

航天器发动机羽流紫外辐射的在轨监测试验及分析

金云飞^{1,2}, 王后茂^{1*}, 王咏梅^{1,2}

¹中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

²中国科学院大学天文与空间科学学院, 北京 100049

摘要 为了不影响发动机的运行和航天活动的开展, 基于羽流紫外辐射的监测和光谱特性, 对发动机的工作状态、羽流特性等进行了在轨观测。从传回的试验数据可以看出, 在轨羽流紫外辐射试验获得了较好的观测结果, 并为今后开展发动机羽流常态化监视及羽流效应的研究提供了较好的参考。

关键词 遥感; 光谱学; 紫外; 羽流; 成像

中图分类号 O432.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.072802

On-Orbit Monitoring Test and Analysis of Ultraviolet Radiation of Spacecraft Engine Plumes

Jin Yunfei^{1,2}, Wang Houmao¹, Wang Yongmei^{1,2}

¹ National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

² School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Without influencing the normal operation of engines and space activities, the on-orbit observation of the working state and plume characteristics of the engines is carried out based on the monitoring of ultraviolet radiation and the spectral characteristics of plumes. From the returned test data, one can see that the on-orbit plume ultraviolet radiation test has obtained relatively nice observation results and provides a certain reference for the future research of plume effects and the routine monitoring of plumes.

Key words remote sensing; spectroscopy; ultraviolet; plume; imaging

OCIS codes 280.4788; 040.7190; 300.6540

1 引言

航天器发动机喷流向外部真空环境自由膨胀会形成真空羽流。受羽流效应影响, 航天器太阳能电池功率和热控涂层表面反射率会降低, 严重时整个航天任务可能会失败^[1-2]。因此, 在航天器设计中必须考虑羽流效应的影响。为了直接掌握发动机羽流的辐射特性, 可以进行在轨羽流监视, 但考虑到不能影响发动机及航天活动的正常运行, 因此非接触

式的光谱遥感观测是最好的选择。其中, 紫外光谱测量能够获得喷流的紫外辐射特性, 为进一步研究羽流提供更加详实的数据^[3-6]。

2 发动机羽流紫外辐射的在轨观测试验

国际上, 基于紫外光谱的在轨羽流观测主要是基于和平号空间站(Mir)开展的。1999年2月联盟号货运飞船从和平号空间站返回时, 联盟号货运飞船轨道控制发动机羽流紫外测量示意图如

收稿日期: 2017-12-06; **收到修改稿日期:** 2018-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(41704178)

作者简介: 金云飞(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事空间环境探测及数据处理方面的研究。

E-mail: jinyunfei14@mailsucas.edu.cn

导师简介: 王咏梅(1967—), 女, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气痕量气体探测方面的研究。

E-mail: wym@nssc.ac.cn

* **通信联系人.** E-mail: hmwang@nssc.ac.cn

图 1 所示,其中 T 为货运飞船离开空间站的时间。图 2 所示为联盟号离开和平号 3 s 和 130 s 时拍摄到的轨道控制发动机紫外辐射图像,其中紫外观测仪器的光谱范围为 270~340 nm, t 为联盟号离

开和平号的时间。试验初步获得了羽流紫外辐射的特性,在一般情况下,羽流最大紫外辐射强度约为 10^{-8} W/m²,而推进剂成分 OH 在 308.5 nm 波段的辐射能量占总辐射能量的 40%~80%。

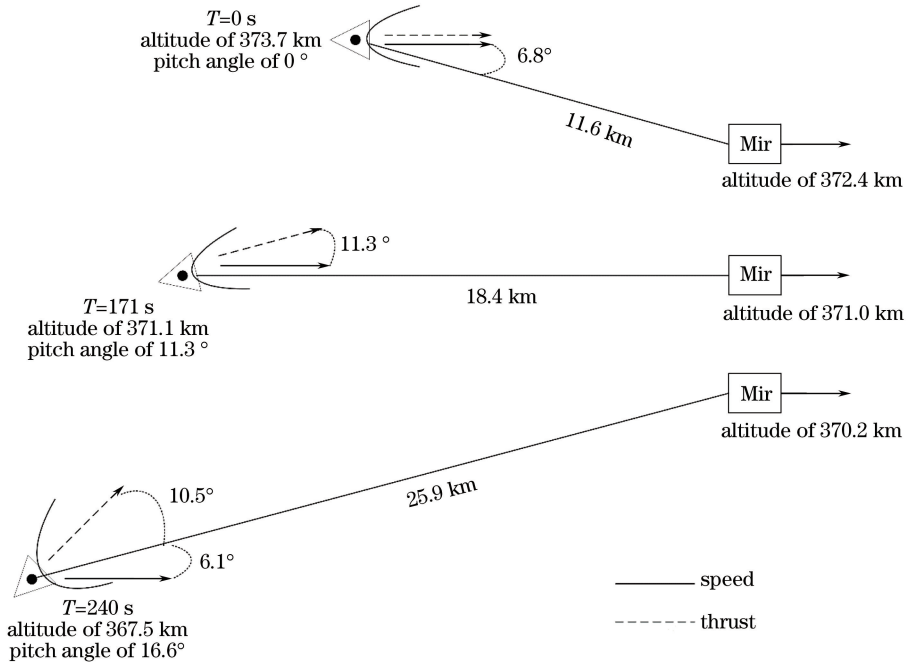


图 1 联盟号货运飞船轨道控制发动机的羽流紫外测量示意图

Fig. 1 Schematic of ultraviolet measurement of plumes of orbital control engines in Soyuz cargo spacecraft

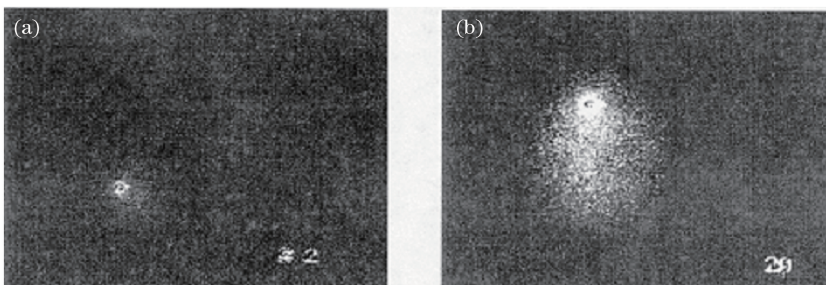


图 2 不同时间下的轨道控制发动机紫外光图像。(a) $t=3$ s; (b) $t=130$ s

Fig. 2 Ultraviolet images of orbital control engines under different time. (a) $t=3$ s; (b) $t=130$ s

2017年4月20日,我国货运飞船天舟一号由长征七号遥二运载火箭在海南文昌航天发射场成功发射^[7]。随后,货运飞船进行了羽流观测试验,安装在舱外的羽流紫外辐射监测单元进行了在轨加电,并进行了初步的在轨观测试验,成功获得了发动机羽流紫外辐射数据。这是我国首次对羽流的紫外辐射进行在轨直接观测试验。

3 探测原理及观测波段的选取

羽流光谱特性与羽流气体的成分密切相关,不同的气体成分,其辐射的光谱特性不同。为实现空间多次点火,常用的姿轨控发动机通常采用自燃推

进剂组合,其中偏二甲肼(UDMH)/四氧化二氮(NTO)组合和一甲基肼(MMH)/NTO组合应用较多。

UDMH/NTO组合下羽流气体成分如表1所示^[8-10],MMH/NTO组合下羽流气体成分如表2所示。

当发动机工作于360~400 km高度的低轨道时,大气环境中原子氧的密度约为 1.24×10^{14} m⁻³。因此,羽流的燃烧产物会被原子氧激发,从而出现紫外辐射。主要的化学反应^[7-9]有



表1 UDMH/NTO 推进剂组合下的羽流气体成分
(摩尔分数,%)

Table 1 Components of plume gases under UDMH/NTO propellant combination (mole fraction, %)

Component	Value
H ₂ O	28.84
N ₂	26.68
H ₂	19.05
CO	18.91
CO ₂	5.31
H	1.10
O	10 ⁻³
OH	10 ⁻³

表2 MMH/NTO 推进剂组合下的羽流气体成分
(摩尔分数,%)

Table 2 Components of plume gases under MMH/NTO propellant combination (mole fraction, %)

Component	Value
CO	0.49
N ₂	31.71
H ₂	27.02
H ₂ O	23.93
CO ₂	16.46
CH ₄	0.39

式中 CH₂NH 为推进剂燃烧中间产物, A 表示激发态。由此可知, 辐射主要来源于激发的 OH 和 NH, 其中 OH 在近紫外波段的辐射波长为 282, 308.5, 315 nm, NH 为 336 nm。根据发动机推进剂的燃料和功率, 可在 270 ~ 360 nm 间选择目标的探测波段^[11]。

4 紫外辐射监测仪器及观测设计

羽流紫外辐射监测单元的主要功能是监测发动机羽流的紫外光谱特性, 为分析羽流流动, 监测发动机工作状态, 及抑制羽流效应等提供重要的数据支持。羽流紫外辐射监测单元包括大光圈光学系统、带有半导体制冷器 (TEC) 的电荷耦合器件 (CCD)^[12-13] 和电子学系统, 如图 3 所示, 其中 LVDS 为低压差分信号接口。

为了满足各项指标要求, 羽流紫外辐射监测单元的主要技术指标如表 3 所示。

羽流紫外辐射监测单元安装在空间站舱外, 视场对应着发动机喷管及其尾焰部位。图 4 所示为可见光相机拍摄的照片, 紫外辐射监测单元的观测角度与可见光相机相似, 但其视场相对较小, 仅监测部分喷管装置及尾焰, 如图 5 所示。羽流紫外辐射监

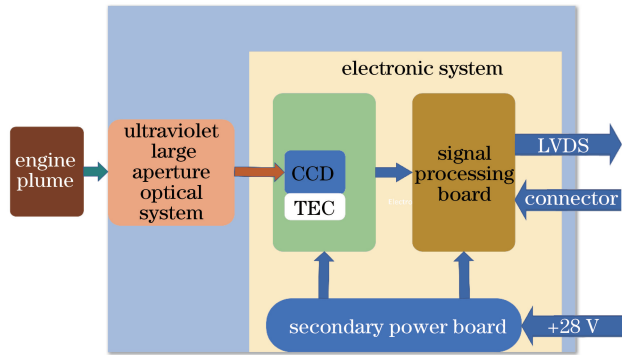


图3 羽流紫外辐射监测单元示意图

Fig. 3 Schematic of monitoring unit of plume ultraviolet radiation

表3 羽流紫外辐射监测单元的主要技术指标

Table 3 Main technical indicators of monitoring unit of plume ultraviolet radiation

Parameter	Content
Spectral range /nm	270-360
Angle of field of view / (°)	30(1±5%)
Signal-to-noise ratio	>50
Mass /kg	<4
Power consumption	<10 W(instrument), <20 W(cooling system)
Volume / (mm×mm×mm)	270×200×170
Operating temperature /°C	-40-10
Operating time	Night

测单元的安装位置及其相对于发动机喷口的位置如图 6 所示。由图 6(a)可知, 总体平台转动 36°后, 光轴与发动机喷口的中心仍然有 3°的夹角, 当羽流以 30°的张角喷出长度为 200 mm 的火焰时, 需要的张角为 31°, 考虑到光轴的影响, 单侧最大半视场角为 14°, 则光学系统的总视场角至少为 28°。因此, 考虑到安装误差等因素的存在, 将仪器的水平视场角设计为 30°。由图 6(b)可知, 当光轴倾斜 15°, 对长度为 335 mm 的尾焰中心成像, 需要的视场角为 16°。但是由于光轴并不是位于中心, 则需要的视场角至少为 22°, 因此垂直方向需要的视场角为 25°。



图4 可见光相机拍摄的照片

Fig. 4 Photo taken by visible light camera

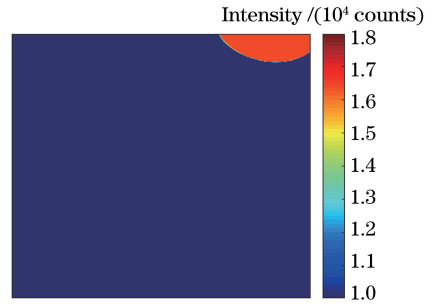


图5 羽流紫外辐射监测单元拍摄的照片

Fig. 5 Photo taken by monitoring unit of plume ultraviolet radiation

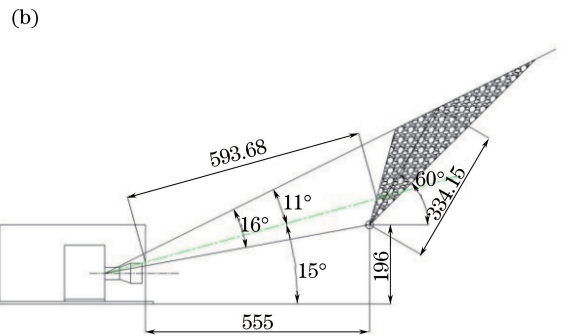
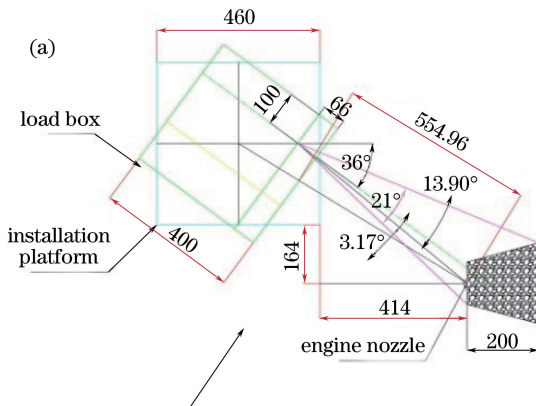


图6 载荷与发动机的相对位置。(a)俯视图;(b)侧视图

Fig. 6 Relative position of load and engine. (a) Top view; (b) side view

综上所述,仪器在垂直方向的视场角为 25° ,水平方向的视场角为 30° ,即两个方向的视场相近,光学系统的设计视场角至少为 30° 。因此,确定镜头的水平 and 垂直视场角为 30° ,载荷的安装方向朝羽流方向倾斜 36° ,镜头的光轴朝高度方向倾斜 15° 。

5 探测结果

北京时间2017年5月31日09:10:02,羽流紫外辐射监测单元在阴影区进行开机试验。北京时间6月2日08:50:48,羽流紫外辐射监测单元再次开机,此次试验仍在阴影区。北京时间2017年6月2日09:23:26,羽流紫外辐射监测单元在阳照区再次开机。试验流程如图7所示。2017年6月23日,首次开展了羽流效应试验。北京时间07:36:36羽流紫外辐射监测单元开机;09:03:20紫外辐射监测单元启动测量;09:03:55航天器发动机开机,开机持续时间为8~9 s;09:05:15紫外辐射监测单元停止测量;09:05:45紫外辐射监测单元关机。图8所示为航天器发动机开机时羽流紫外辐射监测单元拍

摄的辐亮度数据。

由图8可知,在270~360 nm紫外波段可以清晰地观测到发动机羽流形状,同时可以监测羽流形状随时间发生的变化情况。羽流的形状由外向内快速收敛,且三次试验观测到的羽流紫外辐射变化情况较为一致。发动机启动时,羽流喷射的张角较大,紫外辐射强度也相对较强,计数值最大为135左右,随后喷射张角变小,整体形状呈收敛状态,辐射强度也逐渐减小,最大计数值为120左右。试验结果表明,利用紫外辐射进行阴影区羽流观测是可行性的。但相对于白天大气散射,发动机的紫外辐射强度明显要弱很多,图9所示为羽流紫外辐射监测单元拍摄到的向阳面大气散射信号,其计数值大于12000,远大于羽流的紫外辐射强度,这表明光照区的紫外羽流监测难度较大。

6 结论

利用紫外辐射监测单元进行了航天器发动机羽流紫外辐射的在轨监测试验,并利用270~360 nm紫外波段对飞船发动机的喷管羽流进行了成像观测,并观测了羽流的动态变化情况。

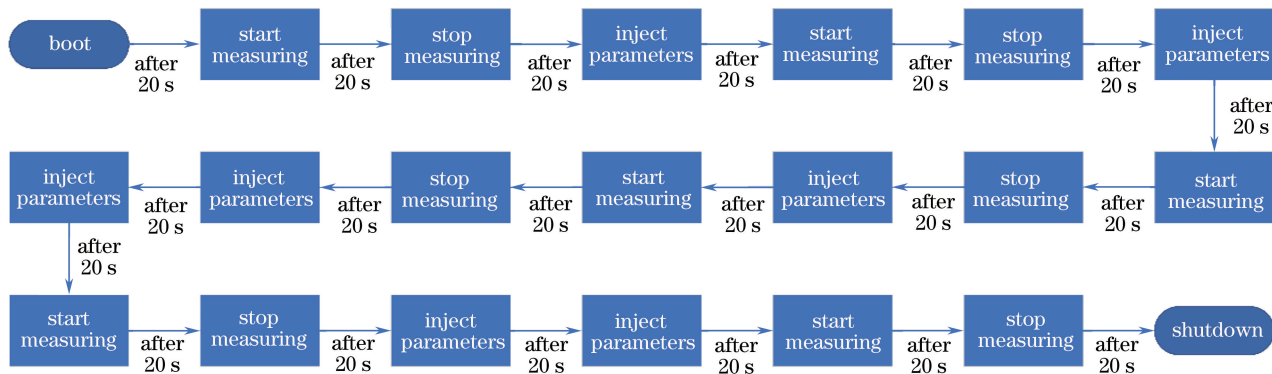


图 7 羽流紫外辐射监测单元开机试验流程图

Fig. 7 Flow chart of boot test of monitoring unit of plume ultraviolet radiation

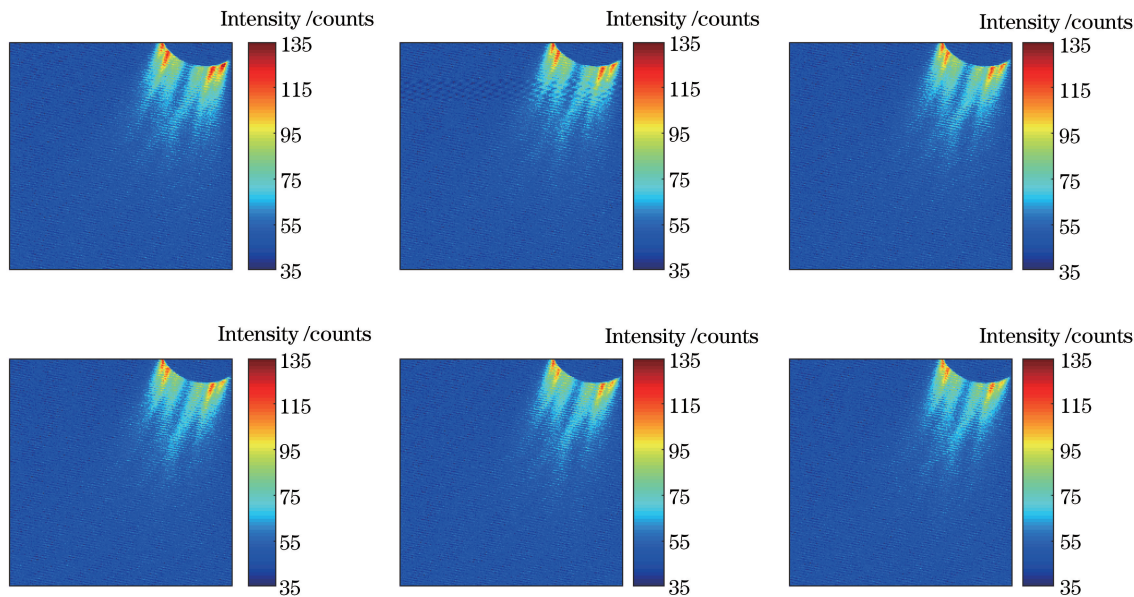


图 8 羽流紫外辐射监测单元拍摄的紫外辐射数据

Fig. 8 Ultraviolet radiation data taken by monitoring unit of plume ultraviolet radiation

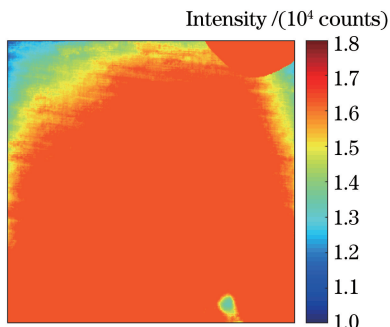


图 9 羽流紫外辐射监测单元拍摄的向阳面紫外辐射数据

Fig. 9 Sunward ultraviolet radiation data taken by monitoring unit of plume ultraviolet radiation

此次试验仅进行了羽流紫外辐射形状及其相对强度的观测,在今后的研究中还需对其光谱特性及辐射强度进行观测研究,从而对推进剂的成分进行进一步分析。

致谢

感谢中国科学院西安光学精密机械研究所提供的可见光监测数据。

参 考 文 献

[1] Zhao Y X, Zhang Y L, Li M L, *et al.* Study of the fault diagnosis technology for liquid propellant rocket enging by plume UV-VIS radiation [J]. Journal of Astronautics, 2002, 23(1): 34-39.
 赵永学, 张育林, 李麦亮, 等. 羽流 UV-VIS 辐射在液体火箭发动机故障诊断中的应用技术研究 [J]. 宇航学报, 2002, 23(1): 34-39.

[2] Cheng X L, Mao M F, Yan X Q. 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.
- [3] Gimelshein S F, Levin D A, Drakes J A, *et al.* Modeling of UV radiation from high altitude plumes and comparison with data from the Mir space station [C]. The 33rd Thermophysics Conference, 1999: AIAA 99-3452.
- [4] Guo A Y, Bai T Z, Han Q, *et al.* Analysis of ultraviolet radiation characteristics of liquid propellant rocket motor exhaust plumes [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(4): 418-424.
国爱燕, 白廷柱, 韩强, 等. 液体火箭发动机羽流紫外辐射特性分析[J]. 兵工学报, 2013, 34(4): 418-424.
- [5] Guo A Y, Tang Y, Bai T Z, *et al.* Simulation of 3-D ultraviolet radiation from liquid rocket engine plume [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(4): 84-88.
国爱燕, 唐义, 白廷柱, 等. 液体火箭发动机羽流三维紫外辐射仿真研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(4): 84-88.
- [6] Guo A Y, Bai T Z, Han Q, *et al.* Analysis of ultraviolet radiation characteristics of solid propellant rocket motor exhaust plume[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1016002.
国爱燕, 白廷柱, 韩强, 等. 固体火箭发动机羽流紫外辐射特性分析[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1016002.
- [7] Zhuge N. China's first cargo spacecraft TZ-1 entered orbit successfully[J]. Space International, 2017(4): 2-9.
诸葛南. 我国首艘货运飞船天舟-1 成功入轨[J]. 国际太空, 2017(4): 2-9.
- [8] Levin D A, Gimelshein S F, Drakes J, *et al.* Modeling of emissions from the Soyuz, progress, and Mir rocket exhaust plumes at high altitudes[C]. The 38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2000: 0601.
- [9] Gimelshein S F, Levin D A, Drakes J A, *et al.* Ultraviolet radiation modeling from high-altitude plumes and comparison with Mir data [J]. AIAA Journal, 2000, 38(12): 2344-2352.
- [10] 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.
- [11] Shi E T, Wang Y M, Fu L P. Optical system design of plume ultraviolet radiance monitor unit [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(11): 112202.
石恩涛, 王咏梅, 付利平. 羽流紫外辐射监视单元光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(11): 112202.
- [12] Chang Z, Wang Y, Si F Q, *et al.* Design and implementation of ultraviolet imaging system base on scientific grade CCD[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0804002.
常振, 王煜, 司福祺, 等. 基于科学级 CCD 的紫外成像系统设计与实现[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0804002.
- [13] Lü H, Liao N F, Wu W M, *et al.* Zero-order drift of interferograms in ultraviolet imaging spectrometer [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911003.
吕航, 廖宁放, 吴文敏, 等. 紫外成像光谱仪干涉图零级漂移现象分析[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911003.