第1卷 第5期
1981年9月

光 学 学 报
ACTA OPTICA SINICA

Vol. 1, No. 5
September 1981

利用本征色差校正二级光谱

史 光 辉
(中国科学院长春光学精密机械研究所)

提 要

一个消色差的透镜系统可由若干个互相贴合的或互相分离的、由冕玻璃和火石玻璃组成的组元组成。从理论上讲，如果使每一组元产生一定量的色差，并使色差的正或负与玻璃的选择满足一定的关系，则整个透镜系统的二级光谱可减小到任意值。本文给出了利用这一原理设计的、校正了二级光谱的两个三片复杂化型物镜实例。焦距为1.5米，相对孔径为1:7，视场角分别为15°和18°。其中一个物镜完全采用了普通玻璃。

一、前 言

C. G. Wynne[1] 曾进行过利用互相分离的单组元产生色差，使整个透镜系统校正二级光谱的研究。他所采用的原理是利用衍生色差产生衍生二级光谱。如图1所示，因为前组有色差，C光和F光在后组的入射高度h_C和h_F已不再相等，因而光焦度也不相等，于是就产生了色差。我们称这种色差为衍生色差。因衍生色差而产生的二级光谱叫做衍生二级光谱。但是，根据费马原理，在通常的色差公式中，忽略了各波长光之间的光程差的差别，即把每一组元对于各波长光的光焦度都看成是相等的。我们称这种色差和二级光谱为本征色差和本征二级光谱。本文讨论利用本征色差校正本征二级光谱。

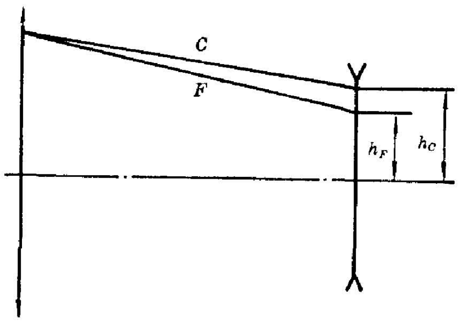


图 1

二、原 理

利用本征色差来校正二级光谱，就是要把色差系数C_1当作一个变数来看待。我们首先找出二级光谱系数C_1^{II}和C_1，以及和系统中每一组元的光线入射高度h、焦距倒数φ、玻璃的阿贝数ν和相对部分色散系数P之间的关系。要求产生一定的C_1值，且满足总焦距要求，由两种玻璃(ν_a、P_a)和(ν_b、P_b)组成的薄透镜组的φ分别为

$$\left.\begin{aligned}\varphi_a&=\frac{\nu_a\varphi}{\nu_a-\nu_b}-\frac{\nu_a\nu_b}{(\nu_a-\nu_b)h^2}C_1,\\ \varphi_b&=-\frac{\nu_b\varphi}{\nu_a-\nu_b}+\frac{\nu_a\nu_b}{(\nu_a-\nu_b)h^2}C_1。\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

收稿日期：1981年1月29日

如果(1)式是对 C 光和 F 光而言,在满足(1)式的情况下,F 光对 D 光(中间波长)则有

$$C_1^{\mathrm{II}}=h^2\left(\frac{\varphi_a}{\nu_a}P_a+\frac{\varphi_b}{\nu_b}P_b\right)。\tag{2}$$

将(1)式代入(2)式,经过整理得到

$$C_{1(1)}^{\mathrm{II}}=h_{(1)}^2\varphi_{(1)}\left(\frac{P_a-P_b}{\nu_a-\nu_b}\right)_{(1)}-\left(\frac{\nu_bP_a-\nu_aP_b}{\nu_a-\nu_b}\right)_{(1)}C_{1(1)}。\tag{3}$$

脚标(1)表示第一薄透镜组。同样由另一对玻璃组成的第二薄透镜组有

$$C_{1(2)}^{\mathrm{II}}=h_{(2)}^2\varphi_{(2)}\left(\frac{P_a-P_b}{\nu_a-\nu_b}\right)_{(2)}-\left(\frac{\nu_bP_a-\nu_aP_b}{\nu_a-\nu_b}\right)_{(2)}C_{1(2)}。\tag{4}$$

若两组薄透镜的组合系统是消色差的,应满足

$$C_{1(1)}=-C_{1(2)}=C_1。\tag{5}$$

并令

$$\alpha=\frac{P_a-P_b}{\nu_a-\nu_b},\tag{6}$$

$$\beta=\frac{\nu_bP_a-\nu_aP_b}{\nu_a-\nu_b}。\tag{7}$$

将(3)式和(4)式相加,并满足(5)式,得

$$C_1^{\mathrm{II}}=h_1^2\varphi_1\alpha_1+h_2^2\varphi_2\alpha_2-C_1(\beta_1-\beta_2),\tag{8}$$

这就是我们要得到的关系式。当玻璃确定后,α、β 就可确定,而 $h_1\varphi_1$ 和 $h_2\varphi_2$ 要满足总光焦度的要求。在分离的透镜组系统中,h 的选择有时要用来校正场曲。当这些参数确定后,我们可求出为校正二级光谱 C_1^{II} 每组元所要求的 C_1 值,即

$$C_1=\frac{h_1^2\varphi_1\alpha_1+h_2^2\varphi_2\alpha_2-C_1^{\mathrm{II}}}{\beta_1-\beta_2}。\tag{9}$$

$h_1^2\varphi_1\alpha_1+h_2^2\varphi_2\alpha_2$ 是 $C_1=0$ 时,系统的二级光谱。实际上它是一个负值。β 值亦为负,因此,由玻璃(α_1、β_1)组成的组元的 C_1 与(9)式得出的 C_1 其符号应相同。而由玻璃(α_2、β_2)组成的组元的 C_1 应与(9)式得出 C_1 的符号相反。注意到这里的脚标1或2,只是为了区别两对不同的玻璃组合而已,并不是指玻璃在系统中的排列顺序。因此我们可以得出结论:只要选 $|\beta|$ 值大的玻璃组成的组元的 C_1 为正,而 $|\beta|$ 值小的玻璃组成的组元的 C_1 为负,且 C_1 值由(9)式求出,则整个系统就可校正二级光谱。

当 $h_1^2\varphi_1\alpha_1+h_2^2\varphi_2\alpha_2$ 值为正时,得出的结论正好相反,但这个情况一般是没有实际意义的。

对(8)式的进一步分析,还可以得出下面一些结论:

(1) 在 $C_1(\beta_1-\beta_2)$ 一项中,不包含 h 和 φ。C_1 虽和 h、φ 有关,但它们是作为变量出现的。我们可以利用这一性质,将由(9)式计算出的 C_1 值,按任一比例分配到由相同两种玻璃组成的各组元中去,而不管这个组元处在系统中的什么位置。其结果对二级光谱不发生影响。因此,(9)式可改写成下面形式:

$$C_1=\frac{\alpha_1\sum_{i=1}^{k}h_i^2\varphi_i+\alpha_2\sum_{i=k+1}^{n}h_i^2\varphi_i-C_1^{\mathrm{II}}}{\beta_1-\beta_2}。\tag{10}$$

因为在 $C_1(\beta_1-\beta_2)$ 中不包括有 φ，所以每组元的 C_1 值取正号还是取负号，和 φ 的正或负无关，而只取决于组成 φ 的玻璃的 $|\beta|$ 值的大小。(8)式中的 φ_1 和 φ_2，(10)式中的 φ_i，可以为正，可以为负，也可以为零。

(2) 若 φ_1 和 φ_2 都为零，则

$$C_1=\frac{C_1^{\mathrm{II}}}{\beta_1-\beta_2}。\tag{11}$$

而每一组元的两种玻璃的 φ，等值反号，即

$$\varphi_a=-\varphi_b=\frac{\nu_a\nu_b}{(\nu_a-\nu_b)h^2}C_1。$$

让(11)式中的 C_1^{II} 和被校正系统的 C_1^{II} 等值反号，就可校正已知系统的二级光谱。如果所选择的玻璃的折射率都相等，并把它放在被校正系统的平行光路中，则这个系统只起校正二级光谱的作用。和 C. G. Wynne[1] 设计的二级光谱校正器不同之处是这种校正器产生的是本征二级光谱，并且用不着分离，因而就不必为了校正倍率色差而使整个系统进一步复杂化。

C. G. Wynne 设计的二级光谱校正器，相当于(8)式中 $\beta_1=\beta_2$ 的情况。这时，本征色差已不起产生本征二级光谱的作用。正象前面提到的，这种校正器是靠衍生色差产生二级光谱来达到目的。

(3) 由(8)式表明的关系，也适用于由两对以上的玻璃组成的透镜系统。这时，公式可写成

$$C_1^{\mathrm{II}}=\sum_{i=1}^{n}h_i^2\phi_i\alpha_i-C_1\left(\sum_{i=1}^{k}\beta_i-\sum_{i=k+1}^{n}\beta_i\right)。\tag{12}$$

为校正二级光谱，在两个玻璃组合系统 $\sum\limits_{i=1}^{k}\beta_i$ 和 $\sum\limits_{i=k+1}^{n}\beta_i$ 中，取 $\sum|\beta_i|$ 大的组合系统的 C_1 为正值，取 $\sum|\beta_i|$ 小的组合系统的 C_1 为负值。同样，由(12)式求出的 C_1 值可在组合系统中由相同玻璃组成的各组元间任意分配。

三、玻璃的选择

我们用等效玻璃的概念来讨论这个问题。把等效玻璃的阿贝数和相对部分色散写成 $\bar{\nu}$ 和 $\bar{P}$。由(3)式可写成

$$h^2\phi\left(\alpha-\beta\frac{1}{\bar{\nu}}\right)=h^2\phi\frac{\bar{P}}{\bar{\nu}},$$

于是得

$$\bar{P}=\alpha\bar{\nu}-\beta。\tag{13}$$

此式说明，$\bar{P}$ 和 $\bar{\nu}$ 是一个线性函数关系。而 $\bar{\nu}$ 可由方程

$$\varphi_a+\varphi_b=\varphi,$$

$$\frac{h_a^2\varphi_a}{\nu_a}+\frac{h_b^2\varphi_b}{\nu_b}=\frac{h^2\phi}{\bar{\nu}},$$

得出

$$\frac{1}{\bar{\nu}}=\frac{1}{\nu_b}+\frac{\varphi_a}{\varphi}\left(\frac{1}{\nu_a}-\frac{1}{\nu_b}\right)。\tag{14}$$

若 $\nu_a=\nu_b$，由(14)式得 $\bar{\nu}=\nu_b$，再由(12)式得 $\bar{P}=P_b$。因此在 P-ν 图上可以反映出 $\bar{P}-\bar{\nu}$ 的关系(见图2)。从(12)式可知，由 A 和 B 两种玻璃组成的等效玻璃都在 A 和 B 的连线上。同样由 C 和 D 两种玻璃组成的等效玻璃，都在 C 和 D 的连线上。平行于 ν 轴的直线和 AB、CD 两直线的两个交点 E 和 F 就代表消二级光谱所要求的两块等效玻璃。显然，这样的等效玻璃是许许多多的。但为使每种玻璃的光焦度尽量小，希望 $\bar{\nu}$ 差和 ν 差都越大越好。因此反映在 P-ν 图(图2)上选择玻璃时，应尽量满足：(1) 两条直线 AB 和 CD 的夹角越大越好；(2) 由 A、B、C、D 包围的面积，或者当两条直线交叉时，由两条直线围成的三角形 $\triangle AOC$ 和 $\triangle BOD$ 面积的和越大越好；(3) 两条直线应尽量平行于 ν 轴。

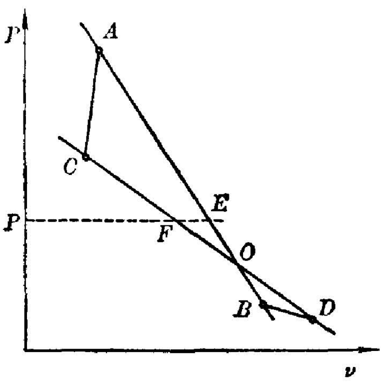


图 2

通常用三种玻璃校正二级光谱，相当于由一个定点向一条直线引平行于 ν 轴的直线[2]。$\bar{\nu}$ 差是不能任意选择的。因此，由四块以上的透镜组成的复杂化的物镜，选用四种玻璃比选用三种玻璃有利。

四、设计实例

C.G. Wynne 曾设想在三片物镜的复杂化过程中，把各组元的色差考虑进去，借以达到改善二级光谱的目的。但他想利用的只是由衍生色差产生二级光谱的方法。下面举出两个设计实例，说明用本征色差产生本征二级光谱的方法可以达到这一目的。

在求解三片型物镜结构时，要考虑校正场由 S_{IV}、色差 C_1 和倍率色差 C_{11}。这首先须确定一个结构模型。如图3所示，让轴上光线在第二组和第三组之间为平行光，光阑放在第二组上。这样，当玻璃选定后，考虑 S_{IV} 的要求，给定 u_1' 和 h_2，就可将除 d_2(φ_2 至 φ_3 主平面间距)的全部参数求出。让两个正组的 C_1 等于负组的C_1，并反号。d_2 将根据 C_{11} 的要求来确定。

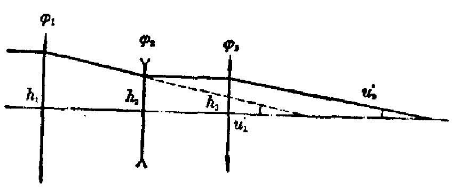


图3

取物镜焦距 $F'=1.5$ 米，相对孔径 $D/f'=1:7$，视场角 $2\omega=15°\sim18°$，对 C、F 光消色差，取 D 光为中间波长光。

我们用正组产生负色差，负组产生正色差，以及正组产生正色差，负组产生负色差两种型式来设计这个物镜。

1. 正组产生负色差，负组产生正色差型

根据上面确定的结构模型，求出一组参数如下：

$$h_1=107.143;\ h_2=76.76;\ \varphi_1=0.000933329;$$

$$\varphi_2=-0.00130269;\ \varphi_3=0.000930487;\ d_1=303.79$$

按我国玻璃表，选出以下两对普通玻璃：

ZK7：$n_D=1.613$，$\nu=60.5731$，$P=0.704545$；

ZF2: $n_D=1.6725$, $\nu=32.2273$, $P=0.717298$。

由公式(6)和(7)求出它们的 α 和 β 为：$\alpha=-0.00449907$; $\beta=-0.731797$。

另一对玻璃为：

K4: $n_D=1.50795$, $\nu=61.0517$, $P=0.700721$;

ZF7: $n_D=1.806$, $\nu=25.3619$, $P=0.721838$。

算出它们的 α 和 β 为：$\alpha=-0.000591682$; $\beta=-0.736844$。

因为要使负组产生正色差，因此选 $|\beta|$ 值大的一对玻璃 K4 和 ZF7 做负组。下面我们把负组玻璃的 α、β 写成 α_- 和 β_-，正组的写成 α_+ 和 β_+。

考虑到各组元间有一定的距离，会产生小量的衍生二级光谱，在解方程时，给 C_1^{II} 一定的量。令 $C_1^{\mathrm{II}}=-0.00882$。由(10)式得

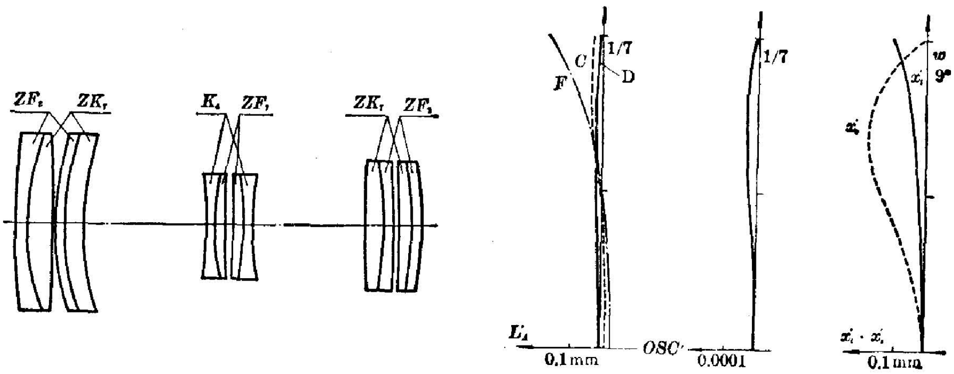
$$C_1^{\mathrm{II}}=\frac{(h_1^2\varphi_1+h_3^2\varphi_3)\alpha_++h_2^2\varphi_2\alpha_--C_1^{\mathrm{II}}}{\beta_--\beta_+}=0.3685。$$

让第一组的 $C_{1(1)}=-0.1765$，则第三组的 $C_{1(3)}=-0.192$，而第二组的 $C_{1(2)}=0.3685$。根据(1)式算出第一组两种玻璃的 φ 值为：$\varphi_{ZK7}=0.00305336$, $\varphi_{ZF2}=-0.00212004$。

第二组为：$\varphi_{K4}=-0.00494174$, $\varphi_{ZF7}=0.00363905$。

第三组为：$\varphi_{ZK7}=0.00423251$, $\varphi_{ZF2}=-0.00330202$。

为满足 $C_{11}=0$，求出 $d_2=200.03$。根据算出的各种玻璃的 φ 值，可求出 S_{IV}。若不合适，可另取 h_2 值，重复上述计算过程，直到满意为止。用这些参数设计出的物镜和象差曲线见图4。这个例子说明，用这个原理，将物镜适当地复杂化，用普通玻璃可以完满地校正好二级光谱。



(a)　结构图　　　(b)　曲线图

图 4

2. 正组产生正色差，负组产生负色差型

同样，先求出一组参数如下：

$h_1=107.143$; $h_2=h_3=85.712$; $\varphi_1=0.00106666$;

$\varphi_2=-0.00133333$; $\varphi_3=0.000833333$; $d_1=187.5$。

选出的两对玻璃为：

ZK7: $n_D=1.613$, $\nu=60.5731$, $P=0.704545$;

BaF8: $n_D=1.6259$, $\nu=39.1016$, $P=0.714553$。

计算出它们的 α 和 β 为：$\alpha=-0.000466106$，$\beta=-0.732778$。

另一对玻璃为：

$$\text{FK1:}\ n_D=1.48601,\ \nu=81.408,\ P=0.703518;$$

$$\text{TF3:}\ n_D=1.6123,\ \nu=44.0821,\ P=0.708423。$$

计算出它们的 α 和 β 为：$\alpha=-0.00013141$，$\beta=-0.714216$。

这里采用了特殊色散玻璃 FK1 和 TF3，是为了避免负组结构过分复杂。因为是让正组产生正色差，因此选 $|\beta|$ 大的 ZK7 和 BaF8 作为正组玻璃。并且让第一组和第三组只用一种玻璃。如第一组玻璃用 ZK7，相当于 $\varphi_{\mathrm{BaF8}}=0$，第三组玻璃为 BaF8，相当于 $\varphi_{\mathrm{ZK7}}=0$。于是第一组和第三组的色差为：

$$C_{1(1)}=\frac{h_1^2\varphi_1}{\nu_{\mathrm{ZK7}}}=0.2022,\quad C_{1(3)}=\frac{h_3^2\varphi_3}{\nu_{\mathrm{BaF8}}}=0.1566。$$

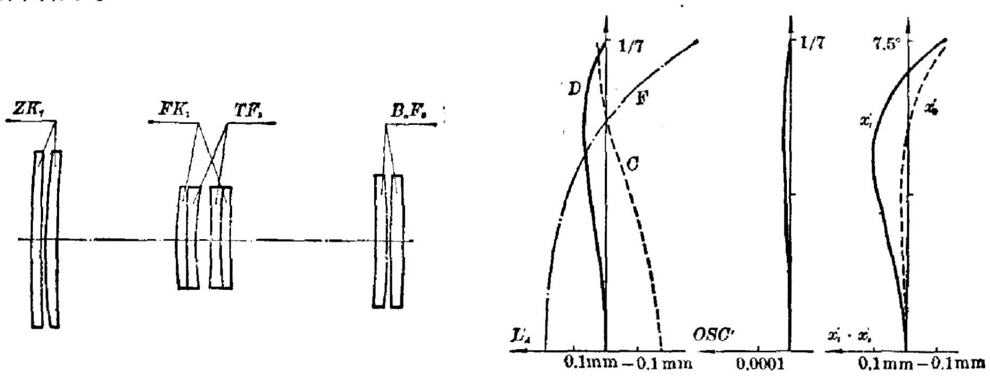
整个物镜的二级光谱为：

$$C_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}}=(h_1^2\varphi_1+h_3^2\varphi_3)\alpha_+ + h_2^2\varphi_2\alpha_- - [C_{1(1)}+C_{1(2)}](\beta_+-\beta_-)=-0.000601。$$

如果 $C_{\mathrm{I}}^{\mathrm{II}}$ 不满足要求，可更换第一组或第三组的玻璃，重新计算，直到满意为止。第二组的色差应为：$C_{1(2)}=-[C_{1(1)}+C_{1(2)}]=-0.3588$。根据 $C_{1(2)}$，可求出第二组两种玻璃的 φ 值为：

$$\varphi_{\mathrm{FK1}}=0.00178757,\quad \varphi_{\mathrm{TF3}}=-0.00312090。$$

根据 $C_{11}=0$，求出 $d_2=193.65$。利用这些参数设计出的物镜和象差曲线见图 5。与一般采用有特殊色散玻璃消二级光谱的物镜比较，不同的是在这种结构中，特殊色散玻璃被用在负组元中，并且正透镜用的是冕玻璃，负透镜用的是火石玻璃。这样使特殊色散玻璃的光焦度明显地降低了。



(a) 结构图　　　　(b) 曲线图

图 5

由于在负组元中，用折射率低的玻璃 FK1 做正透镜，折射率高的玻璃 TF3 做负透镜，因此靠间距校正 S_{IV} 已不灵敏。为此在象面附近加了一个负场镜校正场曲(在图中没有画出)。

上面两个设计结果，在整个视场范围内部获得了比较好的成象质量。

五、关于衍生二级光谱

我们计算了两个例子(薄透镜解时)的衍生二级光谱。第一个例子为 0.07 毫米，第二个

例子为 0.06 毫米。两个例子的情况虽然不同，但衍生二级光谱都是正值，即都对校正二级光谱有利。我们还计算了其他结构，以及其他不同条件下的衍生二级光谱，结果也都是如此。从计算结果我们还看到，衍生色差产生的衍生二级光谱比本征色差产生的本征二级光谱要小得多，它仅占物镜须要校正的二级光谱量很小一部分(不到十分之一)。如果在两个例子中，只靠衍生二级光谱来校正二级光谱，势必导致结构更加复杂化，同时也会给象差校正带来难以克服的困难。这是很难实现的。

参 考 文 献

[1] C. G. Wynne; *Opt.Commun.*, 1977, **21**, No. 3 (Jun), 419.
[2] R. E. Stephens; *J. O. S. A.*, 1959, **49**, No. 4 (Apr), 398.

Correction of secondary spectrum with intrinsic chromatic aberration

SHI GUANGHUI
(*Chanchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 29 January, 1981)

Abstract

An achromatic lens system may consists of several cemented or separated groups of crown and flint glasses. If there is a value of chromatic aberration in each group, and a certain relationship between the positive or negative sign of chromatic aberration and the selection of glasses, the secondary spectrum of the whole lens system can be reduced to any small value. According to this principle, two complicated triplets with secondary spectrum corrected, are given as an example. Their focal lengths are 1.5 m, F numbers are 7, and field angles are 15° and 18° respectively. It is entirely common glasses used in one of the lens.