

# 空间交会对接探测器光学系统设计

吕 博<sup>1,2</sup> 刘伟奇<sup>1</sup> 张大亮<sup>1</sup> 康玉思<sup>1</sup> 冯 睿<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所大珩学院, 吉林 长春 130033)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 设计了一种空间交会对接探测器光学系统。系统根据超焦距原理增大光学景深,通过像方远心光学结构,解决了变化物距下标志灯信号光在 CCD 成像面上成像质心不稳定的问题,应用改进的库克物镜结构有效地校正了对成像质心位置影响较大的垂轴像差。光学系统光学总长为 36 mm,系统采用 6 片透镜元件,全部为球面结构,均为普通商用玻璃,避免了特种玻璃的使用。在 800~880 nm 波段,0.5~130 m 物距下,系统的光学绝对畸变设计值优于  $\pm 1 \mu\text{m}$ ,视场角探测设计精度近似  $10''$ 。设计的系统探测精度高,制造成本低,结构紧凑,适用于高精度空间飞行器交会对接领域。

**关键词** 光学设计; 交会对接; 探测器; 光学系统

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1216003

## Optical System Design of Sensor for Space Rendezvous and Docking

Lü Bo<sup>1,2</sup> Liu Weiqi<sup>1</sup> Zhang Daliang<sup>1</sup> Kang Yusi<sup>1</sup> Feng Rui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> College of Daheng, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** An optical system for space rendezvous and docking simulator sensor is designed. The depth of field is increased by using the hyperfocal theory. The problem that the image centroid of signal light in CCD image plane changes with changing object distance is solved by adopting telecentric image space optical design. The lateral aberrations that affect the image centroid seriously is corrected by applying the ameliorative cooke optical configuration. The system has an optical length of 36 mm with 6 pieces of lenses, all of which are spherical surface with no special glass employed. For the 800~880 nm working wavelength and object length of 0.5~130 m, the design quantity of optical absolute distortion is less than  $\pm 1 \mu\text{m}$  with detected precision of field of view approximate to  $10''$ . The designed system meets the requirement of high precision, low cost for manufacture and fine structure. It can be applied in the field of high precision aerocrafts space rendezvous and docking.

**Key words** optical design; rendezvous and docking; sensor; optical system

**OCIS codes** 010.0280; 040.1490; 230.0040; 220.3620

## 1 引 言

随着我国在航天交会对接领域中的发展,建立具有科学研究意义的空间站变得尤为重要。为了保证航天员在空间站的正常生活及完成必要的空间科研实验任务,需要不断地进行太空补给,因此需要完

成物资补给飞船与空间站或目标飞行器的交会对接任务。传统的交会对接需要航天员通过可视成像设备进行控制,发射成本较高,同时对航天员的生命安全也有一定的威胁。自 20 世纪 60 年代起,美国国家航空航天局(NASA)等开展了一系列的无人飞行

收稿日期: 2013-04-20; 收到修改稿日期: 2013-07-16

基金项目: 国家 863 计划(2009AA032701)

作者简介: 吕 博(1986—),男,博士研究生,主要从事精密光学系统设计方面的研究。E-mail: jllvbo@163.com

导师简介: 刘伟奇(1958—),男,研究员,博士生导师,主要从事激光显示技术、图像显示技术以及空间成像与瞄准技术等方面的研究。E-mail: liuwq@ciomp.ac.cn

器的空间交会对接实验<sup>[1-7]</sup>,相继论证试验了以自动命中及反射线性概念的计算机视觉系统(ACVS)、视频导航系统(VGS)、高级视频导航系统(AVGS)为代表的空间交会对接探测模拟器。其中ACVS探测器采用9 mm定焦距、像面分辨率1024 pixel×768 pixel、全视场为28°×21°的光学系统作为物资飞行器的探测单元,探测器整机系统精度优于±0.1°。AVGS全视场为16°×16°,探测成像距离0.75~300 m,1~100 m探测器整机系统精度为±0.3°。AVGS是VGS的改进型,在VGS基础上提升了电子系统,改进了机械设计进而减轻探测器重量与功耗,提高了物资飞行器操控性和探测质量。上述空间对接探测系统已成功应用在相应的空间交会对接任务中。根据相关资料,当前国内还没有研制出具有探测精度为±0.1°的整机系统及具有在0.5~130 m物距,设计探测精度为10"甚至更高的高精度空间交会对接探测器光学系统。

从实际应用角度出发,设计了一种空间交会对接探测器光学系统,可用于无人物资飞船与空间站或目标飞行器的空间对接领域,并完成了其光机系统加工组装工作。该光学系统具有探测精度高,体积小、重量轻的特点,可为高探测精度空间交会对接探测器光学镜头的设计提供一定的参考。

## 2 空间交会对接探测器工作原理与光学系统参数选择

### 2.1 空间交会对接探测器工作原理说明

运用在空间交会对接中的探测器主要由光学与电子学图像处理两部分组成。由空间站或目标飞行器上的标志灯发出或反射的信号光经光学系统照射到探测器光学 CCD<sup>[8-12]</sup>上,探测器 CCD 后置的电子学系统计算 CCD 上信号光对应的视场角,即为两飞船的相对视场值。在目标飞行器与物资飞船不断接近的过程中,控制物资飞船推进装置使其在逼近

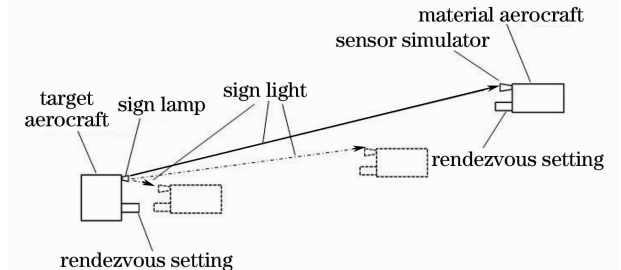


图1 两飞行器模拟对接过程示意图

Fig. 1 Schematic of rendezvous of two aircrafts

目标飞行器时做出飞船姿态调整,通过不断地探测-调整-靠近工作,最终在轨完成两飞行器的对接、锁紧等任务。如图1所示为两飞行器模拟对接过程示意图。

图2所示为探测器光学系统成像说明。其中,对探测器光学部分的要求主要为在变化的物距下,保持两飞行器各相对视场下信号光成像质心稳定,各视场信号光成像弥散圆尽量呈圆对称,确保内置电子学系统计算 CCD 上信号光对应视场角的判读的准确性。

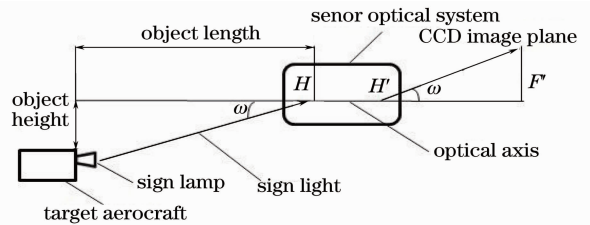


图2 探测器光学系统成像说明

Fig. 2 Illumination of imaging for sensor optical system

### 2.2 空间交会对接探测器光学系统设计说明

空间交会对接探测器工作在太空环境中,强烈的太阳光进入探测器成像视场内会掩盖标志灯发出或反射的信号光,在远距离靠近过程中太阳光对其影响尤为强烈,此外近距离交会对接时目标飞行器外部对接机构反射的太阳光也将影响信号光的探测。所以,选择空间交会对接探测器工作波长时应避开太阳光光谱范围辐照较强的区域(400~780 nm),可选择较常见的短波红外波段作为探测器工作波长,同时光学系统应加入遮光罩或是在窗口前部及 CCD 前设置滤光片。

在物资飞行器捕获目标飞行器后,通过自身携带的推进装置实现姿态调整,并与目标飞行器靠近。在靠近的过程中要探测目标飞行器标志灯信号,且要求特定视场角下,需保持目标飞行器的标志灯信号在物资飞行器 CCD 成像,保证标志灯成像共轭距离的变化不影响成像稳定性,从而确保探测器对目标飞行器的测量精度。因此,探测器需具有较大的成像空间深度(景深)和较低的畸变值。可采用超焦距<sup>[13-14]</sup>原理增大探测器的景深,其探测器景深示意图如图3所示。

当 CCD 像面与探测器光学系统焦面重合时,其物方空间中的最佳物平面  $O$  和后景  $O_2$  位于无限远,前景  $O_1$  位于  $l_{o1} = -f'^2 / (\delta'F)$  处,其中  $f'$  为系统焦距,  $F$  为系统像方  $F$  数,  $\delta'$  为弥散斑直径。由于此时最佳物平面  $O$  位于无限远,导致部分景深丢失,进

而导致远距离探测时的精度失真。为了保证探测器对有限远目标成像时有足够景深,可采用超焦距的方法,令最佳物平面位于  $l_o = l_{o1} = -f'^2/(\delta'F)$  处,

此时,背景仍位于无穷远处,而前景位于距离  $l_{o1} = -f'^2/(2\delta'F)$  处。

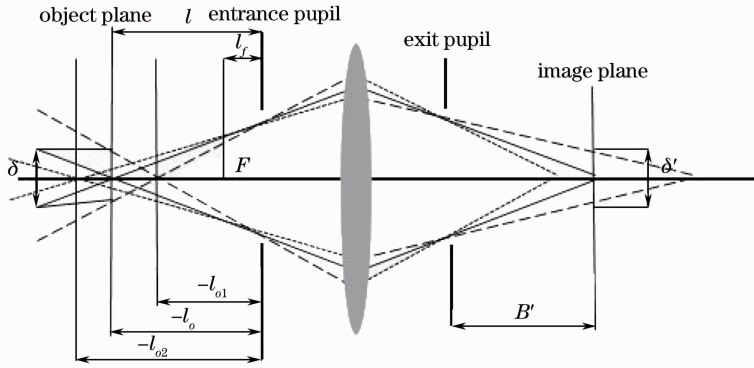


图 3 探测器景深示意图

Fig. 3 Schematic of sensor depth of field

背景位于无穷远处,前景到光学系统距离提高一倍,总的景深增加,但所对应的最佳像面将稍微偏离 CCD 所在面。为了保证产生的离焦量不影响成像质量与测量精度,令光学系统的光阑与入瞳重合,光学系统采用像方远心<sup>[15]</sup>光路,如图 4 所示,可解决有限距变化时标志灯共轭像点位置变化的问题。

表 1 空间交会对接探测器主要光学设计指标

Table 1 Main optical design specifications of space rendezvous and docking sensor system

Specification	Value
Design absolute distortion / $\mu\text{m}$	Less than $\pm 1.0$
Object length / m	0.5~130
Focal length / mm	20
F number	$\leq 3$
Wavelength band / nm	800~880
Full field of object view / ( $^\circ$ )	$32 \times 32$
Surface type	Spherical surface
Optical length / mm	$\leq 50$

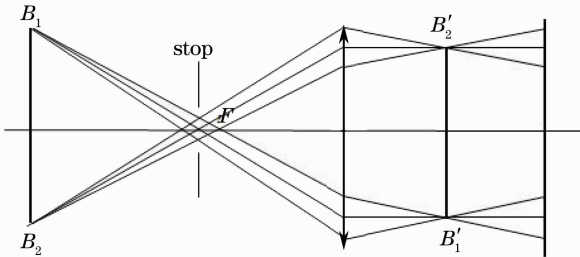


图 4 像方远心示意图

Fig. 4 Layout of telecentric optics in image space

采用分辨率为 2048 pixel $\times$ 2048 pixel、像素尺寸为  $5.5 \mu\text{m}$ 、对短波红外光源敏感的 CCD 成像单元作为接收器,视场设定为  $32^\circ \times 32^\circ$ ,全视场内无渐晕,与光学系统像方远心的特征共同保证了 CCD 像面照度均匀。同时,光学系统中采用定焦距镜头,降低交会对接探测器外太空环境工作的故障率。此外,系统不应该含有胶合面,避免由于太空辐照造成的胶层发黑,影响信号光透过率与探测精度。考虑现有探测精度要求、加工装调工艺水平及应用范围等因素,对空间交会对接探测器提出的光学设计技术指标如表 1 所示。

### 3 空间交会对接探测器光学系统设计

#### 3.1 探测器光学系统成像质量评价方法

光学系统对不同视场的信号光在接收面上成像,各参数中,高斯像高是一个重要的量<sup>[16-17]</sup>。高斯像高即为各视场主光线的像高。但受空间交会对接探测器尺寸及所处应用环境的限制,不同物距下目标飞行器标志灯发出的信号光成像弥散圆尺寸变化较大,轴外视场的残余像差将使弥散圆能量不完全关于主光线像点成中心对称分布。

根据现有电子学用于提取 CCD 弥散圆分布强度,计算弥散圆的能量质心位置的处理方式及实际成像能量分布特性,选择弥散圆能量实际质心高度与信号光理论像高偏差量的大小,即绝对畸变,作为空间交会探测器光学成像系统的质量评价标准。对该评价标准的理论计算为

$$y'_{cd} = y'_c + \Delta y' V_{cd}, \quad (1)$$

$$\Delta y' = y'_{cd} - f' \tan \omega, \quad (2)$$

其中(1)式描述了弥散圆能量质心,(2)式为弥散圆能量质心与某视场角下理想像高位置的偏差,即绝对畸变值。 $y'_c$ 为 $\omega$ 视场角下信号光主光线在 CCD 像面上高度值, $\Delta y'_{cd}$ 为 $\omega$ 视场角下信号光在 CCD 像面上弥散圆质心相对主光线高度的偏差量, $y'_{cd}$ 为 $\omega$ 视场角下信号光在 CCD 像面上弥散圆质心高度即实际像高质心值, $f'\tan\omega$ 为 $\omega$ 视场角下信号光理想像高值, $\Delta y'$ 为实际像高质心值与信号光理想像高的差值即绝对畸变量值。成像系统绝对畸变示意图如图 5 所示。

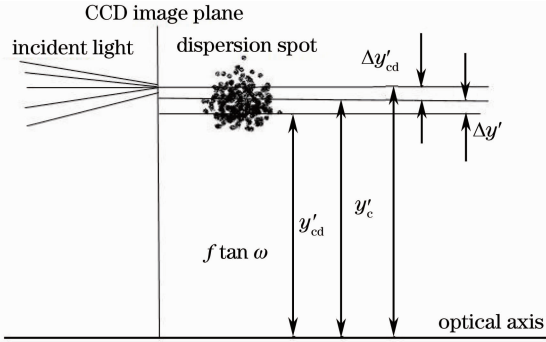


图 5 绝对畸变示意图

Fig. 5 Sketch of absolute distortion

由(2)式可知,实际像质心高度与理想像高的差值即绝对畸变量值 $\Delta y'$ 趋于 0 时,信号光成像能量质心位置与理想像高重合,说明此时光学系统对某一视场信号光成像的视场角与真实视场角一致,视场角测量精度高。因此光学设计过程中应尽量减少各视场主光线像高与其理想像高的偏差以及信号光在 CCD 像面上弥散圆质心相对主光线高度的偏差量。因此在光学设计中对轴外视场垂轴像差的控制尤为重要,影响弥散圆对称性的彗差应尽量小,系统的相对畸变值也应较小。

同时,为了提高探测器后续电路对弥散圆能量质心位置精度计算的可靠性,弥散圆能量集中度也应该尽量高,对应系统像散、彗差值应尽量小,各视场弥散圆形状分布应近乎为圆形。设计实践也表明,均方根(RMS)直径下能量百分比大于 80%、近似为圆形的弥散圆能量分布下的信号光能量质心位置与理想像高位置相差较小,即绝对畸变 $\Delta y'$ 较小,光学系统视场角测量精度高。

### 3.2 探测器光学结构选型

不同的光学系统结构适用于不同的使用环境,其校正像差的能力及适用范围差别也较大。正确的选型不但可以精简元件,缩小系统尺寸,更可以校正敏感像差、简化工作。通过比较几种常用的成像物

镜发现,选定高精度探测器光学系统形式尤为重要。

关于光阑前后对称的双高斯物镜<sup>[18]</sup>是校正垂轴像差的常用结构,其平衡彗差、畸变和垂轴色差的能力很强。其透镜元件数通常为 6~8 片,设计指标中的光学总长较小,包边之后的透镜元件表面应力变形较大,但透镜元件过于纤薄也将增大在做震动冲击等试验时的危险性。三片式库克镜头含有 8 个自由量,理论上可以校正 7 种像差,三镜片光焦度的不同组合有利于个别较大像差的校正。天塞镜头是在三片式库克镜头基础上改进而来,但由于有增加的胶合面,需在初始设计时予以回避。因此,为了保证光阑前后光学结构的对称性,降低校正垂轴像差的难度,可以将三片式库克镜头中第三片透镜拆分成两片正光焦度的透镜,来满足焦距及对称性的需要。

### 3.3 探测器光学系统设计及结果

光学系统三维视图如图 6 所示,沿光轴从左到右依次为窗口玻璃、滤光片、改进的库克结构、CCD 保护玻璃及 CCD 成像面。在设计过程中,考虑了元件包边后的面型变化,CCD 保护玻璃前的透镜中心厚度都大于 3 mm,边缘厚度大于 1.8 mm,光阑与前后的弯月透镜中心间隔及边缘空气间隔均大于 1.5 mm,并在此基础上进行系统深度优化。

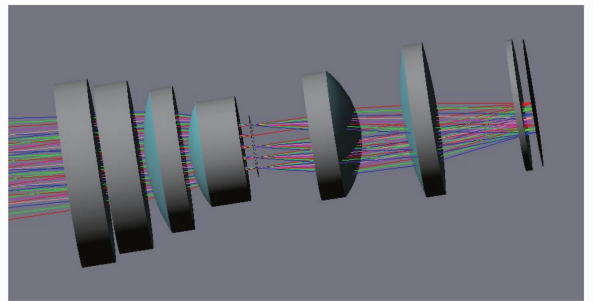


图 6 光学结构示意图

Fig. 6 Schematic of optical structure

光阑前两片弯月镜采用折射率较大的火石玻璃,将轴外光线压低进入光阑,缩小光阑后镜片通光尺寸。光阑后第一片弯月镜应适当远离光阑,以使大视场信号光在满足共轭距离的条件下产生足够大的像高,双凸透镜使入射光会聚并产生一定的像方孔径角。光阑后两片透镜采用冕牌玻璃,平衡色差。初始设置的四片式结构,使光阑前后的光学结构达到了对称,有效地校正了对信号光质心计算影响较大的彗差。适当地调整光阑的位置及第二片弯月镜后表面半径使子午、弧矢场曲在各视场比较接近,有效地降低了像散值,使各视场信号光在 CCD 成像面的弥散圆形状几乎呈中心对称。同时需要注意的是

由于探测器工作在外太空高辐照条件下,所以所选用的透镜元件都是耐辐照性好的玻璃材料。

图 7 所示为在 3 个工作波长下,0.5、1、130 m 物距时,0°、3°、6°、8°、10°、16° 视场角弥散圆分布情况,3 个物距下 80% 能量弥散圆直径分别为 132、

13、130  $\mu\text{m}$ 。各视场弥散圆形状接近圆形,尺寸相近,无渐晕条件及像方远心设计保证了各视场照度均匀,为后续电子学计算信号光能量质心位置降低了难度。

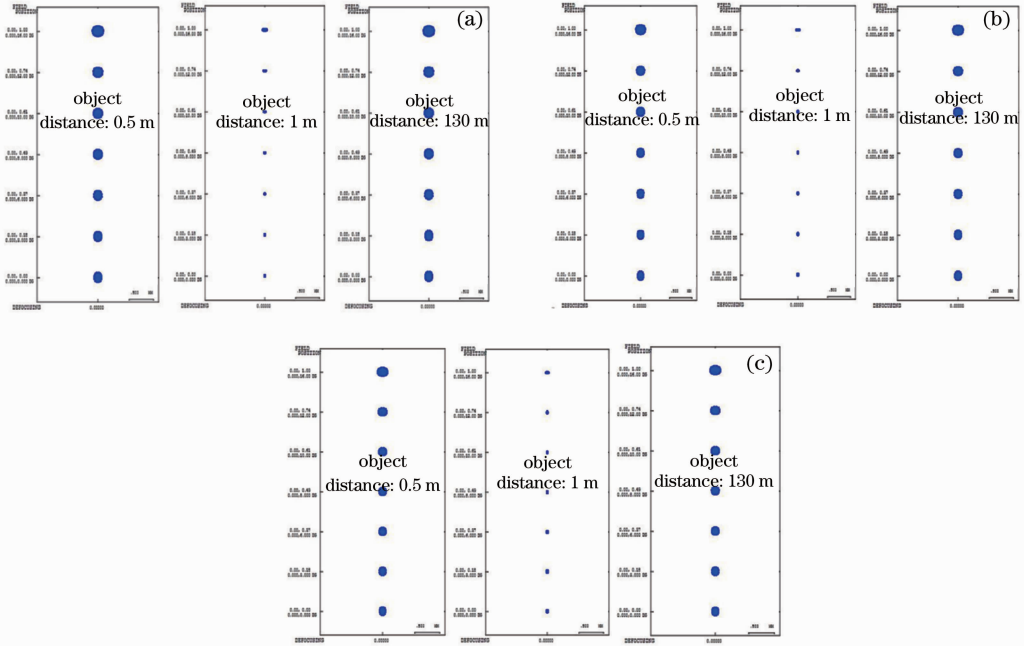


图 7 不同工作波长下 0.5、1、130 m 物距时的成像弥散圆。(a) 800 nm; (b) 850 nm; (c) 880 nm

Fig. 7 Dispersion of images with different wavelengths when object distances are 0.5, 1, 130 m, respectively.

(a) 800 nm; (b) 850 nm; (c) 880 nm

探测器光学系统 800 nm、850 nm(参考波长)、880 nm 波段下的倍率色差如图 8 所示。全视场下

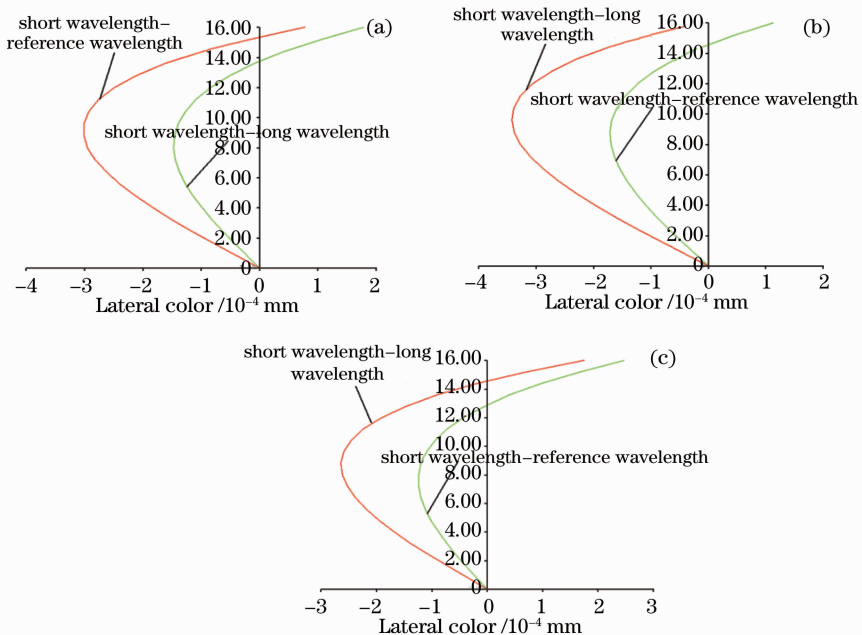


图 8 0.5、1、130 m 物距下倍率色差。(a) 0.5 m; (b) 1 m; (c) 130 m

Fig. 8 Lateral color when object distances are 0.5, 1, 130 m, respectively. (a) 0.5 m; (b) 1 m; (c) 130 m

0.5、1、130 m 物距的倍率色差分别小于 0.4、0.4、0.3  $\mu\text{m}$ ,全波段、全工作谱段各视场主光线像高十分接近,增强了探测器在外太空骤变温度环境中工作波长的适应性。

根据(1),(2)式,并通过光学软件计算得出各视场下的绝对畸变值。图 9 所示为 800、850、880 nm 工作波长下,0.5、1、130 m 物距系统各视场绝对畸变值的分部情况。

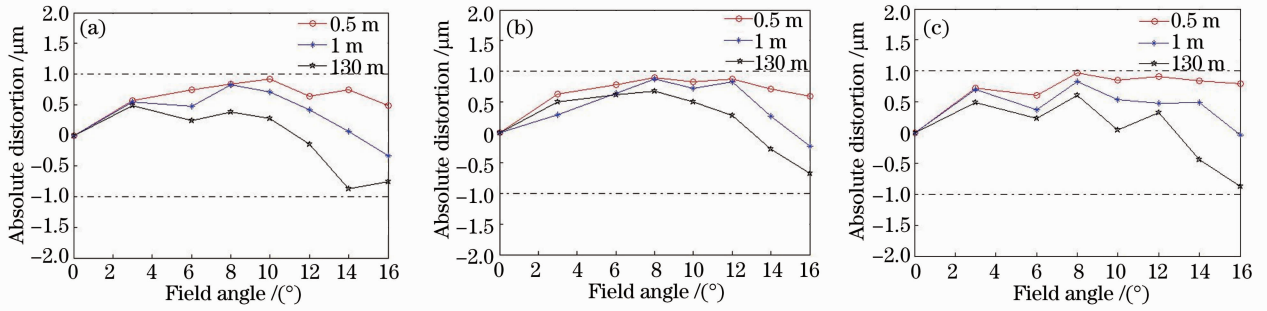


图 9 不同波长下 0.5、1、130 m 物距时光学系统的绝对畸变。(a) 800 nm; (b) 850 nm; (c) 880 nm

Fig. 9 Absolute distortion of optical system with different wavelengths when object distances are 0.5, 1, 130 m, respectively. (a) 800 nm; (b) 850 nm; (c) 880 nm

在选定的 8 个视场(0°、2°、4°、6°、8°、10°、12°、14°、16°)、3 个工作波长下的绝对畸变均在  $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 之内,光学系统达到了较高的设计精度。

### 3.4 探测器机械结构设计

为了确保光学系统在不同环境温度条件下结构尺寸的稳定性,采用钛合金材料制作镜筒、镜框及压圈。钛合金的线膨胀系数与光学玻璃的线膨胀系数接近,可减少由温度变化而引起的光学参数变化,避免影响镜头的成像质量,也可避免在配合间隙公差不当的情况下可能造成的压碎镜片的情况。

由于光学镜头中各透镜之间的径向安装精度高达  $1\sim 2 \mu\text{m}$ ,为保证精度要求,这些透镜需单独设计加工成一个组件,并配合镜筒采用高精度光学定中心修镜框的方法实现。探测器三维机械结构如图 10 所示。

阶,便于加工和研磨。镜筒的前端留有凸台,并对凸台根部进行清理,保证保护玻璃与凸台的正确接触,镜座安装完成后用压圈对后端进行定位。

探测器实物如图 11 所示,镜筒直径为 28 mm,光学总长小于 36 mm,机械全长为 40 mm,总重量小于 95 g,结构紧凑,占用空间小,重量轻。

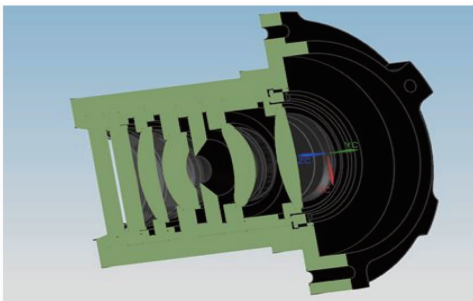


图 10 探测器三维机械结构

Fig. 10 Three-dimensional mechanical structure of sensor

由于光学件的径向安装精度要求较高,为保证精度要求,采用在测量光学件尺寸后配做镜座的方式来进一步保证空气间隔。其中,镜筒内的各镜座外径尺寸设计成相同的值,避免镜筒内出现多个台



图 11 探测模拟器实物图

Fig. 11 Physical map of sensor simulator

## 4 结 论

设计并制造了用于空间交会对接探测器的光机系统,系统共由 3 片平行平板透镜、3 个弯月透镜和 1 片双凸透镜共 7 片透镜组成,没有使用特种玻璃,无胶合面,全球面设计,降低了制造、检测成本;光学系统总长 36 mm,机械全长 40 mm,镜筒直径小于 28 mm,结构紧凑小巧,占用空间小。系统无渐晕,各视场弥散圆形状对称、大小相当,全视场照度均匀;采用改进的库克式结构,形式上关于光阑对称,较好地校正了垂轴像差。超焦距的设计增大了成像景深,与像方远心特性相结合,保证较大物距范围下各视场信号光成像位置的稳定。光学设计结果表明,在 800、

850、880 nm 工作波长, 0.5、1、130 m 物距下, 各视场信号光的绝对畸变均在  $\pm 1 \mu\text{m}$  范围内, 对目标飞行器的视场探测精度接近  $10''$ , 达到了空间交会对接光学系统的设计指标要求。

### 参 考 文 献

- 1 R T Howard, T C Bryan, M L Book. The video guidance sensor-a flight proven technology [C]. Proceedings of 22nd Annual American Astronautical Society Guidance and Control Conference, 1999.
- 2 R Howard, T Bryan, M Book, *et al.*. Active sensor system for automatic rendezvous and docking [C]. SPIE, 1997, 3065: 106-115.
- 3 R Howard, H Cole, J Jackson, *et al.*. Automatic rendezvous and docking system test and evaluation [C]. SPIE, 1997, 3068: 131-139.
- 4 C A Cruzen, J J Lomas. Design of the automated rendezvous and capture docking system [C]. Proceedings of AIAA International Space Station Service Vehicles Conference, 2000.
- 5 R Howard, T Bryan, M Book. Video guidance sensor Hight experiment result [C]. SPIE, 1996, 3880: 315-325.
- 6 F Roe, R Howard, L Murphy. Automated rendezvous and capture system development and simulation for "NASA" [C]. Proceeding of SPIE Space Technologies and Operation Conference, 2004.
- 7 R T Howard, T C Bryan, M L Book. On-orbit testing of the video guidance sensor [C]. SPIE, 1999, 3707: 290-300.
- 8 Meng Xiang'e, Jiang Junfeng, Liu Tiegeng, *et al.*. Mathematical model of illumination of CCD in space scanning optical fiber Fabry-Perot sensor demodulation system [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1128006.  
孟祥娥, 江俊峰, 刘铁根, 等. 空间扫描型光纤法布里-珀罗传感解调系统中 CCD 的光照度数学模型研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1128006.
- 9 Chang Lingying, Zhao Baochang, Yang Jianfeng, *et al.*. Optical system design of a two-linear array stereoscopic mapping CCD camera [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0816001.  
常凌颖, 赵葆常, 杨建峰, 等. 两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统设计 [J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0816001.
- 10 Wang Xuebing, Zhang Qiheng, Liu Yuqing, *et al.*. Analysis for operating distance of a searching and tracking system based on CCD detector [J]. Opto-Electronic Engineering, 2004, 31(9): 12-15, 62.  
王学兵, 张启衡, 刘玉清, 等. CCD 探测器搜索跟踪系统的作用距离分析 [J]. 光电工程, 2004, 31(9): 12-15, 62.
- 11 Cheng Shubo, Zhang Huige, Wang Zhebin, *et al.*. Nonlinearity property testing of the scientific grade optical CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0404001.  
程书博, 张惠鹤, 王哲斌, 等. 科学级光学 CCD 非线性特性测试 [J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0404001.
- 12 Kazuya Yonemoto. CCD/CMOS Image Sensor Basis and Application [M]. Chen Rongting, Peng Meizhu, Transl. Beijing: Science Press, 2009. 73-102.  
米本和也. CCD/CMOS 图像传感器基础与应用 [M]. 陈榕庭, 彭美柱, 译. 北京: 科学出版社, 2009. 73-102.
- 13 刘晓军, 倪国强, 卢欣, 等. 空间交会对接 CCD 光学成像敏感器光学特性 [J]. 中国空间科学技术, 2006, (5): 57-60.
- 14 Zhao Chunhui, Gao Wenwen, Liu Lu, *et al.*. A vision guidance sensor for Shenzhou-8 spacecraft autonomous rendezvous and docking [J]. Aerospace Control and Application, 2011, 37(6): 6-7.  
赵春晖, 高文文, 刘鲁, 等. 神舟八号飞船交会对接 CCD 光学成像敏感器 [J]. 空间控制技术与应用, 2011, 37(6): 6-7.
- 15 Zhang Yimo. Applied Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010. 120-122.  
张以谟. 应用光学 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 120-122.
- 16 Wang Zhijiang. Applied Optics Technical Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 2007. 242-259.  
王之江. 实用光学技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. 242-259.
- 17 Wang Zhijiang. Theory Elements of Optical Design [M]. Beijing: Science Press, 1985. 38-70.  
王之江. 光学设计理论基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 38-70.
- 18 Chi Zeying, Chen Wenjian. Applied Optics and Elements of Optical Design [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008. 12-65.  
迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础 [M]. 南京: 东南大学出版社, 2008. 12-65.

栏目编辑: 张 腾