

CNG 储气井套管远场涡流检测的设备研制

杜 坚¹, 段北辰¹, 张文涛², 仇 芝¹, 赵 媛¹, 芦 澍³

(1. 西南石油大学 电气信息学院, 成都 610500; 2. 中国石油集团东方地球物理公司
采集技术支持部, 涿州 072750; 3. 中国石油天然气管道局 管道投产运行公司, 廊坊 065000)

摘 要: 在研究远场涡流理论的基础上, 针对 CNG 储气井套管损伤的特点, 设计研发一套远场涡流检测系统。重点阐述了激励线圈和检测线圈的功能及设计, 该远场涡流检测系统可以用于 CNG 储气井套管损伤检测。

关键词: 远场涡流; CNG; 储气井; 套管损伤; 检测

中图分类号: TG115.28+4; TE978 文献标志码: A 文章编号: 1000-6656(2012)02-0041-04

Research on CNG Gas Storage Well Casing Damage Detection Based on Remote Field Eddy Current Technology

DU Jian¹, DUAN Bei-Chen¹, ZHANG Wen-Tao², QIU Zhi¹, ZHAO Yuan¹, LU Shu³

(1. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. Acquisition Technology Supporting Department, Bureau of Geophysical Prospecting, China National
Petroleum Corporation, Zhuozhou 072750, China;
3. Commissioning and Operation Company, China Petroleum Pipeline Bureau, Langfang 065000, China)

Abstract: A Remote Field Eddy Current (RFEC) system based on RFEC theory and the features of CNG gas storage well's casing damage was developed. Emphasis was focused on the functions and design of driving coil and detection coil. The RFEC system can be used in CNG gas storage well's casing damage detection.

Keywords: Remote field eddy current (RFEC); CNG; Gas storage well; Casing damage; Detection

远场涡流(简称 RFEC)检测技术是一种能够穿透金属管壁的低频涡流检测技术。20 世纪 50 年代壳牌公司的 Schmidt TR 在世界上首次研制成功检测井下套管的探头, 并用来检测井下套管的腐蚀情况。从 20 世纪 80 年代开始, 加拿大 Russell NDE Systems 公司致力于远场涡流技术在管道检测方面的研究, 其生产的远场涡流无损检测系统的技术居世界领先水平。进入新世纪以来, 我国电力、石化、化工行业从 Russell 公司购买了数套 204 型和 308 型远场涡流检测系统, 以检测锅炉和热交换器, 应用效果很好^[1]。近几年来, 我国石油天然气企业开始

应用 Russell 公司生产的远场涡流井下套管无损检测系统。

对于 CNG 储气井, 由于其埋地固井的特点, 只能采用内穿式仪器下井检测, 目前还没有一种无损检测手段能够较理想地对其内外壁进行检测^[2]。笔者将远场涡流技术应用于该领域, 在理论研究的基础上设计了一套远场涡流检测系统。

1 远场涡流检测原理及数学模型

1.1 基本原理

远场涡流检测的探头通常为内通过式, 由激励线圈和检测线圈构成, 检测线圈与激励线圈相距约 2~3 倍管内径的长度, 激励线圈通以低频交流电, 检测线圈能拾取发自激励线圈穿过管壁后又返回管内的涡流信号, 从而有效地检测金属管子的内、外壁缺陷和管壁的厚薄情况。

收稿日期: 2011-03-15

作者简介: 杜 坚(1960—), 男, 教授, 博士生导师。从事油气测控工程、石油矿场机械、现代仪器仪表技术等领域的基礎理論和應用技術研究以及教學工作。

随着两线圈间距的增加,检测线圈感应电压的幅值开始急剧下降,然后变化趋于缓慢,而相位存在一个跃变。通常把信号幅值急剧下降后变化趋缓而相位发生跃变之后的区域称为远场区;靠近激励线圈信号幅值急剧下降的区域称为近场区;近场区与远场区之间的相位发生大跃变的区域称为过渡区域^[3],如图1所示。

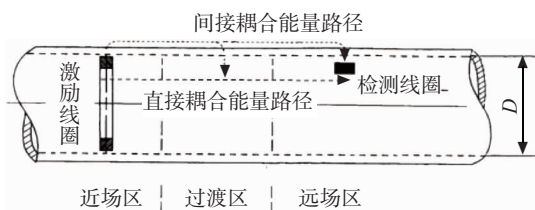


图1 远场涡流检测原理

需要检测的不是线圈的阻抗变化,通常是测量检测线圈的感应电压与激励电流之间的相位差和感应电压的幅值。有研究表明^[4],90%的磁通被紧紧地束缚在激励线圈附近,9%的磁通在距离激励线圈一个管径以内的区域,只有1%甚至更少的磁通向管内的远处扩散,而对远场涡流检测线圈起作用的磁通大约只占0.1%的总磁通,所以检测到的信号只有微伏级。这一无损检测技术实际上是“涡流检测的弱场效应”。

1.2 数学模型

远场涡流检测技术从本质上来说,是一种电磁场检测手段,因此其原理首先满足麦克斯韦方程组:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

对于远场涡流技术,引入矢量磁位 \mathbf{A} ,则磁感应强度为:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中的第二个方程,并不考虑恒定场,则磁场强度为:

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (3)$$

又因金属管壁内涡流场:

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)中的第三个方程,可得:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J} - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (5)$$

式(5)是正在激励线圈的附近金属管壁内、外区域,描述远场涡流现象的扩散方程;式中 μ, σ 是金属管材的磁导率和电导率。对于时谐电磁场,由矢量恒等式,并考虑到 $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$,则式(5)可简化为:

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{J} + j\omega \sigma \mathbf{A} \quad (6)$$

式中 \mathbf{J}, \mathbf{A} 分别为传导电流密度矢量和矢量磁位的复振幅矢量。在圆柱坐标中, \mathbf{J} 和 \mathbf{A} 均只有 θ 方向分量,且 \mathbf{A} 只是 r, z 的函数,因此,在轴对称的情况下,式(6)可简化为:

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial z^2} - \frac{\mathbf{A}}{r} \right) = -\mathbf{J} + j\omega \sigma \mathbf{A} \quad (7)$$

式(7)即为远场涡流的电磁场模型,对方程进行数值计算,可求得远场涡流的空间分布。

2 远场涡流检测系统设计

2.1 套管检测需求分析

根据目前 CNG 地下储气井的制造情况,目前均采用两大规格系列的套管产品:7"井筒(管径 177.8 mm×壁厚 10.36 mm,井筒钢级 N80Q)和 9-5/8"井筒(管径 244.5 mm×壁厚 11.05 mm,井筒钢级 P110)。如图2所示,CNG 地下储气井属固定式压力容器,容器的主体(井筒)埋于地下(属隐蔽工程),裸露在地面的部分为容器的井口装置及相关连接附件。储气井主要由以下部分构成:

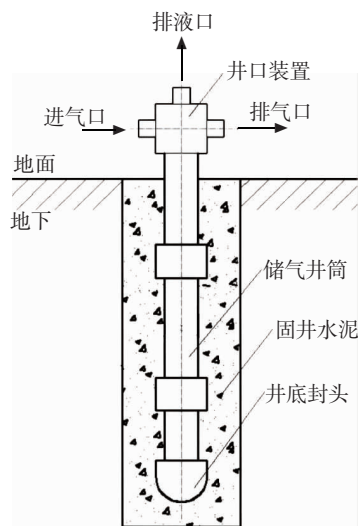


图2 CNG 储气井结构

(1) 井口装置(接箍、阀门、压力表、短节、接头、O型密封圈等外部连接管组件件)。

(2) 储气井主体(下封头组合件、上下法兰组合件、套管)。

(3) 排污系统。

(4) 固井水泥环(井眼及水泥固井层)。

随着使用年限的增长,CNG 储气井套管容易出现腐蚀,造成各种形态的损伤,主要有裂纹、减薄、点蚀等。裂纹有不同的走向,各种损伤可能发生在套管内壁和外壁。因此,提前对管道进行有效的无损探伤,确定各类损伤的位置和程度,对安全生产至关重要。

目前,远场涡流检测技术在国内主要应用于换热器管道缺陷检测,而在大口径管道检测上应用还不成熟,推测主要问题是检测信号微弱,系统设计不成熟等原因。

2.2 检测系统设计

针对 CNG 储气井套管损伤的特点,设计研发一套远场涡流检测系统。如图 3 为设计的远场涡流检测系统框图,主要由信号源、功率放大器、激励线圈、检测线圈、数据采集模块以及用于数据显示和处理的上位机组成。

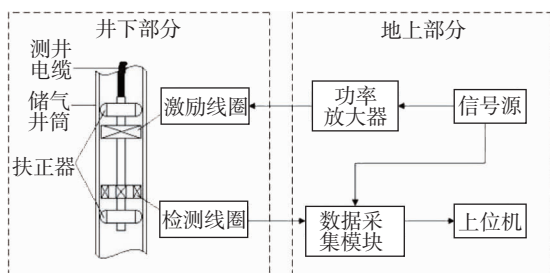


图3 CNG 储气井套管损伤远场涡流检测系统设计

(1) 信号源 作为激励线圈的激励源,同时提供相位测量的参考信号。采用信号发生模块,产生 30~80 Hz 的交流信号。

(2) 功率放大器 用来提高信号源的功率。采用功率放大器电路模块,使激励信号功率加大,至少达到 50 mA 的电流强度(最新试验确定)。

(3) 激励线圈 通以经功率放大器放大的交流电信号,在空间中产生电磁场。设计采用漆包线在环形磁芯上绕制形成激励线圈,线圈两侧加装铜板,用以屏蔽直接耦合信号对检测信号的干扰,从而缩短激励线圈和检测线圈的间距。

(4) 检测线圈 在距离激励线圈 2~3 倍管径处放置检测线圈阵列。设计采用多个电感形成检测阵列。另外可以设计采用其他类型的磁传感器,如霍尔元件、巨磁阻传感器等。

(5) 数据采集模块 主要将检测线圈接收到的微弱电信号实现高增益、低噪声放大,检测接收信号

与参考信号的相位差以及接收信号的幅值。

(6) 上位机 设计将采用图形化虚拟仪器开发平台 LabVIEW 开发远场涡流检测系统,实现对检测信号的显示和存储,同时开发更多数据处理功能。

3 核心设备设计

3.1 激励线圈

激励线圈的作用是在被检测管道空间中产生交变电磁场。由于远场涡流检测技术的弱场效应,可被检测到的信号微弱;而且所检测的 CNG 储气井套管属于大口径铁磁性钢管,管壁较厚。为取得满意的检测效果,首先要求激励线圈激发出的电磁场有足够大的功率。基于这种考虑,激励线圈需要在保证设备安全的基础上,加大激励电流强度;在结构允许的范围内,增加线圈匝数。

激励线圈由漆包线、磁芯、线圈骨架和屏蔽板构成。首先确定漆包线线径,如果线径太小,就不能承受产生足够电磁场功率所需的激励电流强度;如果线径太大,在有限的空间中无法绕制足够的线圈匝数,也限制了激励电磁场功率的提高。综合这两点,选定线径为 0.31 mm 的锗锰铜电阻合金漆包线绕制激励线圈。

确定线圈匝数 N 的公式为:

$$N = \frac{S \cdot \epsilon}{s} \quad (8)$$

式中 S ——线圈绕线部分截面积,为 430 mm²;

ϵ ——线圈槽满率,一般取 0.7;

s ——导线截面积;

$$s = \frac{1}{4} \pi d^2 = 0.0755 \text{ mm}^2。$$

将 S 、 ϵ 和 s 代入式(8),得到 $N=3988$ 。考虑到实际绕线操作中不可避免产生绕线间隙,取 3000 匝。绕线完成后,线圈外径低于线圈骨架边缘 5~6 mm,比较合理地利用了空间。

根据远场涡流理论,检测二次穿过管壁的间接耦合磁通,只有这部分电磁场携带了套管损伤的信息。因此在系统设计时,需尽力增强间接能量耦合,减弱直接能量耦合。为了达成此效果,在激励线圈两侧加装了铜板,再在其轴心通孔加装了铜管。由于铜是抗磁性材料,这样可以引导更多的磁通传出管壁,有助于加强远场效应。如图 4 为制作完成的激励线圈。

3.2 检测线圈

检测线圈相当于一个磁传感器,感受二次穿过

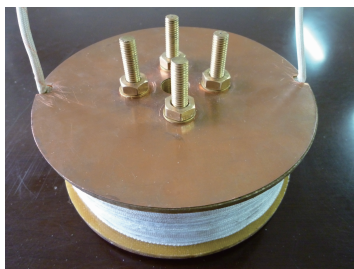


图4 激励线圈

管壁的交流磁场信号。由于电磁感应原理,检测线圈中产生感应电压,分析这个微弱的电压信号,可以获知管壁的信息。根据远场涡流原理,在管壁无缺陷时,检测线圈的感应电压与激励电流间的相位滞后正比于壁厚与集肤深度倒数的乘积;管壁存在裂纹、凹坑及腐蚀等缺陷时,管壁厚度减小,因而导致检测信号相位差减小和幅值增大,于是管道缺陷被发现^[4]。为了同时检测管壁不同周向位置的缺陷,一个大的轴向线圈显然无法判断缺陷位置,故检测线圈部分采用多个线圈,实际形成一个检测线圈阵列。

对检测线圈来说,希望其具备足够的检测精度和检测灵敏度,使其能够检测最小间距 20 mm,宽 2 mm 的周向裂纹。检测精度要求检测线圈不能太大,否则对细小裂纹缺陷无法检测,检测灵敏度又需要检测线圈有足够的匝数,可以感知微弱的磁场变化。综合考虑,选择了规格为 0.4 A/100 mH 的环形电感元件作为检测线圈,其外形尺寸为 16 mm (外径)×18 mm (高),符合检测要求。

检测线圈的排列方向主要有周向、径向、轴向三种方式。由于激励线圈为轴向,在套管内部远场空间的磁场主要为轴向,故检测线圈也选用轴向排列。

在每个检测线圈外部加装了铜皮,用来屏蔽相邻检测线圈之间的电磁干扰。制作完成的检测线圈阵列如图 5。



图5 检测线圈阵列

4 结论及展望

设置激励信号参数为:交流正弦波信号,幅值 50 mA,频率 30 Hz。通过试验测试,检测线圈阵列在远场区域可以检测到携带套管损伤信息的交变信号。说明设计的远场涡流检测系统可以用于 CNG 储气井套管损伤检测。下一步将设计试验,使用研发的套管内外壁缺陷标定装置完成远场涡流检测。

参考文献:

- [1] 严舒. 远场涡流无损检测技术的发展与应用[J]. 石油科技论坛, 2008(3): 55—56.
- [2] 许立志, 王明灼, 曾黄麟. CNG 储气井套管检测技术综述[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2009(12): 111—115.
- [3] David L Atherton. Remote field eddy current inspection[J]. IEEE Transaction on Magnetics, 1995(11): 4142—4147.
- [4] 任吉林, 林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 203—213.
- [3] 王珏, 黄苏红, 蔡玉芳. 工业 CT 材料密度测量方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(2): 203—205.
- [4] 杨雪海, 张伟斌, 戴斌, 等. 含能材料密度的 XCT 自参照测试[J]. 无损检测, 2010, 32(6): 431—433.
- [5] Hui-neng CHEN, Shu-bing YANG. Study on the density characterization of the CT image[C]. 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25—28, Oct 2008, shanghai, China.
- [6] 倪培君, 蔡和平, 任安峰, 等. 基于组分特性的材料密度工业 X 射线 CT 定量检测[J]. 无损检测, 2011, 33(7): 5—10.

(上接第 15 页)

(3) 对于带钢壳铝合金材料密度的测试, 密度对比法的测试结果要优于线衰减系数对比法。为此, 弹药类非均匀结构中材料密度工业 CT 定量检测应优选密度对比法。

参考文献:

- [1] ASTM E1935—1997(2008) Standard Test Method for Calibrating and Measuring CT Density[S].
- [2] 杨文海, 何得昌, 徐军培, 等. γ 射线工业 CT 技术在高能炸药密度检测中的应用[J]. 火炸药学报, 2001, 24(3): 33—34, 72.