

# 小轻型 CCD 遥感相机全反射光学系统设计\*

许世文 付 苓 徐 波 龙夫年

(哈尔滨工业大学航天电子与光电工程系, 哈尔滨 150001)

**摘 要** 利用三反射镜的消像差理论, 进行了一种小轻、大视场的全反射系统的设计。该系统通过同轴设计、离轴使用, 使筒长达到  $f'/7 \sim f'/9$ , 视场达到  $3^\circ$  以上, 遮光比在 6% 以下, 像质达到衍射极限。这种系统特别适于长焦距遥感 CCD 相机的应用。

**关键词** 全反射光学系统, 三反射镜, 光学设计。

## 1 引 言

在大口径天文望远镜系统、红外或紫外光学系统中, 通常采用反射镜, 其中最常用的结构形式是卡氏系统。其优点是: 1) 口径可以做得较大; 2) 不产生色差且使用波段范围宽; 3) 采用非球面后, 有较大的消像差能力, 光学系统结构简单, 像质优良。但它也存在不足之处: 不易得到较大的、像质优良的视场(一般视场  $\ll \frac{\pi}{180}$  rad), 若片面强调扩大视场, 又想保持良好的像质, 则只能以牺牲短的筒长为代价, 筒长大大增加, 则体积增加, 这是航天的一大禁忌。其中主要原因是在卡氏系统中参量只有 5 个, 像差校正和轮廓尺寸之间的矛盾限制了设计, 为解决这一矛盾, 产生了三镜系统<sup>[1]</sup>, 这时参量增至 8 个, 从而大大缩短筒长, 又增加了像差校正的参数。

## 2 结构型式确定

如图 1 所示, 反射镜  $M_1$ 、 $M_2$  组成卡氏系统, 根据设计时的具体要求, 其合成焦点  $F_1'$  可在主、次镜之间, 也可伸出主镜之外, 即经过  $M_1$ 、 $M_2$  所成的一次像可在  $M_1$ 、 $M_2$  之间, 也可在主镜  $M_1$  之后, 后截距  $b$  值可正可负。在主镜后面加入第三反射镜  $M_3$ , 其位置的安放应从设计时的具体要求及结构安排的角度出发,  $M_3$  应在  $F_1'$  之后, 这样即构成了三反射镜系统的原始结构。

根据实际需要, 相机在进行推扫过程中, 需要的像

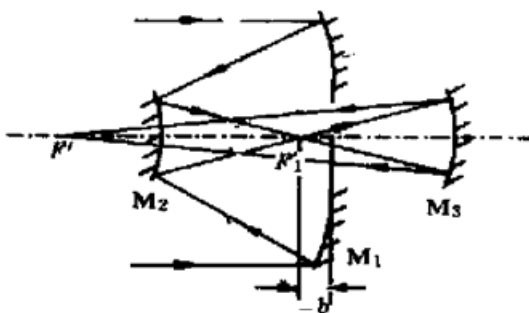


Fig. 1 Primitive optical system

\* 国防基金重点资助项目。

面是垂直于推扫方向的长条。所以在设计时,像面处的 CCD 接收器采用线阵的,即采用子午方向很窄(只有几十个像元,像元尺寸根据所采用的 CCD 的规格不同而有所不同,可采用单位像元为 10~15  $\mu\text{m}$  的 CCD)、弧矢方向较宽的 CCD(例如 10000 个像元,可采用若干个 2048 像元的 CCD 进行拼接)。为保证最终系统具有较高的传递函数值,不仅要使像差平衡到最佳状态,又要尽量减少由次镜造成的遮光,以保证像面具有足够的能量;同时为便于安放接收器和解决后截距有可能较长的弊病,采用了同轴设计、离轴使用的方法,即取整个像面轴外的某一部分(弧矢方向取全视场,子午方向取轴外某一视场),可在主镜的背面附近安放一个平面折转反射镜。为不造成遮光,要进行光线追迹,以确定经次镜的反射光束在主镜附近的口径,从而确定平面折转反射镜的径向位置。另外,还可采用另一结构型式:利用二次成像原理,在一次像的附近放置一平面折转反射镜。这可保证像质、缩短筒长、减小体积。

### 3 光学设计

各参数的含义如下:  $f'$  为系统的总焦距;  $\alpha_1$  为次镜对主镜的遮光比;  $\alpha_2$  为第三反射镜对次镜的遮光比;  $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为次镜、第三反射镜的放大率;  $e_1^2$ 、 $e_2^2$ 、 $e_3^2$  为分别为 3 个非球面反射镜的面形系数;  $D_1$  为主镜全口径(主镜与入瞳重合);  $d_1$ 、 $d_2$  分别为主镜与次镜、次镜与第三反射镜的间距;  $b$  为次像距主镜的距离,即后截距;  $S_I$ 、 $S_{II}$ 、 $S_{III}$ 、 $S_{IV}$  分别为三级球差、慧差、像散、场曲的系数和。

初始三镜光学系统示于图 1。利用三级像差理论得出的单色像差的一般表示式也适用于三镜系统,最终结果如下<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned}
 S_I &= \frac{1}{4} [(e_1^2 - 1)\beta_1^3\beta_2^3 - e_2^2\alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)^3 + e_3^2\alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)^3 + \\
 &\quad \alpha_1\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \alpha_1\alpha_2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2], \\
 S_{II} &= -\frac{e_2^2(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)^3}{4\beta_1\beta_2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_1)](1 + \beta_2)^3}{4\beta_1\beta_2} + \\
 &\quad \frac{(\alpha_1 - 1)\beta_2^3(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\beta_1\beta_2} - \frac{1}{2}, \\
 S_{III} &= -e_2^2 \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)^2(1 - \beta_1)^3}{4\alpha_1\beta_1^2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} + \\
 &\quad \frac{\beta_2(\alpha_2 - 1)^2(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1\beta_1^2} - \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)]^2(1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1\alpha_2\beta_1^2\beta_2^2} - \\
 &\quad \frac{\beta_2(\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1\beta_1} - \beta_1\beta_2 + \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{(1 + \beta_2)}{\alpha_1\alpha_2} - \\
 &\quad \frac{[\alpha_2(\alpha_1 - 1) + \beta_1(1 - \alpha_2)](1 - \beta_2)(1 + \beta_2)}{\alpha_1\alpha_2\beta_1\beta_2}, \\
 S_{IV} &= \beta_1\beta_2 - \frac{\beta_2(1 + \beta_1)}{\alpha_1} + \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1\alpha_2},
 \end{aligned}$$

并且推导出系统结构参数的公式:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{2}{\beta_1\beta_2}f', & R_2 &= \frac{2\alpha_1}{\beta_2(1 + \beta_1)}f', & R_3 &= \frac{2\alpha_1\alpha_2}{1 + \beta_2}f', \\
 b &= \frac{[\alpha_1(\beta_1 - 1) + 1]}{\beta_1\beta_2}f', & d_1 &= \frac{(1 - \alpha_1)}{\beta_1\beta_2}f', & d_2 &= \frac{\alpha_1(1 - \alpha_2)}{\beta_2}f',
 \end{aligned}$$

基于以上思想, 编程进行初始结构参数计算, 程序流程图如图 2 所示。

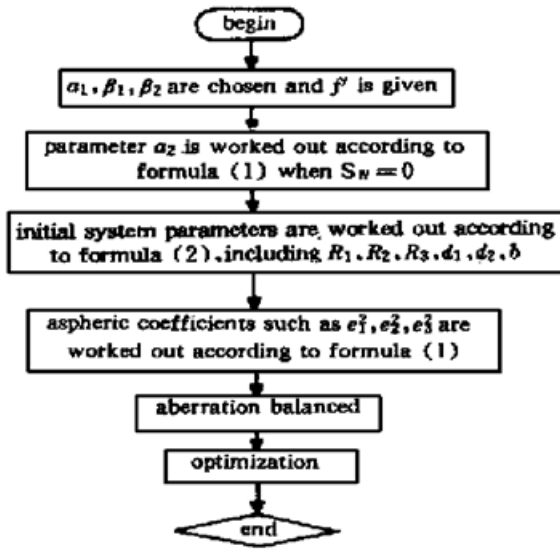


Fig. 2 Flow chart for optical design

由前面得出的初始结构, 尽管其三级像差系数  $S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = 0$ , 但其像质只是在小视场( $\pi/180$ 左右)的情况下较佳, 随着视场的增大, 其像质变坏, 所以欲获得较大视场还需进一步进行优化设计, 在将反射镜  $M_3$  进行离轴使用的过程中, 需利用光学计算程序对光线反复进行追迹, 以确保平面折转反射镜  $L_1$  不挡光, 同时, 通过对光线进行追迹, 可知在实际使用时, 只需用到反射镜  $M_3$  的轴外的一部分, 视场可达到  $\pi/60$  以上, 像质达到衍射极限, 而整个系统的筒长仅为  $f'/7 \sim f'/9$ 。在工艺上还可采取一些轻量化措施, 则系统的重量可大大减轻, 这是常规的卡氏系统无法达到的, 如此小而轻的光学系统在航天卫星应用中是极为有利的。

### 4 设计实例

现设计一个  $f' = 3000$ 、 $D/f' = 1/12.5$ 、 $2W = \pi/60$  的三反射镜系统。

根据经验确定  $\alpha_1 = 0.22$ ,  $\beta_1 = -3$ ,  $\beta_2 = 3.155138$ , 计算得到初始结构参数:

$$\begin{aligned}
 e_1^2 &= 0.9724128, & e_2^2 &= 3.60846, & e_3^2 &= 0.5263748, \\
 R_1 &= -633.8867, & R_2 &= -209.1826, & R_3 &= -312.2129, \\
 b &= -38.05513, & d_1 &= -247.2159, & d_2 &= 414.7660,
 \end{aligned}$$

进行优化设计后得到如下结果:

$$\begin{aligned}
 e_1^2 &= 0.971906, & e_2^2 &= 3.639827, & e_3^2 &= 0.521299, \\
 R_1 &= -633.8918, & R_2 &= -209.1843, & R_3 &= -312.4916, \\
 b &= -38.0338, & d_1 &= -247.2159, & d_2 &= 414.7660,
 \end{aligned}$$

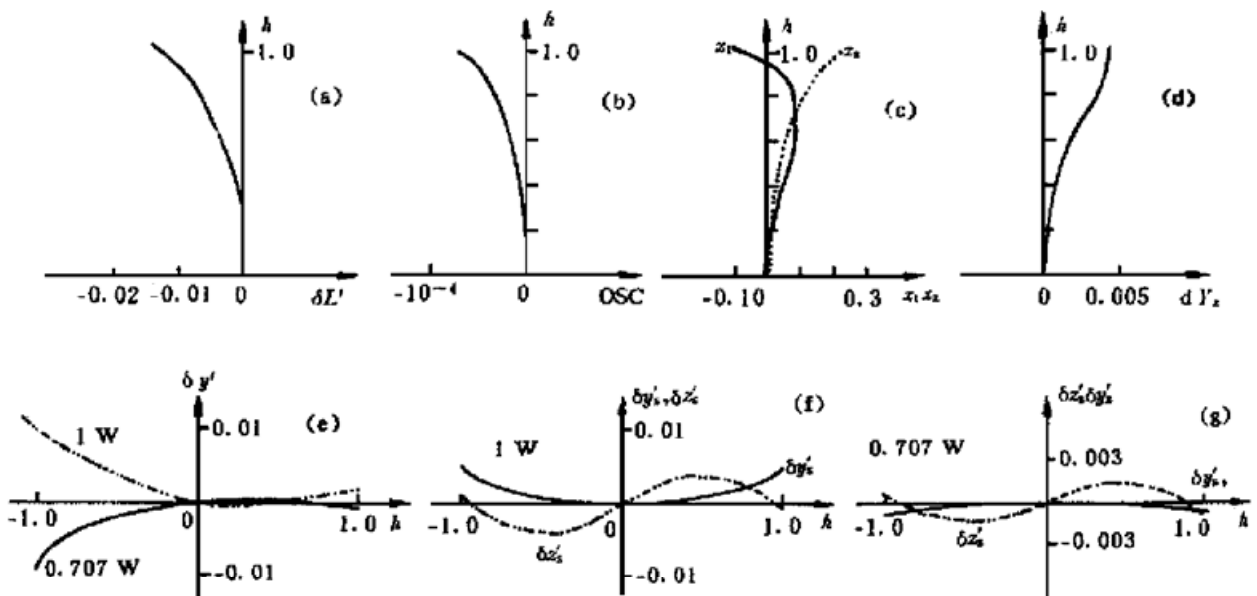


Fig. 3 Curve of aberration

可见,主镜和三镜均为椭球面,次镜为双曲面。经过复算,其像质达到衍射极限,其像差曲线如图 3 所示,光学传递函数  $f_{\text{MTF}} \approx 0.5$  (曲线略),经合理安排后其筒长仅为  $f'/7$  左右。

**结束语** 这种三镜系统的设计方法在理论上是可行的,在实际加工中也是可以达到要求的。所给出的设计实例其像质达到衍射极限,光学传递函数  $f_{\text{MTF}} \geq 0.5$ ,其有效筒长约为  $f'/7 \sim f'/9$ ,尽管随着视场的增大,后截距变长,但是通过合理安排(例如利用折转反射镜)可以达到缩短筒长、减小体积的目的,特别是同轴设计、离轴使用是该设计的主要特点,在进行同轴设计时,可将所取视场处的像质校正至最优,而其他视场的像质次之,在取轴外部分的视场时,尽管全视场有所减小,但在设计之初选择视场时已考虑到这一点,即初始视场大于指标要求,所以最终视场可以满足要求;同轴设计、离轴使用的又一优点是减小挡光。另外,在具体加工工艺上,可以采用轻量化技术,对口径较大的主镜进一步采取轻量化措施,可进一步减轻重量。总之,该类系统具有小而轻的结构,适于作为小轻型高分辨率 CCD 遥感相机的光学系统。

### 参 考 文 献

- [1] 潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检测. 北京: 科学出版社, 1994. 157~ 167
- [2] Korsch D. *Reflective Optics*. Huntsville, Alabama: Academic Press, 1991. 207~ 225
- [3] Figoski J W. Development of a three-mirror, wide-field sensor, from paper design to hardware. *Proc. SPIE*, 1989, **113**: 126~ 133

## Design of a Compact All-Reflective Optical System for a CCD Remote Sensing Camera

Xu Shiwen    Fu Ling    Xu Bo    Long Funian

(Department of Astronautics and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(Received 10 March 1999; revised 26 April 1999)

**Abstract** An all-reflective system with compact structure and wide field-of-view is designed on the basis of the three-mirror aberration theory. Coaxial design is adopted whereas its off-axis rays is used, so that the length of its lens barrel can be of  $f'/7 \sim f'/9$ , field-of-view more than  $3^\circ$ , the obstruction ratio less than 6%, and the image of quality reaches to the limit of diffraction. The optical system suits the needs of long focus remote sensing CCD camera.

**Key words** reflective optical system, three-mirror, optical design.