

高分辨率空间同轴偏视场三反光学系统设计

韦晓孝^{1,2} 许峰^{1,2} 余建军^{1,2}

(¹苏州大学现代光学技术研究所, 江苏 苏州 215006)
(²江苏省现代光学技术重点实验室, 江苏 苏州 215006)

摘要 同轴三反射光学系统具有体积小、装调精度要求低,且成像质量好等优点,因此在高分辨率航天遥感领域有着广泛的应用前景。通过初级像差理论求解了同轴三反光学系统的初始结构参数,设计了焦距 25 m, F 数为 12.5 的同轴偏视场三反光学系统。设计结果表明,该系统采用矩形视场偏置,杂光少,引入折叠镜后系统总长 $f'/6.0 \sim f'/6.6$, 结构紧凑,视场角达 $0.6^\circ \times 0.3^\circ$, 适合线阵时间延迟积分电荷耦合器件(TDI-CCD)传感器以推扫方式成像,空间频率 50 lp/mm 处,各视场的调制传递函数(MTF)均大于 0.47, 接近衍射极限,成像质量良好,特别适用于高分辨率对地精细观测等领域。

关键词 光学设计;同轴三反;高分辨率;偏视场;矩形视场

中图分类号 TH703 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0416002

Design of Space Coaxial Field-Bias Three-Mirror Optical System with High Resolution

Wei Xiaoxiao^{1,2} Xu Feng^{1,2} Yu Jianjun^{1,2}

(¹*Institute of Modern Optical Technology, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215006, China*)
(²*Key Laboratory of Modern Optical Technologies of Jiangsu Province, Suzhou, Jiangsu 215006, China*)

Abstract The coaxial three-mirror optical system has the advantage of small volume, easy to assembly and high quality image, which can be widely used in the field of aerospace remote sensing. The initial configuration parameters of the system are resolved by using the primary aberration theory, a coaxial field-bias three-mirror optical system with a focal length of 25 m and F number of 12.5 is designed. The design results show that the field of view of the system can attain to $0.6^\circ \times 0.3^\circ$ by offsetting the rectangle field with low parasitic light and compact structure, by using the folded mirror, the total length is about $f'/6.0 \sim f'/6.6$, which is suitable for linear array time-debayed-integration charge coupled device (TDI-CCD) sensor to push-scanning image. The modulation transfer function (MTF) is higher than 0.47 at 50 lp/mm and the image quality of the optical system approaches the diffraction limit. The optical system provides a good option for the field of high-resolution space-to-earth fine observation.

Key words optical design; coaxial three mirrors; high resolution; field bias; rectangle field

OCIS codes 220.3620; 080.4035; 080.4228; 120.4570

1 引言

在空间光学领域中,光学系统是决定卫星对地观测相机性能、体积和重量的关键因素,随着科学技术的发展,人们对观测精度的要求越来越高,也对高

分辨率光学成像系统提出了强烈需求,高分辨率需要采用长焦距大口径光学系统,但相应地会带来体积大、重量重的不利因素,且要求具有足够的运载能力。美国的 KH-12 详查相机,地面分辨率达 $0.10 \sim$

收稿日期: 2011-10-26; 收到修改稿日期: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(61007010)和江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD)资助课题。

作者简介: 韦晓孝(1983—),女,博士研究生,助理研究员,主要从事光学工程、光学设计等方面的研究。

E-mail: weixx@suda.edu.cn

导师简介: 薛鸣球(1930—),男,中国工程院院士,博士生导师,主要从事光学设计方面的研究。

E-mail: xuemq@suda.edu.cn

0.15 m,可称为光学甚高分辨率;前苏联/俄罗斯的相机地面像元分辨率由第1代的2~4 m发展到现在的米级以下;20世纪90年代以来,其他国家,如以色列、日本、法国等,也先后拥有了地面分辨率达米级的传输型光学侦察卫星^[1]。我国的米级高分辨空间光学遥感器已有应用先例,但与国外的分辨率水平还有一定的距离,尤其是米级以下的高分辨空间光学遥感器,因此对于我国来说,开展具有国际水平高分辨率相机的研究具有很重要的意义。

对于长焦距高分辨率成像光学系统来说,采用折射式光学系统几乎没有可能,且不说大口径光学透射玻璃材料难以获得^[2],对于高分辨率要求来说,采用特殊色散光学玻璃来补偿,也难以匹配,结构也过于复杂;折反式光学系统由于存在校正色差及消二级光谱等问题,能实现的视场角小^[3,4],应用也受到一定的限制;相比较前两种系统,纯反射式光学系统没有色差,也不存在二级光谱的问题,孔径可以做得较大,光路不经过玻璃等材料,可对镜胚实施轻量化处理,对于减轻相机重量有重要的意义,且在抗热性能方面有较强的优势^[5,6],若采用非球面,还可有较大的消像差能力,因此纯反射式光学结构可很容易实现高分辨率且成像性能优良的大口径光学系统。纯反射式光学系统中的三反射系统能得到较高质量的光学系统,相比离轴三反光学系统,三反射系统的同轴结构避免了离轴镜的使用,加工、装调方便^[7],特别是随着探测器的发展,焦平面器件越来越大,性能也有很大提高,且体积小、重量轻。因此同轴三反光学系统在轻小型高分辨率光学卫星上有着广泛的应用前景。

本文针对光谱范围为0.5~0.8 μm谱段,具体研究了500 km轨道高度、分辨率达0.2 m的同轴偏视场三反光学系统的设计方法,完成了光学系统的设计,提供一个高分辨率光学系统的可行性方案。

2 光学系统结构参数计算

光学系统的基本参数有3个,即焦距、视场和口径,它们限制相机性能可达到的理论极限。光学系统的焦距 f 由轨道高度 H 、接收器的像元尺寸 a 及空间相机的地面像元分辨率 G 所决定^[8],可表示为

$$G/H = a/f, \quad (1)$$

表明轨道高度和地面分辨率要求一定时,光学系统的焦距与像元尺寸成正比,因此当轨道高度为500 km,分辨率为0.2 m时,取像元尺寸为10 μm,要求相应光学系统的焦距至少为25 m。

光学系统的口径决定进入相机的能量和信息量,与信息量直接关联的物理量是分辨率。根据(1)式确定光学系统的焦距及CCD像元尺寸,它的像元角分辨率为

$$\theta' = a/f = 0.08 \text{ rad} \cdot \text{s}. \quad (2)$$

在这样一个角分辨率的情况下,要求光学系统的口径与之相匹配,由瑞利判据可得,光学系统的角分辨率由光学系统的口径决定,即

$$\theta' = 120''/D, \quad (3)$$

式中 D 为入射光瞳口径。由(3)式可得系统的口径 $D=1.5 \text{ m}$ 。

从根本上说,相机的角分辨率由地面分辨率和轨道高度确定,因此,为使相机达到地面分辨率及指标要求,光学系统的有效通光口径至少要大于1.5 m,取 $D=2 \text{ m}$,此时的系统相对口径为 $f/12.5$,这种相对孔径已是遥感相机光学系统中较小的。

一般来说,高分辨率空间相机采用推扫成像工作方式,地面的覆盖宽度 W 与轨道高度 H 和光学系统的全视场角 2ω 有关^[8],即

$$W = 2H \tan \omega. \quad (4)$$

对于焦距为25 m的同轴三反光学系统,为了达到或超过5 km的地面覆盖,以轨道高度 $H=500 \text{ km}$ 计算,要求光学系统的全视场角至少为 0.57° 。

一般要求空间相机在奈奎斯特空间频率处的静态调制传递函数(MTF)值等于或高于0.2,对于空间频率 ρ 相机的静态MTF可表示为

$$f_{\text{MTF}}(\rho) = M_{\text{tol}} M_{\text{CCD}} f_{\text{MTF-optics}}(\rho) f_{\text{MTF-sample}}(\rho), \quad (5)$$

式中, $f_{\text{MTF-sample}}(\rho)$ 为采样过程MTF, $f_{\text{MTF-optics}}(\rho)$ 为光学系统MTF, M_{tol} 为光机误差引起的MTF衰减,取0.85, M_{CCD} 为CCD像元势阱横向扩散等效应引起的MTF衰减,取0.85。

采样 $f_{\text{MTF-sample}}(\rho)$ 仅与采样脉冲宽度(采样脉冲的占空比)有关,考虑到能量利用率和探测器灵敏度,目前绝大多数CCD探测器的占空比为1,故在奈奎斯特频率50 lp/mm处, $f_{\text{MTF-sample}}(\rho_N)=0.64$,如图1所示。

因此,由(5)式可得,为使相机在奈奎斯特频率处的静态MTF高于0.2,要求 $f_{\text{MTF-optics}}(\rho_N)$ 满足

$$f_{\text{MTF-optics}}(\rho_N) \geq 0.43. \quad (6)$$

根据前面的计算,表1列出了光学系统的主要设计指标。

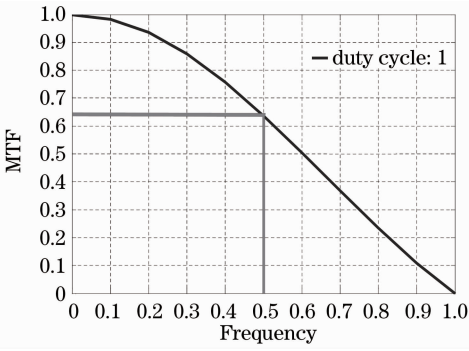


图1 采样调制传递函数(MTF)曲线

Fig.1 Curve of sample modulation transfer function (MTF)

表1 光学系统设计指标

Table 1 Parameters of optical system

Spectral bands / μm	0.5~0.8
Focal length /m	25
Aperture /m	2
Field of view / $^\circ$	≥ 0.57
Geometric standard deviation /m	0.2
MTF	≥ 0.43
Line obscured	≤ 0.25

3 同轴三反光学系统初始结构的确定

三镜反射系统如图2所示。对于望远系统,假设物体位于无穷远,即 $l_1 = \infty, u_1 = 0$ (其中 l_1 和 u_1 分别为主镜的物距和物方孔径角),入瞳位于主镜 M_1 上,即 $x_1 = 0, y_1 = 0$ 。主镜、次镜及第三镜的二次曲面系数分别为 e_1^2, e_2^2, e_3^2 ,引入如下新参数^[8]:

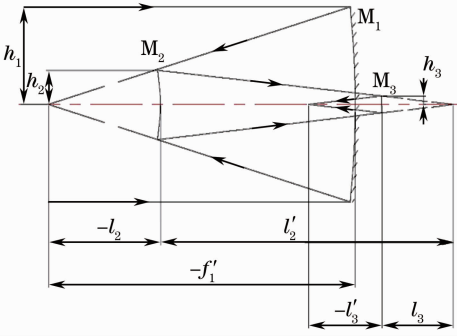


图2 同轴三反光学系统初始结构

Fig.2 Initial configuration of coaxial three-mirror system

次镜对主镜的遮拦比为

$$\alpha_1 = l_2 / f'_1 \approx h_2 / h_1, \quad (7)$$

三镜对次镜的遮拦比为

$$\alpha_2 = l_3 / l'_2 \approx h_3 / h_2, \quad (8)$$

次镜的放大率为

$$\beta_2 = l'_2 / l_2 = u_2 / u'_2, \quad (9)$$

三镜的放大率为

$$\beta_3 = l'_3 / l_3 = u_3 / u'_3. \quad (10)$$

将上述参数代入 Seidel 像差公式,可得初级像差系数 S_1, S_2, S_3, S_4 的表达式,且为校正像差,可使 $S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = 0$ 确定 e_1^2, e_2^2, e_3^2 ^[5]

$$S_1 = 0 \Rightarrow e_1^2 = 1 + \frac{1}{\beta_1^2 \beta_2^2} [e_2^2 \alpha_1 \beta_2^2 (1 + \beta_1)^3 - e_3^2 \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)^3 - \alpha_1 \beta_2^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 + \alpha_1 \alpha_2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2], \quad (11)$$

$$S_2 = 0 \Rightarrow e_2^2 (\alpha_1 - 1) \beta_2^2 (1 + \beta_1)^3 - e_3^2 [\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)^3 = (\alpha_1 - 1) \beta_2^2 (1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2 - [\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2 - 2\beta_1 \beta_2, \quad (12)$$

$$S_3 = 0 \Rightarrow e_2^2 \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)^2 (1 + \beta_1)^3}{4\alpha_1 \beta_1^2} - e_3^2 \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)^3}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} = \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)^2}{4\alpha_1 \beta_1^2} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)]^2 (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)^2}{4\alpha_1 \alpha_2 \beta_1^2 \beta_2^2} - \frac{\beta_2 (\alpha_1 - 1)(1 + \beta_1)(1 - \beta_1)}{\alpha_1 \beta_1} - \frac{[\alpha_2 (\alpha_1 - 1) + \beta_1 (1 - \alpha_2)] (1 + \beta_2)(1 - \beta_2)}{\alpha_1 \alpha_2 \beta_1 \beta_2} - \beta_1 \beta_2 + \frac{\beta_2 (1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2}, \quad (13)$$

$$S_4 = 0 \Rightarrow \beta_1 \beta_2 = \frac{\beta_2 (1 + \beta_1)}{\alpha_1} - \frac{1 + \beta_2}{\alpha_1 \alpha_2}. \quad (14)$$

现在自由变量共有7个,即 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, e_1^2, e_2^2$ 及 e_3^2 ,不仅可以很好地校正初级像差,还能利用剩余的变量控制3个反射镜的外形尺寸。从上面参数的定义可知, $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ 及 β_2 是与轮廓尺寸有关的变量,因此,在满足系统的总焦距要求及消除系统的球差、彗差、像散、场曲等像差后,轮廓尺寸完全可以自由安排,可用来协调中心遮拦、后工作距、间隔等外形尺寸的要求^[9,10]。

4 同轴三反光学系统的优化设计

优化设计得到的偏视场同轴三反光学系统如图3所示,它由三块非球面反射镜和两块平面反射镜组成,平面反射镜只起折叠光路的作用,地面目标的光线经主次镜成像后,在主镜后表面附近形成中间像,经三镜中继成像后在像面处得到地面目标的

像。光学系统的结构参数如表 2 所示,其焦距 25 m, F 数为 12.5, 视场角 $0.6^\circ \times 0.3^\circ$, 为一矩形视

场, 适合线阵时间延迟积分电荷耦合器件 (TDI-CCD) 传感器以推扫方式成像。

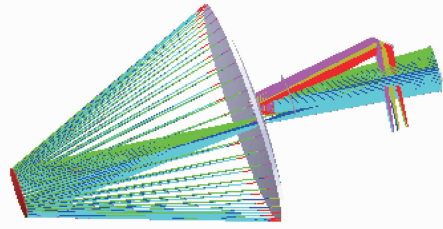
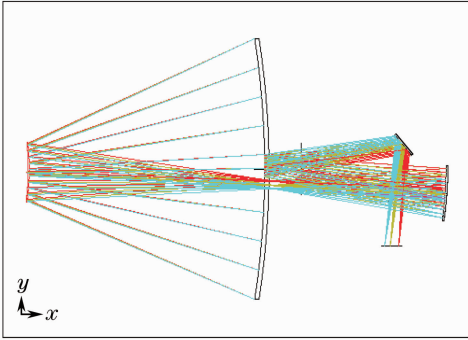


图 3 同轴三反光学系统结构形式 1

Fig. 3 Layout 1 of coaxial three-mirror system

表 2 结构参数

Table 2 Structural parameters

	Radius /mm	Thickness /mm	Conic
Primary mirror	-5479.5479	-2157.6082	-0.9737
Secondary mirror	-1570.2383	3821.6854	-2.6093
Third mirror	-2204.5652	-1664.0000	-0.5384
Fold mirror 1	Infinity	1450.0000	0
Fold mirror 2	Infinity	-588.1605	0

从表 2 看出,主镜的偏心面系数 e_1^2 值接近于 1, 即其面形为接近于抛物面的椭球面, 这样也有利于校正初级球差、正弦差和像散; 次镜的偏心面系数 $e_2^2 > 1$, 为双曲面; 三镜的面形为椭球面 ($e_3^2 < 1$), 符合光学设计理论, 在三镜的两端均有像质达衍射限的一次和二次成像面, 这样的设计结果可以使得三个非球面反射镜产生的初级像差系数都较小。在三镜和最终像面之间用两块平面反射镜折叠光路, 一

是为了减小光学系统的长度, 二是为了便于 CCD 探测器的安装, 通过折叠平面镜不同角度的放置使得 CCD 与各相邻元件间均留有足够的空间。通过偏视场的使用, 中心光线的主光线与光轴夹一小角度, 使得主次镜形成的中间像与折叠镜 1 空间分离, 不会造成二次遮拦, 且两块折轴镜均远离中间像和像平面, 避免了折轴镜上的缺陷对像的影响。此外, 通过折轴镜的不同角度及不同距离的放置, 也可以合理调整主镜到三镜之间的距离, 而不会引入额外的像差。因此, 图 3 所示的光学结构形式可以通过移动折叠平面镜来补偿离焦量^[3]。考虑到折轴镜的数量, 也可衍生出如图 4 所示的光学系统结构形式, 经折轴镜压缩后, 系统总长为 $f'/6.0 \sim f'/6.6$, 体积较小, 结构紧凑。

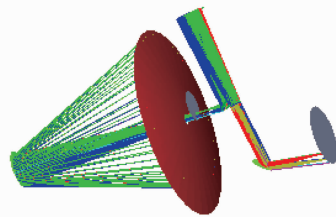
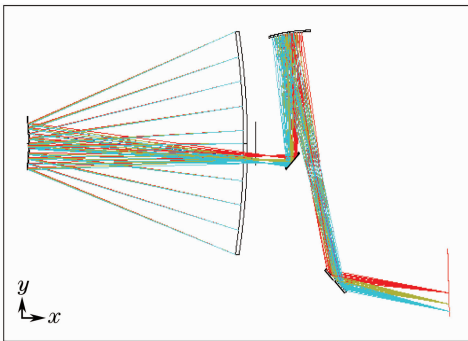


图 4 同轴三反光学系统结构形式 2

Fig. 4 Layout 2 of coaxial three-mirror system

选择 6 个具有代表性的视场对系统成像质量进行评价, 如表 3 所示。由于系统采用矩形偏置视场, 且视场关于 y 轴对称, 因此仅分析对应的半个视场, 各个视场的分布如图 5 所示, 图中各视场分别与表 3 数据一一对应。

6 个典型视场的点列图如图 6 所示, 可见在 CCD 探测器所在位置处, 点列图直径均方根 (RMS) 值均在艾里斑以内 (艾里斑直径 $19.8 \mu\text{m}$)。图 7 的 MTF 曲线表明 (T 表示子午方向, S 表示弧矢方向), 50 lp/mm 时的全视场全波段 MTF 值均达到

0.47 以上,接近衍射极限,从图 8 能量分布曲线图看出,各个视场在 CCD 探测器像元大小 $10 \mu\text{m}$ 以内的能量集中度均优于 85%,因此该系统的成像质量良好。

表 3 视场角
Table 3 Field of view

	1	2	3	4	5	6
$x / (^{\circ})$	0	0	0.3	0.3	0.3	0
$y / (^{\circ})$	-0.68	-0.5	-0.5	-0.68	-0.8	-0.8

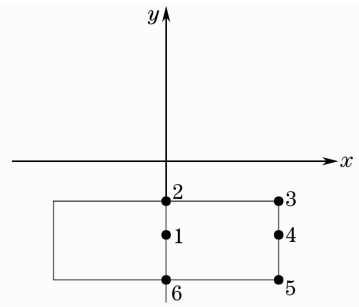


图 5 选取视场示意图

Fig. 5 Map of the field of view

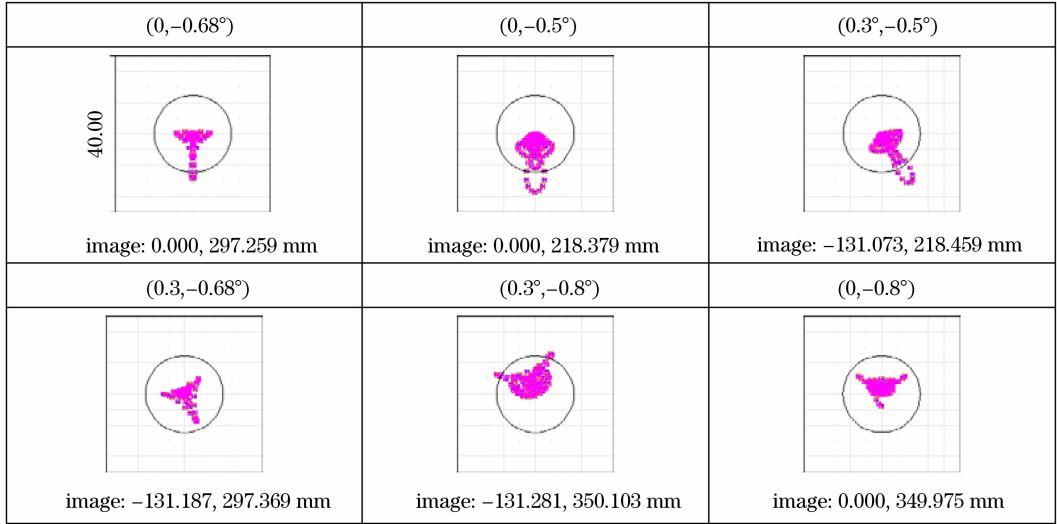


图 6 点列图

Fig. 6 Spot diagram

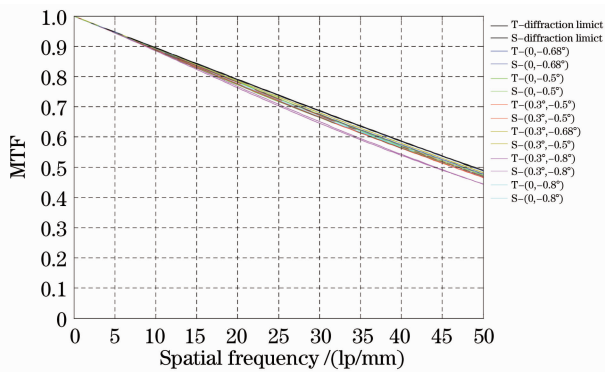


图 7 MTF 曲线

Fig. 7 Curves of the MTF

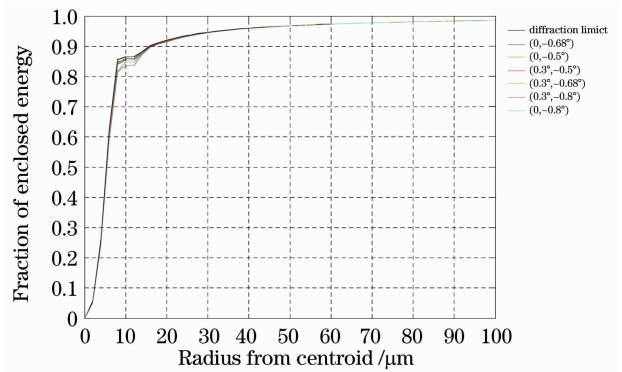


图 8 能量分布曲线

Fig. 8 Encircled energy

对于大口径的同轴偏视场三反光学系统来说,装调技术对其成像质量有着关键作用,目前来讲,传统两反射镜系统的装调技术已经较为成熟,而三镜系统像质的关键是两镜系统,如果两镜系统像质不好,就很难得到好的三镜系统像质。因此,在三镜系统的装调中,利用计算机辅助装调技术,先初调好主镜和次镜,再进行三镜的安装,同时完成对整个光学系统的精调,与装调密切相关的光学像差主要为彗

差、像散和球差,其中球差项与主次镜之间的距离有直接关系,因此,协调主次镜之间的轴向关系即可消除装调产生的球差。此外,通过调整次镜相对主镜的平移间隙,可以使主次镜组合像质零慧差。像散是由次镜光轴相对主镜光轴的倾斜造成的,可通过对心加工镜筒,达到无像散的两镜系统,为取得像质良好的三镜系统做好准备。

这种结构形式的主要特点:1) 通过偏视场的使

用,避免折叠镜的二次拦光,降低了研制难度;2) 折叠镜远离中心像面,避免了平面镜上的缺陷导致的图像缺损;3) 主、次镜同轴,无二次遮拦,克服三镜系统装调难的问题;4) 与一般的非共轴三反射镜结构相比,装调简单,对环境温度变化不敏感^[11]。

5 结 论

同轴偏视场三反光学系统由于其独特优势,避免了离轴系统的加工、装调,适用于大型空间光学系统。设计实现的高分辨率光学系统特别适用于对地精细观测等领域。同轴偏视场三反光学系统通过视场偏置,杂光少,结构紧凑,体积较小,装调简单,且成像质量好,在航天遥感领域有着良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang Jintang, Wu Chongde. Introduction of some foreign spaceborne optical remote sensors[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, **23**(2): 15~20
王金堂, 乌崇德. 国外几种星载光学遥感器的发展情况简介[J]. *航天返回与遥感*, 2002, **23**(2): 15~20
- 2 Xue Mingqiu. On optical system with high spatial resolution and wide angle of view in remote sensing[J]. *J. Suzhou Institute of Silk Texture Technology*, 2000, **20**(1): 1~6
薛鸣球. 高分辨宽覆盖遥感相机光学系统设计[J]. *苏州丝绸工学院学报*, 2000, **20**(1): 1~6
- 3 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Coaxial three-mirror-anastigmat system of high-resolution space camera [J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(5): 717~723
李旭阳, 李英才, 马 臻等. 高分辨率空间相机共轴三反光学系统实现形式研究[J]. *应用光学*, 2009, **30**(5): 717~723
- 4 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with long focal length and correction of image distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2657~2661
李旭阳, 李英才, 马 臻等. 消畸变、长焦距相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2657~2661
- 5 Li Xuyang, Ma Zhen, Li Yingcai. Optical design of coaxial eccentric-pupil three-mirror system with wide field of view[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(4): 542~546
李旭阳, 马 臻, 李英才. 共轴偏光瞳宽视场折轴三反射光学系统设计[J]. *应用光学*, 2009, **30**(4): 542~546
- 6 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Lü Baobin *et al.*. Design of new-style unobscured three-mirror optical system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1144~1147
郭永祥, 李英才, 吕保斌等. 一种新型无遮拦三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(4): 1144~1147
- 7 Yuan Tao, Xiong Yanjian, Wu Hanping. Design of coaxial three-mirror infrared optical system for space camera[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, **26**(2): 21~26
袁 涛, 熊衍建, 吴哈平. 空间相机共轴三反红外光学系统设计[J]. *光电技术应用*, 2011, **26**(2): 21~26
- 8 Li Xuyang, Li Yingcai, Ma Zhen *et al.*. Optical system design of space camera with large F number and long focal length[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(7): 2093~2097
李旭阳, 李英才, 马 臻等. 大 F 数长焦距空间相机光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(7): 2093~2097
- 9 Guo Yongxiang, Li Yingcai, Liang Tianmei *et al.*. Optical design of the uncoaxial three-mirror system with wide field of view[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2680~2683
郭永祥, 李英才, 梁天梅等. 一种大视场离轴三反射光学系统研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(9): 2680~2683
- 10 Pan Junhua. Design, Fabrication and Testing of the Aspherical Optical Surfaces[M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. 130~138
潘君骅. 光学非球面的设计、加工与检验[M]. 苏州: 苏州大学出版社, 2004. 130~138
- 11 Liu Xinping. Three-mirror system with a folded mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1998, **27**(1): 73~76
刘新平. 折射三反射镜成像光学系统结构研究[J]. *光子学报*, 1998, **27**(1): 73~76

栏目编辑: 谢 婧