
	SM/X	75	0.57	-0.02	0.73	0.42	0.74	0.37	-0.36	-0.72
Tolerances	SM/Y	75	-30.01	-10.48	-0.04	-0.72	-35.01	-17.51	1.33	2.66
	SM/α	15	-4.40	-1.39	3.49	-3.51	-6.08	-3.04	1.145	2.29
	SM/β	15	2.54	-0.01	0.02	-0.02	-1.63	-0.815	0.655	1.31
	TM/Z	150	11.01	-0.05	4.62	-4.78	39.74	19.87	-15.13	-30.25
	TM/X	50	-9.81	-0.12	0.03	0.35	5.37	2.685	-2.355	-4.71
	TM/Y	50	-14.54	-6.76	0.55	-0.49	-34.18	-17.09	4.15	8.3
	TM/α	10	-6.32	-1.64	0.41	-0.43	-7	-3.5	0.345	0.69
	TM/β	10	2.59	0	0	0	-1.54	-0.77	0.655	1.31
	PM	λ/50	$\lambda/51.7$	$\lambda/51.6$	$\lambda/54.1$	λ/50	$\lambda/42.1$	$\lambda/45.3$	$\lambda/49.6$	$\lambda/51.5$
RMS	SM	λ/50	$\lambda/422$	λ/398	$\lambda/200$	$\lambda/201$	$\lambda/59.6$	$\lambda/107$	$\lambda/95.3$	$\lambda/58.5$
	TM	λ/50	$\lambda/62.3$	λ/77.7	$\lambda/77.5$	$\lambda/77.4$	$\lambda/62.8$	$\lambda/59.8$	$\lambda/64$	λ/56.9

化数据不能直接反应大视场 TMA 空间相机所对应的成像性能变化。

1.3 反射镜尺寸稳定性对系统波像差的影响

将尺寸稳定性分析数据代人到光学的模型中,

并考虑反射镜 λ/50 的加工面形,用光学设计软件计算出空间相机的成像性能稳定性,即表 3 所示。结合表 2,在 λ/50 面形情况下,位置误差引起的成像性能变化大于反射镜面形误差引起的变化。

	Tab.3 Analysi	is data of sy	stem perfo	rmance	stability	WFA _D	(λ)		
	-Y(three point)	− <i>Y</i> (hanging)	+Z(down)	-Z(up)	-4°	-2°	+2°	+4°	Max diff
-1 field	0.066	0.066	0.067	0.067	0.077	0.068	0.064	0.075	-0.013
-0.7 field	0.077	0.076	0.076	0.076	0.058	0.064	0.084	0.088	-0.030
-0.5 field	0.063	0.062	0.062	0.062	0.052	0.051	0.068	0.080	-0.029
0 field	0.057	0.057	0.057	0.057	0.056	0.054	0.057	0.062	-0.008
+0.5 field	0.068	0.067	0.067	0.067	0.050	0.056	0.074	0.087	-0.037
+0.7 field	0.078	0.075	0.076	0.076	0.058	0.064	0.085	0.089	-0.031

0.069

0.0677

0.076

0.0610

表 3 成像性能稳定性分析数据 WFA_D(λ)

0.069

0.0677

由表3中的各种状态比较可知,系统的分析波 像差平均变化在 0.061 0λ~0.080 8(λ/16.4~λ/12.4)之 间,单个视场上最差为 0.089λ(λ/11.2)。其中三个重 力状态下平均波像差的差别只有 0.01λ,温度状态下 有 0.02λ 的差别,温度影响大于重力影响。重力工况 中,±0.7 视场的波像差为最大,中心视场最小。在温 变工况中,低温时±1视场的波像差最大,±0.5视场 趋于最小,高温时,±0.7视场的波像差最大,0视场 最小,且低温时系统性能要优于高温。

0.069

0.0683

0.068

0.0673

各视场比较,在不同状态下,在±0.7、±0.5视场 变化最大,0视场变化最小。

2 成像性能稳定性的全状态测试

States average

+1 field

RMS

成像性能稳定性,即系统波像差测试采用自准 干涉测量方法[8],如图 3 所示。光束经过干涉仪标准 镜头转换为标准球面波,依次经过三镜、次镜、主镜, 垂直入射到标准平面镜上,光束原路返回,在干涉仪 内形成干涉条纹,数据采集处理,计算出波像差。

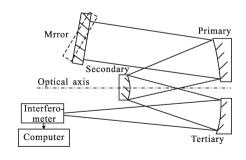


图 3 TMA 系统自准检测原理图 Fig.3 Schematic diagram of WFA measure for TMA

其中主镜为双曲面形式的高次凹非球面,次镜 为凸椭球面,三镜为扁椭球面形式的高次凹非球面。 主镜的离轴量达 189.8 mm, 三镜离轴量 187.5 mm。

主镜和三镜采用零位法线补偿检测方法,凸次镜采用 计算全息(Computer Generated Hologram, CGH)检测。

0.073

0.0721

0.085

0.080.8

-0.020

0.065

0.0602

选用的 Φ 320 mm 标准平面镜, 面形优于 λ /70, 大于相机 200 mm 入瞳通光口径; 采用 ZYGO 公司 的 Verifer PX/D 干涉仪和 F#=3.3 的标准镜头,口径 为 Φ 100 mm, 精度为 0.002 wave, 能满足 TMA 空间 相机反射镜和系统波像差的检测需要。

2.1 多方向重力的成像稳定性测试

多向重力成像性能稳定性的测试原理如图 4 所 示,用于模拟 1.2 节中四种支撑状态((1)、(2)、(3)、(4))。

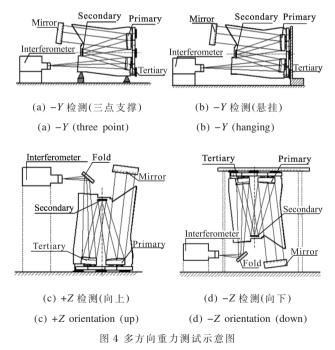


Fig.4 Schematic diagram of multi-orientation measurement

图 4 中,水平三点支撑(a)和水平悬挂(b)状态检 测,检测光路中只有主镜、次镜和三镜,没有折叠镜。 垂直向上(c)放置状态和垂直向下(d)放置状态,为了 方便检测和安装干涉仪,在后工作距上增加一个光 路转折的平面镜,面形 λ/80,口径 100 mm,相当于 TMA 系统的折叠镜。大视场 TMA 空间相机多向重 力波像差测试状态如图 5 所示,相机各个视场波像 差测试时,需要通过移动干涉仪和转动标准平面镜 来实现。





(a) -Y 检测(三点支撑)

(b) -Y 检测(悬挂)

(a) -Y measure (three point)

(b) -Y measure (hanging)





(c) +Z 检测(向上)

(d) -Z 检测(向下)

(c) +Z measure (up)

(d) -Z measure (down)

图 5 微重力模拟检测实图

Fig.5 Scene of multi-orientation gravity test

2.2 温度变化的成像稳定性测试

温度变化的成像性能稳定性测试,是在实验室 20±4°调温的方法来模拟,使用空调、加热器和相机 自身热控使得相机在指定温度上平衡(±0.5°),并保 持1个小时以上再测量。调温实施时,对相机进行单 方向加热,测试的温度顺序为:16°→17°→18°→19° →20°→21°→22°→23°→24°,便于测试和安全,采用 水平-Y(o)状态放置。

在数据分析中,考虑变化连续性和降低分析处 理数据量,选择16°、18°、22°、24°(即-4°、-2°、+2°、+4°) 四个温度水平,结合-Y (three point) 状态装调时的 20°进行分析。

2.3 测试结果

按照 2.1 和 2.2 节所述多方向重力测试和调温 测试,结果如表 4 所示。其中-Y(three point)是相机系 统检测、装调、集成的状态,为基本状态。其他状态都 与-Y(three point)进行比较说明,图 6 所示为系统-Y(three point)状态装调完后的系统波像差。

各种状态比较,系统的测试波像差平均变化在 0.068 0λ~0.078 7λ(λ/14.7~λ/12.7)之间,单个视场上最 差为 $0.091\lambda(\lambda/11)$, 波像差变化最大状态是水平+4° 温升。三个重力状态下平均波像差的差别有0.0107A,

表 4 成像性能稳定性测试数据 $WFA_T(\lambda)$

Tab.4 Measure data of system performance stability WFA_T (λ)

		-Y(three point)	-Y(hanging)	+Z(down)	-Z(up)	-4°	-2°	+2°	+4°	Max diff
	-1 field	0.071	0.089	0.080	0.079	0.086	0.076	0.079	0.088	-0.018
	-0.7 field	0.070	0.085	0.079	0.077	0.077	0.075	0.078	0.081	-0.015
	-0.5 field	0.068	0.079	0.058	0.073	0.074	0.067	0.069	0.070	-0.021
RMS	0 field	0.059	0.069	0.057	0.062	0.064	0.063	0.064	0.067	-0.012
	+0.5 field	0.068	0.064	0.079	0.076	0.068	0.072	0.071	0.069	-0.015
	+0.7 field	0.068	0.083	0.071	0.072	0.067	0.064	0.065	0.078	-0.019
	+1 field	0.072	0.082	0.080	0.077	0.079	0.071	0.078	0.091	-0.020
States	average	0.0680	0.078 7	0.0720	0.073 7	0.0735	0.0697	$0.072\ 0$	0.077 7	_















0.500 Wave Pv

0.497 Wave pv

0.657 Wave Pv

0.583 Wave pv

0.658 Wave Pv 0.487 Wave pv $\hline \text{rms} \quad 0.071 \text{ Wave} \quad \hline \text{rms} \quad 0.070 \text{ Wave} \quad \hline \text{rms} \quad 0.068 \text{ Wave} \quad \hline \text{rms} \quad 0.072 \text{ Wave} \quad$

0.509 Wave

(a) -1 视场

(b) -0.7 视场

(c) -0.5 视场

(d) 0 视场

(f) +0.7 视场 (f) +0.7 field (g) +1 视场

(a) -1 field

(b) -0.7 field

(c) -0.5 field

(d) 0 field

(e) +0.5 视场 (e) +0.5 field

(g) + 1 field

图 6 全视场系统波像差测试图 Fig.6 All fields testing WFA_T of TMA system 四个温度状态下有 0.008\(\lambda\) 的差别,温度影响与重力影响相当。重力工况中,±1 视场的波像差为最大,中心视场最小,波像差变化最大状态是水平-Y(hanging)。在温变工况中,也是±1 视场的波像差最大,中心视场最小,但低温时系统性能稍优于高温,相机应在 20°负偏差进行热控;负方向调温,-1 视场变化大,正方向调温,+1 视场变化大,中心视场随温度有向正视场方向偏的趋势,说明结构热变形的微小不对称。

各视场比较,在不同状态下,最大差值在 -0.012λ ~ -0.020λ 。

3 数据分析和稳定性验证

3.1 分析数据和测试数据比较

将表3和表4数据进行差处理,结果如表5所示。符号"+"表示测试数据优于分析数据,符号"-"反之。按各种状态比较,分析和测试的平均误差在-0.0126\~+0.0031\lambda之间;按视场比较,分析和测试的平均误差在-0.012\lambda~+0.004\lambda之间;就单个视场,误差在-0.023\lambda~+0.020\lambda之间。

其中温度-4°状态测试与分析数据相差最大,悬

表 5 系统性能稳定性的分析与测试比较 (λ)

Tab.5 System performance stability comparison between FEA and measurement (λ)

		-Y(three point)	-Y(hanging)	+Z(down)	-Z(up)	-4°	-2°	+2°	+4°	Max diff
	-1 field	-0.005	-0.023	-0.013	-0.012	-0.009	-0.008	-0.015	-0.013	-0.012
	−0.7 field	+0.007	-0.009	-0.003	-0.001	-0.019	-0.011	+0.006	+0.007	-0.003
	-0.5 field	-0.005	-0.017	+0.004	-0.011	-0.022	-0.016	-0.001	+0.010	-0.007
RMS	0 field	-0.002	-0.012	0	-0.005	-0.008	-0.009	-0.007	-0.005	-0.006
	+0.5 field	0	+0.003	-0.012	-0.009	-0.018	-0.016	+0.003	+0.018	-0.004
	+0.7 field	+0.010	-0.008	+0.005	+0.004	-0.009	0	+0.020	+0.011	+0.004
	+1 field	-0.003	-0.014	-0.011	-0.008	-0.003	-0.006	-0.005	-0.006	-0.007
States	average	+0.0003	-0.0114	-0.0043	-0.006	-0.0126	-0.0094	+0.0001	+0.0031	-

挂状态次之。主要因为相机是在-Y(three point)状态下装调到最佳,其他状态就相当于将表 2 中-Y(three point) 状态下的尺寸稳定分析数据直接加到其他状态上,显然-4°状态变化最大,其次为悬挂状态,主要为转角引起。

在多方向重力测试时,±1 视场实测数据低于分析数据,其他视场实测数据与分析数据几乎相当,主要是因为反射镜加工面形边缘效应和半径误差引起,局部单个视场起伏是加工面形引起。负方向调温时,±0.7 和±0.5 实测数据明显低于分析数据;正方向调温时,-1 视场实测数据明显低于分析数据,而±0.7 和±0.5 实测数据明显高于分析数据,两个调温方向变化不一致,说明 TMA 相机在结构、反射镜加工、系统装调上存在微小不对称,相机各视场的成像性能具有随温度不同等变化的特性。

3.2 成像稳定性的传函测试验证

成像性能稳定性也用 MTF 来描述,对系统波像 差变化引起的 MTF(ν_n)下降因子 ATF(ν_n)如下式^[13]。

ATF(
$$v_n$$
)= $\left\{1 - \left[\left(\frac{W_{\text{ms}}}{0.18}\right)^2\right] [1 - 4(v_n - 0.5)^2]\right\}$

式中: v_n 是规划空间频率, v_n =0.325; W_{ms} 为表 4 中波像差。相对于-Y(three point)状态,各视场对应的最大差值用上式来计算,系统设计传函为 MTF_D =0.5,装调后传函 MTF_T 如表 6 所示,其中 ΔMTF = MTF_T × $(ATF_{max}$ - $ATF_{-y})。$

表 6 波像差最大差值引起的传函下降分析(ΔMTF)
Tab.6 Relation between WFA and descending MTF

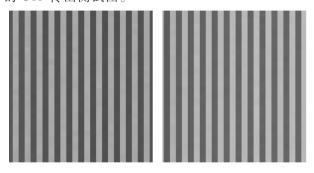
Field	-Y(three point)	WFA _{max}	ATF_{-Y}	ATF_{max}	MTF_T	Δ MTF
-1	0.071	0.089	0.863	0.785	0.431	-0.034
-0.7	0.070	0.085	0.867	0.804	0.452	-0.028
-0.5	0.068	0.079	0.875	0.831	0.467	-0.020
0	0.059	0.069	0.906	0.871	0.472	-0.016
+0.5	0.068	0.079	0.875	0.831	0.463	-0.020
+0.7	0.068	0.083	0.875	0.813	0.448	-0.027
+1	0.072	0.091	0.860	0.776	0.423	-0.035

平均波像差从 $\lambda/14.7$ 变化到 $\lambda/11$, 在规划频率 ν_n =0.325 处 MTF 的最极端变化为-0.016~-0.035 之间, 边缘视场大于中心视场, 乃奎斯特频率处的MTF_T

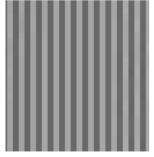
越高,影响越大。

大视场 TMA 空间相机系统集成完成后,兼顾了电子学和定标的影响,在多次整机传函测试中^[14],选择四种不同状态来验证系统成像性能稳定性:(1) 相机振动前传函测试,水平放置,重力-Y方向状态;(2) 相机振动后传函测试,水平放置,重力-Y方向状态;(3) 装星传函测试,重力-Z方向,相机开口向上,底部法兰与卫星连接;(4) 热光学传函测试,重力-Y方向,悬挂状态,在 16°、20°和 24°三个温度水平下测试。并选用三个典型视场(±1、0)来描述传函稳定性变化数据,测试结果如表 7 所示。

表7中的(1)~(4)为四种传函实测状态,可见视场平均CTF最大变化-0.014,对应MTF最大变化为-0.011。MTF平均变化小于-0.010,相对变化只有-4.8%,远小于表6所计算的理论最大数据(-0.016~-0.035),变化最大的是悬挂温升+4°状态,与前面的分析与测试一致。各状态下传函都大于0.2,具有良好的稳定性能。图7为大视场TMA相机中心视场在振前(1)状态、整星(3)状态和热光学(4)20°下的CTF传函测试图。



- (a) -Y(三点)
- (b) +Z(向上)
- (a) -Y (three point)
- (b) +Z (up)



(c) -Y(悬挂)

(c) -Y (hanging)

图 7 传函测试效果图

Fig.7 Picture of MTF measurement

表 7 系统性能稳定性的传函测试验证

Tab.7 MTF data of system performance stability

Star	tes	-1 field	0 field	+1 field	Mean CTF	Mean MTF
(1) -Y(thi	ree point)	0.276	0.286	0.278	0.279	0.219
(2) $-Y$ (three point)		0.270	0.289	0.273	0.278	0.218
(3) -Z(up)		0.265	0.289	0.272	0.275	0.216
(4) -Y	16°	0.269	0.281	0.268	0.272	0.213
(hang-	20°	0.268	0.279	0.264	0.270	0.212
ing)	24°	0.264	0.278	0.265	0.268	0.210
Max change		-0.012	-0.010	-0.014	-0.012	-0.010

4 结 论

对大视场TMA 空间相机最为关键的成像性能稳定性进行充分分析、测试和验证。结果表明:(1) 相机在各状态下性能稳定的计算分析和测试结果趋于一致,仿真计算可有利支撑系统设计;(2) 温度对TMA 相机成像性能的影响要大于重力,需要精准热控,各视场波像差具有随温度不同等变化的特性,负向温控要优于正向;(3) 不同支撑、受力状态对成像性能有影响,悬挂影响最大,相机设计应考虑应用状态和测试状态一致;(4) 系统中反射镜的倾角误差对成像性能的影响大于位移误差影响,设计和制造时应重点考虑;(5) 对于镜头传函达到 0.42 的系统,即使系统波像差达到 \(\lambda/11\),可实现整个相机静态传函0.2 的要求;(6) 波像差达到 \(\lambda/14\) 的系统,具有较宽泛的成像性能稳定裕度;(7) 全状态性能稳定的系统,是优良成像的保障。

大视场 TMA 空间相机成像性能稳定性的全状态分析和测试方法,很好的解决了空间相机在轨成像质量预估和系统状态稳定性的测试问题,是一种检验和验证空间相机光机结构、反射镜支撑、光学加工装调的精度、可靠性、稳定性的有效手段。该方法简单易行,使用灵活,操作成本较低。已应用到大视场 TMA 空间相机实际研制中,指导了生产,验证了设计,相机已在轨运行,成像稳定优良。

参考文献:

[1] Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007,

- 36(2): 278-280. (in Chinese) 张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统 设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.
- [2] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese) 宋岩峰, 邵晓鵬, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 706-709.
- [3] Ding Yanwei, Liu Jian, Lu E. Effect of space environment on the dimension stability [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, 10(1): 106-107. (in Chinese) 丁延卫, 刘剑, 卢锷. 空间环境对光学成像遥感器尺寸稳定性的影响[J]. 光学 精密工程, 2002, 10(1): 106-107.
- [4] Hearn D R. Earth obsreving-1 advanced land imager:detector line-of-sight calibration [R]. Lincoln Laboratory, 2002: 37– 39.
- [5] Bret-Dibat T, Albouys V, Berthon J, et al. Tests of a high resolution three mirrors anastigmat telescope [C]//SPIE, 1999, 3780: 130-131.
- [6] John W Figoski. The QuickBird telescope: the reality of large, high-quality, commercial space optics [C]//SPIE, 1999, 3779: 22-27.
- [7] Liu Lei, Li Jinglin, Lv Qingtao. Research on adjusting device of large aperture reflective optics system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, 13(21): 134–137. (in Chinese) 刘磊,李景林, 吕清涛. 大口径反射光学系统装调装置设计研究[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(21): 134–137.
- [8] Yang Xiaofei, Han Changyuan. Study on decision of alignment priority using mirror tolerance in a three off-axis

- opticalsystem[J]. *Optical Technique*, 2004, 31(2): 173–175. (in Chinese)
- 杨晓飞,韩昌元. 利用离轴三反光学系统确定各镜的装调 公差[J]. 光学技术, 2005, 31(2): 173-175.
- [9] Dietrich Korsch, Huntsville, Alabama. Reflective Optics [M].USA: Academic Press, 1991: 98–100, 212–216.
- [10] Yan Yong, Jin Guang, Yang Hongbo. Lightweight structural design of space mirror [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(1): 97–101. (in Chinese) [月勇, 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, 37(1): 97–101.
- [11] Sha Wei, Zhang Xingxiang, Chen Changzheng, et al. Application of zero clearance support method based on circle mirrors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(10): 2200–2202. (in Chinese) 沙巍, 张星祥, 陈长征, 等. 圆形反射镜无隙支撑方法的应用[J]. 光学 精密工程, 2010, 18(10): 2200–2202.
- [12] Leigh D, Freimand D. Computer aided optical system with CODE V[C]//SPIE, 1988, 1038: 288-294.
- [13] Han Changyuan. Image Quality Evaluating and Testing of Optical System[M]. Changchun: CIOMP, 2009. (in Chinese) 韩昌元. 光学系统成像质量评价及测试[M]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2009.
- [14] Zhang Xiaohui, Han Changyuan, Pan Yulong, et al. Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCDcamera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 31(4): 697–701. (in Chinese)
 - 张晓辉,韩昌元,潘玉龙,等.传输型 CCD 相机综合像值评价方法的研究[J]. 红外与激光工程,2008,31(4):697-701.