

飞机典型结构冲击类损伤的智能检测和评估

原赛男,于闯,陈少敏

(中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心,北京 102211)

摘要: 以飞机碳纤维增强复合材料典型结构的低能量冲击损伤为切入点,根据无损检测缺陷评估需求,构建航空复合材料冲击损伤专业检测人员标注数据集,开展高效的人工智能辅助检测算法工具研究,对超声图像进行数据增强,训练典型航空复合材料结构超声冲击损伤目标检测模型,实现冲击类损伤的智能检测和评估。

关键词: 航空复合材料;冲击类损伤;智能检测与评估

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号:1000-6656(2023)05-0051-05

Intelligent detection and evaluation of impact damage of typical aircraft structures

YUAN Sainan, YU Chuang, CHEN Shaomin

(BATRI COMAC, Beijing 102211, China)

Abstract: The low energy impact damage of typical carbon fiber reinforced composite structures was taken as a breakthrough point. According to the nondestructive testing requirement of defect evaluation, data set of aviation composite impact damage labelled by professionals was constructed. The research of an efficient artificial intelligent assistant inspection tool was conducted to enhance the data of ultrasonic images, train the target detection model of ultrasonic impact damages, and achieve intelligent detection and evaluation of impact damages.

Key words: aeronautical composite; impact damage; intelligent inspection and evaluation

与金属材料相比,复合材料具有强度高、刚度大、密度小、抗疲劳和可设计等特点,被广泛应用于航空、航天产品中。先进复合材料在飞机结构上的用量已成为飞机先进性的标志之一。但复合材料也存在弱点,即在制造和服役过程中,对外来冲击载荷敏感,易产生冲击损伤。冲击损伤按冲击能量可分为3类,即高能量、中能量和低能量冲击损伤^[1]。

高能量冲击(如高速甩出的涡轮叶片)可能会造成穿透性损伤,损伤区域存在一定范围的分层。中能量冲击(如地勤车辆低度碰撞)会在冲击点区域产生明显局部损伤,如分层和冲击点背面纤维断裂等。低能量冲击(如维修工具掉落、冰雹、起飞或着陆时跑道上碎石、螺钉、轮胎碎片和鸟撞等引起)形成的

表面凹坑深度通常小于0.5 mm,目视很难发现,但复合材料内部已经发生纤维的变形、断裂,树脂的塑性变形,复合板的分层、开裂和破碎等层内损伤和分层损伤,力学性能显著下降,剩余压缩强度甚至会下降至60%以下,严重影响飞机持续适航安全。因此,在生产和使用中及时、准确地检测出低能量冲击损伤并正确评估其严重程度是非常必要的^[2-4]。低能量冲击损伤形状多类,且多为不规则图形,因此目前的标注多为人为标注,其对检测人员的经验依赖度高,存在人为误差,同时效率较低。

近年来神经网络深度学习方兴未艾,国内外涌现出了很多优秀的神经网络深度学习框架平台,可以方便快捷地构建模型,进行训练和部署应用。PaddleSeg是基于百度公司开发的神经网络深度学习框架飞桨开发的语义分割库,提供了多种神经网络模型结构和丰富的预训练模型以加速训练,例如在语音分割方面提供了在COCO数据集上预训练的U-Net结构模型,在Imagenet和COCO数据集上

收稿日期:2022-10-19

基金项目:北京市科技计划(Z201100004520031)

作者简介:原赛男(1986—),女,博士,高级工程师,主要从事航空智能检测技术研究工作

通信作者:原赛男,yuansainan@comac.cc

预训练的 Deeplabv3 结构模型等。

由于航空复合材料缺陷样本具有种类多、收集难、数量小、同类差距大等特点,研究样本数据增强方法、基于深度神经网络模型压缩、多尺度特征融合、案例挖掘等理论和技术,实现模型的小样本训练以及针对不同环境和缺陷种类的快速知识迁移,是复合材料缺陷智能评估技术发展的重点。

以飞机碳纤维增强复合材料典型结构的低能量冲击损伤为切入点,根据无损检测缺陷评估需求,构建航空复合材料冲击损伤专业检测人员标注数据集,开展冲击损伤类型和特征研究;利用神经网络深度学习,基于百度飞桨 PaddleSeg 图像分割套件开发,开展高效的人工智能辅助检测算法研究,对冲击类损伤进行智能检测与评估。

1 试验设计

1.1 试件设计

试件采用碳纤维增强的环氧树脂基单向带预浸料制作,经自动铺丝和热压罐固化工艺制作成复合材料层压板结构。铺层为对称铺层,试件参数分别为:12 层,厚度约 1.8 mm;18 层,厚度约 3.3 mm;24 层,厚度约 4.3 mm;36 层,厚度约 6.5 mm;48 层,厚度约 8.7 mm。

1.2 冲击试验

按照 ASTM D 7136《测量纤维增强聚合物基体复合材料落锤冲击损伤的标准试验方法》的试验方法,采用 Ceast9350 型落锤冲击试验机在常温条

件下引入 BVID(勉强可见冲击损伤)。试验机冲头为半球形,直径为 (16 ± 0.1) mm,冲头质量为 (5.5 ± 0.25) kg,冲击区域为试件表面几何中心。冲击能量的选择依据为:冲击后立即测量凹坑深度为 (1.0 ± 0.1) mm 或 $1/4$ 板厚时对应的冲击能量,将其与 35 J 进行比较,取小值。

1.3 超声 C 扫描检测

利用全自动超声 C 扫描系统对试件进行喷水法穿透 C 扫描检测,探头频率为 5 MHz,设备水平线性误差小于 0.4%FSW(全屏幕宽度),垂直线性误差小于 1%FSH(全屏幕高度)。

2 冲击损伤检测与分析

2.1 不同厚度试件冲击损伤形貌

随着单向带层数的增加(10 层增加至 44 层),碳纤维增强树脂基复合材料冲击损伤形貌发生明显变化,C 扫描图像如图 1 所示。可将冲击损伤形貌分为 A,B,C,D 等 4 类。A 类为:10~16 层,冲击面集中损伤面积小,但冲击背面出现 45° 方向长为 100 mm 级别的开裂损伤。B 类为:18 层,冲击损伤的 C 扫描图像呈现不规则开裂形状,包含沿 $0^\circ/90^\circ$ 方向和 45° 方向的损伤扩展,45°开裂损伤集中在冲击背面。C 类为:24 层,冲击损伤基本为圆形,沿 $0^\circ/90^\circ$ 方向有较短开裂。D 类为:36~44 层,无其他方向开裂,无冲击背面损伤,冲击损伤 C 扫描图像为圆形。

2.2 智能检测和评估

目前, U-Net 网络在生物医学细胞影像图像分

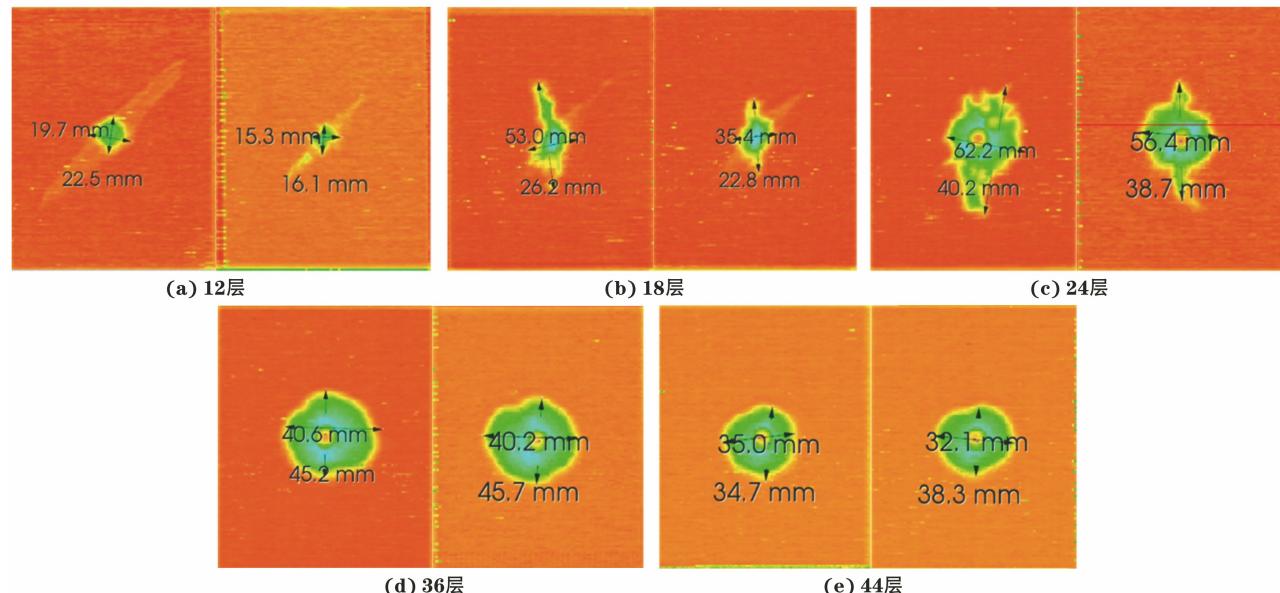


图 1 12~44 层厚度试件冲击损伤的 C 扫描图像

割领域得到了广泛应用。鉴于飞机典型结构冲击类损伤 C 扫描图像与生物医学细胞边界具有一定的相似性, 提出基于 U-Net 开发的 U²-Net 深度学习网络对飞机典型结构冲击类损伤的 C 扫描图像进行分割, 模拟专业技术人员对超声图像进行标注与评估, 实现自动化与智能化的飞机典型结构冲击类损伤检测与评估。

2.2.1 构建训练数据集

为通过神经网络实现缺陷图像的分割, 需人工构建一定量的缺陷-标注图像数据集, 神经网络模型将在该数据集上进行学习, 最终生成能够实现飞机典型结构冲击类损伤 C 扫描图像分割的网络模型。使用 Labelme 图像标注工具生成定制化的缺陷-标注图像数据集, 该数据集的制作由具备无损检测证书的专业技术人员完成, 保证了该数据集的专业性和有效性。冲击类损伤 C 扫描图像标注示例如图 2 所示。

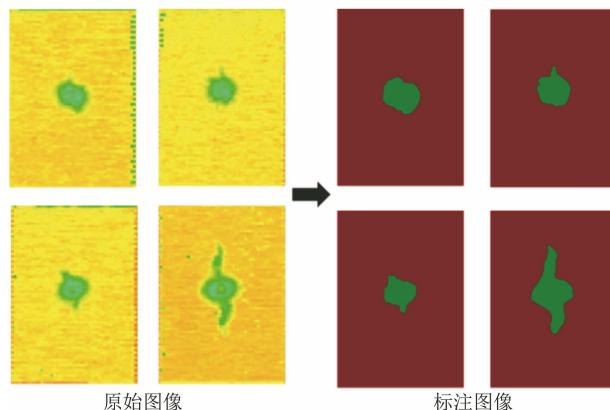


图 2 冲击类损伤 C 扫描图像标注示例

2.2.2 训练数据增强

目前航空复合材料冲击损伤样本较少, 从而导致训练出来的模型泛化能力较差。为解决这一问题, 根据实际检测过程中同一缺陷检测图像可能出现的潜在可能性, 使用随机左右翻转、随机上下翻转、随机长宽比变换、随机旋转变换、随机颜色空间扰动等 6 种数据增强策略对训练数据进行数据增强(见图 3), 将数据集扩充到 1 200 个数据, 随机抽取其中 1 000 个数据构成训练集, 其余 200 个构成测试集。这样不仅丰富了缺陷-标注数据集, 也避免了模型出现过拟合现象, 增强模型的泛化能力。

2.2.3 基于 U²-Net 的深度学习网络构建

QIN 等^[5]在 2020 年提出了一种基于 U-Net 网络的专门针对显著性目标检测的卷积神经网络架构 U²-Net, 在显著性目标检测任务中, 其以轻量级的网络架构和优异的图像分割性能取得了不错的效

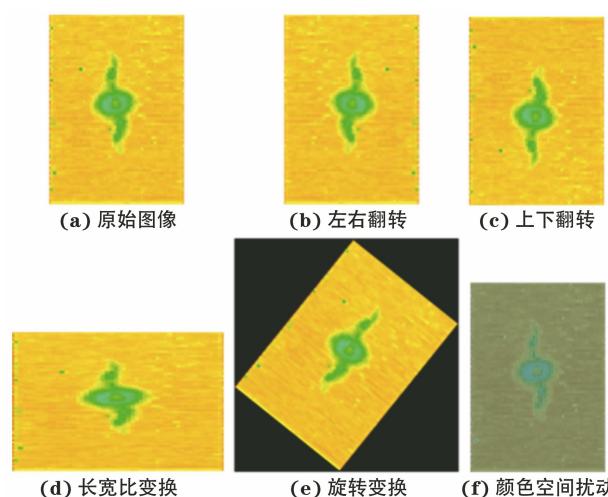


图 3 冲击类损伤 C 扫描图像数据增强示例

果。U²-Net 网络在一个大的 U-Net 网络中嵌套了小的 U-Net 网络, 整个网络结构宏观来看仍是标准的 encoder-decoder 网络。其与 U-Net 网络主要的不同就是设计了一种残差 U 型块(RSU)来替换原 U-Net 网络中的卷积层, 使得 U²-Net 网络具有较 U-Net 更好的多尺度融合能力, 对飞机典型结构冲击类损伤中出现的劈丝等长宽比较大的缺陷图像有更好的分类能力。同时考虑到飞机典型结构冲击类损伤检测与评估也是一种显著性目标检测任务, 因此采用 PaddleSeg 套件构建了基于 U²-Net 神经网络结构, 用于飞机典型结构冲击类损伤检测与评估。

RSU 也是一个 U 型网络, 由编码器和解码器构成, 其结构如图 4 所示(以 RSU-7 为例, H 为图片高度; W 为图片宽度; C_{in} 为输入通道数; C_{out} 为输出通道数; M 为图片尺寸; Addition 为图片叠加; d 为膨胀卷积系数; BN 为批归一化)^[6], 左半部分为编码器, 由 3×3 卷积网络进行下采样连接得到不同视野下的多尺度特性信息; 右半部分为解码器, 由 3×3 反卷积层进行上采样连接, 将不同视野下的特征信息编码为高分辨率的特征图像, 左右两边通过跳层连接补充因采样造成的特征缺失。U²-Net 网络由 RSU-7, RSU-6, RSU-5, RSU-4 和 RSU-4F(数字代表 RSU 网络深度)等 5 种残差 U 型块构成。

整个 U²-Net 网络通过显著特征融合模块, 采用 3×3 的卷积层将 6 个不同层级的预测概率图融合为黑白特征图像, 然后使用双线性插值的方法将这些图像拼接还原为原图像大小, 最后通过 Sigmoid 激活函数得到最终预测图片。

使用百度飞桨 PaddleSeg 图像分割套件快速搭建并配置 U²-Net 网络, 在飞机典型结构冲击类损伤

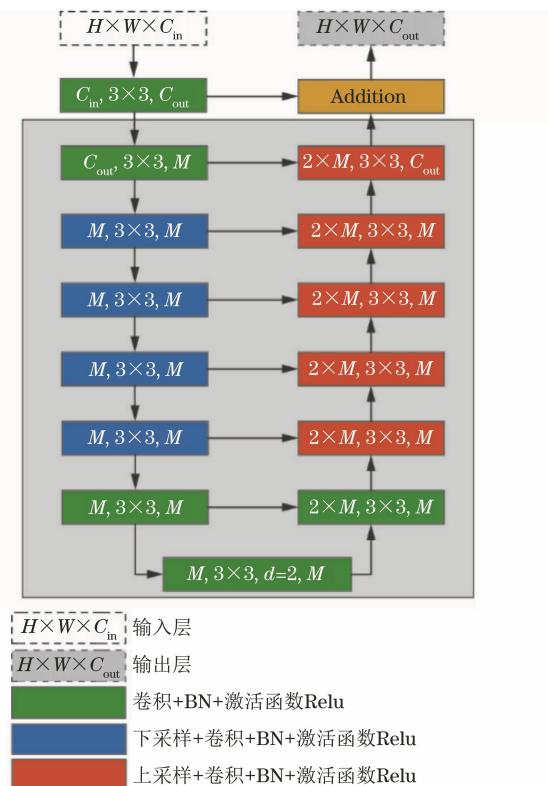


图 4 RSU 网络结构示意(以 RSU-7 为例)

检测缺陷-标注数据集中完成模型的训练, 取得了良

好的泛化效果。该网络针对较大长宽比的劈丝损伤缺陷也具有良好的检测与评估能力, 智能评估交并比达到 92.3%。神经网络模型预测示例如图 5 所示。

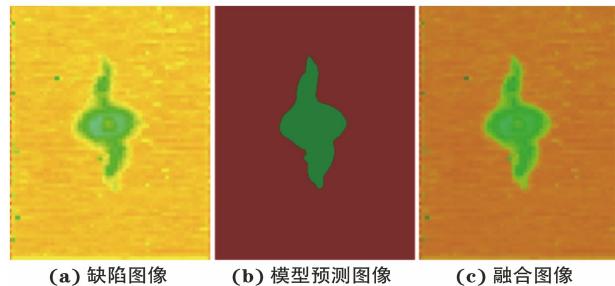


图 5 神经网络模型预测示例

2.2.4 预测数据处理

飞机典型结构冲击类损伤缺陷通过训练完成的神经网络模型后可得到该缺陷的图像, 使用二值图像处理函数获得缺陷边界上的点集, 并遍历点集获得缺陷轮廓上最远端的两点坐标 P_1 和 P_2 , 依据这两点坐标获得该遍历点集中垂直于这两点连线的最大距离及该点坐标, 后续利用图像处理函数在原始图像上生成缺陷轮廓、该轮廓面积及最大长度和垂直长度方向的最大宽度。智能无损检测工具工作流程如图 6 所示。

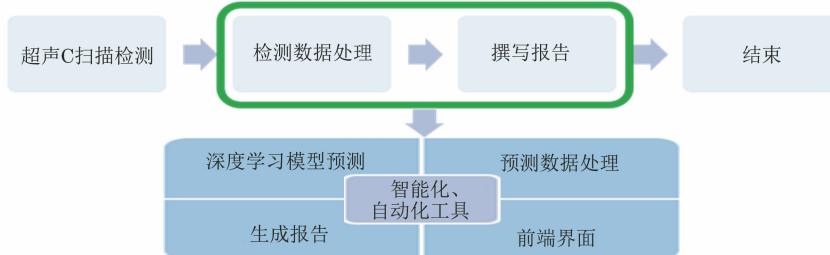


图 6 智能无损检测工具工作流程

智能无损检测工具界面(部分代码、界面、自动生成报告截图)如图 7 所示, 该工具可实现复合材料

冲击类损伤位置、尺寸的检测与标注, 并依据标注后的图片自动生成检测报告。冲击损伤精准检测与评

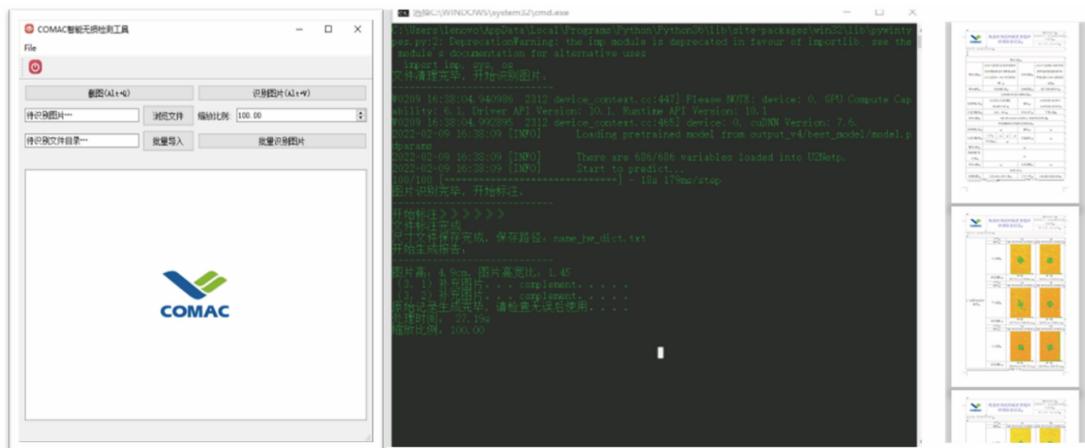


图 7 智能无损检测工具界面(部分代码、界面、自动生成报告截图)

估结果示例如图 8 所示。该工具对圆形、近圆形等相对规则形状以及不规则形状的冲击损伤, 都能进行准确标识, 同时也能识别图形的精准边界并计算不规则图形的精确面积, 实现冲击类损伤的精准检测与评估。

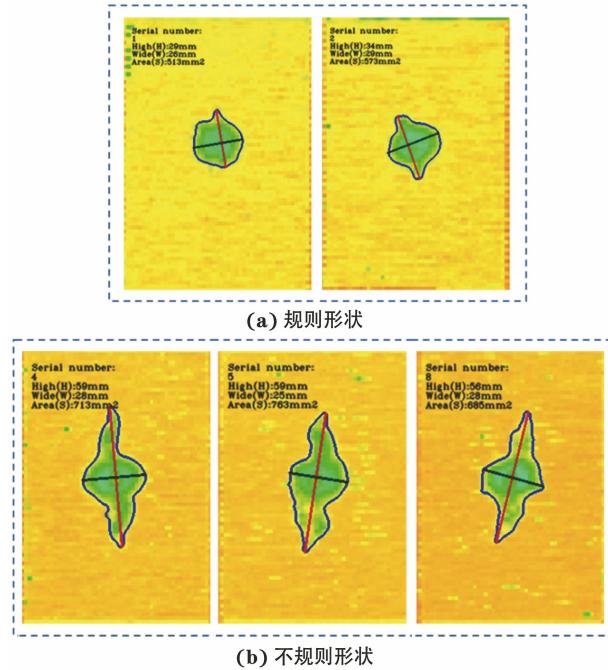


图 8 冲击损伤精准检测与评估结果示例

2.3 人工评估与智能检测工具评估结果比对

通过智能无损检测工具可实现飞机典型结构冲击类损伤的智能检测与评估。该工具目前已检测样本 1 400 余件, 检测精度可达到复合材料缺陷检测要求, 智能评估交并比达到 92.3%。人工识别速度约 $15 \text{ s} \cdot \text{个}^{-1}$, 检测工具识别速度约 $0.18 \sim 0.21 \text{ s} \cdot \text{个}^{-1}$, 效率提升了 98%。

3 结语

以飞机碳纤维增强复合材料典型结构的低能量冲击损伤为切入点, 根据无损检测缺陷评估需求, 开展冲击损伤类型及特征研究; 构建航空复合材料冲击损伤专业检测人员标注数据集, 为航空典型损伤无损检测+人工智能融合技术应用提供数据支撑; 基于百度飞桨 PaddleSeg 图像分割套件, 对超声图像进行数据增强, 训练典型航空复合材料结构超声冲击损伤目标检测模型, 开发出高效的人工智能辅助检测算法工具, 实现了冲击类损伤的智能检测和智能评估。

参考文献:

- [1] 宁荣昌. 复合材料冲击损伤问题的研究现状[J]. 玻璃钢/复合材料, 1992(6):35-40, 34.
- [2] WYRICK D A, ADAMS D F. Residual strength of a carbon/epoxy composite material subjected to repeated impact[J]. Journal of Composite Materials, 1988, 22(8):749-765.
- [3] CHANGDUK K, HYUNBUM P. Study on damage evaluation of composite structure after impact damage and quasi-static indentation damage[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2010, 4(9):83-87.
- [4] 张风翻. 树脂增韧及韧性复合材料[J]. 材料工程, 1995, 23(5):3-6.
- [5] QIN X, ZHANG Z, HUANG C, et al. U2-Net: Going deeper with nested U-structure for salient object detection [J]. Pattern Recognition, 2020, 106: 107404.
- [6] 陈其浩, 孙林, 张倩. 基于改进 U²-Net 的透明件划痕检测方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2):620-627.

欢迎网上投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告