

文章编号: 1672-8785(2020)01-0021-06

## 微测辐射热计的热响应时间测试方法

史 杰 李 静 董 珊 陈文礼 王宏臣\*

(烟台艾睿光电科技有限公司, 山东烟台 264006)

**摘 要:** 热响应时间是微测辐射热计的关键参数, 它会制约非制冷红外探测器的最高工作帧频。热响应时间的像元级测试能够真实反映传感器的物理热响应时间, 为产品设计优化提供及时、有效的数据支持, 因此准确测量该参数具有十分重要的意义。但目前像元级测试方法均未能有效补偿微测辐射热计的自热效应, 无法精准地测量热响应时间。基于频率响应法测试了微测辐射热计的有效热响应时间。通过用电阻温度系数对自热效应进行补偿, 可以精确测量物理热响应时间。通过实验分析了不同偏置电流下测得的物理热响应时间。结果表明, 该方法准确度高, 稳定性强。

**关键词:** 微测辐射热计; 热响应时间; 自热效应; 频率响应

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2020.01.005

### Test Method for Thermal Response Time of Microbolometer

SHI Jie, LI Jing, DONG Shan, CHEN Wen-li, WANG Hong-chen\*

(Yantai IRay Technology Co., Ltd., Yantai 264006, China)

**Abstract:** Thermal time constant is a key parameter of the microbolometer, which constrains the maximum frame frequency of uncooled infrared detector. The pixel-level test of thermal response time can truly reflect the physical thermal response time of the sensor, and provide timely and effective data support for product design optimization. It is very important to accurately measure this parameter. However, the current pixel-level test methods have not been able to effectively compensate the self-heating effect of microbolometers, and can not accurately measure the thermal response time. The effective thermal response time of the microbolometer is measured based on the frequency response method. The self-heating effect is compensated by the resistance temperature coefficient, and the physical thermal response time can be accurately measured. The physical thermal response time measured under different bias currents is experimentally analyzed. The results show that this method has high accuracy and strong stability.

**Key words:** microbolometer; thermal response time; self-heating effect; frequency response

## 0 引言

非制冷红外成像技术以成本低、尺寸小、功耗低及寿命长等优点在军用国防装备和商用领域获得了广泛应用。微测辐射热计技术是目

收稿日期: 2020-01-08

作者简介: 史杰(1994-), 男, 内蒙古人, 工程师, 硕士, 主要从事微测辐射热计研究。

\* 通讯作者: E-mail: hcwang@raytrontek.com

前非制冷红外探测器的主流技术。热响应时间作为其关键指标,本质上是传感器的参数,用于表征像元对入射辐射的响应快慢。它的数学定义是,像元从初始温度升至稳定温度与初始温度之差的 $(1-1/e)$ 所需的时间,或像元从稳定温度降至稳定温度与终点温度之差的 $1/e$ 所需的时间。热响应时间越短,像元越能快速反映(升高或降低)场景的实际温度,在器件成像时越不容易出现动态目标的拖尾或边界模糊现象<sup>[1]</sup>。

物理上,热响应时间可用 $\tau=C/G$ 表示,其中 $C$ 为像元的热容, $G$ 为像元的热导。一方面,热导 $G$ 越小,像元灵敏度就越好,但由上式可知, $G$ 越小,像元热响应时间也越长。故在像元层面,热响应时间与灵敏度此消彼长、相互制约。另一方面,探测器的工作帧频决定了同一像元相邻两帧的采样间隔。对于快速运动的物体,像元的辐射变化快,过长的热响应时间使像元尚未达到稳定的温升就被采样了。为了温升充分,需加长采样间隔,而热响应时间过长则会限制探测器的工作帧频。由于热响应时间制约着探测器的灵敏度和工作帧频,对其进行准确评估显得极其重要。

本文提出了一种补偿微测辐射热计自热效应的热响应时间测试方法。首先,基于像元级频率响应特性,经拟合得到有效热响应时间;然后通过自热效应补偿得到像元的物理热响应时间。与其它像元级测试相比,该方法测量的物理热响应时间的准确性高、重复性好,不会受微测辐射热计自热效应的影响,可直接与设计值进行比对。

## 1 研究现状

目前,热响应时间测试方法主要分为像元级测试和焦平面级测试两种。在像元级测试方面,1998年新加坡国立大学的 Karunasiri G 等人采用电桥法测试了将钛薄膜作为敏感材料的微测辐射热计单元的热响应时间<sup>[2]</sup>,分析了电桥电路下的热平衡。但该方法的测试条件为 $\alpha$

$\cdot \frac{\Delta T}{2} \ll 1$  ( $\alpha$  为敏感材料的电阻温度系数(Temperature Coefficient of Resistance, TCR),  $\Delta T$  为微测辐射热计测试时的温度与初始温度的差值),即敏感值材料的自热效应可忽略。钛薄膜的 TCR 值仅为 0.25%,但对于用 TCR 值较大的热敏材料制作的微测辐射热计,该测试条件不再成立。

1999年,中国科学院上海技术物理研究所分析了微测辐射热计存在的自热效应,并提出可利用频率响应法测量有效热导与有效热响应时间,但未分析如何补偿此自热效应,也未提及具体测试方法<sup>[3]</sup>。

2005年,美国 L3 公司的 Syllaios J 等人尝试用高帧频碲镉汞(Mercury Cadmium Telluride, MCT)探测器观测非制冷探测器的温度变化<sup>[4]</sup>,并通过对采集的 MCT 输出电压信号进行指数拟合来得到热响应时间,但未考虑自热效应的影响。

在焦平面级测试方面,2006年以色列 SCD 公司的 Fraenkel A 等人<sup>[5]</sup>提出,在机械快门开合瞬间记录传感器输出变化曲线,并通过指数公式拟合得到焦平面阵列所有像元的热响应时间。理论上,该方法要求机械快门的开合时间为零,或远小于微测辐射热计像元的热响应时间,否则在快门开合瞬间记录的像元输出曲线不仅反映了像元对辐射信号的响应快慢,还夹杂着快门动作的快慢。因此该方法对实验装置的要求极高,较难实现。

2019年,电子科技大学报道了一种基于探测器频率响应曲线拟合焦平面阵列所有像元热响应时间的方法<sup>[6]</sup>,并利用该方法对实际工作条件下的有效热响应时间进行了测试。一旦焦平面探测器的工作条件发生变化,自热效应就会产生差异,所测结果也会随之变化,导致无法表征像元本身的物理热响应时间。该方法的优点是测试装置简单,且反映的是器件的频率响应特性,因此适用于实际工作条件下系统应用层面的评估。

由于热响应时间本质上是微测辐射热计的参数, 像元级测试能直观表征像元本身的热响应时间, 为传感器的设计优化提供更有效的数据支持。目前, 国内的研究单位较多使用像元级方法测试热响应时间, 包括惠斯通电桥法、分压法等。随着微测辐射热计向小像元、高灵敏度方向发展<sup>[7-8]</sup>, 热导越来越小, 在恒流偏置下微测辐射热计的  $\Delta T$  越来越高,  $\alpha \cdot \Delta T/2$  越来越大。这种趋势最终导致在恒流偏置下微测辐射热计的自热效应越来越显著, 不能直接忽略。虽然也可通过减小偏置来减小自热效应, 但在实际测试中, 过小的偏置会使测试信噪比下降, 进而增加测试难度和降低测试的准确性。

## 2 测试原理

微测辐射热计一般采用微桥结构(见图 1)<sup>[9]</sup>。其中, 绝热桥腿用于支撑桥面以及与衬底隔热, 同时也作为探测热敏电阻变化的电学通道; 包含热敏电阻的桥面用于吸收红外辐射, 将光能转换为热能, 使热敏电阻的温度升高, 从而将此温度变化转换为电学信号。

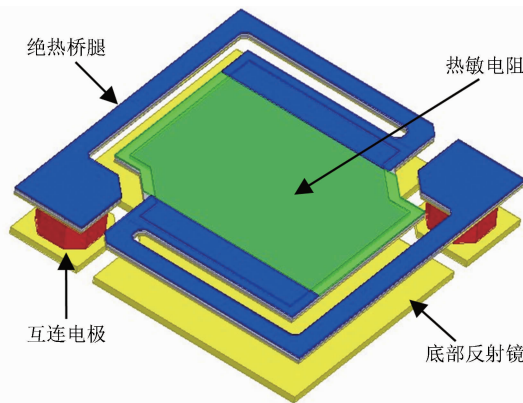


图 1 微测辐射热计的结构示意图

恒流时的热平衡方程为<sup>[10]</sup>

$$C \frac{dT}{dt} = I^2 R(T) + P + \epsilon P_s - G(T - T_s) - P_{rad} \quad (1)$$

式中,  $I^2 R(T)$  为恒流产生的焦耳热功率,  $P$  为目标的辐射功率,  $\epsilon P_s$  为环境辐射功率,  $G(T - T_s)$  为桥腿的传热功率,  $P_{rad}$  为辐射传热功率。测试时, 将待测像元置于金属管壳中的真空环

境内。空气与微桥的热交换以及微桥与环境的热辐射交换可以忽略, 此时热平衡方程简化为

$$C \frac{dT}{dt} = I^2 R(T) + P - G(T - T_s) \quad (2)$$

负温度系数半导体材料的典型  $R(T)$  行为<sup>[10]</sup>是

$$R(T) = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E}{KT}\right) \quad (3)$$

式中,  $T$  是测试单元的温度;  $R(T)$  是测试单元在温度  $T$  时的电阻;  $\Delta E$  是激活能;  $K$  是玻尔兹曼常数;  $R_0$  是电阻量纲的常数。

辐射功率  $P = \beta \eta A_D P_0 \exp(j\omega t)$ , 则热平衡方程的稳态解为

$$\Delta T = \frac{\beta \eta A_D P_0}{G_{eff} (1 + \omega^2 \tau_{eff}^2)^{1/2}} \quad (4)$$

式中,  $G_{eff}$  为考虑焦耳热效应后的有效热导。在恒流状态下,  $V_s = i_b \alpha R \Delta T$ 。由此可得电阻式测辐射热计的响应率随调制角频率  $\omega$  ( $\omega = 2\pi f$ ) 变化的表达式<sup>[11]</sup>:

$$\mathfrak{R}(f) = \frac{\alpha \beta \eta i_b R}{G_{eff} (1 + \omega^2 \tau_{eff}^2)^{1/2}} \quad (5)$$

当  $\omega = 0$  时, 响应率  $\mathfrak{R}_0$  为

$$\mathfrak{R}_0 = \frac{\alpha \beta \eta i_b R}{G_{eff}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得:

$$\mathfrak{R}(f) = \frac{\mathfrak{R}_0}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_{eff}^2}} \quad (7)$$

因此, 利用式(7)即可得到有效热响应时间  $\tau_{eff}$ 。

为了量化自热效应, 使用图 2 所示的电路进行分析。其中, 偏置发生器由其该电路替代, 该电路由理想(零阻抗)偏置电压源  $V_b$  和负载电阻  $R_L$  串联构成; 测试单元的电阻为  $R$ 。施加偏置后, 目标辐射功率  $P$  变化的有效热导  $G_{eff}$  为<sup>[10]</sup>

$$G_{eff} = G \left(1 + \beta \frac{R - R_L}{R + R_L}\right) \quad (8)$$

式中,  $G$  是微测辐射热计与周围环境的物理热导,  $\beta = \alpha \Delta T$ 。

在恒流偏置条件 ( $R_L \gg R$ ) 下, 有

$$G_{eff} \approx G(1 - \alpha \Delta T) \quad (9)$$

由于室温下微测辐射热计的热容在施加偏

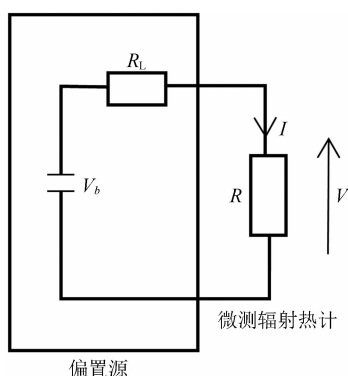


图2 微测辐射热计的偏置电路

置时可视为不变,因此有效热导  $G_{eff}$  对于因  $P$  变化产生的有效热响应时间为<sup>[10]</sup>

$$\tau_{eff} = \frac{c}{G_{eff}} \approx \tau \frac{1}{1 - \alpha \Delta T} \quad (10)$$

式中,  $\tau$  是微测辐射热计的物理热响应时间。因此,  $\tau$  可由式(11)计算:

$$\tau \approx \tau_{eff} [1 - \alpha(T) \cdot (T - T_s)] \quad (11)$$

式中,  $\alpha(T)$  是测试单元在温度  $T$  时的电阻温度系数,  $T$  是测试单元的温度,  $T_s$  是环境温度。

### 3 测试方法

本文的测试方法如图3所示。将测试单元置于真空环境中,并施加恒流偏置,将黑体辐射源在某一调制频率下的辐射信号转换为电信号。然后通过前置放大器放大和锁相放大器锁频,得到此调制频率的单元响应信号值。改变调制频率,测得不同调制频率下的单元响应信号值。最后根据式(7)对各频率下的响应信号

进行拟合,得到有效热响应时间  $\tau_{eff}$ 。图4所示为基于最小二乘法的拟合结果。

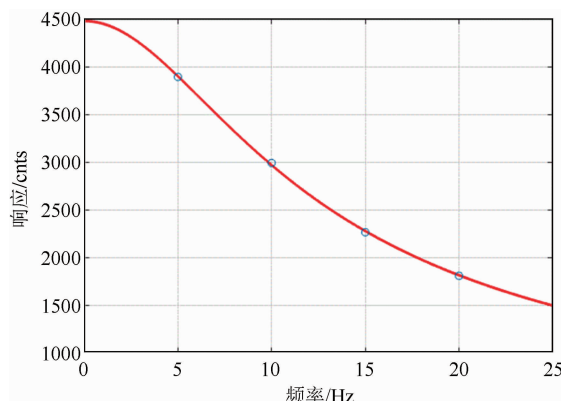


图4 有效热响应时间拟合曲线

由于该方法为像元级测试,其信号并未经读出电路放大。为弥补信号强度减小的不足,使用腔室高温黑体作为辐射源,并设定辐射温度为 500 K,以增大输入信号的强度;同时使用低噪声前置放大器对输出信号进行放大,使锁相放大器能够准确读取频率响应信号。

将  $\tau_{eff}$  代入式(11),即可计算物理热响应时间,但式(11)中的  $T$  和  $\alpha(T)$  需要通过以下测试得到。首先,测试不同温度下微测辐射热计的电阻值,得到电阻-温度( $R-T$ )曲线;然后将恒流偏置下稳定后的微测辐射热计的电阻  $R$  插值至  $R-T$  曲线中,得到微测辐射热计在此电流下的温度  $T$ 。 $\alpha(T)$  可根据下面的定义式计算得到<sup>[10]</sup>:

$$\alpha(T) = \frac{1}{R(T)} \frac{d[R(T)]}{dT} \quad (12)$$

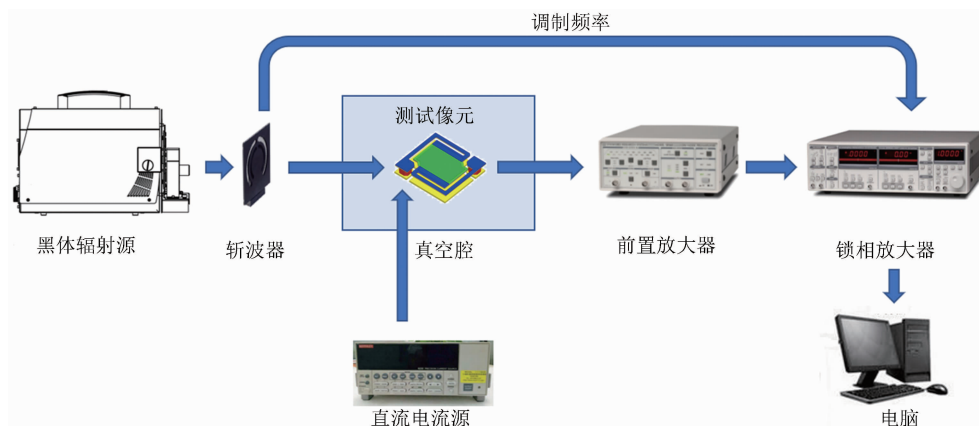


图3 频率响应法测试的示意图

#### 4 实验及结果分析

本文基于以上测试方法, 对一款微测辐射热计的像元进行了测试。设计时, 利用有限元仿真软件的瞬态热传导模块进行仿真, 得到该探测器的热响应时间为 7.4 ms。设计仿真结果如图 5 所示。

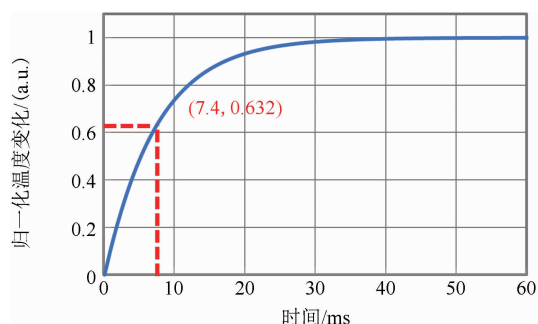


图 5 瞬态热传导模块的仿真结果

实验中, 使用 LS1050-100/MV 高温腔式黑体作为辐射源, 其前端自带斩波器模块。综合考虑斩波器的工作范围及探测像元的热响应时间, 将黑体温度设置为 500 K, 并将测试频率选择在 4~30 Hz 范围内。如图 6 所示, 将测试像元固定于金属管壳中。测试时, 将金属管壳与真空泵连接, 以实现管壳内的动态真空测试环境。金属管壳通过测试电路板与外部电路连接。将该测试电路板固定在精密三维调整架上, 且置于黑体辐射源前端 10 cm 处。通过调节三维调整架, 使像元输出信号值最大。此时可认为测试像元与黑体出射口的准直已完成。

测试像元的响应信号经测试板输出至低噪声前置放大器 SR560。该前置放大器除放大信

号外, 还具有滤波作用。实验时, 将该仪器设置为 AC 输入、0.03 Hz 高通滤波, 以消除幅值较大的直流杂波信号, 避免前置放大器的输出信号过载。所用锁相放大器为 SR830。测试中, 将斩波器的调制频率信号输入至锁相放大器, 并将其作为参考频率, 进一步保证在斩波频率处测试像元响应值的准确度。

本文在实验中测量了同一像元在 0.2~1.2  $\mu\text{A}$  恒流偏置下的热响应时间(结果见表 1 和图 7)。由测试结果可知, 在恒流偏置下, 偏置电流与微测辐射热计的自热效应正相关, 与有效热响应时间负相关。该结果与理论相符。在不同偏流下, 通过式(11)计算的物理热响应时间的一致性良好, 与多次测量均值的偏差在 2% 以内, 验证了本文测试方法的可行性、可靠性及准确性。测得的物理热响应时间约为 7.96 ms, 较设计值 7.4 ms 偏大。考虑到像元制备过程中绝缘桥腿的宽度及厚度与设计值相比存在波动, 测量结果与设计值之间 7% 的偏差在合理范围内。

#### 5 结束语

由于热响应时间的像元级测试能够为产品设计优化提供及时有效的数据支持, 本文利用频率响应法对同一像元在不同偏置电流下的热响应时间进行了测试, 并通过理论补偿微测辐射热计的自热效应, 得到了一致性良好的物理热响应时间, 验证了该方法的可行性和稳定性。因此, 本文方法可以精确测量微测辐射热

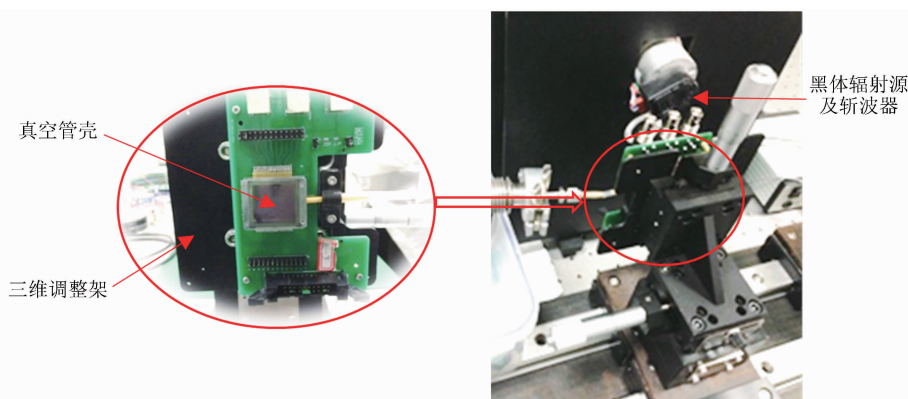


图 6 测试装置图

表 1 基于频率响应法的热响应时间测试结果

$i_b/\mu\text{A}$	$\tau_{eff}/\text{ms}$	$\tau/\text{ms}$
0.2	7.3	8.12
0.3	7.1	8.09
0.4	6.7	8.03
0.5	6.4	7.93
0.6	6.1	7.97
0.7	5.7	7.82
0.8	5.5	7.93
0.9	5.3	7.91
1	5.1	7.89
1.1	5.0	7.96
1.2	4.9	7.94

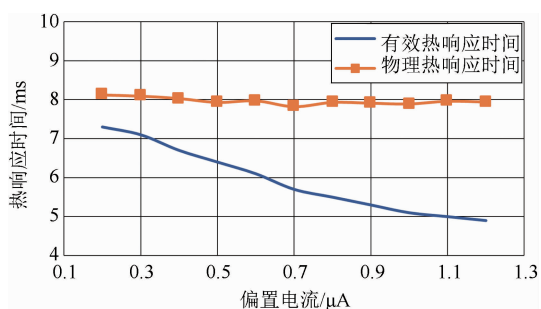


图 7 用频率响应法测得的热响应时间与偏流的变化关系

计的热响应时间,对微测辐射热计的设计评估具有重要意义。微测辐射热计像元级测试除热响应时间外还包括热容、热导等方面。如何更精确地测量这些参数并补偿测试过程中引入的误差,还需作进一步研究,以对微测辐射热计进行更全面、更精确的设计评估。

### 参考文献

[1] Blackwell R, Lacroix D, Bach T, et al.  $17\ \mu\text{m}$  Microbolometer FPA Technology at BAE Systems

[C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 72980P.

- [2] Karunasiri R P G, Xu G, Chen G X, et al. Extraction of Thermal Parameters of Microbolometer Infrared Detectors Using Electrical Measurement [C]. *SPIE*, 1998, **3436**: 668–674.
- [3] 刘西钉, 梁平治. 非制冷红外微测辐射热计的自热效应分析及重要参数测定 [J]. *红外与毫米波学报*, 1999, **18**(1): 37–40.
- [4] Syllaios A J, Ha M J, Mccardel W L, et al. Measurement of Thermal Time Constant of Microbolometer Arrays [C]. *SPIE*, 2005, **5783**: 625–630.
- [5] Fraenkel A S, Mizrahi U, Bykov L, et al. Advanced Features of SCD's Uncooled Detectors [J]. *Opto-electronics Review*, 2006, **14**(1): 47–54.
- [6] 刘子骥, 赵晟晨, 赵征庭, 等. 非制冷红外焦平面阵列器件的热响应时间常数测试方法 [J]. *红外与激光工程*, 2019, **48**(12): 120400.
- [7] 冯涛, 金伟其, 司俊杰. 非制冷红外焦平面探测器及其技术发展动态 [J]. *红外技术*, 2015, **37**(3): 177–184.
- [8] Niklaus F, Vieider C, Jakobsen H. MEMS-based Uncooled Infrared Bolometer Arrays: A Review [C]. *SPIE*, 2008, **6836**: 68360D.
- [9] Paul W K, David D S. Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1997.
- [10] Paul W K. Uncooled Thermal Imaging: Arrays Systems and Applications [M]. Bellingham: SPIE Press, 2001.
- [11] Stanford Research Systems. DSP Lock-In Amplifier Model SR830 [Z]. *User and service guide*, 1999.