

适用于微小卫星平台的小型可见光相机设计

陈永和^{1,2}, 陈洪达^{1,2}, 傅雨田¹

- (1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 现代微小卫星具有体积小、质量轻、研制周期短、成本低、发射方式灵活等优势,可在多个领域发挥重要作用,因此备受各国青睐,是当前空间技术发展的一个重要方向。实现微小卫星的一大关键是所搭载仪器、设备的小型化。设计了一套小型可见光相机,适合搭载于微小卫星平台。相机焦距 210 mm,有效口径 56 mm,角分辨率 33 μrad ,视场 $7.8^\circ \times 7.8^\circ$,像素规模达 16 M。设计分析对比了不同光学结构型式的特点,最终采用折反射式光学系统。设计采用全球面镜片,选用了融石英和常规火石玻璃等低密度材料组合消像差,系统长度 110 mm,摄远比小于 0.53,光学质量小于 370 g。

关键词: 光学系统设计; 折反射系统; 空间相机; 高分辨率; 微小卫星

中图分类号: TB133; O43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2087-06

Optical design of small-sized camera in visible for micro-satellite

Chen Yonghe^{1,2}, Chen Hongda^{1,2}, Fu Yutian¹

- (1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Micro-satellite was greatly developed in the past 20 years due to its advantages of small-size, light weight, short developing period, low cost, etc. Now, micro-satellite plays a great role in many realms, such as navigation, communication, earth observation, science research and technology experiments, which make it to be an important part of space technology. To miniaturize, micro-satellite has to be equipped with small-size instruments. A small-sized camera worked in visible band was introduced, which can be installed on micro-satellite. Technical parameters of the camera were as follows: effective focal length was 210 mm, optical aperture was 56 mm, spatial resolution was 33 μrad , field of view was $7.8^\circ \times 7.8^\circ$, or 16 M pixels in all. In the design phase, different optical structures were compared, and a catadioptric system was adopted. Fused silica and low density flint glass materials were used to balance chromatic aberration. Total length of optical system was 110 mm, and the ratio between total length and effective focal length was less than 0.53. The weight of all lenses was under 370 g.

Key words: optical system design; catadioptric system; space camera; high resolution; micro-satellite

收稿日期: 2014-11-15; 修订日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(40776100)

作者简介: 陈永和(1982-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事空间光学设计、红外成像系统设计等方面的研究。

Email: chen Yonghe@ mail.sitp.ac.cn

导师简介: 傅雨田(1967-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事空间红外遥感仪器方面的研究。Email: yutianfu@mail.sitp.ac.cn

0 引言

微小卫星具有体积小、质量轻、研制周期短、成本低、发射方式灵活等优势。人类历史上第一批人造卫星就属于小卫星,但是功能比较简单。20 世纪 70 年代以后,由于卫星应用需求的扩大和制造工艺的限制,大型卫星成为航天领域发展的主流。但是,大型卫星成本高、技术复杂、研制周期长和风险大的特点使得众多国家无力支持。20 世纪 90 年代以来,随着微电子、微机械和计算机等技术的发展,微小卫星重新引起重视,由此出现了大、小卫星并举的局面。目前,微小卫星已在导航、通信、对地遥感、空间目标探测、行星际探测、科学研究和技术试验等领域发挥着重要作用。许多国家都已经拥有自己的微小卫星^[1-3]。

现代小卫星的质量通常为 100~500 kg, 微卫星则小于 100 kg, 而且是包含燃料的湿重量^[2-3]。要实现这样的质量, 一大关键是各种仪器、设备的小型化、微型化。对地和空间光学遥感应应用中, 在满足系统技术指标的前提下, 使仪器小型化是微小卫星遥感载荷所必须实现的。文中针对微小卫星平台设计了一套小型化的可见光相机, 该相机焦距 210 mm, 可实现 33 μrad 的角分辨率, 像素规模达 16 M, 而光学系统长度为 110 mm, 摄远比(光学系统长度与焦距的比值)小于 0.53, 光学质量小于 370 g。

1 相机技术指标

文中所设计的可见光相机针对表 1 所列系统技术参数。

表 1 相机系统技术参数

Tab.1 Technical parameters of camera

Item	Value
Orbit height/km	600
Resolution(GSD)/m	20
Ground width/km	80×80
Wavelength/nm	450-800
Pixel size/ μm	7×7
Image sensor format/pixels	4 k×4 k
System MTF(@72 lp/mm)	≥ 0.15

根据以上指标可以计算出相机的光学技术要求。

(1) 分辨率、焦距、视场

相机的像元角分辨率由下式计算:

$$\beta = \frac{GSD}{H} = \frac{20 \text{ m}}{600 \text{ km}} = 33 \mu\text{rad}$$

式中: GSD 为地面像元分辨率; H 为轨道高度。

由此可计算相机的焦距为:

$$f' = \frac{d}{\beta} = \frac{70 \mu\text{m}}{33 \mu\text{rad}} = 210 \text{ mm}$$

式中: d 为探测器像元尺寸; β 为角分辨率。

相机的视场可由下式计算:

$$2\omega = 2\arctan \frac{GW}{2H} = 2\arctan \frac{80}{2 \cdot 600} = 7.63^\circ$$

式中: ω 为半视场角; GW 为地面幅宽。

相机的视场还可根据探测器靶面大小计算。探测器的规模为 4 k×4 k, 结合角分辨率可得视场为:

$$2\omega = 2\arctan \frac{DW/2}{f'} = 2\arctan \frac{d \cdot N_{\text{pix}}/2}{f'} = 2\arctan \frac{0.007 \times 4096}{2 \times 210} = 7.8^\circ$$

式中: DW 为探测靶面宽度; d 为像元尺寸; N_{pix} 为探测器规模。

根据上述结果, 为保证整个探测器靶面的成像效果, 光学系统的视场应取为 $7.8^\circ \times 7.8^\circ$ 。

(2) 相机有效口径

相机的有效口径应满足分辨率和系统信噪比的需求。

相机的有效口径 D 决定相机的极限角分辨率(衍射角分辨率) φ , 即 $\varphi = 1.22\lambda/D$ ^[4]。由此可计算出相机 33 μrad 像元角分辨率对应的极限口径为 24 mm。为了清晰获取所需分辨率的图像, 衍射角分辨率应小于实际的像元角分辨率。因此, 要求相机的有效口径大于 24 mm。

相机的有效口径还受系统信噪比的制约。当相机观测目标处于弱光照条件时, 为了保证系统的信噪比, 要求相机具有足够大的口径。文中最终确定相机的有效口径为 56 mm, 相对孔径为 $F/3.75$ 。

(3) 光学系统传递函数

相机的系统传函由光学系统传函和探测器传函决定:

$$MTF = MTF_{\text{OPT}} \cdot MTF_{\text{DET}}$$

式中: MTF_{OPT} 为光学系统传函; MTF_{DET} 为探测器传函。

MTF_{DET} 由探测器的几何传函和电子学传函决定, 其典型值通常不低于 0.5。

MTF_{OPT} 由光学系统设计传函和加工、装校误差决定。相机工作在可见光谱段,为了增大容差,加工、装校误差对传函的影响因子取 0.75。

相机的系统传函要求大于 0.15,结合上述影响因子,可计算出光学系统的设计传函要求为大于 0.4^[5]。

综上,可归纳出相机的光学技术指标,如表 2 所示。

表 2 相机光学技术指标

Tab.2 Optical parameters of camera

Parameter	Value
Wavelength/nm	450-800
Focal length/mm	210
Field of view	7.8°×7.8°
Aperture/mm	56
$F/\#$	$F/3.75$
MTF(@72 lp/mm)	≥0.4

2 光学系统结构选型和设计考虑

2.1 结构选型

光学系统的典型结构包含反射式系统、透射(折射)式系统和折反射式系统。

反射式系统主要适合于大 F 数、小视场应用需求。这类系统可有效压缩光路长度,使系统尺寸大大小于系统焦距。其不足在于可用变量少,轴外点像差的校正能力不足,所能实现的视场很小,难以实现相机 7.8°×7.8°的视场。典型的反射式系统如牛顿系统、卡塞格林系统、格里高利系统等等,视场都很小。

透射式系统可以实现很大的视场,适合于小 F 数、大视场的应用需求。透射式长焦系统多采用摄远型物镜,以缩短光学系统长度(即镜筒长度)。光学系统长度与焦距的比值称为摄远比,是摄远物镜的一个重要指标。透射系统的摄远比受视场角和相对孔径制约。视场越大,相对孔径越大,摄远比越大。透射系统的摄远比通常在 0.8 以上,要进一步减小,往往需要采用具有特殊相对部分色散的玻璃或 CaF_2 ,以消除二级光谱。

折反射式系统通常由反射式物镜和透射式校正镜组成,综合了反射式系统孔径大、压缩光路和透射式系统校正能力强的优点。通过在反射系统前端或后端设置校正透镜,可以提高像差校正能力,增大视场。经典的折反射结构如施密特系统、马克苏托夫

系统(图 1)、曼金折反射镜(图 2)等。其中,马克苏托夫系统和曼金折反射镜均为球面,加工可大大简化。

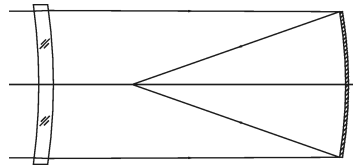


图 1 马克苏托夫系统

Fig.1 Maksutov telescope

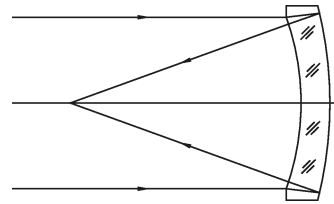


图 2 曼金折反射镜

Fig.2 Mangin mirror

根据以上分析,考虑到相机的小型化设计需求,并且其视场属于中等视场,因此适合选用折反射式光学系统。

2.2 设计考虑因素

(1) 小型化设计

载荷小型化是卫星小型化的必然要求。因此,光学系统在设计中需要严格控制尺寸和重量。对于一定的焦距,摄远比越小,则光学系统尺寸越小。因此,设计的目标是实现小的摄远比。

(2) 抗空间辐射设计

空间辐射会使玻璃的特性发生变化,导致玻璃透过率下降,并可能引起表面曲率发生改变,造成光学系统性能下降。因此,在空间光学系统设计中,必须考虑抗辐射设计,相机前端透镜需选用抗辐射玻璃。

(3) 光学效率

折反射式系统会存在中心挡光,其中反射系统次镜的支撑结构会进一步加大挡光。在设计中,必须控制次镜的口径,并考虑次镜的支撑方式。

(4) 力学性能

光学系统应该具有足够的刚度和强度,能够经受住卫星发射过程中严苛的振动、冲击等力学环境考验。

3 光学设计结果与像质分析

3.1 光路结构与消像差设计

所设计的光学系统如图 3 所示。系统采用折反

射式结构,由 6 片镜片组成,基本型式为马克苏托夫-卡塞格林式系统。其中,L3 背部镀反射膜作为反射结构的主镜,L2 前表面中心部分镀反射膜作为卡塞格林结构的次镜。

光学系统全长为 110 mm,摄远比小于 0.53。各镜面均采用球面,降低了加工、检测难度。

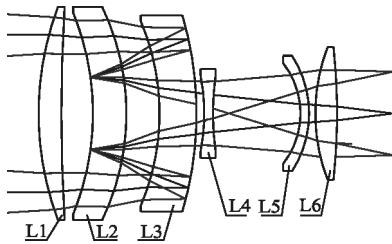


图 3 相机光路布局

Fig. 3 Layout of optical system

在消像差方面,进行了以下设计:(1)L2 作为弯月形校正镜,与 L3 一起形成马克苏托夫系统,用于改善系统的彗差和像散。(2)用曼金折反镜代替球面反射镜,用于校正球差。L2、L3 采用不同的材料,以减小曼金折反镜所引入的色差。(3)L2 镜即作为校正透镜,又作为卡塞格林结构的次镜,避免了次镜支撑所引入的额外挡光结构,但也有残余像差。为此,在前方加入 L1 镜,用于校正残余球差和轴向色差。(4)引入透镜组 L4、L5 和 L6 作为后校正镜组,主要用于校正系统的场曲和畸变,同时也校正前组的残余像差,包括球差、色差等。

在材料选择方面,前端透镜使用融石英,以达到抗辐射目的,同时融石英的密度仅为 2.2 g/cm^3 ,可减轻系统质量。其他材料主要采用具有低密度的火石玻璃,以控制系统质量。各透镜所使用的材料及其质量如表 3 所示。光学总质量 367 g。

表 3 各透镜所使用的材料及质量

Tab.3 Optical materials and weight of lenses

Lens No.	L1	L2	L3	L4	L5	L6
Material	Fused silica	F4	Fused silica	F1	F6	F6
Weight/g	46	161	104	12	17	27

3.2 像质分析

图 4 所示为光学系统的传递函数。探测器的光敏元尺寸为 $7 \mu\text{m} \times 7 \mu\text{m}$,其对应的 Nyquist 采样频率为 72 lp/mm 。根据图 4,各视场的调制传递函数均大

于 $0.47(@72 \text{ lp/mm})$,高于 0.4 的指标要求。

图 5 所示为光学系统的像面点列图。图中,外方框表示一个光敏元大小($7 \mu\text{m}$),内圈圆表示衍射斑大小。从图中可以看出,各视场的弥散斑大小较为均匀,弥散斑直径 RMS 值小于 $4 \mu\text{m}$,PV 值小于 $7.4 \mu\text{m}$,基本都在一个像元尺寸以内,接近衍射极限。各谱线中心基本重合,倍率色差得到了很好的校正。图 6(a)、(b)所示为光学系统的场曲、畸变曲线,图中纵坐标为视场。系统的相对畸变小于 1.5%^[6-7]。

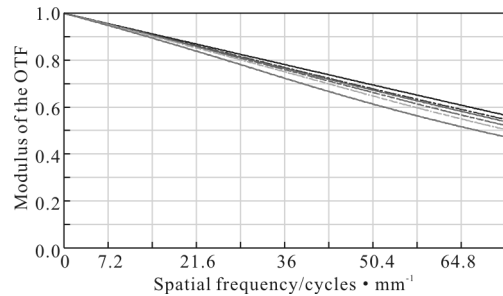


图 4 光学系统调制传递函数

Fig.4 MTF curve of optical system

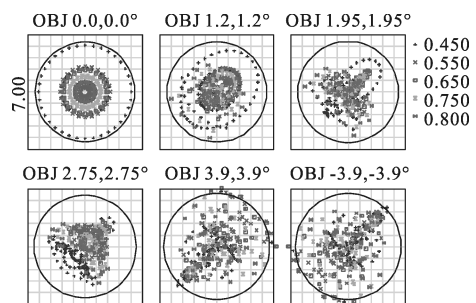


图 5 光学系统点列图

Fig.5 Spot diagram of optical system

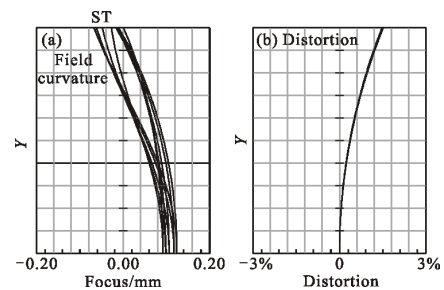


图 6 光学系统场曲、畸变曲线

Fig.6 Field curvature and distortion of optical system

图 7 所示为系统的像差特性曲线。图中,各曲线上标题(如 OBJ:0,0DEG)表示视场,这里给出了 0、0.5w、0.7w 和 1w 等 4 个视场的曲线。每个视场的曲线中,左小图为子午特性曲线,右小图为弧矢特

性曲线。横坐标 PX 或 PY 为归一化的光瞳坐标,纵坐标 EX 和 EY 分别为垂轴像差的弧矢和子午分量, EX 和 EY 每一小格为 $2\mu\text{m}$ 。可以看出,绝大部分视场的垂轴像差都不超过 $7\mu\text{m}$,只有边缘视场短波段的像差略大,在 $10\mu\text{m}$ 以内。

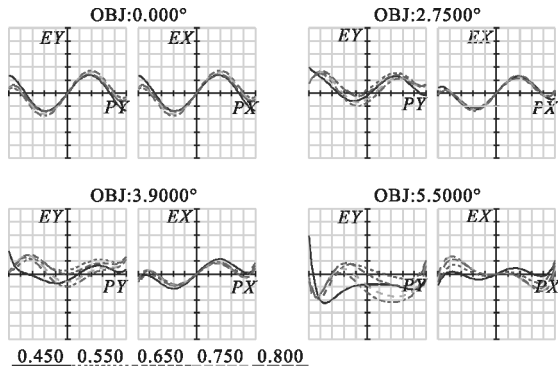


图 7 光学系统像差特性曲线
Fig.7 Transverse ray aberration plot

图 8 所示为系统的倍率色差曲线。横坐标为短波 450 nm 与长波 800 nm 主光线在像面上的高度差,即倍率色差。纵坐标为视场。可以看出,各视场的倍率色差均小于艾利斑半径,在 $2\mu\text{m}$ 以内。

综上可知,系统成像质量满足指标要求。

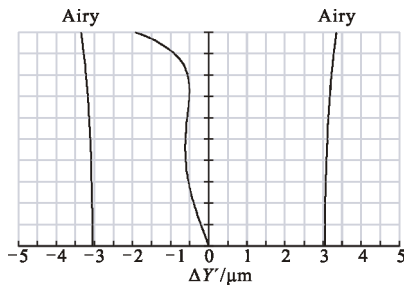


图 8 倍率色差曲线
Fig.8 Plot of lateral color

4 容差分析

光学系统在加工、装配过程中不可避免地存在一定的误差,误差的大小会对系统的成像性能产生影响。因此,光学系统设计中必须进行容差分析,给出加工、装配过程中所允许的公差范围。

结合目前国内的加工、检测和装配工艺水平,文中对所设计的光学系统进行了容差分析,并利用 Monte Carlo 方法进行了综合随机分析^[8]。分析结果表明,在表 4、5 所示的容差范围内,各透镜的加工和

装配所引起的传函下降不会超过 20%。其中,透镜 L2 和 L3 由于承担了主要的聚焦和像差平衡作用,因此公差要求最高。

表 4 光学元件加工公差要求

Tab.4 Tolerance for lenses manufacture

N	ΔN	Tolerance on thickness/mm	Tolerance on decenter/mm
4-5(T)*	1(T)	$\pm 0.02 - \pm 0.05$	$\pm 0.01 - \pm 0.02$
3(R)*	0.5(R)		

*:T 为透镜,R 为反射镜。

表 5 光学系统装配公差要求

Tab.5 Tolerance for optical alignment

Tolerance on thickness/mm	Tolerance on decenter/mm	Tolerance on tilt
$\pm 0.02 - \pm 0.05$	$\pm 0.01 - \pm 0.03$	$\pm 30'' - \pm 2'$

5 结论

文中针对微小卫星平台的需求,设计了一套小型化的高分辨率可见光相机。相机采用马克苏托夫-卡塞格林-曼金折反镜结合的折反射结构型式,实现了较大的视场和较小的摄远比。设计中,采用卡塞格林结构压缩光路,减小摄远比;采用曼金折反镜校正球差;采用马克苏托夫结构校正彗差和像散;采用后校正镜组校正场曲和畸变等;采用融石英和低密度的常规火石玻璃,使系统适应空间辐射环境的同时,具有较轻的重量,且材料易获得;镜面全为球面,加工、检测难度较低。光学系统设计结果在全视场内成像质量良好,结合现有加工装配水平,最终的系统像质能够满足相机的指标要求。

参考文献:

[1] Zhang Junhua, Yang Gen, Xu Qing. Development status and application in counter space operation of micro-satellite[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2008, 24(4): 14-17. (in Chinese)
张俊华, 杨根, 徐青. 微小卫星的现状及其在空间攻防中的应用[J]. *航天电子对抗*, 2008, 24(4): 14-17.

[2] Wen Xin, Zhang Xingwang. Analysis of current developments in the field of modern small satellite [J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2013, 30(5): 33-36. (in Chinese)

- 闻新, 张兴旺. 现代小卫星领域的发展现状分析 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(5): 33-36.
- [3] Shen Jiashuang, Chen Bo, Zhai Jingsheng, et al. The technology of modern small satellites and its application in earth observation [J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2008, 28(1): 75-79. (in Chinese)
- 申家双, 陈波, 翟京生, 等. 现代小卫星技术在对地观测中的应用[J]. 海洋测绘, 2008, 28(1): 75-79.
- [4] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2002.
- 郁道银, 谈恒英. 工程光学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] Gong Dun, Wang Hong. Optical design of hyperspectral imaging spectrometer on space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 541-545. (in Chinese)
- 巩盾, 王红. 空间高光谱成像仪的光学设计 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 541-545.
- [6] Yao Gang, Tang Tianjin, Huang Ying. Optical system design used for the near infrared remote sensing with large field of view and small F number[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(S1): 107-110. (in Chinese)
- 姚罡, 汤天瑾, 黄颖. 大视场大相对孔径近红外观测相机光学系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42 (S1): 107-110.
- [7] Lei Li, Zhang Chenzhong, Meng Junhe. Imaging optical system with wide field of view, fast aperture and large surface array CCD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S): 12-15. (in Chinese)
- 雷丽, 张晨钟, 孟军和. 大视场大相对孔径大面阵 CCD 成像光学系统设计研究 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S): 12-15.
- [8] Andersen T B, Schweiger P F. Assessment of NIRCcam alignment tolerances by Monte Carlo simulations [C]//SPIE, 2008, 7068: 70680H.