

## 双光路互参考高精度 AOTF 衍射效率测试方法及装置

秦侠格, 姬忠鹏, 徐映宇, 舒 嵘

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

**摘要:** 适应现代光电检测技术对微弱光电信号测量精度的进一步追求, 提出并验证双光路互参考高精度 AOTF 衍射效率测试方法。该方法利用光路可切换器件实现光路互参考检测, 从而达到降低光源不稳定性、探测器响应差异性及光电干扰的目的, 有效提高测试精度。首先对双光路互参考高精度 AOTF 测试方法的原理进行具体阐述, 然后说明建立的针对 AOTF 衍射效率测量的双光路互参考探测实验装置并对其进行实验验证。分析及试验结果表明: 采用互参考技术可使衍射效率测量方法数据精确度平均提高 50%, 有效降低光源不稳定性、探测器响应差异性的影响, 实现提高测试精度的目的, 最后对方法的适用范围及参考意义进行了分析及讨论。

**关键词:** 测试方法; 双光路互参考; 高精度; 声光可调谐滤光器; 衍射效率

**中图分类号:** TP70 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0417001

## High-precision measurement method and device on diffraction efficiency of Acousto-Optic Tunable Filter based on double-optical-path and cross-references

Qin Xiage, Ji Zhongpeng, Xu Yingyu, Shu Rong

(Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** To adapt to the further requirement of measurement accuracy of slight photo electric signal in the field of modern photoelectric detection technology, high-precision measurement method of diffraction efficiency of Acousto-Optic Tunable Filter (AOTF) was proposed and verified. Light path switchable devices was used to achieve cross-reference detection, reducing the effect of light source instability, non-uniform response of the detector and photoelectric -jamming, which improved the accuracy of measurement effectively. Firstly, the principle of high-precision measurement of diffraction efficiency of AOTF based on double-optical-path and cross-references was introduced concretely in this paper. Experiments were performed to testify the accuracy of this method. Experimental results indicate that the diffraction efficiency measurement accuracy is improved 50 percent averagely by using cross-references approach. The proposed method has a significance to reduce the influence of source instability and

收稿日期: 2016-08-06; 修订日期: 2016-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(21105109)

作者简介: 秦侠格(1991-), 男, 博士生, 主要从事成像光谱技术方面的研究。Email: jackchinor@sina.com

导师简介: 舒嵘(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电遥感方面的研究。Email: shurong@mail.sitp.ac.cn

response difference in detectors, and improve high-precision measuring. Finally, the range of application and referential meaning of this method were also discussed and analyzed.

**Key words:** measuring method; double-optical-path and cross-references; high-precision; AOTF; diffraction efficiency

## 0 引言

光电测试技术是以光电传感器件为基础,通过对载有被检物体信号的电磁辐射进行检测和处理的现代检测技术<sup>[1]</sup>。通常而言,影响光电测量精度的因素主要包括光源的不稳定性、探测器响应的差异性、探测器的各种噪声引入的误差、外界环境的干扰等等。如参考文献[2]针对点衍射干涉仪系统详细分析了光源的不稳定性、CCD 像元间暗电流、非线性及响应不一致对其测试精度的影响及矫正方法;参考文献[3]利用光透过待测物质的光谱信息测量浑浊度的高精度实验装置同样分析了光源对测试系统测量精度的影响。

随着光电检测技术的深入研究和飞速发展,对微弱光电信号的测量精度要求越来越高,如何有效降低上述因素的影响,提高微弱光电信号检测的精度,是现代光电检测技术的难点和研究热点。

为有效消除光源、外界环境等随机干扰的影响,采用双光路进行源补偿测量是一种有效的方式<sup>[4]</sup>。文中面向声光可调谐滤光器(Acousto-Optic Tunable Filter, AOTF)衍射性能测试应用,以设计双光路互参考测试方法并完成装置构建。测试装置通过光路可切换器件实现光路互参考检测,分析及试验表明可以达到降低光源不稳定性、探测器响应差异性、光电干扰等影响、提高测试精度的目的,为 AOTF 分光器件的研制、检测及进一步广泛应用提供了技术基础。

## 1 测试原理及装置

声光可调谐滤光器作为一种新型的色散分光器件,其基于声光效应原理,通过射频控制可实现电调谐光谱滤波。AOTF 为全固态结构,力、热特性较好;采用电调谐实现光谱滤波,光谱选择灵活、采样间隔可控、波长扫描快速<sup>[5-6]</sup>。基于上述特性,AOTF 分光技术出现后即开始广泛应用于非成像及成像型光谱

仪器设备当中<sup>[7-9]</sup>。

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等<sup>[10]</sup>。其中衍射效率是评价 AOTF 性能的关键指标,是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测量的基础数据。波长与衍射效率关系即为器件光谱范围内各波长对应的最大衍射效率;波长与驱动频率关系即为器件光谱范围内各波长最大衍射效率对应的驱动频率;波长与光谱分辨率关系即为器件光谱范围内各波长最大衍射效率下降 50% 时对应的光谱带宽值。因此,AOTF 晶体光学性能参数的精确测量有赖于对衍射效率的精确测量。AOTF 基于其正常和反常 Bragg 衍射的理论,其理论衍射效率计算公式统一如公式(1)所示<sup>[11]</sup>:

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{M_2 L P_a}{2H}} \right) \quad (1)$$

式中: $\lambda$  为衍射光波长; $M_2$  为 AOTF 晶体的声光优值; $P_a$  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; $H$  为声波传输距离。

在对 AOTF 特定波长进行测量时,测试该波长衍射光信号相对入射光信号的最大比值。入射光通过 AOTF 后,分为 0 级光和衍射光,测试 0 级光能量为  $e_0$ ,衍射光能量为  $e_1$ ,其衍射效率为:

$$\eta = \frac{e_1}{e_0 + e_1} \quad (2)$$

在对 AOTF 晶体衍射效率进行测量时,传统方法一般利用分时测量 0 级光和  $\pm 1$  级衍射光的方法,如武汉大学电子信息学院利用测量 0 级光的方法间接对 AOTF 晶体 400~1 000 nm 衍射效率进行测量<sup>[12]</sup>;天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室以卤钨灯作为光源利用同一驱动频率下产生的 +1 级衍射光与 -1 级衍射光的中心波长通常不重合而导致的接收的零级光谱的变化信息对衍射效率进行测量<sup>[13]</sup>。但上述机构均只给出了 AOTF 衍射效率的测量方案及测试结果,并未对测试误差进行分

析。由于两次分时测量前端光源的不稳定干扰,以及外界环境的变化,影响测量的精度;另一方面,探测器响应的不同也导致测量时较大的误差。为此,文中提出一种双光路互参考高精度 AOTF 衍射效率测试方法,由于 0 级光和±1 级衍射光同一测量时刻所包含的光源波动信息相同,外界环境也相同,故利用两束光的相互参考的方法能够有效消除光源的不稳定性以及外界干扰。再利用交替测量双光束的方法能够大大减小由探测器响应不一致而引起的误差。具体方法如图 1 所示,激光光源经过中性密度滤光片、格兰棱镜变成线偏正光,进入待测 AOTF 晶体,由相应射频驱动 AOTF 晶体,通过功率计探头的交替测量,处理后得到该波长下 AOTF 的衍射效率。

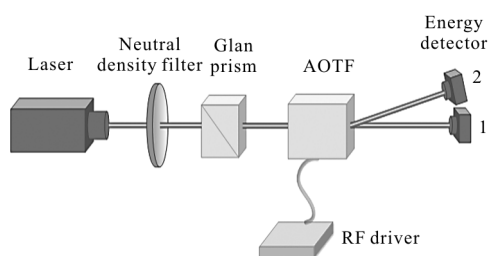


图 1 双光路互参考 AOTF 衍射性能高精度测试装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of high-precision measurement device on diffraction efficiency of AOTF using double-optical-path and cross-references method

AOTF 高精度衍射效率测量验证装置实物图如图 2 所示,装置主要由光纤耦合半导体激光器(CW)、中性密度滤光片、格兰棱镜、二维电动转台、声光晶体 AOTF、换能器和功率计探头组成。系统采用 iFLEX-2000 半导体激光器作为光源,中心波长为 780 nm,功率 48 mW。选用 Spiricon 中性密度滤光片;格兰棱镜选用 GL15 Glan-Laser Calcite Polarizers,消光比优于 10 000:1,光谱范围在 350~2 300 nm 之间,能够实现宽谱段测试。本系统采用联谊 148×142 二维电动转台,调节范围为 360°,电机的传动比 1:360,标尺最小读数为 0.1°,电机整步运行分辨率为 0.005°。功率计选用 THORLABS PM100D。通过旋转格兰棱镜改变衍射出射光的偏振态得到 o 光和 e 光单色光,由上位机软件控制改变施加在 AOTF 晶体的射频频率实现 780 nm 的衍射波长输出。

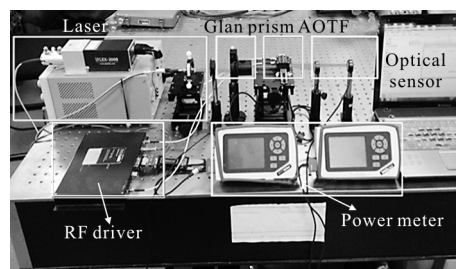


图 2 测量装置实物图

Fig.2 Physical picture of the measurement device system

## 2 测试方法及误差分析

双光路互参考 AOTF 衍射性能高精度测试装置原理如图 1 所示,具体原理及测量方法如下:

调节激光器的输出波长,对 AOTF 施加一定射频驱动,设第一功率计探头接收到的 0 级光能量为  $E_0$ ,第二功率计探头接收到的衍射光能量为  $E_1$ 。互换两个功率计探头的位置,保持原射频驱动频率不变,设此时第二功率计探头接收到的 0 级光能量为  $E_0'$ ,第一功率计探头接收到的衍射光能量为  $E_1'$ 。

设激光器能量不稳定所造成的影响因子系数为  $\beta$ ,第一功率计探头的响应系数为  $\alpha$ ,第二功率计探头的响应系数为  $\alpha(1+\Delta x)$ , $\Delta x$  为两个功率计探头响应不一致所产生的相对偏差。由此,两个功率计探头获取的光能量响应为: $E_0=\beta\alpha e_0$ , $E_1=\beta\alpha(1+\Delta x)e_1$ 。调换功率计探头后,二者获取的光能量为: $E_0'=\beta\alpha(1+\Delta x)e_0$ , $E_1'=\beta\alpha e_1$ 。

两次测量的衍射效率分别为:

$$\eta_1 = \frac{E_1}{E_1 + E_0} = \frac{(1+\Delta x)e_1}{(1+\Delta x)e_1 + e_0} \quad (3)$$

$$\eta_2 = \frac{E_1'}{E_1' + E_0'} = \frac{e_1}{e_1 + (1+\Delta x)e_0} \quad (4)$$

则衍射效率计算公式为:

$$\eta = \sqrt{\eta_1 \eta_2} = \sqrt{\frac{E_1 E_1'}{(E_0 + E_1)(E_0' + E_1')}} \quad (5)$$

光路分时测量时光源的不稳定性及外界环境干扰的影响,且针对探测器响应不一致引入的误差,根据以上衍射效率计算公式模型利用两探测器交替测量予以减弱。具体分析如下:

若不进行功率计探头交替测试,此时测得衍射效率的极限误差为  $\Delta\eta'$ ,可知:

$$\Delta\eta' = \eta_1 - \eta_{\text{real}} \quad (6)$$

进行功率计探头交替测试后,此时衍射效率的

误差为  $\Delta\eta''$ , 可知:

$$\Delta\eta'' = \eta - \eta_{\text{real}} = \sqrt{\eta_1 \eta_2} - \eta_{\text{real}} \quad (7)$$

由公式(2)、(3)和(4)可将公式(6)与(7)推导为:

$$\Delta\eta' = \eta_1 - \eta_{\text{real}} = \frac{\eta_{\text{real}}(1+\Delta x)}{\eta_{\text{real}}(1+\Delta x) + 1 - \eta_{\text{real}}} - \eta_{\text{real}} \quad (8)$$

$$\Delta\eta'' = \eta - \eta_{\text{real}} =$$

$$\frac{\eta_{\text{real}}}{\sqrt{2\eta_{\text{real}}^2 - 2\eta_{\text{real}} + 1 + \eta_{\text{real}}(1 - \eta_{\text{real}})(1 + \Delta x + \frac{1}{1 + \Delta x})}} - \eta_{\text{real}} \quad (9)$$

由公式(9)可知,采用功率计探头交替测试的方法其误差  $\Delta\eta''$  的大小与特定波段衍射效率的值  $\eta_{\text{real}}$  以及两个功率计探头响应不一致所产生的相对偏差  $\Delta x$  有关,对于 AOTF 晶体,其各个波段的衍射效率不同且较低,如图 3 所示,分别取  $\eta_{\text{real}}$  为 0.1、0.3 和 0.5 时,得到  $\lg\Delta\eta$  和  $\Delta x$  的关系曲线图( $\Delta x$  取值范围在 0~5%之间),对比单次测量和交替测量的理论极限误差结果可知,采用功率计探头交替测试可有效提高测试精度,衍射效率的测试精度理论提高了  $10^3 \sim 10^4$  倍,有效地降低了激光器能量不稳定,能量计探头响应率偏差等因素引起的误差。

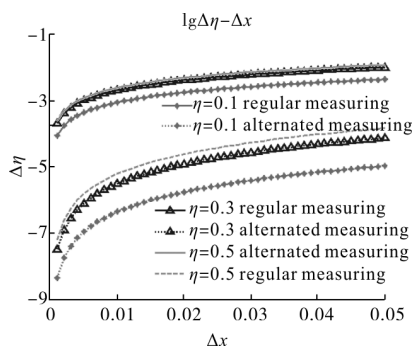


图 3  $\lg\Delta\eta-\Delta x$  关系曲线图

Fig.3 Relation curves of  $\lg\Delta\eta-\Delta x$

### 3 试验及数据处理

半导体激光器中心波长 780 nm, 功率 48 mW, 功率稳定性 <2%。旋转格兰棱镜使出射光变为线偏振光( $e$  光  $272^\circ$ ,  $o$  光  $2^\circ$ ), 调节驱动频率( $o$  光 88.7 MHz,  $e$  光 89.51 MHz)分别测试在  $o$  光和  $e$  光条件下 AOTF 的衍射光和 0 级光的光强,再交换探头,重复试验,利用公式(5)测得衍射波长为 780 nm 时, AOTF 晶体  $o$  光和  $e$  光的衍射效率,与仅利用两个功率计同时但不交替测量两种情况下的测量结果对比(功率计 1 测量衍射光,功率计 2 测量 0 级光对应表格中功率

计 1、2,同理交换测量的情况对应于功率计 2、1),绘制测试曲线,并计算每种情况下的平均值、方差结果如表 1、图 4 所示。

表 1  $o$  光和  $e$  光条件下交替测量和不交替测量结果对比

Tab.1 Compared result between alternated and regular measuring on  $o$ -light and  $e$ -light

| Diffracted light | Measuring method | Mean value | Variance  |
|------------------|------------------|------------|-----------|
| $o$ -light       | Power meter1, 2  | 0.407 805  | 0.005 228 |
|                  | Power meter2, 1  | 0.420 984  | 0.005 448 |
|                  | Alternated       | 0.414 315  | 0.002 421 |
| $e$ -light       | Power meter1, 2  | 0.442 956  | 0.004 178 |
|                  | Alternated       | 0.426 804  | 0.002 759 |

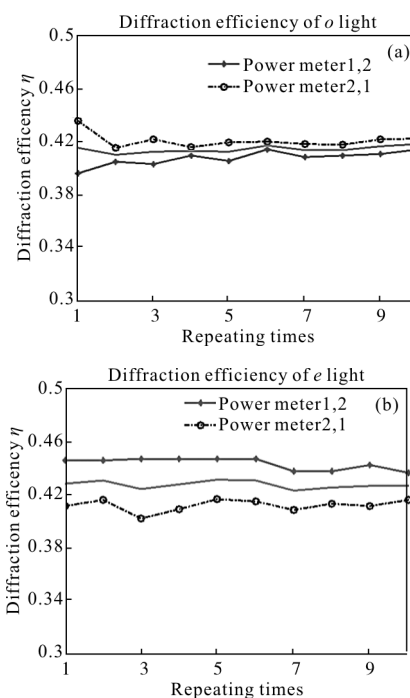


图 4  $o$  光、 $e$  光衍射效率曲线

Fig.4 Curves of diffraction efficiency for  $o$ -light and  $e$ -light

由于 AOTF 晶体在特定波段的衍射效率是真实、未知的,需要通过测量的方法得到,且受制于光学加工工艺的影响,因此,文中利用精确度对两种测试方法的结果做对比分析(精确度表示在相同条件下,多次重复测定值的接近程度)。

标准偏差:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n-1}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

式中： $x_i$  为每次测定值； $\mu$  为多次测定的算术平均值； $n$  为测定次数。

相对标准偏差：

$$RSD = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (7)$$

式中： $s$  为标准偏差； $\bar{x}$  为多次测定的算术平均值。 $o-1$  表示  $o$  光功率计 1、2 测量， $o-2$  表示  $o$  光功率计 2、1 测量， $o-1,2$  表示交替测量的结果。对比两种方法偏差的计算结果如表 2 所示。

表 2  $o$  光和  $e$  光条件下交替测量和不交替测量偏差计算结果对比

Tab.2 Compared result of deviation between alternated and regular measuring on  $o$ -light and  $e$ -light

| Diffracted light | Average deviation | Relative deviation | Standard deviation | RSD   |
|------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------|
| $o-1$            | 0.004 2           | 0.103 4            | 0.005 5            | 1.35% |
| $o-2$            | 0.003 6           | 0.086 2            | 0.005 7            | 1.36% |
| $o-1,2$          | 0.002 1           | 0.050 7            | 0.002 6            | 0.62% |
| $e-1$            | 0.003 9           | 0.087 1            | 0.004 4            | 0.99% |
| $e-2$            | 0.003 4           | 0.083 2            | 0.004 5            | 1.09% |
| $e-1,2$          | 0.002 4           | 0.055 1            | 0.002 9            | 0.68% |

对比  $o$  光和  $e$  光衍射效率的计算结果与偏差分析结果可知，使用两个功率计时测量衍射效率（即功率计 1 测量衍射光，功率计 2 测量 0 级光的情况与交换探头测量的情况测量）的方法，数据的稳定性和一致性吻合，表明同种型号的功率计所测量的衍射效率的差别较大，数据浮动在 5%~7% 左右，主要由于激光器能量的不稳定以及功率计探头自身的响应率不一致所造成的，理论上利用两个探测器同时测量两束光束的方法能够消除前端光源及背景光的干扰，但由于响应率的不同导致误差仍相对较大，利用双光路互参考交替测量的方法相比单个探头分时测量衍射光和 0 级光和两个探头不交替测量，所测量的数据方差减小了，数据的一致性提高了 50%。理论仿真误差模型计算时忽略 AOTF 晶体材料内部超声损耗以及声光材料旋光性的影响，模型相对简单，

且未考虑除光功率计探头响应差异以外的其他噪声对测量结果的影响，如散粒噪声，热噪等。故理论仿真曲线旨在说明该方法在消除光源不稳定以及功率计响应不一致等方面的显著效果。该方法有效地减弱了光源的不稳定、外界环境干扰以及探测器响应差异对测量结果的影响，大大提高了测量数据的精确度，为后续利用 AOTF 不同波段的衍射效率数据进行光谱成像质量、分光性能分析及光谱辐射定标和校正提供了高精度参考依据，实验验证结果与理论分析仿真结果相一致。

## 4 结 论

双光路互参考声光可调谐滤波器高精度衍射性能测试方法利用探测器交替同时测量衍射光和 0 级光光强，由于两束光的光源波动及所处的外界环境状况相同，利用该方法大大消除激光光源能量不稳定对测量结果的影响。通过交替测量衍射效率计算公式，有效减小探测器响应不一致对衍射效率测量精度的影响。相比传统的测量方法， $o$  光 AOTF 衍射效率的相对标准偏差 RSD 由原来的 1.35% 减小到 0.62%； $e$  光相对偏差 RSD 由原来的 1.09% 减小到 0.68%。稳定性平均提高了 50%，数据一致性大大提高，明显提高测量精度，使所测数据更接近衍射效率。验证装置采用了单波长激光作为光源，实际测量系统研制时，应选用波长可调谐光源（如超连续白光激光光源）满足宽谱段测试需求。该方法利用双光路测试实现互参考提高测试精度，有效减小测试中的误差，在其他光电测试领域，可以通过分束片实现双光路光学系统，再通过探测器交替测量实现互参考高精度测量，具有重要的参考意义。

## 参考文献：

- [1] Pramod K Rastogi. Optical Measurement Techniques and Applications[M]. Boston: Artech House Publisher, 1997.
- [2] Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, et al. Analysis of measuring errors for visible light phase-shifting point diffraction interferometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1351-1356. (in Chinese)  
张宇, 金春水, 马冬梅, 等. 可见光移相点衍射干涉仪的测试误差分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1351-1356.
- [3] Kuanfan G Ren, Feng Xu. Development of a precise and in

- situ turbidity measurement system[C]//AIP Conf Proc, 2007, 914: 419.
- [4] Wen Xiaoming, Lin Lizhong, Wu Yinghong. A kind of method for measuring absorbance spectrum with dual beam light and one detector [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 1998, 18(5): 626–628. (in Chinese)  
文小明, 林理忠, 吴映虹. 一种双光路单探头吸收光谱同时测量方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 1998, 18(5): 626–628.
- [5] He Zhiping, Shu Rong, Wang Jianyu. Imaging spectrometer based on AOTF and its prospects in deep-space exploration application[C]//SPIE, 2011, 8196: 819625–1–7.
- [6] He Zhiping, Qin Xiage, Xu Yingyu, et al. Staring acousto-optic spectral imaging technology with area FPA and discussion on its application of unmanned aerial vehicle (UAV) platforms [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 3001–3007. (in Chinese)  
何志平, 秦侠格, 徐映宇, 等. 面阵凝视声光光谱成像技术及其轻小型无人机载应用探讨[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 3001–3007.
- [7] He Z P, Wang B Y. Visible and near-infrared imaging spectrometer and its preliminary results from the Chang'e 3 project[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 083104.
- [8] He Zhiping, Wang Binyong. Operating principles and detection characteristics of the Visible and Near-Infrared Imaging Spectrometer in the Chang'e-3 [J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2014, 14(12): 1567–1577.
- [9] Liu Jifan, Ma Yanhua. New hyperspectral imaging system based on AOTF [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 3065–3069. (in Chinese)
- 刘济帆, 马艳华. 基于 AOTF 的新型成像光谱系统 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(11): 3065–3069.
- [10] Liu Shuqin, Wang Binyong, Xu Rui, et al. Broad spectral range AOTF performance analysis system based on multi-band acquisition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1343–1348.  
刘书勤, 王斌永, 徐睿, 等. 基于多谱段集成检测的宽光谱 AOTF 性能测试系统 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(4): 1343–1348.
- [11] Xu Rui, He Zhiping, Chen Kai, et al. Temperature characteristics of SWIR spectrometer based on AOTF and data pre-processing model for deep-space exploration application[J]. *J Infrared Millim Waves*, 2014, 33(3): 327–332. (in Chinese)  
徐睿, 何志平, 陈凯, 等. AOTF 短波红外光谱仪的空间温度特性及其数据预处理模型[J]. *红外与毫米波学报*, 2014, 33(3): 327–332.
- [12] 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)  
胡善州, 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.
- [13] Li Qingbo, Xu Kexin, Ni Yong. et al. Study on characteristics of acousto-optic tunable filter optical system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(4): 329–333. (in Chinese)  
李庆波, 徐可欣, 倪勇, 等. 声光可调谐滤光器分光系统光学特性的研究[J]. *中国激光*, 2003, 30(4): 329–333.