

激光与光电子学进展

立方星平台相机光学系统设计

孙永雪*, 孙晖, 姜守望, 王珂, 陈刚义, 李涛

上海卫星装备研究所, 上海 200240

摘要 立方星具有发射成本低、周期短、尺寸小和功率小等优点, 非常适合某些新技术率先验证、星载一体化或者以分布式空间网络的方式提供遥感与通讯等服务, 例如星座和编队飞行等。鉴于此, 设计一个适用于 3U 立方星平台的相机光学系统。首先通过对不同光学系统结构进行对比分析, 确定系统采用同轴折反式结构, 该系统的焦距为 460 mm, 视场角为 4°, 工作波段为 450~700 nm。然后通过分析系统的传递函数, 得到系统口径与遮拦比之间的对应关系, 确定口径为 92 mm, F 数为 5。最后对系统进行优化, 系统以卡式系统为原型, 主、次镜为曼金镜, 优化后各视场的像质均接近衍射极限, 在奈奎斯特频率处传递函数优于 0.3。

关键词 光学设计; 光学系统设计; 立方星; 折反式光学系统; 公差分析; 光学传递函数分析

中图分类号 TH702

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0522002

Optical System Design of Camera for Cubesat

Sun Yongxue*, Sun Hui, Jiang Shouwang, Wang Ke, Chen Gangyi, Li Tao

Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China

Abstract Cubesat has the advantages of low launch cost, short cycle, small size, and low power requirement. It is highly suitable for the first verification of certain innovative technologies, satellite-borne integrations, or distributed space networks to provide remote sensing and communication services, such as constellations and flight formations. Herein, an optical camera system suitable for 3U cubic star platforms is designed. First, based on a comparison and analysis of different optical system structures, the proposed system uses a coaxial reflex structure. The focal length, field of view angle, and working waveband of the system are 460 mm, 4°, and 450-700 nm, respectively. Then, by analyzing the transfer function of the system, the corresponding relation between the system aperture and blocking ratio is obtained. The aperture and F number are determined to be 92 mm and 5, respectively. Finally, the system is optimized. The system uses the cassette system as the prototype, and the primary and secondary mirrors are Mankin mirrors. After optimization, the image quality of each field of view is close to the diffraction limit and the transfer function at the Nyquist frequency is greater than 0.3.

Key words optical design; optical system design; cubesat; catadioptric optical system; tolerance analysis; modulation transfer function analysis

OCIS codes 220.3620; 220.4830; 120.4820

1 引言

立方体卫星(立方星)因具有研发成本低、研制

周期短、风险小、器件商业化、发射方式灵活和可快速组网补网等优势, 已成为军、民用航天领域的研究热点之一。近年来, 国外立方星的发展迅速, 美

收稿日期: 2020-07-05; 修回日期: 2020-08-06; 录用日期: 2020-08-13

基金项目: “十三五”装备预研共用技术(41403010110)

*E-mail: 983042171@qq.com

国已建成商业对地观测星座“鸽群”。由于受到尺寸和功率的限制,立方星目前主要为 1U~3U 构型,其在遥感、导航、地址探测、环境监测和科学实验等领域的应用发展迅速,今后将朝着标准化、高度模块化、即插即用、更多单元构型和星载一体等方向发展^[1-2]。本文根据某商业航天 3U 立方星的项目要求,设计一个焦距为 460 mm、摄远比为 0.36、角分辨率为 10 μrad 的光学系统。为了满足尺寸的要求,系统采用同轴折反式结构。

2 光学系统的设计过程

2.1 光学系统技术指标分析

针对某 3U 立方星的项目要求来设计光学系统,设计的指标有轨道高度为 500 km、地面分辨率为 5 m、幅宽(K)为 35 km、工作谱段为 450~700 nm 和静态传递函数(MTF)大于 0.15。经过调研可知,选用探测器的像元尺寸为 4.6 μm × 4.6 μm,规格为 8428 × 6033 个像元。

分析光学系统的主要技术指标是光学系统设计过程中的重要一步,光学系统的主要参数包括系统焦距、有效口径、视场角和系统 F 数等,成像系统如图 1 所示,其中 H 为立方星的轨道高度,ω 为系统的视场角。

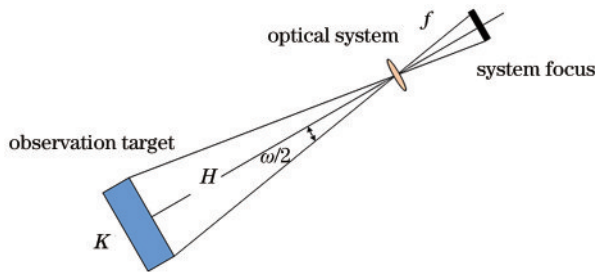


图 1 成像系统

Fig. 1 Imaging system

根据几何关系,ω 可表示为

$$\omega = 2\arctan(K/H). \quad (1)$$

使用(1)式可计算出 ω 值为 4°,同理根据 H 和地面分辨率(GSD)可以计算出极限分辨率角 θ 值为 10 μrad。f 可表示为

$$f = aH/x_{GSD}, \quad (2)$$

式中:a 为探测器的像元尺寸。使用(2)式可计算出 f 值为 460 mm。根据衍射理论,系统口径 D 与 θ 满足

$$D \geq 1.22\lambda/\theta, \quad (3)$$

式中:λ 为波段中心的波长,实验取 575 nm。使用(3)式可以计算出 D ≥ 70 mm。

相机静态传递函数由光学系统的传递函数和探测器的传递函数来确定,光学系统的传递函数由光学系统设计的传递函数和加工装调的传递函数来确定,表达式为

$$x_{MTF} = x_{MTF1} \times x_{MTF2}, \quad (4)$$

$$x_{MTF1} = x_{MTF3} \times x_{MTF4}, \quad (5)$$

式中: x_{MTF} 为相机静态传递函数; x_{MTF1} 为光学系统的传递函数; x_{MTF2} 为探测器的传递函数; x_{MTF3} 为光学系统设计的传递函数; x_{MTF4} 为加工装调的传递函数。 x_{MTF1} 是探测器的固有属性之一,实验中 x_{MTF2} 值为 0.6。由于目前的加工装调水平较高,则 x_{MTF4} 值取为 0.9。若使 x_{MTF} 值优于 0.15,则 x_{MTF3} 值优于 0.28。

x_{MTF3} 与系统口径、焦距、中心波长及像元尺寸满足^[3]

$$x_{MTF3} = \frac{2}{\pi} \times \frac{A + B + C}{1 - \epsilon^2}, \quad (6)$$

式中:ε 为系统的遮拦比;

$$A = \arccos k_n - k_n \sqrt{1 - k_n^2}, \quad (7)$$

$$B = \epsilon^2 \left[\arccos(k_n/\epsilon) - (k_n/\epsilon) \sqrt{1 - (k_n/\epsilon)^2} \right],$$

$$0 \leq k_n \leq \epsilon, \quad (8)$$

$$B = 0, k_n > \epsilon, \quad (9)$$

$$C = -\pi\epsilon^2, 0 \leq k_n < \frac{1-\epsilon}{2}, \quad (10)$$

$$C = -\pi\epsilon^2 + \left\{ \epsilon \sin \varphi + \varphi(1 + \epsilon^2)/2 - (1 - \epsilon^2) \arctan \left[\frac{(1 + \epsilon) \tan(\varphi/2)}{1 - \epsilon} \right] \right\}, \frac{1-\epsilon}{2} \leq k_n \leq \frac{1+\epsilon}{2}, \quad (11)$$

$$C = 0, k_n > \frac{1+\epsilon}{2}, \quad (12)$$

$$\varphi = \arccos \left(\frac{1 + \epsilon^2 - 4k_n^2}{2\epsilon} \right), \quad (13)$$

$$k_n = \frac{k_s}{k_o}, \quad (14)$$

$$k_s = \frac{1}{\lambda F}, \quad (15)$$

$$F = \frac{f}{D}, \quad (16)$$

其中

式中: k_s 为奈奎斯特频率, 值为 109 lp/mm; k_c 为光学系统的截止频率。根据(6)~(16)式可以得到, x_{MTF3} 值大于 0.28。 D 与 ϵ 之间的对应关系, 如表 1 所示。

表 1 D 与 ϵ 的对应关系Table 1 Correspondence between D and ϵ

D /mm	F	ϵ
100	4.60	≤ 0.55
90	5.11	≤ 0.50
80	5.75	≤ 0.45
70	6.57	≤ 0.40

对于光学系统来说, 口径越大, 则信噪比越大, 探测能力越强, 分辨细节的能力也越强。考虑到加工成本、装调难度及系统尺寸, 确定 D 值为 92 mm, 系统 F 数为 5。最终光学系统的技术指标: 系统焦距为 460 mm; 视场角为 4° ; 有效口径为 92 mm; 波段为 450~700 nm; F 数为 5; k_s 为 109 lp/mm 的系统 MTF 优于 0.28。

2.2 结构形式的选择

光学系统的基础形式主要有折射式、折反式和全反射式三种。折射式光学系统具有大视场、无中心遮拦和加工装调容易的优点, 为了满足上述优点, 通常需要很多镜片, 但系统会存在色差。为了消除色差及高级像差, 系统结构可能较复杂并且摄远比较大。全反射式光学系统具有无色差、结构简单易于压缩和材料不受波长限制的优点, 但平衡像差的参数较少, 在此基础上的离轴反射式结构可以在单一方向上加大视场, 但装调难度很大。折反式光学系统与反射式系统相比, 具有视场大、优化变量多、可以不使用非球面和加工装调容易等优点; 与折射式系统相比, 具有摄远比小、可用小透镜组校正轴外像差和镜片数量少等优点^[4]。

本光学系统要求视场角为 4° , 属于中等视场, 要求焦距为 460 mm, 系统总长小于 200 mm, 即摄远比小于 0.43, 根据上述分析, 确定采用折反式光学系统。

2.3 光学系统的优化

根据 2.2 节的设计指标要求, 选择合适的初始结构并对其进行光学系统的优化设计。经过优化, 最终的系统结构如图 2 所示。系统由 6 片球面镜组成, 其中镜片 1 为校正镜, 有利于校正轴外像差, 增大视场; 镜片 2 和镜片 3 均为曼金镜, 有利于校正像差, 减少镜片数量, 而且镜片 2 和镜片 3 构成卡式系统的原型, 镜片 3 为主镜, 其前表面透射, 后表面反

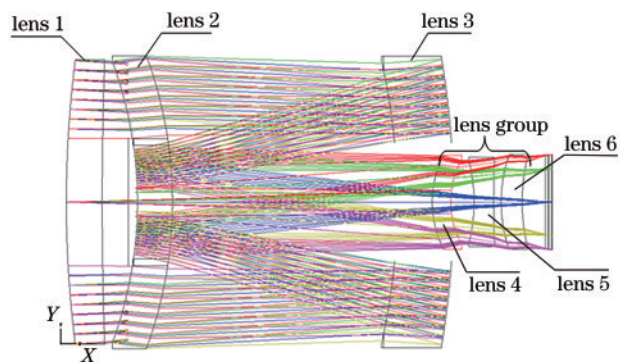


图 2 光学系统

Fig. 2 Optical system

射, 镜片 2 起到校正的作用, 其前表面的中间部分镀反射膜, 其余部分和后表面均透射, 这可以减少次镜支撑结构对主镜的遮挡, 减小遮拦比, 并同时起到校正轴外像差的作用; 后光路小透镜组用于校正剩余像差。

具体的镜面参数如表 2 所示。

表 2 镜面参数

Table 2 Mirror parameters

Lens	Diameter/mm	Thickness/mm	Material
1	94	11.28	H-BAK3
2	94	11.00	H-LAK61
3	96	18.70	H-ZK6
4	24	7.90	H-BAF3
5	22	8.42	H-ZBAF16
6	24	8.95	SILICA

2.4 像质分析

实际光学系统与理想光学系统之间有很大差异, 物空间一点发出的光线经过实际光学系统后, 不会聚成一个点而是一个弥散斑, 弥散斑的大小及形状与系统的像差有关。对于一个实际的光学系统来说, 不可能也没必要将各种像差都校正为零, 但是像差是评价一个成像光学系统质量好坏的标准^[5]。

系统点列图如图 3 所示, 其中 OBJ 为物面, IMA 为像面, GEO 为弥散斑半径。从图 3 可以看到, 艾里斑半径为 $3.36 \mu\text{m}$, 各视场弥散斑的方均根半径都在 $1.4 \mu\text{m}$ 以内, 均在探测器的一个像元内而且接近衍射极限。图 4 为系统像散(场曲)和畸变曲线。

从图 4 可以看到, 像散的最大值在 $0.01 \mu\text{m}$ 以内, 系统的畸变小于 0.5%。系统的倍率色差的最大值为 $0.32 \mu\text{m}$, 在 0.18° 视场附近, 远小于艾里斑半径。因为系统中心有遮拦, 所以缺失中间孔径, 则最大垂轴像差小于 $4 \mu\text{m}$ 。

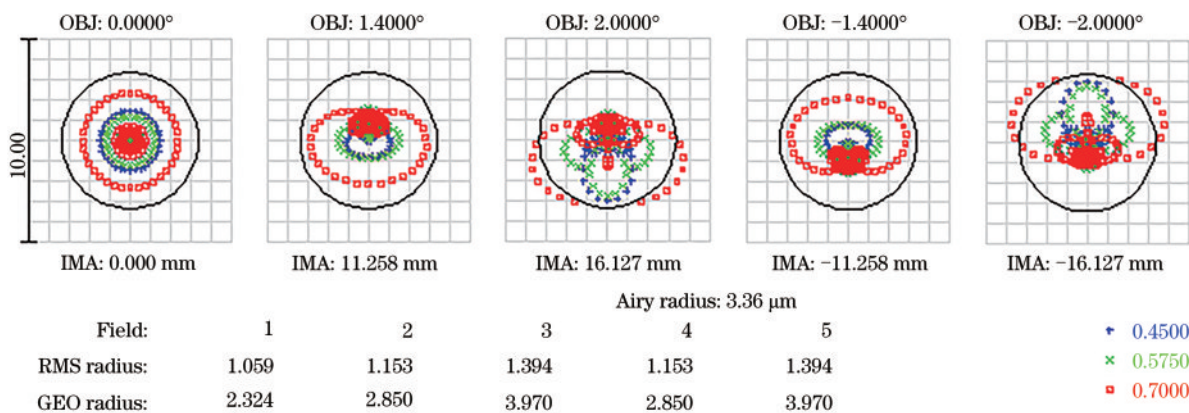


图 3 点列图

Fig. 3 Spot diagram

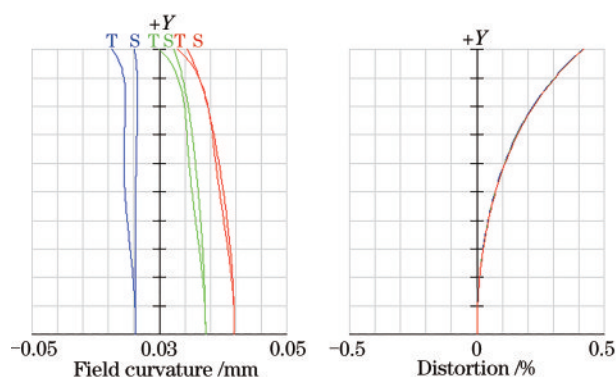


图 4 光学系统的性能曲线。(a) 像散(场曲);(b) 畸变

Fig. 4 Performance curves of optical systems. (a) Astigmatism (field curvature); (b) distortion

光学系统常用的像质评价方法有仅适用于小像差系统的瑞利判断和中心点亮度法,以及仅适用大像差系统的分辨率和点列图法。与以上几种像质评价方法相比,光学传递函数既与像差相关,又与系统衍射效果有关,并且具有客观和可靠的优点,同时适用于大像差系统与小像差系统^[6]。图 5

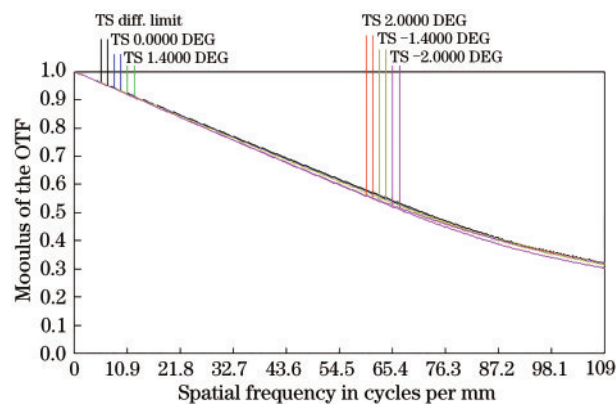


图 5 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curves

为光学系统传递函数曲线。从图 5 可以看到,各视场、各波段的 MTF 在奈奎斯特频率为 109 lp/mm 处均在 0.3 以上,说明系统满足指标要求。

综上分析,系统虽然存在一些像差,但是综合评价结果满足指标要求。

2.5 公差分析

光学系统优化完成后的像质并不是最后的结果,加工和装调过程中还是会产生一些偏差,所以需分析加工和装调过程中产生的偏差对成像质量造成的影响,从而确定公差^[7]。加工过程中,需要分析元件的曲率半径、厚度、材料折射率、阿贝数及加工面形等;装配过程中,主要分析元件偏心、倾斜和各个镜面之间的轴向距离等误差对系统成像质量的影响,装配公差引起的像质变化可以通过元件间距及后截距来补偿。公差分配的原则:在满足系统指标要求的情况下,最大程度地放松系统的加工和装调公差要求,从而降低成本和装调难度,使用 Zemax 软件对加工和装调的公差进行蒙特卡罗分析,结果如表 3 所示。从表 3 可以看到,因要求光学系统的 MTF 不低于 0.252,而 90% 的 MTF 值优于 0.252,说明公差分配合理。公差分配的情况如表 4 所示,其中 N 为光圈, ΔN 为局部光圈。

表 3 蒙特卡罗分析结果

Table 3 Monte Carlo analysis results

Index/%	MTF
> 99	0.223
> 90	0.262
> 80	0.274
> 50	0.290
> 20	0.302
> 10	0.308

表 4 公差分配

Table 4 Tolerance distribution

Surface	N	ΔN	Thickness /mm	Decentration /mm	Lens	Decentration /mm	Thickness /mm	Tilt /(")
1	2.0	0.200	± 0.050	± 0.02	1	± 0.05	± 0.05	± 0.05
2	1.0	0.300		± 0.02				
3	1.0	0.168	± 0.025	± 0.01	2	± 0.02	± 0.02	± 0.02
4	1.0	0.200		± 0.01				
5	1.4	0.200	± 0.025	± 0.01	3	/	/	/
6	1.0	0.168		± 0.01				
7	4.0	0.300	± 0.050	± 0.02	4	± 0.05	± 0.05	± 0.05
8	2.0	0.300		± 0.02				
9	4.0	0.300	± 0.050	± 0.02	5	± 0.05	± 0.05	± 0.05
10	5.0	0.300		± 0.02				
11	5.0	0.300	± 0.050	± 0.02	6	± 0.05	± 0.05	± 0.05
12	6.0	0.300		± 0.02				

2.6 成像效果

根据 2.5 节的公差分析结果,使用定心车边仪对系统进行装调。首先将镜片与镜室通过罐胶的方式进行成组,采用定心车削的方式来保证镜子与镜室的同心度以及镜室端面的垂直度;按照主镜、后光路透镜组、次镜和校正镜的顺序进行装调,装调完成后在镜筒罐胶孔罐胶,从而固定镜筒和镜室。图 6 为使用该系统对 8 km 外实景的成像结果。



图 6 实景成像

Fig. 6 Scene imaging

3 结 论

本课题组设计一个中等视场、小摄远比、全球面、小体积和低成本同轴折反式光学系统,该系统适用于 3U 立方星平台。经过公式计算可以确定系统的焦距与视场角,通过计算分析系统 MTF 可以确定系统口径。对不同的光学系统结构进行对比分析,最终采用同轴折返式结构,该结构可以有效减小摄远比,系统以卡式系统为原型,采用曼金镜、校正镜和小透镜组来校正系统像差,扩大视场,而且成像质量接近衍射

极限。该系统焦距为 460 mm,视场角为 4° ,口径为 92 mm,系统结构尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 166\text{ mm}$,相机总质重小于 5 kg。该系统采用常规材料,具有加工难度低、成本低、装调简单和工程可实现性好的优点,在立方星及微纳卫星领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ye Z, Li X W, Wang C, et al. Survey of technological development of optical payload for micro-nano satellite [J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 122-130.
叶钊, 李熹微, 王超, 等. 微纳卫星光学载荷技术发展综述[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 122-130.
- [2] Ma D K, Kuang Y, Yang X Q. Development actual state and trends of nano-satellite [J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(3): 42-45, 79.
马定坤, 匡银, 杨新权. 微纳卫星发展现状与趋势[J]. 空间电子技术, 2017, 14(3): 42-45, 79.
- [3] Cota S A, Bell J T, Boucher R H, et al. PICASSO: an end-to-end image simulation tool for space and airborne imaging systems[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7087: 708703.
- [4] Ren Z G, Li X Y, Ni D W. Compact space optical system design with large relative aperture and field of view [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(9): 0922001.
任志广, 李旭阳, 倪栋伟. 大相对孔径、大视场、紧凑型空间光学系统设计[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0922001.
- [5] Yang F Z, Chen X H, Zhao Z C, et al. Visible-infrared imaging spectrometer for the exploration of asteroids [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(7):

0722002.

杨福臻, 陈新华, 赵知诚, 等. 面向小行星探测的可见-红外光谱成像光学系统[J]. 光学学报, 2020, 40(7): 0722002.

- [6] Chen H D, Xue C X. Design of mid-wave infrared optical system with high variable ratio miniaturization [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0222001.
陈虹达, 薛常喜. 高变倍比小型化的中波红外光学

系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0222001.

- [7] Du K, Liu C Y, Liu S, et al. Design of coaxial ultra-compact primary and tertiary mirror integrated optical system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 072202.

杜康, 刘春雨, 刘帅, 等. 同轴超紧凑型主三镜一体化光学系统的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 072202.