

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0136-05

空间目标探测相机光学系统设计

常凌颖^{1,2} 赵葆常¹ 汶德胜¹ 陈荣利¹ 马 臻^{1,2} 姚大为¹

(¹ 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)
(² 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 为了实现对空间暗弱目标的探测, 设计了大孔径可见光探测相机的光学系统。该系统焦距为 350 mm, 相对孔径为 1/1.6, 全视场角为 3.2°, 波段范围为 450~950 nm。介绍了可见光探测相机的构成, 确定光学系统的结构形式为马克苏托夫两反射系统, 主次镜均采用球面镜。采用 CODE-V 光学设计软件对系统进行了优化设计。给出了像质评价及热分析结果。设计结果表明, 该可见光探测相机光学系统各视场点列图基本是圆形, 全视场内 80% 能量的弥散斑直径均小于 26 μm, 最大畸变小于 0.05%, 倍率色差小于 5 μm, 满足探测要求。

关键词 光学设计; 空间目标; 探测相机; 弥散斑

中图分类号 O439 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0136

Optical System Design of Visible Camera for Space Target Detection

Chang Lingying^{1,2} Zhao Baochang¹ Wen Desheng¹ Chen Rongli¹ Ma Zhen^{1,2} Yao Dawei¹

(¹ Xi'an Institute Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China)
(² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to realize the detection of dark and weak target in space, the optical system of visible light detection camera with a large aperture is designed. Its effective focal length is 350 mm, F-number is 1/1.6, field of view is 3.2°, and working wavelength ranges from 450 to 950 nm. The structure of the visible light detection camera is described, and the structure form is determined to be Maksutov's two reflection system whose primary and secondary mirrors are spherical. CODE-V optical design software was used to optimize the optical system. The image quality evaluation and thermal analysis result are presented. The result shows that each field spot diagram is nearly circular, 80% energy encircled is within the spot diameter of 26 μm, maximum distortion is less than 0.05% and lateral color is less than 5 μm, which meet the requirement of detection.

Key words optics design; space target; detection camera; spot diagram

1 引 言

随着人们对太空的不断探索, 空间航天器及太空碎片也不断增多, 相互之间发生碰撞的几率也在增大。自 1957 年前苏联第一颗人造卫星升空, 射入外层空间物体的数量不断增加, 空间碎片问题越来越突出, 联合国有关机构和世界各航天国家对这一问题越来越重视。近年来, 包括中国在内, 美国, 欧空局, 日本, 英国, 德国, AIAA, IAA 和 COSPAR 等

国家和团体都在积极开展空间碎片跟踪与观测的研究工作^[1]。为了避免航天器的碰撞, 需对空间目标进行探测。

传统的空间目标监视都采用地基光学望远镜、雷达探测器及无线电信号探测器组成的监视网, 对空间目标进行探测和跟踪。这种方式的优点是技术成熟、投资成本低, 能够对空间目标进行有效搜索和跟踪, 但易受气象、地理位置和时间限制。为了提高

收稿日期: 2010-03-25; 收到修改稿日期: 2010-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(60808028)资助课题。

作者简介: 常凌颖(1977—), 女, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事光学设计及空间光学等方面的研究。

E-mail: lychang@opt.ac.cn

导师简介: 汶德胜(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事空间相机方面的研究。E-mail: wen@opt.ac.cn

空间目标监视能力,美国、加拿大等国都开展了建立天基空间目标监视系统的计划。天基空间目标监视系统的优点是不受地理位置和气象条件限制,探测效果好,天基空间目标探测设备可以在太空中相对较近的距离对空间目标进行跟踪捕获任务。这类设备避开大气造成的干扰,能够精确地获得目标的尺寸、形状及轨道参量等重要目标信息,大大弥补了地基系统在中层空间探测能力的不足^[2,3]。本文根据对空间暗弱目标的探测需要,给出了空间目标可见光探测相机的光学系统设计,系统焦距 350 mm,相对孔径为 1/1.6,全视场角为 3.2°,波段范围为 450~950 nm。

2 探测相机系统构成

探测相机组成部分包括光学分系统:收集目标的光辐射信号,并将其聚集在像面上;CCD 焦平面组件:把光学信号转变为数字电荷图像信号,并按规定的序列读出,它包括 CCD 焦平面探测器,CCD 时钟驱动和视频处理电路等;相机结构分系统:由镜座、镜筒和遮光罩等组成;相机电控分系统:接收遥控信号,实现相机的各种功能;相机热控分系统:为相机各部分提供合适的温度条件以确保相机的探测性能。组成框图如图 1 所示。

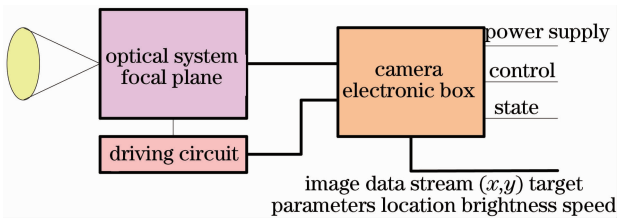


图 1 探测相机的组成框图
Fig. 1 Framework of detection camera

3 光学系统设计参数确定

探测相机为了捕获空间的暗弱目标,指标要求探测 15 等星,因而需要光学系统能够汇聚较大能量,使系统能够获得更多的信息,也就要求光学系统有较大的相对孔径。在地球大气之外,零等星的照度为 2.54×10^{-6} lx。两个恒星的照度与星等的关系为

$$mv_2 - mv_1 = -2.5 \lg \frac{E_2}{E_1}, \quad (1)$$

式中 mv_1, mv_2 是两个恒星的星等, E_1, E_2 是其照度值。可推出星等为 m 的恒星在地球大气外的照度公式

$$H = 2.54 \exp(-0.92 m) \times 10^{-6}.$$

设光学系统的透射率为 η , 通光孔径的面积为 S_0 , 直径为 D_0 , CCD 上的像点面积为 S_1 , 直径为 D_1 , 恒星照度为 H , CCD 接收的恒星光照度为 H_c 为

$$H_c = \frac{H \times \eta \times S_0}{S_1}, \quad (2)$$

又设 CCD 能探测到的最小光照度为 H_c , 要求条件为 $H_c \geq H_M$, 即

$$D_0 \geq \left(\frac{E_s \times D_1^2}{D_R \times H \times T_m \times \eta} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中 E_s 为 CCD 饱和曝光量, D_R 为 CCD 可用动态范围, T_m 为积分时间。

(1)~(3)式表明只要给出 CCD 饱和曝光量、探测器上像斑尺寸、恒星功率密度、积分时间、光学效率和 CCD 动态范围就可以计算出所需光学系统的最小口径。经过计算,要探测 15 等星的目标,需要光学系统有效口径大于 180 mm。由于系统采用折反式结构形式,这种光学系统结构形式有中心遮拦,设计中系统的实际入瞳直径为 220 mm,为了减小遮拦比,将光阑设在次镜上,并在系统优化时对遮拦比进行严格控制,将其控制在 100.5 mm 内,这样系统的通光面积与所要求的有效通过面积之比为 1.18 (大于 180 mm),因此通光口径满足光学系统所需的最小口径。

由于探测相机需要系统焦距较长,孔径较大,相对孔径也比较大,光谱范围很宽(450~950 nm)。并且空间目标对于相机系统而言为点目标,目标的细节不可分辨,为了利用亚像素的方法提高星点的准确度,需要所成的星点在像面上有所弥散,指标要求 80% 的能量弥散在 26 μm 内。

4 光学系统设计

4.1 设计指标

根据总体系统参量的要求,光学系统的指标要求为:视场 3.2°,相对孔径 1:1.6,焦距 350 mm,筒长不大于 300 mm,谱段范围 450~950 nm,弥散斑直径不大于 26 μm (80%能量),达到圆整要求。

4.2 结构选型

光学系统结构选型在设计中非常关键,这是光学系统设计的第一步。合适的系统结构形式可以减小设计、制造和装调的难度,缩短研制周期。对探测相机这一小视场、大相对孔径、宽谱段要求的光学系统,有许多种系统结构形式能满足设计要求,如折射

系统、折反射系统、离轴的全反射系统。对折射系统如 Petzval 型物镜, Sonnar 型物镜, 双高斯物镜和远摄型物镜等都可以满足这一要求。但由于系统焦距较大, 采用折射式结构会造成系统的长度很长, 重量较大, 而且由于系统的光谱范围很宽, 为了校正二级光谱, 需采用特殊材料, 从而导致加工难度及成本的提高; 另外, 折射系统受温度梯度的影响较大, 航天环境适应性较差, 因此该系统不考虑选择折射系统。对全反射系统, 由于需要使用离轴非球面, 系统的加工周期与项目周期要求相比较长, 因而不考虑使用这种系统。而折反系统一般由两块反射镜和无光焦度的折射元件构成, 且具有外形尺寸小, 孔径和视场较大的长处。因此探测相机最终考虑采用折反式系统结构形式。折反式光学系统中所需的光焦度主要由反射镜来承担, 而无光焦度的多块折射元件校正像差, 扩大视场, 因此, 色差较小^[4]。

综合考虑设计、加工和装调等因素后, 选择了马克苏托夫两反射系统形式, 利用反射镜来折叠光路, 减小仪器的体积和重量。并且由于主次反射镜都不产生色差, 和相同光学特性的透镜系统相比, 可以大大减小二级光谱色差。为了避免非球面制造的困难及较长的加工周期, 采用球面反射镜作为主镜和次镜, 然后用透镜来校正球面镜的残余像差。

4.3 设计优化

优化中需考虑的是, 1) 由于系统相对孔径较大,

表 1 系统优化后的各类像差
Table 1 Optimized aberrations of the system

Number	SA	TCO	TAS	SAS	PTB	DST	AX	LAT	PTZ
1	-0.260962	0.000714	-0.001652	-0.001652	-0.001652	0.000002	-0.700837	0.000639	-0.000555
2	-0.001970	-0.003933	-0.002217	-0.000472	0.000401	-0.000314	-0.076505	-0.050914	0.000135
3	1.730490	0.513087	0.053242	0.019436	0.002533	0.001921	1.314994	0.129964	0.000851
4	-0.146570	-0.061966	-0.010131	-0.004309	-0.001398	-0.000607	-0.622022	-0.087658	-0.000470
5	-2.393556	-0.758180	-0.069369	-0.016000	0.010685	-0.001689	0.000000	0.000000	0.003589
6	1.051354	0.278862	0.016437	0.000000	-0.008218	0.000000	0.000000	0.000000	-0.002761
7	0.596756	0.060627	0.007472	0.006103	0.005418	0.000207	0.438210	0.014840	0.001820
8	-0.126112	-0.074032	-0.014487	-0.004829	0.000000	-0.000945	-0.238344	-0.046639	0.000000
9	0.014170	0.033535	0.019870	0.002233	-0.006586	0.001761	0.052857	0.041698	-0.002212
10	-0.546405	-0.016241	-0.004120	-0.004012	-0.003959	-0.000040	-0.215193	-0.002132	-0.001330
Sum	-0.082805	-0.027527	-0.004955	-0.003503	-0.002776	0.000295	-0.046841	-0.000202	-0.000933

从表 1 可看出, 1~4 面即前校正组承担了系统的大部分球差, 较好地平衡了系统的孔径像差。7~10 为后校正组, 较好地校正了系统的视场像差。最终光学系统结构如图 2 所示。

系统一共有 5 个元件, 其中前两个透镜是几乎无光焦度的孔径校正镜, 第一片为正透镜, 材料为

轴外光束在透镜组上的投射高比较大, 在透镜表面上的入射角自然也就增大, 因此轴外光束像差如彗差、像散、场曲、畸变和垂轴色差都很大。2) 是谱段较宽使得系统的色差较大, 校正难度也加大。3) 是考虑到探测相机对成像质量的特殊要求, 几种轴外像差, 如彗差、像散和垂轴色差对成像清晰度的影响大, 应充分考虑校正。轴上像差(球差和轴向色差)可相应地放松校正, 但尽量不要太大, 以保证弥散斑的圆整^[5]。

在马克苏托夫两反射系统结构形式中, 主镜和次镜承担了系统大多数的光焦度, 在主镜之前采用一组透镜作为校正透镜, 主要用来校正系统的孔径像差。在离最后像面不远的会聚光束中, 再加入一组校正透镜, 主要用来校正系统的轴外像差, 增大系统的视场。为了加工方便, 把次镜和前校正镜组中的后表面设计成相同的曲率半径, 在(对应着次镜)内径镀反射膜, 在整个表面镀增透膜。这样前校正镜组的第二个透镜就成为一个三面镜。

在系统初始结构的基础上, 用 CODE-V 软件进行自动设计, 并进行人工干预, 分析像差的变化, 设置合适的变量及优化参数, 以使设计结果向所希望的方向变化。经过优化后各种像差基本达到了系统所需要的校正要求, 系统优化后的各类像差如表 1 所示。

JGS1, 为窗口保护玻璃, 为了减轻系统的重量, 也分配了光焦度, 参与系统像差的优化, 第二片是负透镜, 材料为 K9 玻璃; 主次镜均为球面反射镜, 并利用了 K9 透镜的后表面作为次镜, 后两个透镜是视场校正镜。优化设计中为了使系统像点为圆形, 对慧差和轴向色差进行了一定程度的控制, 以保证系统所成的星点像

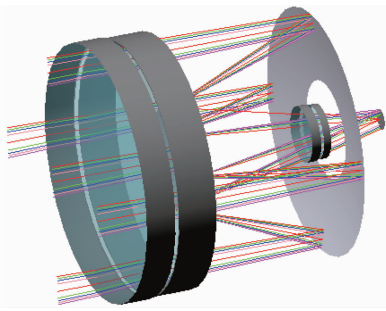


图2 光学系统结构

Fig. 2 Structure of the optical system

是圆形的。使用这种系统结构较为紧凑,整个系统从第一透镜面到像面的距离约为 285 mm。

4.4 设计结果

探测相机较普通光学系统的设计像质要求是不一样的,为了能准确捕获目标,常常要求光学系统能较好地消除倍率色差^[6],并在一定的范围内像面上像点的弥散圆尽量圆,同时要求系统的畸变小^[7]。

用 CODE-V 软件进行了光线追迹,光学系统的点列图如图 3 所示。可以看出,系统整个视场点列图基本是圆形,直径均小于 26 μm。全视场内集中 80% 能量的弥散斑直径如表 2 所示,弥散圆直径为 2 pixel×2 pixel(26 μm),所对应的能量分布如图 4 所示。

畸变及倍率色差如图 5 所示,最大畸变小于 0.05%,倍率色差小于 5 μm,能够满足定轨精度的要求。

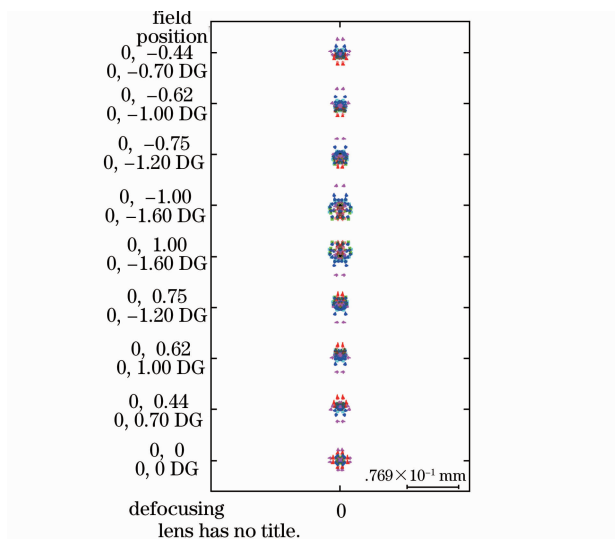


图3 光学系统弥散斑

Fig. 3 Spot diagram of optical system

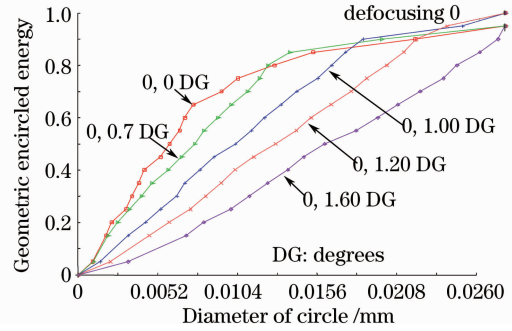


图4 光学系统 26 μm 所对应的能量分布

Fig. 4 Radial energy in 26 μm of optical system

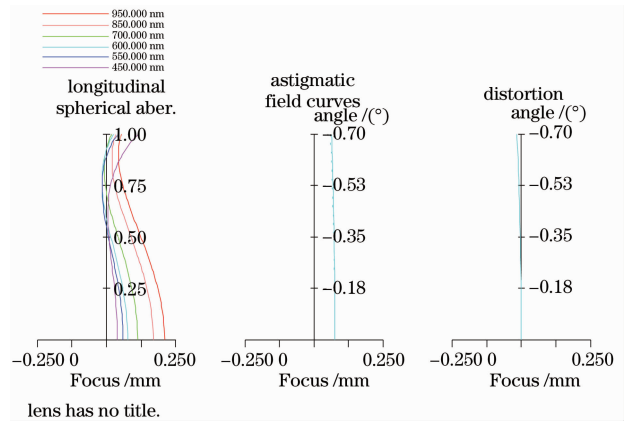


图5 光学系统的球差、场曲及畸变曲线

Fig. 5 Spherical aberration, astigmatic field and distortion curves of optical system

表2 集中 80% 能量相对应的弥散圆直径(μm)
Table 2 Diameter of spot diagram concentrating on 80% energy

Field / (°)	Spot diagram
0	12.8
0.7	12.4
1	16.5
1.2	20.1
1.6	24.7

4.5 热分析

由于探测相机工作在外层空间环境,即便是相机系统有热控包扎,也只能使得相机在工作期间时维持在一定的温度变化范围内,还是需要光学系统在热控下的温度变化范围内具有稳定的性能。并且根据总体指标对质量、体积的要求,该探测相机的焦平面不具备调焦机构。因此,光学系统在设计时要综合考虑分析温度变化对成像质量的影响。

当温度变化时,构成光学系统的结构参数如曲率半径、厚度、间隔、镜片材料及系统所在介质的折射率都将发生变化,系统参数的改变将引起系统性能的变化如像面离焦及像差变化^[8]。光学材料折射

率 n 的变化量 Δn 计算公式为

$$\Delta n = \frac{dn}{dT} \Delta T, \quad (4)$$

式中 dn/dt 为玻璃材料的温度折射率系数, ΔT 为温度变化量。

在规定的温控范围内, 认为所用材料线性热膨胀, 则各个间隔 L 的热膨胀变化量 ΔL 的计算公式为 $\Delta L = L \times \rho_{\text{material}}$, 曲率半径 R 的变化量 ΔR 计算公式为

$$\Delta R = R \times \sigma_{\text{material}}, \quad (5)$$

式中 ρ_{material} 为隔圈材料的线膨胀系数, σ_{material} 为玻璃材料的线膨胀系数。

探测相机热控所能保证的温度范围为 $18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 即温度变化范围为 $15\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 21\text{ }^{\circ}\text{C}$, 经过 CODE-V 光学设计软件分析计算, 温度变化导致的光学系统焦平面移动量如表 3 所示。

表 3 温度变化对后工作距的影响
Table 3 Back working distance dependence on the temperature

Serial number	Temperature / $^{\circ}\text{C}$	Back working distance / mm	Focal plane drift / mm
1	21	56.4068	-0.0157
2	20	56.412	-0.0105
3	19	56.4173	-0.0052
4	18	56.4225	0
5	17	56.4278	0.0053
6	16	56.433	0.0105
7	15	56.4383	0.0158

在 $\pm 0.02\text{ mm}$ 的离焦变化量内对光学系统 80% 能量的弥散斑直径进行了计算, 如图 6 所示, 各个视场平均 80% 能量的弥散斑直径变化量较小, 都没有超过 $26\text{ }\mu\text{m}$ 。

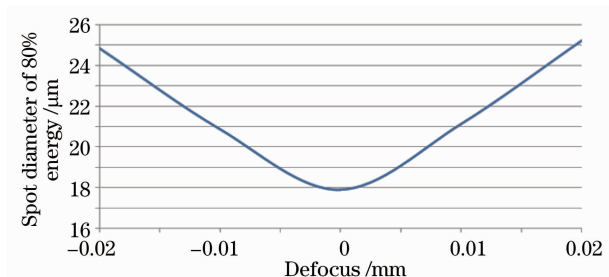


图 6 离焦对 80% 能量的弥散斑直径的影响

Fig. 6 Spot diameter of 80% of energy dependence on out of focus

从以上分析结果可以看出, 探测相机在有热控包扎的条件下, 采用钛合金镜筒与玻璃材料等的组

合, 在温度范围为 $18\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时能够满足指标使用要求。

5 结 论

根据空间目标探测相机的指标要求, 采用马克苏托夫折反射式光学结构形式设计了一种宽谱段大孔径可见光光学系统。该系统由 5 个光学元件组成, 其中次镜和前校正镜组中的后表面结合为同一个面, 并将系统光阑设在次镜上, 减小了遮拦比。系统结构较为紧凑, 整个系统筒长约为焦距的 0.75 倍。设计像质评价结果和热分析结果表明, 该光学系统倍率色差较小, 对所成的星点像弥散圆, 且控制 80% 的能量集中在在 $2\text{ pixel} \times 2\text{ pixel}$ ($26\text{ }\mu\text{m}$) 内, 满足探测要求。

参 考 文 献

- Huo Jiangtao. Study on general situation of space debris[J]. *J. Academy of Equipment Command & Technology*, 2007, **18**(5): 56~60
霍江涛. 空间碎片概况研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2007, **18**(5): 56~60
- Zhang Keke. Research on space-based space surveillance visible sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, **26**(4): 10~14
张科科. 天基空间目标监视可见光传感器研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, **26**(4): 10~14
- Li Ying. Development and prospects of monitoring system of space target [J]. *Space International*, 2004, **6**: 28~32
李 颖. 空间目标监视系统发展现状及展望[J]. 国际太空, 2004, **6**: 28~32
- Yuan Xucang. Optical Design[M]. Beijing: Science Press, 1983. 620~628
袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 620~628
- Lu Xin. Optical design of CCD star sensor[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 1994, **4**: 49~53
卢 欣. CCD 星敏传感器光学系统设计[J]. 中国空间科学技术, 1994, **4**: 49~53
- Wang Hu. Optical system design of star sensor with wide-view field and small F-number [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1822~1824
王 虎. 宽视场大相对孔径星敏传感器光学系统设计[J]. 光子学报, 2005, **34**(12): 1822~1824
- Sun Xin. Optical system design of visible-spectra camera for space-object capture [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1548~1551
孙 鑫. 一种用于空间目标捕获的宽视场可见光光学系统的设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(6): 1548~1551
- Li Lin. Current status and prospects for thermal effects on optical systems and athermalisation techniques [J]. *Optical Technology*, 1997, **5**(9): 26~29
李 林. 环境温度对光学系统影响的研究及无热系统设计的现状与展望[J]. 光学技术, 1997, **5**(9): 26~29