

具有两次透射的无光焦度校正透镜组的准施密特系统的准施密特系统

史光辉

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘 要 介绍了一种具有两次透射的无光焦度校正透镜组的准施密特系统及其设计思想和方法, 并给出了一个设计结果。焦距 2.7 m, 相对孔径 $F/5.5$, 视场角 3.42° 。在全视场范围内成像质量达到了衍射极限。

关键词 准施密特系统, 无光焦度透镜, 成像质量。

1 引 言

典型的施密特系统为在球面反射镜的球心放一施密特校正板, 它可用来校正球面反射镜的球差。由于孔径光阑亦放在球心, 因此该系统只存在场曲一种像差。施密特系统的缺点是筒长很长, 口径很大。为缩短筒长和减小口径以及平像场, 可在球面反射镜前加一无光焦度透镜组代替施密特校正板, 在像面前加一场镜。光阑亦放在无光焦度透镜组上。这样的系统可称之为准施密特系统。为了进一步缩短筒长和减小反射镜口径, 无光焦度校正透镜组就需放在球面反射镜和像面之间, 这样一来, 球面反射镜的入射和出射光线都要经过该透镜组。于是形成了光线两次透射的无光焦度校正透镜组。实践表明该系统可以得到优良的像质^[1]。

2 设计思想和方法

球面反射镜的半径和场镜的焦距由高斯光学尺寸和校正场曲要求确定。无光焦度组正, 负透镜用同一种光学玻璃, 场镜用消色差透镜组, 于是色差得以校正。对于单色像差而言, 无光焦度透镜组和场镜共有 4 个变数, 即和弯曲有关的 P_1 、 W_1 和 P_2 、 W_2 , 刚好可校正球面镜产生的四种像差, 即球差、彗差、像散和畸变。它们的像差系数分别为 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_5 。于是可列 4 个方程。取 P 、 W 规化形式^[2]

$$\left. \begin{aligned} S_1 &= \sum_{i=1}^2 h_i^4 \mathcal{Q}^3 P_i, & S_2 &= \sum_{i=1}^2 (h_i^3 h_{P_i} \mathcal{Q}^3 P_i + j h_i^2 \mathcal{Q}^3 W_i), \\ S_3 &= \sum_{i=1}^2 (h_i^2 h_{P_i}^2 \mathcal{Q}^3 P_i + 2j h_i h_{P_i} \mathcal{Q}^3 W_i + j^2 \mathcal{Q}), \\ S_5 &= \sum_{i=1}^2 (h_i h_{P_i}^3 \mathcal{Q}^3 P_i + 3j h_{P_i}^2 \mathcal{Q}^3 W_i + j^2 \frac{h_{P_i}}{h_i} (3 + \mu_i) \mathcal{Q}) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_5 为反射镜产生的, 但反号。 h_i 、 h_{P_i} 分别为轴上光线和主光线在透镜组上的高度。 j 为拉格郎日不变量, μ_i 为规化的场曲系数。 P_i 和 W_i 需转换成物在无限远的 P_i^∞ 和 W_i^∞ 。对于场镜有如下的关系:

$$W_2^\infty = W_2 + u_1(2 + \mu_2), \quad P_2^\infty = P_2 + u_1(4W_2^\infty + 1) - u_1^2(3 + 2\mu_2). \quad (2)$$

式中 u_1 为规化的物方孔径角。对于无光焦度组, \mathcal{Q} 为无光焦度组单块透镜的光焦度, 而 P_1 和 W_1 仍为整组的。下面需求出无光焦度组物在无限远的 P_1^∞ 和 W_1^∞ 与 P_1 和 W_1 的关系。

设无光焦度组两个透镜分别用 a 和 b 表示。光线由正向计算(用 \rightarrow 表示) 变成反向计算(用 \leftarrow 表示) 时, 有关系 $\vec{P} = \overleftarrow{P}$, $\vec{W} = -\overleftarrow{W}^{[2]}$ 。两个透镜物方孔径角有关系 $\overleftarrow{u}_b = -\overrightarrow{u}_a$ 。又由于有和(2)式相同的关系, 于是有:

$$\vec{W}_1 = \overleftarrow{W}_a + \overleftarrow{W}_b = \overleftarrow{W}_a - \overleftarrow{W}_b = \overleftarrow{W}_1^\infty. \quad (3)$$

又因在方程组(1)中, P 的系数含有 \mathcal{Q} 项, 且 $\mathcal{Q} = -\mathcal{Q}_a$, 因此有:

$$\vec{P}_1 = \overleftarrow{P}_a - \overleftarrow{P}_b = \overleftarrow{P}_a - \overleftarrow{P}_b = \overleftarrow{P}_1^\infty - 4u_1\overleftarrow{W}_1^\infty. \quad (4)$$

这便是一次透射无光焦度组 P^∞ 、 W^∞ 和 P 、 W 的关系。再看二次透射无光焦度组 P^∞ 、 W^∞ 和 P 、 W 的关系。用角标 11 表示第一次透射, 用 12 表示第二次透射。注意二次透射为一次透射的反向计算, 则因

$$\overleftarrow{W}_{12} = -\overleftarrow{W}_{12} = -\overleftarrow{W}_{12} = -\overleftarrow{W}_{11} = -\overleftarrow{W}_1^\infty, \quad \overleftarrow{P}_{12} = \overleftarrow{P}_{12} = \overleftarrow{P}_{12} = \overleftarrow{P}_{11} = \overleftarrow{P}_1^\infty \quad (5)$$

$$\text{于是: } \overleftarrow{W}_{12} = \overleftarrow{W}_{12} = -\overleftarrow{W}_{11} = -\overleftarrow{W}_1^\infty, \quad \overleftarrow{P}_{12} = \overleftarrow{P}_{12} - 4u_{12}\overleftarrow{W}_{12} = \overleftarrow{P}_1^\infty + 4u_{12}\overleftarrow{W}_1^\infty \quad (6)$$

这样一来, 第二次透射的 P 和 W 也变成了第一次透射 P^∞ 和 W^∞ 的函数。解方程组(1)就可求出无光焦度组的 P_1^∞ 、 W_1^∞ 和场镜的 P_2^∞ 、 W_2^∞ 。由 P_2^∞ 和 W_2^∞ 以及规化的色差系数 C_1 (本设计为 0) 以及选定的玻璃和结构型式(本设计为正, 负双透镜) 就可求出半径。这部分已编出程度^[3]。对于无光焦度组, 两个透镜的弯曲 Q 和 P^∞ 、 W^∞ 的关系有^[4]:

$$\overleftarrow{Q}_a - \overleftarrow{Q}_b = \frac{n}{n+1}W_1^\infty, \quad \overleftarrow{Q}_a + \overleftarrow{Q}_b = \frac{n+1}{n+2}\left(\frac{P_1^\infty}{W_1^\infty} - \frac{3n}{n^2-1}\right). \quad (7)$$

式中 n 为折射率, 正、负透镜相同。由 Q_a 和 Q_b 可求出 4 个半径。注意由 Q_b 求出的两个半径要按顺序颠倒过来, 并反号。在编制的程序中, 无光焦度组的半径直接给出来。

高斯光学参数的选择和由像差方程求解薄透镜需反复进行多次, 直到求出高级像差最小、且满足像质要求的解, 才是最佳初始解。影响高级像差可变的因素有: 无光焦度组和场镜位置的选择; 无光焦度组正、负透镜排列顺序和单个透镜的焦距(在程序中输入的焦距值为正即为正透镜在前, 如果为负则为负透镜在前); 场镜结构型式和玻璃的选择; 若畸变要求不严, S_5 也可作为变数利用。所有这些可变参数都经过最佳选择得到的解才是最佳解。

因为光焦度小, 因此从薄透镜变厚透镜后, 初级像差变化不大, 高级像差变化更小, 稍加调整和弯曲即得最终结果。

3 设计结果

图 1 是同一设计两种不同用途的结构按排。图 1(a) 的型式可用于画幅摄影, 由反射镜产生的中心遮栏比大约为 0.4。图 1(b) 的型式可用于线阵 CCD 扫描摄像, 在反射镜中间只需开一道窄缝, 因此中心遮栏不大。系统焦距 2.7 m, 相对孔径 $F/5.5$, 视场角 3.42° 。

无光焦度组取正组在前, 单透镜光焦度为 5×10^{-5} , 均用 K9 玻璃。场镜的正、负透镜分别用 K9 和 ZF4 玻璃。场曲得到了完全校正。计算波长为 $0.5893 \mu\text{m}$ 、 $0.6563 \mu\text{m}$ 和 0.5461

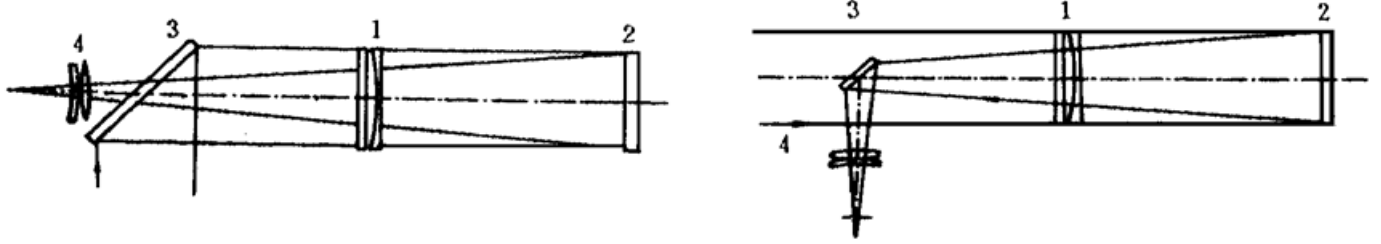


Fig. 1 Optical system 1: corrector, 2: mirror, 3: reflector, 4: field lens

μm 。图 2 右边为点列图, 左边为能量集中状况图, 纵座标为弥散斑半径, 横座标为能量集中度, 用百分数表示。计算中没有考虑中心遮栏影响。由图可见, 边缘视场的弥散园最大半径小于 0.004 mm 。而爱里斑直径为 0.008 mm 。说明在全视场内成像质量达到了衍射极限。表 1 为三种波长光线的平均调制传递函数 (MTF) 值, 取频率为 100 lp/mm 。三种波长光线的平均衍射调制传递函数值为 0.58 。可见在全视场范围内的调制传递函数值亦达到了衍射极限。显然, 该系统若用作 CCD 线扫描摄像、孔径和视场还可以增加。

Table 1. Value of MTF for 100 cl/mm

field	tangential MTF	sagittal MTF
0	0.589	0.589
0.7	0.588	0.578
1.0	0.578	0.569

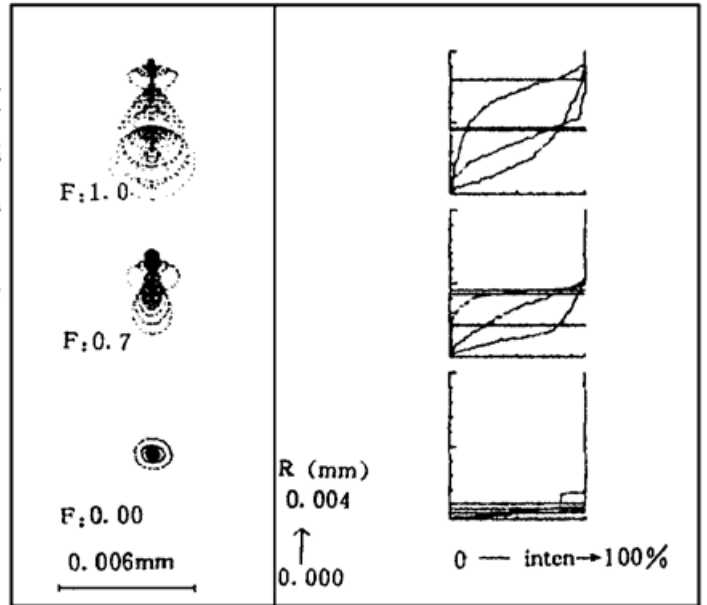


Fig. 2 Dispersion of point array and energy distribution

参 考 文 献

- [1] James J. Ulmes, Design of catadioptric lens for long-range oblique aerial reconnaissance. *Proc. SPIE*, 1989, **1113**: Reflective Optics II, 116~ 125
- [2] 王之江, 光学设计理论基础. 北京, 科学出版社, 1965: 239~ 240
- [3] 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): 362~ 367
- [4] 史光辉, 长焦距大视场折反系统光学设计. *光学学报*, 1991, **11**(7): 51~ 655

A Pseudo-Schmidt System with Through-Twice Afocal Corrective Lens

Shi Guanghui

(Changchun Institute of Optical and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

(Received 8 November 1996; revised 7 April 1997)

Abstract A smart Pseudo-Schmidt system is introduced with a afocal corrective lens through which the ray bundles pass before and after the reflection of the primary mirror. The image quality of this system reached the diffraction limit with 2.7 m focal length, 3.42° field of view and $F/5.5$. The design idea and method are presented.

Key words pseudo-Schmidt system, afocal lens, image quality.