

滚仰式导引头红外光学系统设计

孙赤全¹, 赵侃², 孟军合², 穆郁²

(1. 海军驻天津地区兵器设备军代表室, 天津 300300; 2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: 滚仰式红外光学系统由物镜前组、折转镜组和成像后组组成, 其平台内框架俯仰范围可达到 $\pm 90^\circ$, 外框架可以实现 360° 滚转, 使光学系统观察视场覆盖整个前半球。光学系统实现了 100% 冷光阑效率。为适应较大的工作环境温度变化, 对光学系统开展了被动无热化设计, 给出了被动无热化实现的计算公式, 并利用“虚拟色差”技术, 快速确定了满足无热化条件的光学系统最优初始解。针对制冷型红外光学系统的“冷反射”效应, 给出了冷反射诱导温差(NITD)的计算公式, 并对敏感表面进行了优化控制。设计结果表明, 光学系统焦距为 58 mm, 视场大小为 4.0° , F 数为 2.0, 在 $-50\sim 60^\circ\text{C}$ 工作温度范围内系统 MTF 值接近衍射极限, 并对“冷反射”效应具有较好的抑制能力。经样机测试, 光学系统成像清晰稳定, 性能良好, 满足设计及使用要求。

关键词: 滚仰; 红外光学系统设计; 虚拟色差; 冷反射

中图分类号: TN21; O43 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0204005

IR optical system design of roll-elevation seeker

Sun Chiquan¹, Zhao Kan², Meng Junhe², Mu Yu²

(1. Military Representative Office of Navy in Tianjin, Tianjin 300300, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: IR optical system of roll-elevation seeker was composed of object lens front group, turning mirrors group and imaging rear group. The pitch frame had $\pm 90^\circ$ moving range and the roll frame had 360° moving range, so that the combination of rolling and pitching enabled the optical system to realize all over the front hemisphere field. The optical system achieved 100% cold shield efficiency. In order to adapt to the large variation of working environment temperature, the athermal design was used, and the formulas to realize athermal design were given. By using the technique named dummy chromatic aberration, the best initial solution of athermal design was found quickly. For controlling the Narcissus effect of this cooled IR optical system, the formula to compute the NITD were given, and the sensitive surface of Narcissus effect was optimized. The design result showed that the optical system working parameters were the effective focal length of 58 mm, field of view of 4.0° , $F/\#$ of 2.0, and the MTF of the optical system was close to the diffraction limit when working temperature changed from -50°C to 60°C . The narcissus effect was also controlled effectively. The optical system met the design requirements by imaging test.

Key words: roll-elevation; IR optical system design; dummy chromatic aberration; Narcissus

收稿日期: 2016-06-10; 修订日期: 2016-07-20

作者简介: 孙赤全(1960-), 男, 高级工程师, 从事红外技术的研究和管理方面的研究工作。Email: dakanxia3434@163.com

0 引言

作为导弹的重要部件,导引头在搜索目标和识别目标方面起到至关重要的作用,其性能直接影响导弹的整体性能。以近距格斗空空导弹为代表的导弹,导引头需要具有红外成像制导、捷联制导、大视场、小型化以及轻量化等特点,以满足高机动性及大离轴角发射要求。常规的导引头稳定平台受限于空间结构,其离轴角很难超过 $\pm 60^\circ$ ^[1]。滚仰式导引头稳定平台采用滚转外框架、俯仰内框架结构,外框架可以实现 360° 滚转,内框架俯仰范围可达到 $\pm 90^\circ$,使导引头观察视场可以覆盖整个前半球,为导弹实现大离轴角发射提供了必要条件^[2]。同时滚仰式导引头采用双框架稳定平台,既减小了导引头的体积和质量,改进弹体气动性能,又节约了成本,非常适用于红外成像型近距格斗空空导弹。

目前国外现役的四代近距格斗空空导弹纷纷采用滚仰式两轴捷联稳定平台^[3],典型代表有美国雷神(Raytheon)公司生产的 AIM-9X、德国博登湖仪器技术公司(BGT)生产的 IRIS-T^[4]、英国 BAE 公司生产的 ASRAAM 和俄罗斯三角旗设计局生产的 R-73M。其主要特点是采用低阻大攻角气动外形、红外成像制导、大离轴角发射技术,以及推力矢量和气动力复合控制等。图 1 所示为 AIM-9X 导引头照片,图 2 所示为 IRIS-T 导引头照片。

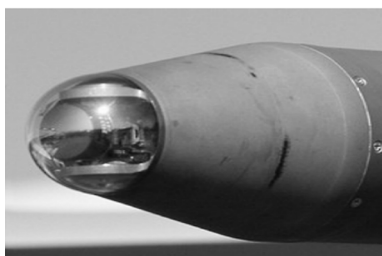


图 1 AIM-9X 导弹导引头

Fig.1 AIM-9X seeker



图 2 IRIS-T infrared imaging seeker

图 2 IRIS-T 红外成像导引头

国内目前还没有采用滚仰式稳定平台的空空导弹定型服役。

综合国内外研究现状,采用滚仰式稳定平台的空空导弹因其大搜索/跟踪视场、红外凝视成像、小体积、轻质量等特点已成为未来近距空空武器发展的主要方向,但也存在较大的研制难度。

红外光学系统作为滚仰式导引头的核心部件,结构复杂,布局限制及其苛刻,对光学系统的各部分的口径和长度都有严格限制,为同时实现小型化和 $\pm 90^\circ$ 大离轴角搜索需在光学系统中引入运动光学元件,导致光学系统的复杂程度进一步增加,设计、加工、装校难度较大。此外,空空近距格斗导弹工作环境温度极端恶劣,温度跨度通常超过 100°C ,导致光学系统在工作中产生较严重的热差,严重影响系统性能^[5-8]。同时,制冷型红外系统的“冷反射”效应也会导致图像均匀性恶化^[9-11]。因此,有必要对滚仰式导引头红外成像光学系统的设计方法开展深入研究。

文中提出了一种基于被动无热化技术的滚仰式导引头中波红外光学系统设计方法,并对“冷反射”效应进行了优化控制,经理论分析和样机实测,光学系统性能优良,在 $-50\sim 60^\circ\text{C}$ 工作温度范围内工作稳定,符合设计及应用要求。

1 系统布局及工作原理

滚仰式导引头光学系统由光学头罩和光学镜头两部分组成。光学头罩采用蓝宝石材料,与中波红外导引头普遍采用的氟化镁材料相比,蓝宝石头罩气动加热后的红外辐射较低,可以进一步降低探测背景噪声,扩大动态探测范围。且由于蓝宝石极高的强度使得光学头罩可以做得更薄,抗热冲击、耐腐蚀能力更强。根据导引头的气动外形设计要求确定头罩外表面直径为 85mm ; $\pm 90^\circ$ 的俯仰角要求光学头罩球冠张角达到 180° ,即半球形头罩。

光学镜头由物镜前组、折转镜组和成像后组组成,其布局形式大致如图 3 所示。其中物镜前组安装在俯仰框(内框架)上,绕 Y 轴转动实现“俯仰动作”,转心与光学头罩中心重合,俯仰角度范围为 $\pm 90^\circ$;俯仰框通过轴承与滚动框(外框架)相连,与折转镜组一起随滚动框绕 Z 轴做 360° 滚动;成像后组和探

测器固联于弹体上。内外框架组合运动,实现对目标全向大离轴角搜索与跟踪。

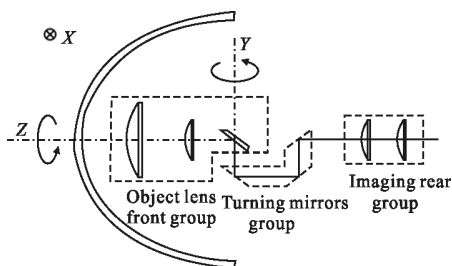


图 3 滚仰式光学系统结构布局

Fig.3 Configuration of roll-elevation optical system

滚仰式导引头体积限制严格,由于目前可获得斯特林制冷型中波红外探测器体积较大,通常长度大于 120 mm,导致光学系统设计空间极为狭小,布局难以实现。文中系统采用 J-T 制冷型中波红外探测器,探测器与成像镜组对接,并固联于弹体上,这样设计既拓宽了光学系统的设计空间,又减少运动部件的数量,降低了信号传输干扰及电机负荷,有利于提高光学系统的信噪比和可靠性,同时可消除弹体自旋对成像的影响。

2 光学系统设计方法

制冷型红外光学系统,设计中应实现 100%冷光阑效率,即光学系统出瞳与探测器冷光阑 100%匹配,以降低杂散光对成像的影响,提高系统信噪比。同时,为保证红外光学系统具有较高的灵敏度和均匀性,系统中一般不允许存在遮挡或渐晕。

光学系统要求在 -50~60℃ 工作温度范围内工作稳定,且其结构复杂,布局空间受限,因此,需对滚仰式光学系统开展被动无热化设计。被动无热化设计实现的条件为:

$$\begin{cases} \frac{1}{(h_1 \varphi)^2} \sum_i h_i^2 T_i \varphi_i = X_m L \\ \frac{1}{(h_1 \varphi)^2} \sum_i h_i^2 C_i \varphi_i = 0 \\ \varphi = \sum_i h_i \varphi_i \end{cases} \quad (1)$$

式中: φ 为系统总的光焦度; h_i 为光线在第 i 个薄透镜上的投射高度; T_i 为第 i 个薄透镜的热差系数; φ_i 为第 i 个薄透镜的光焦度; X_m 为结构材料的

热膨胀系数; L 为光学系统结构材料的总长度; C_i 为第 i 个薄透镜的色差系数。

为快速确定无热化设计的最优初始解,光学系统采用了“虚拟色差”设计技术,将热差融合到色差中,建立虚拟材料库,设计时直接考虑“虚拟色差”和其他像差的影响,省却了常温设计过程和宽温度带下的分析过程,快速有效地获得了满足无热化条件的初始解^[12]。

光学系统设计中需进行“冷反射”控制。“冷反射”是指由于光学系统折射元件表面存在剩余反射,制冷型红外成像系统的探测器通过冷光阑观察到自身冷杜瓦和周围热外壳的现象,其典型的表现形式为在图像某个位置存在黑斑(冷信号),如图 4 所示。“冷反射”计算的公式为:

$$\Delta T_N = (\Delta T_{sd} \cdot R) / (S_N \cdot S_I)^2 \quad (2)$$

式中: ΔT_N 为冷反射导致的图像温差,即冷反射诱导温差 (NITD); ΔT_{sd} 为景物与探测器之间的温差; R 为透镜的表面反射率; S_N 为冷反射点的弥散斑直径; S_I 为正常像点的弥散斑直径。

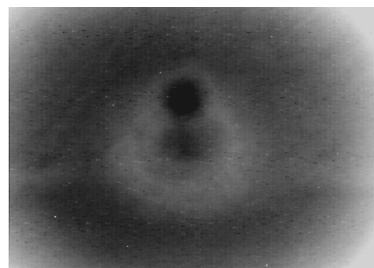


图 4 冷反射的表现形式

Fig.4 Influence of Narcissus

“冷反射”是制冷型红外光学系统所特有的现象,会导致图像的均匀性下降。设计中,通过控制特定光线在敏感表面上的投射高度和投射角度,以及冷反射随视场的变化情况,有效抑制了光学系统的“冷反射”效应。

3 光学系统设计结果及分析

光学系统的主要设计指标如下:

- (a) 光谱范围 中波红外;
- (b) 物方视场 4.0°;
- (c) 焦距 58 mm;
- (d) 光学系统 F 数 2;

- (e) 冷光栏效率 100%；
- (f) 无热化温度范围 $-50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。

光学系统的设计结果如图 5 所示,系统由蓝宝石光学头罩、6 片透镜和 4 面反射镜构成,透镜材料包括 Si、Ge、CVD ZnS 等。为提高成像质量,控制系统尺寸,设计中使用了高次非球面。

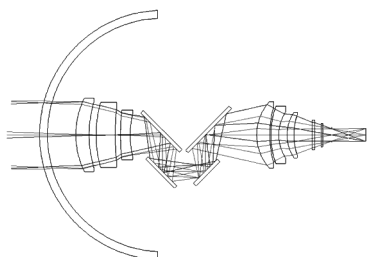


图 5 光学系统图

Fig.5 Layout of optical system

图 6、图 7 分别给出光学系统在不同视场下的点列图和图像畸变曲线。光学系统各视场弥散斑半径最大值不大于 $14\ \mu\text{m}$, RMS 最大值仅为 $7\ \mu\text{m}$, 弥散斑大小接近艾里斑的物理半径, 图像最大畸变小于 2%, 满足使用要求。

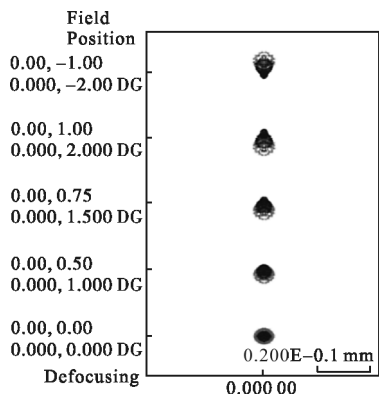


图 6 不同视场下的点列图

Fig.6 Spot diagram under different FOVs

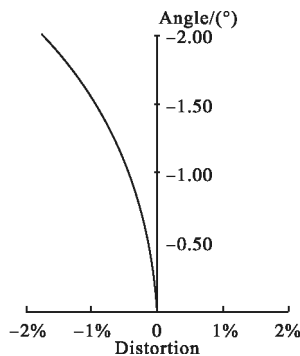


图 7 畸变曲线

Fig.7 Distortion curve

由于光学系统结构复杂,光路较长,导弹在高速飞行中,气动加热会产生较大的温度梯度。为此,设计中首先对物镜前组和成像后组单独进行被动无热化设计,满足消热差条件后,再进行联合优化,使光学系统在多种温度分布条件下成像质量始终保持稳定。

光学系统在 $-50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内的调制传递函数曲线如图 8 所示。从图中可以看出,光学系统各视场下的调制传递函数(MTF)值在乃奎斯特频率(16 lp/mm)处均接近衍射极限,在全温度带内实现了被动无热化设计。

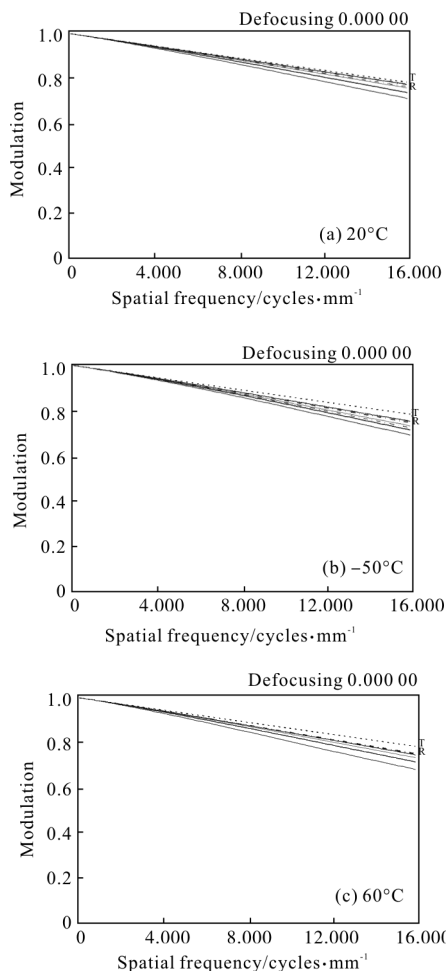


图 8 $-50\sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内系统的 MTF 曲线

Fig.8 MTF curves of optical system in the range of $-50\sim 60^{\circ}\text{C}$

优化后光学系统的 NITD 曲线如图 9 所示。图 9 表明,光学系统在不同温度下,全视场内冷反射诱导温度变化均较小,不存在突变点。全温度带内的冷反射均得到较好的抑制。

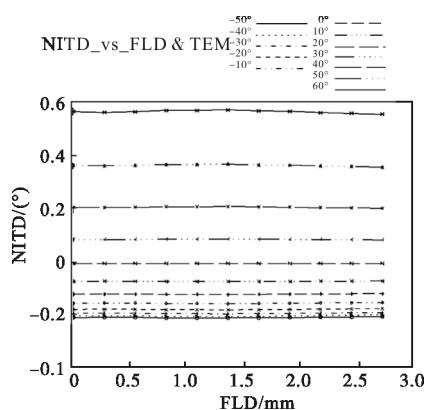


图 9 光学系统的 NITD 曲线
Fig.9 NITD curve of optical system

光学系统进行精密装校后,与探测器组件对接,对室外景物开展了成像测试,如图 10 所示。由图可见,光学系统成像清晰,性能稳定,满足使用要求。

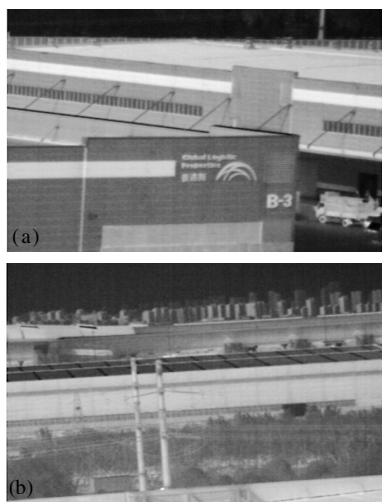


图 10 成像性能测试
Fig.10 Imaging performance test of system

4 结 论

文中实现了一种基于滚仰式导引头的红外光学系统方案。光学系统具备全向大离轴角搜索能力,搜索视场覆盖整个前半圆。利用虚拟色差技术快速确定了光学系统的无热化最优初始解,在 $-50^{\circ}\text{C}\sim+60^{\circ}\text{C}$ 温度范围内实现了被动无热化。光学系统对“冷反射”效应具备较好的抑制能力。经实测,光学系统在全视场内调制传递函数在 16lp/mm 处大于 0.65,成像清晰稳定,性能良好,满足设计及使用要求。该方案有效解决了光学系统大离轴视

场需求与小型化设计之间的矛盾,具有广阔的应用前景。下一步的研究方向主要有:一、对滚仰式光学系统在多种极限工作条件下的成像性能开展进一步研究分析;二、开展基于其他搭载平台的滚仰式光学系统应用研究;三、尝试通过直接控制冷反射光线在冷光阑上的投射高度来抑制系统的冷反射效应。

参考文献:

- [1] Mu Xuezheng, Zhou Shuping, Zhao Guijin. Analysis and evaluation of new approach of AIM-9X AAM seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(4): 392-394. (in Chinese)
穆学桢,周树平,赵桂瑾. AIM-9X 空空导弹位标器新技术分析和评价[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(4): 392-394.
- [2] Zhang Xin, Jia Hongguang. 90° off-axis angle infrared optical system of roll-pitch seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 143-147. (in Chinese)
张鑫,贾宏光. 90° 离轴角红外滚仰式导引头光学系统[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 143-147.
- [3] Shang Chao, Wang Junping, Wu Junbiao. Simulation of object-image transformation for roll-pitch seeker with slick chain [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(9): 1768-1773. (in Chinese)
尚超,王军平,吴军彪. 滚仰式光滑环物象变换关系仿真研究[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(9): 1768-1773.
- [4] Fan Huitao, Liu Daijun. Development trends of short-range dogfight IR air to air missile [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(5): 564-568. (in Chinese)
樊会涛,刘代军. 红外近距离格斗空空导弹发展展望 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 564-568.
- [5] Fu Qiang, Zhang Xin. Athermalization of the medium-wave infrared optical system based on chalcogenide glasses [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5): 1467-1471. (in Chinese)
付强,张新. 基于硫系玻璃的中波红外光学系统无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1467-1471.
- [6] Mi Shilong, Mu Da, Mu Meng. Athermalization of a compact LWIR optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(10): 3032-3036. (in Chinese)
米士隆,牟达,牟蒙. 紧凑型长波红外光学系统无热化设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(10): 3032-3036.

- [7] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Liao Sheng, et al. Infrared dual band athermal optical system with common aperture [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 268–277. (in Chinese)
白瑜, 廖志远, 廖胜, 等. 共孔径消热差红外波段光学系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(2): 268–277.
- [8] Qu Hemeng, Zhang Xin. Design of athermalized infrared optical system with high-speed switching and compact dual-FOV[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(8): 622–629. (in Chinese)
曲贺盟, 张新. 高速切换紧凑型双视场无热化红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2014, 7(8): 622–629.
- [9] Dun Xiong, Tao Yu, Meng Junhe. Narcissus suppression in dual-FOV IR scanned imaging systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 732–735. (in Chinese)
顿雄, 陶玉, 孟军合. 双视场红外扫描成像系统冷反射抑制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 732–735.
- [10] Luo Shoujun, Xia Yinhui, Yang Ningning, et al. Long-wavelength infrared continuous zoom scanning optical system [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 107–113. (in Chinese)
骆守俊, 夏寅辉, 杨宁宁, 等. 扫描型长波红外连续变焦光学系统[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 107–113.
- [11] Zhang Bao, Hong Yongfeng, Shi Guanghui. Application of non-uniformity correction to stray radiation suppression of infrared optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(12): 2412–2427. (in Chinese)
张葆, 洪永丰, 史光辉. 非均匀性矫正对红外杂散光辐射抑制中的作用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(12): 2412–2427.
- [12] Lei Li, Wu Xiaojing, Meng Junhe, et al. Study on the method for finding initial solution of IR optical system athermalization design [C]// Guidance and Fuze Information Net Association, CSAA, 2005. (in Chinese)
雷丽, 吴晓靖, 孟军和, 等. 红外光学系统无热化设计初始解确定方法研究 [C]//中国航空学会制导与引信专业信息网学术交流会, 2005.