

铁磁性平板构件远场涡流传感器设计与仿真分析

崔文岩¹, 朱荣新¹, 杨宾峰¹, 张辉², 李龙军¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077; 2. 空军工程大学科研部, 陕西西安, 710051)

摘要 远场涡流检测技术不受集肤效应的限制,其相对于传统涡流检测技术而言,能够对金属构件的更深层缺陷进行检测,首先介绍了平板远场涡流的一些研究现状,分析了平板远场涡流的检测原理和传感器设计要求,在此基础上,设计了基于圆柱和矩形结构的2种传感器模型,分析了2种模型在平板构件中所感应磁场的分布规律,并对比了其对不同板厚的检测能力。结果表明:矩形激励线圈能在平板中感应出定向传播的磁场,可以利用矩形结构的远场涡流传感器对较厚平板构件中缺陷的深度和长度进行定量检测。

关键词 平板构件;远场涡流;传感器设计

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.05.015

中图分类号 TG115 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)05-0071-05

平板类导体件在长期使用后容易产生疲劳裂纹和腐蚀缺陷,从而导致各类事故的发生,这严重威胁着人们的生命财产安全。因此对其无损检测就显得尤为重要。目前应用于平板构件的无损检测方法主要有超声波检测法、射线检测法和传统涡流检测法等。超声波检测需要耦合剂;射线检测技术成本高,检测时需要防护措施;常规涡流检测技术,难以对深层缺陷进行检测;远场涡流技术不受集肤效应的限制,其对内外壁缺陷具有相同的检测灵敏度,通常用于对大壁厚铁磁性管道的检测。近年来,远场涡流技术的应用领域被扩展到平板构件的检测之中,从而为平板构件中深层缺陷的检测提供了新的解决途径。

在平板远场涡流研究中,文献[1]采用多个激励线圈的组合结构设计了一套适用于平板构件的远场涡流检测系统,文献[2]设计了远场涡流传感器对多层金属构件中的缺陷进行了检测,文献[3]利用远场涡流技术对石油储罐的底板进行了检测。研究结果表明要在平板构件中产生远场涡流效应,核心问题在于传感器结构的设计。本文针对平板构件远场涡流技术的特点,从传感器设计出发,分析了基于圆柱型和矩形结构的2种传感器模型,比较了2种传感器对不同板厚中缺陷的检测能力,最后利用矩形远场涡流传感器对缺陷的深度和长度进行了定量检测。

1 平板构件远场涡流检测原理

远场涡流检测技术一直被应用于管道的无损检测,管道远场涡流检测系统通常设计成内置式结构,传感器由2个与管道同轴的线圈组成,分别为激励和检测线圈,检测线圈被放置于距离激励线圈2-3倍管径处。管道远场涡流现象的发生取决于磁场的二次穿透管壁。激励线圈产生的磁场在传播的过程中由于管道的屏蔽作用使得管内的磁场直接耦合分量以指数规律迅速衰减,而管外的磁场间接耦合分量沿管道轴向衰减较管内磁场慢的多,从而使得在远离激励线圈的远场区,管外磁场强于管内磁场,从而发生管道检测中的远场现象^[4-6]。

收稿日期:2012-04-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107149);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2011JQ6010)

作者简介:崔文岩(1987-),男,河南确山人,硕士生,主要从事测试计量技术及仪器研究。

E-mail: cuiwenyan1987@163.com

平板远场涡流传感器示意图见图 1,其中给激励线圈加装屏蔽结构以抑制激励磁场能量经由直接耦合通道向检测线圈传播,同时聚集激励磁场能量穿透平板向板下传播,板下的磁场在距离激励线圈一定距离处再次穿过平板,并被检测线圈所拾取。这就是平板远场涡流检测的原理^[7-8]。

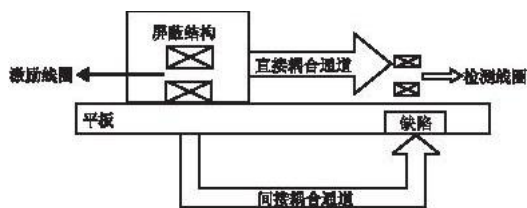


图 1 平板远场涡流检测示意图

Fig. 1 The principle of the remote field eddy current of the plate

2 圆柱型远场涡流传感器的仿真分析

2.1 圆柱型传感器模型的建立

本文采用大型有限元软件 ANSYS 进行仿真建模。其中,在建立传感器模型时,为了聚集激励磁场向平板构件底部传播,将圆柱形的激励线圈绕制在杯形的导磁结构上。同时,为了抑制激励磁场直接向检测线圈方向扩散,在导磁结构的外面增加了屏蔽结构,传感器的仿真模型如图 2 所示。仿真模型的参数如下:平板的长度为 300 mm,宽度为 200 mm,电阻率为 $1.8 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$,相对磁导率为 80。激励线圈的内半径为 5 mm,长度为 20 mm,匝数为 500 匝,检测线圈内半径为 2 mm,长度为 5 mm,匝数为 1 000 匝,导磁结构厚度为 10 mm,相对磁导率为 1 000,空气隙厚度为 1 mm,相对磁导率为 1,屏蔽结构厚度为 10 mm,相对磁导率为 1 000,电阻率 $1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ 。激励线圈和检测线圈的电阻率为 $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,相对磁导率为 1,激励频率为 40 Hz。图 3 是仿真得到的激励线圈正下方平板上磁通密度的分布图,从图可以看出,感应的磁场均匀的向四周扩散,这是采用圆柱激励线圈结构所导致的。

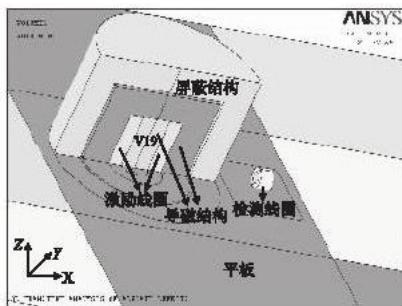


图 2 圆柱型传感器模型

Fig. 2 The model of cylindrical exciting coil

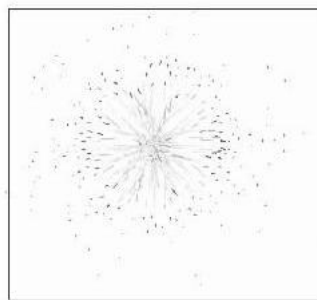


图 3 圆柱型传感器下方平板上磁通密度的分布

Fig. 3 The magnetic flux density of the plate under the cylindrical exciting coil

2.2 圆柱型传感器模型的仿真结果

为了确定圆柱型的传感器模型是否发生了远场现象,仿真得到了其 x 向磁场强度的幅值和相位特性曲线分别见图 4、图 5,其中 x 向为检测点距离激励线圈边缘的距离, y 向为缺陷中心向两边扩展的距离。从图中可以看出,幅值和相位特性曲线出现了远场涡流检测所特有的“磁位峡谷”和“相位节点”2 个典型特征。因此,文中所设计的圆柱型传感器可以在平板构件中实现远场涡流效应,并且可以看到其远场区大致出现于距离激励边缘 10 mm 处,远场涡流测量法需要检测线圈置于远场区,才具有穿透平板的检测能力,而如果检测线圈距离激励过远,会使检测信号过于微弱,难以测量。综合考虑各方面因素,将检测线圈放置距离激励边缘 35 mm 处。

为了研究圆柱型传感器模型对不同厚度平板中缺陷的检测能力,分别建立了板厚 3 mm、缺陷深 2 mm,以及板厚 5 mm、缺陷深 3 mm 的 2 组模型,其缺陷宽度均为 2 mm,长度均为 20 mm,缺陷位于平板的下表面且处于远场区。当传感器从缺陷上扫描时,仿真得到的检测线圈幅值和相位扫描曲线分别如图 6 和图 7 所示,从图中可以看出,当板厚为 3 mm 时,扫描曲线在缺陷上方有明显的峰值出现,表明圆柱型传感器能够对 3 mm 厚的平板进行检测。当板厚增加到 5 mm 时,扫描曲线已无法正确反映缺陷信息,因此圆柱型传感器很难对 3 mm 以上板厚中的缺陷进行检测。

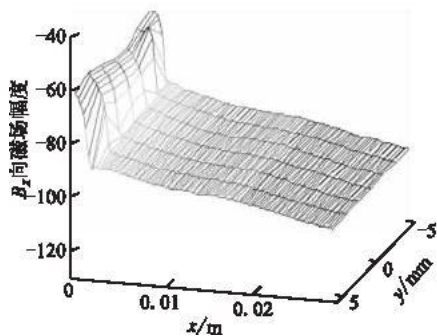


图 4 幅值随检测线圈点的变化曲线

Fig. 4 The amplitude signal due to the position of detection coil

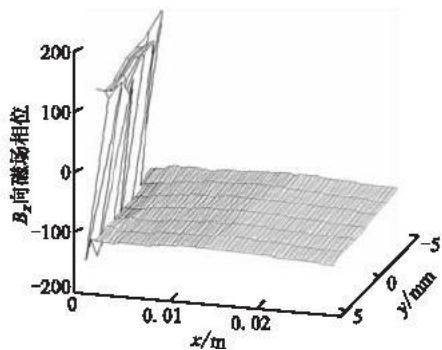


图 5 相位随检测线圈点的变化曲线

Fig. 5 The phase signal due to the position of detection coil

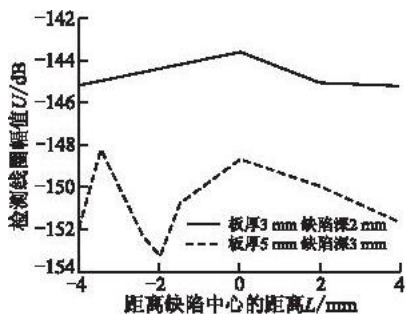


图 6 不同板厚的缺陷检测线圈幅值

Fig. 6 The amplitude of induced voltage due to crack of different thickness of plate

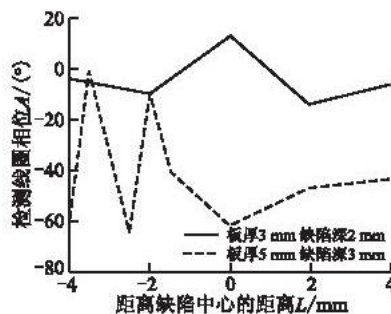


图 7 不同板厚的缺陷检测线圈相位

Fig. 7 The phase of induced voltage due to crack of different thickness of plate

3 矩形远场涡流传感器的仿真

3.1 矩形传感器模型的建立

交变磁场测量法通常采用矩形结构的传感器,其利用矩形结构线圈的特殊性,将感应涡流从空间走向上转化为匀强涡流场,从而使得磁场能够定向的沿着激励线圈长度方向传播^[9-10]。因此,可以将矩形结构的激励线圈用到远场涡流检测中去,来建立矩形结构传感器模型。同时,为了使矩形结构的传感器能产生远场效应,给矩形激励线圈加装了方形的屏蔽罩来抑制激励磁场的直接耦合分量,传感器模型如图 8 所示(为了清楚观察传感器结构,在此没有显示屏蔽罩单元),其中为激励线圈补充了绕线方向来明晰磁场走向。图 9 是激励线圈正下方平板的磁通密度分布图。仿真参数如下:矩形激励线圈的长度为 45 mm,宽度为 45 mm,高度为 25 mm,厚度为 2 mm,匝数为 300 匝,线径为 0.35 mm。检测线圈内、外半径分别为 2 mm 和 4 mm,长度为 6 mm,匝数为 800 匝,线径为 0.08 mm。激励和检测线圈绕线的电阻率为 $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$,相对磁导率为 1,激励频率为 20 Hz。屏蔽结构厚度 10 mm,相对磁导率为 1 000,电阻率 $1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 。

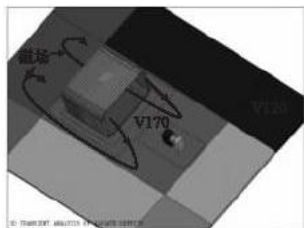


图 8 矩形激励线圈传感器模型

Fig. 8 The model of the rectangular exciting coil

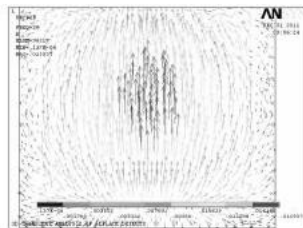


图 9 矩形激励线圈下方平板磁通密度分布图

Fig. 9 The magnetic flux density of the plate under the rectangular exciting coil

由图9可以看出,矩形激励线圈正下方的平板所感应的磁场在一定范围内为匀强场,并且磁场沿矩形激励线圈长度方向传播。对比图3和图9可以发现,采用矩形激励线圈后,平板中感应的磁场明显加强,不再均匀的向四周扩散,而是定向的向激励线圈长度方向传播。因此,采用矩形激励线圈可以提高对缺陷的检测能力。采用圆柱型传感器确定检测线圈放置位置的方式,在矩形传感器中,检测线圈放置在距离屏蔽边缘45 mm处。

3.2 矩形传感器模型的仿真结果

3.2.1 缺陷深度的定量检测

为了对缺陷深度进行定量检测,仿真建立了4组不同深度的缺陷进行扫描。模型参数如下:平板厚度为5 mm,缺陷深度分别为1 mm、2 mm、3 mm和4 mm,宽度均为2 mm,长度均为20 mm。将有缺陷的扫描波形减去无缺陷时的扫描背景值,得到的结果分别见图10、图11,从图中可以看出,矩形传感器模型能够很好地实现对5 mm板厚中不同深度缺陷的检测。当传感器扫描到缺陷上方时,检测线圈电压的幅值和相位扫描曲线均出现了负峰值,并且随着缺陷深度的增加,检测信号负峰值也随之增加。分别提取图10和图11检测电压的幅值和相位负峰值,做出负峰值随缺陷深度变化的拟合曲线,就可以对缺陷的深度进行定量检测。

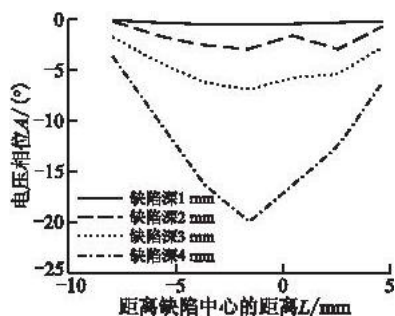
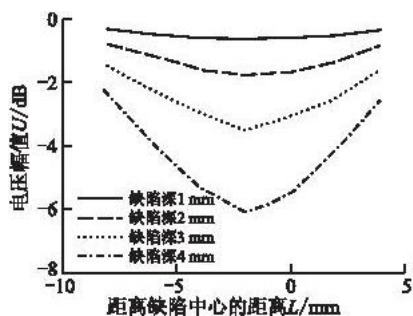


图10 不同深度缺陷的检测电压幅值变化曲线

图11 不同深度缺陷的检测电压相位变化曲线

Fig. 10 The voltage amplitude of different crack depth

Fig. 11 The voltage phase of different crack depth

3.2.2 缺陷长度的定量检测

为了对缺陷长度进行定量检测,同样对2组不同长度的缺陷进行扫描。模型参数如下:平板厚度为5 mm,缺陷深度均为3 mm,宽度均为4 mm,长度分别为10 mm和20 mm。当传感器从缺陷上方扫描时,仿真得到的检测线圈电压幅值和相位扫描曲线分别如图12和图13所示,可以看出,矩形结构传感器对不同长度的缺陷有很好的区分能力,扫描信号峰值宽度随缺陷长度的增加而变大,结果见图13。提取不同长度缺陷下的扫描电压曲线的峰值宽度与缺陷长度进行线性拟合,就可以对缺陷长度进行定量检测。

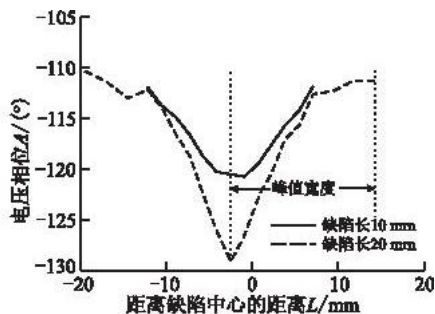
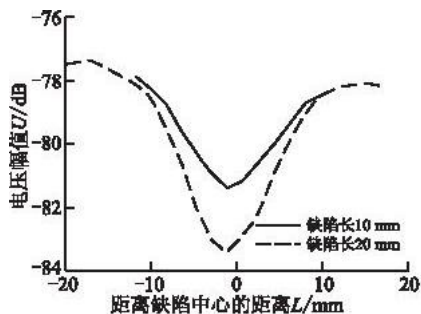


图12 不同长度缺陷的扫描电压幅值

图13 不同长度缺陷的扫描电压相位

Fig. 12 The voltage amplitude of different crack width

Fig. 13 The voltage phase of different crack width

4 结束语

由于远场涡流检测技术具有检测深度深,受激励场干扰小的优势,因而在平板类构件缺陷检测方面有很好的应用前景。本文分析比较了2种不同结构的远场涡流传感器模型,仿真研究了2种模型下的平板感应磁场分布规律,以及其对不同板厚中缺陷的检测能力。最后利用矩形激励线圈传感器模型对平板构件缺陷

的深度和长度进行了定量检测。

参考文献(References):

- [1] 王新. 平板导体件的远场涡流检测系统的研究与设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.
WANG Xin. Research and design on remote field eddy current technique used for plate member [D]. Nanjing: Nanjing university of aeronautics & astronautics,2010. (in Chinese)
- [2] Sun Y,Wan W,Yang X,et al. Applications of motorized RFEC probes in thick aircraft structure crack detection[J]. QNDE, 2007, 18(4):125-133.
- [3] Naoya Kasai, Yasuhiro Fujiwara, Kazuyoshi Sekine, et al. Evaluation of back-side flaws of the bottom plates of an oil-storage tank by the RFECT [J]. NDT & E international,2008,41(5):525-529.
- [4] 荆毅飞,王晓锋,杨宾峰,等. 管道轴向裂纹检测脉冲远场涡流传感器设计与仿真分析[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(6):74-78.
JING Yifei, WANG Xiaofeng, YANG Binfeng, et al. Simulation research on design of pulsed remote field eddy current sensor for axial crack detection in pipeline[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011,12(6):74-78. (in Chinese)
- [5] 徐小杰. 铁磁性管道中轴向裂纹的远场涡流检测技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007.
XU Xiaojie. Research on remote field eddy current technique used for axial crack detection in ferromagnetic pipe[D]. Changsha: National university of defense technology, 2007. (in Chinese)
- [6] 李学超. 脉冲远场涡流管道检测技术研究[D]. 西安:西安交通大学,2008.
LI Xuechao. The research on nondestructive testing of ferromagnetic tubes using pulsed remote eddy current technique[D]. Xi'an: Xi'an jiaotong university, 2008. (in Chinese)
- [7] 周连文,曲民兴,孟小利. 导电平板中的远场涡流特性[J]. 南京航空航天大学学报,1998,30(2):146-152.
ZHOU Lianwen,QU Minxing,MENG Xiaoli. The character of RFECT of conducting plate[J]. Journal of Nanjing university of aeronautics & astronautics, 1998,30(2):146-152. (in Chinese)
- [8] Isabelle IDufour, Dominique Placko, Marc Geoffroy. Active shielding of eddy current sensors: a method to focus the magnetic field in order to improve lateral resolution and coupling coefficient [J]. NDT & E international, 1995, 28(4):225-233.
- [9] 杨宾峰,张辉,余付平,等. 新型脉冲漏磁传感器的仿真设计与实验研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(4):57-61.
YANG Binfeng, ZHANG Hui, YU Fuping, et al. Simulation design and experimentation research on a new type of pulsed magnetic flux leakage sensor[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition,2010,11(4):57-61. (in Chinese)
- [10] 杨宾峰,张辉,赵玉丰,等. 基于新型脉冲涡流传感器的裂纹缺陷定量检测技术[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(1):73-77.
YANG Binfeng, ZHANG Hui, ZHAO Yufeng, et al. Quantification of crack defect using a new pulsed eddy current sensor [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011,12(1):73-77. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Simulation Research on Design of Remote Field Eddy Current Sensor for Ferromagnetic Plate Members

CUI Wen-yan¹, ZHU Rong-xin¹, YANG Bin-feng¹, ZHANG Hui², LI Long-jun¹

(1. School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Remote field eddy current (RFEC) technique in combination with the advantages of infinitive from skin effect and ability to detect the inner crack of metal member is characterized by its equal sensitivity to a flaw irrespective to its location in the tube wall, and has a small relationship with the magnetic field from the exciting coil. This paper applies the traditional pipeline RFECT to detection for plate member. In this paper the basis of the principle of RFEC is analyzed, the cylindrical and rectangular exciting coils are designed; the detection effect of plate and the law of magnetic flux density of two sensor models are simulated. The result of simulation shows that rectangular exciting coil can induce the directional magnetic field in the plate and RFECT can be used to detect the crack in plate and perform quantitative determination of the depth and length.

Key words: plate member; remote field eddy current; sensor design; simulation analysis