

面型误差和失调量对同轴三反系统像质的影响

李 斌^{1,2}, 陈佳夷², 王海超², 霍腾飞², 李新华³

(1. 中国航天系统科学与工程研究院, 北京 100048;

2. 北京空间机电研究所, 北京 100076; 3. 安顺学院, 贵州 安顺 561000)

摘 要: 应用于对地观测的高分辨同轴三反式系统对光学装调有着严格的要求, 光学元件的失调量和由装配应力导致的面型误差都会严重影响系统成像质量。该方法通过镜面受力分析和光学系统仿真指导系统装调, 以某商业遥感卫星搭载的同轴三反式镜头装调过程为例, 分析失调量和面型误差的像差特性。通过分析光学元件失调量和面型误差与系统像散、彗差以及球差的关系, 并利用系统波像差的均方根(RMS)作为系统像质的评价标准, 得出各个光学元件失调量和面型误差对系统成像质量的影响权重。根据计算结果进行针对性调校, 使系统各视场的平均 RMS 值收敛为 0.06λ 以下。经过多台同类镜头装调结果验证, 证明该方法切实有效, 可缩短装调周期, 提升装调精度。

关键词: 光学遥感; 镜头装调; 光学仿真; 反射式光学系统

中图分类号: TP73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0918002

Effect of surface error and alignment aberration on imaging quality of coaxial three mirror system

Li Bin^{1,2}, Chen Jiayi², Wang Haichao², Huo Tengfei², Li Xinhua³

(1. China Aerospace Academy of Systems Science and Engineering, Beijing 100048, China;

2. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076, China;

3. Anshun University, Anshun 561000, China)

Abstract: Surface error and alignment aberration of mirrors are required precision uniform in space transmission coaxial three mirror system alignment. Based on force analysis and system simulation methods for efficient alignment of the coaxial optical systems, one coaxial three mirror system with large aperture and long focal length was used to illustrate the relationship between aberration characteristics to alignment aberration and surface error. The spherical aberration, coma and astigmatism caused by alignment aberration and surface error were calculated, then wavefront RMS was used as an evaluation standard for system imaging quality. Finally, the weight of alignment aberration and surface error to system imaging quality were obtained. Based on the calculated result, the average RMS was adjusted to below 0.06λ . The lens alignment results demonstrate the possibility and effectiveness of this method, and the proposed methods could be available to shorten the alignment process, and promote system alignment accuracy.

Key words: optical remote sensing; lens alignment; optical simulation; reflective optical system

收稿日期: 2018-04-06; 修订日期: 2018-05-10

基金项目: 国家重大科技专项

作者简介: 李斌(1989-), 男, 工程师, 博士生, 主要从事遥感器镜头装调与系统工程方面的研究。Email: 290162457@qq.com

导师简介: 郭宝柱(1945-), 男, 研究员, 博士, 主要从事系统工程方面的研究。Email: 18911899515@16.com

0 引言

随着我国空间技术的发展,对地观测的需求日渐提升。遥感器也在不断地追求高分辨率、高轻量化,而同轴三反式镜头因其易于实现大口径、大视场、轻量化的特性,被广泛应用于各类高分辨率的遥感器上^[1]。多数情况下同轴三反式镜头的成像质量由其系统设计的残留像差、光学元件的面型误差、系统装调结果决定,在装调过程中对各个元件的失调量校正已经有了精确的指导方法,然而在对高精度反射式镜头进行批量化装调过程中,经常会遇到由于加工残留或装配应力导致的光学元件面型误差带入系统像差中的情况,从而误导对失调量的预判结果^[2-3]。因此,如何在高精度同轴三反式镜头中利用像差分析和仿真的方法指导装调,准确区分元件失调量和面型误差,成为航天光学遥感器研制需要解决的问题。

该方法针对某商业遥感卫星搭载的同轴三反式镜头的装调过程,通过计算过程中各反射镜的失调量和面型误差对系统波像差的影响,确定其平移、倾斜以及面型偏差量,根据偏差量建立模型指导系统装调过程。

1 失调量和面型误差对应的系统像差特性

以某商业遥感卫星的光学有效载荷装调过程为例,分析失调量和面型误差对系统像差的影响。该镜头光学系统为同轴三反系统(图 1), F 数为 10,视场

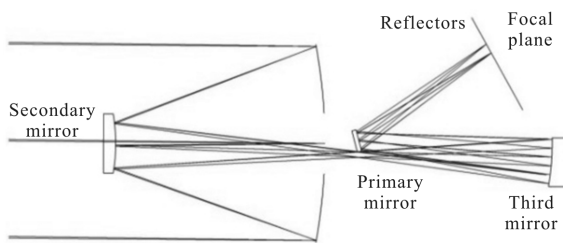


图 1 光学系统结构图

Fig.1 Structure diagram of optical system

角 $FOV(2\omega)=3^\circ$, MTF 在奈奎斯特频率 156 lp/mm 处为衍射受限系统,镜头是高分辨率对地观测系统,对光学元件的面型误差和失调量均有严格的要求。镜

头装调结果以系统各视场波像差的 RMS 值为评价标准,设计要求装调结束后各视场 RMS 的平均值在 0.060λ 以下。

1.1 失调量与系统像差的关系

由于机械结构限位的局限性,在镜头的初始装调时,各个反射镜不可避免地会产生诸如平移、倾斜等光轴不一致的情况。这种反射镜光轴与理想光轴的一致性偏差,破坏了反射式光学系统轴线的唯一性与旋转对称性^[4]。反射镜平移和倾斜可以分为六个维度,由于同轴光学系统的旋转对称性,轴对称的光学元件绕光轴自转不带来任何系统变化,故不予考虑。剩余五个维度的倾斜和偏心在同轴光学系统三阶波前赛德尔多项式的矢量表达形式为:

$$W = \sum_i W_{0i0} (R \cdot R)^2 + \sum_i W_{131i} [(H - \sigma_i) \cdot R] (R \cdot R) + \sum_i W_{222i} [(H - \sigma_i) \cdot R]^2 + \sum_i W_{220i} [(H - \sigma_i)(H - \sigma_i)R] \cdot (R \cdot R) + \sum_i W_{331i} [(H - \sigma_i) \cdot (H - \sigma_i)] [(H - \sigma_i) \cdot R] \quad (1)$$

式中: W 表示实际波前与球面参考波面的光程差,即波像差; H 表示归一化后的实际像高与理想像高的比值; R 表示归一化后的实际孔径高与理论出瞳半径的比值; i 表示光学系统中反射面的个数; W_{0i0} 、 W_{131} 、 W_{222} 、 W_{220} 、 W_{331} 分别代表系统各光学元件表面的球差、彗差、像散、场曲和畸变系数; σ 决定像差相对于中心的偏移量。从公式(1)中可以看出,在反射镜的五个失调量中非轴向的平移、倾斜不会导致球差变化,球差仅受各光学元件的轴向平移影响。而其中的畸变和场区虽然也受失调量的影响,但是其不影响成像的清晰程度,故着重分析由失调量导致的球差、彗差和像散^[5]。

通过上述分析可以得出反射镜的轴向平移影响最大,可同时影响到球差、彗差、像散,应作为优先调整项,也就是说镜头装调过程中需要优先确保各个反射镜之间的相互间距,然后再调节各反射镜的光轴一致性。

1.2 反射镜面型误差与系统像差的关系

除去光学元件失调量对系统像差的影响,还需考虑到光学元件面型误差对系统像差的影响,而导致系统中反射镜出现面型误差的因素通常包括两个:反射镜加工过程中的残留像差和镜头装调过程中装配应力导致的像差^[6-7]。文中关注的过程为光学装调过程,此时反射镜的加工残留误差已经确定,故

着重考虑由装配应力导致的面型误差。且由于镜头光学装调过程中无法实时检测各个反射镜的面型，结构应力导致的面型参数变化就更难被察觉，需要对反射镜面型误差与系统像差的关系进行深入分析，才能够准确区分由失调量和面型误差导致的系统像差，进而指导装调过程。

利用商业有限元软件 hypermesh 建立各个反射镜的有限元模型，通过 patran/nastran 软件进行仿真分析。以主镜为例，采用 FEM 模型分析镜体承受各种外界应力时主镜表面形状的变化情况(图 2)，并使用 ZYGO 干涉仪检测实际受力条件下主镜的面型参数变化(图 3)。经过反复的受力分析及应力试验，总结发现在该相机的支撑结构下，主镜承受的结构应力变形只会带来不同角度的像散变化，并不会导致彗差及球差的变化。将测试所得结果通过 CODE V 光学仿真软件代入到光学系统中，分析不同的面型误差对系统各个视场的波像差影响。

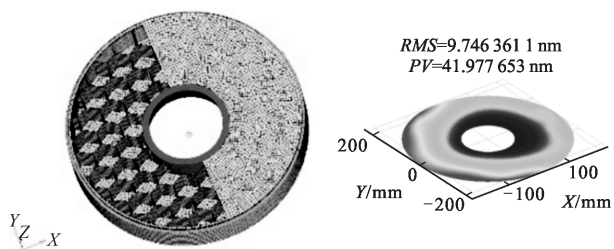


图 2 主镜的有限元模型

Fig.2 Finite element model of primary mirror

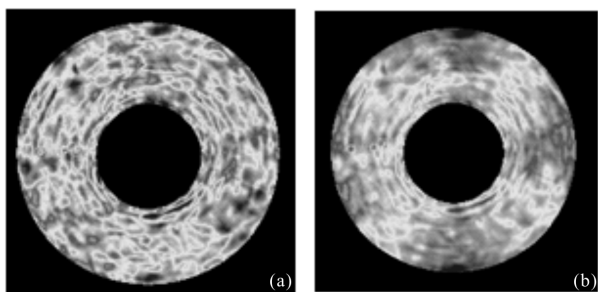


图 3 主镜受力前后面型比较

Fig.3 Surface change of primary mirror before and after stress

由于文中所研究镜头的结构特殊性，第三反射镜在组件装配过程中排除了应力影响后，后期的装调过程基本不会对其带来新的面型误差，故未参与到数据分析中，如果在其他需考虑此项因素的结构条件下，则应该增加对三镜面型误差的分析。

2 系统检测与仿真

镜头系统的像差影响因素主要包括光学系统设计残差、光学元件失调量、反射镜面型加工误差、以及装调过程中因装配应力导致的面型偏差。其中光学系统的设计残差和反射镜面型加工误差为系统的先期误差，无法通过系统调校消除，将反射镜加工面型误差代入镜头光学设计模型中可以求得各视场的先期波相差的均方根值：中心视场的 RMS 为 0.045λ ，边沿视场的 RMS 为 0.053λ ，该数值也是镜头系统可以通过调节到达的最优状态。

2.1 系统失调量分析

通过光学设计软件计算，可以确定由系统失调量和面型变化所导致的像差主要为初级像差，高级像差相比来说变化较小，所以在装调过程中将初级像差作为主要校正对象。使用 Zygo 干涉仪检测镜头系统得到的波前数据显示为 Zernike 系数，其对应初级像差的几项系数，第五项~第九项如下： Z_5 为 0° 或 90° 像散， Z_6 为 45° 或 135° 像散， Z_7 为水平方向彗差， Z_8 为垂直方向彗差， Z_9 为球差。系统装调过程中以主镜光轴为调试基准，主要通过调节次镜与三镜的五个维度的自由量来矫正系统的失调量，最终确保主、次、三镜的光轴一致且相互之间的间距 $D1$ 、 $D2$ 符合设计值，如图 4 所示。

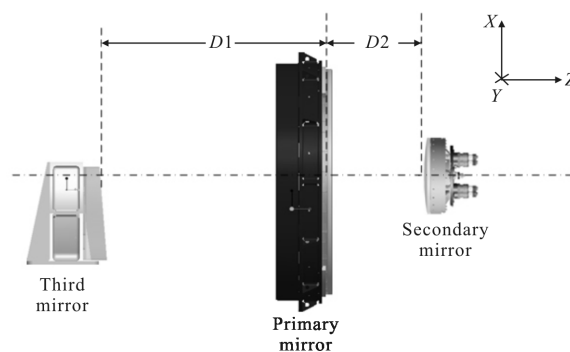


图 4 系统装调示意图

Fig.4 Sketch figure of lens alignment

通过对次镜、三镜不同平移及倾斜的偏差状况进行仿真分析，得到次镜各个失调量变化对系统像差的影响，通过仿真结果可以确定各反射镜的失调量与系统各低阶像差之间的变化关系为线性关系，故只需一组失调与对应像差的数值即可求得该失调

量对系统像差的影响权重。表 1 为次镜与三镜光轴方向平移对应系统各个视场的像差变化值, 从表中可以看出次镜的 Z 向平移相较三镜要敏感得多, 所以在系统装调初始时应该以次镜调节作为主要的校正手段。

表 1 次镜和三镜 Z 向平移对系统像质的影响

Tab.1 Influence of secondary-mirror and third-mirror translation along Z direction on system aberration

	Secondary-mirror moves 0.05 mm in the Z direction			Third-mirror moves 0.05 mm in the Z direction		
	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV
Z ₅	-0.007 9	0.081	0.081	0.006 5	-0.065 8	-0.065 8
Z ₆	0	-0.056	0.056	0	0.045 5	-0.045 5
Z ₇	0	-0.025 7	0.025 7	0	0.069 7	-0.069 7
Z ₈	0.007 2	0.008 1	0.008 1	-0.020 2	-0.021 7	-0.021 7
Z ₉	0.025 3	0.026 3	0.026 3	-0.005 1	-0.004 9	-0.004 9

在大致调节完 Z 向平移的失调后, 需进一步分析次镜与三镜的 X、Y 向的平移对系统全视场像质的影响, 分析结果在表 2、表 3 中给出。从表 2、和表 3 的对比中不难看出, 在反射镜 X、Y 向平移对系统像质影响中, 次镜仍旧比三镜要敏感得多, 且从表中数据可以得知 X、Y 向的平移只对水平或垂直方向的像散有较大影响, 装调过程可以以此为指导进行。

表 2 次镜 X、Y 向平移对系统像质的影响

Tab.2 Influence of secondary-mirror translation along X direction or Y direction on system aberration

	Secondary-mirror moves 0.02 mm in the X direction			Secondary-mirror moves 0.02 mm in the Y direction		
	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV
Z ₅	-0.000 2	0.027 1	-0.027 2	0.007 7	0.008 1	0.008 1
Z ₆	-0.007 4	-0.009 4	-0.009 3	0	0.025 9	-0.025 9
Z ₇	-0.110 2	-0.112 5	-0.111 8	0	-0.002 6	0.002 6
Z ₈	0	0	0	-0.109 3	-0.115 7	-0.115 7
Z ₉	-0.000 1	-0.000 7	0.000 6	0	0	0

表 3 三镜 X、Y 向平移对系统像质的影响

Tab.3 Influence of third-mirror translation along X direction or Y direction on system aberration

	Third-mirror moves 0.5 mm in the X direction			Third-mirror moves 0.5 mm in the Y direction		
	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV
Z ₅	0.000 9	-0.028 4	0.03	-0.006 9	-0.005 2	-0.005 2
Z ₆	0.005 9	0.012 5	0.012 5	0	-0.022 6	0.022 6
Z ₇	-0.073 5	-0.071 3	-0.070 6	0	-0.003 6	0.003 6
Z ₈	0	-0.001 8	0.001 9	-0.072 4	-0.078 8	-0.078 8
Z ₉	0	-0.001 3	0.001 2	0.000 3	0.000 3	0.000 3

分析过次镜、三镜平移对系统像质的影响后, 还需要分别对其绕 X、Y 轴的偏转角影响进行分析。表 4、表 5 中分别给出了次镜和三镜倾斜对系统全视场各项初级像差的影响。从分析数据可以得出, 反射镜的倾斜会导致系统边沿视场的某一项像散向不同的方向变化, 同时还会带来全视场某一项彗差同向变化, 因此, 在系统边沿视场存在符号不一致的像散时应该考虑调节反射镜的倾斜。同样的, 在反射镜倾斜对像质的影响上, 次镜仍旧比三镜要敏感。

表 4 次镜倾斜对系统像质的影响

Tab.4 Influence of secondary-mirror tilt on system aberration

	Secondary-mirror rotates 0.005° around the X axis			Secondary-mirror rotates 0.005° around the Y axis		
	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV
Z ₅	-0.035 7	-0.039 5	-0.039 5	-0.000 2	0.122 1	-0.121 9
Z ₆	0	-0.122 1	0.122 1	-0.035 7	-0.039 6	-0.039 4
Z ₇	0	0.002 3	-0.002 3	-0.087 4	-0.088 4	-0.087 8
Z ₈	0.087 0	0.091 7	0.091 7	0	-0.000 2	0.000 2
Z ₉	-0.000 2	-0.000 2	-0.000 2	-0.000 1	-0.000 7	0.000 6

表 5 三镜倾斜对系统像质的影响

Tab.5 Influence of third-mirror tilt on system aberration

	Third-mirror rotates 0.005° around the X axis			Third-mirror rotates 0.005° around the Y axis		
	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV
Z ₅	0.021 6	0.024 2	0.024 2	0.000 1	-0.076 2	0.076 4
Z ₆	0	0.075 7	-0.075 7	0.021 6	0.025	0.025
Z ₇	0	0.000 3	-0.000 3	-0.005 5	-0.005 4	-0.005 4
Z ₈	0.005 4	0.006 3	0.006 3	0	-0.000 2	0.000 2
Z ₉	0	-0.000 1	-0.000 1	0	-0.000 1	0.000 1

2.2 系统光学元件面型误差分析

通过将各个反射镜在承受结构应力下改变的面型参数代入到光学设计软件中, 计算可以得出各反射镜不同像差对系统像质的影响。从上文的分析结果可知通常由装调应力导致的面型误差以像散为主, 故分析主、次镜面型 0° 和 90° 像散以及 45° 或 135° 像散变化对系统各视场的像质影响, 结果如表 6、表 7 所示。从变化数据可以看出, 主镜的 0° 和 90° 像散的变化主要导致系统全视场 Z₅ 项像散发生变化, 同时还会影响全视场的球差。而 45° 或 135° 像散仅导致系统全视场 Z₆ 项的像散变化。且从变化比例来看, 主镜的面型变化对系统像差的影响比次镜要更加敏感。

表 6 主镜面型变化对系统各视场像质的影响

Tab.6 Influence of primary-mirror's surface on system aberration

	0° or 90° astigmatic coefficient changed -0.05λ			45° or 135° astigmatic coefficient changed -0.05λ		
	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV
Z ₅	-0.115 8	-0.115 3	-0.116 9	-0.003 8	-0.003 5	-0.005 2
Z ₆	-0.006 1	-0.005 5	-0.004 3	-0.107 5	-0.106 4	-0.106 1
Z ₇	-0.003 6	-0.004 1	-0.002 2	-0.000 4	-0.000 8	0.000 7
Z ₈	0.014 8	0.019 1	0.022 5	0.002 2	0.006 1	0.009 7
Z ₉	0.026 3	0.012 1	0.018 8	0.006 6	-0.007 8	-0.001 3

表 7 次镜面型变化对系统各视场像质的影响

Tab.7 Influence of secondary-mirror's surface on system aberration

	0° or 90° astigmatic coefficient changed -0.05λ			45° or 135° astigmatic coefficient changed -0.05λ		
	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV	Center area of FOV	+1.5° area of FOV	-1.5° area of FOV
Z ₅	0.067 9	0.067 9	0.069 4	0.002 0	0.005 2	0.003 5
Z ₆	-0.000 9	-0.010 9	0.007 8	-0.068 9	-0.078 7	-0.060 1
Z ₇	0.005 1	-0.001 1	0.003 8	0.005 2	-0.001 2	0.004 1
Z ₈	0.005 5	0.003 5	-0.002 5	0.005 5	0.003 2	-0.002 4
Z ₉	-0.022 3	0.004 1	-0.009 5	-0.022 2	0.004 1	-0.009 5

2.3 系统像差分析

镜头装调结果以系统各视场波像差的 RMS 值为评价标准, 而镜头装调过程中系统波像差的 RMS 值主要由 Zernike 系数的 Z₅~Z₉ 项决定, 镜头三个视场均需符合要求, 则最终需要满足的结果为 15 项。从上述分析中可得: 影响系统波像差的变量项包括次镜的平移和倾斜、三镜的平移倾斜、次镜面型误差和主镜面型误差等总 14 项因素, 从分析的数据中可以计算得出各项变量的系数, 用方程式即可描述这 14 个变量与 15 项结果之间的映射关系:

$$Z_{ij}=A_{ij} \times SD_x + B_{ij} \times SD_y + C_{ij} \times SD_z + D_{ij} \times ST_x + E_{ij} \times ST_y + F_{ij} \times TD_x + G_{ij} \times TD_y + H_{ij} \times TD_z + I_{ij} \times TT_x + J_{ij} \times TT_y + K_{ij} \times SA_1 + L_{ij} \times SA_2 + M_{ij} \times PA_1 + N_{ij} \times PA_2 \quad (2)$$

式中: Z_{ij} 为系统波像差 Zernike 系数中 i 视场的第 j 项值; A_{ij}~N_{ij} 分别代表不同变量对 i 视场第 j 项像差的影响因子, 均可通过分析数据得到确定值; SD_x、SD_y 和 SD_z 分别代表次镜在 X、Y、Z 向的平移量; ST_x、ST_y 分别代表次镜绕 X、Y 轴旋转的角度; TD_x、TD_y 和 TD_z 分别代表三镜在 X、Y、Z 向的平移量; TT_x、TT_y 分别代表三镜绕 X、Y 轴旋转的角度。

镜头装调指标要求系统波像差的 RMS 值 ≤ 0.06λ, 在仅考虑初级像差的前提下, 使用干涉仪软件仿真(如图 5 所示)可推算出系统各视场像差所对应的 Zernike 系数平均值应该在 0.068 以下, 即

$$Z_{ij} \leq 0.068 \quad (3)$$

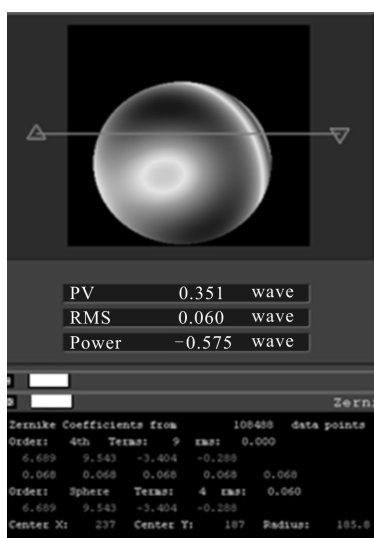
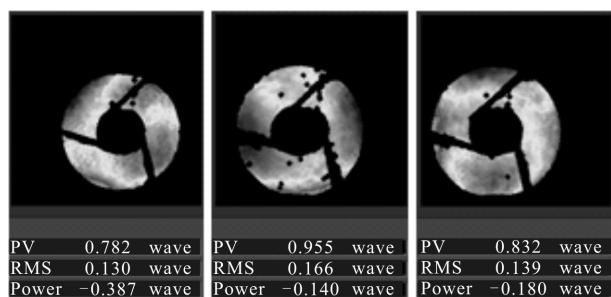


图 5 使用测量软件推导方程边界值

Fig.5 Deriving boundary values of equations using measurement software

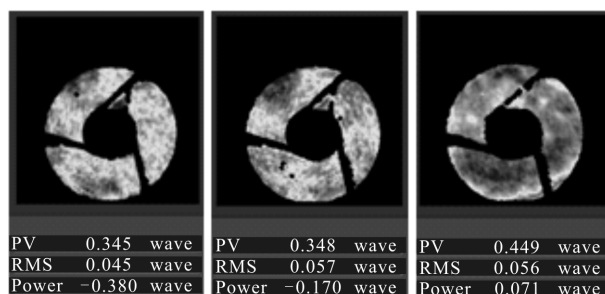
上述方程组可以用矩阵的形式表示为 $A_{m \times n} X = \Delta Z$, 若 Z_{ij} 为镜头实测值, 那么就有 $Z_{ij} + \Delta Z_{ij} \leq 0.068$, 即 $A_{m \times n} X + Z_{ij} \leq 0.068$, 解该超定方程组即可得到其最小二乘解。式中 $A_{m \times n}$ 为 m 列、 n 行的矩阵, 代表调节量与 Zernike 系数间的关系; X 为各项调节量; ΔZ 为调节后各视场的 Zernike 系数变化值。

依据方程式的最小二乘解对镜头进行针对调校, 即可迅速地收敛系统的各项像散。图 6(a) 为某商业遥感相机进行初步装调后, 检测系统各视场波像差所得的结果。通过采用该方法进行计算并依据计算结果进行装调, 得出需调节次镜 Z 向平移 0.126 mm、次镜 X 向平移 -0.020 mm、次镜 Y 向平移 -0.019 mm、次镜绕 Y 轴倾斜 0.034° 以及三镜向 Z 向平移 0.021 mm, 调节量的方向参照图 3 的坐标系。通过调校后, 系统



(a) 调节前各个视场的波像差

(a) Wave aberration of each field of view before alignment



(b) 调节后各个视场的波像差

(b) Wave aberration of each field of view after alignment

图 6 对比调节前后系统的波像差

Fig.6 Contrast before and after alignment system wave aberration

波像差迅速收敛, 结果如图 6(b) 所示。结果显示该方法能够准确、有效地指导镜头装调过程, 为镜头装调提供了一种快捷有效的方法。

3 结论

随着我国对地观测需求的扩大, 星载遥感器的研制也日趋批量化, 遥感相机的镜头装调不仅要求高精度还要求高效率^[8-10]。文中介绍了一种基于像差分析和光学仿真的镜头装调方法, 通过对镜头中各光学元件的失调量和面型误差分析, 确定其影响系统像差的权重, 由此得出两者之间的关联方程组, 根据方程所得结果指导装调过程。该方法能够为高精度、批量化镜头装调提供明确的指导方向, 准确定位失调量和装调过程中的面型偏差, 可在确保装调精度的情况下提升装调效率。

参考文献:

- [1] Dong Xuyong, Li Xin, Zhou Fengli, et al. Alignment technology of the Cassegrain reflector with small F -number [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40 (9): 1730 - 1733. (in Chinese)
董续勇, 李辛, 周凤利, 等. 小 F 数卡塞格林系统装调技术 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(9): 1730-1733.
- [2] Duan X T, Bai J G, Zhou R K. An experimental study on the image quality loss of an objective caused by assemblage stress[C]//SPIE, 2006, 6149: 61493DI-5.
- [3] Daisuke Miyazaki, Yuji Ohno, Kenji Matsushita, et al. Alignment-free optical modules using solder-bump-bonding technique for free-space optical interconnections [J]. *Optical Review*, 2008, 15(1): 19-25.

- [4] Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang, et al. Aberration properties of decentered and titled optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(11): 1658–1662. (in Chinese)
杨新军, 王肇圻, 母国光, 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性[J]. *光子学报*, 2005, 34(11): 1658–1662.
- [5] Pang Zhihai, Fan Xuewu, Ma Zhen, et al. The computer aided alignment study of three-mirror off-axis field bias optical system[C]//SPIE, 2012, 8417: 1–5.
- [6] Schmid T, Thompson K P, Rolland J P. Alignment induced aberration fields of next generation telescopes [C]//SPIE, 2008, 7068: 70680E1–70680E7.
- [7] Thompson K P. Description of the third -order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22(7): 1389–1401.
- [8] Gong Dun, Tian Tiejun, Wang Hong. Computer-aided alignment of off-axis three-mirror system by using Zernike coefficients [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1754–1758. (in Chinese)
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): 1754–1758.
- [9] Yue Liqing, Zhang Jiyou. Alignment method of axis angle and linear array parallelism for three-line array mapping camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2012, 33(3): 35–40. (in Chinese)
岳丽清, 张继友. 三线阵相机视轴夹角及线阵平行性装调测试[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(3): 35–40.
- [10] Guo Xiarui, Liao Zhibao, Wang Chunyu, et al. Aberration and alignment quality investigation of space transmission optical system with centering error of optical axes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 436–442. (in Chinese)
郭夏锐, 廖志波, 王春雨, 等. 光轴一致性误差对空间透射式系统像差和质量的影响 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 436–442.