

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

张超¹, 王晓锋¹, 杨宾峰^{1,2}, 赵雪岩¹, 张战斌¹, 张辉³

(1.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077;

2.南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室,江西南昌,330063;

3.空军工程大学科研部,陕西西安,710051)

摘要 在分析脉冲远场涡流检测原理的基础上,采用U型罩结构模拟管道,成功的将脉冲远场涡流技术应用到了非磁性金属平板的检测中;仿真设计了空心、聚磁、连通磁路3种传感器模型,比较了不同模型过渡区的远近、对缺陷检测的灵敏度及对不同厚度平板的检测能力。仿真结果表明;带连通磁路的传感器模型不仅可以将激励与检测线圈之间的距离从20 mm缩短至10 mm,还可以提高对缺陷检测的灵敏度,同时,带连通磁路的传感器模型对厚度为11 mm以上的平板具有更强的检测能力。

关键词 非磁性金属平板;脉冲远场涡流;传感器;仿真设计

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.017

中图分类号 TG115 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0073-05

Simulation Design of Pulsed Remote Field Eddy Current Probe for Nonmagnetic Metal Aviation Component

ZHANG Chao¹, WANG Xiao-feng¹, YANG Bin-feng^{1,2}, ZHAO Xue-yan¹, ZHANG Zhan-bin¹, ZHANG Hui³

(1.Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2.Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang 330063, China; 3.Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Based on the analysis of pulsed remote field eddy current principle, this article applied the pulsed remote field eddy current technology in the detection of nonmagnetic aviation metal plate components with using U-type component, simulated and designed hollow model, assembled magnetic model, connected magnetic circuit model, compared the distance of the three models' transition zone, the defects detection sensitivity, and the detection capability of the three models for different thickness plates. The simulation results show that, with connected magnetic circuit of the sensor model can not only narrow the distance between the excitation and detection coil from 20 mm to 10 mm, but also can improve the sensitivity of defects detection, while it has a stronger detection capability for more than 11 mm thickness plates.

Key words: nonmagnetic metal plate; pulsed remote field eddy current; sensor; simulation design

收稿日期: 2012-11-23

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资助项目(2011JQ6010); 教育部重点实验室开放基金资助项目(ZD201229004)

基金项目: 张超(1989-), 男, 山西晋城人, 硕士生, 主要从事测试计量技术及仪器研究。

E-mail: zhangchao-168@163.com

飞机机身采用多层铝合金结构,在长时间飞行后,由于应力载荷的作用,会产生疲劳裂纹,从而给飞行安全带来重大隐患,极易导致重大安全事故。因此,对机身采用的非磁性金属构件进行无损检测及定量评估有重大意义和实用价值。

目前,对飞机机身进行无损检测的方法主要有:超声波检测、射线检测、传统涡流检测等。超声波检测法需要耦合剂,且难以适用于对多层结构的检测。射线检测需要进行防护,因而不适用于外场检测。传统涡流检测受集肤效应的影响,难以对深层缺陷进行检测^[1-2]。脉冲远场涡流检测技术将脉冲涡流与远场涡流技术相结合,具有频谱成分丰富又不受集肤深度限制的优势^[3],在大厚度构件无损检测中已有广泛应用。

对于飞机机身采用大面积多层铝合金结构而言,其在检测过程中可以近似等效为非磁性金属平板构件,美国 Iowa state university 的 Y.S.Sun 等人将远场涡流成功的应用到了飞机多层铆接结构的检测中,但是其没有给出传感器的具体设计方案^[4-5];日本学者 N.Kasai 等人针对铁磁性金属平板的检测,设计了一种新型的远场涡流传感器,实现了平板中缺陷的定量检测^[6],但其采用正弦激励信号,无法对缺陷进行分类识别;南京航空航空大学的王新等人设计了一种带屏蔽结构的平板远场涡流检测传感器,实现了对铁磁性平板中裂纹缺陷的检测,但其设计的传感器无法对非磁性金属平板进行检测^[7]。

针对上述问题,本文基于脉冲远场涡流检测技术,设计了3种传感器模型,并通过仿真比较了3种传感器模型过渡区的远近、对缺陷检测的灵敏度以及对大厚度平板的检测能力,最终得到了优化后的传感器结构模型。本文的研究结果可以为脉冲远场涡流技术在非磁性金属平板无损检测中的应用提供理论依据。

1 非磁性金属平板脉冲远场涡流检测原理

传统远场涡流技术主要应用于铁磁性管道的检测,其传感器由相距2~3倍管径的激励和检测线圈构成。激励线圈感应出的磁场直接耦合分量沿管道轴向传播,磁场间接耦合分量穿出管外沿着管壁传播,由于管壁感应出的涡流对直接耦合分量的衰减作用,使得远场区的间接耦合分量将强于直接耦合

分量,从而发生磁场的2次穿透现象,最终形成远场涡流效应^[8]。

对于金属平板构件的检测,由于没有管道的屏蔽作用,因而难以实现磁场的2次穿透,本文将 UTC(U-type component)构件罩于激励和检测线圈之上,用以模拟管道结构,见图1。直接耦合分量在 UTC 结构的作用下快速衰减,而间接耦合分量衰减较慢,其在远场区将会强于直接耦合分量,并发生2次穿透。由于2次穿透平板的磁场带有缺陷信息,从而可实现对非磁性金属平板的检测。

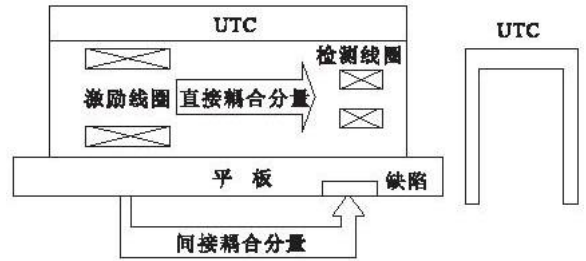


图1 平板构件远场涡流检测示意图

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

在脉冲信号激励下,激励线圈上的激励电流和检测线圈上的感应电压波形分别见图2~3。从图中可以看出,检测线圈感应电压波形的正负峰值是受到磁场直接耦合分量影响产生的,且其分别对应于激励电流上升沿和下跳沿。当激励电流关断后,感应电压主要体现磁场的间接耦合分量。克罗地亚学者 Darko Vasic 在文献中利用检测电压的最后一个过零时间作为特征量对管道属性进行了定量检测^[9],本文题借鉴前人相关研究成果,利用图3中的最后一个过零时间作为特征量对非磁性金属平板进行检测。

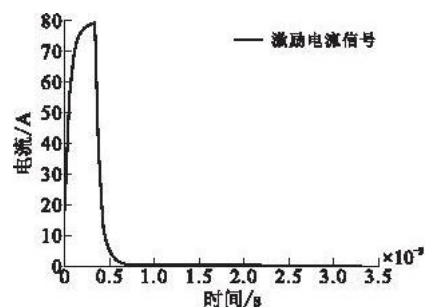


图2 激励电流信号

Fig. 2 The signal of exciting current

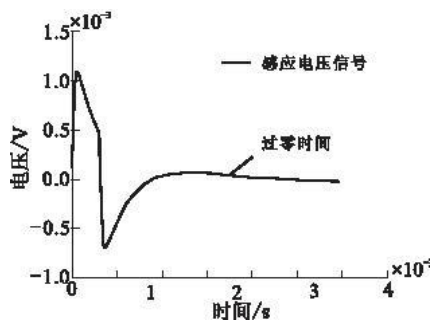


图 3 感应电压信号

Fig. 3 The signal of induced voltage

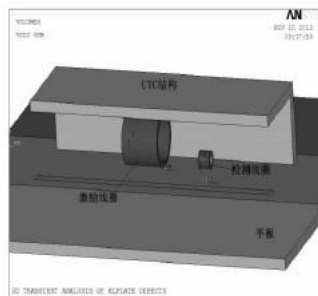
2 脉冲远场涡流传感器模型的建立

本文采用大型有限元仿真软件 ANSYS,分别建立了 3 种不同结构的非磁性金属平板远场涡流检测模型。3 种模型建立相同的平板和 UTC,其中平板长、宽均为 200 mm,厚 5 mm,UTC 长 132 mm,内部宽 34 mm,高 31 mm,厚 5 mm。平板与 UTC 相对磁导率均为 1,电阻率均为 $2.65E-8 \Omega \cdot m$ 。

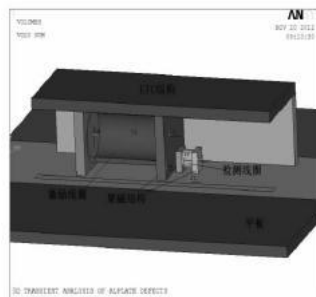
模型 1 中激励与检测线圈间距 20 mm,均为空心结构。激励线圈长 20 mm,外半径为 12 mm,厚度 2mm,共绕制 300 匝;检测线圈长为 6 mm,外半径为 4 mm,厚 2 mm,共绕制 800 匝。绕线的相对磁导率均为 1,电阻率均为 $1.724E-8 \Omega \cdot m$ 。

模型 2 为了增强检测线圈的感应信号,为检测线圈加装了“工”字型磁芯,为激励线圈加装了聚磁板。但是激励线圈加装聚磁板后使得线圈的等效电感增大,导致激励电流发生了失真。为了减小激励线圈电感,我们将激励线圈拉长至 40 mm,匝数减少为 100 匝。

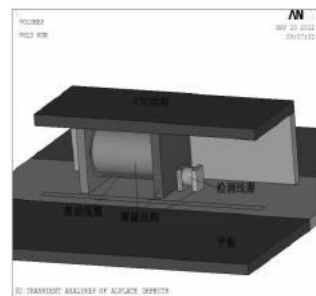
为了进一步增强激励线圈对磁场的汇聚能力,模型 3 在模型 2 基础上为激励线圈加装了磁芯,与聚磁板形成了连通磁路。模型 2、3 中聚磁结构相对磁导率均为 1 000。为了将模型更清晰的显示,我们在绘图时将 UTC 前板去掉,所得 3 种不同结构传感器模型见图 4。



(a) 模型1



(b) 模型2



(c) 模型3

图 4 3 种不同结构的脉冲远场涡流传感器模型

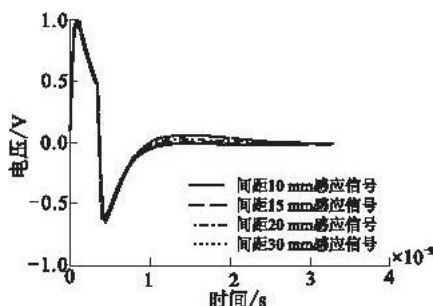
Fig. 4 Three PRFEC sensor models of different structures

3 仿真结果及分析

3.1 3 种模型过渡区远近的比较

传统脉冲远场涡流检测中存在近场区,远场区和过渡区,在铁磁性管道的检测中,检测线圈通常置于远场区。但是 H.Fukutom 等人研究发现,在非磁性金属管道远场涡流检测中,将检测线圈置于过渡区时,其对缺陷检测灵敏度更高^[10],因此仿真中将检测线圈置于过渡区。

本文在 3 种模型的基础上,分别仿真计算了检测与激励线圈间距 10 mm、15 mm、20 mm、30 mm 4 种情况下的瞬态感应电压信号,用来比较 3 种模型过渡区远近。为了便于观察,将所得检测信号进行归一化处理,归一化后检测信号波形见图 5。



(a) 模型1

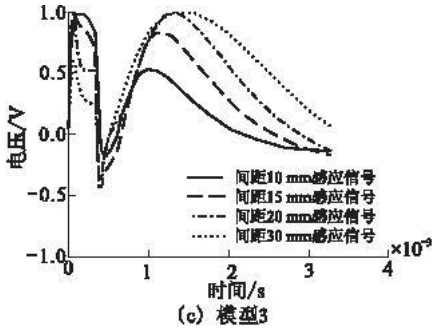
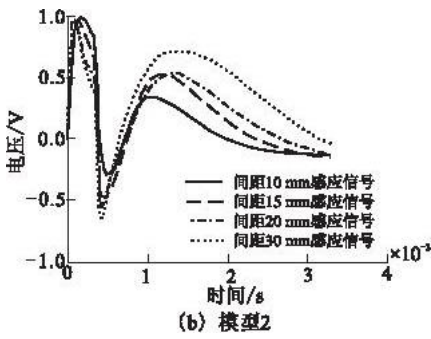


图5 不同线圈间距时的感应电压波形

Fig. 5 Induced signals from various distances between the exciter coil and the detector coil

从图5(a)中可以看出,当激励线圈与检测线圈间距10 mm和15 mm时,模型1中检测线圈瞬态感应信号只有直接耦合分量,而当间距为30 mm时,感应信号过零特征量基本消失,只有当激励与检测线圈间距20 mm时,感应信号过零特征最明显。从图5(b)、(c)中可以看出,检测线圈瞬态感应信号均有直接和间接耦合分量,但是随着两线圈间距的拉大,感应信号的过零时间特征值逐渐变得微弱,当检测与激励线圈间距10 mm时,感应信号过零特征最明显,检测效果最好。通过比较可以看出,模型1激励与检测线圈最优间距为20 mm,模型2、3激励与检测线圈最优间距为10 mm,所以模型2、3在拉近过渡区方面有更大的优势。

3.2 3种模型对缺陷检测灵敏度的比较

为了比较3种不同结构传感器模型对缺陷检测的灵敏度,本文在平板下表面建立长为20 mm,宽为3 mm,深分别为1、2、3、4 mm的4组缺陷,分别计算3种模型在不同缺陷深度情况下检测线圈的瞬态感应信号,并提取过零时间,绘制了3种模型检测信号过零时间随缺陷深度变化的曲线,见图6。

从图6中可以看出,随着裂纹缺陷深度的增加,感应信号的过零时间变化量逐步增大,且与缺陷深度变化量近似成线性关系。其中模型1曲线斜率最小,模型3曲线斜率最大,说明随着缺陷深度增加,模型3感应信号过零时间变化更明显。因此模型3对非磁性金属平板缺陷检测具有更高的灵敏度。

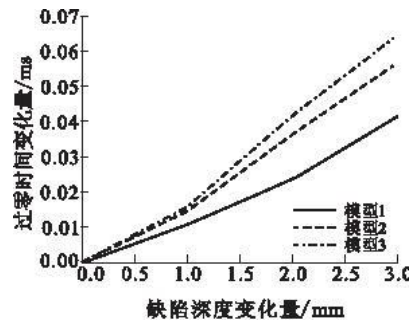


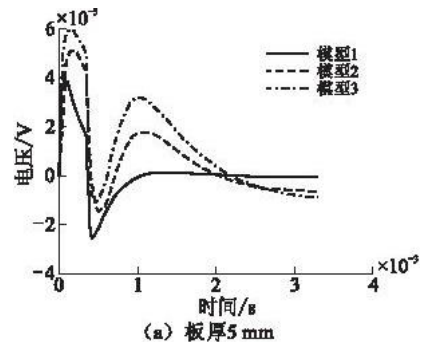
图6 过零时间随缺陷深度的变化曲线

Fig. 6 The zero-crossing time due to variation of crack depth

3.3 3种模型对不同厚度平板检测结果的比较

为了进一步比较3种不同结构传感器对于不同厚度平板的检测效果,分别计算了3种模型在板厚分别为5、7、9、11 mm时的感应信号。经过仿真验证,对于非磁性金属平板检测,只有当感应涡流集肤深度与平板厚度相当时,才可以实现远场涡流效应。因此当板厚为5 mm时,激励信号频率选择300 Hz;当板厚为7 mm时,激励信号频率选择150 Hz;当板厚为9 mm时,激励信号频率选择100 Hz;当板厚为11 mm时,激励信号频率选择50 Hz。仿真计算得到的3种模型在不同板厚下检测线圈瞬态感应信号波形见图7。

从图7中可以看出,3种模型在4种不同板厚的情况下,检测线圈瞬态感应信号都有间接耦合分量,说明在4种不同厚度平板检测中,3种模型均可以实现远场涡流效应。但是模型1的感应信号间接耦合分量非常小,其过零时间特征量也不明显,给特征量的提取造成了困难。在模型2和模型3中,模型3比模型2的感应信号幅值更大,过零时间特征量更为明显,有利于特征量的提取。因此,在对大厚度非磁性金属平板的检测中,传感器模型3有更强的检测能力。



(a) 板厚5 mm

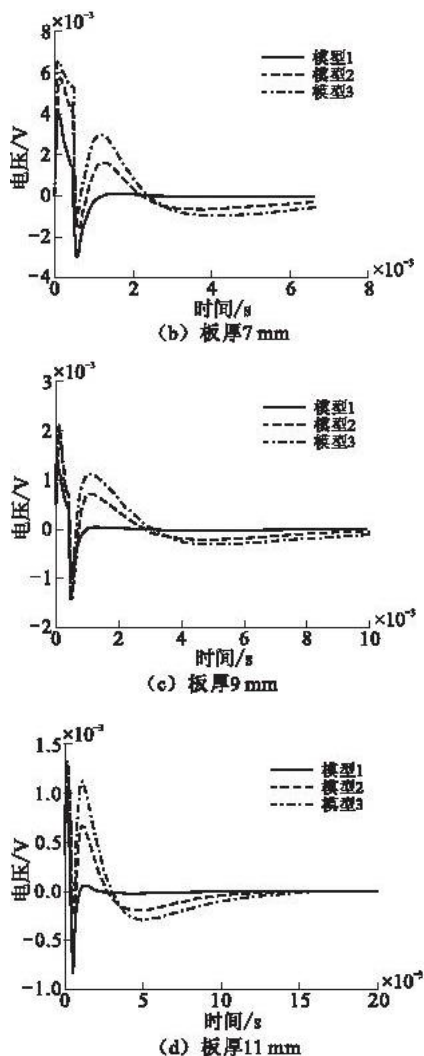


图7 3种模型测量不同厚度平板时感应电压

Fig. 7 Induced signals from various plate thickness using three models

4 结语

传统的无损检测方法对非磁性航空金属平板构件的检测存在诸多问题,脉冲远场涡流检测技术具有检测信号频谱成分丰富、检测深度大、适合外场检测等优点,因此本文采用脉冲远场涡流技术对非磁性金属平板构件的检测问题进行了仿真研究,设计了3种不同结构的传感器模型,分别比较了其过渡区的远近、缺陷检测的灵敏度以及对大厚度平板的检测能力。研究表明,带连通磁路的传感器模型不仅可以拉近过渡区距离,增强对大厚度平板的检测能力,同时其对缺陷检测具有更高的灵敏度。本文仿真分析的结果可以指导相应的实验研究,对非磁性航空金属构件脉冲远场涡流传感器的研发具有重要意义。

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] 李国华,吴森.现代无损检测与评价[M].北京:化学工业出版社,2009.

LI Guohua, WU Miao. Modern non-destructive testing & evaluation [M]. Beijing: Chemical industry press, 2009. (in Chinese)

[3] 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 Bin Feng, 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)

[4] Sun Y S, Zhu Harry, Moran Tom. Detecting cracks under bushings in aircraft structures using FG RFEC & SSEC technique[C]//ASIP conference. Memphis, TN, [s. n.], 2004:1-8.

[5] Sun Y S, Wan W, Yang W, et al. Applications of motorized RFEC probes in thick aircraft structure crack detection[J]. QNDE, 2007, 18(4):125-133.

[6] 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.

[7] 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)

[8] Vasic D, Bilas V, Ambruš D. Measurement of ferromagnetic tube wall thickness using pulsed remote field technique [C]//Proc 12th IMEKO TC4 int symp, Zagreb, Croatia, [s. n.], 2002:468-472.

[9] Vasic D, Bilas V, Ambruš D. Pulsed eddy current nondestructive Testing of ferromagnetic tubes [C]//IEEE transaction on instrumentation and measurement technology, 2003, 53(4):1289-1294.

[10] Fukutomi H, Takagi T, Nishikawa M. Remote field eddy current technique applied to non-magnetic steam generator tubes [J]. NDT & E international, 2001, 34: 17-23.

(编辑:徐楠楠)