

涂层覆盖下飞机蒙皮腐蚀损伤识别与评估

单柏荣¹, 仇淞平², 商梓¹, 樊伟杰¹, 陈新波^{1*}, 李小丽¹

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 93395 部队, 山东 高密 261500)

摘要: **目的** 解决涂层覆盖下飞机蒙皮腐蚀损伤快速检测与定量评估的技术难题。**方法** 针对飞机铝合金腐蚀损伤特点, 采用阵列涡流检测技术作为原位检测方法, 结合实际工况, 开展定量评价方法研究。设计和试验预制人工缺陷的试块, 确定蒙皮腐蚀损伤检测的最佳频率, 找出阵列涡流检测信号的变化规律。**结果** 随着检测频率的增高, 检测灵敏度逐渐增高。当检测频率超过 1.0 MHz 时, 缺陷边缘电压过高, 从而产生畸变, 影响对缺陷的定量。通过正态概率分布和一元线性回归分析, 得出缺陷深度与检测信号的定量关系符合 $y=1\ 559.7x+8.264$, 解决了阵列涡流检测仪阻抗显示定量评估的难题。**结论** 阵列涡流检测技术可有效解决涂层覆盖下飞机蒙皮损伤的检测问题, 在检测效率、信号显示、定量评估等方面具有明显优势, 得到的定量关系符合实际情况, 可实现自动评估, 对实际应用具有指导意义。

关键词: 飞机蒙皮; 阵列涡流; 原位无损检测; 定量评估; 涂层; 腐蚀损伤

中图分类号: TG172

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)04-0044-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.006

Identification and Evaluation of Corrosion Damage in Aircraft Skin Covered by Coatings

SHAN Borong¹, QIU Songping², SHANG Zhi¹, FAN Weijie¹, CHEN Xinbo^{1*}, LI Xiaoli¹

(1. Qingdao Branch of Naval Aeronautical University, Shandong Qingdao 266041, China;

2. 93395 Unit of PLA, Shandong Gaomi 261500, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the technical problem of rapid detection and quantitative evaluation of corrosion damage of aircraft skin under coatings. Combined with the actual working conditions, array eddy current testing was selected as the in-situ nondestructive testing method to study the quantitative evaluation method for corrosion damage characteristics of Al alloy. Through the design and testing of prefabricated defect test blocks, the optimal detection frequency for detecting corrosion damage on the skin of aircraft was determined and the change rules of the array eddy current detection signal were obtained. The detection sensitivity gradually rose with the detection frequency increased. When the detection frequency exceeded 1.0 MHz, the voltage at the defect edge became excessively high, leading to distortion and affecting the quantification of defects. Through normal probability distribution and univariate linear-regression analysis, the quantitative relationship $y=1\ 559.7x+8.264$ between defect depth and detection signals was obtained, and the problem of quantitative evaluation of array eddy current instrument

收稿日期: 2025-01-26; 修订日期: 2025-03-18

Received: 2025-01-26; Revised: 2025-03-18

基金项目: 国家自然科学基金 (52101392); 山东省自然科学基金 (ZR202102240842)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (52101392); The Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR202102240842)

引文格式: 单柏荣, 仇淞平, 商梓, 等. 涂层覆盖下飞机蒙皮腐蚀损伤识别与评估[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 44-50.

SHAN Borong, FAN Weijie, QIU Songping, et al. Identification and Evaluation of Corrosion Damage in Aircraft Skin Covered by Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 44-50.

*通信作者 (Corresponding author)

impedance display was solved. The array eddy current detection technology can effectively solve the problem in detecting the damage of the aircraft skin under coatings and has obvious advantages in terms of detection efficiency, signal display and quantitative evaluation and the quantitative relationship obtained accords with the actual situation, so it can realize automatic evaluation and has guiding significance for practical application.

KEY WORDS: aircraft skin; array eddy current; in-situ nondestructive testing; quantitative evaluation; coating; corrosion damage

飞机蒙皮是飞机的重要部件之一, 在飞行过程中起到承受和传递气动载荷的作用, 由于受力复杂, 载荷较大, 并且与外界环境直接接触, 容易产生损伤^[1-2]。特别是对于军用飞机, 由于日常飞行训练强度大, 长期处于盐雾、水汽、霉菌的复杂大气环境中, 使得作为飞机蒙皮主要材料的铝合金极易发生结构的腐蚀和产生疲劳裂纹^[3-4]。这些早期损伤若不及时发现并尽早处理, 在载荷与腐蚀环境的双重耦合作用下, 损伤会迅速扩展, 进而导致飞机蒙皮强度降低, 给飞行带来严重的安全隐患^[5-6]。

现代飞机多采用涂装涂层以增加飞机的飞行性能和作战需求, 飞机金属蒙皮表面经过表面处理, 喷涂底漆和面漆, 对飞机蒙皮起到了防腐、隐身、隔热、改善气动性能等多种作用^[7-9]。但是涂层的使用也对金属蒙皮上缺陷的检测带来了新的问题, 受涂覆涂层的影响, 对于涂层下蒙皮的早期损伤难以通过目视进行识别, 在一定程度上增加了飞机蒙皮缺陷检测的难度。

目前, 对于涂层覆盖下铝合金蒙皮缺陷的检测方法主要有 X 射线衍射法、红外检测、超声检测、涡流检测等。刘芳等^[10]综述了飞机蒙皮常见的缺陷类型、产生原因和对应的检测手段。张幸等^[11]采取的 X 射线和 DR 检测方法对铝合金隐藏腐蚀缺陷检测效果较好, 但对人体有危害, 在外场特别是人多的环境下难以实施。郭兴旺等^[12]采用红外检测技术检测了飞机铝合金腐蚀, 结果表明, 生成的二维图像有效反映了缺陷的形状、大小, 但对于缺陷深度难以精准测量。金国锋等^[13]对涂层下金属的腐蚀损伤进行了红外检测, 可实现腐蚀损伤大小和位置的识别, 但检测结果受材料表面均匀度的影响大, 在外场使用时受环境干扰, 导致检测灵敏度降低。王昊^[14]采用机器视觉技术, 通过检测机器人搭载摄像头, 可以识别蒙皮铆钉周围的细小裂纹, 但无法对缺陷深度进行定量评估。罗云林等^[15]利用超声相控阵技术, 对涂层覆盖下的飞机蒙皮划痕进行检测, 检测速度快, 可以直观成像, 但是需要涂抹耦合剂, 对蒙皮表面造成污染。相比于其他方法, 涡流检测无需涂抹任何制剂, 检测速度快, 灵敏度高, 受环境干扰小, 而被广泛应用于飞机机体检测^[16]。赵志鹏^[17]采用传统涡流检测技术, 选取 2 MHz 为最佳检测频率, 对在役飞机未褪漆层平整蒙皮、铆钉位置进行了涡流检测。结果表明, 传

统单线圈涡流检测技术能定量分析缺陷深度, 但检测结果不直观, 检测面积小。张朝晖等^[18]采用单线圈涡流探头对飞机未褪漆层框板进行了涡流检测, 检测效果较好, 但检测效率低。

考虑到飞机蒙皮的表面积很大, 选择的检测手段要兼顾效率, 同时要满足外场对于飞机蒙皮的定量检测需求, 阵列涡流检测技术作为涡流检测技术中的一个新兴技术分支, 因其检测效率高、检测面积大、检测灵敏度高而被广泛应用^[19-20]。本文采用阵列涡流检测技术, 对涂层覆盖下的铝合金蒙皮腐蚀损伤检测进行了比较系统的研究, 通过人工模拟缺陷的阵列涡流检测信号对比, 确定了铝合金蒙皮损伤的最佳检测频率。在此基础上, 探究不同腐蚀深度下检测信号的变化规律, 得出了腐蚀深度与检测电压之间的定量关系, 并在实际检测对象上进行了验证, 检测结果符合实际情况, 有效解决了涂层覆盖下飞机蒙皮损伤的检测问题, 检测效率高, 对实际应用具有指导意义。

1 试验

1.1 人工缺陷试块制作

试块基材选用厚度为 2 mm, 与飞机蒙皮材质相同的硬铝合金薄板, 在薄板上预制深度分别为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mm, 直径为 10 mm 的 5 个腐蚀坑缺陷。为分析涂层覆盖下铝合蒙皮上缺陷阵列涡流检测可行性, 在设计制作的铝合金薄板上涂敷 TB06 航空用涂层, 涂层厚度为 0.2 mm。

1.2 阵列涡流检测试验

阵列涡流检测技术是通过特殊的方式将被测线圈进行排列, 阵列涡流探头与常规单探头相比, 由多个检测线圈组成, 其有效探测覆盖面积大^[21], 通过单次扫查就能达到传统单线圈探头涡流检测的多次扫查, 扫查原理如图 1 所示。

试验选用某公司生产的 MIZ-21C 手持式阵列涡流探伤仪, 拥有直观的图像显示功能, 具有 5 Hz~10 MHz 的检测频率范围, 几乎满足所有材料的最佳检测频率。配备 Surf-X 型柔性涡流阵列检测探头, 线圈分为 2 排, 每排 16 个, 共计 32 个线圈, 支持 C 扫描和三维立体成像技术, 在实际使用中更具有普遍性。将阵列涡流探头放置在试样上无人工缺陷的位

置,调节设备对检测信号进行自动平衡,使检测信号在试块无缺陷处基本稳定,选择编码器扫描模式,移动阵列涡流探头缓慢扫过缺陷,记录缺陷的C扫描视图、三维视图和阻抗图。

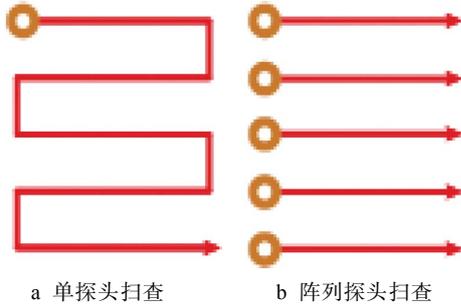


图1 常规涡流与阵列涡流扫查对比

Fig.1 Comparison of conventional eddy current inspection and array eddy current inspection: a) single probe inspection; b) array probe inspection



图2 检测仪器及探头实物

Fig.2 Actual images of testing instrument and probe: a) array eddy current defect detector; b) surf-X flexible eddy current array probe

2 飞机蒙皮无损检测

2.1 确定最佳检测频率

在实际检测工作中,为尽可能提高检测效率,降低工作难度,需要确定飞机铝合金蒙皮的阵列涡流检测最佳频率。机身蒙皮的允许损伤范围为蒙皮原厚度的10%~20%,腐蚀超过10%,预示此区域需要进行蒙皮结构修理,因此需要识别0.2~0.4 mm深的腐蚀损伤。受仪器最高频率限制,以及探头检测信号的特点,选择检测频率范围在0.5~3.0 MHz,对0.2、0.4 mm深度缺陷进行扫查,检测结果如图3所示。

在C扫描视图上,绿色是背景,表示没有缺陷,红色和黄色表示缺陷,其中每张图左侧为0.2 mm深度缺陷,右侧为0.4 mm深度缺陷。由图3对比分析得到,1.0 MHz频率下,0.2 mm缺陷颜色明显深于0.5 MHz,呈现鲜红色,与背景区的绿色对比明显。这是由于频率越高,激发出的电压也越高,有缺陷

处与无缺陷对比越明显。当检测频率在1.5 MHz以上时,缺陷图像面积增大,甚至发生变形,且随着检测频率的升高,缺陷形变越明显。

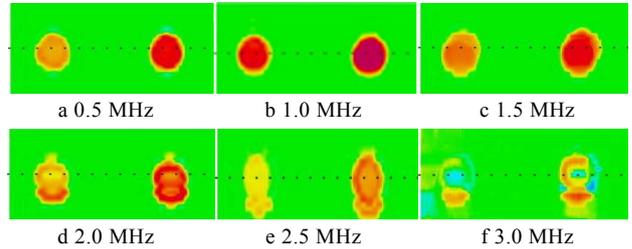


图3 腐蚀缺陷阵列涡流C扫描图像
Fig.3 C-scan image of corrosion defects through array eddy current testing

腐蚀损伤面积大小是判断飞机蒙皮是否需要维修的重要依据,由此可以判断最佳检测频率应该在0.5~1.5 MHz。为进一步确定最佳检测频率,移动探头扫过缺陷时,记录该频率下的缺陷轴向长度与横向长度,与实际缺陷直径进行对比,计算检测误差,见表1。

表1 测量误差
Tab.1 Measurement error

| 频率/ kHz | 轴向长度/ mm | 横向长度/ mm | 实际长度/ mm | 检测误差/ mm |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 500 | 10.43 | 10.38 | 10 | 0.81 |
| 600 | 10.33 | 10.37 | 10 | 0.70 |
| 700 | 10.37 | 10.31 | 10 | 0.68 |
| 800 | 10.30 | 10.26 | 10 | 0.56 |
| 900 | 10.24 | 10.17 | 10 | 0.41 |
| 1000 | 10.08 | 10.05 | 10 | 0.13 |
| 1100 | 10.17 | 10.11 | 10 | 0.28 |
| 1200 | 10.28 | 10.21 | 10 | 0.49 |
| 1300 | 10.49 | 10.35 | 10 | 0.84 |
| 1400 | 10.68 | 10.43 | 10 | 1.09 |
| 1500 | 10.88 | 10.61 | 10 | 1.49 |

由表1可知,在0.5~1.0 MHz时,随着检测频率的增高,检测灵敏度逐渐增高,对缺陷大小的定量越准确。当频率超过1.0 MHz时,过高的检测频率使得缺陷边缘电压过高,从而产生畸变,使得缺陷边界偏大,甚至发生变形。综合考虑,在1.0 MHz的检测频率下,缺陷大小检测误差最小,同时检测灵敏度较高,缺陷和非缺陷对比明显。因此,确定1.0 MHz为铝合金蒙皮缺陷检测的最佳频率。

2.2 调节滤波的影响

在实际检测过程中,由于飞机蒙皮上涂装涂层厚度的不均匀或受蒙皮上所沾染的油污、灰尘等因素的影响,会产生较多的干扰信号。这些干扰信号分布不均匀,且较为复杂,通过人工经验进行分析的效率较

低, 且容易有缺检、漏检的情况发生。阵列涡流检测方式的优点之一, 就是可以通过使用检测仪器内置的滤波器, 对检测过程中的杂波干扰信号进行过滤, 以获得较为清晰明显的缺陷检测图像。使用 1.0 MHz 检测频率, 对沾染灰尘处的涂层下深度为 0.2、0.4 mm 的腐蚀缺陷进行检测, 对比无滤波与滤波下的检测图像, 如图 4 所示。

由图 4a 可知, 未滤波下, 灰尘及涂层本身厚度不均所产生的非缺陷信号影响明显。图 4b 中, 滤波器滤波后, 由涂层厚度不均匀等因素所引起的干扰信号明显减少, 缺陷信号显示更加明显, 对判断缺陷更有利。阵列涡流检测是依靠在导体内产生涡电流, 通过分析缺陷对电流影响来判断缺陷信息, 漆层本身作为绝缘体, 与空气性质相似, 对电场和磁场分布没有影响。在实际检测中, 油污颗粒等导致漆层厚度不均, 致使探头在扫查时会出现提离效应, 产生干扰信号, 阻碍了缺陷检测, 因此需要对其进行滤波处理, 滤除杂波, 使对比度增强。

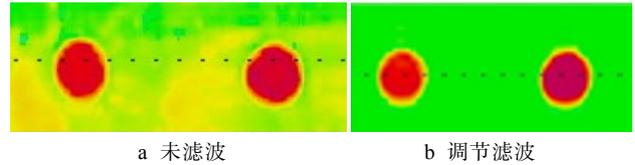


图 4 滤波效果对比
Fig.4 Comparison of filtering effects: a) unfiltered; b) adjusted filtering

3 定量评估技术

腐蚀坑深度对飞机蒙皮的强度造成很大影响, 严重可能引发应力腐蚀开裂, 对飞行安全造成严重后果, 因此需要对腐蚀深度进行定量评估^[22]。用设计的专用试块进行阵列涡流检测试验, 选用实际试验得到最佳检测频率 $f=1.0$ MHz, 分别对不同深度缺陷采集 5 次检测结果作为数据样本, 整理得到腐蚀深度与阵列涡流检测电压峰峰值之间的关系, 见表 2。

表 2 深度-电压关系
Tab.2 Depth-voltage relationship

| 深度/mm | 电压 1/mV | 电压 2/mV | 电压 3/mV | 电压 4/mV | 电压 5/mV | 电压平均值/mV |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 0.2 | 308.19 | 307.27 | 312.43 | 312.34 | 310.28 | 310.1 |
| 0.4 | 636.13 | 634.06 | 632.53 | 637.74 | 634.37 | 635.0 |
| 0.6 | 930.31 | 938.43 | 954.41 | 957.20 | 949.18 | 945.91 |
| 0.8 | 1 284.54 | 1 265.37 | 1 299.88 | 1 286.45 | 1 284.95 | 1 284.22 |
| 1.0 | 1 497.33 | 1 500.23 | 1 508.55 | 1 545.35 | 1 574.49 | 1 545.19 |

阵列涡流检测结果受到设备自身干扰、蒙皮厚度变化等诸多因素的影响, 对结果的影响具有随机性, 所以相同缺陷的检测信号在一定范围内是一个随机的数, 因此同一腐蚀缺陷的信号幅值满足正态分布。设 x 为检测电压峰峰值, 根据正态分布的概率密度函数有:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式 (1) 表示电压峰峰值 x 服从均值为 μ 、标准差为 σ 的正态分布, 即 $x \sim N(\mu, \sigma^2)$ 。

表 2 的数据显示, 电压峰峰值与腐蚀深度基本呈线性关系, 以腐蚀深度为横坐标, 电压峰峰值为纵坐标作图, 如图 5 所示。

采用一元线性回归分析, 拟合腐蚀深度和电压峰峰值的关系, 假设腐蚀深度为 x , 电压峰峰值为 y , 则满足:

$$y = bx + a \quad (2)$$

式中: a, b 为回归系数, 可通过数据样本求出^[23]。

拟合曲线可以根据线性最小二乘法计算得出, $y = 1 559.7x + 8.264$, 且可决系数 $R^2 = 0.998$, 表示回归模型系数的拟合优度较高, 即腐蚀深度在 99.8% 的程度

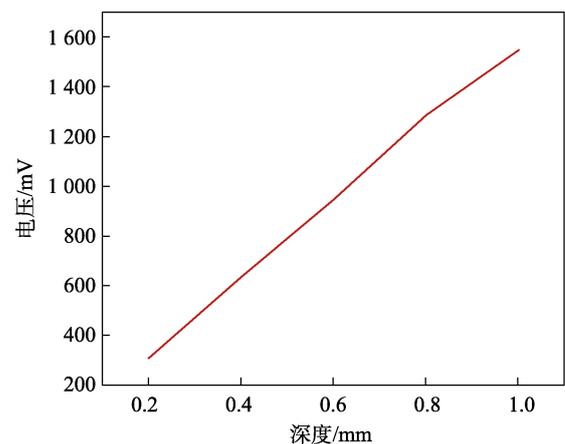


图 5 电压与深度关系
Fig.5 Voltage-depth relationship

上与阵列涡流检测结果电压峰峰值密切相关, 更具有实际意义。

4 原位检测方法应用

使用前述试验中确定的最佳检测频率 ($f=1.0$ MHz) 对飞机铝合金蒙皮进行检测试验。由于飞机受高盐高

湿高应力的影响, Cl^- 和水分子易进入铆钉孔附近形成的缝隙部位, 因而在铆钉孔周围腐蚀集中, 这些腐蚀细小且位置隐蔽, 多隐藏在涂层下面^[24-25]。为检测可能存在的裂纹或隐藏的腐蚀, 要对飞机蒙皮的铆钉孔周边区域进行检测, 调节检测频率为 1.0 MHz, 扫查方式为融合扫查, 对飞机的机翼、平尾、垂尾等易发生腐蚀部位的铝合金蒙皮进行检测试验, 检测过程如图 6 所示。

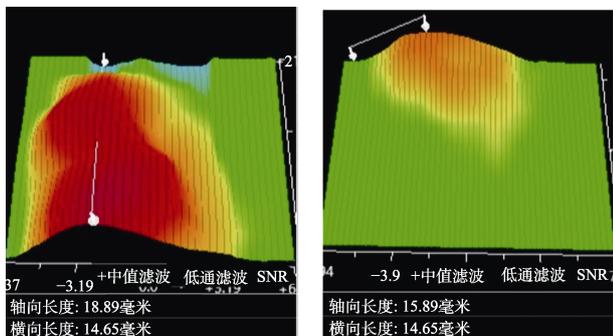


图 6 阵列涡流检测过程
Fig.6 Array eddy current testing process

图 7 为飞机蒙皮缺陷阵列涡流 C 扫描图。可以明显观察到在飞机铝合金蒙皮上存在 2 处腐蚀缺陷, 其中第 4 处铆钉孔周围缺陷区域的颜色明显深于第 8 处铆钉孔周围, 代表该处铆钉孔周围腐蚀更深。图 8 为飞机蒙皮缺陷阵列涡流三维成像图。三维视图实现了缺陷的三维成像, 满足对缺陷辨别的要求。其中, 第 4 处铆钉周围腐蚀面积(轴向长度为 18.89 mm, 横向长度为 14.65 mm)明显大于第 8 处铆钉周围的腐蚀面积(轴向长度为 12.74 mm, 横向长度为 14.65 mm)。



图 7 阵列涡流 C 扫描图
Fig.7 C-scan image of array eddy current

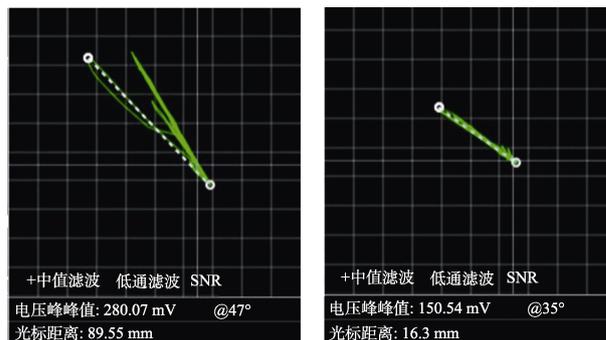


a 第4颗铆钉 b 第8颗铆钉

图 8 阵列涡流三维成像图

Fig.8 Three-dimensional imaging of array eddy current:
a) the fourth rivet; b) the eighth rivet

飞机蒙皮缺陷阵列涡流阻抗如图 9 所示。为进一步定量分析缺陷深度, 结合阻抗图, 将电压峰峰值 280.07 mV 和 150.54 mV 作为 y 值, 代入拟合曲线 $y=1\ 559.7x+8.264$, 得到 2 处缺陷深度分别为 0.17、0.1 mm, 与实际基本相符。综上, 缺陷的 3 种视图不仅反映出缺陷的位置、形状和大小, 结合拟合曲线还可以实现缺陷深度的定量分析。飞机蒙皮表面存在的凹痕、划痕、裂纹、腐蚀等缺陷, 阵列涡流检测技术同样适用, 因其检测面积大、速度快、适应性强等优点, 成为飞机外场原位检测的重要手段, 为飞机的装配质量、飞行安全提供保障。



a 第4颗铆钉 b 第8颗铆钉

图 9 阵列涡流阻抗图

Fig.9 Array eddy current impedance map:
a) the fourth rivet; b) the eighth rivet

5 结论

- 1) 制作铝合金蒙皮检测专用试块并进行试验, 确定 1.0 MHz 为飞机蒙皮阵列涡流检测的最佳检测频率, 既能满足检测准确性, 又能满足检测灵敏度。
- 2) 腐蚀深度和电压峰峰值的关系满足 $y=1\ 559.7x+8.264$, 解决了铝合金蒙皮腐蚀定量评估难题。C 扫描视图、三维视图、阻抗图能够从形状、大小、位置等方面对缺陷进行综合描述, 信息全面, 显示直观, 在实际检测中具有重要意义。
- 3) 阵列涡流检测技术检测效率高, 检测性能好, 有助于快速判定缺陷信息, 提前发现铝合金隐藏腐蚀损伤, 适用于对飞机蒙皮进行大规模检测及定量分析。

参考文献:

[1] 吴军, 石改琴, 卢帅员, 等. 采用无人机视觉的飞机蒙皮损伤智能检测方法[J]. 中国测试, 2021, 47(11): 119-126.
WU J, SHI G Q, LU S Y, et al. Intelligent Damage Detection Method of Aircraft Skin Using Drone Vision[J]. China Measurement & Test, 2021, 47(11): 119-126.

[2] 王在俊. 民用飞机蒙皮腐蚀研究[J]. 中国民航飞行学院学报, 2011, 22(1): 31-34.

- WANG Z J. Study on the Corrosion of Civil Aviation Aircraft Skin[J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2011, 22(1): 31-34.
- [3] 刘海燕, 李喜明, 张亚娟. 腐蚀损伤对 LY¹²CZ 铝合金疲劳寿命的影响研究[J]. 装备环境工程, 2009, 6(1): 13-16.
LIU H Y, LI X M, ZHANG Y J. Study on Effect of Corrosion on the Fatigue Life of LY¹²CZ Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 6(1): 13-16.
- [4] 刘旭. 飞机铝合金结构腐蚀与防护研究[J]. 世界有色金属, 2015(11): 103-104.
LIU X. Study on Corrosion and Protection of Aircraft Aluminum Alloy Structure[J]. World Nonferrous Metals, 2015(11): 103-104.
- [5] 陈勇, 陆斌荣, 黎泽金. 某型机襟翼舱下壁板蒙皮腐蚀原因分析与修理措施研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(11): 48-51.
CHEN Y, LU B R, LI Z J. Corrosion Causes Analysis and Repair Measurement Research of a Certain Aircraft Flap Cabin Lower Wainscot Skin[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(11): 48-51.
- [6] 林再兴. 沿海飞机铝合金结构腐蚀与防护[J]. 装备环境工程, 2005, 2(1): 83-88.
LIN Z X. Corrosion and Prevention of Aircraft Aluminum Structure Served in Marine Atmosphere[J]. Metal Forming Technology, 2005, 2(1): 83-88.
- [7] 王晨光, 陈跃良, 张勇, 等. 表面涂层破损对 7B04 铝合金点蚀的影响及仿真研究[J]. 航空材料学报, 2016, 36(6): 48-53.
WANG C G, CHEN Y L, ZHANG Y, et al. Influence and Simulation Study of Surface Coating Damage on Pitting Corrosion of 7B04 Aluminum Alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(6): 48-53.
- [8] 刘志, 郭年华, 宋庆功, 等. 飞机蒙皮涂层发展概述[J]. 中国涂料, 2010, 25(2): 17-20.
LIU Z, GUO N H, SONG Q G, et al. Summary on the Development of Aircraft Dope[J]. China Coatings, 2010, 25(2): 17-20.
- [9] 骆晨, 李宗原, 孙志华, 等. 直升机蒙皮典型结构有机涂层防护性能在模拟高原大气环境中的变化[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 8-13.
LUO C, LI Z Y, SUN Z H, et al. Degradation of Protective Properties of Organic Coatings on Typical Helicopter Skin Structure in Simulated Plateau Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 8-13.
- [10] 刘芳, 夏桂锁, 温志辉, 等. 飞机蒙皮缺陷检测的现状与展望[J]. 航空制造技术, 2021, 64(S2): 39-50.
LIU F, XIA G S, WEN Z H, et al. Current Status and Prospect of Defect Detection of Aircraft Skin[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(S2): 39-50.
- [11] 张幸, 何卫平. 飞机外场腐蚀损伤检测方法研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 116-123.
ZHANG X, HE W P. Investigations on Outfield Detection Methods for Corrosion Damages of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 116-123.
- [12] 郭兴旺, VAVILOV V, SHIRYAEV V. 飞机铝板腐蚀的热无损检测及数据处理方法[J]. 机械工程学报, 2009, 45(3): 208-214.
GUO X W, VAVILOV V, SHIRYAEV V. Thermal Nondestructive Testing of Corrosion in Aviation Aluminum Panels and Data Processing Algorithms[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(3): 208-214.
- [13] 金国锋, 张炜, 杨正伟, 等. 涂层下金属腐蚀损伤的红外热波检测与评估[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(1): 58-62.
JIN G F, ZHANG W, YANG Z W, et al. Detection and Evaluation of Corrosion Damage under Coating by Infrared Thermal Wave Technology[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(1): 58-62.
- [14] 王昊. 基于机器视觉的飞机蒙皮损伤检测与寿命分析方法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
WANG H. Aircraft Skin Damage Detection and Life Analysis Method Based on Machine Vision[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [15] 罗云林, 耿智军. 基于超声相控阵的飞机蒙皮检测技术研究[J]. 测控技术, 2014, 33(5): 131-134.
LUO Y L, GENG Z J. Research on Detection Technology for Aircraft Skin Based on Ultrasonic Phased Array[J]. Measurement & Control Technology, 2014, 33(5): 131-134.
- [16] 袁英民, 程文, 杨晓华. 在役飞机蒙皮夹层腐蚀涡流检测[J]. 无损检测, 2011, 33(1): 31-32.
YUAN Y M, CHENG W, YANG X H. Application of Eddy Current Testing in the Aircraft Skin Sandwich Structure Corrosion Flaw[J]. Nondestructive Testing Technology, 2011, 33(1): 31-32.
- [17] 赵志鹏. 基于涡流检测未褪漆层飞机蒙皮探伤工艺方法研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2022.
ZHAO Z P. Research on the Flaw Detection Technology of Aircraft Skin with Unpainted Paint Layer Based on Eddy Current Detection[D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2022.
- [18] 张朝晖, 王晓青, 晋素梅, 等. 某型飞机框板带漆涡流检测可行性研究[J]. 航空维修与工程, 2017(6): 91-95.
ZHANG (C/Z)H, WANG X Q, JIN S M, et al. Feasibility Study on Eddy Current Testing to Painted Frame for a Certain Type of Aircraft[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2017(6): 91-95.
- [19] Michael Wright. Eddy Current Array Technology[M]. Canada: Eclipse Scientific Products Inc, 2014.
- [20] 郭庆, 张洪波, 胡鸿志, 等. 脉冲涡流阵列探头与铝合金缺陷定量检测[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 593-599.
GUO Q, ZHANG H B, HU H Z, et al. Pulsed Eddy Current Array Probe and Quantitative Detection of Aluminum

- Alloy Defects[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 593-599.
- [21] 樊祥洪, 缙百勇, 陈涛等. 柔性涡流阵列传感器孔边裂纹监测技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(3): 726-734.
- FAN X H, GOU B Y, CHEN T, et al. Hole Edge Crack Monitoring Technology of Flexible Eddy Current Array Sensor[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(3): 726-734.
- [22] 田云飞, 曹宗杰. 基于有限元理论的飞机蒙皮搭接结构腐蚀红外检测建模分析[J]. 无损检测, 2012, 34(11): 42-47.
- TIAN Y F, CAO Z J. The Analysis of Corrosion Modeling for Aircraft Lap Joint Structure Based on Finite Element Theory and the Infrared NDT[J]. Nondestructive Testing Technology, 2012, 34(11): 42-47.
- [23] 刘凯. 第二专题 涡流阻抗图分析[J]. 无损检测, 1996, 18(2): 50-56.
- LIU K. Analysis of Eddy Current Impedance Diagram in the Second Topic[J]. Nonde Structive Testing, 1996, 18(2): 50-56.
- [24] 张蕾, 陈群志, 王逾涯, 等. 某型飞机腐蚀关键结构含涂层模拟件腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 45-49.
- ZHANG L, CHEN Q Z, WANG Y Y, et al. Research on the Corrosion Behavior of Simulated Samples with Coating for the Corrosion Critical Component on a Certain Type of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 45-49.
- [25] 苏景新, 邹阳, 陈康敏, 等. 民航客机 7075-T6 铝合金壁板的腐蚀特征与机制[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 91-96.
- SU J X, ZOU Y, CHEN K M, et al. Corrosion Mechanism and Characteristic of 7075-T6 Aluminum Alloy Panel on Airline Aircraft[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 91-96.