

文章编号: 1672-8785(2023)11-0023-08

基于 QT/C++ 的红外探测器 多区域性能分析系统

刘博文 陈彦冠 王 亮 王京飞 刘 璇

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 针对不同类型红外探测器对测试数据分析筛选需求的差异性问题的差异性, 提出了一种基于 QT/C++ 的红外探测器多区域性能分析系统。该系统以传统红外探测器测试系统为基础, 使用 QT 软件及 C++ 语言扩展开发性能分析软件。所开发的软件嵌入 OpenCV 插件库, 具备区域划分、盲元筛选、指标计算和盲元簇识别等功能。使用 640×512 甚长波碲镉汞探测器测试数据验证所开发软件的性能分析功能。结果表明, 所开发的软件具备高效数据处理及准确性能分析的能力, 并能够提供盲元位置及盲元簇图。与现有测试系统相比, 所提出的分析系统可提高针对全阵列尺寸和不同材料探测器的性能分析能力及测试效率。

关键词: 红外探测器; 指标计算; 性能分析; QT; C++

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.11.004

The Multi-region Performance Analysis System for Infrared Detectors Based on QT/C++

LIU Bo-wen, CHEN Yan-guan, WANG Liang, WANG Jing-fei, LIU Xuan

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: A multi-region performance analysis system for infrared detector based on QT/C++ is proposed to address the differences in the requirements for testing data analysis and screening among different types of infrared detectors. The analysis system is based on traditional infrared detector testing system, and performance analysis software is developed using QT software and C++ language. The developed software is embedded in the OpenCV plugin library and has functions such as region partitioning, blind element filtering, index calculation, and blind element cluster recognition. The test data from the very-long-wavelength 640×512 HgCdTe detector is used to verify the performance analysis function of the developed software. The verification results prove that the developed software has the ability to efficiently process data and accurately analyze performance, and can provide blind element positions and blind element cluster maps. Compared with existing testing systems, the proposed analysis system can improve performance analysis capabilities and testing efficiency for detectors of full array size and different materials.

Key words: infrared detector; index calculation; performance analysis; QT; C++

收稿日期: 2023-07-06

作者简介: 刘博文(1997-), 男, 河北保定人, 硕士, 主要从事红外探测器测试技术及系统研究。

E-mail: 2511685055@qq.com

0 引言

随着红外探测器技术的不断发展、成熟,红外焦平面探测器在军事、民用等各个领域得到广泛应用^[1]。近年来,红外探测器的需求量日益增长^[2]。为保证红外焦平面探测器的器件质量和生产效率,性能分析软件已成为红外探测器制造的必备配套技术^[3],为探测器性能的描述提供有力数据支撑。然而,目前国内使用的性能分析软件大多基于 MATLAB、LabVIEW 等开发,其系统兼容性、代码可读性、软件扩展性等方面均存在一定的限制^[4-6]。为进一步提高红外探测器性能分析的效率,本文提出一种基于 QT/C++ 的红外探测器多区域性能分析系统。该系统以传统数据采集卡、探测器驱动板等仪器装置为基础,采用 QT 软件及 C++ 语言扩展开发性能分析软件。这种系统在实现多区域性能分析功能的同时,可提高对不同操作系统的兼容性、不同功能需求的扩展性和非软件开发人员的可读性。

1 硬件组成及原理

所提出的性能分析系统可实现参数设置、数据采集、数据传输以及数据分析等功能。稳定可靠的硬件组成能够为系统提供准确、可靠的探测器测试数据,以实现红外探测器性能指标的准确计算,进而提供真实、可信的性能分析结果。

为降低系统搭建成本,本文系统具备同传统探测器测试系统相近的层级结构,如图 1 所示^[7]。

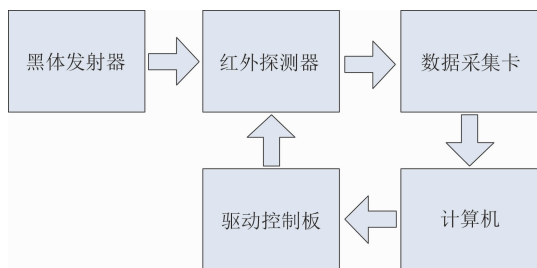


图 1 硬件组成示意图

根据所实现的功能,性能分析系统可以分为数据产生、数据采集和数据分析三个部分。为保证性能分析软件得出可靠、准确的分析结

果,数据产生部分肩负重要使命。它包括用于提供稳定且均匀黑体辐射的黑体发射器、用于接收黑体辐射光子并输出电信号的红外探测器以及用于为探测器提供驱动偏压与控制时序的驱动控制板。

数据采集部分以数据采集卡为核心,包括 8 通道模拟采集卡和 32 通道单端数字采集卡。其中,模拟采集卡的采集速率最高可达 20 MHz,可采集电压包括 $\pm 1\text{ V}$ 、 $\pm 2\text{ V}$ 和 $\pm 5\text{ V}$ 等,且在 20 MHz 采集速率情况下噪声小于 $100\text{ }\mu\text{V}$ 。数字采集卡的单通道采集速率可达 250 Mbit/s,可兼容多个晶体管-晶体管逻辑集成电路(Transistor-Transistor Logic, TTL)或互补型金属氧化物半导体电路(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)逻辑电平。高速高精度数据采集和传输为探测器输出信号的无损传递提供了可能,为随后的数据分析提供有力的支撑。

数据分析部分以计算机为核心,内嵌本文提出的红外探测器多区域性能分析软件,可实现针对不同阵列尺寸红外探测器的多区域性能分析,包括区域划分、盲元筛选和性能指标计算等。

2 软件设计及开发

在上述硬件设备的支持下,计算机可获取真实、可靠且准确的探测器输出数据。为保证对不同阵列尺寸探测器的性能分析,本文提出一种基于 QT/C++ 的多区域性能分析软件,用于实现数据处理及指标计算功能。计算指标参数包括盲元率、噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)、响应率、响应非均匀性等。

2.1 性能参数计算原理

目前对红外探测器的性能评价参数包括噪声、响应率、信号传递函数、NETD 和探测率等^[8]。所开发软件具备计算上述典型参数的能力,下面将介绍各参数的计算原理^[9]。

探测器输出数据的噪声参数定义为图像中各个像元输出电平的振荡,使用像元输出电平

的标准差表征, 计算方法为^[9]

$$V_N = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (V_{(i,j)} - \bar{V})^2}{(M \times N) - 1}} \quad (1)$$

式中, V_N 表示探测器输出数据的噪声电平值, $V_{(i,j)}$ 表示探测器中第 i 行第 j 列像元的输出电平值, $\bar{V}$ 表示探测器输出电平的平均值, N 表示探测器的每行像元个数, M 表示探测器的每列像元个数。

探测器响应率参数用于表征探测器内各像元对单位辐照功率的响应电压, 其计算公式为^[9]

$$R(i,j) = \frac{V_{T_2}(i,j) - V_{T_1}(i,j)}{\Delta I_{PF} \cdot FOV \cdot A_d} \quad (2)$$

式中, $R(i,j)$ 表示探测器中第 i 行第 j 列像元的响应率; $V_{T_1}(i,j)$ 和 $V_{T_2}(i,j)$ 分别表示 T_1 和 T_2 温度下探测器第 i 行第 j 列像元的输出电压值; FOV 表示探测器的视场角; A_d 表示探测器的像元面积; ΔI_{PF} 表示黑体分别工作于 T_1 和 T_2 温度时的辐照功率变化量, 其计算方法为^[9]

$$\Delta I_{PF} = \frac{\epsilon \sigma (T_{T_2}^4 - T_{T_1}^4)}{\pi} \quad (3)$$

式中, ϵ 表示面源黑体辐射率; σ 表示常数, 其值为 $5.67 \times 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

探测器的 NETD 参数用于表征探测器的灵敏程度及噪声幅值, 其计算公式为^[9]

$$NETD(i,j) = \frac{V_N(i,j)}{V_{T_2}(i,j) - V_{T_1}(i,j)} (T_2 - T_1) \quad (4)$$

探测器的响应非均匀性参数用于描述探测器在相同辐照功率下像元输出信号的差异性。需注意的是, 在实际使用过程中, 探测器中每个像元的辐照功率是不同的。为保证计算结果的准确性, 需在计算响应非均匀性前根据探测器的结构特性对各像元的输出电平进行校正。校正方法为^[9]

$$V_{c,T_1}(i,j) = \frac{V_{T_1}(i,j)}{K(i,j)} \quad (5)$$

式中, $V_{c,T_1}(i,j)$ 表示面对 T_1 温度黑体情况下

第 i 行第 j 列像元校正后的输出电压; $K(i,j)$ 表示校正系数。由此可以得到各像元校正后的响应电压^[9]:

$$R_c(i,j) = \frac{V_{c,T_2}(i,j) - V_{c,T_1}(i,j)}{\Delta I_{PF} \cdot FOV \cdot A_d} \quad (6)$$

校正后各像元输出电压的非均匀性计算公式为^[9]

$$U_R = \frac{\sqrt{\frac{1}{(M \times N) - 1} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (R_c(i,j) - \bar{R}_C)^2}}{\bar{R}_C} \quad (7)$$

式中, $\bar{R}_C$ 表示探测器组件在剔除盲元后剩余有效像元的平均校正后响应电平。

探测器的探测率参数用于描述探测器的性能, 各像元探测率及探测器平均探测率的计算方法为^[9]

$$D_{pixel}^*(i,j) = \sqrt{\frac{A_d}{2 \times Int}} \times \frac{R(i,j)}{V_N(i,j)} \quad (8)$$

$$\bar{D}^* = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M D_{pixel}^*(i,j)}{(M \times N) - N_{my}} \quad (9)$$

式中, $D_{pixel}^*(i,j)$ 表示第 i 行第 j 列像元的探测率; Int 表示积分时间; $\bar{D}^*$ 表示探测器平均探测率; N_{my} 表示探测器盲元数量。

2.2 软件实现

软件以非专业操作人员为服务对象, 通过设计开发可视化图形用户界面 (Graphical User Interface, GUI), 实现测试过程的简化和测试效率的提升^[10]。GUI 是操作人员可直接与计算机对话的窗口。通过 GUI, 即使不是专业操作人员, 也可实现对红外探测器的性能分析。

较之 MiniGUI 和 Micro Windows, 由 QT 开发软件开发的应用程序具备移植性好、开发灵活度高等优点, 可根据实际需要移植到不同的操作系统^[10]。因此, 为保证软件的系统兼容性、功能拓展性等, 所开发的软件采用 QT 软件提供的图形用户界面 GUI 编程功能实现对探测器输出数据的处理和性能评价参数的计算, 软件流程如图 2 所示。

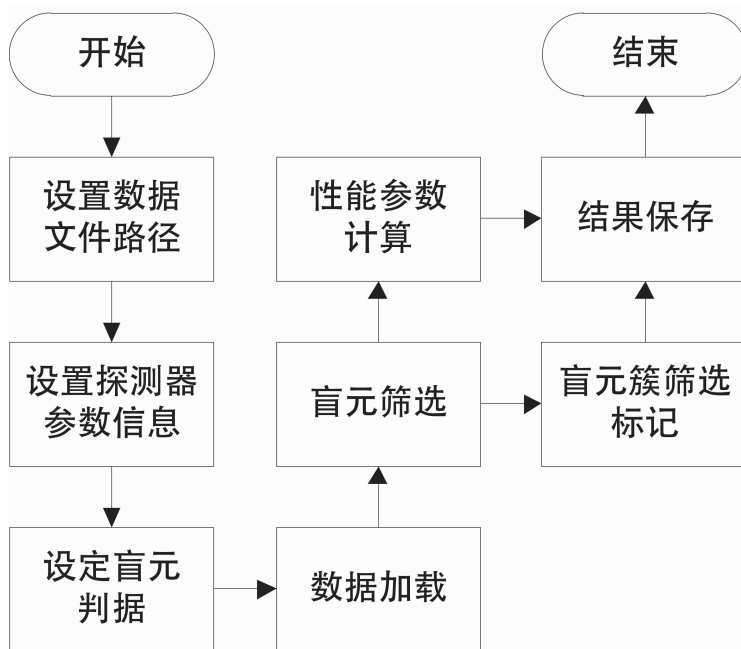


图 2 软件算法流程图

2.2.1 数据读取

如前所述, 本文所提出的分析系统建立在传统探测器测试系统的基础上。传统测试系统输出的数据包括 txt 文档和 EXCEL 表格两种格式。为保证分析系统对不同类型数据文件的兼容性, 所设计的软件提供 txt 文档格式数据读取和 EXCEL 表格数据读取两种功能。

针对 txt 文档格式数据, QT 软件提供了 QFile 函数封装库, 其中包括 open()、readLine() 等函数, 用于打开 txt 文档文件, 并加载其中的文本数据。为保证所获取的数据能用于接下来的计算和筛选, 在获取文本数据后, 利用 toDouble() 函数将其转换为 double 类型数据。

针对 EXCEL 表格格式数据, QT 软件提供了 QAxObject 对象类, 实现对 Office 软件的访问和调用。QAxObject 对象类包含 getWorksheet()、getCellString() 等方法, 用于打开 EXCEL 表格文件, 并加载其中的数据。为保证所获取数据能够用于接下来的计算和筛选, 在获取数据后, 利用 QString().number() 函数将其转换为 double 类型数据。

数据读取算法流程如表 1 所示。

2.2.2 指标计算

获取测试数据后, 按照上述参数计算原

理, 对数据进行处理和计算, 得到探测器的盲元率、探测率、响应非均匀性等性能指标参数, 并将其可视化于软件内的对应区域。性能指标参数计算算法流程如表 2 所示。

表 1 数据读取算法流程

输入: 本地 EXCEL 或 txt 数据文件

输出: 探测器输出数据矩阵

算法流程:

- 1: 选择需加载的数据文件格式;
- 2: 基于数据文件格式, 调用数据加载算法:
 - If 加载 EXCEL 数据文件
 - (1) 打开相应文件;
 - (2) 以行为步进读取数据;
 - (3) 将所读取行数据进行切分;
 - (4) 将切分后的数据保存至探测器输出数据矩阵对应位置;
 - (5) 若数据文件未被全部读取, 则返回步骤(2); 若被全部读取, 则关闭文件, 输出数据矩阵。
 - else if 加载 txt 数据文件
 - (1) 打开相应文件;
 - (2) 将全部数据读取至本地内存;
 - (3) 将所读取数据进行格式变换并保存至探测器输出数据矩阵对应位置;
 - (4) 关闭文件, 输出数据矩阵。

end



图 3 软件界面

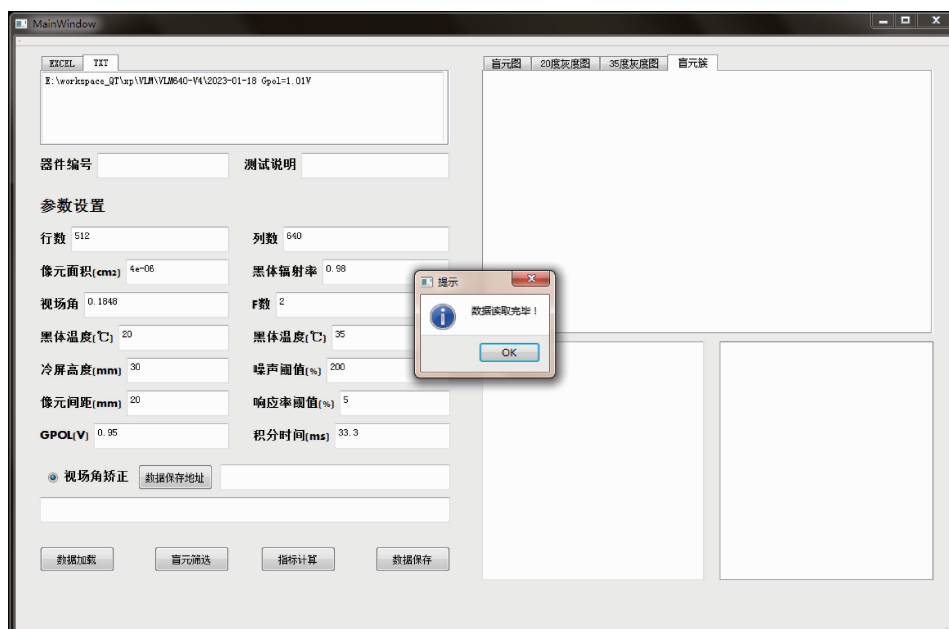


图 4 数据读取效果展示图

表 2 性能指标计算算法流程

输入：探测器输出数据矩阵

输出：性能指标计算结果

算法流程：

- 1: 读取数据矩阵;
- 2: 根据 2.1 节所示的公式原理, 计算探测器的性能指标参数, 包括响应率、NETD 等;
- 3: 输出计算结果, 用于保存和可视化。

2.2.3 盲元簇筛选

盲元簇作为被广泛关注的探测器性能指标,对于评价探测器性能具有重要意义。盲元簇的筛选建立在盲元筛选的基础上。在获取探测器盲元分布矩阵后,使用深度优先搜索(Depth First Search, DFS)方法对盲元分布矩阵进行遍历及标记,从而得到探测器的盲元簇分布位置及各盲元簇内的盲元数量。盲元簇筛选算法流程如表 3 所示。

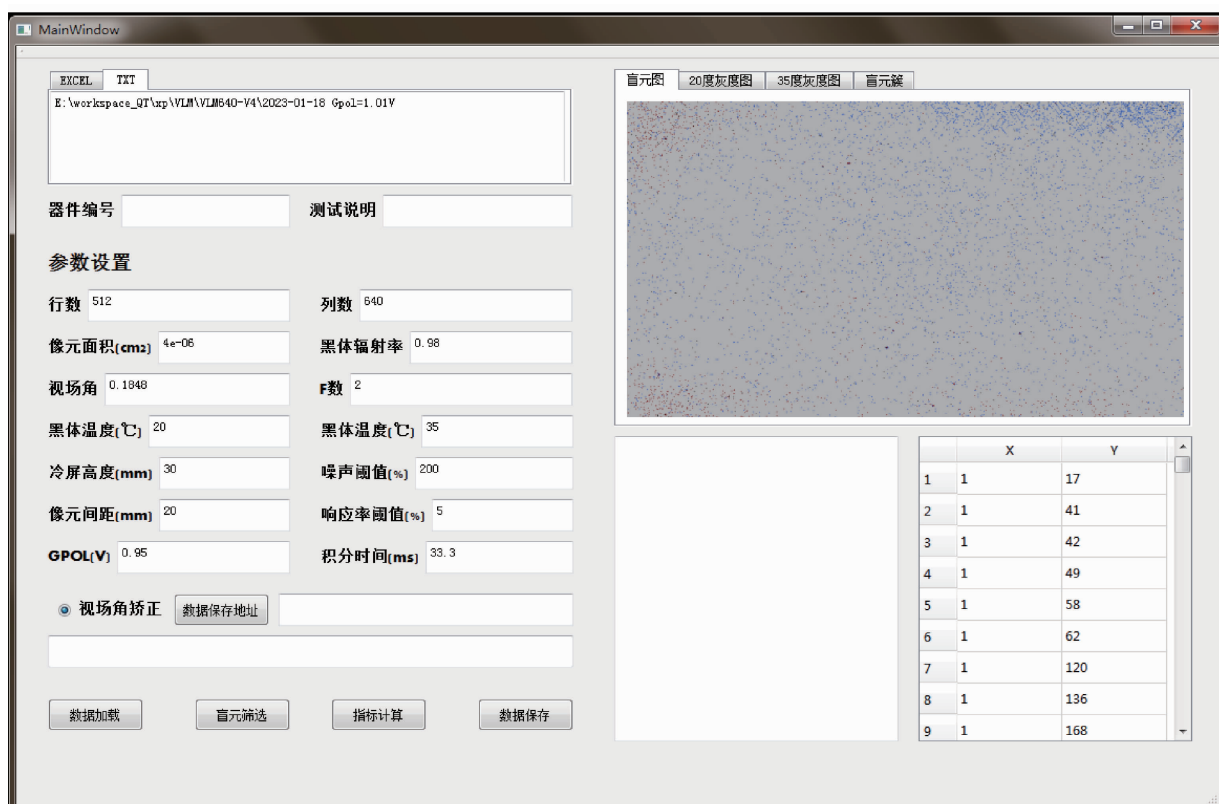


图 5 盲元筛选效果图



图 6 部分指标计算结果效果图

表 3 盲元簇筛选算法流程

输入: 探测器输出数据矩阵

输出: 盲元簇标记图

算法流程:

- 1: 读取数据矩阵;
- 2: 根据响应率、噪声指标, 利用 GB/T-17444 标准筛选盲元, 并生成盲元标记矩阵;
- 3: 初始化 DFS 方法相关 DFS 栈及搜索标志数组;
- 4: 将未被搜索的盲元压入 DFS 栈;
- 5: 弹出栈顶元素, 判断其周围 4 或 8 个相邻像元是否被标记为已搜索并判断相邻像元是否为盲元。若相邻像元未被搜索且为盲元则压入 DFS 栈, 并将其对应搜索标志数组设置为 1, 反之跳过且标记已搜索。
- 6: 判断 DFS 栈是否为空, 不为空则返回步骤 5, 若为空则表示完成盲元簇筛选, 调用涂色算法, 完成不同盲元簇的差异化标记。

2.2.4 区域划分

鉴于部分探测器要求对图像中心位置进行单独参数计算, 本软件提供区域性能计算功能。该功能内嵌于软件源代码内。在参数初始化过程中, 设置区域划分矩阵, 并在参数计算过程中, 利用区域划分矩阵独立计算区域内性能指标参数。

2.2.5 结果显示

为了实现软件使用的便捷性, 探测器性能指标计算结果及盲元筛选结果被显示在软件界面上。其中, 性能指标计算结果以文字及数值形式显示; 盲元筛选结果以图片形式显示。此外, 针对盲元簇筛选功能, 软件将盲元簇筛选结果以图片形式保存至数据调用路径。

3 实验结果

软件设计开发完成后, 需同硬件测试系统联调, 从而有效发挥其支持红外探测器性能测试的作用。

测试软件的人机交互界面对于提升使用体验、提高测试效率具有重要作用。其页面布局的合理性、测试结果的可视性等方面均对人机交互界面的友好性存在重要影响。因此, 所开

发软件的界面如图 3 所示。

软件界面左上角为数据路径选择功能区, 包括 txt 数据文件、EXCEL 数据文件路径选择功能。调用数据时, 输入数据文件所在文件夹的路径即可实现数据文件的自动选择和读取。读取完成后, 软件以弹窗形式返回数据读取结果。数据读取效果如图 4 所示。

数据读取完成后, 点击“盲元筛选”按钮。该按钮的功能是利用已读取数据绘制灰度图, 然后根据 GB/T-17444 筛选过热像元及死像元, 并在此基础上绘制盲元图。绘制效果如图 5 所示。

在盲元筛选的基础上, 软件提供“指标计算”按钮, 用于根据上述所属参数计算方法计算响应非均匀性、NETD 等相关性能指标并予以显示(见图 6)。同时, 作为探测器性能评价的关键环节, 盲元簇筛选在“指标计算”功能中实现。盲元簇筛选和标记效果如图 7 和图 8 所示。



图 7 盲元簇筛选结果图

5 结束语

针对不同类型红外探测器对测试数据分析筛选需求的差异性, 本文提出了一种基于 QT/C++ 的红外探测器多区域性能分析系统。该系统基于传统红外探测器测试系统获取的测试数据完成性能分析。所提出的性能分析系统利用 QT 软件完成可视化 GUI 界面设计, 并在此基础上以 C++ 为核心语言完成软件算法逻辑开发。测试结果表明, 所开发的软件可实现

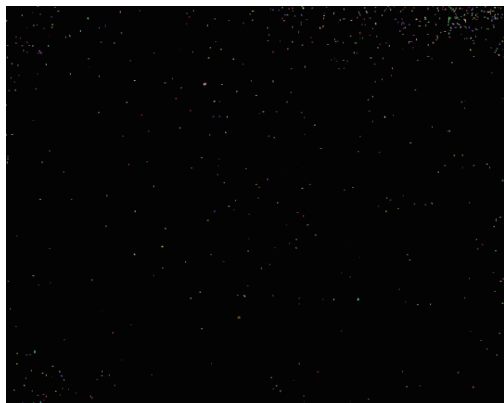


图 8 盲元簇标记结果图

性能指标计算、盲元筛选、盲元簇筛选标记等预期功能。由于红外探测器用户的使用条件存在多样性、随机性等特点，还需对此系统进行升级，以提高其针对不同用户的使用灵活性和兼容性。

参考文献

- [1] 张小倩, 王亮. 长波碲镉汞探测器工作温度对输出图像的影响 [J]. 红外, 2019, 40(9): 12-17.
- [2] 张小倩, 周翠. 红外探测器相对光谱响应测试 [J]. 红外, 2020, 41(6): 1-6.
- [3] 王晓龙, 龚志宏, 李冬冰, 等. 线列红外探测器盲元检测技术研究 [J]. 红外, 2020, 41(8): 21-28.
- [4] 毛京湘, 王忆锋. 用 MATLAB 实现红外焦平面探测器盲元的统计分析 [J]. 红外, 2009, 30(3): 43-45.
- [5] 张宁, 吴和然, 周云, 等. 基于 LabVIEW 的非制冷红外焦平面阵列测试系统的设计 [J]. 红外技术, 2011, 33(5): 301-304.
- [6] 阳平, 夏小华. 基于 MATLAB GUI 的红外图像坏元检测软件 [J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(8): 85-87.
- [7] 王晓龙, 李冬冰, 张兴胜. 红外焦平面探测器的暗电流测试分析及性能研究 [J]. 红外, 2019, 40(11): 23-28.
- [8] 曾戈虹. HgCdTe 红外探测器性能分析 [J]. 红外技术, 2012, 34(1): 1-3.
- [9] 王术军. 红外焦平面阵列特性参数定义和测试方法的讨论 [J]. 红外技术, 2007, 29(4): 211-214.
- [10] 张艺萌, 齐放, 张朋. 基于 Qt 框架的手持红外观测设备软件设计 [J]. 红外, 2022, 43(6): 27-34.