

离轴三反成像光谱仪光学系统设计

张庭成, 廖志波

(北京空间机电研究所, 北京 100190)

摘要: 高质量的成像光谱仪光学系统必须具备大线视场、大相对口径、宽光谱成像、体积小、重量轻等优点, 因此离轴全反射系统成为该领域的一个研究方向。介绍了一种基于赛德尔像差理论的大线视场、大相对口径离轴三反光学系统的设计方法。该方法通过对初级像差方程组进行约束优化, 求得满足要求的初始结构参数, 并在优化的过程中, 不断地调整系统中各个镜子的偏心和倾斜, 在保证成像质量的前提下, 消除系统的遮拦。最后的设计结果表明了这种方法的有效性和可行性。

关键词: 成像光谱仪; 赛德尔像差理论; 离轴三反光学系统; 结构参数; 无遮拦

中图分类号: O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)07-1863-03

Design of off-axis reflective optical system with 3 mirrors used in imaging spectrometers

Zhang Tingcheng, Liao Zhibo

(Beijing Space Mechanics & Electronics Institute, Beijing 100190, China)

Abstract: The high-qualified optical systems which are used in imaging spectrometers must have some advantages, such as large linear FOV, large relative aperture, wide-spectral imaging, light weighted, etc, which makes the off-axis all reflective optical systems an important research direction in this field. A method for the design of off-axial reflective 3-mirror optical system with large linear field of view(FOV) and large relative aperture was described in this paper. The method was based on the 3rd-order aberration theory. After the constrained optimization of a set of Seidel aberration coefficient functions, the designer could achieve the initial construction parameters of the optical system, i. e. the radii and separations of lenses. And during the designing process, decenters and tilts of mirrors were adjusted continuously to eliminate the obscurations under the premise of assurance of image quality. In the end, the design results were given, and the MTF curves prove the feasibility of this method.

Key words: imaging spectrometer; Seidel aberration theory; off-axial reflective optical system; construction parameters; without obscuration

收稿日期: 2012-11-17; 修订日期: 2012-12-19

作者简介: 张庭成(1982-), 男, 工程师, 博士, 主要从事成像光学系统设计方面的研究。Email: tczhang1217@gmail.com

0 引言

成像光谱仪是航天遥感器的一个重要类别,主要由成像系统和光谱仪系统组成,前者不仅直接决定了光谱仪的成像质量和成像谱段,而且也基本决定了光谱仪的体积和重量。因此,开展高像质、宽谱段、小体积、重量轻的成像光学系统设计的研究,对于提高成像光谱仪的性能具有重要的意义。

可用于成像光谱仪的光学系统主要有透射式、折反式以及全反式三种,其中反射式光学系统具有透过率高、无色差、成像谱段宽、体积小、重量轻等优点^[1],因此被广泛地应用于各种空间遥感器的光学系统中^[2-4],如成像光谱仪^[5]。

文中提出了一种基于赛德尔像差理论的离轴三反光学系统的设计方法,给出了该方法实现的理论依据和具体的操作步骤,包括初始结构的求解、离轴量的确定等。最后给出了一个依据文中所提方法进行的设计实例,其相对孔径为0.3,成像质量达到了衍射极限。

1 三反系统的赛德尔像差系数

虽然赛德尔像差理论只是一个近似的结果,但是它可以用简单的解析表达式来描述系统的各种初级像差,使得人们对光学系统成像质量有一个完整把握。由于所选参数不同,赛德尔像差系数的表达式也多种多样^[6]。这里选取各个镜子的焦距值 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 和垂轴放大率 β_2 、 β_3 作为自变量,并将孔径光阑设置在次镜上,具体的推导过程如下:

(1) 将各个镜子之间的间隔表示为 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 β_2 、 β_3 的函数;

$$\begin{cases} d_{12}=f_1'(1-\beta_1)-f_2'\left(1-\frac{1}{\beta_2}\right)<0 \\ d_{23}=f_2'(1-\beta_2)-f_3'\left(1-\frac{1}{\beta_3}\right)>0 \end{cases} \quad (1)$$

(2) 对第一和第二辅助光线进行逐面的傍轴追迹^[7],取得它们在各个面上的投射高、入射角、出射角等高斯参数的解析表达式;

(3) 在已得到的高斯参数解析表达式的基础上,推导出系统在不同焦距状态下,各个面的像差特性参数 P 、 W ^[8];

(4) 根据初级像差的定义和性质^[7,9],最终推导出由 f_1' 、 f_2' 、 f_3' 、 β_2 、 β_3 表示的系统各个赛德尔像差系数

的解析表达式:

$$\begin{cases} S_1=S_1(f_1', f_2', f_3', \beta_2, \beta_3) \\ S_2=S_2(f_1', f_2', f_3', \beta_2, \beta_3) \\ S_3=S_3(f_1', f_2', f_3', \beta_2, \beta_3) \\ S_4=S_4(f_1', f_2', f_3', \beta_2, \beta_3) \end{cases} \quad (2)$$

此时,系统的焦距值 F 可以表示为:

$$F=f_1' \beta_2 \beta_3 \quad (3)$$

2 设计思路

全反射光学系统可以分成两类,一类是带有中心遮拦的共轴系统;一类是无遮拦的离轴系统。前者由于遮拦的存在,限制了系统视场角的进一步扩大,无法满足大视场的要求;后者比较常用的是三反离轴系统,因为其结构相对简单,且与低阶非球面配合使用,也可以做到大相对口径和大视场。

目前,将共轴三反系统优化为离轴三反系统的手段主要有两种:一是将系统的光阑离轴,此类系统的光阑多位于主镜上或主镜之前。缺点是视场较小,且各个镜子的旋转和偏移量较大,像差校正比较困难;二是将系统的视场离轴,此类系统的光阑多位于次镜上或其附近。优点是在各个镜子引入较小离轴量的情况下,通过简单优化就可以获得大视场和较好的成像质量,文中采用第二种优化设计方法。

另外,在优化的过程中,需要对各个镜子之间的间隔和系统的总长度进行严格的控制,应尽量保持各个镜子的间隔不会有太大的变化,否则系统的像差会有较大幅度的变化,给像差的平衡带来困难^[10]。

3 设计实例

文中举例设计一个大口径离轴三反系统,其入瞳直径为33.3 mm,系统焦距值为100 mm,视场角为 $50^\circ \times 2.9^\circ$,成像波段为可见光到远红外,要求系统在各个视场下都能够达到衍射极限。

根据前面所述方法进行离轴和优化,最终的结果如表1所示。图1给出了系统的三维结构示意图,图2为系统的MTF曲线。由图2可知,系统在15 lp/mm处MTF的最小值为60%,且系统在各个视场下都能够达到或者接近衍射极限。为了降低加工和装调的难度,文中在设计过程中,将主、次镜的非球面系数分别控制在4、6阶以内。

表 1 离轴三反系统的结构参数

Tab.1 Constructure parameters of off-axis reflective system with 3 mirrors

Mirror	Radius/mm	Conic, 4th, 6th aspheric coefficient	Separation/mm
M1	262.131	3.551, 1.803e-009	-191.729
M2(STOP)	325.709	-0.397, 1.849 7e-009, 1.478 7e-015	166.993 9
M3	-966.599	-4.802	-150.481



图 1 离轴三反系统结构示意图

Fig.1 Layout of off-axis reflective system with 3 mirrors

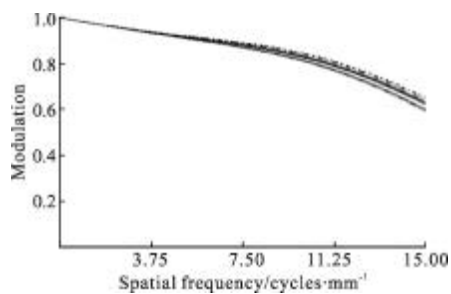


图 2 离轴三反系统的 MTF 曲线

Fig.2 MTF of off-axis reflective system with 3 mirrors

4 结论

文中设计出了一个大大口径、大线视场反射式光谱仪成像光学系统。首先从三阶赛德尔像差理论入手，通过优化计算约束方程组的方法来求解系统的初始结构参数，同时给出了三反离轴系统优化计算的一般思路。文中的光学系统不仅适用于宽视场成像光谱仪，也可用于采用线阵探测器推扫成像的其他光学成像系统。

参考文献:

[1] Cong Shanshan. The design of reflective aerospace optical system with large field of view and large focal length [D].

Changchun: Changchun Institute of Technology, 2008: 3-4. (in Chinese)

丛杉珊. 大视场、长焦距、反射式空间光学系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2008: 3-4.

- [2] Ding Xuezhuan, Liu Yinnian, Wang Xin, et al. Design of reflective optic system used in aerospace remote sensing [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(5): 253-256. (in Chinese)
- 丁学专, 刘银年, 王欣, 等. 航天遥感反射式光学系统设计 [J]. *红外技术*, 2007, 29(5): 253-256.
- [3] Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, et al. Design of three-reflective-mirror system used in space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(2): 216-219. (in Chinese)
- 常军, 翁志成, 姜会林, 等. 用于空间的三反射镜光学系统设计 [J]. *光学学报*, 2003, 23(2): 216-219.
- [4] Zhang Liang, An Yuan, Jing Guang. 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.
- [5] 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镜系统的光学设计 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 500-504.
- [6] Zou Meifang, Chang Jun, Talha M M, et al. Design and analysis of the four-mirror optical system [J]. *Optic*, 2010, 121(20): 1900-1903.
- [7] Warren J Smith. *Modern Optical Engineering* [M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2007: 31-36.
- [8] Yuan Xucang. *Optical Design* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 84. (in Chinese)
- [9] Zhang Tingcheng, Liu Liping, Chang Jun, et al. Design of infrared zoom system with 4 reflective mirrors [J]. *J Infrared Millim Waves*, 2010, 29(3): 196-200. (in Chinese)
- 张庭成, 刘莉萍, 常军, 等. 四反射镜红外变焦距系统设计 [J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(3): 196-200.
- [10] Wang Lihui, Yu Yunjian, Lu Duanjun. Optical design of IR imaging system with large linear field of view and large relative aperture [J]. *J Infrared Millim Wave*, 2008, 27(1): 39-41. (in Chinese)
- 王立辉, 郁蕴健, 陆段军. 大线视场大相对口径红外成像系统的光学设计 [J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(1): 39-41.