

脉冲涡流检测中参数影响的仿真分析与实验研究

张 辉¹, 杨宾峰², 王晓锋², 赵玉丰²

(1. 空军工程大学科研部, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安, 710077)

摘要 脉冲涡流检测过程中传感器尺寸及激励参数对检测结果影响较大, 对其进行优化设计可提高检测系统的性能。在分析矩形脉冲涡流传感器工作原理的基础上, 采用 ANSYS 仿真软件建立了脉冲涡流的仿真模型, 仿真分析了传感器尺寸变化对铝板中涡流衰减规律的影响, 激励脉冲频率和占空比变化对缺陷检测灵敏度的影响, 仿真结果表明: 当激励线圈长度增加时, 涡流在铝板中的衰减速度变慢, 而当激励线圈宽度和高度增加时, 涡流在铝板中的衰减速度变快; 激励频率与占空比对缺陷检测灵敏度的影响与被测试件厚度有关, 对于厚度较大的板材, 应适当降低激励频率并提高占空比。最后采用实验的方法对仿真结果进行了验证, 实验与仿真结果相一致, 证明了仿真结论的正确性。

关键词 脉冲涡流; 矩形传感器; 激励频率; 占空比; 优化设计

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.01.012

中图分类号 TG115 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)01-0052-06

脉冲涡流无损检测技术是涡流检测的新发展, 与单频涡流检测技术相比较, 由于脉冲激励频谱较宽, 其检测信号就包含更多有关缺陷的信息, 在不改变激励频率的情况下, 其只需一次扫描就可以实现对被测试件中不同深度缺陷的检测, 因而脉冲涡流技术成为无损检测领域的一个研究热点^[1-3]。

传统的脉冲涡流采用圆柱形线圈作为激励线圈, 采用同轴的圆柱形线圈或位于激励线圈底部的磁传感器(Hall 传感器或 GMR 传感器)来检测受到缺陷扰动磁场的变化。为了提取出只受缺陷扰动的那部分磁场的变化, 必须对感应信号进行差分处理^[4-6], 从中减去无缺陷存在时的参考信号, 由于差分处理必须首先保证 2 个差分信号的同步, 否则容易引起较大的误差, 这就增加了信号处理的难度。

为了克服传统脉冲涡流检测中存在的问题, 本文设计了矩形脉冲涡流传感器, 采用实验与仿真相结合的方法, 研究了矩形脉冲涡流传感器检测过程中传感器尺寸、激励脉冲频率以及占空比的优化设计问题。

1 矩形探头脉冲涡流无损检测原理

传统脉冲涡流技术采用圆柱形激励线圈, 其在被测试件上感应的涡流呈封闭的圆环状流动, 当有缺陷存在时产生的扰动场以和激励场相反的方向穿过检测线圈, 由于激励场比缺陷引起的扰动场要强很多, 因此, 缺陷信息较难提取。

为了克服这个问题, 通过采用矩形线圈作为激励线圈, 其感应涡流在线圈底部的导体区域内朝同一个方向流动, 然后分别在线圈的两侧形成闭合。内径很小的 2 个正交检测线圈位于激励线圈底部的中央, 分别用来对缺陷引起的扰动场进行检测^[7-8]。新型脉冲涡流传感器结构见图 1。

采用图 1 所示的模型得到存在缺陷时空间 Y 向和 Z 向磁场的分布如图 2 和图 3 所示, 从图 2-3 中可以看出, 由于缺陷的存在, 原本均匀的感应场被破坏, 导致空间磁场分布出现变化。对于 Y 向磁场而言, 其在

* 收稿日期: 2011-077-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50807053; 51107149); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JQ6010)

作者简介: 张 辉(1977-), 男, 河南开封人, 博士, 主要从事电磁无损检测及信号处理研究。

E-mail: zhydhey@126.com

缺陷内部出现凹陷,见图 2。这是因为电流总是沿着电阻率小的方向流动,当金属导体中有缺陷存在时,沿着 X 向均匀流动的涡流就会向缺陷的边缘偏转,此时只有部分涡流沿着缺陷底部流过,最终导致 Y 向磁场在缺陷内部出现了凹陷,缺陷越深,从缺陷底部流过的涡流越少,则 Y 向磁场凹陷越厉害。同时,部分涡流顺着缺陷边缘发生偏转而形成 Z 向磁场,因为涡流偏转的方向性致使这 2 个信号在缺陷边缘处的方向刚好相反,见图 3。综合以上分析可以看出, Y 向和 Z 向磁场分布与缺陷的长度和深度存在一定的关系,通过分析空间磁场的分布,可以实现对缺陷的定量检测。

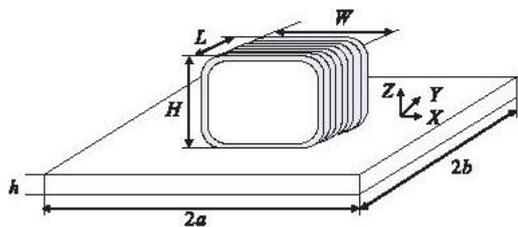


图 1 矩形探头脉冲涡流传感器示意图
Fig. 1 The schematic of rectangular PEC probe

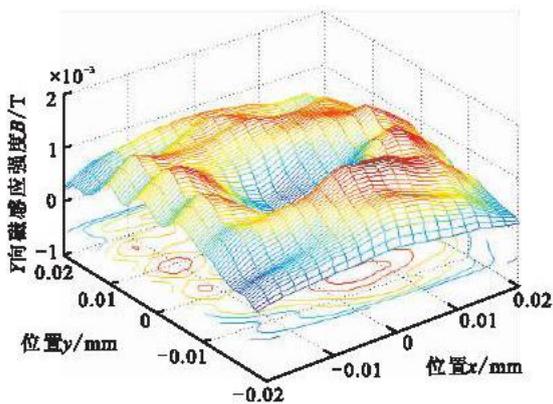


图 2 空间 Y 向磁场分布

Fig. 2 The space magnetic field distribution of ΔB_y

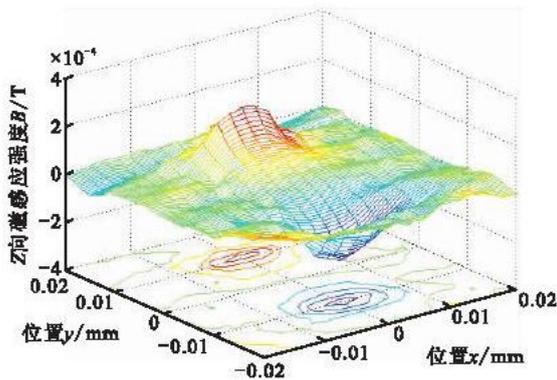


图 3 空间 Z 向磁场分布

Fig. 3 The space magnetic field distribution of ΔB_z

2 矩形探头脉冲涡流仿真模型的建立

采用 ANSYS 有限元仿真软件建立仿真模型,仿真参数如下所示:铝板的尺寸(长 \times 宽 \times 厚)为 200 mm \times 200 mm \times 5 mm,相对磁导率为 1,电阻率为 $2.65 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。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,高度为 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 $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ 。脉冲方波的电压为 12 V。仿真模型见图 4。

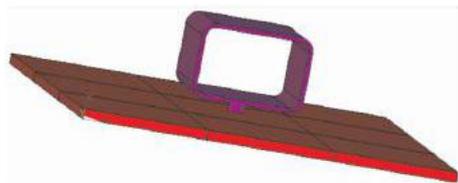


图 4 矩形激励探头的仿真模型

Fig. 4 The simulation model of rectangular probe

3 线圈尺寸改变对涡流衰减的影响

分别研究激励线圈的长度、宽度和高度改变时,感应涡流沿铝板厚度方向的衰减情况,其中,线圈长度改变时尺寸为 45 mm \times 25 mm \times 25 mm、45 mm \times 45 mm \times 25 mm、45 mm \times 65 mm \times 25 mm、45 mm \times 75 mm \times 25 mm;线圈宽度改变时尺寸为 25 mm \times 45 mm \times 25 mm、35 mm \times 45 mm \times 25 mm、45 mm \times 45 mm \times 25 mm、65 mm \times 45 mm \times 25 mm;线圈高度改变时尺寸为 45 mm \times 45 mm \times 15 mm、45 mm \times 45 mm \times 25 mm、45 mm \times 45 mm \times 35 mm、45 mm \times 45 mm \times 45 mm。

为了观察涡流衰减情况,取激励线圈正下方铝板表面到底部多条不同垂直路径上涡流密度值,做归一化处理后得到的涡流分布如图 5 所示,从图中可以看出,当激励线圈长度增加时,涡流在铝板中的衰减速度变慢,这样就有利于实现对表面下深层缺陷的检测,因此,为了提高对表面下缺陷的检测能力,应当使激励线圈的长度适当增加。

为了更好地研究激励线圈长度与涡流衰减的定量关系,取不同长度激励线圈正下方中心点处垂直路径上涡流做出衰减曲线,如图 6 所示,从图中可以看出,铝板中涡流的衰减快慢与激励线圈的长度是成反比的,对激励线圈长度进行优化设计可以提高表面下深层缺陷的定量检测效果。

同样研究了激励线圈宽度和高度改变对涡流衰减的影响,其衰减曲线分别如图 7 和图 8 所示,从图中可以看到,与线圈长度变化时的规律不同,当激励线圈宽度和高度增加时,涡流在铝板中的衰减速度变快。这是由于在研究线圈尺寸变化对涡流衰减的影响时,都保持线圈的匝数保持不变,这样,当线圈长度增加时,线圈的时常数减小,激励电流的上升沿变得陡峭,而当线圈宽度和高度增加时,线圈时常数增大,激励电流上升变缓,脉冲频谱中的有些频谱成份被消除,最终使得涡流衰减速度加快。

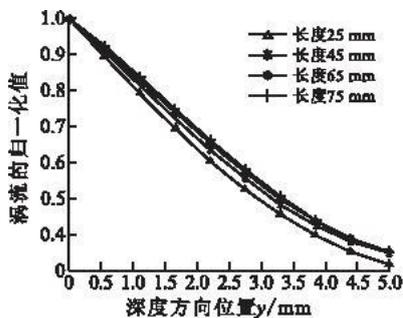


图 6 激励线圈长度不同时的涡流衰减曲线

Fig. 6 The eddy current attenuation for different coil lengths

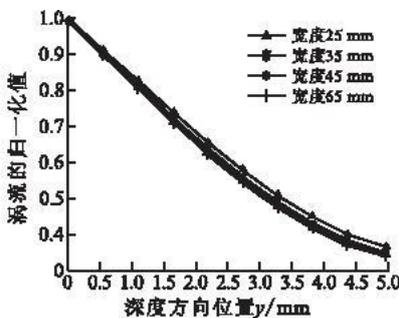


图 7 激励线圈宽度不同时的涡流衰减曲线

Fig. 7 The eddy current attenuation for different coil widths

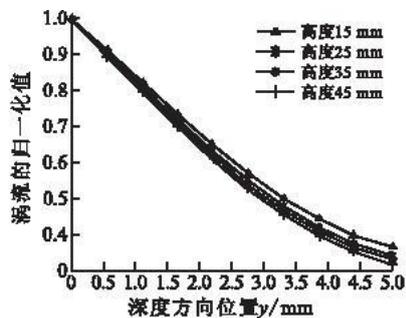


图 8 激励线圈高度不同时的涡流衰减曲线

Fig. 8 The eddy current attenuation for different coil high

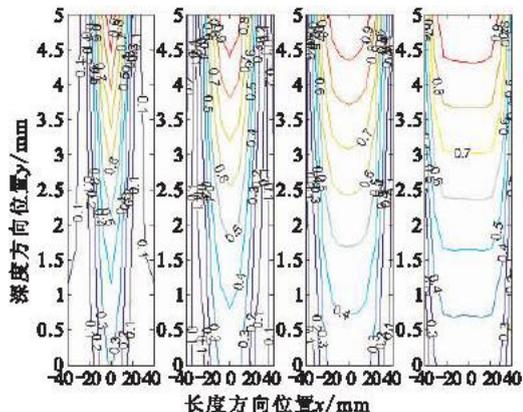


图 5 激励线圈长度不同时铝板厚度方向涡流密度等高线图

Fig. 5 The eddy current distribution for different coil lengths

通过以上分析可以发现,为了减慢铝板中涡流的衰减速度,提高矩形激励线圈对深层缺陷的检测能力,必须对激励线圈的长度、宽度以及高度进行优化设计。

4 激励频率对缺陷检测灵敏度的影响

仿真建立了铝板存在表面下裂纹缺陷的模型,分析了 3 种不同板厚情况下,激励频率变化对缺陷检测灵敏度的影响。当铝板厚度为 3 mm 时,不同激励频率得到的缺陷检测电压峰值曲线如图 9 所示,从图中可以看出,对于 3 mm 厚的铝板,缺陷检测灵敏度最高时的频率在 400 Hz 左右。这是由于当频率过低时,脉冲频谱集中在低频段,造成缺陷可检但灵敏度不高。当激励频率过高时,高频成分限制了集肤深度,所以检测灵敏度也将降低。

同样仿真分析了铝板厚度为 5 mm 和 7 mm 时,激励频率与表面下缺陷检测灵敏度的关系,其结果分别见图 10、图 11,从图中可以看出,当铝板厚度为 5 mm 时,最优的激励频率为 200 Hz 左右;当铝板厚度为 7 mm 时,最优激励频率在 100 Hz 左右。

由此可见,激励频率的改变可以影响表面下缺陷的检测灵敏度,最优激励频率与被测试件的厚度存在一定的关系,对于较厚的铝板,应适当降低激励频率来提高缺陷检测灵敏度。

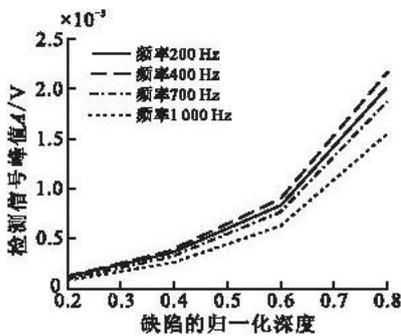


图 9 厚度 3 mm 铝板表面下缺陷的检测电压峰值曲线

Fig. 9 The response signal peaks of 3 mm aluminium plate

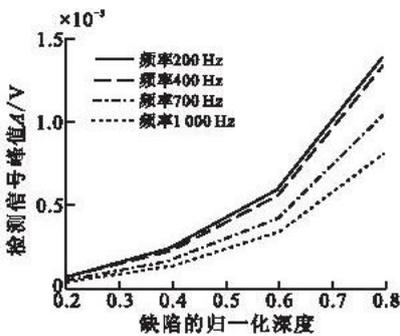


图 10 厚度 5 mm 铝板表面下缺陷的检测电压峰值曲线

Fig. 10 The response signal peaks of 5 mm aluminium plate

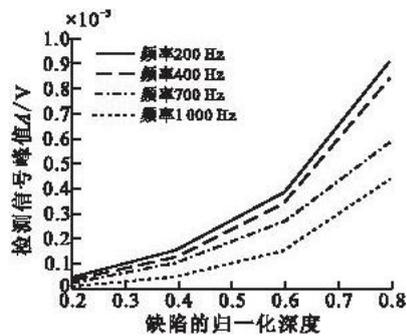


图 11 厚度 7 mm 铝板表面下缺陷的检测电压峰值曲线

Fig. 11 The response signal peaks of 7 mm aluminium plate

5 占空比对缺陷检测灵敏度的影响

首先仿真分析了激励脉冲频率为 100 Hz 时,占空比变化对检测信号的影响,仿真结果见图 12。

从图 12 中可以看出,当激励脉冲的占空比变化时,检测信号在脉冲上升沿和下降沿产生的正负峰值将不再对称,检测信号的正峰值基本不随占空比的变化而改变,而检测信号的负峰值则随占空比的变化发生了明显改变,因此,在研究脉冲占空比对检测灵敏度的影响时,所提取的特征量为检测信号的正峰值。

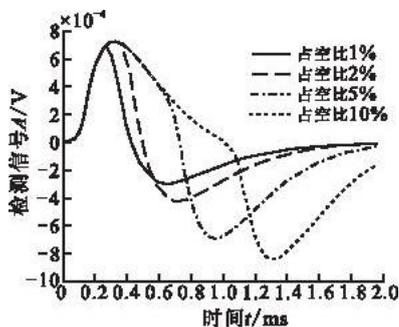


图 12 占空比不同时表面下缺陷的检测电压信号
Fig. 12 The response signals for different duty cycles

图 13、图 14 和图 15 分别为铝板厚度为 3 mm、5 mm 以及 7 mm 时,采用不同激励脉冲占空比检测表面下缺陷得到的检测信号峰值曲线,从图中可以看出,对于 3 mm 厚的铝板,检测灵敏度最高的占空比为 10%,板厚为 5 mm 时,检测灵敏度最高的占空比介于 10% 与 50% 之间,而对于 7 mm 厚的铝板,50% 占空比的检测灵敏度明显优于 10%,因此可以得出如下结论,对于不同厚度被测试件中缺陷的检测,占空比对缺陷检测灵敏度的影响与被测试件厚度有关。当板厚较大时,为了提高缺陷检测灵敏度,应适当增加占空比。而当板厚较小时,则应适当降低占空比。

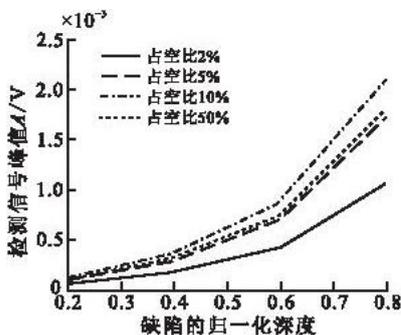


图 13 铝板厚 3 mm 时检测电压峰值曲线
Fig. 13 The response signal peaks of 3 mm aluminium plate

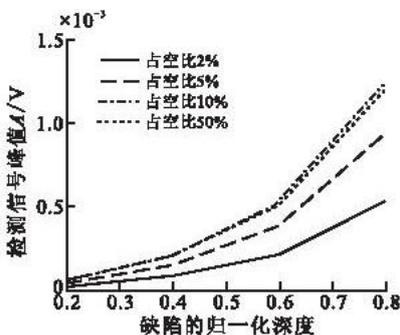


图 14 铝板厚 5 mm 时检测电压峰值曲线
Fig. 14 The response signal peaks of 5 mm aluminium plate

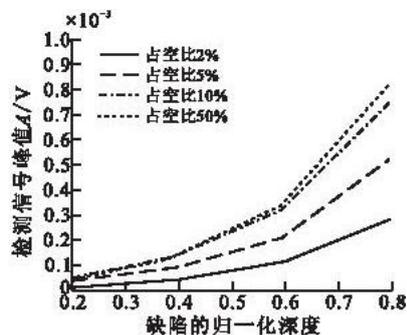


图 15 铝板厚 7 mm 时检测电压峰值曲线
Fig. 15 The response signal peaks of 7 mm aluminium plate

6 实验结果

实验系统主要由信号发生器、功率放大模块、信号调理模块、数据采集模块、传感器等几个部分组成。采用 Agilent 公司的 33220A 型数字信号发生器产生激励信号,功率放大模块主要是由 IR2233 驱动芯片及

MOSFET 组成,信号调理电路采用 AD620 仪表放大器进行设计,数据采集模块采用 NI 公司生产的 12 位 PCI 数据采集卡 PCI-6010,采样频率为 100 kHz。铝板厚度为 3 mm,激励信号的幅值为 10 V。

图 16 为采用不同频率的激励信号,而脉冲占空比均为 50% 时,实验得到的检测电压峰值随缺陷深度的变化曲线,从图中可以看出,检测灵敏度最高的频率在 400 Hz 左右,频率增高或降低都将使得检测灵敏度下降,实验与仿真结果相一致。

图 17 为采用不同占空比时得到的检测电压峰值随缺陷深度的变化曲线,从图中可以看出,缺陷检测灵敏度最高时的脉冲占空比为 10% 左右,这与仿真结果相吻合,验证了仿真的正确性。

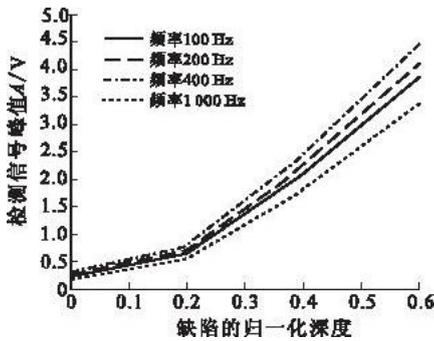


图 16 不同频率的实验结果

Fig. 16 The experimental results of different frequencies

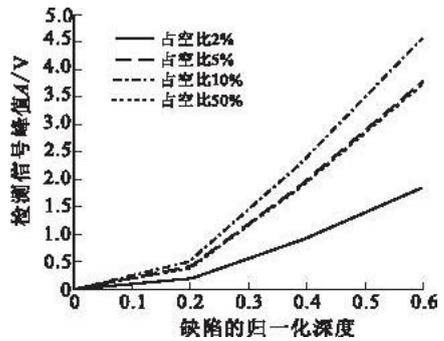


图 17 不同占空比的实验结果

Fig. 17 The experimental results of different duty cycles

7 结束语

本文采用仿真与实验相结合的方法研究了脉冲涡流检测中参数的优化设计问题。首先分析了基于矩形传感器的脉冲涡流检测原理,在此基础上,采用 ANSYS 仿真软件建立了脉冲涡流检测的仿真模型,仿真分析了传感器尺寸及激励参数变化对检测性能的影响,仿真结果表明,为了实现对深层缺陷的检测,需增大传感器长度的尺寸,为了提高缺陷的检测灵敏度,需根据被测试件的厚度来合理设计激励脉冲的频率和占空比。最后采用实验的方法对仿真结果进行了验证,实验与仿真结果相一致,证明了仿真结论的正确性。

参考文献(References):

- [1] TIAN G Y, LI Y. Study of lift-off invariance for pulsed eddy current signals[J]. IEEE transactions on magnetics, 2009, 45(1): 184-191.
- [2] CHEN T L, TIAN G Y, SOPHIN A, et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT[J]. NDT&E international, 2008, 41: 467-476.
- [3] LI S, HUANG S L, ZHAO W. Development of differential probes in pulsed eddy current testing for noise suppression[J]. Sensors and actuators A, 2007, 135: 675-679.
- [4] SHIN Y K, CHOI D M, KIM Y J, et al. Signal characteristics of differential pulsed eddy current sensors in the evaluation of plate thickness[J]. NDT&E international, 2009, 42: 215-221.
- [5] SMITH R A, HUGO G R. Transient eddy current NDE for ageing aircraft - capabilities and limitations[J]. Insight, 2001, 43(1): 14-25.
- [6] SAFIZADEH M S, LEPINE B A, FORSTH D S, et al. Time-frequency analysis of pulsed eddy current signals[J]. Journal of nondestructive evaluation, 2001, 20(2): 73-86.
- [7] 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 Bin Feng, ZHANG Hui, ZHAO Yu Feng, 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)
- [8] 曹海霞,王畅,杨宾峰,等.脉冲涡流无损检测提离效应研究[J].空军工程大学学报:自然科学版,2011,12(3):45-49.
CAO Haixia, WANG Chang, YANG Bin Feng, et al. Study of lift-off effects for pulsed eddy current nondestructive testing technique[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2011, 12(3): 45-49. (in Chinese)

Simulation Analysis and Experimental Research on Parameter Influence in Pulsed Eddy Current Nondestructive Testing Technique

ZHANG Hui¹, YANG Bin - feng², WANG Xiao - feng², ZHAO Yu - feng²

(1. Department of Science and Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: The dimension of probe and the exciting parameters have an obvious influence on the result of pulsed eddy current (PEC) nondestructive testing, the capability of the PEC inspection system can be improved by optimizing these parameters. Based on the analysis of the principle of PEC, the PEC model is established by ANSYS finite element simulation software to analyze the influence of the variation of probe dimension on the eddy current decay law and that of the change of exciting frequency and duty cycle on the detecting sensitivity. The simulation results show that the attenuation of the eddy current slows down with the increase of exciting coil length, and the attenuation of the eddy current quickens with the increase of exciting coil width and highness. The influence of exciting frequency and duty cycle on the detecting sensitivity of defect has a relationship with the specimen thickness, the exciting frequency should be appropriately decreased and the duty cycle increased in inspecting thick specimen. Finally, the results of simulation are testified by experiment methods, the agreement between simulation and experiment shows the correctness of simulation.

Key words: pulsed eddy current; rectangular probe; exciting frequency; duty cycle; optimization design

(上接第 36 页)

Location Algorithm for Near Space Radar Network Based on Angle Information

WANG Shen - shen^{1,2}, FENG Jin - fu¹, LI Qian³, WANG Fang - nian⁴, ZHANG Jia - qiang¹

(1. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China; 2. Key Lab of Complex Aviation System Simulation, Beijing 100076, China; 3. Unit 95949, Cangzhou 061736, Hebei, China; 4. Guilin Air Force Academy, Guilin 541010, Guangxi, China)

Abstract: An effective location algorithm for near space radar network based on angle information is discussed in this paper. The location model is established according to the geometric relationship between target and radar station. The nonlinear equations about azimuth and elevation are transformed into linear equations. Least square algorithm is used to get the initial value of the target location. Then the location issue is transformed into a non - constrained optimization issue by the maximum likelihood method. Believable field method is used to solve the optimization issue. The detailed process of the algorithm is also presented. The location accuracy of the algorithm is analyzed and the geometric dilution of precision (GDOP) is obtained. The simulation results show that the use of the algorithm can effectively improve the location precision of angle information and the performance of the proposed method is better than that of the least square method. The research result of this paper provides a theoretical basis for the detecting and tracking of the near space radar network.

Key words: radar network; direction of arrival; believable field method; maximum likelihood; GDOP