

基于机器学习多特征融合成像的感应扫描热成像焊缝缺陷检测

田康¹, 彭建平¹, 张迁¹, 李金龙¹, 张翔², 向祖怡¹

(1. 西南交通大学物理科学与技术学院 四川 610031;

2. 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400074)

Email: tiankang@my.swjtu.edu.cn

摘要: 在役中的焊缝结构由于表面的褶皱和污渍对检测技术的干扰程度大, 针对这一问题, 本文基于更适用于复杂结构加热的磁轨激励方式, 以及大范围检测的感应扫描热成像技术搭建了检测平台。在采集并预处理热图像序列数据后, 基于设计了一种多特征融合成像方法, 通过焊缝图像序列的多种时域热特征图像作为输入, 并且提出一种基于动态检测信号机理的空间相位峭度 (SPK) 改进特征, 这些特征由一个训练好的人工神经网络 (ANN) 进行融合, 以获得一个评估值。实验结果表面, 这种方法可以准确地在复杂背景下以像素级别检测分离出缺陷区域, 将成像准确率提高至 99.6%, 并且在没有误报的情况下, 极大地抑制了复杂背景信息的干扰。

关键词: 缺陷检测; 焊缝; 感应式热成像; 多特征融合

1、研究背景

随着检测技术的快速发展, 能更加准确高效地适应复杂场景的检测技术引发了相当的关注。焊接是世界上应用最广泛的连接金属的冶金工艺, 其在汽车、航空航天、石油、天然气和太空勘探等多个行业中发挥着重要作用 [1]。焊接监测技术对保证焊缝的在役质量至关重要, 先进的检测技术能够及时发现可能不利于焊接结构使用寿命的缺陷, 避免安全隐患。涡流热成像 (ECT) 是近年时新的一种检测方法, 具有快速、直观、准确、远距离、可穿透、无接触、无污染等诸多优势 [2], 由于复杂的焊缝分布会对温度分布产生影响, 目前利用热成像系统应用于焊缝区域检测仍然数量较少。近年来, 多位学者对涡流热成像检测技术提出了诸多改进方案。在系统搭建和改进方面, 在图像处理方面, 主要有以下两类方法: 第一类更加注重利用时域图像序列的信息, 对其进行降维提取和图像增强, 包括时域差分法、频域分析法 (PPT)、主成分分析 (PCA)、独立成分分析 (ICA)、热信号重构 (TSR) 等。Chisung [3] 等人采用了机器学习的方式处理焊缝的单张热图像, 正确分割出了焊缝上的缺陷形态, 但由于只采用了单张热图像, 存在训练数据过少的问题, 需要利用 CycleGAN 生成模拟缺陷数据集后进行训练, 系统庞大复杂, 且没有充分利用图像序列时域信息。因此, 现有方法对 ECT 焊缝检测的图像处理的程度相对有限, 有无法分离和特征利用有限等问题。本文采用感应扫描热成像技术, 设计了多特征融合成像方法, 通过焊缝图像序列的多种时域热特征图像作为输入, 融合动态检测过程下焊缝背景和缺陷区域的空间相位峭度 (SPK) 改进特征, 准确地在复杂背景下以像素级别检测分离出了缺陷区域。

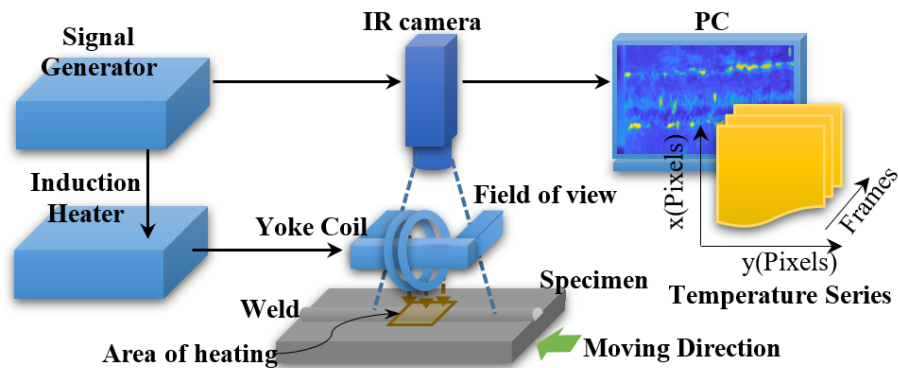


Fig.1 Overview of the induced scanning thermography system.

2、研究内容

如图 1 所示，我们使用 IST(Induced scanning thermography) 平台检测焊缝缺陷，由信号发生器产生同步信号驱动红外相机和激励源，磁轭激励源会在焊缝区域产生一个均匀涡流场。由于焦耳热效应，导电材料的温度升高。所产生的热量的总和 Q 与涡流密度 J_s 的平方成正比。电流密度又与电场强度矢量 e 成正比，这种关系可以表示为：

$$Q = \frac{1}{\sigma} |J_s|^2 = \frac{1}{\sigma} |E|^2 \quad (1)$$

红外相机会对表面的温度分布时间序列进行持续记录，并将信息实时传输给计算机。利用导轨系统使焊缝试件保持匀速平移，实现更大范围的感应扫查。在完成数据采集后，动态过程会产生一种特定的数据结构，从时间维度来看，随着时间推移，所观测的目标在不同的帧中持续平移运动经过加热区域，这里像素位置不代表焊缝的空间位置，由于我们的分析必须对同一空间位置的时间序列进行，因此需要对原扫描数据进行对齐操作。完成对齐后的图像如图 2(a) 焊缝的热响应分布。由于焊缝褶皱对热场的扰动以及污渍的高表面辐射率，焊缝褶皱和污渍都同缺陷一起产生了一定的温度响应，尽管采用了高分辨度的伪彩色显示方案，缺陷混淆在焊缝复杂背景中无法通过简单图像处理方法进行区分。这种分割成像的难度也体现在时域的热响应中。

接下来说明这种缺陷区域与焊缝以及其他污渍背景的区别方法。由于焊缝和污渍对缺陷检测的影响，我们提取了多种特征信息的组合方案，以更彻底地进行缺陷表征。在完成步骤一数据采集和步骤二对齐预处理后，我们在第三步中对图像序列的特征通过以下四类传统方法和一种改进特征进行提取，这些特征提取方法可以将物理过程很难分离得缺陷表面热波以及其他背景信号进行一定程度地表征，我们会在后文中详细阐述。在第四步中，通过一个人工神经网络进行特征融

合，由于前四个成分可以提取原数据 85% 的有效信息，我们对 PCA、ICA 选取前四个成分。TSR 特征也保留主要温度变化位置的 4 个主要结果。对 PPT 保留 10 个相位和幅值信息，来保证时域信息的特征。以及计算了 4 个峭度特征，共计 36 项特征作为输入。在隐藏层中设置了 300 个神经元，采用一定的设置后，对时域信号进行训练和分类。

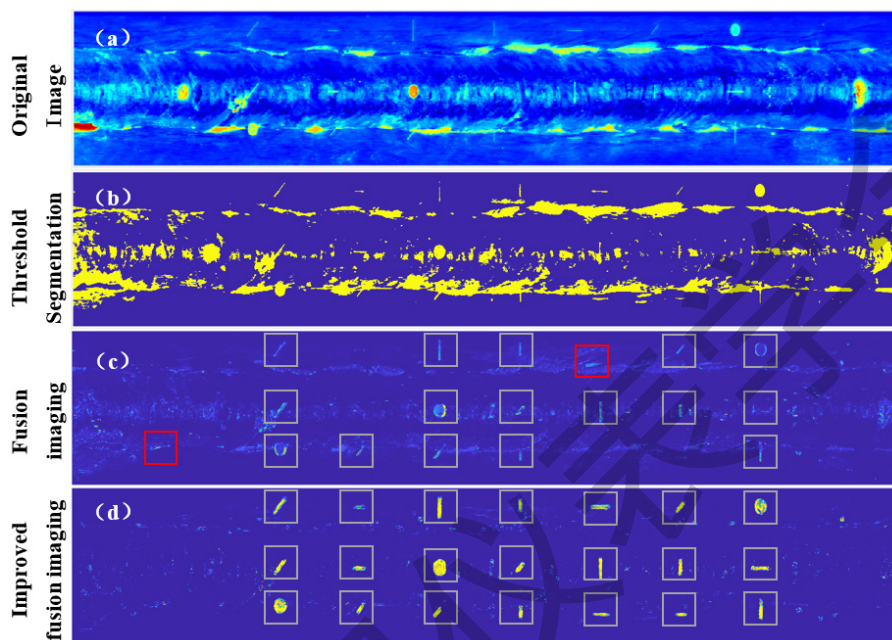


Fig.2 Multi-Feature fusion result

相位空间峭度特征（PSK）。在分析图像相位特征时发现，试件由于水平方向的移动，缺陷左右边缘出现了一个方向相反的相位信号，这是由于缺陷在经过热场区域时经历了不同的热量积累和扩散过程。当试件开始持续运动时，由于试件向右持续运动热源左侧积累了热量使得扩散速率降低，其右侧距离缺陷较远所以扩散速率更快。因此空间位置对称的缺陷两侧点，温度变化的峰值和其位置都有不同，这种差异性会体现在 PPT 的相位特征上，我们利用这种缺陷独有的特征尝试更好地区分缺陷信号。图 2 给出了最终的成像结果，图 2(a) 为原时域图像，为了进行对比，图 2 (b) 直接利用阈值分割，可以看到，在焊缝区域内都无法将缺陷区域有效分离。在初步利用传统特征进行融合成像后，如图 2 (c) 中的结果，一定程度上分离出了 21 个缺陷中的 18 个缺陷，检出率为 80.95%，漏检率为 19.05%，这里漏检的均为横向缺陷。出现了两个难以分辨的误检（红色框）。

3、结论

针对焊缝结构表面的褶皱和污渍干扰，建立了基于感应扫描热成像技术的缺陷检测和分离方法，主要优点如下：

(1) 通过焊缝图像序列的多种时域热特征图像作为输入，基于一个神经网络搭建了多特征融合的成像系统，充分利用各类盲源分析算法对感应热成像数据的提取分析效果。

(2) 分析了动态过程的热扩散缺陷信号差异，基于这种差异性提出了一种基于动态检测信号机理的空间相位峭度（SPK），并在这种改进特征上进一步提高了系统的检测性能，将像素的准确率提高至 99.6%，检出率提高至 100%，并且没有误报率。

尽管本文搭建了多特征融合成像系统并验证了有效性，但其中所采用的盲源分析方法仍然具有一定的不可解释性，无法证明其在更多的复杂场景中具有有效性，未来的研究方向应利用物理数学方法更进一步的挖掘这些异常信号的特殊性，并开展广泛的验证工作。

参考文献

- [1] Siying Tang, Xiaorong Gao, Kang Tian, Qian Zhang, Xiang Zhang, Jianping Peng, Jianqiang Guo. Non-destructive evaluation of weld defect with coating using electromagnetic induction thermography[J], *Nondestructive Testing And Evaluation*, 2023.
- [2] X. Zhang, J. P. Peng, Q. Zhang, K. Tian, S. Y. Tang, X. Liang, T. X. Wang, and X. R. Gao, "Nondestructive analysis of rolling contact fatigue cracks using induced scanning thermography," *Opt. Express*, vol. 30, no. 24, pp. 42982-42994, 2022.
- [3] Kim, Chisung et al. Weld crack detection and quantification using laser thermography, mask R-CNN, and CycleGAN[J]. *Automation In Construction*, 2022, 143.