

多光谱相机计算机辅助装调方法

张 超 魏学敏 赵希婷 焦文春 廖志波

北京空间机电研究所, 北京 100094

摘要 应用于航天遥感领域的光学相机光学元件多, 分离变量多, 结构复杂, 成像质量要求接近衍射极限, 对光学装调有着苛刻的要求。结合装调数学模型, 将CODE V光学设计软件与各视场干涉图的Zernike系数整合为装调变量, 优化求取失调量; 根据离轴三反系统理想光学模型求取装调灵敏度矩阵及确定多标量修正次序, 有效克服装调变量相关性。在波长 λ 为632.8 nm时, 成功将多光谱相机装调结果均方根(RMS)由0.563 λ 提升至0.064 λ , 实现了多光谱相机高精度、高效率的装调。

关键词 遥感; 计算机辅助装调; 反向优化; 多光谱相机

中图分类号 TH741.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0812005

Computer-Aided Alignment Technology of Multi-Spectral Camera

Zhang Chao Wei Xuemin Zhao Xiting Jiao Wenchun Liao Zhibo

Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China

Abstract Refract optical system using in remote sensing usually has many elements, complicated structure and diffraction limited image quality, which makes the alignment puzzled. Combined with the adjustment mathematical model, the CODE V optical design software and the field interference Zernike coefficient are integrated into the alignment variables for calculating the misalignment. According to the off-axis three mirror ideal optical system model, the alignment sensitivity matrix is acquired and the correct order of multi misalignment variables is determined, which can overcome the alignment correlation effectively. It is effective and convenient to raise the optical system wavefront error root mean square (RMS) from 0.563 λ (=632.8 nm) to 0.064 λ . After the orbit test, the multi-spectral camera imaging quality is excellent.

Key words remote sensing; computer-aided alignment; reverse optimization; multi-spectral camera

OCIS codes 120.0280; 110.4234; 220.1140

1 引言

随着空间遥感器研制技术的飞速发展, 高性能光学系统的大量应用, 计算机辅助装调技术是针对传统装调方法存在不可视、不定量、随机成分多、装调周期长等缺点提出的一种新的装调手段。此技术理论已日趋成熟^[1-2], 本文以多光谱相机为例, 介绍计算机辅助装调技术在实际装调过程中的具体运用。利用反向优化算法和最小二乘法对系统失调量进行分析, 建立合理可行的装调思路, 通过设置补偿环节对相机初级像差进行调整, 优选调整变量来补偿各初级像差的失调, 实现了多光谱相机高精度、高效率的装调。

2 理论分析

计算机辅助装调从数学上是把系统像差作为镜面位置误差量的函数^[3-4], 建立失调量与像差变化之间的关系, 并寻求最佳的解决方法来得到失调量。可以近似地用线性方程来表示

$$A\Delta X + H = \Delta F, \quad (1)$$

收稿日期: 2015-04-08; 收到修改稿日期: 2015-04-28

作者简介: 张超(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事光学遥感器装调与仿真测试等方面的研究。

E-mail: zhangchao19870408@163.com

$$\Delta X = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 - x_{01} \\ x_2 - x_{02} \\ \vdots \\ x_n - x_{0n} \end{bmatrix}, \quad \Delta F = \begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \\ \vdots \\ \Delta F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 - F_{01} \\ F_2 - F_{02} \\ \vdots \\ F_m - F_{0m} \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial F_m}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial F_m}{\partial x_n} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 A 为灵敏度矩阵, 由光学设计数据确定; H 为噪声, 包含加工面形误差、环境震动或扰动影响和检测误差等; ΔX 为系统失调量, 通常包括沿垂直于光轴方向的平移、旋转、各镜面之间的轴向间距; ΔF 为各校正对象的实测值与光学设计值之差, 也就是系统质量随失调量的变化值。采用 Zernike 多项式系数作为系统成像质量评价标准。其中 Z_5 、 Z_6 、 Z_7 、 Z_8 、 Z_9 代表光学系统的各种初级像差 (Z_5 - 0° 或 90° 像散, Z_6 - 45° 像散, Z_7 - X 方向彗差, Z_8 - Y 方向彗差, Z_9 -球差)。

离轴三反光学系统装调的关键是确定系统的失调量 ΔX ^[9]。为获取系统的失调量, 采用自准干涉法来实时检测系统各个视场的波像差 ΔF , 通过计算机辅助装调软件分析干涉条纹, 反向优化求解波面的多项式系数, 拟合被测波面, 计算出各个光学元件的装调方向和量化值, 指导修正各个元件相对位置误差, 使光学系统成像质量以及各元件的相互位置可以接近于理论设计指标, 从而指导装调过程有目的地进行^[6-9]。

3 仿真分析

3.1 失调特性分析

光学系统图如图 1 所示^[10-11], 离轴三反系统的每个单镜在光学系统的三维坐标系中都有 6 个自由度, 包括沿 X 、 Y 、 Z 轴的平移量以及绕 X 、 Y 、 Z 轴的转动量。实际装调时, 以公差要求高的主镜作为基准, 装调时仅考虑次镜的偏心和倾斜 (D_{x2} 、 D_{y2} 、 T_{x2} 、 T_{y2})、三镜的偏心和倾斜 (D_{x3} 、 D_{y3} 、 T_{x3} 、 T_{y3})。

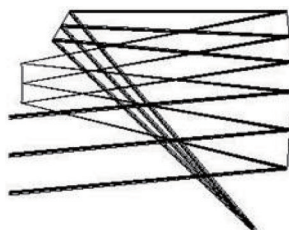


图 1 光学系统图

Fig.1 Optical system figure

为考虑轴外点成像质量, 分别对系统 0° 视场、 $+3^\circ$ 视场、 -3° 视场进行失调状态仿真。装调仿真过程通过 CODE V 软件和自编程序完成, 计算三反离轴系统在不同偏心倾斜量值下出瞳面的像差, 并绘出中心视场像差 (Zernike 系数) 随次镜、三镜自由度变化的曲线图。

图 2、图 3 为中心视场失调量与各阶 Zernike 多项式关系曲线图 (X 轴为失调量, Y 为 Zernike 系数), $+3^\circ$ 视场、 -3° 视场关系曲线图与中心视场类似。从图中可看出, 初级像差随自由度变化关系近似为一次曲线, 利用最小二乘法对像差随次镜或三镜自由度变化的曲线进行拟合, 得到拟合后的曲线求出其斜率, 即可表示该项像差的自由度灵敏度。得到灵敏度矩阵如表 1 所示。

对关系曲线图及灵敏度矩阵进行分析可以得到该系统具有以下失调特性:

- 1) 倾斜比偏心敏感, 绕 X 向倾斜比绕 Y 向倾斜敏感;
- 2) 彗差主要是由次镜偏心产生, 而三镜倾斜和偏心主要影响像散, 同时次镜偏心在边缘视场会附加一定量的像散;
- 3) 三镜倾斜比次镜倾斜更敏感, 三镜有约 3~4 倍于次镜的灵敏度;
- 4) 次镜和三镜倾斜对单个视场波像差并不关于零位对称, 中心视场和边缘视场分别在正负区间上获得最小波像差。

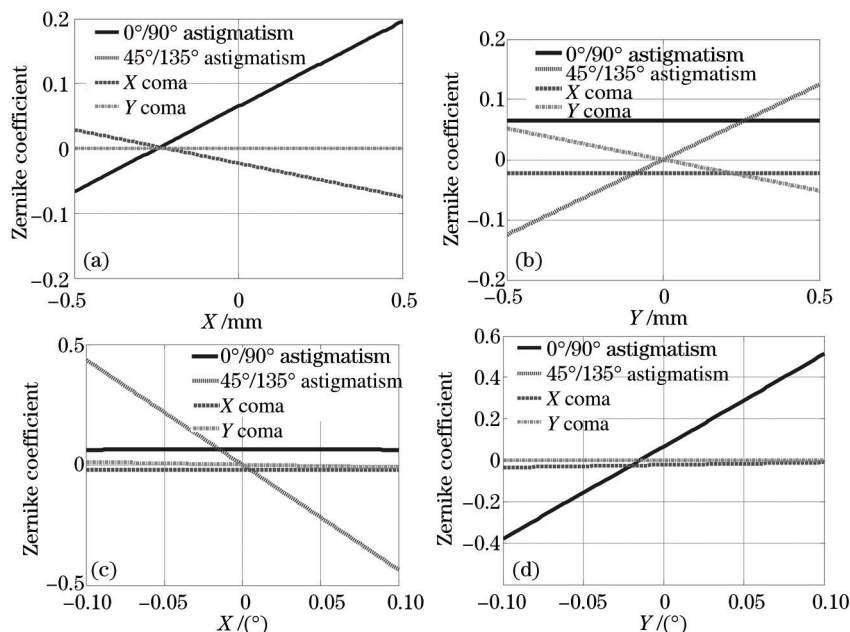


图 2 次镜自由度变化曲线。(a) X 轴偏心; (b) Y 轴偏心; (c) X 轴倾斜; (d) Y 轴倾斜
 Fig.2 Freedom degree variation curve of the secondary mirror. (a) X axis decenter; (b) Y axis decenter; (c) X axis tilt; (d) Y axis tilt

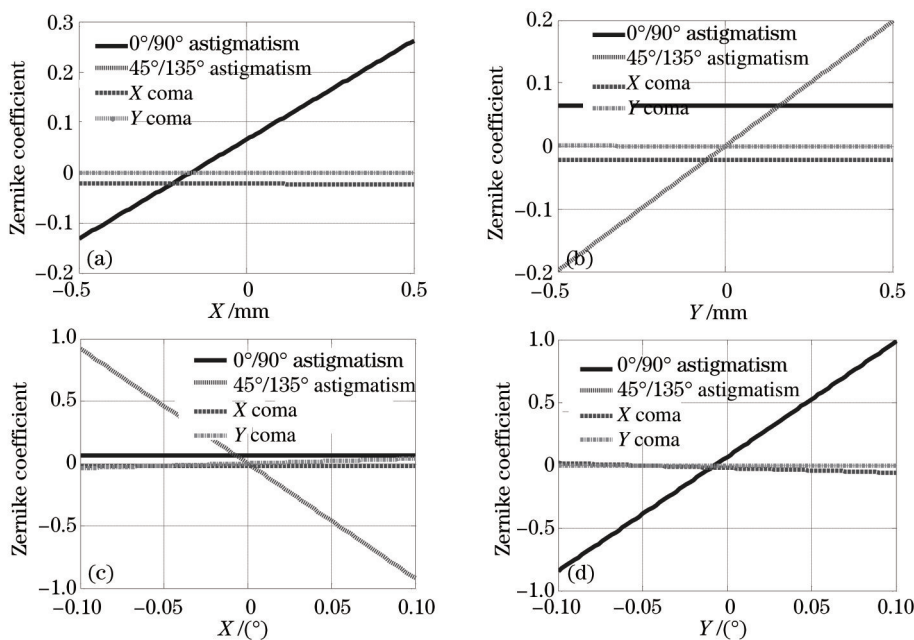


图 3 三镜自由度变化曲线。(a) X 轴偏心; (b) Y 轴偏心; (c) X 轴倾斜; (d) Y 轴倾斜
 Fig.3 Freedom degree variation curve of the third mirror. (a) X axis decenter; (b) Y axis decenter; (c) X axis tilt; (d) Y axis tilt

通过对三反离轴系统失调特性分析,可以确定以下装调思路:在粗装调阶段,以主镜作为装调基准,首先通过调整次镜平移以消除彗差,再调整三镜倾斜以使像散减小到 0.1λ 以内,使得中心视场波像差达到一定范围,这时系统快速进入精调阶段。精调阶段,中心视场的波像差很小,但是两个边缘视场像质较差,因此在精调阶段就需综合考虑两个对称的边缘视场波像差调至最小,如: $(0^\circ, +3^\circ)$ 和 $(0^\circ, -3^\circ)$ 。运用该装调思路能达到简化装调环节、提高装调效率的目的。

3.2 优选调整变量

利用反向优化,对系统进行的失调仿真,将优化好的理论系统加入失调量,建立系统失调状态的数学模

型。利用自编计算机辅助装调专用软件求解失调量,计算结果见表2。

表1 灵敏度矩阵

Table 1 Sensitivity matrix

| $\Delta Z/\Delta x$ | Secondary mirror | | | | Third mirror | | | | |
|---------------------|------------------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|--------|
| | D_{x2} | D_{y2} | T_{x2} | T_{y2} | D_{x3} | D_{y3} | T_{x3} | T_{y3} | |
| (0,0) | Z_5 | 0.266 | 0 | 0 | 4.502 | 0.395 | 0 | -0.006 | 9.158 |
| | Z_6 | 0 | 0.254 | -4.401 | 0 | 0 | 0.398 | -9.227 | 0 |
| | Z_7 | -0.313 | 0 | 0 | 0.355 | -0.003 | 0 | 0 | -1.196 |
| | Z_8 | 0 | -0.314 | -0.331 | 0 | 0 | 0 | 1.140 | 0 |
| (0,3) | Z_5 | 0.265 | -0.124 | 2.187 | 4.500 | 0.396 | -0.200 | 4.632 | 9.109 |
| | Z_6 | 0.141 | 0.262 | -4.475 | 2.325 | 0.196 | 0.394 | -9.121 | 4.534 |
| | Z_7 | -0.309 | 0 | -0.012 | 0.360 | -0.004 | -0.001 | 0.027 | -1.197 |
| | Z_8 | 0 | -0.311 | -0.342 | 0.012 | -0.002 | -0.002 | 1.154 | -0.029 |
| (0,-3) | Z_5 | 0.265 | 0.124 | -2.192 | 4.500 | 0.393 | 0.200 | -4.644 | 9.109 |
| | Z_6 | -0.141 | 0.262 | -4.474 | -2.325 | -0.196 | 0.394 | -9.122 | -4.534 |
| | Z_7 | -0.309 | -0 | 0.011 | 0.360 | -0.004 | 0.001 | -0.027 | -1.197 |
| | Z_8 | 0 | -0.311 | -0.342 | -0.013 | 0.002 | -0.002 | 1.155 | 0.0291 |

表2 失调量与求解结果对比

Table 2 Comparison of misalignment and the solution

| Number of the variables | Misalignment | D_{x2} | D_{y2} | T_{x2} | T_{y2} | D_{x3} | D_{y3} | T_{x3} | T_{y3} |
|-------------------------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 2 | True value | | | | | | | 0.015 | 0.012 |
| | Solution | | | | | | | 0.0150 | 0.0121 |
| 4 | True value | 0.25 | -0.30 | | | | | -0.016 | 0.018 |
| | Solution | 0.267 | -0.30 | | | | | -0.0161 | 0.0174 |
| 6 | True value | 0.1 | 0.15 | 0.015 | -0.019 | | | -0.016 | 0.02 |
| | Solution | 0.1 | 0.154 | 0.013 | -0.022 | | | -0.0152 | 0.0216 |
| 8 | True value | 0.1 | 0.15 | 0.015 | -0.019 | 0.08 | 0.1 | -0.016 | 0.02 |
| | Solution | 0.054 | 0.1803 | 0.016 | -0.0153 | -0.35 | 0.29 | -0.0072 | 0.038 |

表2中,位移单位为毫米,角度单位为度。从表2中可以发现,当变量数较多时,计算结果与真值存在误差。这是由于次镜平移、倾斜与三镜平移、倾斜之间在一定补偿关系。因此求解失调量过程中会出现多组解的情况,表3分析了采用不同自变量求解来模拟实际装调过程中如何较快、较好地优选自变量。

表3中从反算系统波前来看,不同自变量的选取都具有合理性。虽然系统各镜面并不处于理论位置,存在一定的失调量,由于反射镜的各自自由度之间具有补偿关系,系统成像质量很好,接近理论像质。

表3 不同自变量计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation result with different variables

| Misalignment | D_{x2} | D_{y2} | T_{x2} | T_{y2} | D_{x3} | D_{y3} | T_{x3} | T_{y3} | Wavefront |
|--------------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-------------------|
| 1 | True value | | 0.012 | 0.018 | | | 0.015 | 0.012 | 0.136/0.13/0.118 |
| | Solution 1 | | 0.0119 | 0.0132 | | | 0.015 | 0.01439 | 0.133/0.125/0.112 |
| | Solution 2 | | | | | | 0.0206 | 0.0207 | 0.132/0.125/0.112 |
| 2 | True value | 0.1 | 0.05 | 0.016 | 0.015 | | 0.014 | 0.008 | 0.124/0.117/0.106 |
| | Solution 1 | 0.102 | 0.056 | 0.0143 | 0.0157 | | 0.015 | 0.0076 | 0.124/0.117/0.106 |
| | Solution 2 | 0.0645 | 0.102 | | | | 0.024 | 0.0164 | 0.126/0.122/0.109 |

从上述分析可以看出,当系统存在一定失调量时,也能得到很好的成像质量。所以在进行装调前应对系统进行装调特性分析,在保证像质的前提下,尽可能地优选最少的调整量,优选调整变量原则为:1)当波像差较大时,用较灵敏的补偿量对初级像差进行调整,波像差较小时,用较不灵敏的补偿量调整;2)当不同

组合出现近似相关的变量,则先予以消除,加快收敛速度;3)针对主要像差进行消除的办法。综合运用上述方法,从而简化装调过程、缩短装调时间、提高装调精度。

4 实际装调测试

4.1 粗装调

粗装调中,由中心视场的干涉图获得 Zernike 系数(只参考前 9 项系数,初级像差),以主镜作为装调基准,结合实际判断次镜、三镜可能的偏离方向与量级,试探性调整以确定最大误差源。

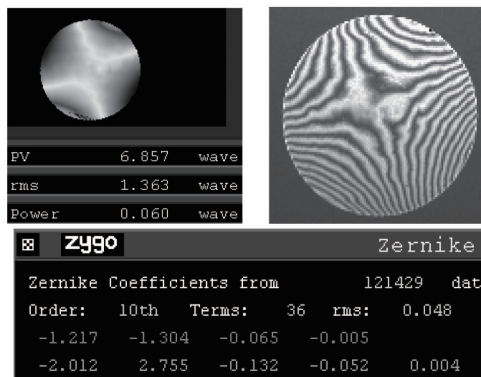


图 4 中心视场干涉图和前 9 项 Zernike 系数

Fig.4 Center field interferogram and first 9th terms Zernike coefficients

从中心视场 Zernike 系数可得像散与彗差较大,当波像差较大时,优先选用较灵敏的变量。将次镜 X 、 Y 方向的平移,三镜绕 X 、绕 Y 倾斜优选作为需要调整的失调量,把中心视场 Zernike 系数带入计算机辅助装调专用软件计算得到失调量如表 4 所示。

表 4 计算机辅助装调软件得到的失调量

Table 4 Misalignment of computer-aided alignment software

| Misalignment | D_{x2} | D_{y2} | T_{x3} | T_{y3} | Wavefront |
|--------------|----------|----------|----------|----------|---|
| | | | | | RMS: 0.133 λ |
| Solution | 2.174 | -0.623 | -0.317 | -0.290 | $Z_5 = -0.198$ $Z_6 = 2.552$ $Z_7 = -0.135$ $Z_8 = -0.052$ |

根据表 4 给出的调整量值与方向,对次镜和三镜调整。经三次调整后,重复上述迭代测试与调整的过程,中心视场的干涉图基本满足要求,此时系统波像差均方根(RMS)为 0.064 λ ,从干涉图中可以看出基本消除彗差,同时像散减小到 0.1 λ 以内。

4.2 系统精调

精调阶段需综合考虑对称边缘视场波像差调整至最优。原则上在满足各视场质量要求的前提下,视场数越少越好。对于本系统,视场为 6°,其视场数选择 3 个为宜,即能保证计算机辅助装校后的光学系统任何视场点的质量。其中,中心视场波像差较小,但边缘视场像质不对称,并且主要存在的是像散,因此精调整阶段主要的任务就是消去像散。首先,选取轴外两个对称视场,同时遵循优选变量的原则,当波像差较小时,用较不灵敏的次镜作为失调变量。

经过图 5 各视场的干涉图进行分析,同时将各反射镜实测面形代入光学设计软件 CODE V 对系统质量预估,通过考察真实波面对系统质量的影响可知稍大的波像差均为加工面形残留误差。

经过几次迭代计算,如图 6 所示,检测波长为 632.8 nm 时,中心视场均方根值达到 0.060 λ , +3°视场均方根值为 0.075 λ , -3°视场均方根值为 0.073 λ ,达到光学系统成像质量的要求,装调质量因子 K 优于 0.9。

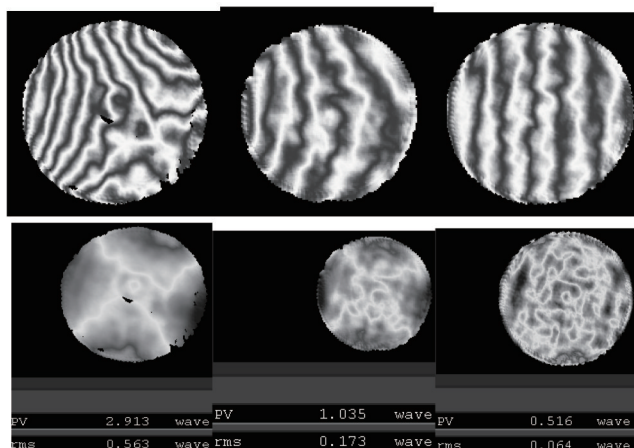


图5 中心视场调整

Fig.5 Center field adjustment

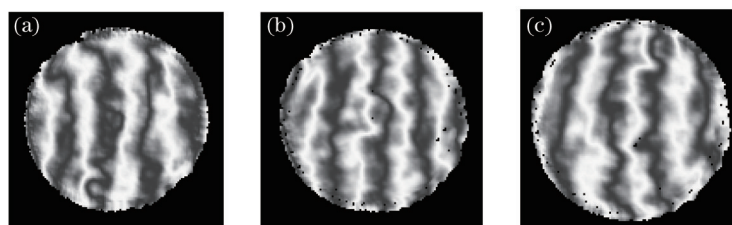


图6 各视场最终装调结果。(a) $(0^\circ, +3^\circ)$ RMS: 0.075λ ; (b) $(0^\circ, 0^\circ)$ RMS: 0.060λ ; (c) $(0^\circ, -3^\circ)$ RMS: 0.073λ

Fig.6 Final alignment result of all fields. (a) $(0^\circ, +3^\circ)$ RMS: 0.075λ ; (b) $(0^\circ, 0^\circ)$ RMS: 0.060λ ; (c) $(0^\circ, -3^\circ)$ RMS: 0.073λ

5 结 论

以多光谱相机为例,详细介绍了CODE V光学设计软件与视场干涉图的Zernike系数整合为装调变量并优化求取模型的方法。对光学系统理想模型进行合理优化,确定多标量的修正次序,有效减小了装调变量之间的相关性,避免了传统模式中的经验式、盲目性调整,大大提升了此相机的装调质量和效率。

参 考 文 献

- 1 Zhu Shiyu, Zhang Xin, Li Wei. Alignment of off-axis TMA system by combining computer-aided adjustment and traditional benchmark pass method[J]. Chinese Optics, 2011, 4(6): 571-575.
朱时雨, 张 新, 李 威. 计算机辅助装调与传统基准传递技术相结合实现三镜消像散系统的装调[J]. 中国光学, 2011, 4(6): 571-575.
- 2 Sun Jingwei, Chen Tao, Wang Jianli, *et al.*. Computer-aided alignment for primary and secondary mirrors[J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(10): 2156-2163.
孙敬伟, 陈 涛, 王建立, 等. 主次镜系统的计算机辅助装调[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10): 2156-2163.
- 3 Wang Fuguo, Yang Hongbo, Yang Fei, *et al.*. Optimization and analysis for the axis support points position of the large aperture mirrors [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(6): 877-880.
王富国, 杨洪波, 杨 飞, 等. 大口径主镜轴向支撑点位置优化分析[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(6): 877-880.
- 4 Zhang Wenjing, Liu Wenguang, Liu Zejin. Numerical simulation for computer-aided precise alignment of unstable resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(3): 516-521.
张文静, 刘文广, 刘泽金. 一种非稳腔计算机辅助装调方法的数值模拟[J]. 光学学报, 2008, 28(3): 516-521.
- 5 Xue Donglin, Zheng Ligong, Wang Shuping, *et al.*. Research on off-axis conic asphere null testing using computer-aided alignment method [J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3): 380-385.
薛栋林, 郑立功, 王淑平, 等. 离轴二次非球面补偿检验计算机辅助调整技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 380-385.
- 6 Ye Jingfei, Gao Zhishan, Liu Xiaoli, *et al.*. Freeform surfaces reconstruction based on zernike polynomials and radial basis function[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0822003.

- 叶井飞, 高志山, 刘晓莉, 等. 基于Zernike多项式和径向基函数的自由曲面重构方法[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0822003.
- 7 Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0722001.
- 巩 盾, 王 红. 含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0722001.
- 8 Lin Jing, Cui Qingfeng, Zhu Hao. Research of broad width off-axis three mirror optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0722002.
- 林 晶, 崔庆丰, 朱 浩. 宽幅离轴三反光学系统研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0722002.
- 9 Shen Hua, Li Jia, Zhu Rihong, *et al.*. Design of non-null interferometer based on point source array for testing freeform surface[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1222003.
- 沈 华, 李 嘉, 朱日宏, 等. 基于点源阵列的自由曲面非零位干涉检测系统设计方法[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1222003.
- 10 Fan Bin, Cai Weijun, Zhang Xiaohong, *et al.*. Technology of the multi-spectral camera of ZY-3 satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(3): 75-84.
- 范 斌, 蔡伟军, 张孝弘, 等. “资源三号”卫星多光谱相机技术[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 75-84.
- 11 Cai Weijun, Fan Bin, Zhang Fengqin, *et al.*. High opto-mechanical stability design of multi-spectral camera[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2012, 33(3): 85-92.
- 蔡伟军, 范 斌, 张凤芹, 等. 多光谱相机高稳定性光机结构设计技术[J]. 航天返回与遥感, 2012, 33(3): 85-92.

栏目编辑: 韩 峰