

铆接结构中缺陷的脉冲远场涡流定量评估技术

胥俊敏¹, 杨宾峰¹, 王晓峰¹, 李 驰¹, 张 辉²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 空军工程大学科研学术处, 西安, 710051)

摘要 针对飞机机身铆接结构检测中难以对缺陷进行定量评估的问题,将脉冲远场涡流检测技术运用于铆接结构缺陷检测之中。利用脉冲激励频谱成分丰富、可提取特征信息较多的优势对铆接结构中缺陷的定量评估技术展开研究。首先,建立铆接结构脉冲远场涡流三维检测模型,对缺陷进行检测,从而确定缺陷位置。在此基础上,分析缺陷类型、尺寸对检测信号的影响发现直接耦合分量幅值与上下表面缺陷深度之间具有不同的变化关系,从而实现对缺陷的分类识别。最终,利用信号的过零时间变化量实现对缺陷深度的定量,在缺陷深度已知的情况下,进一步利用直接耦合分量幅值变化对上表面缺陷长度进行定量;利用间接耦合分量幅值变化对下表面缺陷长度进行定量。

关键词 脉冲远场涡流; 铆接结构; 缺陷检测; 分类识别; 定量评估

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.01.014

中图分类号 TG115 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)01-0079-06

A Crack Quantitative Technology in Riveted Structure Based on Pulsed Remote Field Eddy Current

XU Junmin¹, YANG Bin Feng¹, WANG Xiao Feng¹, LI Chi¹, ZHANG Hui²

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Aimed at the problem that crack is very hard to be evaluated quantitatively in the riveted structure at aircraft fuselage, pulsed remote field eddy current testing technology is used to detect the crack of riveted structure. The cracks quantitative evaluation in riveted structures are studied by utilizing the advantages rich in the pulsed spectrum components and more information. Firstly, a three-dimensional model of remote field eddy current riveted structure is established to detect crack so as to get crack position. Then, the influence of crack type and size on detection signal is analyzed and the classification of surface and sub-surface cracks is realized according to the different relation between direct coupling component and crack depth. Finally, the quantitative detection of crack depth is realized by zero cross time changes. Under the premise of knowing crack depth, direct coupling component amplitude and indirect coupling component amplitude are used for quantitative evaluation of the crack length on surface and sub-surface respectively.

Key words: pulsed remote field eddy current; riveted structure; crack testing; identification; quantitative detection

收稿日期: 2017-01-09

基金项目: 国家自然科学基金(51377172); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2015JM5147; 2016JM6073)。

作者简介: 胥俊敏(1993—), 男, 四川绵阳人, 硕士生, 主要从事电磁无损检测技术研究。E-mail: zixu-sir@163.com

引用格式: 胥俊敏, 杨宾峰, 王晓峰, 等. 铆接结构中缺陷的脉冲远场涡流定量评估技术 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(1): 79-84. XU Junmin, YANG Bin Feng, WANG Xiao Feng, et al. A Crack Quantitative Technology in Riveted Structure Based on Pulsed Remote Field Eddy Current [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(1): 79-84.

飞机机身大量采用铆接结构连接机身不同部位,以保证飞机结构的完整性。铆接结构主要由铆钉以及2层以上工件构成,铆钉连接各层工件,使得各层工件构成一个整体^[1]。由于飞行服役过程中恶劣的工作环境以及机身应力分布不均匀的影响,机身铆接结构极易形成各种裂纹缺陷,从而给飞行安全带来严重隐患,甚至导致灾难性的飞行事故^[2-5]。因此,有必要及时采用无损检测方法对机身铆接结构进行检测评估,从而保障飞行安全。

由于铆接结构具有多层、大厚度的特点,传统的无损检测方法难以实现对其缺陷的检测。超声检测难以穿透层间气隙,无法探测到下层缺陷,红外检测仅对表面缺陷敏感,漏磁检测仅适用于铁磁性材料。远场涡流检测作为一种新型的涡流检测技术,由于其不受“集肤效应”的限制,能够穿透较大厚度的被测试件,适合大厚度多层铆接结构的无损检测^[5]。传统上,远场涡流被认为是管道结构的特有现象。南京航空航天大学的曲民兴教授等人通过仿真验证了远场涡流现象在平板结构中也能够实现^[6]。美国IMTT公司学者孙雨施通过设计带屏蔽结构的传感器实现了对铆接结构中缺陷的检测,但是,由于远场涡流对上下表面缺陷的检测灵敏度相当,其并未实现对缺陷的分类识别^[7-8]。加拿大安大略皇家军事学院的V. K. Babbar等人采用主成分分析算法实现了对铆接结构中缺陷的分类识别^[9],但是,其算法基于常规涡流检测技术,由于受集肤深度的限制,对深层缺陷的识别能力有限。电子科技大学的师奕兵教授提出了一种基于最小均方误差准则的波形逼近技术,并利用支持向量机实现对管道裂纹缺陷的定量反演^[10-11],但是由于算法复杂,并且需要大量的样本数据对模型进行训练,在实际检测中尚难以运用。综上所述,目前还缺乏一种针对铆接结构中缺陷检测与识别的有效技术手段。课题组借鉴前人的研究成果,前期通过给传感器设计信号增强单元与磁场抑制单元,在铆接结构中实现了远场涡流现象,并对缺陷进行了检测。本文在此基础上利用脉冲远场涡流丰富的频谱成分,较大的检测深度对铆接结构中缺陷的定量评估技术展开研究。

1 脉冲远场涡流的基本原理

远场涡流的基本原理见图1,激励线圈产生的磁场分为直接耦合分量与间接耦合分量,直接耦合分量在传播过程中受到磁场抑制单元的作用而快速衰减,间接耦合分量通过信号增强单元的引导向被测试件下方传播,在传播一定距离后再次穿透被测

试件,实现“二次穿透”,到达检测线圈。由于间接耦合分量在传播过程中穿透被测试件,因此通过检测线圈提取间接耦合分量的信息便能实现对缺陷的检测^[12-14]。

传统远场涡流检测采用正弦作为激励信号,检测特征信息较少,脉冲远场涡流采用脉冲作为激励信号克服了传统远场涡流探头过长,激励功耗过大,可用信息较少等问题^[15]。当激励线圈加载脉冲激励时,检测信号如图2所示,主要包含2个正峰值,分别对应远场涡流检测中的直接耦合分量与间接耦合分量。对缺陷进行检测时,通过分析直接耦合分量幅值、间接耦合分量幅值以及过零时间点等特征信息,便可实现对缺陷的定性以及定量评估^[16]。

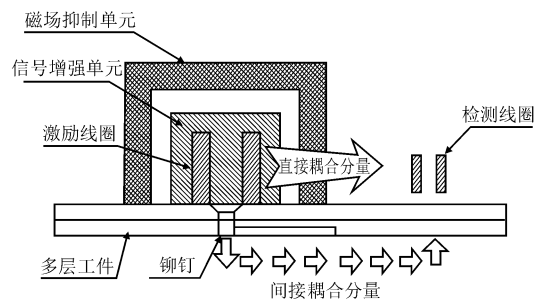


图1 远场涡流的基本原理

Fig. 1 Basic principle of remote field eddy current

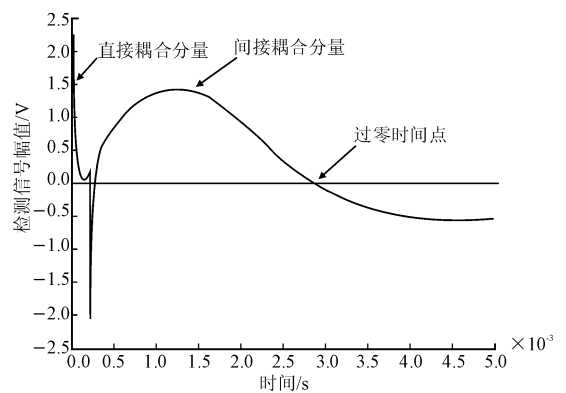


图2 脉冲远场涡流检测信号

Fig. 2 Signal of pulsed remote field eddy current

2 传感器设计与仿真

借助大型有限元仿真软件 ANSYS,建立铆接结构脉冲远场涡流三维检测模型。模型截面见图3。其主要包括传感器与被测试件。其中传感器由激励线圈、检测线圈以及信号增强单元、磁场抑制单元组成。传感器的主要尺寸参数见表1。

模型中被测试件由铆钉及两层铝板构成,铝板总厚度为10 mm。在对缺陷深度进行定量分析时,缺陷长度保持为20 mm、宽度保持为2 mm,深度分

别设置为 2 mm、4 mm、6 mm、8 mm。在对缺陷长度进行定量分析时,缺陷深度保持为 4 mm,宽度保持为 2 mm,缺陷长度分别设置为 22 mm、24 mm、26 mm、28 mm。

表 1 传感器主要尺寸参数

Tab. 1 Dimension parameters of sensor

	内径/mm	外径/mm	高度/mm
激励线圈	15	18	15
检测线圈	1	2	5
信号增强单元	18	23	23
磁场抑制单元	28	34	34

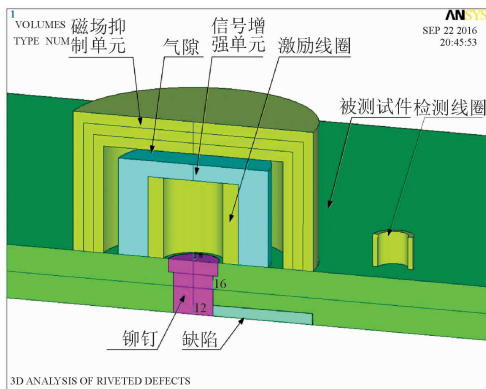


图 3 铆接结构缺陷检测三维仿真模型

Fig. 3 Threedimension simulation model of riveted structure crack detection

3 缺陷定量评估

铆接结构中的缺陷可分为上表面缺陷和下表面缺陷,见图 4。针对铆接结构中缺陷的定量评估技术应分 3 个步骤完成,首先是对铆接结构进行扫描,确定缺陷的具体位置。其次,考虑到上下表面缺陷的定量评估可能需要采用不同的特征量,定量评估之前应先对上下表面缺陷进行分类识别。最后,从上下表面缺陷的检测信号中提取出对应的特征信息,实现对缺陷的定量评估。

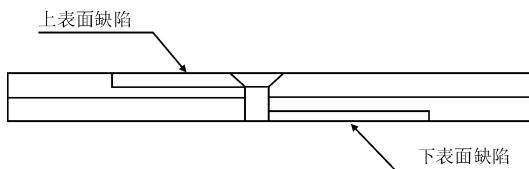


图 4 上下表面缺陷示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the surface and sub-surface crack

3.1 缺陷的定位检测

对铆接结构中缺陷进行检测时,将传感器置于

被测试件上方,激励线圈与铆钉同轴放置。传感器围绕铆钉进行 360°旋转,按图 5 所示的方式进行扫描。此时,激励线圈加载一频率为 200 Hz 的正弦信号,检测线圈收集铆钉周围的磁场信息。当检测线圈经过缺陷附近时,检测信号幅值与缺陷相对位置的变化关系见图 6。

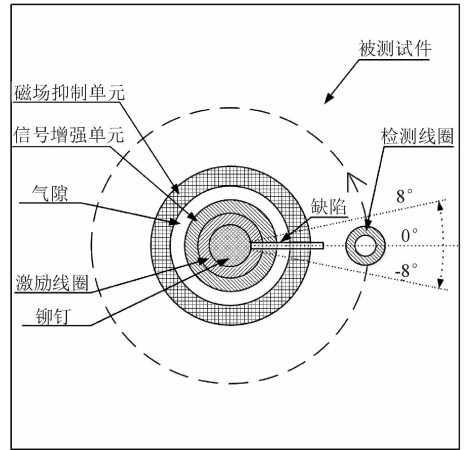


图 5 铆接结构缺陷检测扫描示意图

Fig. 5 Schematic diagram of crack detection

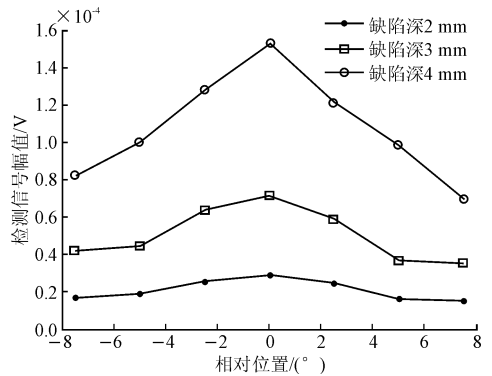


图 6 检测信号幅值与相对位置的变化关系

Fig. 6 Relationship between signal and crack position

从图 6 可以看出,当检测线圈在经过缺陷位置时,检测信号幅值存在一个极大值。因此,通过分析扫描过程中检测信号幅值的变化,便可实现对缺陷的定位检测。

3.2 缺陷的分类识别

在确定缺陷位置的情况下,进一步需要获得缺陷的种类和尺寸,由于正弦激励信号可提取特征信息相对较少,难以进行分类识别和定量评估,因此,此时激励信号设置为一频率为 200 Hz、幅值为 10 V、占空比为 10% 的脉冲信号。仿真得到上下表面不同深度缺陷的检测信号,见图 7(a)、(b)。

从图 7(a)、(b)中提取出上下表面不同深度缺陷检测信号的直接耦合分量。绘制直接耦合分量幅值与缺陷深度变化关系图,见图 8。

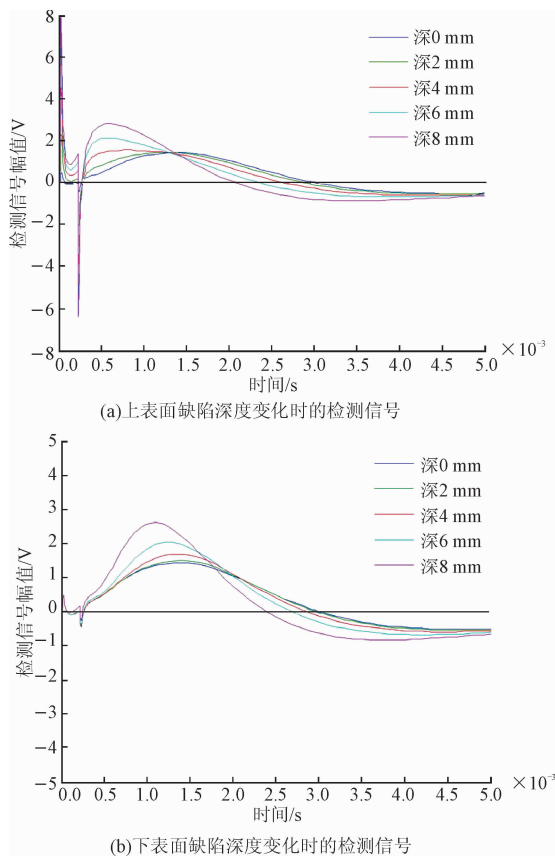


图7 上下表面缺陷深度变化时陷检测信号
Fig. 7 Signal of different depth cracks

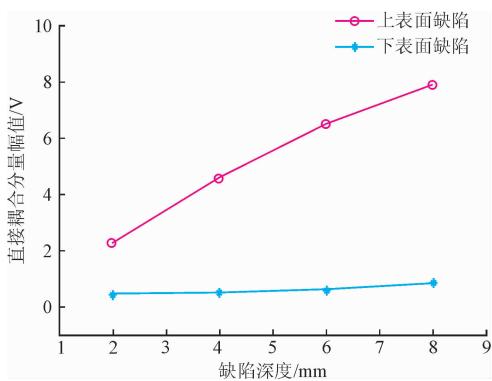


图8 直接耦合分量幅值随缺陷的变化
Fig. 8 Variation of direct coupling component amplitude with cracks

从图8可以看出,上表面缺陷检测信号中直接耦合分量幅值较大,并且直接耦合分量幅值随着缺陷深度的增大而增大,而下表面缺陷检测信号中直接耦合分量的幅值相对较小,且基本不随着缺陷深度的变化而变化。这种差异形成的原因在于:脉冲激励信号在频带上具有较宽的频域分布,由于集肤效应的影响,高频成分被束缚在被测试件上表面,只有低频成分才能穿透被测试件到达下方,而脉冲远场涡流检测信号中的直接耦合分量正好反应了磁场中的高频成分。因此,直接耦合分量幅值对上表面

缺陷深度变化敏感,而基本不随下表面缺陷深度的变化而改变。利用这一特性便可实现对上下表面缺陷的分类识别。

3.3 对缺陷深度的定量

从图7可以看出,检测信号过零时间点随上下表面缺陷深度的改变均有变化。以无缺陷时的过零时间点为参考,绘制出过零时间变化量与缺陷深度的变化关系图,见图9。

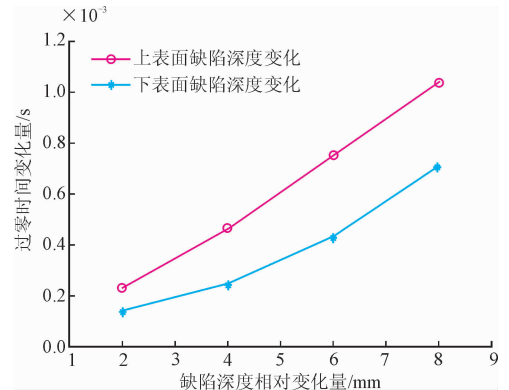


图9 上下表面缺陷检测信号过零时间变化量
Fig. 9 Zero crossing time variation of surface and sub-surface cracks testing signals

从图9可以看出,随着缺陷深度的增加,上下表面缺陷检测信号的过零时间变化量也逐渐增大,两者存在近似线性关系。由于间接耦合分量传播过程中2次穿透被测试件,缺陷深度的变化将直接影响间接耦合分量在被测试件中的传播距离,进而对间接耦合分量的过零时间产生影响。因此,可以利用缺陷过零时间变化量实现对缺陷深度的定量。

3.4 对缺陷长度的定量

仿真得到上下表面不同长度缺陷的检测信号,见图10。从图10提取出直接耦合分量幅值与间接耦合分量幅值2个特征,分别绘制出直接耦合分量幅值与上表面缺陷长度的变化关系图以及间接耦合分量幅值与下表面缺陷长度的变化关系图,见图11(a)、(b)。可以看出对上表面缺陷,直接耦合分量幅值随着缺陷长度的增大而增大;对下表面缺陷,间接耦合分量幅值随缺陷长度的增大而增大。但是,从图7缺陷深度引起的检测信号变化中可以发现,直接耦合分量幅值与间接耦合分量幅值随缺陷深度的不同也有变化,因此,在对缺陷长度进行定量之前应首先确定缺陷的深度。

从图10提取出过零时间变化量与缺陷长度之间的变化关系,与缺陷深度变化引起的过零时间变化量进行比较,结果见图12。可以看出,过零时间变化量对缺陷深度的变化较为敏感,而基本不随缺陷长度的变化而变化。因此,可以利用过零时间变

化量确定缺陷的深度,在缺陷深度已知的情况下,再利用直接耦合分量幅值对上表面缺陷长度进行定量,利用间接耦合分量幅值对下表面缺陷长度进行定量。

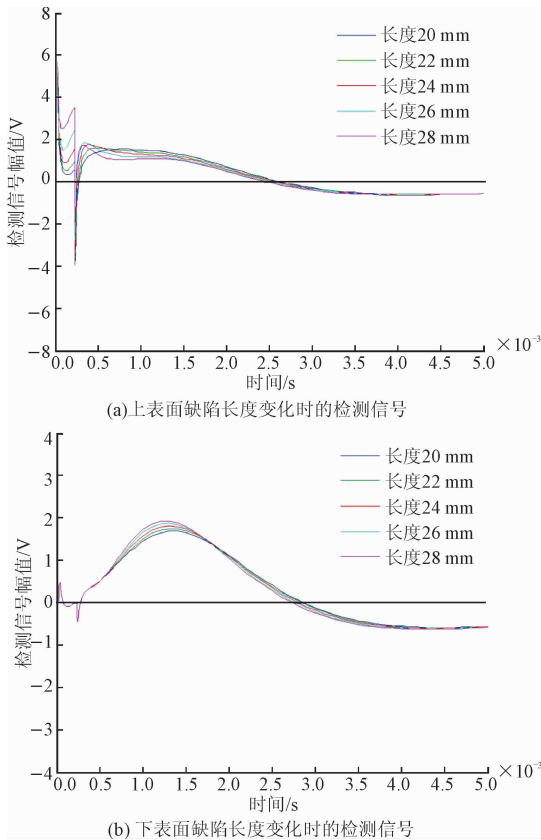


图 10 上下表面缺陷长度变化时的检测信号
Fig. 10 Signal of different length cracks

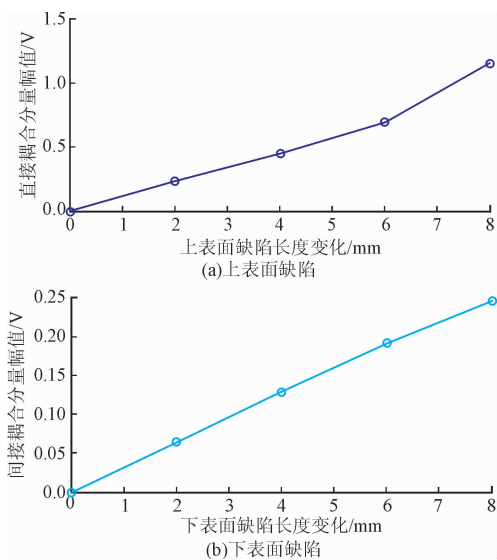


图 11 缺陷长度变化对检测信号的影响
Fig. 11 Signal change caused by crack length

缺陷长度对检测信号产生的影响,可以用缺陷对被测试件中涡流的扰动来解释。如图 13 所示,激励线圈产生的交变磁场会在被测试件中感生出环状

涡流,缺陷的存在会导致涡流流动方向的偏转和聚集,缺陷长度越长,这种聚集效果越明显,使得检测信号中对应的幅值也越强。因此,对上表面缺陷,长度越大,直接耦合分量幅值越大;对下表面缺陷,长度越大,间接耦合分量幅值越大。

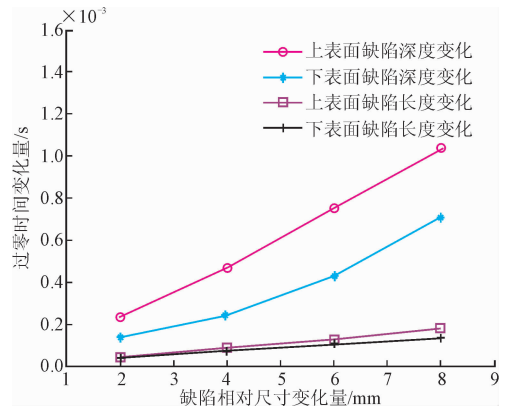


图 12 过零时间变化量与缺陷深度变化关系
Fig. 12 Variation of zero-cross time with crack size

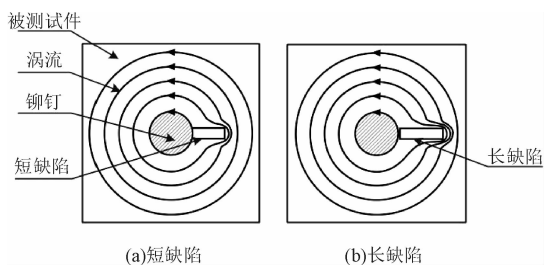


图 13 缺陷对涡流的扰动
Fig. 13 Disturbance of eddy current caused by cracks

4 结论

基于脉冲远场涡流频谱成分丰富,可提取特征信息较多的优势,利用 ANSYS 有限元仿真软件,建立了铆接结构脉冲远场涡流缺陷检测模型,利用该模型对上下表面不同尺寸的缺陷进行检测,并从检测信号中提取恰当的特征信息,实现了对铆接结构中缺陷的分类识别和对缺陷深度与长度的定量评估。

1) 检测信号直接耦合分量幅值对上表面缺陷深度变化敏感,而基本不随下表面缺陷深度的变化而变化,利用这一特性可以实现对上下表面缺陷的分类识别。

2) 检测信号过零时间变化量对缺陷深度变化敏感,而基本不随缺陷长度的变化而变化,利用这一特性可以实现对缺陷深度的定量评估。

3) 对缺陷长度的定量,应首先利用过零时间变化量确定缺陷的深度,在此基础上,利用直接耦合分量幅值对上表面缺陷长度进行定量,利用间接耦合分量幅值对下表面缺陷长度进行定量。

参考文献(References):

- [1] ZHANG K F, CHENG H, LI Y. Riveting Process Modeling and Simulating for Deformation Analysis of Aircraft's Thin-Walled Sheet-metal Parts [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24: 369-377.
- [2] 赵平, 李旭东, 于化东, 等. 一种针对铆接结构进行疲劳寿命评估的新方法 [J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(2): 310-315.
ZHAO P, LIU X D, YU H D, et al. New Method of Fatigue Life Prediction for Riveted Structure [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(2): 310-315. (in Chinese)
- [3] 田本鉴, 熊峻江. 非对称疲劳载荷作用铆钉连接件疲劳寿命估算 [J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(12): 1649-1653.
TIAN B J, XIONG J J. Fatigue Life Estimation of Riveted Joints Subjected to Asymmetrical Loading [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2013, 39(12): 1649-1653. (in Chinese)
- [4] 马保全, 周正干. 航空航天复合材料结构非接触无损检测技术的进展及发展趋势 [J]. 航空学报, 2014, 35(1): 1787-1803.
MA B Q, ZHOU Z G. Progress and Development Trends of Composite Structure Evaluation Using Noncontact Nondestructive Testing Techniques in Aviation and Aerospace in Dustries [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 1787-1803. (in Chinese)
- [5] 杨宾峰, 张辉, 周义建, 等. 新型脉冲远场涡流传感器检测性能的仿真分析 [J]. 失效分析与预防, 2014, 9(4): 193-197.
YANG B F, ZHANG H, ZHOU Y J, et al. Simulation Analysis the Performance of New Pulsed Remote Field Eddy Current Probe [J]. Failure Analysis and Prevention, 2014, 9(4): 193-197. (in Chinese)
- [6] 曲民兴, 周连文, 孟小利. 导电平板的远场涡流现象 [J]. 无损检测, 1997(8): 216-219.
QU M X, ZHOU L W, MENG X L. Remote Field Eddy Current Phenomenon in Metallic Plates [J]. Nondestructive Testing, 1997(8): 216-219. (in Chinese)
- [7] 孙雨施. 远场涡流效应的普遍性以及远场技术更广泛的应用 [C]// 第十届全国无损检测学术年会. 南昌, 2013: 523-528.
SUN Y S. Generality of Remote Field Eddy Current Effect and Its Widened Applications [C]// The 10th National Annual Conference on Nondestructive Testing. Nanchang, 2013: 523-528. (in Chinese)
- [8] SUN Y S, OUYANG T, UDPA S. Multi-Layer Aircraft Structure Inspection Using Super-Sensitive Remote-Field Eddy-Current System [C]// AIP Conference Proceedings, 2001, 557(1): 1906-1913.
- [9] BABBAR V K, UNDERHILL, P R, STOTT C, et al. Finite Element Modeling of Second Layer Crack Detection in Aircraft Bolt Holes with Ferrous Fasteners Present [J]. NDT&E International, 2014, 65: 64-71.
- [10] 张伟, 师奕兵, 王志刚, 等. 管道裂纹远场涡流检测的定量反演方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1681-1689.
ZHANG W, SHI Y B, WANG Z G, et al. Research on the Quantitative Inverse Method of RFEC inspection for Pipe Cracks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1681-1689. (in Chinese)
- [11] 罗清旺, 师奕兵, 王志刚, 等. 一种基于远场涡流的管道大面积缺陷定位检测方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(12): 2790-2797.
LUO Q W, SHI Y B, WANG Z G, et al. Location and Inspection Method for Large Area Pipe Defect Based on RFEC Testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2790-2797. (in Chinese)
- [12] 陈佩华, 黄平捷, 张武波, 等. 铁磁性导体材料平板远场涡流探伤技术分析 [J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(12): 1948-1956.
CHEN P H, HUANG P J, ZHANG W B, et al. Fault Detection by Remote-Field Eddy Current Technique in Ferromagnetic Conductive Plate [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2013, 47(12): 1948-1956. (in Chinese)
- [13] 刘相彪, 李勇, 陈振茂, 等. 基于磁场测量的脉冲远场涡流检测双层套管仿真 [J]. 无损检测, 2013, 35(10): 48-52.
LIU X B, LI Y, CHEN Z M, et al. Pulsed Remote Field Eddy Current Simulation of Double-Casing Pipeline Based on Magnetic Field Measurement [J]. Nondestructive Testing, 2013, 35(10): 48-52. (in Chinese)
- [14] 陈佩华. 平板导体缺陷复合式涡流检测技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
CHEN P H. Study on Multi-Mode Eddy Current Technology for Defect Inspection of Planar Conductive Structures [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [15] VASIC D, BILAS V, AMBRUS D. Measurement of Ferromagnetic Tube Wall Thickness Using Pulsed Remote Field Technique [C]// Proc 12th IMEKO TC4 Int Symp. Zagreb, Croatia, 2002: 468-472.
- [16] 杨宾峰, 张辉, 荆毅飞, 等. 基于脉冲激励的远场涡流检测机理及缺陷定量评估技术 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2012, 13(6): 45-49.
YANG B F, ZHANG H, JING Y F, et al. Inspection Principle and Defect Quantitative Estimation of Pulsed Remote Field Eddy Current Technique [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012, 13(6): 45-49. (in Chinese)