DOI:10.3969/j.issn.1001 -4551.2014.07.003

电磁成像金属探伤传感结构激励模式的仿真研究*

李玉川,何 敏*
(上海海事大学 电气自动化系,上海 201306)

摘要:针对电磁成像金属探伤传感系统的激励模式的选择问题,对电磁金属探伤传感系统的 3 种主要的激励模式—单激励模式、相邻激励模式、相对激励模式进行了研究,并对后两种激励模式在不同的激励信号方向下进行了对比研究,提出了一种基于 Ansoft Maxwell 电磁仿真软件对八线圈的传感结构以及被测金属板进行建模的方法,在 3 种不同激励模式下,分别求解出八线圈传感结构检测端的感应电压信号,并进行了比较和分析。仿真结果表明,在电磁成像金属探伤传感系统中,以正弦电压信号为激励信号,当采用激励信号同方向的相对激励模式,则系统激励电磁场范围最大,检测到的感应电压信号幅值最明显,传感器灵敏度也最强。该仿真分析以及结果对实际电磁成像金属探伤传感系统的设计以及图像重建算法的开发都具有指导意义。

关键词:电磁探伤;ANSOFT;传感结构;激励模式
中图分类号:TH878;TM55;TP206 +.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001 -4551(2014)07 -0828 -05

Simulation research of excitation mode on metal detection sensor structure for electromagnetic imaging

LI Yu-chuan, HE Min
(School of Logistics Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Aiming at the choice of excitation mode in metal detection sensor system of electromagnetic imaging, three main excitation modes: single excitation mode, adjacent excitation mode, relative excitation mode were studied in metal detection sensor system of electromagnetic imaging, and the following two kinds of excitation modes under different excitation signal directions were studied comparatively, a solution of modeling for the sensing structure of eight coils and sheet metal under test based on electromagnetic simulation software Ansoft Maxwell was proposed, in three different excitation modes, the induced voltage signals in eight coil sensor structure were solved out respectively, compared and analyzed; The results indicate that when the sine voltage signal is used as excitation signal and relative excitation mode has the excitation signal of the same direction in metal detection sensor system of electromagnetic imaging, the system excitation electromagnetic field has a widest range, the induced voltage signals shows the largest amplitude, and the sensor sensitivity is the strongest. The simulation analysis has significance to the design and construction of actual electromagnetic imaging based metal flaw detection system and the development of image reconstruction algorithm.

Key words: electromagnetic imaging; ANSOFT; sensing structure; excitation mode

0 引 言

电磁成像技术是二十世纪九十年代发展起来的一种基于电磁感应原理的新型计算机成像技术,它可以同时获取被测物场空间的电导率和磁导率的分布信息。电磁成像兼具了电磁检测和计算机成像的优点,

收稿日期:2013 -12 -09
基金项目:国家自然科学基金资助项目(61141002).
作者简介:李玉川(1989 -),男,重庆永川人. 主要从事电磁层析成像和电磁测量方面的研究. Email:451968094@163.com.
通信联系人:何 敏,女,教授,硕士生导师. Email:minhe@shmtu.edu.com

它不仅具备电磁检测的无接触、非倾入、安全、快速检测等优点[1],同时其还能通过分时扫描将被测截面以图像形式反应出来。经过十余年的发展,各国的电磁成像技术发展也陆续进入了应用研究阶段,如炼钢过程的在线监控、钢板在线探伤、铁轨探伤和生物医学监测等[2-4]。

和其他电磁检测技术一样,电磁成像技术用于工业过程的检测,传感结构及其系统设计是重要问题。例如,1993 年,曼彻斯特理工学院的 Z. Z. Yu 等人设计一种由两列大线圈产生的平行激励磁场[5];1994 年,Z. Z. Yu 与 Peyton 等人又设计了一套基于平行场激励模式的电磁层析成像系统。在此基础上,电磁成像技术用于工业多相流在线监测的研究之中,先后出现了将近 10 种不同的传感结构[6-10],本研究称之为传统电磁成像技术。

电磁成像技术用于金属结构的探伤,首要问题之一也是传感结构及其系统的设计。传感结构的研究包括传感线圈个数、传感线圈材料、工作频率、分布直径、激励模式等。

传统电磁成像技术中的传感结构中,传感线圈对称环绕分布在被测对象周围,笔者将此种传感结构称之为环绕式传感结构,以此与涡流等传统电磁探伤传感结构区别开来。本研究中的电磁成像金属探伤系统正是采用了此种环绕式结构。对此,本研究从电磁场理论出发,利用 ANSOFT 电磁仿真软件建立了八线圈环绕式传感结构的金属探伤三维模型,在此基础上对常见的 3 种激励模式—单激励模式、相邻激励模式和相对激励模式进行仿真分析和比较。仿真分析结果不仅可以为实际传感系统的设计提供指导,而且电磁仿真过程还可得到某些有关被测对象的定量信息,如灵敏度矩阵,而这些信息往往可为后续的图像重建所用[11]。

1　传感结构的选型

1.1　八线圈环绕式传感结构

环绕式的传感结构是指将所有传感线圈均匀放置于同一个圆周的边上。传统的电磁成像系统中的环绕式传感阵列排列方式如图 1 所示。

Aveior 大学研制的多线圈不对称激励系统如图 1 所示,整个传感器包括 16 个绕在铁芯上的线圈和一个磁屏蔽层。多个激励/检测线圈的采用解决了对被测对象的多投影问题而不借助于机械运动。

传感结构阵列的设计中包括 3 个重要参数:传感

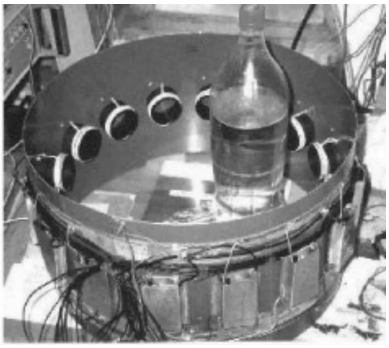

图 1　传统传感器排列图

线圈个数,传感线圈材料和工作频率[12],本研究通过改变线圈个数,主要研究多线圈环绕式传感结构的不同激励模式的比较。

1.2　八线圈传感结构

受文献[13]的启发,本研究将传统电磁成像的环绕式传感结构用于金属探伤中。但是,考虑到系统的空间分辨率的提高和获取更具体更多方位的有关被测物场分布的数据,且由于电磁成像系统的硬件限制和对数据处理速度要求,因此,本研究选择了八线圈的传感器结构,如图 2 所示。

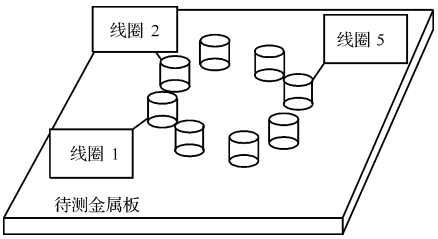

图 2　八线圈传感器结构

图 2 中,8 个传感线圈依次围绕着被测物体间隔 45°放置。每个线圈要求绕线匝数、线圈密度、线圈材质都要相同一致。在绕制过程中,每隔一定长度,便要测取线圈的阻抗参数,同时利用高精度万用表对线圈绕制过程进行不定时的数值测量,稍有偏差随即修改制作工艺,尽最大能力获取相同的传感器线圈[14]。

对于八线圈传感结构,虽然在绕制过程、线圈参数、空间间隔等的制作上增加了设计的难度,同时增加线圈个数很容易降低整个电磁金属探伤系统的数据处理速度,但是由于相邻一对线圈的相互作用磁场空间相对于其他低于八线圈的环绕式传感结构(例如六线圈)要小,系统的空间分辨率相对于其他的低线圈数的传感结构高;同时,每个时刻不只 4 个检测线圈在采集数据,这样得到的检测数据量比其他少线圈数的更多。

2 八线圈传感结构的建模仿真

电磁成像系统中检测线圈上的感应电压信号是图像重建数据的来源[15-16]，因此研究者可观察检测线圈感应电压信号以完成对激励模式的比较。

2.1 建模

本研究首先对单线圈激励模式和双线圈激励模式进行三维瞬态场分析。

这里，假设八线圈传感结构具有 3 种激励模式：单线圈激励模式，相邻激励模式和相对激励模式，在 3 种激励模式下，对比分析八线圈传感结构在被测金属板有缺陷时检测端的感应电压信号。

（1）选择求解器类型。

因为选择时域的仿真计算模式，选择 transient 瞬态磁场求解器。

（2）建立仿真模型。

8 个线圈（顺时钟方向依次为线圈 1，线圈 2，线圈 3，线圈 4，线圈 5，线圈 6，线圈 7，线圈 8）依次围绕着被测物体间隔 45°放置并且 8 个线圈完全相同，内半径为 10 mm，外半径为 15 mm，高度为 15 mm，线圈下方被测物体尺寸为 200 mm × 200 mm × 19 mm，在其上为一个 60 mm × 60 mm × 9 mm 的缺陷，线圈的提离高度为 10 mm。添加求解域 Region，一般实际工程模型其求解域至少要是所绘模型尺寸的 5 倍左右为宜[17]，因此此处给出 100 倍。整个模型如图 3 所示。

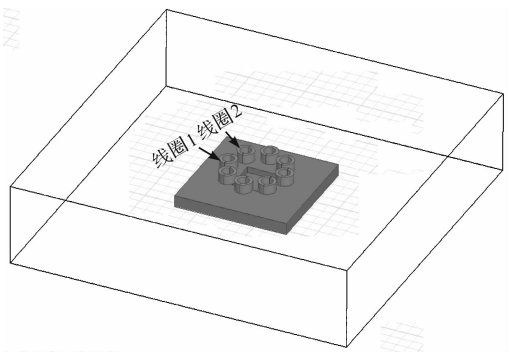

图 3 八线圈传感器结构的三维有限元模型

（3）设定材料的属性。

求解域的属性为真空；8 个线圈在实际检测中采用铜漆包线，材料属性设置为铜 copper；被测铝板的材料属性设置为铝制材料 aluminum。以上材料均调用 maxwell 材料库中现有的材料。

具体材料属性设置如表 1 所示。

2.2 3 种激励模式下的仿真比较和比较分析

由于激励信号直接作用于传感器阵列，激励模式会影响到检测线圈感应信号的测量值质量，在不同激励模式下，检测线圈感应信号测量值不同。为了选取最佳的激励模式，笔者分别对单激励模式、双激励模式下的检测线圈所感应到的感应电压波形进行仿真。

表 1 相关材料的属性

材料名称	电导率 S/m	相对磁导率
铝（aluminum）	38 000 000	1.000 021
铜（copper）	58 000 000	1
真空（vacuum）	0	1

2.2.1 单激励模式

单激励模式是指八线圈绕组以其中一个线圈作为激励线圈，其余 7 个线圈作为感应线圈。首先，在 Ansoft 仿真软件中添加 8 个绕组 coil1 ~ coil8，选定 coil1 为激励线圈，设置激励信号源为电压激励源，激励频率为 10 kHz，周期为 100 μs，最大值为 10 V。其余 7 个绕组的激励源为 0，仿真的结束时间为 500 μs，时间间隔为 1 μs，得到 501 个数据通过后处理后，可以得出检测线圈的感应电压信号，如图 4 所示。

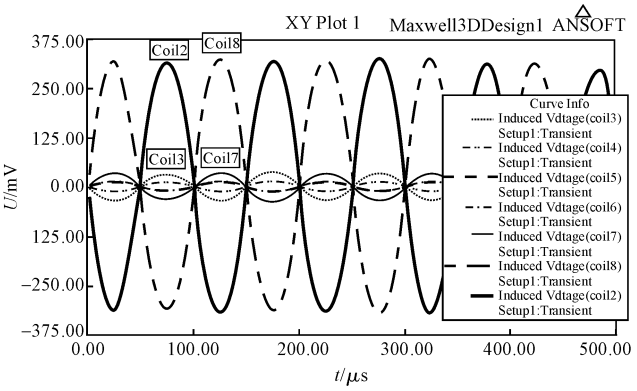

图 4 coil2 ~ coil8 的感应电压信号波形

从图 4 可以看出，感应电压信号为毫伏级别，相对于激励信号非常微弱，而且与激励线圈相邻的检测线圈 coil2 感应电压幅值最大，随着与激励线圈的距离的增大，检测线圈的感应电压越来越弱；coil2 与 coil8 感应电压信号幅值大小相差不大，相位相差 π，这是由于 coil2 与 coil8 与激励线圈的距离相等，但是由于线圈的位置不同产生的磁场方向不同，coil3 与 coil7、coil4 与 coil6 是同样的情况。

2.2.2 相邻激励模式

相邻激励模式是双激励模式的一种，相邻激励模式是选择两个相邻的线圈作为激励线圈，其余 6 个线圈作为检测线圈。选定线圈 1 和线圈 2 为激励线圈，激励信号源与单激励模式相同，其余 6 个绕组的激励源为 0，仿真的结束时间为 500 μs，时间间隔为 1 μs，得到的数据为 501 个。由于两个激励线圈的激励信号方向相同与相反时，检测线圈的感应电压信号不同，激

励信号方向相同时,6 个检测线圈的感应电压信号波形如图 5 所示;激励信号方向相反时,6 个检测线圈的感应电压信号波形如图 6 所示。

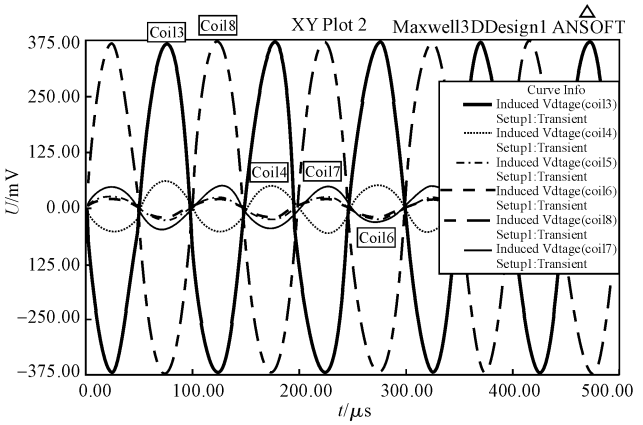

图 5　激励信号相同时,检测线圈的感应电压信号波形

由图 5 可以看出,在相邻激励模式下,激励电压信号方向相同时,线圈 3 与线圈 8、线圈 4 与线圈 7、线圈 5 与线圈 6 这 3 组线圈的特征具有对称性:每对线圈在同一时刻的感应电压的大小一样方向相反;其中,第一组线圈的峰值都在 185 mV 左右,为 3 组线圈中的最大峰值,第二组线圈次之,第三组线圈的感应电压信号为最弱,其最大感应电压只有 10 mV 左右。

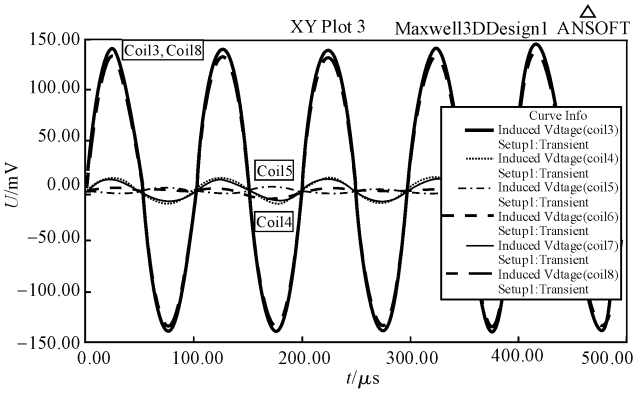

图 6　激励信号相反时,检测线圈的感应电压信号波形

由图 6 可知,在相邻激励模式下,激励电压信号方向相反时,线圈 3 与线圈 8 的感应电压信号相同,线圈 4 与线圈 7 的感应电压信号相同,线圈 5 和线圈 6 的感应电压信号相同;最大幅值为线圈 3 和线圈 8 所感应到的,为 139 mV 左右;最小幅值为线圈 5 和线圈 6 所感应到的,几乎为 0。

对比图 5 和图 6,可以看出激励信号方向相反时,离激励线圈距离最远的两个线圈 coil5 和 coil6 感应电压信号非常微弱,大小几乎为 0;激励信号方向相同时,coil4 ~ coil7 的感应电压信号均强于激励信号相反时。所以,应将两个激励线圈的激励方向设定为同向。

2.2.3　相对激励模式

相对激励模式是选择相对位置的两个线圈作为激励线圈,其余 6 个线圈作为检测线圈。选定线圈 1 和线圈 5 为激励线圈,每个激励线圈的激励信号源与单激励模式相同。与相邻激励模式类似,相对激励模式也通过两个线圈的激励电压信号的方向的相同和相反分别求解出 6 个检测线圈的感应电压信号波形如图 7、图 8 所示。

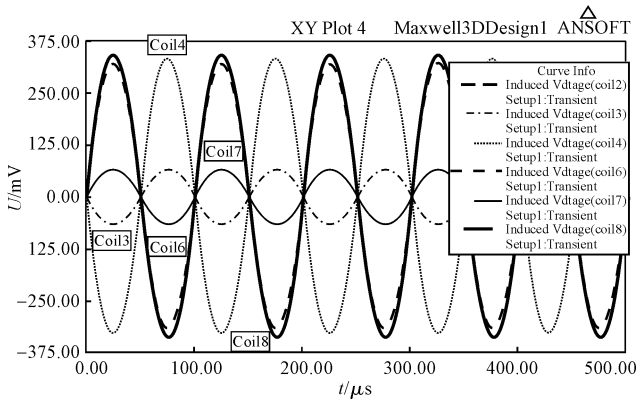

图 7　相对激励模式下激励信号相同时,检测线圈感应电压波形

由图 7 可以看出,在相对激励模式下,两线圈激励电压信号方向相同时,与激励线圈相邻的检测线圈 coil8 感应电压幅值最大,为 340 mV 左右,随着与激励线圈的距离的增大,检测线圈的感应电压越来越弱;coil2 和 coil4 的感应电压信号波形重合,且与 coil8 感应电压信号幅值大小相差不大,相位相差 π;coil3 和 coil7 的感应电压信号幅值为最小,为 70 mV 左右。

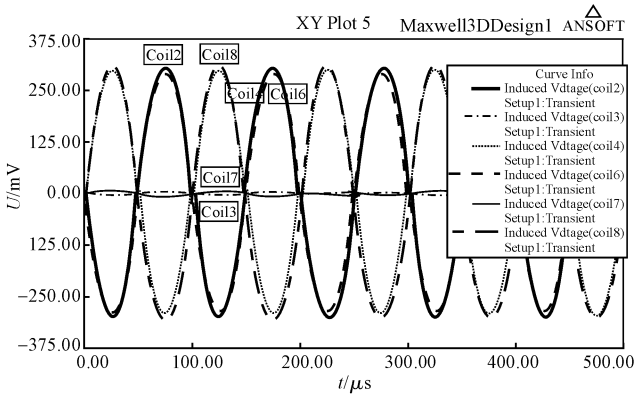

图 8　相对激励模式下激励信号相反时,检测线圈感应电压波形

由图 8 可以看出,在相对激励模式下,两线圈激励电压信号方向相反时,与激励线圈相邻的检测线圈 coil8 感应电压幅值最大,为 315 mV 左右;coil2 与 coil8 感应电压信号幅值相差不大,相位相差 180°,coil4 与 coil6 类似;coil3 和 coil7 的感应电压信号幅值几乎为 0。

对比图 7 和图 8,在相对激励模式下,基于相邻激

励模式下类似的原因,此处也将两个激励线圈的激励信号方向设定为同向。

2.3 3 种激励模式下的对比分析

对比图 4 和图 5 可以得出,相比较单激励模式,相邻激励模式下远离激励线圈的检测线圈感应电压信号更强,这样更有利于获取各个检测线圈的感应电压信号,从而获取各个方位的采样数据,所以相邻激励方式优于单激励模式。

对比图 5 和图 7 可以得出,对于检测线圈 coil3 的感应电压信号幅值,虽然在相对激励模式下比在相邻激励模式下要小很多,但是前者除了 coil3 之外的线圈的感应电压信号幅值都远远大于后者,所以在激励信号同方向的情况下,相对激励模式优于相邻激励模式。

综上所述,通过比较分析 3 种激励模式,得出激励信号同方向的相对激励模式下的被测数据幅值明显,覆盖范围最大,测量最有优势,有利于采集到多方位的检测数据,最适合于八线圈的电磁成像金属探伤系统。

3 结束语

传感结构的设计和激励模式的选取问题都是电磁成像金属探伤系统中的重要问题。

本研究设计了八线圈的环绕式结构传感器,采用 Ansoft Maxwell 软件建立了其三维仿真模型,并在 3 种不同的激励模式下,仿真了八线圈传感器的检测端的感应电压信号并进行了对比和分析。通过仿真结果的比较可知,激励信号同方向的相对激励模式下,检测信号更强且检测最有优势。因此,激励信号同方向的相对激励模式是一种适合于八线圈环绕式传感结构的激励模式,这为实际系统的构建提供了基础。

参考文献(References):

[1] 尹武良. 低频电磁传感检测技术—设计、分析、计算及应用[M]. 北京:科学出版社,2010.

[2] YIN W, 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.

[3] 章学铜,尹武良,李安阳,等. 基于时域和频域信号综合分析的金属探伤研究[J]. 机电工程,2013,30(3):253-256.

[4] HIGSON S R, DRAKE P, LYONS A, et al. Electromagnetic visualization of steel flow in continuous casting nozzles[J]. **Ironmaking and Steelmaking**,2006,33(5):357-361.

[5] YU Z Z, PEYTON A J, CONWAY W F, et al. Imaging system based on electromagnetic tomography(EMT)[J]. **Electron Lett**,1993,29(7):625-626.

[6] GRIFFITHS H. Magnetic induction tomography[J]. **Measurement Science and Technology**,2001,12(8):1126-1131.

[7] PEYTON A J, YU Z Z, LYON G, et al. An overview of electromagnetic inductance tomography: description of three different systems[J]. **Measurement Science and Technology**,1996,7(3):261-271.

[8] MATOORIAN N, PATEL B C, BOWLER A M. Dental electromagnetic tomography: properties of tooth tissues[C]// IEE Colloquium Digest. lodon:[s. n.],1995:3/1-3/7.

[9] GRIFFITHS H, STEWART W R, GOUGH W. Magnetic induction tomography: a measuring system for biological tissues[J]. **Annals of the New York Academy of Sciences**, 1999(873):335-345.

[10] MORRIS A, GRIFFITHS H, GOUGH W. A numerical model for magnetic induction tomographic measurements in biological tissues [J]. **Physiological Measurement**, 2001,22(1):113-119.

[11] HE Min, LIU Ze, XU Li-jun. Multi-Excitation-Mode Electromagnetic Tomography (EMT) System[C]. 2nd World Congress on Industrial Process Tomogrpahy. Hannover: 2001.

[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] 熊汉亮,徐苓安. 电磁层析成像:正问题的理论分析[J]. 应用数学和力学,2000,9(9):933-941.

[14] 何 敏,邹富墩. 电磁层析成像金属探伤传感系统的仿真研究[J]. 计算机工程与设计,2013,34(7):2614-2618.

[15] 何 敏,刘 泽,董 峰,等. 电磁层析成像技术图像重建的仿真研究[J]. 天津大学学报,2001,34(4):435-438.

[16] 谢代梁,王保良,黄志尧,等. 一种电容层析成像系统结构的优化方法[J]. 机电工程,2000,17(6):59-61.

[17] 赵 博,张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京:中国水力水电出版社,2010.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

李玉川,何 敏. 电磁成像金属探伤传感结构激励模式的仿真研究[J]. 机电工程,2014,31(7):828 - 832.

LI Yu-chuan, HE Min. Simulation research of excitation mode on metal detection sensor structure for electromagnetic imaging[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(7):828 - 832.