

# 一种离轴三反射系统初始结构的求解方法

于鑫<sup>1,2</sup> 张葆<sup>1</sup> 洪永丰<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 离轴三反射(TMA)系统是基于同轴三反射系统,通过视场离轴及孔径离轴实现无中心遮拦。传统解法需通过三反射镜遮拦比与放大率,来确定同轴结构的间隔等参数,该方法不利于直接限制系统筒长。在传统解法的基础上,提出一种通过给定三个反射镜间隔及三镜到像面距离,确定同轴结构的方法。利用 Matlab 软件设计程序求解初始参数;利用 Zemax 光学设计软件进行优化。根据是否有中间像面,分别设计得到焦距为 1500 mm,入瞳 250 mm 的 Cook 式和 Wetherell 式离轴三反射系统。结果显示,两种光学系统调制传递函数在 50 lp/mm 处均大于 0.6,点列斑均方根半径小于 5  $\mu\text{m}$ 。该方法直接有效的控制了系统长度,设计结果像质满足要求。

**关键词** 光学设计; 初始结构; 同轴三反; 离轴三反

中图分类号 V248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.112201

## A Method for Initial Configuration of Off-Axis Three-Mirror System

Yu Xin<sup>1,2</sup> Zhang Bao<sup>1</sup> Hong Yongfeng<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Off-axis three-mirror (TMA) systems are based on coaxial three mirror systems, which can avoid the obstructions through field off-axis and aperture off-axis. Traditional methods obtain coaxial system parameters such as structure intervals by calculating obscuration ratios and amplifications three mirror, which fails to limit the physical size of system directly. Based on traditional method, a new method is proposed to calculate coaxial configuration parameters by offering the interval of three mirror and distances between three mirrors and image plane. Configuration parameters are initialized by Matlab and further optimized via Zemax. According to the existence of an intermediate image or not, Cook TMA and Wetherell TMA are designed with effective focal length of 1500 mm and entrance pupil of 250 mm. Experimental results demonstrate that the modulation transform functions at the spatial frequency of 50 lp/mm are above 0.6, and the root-mean-square radii of diffusion plaques are below 5  $\mu\text{m}$ . The proposed method can determine system size and the image quality meets the requirements.

**Key words** optical design; initial configuration; coaxial three-mirror; off-axis three-mirror

**OCIS codes** 220.4830; 110.6770; 220.1250

## 1 引言

空间光学系统的发展经历了从折射系统到反射系统<sup>[1-2]</sup>的演变。折射系统由于透镜材料限制,存在口径不能太大、色差校正困难及不易轻量化等问题。反射材料具有易加工、易大型化和轻量化且抗热性良好等特点<sup>[3]</sup>,在镀膜后,在很宽的波段内有很高的反射率,且全反射系统不存在色差。同轴两反射镜系统由于变量有限,只能同时消两种像差,常见的是由 Chretien 和 Ritchey 改进的卡塞格林系统,即 R-C 系统;同轴三反系统(TMC),利用三个反射镜二次曲面系数、曲率半径及间隔,达到消球差、彗差、像散及场曲目的。以上同

收稿日期: 2015-04-16; 收到修改稿日期: 2015-05-30; 网络出版日期: 2015-09-07

基金项目: 长春光学精密机械与物理研究所重大创新项目(Y3C1SS14C)、中国科学院航空光学成像与测量重点实验室开放基金(Y3HC1SR141)

作者简介: 于鑫(1990—),男,硕士研究生,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: hey.yuxin@gmail.com

导师简介: 张葆(1966—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空光电成像技术等方面的研究。

E-mail: cleresky@vip.sina.com(通信联系人)

轴系统,优点是结构简单尺寸小,但视场(FOV)不能太大,且有中心遮拦,降低了系统传递函数。通过孔径离轴和视场离轴,解决了中心遮拦的问题。离轴三反系统可以通过是否具有中间像面具体分为Cook式和Wetherell式<sup>[4-5]</sup>。在航天航空领域,光学系统的体积有严格要求,当对系统长度要求小于焦距的0.3时,可以通过在Cook式离轴三反系统的中间像面处插入场镜折叠光路来使结构更加紧凑,形成折轴三反或离轴四反系统<sup>[6-8]</sup>。

离轴系统是在同轴系统的基础上得到的,传统求解初始结构的方法,通过给定与反射镜轮廓尺寸相关的遮拦比和放大率,得到三反射镜系统的间隔、曲率半径及二次曲面系数,求解时需通过尝试多组遮拦比和放大率组合才能得系统长度合适的初始结构。本文在传统解法的基础上,对公式进行改进,通过给定各元件间隔,来确定其他结构参数。

## 2 同轴初始结构的求解

### 2.1 传统解法

传统解法<sup>[9]</sup>通过高斯光学和平像场条件 $S_{\text{IV}}=0$ ,给定遮拦比 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 和放大率 $\beta_1$ 这三个轮廓尺寸参数来确定 $D_1$ 、 $D_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 及 $L'_3$ 这6个结构参数,再根据三级像差方程 $S_{\text{I}}$ 、 $S_{\text{II}}$ 、 $S_{\text{III}}$ 确定三面反射镜二次曲面系数 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ ,二次曲面也经常用偏心率的平方 $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 及 $e_3^2$ 描述,两者关系为 $K=-e^2$ 。同轴三反射镜系统如图1所示,具体方程如下。

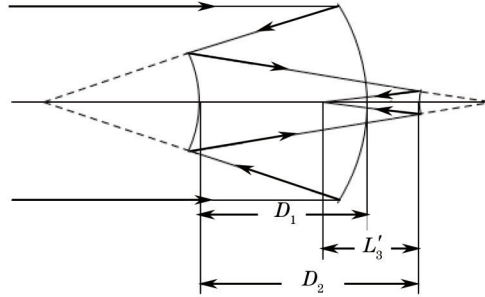


图1 同轴三反射镜系统

Fig.1 Coaxial three-mirror system

$\alpha_1$ 为次镜对主镜的遮拦比, $\alpha_2$ 为三镜对次镜遮拦比, $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 为次镜三镜放大率, $D_1$ 为主镜次镜间隔, $D_2$ 为次镜三镜间隔, $L'_3$ 为三镜到像面距离, $R_1$ 、 $R_2$ 及 $R_3$ 分别为三反射镜的曲率半径, $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 及 $-e_3^2$ 分别为三反射镜二次曲面系数。

$$R_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f', \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1}{\beta_2(1+\beta_1)} f', \quad (2)$$

$$R_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{1+\beta_2} f', \quad (3)$$

$$D_1 = \frac{R_1}{2}(1-\alpha_1)f' = \frac{1-\alpha_1}{\beta_1 \beta_2} f', \quad (4)$$

$$D_2 = \frac{R_1}{2}\alpha_1 \beta_1(1-\alpha_2)f' = \frac{\alpha_1(1-\alpha_2)}{\beta_2} f', \quad (5)$$

$$L'_3 = \alpha_1 \alpha_2 f', \quad (6)$$

要求像面是平的,即 $S_{\text{IV}}=0$ ,

$$\beta_1 \beta_2 - \frac{\beta_2(1+\beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1+\beta_2}{\alpha_1 \alpha_2} = 0, \quad (7)$$

在根据消球差、彗差和像散的要求,令

$$S_{\text{I}}, S_{\text{II}}, S_{\text{III}} = 0, \quad (8)$$

可将 $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 及 $e_3^2$ 通过 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$ 及 $\beta_2$ 表示。

## 2.2 通过间隔确定同轴初始结构参数

现将(1)~(7)式改进,通过间隔  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $L'_3$  及目标焦距值  $f'$  来求解  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$  及  $\beta_2$ 。

再根据(4)式和(5)式,将放大率  $\beta_1, \beta_2$  表示成  $\alpha_1, \alpha_2, f', D_1, D_2$  函数,

$$\beta_1 = \frac{1 - \alpha_1}{D_1 \beta_2} f', \quad (9)$$

$$\beta_2 = \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)}{D_2} f'. \quad (10)$$

通过(6)式将  $\alpha_2$  表示成  $\alpha_1, f'$  的函数,

$$\alpha_2 = \frac{L'_3}{\alpha_1 f'}. \quad (11)$$

再通过平像面条件(7)式,把方程整理成关于  $\alpha_1$  的二次方程,

$$A\alpha_1^2 + B\alpha_1 + C = 0, \quad (12)$$

式中

$$\begin{cases} A = \frac{D_2 L'_3}{f'^2} - \frac{D_1}{f'} \\ B = 2 \frac{L'_3}{f'^2} (D_1 - D_2) + \frac{D_1 D_2}{f'^2} \\ C = \frac{L'_3}{f'} \left( \frac{D_2}{f'} - \frac{D_1 L'_3}{f'^2} \right) \end{cases} \quad (13)$$

考虑到遮拦比为正,取

$$\alpha_1 = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}. \quad (14)$$

根据方程(1)~(3)式求出  $R_1$ 、 $R_2$  及  $R_3$ 。根据(8)式求出相应二次曲面系数。至此同轴初始结构求解完毕。需要注意的是,一次成像系统  $f'$  取负值,具有中间像面的二次成像系统  $f'$  取正值,而在 Zemax 中焦距情况正好相反,优化时需注意控制焦距正负。

## 3 光学系统设计

根据是否具有中间像面,分别设计 Cook 式和 Wetherell 式系统。由于视场设置,均可在轴外一条狭窄的像面上获得良好的像质,在像面位置上放置线阵电荷耦合器件(CCD)或时间延迟积分电荷耦合器件(TDI CCD)探测器,采用推扫形式成像。考虑到因加入高次项的离轴非球面加工检测难度增加,在像质符合要求的情况下,三个反射镜仅使用二次曲面;离轴三反系统本质上还是共轴系统,三个反射镜为离轴非球面,虽然几何轴线不重合,但其母盘的轴线一致;当反射镜的倾斜项也设为变量时,共轴系统变成偏轴系统<sup>[10]</sup>,像质与视场都得到提升,但是给后期装调增加难度,因此优化时倾斜项也不设为变量。

系统体积主要由反射镜的间隔和尺寸决定。主镜的尺寸由入瞳和视场决定,优化过程中基本不变;次镜接收主镜汇聚的光束,尺寸也相对较小;需要格外注意三镜尺寸,优化中使像质改善的趋势是使间隔变大,间接导致三镜变大。控制间隔有利于控制体积,但不利于改善像质,两者需要在优化中平衡。以下设计举例将初始解间隔设置为  $1/3f'$ ,作为优化的起点。

孔离轴量在保证无中心遮拦的情况下,不宜过大。二次成像系统,在加入正视场倾斜和不加入视场倾斜情况下,像面会和次镜部分重合,需加入负视场倾斜。视场倾斜量需多次尝试,取适合值。

根据  $G_{sd} = \frac{Ha}{f'}$ ,  $G_{sd}$  为地面分辨率,  $H$  为作用距离,  $a$  为 CCD 像元尺寸,假设相机在 15 km 高度俯拍,要求地面分辨率达到 0.1 m,像元尺寸选为 10  $\mu\text{m}$ ,计算出系统焦距为 1500 mm。

### 3.1 Wetherell 式一次成像系统

系统焦距  $f' = -1500$  mm,入瞳直径  $D = 250$  mm,视场角为  $F_{ov} = \pm 2^\circ$ ,波长范围为可见光波段。视场倾斜  $3^\circ$ ,将各反射镜和像面之间间隔选为  $1/3f'$ ,即 500 mm,孔阑设置在次镜处,将间隔和焦距数据带入 Matlab

自编程序,得到初始结构参数如表1所示。

表1 同轴初始结构参数

Table 1 Coaxial initial configuration parameters

Surface	Radius /mm	Distance /mm	$-e^2$
Primary	-1627.7187	-500	-1.3641
Secondary (stop)	-686.1407	500	-2.6341
Tertiary	-1186.1407	-500	-1.8268

图2是未考虑中心遮拦时的调制传递函数(MTF)曲线和点列图,传递函数曲线接近衍射极限,点列斑均方根半径小于  $2 \mu\text{m}$ 。

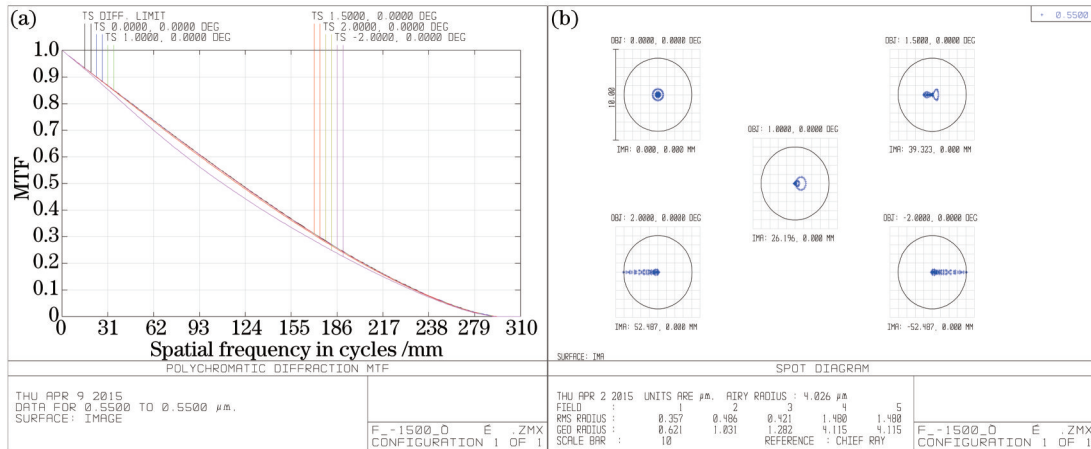


图2 (a) 同轴系统的 MTF 曲线; (b) 同轴系统的点列图

Fig.2 (a) MTF curves of coaxial system; (b) spot diagrams of coaxial system

在同轴结构上进行视场离轴,即视场沿光轴方向倾斜  $3^\circ$ ,对同轴系统优化后,进行孔径离轴后再优化,最终孔径离轴量为 177 mm。视场离轴和孔径离轴量的选择经过多次尝试,从中选取最合适的组合。最终得到参数结果如表2所示,评价系统选取的视场点如表3所示,图3为系统结构图,图4(a)、(b)分别为系统 MTF 曲线图和点列图。

表2 Wetherell式离轴三反射系统结构参数

Table 2 Configuration parameters of Wetherell off-axis three-mirror system

Surface	Radius /mm	Distance /mm	$-e^2$	Aperture	Aperture Y-axis /mm	Aperture radius /mm
Primary	-2413.138	-737.2538	-1.3126	circle	-280	200
Secondary (stop)	-806.1342	737.2538	0.5956	circle	-70	60
Tertiary	-1219.09	-734.0705	-0.1156	rectangular	10	X 160, Y 80

表3 评价系统像质选取的视场点

Table 3 Selected FOV for image appraisal of the system

FOV	1	2	3	4	5	6
X	$0^\circ$	$0.5^\circ$	$1^\circ$	$1.5^\circ$	$2^\circ$	$-2^\circ$
Y	$3^\circ$	$3^\circ$	$3^\circ$	$3^\circ$	$3^\circ$	$3^\circ$

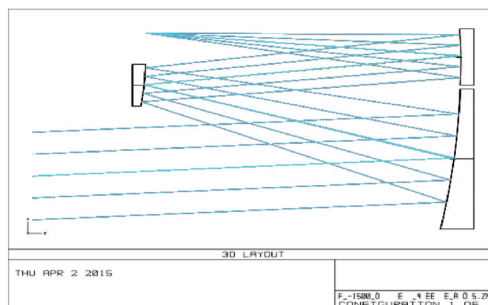


图3 Wetherell式离轴三反射系统

Fig.3 Wetherell off-axis three-mirror system

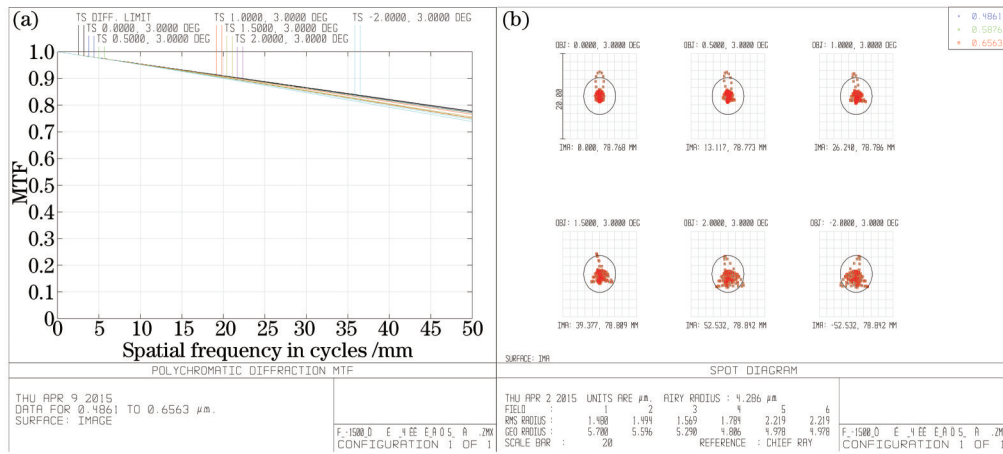


图4 (a) Wetherell式系统的MTF曲线; (b) Wetherell式系统的点列图

Fig.4 (a) MTF curves of the Wetherell system; (b) spot diagrams of Wetherell system;

### 3.2 Cook式二次成像系统

焦距  $f' = 1500 \text{ mm}$ ,  $F_{ov} = \pm 1.5^\circ$ , 视场离轴  $-1^\circ$ , 将孔阑设置在主镜处, 其他同上。得到初始结构如表4所示。

表4 同轴初始结构参数

Table 4 Coaxial initial configuration parameters

Surface	Radius /mm	Distance /mm	$-e^2$
Primary(stop)	-1145.3345	-500	-0.8881
Secondary	-307.3344	500	-5.9200
Tertiary	-420.0484	-500	-0.2311

图5为未考虑遮拦时的调制传递函数曲线, 孔径离轴量  $256.6 \text{ mm}$ , 最终优化后的结构参数如表5所示, 像质评价的视场点如表6所示。图6为系统结构图, 图7(a)、(b)分别为系统MTF曲线图和点列图。

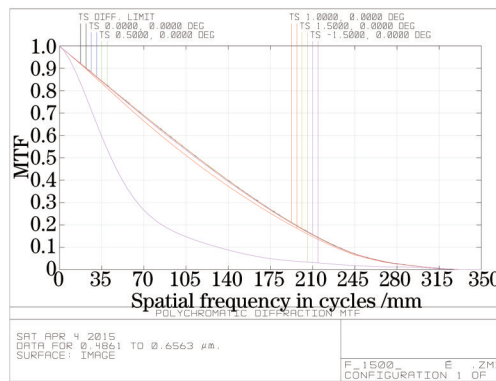


图5 同轴初始结构的调制传递函数曲线

Fig.5 MTF curves of coaxial initial configuration

表5 Cook式离轴三反射系统结构参数

Table 5 Configuration parameters of Cook off-axis three-mirror system

Surface	Radius /mm	Distance /mm	$-e^2$	Aperture	Aperture Y-axis /mm	Aperture radius /mm
Primary	-1243.027	-546.3368	-0.8777	circle	-260	150
Secondary (stop)	-321.4794	546.3377	-5.6390	circle	-40	30
Tertiary	-455.5914	-520.3265	-0.2159	rectangular	35	X 120, Y 60

表6 评价系统像质选取的视场点

Table 6 Selected FOV for image appraisal of the system

FOV	1	2	3	4	5
X	$0^\circ$	$0.5^\circ$	$1^\circ$	$1.5^\circ$	$-1.5^\circ$
Y	$-1^\circ$	$-1^\circ$	$-1^\circ$	$-1^\circ$	$-1^\circ$

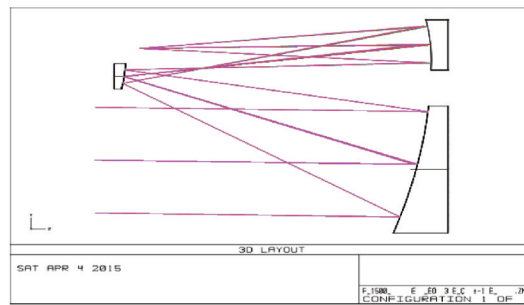


图6 Cook式离轴三反射系统

Fig.6 Cook off-axis three-mirror system

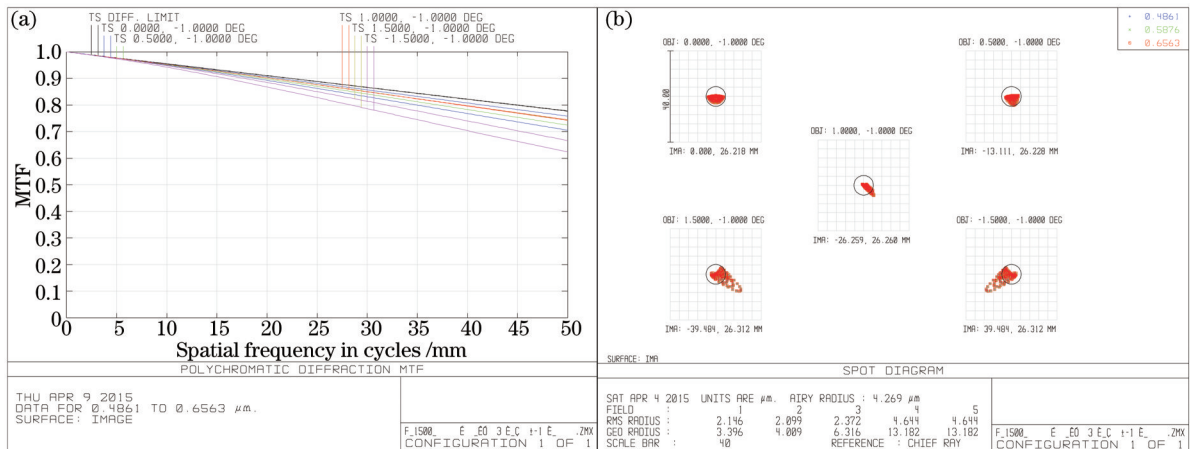


图7 (a) Cook式系统的传函曲线; (b) Cook式系统的点列图

Fig.7 (a) MTF curves of the Cook system; (b) spot diagrams of Cook system

### 3.3 两种系统分析比较

两种同轴初始结构,一次成像系统在边缘视场 $2^\circ$ 处的传函接近衍射极限,二次成像系统在中心视场处,传函接近衍射极限,边缘视场 $1.5^\circ$ 时,MTF(50 lp/mm)小于0.5。

二次成像系统,将孔阑设置在主镜上,入瞳位置与主镜重合。可在中间像面处放置视场光阑消杂光,入瞳与出瞳的缩小比很大,可在出瞳处放置小的光阑用于消杂光。也可在中间像面处插入场镜,折叠光路,使结构更紧凑,工作距离可以到达 $0.25\sim 0.3f'$ ,在机载方面应用前景很大。边缘视场 MTF(50 lp/mm)大于0.6。全视场角为 $\pm 1.5^\circ$ ,当视场增加到 $\pm 2^\circ$ 时,要达到相同成像质量,优化时各个元件间隔变大,系统过长,间接导致三镜在X方向上比主镜还大,结构不合理。优化时注意对3个间隔控制,系统长度控制在 $0.3\sim 0.5f'$ 范围内。

一次成像系统与二次成像系统相比,一次成像系统把孔阑设置在次镜上,结构更加对称,视场更大,全视场为 $\pm 2^\circ$ ,像质优于二次成像系统,边缘视场 MTF(50 lp/mm)大于0.74。易于设计成像方远心光路,对于测绘相机以及有后继光路的望远物镜来说是很重要的优点。

离轴非球面反射镜加工难度主要取决于非球面陡度,其次是口径和非球面度。非球面度是非球面与最佳比较球面在沿光轴方向的偏差,非球面陡度是该偏差在沿口径方向的变化率。计算非球面陡度的标准不一,具体加工能力需跟加工人员确定。现采用将离轴非球面看作轴对称非球面的一部分<sup>[1]</sup>来计算陡度。经过与加工人员沟通,陡度控制在 $10\lambda/\text{mm}$ 以下属于容易加工, $15\lambda/\text{mm}$ 以上属于较难加工, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$ 。Wetherell式系统三个反射镜非球面陡度依次为2.37、1和 $0.08\lambda/\text{mm}$ ,较好加工。Cook式系统陡度依次为12.01、18.64和 $2.21\lambda/\text{mm}$ ,次镜陡度过大。在保证三镜尺寸不过大和像质不降低的情况下,将间隔从550 mm放宽到620 mm,陡度依次下降为7.90、11.54和 $1.41\lambda/\text{mm}$ ,降低了加工难度。

某些空间遥感测绘要求光学系统体积小、长焦、幅宽,相对畸变控制在0.003%以下,在高次非球面无法满足像质要求时,使用自由曲面<sup>[11]</sup>可以取得像质显著提高。计算全息技术(CGH)发展,促进了高次非球面和自由曲面的检测,使其在工程中广泛应用成为可能。

## 4 结 论

基于高斯光学和像差理论推导出根据三反射镜间隔及三镜到像面距离求解同轴初始结构的方法。采用该方法分别设计了满足设计要求的一次成像、二次成像的离轴三反射系统,均可获得像质良好的结构。在同样焦距和入瞳的情况下,比较两种系统差异,一次成像系统的视场更大,像质更好;二次成像系统更易于插入场镜,折叠光路,得到更紧凑结构。与传统方法相比,该方法在控制系统长度方面更具优势。

### 参 考 文 献

- 1 Chang Jun, Weng Zhicheng, Jiang Huilin, *et al.*. Design on three-reflective-mirror system used in space[J]. *Acta Optical Sinica*, 2003, 23(2): 216-219.  
常 军,翁志诚,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.
- 2 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Research on the optical design and stray light suppression for off-axis reflective space astronomical telescope[J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, 34(8): 0822002.  
朱 杨,张 新,伍雁雄,等.离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J].*光学学报*, 2014, 34(8): 0822002.
- 3 Gao Minghui, Liu Lei, Ren Jianyue. Characteristic test of SiC for space camera's mirror[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(8): 1170-1174.  
高明辉,刘 磊,任建岳.空间相机反射镜碳化硅材料性能测试[J].*光学精密工程*, 2007, 15(8): 1170-1174.
- 4 Han Changyuan. Study on optical system of high resolution space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(11): 2164-2172.  
韩昌元.高分辨力空间相机的光学系统研究[J].*光学精密工程*, 2008, 16(11): 2164-2172.
- 5 Wang Xiaokun. Optical design of a high resolution space camera[J]. *Acta Optical Sinica*, 2015, 35(1), 0122001.  
王孝坤.一种高分辨力空间相机的光学设计[J].*光学学报*, 2015, 35(1), 0122001.
- 6 Chen Jianfa, Wang Helong, Liu Xin, *et al.*. Design of a compact four-mirror optical system[J]. *Electronics Optics and Control*, 2012, 19(12): 76-79.  
陈建发,王合龙,刘 欣,等.紧凑型四反射镜光学系统设计[J].*电光与控制*, 2012, 19(12): 76-79.
- 7 L G Cook. Compact four-mirror anastigmat telescope: US Patent, 6767103B2[P]. 2004.
- 8 Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng. Compact and multispectral off-axial three-mirror reflective optical system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(3): 391-394.  
李 岩,张 葆,红永丰.灵巧型离轴三反光学系统设计[J].*应用光学*, 2014, 35(3): 391-394.
- 9 Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of Optical Asphere[M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004.  
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.
- 10 Ren Baichuan. The Study on Vector Aberration Theory for Off-Axis Optical System[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2012: 102-112.  
任百川.偏轴光学系统矢量像差理论研究[D].长春:长春光学精密机械与物理研究所,2012: 102-112.
- 11 Gong Dun, Wang Hong. Optical design of large field and low distortion coaxial three mirror system with free-form surface[J]. *Acta Optical Sinica*, 2014, 34(7): 0722001.  
巩 盾,王 红.含有自由曲面的大视场低畸变同轴三反射光学系统设计[J].*光学学报*, 2014, 34(7): 0722001.

栏目编辑: 苏 岑