

环境温度和气压变化对象面位移的影响与二级光谱校正

史光辉 姜会林

(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

说明利用本征色差校正二级光谱的方法^[1,2],不仅可以用普通玻璃校正二级光谱,而且可以同时降低环境温度和气压变化对光学系统象面位移的影响。

一、引 言

根据某些特殊使用要求,在设计高质量、长焦距摄影物镜时,不仅需要校正二级光谱,而且还必须考虑消除环境温度和气压变化对象面位移的影响。设计者应根据允许的象面位移量(本文中的例子允许的象面位移量不超过八分之一波长),对环境温度和气压变化量提出要求,但这与二级光谱校正发生了矛盾。本文通过理论分析和三个设计实例,对这一矛盾进行了分析、比较,并给出了解决这一矛盾的具体途径。

二、环境温度变化对象面位移的影响

关于环境温度变化引起象面位移的问题,斯留萨列夫曾作过讨论^[3]。当温度变化 Δt 时,由于折射率和半径变化而产生的光焦度 ϕ 的变化由下式求出

$$\Delta\phi = V_t \phi \Delta t, \quad V_t = [\beta_\lambda / (n_\lambda - 1)] - \alpha_t, \quad (1)$$

式中 V_t 为热光学常数, β_λ 为某一波长 λ 的折射率温度系数, α_t 为线膨胀系数。

由同一种玻璃组成的贴合薄透镜系统,焦距为 f' 时,温度变化引起的象面位移量为

$$\Delta l'_t = -f' V_t \Delta t. \quad (2)$$

由 K 种玻璃组成的系统的象面位移量为

$$\Delta l'_t = -V_K^2 \sum_{\mu=1}^K \frac{h_\mu^2}{h_K^2} \phi_\mu V_{t\mu} \Delta t, \quad (3)$$

式中 V_K 为系统的后截距, h 为轴上点光线在组元上的入射高度。

随温度变化产生的镜筒长度 d 的变化所引起的象面位移量为

$$\Delta l'_K = \sum_{\mu=1}^{K-1} d_\mu \alpha_\mu \Delta t (1 - \beta_\mu) + l'_K \alpha_K \Delta t, \quad (4)$$

式中 d_μ 表示第 μ 组和第 $\mu+1$ 组之间的距离, α_μ 为相应间隔所采用的镜筒材料的温度系数(在本文例子中,都采用铝作为镜筒材料), β_μ 为象空间对相应间隔空间的纵向放大率。

进一步分析将会发现, 对于一般系统可以选择不同 V_t 的玻璃和不同 α 的镜筒材料相匹配来减小 $\Delta l'_K$ 。但对于采用特殊色散材料如 CaF_2 或 FK_1 来校正二级光谱的光学系统, 这个办法就不行了。因为 CaF_2 和 FK_1 的 β_λ 为比较大的负值, 而 α_t 是比较大的正值, 由(2)式可知, V_t 很大, 即随着温度变化产生的折射率变化和透镜半径变化对象面位移的影响是迭加的。由于特殊色散材料的品种很少, V_t 几乎没有被选择的余地; 而普通玻璃的 β_λ 和 α_t 都是正值, 由(2)式可知, V_t 要比特殊色散材料小得多。大多数普通玻璃的 V_t 值都在 $-4 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-6}$ 之间, 而 FK_1 的 V_t 值为 -28.1×10^{-6} , CaF_2 的 V_t 值还要更负些。由此可见, 采用特殊色散材料校正二级光谱必然会大大加重环境温度变化对象面位移的影响, 这种影响也是无法用选择镜筒材料来补偿的。例如图 1 所示的系统, 是用 FK_1 和 TF_3 来减小二级光谱的, 该系统要求允许的温度变化量 $\Delta t = 0.15^\circ\text{C}$, 二级光谱残余量为 0.18 mm 。如果二级光谱再减小些, 对 Δt 的要求就更严了。因为二级光谱校正得越好, 特殊色散玻璃的光焦度就越大, 由(1)式可知, $\Delta \phi$ 就越大, 因而 $\Delta l'$ 也就越大。

在同样校正二级光谱的情况下, 如果设法减小特殊色散玻璃的光焦度, 就可以降低温度变化对象面位移的影响。图 2 所示系统就是一例。这个系统就是用我们称之为利用本征色差校正二级光谱的方法设计的。前后正组产生正色差, 中间负组产生负色差。与一般利用特殊色散玻璃校正二级光谱的方法不同, FK_1 被用在负组元中作正透镜, 因此光焦度大大减小, 而且光线入射高度 h 也处于最低位置, 同时允许的 Δt 值为 0.6°C , 比起前例来, 放宽了三倍; 而二级光谱仅为 0.06 mm , 比前例缩小了两倍。但从目前温度控制精度所能达到的水平来看, $\Delta t = 0.6^\circ\text{C}$ 仍然比较严, 由此看来, 除非不用特殊色散玻璃校正二级光谱, 否则再放宽对温度控制精度的要求是很困难了。为此我们设计了图 3 所示的完全采用普通玻璃校正二级光谱的系统。与图 2 所示的系统相反, 它是利用正组产生负色差, 负组产生正色差来校正二级光谱的。由于没有用特殊色散玻璃, 得到允许的 $\Delta t = 2^\circ\text{C}$, 与前两个例子相比, 对温度控制精度的要求分别放宽了 13 倍和 2.3 倍, 二级光谱残余量仍为 0.06 mm 。

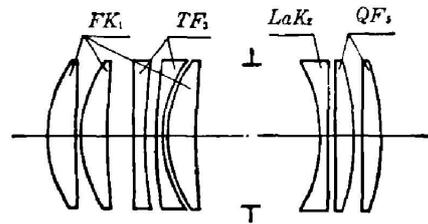


图 1 (焦距 $f' = 1.7 \text{ m}$, 相对孔径 $D/f' = 1/7$, 视场 $2\omega = 12^\circ$)

Fig. 1 (focal length $f' = 1.7 \text{ m}$, relative aperture $D/f' = 1/7$, view field $2\omega = 12^\circ$)

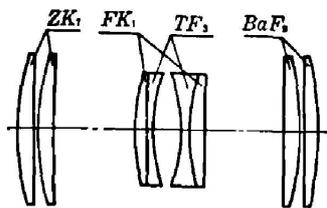


图 2 (场镜略, 焦距 $f' = 1.7 \text{ m}$, 相对孔径 $D/f' = 1/7$, 视场 $2\omega = 18^\circ$)

Fig. 2 (The field lens is not shown, focal length $f' = 1.7 \text{ m}$, relative aperture $D/f' = 1/7$, view field $2\omega = 18^\circ$)

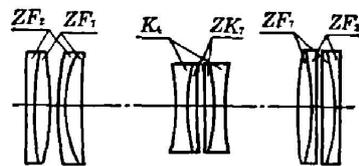


图 3 (焦距 $f' = 1.7 \text{ m}$, 相对孔径 $D/f' = 1/7$, 视场 $2\omega = 18^\circ$)

Fig. 3 (Focal length $f' = 1.7 \text{ m}$, relative aperture $D/f' = 1/7$, view field $2\omega = 18^\circ$)

三、环境气压变化对象面位移的影响

气压变化引起象面位移,是由于空气折射率发生变化所致。空气折射率 $n_{\text{空}}$ 和温度 t 、气压 P 之间的关系^[4]为 $n_{\text{空}} = 1 + [0.000292/(1+0.0037t)]P$, 取微分得

$$\Delta n_{\text{空}} = [0.000292/(1+0.0037t)]\Delta P。$$

通常的玻璃折射率,可以看作是把空气折射率认为是 1 时玻璃相对于空气的折射率,它可写成 $n^* = n/n_{\text{空}}$ 。当空气折射率 $n_{\text{空}}$ 发生改变后,仍把 $n_{\text{空}}$ 看成为 1, 则相应的玻璃折射率的变化应为

$$\Delta n^* = -n \Delta n_{\text{空}} / n_{\text{空}}^2 \doteq -n \cdot \Delta n_{\text{空}}, \quad (5)$$

再令相应的阿贝数为 $V^* = (n-1)/\Delta n^* = -(n-1)/n \cdot \Delta n_{\text{空}}$, 于是,对用一种玻璃组成的贴合薄透镜组,可得到象面位移系数 C_1^*

$$C_1^* = h^2 \phi / V^* = -Q h^2 \phi \Delta n_{\text{空}}, \quad Q = n / (n-1)。 \quad (6)$$

从(6)式可知,对用一种玻璃组成的组元,为降低气压变化对象面位移的影响,应尽量选择折射率高的玻璃。

对于两种玻璃(n_1, ν_1)、(n_2, ν_2)组成的、光焦度为 ϕ 的消色差贴合薄透镜组元,经推导可得

$$C_{10}^* = -Q_0 h^2 \phi \Delta n_{\text{空}}, \quad Q_0 = \frac{1}{n_1 - 1} \left[n_1 - \frac{n_1 - n_2}{(\nu_1 - 1)(n_2 - 1)} \right], \quad (7)$$

式中 $\nu = \nu_1/\nu_2$, 由(6)式可知,若减小 C_{10}^* , 必然要求 Q_0 值尽量小,即

$$\frac{n_1 - n_2}{(\nu - 1)(n_2 - 1)} > 0, \quad (8)$$

且应尽量与 n_1 相接近。在(8)式中,若 $\nu > 1$, 则要求 $n_1 > n_2$; 若 $\nu < 1$, 则要求 $n_1 < n_2$ 。所以可得出结论,在组成消色差的、产生正光焦度的贴合薄透镜系统的两种玻璃中,选择 ν 值大的玻璃(或者说正透镜的玻璃)的折射率大于 ν 值小的玻璃(或者说负透镜的玻璃)的折射率,可以减小气压变化对象面位移的影响。实际上大多数消色差玻璃组合中,恰好与此相反。因此,一般的消色差玻璃组合将增加气压变化对象面位移的影响。可以证明,对于非消色差的透镜组,这个结论也是正确的。

由于用特殊色散玻璃校正二级光谱时,两种玻璃折射率的差值不可能选择得很小,因而 Q_0 值也比较大,所以这种系统不仅对温度控制精度要求很严,而且对气压控制精度的要求也是严的。图 1 所示系统中两组透镜都是单独消色差的,在前正组中,正透镜的折射率(1.48601)比负透镜折射率(1.6123)低,而在后负组中,负透镜的折射率(1.692)比正透镜折射率(1.57)高。这两种玻璃选择,对气压变化引起的象面位移的控制都是不利的。因此使得这个系统对气压控制精度要求也很严,计算表明 $\Delta P = 0.01$ 个大气压。

对于图 2、图 3 所示的系统,每一组元都产生一定的色差。对产生一定量的色差 C_1 、并由两种玻璃组成的贴合薄透镜组有

$$C_1^* = C_{10}^* + C_{1c}^*, \quad (9)$$

式中 C_{10}^* 仍由(10)式决定, C_{1c}^* 则是由于贴合薄透镜组产生的一定的 C_1 带来的,而且

$$C_{1c}^* = -C_1 Q_c \Delta n_{\pm}, \quad Q_c = \frac{\nu_1}{\nu - 1} \frac{n_1 - n_2}{(n_1 - 1)(n_2 - 1)} \quad (10)$$

从(10)式可知, C_{1c}^* 和 $(n_1 - n_2)$ 成正比, 当 $n_1 = n_2$ 时, $C_{1c}^* = 0$ 。将(7)式和(10)式代入(9)式可以写成

$$C_1^* = -\Delta n_{\pm} (Q_0 h^2 \phi + C_1 Q_c), \quad (11)$$

前面已经提到, 实际上在绝大多数玻璃组合中, 都是 ν 值大的玻璃 n 值小, ν 值小的玻璃 n 值大, 前面举出的三个例子都是如此。所以由公式(6)、(7)和(10)式可知, Q 、 Q_0 一般都是正值, 而 Q_c 为负值; 由(6)、(7)、(11)式可知, 正组的 $Q h^2 \phi$ 、 $Q_0 h^2 \phi$ 为正值; 又由(10)式可知, C_{1c}^* 与 ϕ 以及 h 无关。因此可以得出一个结论, 即为减小气压变化对象面位移的影响, 在利用本征色差校正二级光谱时, 应尽量增大产生正色差组元的 Q_c 值, 并尽量减小产生负色差组元的 Q_c 值, 这可以通过选择两种玻璃折射率的差值大小来实现。图3所示系统就符合这个原则。两个正组元产生的 C_1 是负的, 但折射率差值很小(0.06), 因而 Q_c 值很小; 而负组元产生正色差 C_1 , 折射率差很大(0.3), 因此 Q_c 值很大, 使得 $C_1 Q_c$ 值几乎与 $h^2 \phi Q_0$ 值一样大。与各组单独消色差的系统相比较, 相当于负组元产生两倍的 C_1^* 与正组的元 C_1^* 相补偿, 因而使这个系统对气压控制精度的要求大大降低, 计算结果 $\Delta P = 0.05$, 比图1所示系统放宽了四倍。

而图2所示系统, 产生负的 C_1 的负组元的折射率差较大, 因而 Q_c 较大; 而产生正的 C_1 的正组元的折射率差相当于零, 即 Q_c 值为零。因此这个系统对气压控制精度的要求也是很严的, 计算结果 $\Delta P = 0.015$ 。

四、结 论

用特殊色散玻璃校正二级光谱的光学系统对环境温度和气压控制精度都要求很高。根据本文进行的论证和得到的结果, 选择普通玻璃利用本征色差校正二级光谱并取合适的解, 不仅可以校正好二级光谱, 而且可以同时降低系统对温度和压力控制精度的要求, 既可保证系统具有优良的成象质量, 又能为目前的控制技术所实现。

参 考 文 献

- [1] 史光辉;《光学学报》, 1981, 1, No. 5 (Sep), 433.
- [2] 姜会林;《光学学报》, 1982, 2, No. 3 (May), 225.
- [3] Г. Р. Слюсарев; «Методы Расчета Оптических систем», (Издательство "Машиностроение" Ленинград 1969) 273.
- [4] Rudolf Kingslake; «Applied Optics and Optical Engineering», (Academic Press, New York and London 1967) V, IV, 146.

**Effect of temperature and pressure changes on the image shift
and the secondary spectrum correction**

SHI GUANGHUI AND JIANG HUILIN

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)

(Received 29 October 1982; revised 10 January 1983)

Abstract

A method for the secondary spectrum correction by using intrinsic chromatic aberration^[1,2] is described. It is possible that not only the secondary spectrum is corrected by using usual glasses, but also the effect of the environmental temperature and pressure on the image shift of the optical system can be reduced.