DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2025.03.023

基于 CFRP-DDRCNN 的 CFRP 缺陷检测方法*

章栩苓1,周正东1,毛 玲1,张灵维1,魏士松1,3,盛 涛2,郑金华2

(1.南京航空航天大学航空航天结构力学及控制全国重点实验室 南京,210016)

(2.上海复合材料科技有限公司技术发展部 上海,201112)

(3.上海航天精密机械研究所 上海,201600)

摘要 针对碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer,简称 CFRP)缺陷检测通常由人工进行,存在检测 效率低和漏检等问题,以掩码区域卷积神经网络(mask region based convolution nerual network,简称 Mask R-CNN) 为基础,提出了一种新的碳纤维增强复合材料缺陷检测网络(carbon fiber reinforced polymer defect detect region based convolutional neural network,简称 CFRP-DDRCNN)。首先,该网络前端设置了图像裁剪和背景去除模块 (background removal module,简称 BRM),以提升网络的缺陷检测效率和精度;其次,引入分割图像数据集,将其和 原图像数据集一起进行网络训练,以提高网络的缺陷检测精度;然后,引入注意力机制,提高网络的缺陷特征提取能 力;最后,通过缺陷尺寸聚类对锚框参数进行优化,以提高缺陷检测精度。实验结果表明,所提出的 CFRP-DDRCNN具有良好的 CFRP 缺陷检测性能,能有效提高 CFRP 缺陷的检测精度,与 Mask R-CNN 相比, CFRP-DDRCNN使 CFRP 缺陷检测的平均精准度提高了 87.74%。

关键词 碳纤维增强复合材料;掩码区域卷积神经网络;图像分割;碳纤维增强复合材料缺陷检测网络;缺陷检测 中图分类号 TP391;TH140

引 言

碳纤维增强复合材料凭借重量轻、强度大和热力学性能高等特点^[13],广泛用于制造大型飞机的二级结构^[4]。然而,复合材料内部易损伤,致使其机械性能恶化^[5],其成型过程及服役条件复杂,制造工艺和运输等都会造成复合材料表面或者内部产生微小的形变或缺陷,这些形变或缺陷随着使用时间的增长,会产生较大的形变或导致材料断裂,从而造成灾难性的后果^[6]。

常见的复合材料无损检测方法主要包括超声检测法^[7]、红外热波检测法^[8]和X射线检测法等^[9]。超声检测对于小而薄的零部件难以检测,且检测效率较低^[10]。红外热波检测较适合表面裂纹、脱粘等缺陷,但检测深度较浅,很难发现内部缺陷^[11]。X射线检测利用有缺陷和无缺陷部位对X射线的吸收差异进行检测,能较好地解决材料内部密度分布不均的问题,可用于检测大部分的缺陷类型^[12]。相比于电磁检测,X射线能反映出缺陷的大小和分布^[13],检测较快,效率较高。上述无损检测方法可以提供CFRP缺陷的信息图像,但缺陷或可疑位置的检测

和定位通常需要人工处理,工作量大、效率低,难以 保证检测结果的可靠性。因此,亟需自动且准确可 靠的方法对CFRP缺陷进行检测。

近年来,机器学习在图像处理和计算机视觉等 领域表现出巨大潜力,使其在缺陷分类和检测领域 的应用成为可能^[14]。传统的机器学习需要人工提取 特征,效率低的同时准确率也难以保障,而卷积神经 网络自动提取图像特征、不需要人为辅助的特点使 其成为深度学习最常用的算法之一。Dong等^[15]构 建了不同缺陷的CFRP零部件热图数据集,提出了 一种三维卷积神经网络模型,将空间和时间卷积滤 波器和独立的批量归一化作为一个统一的框架来处 理热图像序列,并进行内部缺陷检测和深度估计。 Saeed 等^[16]提出了一种组合式的神经网络,通过卷 积神经网络从CFRP的热图中自动检测缺陷,再结 合深度前馈神经网络来估计缺陷深度,能够快速检 测并量化缺陷。

笔者以Mask R-CNN^[17]为基础,提出了一种新颖的CFRP-DDRCNN,并对其性能进行分析。为了提升检测效率,在网络前端引入了图像裁剪和

^{*} 上海航天科技创新基金资助项目(SAST 2019-121);江苏省高校优势学科建设工程资助项目(PAPD) 收稿日期:2022-03-29;修回日期:2022-11-27

BRM。为了丰富图像特征并提高检测性能,引入了 分割图像数据集,和原数据集共同训练网络。为了 进一步提高检测精度,在特征金字塔网络(feature pyramid network,简称FPN)中引入了注意力机制, 并在区域建议网络(region proposal network,简称 RPN)中对锚框参数进行了优化。

1 数据集预处理

1.1 CFRP缺陷类型及其特点

本研究所用的CFRPX射线图像数据集来自上 海复合材料科技有限公司,利用X射线对CFRP零 件进行成像得到。该CFRP数据集包括聚胶、夹杂、 裂纹、气孔和疏松5种缺陷类型的图像。这些缺陷 形状不一,尺寸较小,与背景的灰度值相近,即使已 知缺陷的位置,凭肉眼也很难分辨。为了提高检测 精度,笔者运用图像增强突出缺陷特征,运用图像扩 增扩充数据集并均衡类间数据。

1.2 图像扩增

在深度学习领域,网络模型需要学习的参数越 多,训练所需的数据也会增加。因此,需要大量的样 本训练才能达到较好的泛化效果。由于CFRP缺陷 的样本较少,笔者通过图像扩增来扩充样本数量并 均衡类间数据量。原始样本总数为164,其中,裂 纹、夹杂、疏松、聚胶和气孔缺陷样本数量分别为 54、94、11、2和3。利用传统的图像扩增方法对数据 集进行扩充,包括添加噪声、改变图像明暗度、翻转、 旋转90°和180°。采用生成对抗网络对样本进一步 扩增,对扩增后的数据集采用自助法进行划分,得到 训练集、验证集和测试集,样本数量分别为1395、 174和174。

2 CFRP-DDRCNN

Mask R-CNN 是一个实例分割网络^[17],其结合 了快速区域卷积神经网络和全卷积网络的特点并在 此基础上进行了改进。图1为 Mask R-CNN 结 构图。



针对 CFRP 数据集的特点, 笔者以 Mask R-CNN为基础,提出了一种新的CFRP-DDRCNN, 图 2 为 CFRP-DDRCNN 结构图,引入了4 种优化措 施。为了提升网络的缺陷检测效率和检测精度,在 网络前端设置了图像裁剪和BRM。这2个模块可 将图像的背景与目标进行分离,并将目标区域裁剪 为图像块,筛选出存在缺陷的图像块送入网络,提高 网络的检测效率。利用边缘检测算法 Prewitt 和大 律法Otsu对图像中的CFRP缺陷进行分割与融合, 以提高缺陷分割性能,将分割图像与原图像一起参 与模型训练,在丰富图像特征的同时也突出了缺陷 位置,有利于提高网络模型对缺陷区域的检测能 力。为了提高网络对图像中缺陷部位的注意力,在 FPN 中加入了卷积块注意力模块(convolutional block attention module, 简称 CBAM), 使网络在缺 陷位置更加集中。为了进一步提高网络的检测精 度,对RPN进行了锚框优化,通过对缺陷尺寸进行 K-means聚类来优化锚框参数。对于裁剪过程中出 现的分离缺陷情况,在缺陷检测完成后将分离的缺 陷按照图像编号进行合并。



Fig.2 The structure of CFRP-DDRCNN

3 实验与分析

3.1 提取特征实验与分析

为了验证分割图像输入网络后的特征提取效 果,比较了原图像和融合2种分割方法后的图像在 网络ResNet中产生的特征图,对ResNet的C₄和C₅ 层进行可视化。由于层数较深,每一张特征图中提 取的信息较少,故对当前层中的所有特征图进行了 叠加,输出叠加后的结果。原图像和分割图像在 ResNet中的特征图如图3所示。



Fig.3 Feature maps of original and segmentation images in ResNet

从图3可以看出,随着网络层数的加深,相比于 原图像存在背景干扰的情况,网络在缺陷分割图像 上提取到的特征更能集中于缺陷本身。另外,缺陷 分割图像中的目标区域与背景之间的界限明显,输 入分割图像得到的特征图目标边缘比输入原图像得 到的特征图目标边缘更加清晰,有利于目标检测。

3.2 缺陷检测实验与分析

运用软件 labelme 对缺陷图像进行标注,并将 Mask R-CNN 在 COCO 数据集上训练得到的权重 迁移到本模型中,以提高网络的训练效果。网络的 学习率设为 0.000 1,动量为 0.9,权重衰减系数为 0.000 1,训练轮数为 200,批尺寸为 1。检测部分的 评价指标为平均精准度(average precision,简称 AP)和查准率-召回率(precision-recall,简称 P-R)曲 线。P-R曲线的横轴代表召回率,纵轴代表查准率。 根据网络的预测概率值对样本进行排序,概率值最 高的正例排在最前面,概率值最低的正例排在最后 面,按此顺序把各个样本的概率作为阈值,计算在每 个阈值下的召回率和查准率,把这2项作为P-R曲线的横轴和纵轴。P-R曲线越靠近右上方,表明模型的性能越好。AP值通过对P-R曲线求积分得到,即

$$AP = \int_{0}^{1} p(R) dR$$
 (2)

其中:R为召回率;p(R)是以召回率为自变量、查准 率为因变量的函数。

笔者利用K-means进行锚框尺寸优化,得到的 缺陷尺寸主要集中在(27,27)、(54,54)、(74,131)、 (119,48)和(214,86)。对于CFRPX射线数据集, 笔者选择[27,54,80,120,210]作为锚框尺寸,[0.5, 1,3]作为锚框的长宽比。网络训练时,不同优化措 施下的网络损失值随着训练轮数的变化趋势如图4 所示。其中:缺陷分割1采用Prewitt边缘分割方 法;缺陷分割2采用Otsu多阈值分割方法;缺陷分割 融合为融合Prewitt和Otsu的多阈值分割方法。





Fig.4 The training loss varies with epochs with different optimization methods

根据召回率和查准率得到的P-R曲线如图5 所示。可以看出,相比于Mask R-CNN^[17],加入优化 措施后得到的P-R曲线都往右上角偏移,能得到更 好的检测效果。加入分割图与原图像共同进行网络



0.796

训练,能够显著提升网络的缺陷检测精度。为了进 一步比较各个优化算法对网络性能的提升效果,进 行了消融实验,分别计算 AP 值。不同优化算法下的 AP 值如表1所示。其中, √表示运用了该算法。

Tab.1 Statistical of AP under different optimization						
BRM	CBAM	Prewitt 边缘分割	Otsu多阈值分割	分割图像融合	锚框优化	AP值
—			—	—	—	0.424
\checkmark			—	—	—	0.534
\checkmark	\checkmark	—	—	—	_	0.588
\checkmark	\checkmark	\checkmark	—	—	_	0.709
\checkmark	\checkmark	_	\checkmark	—		0.590
\checkmark	\checkmark		—	\checkmark	—	0.759

表 1 不同优化算法下的 AP 值 Tab 1 Statistical of AB under different entimization

表1中,第1行表示未加入任何优化算法的 Mask R-CNN 网络,其他各行表示加入了勾选的网 络优化算法,最后1行表示加入了4种优化算法的 CFRP-DDRCNN。可以看出,每增加一种优化算 法,AP值就会有一定的提升,表明每一种优化算法 都能提高缺陷的检测精度。Mask R-CNN的AP值 为 0.424, 而 CFRP-DDRCNN 的 AP 值达到 0.796。 相比于 Mask R-CNN, CFRP-DDRCNN的 AP 值提 高了 87.74%。加入 CBAM 得到的 AP 值比 Mask R-CNN提高了38.68%。针对不同的图像分割方 法,融合Prewitt边缘分割和Otsu多阈值分割方法 得到的分割图像送入网络获得的AP值达到0.759, 相比于单独使用Prewitt边缘分割和Otsu多阈值分 割得到的AP值分别提高了7.05%和28.64%,相比 于只用原始图像送入网络获得的AP值提高了 29.08%。对于Prewitt边缘分割和Otsu多阈值分割 2种方法,单独使用Otsu多阈值分割方法和单独使 用Prewitt边缘分割方法送入网络能获得更高的AP 值。加入锚框优化比未加入锚框优化方法得到的 AP值提高了4.87%。同时, Mask R-CNN网络的单 张图像检测时间为1s,能有效满足实际应用需求。

4 结束语

笔者以实例分割网络 Mask R-CNN 为基础,通 过引入了图像裁剪、背景去除、图像分割、注意力机 制和锚框参数优化等技术,提出了一种新的 CFRP-DDRCNN。实验结果表明,CFRP-DDRCNN 对 CFRP缺陷检测的平均精准度达到 0.796。与 Mask R-CNN 相比,CFRP-DDRCNN 使 CFRP 缺陷检测 的平均精准度提高了 87.74%,有效提升了缺陷检测 精度。引入的网络优化算法在一定程度上提高了 CFRP 缺陷检测性能,引入分割图像数据集进行网 络训练,能显著提升 CFRP 缺陷检测精度。

- [1] 齐姝婧,韩勇锡,李梦涵,等.碳纤维复合材料的应用领域及预测[J].化学工业,2021,39(2):33-35,47.
 QI Shujing, HAN Yongxi, LI Menghan, et al. Application and prediction of carbon fiber composites[J]. Chemical Industry, 2021, 39(2):33-35,47. (in Chinese)
- [2] SHI Z Y, CUI P, LI X. A review on research progress of machining technologies of carbon fiber-reinforced polymer and aramid fiber-reinforced polymer[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 2019, 233 (13) : 4508-4520.
- [3] 邱超,马心旗,王亚震,等.薄层碳纤维增强树脂基复合材料研究与应用进展[J].航空制造技术,2021, 64(14):22-31.

QIU Chao, MA Xinqi, WANG Yazhen, et al. Research and application progresses of thin-ply carbon fiber reinforced polymer matrix composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(14): 22-31. (in Chinese)

[4] 王彝.复合材料的应用与展望[J].中国新技术新产品,2018(6):40-41.
WANG Ben. Application and prospect of composite materials [J]. China New Technologies and New Products, 2018(6):40-41. (in Chinese)

- [5] POELMAN G, HEDAYSTRASA S, SEGERS J, et al. Optical infrared thermography of CFRP with artificial defects: performance of various post-processing techniques[J]. Proceedings, 2018, 2(8): 457.
- [6] 袁鑫超.碳纤维复合材料多层内部结构及缺陷检测方 法研究[D].成都:电子科技大学,2018.
- [7] DERUSOVA D, VAVILOV V, SFARRA S, et al. Ultrasonic spectroscopic analysis of impact damage in composites by using laser vibrometry [J]. Composite Structures, 2019, 211: 221-228.
- [8] 盛涛,江海军,郑金华,等.锁相红外热波法在碳纤维 夹层结构中的应用[J].红外技术,2019,41(5):

489-492.

SHENG Tao, JIANG Haijun, ZHENG Jinhua, et al. Application of phase-locked infrared thermal wave technology in carbon fiber sandwich structures [J]. Infrared Technology, 2019, 41(5): 489-492. (in Chinese)

[9] 周正干,孙广开,李洋.先进无损检测技术在复合材 料缺陷检测中的应用[J].航空制造技术,2016(4): 28-35.

ZHOU Zhenggan, SUN Guangkai, LI Yang. Application of advanced nondestructive testing technologies for the detection of defects in composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(4): 28-35. (in Chinese)

[10] 白艳,董楹.飞机复合材料的先进无损检测技术[J]. 商品与质量,2020(50):160.
BAI Yan, DONG Ying. Advanced nondestructive testing technology for aircraft composites[J]. The Merchandise and Quality, 2020(50):160. (in Chinese)

[11] 郭德伟,马其华.CFRP 薄壁管红外热成像和CT 检测的研究分析[J].智能计算机与应用,2020,10(3):294-298.

GUO Dewei, MA Qihua. Research and analysis of infrared thermography and CT detection of thin-walled CFRP tube[J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(3): 294-298. (in Chinese)

- [12] 刘元林,赵国金,高帅帅,等.碳纤维复合材料缺陷无 损检测方法研究[J].煤矿机械,2017,38(12):64-66.
 LIU Yuanlin, ZHAO Guojin, GAO Shuaishuai, et al. Research of nondestructive examination of carbon fiber reinforced plastics [J]. Coal Mine Machinery, 2017, 38(12):64-66. (in Chinese)
- [13] SCHUMACHER D, MEYENDORF N, HAKIM I, et al. Defect recognition in CFRP components using various NDT methods within a smart manufacturing

process[C]//AIP Conference Proceedings. [S.l.]: AIP, 1949: 020024.

- [14] 张涛,刘玉婷,杨亚宁,等.基于机器视觉的表面缺陷 检测研究综述[J].科学技术与工程,2020,20(35): 14366-14376.
 ZHANG Tao, LIU Yuting, YANG Yaning, et al. Review of surface defect detection based on machine vision
 [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(35): 14366-14376. (in Chinese)
- [15] DONG Y F, XIA C J, YANG J X, et al. Spatiotemporal 3-D residual networks for simultaneous detection and depth estimation of CFRP subsurface defects in lock-in thermography[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(4): 2571-2581.
- [16] SAEED N, KING N, SAID Z, et al. Automatic defects detection in CFRP thermograms, using convolutional neural networks and transfer learning [J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 102: 103048.
- [17] HE K M, GKIOXARI G, DOLLÁR P, et al. Mask R-CNN [C] //2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice, Italy: IEEE, 2017: 2980-2988.



第一作者简介:章栩苓,女,1997年12 月生,硕士。主要研究方向为深度学习。 E-mail: 1261312736@qq.com

通信作者简介:周正东,男,1969年6月 生,博士、副教授。主要研究方向为信 号与图像处理、深度学习、脑机接口以 及计算机辅助制造等。 E-mail: zzd_msc@nuaa.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学和全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年 180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。