

远距型红外消热差物镜设计

张 鑫,贾宏光,张 跃

(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:介绍了一种远距型红外消热差物镜的设计方法。首先建立了由多个光组构成的组合光学系统的消热差模型,将其与远距型物镜模型相结合,得到了光焦度分配方程组,再根据系统要求的远距比和所选择的光学材料组合,获得初始的光焦度分配,然后利用计算机辅助设计进行像差校正。该方法准确、实用。作为应用实例,利用 ZEMAX 软件分别设计了中波红外和长波红外光学系统,它们的焦距均为 100 mm, F 数为 2.0,远距比达到 0.8。环境温度分析结果表明:在 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,成像质量稳定,调制传递函数(MTF)接近衍射极限。实际设计结果与理论计算结果相吻合。

关键词:光学设计; 红外光学系统; 消热差设计; 远距型物镜

中图分类号: TN21 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2012)01-0178-06

Optical design of athermalized infrared telephoto objective

Zhang Xin, Jia Hongguang, Zhang Yue

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

Abstract: One method for athermalized infrared telephoto objective design was proposed. First, by synthesizing the formulated athermal model for the multiple-lens optical system with telephoto objective model, the optical power distribution equations were established. Thus, the initial optical power distribution among lens could be resolved with consideration of the telephoto ratio requirement and lens material constraint. Then, a final routine computer-aid modification procedure would help to correct the optical system's aberrations. This systematic design method was straightforward and applicable. As practical examples, a mid wavelength infrared optical system and a long wavelength infrared optical system were designed with ZEMAX software. With the focal length equal to 100 mm and F number equal to 2.0 for both systems, the telephoto ratio reached 0.8. When environment temperature varies from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, the image preserves high quality and modulation transfer function (MTF) still approaches diffraction limit. The result of the implemented design agrees well with the method predictions.

Key words: optical design; infrared optical system; athermal design; telephoto objective

收稿日期:2011-05-21; 修订日期:2011-06-06

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,硕士,助理研究员,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

红外热像仪已经在航空航天、安防搜救、工业生产等领域起到了不可替代的作用，环境适应性强和结构紧凑是其发展的方向^[1-2]。由于红外光学材料的折射率温度系数很大，温度变化将引起红外物镜严重的离焦，调焦机构的应用增加了系统的复杂度和体积，因而被动消热差设计非常必要^[3]。被动消热差分为机械消热差和光学消热差，前者通常会使系统复杂性增加、体积和质量增大，而光学消热差没有上述缺点，因此成为研究的热点。常规的光学消热差包括利用消热图指导多透镜系统的消热差设计^[4]，不同材料热性能互补的消热差设计方法^[5]，以及利用材料特性图的光焦度分配法^[6]。目前最新的折射与衍射混合消热差方法已有报道^[7-9]。消热差设计往往使物镜的总长焦距比大于 1，不利于系统小型化。而远距型物镜采用正负光焦度分离的结构，前组为正，后组为负，后主面向前移出光学系统之外，使得总长焦距比小于 1，大幅度地缩短了物镜长度，广泛应用于紧凑结构的长焦距系统中。

文中将光学系统消热差模型与远距结构模型相结合，给出了远距结构消热差物镜设计方法，即在初始阶段确定符合消热差和远距结构的材料组合和光焦度分配，分别在中波红外和长波红外波段设计了远距比为 0.8 的消热差物镜。

1 设计原理

透镜的光焦度随温度变化，其原因是材料的折射率和透镜的形状都随温度变化。定义透镜的归一化光焦度温度系数为 T ，有：

$$T = \frac{d\phi}{\phi \cdot dt} \quad (1)$$

式中： ϕ 为光焦度； t 为温度。

为简化模型，采用薄透镜近似，根据薄透镜光焦度公式可推导出薄透镜的归一化光焦度温度系数为：

$$T = \frac{dn/dt}{n-1} - \alpha_L \quad (2)$$

式中： n 为折射率； α_L 为透镜材料热膨胀系数。

对于密接薄透镜组，其光焦度为各个薄透镜光

焦度之和，定义密接薄透镜组的归一化光焦度温度系数为：

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^k \phi_i \cdot T_i}{\sum_{i=1}^k \phi_i} \quad (3)$$

图 1 所示为由多个密接薄透镜组构成的组合光学系统，其光焦度为：

$$\Phi = \sum_{i=1}^n h_i \Phi_S \quad (4)$$

式中： h_i 为各个密接薄透镜组的归一化入射光线高度， $h_1=1$ ； Φ_S 为各个密接薄透镜组的光焦度。

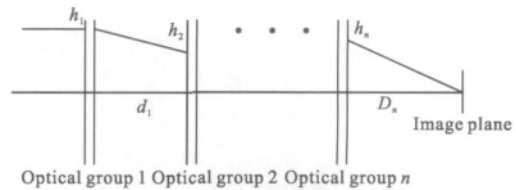


图 1 组合光学系统示意图

Fig.1 Sketch of the multiple components optical system

温度改变 Δt ，系统光焦度改变 $\Delta\Phi$ ：

$$\Delta\Phi = \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n h_i^2 \Phi_{s_i} T_{s_i} \quad (5)$$

红外光学系统的材料温度折射率变化对热差起到主导作用，因而在光焦度分配时可以忽略镜筒的热膨胀，由此得到了密接薄透镜组组合光学系统简化的消热差公式：

$$\sum_{i=1}^n h_i^2 \Phi_{s_i} T_{s_i} = 0 \quad (6)$$

该消热差方程的物理意义是多个密接透镜组互补偿各自的剩余热差，使系统总热差为零。

红外光学材料的折射率大、色散小，有利于系统像差的校正，因而通常利用两组式光学结构已经足够获得优良像质，消热差公式可写为：

$$\Phi_{s1} T_{s1} + h_2^2 \Phi_{s2} T_{s2} = 0 \quad (7)$$

根据公式(7)，前后两个光组选择不同的透镜数量、透镜材料和透镜光焦度，可以获得大小和符号不同的 Φ_{s1} 、 T_{s1} 、 Φ_{s2} 、 T_{s2} 组合。通过合理选择每组透镜的数量、材料搭配，使 Φ_{s1} 为正， Φ_{s2} 为负，且 T_{s1} 和 T_{s2} 符号相同，即可构成远距式光学系统，能够大幅度减

小光学系统长度。

远距式光学系统的远距比定义为光学总长与焦距的比值,归一化条件下,即 $h_1=0, \Phi=0$, 根据光组组合的正切计算公式,得到以下关系式:

$$\Phi_{s1} + h_2 \Phi_{s2} = 1 \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{1-h_2}{\Phi_{s1}} + h_2 \quad (9)$$

式中: α 为远距比; h_2 为后组的归一化入射光线高度,在数值上等于后工作距。

当远距比 α 确定时, Φ_{s1} 与 Φ_{s2} 依赖于 h_2 的取值。当 $\alpha=0.8$ 时,有如图 2 所示的关系。 h_2 的取值决定了远距系统的结构布局,既要保证足够的后工作距,也要获得前后组的合理光焦度分配,即二者的光焦度都不太大,以利于像差校正。在远距比为 0.8 情况下,合理的 h_2 取值范围约为 0.2~0.5。

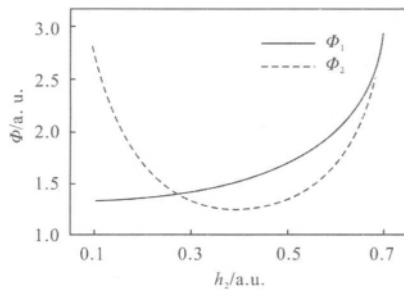


图 2 Φ_{s1} 、 Φ_{s2} 与 h_2 的关系图

Fig.2 Relationships between Φ_{s1} , Φ_{s2} and h_2

h_2 、 Φ_{s1} 和 Φ_{s2} 确定后,根据公式(7),则 T_1 与 T_2 的比例关系也确定。由公式(3)可知, T 取决于光组内部的材料搭配和光焦度分配,选择材料时应优先选择 T 值相差较大的材料组合。

光焦度分配还要满足消色差方程,即

$$\sum h^2 \frac{\phi}{V} = 0 \quad (10)$$

2 光学设计

2.1 中波红外光学系统

中波红外系统选用制冷焦平面阵列,像元数为 256×256 ,像元尺寸为 $30 \mu\text{m}$,光学系统指标如表 1 所示。

为了达到指标要求的远距比,初始的光焦度分配时选取远距比为 0.75,为计算机优化设计留有适

当余量。制冷焦平面封装结构要求较大的后工作距,取 h_2 ,计算得 $\Phi_{s1}=1.556$ 和 $\Phi_{s2}=-0.852$, $T_{s1}/T_{s2}=0.107$ 。

表 1 中波红外光学系统指标

Tab.1 Specifications of the mid wavelength infrared optical system

Focal length	Field angle	F/number	Spectral range	Telephoto ratio	Temperature range
100 mm	4.4°	$F/2.0$	$3.7\text{--}4.8 \mu\text{m}$	0.8	$-40\text{--}60^\circ\text{C}$

下面将选择材料并确定透镜数量。常用的中波红外材料参数如表 2 所示。 n 值大的材料有利于校正像差, V 值相差较大的材料组合有利于消色差,而 T 值相差较大的材料组合有利于消热差。又由于系统的光焦度为正,选择 V 值大而 T 值小的材料作为正透镜, V 值小而 T 值大的材料作为负透镜,有利于系统消热差和消色差。综合比较表中参数,发现 Si 和 Ge 两种材料恰好满足上述要求,所以确定远距物镜结构为 Si 正 Ge 负 + Ge 负 Si 正,前组为正,后组为负,共 4 片透镜。

表 2 常用中波红外材料的 n 、 V 、 T 值

Tab.2 n , V and T data of the conventional mid wavelength infrared materials

	Si	Ge	ZnS	ZnSe
n	3.425	4.025	2.253	2.433
V	236	103	110	179
$T \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$	59.3	125.2	28.0	34.8

根据上述条件和参数,可以得到光焦度分配的方程组:

$$\phi_1 + \phi_2 = 1.556$$

$$\phi_3 + \phi_4 = -1.852$$

$$\frac{(59.3\phi_1 + 125.2\phi_2)/1.556}{-(125.2\phi_3 + 59.3\phi_4)/1.852} = 0.107$$

显然,此方程组有无穷解,若加上消色差条件,则构成唯一解方程组,但是数学上容易证明这个唯一解方程组是病态的。这是因为上述简化模型与实际有一定差距,且实际中热差和色差很小,但不为零,色差的微小扰动将引起解的巨大变化,所以该模型不可能确定唯一的光焦度分配解。前面已经分析

了色差影响小，所以可以从光焦度方程和消热差方程构成的无穷解方程组中找出一组合理的解作为初始的光焦度分配，但是这个初始值并不唯一。

依据各个透镜的相对孔径都不太大的原则，并缩放至 100mm 焦距，试取初始的光焦度分配如表 3 所示。

表 3 初始的光焦度分配

Tab.3 Initial optical power distribution

ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
0.024 5	0.008 9	-0.04	0.021 5

镜筒材料选择铝，热膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ，利用光学软件 ZEMAX 进行优化设计，设计结果如图 3 所示。远距消热差物镜的光焦度分配关系减少了系统的变量个数，该设计中使用一个二次曲面来增加变量数，以利于消像差，即前组中 Ge 透镜的前表面。系统光学长度 80 mm，即远距比达到 0.8，从第一片透镜顶点到探测器窗口仅 56 mm，通光孔径 65 mm，结构紧凑、小巧。图 4 所示为室温 20°C 下的 MTF 曲线，像元尺寸对应的奈奎斯特频率处，即 17 lp/mm，全视场的 MTF 值都大于 0.7，接近衍射极限。

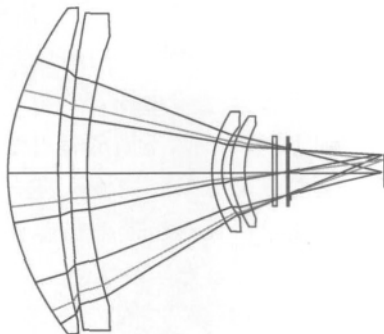


图 3 中波红外远距物镜结构图

Fig.3 Configuration of the mid wavelength infrared telephoto objective

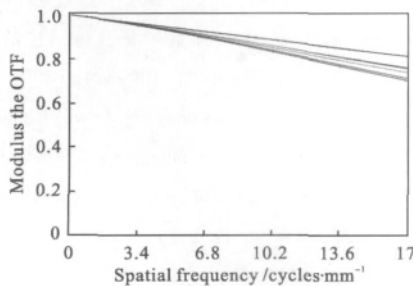


图 4 20°C 下的 MTF 曲线

Fig.4 MTF curves at 20°C

利用 ZEMAX 软件进行热环境分析。图 5 所示为 17 lp/mm 处的各个视场的 MTF 随温度变化情况，在 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内，轴上视场的 MTF 大于 0.75，0.7 视场子午和弧矢方向的 MTF 都大于 0.65，1.0 视场子午和弧矢方向的 MTF 都大于 0.6。MTF 在 100°C 的温度范围内波动很小，轴上视场的 MTF 波动最小，小于 0.05；1.0 视场弧矢方向的 MTF 波动最大，小于 0.13。这些数据说明该物镜具有很好的热环境适应性，满足 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 范围内的被动消热差要求，像质保持稳定。

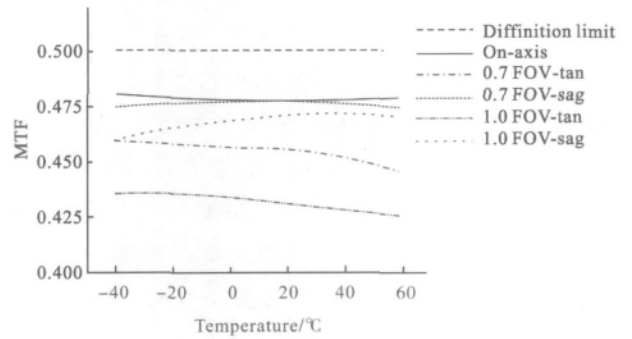


图 5 17 lp/mm 处的 MTF 随温度的变化关系

Fig.5 Relationship between MTF at 17 lp/mm and temperature

设计结果的光焦度分配如表 4 所示。前组 Si 正 Ge 负，后组 Ge 负 Si 正，与初始分配的大小趋势一致，数值有一定差别，其中第二片相差较大，其余三片相差较小。造成数值差距有两个主要原因：其一是计算机自动优化色差时光焦度会随之变化；其二是薄透镜模型被实际厚透镜取代。但是初始值与最终值总体上是相近的，设计结果验证了上述方法的指导作用。

表 4 最终光焦度分配

Tab.4 Final optical power distribution

ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	ϕ_4
0.027 7	-0.017 5	-0.041 5	0.026 5

2.2 长波红外光学系统

长波红外系统选用非制冷焦平面阵列，像元数为 320×240 ，像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$ ，光学系统指标如表 5 所示。

长波红外系统的材料选择和光焦度分配方法与中波红外系统相同，这里只给出设计结果。但是需要强调的是，长波红外波段找不到类似于中波红外波

段 Si 和 Ge 这样的组合, 需要选择至少三种材料搭配来实现消热差和消色差。

表 5 长波红外光学系统指标

Tab.5 Specifications of the long wavelength infrared optical system

Focal length	Field angle	$F/\#$ number	Spectral range	Telephoto ratio	Temperature range
100 mm	5.7°	$F/2.0$	8–12 μm	0.8	-40–60°C

图 6 所示为最终的设计光学结构图。结构形式为 Amtirl 正 Ge 负 ZnS 负 + Ge 负, 前组为正, 后组为负, 共 4 片透镜。镜筒材料同样选择铝, 光学长度 80 mm, 即远距比达到 0.8, 孔径光阑设置在第一面上, 以最小化系统口径, 后组 Ge 透镜第二面采用二次曲线, 校正剩余像差。室温 20°C 时的 MTF 曲线如图 7 所示, 像元尺寸对应的奈奎斯特频率处, 即 20 lp/mm, 全视场的 MTF 值都大于 0.42, 接近衍射极限。

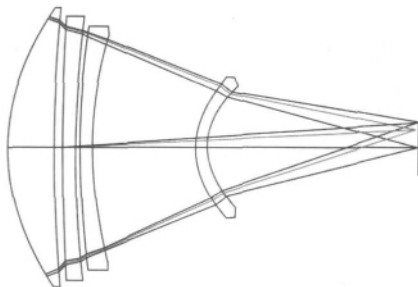


图 6 长波红外远距物镜结构图

Fig.6 Configuration of the long wavelength infrared telephoto objective

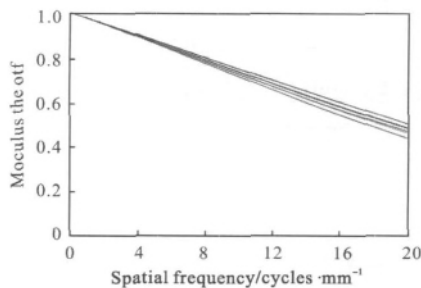


图 7 20°C 下的 MTF 曲线

Fig.7 MTF curves at 20°C

与中波红外系统一样进行热环境分析, 图 8 所示为 20 lp/mm 处的各个视场的 MTF 随温度变化情况, 在 -40°C~60°C 范围内, 轴上视场的 MTF 大于

0.47, 0.7 视场子午和弧矢方向的 MTF 都大于 0.43, 1.0 视场子午和弧矢方向的 MTF 都大于 0.42。MTF 在 100°C 的温宽范围波动很小, 轴上视场的 MTF 波动最小, 小于 0.01; 1.0 视场弧矢方向的 MTF 波动最大, 小于 0.02。说明该物镜具有很好的热环境适应性, 满足 -40~60°C 范围内的被动消热差要求, 像质保持稳定。

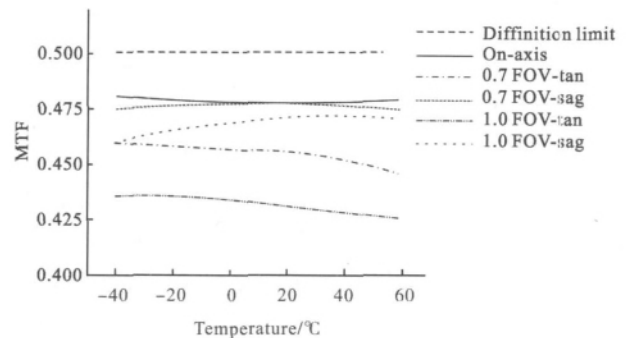


图 8 20 lp/mm 处的 MTF 随温度的变化

Fig.8 Relationship between MTF at 20 lp/mm and temperature

3 结论

文中研究了红外消热差模型和远距型物镜模型之间的光焦度分配关系, 并将二者统一起来, 用于光学设计初始的光焦度分配计算。利用该方法分别在中波红外和长波红外设计了远距比为 0.8 的消热差物镜。根据不同的指标要求, 不同的材料组合有相应不同初始的光焦度分配结果, 该方法具有普遍的指导意义。同时也说明了灵活运用消热差模型能够实现各种结构形式的消热差光学系统。

参考文献:

- [1] Fan Yongjie, Jin Weiqi, Liu Chongliang. New progress on FLIR imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 189–194. (in Chinese)
范永杰, 金伟其, 刘崇亮. 前视红外成像系统的新进展[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(2): 189–194.
- [2] Zhang Xingde, Liu Lin, Li Ronggang. Infrared optical window for airborne photoelectric equipments [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 601–606. (in Chinese)
张兴德, 刘琳, 李荣刚. 机载光电设备红外窗口技术[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(4): 601–606.
- [3] Wu Xiaojing, Meng junhe. Approach of athermalizing infrared optical systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003,

- 32(6): 1567–1571. (in Chinese)
 吴晓靖, 孟军和. 红外光学系统无热化设计的途径[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(6): 1567–1571.
- [4] Tamagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T, et al. Multilens system design with an athermal chart [J]. *Applied Optics*, 1994, 33: 8009–8013.
- [5] Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang, Xiang Libin, et al. Design of athermal optical system [J]. *Acta Optical Sinica*, 2000, 20(10): 1386–1391. (in Chinese)
 胡玉禧, 周绍祥, 相里斌, 等. 消热差光学系统设计[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1386–1391.
- [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] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Design of a hybrid infrared apochromatic optical system beyond normal temperature [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(10): 6298–6303. (in Chinese)
 宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 实现复消色差的超常温混合红外光学系统[J]. 物理学报, 2008, 57(10): 6298–6303.
- [8] Sun Jinxia, Liu Jianzhuo, Sun Qiang, et al. Athermal design for hybrid refractive/diffractive comformal optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(4): 792–797. (in Chinese)
 孙金霞, 刘建卓, 孙强, 等. 折/衍射混合消热差共形光学系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(4): 792–797.
- [9] 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.

下期预览

红外迷彩伪装对发射率要求的数值分析

刘姜伟^{1,2}, 时家明^{1,2}, 陈宗胜^{1,2}, 许波^{1,2}

- (1. 脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037;
2. 安徽省红外与低温等离子体重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要: 针对红外迷彩伪装涂层中发射率的取值问题建立了计算模型。推导计算了目标 8~14 μm 的平均发射率 ε_t 对目标辐射温度 T_R 的影响, 并以 4 K 辐射温差作为隐身标准, 计算分析了目标不同真实温度 T 对 ε_t 取值范围的影响以及相邻斑块发射率差值 $\Delta\varepsilon_t$ 与固定斑块发射率 ε_1 、目标真实温度 T 的关系。所得结论对红外迷彩伪装涂层的制备具有一定的指导作用。