

含有三个非球面的卡塞格林系统光学设计

史光辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘 要 介绍了一种含三个非球面的卡塞格林系统的设计思想, 给出了一个设计结果。焦距 2.8 m, F/5.6, 视场 3.2°, 主镜、次镜均为 6 次方非球面, 场镜含一 4 次方非球面, 成像质量接近衍射极限, 畸变也得到了校正。

关键词 卡塞格林, 非球面, 设计。

1 引 言

为了缩短筒长和减小体积, 长焦距物镜一般多采用卡塞格林系统。典型的卡塞格林系统视场很小。为了增大视场, 如果采用球面系统, 若校正五种基本像差, 则需在系统的物方加一组校正透镜, 在像方加一组场镜。但由于前校正透镜组口径很大, 这样会增加系统的重量。如果不加前校正透镜组, 则需采用非球面系统。若使成像质量接近衍射极限, 还要校正畸变, 就需采用三个非球面。

2 设计思想

典型的卡塞格林系统主镜为抛物面, 次镜为双曲面, 这只能校正球差。如果将主镜也改为双曲面, 则可校正两种像差, 如球差和彗差, 视场就可增大。但为了进一步增大视场, 则还需校正场曲, 像散和畸变。这就需要在像方加一组至少由两片透镜组成的透镜组, 可称之为场镜。场镜的光焦度与主镜、次镜的光焦度匹配以校正场曲, 利用弯曲可以校正两种像差, 主要是像散和畸变。但为校正高级轴外像差, 主要是高级像散, 则不得不在场镜上增加一非球面。而靠场镜的复杂化解决不了这个问题。

轴对称非球面可以是二次曲面, 也可以是高次曲面。二次曲面方程一般表示为:

$$x = \frac{Cy^2}{1 + \sqrt{1 - A_1 C^2 y^2}} \quad (1)$$

坐标原点为曲面顶点, x 为曲面上各点沿光轴方向坐标, y 为光线与曲面交点高度, C 为顶点半径 R 的倒数。由初级像差求解即求解 A_1 。一般的非球面方程可写成:

$$y^2 = 2Rx + bx^2 + cx^3 + \dots \quad (2)$$

上面的二次曲面方程(1)式等价于(2)式的前两项, 因此称二次曲面。而含高于 x^3 项以上项的

曲面就称高次曲面。对于高次曲面, 用初级像差理论求解应采用下面形式:

$$x = \frac{1}{2R}y^2 + A_2y^4 + A_3y^6 + \dots \quad (3)$$

令二次曲面方程中的 A_1 为零即得到上式的第一项。 y^4 项即为产生初级像差项。用初级像差求解即求解 A_2 。高于 y^6 的项即为产生高级像差项。从初级像差观点来看, 将主镜、次镜非球面化即产生了两个变数。而场镜也有两个变数 P_3^∞ 和 W_3^∞ 。四个变数刚好校正四种像差, 于是可列四个方程:

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= 8y_1^4K_1 + 8y_2^4K_2 + y_3^4\mathcal{Q}P_3 \\ S_2 &= y_1^3y_{p_1}K_1 + y_2^3y_{p_2}K_2 + y_3^3y_{p_3}\mathcal{Q}P_3 + jy_3^2\mathcal{Q}W_3 \\ S_3 &= y_1^2y_{p_1}^2K_1 + y_2^2y_{p_2}^2K_2 + y_3^2y_{p_3}^2\mathcal{Q}P_3 + 2jy_3y_{p_3}\mathcal{Q}W_3 + j^2\mathcal{Q} \\ S_5 &= y_1y_{p_1}^3K_1 + y_2y_{p_2}^3K_2 + y_3y_{p_3}^3\mathcal{Q}P_3 + 3jy_{p_3}^2\mathcal{Q}W_3 + j^2(y_{p_3}/y_3)\mathcal{Q}(3 + \mu) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_5 分别为以顶点半径为半径的主镜、次镜以及光路中平玻璃产生的球差、彗差、像散和畸变系数的和但反号。 y_p 为主光线的高度, \mathcal{Q} 为场镜焦距的倒数, μ 为规化的场曲系数, j 为拉格朗日不变量。由上述方程组可解出 K_1 、 K_2 、 P_3 和 W_3 。由 K_1 和 K_2 可求出主镜和次镜的非球面系数。对于二次曲面依次为:

$$\left. \begin{aligned} A_{11} &= 1 + 8K_1R_1^3/(n_2 - n_1), \\ A_{12} &= 1 + 8K_2R_2^3/(n_1 - n_2). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对于高次曲面, y^4 项系数为:

$$A_{21} = K_1/(n_2 - n_1) + 1/8R_1^3, \quad A_{22} = K_2/(n_1 - n_2) + 1/8R_2^3. \quad (6)$$

式中 n_1 和 n_2 为折射率, 这里取 $n_1 = 1$, $n_2 = -1$ 。采用高次非球面比二次曲面有更大的自由度, 在像差平衡时, 利用 y^6 项还可降低高级像差。由于反射面的高级像差比较小, 采用二次曲面也可得质量较高的设计结果。采用二次曲面时, 由解像差方程得到的 A_1 值皆为负值, 即表明主镜、次镜皆为双曲面。由 P_3 和 W_3 可求出物在无限远的 P_3^∞ 和 W_3^∞ ^[1]:

$$\left. \begin{aligned} W_3^\infty &= W_3 + u_1(2 + \mu) \\ P_3^\infty &= P_3 + u_1(4W_3^\infty + 1) - u_1^2(3 + 2\mu). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

u_1 为规化的场镜物方孔径角。由 P_3^∞ 和 W_3^∞ 可求出场镜的结构型式、光学玻璃和半径。这一步已有了程序^[2]。

可供选择的变量有主、次镜的间隔, 中心遮拦比以及场镜的结构形式和光学玻璃等。拉大主、次镜的间隔, 主镜和次镜的半径和场镜的焦距变大, 有利于降低高级像差。但为了减轻重量和缩小体积, 需将主镜口径限定, 因而拉大主、次镜间隔会增加轴外视场拦光, 从而降低了轴外视场的衍射调制传递函数, 而这是决定轴外调制传递函数的主要因素, 因此这一间隔应取得尽量小, 小到由于高级像差的增加导致调制传递函数下降为止。同样, 受衍射调制传递函数和高级像差的影响, 中心遮拦比也存在一个最佳值, 也需经过逐步选择。场镜的结构型式、玻璃材料的选择原则也是在高级像差满足要求的条件下, 越简单和越普通越好。场镜在像空间的位置对高级像散有明显的影 响, 但为使结构紧凑和加长工作距离, 将其限定在主镜的中心孔内, 因此就不能作为一个变数利用了。孔径光阑设在次镜上。孔径光阑位置对初始解无影响。对于衍射极限系统来说, 孔径光阑位置对最终的像质也无明显的影响。

由于高级像散和畸变都主要由场镜产生, 而且相互矛盾, 如果校正畸变就得不到高级像散小的解。只有令 S_5 为较大的负值时才会得到高级像散小的解。为了校正畸变, 最后不得不

在场镜上加一非球面。求解方法是，给定 S_5 一个正值，求出 K_3 ，由 K_3 可求出 A_1 或 A_2 以及求出该非球面产生的 S_1 、 S_2 和 S_3 ，然后和 S_5 一并反号加到方程组中相应的像差系数中去，重复上面求解过程，经过几次反复就可得到满意的解。

3 一个设计结果

光学系统如图 1 所示。焦距 2.8 m，F/5.6，视场 3.2° ，总长为 0.37 倍焦距，工作距离为 0.09 倍焦距，主、次镜间隔为 0.24 倍焦距，中心遮拦比为 0.39。场镜为由正、负两片透镜组成的消色差透镜组，玻璃为 ZF1 和 BaF4，主镜口径为 $\phi 500$ mm。主镜和次镜均为 6 次方非球面。场镜最后一面为 4 次方非球面。

表 1 为由美国 ORA 生产的软件 CODEV 计算得到的，频率为 110 lp/mm 时的调制传递函数值。计算波长为 $0.5461 \mu\text{m}$ 、 $0.5893 \mu\text{m}$ 和 $0.6563 \mu\text{m}$ 。取三种波长的平均值。系统的高级色差非常小，因此色差对调制传递函数的影响很小。由表 1 可见，调制传递函数值很接近衍射极限。边缘视场的子午衍射调制传递函数值低，而弧矢调制传递函数值高，甚至超过轴上，这是由中心遮拦和轴外视场拦光造成的。图 2 为边缘视场在入瞳面上的拦光情况。通光孔的形状很不规整。根据传递函数是光瞳函数自相关函数的理论，将光瞳半径规范化为 1，将同样两光瞳在子午和弧矢两个方向错开一个和频率 110 lp/mm 对应的规范化频率 0.72 的距离就会发现，两光孔重叠面积在子午方向要比弧矢方向小得多。轴外视场的调制传递函数值稍低于衍射值，主要是由于高级像散的影响，这可以容易地用增加场镜非球面方程中的 y^6 项来消除。

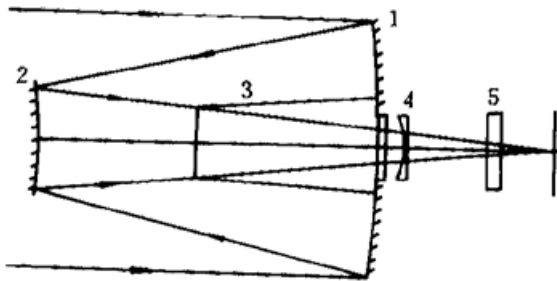


Fig. 1 Optical system: 1. primary mirror; 2. secondary mirror; 3. baffle bariel; 4. field lens; 5. plate glass

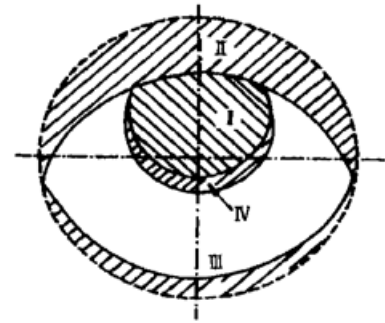


Fig. 2 Vignetting case of marginal field of view on the entrance pupil section. Shading indicates image rays prevented by central obscuration (I), front aperture of the baffle bariel (II), aperture of the primary mirror (III), outside wall of the baffle bariel (IV)

Table 1. Value of MTF for 110 lp/mm

field	diffraction MTF		design MTF		distortion/(%)	transmission/(%)
	S	T	S	T		
0	0.34	0.34	0.34	0.34	0	100
0.4	0.31	0.32	0.31	0.30	0.02	85.0
0.7	0.32	0.27	0.32	0.24	0.06	70.5
1.0	0.37	0.20	0.33	0.19	0.14	58.8

S: sagittal, T: tagential.

用同样的结构型式, 主镜和次镜改用二次曲面, 场镜用含有 y^6 项的高次非球面, 也可以得到像质相近的结果。

参 考 文 献

- [1] 林大键, 工程光学系统设计. 第一版, 北京, 机械工业出版社, 1987: 48
[2] 史光辉, 求满足 C_1 、 P^∞ 和 W^∞ 透镜组的初始解程序. 仪器仪表学报, 1988, 9(4): 364~ 367

Optical Design of Cassagrain System with Three Aspherical Surfaces

Shi Guanghui

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academia of Sciences, Changchun 130022)

(Received 26 November 1996; revised 3 March 1997)

Abstract The design idea for Cassagrain system with three aspherical surfaces is presented. A design result for focal lenth of 2.8 m, F/5.6, field of view 3.2° , is obtained. The primary and secondary mirror have six order terms aspherical surfaces and the field lens has four oder terms aspherical surface. The image quality is close to the diffraction limit and the distortion is also corrected.

Key words Cassagrain, aspherical surface, design.