

消热差光学系统设计*

胡玉禧 周绍祥

(中国科学技术大学精密机械与精密仪器系, 合肥 230026)

相里斌 杨建峰

(中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

摘 要 引入光学材料的规化热差系数 T 和规化色差系数 C , 得到对无热差光学系统设计的材料选择具有指导作用的 T - C 图。提出基于热差互补原理的无热差光学系统设计方法, 建立了一组既消热差又消色差的方程组。给出了应用这种设计方法设计的密接三片和三分离两种结构型式的无热差系统在不同温度时的像面位移、垂轴像差和各色传递函数曲线。

关键词 光学系统无热化, 空间光学, 红外光学系统。

1 引 言

对空间光学系统来说, 仪器要经受非常大的环境温度变化, 如搭载在低轨道飞行器上的光学仪器要承受 -20°C 到 $+60^{\circ}\text{C}$ 温度变化范围。空间光学系统(特别是红外光学系统)的焦面会随温度产生轴向位移, 成像质量恶化。因此, 空间光学系统的设计应考虑温度变化对光学质量带来的影响, 使光学系统能承受大范围温度变化, 保持光学性能的稳定。

一个理想的无热化光学系统应在工作环境温度变化范围内具有稳定的像面位置和稳定的像质。无热化光学系统作为一个整体, 应从光学和机械结构两个方面考虑。最初, 消除温度对光学系统的影响的方法是被动的机械补偿技术, 利用选择对温度敏感的机械材料或记忆合金, 使透镜产生轴向位移来补偿温度变化引起的像面位移。随后, 又出现了主动机电无热补偿技术, 利用热传感器自动探测温度变化, 由处理器实时计算出温度变化引起的像面位移, 并借助电机驱动透镜产生轴向位移。被动机械式和主动机电式无热技术已在某些红外光学系统中有所应用^[1, 2]。但是, 机械式补偿技术使系统体积变大, 重量增加。主动机电式补偿技术还需要电源、电子线路、执行机构, 导致系统的可靠性降低。而光学无热化技术则有不增加任何机构和重量、不需供电、可靠性好等特点。随着遥感技术、空间光学发展的需要而受到了各国学者的重视, 光学系统的无热化设计方法得到了发展。Rogers^[3]提出试探法, 通过反复计算以寻求合适的透镜组合, Gibbons^[4]利用色阿贝数和热阿贝数曲线设计无热系统, 但仅限于透镜对。Rayces 和 Lebach^[5]按照 \mathcal{Y}^{ν} 图设计专用的三片镜头, Tamagawa 和 Tajime 采

* 国家科委 863 高科技项目。

收稿日期: 1999-02-10; 收到修改稿日期: 1999-05-25

用一个无热图来实现多透镜系统无热化^[6, 7]。本文提出利用不同材料热性能互补的无热化光学设计方法。考虑到光学材料与系统的热性能、色性能都有关, 引入规化热差系数 T 和规化色差系数 C , 导出一组既消热差又消色差的方程解。作为实例, 文章给出了两个镜头的无热化设计结果。

2 规化热差系数和规化色差系数

光学材料的折射率不仅与工作波长有关, 还与工作温度有关。所以, 透镜的光焦度既因波长而变化, 又随环境温度改变。光焦度的变化导致像面位移, 使成像质量下降。假设透镜光焦度为 Φ , 工作温度改变 1°C 引起的光焦度变化为 $\Delta\Phi_t$, 工作波段 $\Delta\lambda$ 引起的光焦度变化为 $\Delta\Phi_\lambda$, 将它们作归一化处理, 即

$$T = \Delta\Phi_t/\Phi, \quad C = \Delta\Phi_\lambda/\Phi, \quad (1)$$

这里, 称 T 为规化热差系数, 称 C 为规化色差系数。经变换, T 、 C 又可表示为

$$T = \beta/(n_{\lambda_0} - 1) - \alpha, \quad C = (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2})/(n_{\lambda_0} - 1), \quad (2)$$

式中, $\beta = \partial n/\partial t$ 为折射率温度系数, α 为线膨胀系数, n_{λ_0} 为中心波长的折射率, $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ 为 $(\lambda_1 \sim \lambda_2)$ 波段内折射率之差。

从(1)和(2)式可见, 规化热差系数 T 和规化色差系数 C 仅与透镜材料有关, T 和 C 既是透镜的成像质量指标, 又是材料的性能指标, 不同材料具有不同的 T 、 C 值, 在以 T 、 C 作坐标轴的笛卡尔坐标系中, 一种材料有其相应的点。

3 Φ 、 T 、 C 方程组的解

3.1 密接透镜组

根据薄透镜理论, 由 K 块透镜组成的密接型光组的光焦度 Φ 、规化热差系数 T 、规化色差系数 C 满足如下关系式:

$$\Phi = \sum_{i=1}^K \Phi_i, \quad T = \sum_{i=1}^K T_i \Phi_i/\Phi, \quad C = \sum_{i=1}^K C_i \Phi_i/\Phi, \quad (3)$$

式中, Φ_i 、 T_i 、 C_i 分别为各透镜的光焦度、规化热差系数和规化色差系数。

对于密接双透镜, 由(3)式得到

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2, \quad T = (T_1\Phi_1 + T_2\Phi_2)/\Phi, \quad C = (C_1\Phi_1 + C_2\Phi_2)/\Phi, \quad (4)$$

假设 $\Phi_1/\Phi = a$, $\Phi_2/\Phi = b$, 则(4)式又可写成

$$1 = a + b, \quad T = aT_1 + bT_2, \quad C = aC_1 + bC_2, \quad (5)$$

当光学系统完全消热差和消色差时(即 $T = 0$, $C = 0$), 为使(5)式有解, 必须满足

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{C_1}{C_2}. \quad (6)$$

(6)式为密接透镜对的消热差和消色差条件, 满足(6)式的两透镜光焦度为

$$\Phi_1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \Phi = \frac{C_1}{C_2 - C_1} \Phi, \quad \Phi_2 = \frac{-T_2}{T_1 - T_2} \Phi = \frac{-C_2}{C_1 - C_2} \Phi.$$

对三透镜密接光组, 由(3)式同样可写出如下方程组:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3, \\ T &= (T_1\Phi_1 + T_2\Phi_2 + T_3\Phi_3)/\Phi, \\ C &= (C_1\Phi_1 + C_2\Phi_2 + C_3\Phi_3)/\Phi, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

假设 $\mathcal{Q}_1/\Phi = a$, $\mathcal{Q}_2/\Phi = b$, $\mathcal{Q}_3/\Phi = c$, 则有

$$1 = a + b + c, \quad T = aT_1 + bT_2 + cT_3, \quad C = aC_1 + bC_2 + cC_3, \quad (8)$$

(8) 式中包含三个变量 a 、 b 、 c 。当满足 $T = 0$, $C = 0$ 时, 它们具有如下确定的解:

$$\frac{\mathcal{Q}_1}{\Phi} = \frac{C_2T_3 - C_3T_2}{M}, \quad \frac{\mathcal{Q}_2}{\Phi} = \frac{C_3T_1 - C_1T_3}{M}, \quad \frac{\mathcal{Q}_3}{\Phi} = \frac{C_1T_2 - C_2T_1}{M}, \quad (9)$$

式中 $M = (C_1T_2 - C_2T_1) + (C_2T_3 - C_3T_2) + (C_3T_1 - C_1T_3)$ 。

3.2 分离透镜组

当各透镜之间被空气分隔时, 假设空气间隔随温度的变化可忽略, 按薄透镜理论可得到下面关系:

$$\Phi = \sum_{i=1}^K h_i \mathcal{Q}_i, \quad T = \sum_{i=1}^K h_i^2 T_i \mathcal{Q}_i / \Phi, \quad C = \sum_{i=1}^K h_i^2 C_i \mathcal{Q}_i / \Phi, \quad (10)$$

式中 h_i 指轴上近轴光线在各透镜上的规化高度, 即 $h_1 = 1$ 时轴上近轴光线在各透镜上的高度。设 $h_i \mathcal{Q}_i = \mathcal{Q}'_i$, $h_i T_i = T'_i$, $h_i C_i = C'_i$, 则(10)式又可写成

$$\Phi = \sum_{i=1}^K \mathcal{Q}'_i, \quad T = \sum_{i=1}^K T'_i \mathcal{Q}'_i / \Phi, \quad C = \sum_{i=1}^K C'_i \mathcal{Q}'_i / \Phi, \quad (11)$$

式中 \mathcal{Q}'_i 、 T'_i 、 C'_i 分别称为各透镜的加权光焦度、加权热差系数、加权色差系数。

(11) 式和(3)式具有相同形式, 不同之处在于密接透镜组中的 \mathcal{Q} 、 T_i 、 C_i 是指实际的量; 而分离透镜组中的 \mathcal{Q}'_i 、 T'_i 、 C'_i 是指加权的量, 权因子为 h_i 。因此, 分离透镜组中求解透镜光焦度的表达式形式与密接光组的相同, 即双分离透镜组时为:

$$\mathcal{Q}'_1 = h_1 \mathcal{Q}_1 = \frac{T'_1}{T'_1 - T'_2} \Phi = \frac{C'_1}{C'_1 - C'_2} \Phi,$$

$$\mathcal{Q}'_2 = h_2 \mathcal{Q}_2 = \frac{-T'_2}{T'_1 - T'_2} \Phi = \frac{-C'_2}{C'_1 - C'_2} \Phi,$$

三分离透镜组时

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{Q}'_1 = h_1 \mathcal{Q}_1 &= \frac{C'_2 T'_3 - C'_3 T'_2}{M'} \Phi, \\ \mathcal{Q}'_2 = h_2 \mathcal{Q}_2 &= \frac{C'_3 T'_1 - C'_1 T'_3}{M'} \Phi, \\ \mathcal{Q}'_3 = h_3 \mathcal{Q}_3 &= \frac{C'_1 T'_2 - C'_2 T'_1}{M'} \Phi, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中 $M' = (C'_1 T'_2 - C'_2 T'_1) + (C'_2 T'_3 - C'_3 T'_2) + (C'_3 T'_1 - C'_1 T'_3)$ 。

对三块透镜以上的多透镜系统, 当材料选定后, 满足无热化的透镜光焦度解有多个可供选择, 虽然透镜个数增加, 但为校正其它像差提供了更多自由度。

4 T - C 图对材料选择的指导作用

无热系统中的每块透镜在 T - C 图上对应一个点(如图1所示), L_1 、 L_2 代表两块透镜位置, 由 L_1 、 L_2 代表的透镜组成密接无热透镜时, 按无热化条件(6)式, L_1 、 L_2 、 0 三点连线位在同一条直线上。这就是说, 双透镜无热系统的材料必须选在过坐标原点的任一条直线上。如果 $T_1 > T_2$ 或 $C_1 > C_2$, 则 \mathcal{Q} 为正, \mathcal{Q} 为负; 反之, 光焦度符号相反。而且, 所有在 T 或 C 轴上投影间距相等的透镜对都具有同样的光焦度, 如图中 L_1 、 L_3 、 L_5 代表的透镜光焦度相同, L_2 、 L_4 、

L_6 代表的透镜光焦度也相同。但是, 两透镜沿材料连线方向拉开距离时, 能减小光焦度。

对三透镜无热系统, 其材料选择从理论上讲没有限制, 但从尽量减小透镜光焦度考虑, 希望求解(9)式、(12)式中的分母值尽量大些。根据解析几何中平面上三角形面积计算公式, 求解公式中的分母值正好是 $T-C$ 图上以三块透镜 L_1 、 L_2 、 L_3 为顶点的三角形面积的两倍。如图 2 所示, 为了减小透镜光焦度, 在选择材料时应使三透镜的材料三角形尽量大, 也就是说, 三块材料间的距离尽量拉开。透镜材料点与 $T = C = 0$ 点连线的斜率用 α 表示, 三块透镜的 α 值由大到小分别为 α_L 、 α_M 、 α_S 。如果具有 α_M 的透镜位在其它两透镜连线左下方, 则该透镜光焦度为正, 其它两光焦度为负。若具有 α_M 的透镜位在其它两透镜连线右上方, 则该透镜光焦度为负, 其它两透镜光焦度为正。按此规则, 图 2 中所示三透镜, 其 L_2 代表的透镜的光焦度为正, L_1 、 L_3 代表的透镜的光焦度为负。而且, 这三透镜在系统中的顺序不管怎样放置, 其光焦度的符号和大小始终不变。

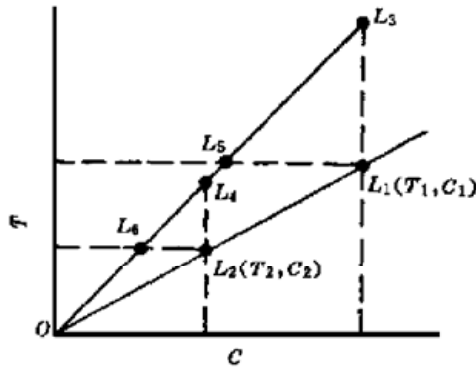


Fig. 1 The choice of materials for athermal doublet

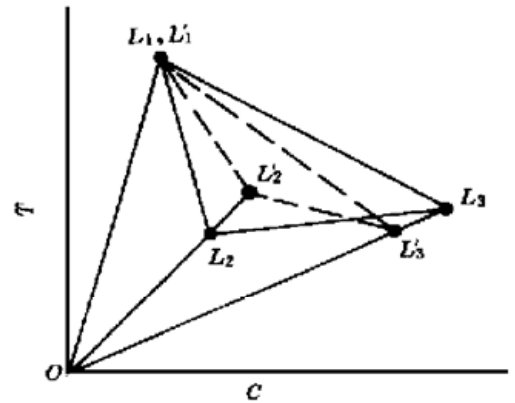


Fig. 2 The choice of materials for athermal system with three thin lenses

如果是三分离透镜组, 则 $T-C$ 图上的材料三角形应由三块加权材料点构成, 如图 2 中的 $\Delta L_1' L_2' L_3'$ 组成的三角形。 L_1' 、 L_2' 、 L_3' 三点的位置根据权因子而定, 即 $OL_1'/OL_1 = h_1$, $OL_2'/OL_2 = h_2$, $OL_3'/OL_3 = h_3$ 。显然, $\Delta L_1' L_2' L_3'$ 与 $\Delta L_1 L_2 L_3$ 的面积是不等的。所以, 即使是由同样材料组成的三片型, 密接和分离情况下的各透镜光焦度尽管符号相同, 但大小不同。

5 应用实例

按前面所述方法, 设计了两个具体的无热光学系统, 一个是密接三片型, 另一个为分离三片型。两个系统具有同样的设计参数: 焦距 45.4 mm, 相对孔径 1/2.5, 全视场 6° , 工作波长 8~12 μm , 温度范围 $-20^\circ\text{C} \sim +60^\circ\text{C}$, 期望的热差和色差点 (0, 0)。两个系统采用同样的材料: $\text{Ge}(T = 1.27 \times 10^{-4}, C = 1.6 \times 10^{-3})$, $\text{CdTe}(T = 5.34 \times 10^{-5}, C = 5.78 \times 10^{-3})$, $\text{ZnS}(T = 2.76 \times 10^{-5}, C = 4.41 \times 10^{-2})$ 。

按(9)式求得密接三透镜的光焦度为 $\mathcal{Q}_1 = -0.831\Phi$, $\mathcal{Q}_2 = 2.061\Phi$, $\mathcal{Q}_3 = -0.249\Phi$ 。当三块透镜分离时, 考虑到光焦度是正、负、正分布, 所以, 近轴光线高度应为 $h_2 > h_1, h_2 > h_3$ 取 $h_1 = 1, h_2 = 1.1, h_3 = 1$ 时, 由(12)式求得三透镜光焦度为 $\mathcal{Q}_1 = -1.000\Phi$, $\mathcal{Q}_2 = 2.097\Phi$, $\mathcal{Q}_3 = 0.306\Phi$ 。从计算结果可见, 分离的光焦度比密接型的有所加大。这是因为分离型的加权材料三角形比密接型的实际材料三角形小之故。通过调正加权因子, 选取互相更远离的光学材料, 将有利于光焦度的减少。

在满足消热差和消色差要求求得初始结构参数后，保持透镜光焦度不变或变化很小的条件下，改变弯曲以平衡各种像差，最后得到两无热系统的像面移动曲线，如图 3 和图 4 所示。密接三片型的垂轴像差曲线如图 5 所示。分离型的各色传递函数曲线如图 6 所示。为了便于比较，又计算了同样光学参数的普通系统的成像质量和像面位移。一个是由两片 Ge 组成的密接型，另一个是由 Ge、Si、Ge 组成的三片分离型。它们的计算结果和无热系统的结果画在同一图上，如图 3 至 6 所示。由计算曲线显而易见，无论是密接型还是分离型无热系统，在 - 20℃ 到 + 60℃ 的范围内，像面位移很小，位移量可控制在微米量级，其成像质量也不受温度变化的影响，取得了预期的无热化效果。而且从图 4 和图 6 还可看到，所设计的无热系统在不同波长时，其像面位置稳定，各色的传递函数值也保持不变，既实现了无热化的要求，又满足消色差。

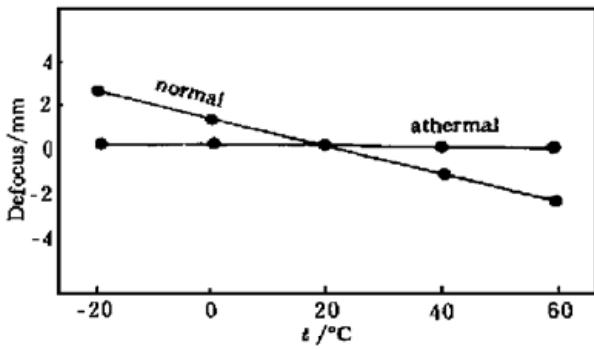


Fig. 3 The defocus of three contact thin lenses

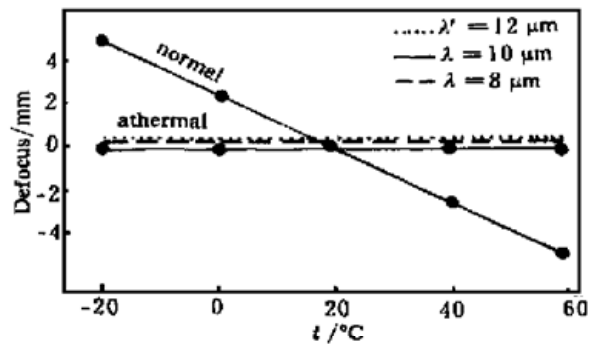


Fig. 4 The defocus of three thin lenses spaced apart

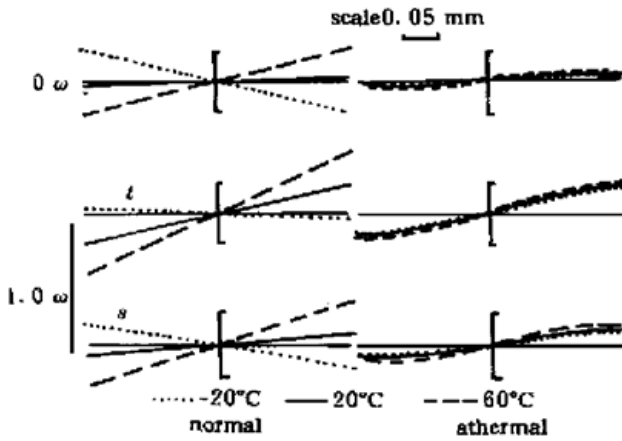


Fig. 5 The lateral aberrations of three contact thin lenses

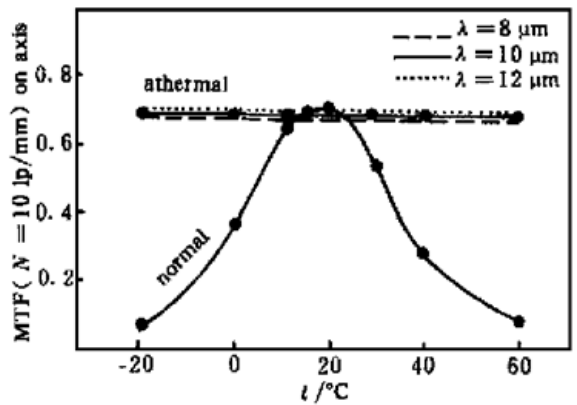


Fig. 6 The MTF of three lenses spaced apart

结 论 提出了光学材料的规化热差系数 T 和规化色差系数 C ，利用光学材料热差和色差各自互相补偿的原理，导出了一组同时消热差和色差的方程组解，经进一步像差平衡可以获得满足要求的无热化光学系统。根据光学系统的环境温度范围和工作波长可算出各种材料的 T 和 C 值，并可用 $T-C$ 图表示，这种 $T-C$ 图对设计无热光学系统的材料选择具有指导作用。

实际光学系统的热效应除与透镜本身的热性能有关外，还与支撑透镜的机械结构密切相关。对一个精心设计的无热光学系统，其机械结构应选用低热膨胀的材料(如钢、碳纤维复合材料)。另外，镜框的热膨胀能用光学系统焦点的位移量来抵消。所以，在设计无热光学系统时，如果镜框热膨胀相对光学系统本身热效应引起的焦点移动不能忽略时，那么所希望的热差和色差点便不再在 $T-C$ 图的坐标原点上，而是在 T 轴上某一点，不管 T 的数值和符号如

何, 都可以采用本文所述无热化光学系统的设计方法。

参 考 文 献

- [1] Roberts M. Athermalization of infrared optics: A review. *Proc. SPIE*, 1989, **1049**: 72~ 81
- [2] Dawn S, Nunez G, Michika D. The design of athermal infrared optical systems. *Proc. SPIE*, 1989, **1049**: 82~ 86
- [3] Rogers P J. Athermalized FLIR optics. *Proc. SPIE*, 1990, **1354**: 742~ 751
- [4] Gibbons R C. Compact high cold shield efficiency optical system. *U. S. Patent* 4431917, 1984
- [5] Rayces L, Lebach L. Thermal compensation of infrared achromatic objectives with three optical materials. *Proc. SPIE*, 1990, **1354**: 752~ 759
- [6] Tamagawa Y. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(10): 3001~ 3006
- [7] Tamagawa Y, Tajime T. Dual-band optical systems with a projective athermal chart: Design. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(1): 297~ 301

Design of Athermal Optical System

Hu Yuxi Zhou Shaoxiang

(Department of Precision Machinery and Precision Instrumentation,
University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

Xiangli Bin Yang Jianfeng

(Xian Institute of Optics and Precision Machinery, The Chinese Academy of Sciences, Xian 710068)

(Received 10 February 1999; revised 25 May 1999)

Abstract The normalized efficiency T of thermal power dispersion and normalized efficiency C of chromatic power dispersion of optical materials are introduced. Based on the mutual compensation of thermal dispersion and chromatic dispersion, the equations are formulated for athermalization of optical system. The suitable materials of athermal optical system can be selected using the T - C chart. The defocus, lateral aberration and modulation transfer function (MTF) of two athermalized lenses with the same parameters are designed using the method, are given as examples.

Key words athermalization of optical system, space optics, infrared system.