

# 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  $300 \text{ mm}$ , 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  $300 \text{ mm}$  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  $900 \text{ mm}$ , 口径  $300 \text{ mm}$ , 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<sup>[1]</sup>, 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<sup>[2]</sup>, 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<sup>[3]</sup>, 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

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。

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<sup>[4-7]</sup>, 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<sup>[3]</sup>。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<sup>[4]</sup>。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

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  $k^{[2]}$ 。

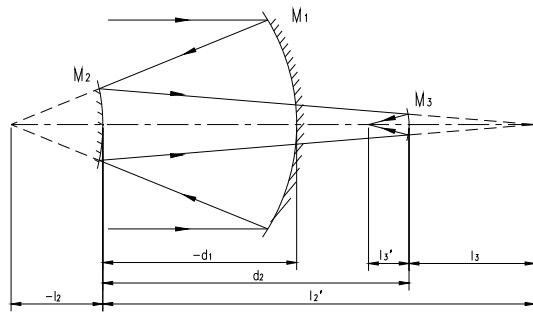


图 1 一次成像同轴三反射镜

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  $\alpha_1$  和放大率  $\beta_1$  以及三镜对次镜的遮拦比  $\alpha_2$  和放大率  $\beta_2$  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  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$  及  $\beta_2$  的值，校正球差、彗差、像散和匹兹万场曲，可有多组解<sup>[5]</sup>，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  $f'$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  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，主光线与光轴的夹具不为 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<sup>[8]</sup>，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<sup>[9]</sup>。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，可用干涉仪方便的进行检验。若根据像差公式求解  $e_2^2=0$ ，需多次调整  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$  及  $\beta_2$  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。

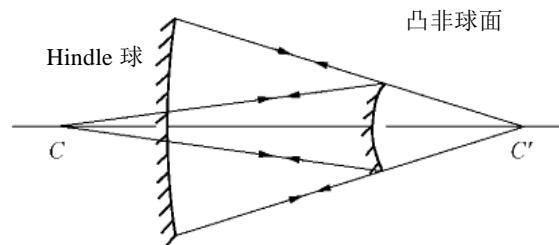


图 2 凸非球面无像差点检验示意图

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-b1)^2/(4*a1*a2*b1^2*b2^2))];
```

$$-a2)^2*(1+b2)*(1-b2)^2/(4*a1*a2*b1^2*b2^2) + b2*(a1-1)*(1-b1)*(1+b1)/(a1*b2) + (a2*(a1-1)+b1*(1-a2))*(1-b2)*(1+b2)/(a1*a2*b1*b2) + b1*b2-b2*(1+b1)/a1+(1+b2)/(a1*a2)];$$

$$E=A/b;$$

$$E(1)=E(1)+1.$$

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<sup>[6]</sup>。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、Φ147 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。

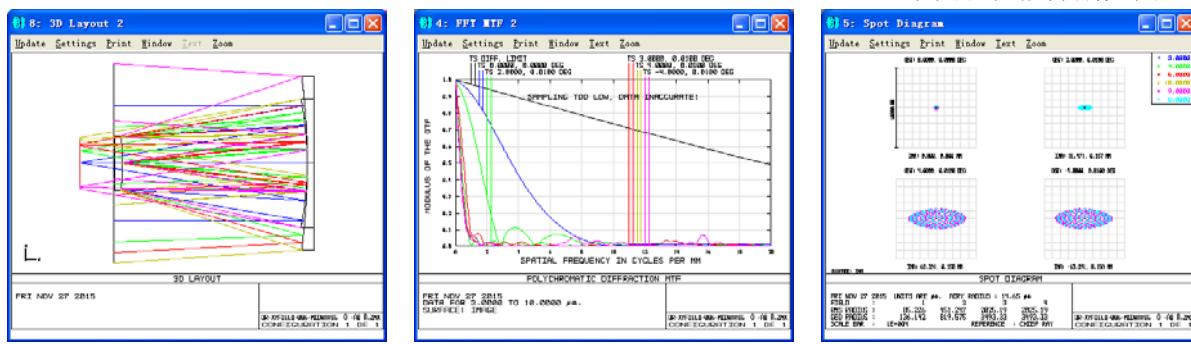


图 3 同轴三反系统结构及性能

Fig.3 2D layout and performance of Co-axis three-mirror system

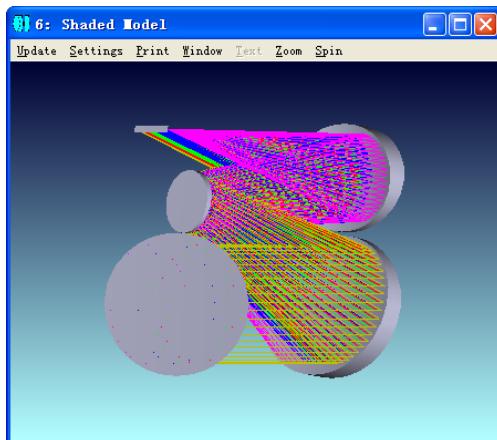


图4 光学系统三维图

Fig.4 3D layout

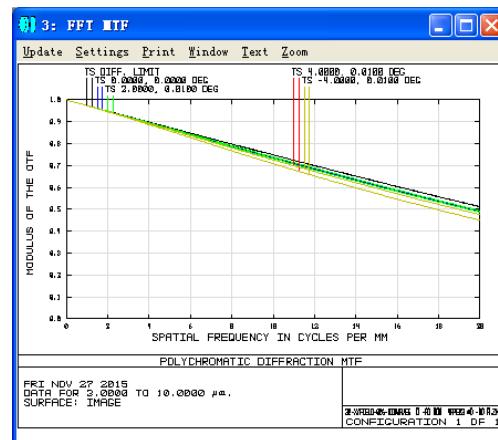


图5 光学系统传函

Fig.5 FFT MTF

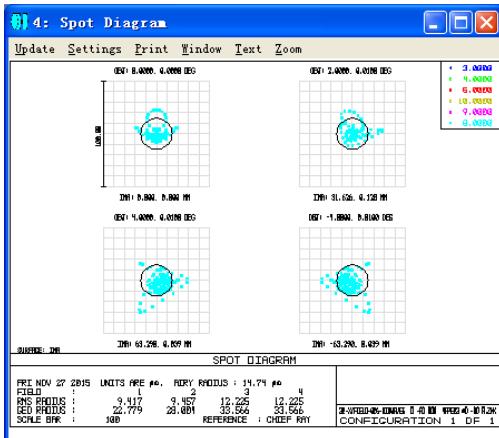


图6 光学系统点列图

Fig.6 Spot diagram

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  $\mu\text{m}$ ; 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  $\lambda/2$  和  $\lambda/10$ ; 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/ $\lambda=632.8 \text{ nm}$	面型 rms 值/ $\lambda=632.8 \text{ nm}$	距离 0.2 mm	零件 偏心 0.2 mm	零件 倾斜 1'
0.5	0.1			

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。

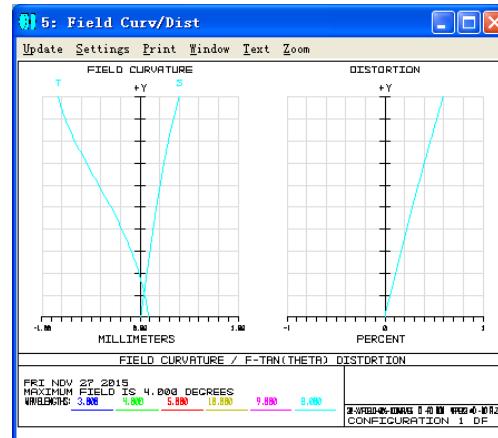


图7 光学系统场曲与畸变

Fig.7 Field curve/Dist

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<sup>[10]</sup>。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 $100^{\circ}\text{C}$ 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

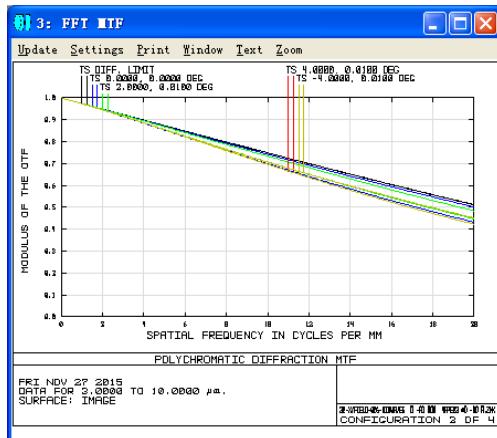


图8  $-40^{\circ}\text{C}$ 的传函 Fig.8 MTF at  $-40^{\circ}\text{C}$

## 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.

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 $300\text{ mm}$ , 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。

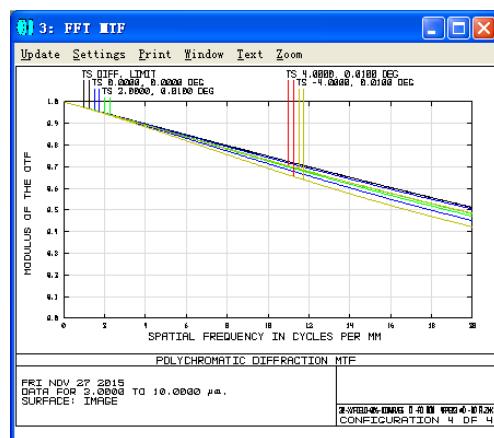


图9  $+60^{\circ}\text{C}$ 的传函 Fig.9 MTF at  $+60^{\circ}\text{C}$

- [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.