

多激励涡流阵列探头阻抗分析

刘波, 罗飞路, 何赞泽, 高军哲

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南省长沙市 410073)

Impedance Analysis of Multi-induced Eddy Current Array Probe

LIU Bo, LUO Fei-lu, HE Yun-ze, GAO Jun-zhe

(Institute of Mechanical and Electrical Engineering, National University of Defence Technology, Changsha 410073, Hunan Province, China)

ABSTRACT: Based on the research of eddy current multi-induced field, the magnetic field distribution of a matrix of coils over a conductive plate was deduced. With the application of the reciprocity theorem, an analytical impedance variation of eddy current array sensor inspecting ideal crack was obtained, and the mutual inductance of coil elements was proposed. The impedance analyses of dual coils and triple coils were carried out; and approximate solutions of the crack length and center were given. An eddy current array instrument was designed, and the experiment of dual coils was conducted, which verified the validation of analytic solutions and computed results.

KEY WORDS: multi-induced field; eddy current array sensor; mutual inductance; ideal crack; reciprocity theorem

摘要: 针对涡流阵列多激励场的理论计算问题, 推导无缺陷有限厚无限大平板导体涡流多激励阵列传感器的磁场分布, 应用互易定理得到理想裂纹时阵列传感器的阻抗变化解析式, 提出阵列传感器线圈单元近似互感的计算式。对双激励、三激励线圈阵列传感器裂纹检测进行阻抗分析, 给出了裂纹长度和裂纹中心的近似解。研制涡流阵列无损检测平台, 基于实验平台验证了解析解和数值计算结果的正确性。

关键词: 多激励场; 涡流阵列传感器; 互感; 理想裂纹; 互易定理

0 引言

涡流阵列(eddy current array, ECA)检测技术是涡流无损检测技术中新兴的技术分支, 它是通过检测传感器结构的特殊设计, 运用计算机技术和数字信号处理技术, 实现对材料和零部件的快速、有效地检测。由于具有高空间分辨率、无需自动扫描装置和可视化等优势, 该技术已广泛应用于飞机机体、飞机轮毂、核电站蒸发器传热管、管棒条型材、

平面大面积金属板材、焊接缝隙等领域的无损检测中^[1-10]。涡流阵列检测技术已成为当前涡流检测技术和传感器技术中的重要发展方向。

涡流阵列检测理论方面仍存在很多难题制约该技术的发展, 如多激励阵列传感器的电磁耦合效应、阵列传感器缺陷重构技术、阵列传感器设计理论等^[11-14]。

本文针对涡流多激励阵列检测技术展开研究, 将理想裂纹模型条件下单传感器缺陷阻抗变化解析解推广到阵列传感器的缺陷检测中^[15], 计算了涡流双激励阵列传感器对裂纹缺陷的检测结果, 设计并研制了涡流阵列无损检测平台, 基于实验平台验证解析解和数值计算结果的正确性。

1 多激励涡流阵列场的磁场分布

1.1 涡流阵列检测模型简介

如图1所示, 涡流阵列传感器置于含理想缺陷的试件表面上方, 线圈和试件间的距离为 l_1 , 线圈单元尺寸均相同, 其高为 l_2-l_1 , 内径为 r_1 , 外径为 r_2 。试件的电导率为 σ , 整个区域的磁导率为 μ_0 , 介电常数为 ϵ_0 。为了简化分析, 假定涡流阵列传感器线圈单元串接, 由一时谐电流源激励, 且线圈单元中电流密度均为 J_c 。

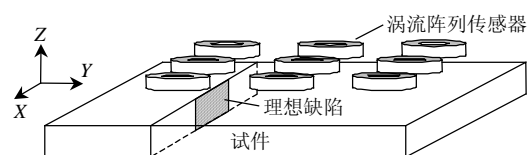


图1 多激励涡流阵列检测示意图

Fig. 1 Diagram of multi-induced ECA inspection

1.2 线圈单元的磁矢量位

假定空气域为 V_a , 有限厚均匀无限大导体域为

V_c , 缺陷域为 V_f 。整个区域中的电磁场可以认为是导体中无缺陷时的场电场强度 E^0 和磁场强度 H^0 与缺陷存在引起的扰动场 E^d 和 H^d 之和。

$$\begin{cases} E_k = E_k^0 + E_k^d, & k = a, c, f \\ H_k = H_k^0 + H_k^d, & k = a, c, f \end{cases} \quad (1)$$

式中下标“a”、“c”、“f”分别表示场量在空气域、导体域和缺陷域。下文计算无缺陷时线圈单元产生的磁场时, 将空间分为线圈上端面以上区域、线圈所在区域、线圈下端面以下区域、导体区域和导体以下区域 5 个部分, 每个区域的矢量磁位 $A_i^0(r, z)$ ($i=1, 2, \dots, 5$) 可参见文献[16]推导。

导体域中的电场强度为

$$\begin{cases} E^0 = E^0 \hat{e}_\theta = -j\omega A_4 \hat{e}_\theta \\ J_c^0 = \sigma E^0 = \sigma E^0 \hat{e}_\theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: E^0 为无缺陷时导体域中的电场强度; J_c^0 为无缺陷时导体域中的涡流密度。

1.3 多激励阵列传感器总的磁矢量位

对线圈单元应用空间变换和叠加原理^[17], 则可得到无缺陷时阵列传感器产生总的磁矢量位:

$$\begin{cases} A_x^{0T}(x, y, z) = \sum_{k=1}^N \text{sign}(I_k) \frac{o_{ky} - y}{r_k} A^{(k)}(r_k, z) \\ A_y^{0T}(x, y, z) = \sum_{k=1}^N \text{sign}(I_k) \frac{x - o_{kx}}{r_k} A^{(k)}(r_k, z) \\ A_z^{0T}(x, y, z) = \sum_{k=1}^N \text{sign}(I_k) A^{(k)}(r_k, z) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: N 为阵列传感器线圈单元的个数; (o_{kx}, o_{ky}) 为线圈 k 中心轴线的坐标; r_k 为线圈 k 中心轴线与计算点 (x, y) 之间的距离; $A^{(k)}(r_k, z)$ 为线圈 k 在 (r_k, z) 点产生的磁矢量位。

涡流阵列传感器在导体中产生的磁场由下式确定:

$$E_i^{0T} = -j\omega A_i^{0T}, \quad i = x, y, z \quad (4)$$

$$J_i^{0T} = -j\omega \sigma A_i^{0T}, \quad i = x, y, z \quad (5)$$

式中 ω 为激励信号的角频率。

1.4 电偶极子密度的求解

理想缺陷的宽度为 0, 其作用相当于不可穿越的障碍面, 理想缺陷引起的扰动场等效于位于缺陷处的一层面分布的电流偶极子产生的场。平板导体中扰动电场方程为

$$E_c^{dT}(\mathbf{r}) = -j\omega\mu_0 \int_{S_0} G^m(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot n\mathbf{p}(\mathbf{r}') ds' \quad (6)$$

式中: $\mathbf{p}(\mathbf{r}')$ 为缺陷面 S_0 上的等效电流偶极子分布; \mathbf{n} 为面 S_0 的单位法向矢量; $G^m(\mathbf{r}, \mathbf{r}')$ 为源点和场点

均位于导体板 V_c 中的并矢格林函数。

在缺陷面 S_0 上, 总电流密度的法向分量为 0, 则有

$$J_n^T = \sigma n(E_c^{0T} + E_c^{dT}) = 0 \quad (7)$$

综合式(6)和式(7)有^[18]

$$J_n^{0T} = j\omega\mu_0 \sigma \int_{S_0} \mathbf{n} \cdot G^m(\mathbf{r}, \mathbf{r}') \cdot n\mathbf{p}(\mathbf{r}') ds' \quad (8)$$

式中 J_n^{0T} 为平板导体中无缺陷时缺陷面 S_0 的电流密度。当缺陷面位于 $x=0$ 平面, 则 $\mathbf{n} = \mathbf{i}$ (\mathbf{i} 为 X 方向的单位矢量), 积分方程为

$$J_x^{0T} = j\omega\mu_0 \sigma \int_{S_0} G_x^m(\mathbf{r}, \mathbf{r}') p(y', z') dy' dz' \quad (9)$$

有限厚无限大导体并矢格林函数的求解可参考文献[19], 求解式(5), 得到 J_x^{0T} , 利用矩量法求解积分方程(9), 可得矩阵方程:

$$\mathbf{J} = \mathbf{G}\mathbf{P} \quad (10)$$

求解方程(10), 可得到缺陷面 S_0 上等效电偶极子分布 \mathbf{P} , 即 $p(y, z)$ 。

2 涡流多激励阵列传感器的阻抗分析

应用互易定理, 涡流阵列传感器总的阻抗变化由式(11)给出:

$$\Delta Z = -\frac{1}{I^2} \int_{S_0} E_n^{0T} p ds \quad (11)$$

式中: p 为等效电流偶极子密度; I 为线圈中的电流强度。由于传感器所有线圈单元串接, 从而有^[20]

$$\Delta Z = \sum_{k=1}^N \Delta Z^{(k)} = -\frac{1}{I^2} \int_{S_0} \sum_{k=1}^N E_n^{0(k)} p ds \quad (12)$$

式中: $E_n^{0(k)}$ 为传感器线圈单元 k 产生的完好场沿缺陷面 S_0 切线方向的分量; $\Delta Z^{(k)}$ 为线圈单元 k 阻抗变化。进一步分析式(12), 从而有

$$\Delta Z^{(k)} = -\frac{1}{I^2} \int_{S_0} E_n^{0(k)} p ds \quad (13)$$

由于阵列传感器总场等效电偶极子密度 p 可看成由每个线圈单元等效电偶极子密度 $p^{(m)}$ ($m=1, 2, \dots, N$) 线性叠加, 则有

$$\Delta Z^{(k)} = -\frac{1}{I^2} \left[\int_{S_0} E_n^{0(k)} p^{(m)} ds + \int_{S_0} E_n^{0(k)} \sum_{m \neq k} p^{(m)} ds \right] \quad (14)$$

式(14)可近似认为是阵列传感器线圈单元间互感对线圈单元 k 影响作用后, 经过理想缺陷的阻抗变化量, 即:

$$\Delta Z_m^{(k)} = -\frac{1}{I^2} \int_{S_0} E_n^{0(k)} \sum_{m \neq k} p^{(m)} ds \quad (15)$$

式中 $\sum_{m \neq k} p^{(m)}(x, y, z)$ 等同于矩阵 $\sum_{m \neq k} \mathbf{P}^{(m)}$, 而

$$\sum_{m \neq k}^N \mathbf{J}^{(0m)} = \mathbf{G} \sum_{m \neq k}^N \mathbf{P}^{(m)} \quad (16)$$

$$\sum_{m \neq k}^N \mathbf{J}^{(0m)} = -j\omega\sigma[\mathbf{A}^{0T} - \mathbf{A}^{0(m)}] \quad (17)$$

式中 $\sum_{m \neq k}^N \mathbf{J}^{(0m)}$ 为无缺陷时除线圈 k 外的涡流传感器单元产生的电流密度。

3 数值计算结果及理论分析

3.1 双激励线圈阵列传感器产生的涡流密度

数值计算使用的线圈和导体缺陷参数见表 1。由第 2 节分析可知,在理想缺陷形状、大小已定的情况下,裂纹等效电偶极子密度仅取决于导体中无缺陷时穿过该缺陷面的涡流场,线圈的阻抗变化量也仅与这部分有关系。图 2 给出算例单线圈、反向和同向(反向指两线圈激励电流方向相反,同向则反之)双线圈沿 $y=0, z=0$ 方向上无缺陷导体场的涡流密度分布图,坐标原点位于线圈 A 中心轴线,线圈 A 中心 X 坐标小于线圈 B。

表 1 计算实例中线圈和导体缺陷参数

Tab. 1 Coils, conduct and defect parameters of example

参数	数值	参数	数值
线圈单元内半径 r_1/mm	0.4	导体板厚 d/mm	2.0
线圈单元外半径 r_2/mm	1.0	缺陷长度 L/mm	3.0
线圈单元高 $(l_2 - l_1)/\text{mm}$	0.4	缺陷宽度 W/mm	0.2
线圈单元匝数 n	140	缺陷深度 D/mm	0.6
线圈单元中心距 C/mm	2.5	电导率 $\sigma/(\text{mS/m})$	1.0
提离 l_1/mm	0.2	激励频率 f/kHz	300
激励电流 I/A	0.28	透入深度 δ/mm	0.92

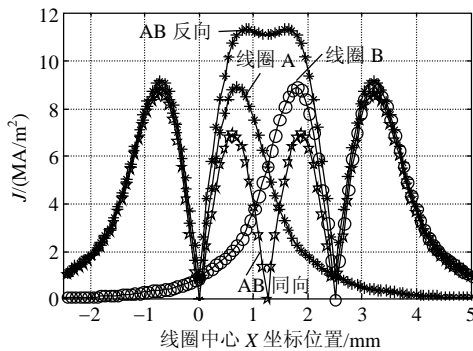


图 2 涡流双线圈电流密度数值计算结果
Fig. 2 Numerical results of eddy current dual coils current density

从图 2 可以看出,线圈单独作用时,线圈 A 和线圈 B 涡流主要分布于线圈绕组的正下方。定义线圈的平均半径 $r_e = (r_1 + r_2)/2$, 涡流密度最大点约在距线圈轴线 r_e 处。当 $x = 3r_e$ 时,涡流密度约衰减为最大值的 1/10, 因此涡流探头的有效激励半径约为激励线圈平均半径的 3 倍。

双激励线圈作用于无缺陷导体分反向和同向双线圈 2 种情况论述: 反向双线圈作用下导体表面涡流密度最大点出现在两线圈轴线之间距线圈轴线约 r_e 处, 较单线圈最大点位置右移, 且随着两线圈中心距的减小涡流密度最大值增大; 同向双线圈涡流密度最大点出现在两线圈轴线之外大约距线圈轴线 r_e 处, 且随着两线圈中心距的减小涡流密度最大值减小。

3.2 双线圈阵列传感器缺陷检测阻抗变化分析

图 3、4 分别给出了反向和同向双线圈不同中心距时阻抗幅值变化量随线圈位置的变化, 图中 $|\Delta Z_A|$ 表示线圈 A 阻抗幅值变化。由于缺陷长度 L 大于线圈直径 $2r_2$ (长裂纹), 单线圈检测幅值变化曲线关于中央峰对称, 中央峰的两侧各有一个明显的变化平缓的“肩”, 两肩的间距约等于缺陷长度。反向双线圈线圈 A 幅值变化曲线中央峰值点向左发生了偏移, 随着线圈中心距离的减小, 该点与线圈 A 中心轴向偏移量变大, 同时, 中央峰值也在增大。曲线左边肩部幅值随着线圈中心距减小而变

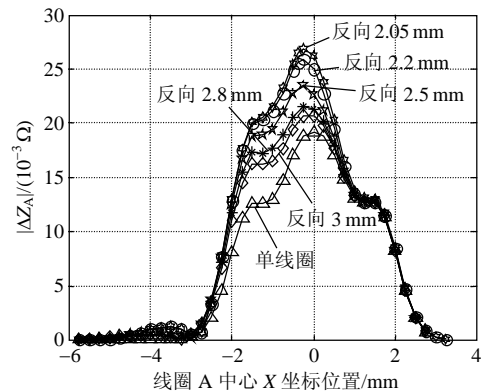


图 3 不同中心距反向双线圈阵列线圈 A 阻抗幅值变化
Fig. 3 $|\Delta Z_A|$ of coil A, dual coils fed in opposite polarities with different center distances

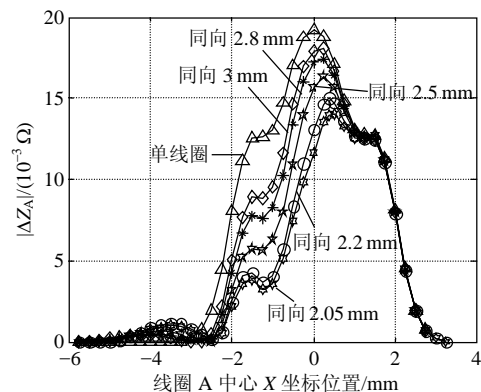


图 4 不同中心距同向双线圈阵列线圈 A 阻抗幅值变化
Fig. 4 $|\Delta Z_A|$ of coil A, dual coils fed in the same polarity with different center distances

大，当两线圈紧贴时，左肩幅值达到最大，两肩的位置和间距不随线圈中心距变化而变化，两肩的间距仍约等于缺陷长度。同向双线圈变化规律与反向双线圈相反。图 5 为不同中心距双线圈阻抗实部(ΔR)的变化，互感同向双线圈阻抗总是大于反向，且互感随线圈中心距的增大呈近似指数关系减小。

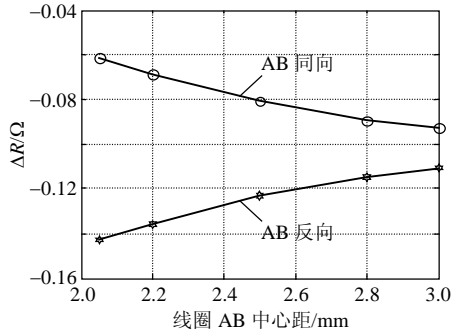


图 5 裂纹中心处不同中心距双线圈线圈 A 阻抗实部变化
Fig. 5 ΔR of coil A in the center of crack, dual coils with different center distances

上述分析说明，阵列检测区别于单频检测在于传感器线圈单元的互感对检测的影响，阵列线圈单元检测曲线中央峰值点位置发生了偏移，使得检测中对于缺陷中心位置的判断方法应做出调整，检测曲线两侧肩部位置均未发生偏移，裂纹长宽信息仍可借助两肩间距来近似估计，裂纹中心可用两肩中间点估计。在多激励阵列检测中，相邻线圈采用反向激励检测效果比同向激励好。为了减小线圈互感，应增大两线圈中心距，但增大中心距会导致阵列传感器尺寸和阵列传感器不敏感区域的增大，且会降低反向激励检测的灵敏度。在检测能力方面，图 3 所示的反向双线圈阻抗最大幅值变化比单线圈检测增加了约 40%，单线圈检测比反向双线圈增加了约 40%。由此说明，在同样的硬件系统、传感器尺寸、试块条件下，反向双线圈检测灵敏度高于单传感器，单传感器检测灵敏度高于同向双线圈。

3.3 三线圈阵列传感器理想缺陷检测阻抗变化分析

三线圈阵列传感器线圈做线性分布，采用同向激励，三线圈阵列传感器阻抗幅值变化如图 6 所示。三线圈阵列检测同双线圈检测规律类似，两侧线圈单元 A 和 C 阻抗幅值变化量较单线圈减小，左侧线圈 A 中央峰值点右移，右侧线圈中央峰值点左移，中间线圈单元与单线圈检测曲线变化趋势类似，但中央峰值明显变小。这说明多激励阵列传感器缺陷检测时，应尽量采用相邻差分式激励，且不论线圈单元为线性排布、面排布和体排布，其缺陷提取算法对边缘线圈单元、中间线圈单元可加以区分，

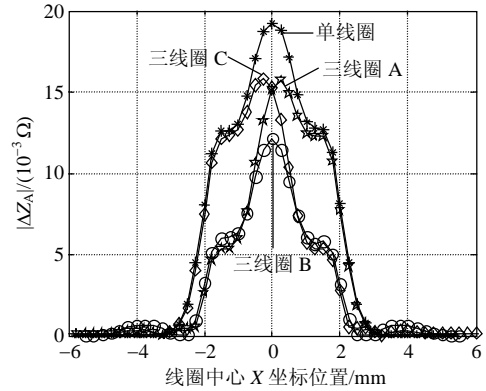


图 6 同向三线圈阵列传感器阻抗幅值变化
Fig. 6 $|\Delta Z_A|$ of triple coils fed in the same polarity

将对称位置线圈单元进行分类近似，能提高算法的执行效率，减小缺陷误检率。

4 实验验证

如图 7 所示，涡流阵列无损检测平台由阵列传感器、DDS 信号发生电路、运放和功放电路、线圈单元阵列的模拟开关阵、正交锁定放大电路和数据采集处理显示 5 部分组成。DDS 发生单频、双频或脉冲信号，经滤波、放大与传感器线圈单元阵列的模拟开关阵连接，对阵列传感器线圈单元阵列进行同时、分时激励。线圈单元阵列的模拟开关阵对激励和检测传感器同时选通。阵列传感器线圈单元阵列通过线圈单元阵列的模拟开关阵将检测信号送至正交锁定放大电路，调理后用 PCI 卡采集数据，进行数据处理后，完成 C 扫描显示。

为了验证多激励阵列检测阻抗变化，进行了双线圈和单线圈缺陷检测实验，实验结果如图 8 所示，图 8 纵坐标为裂纹检测时正交锁定放大电路提取的

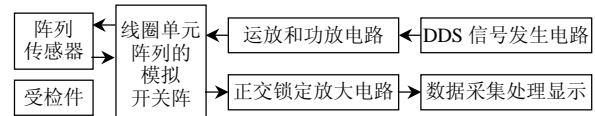


图 7 涡流阵列无损检测平台硬件组成框图
Fig. 7 Block of eddy current array experimental system

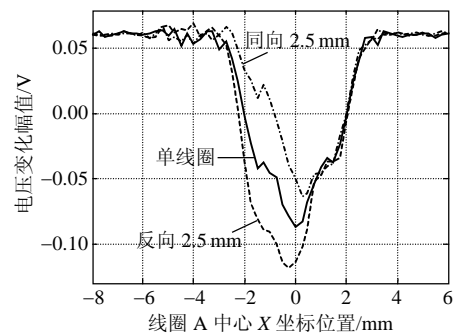


图 8 双线圈与单线圈传感器缺陷检测示意图
Fig. 8 Defect inspection of dual coils and single coil

微小信号幅值。实验中,双线圈中心距 2.5 mm,激励频率为 300 kHz,传感器按照表 1 所示的参数绕制,试块为山东济宁模具厂生产的标准件。3 个实验中,传感器均沿缺陷长度方向进行扫描。

5 结论

1) 求解了无缺陷时多激励阵列传感器产生的磁场,应用互易定理得到了阵列传感器在理想缺陷检测的阻抗变化,提出了多激励阵列传感器线圈单元间近似互感的计算式,为多激励阵列电磁场理论分析、互感计算和阵列传感器设计提供了理论依据。

2) 计算了不同中心距时反向激励和同向激励双线圈阻抗幅值变化曲线,双线圈阵列传感器中央峰值点位置发生了偏移,两侧肩部位置不变,用两肩间隔可估计缺陷长度,两肩中间点可近似估计缺陷中心位置。反向双线圈检测灵敏度高于单传感器,单传感器检测灵敏度高于同向双线圈。

3) 多激励阵列传感器缺陷检测时,不论线圈单元为线性排布、面排布和体排布,其缺陷提取算法如对边缘线圈单元、中间线圈单元加以区分,对称位置线圈单元进行分类近似,则可提高算法的执行效率,减小缺陷误检率。

参考文献

- [1] Bureau J F, Ward R C, Jenstead W. Advances in eddy current array sensor technology[C]. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, China, 2008.
- [2] Butin L, Wache G, Perez L, et al. New NDE perspectives with magnetoresistance array technologies—from research to industrial applications[J]. Insight, 2005, 47(5): 280-284.
- [3] Crouch A E, Goyen T, Porter P. New method uses conformable array to map external pipeline corrosion[J]. Oil and Gas Journal, 2004, 102(41): 55-59.
- [4] Goldfine N, Zilberstein V, Washabaugh A, et al. Eddy current sensor networks for aircraft fatigue monitoring[J]. Material Evaluation, 2003, 61(7): 852-859.
- [5] Huang H Y, Sakurai N, Takagi T, et al. Design of an eddy-current array probe for crack sizing in steam generator tubes[J]. NDT & E International, 2003, 36(7): 515-522.
- [6] Mirshekar Syahkal D, Mostafavi R F. 1-D probe array for ACFM inspection of large metal plates[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(2): 374-382.
- [7] McNab A, Thomson J. An eddy current array instrument for application on ferritic welds[J]. NDT & E International, 1995, 28(2): 103-112.
- [8] Hill B, Sheppard W. Detecting second-layer fatigue cracks under installed skins and fasteners with low-frequency eddy current array[J]. Material Evaluation, 1992, 50(12): 1404-1405.
- [9] 丁天怀, 陈祥林. 电涡流传感器阵列测试技术[J]. 测试技术学报, 2006, 20(1): 1-5.
Ding Tianhuai, Chen Xianglin. Measurement technology of eddy current sensor array[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2006, 20(1): 1-5(in Chinese).
- [10] 林俊明, 李同滨, 林发炳, 等. 阵列涡流探头在钢管探伤中的实验研究[J]. 钢管, 2001, 30(3): 39-66.
Lin Junming, Li Tongbin, Lin Fabing, et al. Array eddy current probes for steel tube flaw inspection[J]. Steel Pipe, 2001, 30(3): 39-66(in Chinese).
- [11] Grimberg R, Udpa L, Savin A, et al. 2D eddy current sensor array[J]. NDT & E International, 2006, 39(4): 264-271.
- [12] Joubert P Y, Le Bihan Y. Multi sensor probe and defect classification in eddy current tubing inspection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 129(1-2): 10-14.
- [13] Modest Gramz, Tadeusz Stepinski. Eddy current imaging, array sensors and flaw reconstruction[J]. Research in Nondestructive Evaluation, 1994, 5(3): 157-174.
- [14] Macecek M. Advanced eddy current array defect imaging[C]. The 17th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, La Jolla, CA, 1990.
- [15] Bowler J R. Eddy-current interaction with an ideal crack. I: the forward problem[J]. Journal of Application Physics, 1994, 75(12): 8128-8137.
- [16] 唐磊. 体积分方法及涡流无损检测中缺陷智能重构系统的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 1997.
Tang Lei. Study of volume integral equation method and a defect intelligent reconstruction system in Nondestructive testing[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 1997(in Chinese).
- [17] Zaoui A, Feliachi M, Doirat V, et al. A fast 3D modeling of arrayed eddy current sensor[C]. 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Fields Computation, Miami, USA, 2006.
- [18] Chen D, Shao K R, Lavers J D. Very fast numerical analysis of benchmark models of eddy-current testing for steam generator tube[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 2355-2357.
- [19] 陈德智, 唐磊, 盛剑霓, 等. 无限大均匀平板导体中的涡流场并矢格林函数[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(2): 64-66.
Chen Dezhi, Tang Lei, Sheng Jianni, et al. Dyadic Green's function of eddy current problem for infinite uniform plate conductor[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(2): 64-66(in Chinese).
- [20] Zaoui A, Menana H, Feliachi M, et al. Generalization of the ideal crack model for an arrayed eddy current sensor[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6): 1638-1641.



刘波

收稿日期: 2009-11-01。

作者简介:

刘波(1982—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电磁无损检测技术、数字化测试技术, llbbsdf@yahoo.com.cn。

(编辑 李婧妍)