

基于改进 CLAHE 的航空发动机导向叶片 DR 图像增强

冯雄博¹, 陈曦¹, 闵慧娜², 吴伟¹, 王树鹏², 邬冠华¹

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063;

2. 中国航空发动机集团有限公司沈阳黎明航空发动机有限责任公司, 沈阳 110043)

摘 要: 为了解决航空发动机导向叶片数字射线(DR)检测图像信息动态范围大、对比度低、细节信息不明显,缺陷区域难以识别的问题,提出一种改进型限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE)算法。采用 CLAHE 增强导向叶片 DR 图像对比度,同时引入基于空间均值滤波器的 Gaussian 掩模处理,进行 DR 图像降噪,提取 DR 图像的低频信息;采用 CLAHE 增强的图像与提取的 DR 图像低频信息线性做差,突出 DR 图像的高频细节信息;与 CLAHE 增强的图像线性叠加,进一步提高了 DR 图像的对比度,实现导向叶片 DR 图像增强。依据图像基本空间分辨率(SRB)、信噪比(SNR)、灰度平均值对 DR 图像增强效果进行评价。结果表明:改进的 CLAHE 算法,可以同时表征 SRB 的 D13 双丝线对应的调制深度值从 49.17% 提高到了 56.08%,整体灰度平均值从 32 400.66 增加到了 38 684.43,02 号微小裂纹缺陷的 SNR 从 14.10 提升到了 15.16。结果显示优化的 CLAHE 算法,相比自适应直方图均衡化(AHE)等 4 种经典的航空发动机导向叶片 DR 图像增强算法,不仅提高了平坦区域对比度,突显了边缘细节信息,而且有效提升了微小缺陷的视觉效果。

关 键 词: 数字射线(DR)图像;微小缺陷;导向叶片;限制对比度自适应直方图均衡化(CLAHE);图像增强

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

DR image enhancement of aero-engine guide vane based on improved CLAHE

FENG Xiongbo¹, CHEN Xi¹, MIN Huina², WU Wei¹,
WANG Shupeng², WU Guanhua¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing,

Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;

2. Shenyang Liming Aero-Engine Company Limited,

Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110043, China)

Abstract: In order to solve the problems of large dynamic range, low contrast, inconspicuous detail information, and difficulty in identifying defect areas in the image information detected by digital radiography (DR) of aero-engine guide blades, an improved adaptive histogram equalization algorithm with limited contrast was proposed. Contrast limited adaptive histogram equalization

收稿日期:2021-05-26

基金项目:国家自然科学基金(62161030,62061033);基础科研项目(JCKY2019401D001);

南昌航空大学研究生创新专项资金(YC2020-080)

作者简介:冯雄博(1993—),男,硕士生,主要从事智能射线检测及图像处理研究。

引用格式:冯雄博,陈曦,闵慧娜,等. 基于改进 CLAHE 的航空发动机导向叶片 DR 图像增强[J]. 航空动力学报,2022,37(7):1425-1436. FENG Xiongbo, CHEN Xi, MIN Huina, et al. DR image enhancement of aero-engine guide vane based on improved CLAHE[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(7):1425-1436.

(CLAHE) was used to enhance the contrast of the DR image of the guide vane. Meanwhile, the Gaussian mask processing based on the spatial mean filter was introduced to reduce the image noise and extract the low-frequency information of the DR image. The high-frequency information of DR image was highlighted by difference of CLAHE enhanced image and the low-frequency information of DR image. Furthermore, a linear superimposing of CLAHE enhanced image and highlighted image high frequency information was employed to further improve the contrast of DR image and realize the enhancement of the DR image of the guide vane. In addition, the DR image enhancement effect was evaluated based on the basic spatial resolution of the image (SRB), signal-to-noise ratio (SNR) and gray average. Experimental results showed that the improved CLAHE algorithm can simultaneously increase the modulation depth value characterizing SRB correspondingly to the D13 double-filament wire from 49.17% to 56.08%, and the overall grayscale average value from 32 400.66 to 38 684.43, and the SNR of the No. 02 micro crack defect was improved from 14.10 to 15.16. The result showed that the improved CLAHE algorithm not only improved the flat area contrast and highlighted the edge detail information, but also effectively improved visual effect of small defects in comparison with four classic aero-engine guide vane DR image enhancement algorithms such as adaptive histogram equalization (AHE).

Key words: digital radiography (DR) image; small defects; guide vane;
contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE);
image enhancement

导向叶片是航空发动机的核心部件之一,其制造质量关系着发动机的安全与性能,由于叶片形状复杂,加工难度大,铸造缺陷率高,企业要求必须对其进行100%的X射线检测^[1],现阶段低成本的数字射线检测被广为使用,得到信息量充足的数字射线(digital radiography, DR)图像。

在DR成像检测过程中,由于X射线成像系统中的散射、电噪声、平板探测器结构噪声以及人为因素等影响,DR图像中微小缺陷,存在着对比度较小与细节清晰度较低^[2],导致缺陷区域难以判决,因此需要进行适当的数字图像处理。航空发动机导向叶片,由于构造形状复杂,内部空心区域多变。进行DR成像检测时,某些区域会出现对比度较低、细节信息不明显,以及微小缺陷清晰度较低^[2],为了提高航空发动机导向叶片DR图像缺陷检测的精准度,DR图像增强处理是非常必要的。目前对DR图像增强处理的方法主要分为两大类:针对DR图像对比度提高的算法和丰富DR图像细节信息的算法^[3]。

直方图均衡化(histogram equalization, HE)是一种简单有效的对比度增强技术,主要用于增强图像对比度动态范围偏小的图像。针对直方图均衡化HE在图像增强过程中的局限性,相继提出了自适应直方图均衡化(adaptive histogram

equalization, AHE)^[4]算法,但这种算法是一种全局处理方式,它对处理数据不加选择,可能会增加背景干扰信息的对比度,并且降低有用信号的对比度,针对这种不足,提出了对比度受限的直方图均衡化算法^[5];其中自适应直方图均衡化AHE是计算指定区域的直方图,然后重新分布灰度值来改变图像的对比度,这种算法视觉效果要优于直方图均衡化,但它对局部对比度提高过大,容易导致图像失真,因此提出了限制对比度自适应直方图均衡化(contrast limited adaptive histogram equalization, CLAHE),其核心是限制局部对比度,它既能克服AHE的过度放大噪声问题,又可以使对比度得到增强^[6]。刘轩、刘佳宾等将对对比度受限自适应直方图均衡化应用到医学乳腺图像,有效地增强了细节信息^[7]。此外,以直方图均衡化为基础的衍生算法还有很多,如Loganathan等提出了一种基于种子区域选择的对比度增强方法^[8]。Kim等提出了一种递归加权的直方图均衡化算法(recursively separated and weighted histogram equalization, RSWHE)^[9]。在传统的CLAHE算法的基础上,孙冬梅、陆剑锋等提出了通过引入一个自适应参数T来自动调整图像每个子块的像素点重新分配的范围,从而达到增强图像细节的目的^[10]。王红茹、李瑞等提出了一种由像

素的直方图分布确定裁剪幅值,解决了部分子块得不到增强的问题^[11]。张文霞、王春光等提出了基于自适应亮度调整的 CLAHE 图像增强算法,有效改善了过暗图像增强效果不佳的问题^[12],刘陈瑶、胡梦竹等提出一种用于六氟化硫(SF₆)红外图像增强的限制对比度自适应直方图均衡化算法,效果优于常见的几种红外图像增强算法^[13]。

对图像细节信息增强,主要是从降低图像噪声与突出图像的边缘细节信息这两个方面考虑的。常见的去噪算法一般有空间域滤波,变换滤波,偏微分方程,变分法,形态学噪声滤除等;图像边缘检测常用 Roberts、Sobel、Prewitt、Laplacian、Canny 等空间域算子。为了更加细致地刻画边缘,提出了一种反锐化掩膜算法(unsharp masking, UM),其基本原理是将原图像通过反锐化掩膜进行模糊预处理(相当于采用低通滤波)后与原图逐点做差值运算,然后乘上一个修正因子再与原图求和,以达到提高图像中高频成分、增强图像轮廓的目的。ilk 等提出了一种自适应反锐化掩膜算法(adaptive unsharp masking, AUM)^[14],该算法能增强图像的边缘细节信息,但是对于图像中平坦区域几乎没有体现出增强效果。徐艳丽、谭剑等提出了一种基于非线性反锐化掩膜的图像边缘细节增强方法,该方法首先利用非线性曲线调整图像的对比度和亮度,突出图像细节,在一定程度上也能够避免对噪声进行增强^[15]。Ramponi 等提出了立方反锐化掩膜算法(cubic unsharp masking, CUM)^[16]该算法在某些情况下使用效果较好。

对航空发动机导向叶片进行 DR 检测时,DR 图像为高动态范围(16 bit),某些区域对比度较低,细节清晰度较小,导致 DR 图像中的微小缺陷识别率不高。提出了一种既能提高 DR 图像对比度,又能增强 DR 图像细节信息的一种优化算法:在 CLAHE 算法基础上,提出了利用 CLAHE 算法增强 DR 图像的同时,引入基于空间均值滤波器的 Gaussian 掩模处理获取 DR 原始图像的低频信息,然后再利用 CLAHE 增强图像和 Gaussian 掩模处理的结果线性做差,突出 DR 图像的边缘细节信息,最后再与 CLAHE 增强图像线性叠加,实现航空发动机导向叶片 DR 图像增强。

1 改进型 CLAHE 算法

在 DR 图像对比度增强算法中,结合自适应直方图均衡化和限制对比度两项技术的限制对比

度自适应直方图均衡化算法 CLAHE 是一种常用的低对比度 DR 图像增强算法。由于 CLAHE 算法只提高了图像对比度,而航空发动机导向叶片的某些区域,还会出现细节信息不明显。在此基础上,为了突出 DR 图像中的细节信息,提出了一种改进型的 CLAHE 算法,既能提高 DR 图像对比度,又可以突出 DR 图像中的边缘细节信息。

1.1 限制对比对自适应直方图均衡化 CLAHE

CLAHE 算法在 HE 算法的基础上,采取对每一个子块的直方图进行限幅,从而抑制噪声的放大和局部对比度的过度增强。首先将图像分为若干子块,然后对每个子块进行直方图的裁剪,再对每个子块进行直方图均衡化调整,最后在根据子块位置的不同,采取不同的插值运算得到变换后的灰度值,从而实现限制对比度自适应直方图均衡化,具体的步骤如下所示^[11]。

1) 将图像分割成连续、非重叠的 $m \times n$ 子块, m 和 n 的值可以为 4、6、8 等,每个子块含有的像素数为 N ,子块越大,增强效果越明显,但图像细节信息丢失得越多。

2) 将分割所得的全部子块进行直方图均衡化,并得到其灰度直方图,用 $h(x)$ 表示。

3) 计算裁剪幅值 T 。

$$T = C_{\text{clip}} \times \frac{N_x \times N_y}{M} \quad (1)$$

式中 N_x 和 N_y 为每个子块在 x 和 y 方向上的像素个数, M 为对应子块的灰度级数, C_{clip} 为裁剪系数。

4) 裁剪灰度直方图,并对像素点进行重新分配。根据裁剪幅值 T 对每个子块的直方图 $h(x)$ 进行裁剪,如图 1(a)所示;然后将裁剪部分的像素重新分配到每个灰度级上,灰度级数为 M ,如图 1(b)所示。设超出裁剪幅值 T 的像素总数为 S ,每个灰度级平均分配的像素 A ,则可以得到

$$S = \sum_{x=0}^{M-1} \{ \max[h(x) - T] \} \quad (2)$$

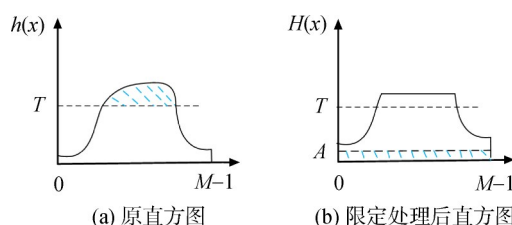


图1 CLAHE 算法直方图变换过程

Fig.1 CLAHE algorithm histogram transformation process

$$A = \frac{S}{M} \quad (3)$$

用 $H(x)$ 来表示重新分配后的直方图, 则

$$H(x) = \begin{cases} T + A & h(x) \geq T \\ h(x) + A & h(x) < T \end{cases} \quad (4)$$

5) 如图1所示, 将原始图像的分块区域进行均匀化调整, 利用图像像素与分块区域灰度的转换函数之间的映射关系, 运用插值运算来求解对应像素的灰度值, 同时可以提高计算效率。根据相邻点的个数, 变化函数为4个参考点时, 采用双线性插值; 变化函数为2个点时, 采用单线性插值; 变化函数为一个参考点时, 采用所在块灰度值。

6) 用橙色标记的4个边角区域, 直接根据所在子块的映射函数进行计算, 如图2所示。墨绿色标记的4个边缘区域的像素值, 通过相邻两个子块的映射函数进行变换得到两个映射值, 再对这两个值进行线性插值运算, 运用如下计算公式:

$$f(x, y) = \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} f_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} f_2 \quad (5)$$

其中 $f(x, y)$ 表示所求点的像素值, f_1, f_2 为该点相

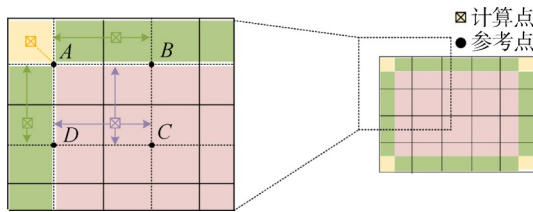


图2 插值运算示意图

Fig.2 Schematic diagram of interpolation operation

邻两个子块的映射函数变换得到的映射值, $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ 为相邻两个子块的中心点像素坐标。紫色区域的中心点像素值, 则通过周围4个子块的映射函数变换得到的4个映射值, 再对这4个值进行双线性插值运算得到, 如下计算式:

$$f(x, y) = f_a \frac{(x'_2 - x)(y'_2 - y)}{(x'_2 - x'_1)(y'_2 - y'_1)} + f_b \frac{(x'_2 - x)(y - y'_1)}{(x'_2 - x'_1)(y'_2 - y'_1)} + f_c \frac{(x - x'_1)(y'_2 - y)}{(x'_2 - x'_1)(y'_2 - y'_1)} + f_d \frac{(x - x'_1)(y - y'_1)}{(x'_2 - x'_1)(y'_2 - y'_1)} \quad (6)$$

其中 f_a, f_b, f_c, f_d 分别为该点通过周围4个子块的映射函数变换得到的映射值, $(x'_1, y'_1), (x'_1, y'_2), (x'_2, y'_1), (x'_2, y'_2)$ 分别为周围4个子块的中心像素坐标。这种双线性插值算法可以降低复杂度, 提高运算速率, 降低了块状效应^[17]。

1.2 改进的限制对比度自适应直方图均衡化

获取航空发动机导向叶片 DR 图像后, 进行 CLAHE 算法增强处理, 在分割成固定大小的子块时, 同时引入了基于空间滤波器 Gaussian 掩模处理每个子块, 得到每个子块对应的 DR 图像低频信息 Y , 然后将 CLAHE 算法处理获取的对比度增强图像和 Gaussian 掩模处理的低频图像信息线性做差, 突出高频细节信息 Z , 再与 CLAHE 增强图像 (X) 做线性叠加, 实现航空发动机导向叶片 DR 图像增强。改进型算法流程图, 如图3所示。

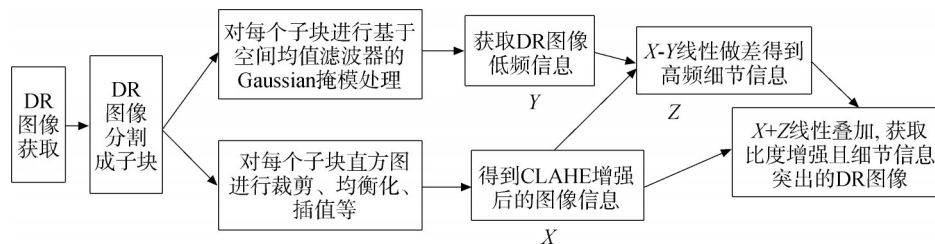


图3 改进的 CLAHE 算法流程图

Fig.3 Improved CLAHE algorithm flow chart

由于 DR 图像中存在不可避免的电噪声, 这些噪声一般属于高斯噪声, 因此可以采用基于空间均值滤波器的 Gaussian 滤波有效去除^[18]。高斯滤波可以是对整幅图像的加权平均, 即用特定的模板 (或称为掩膜) 去扫描图像中的每一个像素, 用模板覆盖的邻域内像素加权平均值来替代模板

中心像素点的值。均值为0, 方差为 σ^2 的二维高斯函数为

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

高斯掩膜将连续的二维高斯函数离散化, 任意大小的高斯模板可以通过建立一个 $(2k+1) \times (2k+1)$ 的矩阵 M 得到, 其 (i, j) 位置的元素值由

下式确定:

$$M(i,j)=\frac{1}{2\pi\sigma^2}\exp\left[-\frac{(i-k-1)^2+(j-k-1)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (8)$$

高斯掩膜保留图像的低频部分,即图像轮廓和内容的同时,滤除的高频部分含有噪声和边缘细节信息,在模板确定的情况下, σ 的取值决定了保留图像有用信息的程度,实际使用过程中。根据图像特征及图像处理需求,选取合适的 σ 值。

2 实验对比与分析

某航空发动机导向叶片构造复杂,叶身表面通常为变截面曲面,内部气道多变。对含有微裂纹的导向叶片进行微焦点 DR 成像检测。实验中采用射线设备如下:射线源为 FineTec 公司 225 kV 微焦点射线源,最小焦点尺寸为 $5\text{ }\mu\text{m}$;平板探测器为万睿视(VAREX)公司的 XRPad2 4336 型平板探测器,闪烁体为碘化铯晶体,单个探测器单元尺寸为 $100\text{ }\mu\text{m}\times 100\text{ }\mu\text{m}$,成像矩阵 $3\,524\times 4\,288$,模/数(A/D)转换器位数为 16 bit。在进行微焦点发达成像实验中,透照参数如下:管电流为 120 kV、管电流为 $160\text{ }\mu\text{A}$ 、探测器积分时间为 4 000 ms,采集 30 帧做平均处理,叶片与射线源距离为 160 mm,焦距为 800 mm,放大倍数为 5 倍。航空发动机导向叶片原图和局部 DR 缺陷图像,如图 4 所示。

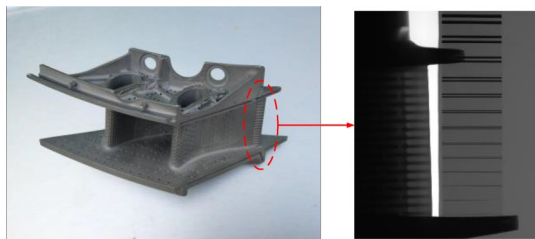


图 4 航空发动机导向叶片原图和局部 DR 图像

Fig.4 Original image and partial DR image of aero engine guide vane

2.1 改进的 CLAHE 算法仿真实验

对航空发动机导向叶片 DR 图像进行改进的 CALHE 算法处理,航空发动机导向叶片 DR 图像及灰度直方图,如图 5 所示。首先,将导向叶片 DR 图像分割成若干子块,假设切分成 4 块,则子块图像及灰度直方图,如图 6 所示;子块通过自适应直方图均衡化处理,结果如图 7 所示;再经过裁剪重新分配和插值运算结果,如图 8 所示。观察

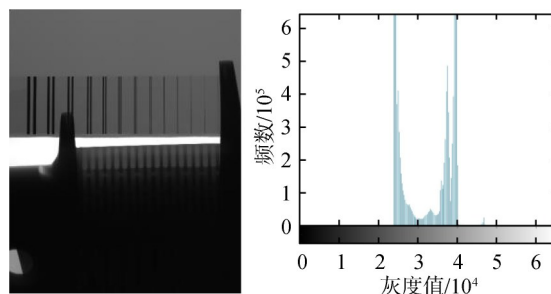


图 5 导向叶片 DR 缺陷图像及灰度直方图

Fig.5 DR defect image and gray histogram of guide vane

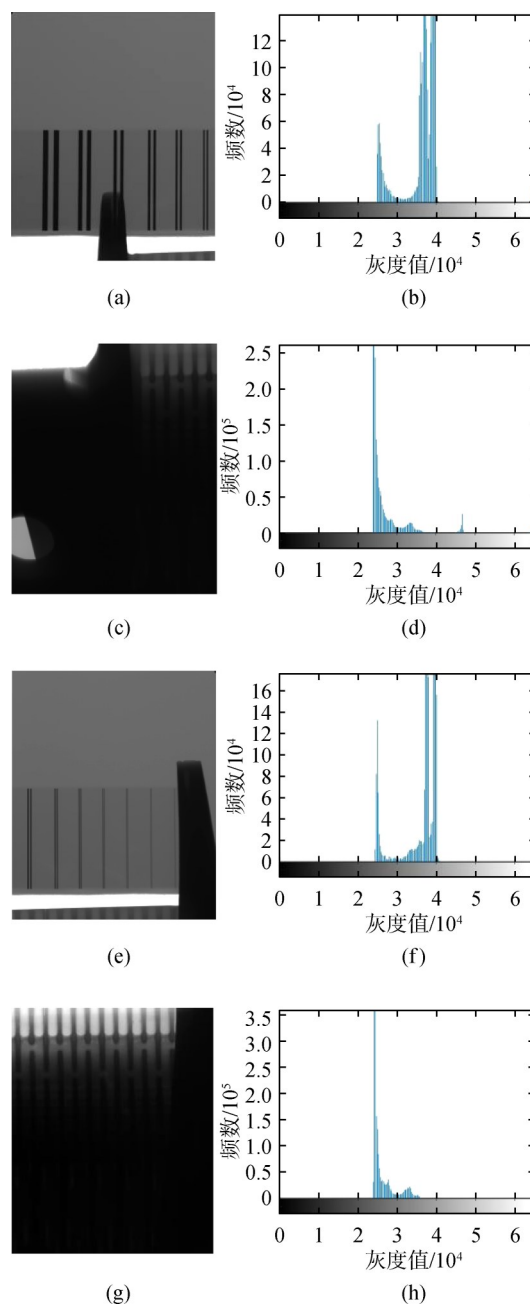


图 6 导向叶片 DR 缺陷图像子块及灰度直方图

Fig.6 Sub-block and gray histogram of the DR defect image of the guide vane

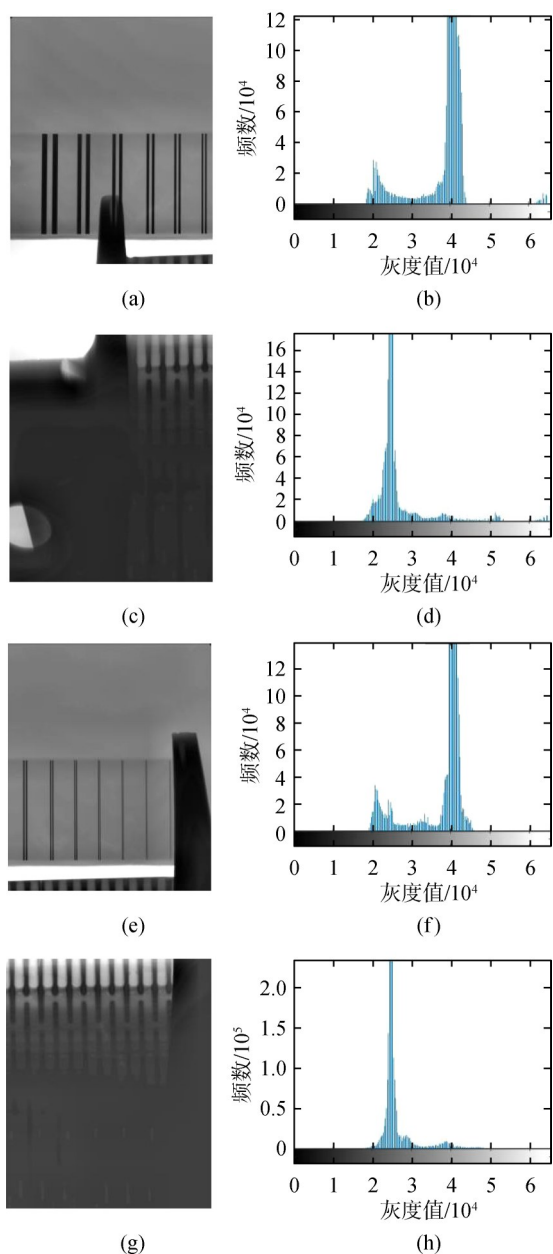


图7 自适应直方图均衡化处理结果及灰度直方图
Fig.7 Adaptive histogram equalization processing results and gray histogram

图7和图8中的灰度直方图,可以观察到对应子块的灰度直方图发生了变化:裁剪重新分配和插值运算,得到的CLAHE增强处理的结果,如图9所示。引入Gaussian滤波器对子块进行处理,处理结果如图10所示;获取的导向叶片DR图像低频信息,如图11所示。然后用CLAHE增强的图像与获得的发动机导向叶片DR图像低频信息线性做差,得到高频细节信息结果如图12所示,计算公式如下:

$$P_{\text{image, HF}} = P_{\text{image, CLAHE}} - P_{\text{image, Gaussian}} \quad (9)$$

其中 $P_{\text{image, CLAHE}}$ 为 CLAHE 增强的导向叶片 DR 图

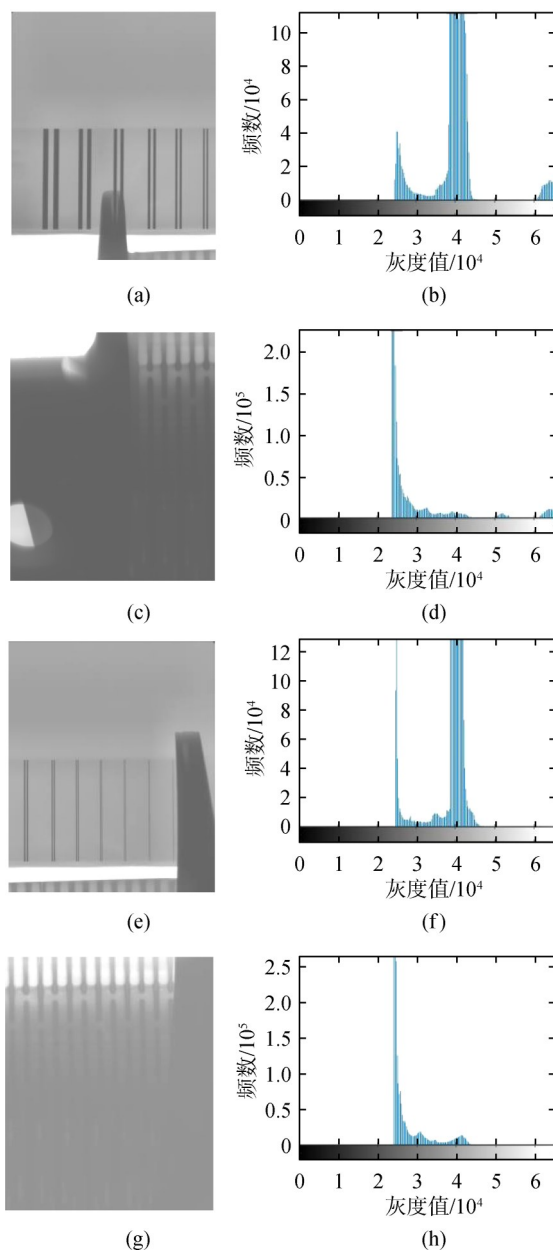


图8 裁剪分配插值运算结果及灰度直方图
Fig.8 Interpolation operation results and gray histogram of crop distribution

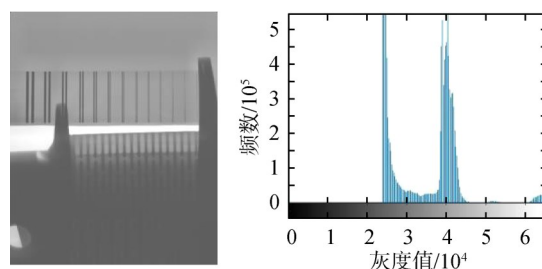


图9 CLAHE算法结果及灰度直方图
Fig.9 CLAHE algorithm results and gray histogram

像, $P_{\text{image, Gaussian}}$ 为 Gaussian 滤波处理的 DR 图像, $P_{\text{image, HF}}$ (high frequency, HF) 为 DR 图像高频细节

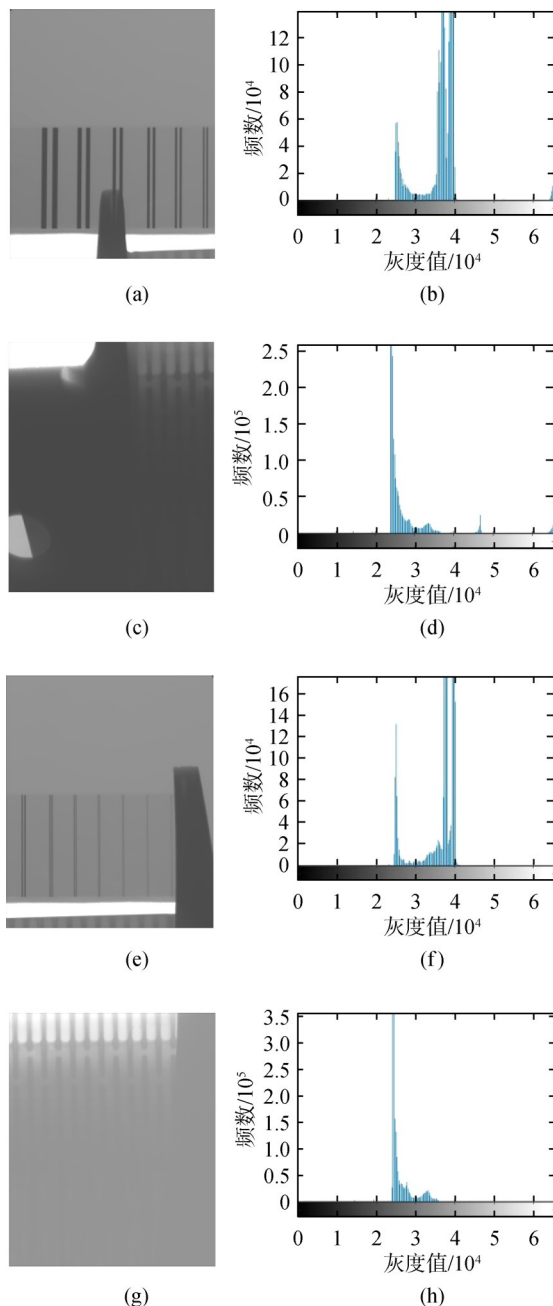


图 10 Gaussian 处理导向叶片 DR 图像子块及灰度直方图

Fig.10 Gaussian processing guide blade DR image sub-block and gray histogram

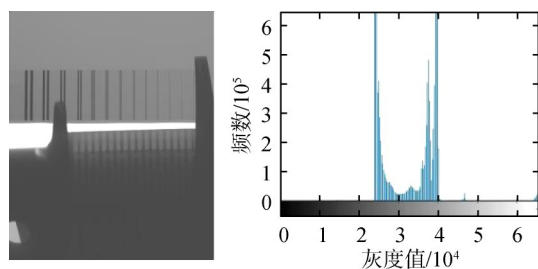


图 11 导向叶片 DR 图像低频信息及灰度直方图

Fig.11 Low-frequency information and gray histogram of the DR image of the guide vane

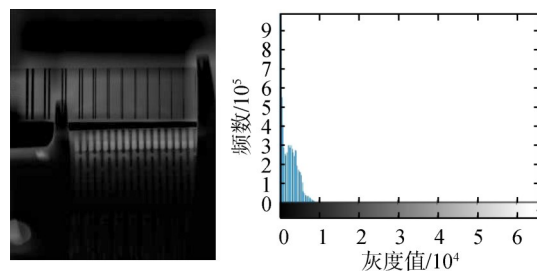


图 12 导向叶片 DR 图像高频信息及灰度直方图

Fig.12 High-frequency information and gray histogram of the DR image of the guide vane

信息。

最后再将高频图像信息与 CLAHE 增强的图像线性叠加,计算公式如下:

$$P_{\text{image, enhance}} = P_{\text{image, HF}} + P_{\text{image, CLAHE}} \quad (10)$$

其中 $P_{\text{image, enhance}}$ 为改进 CLAHE 算法增强图像,其结果,如图 13 所示。

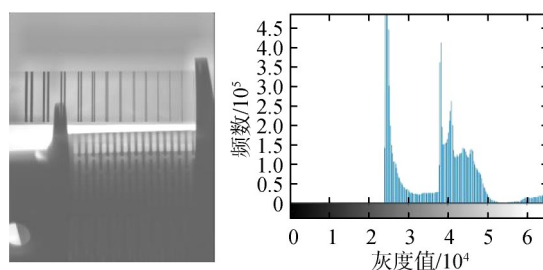


图 13 改进 CLAHE 处理结果和灰度直方图

Fig.13 Improved CLAHE processing results and gray histogram

2.2 对比分析

对比实验,将航空发动机导向叶片的原始 DR 图像和经过自适应直方图均衡化(adaptive histogram equalization, AHE)、Gaussian 滤波、Unsharp 锐化、CLAHE 算法处理的结果图像以及改进的 CLAHE 算法处理的结果图像进行比较如下。

由图 14 可以看出,航空发动机导向叶片原始 DR 缺陷图像中,图 14(a)和图 14(b)中的缺陷图像对比度低、细节信息不突出、局部清晰度较差;经过 AHE 算法处理的导向叶片 DR 缺陷图像,如图 15 所示,图 15(a)和图 15(b)中的缺陷图像对比度有所提高、边缘信息与清晰度未变化;经过 Gaussian 滤波处理的导向叶片 DR 缺陷图像,如图 16 所示,图 16(a)和图 16(b)中缺陷图像对比度、边缘特征信息、清晰度未变化;经过 Unsharp 锐化处理的导向叶片 DR 缺陷图像,如图 17 所示,图 17(a)中缺陷边缘信息得到增强,但图 17(b)中

缺陷图像对比度、边缘细节信息、清晰度未得到改善;经过 CLAHE 算法处理的导向叶片 DR 缺陷图像,如图 18 所示,图 18(a)和图 18(b)中的缺陷图像对比度得到了增强,边缘特征和清晰度相比导向叶片原始 DR 缺陷图像,处理效果并不理想;经

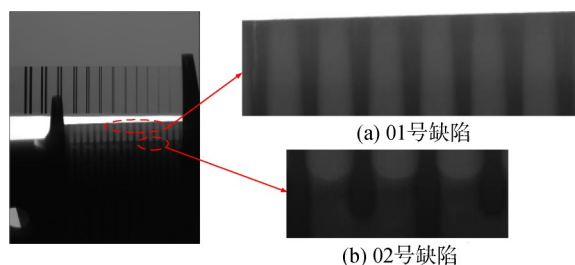


图 14 导向叶片 DR 缺陷图像
Fig.14 Image of guide vane DR defect

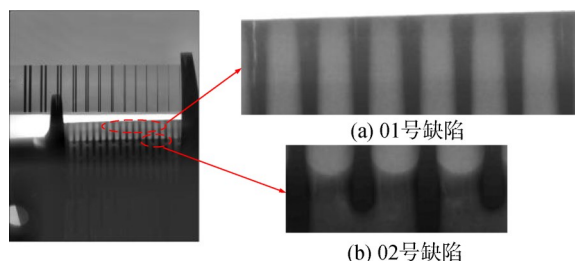


图 15 AHE 处理的导向叶片 DR 缺陷图像
Fig.15 DR defect image of guide vane processed by AHE

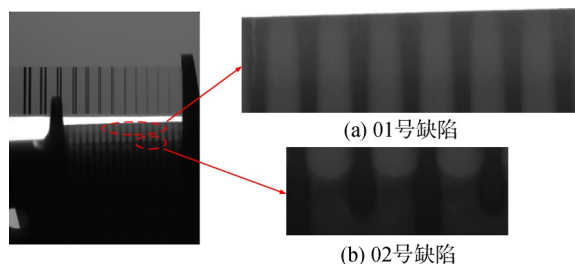


图 16 Gaussian 滤波处理的导向叶片 DR 缺陷图像
Fig.16 DR defect image of guide vane processed by Gaussian filter

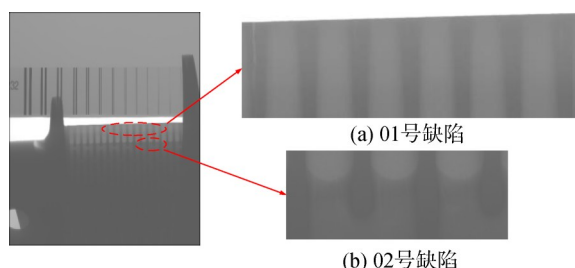


图 17 Unsharp 锐化处理的导向叶片 DR 缺陷图像
Fig.17 DR defect image of guide vane processed by Unsharp sharpening

过改进 CLAHE 算法处理的导向叶片 DR 缺陷图像,如图 19 所示,图 19(a)和图 19(b)中缺陷图像清晰度和对比度得到了显著提高,同时突出了边缘细节。

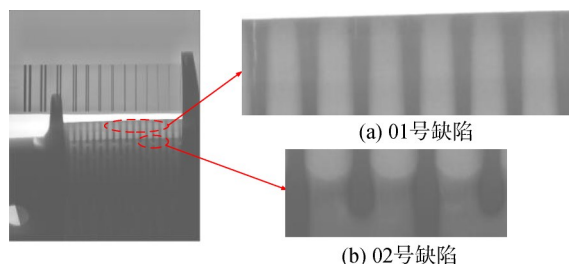


图 18 CLAHE 处理的导向叶片 DR 缺陷图像
Fig.18 DR defect image of guide vane processed by CLAHE

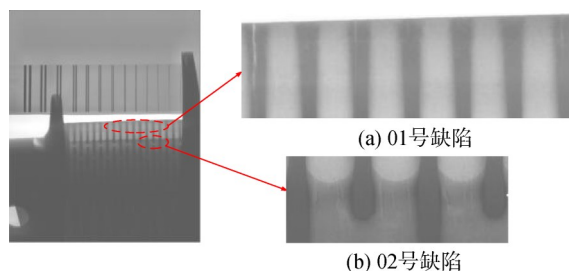


图 19 改进 CLAHE 处理的导向叶片 DR 缺陷图像
Fig.19 DR defect image of guide vane processed by improved CLAHE

3 图像质量评价与对比分析

DR 数字成像系统图像质量的主要指标是图像基本空间分辨率(SRB)、对比灵敏度等,航空发动机导向叶片经过 DR 系统成像后,需要进行图像质量评价,用于评判缺陷位置与大小。

图像基本空间分辨率瑞利判决曲线调制深度(modulation depth, 量符号记为 D_p), 概形表达图像,如图 20 所示,计算公式如下:

$$D_p = 100\% \times \frac{A + B - 2C}{A + B} \quad (11)$$

其中 A 、 B 、 C 分别表示一对双丝线对应的瑞利判决曲线中的两个波峰和一个波谷。

由于航空发动机导向叶片 DR 图像,经过了多种图像增强算法处理,为了评判算法的有效性,要进一步做图像质量评价。图像评价客观指标一般有峰值信噪比(peak signal to noise ratio, PSNR, 量符号记为 R_{psn}), 结构相似性(structural similarity, SSIM), 方均根误差(root mean square error, RMSE, 量符号记为 E_{rms}), 灰度平均值等。其中灰度平均值,反应整体图像的平均亮度,平均亮度越

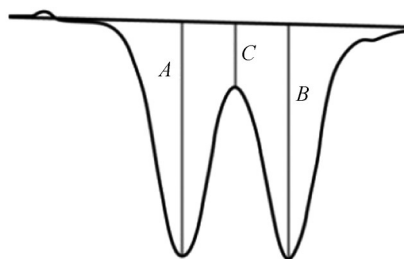


图20 调制深度概形表达图像

Fig.20 Modulation depth profile representation image

大,图像质量越好。灰度平均值 u 计算公式为如下:

$$u = \frac{1}{L \times H} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^H F(i, j) \quad (12)$$

其中 L 、 H 分别为图像长度和高度, $L \times H$ 为图像分辨率, $F(i, j)$ 为图像像素值。

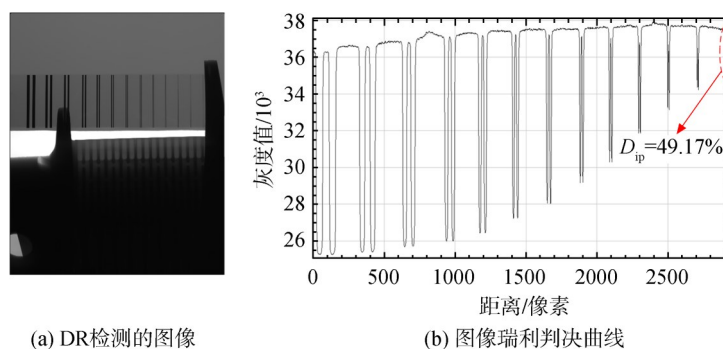
国家能源行业标准《NBT 47013.11-2015 X射线数字成像检测》定义了信噪比(signal noise ratio, SNR, 量符号记为 R_{sn}),即感兴趣区域的图像信息平均值与标准差之比,信噪比越大,说明图像信息质量越高。图像信噪比计算公式如下:

$$R_{sn} = u / \sqrt{\frac{1}{L \times H} \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^H [F(i, j) - u]^2} \quad (13)$$

其中 u 为图像灰度平均值,其他变量同公式(12)所示。

对航空发动机导向叶片DR原始图像,及其经过AHE、Gaussian滤波、Unsharp锐化、CLAHE算法处理的图像,以及改进的CLAHE算法处理的图像,都进行SRB图像基本空间分辨率测评和图像质量评判^[19]。测评结果,分别如图21~图26所示。其中DR原始图像与5种算法处理的图像瑞利判决曲线分别如图21(b)~图26(b)所示,且D13双丝线调制深度计算值都达到了20%,表明6种图像基本空间分辨率能达到0.05 mm,其调制深度(DIP)计算值已在图中标出,分别为49.17%、42.73%、48.97%、72.69%、47.68%、56.08%,调制深度计算值越大,图像清晰度越高。6种导向叶片DR整体图像对应的信噪比和灰度平均值对比结果如表1。

航空发动机导向叶片DR图像,图14(b)中缺陷更加细微,分别计算图14(b)~图19(b)中02号缺陷的信噪比如表2所示,由表2可知:经过改进的CLAHE处理的导向叶片DR图像,图19(b)中02号微小裂纹的信噪比值最大。

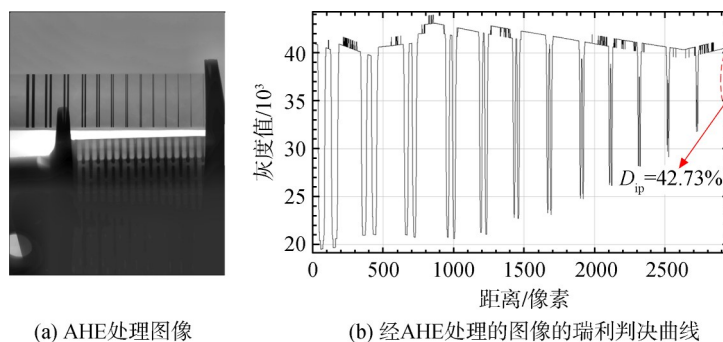


(a) DR检测的图像

(b) 图像瑞利判决曲线

图21 导向叶片DR原始图像的测试结果

Fig.21 Test results of DR original image of the guide vane

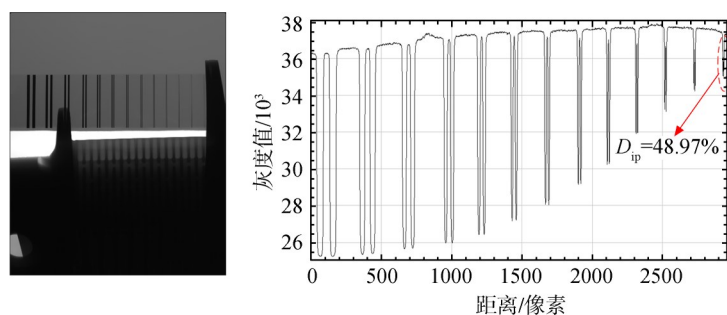


(a) AHE处理图像

(b) 经AHE处理的图像的瑞利判决曲线

图22 AHE处理的导向叶片DR图像的测试结果

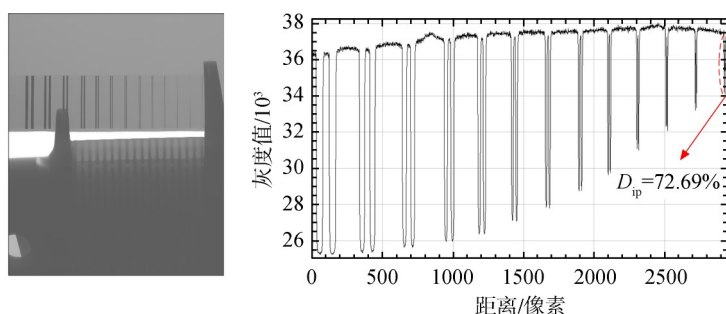
Fig.22 Test results of DR images of guide blades processed by AHE



(a) Gaussian滤波的处理图像 (b) 经Gaussian滤波处理的图像瑞利判决曲线

图 23 Gaussian滤波处理的导向叶片DR图像的测试结果

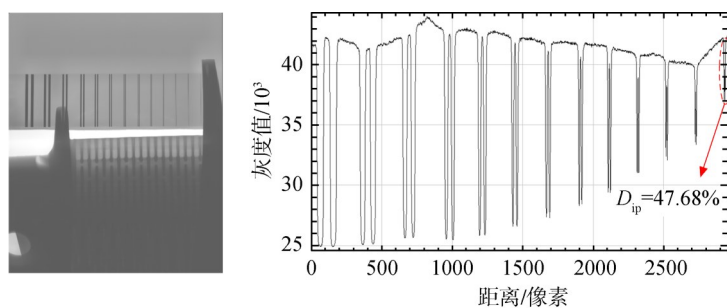
Fig.23 Test results of DR images of guide blades processed by Gaussian filtering



(a) Unsharp锐化的处理图像 (b) 经Unsharp锐化处理的图像瑞利判决曲线

图 24 Unsharp锐化处理的导向叶片DR图像的测试结果

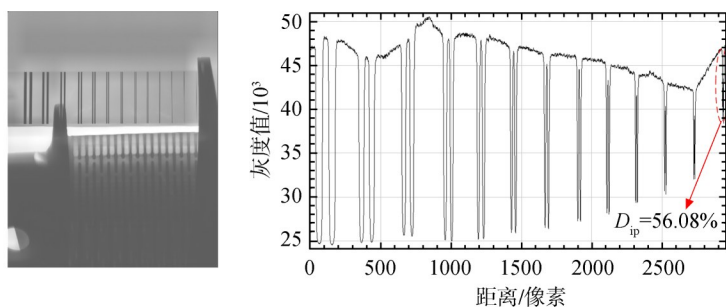
Fig.24 Test results of DR images of guide blades processed by Unsharp sharpening



(a) CLAHE处理的图像 (b) 经CLAHE处理的图像瑞利判决曲线

图 25 CLAHE算法处理的导向叶片DR图像的测试结果

Fig.25 Test results of DR images of guide blades processed by CLAHE algorithm



(a) 改进CLAHE处理的图像 (b) 经改进CLAHE处理的图像瑞利判决曲线

图 26 改进CLAHE算法处理的导向叶片DR图像的测试结果

Fig.26 Test results of DR images of guide blades processed by improved CLAHE algorithm

根据以上6种DR图像的瑞利判决曲线和对应的图像信噪比,可以得出,图像基本空间分辨率

都可以达到D13双丝线,其中Unsharp锐化处理的基本空间分辨率对应的调制深度值最大为

72.69%,其导向叶片整张 DR 图像、图 14(b)中 02 号缺陷信噪比及灰度平均值并不是最优,且缺陷对比度较低、清晰度不明显;结合表 1、表 2、图 27

表 1 不同处理方式导向叶片 DR 图像整体信噪比 SNR
Table 1 Overall signal-to-noise ratio SNR of the DR image of guide blade with different processing methods

图像种类	灰度平均值	灰度均方差	信噪比/ dB
DR 原始图像	32 400.66	9 634.52	3.36
AHE 处理	32 578.79	10 724.24	3.04
Gaussian 滤波	32 400.66	9 633.61	3.36
Unsharp 锐化	32 412.68	9 645.22	3.37
CLAHE 处理	33 522.93	9 926.95	3.38
改进 CLAHE 处理	38 684.43	9 998.56	3.87

表 2 不同处理方式 02 号缺陷的信噪比 SNR
Table 2 Signal-to-noise ratio SNR of No.02 defect in different processing methods

图像种类	灰度平均值	灰度均方差	信噪比/ dB
DR 原始图像	28 232.77	2 002.11	14.10
AHE 处理	25 628.03	5 973.01	4.29
Gaussian 滤波	28 232.81	2 001.42	14.10
Unsharp 锐化	28 232.47	2 009.34	14.05
CLAHE 处理	34 085.50	4 130.98	8.25
改进 CLAHE 处理	31 159.31	2 055.01	15.16

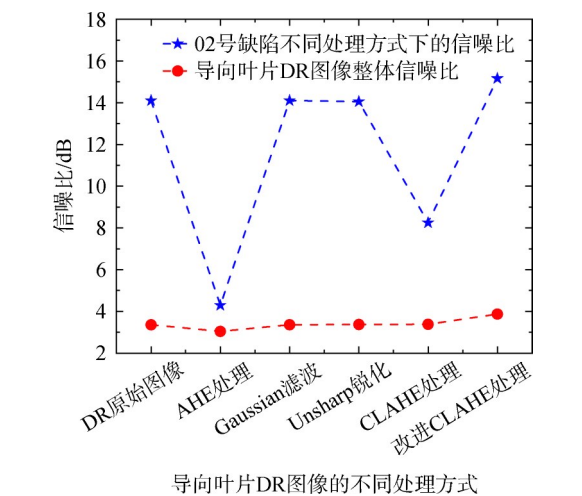


图 27 不同处理方式导向叶片 DR 整体图像和 02 号缺陷信噪比对比结果

Fig.27 Comparison results of the overall image of the guide blade DR with different processing methods and the signal-to-noise ratio of No.02 defect

以及瑞利判决曲线 D13 双丝线调制深度值,改进的 CLAHE 算法处理整张 DR 导向叶片图像,得到的图像信噪比最大为 3.87,灰度平均值最大为 38 684.43,其中图 19(b)中 02 号缺陷图像信噪比最大为 15.16,且 D13 双丝线的调制深度值为 56.08%。与 4 种典型图像增强算法相比,运用改进的 CLAHE 算法对导向叶片 DR 图像进行增强处理,获得的图像质量最优。

4 结 论

航空发动机导向叶片进行 DR 数字成像检测时,针对产生的 DR 图像对比度较低、细节信息不足等进行研究。在 CLAHE 算法的基础上,提出了一种改进型的 CLAHE 算法,成功解决了航空发动机导向叶片的 DR 图像中微小缺陷对比度较低,清晰度不高,细节信息不足的问题。与传统的几种图像增强方法进行了对比分析,实验表明:改进的 CLAHE 算法,可以明显提升航空发动机导向叶片 DR 图像的对比度,突显 DR 图像细节和边缘信息,有效提高了缺陷清晰度和视觉效果。

参考文献:

[1] 周莹.航空发动机涡轮叶片数字射线成像研究[D].南昌:南昌航空大学,2017.
ZHOU Ying.Research on digital radiography of aero-engine turbine blades[D].Nanchang:Nanchang Hangkong University,2017.(in Chinese)

[2] 赵俊皓.空心涡轮叶片残芯 X 射线检测技术[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
ZHAO Junhao.X-ray detection technology of hollow turbine blade residual core[D].Harbin:Harbin Institute of Technology,2018.(in Chinese)

[3] 王攀峰,赵书俊,王双玲,等.一种基于 Retinex 原理的 DR 图像增强改进算法[J].中国体视学与图像分析,2020,25(1):57-64.
WANG Panfeng,ZHAO Shujun,WANG Shuangling,et al. An improved DR image enhancement algorithm based on Retinex principle[J].Chinese Stereology and Image Analysis, 2020,25(1):57-64.(in Chinese)

[4] BZIMMERMAN J,PIZER S,STAAB E,et al.An evaluation of the effectiveness of adaptive histogram equalization for contrast enhancement[J].IEEE Transactions on Medical Imaging,1988,7(4):304-312.

[5] REZA A M.Realization of the contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) for real-time image enhancement[J].Journal of Vlsi Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology,2004,38(1):35-44.

[6] 陶佩,付青青,吴爱平.一种限制对比度的快速 POSHE 图像增强算法[J].长江大学学报(自然科学版),2020,17(2):

- 104-111.
- TAO Pei, FU Qingqing, WU Aiping. A fast POSHE image enhancement algorithm with limited contrast[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2020, 17(2): 104-111. (in Chinese)
- [7] 刘轩, 刘佳宾. 基于对比度受限自适应直方图均衡的乳腺图像增强[J]. 计算机工程与应用, 2008(10):173-175.
- LIU Xuan, LIU Jiabin. Breast image enhancement based on contrast-constrained adaptive histogram equalization[J]. Computer Engineering and Applications, 2008(10):173-175. (in Chinese)
- [8] LOGANATHAN R, KUMARASWAMY Y S. Medical image compression with lossless region of interest using adaptive active contour[J]. Journal of Computer ence, 2012, 8(5): 747-751.
- [9] KIM M, CHUNG M. Recursively separated and weighted histogram equalization for brightness preservation and contrast enhancement[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2008, 54(3):1389-1397.
- [10] 孙冬梅, 陆剑锋, 张善卿. 一种改进 CLAHE 算法在医学试纸条图像增强中的应用[J]. 中国生物医学工程学报, 2016, 35(4):502-506.
- SUN Dongmei, LU Jianfeng, ZHANG Shanqing. Application of an improved CLAHE algorithm in image enhancement of medical test strips[J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2016, 35(4):502-506. (in Chinese)
- [11] 王红茹, 李瑞, 王佳. 基于改进 CLAHE 的水下彩色图像增强算法[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(11):119-122, 141.
- WANG Hongru, LI Rui, WANG Jia. An underwater color image enhancement algorithm based on improved CLAHE [J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(11):119-122, 141. (in Chinese)
- [12] 张文霞, 王春光, 王海超, 等. 改进的 CLAHE 无芒隐子草叶切片图像增强[J]. 农机化研究, 2022, 44(1):25-30.
- ZHANG Wenxia, WANG Chunguang, WANG Haichao, et al. Improved image enhancement of CLAHE without awn cryptocarp leaf slices[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(1):25-30. (in Chinese)
- [13] 刘陈瑶, 胡梦竹, 张龙飞. 基于改进 CLAHE 的 SF₆ 红外图像增强[J]. 光学技术, 2021, 47(1):107-112.
- LIU Chenyao, HU Mengzhu, ZHANG Longfei. SF₆ infrared image enhancement based on improved CLAHE[J]. Optics Technology, 2021, 47(1):107-112. (in Chinese)
- [14] İLK H G, JANE O, İLK Ö. The effect of Laplacian filter in adaptive unsharp masking for infrared image enhancement[J]. Infrared Physics and Technology, 2011, 54(5):427-438.
- [15] 徐艳丽, 谭剑. 基于非线性反锐化掩膜的 DR 图像边缘增强[J]. 中国医学物理学杂志, 2010, 27(4):2013-2015.
- XU Yanli, TAN Jian. DR image edge enhancement based on nonlinear unsharp masking[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2010, 27(4):2013-2015. (in Chinese)
- [16] RAMPONI G. A cubic unsharp masking technique for contrast enhancement[J]. Signal Processing, 1998, 67(2):211-222.
- [17] 黄勇. 基于双边滤波和改进 CLAHE 算法的低照度图像增强研究[D]. 湖南 湘潭:湘潭大学, 2019.
- HUANG Yong. Research on low-light image enhancement based on bilateral filtering and improved CLAHE algorithm [D]. Xiangtan Hunan: Xiangtan University, 2019. (in Chinese)
- [18] 许蓉, 王直, 宗涛. 基于改进高斯滤波的医学图像边缘增强[J]. 信息技术, 2020, 44(4):75-78.
- XU Rong, WANG Zhi, ZONG Tao. Medical image edge enhancement based on improved Gaussian filtering[J]. Information Technology, 2020, 44(4):75-78. (in Chinese)
- [19] 刘凯, 王晓勇, 袁孟春. 碳纤维缠绕发动机壳体数字射线 DR 成像检测图像质量控制[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(5): 76-82.
- LIU Kai, WANG Xiaoyong, YUAN Mengchun. Image quality control of digital radiographic DR imaging inspection of carbon fiber wound engine shell[J]. Aerospace Materials Technology, 2020, 50(5):76-82. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)