

基于 COMSOL 的电容成像传感器仿真研究

李 振 殷晓康 李 晨 王克凡

(中国石油大学(华东)海洋油气装备与安全技术研究中心 青岛 266580)

摘要: 针对电容成像传感器仿真分析的难点,以8极板电容成像传感器为例,建立了电容成像传感器的三维有限元仿真数学模型,详细介绍了如何使用 COMSOL 软件对电容成像传感器进行三维仿真,后处理结果表明8极板电容成像传感器能检测到有机玻璃内部7个不同深度的缺陷,验证了电容成像检测技术的可行性。除此之外还运用 COMSOL 对8极板电容成像传感器的电容值进行提取分析,并与实验结果相对比,结果表明两者的检测结果相吻合。此方法方便了电容成像检测技术正问题的研究,为运用 COMSOL 软件对电容成像传感器的性能分析与参数优化提供了依据。

关键词: 有限元;电容成像传感器;COMSOL;仿真;无损检测

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Simulation study of capacitance imaging sensor based on COMSOL software

Li Zhen Yin Xiaokang Li Chen Wang Kefan

(Center for Offshore Engineering and Safety Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The difficulties in the simulation analysis of capacitance imaging sensor are discussed in this paper, using the eight electrode capacitance imaging sensor as an example, three dimensional finite element simulation mathematical model of capacitance sensor is established, this paper introduces how to use COMSOL software for three dimensional simulation of capacitance imaging sensor, postprocessing results show that the eight electrode capacitance imaging sensor can detect the defects in the inner surface of the glass with seven different depths, the feasibility of capacitance imaging detection technology is verified. In addition, COMSOL is used to extract and analyze the capacitance value of the eight electrode capacitance imaging sensor, and the results are compared with the experimental results. This method is convenient for the research on the problem of capacitance imaging detection technology, and provides the basis for the performance analysis and parameter optimization of the capacitance sensor using COMSOL software.

Keywords: finite element; capacitance imaging sensor; COMSOL; simulation; nondestructive testing

0 引 言

有限元分析方法也称为有限单元法(finite element analysis, FEA),是一种随着计算机发展而快速发展的数值计算方法^[1]。有限元方法最初起源于航空工程领域和土木工程领域中的结构力学分析,现已广泛应用于各种数学、物理、工程等领域。目前,应用于静电场的有限元分析软件有 ANSYS、Ansoft Maxwell、Infolytica 等,与这些软件相比,COMSOL Multiphysics 的使用相对简单,不需要记住复杂的命令流、也不需要复杂的操作、使用的 GUI 界面友好,而且它的后处理功能比较完善,这是其他类似软件所不具备的。由于电容成像检测技术所需求解的电容值公式很难通过数学推理的方法求出且推理过程比较繁琐,而且实验方

法费时费力。目前为止,利用 COMSOL 仿真软件求解计算是分析电容成像技术的最佳选择。

电容成像检测技术(capacitance imaging detection technology, CIDD)是一种从医学 CT 技术发展而来的无损检测技术,它是利用共面电极对之间产生的准静态边缘电场对试件中的缺陷进行检测^[2-5]。与传统的涡流检测技术^[6]和 ACFM 技术^[7]相比,它除了具有廉价、非接触式、非侵入式和单侧检测的特点,还具有能对导电性能差的材料进行检测的特点,现已应用到检测非金属材料缺陷和含防腐层的金属管道表面缺陷中。一个典型的电容成像检测系统包括电容成像传感器、XYZ 扫描平台、步骤监测控制器、函数发生器、锁相放大器、电荷放大器、数字示波器和计算机。其基本原理是函数发生器给电容成像传感器上的激励

电极提供交流电压信号,当电容成像传感器被步骤监测控制器控制沿试件表面进行扫描检测时,反映试件介电常数信息的电荷信号经电荷放大器转换为交流电压信号,交流电压信号经锁相放大器转换为直流电压信号,直流电压信号被示波器获取并存储在计算机中,通过对数据的排列组合就能得到用于判断缺陷的电容图。

为了对电容成像传感器进行分析研究,需要对电容成像检测技术进行综合分析,涉及到检测技术中的正问题和反问题。对于电容成像检测技术,正问题是已知被测试件材料分布情况求取极板对间的电容值,反问题是已知极板对间的电容值求取被测试件材料分布情况,由于反问题存在着欠定性、非线性和病态性三大难点,仿真分析只对电容成像检测技术的正问题进行初步研究。

本文应用 COMSOL Multiphysics 有限元仿真软件在 AC/DC 领域的静电场模块,以 8 极板电容成像传感器为例,详细介绍 COMSOL Multiphysics 在电容成像检测技术中的具体应用,包括从仿真模型建立到后处理的全部操作步骤。

1 电容成像传感器的三维数学模型

出于简化模型的考虑,ECT 中电容传感器的有限元仿真计算多采用二维模型,这种模型省略了轴向的边缘效应^[8]。对于电容成像检测技术而言,所依据的原理是共面电极对之间的边缘电场,而且检测到的电容值的数量级非常小,一般都在皮法级以下,故采用三维模型能真实地反映检测结果,为准确分析电容成像传感器的性能提供了可靠的仿真依据。

当编号为 i 的电极为激励电极(激励电压为 U),编号为 j 的电极为检测电极时(感应电荷量为 Q_{ij}),那么两极板间的电容值 C_{ij} 可通过如下的公式求得:

$$C_{ij} = \frac{Q_{ij}}{U} \quad (1)$$

式中: $i=1,2,3,\dots,8;j=1,2,3,\dots,8;i \neq j$ 。

由于激励电极所施加的激励信号频率通常为 10 kHz~1 MHz,此频率范围内的探测电磁场可视为准静态电场,这种准静态电场的分布与静电情况相似^[4]。基于以上假设,高斯定理可用于计算检测电极上产生的电荷量 Q_{ij} :

$$Q_{ij} = - \iint \epsilon(x,y,z) \nabla \varphi(x,y,z) \cdot ds \quad (2)$$

式中: $\epsilon(x,y,z)$ 为被测试件材料的介电常数的分布, $\varphi(x,y,z)$ 为电势分布, s 为检测电极的外包络, ds 为外向型表面矢量。

值得注意的是在 COMSOL 仿真分析中,检测极板面积分获取的 Q_{ij} 只有在 1 个激励电极和 1 个检测电极的情况下才是真实有效的。在 1 个激励电极和多个检测电极的情况下,终端电荷得到的 Q_{ij} 是检测极板 j 上真实的电荷量,而通过对表面电荷密度进行面积分得到的 Q_{ij} 并不是检测极板 j 上真实的电荷量,因为这种方法得到的总电荷量不守恒^[9-10]。

2 仿真计算过程

应用有限元软件 COMSOL 进行仿真分析的流程如图 1 所示。首先对实际工程问题进行分析,其次根据分析的结果运用有限元软件 COMSOL 依次建立几何模型、设置材料属性、网格划分、设置物理场、求解设置和后处理,最后对结果进行研究判断。如果得到结果是合理的,就解决了此工程问题;如果得到的结果是不合理的,就要提出改进方法,对仿真分析模型中的一个步骤或者几个步骤进行修改,再对模型的计算结果进行判断,直到得出合理结果、解决问题为止。

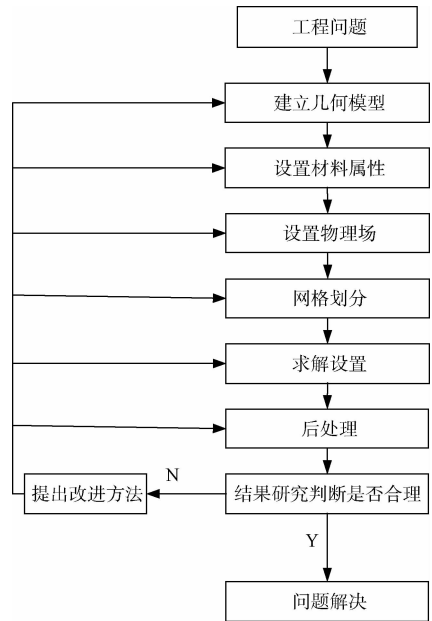


图 1 有限元软件 COMSOL 的分析流程

电容成像检测技术是一种新型的无损检测技术,它所解决的实际工程问题是检测被测试件表面和内部的缺陷。按照图 1 所示的流程,接下来是利用有限元软件 COMSOL 进行仿真分析,总共分为 6 步,具体如下。

1) 建立几何模型:启动有限元软件 COMSOL,选择三维实体。几何模型建立过程中用到的域操作命令有长方体、圆柱体,边界操作命令有矩形,布尔运算和分割操作命令有复制、移动和拷贝^[11]。有机玻璃试件内含有 7 个深度不同的缺陷,用组合体命令把电容成像传感器、有机玻璃模型和空气层模型组成一个长方体(图 2),整个模型的仿真分析都在这个长方体内完成。

2) 设置材料属性:仿真分析过程中要设置 4 种不同材料,分别为空气、铜、有机玻璃和树脂复合材料。空气被赋值到空气层,相对介电常数为 1、相对磁导率为 1、电导率为 10 S/m;铜被赋值到电容传感器的激励电极、检测电极和屏蔽电极,相对介电常数为 1、相对磁导率为 1、电导率为 5.9×10^7 S/m;有机玻璃被赋值到试件,相对介电常数为

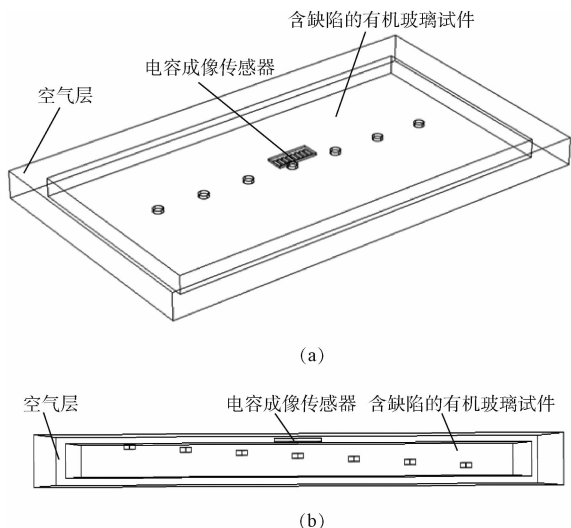


图 2 电容成像检测技术的仿真模型

4.2、相对磁导率为 1、电导率为 10^{-14} S/m;树脂复合材料被赋值到电容成像传感器的基体,相对介电常数为 4、相对磁导率为 1、电导率为 4×10^{-3} S/m^[12-13]。

3)设置物理场:选择 AC/DC 模块下的静电(es)物理场。此物理场有 3 个缺省的边界条件,即电荷守恒 1、零电荷 1 和初始值 1,除此之外还要设置终端 2~8 和接地 1。终端 1 设置为 1 V,被赋值到激励电极 1;终端 2~8 设置为 0 V,分别被赋值到检测电极 2~8;接地 1 被赋值到电容成像传感器的板件屏蔽电极和背面屏蔽电极^[14]。

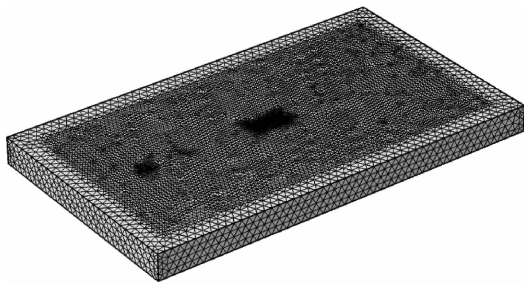


图 3 电容成像模型的四面体剖分网格

4)划分网格:COMSOL 可以创建自由网格、映射网格、扫掠网格、边界层网格等多种网格,由于电容成像仿真模型的截面是矩形,故选择自由剖分四面体网格。四面体网格的最大单元尺寸为 0.7 cm,最小单元尺寸为 0.007 cm,最大单元生长率为 1.3,曲率因子为 0.2,狭窄区域解析度为 1。划分网格后的模型如图 3 所示,该剖分共有 216 个顶点单元数、3 540 个边单元数、67 120 个边界单元数和 709 887 个单元数。当网格划分较粗时,求解到的结果会偏离实际;网格划分较细时,计算所需时间较长,如何选择适合的网格划分精度需要反复调试。

5)设置求解器:在电容成像检测技术实际检测过程中,

激励电极所加激励信号的频率为 10 kHz~1 MHz。在这个频率范围内,产生的电磁场可视为准静态电场,据此可知电容成像检测模型需要使用稳态分析^[15]。在稳态求解步骤中选择共轭梯度求解器,预条件为左,误差估计因子为 400,最大迭代数为 10 000。在全耦合设定中选择自动高度非线性方法,初始衰减因子为 1,最小衰减因子为 1×10^{-4} ,更新步长的限制为 10,恢复阻尼因子为 0.75,终止技术为容差,最大迭代数为 25,容差因子为 1,终止判据为解或残差,残差因子为 1 000。求解器的设置是有限元软件的核心,关系到仿真结果的合理性,以上设置的数值是经过优化处理得到的,这种设置可以在得出最优结果的同时最大限度地减小对工作站 CPU 的占用率^[16]。

6)后处理:COMSOL 的后处理器具有丰富的功能,有些功能是其有限元分析软件所不具备的^[17]。在一维绘图组中,可以生成点、线、表图、全局数据图等;在二维绘图组中,可以生成表面图、云图、粒子追踪、流线等;在三维绘图组中,可以生成切片图、箭头图、求解域图等。在仿真分析的后处理过程中,设置三维绘图组 1,在其子序列下,调用流线 1 命令,点数为 80,就能得到如图 4 所示的电容成像模型的电场流线图^[18];再设置三维绘图组 2,在其子序列下,调用体箭头 1 命令, x 格点为 20、 y 格点为 1、 z 格点为 20,就能得到如图 5 所示的电容成像模型的电场箭头图^[19]。在求解 8 极板对之间的电容值时需要用到 es. C_{ij} 或 es. Q_{ij} 的表达式,由于在物理场设置中赋值给激励电极的电压信号为 1 V,所以无论使用哪种表达式,得到的数值是一样的^[20]。在三维绘图组中输入表达式 es. C_{61} 就得到了如图 6 所示的极板对 6-1 的电容值图,从图 6 可得,4 个较浅的缺陷都有两个波峰,3 个较深的缺陷都有一个波峰,从而确定有机玻璃内部含有 7 个不同位置的缺陷,从而达到检测缺陷的目的。至于对缺陷深度的定位,需要对电容成像技术进一步的研究。

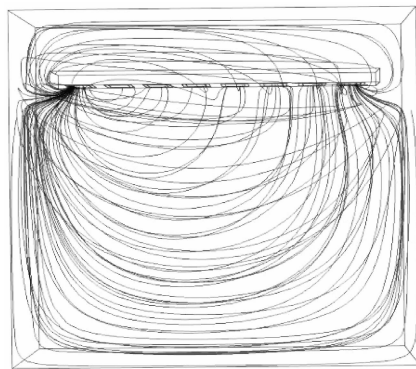


图 4 电容成像模型的电场流线图

在仿真分析过程中,由于仿真步骤设置的不合理,很可能得不到合理的结果。对于不同的错误应采用不同的解决方法,需要按照图 1 所示的流程图对仿真步骤进行修改,直

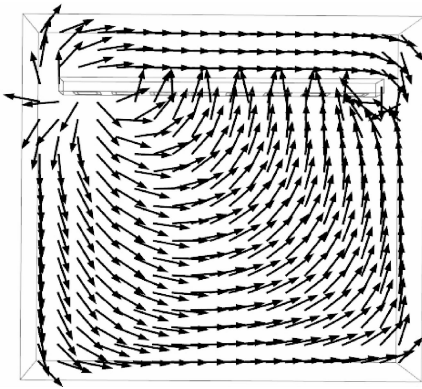


图 5 电容成像模型的电场箭头图

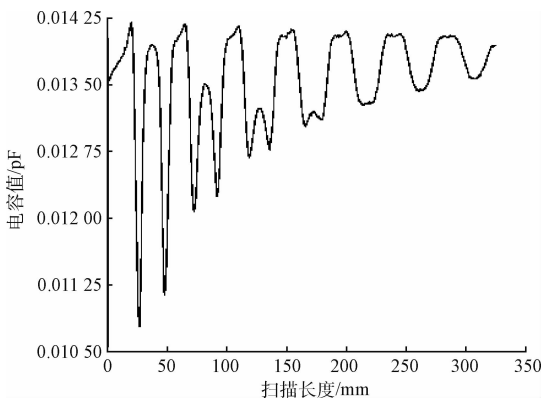


图 6 极板对 6-1 检测到的电容值

到得出合理的结果为止。

3 结果

第 3 部分仿真检测的有机玻璃试件中含有 7 个深度不同的缺陷,这部分仿真验证了 8 极板电容成像传感器对 7 个不同深度缺陷的检测能力。而在实际工程问题的解决过程中比较关心的是仿真结果与实际结果之间的误差,为了定量分析两者之间的误差需要对仿真模型进行修改。对于仿真模型的修改,只需在建立几何模型时把有缺陷的有机玻璃试件改为无缺陷的有机玻璃试件,其他仿真分析步骤不变,就能完成仿真要求。对比 COMSOL 软件仿真分析与实验方法得到的 8 极板电容成像传感器的电容值,如图 7 所示。

从图 7 可知,单方面看仿真结果或者实验结果,都能发现随着极板对间距的增大,电容值呈指数减小,这主要是因为电容成像检测技术所依据的原理是电场的边缘效应,距离电极距离越远电场强度衰减越大。从图 7 还可以看出,仿真结果与实验结果之间的误差小于 6%,这部分误差主要是由于外部杂散电容造成的;鉴于两者之间的误差不大,在科学研究中可以用仿真分析得出的电容值代替实验检测得到的电容值进行初步的定性研究,为下一步电容成像传

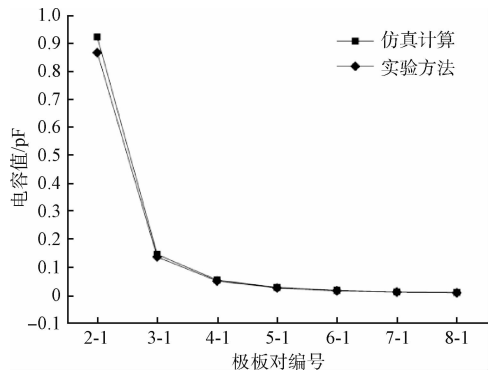


图 7 仿真分析与实验方法结果对比

感器的性能分析和优化设计奠定了基础。

4 结 论

以 8 极板电容成像传感器为例,建立了电容成像传感器的三维有限元仿真数学模型,运用 COMSOL 软件对电容成像传感器进行三维仿真分析,这种方法弥补了数学推理和实验检测上的局限性,解决了其他类似有限元软件仿真分析所具有的复杂性,具体结论如下。

1) 运用 COMSOL 软件对 8 极板电容成像传感器进行仿真分析,检测到了有机玻璃内部 7 个深度不同的缺陷,验证了电容成像检测技术理论上的可行性。

2) 运用 COMSOL 软件提取了 7 对极板对之间的电容值,并与实验结果相对比,结果表明两者之间的误差在电容成像检测技术的检测精度之内,这种仿真分析方法可以在一定程度上代替实验对电容成像传感器进行初步研究。运用 COMSOL 软件进行仿真分析方便了电容成像检测技术正问题的研究,为电容成像传感器的性能分析和优化设计提供了依据。

参考文献

- [1] PAPAGEORGIU S N, KEILIG L, VANDEVSKA V, et al. Torque differences due to the material variation of the orthodontic appliance: a finite element study[J]. Progress in Orthodontics, 2017, 18(1): 6.
- [2] YIN X, HUTCHINS D A, CHEN G, et al. Preliminary studies on the design principles of capacitive imaging probes for non-destructive evaluation [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013, 42 (3): 447-470.
- [3] YIN X, HUTCHINS D A, CHEN G, et al. Investigations into the measurement sensitivity distribution of coplanar capacitive imaging probes[J]. NDT & E International, 2013, 58 (3): 1-9.
- [4] YIN X, HUTCHINS D A, CHEN G, et al. Studies

- of the factors influencing the imaging performance of the capacitive imaging technique [J]. *NDT & E International*, 2013, 60(12): 1-10.
- [5] YIN X, LI W. A novel non-destructive evaluation (NDE) technique using coplanar capacitive imaging probes[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2014, 42(3): 713-724.
- [6] WANG Z, LUO Q, SHI Y. Divide-and-conquer approach applied to impedance analysis of pipe eddy current test[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2016, 45(5): 377-381, 392.
- [7] GE J, LI W, CHEN G, et al. New parameters for the ACFM inspection of different materials [J]. *Insight*, 2016, 58(6): 313-317.
- [8] 周海婷, 厚康, 潘红良, 等. 基于有限元仿真电涡流传感器的结构设计[J]. *电子测量技术*, 2016, 38(7): 15-19.
- [9] 郭小辉, 黄英, 腾珂, 等. 全柔性电容式触觉传感阵列设计与实验[J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(9): 1278-1285.
- [10] 刘延东, 周恩学, 董德帅. 基于 Comsol 的电容传感器仿真研究[J]. *电气电子教学学报*, 2015(1): 74-75.
- [11] 王惠玲, 李宝生. 基于边缘效应的圆环式电容传感器电场仿真分析[J]. *传感器与微系统*, 2014(4): 31-34.
- [12] GALLIEN B, ALBARIC M, DUFFAR T, et al. Study on the usage of a commercial software for dislocation multiplication model [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2017, 457(SI): 60-64.
- [13] 谢江容, 潘凤明, 吴政南, 等. 基于 COMSOL 的电容触摸屏仿真研究[J]. *家电科技*, 2016(2): 78-81.
- [14] 曹海燕, 王化祥. 电容层析成像传感器仿真研究[J]. *计算机工程与应用*, 2012(15): 207-211.
- [15] 吴新杰, 胡晟, 付荣荣. 基于 COMSOL 的电容层析成像系统灵敏度场的计算[J]. *辽宁大学学报: 自然科学版*, 2011(3): 193-196.
- [16] 赵丽梅. 基于共平面阵列式电容成像技术的无损检测研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [17] BUTLER L, ZHANG Z. Forward modeling of geophysical electromagnetic methods using COMSOL[J]. *Computers & Geosciences*, 2016, 87(2): 1-10.
- [18] 林振东. 基于 COMSOL 的三维 ECT 传感器参数研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2015.
- [19] 马平, 周晓宁, 田沛, 等. 基于 COMSOL 电容层析成像[J]. *电测与仪表*, 2009(11): 20-23.
- [20] MALIKI M, LAREDJ N, BENDANI K, et al. Two-dimensional transient modeling of energy and mass transfer in porous building components using COMSOL multiphysics[J]. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2017, 10(12): 319-328.

作者简介

李振, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为电容成像检测技术和旋转电磁场检测技术。

E-mail: lizhenndt@163.com

殷晓康, 1983 年出生, 博士后, 副教授, 主要研究方向为油气装备关键部件完整性无损检测技术及结构健康状态监测技术。

E-mail: xiaokang.yin@upc.edu.cn