

# 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计

曲贺盟<sup>1,2</sup> 张 新<sup>1</sup> 王灵杰<sup>1</sup> 张继真<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 光学系统先进制造技术中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 根据目前搜索和跟踪系统要求其红外成像光学系统具有高成像质量、超轻小型化和高温度适应性的特点。采用折反射式光学系统结构形式, 基于 J-T 制冷型  $320 \times 320$  凝视焦平面阵列探测器, 设计了一种大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统, 光学系统远摄比达到 0.6。采用光学被动消热差方法进行设计, 使该系统在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内实现了无热化。同时采用杂散辐射分析软件对系统进行杂散辐射分析, 提出合理杂散辐射抑制方案, 给出了完整的光学系统设计。结果表明, 光学系统在不同温度环境下所有视场的调制传递函数 (MTF) ( $17\text{ lp/mm}$ ) 均接近衍射极限, 80% 的能量集中在 1 个像元内, 且具有结构紧凑、体积小等优点, 可满足搜索和跟踪红外光学系统的使用要求。

**关键词** 光学设计; 红外光学系统; 折反射式光学系统; 无热化; 杂散辐射

**中图分类号** TN216 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0322003

## Design of a Low $F$ -number Compact Athermalizing Infrared Optical System

Qu Hemeng<sup>1,2</sup> Zhang Xin<sup>1</sup> Wang Lingjie<sup>1</sup> Zhang Jizhen

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** According to the requirements of good image quality, miniaturized dimension and high-temperature environmental adaptability in the applications of infrared search and track systems presently, a compact infrared catadioptric system structure is used, which base on the J-T cooler staring high-sensitivity focal plane array infrared detector comprised of  $320 \times 320$  elements, to design a low  $F$ -number and compact athermalizing infrared system optical system. The ratio of total length and focal length is 0.6. A passive optical athermalization design is used for infrared optical systems, which makes the system athermalize in the temperature range of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The stray radiation in the system is also analyzed and a scheme to suppress the stray radiation is given. The results show that the modulation transfer function (MTF) ( $17\text{ lp/mm}$ ) of optical system in all field of view approaches the diffraction limit at different temperature, and 80% energy concentrates in 1 pixel. The optical system has many advantages, such as compact structure, small volume and so on. It can meet requirement of imaging infrared search and track.

**Key words** optical design; infrared optical system; catadioptric optical system; athermalization; stray radiation

**OCIS codes** 220.4830; 040.3060; 110.3080

## 1 引 言

由于红外探测技术探测精度高、抗干扰能力强和可全天候工作等一系列优势, 使其近年来得到了

飞速的发展。按照探测器成像原理划分, 目前所广泛采用的第三代红外凝视探测器, 由于其成像光学系统不再需要光机扫描机构, 因此使红外成像光学

**收稿日期**: 2011-08-03; **收到修改稿日期**: 2011-10-20

**基金项目**: 国家自然科学基金青年科学基金(61007009)资助课题。

**作者简介**: 曲贺盟(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: quhemeng@126.com

**导师简介**: 张 新(1968—), 男, 博士, 研究员, 主要从事非常规复杂光学系统设计方面的研究。

E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

系统开始向紧凑、轻小型方向发展<sup>[1~3]</sup>。尤其在—些特殊用途中,需要光学系统具有成像质量高、结构尺寸小、系统质量轻和环境适应能力强等特点,特别是应用于目前搜索和跟踪红外成像系统受到结构尺寸和工作环境严格的限制。因此,发展一种结构紧凑、质量小、成像质量好和环境适应性强的红外光学系统就变得非常必要<sup>[4,5]</sup>。

近年来国内所发表的有关大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计方面的文章,其设计思路主要是采用透射反远距一次成像光学系统结构形式,配合光学被动消热差的方式,利用不同材料热性能互补完成无热化光学系统的设计。已经在中波红外和长波红外领域取得了一些成果。最新的折射与衍射混合消热差方法也已经有大量的报道<sup>[6~9]</sup>。但是由于采用透射反远距一次成像结构形式,由于其本身的特点决定:远摄比不会小于 0.8,同时在配合制冷探测器时,为了达到 100% 的冷光阑匹配,设计结果往往造成光学系统前组镜片被放大较多,限制了光学系统轻小型化程度,同时前组透镜放大较多对于杂散辐射的抑制同样不利。另外红外光学系统采用较多透射元件,光学系统元件的自辐射同样成为了影响成像质量的重要因素。

考虑上面的因素,本文针对目前红外搜索和跟踪成像系统轻小型、大相对孔径和高环境适应性的要求,采用折反式光学系统结构形式,设计了一个工作波段为红外中波 3~5  $\mu\text{m}$ ,焦距 168 mm,  $F$  数 1.2 的红外成像系统,其远摄比达到了 0.6。红外成像系统充分考虑了系统无热化要求,采用光学被动消热差方法,通过材料匹配使系统实现了一 40  $^{\circ}\text{C}$  ~ 60  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内消热差。设计结果表明:在空间频率为 17 lp/mm 各视场调制传递函数接近于衍射极限。该红外成像系统优势在于:成像质量高、结构尺寸小、环境适应能力强。

## 2 光学系统选型

目前,红外光学系统比较常见的结构形式主要有 3 种包括:折射一次成像、折射二次成像、折反射式结构形式。不同红外光学系统结构形式特点比较如表 1 所示。其中结构尺寸较小的紧凑型红外光学系统常用的结构形式通常有两种:第一种是采用一次成像的反远距结构形式,第二种是将光路进行折叠的折反射结构形式<sup>[10]</sup>。

表 1 不同光学系统结构形式的特点比较

Table 1 Characteristic of different optical system configuration

Parameter	Primary imaging	Secondary imaging	Catadioptric
Focal length	Short	Long	Long
Lenght /focal length	1	>1	<1
Field of view	Large	Large	Narrow
Stray light	Much	Little	Little
Lens	Few	Many	Many
Central obscuration	No	No	Yes

典型的折射一次成像反远距结构光学系统经常用于可见光光电成像系统。其优势在于成像光学系统结构简单、质量轻、易于装调、视场相对较大且无中心遮拦<sup>[11]</sup>。但制冷型红外系统由于采用红外制冷探测器需要 100% 的冷光阑匹配效率,孔径光阑需要放在镜头后面与探测器光阑重合,设计结果造成光学系统前组镜片放大较多,不利于光学系统的轻小型化,且使进入镜头的杂散辐射变多。如果把孔径光阑放在镜头前组或中间,又会降低冷光阑匹配效率,影响红外光学系统成像质量。另外,由于一次成像系统采用的材料有限,无热化效率较差,难以满足搜索和跟踪红外光学系统使用环境的温度适应性要求。红外折射一次成像系统采用非球面时远摄比极限达到 0.8 左右,再缩短长度就必须加入更多的非球面,这不但增加了成本,而且增加了装调难度和公差严格性;如果是二次成像,那么远摄比将更加难以减小。因此选用折射形式成像系统很难满足搜索和跟踪红外光学系统使用要求。

典型的红外折反射光学系统前组反射系统较多采用卡塞格林形式。经典卡塞格林系统主镜采用抛物面,次镜采用双曲面,只能校正轴上点球差。其缺点之一是没有满足正弦条件,像质优良的视场太小,一般不超过 2'<sup>[12]</sup>。为了满足设计要求,进一步增大视场,并校正系统彗差 Ritchey 等<sup>[13]</sup>提出的 R-C 系统,对卡塞格林系统的视场进行了改良,该系统的主、次镜形状很接近旋转双曲面。由于消除了彗差,可用视场比其它形式的卡塞格林系统更大一些,并且点列图成对称的椭圆形。为保证成像质量,R-C 系统所能获得的最大视场一般为 20' 左右。系统一次像面后采用中继透镜组,最终将物成像到探测器上,从而减小系统的口径,同时可以校正剩余的轴外像散、场曲和畸变,进一步增大系统视场。并且可在一次像面处放置视场光阑从而有效地抑制杂散辐射。折反射光学系统由于前组主、次镜分担系统 1/2~

2/3的光焦度,有利于系统整体的无热化设计。折反系统由于进行光路折叠,其远摄比可以达到 0.8 以内,是设计紧凑型光学系统的最优结构形式。因此本文中选用该结构形式进行红外光学系统设计。

### 3 光学系统设计

#### 3.1 光学系统参数

光学系统的工作波段为 3~5  $\mu\text{m}$ ,中心波段为 4.25  $\mu\text{m}$ ,系统采用的探测器为中波 J-T 制冷型 320×320 面阵探测器,单个像元尺寸为 30  $\mu\text{m}$ 。有效焦距为 168 mm, $F$  数 1.2,全视场  $3.7^\circ \times 3.7^\circ$ ,中心遮拦比小于 30%。由于实际应用的需要光学系统的总体长度  $L$  不大于 100 mm。为了抑制杂散辐射系统采用 100%冷阑匹配。设计要求全视场单像元内能量集中度 80%以上。 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  温度范围内消热差。

#### 3.2 初始结构建立

分析系统技术指标要求,发现设计的难点在于如何同时满足系统长度、中心遮拦尺寸及  $F$  数的要求。通过本文上面分析可知,系统前组反射系统采用经典 R-C 系统结构形式如图 1 所示,将主镜改为双曲面,不但可以校正球差和彗差,而且可以进一步提升视场。设计时前组主、次镜成的一次像面至少保证轴上像质优良,然后与后组中继透镜组一起优化。在一次像面处放置视场光阑,以减小杂散辐射

对系统的影响。

R-C 系统结构形式如图 1 所示。其中定义物体位于无穷远,即  $l_1 = \infty, u_1 = 0$ ;光阑位于主镜上,即  $x_1 = y_1 = 0$ ;  $\alpha$  表示次镜离第一焦点距离,即次镜遮拦比,  $\alpha = h_2/h_1$ ;  $\beta$  表示次镜的放大倍率,  $\beta = l'_2/l_2$ ,主镜焦距乘以  $\beta$  即为前组 R-C 反射系统焦距,  $e_1^2$  为主镜二次曲面系数;  $e_2^2$  为次镜二次曲面系数;  $S_I$  为赛德尔球差系数;  $S_{II}$  为赛德尔彗差系数。利用高斯光学公式求解出<sup>[14]</sup>

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{1+\beta}R_1. \quad (1)$$

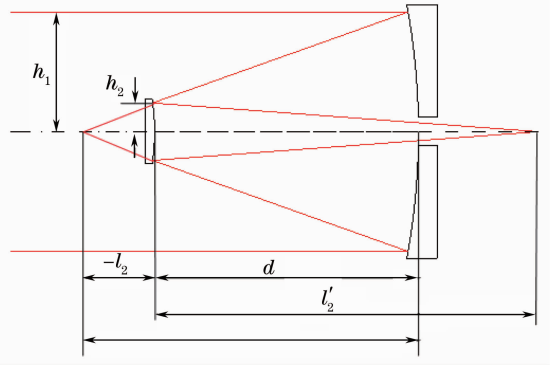


图 1 R-C 光学系统结构

Fig. 1 R-C optical system configuration

由于 R-C 系统不产生色差,采用 5 种单色像差对系统  $\alpha, \beta, e_1^2, e_2^2$  进行确定。单色像差共 5 种:球差、彗差、像散、场曲和畸变,其三级像差系数分别为

$$\begin{cases} S_I = \sum hP + \sum h^4K \\ S_{II} = \sum yP - J \sum W + \sum h^3yK \\ S_{III} = \sum \frac{y^2}{h}P - 2J \sum \frac{y}{h}W + J^2 \sum \phi + \sum h^2y^2K \\ S_{IV} = \sum \frac{\Pi}{h} \\ S_V = \sum \frac{y^3}{h^2}P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2}W + J^2 \sum \frac{y}{h} \left( 3\phi + \frac{\Pi}{h} \right) - 3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \frac{1}{n^2} + \sum hy^3K \end{cases} \quad (2)$$

对于 R-C 反射系统,其中  $n_1 = n'_2 = 1, n'_1 = n_2 = -1$ ,令  $h_1 = 1, f' = 1$  及  $\theta = -1$ ,可得  $f'_1 = \frac{1}{\beta}, u'_1 = u_2 = \beta, u'_2 = 1, J = 1, y_2 = -\frac{1-\alpha}{\beta}, R_2 = \frac{2\alpha}{\beta+1}$  由此得到系统参数

$$\begin{cases} P_1 = -\frac{\beta^3}{4}, & P_2 = \frac{(1-\beta)^2(1+\beta)}{4} \\ W_1 = \frac{\beta^2}{2}, & W_2 = \frac{1-\beta^2}{2} \\ \Pi_1 = \beta, & \Pi_2 = -(1+\beta) \\ \phi_1 = -\beta, & \phi_2 = \frac{1+\beta}{\alpha} \\ K_1 = \frac{e_1^2}{4}\beta^3, & K_2 = -\frac{e_2^2(1+\beta)^3}{4\alpha^3} \end{cases} \quad (3)$$

将 R-C 反射系统参数代入像差表达(2)式得出

$$\begin{cases} S_I = \left[ \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4} e_2^2 \right] - \frac{\beta^3}{4} (1 - e_1^2) \\ S_{II} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[ \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta} e_2^2 - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta} \right] - \frac{1}{2} \\ S_{III} = \left( \frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^2 \left[ \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta^2} - \frac{\alpha(\beta+1)^2}{4\beta^2} e_2^2 \right] - \frac{(1-\alpha)(\beta+1)(\beta-1)}{\alpha\beta} - \frac{\alpha\beta - \beta - 1}{\alpha} \\ S_{IV} = \beta - \frac{1+\beta}{\alpha} \\ S_V = \left( \frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^3 \left[ \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^3} e_2^2 - \frac{\alpha(1-\beta)^2(1+\beta)}{4\beta^3} \right] - \frac{3}{2} \frac{(1-\alpha)^2(1-\beta)(1+\beta)}{\alpha^2\beta^2} - \frac{2(1-\alpha)(1+\beta)}{\alpha^2\beta} \end{cases} \quad (4)$$

由于 R-C 系统消除球差和彗差,即  $S_I = S_{II} = 0$ , 通过对(4)式进行求解得出

$$\begin{cases} e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2} \\ e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{1-\alpha} + (1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3} \end{cases} \quad (5)$$

设计指标对系统长度做出了严格规定,为了缩短系统总长,本例将一次像面放置在主镜之前。这就使前组反射系统焦距不可能很长,将其设置为系统焦距的 1/2,后组的倍率为 2 倍。设计指标同时对次镜遮拦比提出了较高要求,因此主镜的相对孔径就必须做大,本例初步取 1。由于系统本身带来的像差很严重,必须采用高次非球面才能有效地校正像差。本设计选用二次项、六次项、八次项和十次项作为优化变量。此类高次非球面加工技术已经很成熟,加工精度能够达到系统设计公差要求,且成本不是很高。后组采用三片式成像系统,能够很好地满足系统设计指标要求。

### 3.3 光学系统无热化设计

由于红外光学系统工作温度范围在  $-40\text{ }^\circ\text{C} \sim 60\text{ }^\circ\text{C}$  之间。环境温度对红外光学系统有极其严重的影响,例如:红外锗单晶  $\partial n/\partial t$  的典型值为  $396 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,而可见光的 K9 玻璃  $\partial n/\partial t$  值只有  $2.8 \times$

$10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,大约相差两个数量级以上。由热效应使光学材料的折射率、厚度等都发生了变化,光学系统面形以及光学元件之间的间隔也会发生变化,这些变化都会对系统焦距产生影响,进而影响光学系统的成像质量,导致探测系统输出信号质量下降。因此,在红外光学系统的设计过程中进行无热化设计是相当必要的<sup>[15~18]</sup>。

对比了电子主动补偿、机械被动补偿和光学被动补偿三种技术的特点。并结合搜索和跟踪光学系统工作环境特点,避免使系统复杂化,减小体积重量,增加可靠性的要求。得出结论:光学被动补偿无论在可靠性还是无热化的效果上都能达到光学系统环境使用要求。基于这样的考虑,在红外光学系统无热化设计的过程中,选用光学被动式无热化技术<sup>[19~21]</sup>。

光学被动式无热化技术通过匹配光学材料的  $\partial n/\partial t$ 、膨胀系数和光学机械材料的膨胀系数,使各种因素影响产生的温度焦移互相抵消/补偿,使光学系统的成像质量在工作温度范围内始终保持可以接受的水平。目前国内适用于热成像的红外光学材料较为常用的主要有 3 种:锗、硅和硒化锌。表 2 列出这 3 种材料的光学特性和热特性,表中  $\partial n/\partial t$  是折射率温度变化系数,  $X_t$  是光学热膨胀系数。

表 2 红外光学材料的光学特性和热特性(20 °C)

Table 2 Optical and thermal properties of infrared material available (20 °C)

Material	$n / 4\text{ }\mu\text{m}$	$n / 10\text{ }\mu\text{m}$	$(dn/dt) / 10^6$	$X_t(10^6) / 4\text{ }\mu\text{m}$	$X_t(10^6) / 10\text{ }\mu\text{m}$
Ge	4.024	4.003	396	-125.1	-126.1
Si	3.425	3.417	150	-58.02	-58.22
ZnSe	2.433	2.406	60	-34.81	-35.61

本例中红外光学系统主次镜均采用金属铝镜作为反射镜基底材料,其厚度的选择上首先要保证加工要求厚度,同时考虑材料比热容要求其具有较大的体积才能使其升温速度缓慢,而线胀系数要求材

料尽可能轻薄,综合以上条件,选择最优的反射镜厚度。

结构材料选用限胀系数低的钛合金材料,以保证不同温度时结构材料的形变量最小。后组中继透

镜组初步选择三片式,通过对表 2 各材料的特点分析,选择了两种材料组合方式分别为:硅、锗和硅;硅、锗和硒化锌。后组镜筒结构材料也采用热膨胀系数较低的钛合金材料。并结合前组主、次反射镜综合分析。从表 3 中可以看出在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境下硅、锗和硒化锌的材料组合离焦范围较小,满足成像质量要求。

表 3 三片式系统在不同温度下的离焦量

Table 3 Defocusing value of systems which are made up of three lenses at different temperatures

Combination / $\mu\text{m}$	$-40\text{ }^{\circ}\text{C}$	$20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$60\text{ }^{\circ}\text{C}$
SGS	180	0	285
SGZ	25	0	40

由上面的分析得出结论:考虑主、次金属反射镜的温度形变,结合其材料特性和面形,选择最优的厚度,同时在支撑材料的选择上保证在温度变化条件下最小的形变量。结合前组反射系统后组透镜组采用硅、锗和硒化锌三种材料组成的三片式结构,使光学系统满足的无热化要求。

### 4 设计结果

本例中主镜相对孔径取 1。由于系统本身带来的像差很严重,只有采用高次非球面才能有效地校正像差。同时为了降低次镜加工、检测的难度及成本,控制次镜为平面反射镜。系统有效焦距  $f$  为 168 mm,  $F$  数 1.2。系统选用制冷型中波红外探测器,主次镜成的像保证轴上像质优良,以便于顺利装配。中继透镜组为三片结构,材料分别为锗、硅和硒化锌。为了利于消球差、彗差和像散等像差,大幅度提高像质,锗镜两面均采用非球面设计。通过光学设计软件对光学系统进行优化,得到最终结果如图 2 所示。

选用的探测器像元大小为  $30\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$ ,系统的特征频率为 17 lp/mm。图 3、图 4 和图 5 为系统分别处在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度状态时光学系统的调制传递函数曲线图,从图中可以看出,系统在不同温度环境下所有视场子午、弧矢的调制传递函数(MTF)(17 lp/mm)均接近衍射限。

图 6~8 分别为系统在  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度状态时的能量集中度图,从图中可以看出,在不同温度环境下所有视场 80% 的能量集中在 1 个像元内。

### 5 系统杂散辐射分析

采用杂散辐射分析软件对本文设计的红外光学

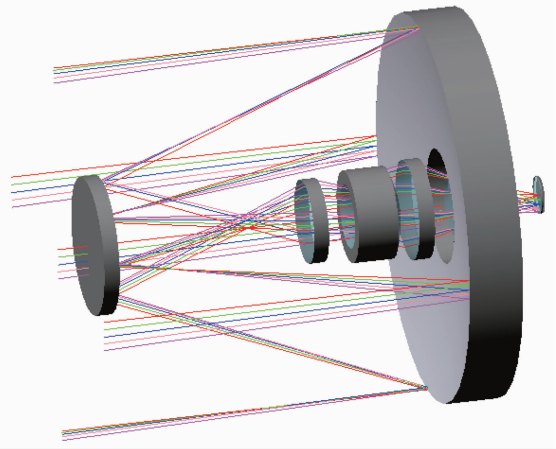


图 2 光学系统结构图

Fig. 2 Configuration of optical system

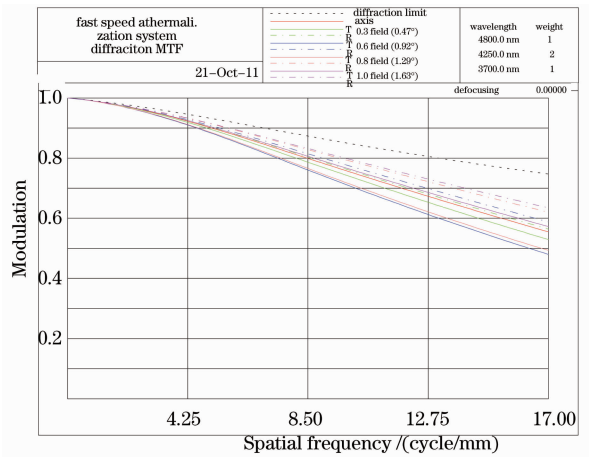


图 3  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  的调制传递函数曲线图

Fig. 3 MTF curves at  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$

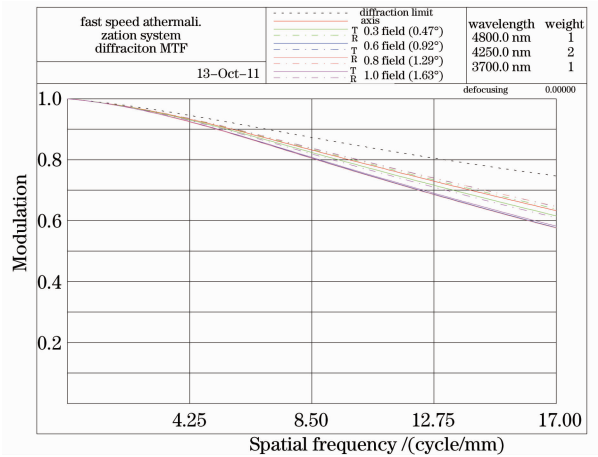


图 4  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的调制传递函数曲线图

Fig. 4 MTF curves at  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$

系统进行杂散辐射分析。如图 9 所示。

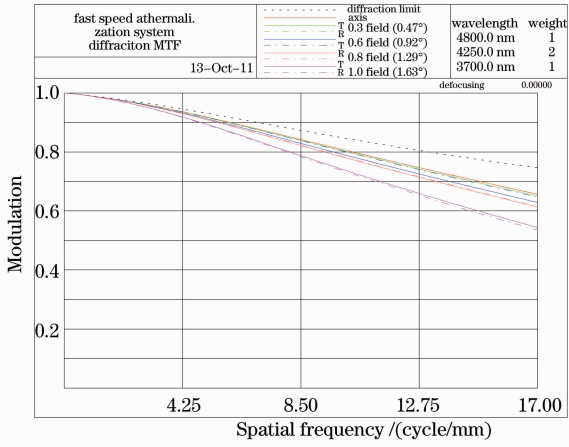


图 5 60 °C 的调制传递函数曲线图

Fig. 5 MTF curves at 60 °C

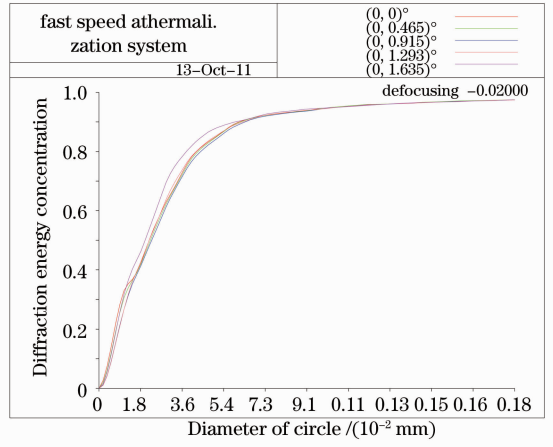


图 6 -40 °C 能量集中度曲线图

Fig. 6 Energy-concentration curves at -40 °C

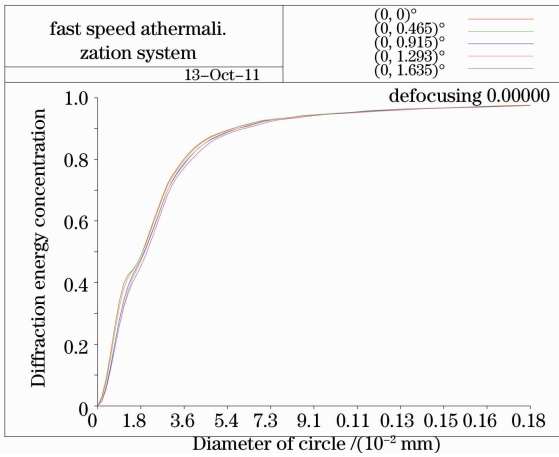


图 7 20 °C 能量集中度曲线图

Fig. 7 Energy-concentration curves at 20 °C

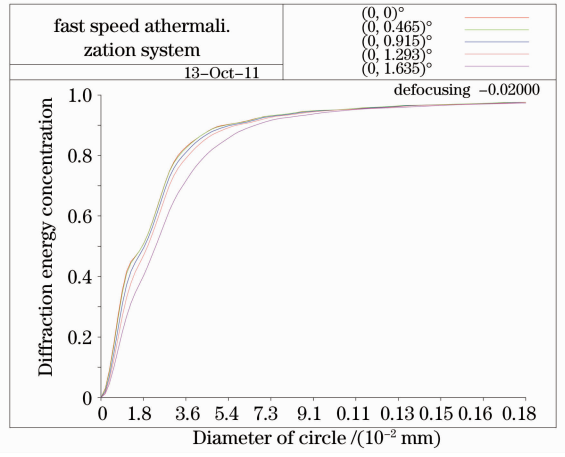


图 8 60 °C 能量集中度曲线图

Fig. 8 Energy-concentration curves at 60 °C

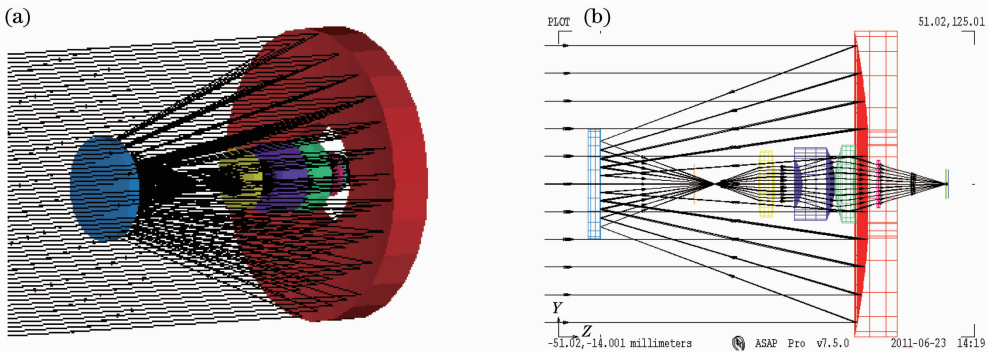


图 9 红外光学系统杂散辐射分析图

Fig. 9 Stray radiation analysis of infrared system

由上面的分析可以看出,由于没有杂散辐射抑制结构,分别在 $\pm 4^\circ \sim \pm 12^\circ$ 之间光学系统存在一次杂散辐射照射到像面上。经考察光线历史轨迹可知,该光学系统杂散辐射主要产生于:不经主镜、次镜,由物空间直接照射到后组折射透镜组并折射到

像面上的杂光。

针对系统存在的杂散辐射情况,设计合理可行的杂散辐射抑制方案。系统采用后组镜筒消杂散辐射的设计方案。消杂光筒采用消光螺纹进行处理,在一次像面处加入合理尺寸的光阑,可以有效消除

一次和二次反射杂光<sup>[22,23]</sup>。系统结构如图 10 所示。整个红外光学系统没有采用传统的在主镜加外遮光筒和次镜加内遮光筒的方案,主要原因在于:该方案不但有利于系统的轻小型化,而且降低了遮光筒自辐射对系统成像质量影响的可能。该方案能够有效的抑制系统杂散辐射。

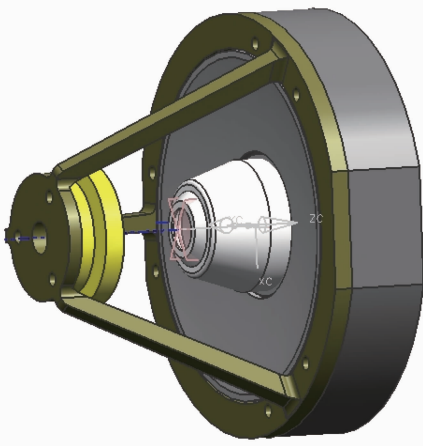


图 10 杂散辐射光机结构模型

Fig. 10 Opto-mechanical model for stray radiation analysis

## 6 结 论

本文针对搜索和跟踪系统对其红外光学成像系统部分提出:成像质量好、超轻小型化和温度适应性高等需求,采用折反射式光学系统结构形式设计了一种大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统。实现了远摄比 0.6,通过比对不同材料匹配实现了 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内光学系统的无热化设计。采用一次像面处设置视场光阑方案,对系统杂散辐射进行有效的抑制。同时给出了完整的光学系统设计结果,设计结果表明,红外光学系统在不同温度环境下所有视场子午、弧矢的 MTF(17 lp/mm)均接近衍射限。

### 参 考 文 献

- Liu Wu, Ye Zhenghua. Status and trends of foreign infrared photodetectors[J]. *Laser and Infrared*, 2011, **41**(4): 365~370
- 刘武,叶振华. 国外红外光电探测器发展动态[J]. *激光与红外*, 2011, **41**(4): 365~370
- Cai Yi, Hu Xu. State of the art and future trend of detectors for infrared imaging seekers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**(1): 7~11
- 蔡毅,胡旭. 红外成像用的红外探测器现状和发展趋势[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**(1): 7~11
- Du Chunlei, Lin Xiangdi, Zhou Lishu *et al.*. Method for improving performance of infrared detector by micro-optical lens array[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **21**(2): 246~249
- 杜春雷,林祥棣,周礼书等. 微透镜阵列提高红外探测器探测能力的方法研究[J]. *光学学报*, 2010, **21**(2): 246~249

- Li Jie, Zhang Zhiming, Feng Shengru. Passive athermalisation technique of infrared optical system loading in missile [J]. *Infrared Technology*, 2005, **27**(3): 196~201
- 李婕,张志明,冯生荣. 弹载红外光学系统被动消热技术[J]. *红外技术*, 2005, **27**(3): 196~201
- Shen Honghai, Wang Guohua, Ding Jingwei *et al.*. Application of active-athermal compensation to airborne IR optical systems [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2010, **18**(3): 593~600
- 沈宏海,王国华,丁金伟等. 主动补偿无热化技术在机载红外光学系统中的应用[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(3): 593~600
- Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong *et al.*. Low F number LWIR optical system with wide field of view[J]. *J. Appl. Opt.*, 2010, **31**(1): 350~353
- 陈潇,杨建峰,马小龙等. 长波红外大视场大相对孔径光学系统设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(1): 350~353
- Zhang Xin, Jia Hongguang. Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture [J]. *Chin. Opt.*, 2011, **4**(4): 374~379
- 张鑫,贾宏光. 大相对孔径红外消热差物镜设计[J]. *中国光学*, 2011, **4**(4): 374~379
- Liu Lin, Chen Xinhua, Shen Weimin. Development of an athermalization midwave infrared telescopic-objective with fast speed[J]. *Optical Technique*, 2011, **37**(4): 418~423
- 刘琳,陈新华,沈为民. 消热差大相对孔径中波红外望远物镜的研制[J]. *光学技术*, 2011, **37**(4): 418~423
- Liu Lin, Shen Weimin, Zhou Jiankang. Design on athermalised middle wavelength infrared optical system with large relative aperture [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 675~679
- 刘琳,沈为民,周建康. 中波红外大相对孔径消热差光学系统的设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 675~679
- Kang Yusi, Liu Weiqi, Feng Rui. A refract-reflect telescope with meniscus corrector [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(2): 215~220
- 康玉思,刘伟奇,冯睿. 弯月镜结构补偿镜的折反型望远系统[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(2): 215~220
- Kang Yusi, Liu Weiqi, Feng Rui. A refract-reflect telescope with Cooke as compensated lens [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2007, **15**(3): 303~307
- 康玉思,刘伟奇,冯睿. Cook 结构补偿镜的球面折反型望远系统[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(3): 303~307
- R. Blakley. Casarian telescope optical system [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(1): 3338~3341
- Cai Zhenen, Liu Zhaohui, Huang Jing. Dual band night vision R-C system with wide field of view and large relative aperture [J]. *J. Appl. Opt.*, 2010, **31**(4): 525~528
- 蔡占恩,刘朝晖,黄静等. 大视场大相对孔径双波段夜视 R-C 系统设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(4): 525~528
- Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004
- 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测[M]. 苏州:苏州大学出版社, 2004
- Yasuhisa Tamagawa. Dual-band optical systems with a projective athermal chart; design [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 297~301
- Tadeusz Kryszczyński. Material problem in athermalization of optical systems [J]. *Opt. Engng.*, 1997, **36**(6): 1596~1601
- Pilkington. Athermalization techniques in infrared systems [C]. *SPIE*, 1986, **0655**: 142~153
- Juan L. Rayces. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials [C]. *SPIE*, 1990, **1354**: 752~759
- Guo Yonghong, Shen Mangzuo. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1392~1395
- 郭永洪,沈忙作. 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

- 20 Xue Hui. Optical design of infrared search and trace system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2383~2386  
薛 慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2383~2386
- 21 Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi *et al.*. Optical design of a off-axis dual-channel helmet mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2662~2667  
佟静波, 崔庆丰, 薛常喜 等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2662~2667
- 22 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohu *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2267~2271  
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2267~2271
- 23 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohu *et al.*. Analysis and calculation of space-based infrared detecting system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 768~771  
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖 等. 天基红外探测系统的杂散光分析与计算[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 768~771

栏目编辑: 谢 婧