

·信号与信息处理·

基于图像处理的红外成像设备非均匀性检测方法

吕俊伟¹, 陈玉华¹, 宋庆善²

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 91213 部队 装备部, 山东 烟台 264001)

摘要:提出基于图像处理的图像非均匀性检测方法,作为判断红外成像设备工作正常与否的依据。以标准红外成像设备所成图像为标准图像,在测试条件不变的情况下,利用待测红外成像设备捕获红外图像,与标准图像做差,对差值图像二值化处理,求出设备标准差。根据罗曼诺夫准则思想,建立红外成像设备非均匀性判定准则,利用待测设备标准差来判断设备是否存在非均匀性。

关键词:红外成像设备;图像处理;非均匀性检测;标准差;罗曼诺夫斯基准则

中图分类号:TN219

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-04-0031-08

Non-uniformity Testing Method of Infrared Imaging Equipment Based on Image Processing

LV Jun-wei¹, CHEN Yu-hua¹, SONG Qing-shan²

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;

2. Equipment Department of 91213 Army Unit, Yantai 264001, China)

Abstract: Based on image processing, the image non-uniformity testing method is proposed as the reference to determine whether the infrared imaging equipment in normal operation or not. The images from the standard infrared imaging equipment are taken as standard images. Under the same testing condition, the infrared imaging equipment to be tested is used to capture infrared images, the difference with the standard images is made, and the difference images are performed through binaryzation processing and the standard deviation of the equipment is deduced. According to Romanowski criterion, non-uniformity determination criterion of the infrared imaging equipment is established. The standard deviation of the equipment to be tested is used to determine whether the equipment has non-uniformity or not.

Key words: infrared imaging equipment; image processing; non-uniformity testing; standard deviation; Romanowski criterion

红外成像设备由于其保存条件改变,或者运输等原因,以及红外探测器因其制造工艺原因,普遍存在各探测单元响应不一致的问题,且其响应会随着时间发生漂移,会对红外成像设备中焦平面阵列输出的均匀性产生影响,导致其捕获图像含有噪点或者疵点,严重会使图像不清晰、图像失真将直接

影响到侦察监视与定位的准确性。因此,在使用之前,必须对红外成像设备进行检测。红外焦平面阵列的非均匀性是红外成像设备好坏的一个评价标准,根据其非均匀性可判断设备能否正常工作。在实验室条件下对红外成像设备进行检测,精度虽高但其过程复杂。基于此,在外场实地检测时,需要

收稿日期:2015-07-23

基金项目:国家自然科学基金(61032001;60801049)

作者简介:吕俊伟(1960-),男,山东牟平人,教授,博士研究生导师,1985年于吉林工业大学获硕士学位,2003年与法国第戎大学获得博士学位,主要从事目标识别与智能系统、目标探测与跟踪等方面的研究;陈玉华(1984-),男,山东聊城人,硕士,研究方向为目标识别与跟踪。

一种更快捷简便、更有效的畸变检测方法。

1 基于数字图像处理的红外成像设备非均匀性检测原理

在理想情况下,红外焦平面阵列受均匀辐射时,输出幅度应完全一样。而实际上,由于探测器的加工工艺、材料、温度和偏置情况的不均匀性,造成了输出幅度并不相同,即红外焦平面阵列在外界同一均匀辐射场输入时各个光敏元之间响应输出的一致性,这就是所谓的红外焦平面阵列的非均匀性。(nonuniformity, NU)。设备非均匀性直接反映到图像上就是噪声和斑点,因此根据图像上噪声和斑点的情况可判断成像设备是否存在非均匀性问题。

在实验室通过判断靶标图像噪声或斑点情况来判断红外成像设备是否存在非均匀性。选择靶标为一可保持恒温状态的,并且温度可调节的方形靶标。其靶标大小应大于成像系统 1/4 视场。以对靶标所成图像作为目标图像,以图像噪声情况为测试设备要测试的内容,靶标在四个不同温度下,分别捕捉标准成像设备和待测试设备所成图像,按次序分别编成 1~4 组。通过图像帧频采集卡获取这五组图像,利用计算机对图像进行处理,求出图像差值,把每组图像差值图像进行二值化处理,计算四组差值图像标准差均值。根据这四组图像标准差均值大小可以判断待测设备噪声情况,来判断是否存在非均匀性问题。如果标准差均值较大,则可判断待测试设备非均匀性问题比较严重,应当判定为不合格。

首先把标准设备放置到摄像机底座上,将其所成的图像作为标准图像存储到计算机硬盘中备份,然后将标准设备换成待测试设备,将图像存储到计算机硬盘备份,如此按次序得到五组图像,按照如图 1 所示结构图进行组装。

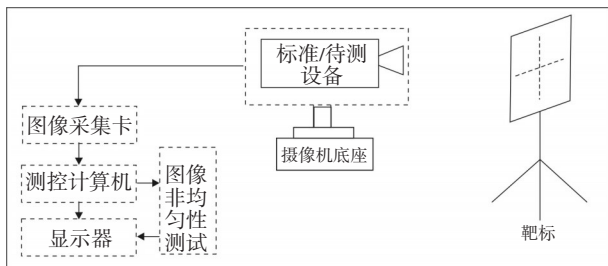


图1 组装结构图

1.1 基于数字图像处理的红外成像设备非均匀性检测过程

测试时,将标准红外成像设备所成靶标图像输入计算机,利用数字图像处理方法对图像进行滤波,除去原始图像的噪声后,再进行二值化处理及边缘分割,得出图像的面积和周长。在同样条件下,更换待测试设备,将待测设备所成图像输入计算机,二者进行处理对比结果。流程如图 2。

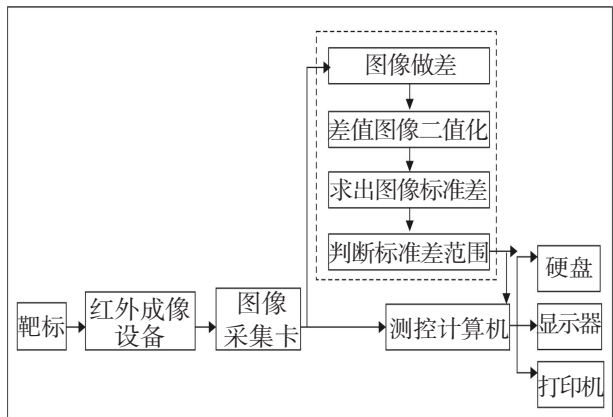


图2 图像处理对比结果流程图

测试过程可分三步:

(1)设定靶标温度,获取标准设备图像和待测设备图像;(2)获取图像差,并进行二值化,保存;(3)计算差值图像标准差和均值,判断图像是否有非均匀问题。

1.1.1 设定温度,捕捉不同温度下红外成像设备和待测红外成像设备的图像

靶标温度设定在某一恒定温度,按照图 1,把标准红外成像设备固定在摄像机底座上,捕捉其所成灰度图像并储存到计算机上。靶标不变,在温度不变,红外成像设备更换为待测红外成像设备,捕捉所成图像,存储到计算机中。

改变靶标温度,依照以上同样步骤,捕获标准成像设备与待测红外成像设备的图像。每个温度下两幅图像编成一组,捕捉四组图像。

1.1.2 计算图像差值,并进行二值化处理,计算差值图像标准差

计算差值图像。与标准红外成像设备相比,待

测红外成像设备即被噪声污染过的噪声图像,用待测红外成像设备减去标准红外成像设备,差值图像就是背景为黑色的噪声的图像表现。把差值图像二值化,阈值取为1,这样,所有不为零的噪声都以白色像素形式呈现在图像上。因为在不同温度下,红外成像设备温度探测器响应是不同的,为排除温度对图像计算结果影响,不应该只取一幅图像,所以要获取不同温度下四组图像,这样可以最大程度判断温度对问题像元的非均匀性影响。

计算二值图像标准差,设图像像素为 $a = P_x \times P_y$,做差后非零像素数为 n ,则差值图像均值为 $\bar{x} = [n \times 1 + (a - n) \times 0] / a = n / a$ 。

图像标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{n(1 - n/a)^2}{a}} = \sqrt{\frac{n/a(1 - n/a)^2}{a}} = y = \sqrt{t(1-t)^2} \quad (1)$$

其中, $t = n/a$,且 $0 \leq t \leq 1$,易知 $y = \sqrt{t(1-t)^2}$ 为增函数,故 t 越大, n 越大(a 为常值)。

即标准差越大表示噪声越多,即非均匀性越明显。

综上,计算二值图像标准差,背景为黑色像素的情况下,标准差越大,说明噪声元素越多,表明非均匀性越明显。

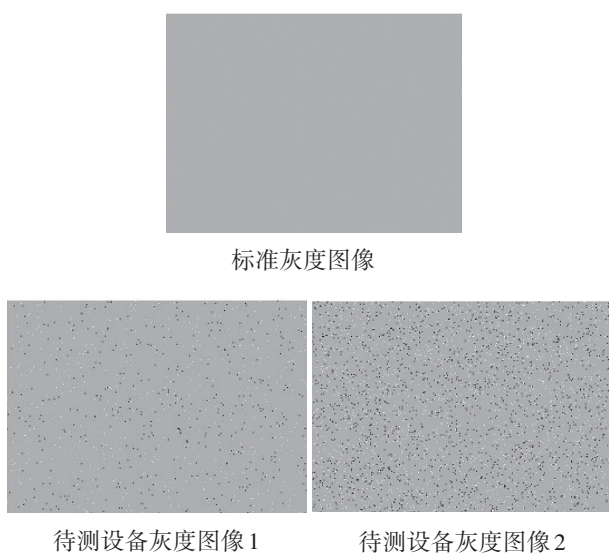


图3 在201灰度级下,标准灰度图像与待测设备灰度图像对比图

由图3可知,差值图像标准差分别为:待测设备灰度图像1为0.071 9,待测设备灰度图像2为0.140 9。

1.1.3 根据图像标准差大小判定图像非均匀性

按照1.1.1节和1.1.2节所述,先测试一个红外设备,捕捉四组图像,并计算差值,二值化处理,算出二值图像标准差,如图3~图6。标准差分别为0.071 9, 0.070 4, 0.069 2, 0.071 4。

标准差均值为 $\bar{\sigma}_1 = (0.071 9 + 0.070 4 + 0.069 2 + 0.071 4) / 4 = 0.070 7$ 。

以同样方式,对另一个非均匀性较为严重的红外成像设备进行测试,如图7~图9。得出标准差,分别为0.140 9, 0.139 7, 0.140 1, 0.139 8。

标准差均值为 $\bar{\sigma}_2 = (0.140 9 + 0.139 7 + 0.140 1 + 0.139 8) / 4 = 0.140 1$ 。对比结果 $\bar{\sigma}_2$ 和 $\bar{\sigma}_1$,很明显 $\bar{\sigma}_2 = 0.140 1 > 0.070 7 = \bar{\sigma}_1$ 。

从图像对比看,在相同温度条件下,如图3、图4、图5与图6,每组图像中,即待测设备灰度图像2比待测设备灰度图像1的噪声严重,反映出第二个测试的红外成像设备比第一个图像的红外成像设备的非均匀性更严重。

从四组非均匀性已知设备图像对比看,方法得出的结果是准确的。对于一个一般的红外成像设备,在其非均匀性未知情况下,需要通过统计规律,得出一般的判定参数,这样才能判定出设备非均匀性程度。

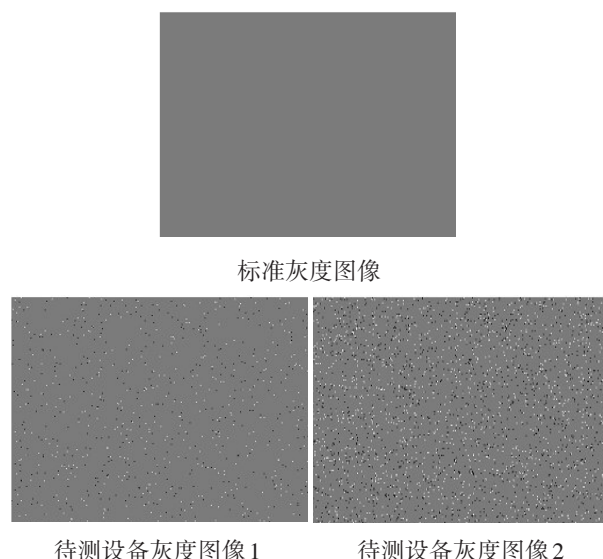


图4 在156灰度级下,标准灰度图像与待测设备灰度图像对比图

由图4可知,差值图像标准差分别为:待测设备灰度图像1为0.070 4,待测设备灰度图像2为0.139 7。

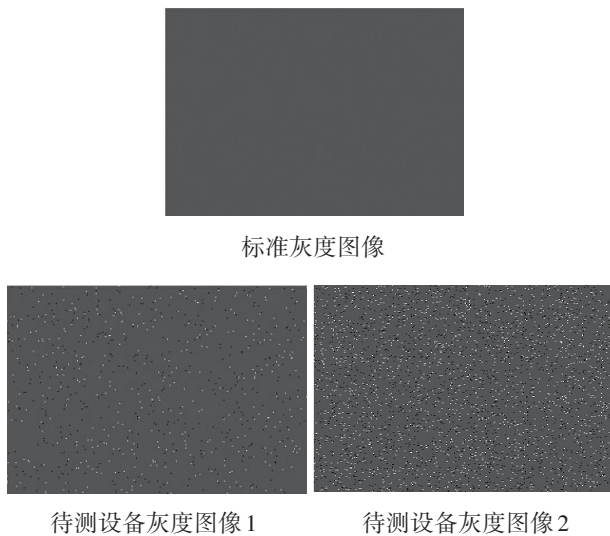


图5 在119灰度级下,标准灰度图像与待测设备灰度图像对比图

由图5可知,差值图像标准差分别为:待测设备灰度图像1为0.069 2,待测设备灰度图像2为0.140 1。

1.2 评价指标与评价准则的建立

用统计规律分析得出评价指标,是通过捕获大量的图像进行计算,对计算结果进行分析统计。这里用罗曼诺夫斯基准则的思想来确定评价参数。

选取评价指标的是通过罗曼诺夫斯基准则来实现。选择同一批次20个经过检测合格的红外成像设备,每一个设备都含有轻微非均匀性,以理想标准设备(几乎不含有噪声)为标准来对比,按照第1.1.1节和第1.1.2节计算出其每一个设备与标准设备差值图像标准差。共得到20个标准差,根据罗曼诺夫斯基准则,用大误差判别方法求得次数在20时的 σ 值, σ 就是判别准则的值域边界值。

1.2.1 罗曼诺夫斯基准则

罗曼诺夫斯基准则是当测量次数较少时,按 t 分布的实际误差分布范围来判别粗大误差。罗曼诺夫斯基准则又称 t 检验准则,其特点是首先剔除一个可疑的测得值,然后按 t 分布检验被剔除的测量值是否含有粗大误差。

当测量次数较少时,按 t 分布的实际误差分布范围来判别粗大误差较为合理。罗曼诺夫斯基准则又称 t 检验准则,其特点是首先剔除一个可疑的测

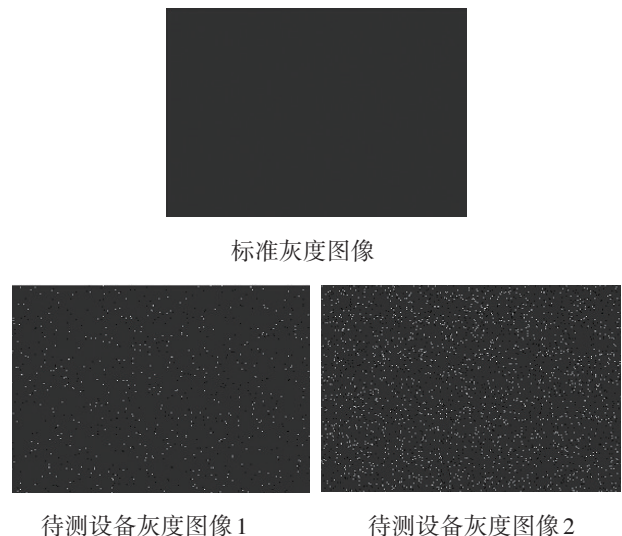


图6 在81灰度级下,标准灰度图像与待测设备灰度图像对比图

由图6可知,差值图像标准差分别为:待测设备灰度图像1为0.071 4,待测设备灰度图像2为0.139 8。

得值,然后按 t 分布检验被剔除的测量值是否含有粗大误差。

设对某量作多次等精度独立测量,得

$$x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n \quad (2)$$

若认为测量值 x_j 为可疑数据,将其剔除后计算平均值为(计算时不包括 x_j)

$$\bar{x} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

并求得测量列的标准差(计算时不包括 $v_j = x_j - \bar{x}$)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-2}} \quad (4)$$

根据测量次数 n 和选取的显著度 α ,即可由表1查得 t 分布的检验系数 $K(n, \alpha)$ 。

若

$$|x_j - \bar{x}| > K\sigma \quad (5)$$

则认为测量值 x_j 含有粗大误差,剔除 x_j 是正确的,否则认为 x_j 不含有粗大误差,应予保留。

1.2.2 评价参数与判定法则

设对某量作多次等精度独立可靠测量,得

$x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$

x_{n+1} 为待测设备数据,认为测量值 x_{n+1} 为可疑数据,计算前 n 项平均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

并求得测量列的标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} \quad (7)$$

根据测量次数 n 和选取的显著度 α ,即可由表 1 查得 t 分布的检验系数 $K(n, \alpha)$ 。

若

$$|x_{n+1} - \bar{x}| > K\sigma \quad (8)$$

则认为测量值 x_{n+1} 含有粗大误差,待测设备为不正常设备,否则认为 x_{n+1} 不含有粗大误差,是正常设备,可以使用。

选取 20 组正常工作设备所成图像数据作为样本,不能正常工作的设备所成图像经过处理后得到的一组数据作为粗大误差来处理。按照以上 1.1.1 节、1.1.2 节和 1.1.3 节的方法算出 20 个标准差,求出

标准差均值,待测红外成像设备捕获图像经过处理后差值二值图像的标准差设为 x_{n+1} 。

由 20 组正常数据根据罗曼诺夫斯基准则,根据测量次数 n 和选取的显著度 α 算出的范围 $K\sigma$,其中 $K\sigma$ 值即为所要求的评价参数。测试时,看待测设备的数值 x_{n+1} 是否在 $|x_{n+1} - \bar{x}| > K\sigma$ 范围中,如果数值满足不等式,则判定设备数值差异过大,设备不合格。

又因为,这里判定的原则是通过噪声多少来表征红外成像设备非均匀性的,当待测红外成像设备很好,即非均匀性几乎不明显,则相应噪声表现更轻微,故这里 $|x_{n+1} - \bar{x}| > K\sigma$ 应该修改为 $x_{n+1} - \bar{x} > K\sigma$ 。

具体过程如下

在外界条件不变情况下,选择按照第 1.1.1 节,在不同温度条件下,得出 8 幅图像,如图 7,根据 1.1.2 节和 1.1.3 节计算得出差值图像的标准差分别为: 0.021 6, 0.021 2, 0.024 5, 0.021 6,

均值为 $\bar{\sigma} = 1/4(0.021\ 6 + 0.021\ 2 + 0.024\ 5 + 0.021\ 6) = 0.022\ 225$ 。

表 1 t 分布的检验系数 $K(n, \alpha)$ 值

	n									
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
$\alpha=0.05$ 时的 K 值	4.97	3.56	3.04	2.78	2.62	2.51	2.43	2.37	2.33	
$\alpha=0.01$ 时的 K 值	11.46	6.53	5.04	4.36	3.96	3.71	3.54	3.41	3.31	
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
$\alpha=0.05$ 时的 K 值	2.29	2.26	2.24	2.22	2.20	2.18	2.17	2.16	2.15	
$\alpha=0.01$ 时的 K 值	3.23	3.17	3.12	3.08	3.04	3.01	3.00	2.95	2.93	
	22	23	24	25	26	27	28	29	30	
$\alpha=0.05$ 时的 K 值	2.14	2.13	2.12	2.11	2.10	2.10	2.09	2.09	2.08	
$\alpha=0.01$ 时的 K 值	2.91	2.90	2.88	2.86	2.85	2.84	2.83	2.82	2.81	

按照同样步骤可计算得出后 19 组数据,如表 2。

单幅图像的标准差用 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 表示,标准差均值用 $\bar{\sigma}$ 表示。

得出 20 组正常设备差值图像的标准差的均值,根据 1.2.1 节,此时差值图像均值就是 1.2.1 节中的 $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_{20}$

那么均值为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} x_i = 0.023\ 34 \quad (9)$$

下面计算标准差

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.000\ 626\ 95 \quad (10)$$

查表1,当 $n = 20$,取置信度 $\alpha = 0.5$ 时, $K = 2.16$,得下式

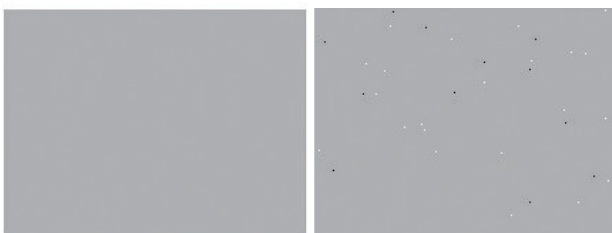
$$K\sigma = 2.16 \times 0.000\ 626\ 95 = 0.001\ 35 \quad (11)$$

故由 $x_{n+1} - \bar{x} > K\sigma$,判定 x_{n+1} 值, $x_{n+1} - \bar{x}$ 值大于 $K\sigma = 0.001\ 35$ 时,即 x_{n+1} 大于 $0.024\ 69$ 时判定该红外成像设备不合格。

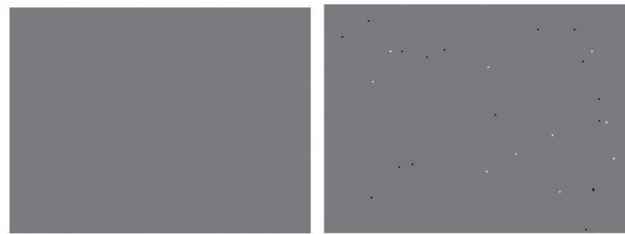
表2 计算得出后 19组数据

序号	标准差				$\bar{\sigma} =$ $1/4 (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4)$
	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	
1	0.022 7	0.021 6	0.021 4	0.024 5	0.022 55
2	0.023 0	0.021 9	0.022 9	0.021 9	0.022 425
3	0.022 5	0.024 5	0.022 5	0.022 2	0.022 925
4	0.021 9	0.023 8	0.023 1	0.020 7	0.022 375
5	0.023 0	0.023 0	0.023 9	0.023 9	0.023 45
6	0.021 4	0.022 7	0.023 2	0.024 1	0.022 85
7	0.024 5	0.022 3	0.023 6	0.023 0	0.023 35
8	0.021 8	0.024 7	0.023 3	0.023 2	0.023 25
9	0.024 9	0.022 4	0.022 3	0.023 4	0.023 25
10	0.023 0	0.022 9	0.024 8	0.024 6	0.023 825
11	0.024 3	0.025 6	0.024 0	0.022 5	0.024 1
12	0.023 2	0.024 1	0.025 1	0.0246	0.024 25
13	0.023 4	0.022 7	0.023 1	0.023 8	0.023 25
14	0.023 7	0.024 1	0.023 1	0.022 8	0.023 425
15	0.023 2	0.023 0	0.024 1	0.023 9	0.023 55
16	0.024 9	0.023 6	0.024 3	0.024 3	0.024 275
17	0.023 8	0.024 5	0.023 5	0.023 7	0.023 875
18	0.024 4	0.022 7	0.024 7	0.023 9	0.023 925
19	0.022 5	0.023 4	0.024 4	0.024 8	0.023 775

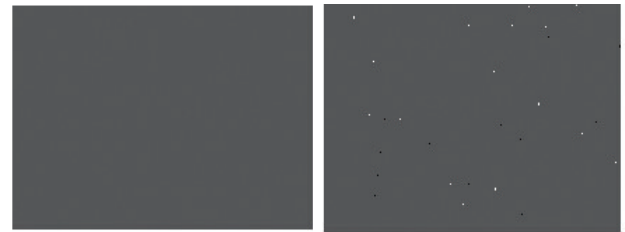
对待测试红外成像设备来说,捕捉该设备和标准设备在不同温度下四组红外灰度图像,每组之间做差,然后二值化,求得平均标准差,如果平均标准差大于 $0.024\ 69$,则可判定该红外成像设备均匀性不达标,该红外成像设备不合格。



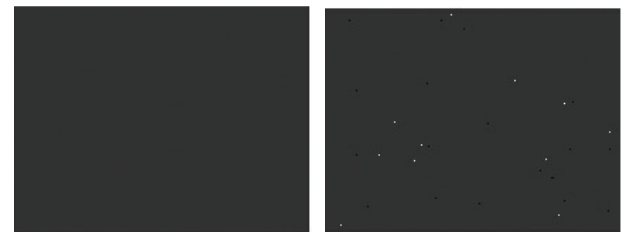
标准灰度图像 轻微非均匀性灰度图像



标准灰度图像 轻微非均匀性灰度图像



标准灰度图像 轻微非均匀性灰度图像



标准灰度图像 轻微非均匀性灰度图像

图7 不同灰度级下,标准灰度图像与轻微非均匀图像对比图

2 实验验证

下面利用两个待测红外成像设备来对该法则进行验证。

首先按照 1.1.1 节捕捉两组待测红外成像设备的图像,再按照 1.1.2 节和 1.1.3 节计算差值图像二值化以后标准差。过程如下:

第一个红外成像设备如图 8。

通过肉眼观察,该红外成像设备中噪声很明显、很密集,与图 7 相比,其非均匀表现非常明显。

对第二个红外成像设备进行测试,如图 9。

通过肉眼观察,第二个红外成像设备中噪声很少,与图 7 相比,其非均匀表现很轻微。

通过选取两组待测红外成像设备,对其所捕获图像进行分析、计算验证、判定准则可判定出红外成像设备的非均匀性,同时用肉眼观测,可明显看出其差别,因此,证明法则成立,是可行的。

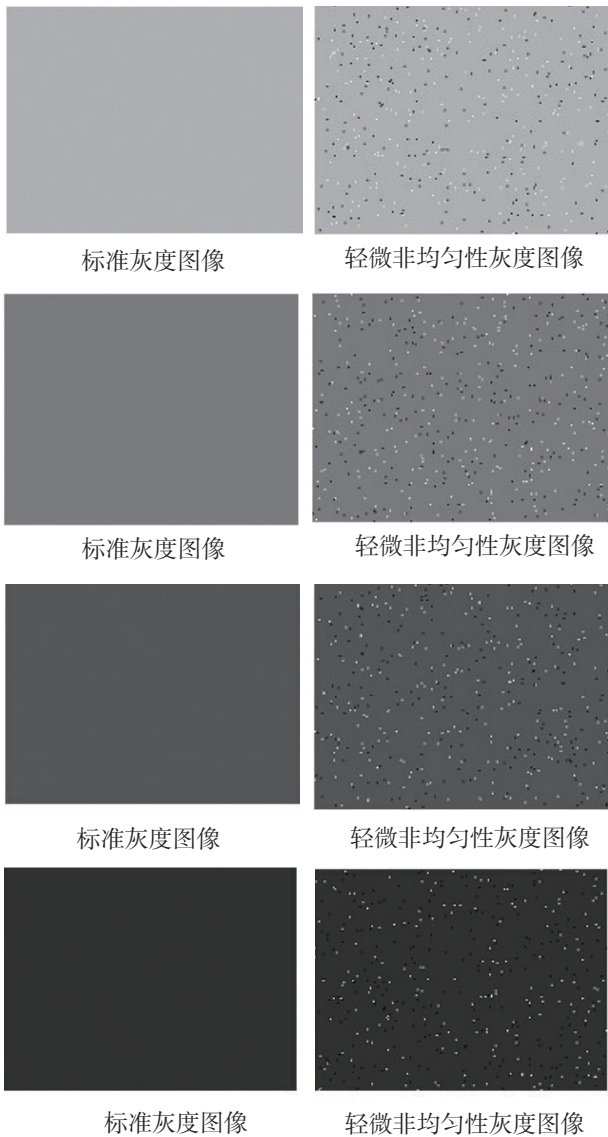


图8 不同灰度级下,标准灰度图像与轻微非均匀图像对比图

由图8可知,差值图像二值化以后图像标准差分别为:0.085 5,0.086 0,0.086 7,0.085 1,均值为0.085 825,因为0.085 825大于0.024 69,故该设备不合格。

3 结 论

利用数字图像处理方法,通过对红外成像设备的图像进行做差,并进行二值化处理计算出差值图像平均标准差,对比已知判定参数来判断红外成像设备的非均匀性,这种方法简单快捷,也有较高的准确度。当然该种方法也有其局限性,只能初步判

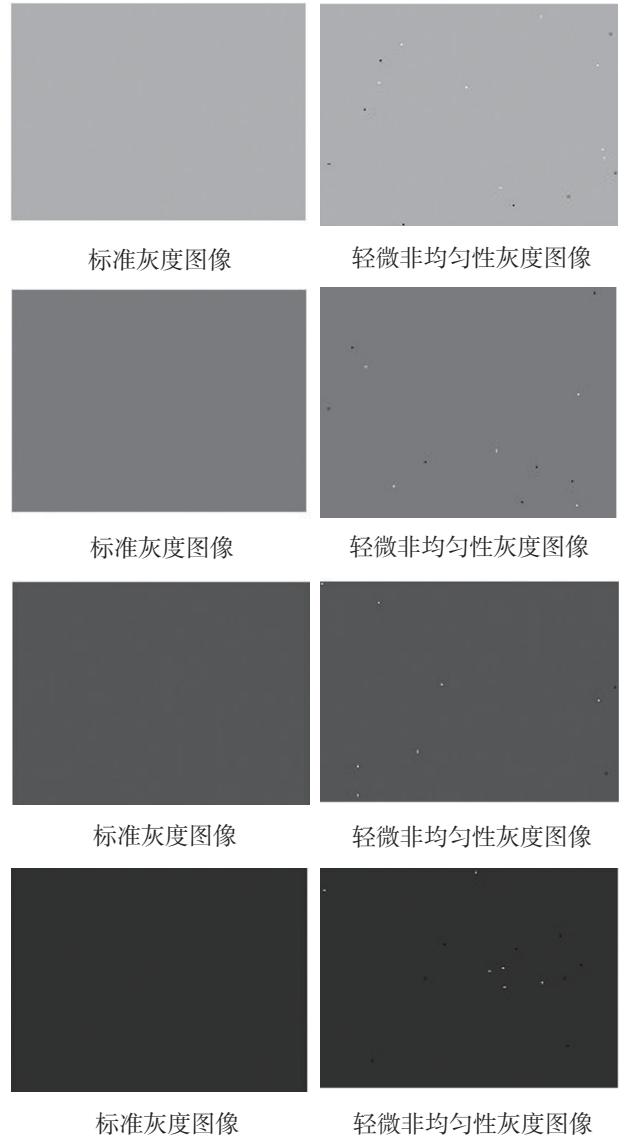


图9 不同灰度级下,标准灰度图像与轻微非均匀图像对比图

由图9可知,差值图像二值化以后图像标准差分别为:0.016 4,0.015 2,0.013 7,0.015 9,均值为0.015 3,因为0.015 3小于0.024 69,故该设备合格。

定出红外成像设备非均匀性表现,如果设备含有成片盲元、坏点时,还是要结合肉眼观察,有一定的主观性。如果对非均匀性要求更高,并对非均匀性进行校正,则还需要进一步研究。再者,该方法是通过数理统计的方式得出评价参数,不能达到百分百的判断准确度,因此,如果需要更高精度,还需要进一步研究探索。

参考文献

- [1] Rafael C Gonzalez, Richard E Woods. 数字图像处理[M]. 阮秋琦,阮宇智,译.3版.北京:电子工业出版社,2013:443-467.
- [2] 费叶泰.误差理论与数据处理[M].6版.北京:机械工业出版社,2010:46-47.
- [3] Bradley M Ratliff, Majeed M Hayat, J Scott Tyo. Generalized algebraic scene-based nonuniformity[J]. Optical Society of America,2005, 22(2): 239-249.
- [4] 孙红胜,陈应航,隋左宁.红外成像导引头灵敏度现场校准技术研究[J].红外与激光工程,2008,37 :463-469.
- [5] 张学峰,陈宝国,樊养余.基于场景的红外非均匀性校正算法对比研究[J].红外技术,2013,35(9):560-566.
- [6] 任婷婷,张智杰.一种基于场景的红外图像非均匀性校

- 正算法[J].光学与光电技术,2014.12(9):44-47.
- [7] 陈锐,谈新权.红外图像非均匀性校正方法综述[J].红外技术,2002,24(1):1-3.
- [8] 左超,陈钱.基于焦平面归一化响应特性的红外非均匀性校正[J].光子学报,2011,40(6):926-932.
- [9] 李玉珏.基于两点法的使用FPA非均匀性校正系统[J].激光与红外,2007,37(8):753-755.
- [10] 陈治宣,周晓东,姜树理.红外焦平面阵列非均匀性校正研究[J].海军航空工程学院学报,2006,21(4):444-448.
- [11] CHEN Bao-guo, FAN Yang-yu, ZHANG Xue-feng, et al. Moving scene based nonuniformity correction algorithm[C]// Proceeding of SPIE, 2012, 8419: 84191Q-1-84191Q-6.
- [12] 刘书琴,毋立芳,宫玉.图像质量评价综述[J].中国科技论文在线,2011,6(7):501-523.

(上接第10页)

行硅材料表面的温度分布分析。

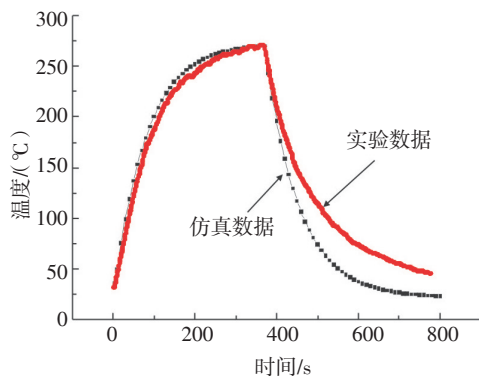


图6 理论计算与实验数据结果对比

4 结 论

使用不同功率的连续激光辐照硅材料,测量了硅材料不同位置的温度变化曲线,并根据实验条件进行了数值建模,得到了连续激光辐照硅材料表面的温度分布模型,并利用该模型进行仿真模拟,得到的模拟结果与实验结果基本一致。说明模型建立符合实际情况。可通过改变该模型参数进行激光加工模拟实验,为激光加工硅材料的热效应分析提供了实验依据。

参考文献

- [1] 强希文,张建泉,刘峰,等.强激光辐照半导体材料的温升及热应力损伤的理论研究[J].中国激光,2000,27(8):709-713.
- [2] 段晓峰,汪岳峰,牛燕雄,等.激光辐照光学材料热力效应的解析计算和损伤评估[J].中国激光,2004,31(12):1455-1459.
- [3] 沈中华,陆建,倪建武.强激光作用下半导体材料的加热与熔融的解析计算[J].中国激光,1998,25(7):632-636.
- [4] 沈中华,陆建.硅材料在强激光作用下的二维温升模拟计算[J].南京理工大学学报,1998,22(3):272-275.
- [5] ZHANG Chen-zhi, Blarrie L. Mechanisms for laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. Applied Optics, 1993, 32(27): 632-636.
- [6] Appleton B R. Laser and electron beam interactions with solids[J]. Elsevier Science Publishing Company, Inc. 1982: 3-11.
- [7] 孙承纬,陆启生,范正修,等.激光辐照效应[M].北京:国防工业出版社,2002:28-42.
- [8] 彭玉峰,盛朝霞,张虎,等.激光辐照下固体材料的温度分布理论研究[J].强激光与粒子束,2004,16(10):1225-1227.
- [9] 禹焯,牛燕雄,刘杰.强激光辐照下硅材料的温度分布研究[J].科学技术与工程,2006,6(19):3185-3187.