

文章编号: 1672-8785(2025)02-0026-10

基于 QT 的红外探测器特性 参数测试方法

刘博文 邱 晨 王晓龙 邢艳蕾 王 亮 陈彦冠

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 受红外探测器广泛应用的影响, 对红外探测器性能数据分析的需求呈多样性和复杂性。针对部分不可直接测得或者获取难度大的特性参数(如暗电流、量子效率等), 提出了一种基于 QT 的红外探测器特性参数集成测试方法, 包括传统测试系统以及自主开发的计算软件。计算软件使用 QT 及 C++ 语言开发。独立自主完成底层算法设计开发, 使其具备全波段任意温度黑体辐射光子数、暗电流、量子效率等多种特性参数计算功能。现有计算软件仅支持单一性能参数计算功能, 且参数计算过程中存在普适性差、容错性低等问题。所提出的软件对底层计算原理采取封包处理, 综合了多个性能参数计算功能。经多种阵列尺寸红外探测器验证, 该软件具有准确、便捷等优点。

关键词: 红外探测器; 特性参数; 集成计算; QT; C++

中图分类号: TN206 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.02.004

QT-Based Characteristic Parameter Testing Method for Infrared Detectors

LIU Bo-wen, QIU Chen, WANG Xiao-long, XING Yan-lei, WANG Liang, CHEN Yan-guan

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

Abstract: Affected by the widespread application of infrared detectors, the demand for performance data analysis of infrared detectors is diverse and complex. For some characteristic parameters that cannot be directly measured or are difficult to obtain (such as dark current, quantum efficiency, etc.), a QT-based integrated test method for infrared detector characteristic parameters is proposed, including traditional test systems and self-developed calculation software. The calculation software is developed using QT and C++ language. The underlying algorithm design and development is completed independently, so that it has the calculation function of various characteristic parameters such as the number of blackbody radiation photons, dark current, quantum efficiency, etc. at any temperature in the full band. The existing calculation software only supports a single performance parameter calculation function, and there are problems such as poor universality and low fault tolerance in the parameter calculation process. The proposed software adopts packet processing for the underlying calculation principle and integrates multiple performance parameter calculation functions. After verification by

收稿日期: 2024-06-15

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

infrared detectors of various array sizes, the software has the advantages of accuracy and convenience.

Key words: infrared detector; characteristic parameter; integrated computing; QT; C++

0 引言

随着红外探测技术的成熟与推广, 红外焦平面探测器成为多个领域不可或缺的重要组成部分, 其性能直接影响应用对象的工作效能^[1-2]。近年来, 为更加全面、准确地评价探测器性能, 关注焦点正在从盲元率、探测率等直观性能参数向特性参数延伸^[3-4]。红外焦平面探测器的特性参数主要表征红外器件及读出电路的工作状态, 其中部分参数(如黑体辐射光子数、暗电流、量子效率等)无法通过直接测试的方法获得或者获取难度较大^[5-6]。

对于现有特性参数, 均使用特有测试方法或测试系统获取红外焦平面探测器的输出电压数据, 经系列转换计算得到参数结果。一方面, 在数据获取的同源性限制下, 特性参数获取及分析效率的提高受到数据转换、处理、计算的直接影响。数据计算中往往使用 MATLAB 或 LabVIEW 等软件开发。上述软件开发的数据计算程序在系统兼容性、代码可读性、软件扩展性和界面友好性等方面存在不同程度的限制^[7-8]。另一方面, 部分测试系统自身存在误差, 当同一参数需要使用不同测试系统获取测试数据时, 设备误差将导致计算结果误差。因此, 一种针对红外探测器特性参数的简化集成测试系统亟待提出。

针对上述问题, 本文提出一种基于 QT 的红外探测器特性参数测试系统。该系统包括传统红外探测器性能测试设备以及自主开发的参数计算软件, 在保证常规性能指标测试的同时, 可实现部分特性指标参数(如全波段任意温度黑体辐射光子数、暗电流、量子效率等)的计算。

1 硬件组成及原理

以所提出的特性参数测试系统的常规性能指标计算功能为基础, 扩展特性指标参数计算

能力。指标参数的计算依赖于准确的探测器输出数据获取。因此, 准确、可靠的探测器输出数据的获取成为指标参数计算准确的有力保障。为保证所获取数据的准确可靠, 本文以具备高可靠性、高稳定性的传统红外探测器性能测试硬件设备为依托, 构建通用性能测试系统, 以实现常规性能指标及特性指标参数的计算。

经长时间验证, 传统红外探测器性能测试设备的可靠性得到充分验证^[8]。因此, 本文以传统红外探测器性能测试设备为硬件基础, 获取探测器输出电平数据, 为后续软件处理和指标计算提供硬件支撑。所使用的测试设备包括多个模组, 即黑体、红外焦平面探测器、数据采集模块、偏压驱动电路、时序控制电路和计算机(见图 1)。

根据各部分功能的不同, 测试设备内包含的硬件模组可分为数据输出、数据获取和数据处理三个部分。数据输出部分包括黑体、红外焦平面探测器、偏压驱动电路和时序控制电路四种硬件模组。其中, 黑体用于提供稳定的黑体辐射, 偏压驱动电路和时序控制电路用于驱动红外焦平面探测器正常工作, 红外焦平面探测器用于输出电平数据, 为后续数据的获取和处理提供支撑。

数据获取部分以数据采集模块为核心模组, 包括 32 通道高速数字采集卡和 16 通道 16 位高精度模拟采集卡。其中, 模拟采集卡具备多种模拟通道输出模式选择功能, 且具备 20 MHz 采样条件下噪声小于 150 μV 的工作能力; 数字采集卡的单通道采集速率可达 250 Mbit/s, 可兼容多个等级的(LV)TTL 或(LV)CMOS 逻辑电平。准确可靠的探测器输出电平数据的获取依赖于高速高精度的数据采集模块。本文所用测试设备的数据采集能力可以满足数据获取需求, 为随后的数据处理与分析提供了有力支撑。

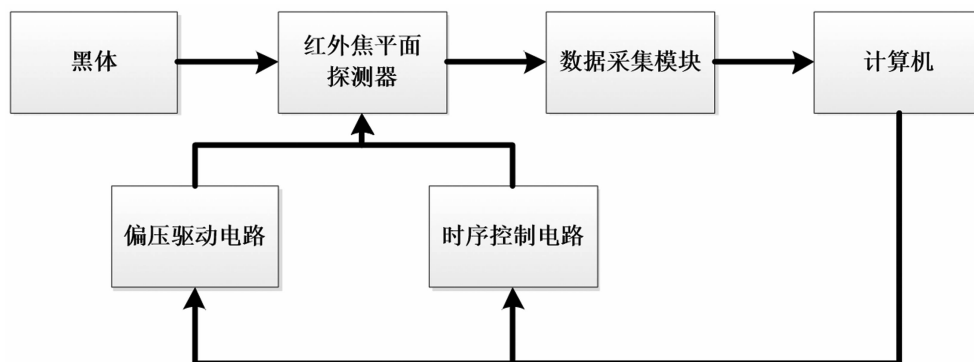


图 1 硬件组成结构图

数据处理部分以计算机为核心，其中包含了数据采集重组功能以及本文提出的特性指标参数计算软件，可实现对全面阵尺寸、不同材料红外探测器的特性指标参数计算。

2 软件设计及开发

如前所述，可靠、稳定的硬件设备为后续数据处理提供了准确的数据来源。所获取的探测器输出电平被传输至计算机并通过进一步转换和处理，最终获得准确的性能指标计算结果。针对无法直接测得或者获取难度大的特性指标参数，本文提出一种基于 QT 的红外探测器特性指标参数计算软件，用于实现对特性指标参数的计算。计算指标包括黑体辐射光子数、量子效率、探测距离和暗电流等。

2.1 特性指标参数的计算原理

目前红外探测器性能测试的主要评价指标包括噪声和响应率等。此类性能指标可使用传统红外探测器性能测试系统直接获取。然而，对于黑体辐射光子数、量子效率、理论探测率、探测距离、暗电流等具有较大获取难度的特性指标，本节将介绍其计算原理，并以此为依据开发红外探测器特性指标参数计算软件，从而实现特性指标的集成、简化计算。黑体辐射光子数作为计算量子效率、理论探测率等多个特性指标的重要参数，其准确性直接影响多个特性指标的计算准确性和可靠性^[9]。该特性指标用于描述黑体在指定温度、指定波长范围等条件下的辐射光子数，其主要计算依据为普朗克黑体辐射定律^[9]，计算方法如下：

$$N = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E(\lambda, T) \cdot \lambda}{hc} d\lambda \quad (1)$$

式中， λ 表示波长； λ_1 表示计算前的截止波长； λ_2 表示计算后的截止波长； T 表示温度； h 表示普朗克常数，其值为 6.626×10^{-34} J·s； c 表示光速，其值为 3×10^8 m/s； $E(\lambda, T)$ 表示黑体辐射能量，其计算方法为

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

式中， k 表示为玻耳兹曼常数，其值为 1.38×10^{-23} J/K。

理论后截止波长为理论参数。以碲镉汞的材料组分 x 为变量计算探测器的理论后截止波长，其计算方法为

$$\lambda = \frac{1.24}{E_g} \quad (3)$$

式中， E_g 的计算方法为

$$E_g = -0.302 + 1.93x + 5.35 \times 10^{-4} \times T(1 - 2x) - 0.81x^2 + 0.832x^3 \quad (4)$$

量子效率用于描述探测器将入射光子转换为电子并输出的能力^[10]。该值无法直接测得，其计算方法为

$$\eta = \frac{N_{\text{photon}}}{N_{\text{electron}}} \quad (5)$$

式中， η 表示量子效率； N_{photon} 表示入射到探测器的光子数； N_{electron} 表示探测器转换并输出的电子数。 N_{photon} 和 N_{electron} 的计算方法为

$$N_{\text{photon}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E(\lambda, T) \cdot \epsilon \cdot \text{FOV} \cdot A_d \cdot \tau \cdot \lambda}{hc} d\lambda \quad (6)$$

$$N_{\text{electron}} = \frac{CV}{q} \quad (7)$$

式中, ϵ 为黑体辐射率; FOV 表示探测器视场角, 单位为 sr ; A_d 表示探测器像元的光敏面积, 单位为 cm^2 ; τ 表示探测器的积分时间; C 表示探测器读出电路积分电容; V 表示探测器输出信号; q 表示单电子电量, 其值为 $1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

暗电流用于评价在无光入射条件下探测器自身产生的电流。该电流会导致探测器输出无效电平。常规测试中, 需要将探测器置于无光条件下完成测试, 即探测器需要在极低温环境下工作^[6]。这在工程应用场景中非常难实现。因此, 可使用以下两种方法完成计算:

(1) 以探测器输出电压、量子效率和相对光谱响应作为参数计算。此方法的计算原理如下:

$$I_{\text{dark}} = I - I_{\text{photon}} - I_{\text{window}} - I_{\text{CS}} \quad (8)$$

式中, I_{dark} 表示暗电流; I 表示探测器输出的总电流; I_{photon} 表示由黑体辐射造成的探测器输出电流; I_{window} 表示由窗口辐射造成的探测器输出电流; I_{CS} 表示由冷屏辐射造成的探测器输出电流。 I 、 I_{photon} 、 I_{window} 和 I_{CS} 的计算方法为

$$I = \frac{CV}{\tau} \quad (9)$$

$$I_{\text{photon}} = \eta q N_{\text{photon}} A_d \quad (10)$$

$$I_{\text{window}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E(\lambda, T) \cdot FOV \cdot A_d \cdot \lambda \cdot \eta \cdot q \cdot \epsilon_{\text{window}}}{hc} d\lambda \quad (11)$$

$$I_{\text{CS}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{E(\lambda, T) \cdot (\pi - FOV) \cdot A_d \cdot \lambda \cdot \eta \cdot q}{hc} d\lambda \quad (12)$$

式中, η 表示量子效率; N_{photon} 表示黑体辐射光子数; ϵ_{window} 表示探测器窗口的发射率。

(2) 以多组信号-积分时间作为参数计算。此方法需要在相同黑体温度条件下使用不同积分时间获取探测器输出信号, 然后通过曲线拟合方式获得多组暗电流的近似拟合结果, 并将其作为最终结果。

探测距离用于描述探测器对某强度目标的作用距离, 常使用 Hudson R D 提出的计算方

法:

$$L = \sqrt{\frac{\pi P_{\text{target}} \epsilon_{\text{air}} d_{\text{entrance}} \epsilon_{\text{photon}} d_{\text{lens}} D^*}{2n \sqrt{\left(\frac{A_d \Delta f}{f^2}\right)} \text{SNR}}} \quad (13)$$

式中, P_{target} 表示目标辐射强度; ϵ_{air} 表示大气衰减系数; ϵ_{photon} 表示光学衰减系数; d_{entrance} 表示光学系统的入瞳直径; d_{lens} 表示光学系统的镜头直径; D^* 表示探测器的探测率; n 表示目标所占的像元数; Δf 表示等效噪声带宽; f 表示焦距; SNR 表示信噪比。

2.2 软件实现

如前所述, 各特性指标的计算过程较为繁琐且公式复杂。使用原理公式计算各指标会给操作人员造成极大的困难。针对上述问题, 本文基于 QT 软件开发一款可视化软件操作界面, 旨在简化特性指标计算过程, 降低操作难度。

目前常用的可视化界面设计软件包括 MiniGUI、Micro Windows 和 MATLAB GUI。相比之下, 由 QT 软件实现的可视化界面具有可扩展性强、自由度高、兼容性好等优点, 设计人员可根据实际情况将其迁移至不同设备^[8]。针对现有测试设备丰富多样、操作系统种类繁多等实际问题, 本文使用 QT 软件实现计算软件的设计及开发。所开发的计算软件使用 C++ 语言实现红外探测器特性指标的计算功能。计算流程如图 2 所示。操作人员可根据需求进入相应界面、设置参数, 并获得计算结果。

2.2.1 数据获取

本文所提出的特性指标计算方法以传统红外探测器测试系统为依托, 通过开发通用计算软件实现指标计算。部分特性指标需要使用探测器输出电平数据来完成计算。因此, 在特性指标计算前, 需将探测器输出电平数据读取至计算机内存内。

传统红外探测器测试系统具有数据输出格式多样性等特点。目前常见的数据格式包括 txt 文档和 EXCEL 表格两种。为保证所提出的

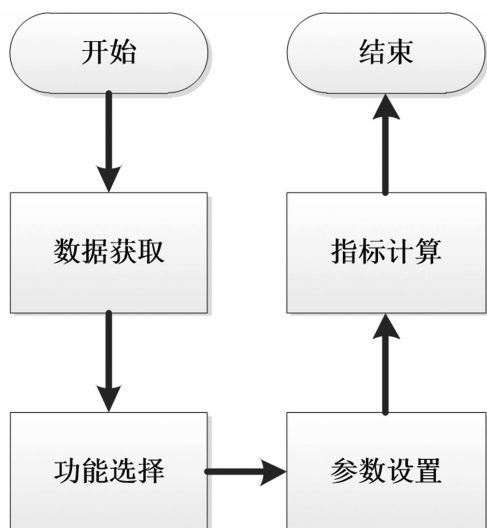


图2 软件算法流程图

指标计算方法具备通用性和兼容性，所设计的软件需具有读取上述两种数据格式的能力。

针对 txt 格式的数据文件，软件使用 QFile 类的 open() 和 readLine() 等函数实现数据文件的打开、逐行读取，并通过数据重组算法实现对逐行获取的电平数据的重新组合，最

终获得一个与探测器阵列尺寸相同的二位数组合。针对 EXCEL 格式的数据文件，软件使用 QAxObject 对象类的 getWorkSheet() 和 getCellString() 等函数，实现对数据文件的打开和数据的加载。由于读取的数据在被加载后尚为字符串格式，无法直接用于计算，因此使用字符串相关函数库内的 QString().number() 函数将数据转换为 double 类型数据，以便后续参与计算。

表 1 列出了具体的数据获取流程。

2.2.2 指标计算

获取数据后，计算响应信号、探测率等常规指标。计算结果作为输入参数参与到后续特性指标的计算过程。获取必要常规指标后，按照前面所述的特性指标计算原理对数据进行处理和计算，得到探测器的量子效率等特性指标，并将计算结果可视化于软件内的相应区域。具体算法流程如表 2 所示。

表 1 算法 1 的数据获取流程

输入：本地 EXCEL 或 txt 数据文件 输出：探测器输出数据矩阵 流程： 1：选择数据文件格式； 2：基于数据文件格式，调用数据加载算法： If 数据文件为 EXCEL 表格 (1) 文件打开； (2) 执行 getWorkSheet() 和 getCellString()； (3) 数据切分重组； else if 数据文件为 txt 文件 (1) 文件打开； (2) 循环执行 readLine() 直至文档结尾； (3) 数据切分重组； end

表 2 算法 2 的具体流程

输入：探测器输出数据矩阵及常规指标参数 输出：特性指标参数计算结果 算法流程： 1：读取数据矩阵； 2：根据前面所述的公式原理，计算暗电流、量子效率等特性参数指标； 3：输出计算结果，用于保存和可视化

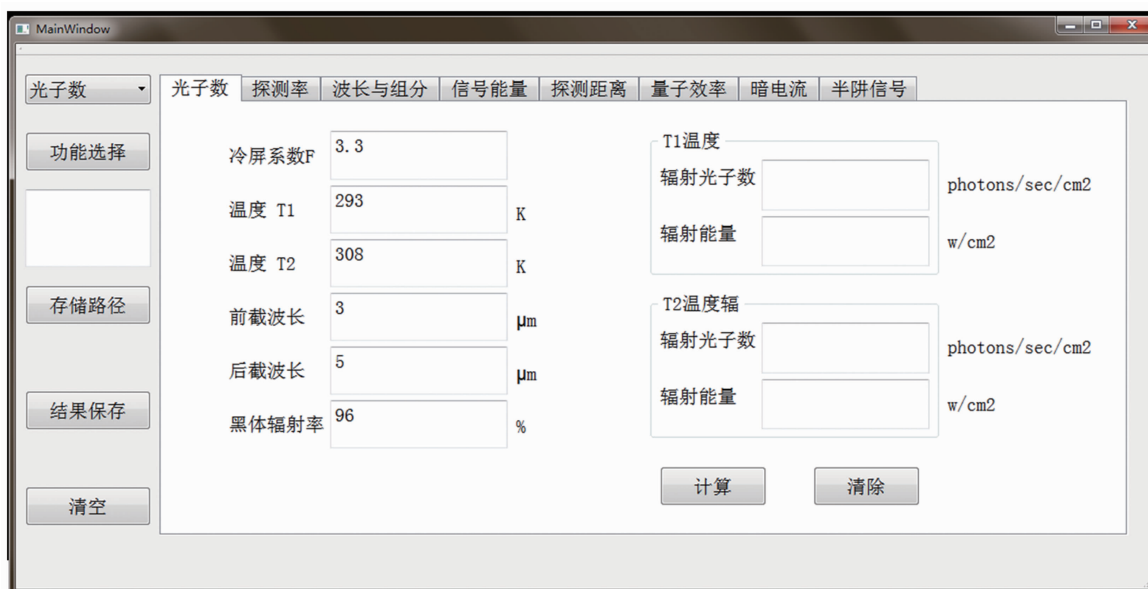


图 3 软件界面



图 4 光子数与辐射能量计算参数设置及计算结果展示图

3 实验结果

完成计算软件开发工作后, 搭建如前所述的红外探测器测试系统, 用于验证所开发软件的功能性和准确性。针对测试软件的人机交互友好性问题, 开发了图 3 所示的特性参数计算软件。实现的功能包括理论后截止波长计算、暗电流计算、量子效率计算等。

点击软件上方的功能按钮, 可实现对特性参数计算功能的选择。针对黑体辐射光子数计

算功能, 测试人员仅需将测试环境及探测器光谱测试结果中提供的截止波长相关数据填入至界面内的对应位置处, 然后点击“计算”按钮, 即可获得对应的计算结果(见图 4)。

由图 4 可知, 输入黑体温度、波段范围等参数后即可获得相应温度黑体辐射光子数及辐射能量计算结果。由于辐射能量可由光子数计算得到, 使用光子数作为计算结果准确性对比指标(结果见表 3)。

表 3 黑体辐射光子数计算结果对比

温度/K	前截止波长/ μm	后截止波长/ μm	计算光子数/ (photon/(sec \cdot cm 2)))	理论光子数/ (photon/(sec \cdot cm 2)))	误差/%
293	3.1	4.9	4.83×10^{14}	4.84×10^{14}	0.22
293	5.3	9.6	1.98×10^{16}	1.98×10^{16}	0.001
308	3.1	4.9	8.34×10^{14}	8.36×10^{14}	0.272
308	5.3	9.6	2.70×10^{16}	2.7×10^{16}	0.114

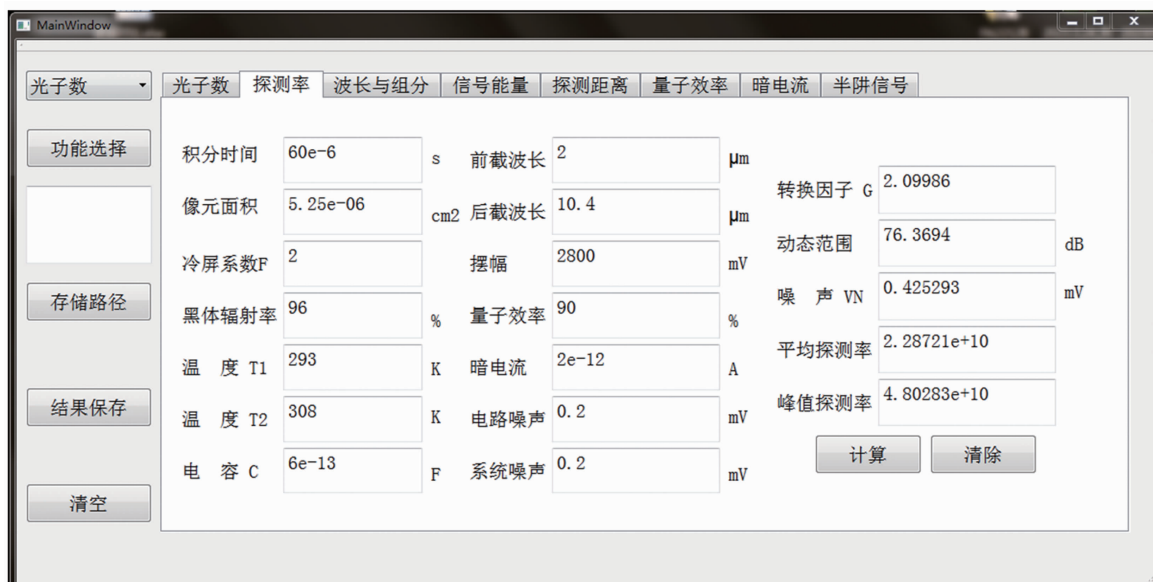


图 5 理论探测率计算参数设置及计算结果

表 4 探测率计算结果对比

阵列尺寸	像元面积/cm 2	前截止波长/ μm	后截止波长/ μm	计算结果	测试结果	误差/%
640 \times 512	6.25×10^{-6}	2.778	4.789	5.20×10^9	5.17×10^9	0.67
640 \times 512	6.25×10^{-6}	5.062	10.338	1.57×10^{10}	1.56×10^{10}	0.25
1280 \times 1024	2.25×10^{-6}	3.43	4.82	9.58×10^8	9.52×10^8	0.62

表 3 展示了使用所提出软件和理论公式计算的黑体辐射光子数。计算过程中使用的参数涵盖不同黑体温度和不同波段范围。由表 3 可知，计算误差均小于 0.3%，说明所开发的软件具备不同波段黑体辐射光子数及辐射能量的计算准确性和普适性。

针对黑体探测率的理论计算功能，测试人员需将部分探测器的测试参数、测试环境参数以及光谱参数输入至界面内的对应位置处，设置不同类型的噪声值，然后点击“计算”按钮即可获得相应计算结果(见图 5)。

表 4 对探测率指标计算结果进行了对比。

对比内容包括相同像元面积、相同截止波长条件下软件计算探测率和实际探测率的结果和误差。为表征所提方法的普适性，选用不同阵列尺寸、不同像元面积的多个探测器完成对比计算。可以看出，计算准确性均超过 99%，说明所开发的软件在部分参数已知的条件下具备探测率指标的计算准确性和普适性。

针对理论后截止波长计算功能，测试人员需设置探测器的工作温度以及碲镉汞的组分参数，然后点击“计算”按钮即可获得相应计算结果(见图 6)。



图 6 理论后截止波长计算参数设置及计算结果

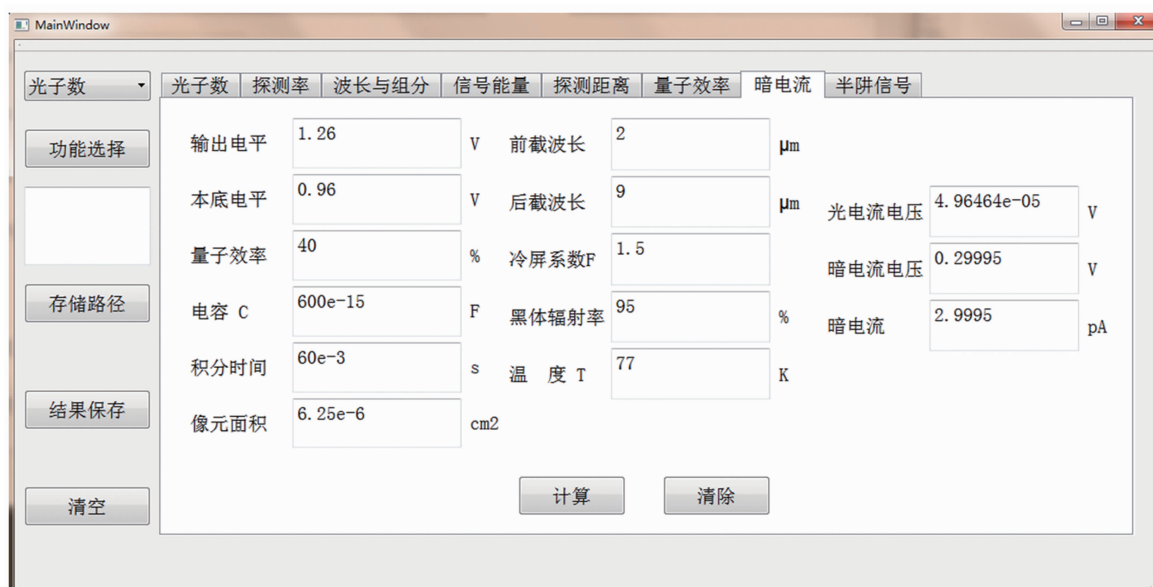


图 7 暗电流计算参数设置及计算结果

表 5 暗电流计算结果对比

阵列尺寸	像元面积/cm ²	前截止波长/μm	后截止波长/μm	计算结果/A	测试结果/A	误差/%
320×256	9.0×10 ⁻⁶	7.7	9.3	2.089×10 ⁻¹⁰	2.10×10 ⁻¹⁰	0.52
640×512	2.25×10 ⁻⁶	3.1	4.9	2.386×10 ⁻¹³	2.40×10 ⁻¹³	0.58
1280×1024	2.25×10 ⁻⁶	1	2.68	9.448×10 ⁻¹⁶	9.5×10 ⁻¹⁶	0.55

针对暗电流计算功能，测试人员获取探测器输出电平数据后，将电平数据、电容参数、积分时间等测试条件输入至界面内的相应位置处。软件可根据所设置的参数计算光电压、暗电压和暗电流等参数(结果见图 7)。

表 5 对暗电流指标计算结果进行了对比。对比内容包括相同条件下软件计算暗电流和实际测试暗电流的结果和误差。为证明所提方法的普适性，选用的探测器具备阵列尺寸、像元面积等多种差异性，而计算准确性均优于 99%。



图 8 量子效率计算参数设置及计算结果

表 6 量子效率计算结果对比

阵列尺寸	像元面积/cm ²	前截止波长/μm	后截止波长/μm	计算结果/%	测试结果/%	误差/%
640×512	6.25×10 ⁻⁶	5.062	11.785	32.8895	32.972	0.25
1024×256	5.76×10 ⁻⁶	0.93	2.69	76.3873	76.939	0.7171
1280×1024	2.25×10 ⁻⁶	1	2.68	77.5018	78.001	0.64

上述结果表明，所提方法适用于不同阵列尺寸、不同像元面积、不同波段探测器，且计算结果稳定、准确。

计算量子效率时，测试人员需获取探测器的响应信号、积分时间、积分电容等信息。其中，响应信号可使用如前所述的硬件设备获取。将上述信息填入相应位置后，可计算探测器量子效率特性参数(结果见图 8)。

表 6 对量子效率指标计算结果进行了对比。对比内容包括相同条件下软件计算量子效率和实际测试量子效率的结果和误差。参与对比的探测器具备阵列尺寸、像元面积、截止波长等多种差异性。由表 6 可知，在探测器各类条件存在差异的情况下，所提方法的计算误差均小于 0.8%，说明该方法的计算在各类条件存在差异的情况下具备准确性和稳定性。

4 结束语

针对红外探测器性能数据分析需求的多样性和复杂性，特别是暗电流、量子效率等不可

直接测得的探测器特性参数，本文提出了一种基于 QT 的红外探测器特性参数集成测试方法。该方法包括传统测试系统以及自主开发的计算软件，具备全波段任意温度黑体辐射光子数、暗电流、量子效率、理论探测距离等多种特性参数计算功能，实现了红外探测器的全面性能分析。所提软件综合多个性能参数计算功能。经多种阵列尺寸红外探测器验证，它具有准确、便捷等优点。鉴于对红外探测器性能测试评价的需求越来越复杂多样，所开发的软件将涵盖更多的指标参数，并提供更加便捷、快速的计算方式。

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] 王亮, 刘建伟, 吴卿. 12.5 μm 碲镉汞探测器工作温度对输出电平的影响 [J]. 红外, 2020, 41(9): 20-24.

- [3] 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.
- [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] 崇元, 艾葳, 王玉坤. 红外点目标探测距离估算模型 [J]. *指挥控制与仿真*, 2020, **42**(6): 59-62.
- [6] 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.
- [7] 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**(1): 301-304.
- [8] 刘博文, 陈彦冠, 王亮, 等. 基于 QT/C++ 的红外探测器多区域性能分析系统 [J]. *红外*, 2023, **44**(11): 23-30.
- [9] 郑跃瑜, 张志龙, 郭建. 高空远距离目标红外辐射及大气衰减模型研究 [J]. *红外*, 2015, **36**(1): 40-45.
- [10] 曹原. 红外探测器光电性能测试系统研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2014.