

# 基于 S-L 图的复消色差方法

钟萍华 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)

李英才 樊学武

(中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710068)

**摘要** 建立了一组既消位置色差又消二级光谱的方程组,即复消色差方程组.同时引入了规范化位置色差系数  $L$  和规范化二级光谱系数  $S$  的概念,得到了对复消色差光学系统设计中的玻璃选择具有指导意义的  $S-L$  图.最后给出了应用这种方法进行的三片型透镜组和 Petzval 型透镜组的复消色差设计过程.

**关键词** 复消色差光学系统;光学设计;二级光谱

**中图分类号** TB851 **文献标识码** A

## 0 引言

大多数的光学系统设计中,二级光谱对整个系统来说不会很大,不至于显著影响成像质量,一般都不需要进行校正.但是,对于一些质量要求特别高的光学仪器或长焦距、宽波段以及一些高分辨率的成像光学系统来说,二级光谱的校正是设计中必须要解决的重要问题.二级光谱校正的最有效方法是采用特殊光学材料,如萤石(CaF<sub>2</sub>)、氟冕玻璃等,但特殊光学材料极少且昂贵,一般很少采用.纯折射式系统存在着二级光谱不易校正的困难,但国内外已有很多研究成果对二级光谱及复消色差问题做出了探讨,并给出一些设计实例.如,采用加二级光谱校正器的方法校正二级光谱<sup>[1]</sup>;应用等效玻璃概念,采用普通玻璃达到复消色差的目的<sup>[2]</sup>;也有把二元光学元件和另一种玻璃组合成混合复消色差透镜组<sup>[3]</sup>.本文建立了一组复消色差方程组,引入规范化位置色差系数  $L$  和规范化二级光谱系数  $S$  的概念,从而得到了对复消色差光学设计中的材料选择具有指导意义的  $S-L$  图.为进一步验证,还给出了三片型光组和 Petzval 型光组的复消色差设计过程.

## 1 S-L 图

在不考虑其他因素的情况下,光学材料的折射率取决于工作波长.二级光谱的产生是由于透镜组材料的折射率随波长的变化规律不同而造成的.玻璃材料的相对部分色散  $P_{\lambda_1\lambda_2} = (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}) / (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_3})$ ,阿贝常数  $v = (n_{\lambda_2} - 1) / (n_{\lambda_1} - n_{\lambda_3})$ ,其中, $\lambda_1$ 、 $\lambda_3$  分别为短波和长波波长, $\lambda_2$  为参考波长.文中把

$1/v$  定义为规范化位置色差系数  $L$ ,  $P/v$  定义为规范化二级光谱系数  $S$ .不同材料具有不同的  $L$ 、 $S$  值.在以  $L$ 、 $S$  为坐标轴的笛卡尔坐标系中,各种材料有其对应的坐标点,这样的坐标系即为  $S-L$  图,如图 1 所示(选取  $e$ 、 $c$  为边缘色光, $D$  光为中间色光). $S-L$  图对于光学设计中透镜材料的选择具有指导意义.

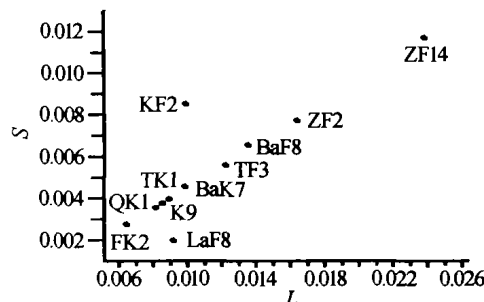


图 1 几种无色光学玻璃的  $L$ 、 $S$  值

Fig. 1 The value of  $L$ 、 $S$  of some colorless optical glass

## 2 复消色差系统设计

### 2.1 复消色差方程组

根据薄透镜理论,对置于空气中的  $K$  块透镜组成的密接型光组的光焦度  $\Phi$ 、规范化位置色差系数  $L$ 、规范化二级光谱系数  $S$  满足如下关系<sup>[4]</sup>

$$\Phi = \sum_{i=1}^k \varphi_i, L = \sum_{i=1}^k L_i \varphi_i / \Phi, S = \sum_{i=1}^k S_i \varphi_i / \Phi \quad (1)$$

式中, $\varphi_i$ 、 $L_i$ 、 $S_i$  分别为第  $i$  个透镜的光焦度、规范化位置色差系数和规范化二级光谱系数.

当各透镜之间被空气分隔,即为分离透镜组时,式(1)可表示为

$$\Phi = \sum_{i=1}^k \frac{h_i}{h_1} \varphi_i, L = \sum_{i=1}^k \left(\frac{h_i}{h_1}\right)^2 L_i \varphi_i / \Phi$$
$$S = \sum_{i=1}^k \left(\frac{h_i}{h_1}\right)^2 S_i \varphi_i / \Phi \quad (2)$$

近轴光线在透镜上的光线高度  $h_i$  与  $h_1$  的比值是  $\varphi_i$ 、 $L_i$ 、 $S_i$  的系数,设  $(h_i/h_1) \varphi_i = \varphi'_i$ ,  $(h_i/h_1) L_i = L'_i$ ,

\*Tel:0551-3607446 Email:shao@ustc.edu.cn  
收稿日期:2003-06-16

$(h_i/h_1)S_i = S'_i, \varphi'_i, L'_i, S'_i$  分别为各透镜的加权光焦度、加权位置色差系数和加权二级光谱系数<sup>[5]</sup>, 则方程式(2)又可以写成

$$\Phi = \sum_{i=1}^k \varphi'_i, L = \sum_{i=1}^k L'_i \varphi'_i / \Phi, S = \sum_{i=1}^k S'_i \varphi'_i / \Phi \quad (3)$$

### 2.2 复消色差光焦度分配

对于密接双透镜, 由式(1)得到

$$\begin{aligned} \Phi &= \varphi_1 + \varphi_2, L = (L_1 \varphi_1 + L_2 \varphi_2) / \Phi \\ S &= (S_1 \varphi_1 + S_2 \varphi_2) / \Phi \end{aligned} \quad (4)$$

若令  $\varphi_1/\Phi = a, \varphi_2/\Phi = b$ , 则可得到下列关系

$$1 = a + b, L = aL_1 + bL_2, S = aS_1 + bS_2 \quad (5)$$

当密接双透镜完全消位置色差和二级光谱, 即  $L = 0, S = 0$  时, 有

$$L_1 S_2 - S_1 L_2 = 0 \quad (6)$$

那么, 满足复消色差条件的密接双透镜的光焦度分别为

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= L_2 \Phi / (L_2 - L_1) = S_2 \Phi / (S_2 - S_1) \\ \varphi_2 &= -L_1 \Phi / (L_2 - L_1) = -S_1 \Phi / (S_2 - S_1) \end{aligned} \quad (7)$$

比较式(1)和式(3)可知, 分离透镜组中各透镜的光焦度的表达式与密接透镜组的各透镜的表达式相比, 形式相同, 唯一不同的是, 分离透镜组中的表达式多了加权的量. 所以, 分离双透镜的光焦度  $\varphi_1, \varphi_2$  将满足下面的关系式

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{L_2 \Phi}{L_2 - L_1} = \frac{S_2 \Phi}{S_2 - S_1} \\ \varphi_2 &= \frac{-L_1 \Phi h_1}{L_2 - L_1 h_2} = \frac{-S_1 \Phi h_1}{S_2 - S_1 h_2} \end{aligned} \quad (8)$$

对于密接三透镜组, 若令  $\varphi_1/\Phi = a, \varphi_2/\Phi = b, \varphi_3/\Phi = c$ , 同样, 可由式(1)得到

$$\begin{aligned} 1 &= a + b + c, L = aL_1 + bL_2 + cL_3, \\ S &= aS_1 + bS_2 + cS_3 \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)中包含三个变量  $a, b, c$ , 当满足  $L = 0, S = 0$  时,  $a, b, c$  有确定的解, 所以

$$\begin{aligned} \frac{\varphi_1}{\Phi} &= (L_2 S_3 - L_3 S_2) / G, \frac{\varphi_2}{\Phi} = (L_3 S_1 - L_1 S_3) / G \\ \frac{\varphi_3}{\Phi} &= (L_1 S_2 - L_2 S_1) / G \end{aligned} \quad (10)$$

式中,  $G = (L_1 S_2 - L_2 S_1) + (L_2 S_3 - L_3 S_2) + (L_3 S_1 - L_1 S_3)$ .

而对于分离三透镜组, 有

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \frac{(L_2 S'_3 - L_3 S'_2) \Phi}{G'}, \varphi_2 = \frac{(L_3 S'_1 - L_1 S'_3) \Phi h_1}{G' h_2} \\ \varphi_3 &= \frac{(L_1 S'_2 - L_2 S'_1) \Phi h_1}{G' h_3} \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $G' = (L_1 S'_2 - L_2 S'_1) + (L_2 S'_3 - L_3 S'_2) + (L_3 S'_1 - L_1 S'_3)$ .

设计三块以上的薄透镜组, 要求复消色差时, 虽然满足前面所建立的复消色差方程的光焦度解并不唯一, 但加上其他像差方面的要求, 可以限定解空间的自由度, 从而得到合适的光焦度的解.

### 2.3 玻璃材料的选择原则

复消色差系统中的每块透镜在  $S-L$  图中都对应一个确定的点. 图2所示,  $Z_1, Z_2$  表示密接透镜组中两透镜的位置. 当该透镜组满足复消色差条件, 即式(6)时,  $Z_1, Z_2$ 、原点  $O$  在一条直线上, 也就是说双透镜复消色差系统必须选择过坐标原点的任一条直线上的材料, 并且该系统肯定是正、负透镜组合. 然而, 在实际的玻璃选择中, 很难找到确切的位于过原点的一条直线上的两块材料. 但是, 可以使组成系统的每一成员光组产生定量值的二级光谱, 并通过玻璃的选择改变各成员光组的二级光谱的正或负符号, 从而使整个系统的二级光谱值减至最小. 这在实际设计中是可能的. 如图2所示,  $Z_3, Z_4$  组成的双透镜与  $Z_5, Z_6$  组成的双透镜产生的二级光谱值相等, 符号相反时, 二级光谱可以相互抵消.

对于密接三透镜的复消色差系统, 应使式(10)的解有意义, 即要求点  $Z_1, Z_2, Z_3$  不在同一条直线上. 同时, 从尽量减小透镜光焦度的角度考虑, 希望式(10)的分母值  $G$  尽可能大些, 而  $G$  值是  $S-L$  图中以点  $Z_1, Z_2, Z_3$  为顶点的三角形面积的两倍. 也就是说, 在选择材料时应使三透镜的材料三角形面积尽量大. 图3中, 很显然存在  $S_1/L_1 > S_2/L_2 > S_3/L_3$ , 三角形面积总大于零, 所以有  $a < 0, b > 0, c < 0$ . 若总光焦度为正, 则第二个透镜为正透镜, 前后两个为负透镜. 当三透镜分离时,  $S-L$  图中的材料三角形由加权材料点  $Z'_1, Z'_2, Z'_3$  构成,  $Z'_1, Z'_2, Z'_3$  的位置由权因子确定, 即  $\overline{OZ'_1}/\overline{OZ_1} = 1, \overline{OZ'_2}/\overline{OZ_2} = h_2/h_1, \overline{OZ'_3}/\overline{OZ_3} = h_3/h_1$ . 图3中, 光线高度的变化(设  $h_1 = h_3 = 1, h_2 = 1.2$ ) 有助于加权材料三角形面积的加大. 该图中两个三角形所代表的同材料制成的密接三透镜和分离三透镜尽管正、负相同, 但光焦度的大小有差别.

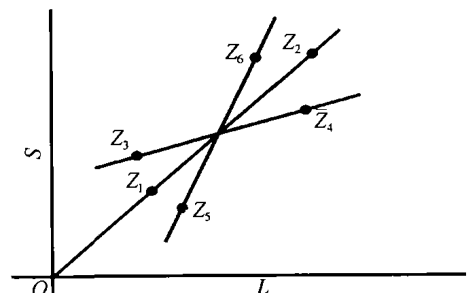


图2 复消色差双透镜的  $S-L$  图  
Fig.2 The  $S-L$  chart of apochromatic doublet

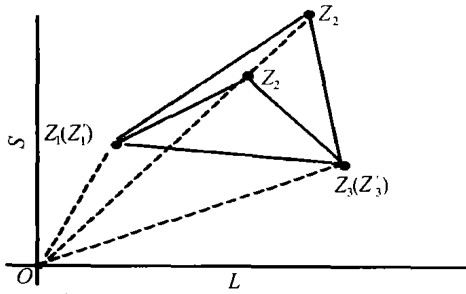


图3 复消色差三透镜的 S-L 图  
Fig.3 The S-L chart of apochromatic three-lens

### 3 设计实例

#### 3.1 三片型透镜组

按照上面所讨论的方法,给出了三片型光组的设计. 该光组焦距为 1500 mm,全视场 5°,相对孔径 1/10,工作波段 0.5 ~ 0.8 μm. 这里选取 e、c 两种色光,中间色光取 D 光. 图 1 中,以玻璃材料 KF2、ZF14、LaF8 为顶点的材料三角形面积较大. 选取同样的三种玻璃材料:KF2 ( $L_1 = 9.97 \times 10^{-3}, S_1 = 8.43 \times 10^{-3}$ ), ZF14 ( $L_2 = 24.14 \times 10^{-3}, S_2 = 11.34 \times 10^{-3}$ ), LaF8 ( $L_3 = 9.12 \times 10^{-3}, S_3 = 2.14 \times 10^{-3}$ ).

表 1 为三片密接型和三片分离型透镜组的光焦距度的比较(其中  $\Phi$  为总光焦距度). 从表 1 中可以看出,分离透镜组的光焦距度较密接透镜组有所加大,这是由于分离透镜组加权后的材料三角形面积变小了的缘故. 调整加权因子,使 S-L 图中围成的材料三角形面积加大,从而可以调整成较小的光焦距度组合. 图 4 为经过调整加权因子后的三片分离型薄透镜组的各种球差曲线. 其他像差如球差、彗差等可通过 zemax 等光学设计软件在保持透镜光焦距度不变或变化很小,改变透镜表面的曲率来加以平衡.

表 1 三片密接光组和三片分离光组的光焦距度

	密接型	分离型
$\varphi_1$	0.59692 $\Phi$	0.71578 $\Phi$
$\varphi_2$	-0.64059 $\Phi$	-0.94832 $\Phi$
$\varphi_3$	1.04366 $\Phi$	1.03428 $\Phi$

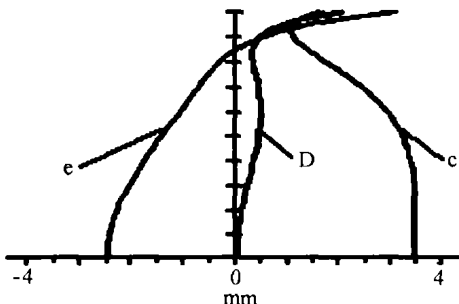


图4 三片型光组各种球差曲线  
Fig.4 The longitudinal aberration of thin three-lens

#### 3.2 Petzval 型光组

Petzval 物镜是由两组分离的正光焦距度的双胶合透镜构成. 本例中所采用的 Petzval 型光组的焦距

为 1500 mm,全视场 5°,相对孔径 1/10,工作波段 0.5 ~ 0.8 μm. 这里,同样选取 e、c 两种色光,中间色光取 D 光. 前光组由采用玻璃 BaK7 ( $L_1 = 9.65 \times 10^{-3}, S_1 = 4.41 \times 10^{-3}$ ) 和 TF3 ( $L_2 = 12.22 \times 10^{-3}, S_2 = 5.61 \times 10^{-3}$ ) 制成的双胶合透镜及一个无焦补偿组构成. 该无焦补偿组由两块透镜构成,它们光焦距度大小相等、符号相反,且都由同种玻璃 K9 ( $L_3 = 9.65 \times 10^{-3}, S_3 = 4.41 \times 10^{-3}$ ) 制成. 后光组由同样采用玻璃 BaK7 和 TF3 制成的双胶合透镜和一个由 K9 玻璃制成的用于矫正场曲的负场镜组成. 在满足复消色差要求求得初始结构参数后,保持透镜光焦距度不变或变化很小,改变弯曲以平衡各种像差,最后得到如图 5 所示的总长为 1877 mm 的 Petzval 型光组. 此光组的各种球差曲线如图 6 所示. 从图 6 中可以看出该光组的二级光谱已经得到了很好地矫正.

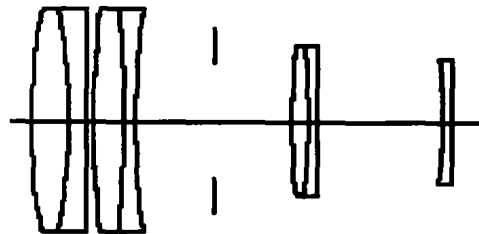


图5 Petzval 型光组的结构图  
Fig.5 The construction of Petzval objective

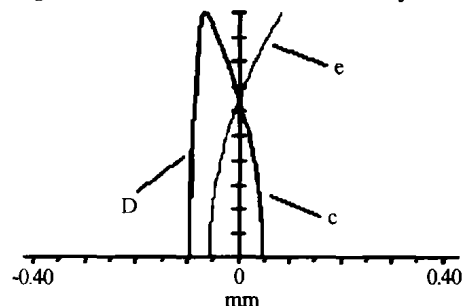


图6 Petzval 型光组各种球差曲线  
Fig.6 The longitudinal aberration of Petzval objective

### 4 结论

本文在考虑初级位置色差、二级光谱及光焦距度方程之间关系的基础上,导出了一组复消色差方程. 通过由此引入的 S-L 图,可以帮助选择合适的玻璃并求出满足复消色差方程组的光焦距度的解. 然后再通过进一步平衡像差获得满足设计要求的复消色差光学系统.

S-L 图在玻璃材料的选择过程中具有指导作用,其特点在于它简单明了,对于透镜组光焦距度分配有很好的辅助作用,所以 S-L 图对于光学设计是很有效的.

## 参考文献

- 1 Wynne C G. Secondary spectrum correction with normal Glasses. *OPT Commun*, 1977, **21**(3):419~424
- 2 姜会林. 关于二级光谱问题的探讨. 光学学报, 1982, **2**(3):225~232  
Jiang H L. *Acta Optica Sinica*, 1982, **2**(3):225~232
- 3 崔庆丰. 用二元光学元件实现复消色差. 光学学报, 1994, **14**(8):877~881  
Cui Q F. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(8):877~881
- 4 Yasuhisa Tamagawa, Toru Tajime, *et al.* Multilens system design with an athermal chart. *Applied Optics*, 1994, **33**(34):8009~8013
- 5 Yasuhisa Tamagawa, *et al.* Expansion of an athermal chart into a multilens system with thick lenses spaced apart. *OPT Eng*, 1996, **35**(10):3001~3006

## Design Method of Apochromatic System Based on *S-L* Chart

Zhong Pinghua, Hu Yuxi, Zhou Shaoxiang

*Department of Precision Machine and Precision Instrument, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

Li Yingcai, Fan Xuewu

*Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Xi'an 710068*

Received date:2003-06-16

**Abstract** An equation set for apochromatic system has been formulated, which can eliminate longitudinal chromatic aberration and secondary spectrum. At the same time, the normalized coefficient  $L$  of longitudinal chromatic aberration and normalized coefficient  $S$  of secondary spectrum of optical materials are introduced. With the help of the instructive *S-L* chart, suitable optical materials for the design of apochromatic system can be selected effectively. Finally, design examples of apochromatic system composed of three thin lenses or Petzval objective are given in this article.

**Keywords** Apochromatic system; Optical design; Secondary spectrum

**Zhong Pinghua** was born in 1978. Now she is a post-graduate student in the department of precision machinery and precision instrumentation in University of Science & Technology of China. Her current interest is optical system design.

