

文章编号: 0253-2239(2003)02-0216-04

# 用于空间的三反射镜光学系统设计

常 军<sup>1</sup> 翁志成<sup>2</sup> 姜会林<sup>1</sup> 张 新<sup>2</sup> 丛小杰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 长春光学精密机械学院光电工程系, 长春 130022  
<sup>2</sup> 长春光学精密机械与物理研究所国家应用光学重点实验室, 长春 130022)

**摘要:** 在三块反射镜系统的高斯公式基础上,就中间成一次实像的情况进行了系统的讨论,中间成一次实像可分为主镜成一次实像和主镜与次镜成一次实像两种,在对系统的几何参量进行分析的基础上,得出了这两种情况下的求解范围,并进行了实例设计,给出了对应的两个焦距为 4 m、视场为 3°的设计结果。

**关键词:** 空间光学; 二次曲面; 全反射; 三反射镜光学系统

中图分类号: TB133 文献标识码: A

## 1 引 言

20 世纪 90 年代后,在空间对地遥感领域中,无论是军事还是民用领域对空间光学系统的分辨率要求都越来越高。增大物镜的孔径能使进入光学系统的能量增加且具有较高的角分辨能力<sup>[1]</sup>。在大孔径光学系统中,需采用特殊光学材料或复杂的结构的折射系统来消除二级光谱<sup>[2]</sup>,而反射系统不产生色差,孔径可以做得较大,宜于轻量化,在抗热性能方面有较强的优势,而且通过使用非球面来校正像差,可以使结构简单,像质优良。因此目前已有学者在这方面做了不少工作<sup>[3~5]</sup>。其中,常用的卡氏两镜望远系统最多能校正两种初级像差(球差和彗差),其余几种像差也需使用折射元件校正;而三镜系统可以用来同时消除四种像差(球差、彗差、像散和畸变),不需使用折射元件,因而更具应用前景。本文在文献[5]的基础上,综合了系统几何参量的物理含义,给出了三反射镜系统(TMA)成一次中间实像时的各几何参量取值范围的必要条件。由于,中间成一次实像的三反射镜系统可在中间像的位置放置消杂光光阑,起到更好抑制杂光的作用,其使用前景更广泛,本文主要对满足这类系统所需的条件进行了分析和讨论,对其中的几何参量进行了推导,并依此解出此类三反射镜系统的初始结构,最后举例予以了论证。

## 2 求解参量推导

成一次中间实像包括两种情况:主镜成一次中

间实像和主镜与次镜成一次中间实像。当三反射镜光学系统的三块反射镜都为二次曲面时,系统有七个变量( $a_1$ 、 $a_2$ 、 $\beta_2$ 、 $\beta_3$ 和三个二次非球面系数),满足了总焦距和校正初级像差后,剩余的变量可以用来满足中心遮拦、工作距等外形尺寸约束要求,可有多组解。如图 1 所示为三反射镜的原始结构图。

其中,

$$a_1 = l_2/f'_1 \approx h_2/h_1,$$

$a_1$  为次镜对主镜的遮拦比, $h_1$ 、 $h_2$  为主镜和次镜的口径(入瞳与主镜重合);

$$a_2 = l_3/l'_2 \approx h_3/h_2,$$

$a_2$  为第三镜对次镜的遮拦比, $h_3$  为第三镜的口径;

$$n_1 = n'_2 = n_3 = 1;$$

$$n'_1 = n_2 = n'_3 = -1;$$

$$\beta_2 = (n_2 l'_2)/(n'_2 l_2),$$

$$\beta_3 = (n_3 l'_3)/(n'_3 l_3),$$

$\beta_2$  为次镜的放大率, $\beta_3$  为第三镜的放大率; $d_1$ 、 $d_2$  分别为主镜与次镜、次镜与第三镜的间隔; $l_2$ 、 $l'_2$ 、 $l_3$ 、 $l'_3$  的定义和文献[5] 相同。

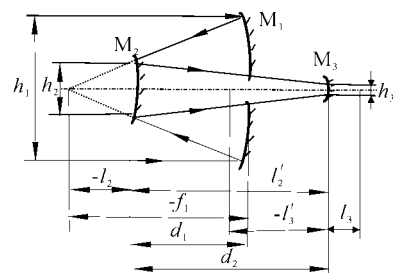


Fig. 1 Three mirrors layout

要使系统有解,需同时满足:  $d_1 < 0, d_2 > 0$  和

E-mail: ciom.cj@eyou.com

收稿日期: 2001-11-02; 收到修改稿日期: 2002-03-07

$L'_3 < 0$ , 即:

$$\left. \begin{aligned} (1-a_1)f'_1 &< 0, \\ a_1(a_2-1)\beta_2 f'_1 &> 0, \\ a_1 a_2 \beta_2 \beta_3 f'_1 &< 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

1) 主镜成一次中间实像,需同时满足下列条件:

$$d_1 f'_1 > 0, \quad |f'_1| < |d_1|. \quad (2)$$

联立(1)式和(2)式,当满足下列关系式之一时,主镜成一次实像:

$$f'_1 < 0, \quad -1 < a_1 < 0, \quad a_2 > 1, \quad \beta_2 > 0, \quad \beta_3 < 0, \quad (3a)$$

$$f'_1 < 0, \quad -1 < a_1 < 0, \quad 0 < a_2 < 1, \quad \beta_2 < 0, \quad \beta_3 > 0, \quad (3b)$$

$$f'_1 < 0, \quad a_1 < -1, \quad a_2 > 1, \quad \beta_2 > 0, \quad \beta_3 < 0, \quad (3c)$$

$$f'_1 < 0, \quad a_1 < -1, \quad 0 < a_2 < 1, \quad \beta_2 < 0, \quad \beta_3 > 0. \quad (3d)$$

2) 主镜所成中间实像的位置为

- i) 当  $|f'_1| = |d_1| - |d_2|$  时,实像成在第三镜的中心,此时  $\beta_2(a_2 - 1) = 1$ ;
- ii) 当  $|f'_1| < |d_1| - |d_2|$  时,实像成在主镜和第三镜的几何位置之间,此时  $\beta_2(a_2 - 1) < 1$ ;
- iii) 当  $|f'_1| > |d_1| - |d_2|$  时,实像成在次镜和第三镜的几何位置之间,此时  $\beta_2(a_2 - 1) > 1$ 。

3) 主镜与次镜成一次中间实像,需同时满足下列条件:

$$a_1 > 0, \quad L'_2 < d_2. \quad (4)$$

联立(1)式和(4)式,当满足下列关系式之一时,主镜成一次中间实像:

$$f'_1 < 0, \quad 0 < a_1 < 1, \quad -1 < a_2 < 0, \quad \beta_2 > 0, \quad \beta_3 < 0, \quad (5a)$$

$$f'_1 < 0, \quad 0 < a_1 < 1, \quad a_2 < -1, \quad \beta_2 > 0, \quad \beta_3 < 0, \quad (5b)$$

$$f'_1 < 0, \quad a_1 > 1, \quad -1 < a_2 < 0, \quad \beta_2 < 0, \quad \beta_3 < 0, \quad (5c)$$

$$f'_1 < 0, \quad a_1 > 1, \quad a_2 < -1, \quad \beta_2 < 0, \quad \beta_3 < 0. \quad (5d)$$

4) 主镜与次镜所成中间实像的位置为

- i) 当  $|l'_2| = |d_1|$  时,实像成在主镜的中心,此时  $\beta_2 = (1 - a_1)/a_1$ ;
- ii) 当  $|l'_2| < |d_1|$  时,实像成在主镜和第三镜的几何位置之间,此时  $\beta_2 > (1 - a_1)/a_1$ ;
- iii) 当  $|l'_2| > |d_1|$  时,实像成在主镜和次镜的几何位置之间,此时  $\beta_2 < (1 - a_1)/a_1$ 。

心遮拦对像质的影响,减小系统的尺寸,在主镜前加一  $45^\circ$  倾斜的平面转折镜,系统的结构如图 2 所示。

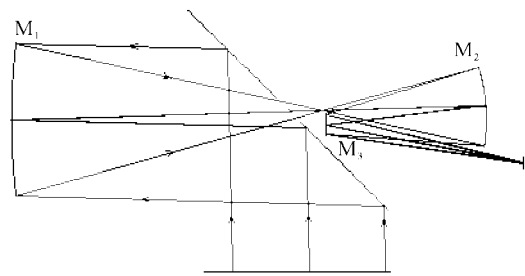


Fig. 2 System layout

### 3 设计举例

现设计一个焦距  $f' = 4000$ 、相对孔径  $D/f' = 1/10$ 、视场角  $2\omega = 3^\circ$  的三反系统。

1) 要求中间成像,取  $a_1 = -0.52, a_2 = 0.31, \beta_2 = -1.01, \beta_3 = 4.82$  得到初始结构参量示于表 1。

Table 1. The system structure parameters

Radius /mm	Distance /mm	Conic coefficient $k$
$M_1: -1640.0$	$d_1: -1244.4$	$-0.6$
$M_2: 481.6$	$d_2: 418.6$	$-0.1$
$M_3: 377.3$	$l'_2: -513.1$	$-3.5$

由参量  $a_1, a_2, \beta_2, \beta_3$  的取值可得出,符合条件(3a),且由于关系式:  $(a_2 - 1)\beta_2 = 0.697 < 1$ ,因此实像成在主镜和第三镜之间,符合 2) 中的成像位置条件 ii)。表中  $k$  的定义见参考文献[5]。为了降低中

经优化后的传递函数图如图 3 所示。

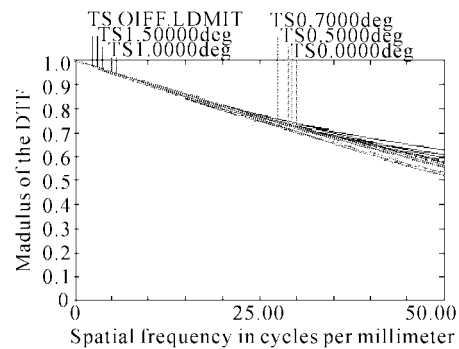


Fig. 3 Modulation transfer function curve

能量分布如图 4 所示。

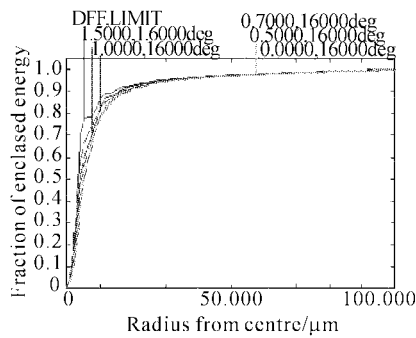


Fig. 4 Diffraction energy curve

2) 要求次镜成中间像, 取  $a_1 = 0.2, a_2 = -2.5, \beta_2 = 2, \beta_3 = -2$  得到初始结构参量示于表 2。

Table 2. The system structure parameters

Radius /mm	Distance /mm	Conic coefficient /k
$M_1: -2000.0$	$d_1: -800.4$	$-0.9$
$M_2: -800.0$	$d_2: 418.6$	$-6.7$
$M_3: -1333.3$	$l'_2: -2000.0$	$-0.3$

由参量  $a_1, a_2, \beta_2, \beta_3$  的取值可得出, 符合条件 (5b), 且由于关系式:  $(1-a_1)/a_1 = 4 > \beta_2 = 2$ , 因此实像成在主镜和次镜之间, 符合 4) 中的成像位置条件 iii)。同上例, 为了避免中心遮拦对像质的影响, 将孔径离轴, 系统的结构如图 5 所示。

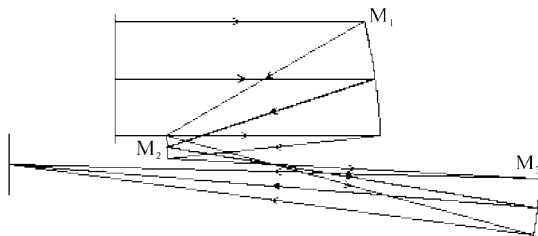


Fig. 5 System layout

经优化后的传递函数如图 6 所示。

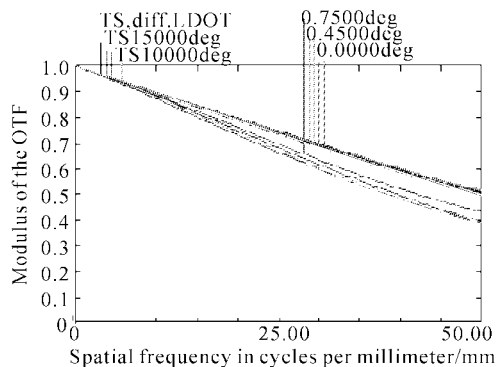


Fig. 6 Modulation transfer function curve

能量分布如图 7 所示。

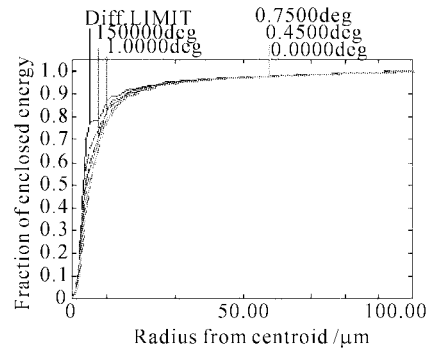


Fig. 7 Diffraction energy curve

**结论** 三反射镜系统由于其独特优势, 适合于空间遥感、摄像等领域, 已备受关注。而成一次中间像系统由于具有可更好抑制杂散光等优势, 应用前景更为广泛。

如何做到焦距长、视场大、尺寸小、像质好, 这一一直为广大学者所感兴趣。同轴的三反射镜系统由于受到中心遮拦的影响, 传函值不高, 目前解决这问题的方法主要是通过使用偏轴结构。

本文在高斯光学理论的基础上, 通过对系统的几何参量进行分类推导和分析, 得出对应的各类解的条件, 依据这些条件能方便地解决所需的初始结构值。通过使用上述推导条件可得出同轴条件下的三反射镜系统的初始结构值, 再进行特定的偏轴适用, 采用这种无遮拦、偏轴的三反射镜系统可得较好的结果。而且随着计算机辅助加工与干涉装调的技术不断提高, 这类偏轴系统将得到更广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 Xue Mingqiu. About Lagrange's invariant. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics* (长春光学精密机械学院院报), 1982, (4):1~4 (in Chinese)
- 2 Jiang Huilin. On the secondary spectrum. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1982, 2(3):225~230 (in Chinese)
- 3 Jone L. R. Development of a wide field-of-view, unobscured, three mirror anastigmat. *Proc. SPIE*, 1992, 1762:39~49
- 4 Melsheimer R. A very wide field, very fast telescope. *Proc. SPIE*, 2001, 4003:456~463
- 5 Pan Junhua. A study of the optical system with three mirror of second order surface. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1988, 8(8):717~721 (in Chinese)

## Design on Three-Reflective-Mirror System Used in Space

Chang Jun<sup>1</sup> Weng Zhicheng<sup>2</sup> Jiang Huiling<sup>1</sup> Zhang Xin<sup>2</sup> Cong Xiaojie<sup>2</sup>

*1 Changchun Institute of Optics and Fine mechanics, Changchun 130022*  
*2 The State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,*  
*Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*

(Received 2 November 2001; revised 7 March 2002)

**Abstract:** The formulas for relayed three mirror anastigmat (TMA) are derived used for all reflective system, which is consisted of three aspherical surfaces. These relayed TMA can be considered in two conditions, one is formed by the primary mirror; the other is formed by the second mirror. Here the solutions for the two conditions are given. The results show that the optical systems with focal length of 4 meters, field of view 30 are suitable to the two conditions.

**Key words:** space optics; quadratic surface; total reflection; three-mirror optical system