

## 90°离轴角红外滚仰式导引头光学系统

张鑫, 贾宏光

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 介绍了一种光机一体化结构的滚仰式红外导引头光学系统。光学系统的部分组件通过四块反射镜嵌入万向节支架, 万向节支架由  $N \times 360^\circ$  运动的滚转框架和  $\pm 90^\circ$  运动的俯仰框架组成, 双框架结构进行滚仰式运动, 使光学系统具有前半球的观察视场。光学系统为二次成像结构, 由前组一次成像物镜、中继镜和后组倒像物镜三部分构成。由于导引头内部存在大的热梯度, 前组需要单独消热差, 而中继和后组共同消热差。利用热差互补原理的消热差设计方法获得各个透镜初始的光焦度, 再由 ZEMAX 光学设计软件进行像差校正。分析结果表明, 当环境热沉浸温度或热梯度温度从  $-40 \sim 80^\circ\text{C}$  变化时, 成像质量保持稳定, 调制传递函数(MTF)接近衍射极限。光学系统满足光、机、热一体化设计要求。

**关键词:** 滚仰式导引头; 红外光学系统; 90°离轴角; 消热差设计

**中图分类号:** TN21   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2013)01-0143-05

## 90° off-axis angle infrared optical system of roll-pitch seeker

Zhang Xin, Jia Hongguang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** An optical system of roll-pitch infrared seeker with optical, mechanism integrated structure was presented. With the use of four reflective plane mirrors, the subassemblies of the optical system embed in the gimbal. The gimbal consisted of roll frame with  $N \times 360^\circ$  moving range and pitch frame with  $\pm 90^\circ$  moving range, so that the optical system could be adjusted to look over all of the front hemisphere field. The optical system design process was as follows: firstly, a reimaging system was set up, including front group, relay lens and rear group. As a high thermal gradient existed within the seeker, the front group must be athermal design alone, while the relay lens and rear group can be athermal design together. Then, the initial optical power distribution among lens can be resolved with the design method of mutual compensation of thermal dispersion. Finally, the optical system's aberrations were corrected by ZEMAX software. The analysis results show that when environment soaking temperature or gradient temperature varies from  $-40^\circ\text{C}$  to  $80^\circ\text{C}$ , the image preserves high quality and modulation transfer function (MTF) still approaches diffraction limit. The optical system achieves optical, structure and thermal integrated design.

**Key words:** roll-pitch seeker; infrared optical system; 90° off-axis angle; athermal design

收稿日期: 2012-05-12; 修订日期: 2012-06-15

基金项目: 国防科技创新重要方向项目(YYYJ-1122)

作者简介: 张鑫(1985-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事光学设计、激光技术方面的研究。Email: xin\_tju@163.com

## 0 引言

近距离格斗在现代高科技空战中发挥着不可替代的作用,当今世界强国都在大力发展第四代、第五代空空近距离格斗导弹<sup>[1]</sup>。先进气动外形、红外成像制导、矢量推力、捷联制导、以及小型化、轻量化是其核心技术。空战格斗中,早发现、先打击,是克敌制胜的要诀,所以红外成像导引头是首先要发展关键技术。空空近距离格斗导弹需要具有大离轴角发射能力,达到 $\pm 90^\circ$ ,所以要求导引头万向节具有相应的离轴观察视场。常规的导引头万向节采用俯仰和方位两自由度框架结构,简单紧凑,但由于空间结构的限制,其离轴角很难超过 $60^\circ$ <sup>[2]</sup>。滚仰式导引头<sup>[3-4]</sup>万向节采用滚转外框架、俯仰内框架结构,其中外框架滚转轴与弹体纵轴一致,内框架俯仰轴与外框架滚转轴正交。外框架可以实现 $N \times 360^\circ$ 滚转,内框架俯仰范围可达到 $90^\circ$ ,使导引头观察视场可以覆盖整个前半球。美国研制的 AIM-9X 导弹,欧洲六国联合研制的 IRIS-T 导弹<sup>[5]</sup>是最具代表性的第四代空空近距离格斗导弹。二者都是采用滚仰式万向节支架结构,其红外成像系统拥有前半球观察视场,具有超强的空中近距打击能力,目前已经装备美、欧空军。

空空格斗弹导引头工作的温度环境极端恶劣,温度范围从 $-40 \sim -80^\circ\text{C}$ ,通常光学系统将产生严重的热差,从而导致成像模糊,严重降低系统性能。调焦补偿能够使成像重新清晰,但是极大地增加了系统复杂度,且难以保证实时性,所以导引头光学系统主动消热差难以实现,需要采用被动消热差方案。目前光学系统被动消热差设计已有很多报道<sup>[6-8]</sup>,已经应用到多个领域,但是这类系统往往体积较大。如何在滚仰式导引头复杂的光机结构中实现消热差也是需要解决的技术。

文中报道了一种红外滚仰式导引头光学系统,将红外成像组件嵌入滚仰式万向节支架,物镜组件随万向节支架滚转运动,实现前半球观察视场,并且利用红外材料的热性质差异实现了被动消热差。分析结果表明,光学系统性能优良,并且在 $-40 \sim -80^\circ\text{C}$ 的温度范围内像质稳定。

## 1 光机系统结构

导引头光学系统包括整流罩和物镜组件。整流罩为同心等厚球冠,外形尺寸受到导引头外形结构和内部结构组建的共同制约, $\pm 90^\circ$ 的离轴观察视场要求整流罩球冠达到半球,气动外形设计要求整流罩直径为 $96\text{ mm}$ 。超音速导弹整流罩的材料要求光学透过率高、机械强度大、理化性质稳定,可选择材料主要为蓝宝石、氧化铝和尖晶石。整流罩的厚度为 $5\text{ mm}$ ,其内直径仅为 $86\text{ mm}$ 。

导引头万向节支架的转动中心必须与整流罩球心重合,要实现 $\pm 90^\circ$ 的离轴观察视场,要求物镜组件和探测器总长要小于整流罩内直径。由于目前可获得的中波制冷探测器体积较大,例如法国 Sofradir 公司的斯特林制冷探测器长度大于 $140\text{ mm}$ ,J-T 制冷探测器长度大于 $80\text{ mm}$ ,而焦距为 $60\text{ mm}$ 的光学系统,无论采用何种结构方式,长度至少大于 $30\text{ mm}$ ,所以物镜组件和探测器不能同时随同万向节滚转运动以实现 $2\pi$ 半球的观察角,需要引入运动光学元件使镜头与探测器分离,以实现前半球视场的观察范围。

引入运动光学元件将导致整个系统复杂度增大,装调、控制难度增加,所以要尽可能减少运动光学元件和质量,借鉴滚仰式光滑环光路<sup>[9]</sup>,文中设计采用的光机系统结构如图 1 所示。

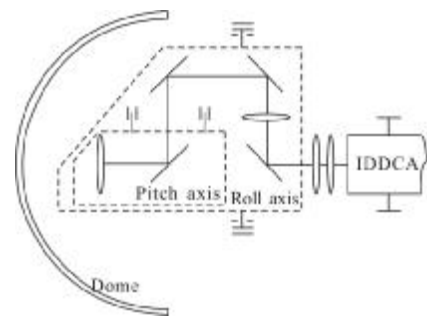


图 1 中波红外光学系统结构图

Fig.1 Configuration of the mid wavelength infrared optical system

万向节中心与整流罩球心重合,外框架滚转运动,内框架俯仰运动,实现前半球视场扫描,四反射镜穿轴导光;物镜前组和第一片反射镜在俯仰框架上,俯仰框架通过轴承与滚转框相连,运动范围 $\pm 90^\circ$ ;其余三片反射镜和中继透镜,连同俯仰框通过轴承连接在滚转框架上,滚转框架通过轴承与弹体相连,

运动范围  $N \times 360^\circ$ ; 物镜后组和斯特林制冷探测器 (IDDCA) 固联在弹体上, 以减小运动框架的重量和尺寸。内外框架组合运动, 即实现  $2\pi$  半球观察视场。

## 2 光学系统设计

由于系统结构复杂, 光路转折, 所以对整个光学系统的各个部分的长度和口径都有严格约束。物镜前组、中继、后组以及四反射镜的位置和尺寸设计要兼顾框架、轴承、电机、编码器等结构要求。红外系统要求高的灵敏度和均匀性, 不允许存在渐晕、遮挡。所以系统对光学元件和光束路径都有严格要求, 这是该系统的设计难点之一。

另一个难点是复杂穿轴长光路光学系统的消热差设计。由于光机结构复杂, 光路长且转折, 高速飞行导致的气动加热将使导引头内部产生大的温度梯度: 前组透镜靠近头罩, 温度高; 中继透镜和后组透镜远离头罩, 温度低。所以前组一次成像系统需要单独满足消热差条件, 而中继和后组倒像放大系统可以组合满足消热差条件。这样才能保证光学系统在热梯度和热浸没条件下都能实现被动消热差。

采用二次成像结构既能延长光路, 又可以有效控制系统口径, 使入瞳位于物镜前组和第一片反射镜之间, 最大限度地减小光束直径, 探测器冷光阑作为系统孔径光阑, 以达到 100% 冷光阑效率; 中间像面在第三片反射镜与中继透镜之间, 此处也是视场光阑的位置, 视场光阑能够减少视场外杂散光影响; 中继透镜起到场镜作用, 使入瞳与孔径光阑共轭, 并且降低光线投射高度, 减小后组尺寸; 后组将中间像面二次成像在焦平面处, 并且承担校正系统剩余像差的作用。

中间像面的位置至关重要, 靠前则后面光束直径和元件尺寸势必越来越大, 难以控制; 靠后则前面光束直径和元件尺寸较大, 也不利于系统结构优化; 中间像面也不能与光学元件相交, 否则会将该光学元件成像在探测器的靶面上, 影响成像质量; 系统设计还要考虑减小冷反射效应, 否则将导致鬼像, 降低系统性能。二次成像结构的焦距公式为:

$$f_s = f_1 \cdot m_2$$

式中:  $f_s$  为系统焦距;  $f_1$  为前组一次成像焦距;  $m_2$  为后组放大率。由上式可知, 中间像面的位置和大小取决于前组焦距, 所以系统各组的光焦度分配需要仔

细设计。经过反复尝试, 确定将中间像面放在位于第二片和第三片反射镜之间, 场镜位于第三片和第四片反射镜之间, 能够同时兼顾前组和后组的口径, 前组的焦距约为 100 mm, 后组的放大率约为 0.6。调整中继透镜和后组透镜焦距和位置, 使入瞳位于前组附近, 从而前组口径实现最小化, 约为 30 mm。

前组一次成像系统要求单独消热差, 而且剩余色差也要非常小, 否则中继和后组倒像放大系统难以补偿色差。镜筒热胀冷缩引起的热差与透镜折射率随温度变化引起的离焦相比, 影响较小, 为简化分析过程, 初始分析时暂不考虑。应用热差互补的消热差设计方法, 前组应满足光焦度方程、消热差方程和消色差方程:

$$\sum_{i=1}^j \phi_i = \frac{1}{f} \quad \sum_{i=1}^j T_i \phi_i \approx 0 \quad \sum_{i=1}^j \frac{\phi_i}{V_i} \approx 0$$

式中:  $T_i$  为材料的归一化光焦度温度系数;  $f$  为总焦距;  $\phi_i$  为第  $i$  个透镜的光焦度;  $V_i$  为第  $i$  个透镜的阿贝常数;  $j$  为总透镜数量。

常用中波红外材料的  $T-1/V$  如图 2 所示, 从图中容易看出, 硅和锗的连线通过原点附近, 所以硅锗材料二者组合可以同时近似满足光焦度分配、消热差和消色差条件。经计算, 硅透镜光焦度为正, 初始的光焦度为 0.018 333; 锗透镜光焦度为负, 初始的光焦度为 -0.008 333。

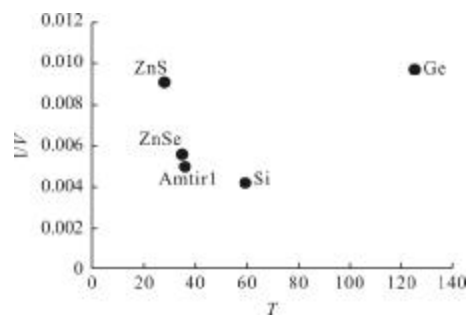


图 2 中波红外材料的  $T-1/V$  值分布

Fig.2  $T-1/V$  of the mid-infrared materials

中继透镜位于第三片和第四片放射镜之间, 由于空间限制, 只用一片透镜, 因其光焦度为正, 所以采用光焦度温度系数较小且色散较小的材料硅, 它的光焦度直接决定第四片反射镜的尺寸, 初步确定为 0.024 983; 后组倒像透镜组承担较大的光焦度, 同时要补偿系统剩余像差, 所以采用三片透镜, 材料依

次为硅、锗、硅,并且在靠近光阑最近的表面引入高次非球面,以提供更多的自由变量,有利于系统剩余像差的校正。后组的光焦度为 0.045 163,后组透镜连同中继透镜,共同近似满足光焦度分配、消热差和消色差条件,三片透镜的光焦度依次为:0.005 651, -0.037 636,0.077 148。

通过以上步骤,确定了透镜元件的材料、光焦度和位置,将此初始结构导入 ZEMAX 商用光学设计软件进行优化,需指出的是本设计中优化函数必须仔细限制各个元件的位置和光束在各个元件上的入射高度,才能保证外形尺寸满足机械结构要求。同时 ZEMAX 软件的多重结构功能设计多个温度点同时优化,保证最终设计满足消热差要求。优化设计结果如图 3 所示。图 3 中显示了 0,0.7,1.0, -0.7 和 -1.0 视场光线,包络线为子午截面上的光束全口径,光束分布均匀,为机械结构设计留了充足空间。

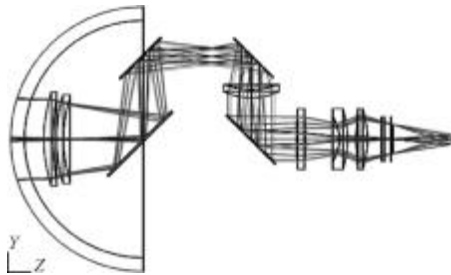


图 3 中波红外光学系统光路图

Fig.3 Layout of the mid wavelength infrared optical system

图 4 为 20℃下的 MTF 曲线,像元尺寸的乃奎斯特频率处,即 17 lp/mm,全视场的 MTF 值都大于 0.7,接近衍射极限。图 5 所示为 20℃下的能量包围圆曲线,全视场范围内单位像元收集能量接近 90%。

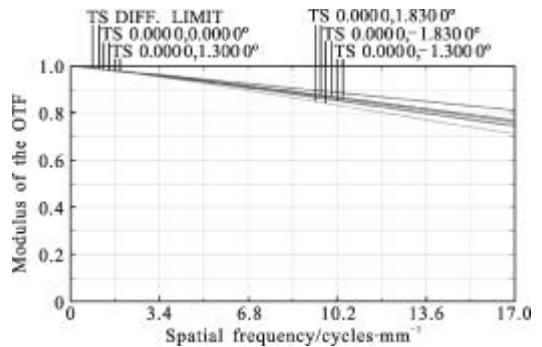


图 4 20℃下的 MTF 曲线

Fig.4 MTF curves at 20℃

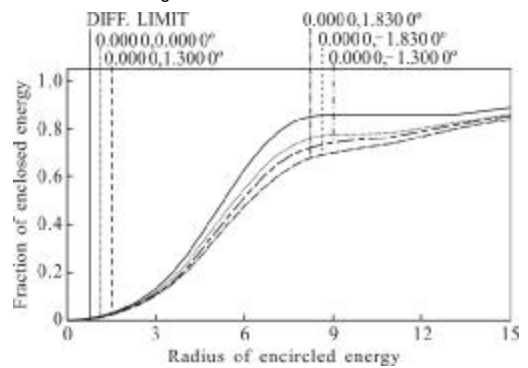


图 5 20℃下的能量包围圆曲线

Fig.5 Encircled energy curves at 20℃

### 3 光学系统热环境分析

导引头通常在极端环境下工作,温度范围从 -40~80℃,而且由于气动加热,容易产生大的温度梯度。在设计中已将各种温度分布情况设计在软件中,同时进行优化。这里仅给出最极端的三种情况下的分析结果。图 6 为三种极端温度情况下光学系统的 MTF 曲线,17 lp/mm 处全视场的 MTF 值都大于 0.65,比 20℃时下降约 0.05,满足消热差设计要求。三种温度情况状态如表 1 所示。

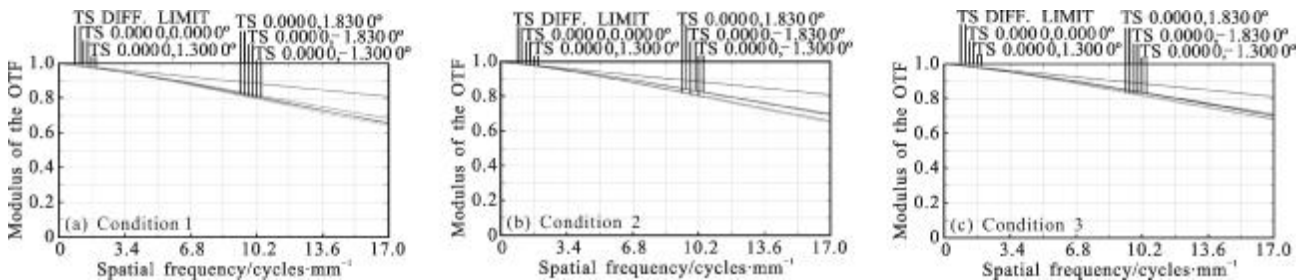


图 6 三种极端温度情况下的 MTF 曲线

Fig.6 MTF curves in three extreme temperature conditions

表1 三种极端温度情况

Tab.1 Three extreme temperature conditions

Temperature condition	1	2	3
Front group lens/°C	-40	80	80
Relay and rear group lens/°C	-40	80	-40

## 4 结论

文中研究了一种滚仰式红外导引头光学系统的结构和光学方案,部分光学组件嵌入滚仰式框架结构,通过四反射镜转动而具有90°离轴角,覆盖前半球观察视场,并且满足-40~80℃的热沉浸和热梯度条件下的消热差设计。该方案解决了滚仰式导引头超大离轴视场与总体结构尺寸之间的矛盾,为新一代空空近距格斗导弹导引头设计提供了新的思路。

### 参考文献:

- [1] Paulo R Leite Jr, Maurício da Silva, Eduardo T Paoli. Design of an optical system for a 5th generation, multi-spectral, air-to-air missile, considering the imaging performance degradation due to the aerodynamic heating[C]//SPIE, 2009, 7338: 733801.
- [2] 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.
- [3] Chen Yu, Zhao Yan, Zhang Tonghe, et al. Tracking principle and simulation for roll-pitch strap-down seeker [J]. Aero Weaponry, 2010(5): 55-58. (in Chinese)  
陈雨, 赵彦, 张同贺, 等. 滚仰式捷联导引头跟踪原理与仿
- 真[J]. 航空兵器, 2010(5): 55-58.
- [4] Zhu Mingchao, Jia Hongguang. Solution of angle increments for roll-pitch seekers based on Paden-Kahan sub-problems [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19 (8): 1838-1844. (in Chinese)  
朱明超, 贾宏光. 基于 Paden-Kahan 子问题求解滚仰式导引头角增量[J]. 光学精密工程, 2011, 19(8): 1838-1844.
- [5] 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. 红外近距格斗空空导弹发展展望 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(5): 564-568.
- [6] Wang Xuexin, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(1): 129-133. (in Chinese)  
王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究 [J]. 应用光学, 2009, 30(1): 129-133.
- [7] Chen Xiao, Yang Jianfeng, Ma Xiaolong, et al. Athermalization design of wide temperature range for hybrid refractive-diffractive objective in 8-12 μm[J]. Acta Optical Sinica, 2010, 30(7): 2090-2092. (in Chinese)  
陈潇, 杨建峰, 马小龙, 等. 8-12 μm 折-衍混合物镜超宽温度消热差设计[J]. 光学学报, 2010, 30(7): 2090-2092.
- [8] Zhang Xin, Jia Hongguang. Optical design of infrared athermalized objective with large relative aperture[J]. Chinese Optics, 2011, 4(4): 374-379. (in Chinese)  
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.
- [9] 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.