

电磁层析成像系统敏感场激励特性仿真研究

付妍, 董峰, 谭超

(天津市过程检测与控制重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

Simulation of Excitation Characteristics in Sensing Field of Electromagnetic Tomography System

FU Yan, DONG Feng, TAN Chao

(Tianjin Key Laboratory of Process Measurement and Control (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: Electromagnetic tomography (EMT) has potential value in process measurement. The frontier of electromagnetic tomography system is the sensor array. Owing to the excited signal acting on the sensor array directly, the excited strategy, the excited frequency and amplitude characteristics affect the quality of the information that the detected coil acquired from the object space. Furthermore, it would affect the accuracy of the information post extracted from the object field. To improve the sensitivity of the sensor array on the changes of the object field distribution, upgrade the sensitivity and accuracy of the system and guarantee high precision and high stability of the experimental data, finite element simulation software, COMSOL multiphysics was used, to analyze the excited strategy and the characteristic of the excitation frequency of EMT. And the relationship between the output character with the excited strategy and excited frequency was acquired. Establish the foundation in optimal using of EMT sesor array was established.

KEY WORDS: electromagnetic tomography (EMT); sensing field; excited strategy; excitation frequency; sensor array

摘要: 电磁层析成像(electromagnetic tomography, EMT)技术在过程检测中具有潜在的价值。电磁传感器阵列是电磁层析成像系统的前端,由于激励信号直接作用于电磁传感器阵列,因此激励模式、激励信号的频率和幅值特性直接影响检测线圈获取物场信息的质量,进而影响后续物场信息特征提取的精度。为了提高传感器阵列对物场信息分布变化的敏感程度,提高系统的敏感性和精确度,保证实验数据的高精度与高稳定性,利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics 对电磁层析成像系统的激励模式和激励频率特性进行仿真

分析,并获得激励模式及激励频率与传感器输出之间的关系,为电磁传感器阵列的优化使用奠定基础。

关键词: 电磁层析成像技术; 敏感场; 激励模式; 激励频率; 传感器阵列

0 引言

电磁层析成像(electromagnetic tomography, EMT)作为一种非侵入、非接触、可视化的测量方法,得到越来越广泛的应用^[1]。目前,电磁层析成像系统已在流化床内物料分布、气力输送及分离器的气/固两相流及燃烧火焰测量等可视化监测中获得实验应用^[2-4]。

电磁层析成像技术于20世纪90年代初期,由英国曼彻斯特理工大学(UMIST)率先提出。他们基于物流断面的平行激励场方法,设计了敏感阵列及数据采集与处理系统,获得了简单被测物的定性图像,并提示该技术应用于导电与导磁物流(双模式)成像的可能性^[5]。同时,一些学者进行了电磁层析成像系统的初步可行性研究^[6-8],并拟将这一技术应用于生物医学研究。之后,俄罗斯 Aveiro 大学研制的多线圈不对称激励系统^[9],解决了在不借助于机械运动的前提下被测对象的多投影问题;俄罗斯学者 Korjenskyy 等人也研制了类似的 EMT 实验系统样机^[9-11],并计划将该系统应用于生物组织的成像;Peyton 和 Yin 等人提出了一种用于检测金属板缺陷的平面 EMT 系统^[12-13],并对 EMT 检测水平面和电导率做了仿真研究^[14]。EMT 是通过对被研究空间施加特定的电磁场,检测此空间中由于物质分布的变化而产生的电磁场畸变,从而依据畸变信息分析物质在空间的分布状况^[7]。

在 EMT 中选取不同的激励模式和激励频率对检测结果会产生直接的影响,然而现有的研究通常

基金项目: 国家自然科学基金项目(50776063); 天津市应用基础及前沿技术研究计划重点项目(08JCZDJC17700)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50776063); Natural Science Foundation of Tianjin (08JCZ-DJC17700).

给出的是输入量与中间参量间的变化关系。为了解决这个问题,获得直观的输出-输入间的关系,本文利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics,结合电磁场的基本原理,对 EMT 系统激励模式与激励频率特性进行分析。

1 EMT 系统敏感场仿真

1.1 EMT 系统的仿真原理

根据电磁感应原理,EMT 系统在正弦时变激励下由电磁场中的全电流定律、推广的电磁感应定律、磁通连续性原理以及高斯定律,可以得到如下的 Maxwell 方程组的微分形式^[15-16]:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇ 为拉普拉斯算子, $\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$;

\vec{H} 为磁场强度; \vec{J} 为电流密度; \vec{D} 为电位移; \vec{E} 为电场强度; \vec{B} 为磁感应强度; ρ 为电荷密度。

对 EMT 敏感场及被测物体进行假设并结合物场媒质特性,最终可得 EMT 电磁敏感场的矢量磁位 \vec{A} 的方程为

$$\nabla(\mu^{-1}\nabla\vec{A}) = j\omega\sigma\vec{A} \quad (2)$$

式中: μ 为相对磁导率; σ 为电导率。

在利用 COMSOL 仿真后可以得到的物理量有磁矢位 \vec{A} , 磁感应强度 \vec{B} , 然而在实际的检测过程中,得到的物理信号是检测线圈的输出电压。其原因是,根据电磁感应原理可知,变化的磁场产生变化的电场,故在线圈中产生随时间变化的电流,经线圈电阻后输出成为电压信号。在仿真实验中,各检测线圈的输出电压 U 可由下式进行计算:

$$U = -\frac{d\phi}{dt} = -n \frac{d(\vec{B}S)}{dt} = -n \frac{d(\vec{A}l)}{dt} = -nj\omega l(\vec{A}_1 - \vec{A}_2) \quad (3)$$

式中: \vec{A}_1 、 \vec{A}_2 分别为检测线圈两端节点处的矢量磁位值; n 和 l 分别为检测线圈的匝数和沿管道轴向的长度; ω 为角频率。

由式(3)可以看出,当 EMT 系统结构固定后,对系统施加某一激励时,检测线圈的匝数、沿管道轴向的长度以及角频率均为固定值,此时线圈上的测量电压与线圈上的磁位差成某一定比例系数的线性关系,即检测线圈上获得的磁位差实际上可作

为整个电磁场的表征。

由 EMT 系统的检测原理可知,检测线圈中的磁场由两部分组成:一部分来自激励线圈本身产生的磁感应强度 \vec{B}_p ;另一部分则来自被测物场中被测物质的感应电流所产生的磁感应强度 \vec{B}_s 。由于激励信号为外界输入的固定信号,可视为恒定值,磁感应强度 \vec{B}_p 可认为是恒定不变的量。因此检测线圈中的磁感应强度的变化是来自被测物场的磁感应强度 \vec{B}_s 的变化,即 $\Delta\vec{B} = \vec{B}_s$ 。

根据毕奥-沙伐定律^[17-18],磁通量为

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \oint_l \frac{I' dl' \times (r - r')}{|r - r'|^3} \quad (4)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; I' 为源位置为 r' 微小线元素 dl' 出的电流; r 为场位置。

由此可得,

$$\begin{aligned} \vec{B}_s = & -j \frac{\mu_0}{4\pi} \int \vec{J} \times \frac{\vec{R}}{R^3} dV = -j \frac{\mu_0}{4\pi} \int \sigma(\omega\vec{A} + \nabla\phi) \times \frac{\vec{R}}{R^3} dV = \\ & -j \frac{\mu_0}{4\pi} \int [(\omega\vec{A} + \nabla\phi + \sigma_0 \frac{\partial(\nabla\phi)}{\partial\sigma}) \Delta\sigma \times \frac{\vec{R}}{R^3}] dV \end{aligned} \quad (5)$$

式中: ϕ 为磁通量; dV 为微小源体积元素; \vec{R} 为场位置。

式(5)解释了当被测物场媒质发生改变,即被测电导率发生变化时,测量线圈中的磁场发生相应改变。在应用 COMSOL Multiphysics 进行仿真研究中,磁感应强度和磁矢位作为重要的中间参量反应整个敏感场的变化。

1.2 敏感场基本 2 维仿真模型

在电磁敏感场的仿真中,采用的实际参考模型如图 1 所示,中间区域表示物流空间,在其周围分布 8 个完全相同的线圈,以 45° 空间角均匀排列,将 8 个线圈按逆时针顺序编号,依次为线圈 1 至线圈 8,即构成 EMT 核心检测装置,传感器阵列。

在建立仿真模型时,仿真模型按实物模型的

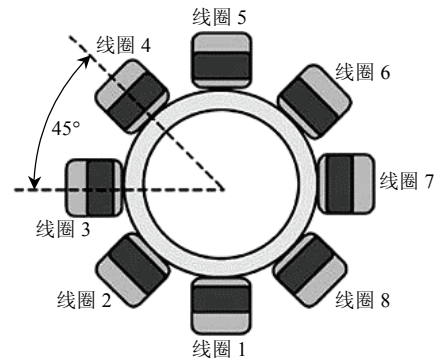


图 1 EMT 传感器阵列示意图
Fig. 1 EMT sensor array diagram

1/20 确定几何尺寸(实验所用电磁传感器阵列的尺寸:物场直径为 120 mm,管道壁厚为 10 mm;线圈直径为 16 mm),忽略管壁厚度,在被测物场与线圈的外测设置一个由铁磁物质构成的磁屏蔽层,以消除外部因素对系统的干扰。在仿真模型中,线圈被简化成为一条以线圈直径为长度的线段,激励线圈的信号则通过施加边界线电流密度实现。本文采用线圈两端磁位相减的方法获得磁位差,进一步通过式(3)获得检测线圈的检测电压信号。

2 激励频率对敏感场影响的分析

2.1 敏感场响应的影响因素

在 EMT 系统中,影响检测信号质量的因素有很多,如激励模式、激励频率等。激励模式主要有单一激励模式、相邻激励模式和相对激励模式 3 种。不同的激励模式会直接导致被测物场内磁场分布的改变,激励频率的改变则会使得物场内磁感应强度发生变化,从而进一步影响检测线圈的输出电压。

2.2 空场条件下敏感场的频率响应

目前 EMT 应用的主要被测对象以低电导率物场分布为主,为使检测信号更为有效,需要对激励信号展开讨论。如激励信号的频率范围、检测信号与激励频率的对应关系等。

针对如上 2 个问题,研究中将激励信号的范围设定在 100~700 kHz。针对所获得检测信号的实部和虚部,对 3 种激励模式分别采用多个频率点在 COMSOL Multiphysics 的环境下进行仿真。对于单一激励模式选取线圈 1 为激励线圈,其他线圈为检测线圈;相邻激励模式选取线圈 1、2 为激励线圈,其他线圈为检测线圈;相对激励模式选取线圈 1、5 为激励线圈,其他线圈为检测线圈;线圈位置如图 1 所示。定义空场为被测物场中为空气(1 个标准大气压)单一介质分布,可得到在空场条件下激励场的磁感应强度分布图,如图 2 所示。

图 3—5 为基于该模型,当激励频率由 100 kHz 变化至 700 kHz 时不同激励模式的仿真结果图。

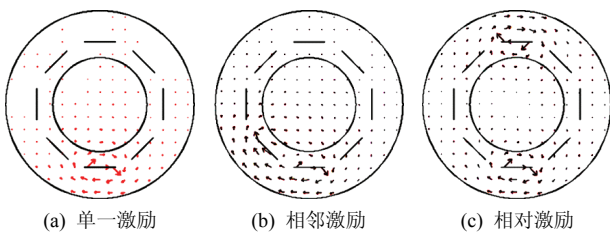
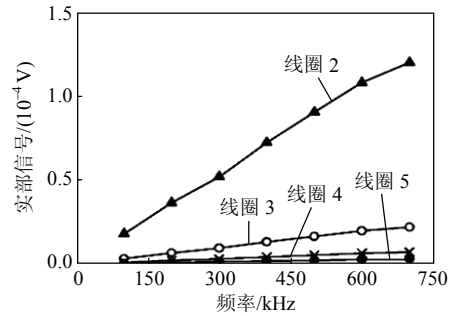


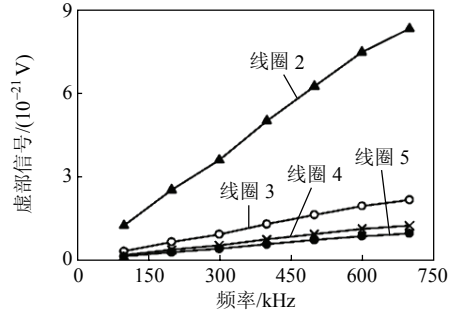
图 2 空场激励场的磁感应强度分布

Fig. 2 Magnetic induction distribution of empty field

从图 3—5 可以得到,实部和虚部信号均随频率信号的增加而增加,且越靠近激励线圈的检测信号增加得越快,检测数值越大,输出效果越好,检测信号的实部和虚部均与频率基本呈线性关系;同时可以得到:这种封闭式多线圈复合激励的情况下,实部信号跟虚部差几个数量级,二者构成的测量信号,实部信号占主导作用,使得测量电压的幅



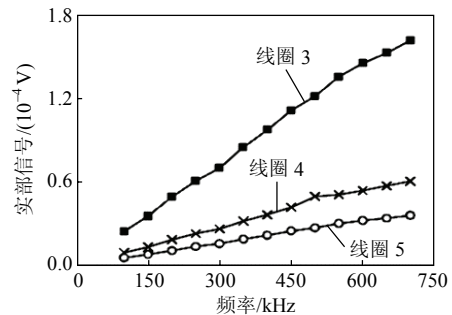
(a) 实部与激励频率的关系



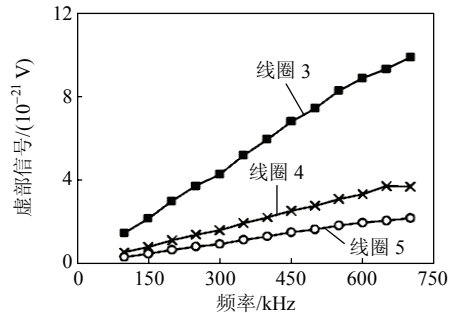
(b) 虚部与激励频率的关系

图 3 单一激励模式仿真结果

Fig. 3 Simulation results of single strategy



(a) 实部与激励频率的关系



(b) 虚部与激励频率的关系

图 4 相邻激励模式仿真结果

Fig. 4 Simulation results of adjacent strategy

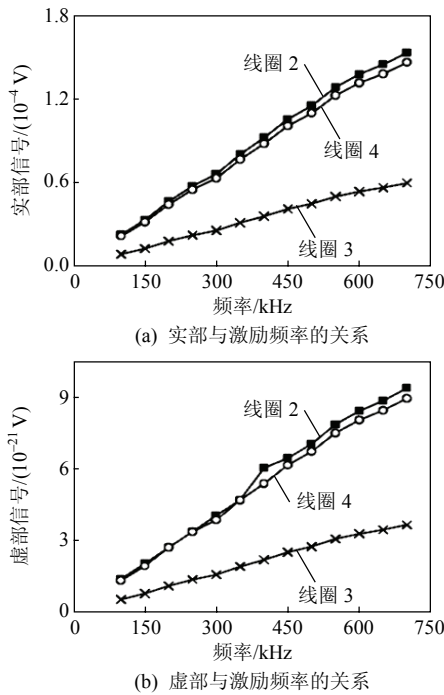


图5 相对激励模式仿真结果

Fig. 5 Simulation results of opposite strategy

值主要取决于测量电压的实部信号，而虚部信号则可以忽略不计。故当增加激励频率时检测信号输出增加，且这种特性不随激励模式的改变发生改变。

2.3 多介质分布下敏感场的频率响应

由于系统在实际应用时，物场通常为多种介质分布，因此需要对存在多种介质分布环境下的敏感场频率响应特性进行仿真。仿真中，物场空间中的分布介质采用空气和铜棒(其中铜棒的热膨胀系数为 $1.7 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ，热导率为 $400 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，电导率为 5.998 S/m ，密度为 8700 kg/m^3)。将铜棒放置在物场空间的中心点，这样的设置可得到均匀的检测信号，使得仿真结果直观，便于得到一般的特性规律。图6所示为在物场条件下，选择激励电极与空场仿真相同条件时，激励场的磁感应强度分布趋势图。对比图2空场下的强度分布，可得出在物体周围由于集肤效应出现了较为明显的磁感应强度加强的现象，打破了空场中均匀分布的状态。

图7—9为基于该模型，当激励频率由100 kHz

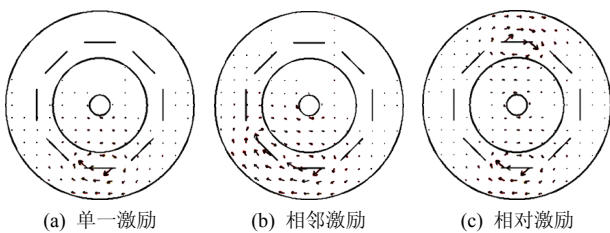


图6 物场激励场的磁感应强度分布

Fig. 6 Magnetic induction distribution of object field

变化至700 kHz时，采取与空场条件下相同激励-检测工作方式获得的仿真结果图。

由图7—9可以得到，实部和虚部信号与频率信号的关系同空场下的仿真结果所呈现的变化趋势基本一致。区别在于线圈检测信号的虚部较之空场条件下的输出有了较为明显的改善，所获得的曲线在坐标平面内的分布更为均匀。另一方面，从计

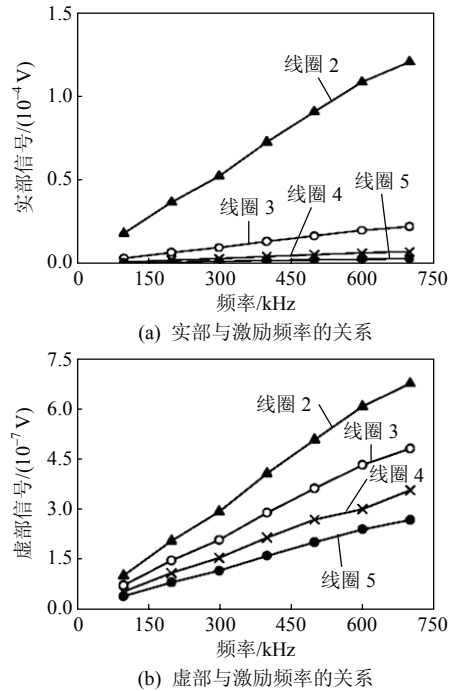


图7 单一激励模式仿真结果

Fig. 7 Simulation results of single strategy

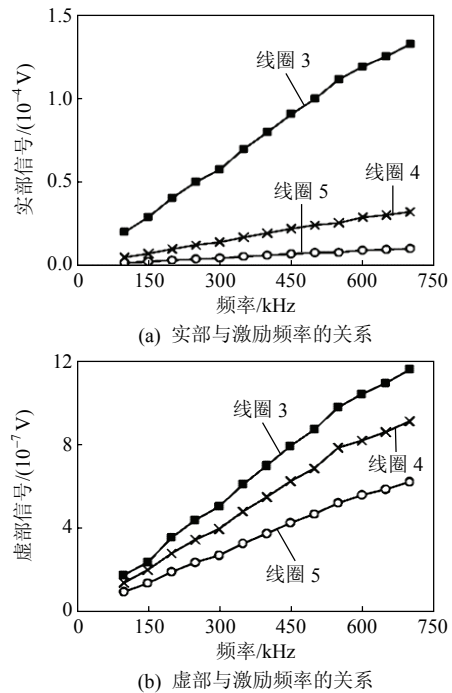


图8 相邻激励模式仿真结果

Fig. 8 Simulation results of adjacent strategy

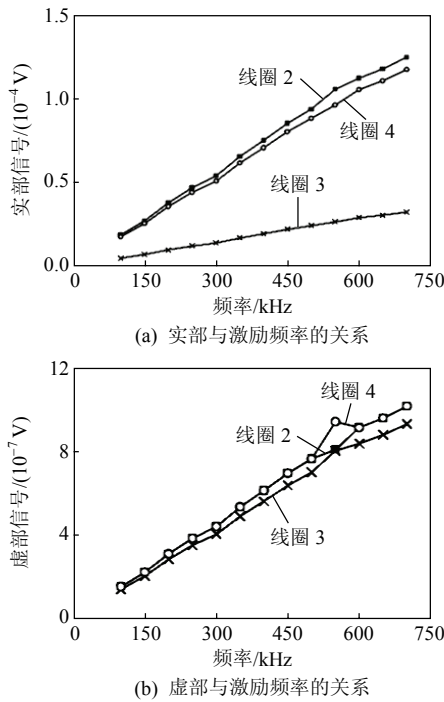


图 9 相对激励模式仿真结果

Fig. 9 Simulation results of opposite strategy

算获得的输出电压数值发现，较之空场下实部与虚部间相差几个数量级的情况有所改善，实部与虚部间的数值差异明显缩小，但测量电压的幅值依然取决于测量电压的实部信号，虚部信号仍可以忽略不计，故当激励频率增加时检测信号输出增加的结论对物场环境仍适用。

3 激励模式对敏感场影响的分析

通过上述对激励信号所进行的讨论，得到检测信号与激励频率间的对应关系。基于电磁感应原理，向激励线圈注入变化的电流产生变化的磁场，检测线圈通过电磁感应获得变化的电场，进而在检测线圈电阻的作用下获得检测电压。因此，检测电压与磁场的分布情况之间具有紧密的联系，当改变激励模式时，磁场分布相应发生改变。在这样一个前提下，分析激励模式能够使得检测信号更为有效。

研究中，对单一激励模式、相邻激励模式和相对激励模式 3 种激励模式分别进行讨论，选择激励电极与空场仿真相同条件时，并以检测线圈 8 作为讨论对象。

图 10、11 为 3 种不同的激励模式下空场和物场时的仿真结果。从图中得到，对于 3 种不同的激励模式，无论是在空场条件、还是在物场条件下，检测信号的实部、虚部具有相同的数值关系。其中，相邻激励模式的检测数值最大，相对激励模式次

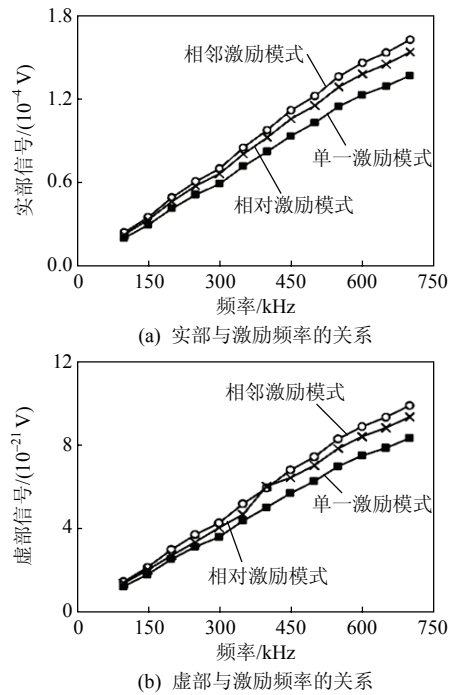


图 10 空场条件下线圈 8 测量信号

Fig. 10 Measurement of coil 8 under empty field

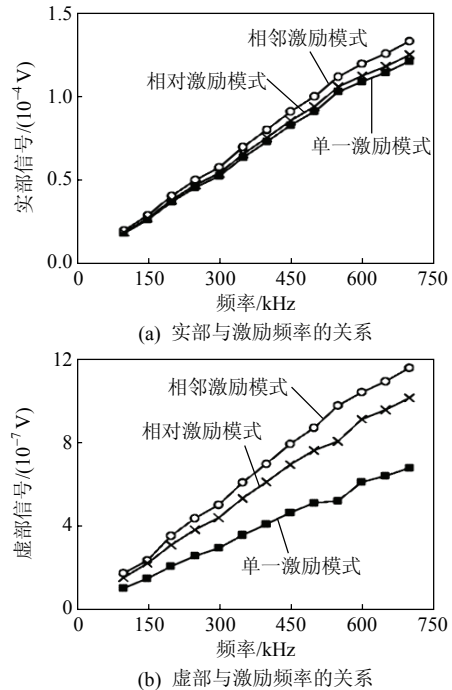


图 11 物场条件下线圈 8 测量信号

Fig. 11 Measurement of coil 8 under object field

之，单一激励模式最小。这是由于相邻激励模式和相对激励模式均选取了 2 个激励线圈，相比较单一激励模式选取一个激励线圈而言，大大增加了激励场的磁场强度，使得检测线圈的检测电压增大。而相邻激励模式与相对激励模式间的差异在于二者激励线圈位置的选取，相邻激励模式的线圈选取相距较近，空间角度较小，使得物场磁感应强度在局

部得到加强；相比之下，相对激励模式下激励线圈空间相距较远，分离角度较大，使得激励信号在物场中产生了衰减，因此物场中的磁场强度要小于相邻激励模式下物场的磁场强度，进而使得检测电压较小。

图 12 所示为 3 种不同激励模式下线圈 8 检测到的铜棒内感应电压幅值信号。其中相邻激励模式与相对激励模式的曲线基本重合，证明相邻激励模式的检测电压虽然在数值上大于相对模式的检测电压，但二者的检测效果及对物场的敏感性并没有太大的差异。

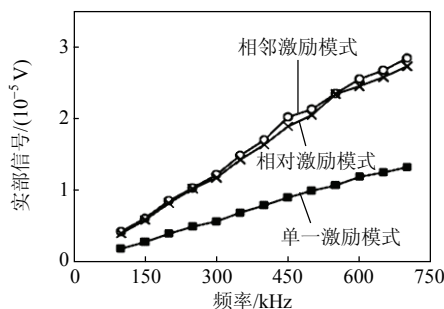


图 12 线圈 8 的物场感应电压幅值

Fig. 12 Induced voltage from coil 8 in object field

选取 2 个激励线圈获得的磁场，相当于 2 个激励线圈单独激励时获得磁场的叠加，由线性叠加的齐次性原理可知，相邻激励模式和相对激励模式下的检测电压应是单一激励模式下检测电压的 2 倍。图 13 所示为单一激励模式分别与相邻激励模式和相对激励模式在线圈 8 检测到铜棒内感应电压的幅值信号之比。由图可见，其比值在 2 上下浮动，且最大误差在 10% 以下。可以认为，相邻激励模式与相对激励模式在物场的敏感性上没有较大差异。另外，单一激励模式的检测数据和独立测量数据更为充分，且硬件实施相对简单。从上述角度考虑，在 3 种激励模式中选取单一激励模式为最佳激励模式。

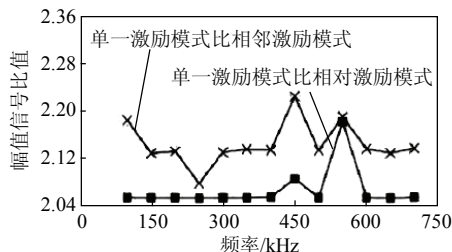


图 13 单一激励与相邻和相对激励的幅值之比

Fig. 13 Ratio of induced voltage amplitude between single strategy with adjacent and opposite strategy

4 结论

在 EMT 系统中，随着激励频率的增加，激励

作用逐渐增强，导致主导磁场的作用增加，使得检测电压信号随着激励频率的增加而增加，且该趋势与激励模式的选取无关。检测电压信号由实部信息和虚部信息 2 部分组成，二者相差一定数量级，在对整体磁场进行表征时，检测电压的实部信号比虚部信号更具优势。无论在何种物场条件下 3 种激励模式检测信号的实部、虚部均具有相同的数值关系，即相邻激励模式的检测数值最大，相对激励模式的检测数值次之，单一激励模式的检测数值最小。对比不同激励模式检测的敏感性，相邻激励模式与相对激励模式相较单一激励模式没有明显改善。由于单一激励模式有更多的检测数据和独立数据，且实施简单，因此从这个角度分析认为，在 3 种激励模式中单一激励模式为最佳激励模式。

参考文献

- [1] Dyakowski T. Process tomography applied to multi-phase flow measurement[J]. Measurement Science and Technology, 1996, 7(3): 343-353.
- [2] 王海刚, 刘石, 姜凡, 等. 电容层析成像技术在旋风分离器固体浓度测量中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 174-179. Wang Haigang, Liu Shi, Jiang Fan, et al. Using electrical capacitance tomography for measuring the solids distribution in cyclone separator [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 174-179(in Chinese).
- [3] 陈琪, 刘石. 多孔介质内燃烧的电容层析成像可视化测量及数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(29): 63-67. Chen Qi, Liu Shi. Electrical capacitance tomography visualization and numerical analysis of combustion in porous media[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(29): 63-67(in Chinese).
- [4] 董向元, 陈琪, 李惊涛, 等. 基于快速投影 Landweber 法的电容层析成像图像重建算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 90-92. Dong Xiangyuan, Chen Qi, Li Jingtao, et al. A fast projected-Landweber for image reconstruction for ECT[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 90-92(in Chinese).
- [5] Yu Z Z, Peyton A J, Beck M S, et al. Imaging system based on electromagnetic tomography (EMT)[J]. Electronic Letters, 1993, 29(7): 625-626.
- [6] Al-Zeibak S, Saunders N H. Feasibility study of In Vivo electromagnetic imaging[J]. Physics in Medical and Biology, 1993, 38(1): 151-160.
- [7] Griffiths H. Magnetic induction tomography[J]. Measurement Science and Technology, 2001, 12(8): 1126-1131.
- [8] Peyton A J, Beck M S, Borges A R, et al. Development of electromagnetic tomography (EMT) for industrial applications, part 1: sensor design and instrumentation[C]//1st World Congress on Industrial Process Tomography, Buxton, Greater Manchester, 1999, 306-312.
- [9] Korjensky A, Cherepenin V, Sapetsky S. Magnetic induction tomography: experimental realization[J]. Physical Measurement, 2000, 21(1): 89-94.
- [10] Korzhenevskii A, Cherepenin V A. Progress in realization of magnetic

- induction tomography[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1999, 873(1): 346-352.
- [11] York T A. Status of electrical tomography in industrial applications [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2001, 10(3): 608-619.
- [12] Yin W L, Peyton A J. A planar EMT system for the detection of faults on thin metallic plates[J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(8): 2130-2135.
- [13] Liu D, Dong F. Simulative measurement on conductivity and permeability distribution in sensing field of electromagnetic tomography[C]//*Proceedings of the 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2009, 1: 345-348.
- [14] Yin W, Peyton A J, Zysko G, et al. Simultaneous non-contact measurement of water level and conductivity[C]//*Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Sorrento, Italy, 2006. 2144-2147.
- [15] 饶明忠, 谭邦定, 黄键. 应用微分形式描述和分析电磁场问题[J]. *中国电机工程学报*, 1994, 14(5): 56-61.
Rao Mingzhong, Tan Bangding, Huang Jian. Differential forms with applications to description and alysis of electromagnetic problems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1994, 14(5): 56-61(in Chinese).
- [16] 云正清, 俞集辉, 谭邦定. Maxwell 方程组与电磁量的微分形式[J]. *重庆大学学报*, 1994, 17(1): 29-34.
- Yun Zhengqing, Yu Jihui, Tan Bangding. Maxwell's equations and differential forms of electromagnetic quantities[J]. *Journal of Chongqing University*, 1994, 17(1): 29-34(in Chinese).
- [17] 冯慈章. 电磁场[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983: 94-101.
Feng Cizhang. *Electromagnetic field*[M]. Beijing: Priority Education Press, 1983: 94-101(in Chinese).
- [18] 付林兴, 邓志武. 毕奥-萨伐尔定律的推导[J]. *湘潭师范学院学报: 自然科学版*, 1996, 28(1): 28-29.
Fu Linxing, Deng Zhiwu. Derivation of Biot-Savart law[J]. *Journal of Xiangtan Normal University: Nature Science Edition*, 1996, 28(1): 28-29(in Chinese).



付妍

收稿日期: 2010-07-28。

作者简介:

付妍(1988), 女, 硕士研究生, 主要从事过程层析成像技术研究;

董峰(1966), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事两相流测试技术及现代信息处理方法研究, 本文通讯作者, fdong@tju.edu.cn;

谭超(1980), 男, 博士, 讲师, 主要从事多相流测试技术与系统研究。

(责任编辑 张媛媛)