

引用格式: 韩扬, 朱琪, 陈永安, 等. 脉冲涡流检测在核电厂管道的应用 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 118-126. HAN Yang, ZHU Qi, CHEN Yongan, et al. Application of pulsed eddy current detection in pipeline of nuclear power plant [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 118-126. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.12.

脉冲涡流检测在核电厂管道的应用

韩扬¹, 朱琪², 陈永安^{3,✉}, 徐宁¹

(1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004;

2. 中能建建筑集团有限公司, 安徽 合肥 230088;

3. 中能建数科集团有限公司, 北京 100022)

摘要: [目的] 为了提高换热效率, 核电厂的凝结水管线、主给水管线、疏水管线及部分抽气管线管道外侧均加装了包覆层, 目前对于铁磁性管道的检测手段主要为常规超声技术及超声导波技术。上述检测技术受限于检测环境及前提条件, 检测难度较大。文章旨在提高带保温层管道的检测效率, 丰富技术手段, 缩短检修工期, 提高核电厂经济效益。[方法] 通过研究核电站低频电磁干扰下脉冲涡流检测方法的可行性和可靠性, 利用感应电压测量值与计算值建立最优化参数反演问题, 并结合参数之间的耦合关系式, 根据管道脉冲涡流场时域解析解的基础上, 建立感应电压测量值与计算值特定关系式, 建立最优化参数反演问题, 并结合参数之间的耦合关系式, 提出 1 种针对核电厂带保温管道在役运维的脉冲涡流检测技术。[结果] 利用文章提出的铁磁管道相对壁厚脉冲涡流检测方法对核电厂在役样管进行检测, 并将检测结果与常规超声检测结果进行对比, 得出二者检测结果误差在 5% 左右。[结论] 脉冲涡流检测结果可靠, 适用于核电厂铁磁管道壁厚腐蚀减薄的无损检测与评估。

关键词: 脉冲涡流检测; 铁磁管道; 壁厚检测; 反演问题; 腐蚀减薄

中图分类号: TL4; O441.5; TM62

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)04-0118-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.12

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Application of Pulsed Eddy Current Detection in Pipeline of Nuclear Power Plant

HAN Yang¹, ZHU Qi², CHEN Yongan^{3,✉}, XU Ning¹

(1. Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou 215004, Jiangsu, China;

2. China Energy Construction Group Co., Ltd., Hefei 230088, Anhui, China;

3. China Energy Engineering Group, Beijing 100022, China)

Abstract: [Introduction] In order to improve heat exchange efficiency, the condensate pipelines, main water supply pipelines drain pipelines and partial extraction pipelines of nuclear power plants are all coated outside the pipelines. At present, the test methods of ferromagnetic pipelines are mainly conventional ultrasound and ultrasonic guided waves. These test methods are limited by the detection environment and preconditions, which increase the difficulty of test. In order to improve the test efficiency of pipelines with insulation layer, we shall enrich technical methods, shorten maintenance period and improve economic benefit of nuclear power plant. [Method] This paper mainly studied the feasibility and reliability of pulsed eddy current testing method under low frequency electromagnetic interference in nuclear power plant, and used the measured and calculated values of the induced voltage to establish the optimal parameter inversion problem. In combination with the coupling relationship between the parameters and based on the time-domain analytical solution of the pipeline pulsed eddy current field, the paper established the specific relationship between the measured value and the calculated value of the induced voltage, and established the optimization parameter inversion problem. In combination with the coupling relationship between the parameters, the paper proposed a pulsed eddy current detection method for in-service operation and

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-09-08

基金项目: 中国能源建设股份有限公司科技项目“核电常规岛设备无损检测关键技术研究与应用”(CEEC2020-KJ02)

maintenance of insulated pipes in nuclear power plants. [Result] Using the pulsed eddy current detection method for the relative wall thickness of ferromagnetic pipelines proposed in this paper, in-service sample pipelines of nuclear power plant are tested and the testing result is compared with conventional ultrasonic testing. The error of the two testing results is about 5%. [Conclusion] The testing results of impulse eddy current testing are reliable and it is suitable for non-destructive testing and evaluation of nuclear power plant ferromagnetic pipeline wall thickness corrosion thinning.

Key words: pulsed eddy current testing; ferromagnetic tube; wall thickness testing; inversion problem; corrosion thinning

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

电厂在役运行阶段,汽水管道及工业管道由于介质长期冲刷,存在加速腐蚀情况,严重威胁电厂安全运行^[1]。现阶段针对电厂在役运维的技术手段主要为超声波检测,对于检测前序准备及检测前提条件要求较高,增加了现场实施难度。

脉冲涡流法,具有穿透距离大,检测速度快等优点,可以作为一种新型无损检测技术应用于核电厂在役运维^[2]。在激发线圈加载方波电流,通过检测线圈检测待检部件内涡流电磁场的变化来检测剩余壁厚。针对核电厂带保温层管道,其保温层厚度范围为50~100 mm,脉冲涡流可以穿透保温层对待检管道剩余壁厚进行评估,使用脉冲涡流进行管道初筛,可以缩短电厂检修工期,提高发电经济效益。

现有铁磁管道脉冲涡流检测技术,主要根据感应电压与时间绘制关系曲线,通过对数变换等手段截取曲线变化前后期的特征参数。黄平捷等^[3-4]对多层厚度电涡流检测反演算法及实验进行了研究。贺光琳^[5]研究了涡流检测缺陷反演算法以及直接数字频率合成技术。Dehaan等^[6]以双对数坐标系下时域感应电压拐点时间作为检测特征量来检测铁磁管道壁厚的相对变化量。Cheng^[7]对同时带有非金属保温层和金属保护层的碳钢管道的壁厚减薄脉冲涡流检测方法进行了研究,将理论模型简化为4层平板模型,并提取磁场衰减系数作为特征量来检测碳钢管道壁厚。柯海等^[8]针对钢材腐蚀,采用特定脉冲涡流信号变换并提取,以后期感应电压直线段的斜率为特征量来反映壁厚大小或利用信号拐点来检测铁磁管道的壁厚。Xu等^[9]利用差分信号峰值时间来检测铁磁管道的壁厚。

最优化方法是涡流检测中参数反演、缺陷重构

的另一种有效方法。Vasić等^[10]利用管道内同轴线圈的阻抗变化,来同时反演金属管道的内径和电磁参数,研究发现该方法只能反演出管道的内径以及相对磁导率与电导率的比值。Mao等^[11]则基于金属管道外放置式线圈涡流检测模型的频域解析解,与线圈阻抗-频率变化曲线建立最小二乘参数反演问题,利用Levenberg-Marquardt(LM)算法同时反演铁磁管道的电导率、磁导率、壁厚、内径、线圈提离5个参数,实验结果表明,参数反演结果受迭代初值的影响较大。Xie等^[12]利用脉冲涡流检测中感应电压差分信号,运用共轭梯度算法来反演双层金属管道壁内局部腐蚀减薄缺陷,论文指出,当同时反演缺陷形状的多个参数时,第一参数的选取极为重要,参数顺序选取错误,反演结果无法提取特征量,随着待反演参数的增加,这类问题会变得更加严重。

上述文献均指出同时反演多个参数时难度更大,检测结果的精度和可靠性会变差。重要原因之一是待反演参数之间存在耦合关系,当待检测参数耦合在一起时,不管是采用特征量法还是最优化参数反演法,检测信号微小的扰动,或者反演条件稍微的改变,均会导致检测结果显著的误差。

与石油、石化厂相比,核电站中存在发电机组、变电站、输电母线等大功率电器设备,其中的大电流会在整个电厂空间形成低频磁场,频率成分以50 Hz基波及其奇次谐波为主。而这个频段,会与脉冲涡流检测信号的频谱有明显重合,因此,在役机组产生的低频磁场会对脉冲涡流检测信号造成明显的电磁干扰。本文主要研究核电站低频电磁干扰下脉冲涡流检测方法的可行性和可靠性。根据管道脉冲涡流场时域解析解的基础上,建立感应电压测量值与计算值特定关系式,建立最优化参数反演问题,并结合参数之间的耦合关系式,提出1种针对核电厂带保温管道在役运维的脉冲涡流检测技术。

1 带保温层管道脉冲涡流检测模型的时域解析解

设长直导电、导磁金属管道的内半径为 r_1 , 外半径为 r_2 , 管道壁厚 $d = r_2 - r_1$, 电导率 σ , 磁导率 $\mu = \mu_0 \mu_r$ (μ_0 为真空磁导率, μ_r 为相对磁导率)。激励线圈(下标为 d)和检测线圈(下标为 p)沿管道径向法线垂直放置在管道外, 线圈高度为 h 。如图 1 所示, l_0 为保温层厚度, 即探头的提高距离。圆柱线圈的内半径和外半径分别为 r_{di} 和 r_{do} , 匝数为 N 。建立圆柱坐标系 $O\rho\phi z$, 并让 z 轴与管道轴线重合。对管道实施脉冲涡流检测时, 通过在激励线圈中通入方波电流激发待检管道模型本体的涡流场变化, 涡流场变化被检测线圈接收并处理, 得到待检管道模型的剩余壁厚及相关参数。

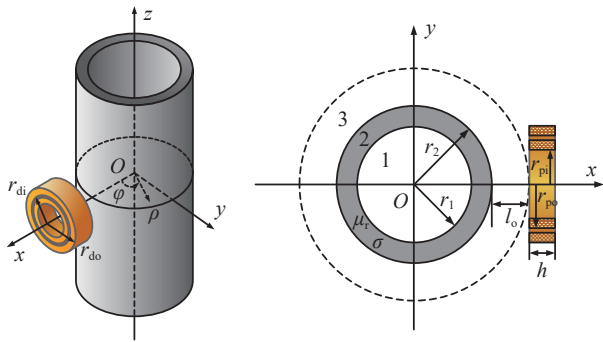


图 1 金属管道外垂直放置圆柱线圈脉冲涡流检测模型

Fig. 1 Pulse eddy current testing model of placing cylindrical coil vertically outside the metal pipeline

图 1 所示管道涡流检测模型是 1 个三维涡流场问题。当进行方波电流 $i(t)$ 激励时, 引用文献 [13] 的结果, 可以得到如下感应电压时域解析公式, 如式(1)所示:

$$u_{ec}(t) = i'(t) \int_0^{+\infty} \sum_{m=0}^{+\infty} \frac{v_m C_d(\lambda, m) C_p(\lambda, m)}{\lambda^3 K_m^2(\lambda r_2)} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{F_{nu}(\xi_{dek})}{F'_{de}(\xi_{dek})} \xi_{dek} e^{-\frac{\xi_{dek}^2 + \lambda^2}{\mu\sigma} t} d\lambda \quad (1)$$

$$V_m = \begin{cases} 1, & m=0 \\ 2, & m \neq 0 \end{cases}$$

式中:

$K_m(x)$ ——第 2 类 m 阶修正贝塞尔函数;

$i'(t)$ ——方波电流的导数。

$$f_1(t) * f_2(t) = \int_0^t f_1(\tau) f_2(t-\tau) d\tau$$

“*” 表示对时间的卷积。

激励线圈系数如式(2)所示:

$$C_d(\lambda, m) = \frac{N_d}{(r_{do} - r_{di}) h_d} \int_{r_{di}}^{r_{do}} \int_0^{r_0} (C_{sa} + C_{sb}) \sin\left(\lambda \sqrt{r_0^2 - y^2}\right) dy \quad (2)$$

$$C_{sa} = \frac{x\lambda}{\sqrt{x^2 + y^2}} K'_m(\lambda \sqrt{x^2 + y^2}) \cos\left(\arctan \frac{y}{x}\right);$$

$$C_{sb} = \frac{my}{x^2 + y^2} K_m(\lambda \sqrt{x^2 + y^2}) \sin\left(\arctan \frac{y}{x}\right);$$

式中:

N_d ——圆柱激励线圈的匝数(个);

r_{do} ——激励线圈外半径(mm);

r_{di} ——激励线圈内半径(mm);

h_d ——激励线圈外半径(mm)。

将检测线圈几何参数代入到式(2)中得到 $C_p(\lambda, m)$ 。式(1)中分子和分母的表达式分别如式(3)、式(4)所示:

$$F_{nu}(\xi) = \beta_s A_m D_m - \alpha_s B_m C_m - A_m B_m r_{22} \quad (3)$$

$$F_{de}(\xi) = (\beta_\xi A_m + \alpha_\xi B_m)^2 - \alpha_\xi \beta_\xi (C_m + D_m)^2 - \beta_\xi A_m (C_m r_{22} + D_m r_{11}) + \alpha_\xi B_m (D_m r_{22} + C_m r_{11}) + A_m B_m r_{11} r_{22} \quad (4)$$

式中:

$$\alpha_\xi = -\frac{\lambda \mu_r}{\xi};$$

$$\beta_\xi = -\frac{m^2 \mu_r}{\xi^2} \left(\frac{\lambda}{\xi} + \frac{\xi}{\lambda} \right);$$

A_m 、 B_m 、 C_m 和 D_m 分别为贝塞尔函数的多项式:

$$A_m = J_m(r_1 \xi) Y_m(r_2 \xi) - J_m(r_2 \xi) Y_m(r_1 \xi)$$

$$B_m = [J'_m(r_1 \xi) Y'_m(r_2 \xi) - J'_m(r_2 \xi) Y'_m(r_1 \xi)] r_1 r_2$$

$$C_m = [J'_m(r_1 \xi) Y_m(r_2 \xi) - J_m(r_2 \xi) Y'_m(r_1 \xi)] r_1$$

$$D_m = [J_m(r_1 \xi) Y'_m(r_2 \xi) - J'_m(r_2 \xi) Y_m(r_1 \xi)] r_2$$

其中 $J_m(x)$ 和 $Y_m(x)$ 分别为第 1 类和第 2 类 m 阶贝塞尔函数, $J'_m(x)$ 和 $Y'_m(x)$ 分别表示其对变量 x 的导数。式(1)中 ξ_{dek} 是分母表达式 $F_{de}(\xi) = 0$ 的第 k 个正实根, $F'_{de}(\xi)$ 表示分母 $F_{de}(\xi)$ 对变量 ξ 的导数 (ξ_{dek} 、 $F'_{de}(\xi)$ 可通过数值计算方法获得)。

2 铁磁管道壁厚反演方法

2.1 参数反演数学模型

图 1 所示管道检测模型中, 已将脉冲磁场激励

下铁磁管道的磁化曲线作线性化近似处理,设相对磁导率值为1个未知常数^[14]。在此,利用最小二乘法求解参数反演问题如表1所示。设被检铁磁管道的壁厚 d 、电导率 σ 和相对磁导率 μ_r 为3个未知参数,设参数向量 $x = (d, \sigma, \mu_r)^T$ 。设采集到的检测线圈两端时域感应电压数据为 $(t_1, u_1), (t_2, u_2), \dots, (t_m, u_m)$,检测线圈两端理论感应电压为 $u(x, t)$,取二者误差平方的一半的最低值进行反演^[15]。

$$\begin{cases} \min_{x \in R^3} f(x) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m [u_j - u(x, t_j)]^2 \\ s.t. x_i > 0, i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (5)$$

表1 模拟线圈的几何参数

Tab. 1 Geometry of excitation coil and test coil

线圈参数	激励线圈	检测线圈
匝数 N /个	174	1 025
高度 h /mm	25.0	25.0
内半径 r_i /mm	20.9	20.0
外半径 r_o /mm	22.2	20.8

研究过程中,通过比较时域感应电压对壁厚、电导率和相对磁导率的偏导函数表达式和计算曲线,判断出3个偏导函数之间存在近似线性相关,进而分析得出在铁磁构件脉冲涡流检测中,构件电导率与壁厚,以及相对磁导率与壁厚,大体以乘积的形式耦合在一起^[16]。

即在铁磁管道脉冲涡流检测中,感应电压对 x 中各参数的偏导函数满足:

$$\frac{\partial u_{ec}(x, t)}{\partial \sigma} \sigma + \frac{\partial u_{ec}(x, t)}{\partial \mu_r} \mu_r - \frac{\partial u_{ec}(x, t)}{\partial d} d \approx 0 \quad (6)$$

利用特征方程法解此一阶齐次偏微分方程(6),方程的通解可以写为^[17]:

$$u_{ec}(d, \sigma, \mu_r, t) = u_{ecp}(\sigma d, \mu_r d, t) \quad (7)$$

这表明时域感应电压 $u_{ec}(\sigma, \mu_r, d, t)$ 可以用1个只含变量 σd 、 $\mu_r d$ 的函数 u_{ecp} 表出。设参数向量 $x_p = (\sigma d, \mu_r d)^T$,即时域感应电压 $u_{ec}(x, t)$ 可用 $u_{ecp}(x, t)$ 来表示。为了验证这一结论,将图1所示管道检测模型中,铁磁管道的参数 x 分别设为:

$$x_1 = (7.0\text{mm}, 4.5M_s/m, 200)^T$$

$$x_2 = (5.0\text{mm}, 6.3M_s/m, 280)^T$$

$$x_2 = (9.0\text{mm}, 3.5M_s/m, 156)^T$$

x_1 、 x_2 和 x_3 对应的 $x_p = (3.15 \times 104S, 1.4m)^T$ 固定不变。由式(1)分别计算出 x_1 、 x_2 和 x_3 对应的感应电压理论曲线如图2所示。图中感应电压曲线几乎重合,很难区分。综上所述,对铁磁管道实施脉冲涡流检测时,电导率与壁厚以及相对磁导率与壁厚,也会以乘积的形式耦合在一起。

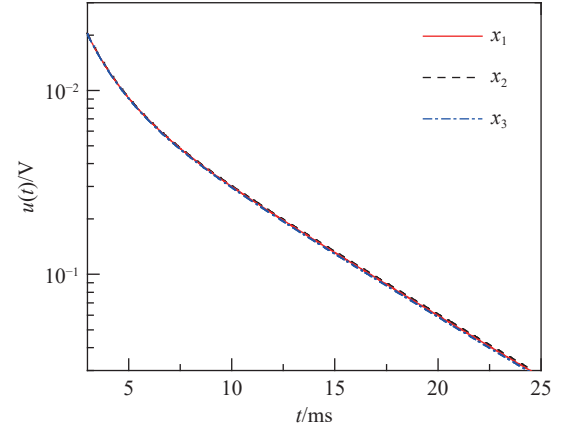


图2 不同参数设置下铁磁管道时域感应电压理论计算曲线

Fig. 2 Theoretical calculation curve of time domain induced voltage of ferromagnetic pipeline under different parameter settings

2.2 铁磁管道壁厚反演方法

研究表明,当参数之间存在耦合关系时,对参数的涡流检测灵敏度会显著降低^[18]。当待反演的参数之间存在耦合关系时,参数反演问题会变成1个多解问题,此时,检测信号微小的扰动,或者反演条件(反演算法、迭代初值、迭代次数等)稍微的改变,均会引起检测结果显著的误差,导致参数检测结果的精度和可靠性变差。利用脉冲涡流感应电压检测信号将只能准确反演出 ud 和 $\mu_r d$ 两个乘积量,即参数向量 x_p 。一般而言,被检铁磁构件的电磁参数很难预先测得。在实施检测过程中,可设同一段被检构件的电导率为一固定常数,通过两处检测点壁厚反演结果作比,来消除电导率的影响,从而检测出两检测点壁厚的相对变化量。具体检测步骤如下:

步骤1:在待检部件上任意选取一处检测点,标记为参考点 Q_0 ,参考点 Q_0 处的真实壁厚记为 d_0 。

步骤2:将线圈探头置于参考点 Q_0 处,对参考点 Q_0 实施脉冲涡流检测,采集得到检测线圈两端时域感应电压 $(t_1, u_1), (t_2, u_2), \dots, (t_m, u_m)$ 。

步骤 3: 利用参考点 Q_0 处的时域感应电压测量值 u_m 与式 (2) 得到的理论计算值 $u(x, t)$ 比较, 建立最小二乘参数反演问题 (4), 并将参数向量 x 中电导率值设为常数 σ_0 , 壁厚和相对磁导率设为未知参数, 然后采用数值迭代算法反演出参考点 Q_0 处壁厚反演结果 d_0^* , 相对磁导率反演结果 μ_0^* 。

步骤 4: 在待检部件检测点 Q_j 处放置空心线圈探头, 重复步骤 2 和步骤 3, 得到检测点 Q_j 处壁厚反演结果 d_j^* , 电磁参数反演结果 μ_j^* , 检测点 Q_j 处的真实壁厚记为 d_j 。

步骤 5: 对比参考点与检测点所得结果, 得到式 (8):

$$\frac{d_j}{d_0} = \frac{d_j^*}{d_0^*} \quad (8)$$

2.3 脉冲涡流检测系统

脉冲涡流检测系统的构成如图 3 所示, 通常分为: 供电电源部分、脉冲涡流检测探头、数据采集卡、系统主机。系统主机用于脉冲激励信号波形的编辑和输出、探头检测装置两端感应电压的采集和储存、检测信号的后期处理, 最终输出检测结果; 脉冲功率放大器将主机输出的脉冲激励信号放大成相同波形的大功率脉冲电流输出到激励线圈, 在被测构件中产生涡流。探头内部分为激励线圈和检测接收元件两部分, 分别用于脉冲磁场的激励和脉冲涡流场的检测, 将涡流场的衰减变化转变为检测元件输出端的电压信号随时间的变化。

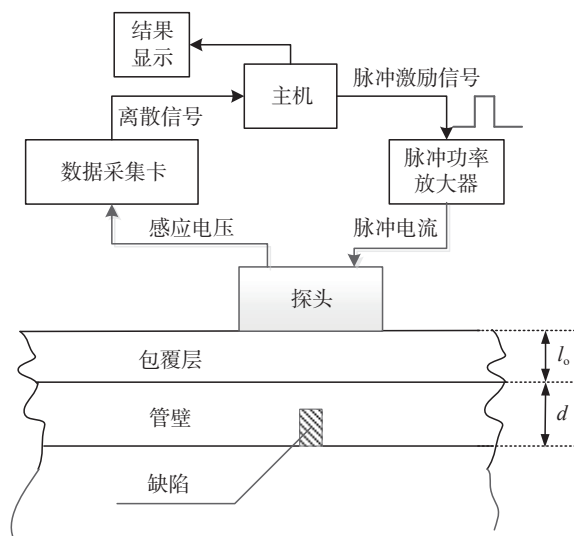


图 3 脉冲涡流检测系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pulse eddy current testing system

3 实验结果分析

核电厂二回路汽水管道多采用碳钢或低合金钢制造, 管道内径通常为 25.4~800 mm, 壁厚通常为 3.4~80 mm。管线中存在弯头、变径、三通、节流孔板、阀门等结构形状变化显著且易发生湍流的部位, 从而引起流体加速腐蚀 (FAC)、液滴冲击 (LDI)、汽蚀等。由于管材材质、服役环境、结构形状等因素的影响导致管线在敏感部位发生局部减薄^[19-21]。

相对于直管而言, 弯管检测难度有所增加: (1) 弯头部分由于制造原因使得不同位置厚度变化较大; (2) 带包覆层的弯头由于曲率原因, 会造成不同位置包覆层厚度不均匀的状况, 引起提离变化; (3) 对于管径较小的弯管导致检测探头无法放置或提力度过大等情况。本文选取核电在役弯管作为研究对象, 所得结果更加具有说服力, 更能体现本文所提脉冲涡流方法检测的准确性。

选取 7 根典型汽水系统弯管作为研究对象, 弯管信息如表 2 所示, 将弯管待检区域沿周向划分八条检测线, 如图 4 所示; 每条侧线上等距离选取 4~10 个测点, 利用脉冲涡流与常规超声分别对上述测点进行检测。

表 2 实验对象信息

Tab. 2 Subject information

管线号	外径/mm	名义壁厚/mm	材质	包覆层材质
AHP	559	28	碳钢	
STR	114	7	碳钢	
APA	324	16	碳钢	
GSS	114	10	碳钢	铝皮
GSS	168	9	碳钢	
GSS	324	11	碳钢	
GSS	324	10	碳钢	

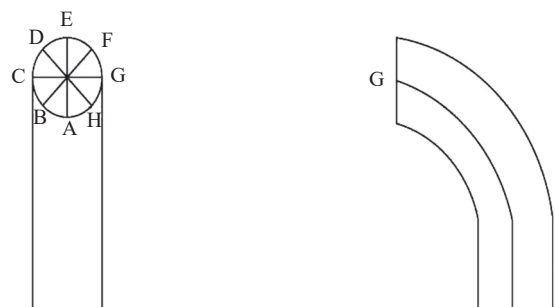


图 4 检测区域划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of test area division

脉冲涡流采用两种记录方法, 其中 1 种以实际壁厚进行标定, 如表 3 所示; 另 1 种采用壁厚变化量进行标定, 如表 4 所示。表 3 中, 背弧侧脉冲涡流数据与超声测厚数据的相对平均误差为 9.6%, 背弧面两侧 D、F 线相对平均误差均为 11%; 表 4 以 C2 处进行脉冲涡流标定, 记录了各个位置的相对壁厚变化量, 壁厚整体变化趋势与超声检测壁厚变化趋势一致。

表 3 脉冲涡流 (PECT) 和超声 (UT) 测试结果对比
(实际壁厚测量)

Tab. 3 Comparison of pulsed eddy current and ultrasonic test results (actual wall thickness measurement)

编号	方法	1	2	3	4	5	6	7
B	P	10.56	10.99	11.22	11.44	—	—	—
	U	9.60	10.30	11.10	10.80	—	—	—
C	P	9.40	10.09	10.06	10.29	10.00	9.64	9.98
	U	10.20	11.02	11.00	11.10	11.10	10.80	10.00
D	P	9.81	9.84	9.59	9.46	9.24	9.25	9.14
	U	10.80	10.70	10.90	10.80	10.40	10.40	10.30
E	P	9.98	9.83	9.51	9.35	9.14	—	—
	U	10.90	10.30	10.20	10.70	10.30	—	—
F	P	9.99	10.02	9.73	9.48	9.32	—	—
	U	11.30	11.10	11.00	10.70	10.20	—	—
G	P	9.68	9.95	10.04	10.15	9.75	9.90	—
	U	11.10	11.50	11.70	11.50	11.40	11.30	—
H	P	10.08	10.63	10.90	10.61	10.48	—	—
	U	11.60	11.50	11.80	11.30	10.30	—	—

注: A线为弯管内弧侧; E线为弯管外弧侧; P为PECT; U为UT。

表 4 相对壁厚测量法

Tab. 4 Relative wall thickness measurement

编号	方法	1	2	3	4	5	6	7
B		98.3	106.3	103.0	98.4	—	—	—
C		98.3	99.8	99.4	99.7	98.7	98.8	97.2
D		93.5	98.3	96.6	98.7	97.5	99.3	87.9
E	PECT	93.7	91.4	91.5	89.4	87.9	—	—
F		97.5	99.1	99.5	98.4	97.7	—	—
G		97.9	97.4	101.5	101.5	101.2	99.8	—
H		96.9	99.0	102.2	100.2	—	—	—

注: 每个测点记录的为壁厚百分比%; PECT为脉冲涡流检测。

选取实验对象 2 进行测试, 脉冲涡流以 10 mm 进行标定。选取实验对象 2 进行测试, 脉冲涡流以

7 mm 进行标定。选取实验对象 3 进行测试, 脉冲涡流以 22 mm 进行标定。两种方法对比结果如表 5 所示。

表 5 两种方法对比结果

Tab. 5 Result comparison of two methods

编号	方法	1	2	3	4	5	6	7	8	9
B	U	22.10	22.56	22.18	22.84	—	—	—	—	—
	P	21.10	21.70	22.80	22.70	—	—	—	—	—
C	U	21.43	21.88	22.34	21.24	22.47	21.69	22.38	—	—
	P	20.40	21.80	22.10	22.40	22.20	22.50	22.20	—	—
D	U	22.06	21.84	22.33	21.68	21.57	21.56	22.01	22.42	—
	P	21.80	21.80	21.80	22.30	21.70	21.80	21.90	21.80	—
E	U	22.75	22.06	21.49	21.26	21.24	21.85	21.44	22.11	22.92
	P	21.80	21.50	21.80	21.90	21.30	21.20	21.80	21.70	21.90
F	U	22.99	22.55	22.54	22.63	22.41	22.12	22.31	—	—
	P	21.40	21.70	22.20	22.40	21.80	21.80	22.40	—	—
G	U	22.57	22.30	22.37	22.90	—	—	—	—	—
	P	21.50	21.60	21.80	21.30	—	—	—	—	—

D 线和 E 线结果对比线如图 5、图 6 所示。弯头背弧侧通常是易减薄区域, 选取背弧面的 3 条检测线(D、E、F)作为主要参考, 通过测试线上两种方法所得数据对比, 可以反映出脉冲涡流技术的适用性。E 线上最大误差为 4.1%, 最小误差为 0.2%, 平均误差为 2.5%; D、F 线平均误差分别为 1.5%、2.5%。

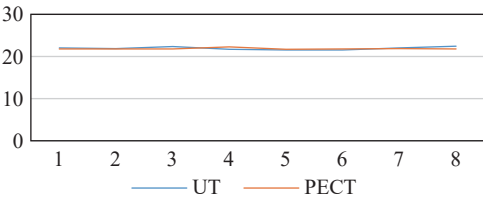


图 5 D 线结果对比曲线
Fig. 5 Result comparison curve of D line

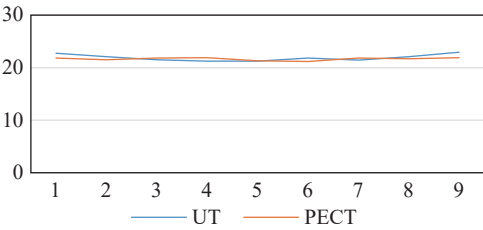


图 6 E 线结果对比曲线
Fig. 6 Result comparison curve of E line

选取实验对象 1 进行测试, 脉冲涡流以 28 mm 进行标定。从表 6 中可以得出, 同一条检测线上脉

冲涡流检测数据整体平稳,与超声测厚结果误差较小,具体为:C线上两种方法所得数据相对平均误差为1%,背弧侧(E线)为2.8%,整体差异较小。

表 6 弯管测试结果
Tab. 6 Result of bending test

编号	方法	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	U	37.47	38.98	40.25	39.24	39.88	39.31	36.43	—	—
	P	37.13	37.39	38.32	37.53	37.26	37.66	37.79	—	—
B	U	36.65	36.31	36.54	38.00	36.44	37.12	36.74	37.35	37.18
	P	36.51	36.38	36.70	37.29	36.90	36.90	36.30	37.29	36.64
C	U	36.59	35.71	33.70	32.04	32.00	32.22	32.97	32.37	—
	P	36.51	32.80	32.80	32.80	31.20	33.15	32.57	31.31	—
D	U	35.50	35.65	35.83	36.71	35.48	35.33	35.28	36.12	36.97
	P	34.71	35.49	35.87	37.15	36.20	36.64	36.62	36.25	35.35
E	U	37.47	38.98	40.25	39.24	39.88	39.31	36.43	—	—
	P	37.13	37.39	38.32	37.53	37.26	37.66	37.79	—	—

选取 D~F 线长方形区域,根据各侧线上测点划分网格,对每个网格进行脉冲涡流进行测厚,将结果以伪彩色图进行描述,以颜色变化表示相对壁厚的变化。如图 7 和图 8 所示,可以得出相同位置两种方法测量的相对壁厚变化趋势基本一致,这也证明了本文所研究的脉冲涡流技术具有更好的适用性。

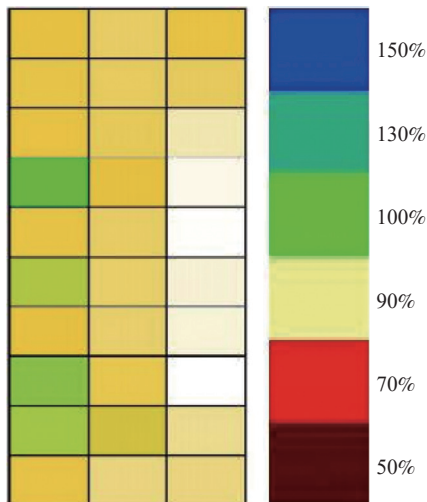


图 7 脉冲涡流检测结果

Fig. 7 Result of pulse eddy current test

综上所述,本次共对 7 根弯管进行测试,总计布置 218 个测厚点,用“ Δ ”表示同一位置上脉冲涡流测厚值相对超声测厚值的相对误差百分比,其中 $\Delta \leq 5\%$ 的测厚点占 52%, $5\% < \Delta \leq 10\%$ 的测厚点占

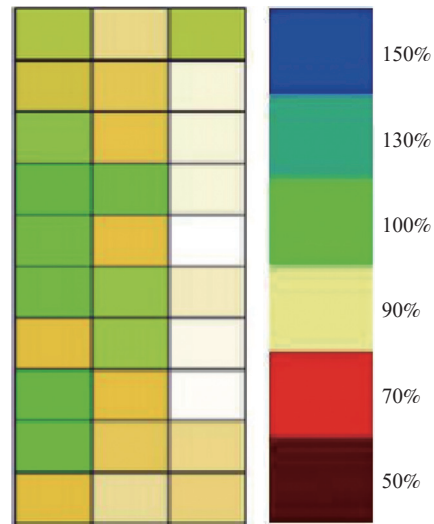


图 8 超声检测结果

Fig. 8 Result of ultrasonic test

22%, $\Delta > 10\%$ 的测厚点占 26%。从占比分析可以得出,存在较大误差的点占比在 20% 左右,大部分误差较大的点主要集中在弯管测线的首末端,由于弯管两侧存在焊缝,导致端面效应影响脉冲涡流测厚精确度;对于弯管背弧面敏感部位,对比两种方法在 E、F 线附近的结果,所测结果的相对误差为 6%。

4 结论

在铁磁管道脉冲涡流检测中,管道电导率与壁厚以及相对磁导率与壁厚会以乘积形式耦合在一起,利用感应电压信号,只能反演出这两个乘积量。选取同一段管道上两处不同的检测点,实施脉冲涡流检测,将所得结果进行反演及对比,可消除管道材料电磁参数的影响,得到两检测点壁厚的相对变化量。该检测方法一定程度上可有效抑制脉冲激励磁场强度、探头提离变化对壁厚检测结果的影响。选取相同或相近检测条件下的壁厚反演结果作为参考值,可进一步抑制检测条件变化对壁厚检测结果的影响,提高壁厚检测的可靠性。利用本文提出的铁磁管道壁厚脉冲涡流检测方法对在役管道非焊缝处进行扫描检测并于超声测厚结果对比,检测结果准确、可靠,对于如何解决弯管焊缝引起的端面效应,则是未来脉冲涡流技术的主要发展方向。

参考文献:

- [1] 余兆虎,付跃文,江礼凡,等.小径管脉冲远场涡流检测研究

- [J]. *机械工程学报*, 2021, 57(6): 10-18. DOI: [10.3901/JME.2021.06.010](#).
- YU Z H, FU Y W, JIANG L F, et al. Study on inspection for small diameter tubes using pulsed remote field eddy current method [J]. *Journal of mechanical engineering*, 2021, 57(6): 10-18. DOI: [10.3901/JME.2021.06.010](#).
- [2] KUMAR K S, BALASUBRAMANIAM K. Simulations and experiments for the detection of flow-assisted corrosion in pipes [J]. *Journal of pressure vessel technology*, 2015, 137(6): 061409. DOI: [10.1115/1.4030931](#).
- [3] 黄平捷, 吴昭同, 郑建才, 等. 多层厚度电涡流检测反演算法及实验研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(4): 428-432. DOI: [10.3321/j.issn:0254-3087.2005.04.025](#).
- HUANG P J, WU Z T, ZHENG J C, et al. Inversion algorithms for multi-layered thickness measurement in eddy current testing [J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2005, 26(4): 428-432. DOI: [10.3321/j.issn:0254-3087.2005.04.025](#).
- [4] 黄平捷, 吴昭同, 严仍春. 多层厚度电涡流检测阻抗模型仿真及验证 [J]. *仪器仪表学报*, 2004, 25(4): 473-476, 480. DOI: [10.3321/j.issn:0254-3087.2004.04.015](#).
- HUANG P J, WU Z T, YAN R C. Impedance model simulation and verification of multi-layered structure thickness measurement using eddy current method [J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2004, 25(4): 473-476, 480. DOI: [10.3321/j.issn:0254-3087.2004.04.015](#).
- [5] 贺光琳. 电涡流检测系统开发及缺陷反演算法研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- HE G L. The development of eddy current testing system and the research of classification methods about inversion problem [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [6] DE HAAN V O, DE JONG P. Simultaneous measurement of material properties and thickness of carbon steel plates using pulsed eddy currents [C]//Anon. Proceedings of the 16th World Conference on Non-Destructive Testing, Montreal, Canada, November 1, 2004. Montreal, 2004.
- [7] CHENG W Y. Pulsed eddy current testing of carbon steel pipes' wall-thinning through insulation and cladding [J]. *Journal of nondestructive evaluation*, 2012, 31(3): 215-224. DOI: [10.1007/s10921-012-0137-9](#).
- [8] 柯海, 徐志远, 黄琛, 等. 基于信号斜率的铁磁材料脉冲涡流测厚研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(10): 2376-2381. DOI: [10.19650/j.cnki.cjsi.2011.10.033](#).
- KE H, XU Z Y, HUANG C, et al. Research on thickness measurement of ferromagnetic materials using pulsed eddy current based on signal slopes [J]. *Chinese journal of scientific instrument*, 2011, 32(10): 2376-2381. DOI: [10.19650/j.cnki.cjsi.2011.10.033](#).
- [9] XU Z Y, WU X J, LI J, et al. Assessment of wall thinning in insulated ferromagnetic pipes using the time-to-peak of differential pulsed eddy-current testing signals [J]. *NDT & E international*, 2012, 51: 24-29. DOI: [10.1016/j.ndteint.2012.07.004](#).
- [10] VASIC D, BILAS V, AMBRUS D. Validation of a coil impedance model for simultaneous measurement of electromagnetic properties and inner diameter of a conductive tube [J]. *IEEE transactions on instrumentation and measurement*, 2006, 55(1): 337-342. DOI: [10.1109/TIM.2005.861244](#).
- [11] MAO X F, LEI Y Z. Thickness measurement of metal pipe using swept-frequency eddy current testing [J]. *NDT & E international*, 2016, 78: 10-19. DOI: [10.1016/j.ndteint.2015.11.001](#).
- [12] XIE S J, CHEN Z M, TAKAGI T, et al. Quantitative non-destructive evaluation of wall thinning defect in double-layer pipe of nuclear power plants using pulsed ECT method [J]. *NDT & E international*, 2015, 75: 87-95. DOI: [10.1016/j.ndteint.2015.06.002](#).
- [13] CHEN X L, LEI Y Z. Time-domain analytical solutions to pulsed eddy current field excited by a probe coil outside a conducting ferromagnetic pipe [J]. *NDT & E international*, 2014, 68: 22-27. DOI: [10.1016/j.ndteint.2014.07.005](#).
- [14] 陈兴乐, 雷银照. 导电导磁管道外任意放置线圈激励下脉冲涡流场时域解析解 [J]. *物理学报*, 2014, 63(24): 240301. DOI: [10.7498/aps.63.240301](#).
- CHEN X L, LEI Y Z. Analytical solutions to pulsed eddy current field excited by a differently oriented probe coil outside a conducting ferromagnetic pipe [J]. *Acta physica sinica*, 2014, 63(24): 240301. DOI: [10.7498/aps.63.240301](#).
- [15] MAO X F, LEI Y Z. Analysis of eddy current interaction between a parallel coil and a ferromagnetic pipe with remanence [J]. *NDT & E international*, 2013, 60: 121-126. DOI: [10.1016/j.ndteint.2013.07.012](#).
- [16] 陈宝林. 最优化理论与算法 (2 版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- CHEN B L. Optimization theory and algorithm (2nd ed.) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [17] CHEN X L, LEI Y Z. Inverse problem of pulsed eddy current field of ferromagnetic plates [J]. *Chinese physics B*, 2015, 24(3): 030301. DOI: [10.1088/1674-1056/24/3/030301](#).
- [18] CHEN X L, LEI Y Z. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method [J]. *NDT & E international*, 2015, 75: 33-38. DOI: [10.1016/j.ndteint.2015.06.005](#).
- [19] 钟志民, 郑会, 李杰. 核电厂二回路汽管道局部减薄管理的挑战和应对 [J]. *腐蚀与防护*, 2020, 41(9): 39-44. DOI: [10.11973/fsyfh-202009007](#).
- ZHONG Z M, ZHENG H, LI J. Challenges and solutions to localized thinning management of secondary loop steam & water piping in nuclear power plants [J]. *Corrosion & protection*, 2020, 41(9): 39-44. DOI: [10.11973/fsyfh-202009007](#).
- [20] 邓宏伟. 核电厂二回路管道应对流动加速腐蚀机理研究 [J]. *南方能源建设*, 2015, 2(1): 51-54, 61. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.010](#).
- DENG H W. Research on flow accelerated corrosion discussion

for secondary loop piping of nuclear power plant [J]. *Energy construction*, 2015, 2(1): 51-54, 61. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.010](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.010).

- [21] 林燕, 杨道宏, 施海云. 快堆核电蒸汽管道疏水系统的设计研究 [J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 84-88. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.012](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.012).

LIN Y, YANG D H, SHI H Y. Design research on steam drain system of fast reactor nuclear power plants [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 84-88. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.012](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.012).

作者简介:



韩扬

韩扬(第一作者)

1989-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事核电厂在役检查技术方法研究工作(e-mail)han.yang@cgnpc.com.cn。

朱琪

1990-, 男, 高级工程师, 学士, 主要从事无损检测技术研究和设备开发工作(e-mail)zq.zasidler@outlook.com。



陈永安

陈永安(通信作者)

1981-, 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事电力工程科研和标准化工作(e-mail)yachen@ceec.net.cn。

徐宁

1989-, 男, 工程师, 硕士, 主要从事核电厂在役检查技术方法研究工作(e-mail)xuning@cgnpc.com.cn。

项目简介:

项目名称 核电常规岛设备无损检测关键技术研究与应用

承担单位 中国能源建设集团有限公司工程研究院

项目概述 项目主要针对国内核电站常规岛中的管道设备, 研究未拆除覆盖层的条件下, 对管道设备进行在役检测, 采用相控阵、脉冲涡流、旋转超声等技术方法, 提出可靠性的工艺方案。

主要创新点 (1)不拆除覆盖层条件下的脉冲涡流检测方法;(2)采用双晶面阵相控阵探头和全聚焦检测进行厚壁管奥氏体不锈钢焊接接头检测;(3)换热管弯管段的自动化旋转超声检测。