

基于权重分组的可见光光学系统无热化设计

解娜^{**}, 崔庆丰^{*}

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 提出了一种基于权重分组的可见光波段光学系统的无热化设计方法。基于常温下满足像质要求的光学系统, 计算了每一片透镜产生色差及热差能力的综合权重, 通过比较权重进行结构分组, 将初始系统等效成两个单透镜系统以进行光学材料的挑选。对焦距为 400 mm、F 数为 4 的双高斯型航空相机在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内进行了无热化设计。在各个温度下, 该系统在空间频率为 55 lp/mm 处的调制传递函数值均大于 0.4。研究结果表明, 该方法能使长焦光学系统在大温差环境下保持较好像质, 光学性能稳定。

关键词 光学设计; 几何光学; 可见光; 无热化

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1222001

Athermalization Design of Visible Light Optical System Based on Grouping by Weight

Xie Na^{**}, Cui Qingfeng^{*}

*School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract An athermalization design method of a visible light optical system is proposed based on the grouping by weight. For this optical system satisfying the requirements of image quality at normal temperature, the comprehensive weight of chromatic power and thermal power produced by each element is calculated. The structures are grouped by the comparison among the comprehensive weights, and the initial system is equivalent to two single lens systems for the choice of the optical materials. The athermalization design of a double Gaussian aerial camera with a focal length of 400 mm and an F number of 4 is conducted, whose modulation transfer function (MTF) is larger than 0.4 at a spatial frequency of $55\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$ under the temperature in the range of $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. The research results show that this design method can ensure the telephoto optical system possess good image quality and stable optical performance under the environment of large temperature difference.

Key words optical design; geometric optics; visible light; athermalization

OCIS codes 220.3620; 080.2740; 220.1000

1 引 言

空间环境温度的变化对光学系统有很大影响, 但用于军事或航天器上的现代光学仪器都期望在一个很宽的温度环境范围内有稳定的性能^[1-6]。典型的温度变化范围为 $-20\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 军用光学系统可承受的温度变化范围需达到 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。环境温度的变化导致光学元件和装配结构件发生热变形, 引起热离焦, 这对光学系统尤其是长焦系统的成像质量影响极为严重。

为完成系统的无热化设计, 常用的方法包括机

械补偿式和光学无热化两种方法。典型的机械补偿技术包括 Friedman^[7] 提出的被动机械补偿技术和主动机电无热补偿技术。这两种方法都会使系统更加复杂, 增大体积和重量, 降低系统的可靠性。光学无热化技术避免了机械补偿, 即在既定的波段范围及温度范围下, 对折射光学元件材料进行组合以保持光学性能的稳定, 不需增加任何机构且可靠性好。在红外波段, 由于材料较少, 许多研究者进行了光学无热化方法的研究, 并提出了结构设计及玻璃组合方法。Tamagawa 等^[8-9] 利用无热图挑选玻璃组合, 实现了多透镜系统的无热化; 胡玉禧等^[10-11] 通

收稿日期: 2018-05-29; 修回日期: 2018-07-13; 录用日期: 2018-07-25

基金项目: 国家重大科技专项高分专项(51-H34D01-8358-13/16)

* E-mail: qf_cui@163.com; ** E-mail: flourish1994@163.com

过建立消色差、消色差方程组求解透镜组,进行了无热化光学设计。但在可见光波段的光学材料众多,很难在设计初始结构时挑选出适当的玻璃组合,红外波段常用的光学无热化方法并不能完全适用。Lim 等^[12-13]提出了利用系统结构等效并利用无热玻璃图挑选光学材料及镜筒材料的方法。此方法可以有效改善简单系统的热离焦问题,但对于结构复杂光学系统,镜筒材料的选择与实际设计的偏差较大,且对结构的分组方法不明确。

本文提出了一种基于权重分组进行材料挑选的可见光波段光学系统的无热化设计方法。在常温下满足像质要求的光学系统的基础上,计算每一片透镜产生色差及热差能力的综合权重,通过比较权重进行结构分组,并依据分组将初始系统等效成两个单透镜系统进行光学材料挑选,可避免机械补偿或光学变焦补偿,能够使结构复杂的光学系统在大温差环境仍保持光学性能稳定。该方法可用于任意波段的无热化设计,但其他波段(如红外波段等)可选择的光学材料较少,材料替换空间较小,故该方法更适用于光学材料众多的可见光波段。

2 消色差和消热差理论

2.1 消色差和消热差方程及等效系统

对于一光焦度为 ϕ_i (i 为透镜编号) 的单薄透镜,其色差度 ω_i 及热差度 γ_i 的表达式^[8-9] 分别为

$$\omega_i = -\frac{\partial \phi_i / \partial \lambda}{\phi_i} = -\frac{(\partial n_i / \partial \lambda) \Delta \lambda}{n_i - 1}, \quad (1)$$

$$\gamma_i = \frac{\partial \phi_i / \partial T}{\phi_i} = -\frac{(\partial n_i / \partial T)}{n_i - 1} - \alpha_i, \quad (2)$$

式中 λ 为波长; $\Delta \lambda$ 为设计波段; n_i 为光学材料的中心波长折射率; α_i 为光学材料的线膨胀系数; T 为环境温度。若光学系统中存在 K 块透镜,总光焦度为 ϕ_T ,此系统中各透镜需满足的消色差消热差条件^[14] 为

$$\begin{cases} \phi_T = \sum_{i=1}^K \phi'_i \\ \frac{d\phi_T}{d\lambda} \cong \sum_{i=1}^K \omega_i \phi'_i = 0 \\ \frac{d\phi_T}{dT} \cong \sum_{i=1}^K \gamma_i \phi'_i = -\alpha_h \phi_T \end{cases}, \quad (3)$$

式中参数 $\phi'_i = \frac{h_i}{h_1} \phi_i$; h_i 为第 i 个透镜的近轴光线高度; α_h 为镜筒材料的线膨胀系数。

为简化无热化设计过程,将需材料替换的透镜

单独分为一组记作 L_j ,其色差度、热差度和光焦度分别为 $\omega_j, \gamma_j, \phi_j$,参数 $\phi'_j = h_j/h_1 \phi_j$;其余 $K-1$ 个透镜作为一组并等效为一块透镜 L_e ,则原有的系统被等效为由两个单透镜组成的系统,如图 1(a) 所示。需要的等效单透镜的参数为等效光焦度 ϕ'_e 、等效色差度 ω_e 和等效热差度 γ_e ^[12-13],可由(3)式得

$$\begin{cases} \phi'_e = \sum_{i=1}^K \phi'_i - \phi'_j \\ \omega_e = \left[\sum_{i=1}^K (\omega_i \phi'_i) - \omega_j \phi'_j \right] / \phi'_e \\ \gamma_e = \left[\sum_{i=1}^K (\gamma_i \phi'_i) - \gamma_j \phi'_j \right] / \phi'_e \end{cases} \quad (4)$$

整理后得

$$\gamma_j = \frac{\gamma_e + \alpha_h}{\omega_e} \omega_j - \alpha_h. \quad (5)$$

由(5)式可知,若等效色差度 ω_e 、等效热差度 γ_e 和镜筒材料的线膨胀系数 α_h 为定值,则理想无热化系统中单透镜 L_j 的色差度 ω_j 和热差度 γ_j 为一次函数关系。如图 1(b) 所示, $L_j(\omega_j, \gamma_j)$ 、 $L_e(\omega_e, \gamma_e)$ 和 $H(0, -\alpha_h)$ 三点满足线性关系时可实现完全消色差、消热差。

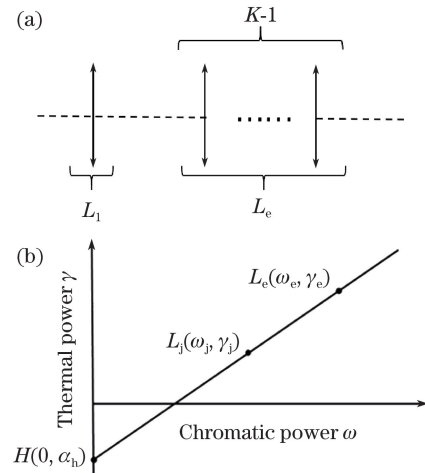


图 1 等效系统。(a) 等效透镜系统的示意图;

(b) 消色差、消热差条件下的 H 、 L_j 和 L_e 。

Fig. 1 Equivalent system. (a) Equivalent lens system; (b) H , L_j and L_e under achromatic and athermal conditions

2.2 扩展的等效系统无热化条件及无热化设计原理

对于结构复杂型系统,由于透镜数量增多,各个透镜的材料及光焦度对热离焦的影响情况复杂,需将以上等效模型进行扩展以表达无热化条件。

若分别将第 1、2、 \dots 、 K 块透镜作为一组,其余作为等效透镜组,则有 K 种等效情况。令 $\omega =$

$(\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_K), \boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_K)$, 整理后得出理想无热化状态下系统中 K 个等效组应满足的无热化关系为

$$\boldsymbol{\gamma}^T = \text{diag}\left(\frac{\gamma_{e1} + \alpha_h}{\omega_{e1}}, \frac{\gamma_{e2} + \alpha_h}{\omega_{e2}}, \dots, \frac{\gamma_{eK} + \alpha_h}{\omega_{eK}}\right) \boldsymbol{\omega}^T - (\alpha_h, \alpha_h, \dots, \alpha_h)^T, \quad (6)$$

式中 $\gamma_{ei}, \omega_{ei} (i=1, 2, \dots, K)$ 分别为第 i 块透镜的等

效热差度和等效色差度; T 代表求转置; diag 表示对角矩阵。

常温下满足像质要求的光学系统一般不满足上述无热化关系, 如图 2(a) 所示。引入色偏差 $\Delta\omega_i$ 和热偏差 $\Delta\gamma_i$, 分别代表实际系统中透镜 L_i 与理想无热化系统中透镜 L'_i 的色差度的偏差量和热差度的偏差量, 则实际系统的热差表达式为

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 + \Delta\gamma_1 \\ \gamma_2 + \Delta\gamma_2 \\ \vdots \\ \gamma_j + \Delta\gamma_j \\ \vdots \\ \gamma_K + \Delta\gamma_K \end{pmatrix} = \text{diag}\left(\frac{\gamma_{e1} + \alpha_h}{\omega_{e1}}, \frac{\gamma_{e2} + \alpha_h}{\omega_{e2}}, \dots, \frac{\gamma_{ej} + \alpha_h}{\omega_{ej}}, \dots, \frac{\gamma_{eK} + \alpha_h}{\omega_{eK}}\right) \begin{pmatrix} \omega_1 + \Delta\omega_1 \\ \omega_2 + \Delta\omega_2 \\ \vdots \\ \omega_j + \Delta\omega_j \\ \vdots \\ \omega_K + \Delta\omega_K \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha_h \\ \alpha_h \\ \vdots \\ \alpha_h \\ \vdots \\ \alpha_h \end{pmatrix}. \quad (7)$$

$\Delta\omega_i$ 和 $\Delta\gamma_i$ 越趋近无限小, 光学系统的热稳定性和色差校正越好。若选取 L_j 作为替换透镜, 并将准备的玻璃库导入热度差-色度差 (T-C) 图中, 通过比较玻璃库中光学玻璃和 L_j 在 T-C 图上的分布, 将替

换透镜 L_j 的材料调整为更靠近直线 $H-L_{ej}$ 的材料 L'_j , 再利用软件优化, 重新分配光焦度以校正像差, 使各个透镜的色差度 ω_i 调整为 ω'_i , 如图 2(b) 所示, 则系统的热差表达式为

$$\begin{pmatrix} \gamma_1 + \Delta\gamma'_1 \\ \gamma_2 + \Delta\gamma'_2 \\ \vdots \\ \gamma'_j + \Delta\gamma'_j \\ \vdots \\ \gamma_K + \Delta\gamma'_K \end{pmatrix} = \text{diag}\left(\frac{\gamma'_{e1} + \alpha_h}{\omega'_{e1}}, \frac{\gamma'_{e2} + \alpha_h}{\omega'_{e2}}, \dots, \frac{\gamma'_{ej} + \alpha_h}{\omega'_{ej}}, \dots, \frac{\gamma'_{eK} + \alpha_h}{\omega'_{eK}}\right) \begin{pmatrix} \omega_1 + \Delta\omega'_1 \\ \omega_2 + \Delta\omega'_2 \\ \vdots \\ \omega'_j + \Delta\omega'_j \\ \vdots \\ \omega_K + \Delta\omega'_K \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \alpha_h \\ \alpha_h \\ \vdots \\ \alpha_h \\ \vdots \\ \alpha_h \end{pmatrix}. \quad (8)$$

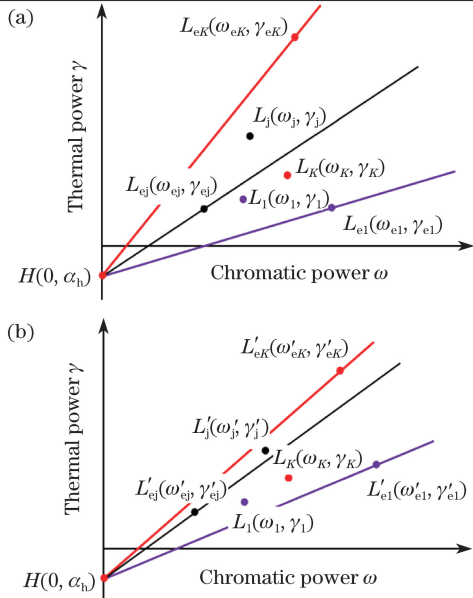


图 2 无热化设计原理。(a) 初始系统的热差示意图;

(b) 无热化系统的热差示意图

Fig. 2 Principle of athermal design. (a) Thermal aberration of initial system; (b) thermal aberration of athermal system

若替换后 $\Delta\omega'_i < \Delta\omega_i, \Delta\gamma'_i < \Delta\gamma_i (i=1, 2, \dots, K)$, 即色偏差和热偏差均减小, 则光学系统热稳定性增强, 热离焦有所改善。

2.3 替换透镜的选择方法

为实现光学系统的无热化, 需进行一次或多次玻璃替换, 每一次替换透镜的选择对替换次数及优化效率起决定性作用。计算并比较透镜产生色差及热差能力的权重, 进行替换透镜的选择。根据 (3) 式, 令 M_i 和 N_i 分别为透镜 L_i 在光学系统 K 片透镜中所占的色差比重和热差比重, M_i 为色差度 ω_i 和光焦度 ϕ'_i 乘积的绝对值与 K 个透镜的色差度 ω 和光焦度 ϕ' 的乘积绝对值总和之比, N_i 为热差度 γ_i 和光焦度 ϕ'_i 乘积的绝对值与 K 个透镜的热差度 γ 和光焦度 ϕ' 的乘积绝对值总和之比, 则 M_i, N_i 的表达式为

$$M_i = |\omega_i \phi'_i| / \left(\sum_{i=1}^K |\omega_i \phi'_i| \right), \quad (9)$$

$$N_i = |\gamma_i \phi'_i| / \left(\sum_{i=1}^K |\gamma_i \phi'_i| \right). \quad (10)$$

根据消色差、消热差方程组, 色差和热差对光学

系统像质稳定性的影响力相当,故引入热差比重 N_i 和色差比重 M_i 的和,即综合权重 W_i 为

$$W_i = M_i + N_i. \quad (11)$$

若选取的替换透镜 L_j 为 K 片透镜中综合权重最大的透镜,则可有效调整系统的热差分配,以最少的替换次数完成无热化设计。

3 无热化长焦光学系统的设计实例

3.1 设计指标

设计一焦距 $f = 400$ mm, F 数为 4 的航空相机,选取加拿大 Teledyne DALSA 公司的 FTF4052 型相机为探测器,其像元尺寸为 $9 \mu\text{m} \times 9 \mu\text{m}$,光敏面尺寸为 $36.1 \text{ mm} \times 48.1 \text{ mm}$,操作温度范围为 $-40 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$,镜筒材料选用可见光波段常用的钛合金 Ti6AL4V。系统指标要求见表 1。

3.2 初始光学系统的设计结果

初始系统的设计结果如图 3 所示,系统总长为 496.50 mm,共包含 7 片透镜,各个透镜的参数见

表 2 初始系统的光学元件参数

Table 2 Parameters of optical elements in initial system

i	Material	$\omega_i / (10^{-3} \mu\text{m}^{-1})$	$\gamma_i / (10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1})$	ϕ / mm^{-1}	h / mm
1	NSSK5	19.661	-2.569	0.0030	50.000
2	NSSK8	20.077	-3.419	0.00625	47.250
3	NKZFS11	23.589	-6.990×10^{-3}	-0.00935	42.849
4	NKZFS11	23.589	-6.990×10^{-3}	-0.01266	37.528
5	NSSK5	19.661	-2.569	0.00977	38.578
6	NSK14	16.509	-1.372	0.00305	40.926
7	NBAK4	17.872	-0.813	0.00026	9.202

对系统进行无热化分析,图 4 所示为热离焦曲线,其中 BFL 为后截距, FBD 为法兰距, Δ 为热离焦量(Δ 为 BFL 与 FBD 之差),可以看出,大部分温度下热离焦量远大于焦深。不同温度下的调制传递函数(MTF)曲线如图 5 所示,其中 ANG 表示视场角度, FOV 表示视场, T 表示子午, R 表示弧矢,可以看出,在 $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时系统像质剧烈下降。

3.3 无热化设计过程

首先挑选第一次替换的透镜。根据(3)、(9)、(10)、(11)式可计算出各透镜的综合权重分别为: $W_1 = 0.228718$, $W_2 = 0.54798$, $W_3 = 0.242901$, $W_4 = 0.288202$, $W_5 = 0.569348$, $W_6 = 0.120058$, $W_7 = 0.002787$,故第一次替换综合权重最大的第 5 块透镜。根据(4)式计算出 $L_{e1}(\omega_{e1}, \gamma_{e1})$ 、 $L_{e2}(\omega_{e2}, \gamma_{e2})$ 、 \dots 、 $L_{e7}(\omega_{e7}, \gamma_{e7})$,此时初始系统的热差图如图 6(a)所

表 1 系统指标

Table 1 Design specifications of system

Parameter	Content
Focal length /mm	400
F-number	4
Wavelength /nm	435.0-700.0
Depth of focus /mm	± 0.019
Field of view /($^\circ$)	8.4
Modulation transfer function	$> 0.4 @ 55 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$
Temperature range / $^\circ\text{C}$	$-40 + 60$
Housing material	Ti6AL4V ($\alpha_h = 9.5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$)

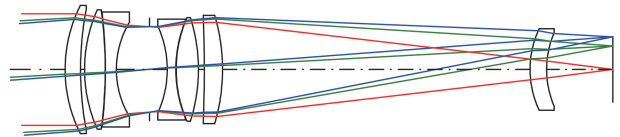


图 3 初始光学系统的结构

Fig. 3 Layout of initial optical system

表 2,包括透镜材料的色差度 ω 和热差度 γ 、光焦度 ϕ 及近轴光线的入射高度 h 。

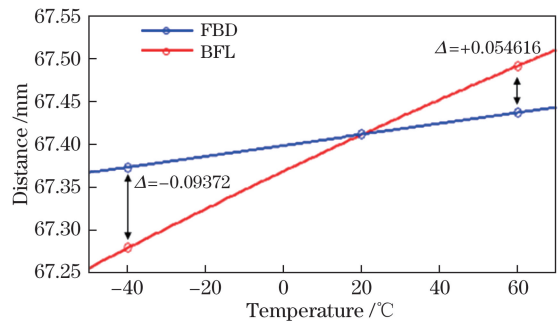


图 4 初始系统的热离焦曲线

Fig. 4 Thermal defocus curves of initial system

示。导入 Schott 玻璃库并比较库中材料和 L_5 相对于 $H-L_{e5}$ 的位置,将 L_5 (NSSK5) 替换为与直线 $H-L_{e5}$ 较为贴近的 L'_5 (NSSK2),并利用 Code V 软件进行优化重新分配光焦度以校正像差, L_{ei} 调整为 L'_{ei} ,得到第一次设计系统。若第一次设计系统未能满足像质要求,则进行第二次玻璃替换。

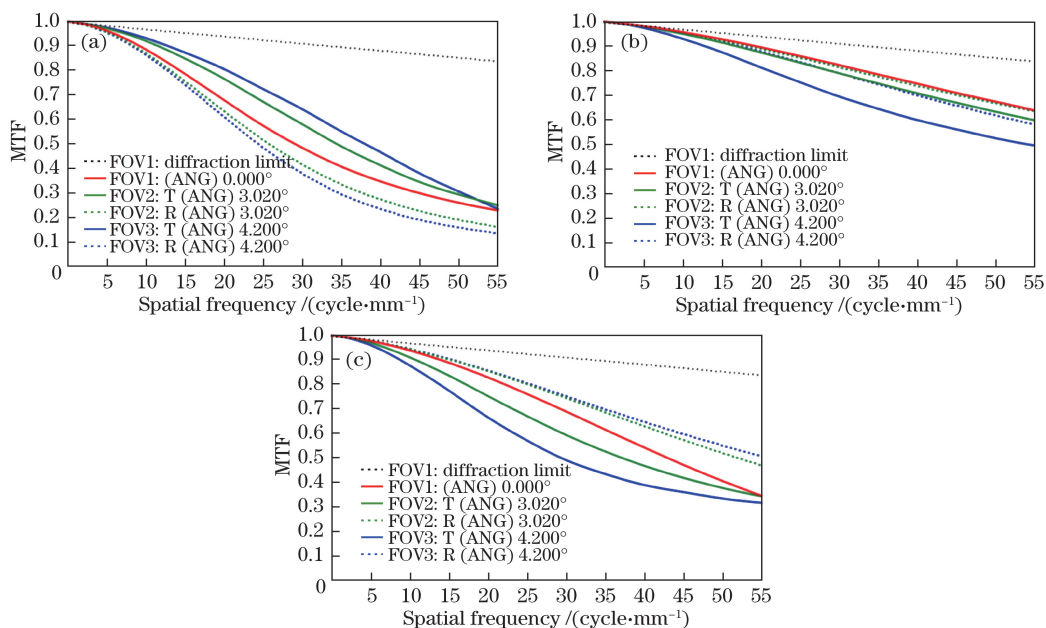


图 5 不同温度下初始光学系统的 MTF 曲线。(a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 MTF curves of initial optical system under different temperatures. (a) $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

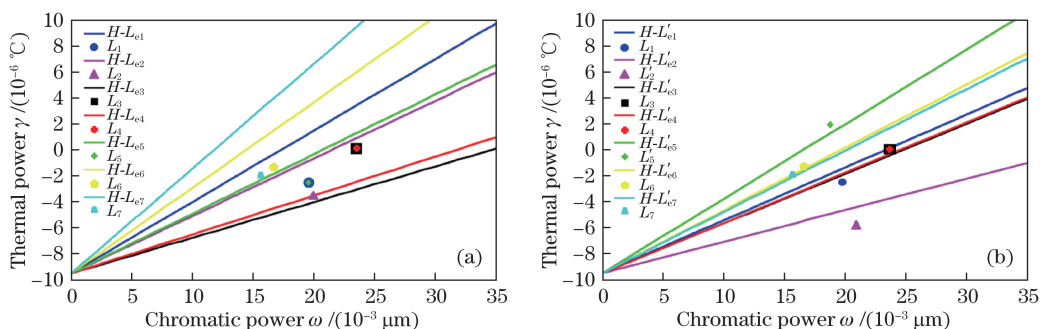


图 6 热差示意图。(a)初始系统;(b)无热化系统

Fig. 6 Schematic of thermal aberration. (a) Initial system; (b) athermal system

第二次玻璃替换需在第一次设计系统的基础上挑选第二次替换的透镜。计算出各透镜的综合权重分别为: $W_1=0.10254, W_2=0.322548, W_3=0.123183, W_4=0.143294, W_5=0.217365, W_6=0.087965, W_7=0.003103$, 故选第二块透镜作为替换透镜。计算比较后将 L_2 (NSSK8) 替换为 L'_2 (NLAf3), 并利用 Code V 软件进行优化重新分配光焦度以校正像差, L_{e2} 调整为 L'_{e2} , 得到第二次设计系统。优化后系统的热差图如图 6(b) 所示。

3.4 无热化设计结果

无热化光学系统的结构如图 7 所示, 系统总长为 500.41 mm, 共 7 片透镜, 无热化设计后光学系统中各元件的光学参数见表 3, 可知第 2 片透镜材料由 NSSK8 换为 NLAf3, 第 5 片透镜材料由 NSSK5 换为 NSSK2, 并且对光焦度进行了重新分配以校正像差。

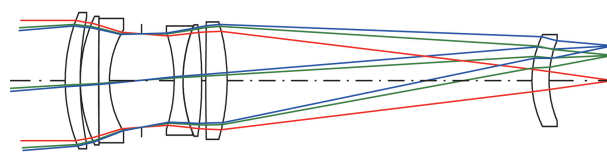


图 7 无热化光学系统的结构

Fig. 7 Layout of athermal optical system

对系统进行无热化分析可知, 经无热化设计后, 系统的热稳定性明显改善。由图 8 可知, $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内热离焦量均小于 0.0014 mm , 均在焦深以内。温度为 $-40, +20, +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 55 lp/mm 处的 MTF 曲线如图 9 所示, 三个温度下 MTF 均大于 0.4, 像质良好稳定, 满足光学系统无热化的设计要求。

4 结 论

提出了一种基于权重分组进行材料挑选的可见

表 3 无热化光学系统的元件参数

Table 3 Parameters of elements in athermal optical system

i	Material	$\omega_i / (10^{-3} \mu\text{m}^{-1})$	$\gamma_i / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	ϕ / mm^{-1}	h / mm
1	NSSK5	19.661	-2.569	0.0023	50.000
2	NLAF3	20.859	-5.93	0.0063	47.849
3	NKZFS11	23.589	-6.990×10^{-3}	-0.0085	43.618
4	NKZFS11	23.589	-6.990×10^{-3}	-0.0115	37.638
5	NSSK2	18.779	1.914	0.0080	38.293
6	NSK14	16.509	-1.372	0.0039	40.687
7	NBAK4	17.872	-0.813	0.0005	9.140

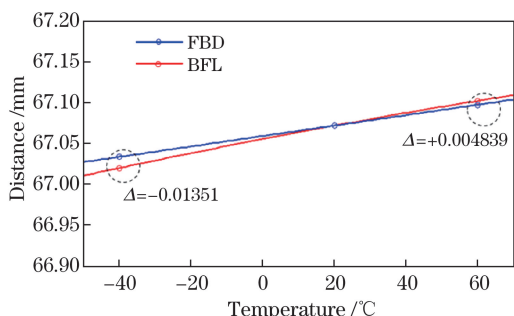


图 8 无热化系统的热离焦曲线

Fig. 8 Thermal defocus curves of athermal system

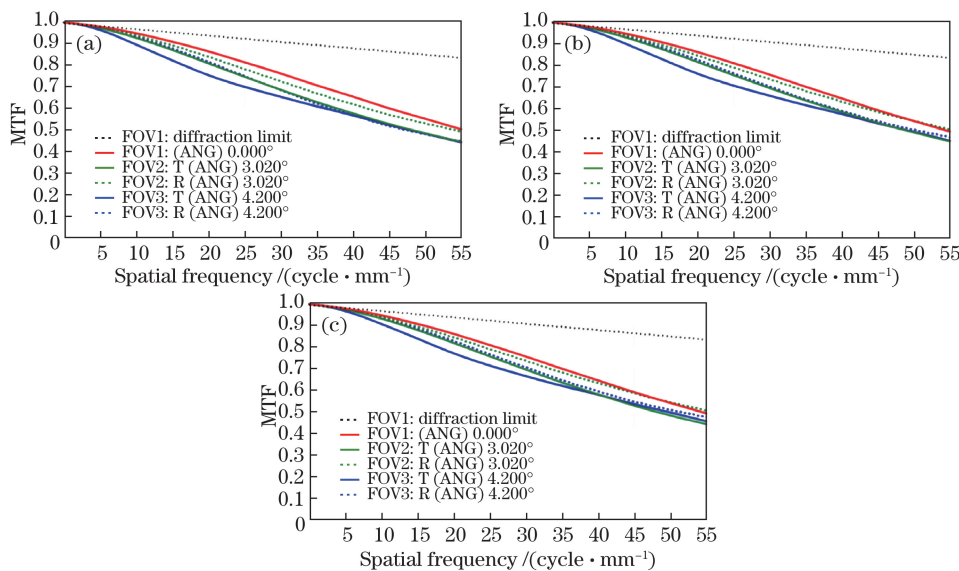


图 9 不同温度下光学系统的 MTF 曲线。(a) -40 °C；(b) +20 °C；(c) +60 °C

Fig. 9 MTF curves of optical system under different temperatures. (a) -40 °C；(b) +20 °C；(c) +60 °C

参 考 文 献

[1] Li L, Wang X. Current status and prospects for thermal effects on optical systems and athermalisation techniques[J]. Optical Technology, 1997, 9(3): 26-29.
李林, 王焯. 环境温度对光学系统影响的研究及无热化系统设计的现状与展望[J]. 光学技术, 1997, 9(3): 26-29.
[2] Qu H M, Zhang X, Zhang J Z, et al. Design of

光波段光学系统的无热化设计方法。在常温下满足像质要求的光学系统的基础上,计算了每一片透镜产生色差及热差能力的综合权重,通过比较权重进行结构分组,并依据分组将初始系统等效成两个单透镜系统以进行光学材料挑选。设计出了大温度范围内像质稳定的长焦航空相机的光学系统。研究结果表明,该方法极大地简化了光学系统无热化的设计方法,可避免机械补偿或光学变焦补偿像质,能够使航空光学系统在大温差环境中保持光学性能的稳定。

compact athermalizing uncooled infrared optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0522003.
曲贺盟, 张新, 张继真, 等. 紧凑型无热化非制冷红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0522003.
[3] Qu R, Deng J. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of view athermalized optical design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0122006.
曲锐, 邓健. 红外双波段双视场消热差光学系统设计

- 中消波段间色差条件(方法)的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0122006.
- [4] Wu Y X, Wu H B, Zhang J Z, *et al.* Optical system design of star camera with high precision better than second level[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(7): 0716001.
伍雁雄, 吴洪波, 张继真, 等. 亚秒级甚高精度星相机光学系统设计[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0716001.
- [5] Qu R, Deng J, Peng X L, *et al.* 0.4-1.7 μm wideband fast f-number optical system design[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(8): 0822007.
曲锐, 邓键, 彭晓乐, 等. 0.4~1.7 μm 宽波段大相对孔径光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35(8): 0822007.
- [6] Liu W Y, Xu Y S, Yao Y, *et al.* Relationship analysis between transient thermal control mode and image quality for an aerial camera[J]. Applied Optics, 2017, 56(4): 1028-1036.
- [7] Friedman I. Thermo-optical analysis of two long-focal-length aerial reconnaissance lenses[J]. Optical Engineering, 1981, 20(2): 161-165.
- [8] Tamagawa Y. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart[J]. Optical Engineering, 1996, 35(10): 3001-3006.
- [9] Tamagawa Y, Tajime T. Daul-band optical systems with a projective athermal chart: Design[J]. Applied Optics, 1997, 36(1): 297-301.
- [10] Hu Y X, Zhou S X, Xiangli B, *et al.* Design of athermal optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(10): 1386-1391.
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.
- [11] Li R G. Passively athermalized broadband optical design using doublet combinations[J]. Applied Optics, 2014, 53(18): 3903-3907.
- [12] Lim T Y, Park S C. Achromatic and athermal lens design by redistributing the element powers on an athermal glass map[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18049-18058.
- [13] Lim T Y, Kim Y S, Park S C. Achromatic and athermal design of an optical system with corrected petzval curvature on a three-dimensional glass chart[J]. Current Optics and Photonics, 2017, 1(4): 378-388.
- [14] Kingslake R, Johnson R B. Lens design fundamentals[M]. 2nd ed. Bellingham: SPIE Press, 2010: 53-82.