

· 光学设计与制造 ·

## 用于高分辨率光谱仪的离轴三反射镜光学系统的设计

王美钦<sup>1,2</sup>, 王忠厚<sup>1</sup>, 白加光<sup>1</sup>, 胡炳燊<sup>1</sup>, 魏儒义<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 面对空间遥感, 尤其在目标特性的精细化识别中, 要求成像光谱仪具有高灵敏度、高光谱分辨率与高能量通过力等优点. 在同轴三反射光学系统的基础上, 采用视场离轴方式, 设计了一个三镜无遮拦全反射光学系统. 次镜和光阑重合, 无中间像, 实现了高分辨率、大视场、长焦距的要求. 光学系统的基本参数为: 焦距  $f' = 1\ 600\ \text{mm}$ , 视场角为  $2\ \omega = 18^\circ \times 0.148^\circ$ , 相对孔径为  $1/10$ , 3个反射面均为二次曲面. 设计结果表明, 成像质量接近衍射极限, 用此方法设计的光学系统在航天遥感领域具有很好的应用前景.

**关键词:** 空间光学; 离轴三反系统; 光学设计; 长焦距

**中图分类号:** TH74; O435.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-1255(2010)01-0029-04

## Design of Uncoaxial Three-reflective Optical System Used in Imaging Spectrometer with High Spectrum Resolution

WANG Mei-qin<sup>1,2</sup>, WANG Zhong-hou<sup>1</sup>, BAI Jia-guang<sup>1</sup>, HU Bing-liang<sup>1</sup>, WEI Ru-yi<sup>1</sup>

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** With regard to the remote sensing, especially the subtle discriminating of the target, the imaging spectrometer with high delicacy, high spectrum resolution and super throughput are required. Based on the coaxial three-reflective optical system, an off-axial three-reflective optical system with no obstructing between three mirrors was designed by means of field of view off-axis form. The aperture stop of the system was on the secondary mirror, and with no middle image the requirement of high resolution, wide field of view, long focal length was satisfied. The capital parameters of the optical system are  $f' = 1\ 600\ \text{mm}$ ,  $2\ \omega = 18^\circ \times 0.148^\circ$ ,  $F/\text{number} = F/10$ , and all surfaces are conicoid. The results indicate that the quality of imaging has arrived at the diffraction-limitation, and the optical system designed by this method has good application prospect on space sensing.

**Key words:** space optics; the uncoaxial three-reflective system; optical design; long focal length

光谱成像技术是融合光谱技术与成像技术为一体, 既能对目标成像又可以测量目标波谱特征, 实现对目标特性的综合探测与识别. 面对空间遥感, 对目标特性的精细化识别中, 要求成像光谱仪具有高灵敏度、高分辨率与高能量通过力等优点. 当工作轨道高度和探测器尺寸一定时, 增大焦距可以提高对地

面像元的分辨率. 在长焦距的光学系统中, 折射系统需要采用特殊的材料和结构来消除二级光谱色差, 而反射系统不产生色差, 孔径、焦距都可以做得很大, 且宜于轻量化. 虽然两反系统结构形式简单, 但系统自变量少, 只有轴上点成像符合理想, 视场不能做得很大. 不能满足大视场、大相对孔径的要求. 在

收稿日期: 2009-12-02

基金项目: 国家自然科学基金(40805013)

作者简介: 王美钦(1984-), 女, 福建莆田人, 硕士研究生, 主要从事光学设计与杂散光方面的研究.

三反系统中,同轴三反射系统虽然结构比较简单,但成像质量受次镜的遮拦影响较大,辐射利用率也不高,降低了光学系统的分辨率,一方面不能有很大的视场,另一方面还要增加口径来保证有一定的接收辐射能量<sup>[1]</sup>.而离轴三反系统不仅能够解决中心遮拦问题而且系统的自变量多达8个<sup>[2]</sup>,解决了光学系统视场问题,同时极大地改善了系统的成像质量.

从同轴三反射式光学系统结构参数的基本计算公式出发,根据高分辨率成像光谱仪的技术指标,设计了一种光谱范围为400~950 nm,焦距为1 600 mm,相对孔径为1/10,视场角为 $2\omega = 18^\circ \times 0.148^\circ$ 的离轴三反射式光学系统,成像质量接近衍射极限.

## 1 设计思想及其步骤

离轴三反射系统是在同轴三反射系统的基础上进行离轴、优化得到的<sup>[3-4]</sup>.离轴方法主要有2种:一是将光阑置于主镜上,光阑离轴;二是将光阑置于次镜上,通过视场的倾斜来避免中心遮拦,光阑不离轴.采用光阑离轴的方法,虽然可以使系统结构变得紧凑,但是在较大视场的情况下,成像质量下降得很快.而视场离轴的三反射系统具有更强的像差校正能力,视场大,成像质量好,比较适合大视场和大相对口径的要求,因此该设计采用视场离轴的三反射镜系统来完成.

如图1所示,一种类型的三反射面非共轴光学系统的初始结构.在选取初始结构时选用无中间成像的结构,因为中间成像的结构在倾斜入射角较小时,像面可能会遮挡入射光线;倾斜入射角较大时,成像质量又会下降,所以视场离轴的三反系统采用无中间像的共轴三反系统作为初始结构.系统的3个反射面都是二次非球面,孔径光阑与次镜重合,无中间像,通过倾斜视场来实现无中心遮拦.

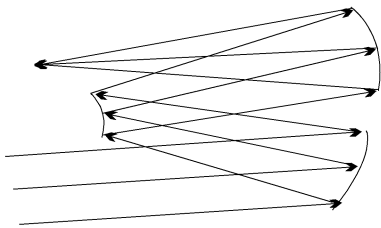


图1 离轴三反光学系统

首先要确定同轴三反射系统的结构参数.一般来说,给定的有关结构方面的条件和系统的长度要求情况下,可以用3个间隔为给定的条件,即把主镜

到次镜的距离 $d_1$ ,次镜到三镜的距离 $d_2$ ,三镜到像面的距离 $d_3$ 作为已知量<sup>[5]</sup>规定光线的入射方向从左到右为正,则, $d_1 < 0$ ;  $d_2 > 0$ ;  $d_3 < 0$ ,则可以得到<sup>[6]</sup>

$$\frac{r_1 r_2 - 2r_2 d_1}{2r_1 - 4d_1 - 2r_2} - d_2 = \frac{1}{f} \quad (1)$$

$$\frac{2(r_1 r_3 - 2r_3 d_1 - r_2 r_3) + 1}{2r_1 r_2} = \frac{d_3}{f} \quad (2)$$

在全反射光学系统中,各个镜面对 $S_{IV}$ 的贡献量的大小只与半径成反比,主镜和三镜的 $S_{IV}$ 与次镜的 $S_{IV}$ 符号相反.因此选择3个合适的半径 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ ,使满足

$$1/r_1 + 1/r_2 = 1/r_3 \quad (3)$$

则可以校正 $S_{IV}$ .把系统的总焦距 $f$ 和给定的3个间隔 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 作为已知量代入式(1)~式(3)中,可以求出3个镜面在顶点处的曲率半径 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ .由 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 和 $f$ 可以求出次镜对主镜的遮拦比 $\alpha_1$ ,第3镜对次镜的遮拦比 $\alpha_2$ ,次镜的放大率 $\beta_1$ ,3镜的放大率 $\beta_2$ .再由求出的 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 、 $\beta_2$ ,可求得3个反射镜面的二次非球面系数 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$ .至此,系统的8个参数 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$ 就全部确定了<sup>[7]</sup>.由于视场离轴三反系统采用的是无中间成像面的原始同轴结构,其轮廓参数应满足: $\alpha_1 > 0$ ;  $\alpha_2 > 0$ ;  $\beta_1 < 0$ ;  $\beta_2 < 0$ ,而且计算时系统焦距应取负值.

求出初始结构参数后,将光阑置于次镜上,在保证焦距为定值的条件下,对系统的结构参数进行微小的优化,即可得到很好的像质.然后中心视场离轴,选取合适的倾斜角,避免中心遮拦,同时适当调节各个镜面的离轴量,使结构更加合理.反复进行优化,直到整个系统无遮拦而且成像质量接近衍射极限为止.在优化过程中,应尽量保持间隔 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 不变,否则像差平衡的结果会大幅度增加 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ,使系统总长度变大.也不能无限地优化视场和各个镜面的离轴量,否则系统会减小离轴量,趋向于同轴系统来达到提高像质,即此时离轴量不应作为优化变量,最好能用手动控制.

考虑到系统结构方面的要求,为了减小系统尺寸,达到小型、轻量化的目的,应使主镜到次镜,次镜到三镜的间隔距离大致相等,这样主镜和三镜可以用同一个基底来固定,同时也可使系统的结构紧凑.其中视场倾斜度可以计算为

$$(-d_1 + l - D/2 \tan \omega) \cdot \tan \omega = D/2\beta$$

$$\text{即 } \omega = \arctan \frac{D/2(1+1/\beta)}{-d_1+l} \quad (4)$$

其中,  $d_1$  为主镜到次镜的距离;  $l$  为入瞳到主镜的距离;  $D$  为入瞳大小;  $\omega$  为视场倾斜角的大小;  $\beta = 1/d_1$  为放大率.

通过设计过程发现,一开始并不能把中心视场的倾斜角设为最大,否则优化工程中很难找到最优解,应该先取较小的倾斜角,并不断优化,使系统逐步达到无遮拦.

## 2 设计结果和性能评价

根据成像光谱仪技术指标和所选用的探测器指标,该光学系统应满足下列技术指标:(1)焦距为 1 600 mm,相对孔径  $D/f = 1/10$ ;(2)视场角:  $x$  方向  $\pm 9^\circ$ ,  $y$  方向  $\pm 0.074^\circ$ ;(3)工作波段: 400 ~ 950 nm;(4)成像质量良好,达到衍射极限.

这是一个长焦距、大视场的光学系统,考虑到系统的工作环境,取  $d_1 = -700$  mm;  $d_2 = 700$  mm;  $d_3 = -800$  mm 通过式(1)~式(3)解得光学系统的初始结构.

根据前面所述的设计步骤进行离轴与优化的操作.选取中心视场的倾斜角为  $-3.5^\circ$ ,优化后的最终结构参数如表 1 所示.

表 1 系统的最终结构参数

	半径 $r/\text{mm}$	间距 $d/\text{mm}$	二次非球面系数 ( $-e^2$ )
主镜	-2 366.352 544	-689.993 411	-1.480 303
次镜	-863.345 300	685.870 657	-1.127 013
三镜	-1 339.974 666	-799.171 699	-0.039 340

从表 1 可以看出,主镜、次镜均为双曲面,三镜为扁椭球面.将中心视场离轴,选取合适的倾斜角,避免中心遮拦,形成如图 2 所示的离轴三反射光学系统,透镜的偏心会产生新的附加像差,主要为离轴彗差和一定量的离轴像散,在此通过第三镜的偏心和像面的偏心来校正.

用调制传递函数(MTF)、点列图和衍射能量分布图来评价光学系统的成像质量.性能分析时,选择如图 3 所示的 1~5 五个视场,这 5 个视场都在  $Y$  轴的右侧,这是因为系统对于图 3 的  $Y$  轴是对称的,只

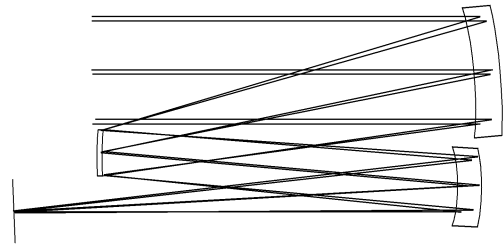


图 2 系统三维结构图

用分析  $Y$  轴右侧的像点就可以了<sup>[8]</sup>.图 3 中各点代表的视场分别为 1( $0^\circ, 0^\circ$ ); 2( $6.3^\circ, 0.074^\circ$ ); 3( $9^\circ, 0.074^\circ$ ); 4( $9^\circ, 0^\circ$ ); 5( $9^\circ, -0.074^\circ$ )这 5 个视场的成像情况基本可以说明整个视场的成像质量.

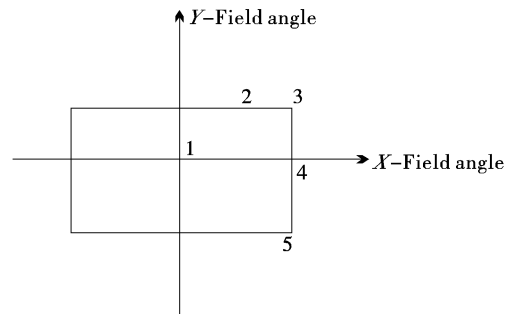


图 3 视场中各点的定义

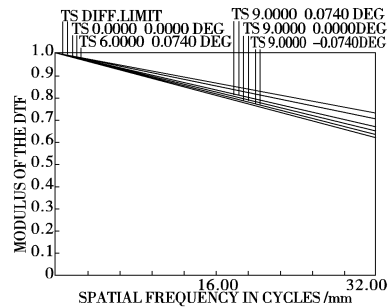


图 4 系统的传递函数曲线图

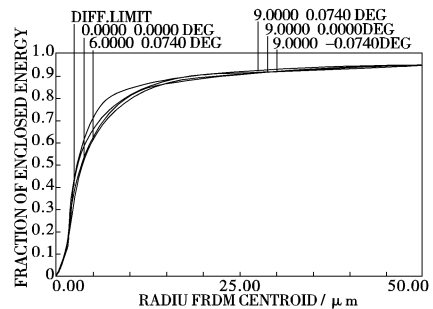


图 5 衍射能量分布图

由图 4 的传递函数曲线图,可以看出系统在整个波段和视场内成像质量都接近衍射极限,在极限频率 32 线对/mm 处的传递函数值基本都超过 0.6,成像质量良好.从图 5 的点列图和图 6 的衍射能量分布图可以看出,系统的残留像差主要是彗差,系统

在视场范围内具有接近衍射极限的成像质量,而且结构合理,无遮拦。

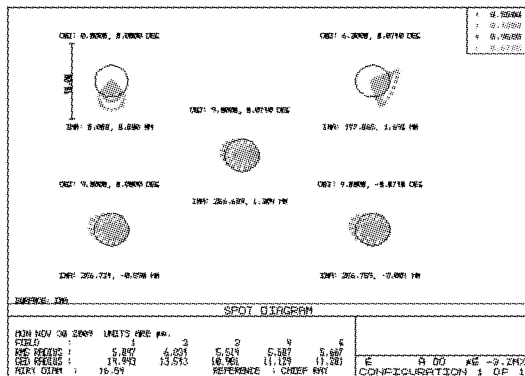


图 6 系统的点列图

### 3 结 束 语

在同轴三反射系统的基础上,采用视场离轴的方法避免中心遮拦,极大地提高了光学系统的成像质量.孔径光阑和次镜重合,无中间像,具有良好的对称性,因此可以达到很大的视场,同时系统的结构较为紧凑,适合应用于高分辨率成像光谱仪.在系统设计时不但考虑满足设计要求,还兼顾了系统的加工和装调成本,如尽量使主镜到次镜的距离和次镜到三镜的距离大致相等.在避免中心遮拦的前提下尽可能地减少加工离轴非球面镜所需的面形尺寸,必要时还可以考虑将镜面倾斜一定角度。

另外,由于系统没有中间像面,对系统的杂光抑

制相比较有一次像面的系统要差些.但系统的结构近似对称分布,校正像差的能力很强,可以取得相对较大的设计视场.如果使用高次非球面,也可以提高系统校正像差的能力或者减小系统的结构。

### 参 考 文 献

- [1] H J JURANEK, R SAND, J SCHWEIZER, et al. Off Axis Telescope-the Future Generation of Earth Observation Telescopes[J]. SPIE, 1998, 3439: 104 - 115.
- [2] 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.
- [3] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 157 - 160.
- [4] John W FIGOSKI. Development of a three-mirror, wide-field sensor, from paper design to hardware[J]. SPIE, 1989, 1113: 126 - 133.
- [5] 刘琳, 薛鸣球, 沈为民. 提高离轴三反射镜成像质量的途径[J]. 光学技术, 2002, 28(2): 181 - 184.
- [6] 卜江萍, 田维坚, 杨小君, 等. 一种新型离轴三反式光学系统的设计[J]. 光子学报, 2006, 35(4): 608 - 610.
- [7] Wongthanavas S, Sadananda R. A CA-based edge operator and its performance evaluation [J]. J. Vis. Commun. Image R, 2003(14): 83 - 96.
- [8] Chattopadhyay Santanu, Shelly Adhikari, Sabyasachi Sengupta, et al. Highly regular, modular, and cascable design of cellular automata-based pattern classifier [J]. IEEE, 2000, 8(6): 724 - 735.
- [9] Dietrich Korsch. A Three-Mirror Space Telescope[J]. Optical Engineering, 1975, 14(6): 533 - 535.

(上接第 28 页)

计算过程概念清晰,程序实现简单.虽然只考虑了最简单的镜面反射的情况,但足以反映本算法实现冷屏效率计算的可操作性和简捷性.通过在程序中设定不同参数,可以观察结构条件变化对于冷屏效率的影响.该算法进一步细化后可用于实际冷屏的效率分析和计算。

### 参 考 文 献

- [1] 王忆锋, 范乃华. 用蒙特卡罗方法和 MATLAB 计算矩形冷屏的视场角[J]. 光电技术应用, 2008, 23(6): 18 - 21
- [2] 王忆锋, 范乃华. 用蒙特卡罗方法和 MATLAB 计算田径场形冷屏的视场角[J]. 激光与红外, 2009, 39(3):

274 - 276

- [3] 王忆锋, 范乃华, 庄继胜. 用 MATLAB 实现圆形冷屏限制下投影面积的准确计算[J]. 激光与红外, 2009, 39(5): 397 - 398
- [4] 王忆锋, 庄继胜, 毛京湘. 用蒙特卡罗方法和 MATLAB 计算糖果形冷屏的视场角[J]. 红外, 2009, 30(12): 45 - 48
- [5] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.
- [6] Y J Shanam, M Umbricht, S Rudin. Cold shield effectiveness in MWIR cameras[J]. SPIE, 1994, 2269: 438 - 449.
- [7] John Lester Miller. Principles of Infrared Technology, A Practical Guide to the State of the Art[M]. New York: Chapman and Hall, 1994.