

一种新型离轴三反式光学系统的设计

卜江萍^{1,2} 田维坚¹ 杨小君^{1,2} 孙爱娟^{1,2} 刘 蔚^{1,2}

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学与光子技术国家重点实验室信息光子学研究室,西安 710068)

(2 中国科学院研究生院,北京 100039)

摘 要 在三反射镜光学系统的几何光学理论的基础上,设计了一个焦距 $f=1000$ mm,相对孔径 $D/f=1/4$,视场角 $2\omega=3^\circ$ 的离轴非球面三镜反射系统,讨论了优化方法和各参量对系统结构和像差的影响.

关键词 空间光学;反射系统;非球面;离轴

中图分类号 TH74 **文献标识码** A

0 引言

长焦距、小体积、轻量化的空间光学系统是遥感技术领域研究的热点之一. 目前,光学设计最常用的结构形式为折射式. 长焦距、大相对孔径的要求使得折射式光学系统色差校正难的缺点显得尤为突出. 若使用过多的透镜,会使得系统长度过长,系统结构不够紧凑,整个系统的质量过大,达不到系统小型化、轻量化的要求. 常用的马克苏托夫望远镜、施密特折反射式光学系统作为空间光学系统,前者对使用的光学玻璃有较高的要求,限制了口径的增大,后者改正镜的非球面面型特殊,加工困难,且其镜筒长度约为焦距的两倍,也无法满足小体积、轻量化的要求. 反射式光学系统结构折叠,其体积和重量远小于折射式. 但单纯的两反射系统最多只能校正两种像差(球差和彗差),三反射系统在长焦距、大相对口径的情况下,中心遮拦大得无法接受.

本文根据长焦距、大相对口径空间光学系统的要求,在高斯光学理论的基础上,通过对系统的几何参量推导和分析,得出了三镜反射系统的求解方程,并提出了一种离轴非球面三镜反射系统的设计. 即在共轴三反射系统求得初始结构基础上将光阑置于主镜上,适当的离轴、倾斜避免了中心遮拦,不仅大大减小了系统的体积和重量,还有效提高了系统的成像质量.

1 设计思想

在成像轴对称系统中引入参量如图 1. 其中, M_1, M_2, M_3 分别为主镜、次镜和三镜, A' 为像面. f_1 为主镜焦距, l_2, l'_2, l_3, l'_3 分别为次镜的物距、像距及三镜的物距、像距,令三个镜面的曲率半径分别为 c_1, c_2, c_3 , 三个反射镜面的二次非球面系数分别为 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$. 则

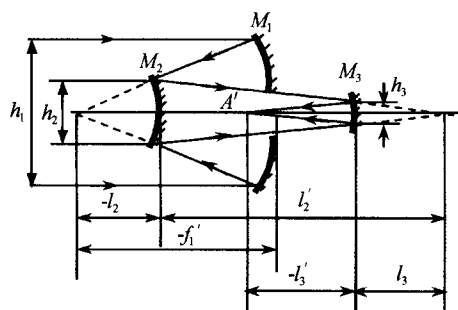


图 1 共轴三反系统

Fig. 1 Optical schematic of three-mirror reflective system

次镜对主镜的遮拦比

$$\alpha_1 = l_2 / f'_1 \approx h_2 / h_1 \quad (1)$$

第三镜对次镜的遮拦比

$$\alpha_2 = l_3 / l'_2 \approx h_3 / h_2 \quad (2)$$

次镜的放大率

$$\beta_1 = l'_2 / l_2 = u_2 / u'_2 \quad (3)$$

第三镜的放大率

$$\beta_2 = l'_3 / l_3 = u_3 / u'_3 \quad (4)$$

作为望远镜系统有, $l_1 = \infty, u_1 = 0$

如图 1, 设光线方向从左到右为正, 则有

$$d_1 < 0, d_2 > 0, d_3 < 0 \quad (5)$$

对于反射系统, 有 $n_1 = n'_1 = n_2 = n'_2 = n_3 = n'_3 = 1, n_1 = n_2 = n_3 = -1$, 令 $h_1 = -1, \theta = -1$. 由参考文献[5]知, 当三个反射镜都为二次曲面时, 系统有 8 个变量(两个间隔, 三个半径, 三个非球面系数), 满足了总焦距和校正主要像差后, 有充分的剩余变量可以用来满足中心遮拦、工作距等外形尺寸的约束要求或降低系统的高级像差.

2 设计实例

现要求设计一种空间光学系统. 其设计要求为焦距 $f=1000$ mm, 相对孔径 $D/f=1/4$, 视场角 $2\omega=3^\circ$ 系统的观测波段为可见光波段, 探测器为 $10 \mu\text{m}$ 的 CCD.

考虑到该系统为空间光学系统, 应尽量使系统

结构小型化. 另外, 此设计要求相对孔径较大, 视场也较大, 对像质要求也较高, 适合采用三镜反射式系统. 中间成像的二次成像结构具有相对中心遮拦小的优点, 但经过实际设计结果表明, 该种结构只适合于小视场使用, 加大视场后像质降低很快. 若将该系统在同轴的基础上离轴, 即可解决这一问题, 最后确定选用系统中间不成像的一次成像结构. 为使系统结构小型化, 故在本设计中将光阑位置定在主镜上, 即 $x_1 = y_1 = 0$.

由文献[1]知, α_1 值的增大将增大高级球差, 对其他像差则有利; 考虑加工难度及对像差的影响, 设主镜对次镜的遮拦比 $\alpha_1 = 0.25$, 反射镜 M_1 的半径 $r_1 = 2 \times D/F$. 为简化初始值计算, 分析各面曲率半径对场曲的影响可知, 各面对 S_N 的贡献量大小只与各面曲率半径成反比, 且有主镜和三镜产生 S_N 与次镜产生的 S_N 符号相反. 因此, 选择 r_1, r_2, r_3 使

$$1/r_1 + 1/r_3 = 1/r_2$$

即可校正 S_N .

根据上述方法, 经过反复计算得到共轴三反射系统初始数据见表 1.

表 1 共轴三反射系统初始数据

No.	R	d	$-e^2$
1	-2000	-500	-8.63
2	-666.7	500	-0.445
3	-1000	-750	2.67

经分析, 解出的初始结构成像质量较差, 需进行初步优化. 为保证系统结构的合理性, 在优化过程中, 保持系统结构 d_1, d_2 参量不变, 以 $r_1, r_2, r_3, e_1^2, e_2^2, e_3^2$ 为变量进行优化, 得到成像质量有所提高的同轴结构. 优化后共轴三反射系统数据见表 2.

表 2 优化后共轴三反射系统数据

No.	R	d	$-e^2$
1	-2342.68	-525	-8.43
2	-629.52	606	-0.45
3	-1122.37	-738.4	2.8

其 MTF 值如图 2. 可以看出共轴系统的光学传递函数数值在边缘视场低于 0.2, 有待进一步提高.

由图 1 可以看出通过视场角离轴, 可消孔径中心遮拦, 在增加通光量的同时提高像质. 将主镜, 三镜及像面离轴, 经过优化计算得系统主要结构参量如表 3.

表 3 离轴三反射系统数据

No.	R	d	$-e^2$
1	-2466.45	-525	-8.5362
2	-769.82	606	-0.4494
3	-1158.68	-738.4	2.76

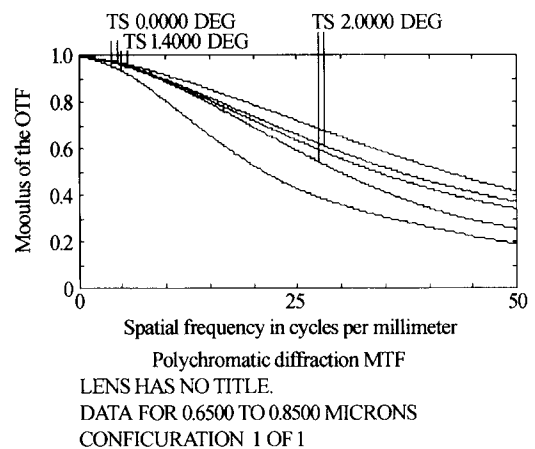


图 2 共轴系统的传递函数数值
Fig. 2 MTF curve of on-axis system

最终的 MTF 值如图 3. 由于在重新设计过程中, 对镜面像实施了离轴和倾斜, 最终的成像质量比同轴系统有了很大提高. 其中, 主镜为双曲面, 次镜为椭球面, 三镜为扁椭球面. 系统在像空间呈远心光路, 像平面具有良好的成像质量, 通光孔径不受遮拦. 比较图 2, 图 3 可以看出, 离轴的设计将系统 MTF 值从原来的 0.2 提高到了 0.4, 显著改善了像质.

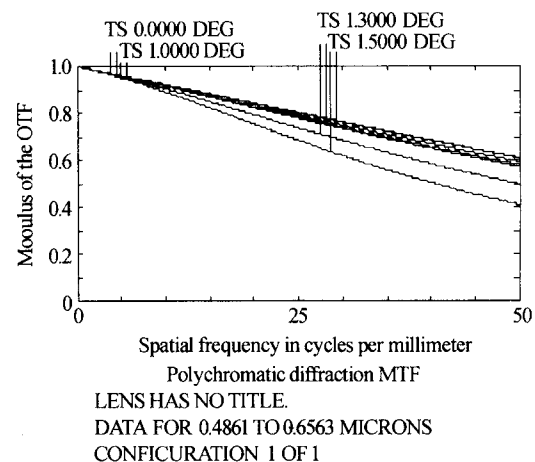


图 3 离轴系统的传递函数数值
Fig. 3 MTF curve of off-axis system

通过实际优化平衡发现:

1. 在像差校正方面: 1) 加大各镜间隔及各镜焦距, 有利于降低高级球差, 但加大了系统体积和重量; 2) α_1 的取值对视场高级球差和视场高级慧差影响较小, 对孔径高级球差和高级像散有较大影响, 且随着 α_1 的增大, 孔径高级球差变大, 高级像散变小; 3) 在初级像差的平衡中, $-e_1^2$ 对轴上球差的校正效果明显, $-e_2^2$ 对子午慧差和球差、正弦差、子午场曲的校正相互制约, $-e_3^2$ 对子午场曲和慧差的校正相互制约; 4) 视场高级慧差与视场高级球差、高级像散相互矛盾, 应综合考虑.

2. 在结构方面的影响: 1) 在三反射系统中, 光阑位置对像质的影响不大. 为使结构简洁, 本例中

选择主镜口径为光栏;2)对于中间不成像结构,无论是对同轴系统还是离轴系统都不能将间隔 d_1, d_2 作为变量进行优化,否则将大大增加系统间隔值,使系统结构成倍增大;3)此时离轴量不应再作为优化变量,而只能手动,否则系统会减小离轴量,趋向于同轴系统来提高像质。

3 结论

对于中间成一次像的三反射系统,该系统很好地运用了光学设计中的对称法则,具有很强的像差校正能力。在全视场范围内具有较好的成像性能,系统结构较为紧凑,其长度约为焦距的 $1/3$,但由于没有一次像面,对系统杂光的抑制较有一次像面的系统要差些。采用系统离轴的方法,在避开中心遮挡、改善了像质的同时,保持了反射镜系统小型化、轻量化的特色。另外,随着非球面工艺技术的进步,本文设计中采用的非球面,使得光学系统在同样的技术要求下更简洁、轻便。

参考文献

- 1 刘新平,杨建峰.折轴三反射镜成像光学系统结构研究.光子学报,1998,27(1):73~76
- 2 Liu X P, Yang J F. *Acta Photonica Sinica*, 1998, 27(1): 73~76
- 3 Heffernan K J, Heiss J E, et al. The UVISI instrument. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, 1996, 17(2): 198~214
- 4 樊学武,马卫红,陈荣立,等.具有二次像面的三反射光学系统的研究.光子学报,2003,32(8):1000~1003
- 5 Fan X W, Ma W H, Chen R L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 1000~1003
- 6 杨建峰,安葆青,薛鸣球,等.大视场三反射非共轴光学系统研究.光子学报,1997,26(3):277~281
- 7 Yang J F, An B Q, Xue M Q, et al. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(3): 277~281
- 8 潘君骅.光学非球面的加工与检验.北京:科学出版社,1994.41~42
- 9 Pan J H. *Fabrication and Testing of Optical Asphere*. Beijing: Science Press, 1994. 41~42
- 10 Howard J E. Imaging properties of off-axis parabolic mirror. *Applied Optics*, 1979, 18(15): 2714~2720
- 11 Barry J R. Wide field of view three-mirror telescopes having a common optical axis. *Optical Engineering*, 1988, 27(12): 1046~1050

A Novel Design of Off-axis Three-mirror Reflective Optical System

Bu Jiangping^{1,2}, Tian Weijian¹, Yang Xiaojun^{1,2}, Sun Aijuan^{1,2}, Liu Wei^{1,2}

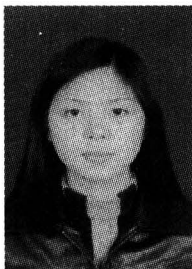
¹ Lab of Information and Photonic Technology, State Key Lab of Transient Optics Technology, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2005-01-02

Abstract The optical system with compact structure, wide field of view and long focal length is discussed and an off-axis three-mirror reflective optical system with 1000 mm focal length, aperture of $f/4$ and 3° field of view is designed on the basis of geometry optical theory. Moreover, the infection of system and aberration made by optimize method and parameter is discussed.

Keywords Space optics; Reflective system; Aspheric surface; Off-axis



Bu Jiangping was born in 1978 and graduated from Xi'an Institute of Technology in 2000. Then she became a graduate student of Graduate School of The Chinese Academy of Sciences in optics. Now, her research job is long focal length and large relative aperture optical system based on off-axis and reflective at Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of Chinese Academy of Sciences.