

航空复合材料典型缺陷数据库建设

原赛男,李凯铭,于 闯

(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:对复合材料全生命周期的缺陷形成机理、缺陷信号模型及对应的可靠检测技术进行研究,构建基于国产大飞机、面向航空全产业链开放的复合材料体系缺陷数据库。该缺陷数据库可提高人员检测的规范性和一致性,也可为航空复合材料缺陷智能辅助识别与评估技术提供数据基础,推动航空复合材料检测的自动化和智能化发展。

关键词:航空复合材料;缺陷数据库;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(2022)05-0006-05

Construction of aeronautical composite defect database

YUAN Sainan, LI Kaiming, YU Chuang

(COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China)

Abstract: The defect formation mechanism, defect signal model and corresponding reliable detection technology of composite materials in their whole life cycle are studied, and the defect database of composite materials system based on domestic large aircraft and open to the whole aviation industry chain is constructed. The defect database can not only improve the standardization and consistency of personnel detection, but also provide data basis for intelligent aided identification and evaluation technology of aviation composite defects, and promote the automation and intelligent development of aviation composite detection.

Key words: aeronautical composite; defect database; intelligent inspection and evaluation

当今,复合材料以其优良的力学性能和物理性能在航空器中得到了广泛使用。目前,波音公司 B787 客机和空客公司 A350 客机所使用的复合材料质量占比高达 50% 和 52%^[1-2],大多数用作初级教练机的单发飞机(如 SR20 和 DA40 等)及用作中级教练机的双发飞机(如 DA42NG 等),其结构都已广泛使用复合材料。

航空复合材料结构复杂,其在设计、生产制造和服役全生命周期中都有比传统金属材料更为严格的缺陷控制要求。目前航空复合材料结构件要求 100% 的检测率,主要以人工检测为主。检测方案的制定和检测过程实施均对检测人员的资质和

专业性要求较高;人工缺陷评定过程耗时长且易出现失误,容易受工艺参数精度或人为因素影响;复合材料结构整体制备时间较长,质量检测成本高,检测结果稳定性不高。因此,如何快速、准确地检出制造和服役过程中的缺陷和损伤,进而采取措施稳定工艺、降低成本、推进航空器持续适航尤为重要。

随着计算机及网络技术的发展,机器视觉技术、5G 技术在航空复合材料检测中的应用研究及相关发展设备研发成为了行业热点,以机器视觉技术应用为代表的新型航空复合材料检测设备研发成为重要方向。目前,国产大飞机的复合材料批生产应用处于起步阶段,急需对批生产过程的制造缺陷和服役缺陷进行缺陷经验积累和数字化提炼,同时需通过机器视觉的算法开发和智能化检测系统的搭建,实现缺陷的自动化智能辅助评估来逐步替换人工检测,提高检测效率和检测质

收稿日期: 2021-09-08
基金项目: 北京市科技计划项目(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

量的一致性。文章主要对复合材料全生命周期典型缺陷信号及对应的可靠检测技术进行分析，构建基于国产大飞机、面向航空全产业链开放的复合材料体系缺陷数据库。基于该缺陷数据库，可开发航空复合材料机器视觉算法和缺陷智能辅助识别算法，探索基于机器视觉的复合材料结构件缺陷诊断系统建设，提高检测一致性、生产效率和智能化程度，推动航空复合材料检测的自动化和智能化发展。

1 航空复合材料缺陷分类与编码

针对国际和国内复合材料缺陷图谱库空缺的现状，建立了一套科学、合理且相对灵活的航空复合材料缺陷编码体系，规定了复合材料缺陷图谱数据库中含缺陷样本的代码结构、编码方法和编码要求。

航空复合材料缺陷数据库样本代码共分 4 层，各层次的意义如图 1 所示。

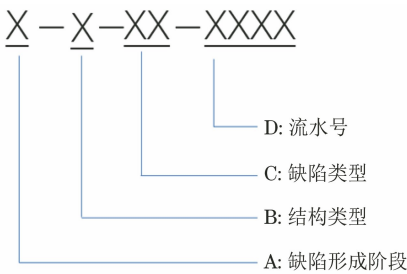


图 1 航空复合材料缺陷数据库代码结构

缺陷形成阶段代码用来标识样品中缺陷的形成阶段，如制造过程(M)或服役过程中(S)；结构类型代码用来标识复合材料零部件的材料结构，例如层压板结构(L)、泡沫夹层结构(F)、蜂窝夹层结构(H)、R 区结构(R)、其他结构(Q)；缺陷类型代码用来标识不同材料结构零部件的特有缺陷类型(见表 1)；4 位流水号用来区别标识同样阶段同样材料结构同样缺陷的不同物理个体，按 0001-9999 顺序编制。

表 1 层压板结构(L)缺陷类型代码表

代码	缺陷类型名称	说明
HH	表面划痕	裁纸刀等锋利器具划过零部件表面留下的一种宽度很窄的线状损伤，其宽度小于 0.15 mm 且宽度小于深度
PL	纤维劈裂	纤维劈裂有别于纤维断裂，主要指钻孔区域或者机械加工区域边缘的表面纤维分离或者纤维撕裂
FC	分层	层压板或夹层结构面板中铺层之间的材料分离。分层可能出现在层压板中的局部区域，也可能覆盖很大区域。在层压板固化过程或在随后使用过程的任何时刻中，都可能由于各种原因而出现分层
KX	孔隙	复合材料零件中的微小气体形成的密集缺陷
ZN	面内褶皱	主要指铺层内纤维弯曲，在该处材料的名义厚度无明显变化，但材料却形成了永久性的皱纹
ZW	面外褶皱	已固化零件的面外纤维变形，即厚度方向上的凸起与凹陷
JZ	异物夹杂(渣)	制造过程中无意带进制件中的杂质，如颗粒、芯片和薄膜等
DL	纤维断裂	复合材料在使用过程中，发生在表面或内部的纤维分离或者纤维撕裂
QQ	翘曲变形	局部层压板或夹层结构面板因固化或外部因素，造成工件外形定义的面与工装模具外形定义的面之间的偏差超出制造公差的一种缺陷
YJ	溢胶(胶瘤、富树脂)	在某(局部)区域树脂过量的一种缺陷，通常出现在圆角、台阶以及夹芯闭室的边缘
QJ	缺胶	在某(局部)区域树脂含量比结构件平均树脂含量低出较多的一种缺陷，如树脂未充分覆盖在纤维上
MJ	模具痕迹	模具破损、缺陷或异物等造成制件表面出现痕迹
AX	表面凹陷	压力垫表面凸起等情况导致零件表面凹陷超出规范要求 ^[3]
DM	打磨过度	后续打磨过程中发生超出规范要求等情况
CJ	冲击损伤	复合材料在冲击的作用下会产生纤维变形、断裂，树脂的塑性变形，复合板的分层、开裂和破碎等损伤 ^[4]
QT	其他	——

2 数据库建设

2.1 数据库构建规划

针对国产商用飞机复合材料体系、型号标准规范要求和航空复合材料检测场景需求，开展面向国产大飞机制造供应链和航空公司的航空复合材料体系缺陷数据库和检测机理模型相关技术研究，利用商飞 5G 云平台，通过“端、边结合”方式推进缺陷数据库的应用；在缺陷数据库的基础上，研究基于深度

学习的复合材料缺陷检测算法，探索基于机器视觉的复合材料结构缺陷智能检测系统开发与验证技术。缺陷数据库构建与应用路线如图 2 所示。

2.2 数据库架构

此数据库系统采用 B/S(浏览器/服务器)架构，由后台数据库管理系统和 Web 前端组成，主要实现了检测实例库、典型缺陷库和检测规范库 3 个数据库的添加、删除、更改和查询功能、用户权限管理和数据变更记录功能。检测实例库、典型缺陷库和检

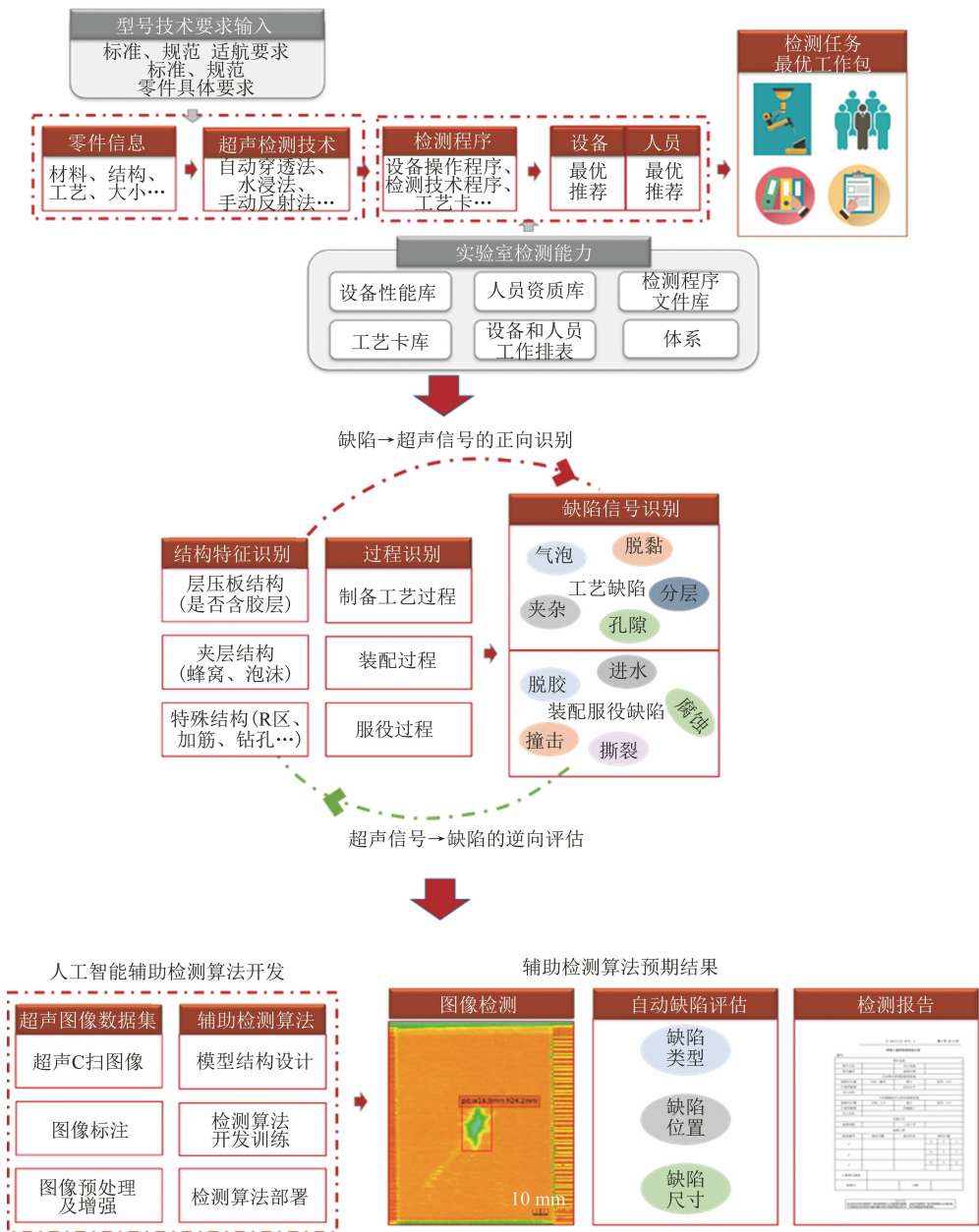


图 2 缺陷数据库构建与应用路线

测规范库是本数据库系统的核心,内部逻辑关系如图 3 所示。

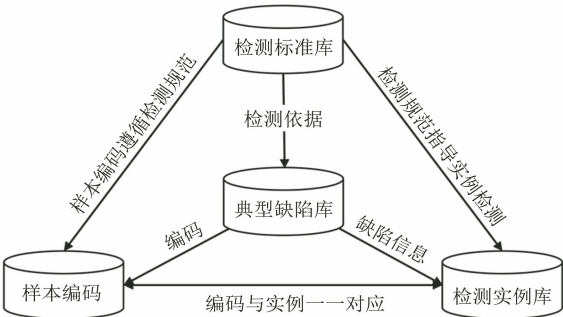


图 3 缺陷数据库内部逻辑关系

此数据库系统服务端采用的是 MySQL+Flask 技术方案。该技术方案一方面保证了数据库的功能,另一方面技术框架耦合性低,方便后续在此数据库系统的基础上进行二次开发及维护。前端采用的是 Bootstrap 框架,其具备简单灵活,可用于架构流行的用户界面和交互接口的 HTML、CSS、Javascript 工具集的特点,同样为后续开发打下了基础。

2.3 数据库功能

该航空复合材料缺陷数据库应包含检测规范库、典型缺陷库、检测实例库等,建设检测规范库,梳理国标、美标、行标、企标等无损检测技术的要

求,梳理零件信息(应用型号、材料、结构、工艺)、对应检测方法、检测技术、设备能力、人员资质匹配、检测程序文件、工艺卡,实现对标检测;建设典型缺陷库,识别复合材料结构无损检测典型缺陷信号特征;构建典型缺陷特征和缺陷图谱的正向关联模型,进一步为智能化缺陷评估提供依据。

目前缺陷数据库涵盖多种机型,涉及后机身前段、后机身后段、副翼、襟翼、垂平尾等多个部段,涵盖纤维增强树脂基复合材料层压板结构、蜂窝夹层结构、泡沫夹层结构、R 区结构等多种结构

类型以及分层、夹杂、脱黏、气孔、冲击损伤等缺陷类型,缺陷数据库综合看板(示例)如图 4 所示。数据库可查阅的信息标签如表 2 所示。缺陷数据库按照缺陷分类与编码进行管理,用户可通过信息标签分类查找、组合查询等多种方式获取所需缺陷标准;可通过左侧的分类查找或点击切换按钮后的组合查找和模糊查找快速获取所需的典型缺陷信息。检测实例库界面如图 5 所示。用户还可通过检测规范库来查阅航空复合材料典型缺陷的相关检测规范。

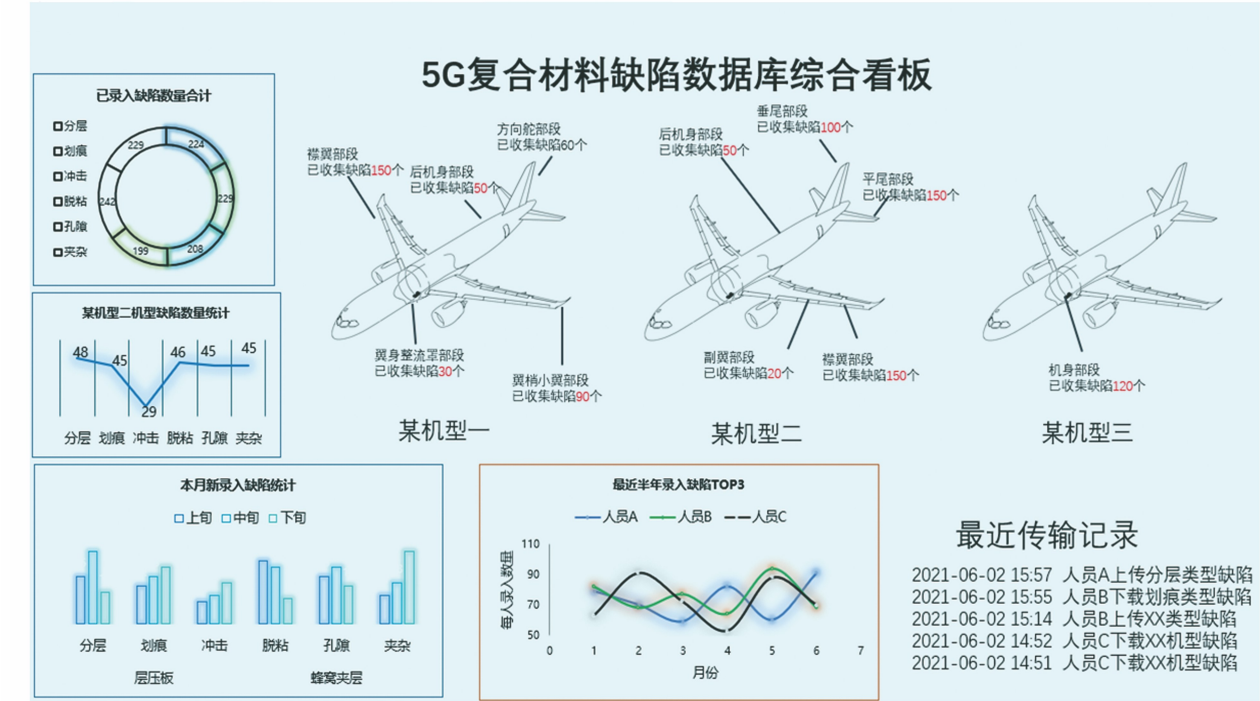


图 4 航空复合材料缺陷数据库综合看板(示例)

表 2 缺陷数据库可查阅的信息标签

序号	信息类别	详细信息	具体选项
1	工件基本情况	来源机型	详细描述
2		工件部段	后机身前中段、副翼、襟翼、垂尾、平尾等
3		工件结构类型	层压板、蜂窝夹层结构、泡沫夹层结构、R 区结构等
4	检测技术	检测方法	目视检测、超声检测、红外检测、射线检测、空气耦合检测、激光检测等
5		检测具体技术	与检测方法对应
6		设备	与检测方法对应(具体到设备型号)
7		检测关键参数	与检测方法对应
8	缺陷描述	检测人员	具体描述
9		缺陷产生阶段	生产制造过程、服役过程
10		缺陷类型	与缺陷类型代码对应
11		缺陷图片	各类缺陷图片及信号
12		缺陷位置	内部、外部、贯穿类
13		位置信息	具体描述
14	诊断	缺陷尺寸	具体描述
15		缺陷产生的原因	具体描述



图 5 检测实例库界面

3 数据库未来应用

(1) 构建航空复合材料检测缺陷数据库,为缺陷的智能检测和评估提供数据支撑。以国内航空复合材料应用需求为基础,梳理航空复合材料无损检测方法规范,建立航空复合材料缺陷分类编码管理系统,分析复合材料不同应用阶段的检测数据和典型缺陷图谱,建立检测标准库、缺陷数据库和案例分析库等,为机器学习算法开发,构建基于机器视觉的智能化检测和评估方案提供宝贵的素材;构建缺陷特征与缺陷图谱的正向对应模型,开展典型缺陷特征、典型结构性能与检测数据、缺陷图谱的关联模型研究,开展涵盖检测数据、缺陷图像集、关联模型等多维信息元素的航空复合材料体系缺陷数据图像存取技术研究,并完成相应数据集构建,为制造缺陷的在线控制和预防,以及智能检测和评估提供数据支撑。

(2) 基于航空复合材料缺陷数据库,开发基于深度学习的缺陷检测算法。定义缺陷检测算法架构,实现基于小样本的模型参数训练和面向端侧设备的模型压缩研究,构建基于深度学习的复合材料检测模型。结合航空复合材料缺陷样本种类多、难收集、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、难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,助推复合材料缺陷智能评估技术发展。

(3) 基于航空复合材料缺陷数据库和缺陷检测

算法,开发复合材料结构件缺陷诊断系统及适航验证。结合航空复合材料成型过程中的缺陷在线监测预警、成型后自动化检测和智能评估以及服役过程中损伤监测和快速维修等产品全生命周期应用场景需求,开发复合材料结构缺陷智能检测系统以及缺陷智能评估技术的适航验证,推动复合材料智能检测技术在航空领域的应用。

4 结语

基于国产大飞机,构建了面向航空全产业链开放的复合材料体系缺陷数据库,对复合材料全生命周期产生的缺陷类型、缺陷信号模型及对应的可靠检测技术进行统一提炼与构建。该缺陷数据库可提高人员检测的规范性和一致性,也可为航空复合材料缺陷智能辅助识别与评估技术提供数据基础,推动航空复合材料检测的自动化和智能化发展。

参考文献：

[1] 唐见茂. 航空航天复合材料发展现状及前景[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 352-359.

[2] 马立敏, 张嘉振, 岳广全, 等. 复合材料在新一代大型民用飞机中的应用[J]. 复合材料学报, 2015, 32(2): 317-322.

[3] 林明杰. 某大型飞机复合材料壁板的制造缺陷及工艺改进研究[J]. 材料开发与应用, 2020, 7(8): 102-103.

[4] 李国耀, 蔡忠龙, 段祝平, 等. 聚苯硫醚复合材料高速冲击破坏特征的微观分析[J]. 复合材料学报, 1996, 13(1): 1-8.