

电磁量测量的一体化传感器仿真分析与设计

杨宾峰^{1,2}, 张辉³, 杨卫国⁴, 张战斌²
周义建², 张超², 曹海霞²

(1.南昌航空大学无损检测教育部重点实验室,江西南昌,330063;2.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077;3.空军工程大学科研部,陕西西安,710051;4.94162部队,陕西西安,710600)

摘要 单种电磁无损检测方法检测对象较为单一,而且缺陷的定量评估精度和检测的可靠性不高,采用集成化无损检测技术是解决这些问题的有效途径。该文在前期研究基础上,利用脉冲激励频谱成分丰富的优势,将脉冲激励方式引入电磁无损检测领域,深入研究脉冲激励下多种电磁无损检测方法的集成化问题,通过突破多种电磁无损检测方法的原理集成、一体化传感器设计等关键技术,从而在解决传统正弦激励的电磁无损检测技术不足的基础上,进一步拓展和提高集成化电磁无损检测技术的研究领域和理论水平。预期研究成果将进一步推进集成化无损检测技术的发展进程,对于提高大型装备无损检测的效率及缺陷定量评估的精度都具有十分重要的理论意义和实用价值。

关键词 电磁无损检测;一体化传感器;仿真设计;缺陷定量

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2015.01.013

中图分类号 TG115 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2015)01-0056-06

A Simulation Analysis and A Design of Integrative Probe Based on Electromagnetic Measurement

YANG Bin-feng^{1,2}, ZHANG Hui³, YANG Wei-guo⁴, ZHANG Zhan-bin², ZHOU Yi-jian², ZHANG Chao², CAO Hai-xia²
(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Nanchang Hangkong University, Ministry of Education, Nanchang 330063, China; 2. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 3. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 4. Unit 94162, Xi'an 710600, China)

Abstract: The single electromagnetic method can be used to detect only one kind of material, the precision of defect quantification and dependability of defect detection are not high. The integration of multiple methods is an effective solution to this problem. On the basis of the previous research work, the pulsed excitation can provide wideband exciting frequency components and this excitation mode is introduced into the field of electromagnetic NDT technique. The key problems of the integration of multiple electromagnet-

收稿日期: 2014-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51377172, 51107149); 航空科学基金资助项目(20130996009); 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室基金资助项目(ZD201229004)

作者简介: 杨宾峰(1976-),男,陕西户县人,副教授,博士(后),主要从事电磁无损检测技术研究。E-mail: by_yang@163.com

引用格式: 杨宾峰,张辉,杨卫国,等. 电磁量测量的一体化传感器仿真分析与设计[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2015,16(1):56-61. YANG Bin-feng, ZHANG Hui, YANG Weiguo, et al. A Simulation Analysis and A Design of Integrative Probe Based on Electromagnetic Measurement[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2015, 16(1): 56-61.

ic methods and integrative probe are studied in this paper, and the disadvantages of the single frequency excitation technique are overcome. This researching achievement expected will extend and improve the research domain and level of Integration NDT technique, and also has an important theoretical meaning and a practical value for improving defect detecting ability of nondestructive testing.

Key words: electromagnetic nondestructive testing; integrative probe; simulation design; defect quantification

电磁检测技术方法较多但目前运用单个方法实现电磁无损检测仍存在的问题。传统的涡流 (Eddy Current, EC) 方法采用单频激励的方式, 主要对表面及近表面的缺陷进行检测, 然而, 由于对其它参数也很敏感, 影响了对缺陷的检测精度。脉冲涡流技术 (Pulsed Eddy Current, PEC) 采用方波作为激励电流, 由于脉冲激励的频谱较宽, 因而可获得更多的缺陷信息^[1-3], 其主要应用于对非磁性板材的检测。但传统脉冲涡流技术由于传感器结构的局限使得其信号处理过程复杂, 缺陷定量精度不高。

远场涡流检测技术 (Remote Field Eddy Current, RFEC) 是基于远场涡流效应的原理, 通常使用内通过式探头来检测铁磁性管材, 但远场涡流技术存在着探头长度较长、功耗大、信号幅度低、无法识别内外壁缺陷等问题^[4-6]。漏磁技术 (Magnetic Flux Leakage, MFL) 主要应用于对铁磁性材料的检测^[7-8], 然而其检测结果受磁化方式影响较大。

单个电磁无损检测方法主要存在以下 2 个方面的局限性: 首先, 检测对象比较单一; 其次, 检测原理都存在一定的局限性, 使得缺陷检测的灵敏度和精度不高。

为了克服以上问题, 需要从各种电磁无损检测方法的作用机理入手寻求解决途径, 仔细分析可以发现, 电磁无损检测方法之间存在一定的共性: 首先, 其都是基于电磁量检测的原理, 传感器结构也存在一定的相似性, 通常都利用激励线圈感应的磁场作用于被测件, 采用检测线圈拾取扰动磁场来实现对缺陷的定量; 其次, 分析单种电磁无损检测方法存在的问题可以发现, 其通常是由于采用单频正弦信号作为激励而引起的, 而脉冲激励的频率成分丰富, 采用脉冲信号作为激励, 在此基础上, 通过利用其检测原理的共性, 将多种无损检测方法集成为一体, 使得集成后的无损检测方法在提高缺陷检测精度的同时也具有更为广泛的应用场合是解决以上问题的新思路、新方法, 也是电磁无损检测技术的重要发展方向, 针对集成化电磁无损检测技术进行研究, 具有十分重要的理论意义和应用价值。

1 一体化传感器的集成原理分析

通过分析单频涡流、脉冲涡流、漏磁以及远场涡流 4 种无损检测方法的原理可以发现, 前 3 种检测方法主要利用近场检测的原理, 也就是检测线圈位于激励 (励磁) 线圈的附近, 利用检测线圈来收集缺陷引起的扰动场或漏磁场。与此不同, 远场涡流检测技术将检测线圈放置于远场区, 对于铁磁性管道检测而言, 通常将检测线圈放置于距离激励线圈 2~3 倍管径的位置。因此, 一体化传感器的设计问题可以归结为近场检测和远场检测的集成问题, 其可共用一个激励线圈, 但是需在近场区和远场区分别放置不同的检测线圈。前期研究表明, 通过给单频涡流的激励线圈施加脉冲方波激励信号, 可以将单频涡流和脉冲涡流 2 种方法集成在一起, 同时, 涡流检测的激励线圈也可以实现对铁磁性被测件的磁化, 因此, 该传感器同样可以实现漏磁检测的效果, 这样就可以将近场检测的 3 种方法集成在一起。

为了将近场检测的传感器和远场检测的传感器集成在一起, 需要在传感器的远端放置一个检测线圈, 这样就可以将多种无损检测技术的传感器集成为一体, 这种传感器可直接应用于对铁磁性管材的检测。一体化集成传感器的示意图见图 1。

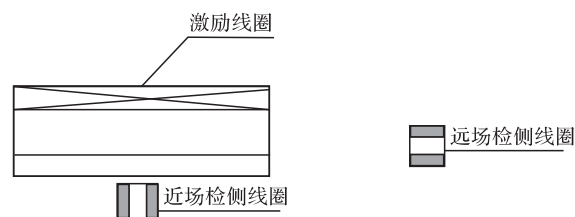


图 1 一体化传感器示意图

Fig.1 The schematic diagram of integrative electromagnetic probe

然而, 将该传感器应用于非磁性管材检测时, 需对激励参数进行一定的优化设计, 见图 2。从图中可以看出, 对于频率较低的激励信号, 幅值特性曲线没有出现拐点, 相位特性曲线也没有出现突变, 当激励频率逐渐增加时, 出现了远场涡流所具有的“磁位峡谷”和“相位节点”等典型特征。

通过以上分析可以看出,通过对激励参数的优化设计,该一体化传感器可应用于铁磁性和非磁性管道的检测。但是,对于铁磁性和非磁性平板的检测,该一体化传感器却无法直接应用,这是因为在检测管道时,管道壁中感应的涡流可以使得激励线圈产生的直接耦合分量快速衰减,而对于板材的检测,由于没有管道的屏蔽作用,无法衰减直接耦合分量,这使得激励线圈产生的直接耦合分量将始终大于间接耦合分量,因此磁场无法实现二次穿透的效果,也就无法实现远场检测。针对此前期给一体化的传感器增加了 U 型罩^[9] (U-Type Component, UTC),结构见图 3,UTC 罩的材质与被测的非磁性平板相一致,使得 UTC 罩和被测试件构成完整的闭合导体回路用来模拟管道的屏蔽作用,其感应的涡流势必会对磁场的直接耦合分量造成衰减,使得磁场在远场区二次穿透平板,从而实现了平板的远场涡流检测效果。同时,该结构也适用于对铁磁性平板的检测,只是这时需将 UTC 罩的材质改变为铜^[10]。

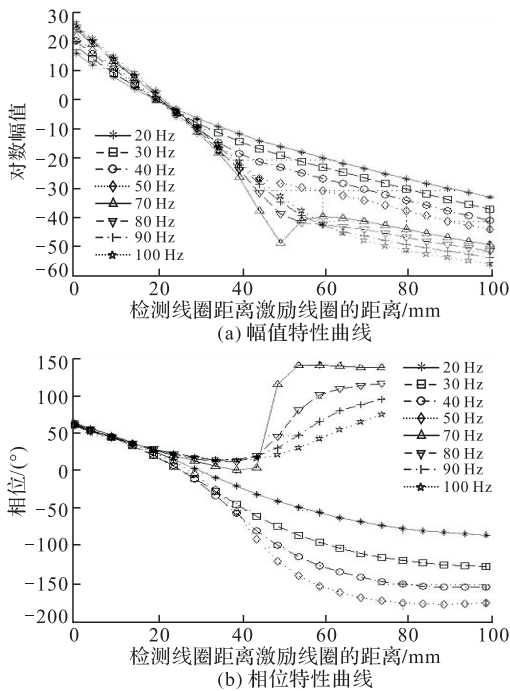
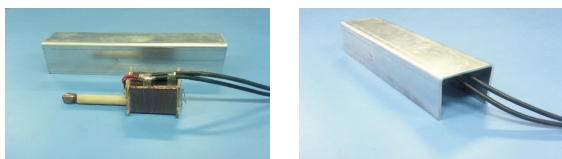


图 2 不同激励频率下非磁性管道检测的幅值和相位特性曲线

Fig.2 The characteristic curves of remote field eddy current with different frequencies in detecting non-magnetic tube



(a) 传感器及UTC罩分立照片 (b) 带UTC罩的传感器整体照片

图 3 基于 UTC 结构的平板构件检测传感器照片

Fig.3 The photograph of probe in detecting plate with UTC

综上所述,对于铁磁性和非磁性管道的检测,将传感器插进管道后,管壁起到了屏蔽作用,近场检测线圈和远场检测线圈可以分别实现对不同位置缺陷的检测,只是在检测非磁性管道时,需适当提高激励频率,使其产生远场效应。对于铁磁性和非磁性平板的检测,只需在一体化传感器外增加 U 型罩即可。因此,本文设计的一体化传感器可同时适用于检测铁磁性和非磁性的管道及板材。

2 一体化集成传感器模型的建立

前面分析表明,本文设计的一体化传感器可同时适用于管材和板材,其检测原理基本相同,区别仅在于是否需要 U 型罩。因此,为了分析的方便,下面以管道的检测为例来建立仿真模型。

本文采用有限元仿真软件 ANSYS 建立传感器模型。具体参数如下:被测管道长度 400 mm,内半径 25 mm;激励线圈为空心圆柱形,匝数为 200 匝,其内半径 10 mm,外半径 12 mm;近场和远场检测线圈的尺寸相同,均为圆柱形,为了聚集磁场,其均缠绕在铁氧体磁芯上,匝数为 1 000 匝,长 6 mm,内半径 2 mm,外半径 4 mm。近场检测线圈位于激励线圈的中部,其轴线与激励线圈的轴线相互平行。远场检测线圈位于激励线圈前部,与激励线圈相距一定的距离,其轴线与激励线圈的轴线也相互平行。本文检测了 2 种不同材质的管道,对于铁磁性管道,其厚度为 10 mm,相对磁导率为 100,电阻率为 $2 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$,远场检测线圈距离激励线圈的距离为 125 mm。对于非磁性管道,其厚度为 20 mm,相对磁导率为 1,电阻率为 $2.65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$,远场检测线圈距离激励线圈的距离为 50 mm。图 4(a)为仿真建立的一体化传感器模型,图 4(b)为一体化传感器放置于被测管道内部时的模型,为了方便观测,在此给出了 1/4 模型。

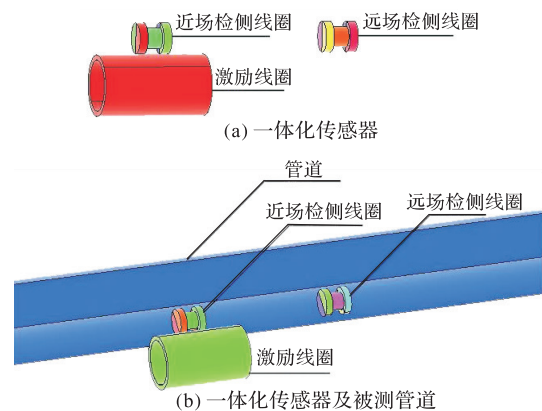


图 4 仿真模型

Fig.4 Simulation model

3 缺陷定量检测结果及灵敏度对比

为了验证一体化传感器对缺陷的检测效果,在铁磁性和非磁性管道壁上分别设置了 3 种不同深度的缺陷,对于壁厚为 20 mm 的非磁性管道,缺陷的尺寸分别为(长×宽×深)20 mm×4 mm×5 mm、20 mm×4 mm×10 mm、20 mm×4 mm×15 mm。对于壁厚为 10 mm 的铁磁性管道,缺陷的尺寸分别为(长×宽×深)20 mm×4 mm×4 mm、20 mm×4 mm×6 mm、20 mm×4 mm×8 mm。

3.1 非磁性管道中缺陷的检测结果

在对非磁性管道中的缺陷进行检测时,设置激励脉冲信号的频率为 50 Hz, 占空比为 0.1, 幅值为 100 V。首先让近场检测线圈刚好位于管壁中缺陷的正下方,远场检测线圈远离缺陷,此时,近场和远场检测线圈得到的不同深度缺陷的检测信号分别见图 5。接着,让远场检测线圈刚好位于缺陷的正下方,此时得到的检测信号见图 6。

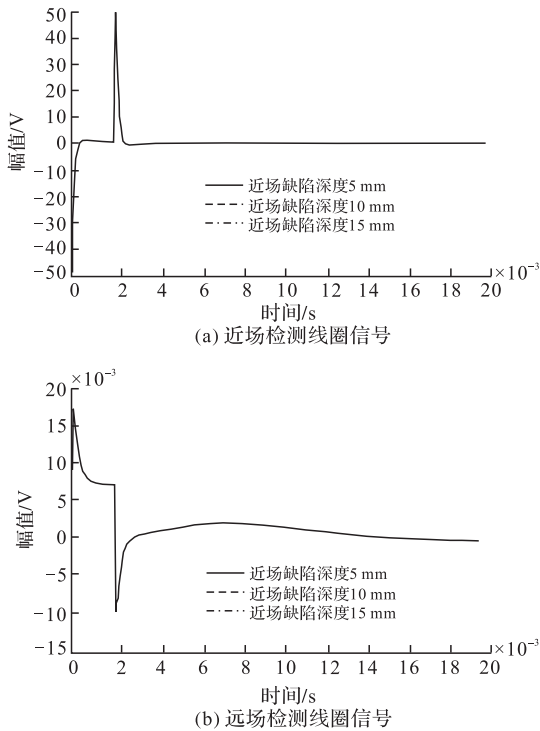


图 5 近场检测线圈位于非磁性管道中缺陷正下方时的检测结果
Fig.5 The near field sensor locates under the defect of non-magnetic tube

图 5 可知,当近场检测线圈刚好位于缺陷的正下方时,随着缺陷深度的增大,近场检测线圈感应信号的峰值逐渐减小,分别为 48.897 5 V、48.249 1 V、48.0145 V。远场检测线圈感应信号的过零时间分别为 0.013 7 s、0.013 6 s、0.013 5 s。分析图 6 的结

果可以发现,当远场检测线圈刚好位于缺陷的正下方时,随着缺陷深度的增大,近场检测线圈感应信号的峰值基本保持不变,分别为 50.494 V、50.494 V、50.492 V。远场检测线圈感应信号的过零时间分别为 0.013 5 s、0.013 1 s、0.012 8 s。对比分析可以发现,当近场检测线圈刚好位于缺陷下方时,缺陷使得近场检测信号的峰值和远场检测信号的过零时间都产生了改变。而当远场检测线圈刚好位于缺陷下方时,远场检测信号的过零时间发生了明显改变,而近场检测信号的峰值却基本不变,仿真结果符合涡流以及远场涡流的检测原理,对近场检测而言,只能检测缺陷附近的很小区域,远场检测却对位于激励线圈附近及检测线圈附近的缺陷均具有检测能力。

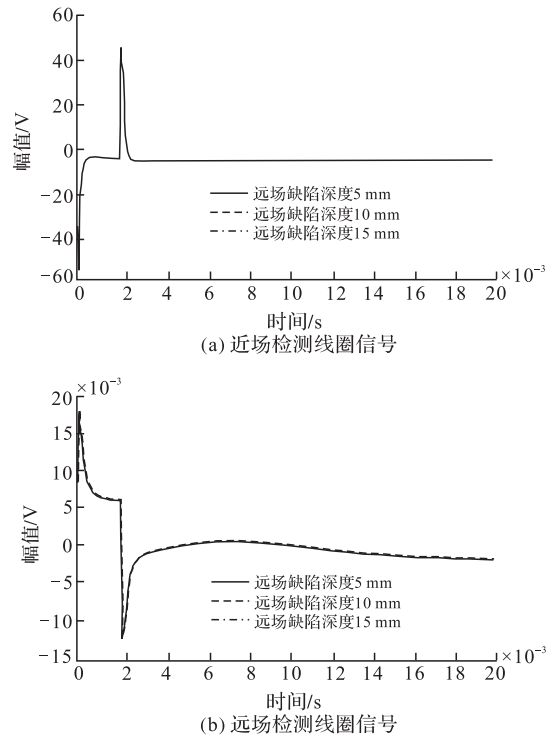


图 6 远场检测线圈位于非磁性管道中缺陷正下方时的检测结果

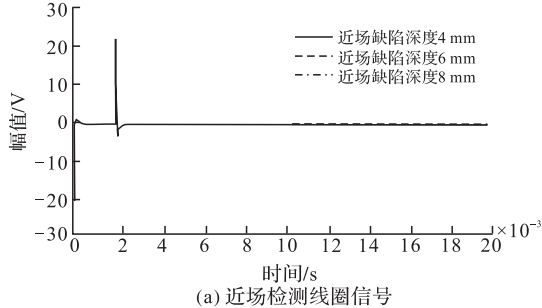
Fig.6 The remote field sensor locates under the defect of non-magnetic tube

3.2 铁磁性管道中缺陷的检测结果

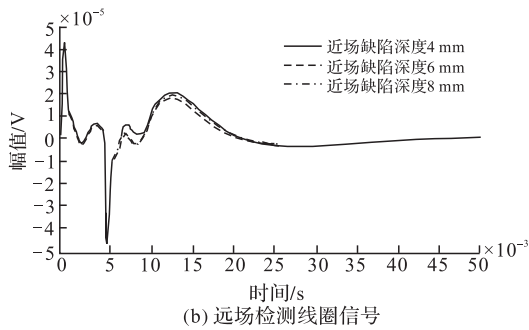
在对铁磁性管道中的缺陷进行检测时,设置激励脉冲信号的频率为 20 Hz, 占空比为 0.1, 幅值为 100 V。与检测非磁性管道相类似,仿真中也让近场检测线圈和远场检测线圈分别位于缺陷的正下方,检测结果见图 7、图 8。

图 7 可知,当近场检测线圈刚好位于缺陷的正下方时,随着缺陷深度的增大,近场检测线圈感应信号的峰值逐渐减小,分别为 29.720 5 V、28.859 9 V、28.164 2 V。远场检测线圈感应信号的过零时间分别为 0.020 8 s、0.020 3 s、0.019 9 s。图 8 可知,当远

场检测线圈刚好位于缺陷的正下方时,随着缺陷深度的增大,近场检测线圈感应信号的峰值基本保持不变,分别为 31.016 2 V、31.015 8 V、31.015 8 V。远场检测线圈感应信号的过零时间分别为 0.019 9 s、0.019 0 s、0.018 1 s。铁磁性管道的仿真规律与非磁性管道基本一致,在此不再赘述。



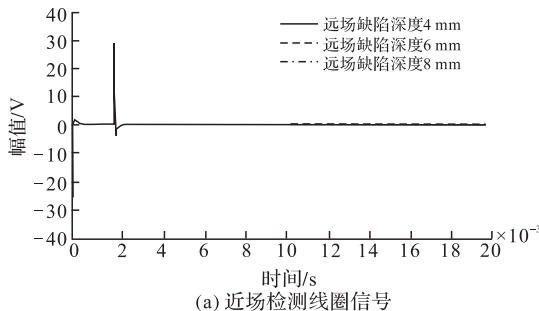
(a) 近场检测线圈信号



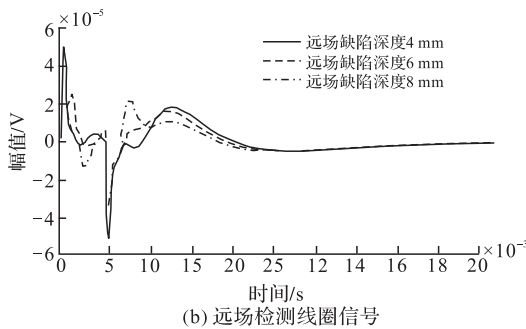
(b) 远场检测线圈信号

图 7 近场检测线圈位于铁磁性管道中缺陷正下方时的检测结果

Fig.7 The near field sensor locates under the defect of magnetic tube



(a) 近场检测线圈信号



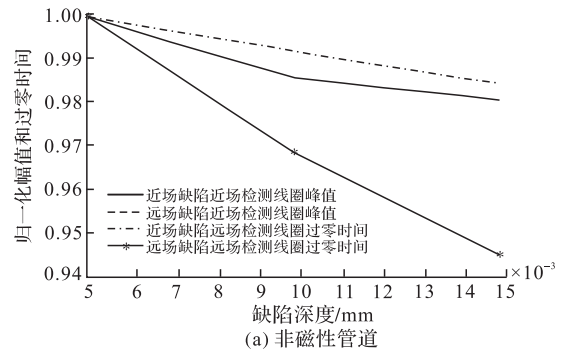
(b) 远场检测线圈信号

图 8 远场检测线圈位于铁磁性管道中缺陷正下方时的检测结果

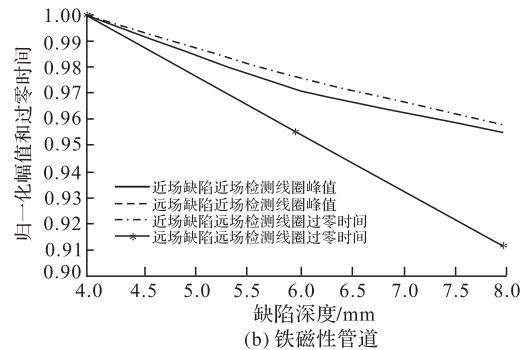
Fig.8 The remote field sensor locates under the defect of magnetic tube

3.3 缺陷检测灵敏度的对比分析

为了分析近场检测线圈和远场检测线圈对不同位置缺陷的检测灵敏度,根据图 5~8 的仿真结果,得到了一体化传感器的检测灵敏度曲线,见图 9。从图中可以看出,无论是检测非磁性管道还是检测铁磁性管道,当缺陷位于远场区时,采用近场检测线圈几乎无法检测到缺陷的存在。而当缺陷位于远场区时,远场检测线圈的灵敏度最高。由以上分析可以得出结论:对于本文设计的一体化传感器,其远场检测线圈的灵敏度最高,因此,在采用一体化传感器对缺陷进行扫描检测时,为了实现对缺陷的精确定量检测,主要应该提取远场检测信号的特征,近场检测线圈可以作为辅助线圈用来进一步确定缺陷位置。



(a) 非磁性管道



(b) 铁磁性管道

图 9 缺陷检测灵敏度的比较

Fig.9 The defect detecting sensitivity

4 结语

非磁性和铁磁性管材和板材在航空航天及石油化工领域有着广泛的应用,为了确保装备的安全运行,必须对其中可能出现缺陷进行无损检测。然而,采用电磁无损检测方法进行检测时,存在着检测对象单一,无法实现通用检测的问题。本文在分析了不同电磁无损检测方法传感器一体化设计原理的基础上,仿真分析了一体化传感器对非磁性和铁磁性管道的检测能力,并对比分析了近场检测线圈和远

场检测线圈的缺陷检测灵敏度。仿真结果表明,本文设计的一体化传感器通过对结构和简单改变及对激励参数的调整,可以通用于对不同形状、不同材质被测件的检测,论文的研究结果为多种电磁无损检测方法的原理集成进行了有效的探索,也为一体化传感器的设计指明了方向。

参考文献(References):

- [1] Tian G Y, Li Y, Mandache C. Study of lift-off Invariance for Pulsed Eddy Current Signals [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(1):184-191.
- [2] Yang B F, Zhao Y F, Zhang W S. Quantification of Crack Defect Using A New Pulsed Eddy Current Probe [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2011, 26(2):155-168.
- [3] Huang C, Wu X J, Xu Z Y, et al. Pulsed Eddy Current Signal Processing Method for Signal Denoising in Ferromagnetic Plate Testing [J]. NDT&E International, 2010, 43(7):648-653.
- [4] Mihalache O, Yamaguchi T, Ueda M, et al. 3D RFEC Simulations for the In-Service Inspection of Steam Generator Tubes in Fast Breeder Reactors [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33:1165-1171.
- [5] Wang H T, Luo Q F, Wang X, et al. Simulation and Experimental Study of Remote Field Eddy Current Testing on Flat Conductive Plate [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2010, 33: 1261-1266.
- [6] Yang Bin Feng, Li Xuechao. Pulsed Remote Field Technique Used for Nondestructive Inspection of Ferromagnetic Tube [J]. NDT&E International, 2013, 53:47-52.
- [7] Sophian A, Tian G Y, Zairi X. Pulsed Magnetic Flux Leakage Techniques for Crack Detection and Characterisation [J]. Sensors and Actuators A, 2006(125): 186-191.
- [8] Wilson J W, Tian G Y. Pulsed Electromagnetic Methods for Defect Detection And Characterization [J]. NDT&E International, 2007, 40:275-283.
- [9] 张超, 王晓锋, 杨宾峰, 等. 非磁性航空金属构件检测中脉冲远场涡流传感器的仿真设计 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2013, 14(3):73-77.
ZHANG Chao, WANG Xiaofeng, YANG Bin Feng, et al. Simulation Design of Pulsed Remote Field Eddy Current Probe for Nonmagnetic Metal Aviation Component [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2013, 14(3): 73-77. (in Chinese)
- [10] 崔文岩, 朱荣新, 杨宾峰, 等. 铁磁性平板构件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, 2012, 13(5):71-75.
CUI Wenyan, ZHU Rongxin, YANG Bin Feng, et al. Simulation Research on Design of Remote Field Eddy Current Sensor for Ferromagnetic Plate Members [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2012, 13(5): 71-75. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)