

脉冲远场涡流检测中磁场抑制技术

胥俊敏¹, 王晓锋¹, 杨宾峰¹, 张 辉², 方司阳³

(1.空军工程大学信息与导航学院,西安,710077;2.空军工程大学科研部,西安,710051;
3.95526 部队,拉萨,850000)

摘要 脉冲远场涡流用于飞机机身金属结构中缺陷的检测时,由于信号微弱,检测灵敏度往往不高,因此,如何实现对远场涡流的磁场抑制与信号增强,从而改进和提高其检测能力是一个关键问题。从抑制远场涡流磁场直接耦合分量的角度出发,仿真设计了带有不同屏蔽结构的传感器模型,分析了不同材料的屏蔽效果,比较了不同模型的缺陷检测灵敏度以及对大厚度平板的检测能力。研究表明:基于高导磁材料屏蔽盘的连通磁路传感器对直接耦合分量具有较好的抑制作用,可以拉近激励与检测线圈间的距离,提高缺陷的检测灵敏度,其对非磁性平板的检测厚度可扩展至 25 mm。

关键词 脉冲远场涡流;直接耦合分量;屏蔽结构;磁场抑制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2016.03.007

中图分类号 TG115 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2016)03-0033-07

Research on Magnetic Field Suppression Technique in Detecting Pulsed Remote Filed Eddy Current

XU Junmin¹, WANG Xiaofeng¹, YANG Bin Feng¹, ZHANG Hui², FANG Siyang³

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. Unit 95526, Lasa 850000, China)

Abstract: Aimed at the problems that the signals of traditional remote field eddy current are weak, and the detection sensitivity is low, and how to realize the suppression of the magnetic field in the remote field eddy current is a key problem to improve the detection ability, this paper designs some sensors with different shield structure from the perspective of restraining direct coupling component of magnetic field, analyzes the effect of shield with different materials, and compares the defects, detection sensitivity and the capability of detecting large thick flat geometry. The results show that the sensor with the connected magnetic circuit based on high magnetic shield has a good ability in restraining as for the direct coupling component, and can shorten transient length, can narrow the distances between the excitation and the detection coil, and can improve the sensitivity in detecting defects. And its detection depth can be extended to 25mm as for nonmagnetic plate.

收稿日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51377172);陕西省自然科学基金基础研究计划(2015JM5147)

作者简介: 胥俊敏(1993-),男,四川绵阳人,硕士生,主要从事测试计量技术及仪器研究.E-mail: zixu_sir@163.com

引用格式: 胥俊敏,王晓锋,杨宾峰,等.脉冲远场涡流检测中磁场抑制技术[J].空军工程大学学报:自然科学版,2016,17(3):33-39. XU Junmin, WANG Xiaofeng, YANG Bin Feng, et al. Research on Magnetic Field Suppression Technique in Detecting Pulsed Remote Filed Eddy Current [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2016, 17(3): 33-39.

Key words: pulsed remote field eddy current; direct coupling component; shield structure; magnetic field suppression

飞机机身在经历长时间的飞行后会产生各种裂纹缺陷,从而带来安全隐患,因此需要及时采用无损检测的方法进行安全检测。远场涡流检测技术具有内外壁缺陷检测灵敏度一致、受提离效应影响小、不受集肤效应影响等优势^[1-2],因而很适用于飞机机身裂纹缺陷的检测。

国外在远场涡流检测技术方面起步较早。Darko.Vasic^[3]利用脉冲远场涡流检测技术实现了对铁磁性管道缺陷的检测,并实现了对缺陷的分类识别。Y.S.Sun^[4]等人将远场涡流检测技术的应用扩展到飞机多层结构的检测之中,通过对传感器的改进设计,实现了对多层结构中深层缺陷的检测。邢丽冬^[5]设计了一种新型的远场涡流传感器,并对管壁的对称和不对称缺损进行了对比试验,结果表明新型传感器可以确定缺损的三维位置。刘春艳^[6-7]等人通过对传感器的改进,拉近了激励与检测线圈的距离,缩小了传感器的尺寸。吴德会^[8]等人研究了检测信号相位与缺陷几何参数之间的对应关系。

本课题组前期研究发现,通过给探头加装 UTC (U-type component) 结构来模拟管道的作用,可以在非磁性平板构件上实现远场涡流效应^[9-10]。然而,远场涡流检测中激励与检测线圈间距大,检测信号非常微弱,制约了传感器对缺陷的检测能力,因此,需要从信号增强与磁场抑制方面对传感器进行优化设计。在信号增强方面,利用脉冲代替正弦作为激励信号,从而缩短了过渡区,达到了增强检测信号的目的^[11],同时设计了带聚磁结构的连通磁路传感器,实现了对检测信号的增强,提高了缺陷检测灵敏度^[12-13]。本文拟从磁场抑制的角度出发,通过给传感器加装不同的屏蔽结构,来抑制远场涡流中的直接耦合分量,从而进一步缩短激励与检测线圈间的距离,同时提高缺陷的检测灵敏度。

1 脉冲远场涡流检测原理

远场涡流检测传感器由激励线圈和检测线圈组成。激励线圈感生的磁场分为 2 个部分:一部分在管道内部直接传播,称为直接耦合分量;另一部分穿透管壁,沿着管道外壁传播,称为间接耦合分量。同时激励信号会在管壁上激发出感应涡流,对直接耦合分量的传播形成阻碍作用,使得直接耦合分量快速衰减。因为间接耦合分量衰减较慢,在远场区,间

接耦合分量强于直接耦合分量,因此,间接耦合分量会再次穿透管壁向管内传播,形成二次穿透现象。间接耦合分量在传播过程中 2 次穿透管壁,因而带有缺陷信息。通过提取检测信号中的相关特征,就可以实现对缺陷的定量检测^[14-15]。

由于金属平板构件不具备管道的屏蔽作用,当传感器置于平板上方时,穿透平板向下传播的磁场由于受到衰减而弱于板上磁场,因而在磁场传播过程中,板下磁场会一直弱于板上磁场,从而无法实现二次穿透和远场涡流现象^[16-17]。课题组通过给传感器加装 UTC 结构来模拟管道的作用,达到抑制直接耦合分量的目的,使得间接耦合分量在远场区再次穿透平板抵达检测线圈,从而在平板构件上实现远场涡流现象,其原理见图 1。

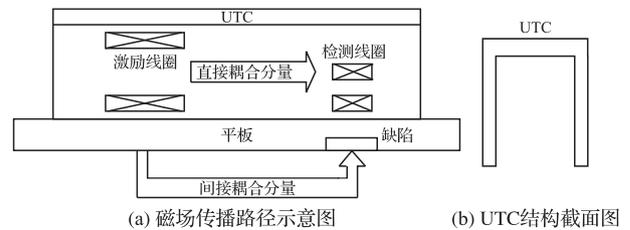


图 1 平板远场涡流原理

Fig.1 Principle of flat remote field eddy current

传统远场涡流采用正弦激励,其远场区距离远,传感器尺寸大,检测信号特征信息少。脉冲激励信号功耗低,频谱成分丰富,采用脉冲代替正弦作为激励信号,可以提取到更多缺陷信息^[17]。采用脉冲激励时感应电压波形见图 2。从图中可以看出,检测信号存在 2 个正峰值,分别对应的是直接耦合分量与间接耦合分量。其中,直接耦合分量的正负峰值分别对应了脉冲信号的上升沿与下降沿。前期研究成果表明,提取最后一个过零时间点的变化量便可实现对缺陷的检测。

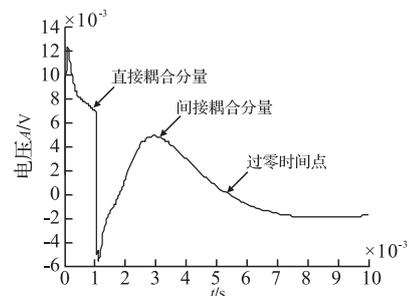


图 2 感应电压信号

Fig.2 The signal of induced voltage

2 仿真模型的建立

本文采用有限元软件 ANSYS 进行建模仿真。模型中,金属平板长度为 200 mm,宽度为 200 mm,厚度为 10 mm;UTC 结构长度为 175 mm,内部高度为 34 mm,宽度为 34 mm,壁厚 10 mm,其与被测金属平板的材质均为铝;激励线圈长度为 20 mm,宽度为 30 mm,高度为 30 mm,匝数为 100 匝;检测线圈长度为 6 mm,内径为 2 mm,外径为 4 mm,匝数为 800 匝。激励与检测线圈的间距为 25 mm。本文共建立了 3 种不同结构的传感器模型。

模型 1 称为连通磁路传感器。其在传统远场涡流传感器的基础上给激励与检测线圈加装“工”字型磁芯,磁芯材料为铁氧体,以便引导更多的磁场穿透管壁沿管外传播,起到增强检测信号的作用。

模型 2 称为带屏蔽盘的传感器。其在模型 1 的基础上,给激励与检测线圈中间加装屏蔽盘,来阻碍直接耦合分量的传播,起到抑制磁场直接耦合分量的作用。其中屏蔽盘长度为 5 mm,宽度为 33 mm,高度为 33 mm。

模型 3 称为检测线圈带屏蔽罩的传感器。其在模型 2 的基础上给检测线圈加装屏蔽罩,来阻止直接耦合分量抵达检测线圈,进一步抑制磁场。其中屏蔽罩长度为 18 mm,宽度为 16 mm,高度为 14 mm,厚度为 2 mm。

3 种模型分别见图 3(为了便于观察,部分外侧构件没有画出)

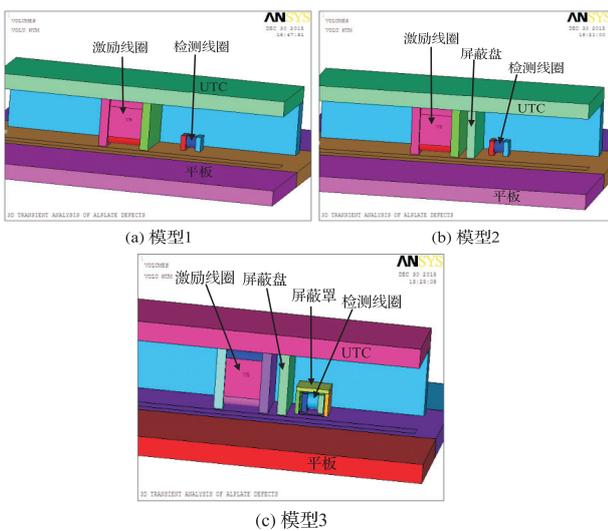


图 3 3 种传感器模型

Fig.3 Three kinds of models

3 3 种仿真模型的分析

3.1 连通磁路模型的仿真结果

为了研究连通磁路传感器对平板表面缺陷的检测能力,仿真中给激励线圈加载幅值为 100 V、频率为 100 Hz、占空比为 10% 的脉冲信号,并在平板表面设置长度为 20 mm,宽度为 2 mm,深度分别为 3 mm、5 mm、7 mm 的缺陷。仿真结果见图 4。从图中可以看出:在无缺陷时,过零时间最大;随着缺陷深度加深,过零时间越来越小,表明连通磁路传感器可以实现对平板表面缺陷的检测。

由于连通磁路传感器只是通过 UTC 构件上的感应涡流来衰减磁场的直接耦合分量,感应电压中直接耦合分量仍然较强,使得激励与检测线圈之间必须保持一个较远的距离,这制约了传感器对缺陷的检测能力。因此,拟在激励与检测线圈之间加装屏蔽结构,加强对磁场直接耦合分量的抑制,来达到拉近检测线圈,提高检测灵敏度的目的。

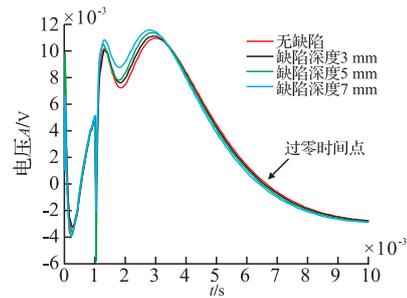


图 4 模型 1 在不同深度缺陷下的波形

Fig.4 The induced signal of model one with different defects

3.2 带屏蔽盘模型的仿真结果

模型 2 在激励与检测线圈之间加装屏蔽盘来达到抑制磁场直接耦合分量的目的,仿真结果见图 5。与模型 1 相比,带屏蔽盘传感器的直接耦合分量进一步衰减,间接耦合分量有所增强。同时,带屏蔽盘的传感器其远场区距离激励线圈更近,从而使得检测线圈可以更加靠近激励线圈,最终达到增强检测信号幅度,提高检测灵敏度的目的。

为了从原理上说明屏蔽盘的对磁场直接耦合分量的抑制作用,在此给出 UTC 结构内部磁场直接耦合分量的分布见图 6。从图中可以看出,激励线圈产生的磁场直接耦合分量传播到屏蔽盘结构时,由于屏蔽盘为高导磁材料,磁场在此会产生明显的汇聚,屏蔽盘在沿磁场传播路径上的厚度较小,在与传播路径相垂直的方向上长度较大,因此,聚集在屏蔽盘内部的磁场分量将会改变其传播路径,大部分磁场会向 UTC 结构附近传播,只有少部分磁场分量会穿透屏蔽盘接着向前传播。从图中可以明显地

看出,经过屏蔽盘的衰减作用之后,UTC 结构内的磁场直接耦合分量明显减弱,从而起到了进一步抑制磁场直接耦合分量的作用。

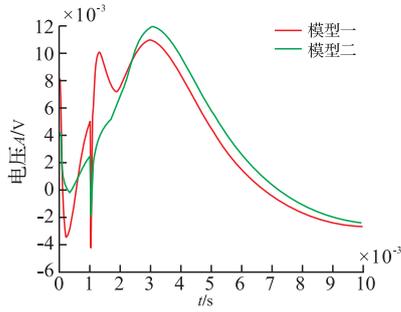


图5 模型2与模型1的波形比较

Fig.5 Comparison between Model one and Model two

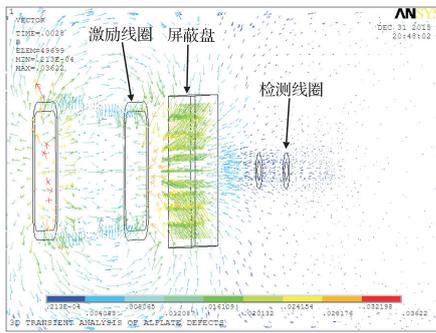


图6 磁场分布图

Fig.6 Magnetic field distribution

为了比较以上2个模型对缺陷的检测灵敏度,计算出2个模型在不同深度下过零时间变化量,见图7。可以看出,不同深度下,模型2的过零时间变化量更大;并且模型2的曲线斜率大于模型1,这说明,模型2对缺陷的检测灵敏度更高。

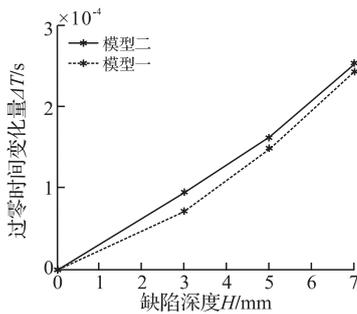


图7 模型2与模型1检测灵敏度对比

Fig.7 Comparison of defects detection sensitivity

以上仿真中,屏蔽盘采用的是单层铁氧体材料,为了对比分析不同特性材料对直接耦合分量抑制的效果,在此仿真分析了屏蔽盘为铁氧体、硅钢、铝3种材料的效果。3种材料属性见表1,其中铁氧体和硅钢具有较高的磁导率;铝具有较高的电导率。不同屏蔽材料下模型的仿真结果见图8(因为铁氧体和硅钢的曲线过于相似,所以只能分辨出2条曲

线),可以看出,高导磁材料对直接耦合分量具有更好的抑制能力;进一步对比仿真数据表明,抑制能力最强的材料为铁氧体。

表1 不同材料的属性

Tab.1 The properties of different materials

	铁氧体	硅钢	铝
相对磁导率	1 000	4 000	1
电阻率/($\Omega \cdot m$)	∞	0.1	2.65E-8

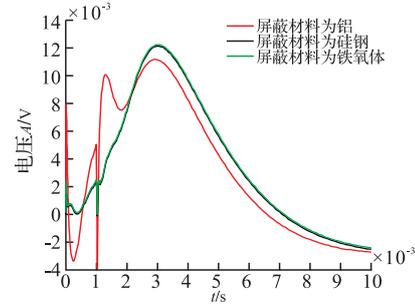


图8 不同屏蔽材料对感应电压波形的影响

Fig.8 The influence of different materials on induced signal

在仿真分析了屏蔽盘为单层结构的基础上,进一步仿真研究了不同材料相互组合的多层屏蔽结构的检测效果。在此,设计了“铁氧体+铜+铝”的组合屏蔽结构。其通过高导磁材料铁氧体引导和聚集磁场的直接耦合分量,然后利用高导电材料铜和铝上的感应涡流对其进行抑制,仿真结果见图9。从图中可以看出,组合屏蔽结构对磁场的抑制能力与单层屏蔽结构基本相当。因此,从传感器结构的简单化以及原材料的一致性上考虑,本文选择单层铁氧体材料作为屏蔽盘。

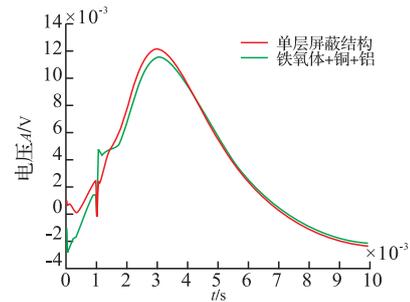


图9 组合屏蔽结构对磁场的抑制能力

Fig.9 The restraining capability of composite structure

3.3 检测线圈加屏蔽罩的仿真结果

前文的仿真结果表明,屏蔽盘结构有效地实现了对磁场直接耦合分量的抑制,但从原理上分析,还可以通过给检测线圈加装屏蔽罩来进一步抑制到达其附近的直接耦合分量,由此可建立模型3,见图10。从图中可以看出,传统脉冲远场涡流检测中的直接耦合分量所产生的正负峰值特征消失,表明经过UTC、屏蔽盘以及屏蔽罩的衰减作用后,磁场直接耦合分量几乎完全被抑制。根据 Darko.Vasic 的

研究,直接耦合分量的负峰值可以用来对上下表面缺陷进行分类识别^[18]。因此,给检测线圈加装屏蔽罩完全抑制了直接耦合分量的传播,使检测信号中的部分有用特征信息消失,该结构不能满足实际检测需求。

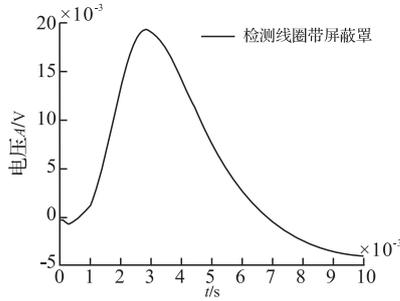


图 10 模型 3 的感应电压波形

Fig.10 The induced signal of model three

综合分析以上仿真结果,连通磁路传感器可以实现对缺陷的检测,但其对磁场直接耦合分量的抑制作用不强,带屏蔽盘的传感器既能够有效抑制磁场直接耦合分量,又保留了感应电压中负峰值等有用特征信息;检测线圈带屏蔽罩的传感器对磁场直接耦合分量的抑制作用最强,但因为缺失了负峰值等有用缺陷信息,并不适用于实际的检测。因此,带屏蔽盘的传感器的检测性能更优。

4 基于屏蔽盘结构的连通磁路传感器检测能力分析

4.1 对不同走向缺陷的检测

在上文建立的带屏蔽盘的传感器模型中,缺陷走向与金属平板上的感应涡流方向垂直。为了分析传感器对不同走向缺陷的检测能力,在原先模型的基础上对缺陷走向进行调整,分别为与感应涡流方向成 45°以及和感应涡流方向平行,模型中缺陷深度分别为 3 mm,5 mm,7 mm。仿真分析不同走向缺陷条件下过零时间变化量与缺陷深度之间的关系,结果见图 11。图中可见,当缺陷走向与感应涡流方向垂直时,曲线斜率最高,表明传感器对此类缺陷的检测灵敏度最高;当缺陷走向与感应涡流方向平行时,曲线斜率最低,表明传感器对此类缺陷检测

灵敏度也最低。这也进一步说明了脉冲远场涡流用于检测非磁性材料时,影响检测信号的主要是缺陷对涡流的扰动。

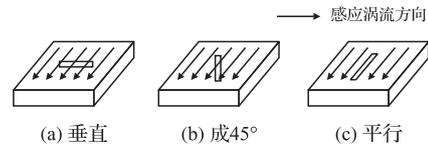


图 11 对不同走向缺陷的检测能力

Fig.11 Defects detection sensitivity of different orientations

4.2 对缺陷深度定量检测

利用带屏蔽盘的传感器对无缺陷平板以及存在深度为 3 mm、5 mm、7 mm 缺陷的平板进行检测,感应电压过零时间依次为 0.006 474 s、0.006 381 s、0.006 312 s、0.006 221 s。可以发现,随着缺陷深度增加,过零时间越来越小。以无缺陷时过零时间为基准,计算出不同深度下过零时间的变化量,绘制出过零时间变化量与缺陷深度的关系图,见图 12。可以看出,过零时间变化量与缺陷深度之间存在近似线性的关系,可以实现对缺陷深度的定量检测。

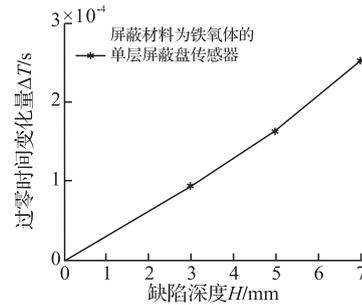


图 12 缺陷深度的定量检测

Fig.12 Quantitative detection of defects' depth

4.3 对不同板厚的检测

为了研究传感器对大厚度平板的检测能力,利用带屏蔽盘的传感器分别对厚度为 15 mm、20 mm、25 mm 的金属平板进行仿真。为了增强对大厚度平板的穿透能力,此时激励线圈尺寸长度为 40 mm、宽度为 40 mm、高度为 40 mm,激励与检测线圈距离调整为 35 mm。仿真结果见图 13,可以看出,随着缺陷深度增加,过零时间越来越小,符合如图 12 中远场涡流对缺陷定量检测的规律,证明带屏蔽盘的传感器可以实现对大厚度平板上缺陷的检测。

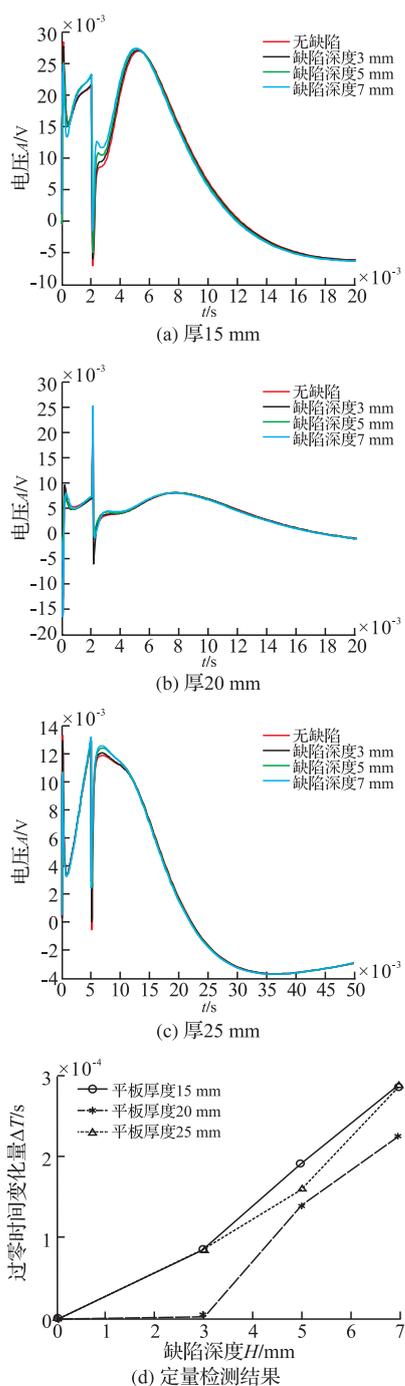


图13 对大厚度平板的检测能力

Fig.13 The capability of detection of large depth flat geometry

5 结语

脉冲远场涡流检测中的磁场抑制与信号增强技术是目前无损检测中的研究热点,在前期实现信号增强的基础上,从抑制脉冲远场涡流中磁场直接耦合分量的角度出发,设计了带不同屏蔽结构的传感器模型,仿真结果表明:高导磁材料具有较强的磁场抑制能力,单层屏蔽结构与组合屏蔽对磁场的抑制能力相当,带屏蔽盘的传感器能够在保留有用信息的基础上提高对缺陷的检测灵敏度,当缺陷走向与

感应涡流垂直时该传感器的检测灵敏度最高,经过改进后,该传感器能够实现对25 mm厚的金属平板上缺陷的检测。

参考文献(References):

- [1] 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):74-76.
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): 74-76. (in Chinese)
- [2] SUN Y, Ouyang T, Udpa S. Multi-layer Aircraft Structure Inspection Using Super-Sensitive Remote-Field Eddy - Current System [J]. Aip Conference, 2001, 557(1): 1906-1913.
- [3] VASIC D, BILAS V, AMBRUS D. Measurement of Ferromagnetic Tube Wall Thickness Using Pulsed Remote Field Technique [C]//In Proc 12th IMEKO TC4 Int Symp, Zagreb, Croatia, 2002: 468-472.
- [4] Sun Y, Wan W, Yang X, et al. Applications of Motorized Rotational RFEC Probes in Thick and Multi-layer Structure Crack Detection [C]//Review of Progress in Quantitative Nondestructive, 2008: 336-343.
- [5] 邢丽冬,于盛林,曲民兴.三维远场涡流探头的设计与应用研究[J].中国机械工程,2007,18(4):423-426.
XING Lidong, YU Shenglin, QU Minxing. Design of Three-dimensional Remote Field Eddy Current Probe and Its Applications [J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(4): 423-426. (in Chinese)
- [6] 刘春艳,罗飞路,徐小杰.远场涡流探头改进的有限元仿真[J].无损检测,2006,28(9):469-470,501.
LIU Chunyan, LUO Feilu, XU Xiaojie. The Finite Element Simulation of the Improvement in Remote Field Eddy Current Probe Structure [J]. Nondestructive Testing, 2006, 28(9): 469-470, 501. (in Chinese)
- [7] 刘春艳,罗飞路,徐小杰,等.基于ANSYS的远场涡流建模与仿真[J].兵工自动化,2005,24(5):37-38.
LIU Chunyan, LUO Feilu, XU Xiaojie, et al. Modeling and Simulation of Remote Field Eddy Current Based on ANSYS [J]. Ordnance Industry Automation, 2005, 24(5): 37-38. (in Chinese)
- [8] 吴德会,黄松岭,赵伟,等.管道裂纹远场涡流检测的三维仿真研究[J].系统仿真学报,2009,21(20):6626-6629.
WU Dehui, HUANG Songling, ZHAO Wei, et al. Research on 3-D Simulation of Remote Field Eddy Current Detection for Pipeline Cracks [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(20): 6626-6629. (in Chinese)

- [9] 赵雪岩,张科英,杨卫国,等.基于UTC结构的非磁性平板脉冲远场涡流传感器参数优化的仿真设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(3):61-65. ZHAO Xueyan, ZHANG Keying, YANG Weiguo, et al. Simulation Optimization Design of Pulsed Remote Field Eddy Current Probe Based on UTC Structure for Nonmagnetic Material[J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2014, 15(3): 61-65. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 杨宾峰,张辉,荆毅飞,等.基于脉冲激励的远场涡流检测机理及缺陷定量评估技术[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(6):45-49. YANG Bin Feng, ZHANG Hui, JING Yifei, et al. Inspection Principle and Defect Quantitative Estimation of Pulsed Remote Field Eddy Current Technique[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(6): 45-49. (in Chinese)
- [12] 张辉,杨宾峰,荆毅飞,等.基于连通磁路的脉冲远场涡流传感器设计及缺陷定量评估与分类识别[J].传感技术学报,2012,(10):1370-1375. ZHANG Hui, YANG Bin Feng, JING Yifei, et al. Defect Quantification and Classification Based on Design of Connected Magnetic Core Pulsed Remote Field Eddy Current Probe[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(10): 1370-1375. (in Chinese)
- [13] 杨宾峰,张辉,周义建,等.新型脉冲远场涡流传感器检测性能的仿真分析[J].失效分析与预防,2014(4):193-197,31. YANG Bin Feng, ZHANG Hui, ZHOU Yijian, et al. Simulation Analysis the Performance of New Pulsed Remote Field Eddy Current Probe. Failure Analysis and Prevention, 2014(4): 193-197, 231. (in Chinese)
- [14] 邢丽冬,曲民兴.远场涡流技术检测带翼片管的研究[J].无损检测,2004,26(11):554-557. XING Lidong, QU Minxing. Research on the Remote Field Eddy Current Testing for the Tube with Ribs [J]. Nondestructive Testing, 2004, 26(11): 554-557. (in Chinese)
- [15] SUN Y, OUYANG T. Detection of Cracks in Multi-layer Aircraft Structures with Fasteners Using Remote Field Eddy Current Method[J]. Proc SPIE, 2000, 3994. doi:10.1117/12.385030.
- [16] 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)
- [17] 陈佩华.平板导体缺陷复合式涡流检测技术研究[D].杭州:浙江大学,2014. CHEN Peihua. Study on Multi-Mode Eddy Current technology for Defect Inspection of Planar Conductive Structures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese)
- [18] VASIC D, BILAS V, AMBRUS D. Pulsed Eddy-current Nondestructive Testing of Ferromagnetic tubes [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2004, 53(4): 1289-1294.

(编辑:徐敏)