

# 双贴合无光焦度校正板在双球面镜次镜后的系统的像差特性研究

何宗平<sup>1,2</sup> 张 权<sup>3</sup> 胡明勇<sup>4</sup>

(1 合肥运涛光电科技有限公司, 合肥 230031)

(2 安徽医科大学, 合肥 230032)

(3 中国科技大学天文与应用物理系, 合肥 230026)

(4 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘 要** 讨论了双贴合无光焦度校正板放在次镜后的双反射球面系统. 根据像差理论分析了消像差的条件, 研究了主镜的相对孔径变化、校正板在次镜后的位置变化以及无光焦度校正板的正负透镜的不同组合形式对系统高级残余像差的影响. 结果表明: 当主镜的相对孔径增加或校正板靠近次镜时, 系统的残余像差增加; 无论校正板的第一个透镜是正透镜还是负透镜, 系统在某一光焦度处残余像差最小, 并且靠近次镜的透镜最好采用负透镜.

**关键词** 三级像差理论; 无光焦度校正板; 像差平衡; 两镜系统

**中图分类号** O435.2 **文献标识码** A

## 0 引言

像差校正板的应用历史可以追溯到 1828 年 Alexander Rogers 的工作<sup>[1~4]</sup>. 1932 年 Bernhard Schmidt 根据对称性原理发明了 Schmidt 校正板, 该发明说明了在光学系统中可以引入附加的元件来减少或消除其他元件所产生的像差. 这一思想在当时的光学设计者当中相当普及, 甚至引入了一个专门的术语“像差平衡”. 同时也引起了天文学家的关注, 但是要在巨大的抛物面反射镜前加一个同样大的校正板是不太可能的. 因而 Frank Ross 考虑在靠近焦点的位置放置某种光学元件, 即 Ross 校正板<sup>[2]</sup>. 它是由 2~3 个小的透镜组成, 放在离系统焦点很近的地方, 主要用于校正慧差. 目前, Ross 型校正板有好多种形式. Wynne C, Gascoigne S, Meinel A, Schulte D, Baker J 等人都从事过这方面的研究<sup>[3~7]</sup>. 如带两透镜校正板的 Ritchey-Chretien 系统<sup>[8~10]</sup>, 该校正板用于消除 Ritchey-Chretien 系统固有的像散和场曲以及带两透镜校正板的采用球面次镜的 Cassegrain 系统<sup>[11]</sup>. 由于加入了无光焦度校正板, 反射系统的性能得到了极大的改善. 采用无光焦度是为了不使系统产生轴向色差, 通过将校正板放在系统中的适当位置, 所有的三级像差(除畸变外)都得到了校正. 此外, 除主镜外系统中所有的面都是球面. 和 Schmidt 校正板相比, Ross 型校正板

采用小尺寸, 容易加工的球面透镜.

对于无光焦度校正板对系统高级残余像差的影响, 作者曾撰文讨论过两透镜无光焦度校正板在单一球面反射镜前、后的系统像差特性<sup>[12,13]</sup>. 本文研究在双反射镜系统中次镜后放入两透镜无光焦度校正板的系统的像差特性. 讨论了当主镜的相对孔径改变或校正板的位置改变时, 系统的高级残余像差的变化情况; 并分析了校正板的正负透镜的组合形式及校正板单透镜的光焦度的变化对系统残余像差的影响.

## 1 基本结构和赛得尔像差系数

图 1 为系统框图, Lc 是双贴合无光焦度校正板.

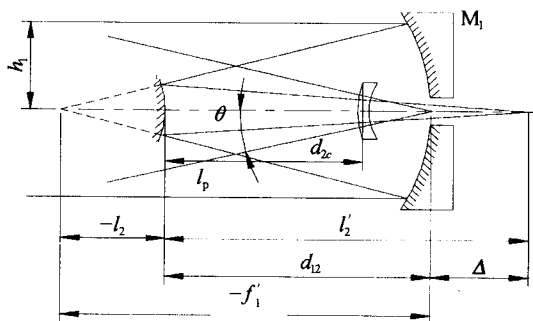


图 1 无光焦度校正板放在副镜后  
Fig. 1 Zero-power corrector is behind the secondary mirror

为写出该系统的赛得尔像差系数, 先作如下假定:

- 1) 物体位于无限远, 即  $l_1 = -\infty, u_1 = 0$ ; 2) 光阑位于主镜上, 即  $h_{pc} = 0$ ; 3) 折射率  $n_1 = n_{m1} = n_2 = n_c = n'_c = 1, n'_{m1} = n_{m2} = -1$ ; 4) 校正板各透镜相贴合, 轴

上光线在主镜上的高度  $h_{m1} = h_1$ , 在副镜上的高度  $h_{m2} = \alpha_m h$ , 在校正板上的高度为  $h_c = \alpha_c h_1$ ,  $\alpha_m$ 、 $\alpha_c$  称为遮光比; 5) 主光线在副反射镜上的高度为  $h_{p2}$ , 在校正板上的高度为  $h_{pc}$ ; 6) 当物体位于无限远时, 令轴上高度  $h_1 = 1$ , 光学系统的总光焦度  $\Phi = 1$ , 视场角  $\theta = -1$ .

根据以上假定, 可求解反射镜的参量<sup>[14]</sup>, 并可写出该系统的赛得尔像差系数, 为了简化起见, 引入中间变量

$$\beta_+ = 1 + \beta, \beta_- = 1 - \beta, \alpha'_m = \frac{1 - \alpha_m}{\alpha_m}$$

因而赛得尔像差系数可以写成

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \frac{\alpha_m \beta_+ (\beta_-^2 - \beta_+^2 e_2^2) - \beta_-^3 (1 - e_1^2)}{4} + \alpha_c P_c \\ S_2 &= -\frac{1}{2} + \frac{\alpha'_m \alpha_m \beta_+ (\beta_+^2 e_2^2 - \beta_-^2)}{4\beta} + h_{pc} P_c - W_c \\ S_3 &= \frac{\alpha_m^2 \alpha_m \beta_+ (\beta_-^2 - \beta_+^2 e_2^2)}{4\beta^2} + \frac{\alpha'_m \beta_- \beta_+}{\beta} - \frac{\alpha_m \beta_- \beta_+}{\alpha_m} + \frac{h_{pc}^2 P_c}{\alpha_c} - \frac{2h_{pc} W_c}{\alpha_c} \\ S_4 &= \beta - \frac{\beta_+}{\alpha_m} \\ S_5 &= \frac{\alpha_m^3 \alpha_m \beta_+ (\beta_+^2 e_2^2 - \beta_-^2)}{4\beta^3} - \frac{3\alpha_m^2 \beta_- \beta_+}{2\beta^2} - \frac{2\alpha'_m \beta_+}{\alpha_m \beta} + \frac{h_{pc}^3 P_c - 3h_{pc}^2 W_c}{\alpha_c^2} \end{aligned} \right\} (1)$$

## 2 消像差条件

根据式(1), 令相应的像差系数为零就可以得出各种消像差条件. 为简单起见, 只讨论同时消球差和慧差的情况, 令式(1)中  $S_1 = S_2 = 0$  就可得出消像差条件

$$\left. \begin{aligned} P_c &= \frac{\beta_-^3 (1 - e_1^2) - \alpha_m \beta_+ (\beta_-^2 - \beta_+^2 e_2^2)}{4\alpha_c} \\ W_c &= -\frac{1}{2} + \frac{\alpha'_m \alpha_m (\beta_+^2 e_2^2 - \beta_-^2 \beta_+)}{4\beta} + h_{pc} \left[ \frac{\beta_-^3 (1 - e_1^2) - \alpha_m \beta_+ (\beta_-^2 - \beta_+^2 e_2^2)}{4\alpha_c} \right] \end{aligned} \right\} (2)$$

从式(2)可以看出, 如果  $\alpha_m$ ,  $\alpha_c$  和  $\beta$  选择适当, 可以设计一个能同时消两种像差的球面系统.

## 3 系统的像差特性

对于普通的两镜系统, 如果不采用校正板, 要同时消除几种像差, 往往两块镜子都要采用非球面. 加了校正板后, 就可以考虑设计消多种像差的球面系统. 为简单起见, 只考虑消球差和慧差. 在(2)中令  $e_1^2 = e_2^2 = 0$ , 可得无光焦度校正板的  $P$ ,  $W$  参量为

$$\left. \begin{aligned} P_c &= \frac{\beta_-^3 - \alpha_m \beta_+ \beta_-^2}{4\alpha_c} \\ W_c &= -\frac{1}{2} - \frac{\alpha'_m \alpha_m \beta_-^2 - \beta_-}{4\beta} + h_{pc} \left[ \frac{\beta_-^3 - \alpha_m \beta_+ \beta_-^2}{4\alpha_c} \right] \end{aligned} \right\} (3)$$

给定  $\alpha_m$ ,  $\alpha_c$  和  $\beta$  的值和确定的校正板位置, 即可求出  $P_c$ ,  $W_c$ , 并由此求解校正板的结构参量, 为此, 首先用归化的  $P$ ,  $W$  来描述  $P_c$ ,  $W_c$ <sup>[15]</sup>

$$\left. \begin{aligned} P_c &= \frac{\beta_-^3 - \alpha_m \beta_+ \beta_-^2}{4\varphi^3 \alpha_c^4} \\ W_c &= -\frac{2\beta \alpha_c + \alpha_c (1 - \alpha_m) \beta_-^2 - h_{pc} \beta (\beta_-^3 - \alpha_m \beta_+ \beta_-^2)}{4\varphi^2 \beta \alpha_c^2} \end{aligned} \right\} (4)$$

式中  $\varphi = \varphi_1 = -\varphi_2$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  分别是校正板第一和第二透镜的光焦度.

$P_c$ ,  $W_c$  求出后, 就可以求解校正板的四个半径, 从而研究系统的像差特性. 以通光孔径  $D = 250$  mm, 焦距  $f' = 1000$  mm, 焦点伸出量  $\Delta = 180$  mm 的系统为例来进行研究.

1) 不同的主镜相对孔径下单透镜光焦度对系统残余像差的影响

对于上述的系统, 研究了在  $\alpha_c = 0.3$  的情况下, 主镜的相对孔径分别为 1:1.5、1:2、1:2.5 时, 单透镜光焦度的变化对系统残余像差的影响. 表 1 是在上述主镜的相对孔径下计算出的系统参量.

表 1  $\alpha_c = 0.3$ , 主镜相对孔径为 1:1.5、1:2、1:2.5 时的系统参量

	1:1.5	1:2	1:2.5
$R_1$	-750.000000	-1000.000000	-1250.000000
$R_2$	-484.363636	-906.666667	-1651.282051
$d_{12}$	-223.636364	-273.333333	-315.384615
$d_{2c}$	103.636364	153.333333	195.384615
$\alpha_m$	0.403636	0.453333	0.495385
$\beta$	-2.666667	-2.000000	-1.600000

根据表 1 中的参量, 按消球差和慧差的条件, 计算出单透镜的光焦度从 -3 变化到 -0.1, 从 0.1 变化到 +3 的情况下无光焦度校正板的四个曲率半径, 并将这些半径输入 ZEMAX, 从而获得轴上的波相差函数的 PV 值, 结果见图 2.

从以上曲线可以得出如下结论: 1) 随着主镜的相对孔径增加, 系统的残余像差增加较快; 2) 无论第一个透镜是正透镜还是负透镜, 系统在某一光焦度处残余像差最小, 并且随着主镜的相对孔径增加, 该光焦度向  $|\varphi|$  增大的方向移动; 3) 当第一个透镜是负透镜时, 系统的残余像差小于第一个透镜是正透镜时系统的残余像差.

在计算中还发现只有系统主镜的相对孔径、 $\alpha_c$  及单透镜的光焦度取值合适时, 得出的无光焦度校正板的结构才有意义. 如果主镜的相对孔径取值较大, 而校正半的  $\alpha_c$  又较小时, 得出的无光焦度校正

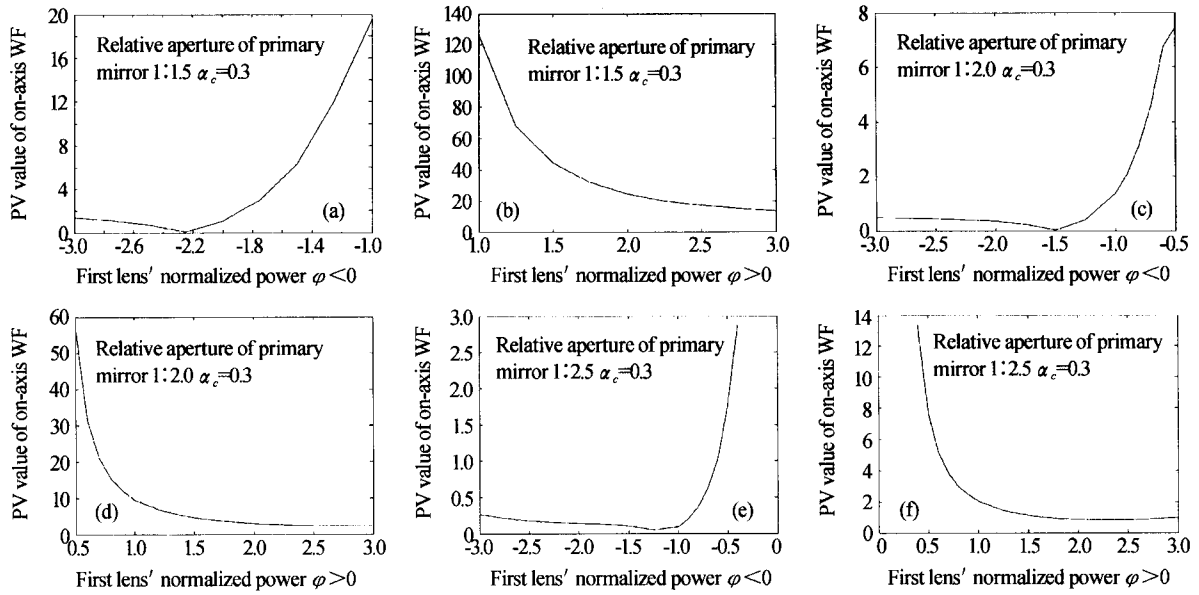


图 2 不同的主镜相对孔径下轴上点波像差函数 PV 值

Fig. 2 PV Values of On-axis wavefront functions(WF) for different relative apertures of the primary mirror

板的直径会小于其孔径,解出的结果没有意义. 根据计算,为使解出的结果有意义,在  $\alpha_c = 0.3$  的条件下,主镜的相对孔径为 1 : 1 时,  $|\varphi|$  必须大于 2.0; 主镜的相对孔径为 1 : 1.5 时,  $|\varphi|$  必须大于 1.0; 主镜的相对孔径为 1 : 2 时,  $|\varphi|$  必须大于 0.4; 主镜的相对孔径为 1 : 2.5 时,  $|\varphi|$  必须大于 0.3.

2) 不同的  $\alpha_c$  的条件下单透镜光焦度对系统残

余像差的影响

选定主镜的相对孔径为 1 : 3,  $\alpha_c$  分别等于 0.2、0.25、0.3. 同样按消球差和慧差的条件,计算出单透镜的光焦度从 -3 变化到 -0.1, 从 0.1 变化到 +3 的情况下无光焦度校正板的四个曲率半径,并将这些半径输入 ZEMAX,从而获得轴上的波相差函数的 PV 值,结果见图 3.

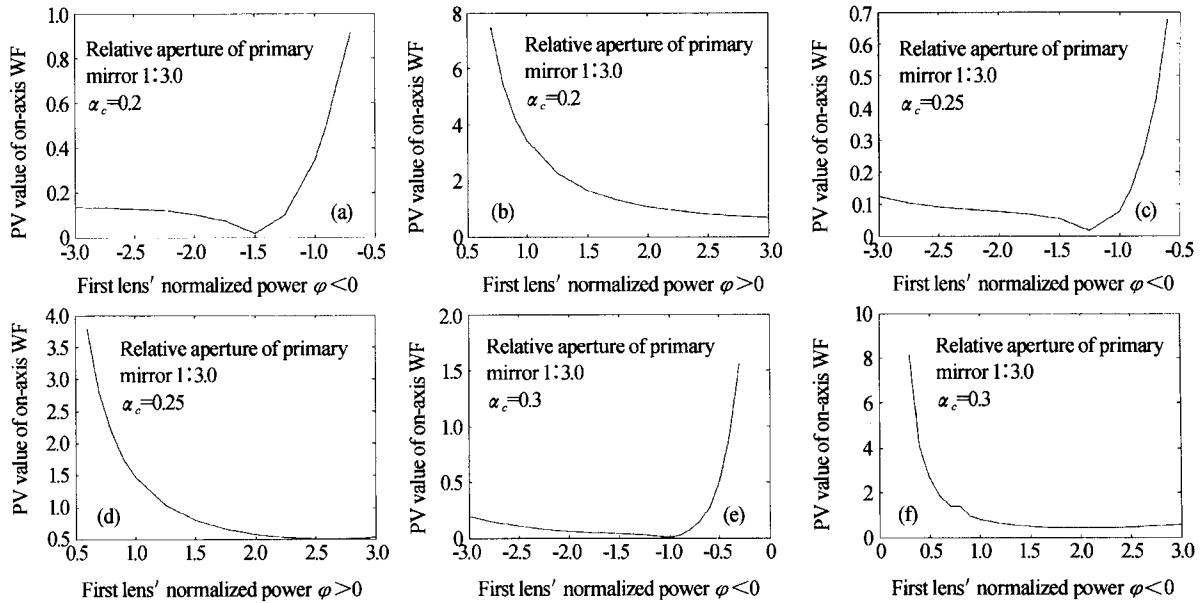


图 3 不同  $\alpha_c$  下轴上点波像差函数 PV 值

Fig. 3 PV Values of On-axis wavefront functions(WF) for different obscuration ratios

从以上曲线可知:1)随着  $\alpha_c$  的增加,系统的残余像差也增加;2)无论第一个透镜是正透镜还是负透镜,系统在某一光焦度处残余像差最小,并且随着  $\alpha_c$  的增加,该光焦度向  $|\varphi|$  减小的方向移动;3)当第一个透镜是负透镜时,系统的残余像差小于第一个

透镜是正透镜时系统的残余像差.

### 4 结论

对于双贴合无光焦度校正板在次镜后的双反射镜系统,当主镜的相对孔径增加或校正板靠近次镜

时,系统的残余像差增加;无论校正板的第一个透镜是正透镜还是负透镜,系统在某一光焦度处残余像差最小,并且靠近次镜的透镜最好采用负透镜.

#### 参考文献

- Rogers A. On the construction of large achromatic telescopes. *Memoirs of the Astronomical Society of London*, 1829, **32**(6): 229~233
- Ross F. Lens system for correcting coma or mirrors. *Astrophysics Journal*, 1935, **81**(2): 156~159
- Wynne C. Field correctors for large telescopes. *Applied Optics*, 1965, **4**(9): 1185~1189
- Gascoigne S. Recent advances in astronomical optics. *Applied Optics*, 1973, **12**(7): 1419~1423
- Meinel A. Aspheric field correctors for large telescopes. *Astronomical Journal*, 1953, **118**(6): 335~339
- Schulte D. Prime focus correctors involving aspherics. *Applied Optics*, 1966, **5**(2): 313~316
- Wynne C. Field correctors for astronomical telescopes. *Progress in Optics*, 1972, **X**: 139~142
- Schulte D. Anastigmatic cassegrain type telescope. *Applied Optics*, 1966, **5**(2): 309~313
- Rosin S. Richey-chretien corrector system. *Applied Optics*, 1966, **5**(4): 675~680
- Wilson R. Corrector system for cassegrain telescope. *Applied Optics*, 1968, **7**(2): 253~259
- Rosin S. Corrected cassegrain system. *Applied Optics*, 1964, **3**(1): 151~155
- 何宗平, 赵文才, 郝沛明. 双透镜无光焦度校正板在单一反射镜后的光学系统的像差特性分析. *量子电子学报*, 2003, **20**(5): 531~536  
He Z P, Zhao W C, Hao P M. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(5): 531~536
- 何宗平, 赵文才, 郝沛明. 双透镜无光焦度校正板在单反射镜前的系统研究. *光子学报*, 2004, **33**(3): 346~349  
He Z P, Zhao W C, Hao P M. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 346~349
- 潘君华. 光学非球面的设计、加工与检验. 北京: 科学出版社, 1994. 12~15  
Pan J H. *The Designing, Manufacturing and Testing of Optical Aspheric Surface*. Beijing: Science Press of China, 1994. 12~15
- 张以谟. 应用光学. 北京: 机械工业出版社, 1982. 510~513  
Zhang Y M. *Applied Optics*. Beijing: Mechanical Industry Press of China, 1982. 510~513

## The Aberration Characteristics Analysis of A Two-sphere System with A Two-lens Zero-power Corrector Behind the Secondary Mirror

He Zongping<sup>1,2</sup>, Zhang Quan<sup>3</sup>, Hu Mingyong<sup>4</sup>

1 Hefei Yuntao Optoelectronics Science CO. Ltd., Hefei 230031

2 Anhui Medical University, Hefei 230032

3 Department of Astronomy and Applied Physics, USTC, Hefei 230026

4 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of CAS, Hefei 230003

Received date: 2004-12-13

**Abstract** A two-sphere system with a two-lens zero-power corrector placed behind the secondary mirror was discussed. According to third-order aberration theory, the conditions of the absence of aberrations were analyzed, and the influences to the remaining high order aberrations of the system caused by the change of the relative aperture of the primary mirror, the position of the corrector and the different combination of the positive and negative lens in the corrector were investigated. The results show that the remaining aberrations will increase if the relative aperture of the primary increase or if the corrector approaches the secondary mirror. No matter the first lens of the corrector is positive or negative, there would be a particular optical power which causes smallest remaining aberrations, and it's better to use a negative lens near the secondary mirror.

**Keywords** Third order aberration theory; Zero-power corrector; Aberration balance; Two-mirror system



**He Zongping** was born in 1960, and received his Ph. D. degree from Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics of CAS in 2004. Now he is working in Anhui Medical University and doing dynamic phototherapy research and other interdisciplinary researches. He is also a general engineer of Hefei Yuntao Optoelectronics Science CO. Ltd., and engaging in optoelectronic medical instrument designing and manufacturing.