

文章编号: 1671-7449(2005)01-0027-03

飞机结构腐蚀检测中的脉冲涡流无损检测技术

杨宾峰, 罗飞路, 曹雄恒, 徐小杰

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 对脉冲涡流无损检测技术的工作原理进行了分析, 建立了脉冲涡流的检测系统对加工的模拟飞机多层结构的试件进行了测试, 提取其时域瞬态感应信号的峰值和过零时间作为特征量, 对出现在飞机多层结构第二层中的腐蚀缺陷进行了定量检测, 试验结果和理论分析相一致, 证明了脉冲涡流检测方法的有效性, 由于其具有快速和定量化的优点, 因而在飞机结构的腐蚀检测中具有广阔的应用前景。

关键词: 脉冲涡流; 无损检测; 腐蚀; 峰值; 过零时间

中图分类号: TM935.4 **文献标识码:** A

The Detection of Corrosion in Aeroplane Using Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technology

YANG Bin-feng, LUO Fei-lu, CAO Xiong-heng, XU Xiao-jie

(Institute of Mechanical and Electrical Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The working principle of pulsed eddy current (PEC) nondestructive testing technology is analyzed, The PEC testing system was been established to examined the specimen of multi-layered aircraft structure, peak and zero-crossing time of the time domain transient response signal of PEC are extracted as the features to detect the corrosion in the second layer of aircraft structure quantificationally, the experiment results are consistent with that of the theory analysis, as the PEC have the advantages of fast speed and quantification, this makes the method have the broad using foreground in the testing of aircraft structure corrosion.

Key words: pulsed eddy current; nondestructive testing; corrosion; peak; zero-crossing time

飞机在长期的服役过程中, 很容易出现腐蚀和疲劳裂纹等缺陷, 如果不能及时检测出这些隐患, 将严重威胁飞行安全. 但是由于飞机的机身部分一般采用多层合金复合结构, 老旧飞机的腐蚀通常出现在多层结构的第二层, 因此很难被及时发现. 如何实现对腐蚀快速、准确和定量的检测, 是目前无损检测领域面临的一个难题. 传统的超声、涡流、射线及脉冲红外等无损检测技术都可以对飞机复合结构中第一层出现的腐蚀进行检测, 但是, 这些方法都很难检测到出现在第二层的缺陷. 脉冲涡流是近几年发展起来的一种新的无损检测方法, 是目前被证实唯一能对飞机结构中第二层出现的腐蚀进行定量检测的方法^[1], 在飞机结构的无损评估领域得到了广泛的应用^[2,3].

1 脉冲涡流检测基本原理

脉冲涡流的激励电流为一个脉冲, 通常为具有一定占空比的方波, 施加在探头上的激励方波会感应出脉冲涡流在被测试件中传播, 根据 Faraday 电磁感应定律, 检测线圈上感应的电压

$$V_f = \frac{\iint V_p(r, z, t) dr dz}{\iint dr dz}, \quad (1)$$

$$V_p = - \frac{\partial}{\partial t} \iint B \cdot dS = - \frac{\partial}{\partial t} \iint (\nabla \times A) \cdot dS = - \int_c \frac{\partial A}{\partial t} \cdot dl, \quad (2)$$

* 收稿日期: 2004-06-25

作者简介: 杨宾峰(1976—), 男, 讲师, 博士, 主要从事电磁无损检测研究.

式中: V_p 为“点”检测线圈感应的电压^[4].

假如有腐蚀等缺陷存在, 势必使得感应磁场强度 B 发生变化, 最终将体现在检测线圈上感应电压的变化, 由于脉冲包含很宽的频谱, 感应的电压信号中就包含重要的有关腐蚀的信息^[5].

脉冲涡流一般使用峰值和过零时间这两个特征参数来实现对腐蚀的定量检测, 脉冲涡流时域波形及典型特征参数如图 1 所示. 由于峰值随腐蚀体积大小的变化而变化, 过零时间随腐蚀出现深度的变化而变化, 基于这个原理, 对检测线圈感应的信号进行时域的瞬态分析, 就可以得到腐蚀体积和深度的定量信息.

2 脉冲涡流检测系统

脉冲涡流测试系统主要由 3 个部分组成, 即脉冲发生电路、探头和被测试件, 其系统框图如图 2 所示. 在本试验系统中, 采用直接数字合成 (Direct Digital Synthesizer, 简称 DDS) 技术来产生激励脉冲. DDS 是近几年来发展起来的一种新的频率/波形合成技术, 具有频率分辨率高、转换速度快、信号纯度高、相位可控等优点.

探头包括激励探头和检测探头, 激励探头是用直径为 0.24 mm 的漆包线绕成的空心线圈, 内径为 10.2 mm, 外径为 22.4 mm, 高为 10 mm, 共绕了 400 匝. 在设计检测探头时, 既可以采用霍尔传感器直接测量磁场的值, 也可以采用线圈来检测磁场的变化率. 为了克服霍尔传感器灵敏度较低的缺点, 本文采用了和激励探头同轴的线圈作为检测探头, 检测探头是用直径为 0.07 mm 的漆包线绕成的空心线圈, 内径为 2 mm, 外径为 5 mm, 高为 2 mm, 共绕了 800 匝.

脉冲涡流测试系统的工作过程为: 系统加电后, 根据液晶显示屏上的提示信息, 依次输入脉冲的幅值和频率值, 按确认键后, 系统开始工作. 由于 AD7008 产生的是正弦波, 因此需通过电压比较器进行整形得到方波激励信号, 但此时的激励电流很小, 需由音频功放集成芯片 TDA2030 对激励信号进行功率放大后再加到激励线圈两端. 当探头在被测试件表面扫描时, 通过数据采集卡对感应线圈上的信号进行采集并且将采集的数据实时存到硬盘上, 扫描结束后, 再对数据进行离线分析, 提取瞬态感应信号的特征量实现对腐蚀的定量检测.

我们在厚度为 3 mm 面积为 100 mm×100 mm 的铝板上加工了尺寸(长×宽×深)分别为: 15 mm×5 mm×2 mm, 15 mm×5 mm×2.5 mm, 15 mm×4 mm×2 mm, 15 mm×6 mm×2 mm, 15 mm×8 mm×2 mm 的长方形平底槽来模拟腐蚀, 然后将面积为 100 mm×100 mm 厚度为 1 mm 的完好铝板和加工有腐蚀的铝板紧密的粘和在一起, 来模拟飞机结构中出现在第二层中的腐蚀, 含有腐蚀的被测试件尺寸示意图如图 3 所示.

3 试验结果

在试验中, 激励脉冲的频率为 100 Hz, 占空比为 0.5, 采样频率为 100 kHz, 使用检测探头对感应磁

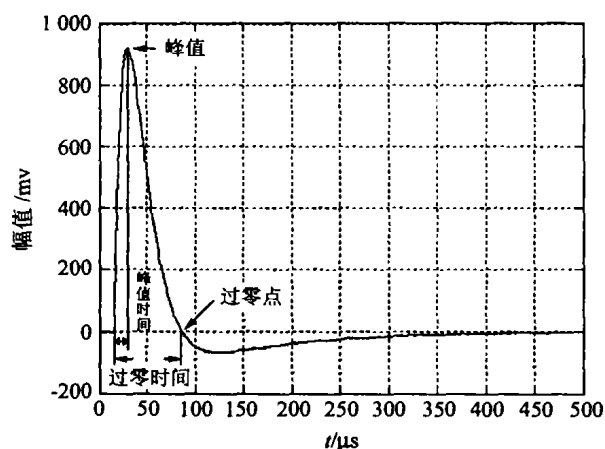


图 1 脉冲涡流时域信号的典型特征参数

Fig. 1 The key features of the PEC time domain transient response signal

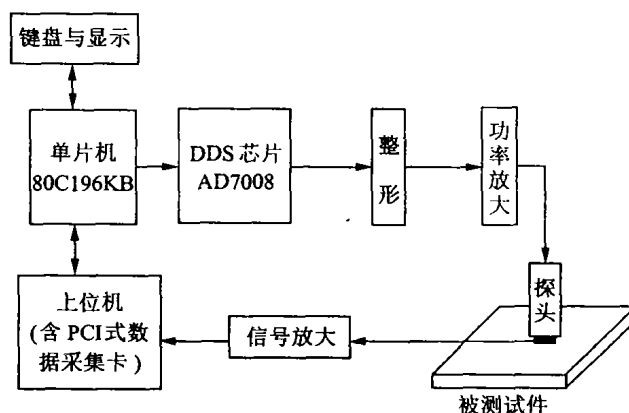


图 2 脉冲涡流测试系统框图

Fig. 2 The schematic of the PEC experimental system

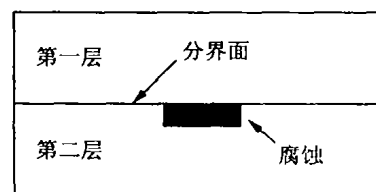


图 3 含有腐蚀的被测试件示意图

Fig. 3 The sketch map of specimen with corrosion

场的垂直分量进行检测. 当探头扫描被测试件表面时, 在没有腐蚀的地方, 检测探头感应信号的峰值不发生变化, 当探头扫描经过第二层有缺陷的试件表面时, 感应信号的峰值和过零时间发生明显的变化, 表 1 为探头在不同腐蚀程度的被测试件上扫描时, 测试得到的峰值和过零时间的数据.

表 1 不同腐蚀情况下的峰值和过零时间

Tab. 1 The peak and zero-crossing time of different corrosion condition

腐蚀体积(mm ³)	腐蚀深度(mm)	峰值(mv)	过零时间(μs)
无腐蚀	无	480	810
15×5×2	2	696	730
15×5×2.5	1.5	876	650
15×4×2	2	657	730
15×6×2	2	725	730
15×8×2	2	759	730

从表 1 的数据可以看出, 峰值的大小与腐蚀的体积有关, 腐蚀的体积越大, 则峰值越大. 过零时间与腐蚀出现的深度有关, 腐蚀出现的地方距离表面越远, 过零时间越长. 当腐蚀出现的深度相同而腐蚀的体积不同, 过零时间仍然相同, 这说明过零时间只与腐蚀出现的深度有关, 而与腐蚀的体积无关. 因此, 我们可以根据峰值的大小来定量测量腐蚀的体积, 根据过零时间来定量测量腐蚀出现的深度. 根据测试数据, 我们采用最小二乘法拟合出腐蚀深度随过零时间变化的曲线, 其关系式为: $D = 0.0268t - 9.6235$ (mm), 以及腐蚀体积随峰值变化的曲线, 其关系式为: $V = 0.002p^2 - 1.61p + 318$ (mm³). 在实际测试过程中, 只要测得峰值和过零时间, 就可以根据关系式计算得到有关腐蚀体积和深度的定量信息. 图 4 为不同腐蚀体积情况下检测探头感应信号波形的比较.

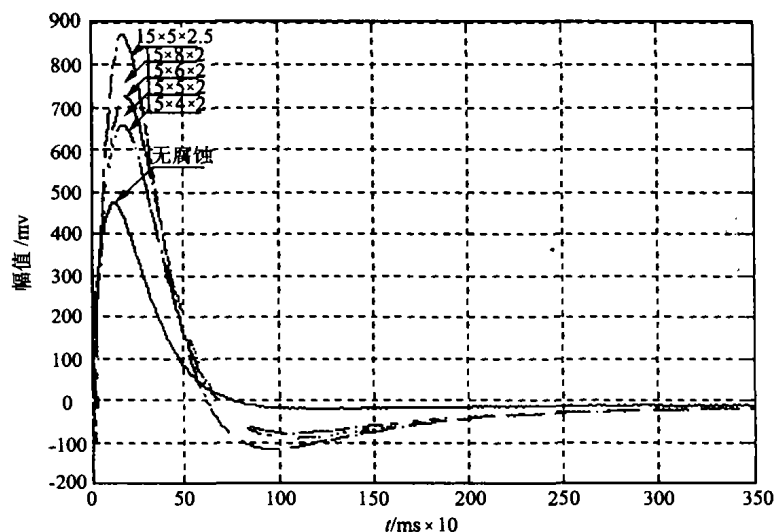


图 4 不同腐蚀体积情况下瞬态感应波形的比较

Fig. 4 Comparison of transient response signal with different corrosion volume

4 结 论

本文采用脉冲涡流无损检测技术对飞机结构中出现在第二层中的腐蚀进行了定量的检测, 从文中可以看出, 脉冲涡流只需在被测试件上进行一次扫描, 就可以快速地对腐蚀体积的大小和深度进行定量检测, 因而在飞机结构的腐蚀检测中具有广阔的应用前景.

参考文献:

- [1] Moulder J C, Bieber J A, Ward W W, et al. Scanned pulsed-eddy-current instrument for non-destructive inspection of aging aircraft[J]. SPIE, 1996, 2945: 2-13.
- [2] Smith R A, Hugo G R. Transient eddy current NDE for ageing aircraft-capabilities and limitations[J]. Insight, 2001, 43(1): 14-25.
- [3] Clauzon T, Thollon F, Nicolas A. Flaws Characterization with Pulsed Eddy Currents N. D. T[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1999, 35(3): 1873-1876.
- [4] Dai X W, Ludwig R, Palanisamy R. Numerical Simulation of pulsed Eddy-Current Nondestructive Testing Phenomena[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1990, 26(6): 3089-3096.
- [5] Sophin A, Tian G Y, Taylor D, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2003, 36: 37-41.