光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20250723002

红外探测器成像稳定性筛选方法

于元祯[1*]，高 璐[2]，陈彦冠[1]，王 亮[1]，邢艳蕾[1]，王晓龙[1]，张 磊[1]，李 娟[1]
（1. 中国电子科技集团公司第十一研究所，北京 100015；2. 火箭军装备部驻北京地区第六代表室，北京 100043）

摘 要： 针对现行国标判据中制冷型红外探测器成像质量稳定性评价方法不完整的问题，提出一种基于邻域响应一致性的稳定筛选方法。通过构建非稳定像元识别模型与量化评价体系，建立以非稳定像元占比为核心指标的红外探测器成像稳定性筛选标准。具体实施过程包括：采用相同校正系数对探测器进行多周期非均匀性校正，通过滑动窗口算法分析各像元与邻域像元的一致性，结合多次开关机测试累积非稳定像元数量实现红外探测器成像稳定性的判别。所提方法以多次测试数据为支撑，剔除测试误差影响，提高了筛选方法准确性。经过对320×256阵列规格、640×512阵列规格的探测器进行实验验证，该方法对不同阵列规模的红外探测器应用成像稳定性均有很强的识别能力，同时具有一定普适性和有效性。

关键词： 非稳定像元；碲镉汞；红外探测器；非均匀性校正；开关机
中图分类号： TN215 **文章编号：** 1001－5868(2025)06－1058－06

Screening Method for Evaluating Imaging Stability of Cooled Infrared Detectors

YU Yuanzhen[1], GAO Lu[2], CHEN Yanguan[1], WANG Liang[1], XING Yanlei[1], WANG Xiaolong[1], ZHANG Lei[1], LI Juan[1]
(1. The 11th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100015, CHN; 2. The Sixth Representative Office in Beijing of Rocket Force, Beijing 100043, CHN)

Abstract: This paper presents a screening method that can identify unstable pixels, based on the consistency of adjacent pixel responses, and can thus address the limitations of the national standard criteria for evaluating the imaging stability of cooled infrared detectors. The imaging stability of infrared detectors is assessed by counting the number of unstable pixels. This method applies the same non-uniformity correction coefficient to multiple test datasets and analyzes the consistency of each pixel and its adjacent pixels using a sliding window approach. The imaging stability of the detector is determined by accumulating the number of unstable pixels over multiple power on/off cycles. Supported by extensive test data, this approach mitigates test errors and improves the screening method accuracy. Experimental verification of detectors with 320 × 256 array and 640 × 512 array specifications reveals that the proposed method exhibits strong recognition ability, showing potential for ensuring the imaging stability of infrared detectors with different array scales. In addition, the universality and effectiveness of the proposed method are verified.

Key words: unstable pixels; mercury cadmium tellurium; cooled infrared detectors; non-uniformity correction; imaging stability; power on/off cycles

收稿日期：2025－07－23.

*通信作者：于元祯

0　引言

随着现代科技水平不断提高，红外探测器在各领域的需求与日俱增。为保证红外探测器在工程实践中的图像质量，对其开展全面、准确的性能分析是评价探测器是否具备工程应用能力的必要前提[1-2]。常规的光电性能测试和筛选方法仅通过响应率、探测率、噪声等效温差（NETD）、噪声等指标对探测器性能进行表征和评价[3-8]。基础方法可以表征探测器在实验室条件下的部分特性，但不能为后续系统级应用提供全面的分析评价。尤其是在红外探测器成像领域，人眼通过各像元间的亮度差异对红外探测器影像进行识别，当部分像元电平在温度激励后突变，且与邻域像元存在较大差异时，这些异常像元将被人眼识别到，若该类非稳定像元数量过多，红外探测器成像质量会受到严重影响[9-10]。文献[11]中所提方法虽将电平图上非国标响应异常像元量化，但无法识别成像过程中出现的非稳定像元。因此，如何准确筛选非稳定像元，成为红外探测器成像稳定性评价体系的核心问题之一。

本文提出一种基于多次开机累计邻域响应不一致像元数量的红外探测器成像稳定性筛选方法。该方法针对温度激励后探测器校正输出电压存在异常变化现象的非稳定像元，基于相邻像元一致性指标实现单次筛选，同时通过重复开关机测试，获取累计非稳定像元数量作为筛选辅助指标，从而提高筛选精度，有效避免因单次测试误差导致的误判或漏判问题。所提方法有效结合了滑动窗口判别方法和重复性实验方法，通过准确识别并量化非稳定像元数量，实现了对探测器成像稳定性的筛选。

1　实验原理分析

由于探测器视场角等因素影响，在实际应用条件下探测器直接输出成像较为模糊，需在成像前对探测器输出信号进行非均匀性校正，以保证其在视场角受限情况下具备良好的成像质量。然而，受限于探测器应用场景，无法随时采用均匀辐射黑体进行两点校正。因此，通常使用预先设计的各像元校正系数完成非均匀性校正。接下来将针对非稳定像元校正后电压差异机理展开分析，为后续的非稳定像元筛选提供理论支撑。

1.1　成像应用方法

红外探测器在成像之前需使用非均匀性校正，以消除视场角等因素对探测器内各像元的差异性影响。在实验室条件下，使用均匀辐射黑体为探测器提供标准辐射，进而获得准确的非均匀性校正系数。校正公式为：

$$Y(i,j)=K(i,j)\times X(i,j)+B(i,j) \quad (1)$$

式中，$Y(i,j)$表示校正后探测器输出电压，$X(i,j)$表示校正前探测器输出电压，$K(i,j)$和$B(i,j)$表示探测器校正系数。

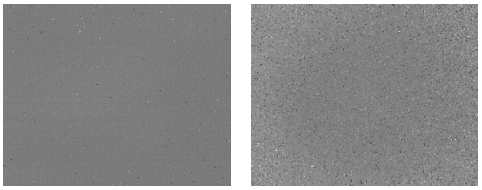
然而，在实际使用过程中，无法在每次开机前为探测器提供标准的实验室环境及均匀辐射黑体，导致其校正质量受环境因素影响。因此，探测器通常在出厂前固化了标定的非均匀性校正系数，确保每次开机后自动完成非均匀性校正，以消除环境影响。

在开机校正后，探测器输出图像的部分像元常存在如下情况：未在测试阶段出现噪声值超过2倍平均噪声或响应率低于平均响应率的50%，但其输出电压值与邻域像元存在较大差异。此类像元被定义为非稳定像元，即经过出厂前的标定校正系数校正后，像元输出电压与相邻像元无较大差异，而后续开机后校正后像元输出电压与相邻像元存在显著差异。该现象可使用公式(2)表示，即：

$$Y(i,j)=K(i,j)\times X(i,j)+B(i,j)+C(i,j) \quad (2)$$

式中，$C(i,j)$表示叠加于像元的动态变化电压值。当该值不为0时，表明对应像元与相邻像元的输出电压存在较大差异。

在$C(i,j)\neq 0$的情况下，校正后图像的部分像元与相邻像元电平差异较大。校正后图像如图1所示，图1(a)为非稳定像元较少器件的校正后图像，该图像中仅包含少部分非稳定像元，使用盲元替代等方法可消除其对成像质量的影响。图1(b)为非稳定像元较多器件的校正后图像，该图像中大量像



(a) 非稳定像元较少的校正后图像　　(b) 非稳定像元较多的校正后图像

图1　非稳定像元

元的$C(i,j)$值差异较大，且盲元替代等方法失效，导致成像质量显著下降。

2 探测器稳定性筛选方法

2.1 国标测试方法

现有制冷型红外探测器主要使用GB/T 17444-2013中所给出测试方法评价探测器性能指标。红外探测器制冷到规定温度后，使用专用测试设备为探测器提供工作所需偏置电压及时序信号，并分别采集探测器受不同温度黑体辐照条件下的输出电压数据。所获取输出电压数据用于后续筛选静态盲元。

获取探测器输出电压数据后，使用公式(3)计算探测器响应信号$V_S(i,j)$：

$$V_S(i,j)=\overline{VT}\left[(i,j),T\right]-\overline{VT}\left[(i,j),T_0\right] \quad (3)$$

式中，$V_S(i,j)$表示探测器第i行第j列像元的响应信号，$\overline{VT}\left[(i,j),T\right]$表示受温度为$T$的黑体辐照情况下探测器第$i$行第$j$列像元输出电压，$\overline{VT}\left[(i,j),T_0\right]$表示受温度为$T_0$的黑体辐照情况下探测器第$i$行第$j$列像元输出电压。GB/T 17444-2013中给出的静态盲元筛选方法包括响应率小于均值50%和噪声超过均值200%两种。其中，响应率由探测器响应信号计算得到，其计算公式为：

$$R(i,j)=\frac{V_S(i,j)}{P} \quad (4)$$

式中，$R(i,j)$表示探测器第i行第j列像元的响应率，P表示入射到像元的辐照功率差值，其计算公式为：

$$P=\frac{\sigma\times\left(T^4-T_0^4\right)\times A_D}{4\times(L/D)^2+1} \quad (5)$$

式中，σ表示斯特藩-玻尔兹曼常数，其值为5.673×10^{-12} W/(cm^2·K^4)；T_0和T表示不同黑体温度，且满足$T_0<T$，单位为K；A_D表示像元面积，单位为cm^{-2}；L表示黑体出射孔至焦平面像元面的垂直距离，单位为cm；D表示冷屏开口孔径，单位为cm。获取上述计算结果后，使用公式(6)～(9)所示筛选方法，判断像元是否为静态盲元。其中，死像元的定义为像元响应率小于均值的50%，即：

$$R(i,j)<0.5\times\overline{R} \quad (6)$$

式中，$\overline{R}$表示响应率均值，其计算方法为：

$$\overline{R}=\frac{1}{M\times N}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}R(i,j) \quad (7)$$

式中，M表示探测器像元行数，N表示探测器像元列数。

过热像元的定义为噪声值大于均值的200%，筛选公式为：

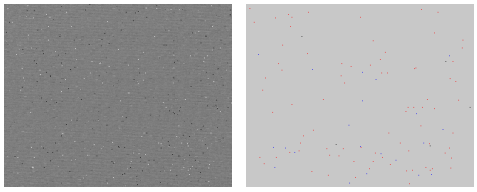
$$V_N(i,j)>2\times\bar{v}_N \quad (8)$$

式中，$V_N(i,j)$表示探测器第i行第j列像元的噪声值；$\bar{v}_N$表示探测器噪声均值，其计算方法为：

$$\bar{v}_N=\frac{1}{M\times N-d}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{N}V_N(i,j) \quad (9)$$

式中，d表示死像元数量，过热像元的筛选需剔除死像元的影响。

选取一只面阵规格为320×256的红外探测器组件，其校正图如图2(a)所示，在国标判据下的盲元如图2(b)所示。从图中可以看出，国标盲元图和红外探测器成像校正中出现的非稳定像元在数量和位置上均存在较大差异，因此无法仅通过国标静态测试指标来准确评价探测器成像质量的优劣。目前，亟需一种新的筛选方法，对红外探测器成像使用效果进行预估，筛选出成像稳定性差的红外探测器。



(a) 成像图 (b) 国标盲元图

图2 红外探测器成像图与国标盲元对比

2.2 非稳定像元筛选方法

当前国标GB/T 17444-2013给出的盲元筛选方法主要针对单次测试过程中出现的电压波动较大或响应电压小的像元，然而非稳定像元的表现特征是在多次开关机过程中出现电压波动性变化。因此，在国标测试过程中无法对非稳定像元进行有效识别和判断。针对此问题，常见的非稳定像元判别方法以目视校正图像为主，即通过两点校正方法凸显像元间差异性，并由人眼判断是否存在过亮或过暗的像元。然而，该方法受测试人员的主观判断影响，存在因人而异的判断标准，且对测试人员的相关经验要求较高，易造成错检或漏检问题。针对上述问题，提出一种基于一致性分析的非稳定像元筛选方法。该方法以局部中位值为依托，描述各像元与其相邻像元的一致性，从而获取准确的非稳定像元位置并汇总数量。所提方法流程如图3所示。

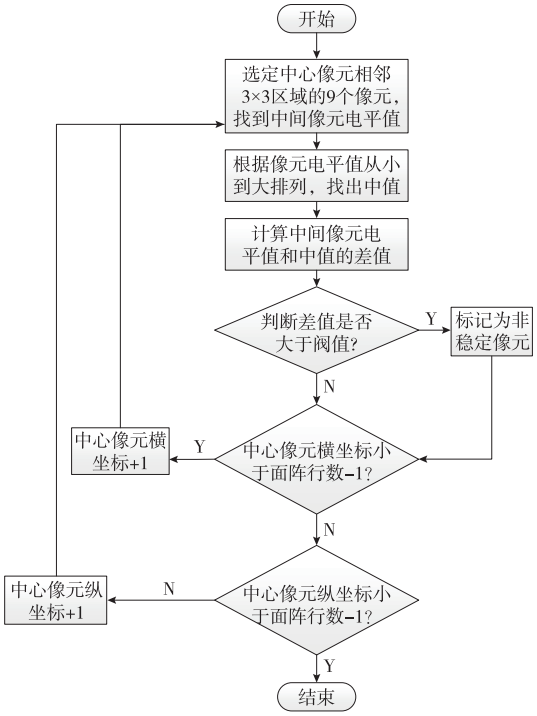


图3　非稳定像元筛选方法流程框图

受探测器自身特性影响，全阵列像元输出电压存在差异性，因此使用全面阵计算中位置无法准确表征各像元的实际输出状态。通过引入滑窗技术，将面阵划分为若干个3×3小区域，并计算得到各区域中位值。具体测试步骤为：

1）将校正图像数据代入，并选定3×3区域，设定边界条件阈值V_t；

2）将目标像元坐标$\boldsymbol{A}(i,j)$（为中心像元）的3×3邻域内9个像元电平提取出来，找出9个像元的中值像元码值V_m；

3）将阈值V_t代入，根据公式（10）判断当前像元$\boldsymbol{V}(i,j)$与中值像元电平差值的绝对值V_{th}是否大于设定阈值，根据公式（11）标记像元状态并记录到矩阵$\boldsymbol{A}$中。

$$V_{th}=|\boldsymbol{V}(i,j)-V_m| \tag{10}$$

$$\boldsymbol{A}(i,j)=\begin{cases}0, & V_{th}<V_t\\ 1, & V_{th}>V_t\end{cases} \tag{11}$$

若$\boldsymbol{A}$矩阵内位置为1，则表示探测器该位置的像元为非稳定像元。

2.3　探测器稳定性筛选方法

非均匀性校正为突出像元间输出电压差异提供技术支撑，而上述各小区域中位数的获取则为非稳定像元的筛选提供阈值支持。基于上述研究结果，所提方法将单次校正参数固化至探测器数据存储单元，并在后续以重复开机的方式获取多帧探测器输出电压数据。所获取输出电压数据使用相同校正参数实现非均匀性校正，并在此校正的基础上，以各小区域中位数为阈值，判断像元是否与相邻像元存在非一致性。根据这一判断结果，最终筛选出非稳定像元。所提探测器稳定性筛选方法的步骤如下：

1）分别采集探测器T_1，T_2温度输出电平X_{t1}，X_{t2}，以T_1，T_2温度电平根据公式（9）计算每个像元的两点校正参数$\boldsymbol{K}(i,j)$，$\boldsymbol{B}(i,j)$；

2）探测器回温1h，采集T_3温度输出电平X_{t3}，并将$\boldsymbol{K}(i,j)$，$\boldsymbol{B}(i,j)$输出电平值代入公式（1）计算校正图像Y_1；

3）根据非稳定像元位置标记法，计算在当前校正图像下的非稳定像元数量、位置；

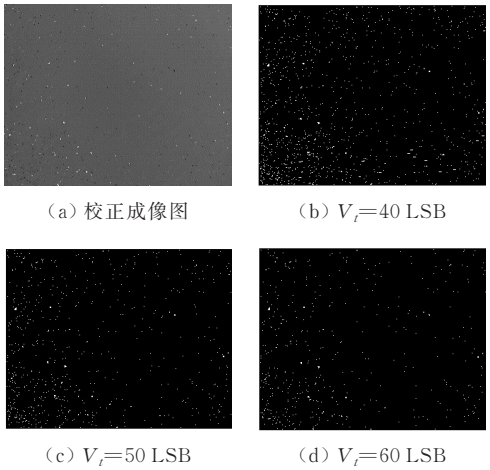
4）重复（2）～（3）的步骤n次；

5）判断n次开机非稳定像元总数，若未超过像元总数1%，则认为探测器稳定性好；若总数超过1%，则认为探测器像元稳定性不好。

3　实验结果

3.1　阈值V_t的选择

针对非稳定像元筛选方法中阈值的选择，根据校正成像图中亮度与相邻像元差异较大的像元，进行不同阈值V_t的计算，得到非稳定像元和人眼感知结果对比，如图4所示。



（a）校正成像图　（b）V_t=40 LSB

（c）V_t=50 LSB　（d）V_t=60 LSB

图4　不同阈值V_t下非稳定像元位置分布图

从图中可以看到，50阈值和校正图像上非稳定像目视的匹配度最高，因此筛选阈值定为50码值对探测器非稳定像元进行判别。

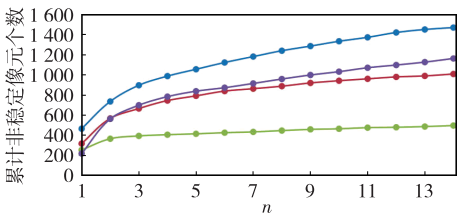
3.2 开关机次数 n 的选择

利用上述非稳定像元位置、数量量化的方法，对探测器成像稳定性筛选方法中的开关机次数 n 值进行量化。本次实验共选取4只红外探测器组件，分别进行14次开关机，累计每次开关机的非稳定像元数量，其结果如图5(a)所示。将每次开机非稳定像元个数变化情况占像元总数的百分比表示为增长率，其结果见表1和图5(b)所示。

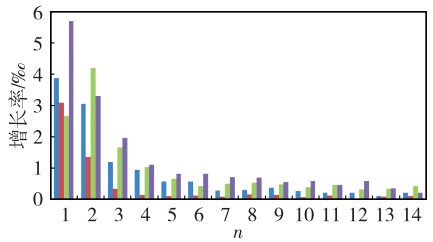
图5和表1的测试结果表明，累计的非稳定像元个数随开机次数的增多而逐渐增加，但是非稳定像元增长的速率会随着开机次数的增加而逐渐变慢。红外探测器的非稳定像元数量在前4次开机时增长较快，第5次开机的非稳定像元增长率已明显低于平均增长率。这表明单次开机时非稳定像元的出现具有一定随机性，仅以单次开机判别非稳定像元的数量和位置存在漏检的可能，4次开关机累计的非稳定像元个数相对稳定。

表1 开机次数与非稳定像元增长率(‰)

探测器编号	开关机次数														平均增长率
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1#	3.88	3.05	1.2	0.96	0.57	0.57	0.29	0.31	0.39	0.27	0.23	0.23	0.12	0.23	0.88
2#	3.1	1.37	0.34	0.15	0.11	0.13	0.1	0.16	0.15	0.07	0.13	0.05	0.09	0.12	0.43
3#	2.67	4.2	1.66	1.04	0.66	0.43	0.51	0.54	0.49	0.4	0.48	0.33	0.35	0.44	1.01
4#	5.69	3.3	1.97	1.11	0.83	0.82	0.72	0.71	0.56	0.59	0.48	0.59	0.37	0.23	1.28



(a) 累计个数与开机次数的关系



(b) 非稳定像元增长率与开机次数的关系

图5 非稳定像元个数与开机次数的关系

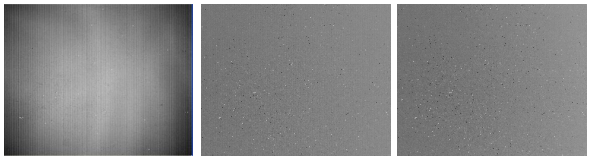
综合考虑测试准确度和效率，最终确定筛选方法的开机次数 n 取4，可有效规避单次开机带来的误差，提高探测器稳定性筛选的准确性。

3.3 探测器稳定性筛选结果

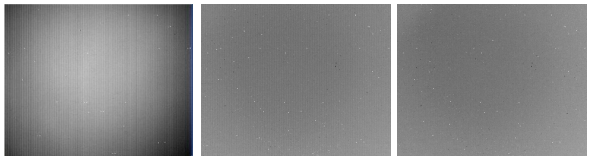
为验证本方法的可行性和有效性，选取国标盲元数量接近、阵列规格分别为320×256和640×512的中波红外探测器各两只。经重复开关机及非稳定像元筛选后，实验数据如表2所示，电平图和校正图如图6和7所示。由上述测试结果可知，尽管探测器在国标判据下存在相近的盲元筛选结果，然而不同探测器在重复开关机后存在不同数量的非稳定像元，且探测器间的差异性较大。因此，该结果有效证明了仅使用国标判据无法准确且完整的筛选出非稳定像元。此外，经上述实验结果可知，非稳定像元数量会影响红外探测器成像的质量。非稳定像元数量多的探测器，随着开关机次数的增加，成像质量劣化明显；而非稳定像元数量少的探测器，随着开关机次数的增加，成像质量并无明显变化。因此，所提出的方法可为成像质量变化提供预测依据，实现对红外探测器成像稳定性的筛选。

表2 国标盲元和非稳定像元数量对比

探测器规格	320×256元		640×512元	
探测器编号	1#	2#	3#	4#
国标盲元总数	38	36	167	168
累计4次开关机非稳定像元总数	1 604	286	1 788	511

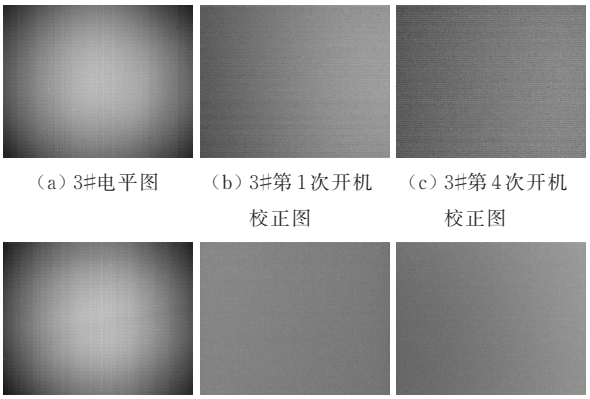


(a) 1#电平图 (b) 1#第1次开机校正图 (c) 1#第4次开机校正图



(d) 2#电平图 (e) 2#第1次开机校正图 (f) 2#第4次开机校正图

图6 320×256阵列图像对比



（a）3#电平图　（b）3#第1次开机校正图　（c）3#第4次开机校正图

（d）4#电平图　（e）4#第1次开机校正图　（f）4#第4次开机校正图

图7　640×512阵列图像对比

4　结论

针对红外探测器在应用过程中出现响应异常跳变、稳定性不足导致降低成像质量的问题，本文提出一种针对非稳定像元的探测器成像稳定性筛选方法。该方法以相同校正系数对探测器4次开机电平数据执行非均匀性校正，后以滑动窗口的方式分析各像元与其相邻像元的一致性，得到4次开关机累积非稳定像元总数，通过与面阵像元总数的数量对比，实现对探测器成像稳定性的筛选。经大量实验数据验证，所提方法适用于制冷型碲镉汞红外探测器。下一步计划在现有测试方法基础上，简化测试流程、优化测试方法、降低测试难度，以提高其针对不同阵列探测器的使用灵活性和兼容性。

参考文献：

[1] 王　巍，樊养余，司俊杰，等. 红外焦平面阵列盲元类型与判别[J]. 红外与激光工程，2012，41(9)：2261-2264.
Wang Wei，Fan Yangyu，Si Junjie，et al. Types and determination of bad pixels in IRFPA[J]. Infrared and Laser Engineering，2012，41(9)：2261-2264.

[2] 王　巍，樊养余，司俊杰，等. 红外焦平面阵列盲元的电平判别法[J]. 红外与激光工程，2012，41(12)：3172-3175.
Wang Wei，Fan Yangyu，Si Junjie，et al. Determination of IRFPA bad pixels with offset criterion[J]. Infrared and Laser Engineering，2012，41(12)：3172-3175.

[3] 崔　坤，陈凡胜，苏晓锋，等. 红外焦平面探测器响应率不稳定像元快速筛选方法[J]. 红外技术，2017，39(2)：130-135.
Cui Kun，Chen Fansheng，Su Xiaofeng，et al. A fast screening method of pixels with unstable response rate in IRFPA[J]. Infrared Technology，2017，39(2)：130-135.

[4] 李　璐，杨甬英，曹　频，等. 大口径光学元件表面灰尘与麻点自动判别[J]. 强激光与粒子束，2014，26(1)：012001.
Li Lu，Yang Yongying，Cao Pin，et al. Automatic discrimination between dusts and digs for large fine optics[J]. High Power Laser and Particle Beams，2014，26(1)：012001.

[5] 中国国家标准化管理委员会. 红外焦平面阵列参数测试方法：GB/T 17444—2013[S]. 北京：中国标准出版社，2014.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Measuring Methods for Parameters of Infrared Focal Plane Arrays：GB/T 17444—2013[S]. Beijing：Standards Press of China，2014.

[6] 李建林，谢　刚，刘　炼，等. 碲镉汞焦平面阵列无效像元（盲元）特征与成因[J]. 红外与激光工程，2021，50(2)：48-59.
Li Jianlin，Xie Gang，Liu Lian，et al. Characteristics and causes of non-effective pixels of HgCdTe FPA[J]. Infrared and Laser Engineering，2021，50(2)：48-59.

[7] 胡若澜，尚　超，王锦春，等. 基于时间序列的红外探测器响应特性漂移评价[J]. 航空兵器，2023，30(4)：123-130.
Hu Ruolan，Shang Chao，Wang Jinchun，et al. Evaluation of infrared detector response characteristics drift based on time sequence[J]. Aero Weaponry，2023，30(4)：123-130.

[8] 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)：21-28，35.
Wang Xiaolong，Gong Zhihong，Li Dongbing，et al. Research on bad pixel detection technology of line array infrared detector[J]. Infrared，2020，41(8)：21-28，35.

[9] 巩凌青，秦志远，耿利川，等. 基于视觉特性的影像增强算法研究[J]. 海洋测绘，2009，29(2)：45-48.
Gong Lingqing，Qin Zhiyuan，Geng Lichuan，et al. Contrast enhancement for image based on visual property[J]. Hydrographic Surveying and Charting，2009，29(2)：45-48.

[10] 于天河，赵树梅，兰朝凤. 结合视觉特性的红外图像增强方法[J]. 激光与红外，2020，50(1)：124-128.
Yu Tianhe，Zhao Shumei，Lan Chaofeng. Infrared image enhancement method combining visual characteristics[J]. Laser & Infrared，2020，50(1)：124-128.

[11] 刘世光，姚　诚，张　轶，等. 中波碲镉汞探测器次级盲元的量化及识别[J]. 红外，2022，43(5)：9-13.
Liu Shiguang，Yao Cheng，Zhang Yi，et al. Quantitative standards and auto recognition of sub bad pixels on MW HgCdTe detector[J]. Infrared，2022，43(5)：9-13.

作者简介：

于元祯（1998—），女，主要从事焦平面红外探测器测试与评价相关工作。