

脉冲涡流检测技术的研究进展和展望

余付平¹, 朱荣新¹, 王韞江¹, 李 斌¹, 丁克勤²

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 西安 710077; 2. 中国特种设备检测研究中心, 北京 100013)

摘 要:飞机多层结构中缺陷的检测是目前航空领域无损检测的难点。脉冲涡流检测技术近年来在航空无损检测领域得到了广泛的重视和应用。综述了国内外科研机构在脉冲涡流技术的工程应用、理论计算、缺陷成像以及缺陷识别方法方面的研究进展。指出了脉冲涡流检测技术的发展趋势以及今后的研究热点。

关键词:脉冲涡流检测; 航空领域; 研究进展

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)11-0842-05

Research of Pulsed Eddy Current Testing Technology

YU Fu-Ping¹, ZHU Rong-Xin¹, WANG Yun-Jiang¹, LI Bin¹, DING Ke-Qin²

(1. Institute of the Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract: The flaw detection of multi-layered structures of aircraft fuselage lap splices is still a difficulty to the aviation industry. Pulsed eddy current testing technique received recognition and application in aviation industry. The recent research advances of research institute in China, abroad are reviewed including the engineering application, theoretical calculation, defect imaging and defect recognition. The developing trend of pulsed eddy current testing technique and its hot research aspects were pointed out.

Keywords: Pulsed eddy current testing; Aviation field; Research development

衡量一个国家基础工业先进与否, 无损检测技术的发展水平是一个不可或缺的因素。由于航空领域对于安全要求特别严格, 使得无损检测在航空领域得到广泛重视和应用, 各种最先进的无损检测技术, 首先都应用在航空领域。可以毫不夸张地说, 航空的安危系于无损检测。目前, 航空无损检测面临的主要难题是老龄飞机的检测。

脉冲涡流(简称 PEC)的激励信号通常为具有一定占空比的方波脉冲, 施加在探头上的激励方波感应出涡流在被测试件中传播。根据电磁感应原理, 该涡流又会感应出一个快速衰减的磁场。随着感生磁场的衰减, 检测元件上就会感应出随时间变化的电压。由于脉冲包含很宽的频谱, 感应的电压

信号中就包含着缺陷很多重要的信息。脉冲涡流由于其出众的检测能力, 目前在飞机结构的无损评估领域得到了广泛的应用。

1 脉冲涡流工程应用的研究进展

20 世纪 70 年代在 Review of Progress in Quantitative NDE 国际学术会议上发表了有关脉冲涡流技术方面的文章, 对探头的优化设计以及脉冲涡流在裂纹缺陷检测中的应用进行了初步的研究^[1]。

近年来, 国外大量研究机构利用脉冲涡流技术对飞机多层结构中裂纹和腐蚀的检测问题进行了广泛深入的研究, 取得了很大的进展。一些研究机构已经推出了可实用的脉冲涡流检测仪器。

1993 年, 法国 CEGELY 的研究人员采用一对磁阻传感器作为检测元件, 利用差分的原理来提高检测灵敏度, 对铆接结构周围的缺陷进行了检测^[2]。1997 年, 他们对原来的方法进行了一些改进, 采用

收稿日期: 2007-12-21

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2006BAK02B02)

作者简介: 余付平(1983—), 女, 硕士研究生, 主要从事测试计量技术及仪器研究。

霍尔传感器作为检测元件,利用峰值、峰值时间和特征频率三个参数来对缺陷的尺寸进行定量^[3]。

1996年,Tai C C等人采用绝对式线圈,利用脉冲涡流作为激励,通过分析线圈中电流的变化,对多层结构镀层的电导率及厚度进行了检测^[4],该检测要求镀层和基底的材料都为非磁性金属。2002年,他们又实现了对镀层或基底之一为磁性材料情况的镀层电导率和厚度的检测^[5]。

美国 Iowa State University 无损评估中心在脉冲涡流的研究主要集中在对飞机多层结构缺陷的检测和定量上^[6],并且取得了有关 PEC 技术的专利。他们采用线圈作为激励和检测元件,利用峰值和过零时间作为特征量,其中,峰值主要和腐蚀的严重程度有关,过零时间和腐蚀的深度密切相关。2001年,其在美国空军的支持下,研制了用于检测飞机多层结构中腐蚀缺陷的脉冲涡流仪器^[7]。

美国通用电气公司研究与发展中心分析了激励脉冲参数对成像结果的影响,认为对于特定的脉冲涡流探头,通过优化设计激励脉冲的形状可以得到理想的检测结果,对于深层缺陷的检测,必须确保足够的激励脉冲长度以提供所需的能量,并实现了对腐蚀缺陷的成像检测^[8]。

2001年,加拿大国防部飞行器研究中心的研究人员发现在腐蚀量一定的情况下,不管提离如何变化,脉冲涡流感应信号会在同一个点相交,提出用提离交叉点(Lift-off Point, LOP)的方法消除提离效应对检测结果的影响,实现了对机身结构中腐蚀缺陷的成像检测^[9]。

英国防卫评估与研究中心(DERA)和澳大利亚航空与航海研究实验室合作,于2001年研制出对飞机机身进行检测的仪器 TRECSAN,采用专用的机械扫描装置,用来对飞机多层结构中出现的裂纹和腐蚀缺陷进行定量检测^[10]。该仪器目前已经进入实用化阶段。

英国的科学家研究了脉冲涡流技术在铁磁性材料(如火车铁轨)和非磁性材料(飞机结构)缺陷检测中的应用^[11]。对铁磁性材料的检测提出了一种集成脉冲涡流和电磁声换能器(EMAT)的方法,将脉冲涡流和 EMAT 集成于同一个探头(图1)。EMAT 传感器置于磁轭的两端,工作于激励检测模式,EMAT 所感应的涡流场与外加磁场形成同频率的交变洛伦兹力,进而在表面产生应力波,即超声波。脉冲涡流传感器位于磁轭的中央,由于磁轭的

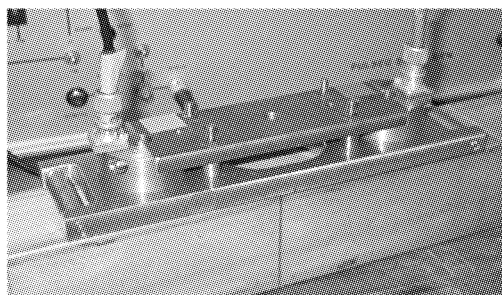


图1 集成 EMAT 探头结构

存在,使得脉冲涡流相当于工作在脉冲漏磁模式^[12],脉冲涡流信号得到了增强。两种方法具有很强的互补性,提高了检测的灵敏度和可靠性,而且一次检测使用了两种方法,缩短了检测时间,实现了快速检测的目标。

表1列出了目前国际上一些研究机构研制的脉冲涡流检测系统情况。

表1 脉冲涡流检测系统情况

系统型号	检测器件	激励模式	信号分析	研究进展	应用对象
DERA(UK)	Hall	电流	时域	有产品	飞机结构
ISU(USA)	Hall	电流	时域	有产品	飞机结构
Canada	线圈	电压	时域	在研	飞机结构
France	Hall/MR	电压	时/频域	在研	飞机结构
HU(UK)	Hall	电压	时/频域	在研	飞机/铁路

从表1中可以看出,各研究机构所采用方法的差别主要体现在以下几个方面:

(1) 激励方式的不同 按照脉冲涡流检测系统激励方式的不同,可以分为恒电压激励和恒电流激励。从理论上讲,恒流激励优于恒压激励,因为感应磁场主要是与线圈中的电流成正比,而不是与激励电压成正比。在恒流激励的情况下,激励线圈中的电流不会随着线圈阻抗的变化而变化。但是,在实际应用中,恒流激励从硬件上实现比较困难,而恒压激励的电路简单,容易实现。

(2) 检测方式的不同 按检测方式的不同,脉冲涡流可以分为线圈检测和磁传感器检测。通常,在检测深层缺陷时,激励信号的频率选择得很低。由于检测线圈测量的是磁场的变化量,因此不适用于低频的检测场合,而磁传感器在低频时具有良好的响应能力。但是,在被测件厚度不是很厚的检测场合,使用线圈作为磁场测量器件也能达到同样效果,而且其检测灵敏度要高于磁传感器。

(3) 信号处理方式的不同 目前,大多数研究

都是从时域提取脉冲涡流信号特征量来对缺陷进行定量,没有充分利用脉冲涡流频率分量丰富的优点。将时域和频域结合起来进行分析能得到更多的缺陷信息,从而更好地对缺陷定量。

除了将脉冲涡流检测技术应用在飞机多层结构缺陷检测之外,国外有关研究人员还将其应用到铁磁性管道和板材检测中,如采用脉冲涡流对深层的表面缺陷进行检测^[13],取得了良好的效果。

国内方面,文献[14]对脉冲涡流的工作原理、特征提取、提高效应减少技术及缺陷分类识别等的研究进行了综述。文献[15]采用绝对式线圈作为传感器,对非磁性金属(铜和铝)和磁性金属(铁)试件中的裂纹缺陷进行了检测,研究结果认为裂纹深度和脉冲涡流信号幅值之间存在密切的关系。文献[16]对脉冲涡流在裂纹长度和深度的定量及缺陷的分类识别问题进行了研究。采用阵列脉冲涡流对腐蚀缺陷进行了成像检测。文献[17]采用脉冲涡流响应信号的峰值、衰减周期、功率谱峰值作为特征量,对脉冲涡流的频率特性进行了深入的分析研究。文献[18]给出一种由 R、L 串联构成的脉冲涡流检测等效电路,并对不同材料、厚度的试件进行了检测。

爱德森(厦门)电子有限公司成功研制了多种用途的便携式和台式涡流检测仪。SMART-2097+型便携式智能多频涡流仪采用阻抗图法实现对裂纹、壁厚和腐蚀等缺陷的检测,被广泛应用于航空、航天、电力和石化等领域的在役和役前检测。同时,该公司研制的 EEC-39 型智能四频八通道涡流检测仪可一次性获得管道缺陷状况及壁厚减薄的涡流信息,能有效抑制在役检测中因管子冷加工、支撑板、凹痕及沉积物等产生的干扰信号。被广泛应用于核能、石油化工和航天等领域的在役管道探伤及壁厚测量;也用于航空领域中发动机叶片裂纹、螺孔内裂纹、飞机的起落架、轮毂和铝蒙皮下等缺陷的检测。

2 脉冲涡流理论计算的研究进展

20 世纪 90 年代以来,国际上对脉冲涡流的理论研究进入了一个高潮,理论计算主要有数值解和解析解两种方法。

在解析解研究方面,1997 年,Tai C C 等通过分析线圈阻抗变化实现了对脉冲电流变化量的计算。其首先在频域对线圈阻抗的差分进行计算,然后在时域对电流的差分进行计算。理论分析和实验结果吻合得很好,误差 $<3\%$ ^[4,5]。

1997 年,Bowler J 等对在时间常数很小的指数激励电流下,半无限大空间中脉冲涡流的响应进行了计算,理论和实验结果吻合得非常好^[19]。

解析解的表达式形式优美,理论价值大,计算比较简单。但大量复杂的电磁场定解问题还是需要用数值方法求解。数值解几乎适用于所有的电磁场问题的求解。脉冲涡流数值解的研究进展如下:

1990 年,Ludwig R 和 Dai X W 采用加权剩余有限元模型对二维轴对称脉冲涡流的磁矢位进行了数值计算^[20],同年,他们又采用混合有限元与有限差分计算模型对脉冲涡流在导体中的分布进行了计算。1993 年,Tanaka M 等人采用边界元(BEM)实现了对脉冲涡流的数值计算,提出了将傅里叶变换的方法应用到边界元的计算中,通过边界元的正弦稳态分析得到频域响应,通过对频域响应的结果进行傅里叶反变换得到瞬态响应,这样就省去了体积积分的计算过程,充分体现了 BEM 方法的优点^[21]。2002 年,Pavo J 采用傅里叶变换的方法实现了多层结构中存在缺陷时脉冲涡流响应的计算^[22]。

因有限元方法对缺陷的描述严重依赖网格划分和网络节点连接系数的选择。为克服这一缺点,近年来,无网格方法因其在几何形状表示方面的优势而引起了人们极大关注,它可以很好地对缺陷的形状加以描述。2004 年,Xuan L 等采用 Galerkin 无元方法(EFG)实现了对脉冲涡流的计算,并进行了实验验证^[23]。Yioultsis T V 等采用显式有限差分算法求解了低频脉冲电磁场,通过联合使用有限差分以及边界元的方法,对于扩散方程的求解采用显式差分方法,对于开域采用边界元的方法,算法具有良好的鲁棒性。2002 年,Yioultsis T V 又提出了采用完好匹配层(PML)的方法来解决开域问题^[24]。

北京航空航天大学的雷银照等人对线性瞬态涡流场定解问题中的法向边界条件与解的唯一性进行了证明,并将其应用到通有单脉冲电流的单匝圆环线圈平行放置在半无限大导体上方的瞬态涡流问题,用拉普拉斯变换的方法求出了导体中涡流密度向量的解析表达式^[25]。南京师范大学的幸玲玲等人应用涡流检测中积分方程法的理想裂纹模型以及有限元-边界元耦合法,在频域中研究了平板导体中含有理想裂纹时的磁场分布,结果表明理想裂纹模型与快速傅里叶变换相结合是一种求解磁场时域冲激励响应的快速有效方法^[26]。

总的来说,脉冲涡流的数值计算方法主要有有

限元法(FEM)、边界元法(BEM)和时域有限差分法(FDTD)三种。对于有限元法,一种是瞬态(时间步进)有限元模型,另一种是把激励信号分解成傅里叶级数的谐波有限元模型,两种方法都需要耗费大量的计算时间。对于时域有限差分法,其通常应用在高频电磁场计算中,但由于该方法简单,近年来通过对算法的改进和边界问题的解决,使得该方法也被应用到脉冲涡流的计算中来,进一步扩展了低频涡流的求解途径。

3 脉冲涡流缺陷成像技术的研究进展

2001年,美国通用电气公司的研究人员对激励脉冲及其响应进行了傅里叶分析,研究了脉冲涡流在导体中的穿透特性,对激励脉冲的幅值、占空比以及采集频率等参数对成像结果的影响进行了分析,并研究了系统参数的优化设置问题^[8]。

对于飞机多层结构中腐蚀缺陷的成像检测,由于探头倾斜、突出的铆钉帽、粘合剂脱落产生层间间隙的变化导致检测中产生的提离效应,如果不加以消除,则会引起成像结果产生失真。Lepine B A等人采用提离交叉点(LOP)方法来消除扫描过程中产生的提离,采用A、B和C扫描三种成像方式对模拟飞机多层结构试件进行了检测,并从退役的波音727飞机机身上取下一块包含两层1.27 mm厚的2024-T3铝的试样(其中含有自然产生的腐蚀),对其进行了实际测试,取得了良好的实验结果^[9]。

以上这些脉冲涡流仪器都采用线圈作为检测传感器。DERA和AMRL合作研制的脉冲涡流仪器TRECSCAN采用Hall传感器作为检测元件,其在低频时具有良好的响应特性,可以对深层缺陷进行检测^[10],图2为该仪器的成像结果。

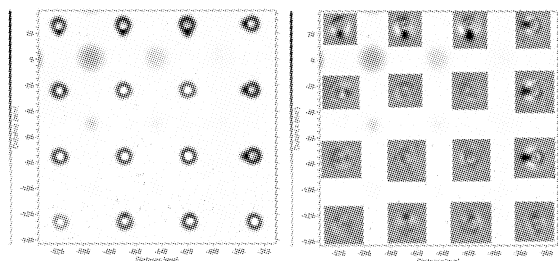


图2 TRECSCAN的成像结果

近年来,超导量子干涉仪器开始被应用到无损检测领域。SQUID是一种高灵敏度的磁传感器,可以检测到位于深层的体积很小的腐蚀缺陷。Panaitov G等采用SQUID作为传感器,采用电导率层析

成像的方法对缺陷进行了成像。其原理是在激励脉冲的关断期间,对磁场的响应信号进行采集,前期和后期的瞬态响应信号分别对应于表层和深层的缺陷信息。为提高信噪比,对几个脉冲周期的响应信号进行平均处理,采用地球物理学中常用的数据解释方法实现了三维电导率成像^[27],成像结果如图3。

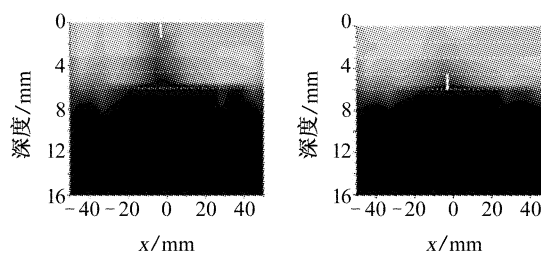


图3 SQUID的成像结果

4 脉冲涡流缺陷识别方法的研究进展

脉冲涡流检测时,如只有腐蚀、提离和层间间隙等缺陷单独存在,则较易进行识别。但是,当这些缺陷同时存在时,对检测结果的解释则容易出现误判和漏判。对此国外研究人员进行了初步的探索。

加拿大Lepine B A等人研究了存在提离、层间间隙以及厚度变化时的缺陷识别问题,采用过零时间作为分类特征,认为层厚变薄与上述缺陷同时存在时会使得过零时间缩短^[9]。

美国的Moulder J C等人对腐蚀和多层结构层间间隙进行了分类识别,采用脉冲涡流时域瞬态信号的过零时间作为分类特征量,作出了不同层出现腐蚀以及存在层间间隙时过零时间的曲线。通过理论分析和实验验证,认为腐蚀缺陷引起的脉冲涡流过零时间要长于层间间隙引起的过零时间,因此可以根据过零时间的长短来进行缺陷的分类识别^[28]。

2005年,英国Huddersfield大学的Tian G Y提出时间上升点(The Rising Point)的方法来进行表面裂纹、表面下裂纹和腐蚀缺陷的识别^[29],其主要原理是当感应的脉冲涡流在导体中传播时,在没有遇到缺陷和遇到缺陷时的传播差异会引起脉冲感应信号的差别,通过对两感应信号进行差分处理,以差分信号的过零上升点出现时间的先后来进行缺陷的识别。该方法只需对差分信号前面的一小部分进行分析就可以进行识别,同时还能用来对导体的厚度进行在线检测,但存在的问题是当存在提离时,提离引起的上升点和表面缺陷引起的上升点很相近,因此无法实现对两者的识别。

目前,脉冲涡流缺陷分类识别的研究仍处于初

级阶段,主要通过时域寻找合适的特征量来进行分类。但由于时域信号容易受到噪声的影响,这就使得目前分类识别的效果都不是很理想。因此探索新的识别方法已经成为必然的研究趋势。

5 脉冲涡流检测技术的发展趋势

脉冲涡流检测技术在飞机多层结构缺陷检测中的发展趋势主要表现在以下几个方面:

(1) 提高脉冲涡流探头的检测能力 对于飞机多层结构中缺陷的检测,增加脉冲的穿透深度非常关键。影响脉冲涡流穿透深度的主要因素包括激励脉冲的频率、占空比和功率等,对这些参数进行优化设计,可以使脉冲涡流的穿透深度达到最大^[8]。

(2) 提高检测速度 目前的脉冲涡流检测系统一般采用单个探头重复对被测件进行扫描,然后提取特征量实现对缺陷的定量。该扫描方法对于飞机机身这种大面积结构的检测,存在着扫描速度慢的严重缺点,采用阵列传感器可以大大提高扫描的速度和效率。

(3) 消除提离效应的影响 飞机机身由于采用了铆接结构,因此,探头在扫描过程中容易产生提离,这使得检测信号受到严重的干扰,容易导致错检、漏检等情况的发生。采用新的传感器结构或新的信号处理方法来消除提离效应,是脉冲涡流技术从实验室走向实际应用必须解决的问题^[9]。

(4) 脉冲涡流腐蚀缺陷成像技术 缺陷成像检测技术具有直观、可视性好等优点,因此,图像化是未来无损检测仪器发展的一个重要趋势^[10,28]。

(5) 缺陷分类识别技术 目前脉冲涡流在缺陷分类识别时,其特征量都是从时域提取^[9,29],造成分类识别的准确性较低。探求新的识别方法,提高准确性,是目前脉冲涡流研究中的一个热点问题。

(6) 阵列脉冲涡流的数据融合技术 信息融合作为一种信息综合和处理的技术,用以提高检测精度,已被成功地应用于智能仪器系统、目标检测与跟踪、自动目标识别和多源图像复合等领域。近年来,信息融合技术在国内外无损检测领域的研究和应用也取得了一定的成果^[30]。

参考文献:

- [1] Fisher J L, Beissner R E. Pulsed eddy current crack characterization experiments[J]. Review of Progress in QNDE, 1985, (5A): 199—206.
- [2] Lebrun B, Jayet Y, Baboux J C. Pulsed eddy current

application to the detection of deep cracks[J]. Material Evaluation, 1995, (10): 1296—1300.

- [3] Lebrun B, Jayet Y, Baboux J C. Pulsed eddy current signal analysis; application to the experimental detection and characterization of deep flaws in highly conductive materials[J]. NDT&E International, 1997, 30 (3): 163—170.
- [4] Tai C C, Rose J H, Moulder J C. Thickness and conductivity of metallic layers from pulsed eddy current measurements[J]. Rev Sci Instrum, 1996, 67 (11): 3965—3972.
- [5] Yang H C, Tai C C. Pulsed eddy current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate[J]. Meas Sci Technol, 2002, (13): 1259—1265.
- [6] Bieber J A, Shaligram S K, Rose J H, et al. Time-gating of pulsed eddy current signals for defect characterization and discrimination in aircraft lap-joints[J]. Review of Progress in QNDE, 1997, (16B): 1915—1921.
- [7] Moulder J C, Bieber J A. Pulsed eddy current measurements of corrosion and cracking in aging aircraft [C]. Materials Research Society Symposium Proceedings of Nondestructive Characterization of Materials in Aging Systems. Shanghai: 1998.
- [8] Plotnikov Y A, Nath S C, Rose C W. Defect characterization in multi-layered conductive components with pulsed eddy current[J]. Review of Progress in QNDE, 2002, (21A): 1976—1983.
- [9] Lepine B A, Wallace B P, Forsyth D S, et al. Pulsed eddy current method developments for hidden corrosion detection in aircraft structures[C]. PACNDT, Shanghai: 1998.
- [10] Smith R A, Hugo G R. Deep corrosion and crack detection in aging aircraft using transient eddy current NDE[J]. Review of Progress in Quantitative NDE, 1999: 1401—1408.
- [11] Sophian A, Tian G Y, Taylor D, et al. Design of a pulsed eddy current sensor for detection of defects in aircraft lap-joints [J]. Sensors and Actuators A, 2002, 101(1): 92—98.
- [12] Sophian A, Tian G Y, Zairi S. Pulsed magnetic flux leakage techniques for crack detection and characterization[J]. Sensors and Actuators A, 2006, (125): 186—191.
- [13] Tai C C, Yang H C, Liang D S. Pulsed eddy current for metal surface cracks inspection: Theory and experiment[J]. Review of Progress in QNDE, 2002, 21A&B: 388—395.

(下转第 857 页)



图4 永久磁铁荧光磁粉检测



图5 钳形磁轭荧光磁粉检测



图6 交叉磁轭荧光磁粉检测

很高的对比度。

(3) 永久磁铁产生的磁场渗入工件表面较深,有利于发现较深层的缺陷,因此在同样的磁通量时,探测深度越大,磁通密度就越低,厚钢板中的这种现象更明显。

4 结论

(1) 永久磁铁虽然具有不用接电,轻便灵活的优点,但在厚壁工件检测中不能满足灵敏度的要求,不能用于厚壁容器检测。可用于薄壁(一般 6 mm)

容器、管道及现场无电源或野外作业场所。

(2) 钳形磁轭具有较高的检测灵敏度,但只能发现与磁轭连线垂直方向的裂纹,在检测时需要做两个垂直方向的检查,以保证检测质量要求。

(3) 交叉磁轭的检测灵敏度最高,一次行走就可以检出各个方向的缺陷,检测效率高。

(4) 荧光磁粉有很大的对比度,能够发现细微的缺陷。

球罐磁粉检测的最佳选择是交叉磁轭加荧光磁粉,这既能保证最高检测灵敏度,又能提高检测速度。

(上接第 846 页)

- [14] 王春艳,陈铁群,张欣宇. 脉冲涡流检测技术的某些进展[J]. 无损探伤,2005,29(4):1—4.
- [15] 叶子郁,朱目成. 应用脉冲涡流检测金属表面裂纹的研究[J]. 计量技术,2005,(10):16—18.
- [16] 杨宾峰,罗飞路,张玉华,等. 飞机多层结构中裂纹的定量检测及分类识别[J]. 机械工程学报,2006,42(2):63—67.
- [17] 游凤荷,蒋韬,孙砚飞. 脉冲涡流磁场特征分析[J]. 仪表技术与传感器,2003,(5):38—40.
- [18] 刘世杭,过玉清. 脉冲涡流感应测量方法的研究[J]. 东华大学学报·自然科学版,2001,27(6):49—52.
- [19] Bowler J, Johnson M. Pulsed eddy current response to a conducting half space[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1997,33(3):2258—2264.
- [20] Ludwig R, Dai X W. Numerical and analytical modeling of pulsed eddy currents in a conducting half-space[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1990,26(1):299—307.
- [21] Tanaka M, Tsuboi H, Kobayashi F, et al. Transient eddy current analysis by the boundary element method using fourier transforms[J]. IEEE Transactions on Magnetics,1993,29(2):1722—1725.
- [22] Pavo J. Numerical calculation method for pulsed eddy current testing[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2002,38(2):1169—1172.

- [23] Xuan L, Shanker B, Zeng Z, et al. Element-free galerkin method in pulsed eddy currents[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2004,19(1—4):463—466.
- [24] Yioultsis T V. Explicit finite difference time domain method with perfectly matched layers for transient low frequency eddy current analysis[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2002,38(5):3439—3447.
- [25] 雷银照,熊华俊,王书彬. 线性瞬态涡流场定解问题中的法向边界条件与解的唯一性[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):81—85.
- [26] 幸玲玲,王恩荣. 脉冲涡流检测中系统冲激响应的快速计算[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):147.
- [27] Panaitov G, Krause H J, Zhang Y. Pulsed eddy current technique with HTS SQUID magnetometer for nondestructive evaluation[J]. Physica C,2002,372(1):278.
- [28] Moulder J C, Bieber J A, Ward W W, et al. Scanned pulsed eddy current instrument for nondestructive inspection of aging aircraft[J]. Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering,1996,2945:2—13.
- [29] Tian G Y, Sophian A. Defect classification using a new feature for pulsed eddy current sensors [J]. NDT&E International,2005,(38):77—82.
- [30] 金建华. 基于磁性传感器信息融合的油管损伤在线检测技术与系统[J]. 武汉:华中科技大学学报,2001.