基于低频电磁技术的管道缺陷检测方法研究*

李俊儒1,钟舜聪2,3,4*,杨晓翔2,龚凌诸5,郭金泉2,

陈世旺5,陈小韩5,林 彤5,叶飞飞5,翁振兴5,杨天雪5

(1. 福州大学 化学化工学院, 福建 福州 350108;

2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108;

3. 华东理工大学 承压系统安全科学教育部重点实验室, 上海 200237;

4. 福建省医疗器械和医药技术重点实验室, 福建 福州 350002;

5. 福建省特种设备检验研究院, 福建 福州 350001)

摘要:为了系统地研究基于低频电磁技术的管道缺陷检测方法,建立了其二维有限元模型。借助 ANSYS 参数化设计语言(APDL),进行了循环仿真计算,研究了不同尺寸缺陷的漏磁场分布;对漏磁场的信号进行微分处理,得到了所隐含的缺陷信息,并进行了实验验证。研究结果表明,该方法在锅炉水冷壁等管道缺陷的无损检测中有较强的实用性。

关键词:低频电磁技术;有限元;管道缺陷检测;ANSYS参数化设计语言

中图分类号:TH878;TM930;TG115.28;TE973 **文献标志码:**A

文章编号:1001-4551(2012)02-0155-04

Flaw detection of pipelines using low frequency electromagnetic technique

LI Jun-ru¹, ZHONG Shun-cong^{2,3,4}, YANG Xiao-xiang², GONG Ling-zhu⁵, GUO Jin-quan², CHEN Shi-wang⁵, CHEN Xiao-han⁵, LIN Tong⁵, YE Fei-fei⁵, WEN Zhen-xing⁵, YANG Tian-xue⁵

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

3. Key Laboratory of Safety Science of Pressurized System of Ministry of Education, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

4. Fujian Key Lab of Medical Instrument and Pharmaceutical Technology, Fuzhou 350002, China;
5. Special Equipment Inspection and Research Institute of Fujian, Fuzhou 350001, China)

Abstract: In order to investigate low frequency electromagnetic technique (LFET) in pipeline flaw detection, a two-dimensional finite element (FE) model of LFET was employed. A series of LFET simulations were carried out with the ANSYS parametric design language (APDL). Magnetic flux lleakage signals of different flaws were obtained from the established models. The magnetic flux leakage signal was processed by using differential algorithm and more useful hidden information about flaws was obtained. From the simulations and experimental results, the practicality of LFET –based pipe flaw detection is demonstrated, therefore, it can be recommended for the applications in non–destructive testing of pipelines such as boiler water wall etc..

Key words: low frequency electromagnetic technique (LFET); finite element (FE); pipeline flaw detection; ANSYS parametric design language(APDL)

收稿日期:2011-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005077);国家质检总局资助项目(2009QK209);教育部回国留学人员启动基金资助项目(教外司留 [2008]890号);福建省质量技术监督局资助项目(FJQT2009039);福建省杰出青年基金资助项目(2011J06020);福州大学人才基金资助项目 (XRC-1024);华东理工大学承压系统安全科学教育部重点实验室开放基金资助项目(未提供)

作者简介:李俊儒(1987-),男,福建泉州人,主要从事特种设备无损检测方面的研究. E-mail:junru_li@163.com 通信联系人:钟舜聪,男,研究员,博士生导师. E-mail:zhongshuncong@hotmail.com

0 引 言

低频电磁技术(LFET)是一种采用低频交流激励的 快速漏磁检测新技术,工作频率一般为5Hz~100Hz。 由低频交流线圈产生的交变电磁场,在衔铁、气隙和 被测工件间形成一个磁路。当被测工件中存有裂纹、 腐蚀坑等缺陷时,磁路中的磁阻增大,缺陷附近的磁 力线将会发生弯曲,部分磁力线泄漏出管壁,产生漏 磁场。而漏磁场的幅值、相位及频率等都与缺陷的性 质和几何尺寸等存在着关联。通过对漏磁场的测量, 能够获得一些工件缺陷的基本信息。

由于激励频率低,低频电磁技术能够克服趋肤效 应,可以在管外或管内^[1]同时检测铁磁性或非铁磁性管 道的内外壁缺陷,最大可检测壁厚为24mm(20#钢)^[2]。 与采用直流或是永磁体磁化的传统漏磁技术比较,低 频电磁技术采用的是不饱和磁化,它具有剩磁小、检测 设备体积小、重量轻、操作简便等的优点。与传统的超 声测厚技术相比,低频电磁技术采用干式非接触方法 检测,对被测工件表面要求不高,可对管道进行快速检 测,在锅炉水冷壁、过热器、再热器等的检测中取得了 较好的应用效果^[3]。

目前,国内对于低频电磁检测技术的研究主要集 中于实验研究。本研究借助有限元分析方法,较为全 面和深入地研究低频电磁技术的检测机理,进而指导 实验的进行和系统及设备性能的改进。

1 低频电磁技术的有限元分析方法

1.1 电磁场有限元的理论基础

电磁场有限元分析的具体任务^[4]就是要求解一个 与特定问题相联系的偏微分方程,即控制方程的定解 问题。根据数学物理方程,所谓定解问题指的是在某一 确定区域内成立的微分方程上加定解条件。对于时变 电磁场问题,定解条件除了边界条件以外,还包括整个 区域未知函数在初始时刻的值,亦即初始条件。麦克斯 韦方程是电磁场的基本方程,也是解决各种电磁场问 题的出发点。麦克斯韦方程组的微分形式:

$$\begin{vmatrix} \nabla \times H = J \\ \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \\ \nabla \cdot B = 0 \\ \nabla \cdot D = 0 \end{vmatrix}$$
(1)

式中:*H*—磁场强度,*E*—电场强度,*B*—磁感应强度, *D*—电位移矢量,*J*—电流密度。

引入矢量磁位,令 B=▽×A,并代入麦克斯韦方程 组的第2个方程可得:

$$\nabla \times (E + \frac{\partial A}{\partial t}) = 0$$
 (2)

根据它的无旋性,定义标量位函数,令:

$$E + \frac{\partial A}{\partial t} = -\nabla\varphi \tag{3}$$

再将本构方程和及式(3)代入麦克斯韦方程组的 第1个方程,可得:

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times A) = J - \sigma (\nabla \varphi + \frac{\partial A}{\partial t})$$
(4)

对于时谐电磁场,由矢量恒等式,并考虑到▽·*A*=0, 式(4)可简化为:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = -J + \sigma (\nabla \varphi + \frac{\partial A}{\partial t})$$
(5)

据此,本研究再利用泛函数的方法推导可得电磁 场的变分方程,进一步利用有限元分解的方法,就可 以对电磁场进行近似模拟。

1.2 低频电磁技术的有限元仿真

下面利用有限元软件 ANSYS 研究不同尺寸矩形 缺陷下的漏磁场分布。在探头扫描行进过程中,整个磁 场和传感器也跟着移动。探头行进扫描模型如图 1所 示。探头自位置 x₀运动至位置 x_n完成一次检测的过程 中,分别在 x_i=x₀+iΔx(i=0,1,2,…,n)处建立模型并进 行 n+1 次谐波电磁场分析。实际上,磁场的移动将会 在钢管内产生涡流,并对管子壁内的磁通密度产生影 响,但由于低频电磁检测速度和频率以及缺陷尺寸都 比较小,可以采用不考虑速度效应的二维平面模型^[5-6]。



ANSYS 的参数化设计语言(APDL)能够实现参数 化变量方式建立分析模型,自动完成有限元分析过程, 并将所需要的计算结果写入到指定文件中,便于后处 理,可以大大减少工作量^[7]。本研究将探头的位置设为 变量,以 x_0 为初始值, x_n 为终值, Δ_x 为步长,完成一组循 环仿真,分别提取传感器在位置 $x_i(i=1,2,3,\dots,n)$ 上的 信号值。

探头结构及尺寸如图 2 所示。各部分模型选用的 参数如下:线圈选用相对磁导率μ,为1,电导率σ为



5.8×10⁷ s·m⁻¹,直径 Φ 为 0.2 mm 的铜导线;衔铁选用 μ,为 60 000,σ 为 100 s·m⁻¹ 的锰锌铁氧体;钢管选用 常见的 X52 钢,材料为非线性,钢管厚度为 4 mm,管子 内壁含有环形矩形缺陷。探头提离值高度为 0.5 mm。除 此之外,还必须对周围的空气进行建模。为便于程序自动 运行,模型采用自由网格划分,网格数目约为 19 600 个, 步长选为 1 mm,进行每组 143 次的循环计算。

宽 6 mm、深 2 mm 矩形缺陷漏磁场分布(探头在 不同 x_i处时传感器位置的磁感应强度 B 及其 x、y 向 分量)如图 3 所示。缺陷处的磁场信号,为漏磁场和线 圈激励磁场的叠加,因而在无缺陷处,磁感应强度并 不为零。在缺陷附近,漏磁场轴向分量幅值IB_xI出现变 化,且在缺陷中心线处达到最大值。磁感应强度幅值 及其径向分量IB_xI,在缺陷边缘处出现两个极值。



2 基于 LFET 的管道缺陷检测

在幅值为 10 V、频率为 12 Hz 的交流电激励下, 本研究对于不同深度、宽度缺陷分别进行了 12 组的 循环仿真。由仿真得到的是时谐电磁场的实部解和虚 部解,经过进一步计算,不同深度和宽度矩形缺陷的 漏磁场磁感应强度的轴向分量幅值IB_xI、径向分量幅 值IB_xI的大小如图 4、图 5 所示。







图 5 不同宽度缺陷下的检测信号(缺陷深度均为 2 mm)

从图 4 和图 5 中可以看出, IB, I极大值和极小值的 差值与缺陷的深度成正比, 两个极值所在位置的距离 又与缺陷宽度成正比。所以, 漏磁场磁感应强度的径 向分量能够较为准确地表征矩形缺陷的几何尺寸, 但 在信号强度较小时则不易区分。漏磁检测中也通常采 用 B, 为检测的物理量^[8]。

而对于轴向分量 *B_x*,由图 4 和图 5 中可知,*IB_x*I的 最大值与缺陷深度成正比,且随着缺陷宽度的增加, *IB_x*I的最大值也出现了先急后缓的变化趋势。*IB_x*I的波 峰宽度也能够反应出缺陷宽度的变化情况,但两者关 系难以准确确定。

为此,本研究采用数值微分方法对漏磁场信号 B



进行处理[9-10]。

经微分处理后的检测信号如图 6 所示。B 在对时间 t 求导后,出现了一个波峰和两个波谷。波峰与波谷的差值与缺陷深度成比例,而两个波谷间的距离大致等于缺陷宽度。所以,经过微分变换的 B 能够很好地表征矩形的几何尺寸。

3 实验验证

为了验证低频电磁技术的有限元仿真结果,本研 究制作了含有宽度相同、深度不同的多个盲孔及一个 通孔的人工缺陷样管,并利用厦门涡流检测技术研究 所生产的低频电磁技术检测设备 ET100,对这些试件 进行检测。经检测发现,检测信号幅值与缺陷深度有 着良好的线性关系;但对于尺寸较小的缺陷,其检测 信号较小,容易被环境噪声所淹没。

样管为 Φ 57.2×4 的 X52 钢管, 盲孔和通孔直径 Φ 均为 6 mm, 盲孔的深度 d 分别为 1 mm、2 mm、3 mm, 检测信号如图 7 所示。



图 7 人工缺陷样管检测信号

另外,本研究对4根从现场收集回来的自然缺陷 管(管子内表面分别存在着点状氢腐蚀坑、垢下腐蚀 坑、管壁单侧均匀减薄、酸腐蚀坑等不同类型自然缺 陷的锅炉水冷壁管)进行了检测。管子材质为20G,规 格为Φ60×5。检测完之后,本研究用点触头卡尺分别 测量这些蚀坑缺陷的最大深度,结果如表1所示。检 测结果与机械深度测量基本一致。鉴于自然缺陷形状 的不规则和检测信号的平均效应,可以认为检测结果 能够较为准确地反映缺陷的实际情况。

表1 自然缺陷管检测结果

管号	检出深度/(%)	实际深度/(%)
1	50	42
2	45	38
3	80	76
4	55	48

此外,本研究使用厦门涡流检测技术研究所生产 的低频电磁技术检测设备 ET100,还对处于停产大修 期间的福建晋江创冠环保有限公司的垃圾焚烧锅炉 2# 炉进行了实地检测。检测结果发现,低频电磁技术 检测设备对于被测管道表面的平整度要求不高,只需 要对被测管道表面进行表面除渣,保证探头扫描行进 过程中不出现大的颠簸即可;设备轻便操作简单,单 人即可进行检测,并判断缺陷分布情况;设备体积小, 能够适应复杂的工作环境;能够较快地完成大规模管 道的缺陷排查任务,并有效地筛选出缺损严重的腐蚀 坑缺陷,配合使用超声波测厚技术可进行更为准确的 定量检测。

4 结束语

本研究运用有限元方法,借助 ANSYS 软件对不同 尺寸缺陷的漏磁场分布进行了研究。并采用参数化设计 语言(APDL)编制了命令流和宏文件,使软件能够自动 完成一系列的循环仿真计算。漏磁场的径向分量 *B*,和 轴向分量 *B*,都含有缺陷的宽度和深度信息。经过微分 变换的漏磁场信号能够很好地反映缺陷宽度和深度信 息,这有利于进一步开展低频电磁技术的定量研究。

通过对人工缺陷样管及自然缺陷管的实际检测 实验,结果表明:低频电磁技术检测设备进行管道缺 陷检测不仅方便快捷,而且高效准确。配以合适的探 头,能够很好地运用于管数众多、管道布置复杂的锅 炉水冷壁、换热器、再热器等的检测。若辅以传统的超 声测厚等技术手段,可以进一步提高检测的准确性。

参考文献(References):

- GOTOH Y, TAKAHASHI N. Three-dimensional FEM analysis of electromagnetic inspection of outer side defects [J].
 IEEE Transactions on Magnetic, 2007, 43(4):1733–1736.
- [2] 林俊明,曲民兴,李同滨. 低频电磁 / 涡流无损检测技术的 研究[J].无损探伤,2002,26(1):30-32.
- [3] 姜 斌,王 方,毛富杰. 低频电磁技术在锅炉四管检测中的应用研究[J]. 无损探伤,2009,33(5):38-40.
- [4] 颜威利,杨庆新,汪友华.电气工程电磁场数值分析[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [5] 杜志叶,阮江军,余世峰. 油管漏磁检测的有限元建模技术 研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(27):108-113.
- [6] PARK G S. PARK S H. Analysis of the velocity-induced eddy current in MFL type NDT [J]. IEEE Transactions on Magnetic, 2004, 40(2):663–666.
- [7] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册 [M].北京:机械工业出版社,2009.
- [8] 李路明,郑 鹏,黄松岭.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.
- [9] 秦旭达,王太勇,刘兴荣. 微分处理方法在漏磁检测信号分 析中的应用研究[J]. 钢铁,2004,39(2):67-70.
- [10] 李庆杨, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 4 版. 北京: 清华 大学出版社, 2001.

「编辑:罗向阳]