

长波红外光学系统混合被动无热化设计

周晓斌, 张 衡, 文江华, 吴 妍, 刘召庆, 张向明, 金明鑫
(西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 结合光学被动无热化和机械被动无热化各自优势, 提出一种低成本、高质量混合被动无热化方法。针对焦距 75 mm, F/1 的无热化镜头研制要求, 分别利用光学被动无热化和混合被动无热化设计实现。对比发现, 相较于传统的机械被动式无热化, 混合无热化可减小补偿结构的体积和复杂性, 从而有助于系统的小型化、轻量化; 相较于光学被动无热化, 在保证成像质量相当的情况下, 可减小系统的体积和加工难度。从而证实, 利用混合被动无热化技术可实现低成本、高质量的长波无热化镜头设计。

关键词: 光学设计; 长波红外; 光学被动无热化; 机械被动无热化; 混合被动无热化
中图分类号: O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)09-0836-04

LWIR Optical System Design by Passive Athermalization

ZHOU Xiaobin, ZHANG Heng, WEN Jianghua, WU Yan, LIU Zhaoqing, ZHANG Xiangming, JIN Mingxin
(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: A low-cost and high-quality hybrid passive athermalization method for LWIR was proposed by combining passive optical and passive mechanical athermalization. An athermalization optical system with a focal length of 75 mm and F/1 was designed using passive optical and hybrid passive athermalization. Compared with traditional passive mechanical athermalization, the volume and complexity of the thermal compensation structure can be reduced using hybrid passive athermalization. In addition, the proposed method decreases the volume and weight of the system. Compared with passive optical athermalization, hybrid passive athermalization can reduce the volume and processing difficulty when the imaging quality is the same. Thus, the propose method can be used to achieve a low-cost, high-quality, long-wave athermalization system.

Key words: optical design, long-wave infrared, passive optical athermalization, passive mechanical athermalization, hybrid passive athermalization

0 引言

随着长波红外探测器技术的成熟, 无论民品还是军品市场对于长波红外镜头的需求日益增长, 尤其在车载无热化镜头, 导引头用红外镜头等领域, 而这些产品对镜头的成像质量、环境适应性、成本均有比较苛刻的要求。

比利时的 Schuster N 分别利用机械被动式、光学被动式和光学机械混合被动无热化方式, 实现两片透镜系统 $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 的无热化设计, 其焦距 50 mm, F/1.3, 波段 $8\sim 13\ \mu\text{m}$ 。通过对比, 他们证实利用光学机械混合被动无热化, 可有效降低红外镜头无热化的

成本^[1]。

国内对于无热化镜头的研究主要集中在折衍混合消热差和硫系玻璃的运用上^[2-4]。哈尔滨工业大学关英姿等人对比了光学被动无热化和机械被动无热化的特点, 指出无热化方案的选取应综合考虑性能、尺寸、重量、成本等方面的要求^[5]。华北光电技术研究所杨加强等人, 实现焦距 25 mm, F/1 的三片式无热化镜头设计加工^[6]。镜筒材料选用铝, 光学系统采用折衍混合的光学被动无热化方法, 包含 4 个非球面和 1 个衍射面, 总长 32 mm。

所谓混合无热化即采用两种或两种以上的无热化方式, 例如王学新等人研究了光学被动式和机电式

组合消热差方法^[7]。混合无热化的主要目的是克服单一无热化方式实现困难或需要较高投入的问题，以实现低成本、高性能的无热化效果。

1 设计要求及思路

某导引头用长波红外无热化镜头的设计指标如表1所示。其焦距要求较长，且探测器像元尺寸较小，需要光学镜头提供足够的能量，确定其F数为1。为满足弹载使用环境，要求体积重量尽可能小，且满足-40℃~60℃被动无热化。

表1 设计指标要求

Table 1 Requirements of design parameters

Parameters	Value
Focal length	75 mm
Wavelength	8μm~12 μm
Temperature	-40℃~+60℃
F/#	1
Field of view	5.86°×4.69°
MTF@42 lp/mm	On axis>0.4 Out axis>0.3
Detector	640×512, 12 μm

被动无热化分为光学被动式和机械被动式。光学被动式是选用不同的光学和结构材料，通过合理分配光焦度，加入衍射元件等方式实现消热差。机械被动式通常是利用不同膨胀系数的结构材料，在不同温度下通过结构设计驱动镜头整体或部分透镜轴向运动以补偿热离焦。光学被动式需要较为复杂的光学结构，设计难度大，限制因素多，但是其无热化效果较好。机械被动式成本较低，但是要利用多层镜筒结构，体积重量偏大，无热化效果也难以保证^[8-10]。

本文所提的混合被动无热化方法是利用光学被动热化选用合适的材料和光焦度分配，实现单个透镜轴向微量移动以补偿热差，再利用较少的热补偿材料通过简单的结构形式驱动透镜按要求移动，以实现低成本、高性能的无热化效果。

2 不同被动无热化光学设计对比

2.1 光学被动无热化

光学被动无热化设计时，承担主要光焦度的透镜，一般选用折射率温度系数较小的材料，并且通过加入衍射元件以进一步减小系统热差。针对表1的指标要求，通过多轮优化，最终确定“硫系-锗-硒化锌”的光学被动无热化结构，如图1所示。该系统3块透镜各有一个非球面，其中有一面为非球面与衍射面的

结合。光学系统设计总长 80 mm，总重 257 g，全视场畸变小于等于 0.7%。

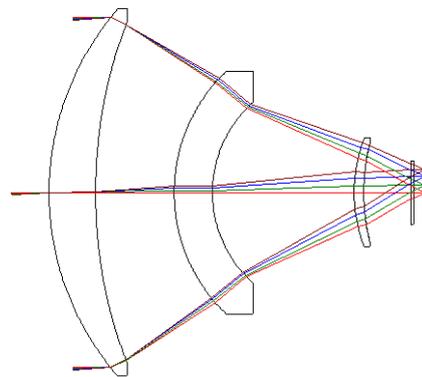


图1 光学被动无热化光学系统

Fig.1 Passive optical athermalization

图2为-40℃、20℃、60℃时，特征频率42 lp/mm处不同视场调制传递函数 MTF (modulation transfer function)，可以看出不同温度下各视场成像质量满足技术要求。

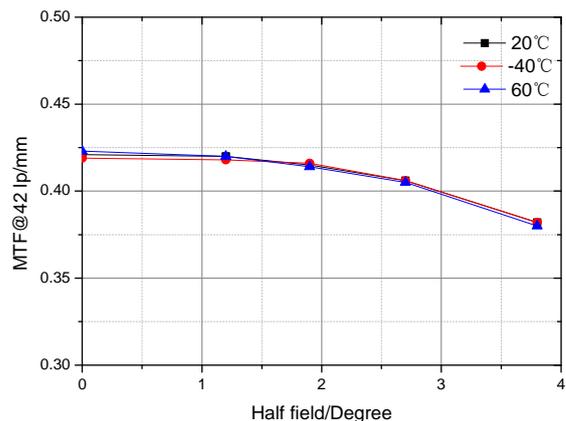


图2 不同温度下不同视场特征频率处 MTF

Fig.2 MTF versus field (parameter temperature) at 42 lp/mm

利用光学设计软件进行公差分析。采用 CODE V 默认公差，像面移动为补偿器，结果显示中心视场 MTF@42 lp/mm 从设计值 0.42 降低到 0.36 的概率约为 98%，其他视场考虑公差后 MTF 均大于等于 0.26 (概率 98%)。常规加工装调精度即可满足系统要求。

2.2 混合被动无热化

混合被动无热化的主要目的是减小光学被动无热化的设计、加工难度，同时减小机械被动无热化的结构复杂度。为此，尽可能简化光学系统省去衍射面，减小加工难度；选取容易驱动，且对镜头整体外形包络影响较小的透镜作为热差补偿元件。

参考光学被动无热化结构形式，省去衍射面，并对光学材料进行调整，优化后选用“硫系-硫化锌-锗”的结构形式，如图3所示。该系统每块透镜各有一个

非球面，设计总长 75 mm，总重 248 g，全视场畸变小于等于 1.3%。

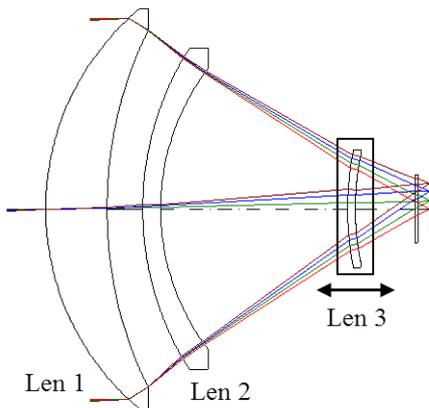


图3 混合被动无热化光学系统

Fig.3 Passive optical and mechanical athermalization

图4为-40℃、20℃、60℃下特征频率42 lp/mm处不同视场调制传递函数，可以看出不同温度下系统成像质量与光学被动无热化相当。

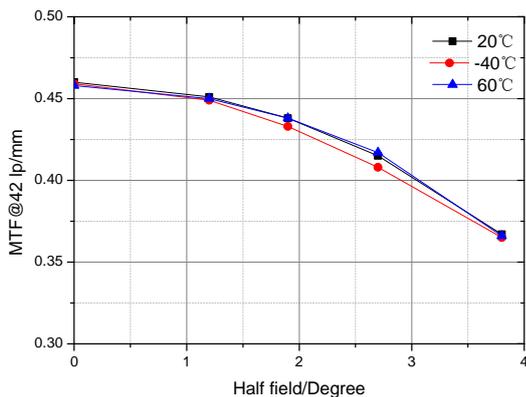


图4 不同温度下不同视场特征频率处MTF

Fig.4 MTF versus field (parameter temperature) at 42 lp/mm

如图3所示，透镜1和透镜2口径相对较大，如果选作热差补偿元件，在其径向设置机械被动调节机构会增大系统的体积、重量；而选择透镜3作为热差补偿元件，则可以有效减小调节机构的体积和重量，从而有利于系统的小型化、轻量化。因此，选择透镜3作为热差补偿元件。透镜3轴向移动以适应不同环境温度。为了减小透镜3的位移，利用多重结构兼顾各个温度下的成像质量和透镜3的移动量，使其尽可能小。如表2所示，低温时透镜3向透镜2移动，为负值；高温时则反方向运动。

表2 不同温度下透镜3的相对位移

Table 2 Shift of the lens 3 under different temperature

Temperature /℃	-40	20	60
Displacement/mm	-0.052	0	0.034

与光学被动无热化设计相同，采用CODE V默认公差，对系统进行公差分析，结果显示中心视场MTF@42 lp/mm以98%的概率，从设计值0.46降到0.36。反转灵敏度分析显示，该系统透镜1中心厚和中心偏差比光学被动无热化系统稍严。但是，总体来说两种设计公差要求相当，常规加工装调精度均可满足要求。

3 混合被动无热化结构设计

混合被动无热化只需简单的多层镜筒结构，驱动单个透镜移动即可。对所设计的混合被动无热化光学系统进行结构设计，如图5所示。镜筒、隔圈、压圈等材料选用铝合金，选用线膨胀系数较大的聚甲醛(POM, polyformaldehyde)作为热补偿材料。设计3层镜筒结构，中间层为POM，其前后两端分别与外层、内层镜筒粘接。温度变化则POM热胀冷缩，能够驱动透镜3按照设计所需的规律移动。

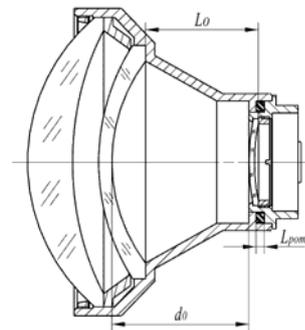


图5 混合被动无热化结构示意图

Fig.5 Mechanical schematic diagram of hybrid passive athermalization

为了保证不同温差 ΔT ，透镜3的相对移动量 ΔL 满足光学设计要求，POM的长度 L_{pom} 必须满足一定条件。如图5所示，透镜2与透镜3的安装基准距离 L_0 ，镜筒材料的线膨胀系数 α ，POM的线膨胀系数 α_{pom} ，则 L_{pom} 应该满足公式：

$$L_{pom}(\alpha_{pom} - \alpha) + L_0\alpha = \Delta L / \Delta T$$

为验证结构设计的合理性，通过有限元仿真分析不同环境温度下各透镜的间隔变化。对透镜与镜筒，透镜与隔圈等选择适合的约束，施加均匀温度场载荷，选取各透镜中心节点，获得不同温度下的位移量如表3。与表2相比误差 ≤ 0.02 mm，满足不同温度下间隔公差要求。

表3 仿真分析不同温度下透镜3的位移

Table 3 Shift of lens 3 under different temperature by simulation

Temperature /℃	-40	20	60
Displacement /mm	-0.053	0	0.032

4 两种无热化方案对比

对比结构设计完成的两种无热化镜头，如表4所示。可以发现混合被动无热化的成像质量、重量与光学被动无热化相当，但是体积和加工难度上明显优于光学被动无热化。从而证实，混合被动无热化技术可实现低成本、高性能的无热化效果。

表4 两种无热化方案对比

Table 4 Comparison of different athermalization methods

	Passive optical athermalization	Passive optical and mechanical athermalization
Weight	356 g	354 g
Volume	$\phi 75 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$	$\phi 75 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$
MTF	On axis ≥ 0.42	On axis ≥ 0.46
	Out axis ≥ 0.38	Out axis ≥ 0.37
Distortion	$\leq 0.7\%$	$\leq 1.3\%$
Complexity	3 aspheric surface	3 aspheric surface
	1 diffractive surface	

5 总结

针对某焦距 75 mm, F/1 长波非制冷无热化镜头的研制需求，分别利用光学被动无热化和混合被动无热化两种方式设计实现。对比两种镜头的体积、重量、加工难度、成像质量等，可以看出混合被动无热化可以有效降低被动无热化镜头的设计难度、加工成本和体积。从而证实，混合被动无热化技术适用于低成本、高质量的被动无热化镜头设计开发。

参考文献：

[1] Norbert Schuster. Passive athermalization of doublets in 8-13 micron waveband[J]. *SPIE*, 2014, **924907**: 1-17.
 [2] George Curatu. Design and fabrication of low-cost thermal imaging optics using precision chalcogenide glass molding[J]. *SPIE*, 2008, **706008**: 1-7.
 [3] 安晓强, 王茜, 宋波. 大相对孔径紧凑型非制冷光学系统消热差设计

[J]. *激光与红外*, 2015, **45**(7): 795-799.
 AN Xiaoqiang, WANG Qian, SONG Bo. Athermal design of compact uncooled optical system with large relative aperture[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(7): 795-799.
 [4] 姜波, 吴越豪, 戴世勋, 等. 硫系玻璃在民用红外车载成像系统中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(6): 1739-1745.
 JIANG Bo, WU Yuehao, DAI Shixun, et al. Application of chalcogenide glasses in designing vehicle-mounted infrared imaging lens for civilian applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(6): 1739-1745.
 [5] 关英姿, 康立新. 长波红外非制冷光学系统设计[J]. *红外技术*, 2008, **30**(2): 79-82.
 GUAN Yingzi, KANG Lixin. LWIR uncooled optical system design[J]. *Infrared Technology*, 2008, **30**(2): 79-82.
 [6] 杨加强, 彭晴晴, 刘琳, 等. 基于硫系玻璃的折衍混合光学无热化镜头设计[J]. *激光与红外*, 2017, **47**(2): 225-229.
 YANG Jiaqiang, PENG Qingqing, LIU Lin, et al. Design of refractive/diffractive hybrid optical athermalization lens based on chalcogenide glass[J]. *Laser & Infrared*, 2017, **47**(2): 225-229.
 [7] 王学新, 焦明印. 光学被动式和机电式组合消热差方法的研究[J]. *应用光学*, 2010, **31**(3): 354-359.
 WANG Xuexin, JIAO Mingyin. Combination of optical passive and mechanical-electrical athermalisation[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(3): 354-359.
 [8] 朱峰. 基于光机热集成的机械被动消热差红外镜头设计[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
 ZHU Feng. The design of mechanical passive athermal infrared lens based on the structure-thermal-optical integrated analysis[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
 [9] 马俊林, 邢妍, 高群, 等. 微小型滚仰式红外导引头光机轴系一体化设计[J]. *红外技术*, 2021, **43**(5): 411-416.
 MA Junlin, XING Yan, GAO Qun, et al. Design of micro-miniature infrared seeker with roll-pitch structure[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(5): 411-416.
 [10] 孙爱平, 龚杨云, 浦恩昌, 等. 非制冷型 640×512 面阵红外导引头光学系统设计[J]. *红外技术*, 2021, **43**(8): 736-742.
 SUN Aiping, GONG Yangyun, PU Enchang, et al. Optical system design of uncooled 640×512 infrared seeker[J]. *Infrared Technology*, 2021, **43**(8): 736-742.