

基于脉冲激励的远场涡流检测机理及缺陷定量评估技术

杨宾峰¹, 张辉², 荆毅飞¹, 李龙军¹, 崔文岩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 脉冲激励信号包含非常丰富的频谱成分,以脉冲激励代替传统的正弦激励为克服远场涡流技术的不足提供了新的解决途径。在分析了脉冲激励下远场涡流检测机理的基础上,仿真分析了激励线圈和管道周围磁场和涡流的分布,得到了检测线圈处于不同场区时瞬态检测信号的变化规律,确定了远场区的范围。并从检测信号中提取了过零时间作为缺陷定量的特征量。最后,采用实验的方法验证了脉冲激励下的远场涡流技术对管道中轴向裂纹缺陷长度和深度的定量检测能力,实验结果表明该技术可以很好的实现对缺陷的定量评估。

关键词 脉冲激励;远场涡流;远场区;特征提取;定量评估

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.06.010

中图分类号 TG115 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2012)06-0045-05

对于铁磁性管道的检测,目前应用最广泛的是远场涡流技术(Remote Field Eddy Current, RFEC),其探头由间隔2~3倍管径的激励线圈和检测线圈组成,探头上加载的是低频交流电,通过提取检测线圈感应电压与激励电流之间的相位差作为特征实现对管道性能的检测^[1]。

远场涡流检测技术具有内外壁缺陷检测灵敏度相同、受提离影响小等优点,国内外学者针对管道远场涡流的建模与仿真^[2-4]、新型远场涡流传感器设计^[5-7]等方面进行了大量的研究工作,取得了丰富的理论成果,并开发出了一些商业化的无损检测仪器^[8]。

传统正弦激励下的远场涡流技术也存在一定的局限性^[9-10],例如,其探头的长度较长,这样在检测弯管时有一定的难度。同时,其采用的正弦激励信号会在探头上产生较大的功耗。针对传统远场涡流存在的问题,本文将脉冲激励方式应用于传统远场涡流检测,采用实验与仿真相结合的方法,研究脉冲激励下远场涡流检测中远场区的确定、缺陷特征的提取以及缺陷的定量评估问题,为该项技术的实际应用奠定基础。

1 脉冲激励下远场涡流的检测机理

脉冲远场涡流传感器与传统正弦激励下的远场涡流传感器结构类似,也是由间隔一定距离的激励线圈和检测线圈组成。当给激励线圈施加一个具有较小占空比的方波激励信号时,当激励电流存在时,磁场主要集中于激励线圈附近,如图1所示,这时检测信号主要体现脉冲磁场分量。当激励电流断开后,管道中涡流感应的磁场就会穿透管壁扩散到管外,形成涡流磁场分量,同时该磁场也会沿着管道向其两端传播,由



图1 脉冲激励下远场涡流检测示意图

Fig.1 Schematic diagram of the pulsed remote field eddy current testing

收稿日期:2012-05-25

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:杨宾峰(1976-),男,陕西户县人,副教授,博士,主要从事电磁无损检测研究. E-mail:bf_yang@163.com

于管道的屏蔽作用,管内的脉冲磁场分量衰减的很快,而管外的涡流磁场分量衰减的较慢,当磁场传播到距离激励线圈一定的位置时,管外磁场强度将大于管内磁场强度时,管外磁场就会再次穿透管壁进入管内,如果管壁上有缺陷存在,就会影响磁场的传播路径,最终使得检测线圈上的瞬态感应电压发生变化,通过对感应电压信号的检测和分析,就可以得到有关缺陷的信息。

2 远场区的确定

采用脉冲作为激励信号后,信号特征以及远场区的位置也都发生了变化,因此,必须首先确定出脉冲激励下远场涡流的远场区,以便确定检测线圈的合理放置位置。

本文采用大型 ANSYS 有限元仿真软件,建立了含全周向内壁缺陷的二维模型进行仿真分析,管道的内径为 30 mm,壁厚为 5 mm,长度为 550 mm,电阻率为 $2\text{E}-7 \Omega \cdot \text{m}$,相对磁导率为 100,在管道内壁设置一个宽度为 2 mm,深度为 40% 壁厚的全周向缺陷。激励线圈的内径为 15 mm,厚度为 2 mm,长度为 40 mm,匝数为 400,检测线圈内径为 27 mm,厚度为 2 mm,长度为 5 mm,匝数为 1 000,所加激励脉冲电压幅值为 10 V,频率为 40 Hz,占空比为 10%。

仿真计算得到的几个不同时刻的磁力线分布如图 2 所示。从图中可以看出,在 1 ms 时刻,也就是激励电流持续的时间里,磁力线束缚于激励线圈周围,并且很快地扩散。在 4 ms 时刻,此时激励电流已经关断,管壁中涡流感应的磁场扩散到管外,并且沿管壁扩散;随着时间的推移,管内磁力线的扩散逐渐变慢,而扩散至管壁外的那部分磁力线,则迅速的沿着管壁向前扩散,直至在某一时刻重新穿回管壁。

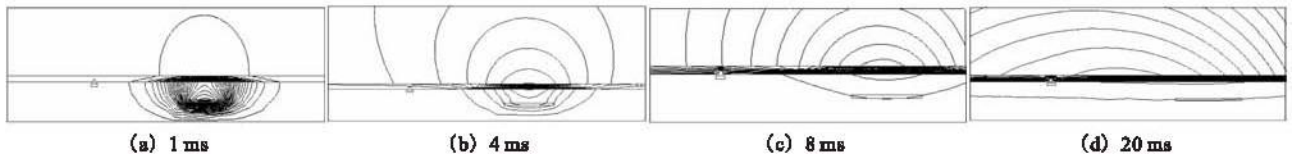


图 2 不同时刻磁力线分布

Fig. 2 The distribution of flux lines at different times

为了分析管道中涡流扩散的情况,明晰缺陷对涡流扰动及其对检测信号的影响规律,在管道内壁上设置长度为 10 mm、宽度为 1 mm、深度为 40% 壁厚的轴向裂纹,其余参数不变,建立相应的三维仿真模型,计算得到管道中的涡流分布如图 3 所示。

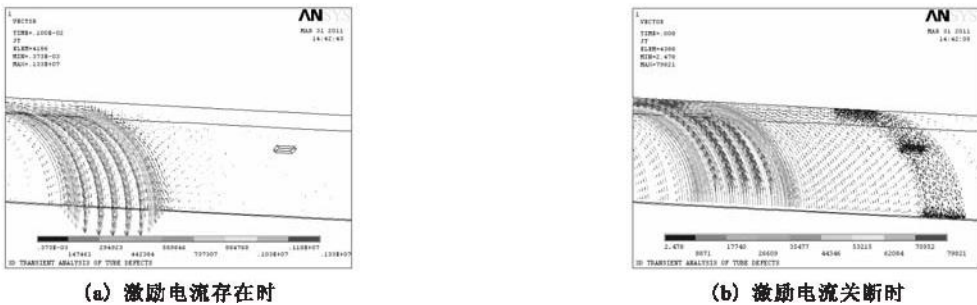


图 3 不同时刻管壁中的瞬时涡流分布

Fig. 3 The distribution of eddy current in pipeline at different times

从图 3 可以看出,在激励电流存在时,管道中感应的涡流主要分布在激励线圈附近。当激励电流断开后,管壁中感应的涡流沿着管道轴向扩散,其强度也迅速衰减。综合分析图 2 和图 3 可以发现,在脉冲激励信号的高电平时间段,检测线圈所感应到的是近场区的脉冲磁场,而当脉冲激励信号关断后,近场区信号很快衰减,远场区的涡流磁场开始占主导地位,检测线圈所接收到的是远场区的信号。

为了确定脉冲激励下远场涡流的远场区,以便确定检测线圈的合理放置位置,在其他条件不变的情况下,分别计算激励线圈与检测线圈间距为 0.8、1.7、3.0 倍管道径时的感应电压波形,结果分别见图 4(a)、(b)和(c)。

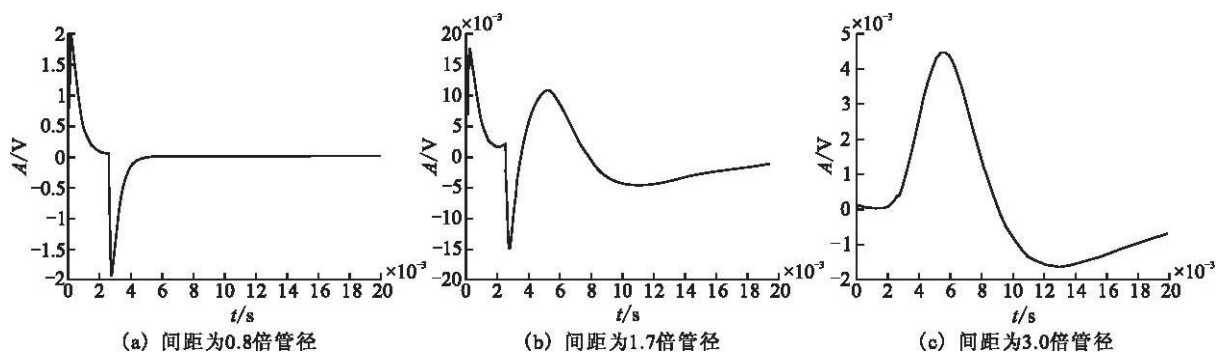


图 4 激励线圈和检测线圈间距变化时的检测信号

Fig. 4 The detecting signals with the variation of distance between exciting and detecting coils

从图 4 中可以看出,当检测线圈距离激励线圈 0.8 倍管径时,即处于传统意义上的近场区位置,检测线圈所接收到的只有激励线圈附近所产生的一次场,从其时域波形上来看,只有在激励脉冲上升和下跳沿存在信号,其检测机理与常规涡流检测机理相同,不存在远场涡流效应;当检测线圈距离激励线圈 1.7 倍管径时,既处于传统意义上的过渡区位置,此时检测线圈上的感应电压由脉冲磁场分量和穿过管壁的涡流磁场分量组成,脉冲磁场分量只出现在激励电流的上升和下跳沿时刻,在其它时间里,涡流磁场分量是其主要成分;当检测线圈距离激励线圈 3.0 倍管径时,即处于传统意义上的远场区位置,此时感应电压中脉冲磁场分量已经消失,只有涡流磁场分量存在,信号也变得十分微弱。

综上所述,在脉冲激励下的远场涡流技术中,检测线圈可以放置于离激励线圈更近的过渡区,此时的检测信号是脉冲磁场分量和涡流磁场分量的叠加,可实现远场涡流检测的效果,同时,检测信号幅值增大,有利于信号特征的提取。

3 缺陷定量评估特征的提取

根据前面的分析可知,采用脉冲激励下的远场涡流技术对管道进行检测时,检测线圈应放置于传统意义下的过渡区,通过分析过渡区检测信号的变化可以实现对管道的检测。为了实现检测信号特征的提取,选取管道的内径和壁厚作为研究对象,建立三维仿真模型进行仿真计算,当管道内径为 30 mm、34 mm、38 mm 时得到的检测信号见图 5。

通过分析图 5 可知,检测信号的负峰值对管道内径的变化十分敏感,而过零时间对管道内径的变化不敏感,因此,可以提取信号的负峰值作为特征量来实现对管道内径的检测。

再分别计算 3 种管壁厚度为 5 mm、6 mm、7 mm 时瞬态感应电压的时域波形,结果如图 6 所示。从图中可以看出,当管道壁厚变化时,感应信号的负峰值基本没有变化,过零时间随着壁厚的增加而增大,也就是说,负峰值对壁厚变化不敏感,而过零时间会随着管道壁厚的改变发生明显的变化,因此,可以提取信号的过零时间作为特征量,来实现对管壁厚度的检测。

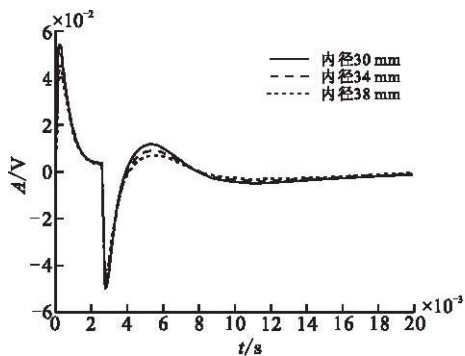


图 5 管道内径变化对检测信号的影响

Fig. 5 The detecting signals with the variation of radius

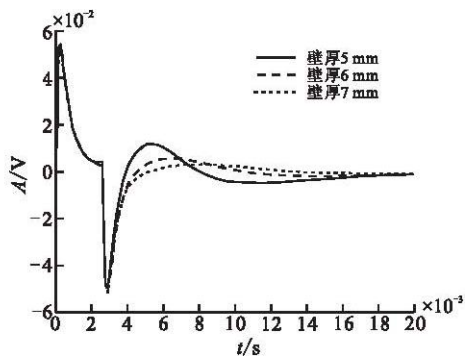


图 6 管道壁厚变化对检测信号的影响

Fig. 6 The detecting signals with the variation of thickness

4 实验验证

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、传感器等部分组成,实验系统采用 Agilent 公司的 33220A 型数字信号发生器产生激励信号,其幅值为 5 V,频率为 100 Hz,占空比为 10%。功率放大模块主要是由 IR2233 驱动芯片及 MOSFET 组成,用于对信号源产生的激励信号进行放大以驱动探头,信号调理电路采用 AD620 仪表放大器进行设计,用于对检测线圈感应的微弱信号进行放大以便数据采集,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。采集的数据实时存到计算机硬盘上,可方便的进行后期的数据分析与处理。

激励线圈的内径为 50 mm,外径为 52 mm,长度为 80 mm,匝数为 900,漆包线线径为 0.35 mm。检测线圈的内径为 6 mm,外径为 9 mm,长度为 10 mm,匝数 2 000,漆包线线径为 0.08 mm。选取一段内径为 98 mm,壁厚为 5 mm,长度为 1 m 的铁磁性管道,在管道外壁上等间距加工 3 个轴向长均为 10 mm,周向宽均为 1 mm,径向深分别为 1.5 mm、2.5 mm、3.5 mm 的矩形槽来模拟轴向裂纹缺陷。

4.1 裂纹缺陷轴向长度定量检测的结果

将传感器沿着管道轴向在裂纹附近进行扫描,在扫描过程中实时采集检测电压的波形,提取过零时间作为特征量,并将所有的过零时间连接起来形成过零时间扫描波形。图 7 为轴向裂纹长度为 10 mm,宽度为 1 mm,深度分别为 1.5 mm、2.5 mm、3.5 mm 时的过零时间扫描波形。

从图 7 中可以看出,传感器在不同深度的轴向裂纹附近进行扫描时,在检测线圈靠近轴向裂纹的过程中,检测信号的过零时间逐渐减小,而在检测线圈远离轴向裂纹的过程中,过零时间逐渐增大,当检测线圈处于轴向裂纹的正下方时,过零时间达到最小值,过零时间变化的总长度约等于从靠近裂纹到远离裂纹的长度,因此可以采用过零时间扫描波形对裂纹轴向长度进行定量检测。

4.2 裂纹缺陷径向深度定量检测的结果

移动传感器位置使检测线圈位于 3 个不同深度轴向裂纹的正下方,分别采集检测线圈上感应电压的波形见图 8。从图中可以发现,随着裂纹深度的增加,检测电压的过零时间逐渐减小,这与仿真结论相一致。提取检测电压的过零时间,得到过零时间与裂纹深度的关系曲线见图 9。从图可以看出,过零时间与裂纹深度之间呈现近似的线性关系,因此可以采用过零时间与裂纹深度的关系曲线对裂纹径向深度进行定量检测。

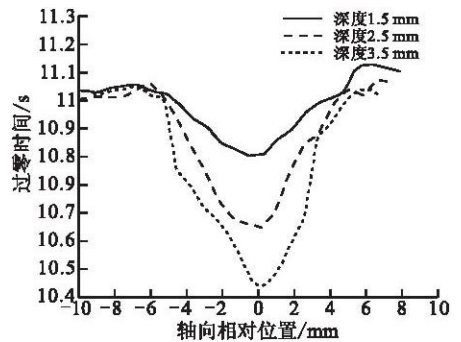


图 7 不同深度裂纹的过零时间扫描波形

Fig. 7 The scan signals of different defect depths

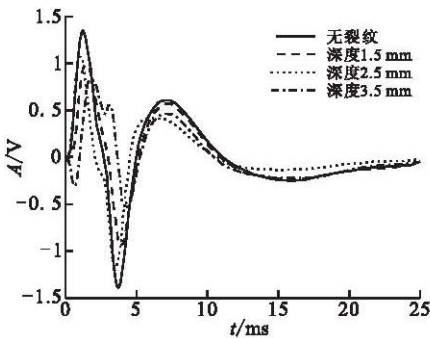


图 8 不同深度裂纹的瞬态检测信号

Fig. 8 The transient signals of different defect depths

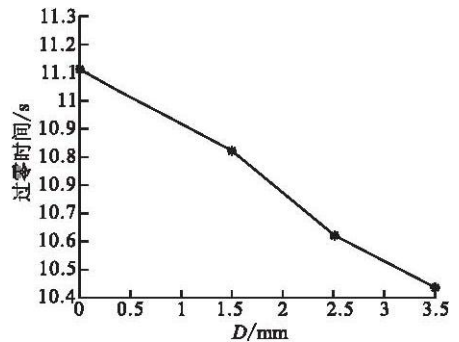


图 9 过零时间与裂纹深度的关系曲线

Fig. 9 The relation of zero-crossing time and defect depths

5 结语

远场涡流技术不受集肤效应的限制,从而在大厚度铁磁性管道的检测中得到了广泛应用。针对传统正弦激励下的远场涡流技术存在的探头长度长,功耗大的问题,本文将脉冲激励方式应用于远场涡流检测中,

在首先分析了脉冲激励下远场涡流的检测机理后,采用 ANSYS 仿真软件建立了二维和三维的仿真模型,仿真分析了脉冲激励方式下,远场涡流检测的机理确定了其远场区的范围。其次,通过改变仿真模型中管道的参数,从时域检测信号中提取了用于缺陷定量的特征量。最后,建立了脉冲激励下远场涡流检测的实验系统,对管道中存在的轴向裂纹缺陷进行了检测,实验结果表明,脉冲激励下的远场涡流技术可以很好的实现对缺陷的定量评估。

参考文献(References):

- [1] 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 application electromagnetics and mechanics, 2010, 33:1261-1266.
- [2] 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.
- [3] Thirunavukkarasu S, Rao B P C, Mahadevan S, et al. Three dimensional finite element modeling of remote field eddy current technique for detection of localized defects[J]. Research in nondestructive evaluation, 2009, 20:145-158.
- [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 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)
- [5] Shin Y K. Design of encircling remote field eddy current probe [J]. IEEE transactions on magnetics, 2002, 38(2):1273-1276.
- [6] Grimberg R, Udpa L, Savin A, et al. Remote field eddy current control using rotating magnetic field transducer: application to pressure tubes examination[J]. Research in nondestructive evaluation, 2008, 19:202-218.
- [7] 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)
- [8] 任吉林,林俊明.电磁无损检测技术[M].北京:科学出版社, 2008.
REN Jilin, LIN Junming. Electromagnetic nondestructive testing technique[M]. Beijing: Science press, 2008. (in Chinese)
- [9] Yang B F, Li X C. Pulsed remote eddy current field array technique for nondestructive inspection of ferromagnetic tube [J]. Nondestructive testing and evaluation, 2010, 25(1):3-12.
- [10] Kasai N, Fujiwara Y, Sekine K, et al. Evaluation of back-side flaws of the bottom plates of an oil-storage tank by the RFECT[J]. NDT & E international, 2008, 41:525-529.

(编辑:徐楠楠)

Inspection Principle and Defect Quantitative Estimation of Pulsed Remote Field Eddy Current Technique

YANG Bin-feng¹, ZHANG Hui², JING Yi-fei¹, LI Long-jun¹, CUI Wen-yan¹

(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)

Abstract: Remote field eddy current (RFEC) technique has been widely used for the inspection of ferromagnetic pipes and it's not restricted by the skin-depth effect. However, the technique under the sinusoidal excitation needs a long probe and a high power dissipation, which restricts the application of RFEC in real inspection. The pulse exciting signal has the advantages of rich frequency components, the disadvantages of the traditional RFEC can be overcome by using pulse excitation instead of sinusoidal excitation. On the basis of analyzing the principle of pulsed RFEC, the distributions of the magnetic field and eddy current around the pipeline and exciting coil are simulated and analyzed, the changing rule of transient state detecting signals in different field regions is studied and obtained with finite element simulation method, then, the remote field region is confirmed. The zero-crossing time and negative peak value are extracted as the eigenvectors for defect quantification. Finally, the performances of quantifying the axial defect length and depth by the pulsed RFEC are verified by performing an experiment, the result shows that this technique can be used to realize the quantitative estimation of the defect.

Key words: pulsed excitation; remote field eddy current; remote field region; eigenvector extraction; defect quantification