

文章编号: 0253-2239(2010)08-2383-04

# 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计

薛 慧

(南京电子技术研究所, 江苏 南京 210013)

**摘要** 完成了红外搜索与跟踪(IRST)系统中光学系统的设计,工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 。首先分析了IRST系统的特性,详细介绍了其光学系统的组成。系统结构采用卡塞格林反射式,通过折/衍混合元件校正剩余像差,完成了二次成像。通过简单机电方式补偿热差,使系统在 $-40\ ^\circ\text{C}\sim +60\ ^\circ\text{C}$ 温度范围内性能均接近衍射极限。通过对主镜和次镜加遮光罩的措施抑制系统杂散光,使红外探测系统的信噪比得以提高,图像对比度得到增强。实验结果表明,此系统性能良好。

**关键词** 成像系统;光学系统设计;卡塞格林;衍射光学元件;热平衡;杂散光抑制

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2383

## Optical Design of Infrared Search and Trace System

Xue Hui

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing, Jiangsu 210013, China)

**Abstract** A Cassegrain optical system of infrared search and trace (IRST) working at  $8\sim 12\ \mu\text{m}$  is introduced. After analyzing the characters of the IRST system, the compositions of the optical system are described. A diffractive optical element (DOE) is successfully introduced to the second imaging to correct ray aberrations, which makes the system working well at room temperature. In order to make the system work in a wide thermal environment, an electromechanical device is utilized to control the compensation lenses. To suppress the great amount of stray light, lens hood is set on the primary and secondary mirrors, which could eliminate stray light efficiently. Hence signal-to-noise ratio and contrast of the picture have been enhanced. The experiment shows that the system works well.

**Key words** imaging systems; design of optical system; Cassegrain; diffractive optical element (DOE); thermal balance; stray light reduction

## 1 引 言

红外搜索与跟踪(IRST)系统是利用目标自身的热辐射特征进行监视探测的无源探测系统,能够探测和跟踪低高空中和水面威胁目标,可用于雷达补盲,是一种重要的雷达辅助设备<sup>[1,2]</sup>。IRST系统的主要优点在于:1)无源探测,被动的工作方式;2)分辨率高;3)红外波谱可避免雷达在海面或接近海面的区域产生的多路径效应。

但是由于红外波长较长,普通玻璃对其透射率小,导致了红外光学系统的材料选择范围小,因此系统色差、热差较难消除。红外光学材料折射率温度系数较大,以常用的单晶锗为例,在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 大气

窗口,Ge的折射率温度系数 $dn/dt$ 为 $3.96\times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ ,而常用可见光玻璃K9的折射率温度系数为 $2.0\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ,前者是后者的将近200倍<sup>[3~5]</sup>。本文利用二元衍射元件的消色差、消热差特性提高系统成像性能。一般军用红外光学系统的工作环境温度范围为 $-40\ ^\circ\text{C}\sim +50\ ^\circ\text{C}$ ,这就意味着大温度范围的变化必然导致光学系统结构参数(包括曲率、厚度和折射率等)的变化,这将严重影响系统的成像质量,所以在系统中采用机械被动补偿方式进行热平衡设计。另一方面红外热图像表征景物的温度分布,是灰度图像,对人眼而言,分辨率低,所以在设计光学系统时,一定要尽量提高信噪比,抑制噪声,采

收稿日期: 2009-09-09; 收到修改稿日期: 2009-10-11

作者简介: 薛 慧(1984—),女,助理工程师,主要从事光学设计及光电图像处理等方面的研究。

E-mail: xuehui\_2001@163.com

取杂散光抑制措施,防止除视场内目标光线外的杂光进入系统,造成图像对比度下降。

### 2 光学系统组成

根据探测面的大小,  $F$  数以及指标要求的有效口径,确定光学系统的焦距及视场如下:

$$\frac{D}{f'} = \frac{1}{F}, \tag{1}$$

$$2\omega = \arctan \frac{t}{f'}, \tag{2}$$

式中  $D$  为有效口径,  $f'$  为系统焦距,  $1/F$  为系统相对孔径,  $\omega$  为系统的半视场角,  $t$  为探测器尺寸的一半。

光学系统结构如图 1 所示,主要由五块镜片组成,分别为系统头罩  $M_1$ ,主反射镜  $M_2$ ,次反射镜  $M_3$  及两块透射镜片  $M_4$  和  $M_5$ ,  $M_1$  为平板镜片,  $M_2$  为高次非球面,  $M_3$  为球面,它们实现光学系统的第一次成像;  $M_4$  和  $M_5$  完成第二次成像,  $M_4$  含二元光学衍射面,  $M_5$  含高次非球面。  $M_6$  为探测器窗口。探测器的冷屏被设计为整个光学系统的孔径光阑,也成为光学系统的出瞳,实现冷光阑效率 100%。

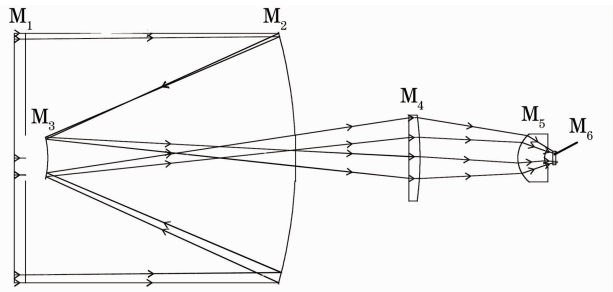


图 1 系统的光路设计

Fig. 1 Optical-path design of the system

光学系统从理论上达到了衍射极限。图 2 为系统的点列图 SPOT,可见弥散斑光点已远远小于艾里斑。图 3 为系统的传递函数(MTF)图,不论是轴上点还是轴外点,都几乎接近于衍射极限,空间频率

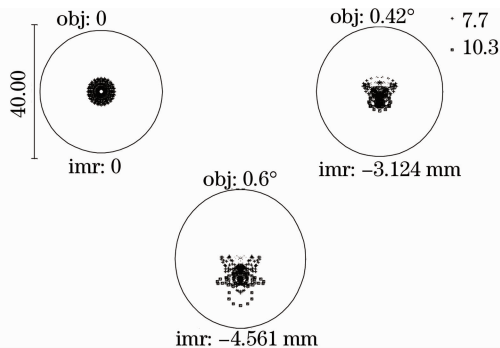


图 2 系统的点列图

Fig. 2 Spot diagram of the system

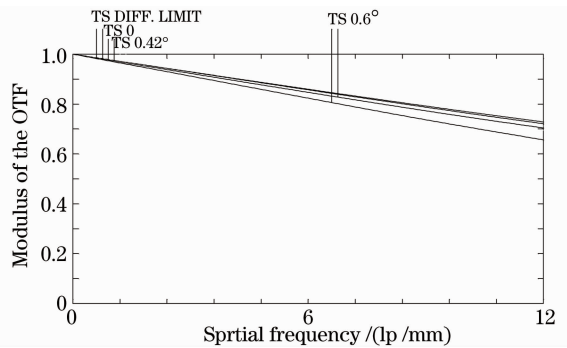


图 3 系统传递函数曲线

Fig. 3 MTF curve of the system

在 12 lp/mm 时均高于 0.7。

### 3 消色差设计

本方案采用折/衍/反混合光学系统原理,以获得结构简单、消色差及高透射率的光学系统。典型的卡塞格林系统主镜为抛物面,次镜为双曲面,这只能校正球差。如果将主镜也改为双曲面,则可校正两种像差,即球差和彗差,视场便可增大。但为了进一步增大视场,则还需校正场曲、像散和畸变。衍射光学元件在成像系统中所起的作用主要在于校正系统各种像差,改善光学系统的成像质量,并有利于简化系统结构、缩小体积和减轻重量<sup>[6,7]</sup>。

普通折射元件的色差是由光学材料的材料色散引起的,而衍射光学元件(DOE)的色差是由微结构衍射的波长依赖性引起的,其色散特性和材料特性正好相反。对 DOE,由其色散特性推导出来的等效阿贝常数  $\nu^D$  和部分色散系数  $p^D$  为

$$\nu^D = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \quad p^D = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_3}, \tag{3}$$

式中  $\lambda_1, \lambda_3$  为波段中选定消色差的两个波长,  $\lambda_2$  为中心波长。

对中远红外波段为  $\lambda_1 = 8 \mu\text{m}, \lambda_2 = 10 \mu\text{m}, \lambda_3 = 12 \mu\text{m}$ , 则  $\nu^D = -2.5, p^D = 0.5$ , 可见 DOE 的等效阿贝常数和光学材料的阿贝常数是异号的。

由于 DOE 具有负的阿贝常数,所以和传统的消色差透镜组相比有许多优点。传统的透镜消色差必须采用正负透镜组合,使得每块透镜的光焦度绝对值较大,这就给单色象差的校正带来困难,特别是对可供选择的材料很少的中红外和远红外波段,消色差更为困难。而对于折衍射混合透镜,因 DOE 的阿贝常数为一个很小的负值,所以折射透镜和 DOE 的光焦度同号,通常折射元件的光焦度略小于总光焦度,而衍射元件的光焦度非常小(这样的

DOE 光栅周期较大,容易加工),使得单色象差容易校正。另外,利用 DOE 校色差时,DOE 可加工在折射元件的某一面上,这样折射混合透镜的体积和重量相当于单透镜,所以利用 DOE 可简化光学系统,这对红外光学系统的设计有非常重要的意义。

衍射元件还具有负热差特性,可以抵消一部分热差,在光学系统中还可以提供非球面自由度,为系统设计提供变量,提高成像质量。

### 4 热平衡设计

系统的主镜材料为铝,次镜采用普通 K9 玻璃,镜筒材料为铝,后两块透射镜为 Ge,衍射元件虽然有负热差系数,但是由于其热常数与折射元件的热常数相比,其绝对值是很小的<sup>[8~10]</sup>,因此仅靠二元面来实现红外光学系统的无热设计是很困难或不可能的,当环境温度变化为 60℃ 时,系统 MTF 如图 4 和图 6 所示,系统性能严重恶化,所以必须对其采取热平衡措施。本文采用机械补偿方式,移动后两块 Ge 透镜,如图 1 所示,移动后两块透镜,会造成第 4 面,第 6 面,第 8 面的厚度发生变化,这里分别记为  $\Delta d_4, \Delta d_6, \Delta d_8$ ,将移动变量与环境温度之间建立函数关系,用电机控制镜头移动。经理论仿真计算,各面的变化量如表 1 所示,以 20℃ 为基准,以远离探测器为正,系统总长保持不变。

表 1 热补偿后系统各面的变化量

Table 1 Compensation value of each lens

$t / ^\circ\text{C}$	-40	-20	0	20	40	60
$\Delta d_4 / \text{mm}$	1.85	1.2	0.6	0	-0.6	-1.2
$\Delta d_6 / \text{mm}$	-2.4	-1.6	-0.8	0	0.8	1.6
$\Delta d_8 / \text{mm}$	0.65	0.4	0.2	0	-0.2	-0.4

用 Matlab 数据拟合,得函数式如下:

$$p(t) = -0.0306t + 0.6000, \quad (4)$$

$$q(t) = 0.0400t - 0.8000, \quad (5)$$

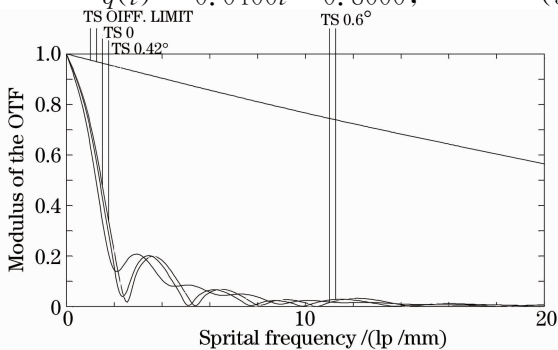


图 4 补偿前 -40℃ 时系统 MTF 图

Fig. 4 System MTF curve at -40 °C before thermal compensation

补偿前后的 MTF 图如图 4~7 所示,几乎达到衍射极限,满足使用要求。

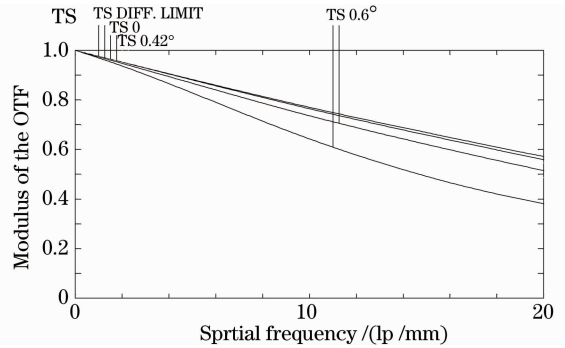


图 5 补偿后 -40℃ 时系统 MTF 图

Fig. 5 System MTF curve at -40 °C after thermal compensation

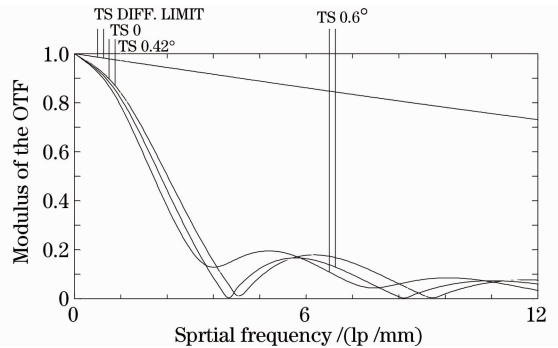


图 6 补偿前 +60℃ 时系统 MTF 图

Fig. 6 System MTF curve at +60 °C before thermal compensation

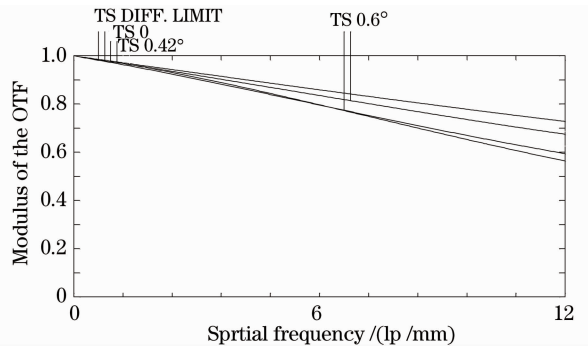


图 7 补偿后 +60℃ 时系统 MTF 图

Fig. 7 System MTF curve at +60 °C after thermal compensation

### 5 杂散光抑制

红外热图像表征景物的温度分布,是灰度图像,没有立体感,对人眼而言,分辨率和对比度低、视觉效果模糊,因此红外光学系统应对噪声有较强的抑制能力,以提高信噪比。设计光学系统时一个十分重要的问题就是排除杂散光的干扰,所希望的是只

接收到视场内的目标发出的辐射,但由于入瞳有一定大小,一部分视场外的杂散光也能进入物镜。这种杂散光照到系统内壁或零件边框上就引起闪耀或反射至红外接收器上,严重地影响目标像的对比度。对IRST系统来说,常有视场外的太阳背景辐射,若不加以消除,将无法工作。

杂光是指入射到光学系统内或在系统内产生的非成像光束。消杂光的目的是减弱或减少进入像面视场的杂光。杂光的危害是降低像的对比度。不同的光学系统有着不同的杂光来源,也对应着不同的消杂光措施。对于本系统采用的卡塞格林形式,经分析主要有三种杂光:

1) 不经主镜、次镜,由物空间直接射到或经过校正镜和场镜后射到像面的杂光,这是卡塞格林系统特有的;

2) 视场内的成像光束,不按成像光路、经镜面来回反射到像面的杂光;

3) 进入系统的,视场外的光线经筒壁漫反射而射到像面的杂光。

其中第二种杂光主要靠镀增透膜和提高镜面光洁度来消除,这在设计加工时已经考虑。系统在光学系统的筒壁上增加了螺纹,使第三种杂光经过筒壁时形成漫反射,从而有效地减少了最终到达像面的杂光。下面主要讨论如何消除第一类杂光。

如图8所示,作入瞳边缘光线 $A_1B_1C_1F'$ ,次镜边缘光线 $A_2B_2C_2F'$ , $A_2B_2$ 和 $B_1C_1$ 交于一点 $P$ , $B_2C_2$ 和 $C_1F'$ 交于一点 $Q$ ,为了遮住不经过主反射镜而直接射向像面的杂光,可以在次反射镜 $M_2$ 上加一个遮光罩 $A_2P$ ,在主反射镜 $M_1$ 上加一个遮光罩 $B_2Q$ 。遮光罩 $A_2P$ 和 $B_2Q$ 都不会阻碍轴向光束中除了中心遮光部分之外的成像光线到达像面。由于整个光学系统是旋转对称的,所以遮光筒 $A_2P$ 和 $B_2Q$ 相当于加在物镜上的不透明圆筒或圆台的侧面。

另外,衍射元件的引入会产生杂散光。但从能

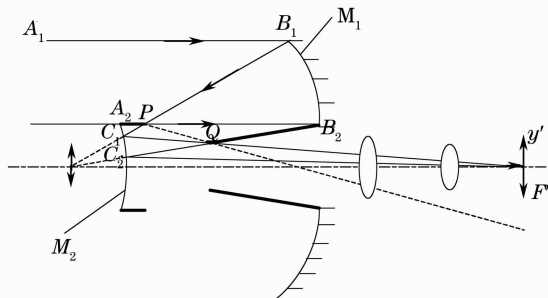


图8 物镜上遮光罩示意图

Fig. 8 Lens hood in the object lens

量角度分析,杂散光能量在总能量中的比值与波像差的均方值成正比,与入射光波长的四次方成反比,本系统工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ ,所以由衍射元件引起的杂散光很小,在这里不再讨论。

## 6 结 论

在IRST光学系统设计中,采用了机械式的被动消热差方式,并给出函数关系,使得系统在整个使用范围内都满足要求,并针对本系统提出了消除杂散光的措施,即在主镜和次镜上加遮光筒,从原理上完全消除了视场外的杂散光影响,从而提高了系统信噪比。

## 参 考 文 献

- Han Genjia. Present status and development trend of shipborn IRSTs[J]. *Modern Defence Technology*, 2007, **35**(3): 109~113  
韩根甲. 舰载红外搜索与跟踪系统的最新现状与发展趋势[J]. 现代防御技术, 2007, **35**(3): 109~113
- Wang Peng, Zhao Wencai, Hu Mingyong *et al.*. Design of catadioptric large aperture three group elements infrared zoom system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(5): 577~581  
王 鹏, 赵文才, 胡明勇 等. 折反式大口径三组元红外变焦距系统设计[J]. 光学学报, 2002, **22**(5): 577~581
- Zhao Xiuli. Design of Infrared Optical System [M]. Beijing: China Machine Press, 1986. 39~50  
赵秀丽. 红外光学系统设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1986. 39~50
- Yuan Xucang. Optical Design[M]. Beijing: Science Press, 1983. 109~120  
袁旭仓. 光学设计[M]. 北京:科学出版社, 1983. 109~120
- Pan Junhua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1475~1478  
潘君骅. 大口径红外成像系统的光学设计[J]. 光学学报, 2003, **23**(12): 1475~1478
- Fan Changjiang, Wang Zhaoqi, Wu Huanbao *et al.*. The design of infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1266~1270  
范长江, 王肇圻, 吴环宝 等. 红外双波段双层谐衍射光学系统设计[J]. 光学学报, 2007, **27**(7): 1266~1270
- Jiao Mingyin, Feng Zhuoxiang. Athermalized and achromatized refractive/diffractive infrared hybrid optical system [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(12): 1226~1229  
焦明印, 冯卓祥. 实现消热差和消色差的折衍混合红外光学系统[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(12): 1226~1229
- Guo Yonghong, Shen Mangzuo, Lu Zukang. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1392~1395  
郭永红, 沈忙作, 陆祖康. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计[J]. 光学学报, 2000, **20**(10): 1392~1395
- Zhang Yu, Yang Changcheng, Yang Kuntao. Design on athermal infrared diffractive/refractive hybrid optical system in  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(11): 1535~1538  
张 羽, 杨长城, 杨坤涛.  $8\sim 14\ \mu\text{m}$  波段折衍混合红外光学系统的热补偿设计[J]. 光学学报, 2005, **25**(11): 1535~1538
- Bai Jian, Sun Ting, Shen Yibing *et al.*. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(7): 997~1002  
白 剑, 孙 婷, 沈亦兵 等. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析[J]. 光学学报, 1999, **19**(7): 997~1002