

# 带有无光焦度校正板两镜系统的三级像差校正

郝沛明 李可新\* 袁立银

(同济大学物理系, 上海 200092)

**摘要** 为增强光学系统校正像差的能力或者避免使用非球面,可在两镜系统中引入无光焦度校正板。该类系统中含有 7 个变数,有利于系统的像差校正,并且无色差。依据三级像差理论、规一化法及近轴公式,对该类系统进行了像差校正的理论分析,得出了各种平衡三级像差的校正条件。并通过一个实例,借助光学设计软件对此进行了验证。带有无光焦度校正板两镜系统的三级像差校正理论分析,对该类光学系统的设计有一定的参考价值。

**关键词** 光学设计;无光焦度校正板;两镜系统;三级像差理论;像差校正

**中图分类号** O435 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0222004

## Third-Order Aberration Correction of Two-Mirror Optical Systems with Zero-Optical Power Corrector

Hao Peiming Li Kexin Yuan Liyin

(Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** Zero-power corrector can be applied in two-mirror system to enhance aberration correction ability or avoid using aspheric optics. There are seven variables in this kind of system, which is helpful for aberration correction and has no chromatism. Based on the third-order aberration theory, normalized method and paraxial function, the aberration characteristic of systems with a zero-optical power corrector which located in front of the mirrors is analyzed, and kinds of third-order aberration correction formula are given. The analysis is confirmed by a design sample with optical design software. It will greatly benefit optical designer for the design of this kind of system.

**Key words** optical design; zero-power corrector; two-mirror system; third-order aberration theory; aberration correction

**OCIS codes** 220.1000; 220.1250; 220.3620

### 1 引 言

在光学系统中,可以引入附加的元件来平衡其他元件产生的像差,引入的元件可以称为像差校正板,如施密特校正板等。无光焦度校正板为其中一种,其光焦度为零。该种设计思想最初起源于 1828 年 Alexander Roges 的研究工作中,当时为解决难以获得大口径火石玻璃的难题,用小口径的火石和冕牌玻璃组合来校正一个大口径的冕牌玻璃透射物镜的像差。由于无光焦度校正对光学系统主体结构改变较小且平衡像差能力较强,由最初应用在透射系统中,逐渐出现在反射式和折反射式光学系统中,出现了诸如 Schulte, Baker, Houghton, Maksutov,

Gabor 等形式的校正板光学系统。

无光焦度校正板用途广泛,在望远物镜、显微物镜及投影物镜中均可采用,尤其在反射式望远系统中采用较多。无光焦度校正板的采用,增加了反射式系统的消像差变量,可提高光学系统的相对孔径和可用视场,改善整个系统的光学性能。无光焦度校正板不产生色差,不用考虑二级光谱校正问题;并且其本身为透镜,易于实现。由于已有的研究通常基于某一特定系统进行具体设计,对校正元件在光学系统中的平衡像差的理论分析尚不完整,本文针对带有校正板的两镜系统中校正板的校正像差做了完整的理论分析。

**收稿日期:** 2010-05-28; **收到修改稿日期:** 2010-07-14

**作者简介:** 郝沛明(1940—),男,研究员,博士生导师,主要从事非球面光学系统设计、加工和检验等方面的研究。

E-mail: haotongji@163.com

\* **通信联系人.** E-mail: likexin@tongji.edu.cn

## 2 三级像差校正分析

无光焦度校正板和双反射镜组成了各种消像差系统,校正板的形式也比较多,位置可以出现在反射镜前,也可以出现在反射镜后。图 1 是无光焦度校正板放置在两反射镜前组成光学系统的两种形式的

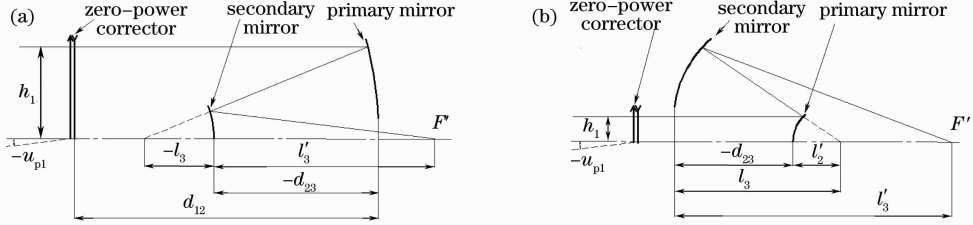


图 1 无光焦度校正板与两反射镜组成的系统

Fig. 1 Zero-power corrector and two-mirror system

根据三级像差理论,无光焦度校正板无色差,系统三级像差的单色像差可表示为<sup>[1,2]</sup>

$$S_1 = \sum hP + \sum h^4 K, \quad (1)$$

$$S_2 = \sum yP - J \sum W + \sum h^3 yK, \quad (2)$$

$$S_3 = \sum \frac{y^2}{h} P - 2J \sum \frac{y}{h} W + J^2 \sum \Phi + \sum h^2 y^2 K, \quad (3)$$

$$S_4 = \sum \frac{\Pi}{h}, \quad (4)$$

$$S_5 = \sum \frac{y^3}{h^2} P - 3J \sum \frac{y^2}{h^2} W + J^2 \sum \frac{y}{h} \left( 3\Phi + \frac{\Pi}{h} \right) - J^3 \sum \frac{1}{h^2} \Delta \left( \frac{1}{n^2} \right) + \sum h y^3 K, \quad (5)$$

式中

$$P = \left[ \frac{\Delta u}{\Delta \left( \frac{1}{n} \right)} \right]^2 \Delta \left( \frac{u}{n} \right), \quad (6)$$

$$W = \frac{\Delta u}{\Delta \left( \frac{1}{n} \right)} \Delta \left( \frac{u}{n} \right), \quad (7)$$

$$\Phi = \frac{1}{h} \Delta \left( \frac{u}{n} \right), \quad (8)$$

$$\Pi = \frac{\Delta(nu)}{m'}, \quad (9)$$

$$K = -\frac{e^2}{R_0^3} \Delta n, \quad (10)$$

式中  $e^2$  为非球面的偏心率,  $R_0$  为非球面顶点的曲率半径,  $S_1 \sim S_5$  为单色初级象差系数, 分别用来描述球差、彗差、象散、场曲和畸变,  $J$  为拉格朗日-霍姆赫兹(Lagrange-Helmholtz) 不变量,  $n$  和  $n'$  为光线透过玻璃前后的折射率,  $u$  为物方孔径角,  $\Delta(\cdot)$  为光

示意图。  $F'$  为系统像方焦点,  $h_1$  为轴上光线在校正板上入射高度,  $u_{p1}$  为主光线在校正板处与光轴的夹角,  $l$  和  $l'$  分别为的物距和像距,  $d$  为各元件之间的间隔。

线经折射面折射或反射面反射前后相关量的差值,  $h$  为轴上光线在每个面上的入射高度,  $y$  为轴外主光线在每个面上的入射高度。

数字下标表示变量所描述的某个透射面或反射面,  $i = 1, 2, 3$ , 分别是表示无光焦度校正板, 主镜和次镜。如  $h_i, y_i$  分别表示轴上光线和主光线在第  $i$  面上的入射高度,  $l_i$  和  $l'_i$  分别为光线入射到  $i$  面上的物距和像距,  $d_{i,i+1}$  为第  $i$  面到第  $i+1$  面的间隔。  $u_i, u'_i$  为轴上光线在第  $i$  面上的物方孔径角和像方孔径角,  $u_{pi}$  为主光线在第  $i$  面上与光轴的夹角。  $R_{0i}$  为第  $i$  面的顶点曲率半径。  $f$  为焦距,  $f_i$  为第  $i$  个元件的物方焦距,  $f'_i$  为第  $i$  个元件的像方焦距。

### 2.1 规划条件

为得出系统的塞德尔(Seidel)系数, 下面按规化条件进行设定<sup>[3,4]</sup>。

物体位于无限远时, 对轴上光线而言,  $l_1 \rightarrow \infty, u_1 = 0, h_1 = l_1 u_1 = h_2 = 1, u'_2 = u_3, u'_3 = 1, f' = 1$ 。次镜对主镜的遮拦比  $\alpha = h_3/h_2$ , 次镜放大率  $\beta = u_3/u'_3 = u_3$ , 主镜焦距  $f'_2 = 1/\beta$ , 主镜顶点曲率半径  $R_{02} = 2f'_2 = 2/\beta$ , 次镜顶点曲率半径  $R_{03} = 2\alpha/(1+\beta)$ 。

光阑位于无光焦度校正板上, 半视场角  $u_{p1} = -1$ , 拉格朗日不变量  $J = 1$ , 主光线在各面上的入射高度  $y_1 = 0, y_2 = d_{12}, y_3 = \frac{\alpha(\beta d + 1) - 1}{\beta}, \alpha y_2 - y_3 = \frac{1-\alpha}{\beta}$ 。将上述假设中的规化参数代入(6) ~ (10) 式中, 得到

$$P_2 = \frac{\beta^3}{4}, \quad P_3 = \frac{(1-\beta)(1-\beta^2)}{4}, \quad (11)$$

$$W_2 = \frac{\beta^2}{2}, \quad W_3 = \frac{1-\beta^2}{2}, \quad (12)$$

$$\Phi_2 = -\beta, \quad \Phi_3 = \frac{1+\beta}{\alpha}, \quad (13)$$

$$\prod_2 = \beta, \quad \prod_3 = -(1+\beta), \quad (14)$$

$$K_2 = \frac{\beta^3}{4}e_2^2, \quad K_3 = \frac{(1+\beta)^3}{4\alpha}e_3^2. \quad (15)$$

将上述参数代入(1)~(5)式,有

$$S_1 = P_1 - \frac{1}{4}E_2 + \frac{\alpha}{4}E_3, \quad (16)$$

$$S_2 = -W_1 - \frac{y_2}{4}E_2 + \frac{y_3}{4} - \frac{1}{2}, \quad (17)$$

$$S_3 = -\frac{y_2^2}{4}E_2 + \frac{y_3^2}{4\alpha}E_3 - \frac{y_3 - 1}{\alpha}, \quad (18)$$

$$S_4 = \beta - \frac{1+\beta}{\alpha}, \quad (19)$$

$$S_5 = -\frac{y_2^3}{4}E_2 - \frac{3\beta^2 y_2^2 + 4\beta y_2}{2} + \frac{y_3^3}{4\alpha^2}E_3 - \frac{3(1-\beta^2)y_3^2 - 4(1+\beta)y_3}{2\alpha^2}, \quad (20)$$

式中  $E_2 = \beta^3(1-e_2^2)$ ,  $E_3 = (1+\beta)[(1-\beta)^2 - (1+\beta)^2 e_3^2]$ . 在(16)~(20)式中,共有7个变数: $d_{12}$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $P_1$ ,  $W_1$ ,  $E_2$  和  $E_3$ ,  $d_{12}$  是光阑移动的变数,  $\alpha$  和  $\beta$  是确定光学系统轮廓尺寸的变数,无光焦度校正板的  $P$ .

$W_1$ , 仅对  $S_1, S_2$  有贡献,  $E_2(e_2^2)$  和  $E_3(e_3^2)$  对  $S_1, S_2, S_3$  和  $S_5$  都有贡献. 因此,无光焦度校正板、主镜和次镜对像差校正各有特点,7个变数对像差校正非常有利.

## 2.2 像差校正分析

根据(16)~(20)式,令相应的像差系数为零,即可对各种消像差条件进行分析,共有13种组合,表达式如下:

$$1) S_1 = 0$$

$$P_1 = \frac{E_2 - \alpha E_3}{4}, \quad (21)$$

$$2) S_2 = 0$$

$$W_1 = \frac{y_3 E_3 - y_2 E_2}{4} - \frac{1}{2}, \quad (22)$$

$$3) S_3 = 0$$

$$E_3 = \frac{\alpha y_2^2 E_2 + 4(y_3 - 1)}{y_3^2}, \quad (23)$$

$$4) S_4 = 0$$

$$\alpha = \frac{1+\beta}{\beta}, \quad R_{02} = R_{03}, \quad (24)$$

$$5) S_5 = 0$$

$$E_3 = \frac{\alpha^2 y_2^3 E_2 + 6\beta^2(\alpha^2 y_2^2 - y_3^2) + 6y_3^2 + 8\beta(\alpha^2 y_2 - y_3) - 8y_3}{y_3^2}, \quad (25)$$

$$6) S_1 = S_2 = 0$$

$$P_1 = \frac{E_2 - \alpha E_3}{4}, \quad W_1 = \frac{y_3 E_3 - y_2 E_2}{4} - \frac{1}{2}, \quad (26)$$

$$7) S_1 = S_3 = 0$$

$$E_3 = \frac{\alpha y_2^2 E_2 + 4(y_3 - 1)}{y_3^2}, \quad P_1 = \frac{(y_3^2 - \alpha^2 y_2^2)E_2 - 4\alpha(y_3 - 1)}{4y_3^2}, \quad (27)$$

$$8) S_1 = S_4 = 0$$

$$\alpha = \frac{1+\beta}{\beta}, \quad P_1 = \frac{\beta E_2 - (1+\beta)E_3}{4\beta}, \quad (28)$$

$$9) S_1 = S_5 = 0$$

$$E_3 = \frac{\alpha^2 y_2^3 E_2 + 6\beta^2(\alpha^2 y_2^2 - y_3^2) + 6y_3^2 + 8\beta(\alpha^2 y_2 - y_3) - 8y_3}{y_3^2}$$

$$P_1 = \frac{(y_3^3 - \alpha^3 y_2^3)E_2 - 6\alpha\beta^2(\alpha^2 y_2^2 - y_3^2) - 6\alpha y_3^2 - 8\alpha\beta(\alpha^2 y_2 - y_3) + 8\alpha y_3}{4y_3^3}, \quad (29)$$

$$10) S_1 = S_2 = S_3 = 0$$

$$E_3 = \frac{\alpha y_2^2 E_2 + 4(y_3 - 1)}{y_3^2}, \quad P_1 = \frac{(y_3^2 - \alpha^2 y_2^2)E_2 - 4\alpha(y_3 - 1)}{4y_3^2}, \quad W_1 = \frac{(\alpha y_2 - y_3)y_2 E_2 + 2(y_3 - 2)}{4y_3}, \quad (30)$$

从(30)式可以看出,可以选择主镜  $e_2^2 = 0$ ,也可以选择次镜  $e_3^2 = 0$ ,都可以得出  $S_1 = S_2 = S_3 = 0$  的光学系统. 如果同时选择,将是无光焦度校正板位于主镜和次镜曲率中心的同心系统.

$$11) S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = 0$$

$$\alpha = \frac{1 + \beta}{\beta},$$

$$E_3 = \frac{\alpha y_2^2 E_2 + 4(y_3 - 1)}{y_3^2},$$

$$P_1 = \frac{(y_3^2 - \alpha^2 y_2^2) E_2 - 4\alpha(y_3 - 1)}{4y_3^2},$$

$$W_1 = \frac{(\alpha y_2 - y_3) y_2 E_2 + 2(y_3 - 2)}{4y_3}, \quad (31)$$

$$12) S_1 = S_2 = S_3 = S_5 = 0$$

$$E_2 = \frac{4\alpha\beta(y_2 - y_3) + 2(1 - \alpha^2) + 2y_3(y_3 - 2)}{\alpha y_2^2(y_3 - \alpha y_2)},$$

$$E_3 = \frac{\alpha y_2^2 E_2 + 4(y_3 - 1)}{y_3^2},$$

$$P_1 = \frac{(y_3^2 - \alpha^2 y_2^2) E_2 - 4\alpha(y_3 - 1)}{4y_3^2},$$

$$W_1 = \frac{(\alpha y_2 - y_3) y_2 E_2 + 2(y_3 - 2)}{4y_3}, \quad (32)$$

如果选择  $e_2^2 = e_3^2 = 0$ , 则与  $S_1 = S_2 = S_3 = 0$  的条件一样。

$$13) S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = 0$$

$$\alpha = \frac{1 + \beta}{\beta}$$

$$E_2 = \frac{4\alpha\beta(y_2 - y_3) + 2(1 - \alpha^2) + 2y_3(y_3 - 2)}{\alpha y_2^2(y_3 - \alpha y_2)},$$

$$E_3 = \frac{\alpha y_2^2 E_2 + 4(y_3 - 1)}{y_3^2}$$

$$P_1 = \frac{(y_3^2 - \alpha^2 y_2^2) E_2 - 4\alpha(y_3 - 1)}{4y_3^2},$$

$$W_1 = \frac{(\alpha y_2 - y_3) y_2 E_2 + 2(y_3 - 2)}{4y_3}, \quad (33)$$

根据上述分析可知:1)无光焦度球面两镜系统可以消除球差或彗差;若选择合适的  $\alpha, \beta$  值,就可以同时消除球差和彗差或球差和场曲或者彗差和场曲;而要校正象散或畸变,一般要采用非球面两镜系统。2)无光焦度两镜系统中,两镜中只要有一个非球面,就可以同时消除两种像差;若选择合适的  $\alpha, \beta$  值,就可以同时消除 3 种像差或 4 种像差。

### 3 设计分析

对于两镜系统,如果不采用校正板,要消除两种及以上的像差,则往往主镜和次镜都需要设计为非球面,例如要求消除球差和彗差,即  $S_1 = S_2 = 0$ , 通常采用 Ritohey-Chretien 系统。但是如果在两镜系统中引入校正板,则可以将两镜都设计为球面镜。

以两镜系统为例,计算一个系统通光口径  $D =$

300 mm,系统相对孔径  $A = 1/5$ ,主镜相对孔径取  $1/1.5$ ,焦点伸出量  $\Delta = 180$  mm 的两反系统。校正板置于主镜曲率中心处,材料取 K9,  $n_d = 1.5163738$ ,视场取 1 mrad。传统的两镜系统如 RC 系统、卡赛格林系统都由非球面组成<sup>[5,6]</sup>,加工成本高、周期长。而借助无光焦度校正板,可以实现全球面的消像差系统。以(26)式为例计算。

根据文献[3],计算出  $\alpha = 0.323, \beta = -3.3333, R_{02} = 2f_2' = -900, R_{03} = -415.2857$ ,两镜间隔  $d_{23} = f_2'(1 - \alpha) = -304.65, l_3' = 304.65 + \Delta = 484.65$ 。无光焦度校正板放在主镜曲率中心处,则  $y_2 = d_{12} = -2f_2' = -2/\beta = 0.6, y_3 = -(1 + \alpha)/\beta = 0.3969$ 。主镜次镜全选择球面,  $e_2^2 = e_3^2 = 0$ ,得到  $E_2 = \beta^3 = -37.037, E_3 = (1 + \beta)(1 - \beta)^2 = -43.814$ 。

将  $y_2, y_3, E_2, E_3$  代入(26)式,得到  $P_1 = -5.721213, W_1 = 0.7080306$ 。由文献[1]得双贴合无光焦度 4 个面曲率半径为  $r_1 = -1509.029856, r_2 = -511.840977, r_3 = -446.793063, r_4 = -1055.834402$  将解出的初始结构输入 Zemax 软件验证,可知  $S_1 = 0, S_2 = 0.0021$ 。按实际情况给出校正板厚度,优化后可以得到像质优良的实用系统。

### 4 结 论

无光焦度校正板位于主镜前的两镜系统中共有 7 个变量 ( $d, \alpha, \beta, e_1^2, e_2^2, P_1$  和  $W_1$ ),共有 13 组消像差条件。根据文中的校正像差的条件式,确定  $P_1$  和  $W_1$  后,按照文献[1]求解无光焦度校正板的曲率半径  $R$ ,即可求解出系统中的各参数规划值,进行缩放后再借助光学设计软件优化可以得到优良的实用系统,有利于该类光学系统的设计。

### 参 考 文 献

- Lin Dajian. Design of Engineering Optical System[M]. Beijing: China Machine Press, 1987. 41~84  
林大键. 工程光学系统设计[M]. 北京:机械工业出版社,1987. 41~84
- Hao Peiming. Optical system with two-lens zero focal power corrector and single mirror[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(8): 1017~1020  
郝沛明. 无光焦度校正器和单一反射镜组成的光学系统[J]. 光学学报, 2003, 23(8): 1017~1020
- Pan Junhua, Hao Peiming. A general study of the optical system with two aspherical mirrors[J]. Acta Astronomica Sinica, 1965, 13(1): 46~56  
潘君骅, 郝沛明. 两个二次曲面反射镜组成的光学系统的一般研究[J]. 天文学报, 1965, 13(1): 46~56
- Hao Peiming, Xiao Guanghui. Design of a Newton optical system with a zero-power corrector before primary mirror[J]. Chinese J. Quantum Electronics, 2008, 25(5): 534~539

- 郝沛明, 肖光辉. 无光焦度校正板在主镜前牛顿光学系统的设计 [J]. 量子电子学报, 2008, **25**(5): 534~539
- 5 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lu Baobin. Design of new-style unobscured three-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1144~1147
- 郭永祥, 李英才, 吕保斌. 一种新型无遮拦三反射光学系统研究 [J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1144~1147
- 6 Shi Guanghui. A pseudo-Schmidt system with through-twice afocal corrective lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(3): 373~375
- 史光辉. 具有两次透射的无光焦度正透镜组的准施密特系统 [J]. 光学学报, 1998, **18**(3): 373~375