

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106045

航空器蒙皮结构缺陷检测电阻抗成像系统设计^{*}

胡远洋

(中国民用航空飞行学院 广汉 618300)

摘 要: 为了便于检测航空器蒙皮结构缺陷状况,弥补人工检测的不足,设计了一套16电极的电阻抗成像系统。该系统利用正弦信号,以相对激励模式刺激样品,用测量值解调信息对比由前向运算求得的相对参考幅值,基于开源软件Octave和软件包EIDORS,利用图像重构算法得到蒙皮结构的电导率分布图像,以其电导率变化趋势表征蒙皮结构缺陷状况。成像实验选用了航空器常用板材2024 T-3铝合金板材作为样品,并利用PE等评价指标对重建图像质量进行了评价,结果表明利用该系统可以测量到样品由于缺损引起的电导率变化,故该系统可以有效检测金属材料蒙皮结构缺陷。

关键词: 蒙皮缺陷;无损测试;电阻抗成像;图像重建;重建图像评价;系统设计

中图分类号: TP391.9;TP274+.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Design of electrical impedance tomography system for aircraft skin structure defects

Hu Yuanyang

(Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618300, China)

Abstract: A 16-electrode electrical impedance imaging system was designed to facilitate the detection of defects in the aircraft skin structure and to make up for the lack of manual testing. The sinusoidal signal was used to stimulate the sample in a relative excitation mode. Compared with the relative reference amplitude obtained by forward operation, measured value demodulation information and the image reconstruction algorithm were used to obtain the conductivity distribution image of the skin structure based on open source software Octave and package EIDORS. So the defect status of skinning structure is characterized by the changing trend of its conductivity. Commonly used material 2024 T-3 aluminum alloy plate in aviation manufacturing industry was selected as a sample for real-time resistance anti-imaging experiments, and the reconstruction image quality is evaluated by PE and other evaluation indicators. The results show that the change of conductivity caused by defect of the sample can be measured by using the system and the system can effectively monitor the structural defects of the metal skin.

Keywords: skin defects; non-destructive test; electrical impedance tomography; image reconstruction; rebuild image evaluation; system design

0 引言

蒙皮是覆盖在机体骨架结构之外的一层由高强度金属或复合材料等构成的维形构件,是构成飞机外形,保持气动性能,承载、传递载荷的重要结构^[1]。然而由于老化腐蚀、事故、鸟击、雷击、FOD、维修失当等因素引起的蒙皮结构缺陷时有发生,通常以人工视觉检测为主,辅以使用飞行小时、起落次数、日历寿命等指标对其进行监控,虽然部分航空器还在设计、制造阶段通过在机体特定位置安装传感器

的方式,掌握航空器运行过程中结构特定位置的应力、温度等参数的变化,结合信息技术与数据分析手段,提取出可能的故障特征对机体结构的安全状况进行评估^[2]。然而在机务维护中主要的安全检测手段仍然依靠人工,劳动强度大、维修时间长且存在漏检的隐患。因此有必要开发一种无损、快速且直接的蒙皮缺陷检测系统。

电阻抗成像技术(electrical impedance tomography, EIT)是一种非侵入式、无损、快捷方便的检测手段^[3]。EIT设备将小的电信号注入到目标物体,并通过表面电极测量

收稿日期:2021-03-18

^{*} 基金项目:中国民用航空飞行学院青年基金项目(校2020246)、四川省科技项目(16ZB0031)资助

边界电压数据,使用反演算法根据边界电压数据重建对象内部的电导率分布^[1]。文献[5-7]提到了 EIT 技术近年来被广泛应用于两相流检测与医学成像领域的例子,近年来 EIT 技术被广泛迁移应用于材料检测领域,如文献[8]将该技术应用于金属材料疲劳损伤检测,文献[9]将其应用于碳纤维复合材料的损伤检测,文献[10]基于 LabVIEW 软件设计一个针对微型物理模型的微电阻抗成像系统,现役民用、通用航空器大部分采用合金基材的蒙皮结构,具有天然的导电性能,具备使用 EIT 技术测试的基础,故将 EIT 技术应用于航空器蒙皮结构缺陷检查具有非常高的可行性。本文以自建硬件系统,配合以 LabVIEW 软件编写控制模块,基于 MATLAB 及开源软件包 EIDORS 开发的数据模块,针对航空器蒙皮常见制造材料 2024 T-3 铝合金板材的实验对象,开发了一套 16 电极的电阻抗成像系统。希望将 EIT 技术应用于航空器蒙皮结构的缺陷检测,弥补目前人工检测方法的不足,为航空器蒙皮结构缺陷检测的研究提供一种新的思路和方法。

1 航空器蒙皮结构电阻抗成像原理

电阻抗成像技术通过在被测域周围施加电极,一般由其中 2 个电极输入激励电流,同时从其余电极采集响应电压,计算时先通过激励电流和激励方式建立模型前向求解问题,再由测量电压值逆向求解被测场域内的电导率分布情况^[4]。

1.1 正问题

在被测物表面施加电流激励产生的电磁场可由麦克斯韦方程组表述,在低幅低频的条件下,可以将其简化为广义拉普拉斯方程^[11]:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \sigma(\vec{r}) \nabla u(\vec{r}) &= 0, \vec{r} \in \Omega \\ \sigma(\vec{r}) \frac{\partial u(\vec{r})}{\partial \nu} &= j(\vec{r}), \vec{r} \in \partial\Omega \end{aligned} \quad (1)$$

式中: σ 是电导率分布, u 代表电势, j 是外部施加的电流密度, Ω 是一个有边界的区域, ν 是边界 $\partial\Omega$ 的外向单位法向量。EIT 正问题是求解施加在物体表面的给定电流和内部电导率分布所产生的表面电压,除了受制于偏微分方程与边界条件,还受电导率分布、场域形状以及电极位置的影响。一般使用有限元法近似求解,通过等价变分、几何剖分、插值最后采用直接法或迭代法求解线性方程组,得到目标场域的边界电压近似解^[12]。在本文研究过程中,针对蒙皮结构缺陷状况检测的目标应用(通常厚度与宽度之比小于 0.01),忽略 Z 方向上的电导率变化,将模型简化为二维矩形。

1.2 逆问题

在给定边界测量值下确定材料分布的反问题是不适定的,因此可能存在不止一个解,到目前为止,已经开发了許多图像重建算法来重建材料电导率分布。相比 X 光等其他方法,EIT 无法带来最好的成像效果,但对于许多应用来

说,这种系统的可移植性、低成本和安全性弥补了这一缺陷^[13]。EIT 的逆问题可以概述为计算一个合理的电导率分布,使得测量数据与仿真数据之间的残差最小^[14]。在逆问题求解过程中,Jacobi 矩阵广义逆的条件数很大,呈严重病态特性,难以求得精确解,故通常使用一些方法对逆问题的真解进行近似。如式(1)所示的最小二乘解为:

$$m_{LS} = \operatorname{argmin} \|F(m) - d\|^2 \quad (2)$$

亦可使用正则化算法降低 Jacobi 矩阵的条件数,使逆问题的解适定。在本系统设计中使用了 Tikhonov 正则化算法在目标函数中加入惩罚函数实现对解的阻尼作用,使其稳定,在式(2)的基础上可以得到:

$$m_{(s,L)} = \operatorname{argmin} \|F(m) - d\|^2 + \lambda \|R\|^2 \quad (3)$$

式中: λ 被称为正则化因子,也称超参数, R 为正则化矩阵。正则化矩阵的选择有很多,通常可以利用单位矩阵,也可选择一阶或二阶微分运算符生成等效低通滤波器,还有 Total Variation 正则化等方法^[15]。本文系统主要致力于通过线性正则化的快速算法将 EIT 技术应用于航空器蒙皮结构缺陷检测,故直接将电导率的比例变化 $x = (\sigma_2 - \sigma_1) / \sigma_1$ 与其引起的边界电压变化 $z = (v_2 - v_1) / v_1$ 关联,这两者的关系可以线性化表示为:

$$z = Jx + n \quad (4)$$

式中: J 表示 Jacobi 矩阵, n 代表测量噪声信号,式(4)的正则化解方程为:

$$x = (J^T W J + \lambda R)^{-1} J^T W z \quad (5)$$

式中: x 是电导率分布实际比例变化的估计值, R 是正则化矩阵, λ 是超参数, W 是对角矩阵。

2 硬件系统设计

设计系统基本构架如图 1 所示,硬件部分包括夹持装置和测试装置,主要由函数信号发生器、多路控制开关、电压信号采集卡和夹持装置基架以及其上的电极构成。

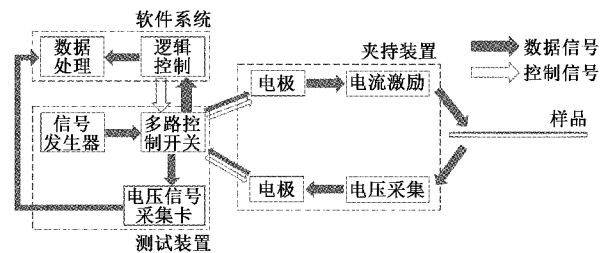


图1 蒙皮结构缺陷检测系统构架

夹持装置用于定位电极,起到支撑电极的作用,电极上设计了弹簧与轨道稳定机构,用于稳定电极与样品的接触面,并提供一个恒定的接触力,使接触电阻的影响尽量减小,同时夹持装置附带信号连接线连通电极与多路控制开关。多路控制开关根据逻辑控制通断电极,在既定的时间通过选定电极接入被测物,使信号发生器产生的低频电流流入被测样品,在目标域内部产生敏感场,同时根据刺激模

式接通对应采集位置的电极与电压信号采集卡,经采集卡采集后做滤波、A/D 转换、放大、调谐等处理,最后将得到的数据汇编为原始测量数据,供数据处理模块使用,硬件系统装配结果如图 2 所示。

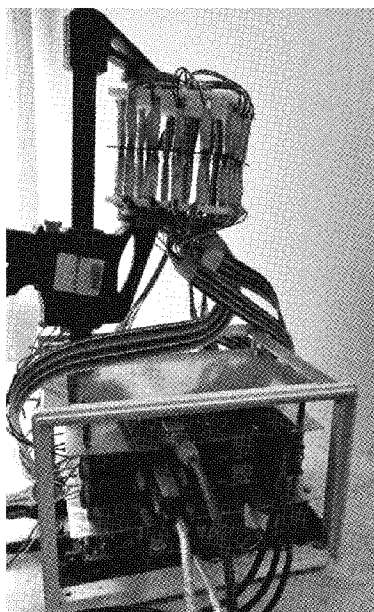


图 2 硬件装置装配

3 软件系统设计

在检测系统硬件系统完成搭建基础上,软件系统可以控制信号的激励与电压的采集,并利用测得的数据对被测物的电导率分布图像进行重建,以反映被测蒙皮部位的缺陷状况。

软件部分结构如图 3 所示,软件系统同时进行正问题的计算和对多路控制开关的控制。这里模拟小块蒙皮结构安装在机体上时正常受力的情况作为正问题计算边界电压的条件。控制程序控制整个程序进程的时序,发送指令控制信号发生器、电压采集卡和被测样品上电极的通断,在既定的时间选择正确的电极分别进行电流刺激和电压采集。为提高目标域内显示的灵敏度,按照相对测量模式,由径向相对的电极注入激励电流,在非激励电极上取得电压测量数据,当电极数量为 n 时,可以获得 $n \times (n-2)$ 个电压测量值(相对测量模式下有效数据为一半,另外一半对称),本系统取 $n=16$ 。然后将实际测量值进行显示,并与匀质情况下的边界电压进行比较、处理,求解逆问题,通过图像重建算法得到被测样品的电导率分布情况并显示。

4 系统验证实验及图像重建质量评价

实验采用了破坏性测试方法,首先选取了样品进行电阻抗成像实验,取得样品初始情况下的电导率分布,之后随机在样品不同位置使用了削凿、钻孔的方式进行破坏以模拟蒙皮结构在适航环境下受到的破坏,并模拟得到破坏结

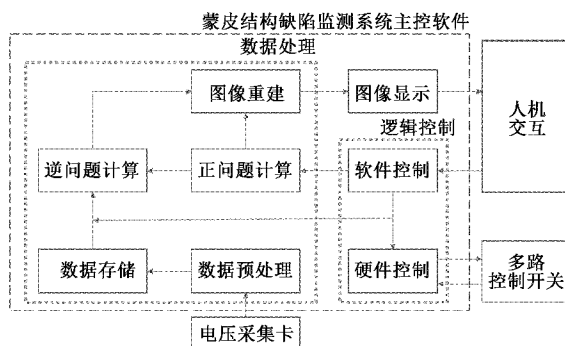


图 3 系统软件框架设计

果的仿真图像,最后对破坏的样品进行电阻抗成像实验,将破坏样品的电阻抗成像实验结果与样品破坏情况及破坏仿真结果对比,对重建的样品电导率分布图像作质量评估。

4.1 实验验证

实验选用的样品为航空器常用板材 2024 T-3 铝合金板,表面阳极化处理,取尺寸为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 2\text{ mm}$ 样品进行了初始测试,经多次测量,得到较为稳定的样品原始电导率分布图,部分结果如图 4 所示。重建时将样品以中心点为原点,划分为 2×2 的位置区间,图 4 中坐标表示实验样品上的相对位置。

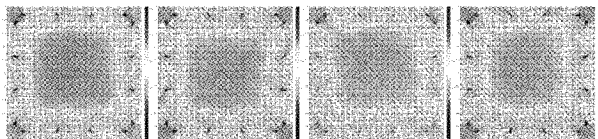


图 4 样品原始电导率分布

图 4 中每个像素点的数值表征该处点位电阻值的大小,重建图像中周边的 16 个点位为电极接触位置,电极与样品的接触会导致样品上接触点位附近的位置电阻率测量结果的变化,电极附近的样品电导率呈跳变式增大状态,在电极接触位置附近也会对测试的结果有些许影响,但其余稍远离电极的位置则表明样品的电导率分布呈均匀分布、变化平滑的状态。

对样品 A 进行破坏处理前后,使用系统对其测试得到的电导率分布如图 5 所示。实验选取了一个随机位置对样品进行钻凿破坏,如图 5(a)所示,图 5(b)是对模型进行了电阻变化设置后仿真得到的电导率分布情况,图 5(c)为样品完整时得到的初始电导率分布图,图 5(d)则是样品进行破坏实验后测得的电导率分布图,由图 5(b)可预见样品会在破坏位置附近区域形成较大的电阻跳变情况,对比图 5(c)和(d)可见样品电导率分布在被破坏位置有明显变化,在破坏区域附近形成了高电阻区域,该区域与图 5(b)中仿真模拟得到的区域高度吻合。

4.2 重建图像质量分析

为了客观量化实验得到的电导率分布图质量,采用几种常用的图像重建质量指标对其进行评价:振幅响应

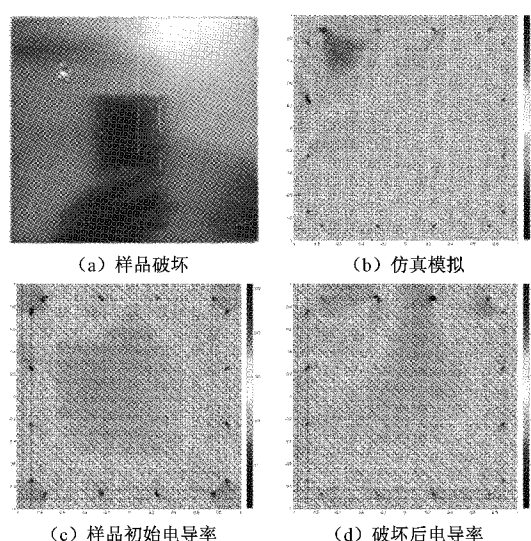


图 5 样品 A 做破坏实验前后电导率分布对比

(AR)、位置误差(PE)、分辨率(RES)、形状误差(SD)、伪影(RNG)和噪声放大(NF)^[16]。其中 AR 是系统可靠的先决条件,在实验中各样品完整情况下多次初始测量结果的多样性、稳定性证明系统的 AR 优秀,实验性可靠。另考虑到本实验样品的特点,选取了其余部分指标进行评价分析,其中 PE 表征了重构后的图像还原目标图像位置的精度,本系统中以破坏点圆心位置与重建图像中显示位置的圆心分别距离样品中心点的距离来计算;RES 表征计算成像面积占图像总面积的百分比,在本例中以破坏实验前后电导率大变化区域的面积除以图像总面积计算;RNG 则表征在围绕主要重建目标区域出现相反变化的情况,在本系统中以破坏区域外围电阻幅值与内圆幅值变化之比计算。故此样品 A 实验得到的电导率分布图像评价参数如表 1 所示。部分更多的样品实验结果如样品 B、C、D、E 的实际破坏情况、模拟仿真结果、初始电导率分布和样品破坏后的重建电导率分布如图 6 所示,各样品重建成像的评价结果如表 2 所示。

表 1 样品 A 测得的成像结果评价参数

评价参数	PE	RES	RNG
样品 A	21.124	0.164	0.176

如图 6 与表 2 所示,使用该电阻抗成像检测系统得到的大部分样品电导率分布重建图像在 PE、RES 指标上有较好的效果,特别在比初始样品电导率分布与破坏实验后样品电导率分布基础上,可以大致还原样品被破坏区域位置、大小,缺点也很明显,由于受电阻抗成像逆问题解的不适定性影响,重建图像无法完全指示破坏情况,实验中全部使用了圆孔钻头进行破坏,而重建图像反馈电阻变化区域形状各异,故 RNG 指标大多不符合小且稳定的期望。总的来说,系统能够完成数据测量和重建成像的功能,并说

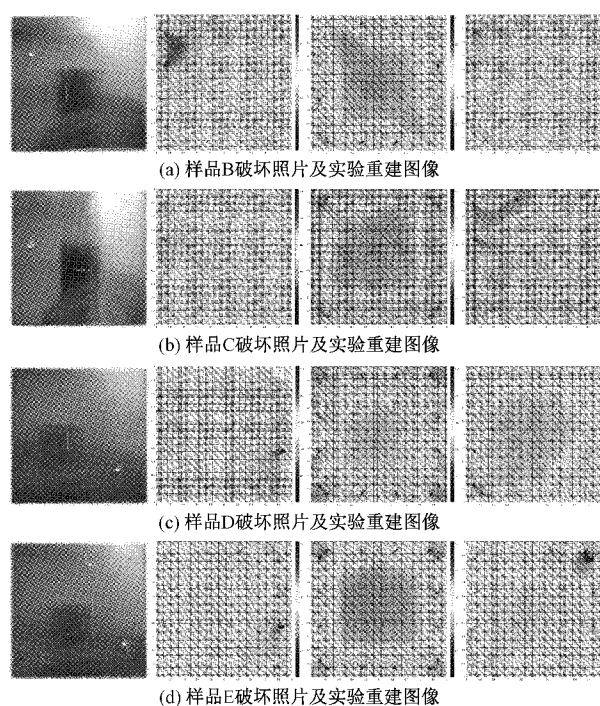


图 6 不同破坏情况下样品电导率分布变化

表 2 各样品重建结果评价参数

评价参数	PE	RES	RNG
样品 B	15.645	0.162	6.654
样品 C	9.253	0.212	8.081
样品 D	12.341	0.364	2.438
样品 E	28.415	0.548	4.663

明样品中的缺陷存在情况与缺陷存在大致位置,然成像品质尚有待提高。

5 结 论

本文设计了一种用于检测航空器金属蒙皮缺陷的 EIT 系统,介绍了 EIT 技术应用于蒙皮缺陷检测的原理可行性,并说明了系统的硬件设计方案与软件架构。基于设计系统使用航空工业常用蒙皮材料 2024 T-3 铝合金板材进行了破坏性实验,并对样品破坏前后分别进行了数据采集与图像重建。对成像结果进行了质量评价,有优点亦有遗憾,但实验结果证明了本系统的有效性,电阻抗成像技术对航空器蒙皮缺陷检测的研究、应用意义。

参考文献

- [1] 喻龙,章易谦,王宇晗,等.飞机自动钻铆技术研究现状及其关键技术[J].航空制造技术,2017(9):16-25.
- [2] 尚德广,夏禹,薛龙,等.飞机结构单机疲劳寿命监控技术研究综述[J].北京工业大学学报,2020,46(6):556-570.
- [3] WANG Q, WANG H X, GUI Z Q, et al.

- Reconstruction of electrical impedance tomography (EIT) images based on the expectation maximum (EM) method[J]. ISA Transactions, 2012, 51(6): 808-820.
- [4] LEITZKE J P, ZANGL H. A review on electrical impedance tomography spectroscopy [J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20 (18), DOI: 10.3390/s20185160.
- [5] NGUYEN D T, JIN C, THIAGALINGAM A, et al. A review on electrical impedance tomography for pulmonary perfusion imaging [J]. Physiological Measurement, 2012, 33(5): 695-706.
- [6] 徐灿华,董秀珍.生物电阻抗断层成像技术及其临床研究进展[J].高电压技术,2014,40(12):3738-3745.
- [7] PELLEGRINI S P, TRIGO F C, LIMA R G. Adaptive Kalman filter-based information fusion in electrical impedance tomography for a two-phase flow[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150:107326.
- [8] 孙亮,毛汉领,黄振峰,等.基于电阻抗成像技术的金属疲劳损伤检测[J].机械设计与制造,2020(4):177-181.
- [9] CAGÁN J. Hardware implementation of electrical resistance tomography for damage detection of carbon fibre-reinforced polymer composites [J]. Structural Health Monitoring, 2017, 16(2):129-141.
- [10] 戎舟,程大元,李若愚.基于 LabVIEW 的微电阻抗成像系统的设计[J].国外电子测量技术,2020,39(3): 98-103.
- [11] 宋波. ERT 图像重建算法及图像质量评估[D].西安:西安科技大学,2020.
- [12] CHENEY M, NEWELL I J C. Electrical impedance tomography[J]. Current Opinion in Critical Care, 2011, 18(1):35-41.
- [13] 王琦,彭圆圆,汪剑鸣,等.动态电阻抗成像时空相关性重建方法研究[J].电子测量与仪器学报,2018,32(2): 153-160.
- [14] KAI L, YANG W, SONG W, et al. Artificial sensitive skin for robotics based on electrical impedance tomography[J]. Advanced Intelligent Systems, 2020, 2(8), DOI:10.1002/aisy.201900161.
- [15] 范文茹,王化祥,郝魁红.基于两步迭代 TV 正则化的电阻抗图像重建算法[J].仪器仪表学报,2012,33(3): 625-630.
- [16] ADLER A, ARNOLD J H, BAYFORD R, et al. GREIT: A unified approach to 2D linear EIT reconstruction of lung images [J]. Physiological Measurement, 2009, 30(6): S35-S55.

作者简介

胡远洋,工学硕士,实验师,主要研究方向为电阻抗成像、深度学习等。

E-mail:yyhu@cafuc.edu.cn