

文章编号 1004-924X(2015)12-3414-08

离轴三反系统的无应力装调

梅 贵*, 翟 岩, 曲贺盟, 浦前帅

(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:为了解决离轴三反光学系统装调过程中由于连接、紧固、温度变化等产生的应力导致反射镜面形和系统像质恶化的问题,提出了无应力结构设计和装调方法。采用内外框结合的方法设计反射镜组件,同时设置柔性变形环节,增加应力源与镜面间传递距离来削弱应力对反射镜面形的影响。系统框架采用非固定的定位方式,使用 3 个高精度钢球和相应的锥形孔、V 型槽和平面底座约束框架的六自由度,通过两个基准立方镜和莱卡经纬仪监视框架的微位移,数显千分表监视反射镜六维调整架的移动和复位。经初装调和计算机辅助精装调后,系统全视场平均波像差均方根(RMS)值达到 0.068λ ;修垫、连接后为 0.070λ ,在奈奎斯特频率处的全视场平均调制传递函数(MTF)为 0.720,均满足设计指标,得到的结果证明了装调方法的可行性。

关键词:离轴三反系统;无应力装调;计算机辅助装调;波像差

中图分类号:V447.1;V443.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152312.3414

Stress-free alignment of off-axis three-mirror system

MEI Gui*, ZHAI Yan, QU He-meng, PU Qian-shuai

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

* Corresponding author, E-mail: meigui840428@163.com

Abstract: To overcome the degradations of optical figure accuracy and image quality caused by external or internal stresses from connecting, fastening or temperature changing in the alignment process of an off-axis three-mirror system, stress-free mechanical design and system alignment methods were proposed. The impacts of the stresses on the mirrors were reduced by employing combined inner and outer mounts, setting up flexible links and increasing the delivery distance from stress source to mirror surface. The system frame was positioned without being fastened. Three high precision steel balls and corresponding a conical-hole pedestal, a V-type mount and a plate pedestal were utilized to constrain all six degrees of freedom (DOF) of the system support frame. Two Leica theodolites and two datum cubic prisms were used for monitoring the micro displacement of the support frame. Several digital micrometers were employed to monitor the movement and recovery of six-DOF adjustment mechanisms. Through preliminary and computer-aided alignments, the whole-field-of-view average Root Mean Square(RMS) wavefront error reaches to 0.068λ , and then becomes 0.070λ after spacers are ground and connected to the frame. The average Modulation Transfer Function(MTF)(at Nyquist frequency)

收稿日期:2014-11-12;修订日期:2015-01-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61405191);吉林省科技发展计划青年科研基金资助项目(No. 20150520102JH)

corresponding to the whole field of view is 0.720. These results meet the performance specifications and verify the feasibility of the proposed methods.

Key words: off-axis three-mirror system; stress-free alignment; computer-aided alignment; wavefront error

1 引 言

随着光学技术的进步,人们对光学系统的性能指标要求越来越高,传统的同轴折射和折反式系统已经难以满足多方面的应用需求。高精度光学加工、检测技术的飞速发展促进了非球面在光学系统设计中的应用,由于非球面可以有效校正系统像差,所以光学元件少、像质高的全反射式光学系统得以实现^[1]。反射式光学系统具有光谱范围宽、不存在色差、易于实现大口径和长焦距、像质可以接近和达到衍射极限等优点。同轴反射式光学系统还因体积紧凑等被广泛应用于近代高分辨率商业卫星的载荷中,如 WorldView 系列、GeoEye-1、Pleiades-1 等卫星搭载的高性能遥感相机^[2-4]。

为了解决同轴光学系统因中心遮拦导致的入射能量损失问题,离轴反射式光学系统被提出,它不仅消除了光学系统的中心遮拦,还增加了视场角,在一定程度上可以同时实现高分辨率与宽覆盖面积这一对很难兼顾的指标。离轴三反消像散系统是典型的离轴反射式光学系统,虽然拥有众多优点,但由于系统具有非对称性和较多的调整自由度,传统的装调、检测技术已经无法满足其要求。受到这些因素的制约,在 20 世纪 70~80 年代尽管各种离轴三反系统层出不穷,却无法真正实现光机装调。计算机辅助装调技术(Computer-aided Alignment,CAA)的出现和发展,使离轴反射式系统工程化成为可能^[5-10]。国外的 Landsat-7、QuickBird-2、ALOS,国内的遥感八号、天绘一号、资源三号等卫星均搭载有离轴三反系统^[11-14]。

CAA 可以实时检测、快速确定系统各反射镜组件的失调量,通过高精度六维调整机构,可以在较短的时间内调整系统波像差(Wavefront error, WFE)至满足设计要求。然而在调整垫修研,反射镜组件与支撑框架连接的过程中,由于各种应力或残余应力消除和控制方法、措施的不完善,反

射镜面形和系统波像差均会有不同程度的下降,系统的调制传递函数(Modulation Transfer Function,MTF)也相应下降,严重影响系统装调的质量和进度,因此“无应力”装调备受关注。这里,无应力并非指装调过程中完全消除应力的影响(显然是无法做到的),而是通过优化光机结构和改进装调方法使应力导致的光学系统像质的下降在许可范围内。本文针对某星载离轴三反式相机镜头的装调过程提出了相应的解决方法,该方法能够满足设计和装调要求。

2 光学系统组成

如图 1 所示,相机的光学系统为一次成像离轴三反系统。镜头包括主镜、三镜 2 个离轴非球面镜和 1 个球面次镜,3 块反射镜均要求抛光、镀膜后的面形 PV 值优于 $1/10\lambda$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$,下同),RMS 值优于 $1/50\lambda$ 。系统装调结果要求全视场(7 点检验,分别为 0ω 、 $\pm 0.5\omega$ 、 $\pm 0.7\omega$ 和 $\pm 1\omega$ 视场)平均波像差 RMS 值优于 $1/14\lambda$,调制传递函数 MTF(奈奎斯特频率处,下同)优于 0.65。

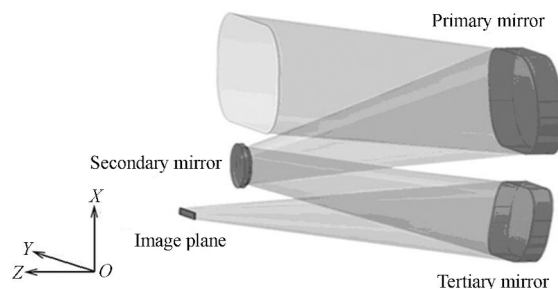


图 1 某空间相机的光学系统

Fig. 1 Optical system of a space camera

3 波像差对系统 MTF 的影响

光学系统的波像差主要包括光学系统设计的残余误差和光学加工、装调引起的误差两部分。随着光学加工与检测技术的发展,超高面形精度

的非球面反射镜制造已经不再是瓶颈,高精度多维调整设备的应用使得光学元件的位置、姿态等调整误差趋于极限。造成系统波像差恶化的主要原因在于装调过程中调整垫的修研误差和结构设计、装调方法不合理产生的连接应力所致的各种变形。由波像差导致系统的 MTF 下降一般可以近似表示为^[15]:

$$ATF_{WFE}(\nu) = 1 - \left[\frac{WFE_{RMS}}{\lambda} \right]^2 \left[1 - 4 \left(\nu - \frac{1}{2} \right)^2 \right],$$

式中: ν 为归一化空间频率, $\nu = f/f_c$, f 为系统空间频率, $f_c = 1/(\lambda F)$ 为系统截止频率, λ 为工作中心波长, λ 取 0.18, WFE_{RMS} 为波像差 RMS 值。图 2 给出了不同归一化频率下波像差导致的 MTF 下降因子,可以看出,波像差对系统的 MTF 影响巨大,因此,在系统装调过程中必须严格控制波像差。

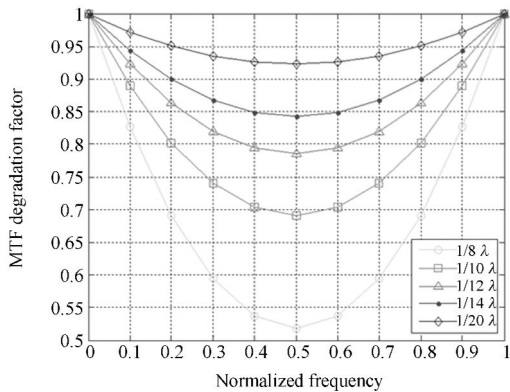


图 2 MTF 衰减因子与归一化频率的关系曲线

Fig. 2 Curves of MTF degradation factor vs normalized frequency

4 反射镜组件消应力设计

反射镜组件一般由反射镜和相应的支撑结构组成。在零件的加工和装配过程中无法完全避免应力的产生,如果应力传递到镜面上,将使镜面面形发生改变,从而影响相机的成像质量。反射镜组件消应力设计的目的是尽可能减小复杂的热、力学环境应力对反射镜面形的影响。

主反射镜结构如图 3 所示,反射镜背部突起的圆柱外壁作为粘接面。使用一种双层环结构作为反射镜的内框,如图 4 所示,两层环以 3 个支柱相连,每个支柱与环之间设计成柔性结构。圆环 1 设置 3 处粘接区域,通过光学环氧胶与反射镜

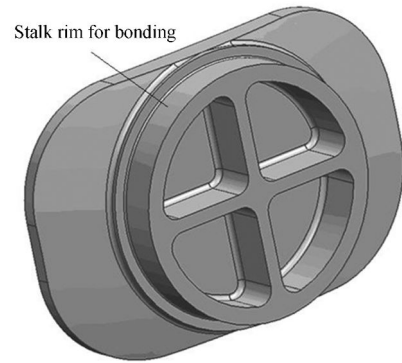


图 3 主镜结构示意图

Fig. 3 Primary mirror

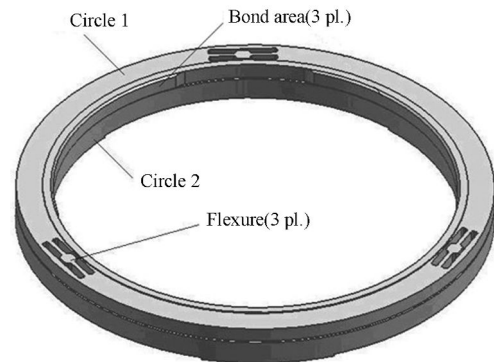


图 4 反射镜内框结构示意图

Fig. 4 Inner mount of a mirror

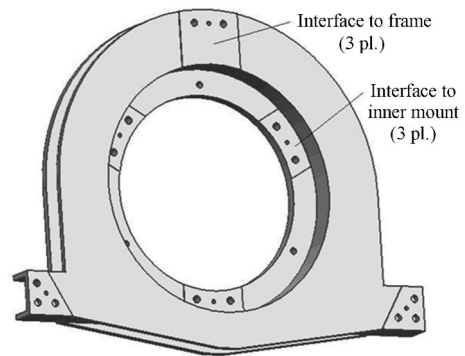


图 5 反射镜外框结构示意图

Fig. 5 Outer mount of a mirror

背部粘接,圆环 2 与反射镜不接触,其上加工有螺钉孔,与反射镜外框紧固连接。这种设计一方面增加了应力的传递距离,利于应力的衰减;另一方面来自不同部位的应力变形均会转变为柔性结构的局部变形,从而使应力“释放”,保证了镜面的面形精度^[16]。同理,连接反射镜组件与框架的反射

镜外框设计如图 5 所示,外框与内框接口位于一层,外框与系统框架接口位于另一层,并且二者接口尽量远离布置。同时,外框还设置了反射镜组件与高精度六维调整架的安装接口。图 6 为反射镜组件的装配示意图。

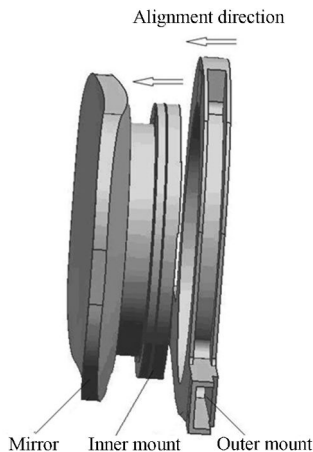


图 6 反射镜装配示意图

Fig. 6 Sketch map of mirror-mounting

对于次镜组件和第三镜组件,均有相似的消应力设计,从而保证在装调过程中,反射镜的面形和位置稳定性。

5 系统的无应力装调方法

图 7 为离轴三反系统装调示意图,各反射镜组件和系统框架分别安装于对应的高精度六维调整架上。采用干涉测量法检测光学系统的波像差和 MTF,根据 CAA 的分析方法确定以主镜作为基准,次镜和第三镜的失调量,进而指导反射镜各自由度的微调和调整垫的修研。

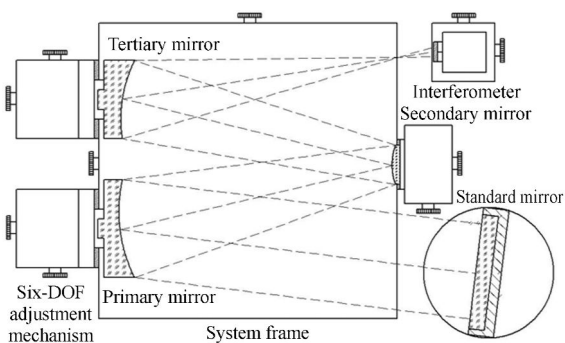


图 7 离轴三反系统装调示意图

Fig. 7 Alignment sketch of off-axis three-mirror system

5.1 反射镜组件与调整架的连接

反射镜在装调过程中需要进行六维高精度调整,因此与调整架的连接应具有很高的稳定性,同时为了保证反射镜面形不变,还应做到无应力连接。由于直接将反射镜外框与调整架用螺钉紧固很难满足上述要求,这里按照第 4 节所述的原理设计了一个过渡件消除连接应力。如图 8 所示,过渡件结构为双层法兰形式,上层法兰与反射镜外框背部连接,下层法兰与六维调整架连接。反射镜组件安装至六维调整架后,应反复检测其面形,当全口径面形相对于反射镜镀膜后的检测结果 RMS 值增大不超过 10% 时,认为反射镜组件与六维调整架实现无应力连接,可以进行后续的装调工作。

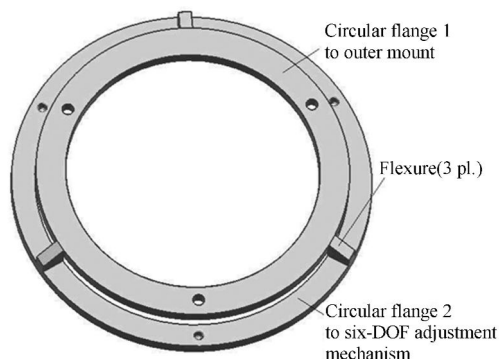


图 8 连接过渡件结构示意图

Fig. 8 Scheme of connecting transition circle

5.2 系统框架的定位

系统装调过程中,框架的空间位置和姿态需要稳定且可以微调,一般用螺钉将框架固定于高精度六维调整架上来实现微调。但是实际装调经验表明,这种简单的固定方式将使框架处于受迫变形状态,反射镜组件的各安装接口面形会有不同程度的下降,导致安装后反射镜面形恶化,典型的恶化情况是出现明显的像散。为了避免上述问题,设计了一种结构来实现框架的非紧固式定位。如图 9 所示,支撑板 3 处高共面度凸台通过调整垫安装有 3 个锥孔支座,标记为 1~3,框架的对应位置安装 3 个不同形式的支座,对应标记为 1'~3'。支座 1'与 1 结构形式相同,均具有锥孔,支座 2'具有 V 型槽,支座 3'为研磨过的平板,上下支座间放置 3 个相同直径的钢球,3 点支撑使框

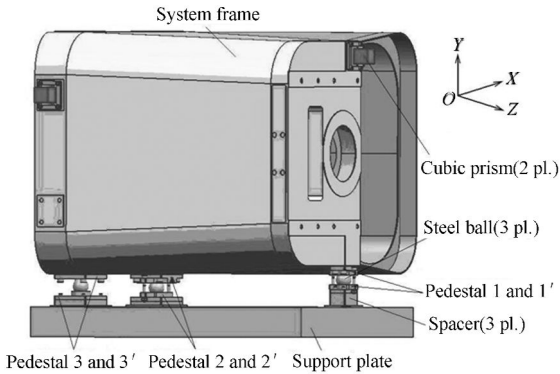


图 9 系统框架定位示意图

Fig. 9 Sketch of frame-positioning

架自由度约束在 OXZ 平面内。支座 1 和 1' 限制了框架沿 X 向和 Z 向的平动, 支座 2 和 2' 共同限制了沿 Y 轴的旋转, 因此框架六自由度全部得到约束。为了防止装调时意外碰撞导致框架倾倒, 设置了 4 处螺栓连接, 采用小螺钉和螺母(相对于连接孔)不拧紧方式仅起到限位作用, 不对框架产生约束力。这种结构使框架仅受重力而实现完全定位, 是系统无应力装调的重要保证。支撑板固定于六维调整架上, 以此调整框架的空间姿态, 两处立方棱镜(具有十字刻线)构成装调基准坐标系, 并用来监视整个装调过程中系统框架的姿态信息。

5.3 系统调整

采用 CAA 进行系统调整。首先建立系统的失调量-像差数学模型, 然后利用干涉仪自带的软件(如 Zygo 干涉仪的 Metropro, 4D 干涉仪的 4Sight)分析干涉测量法获取的系统干涉图样, 得到各视场的波像差 Zernike 系数, 根据相应的算法可以计算出失调量, 进而对反射镜组件的位置进行调整。重复以上分析、计算和调整过程直至系统波像差满足要求。

像差与失调量之间为复杂的非线性关系, 一般在建立像差-失调量数学模型时采用多元函数泰勒展开进行线性近似。当系统初始失调量较小时, 这种近似具有较高的精度, 失调量的求解过程是收敛的, 可以通过较少的调整次数使系统波像差满足要求; 但当初始失调量较大时, 线性近似误差较大, 失调量的求解可能会不收敛, 出现越调整系统像质越差的现象, 严重影响装调进度。因此, 离轴三反系统的 CAA 一般在利用补偿器初调整后, 反射镜位置接近理想目标时进行。

5.4 反射镜组件与系统框架的连接

光学设计的公差分配阶段可以确定对失调量最敏感的反射镜, 对于离轴三反系统一般是主镜, 因此在初装调后主镜组件最先与框架连接固定, 并作为系统装调的基准。为了保证系统的像质, 主镜组件与框架应做到无应力连接, 过程如下:

(1) 用两个莱卡经纬仪监视两处基准立方镜, 记录经、纬读数;

(2) 用数显千分表监视主镜六维调整架沿调整垫厚度方向的平动, 初始读数清零;

(3) 在保证经纬仪与千分表读数不变的情况下测量调整垫对应的空气间隔尺寸;

(4) 修研调整垫, 将主镜组件略微退后, 留出安装空间。调整垫固定于框架上, 保证固定完成后经纬仪读数不变;

(5) 主镜组件恢复初始位置, 数显千分表读数回零, 将主镜组件固定于调整垫上;

(6) 经纬仪读数不变时, 拆离主镜组件与六维调整架, 复检主镜面形, 优于 $1/50\lambda$ 则主镜组件安装完毕。

主镜安装完成后按照前述 CAA 调整第三镜和次镜, 当系统全视场波像差 $RMS \leq 1/14\lambda$, $MTF \geq 0.65$ 时停止调整; 依次进行第三镜和次镜组件的修整连接, 过程与主镜组件相同, 并在步骤(5)、(6)反复检测系统的波像差和 MTF, 满足指标要求方可进行下一步。

6 装调过程与结果

按照前文论述的方法对一个星载离轴三反相机进行了装调, 表 1 为反射镜镀膜完成后与安装至六维调整架后的面形对比, 数据为 $(18 \pm 1)^\circ\text{C}$ 温度范围内多次检测的平均值。可以看出, 消应力设计使得连接、紧固应力传递至镜面时衰减至微乎其微, 安装前后, 反射镜面形基本保持不变。

表 1 反射镜安装前后面形对比

Tab. 1 Contrast of surface deformations

| Mirror | RMS(before)/ λ | RMS(after)/ λ |
|-----------|------------------------|-----------------------|
| Primary | 0.019 | 0.019 |
| Secondary | 0.016 | 0.017 |
| Tertiary | 0.018 | 0.019 |

由于初装调较为粗略,可以只取系统 0ω 、 $\pm 1\omega$ 3 个视场来评价结果。图 10 为初装调后,系统 0 视场的干涉图,此时,3 个视场波像差 RMS 的平均值为 0.091λ ,一般系统初装调波像差达到 RMS 值 $1/10\lambda$ 左右即可进行计算机辅助精装调。

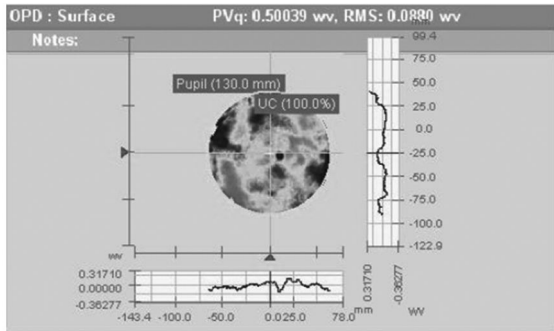


图 10 初装调 0 视场干涉图

Fig. 10 Interferogram of zero field in preliminary alignment

主镜组件固定于框架后进行精调,选取系统 7 个视场进行像质评价。经过多次计算调整,7 个视场平均波像差 RMS 值达到 0.068λ 。依次修研第三镜和次镜调整垫,无应力连接后,复测系统波像差,7 个视场的平均值为 0.070λ 。表 2 为反射镜组件连接前后系统的波像差对比,可以看出连接后系统波像差略有增加,这一方面表明反射镜组件与框架做到了近乎无应力连接,另一方面说明调整垫尺寸的测量和修研精度未达到最佳。对于 $1/14\lambda$ 波像差的系统装调要求来说,该结果完全可以接受,但当有更高的要求时,需要增加调整与修研的次数。图 11 给出了系统装调完成后 0 视场的干涉图,表 3 为系统 7 个视场的 MTF,可以看出均满足指标要求。

表 2 连接前后系统波像差对比

Tab. 2 Contrast of system WFEs before and after alignments

| Field | RMS(before)/ λ | RMS(after)/ λ |
|---------------|------------------------|-----------------------|
| +1 ω | 0.076 | 0.076 |
| +0.7 ω | 0.071 | 0.074 |
| +0.5 ω | 0.065 | 0.067 |
| 0ω | 0.063 | 0.063 |
| -0.5 ω | 0.063 | 0.064 |
| -0.7 ω | 0.065 | 0.069 |
| -1 ω | 0.074 | 0.075 |
| Average | 0.068 | 0.070 |

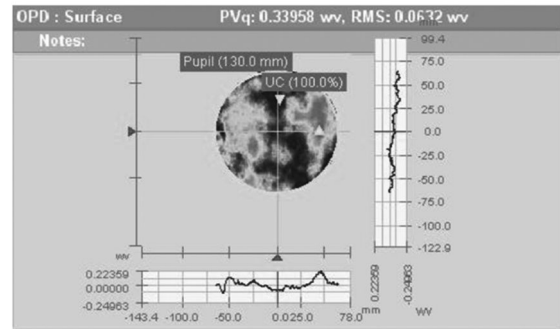


图 11 装调完成后 0 视场干涉图

Fig. 11 Interferogram of in zero field after alignment

表 3 系统 MTF

Tab. 3 System MTF

| Field | MTF | Target(\geq) |
|---------------|-------|------------------|
| +1 ω | 0.716 | 0.65 |
| +0.7 ω | 0.718 | 0.65 |
| +0.5 ω | 0.725 | 0.65 |
| 0ω | 0.725 | 0.65 |
| -0.5 ω | 0.726 | 0.65 |
| -0.7 ω | 0.719 | 0.65 |
| -1 ω | 0.715 | 0.65 |
| Average | 0.720 | 0.65 |

7 结 论

为了在计算机辅助装调离轴三反系统过程中消除应力给系统像质带来的负面影响,本文提出了反射镜组件消应力的结构设计方法,通过添加柔性环节,增长力的传递路径等措施来衰减应力。设计了一种框架的非固定式定位方法,通过 3 点钢球结合平面、V 形槽和锥形孔的支撑方式,实现了框架自由状态下的六维约束。对一个星载离轴三反系统进行了实际装调,结果表明,计算机辅助精调的结果在反射镜组件连接、紧固后基本保持不变,得到的系统全视场平均波像差 $RMS < 1/14\lambda$, $MTF > 0.7$ (奈奎斯特频率处),系统成像质量良好。该方案对离轴三反系统的装调具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 李圣怡,戴一帆. 大中型光学非球面镜制造与测量新技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011:2-34.
LI SH Y, DAI Y F. *New Technology for Manufacturing and Measurement of Large and Middle-scale Aspheric Surfaces* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 2-34. (in Chinese)
- [2] JOHN W F. The QuickBird telescope; the reality of large, high-quality, commercial space optics [J]. *SPIE*, 1999, 3779: 22-30.
- [3] 曲宏松,金光,张叶. “NextView 计划”与光学遥感卫星的发展趋势[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, 2(6):27-36.
QU H S, JIN G, ZHANG Y. NextView program and progress in optical remote sensing satellites [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2009, 2(6): 27-36. (in Chinese)
- [4] 徐伟,朴永杰. 从 Pleiades 剖析新一代高性能小卫星技术发展[J]. *中国光学*, 2013, 6(1):9-19.
XU W, PIAO Y J. Analysis of new generation high-performance small satellite technology based on the Pleiades [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(1): 9-19. (in Chinese)
- [5] 巩盾,田铁印,王红. 利用 Zernike 系数对离轴三反射系统进行计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8):1754-1759.
GONG D, TIAN T Y, WANG H. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1754-1759. (in Chinese)
- [6] 谢耀,于杰,王丽萍,等. 微缩投影系统的计算机辅助装调[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(8):2103-2108.
XIE Y, YU J, WANG L P, *et al.*. Computer-aided alignment for reduced projection systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2103-2108. (in Chinese)
- [7] 孙敬伟,吕天宇,姚丽双,等. 发射望远镜的设计与装调[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2):369-375.
SUN J W, LÜ T Y, YAO L SH, *et al.*. Design and assembly of transmitter-telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 369-375. (in Chinese)
- [8] SEBASTIAN S, CHRISTOPH D, WOLFGANG H, *et al.*. Ultra precisely manufactured mirror assemblies with well defined reference structures [J]. *SPIE*, 2010, 773908: 1-10.
- [9] 辛宏伟,关英俊,柴方茂. 离轴空间遥感器主支撑结构设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6):1257-1264.
XIN H W, GUAN Y J, CHAI F M. Design of main support of off-axis space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1257-1264. (in Chinese)
- [10] 庞志海. 离轴反射光学系统计算机辅助装调技术研究[D]. 北京:中国科学院大学,2013.
PANG ZH H. *Study on Computer-aided Alignment Technology for Off-axis System* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [11] 吕世良,刘全国,贾平,等. 离轴三反消像散多光谱相机调焦系统设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(8):2154-2160.
LÜ SH L, LIU J G, JIA P, *et al.*. Design of focusing system for multispectral camera with off-axis TMA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(8): 2154-2160. (in Chinese)
- [12] 李五,朱雷鸣,刘姜伟. 基于 MTF 的天绘一号卫星多光谱相机分辨率检测[J]. *地理空间信息*, 2013, 11(4):40-42.
LI W, ZHU L M, LIU J W. Resolution detection of Tianhui-01 multispectral camera based on MTF [J]. *Geospatial Information*, 2013, 11(4): 40-42. (in Chinese)
- [13] 李松明,李岩,李劲东. 天绘一号传输型摄影测量与遥感卫星[J]. *遥感学报*, 2012, 16(增):10-16.
LI S M, LI Y, LI J D. Mapping Satellite-1 transmission type photogrammetric and remote sensing satellite [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2012, 16(*suppl.*): 10-16. (in Chinese)
- [14] 蒋永华,张过,唐新民,等. 资源三号测绘卫星多光谱影像高精度谱段配准[J]. *测绘学报*, 2013, 12(6):884-890.
JIANG Y H, ZHANG G, TANG X M, *et al.*. Research on high accuracy band-to-band registra-

- tion method of ZY-3 multispectral image [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 12 (6): 884-890. (in Chinese)
- [15] COTA S A, BELL J T, BOUCHER R H, *et al.*. PICASSO: an end-to-end image simulation tool for space and airborne imaging systems [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2010, 4: 043535.
- [16] 王忠素, 翟岩, 梅贵, 等. 空间光学遥感器反射镜柔性支撑的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(8): 1834-1841.
- WANG ZH S, ZHAI Y, MEI G, *et al.*. Design of flexible support structure of reflector in space remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (8): 1834-1841. (in Chinese)

作者简介:



梅 贵(1984—),男,江苏高邮人,助理研究员,2006年、2009年于清华大学分别获得学士、硕士学位,主要从事空间遥感器光机结构设计的研究。E-mail: meigui840428@163.com



翟 岩(1974—),男,吉林长春人,副研究员,1997年于长春理工大学获得学士学位,2012年于吉林大学获得硕士学位,主要从事空间遥感器总体设计的研究。E-mail:zhaiy163@tom.com

(版权所有 未经许可 不得转载)