

# 基于 CT 图像变异系数的小缺陷定量不确定度评定

齐子诚, 张维国, 唐盛明, 郑颖

(中国兵器科学研究院 宁波分院, 浙江 宁波 315103)

**摘要:** 针对工业 CT 检测技术对小缺陷定量及不确定度评定缺乏有效手段, 分析小缺陷尺寸、材料密度对 CT 图像局部灰度变异系数的影响规律, 结果显示变异系数随小缺陷尺寸的增大而增大, 变异系数幅值与小缺陷尺寸相关系数达 99% 以上; 建立基于变异系数的小缺陷定量及不确定度评定方法, 采用不锈钢材料加工一系列不同尺寸的小缺陷参考试块开展工业 CT 实验; 结果表明: 在  $\Phi 50$  mm 圆形对比试样上对已知  $\Phi 0.7$  mm 的人工通孔缺陷上进行验证, 缺陷尺寸实测结果为  $0.386 \text{ mm}^2 (\pm 0.073 \text{ mm}^2)$ ; 文章介绍的方法定量精度高、测量过程简便, 对金属材料内部小缺陷定量及不确定度评定有一定的参考价值。

**关键词:** 工业 CT; 金属材料; 小缺陷; 变异系数; 不确定度

## Uncertainty Analysis of Small Defect Quantification Based on Coefficient of Variation in CT Image

Qi Zicheng, Zhang Weiguo, Tang Shengming, Zheng Ying

(Ningbo Branch, Ordnance Science Institute of China, Ningbo 315103, China)

**Abstract:** Aiming at the lack of effective methods for the quantification and uncertainty evaluation of small defects in industrial CT systems, the effects of small defect size and material density on the local grayscale variation coefficient of CT images are analyzed. The correlation between the amplitude of the coefficient of variation and the size of the small defect is explored. The results show that the local variation coefficient increases with the increase of the size of the small defect, and the correlation coefficient between its amplitude and the size of the small defect is more than 99%. Establish a small defect quantification and uncertainty evaluation method based on the coefficient of variation. This method verifies the known through-hole defect of  $\Phi 0.7$  mm on a  $\Phi 50$  mm circular contrast sample. The actual measurement result is  $0.386 \text{ mm}^2 \pm 0.073 \text{ mm}^2$ . This method has high quantitative accuracy and simple measurement process. It has certain reference value for the quantification and uncertainty evaluation of small defects in metal materials.

**Keywords:** industrial CT; metallic material; small defects; coefficient of variation; uncertainty

### 0 引言

随着新材料工艺的不断发展和产品轻量化的需求, 金属材料的内部质量要求日趋严格。在生产、加工与使用过程中, 金属材料内部缺陷及检测方法日益受到关注。工业计算机断层扫描技术 (ICT, industrial computerized tomography)<sup>[1-2]</sup> 作为一种先进无损检测技术, 不受被检测物体材料、形状、表面状况等限制, 能够给出被检测物体二维、三维图像, 具有成像直观、分辨率高的优点, 逐渐成为航空、航天、兵器、汽车制造、铁路等<sup>[3-4]</sup> 重要工业领域内部质量检测的主要手段之一。然而, 在对金属材料进行工业 CT 检测时, 特别是大尺寸复杂金属构件<sup>[5-7]</sup>, 小缺陷在 CT 图像上的灰度分布与构件材料灰度值相近, 且受到图像噪声的影响, 致使小缺陷的定量难、误差大。在产品质量控制与验收等方面, 小缺陷定量准确性会造成安全隐

患或不必要的浪费。与此同时, CT 小缺陷定量过程所产生的不确定性是不可避免的, 对其进行不确定度评定十分必要。因此, 研究工业 CT 小缺陷定量及不确定度评定方法对于工业 CT 应用具有重要意义。

国内外学者对无损检测小缺陷识别、定量及不确定度评定作了大量的研究。在小缺陷 ICT 检测方面: 文献[8]通过采集大量缺陷样本图像进行增强等预处理, 采用卷积神经网络的方法训练网络模型, 利用该模型对 CT 图像中小缺陷进行辨识。文献[9-10]结合多种滤波方法对 CT 图像低对比度信息进行预处理, 基于灰度变化率分割缺陷, 利用 Hu 不变矩方法提取缺陷特征, 并结合 RBF 神经网络模型和萤火虫算法对缺陷进行智能识别。文献[11]首先对 CT 图像点扩散函数 (PSF, point spread function) 进行估计, 利用 PSF 与理想缺陷进行卷积运算形成缺陷退化灰度分布, 再与待测真实缺陷进行比较, 采用循环迭代确定最优解。上述方法中, 小缺陷定量需要大量数据进行训练或计算量大, 定量结果缺乏不确定度评定方法。在无损检测不确定度评定<sup>[12-14]</sup> 方面: 文献[15-16]研究了超声波探伤仪、试块及当量法对超声波探伤结果不确定度的影响, 具有一定的参考价值。文献[17-18]研究了工业 CT 尺寸测量模型, 对测量中不确定度的主要来源进行分析, 基于测量不确定

收稿日期: 2020-04-20; 修回日期: 2020-05-11。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61701446); 领域基金项目 (6140923030503); 浙江省基础公益项目 (LGG20F010003); 宁波市科技服务示范项目 (2019F1036)。

作者简介: 齐子诚 (1984-), 男, 浙江宁波人, 硕士, 副研究员, 主要从事无损检测自动化技术、图像处理等方向的研究。

度表示指南 (GUM) 法对工业 CT 线性尺寸测量不确定度评定进行研究。本文基于人工预制通孔小缺陷开展研究工作, 针对小缺陷工业 CT 图像灰度特征变化规律, 设计了 CT 图像局部变异系数的小缺陷定量方法, 并开展不确定度评定工作。

## 1 实验方法

采用不同金属材料 (不锈钢、钛合金、铝合金) 制作圆形试样, 其外圆尺寸为  $\Phi 50$  mm, 厚度为 1.2 mm, 通过电火花打孔加工技术在圆形试样上布置一系列通孔模拟检测用小缺陷, 小缺陷直径分别为  $\Phi 0.1/0.3/0.5/0.7/0.9/1.1$  mm。每种规格直径的缺陷加工 3 个。采用显微镜对加工的小缺陷尺寸进行标定, 缺陷圆形试样如图 1 所示。

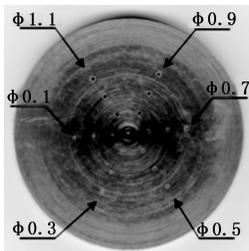


图 1 模拟缺陷试样示意图

试验平台为高能工业 CT 成像系统, 如图 2 所示。该系统采用能量为 6MeV 的 X 射线加速器作为射线源发生器, 射线源的焦点尺寸为 2 mm, 信号采集装置为线阵探测器。从检测效率与精度的角度考虑, 选用了三代 CT 扫描方式、微动次数 5 次、触发次数 4 096 次、切片厚度 0.5 mm (小于试样厚度)。

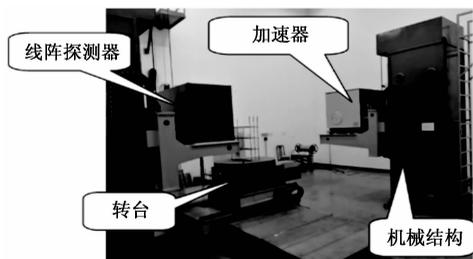


图 2 高能工业 CT 检测系统

检测前, 将两片相同材质、规格的圆形试样与打孔试样两侧紧密贴合, 封闭通孔两端形成内部孔隙模拟缺陷。检测时, 应尽量保证 X 射线透照路径垂直于试样打孔方向, 且 CT 扫描位置位于打孔试样中心平面。

## 2 工业 CT 图像小缺陷定量方法

### 2.1 工业 CT 图像中小缺陷灰度分布

工业 CT 扫描系统通过 X 射线透射检测圆形试样断面, 按照卷积反投影算法获得圆形试样中一幅断层扫描图像, 图像包含了金属材料、空气及缺陷。其中缺陷信号是由实际缺陷形貌经过工业 CT 成像过程叠加噪声、伪影信号组成。缺陷在 CT 图像上的表现形式 (灰度分布、面积) 受缺

陷实际尺寸、CT 系统空间分辨率、密度分辨率和噪声等影响。在实际检测过程中, 金属材料内部小尺寸缺陷检测结果将可能被噪声所淹没, 从而影响小缺陷检出及定量结果。

### 2.2 基于变异系数的小缺陷定量方法

在工业 CT 图像中, 当 CT 成像点扩散函数一定时, 小缺陷局部区域灰度均值与标准偏差受缺陷尺寸影响, 与缺陷尺寸具有一定单调关系。采用一定区域 ( $M \times N$ ) 的灰度变异系数作为小缺陷定量的特征值, 变异系数  $c_v$  定义为:

$$c_v = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{(f(i,j) - \mu)^2}{M \times N - 1}}}{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \frac{f(i,j)}{M \times N}} \quad (1)$$

其中:  $\sigma$  为区域图像灰度标准偏差,  $\mu$  为区域图像灰度均值,  $f(i, j)$  为图像中点  $(i, j)$  处灰度值。

如图 3 所示, 不同金属材料 (不锈钢、钛合金、铝合金) 缺陷面积与灰度变异系数关系曲线示意图 (以  $100 \times 100$  局部区域为例)。从图 3 (a) 可见, 不同材质中小缺陷尺寸与局部区域变异系数呈现近似线性对应关系, 斜率相同但截距不同。分析原因: 针对具体 CT 检测系统, 当检测工艺一定时, 针对具体被检对象其空间分辨率、密度分辨率是固定的。这时缺陷的尺寸及图像噪声水平成为影响缺陷定量准确性的主要因素。从图 3 (b) 可见, 对直径为 50 mm 的圆形试样上不同缺陷尺寸与局部变异系数的相关性进行分析, 多组实验数据相关系数处于 99.1%~99.9% 区间。可见利用变异系数表征缺陷尺寸具有较高的适用性。

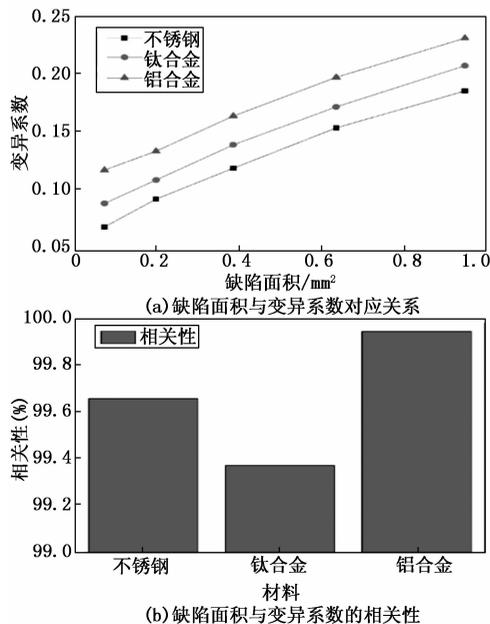


图 3 圆形试样缺陷面积及变异系数关系曲线

采用变异系数对工业 CT 图像中小缺陷进行定量的具体流程如图 4 所示。

基于变异系数的小缺陷定量方法包括 3 个主要步骤: 1) 采用线阵高能工业 CT 成像系统获得预制小缺陷试样和

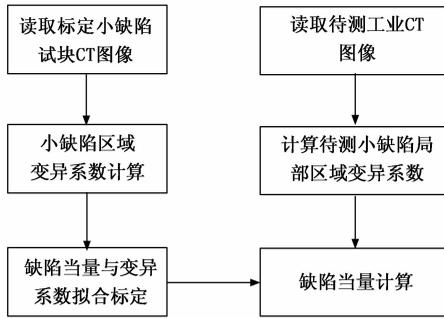


图 4 基于变异系数的小缺陷定量方法流程图

待测样品的断层图像；2) 针对 CT 图像中不同尺寸的预制小缺陷，计算局部区域变异系数，建立缺陷尺寸与变异系数对应关系式；3) 计算待测样品缺陷的局部变异系数，带入对应关系式求得小缺陷定量结果。

### 3 小缺陷定量及不确定度的评定

#### 3.1 变异系数法不确定度来源分析

变异系数法实质在于通过小缺陷所在局部区域灰度分布的离散程度表征缺陷尺寸，分析其不确定度有利于该方法的应用推广。考虑工业 CT 小缺陷定量过程涉及到的相关影响因素，采用变异系数法测量结果的不确定度来源<sup>[19]</sup>主要有：试样中基准缺陷加工尺寸的影响、变异系数法定量曲线拟合的不确定性、工业 CT 系统扫描的影响和变异系数法测量结果重复性。

#### 3.2 变异系数法不确定度评定

##### 3.2.1 圆形试样中基准缺陷的不确定度

在小缺陷变异系数法定量过程中，需要预先获得指定检测工艺下变异系数与小缺陷尺寸的拟合关系曲线，该曲线标定是基于圆形试样中预制小缺陷实现的。由于小孔制造工艺的不稳定性、工件材料自身的膨胀系数变化等，均会导致孔径的偏差。因此，在使用前需要对小孔尺寸进行计量。用于计算变异系数拟合关系式的一系列不同尺寸的小缺陷 (Φ0.5/0.7/0.9/1.1 mm) 及用于测量的 Φ0.7 mm 通孔均进行尺寸计量，查相关对比试样检测报告，可知各公差如表 1 所示。故通孔缺陷的不确定度为：

$$\mu_1 = \mu_{\max} = 0.0303 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

表 1 缺陷面积公差表

序号	缺陷直径/mm	公差范围/mm <sup>2</sup>	分布置信系数	最大不确定度
1	0.5	±0.024 3	均匀√3	0.030 3
2	0.7	±0.033 7	均匀√3	
3	0.9	±0.043 1	均匀√3	
4	1.1	±0.052 5	均匀√3	

##### 3.2.2 缺陷定量曲线拟合的不确定度 $u_2$

通过试验研究确定了小缺陷尺寸与局部区域变异系数呈现近似线性对应关系，利用不同尺寸的小孔对该线性关系曲线进行拟合。由于曲线拟合的自变量（小孔局部变异系数）也是测量结果，其不确定性将会影响线性拟合的结

果。因而，考虑曲线拟合的不确定度。在 Φ50 mm 圆形不锈钢对比试样上，计算通孔缺陷 (Φ0.5/0.7/0.9/1.1 mm) 图像局部区域 (50×50) 的变异系数制作拟合关系曲线，各点数据如表 2 所示。

表 2 拟合曲线用各点数据

拟合数据	测试点 1	测试点 2	测试点 3	测试点 4
变异系数 ( $y_n$ )	0.148 8	0.125 1	0.101 8	0.083 8
拟合系数 ( $f_n$ )	0.150 1	0.123 0	0.101 3	0.085 1
缺陷面积/mm <sup>2</sup>	0.950 3	0.636 2	0.384 8	0.196 4

采用最小二乘法建立缺陷面积与局部变异系数的线性对应关系式（局部区域：50 像素×50 像素）如下：

$$D(c_v) = 11.5546c_v - 0.785386 \quad (3)$$

式中， $D$  为小缺陷面积； $c_v$  为变异系数。

变异系数与线性拟合曲线如图 5 所示。

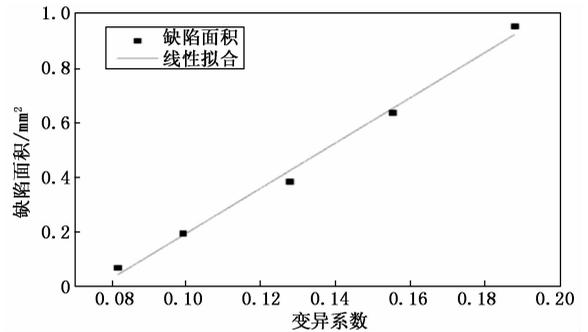


图 5 缺陷面积及变异系数的拟合曲线

利用拟合曲线对应关系式 (3)，对已知 Φ0.7 mm 的人工通孔进行定量。定量数据如表 3 所示。

表 3 多次测量结果

序号	1	2	3	4	5	6	平均值
面积/mm <sup>2</sup>	0.488 2	0.462 9	0.286 6	0.328 9	0.296 9	0.452 8	0.386
直径/mm	0.788 4	0.767 7	0.604 1	0.647 1	0.614 9	0.759 3	0.697
变异系数	0.110 2	0.108 0	0.092 8	0.096 4	0.093 7	0.107 2	0.101

计算拟合公式的判定系数 (coefficient of determination, 记为  $R^2$ )，在线性回归中， $R^2$  是回归平方和与总离差平方和之比值，是对估计的回归方程拟合优度的度量。判定系数 ( $R^2$ ) 计算公式如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

其中： $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$ 。

计算得  $R^2 = 0.996 7$ ，线性拟合曲线最大相对误差为  $1 - R^2 = 0.33\%$ ，按均匀分布计算，并转化为缺陷定量直径：

$$u_2 = [(1 - R^2) / \sqrt{3}] \times 0.386 = 0.000 74 \text{ mm}^2 \quad (5)$$

### 3.2.3 CT 扫描成像结果重复性 $u_3$

CT 扫描成像结果重复性是在同一测量条件下多次重复 CT 扫描获得的图像引起的不确定性。对同一通孔缺陷采用相同检测工艺扫描 10 次, 采用公式 (1) 计算对应得缺陷面积。测量的数据如表 4, 10 次测量缺陷平均面积值为  $\bar{S}=0.405\ 0\ \text{mm}^2$ 。

表 4 多次 CT 扫描并测量的结果

序号	缺陷面积	序号	缺陷面积	序号	缺陷面积	序号	缺陷面积
1	0.349 2	4	0.308 9	7	0.377 0	10	0.346 0
2	0.477 9	5	0.453 6	8	0.405 0		
3	0.371 7	6	0.459 1	9	0.501 4		

由表 4 得到其实验标准偏差  $S$  为:

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (S_i - \bar{S})^2} = 0.064\ 7\ \text{mm}^2 \quad (6)$$

则不确定度为:

$$u_3 = \frac{\sigma(S)}{\sqrt{n}} = \frac{0.064\ 7}{\sqrt{10}} = 0.020\ 4\ \text{mm}^2 \quad (7)$$

故相对不确定度为:

$$u_{31} = \frac{u_3}{\bar{S}} = \frac{0.020\ 4}{0.405\ 0} = 5.05\% \quad (8)$$

### 3.2.4 变异系数法测量结果重复性

变异系数法测量结果重复性是指在一次 CT 扫描图像中多次重复测量结果的不确定性。对已知尺寸为  $\Phi 0.7\ \text{mm}$  通孔的圆形试样进行工业 CT 扫描获得单幅缺陷断层图像, 分别由三名检测人员用变异系数法重复测量小缺陷, 每人测量 6 次, 测量结果如表 5 所示。

表 5 重复测量的数据

人员	1	2	3	4	5	6	平均值	方差 $\sigma^2$
1	0.373 7	0.333 9	0.373 5	0.379 5	0.371 1	0.384 7	0.369 4	0.000 7
2	0.303 1	0.329 2	0.393 2	0.390 8	0.361 7	0.400 6	0.363 1	
3	0.367 0	0.390 8	0.368 8	0.389 6	0.345 4	0.373 9	0.372 6	

计算变异系数法测量结果重复性不确定度  $u_4$ :

$$u_4 = \frac{\sigma^2}{\sqrt{n}} = \frac{0.000\ 7}{\sqrt{18}} = 0.000\ 165\ \text{mm}^2 \quad (9)$$

### 3.3 合成标准不确定度得计算

变异系数法小缺陷定量不确定度各分量形成表, 如表 6 所示。

表 6 变异系数法小缺陷定量不确定度分量

分量类型	来源说明	不确定度分量/ $\text{mm}^2$
缺陷基准大小的不确定度, $u_1$	圆形试样基准缺陷的不确定度	0.030 3
变异系数拟合曲线拟合引入的不确定度, $u_2$	缺陷定量曲线拟合引入的不确定度	0.000 74
小缺陷工业 CT 扫描成像结果重复性(系统误差) $u_3$	相同 CT 扫描工艺对同一缺陷成像引入的不确定度	0.020 4
变异系数法测量结果重复性 $u_4$	基于一次扫描 CT 图像采用变异系数法定量结果重复性	0.000 165

小缺陷定量合成标准不确定度为:

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.036\ 5\ \text{mm}^2 \quad (10)$$

### 3.4 扩展标准不确定度的评定

对于工业 CT 系统等高精度测量设备, 要求给出的测量结果区间包含被测量真值的置信概率较大, 为此需用扩展不确定度表示测量结果。扩展不确定度由合成标准不确定度乘以包含因子  $k$  得到, 认为变异系数法小缺陷定量合成标准不确定度近似正态分布, 取置信概率 95%, 包含因子  $k=2$ 。计算扩展不确定度为:

$$U = k \times u = 2 \times 0.036\ 5 = 0.073\ \text{mm}^2 \quad (11)$$

因此, 基于变异系数法的小缺陷定量结果及不确定度表示为:  $0.386\ \text{mm}^2 (\pm 0.073\ \text{mm}^2)$ 。

## 4 结束语

本文介绍了基于图像局部灰度变异系数的工业 CT 图像小缺陷定量方法。对基于变异系数的小缺陷定量结果影响因素进行了分析, 引入了缺陷基准大小的影响、变异系数公式拟合带来的不确定性、工业 CT 扫描成像结果的影响和测量方法重复性等重要因素, 以高能 6MeV 线阵探测器工业 CT 系统为例进行了说明和计算, 实现了相应的不确定度评定。对已知尺寸为  $\Phi 0.7\ \text{mm}$  (面积  $0.385\ \text{mm}^2$ ) 的小缺陷, 基于变异系数法得到的扩展标准不确定度为  $0.073\ \text{mm}^2$ , 从计算结果可以体现基于变异系数法的工业 CT 小缺陷定量精度, 该方法可广泛地推广和使用。

### 参考文献:

- [1] 张朝宗, 郭志平, 等. 工业 CT 技术和原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [2] 张朝宗. 工业 CT 的系统结构与性能指标 [J]. CT 理论与应用研究, 2014, 23 (3): 443-452.
- [3] 龚群甫, 安小慧. 工业 CT 技术在飞机修理中的应用 [J]. 新技术新工艺, 2020 (2): 71-74.
- [4] 高玉玲, 瑞睿, 宋丽君, 等. 工业 CT 技术在弹药装药密度差测量中的应用 [J]. 无损检测, 2014, 36 (4): 14-19, 25.
- [5] 徐留根, 彭春增, 全建龙, 等. 工业 CT 在航空机载传感器可靠性提升中的应用 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35 (10): 158-160.
- [6] 宋全知, 潘亮. DR 和工业 CT 检测技术原理及其在铁路货车零部件生产中的应用 [J]. 电焊机, 2019, 49 (11): 107-113.
- [7] 蒋绍青, 栾传彬, 满月娥, 等. 工业 CT 在大型复杂机匣检测中的应用 [J]. 无损检测, 2017, 39 (2): 18-21.
- [8] 常海涛, 荀军年, 李晓梅. Faster R-CNN 在工业 CT 图像缺陷检测中的应用 [J]. 中国图象图形学报, 2018, 23 (7): 1061-1071.
- [9] Zhang R P, Shi J Y, Gou J N, et al. Intelligent detection method for workpiece defect based on industrial CT image [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2019, 10 (3): 299-306.

[10] 时佳悦, 张蕊萍, 董海鹰, 等. 基于灰度变化率的低对比度 CT 图像分割研究 [J]. 兰州交通大学学报, 2017, 36 (3): 57-62.

[11] 齐子诚, 倪培君, 姜伟, 等. 金属材料内部缺陷精确工业 CT 测量方法 [J]. 强激光与粒子束, 2018, 30 (2): 124-130.

[12] JJF 1059.1-2012, 测量不确定度的评定与表示 [S]. 2013.

[13] Hiller J, Reindl L M. A Computer simulation platform for the estimation of measurement uncertainties in dimensional X-ray computed tomography [J]. Measurement, 2012, 45 (8): 2166-2182.

[14] Müller P, Hiller J, Cantatore A, et al. A study on evaluation strategies in dimensional X-ray computed tomography by estimation of measurement uncertainties [J]. Journal of Metro-

gy and Quality Engineering, 2012, 3 (2): 107-115.

[15] 董政, 史朝刚, 刘晓磊, 等. 超声波探伤不确定度评定 [J]. 物理测试, 2017, 35 (6): 54-57.

[16] 任国强, 崔冬芳, 胡智博, 等. 超声波检测焊缝缺陷深度的不确定度评定 [J]. 理化检验 (物理分册), 2014, 50 (10): 744-747.

[17] 齐子诚, 倪培君, 唐盛明, 等. 基于工业 CT 的角度测量方法及不确定度分析 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 43-46.

[18] 苏宇航, 王倩妮, 何方成. 已校准量块的工业 CT 测量不确定度分析 [J]. 无损检测, 2016, 38 (2): 28-31.

[19] 程银宝, 陈晓怀, 王中宇, 等. CMM 形状测量任务的不确定度分析与评定 [J]. 计量学报, 2020, 41 (2): 134-138.

(上接第 261 页)

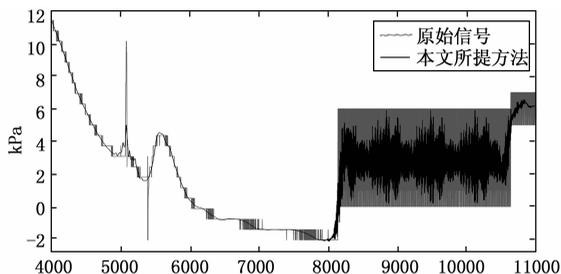


图 9 本文所提方法去噪效果

行去噪时, 由于阈值函数的不连续性, 对于信号发生变化较多的部分, 重构信号虽然高频特征得到恢复, 但是振荡变得更剧烈了; 由图 9 可以看出, 用所提方法进行去噪时, 高频特征得到了保留的同时, 在信号突变前后, 并未在增加原始信号没有的振荡信号, 对噪声信号起到了较好的去噪作用。

通过算例对比, 证明本文方法在处理既含突变又含平滑信号时, 比传统小波包法具有更好的去噪效果。

#### 4 结束语

针对传统小波包去噪方法的阈值函数在处理既含突变又含平滑信号的情形下, 不能在保持良好信号边缘特性与消除恒定偏差的同时, 又能避免出现信号原本没有的振荡的问题, 本文通过采用改进阈值函数的方法, 利用量化反映信号的平滑程度的信息来对阈值函数进行调整, 使得去噪方法在处理既含平滑又含突变信号时, 能够分别采用适合各信号特征的阈值函数进行处理, 避免了去噪后出现信号原本没有的振荡的同时, 有效保留信号的高频特征, 提高重构精度。

#### 参考文献:

[1] Wang Z, Li S. Discrete fourier transform and discrete wavelet packet transform in speech denoising [A]. International Congress on Image & Signal Processing [C]. IEEE, 2012.

[2] Jin Y G, Shin J W, Kim N S. Spectro-temporal filtering for

Multichannel speech enhancement in short-time fourier transform domain [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21 (3): 352-355.

[3] Varghese J, Subash S, Tairan N. Fourier transform-based windowed adaptive switching minimum filter for reducing periodic noise from digital images [J]. Image Processing, IET, 2016, 10 (9): 646-656.

[4] Hussein R, Shaban K B, El-Hag A H. Wavelet transform with histogram-based threshold estimation for online partial discharge signal denoising [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64 (12): 3601-3614.

[5] Srivastava M, Anderson C L, Freed J H. A new wavelet denoising method for selecting decomposition levels and noise thresholds [J]. IEEE Access, 2016, 4: 1.

[6] Chen G Y, Zhu W P. Signal denoising using neighbouring dual-tree complex wavelet coefficients [A]. Conference on Electrical & Computer Engineering, IET, 2009.

[7] Fathi A, Naghsh-Nilchi A R. Efficient image denoising method based on a new adaptive wavelet packet thresholding function [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21 (9): 3981-3990.

[8] Diwakar M, Kumar M. CT image denoising using NLM and correlation-based wavelet packet thresholding [J]. Iet Image Processing, 2018, 12 (5): 708-715.

[9] Yang J, Wang Y, Xu W, et al. Image and video denoising Using adaptive dual-tree discrete wavelet packets [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems for Video Technology, 2009, 19 (5): 642-655.

[10] 陈博文, 蒋磊, 张群, 等. 基于小波包-FHN 模型的 UWB-IR 信号检测 [J]. 信号处理, 2017, 33 (10): 1324-1331.

[11] 章浙涛, 朱建军, 匡翠林, 等. 小波包多阈值去噪法及其在形变分析中的应用 [J]. 测绘学报, 2014 (1): 13-20.

[12] 代海波, 单锐, 王换鹏, 等. 基于改进阈值函数的小波去噪算法研究 [J]. 噪声与振动控制, 2012 (6): 193-197.

[13] 周建, 向北平, 倪磊, 等. 基于 Shannon 熵的自适应小波包阈值函数去噪算法研究 [J]. 振动与冲击, 2018 (16): 206-211.