

文章编号: 0253-2239(2010)09-2680-04

一种大视场离轴三反射光学系统研究

郭永祥^{1,2} 李英才¹ 梁天梅³ 陈钦芳^{1,2}

(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 100049)

³ 长安大学政治与行政学院, 陕西 西安 710054

摘要 从共轴三反射系统的基本理论出发,通过偏瞳和偏视场相结合的方式设计了一个圆视场离轴三反射光学系统,全视场为 5° ,焦距 $f=5000$ mm。从像质评价结果可以看出,系统成像质量接近衍射极限,满足指标要求。在设计中考虑到了实际工程应用中的部分问题,可以为长焦距大视场航天相机系统设计提供参考。

关键词 光学设计;反射系统;三反射系统;离轴三反射系统

中图分类号 TB133 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2680

Optical Design of the Uncoaxial Three-Mirror System with Wide Field of View

Guo Yongxiang^{1,2} Li Yingcai¹ Liang Tianmei³ Chen Qinfang^{1,2}

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

² Graduate Univeristy of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³ School of Politics and Administration Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China

Abstract Based on the theory of off-axis three-mirror system, an optical system with effective focal length of 5000 mm and field of view of 5° is designed. The image qualities of this system are near diffraction limit. Some factors in practical engineering application are taken into account in course of design, so that this system is very useful in the field of space optical remote sensing.

Key words optical design; reflective system; three-mirror system; off-axis three-mirror system

1 引言

航天遥感是指从大气层之外对地进行观测,一般平台离地高度在 80 km 以上。在航天遥感领域,人们对地面分辨力的要求越来越高。若摄影高度一定,光学系统的角分辨率与其入瞳口径成反比。在相对孔径受到限制时,增大焦距可以有效的增大入瞳口径。CCD 相机在轨道高度一定的情况下,地元分辨率的大小与其光学系统焦距大小成反比,因此,相机焦距的增大有利于系统地元分辨率的提高。如果同时能做到大视场,则可扩大所能探测到物面的范围。这类宽视场长焦距系统有广泛的军民两用前景。

反射式光学系统以其无色差、结构紧凑^[1~6]以及

可减轻大口径长焦距望远系统重量等优点在航天遥感领域受到了科研人员长期的关注^[7]。而双反射镜系统由于优化变量少,不能满足宽视场、大相对孔径的要求,进而又引入了三反射镜光学系统。三反射镜系统具有 3 个半径、2 个间隔、3 个二次非球面系数共 8 个参数,在满足焦距、球差、彗差、像散及场曲的条件下,还剩余三个可变参量。但是共轴三反射光学系统在宽视场的情况下,中心遮拦过大,进而影响光学系统的分辨率和进入系统的能量。因此没有中心遮拦的离轴三反射镜系统成为了研究和应用的热点。

实际工程应用中对光学系统设计的要求特别严格,光学系统的尺寸、实际加工装调的难易程度因素

收稿日期: 2009-12-14; 收到修改稿日期: 2010-01-14

作者简介: 郭永祥(1985—),男,硕士研究生,主要从事光学设计和红外等方面的研究。

E-mail: gyxllr605@163.com

导师简介: 李英才(1945—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间光学与观测技术等方面的研究。E-mail: lyc@opt.ac.cn

都得考虑,因而尽可能少的使用高次非球面系数、尽可能不使用三块反射镜的倾斜量、系统长度尽可能小,这就大大增加了宽视场光学系统的设计难度。目前国内长焦距光学系统设计中为了做到大视场大都采用长条形视场的方式(Y 方向视场小,避免了该方向像差难校正的缺点),而真正的圆形宽视场三反射系统全视场基本不超过 3.5° 。

本文从共轴三反射式光学系统结构参数的基本计算公式出发,采用偏瞳和偏视场相结合的方式,设计了一个离轴三反射式消像散光学系统。

2 设计原理

离轴三反射镜光学系统是以共轴三反射系统为初始结构进而进行离轴优化的。因此,首先由共轴三反射镜系统出发求解系统的初始结构参数。同轴三反射式光学系统的光路结构和参数定义如图 1 所示。图中的长度值均为带符号的数据,其符号定义为自左向右为正,反之为负。

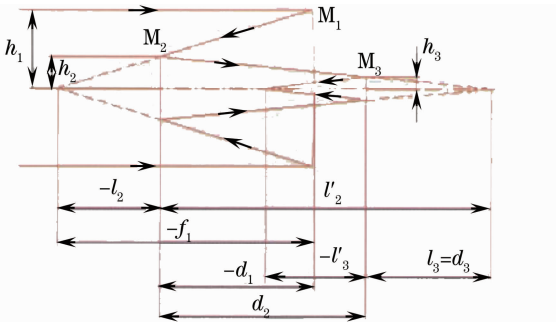


图 1 共轴三反射系统初始结构

Fig. 1 Initial configuration of coaxial three-mirror system

图中 M_1, M_2, M_3 分别为系统的主镜、次镜和三镜。其结构参数分别为:三个反射面的曲率半径 r_1 ,

r_2, r_3 ; 主镜的间距 d_1 , 次镜到三镜的距离 d_2 , 三镜到像面的距离 d_3 ; 三个反射面的二次非球面系数 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ 。要确定共轴三反射系统的结构参数,只要给定三个有关结构方面的条件即可。由于是长焦距系统,往往需要对系统的总长度有一定的要求。一般地将 d_1, d_2, d_3 为给定条件,即将 d_1, d_2, d_3 作为已知量,规定光线的入射方向从左向右为正,显然有 $d_1 < 0, d_2 > 0, d_3 < 0$ 。根据同轴三反射镜结构参数计算公式,可以得到以下三个公式:

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_3} = \frac{1}{r_2}, \quad (1)$$

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

$$\frac{2(r_1 r_3 - 2r_3 d_1 - r_2 r_3) + 1}{2r_1 r_2} = \frac{d_3}{f}. \quad (3)$$

以系统总焦距 f 和给定的工作距离 d_3 , 以及两个间隔 d_1, d_2 作为已知量代入(1)~(3)式中,可以求出三个面的曲率半径 r_1, r_2, r_3 。由 $r_1, r_2, r_3, d_1, d_2, f$ 可以求出次镜对主镜的遮拦比 α_1 , 三镜对次镜的遮拦比 α_2 , 次镜的放大率 β_1 , 三镜的放大率 β_2 , 具体计算公式如式为

$$\alpha_1 = 1 - \frac{2d_1}{r_1}, \quad (4)$$

$$\alpha_2 = 1 - \frac{2d_2(r_1 - 2d_1 - r_2)}{r_2(r_1 - 2d_1)}, \quad (5)$$

$$\beta_1 = \frac{-r_2}{r_2 - r_1 + 2d_1}, \quad (6)$$

$$\beta_2 = \frac{r_3}{\beta_1 r_1 - 2\beta_1 d_1 - 2d_2 - r_3}, \quad (7)$$

再由求出的 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$, 根据系统要求的球差 S_1 、彗差 S_2 、像散 S_3 的值即可求得三个反射面的二次非球面系数 $-e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ [8]:

$$S_1 = \frac{1}{4} [(e_1^2 - 1)\beta_1^3 \beta_2^3 - e_2^2 \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3 + e_3^2 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3 + \alpha_1 \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2], \quad (8)$$

$$S_2 = -\frac{e_2^2 (\alpha_1 - 1) \beta_2^3 (1 + \beta_1)^3}{4\beta_1 \beta_2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)^3}{4\beta_1 \beta_2} + \frac{(\alpha_1 - 1) \beta_2^3 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\beta_1 \beta_2} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\beta_1 \beta_2} - \frac{1}{2}, \quad (9)$$

$$S_3 = -e_2^2 \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 - \beta_1)^3}{4\alpha_1 \beta_1^2} + e_3^2 \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} + \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)(1 - \beta_1)(1 + \beta_1)}{\alpha_1 \beta_1} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2} - \beta_1 \beta_2 + \frac{\beta_2 (1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2}, \quad (10)$$

至此,系统的 8 个结构参数 $r_1, r_2, r_3, d_1, d_2, -e_1^2, -e_2^2, -e_3^2$ 全部确定,编制计算初始结构的程序即可计算初始结构参数。

3 设计实例

卫星轨道高度 $H=500$ km,对地分辨率 $R_{\text{GSD}}=1$ m,相机用的 CCD 像元尺寸 $a=10$ μm ,全色通道波长取 $\lambda=0.5\sim 0.8$ μm ,全视场为 5° 。现设计一种光学系统满足上述指标要求。

系统相对孔径的选取需要考虑两个方面的因素:首先,受衍射斑大小和入射光能量的限制,相对孔径不能太小;其次,受光学系统设计难度和系统质量尺寸要求的限制,相对孔径不能太大。综合考虑以上两个因素,最终确定系统的相对孔径取 $1/10$ 。相机焦距 $f=Ha/R_{\text{GSD}}=5$ m,尼奎斯特(Nyquist)频率 $f_N=1/(2a)=50$ lp/mm。

同轴形式在 5 m 的长焦距情况下,环视场(由于存在中心遮拦,故为环视场)最大只能做到 2.5° ,因此采用离轴三反射系统进行设计。

实际工程应用中离轴三反射光学系统的设计需要考虑以下几点:

1) 三块反射镜均为非球面,但是介于现阶段的加工工艺水平,为了便于实际加工尽量不使用高次非球面系数,因为如果使用高次非球面系数会增加加工难度;

2) 实际应用中小型化很重要,系统的筒长一般不要大于系统焦距的 $1/3$;

3) 现阶段国内航天相机采用离轴三反射系统不多的原因即其装调精度难保证,该类系统装调难点就在于反射镜的倾斜角度问题,因而在设计中尽量不要使用反射镜的倾斜参量。可以采用主镜设置一定量的偏瞳,进而使整个系统达到无遮拦的效果,其间可以同时使用视场离轴。

考虑到实际工程应用,系统筒长取 1500 mm (小于焦距的 $1/3$),根据第 2 节中的理论计算相应的初始结构,将初始数据输入到 Zemax 光学设计软件中进行适当优化。而后设置一个初始的主镜偏瞳量,在优化过程中不断调整视场大小、视场离轴量和主镜偏瞳量,这样反复对系统进行优化,直到系统达到无遮拦并成像质量满足要求。在设计中三块反射镜均未使用高次非球面系数,也没有使用它们的倾斜量。最终优化得到的光学系统结构如图 2 所示,主镜偏瞳量为 500 mm。

系统调制传递函数 MTF 如图 3 所示。从图中

可以看出,Nyquist 频率处各视场的 MTF 均接近衍射极限,且 MTF 值均大于 0.5,符合系统要求。能量分布如图 4 所示。

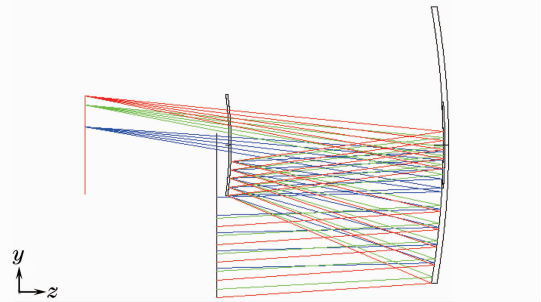


图 2 最终系统结构图

Fig. 2 Layout of the final system

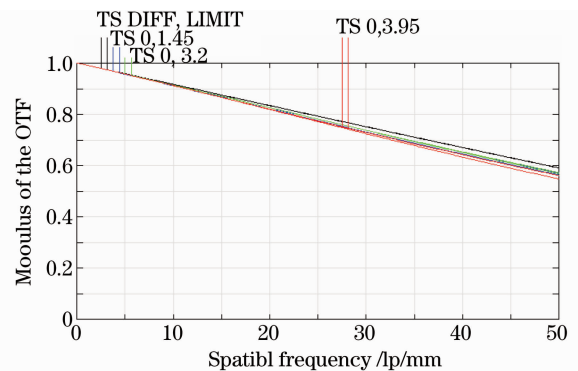


图 3 调制传递函数曲线

Fig. 3 Modulation transfer function curve

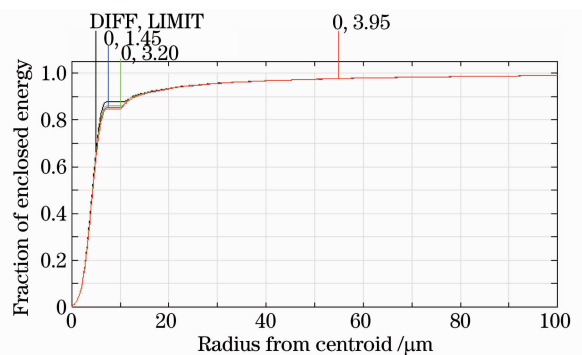


图 4 衍射能量分布图

Fig. 4 Plot of diffraction encircled energy

4 离轴反射系统的加工与装调

4.1 系统的加工

离轴三反射光学系统结构参数可以分为加工结构参数和装调结构参数,其中加工结构参数包括各面反射镜的曲率半径、面型系数等,其余参数如镜面间距、各面反射镜的倾斜、离轴量则属于装调结构参数。依据引用文献中理论,计算出系统各个结构参数的像差灵敏度系数,像差灵敏度高的结构参数对

应的镜面先加工。

根据加工检测精度给出最先加工镜面的曲率半径和面型参数公差,将带有公差的系统输入光学设计软件中,将该镜加工结构参数外的所有参数设为变量进行优化,如果优化结果可以达到设计要求则可放松该面镜的公差再进一步优化,如此循环,直至最大程度上地放松系统公差而成像质量又满足设计要求,进而得到第一面镜的加工公差;然后将第一面镜的加工公差作为加工精度,将第二面镜和第一面镜的加工公差组合输入光学设计软件重复上述过程,直至确定第二面镜的加工公差;最后将第二面镜加工公差作为加工精度,三块镜子的加工公差组合输入光学设计软件再重复前面过程,直至确定第三面镜子的加工公差。这样可以最大程度地放松系统的加工公差要求,大大降低该类光学系统的加工成本。

4.2 系统的装调

该类长焦距大视场离轴三反射光学系统的精密装调,可以在粗装调完成之后采用自准干涉检验的方法。

采集系统每个视场的干涉图样,而后用 MetroPro 等干涉条纹分析软件算出整个光学系统的波前均方根误差,其量值是用泽尼克系数来表示的。通过泽尼克系数与系统波像差的关系(由于各种几何像差与泽尼克多项式各项的系数可以建立起一一对应的联系,因而就可以从泽尼克系数中得出光学系统的波像差),判断需要调整的目标值,即当前在整个光学系统中占主导地位的波前误差,进而由系统波前误差得到系统的失调量,然后进行一次精密机械装调。通过多次这样的分析和优化,直到光学系统达到最好的调整状态。

5 结 论

离轴三反射光学系统以其独特的优势,在遥感领域的应用越来越广泛,但是目前工程应用中为了做到宽视场,通常采用条形视场的方式,即 Y 方向视场小,避免了 Y 方向像差难校正的缺点,而真正的圆形宽视场三反射系统全视场基本不超过 3.5° 。本文通过偏瞳偏视场相结合的方式设计了一中离轴三反射光学系统,全视场角为 5° ,为圆视场。由调制传递函数曲线可以看出在 Nyquist 频率处 MTF

大于 0.5,成像质量良好,基本接近衍射极限,可以满足系统的性能要求。在设计过程中考虑了实际工程应用中对系统尺寸、加工装调的难易程度等的限制,未使用三块反射镜的倾斜量,仅有次镜使用了高次非球面系数(主镜、三镜口径较大,使用高次非球面系数后加工难度很大,故仅仅次镜使用了六次非球面系数),系统长度小于焦距的 $1/3$ 。

参 考 文 献

- 1 Chen Haofeng, Li Yingcai, Fan Chao *et al.*. Design of off-axial three-mirror reflective optical system with large field-of-view and long focal length[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(S1): 142~145
陈浩锋,李英才,樊超等.宽视场长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J].*光子学报*,2007,**36**(S1):142~145
- 2 Song Yanfeng, Shao Xiaopeng, Xu Jun. Off-axis three-mirror reflective optical system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(4): 706~709
宋岩峰,邵晓鹏,徐军.离轴三反射镜光学系统研究[J].*红外与激光工程*,2008,**37**(4):706~709
- 3 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lü Baobin *et al.*. A novel design of two-mirror three reflective optical system[J]. *J. Appl. Opt.*, 2009, **30**(6): 916~920
郭永祥,李英才,吕保斌等.一种新型的两镜三反射光学系统设计[J].*应用光学*,2009,**30**(6):916~920
- 4 Zhang Liang, An Yuan, Jin Guang. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view and long focal length[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(2): 278~280
张亮,安源,金光.大视场、长焦距离轴三反射镜光学系统的设计[J].*红外与激光工程*,2007,**36**(2):278~280
- 5 Zhang Xiangxiang, Fu Yutian, Han Changpei *et al.*. Design and adjustment of the coaxial three-mirror optical system used in field bias[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(12): 118~123
张祥翔,傅雨田,韩昌佩等.一种离轴使用的同轴三反射系统的设计和装调[J].*光电工程*,2007,**34**(12):118~123
- 6 Liu Lin, Xue Mingqiu, Shen Weiming. Approach to increase the image performance of the uncoaxial three-mirror reflective system[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(2): 181~184
刘琳,薛鸣球,沈为民.提高离轴三反射镜系统成像质量的途径[J].*光学技术*,2002,**28**(2):181~184
- 7 Zheng Zhenrong, Sun Xutao, Gu Peifu *et al.*. Design of objective lens with reflective spherical Fresnel zone plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1483~1487
郑臻荣,孙旭涛,顾培夫等.应用反射型球面非涅耳波带片的成像物镜设计[J].*光学学报*,2006,**26**(10):1483~1487
- 8 Pan Junhua. Fabrication and Testing of Optical Asphere[M]. Beijing: Science Press, 1994. 19~37
潘君骅.光学非球面的加工与检验[M].北京:科学出版社,1994.19~37
- 9 Liang Minyong, Liao Ningfang, Feng Jie *et al.*. Design and optimization of three cylindrical reflectors optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1359~1363
梁敏勇,廖宁放,冯洁等.三反射式柱面光学系统设计及优化[J].*光学学报*,2008,**28**(7):1359~1363