

红外双波段/双视场导引头的光学设计

毛延凯, 赵振宇, 张国华, 时光煜

(中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471009)

摘要: 现有对地捷联导引头多数采用红外单波段和单视场相结合的方式对目标进行匹配和截获, 然而该种方式在日益复杂的战场环境下易受目标/背景特性复杂程度、探测器性能、视场大小限制等因素的影响。在保留了某型捷联导引头原有单一的中波红外大视场的基础上, 加入了长波红外大小两个视场, 提出了一种新型的红外双波段/双视场导引头。通过利用中长波双波段的图像融合和长波红外下的双视场切换, 突出目标与背景特征信息差异, 可以有效提高导弹对目标的截获概率。采用 CODE V 软件设计了光学系统。整个系统采用共孔径式光学设计, 具有较好的成像质量, 满足系统要求。

关键词: 双波段/双视场; 导引头; 光学设计

中图分类号: TJ765.3 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190490

Optical design of infrared dual band/dual field of view seeker

Mao Yankai, Zhao Zhenyu, Zhang Guohua, Shi Guangyu

(Luoyang Institute of Electro-optical Equipment, Aviation Industry Corporation of China, Luoyang 471009, China)

Abstract: At present, most of the strapdown seekers use the combination of infrared single band and single field of view to match and intercept the target, but this method is susceptible to factors such as target/background characteristic, detector performance, field of view in increasingly complex battlefield environment. On the basis of retaining the original single medium wave infrared large field of view of a strapdown seeker, a new type of IR dual band/dual field of view seeker was proposed by adding two long wave large and small field of view. By using the image fusion of medium and long wave dual band and the switching of dual field of view under long wave infrared, the difference between target and background feature information was highlighted, which can effectively improve the interception probability of missile to target. The optical system was designed with CODE V software. The whole system adopted the common aperture optical design, which had good imaging quality and meets the system requirements.

Key words: dual band/dual field of view; seeker; optical design

收稿日期: 2019-11-10; 修订日期: 2019-12-16

基金项目: 总装“十三五”装备预先研究项目

作者简介: 毛延凯 (1986-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事导引头系统设计方面的研究。Email: myk2012cm@163.com

0 引言

现代作战环境下,随着目标/背景复杂程度的增加、红外诱饵的强干扰以及激光定向干扰武器的出现,传统对地捷联导引头采用红外单波段与单视场对目标进行匹配和截获方式的局限性日益突出。在日益复杂的战场环境下,红外单波段无法获取更加丰富的目标特征信息,而单视场则无法适应目标远近距离下的有效探测和精确跟踪^[1]。

以某捷联导引头为例,采用中波波段,瞬时视场为 $25^{\circ} \times 20^{\circ}$ 的大视场,作用距离为 5 km。在早晨、傍晚时,地面目标和背景中波辐射温差较小,不利于对目标的匹配截获,而此时长波则可以有效地保留景物之间的辐射对比度差异,细节更为丰富。对于海面/水面目标,海/水杂波在中波波段比长波的辐射更强,采用单一中波会导致目标的信噪比明显下降,不利于进行目标匹配和截获。因此,考虑配合长波特性和目标在中波、长波双波段下的特征信息差异,通过基准图与实时图像模板匹配的方式,采用双波段决策级融合算法,完成对目标的综合确认与识别定位。

在此基础上,笔者所在团队在保留了该型导引头原有 $25^{\circ} \times 20^{\circ}$ 中波大视场的同时,引入了长波 $25^{\circ} \times 20^{\circ}$ 和 $10^{\circ} \times 8^{\circ}$ 大小两个视场,通过设计红外大小双视场,可以丰富导弹作战模式。例如在目标搜索和跟踪过程中提前使用小视场,可以将部分固定目标的作用距离提升至 7 km 左右。此外,引入红外大小双视场后,远距离使用大视场,利用融合后的图像获取地面场景分布及疑似目标区域或目标位置信息,待近距后切换小视场,提高成像分辨率,实现对目标的精确识别确认及可靠跟踪,可以有效提高导弹精确打击的能力。

1 设计思路

1.1 双波段选择

首先,双波段的选择要从系统总体角度综合考虑,既要保证两个不同波段下目标与背景有足够的光谱差异性和干扰性,有利于目标与背景和干扰的鉴别,又要考虑系统的综合探测能力和可实现性。通常来说,需要考虑以下因素:

- (1) 在所选的波段内大气透过率较高;
- (2) 探测器在所选波段内探测灵敏度较高;
- (3) 目标与背景特征差异大,稳定性好。

红外制导方式正向多波段复合制导、多模制导、多传感器信息融合方向发展,其中双色复合的方式有短中复合、中长复合、中中复合等方式^[2]。根据多波段红外图像目标特征差异^[3]可知:

(1) 短中复合

目标与背景干扰在这两个波段差异最大,且在每个单波段,目标与干扰的特征差异也是最大的,从这点考虑,对抗干扰最为有利。

缺点是由于地面目标在短波的辐射较弱,我们只能依靠中波探测目标^[4],且太阳与地物反射干扰在短波较为严重,增加了抗干扰算法的复杂性。

(2) 中长复合

当目标/背景温差较低时,景物间的辐射对比度相差较小,长波能有效体现出对比度差异,可以保留的细节比较多。当目标/背景温差较高时,中波段目标与背景的辐射对比度较大,目标要比长波段明显。此外,在高湿度地区中波更为有利,而长波在穿透烟雾上的能力更强。可见中长波的组合使导引头在天气的适应性上能够相互补充^[5]。

缺点是长波探测器的制作较困难,成本更高。

(3) 中中复合

双视场下双中波设计的光学材料选择和系统设计上较为容易,但目标与干扰的差异相对较小。

通过以上分析,为了实现对地面目标,并兼顾对海面目标的搜索跟踪,选择采用长波和中波双波段复合工作模式。通过双波段信息互补,能够有效剔除目标的伪装信息和红外诱饵干扰,使目标更容易被探测和识别。

1.2 双视场变倍方式

目前双视场成像光学系统实现变倍的方式主要有轴向运动变倍和切换式变倍两种方式^[6]。

轴向运动变倍形式如图 1 所示,在物像共轭点之

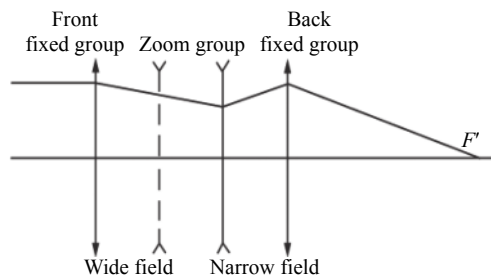


图 1 轴向运动变倍

Fig.1 Axial motion zoom

间通过镜组轴向移动来实现变倍,通常使用电机带动变倍组和补偿组轴向运动,并采用合理的凸轮曲线设计,实现一个电机带动镜组运动。该种变倍方式需要的光学系统轴向空间较大,不利于光学系统小型化,且变倍组运动速度相对较慢^[7],变倍时间较长,因此不适用该种方式。

切换式变倍如图 2 所示,该种方式无需为光学元件预留较大移动空间,光学元件切换到系统垂轴方向,仅需保证元件的复位精度和变倍前后的光轴一致性,利于小型化,同时配合适当的驱动方式能够实现系统大小视场的高速切换。

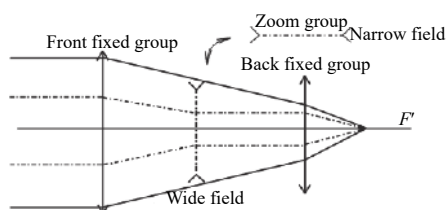


图 2 切换式变倍

Fig.2 Switch-type zoom

通过对比分析,为实现大小视场的高速切换,光学设计采用径向切换式变倍方式,提升整体空间利用率,同时减小载荷整体的体积。

2 光学系统设计方案

2.1 系统总体方案

目前,复合导引头在光路结构上主要有两种形式:分离孔径式和共孔径式^[8]。它们各自的优缺点如下:分离孔径式设计较容易,但体积较大且信息融合效率低^[9];共孔径式相对简单,且信息融合效率较高,不过存在着探测器的遮挡问题,结构排布不易。为了实现导引头的小型化,需要在确保探测性能的基础上使系统结构尽量简化。鉴于此,文中系统采用共孔径式光学系统。

中、长波光路经过同一整流罩后进入内部,在分光镜处进行分光,中波红外经过两次反射,通过中波成像镜组单独形成一路成像,长波红外则直接透过分光镜,经固定镜组和变倍镜组形成一路成像,并通过变倍镜组切入切出来实现长波大小视场之间的变倍。其系统示意图如图 3 所示。

由系统工作原理可知:在保留中波并引入长波探测器后,将双波段红外信息进行光电转换,输出含有

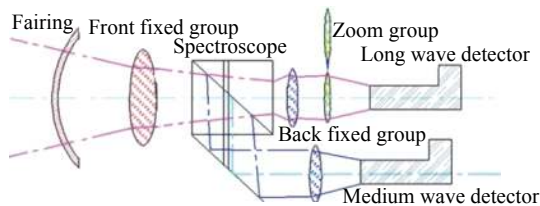


图 3 光学结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of optical structure

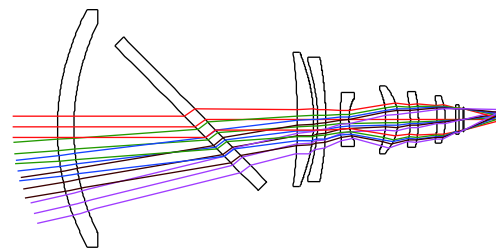
目标信息的电信号,红外成像组件将信号进行放大、滤波、帧处理及模数转换,输出红外数字图像信号,并送到后端进行图像融合,完成图像信号的选择决策、模板匹配、跟踪处理,输出目标偏差。而系统则实时发送切换指令,驱动变倍镜组切入切出来完成视场变倍。此外,利用双视场也可针对不同目标制定多种工作模式。

2.2 红外光学系统设计

中波探测器和长波探测器均采用 $15\ \mu\text{m}$, 640×512 焦平面制冷型探测器。使用 CODE V 软件对光学系统进行设计。依据材料特性,结合实际结构形式,光学系统窗口选用 ZnS 材料,在中长波段都具有较好的透过率,能够适应双波段制导方式的要求。透镜组红外材料选用的是 ZnSe、Silicon 和 IRG204,分光镜采用 Germ 材料。

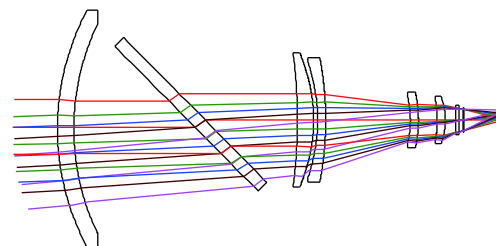
由光线入射方向的第 1 面曲率半径为 $R116.34\ \text{mm}$,第 2 面的曲率半径为 $R112.72\ \text{mm}$,中心厚度为 $7.5\ \text{mm}$,光学系统设计结果如图 4 所示。

长波红外采用一次成像形式,在光路中设计两片透镜切入/切出实现大/小视场切换,其中共用 6 个非



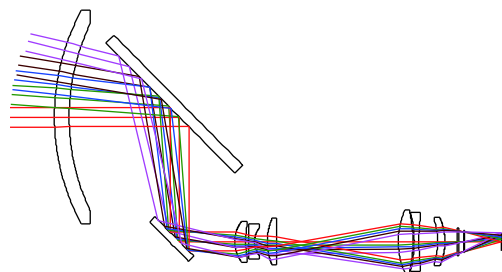
(a) 长波红外大视场

(a) Long wave infrared large field of view



(b) 长波红外小视场

(b) Long wave infrared small field of view



(c) 中波红外大视场
(c) Middle wave infrared large field of view

图 4 红外光学系统

Fig.4 IR optical system

球面,未使用衍射面;中波红外采用二次成像的形式,减小镜片口径,系统共使用 3 个非球面,未使用衍射面。其主要指标如表 1 所示。

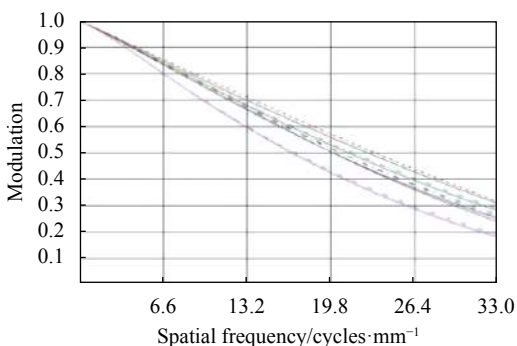
表 1 光学系统指标

Tab.1 Index of optical system

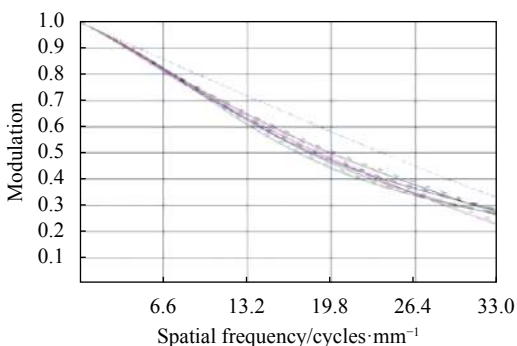
Index	LWIR/wide field	LWIR/narrow field	MWIR
Focal length/mm	21	53	20.92
Field of view	25.92°×20.80°	10.24°×8.27°	25.85°×20.80°

2.3 传递函数

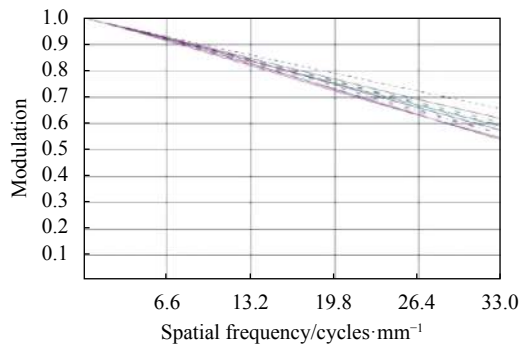
如图 5 所示,对设计结果分析可知:长波大视场、



(a) 长波红外大视场
(a) Long wave infrared large field of view



(b) 长波红外小视场
(b) Long wave infrared small field of view



(c) 中波红外大视场
(c) Middle wave infrared large field of view

图 5 红外光学系统 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves of IR optical system

长波小视场的中心及 0.7 视场 MTF≥0.20,中波大视场的中心及 0.7 视场 MTF≥0.5,系统具有较高传递函数,接近衍射极限,满足成像要求。

2.4 光学透过率

对整个光学系统分析可知:设计完成的长波红外双视场光学系统长焦位置共采用了 6 片透镜,共 12 个工作表面,短焦位置共采用了 8 片透镜,共 16 个工作表面,分光镜透过率为 88%。中波红外光学系统共采用了 6 片透镜,共 12 个工作表面,分光镜反射率为 95%。保护窗口透过率为 95%,探测器保护窗透过率为 0.98,若长波红外光学系统各工作面镀制 7.7~9.3 μm 红外宽带增透膜,单个表面平均透过率为 0.99,中波红外光学系统各工作面镀制 3.7~4.8 μm 红外宽带增透膜,单个表面平均透过率为 0.99,材料吸收系数如表 2 所示。

表 2 光学材料吸收系数

Tab.2 Absorption coefficient of optical materials

Materials	Zns	ZnSe	Germ	IRG204
Absorption coefficient/cm ⁻¹	0.15@10.6 μm	4×10 ⁻⁴ @3.8 μm 5×10 ⁻⁴ @10.6 μm	1.3×10 ⁻³ @3.8 μm 2.3×10 ⁻² @10.6 μm	2.9×10 ⁻² @48 μm 2.4×10 ⁻² @8.5 μm

因而,红外光学系统(含整流罩)平均透过率可通过如下公式计算^[10]:

$$\tau = \tau_0 r^m r_s \tau_1^k \prod_{i=1}^n e^{-\alpha_i \Sigma d_i} \quad (1)$$

式中:τ为光学系统透过率;τ₀为整流罩透过率;m为反射

镜数目; r 为反射镜的反射率; r_s 为分光镜的反射率; n 为透镜材料种类数量; τ_1 为透镜双面平均透过率; k 为透镜数量; α_i 为光学材料 i 的平均吸收系数; $\sum d_i$ 为光学材料 i 透镜总厚度。

中波红外大视场:

$$\tau = 0.99^{12} \times 0.95 \times 0.95 \times (e^{-0.15 \times 0.55} \times e^{-0.024 \times 3.7}) \times 0.98 \times 100\% = 0.66 \quad (2)$$

长波红外大视场:

$$\tau = 0.99^{10} \times 0.95 \times 0.88 \times (e^{-0.0005 \times 0.9} \times e^{-0.024 \times 2}) \times 0.98 \times 100\% = 0.71 \quad (3)$$

长波红外小视场:

$$\tau = 0.99^6 \times 0.95 \times 0.88 \times (e^{-0.0005 \times 0.5} \times e^{-0.024 \times 1.4}) \times 0.98 \times 100\% = 0.75 \quad (4)$$

3 结束语

分析总结了现有对地捷联导引头在复杂战场环境下采用单波段单视场方式对目标进行匹配和截获时存在的若干问题。通过对几种不同波段组合进行对比分析,在某型捷联导引头基础上保留了原有中波红外大视场,并引入长波红外大、小两个视场,阐述了一种新型的红外双波段/双视场导引头设计方案,给出了红外光学成像系统实现方法。通过计算可知,所设计的光学系统在双波段/双视场下均具有良好的传递函数和光学透过率,成像质量良好,光学系统结构紧凑,实现了导引头的小型化设计,能够有效满足系统要求。

此外,在该设计中所需的材料和加工工艺在目前的条件下均可实现,证明了该红外双波段/双视场导引头设计方案是可行的,也对于未来捷联导引头的设计具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] Fan Jinxiang. Development analysis of infrared imaging seekers of kinetic kill vehicles in America [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(1): 1-6. (in Chinese)
范晋祥. 美国动能拦截弹红外成像导引头的发展分析[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(1): 1-6.

[2] Meng Dongdong, Zhang Hongbo, Li Mingshan, et al. Laser technology for direct IR countermeasure system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 1105009. (in Chinese)

孟冬冬, 张鸿博, 李明山, 等. 定向红外对抗系统中的激光器技术[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(11): 1105009.

[3] Zhu Xiaohong, Lin Suzhen, Zhang Shangmin, et al. Selection of difference texture features for multi-band infrared images [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016, 43(4): 66-72. (in Chinese)
朱小红, 蔺素珍, 张商珉, 等. 多波段红外图像的差异纹理特征选择[J]. *光电工程*, 2016, 43(4): 66-72.

[4] Li Yingjie, Zhang Junju, Chang Benkang, et al. Remote multiband infrared image fusion system and registration method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0526002. (in Chinese)
李英杰, 张俊举, 常本康, 等. 远距离多波段红外图像融合系统及配准方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0526002.

[5] Ma Wenpo. Performance analysis on MWIR and LWIR pushbroom imaging [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(12): 3861-3865. (in Chinese)
马文坡. 中波红外与长波红外推扫成像性能分析[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(12): 3861-3865.

[6] Li Yundong, Sun Shuwang, He Lei. Study on varifocal mechanism design for infrared system [J]. *Electronics Optics & Control*, 2012, 19(5): 88-104. (in Chinese)
李运动, 孙树旺, 何磊. 红外系统变倍机构研究与分析[J]. *电光与控制*, 2012, 19(5): 88-104.

[7] Wang Haiyang, Li Li, Jin Ning, et al. Design of MWIR continuous zoom optical systems with large zoom range [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(2): 398-402. (in Chinese)
王海洋, 李力, 金宁, 等. 大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(2): 398-402.

[8] Zhao Chao, Yang Hao. A survey on development trends and key technologies of infrared guidance systems [J]. *Electronics Optics & Control*, 2008, 15(5): 48-53. (in Chinese)
赵超, 杨号. 红外制导的发展趋势及其关键技术[J]. *电光与控制*, 2008, 15(5): 48-53.

[9] Cheng Zhifeng, Liu Fuhe, Xun Xianchao. Opto-mechanical design and analysis of dual band sharing aperture imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3366-3372. (in Chinese)
程志峰, 刘福贺, 荀显超. 双波段共口径成像系统光机设计与分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(11): 3366-3372.

[10] Li Lin. Modern Optical Design Method[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2009. (in Chinese)
李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009.