

一种易检测易装调离轴三反光学系统的设计

张华卫, 刘 波, 李胜男

(四川长虹电子科技有限公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 离轴三反光学系统具有大口径、大视场、传输效率高以及没有色差等优点, 易于实现多谱段共孔径。介绍了一种离轴三反系统的设计, 其工作于红外中波 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和红外长波 $8\sim 10\ \mu\text{m}$ 双波段, 口径 300 mm , F 数为 3。设计中充分考虑加工检测和装调的易实现性, 特点为次镜采用球面, 主镜和三镜共面, 并且整个系统没有高次非球面; 选取合理的反射镜和结构件材料, 使系统具有良好的高低温环境适应性。

关键词: 易于检测; 易于装调; 离轴三反系统; 红外双波段; 共孔径

中图分类号: TP73, TH703

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2016)05-0384-05

Optical Design of an Off-axis Three-mirror System Easy to Test and Assemble

ZHANG Huawei, LIU Bo, LI Shengnan

(Sichuan Changhong Electronic Technology Co. Ltd, Mianyang 621000, China)

Abstract: Off-axis three-mirror system has the advantages of large aperture, large field of view, high transmission efficiency and achromaticity, so it's easy to achieve co-aperture in wide wave band. An off-axis three-mirror system with 300 mm aperture and F/# 3 is introduced, which works in mid-wave ($3\sim 5\ \mu\text{m}$) and long wave ($8\sim 10\ \mu\text{m}$) IR band. It is considered adequately in design that the system will be easy to test and assemble. The system can well adapt wide environment temperature change by choosing right materials.

Key words: easy to test, easy to assemble, off-axis three-mirror system, dual IR band, co-aperture,

0 引言

本文根据单位自研项目撰写。该项目要求设计适用于红外中波 ($3\sim 5\ \mu\text{m}$) 和红外长波 ($8\sim 10\ \mu\text{m}$) 光学系统, 焦距为 900 mm , 口径 300 mm , F 数为 3, 视场 $8^\circ\times 0.02^\circ$ 。

光学系统若要实现长焦距、大口径等特点, 常常要引入特殊的光学材料或更复杂的结构来消除二级光谱的影响^[1], 另外, 透长波的红外材料十分有限, 对红外中波和长波均有良好透过率的材料种类更少, 因此其应用受到一定的限制。反射式光学系统具有没有色差的优点^[2], 特别适用于多谱段共孔径的设计。反射式系统包括同轴式和离轴式两种, 同轴反射式系统有中心遮拦, 降低了理想衍射极限传递函数^[3], 也降低了系统传输效率, 离轴式反射系统具有无中心遮拦、结构布局灵活等优点, 因此越来越受到重视。

离轴三反系统通过各反射面的非球面设计及其

间隔等参数的调整, 可以达到消像差和平像场的要求, 而且系统的体积小、质量轻、热稳定性好。已有较多文献对离轴三反系统进行过研究^[4-7], 相对孔径较小, F 数一般不小于 4。

离轴三反光学系统一般有两种结构形式, 一种是二次成像离轴三反系统 (Cook TMA 系统), 孔径光阑在主镜上; 另一种是一次成像离轴三反系统 (Wetherell TMA 系统), 孔径光阑位于次镜上^[3]。二次成像的结构型式具有较好的消杂光能力, 但不易实现大视场, 且装调公差较为严格^[4]。一次成像可以设计出较大视场且易于装调, 本文采用一次成像设计。

1 设计理论和方法

首先进行一次成像同轴三反系统的设计, 取得初始结构后取其部分口径成为离轴三反系统。一次成像同轴三反系统示意图见图 1。主镜、次镜和三

收稿日期: 2015-11-27; 修订日期: 2015-12-04。

作者简介: 张华卫 (1981-), 男, 工程师, 主要从事红外光电系统光学设计和装调工作。

镜的顶点曲率半径分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 , 主镜与次镜、次镜与三镜的间隔分别为 d_1 、 d_2 , 系统像方焦距为 f' 。主镜、次镜及三镜的二次曲面系数分别为 e_1^2 、 e_2^2 、 e_3^2 , $-e^2$ 即 Zemax 软件中的二次曲面系数 $k^{[2]}$ 。

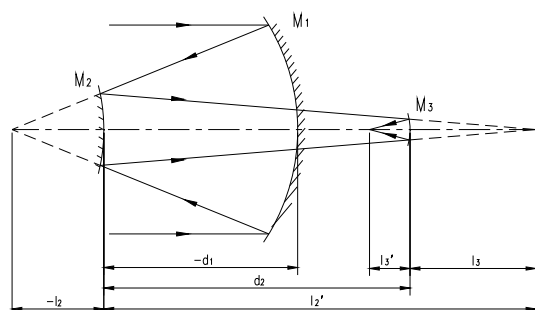


图1 一次成像同轴三反射镜

Fig.1 Once-imaging Co-axis three-mirror system

根据高斯光学理论可以得到次镜对主镜的遮拦比 α_1 和放大率 β_1 以及三镜对次镜的遮拦比 α_2 和放大率 β_2 的表达式, 也可以推导得到三级像差系数即球差 S_I 、彗差 S_{II} 、像散 S_{III} 和场曲 S_{IV} 的表达式, 公式详见参考文献[2]。

根据系统的像面位置、中心遮拦和工作距的要求, 调整 α_1 、 α_2 、 β_1 及 β_2 的值, 校正球差、彗差、像散和匹兹万场曲, 可有多组解^[5], 选出一组较为合理的解作为初始结构进行优化并离轴设计。

2 设计过程

设计光学系统要考虑技术指标是否满足要求, 也要考虑是否容易实现以及成本的高低。离轴三反光学系统的装调一般采用边装调边检测的模式, 即以某反射镜为基准(一般是口径较大的主镜), 调整另外两块反射镜沿 X 、 Y 、 Z 方向的平移和绕 X 、 Y 、 Z 轴的倾斜(共 12 个调整自由度), 同时观察像面的干涉图像, 以干涉图像最佳为判断依据。由于离轴反射镜没有明确的可利用的光学基准, 调整具有相当的盲目性, 因此调整自由度越多, 越难于调试到理想的成像质量, 并且相应的调整装置的设计难度与制造成本也很高, 系统可靠性差。

本文着重从易检测和易装调方面考虑系统的设计, 具体有如下 4 点:

1) 主镜和三镜共面设计。将主镜和三镜设计为共面, 可以以主三镜共同体为基准, 调整次镜的平移和倾斜, 整个系统仅需调整 6 个自由度, 大大提高系统的可达性; 主三镜共面设计后进行数控一体化成型, 可缩短加工周期; 主三镜共面后其支撑结构将合为一个整体, 减重的同时提高了系统的可靠性。

根据上述分析, 得到如下附加约束条件。

主镜和三镜共面, 即令 $d_1 + d_2 = 0$, 结合参考文献[2]的公式推导可以得到:

$$\beta_1 = -\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1(1 - \alpha_2)} \quad (1)$$

另外, 一般系统要求像面是平的, 即 $S_4 = 0$, 推导可以得到:

$$\beta_2 = \frac{1}{\alpha_2 + \alpha_2\beta_1 - \alpha_1\alpha_2\beta_1 - 1} \quad (2)$$

进行上述推导, 仅需给定 f' 、 α_1 、 α_2 即可计算得到系统初始结构。

2) 孔径离轴和视场离轴结合的设计。由于要求系统口径 300 mm, 属于较大口径, 考虑到次镜对主镜不能产生光线遮拦, 主镜的孔径离轴量应大于 300 mm, 但是离轴量太大会导致面型斜率变化剧烈, 带来加工的难度, 同时增加整个系统的体积, 这对系统的轻量化和小型化以及主三镜共面设计是不利的, 因此设计时考虑孔径离轴和视场离轴结合, 即系统接收轴外视场的光线, 主光线与光轴的夹角不为 0° 。视场离轴设计以主镜和三镜尽量靠近又不相互拦光为准则。

3) 次镜设计为球面。在现代光学检测中, 凸非球面的检测一直是一个难点^[8], 而离轴三反光学系统中的次镜往往设计为凸非球面。反射凸非球面的检测方法主要有无像差点法、零位补偿法和计算全息图法(CGH)3种。无像差点法检验的示意图见图2, 其缺点是 Hindle 球或者辅助镜面的口径往往是待测镜面的几倍, 而且系统存在一定的遮拦^[9]。零位补偿法的补偿器有时本身可能还含有非球面元件, 又增加了加工和检测难度。CGH 法可以较好地实现对非球面的检测, 但是需要高精度的全息样板制作设备。本文设计的是大口径系统, 为了降低检测和装调难度, 将次镜设计为球面, 可用干涉仪方便地进行检验。若根据像差公式求解 $e_2^2 = 0$, 需多次调整 α_1 、 α_2 、 β_1 及 β_2 的值, 较为繁琐, 因此采用在软件中优化的方法将 e_2^2 优化到 0。

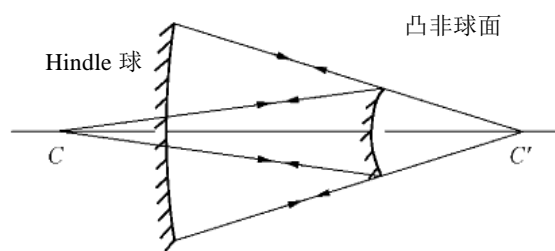


图2 凸非球面无像差点检验示意图

Fig.2 Sketch of convex asphere anastigmatic null test

4) 无高次非球面。高次非球面具有优异的轴外像差校正能力,随着加工手段的进步,高次非球面的应用越来越广泛。然而面型越复杂,对检测手段的要求也就越高,特别是对大口径离轴反射镜。使用常用的零位补偿法进行检测,由于不能单独测量光学补偿器的补偿效果,因此较难评判引入的系统误差,增加了检测的不确定性。因此从易检测易装调的角度考虑,在保证设计质量的前提下,本系统中不使用高次非球面,可进一步提高系统的可达性、降低加工检测成本。

综合像面位置和结构空间等因素后,令 $f' = -900$, $\alpha_1 = 0.45$, $\alpha_2 = 1.45$, 将初始结构参数公式和像差公式输入到 Matlab 软件中求解,程序如下:
 $f = -900$;
 $a1 = 0.45$;
 $a2 = 1.45$;
 $b1 = (a1 - 1)/(a1 * (1 - a2))$;
 $b2 = 1/(a2 + a2 * b1 - a1 * a2 * b1 - 1)$;
 $r1 = 2 * f / (b1 * b2)$;
 $r2 = 2 * a1 * f / (b2 * (1 + b1))$;
 $r3 = 2 * a1 * a2 * f / (1 + b2)$;
 $d1 = r1 * (1 - a1) / 2$;
 $d2 = r1 * a1 * b1 * (1 - a2) / 2$;
 $A = [b1^3 * b2^3, -a1 * b2^3 * (1 + b1)^3, a1 * a2 * (1 + b2)^3; 0, -(a1 - 1) * b2^3 * (1 + b1)^3 / (4 * b1 * b2), (a2 * (a1 - 1) + b1 * (1 - a2)) * (1 + b2)^3 / (4 * b1 * b2); 0, -b2 * (a1 - 1)^2 * (1 - b1)^3 / (4 * a1 * b1^2), (a2 * (a1 - 1) + b1 * (1 - a2))^2 * (1 + b2)^3 / (4 * a1 * a2 * b1^2 * b2^2)]$;
 $b = [-a1 * b2^3 * (1 + b1) * (1 - b1)^2 + a1 * a2 * (1 + b2) * (1 - b2)^2; -(a1 - 1) * b2^3 * (1 + b1) * (1 - b1)^2 / (4 * b1 * b2) + (a2 * (a1 - 1) + b1 * (1 - a2)) * (1 + b2) * (1 - b2)^2 / (4 * b1 * b2) + 1/2; -b2 * (a1 - 1)^2 * (1 + b1) * (1 - b1)^2 / (4 * a1 * b1^2) + (a2 * (a1 - 1) + b1 * (1 - a2))^2 * (1 + b2) / (4 * a1 * a2 * b1^2 * (1 + b2)^2) / (4 * a1 * a2 * b1^2 * b2^2)]$;
 $E = A / b$;
 $E(1) = E(1) + 1$ 。

计算得到同轴三反系统初始结构的全部参数见表 1,初始结构二维图和性能见图 3,可见仅按轴上像差求解的初始结构的性能并不理想。

表 1 同轴三反系统初始结构的参数

Table 1 Initial configuration parameter of Co-axis three-mirror system

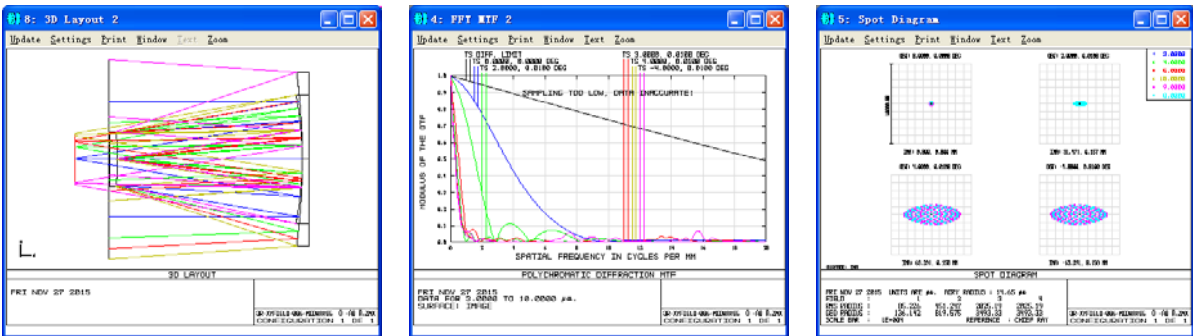
	主镜	次镜	三镜
曲率半径/mm	-1733.7	-570.23	-849.70
间距/mm	-476.78	476.78	-587.72
二次曲面系数	-5.5349	-5.8560	-1.4781

将上述初始结构参数输入 Zemax 软件,以次镜为系统光阑,设置孔径离轴和视场离轴并进行优化。在优化的过程中,不能将离轴量以及倾斜量作为优化变量,否则 Zemax 光学设计软件会默认减少系统的离轴量及倾斜量,即趋向共轴系统,以此达到提高像质的要求,因此离轴量与倾斜量都需要用手动优化^[6]。以光线无遮拦、镜片口径最小和结构紧凑为原则,保证主镜和三镜共面,并逐步将次镜从双曲面优化为球面,适当调整次镜的倾斜,最终得到性能优异的离轴三反光学系统。

3 设计结果及分析

3.1 设计结果

设计完成的离轴三反光学系统孔径离轴量为 215 mm,视场离轴量为 8.5°,主镜、次镜和三镜的有效口径分别为 450 mm×309 mm、 $\phi 147$ mm、367 mm×220 mm,系统整体外形尺寸为 676 mm×589 mm×450 mm,三维图和性能分别见图 4~图 7。



(a) 二维图 2D layout (b) 传函 FFT MTF (c) 点列图 spot diagram

图 3 同轴三反系统结构及性能 Fig.3 2D layout and performance of Co-axis three-mirror system

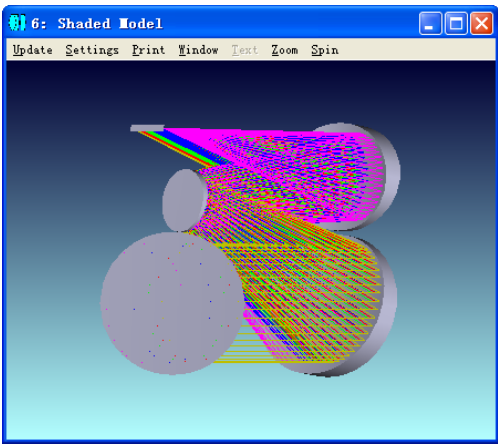


图4 光学系统三维图
Fig.4 3D layout

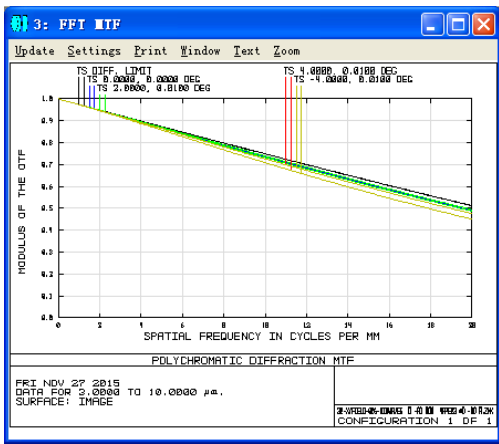


图5 光学系统传函
Fig.5 FFT MTF

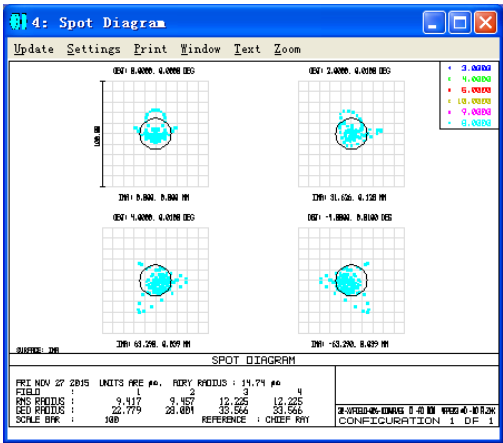


图6 光学系统点列图
Fig.6 Spot diagram

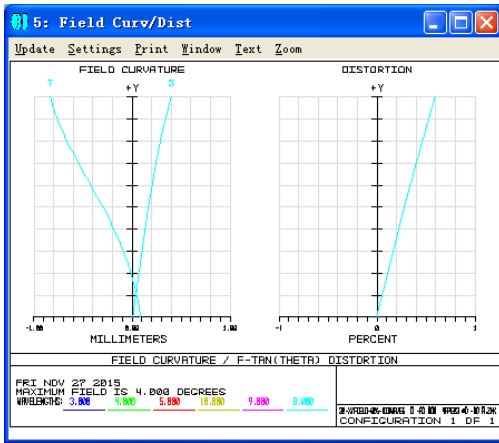


图7 光学系统场曲与畸变
Fig.7 Field curve/Dist

由图可以看出离轴三反光学系统结构紧凑；传函接近衍射极限，在 20 lp/mm 处各视场传函值大于 0.45；弥散均集中在艾利斑直径内，rms 半径最大仅 12.2 μm；畸变小于 0.6%。

3.2 公差分析

该离轴三反光学系统应用于红外中长波波段，对离轴反射镜面型要求相对较低，面型 PV 公差值和 rms 公差值分别设置为λ/2 和 λ/10；由于离轴反射镜的相互距离不易测量，因此距离和平移公差设置为 0.2 mm；倾斜公差设置为 1'。采用 Sensitivity 方式对中心视场 20 lp/mm 的衍射传函（MTF）按表 2 所给的约束条件进行第一次公差分析。

表 2 公差约束条件		Table 2 Tolerance data		
面型 PV 值/ λ=632.8 nm	面型 rms 值/ λ=632.8nm	距离	零件	零件
0.5	0.1	0.2 mm	0.2 mm	1'

中心视场理论传函值为 0.485。
先按以主镜和三镜非一体化设计进行分析，共 12 个调整自由度。结果是评估传函值为 0.408，蒙

特卡洛分析 90%以上概率的传函值是 0.410，可见性能下降较多。

再按主镜和三镜共面一体化设计进行分析，仅 6 个调整自由度。结果是评估传函值为 0.475，蒙特卡洛分析 90%以上概率的传函值是 0.473，可见传函得到了大幅度的提高，非常接近理论值 0.485。

因此，采用本文所述的易检测易装调设计方法进行设计，可以得到性能极高的离轴三反光学系统，并且由于调整装置减少，也提高了系统的可靠性。

3.3 无热化设计及热分析

对于反射式系统而言，温度场的变化将导致反射镜面型及光学间隔的变化^[10]。要提高系统可靠性，进一步降低装调难度，减少活动机构，可考虑系统的被动无热化设计，即在环境温度发生变化时系统各部分可以等比例膨胀或缩小，像面始终保持清晰，免于调焦。在环境变化剧烈的环境中，熔融石英和微晶玻璃具有很好的保持面型的能力，若反射镜采用熔融石英时，结构体最好采用殷钢，因为熔融石英和殷钢的热膨胀系数偏差较小，熔融石英

为 $0.5\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ，殷钢为 $1.26\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

该系统要求的工作温度为 $-40^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ ，在此温度范围内对系统进行了热分析，见图8和图9。可见在 100°C 的温差范围内离轴三反光学系统的MTF均接近衍射极限。

4 结论

本文以同轴三反系统为起点，在设计过程中始终强调易检测性、易装调性和高可靠性，通过主镜

和三镜共面、视场离轴和孔径离轴结合、次镜使用易于加工检测的凸球面和被动无热化等设计方法，最终实现了口径300 mm，F数为3的红外中长波共孔径的紧凑型离轴三反光学系统。对系统进行了公差分析，结果表明该设计所需调整的自由度少，易于实现并保证系统的高性能；对系统进行了热分析，采用合理匹配的镜片和结构材料，可以在 $-40^{\circ}\text{C}\sim +60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内保持清晰成像。

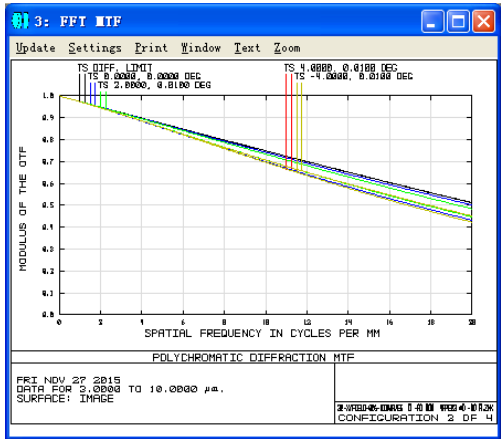


图8 -40°C 的传函 Fig.8 MTF at -40°C

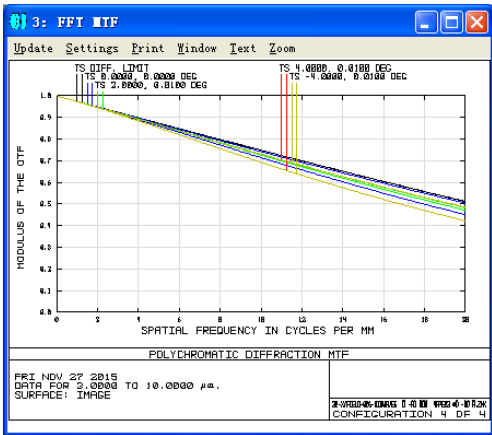


图9 $+60^{\circ}\text{C}$ 的传函 Fig.9 MTF at $+60^{\circ}\text{C}$

参考文献：

[1] 汪大宝, 姜凯, 赵士民, 等. 大口径离轴中波红外连续变焦系统设计[J]. 光子学报, 2014, 43(6): 0622004.
WANG Da-bao, JIANG kai, ZHAO shi-min, et al. Design of large aperture off-axis middle infrared continuous zoom lens[J]. ACTA OPTICA SINICA, 2014, 43(6): 0622004.

[2] 潘君骅. 光学非球面的设计与检验[M]. 苏州大学出版社, 2004.
PAN Jun-hua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.

[3] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究. 光学精密工程[J]. 2008, 16(11): 2164-2172.
HAN Chang-yuan. Study on optical system for compact imaging spectrometre[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(11): 2164-2172.

[4] 汤天瑾, 郑国宪. 轻小型高光谱成像仪前置望远系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(1): 43-48.
TANG Tian-jin, ZHENG Guo-xian. Design of fore telescope system for compact imaging spectrometer[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2015, 36(1): 43-48.

[5] 李欢, 向阳. 成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 500-504.
LI Huan, XIANG Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope systems of imaging spectrometer[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(3): 500-504.

[6] 梁宝雯, 吴晗平, 王华泽. 空间相机离轴三反红外光学系统设计[J]. 红外技术, 2013, 35(4): 217-222.
LIANG Bao-wen, WU Han-ping, WANG Hua-ze. Design of off-axial TMA infrared optical system for space camera[J]. Infrared Technology, 2013, 35(4): 217-222.

[7] 姚波, 袁立银, 亓洪兴, 等. 双通道成像光谱仪共用离轴三反射光学系统的设计[J]. 红外技术, 2013, 35(7): 419-424.
YAO Bo, YUAN Li-yin, QI Hong-xing, et al. Optical design of a dual-channel imaging spectrometer sharing the off-axis TMA system[J]. Infrared Technology, 2013, 35(7): 419-424.

[8] 姚劲刚, 胡文琦, 叶璐, 等. 凸非球面辅助面的背向零位检验分析[J]. 量子电子学报, 2014, 31(5): 520-524.
YAO Jin-gang, HU Wen-qi, YE Lu, et al. Convex asphere back null compensation testing with auxiliary surface[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2014, 31(5): 520-524.

[9] 薛栋林, 张忠玉, 郑立功, 等. 大口径碳化硅材料凸非球面反射镜的检验[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2491-2496.
XUE Dong-lin, ZHANG Zhong-yu, ZHENG Li-gong, et al. Testing methods for large aperture convex SiC asphere mirror[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(12): 2491-2496.

[10] 焦明印, 李元, 肖相国. 一种紧凑型离轴反射式多波段共用光学系统[J]. 红外技术, 2014, 36(12): 949-952, 981.
JIAO Ming-yin, LI Yuan, XIAO Xiang-guo. A compact off-axial reflective optical system for multispectral application[J]. Infrared Technology, 2014, 36(12): 949-952, 981.