

文章编号 1004-924X(2014)11-3100-14

微焦点 X 射线图像乘性加性混合噪声的去除

高红霞^{1,2}, 吴丽璇^{1,2*}, 徐 寒^{1,2}, 康 慧³, 胡跃明^{1,2}

(1. 华南理工大学 精密电子制造装备教育部工程研究中心, 广东 广州 510640;

2. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510640;

3. 广东技术师范学院 自动化学院 广东 广州 510665)

摘要: 考虑微焦点 X 射线仪成像信噪比低, 混合噪声污染严重等问题, 提出了一种乘性、加性混合噪声去除方法。首先, 建立了含乘性、加性混合噪声的图像模型; 其次, 基于总变分和稀疏表示原理分别构造了滤除加性噪声和乘性噪声的目标函数; 最后, 应用显式差分算法和梯度投影算法分步滤除加性噪声和乘性噪声。实验结果显示, 与总变分去加性噪声方法相比, 该方法处理后的图像平滑区域均值与标准差比 (MSR) 平均提升了 10.9%, 细节区域拉普拉斯梯度模 (LS) 平均提升了 15.6%。这些结果表明: 本文算法不仅有效滤除了微焦点 X 射线图像的混合噪声, 并且较好地保留了图像细节特征, 能够满足集成电路内部缺陷检测对图像平滑度和细节清晰度的要求。

关键词: 微焦点 X 射线检测; X 射线图像; 总变分模型; 稀疏表示; 混合去噪

中图分类号: TP391.4; TP242.6 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142211.3100

Denoising method of micro-focus X-ray images corrupted with mixed multiplicative and additive noises

GAO Hong-xia^{1,2}, WU Li-xuan^{1,2*}, XU Han^{1,2}, KANG Hui³, HU Yue-ming^{1,2}

(1. *Engineering Research Center for Precision Electronic Manufacturing Equipment of the Ministry of Education,*

South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. School of Automation Science and Engineering,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

3. School of Automation, Guangdong Polytechnic Normal University, Guangzhou 510665, China)

** Corresponding author, E-mail: wu.lixuan@mail.scut.edu.cn*

Abstract: In consideration of the lower imaging Signal to Noise Ratio (SNR) and serious mixed noise of a micro-focus X-ray inspector, a denoising method was proposed for the images corrupted with mixed multiplicative noise and additive noise. Firstly, an image model was established to represent the micro-focus X-ray images with mixed multiplicative and additive noises. Then, to remove the mixed noises, the objective functions were proposed based on the principle of total variation and sparse representation. Finally, the multiplicative noise and the additive noise were removed by explicit

收稿日期: 2014-05-23; **修订日期:** 2014-06-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61403146); 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA041312); 国家科技重大专项 02 专项子课题“面向封装过程的 X 光学检测关键技术及成套装备”资助项目

difference method and gradient projection in steps. Experiment results show that the proposed method enhances the Mean to Standard deviation Ratio(MSR) of the images by 10.9% in smooth areas, the Laplacian Sum(LS) by 15.6% in detail areas as compared with total variation algorithm for the additive noise model. The experiments demonstrate that the proposed method not only removes the mixed noises in X-ray image but also retains the details of the image edge. It meets the requirements of integrated circuit detection for image smoothness and detail definition.

Key words: micro-focus X-ray detection; X-ray image; total variation model; sparse representation; mixed denoising

1 引 言

精密电子组装中集成电路等精密对象内部缺陷检测的需求推动着微焦点 X 射线检测仪的发展和应。目前,集成电路内部缺陷检测采用的 X 射线管的焦点尺寸仅为几微米^[1],与医学上常用的百微米焦点^[2]X 射线源相比,具有单位时间内射线通量少,成像信噪比低,图像颗粒噪声、雾化情况严重等缺点,表现出较强的混合噪声污染现象,这给精密电子组装中高精密对象的缺陷检测和三维重建带来了困难。

传统的 X 射线图像去噪方法主要分为两类:滤波方法和统计方法^[3]。滤波方法常采用低通滤波器直接对投影数据或重建图像进行滤波^[4],该算法简单,但需要预知图像噪声属性才能对混合噪声图像进行有效去噪。统计方法^[5-6]将噪声看作符合一定分布的加性或乘性噪声,对噪声进行统计建模。目前,该方法很少考虑混合噪声的滤除,故难以较好地恢复受混合噪声污染的微焦点 X 射线图像。

近年来,数学和信号处理领域提出的压缩传感和稀疏表示理论为图像复原提供了新的思路^[7]。其中,稀疏表示将图像去噪看作一个以恢复稀疏性为目的的优化过程,特别适用于 X 射线成像这一天然具有稀疏性的对象,但常见的稀疏表示算法多用于处理仅含加性噪声的图像。

因此,本文针对微焦点 X 射线图像的特点,提出一种含乘性和加性混合噪声的图像模型,基于总变分和稀疏表示原理,分别构造了滤除加性噪声和乘性噪声的目标函数,并应用显式差分算

法和梯度投影法分步滤除混合噪声。

2 微焦点 X 射线图像混合噪声模型

如图 1 所示,在微焦点 X 射线仪成像中,待处理图像都不同程度地受到各种噪声的污染。

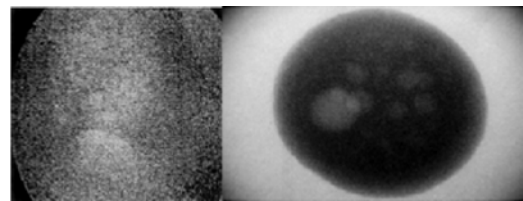


图 1 受混合噪声污染的微焦点 X 射线图像

Fig. 1 Micro-focus X-ray images polluted by mixed noise

现有的总变分(Total Variation, TV)正则化^[8]图像去噪研究常将 X 射线图像噪声看作加性高斯噪声^[9]或泊松噪声^[10],然而,X 射线仪成像来源复杂,成像系统中光管激发、倍增、荧光屏、CCD 等都会产生噪声。另外,微焦点引起光子计数水平低,使得图像噪声的形成更加复杂。不论是将其考虑成何种噪声类型,都难以确切地描述其性质。因此,本文将微焦点 X 射线仪成像的噪声看作加性高斯噪声和未知特性的乘性噪声的混合。其中,加性高斯噪声是成像过程中不可避免的,主要考虑热电子由倍增极放大带来的暗电流波动;乘性噪声则考虑其他与成像相关的噪声,该类噪声可能与图像灰度相关。本文通过抑制乘性、加性噪声能量以及对去噪图像进行稀疏性约束,实现混合噪声去除。

含混合噪声的图像模型定义为:

$$Y = Mu + u + N, \quad (1)$$

其中: Y 为含混合噪声图像信号; u 为干净图像信号; N 为加性高斯噪声; M 为未知特性的乘性噪声。

为有效去除混合噪声, 本文采用式(2)、式(3)所示方法实现微焦点 X 射线图像的去噪。

$$Y = X + N, \quad (2)$$

$$X = Mu + u, \quad (3)$$

其中: 式(2)将乘性噪声和干净图像信号的混合项看作一个整体, 即信号 X ; 式(3)^[11]为仅含乘性噪声的图像模型。本文采用 TV 正则化方法去除加性噪声, 用稀疏表示去噪方法对滤除加性噪声后的图像 X 实现乘性噪声分离。

3 基于总变分模型和稀疏表示的微焦点 X 射线图像去噪方法

3.1 加性噪声去除

考虑微焦点 X 射线图像梯度图的稀疏性, 本文针对 $Y = X + N$ 这一加性噪声图像模型, 采用传统 TV 正则化目标函数:

$$\min \frac{\lambda_1}{2} \|Y - X\|_2^2 + \text{TV}(X), \quad (4)$$

式中: $Y \in R^n$ 为采集的原始图像信号; X 为待复原的含乘性噪声图像; λ_1 为正则化参数。

$$\text{TV}(X) = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^{m-1} \| (X_{i+1,j} - X_{i,j}, X_{i,j+1} - X_{i,j}) \|, \quad (5)$$

其中: n 为图像高度; m 为图像宽度。

目标函数中的第一项是用 l_2 范数抑制加性高斯噪声的能量; 第二项为确保图像梯度图稀疏的变分项, 在图像边缘强度保持的前提下实现图像平滑去噪。

式(4)对应的梯度下降流方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial X}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{X_x}{\sqrt{X_x^2 + X_y^2}} + \\ &\frac{\partial}{\partial y} \frac{X_y}{\sqrt{X_x^2 + X_y^2}} + \lambda_1 (Y - X), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{div} \left[\frac{\nabla X}{|\nabla X|} \right] &= \frac{\partial}{\partial x} \frac{X_x}{\sqrt{X_x^2 + X_y^2}} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{X_y}{\sqrt{X_x^2 + X_y^2}} = \\ &\frac{X_{xx} X_y^2 - 2 X_x X_y X_{xy} + X_{yy} X_x^2}{(X_x^2 + X_y^2)^{\frac{3}{2}}}, \end{aligned}$$

则:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \text{div} \left[\frac{\nabla X}{|\nabla X|} \right] + \lambda_1 (Y - X), \quad (7)$$

式中: div 为散度算子; ∇ 为梯度算子。采用总变分模型的显式差分方案可恢复信号 X , 达到去除加性噪声的目的。

3.2 乘性噪声去除

在滤除加性噪声的基础上, 对上一步得到的恢复信号 X 去除乘性噪声。考虑到乘性噪声的特性未知, 本文基于去除乘性噪声的通用全变差模型 (Rudin-Lions-Osher, RLO 模型)^[9], 结合去噪后图像的稀疏性约束, 将乘性噪声的去噪归结为如下能量泛函的最小化问题:

$$\begin{aligned} E(u) &= \int \left[\frac{X}{u} - 1 \right]^2 dx dy + \\ &\|u - Wx\|_2^2 + \lambda_2 \|x\|_1, \end{aligned} \quad (8)$$

其中: X 为去除加性噪声后的图像; u 为最终去噪图像; W 为离散小波基; x 为去噪图像在小波基上的稀疏系数; λ_2 为正则化参数。

式(8)中, 第一项为乘性噪声的数据保真项, 第二和第三项为稀疏性约束项, 以确保去噪图像在小波基上的稀疏性。

对式(8)采用分步迭代求解方法。对式(8)的第一项采用梯度下降法, 其对应的梯度下降流方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\lambda_2 \left[\frac{X^2}{u^3} - \frac{X}{u^2} \right]. \quad (9)$$

式(8)的第二和第三项的求解为带约束二次规划 (Bound Constrained Quadratic Program, BSQP)^[12] 问题, 可利用梯度投影 (Gradient Projection, GP)^[12] 算法来有效求解。

3.3 微焦点 X 射线图像去噪的实现方案

3.3.1 基于总变分模型去除加性噪声的实现方案

针对去除加性噪声的目标函数式(4)的求解问题, 采用总变分模型的显式差分算法实现加性噪声的去噪, 算法实现过程如下:

基于总变分模型的显式差分方法, 式(4)可表达为:

$$X_{i,j}^{n+1} = X_{i,j}^n + \Delta t \left[\text{div} \left[\frac{\nabla X_{i,j}^n}{|\nabla X_{i,j}^n|} \right] + \lambda_1 (Y - X) \right]. \quad (10)$$

用二阶中心差商代替式(10)中的偏导数,可得:

$$\begin{cases} (X_x)_{i,j}^n = \frac{X_{i+1,j}^n - X_{i-1,j}^n}{2} \\ (X_y)_{i,j}^n = \frac{X_{i,j+1}^n - X_{i,j-1}^n}{2} \\ (X_{xx})_{i,j}^n = \frac{X_{i+1,j}^n - 2X_{i,j}^n + X_{i-1,j}^n}{4} \\ (X_{yy})_{i,j}^n = \frac{X_{i,j+1}^n - 2X_{i,j}^n + X_{i,j-1}^n}{4} \\ (X_{xy})_{i,j}^n = \frac{X_{i+1,j+1}^n - X_{i-1,j+1}^n - X_{i+1,j-1}^n + X_{i-1,j-1}^n}{4} \end{cases} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10)中,即可得到式(12):

$$\begin{aligned} X_{i,j}^{n+1} &= X_{i,j}^n + \Delta t [\lambda_1 (Y_{i,j} - X_{i,j}^n)] + \\ &\Delta t \left[\frac{(X_{xx})_{i,j}^n ((X_y)_{i,j}^n)^2 + (X_{yy})_{i,j}^n ((X_x)_{i,j}^n)^2}{((X_x)_{i,j}^n)^2 + ((X_y)_{i,j}^n)^2 + \epsilon^2} \right] + \\ &\Delta t \left[\frac{-2 (X_x)_{i,j}^n (X_y)_{i,j}^n (X_{xy})_{i,j}^n}{((X_x)_{i,j}^n)^2 + ((X_y)_{i,j}^n)^2 + \epsilon^2} \right] \end{aligned} \quad (12)$$

3.3.2 基于稀疏表示去除乘性噪声的实现方案

本文采用分步迭代方法实现乘性噪声的去除,算法实现过程如下:

第一步:对式(8)的第一项采用梯度下降法求解,可表示为:

$$u_{i,j}^{n+1} = u_{i,j}^n - \Delta t \left\{ \lambda_2 \left[\frac{X_{i,j}^2}{(u_{i,j}^n)^3} - \frac{X_{i,j}}{(u_{i,j}^n)^2} \right] \right\}, \quad (13)$$

求得中间图像 u 。

第二步:利用梯度投影算法求解式(8)的第二和第三项。

将式(8)的第二和第三项表示为如下子目标函数:

$$\min \| u - Wx \|_2^2 + \lambda_2 \| x \|_1. \quad (14)$$

上式可归结为 BSQP 问题,运用 GP 算法求解。实现过程如下:

将式(14)中 x 的值分为正负两部分,引入矢量 s, t , 则:

$$x = s - t, s \geq 0, t \geq 0. \quad (15)$$

l_1 范数定义为:

$$\| x \|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|, i = 1, 2, \dots, n, \quad (16)$$

有 $\| x \|_1 = \mathbf{1}_n^T s + \mathbf{1}_n^T t, \mathbf{1}_n = [1, 1, \dots, 1]^T$ 是长度为 n 的单位矢量。

式(14)变换为:

$$\min \| u - W(s - t) \|_2^2 + \lambda_2 \mathbf{1}_n^T s + \lambda_2 \mathbf{1}_n^T t. \quad (17)$$

将式(17)进行转换,即可得下式:

$$\min \left[\lambda_2 \mathbf{I}_{2n} + 2 \begin{pmatrix} W^T u \\ -W^T u \end{pmatrix} \right]^T \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} W^T W & -W^T W \\ -W^T W & W^T W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix}. \quad (18)$$

因此可将式(18)转化为标准的 BSQP 形式为:

$$\min_z \Gamma^T z + z^T \Theta z, \text{ s. t. } z \geq 0, \quad (19)$$

其中:

$$z = \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix}, \Gamma = \lambda_2 \mathbf{I}_{2n} + 2 \begin{pmatrix} W^T u \\ -W^T u \end{pmatrix}, \\ \Theta = \begin{bmatrix} W^T W & -W^T W \\ -W^T W & W^T W \end{bmatrix}.$$

令:

$$\min_z f(z) = \Gamma^T z + z^T \Theta z. \quad (20)$$

则式(20)的梯度为:

$$\nabla f(z) = \Gamma + \Theta z. \quad (21)$$

应用迭代法,将 $z^{(k)}$ 迭代至 $z^{(k+1)}$, 则有:

$$z^{(k+1)} = z^{(k)} + \eta_k d^k. \quad (22)$$

式中: η_k 为步长因子; d^k 为迭代步长,运用梯度投影算法进行迭代,即可得到方程(14)的最优解。

重复上述步骤一和二,直至达到设定迭代次数。

4 实验结果

为验证所提出去噪算法的有效性,本文以微焦点 X 射线仪采集到的电容和集成电路图像为实验对象。采用均值滤波、高斯滤波、总变分去除加性噪声和总变分去除乘性噪声算法与本文所提出的方法进行对比。本文实验的软硬件环境为: Matlab (R2010b), Intel (R) Core (TM) i3-2120 CPU @ 3.30GHz, 4GB 内存。

集成电路对象的检测特征细小,但其本身由有限材质组成,这类对象的图像在细节区域以外呈现分片光滑的特征。本文依据集成电路图像的上述特点,从主观视觉评价和客观图像质量评价两方面对各算法的去噪和细节特征保持性能进行分析。

4.1 微焦点 X 射线图像去噪的主观视觉评价

图 2 所示为几种算法的 X 射线电容图像的去除效果。其中,图 2(a)所示为原始的微焦点 X 射线电容图像,其图像上下边缘为灰度渐变区域,内部既有对比度较低的弱特征区域,也有平滑区

域。对这一对象的处理可同时体现算法在去噪和细节特征保持方面的能力。因此,本文以电容图

像为主要处理对象。

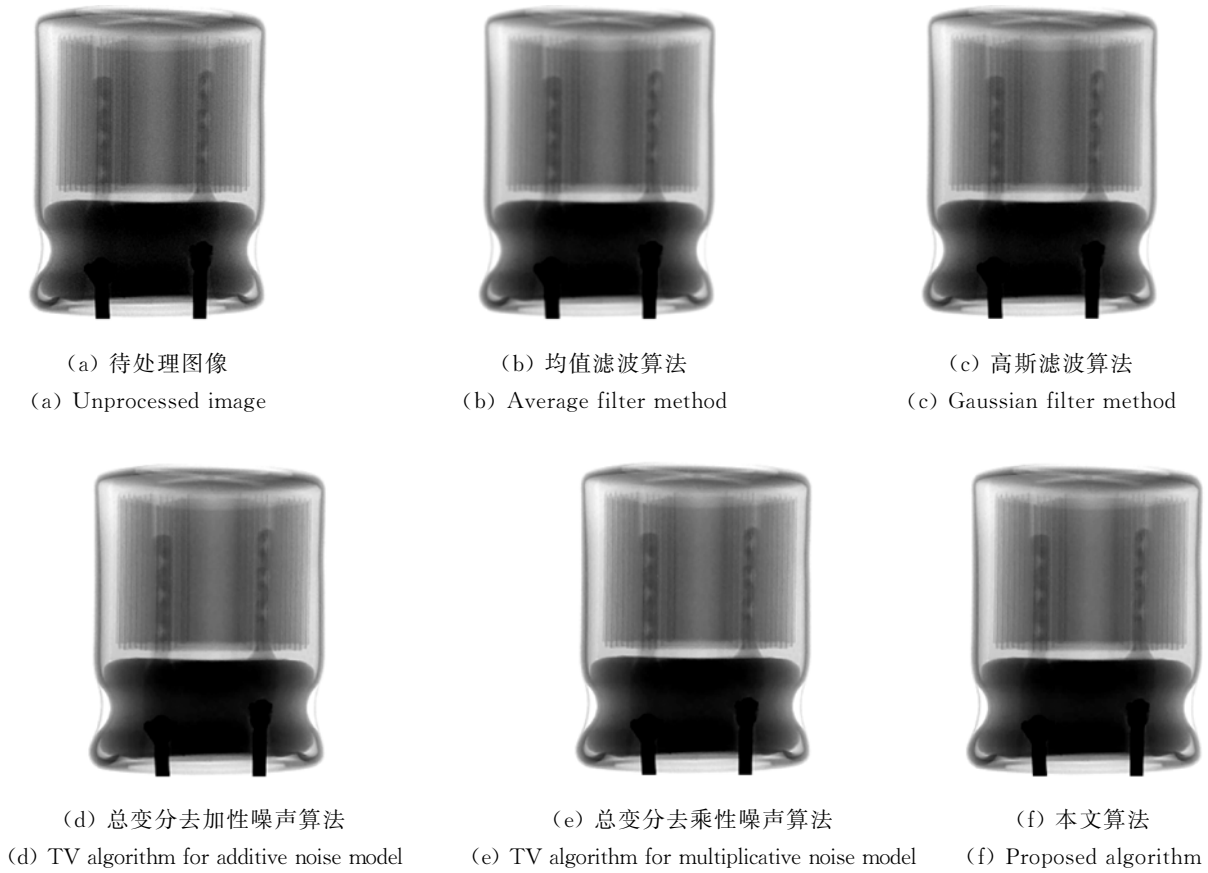
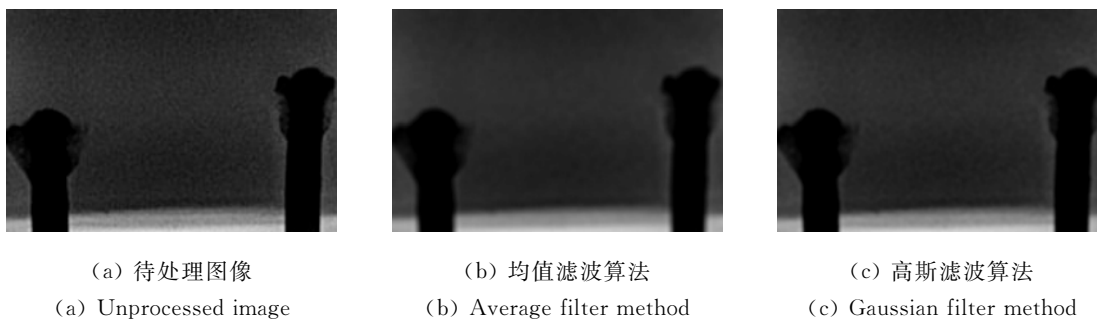


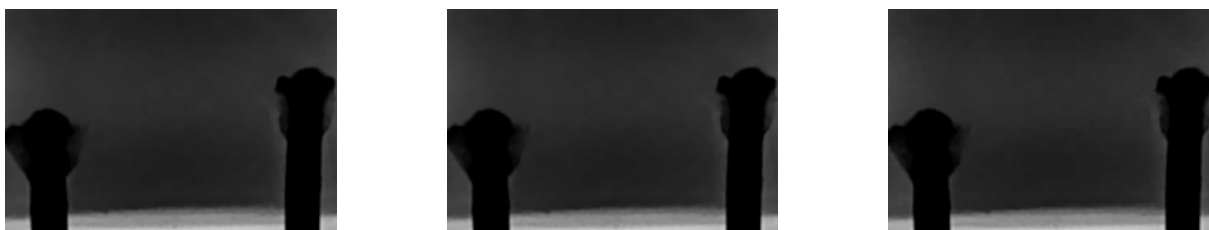
图 2 电容图像去噪实验结果

Fig. 2 Experiment results of capacitor image

为清晰显示图 2(a)微焦点 X 射线电容图像所含的噪声,以及比较本文所提算法与其他 4 种算法在去除微焦点 X 射线图像噪声上的优劣,本文将图 2 中各图在平滑区域和细节区域的相同部位进行放大显示,并采用 Canny 边缘检测和边缘强度检测来体现算法的细节特征保持能力^[13],分别如图 3 和图 4 所示。从图 3(l)Canny 边缘检测

的结果可知,本文算法在滤除混合噪声的同时,能更好地保留边缘特征,完整地检测出了电容引脚边缘。从图 4(h)~(l)的边缘强度检测图知,均值滤波和高斯滤波算法所得图像较为模糊,边缘强度弱,总变分去加性噪声和总变分去乘性噪声算法得到的边缘强度略微弱于本文算法,但这两种方法在非边缘区仍存在较多的干扰。





(d) 总变分去加性噪声算法
(d) TV algorithm for additive noise model

(e) 总变分去乘性噪声算法
(e) TV algorithm for multiplicative noise model

(f) 本文算法
(f) Proposed algorithm



(g) (a) 的 Canny 边缘检测图
(g) Canny edge detection of (a)

(h) (b) 的 Canny 边缘检测图
(h) Canny edge detection of (b)

(i) (c) 的 Canny 边缘检测图
(i) Canny edge detection of (c)



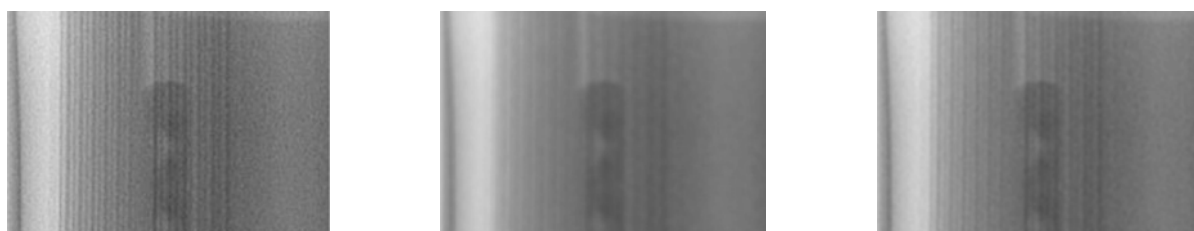
(j) (d) 的 Canny 边缘检测图
(j) Canny edge detection of (d)

(k) (e) 的 Canny 边缘检测图
(k) Canny edge detection of (e)

(l) (f) 的 Canny 边缘检测图
(l) Canny edge detection of (f)

图 3 电容图像平滑区域局部放大图

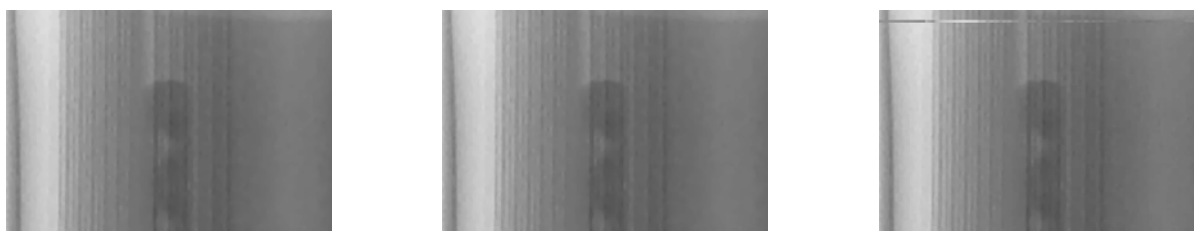
Fig. 3 Local images of capacitor in smooth area



(a) 待处理图像
(a) Unprocessed image

(b) 均值滤波算法
(b) Average filter method

(c) 高斯滤波算法
(c) Gaussian filter method



(d) 总变分去加性噪声算法
(d) TV algorithm for additive noise model

(e) 总变分去乘性噪声算法
(e) TV algorithm for multiplicative noise model

(f) 本文算法
(f) Proposed algorithm

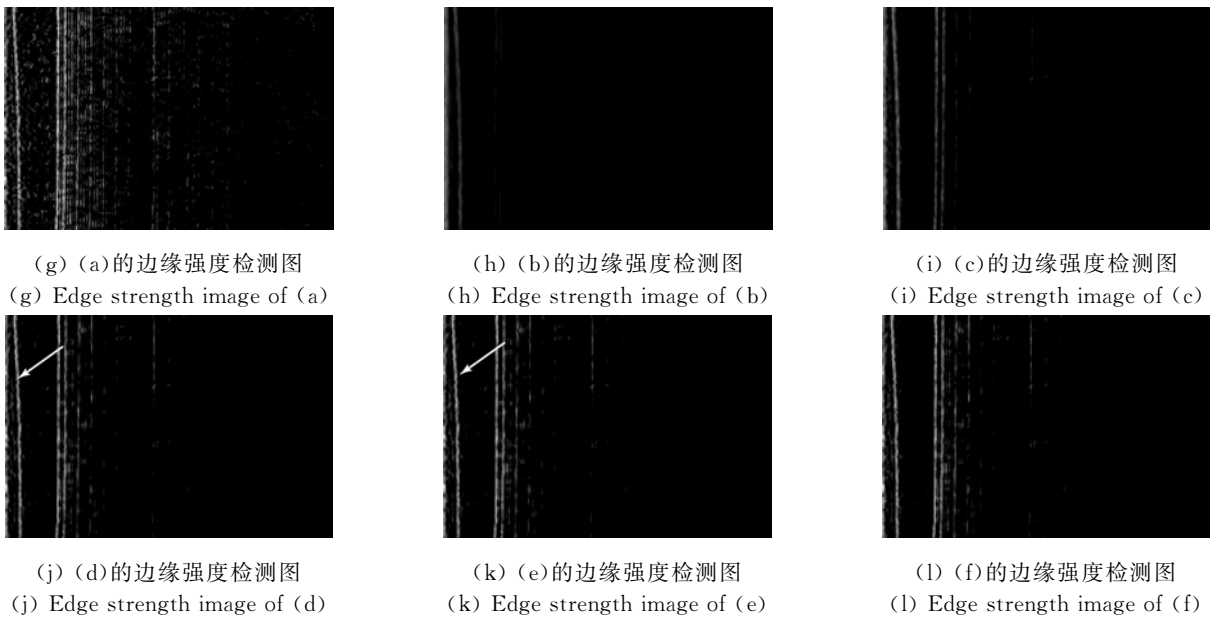


图 4 电容图像细节区域局部放大图

Fig. 4 Local images of capacitor in detail area

为了进一步验证本文算法的有效性,对具有代表性的两类集成电路元件图像进行算法去噪对比,结果如图 5~6 所示。两类集成电路元件的平滑区域局部放大结果如图 7~8 所示,细节区域局部放大与边缘强度检测结果如图 9~10 所示。由图 7~10 可知,与均值滤波、高斯滤波、总变分去

除加性噪声和总变分去除乘性噪声算法相比,本文算法在处理集成电路的微焦点 X 射线图像时,仍然具有优越的去噪和细节保持能力。

因此,从各类对象的主观视觉评价来看,本文算法能有效去除微焦点 X 射线图像噪声,同时较好地保留了图像边缘等细节特征。

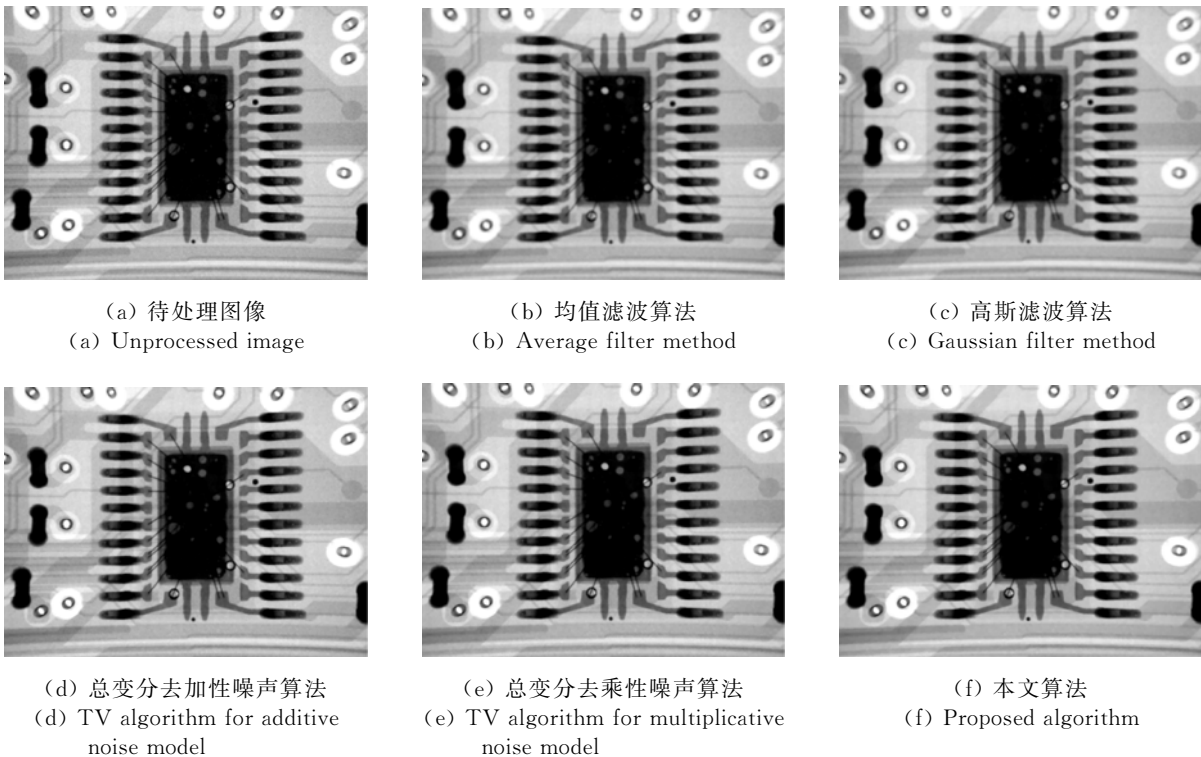


图 5 第一类集成电路元件去噪实验结果

Fig. 5 Experiment results of the first IC component

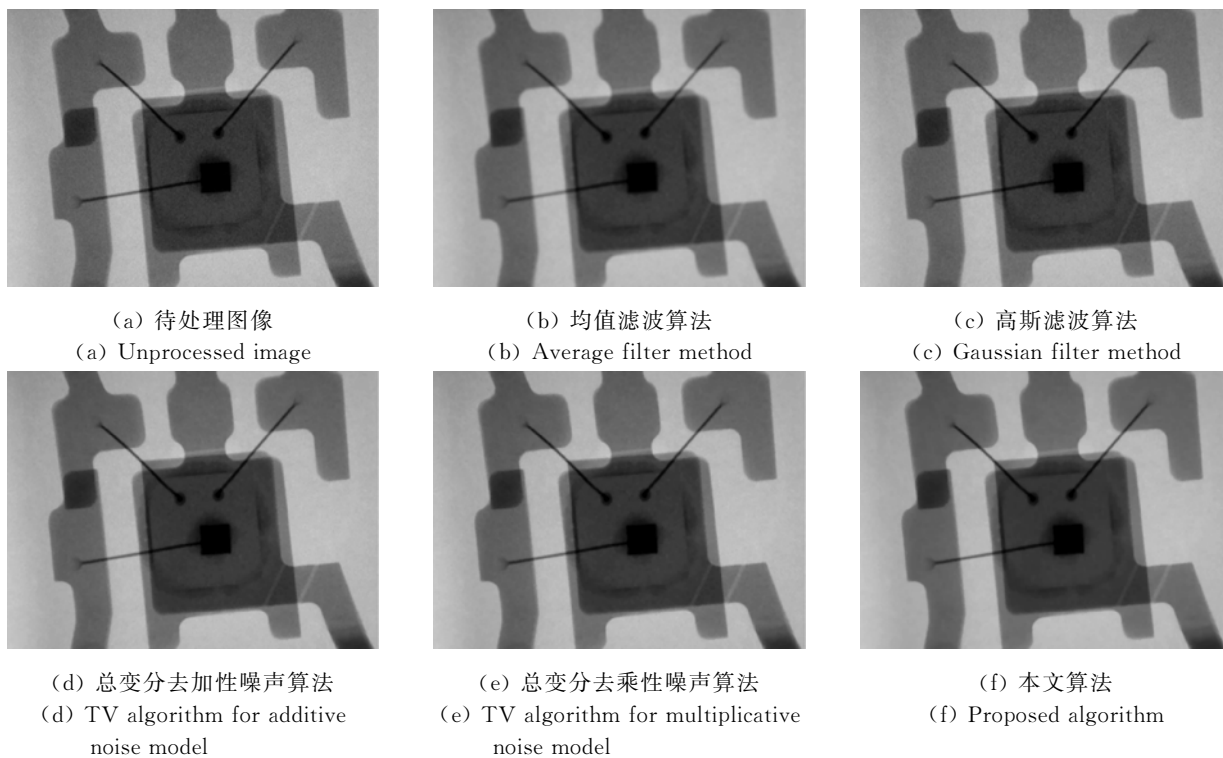


图 6 第二类集成电路元件去噪实验结果
Fig. 6 Experiment results of the second IC component

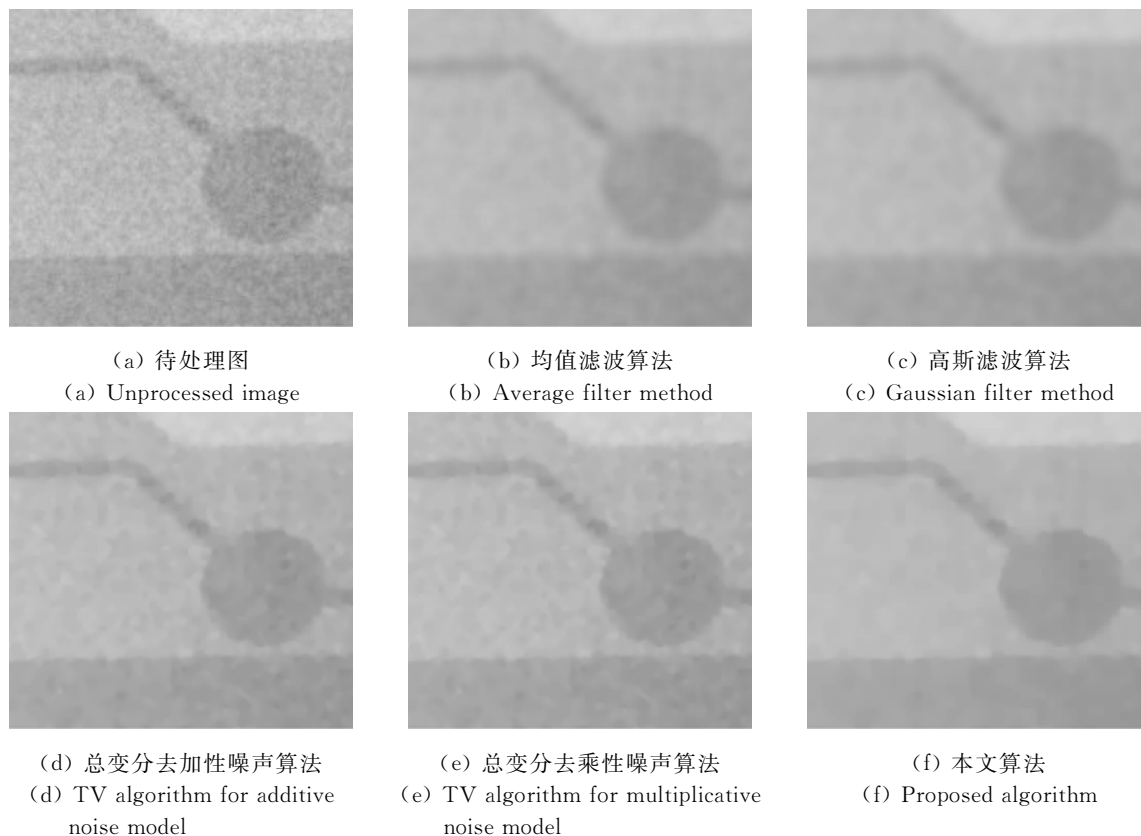


图 7 第一类集成电路元件平滑区域局部放大图
Fig. 7 Local images of the first IC component in smooth area

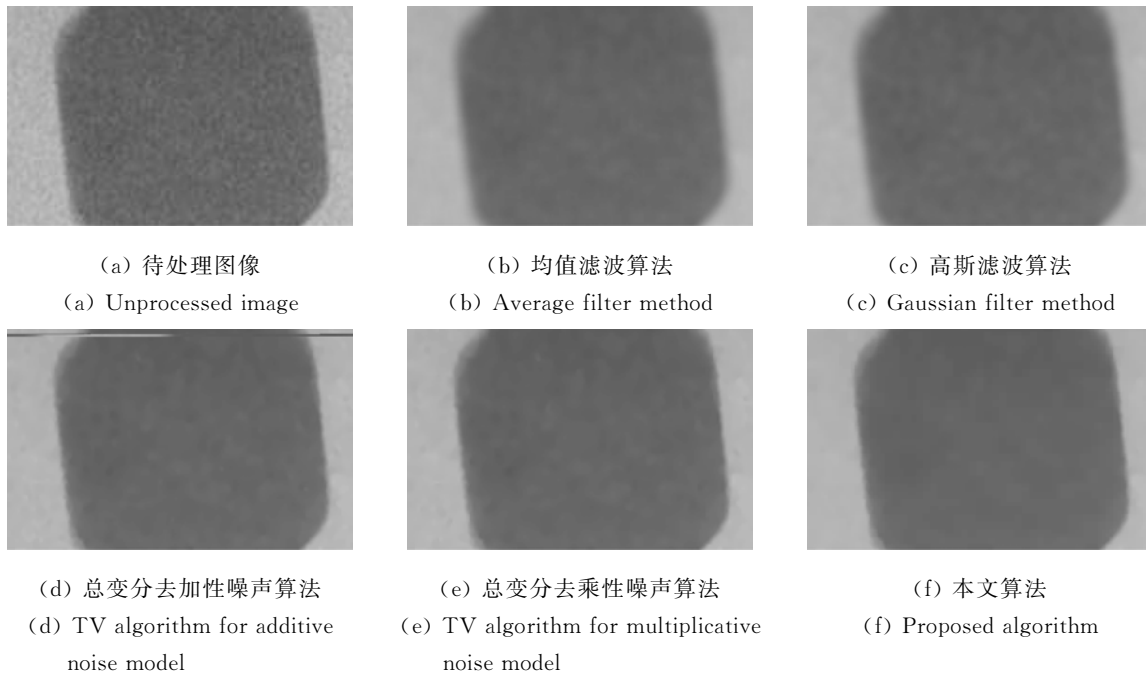
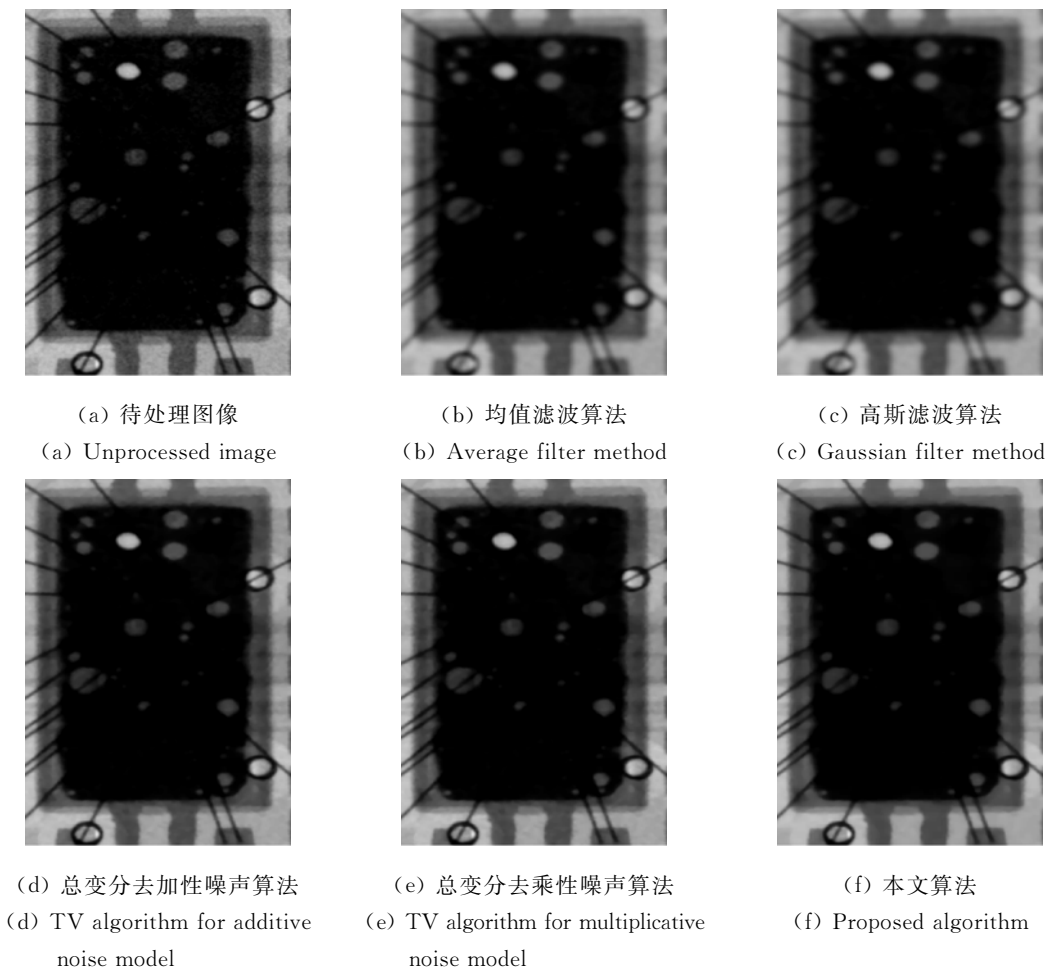


图 8 第二类集成电路元件平滑区域局部放大图
Fig. 8 Local images of the second IC component in smooth area



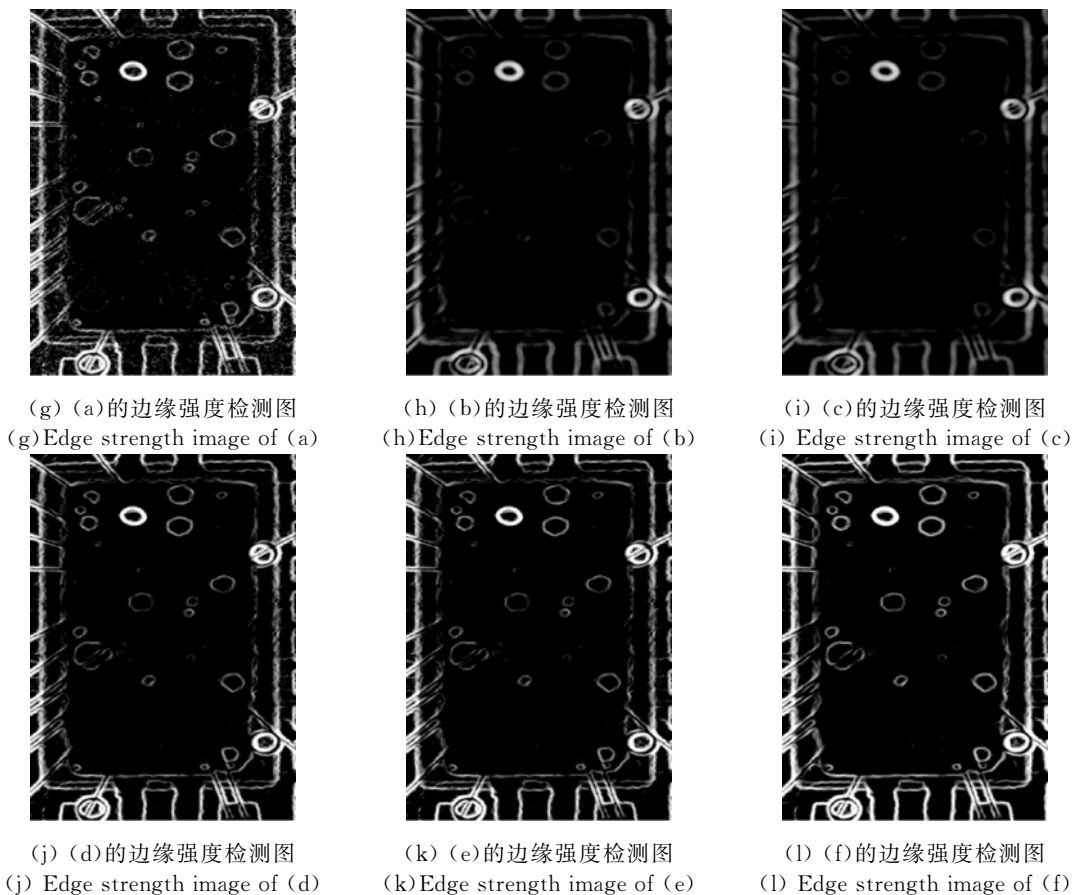
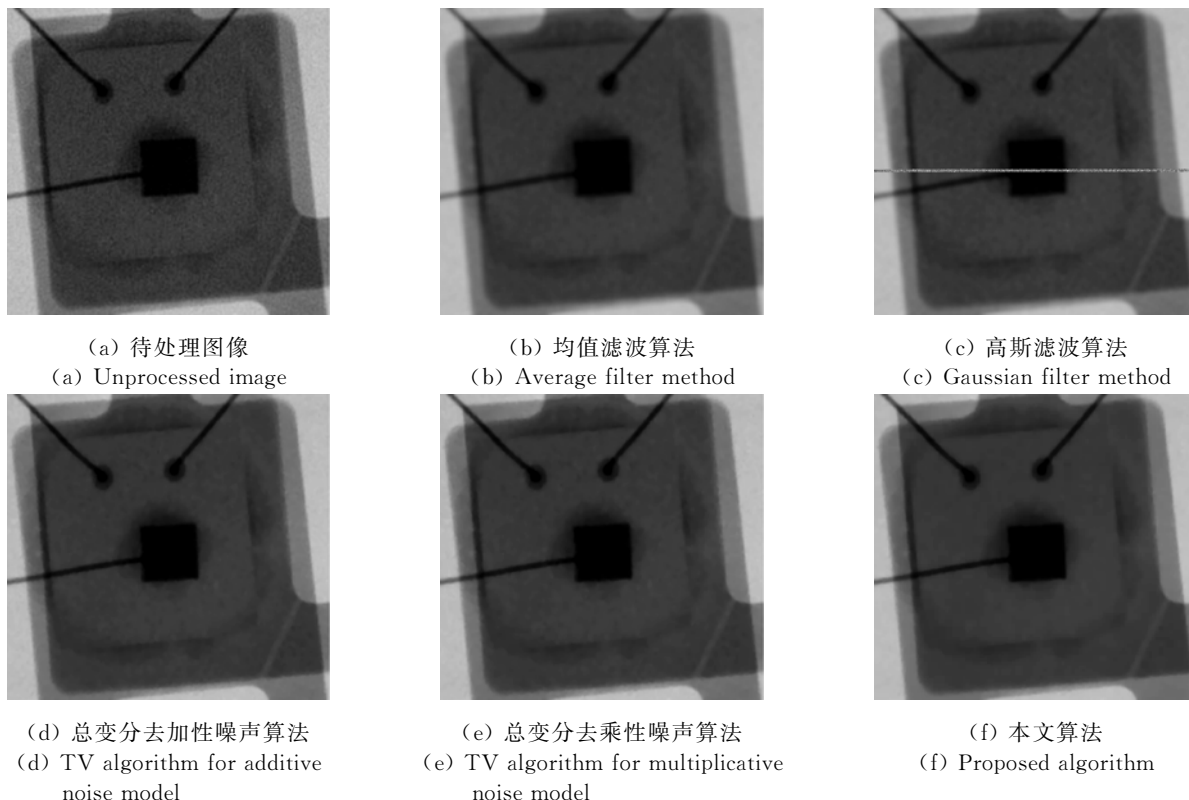


图 9 第一类集成电路元件细节区域局部放大图

Fig. 9 Local images of the first IC component in detail area



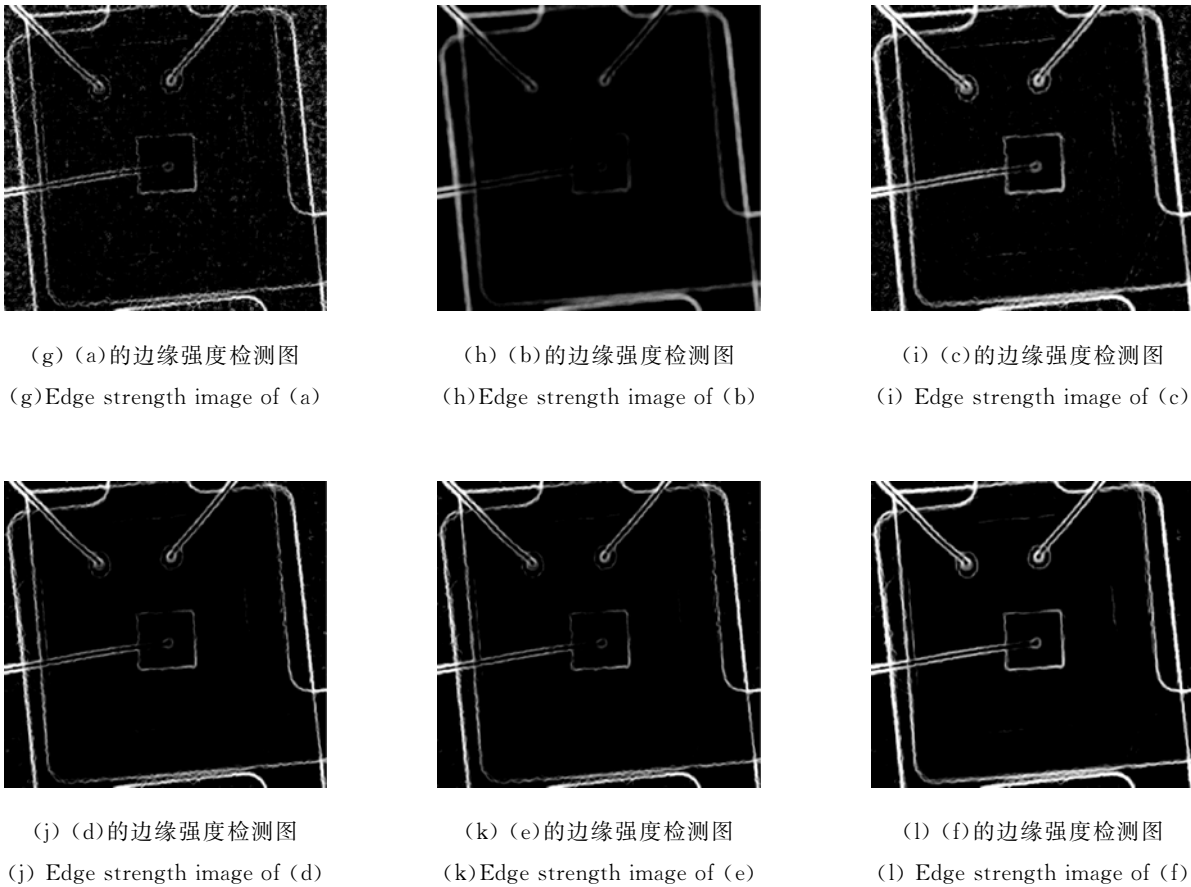


图 10 第二类集成电路元件细节区域局部放大图

Fig. 10 Local images of the second IC component in detail area

4.2 微焦点 X 射线图像去噪的客观评价

为验证所提出算法的去噪和细节保持性能, 本文采用图像均值与标准差比 (Mean to Standard Deviation Ratio, MSR)^[14] 客观评价图 3 平滑区域的平滑程度, 结果如表 1 所示。采用图像清晰度评价指标对图 4 细节区域的细节保持程度进行评价, 包括: 拉普拉斯梯度模 (Laplacian Sum, LS)^[15], 灰度平均梯度 (Gray Mean Grads,

GMG)^[12], 绝对中心距 (Absolute Central Moment, ACM) 和边缘强度 (Edge Intensity, EI), 结果如表 2 所示。

由表 1、表 2 可知, 本文算法在平滑区域的 MSR 值和细节区域的 LS、GMS、ACM 和 EI 值均大于其他 4 种方法, 这说明本文算法能有效去除微焦点 X 射线图像的混合噪声, 且可以较好地保持图像细节特征。

表 1 电容图像平滑区域的客观评价 MSR 值

Tab. 1 MSR results of capacitor's local image in smooth area

Image	Algorithm					
	Original image	Average filter	Gaussian filter	Denoising additive noise TV method	Denoising multiplicative noise TV method	Proposed algorithm
Capacitor image	21.668 8	25.504 0	24.641 5	25.958 5	25.959 0	26.143 1

表 2 电容图像细节区域的客观评价

Tab. 2 Evaluation results of capacitor's local image in detail area

Algorithm	LS	GMG	ACM	EI
Original image	18.326 2	3.665 0	20.484 0	0.027 4
Average filter	3.579 6	1.145 8	20.255 7	0.012 6
Gaussian filter	6.187 4	1.628 2	20.271 3	0.015 8
TV algorithm for the additive noise model	8.225 0	1.625 6	20.310 8	0.019 0
TV algorithm for the multiplicative noise model	8.210 3	1.616 5	20.310 6	0.018 8
Proposed algorithm	9.359 3	1.736 9	20.314 4	0.019 3

为了更充分地验证本文算法在去噪和细节保持上的有效性,选取了 26 张不同种类的集成电路微焦点 X 射线图像(部分图像如图 11 所示)进行实验,将本文算法与其他 4 类方法中性能较好的总变分去加性噪声算法进行比较,依据处理后图像平滑区域的 MSR 值和细节区域的 LS 值来评

价两种算法的性能,实验结果如表 3 所示。根据表 3 的数据分析可知,与总变分去除加性噪声算法相比,本文算法处理后的图像 MSR 值平均提升了 10.9%,LS 值平均提升了 15.6%,从而进一步验证了本文算法在去除微焦点 X 射线图像噪声和细节保持上的有效性。

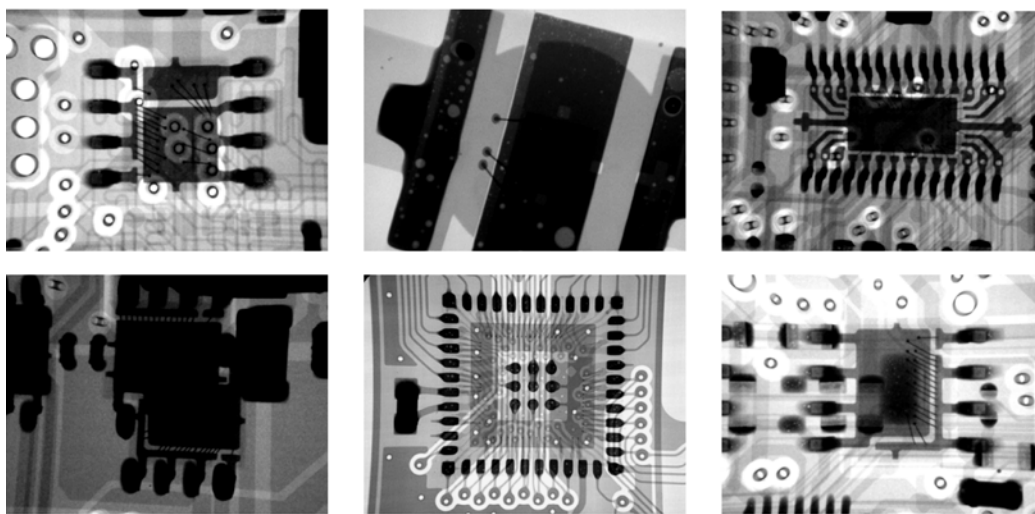


图 11 不同种类的集成电路微焦点 X 射线图像

Fig. 11 Different kinds of micro-focus X-ray images in IC

5 结 论

本文通过对微焦点 X 射线仪成像噪声特征的分析,建立了含混合噪声的微焦点 X 射线图像模型。针对混合噪声图像模型,提出了分步实现图像复原的目标函数和方案,其中采用基于 TV 正则化实现加性噪声的去除,而乘性噪声的去除

则考虑复原图像的稀疏性约束。实验结果表明,与总变分去除加性噪声方法相比,本文提出的混合去噪方法处理后的图像平滑区域的 MSR 值平均提升了 10.9%,细节区域的 LS 值平均提升了 15.6%,验证了乘性、加性混合噪声模型及去噪算法在去除微焦点 X 射线图像噪声和细节保持上的有效性,满足集成电路内部缺陷检测对图像平滑度和细节清晰度的要求。

表 3 不同种类的集成电路微焦点 X 射线图像的客观评价

Tab. 3 Objective evaluation results of different kinds of Micro-focus X-ray images in IC

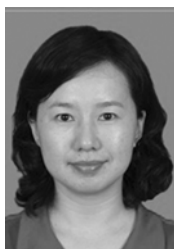
Image	TV algorithm for the additive noise model		Proposed algorithm	
	MSR	LS	MSR	LS
Image 1	25.958 5	8.225 0	26.143 1	9.359 3
Image 2	49.414 9	6.457 5	63.526 6	6.681 7
Image 3	54.423 8	3.612 3	59.218 1	3.739 7
Image 4	43.402 4	8.523 7	49.995 4	9.457 2
Image 5	41.219 9	4.901 0	47.277 2	5.766 7
Image 6	45.565 8	5.629 2	55.587 1	6.542 9
Image 7	49.599 1	8.767 4	54.497 2	10.376 6
Image 8	53.303 1	3.469 9	59.207 6	4.142 4
Image 9	49.043 8	7.553 7	56.476 9	9.102 8
Image 10	41.385 6	4.466 8	44.468 0	4.814 9
Image 11	24.125 2	22.191 0	24.311 1	22.750 8
Image 12	69.300 9	2.199 2	80.676 3	2.711 7
Image 13	43.756 1	3.620 5	45.699 3	4.994 9
Image 14	61.346 2	2.427 2	74.869 0	2.908 2
Image 15	35.407 5	3.750 5	40.581 4	5.552 3
Image 16	32.737 6	4.015 2	34.025 7	4.701 5
Image 17	39.859 7	5.157 7	40.800 9	6.056 2
Image 18	40.977 9	5.629 5	47.412 4	6.404 3
Image 19	48.710 1	2.917 5	55.789 8	3.355 7
Image 20	31.154 2	4.095 4	32.748 8	4.396 0
Image 21	38.410 5	10.763 4	41.841 8	11.788 6
Image 22	35.659 9	3.781 9	41.098 7	4.081 0
Image 23	30.698 3	4.224 6	32.189 2	4.643 3
Image 24	24.885 6	2.765 8	25.432 1	3.488 0
Image 25	31.725 2	4.175 3	35.253 5	4.313 0
Image 26	51.456 1	6.994 9	55.209 0	8.064 5

参考文献:

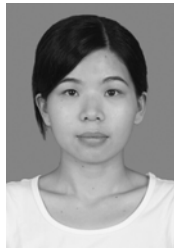
- [1] 李玉彬, 李向良, 姜燕梅, 等. 微焦点 X 射线 CT 及其在无损检测中的应用[J]. 无损检测, 1999, 21(12): 549-552
LI Y B, LI X L, JIANG Y M, *et al.*. Micro-focus X-ray CT and its application in nondestructive testing [J]. *Nondestructive Testing*, 1999, 21(12): 549-552. (in Chinese)
- [2] 王世伟. 医学影像实用技术教程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
WANG SH W. *Medical Imaging Technology Tutorials* [M]. Beijing: China Railway Press, 2007. (in Chinese)
- [3] WANG J, LIANG Z, LU H, *et al.*. Recent development of low-dose X-ray cone-beam computed tomography [J]. *Current Medical Imaging Reviews(CMIR) Journal*, 2010, 6(2): 72- 81.
- [4] LU H B, HSIAO I T, LI X, *et al.*. Noise properties of low-dose CT projections and noise treatment by scale transformation [C]. 2001 *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, San Diego: IEEE*, 2002:1662- 1666.
- [5] LA P J, BILL MIRE D M. Reduction of noise-induced streak artifacts in X-ray computed tomography through spline based penalized likelihood sonogram smoothing [J]. *IEEE Trans. Med. Image*, 2005, 24(1): 105-111.
- [6] WANG J, LI T, LU H, *et al.*. Penalized weighted least-squares approach to sonogram noise reduction

- and image reconstruction for low-dose X-ray computed tomography [J]. *IEEE Trans. Med. Image*, 2006, 25(10): 1272-283.
- [7] 邓承志, 刘娟娟, 汪胜前, 等. 保留结构特征的稀疏性正则化图像修复[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(7): 1906-1913.
DENG CH ZH, JIU J J, WANG SH Q, *et al.*. Feature retained image inpainting based on sparsity regularization[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(7): 1906-1913. (in Chinese)
- [8] 李伟红, 董亚莉, 唐述. 多范数混合约束的正则化图像盲复原[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1357-1364.
LI W H, DONG Y L, TANG SH. Regularized blind image restoration based on multi-norm hybrid constraints[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(5): 1357-1364. (in Chinese)
- [9] 张元科, 张军英, 卢虹冰. 基于 EM 算法的低剂量 CT 图像去噪[J]. *电子学报*, 2012, 40(1): 27-34.
ZHANG Y K, ZHANG J Y, LU H B. Noise Reduction of low-dose CT sinograms based on EM algorithm [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(1): 27-34. (in Chinese)
- [10] IRRERA P, BLOCH I, DELPLANQUE M. A denoising method for whole-body low-dose X-ray images with adaptable parameter control [C]. 2013 *IEEE 10th International Symposium on Biomedical Imaging*, San Francisco, 2013: 1240-1243.
- [11] RUDIN L, LIONS P L, OSHER S. *Multiplicative Denoising and Deblurring: Theory and Algorithms* [M]. New York: Springer New York, 2003: 103-119.
- [12] FIGUEIREDO M A T, NOWAK R D, WRIGHT S J. Gradient projection to compressed sensing and other inverse problem [J]. *Journal of Selected Topics in Signal Processing: Special Issue on Convex Optimization Methods for Signal Processing*, 2007, 1(4): 586-598.
- [13] 吴俊, 汪源源, 陈悦, 等. 基于同质区域自动选取的各向异性扩散超声图像去噪[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1312-1321.
WU J, WANG Y Y, CHEN Y, *et al.*. Speckle reduction of ultrasound images with anisotropic diffusion based on homogeneous region automatic selection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1312-1321. (in Chinese)
- [14] WANG L, LU J M, LI Y Q, *et al.*. Noise removal for medical X-ray images in multiwavelet domain [C]. 2006 *International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, Japan*, 2006: 594-597.
- [15] 唐新建. 图像复原正则化方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
TANG X J. *Image restoration research based on Regularization method* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.

作者简介:



高红霞(1975—),女,陕西富平人,博士,副教授,1996年、2000年于西安交通大学分别获得学士和硕士学位,2003年于中国科学院自动化研究所获得博士学位,现为华南理工大学自动化科学与工程学院控制与信息工程系主任,主要从事机器视觉理论及应用,智能检测与控制方法,精密电子组装中的视觉检测问题的研究。E-mail: hxgao@scut.edu.cn



吴丽璇(1989—),女,广东潮州人,硕士研究生,2008年于华南理工大学获得学士学位,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: wu.lixuan@mail.scut.edu.cn