

文章编号: 1672-8785(2023)12-0024-08

测试环境对亚毫开红外探测器 测试结果的影响研究

王京飞 陈彦冠

(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘 要: 红外探测器是红外系统的核心器件。近年来, 高灵敏度、低噪声成为红外探测器技术的研究热点之一。对于噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)值小于 1 mK 的低噪声红外探测器, 环境因素对其性能的影响不可忽视。从黑体控温精度、测试环境温度、测试环境中的气流扰动等方面, 分析了测试环境对亚毫开红外探测器测试结果的影响, 并对低噪声红外探测器的测试方法进行了探究。实验结果表明, 黑体控温精度对高灵敏度红外探测器的 NETD 值有直接影响, 测试环境温度与气流扰动会影响黑体控温稳定性, 从而间接影响 NETD 测量的准确度。

关键词: 红外探测器; 噪声等效温差; 测试环境; 噪声

中图分类号: TN918 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.12.004

Study on the Influence of Test Environment on the Test Results of Sub-mK Infrared Detectors

WANG Jing-fei, CHEN Yan-guan

(The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, China)

Abstract: Infrared detectors are the core components of infrared systems. In recent years, high sensitivity and low noise have become one of the research hotspots in infrared detector technology. For low-noise detectors with noise equivalent temperature difference (NETD) value less than 1 mK, the impact of environmental factors on their performance can not be ignored. The influence of test environment on the test results of sub-mK infrared detectors was analyzed from the aspects of blackbody temperature control accuracy, test environment temperature and airflow disturbance in the test environment. The test methods of low-noise infrared detectors were explored. The experimental results show that the accuracy of blackbody temperature control has a direct impact on the NETD value of high-sensitivity infrared detectors. The test environment temperature and airflow disturbance can affect the stability of blackbody temperature control, thereby indirectly affecting the accuracy of NETD value measurement.

Key words: infrared detector; noise equivalent temperature difference; test environment; noise

收稿日期: 2023-07-20

作者简介: 王京飞(1996-), 男, 山西运城人, 硕士, 主要从事红外探测器测试工作。

E-mail: 15910593906@163.com

0 引言

红外探测器是红外成像系统的核心组件, 红外探测器技术的突破将带来红外成像技术的革新。红外探测器的发展共经历了 3 个阶段^[1]。第三代红外成像技术约从 20 世纪 90 年代中期开始, 此阶段红外探测器的像元数目大幅增加, 成像焦平面阵列可以覆盖整个视场, 成像灵敏度大大提高^[2]。制冷型红外探测器自研发至今, 一直朝着以下三个方向发展: (1) 大面阵规模。制冷型红外探测器面阵规模从 320×256 逐步提高到 1280×1024 百万像素级别, 再到如今的 $8k \times 8k$ 。随着面阵规模的扩大, 成像分辨率和成像质量不断提高。在航天领域普遍选择大面阵红外探测器用于军事侦查、气象观测等, 主要原因就是大面阵探测器成像分辨率高, 可以获得更多细节信息。(2) 高帧频。高帧频的红外探测器通常用于观察高速运动的物体, 但红外探测器的帧频主要受限于积分时间。比如短波和中波红外探测器的积分时间为毫秒级, 另外还需留有读出时间, 导致其帧频不会太高。进一步提高帧频的方法之一就是研发长波或甚长波红外探测器。它们的积分时间为微秒级, 理论上其帧频相较于短波、中波红外探测器可以提高一个数量级。(3) 高灵敏度。高灵敏度红外探测器具有更高的温度分辨率, 可以分辨出更加细微的温度变化。该探测器甚至能对人体血管分布进行成像^[3]。

灵敏度指标主要通过像元 NETD 进行评估^[4]。噪声电压与目标温差产生的信号电压相等时, 该温差称为 NETD, 即像元目标温差与

像元信噪比的比值^[5-6]。对于强辐射背景下的弱目标探测, 需要红外探测器具有很高的灵敏度, 甚至要求探测器的 NETD 值能够达到亚毫开数量级^[7-8]。在测试高灵敏度红外探测器时, 外界干扰因素要降到最低, 以尽可能准确地评测探测器的 NETD 值。本文从黑体控温精度、测试环境温度、测试环境中的气流扰动等方面, 分析测试环境对亚毫开红外探测器测试结果的影响, 并对低噪声红外探测器的测试方法进行探究。

1 测试方法与测试系统

红外探测器的典型测试系统包括黑体源、被测探测器、测试电路以及计算机, 如图 1 所示。其中, 黑体源用于提供辐射信号, 测试电路负责给探测器提供偏压并采集探测器输出数据, 再将其发给上位机, 用以成像和计算性能。测试步骤如下: (1) 按照图 1 连接测试系统, 进行系统预置; (2) 调节测试系统, 给被测探测器加上规定电压和脉冲, 使器件处于正常工作状态; (3) 利用图 1 所示的测试系统, 分别在黑体温度 T_1 和 T_2 下连续采集 F 帧 ($F \geq 25$) 数据; (4) 在测得 2 组 F 帧数组后, NETD、暗电流等参数按以下定义计算。

下面介绍数据处理时需要用到的计算公式。由普朗克公式所定义的面源黑体光谱辐出度为

$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (1)$$

式中, h 表示普朗克常数, 取 $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; c 表示光速, 取 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$; k 表示玻尔兹曼常数, 取 $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$; T 表示面源黑体温度。

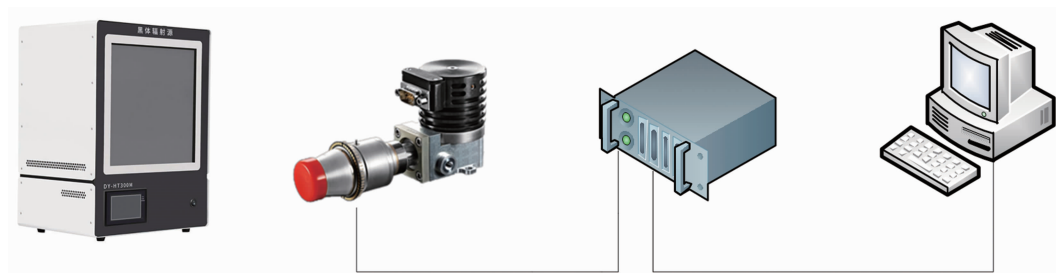


图 1 测试系统框图

像元(温度 T_1)输出数字值为

$$\overline{D_s}[i, j, T_1] = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F D_s[i, j, T_1, f] \quad (2)$$

式中, $\overline{D_s}[i, j, T_1]$ 表示在黑体温度 T_1 条件下第 i 行第 j 列像元的输出数字值(F 次的测量值, 无量纲); $D_s[i, j, T_1, f]$ 表示在黑体温度 T_1 条件下第 i 行第 j 列像元的输出数字值(第 f 次的测量值, 无量纲); F 表示采样总帧数, 不小于 25。

像元(温度 T_2)输出数字值为

$$\overline{D_s}[i, j, T_2] = \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F D_s[i, j, T_2, f] \quad (3)$$

式中, $\overline{D_s}[i, j, T_2]$ 表示在黑体温度 T_2 条件下第 i 行第 j 列像元的输出数字值(F 次的测量值, 无量纲); $D_s[i, j, T_2, f]$ 表示在黑体温度 T_2 条件下第 i 行第 j 列像元的输出数字值(第 f 次的测量值, 无量纲); F 表示采样总帧数, 不小于 25。

像元响应数字值为

$$D_N(i, j) = \overline{D_s}[i, j, T_2] - \overline{D_s}[i, j, T_1] \quad (4)$$

$D_N(i, j)$ 表示像元在 T_1 (低温辐射) 下的噪声码值, 具体计算步骤和公式如下:

$$D_N(i, j) = \sqrt{\frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \{ \overline{D_s}[(i, j), T_1] - D_s[(i, j), T_1, f] \}^2} \quad (5)$$

$$\overline{D_N} = \frac{1}{N - N_{\text{invalid}}} \sum_{i=1}^{N - N_{\text{invalid}}} D_N(i, j) \quad (6)$$

式中, N 表示总的像元数; N_{invalid} 表示无效像元数。

焦平面阵列(Focus Plane Array, FPA)器件的 NETD 计算公式为

$$\text{NETD}(i, j) = \frac{T_2 - T_1}{D_s(i, j) / \overline{D_N}(i, j)} \quad (7)$$

式中, T_2 和 T_1 表示面源黑体测试时黑体辐射的目标温度。

由式(1)~式(7)可知, 对 NETD 产生影

响的主要因素如下: 两次温度条件下 FPA 器件感光面像元输出的电平码值测量、黑体辐射目标温度测量、FPA 器件在 NETD 测试时所用的帧频、像元输出的噪声测量和测试环境的杂散光等。

NETD 表征的是探测器的信噪比指标, 其核心是信号和噪声, 故两者的准确度是研究重点。其中, 噪声里面涵盖了系统本底噪声、读出电路噪声、光子噪声和暗电流噪声^[9]。光子噪声是通过目标辐射后, 经光电转换进入到焦平面的每个像元上, 再通过多帧求均方差得到的。测试环境的变化会直接导致在测量光子噪声时产生扰动, 造成最终 NETD 的测量不确定度。

2 实验与分析

2.1 黑体控温精度与控温稳定性

面源黑体有两项指标对红外探测器性能测试结果有十分重要的影响: 一是面源黑体的控温精度, 即面源黑体是否能将温度准确控制到设置温度; 二是控温稳定性, 即在长时间测试中, 面源黑体是否能将温度保持在设置温度, 不使温度发生较大范围的波动。探究黑体性能对测试的影响, 将有助于提高测试精度, 保证数据的准确性。

如表 1 所示, 面源黑体 A 的控温精度为 7 mK、黑体低温 T_1 为 293 K 时, 温度浮动范围是 292.993 ~ 293.007 K, 同理高温 T_2 为 307.993 ~ 308.007 K。在 NETD 计算时, 黑体实际温差($T_2 - T_1$)与理论计算温差($T_2^* - T_1^*$)之间的差值会对 NETD 计算值有一定影响。当面源黑体实际 T_1 为 292.993 K、 T_2 为 308.007 K 时, 其实际温差 ΔT 为 15.014 K。将以上数值代入式(1)~式(7), 可知 15.014 K 温差下的信号值是 15 K 温差下的 1.0011 倍, 即偏大 0.11 %。又由(7)式可知, NETD 值与信号(接收能量)成反比。信号(接收能量)越大, NETD 值越小。因此, 15.014 K 温差下的 NETD 值会比真实值偏小 0.09 %, 即以 NETD 真实值为 1 mK 计算, 其测量值在

0.9991~1.0009 mK 之间波动。

面源黑体 B 的控温精度为 0.5 mK、黑体低温 T_1 为 293 K 时, 温度浮动范围是 292.9995~293.0005 K, 同理高温 T_2 为 307.9995~308.0005 K。按上述方法计算, 可知 NETD 值比真实值偏小 0.01%, 即以 NETD 真实值为 1 mK 计算, 其测量值在 0.9999~1.0001 mK 之间波动。

分别使用上述两款不同型号的面源黑体测试探测器性能。测试步骤如下: (1) 按图 2 搭建测试系统。连接探测器, 上电待制冷到温, 稳定 3 min 后采集数据。(2) 采集低温 T_1 与高温 T_2 时的数据, 计算响应、噪声、NETD 值并记录于表中; 更换黑体, 重复测试。(3) 分

析处理数据, 观察响应、噪声、NETD 值的波动情况。

使用两款控温精度与控温稳定性不同的黑体进行测试(结果见表 2 和表 3)。采用标准差表征数据稳定性, 如表 4 所示。可以看出, 两款黑体所测的数据值较为接近, 但使用控温精度和稳定性更好的黑体 B 所测的响应标准差、噪声标准差、NETD 标准差更小, 说明数据波动范围小、更加稳定(稳定性提高约 12%~18%)。在 NETD 测量过程中, 两次黑体温度的差值会参与计算。随着探测器灵敏度的提高, 想要准确测出探测器的 NETD、非均匀性等性能参数, 就需要更稳定、控温精度更高的黑体。

表 1 黑体 A、B 的主要性能参数

	黑体 A	黑体 B
尺寸/in	7 × 7	7 × 7
测试温度范围/℃	0 ~ 100	-15 ~ 150
	0.015@ $T < 0$	
控温精度/℃	0.007@ $0 < T < 50$	0.0001
	0.015@ $T > 50$	
控温稳定性/℃	$\pm 0.003 @ \Delta T \leq 10$	0.5 mK@ $0 < T < 65$
	$\pm 0.008 @ \Delta T > 10$	2 mK outside

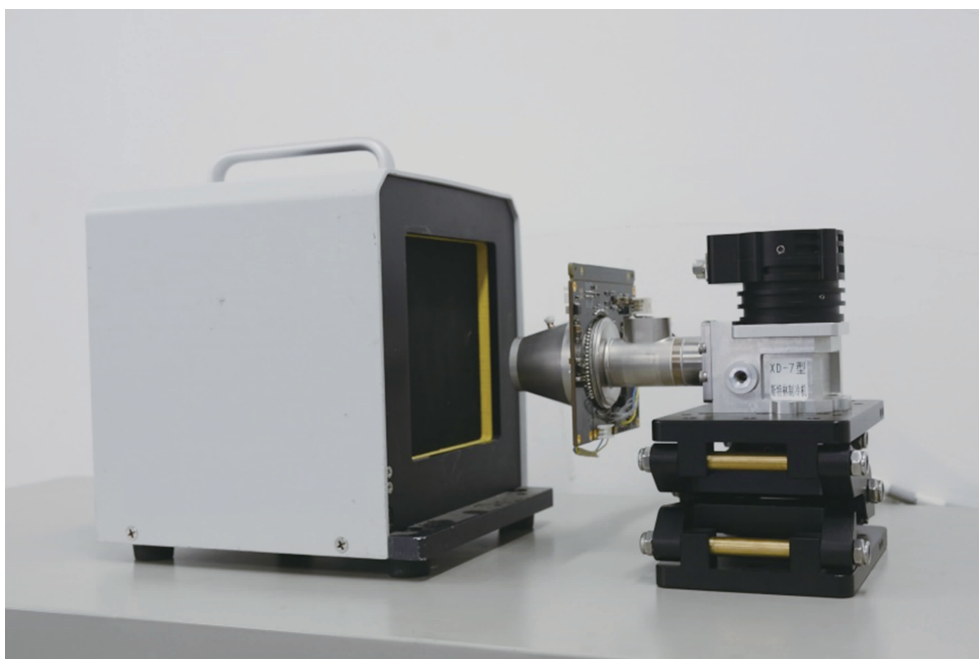


图 2 测试系统示意图

表 2 黑体 A 的测试数据

	响应	噪声	NETD/mK
1	5904.6546	1.1507	2.9200
2	5804.3152	1.1381	2.9410
3	5898.8916	1.1440	2.8090
4	5870.3526	1.2850	3.1834
5	5706.0031	1.1404	2.9075

表 3 黑体 B 的测试数据

	响应	噪声	NETD/mK
1	5806.1564	1.1616	2.9654
2	5900.6510	1.1187	2.7654
3	5874.6848	1.1744	2.8685
4	5833.8943	1.1250	2.8026
5	5827.3000	1.0730	2.7056

表 4 两款黑体测试数据的标准差

	响应	噪声	NETD
黑体 A	74.4963	0.0568	0.1242
黑体 B	34.2377	0.0357	0.0893

表 5 17.5℃测试环境温度、1/3 帧积分时间下的测试数据

	响应	噪声		响应	噪声
1	14522.4400	2.2607	11	14636.9937	2.8816
2	14657.1998	2.8464	12	14664.1721	2.0539
3	14652.3180	2.2045	13	14659.0455	2.7017
4	14635.0201	2.7595	14	14649.3362	2.7510
5	14612.4976	2.0171	15	14630.0114	2.3154
6	14643.7370	2.5770	16	14663.2140	2.8303
7	14638.4426	2.5915	17	14693.2784	2.5241
8	14613.0849	2.1530	18	14612.1910	2.7955
9	14630.2375	2.3330	19	14623.6588	2.1008
10	14618.4198	2.4584	20	14662.8058	2.2286

表 6 17.5℃测试环境温度、1/2 帧积分时间下的测试数据

	响应	噪声		响应	噪声
1	2925.1095	4.0488	11	21028.5712	3.8337
2	20904.5170	3.9233	12	21049.4436	3.1239
3	20991.4669	2.8123	13	21098.2653	4.0449
4	20973.5996	3.2864	14	20976.2567	4.1190
5	20934.0545	4.0638	15	20921.7754	3.8539
6	20861.7154	3.9256	16	20953.5611	3.3930
7	20876.4830	3.9232	17	20968.9961	4.0158
8	21009.5631	3.8316	18	20909.0333	4.3051
9	21047.4102	3.6071	19	2949.0083	3.1666
10	21061.1646	3.0746	20	21033.0689	4.0673

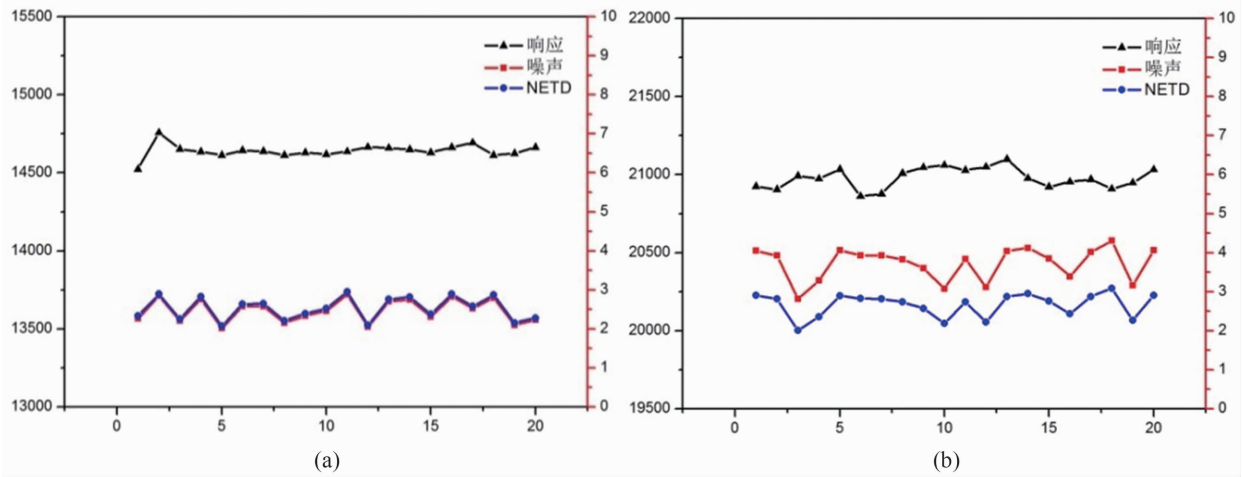


图 3 (a) 1/3 阱积分时间下的测试数据; (b) 1/2 阱积分时间下的测试数据

表 7 30℃测试环境温度、1/3 阱积分时间下的测试数据

	响应	噪声		响应	噪声
1	14453.9983	2.6323	11	14499.6435	2.0976
2	14462.0003	2.9067	12	14500.5647	2.8832
3	14497.4938	2.2337	13	14494.4100	2.4611
4	14497.6130	2.6937	14	14486.9005	2.2066
5	14503.0432	2.2014	15	14483.6674	2.7837
6	14500.4448	1.9596	16	14479.7433	2.1907
7	14503.3684	2.5606	17	14493.1707	2.7395
8	14505.7334	2.4440	18	14490.5958	2.3047
9	14503.1414	3.0613	19	14495.2995	2.8320
10	14503.0756	2.8981	20	14505.4998	1.9566

表 8 30℃测试环境温度、1/2 阱积分时间下的测试数据

	响应	噪声		响应	噪声
1	20684.4482	3.1741	11	20720.0663	4.6668
2	20692.7227	2.9643	12	20713.1368	3.0307
3	20708.3250	3.9003	13	20708.8449	4.2667
4	20699.7836	4.0207	14	20706.8986	3.9751
5	20700.9414	3.4700	15	20695.4827	3.9864
6	20721.5392	3.4326	16	20690.2130	2.7444
7	20724.4816	3.5363	17	20693.5117	3.8740
8	20733.4294	4.0431	18	20694.1070	3.0409
9	20728.1752	3.5513	19	20701.6102	4.0506
10	20723.1676	3.3072	20	20704.3466	4.1460

2.2 测试环境温度

改变测试环境的温度, 增加或减少面源黑体与测试环境的温度差, 将会对黑体控温稳定性造成影响, 进而影响 NETD 测量的精度。测试步骤如下: (1)调节测试环境温度至 17.5℃; (2)按图 2 搭建测试系统, 注意探测器窗

口与面源黑体保持平行; (3)连接探测器与采集卡, 上电稳定 3 min 后采集数据; (4)调节积分时间, 使信号在 1/3 阱(见表 5)和 1/2 阱(见表 6); (5)采集低温 T_1 与高温 T_2 时的数据, 计算响应、噪声和 NETD 值。

在 17.5℃条件下进行实验, 此时测试环

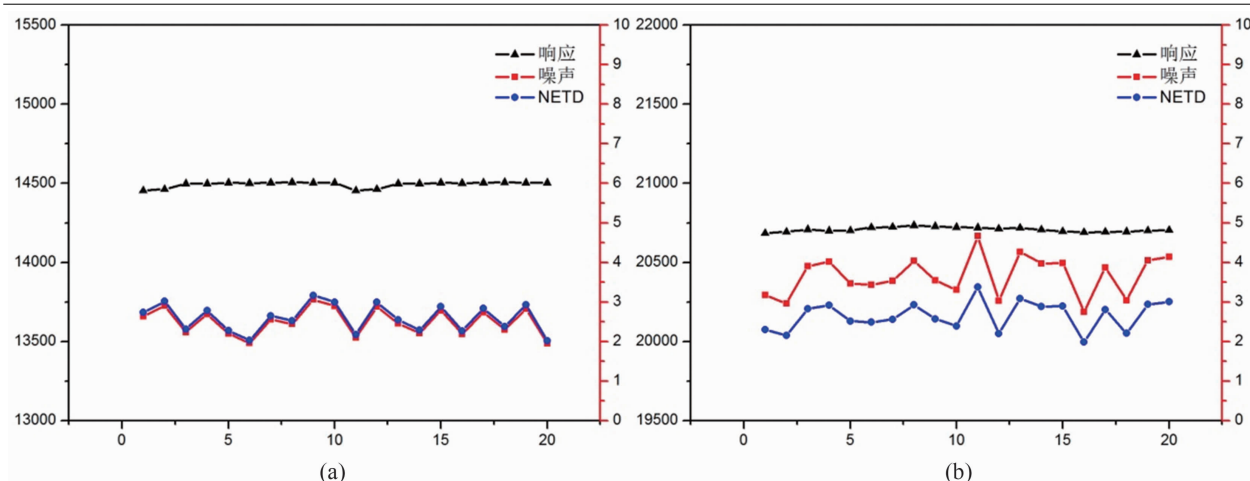


图 4 (a) 1/3 阱积分时间下的测试数据; (b) 1/2 阱积分时间下的测试数据

表 9 实验 1、实验 2 数据的标准方差

	响应	噪声	NETD
17.5℃@1/3 阱积分时间	42.34	0.28	0.289
17.5℃@1/2 阱积分时间	64.30	0.41	0.297
30℃@1/3 阱积分时间	17.76	0.33	0.346
30℃@1/2 阱积分时间	13.63	0.49	0.359

境与 20℃ 低温黑体的温差为 2.5℃。探测器对 20℃ 黑体采集的数据用于计算噪声。这时处于较为理想的温差下。根据前面的理论计算结果(面源黑体的控温精度对 NETD 值的影响为 0.04%), 使用标准差表征数据的离散度, 即是否稳定。结果表明, 在 17.5℃ 温度下, 积分时间加长会使噪声与 NETD 值的标准差增大, 即数据的波动范围加大(见图 3)。

调节测试环境温度至 30℃, 按上文所述实验步骤进行测试。测试数据记录于表 7 和表 8, 绘制折线如图 4 所示。

在 30℃ 条件下进行实验, 此时测试环境与 20℃ 低温黑体的温差为 10℃。根据前面的理论计算结果(面源黑体的控温精度对 NETD 值的影响为 0.11%), 统计 20 组响应、噪声与 NETD 测试数据。结果表明, 在相同积分时间下, 测试环境与面源黑体的温差加大, 会使测试结果的标准差变大, 即数据更加不稳定(见表 9)。因此, 控制测试环境与面源黑体之间的温差, 有利于减小误差, 提高测试精度。

2.3 气流扰动

测试环境的影响因素主要有两点: 一是人员走动带来的气流扰动, 会小幅降低面源黑体的表面温度, 引起黑体表面温度波动, 进而影响黑体的控温精度以及探测器信号大小, 最终使 NETD 等测量值不准确。二是环境温度。当环境温度与面源黑体温度相差较大时, 也会降低面源黑体的控温精度, 使面源黑体表面温度波动加大, 最终影响到 NETD 值的准确度。

按图 5 搭建测试系统, 注意探测器窗口与面源黑体保持平行。连接探测器与采集卡, 上电稳定 3 min 后采集数据。分别采集低温 T_1 与高温 T_2 时的数据, 计算响应、噪声和 NETD 值, 并记录数据于表 10 和表 11。

表 10 使用防风箱时的测试数据

	响应	噪声	NETD/mK
1	5983.8161	1.1416	2.8012
2	5898.6967	1.1261	2.7021
3	5934.7398	1.1668	2.8301
4	5970.7652	1.2001	2.9171
5	5897.3610	1.0810	2.6995

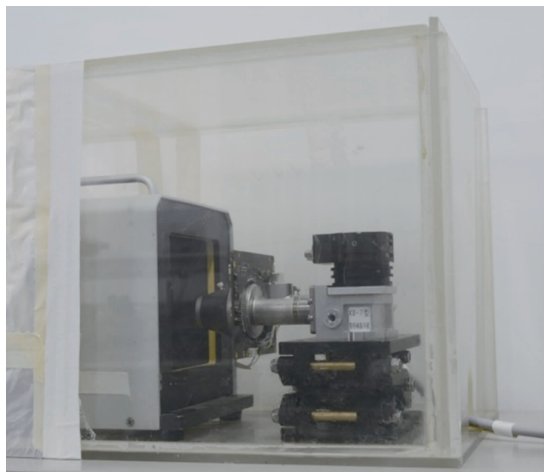


图 5 使用防风箱进行测试

表 11 不使用防风箱时的测试数据

	响应	噪声	NETD/mK
1	5806.1564	1.1612	2.9654
2	5966.6510	1.1187	2.7654
3	5901.6848	1.1744	2.8685
4	5833.8943	1.1950	3.0450
5	5817.3000	1.0730	2.7056

实验环境中气流的微弱扰动会增加面源黑体控温的不稳定性。加入防风箱后会在面源黑体与被测对象之间形成一个较为封闭的环境,隔绝外部气流扰动。同时应在面源黑体后部留有出风口,防止其风扇工作时气流在防风箱内部形成乱流。结果表明,避免气流扰动对于提高测试系统精度、减小测试系统噪声具有积极影响。

3 结束语

本文从黑体控温精度、测试环境温度、测试环境中的气流扰动等方面,分析了测试环境对亚毫开红外探测器测试结果的影响,并对高灵敏度红外探测器的测试方法进行了初步探究。结果表明,黑体控温稳定性直接影响探测器 NETD 值的准确性;选用 3 mK 黑体测得 NETD 值的准确性要比 7 mK 黑体时高 9 倍。此外,环境温度与面源黑体温度的差值 ΔT 以及环境中的气流扰动对数据的影响同样不可忽略。它们会使黑体的实际温度值比计算值偏大或偏小,同时也会影响黑体控温的稳定性,进

而影响探测器的信号值和噪声,最终影响 NETD 值的大小。

由于目前并无成熟的亚毫开红外探测器,本文选用面阵规模为 640×512 、NETD 为 3 mK 左右的红外探测器进行实验。若使用亚毫开红外探测器进行测试,黑体和环境因素的影响则会更加明显,体现在数据上的是信号和噪声数据更加离散,标准差变大。另外,本文对噪声的理论分析还有待完善,后续也将从降低噪声入手,继续对亚毫开红外探测器的测试方法进行探究。

参考文献

- [1] 马润泽,张晓明,冯帅,等. 红外光电探测技术研究现状及展望 [J]. 光子学报, 2021, **50**(10): 1004006.
- [2] Norton P R. Third-generation Sensors for Night Vision [J]. *Opto-Electron*, 2006, **14**(2): 283–296.
- [3] 陈军,习中立,秦强,等. 碲镉汞高温红外探测器组件进展 [J]. 红外与激光工程, 2023, **52**(1): 20220462.
- [4] 袁媛,王静,李冬冰. 甚高灵敏度红外探测器读出电路实现方法研究 [J]. 激光与红外, 2019, **49**(6): 715–719.
- [5] 王忆锋,谈骥. 论红外探测系统的噪声等效温差 [J]. 红外, 2014, **35**(6): 1–9.
- [6] 权清科,仇振安,崔志新. 红外成像系统噪声等效温差数字图像测试方法 [J]. 电光与控制, 2013, **20**(9): 103–104.
- [7] Zhang L S, Feng Y H, Zhao Hao. Application of Pixel-level Digital Integration in Space Infrared Remote Sensing [C]. Beijing: International Symposium on Optoelectronic Technology and Application, 2018.
- [8] Kenneth I S, Michael W K, Justin J. Digital-pixel Focal Plane Array Technology [J]. *Lincoln Laboratory Journal*, 2014, **20**(2): 36–51.
- [9] 李鸥,杨德振. 数字化红外焦平面噪声分析研究 [J]. 激光与红外, 2017, **47**(10): 1282–1285.