

基于多谱段集成检测的宽光谱 AOTF 性能测试系统

刘书勤,王斌永,徐睿,陈凯,何志平

(中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室,上海 200083)

摘要: 声光可调谐滤波器(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)是一种新型分光器件,近年来在光谱分析技术领域得到广泛应用。首先分析了 AOTF 的分光特性及驱动要求,介绍了 AOTF 器件的关键性能指标和测试方法。其次针对 AOTF 器件性能设计了专用测试系统。系统采用单色仪作为光源,通过多谱段集成检测方法,能对宽光谱 AOTF 器件进行驱动频率匹配、衍射效率和光谱分辨率的测试。测试系统波长的覆盖范围是 400~3 200 nm,光源稳定性优于 98%,光谱分辨率在 450 nm 处小于 0.4 nm,在 2 400 nm 处小于 2.0 nm。最后以短中波晶体的测试为例,验证了该测试系统的功能及性能,达到了设计要求。基于多谱段集成检测的宽光谱 AOTF 性能测试系统由于其高效、便捷等特点,具有很强的工程应用价值。

关键词: 声光可调谐滤波器; 性能测试; 多谱段集成检测; 中波红外

中图分类号: TN65 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1343-06

Broad-spectral-range AOTF performance analysis system based on multi-band acquisition

Liu Shuqin, Wang Binyong, Xu Rui, Chen Kai, He Zhiping

(Key Laboratory of Space Active Opto-electronics Technology, Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China)

Abstract: As a new type of spectroscopic devices, acousto-optic tunable filter (AOTF) has been widely used in spectral detection. Firstly, the dispersive principle and drive performance of AOTF were introduced, and some key performances of AOTF were discussed. Secondly, a set of analysis system for these performances was proposed. This system, with a monochromator as the light source, was based on multi-band acquisition, and was used to test the parameters of broad-spectral-range AOTF such as relation between driving frequency, diffraction efficiency and spectral resolution at different wavelength. The spectrum range covered from 400 nm to 3 200 nm. The intensity stability of light was better than 98%. The spectral resolution was less than 0.4 nm at 450 nm, 2.0 nm at 2 400 nm. Taking short-to-middle wave infrared AOTF as an example, the function and performance of the analysis system were verified finally, and the result shows the system suffices requirement of the design, and because of the high efficiency and convenience, the system has a high value for engineering application.

Key words: AOTF; performance testing; multi-band acquisition; MWIR

收稿日期:2014-08-10; 修订日期:2014-09-12

基金项目:国家自然科学基金(21105109)

作者简介:刘书勤(1990-),男,硕士生,主要从事光电检测方面的研究。Email:jdyr1990@gmail.com

导师简介:何志平(1977-),男,研究员,博士,主要从事光学系统、光电检测和光电载荷的系统设计方面的研究。

Email:hziping@mail.sitp.ac.cn

0 引言

光谱分析技术具有快速、高效、无损等优点,是分析物质成分的主要方法之一。光谱仪器就是通过获取目标的光谱曲线,实现对其成分的识别及定性、定量分析,在实验室检测、对地观测,及至深空探测等诸多领域具备优势。光谱仪器按分光方式的不同可以分为滤光片型、光栅型、傅里叶型、二极管阵列型、声光可调滤光器 (Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF) 型等。AOTF 基于声光效应原理,可通过改变加在其上的射频功率信号的频率来改变衍射波长,具有中心波长挑选灵活、光谱采样步长可控、波长扫描快速等特点,在深空探测领域应用中具备优势。AOTF 分光型光谱仪器特性与 AOTF 性能息息相关,因此,对 AOTF 的性能参数如波长-频率关系、波长-衍射效率曲线、波长-光谱分辨率曲线等重要特征进行检测是仪器研制与数据处理的必要条件^[1-2]。

由于材料、工艺等相关技术水平的限制,实用型 AOTF 器件于 20 世纪 90 年代后期才出现,并由欧空局于 2003 年发射的火星快车有效载荷 SPACAM^[3] 得到首次应用。国内在 AOTF 器件研制方面起步较晚,有相关的性能检测方法及相关装置的研究,如上海技术物理研究所提出了一种声光可调谐滤光器衍射性能弱光测试系统及测试方法,能实现 0 级光和衍射光的独立测试^[4];又如武汉理工大学采用近红外光谱仪接受 0 级光的测试方法实现了对工作波段范围为 450~1000nm 的 AOTF 进行关键性能指标的测试^[5]。但参考文献调研未见国内外红外宽谱段 AOTF 性能专用设备研制的相关报道。文中介绍了 AOTF 分光及驱动特性以及由此形成的性能检测方法及相关测试系统,对其全波段多性能指标的综合检测进行了分析,为 AOTF 分光器件的研制及广泛应用提供了基础与条件。

1 AOTF 分光特性

目前主要应用的非共线型 AOTF,由声光介质(一般为 TeO_2)、声波吸收器和换能器组成,其结构及组成如图 1 所示^[6]。AOTF 通过施加于换能器上的射频信号的频率来改变衍射波长,换能器将射频信号转换为超声波振动在声光介质中传播,与入射光产生非线性声光效应,将与驱动频率匹配波长的入射光部分能量衍射并偏转一定的角度,形成衍射光,而仍沿原方向出射

的未衍射的入射光部分称为 0 级光。改变加于换能器上的射频频率,衍射光的波长也相应改变。

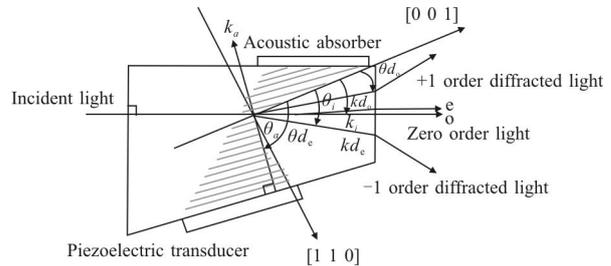


图 1 AOTF 原理图

Fig.1 Schematic diagram of AOTF

AOTF 分光器件的主要性能参数包括波长与驱动频率关系、波长与衍射效率关系和波长与光谱分辨率关系。

各向异性的声光介质的波长与驱动频率关系符合动量匹配原理,如公式(1)所示:

$$\lambda = v \cdot \Delta n \cdot (\sin^4 \theta_i + \sin^2 \theta_d)^{1/2} / f \quad (1)$$

式中: λ 为衍射波长; v 为光速; Δn 为晶体的折射率差; θ_i 为入射角^[7]。驱动频率 f 确定后,衍射光的中心波长就确定了,这就是 AOTF 衍射光的波长与驱动信号频率的调谐关系。

衍射效率是指特定波长的衍射光强与入射光强之比,如公式(2)所示:

$$\eta = \sin^2 \left(\frac{\pi L}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 P_d}{2}} \right) \quad (2)$$

式中: M_2 为声光优值; P_d 为成正比于射频驱动功率的声功率; L 为声光相互作用长度^[8]。

在对 AOTF 某波长性能进行实际测量时,认为该波长衍射光信号相对入射光信号的最大比值为该波长的衍射效率;所对应的驱动频率为该波长所匹配的频率。

光谱分辨率指分光器件的光谱分辨能力,如图 2

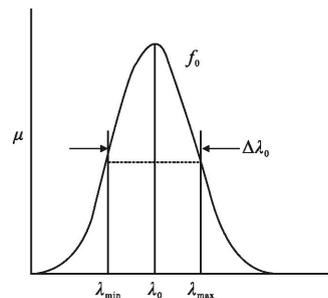


图 2 光谱分辨率示意图

Fig.2 Diagram of spectral resolution

所示, 读取衍射效率下降到最大值一半时的波长点 λ_{\min} 和 λ_{\max} , 待测波长 λ_0 处的光谱分辨率为:

$$\lambda_0 = |\lambda_{\max} - \lambda_{\min}| \quad (3)$$

2 AOTF 性能测试系统的设计

2.1 系统结构及工作原理

基于 AOTF 上述分光特性, 设计专用的性能测试系统, 对 AOTF 器件的衍射波长与驱动频率、衍射波长与衍射效率、衍射波长与光谱分辨率等特性进行全波段的精细测试。

测试系统如图 3 示意, 以卤钨灯作为光源, 经单色仪后产生宽谱段范围内的窄线宽的准单色光, 经狭缝空间滤光并由准直镜准直为平行光。斩波器置于准直镜前, 按设计频率对光束进行交流调制后(斩波器频率同时提供给锁相放大电路作为参考信号), 由格兰棱镜极化形成线偏振平行光进入待测 AOTF 器件。该偏振平行光经过已驱动的 AOTF 器件后, 形成设计频率调制的 0 级光和衍射光, 由光电探测组件施加及不施加射频频率后经会聚镜会聚的 0 级光, 经光电转换、放大及采集后传输至上位机软件进行数据处理与结果显示。

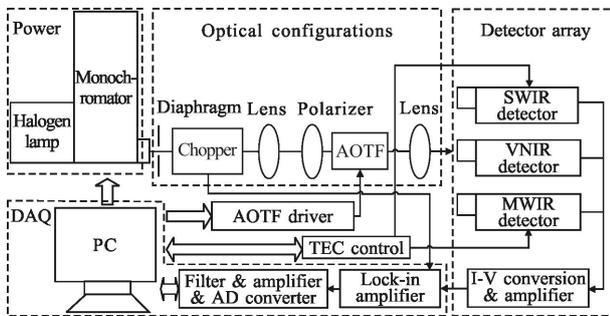


图 3 AOTF 性能测试系统原理框图

Fig.3 Principle diagram of AOTF performance analysis system

测试系统设计指标如表 1 所示。

表 1 系统主要设计指标

Tab.1 Main expected characteristics of the system

Item	Value
Spectral range/nm	450~3 200
Spectral resolution/nm	≤ 0.5 nm at 450 nm; ≤ 2.0 nm at 2 400 nm
Intensity stability	$\geq 90\%$
Uncertainty	$\leq 10\%$

2.2 系统组成模块简述

2.2.1 光源

采用 HORIBA 公司的 JY iHR320 光栅型单色仪及卤钨灯。单色仪配备三个光栅, 光谱覆盖范围为 150~6 000 nm, 满足系统要求。使用 1 200 gr/mm 光栅时的光谱分辨率为 0.06 nm, 波长定位精度为 ± 0.2 nm。除此, 单色仪还配备了滤光片轮, 有效降低多级衍射对测试精度的影响。

2.2.2 光路结构

光路结构由斩波器、准直镜、格兰棱镜、待测器件及会聚镜组成。由单色仪出射狭缝出射的准单色光, 通过斩波器、准直镜、格兰棱镜后, 成为按设定频率调制的线偏振单色光, 作为 AOTF 器件测试的入射光源。经过 AOTF 的出射光, 由会聚镜会聚至光电探测组件上。

斩波器是由直流电机驱动的调制盘, 通过控制电机的转速, 可将光路中的直流光信号调制成为方波交流光信号, 同时为后面锁相放大电路提供参考信号。其斩波频率范围为 4~500 Hz(内槽)和 40~5 kHz(外槽), 孔径大小分别为 15 mm 直径和 15 mm×4.5 mm, 频率不确定度为 0.002 5%。

准直镜的作用是将出射的准单色光准直成平行光, 会聚镜则将平行光会聚在探测器的焦平面上。两组镜头结构形式和参数相同, 焦距为 120mm, 设计波长为 450~3 200 nm, 光学外形尺寸为 $\varnothing 36 \times 26$ mm。

由于 AOTF 晶体的双折射特性, 使用了格兰棱镜对单色仪输出的光束进行起偏。格兰棱镜设计波长为 500~4 000 nm, 消光比 $\leq 5 \times 10^{-6}$, 视场角 $\geq 6.5^\circ$ 。

2.2.3 AOTF 驱动模块

AOTF 驱动模块主要包括单片机控制器、射频发生通道、功率放大器、射频开关等。按测试要求产生并输出 AOTF 驱动信号, 直接控制着 AOTF 的光谱选择性, 此外, AOTF 性能检测系统的工作模式需要灵活配置驱动频率输出参数来实现的。驱动系统频率可调范围为 25~250 MHz, 频率分辨率 ≤ 1 kHz, 频率准确度 ≤ 5 KHz, 输出功率范围 0~4 W, 满足当前各类 AOTF 器件的驱动能力。

2.2.4 光电探测组件

光电探测组件主要实现了对可见近红外波段、短波红外波段和中波红外波段的微弱信号检测, 从而使整个系统满足 450~3 200 nm 范围测试功能。

根据系统光谱范围需求及探测器性能与水平, 兼顾成本约否, 将全谱段分成三段进行测试, 即可见近红外波段(450~950 nm)、短波红外波段(900~2 400 nm)和中波红外波段(2 400~3 200 nm), 每波段由相应光电探测器及其匹配的光电转换电路和前置放大滤波电路组成。其中可见探测器选择方元明科技光敏面直径为 $\varnothing 2.5$ mm 的 FYM-SD 型探测器; 短波红外探测器选择美国 Judson 公司光敏面直径为 $\varnothing 3$ mm 的 J23TE3 型探测器; 中波红外探测器选择波兰 Vigo 公司光敏面为 1 mm \times 1 mm 的 PVI-2TE 探测器。

光电探测组件集成了三个采集通道, 包括光电探测器, 前放电路等, 测试系统工作时, 可以根据待测试 AOTF 器件的光谱范围进行切换, 满足测试要求的同时保证测试的快捷性和准确性。

2.2.5 红外温控电路

红外温控电路是为了降低短波红外探测器和中波红外探测器的噪声, 使其工作在额定温度环境, 保证测试的精度。红外温控电路通过控制 PWM 制冷信号的占空比来控制探测器内部热敏电阻的制冷, 能有效测量和控制探测器的制冷温度。

2.2.6 数据采集及处理

测试光信号经过光电探测组件的接收和前置放大滤波后, 其微弱的交流探测信号还需经过进一步检测和处理才能满足数据处理要求。数据处理的整体流程图如图 4 所示。

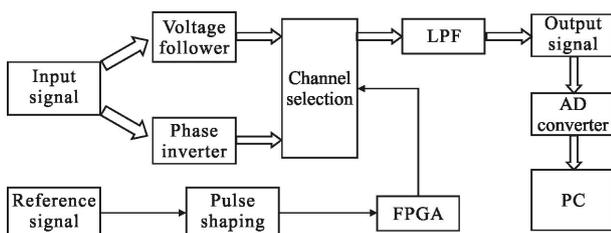


图 4 数据处理流程图

Fig.4 Flow chart of data processing

文中测试系统采用了锁相放大电路进行微弱信号检测。锁相放大电路模块是整个光电探测电路的核心部分, 信号的噪声去除与提取均由此模块完成。输入的待测调制信号通过正相跟随器和反向跟随器处理后分为两路信号, 由 FPGA 的开关信号分时选通, 开关信号为斩波器输出的参考方波经整形和 FPGA 处理后的信号, 与待测的调制信号频率一致,

从而实现了锁相放大的 PSD 处理。经过 PSD 处理后的待测信号再通过低通滤波, 变为可被有效测量的直流信号, 输出到后续的数据采集电路, 经过 AD 转换最后输出到计算机进行分析和处理。

2.2.7 上位机软件

测试系统通过自主开发的上位机软件完成整个测试过程的相关配置、控制、数据采集与处理及图像显示等功能。

上位机软件系统是一个多视窗的应用程序系统, 基于 VS2005 开发, 使用 TeeChart 控件作为曲线显示基础, 开发了基于 Office Access 的数据库用于晶体数据管理, 调用 GSL 实现相关统计运算, 在 Windows 平台运行。

3 测试方法及结果分析

3.1 测试方法

AOTF 器件的性能测试及数据处理包括两个方面工作: 一、对待测器件光谱范围内特定波长的测试, 由此获得该特定波长对应的驱动频率、衍射效率及光谱分辨率; 二、对待测器件光谱范围内不同波长的测试后, 对全波段的数据处理及分析, 获得待测器件全谱段范围内的波长-驱动频率曲线、波长-衍射效率曲线、波长-分辨率曲线。

对待测晶体的测试, 系统主要采用频率扫描法实现。频率扫描法就是在测试时, 首先按测试要求设置输入波长, 然后以精细步长改变驱动频率进行扫描, 测得衍射光最强的频率点为该波长对应的驱动频率; 此时的衍射光与入射光的比值即为该波长的衍射效率; 频率改变过程中比值下降为最大比值一半对应的频率差值转化的波长差值即为该波长的光谱分辨率。在全波段范围获得多个波长点的上述数据, 经数据处理即得到待测器件在全波段性能测试结果。

图 5 所示为测试方案的总体流程图, 软件首先对实验仪器进行全局化配置, 而后通过设定波长扫描范围、波长步进, 实现全谱段需要测试的多个波长的循环测试。待全部波长均完成测试后, 通过对数据库中保存的各个波长所对应的驱动频率、衍射效率和频谱宽度计算出各波长对应的测试结果, 绘制出波长-驱动频率曲线、波长-衍射效率曲线、波长-分辨率曲线。

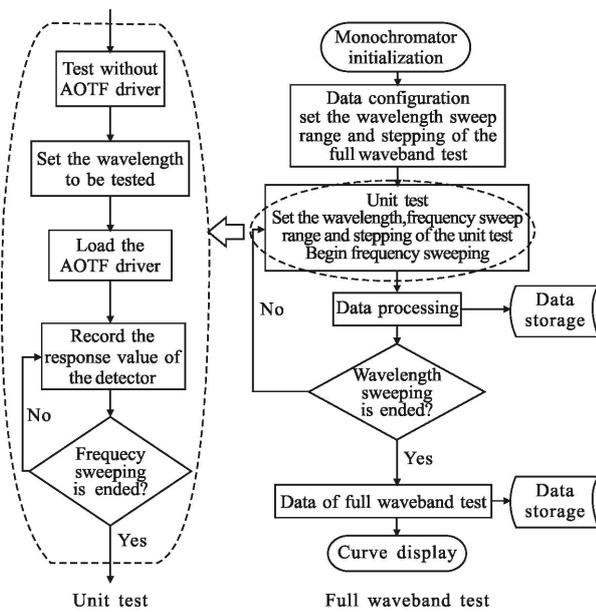


图 5 系统程序框图

Fig.5 Block diagram of system

进行测试时,入射波长设定后,施加驱动频率的扫描,则光电探测器响应 E_i 会随着 f_i 的改变而发生改变,实时计算出衍射光信号相对入射光信号 E_0 的比值 $\eta=1.0-E_i/E_0$,其中 E_0 为不加驱动时的探测器响应。当探测器输出值达到最小 E_i 时, η 达到最大,此时加载的驱动源输出频率 f_0 即为与该衍射波长对应的驱动频率, η 为 AOTF 晶体在该波长下的衍射效率。记录为 η 下降为最大值 50% 时对应的频率,通过 $\Delta\lambda=|f_{\max}-f_{\min}| \frac{\lambda_2-\lambda_1}{f_1-f_2}$ 换算至相应的光谱宽度,即为该测试波长的光谱分辨率,如图 6 所示。

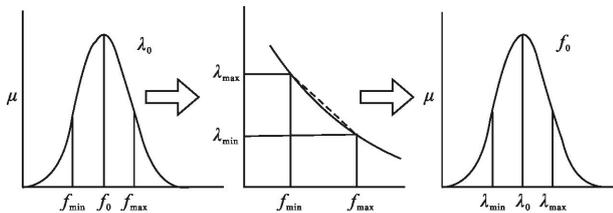


图 6 扫频法计算光谱分辨率

Fig.6 Calculation of spectral resolution by frequency sweeping method

3.2 测试分析

AOTF 性能测试系统研制完成后,运行正常。其中一套提供给中电集团 26 所,用于其器件生产及调试过程;另一套放置于上海技术物理研究所,为器件最终性能及与驱动电路的综合性能测试工作。已完成包括嫦娥三号有效载荷红外成像光谱仪用 AOTF

器件在内的多个型号几十个 AOTF 的性能检测。

现以中电 26 所生产的短中波 AOTF 晶体的测试为例,对系统及其工作状态进行说明,图 7 是指定波长为 2400 nm,扫描区间为 38~40 MHz 时进行性能测试得到的衍射光谱曲线,可以看出在 38.5 MHz 时衍射光信号相对入射光信号比值最大,则 38.5 MHz 为晶体在 2400 nm 所对应的驱动频率,衍射效率为 34.6%。

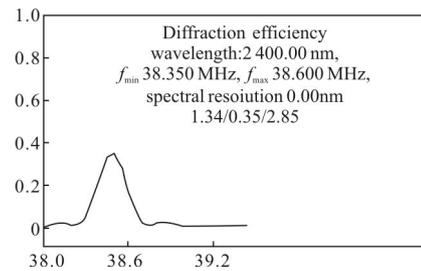


图 7 2400 nm 处衍射光谱曲线

Fig.7 Curve of diffraction efficiency at 2400 nm

图 8 为对器件在中波红外 2500~3200 nm 波段

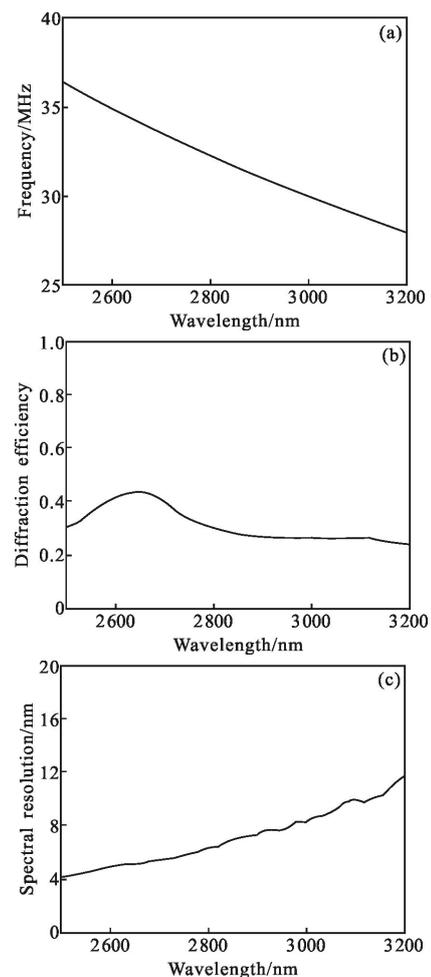


图 8 2500~3200 nm 波段范围性能特性曲线

Fig.8 Characteristic curve of full band test at 2500-3200 nm

范围以 3 W 射频功率驱动进行的全波段性能测试特性曲线,其中图 8(a)为波长与驱动频率关系曲线、图 8(b)为波长与衍射效率关系曲线、图 8(c)为波长与光谱分辨率关系曲线。

对于整个 AOTF 性能测试系统而言,稳定的光源和较低的系统噪声是测试过程有效及测试结果可信的必要条件。在不同波长条件下,设置好单色仪的波长后,对输入光源测试其稳定性优于 98%。在该输入光源下,对测试系统本身的光谱分辨能力,光谱准确度及测试稳定性进行测试及分析,其结果如表 2 所示,满足测试系统的设计要求及 AOTF 器件测试精度要求。

表 2 系统主要指标实测数据

Tab.2 Main testing characteristics of the system

Item	Value
Spectral range/nm	400–3 200
Spectral resolution/nm	≤ 0.4 nm at 450 nm; ≤ 2.0 nm at 2 400 nm
Intensity stability	$\geq 98\%$
Uncertainty	$\leq 5\%$

4 结束语

总之,由于 AOTF 分光型光谱仪器特性与 AOTF 性能息息相关,其性能检测系统是器件研制,进而为光谱仪器研制的必要条件。文中在 AOTF 器件关键性能指标测试方法建立的基础上研制了测试系统,通过光谱多通道分段探测的方式实现宽谱段的测试目的,既可以实现对待测器件全波段的多指标参数检测,同时兼顾测试及数据处理的自动化、便携性。检测系统通过上位机软件集中控制设备中各仪器,管理实验数据,自动进行后期数据处理并绘制测试曲线,极大地提高了 AOTF 性能参数测定的时间效率。这对于 AOTF 器件及相关光谱仪器的研制,以及为批量生产

及广泛推广应用均具有重要的意义。

参考文献:

- [1] Liu Wei, He Xiaoliang, Wang Zhilin, et al. Mid-infrared acoustic-optic tunable filter [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2011, 33(2): 178–181. (in Chinese)
刘伟,何晓亮,王智林,等. 中红外声光可调滤光器[J]. 压电与声光, 2011, 33(2): 178–181.
- [2] Xu Rui, He Zhiping, Zhang Zehong, et al. The research on characteristics of acousto-optic tunable filter by space radiation experiment [C]//SPIE, 2011, 8196: 819627.
- [3] Jean-Loup Bertaux, O Korablev, D Fonteyn, et al. Global structure and composition of the martian atmosphere with SPICAM on Mars Express [J]. *Advances in Space Research*, 2005, 35(1): 31–36.
- [4] 沈渊婷,杨世骥,何志平,等. 声光可调谐滤光器衍射性能弱光测试系统和方法: CN, 101907513 B[P]. 2011–11–31.
- [5] Hu Shanzhou, Chen Fenfei, Zeng Libo, et al. Testing method research for key performance indicator of imaging acousto-optic tunable filter (AOTF) [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(1): 271–274. (in Chinese)
胡善洲,陈奋飞,曾立波,等. 成像型声光可调谐滤光器关键性能指标测试方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(1): 271–274.
- [6] Liu Jifan, Ma Yanhua, Zhang Lei, et al. Key techniques for spectrally programmable imaging spectrometer based on AOTF[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2013, 23(3): 237–241. (in Chinese)
刘济帆,马艳华,张雷,等. 基于 AOTF 的光谱响应可编程成像光谱系统关键技术 [J]. 红外与毫米波学报, 2013, 23(3): 237–241.
- [7] Neelam Gupta, Rachid Dahmani, Steve Choy. Acousto-optic tunable filter based visible-to near-infrared spectropolarimetric imager[J]. *Opt Eng*, 2002, 41(5): 1033–1038.
- [8] Chang I C. Noncollinear tunable acousto-optic filter: US, 612055[P]. 1977–04–01.