

文章编号: 1672-8785(2020)06-0001-06

## 红外探测器相对光谱响应测试

张小倩 周 翠

(中国电子科技集团第十一研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 相对光谱响应作为评价红外探测器性能的一个重要指标, 直接影响用户的使用情况。以中长波红外两个波段的探测器作为实验器件, 分析讨论了两种分别采用傅里叶光谱仪和单色仪的不同测试方法。对于长波红外探测器, 用单色仪和傅里叶光谱仪测得的后截止波长分别为  $9.28\ \mu\text{m}$  和  $9.25\ \mu\text{m}$ , 前截止波长均为  $7.60\ \mu\text{m}$ 。对于中波红外探测器, 用单色仪和傅里叶光谱仪测得的后截止波长分别为  $4.86\ \mu\text{m}$  和  $4.85\ \mu\text{m}$ , 前截止波长均为  $3.60\ \mu\text{m}$ 。结果表明, 两种测试方法所得的前截止波长完全一致, 后截止波长也在允许误差范围内, 从而验证了用这两种仪器测试相对光谱响应时的一致性和准确性。以上两种测试方法的原理通俗易懂, 操作简便, 结果准确, 为红外探测器的性能优化研究提供了一定的参考。

**关键词:** 相对光谱响应; 傅里叶光谱仪; 单色仪

中图分类号: TN2 文献标志码: B DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.06.001

## Measurement of Relative Spectral Response of Infrared Detector

ZHANG Xiao-qian, ZHOU Cui

(The 11th Institute of China Electronic Science and Technology Group, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Relative spectral response is an important index for evaluating the performance parameters of infrared detectors, which directly affects the user's usage. Using the detectors in the middle and long wave bands as experimental devices, two different test methods using Fourier spectrometer and monochromator are analyzed and discussed. For the long-wave infrared detector, the rear cut-off wavelengths of the monochromator and Fourier spectrometer are  $9.28\ \mu\text{m}$  and  $9.25\ \mu\text{m}$ , respectively, and the front cut-off wavelength is  $7.60\ \mu\text{m}$ . For mid-wave infrared detectors, the rear cutoff wavelengths of the monochromator and Fourier spectrometer are  $4.86\ \mu\text{m}$  and  $4.85\ \mu\text{m}$ , respectively, and the front cutoff wavelengths are  $3.60\ \mu\text{m}$ . The results show that the front-cut wavelengths of the two test methods are completely consistent, and the rear cutoff wavelengths are within the allowable error range, thus verifying the consistency and accuracy of the relative spectral response of the two instruments. The principles of the two test methods are easy to understand and operate, the results are accurate, which provides a certain reference for the optimization of infrared detector performance.

**Key words:** relative spectral response; Fourier spectrometer; monochromator

收稿日期: 2020-05-28

作者简介: 张小倩(1995-), 女, 北京人, 助理工程师, 主要研究方向为红外探测器的测试与评价。  
E-mail: 1249503157@qq.com

## 0 引言

红外探测器可以把接收到的红外辐射信号转换为可测量的电信号。红外辐射是一种电磁波，位于可见光红光外端，无法被人眼看到。红外技术在多个领域得到了应用：军事应用包括隐形武器、红外通信、制导、夜视、设备检测和红外警告等；在国民经济中的应用包括红外测温、红外远程遥控、红外遥感和红外线治疗仪等。因为红外探测技术的应用领域越来越多，也越来越重要，所以对其性能指标提出了更高的要求。比如，如何准确测试红外探测器的相对光谱响应范围等<sup>[1]</sup>。因此，本文将介绍常用的相对光谱响应测试方法及理论。

## 1 实验原理

### 1.1 相对光谱响应

这里，光谱响应是指红外探测器的响应率或探测率随波长  $\lambda$  的变化关系。测试探测器时，平均响应率是指在有限时间内探测器像元对单位辐射功率的响应<sup>[2]</sup>，即

$$R(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{\Delta P(\lambda)} \quad (1)$$

实际辐射到红外探测器的单位辐射功率不完全等于黑体辐射出的值。它的真实值不仅有黑体本身在该温度下的辐射功率，而且还受光学因素(光学窗口的透过率)和环境因素(环境空气的透过率)等的共同作用，导致在实际测试中增加了测试和计算难度。所以，为了精简测试过程和减少环境、设备等因素的干扰，通常使用相对光谱响应这一概念，即有一个已知光谱响应的探测器，然后通过这个探测器去测试未知探测器的光谱响应<sup>[2]</sup>。

当已知红外探测器的光谱响应为  $R_{\text{std}}(\lambda)$  时，波长为  $\lambda$  的红外辐射功率  $P(\lambda)$  为<sup>[2]</sup>

$$R_{\text{std}}(\lambda) = \frac{V_{\text{std}}(\lambda)}{P(\lambda)} \quad (2)$$

即

$$P(\lambda) = \frac{V_{\text{std}}(\lambda)}{R_{\text{std}}(\lambda)} \quad (3)$$

未知红外探测器的光谱响应为  $R_{\text{test}}(\lambda)$ 。当

它受到同样的辐射功率时，有<sup>[2]</sup>

$$R_{\text{test}}(\lambda) = \frac{V_{\text{test}}(\lambda)}{P(\lambda)} = \frac{R_{\text{std}}(\lambda)V_{\text{test}}(\lambda)}{V_{\text{std}}(\lambda)} \quad (4)$$

实际测试中，为了消除噪声的影响并便于观看理解，会对测试结果进行归一化处理<sup>[1]</sup>，即用整个波段的响应除以该波段内的峰值响应<sup>[2]</sup>：

$$R_{\text{out}}(\lambda) = \frac{R_{\text{test}}(\lambda)}{R_{\text{peak}}} \quad (5)$$

## 1.2 傅里叶光谱测试方法

### 1.2.1 测试系统的组成

如图 1 所示，测试系统由傅里叶光谱仪、光谱仪控制模块、待测探测器、探测器驱动电路、信号采集与处理模块以及计算机等部分组成。

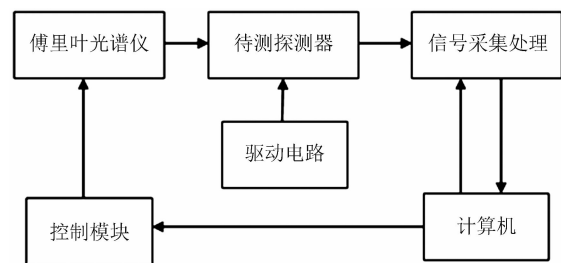


图 1 傅里叶光谱测试系统的结构框图

### 1.2.2 测试原理

傅里叶光谱仪的工作原理如下：采集待测探测器的光谱信号，在时域内对其进行连续变换，并计算光谱特征谱带；使用快速傅里叶变换把光谱从时域转换到频域，分离目标信号与噪声；接着滤除高频的白噪声，并利用傅里叶反变换把滤波后的频谱信息变成滤波后的时域特征光谱信息；最后，在时域内光谱信号被恢复，得到滤波后的光谱<sup>[3]</sup>。

傅里叶光谱仪包含一个标准的探测器。首先测试该探测器的光谱曲线，即辐射源的辐射随波长的变化关系(称为背景光谱曲线)。在同一个辐射源以及其他条件也完全一样的情况下测试待测探测器，得到第二条光谱曲线。该曲线包含待测探测器的光谱响应特性和背景光谱曲线。然后用第二条光谱曲线除以背景光谱曲线，这样就得到了待测探测器自身的光谱响应

特性<sup>[3]</sup>。

### 1.2.3 测试方法

- (1) 预热光谱仪;
- (2) 将待测探测器对准光谱测试仪的出光口;
- (3) 将探测器制冷至工作温度, 然后使其正常加电工作, 并调至合适的积分时间;
- (4) 采集待测探测器的光谱曲线, 并对其进行归一化处理, 得到相对光谱响应曲线;
- (5) 由相对光谱响应曲线确定峰值的 1/2 为前截止波长  $\lambda_1$ , 峰值的 1/2 为后截止波长  $\lambda_2$  和光谱因子  $G$ 。

### 1.2.4 计算方法

根据定义, 将待测探测器测试所得的光谱曲线与标准光谱曲线相比, 再除以归一化基数, 即可得到待测探测器的光谱响应曲线。

相对光谱响应  $S_r(\lambda)$  的计算公式为

$$S_r(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S_m S_{or}(\lambda)} \quad (6)$$

式中,  $S_m$  是待测探测器峰值波长处的相对响应值, 即归一化基数;  $S(\lambda)$  是待测探测器光谱;  $S_{or}(\lambda)$  是标准探测器光谱。

## 1.3 单色仪测试方法

### 1.3.1 测试系统的组成

如图 2 所示, 测试系统由辐照源、单色仪、待测器件样品、信号处理电路以及计算机等部分组成。

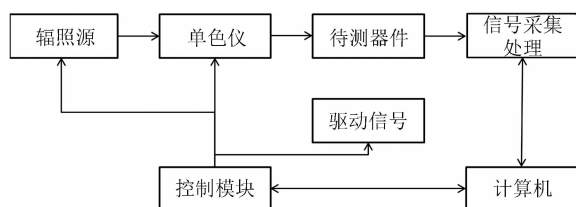


图 2 单色仪测试系统的结构框图

### 1.3.2 测试条件

辐射源通常使用高温黑体或者硅碳棒。单色仪的波长鼓由计算机控制, 完成波长的逐点扫描。参考探测器通常选择热释电器件, 其相对光谱响应  $S_{or}(\lambda)$  是已知的。焦平面的信号必须先经过采样保持处理, 而且信号采样处理电

路仅对红外焦平面接收到的从单色仪发出单色光像元中的某些地方进行采样<sup>[4]</sup>。

### 1.3.3 测试方法

- (1) 按图 2 连接好测试系统, 并且设置系统的初始值。
- (2) 调节测试系统, 比如调节偏压、调出响应程序等, 以保证探测器能正常工作。
- (3) 设置要采集的光谱波长范围、分辨率以及待测探测器的位置。
- (4) 单色仪里有一个波长鼓, 提前在计算机设置好程序, 进行一段一段的波长扫描。这样, 数据采集系统就能获取每一段波长下被测像元的输出信号电压  $V(\lambda)$ <sup>[4]</sup>。

### 1.3.4 计算方法

根据定义, 通过测试可得输出信号的电压值。由参考探测器的输出信号和相对光谱响应, 可求出待测探测器的相对光谱响应  $S_r(\lambda)$ :

$$S_r(\lambda) = \frac{S(\lambda)}{S_m} = \frac{1}{S_m} \left[ \frac{V(\lambda)}{V_0(\lambda)} S_{or}(\lambda) \right] \quad (7)$$

式中,  $S_m$  是光谱特性的最大值, 即归一化基数;  $V_0(\lambda)$  和  $S_{or}(\lambda)$  是参考探测器的输出信号和相对光谱响应。

将波长作为横坐标, 并将相对光谱响应  $S_r(\lambda)$  作为纵坐标, 即可得出一条相对光谱响应曲线。相应的前后截止波长之间的波段即为光谱响应范围。除非有其他特殊要求, 否则建议相对光谱响应取峰值的 1/2<sup>[4]</sup>。

## 2 实验及分析

为了验证用傅里叶光谱仪和单色仪测试相对光谱响应的准确性, 选择中波和长波两个波段的红外探测器进行实验。用相对光谱响应与波长拟合的长波器件光谱结果如图 3 所示。

一般将光谱响应从最大值下降 50% 时所对应的波长范围定义为探测器的光谱响应范围。表 1 列出了长波红外探测器的相对光谱响应数据。

用相对光谱响应与波长拟合的中波器件光谱结果如图 4 所示。表 2 列出了中波红外探测器的相对光谱响应数据。

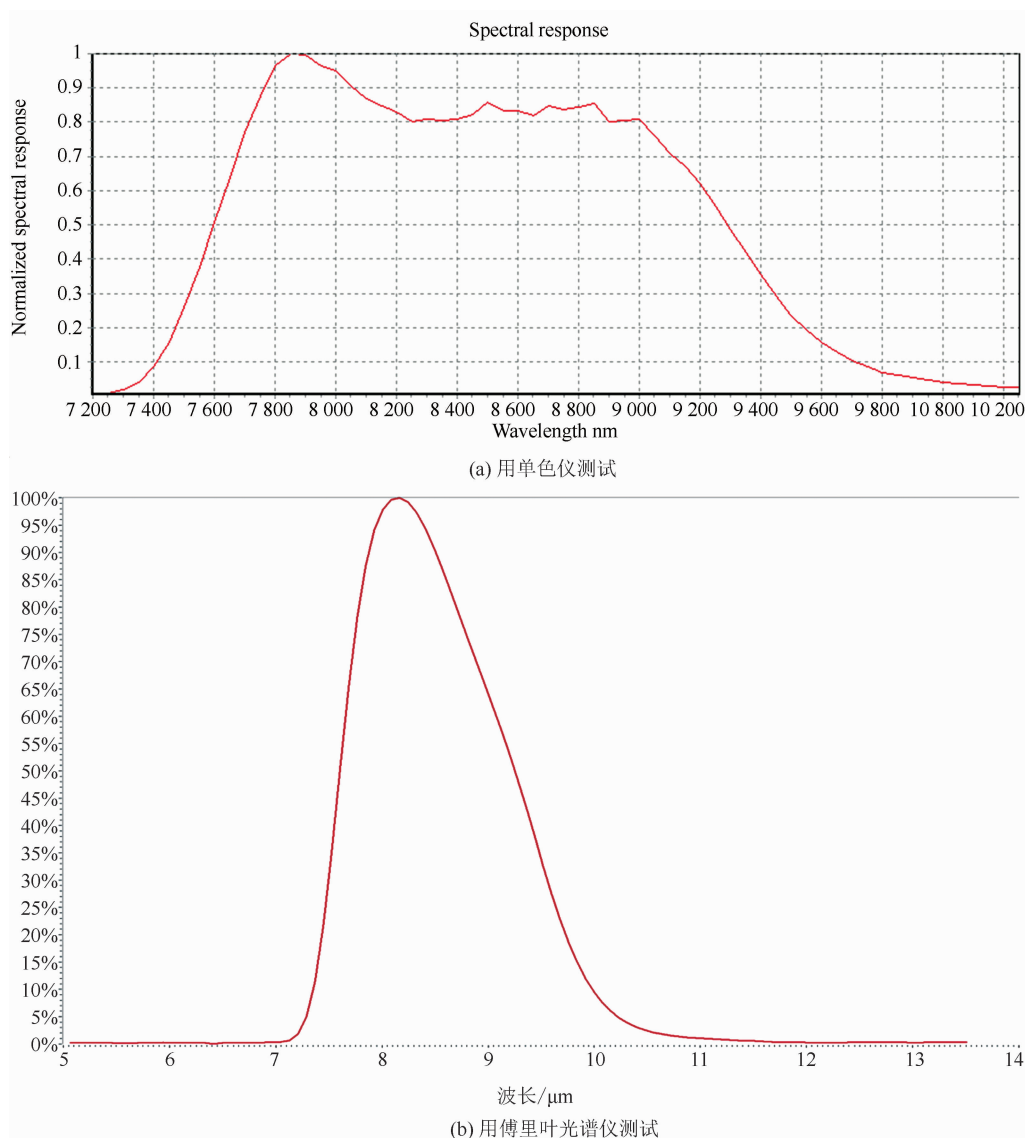


图3 用两种方法分别测得的长波红外探测器光谱图

表1 长波红外探测器的相对光谱响应数据

	前截止波长 / $\mu\text{m}$	后截止波长 / $\mu\text{m}$
单色仪	7.60	9.28
傅里叶光谱仪	7.60	9.25

由实验结果可知,用两种方法测得的红外探测器相对光谱响应均在允许的误差范围之内,且两种结果基本一致。前截止波长完全一样;对于后截止波长,以单色仪方法为基准,用傅里叶光谱仪测得的长波红外探测器光谱误差为0.3%,中波红外探测器光谱误差为0.2%。

由光谱图可以看出,用傅里叶光谱仪测得的光谱曲线更光滑。傅里叶光谱仪的核心是干涉仪。He-Ne光和红外光依次经过分束片与动镜,两路反射回的光产生干涉,得到干涉图。该干涉图是每一个波数的干涉图的矢量和:

$$I(\delta) = \int_{-\infty}^{+\infty} B(\nu) \cdot \cos 2\pi\nu\delta d\nu \quad (8)$$

式中, $I$ 是光强, $\delta$ 是光程差, $B$ 是光源的强度, $\nu$ 是波数。将光强转换成相应的谱图:

$$B(\nu) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta) \cdot \cos 2\pi\nu\delta d\delta \quad (9)$$

提前设置要采集的波数范围、波数分辨率

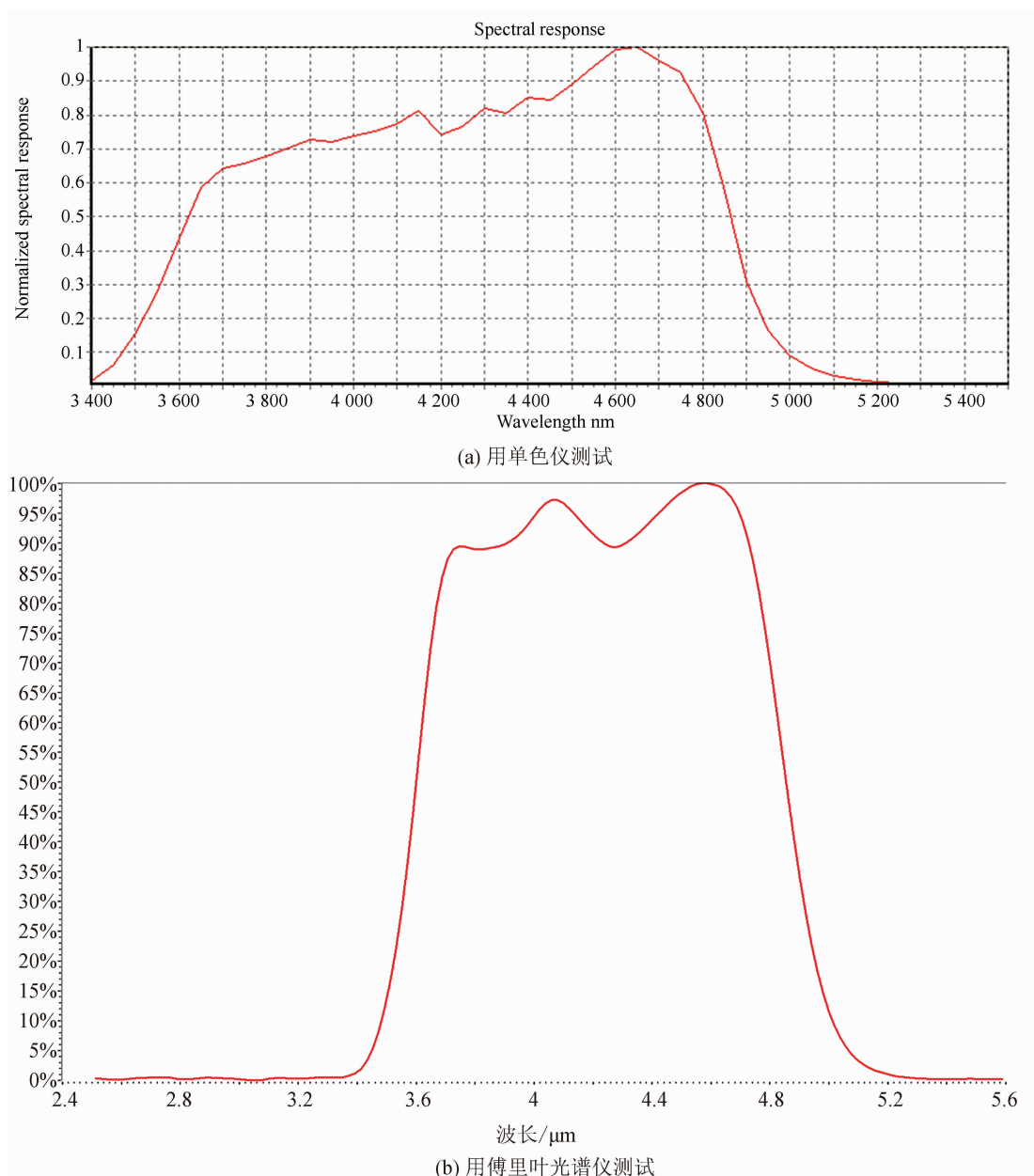


图 4 用两种方法分别测得的中波红外探测器光谱图

和相位分辨率, 然后通过算法自动补偿多点拟合成光滑曲线的光谱图。而单色仪则通过转动光栅依次将不同频率的光导入探测器, 得到相应的信号, 然后将其直接拟合成光谱曲线, 即单色仪采集光谱是在频域内进行的。所以, 傅里叶光谱仪得到的光谱曲线更光滑。

由中波红外探测器的光谱图可以看出, 在  $2300\text{ cm}^{-1}$  附近的  $2340\sim 2360\text{ cm}^{-1}$  处有一个小凹陷, 这是  $\text{CO}_2$  吸收峰。通过除以背景光谱曲线, 该吸收峰会有所改善。

表 2 中波红外探测器的相对光谱响应数据

	前截止波长 / $\mu\text{m}$	后截止波长 / $\mu\text{m}$
单色仪	3.60	4.86
傅里叶光谱仪	3.60	4.85

### 3 结束语

红外技术应用于多个不同场景时需要使用不同波段的红外探测器, 所以相对光谱响应测试的准确性也越来越重要。本文介绍了基于常用光谱仪(傅里叶光谱仪和单色仪)测试相对光



谱响应的方法及原理。通过实验验证了用两种仪器测试相对光谱响应的一致性和准确性,为检测相对光谱响应提供了指导和依据。本文只选取了中波红外和长波红外探测器,而没有对短波红外和甚长波红外探测器进行试验和比较。下一步将验证全波段的相对光谱响应,同时分析暗电流对相对光谱响应的影响。

### 参考文献

- [1] 刘兰娇. 红外辐射源能量光谱分布测试研究[J]. 科技资讯, 2014, 12(33): 42.
- [2] 王梓又. 非制冷红外探测器光谱、串音、MTF测试技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [3] 刘庆杰, 蔺启忠, 王钦军, 等. 基于连续统快速傅里叶变换的红外光谱处理技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 113-116.
- [4] 中国国家标准化管理委员会. 红外焦平面阵列参数测试方法: GB/T 17444-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.