

## 热像仪探测泄漏气体的信噪比建模与测试

罗秀丽<sup>1</sup>, 唐璟<sup>1</sup>, 王岭雪<sup>1</sup>, 蔡毅<sup>1</sup>, 薛唯<sup>1</sup>, 张小水<sup>2</sup>, 王书潜<sup>2</sup>

- (1. 北京理工大学 光电学院“光电成像技术与系统”教育部重点实验室,  
北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081;  
2. 河南汉威电子股份有限公司, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 建立了能够定量预测热像仪探测泄漏气体能力的信噪比(SNR)与气体浓度(C)模型 SNR-C, 利用该模型对制冷热像仪 GasFindIRTM 在 SNR=1 时对应的甲烷气体浓度进行预测, 预测数据与实际测试数据吻合。搭建了 SNR-C 室内测试装置, 测试了非制冷热像仪 Photon320 在以 298、303、308、313 和 318 K 面源黑体为背景时探测乙烯气体的 SNR-C 曲线。数据分析发现, Photon 320 在 SNR $\approx$ 5 时, 实测与预测乙烯浓度在各黑体背景温度下均比较接近。在 SNR=5 时, 模型预测的乙烯气体浓度分别为 3146、987、570、394 和 298 ppm, 该变化规律与实际测量结果一致。建立的 SNR-C 模型能预测热像仪探测气体的能力, 而搭建的测试装置能定量测量热像仪探测泄漏气体时信噪比与气体浓度之间的变化关系, 可用于热像仪探测泄漏气体的室内性能测试。

**关键词:** 泄漏气体红外成像; 热像仪; 气体探测; 信噪比

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201645.1204003

## Modeling and test of signal to noise ratio of leaking gas thermal imager

Luo Xiuli<sup>1</sup>, Tang Jing<sup>1</sup>, Wang Lingxue<sup>1</sup>, Cai Yi<sup>1</sup>, Xue Wei<sup>1</sup>, Zhang Xiaoshui<sup>2</sup>, Wang Shuqian<sup>2</sup>

- (1. Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, Key Laboratory of Photoelectric Imaging Technology and System, Ministry of Education of China, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Henan Hanwei Electronics Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** A SNR-C model to quantitatively predict the leak gas detection capability of thermal imager was proposed. Using this model, methane gas concentration of cooled thermal imager GasFindIRTM at SNR=1 was predicted, which was consistent with the measured results. The indoor testing setup was designed and built, SNR-C curves of uncooled thermal imager Photon320 to detect ethylene were tested at different temperatures of blackbody, namely 298, 303, 308, 313 and 318 K. Through analysis, measurement and prediction concentration at SNR $\approx$ 5 were relatively close in all of five blackbody temperatures, and respectively prediction concentration are 3146, 987, 570, 394 and 298 ppm. And this variation trend was consistent with the measured concentration. Therefore, the SNR-C model put forward

收稿日期: 2016-04-11; 修订日期: 2016-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(61471044)

作者简介: 罗秀丽(1989-), 女, 博士生, 主要从事红外成像、红外成像系统性能建模方面的研究。Email: xiuliluo\_tdcq@163.com

通讯作者: 王岭雪(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事红外成像、图像处理和红外光谱方面的研究。Email: neobull@bit.edu.cn

in this article was able to predict the gas detection capability of thermal imager. While the testing setup can quantitatively measure the relationship between SNR and gas concentration, which can be applied to test the indoor performance of gas leak detection of thermal imager.

**Key words:** gas leakage infrared imaging; thermal imager; gas detection; SNR

## 0 引言

被动式泄漏气体红外成像仪能够在开放环境中快速、大范围成像泄漏气体的空间分布和扩散趋势,具有监测距离远、直观定位泄漏点的优势,近 10 年在气体检测领域得到了迅速发展。目前实现市场销售的泄漏气体红外成像仪主要采用制冷红外焦平面探测器<sup>[1-3]</sup>。具有代表性的是美国 FLIR 公司的 GasFinder 系列泄漏气体红外成像仪,采用制冷碲化铋(InSb)和量子阱(QWIP)红外焦平面探测器以及与气体吸收峰相匹配的窄带滤光片提高对泄漏气体的探测能力<sup>[4-5]</sup>。瑞典 IRnova 公司生产销售针对六氟化硫、烷类气体的制冷量子阱、二类超晶格红外焦平面探测器组件<sup>[6]</sup>。国内浙江大立、武汉高德、华中数控等红外技术公司采用这些探测器组件研制了泄漏气体红外成像仪,已实现一定规模的销售。制冷型泄漏气体红外成像仪的优点是能够对泄漏气体进行高灵敏度探测,价格高昂是限制其大规模推广的主要因素。

目前非制冷红外焦平面探测器的灵敏度得到显著提高,在光学系统  $F\#$  为 1 时,非制冷热像仪的 NETD 已小于 25 mK<sup>[7]</sup>,这使得非制冷红外热像仪也具备成像探测泄漏气体的能力,而且还具有功耗低、尺寸小、重量轻、寿命长和成本低等优势。法国 Bertin 技术公司的 Second Sight<sup>[8]</sup>和上海巨哥红外公司的 GAS60 泄漏气体红外成像仪采用非晶硅材料体系的测辐射热计非制冷焦平面探测器组件;北京理工大学金伟其等<sup>[9]</sup>、北京广微积电公司<sup>[10]</sup>采用氧化钒材料体系的测辐射热计非制冷焦平面探测器组件加装窄带滤光片的方法实现泄漏气体的红外成像,北京理工大学王岭雪等提出采用多片宽带长通滤光片的光谱差分来提高非制冷红外成像系统对气体的探测能力<sup>[11]</sup>。

随着众多泄漏气体红外成像仪的涌现,定量评价其对泄漏气体的探测能力变得至关重要。迄今为止,研究者们提出的能够直接反映探测泄漏气体能

力的指标有最小可探测气体泄漏率<sup>[4,12]</sup>、最小可探测气体浓度<sup>[13]</sup>和最小可识别气体浓度<sup>[14]</sup>。按照性能指标获取方式的不同可将评价方法分为三类:第一类是通过人眼主观判断、将测试人员刚好能“看到”气体目标时的气体泄漏速率确定为最小可探测泄漏速率。这类方法考虑了气体的动态运动特性,但结果受测试人员的主观影响较大,是一种较粗略的评价方式;第二类方法通过对气体扩散进行建模,再借助热成像系统的评价参数得到系统的最小可探测泄漏速率。这种方法的准确性很大程度取决于气体扩散模型的准确性。2011 年,王岭雪等人结合 Gaussian 气体扩散模型和红外成像系统的 NETD 定量推导了系统的最小可探测泄漏量<sup>[12]</sup>;第三类方法借助测试装置定量测量红外成像系统探测泄漏气体的极限能力,如最小可探测气体浓度和最小可识别气体浓度。2006 年,FLIR 公司采用气池装置定量测量了制冷红外成像系统的最小可探测气体浓度,并给出理想情况下光子探测器的最小可探测气体浓度的理论模型<sup>[13]</sup>;2014 年,北京理工大学的金伟其等人采用气池装置测量了最小可分辨气体浓度<sup>[14]</sup>。这类方法由于可以对气体浓度进行精确控制,因此,测量结果的准确性和重复性较高。

文中主要研究红外热像仪对泄漏气体的探测能力,首先从理论上建立红外成像仪探测泄漏气体时的信噪比(SNR)与气体浓度(C)模型(SNR-C),并采用美国 FLIR 公司的制冷热像仪 GasFindIRTM 对 SNR-C 模型进行验证。其次搭建了室内测试系统,并测试得到非制冷热像仪 Photon 320 的 SNR-C 数据。最后通过分析测试数据和模型预测数据,得到 SNR-C 模型用于预测和评价非制冷热像仪 Photon 320 气体探测能力时的 SNR 取值。

## 1 泄漏气体红外成像仪 SNR-C 理论建模

### 1.1 泄漏气体红外成像的辐射传输模型

除了单原子气体(如氩 Ar)和同核双原子分子(如

氧气 O<sub>2</sub>)不直接吸收红外辐射外,其它的异核双原子和多原子分子气体都能够发射和吸收 3~14 μm 的红外辐射。3 层辐射传输模型<sup>[15-16]</sup>定量研究了泄漏气体、环境背景、大气、光学镜头、红外焦平面探测器等因素对泄漏气体红外成像的影响。以泄漏气体云团的前后边界为分界线,将整个辐射传输过程划分为 3 层,如图 1 所示,背景至气体云团前边界为第 1 层,气体云团为第 2 层,气体云团后边界至热像仪光学镜头为 3 层。在热像仪中形成温度差异的辐射来自两条路径:第一条路径未经过泄漏气体云团,背景辐射直接到达热像仪,简称背景路径 (Off plume path); 第二条路径的背景辐射会被泄漏气体云团吸收,简称气体路径 (On plume path)。

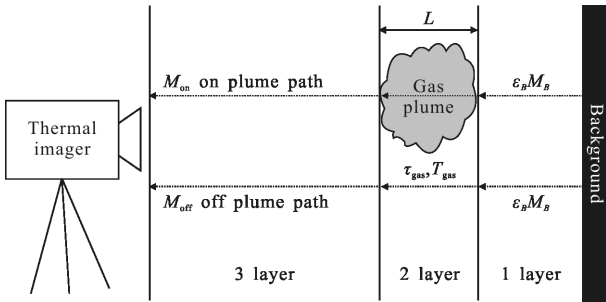


图 1 3 层辐射传输模型示意图

Fig.1 Three-layer radiative transfer model

建立背景路径和气体路径的辐射模型时做以下假设:(1) 忽略颗粒物质对红外辐射的吸收和散射;(2) 假设背景为高发射率灰体,忽略背景对大气环境中红外辐射的反射。(3) 假设每层气体的温度和成分是均匀的;(4) 假设探测距离比较近,忽略大气传输对辐射的影响。

背景路径到达光学镜头处的红外辐射可表示为:

$$M_{\text{off}}(\lambda) = \varepsilon_B M_B(\lambda, T_B) \quad (1)$$

式中:λ 为波长;M<sub>B</sub>(λ, T<sub>B</sub>)表示温度为 T<sub>B</sub> 的黑体辐射出射度;ε<sub>B</sub> 为背景的辐射发射率。

气体路径上的红外辐射表示为:

$$M_{\text{on}}(\lambda) = \tau_{\text{gas}} \varepsilon_B M_B(\lambda, T_B) + (1 - \tau_{\text{gas}}) M_{\text{gas}}(\lambda, T_g) \quad (2)$$

式中:M<sub>gas</sub>(λ, T<sub>g</sub>)为等效黑体温度为 T<sub>g</sub> 的气体黑体辐射出射度;τ<sub>gas</sub> 为泄漏气体云团的透过率。公式(2)中第一项表示经过泄漏气体云团吸收后剩余的背景红外辐射,第二项表示泄漏气体云团自身向外发射的

红外辐射。

根据比尔-朗伯特吸收定律,泄漏气体云团的透过率 τ<sub>gas</sub> 可表示为:

$$\tau_{\text{gas}} = e^{-\alpha(\lambda) \cdot c \cdot L} \quad (3)$$

式中:α(λ)为泄漏气体的红外吸收系数;c 为泄漏气体云团的平均浓度;L 为泄漏气体云团的吸收路径长度。

因此,由于泄漏气体云团存在导致红外热像仪接收到的气体路径辐射 M<sub>on</sub> 与背景路径辐射 M<sub>off</sub> 之间的差异为:

$$\Delta M = |M_{\text{on}}(\lambda) - M_{\text{off}}(\lambda)| = |(1 - e^{-\alpha(\lambda) \cdot c \cdot L}) [M_{\text{gas}}(\lambda, T_{\text{gas}}) - \varepsilon_B M_B(\lambda, T_B)]| \quad (4)$$

### 1.2 泄漏气体红外成像仪 SNR-C 建模与仿真

气体路径与背景路径红外辐射的差异 M 经过光学镜头会聚在红外焦平面探测器上,再经过光电转换为电压或电流值,形成泄漏气体红外成像仪的气体信号。泄漏气体红外成像仪探测泄漏气体的能力取决于气体信号与探测器噪声水平之间的关系,而气体信号又与泄漏气体的浓度密切相关。为此,该小节建立泄漏气体红外成像仪输出信噪比与气体浓度之间的数学模型。

#### 1.2.1 SNR-C 理论建模

红外成像系统响应电压值 ΔV<sub>s</sub> 与接收到的目标与背景光谱辐亮度差 ΔL<sub>eλ</sub> 的关系满足<sup>[17]</sup>:

$$\Delta V_s = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{V\lambda} \pi \Delta L_{e\lambda} A_d \tau_{s\lambda} / [4F_{\#}^2 (1+M)^2] d\lambda \quad (5)$$

式中:G 为系统增益;R<sub>Vλ</sub> 为焦平面探测器的光谱响应率;A<sub>d</sub> 为焦平面探测器光敏元面积;τ<sub>sλ</sub> 为光学系统的光谱透过率;F<sub>#</sub> 为光学系统 F 数;M 为光学系统放大率;λ<sub>1</sub>~λ<sub>2</sub> 为焦平面探测器的光谱响应范围。

假设背景与泄漏气体目标均为朗伯辐射体,将公式(4)代入公式(5),则 M 经过光电转换形成的泄漏气体信号电压 ΔV<sub>s-gas</sub> 为:

$$\Delta V_{s-\text{gas}} = G \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_{V\lambda} \Delta M A_d \tau_{s\lambda} / [4F_{\#}^2 (1+M)^2] d\lambda \quad (6)$$

红外焦平面探测器的噪声主要包括 1/f 噪声、约翰逊噪声、温度噪声和读出电路噪声<sup>[17]</sup>。但在热像仪的实际应用中,这些噪声的具体数值难以准确给出。而能够获得的是热像仪的基本性能参数,如噪声等效温差 (NETD)、D\* 等。

对于红外成像系统,NETD 和噪声等效功率

(NEP)的关系可表示为<sup>[18]</sup>:

$$NEP=NETD \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{A_d \tau_{sa} \epsilon_B}{4F_{\#}^2} \frac{\partial M_B(\lambda, T_B)}{\partial T} d\lambda \quad (7)$$

且 NEP 与噪声电压  $V_n$  的关系为<sup>[19]</sup>:

$$NEP=V_n/R_V \quad (8)$$

因此, 红外热像仪噪声电压  $V_n$  可表示为:

$$V_n=R_V \cdot NETD \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{A_d \tau_{sa} \epsilon_B}{4F_{\#}^2} \frac{\partial M_B(\lambda, T_B)}{\partial T} d\lambda \quad (9)$$

做如下假设:(1) 光学系统的光谱透过率  $\tau_{sa}$  取  $\lambda_1 \sim \lambda_2$  区域内的平均透过率  $\tau_s$ ; (2) 面源黑体的有效光谱发射率  $\epsilon_B$  为常数; (3) 红外焦平面探测器的响应率  $R_{V\lambda}$  为常数  $R_V$ 。则红外热像仪探测泄漏气体时的信噪比为:

$$SNR = \frac{\Delta V_{s-gas}}{V_n} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - e^{-\alpha(\lambda) \cdot c \cdot L}) [M_{gas}(\lambda, T_g) - \epsilon_B M_B(\lambda, T_B)] d\lambda}{(1+M)^2 NETD \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\epsilon_B \partial M_B(\lambda, T_B)}{\partial T} d\lambda} \quad (10)$$

由公式(10)可知: 红外热像仪探测泄漏气体时输出信噪比与背景温度、泄漏气体温度、气体种类、气体浓度、红外焦平面探测灵敏度参数 NETD 及红外焦平面探测器光谱响应波段有关。

### 1.2.2 SNR-C 模型数值仿真

美国 FLIR 公司生产的制冷型 InSb 热像仪 GasFindIRTM 性能参数如表 1 所示。图 2 为甲烷气体(CH<sub>4</sub>)在 3~5 μm 波段的光谱透过率曲线。利用

表 1 制冷热像仪性能参数

Tab.1 Performance parameters of cooled thermal imager

Parameters	Values
Spectral response/μm	3-5
Pitch size/μm	30×30
NETD	<35 mK@303 K
Pixels number	320×240

SNR-C 理论模型可仿真得到 GasFindIRTM 热像仪探测甲烷气体时系统输出 SNR 与气体浓度以及背景温度  $T_B$  之间的关系, 如图 3 所示, 其中甲烷气体温度为  $T_g=300$  K。从图 3 中可以得出如下结论: 背景温度一定时, SNR 随气体浓度的增大而增大; 气体浓

度一定时, 气体温度与背景温度之间的差距越大, SNR 越大; 当气体温度和背景温度相等以及气体浓度很低时, SNR 出现极小值, 此时泄漏气体不能被成像探测。

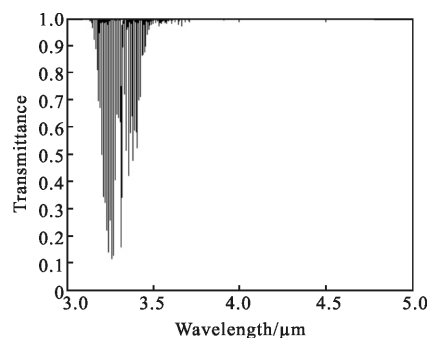


图 2 CH<sub>4</sub> 光谱透过率曲线

Fig.2 Spectral transmittance of methane

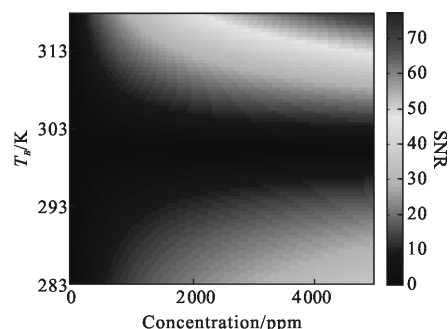


图 3 GasFindIRTM 探测 CH<sub>4</sub> 时信噪比的数值仿真结果( $T_g=300$  K)

Fig.3 Numerical simulation SNR of GasFindIRTM( $T_g=300$  K)

2006 年, 美国 FLIR 公司 Benson 等人对制冷热像仪 GasFindIRTM 探测甲烷气体的能力进行了测试<sup>[4,13]</sup>, 得到 SNR=1 时对应甲烷气体最小可探测浓度为 275 ppm(1 ppm=10<sup>-6</sup>)。而根据文中建立的 SNR-C 理论模型可仿真得到 GasFindIRTM 制冷热像仪在 SNR=1 时对应的甲烷气体浓度为 220 ppm。该预测值非常接近 Benson 等人的实测结果 275 ppm。因此, 可以说文中提出的 SNR-C 模型可用于制冷热像仪对气体探测能力的预测。

由于工作机理的不同, 非制冷热像仪和制冷热像仪在响应率、时间常数、频率带宽、噪声水平等方面均有不同, 因此, 它们对泄漏气体的探测能力也会有所不同。然而, 目前尚没有公开发表的文献研究非制冷热像仪对泄漏气体的探测能力, 因此, 第 2 节搭建了定量测试系统并测试了非制冷热像仪 Photon

320 探测气体时的 SNR-C 关系；第 3 节讨论了 SNR-C 模型对非制冷热像仪的适用性。

## 2 热像仪探测气体时 SNR-C 定量测试

### 2.1 测试系统

红外热像仪输出信噪比与气体浓度测试装置如图 4 所示。测试系统主要由面源黑体、红外气池、配气装置、待测试红外热像仪以及数据采集系统组成。其中面源黑体提供背景红外辐射,型号为法国 HGH 公司的 DCN 1000 H4;待测试红外冷热像仪与面源黑体分别置于红外气池两侧;红外气池材料为不锈钢,长度为 1 m,前后光窗窗片采用透红外辐射的氟化钡材料,进气口用于向气池中充入特定浓度的待测气体(本实验采用乙烯作为待测气体)。配气装置由待测气体、氮气(不吸收红外辐射,作为载气)、减压阀、调压器、高精度质量流量控制计组成。

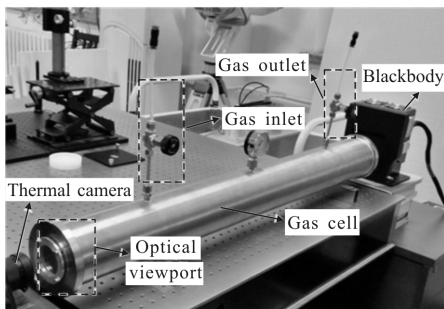


图 4 测试热像仪气体探测性能的实验装置

Fig.4 Experimental setup to test gas detection performance of thermal imager

### 2.2 热像仪输出 SNR 测试流程

设定面源黑体的工作温度为  $T_B$ , 此时数据采集系统采集到热像仪输出的 14 位原始数字图像如图 5 所示,其中虚线圆圈所包围区域为黑体区域。

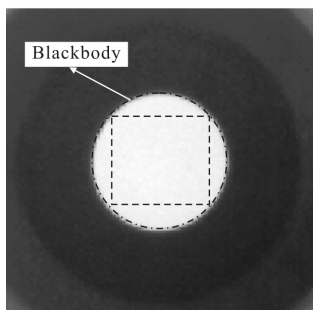


图 5 热像仪采集获得的数字图像

Fig.5 Digital image acquired by thermal camera

充入待测气体前后图像中黑体区域的灰度值会发生变化,因此选取图 5 中黑体区域的内切矩形(黑色虚线框)的灰度值作为考察对象。信噪比与气体浓度关系测量方法和流程如下:

(1) 背景信号:首先用氮气对气池进行吹扫,避免空气中水汽及二氧化碳对辐射产生干扰。待矩形区域的灰度值均值趋于稳定,如图 6 中 I 区所示。取 200 帧图像计算矩形区域灰度值的时间均值作为背景信号。

(2) 噪声值:噪声值定义为氮气吹扫气池时黑体区域灰度值的时空波动。同样选取 I 区 200 帧图像计算矩形区域的时空波动作为噪声。

(3) 透射信号:将已知浓度(ppm)的待测气体持续充入红外气池中,气体会吸收红外辐射使得黑体区域输出灰度值下降,如图 6 中 II 区所示。待气池中气体充分混合均匀后(以浓度为 3 800 ppm 的乙烯气体为例),矩形区域的灰度值趋于稳定,如图 6 中 III 区所示,取 III 区 200 帧图像计算矩形区域灰度值的时间均值作为透射信号。

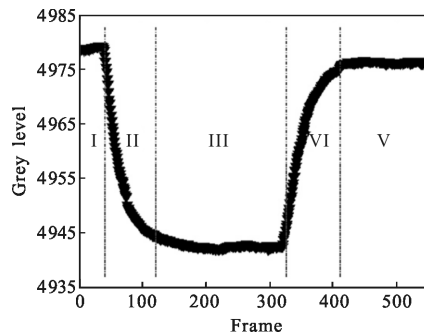


图 6 SNR 测试数据采集过程

Fig.6 Process of data acquisition to test SNR

(4) 气体信号值:背景信号与透射信号的绝对差值。

(5) 信噪比:气体信号值与噪声值的比值。

改变充入气池中待测气体的浓度,即可得到不同气体浓度下热像仪的输出信噪比;改变黑体温度  $T_B$ ,则可得到不同背景温度下热像仪的输出信噪比。图 6 中,IV 区、V 区为再次用氮气对气池进行吹扫时,红外热像仪输出灰度值的变化,V 区表示气池已被氮气吹扫干净。

### 2.3 非制冷热像仪 SNR-C 关系测试

选用 FLIR 氧化钒材料体系的非制冷热像仪

Photon 320 为研究对象。其性能参数如表 2 所示。选择乙烯(在 7.5~13.5  $\mu\text{m}$  波段有强烈吸收)为待测气体,通过室内测试系统可测试得到 Photon 320 非制冷热像仪在不同黑体温度、不同乙烯气体浓度下的输出信噪比。其中气体温度为 294 K。面源黑体温度  $T_B$  分别设置为 298、303、308、313、318 K。根据测试数据可拟合得到不同黑体温度下的 SNR-C 曲线,如图 7 所示。当气体浓度一定时,黑体温度越高,非制冷热像仪输出 SNR 越大;黑体温度一定时,非制冷热像仪输出 SNR 随乙烯气体浓度的增加而增大,且随着气体浓度的增加,SNR 增大的速度逐渐变缓,这也反映了气体对背景信号的衰减服从指数规律。

表 2 Photon 320 非制冷热像仪性能参数

Tab.2 Performance parameters of Photon 320

Parameters	Values
Spectral response/ $\mu\text{m}$	7.5-13.5
Pitch size/ $\mu\text{m}$	38 $\times$ 38
NETD	<85 mK@f/1.6
Pixels number	320 $\times$ 240

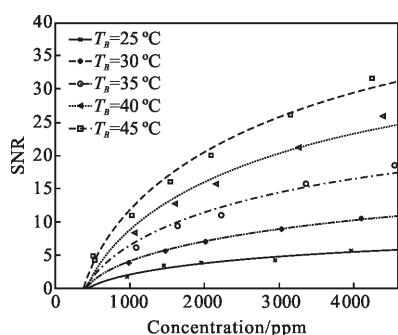


图 7 不同黑体温度下根据测试数据拟合得到的热像仪 SNR-C 曲线

Fig.7 Fitted curves of SNR vs. ethylene concentration at different  $T_B$

### 3 非制冷热像仪 SNR-C 测试数据与模型预测数据比较与分析

根据 Photon 320 非制冷热像仪性能参数、大气光谱数据库网站获得的乙烯气体红外吸收系数以及测试条件下的气体温度和和黑体温度,仿真得到非制冷热像仪 Photon 320 在不同黑体温度下的 SNR-C 曲线如图 8 虚线所示。

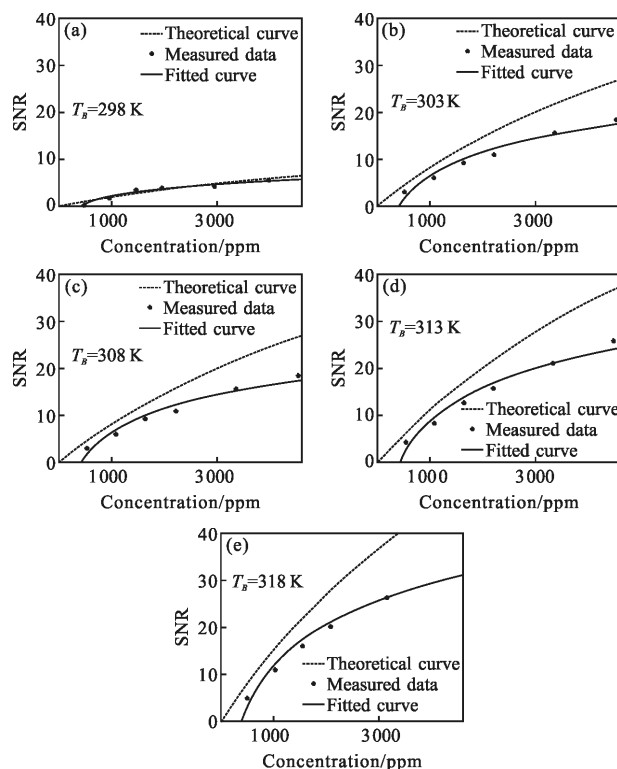


图 8 非制冷热像仪 SNR-C 理论计算及实验拟合曲线

Fig.8 Measured and modeled SNR-C curves of uncooled thermal camera

图 8 中星点为实验测试数据,实线为根据实验测试数据拟合得到的 SNR-C 曲线,从图 8 中可以看出,Photon 320 非制冷热像仪气体探测的模型预测和实验测试 SNR-C 曲线趋势相同。进一步分析数据发现:(1) SNR=1 时理论模型预测的气体浓度与测试数据有较大差异;(2) 随着 SNR 的逐渐增加,理论预测浓度与实际测试浓度之间的差距逐渐变小,经过一个最小值后再逐渐变大,图 9 所示为不同背景温度下理论预测浓度和实际测量浓度差异随 SNR 的变化。

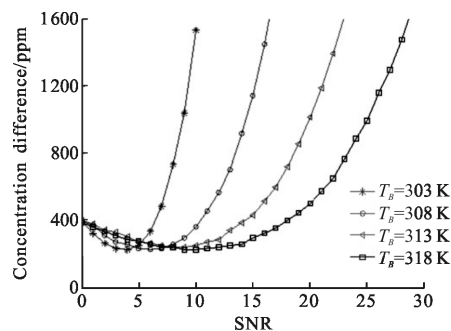


图 9 理论预测浓度和实际测量浓度差异随 SNR 的变化

Fig.9 Concentration difference between theoretical and measurement vs SNR

分析图 9 数据可知,当  $SNR \approx 5$  时,不同黑体温度(303、308、313、318 K)下的理论预测浓度与实验测试浓度的差距均较小。分析其原因为,文中建立的  $SNR-C$  理论模型时所使用的 NETD 是时间 NETD,即没有考虑空间 NETD 的影响,因此,该模型预测的噪声要比实际情况小,进而使得其预测的  $SNR$  要大于实际测量的  $SNR$ 。这也是图 8 中理论  $SNR-C$  曲线(虚线)在实测  $SNR-C$  曲线(实线)上方的原因。由于非制冷热像仪的空间噪声大于制冷热像仪的<sup>[20]</sup>,所以  $SNR-C$  理论模型对非制冷热像仪引入的误差较大。对于非制冷热像仪, $SNR=1$  时对应的气体浓度不再能反映热像仪探测气体的能力。因此,提出预测模型  $SNR \approx 5$  时对应的气体浓度来评价 Photon320 对乙烯气体的探测能力。在  $SNR=5$  时,5 组黑体温度 ( $T_b$  取值分别为 298、303、308、313 和 318 K) 下对应的乙烯气体浓度的实测和预测结果分别为 3 288 和 3 146、1 252 和 987、814 和 570、676 和 394、582 和 298 ppm。可以看出:实际测试结果接近理论预测结果。

另外,从图 8 中可以看出,随着  $T_b$  的增加,气体探测理论计算结果与实验拟合曲线的差异逐渐变大,这是由于空间噪声随着  $T_b$  的增大逐渐起到主要作用,而文中建立的  $SNR-C$  理论模型却未考虑空间噪声的影响。

根据以上测试和分析得出如下结论:

(1) 利用热像仪的灵敏度参数 NETD 值即可以方便建立评价热像仪探测气体能力的信噪比-浓度 ( $SNR-C$ ) 模型,而不必建立多参数的复杂预测模型;

(2) 对于制冷热像仪,以  $SNR=1$  时对应的气体浓度作为最小可探测浓度;

(3) 对于 Photon 320 非制冷热像仪,为了提高预测的准确性,取  $SNR=5$  时对应的气体浓度来评价 Photon 320 对乙烯气体的探测能力。评价其他型号非制冷热像仪气体探测能力时  $SNR$  的取值需要具体测试后确定。

## 4 结 论

文中建立了用于评估泄漏气体红外成像仪对气体探测能力的信噪比-气体浓度 ( $SNR-C$ ) 理论模型,并通过室内实验测试对该模型进行了验证。结果表明: $SNR-C$  模型能够理论预测红外热像仪的气体探

测能力:对于制冷热像仪,取  $SNR=1$  时对应的气体浓度作为最小可探测浓度;对于非制冷热像仪 Photon 320,取  $SNR=5$  时对应的气体浓度来评价其气体探测能力。文中建立的  $SNR-C$  理论模型由于没有考虑热像仪的空间噪声,因此,在预测系统探测能力时具有一定的局限性。下一步工作会对理论模型进行修正,得到普适性更高的模型来预测热像仪的气体探测能力。

## 参 考 文 献:

- [1] Sandsten J, Edner H, Svanberg S. Gas visualization of industrial hydrocarbon emissions [J]. *Optics Express*, 2004, 12(7): 1443-1451.
- [2] Kasai N, Tsuchiya C, Fukuda T, et al. Propane gas leak detection by infrared absorption using carbon infrared emitter and infrared camera [J]. *NDT & E International*, 2011, 44 (1): 57-60.
- [3] Lagueux P, Vallières A, Villemaire A, et al. Chemical agent standoff detection and identification with a hyperspectral imaging infrared sensor[C]//SPIE Europe Security+ Defence. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7486: 74860C.
- [4] Benson R, Madding R, Lucier R, et al. Standoff passive optical leak detection of volatile organic compounds using a cooled InSb based infrared imager [C]//AWMA 99th Annual Meeting, 2006: 131.
- [5] Gross W, Hierl T, Scheuerpflug H, et al. Localization of methane distributions by spectrally tuned infrared imaging [C]//Photonics East (ISAM, VVDC, IEMB). International Society for Optics and Photonics, 1999: 234-240.
- [6] Malm H, Gamfeldt A, von Würtemberg R M, et al. High image quality type-II superlattice detector for 3.3  $\mu\text{m}$  detection of volatile organic compounds[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 70: 34-39.
- [7] Niklaus F, Vieider C, Jakobsen H. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review[C]//Photonics Asia 2007. International Society for Optics and Photonics, 2007, 6836: 68360D.
- [8] Naranjo E, Baliga S, Bernascolle P. IR gas imaging in an industrial setting [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2010, 7661: 76610K.
- [9] Li Jiakun, Dun Xiong, Jing Minglei. et al. Design of wide-band gas leak infrared imaging detection system[J]. *Infrared*

- and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1966–1971. (in Chinese)  
李家琨, 顿雄, 金明磊, 等. 宽波段气体泄漏红外成像检测系统设计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1966–1971.
- [10] Fang Hui, Lei Shuyu. A passive gas imaging system: China, 201110247808.6[P]. 2011–8–24. (in Chinese)  
方辉, 雷述宇. 一种被动式气体成像系统: 中国, CN 201110247808.6[P]. 2011–8–24.
- [11] Wang Lingxue, Xue Wei, Cai Yi, et al. A method of differential gas leak infrared imaging filtered by archimedes spiral filter: China, 201310309389.3 [P]. 2013–10–16. (in Chinese)  
王岭雪, 薛唯, 蔡毅, 等. 阿基米德螺旋线推扫滤光差分气体泄漏红外成像方法: 中国, 201310309389.3 [P]. 2013–10–16.
- [12] Long Y, Wang L, Li J, et al. Detectivity of gas leakage based on electromagnetic radiation transfer[C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8013: 80130D.
- [13] Benson R, Panek J A, Drayton P. Direct measurement of minimum detectable vapor concentrations using infrared optical imaging systems [C]//Proceeding of Air and Waste Management Association (AWMA) 99th Annual Conference and Exhibition, 2006.
- [14] Li J, Jin W, Wang X, et al. MRGC performance evaluation model of gas leak infrared imaging detection system [J]. *Optics Express*, 2014, 22(107): A1701–A1712.
- [15] Rodríguez-Conejo M A, Meléndez J. Hyperspectral quantitative imaging of gas sources in the mid-infrared [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(2): 141–149.
- [16] Golowich S E, Manolakis D G. Performance limits of LWIR gaseous plume quantification [C]//SPIE Defense, Security, and Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2011, 8048: 80481F.
- [17] Holst G C. Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems[M]. US: SPIE, 2008: 63–68.
- [18] Vollmer M, Möllmann K P. Infrared Thermal Imaging: Fundamentals, Research and Applications [M]. NY: John Wiley & Sons, 2010.
- [19] Bai Tingzhu, Jin Weiqi. The Principle and Technology of photoelectric Imaging [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. 2006. (in Chinese)  
白廷柱, 金伟其. 光电成像原理与技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006.
- [20] Zhang Cheng, Li Chunming. Research on NETD test of infrared imaging systems [J]. *Journal of Dali University*, 2009, 8(4): 37–39. (in Chinese)  
张成, 李春明. 红外热成像系统噪声等效温差测试研究 [J]. 大理学院学报, 2009, 8(4): 37–39.