

基于频域变换的MEMS声学薄膜缺陷检测算法

魏冬 桑梅 禹敏慧 黄耀慷 刘红光 刘铁根

Defect detection algorithm of MEMS acoustic film based on frequency domain transformation

WEI Dong, SANG Mei, YU Minhui, HUANG Yaokang, LIU Hongguang, LIU Tiegeng

引用本文:

魏冬, 桑梅, 禹敏慧, 等. 基于频域变换的MEMS声学薄膜缺陷检测算法[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1086–1091. DOI: 10.5768/JAO202142.0603005

WEI Dong, SANG Mei, YU Minhui, et al. Defect detection algorithm of MEMS acoustic film based on frequency domain transformation[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1086–1091. DOI: 10.5768/JAO202142.0603005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0603005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进梯度幅值的包装缺陷检测算法研究及应用

Research and application of package defects detection algorithm based on improved GM

应用光学. 2019, 40(4): 644–651 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0403003>

基于光学相干测振系统的微悬臂梁缺陷检测

Defect detection of micro-cantilever beams based on optical coherence vibrometer system

应用光学. 2021, 42(2): 304–309 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203003>

基于深度神经网络的太阳能电池组件缺陷检测算法研究

Research on detection algorithm of solar cell component defects based on deep neural network

应用光学. 2020, 41(2): 327–336 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0202006>

基于规范化样本拆分的轴承缺陷检测

Bearing defects detection based on standardized sample split

应用光学. 2021, 42(2): 327–333 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203006>

基于傅里叶变换的细胞牵引力测量研究

Research on cell traction measurement based on Fourier transform

应用光学. 2021, 42(2): 317–326 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203005>

激光超声检测带过渡圆角平板表面缺陷的数值研究

Numerical study on surface defects detection of plate with transition fillet by laser ultrasound

应用光学. 2020, 41(1): 214–219 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0107005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2021) 06-1086-06

基于频域变换的 MEMS 声学薄膜缺陷检测算法

魏 冬^{1,2}, 桑 梅^{1,2}, 禹敏慧^{1,2}, 黄耀慷^{1,2}, 刘红光³, 刘铁根^{1,2}

(1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072; 3. 天津市计量监督检测科学研究院, 天津 300192)

摘 要: 微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 声学薄膜对流片、存储和封装环境要求极高, 其表面缺陷会影响 MEMS 器件的质量和性能。图像检测缺陷是一种有效的非接触光学检测手段, 可以有效提高 MEMS 生产的良品率, 然而 MEMS 器件表面的周期性结构纹理会对缺陷检测产生干扰。提出了一种基于频域变换的声学薄膜缺陷检测算法, 通过计算频谱图的梯度分布和建立布尔掩码以消除图像中周期性结构纹理对应的主频分量, 将剩余频谱图进行傅里叶逆变换重构缺陷图像, 对重构图像采用单层 Haar 小波分解去噪获得低频子带图像, 采用简单的阈值分割提取缺陷信息, 展示了不同种类 MEMS 声学薄膜的缺陷检测效果。实验结果表明, 缩放常数 t_g 的取值范围为 0.7~1.0 比较合理。

关键词: MEMS 声学薄膜; 傅里叶变换; 周期性结构纹理; Haar 小波分解; 缺陷检测

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202142.0603005

Defect detection algorithm of MEMS acoustic film based on frequency domain transformation

WEI Dong^{1,2}, SANG Mei^{1,2}, YU Minhui^{1,2}, HUANG Yaokang^{1,2}, LIU Hongguang³, LIU Tiegeng^{1,2}

(1. School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Opto-electronic Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Tianjin Institute of Metrological Supervision and Testing, Tianjin 300192, China)

Abstract: The micro-electro-mechanical system (MEMS) acoustic film has extremely high requirements for tape-out, storage and packaging environments, and its surface defects will affect the quality and performance of MEMS devices. The image defects detection is an effective non-contact optical detection means that can effectively improve the yield rate of MEMS production. However, the periodic structure texture of the MEMS devices surface will interfere with defect detection. A acoustic film defect detection algorithm based on frequency domain transformation was proposed. By calculating the gradient distribution of spectrogram and establishing the Boolean mask, the dominant frequency components corresponding to the periodic structure texture were eliminated. The residual spectrograms were subjected to a Fourier inversion to reconstruct the defect images. The reconstructed images were decomposed by single-layer Haar wavelet to obtain the low-frequency sub-band image and the defect information was extracted by simple threshold segmentation. The defect detection effects of different types of MEMS acoustic film were showed. The experimental results show that it is reasonable to set the zoom constant in the range of 0.7~1.0.

Key words: micro-electro-mechanical system acoustic film; Fourier transform; periodic structure texture; Haar wavelet decomposition; defect detection

收稿日期: 2021-04-25; 修回日期: 2021-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFF01013203)

作者简介: 魏冬 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事声学薄膜表面缺陷检测方面的研究。E-mail: 490026142@qq.com

通信作者: 桑梅 (1967—), 女, 博士, 副教授, 主要从事检测与传感相关技术的研究。E-mail: m_sang@tju.edu.cn

引言

微机电系统 (micro-electro-mechanical system, MEMS) 是集合了微电子技术、机械技术和声学等多学科的高科技传感系统^[1], 已经在航天、通讯等领域获得了广泛的应用^[2]。由于 MEMS 结构多样、尺寸微小且生产工序复杂, 对流片、储存和封装环境要求极高, 通常在流片工序完成之后, 晶圆表面会留下许多表面缺陷, 如斑块、裂纹等, 必须对其进行检测以保证产品质量。当晶圆到达器件厂商一方, 为保证 MEMS 器件的质量和性能, 在切分、封装前后还需要进行颗粒、污染等因素的检测。传统的 MEMS 表面缺陷检测方法 (光电检测、涡流探伤和高分辨率 X 射线衍射 HRXRD) 对检测设备要求极高且有可能对微构件造成二次损伤。机器视觉检测技术作为一种涉及光学、计算机技术和图像处理的多领域交叉综合性技术, 因其具有无接触、高精度的优点, 对于提高 MEMS 微构件的制造水平, 降低生产成本具有重要的研究意义和实用价值^[3]。MEMS 声学薄膜是新型耳机和麦克风中的核心器件, 它是声 (机械振动)/电 (电压、电流) 信号相互转换的重要执行器件。由于其尺寸微小且对外部环境要求高, 空气中悬浮的水蒸气、纤维、灰尘等杂质都可能以表面缺陷的形式附着在声学薄膜表面, 并对其振动模态产生负面影响。

声学薄膜缺陷图像的特点是在周期性结构纹理的背景中叠加着一些斑块状和条带状杂质, 对于这种缺陷进行检测时, 背景信息往往会造成一定的干扰, 不利于缺陷区域信息的提取。近年来研究者们提出了很多表面缺陷检测算法^[4], 大致可分为依赖无缺陷模板图像的参考法^[5]和不依赖于模板的非参考法^[6]。参考法的性能会受到图像旋转、缩放和不均匀照明条件造成的图像扭曲等因素的影响, 在图像差影计算后会产生许多噪声, 稳定性较差^[7]。非参考法中通常利用傅里叶变换^[8-9]、小波变换^[10]和 Gabor 变换^[11-12]等分析方法将二维图像信号转换到频域, 根据相关的频率分布准则提取背景的纹理特征。这类方法能够结合背景纹理的频域特性和空域特性进行研究, 在非参考法中针对周期性结构的应用效果最好。Gabor 变换虽然符合人类视觉感受特性, 具有较好的方位选择性, 但参数的计算量较大^[13], 不满足快速检测的需求。

本文提出了一种结合二维离散傅里叶变换 (DFT) 和 Haar 小波分解的 MEMS 声学薄膜缺陷检测算法, 主要包含 3 个步骤: 1) 通过 DFT 得到缺陷图像的傅里叶频谱图, 采用布尔掩码消除频域中周期性结构对应的主频分量, 对剩余的频谱图采用二维离散傅里叶逆变换 (IDFT) 获得包含缺陷信息的重构图像; 2) 对缺陷图像进行单层 Haar 小波分解去噪, 得到低频分量图像 A, 体现了缺陷图像的主要表现力, 能够较为清晰地显示缺陷的形貌; 3) 采用阈值法针对低频分量图像进行二值化图像分割以进行缺陷的提取。算法流程如图 1 所示。

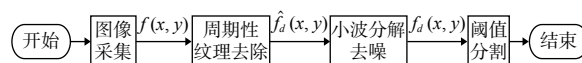


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

1 周期性结构的背景纹理去除

1.1 傅里叶频谱分析

傅里叶频谱对于灰度图像中的周期性结构纹理具有很好的适用性。对于只包含有周期信号的无缺陷图像来说 (见图 2(a)), 其频谱由规则分布的一系列谐波频率点所组成, 表现在含有缺陷图像的频谱中 (见图 2(b)) 为一系列突出的规则峰值。通过将这些峰值及其相邻的峰值修正为 0, 就能够有效地去除周期性模式。通过设置特定角度对频谱进行扫描, 能够发现含缺陷图像频谱的频率分量相较于无缺陷图像的频谱具有更陡峭的尖锐峰值, 即对应更大的梯度值^[14]。因此可以计算频谱的梯度分布并从频谱中提取周期性结构的相关频率分量。

缺陷图像 $f(x,y)$ 看作是缺陷区域 $f_d(x,y)$ 和背景纹理区域 $f_p(x,y)$ 两部分的信息之和:

$$f(x,y) = f_d(x,y) + f_p(x,y) \quad (1)$$

本文的目的是在无相关周期性结构纹理的先验信息时从 $f(x,y)$ 中分离出 $f_d(x,y)$ 。分别以 $\hat{f}_p(x,y)$ 、 $\hat{f}_d(x,y)$ 作为 $f_d(x,y)$ 和 $f_p(x,y)$ 的估计值:

$$\hat{f}_d(x,y) = f(x,y) - \hat{f}_p(x,y) \quad (2)$$

可通过 $f(x,y)$ 的 DFT 运算对 $f_p(x,y)$ 进行估算, 在 $\hat{f}_d(x,y)$ 中缺陷信息得以保留, 大部分背景纹理信息将被消除。

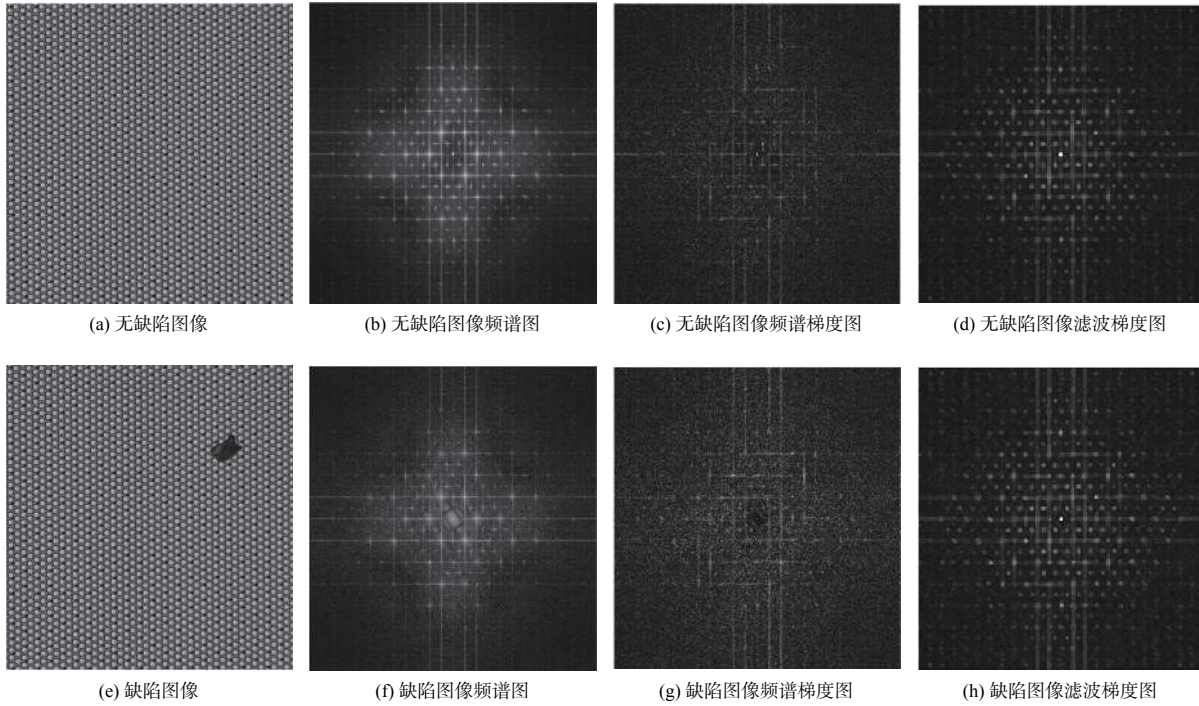


图 2 示例图像及其频谱梯度图

Fig. 2 Sample diagrams and spectrum gradient diagrams

1.2 周期性背景纹理的去除

$F(u, v)$ 表示图像 $f(x, y)$ 的 DFT 结果, 其公式可以表示为

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cdot \exp \left[-j \cdot 2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (3)$$

将频谱 $F(u, v)$ 的振幅谱进行定义:

$$A(u, v) = |F(u, v)| \quad (4)$$

通常来说, $A(u, v)$ 具有较为宽广的动态范围, 然而高频区域中的梯度值远小于低频区域的梯度值, 因此采用对数频谱法减小数值范围:

$$L(u, v) = \lg[A(u, v) + 1] \quad (5)$$

计算梯度值按照如下定义:

$$\nabla L = \begin{bmatrix} g_u \\ g_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta L}{\delta u} \\ \frac{\delta L}{\delta v} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 g_u 和 g_v 分别表示 u 和 v 方向上的梯度值。依据每个坐标点 (u, v) 处的梯度值计算梯度图:

$$G(u, v) = \text{mag}(\nabla L) = \sqrt{g_u^2 + g_v^2} \quad (7)$$

由于频谱中峰的中心梯度值可能小于边缘的梯度值, 为了使峰周围的区域显示接近均匀的响应, 对梯度图 $G(u, v)$ 应用一个 3×3 的最大值滤波器以实现平滑效果。由于之前进行的对数运算使得

梯度图中仍可能会产生噪声, 因此对 $L(u, v)$ 进行同样的滤波去噪使得峰值进一步突显。图 2 中显示了对 $L(u, v)$ 和 $G(u, v)$ 进行了前置和后置滤波操作效果图, 从图 2(d) 和图 2(h) 可以看出组合了前置和后置滤波的梯度图峰值突显, 最适合用于峰值判别。并且, 两幅频谱梯度图中与周期性结构纹理对应的频率分量均显示出较大的梯度值, 而其余频率分量的梯度值则接近 0。

本文采用大津法^[15](Otsu)对具有 2 种梯度值的频率分量的分割阈值 T_g 进行估算, 在确定 T_g 后建立布尔掩码 $M(u, v)$, 便于对频谱中的周期性模式对应的频率分量进行过滤:

$$M(u, v) = \begin{cases} 0 & G(u, v) > T_g t_g \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

式中 t_g 是一个缩放常数, 可以根据经验确定其值约为 0.8。为确保频谱中突出的峰值均被掩码覆盖, 对掩码应用基于 3×3 正方形结构元素的形态学操作“膨胀”。

确定布尔掩码 $M(u, v)$ 后, 按照如下规则获得缺陷区域频谱 $F_d(u, v)$ 的估计值:

$$\hat{F}_d(u, v) = F(u, v) \times M(u, v) \quad (9)$$

对其进行 IDFT 运算重构缺陷图像, 运算法则如下:

$$\hat{f}_d(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \hat{F}_d(u, v) \cdot \exp \left[j \cdot 2\pi \left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N} \right) \right] \quad (10)$$

重构之后的图像如图 3 所示。无缺陷图像样本中的大部分背景纹理都被去除, 而有缺陷图像样本中则留下了较为完整的缺陷区域信息, 证明了本方法的有效性。上述算法的流程如图 4 所示。

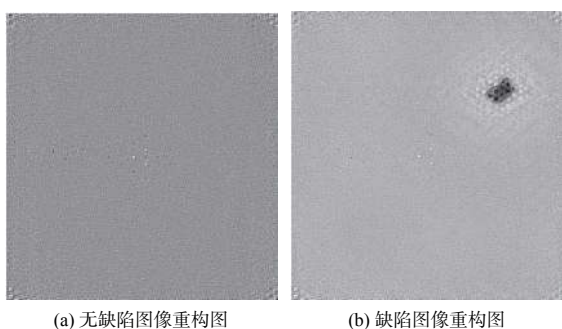


图 3 IDFT 重构图像

Fig. 3 Reconstructed images by IDFT

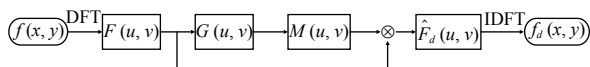


图 4 去除周期性结构纹理流程图

Fig. 4 Flow chart of removing periodic structure texture

2 傅里叶逆变换重构图像的缺陷分割

2.1 单层 Haar 小波变换去噪

由图 3 所示, 在重构图像中仍存在部分噪声。经过分析和统计, MEMS 声学薄膜表面缺陷图像的频谱图特点是: 缺陷信息处在低频部分, 而高频区域主要包含噪声, 因此可以采用低通滤波器进行去噪处理。对于二维图像信号来说, 分别在水平和垂直方向进行滤波能够实现二维小波的多分辨率分解, 得到多子带图像。图 5 为进行二维离散小波变换后的子图像分解示意图。L 表示低通小波滤波器, H 表示高通小波滤波器。LL、HL、LH 和 HH 表示在水平和垂直方向上采用相应的小波

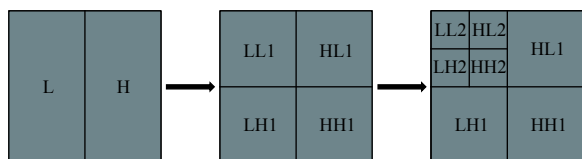


图 5 小波变换子图像分解示意图

Fig. 5 Schematic diagram of wavelet transform sub-image decomposition

滤波器进行卷积后得到的小波系数, 分别对应原图像的近似值、原图像在水平方向的特性(水平子带)、原图像在垂直方向的特性(垂直子带)和原图像的对角特性(对角子带)。

将傅里叶重构后的图像进行 Haar 单层小波分解, 得到 A 、 H 、 V 、 D 4 幅子图像, 其尺寸变为重构图像的一半。 A 对应于原始图像的近似值, 其他 3 个子带 H 、 V 和 D 对应于水平、垂直和对角线方向的小波系数。二维图像的 Harr 小波变换如下所示:

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \mathbf{H} \cdot f(x, y) \cdot \mathbf{H}^T \quad (11)$$

式中: $\mathbf{H}$ 为 Haar 变换矩阵; N 为阶数。经过小波滤波后的图像如图 6 所示。

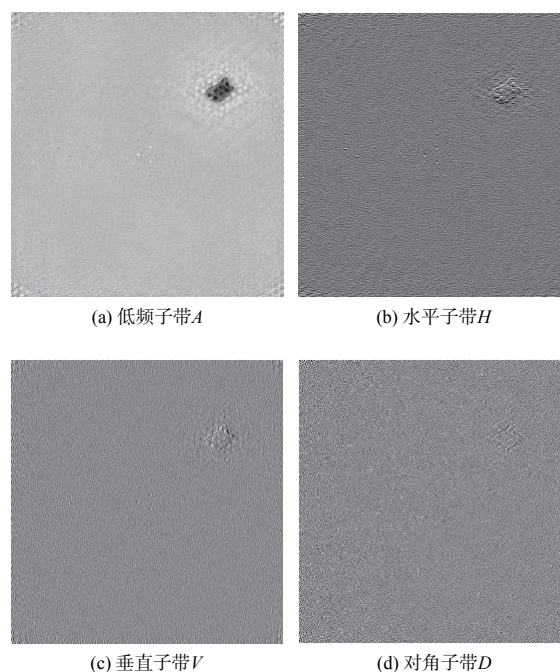


图 6 Haar 单层小波分解子图像

Fig. 6 Sub-image of Haar single-layer wavelet decomposition

2.2 去噪图像二值化

为了分割出缺陷区域, 需要对近似值图像进行二值化操作。从图 6(a)中可以看到, 重构图像的缺陷区域灰度值分布均一且与背景部分具有较大的差异, 可按照如下规则进行二值化操作:

$$f_d(x, y) = \begin{cases} 0 & \left| \hat{f}_d(x, y) - \mu_d \right| < t_d \sigma_d \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

式中: μ_d 为图像的均值; σ_d 为图像的方差; t_d 为控制常数。通过二值化操作, 使得重构图像中的缺陷部分能够被较为完整地分割(如图 7 所示)。

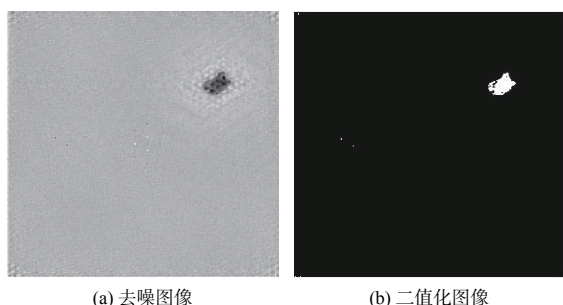


图 7 去噪图像二值化结果图

Fig. 7 Binaryzation result diagrams of denoising image

3 实验和讨论

本文以一组真实的 MEMS 声学薄膜的缺陷图像为实验样本, 对算法的有效性进行验证。实验使用的硬件环境为搭载 Intel Core i7-CPU@2.60 GHz 以及 RAM 为 8.0 GB 的计算机, 操作系统为 Windows10, 算法编程软件为 MATLAB。

3.1 缩放常数 t_g 对周期性纹理去除的影响

缩放常数 t_g 主要用于限制通过 OTSU 算法得到的分割阈值 T_g , 它的取值会影响到布尔掩码的生成, 进而对背景纹理的去除效果产生影响。图 8 给出了 $t_g=0.5$ 、0.7、1.0、1.5 时不同缺陷图像的重构效果。当 t_g 的值过大时, 缺陷重构图像中还残留有未去除的周期性结构纹理, 原因是傅里叶频谱中仍存在一部分对应于背景纹理的高频分量并未被去除; 当 t_g 的值过小时, 有可能会导一部分缺陷信息的频率分量被删除, 使得缺陷区域信息减少并出现噪声, 影响重构效果, 因此, 可以将 t_g 的取值范围固定在 0.7 ~ 1.0。

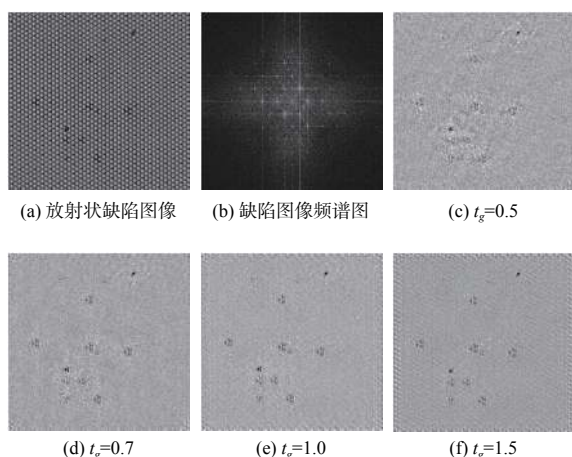


图 8 放射状缺陷图像背景纹理去除效果图

Fig. 8 Removal effect diagrams of background texture for radial defect images

3.2 算法对不同种类 MEMS 声学薄膜检测的适用性

为验证本算法对于消除不同周期性结构纹理的适用性, 选择 2 种背景纹理的 MEMS 声学薄膜缺陷图像导入本算法进行缺陷检测, 其重构图像和二值化结果如图 9 和图 10 所示。可以看到, 算法对于周期性结构纹理的去除效果较好, 缺陷区

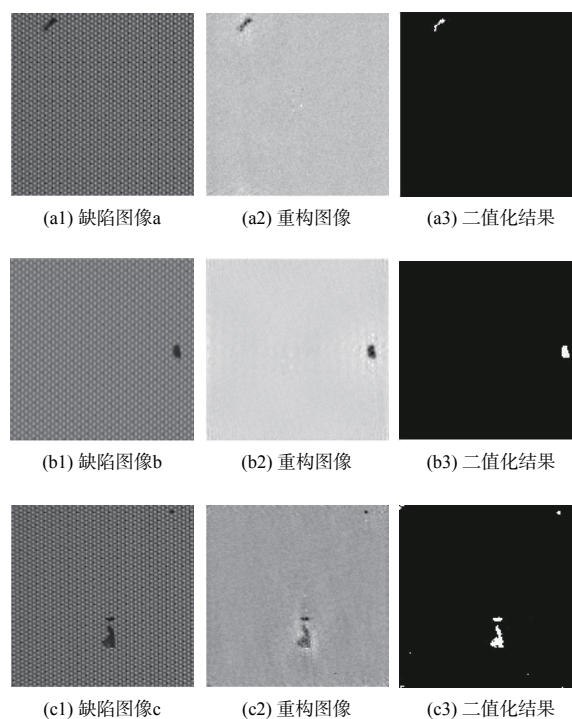


图 9 XC-29 声学薄膜缺陷检测图

Fig. 9 Defect detection diagrams of XC-29 acoustic film

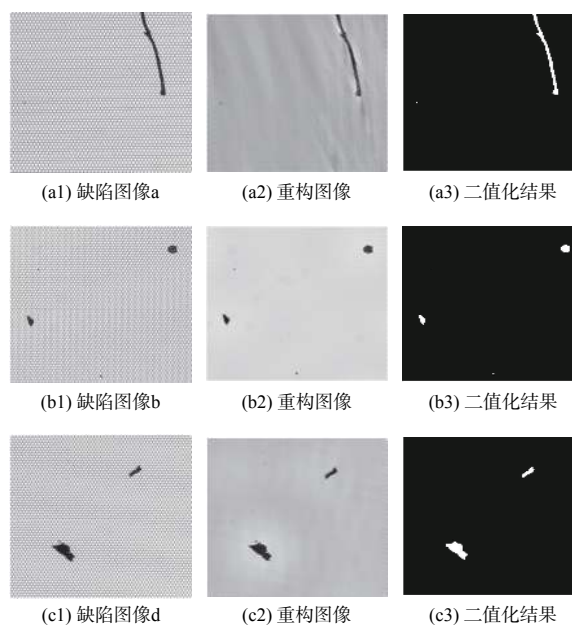


图 10 XC-25 声学薄膜缺陷检测图

Fig. 10 Defect detection diagrams of XC-25 acoustic film

域得到较为完整地保留, 并且当成像质量较高时, 图像的相关细节较为清晰, 分割效果得到进一步提升。然而, 当缺陷区域的面积较大时, 在重构图像中缺陷的周围会产生波纹状的噪声。从前文中的频谱能够看出缺陷区域的信息主要集中在频谱中的低频部分, 周期性结构纹理的信息主要集中于高频部分。对频谱的操作会使得二者之间连接区域的频率分量产生缺失进而出现噪声。但经过小波分解和二值化处理后这些噪声也得到了去除, 对最终的二值化结果并未产生影响。

4 结论

本文提出了一种无监督的 MEMS 声学薄膜缺陷检测算法, 通过提取频谱梯度图中高梯度值对应的频率分量以消除周期性背景纹理, 对重构图像进行单层 Haar 小波变换得到去噪后的低频子图像, 并通过阈值分割输出了二值化缺陷图像。实验结果表明, 缩放常数 t_g 取值于 0.7~1.0 时较为合理, 存在于不同背景纹理的缺陷信息也能够被成功检测, 证实了本算法能够较好地完成具有周期性结构纹理的 MEMS 声学薄膜表面缺陷检测任务。

参考文献:

- [1] 宋宇, 张海霞. 微电子机械系统研究领域的最新进展——IEEE MEMS 2018 国际会议综述[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(2): 372-378.
SONG Yu, ZHANG Haixia. The latest progress in the research field of MEMS—Overview of IEEE MEMS 2018 International Conference[J]. , 2018, 16(2): 372-378.
- [2] 申小萌. MEMS 技术在电子通信产业中的意义初探[J]. 中国新通信, 2016, 18(7): 98-99.
SHEN X M. The significance of MEMS technology in electronic communication industry[J]. China New Telecommunications, 2016, 18(7): 98-99.
- [3] 宗艳芬. 基于计算机视觉的微小零件质量检测系统和方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
ZONG Yanfen. The quality detection system and method of computer based on microscopic vision[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017.
- [4] XIE Xianghua. A review of recent advances in surface defect detection using texture analysis techniques[J]. EL-CVIA Electronic Letters on Computer Vision and Image Analysis, 2008, 7(3): 1-22.
- [5] PAN Zhongliang, CHEN Ling, ZHANG Guangzhao. IC wafer defect detection using image segmentation based on cultural algorithms[J]. SPIE, 2008, 7130: 713046-1-6.
- [6] HU Guanghua, WANG Qinghui, ZHANG Guohui. Unsupervised defect detection in textiles based on Fourier analysis and wavelet shrinkage[J]. Applied Optics, 2015, 54(10): 2963-2980.
- [7] 刘西峰. 基于图像配准的晶圆表面缺陷检测[J]. 仪器仪表与分析监测, 2020(3): 1-4.
LIU Xifeng. Inspection of IC wafer defects based on image[J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2020(3): 1-4.
- [8] TSAI D M, WU S C, LI W C. Defect detection of solar cells in electroluminescence images using Fourier image reconstruction[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2012, 99: 250-262.
- [9] 刘丽, 匡纲要. 图像纹理特征提取方法综述[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(4): 622-635.
LIU Li, KUANG Gangyao. Overview of image textural feature extraction methods[J]. Journal of Image and Graphics, 2009, 14(4): 622-635.
- [10] HARIKUMAR R, VINOTH KUMAR B. Performance analysis of neural networks for classification of medical images with wavelets as a feature extractor[J]. International Journal of Imaging Systems and Technology, 2015, 25(1): 33-40.
- [11] HU Guanghua. Optimal ring Gabor filter design for texture defect detection using a simulated annealing algorithm[C]//2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering. April 26-28, 2014, Sapporo, Japan: IEEE, 2014: 860-864.
- [12] 丛家慧, 颜云辉, 董德威. Gabor 滤波器在带钢表面缺陷检测中的应用[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 257-260.
CONG Jiahui, YAN Yunhui, DONG Dewei. Application of Gabor filter to strip surface defect detection[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2010, 31(2): 257-260.
- [13] JING Junfeng, CHEN Shan, LI Pengfei. Fabric defect detection based on golden image subtraction[J]. Coloration Technology, 2017, 133(1): 26-39.
- [14] TSAI Z D, PERNG M H. Defect detection in periodic patterns using a multi-band-pass filter[J]. Machine Vision and Applications, 2013, 24(3): 551-565.
- [15] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.