

飞机表面制造质量智能检测方法研究

张虎利 马崢翔 冯凌华 谢保红 郑文浩
陕西飞机工业有限责任公司 陕西 汉中 723213

摘要: 飞机表面制造质量对于飞机性能与安全至关重要。本文深入研究飞机表面制造质量智能检测方法, 首先剖析飞机表面常见的划痕、凹坑与凸起、涂层缺陷、缝隙不均匀等缺陷类型; 接着阐述智能检测系统的关键技术, 涵盖多传感器融合、缺陷特征提取与选择、校准与精度补偿以及自动化与智能化技术; 随后介绍由传感器模块、运动控制平台、数据采集与处理单元构成的硬件系统, 以及包含图像与信号处理算法、检测结果可视化软件、数据库管理系统的软件系统; 最后详述智能检测数据的预处理、特征提取与选择以及缺陷识别与分类模型等处理与分析方法, 旨在为提升飞机表面制造质量检测水平提供有效途径。

关键词: 飞机; 表面制造; 质量智能; 检测方法研究

引言: 在飞机制造领域, 表面质量直接影响飞机的空气动力性能、结构完整性和使用寿命等关键方面。传统的人工检测方式存在效率低、主观性强、精度有限等诸多弊端, 难以满足现代飞机制造高精度、高效率的质量要求。随着信息技术、传感器技术和人工智能技术的飞速发展, 飞机表面制造质量智能检测成为必然趋势。通过构建先进的智能检测系统, 综合运用多种关键技术, 能够实现对飞机表面缺陷的快速、准确识别和分类, 有效提高检测的可靠性和一致性, 为保障飞机的高质量制造和安全运行奠定坚实基础, 同时也推动着飞机制造产业向智能化、自动化方向迈进, 提升产业整体竞争力和发展水平。

1 飞机表面常见缺陷类型

1.1 表面划痕

表面划痕是飞机表面常见的缺陷形式。在制造环节, 如加工、搬运时与工具碰撞易产生划痕; 使用中, 与外物刮擦也会形成。其长度、深度和宽度不一, 方向随机。轻微划痕影响外观, 严重的会破坏表面平整度, 改变局部气流状态, 增加飞行阻力, 还可能成为腐蚀起始点, 降低飞机耐久性, 威胁飞行安全, 因此精准检测与修复至关重要。

1.2 凹坑与凸起

凹坑与凸起常出现在飞机表面。凹坑可能因撞击, 如飞行中遭鸟击、地面碰撞等造成, 形状不规则, 大小和深度各异。凸起则多源于材料或装配问题, 像焊接不良、部件安装不当。这些缺陷改变表面流线型, 扰乱气流, 削弱飞行性能, 同时在应力集中处易引发裂纹, 降低结构强度, 给飞机的安全飞行带来隐患, 检测时需准确识别其特征。

1.3 涂层缺陷

飞机表面涂层缺陷较为普遍。涂层脱落可能是附着不力欠佳, 受环境作用剥落; 起泡源于固化时溶剂挥发或受潮; 裂纹则因涂层性能与应力不匹配。涂层缺陷不仅使飞机外观受损, 更关键的是防护性降低, 加速金属腐蚀, 缩短使用寿命, 增加维护成本与难度, 对其检测关乎飞机长期可靠运行, 确保涂层质量意义重大。

1.4 缝隙不均匀

飞机表面部件拼接处易出现缝隙不均匀问题。制造中, 加工精度与装配工艺偏差会致缝隙宽窄不一。缝隙过宽, 杂质易侵入腐蚀内部, 且增大飞行阻力与油耗; 过窄则因温度、振动等产生摩擦挤压, 损伤结构, 影响连接强度与可靠性, 可能引发松动, 危及飞行安全, 故对缝隙的精确检测与控制极为必要^[1]。

2 飞机表面质量智能检测系统的关键技术

2.1 多传感器融合技术

多传感器融合技术是飞机表面质量智能检测系统的核心技术之一。飞机表面检测面临复杂多样的工况, 单一传感器难以全面准确地获取缺陷信息。通过融合机器视觉、激光测量、超声检测等多种传感器数据, 可充分发挥各传感器的优势, 实现信息互补。例如, 机器视觉擅长获取表面的二维图像信息, 能清晰呈现如划痕、涂层缺陷等特征。激光测量则可精确获取表面的三维轮廓, 对凹坑、凸起及缝隙不均匀等缺陷的检测更为精准。融合过程中, 利用数据层融合、特征层融合或决策层融合等方法, 将不同传感器采集到的原始数据或特征进行整合处理, 有效提高缺陷检测的准确性和可靠性, 降低误检率和漏检率, 为飞机表面质量评估提供更全面、精准的依据。

2.2 缺陷特征提取与选择技术

缺陷特征提取与选择技术对于飞机表面质量智能检测系统至关重要。飞机表面缺陷种类繁多，每种缺陷具有独特的几何形状、灰度分布、纹理等特征。首先，利用图像处理算法从采集到的图像或数据中提取大量的潜在特征，如基于边缘检测的形状特征、基于灰度统计的灰度特征、基于纹理分析的纹理特征等。然而，并非所有提取的特征都对缺陷识别有显著贡献，过多的特征还会增加计算复杂度和模型训练的难度。

2.3 检测系统的校准与精度补偿技术

检测系统的校准与精度补偿技术是保证飞机表面质量智能检测准确性的关键环节。由于检测系统中的各类传感器、运动机构及其他部件在制造、安装和使用过程中不可避免地存在误差，如相机的畸变、激光测量系统的零点漂移、运动平台的定位精度误差等，这些误差会严重影响检测结果的精度。为了消除或减小这些误差，需要定期对检测系统进行校准。通过使用高精度的标准件进行测量，获取系统的误差模型，然后采用相应的补偿算法对测量数据进行修正。

2.4 检测系统的自动化与智能化技术

检测系统的自动化与智能化技术是提高飞机表面质量检测效率和质量的重要手段。在自动化方面，通过设计合理的运动控制平台和自动上下料装置，实现飞机部件的自动定位、夹紧和检测过程的自动运行，减少人工干预，提高检测效率和一致性。例如，采用工业机器人或自动化导轨系统，精确控制传感器相对于飞机表面的位置和姿态，确保对整个表面进行全面、无遗漏的检测。在智能化方面，利用机器学习、深度学习等人工智能技术，使检测系统具备自动缺陷识别、分类和评估的能力^[2]。

3 飞机表面制造质量智能检测系统构建

3.1 硬件系统组成

3.1.1 传感器模块

传感器模块是飞机表面质量智能检测系统的关键部分。针对飞机表面检测需求，通常配备多种类型传感器。高精度相机用于获取表面清晰图像，捕捉如划痕、涂层缺陷等细节，其分辨率和帧率根据检测精度和速度要求选定；激光传感器可精确测量表面的三维轮廓，对于凹坑、凸起及缝隙的检测精度高；超声传感器能检测内部隐藏缺陷，辅助表面质量评估。这些传感器协同工作，将飞机表面的不同特征信息转化为电信号或数字信号，为后续的数据处理和缺陷分析提供丰富且准确的数据来源，确保对飞机表面质量进行全面、深入的检测。

3.1.2 运动控制平台

运动控制平台在检测系统中起着重要作用。它负责精确控制传感器与飞机表面之间的相对位置和运动轨迹。一般采用高精度的导轨、丝杆等传动部件，结合先进的伺服电机和运动控制器，实现多自由度的精准运动。在检测过程中，能够按照预设程序平稳、快速地移动传感器，确保对飞机表面进行全面、无遗漏的扫描。同时，运动控制平台具备良好的定位精度和重复性，可精确控制传感器与飞机表面的距离和角度，保证采集到的数据具有一致性和可靠性，从而提高检测系统的整体性能和检测精度，满足飞机表面复杂形状和大面积检测的要求。

3.1.3 数据采集与处理单元

数据采集与处理单元是连接传感器与后续分析环节的桥梁。数据采集卡负责将传感器输出的模拟信号转换为数字信号，并进行初步的信号调理，如放大、滤波等，提高信号的质量和稳定性。高性能的计算机或工业控制计算机作为数据处理核心，配备强大的处理器和大容量内存，用于实时接收、存储和处理大量的检测数据。通过运行先进的图像处理算法、数据融合算法以及缺陷分析软件，对采集到的数据进行快速、准确的分析和处理，提取飞机表面缺陷的特征信息，并进行缺陷的识别、分类和量化评估。

3.2 软件系统设计

3.2.1 图像与信号处理算法

图像与信号处理算法是飞机表面质量智能检测软件系统的核心部分。对于采集到的飞机表面图像和传感器信号，首先进行图像预处理，如灰度化、降噪、增强对比度等操作，以提高图像质量和缺陷特征的清晰度。接着运用边缘检测算法，如Canny算子，精准定位缺陷边缘；再通过特征提取算法，提取形状、纹理、灰度等特征。针对不同类型的缺陷，采用合适的分类算法，如基于深度学习的卷积神经网络，实现对表面划痕、凹坑、涂层缺陷等的准确识别和分类，为后续的质量评估和决策提供关键数据支持，确保检测的准确性和可靠性。

3.2.2 检测结果可视化软件

检测结果可视化软件旨在将复杂的检测数据以直观、易懂的形式呈现给用户。通过图形用户界面（GUI），以二维或三维图像展示飞机表面的缺陷分布情况，用不同颜色和标记区分各类缺陷及其严重程度，例如红色代表严重缺陷，黄色代表轻微缺陷等。提供放大、缩小、平移等交互功能，方便操作人员详细查看特定区域的缺陷细节。还能生成检测报告，以图表和文字

形式呈现检测结果的统计信息,包括缺陷数量、类型占比、位置分布等,使检测人员和质量管理人員能够快速、全面地了解飞机表面质量状况,便于及时采取相应的修复和改进措施。

3.2.3 数据库管理系统

数据库管理系统用于存储、管理和查询飞机表面质量检测过程中的各类数据。它可以记录飞机的型号、批次、检测时间、检测人员等基本信息,以及传感器采集到的原始数据、经过处理后的缺陷特征数据和最终的检测结果数据等。采用关系型数据库或非关系型数据库,确保数据的结构化存储和高效检索。通过数据库查询语言,能够根据不同的需求,如按照飞机型号、检测日期、缺陷类型等条件进行数据查询和统计分析,为质量追溯、工艺改进和质量控制提供数据支持,有助于提高飞机制造企业的质量管理水平和生产效率,保障飞机的整体质量和安全性。

4 智能检测数据处理与分析方法

4.1 数据预处理

数据预处理是智能检测数据处理与分析的首要环节。由于飞机表面检测数据来源多样,如相机图像、激光扫描数据等,这些原始数据往往存在噪声、灰度不均、几何畸变等问题。对于图像数据,需进行灰度校正以统一亮度,采用滤波算法(如高斯滤波、中值滤波)去除噪声,通过直方图均衡化增强图像对比度,凸显缺陷特征。针对激光扫描数据,要进行点云去噪、平滑处理,并进行坐标变换使其与飞机坐标系对齐。同时,对数据进行归一化处理,将不同传感器的数据范围映射到同一区间,便于后续的联合分析。数据的完整性校验也不可或缺,确保无数据缺失或错误,为后续的特征提取与分析奠定坚实基础,提高数据质量和稳定性,使得后续的处理步骤能够更准确地识别飞机表面的缺陷信息^[3]。

4.2 特征提取与选择

特征提取与选择在飞机表面质量检测中起着关键作用。从预处理后的数据中,需提取能够有效表征缺陷的特征。形状特征如缺陷的周长、面积、长宽比等几何参数,对于区分划痕、凹坑、凸起等不同类型缺陷至关重要;纹理特征通过灰度共生矩阵计算对比度、相关性等参数,可反映涂层表面的均匀性和缺陷引起的纹理变化;灰度特征包括均值、方差、灰度直方图分布等,能体现缺陷区域与正常表面的灰度差异。然而,并非所有

提取的特征都具有同等价值,过多特征会导致维数灾难和计算复杂度增加。因此,运用主成分分析(PCA)、线性判别分析(LDA)等方法进行特征选择,筛选出最具判别力和代表性的特征子集,既能保留关键信息,又能降低计算量,提高后续缺陷识别与分类模型的训练效率和准确性,从而精准地识别飞机表面的各类缺陷。

4.3 缺陷识别与分类模型

缺陷识别与分类模型是智能检测的核心。基于提取和选择的特征,采用合适的机器学习或深度学习模型进行构建。传统的机器学习方法如支持向量机(SVM),通过寻找最优分类超平面,对线性可分或非线性可分的数据进行分类,适用于小样本、特征明确的情况;决策树模型则以树形结构对特征进行逐步划分,直观地展示分类规则,但易出现过拟合。近年来,深度学习方法如卷积神经网络(CNN)在图像识别领域表现出色,其通过卷积层自动提取图像的局部特征,池化层降低数据维度,全连接层进行分类决策,能够自动学习复杂的缺陷特征模式,对飞机表面的多种缺陷类型(如不同形状、大小的划痕、各类涂层缺陷等)进行准确分类,且具有较强的泛化能力和鲁棒性。随着训练数据的增加和模型的优化,能够不断提高缺陷识别的准确率和可靠性,为飞机表面质量评估提供有力支持。

结束语

飞机表面制造质量智能检测方法的研究,为航空制造业的质量提升开辟了新的路径。通过对多种智能检测技术的深入探索与应用,有效解决了传统检测方式效率低、精度差的问题,显著提高了飞机表面缺陷的检测能力与准确性,为保障飞行安全提供了坚实支撑。然而,技术的发展永无止境,未来还需持续优化算法、提升硬件性能,并进一步深化多学科融合,以适应航空工业不断提高的质量标准与复杂多变的检测需求,推动飞机制造质量迈向更高的台阶。

参考文献

- [1]夏仁波,苏润,赵吉宾,等.飞机表面制造质量智能检测方法研究[J].自动化博览,2019(5):38-41.
- [2]宋利康,郑堂介,黄少华,等.飞机装配智能制造体系构建及关键技术[J].航空制造技术,2015(13):40-45,50.
- [3]金立.飞机表面制造质量智能检测方法研究[J].航空制造技术,2018(20):38-39.