

文章编号:1004-4213(2010)06-0994-4

# 轻小型 CCD 相机光学系统设计\*

李旭阳<sup>1,2</sup>, 李英才<sup>1</sup>, 马臻<sup>1,2</sup>, 易红伟<sup>1</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:**基于 Ritchey-Chretien 系统, 设计了具有三块球面校正镜组件的折反式光学系统, 所设计的光学系统焦距为 1 000 mm, F 数为 5, 谱段范围为 450~900 nm, 视场角 2.3°, 设计结果表明:该系统在空间频率为 77 lp/mm 时, 面中心遮拦为 15% 时, 各视场 MTF 优于 0.47, 成像质量达到衍射极限, 光学系统畸变量小于 0.5%, 同时该系统具有结构简单、体积小、重量轻等优点, 适合在轻小型空间相机上使用。

**关键词:**光学设计; 空间相机; 折反系统; 衍射极限

**中图分类号:** TH703

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20103906.0994

## 0 引言

空间光学系统现已在国土勘测、城市普查、军事国防等领域得到广泛应用. 为了能够分辨物体的细节, 要求光学系统具有高地元分辨率, 为了能够得到更加清晰的图像, 要求光学系统具有高的调制度和信噪比. 反射系统由于使用谱段宽且不产生色差、口径可以作的很大, 因而在对地光学遥感、天基目标观测等方面得到广泛的应用.

随着卫星飞行控制技术的不断发展, 通过多颗小卫星编队飞行、组网技术可以实现全球的实时覆盖. 如德国的 RapidEye 系统就采用小卫星组网技术提高了地面目标的重访效率<sup>[1]</sup>. 本文所设计的光学系统在采用小像元技术提高地元分辨率, 扩大视场提高覆盖宽度的同时考虑到小卫星应用的需求, 使光学系统尽可能的小型化、轻量化.

## 1 光学设计分析

折射式光学系统视场角虽然可以做的很大, 但焦距一般较短, 所对应的地元分辨率并不高. 而反射式光学系统虽然视场角有限, 但可以增长焦距提高分辨率, 因此在空间光学方面有着广泛应用.

目前常用的 R-C 两镜系统, 主镜和次镜均采用了双曲面, 消除了系统的球差和彗差, 但只有 20' 左右的视场像质非常好<sup>[2]</sup>, 若进一步扩大视场, 成像质量将变差, 需要加入校正镜校正像差<sup>[3]</sup>.

RC 系统加校正镜组件的光学系统如图 1.<sup>[4]</sup>

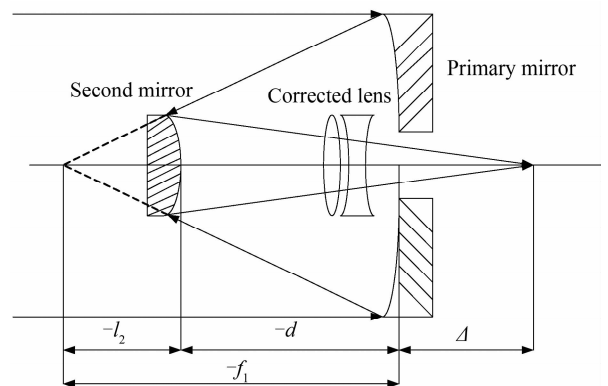


图 1 RC+Lens 系统

Fig1 RC+Lens system

RC 系统只需要确定三个系统参量, 便可以计算出系统的其它参量, 本文以系统焦距  $f$ , 主镜曲率半径  $R_1$ , 焦点伸出量  $\Delta$  为已知量计算其它系统参量.

主镜的焦距为

$$f_1 = R_1 / 2 \quad (1)$$

次镜放大率为

$$\beta = f / f_1 \quad (2)$$

次镜的中心遮拦比为

$$l_2(-f_1 + \Delta) / (\beta - 1) \quad (3)$$

$$\alpha = l_2 / f_1 \quad (4)$$

主次镜间隔为

$$d = f_1(1 - \alpha) \quad (5)$$

次镜的曲率半径为

$$R_2 = \frac{\alpha\beta}{\beta + 1} R_1 \quad (6)$$

主镜二次曲面系数

\* 国家重点基础研究发展计划(2009CB724006)资助

Tel: 029-88887041

Email: lixuyang2004@126.com

收稿日期: 2009-10-23

修回日期: 2009-12-15

$$e_1^2 = 1 + \frac{2\alpha}{(1-\alpha)\beta} \quad (7)$$

次镜二次曲面系数

$$e_2^2 = \frac{\frac{2\beta}{1-\alpha} + (1-\beta)(1+\beta)}{(1+\beta)^2} \quad (8)$$

至此,RC 系统的全部参量都已得到,但由于 RC 系统只校正了球差和彗差,限制了视场角的进一步扩大,如果增加几个变量则可以进一步校正轴外像差扩大视场<sup>[4]</sup>,其常用的方法是在像面附近加校正镜组件,加入校正组件后引入位置色差和倍率色差,同时为了保证系统焦距和尺寸,因此校正组件只能采用复杂化后的正负透镜组合。

## 2 光学设计实例

本文设计了一焦距  $f=1\ 000\ \text{mm}$ ,入瞳直径  $D=200\ \text{mm}$ ,相对孔径  $D/f=1/5$ ,视场角  $2.3^\circ$ ,工作谱段为  $450\sim 900\ \text{nm}$  的折反式光学系统,所采用的 CCD 图像传感器的像敏单元尺寸为  $6.5\times 6.5\ \mu\text{m}^2$ ,光学系统的 Nyquist 频率为  $77\ \text{lp/mm}$ 。

由 RC 系统的初始结构公式所得到的光学系统的参量如表 1。

表 1 光学系统参量

Table 1 Optical system parameter

Name	Radius/mm	Distance/mm	Conic
Primary Mirror	770	267	-1.130
Second Mirror	382	305	-6.906

为了能使所有的像差得到有效校正,校正组件采用复杂化后的正负透镜组,这样系统就有了多个变量可以用于校正初级像差,其余变量用于满足后工作距和总体尺寸的要求。利用光学设计软件 CODE V 优化后得到的光学系统光路图如图 2,设计过程中发现如果增加光学系统的整体尺寸或增加次镜对系统的遮拦,均可以使光学系统的像差变小,但增加光学系统的整体尺寸不利于小型化的需求,增加次镜对系统的遮拦将导致像面照度变低,不利于提高整个系统的调制度(MTF)和信噪比(SNR)<sup>[5]</sup>。

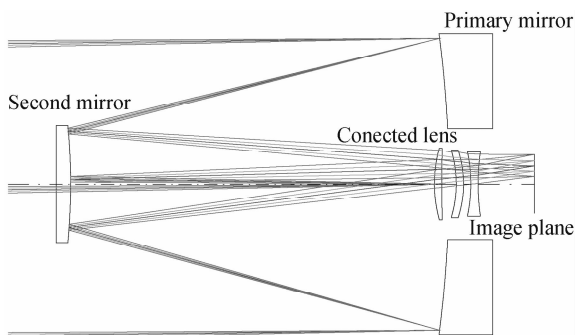


图 2 光学系统形式  
Fig. 2 Layout of optical system

优化后的光学系统如图 2,主镜二次曲面的系数为  $-1.306$ ,次镜二次曲面的系数为  $-9.697$ ,第一块透镜采用正透镜,第二块和第三块透镜采用分离的负透镜组件。因为校正镜组件的加入改变了光线的入射高度和角度,因此主、次镜的二次曲面的系数变化较大,其它参量无较大的改变。同时校正组件位于主镜中心孔处,充分利用了系统空间,光学系统全长不足  $320\ \text{mm}$ ,不足系统焦距的  $1/3$ ,后工作距  $38.12\ \text{mm}$ ,为焦面组件的设置提出了充分的空间。

为了反映光学系统的成像情况,分别用调制传递函数、场曲和畸变、点列图、横向色差来评价光学系统的成像质量。

由图 3 可知所有视场的传递函数均接近衍射极限,  $77\ \text{lp/mm}$  时各视场 MTF 均达到  $0.47$ ,且系统无渐晕。由图 4 中可知在各个视场基本无像散,仅有部分残余彗差,光学系统的畸变量小于  $0.5\%$ 。由图 5 可知各视场光线所成像点的半径均方根值均在  $5\ \mu\text{m}$  以内,小于光学系统的艾里斑直径。由图 6 可知,垂轴色差远小于艾里斑直径。该光学系统的成像质量基本完好。

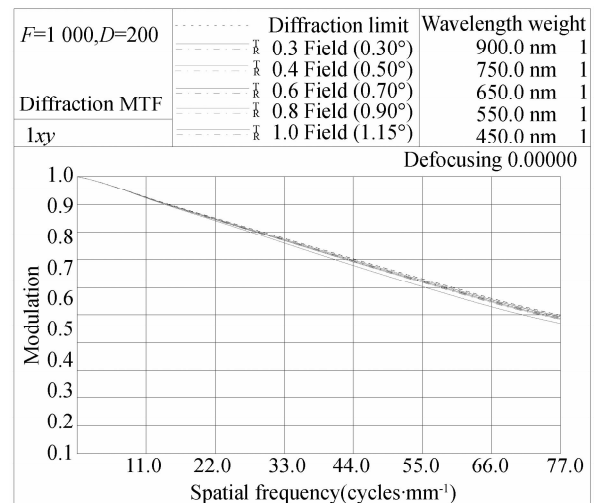


图 3 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curve

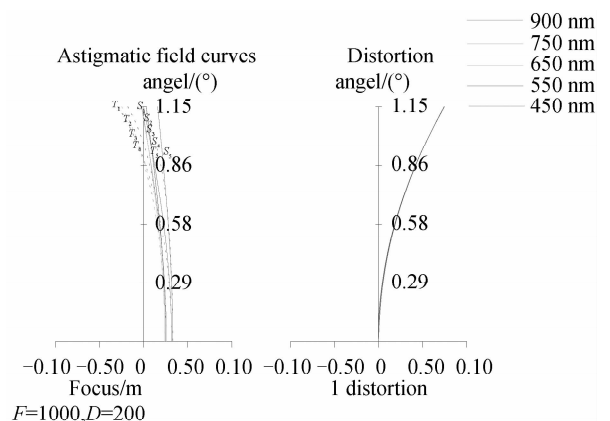


图 4 场曲和畸变

Fig. 4 Field curve and distortion

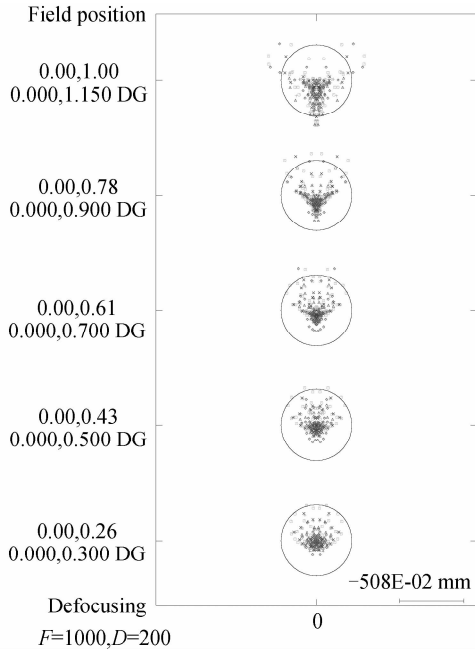


图 5 点列图  
Fig. 5 Spot diagram

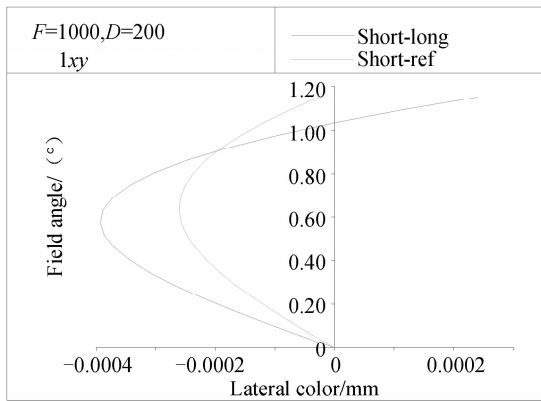


图 6 横向色差  
Fig. 6 Lateral color

空间相机的地面像元素分辨率由传感器的像元尺寸,轨道高度及光学系统的焦距决定<sup>[6]</sup>,如式(8).

$$GSD = \frac{a \cdot H}{f} \tag{8}$$

式中:GSD为地元分辨率;H为轨道高度;f为光学系统焦距;a为传感器的像元尺寸.

当轨道高度为为 450 km,像元尺寸为 6.5 μm,焦距为 1 000 mm 时,地元分辨率为 2.9 m.

地面的覆盖宽度将由空间相机的有效视场角决定,当轨道高度 H 一定时,地面覆盖宽度 W 由式(9)决定.

$$W = 2 \times H \times \tan \omega \tag{9}$$

式中:W 为覆盖宽度;ω 为半视场角.

当系统的视场角 2ω=2.3°时,覆盖幅宽可以达到 18 km.

### 3 结论

本文所设计的光学系统,具有成像谱段宽、中心遮拦小、视场大、光学零件少、复消色差等特点.系统中仅有主镜和次镜使用了二次曲面,校正组件均采用由普通玻璃构成的球面镜,相比采用高次非球面和多个非球面的光学系统减小了加工、装配、检测的实现难度[7].

本文所述的光学系统体积、质量、外形尺寸、适应性、工艺性、造价等都能满足一定的空间应用需求.随着空间小卫星技术的不断发展,小型紧凑的光学系统将会得到更加广泛的应用.

#### 参考文献

- [1] ZHANG Ke-ke, RUAN Ning-juan, FU Dan-ying. Analysis and consideration of development of overseas space off-axis TMA system camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, **9**(3): 63-70.  
张科科, 阮宁娟, 傅丹鹰. 国外空间用三反离轴相机发展分析与思考[J]. *航天返回与遥感*, 2008, **9**(3): 63-70.
- [2] PAN Jun-hua. Research on the field corrector design for the R-C system of the large telescope Cassegrain focus[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2002, **6**(3): 231-234.  
潘君华. 关于大望远镜卡焦 R-C 系统视场改正镜设计的研究[J]. *光学精密工程*, 2002, **6**(3): 231-234.
- [3] AN Lian-sheng. *Applied optics*[M]. Beijing: Beijing Institution of Technology Press, 2003: 175-179.  
安连生. *应用光学*[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2003: 175-179.
- [4] PAN Jun-hua. The design, manufacture and test of the aspherical optical surfaces [M]. Suzhou: Suzhou University Press, 2004, **12**: 32-35.  
潘君华. *光学非球面的设计、加工与检验*[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. **12**: 32-35.
- [5] ZHONG Xing, ZHANG Lei, JIN Guang. Research on long focal length on-axis TMA system for high-resolution remote sensing [C]. *SPIE*, 2007, 6722 67220R1-R5.
- [6] YAN A-qi, ZHU Qing, CAO Jian-zhong, et al. Space optical system with large field of view and high resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(10): 1975-1977.  
闫阿奇, 祝青, 曹剑中, 等. 用于航天的高分辨率大视场光学系统设计[J]. *光子学报*, 2008, **37**(10): 1975-1977.
- [7] QIAN Yi-xian, LIANG Wei, GAO Xiao-dong. Optical design of cassegrain system with wide angle and multiple aspheric surfaces[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(4): 896-899.  
钱义先, 梁伟, 高晓东. 含多个非球面大视场卡塞格林系统光学设计[J]. *光子学报*, 2009, **38**(4): 896-899.

## Optical System Design of Light-Small CCD Camera

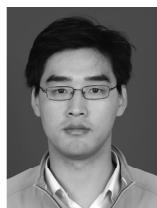
LI Xu-yang<sup>1,2</sup>, LI Ying-cai<sup>1</sup>, MA Zhen<sup>1,2</sup>, YI Hong-wei<sup>1</sup>

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

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** With the development of space technology, small satellite will be widely applied. The paper design a catadioptric system base on Ritchey-Chretien system which including three sphere correction lens. The system has a focal length of 1000,  $F$  number of 5, and spectrum band of 450~900 nm, and the field angle reaches 2.3°. the result indicates that, MTF reaches 0.47 at 77 lp/mm with 15% central obscure, the quality of image approaches the diffraction limit, and optical system distortion is less than 0.5%. The system with simpler structure, small size and light weight, can be used in light-small satellite.

**Key words:** Optical design; Space camera; Catadioptric system; Diffraction limit



**LI Xu-yang** was born in 1981. Now he is working at Space Optics Lab of Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics and for his Ph. D. degree. His research interests focus on optical design and optical testing.



**LI Ying-cai** was born in 1945, research fellow, Doctoral Supervisor, graduated from Zhejiang University in 1967. His research interests focus on space optics and remote sensing technology.