

# 管道轴向裂纹检测脉冲远场涡流传感器设计与仿真分析

荆毅飞<sup>1</sup>, 王晓锋<sup>1</sup>, 杨宾峰<sup>1</sup>, 张辉<sup>2</sup>, 康志斌<sup>1</sup>, 李水芳<sup>1</sup>

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

**摘要** 脉冲远场涡流检测方法结合了脉冲检测频率丰富以及远场方法适于铁磁性管道检测的优势,因此文中采用脉冲远场技术对管道轴向裂纹进行了检测。首先分析了脉冲远场涡流的检测原理,通过提取感应电压信号的负峰值和过零时间作为特征量可以分析管道的检测信息,在此基础上设计了4种不同结构的传感器模型,比较了4种模型过渡区的远近、对轴向裂纹检测灵敏度的高低以及对不同壁厚管道检测的结果。仿真结果表明:与其它模型相比,连通激励磁路的传感器模型具有更好的检测效果。

**关键词** 轴向裂纹;脉冲远场涡流;传感器设计

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.06.0015

**中图分类号** TG115 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)06-0074-05

铁磁性管道以其可靠性高、成本低而被广泛应用于石油和天然气等行业,在管内油气压力作用下,管道极易形成轴向裂纹缺陷,轻者危及油气管道的正常工作,重者发生严重的管道爆裂事故,造成巨额经济损失和人员伤亡,因此对其进行无损检测具有重要的实际应用价值<sup>[1-2]</sup>。

目前应用在管道无损检测中的方法主要有超声波检测法、电磁超声检测法、漏磁检测法和远场涡流检测法等<sup>[3-5]</sup>。超声波检测需要耦合剂,因此在油气管道中的应用受到限制;电磁超声检测不需要耦合剂,但是其探头功率很大,实用性不强;漏磁检测需要对铁磁性构件进行磁化和退磁,因此设备较为庞大和复杂;远场涡流检测对于应力腐蚀裂纹具有较好的检测能力,而且在无需磁化的条件下具有较深的穿透深度,同时对内外壁缺陷具有相同的检测灵敏度,因此其在铁磁性管道的检测中得到了广泛的应用。

本文结合脉冲涡流的信号激励方式<sup>[6-7]</sup>,同时利用远场涡流检测的传感器结构,实现二者在原理层面上的集成,形成了脉冲远场涡流检测技术<sup>[8-10]</sup>。利用脉冲远场涡流技术对油气管道的轴向裂纹进行检测,设计了4种不同结构的传感器模型,仿真研究了4种模型过渡区的远近、对轴向裂纹检测灵敏度的高低以及对不同壁厚管道检测的结果,最终得到了优化的传感器结构。本文仿真分析的结果为脉冲远场涡流检测技术的实际应用提供了理论依据。

## 1 脉冲远场涡流的检测原理

脉冲远场涡流传感器与常规正弦激励下的远场涡流传感器结构相同,也是由间隔一定距离的激励线圈和检测线圈组成,检测线圈放置传统意义上的过渡区,脉冲远场涡流检测的原理如图1所示。在激励线圈上施加一个具有较小占空比的方波激励信号,产生出一个脉冲磁场,磁场能量从激励线圈到检测线圈也存在2个不同的耦合路径:沿管道轴线方向的直接耦合路径,以及从激励线圈附近穿出管壁沿管壁传播,并最终再次穿过管壁到达检测线圈的间接耦合路径;直接耦合路径上的磁场能量由于管道的屏蔽作用,迅速地衰减,而间接耦合路径上的信号2次穿越管壁,携带了管道的结构信息,因此成为管道检测的依据。

\* 收稿日期:2011-05-05

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基础研究计划资助项目(2011JQ6010)

作者简介:荆毅飞(1988-),男,河南栾川人,硕士生,主要从事测试计量技术及仪器研究。

E-mail: jingyifei123@163.com

脉冲信号激励下激励线圈上电流和检测线圈上的感应电压时域波形分别见图 2、图 3。从图中可以看出,感应电压信号的直接耦合分量只出现在脉冲激励电流的上升沿和下跳沿时刻,当激励电流断开以后,感应电压信号并没有消失,而体现为间接耦合分量,且间接耦合分量随时间衰减较慢。直接耦合电压的负峰值对管道内径的变化敏感,而间接耦合电压的过零时间对管道壁厚的变化敏感,因此可以提取感应电压信号的负峰值和过零时间(见图 3 中标注)作为特征量来分析管道裂纹缺陷的检测信息。

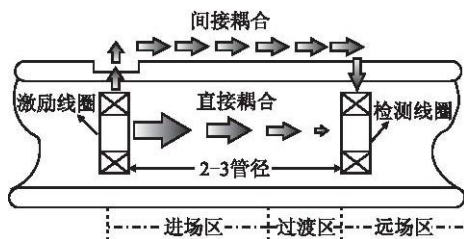


图 1 脉冲远场涡流检测原理

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

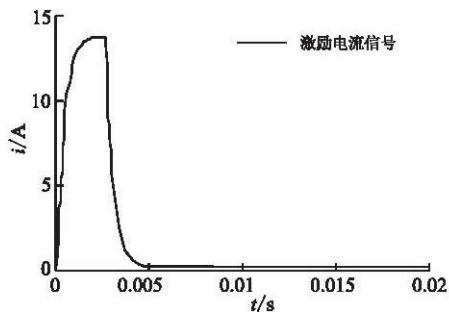


图 2 激励电流信号

Fig. 2 The signal of exciting current

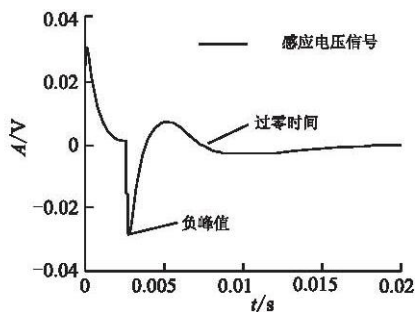


图 3 感应电压信号

Fig. 3 The signal of induced voltage

## 2 4 种脉冲远场涡流传感器模型的建立

本文采用大型有限元分析软件 ANSYS,分别建立了 4 种不同结构的脉冲远场涡流传感器的模型,见图 4。在这 4 种模型中,被测管道的参数相同:管道的内径为 30 mm,壁厚为 5 mm,长度为 550 mm,电阻率为  $2E-7 \Omega \cdot m$ ,相对磁导率为 100,轴向裂纹设置在管道内壁处,是一个凹形槽,其轴向长为 10 mm、周向宽为 1 mm、径向深为 2 mm。模型 1 采用常规传感器结构,激励线圈的内径为 15 mm,厚度为 2 mm,长度为 40 mm,匝数为 400 匝,检测线圈内径为 27 mm,厚度为 2 mm,长度为 5 mm,匝数为 1 000 匝,激励线圈和检测线圈绕线的电阻率为  $1.724E-8 \Omega \cdot m$ ,相对磁导率为 1。

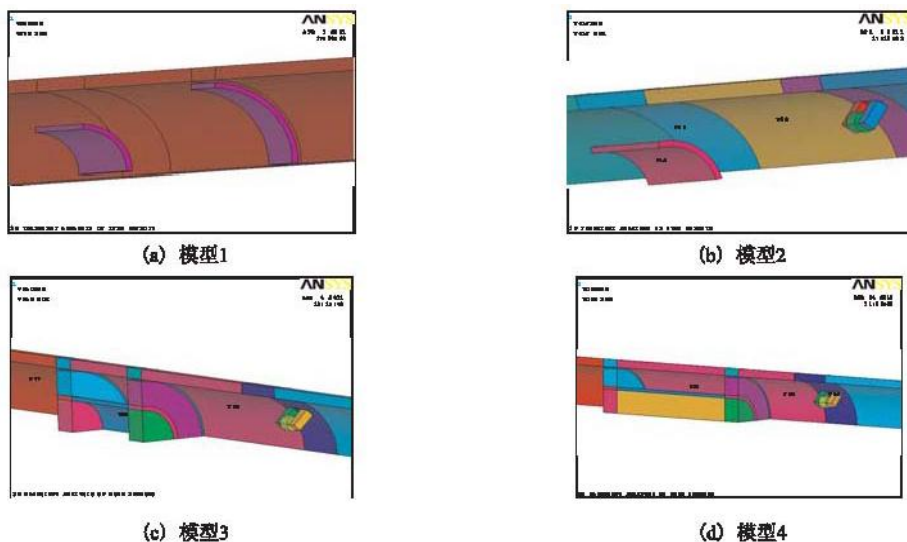


图 4 4 种不同结构的脉冲远场涡流传感器模型

Fig. 4 Four PRFEC sensor models of different structures

模型 2 沿用模型 1 的激励线圈结构,缩小检测线圈尺寸,使其更接近管道的内壁,同时在检测线圈上加装一个 U 字型磁芯,以提高信号幅度,小检测线圈的内径为 2 mm,厚度为 1.5 mm,U 字型磁芯由 2 个矩形

块与一个圆柱体两端相切组成,矩形磁芯长和宽均为 4 mm,高为 10 mm,圆柱形磁芯半径为 2 mm,长为 5 mm,其相对磁导率为 1 000。对模型 2 中的激励线圈结构进行改进形成模型 3,具体做法是在激励线圈两端加装 2 个大小相同的聚磁盘,聚磁盘的半径为 29 mm,厚度为 10 mm,其相对磁导率也为 1 000。模型 4 是将模型 3 中的激励磁路进行重新设计,在激励线圈内部加装磁芯,与两端的聚磁盘构成连通的磁路,此时激励线圈的参数需要进行相应的调整:激励线圈的长度变为 80 mm,匝数变为 100 匝。建立的 4 种不同结构的传感器仿真模型如图 4 所示。

### 3 仿真结果及分析

#### 3.1 4 种模型过渡区远近的比较

在铁磁性管道脉冲远场涡流检测技术中,激励线圈和检测线圈的轴向间距是传感器的重要参数,只有线圈轴向间距达到过渡区的条件,才能利用这种管道检测技术。在各自传感器结构模型的条件下,分别计算激励线圈与检测线圈间距 1.0、1.2、1.5 倍管道内径时的瞬态感应电压信号,得到的结果见图 5。

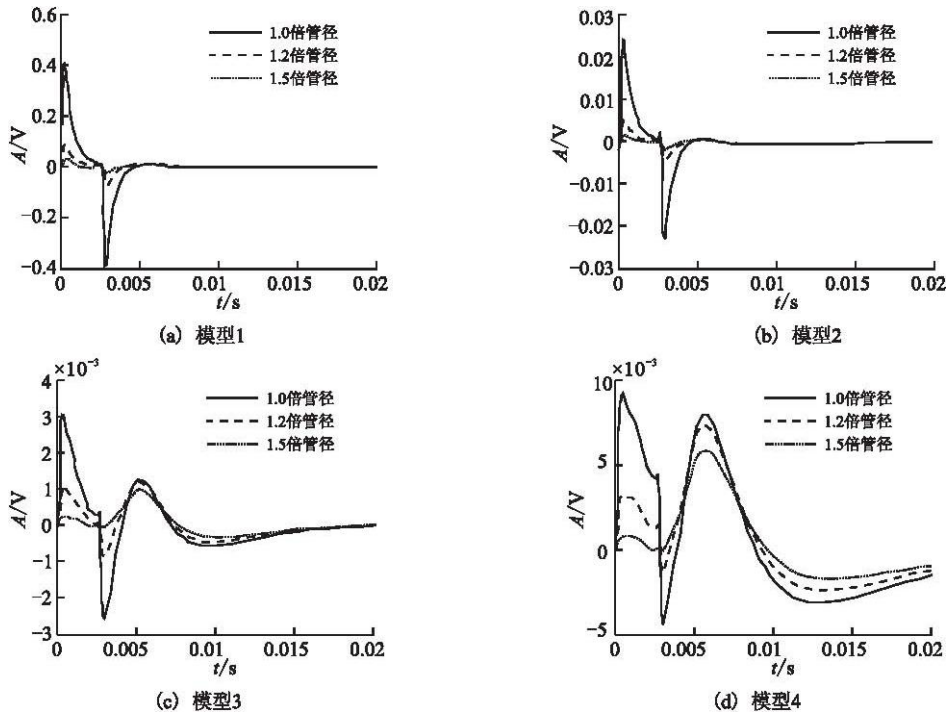


图5 不同线圈间距时的感应电压波形

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

由图 5 可以看出,在线圈间距为 1.5 倍管径的条件下,模型 1 和模型 2 感应信号波形与典型的过渡区检测信号相同,而模型 3 和模型 4 感应信号的间接耦合分量还要大于直接耦合分量;当缩短线圈间距为 1.0 倍管径时,模型 1 和模型 2 感应信号的间接耦合分量已十分微弱,而此时模型 3 和模型 4 的间接耦合分量依然显著。由此可知,模型 1 和模型 2 的过渡区在大约 1.5 倍管径的位置,模型 3 和模型 4 的过渡区可以拉近到 1.0 倍管径,因此在传感器设计时,采用模型 3 和模型 4 的结构可以缩短探头的长度。

#### 3.2 4 种模型检测灵敏度的比较

在管道内壁上设置长 10 mm、宽 1 mm、深分别为 2 mm、3 mm、4 mm 的轴向裂纹,分别计算 4 种模型条件下裂纹深度不同时的感应电压信号,并提取感应电压信号的负峰值和过零时间,为了便于观察,对负峰值特征量和过零时间特征量进行了归一化处理,得到归一化负峰值及归一化过零时间随裂纹深度变化的规律,结果分别见图 6、图 7。

由图 6 可知,随着内壁轴向裂纹深度的增加,4 种模型的归一化负峰值逐渐减小,这正是内壁裂纹处管道等效内径增大的结果。此外,模型 4 曲线的斜率最大,这说明模型 4 对内壁轴向裂纹的检测灵敏度最高。由图 7 可知,在四种模型的条件下,归一化的过零时间均与裂纹的深度成线性递减关系,从曲线的斜率来看,模型 1 的斜率最小,模型 2 与模型 3 的斜率几乎相同,模型 4 的斜率最大,这说明模型 2 与模型 3 对轴向裂

纹检测的灵敏度大致相同,较模型 1 灵敏度有所提高,但不如模型 4 的灵敏度高。

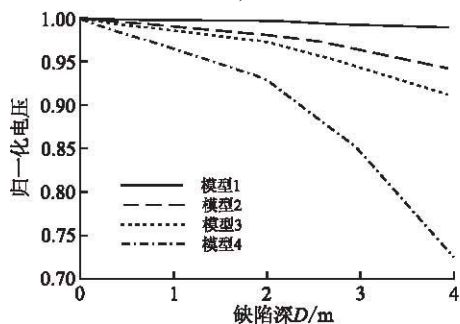


图 6 归一化负峰值随裂纹深度的变化曲线  
Fig. 6 Variation of negative peak due to variation of crack depth

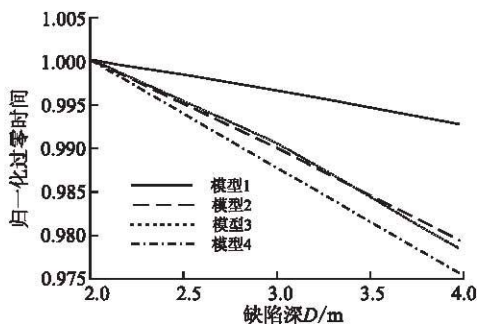


图 7 归一化过零时间随裂纹深度的变化曲线  
Fig. 7 Variation of zero-crossing time due to variation of crack depth

### 3.3 4 种模型对不同壁厚管道检测结果的比较

在脉冲远场检测技术中,激励频率的选择应使壁厚远小于深度,这样才具有穿透管壁的检测能力,因此,对于不同的管壁厚度需采用不同的激励频率。固定管道的内半径为 30 mm 不变,分别计算 4 种模型在管道外半径为 35 mm、38 mm、41 mm 时的感应电压信号,其中壁厚为 5 mm 时采用 40 Hz 的激励频率,壁厚为 8 mm 时采用 20 Hz 的激励频率,壁厚为 11 mm 时采用 10 Hz 的激励频率,对得到的感应电压信号进行归一化处理,最终得到 4 种模型在不同壁厚条件下的归一化感应电压信号见图 8。

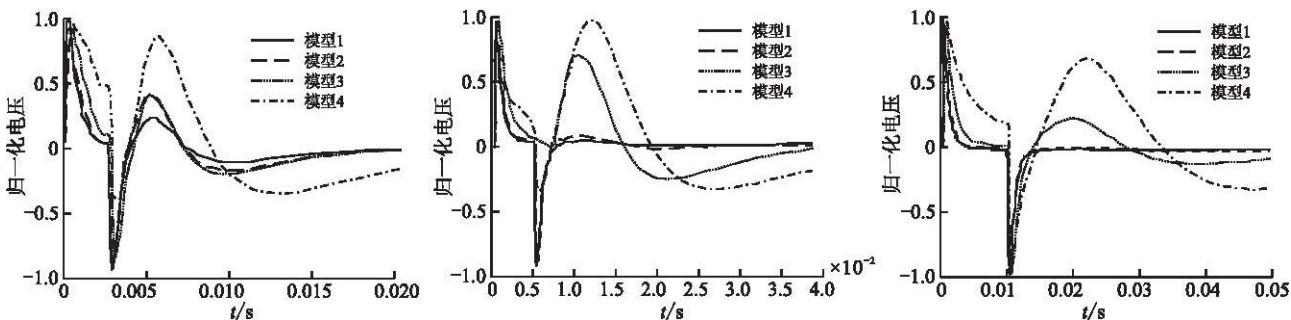


图 8 4 种模型测量不同壁厚管道时的归一化感应电压  
Fig. 8 Induced signals from various wall thickness using four models

由图 8 可知,在壁厚为 5 mm 时,4 种模型检测信号的间接耦合分量都十分明显;当壁厚增加到 8 mm 时,模型 1 信号的间接耦合分量已经消失,模型 2 信号的间接耦合分量也十分微弱,而模型 3 及模型 4 的间接耦合分量仍十分显著;当壁厚继续增加到 11 mm 时,模型 2 信号的间接耦合分量也消失,模型 3 和模型 4 信号的间接耦合分量还很明显,但相比较而言,模型 4 间接耦合分量幅度大于模型 3 的幅度。由此可知,4 种模型都有对小壁厚管道的检测能力,而随着被测管道壁厚的增加,模型 3 和模型 4 开始体现出一定的优势,进一步比较可以发现,模型 4 对大壁厚管道的检测能力还要强于模型 3。

## 4 结束语

脉冲远场涡流检测技术由于集成了脉冲涡流检测和远场检测的优点,因而成为油气管道轴向裂纹检测的一种有效方法。本文设计了 4 种不同结构的脉冲远场涡流传感器模型,仿真研究了 4 种模型过渡区的远近、对轴向裂纹检测灵敏度的高低以及对不同壁厚管道的检测能力,从仿真结果可以看出,与其它模型相比,连通激励磁路模型不仅探头长度短,大壁厚管道检测能力强,而且对轴向裂纹的检测灵敏度也最高。本文仿真分析的结果可以指导相应的试验研究,对于脉冲远场涡流传感器的研发具有重要意义。

### 参考文献:

[1] 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 pipe-

- line cracks[J]. Journal of system simulation, 2009,21(20):6626-6629. (in Chinese)
- [2] 吴德会,黄松岭,赵伟,等. 油气管道裂纹远场涡流检测的仿真分析[J]. 中国机械工程,2009,12(20):1450-1454.  
WU Dehui, HUANG Songling, ZHAO Wei, et al. Simulation analysis on cracks detection based on RFEC in long-distance oil and gas pipeline[J]. China mechanical engineering, 2009,12(20):1450-1454. (in Chinese)
- [3] Tian G Y, Sophian A. Study of magnetic sensors for pulsed eddy current techniques[J]. Insight, 2005,47(5):277-280.
- [4] 李东升,王昌明,沈勇. 管内在役检测技术及管道安全性评估[J]. 油气田地面工程,2001,20(5):85-85.  
LI Dongsheng, WANG Changming, SHEN Yong. Evaluation on testing technique in using inside pipe & pipeline safety[J]. Oil-gasfield surface engineering, 2001,20(5):85-85. (in Chinese)
- [5] 徐小杰. 铁磁性管道中轴向裂纹的远场涡流检测技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2007.  
XU Xiaojie. Research on remote field eddy current technique used for axial crack detection in ferromagnetic pipe[D]. Changsha: National university of defense technology, 2007. (in Chinese)
- [6] 杨宾峰,张辉,余付平,等. 新型脉冲漏磁传感器的仿真设计与实验研究[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2010,11(4):57-61.  
YANG Binfeng, ZHANG Hui, YU Fuping, et al. Simulation design and experimentation research on a new type of pulsed magnetic flux leakage sensor[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010,11(4):57-61. (in Chinese)
- [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 Binfeng, ZHANG Hui, ZHAO Yufeng, 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] Vasic D, Bilas V, Ambruš D. Measurement of ferromagnetic tube wall thickness using pulsed remote field technique[C]//12th IMEKO TC4 international symposium. Zagreb, Croatia: [s. n.], 2002:468-472.
- [9] Vasic D, Bilas V, Ambruš D. Inspection tool for harsh environment operation utilizing pulsed remote field technique[C]//IMTC 2005-instrumentation and measurement technology conference. Ottawa, Canada: [s. n.], 2005:1297-1300.
- [10] 李学超. 脉冲远场涡流管道检测技术研究[D]. 西安:西安交通大学,2008.  
LI Xuechao. The research on nondestructive testing of ferromagnetic tubes using pulsed remote eddy current technique[D]. Xi'an: Xi'an jiaotong university, 2008. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

## Simulation Research on Design of Pulsed Remote Field Eddy Current Sensor for Axial Crack Detection in Pipeline

JING Yi-fei<sup>1</sup>, WANG Xiao-feng<sup>1</sup>, YANG Bin-feng<sup>1</sup>, ZHANG Hui<sup>2</sup>, KANG Zhi-bin<sup>1</sup>, LI Shui-fang<sup>1</sup>  
(1. Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China; 2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

**Abstract:** Pulsed remote field eddy current (PRFEC) technique integrates the advantages of richness frequency components of pulsed eddy current testing and remote field technique adapt to inspect ferromagnetic pipeline, which is used for detecting axial crack in pipelines. In this paper the principle of PRFEC is analyzed, four sensor models of different structures are designed, the detection effects of pipeline by four sensor models are simulated, the distance of transition field and the detection sensitivity for axial crack and the detection result of pipelines of various wall thicknesses are studied. The result of simulation shows that the model with the core connected through the exciting coil has the better testing ability.

**Key words:** axial crack; pulsed remote field eddy current; sensor design