

矢量波像差理论在无遮拦三反光学系统设计中的应用

邹刚毅, 樊学武, 庞志海, 凤良杰, 任国瑞

(中国科学院西安光学精密机械研究所 空间光学研究室, 陕西 西安 710119)

摘要: 传统的无遮拦三反射镜光学系统设计是先设计轴对称反射系统, 然后通过偏光瞳、偏视场或者两者结合的方法来实现系统无遮拦设计, 系统中不可避免地用到了离轴非球面反射镜。以矢量波像差理论的相关结论出发, 将反射镜的倾斜作为系统的优化变量, 利用轴对称非球面反射镜实现了无遮拦三反射系统的设计。分析了此种系统的设计思路及步骤, 设计了焦距为 1 000 mm、视场角为 $10^\circ \times 20^\circ$ 、 F 数为 10 的三反射镜光学系统, 系统结构紧凑, 成像质量接近衍射极限。该系统与其他无遮拦三反光学系统相比, 最大的优点是系统中的非球面均为轴对称反射面, 极大地降低了系统成本。

关键词: 光学设计; 空间光学; 反射系统; 矢量波像差理论; 无遮拦三反系统

中图分类号: TB133 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0569-05

Design of unobscured three-mirror optical system by applying vector wavefront aberration theory

Zou Gangyi, Fan Xuewu, Pang Zhihai, Feng Liangjie, Ren Guorui

(Space Optics Laboratory, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China)

Abstract: The traditional unobscured three-mirror optical system is an intrinsically rotationally symmetric optical system with an offset aperture stop, a biased input field, or both of them, so off-axis sections of rotationally symmetric aspheric parent surface are ineluctable. Using the conclusion of vector wavefront aberration theory, a new unobscured three-mirror system by tilted the rotationally symmetric aspheric mirror was presented. The design reason and step of this system was analyzed, and then a system with effective focal length of 1 000 mm, field of view of $10^\circ \times 20^\circ$ and F -number 10 was designed. The volume of system (Length \times Wide \times Height) less than 350 mm \times 350 mm \times 120 mm and image qualities of the example are near diffraction limit. Compared with other unobscured three-mirror system, the most prominent advantage of this system is that using tilted rotationally symmetric aspheric mirror to achieve unobscured style, thus reducing cost of the system.

Key words: optical design; space optical; reflective system; vector wavefront aberration theory; unobscured three-mirror optical system

收稿日期: 2013-06-09; 修订日期: 2013-07-11

基金项目: 国家“863”计划(Y112G81800); 青年科学与基金项目(Y111B6150Z)

作者简介: 邹刚毅(1983-), 男, 博士生, 主要从事光学系统设计、检测等方面的研究。Email: zougangyi@opt.ac.cn

导师简介: 樊学武(1972-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光学系统设计、光学检测装调等方面的研究。Email: fanxuewu@opt.ac.cn

0 引言

三反射光学系统^[1-2]具有高分辨率、大视场、轻量化、宽谱段、结构紧凑等优点,因此被广泛应用于空间对地观测。但是轴对称反射光学系统存在的中心遮拦不仅会损失系统光通量,而且还降低了系统中、低频的衍射调制传递函数值。为解决传统轴对称三反光学系统中心遮拦的问题,科研工作者提出了离轴无遮拦三反^[2-3]光学系统,系统的无遮拦^[1-5]主要是通过对大口径的轴对称反射光学系统进行偏光瞳、偏视场或者两者结合的办法来实现,因此系统中不可避免地用到离轴非球面,极大地增加了系统的成本与制造难度。

文中介绍了利用矢量波像差理论实现无遮拦三反光学系统的设计方法,该方法以共曲率中心的三球面反射系统作为设计起点,将轴对称反射镜倾斜作为优化变量的方式,实现了不含离轴光学元件的无遮拦反射光学系统设计。

1 矢量波像差理论

矢量波像差理论^[6-8]的基础是:像面上整个光学系统的像差依然是各光学元件像差贡献之和;单个光学元件的像差分布关于连接该元件曲率中心和光瞳中心的直线旋转对称。当理想旋转对称光学系统中的光学元件存在失调(光学元件存在偏心与倾斜,文中仅考虑倾斜)时,系统为非共轴光学系统,利用矢量波像差理论来描述系统的初级像差^[6]形式如下(仅考虑球差、彗差、像散)。

$$W = \underbrace{\sum_j W_{040j} (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})^2}_{\text{Spherical}} + \underbrace{\sum_j W_{131j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}] (\vec{\rho} \cdot \vec{\rho})}_{\text{Coma}} + \underbrace{\frac{1}{2} \sum_j W_{222j} [(\vec{H} - \vec{\sigma}_j) \cdot \vec{\rho}]^2}_{\text{Astigmatism}} \quad (1)$$

式中: \vec{H} 和 $\vec{\rho}$ 为视场向量和光瞳向量; j 表示光学系统中光学元件数; W_j 分别标表示轴对称系统中各元件球差、彗差、像散系数;向量 $\vec{\sigma}_j$ 表示光学系统各元件像差中心与理想状态时的偏离量(见图 1)。

由公式(1)可知,元件倾斜时不会引入新的像差,仅仅是系统中各元件像差中心不再重合,系统像差依然是各个元件像差贡献之和;单个元件的倾斜不影响球差;单个倾斜元件的彗差贡献与视场成线

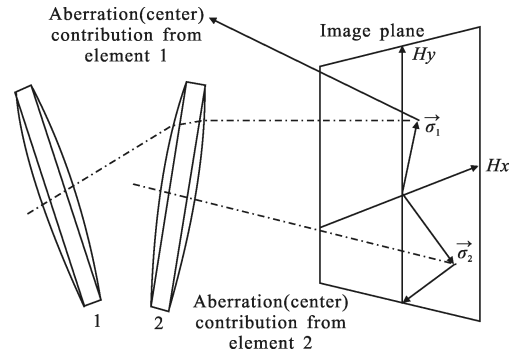


图 1 轴对称光学元件倾斜时像差贡献示意图

Fig.1 Conceptual drawing of aberration centers from individually rotationally symmetric elements

性关系;单个倾斜元件的像散贡献与视场成平方关系。K.P.Thompson^[9]指出含倾斜光学元件光学系统的彗差(矢量)可以认为是不同斜率(表示不同的彗差系数 W_{132})锥面相叠加的结果,像散(矢量)是不同的旋转抛物面(不同的像散系数 W_{222})相互叠加的结果,系统中彗差最多有一个零点,像散最多有两个零点(见图 2)。

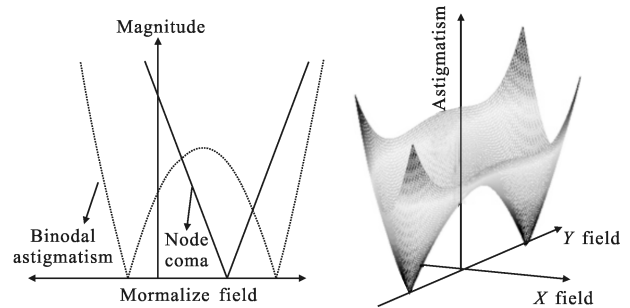


图 2 光学系统彗差、像散零点示意图

Fig.2 Conceptual drawing zero point of coma and astigmatism

当光学元件倾斜(偏心引入离轴量,因此不作考虑)时,系统的线性彗差表现为单零点,而二次像散表现为双零点。优化系统中各元件倾斜使得系统彗差的零点与像散零点重合,以重合点为中心选取适当的视场即可完成无遮拦设计,此时的光学系统像差形式与轴对称光学系统类似。

2 设计实例

由上述分析可知,如果将三反系统中反射元件的倾斜作为优化变量时,系统的彗差存在一个零点,像散存在两个零点。参考文献[6]中指出,包含倾斜元件系统的彗差零点(视场归一化)用矢量表示:

$$\vec{a}_{131} = \sum_j W_{131j} \vec{\sigma}_j / \sum_j W_{131j} \quad (2)$$

同时得到了像散两个零点中心点的矢量表达式:

$$\vec{a}_{222} = \sum_j W_{222j} \vec{\sigma}_j / \sum_j W_{222j} \quad (3)$$

Rogers^[8]通过分析发现,如果球面反射系统各反射镜的曲率中心重合,那么包含倾斜反射面系统的彗差零点位于两个像散零点的中心点上,即 $\vec{a}_{131} = \vec{a}_{222}$ 。此时如果优化反射元件的倾斜使得彗差零点无限靠近像散零点,则系统中的彗差零点与像散的两个零点重合,光学系统像差形式与轴对称光学系统类似。因此文中将共曲率中心球面三反射系统作为设计起点。

参考文献[10]给出了详细的共轴三反射设计公式,由于起始系统是共曲率中心,系统中主次镜、次镜三镜的间隔为相邻两个反射面的半径差,将此条件带入文中公式并取两个遮拦比 α_1, α_2 为1/3、1/2,计算焦距为1000 mm、 F 数为10、工作波段为0.45~0.75 μm 可见光波段、CCD像素尺寸大小为10 μm 的系统初始参数如表1所示。

表1 系统初始参数

Tab.1 Start system parameters

	R	Thickness	K
Primary mirror	-1 400.00	-466.67	0
Secondary mirror	-933.33	233.34	0
Third mirror	-1 166.67	-166.7	0

在CODE V中将系统主镜、次镜分别倾斜(文中倾斜反射镜均绕X轴旋转)10°、-20°系统(图3(a))的彗差与像散用CODE V的像差全视场显示(图3(b)、3(c))。

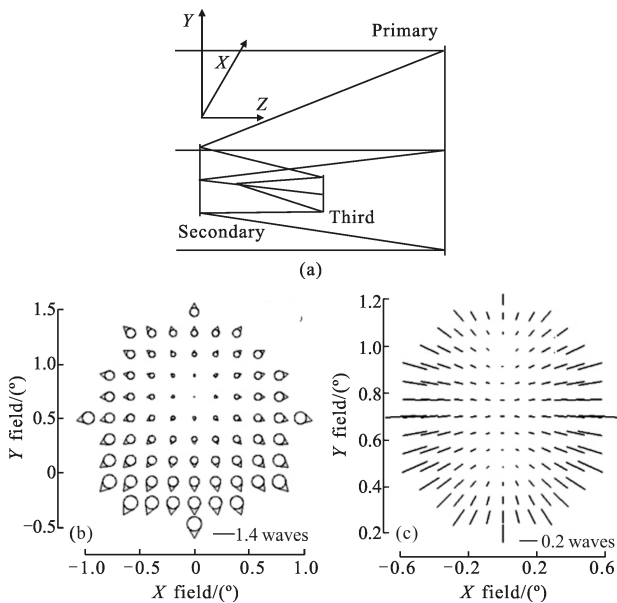


图3 含倾斜元件的系统与系统的彗差、像散

Fig.3 System with tilted elements and the aberrations of coma and astigmatism

分析图3(b)、3(c)可知,系统的彗差零点与两个像散零点的中心点重合,系统的彗差零点与像散零点均不在中心视场。若需要系统次镜无遮拦,需要继续增加主镜的倾斜量才能将次镜移到光束之外,同时优化次镜、三镜倾斜使得系统无遮拦(仅优化主、次、三镜的倾斜)并保证中心视场的彗差为零,利用CODE V宏语言编写自动优化程序,可得系统如图4所示。

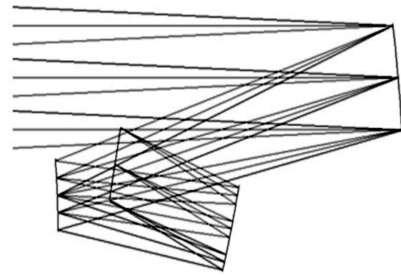


图4 倾斜优化后的三反系统

Fig.4 Three mirror system with tilted optimization

通过在优化过程中发现,仅以倾斜作为系统的优化变量时,系统中反射镜之间可以不发生遮挡,彗差零点不与像散零点重合,但是系统的像面在光路中,且系统的像质不能满足要求。因此需要引入更多的变量来优化系统(半径、间隔、二次曲面系数),使得系统中各反射镜之间不挡光,并且将系统像面移出光路之外,保证中心视场的彗差、像散为零,修改优化程序继续优化获得最终的系统结构如图5所示,参数如表2所示。

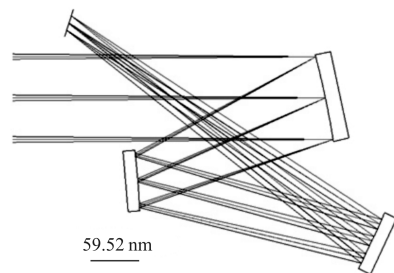


图5 最终系统示意图

Fig.5 Final three mirror system

表2 最终系统参数

Tab.2 Final system parameters

	R	Thickness	Tilt	K
Primary mirror	-1210.10	-249.64	11.865 7	-3.013 0
Secondary mirror	-978.30	294.64	-19.115 1	-19.115
Third mirror	-1 657.56	-454.43	-10.590 5	-25.024
Image	Infinity	0.000	17.633 6	0.000

系统中主镜、次镜、三镜的非球面度如图 6 所示,系统的 MTF 曲线如图 7 所示,点列图如 8 所示,畸变如

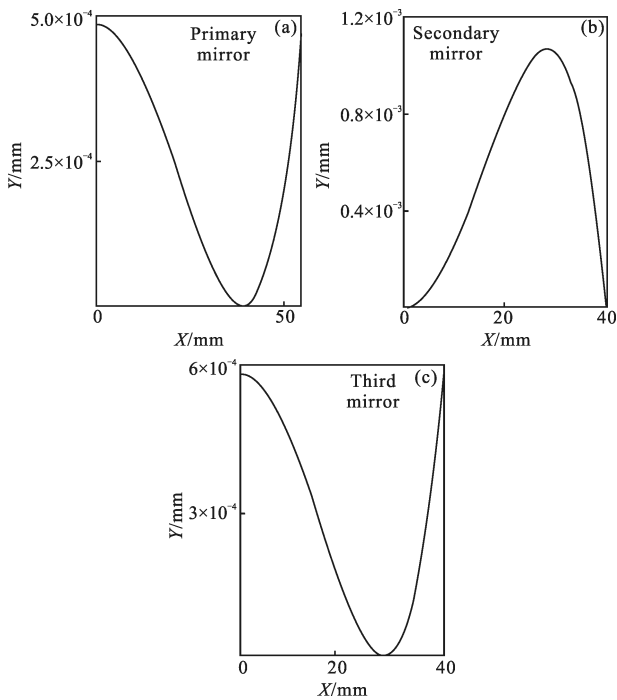


图 6 系统元件非球面度

Fig.6 Aspheric departure of three mirror system

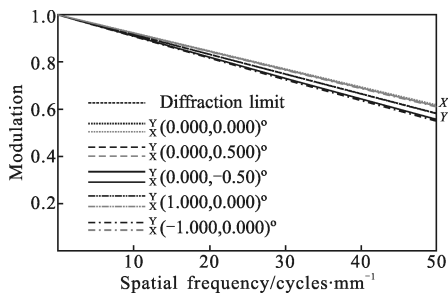


图 7 最终系统 MTF 曲线

Fig.7 Modulation transfer function curve of final system

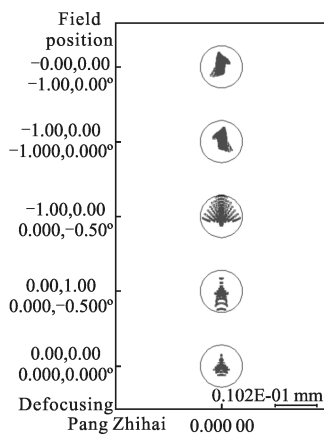


图 8 最终系统点列图

Fig.8 Spot diagram of final system

图 9 所示。由图 6 可知,系统中主、次、三镜的最大非球面度分别小于 0.5、1.1、0.6 μm ,元件制造难度小。而由系统的 MTF 曲线图可知,系统各视场 50 lp/mm 处的 MTF 值均大于 0.55。由系统的点列图可知,各视场的像斑直径均小于 10 μm 。由图 8 可知,在 $10^\circ \times 20^\circ$ 的视场内,系统的最大畸变为 0.49%,系统的像质良好,接近衍射极限。

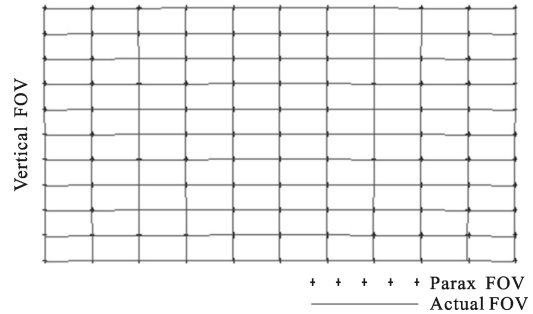


图 9 最终系统畸变

Fig.9 Distortion of the final system

3 结论

文中利用矢量波像差理论的相关结论,介绍了一种利用轴对称元件实现无遮拦三反光学系统的设计方法,以共曲率中心的三反射球面系统作为设计的起始结构,将系统中的反射元件的倾斜作为优化变量,实现了不含离轴元件的无遮拦三反光学系统的设计。通过设计实例可以获得像质良好、结构紧凑的光学系统,满足空间对地观测系统工作要求。该系统与其他无遮拦的三反光学系统相比,最大的优势是系统中的非球面均为旋转对称反射面,在加工费用与难度上减小了很多。

参考文献:

[1] Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei, et al. Optical design of the uncoaxial three mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2680-2683. (in Chinese)
郭永祥, 李英才, 梁天梅, 等. 一种大视场离轴三反光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2680-2683.

[2] Zhang Liang, An Yuan, Jin Guan. Optical design of the uncoaxial three mirror system with wide field of view and long focal length [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2007, 36(2): 278-280. (in Chinese)
张亮, 安源, 金光. 大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统

- 的设计[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(2): 278-280.
- [3] Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 706-709. (in Chinese)
宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军. 离轴三反射镜光学系统研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 706-709.
- [4] Li Huan, Xiang Yang. Optical design of off-axis three-mirror telescope systems of imaging spectrometers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 500-504. (in Chinese)
李欢, 向阳. 成像光谱仪离轴三反望远系统的光学设计[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 500-504.
- [5] Ding Xuezhuan, Wang Xin, Lan Weihua, et al. Design of four-mirror reflective anastigmat optic system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(2): 319-321. (in Chinese)
丁学专, 王欣, 兰卫华, 等. 离轴四反射镜光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(2): 319-321.
- [6] Thompson K P. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. *J Opt Soc Am A*, 2005, 22(7): 1389-1401.
- [7] Rogers J R. Techniques and tools for obtaining symmetrical performance from tilted-component systems [J]. *Opt Eng*, 2000, 39(7): 1776-1787.
- [8] Shark R V, Thompson K P. Influence of alignment error of a telescope system on its aberration field[C]//SPIE, 1980, 251: 146-153.
- [9] Thompson K P. Aberration fields in tilted and decentered optical system[D]. US: University of Arizona, 1983.
- [10] Pan Junhua. The Design, Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004: 130-140. (in Chinese)
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004: 130-140.