

文章编号: 1672-8785(2025)01-0016-07

红外成像非均匀性校正算法研究

康 琦 许洪刚* 韩 冰 马洪涛

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要: 盲元以及非均匀性噪声的存在会导致红外图像的成像质量大幅下降。针对此问题设计了一种红外图像非均匀性校正算法。首先, 介绍了两点校正算法的原理; 然后对盲元的定义以及传统的常用盲元检测方法和盲元补偿方法进行了分析, 并在此基础上提出了梯度阈值盲元检测法, 即通过计算所有相邻像元之间的灰度差值得到盲元的判断阈值; 接着采用改进的邻域代替法进行盲元补偿, 并将上述算法用于某自研中波红外相机中; 最后设计对黑体的成像实验, 分别将本文盲元检测、补偿算法与现阶段的常用方法进行比较, 对比校正前后图像的成像质量以及非均匀性指标。结果表明, 本文提出的非均匀性校正算法可有效抑制盲元及噪声, 校正后图像的非均匀性下降了 65%, 图像质量明显提高, 可满足该自研中波红外相机的工作需求。

关键词: 红外图像; 非均匀性校正; 盲元检测; 盲元补偿

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.01.002

Research on Non-Uniformity Correction Algorithm for Infrared Imaging

KANG Qi, XU Hong-gang*, HAN Bing, MA Hong-tao

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese

Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The existence of blind pixels and non-uniform noise will lead to a significant decrease in the imaging quality of infrared images. Aiming at this problem, a non-uniformity correction algorithm for infrared images is designed. First, the principle of the two-point correction algorithm is introduced. Then the definition of blind pixels and the traditional commonly used blind pixel detection method and blind pixel compensation method are analyzed. On this basis, a gradient threshold blind pixel detection method is proposed, that is, the judgment threshold of the blind pixel is obtained by calculating the grayscale difference between all adjacent pixels. Subsequently, the improved neighborhood substitution method is used for blind pixel compensation, and the above algorithm is used in a self-developed mid-wave infrared camera. Finally, an imaging experiment of a blackbody is designed, and the blind pixel detection and compensation algorithms proposed in this paper are compared with the commonly used methods at this stage, and the imaging quality and non-uniformity indicators of the images before and after correction are compared. The results show that the non-uniformity correction algo-

收稿日期: 2024-07-13

作者简介: 康琦(1996-), 女, 黑龙江大庆人, 硕士, 主要从事红外图像处理方面的研究。

*通讯作者: E-mail: 3021149074@qq.com

rithm proposed in this paper can effectively suppress blind pixels and noise, the non-uniformity of the corrected image is reduced by 65%, and the image quality is significantly improved, which can meet the working requirements of the self-developed mid-wave infrared camera.

Key words: infrared image; non-uniformity correction; blind pixel detection; blind pixel compensation

0 引言

航空相机是一种可对地面目标进行成像的光学载荷, 被广泛用于资源勘探、军事侦察、识别跟踪等多个领域^[1-2]。其中, 高分辨率、强穿透力的红外相机受到了各国学者的广泛关注^[1]。

作为红外相机的关键组成部分, 红外焦平面阵列的性能会对红外成像的质量产生直接影响。受到外部环境、制作工艺、材料特性等不可抗力因素的影响, 红外焦平面阵列会出现像元响应的非均匀性等问题^[3], 表现为红外图像上出现的条状纹理和亮暗盲元, 导致图像质量下降并很难获取有效信息。因此, 对红外图像进行非均匀性条纹的校正以及精确检测并补偿盲元, 是提高红外成像质量的有效措施^[4]。

现阶段一般采用场景校正算法和辐射源校正算法对非均匀性条纹进行校正。其中, 场景校正算法依据图像本身数据进行校正, 无需对均匀黑体成像, 但算法复杂且计算量大; 而辐射源校正算法(如单点法、两点法等)简单, 计算量小且校正效果明显, 在实际工作中应用较广泛, 但由于受到温漂的影响, 应定期校正探测器。本文采用两点校正法来消除图像背景中的条状纹理^[5]。

盲元和有效像元在辐射响应特性上存在差异。盲元检测是根据这一差异设计合理的判断阈值并据此筛选出盲元的过程, 而盲元补偿则是选取盲元所在邻域内的有效像元来替代盲元。随着图像处理技术的飞速发展, 目前常用的盲元检测方法主要是基于场景的检测法。本文在对图像进行两点校正的基础上, 采用了基于图像灰度梯度的盲元检测方法和改进的邻域代替盲元补偿方法。这排除了图像中非均匀性噪声的影响, 对连续盲元具有较好的检测与补

偿效果, 准确度高且计算方法简单。将该方案应用于某自研中波红外相机, 然后通过对黑体进行成像实验来验证本文算法的有效性。

1 两点校正算法原理

在一定温度范围内, 若忽略 $1/f$ 噪声, 则探测器各个像元的响应特性与辐射通量一般呈线性关系^[5], 因此像元的辐射响应特性可表示为

$$Y_{ij}(\varphi) = C_{ij} \cdot \varphi + D_{ij} \quad (1)$$

式中, C_{ij} 为像元 (i, j) 对应的增益量, D_{ij} 为像元 (i, j) 对应的偏置量, 则两点校正法的计算公式为

$$R_{ij} = K_{ij} \cdot Y_{ij}(\varphi) + B_{ij} \quad (2)$$

式中, R_{ij} 为校正后探测器输出的响应值, K_{ij} 为校正增益, B_{ij} 为校正偏移量, $Y_{ij}(\varphi)$ 为探测器未经校正前输出的初始响应值。不同于理想状态, 像元的输出响应 $Y_{ij}(\varphi)$ 在实际工作中是各不相同的, 即像元响应曲线不重合。而两点校正则是利用不同温度下的均匀辐射黑体获取多帧图像, 计算各个像元的平均响应值, 从而得到增益 K_{ij} 和偏移量 B_{ij} , 最终可使全部像元的响应输出曲线趋近重合并近似于像元的平均响应值, 进而提高红外图像的均匀性。

假设在高温 T_H 下, 像元的平均响应为

$$R_H = K_{ij} \cdot Y_{ij}(\varphi_H) + B_{ij} \quad (3)$$

在低温 T_L 下, 像元的平均响应为

$$R_L = K_{ij} \cdot Y_{ij}(\varphi_L) + B_{ij} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可得增益量和偏移量:

$$K_{ij} = \frac{R_H - R_L}{Y_{ij}(\varphi_H) - Y_{ij}(\varphi_L)} \quad (5)$$

$$B_{ij} = R_H - K_{ij} \cdot Y_{ij}(\varphi_H) \quad (6)$$

红外成像系统工作时, 将 K_{ij} 和 B_{ij} 代入即可进行两点校正。该算法计算量小、操作简单, 且校正偏移系数 B_{ij} 可以保存到探测器中。

工作环境不产生较大变化时,探测器开机后该算法无需再次校正即可直接使用。

2 盲元动态检测及补偿算法

2.1 盲元定义

死像元和过热像元可统称为盲元^[6]。在 GB/T 17444-2013 中,从像元响应率和像元噪声的角度对盲元进行了定义,即红外探测器对均匀黑体成像时,计算像元平均响应率:若像元响应处在平均像元响应率的一半以下,则该像元为死像元;若像元噪声处在平均像元噪声 2 倍以上^[7],则该像元为过热像元。图 1 所示为焦平面阵列中像元的输出响应曲线。响应特性可分为 A(截断区)、B(工作区)、C(饱和区)三个阶段^[8]。死像元的输出响应曲线处于截断区,在红外图像中一般以暗点的形式呈现;过热像元的输出响应曲线处于饱和区,在图像中一般以亮点的形式呈现。

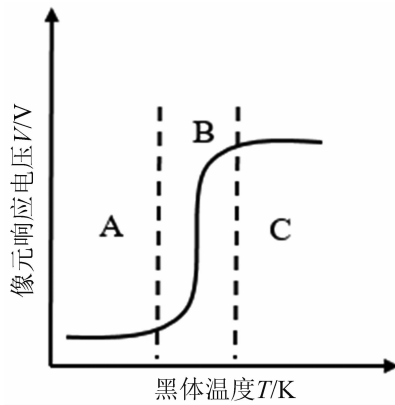


图 1 像元响应特性曲线

2.2 盲元检测算法

在 GB/T 17444-2013 中对盲元进行检测时用到了像元噪声、平均噪声等参数。平均噪声是指对有效像元的噪声取平均值。但由于盲元的存在,平均噪声的计算难度很大,因此我们很难根据国标来检测盲元。

在实际工作中,加窗“ 3σ ”法是现阶段较为常见的盲元检测法^[9]。红外探测器像元的输出近似 $N(\mu, \sigma^2)$ 高斯分布。以图像中某个像元 (i, j) 为中心,选取周围 $N \times N$ 的邻域进行加窗处理,计算邻域内像元灰度的均值 μ 以及均

方根值 σ 。若中心像元 (i, j) 的灰度值与均值 μ 相差超过 3σ , 则该中心像元即为盲元。依此类推,对每个像元使用上述加窗“ 3σ ”法进行盲元检测。该方法原理简单,但图像经过两点校正预处理后,窗口内的像元响应均匀性较好。当窗口内盲元个数较少或者邻域内包含目标边缘信息时,像元灰度均方根值 σ 较小。此时用 3σ 作为检测依据会较为严格,从而导致盲元过检,造成图像有效信息的损失;当窗口内包含较多连续盲元时,用 3σ 作为检测依据会导致盲元漏检,造成成像质量下降。

针对上述问题,本文采用了基于灰度梯度的盲元检测方法。盲元点的灰度值与邻域内像元的灰度值相比会有较大差异。计算该像元在水平、竖直方向上与相邻像元灰度值之差的绝对值作为盲元检测的阈值,具体如下:

$$G_H(i, j) = |G(i, j) - G(i, j + 1)| \quad (7)$$

$$G_V(i, j) = |G(i, j) - G(i + 1, j)| \quad (8)$$

$$T_H = \max(G_H) \quad (9)$$

$$T_V = \max(G_V) \quad (10)$$

式中, $G_H(i, j)$ 为水平方向上所有相邻像元间的灰度值之差, $G_V(i, j)$ 为竖直方向上所有相邻像元间的灰度值之差, T_H 为水平方向上相邻像元间灰度差值的最大值, T_V 为竖直方向上相邻像元间灰度差值的最小值。在盲元检测过程中,若当前像元在水平、竖直方向上的灰度梯度均大于相应方向上的梯度阈值,则该像元即为盲元,反之则不被判定为盲元。阈值判断公式如下:

$$G_H(i, j) \geq Y \cdot T_H \quad (11)$$

$$G_V(i, j) \geq Y \cdot T_V \quad (12)$$

此外,考虑到图像 $N \times N$ 邻域内存在多个连续盲元的情况,在按照上述灰度梯度法检测盲元时,根据设置的阈值对与当前盲元 P_5 相邻的像元进行预判。如图 2 所示,以 3×3 邻域为例,若 $P_1 \sim P_4$ 、 $P_6 \sim P_9$ 中任一像元与盲元 P_5 的灰度差值均在阈值范围外,则 P_5 仅为单一盲元;若 $P_1 \sim P_4$ 、 $P_6 \sim P_9$ 中有一个像元与 P_5 的灰度差值在阈值范围内,则有两个

	P1	P2	P3	
	P4	P5	P6	
	P7	P8	P9	

图 2 像元矩阵

连续盲元；若 P1~P4、P6~P9 中有两个像元与 P5 的灰度差值在阈值范围内，则有三个连续盲元；可依此类推邻域内连续盲元的个数。

与加窗“ 3σ ”检测法相比，上述方法无需考虑窗口大小的选择，可完全覆盖图像边缘处的像元，并能改善加窗“ 3σ ”检测法存在的盲元过检问题，而且可以准确判断出图像中的连续盲元，在提高检测精度的同时也可保留图像的有效信息。

2.3 盲元补偿算法

利用盲元检测算法获得盲元位置后，一般可根据盲元附近的有效像元来进行补偿。邻域代替法是实际工程应用中较为常用的盲元补偿方法^[10]。根据式(13)计算盲元点周围八个像元的灰度平均值并将其用于替代盲元，如图 3 所示。其中， $X_{i,j}$ 表示盲元点所在的位置。

$$X_{i,j} = (X_{i-1,j-1} + X_{i,j-1} + X_{i+1,j-1} + X_{i+1,j} + X_{i-1,j} + X_{i-1,j+1} + X_{i,j+1} + X_{i+1,j+1}) / 8 \quad (13)$$

	$X_{i-1,j-1}$	$X_{i,j-1}$	$X_{i+1,j-1}$	
	$X_{i,j-1}$	$X_{i,j}$	$X_{i+1,j-1}$	
	$X_{i-1,j+1}$	$X_{i+1,j}$	$X_{i+1,j+1}$	

图 3 3×3 邻域内像元

对于单点盲元，邻域代替法的补偿效果较好。但若某一邻域内存在连续盲元，该方法则无法补偿。针对传统邻域代替法对连续盲元进行补偿时的图片质量失真问题，本文采用一种改进的邻域代替盲元补偿算法，仅筛选出盲元附近的有效像元来补偿盲元。这在操作过程中可有效避免使用盲元进行补偿，从而大幅提升补偿效果，最大限度地还原了图像的有效信息。

盲元补偿的算法流程如下：

(1)按照上述灰度阈值法检测盲元，记录所有盲元所在的位置信息为 $X_{1(i,j)}$ 。

(2)使用邻域代替法对单点盲元进行补偿。补偿后的图像记为 X_2 。

(3)确定图像 X_2 中剩余盲元的位置坐标，并将其记为 X_M 。

(4)分别选取盲元 X_M 在水平、垂直方向上的第一个有效像素点 a 、 b 、 c 、 d 并记录灰度值。

(5)若 $|a-b| > 10$ 或 $|c-d| > 10$ ，则选取盲元点 X_M 在斜对角线四个方向上的第一个有效像素点 x 、 y 、 z 、 w 并记录灰度值；若 $|a-b| \leq 10$ 且 $|c-d| \leq 10$ ，则计算 a 、 b 、 c 、 d 的灰度平均值并将其用来对盲元 X_M 进行补偿。

(6)若斜对角线上 x 、 y 、 z 、 w 满足 $|x-y| \leq 10$ 且 $|z-w| \leq 10$ ，则采用该组中 x 、 y 、 z 、 w 的值对盲元 X_M 按照邻域替代法进行补偿；若斜对角线上 x 、 y 、 z 、 w 的灰度值也不满足上述关系，则选取上述两组数据中灰度差值较小的一组数据进行盲元补偿。

根据前文关于图像两点校正以及盲元检测与补偿的分析，确定本文提出的红外图像非均匀性校正算法的流程图(见图 4)，可使上述校正流程更清晰、直观。

3 仿真结果与分析

3.1 盲元检测结果分析

搭建红外目标成像实验，采用某自研制冷式中波红外相机对均匀黑体成像。首先关闭红

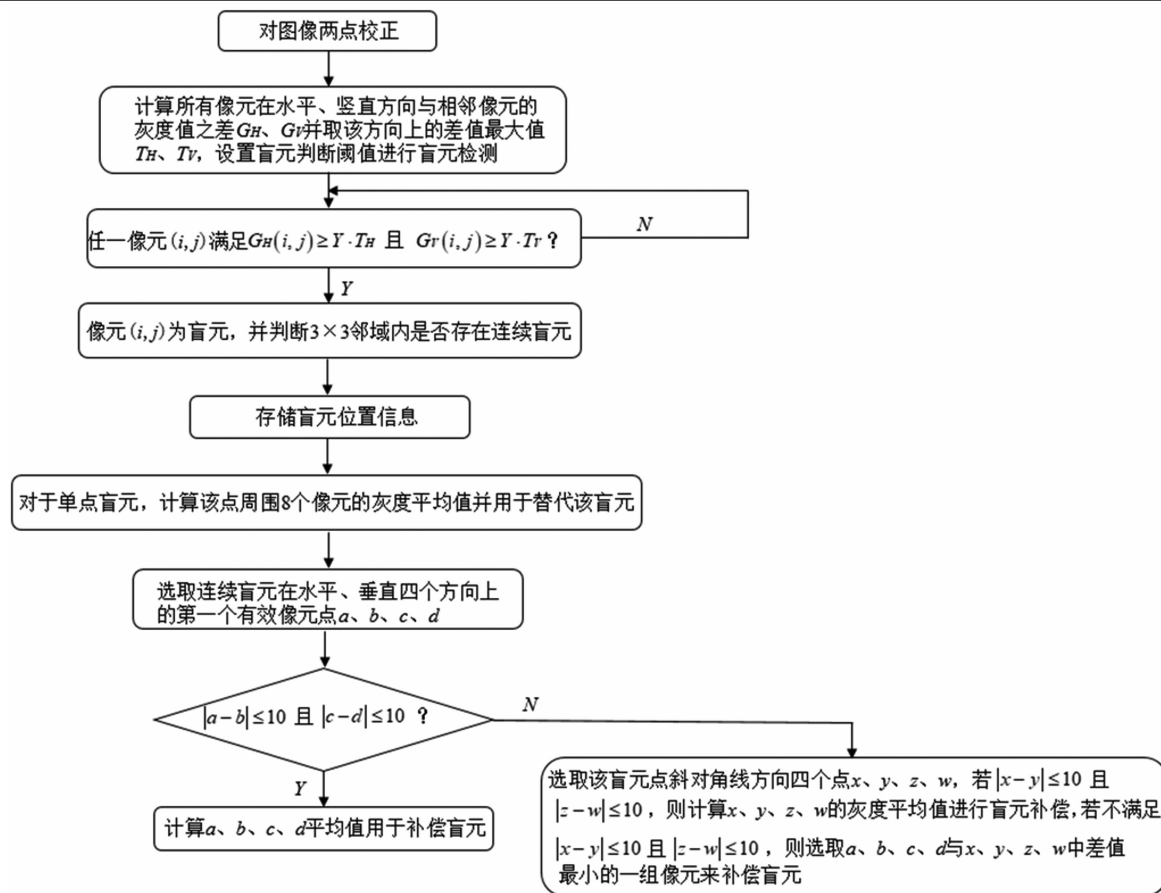


图4 图像校正流程图

外相机的两点校正以及盲元检测与补偿功能。采集的原始图像如图5所示。肉眼可见图像中存在不均匀条纹以及盲元，成像质量较差。图6所示为采用原始方法(即将像元灰度值作为像元响应率，再将国标 GB/T 17444-2013 中对盲元的定义作为判断阈值)得到的盲元检测结果。图7所示为利用加窗“ 3σ ”法进行盲元检测的结果。图8所示为采用本文提出的灰度梯度盲元检测方法所得到的结果。表1列出了上述三种盲元检测方法的检测结果。



图5 原始图像

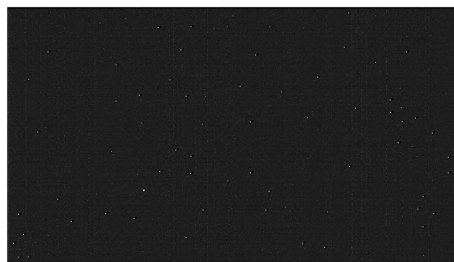


图6 国标方法的盲元检测结果

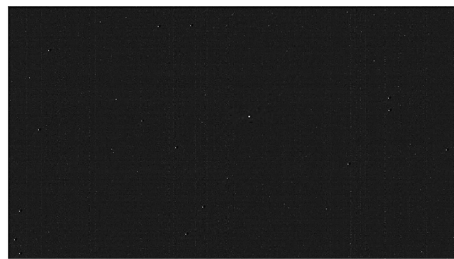
图7 加窗“ 3σ ”法的盲元检测结果

表1 盲元检测结果

	国标方法	加窗“ 3σ ”法	灰度梯度法
盲元数量/个	323	179	248



图 8 灰度梯度法的盲元检测结果

从图 5~图 8 以及表 1 可以看出, 国标方法的误判现象严重; 加窗“ 3σ ”法无法准确检测出图像中的连续盲元, 存在漏判现象; 而本文提出的灰度梯度盲元检测方法对于单点以及连续盲元均有较好的检测效果, 检测精度高。

3.2 图像校正结果分析

非均匀性 N_U 一般可用来评价红外图像的补偿及校正效果。对于大小为 $M \times N$ 的红外焦平面, 分别计算阵列内有效像元响应灰度值的均方差和阵列内全部像元的响应平均值。二者的比值即为非均匀性 N_U , 具体计算公式如下:

$$N_U = \frac{1}{\bar{p}} \sqrt{\frac{1}{M \times N - (d+h)} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (p_{ij} - \bar{p})^2} \quad (14)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{M \times N - (d+h)} \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N p_{ij} \quad (15)$$

式中, d 代表过热像元数量, h 代表死像元的数量, \bar{p} 是全部有效像元的响应平均值, p_{ij} 为坐标 (i, j) 处的像元灰度值。

打开相机的校正及盲元检测与补偿功能, 对采集到的图像进行两点校正并采用灰度梯度法进行盲元检测。在此基础上, 分别使用传统邻域替代法和本文改进的邻域替代法进行盲元补偿(图 9 为原始图像), 得到最终的图像如图 10 和图 11 所示。可以看出, 传统邻域替代法对于单点盲元有较好的处理效果, 但无法补偿连续盲元; 而采用改进的邻域替代法进行盲元补偿后的图像背景均匀且无明显盲元。根据式(14)计算经过本文算法校正前后图像的非均匀性(结果见表 2)。经过校正后, 图像的非均匀性降低了 65%, 成像质量得到了较大改善。



图 9 原始图像

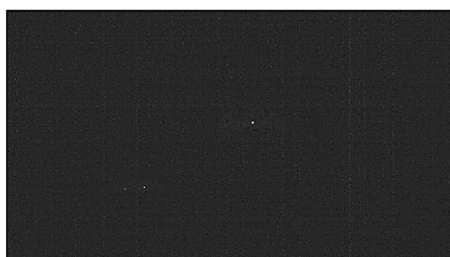


图 10 传统邻域替代法的最终图像

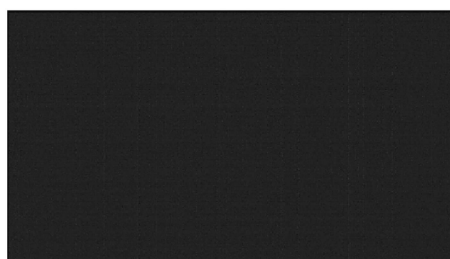


图 11 改进的邻域替代法的最终图像

表 2 非均匀性校正前后的图像非均匀性

红外图像非均匀性	校正前	校正后
		0.051

4 结束语

本文以 GB/T 17444-2013 为基础, 对红外目标成像非均匀性问题进行了研究。采用两点校正算法去除图像背景中的不均匀条纹; 利用梯度阈值法对单点、连续盲元进行检测, 并采用改进后的邻域代替法对盲元进行补偿。搭建对黑体的成像实验, 关闭红外相机所有补偿功能并采集原始图像。对比国标盲元检测法、加窗“ 3σ ”法以及本文灰度梯度阈值法的盲元检测效果。可以看出, 本文灰度梯度阈值法的检测精度高, 对于连续盲元具有较好的检测效果。对原始图像进行两点校正与盲元补偿, 并计算非均匀性指标 N_U 。通过对比校正前后的

图像可以看出,本文算法校正效果好、准确度高,图像非均匀性与校正前相比降低了 65%,成像质量高。此算法已经有效地应用于该自研红外相机。在接下来的研究中,将其与红外系统的硬件设计相结合,不断优化算法实时性等指标,为后续研制高分辨率红外成像系统奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 孙超,张洪文,王沛,等. 中波红外相机盲元的实时动态检测与补偿方法 [J]. *红外技术*, 2021, **43**(9): 869-875.
- [2] 曾岩,黄文刚,马敏舒,等. 一种可实现非均匀校正和盲元补偿的像元 ADC [J]. *激光与红外*, 2021, **51**(7): 938-943.
- [3] 张小龙,赵桂芳,崔瑞清. 红外焦平面阵列盲元检测与补偿算法研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2008, **28**(1): 200-210.
- [4] 郑洪波,邱晓庆,张浩平,等. 基于 FPGA 的红外图像非均匀性校正系统设计 [J]. *红外*, 2023, **44**(9): 8-15.
- [5] 郑晓. 红外导引头目标成像及检测一体化技术研究 [D]. 北京:中国运载火箭技术研究院, 2019.
- [6] 李言俊,崔瑞清,赵桂芳,等. 一种新的红外焦平面阵列盲元检测方法 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(1): 51-65.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局. 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, 2013.
- [8] 胡鹏博,詹东军,陈华旺. 一种红外焦平面阵列盲元检测与补偿方法 [J]. *光学与光电技术*, 2017, **15**(3): 69-73.
- [9] 胡明鹏,马冬梅,刘志祥,等. 红外焦平面阵列无效像元检测技术研究 [J]. *光电器件*, 2008, **29**(2): 184-187.
- [10] 安广齐,赵刻,张海峰,等. 红外探测器盲元检测及补偿 [J]. *航空兵器*, 2016, **35**(3): 54-58.