

Finite Element Simulation for Remote Field Eddy Current and Detection Sensitivity Analysis for Inner and Outer Defect

Xiaojie Xu

Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an

Email: dr_xxj@163.com

Received: Aug. 27th, 2014; revised: Sep. 25th, 2014; accepted: Oct. 8th, 2014

Copyright © 2014 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Remote Field Eddy Current (RFEC) is an important branch cut of eddy current nondestructive testing (NDT) technique, and is drawing more and more attention in the testing and repairing of pipes and tubes. The finite element method used for RFEC simulation was researched in this thesis with detail. Firstly, some important phenomena of RFEC technique such as "amplitude canyon" and "phase knot" were simulated and analyzed. At the same time, to clarify the superiority of RFEC technology used for ferromagnetic tube compared with conventional eddy current, differential defects in "near field" and "remote field" were chosen to simulate and analyzed; Finally, advantages of remote field eddy current for ferromagnetic tube NDT were drawn compared with conventional eddy current.

Keywords

Non-Destructive Testing, Remote Field Eddy Current, Ferromagnetic Pipe, Defect, Finite Element Simulation

管材远场涡流有限元仿真及内外壁缺陷检测灵敏度分析

徐小杰

空军工程大学信息与导航学院, 西安

Email: dr_xxj@163.com

收稿日期: 2014年8月27日; 修回日期: 2014年9月25日; 录用日期: 2014年10月8日

摘要

远场涡流作为涡流无损检测技术的一个重要分支, 目前在各个行业的管道日常维护和安全保障中发挥着重要的作用。本文重点对有限元方法在远场涡流仿真中的应用进行了研究。首先通过建立有限元电磁仿真模型, 对于远场涡流效应的基本现象, 如“矢位峡谷”、“相位节点”等现象进行了仿真研究, 并对其结果进行了分析。同时为进一步证实铁磁性管道中远场涡流相对于常规涡流技术的优势所在, 选取分别位于远场区和近场区的内外壁缺陷进行有限元仿真和对比分析。

关键词

无损检测, 远场涡流, 铁磁性管道, 缺陷, 有限元仿真

1. 引言

远场涡流技术作为涡流检测技术的一个重要分支, 其本质与涡流检测技术一样, 都是研究被测材料中缺陷与电磁场之间的相互作用关系, 根据已知场源来求解扰动场的大小和分布, 从而对检测信号做出准确的评定[1]。远场涡流检测机理如图1所示, 通常采用一个与管道同轴的螺线管线圈激励(周向绕制)的方式, 同时检测线圈也为一个与管道同轴的螺线管线圈(周向绕制)。

远场涡流仿真的基础是 Maxwell 方程。经典电磁场理论采用解析或渐进的方法对其进行解析计算。然而实际工程中的电磁场问题通常具有如下特点: 复杂的几何形状或边界条件, 多设计三维涡流场求解, 待求未知数多等等。

有限元法是一种非常有效的求解微分方程的数值分析方法, 它基于里兹(Ritz)变分原理或迦辽金(Galerkin)方法, 其基本思想是用分片函数去逼近原函数, 即把无限自由度问题转化为有限自由度问题, 再求解一个线性方程组, 得到原方程的近似解。有限元在处理涡流场问题时, 将偏微分方程表征的连续函数所在的封闭场域划分成有限个小区域, 每一个小区域用一个选定的近似函数来代替, 于是整个场域上的函数被离散化, 由此获得一组近似的代数方程, 并联立求解, 以获得该场域中函数的近似数值。有限元法在场域的离散划分中具有很大的灵活性, 特别对不规则的边界形状的处理十分方便, 它还能适合于场域内函数变化剧烈程度差别较大的情况, 对于多介质场域、交接形状复杂的场问题, 交接条件自动满足。同时, 有限元法对于三维涡流场的计算采用向量磁位作为未知量, 并选取位函数规范求解; 针对不同的介质区域采用不同的场量表征形式, 可以达到减少未知数个数的目的。近年来, 随着有限元仿真方法的进一步发展, 各种相应的软件都已逐步成熟并走向商业化应用阶段。其中 Ansys 作为一种通用的有限元分析软件, 可以很好的对结构、流体、电场、磁场、声场进行模拟、分析, 并且借助于可视化技术, 可以将计算中所涉及的物理现象和物理量转变为图像或图形信息, 生动、直观的呈现在研究人员面前, 而得到了广泛的应用。

2. 远场涡流基本现象的有限元仿真

远场涡流作为一种电磁无损检测技术, 其本质在于缺陷存在时对激励场的扰动, 因此, 在对铁磁性管道进行检测之前, 首先利用有限元仿真对其进行分析, 有助于对技术本质的理解和把握。在二维情况下, 利用模型的对称性, 可以将三维涡流场求解问题转化为轴对称情况下的二维有限元求解问题, 从而

大幅度的提高计算效率[2]-[4]。基于二维轴对称模型，对远场涡流中的一些基本现象进行仿真。

2.1. 模型建立

远场涡流的二维有限元仿真模型如图2所示。管内径ID = 36 mm，外径OD = 40 mm，长度400 mm，壁厚2 mm。激励电流密度 $J_s = 0.3 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ ，相对磁导率 $\mu_r = 329.5$ ，电导率 $\sigma = 0.5 \times 10^7 / \Omega \cdot \text{m}$ ，激励频率 $f = 30 \text{ Hz}$ 。

2.2. 仿真结果与分析

图3为二维有限元仿真时的矢量磁位等值图，其中图3(a)为矢量磁位的等幅值线(对数)，可以看出在大约1.5至两倍的管内径处，幅值表现出最小值，也即“磁位峡谷”；图3(b)为矢量磁位的等相位线，可以看出在同样在大约1.5至两倍的管内径处，相位处于不确定状态，也即“相位节点”。

我们采取固定激励线圈位置，逐步移动检测点位置的方法，得到了磁感应强度随其距离变化的幅值和相位图，如图4所示。

从图中可以明显地看出当检测点逐渐远离激励线圈时，其磁感应强度有三种不同的变化趋势，当检测点位于激励线圈附近时，由于管壁的屏蔽作用，其幅值迅速衰减，而相位基本保持不变；当检测点移至大约1.7倍的管径左右时，开始进入过渡区，此时磁感应强度的幅值的衰减速度开始变慢，在某个位

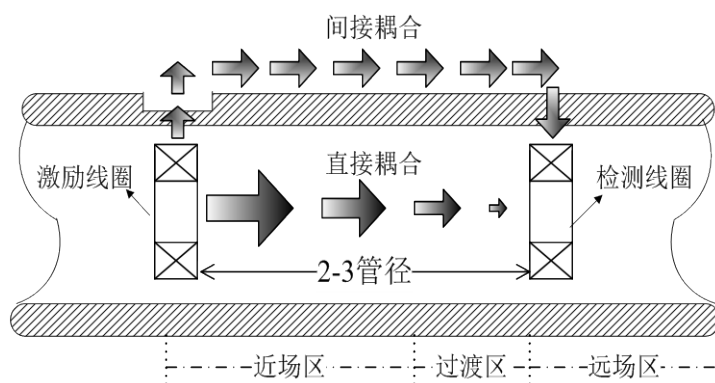


Figure 1. Schematic diagram of the far field eddy current testing mechanism
图1. 远场涡流检测机理示意图

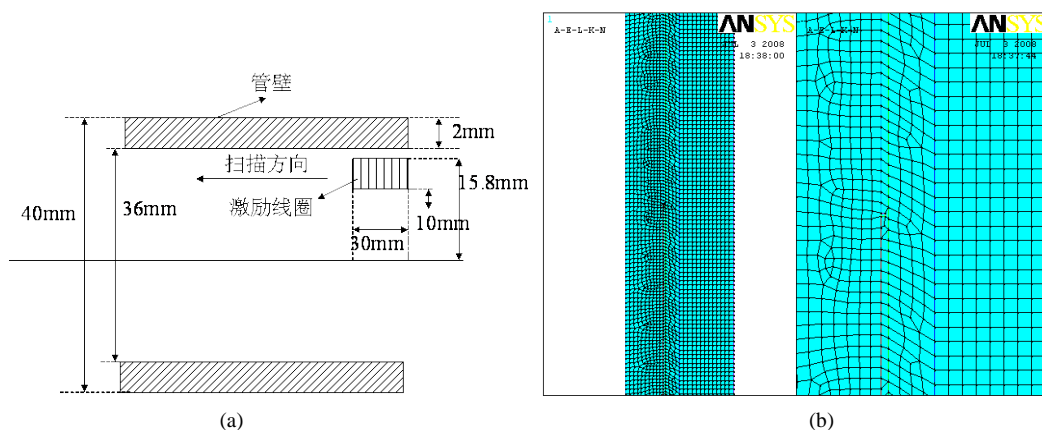


Figure 2. The far field eddy current simulation model of two-dimensional finite element: (a) Schematic diagram of the model; (b) The model of grid division

图2. 远场涡流二维有限元仿真模型：(a) 模型示意图；(b) 模型的网格划分

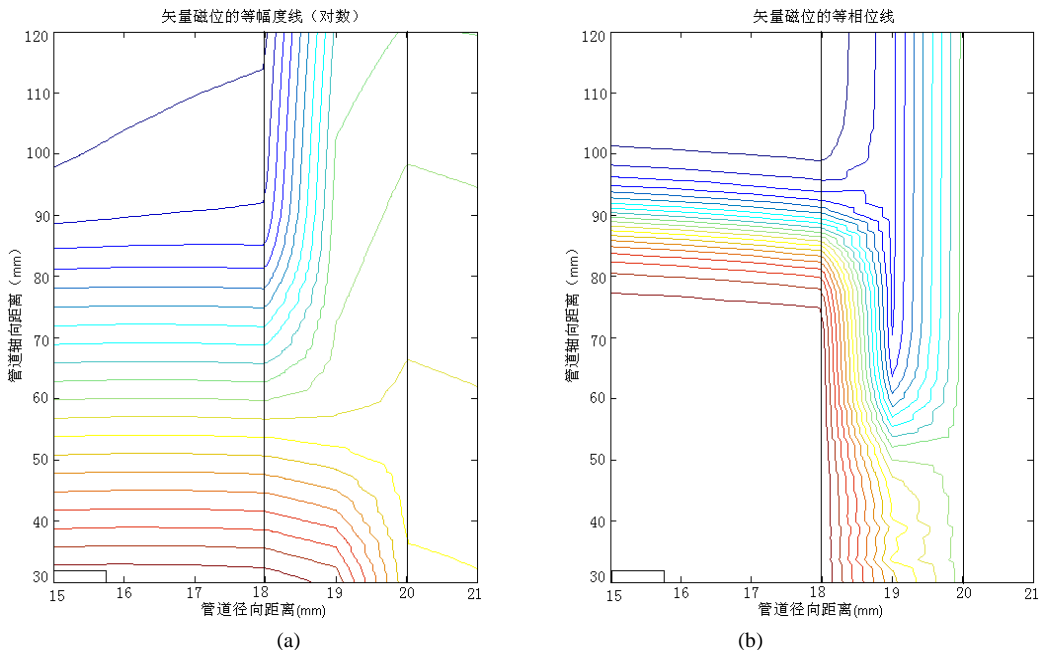


Figure 3. Magnetic potential Canyon in remote field eddy current and phase node: (a) Magnetic potential Canyon; (b) The phase node

图 3. 远场涡流中的磁位峡谷和相位节点: (a) 磁位峡谷; (b) 相位节点

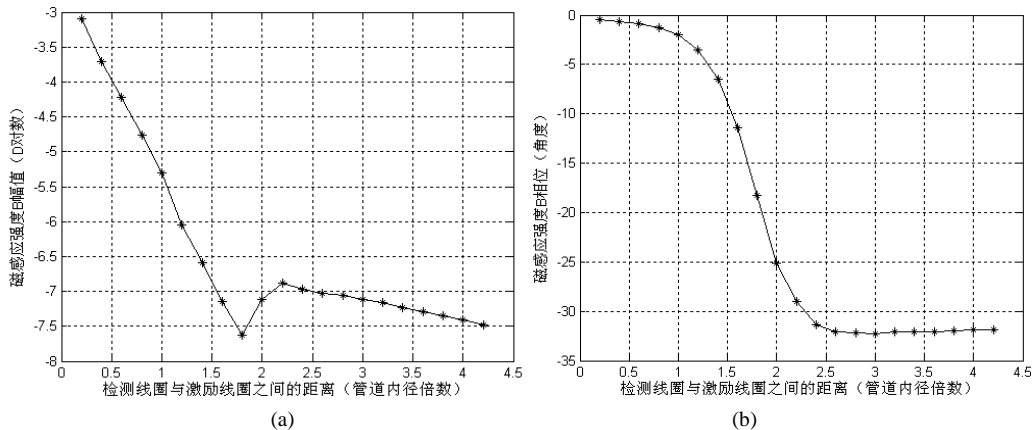


Figure 4. Detection point away from the magnetic induction intensity of the excitation coil: (a) Log (amplitude) change chart; (b) The phase difference change chart

图 4. 检测点远离激励线圈时的磁感应强度: (a) Log (幅值)变化图; (b) 相位差值变化图

置有时还会出现磁感应强度反而增大的现象，同时相位急剧变化，也即是前面所说到“磁位峡谷”和“相位节点”。当检测点进一步远离激励线圈时，开始进入远场区，此时，磁感应强度的幅值以一个较低的衰减速率变化，而相位基本不变。

图 5 为检测点远离激励线圈时，内外壁磁感应强度对比曲线。从图中可以看出，在近场区内壁处磁感应强度大于外壁磁感应强度，且随着距离改变，外壁衰减速率要明显低于内壁；在远场区，内壁与外壁以近乎相同速率变化。这也恰恰说明了远场区所接收到的信号是经过二次管壁以后的信号。

3. 远场涡流与常规涡流的内外壁缺陷仿真结果对比

为了验证远场涡流检测相对于常规涡流检测的内外壁灵敏度，我们选取两种不同位置的内外壁缺陷

进行仿真。仿真模型如图 6 所示：被测对象是一段内径为 140 mm，外径 148 mm，壁厚 4 mm，长 800 mm 的铁磁性钢管，其电导率 $s = 5.96 \times 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ，相对磁导率 μ_r 为 329.5；激励线圈外径 134 mm，内径 124 mm，长 30 mm，相对磁导率为 1，所加电流密度为 $5.5 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ，初始相位角为 0，激励频率为 60 Hz。缺陷为位于管道不同位置的内外壁全周向缺陷。

第一组缺陷为中心距离激励线圈 40 mm 处的内外壁缺陷，缺陷深度为 50%壁厚，长度为 10 mm，这一位置是常规涡流检测中激励和检测线圈的位置，有缺陷存在时，对磁力线的扰动如图 7 所示。

其中(c)和(d)内壁缺陷对磁力线的扰动，可以看出，此时由于这一位置所检测到的磁力线主要为激励线圈所产生的一次场，因此缺陷存在时对磁力线只有很微弱的扰动。(e)和(f)为外壁缺陷的情况，在此时，缺陷的存在几乎未对管道内的磁力线分布产生任何的影响。因此，这也正说明了在采用常规涡流方法进行内通过式检测时，难以有效的检测出外壁缺陷的存在。

第二组缺陷为中心距离激励线圈 600 mm 处的内外壁缺陷，缺陷尺寸同第一组，即深度为 50%壁厚，长度为 10 mm，这一位置是远场区的位置，有无缺陷存在时，磁力线分布的比较如图 8 所示。

其中(c)和(d)为外壁缺陷对磁力线的扰动，(e)和(f)为内壁缺陷对磁力线的扰动，从图中可以看出，此

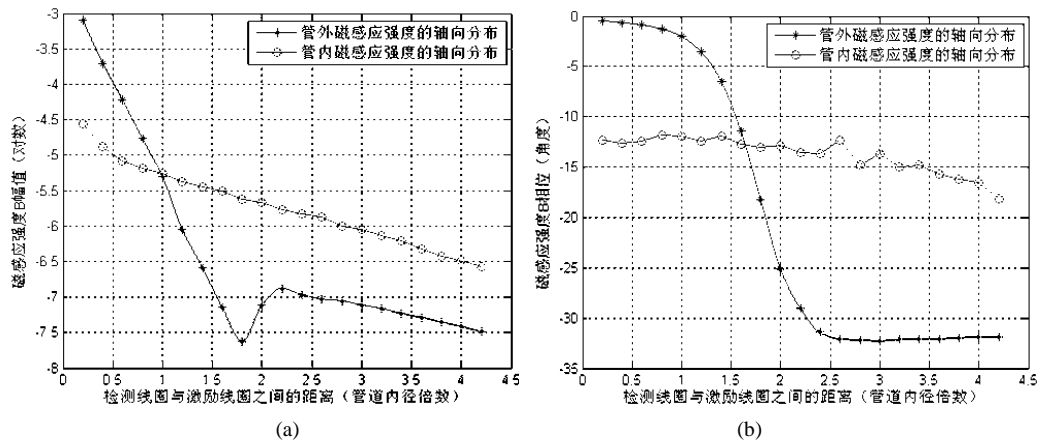


Figure 5. Testing points away from the inner wall and the outer wall of the magnetic induction intensity-contrast excitation coil at (a) Log (amplitude) change chart; (b) The phase difference change chart
图 5. 检测点远离激励线圈时的内外壁磁感应强度对比 (a) Log (幅值)变化图; (b) 相位差值变化图

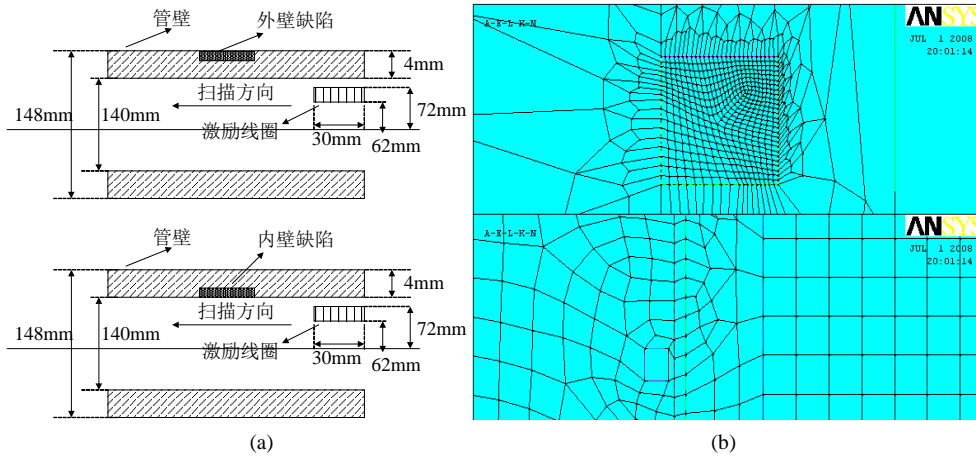


Figure 6. Full weeks to the two-dimensional finite element simulation model of defect: (a) Schematic diagram of the model; (b) The defect meshing
图 6. 全周向缺陷的二维有限元仿真模型: (a) 模型示意图; (b) 缺陷处的网格划分

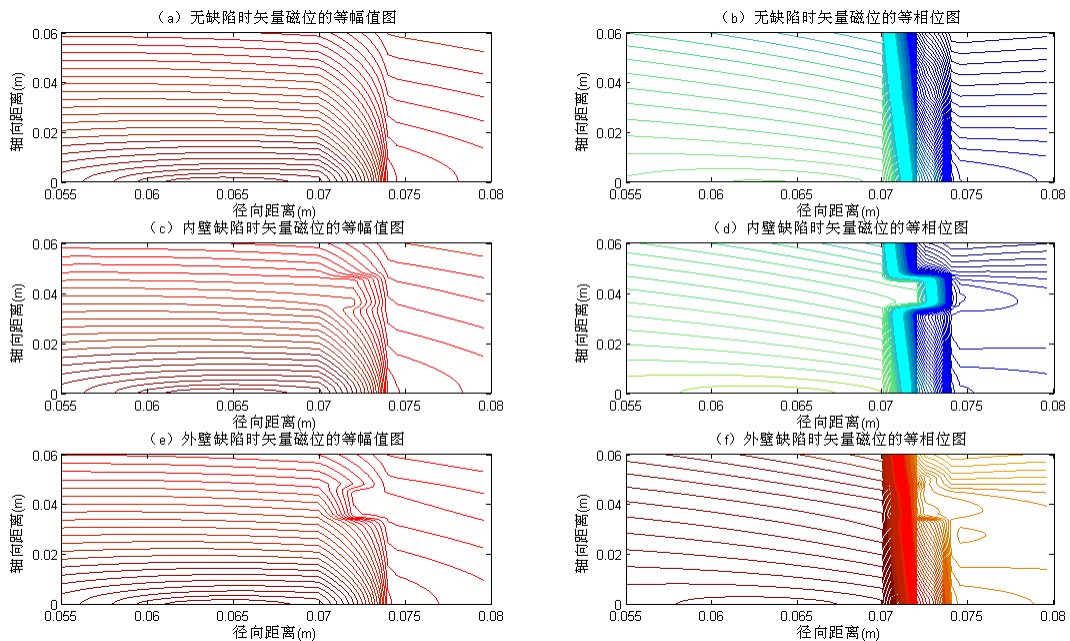


Figure 7. Near field region around the defect distribution of magnetic line of force
图 7. 近场区缺陷附近的磁力线分布

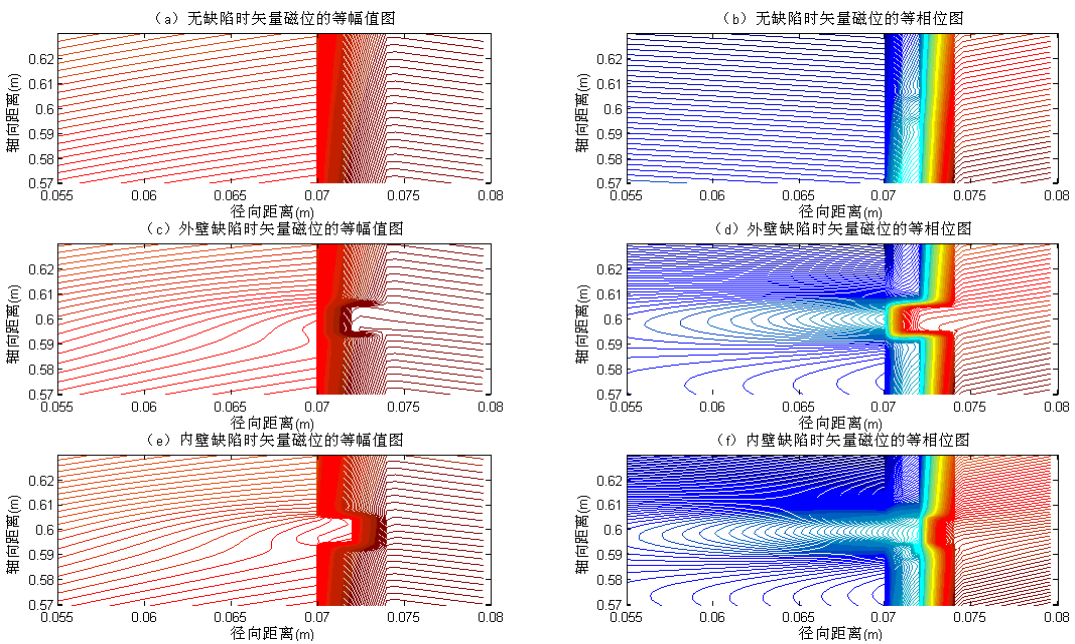


Figure 8. The far-field region around the defect distribution of magnetic line of force
图 8. 远场区缺陷附近的磁力线分布

时由于这一位置所检测到的磁力线主要为二次穿过管壁的磁力线，因此无论是内壁还是外壁缺陷，都对内壁处的磁力线产生很强的扰动，说明置于此位置的检测线圈可以有效的检测出内外壁缺陷的存在。同时，从图中我们可以看出，内外壁缺陷存在时对磁力线的扰动非常相似，这说明了远场涡流在检测外壁缺陷时具有与检测内壁缺陷近似相同的灵敏度，这也正是远场涡流应用于管道(尤其是铁磁性管道)内外壁缺陷检测的优势所在。

4. 结论

本文从远场涡流的基本原理出发,对有限元方法在远场涡流仿真中的应用进行了研究。通过建立有限元电磁仿真模型,对于远场涡流效应的基本现象,如“矢量峡谷”、“相位节点”等现象进行了有限元仿真研究。同时对于分别位于远场区和近场区的内外壁缺陷进行仿真。研究结果表明铁磁性管道中远场涡流相对于常规涡流技术的优势主要在于对内外壁缺陷具有近似相同的灵敏度,同时由于远场涡流的二次穿透效应,根据“集肤深度”效应,检测信号相位与缺陷深度呈线性关系,便于缺陷的定量评估。

基金项目

国家自然科学基金(51107148),陕西省自然科学基金(2011JQ7006)。

参考文献 (References)

- [1] 林俊明 (2004) 电磁(涡流)检测技术及发展趋势. *无损检测*, **9**, 40-41.
- [2] Yusaa, N., Perrina, S. and Mizuno, K. (2007) Numerical modeling of general cracks from the viewpoint of eddy current simulations. *NDT&E International*, **40**, 577-583.
- [3] 吴德会, 黄松岭, 赵伟, 辛君君 (2009) 油气管道裂纹远场涡流检测的仿真分析. *中国机械工程*, **20**, 1450-1454.
- [4] Chen, Z.M., Rebican, M. and Miya, K. (2005) Three dimensional simulation of remote field ECT using the Ar method and a new formula for signal calculation. *Research in Nondestructive Evaluation*, **16**, 35-53.