

长焦距反射式光学系统研究*

吴 煜

薛 鸣 球

(应用光学国家实验室, 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

提 要

本文研究了三反射镜光学系统的像差特性, 提出用比较直观的解方程式的方法来设计三反射镜光学系统, 举例说明了该系统的像差平衡及像质评价问题, 得出焦距为 4000 mm, 相对孔径为 1:4, 视场角为 3°, 弥散盘最大半径为 6.35 μm, 对于空间频率 150 lp/mm, 调制传递函数为 0.36 的结果。

关键词: 反射系统; 光学设计

一、前 言

反射式光学系统由于完全没有色差而受到人们的重视。由二个反射镜构成的光学系统很早就不断地被人们研究过, 但由于校正像差的自由度所限, 视场一般较小。现在的望远摄影要求光学系统具有长焦距, 大的相对孔径和大的视场, 近年来对三反射镜光学系统又有不少研究^[1~7]。

三反射镜光学系统有足够的自由度来满足像差要求, 它有三个半径、二个间隔, 若做成非球面面型还有三个偏心率共八个自由度, 除了满足系统焦距及四种主要象差即球差、彗差、像散和场曲外, 还留有三个自由度, 有充分的余地来满足系统的外形结构尺寸要求或用来降低系统的高级像差。本文通过具体设计三反射镜光学系统来研究其成像特性, 扩大长焦距光学系统的相对孔径和视场。

二、三反射镜系统初级像差公式

引入参数如图 1 所示。图中 α 为第二面半高与主镜半高之比, 反映中心遮拦程度, L 为

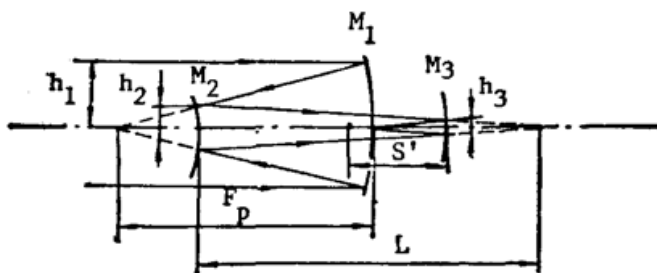


Fig. 1

第二面顶点到第二面像点距离, 反映筒长, S 为像面到第三面顶点距离, 反映后工作距离, F_P 主镜焦距, 作为中间变量, 根据初级像差理论, 对于物体位于无限远, 光阑置于主镜上, 推导出三反射镜系统初级像差表达式为:

$$S_1 = \frac{1}{4} \left[\frac{e_1^2}{F_P^3} + \frac{e_2^2 \alpha (\alpha F_P - L)}{L^3 F_P^3} + \frac{e_3^2 S (L - \alpha)^3}{L^3} - \frac{1}{F_P^3} \right]$$

收稿日期: 1990年10月8日

* 本文主要内容在 90 年全国光学设计与 CAD 软件系统学术讨论会进行了宣读。

$$\left. - \frac{\alpha(\alpha F_P - L)(\alpha F_P + L)^2}{L^3 F_P^3} - \frac{S(L - \alpha)(L + \alpha)^2}{L^3} \right], \quad (1)$$

$$S_{II} = \frac{e_2^2(\alpha - 1)(\alpha F_P - L)^3}{4L^3 F_P^2} + \frac{e_3^2[\alpha S F_P(\alpha - 1) - L(\alpha - S)](L - \alpha)^3}{4\alpha^2 L^3} \\ - \frac{(\alpha - 1)(\alpha F_P - L)(\alpha F_P + L)^2}{4L^3 F_P^2} \\ - \frac{[\alpha S F_P(\alpha - 1) - L(\alpha - S)](L - \alpha)(L + \alpha)^2}{4\alpha^2 L^3} - \frac{1}{2}, \quad (2)$$

$$S_{III} = \frac{e_2^2(\alpha - 1)^2(\alpha F_P - L)^3}{4\alpha F_P L^3} + \frac{e_3^2[\alpha S F_P(\alpha - 1) - L(\alpha - S)]^2(L - \alpha)^3}{4S\alpha^4 L^3} \\ - \frac{(\alpha - 1)^2(\alpha F_P - L)(\alpha F_P + L)^2}{4\alpha F_P L^3} - \frac{[\alpha S F_P(\alpha - 1) - L(\alpha - S)]^2(L - \alpha)(L + \alpha)^2}{4S\alpha^4 L^3} \\ - \frac{(\alpha - 1)(\alpha F_P + L)(\alpha F_P - L)}{L^2 \alpha F_P} - \frac{[\alpha S F_P(\alpha - 1) - L(\alpha - S)](L + \alpha)(L - \alpha)}{S\alpha^2 L^2} \\ - \frac{1}{F_P} - \frac{\alpha F_P - L}{\alpha F_P L} - \frac{L - \alpha}{SL}, \quad (3)$$

$$S_{IV} = \frac{1}{F_P} + \frac{\alpha F_P - L}{\alpha F_P L} + \frac{L - \alpha}{SL}, \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} r_1 = 2F_P, \quad r_2 = \frac{2\alpha L F_P}{L - \alpha F_P}, \quad r_3 = \frac{2SL}{L - \alpha}, \\ d_1 = F_P(1 - \alpha), \quad d_2 = \frac{(S - \alpha)L}{\alpha}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

如果对各面面型不作限定的话, 由像差方程式可以精确地解出各面面型常数来校正初级像差, 这时, 系统还有三个自由变量来安排外形结构尺寸, 如果对外形结构尺寸也不作限定的话, 这三个自由变量可用来降低系统的高级像差, 为此, 以 α 、 L 、 S 为参数, 通过它们的变化来研究系统高级像差变化的情况。

三、三反射镜系统高级像差特性

轴上点只有球差, 可以 0.7 孔径的剩余球差 $LA_{0.7s}$ 表示孔径高级球差; 轴外像差主要是视场高级球差、视场高级彗差和高级像散, 以 0.7 视场的剩余彗差 $K_{t0.7w}$, 剩余像散 $X_{tso.7w}$ 分别表示视场高级彗差和高级像散, 视场高级球差为轴外球差与轴上球差之差, 以 LA_w 表示。

在 α 、 L 、 S 三个参数中, 固定二个参数, 改变其中一个参数来考察高级像差变化情况。图中数值以参数为焦距 4m, 相对孔径 1:4, 视场角 3° 计算得出。

(1) 固定 $L=1$, $S=0.175$, 取 $\alpha=0.2, 0.25, 0.3, 0.4$ 时, 高级像差变化如图 2。随着 α 的增大, 孔径高级球差增大, 但是数值不是很大, 视场高级球差变化不大, 大约在 -0.2 左右, 视场高级彗差由正值逐渐变为负值, 高级像散逐渐减小。

(2) 固定 $\alpha=0.25$, $S=0.175$, 取 $L=0.75, 1.0, 1.25, 1.5$ 时, 高级像差变化如图 3 所示, 随着 L 的增大, 孔径高级球差变化不大, 视场高级球差、高级像散明显减小, 但视场高级彗差由正值变为负值, 并有增大趋势。

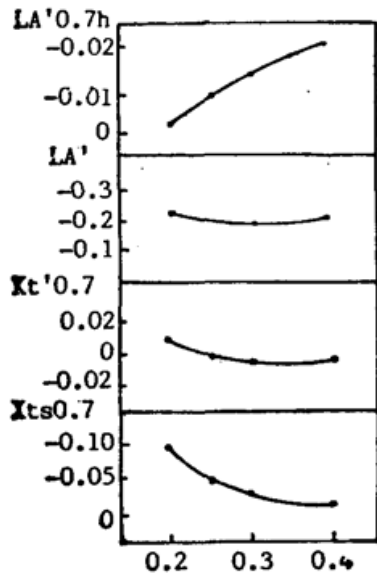


Fig. 2

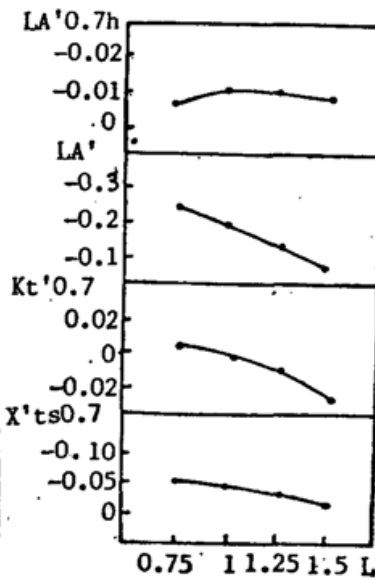


Fig. 3

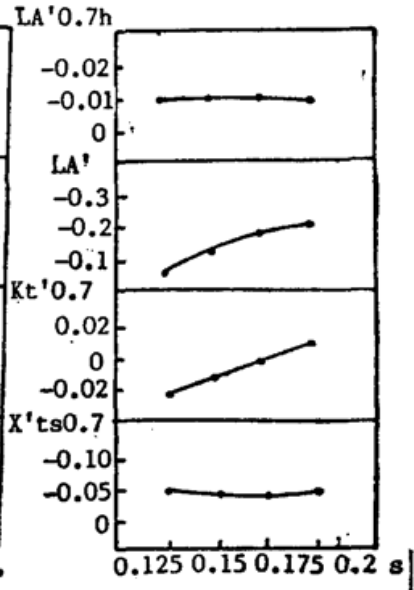


Fig. 4

(3) 固定 $\alpha=0.25$, $L=1.0$, 取 $S=0.125, 0.15, 0.175, 0.2$ 时, 高级像差变化如图 4 所示。随着 S 的增大, 孔径高级球差、高级像散变化不大, 视场高级球差增大, 视场高级彗差由负值逐渐向正值变化。

总的来看, α 取较大值, 除孔径高级球差增加外, 对其他像差是有利的, 但考虑到 α 增大, 中心遮拦也增大, 导致传递函数 MTF 降低, 所以, α 又不能取得太大。取较大的 L 值, 视场高级球差、高级像散较小, 但视场高级彗差向负值增大, 如果同时取较大的 S 值, 视场高级彗差会有所降低, 但视场高级球差、高级像散也会有所增大, 如果取较小的 S 值, 视场高级球差、高级像散会进一步减小, 视场高级彗差也会进一步增大, 反之亦然。因此, 视场高级彗差与视场高级球差、高级像散是矛盾的, 在选取合适的 α, L, S 值时应综合考虑。

四、设计实例

下面举例说明三反射镜光学系统的设计及其结果。系统参数为: 焦距 $f=4000$ mm, 相对孔径 $D/f=1/4$, 视场角 $2\omega=3^\circ$ 。

从中心遮拦对传递函数影响的考虑, 取 $\alpha=0.25$, 同时取 $L=1.0, S=0.175$ 时视场高级彗差有较小值, 视场高级球差和高级像散值较适中, 将 α, L, S 值代入像差方程式和内部结构参数方程式(1)~(5)式, 并令 $S_I=S_{II}=S_{III}=S_{IV}=0$, 解得系统的初始结构参数和像差参数如表 1 所列。

初始的二次曲面偏心率是由像差方程式(1)~(4)式解出, 所以, 该系统严格校正初级像

Table 1

No.	r	d	e^2	type
1	-4541	-1702.71	1.11478	hyperboloid
2	-1323	1200	2.33950	hyperboloid
3	-1867	-700.595	0.93699	ellipsoid

差,但由于系统的相对孔径和视场较大,由此带来一定量的高级像差,像差平衡的目的就是在一定的高级像差条件下,利用各种初级像差的改变,使其与高级像差取得最好的平衡,使整个视场内各像点的弥散盘最小。在平衡过程中,保持系统结构参数不变,而仅仅改变三面的偏心率来控制三种主要像差即球差、彗差和像散。

在实际平衡过程中发现:改变 e_1 能够很好地校正轴上球差,而对其他像差几乎没有影响;改变 e_2 值,在降低子午彗差的同时,球差、正弦差及子午场曲都有不同程度的增大;改变 e_3 值,可以使子午场曲减小,但彗差增大。利用 e_1, e_2 的改变,可以较好地控制球差和彗差,利用 e_2, e_3 的改变,可以较好地控制彗差和场曲,但正弦差不能增加太大,否则会使小视场的成像质量变坏。平衡后的系统结构参数和像差参数如表 2 所列。

Table 2

No.	r	d	e^2	type
1	-4541	-1702.71	1.11668	hyperboloid
2	-1323	1200	2.3505	hyperboloid
3	-1867	-700.595	0.94949	ellipsoid

其点列图如图 5 所示,最大弥散盘半径为 $6.35 \mu\text{m}$,在 4m 焦距下,角分辨率为 $1.59 \mu\text{rad}$,亦即 $0.32''$ 。

在共轴反射式光学系统中,由于光线的反向,中心遮拦是不可避免的。三反射镜系统中,实际的中心遮拦由第三反射镜的口径所决定,而第三反射镜的口径又是由视场角所决定,视场角愈大,第三反射镜的口径愈大,实际中心遮拦也愈大。通过计算,当半视场角为 -1.5° 时,第三反射镜的口径由上边缘光线确定,其入射高度为 244.5 ,按 250 计算,则整个视场的中心遮拦 $s = 250/500 = 0.5$ 。表 3 是 $s = 0.5$,空间频率为 150lp/mm 的传递函数值。

如果适当减小第三反射镜口径,虽然增大了大视场的渐晕系数,但中心遮拦降低,使轴上点和小视场的传递函数值得到增大,大视场的中央光束有所增加,可

以部分补偿边缘光线的损失。为此,令第三反射镜半通光口径为 160 ,中心遮拦 $s = 160/500 = 0.32$,对于空间频率为 150lp/mm ,其传递函数值如表 4 所列。

Table 3

MTF		W				
		0	0.3	0.5	0.71	1.0
section	meridian	0.282	0.309	0.281	0.272	0.036
	sagittal	0.282	0.303	0.294	0.216	0.072

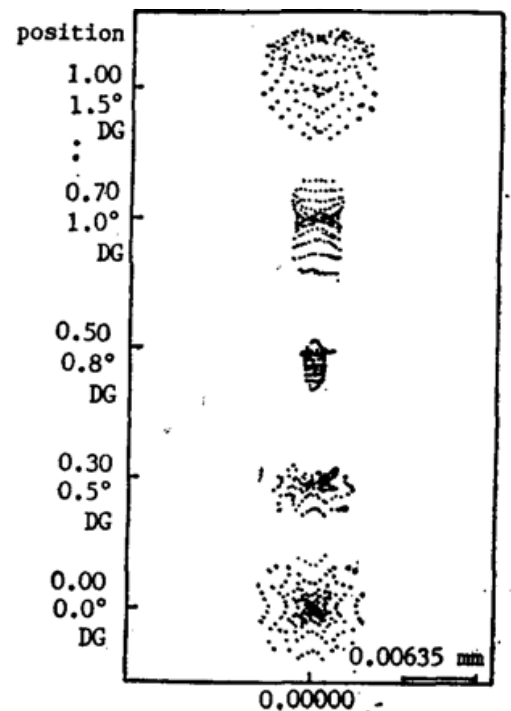


Fig. 5

Table 4

MTF		W				
		0	0.3	0.5	0.71	1.0
section	meridian	0.417	0.457	0.376	0.326	0.175
	sagittal	0.417	0.451	0.445	0.298	0.279

参 考 文 献

- [1] Paul, M.; *Rev. Opt. Theor. Instrum.*, 1935, **14**, 169.
 [2] Baker, J.; *G. Proc. IEEE*, 1969, **AES-5**, 261.
 [3] Rumsey; *N. J. Proc. Astr. Soc. Austr.*, 1971, **2**, 22.
 [4] Korsch, D.; *Appl. Opt.*, 1977, **16**, 2074.
 [5] Robb, P. N. *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 2677.
 [6] Willstrop; *R. N. Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 1985, **216**, 411.
 [7] 潘君骅;《光学学报》, 1988, **8**, No. 8 (Aug), 717.

Study of long focal length all-reflective optical system

WU YU AND XUE MINGQIU

(Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, National Applied Optics Laboratory, Xian 710068)

(Received 8 October 1990)

Abstract

In this paper the aberration properties of three-mirror optical system are investigated. A more directly solving equation method is presented to design this system. The aberration balancing and image evaluation of this system are described. The results show that at the optical system with focal length of 4 meters, relative aperture of $f/4$, angular field of view 3° , the largest spot radius is 6.35 micrometers and the MTF is 0.36 at spatial frequency 150 linepairs per mm.

Key words: Catoptric, optical design.