

·光电系统·

红外搜索跟踪系统中的双波段共孔径光学设计

郭晟男,付跃刚,刘智颖,马辰昊

(长春理工大学光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:由于红外搜索跟踪系统(IRST)探测距离长,伪装性良好和错误率低等特点,因此成为了空中及海上最好的探测装备。针对红外与搜索跟踪系统对多谱段的需求,设计了红外搜索跟踪双波段共孔径光学系统。具有优于单波段获取信息弱的优势,将中波红外图像和长波红外图像融合到一起,综合利用了中波红外和长波红外各自优点,提高了有效侦察率、降低虚警率。系统总焦距为400 mm, $F\#=2$, 视场角为 2° , 采用分光型RC系统实现 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 双波段共孔径清晰成像,为了抑制中波的热辐射杂光,对中波系统实现了二次成像。设计结果表明,系统像质优良,满足红外搜索跟踪系统的使用要求。

关键词:几何光学;红外搜索跟踪系统;RC系统;双波段;共孔径

中图分类号:TN216

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2013)-06-0035-05

Dual-band Common Aperture Optical Design of Infrared Search Track System

GUO Sheng-nan, FU Yue-gang, LIU Zhi-ying, MA Chen-hao

(College of Optical and Electronical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Infrared search and track (IRST) system with the characteristics of long detection range, good camouflage and low error rate becomes the best detection equipments in the air and on the sea. According to the multi-spectral demand of IRST system, an IRST optical system with dual-band common aperture is designed. The system is better than the single-band system in the area of acquiring information. The obtained MWIR and LWIR images can be fused together so as to take the advantages of MWIR and LWIR synthetically. Effective reconnaissance probability is enhanced and false alarm probability is reduced. Total focal length of the system is 400 mm, $F\#=2$ and field of view is 2° . The clear imaging in $3\sim 5\ \mu\text{m}$ and $8\sim 12\ \mu\text{m}$ with dual-band common aperture is realized by dispersive RC system. Second imaging is performed on a medium wave system for suppressing thermal radiation stray light from medium wave. Design result indicates that excellent quality images can be produced by the system and the operation requirements of IRST system can be met.

Key words: geometrical optics; infrared search and track (IRST); Ritchey and Chretien (RC) system; dual-band; common aperture

红外搜索跟踪系统是被动的红外系统,其目的是在目前的背景辐射和其他干扰下可靠检测、定位和连续跟踪红外发光物体和目标^[1]。由于它的被动性和反隐身能力,红外搜索跟踪系统在某些应用中可以替代雷达。

随着红外搜索跟踪系统的发展,目前单一波段的

红外搜索跟踪系统已趋于完善^[2-4],双波段红外搜索跟踪系统也已开展研究,光学系统设计也同步开展。由于红外系统在不同使用区域、气候条件变化和目标伪装时,单一波段的红外搜索跟踪系统获取的信息较弱。在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 两个大气红外窗口波段, $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段一般用于搜索与背景温差较大的目标, $8\sim 12\ \mu\text{m}$

收稿日期:2013-07-26

基金项目:吉林省自然科学基金(201215131)

作者简介:郭晟男(1987-),女,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为光学设计及检测技术;付跃刚(1972-),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为光学设计及检测技术。

波段一般用于搜索温差较小的目标。为了充分利用中波红外、长波红外各自的优点,获得更多的目标特征,提高系统的探测能力和目标识别能力,采用双波段红外搜索跟踪系统。该系统采用双波段、共孔径设计,具有结构紧凑、体积小、质量轻的优点,实现了双波段、大口径、大视场探测目标。

1 光学系统结构选取

红外光学系统一般选用折射系统、反射系统和折反射系统。折射系统虽然可以达到较大的视场,但设计红外双波段大口径光学系统时,折射系统透射材料较少,不利于校正二级色差,还会使得系统体积过大、质量过重。反射式系统不受波段影响,但视场太小,不能满足系统要求,离轴反射系统的视场比一般反射系统大,但其加工、装调和检测的难度较大。为了得到大视场的优良像质,Ritchey和Chretien提出了校正球差及彗差的改进的卡塞格林式系统,即RC系统。但是该系统也只有当视场为 20° 左右的像质比较好^[5],如果要扩大视场就必须在像面之前加入校正透镜组,因此文中选择带有RC反射系统的折反式光学系统。

常用双波段成像系统由以下两种方式构成:一是采用一个能够响应两个波段的双波段探测器共光路系统构成;二是采用两个分别响应不同波段的探测器共光路或部分共光路系统构成。前者虽简化了光学系统结构,但是现有双波段探测器的探测谱段较窄,实用性不强。为此选择后一种构成方式。采用了部分共光路系统。虽然系统结构相对复杂,但是实用性较强,双波段共用前组反射系统,之后由二色分束镜分成中波红外和长波红外两个波段,两波段均再采用折射式系统,通过紧凑的光路结构,中波和长波分别校正像差,选用不同的探测器件。另外,中波红外光学系统采用制冷探测器件,为了对杂散热辐射的抑制,实现100%的冷光阑效率,这就要求中波光学系统的出瞳与冷光阑重合,同时中波光学系统还需要较长的后工作距。

2 设计原理

2.1 RC系统设计

RC系统主要设计参数如表1所示。

RC系统的初始结构,根据系统的焦距 f' ,次镜的放大倍率 β ,系统的中心遮拦比 α 和焦点的伸出

表1 RC系统主要设计参数

工作波段	3 ~ 5 μm , 8 ~ 12 μm
焦距 f'	400 mm
口径 D	200 mm
视场	$2w=2^\circ$
相对孔径 D/f'	1:2 (F# = 2)

量 Δ (即主镜顶点到系统总焦点的距离)来确定主镜与次镜的顶点曲率半径 r_1 、 r_2 ,偏心率 e_1 、 e_2 以及它们之间的距离 d 。光路图如图1所示。

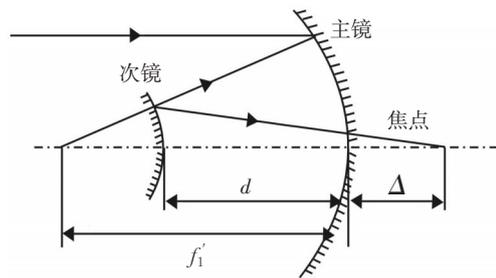


图1 RC光学系统

系统的遮拦比 α 和次镜的放大倍率 β 如式(1)^[6]

$$\alpha = [f' + \Delta \cdot \beta] / \beta(\beta - 1) \quad (1)$$

$$\beta = f' / f_1'$$

确定了 α 值、 β 值后,主镜与次镜的顶点曲率半

径 r_1 、 r_2 ,以及它们之间的距离 d 可由式(2)^[6]确定

$$r_1 = 2 \times f' / \beta$$

$$r_2 = \alpha \beta r_1 / (\beta + 1) \quad (2)$$

$$d = f'(1 - \alpha) / \beta$$

由RC系统消球差 S_I 和慧差 S_{II} ($S_I = S_{II} = 0$),可分别计算出主镜与次镜的偏心率 e_1 、 e_2 ,如式(3)

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta^2} \quad (3)$$

$$e_2^2 = \frac{2\beta/(1-\alpha) + (1+\beta)(1-\beta)^2}{(1+\beta)^3}$$

此系统由经验确定遮拦比 α 等于30%,由公式可知RC系统校正了球差和彗差,由于视场较大,还需折射部分补偿校正场曲、像散和畸变。在主镜后加二色分光镜分光,然后在各自光路中分别补偿校正。通过折射部分与反射部分的像差补偿校正场曲、像散和畸变^[7]。

2.2 中波红外光学系统设计

中波红外系统采用制冷型探测器件,为抑制热辐射的杂光,达到100%的冷光阑效率,要求光学系统出瞳与探测器冷光阑重合。RC反射系统光阑位于主镜,出瞳位于次镜前面,因此需要加中继成像系统如图2所示,将其成像在探测器前面^[8]的冷光阑上。

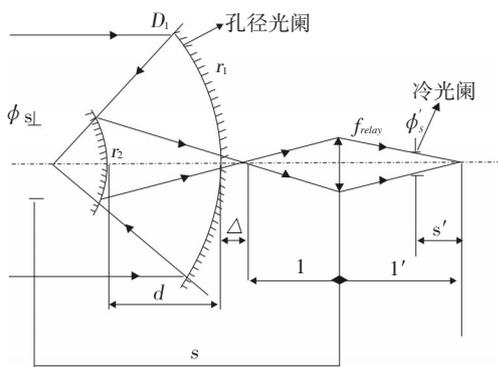


图2 带中继RC系统的光路图

根据前端RC反射系统的参数,即可确定中继系统的参数。中继系统将中间像面成像于焦面红外探测器,同时系统的出瞳位于冷光阑位置。根据高斯光学成像公式(其中 p_{exit} 为前组光学系统的出瞳位置)有

$$\begin{aligned} \frac{1}{l'} - \frac{1}{l} &= \frac{1}{f_{relay}} \\ \frac{1}{L'} - \frac{1}{l} &= \frac{1}{f_{relay}} \\ \beta &= \frac{l'}{l} \\ L - l &= p_{exit} \end{aligned} \quad (4)$$

对于中波系统可直接用中继系统校正场曲、像散和畸变,而长波系统是非制冷系统,不需要二次成像,所以综合两系统共同考虑,为了缩短筒长,降低中继系统难度,平衡长波红外系统校正像差能力和简化长波红外系统结构,在中波红外系统一次成像中加入两片球面校正镜校正轴外像差。系统中采用了锗(Ge)和硅(Si),这样可以更好地消除系统色差,提高成像质量。

2.3 长波红外光学系统设计

长波红外光学系统采用非制冷探测器,并且加入了二色分光镜,二色分光镜在汇聚光路中产生了纵向位移,引入了球差、位置色差和像散^[9]。采用前

两片镜锗(Ge)和硒化锌(ZnSe)校正了二色分光镜的球差和位置色差,综合利用锗(Ge),硒化锌(ZnSe)和锗(Ge)三个球面镜组合校正了RC反射系统的场曲、畸变以及像散,并且将三片折射镜整体进行位移补偿二色分光镜带来的纵向位移,消除光轴偏移引入像差。并设计出足够的后截距,便于探测器的安装。设计结果如图3所示。

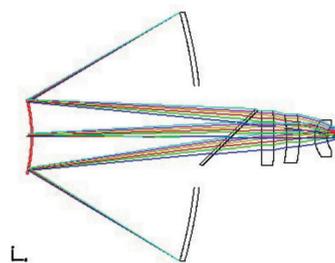


图3 长波红外系统结构图

3 设计结果分析

中波红外系统与长波红外系统通过多重结构进行整合设计。中波红外与长波红外共用前端RC系统,在主镜后通过二色分束镜分光,由于中波红外系统筒长较长,所以对其进行两次反射,长波红外透射(即长波通)。双波段红外搜索跟踪系统结构如图4所示。图5为中波红外光学系统性能指标,图6为长波红外光学系统性能指标。中波和长波共用RC系统,整个系统除主次镜为二次曲面外,其余都为标准球面,便于加工及装调,主次镜采用微晶玻璃,透镜材料为锗(Ge),硅(Si)和硒化锌(ZnSe),分光板采用硒化锌(ZnSe)。

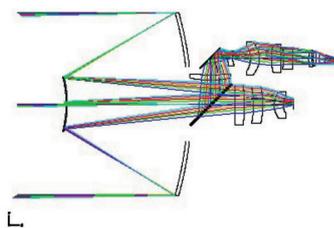
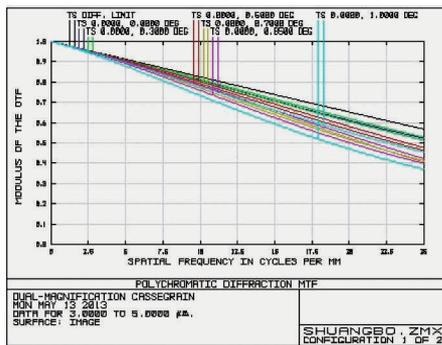
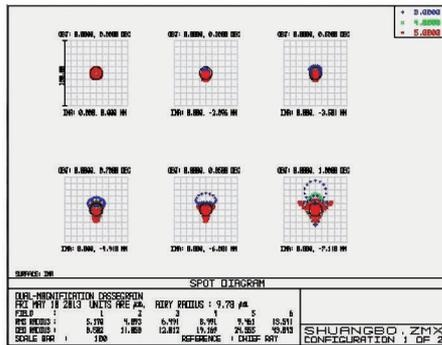


图4 红外搜索跟踪系统(IRST)双波段光学系统

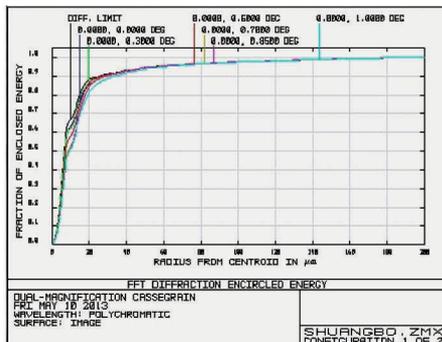
由图5可以看出,中波红外光学系统在探测器截止频率(25 lp/mm)处传递函数大于0.35,达到衍射极限。像点能量分布在2个像元内能量大于90%,满足红外系统对能量的要求。均方根最大半径为13.541 μm ,基本满足20 μm 的探测器像元尺寸要求;由图6知,长波红外光学系统的传递函数在整个波段和视



(a) 传递函数

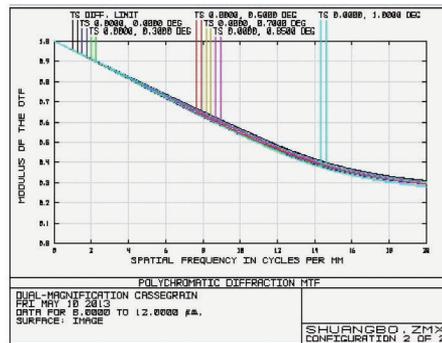


(b) 点列图

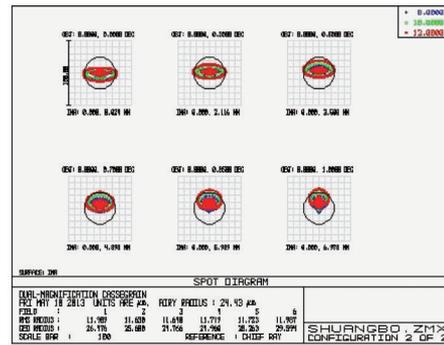


(c) 包围圈能量

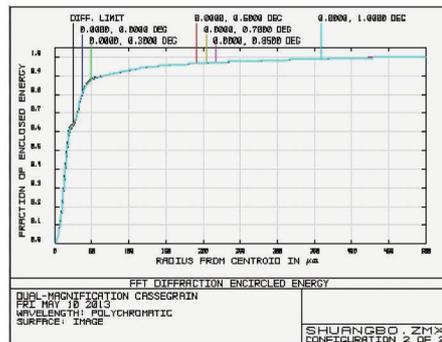
图5 中波红外光学系统性能指标



(a) 传递函数



(b) 点列图



(c) 包围圈能量

图6 长波红外光学系统性能指标

场内都接近衍射极限,在探测器截止频率(20 lp/mm)处,传递函数值均大于0.28。像点能量分布在2个像元内能量大于90%,满足红外系统对能量的要求。均方根最大半径为11.989 μm,满足25 μm的探测器像元尺寸要求。因此,所设计的红外搜索跟踪双波段光学系统具有优良的成像质量。

4 结论

详细介绍了红外搜索跟踪系统(IRST)双波段光学系统的设计过程。系统结构紧凑,体积小质量轻,实现了宽波段、大口径、大视场。系统共用前端两反

射系统克服了大口径宽波段的难题,中波系统采用二次成像技术即100%冷光阑效率,更好地抑制了杂散辐射。系统相对口径、视场一致,可以将中波红外像和长波红外图像融合到一起,综合利用了中波红外、长波红外各自优点,提高了有效侦察率、降低虚警率^[10]。

参考文献

[1] Jai Prakash Singh. An Algorithm for the Neural Fusion of IRST & RADAR for Airborne Target Detection[C]// IEEE, 2005, 0-7803-93 23-6/05.

- [2] 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, 0253-2239(2010)08-2 383-04.
- [3] 陈津津, 赵劲松. 一种紧凑型折射式红外搜索/跟踪光学系统设计[J]. 红外技术, 2008, 30(5): 279-282.
- [4] 刘峰. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 0253-2239(2010)07-2084-05.
- [5] 史光辉. 含有三个非球面的卡塞格林系统光学设计[J]. 光学学报, 1998, 18(2): 238-241.
- [6] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004.
- [7] 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.
- [8] 樊学武, 马臻, 陈荣利. 红外双波段卡塞格林光学系统设计[J]. 光子学报, 2003, 32(4): 463-465.
- [9] Warren J Smith. Modern Optical Engineering [M]. The McGraw-Hill Companies, Inc, 1996.
- [10] 王海涛, 耿安兵. 一体化红外双波段成像光学系统[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 489-492.

(上接第17页)

3 结束语

综上所述, 为了有效地对抗愈发先进的红外制导导弹, 未来要求红外诱饵弹能更加逼真地模拟目标特性。因此红外诱饵技术的发展及战术使用趋势是从单一体制→“cocktail”→多种体制复合的发展及使用模式。同时未来红外诱饵在组分和结构的设计方面将变得更加复杂, 对红外诱饵的发展提出三点展望: (1) 工作波段多光谱化。多光谱探测技术、多波段制导技术的广泛应用极大提高了武器系统的作战性能和抗干扰能力, 因此必须提高红外诱饵的多光谱信息融合; (2) 投放装备的小型化、功能操作简单化。从美军装备来看, 其对体积要求较为苛刻, 因此必须突出投放装备小型化, 以适应各种复杂的战场环境; (3) 对抗功能多层次化。随着光电技术发展, 全方位的侦测技术已逐步形成, 因此对抗手段的多层次、多手段化也成为发展的趋势。

参考文献

- [1] 贾明永, 董德新, 陈勇. 多元双色红外导引头抗干扰技术研究[J]. 航空兵器, 2006(3): 19-22.
- [2] 赵非玉, 卢山, 蒋冲. 面源红外诱饵仿真建模方法研究[J]. 光电技术应用, 2012, 27(2): 66-69.
- [3] Spectrum balanced infrared flares pyrotechnic composition [P]. U.S. Patents, 5472533. 1995.
- [4] Infrared decoy flare composition [P]. U.S. Patents, 20070251 617. 2007.
- [5] Koch E C. Pyrotechnic countermeasures: Advanced aerial infrared countermeasures [J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2006, 31(1): 3-19.
- [6] 赵非玉, 马春孝, 卢山. 机载红外诱饵技术的发展 [J]. 舰船电子工程, 2012(3): 20-22.
- [7] Decoy flare [P]. U.S. Patents, 5400712. 1999.
- [8] Propelled pyrotechnic decoy [P]. U.S. Patents, 5561260. 1996.
- [9] Nozzles for pyrophoric IR decoy [P]. U.S. Patents, 5866840. 1999.
- [10] Towed decoy system [P]. U.S. Patents, 4718320. 1988.
- [11] Electronically configurable towed decoy for dispensing infrared emitting flares [P]. U.S. Patents, 6055909. 2000.
- [12] Exothermically formed aluminide coating [P]. U.S. Patents, 5866840. 1999. 5102700. 1992.
- [13] Aqueous masking solution for metal treatment [P]. U.S. Patent 5262466. 1995.
- [14] Pyrophoric materials and method for making the same [P]. U.S. Patent 5464699. 1995.

(上接第30页)

- [19] GB4599—2007 汽车前照灯配光性能[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [20] 朱骞, 朱向冰. 采用小功率LED的汽车前照灯光学设计[J]. 光学技术, 2012(4): 427-430.
- [21] Aleksandra Cvetkovic, Oliver Dross, Julio Chaves, et al. Etendue-preserving mixing and projection optics for high-luminance LEDs, applied to automotive headlamps [J]. Opt. Express, 2006, 14: 13014-13020.
- [22] Hung CC, Fang YC, Huang MS, et al. Optical design of automotive headlight system incorporating digital micromirror device [J]. Applied Optics, 2010, 49(22): 4182-4187.
- [23] 俞培锋. 世界汽车灯具及灯光技术研究[J]. 汽车工程师, 2012(6): 22-26+51.
- [24] 方英兰, 朱向冰. 自适应前照灯的功能及实现[J]. 中国照明电器, 2010(7): 11-16.
- [25] 武汉, 朱向冰, 朱骞, 等. 王程. 基于数字微镜元件的自适应前照灯光学设计[J]. 红外与激光工程, 2013(4).