

基于图像特征提取与识别的航空紧固件缺陷检测方法

张文文 陈建奎

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要:为解决航空紧固件缺陷检测效率低、精度不足的问题,本文结合传统图像特征提取与深度学习技术,设计了包括图像采集、优化预处理流程,融合几何、纹理特征与深层特征,构建改进识别模型等技术手段的一种高效的紧固件缺陷检测方法,可精准识别多种缺陷,为紧固件安全保障提供技术支持。

关键词:基于图像特征;提取与识别;航空紧固件;缺陷检测方法

引言:航空紧固件是航空器结构连接的核心部件,其质量直接决定飞行安全,疲劳断裂、应力腐蚀开裂等缺陷易引发严重安全事故。当前传统检测方法存在主观性强、效率低、微小缺陷漏检等问题,难以适配先进航空装备检测需求。随着机器视觉与深度学习发展,图像检测成为无损检测热点,本文聚焦检测痛点,设计相关方法,实现缺陷精准定位与分类,提升检测效率与可靠性。

1 相关理论与技术基础

1.1 航空紧固件相关概述

(1)航空紧固件的类型与结构特点:常见类型有螺栓、螺母、铆钉等,材质多选用高强度合金,兼具耐腐蚀性与抗疲劳性,满足航空器高安全性要求。结构尺寸需严格符合航空标准,装配需遵循精准定位原则,杜绝松动隐患,保障连接可靠性。(2)航空紧固件常见失效形式及特征:紧固件的主要失效形式包括疲劳断裂、韧性断裂、脆性断裂、应力腐蚀开裂、氢脆断裂、磨损和腐蚀等。疲劳断裂多由交变应力作用引发,韧性断裂与过载有关,脆性断裂则与材料脆性或低温环境相关;应力腐蚀开裂和氢脆断裂与环境介质及材料敏感性相关,磨损和腐蚀则与接触面摩擦及环境侵蚀有关。这些失效形式在宏观与微观上均表现出不同特征,如疲劳断裂呈现贝壳状断口,应力腐蚀开裂伴有裂纹扩展特征,磨损则表现为表面材料流失。

1.2 图像采集与预处理技术

(1)图像采集系统组成:核心组件为工业相机、光源、镜头,结合紧固件失效检测需求,选用高分辨率相机与漫射光源,搭配合理布置方案,通过偏振滤镜解决金属表面反光问题,确保成像清晰。(2)图像预处理算法:涵盖光照归一化、噪声抑制、几何对齐、图像增强,其中中值滤波、均值滤波可有效抑制噪声,同态滤波能改善光照不均,通过系列处理消除环境干扰,突出失效特征。(3)多曝光图像融合技术:针对复杂光照下

亮部过曝、暗部细节丢失问题,采用多曝光融合方法,剔除运动干扰、优化融合权重,重建高质量图像,为后续特征提取提供良好基础^[1]。

1.3 图像特征提取相关技术

(1)传统特征提取方法:几何特征包括面积、周长、圆度等,可描述失效区域外形;灰度共生矩阵、局部二值模式等纹理特征,能捕捉失效表面纹理差异,适用于简单失效形式检测。(2)深度学习特征提取方法:基于CNN的特征提取原理,通过残差块与跳跃连接解决深层网络退化问题,可自动提取微小失效特征,在微小失效检测中具有明显优势。(3)特征优化方法:针对特征冗余问题,采用特征选择与融合策略,剔除无效特征、整合有效信息,提升特征区分度与鲁棒性,优化后续识别效果。

1.4 失效识别算法基础

(1)传统识别算法:模板匹配操作简单,适用于标准紧固件的简单失效形式识别,但适应性差;SVM分类精度较高,却难以处理复杂背景下的多失效形式识别,存在明显局限性。(2)深度学习识别算法:FasterRCNN基于候选区域检测原理,可同时实现失效定位与分类,识别精度高、速度快,能有效处理复杂场景下的失效识别,为后续模型优化提供理论支撑。

2 基于图像特征提取与识别的航空紧固件失效检测方法设计

2.1 检测系统整体设计

(1)系统总体架构:系统划分为五大核心模块,功能明确且数据流向清晰。图像采集模块获取航空紧固件表面原始图像,传至预处理模块;预处理模块对图像降噪、校正,输出高质量图像;特征提取模块从预处理图像中提取失效相关特征,生成特征向量;失效识别模块分析特征向量,完成失效定位与分类;结果输出模块以可视化呈现检测结果,包括失效类型、位置和严重程度

度,并生成报告,实现数据闭环。(2)系统硬件选型与搭建:依据工业检测对精度和效率的要求选型组装。选用1200万像素工业相机,满足微小失效识别分辨率需求;搭配环形LED漫射光源与偏振滤镜,消除金属表面反光,提升成像质量;配置高精度自动导轨,实现紧固件自动传送与定位,构建自动化图像采集平台,减少人工干预,提高检测效率与一致性^[2]。(3)系统软件环境配置:以Python为主要编程语言,基于OpenCV、TensorFlow搭建图像处理与模型训练环境。

2.2 图像预处理流程优化

(1)光照校正与噪声抑制优化:针对航空紧固件金属表面反光严重、光照不均的问题,采用偏振光技术过滤杂散光,结合自适应直方图均衡化实现光照校正,使图像亮度分布均匀;引入自适应中值滤波算法,相较于传统滤波,可根据像素灰度差异动态调整滤波窗口,有效抑制图像噪声的同时,保留失效细节,大幅提升预处理效果。(2)图像分割算法设计:结合紧固件失效多样、边界模糊的特点,采用自适应阈值分割算法,自动适配不同光照条件下的图像阈值,避免手动阈值选取的主观性;后续搭配形态学开运算、闭运算,分别去除图像中的细小噪声和失效区域的空洞,实现失效候选区域的精准提取,为后续特征提取奠定基础。(3)预处理效果评价指标:定义图像清晰度、对比度、信噪比3项核心评价指标,量化评估预处理算法的有效性。图像清晰度通过灰度梯度值衡量,对比度反映失效与背景的灰度差异,信噪比用于评价噪声抑制效果,通过对比预处理前后各项指标的变化,验证优化后预处理流程的优越性^[3]。

2.3 多维度特征提取算法设计

(1)传统特征提取:针对不同失效形式提取针对性特征,构建基础特征向量。对于疲劳断裂、韧性断裂等失效形式,提取面积、周长、圆度等几何特征,描述失效区域的外形轮廓;对于应力腐蚀开裂、氢脆断裂等失效形式,提取灰度共生矩阵、局部二值模式等纹理特征,捕捉失效表面的灰度分布差异,确保基础特征能覆盖各类失效形式的核心特征。(2)深度学习特征提取:基于ResNet50主干网络,引入通道注意力机制,通过对特征通道进行权重分配,增强模型对失效关键特征的关注,抑制无关背景特征的干扰;利用ResNet50的残差块结构,解决深层网络退化问题,有效提取失效的深层语义特征,提升微小失效的识别能力^[4]。(3)特征融合策略:采用加权融合方法,结合传统特征与深度学习特征的优势,构建更具区分度的融合特征向量。通过实验确定两类特征的权重系数,使融合特征既保留传统特征的

直观性,又兼具深度学习特征的深层表达能力,有效提升失效识别的精度,降低误检、漏检率。

2.4 失效识别模型构建与优化

(1)基于改进Faster R-CNN的识别模型构建:以Faster R-CNN为基础框架,引入SE通道注意力模块嵌入主干网络,优化特征提取效率;改进候选区域生成网络,缩小候选区域范围,提升失效定位精度;调整分类器结构,适配紧固件多失效形式的分类需求,增强模型对微小失效与复杂背景下失效的识别能力。(2)模型训练与参数优化:针对紧固件失效数据集不均衡的问题,采用类加权策略平衡各类失效样本占比,结合随机翻转、旋转、亮度调整等数据增强技术,扩充训练样本量;通过网格搜索法优化学习率、批次大小等训练参数,采用早停策略防止模型过拟合,显著提升模型的泛化能力^[5]。(3)模型推理优化:采用模型轻量化策略,对训练好的模型进行剪枝、量化处理,减少模型参数数量,降低计算复杂度;优化推理流程,提升失效检测的实时性,使检测速度满足工业批量检测的效率要求,确保系统能稳定应用于实际生产检测场景。

3 具体实施及效果判定

3.1 实验数据集构建

(1)数据集采集:借助自动化图像采集平台,模拟工业实际检测场景,采集涵盖螺钉、螺母等常见类型航空紧固件图像。这些图像包含疲劳断裂、应力腐蚀开裂等多种失效形式,以及轻微、中度、重度不同失效程度。采集时设置不同光照强度(弱光、强光、均匀光照)与拍摄角度(0°、30°、45°),获得足够的原始图像,保证数据集多样实用。(2)数据集标注与预处理:由专业人员精准标注图像中失效区域,包括类型、位置和边界,按7:2:1比例划分数据集。(3)数据集评价:对采集的图像进行统计分析,确保失效形式分布合理,数量满足模型需求。具有足够的样本覆盖度与多样性的验证数据集才能全面反映实际得失效情况,为分析提供可靠数据支撑。

3.2 实验环境与参数设置

(1)实验硬件环境:实验计算机配置为IntelCorei7-12700H处理器、32GB内存、6GB显存显卡;图像采集硬件包括1200万像素工业相机、环形LED漫射光源及偏振滤镜等,确保图像采集的精准性。(2)实验软件环境:采用Python作为编程语言,基于OpenCV、TensorFlow框架搭建实验平台;使用PyCharm作为开发工具确保实验软件环境稳定、高效。(3)实验参数设置:模型训练迭代次数不少于100轮;预处理参数中,设置适当的自适应滤

波窗口大小、自适应阈值、纹理特征距离,确保实验参数合理可行。

3.3 实验结果判断

(1)图像预处理效果:图像经预处理后在反光消除、噪声抑制明显,失效区域边界清晰等方面将得到有效改善,可以有效提升图像质量,为后续特征提取与识别奠定基础。(2)特征提取效果分析:通过特征可视化技术,可以观察到融合特征能清晰呈现失效核心特征,有效区分失效与背景,体现了多维度特征提取方法的优越性,能有效提升特征区分能力。(3)失效识别性能验证:预计检测率可达95%以上,优于传统的检测方法,具有一定的先进性与实用性。

3.4 实验稳定性与鲁棒性测试方法

(1)稳定性测试:对测试集进行10次重复实验,要求检测结果中各项性能指标波动范围均小于0.8%,以此证明检测结果一致性良好,所设计的检测系统与方法具有较高的稳定性,能够满足工业批量检测的一致性要求。

(2)鲁棒性测试:改变实验光照强度、拍摄角度等环境参数,要求检测率波动不超过5%,误检率波动不超过2%,以此证明该方法在不同场景下仍能保持良好的检测性能,具备较强的鲁棒性,适用于复杂工业检测环境。

4 发展趋势

航空紧固件缺陷检测技术正呈现以下发展趋势:

(1)多模态融合检测:将视觉检测与振动分析、超声检测、红外热成像、声发射检测等多种技术相结合,构建多模态融合的智能诊断系统。西工大的“光谱+偏振”融合方案、西交大的“振动信号+智能诊断”路线、南航的“视觉+点云”融合方案,均体现了这一趋势。

(2)小样本与零样本学习:针对航空领域故障样本获取困难的问题,小样本学习、零样本学习、迁移学习等技术的发展将为解决数据瓶颈提供新的途径。西交大的SVDD方法、西工大的小样本声音识别方法、哈工大的“零样本”检测系统,代表了这一方向的积极探索。

(3)轻量化与边缘部署:将深度学习模型部署到机器人等边缘计算平台上,实现端侧实时检测,将成为工业应用的主流模式。北航在FPGA平台上的轻量化部署、南航的RIMSDC模型的高效设计,均体现了这一方向。

(4)数字孪生与预测性维护:将紧固件检测数据与数字孪生模型相结合,实现结构健康状态的实时映射和剩余寿命预测,推动从“事后检测”向“事前预警”的跨越。西工大的振动测试数字孪生系统、交大的《连接结构动力学预测与辨识》专著,代表了这一方向的早期探索。

(5)标准化数据集建设:航空紧固件故障检测领域缺乏公开、标准化的数据集,严重制约了算法研究和性能比较。西交大XJTU-DV数据集的发布开创了良好先例,未来需要更多的科研机构 and 行业企业共同参与标准数据集的构建与共享。

结束语

本文围绕航空紧固件缺陷检测展开研究,结合传统图像处理与深度学习技术,给出了检测系统搭建、预处理优化、特征提取及识别模型构建与优化方法。研究存在一定局限,后续将进一步开展试验验证,拓展检测紧固件类型,提升复杂工况下的检测性能,为航空紧固件缺陷检测提供更完善的技术方案。

参考文献

- [1]潘志林.紧固件制造过程中的无损检测[J].无损检测,2022,40(9):73-75.
- [2]陈友玲.航空用紧固件专利发展综述[J].科技创新导报,2023,15(21):255-256.
- [3]王肇宇.国际航空航天紧固件发展现状及趋势研究[J].宇航总体技术,2022,2(4):74-77.
- [4]刘思明.航空紧固件制造企业技术信息管理系统的特点与需求分析[J].国防制造技术,2024,11(3):44-48.
- [5]刘传波.螺纹紧固件防松性能影响因素研究[J].现代制造工程,2021,26(4):138-143.