

油管漏磁检测的有限元建模技术研究

杜志叶¹, 阮江军¹, 余世峰¹, 刘兵²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430072; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100085)

Research on Finite Element Method Modeling Techniques of Magnetic Flux Leakage Testing for Oil Pipe

DU Zhi-ye¹, RUAN Jiang-jun¹, YU Shi-feng¹, LIU Bing²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100085, China)

ABSTRACT: Finite element method (FEM) is commonly used in analysis of magnetic flux leakage (MFL) of defect of oil pipe. It is effective implement to obtain large numbers of MFL signals for constructing database instead of using experimental method. According to actual parameters of inspection equipment, magnetostatic and transient finite element models are established. Parameters of exciters, inspecting velocity and size of defects are analyzed using two models respectively. By analyzing both static and transient simulation results, limitation that uses magnetostatic model to simulate MFL of defects of oil pipe is concluded. When velocity of pipe is over 5m/s, simulating with magnetostatic model suffers somewhat inaccuracy. Although accurate results are usually obtained with transient model, too many computational costs are necessary. At last, the requirements of using magnetostatic model to simulate MFL of defects in steel pipe are presented.

KEY WORDS: magnetic flux leakage testing; finite element method; control equation; magnetostatic model; transient model

摘要: 有限元法广泛应用于石油管道缺陷漏磁场分析, 成为替代物理试验, 获得大量缺陷漏磁信号的有效手段。该文阐述了如何用有限元方法建立漏磁检测仿真模型。根据漏磁检测设备相关参数, 建立静态和瞬态有限元仿真模型。通过对励磁磁场的均匀性、检测速度和缺陷尺寸 3 种影响因素的仿真分析, 比较了静磁场模型和瞬态模型的仿真结果和效率。静磁场模型求解效率高、占用的计算资源少, 但是随着检测速度的增大, 求解结果明显偏高。瞬态模型没有速度带来的误差问题, 但耗费大量的计算资源, 仿真时间大大增加。给出了用静磁场模型分析钢管缺陷漏磁场应满足的条件。

关键词: 漏磁检测; 有限元法; 控制方程; 静磁场模型; 瞬态模型

0 引言

油管在工作过程中由于疲劳、腐蚀和磨损等原因, 管壁会出现裂纹、变薄甚至腐蚀穿孔等现象。定期对采油油管进行质量检测是保证采油企业安全生产的有效措施。油管(钢管)壁的材料通常是导磁性能良好的高碳钢或者合金钢, 宜采用漏磁检测技术进行检测。漏磁检测(MFLT)方法缺陷检测能力强、信号处理方便、易于实现检测自动化, 是目前广泛采用的 1 种电磁无损检测方法^[1-4]。随着计算机技术的进步, 新一代的漏磁检测设备正朝着高速检测, 定量化评价的方向发展^[5-6]。对缺陷进行定量化分析, 须建立缺陷信号样本库, 采集大量的信号样本进行学习 and 比对^[7-10]。由于实际中缺陷形状多种多样, 物理实验很难获得足够的样本, 须借助于仿真分析的手段。以变分法为基础建立起来的有限元法, 在各类电磁场问题的定量分析和优化设计中有独特的优势, 自从W.lord^[11]将有限元技术应用于漏磁场的仿真分析后, 国内外学者们有限元方法获得了丰富的缺陷漏磁通信号^[12-15], 并应用到缺陷的分类和定量化识别中。漏磁检测是涉及运动导体的瞬态电磁问题, 目前的研究大多基于静磁场的仿真分析, 没有考虑检测速度的影响。采用瞬态模型可望获得更为准确的漏磁场信号, 但是占用大量的计算资源和计算时间, 为工程技术人员所诟病。本文分别采用 2D 静态和瞬态模型进行仿真, 分析了励磁磁场、钢管运动速度和缺陷尺寸 3 种因素对缺陷漏磁通信号的影响, 比较不同情况下仿真的结果, 讨论了静态模型和瞬态模型的特点和适用范围。

1 非线性磁场的有限元控制方程

1.1 2D 瞬态磁场有限元控制方程

漏磁检测装置结构如图 1 所示, 励磁线圈通过直流电流 I , 将钢管轴向磁化到近饱和状态; 圆周方向排列的 Hall 元件组, 检测缺陷漏磁信号的轴向分量。工作时, 钢管以速度 $v(t)$ 沿轴向运动, 当钢管壁内的缺陷通过霍尔元件时, 霍尔元件就会将缺陷漏磁通信号转换为电压信号并输出。

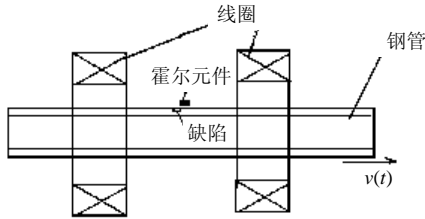


图 1 漏磁检测装置结构示意图

Fig. 1 Configuration of the MFL testing equipment

漏磁检测模型中, 钢管是导体, 运动产生的涡流, 同励磁电流一起作用, 对钢管壁内的磁通密度产生影响。对于这类运动电磁问题, 需要建立瞬态模型进行分析。本文着重研究非线性缺陷漏磁场的一般规律, 模型具有以下特点:

(1) 励磁线圈与钢管同轴, 满足轴对称的要求。

(2) 讨论的缺陷形状均为周向裂缝或凹槽, 也满足轴对称的要求。

对于那些复杂形状的缺陷, 需要建立 3D 模型才能获得较为精确的计算结果。为了达到较高的求解精确度, 针对钢管漏磁检测的特点, 本文建立 2D 轴对称模型。

检测时钢管处于平动状态, 磁场、运动速度以及电流密度等物理量都是时间的函数。求解含有运动的瞬态电磁问题, 一般采用时步有限元法^[16-17], 建立运动带将静止物体和运动物体分开, 在每一个时间步对运动带内的物体重新剖分, 来保证缺陷附近区域的求解精度。当忽略位移电流时, 有源磁场运动问题的麦克斯韦方程的微分形式可写为^[18]:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \mathbf{v} \times \nabla \times \mathbf{A} \quad (1)$$

式(1)中 \mathbf{A} 为磁矢量, 定义为

$$\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad \nabla \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (2)$$

式中: \mathbf{B} 为磁通密度; \mathbf{v} 为钢管的运动速度; \mathbf{J}_s 为外部强加的源电流密度; σ, μ 分别为材料的电导率和磁导率。磁场强度和磁通密度的关系由本征方程:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

确定。对于非线性铁磁材料, 磁导率 μ 是磁场强度的函数:

$$\mu = f(|\mathbf{H}|) \quad (4)$$

在有限元法求解的过程中, 对式(1)进行离散时, 应该尽量避免将速度 \mathbf{v} 带进刚度矩阵中, 这里采用独立坐标系方法, 运动带内外的模型采用两套坐标系, 运动物体固定在自身的坐标系, 因而运动速度为 0, \mathbf{A} 对时间的偏导数变成全导数, 从而控制方程变为

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s - \sigma \frac{d\mathbf{A}}{dt} \quad (5)$$

对于激励源区, 励磁线圈可以看成铰链导体, 忽略其涡流效应, 控制方程为

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_s \quad (6)$$

式(6)中 \mathbf{J}_s 呈均匀分布, 可由下式计算:

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{I} / S \quad (7)$$

此处 \mathbf{I} 是线圈的总电流安匝数; S 是励磁线圈的有效载流面积。如果所加的激励是电压, 电流密度则利用下式求得:

$$\mathbf{J}_s = -\sigma \nabla \varphi \quad (8)$$

此处 φ 是电标势。

1.2 2D 静磁场有限元控制方程

在轴向磁化的情况下, 在检测区域钢管壁内的磁通密度轴向分量 B_z 远远大于径向分量 B_r 。 B_z 同钢管运动的方向一致, 对涡流没有贡献。当钢管以较低的速度匀速运动时, 钢管壁内的涡流基本上可以忽略, 可按静磁场模型处理。在静磁场模型中, 激励源区的控制方程为

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J}_s \quad (9)$$

在其他区域, 则简化为

$$\nabla^2 \mathbf{A} = 0 \quad (10)$$

根据上面的约束关系, 利用有限元法可求解模型中各个网格节点上的 \mathbf{A} 值, 其他的物理量可以由 \mathbf{A} 值推导出来。

2 仿真模型

采用 Ansoft Maxwell 电磁分析软件, 根据漏磁检测装置的具体参数, 建立有限元仿真模型。如图 2 所示, 钢管的外半径为 37mm, 壁厚 6mm, 长度取 1000mm; Hall 元件的尺寸为长 4.0mm, 宽 2.1mm, 旋转 90° 安装。考虑提高要求, 其感应中心点距离钢管外表面约 1.5mm。钢管材料的磁化特性采用金属材料实验室的实测数据, 如表 1 所示。

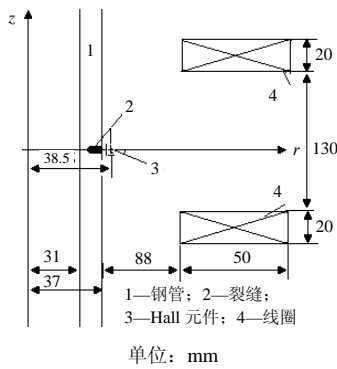


图2 漏磁检测仿真模型图
Fig. 2 Simulation model of MFL

表1 钢管的磁化特性
Tab. 1 Magnetization characteristic of steel pipe

项目	数值					
磁场强度/(A/m)	70	150	250	380	520	680
磁通密度/T	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
磁场强度/(A/m)	880	1200	1700	2600	3183	3501
磁通密度/T	0.35	0.4	0.45	0.5	0.52	0.527

励磁线圈由 $\phi 0.88$ mm的漆包铜线绕制而成,两个励磁线圈的参数相同,内半径125 mm,外半径175 mm,厚度为20 mm,匝数1000匝,相距150 mm。缺陷位于钢管外表面。

根据赫姆霍兹线圈理论,当两线圈通过相等的电流时,将在线圈之间产生1个近似的匀强磁场,保证钢管在进入检测区域后能够被均匀磁化。采用赫姆霍兹线圈有两方面的考虑:①根据漏磁检测理论,钢管在检测区域内,磁化越均匀,缺陷漏磁场信号越稳定;②对于漏磁检测问题,只有在均匀磁化条件下,才可能将瞬态问题转化为静态问题来分析,这一点后文中有详细的论述。为了分析的方便,预先定义了如下观测点和线:

- (1) 缺陷漏磁场测量点(P_m), $P_m(r, z)=P(38.5, 0)$ 。
- (2) 钢管饱和度监测点(P_s), $P_s(r, z)=P(32, 0)$ 。
- (3) 缺陷漏磁场测量路径(L_m), $L_m(r, z)=L(38.5, -10\sim 10)$ 。
- (4) 钢管饱和度测量路径(L_s), $L_s(r, z)=L(32, -10\sim 10)$ 。

其中,(1)、(2)用在瞬态模型中,(3)、(4)用在静磁场模型中。

在瞬态模型中,将钢管以及内部的缺陷用运动带与其他实体分开,设定运动速度和方向,计算每个时间步的场解。记录 P_m 和 P_s 点的 B 值。 P_m 点 B 值随时间变化的信号就是漏磁信号, P_s 点 B 值随时间变化的信号就是钢管饱和度变化曲线。

在静磁场模型中,不需要设置运动带,模型的其他参数同瞬态模型完全一致,求解时采用自适应添加网格和手动添加网格相结合的剖分方式^[15],1次即可计算出稳态情况下的磁场解,分别提取 L_m 和 L_s 路径上的磁通密度随 z 坐标值的变化曲线,前者是漏磁场信号,后者是钢管壁内磁通密度变化曲线。漏磁检测过程中,Hall元件拾取到的信号为缺陷漏磁通随时间的变化值,静磁场模型得到的是缺陷漏磁通随缺陷位置的变化值,两者之间有1个对应关系。只有在匀强磁场的条件下,这种对应关系才准确。因此,检测区域内钢管壁内磁通密度的分布是否均匀,将会对不同仿真模型的仿真结果产生较大的影响。

3 仿真分析

3.1 励磁磁场均匀性的影响

励磁磁场的均匀性同励磁线圈的电流相关,两个线圈的电流差别越大,励磁磁场不均匀度就越大。下面分3种方式考察励磁磁场均匀度的影响:

- (1) 单线圈励磁: $I_1=0, I_2=2A$ 。
- (2) 励磁电流不相等: $I_1=0.5A, I_2=1.5A$ 。
- (3) 励磁电流相等: $I_1=1A, I_2=1A$ 。

令钢管无缺陷,对3种励磁方式,分别采用静磁场和瞬态场模型求解。在瞬态求解时,设置钢管的运动速度为0.5 m/s,求解步长为0.001 s,求解结束时间为0.04 s。这样,当计算进行到最后1个时间步时,运动物体向 z 轴正方向移动20 mm,和实际检测时钢管的运动过程情况完全一致。图3所示的是不同励磁方式下,钢管饱和度的变化曲线。由图中可以看出,静态求解时,单线圈励磁方式,钢管壁内磁通密度随 z 的增大而减小,磁场不均匀度最大;当两个线圈的电流相等时,磁场的均匀度最好,钢管基本上是均匀磁化的,且在 P_s 点(图中 $z=0$ 处),钢管的饱和度也最大。瞬态求解时,在3种励磁方式中,2线圈电流相等时钢管的饱和度最大,此种方式下静态求解结果与瞬态求解结果相近,误差最小。而单线圈励磁方式下,钢管的饱和度急剧下降,励磁效率最低,静态计算结果同瞬态结果相比误差也最大。

为了更进一步说明磁场均匀性的作用,还需要研究有缺陷时的情况。设缺陷位于钢管的外表面,如图2所示,裂缝宽度(轴向)为1 mm,深度(径向)为2 mm,长度(周向)环绕钢管1周。在瞬态求解时,保持钢管运动速度和求解器的参数设定不变。瞬态

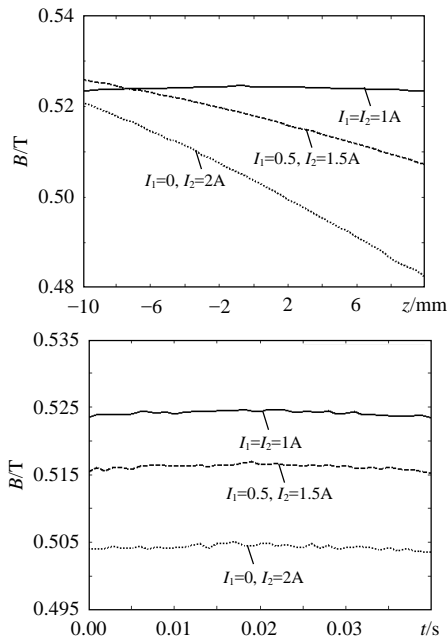


图 3 无缺陷时钢管壁内磁通密度静态和瞬态结果比较
Fig. 3 Comparison of B values in pipe wall without defects simulated in magnetostatic and transient models

模型中裂缝缺陷的初始位置位于 $z=-10\text{ mm}$ 处，计算结束时，缺陷则移动到 $z=10\text{ mm}$ 处。在求解的过程中，裂缝缺陷匀速移过 r 轴。缺陷漏磁通信号的静态、瞬态仿真结果比较如图 4 所示。图中的静态仿真结果显示，当励磁磁场不均匀时，缺陷漏磁通信号的形态将发生变化，不再左右对称。这是因为在静磁场求解时，钢管的饱和度不均匀，因而缺陷漏磁场也是不对称的。而瞬态求解结果基本是对称

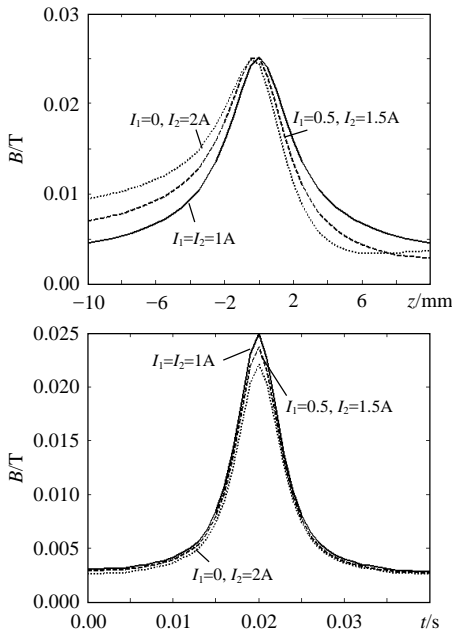


图 4 缺陷漏磁场的静态和暂态计算结果比较
Fig. 4 Comparison of MFL signals of defect simulated in magnetostatic and transient models

的，信号强度随着钢管饱和度的降低而减小。实际检测时，在速度较低的情况下，钢管的饱和度随着励磁方式的改变而不同，但信号一般是对称的^[19]。将瞬态求解结果的时间坐标换算成相对应的位置坐标后，可以看出只有当励磁磁场是匀强磁场时，静态求解结果才接近于瞬态求解结果。由此可见，无论励磁磁场的均匀度如何，瞬态的计算结果能够准确描述缺陷漏磁通信号。但是瞬态求解十分繁琐，仿真耗时大约是静态模型仿真的 $t_f/\Delta t$ 倍， t_f 为求解时间段， Δt 为求解时间步长。也就是说，如果用静磁场模型做分析，磁场的不均匀度越大，缺陷漏磁信号偏离越严重。只有在匀强磁场或近似匀强磁场的情况下，才能使用静磁场模型进行缺陷漏磁场分析。

3.2 运动速度的限制

由式(1)可知，在恒定直流产生的磁场中，运动导体内的涡流密度为

$$J_e = \sigma v \times B \quad (11)$$

钢管做轴向运动时， v 只有 z 分量，因此感应涡流密度 J_e 同磁通密度的径向分量 (B_r) 和运动速度有关。对于不同的运动速度，瞬态求解时须设定适当的求解参数，使运动速度同求解步长和求解时间相一致。当运动速度较高时，优化求解区域内的剖分网格，有助于消减数值振荡，降低计算误差。一个有效的方法就是控制运动带内的网格的尺寸，使网格的最大边长小于 λ ，此处 $\lambda = v\Delta t$ ， v 是运动的速度， Δt 求解时间步长。

为了分析钢管运动速度对漏磁通信号的作用，首先分析最简单模式下的情况：令钢管无缺陷，采取均匀磁场励磁方式，设定不同的运动速度，进行瞬态求解。求解结果显示，当运动速度为 0.5 m/s 时，瞬态计算结果同静态计算结果基本相同；当运动速度为 5 m/s 时，钢管壁内的磁通密度略有下降，且出现一定程度的数值跃变，这种数值的跃变是由于运动带内剖分网格的边长过大造成，可以通过优化运动带内的网格尺寸进行改善。另一方面，随着运动速度的提高，钢管壁内的磁通密度并没有明显的下降，基本同静态情况时相似。这是因为在匀强磁场中，管壁内的磁通密度的径向分量很小，涡流效应不显著所致。

当钢管内有缺陷时，缺陷附近磁通密度的径向分量增大，运动产生的涡流效应增强，影响钢管的饱和度。图 5 所示的是不同速度下的裂缝缺陷漏磁

场的计算结果,缺陷的参数同3.1节中的设置相同。

由图中可以看出,当运动速度增大时,缺陷漏磁通的信号幅值明显下降,当速度为5 m/s时,瞬态计算幅值下降为静态值的80%,且信号波形也有一定的畸变,这种畸变是由于网格的形状引起的计算误差。可见,当漏磁检测速度大于5 m/s时,速度引起的涡流效应已经不能忽视了,利用静磁场模型会使计算结果偏大,两者之间的差别超过20%。

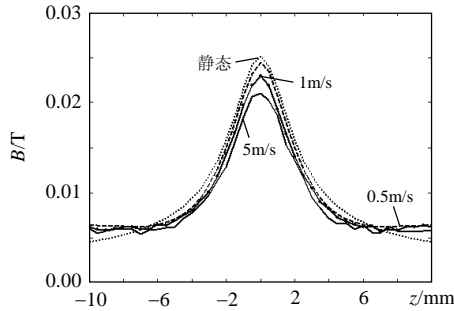


图5 速度对缺陷漏磁信号的影响

Fig. 5 The effects of velocity on MFL signals of defect

3.3 缺陷尺寸的影响

设定裂缝的宽度为1 mm,深度从1 mm到5 mm变化,分别利用2种求解模型进行仿真,仿真结果如图6所示。

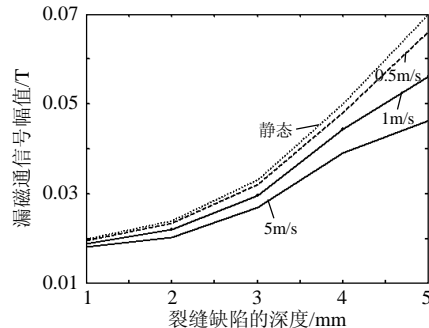


图6 缺陷漏磁通信号幅值同缺陷深度的关系

Fig. 6 The amplitude of MFL signal versus depth of defect

图6中,随着缺陷深度增加,钢管运动速度的影响更加显著,两种模型求解结果差别增大。5 mm深度的裂缝缺陷,采用静磁场模型求解时,缺陷漏磁通信号幅值为0.07 T;采用瞬态模型求解时,1 m/s的速度下,求解结果为0.057 T,比静磁场模型低了约20%。运动速度对求解结果的影响明显超过了图5所示的情况。这是因为当缺陷的深度增大时,钢管壁内的 B 增大,涡流效应增强。涡流增大会降低钢管的饱和度,从而使得缺陷漏磁场的幅值下降。静磁场模型完全忽略了速度的涡流效应,造成仿真结果偏大。

另外一点需要说明的是,对于宽度很大的缺

陷,比如表面腐蚀缺陷或者磨损,缺陷的深度比较小,一般为0.5 mm左右,但是宽度很大。当缺陷的宽度大于100 mm时,不再适合用本文中的静磁场模型求解,而必须用瞬态模型求解。原因是缺陷宽度太大,无法满足匀强磁场的条件,此时若用静磁场模型求解,会得出错误结果。

4 结论

钢管缺陷漏磁场的计算是一个复杂的非线性电磁问题,求解这类问题,有限元法有其独特的优势。采用瞬态模型求解能够精确的模拟由于钢管运动产生的涡流效应的作用,但是需要对运动的物体进行细致的剖分,使得计算复杂度大大增加,占用大量的计算资源和计算时间。静磁场模型没有考虑运动的速度效应,简化了求解过程,具有较高的仿真效率,工程实用性较强。因此,可以得出如下的结论,漏磁检测模型满足下面的条件时,建议采用本文所述的静磁场模型:

- (1) 励磁磁场是稳定的匀强磁场,检测区域内的钢管被均匀磁化到近饱和状态。
- (2) 漏磁检测设备的检测速度低于1 m/s。
- (3) 缺陷尺寸较小,宽度(z 方向)在100 mm以内。

上述结论已在本课题组研制的漏磁检测设备^[15]上得到了验证。检测速度为0.5 m/s,采用静磁场模型,仿真得到的缺陷漏磁通信号与试验结果基本吻合,偏差在10%以内。

参考文献

- [1] Atherton D L. Magnetic inspection is key to ensuring safe pipelines [J]. Oil Gas, 1989, 87(32): 52-61.
- [2] Moore D P, Bayars H G. Economics important in selecting monitoring techniques [J]. Oil and Gas Journal, 1990, 88(32): 68-73.
- [3] Edens W C. Electromagnetic inspection: wall loss and flaw location in oil country tubular goods [J]. Materials E-valuation, 1992, 50(4): 476-490.
- [4] 杜志叶, 阮江军, 余世峰, 等. 提高油管漏磁检测设备性能的新方法 [J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(6): 94-97.
Du Zhiye, Ruan Jiangjun, Yu Shifeng, et al. A new method to improve the equipment function of oil pipe detection of MFL [J]. Journal of Southeast Petroleum Institute, 2006, 28(6): 94-97 (in Chinese).
- [5] Kenzo Miya. Recent advancement of electromagnetic nondestructive inspection technology in Japan [J]. IEEE Trans. on mag, 2002, 38(2): 321-326.
- [6] 汪友生, 潘孟贤, 何辅云. 缺陷参数与漏磁信号相互关系的实验研究 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1998, 21(5): 28-31.
Wang Yousheng, Pan Mengxian, He Fuyun. Experimentl research on the relation between defect parameteres and magnetic leakage signal

- [J]. Journal of Hefei University of Technology, 1998, 21(5): 28-31(in Chinese).
- [7] Udpa S S, lord W. A Fourier descriptor classification scheme for differential probe signals[J]. Materials Evaluation, 1984, 42(9): 1136-1141.
- [8] 王贤琴, 阮江军, 杜志叶. 小波分析与漏磁检测信号处理[J]. 无损检测, 2005, 27(9): 482-484.
Wang Xianqin, Ruan Jiangjun, Du Zhiye. Wavelet analysis and signal processing for magnetic flux leakage testing[J]. NDT, 2005, 27(9): 482-484(in Chinese).
- [9] 王太勇, 蒋奇. 管道缺陷定量识别技术的研究[J]. 天津大学学报, 2003, 36(1): 45-48.
Wang Taiyong, Jiang Qi. Study on quantitative recognition technology of pipeline defect[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(1): 45-48(in Chinese).
- [10] 金涛, 阙沛文, 陈天璐, 等. 基于改进 BP 神经网络算法的管道缺陷漏磁信号识别[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(7): 1140-1144.
Jin Tao, Que Peiwen, Chen Tianlu, et al. Identification of magnetic flux leakage inspection signals for pipeline detection using an improved BP neural network algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(7): 1140-1144 (in Chinese).
- [11] Lord W. Application of numerical field modeling to electromagnetic methods of nondestructive testing[J]. IEEE Trans on Mag, 1983, 19(6): 2437-2442.
- [12] Yan Mingye, Udpa Satish, Mandayam Shreekanth, et al. Solution of inverse problems in electromagnetic NDE using finite Element methods[J]. IEEE Transactions on Mag, 1998, 34(5): 2924-2927.
- [13] Mitsuaki K. Modeling of the yoke-magnetization in MFL-testing by finite element[J]. NDT&E International, 2003, 36(7): 479-486.
- [14] 李路名, 郑鹏, 黄松岭, 等. 表面裂纹宽度对漏磁场 Y 分量的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(2): 43-45.
Li Luming, Zheng Peng, Huang Songling. Effects of surface crack width on Y component of magnetic flux leakage field[J]. Tsinghua UniV(Set & Tech), 1999, 39(2): 43-45(in Chinese).
- [15] 杜志叶, 阮江军, 王贤琴, 等. 基于 ansoft 软件的钢管漏磁检测 3D 有限元仿真研究[J]. 无损检测, 2005, 7(6): 281-285.
Du Zhiye, Ruan Jiangjun, Wang Xianqin. Research on 3D FE Simulation in MFL testing of Steel pipe based on software ansoft[J]. NDT, 2005, 27(6): 281-285(in Chinese).
- [16] 严登俊, 刘瑞芳, 胡敏强, 等. 处理电磁场有限元运动问题的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(8): 163-167.
Yan Dengjun, Liu Ruifang, Hu Minqiang, et al. A new method to deal with the motion problem in electromagnetic field finite element analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 163-167(in Chinese).
- [17] 张秀敏, 苑津莎, 崔翔. 用棱边与节点有限元耦合的 E-E- Φ 法计算三维涡流场[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 70-74.
Zhang Xiumin, Yuan Jinsha, Cui Xiang. Edge-nodal coupled E-E- Φ method for computing 3D eddy current problems[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 70-74(in Chinese).
- [18] 甘艳, 阮江军, 张宇. 有限元法与有限体积法相结合处理运动电磁问题[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 145-151.
Gan Yan, Ruan Jiangjun, Zhang Yu. Combining the finite element method and the finite volume method in motion problem simulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 145-161(in Chinese).
- [19] Yong Li, Gui Yuntian, Steve Ward. Numerical simulation on magnetic flux leakage evaluation at high speed[J]. NDT&E International, 2006, 39(8): 367-373.

收稿日期: 2007-04-27.

作者简介:

杜志叶(1974—), 男, 博士研究生, 主要从事电磁场数值计算和漏磁检测方面的研究, duzhiye@126.com;

阮江军(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场数值计算、高电压绝缘技术、电能质量等方面的研究;

余世峰(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事电磁场数值计算和信号处理方面的研究;

刘兵(1976—), 男, 博士研究生, 工程师, 现在中国电科院从事电磁场应用, 电能质量相关方向的研究, bingl@epri.ac.cn.

(责任编辑 丁玉瑜)