

文章编号 1004-924X(2001)04-0315-04

# 长焦距空间三反光学系统的设计

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

(1. 长春光学精密机械学院, 吉林 长春 130022;

2. 中科院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

**摘要:**长焦距、小体积是空间光学系统设计研究的热点。本文在三镜反射光学系统的几何光学理论上, 尝试性进行了小尺寸、大视场、长焦距全反射系统的设计。本文所研究的光学系统三个反射面都是二次曲面, 并给出了视场可达到 3°, 焦距为 10m 的两种设计结果, 最后对两种设计结果进行了比较, 得出了相应的结论。对实现长焦距、小体积的可行性进行了初步的探讨。

**关键词:**长焦距; 光学系统; 光学设计; 全反射

**中图分类号:**TH703 **文献标识码:**A

## 1 引言

进入 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它的要求都越来越高。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。但是, 焦距增大时, 系统尺寸也将随着增大, 体积大对航空和航天产品非常不利。因此, 如何增大焦距, 同时又在保证成像质量的条件下尽量减小体积是目前空间光学研究的热点。在大孔径光学系统中, 折射系统需采用特殊光学材料或复杂的结构来消二级光谱<sup>[1]</sup>, 而反射系统不产生色差, 孔径可以做的较大, 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>[2-4]</sup>。本文基于几何光学理论的基础上, 尝试设计了焦距为 10m 的两种形式长焦距三反系统, 视场都可达到 3°, 筒长较短, 并对这两种系统进行了比较。

## 2 公式推导

三反镜光学系统的初始结构图如图 1 所示, 假设  $k_1, k_2, k_3$  分别为 3 个非球面的二次曲面系数,  $a_1 = L_2/f_1' \approx h_2/h_1$ ,  $a_1$  为次镜对主镜的遮栏比,  $f_1'$  为主镜的焦距,  $h_1, h_2$  为主镜和次镜的口径 (入瞳与主镜重合);  $a_2 = L_3/L_1' \approx h_3/h_2$ ,  $a_2$  为第

三镜对次镜的遮栏比,  $h_3$  为第三镜的口径;  $m_2 = (n_2'L_2')/(n_2L_2)$ ,  $m_2$  为次镜的放大率,  $m_3 = (n_3'L_3')/(n_3L_3)$ ,  $m_3$  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;  $n_i$  和  $n_i'$  分别为各镜对应的物方和象方折射率;  $f'$  为系统的总焦距。利用高斯光学理论, 可得到系统结构参数的有关公式为:

$$R_1 = \frac{2}{m_2 \cdot m_3} f'$$
$$R_2 = \frac{2 \cdot a_1}{m_3 \cdot (m_2 - 1)} f'$$
$$R_3 = \frac{2 \cdot a_1 \cdot a_2}{(1 - m_3)} f'$$
$$d_1 = \frac{(1 - a_1)}{m_3 \cdot m_2} f'$$
$$d_2 = \frac{a_1 \cdot (a_2 - 1)}{m_3} f'$$

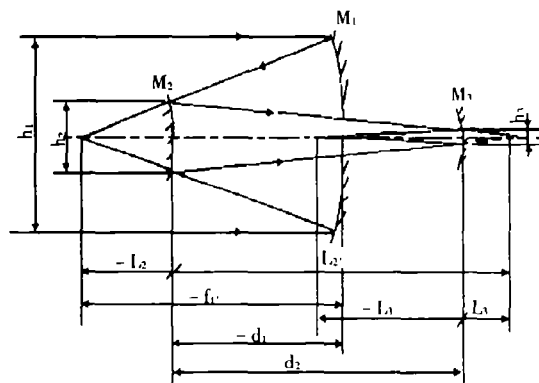


Fig. 1 Primitive optical system

收稿日期: 2001-04-08; 修订日期: 2001-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 69978020 资助

将上述参数代入 Seidel 像差系数公式, 可得初级像差系数  $S_1, S_2, S_3, S_4$  的表达式。

当三个反射镜都二次曲面时, 系统有 8 个变量(三个半径, 两个间隔, 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。其中: 成中间像的充分条件是:  $a_1 < 0$  或  $a_2 < 0$ , 对于同轴三反系统来说, 为了减小次镜遮拦对成像质量的影响,  $a_1$  的取值不应太大。

## 2 设计举例

现设计一个焦距  $f' = 10000$ 、相对孔径  $D/f' = 1/10$ 、视场角  $2w = 3^\circ$  的三反系统。

(1) 根据参数  $a_1, a_2, m_1, m_2$  的值, 通过反复计算, 取  $a_1 = 0.22, m_2 = 2.02, m_3 = -3.00$

可得到初始结构参数:

radius $r$	spacing $d$	secondary curvature $k$
-3300	-1287	-0.9
-1440	2431	-7.0
-2547	-5094	-0.4

从中可以看出: 主镜和第三镜为椭球面, 次镜为双曲面, 孔径光阑和主镜重合, 中间像成在主镜与次镜中间。为了减小中心遮拦, 缩短空间尺寸, 现在中间像点位置加块反射镜, 将系统进行折转, 形成三镜消像散系统(TMA 系统), 如图 2 所示。

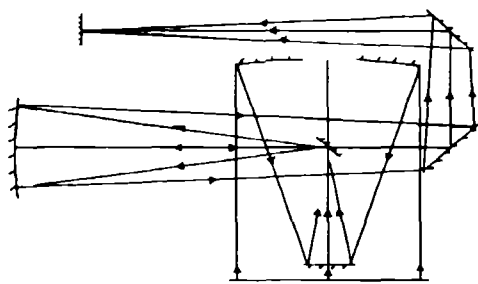


Fig. 2 System layout

将此初始结构进行特定优化, 其像质可达到衍射极限, 传递函数曲线见图 3 所示, 能量分布见图 4, 经两平面反射镜转向后, 系统的全长为  $f'/4 - f'/5$ 。

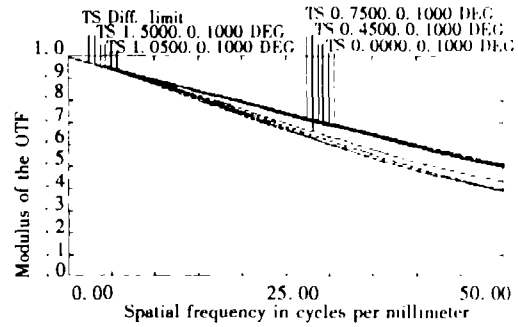


Fig. 3 MTF curve

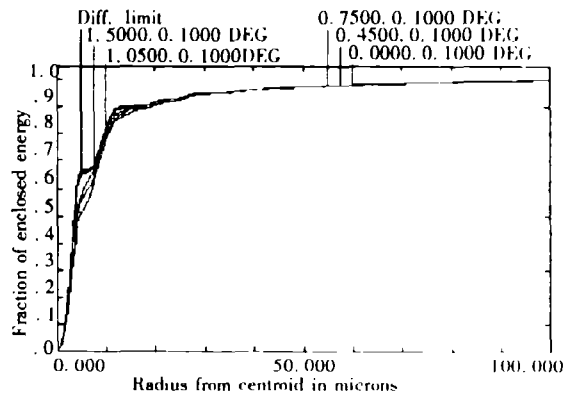


Fig. 4 Diffraction energy curve

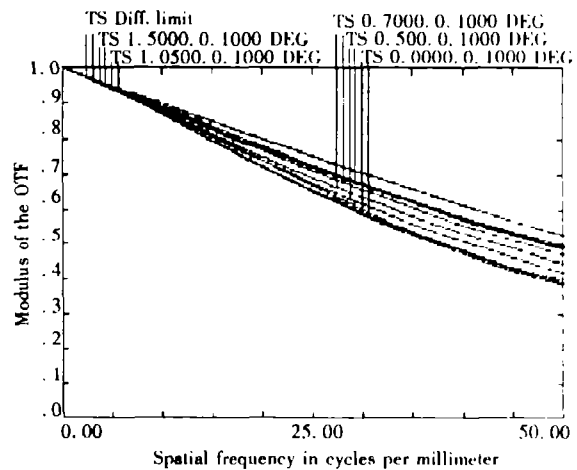


Fig. 5 MTF curve

在相同的系统性能参数条件下, Korsch 十字成像 TMA 系统的结构参数为:

radius $r$	spacing $d$	secondary curvature $k$
-4000.0	-1600.0	-0.93
-1600.0	2666.7	-7.29
-2666.7	-4666.9	-0.34

传递函数曲线见图 5,将两系统相比较,可以看出,在传函值相近的条件下,第一个系统的结构尺寸更小,更紧凑。

(2) 在相同的系统性能参数条件下,现将中间像成在主镜的中心位置,取  $a_1 = 0.22$ ,  $m_2 = 3.4$ ,  $m_3 = -1.8$ , 解得初始结构参数为:

radius $r$	spacing $d$	secondary curvature $k$
-3300.00	-1275.00	-0.95
-1062.50	2498.07	-2.82
-1567.04	-2180.17	-0.43

为了减少中心遮拦,通过视场偏置和一平面反射镜转像的方法来实现,所得系统结构见图 6,全长为  $f/3.5 \sim f/4.5$ 。

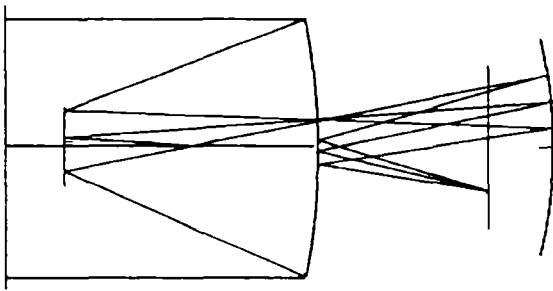


Fig. 6 System layout

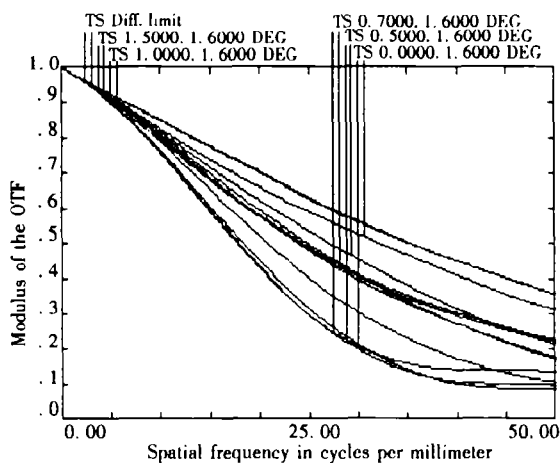


Fig. 7 Diffraction energy curve

系统的传递函数见图 7,可见在相同的特征频率下,传函比上述系统降低了很多,这主要是因为离轴彗差和像散引起的。

将此系统改成焦距为 3m 左右时,其传递函数见图 8 所示,像质基本上达到了衍射极限。

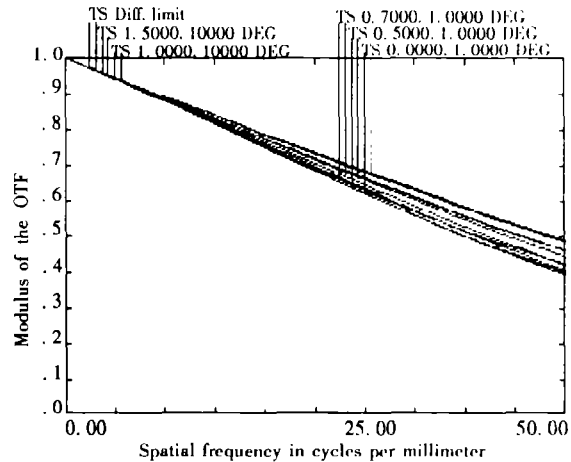


Fig. 8 MTF curve

### 3 结 论

三反系统由于其独特优势,适合于空间遥感等领域,已备受关注。本文设计使用的是条形视场,适用于线阵的 TDI-CCD 接收器,通过推扫方法可得到成像,实例适合空间对地遥感等领域。

通过对上述两系统的分析和比较,可以得出:对于孔径与视场均无偏置的有中间像的同轴 TMA 系统来说,当焦距为 10m、视场为  $3^\circ$  左右,像质可达到衍射极限,但由于中间像是通过一平面反射镜折转,因而对此反射镜的光学质量和固定方式的要求较高。而对于视场偏置、孔径同轴的 TMA 系统来说,当为长焦距(10m)时,其得到的传函低;当焦距为 3m~4m,视场为  $3^\circ \sim 3.5^\circ$  时,像质较好,此时对转向反射镜要求不高。当进一步加大视场,将导致中心遮拦加大,从而使传函降低,像质下降。为了同时达到大视场、长焦距、高质量,宜用无遮拦、偏轴的 TMA 系统,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,这类系统将在下一步继续研究。

**参考文献:**

- [1] 姜会林.关于二级光谱问题的探讨[J].光学学报,1981,3(2):225.
- [2] Korsch D G. Reflective optics[J].SPIE, 1987,751.
- [3] 薛鸣球.长焦距光学系统研究[J].高速摄影与光子学,1989,(4):289-293.
- [4] 潘君群.具有三个二次反射镜的光学系统[J].光学学报,1988,8(8):717-721.

**Design of long focal length space optical system with three reflective mirrors**

CHANG Jun<sup>1</sup>, WENG Zhi-cheng<sup>2</sup>, JIANG Hui-lin<sup>1</sup>, CONG Xiao-jie<sup>2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022, China;*  
2. *The State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022, China*)

**Abstract:** A long focal length and compact space optical system is discussed. An all - reflective system with compact structure and wide field of view is designed on the basis of geometry optical theory. In this paper, two types of three - mirror systems with 10m focal length and 3<sup>0</sup> field of view are given, and the comparison between them are made.

**Key words:** long focal length; optical systems; optical design; all-reflection

**作者简介:**常 军(1973-),男,江西吉安人,1994年毕业于长春光学精密机械学院光电检测专业,1996年考入长春光学精密机械学院,获硕士学位。1999年攻读光学博士学位,主要从事光学设计。