

文章编号: 1002-2082(2006) 03-0195-03

光学系统实现热补偿的通用条件

焦明印

(西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘要: 运用光学系统的近轴成像公式, 推导出微分形式的物面位于任意位置时热补偿的通用条件, 包括薄单透镜、密接薄透镜组和分离薄透镜组等不同情况。推导过程中假设物面位置不随温度发生变化, 并且忽略分离薄透镜组中各组分上光线入射高度随温度的变化。利用推导的条件建立了像距的归一化温度变化率与各透镜光热膨胀系数之间的关系, 指出所得到的条件具有更加普遍的意义, 能够指导机械和伺服控制系统的工程设计, 并且在物面位于无穷远时与目前普遍采用的热补偿条件相吻合, 即光学系统的光热膨胀系数等于壳体的热膨胀系数。

关键词: 光学设计; 热补偿; 消热差

中图分类号: TH703

文献标志码: A

General conditions for thermal compensation in optical systems

JIAO Ming-yin

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the paraxial imaging formula, the differential conditions of thermal compensation for optical systems with the object planes at random distance are derived in the cases of single lens, touched multilens system and separated multilens system. It is assumed that the object distance and the incident height of each lens do not change with temperature. The relationship between the normalized temperature variation of image distance and the opto-thermal expansion coefficient of each lens is established with the derived conditions, which is very useful in the design of mechanical and servo systems for an athermalized optical system. The conditions obtained for single lens and touched multilens system are coincided with the regular conditions of thermal compensation when the object plane is at infinity, i. e., the opto-thermal expansion coefficient of the optical system is equal to the housing expansion coefficient.

Key words: optical design; thermal compensation; athermalization

引言

光学系统的结构参数会随着其所处环境温度的不同而发生变化, 进而引起其性能的降低。对于空间和军用光学仪器, 消除光学系统的热差是着重考虑的问题之一^[1]。关于热补偿条件目前见之于报道的是^[2-3]

$$A_t = V$$

其物理意义即光学系统的光热膨胀系数(焦距对温度的偏导数与焦距之比)与系统壳体材料的热膨胀系数相同。这样, 当光学系统的焦面随温度变化时, 其成像面(或探测器的光敏面)也随之变化并保持一致。但理论推导表明, 这一条件只适用于物面位

收稿日期: 2006-01-04; 修回日期: 2006-01-19

作者简介: 焦明印(1963-), 男, 黑龙江宾县人, 博士, 西安应用光学研究所研究员级高级工程师, 主要从事光学系统设计理论及设计技术研究。

于无穷远时的情况。同时有些材料的线膨胀系数在不同温度段具有不同的值, 透镜焦距和壳体有可能发生非线性变化, 应由微分方程表示系统的补偿过程。这对于机械和机电热补偿方式的工程设计具有重要的意义。

热补偿条件是确定系统初始参数的依据, 应由光学系统的高斯像面随温度变化规律建立。事实上, 光学系统的热补偿过程类似于变焦距光学系统的变焦过程。变焦过程通过改变镜组间的间隔来改变系统的焦距并补偿像面的移动, 以保持像面的稳定。光学热补偿则利用各镜组的焦距随温度的不同变化规律, 使系统的像面保持稳定。温度的均匀变化导致系统参数和性能的变化是一个微分过程。

1 单透镜实现光学热补偿的通用条件

如图 1 所示, 透镜 L 处于折射率为 n_i 的介质中, 物距为 $-l$, 像距 l , 其符号遵守国标 GB 1224-1976 的规定。理想光学系统的高斯公式为

$$\frac{1}{l} - \frac{1}{-l} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

式中 f 是透镜焦距, 它是透镜结构参数和介质折射率的函数。由(1)式得像距 l 的表达式:

$$l = \frac{f l}{f + l} \quad (2)$$

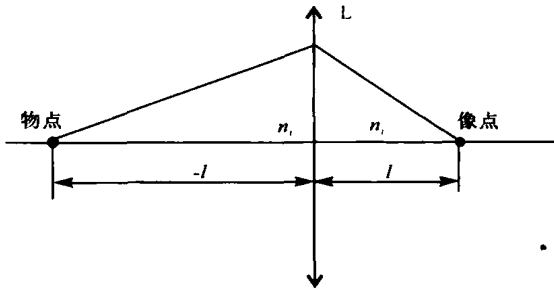


图 1 单透镜成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of single lens imaging

对(2)式 2 边的温度求导数, 并注意到一般情况下光学系统不与物面安装在同一基座上, 即物距 l 不随温度变化, 则有

$$\frac{dl}{dT} = \frac{l^2 \frac{df}{dT}}{(f + l)^2} \quad (3)$$

经变换得

$$f^2 \frac{dl}{dT} = l^2 \frac{df}{dT} \quad (4)$$

(4) 式即为微分形式的单透镜实现光学热补偿需满足的通用条件。实际系统中像距 l 处一般为成像面或探测器的光敏面位置, dl/dT 若等于壳

体随温度的变化率, 则可实现温度补偿。对(4)式进行进一步变换可得

$$f \left(\frac{dl}{l dT} \right) = l \left(\frac{df}{f dT} \right) \quad (5)$$

式中 $dl/(l dT)$ 和 $df/(f dT)$ 分别为像距及焦距的归一化变化率。在某一段温度范围内, 大部分壳体材料具有稳定的温度变化率, 实现温度补偿时, $dl/(l dT)$ 即壳体材料的线膨胀系数 A_s , 设 $df/(f dT) = V$, (5)式化简为

$$f A_s = l V \quad (6)$$

当物面位于无穷远即 $l \rightarrow \infty$ 时, $l = f$, (6)式有最简单的形式

$$A_s = V \quad (7)$$

即物面位于无穷远时的光学热补偿的条件为焦距的归一化变化率与壳体的线膨胀系数相同, 此结论与文献[2-3]一致。对于折射系统, 焦距的归一化变化率与构成透镜材料的折射率及其温度变化率、线膨胀系数和所在介质折射率的温度变化率等有关。对于反射系统, 焦距的归一化变化率仅与反射面型的变化有关。根据(7)式, 对于单一球面构成的反射系统, 当镜体与支撑的壳体采用同一材料时, 可实现自动热补偿。

2 密接多透镜实现光学热补偿的通用条件

如图 2 所示, 系统由 m 个透镜 L_1, L_2, \dots, L_m 密接组成。设其组合焦距为 f_t , 由密接透镜组的成像性质可知

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l} = \frac{1}{f_t} \quad (8)$$

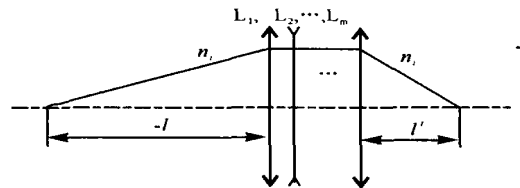


图 2 密接透镜组成像示意图

Fig. 2 Imaging sketch of touched multilens system

因此密接多透镜的热补偿条件与(5)~(7)式表示的单透镜的热补偿条件相同, 只是此时焦距的归一化变化率应为全系统焦距的归一化变化率。由全系统焦距与单透镜焦距的关系可以得到全系统焦距的归一化变化率与各单透镜焦距的归一化变化率的关系。对于密接透镜组有

$$\frac{1}{f_t} = \frac{U}{n_i} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{f_i} \quad (9)$$

由此得

$$\frac{1}{f_t^2} \frac{df_t}{dT} = \sum_{i=1}^m \frac{1}{f_i^2} \frac{df_i}{dT}$$

整理得

$$V_i = \frac{1}{f_t} \frac{df_t}{dT} = \sum_{i=1}^m \left[\frac{U}{U} V_i \right] \quad (10)$$

其中 U 和 U_i 分别为全系统和第 i 个透镜的光焦度。由(10)式可看出, 密接多透镜组焦距的归一化变化率实际上是各单透镜焦距的归一化变化率的加权组合, 其权因子为其光焦度与全系统光焦度的比。这样就可以通过控制权因子得到需要的焦距归一化变化率, 使其满足热补偿条件。

3 分离多透镜实现光学热补偿的通用条件

分离多透镜原理如图3所示。

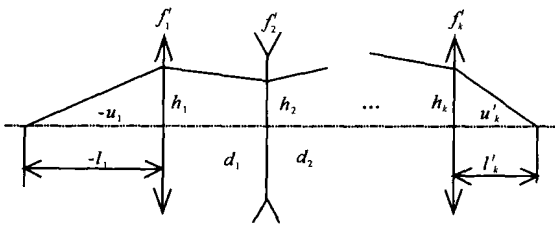


图3 分离多透镜系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of separated multilens system

从图3可以看出:

$$n_{1i} u_{1i} - n_{1i} u_i = h_1 U$$

$$n_{2i} u_{2i} - n_{2i} u_2 = h_2 U$$

...

$$n_{ki} u_{ki} - n_{ki} u_k = h_k U$$

由于 $n_{2i} u_{2i} = n_{1i} u_{1i}$, $n_{3i} u_{3i} = n_{2i} u_{2i}$, ..., $n_{ki} u_{ki} = n_{k-1i} u_{k-1i}$, 将以上各式相加得到

$$n_{ki} u_{ki} - n_{1i} u_i = \sum_{i=1}^k h_i U \quad (11)$$

当系统位于空气或真空中时, $n_k = n_1 = 1$, 则(11)式变为

$$u_k - u_i = \sum_{i=1}^k h_i U \quad (12)$$

因此, 可得到的像距满足:

$$1/l_k = (u_i + \sum_{i=1}^k h_i U) / h_k = u_i / h_k + (1/h_1 \sum_{i=1}^k h_i U) h_1 / h_k \quad (13)$$

对温度求导数, 考虑到 h_i 的温度变化率是由于镜组

焦距及镜组之间间隔的变化引起的, 其相对于焦距的温度变化率可以忽略^[4]。因此, 有

$$dl_k / (l_k dT) = l_k \sum_{i=1}^k U V_i (h_i / h_k) = (1/u_k) \sum_{i=1}^k h_i U V_i \quad (14)$$

(14)式即为微分形式的分离多透镜热补偿方程。其中仍然假定光学系统不与物面安装在同一基座上, 即 u_i 不随温度变化。等式左边是像距的归一化温度变化率, 右边是加权的单个透镜组的光热膨胀系数, 其中 $(h_i U)$ 实际上即为第 i 个透镜组入射和出射光线的偏折角。特别是当物面位于无穷远时, $u_i = 0$, (13)式变为 $1/l_k = U h_i / h_k$ 。此处 U 为全系统的光焦度, l_k 为像方焦距。相应地(14)式变为

$$dl_k / (l_k dT) = l_k \sum_{i=1}^k U V_i (h_i / h_k) = (1/u_k) \sum_{i=1}^k h_i U V_i$$

变换后可得

$$dl_k / (l_k dT) = \sum_{i=1}^k (h_i U V_i / U h_i) \quad (15)$$

4 结论

以上推导了几种情况下实现热补偿需要满足的条件, 这些条件可以在系统的初始结构选取和光焦度分配等阶段使用。值得注意的是, 这里采用的薄透镜模型近似透镜实际结构, 加之温度改变时, 原有的像差平衡被打破, 系统的最佳像面可能随温度非线性变化。因此, 按照补偿条件不可能使系统的像质在所要求的温度范围内得到最佳补偿, 故而应该在获得系统结构参数并经过初步优化后, 计算实际系统在不同温度下的最佳像面位置, 然后采用最小二乘法得到最佳修正曲线。这样可使系统性能在所要求的温度范围内得到更好的补偿^[5]。

参考文献:

- [1] 焦明印. 衍射光学元件在红外成像系统中的应用[J]. 应用光学, 2000, 21(6): 17-20.
- [2] HERZIG H P. Micro-optics[M]. London: Taylor & Francis Ltd, 1997: 269-272.
- [3] COX J A. Application of diffractive optics to infrared imagers[J]. SPIE, 1995, 2552: 304-312.
- [4] TAMAGAWA Y. Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart[J]. Opt Eng, 1996, 35(10): 3001-3006.
- [5] 焦明印, 冯卓祥. 采用衍射光学元件实现像面环境温度补偿的混合红外光学系统[J]. 光学学报, 2001, 21(11): 1364-1367.