

平像场无遮掩大视场两镜系统光学设计*

刘剑峰 龙夫年 张 伟 王治乐

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要 从像差理论出发, 提出一种平像场无遮掩两反射镜系统的设计方法, 能够同时消除球差、慧差、像散和场曲四种初级像差. 描述了该方法的设计过程和步骤, 并总结了这种系统的结构特点. 利用该方法设计出了视场角分别为 $6^\circ \times 6^\circ$ 和 $20^\circ \times 1^\circ$ 两个光学系统, 其成像质量均达到了衍射限. 该系统结构简单, 易于装调, 在航天遥感领域有很大的应用前景.

关键词 航天遥感; 光学设计; 平像场; 无遮掩

中图分类号 O435 **文献标识码** A

0 引言

由两个反射镜组成的光学系统结构简单、无色差, 具有很重要的实用价值. 多年来人们对两镜系统进行了广泛的研究, 并提出了一些不同结构形式的系统^[1~4]. 最早是卡塞格林系统及格里哥里系统. 但两者都因为轴外像差没有校正, 而在使用上受到了限制. 为此, Chrétien 又提出了 R-C 系统和改进的格里哥里系统. Макутов 在稍后提出了校正球差及慧差的系统. Schwarzschild 提出过同时消除球差的、慧差及像面弯曲的系统. 而 Cuder 提出了同时消除球差、慧差及像散的系统^[5~10]. 这些两镜系统像面没有实现平像场, 加上存在中心遮拦, 轴外像质不好, 很难实现大视场.

潘君骅院士推导出了消球差、慧差、像散及场曲的共轴平像场两镜系统初始结构^[11], 本文在此基础上实现了两镜系统的无遮掩设计, 并设计出了两个视场角分别为 $6^\circ \times 6^\circ$ 和 $20^\circ \times 1^\circ$ 的大视场两镜系统.

1 平像场两镜系统初始结构

光学系统的初始结构对性能参数的实现起着决定性的作用. 大视场两镜系统的初始结构不仅要消除轴上点像差, 还要消除轴点外像差.

两镜系统球差、慧差、像散、场曲的三级像差系数分别为 S_I, S_{II}, S_{III} 及 S_{IV} , 表达式为

$$S_I = \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4} e_2^2 \right] - \frac{\beta^2}{4} (1-e_1^2)$$

$$S_{II} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \left[\frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta} e_2^2 - \frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta} \right] - \frac{1}{2}$$

$$S_{III} = \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)^2 \left[\frac{\alpha(\beta-1)^2(\beta+1)}{4\beta^2} - \frac{\alpha(\beta+1)^3}{4\beta^2} e_2^2 \right] -$$

$$\frac{(1-\alpha)(\beta+1)(\beta-1)}{\alpha\beta} - \frac{\alpha\beta-\beta-1}{\alpha}$$

$$S_{IV} = \beta - (1+\beta)/\alpha$$

式中 α 为次镜的遮光比, β 为次镜的放大倍数, e_1^2 为主镜的非球面系数, e_2^2 为次镜的非球面系数.

若同时消除四种像差, 则像差系数必须满足

$$S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0$$

解像差方程, 得到方程组的解为

$$\beta = 0.70711, \alpha = 2.41421$$

$$e_1^2 = -5.8284, e_2^2 = -0.1716$$

两镜系统 5 个自由变量中, e_1^2 和 e_2^2 已经确定, 剩下三个变量, 即主镜曲率半径 r_1 , 次镜曲率半径 r_2 和主次镜间距 d . 在系统焦距 f' 确定后, 可以通过下面的公式求得 r_1, r_2, d 和主镜焦距 f'_1 .

$$f' = \beta f'_1 \quad d = f'_1 (1-\alpha)$$

$$r_1 = 2f'_1 \quad r_2 = \frac{\alpha\beta}{(1+\beta)\beta} f'_1$$

由上面的计算可以看出, 这种同时消除四种初级像差两镜系统结构参数之间相互制约, 在系统 f' 确定以后, 5 个参数唯一确定, 初始结构参数便于求得.

2 无遮掩两镜系统的实现

2.1 共轴系统的结构形式

根据求得的初始结构参数 α, β 的值可以画出共轴两镜系统的结构示意图. $|\alpha| > 1, \alpha < 0$, 表示次镜大于主镜, 次镜位于主镜焦点的同侧; $|\beta| < 1, \beta < 0$ 表示物象为同侧, 次镜将主镜焦距缩短. 这样, 按照其比例画出结构图, 如图 1.

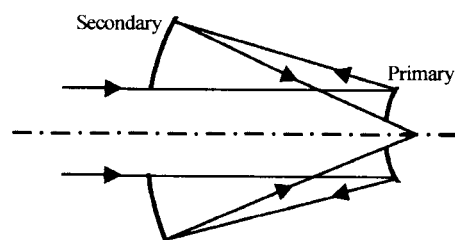


图 1 共轴两镜系统结构
Fig. 1 On-axis two mirrors system layout

从图 1 可以看到,入射光束从次镜中心穿过,成像光束从主镜中心穿过,两个镜子的有效利用面积很小,遮拦较大,若视场增大则遮拦更严重,因此,这样的系统虽然能够实现大视场,但由于遮拦严重,使得其在实际应用中受到很大限制.

2.2 无遮挡系统的结构形式及设计过程

若以图 1 共轴系统的主镜顶点为基点,将整个光学系统绕 X 轴旋转一个角度,就变成了如图 2 所示系统. 系统的人射光束偏离次镜,避开中心遮挡,实现了两镜系统的无遮挡,称这种系统为偏轴系统.

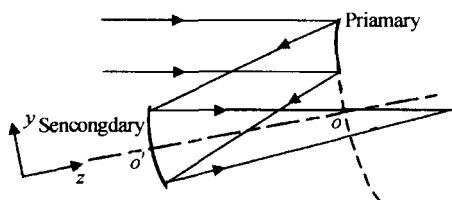


图 2 偏轴两镜系统结构
Fig. 2 Two-mirror system with off-axis field of view

偏轴系统的有效视场是共轴系统视场的一部分,两者之间的关系如图 3.

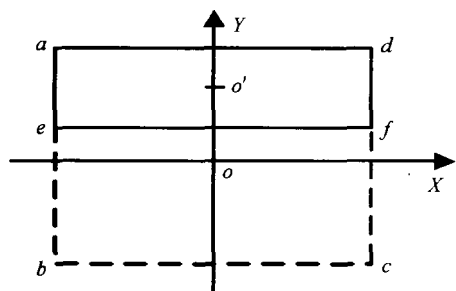


图 3 偏轴系统有效视场
Fig. 3 Effective field of view of tilted system

图 3 区域 $abcd$ 表示共轴系统的有效视场, o 为视场中心,区域 $aefd$ 为偏轴系统的有效视场, o' 为视场中心. 可以看出偏轴系统在 X 方向的视场与共轴系统同样大, Y 方向为共轴的一部分,其大小与整个系统的偏转角度有关系,偏转角越大, Y 方向视

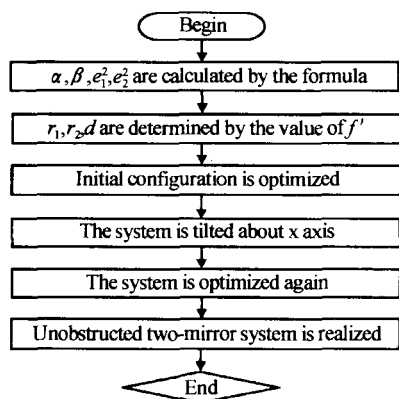


图 4 两镜无遮挡系统设计流程
Fig. 4 Flow chat for two-mirror unobstructed system

场越小.

根据偏轴系统与共轴系统有效视场之间的关系,可以总结出偏轴两镜无遮挡系统的设计方法和步骤,具体过程如图 4.

3 设计实例

按照偏轴系统的设计步骤,首先设计了一个焦距为 600 mm,相对孔径为 1/5.6,视场角为 $20^\circ \times 20^\circ$ 的共轴有遮挡两镜系统,孔径光阑位于次镜上. 通过选取共轴系统视场的不同区域作为偏轴系统的有效视场,最终得到两个无遮挡系统,一个是面视场,视场角为 $6^\circ \times 6^\circ$;另一个是线视场,视场角为 $20^\circ \times 1^\circ$.

3.1 无遮挡面视场光学系统

将共轴系统偏转 10° ,并取 $6^\circ \times 6^\circ$ 面视场作为偏轴系统的有效视场,经优化得到最终结果,系统参数如表 1.

表 1 面视场两镜系统结构参数

光学元件	参数
M_1	$r_1 = 1696.022$ mm $e_1^2 = -5.7677$
M_1-M_2	$d_1 = 1192.6291$ mm $r_2 = 1691.121$ mm
M_2	$e_2^2 = -0.1727$

光学系统结构如图 5,光学系统传递函数曲线如图 6.

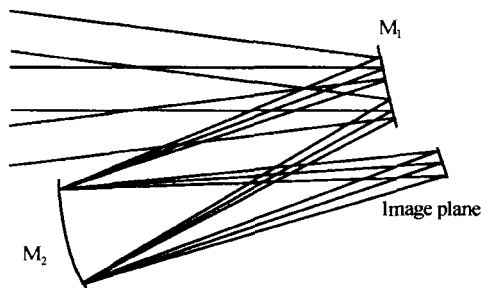


图 5 面视场光学系统结构
Fig. 5 Optical system layout with plane field of view

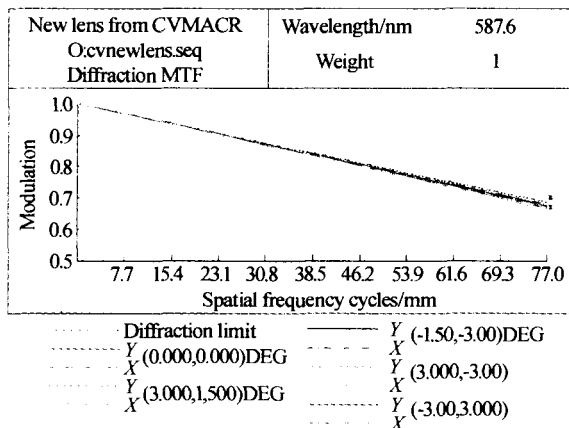


图 6 面视场光学系统传递函数曲线
Fig. 6 MTF curve of system with plane field of view

表 2 列出了 5 个视场波前的均方根误差 (RMS) 和峰谷值 (P-V).

表 2 面视场两镜系统波像差

视场	0°, 0°	3°, 1.5°	-1.5°, -3°	3°, -3°	-3°, 3°
RMS	0.034	0.043	0.024	0.04	0.033
P-V	0.16	0.242	0.202	0.239	0.26

3.2 无遮掩线视场光学系统

将共轴系统偏转 6.5°, 并取视场角为 20°×1° 的线视场作为有效视场, 经优化得到最后结果, 其光学系统的结构与图 5 相似, 结构参数如表 3.

表 3 线视场两镜系统结构参数

光学元件	参数
M ₁	r ₁ = 1699.99 mm
M ₁ -M ₂	E ₁ ² = -5.8256
	D ₁ = 1194.32 mm
M ₂	R ₂ = 1691.84 mm
	E ₂ ² = -0.1731
M ₂ -像面	D ₂ = 1443.0454 mm

光学系统传递函数曲线如图 7.

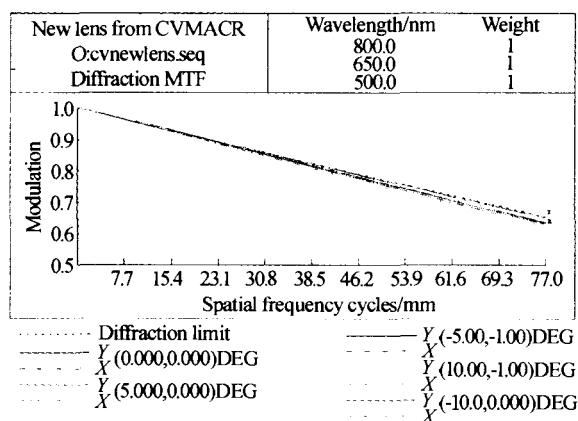


图 7 线视场光学系统传递函数曲线

Fig. 7 MTF curve of system with line field of view

光学系统波像差如表 4.

表 4 线视场两镜系统波像差

视场	0°, 0°	5°, 0°	-5°, -1°	10°, -1°	-10°, 0°
RMS	0.032	0.038	0.034	0.037	0.022
P-V	0.162	0.204	0.178	0.26	0.166

从上面所得到的两个系统的传函曲线和波像差来看, 设计结果均达到了衍射限. 由于消除了四种初级像差, 实现了平像场, 轴外像质好.

4 结构特点

通过设计与分析, 可以总结出这种系统有如下特点: 1) 两个反射面均为二次曲面, 主镜为凸的扁圆, 次镜为凹的扁圆, 两个反射面的半径像差不大. 2) 能够同时消球差、慧差、像散和场曲, 成像质量好, 能实现大视场. 3) 利用轴外点视场成像. X 方向上视场与原系统视场相同, Y 方向视场大小与系统的

偏转角度有关. 4) 系统结构简单, 结构参数固定, 设计方便. 若给定系统焦距, 可以求出所有结构参数数值, 而且优化后系统与初始结构相比, 结构参数变化不大. 5) 主镜和次镜的距离大于系统焦距. 经计算, 它们之间的关系为: $d = 2f'$ 若要减小间距, 可在主次镜间加一个折转镜.

5 结论

本文提出了同时消球差、慧差、像散和场曲的平像场无遮掩两镜系统的设计方法, 按照此方法可以方便地设计出成像质量较高的大视场光学系统.

参考文献

- 1 Korsch, Dietrich. Aplanatic two-mirror telescopes: a systematic study em dash 1. Cassegrain configuration. *Applied Optics*, 1974, **13**(9): 2064~2066
- 2 Shafer, David R. Anastigmatic two-mirror telescopes: some new types. *Applied Optics*, 1977, **16**(5): 1178~1180
- 3 Bezdidko, Serqey N. New aberration properties of two-mirror Cassegrain lenses. *Proc SPIE*, 2002, **4767**: 146~150
- 4 Popov, Gennadi M. New two-mirror systems for astrophysics. *Proc SPIE*, 1994, **2198**: 559~569
- 5 Hannan, Paul G. Optical design of two-mirror widefield cameras for large telescopes. *Proc SPIE*, 1993, **1945**: 443~452
- 6 Chao, Shao-hua. Design of an anastigmat two-mirror microscope. *Proc SPIE*, 1995, **2540**: 21~32
- 7 Popov, Gennadi M. Possible optics of two-mirror telescopes: optical design of the Big Space Telescope. *Proc SPIE*, 1996, **2807**: 298~308
- 8 Clark, Peter P. Two mirror objective design for multispectral remote sensing. *Proc SPIE*, 1982, **345**: 112~118
- 9 樊学武, 马臻, 陈荣利, 等. 红外双波段卡塞格林光学系统设计. *光子学报*, 2003, **32**(4): 463~465
Fan X W, Ma Z, Chen R L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 463~465
- 10 樊学武, 陈荣利, 马臻, 等. 偏心 and 倾斜光学系统初级像差理论的研究. *光子学报*, 2004, **33**(4): 494~496
Fan X W, Chen R L, Ma Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 494~496
- 11 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验. 北京: 科学技术出版社, 1994. 25~26, 40~41
Pan J H. Design, Fabrication and Testing of Optical Asphere. Beijing: Science Publishing Company, 1994. 25~26, 40~41

Optical Design of a Flat Field Unobstructed Two-mirror System with Wide Field of View

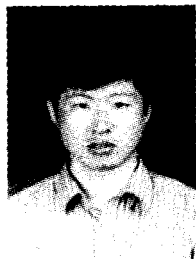
Liu Jianfeng, Long Funian, Zhang Wei, Wang Zhile

Research Center for Space Optical Engineerin, Haerbin Institute of Technology, Haerbin 150001

Received date: 2004-07-12

Abstract Based on aberration theory, the design idea of flat field unobstructed two-mirror system is presented. In this system, spherical aberration, coma, astigmatism and field curvature are free. Designing method and process is described and characteristic of system is summarized. Two systems are designed with the field of view of $6^\circ \times 6^\circ$ and $20^\circ \times 1^\circ$ and the image quality is in limit of diffraction. The configuration is simple and alignment is convenient. This system is very valuable for space sensing field.

Keywords Space sensing; Optic design; Flat field; Unobstructed



Liu Jianfeng was born in 1975 in Liaoning Province. He received his bachelor and master degree in Haerbin Institute of Technology and he is pursuing Doctor's Degree in the same university. His research interests include optical design, test and alignment.