

羽流紫外辐射监视单元光学系统设计

石恩涛^{1,2} 王咏梅² 付利平²¹中国科学院大学, 北京 100049²中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190

摘要 为了在卫星姿态调整时监测羽流紫外(UV)辐射,需要研制紫外宽波段、大视场、小尺寸的光学系统。根据紫外成像的基本原理,提出了采用融石英和氟化钙(CaF₂)两种光学材料实现大视场、大光圈的初始结构,给出了一种焦距为25 mm,视场为40°,光圈 F 值为2的全球面光学系统的方案。利用光学设计软件Zemax和Code V对光学系统进行优化,得到满足要求的紫外成像物镜。系统各个视场的弥散斑直径小于11 μm ,探测器特征频率在40 lp/mm处,各个视场的传递函数大于0.6,满足加工和状态的要求。与其他紫外成像物镜相比,系统实现了大视场、大光圈,且各镜面全部为球面,有效降低了成本,缩短了加工周期。

关键词 光学设计; 紫外成像物镜; 羽流; 球面

中图分类号 O436 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.112202

Optical System Design of Plume Ultraviolet Radiation Monitor Unit

Shi Entao^{1,2} Wang Yongmei² Fu Liping²¹University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China²National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract To monitor the plume ultraviolet (UV) radiation during the satellite attitude adjustment, we need to develop an optical system with UV spectral range, large field of view and small size. Based on the principle of UV imaging, the initial structure with large field of view and aperture is realized by using two optical materials of fused silica and calcium fluorite. The scheme of all spherical surface optical system with focal length of 25 mm, field of view of 40° and aperture F number of 2 is introduced. The optical system is optimized by using optical design software Zemax and Code V, and the UV imaging lens that satisfies the requirement is obtained. The diameters of defocus spot for all fields of view are less than 11 μm , and transfer functions of all fields of view are better than 0.6 at the detector's characteristic frequency of 40 lp/mm, which satisfy the requirements of fabrication and state. Compared with the other UV objective lenses, the proposed system achieves large field of view and aperture, and the surfaces of the lenses are all sphere. Which can effectively reduce the cost and shorten the process cycle.

Key words optical design; ultraviolet imaging objective lens; plume; sphere surface

OCIS codes 220.2740; 080.2740; 080.3620; 280.4788

1 引言

卫星姿态控制发动机在太空环境工作时,发动机喷流向外部空间环境自由膨胀形成空间羽流。航天器受到真空羽流的影响会产生羽流效应,比如羽流在航天器表面的沉积污染,对航天器的气动力、气动热以及电磁、视场等影响^[1]。羽流效应会造成航天器表面敏感元件工作性能下降或者受损、航天器姿态轨道控制不准、航天器寿命缩短等不良后果,严重时甚至导致航天任务失败。因此,羽流效应防护一直是航天器设计中必不可少的一环。在轨监测发动机羽流的膨胀状态,直接掌握真实的羽流特性,对于分析羽流状态、监视发

收稿日期: 2016-07-21; **收到修改稿日期:** 2016-08-09; **网络出版日期:** 2016-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(41005013)

作者简介: 石恩涛(1983—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事光机系统设计方面的研究。E-mail: set@nssc.ac.cn

导师简介: 王咏梅(1967—),女,博士,研究员,主要从事大气痕量气体探测方面的研究。E-mail: wym@nssc.ac.cn

动机工作状态和羽流效应防护都能提供重要支撑。考虑到监视的基本条件,仪器需采用非接触式监测方式,即采用光学镜头配合电路采集、数据处理、数据反演等组合的方式。

羽流紫外(UV)辐射监视单元是用来监视发动机羽流紫外辐射强度随时间和空间分布的仪器。羽流紫外辐射经光学镜头聚焦在制冷探测器上,通过探测器信号的获取得到羽流紫外辐射强度的空间分布,通过多次采集,可以得到羽流紫外辐射的时间分布。

本文根据羽流紫外辐射监视单元的需求,在调研国外同类紫外成像物镜的基础上,突破了折射式紫外成像物镜大视场大光圈的难点。与现有的紫外成像物镜相比,实现了大光圈 $F/2$ 、大视场 40° 和高成像质量,并且系统中没有采用非球面和衍射面,具有易加工、稳定性高等优点。羽流紫外辐射监视单元是对发动机羽流紫外辐射进行在轨监控的仪器,为研究羽流紫外辐射对航天器的影响打下基础。

2 光学系统指标的选取

光学镜头是整台仪器的核心部件之一。光学系统指标的选取直接决定仪器的成败。光学系统指标的选取应符合探测波段、波段强度、视场、工作距离等探测要素的要求,另外还需考虑探测器的尺寸、像素大小等因素。

2.1 探测波段的选择

空间发动机紫外辐射的过程是发动机燃料化学成分与空间大气光化学反应的过程。轨道在 $360\sim 400$ km 高度的空间航天器,为实现空间多次点火,其常用的化学空间姿控发动机通常采用自燃推进剂组合。其中历史上偏二甲肼(UDMH)/四氧化二氮(NTO)组合应用较多,目前应用最多的是一甲基肼(MMH)/NTO 组合^[2]。对于 UDMH/NTO 组合,产物主要气体组成是 H_2O 、 N_2 、 H_2 、 CO_2 、 CO 、 H 、 O 、 OH 等; MMH/NTO 组合产物主要气体组成是 H_2O 、 N_2 、 H_2 、 CO_2 、 CO 、 CH_4 等。

在低轨 $360\sim 400$ km 范围内,大气中氧原子的密度约为 $1.24 \times 10^{14} m^{-3}$,因此,羽流产物可能被原子氧激发,从而发出紫外光。发光的主要成分为激发的 OH 和 NH ,其中, OH 在近紫外波段的辐射波长包括 282 、 308.5 、 315 nm, NH 为 336 nm。国外实验获得一些关于羽流紫外辐射的特性,认为 OH 在 308.5 nm 波段的辐射应占总辐射量的 $40\% \sim 80\%$,羽流最亮点的紫外光强约为 $10^{-8} W/m^2$ ^[3]。羽流紫外辐射谱线如图 1 所示。因此光学系统的探测波段至少应覆盖 4 个特征谱线的范围,即 $282 \sim 336$ nm。考虑到滤光片的透射率,光学系统的探测波段范围增宽为 $270 \sim 360$ nm。

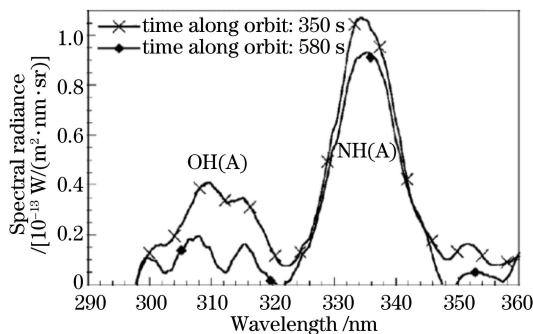


图 1 羽流紫外辐射光谱曲线^[2]

Fig. 1 UV radiation spectrum curve of plume^[2]

2.2 视场和工作距离的选取

仪器的视场取决于发动机喷口的张角和相对于喷口的距离,根据仪器的安装位置、发动机喷口张角以及理论的膨胀范围,羽流紫外辐射监视单元离发动机喷口的距离为 590 mm,发动机喷口的张角为 30° ,当羽流喷出离喷口 200 mm 的距离时,考虑到羽流的膨胀,根据几何关系可以确定仪器的水平和垂直视场均为 30° ,对角视场约为 40° 。

2.3 光学系统的焦距

仪器的探测器选用 E2V 公司的 47-20,像素数为 $1024 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$,像素大小为 $13 \mu m \times 13 \mu m$ 。

像面大小为 $13.3 \text{ mm} \times 13.3 \text{ mm}$ 。将羽流的尺寸 y , 探测器的像高 y' , 工作距离 l , 像距 l' 代入下式:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{l'}{l}, \quad (1)$$

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{l'} - \frac{1}{l}, \quad (2)$$

利用(1)和(2)式可以计算出系统的焦距 f' 约为 25 mm 。

2.4 光学系统的入瞳直径

在系统焦距和探测器确定的前提下, 光学系统的入瞳直径直接决定了整台仪器的响应度, 即信噪比 (SNR)。仪器信噪比的计算公式:

$$R_{\text{SN}} = \frac{E_{\lambda} A_{\text{O}} \Omega \tau_{\text{O}} Q_{\text{e}} \Delta t}{\sqrt{N_{\text{S}}^2 + (N_{\text{D}} \cdot \Delta t \cdot M_{\text{Bing}})^2 + N_{\text{R}}^2 + N_{\text{DN}}^2}}, \quad (3)$$

式中 E_{λ} 为羽流紫外辐射的光谱辐亮度; A_{O} 为光学系统的有效通光面积; Ω 为仪器的瞬时视场立体角; τ_{O} 为光学系统效率; Q_{e} 为探测器的量子效率; Δt 为探测器曝光时间; M_{Bing} 为像素合并数。 N_{S} 为探测信号起伏所引起的散粒噪声; N_{D} 为探测信号暗计数, 其大小随温度变化; N_{R} 为探测信号读出噪声随读出频率的变化; N_{DN} 为数据模数 (AD) 转换噪声。

紫外羽流辐射单元要求在辐亮度 $0.1 \mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{nm} \cdot \text{sr})$ 的条件下, 满足信噪比 100, 将预估的各项参数代入上述计算公式, 可以得出理论情况下, 最小的入瞳直径为 11 mm , 考虑到系统效率、探测器噪声等参数的误差, 将系统的入瞳增大为 12.5 mm , 对应系统 F 数为 $F/2$ 。综上, 光学系统的基本指标如表 1 所示。

表 1 光学系统参数表

Table 1 Optical system specification

Parameter	Value
Spectral range	270~360 nm
Focal length	25 mm
Field of view	$30^{\circ}(\text{H}) \times 30^{\circ}(\text{V}) \times 40^{\circ}(\text{D})$
$F/\#$	2
Object distance	590 mm
Sensor pixel size	$13 \mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$
Sensor pixel	1024 pixel \times 1024 pixel
Image	$13.3 \text{ mm}(\text{H}) \times 13.3 \text{ mm}(\text{V}) \times 18.8 \text{ mm}(\text{D})$

3 紫外镜头的设计原则及结构

紫外成像物镜指工作波段在近紫外波段 (200~400 nm) 的镜头, 羽流紫外辐射监视单元的探测波段为 270~360 nm, 属于紫外波段的一部分。紫外成像物镜主要应用在高压线监测、导弹预警等领域, 相比于可见和红外物镜, 其应用领域较窄。受限于透紫外材料, 折射式成像物镜的结构较少。透紫外波段的光学材料一般有融石英 (fused silica)、氟化钙 (CaF_2)、氟化镁 (MgF_2)、氟化钡 (BaF_2) 晶体等材料, 其中 MgF_2 和 BaF_2 晶体的可加工口径较小, 并且只能用晶体材料, 设计时一般不采用这两种材料。融石英和 CaF_2 两种材料阿贝数相差较小, 给紫外镜头色差校正带来困难。 CaF_2 的热膨胀系数为 18.85×10^{-6} , 而融石英的热膨胀系数为 0.5×10^{-6} , 两种材料的热膨胀系数相差较大, 如果将两种材料胶合, 温度变化时两种材料胶合面易开裂, 进一步增加了设计难度。另外 CaF_2 在空气中容易潮解, 系统的第一片镜片和最后一片镜片不易采用 CaF_2 , 或者将滤光片放置于系统最后面, 以避免最后一片 CaF_2 直接接触空气。因此, 为得到高成像质量的紫外成像物镜, 必须合理谨慎地匹配两种材料。

宋珊珊等^[4]设计了一种工作波段为 240~280 nm 的紫外镜头, 其系统结构如图 2 所示, 系统中采用二元面校正了系统的色差, 通过非球面校正了系统的球差, 整个系统的成像质量较好。但是由于融石英和 CaF_2 的物理特性, 在其表面增加二元面和非球面, 给加工带来了很大的困难。采用该方式虽然得到了较好的成像质量, 但是可加工性并不是很高。Chen 等^[5-7]设计了与文献[4]中类似的结构; 王保华等^[8]设计了相

同波段、焦距为 150 mm、视场为 $\pm 4^\circ$ 的紫外镜头,其结构如 3 所示。从其设计结果来看,系统光圈在 $F/3.5 \sim F/4$,经过尝试之后无法进一步增大光圈,因此,羽流紫外监视单元无法采用类似的结构。

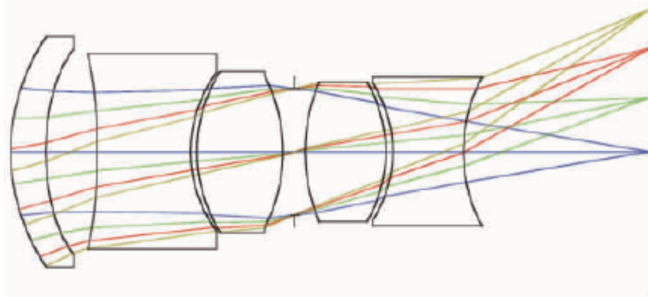


图 2 紫外成像物镜^[4]

Fig. 2 UV imaging objective lens^[4]

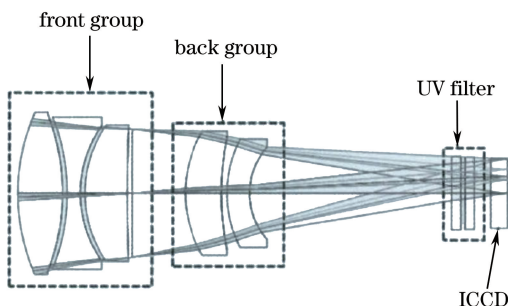


图 3 紫外物镜结构^[8]

Fig. 3 UV objective lens construction^[8]

Wang 等^[9]提到了一款工作波段为 240~280 nm、焦距为 120 mm、光圈 $F/5.6$ 、视场角为 48° 的系统,系统结构图如图 4 所示,可见系统仍然属于小光圈系统。张鸿佳等^[10]设计了一款紫外变焦镜头,系统焦距范围为 30~60 mm,光圈为 $F/3.5$,系统中采用了 MgF_2 及碳酸钙($CaCO_3$) 等不常用的材料,系统加工成本及加工周期均较长,并且两种材料在空气中很容易潮解,稳定性较差。羽流结构同样无法采用类似结构。吴礼刚等^[11-12]提出了一种折反射式紫外成像系统,系统结构如图 5 所示。整个系统的视场最大为 14° ,光圈可达 $F/2.6$ 。虽然光圈较之前所提文献增大,但是由于有中心遮拦,其有效光圈依然很小。

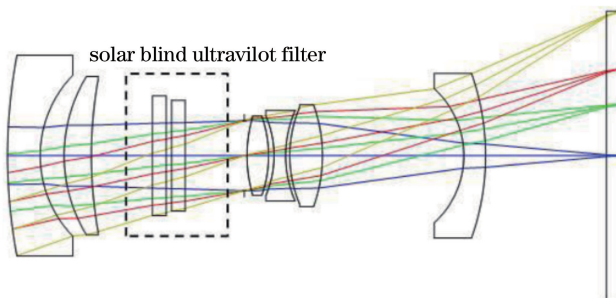


图 4 文献[9]中的紫外镜头结构

Fig. 4 UV lens structure in Ref. [9]

Eijiroh 等^[13]公布了一款 8 片 4 组的紫外成像物镜,采用了 4 组双分离结构,很好地矫正了色差和畸变。系统光圈能够做到 $F/2.3$ 。在此结构的基础上最大像高只能做到直径 8 mm,对应视场角只有 $\pm 5^\circ$ 。文献 [13]在该结构的基础上,提出了三种相似结构的光学系统,系统结构如图 6 所示。

综上,目前文献和专利中所提供的结构无法满足羽流紫外辐射监视单元的光学指标。

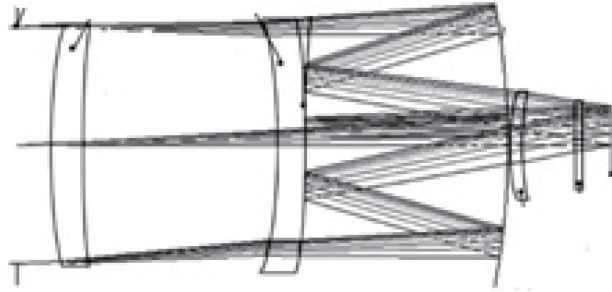


图 5 文献[11-12]中的紫外镜头结构

Fig. 5 UV lens structure in Ref. [11-12]

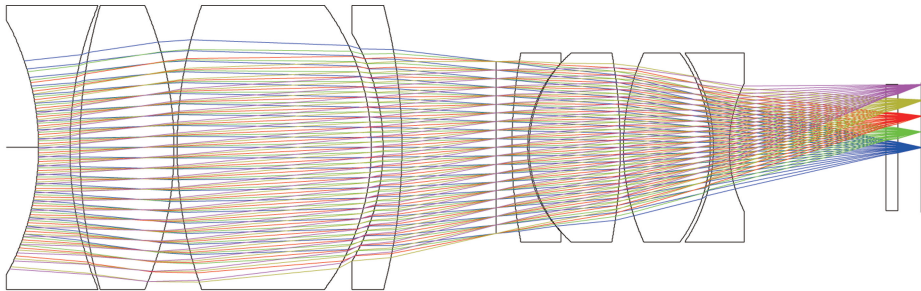


图 6 文献[13]中紫外镜头结构

Fig. 6 UV lens structure in Ref. [13]

4 紫外成像物镜的设计

成像物镜一般有反射式、折射式以及折反射式。反射式物镜是采用多个反射镜,通过优化反射镜的曲率半径和偏心以达到满足成像质量的要求。反射式物镜结构的好处是没有色差,系统只需要校正球差、彗差以及场曲即可。但是由于反射镜误差对光程的影响是双倍的,因此对反射镜面型加工的误差精度要求高。受限于实际的加工和装调,反射式结构很少应用于大视场、大光圈的系统,一般应用在长焦距、小光圈的物镜中,通过反射达到缩小外形尺寸的目的。折反射式成像物镜是在反射式系统中加入折射镜片,通过两种方式达到校正像差的目的,折反射式成像物镜可以实现大光圈、大视场的要求,其一般应用在广角、超广角或者全景成像系统中。

羽流紫外辐射监视单元设计定位为小型化轻量化光学成像仪器,其外形尺寸限制为小于 $270\text{ mm} \times 160\text{ mm} \times 170\text{ mm}$,重量小于 4 kg ,因此如何实现小型化是仪器的设计出发点。如果系统采用反射式结构,系统没有色差的影响,但是对于视场为 40° 的反射式成像物镜,其占用的几何尺寸较大,仪器的机壳重量会增加较多。基于此,设计采用折射式系统。对以上各种类型的紫外折射物镜进行比较,Eijiroh 等^[13]设计的镜头结构实现了大光圈,其他结构虽然能够得到大视场,但是其光圈较小,因此羽流紫外辐射监视单元紫外成像物镜基本选型为在文献[13]的结构上进行改进,但该类型物镜缺点在于视场小,如果直接增大视场进行相差矫正,则最后一组双分离镜片之间会发生全反射,导致边缘相对亮度下降。因此,为增加系统的视场,在系统之前增加一组镜片组成伽利略望远镜结构,缩小入射到后续镜片的视场。系统所用材料为融石英和 CaF_2 。

在上述结构的基础上,利用光学设计软件 Zemax 和 Code V 进行优化。设计完成后的系统结构如图 7 所示。系统采用了 10 片 4 组的结构,前三个镜片构成第一组,正正负光焦度的结构引入正场曲和正畸变以降低后续透镜组的场曲和畸变矫正压力,光学材料分别为融石英、 CaF_2 、融石英;第二组为后续三个镜片,正负正三分离结构能够矫正色差和部分球差,光学材料为 CaF_2 、融石英、 CaF_2 ;第三组和第四组采用双分离透镜矫正色差和像差,负透镜组为融石英,正透镜组为 CaF_2 。系统采用了摄远结构,第一组为负光焦度,第二组为正光焦度,第三组为负光焦度,第四组为正光焦度。

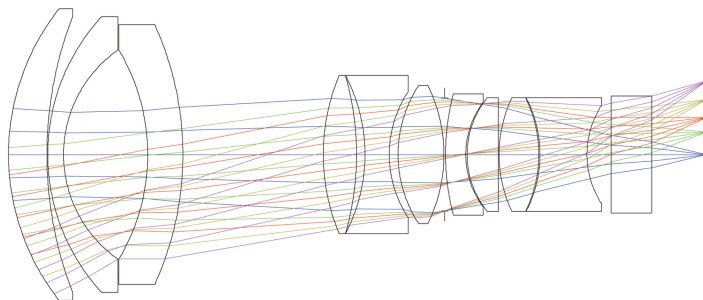


图7 紫外成像物镜结构图

Fig. 7 UV imaging objective lens layout

从图7可以看出,系统的结构合理,没有同心或者边缘厚度过小等加工困难的镜片。由图8(a)可以看出,所有视场内的像差小于 $20\ \mu\text{m}$;图8(b)为整个视场范围内系统的点列图(SPT),从SPT图中可以看出弥散斑均方根(RMS)直径最大为 $11\ \mu\text{m}$,小于像元的半径;图8(c)为系统在探测器特征频率下的衍射传递函数(MTF)曲线,从图中可以看出在 $0\sim 40\ \text{lp/mm}$ 范围内,MTF大于0.6,满足成像的要求;从图8(d)可以看出,整个系统的场曲和畸变均较小,可以满足成像质量的要求,系统的失真(keystone)可以通过标定消除。

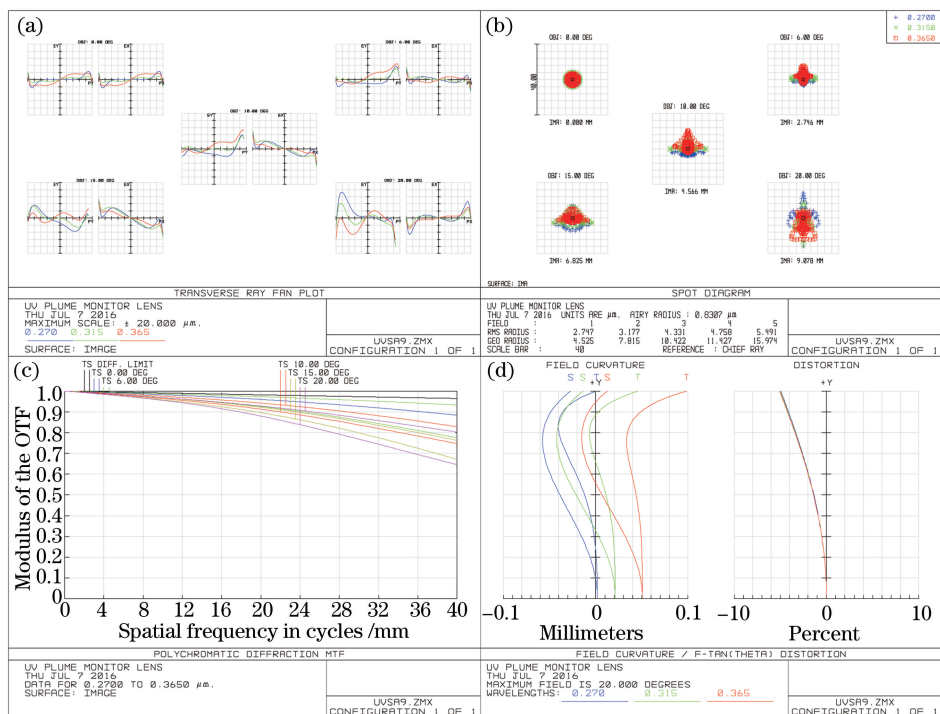


图8 (a)像差曲线图;(b)点列图;(c)衍射传递函数曲线;(d)场曲和畸变

Fig. 8 (a) Aberration curve; (b) spot diagram; (c) diffractive MTF curves; (d) field curvature and distortion

从图9(a)可以看出,在像素尺寸 $13\ \mu\text{m}$ 范围内集中了92%以上的能量;图9(b)是系统的点扩展函数(PST),表明光学系统衍射像的能量高度集中;从图9(c)相对亮度曲线可以看出,系统边缘的相对亮度大于60%,通过地面定标后,可以进行校正;图9(d)为系统的色球差曲线,从图中可以看出,系统的轴向色差得到了矫正,并实现了复消色差。

从上述设计结果可以看出,系统的成像质量符合要求,并且全部采用了球面,容易加工。

5 结论

在设计羽流紫外辐射监视单元光学系统的过程中,根据发动机羽流紫外辐射的光谱特性,确定仪器的探测波段;由安装位置、几何尺寸、像面尺寸等,确定了仪器的视场;通过仪器对信噪比的要求,确定系统的入瞳

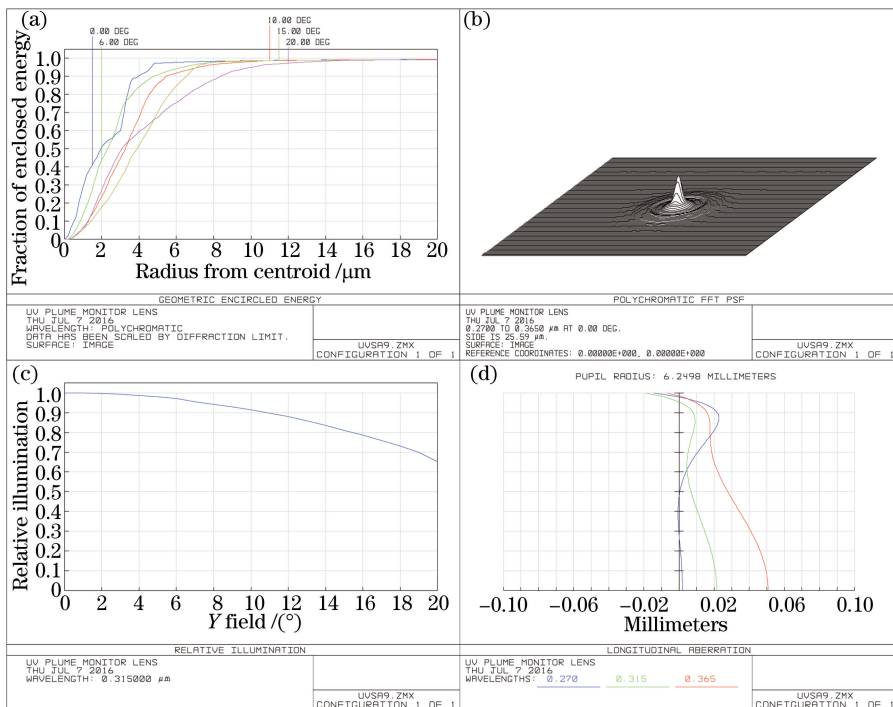


图9 (a)包围圈能量;(b)点扩展函数;(c)相对亮度曲线;(d)色球差曲线

Fig. 9 (a) Encircled energy; (b) PST; (c) relative brightness curve; (d) spherochromatic aberration curves

直径。在羽流紫外辐射监视单元光学系统设计过程中,调研了国内外紫外成像物镜的基本结构,根据本仪器的特点,在参考结构的基础上,通过合理优化系统结构,在不增加非球面和衍射面的前提下,对摄远型结构进行优化,实现了复消色差和小像差,使系统的弥散斑 RMS 小于电荷耦合器件像素尺寸,能量集中度和像面均匀度均较好,使羽流紫外辐射监视单元光学系统既满足大视场(40°)的要求,又满足大光圈的要求。光学系统的设计为实现羽流紫外辐射监视单元的小型化和轻量化提供了良好的基础。

参 考 文 献

- Cheng Xiaoli, Mao Mingfang, Yan Xiqin. Study on contamination caused by plume flow from the transfer orbital rocket of satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2000, 17(5): 15-18.
程晓丽, 毛铭芳, 阎喜勤. 卫星变轨发动机羽流污染的研究[J]. 上海航天, 2000, 17(5): 15-18.
- Gimelshein S F, Levin D A, Drakes J A, *et al.* Modeling of ultraviolet radiation in steady and transient high-altitude plume flows[J]. Journal of Thermophysics and HEAT Transfer, 2002, 16(1): 58-67.
- Neele F P, Schleijsen R M A. Electro-optical missile plume detection[C]. SPIE, 2003, 5075: 270-280.
- Song Shanshan, Lin Lina, Wang Wensheng. Design of solar blind ultraviolet warning optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 102203.
宋珊珊, 林丽娜, 王文生. 日盲紫外告警光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 102203.
- Chen Y, Huo F R, Zheng L Q. Design of solar-blind UV optical system for missile approach warning[C]. SPIE, 2014, 9272: 92721U.
- Li Q Y, Xu X Y, Dong J N. Optical design of solar blind ultraviolet warning system[C]. SPIE, 2012, 8557: 85571L.
- Chen Y, Huo F R, Zheng L Q. Optical system design of solar-blind UV target receiver with large FOV[C]. SPIE, 2014, 9298: 929811.
- Wang Baohua, Li Tuotuo, Zheng Guoxian. Research of solar blind ultraviolet detection system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(2): 022202.
王保华, 李妥妥, 郑国宪. 日盲紫外探测系统研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(2): 022202.
- Wang B H, Wang Y Y, Zhong X M, *et al.* Research on solar-blind UV optical imaging system[C]. SPIE, 2015, 9449: 94492L.

- 10 Zhang Hongjia, Ma Jun, Zhu Haiyu, *et al.* Design of “solar blind” ultraviolet zoom optical system used in corona detection[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 102201.
张鸿佳, 马 军, 朱海宇, 等. “日盲”紫外电晕检测变焦光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 102201.
- 11 Wu Ligang, He Wenrong, Hu Jinsun, *et al.* Solar blind UV and visible dual-spectral camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1529-1535.
吴礼刚, 何文荣, 胡晋荪, 等. 日盲紫外-可见光双光谱照相机系统[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(7): 1529-1535.
- 12 胡晋荪, 吴礼刚, 周方洁. 一种日盲紫外照相机镜头: CN101435914B[P]. 2010-06-02.
- 13 Eijiroh T, Li F. Ultraviolet imaging system: US7057804 B2[P]. 2006-06-06.