

doi:10.3788/gzxb20154403.0311002

# 多光谱遥感相机光学系统设计

李旭阳<sup>1</sup>, 易红伟<sup>1</sup>, 齐浩程<sup>2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 北方光电集团有限公司, 西安 710065)

**摘 要:** 设计了谱段位于 450~900 nm, 焦距  $f=6\ 000$  mm,  $F$  数为 10 的大  $F$  数、矩形视场、长焦距的折轴三反光学系统. 光学系统视场角为  $1.6^\circ$ , 光学系统的畸变优于 0.5%, 中心面遮拦为 6% 时, Nyquist 频率 (25 lp/mm) 处各谱段调制传递函数优于 0.65, 整个光学系统成像质量达到衍射极限. 同时根据所采用的多光谱时间延迟积分 CCD 分析了相机各谱段的静态调制传递函数, 可以满足多光谱遥感相机的设计使用要求.

**关键词:** 光学设计; 空间相机; 多光谱; 宽视场; 衍射极限

**中图分类号:** TH703

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-421(2015)03-0311002-5

## Optical System Design of Multispectral Space Camera

LI Xu-yang<sup>1</sup>, YI Hong-wei<sup>1</sup>, QI Hao-cheng<sup>2</sup>

(1 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanic, CAS, Xi'an 710119, China)

(2 North Electro-optics Group Co. LTD, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** The reflective optical system which is characterized by the spectrum band 450~900 nm, focal length of 5 000 mm and  $F$  number of 10 was designed. The result indicates that the field angle reaches  $1.6^\circ$ , optical system distortion is less than 0.5%. Modulation Transfer Function (MTF) reaches 0.65 at Nyquist frequency (25 lp/mm) with 6% central obscure, the quality of image reaches the diffraction limited. At the same time, the paper studies the static MTF of all spectrums based on using time delayed integration CCD. So this kind of optical system can meet the demand for the use of multispectral space cameras.

**Key words:** Optical design; Space camera; Multispectral; Wide field of view; Diffraction limited

**OCIS Codes:** 110.4850; 110.6770; 080.0080; 080.3095; 120.0120; 120.4820

## 0 引言

多光谱遥感技术是利用不同光谱谱段获取同一地物目标的不同谱段图像, 通过不同谱段图像的融合, 能够同时获取地表景物的几何和光谱属性, 具有广泛的应用前景. 多光谱遥感目前已广泛应用于国地资源调查与监测、防灾减灾、农林水利、生态环境、城市规划与建设等领域<sup>[1]</sup>.

多光谱相机具有较宽谱段的成像能力, 典型的多光谱相机具有蓝、绿、红和近红外四个谱段. 传统的多光谱成像采用棱镜分光的方法进行, 因此不同谱段的图像需要进行精确配准以消除“色边缘”情况的发

生<sup>[2]</sup>. 但随着技术的发展, 特别是大尺寸晶圆和硅片加工工艺的提高, 现今的多光谱 CCD 器件已经可以在同一个晶圆上刻蚀出来, 多光谱 CCD 器件可以实现在一个 CCD 器件内探测多个光谱目标, 其实现方式是将多条 CCD 线阵封装在一起, 在窗口镀滤光膜分光使每条线阵探测不同的光谱, 该方法大大减小了各谱段间的配准误差, 配准误差仅为 CCD 的光刻误差. 但同时也对多光谱相机的光学设计提出了新的要求, 光学设计要满足宽视场以排布多光谱时间延迟积分 CCD (Time delayed Integration CCD, TDI-CCD). 美国的 Geoeye-1、Geoeye-2 卫星和法国的 Pleiades 卫星和国内的资源三号卫星均采用了四谱段的多光谱成像.

**基金项目:** 中国科学院西部之光项目资助

**第一作者:** 李旭阳 (1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为光学系统设计. Email: lixuyang2004@126.com

**收稿日期:** 2014-07-24; **录用日期:** 2014-09-19

<http://www.photon.ac.cn>

本文以三反射光学系统为基础,通过参数优化和合理的视场排布,设计了矩形视场的三反射光学系统,不仅避免了二次遮拦也使成像质量达到衍射极限.

### 1 光学系统初始结构

在空间光学系统中,折射式光学系统结构尺寸大且存在二级光谱干扰,需要采用特殊的材料和复杂的结构来消二级光谱.折反式光学系统则体积大、口径受限<sup>[3-4]</sup>,大口径材料对环境温度和压力的变化也较敏感.而反射式光学系统零件数量相对较少,容易实现轻量化,可以借助折转反射镜折叠光路,结构紧凑、体积减小、重量减轻,同时在抗热性能方面也有较强的优势.因此反射式光学系统在空间光学领域得到了广泛应用,而三反消像散系统是可以满足消像差、平像场要求的最少的反射式光学系统.

三反射镜光学系统的初始结构如图 1,  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  分别代表三反系统的主镜、次镜、三镜,其结构参数共有 8 个:三个面的半径:  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ ,主镜到次镜的距离  $d_1$ ,次镜到三镜的距离  $d_2$ ,三个反射面的二次非球面系数  $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$ <sup>[5-6]</sup>.

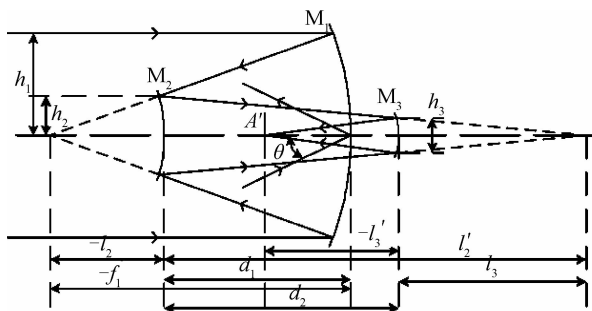


图 1 共轴三反系统的初始结构

Fig. 1 Initial configuration of co-axial three mirrors

图 1 中:主、次、三镜的口径分别为  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ ,  $f_1$  为主镜的焦距,  $l_2$  为次镜顶点到主镜焦点的距离,  $l'_2$  为次镜顶点到主、次两反射镜顶点的距离,  $l_3$  为三镜顶点到主、次两反射镜顶点的距离,  $l'_3$  为三镜顶点到三反镜系统焦点的距离.

次镜对主镜的遮拦比  $\alpha_1$  为

$$\alpha_1 = \frac{l_2}{f_1} \approx \frac{h_2}{h_1} \tag{1}$$

三镜对次镜的遮拦比  $\alpha_2$  为

$$\alpha_2 = \frac{l_3}{l'_2} \approx \frac{h_3}{h_2} \tag{2}$$

次镜的放大率  $\beta_1$  为

$$\beta_1 = \frac{l'_2}{l_2} \tag{3}$$

三镜的放大率  $\beta_2$  为

$$\beta_2 = \frac{l'_3}{l_3} \tag{4}$$

利用近轴光学理论,可得系统结构参数为

$$r_1 = \frac{2}{\beta_1 \beta_2} f' \tag{5}$$

$$r_2 = \frac{2\alpha_1}{(1+\beta_1)\beta_2} f' \tag{6}$$

$$r_3 = \frac{2\alpha_1 \alpha_2}{(1+\beta_2)} f' \tag{7}$$

$$d_1 = \frac{r_1}{2} (1-\alpha_1) \tag{8}$$

$$d_2 = \frac{r_1}{2} \alpha_1 \beta_1 (1-\alpha_2) \tag{9}$$

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  $S_3$ ,即可求出三个反射面的非球面系数  $-e_1^2$ 、 $-e_2^2$ 、 $-e_3^2$ ,至此,可以确定系统的 8 结构参数.

共轴三反光学系统在满足焦距及球差、彗差、像散和场曲条件下剩余三个可变参数,如果再给定有关结构方面的三个条件,即可确定整个系统.同轴三反光学系统中存在中心遮拦,中心遮拦将导致光学系统的有效通光口径变小,能量降低,最终导致整个光学系统的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 下降.因此,在同轴三反光学系统的设计过程中应当尽量避免二次遮拦.缩短一次像面的焦距可以减小系统中心遮拦;同时为了使光学系统的结构更为紧凑采用大相对孔径的主反射镜以缩短系统长度及尺寸<sup>[7]</sup>.为了改善有效视场的成像质量并减小整个系统的光学畸变以提高三镜放大倍率,为了避免光学系统产生二次遮拦,应使一次像面与系统的出瞳位置尽可能靠近<sup>[8-9]</sup>.

### 2 光学设计实例

本文所采用的 TDI-CCD 传感器四条多光谱 TDI-CCD 在同一芯片上,光敏面的尺寸为  $61.44 \times 10 \text{ mm}^2$ ,如图 2.

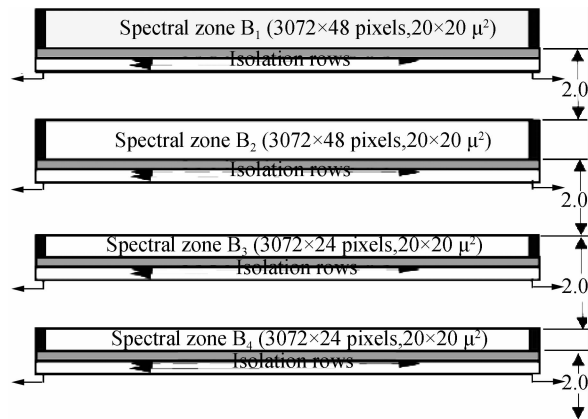


图 2 TDI-CCD 结构

Fig. 2 TDI-CCD structure chart

TDI-CCD 采用窗口加滤光膜的方式分光,如图 3.

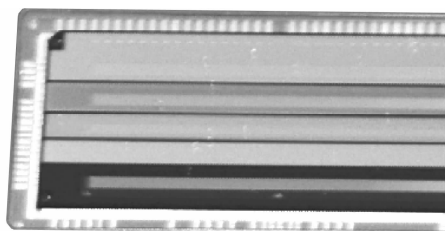


图3 TDI-CCD的滤光膜  
Fig.3 TDI-CCD Filter

TDI-CCD的其它主要参数如表1.

表1 TDI-CCD的主要参数

Table 1 TDI-CCD main parameters

| Technology Index | Parameters                                 |
|------------------|--|
| Spectral Range   | $B_1$ : 0.45-0.52 $\mu\text{m}$            |
|                  | $B_2$ : 0.52-0.59 $\mu\text{m}$            |
|                  | $B_3$ : 0.63-0.69 $\mu\text{m}$            |
|                  | $B_4$ : 0.77-0.89 $\mu\text{m}$            |
| Pixel number     | 3 072 pixel                                |
| Pixel size       | 20 $\mu\text{m}$ $\times$ 20 $\mu\text{m}$ |
|                  | $B_1$ : 0.57                               |
| MTF              | $B_2$ : 0.54                               |
|                  | $B_3$ : 0.50                               |
|                  | $B_4$ : 0.46                               |

本文光学系统的焦距  $f=5\ 000\ \text{mm}$ ;入瞳直径  $D=500\ \text{mm}$ ,相对孔径  $D/f=1/10$ ,视场角  $1.6^\circ$ ,工作波段为  $450\text{-}900\ \text{nm}$ 的折轴三反光学系统,所采用的 TDI-CCD 图像传感器的像敏单元尺寸为  $20\ \mu\text{m}\times 20\ \mu\text{m}$ .

为了适应宽尺寸多光谱 TDI-CCD 的排布,由共轴三反光学系统的初始结构公式并由光学设计软件 Code V 优化后得到的光学系统如图 4.

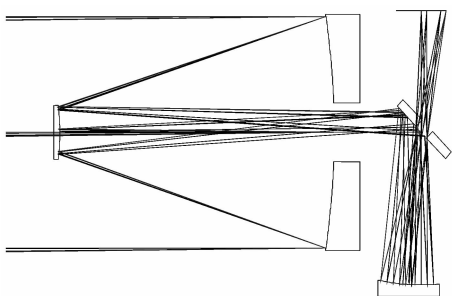


图4 光学系统形式

Fig.4 Optical System Layout

光学系统的长度不到光学系统焦距的  $1/7$ ,同时折轴光学系统充分利用光学系统的轴向和垂轴方向的空间.其中光学系统中的折轴镜即需要反射主次镜的入射光线,又需要透射三反射镜反射的出射光线,而且两者的边缘光线不能相交,如果两者相交则会在像面上产生渐晕即二次遮拦.为了使折轴反射镜的尺寸尽可能小,应使折轴镜的反射面尽可能接近一次像面处,同时为了使折轴镜的通光孔面积尽可能小,应该使其接近光学系统出瞳处.通过以上措施可以保证折轴镜

反射面的入射光线与中心通光孔的出射光线无干涉,即光学系统无二次遮拦.折轴镜的设计形式如图 5.

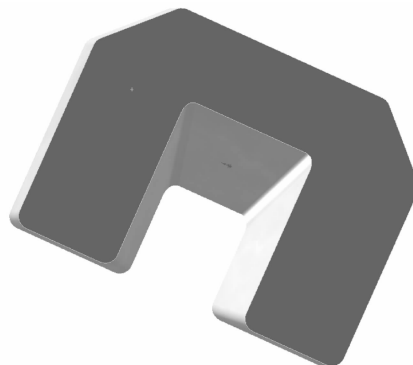


图5 折轴反射镜形式

Fig.5 Fold Mirror Layout

为了反映整个光学系统的成像情况,分别用点列图、包围圆能量来评价各个视场的成像质量.分别如图 6~8.

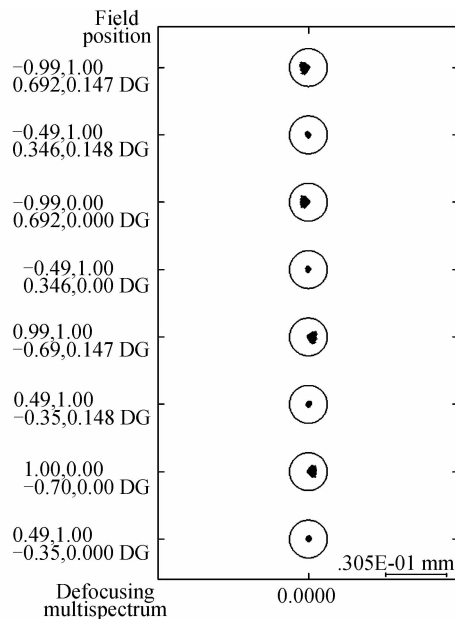


图6 点列图

Fig.6 Spot diagram

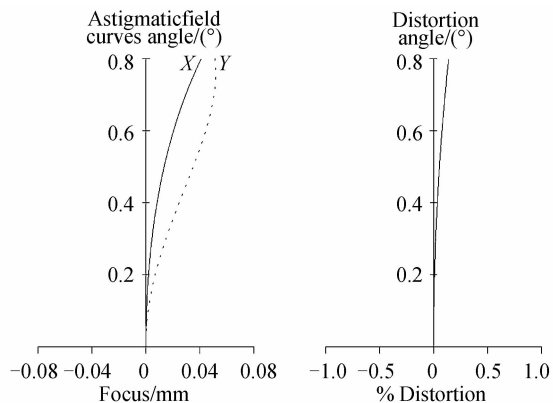


图7 场曲和畸变

Fig.7 Field curve and Distortion

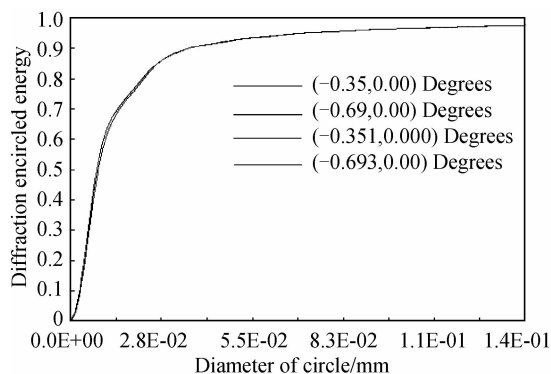


图 8 包围圆能量  
Fig. 8 Encircled energy

由图 6 可知各视场光线所成像点的半径均方根值均在  $2.2 \mu\text{m}$  以内,远小于光学系统的艾里斑直径,且系统无渐晕;由图 7 可知整个光学系统的畸变小于  $0.5\%$ ;由图 8 可知在  $20 \mu\text{m}$  的范围内包围圆能量大于  $90\%$ ;整个系统的成像质量达到衍射极限.为了评价多光谱各谱段的 MTF,各谱段的 MTF 曲线如图 9~12.

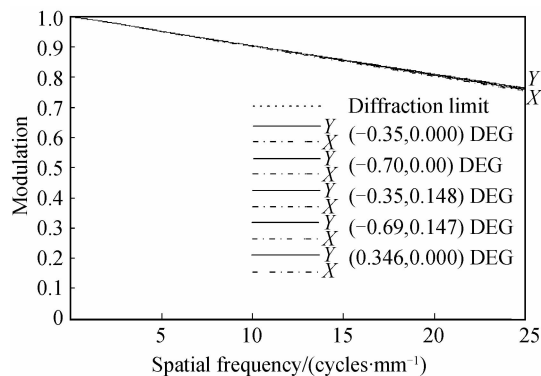


图 9  $B_1$  谱段 MTF  
Fig. 9 The MTF of  $B_1$  spectrum

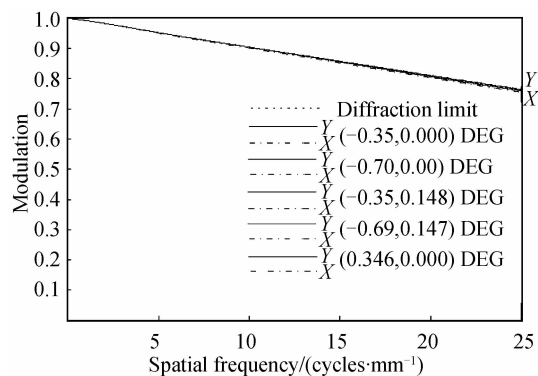


图 10  $B_2$  谱段 MTF  
Fig. 10 The MTF of  $B_2$  spectrum

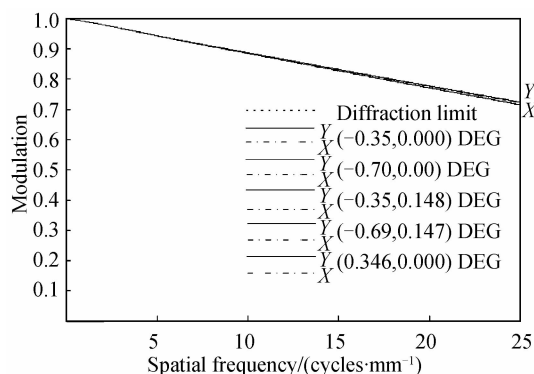


图 11  $B_3$  谱段 MTF  
Fig. 11 The MTF of  $B_3$  spectrum

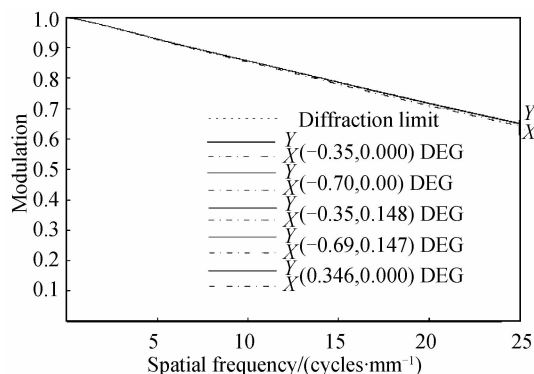


图 12  $B_4$  谱段 MTF  
Fig. 12 The MTF of  $B_4$  spectrum

各个谱段在 Nyquist 频率处的光学 MTF 如表 2.

表 2 各谱段 MTF

Table 2 Each spectral MTF

| Spectrum | Optical MTF |
|----------|-------------|
| $B_1$    | 0.78        |
| $B_2$    | 0.74        |
| $B_3$    | 0.71        |
| $B_4$    | 0.66        |

由表 2 可知:多光谱各谱段在 Nyquist 频率( $25\text{lp/mm}$ )处的 MTF 优于  $0.65$ ,各谱段的 MTF 达到光学系统的衍射 MTF.

### 3 相机静态 MTF 分析

将采用多光谱 TDI-CCD 离散采样的多光谱相机系统近似为线性空间不变系统,则整个多光谱相机各谱段的 MTF 为光学部分、TDI-CCD 和处理电路各部分 MTF 的乘积,如式(10)

$$\text{MTF}_{\text{相机}} = \text{MTF}_{\text{光学衍射}} \times \text{MTF}_{\text{光学像差}} \times \text{MTF}_{\text{TDI-CCD}} \times \text{MTF}_{\text{处理电路}} \quad (10)$$

式中,光学系统的衍射 MTF 由光学系统的相对孔径和

中心遮拦决定;光学像差包含光学设计的残余像差和光机装配的失调引入的像差;TDI-CCD的MTF受到像元尺寸大小、载流子扩散和电荷转移等因素的影响;处理电路的MTF受到电路带宽、品质因数等因素的影响。

对于小像差的光学系统,波像差RMS与MTF的关系为

$$\text{MTF}_{\text{abb}} = 1 - \left(\frac{W_{\text{RMS}}}{A}\right)^2 \left[1 - 4\left(\frac{u_i}{u_c} - \frac{1}{2}\right)^2\right] \quad u_i \leq u_c \quad (11)$$

式中, $W_{\text{RMS}}$ 为光学系统的均方根波像差, $A=0.18$ , $u_c$ 为光学系统的截止频率, $u_i$ 为光学系统的Nyquist频率。对于 $F/10$ 的光学系统,Nyquist频率为25 lp/mm的多光谱相机系统,光学系统波前像差RMS与调制传递函数MTF之间的关系如图13。

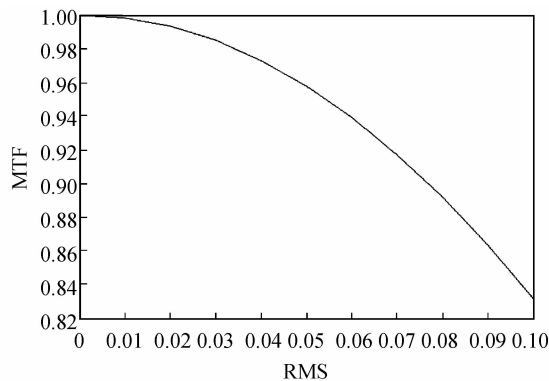


图13 光学系统波像差与调制传递函数的关系

Fig. 13 Relationship of optical system between RMS and MTF

当光学系统的波前像差优于 $0.07\lambda$ ,可认为光学系统的成像质量达到衍射极限,波前像差对MTF的影响为0.95。本文多光谱相机各谱段静态MTF的计算结果如表3。

表3 多光谱相机的MTF  
Table 3 Multispectral camera MTF

|                     | $B_1$    | $B_2$    | $B_3$    | $B_4$    |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| Nyquist frequency   | 25 lp/mm | 25 lp/mm | 25 lp/mm | 25 lp/mm |
| Optical diffraction | 0.78     | 0.74     | 0.71     | 0.66     |
| Optical aberration  | 0.92     | 0.92     | 0.92     | 0.92     |
| TDI-CCD             | 0.57     | 0.54     | 0.50     | 0.46     |
| Circuit             | 0.98     | 0.98     | 0.98     | 0.98     |
| System MTF          | 0.40     | 0.36     | 0.32     | 0.27     |

由表3可知:多光谱相机各谱段的静态MTF均可以优于0.25。

## 4 结论

本文结合多光谱TDI-CCD探测器研究了多光谱遥感相机的设计,解决了小中心遮拦、大压缩比、小畸变、宽视场的光学系统设计。设计结果表明光学系统在有效视场内的成像质量达到衍射极限,可以满足多光谱相机的使用要求。同时根据所选用的多光谱TDI-CCD探测器和光学系统,计算分析了多光谱相机的静态MTF,可以作为多光谱相机设计的参考。折轴三反光学系统虽然存在一定的中心遮拦,但通过缩小中心遮拦提高系统的压缩比,可以得到结构紧凑、外形适合的的光学系统,而且它的体积、质量、工艺性、可靠性、造价等更能满足空间应用的需求,因此在多光谱遥感相机中会得到广泛应用。

### 参考文献

- [1] FAN Bin, CAI Wei-jun, ZHANG Xiao-hong, et al. Technology of the multi-spectral Camera of ZY-3 satellite[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, **33**(6):75-84.  
范斌,蔡伟军,张孝弘,等.“资源三号”卫星多光谱相机技术[J]. *航天返回与遥感*, 2012, **33**(6):75-84.
- [2] GUO Yue, YANG Hua. Image rectification of multispectral CCD camera registration[J]. *Optical Technology*, 2003, **29**(2):229-231.  
郭悦,杨桦.多光谱CCD相机配准的图像校正[J]. *光学技术*, 2003, **29**(2):229-231.
- [3] LI Xu-yang, LI Ying-cai, MA Zhen, et al. Optical system design of light-small CCD camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(6):994-997.  
李旭阳,李英才,马臻,等.轻小型CCD相机光学系统设计[J]. *光子学报*, 2010, **39**(6):994-997.
- [4] PAN Jun-hua. The methodic design of the IR imaging system with large aperture[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **23**(12):1475-1478.  
潘君华.大口径红外成像系统的光学设计[J]. *光子学报*, 2003, **23**(12):1475-1478.
- [5] 潘君华.光学非球面的设计、加工与检验[M].苏州大学出版社,2004, **12**:130-138.
- [6] LAMPTON M, SCHOLL M. Comparison of on-axis three-mirror-anastigmat telescopes[C]. SPIE, 2007, **6687**:66870S1-8.
- [7] GALLAGHER D, BERGSTOM J, DAY J, et al. Overview of the optical and performance of the high resolution science imaging experiment[C]. SPIE, 2005, **5874**:58740K1-14.
- [8] FAN Xue-wu, MA Zhen, CHEN Rong-li, et al. Study on three-mirror reflective optic system having one image surface[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(8):1001-1003.  
樊学武,马臻,陈荣利,等.具有二次像面的三反射光学系统的研究[J]. *光子学报*, 2003, **32**(8):1001-1003.
- [9] LI Xu-yang, YANG Hong-tao, HE Tian-bing, et al. Design of a new type on-axis three-mirror anastigmat optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1):31-35.  
李旭阳,杨洪涛,贺天兵,等.新型三反射光学系统设计[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1):31-35.