

# 采用参数反演的反应堆压力管间距涡流检测方法

韩捷<sup>1,2</sup>, 陈振茂<sup>1</sup>, 陈兴乐<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学航天航空学院, 710049, 西安; 2. 核动力运行研究所, 430074, 武汉;  
3. 北京航空航天大学自动化工程与电气工程学院, 100191, 北京)

**摘要:** 针对核电站重水反应堆压力管间距难以进行高效检测的问题, 提出了一种基于参数反演的套管间距脉冲涡流检测方法, 可用于重水堆压力管-排管、排管-停堆系统液体注入(LISS)管之间的间距检测。首先, 基于双层套管建立脉冲涡流检测模型, 采用最小二乘法进行参数反演; 接着, 利用数值迭代算法求解双层套管间距, 得到的结果可直接用于检测压力管-排管的间距变化; 然后, 通过实验标定, 拟合得到反演结果中外层排管壁厚与排管-LISS 管间距之间的指数函数关系; 最后, 利用该函数关系确定排管-LISS 管之间的间距。实验结果表明: 基于参数反演的压力管-排管间距检测误差可控制在 $\pm 0.5$  mm 以内, 排管-LISS 管的间距检测误差可控制在 $\pm 1.1$  mm 以内, 能够满足反应堆压力管现场检测结果(压力管-排管间距误差为 $\pm 1$  mm、排管-LISS 间距误差为 $\pm 2$  mm)的精度要求。该研究可为压力管道的安全状态评估与风险管理提供可靠依据。

**关键词:** 压力管; 套管; 脉冲涡流检测; 间距检测; 参数反演

**中图分类号:** TG115.28 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202606009 **文章编号:** 0253-987X(2026)06-0110-08

## Eddy Current Testing Method for Pressure Tube Spacing of Heavy Water Reactors Based on Parameter Inversion

HAN Jie<sup>1,2</sup>, CHEN Zhenmao<sup>1</sup>, CHEN Xingle<sup>3</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan 430074, China; 3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** To address the challenge of efficiently testing the pressure tube spacing of heavy water reactors (HWRs) in nuclear power plants, a pulsed eddy current testing method for casing spacing based on parameter inversion is proposed. The method is used to test the spacing between pressure tubes and calandria tubes, as well as between calandria tubes and liquid injection shutdown system (LISS) tubes of HWRs. First, a pulsed eddy current testing model was established based on a double-layer casing to perform parameter inversion using the least squares. Next, the double-layer casing spacing was solved via a numerical iterative algorithm, and the resulting values were directly applicable to testing variations in spacing between pressure tubes and calandria tubes. Subsequently, through experimental calibration, an exponential function relationship was fitted between the wall thickness of the outer calandria tube and the spacing between the calandria tube

收稿日期: 2025-08-19。 作者简介: 韩捷(1981—), 男, 在职博士生, 正高级工程师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52477015); 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3707205)。

网络出版时间: 2025-10-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.T.20251015.1537.005>

and LISS tube from the inversion results. Finally, the spacing between the calandria tube and LISS tube was determined using this function relationship. Experimental results show that the error for testing the spacing between the pressure tube and the calandria tube based on parameter inversion can be controlled within  $\pm 0.5$  mm, and that between the calandria tube and the LISS tube within  $\pm 1.1$  mm, meeting the accuracy requirements for on-site testing results of pressure tubes of HWRs ( $\pm 1$  mm for the spacing between the pressure tube and the calandria tube and  $\pm 2$  mm for the spacing between the calandria tube and LISS tube). This study provides a reliable basis for safety assessment and risk management of pressure tubes.

**Keywords:** pressure tube; casing; pulsed eddy current testing; spacing detection; parameter inversion

不同于压水堆核电站,重水堆核电站采用的是 CANDU 型反应堆,此时核燃料并不是放置在大的压力容器中,而是放置在压力管中。CANDU 型反应堆共有数百个横向布置的燃料通道,每个燃料通道主要由压力管、排管和将压力管与排管分隔的卡簧组成,如图 1 所示。压力管是燃料通道最主要的部件,也是 CANDU 型反应堆的核心部件。由于压力管内放置的是核燃料棒束,因此长期处于高温、高压以及较高的快中子剂量率环境中,辐射后的压力管具有极强的放射性。同时,高温、高压、高辐照的运行环境会导致压力管的尺寸和材料性能发生变化,而压力、热量和辐照会引起压力管径向移动,导致压力管偏心,使得其与排管一侧的间隙减小,造成冷排管与热压力管直接接触。两管道长时间的接触会导致压力管的局部冷却,且使压力管外壁形成氢化物泡物质,存在压力管破裂的危险。因此,需要开发一种检测技术,用于定期测量压力管到排管的间隙,以及监测压力管和排管的分离,避免两管道直接接触。

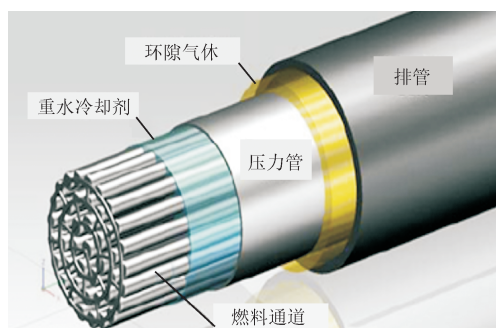
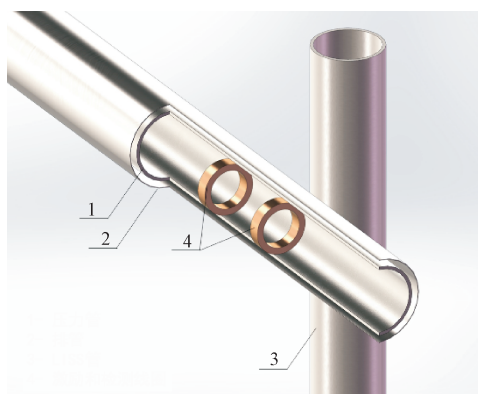


图 1 压力管结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pressure tube structure

液体注入停堆系统 (LISS) 管是核电站安全系统的关键部件,能贯穿压力管并在事故时快速注入中子毒物实现紧急停堆,其能不可逆地终止链式反应,以确保反应堆安全。排管-LISS 管的额定安装间隙为 50 mm,运行后的实际间隙应位于 0~65 mm

之间,因此需定期检测燃料通道压力管外排管与 LISS 管的间距,以防止二者发生接触。其具体的位置关系如图 2 所示。



1—压力管;2—排管;3—LISS 管;4—激励和检测线圈。

图 2 压力管-排管-LISS 管间距位置排列示意图

Fig. 2 Schematic diagram of spacing and position arrangement for pressure tube-calandria tube-LISS tube

目前,已有众多研究致力于测量压力管与排管之间的间隙。Shokralla 等利用发射-接收多频涡流探头,采用两块被空气隔开的平行板来近似模拟燃料通道的几何结构,测量了加拿大重水堆燃料通道中压力管与排管的间隙,探索了涡流电压对管壁厚度和电阻率变化的响应,其局限性在于仅对驱动线圈的恒定振幅电流激励和开路接收线圈有效<sup>[1]</sup>。Luloff 开发了一种通用的间隙测量平行板模型,考虑了探头相对于压力管的倾斜情况,确定了由探头和分层导体产生的所有电磁耦合系数,可用于计算接收线圈的感应电压<sup>[2-3]</sup>。此外,研究人员还通过截断区域特征函数展开法推导了检测模型的解析解,简化了计算过程。这种新的解析模型被当作反演算法的基础,能够从多频测量数据中同时提取探头脱离距离、平板电阻率和套管间隙。采用上述方法,即可实现快速反演,每组多频测量仅需 1~2 s,且在公称脱离距离 (2.8 mm) 下,该反演算法对间隙的测量

精度可达到 $\pm 0.7 \text{ mm}$ <sup>[4-6]</sup>。

核电厂检测规范要求:将压力管-排管的间隙检测误差控制在 $\pm 1 \text{ mm}$ ,将排管-LISS管的间距检测误差控制在 $\pm 2 \text{ mm}$ 。上述两种检测精度要求非常高。目前,加拿大CE公司垄断了全球的CANDU堆压力管的检修市场。其采用多频涡流法检测压力管-排管间隙,将放置式探头置入压力管内壁进行扫查,将探头线圈接收到的当前间距下的感应电压与不同间距下的间距-幅值标定曲线进行比对,得到当前间隙<sup>[7-8]</sup>。然而,由于多频涡流检测施加的是正弦激励电流,所加激励电流较小,通常用于工件表面、近表面和较近间距管子的检测,无法穿透较大间距(20 mm以上)的管壁,因此在检测压力管与LISS管间距时,需采用远场涡流检测技术对压力管-LISS管的间距进行检测<sup>[9-10]</sup>。远场涡流检测技术需要先采用一个与压力管直径相当的激励线圈激发涡流场,然后再采用一个较小的接收线圈探头检测间距变化所引起的信号响应,因此在压力管涡流检查过程中,需要将检查装置上的多频涡流探头更换为远场涡流探头来执行以上两种间距的检测,检测耗时较长<sup>[11-13]</sup>。

考虑到正弦电流激励下的正弦涡流检测方法容易受到渗透深度和探头提离的限制,脉冲涡流检测作为一种替代方法,已被证明在以下研究领域有效:带涂层铁磁性管道和容器的壁厚减薄腐蚀评估<sup>[14-16]</sup>,铁磁性材料电磁参数的检测,以及多层导体中埋藏腐蚀缺陷的检测。该方法并非采用正弦电流,而是通过脉冲电流激励,感应出导体内部的脉冲涡流场,进而通过时域信号的衰减过程来确定导体的几何尺寸和电磁参数<sup>[17-20]</sup>。研究人员结合提离噪声和主成分的信号特征,对双金属恒温器的内部状态开展检测<sup>[21-24]</sup>。与正弦涡流检测相比,脉冲涡流检测的优势不仅在于穿透力强,还在于对厚度、电导率和磁导率等参数具有较高的灵敏度。

本文探索了采用脉冲涡流技术进行压力管-排管、压力管-LISS管间距检测的可行性。在保证检测精度的前提下,只需一套脉冲涡流探头即可高效地完成上述两种间距的检测,无须更换探头和检查装置,有效节省了时间,且减少了频繁操作带来的设备卡涩和重水渗漏风险,显著提高了检测效率,有效降低了检测操作人员的辐射剂量。

## 1 间距脉冲涡流检测系统

### 1.1 检测模型的建立

图3给出了压力管-排管-LISS管间距脉冲涡流

检测模型。图3(a)为模型主视图,图3(b)为截面图。压力管、排管和LISS管的材质均为导电、非导磁的金属材料。空心圆柱线圈探头置于被检压力管内,沿管道径向垂直于压力管放置。沿Z轴方向,线圈探头下边缘与被检压力管内表面之间的距离记为探头提离距离 $l_0$ 。压力管、排管和LISS管的电导率均为 $\sigma$ ,磁导率均为真空磁导率 $\mu_0$ 。探头正下方压力管与排管的间隙定义为 $d_p$ ,垂直放置于排管外的LISS管与排管外壁的距离定义为 $d_L$ 。线圈探头下方压力管道壁厚为 $d_{in}$ ,外侧排管壁厚为 $d_{out}$ 。本文研究目的就是采用脉冲涡流检测方法,来确定模型中压力管-排管间距 $d_p$ 和排管-LISS管间距 $d_L$ 。

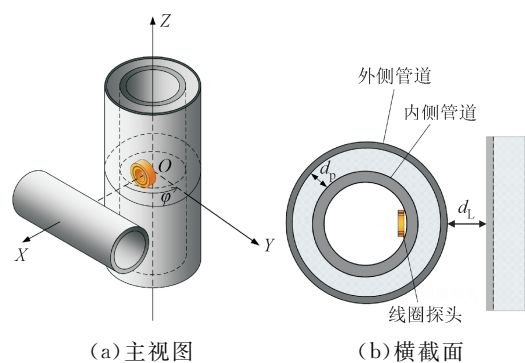


图3 压力管-排管-LISS管间距脉冲涡流检测模型示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of pulse eddy current detection model for the spacing between pressure tube-calandria tube-LISS tube

### 1.2 检测模型解析解

对于图3所示的压力管-排管-LISS管间距脉冲涡流检测模型,暂不考虑LISS管的影响,先求解压力管-排管组成的双层套管涡流场。这是一个非轴对称双重管道涡流场模型,直接求解磁矢位 $\mathbf{A}$ 十分困难,因此可依据磁矢位的洛仑兹规范引入二阶矢量位 $\mathbf{W}$ 来表示磁矢位 $\mathbf{A}$ ,从而简化模型求解。其计算式可写为

$$\mathbf{A} = \nabla \times \mathbf{W} = \nabla \times (W_a \mathbf{e}_z + \mathbf{e}_z \times \nabla W_b) \quad (1)$$

式中: $W_a$ 、 $W_b$ 为相互独立的两个标量函数; $\mathbf{e}_z$ 为Z轴方向的单位矢量。

将式(1)代入磁矢位 $\mathbf{A}$ 满足的约束方程,可将涡流场约束方程由矢量亥姆霍兹方程转化为 $W_a$ 和 $W_b$ 满足的亥姆霍兹方程,表达式如下

$$\nabla^2 W_a + p^2 W_a = 0 \quad (2)$$

$$\nabla^2 W_b + p^2 W_b = 0 \quad (3)$$

式中: $p^2 = -j\omega\mu_0\sigma$ , $j$ 为虚数单位, $\omega$ 为角频率。在空气场区, $p^2 = 0$ 。

采用分离变量法求解式(2)和式(3),并利用场量有界性以及磁场边界条件,给出压力管-排管组成的双层套管内检测线圈中感应电压的频域解析式

$$\dot{U} = \frac{j\omega 4\pi^2}{\mu_0} \dot{I}(\omega) \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \alpha^2 C_T C_R \cdot \left( R_{out}(\alpha, m) + \frac{R_{in}(\alpha, m) R_1(\alpha, m) R_2^{(1)}(\alpha, m)}{1 - R_2^{(2)}(\alpha, m) R_1(\alpha, m)} \right) d\alpha \quad (4)$$

其中,下标 T、R 分别表示激励线圈和检测线圈,  $N$  为线圈匝数,  $h$  为线圈高度,  $r_i, r_o$  分别为线圈内、外半径,  $d_T, d_R$  分别为激励线圈和检测线圈几何中心距管道中心的径向距离,  $\kappa^2 = u^2 + v^2$ ,  $u, v$  分别为 X、Y 方向的傅里叶积分参数。

得到检测线圈中感应电压频域解后,通过离散傅里叶逆变换,即可得到脉冲涡流检测中的感应电压时域解,表达式如下

$$u(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \dot{U}_{\omega_k} e^{j\frac{2\pi k t}{n}} \quad (6)$$

式中:  $n$  为频域信号的采样点数;  $\omega_k$  为第  $k$  个离散的角频率;  $t$  为时间。

### 1.3 脉冲涡流检测系统

压力管-排管-LISS 管间距检测脉冲涡流检测系统示意图如图 4 所示。

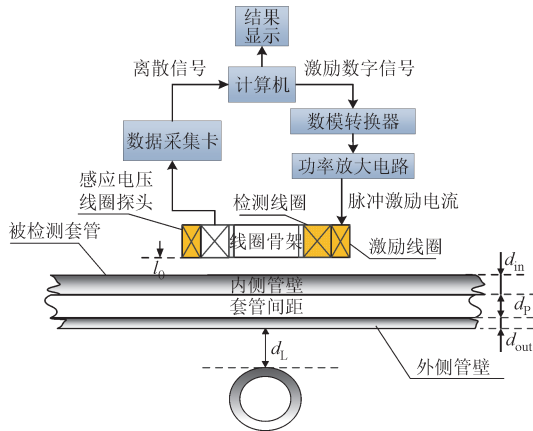


图 4 间距脉冲涡流检测系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of structure of pulse eddy current detection system

该检测系统包括空心圆柱线圈探头、数模(DA)转换器、功率放大电路和模数(AD)数据采集卡。空

式中:  $\dot{U}$  为激励电压相量;角频率  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为激励频率;  $\dot{I}(\omega)$  为激励电流相量;  $m$  为分离变量法在  $\varphi$  方向贝塞尔函数的阶数;  $\alpha$  为分离变量法在  $Z$  方向的傅里叶积分参数;  $R_{out}(\alpha, m)$ 、 $R_{in}(\alpha, m)$ 、 $R_1(\alpha, m)$ 、 $R_2^{(1)}(\alpha, m)$  和  $R_2^{(2)}(\alpha, m)$  均为双层套管管道系数,只与内、外层管道的电导率、壁厚和套管间距有关,其具体表达式参见文献[25];  $C_T$ 、 $C_R$  分别为激励线圈系数和检测线圈系数,计算式如下

$$\begin{cases} C_T = \frac{j}{\alpha 4\pi} \frac{\mu_0 N_T}{(r_{o,T} - r_{i,T}) h_T} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\kappa d_T} - e^{-\kappa d_R}}{\kappa^4} \chi(\kappa r_{i,T}, \kappa r_{o,R}) e^{-j m \arctan(j u / \kappa)} du \\ C_R = \frac{j}{\alpha 4\pi} \frac{\mu_0 N_R}{(r_{o,R} - r_{i,R}) h_R} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\kappa d_T} - e^{-\kappa d_R}}{\kappa^4} \chi(\kappa r_{i,R}, \kappa r_{o,R}) e^{-j m \arctan(j u / \kappa)} du \end{cases} \quad (5)$$

心圆柱探头由线圈骨架、激励线圈和检测线圈组成。检测线圈直接绕制在线圈骨架上,检测线圈的外部缠绕激励线圈。计算机能够实现信号采集、处理、结果显示、数据存储等功能,通过对接接收的离散信号数据进行处理,获得被检压力管-排管-LISS 管间距信息。计算机编程输出的激励数字信号,经过数模转换、功率放大后持续输出脉宽为 50 ms、幅值为 5 A 的激励电流给激励线圈,并通过数据采集卡获得检测线圈两端的感应电压时域信号,发送到计算机端进行处理。

## 2 压力管-排管-LISS 管间距检测方法

### 2.1 最小二乘参数反演问题

对压力管-排管-LISS 管间距进行脉冲涡流检测,本质是一个电磁场反演问题。如何根据检测信号得到被检测模型中的压力管-排管间距  $d_p$  和排管-LISS 管的间距  $d_L$ ,是信号分析的关键。与提取特征量的方法相比,基于模型精确解析解的参数反演方法,一方面无需进行大量模拟实验来厘清各参数之间的函数关系,另一方面能显著提高间距检测的精度和可靠性,降低壁厚、探头提离等检测条件变化对检测结果的影响。下面基于 1.2 节中套管脉冲涡流检测模型的解析式,给出采用参数反演法检测压力管-排管-LISS 管间距的信号处理过程。

暂不考虑 LISS 管的影响,设压力管-排管组成的双层套管模型中,压力管-排管间距  $d_p$  和外层排管的壁厚  $d_{out}$  为两个待反演参数,记为未知向量  $\mathbf{x} = (d_p, d_{out})^T$ 。设脉冲涡流检测中,采集得到的检测线圈两端的时域感应电压测量值为  $u_1, u_2, \dots, u_n$  共  $n$  个离散的数据点,将其与式(6)计算得到的感

应电压理论值  $u(t)$  进行比较,令测量值与计算值之间的误差平方和最小来反演未知参数  $\mathbf{x}$ ,即建立最小二乘问题如下

$$\begin{cases} \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^2} f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n (u_i - u(\mathbf{x}, t_i))^2 \\ \text{s. t. } x_1 > 0, x_2 > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:待反演未知参数  $x_1$  为压力管-排管间距  $d_p$ ,  $x_2$  为外层排管壁厚  $d_{out}$ 。

通过数值迭代算法计算上述最小二乘问题,即可确定  $\mathbf{x}$  中的未知参数。在计算过程中,将感应电压测量曲线代入式(7),然后利用式(6)计算感应电压理论曲线,通过改变  $\mathbf{x}$  中参数的取值,令感应电压理论计算值与实际测量值之间的误差平方和最小,此时  $\mathbf{x}$  的取值即为参数反演结果  $\mathbf{x}^*$ 。

## 2.2 排管-LISS 管间距检测方法

反演结果第1个元素  $x_1^*$  即为待检测的压力管-排管间距  $d_p$ 。然而,在上述反演模型中,并未考虑 LISS 管的影响,故不能直接通过参数反演结果确定排管-LISS 管的间距  $d_L$ 。反演结果第2个元素  $x_2^*$  对应外层排管的壁厚  $d_{out}$ 。实际检测时,当排管外出现垂直放置的 LISS 管时,LISS 管壁内的涡流会影响检测信号,从而间接导致反演结果  $x_2^*$  的变化。基于此,可通过观察  $x_2^*$  的变化来检测排管-LISS 管的间距  $d_L$ 。

通过实验拟合得到反演结果  $x_2^*$  与间距  $d_L$  之间的函数关系,具体步骤如下。

**步骤1** 将探头下方的压力管排管间距  $d_p$  设定为实际工作时的公称间距 10 mm,将排管-LISS 管的间距  $d_L$  设置为 60 mm,实施一次脉冲涡流检测,采集检测线圈两端感应电压时域信号  $u(t)$  代入式(7),通过迭代算法计算出第一组反演结果  $x_2^*$ ,将反演结果与当前的排管-LISS 管的间距  $d_L$  对应,并存储到计算机中。

**步骤2** 以 10 mm 为步长,逐渐缩小排管-LISS 管的间距  $d_L$ ,直至最小间距 10 mm。对每一个间距实施一次脉冲涡流检测,并将反演结果与当前的排管-LISS 管的间距  $d_L$  对应,存储到计算机中。

**步骤3** 利用步骤1和2中获得的实验结果,绘制以反演结果  $x_2^*$  为自变量、排管-LISS 管的间距  $d_L$  为函数的变化曲线,观察变化规律,并利用曲线拟合方法,得到两者之间的函数关系式,即  $d_L = f(x_2^*)$ 。

按照以上步骤标定完所有函数关系后,便可通过反演结果  $x_2^*$ ,得到排管-LISS 管的间距  $d_L$ 。

## 3 实验过程及结果分析

### 3.1 实验装置设计

实验所用管道材质均为 304 不锈钢,其电磁参数与压力管相近。采用壁厚为 4.50 mm、外径为 109 mm 的不锈钢管模拟压力管,采用壁厚为 1.50 mm、直径为 132 mm 的不锈钢管模拟排管,压力管和排管同心放置时,套管间距为 10.0 mm。采用直径为 60 mm、壁厚为 2.5 mm 的不锈钢管模拟 LISS 管,垂直放置于排管外。3 根管的长度均为 600 mm。利用脉冲涡流检测仪对压力管排管-LISS 管间距实施检测,实验装置如图5所示。



图5 压力管-排管-LISS 管间距脉冲涡流检测实验装置  
Fig. 5 Experimental setup of pulse eddy current testing for pressure tube-calandria tube-LISS tube spacing

脉冲涡流检测系统中,圆柱形空心线圈探头的参数如表1所示。

表1 圆柱形空心线圈探头参数

Table 1 Parameters of cylindrical air-cored probe coils

| 参数                 | 激励线圈 | 检测线圈  |
|--------------------|------|-------|
| 线圈匝数 $N$           | 400  | 2 400 |
| 高度 $h/\text{mm}$   | 10.0 | 10.0  |
| 内径 $r_i/\text{mm}$ | 21.1 | 20.0  |
| 外径 $r_o/\text{mm}$ | 23.0 | 21.0  |

将探头下方的压力管-排管间距  $d_p$  设定为实际工作时的公称间距 10 mm,不放置 LISS 管,实施一次脉冲涡流检测,采集得到检测线圈中感应电压时域信号  $u(t)$ 。将采集到的感应电压代入式(7),利用 Levenberg-Marquardt(L-M)迭代算法反演  $\mathbf{x}$  中的两个参数,反演结果为  $\mathbf{x}^* = (10.10, 1.50)^T$ 。将反演结果  $\mathbf{x}^*$  代入式(6),计算出对应的感应电压理论值。图 6 给出了公称间距下脉冲涡流检测实验结果与理论结果的对比。由图可见,理论结果与实验结果吻合较好,表明参数反演结果  $\mathbf{x}^*$  可作为式(7)的最优解。

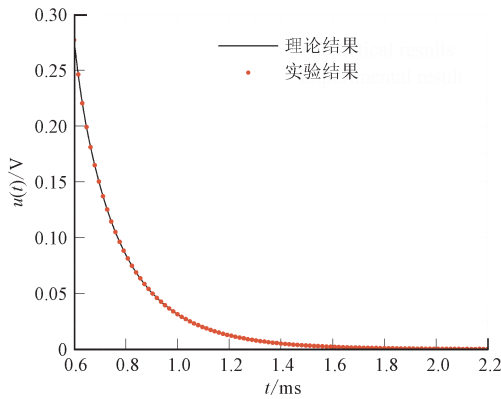


图 6 公称间距下脉冲涡流检测信号实验结果与理论结果的对比

Fig. 6 Comparison of experimental and theoretical results of pulse eddy current detection signals under nominal spacing

### 3.2 压力管-排管间距检测结果

将压力管-排管间距为公称间距时的感应电压时域信号计为  $u_r(t)$ ,然后保持线圈探头位置不变,按照 1 mm 步长逐渐缩小压力管-排管间距  $d_p$ ,每个间距下实施一次脉冲涡流检测,采集检测线圈中感应电压时域信号  $u(t)$ ,并将其与公称间距下的差分信号  $\Delta u(t) = u(t) - u_r(t)$  绘制于图 7 中。同样地,将每个间距下采集的感应电压代入式(7),利用 L-M 迭代算法反演  $\mathbf{x}$  中的两个参数,反演结果第 1 个元素  $x_1^*$  即为压力管-排管间距的检测值,其与游标卡尺测量实际值之间的误差列于表 2。将反演结果  $\mathbf{x}^*$  代入式(6)中,计算得到对应的感应电压理论曲线如图 7 中实线所示。由图可见,理论计算曲线与测量曲线吻合良好,再次表明参数反演结果  $\mathbf{x}^*$  是最小二乘问题的最优解。本文所提基于参数反演方法检测压力管-排管间距的误差在  $\pm 0.5$  mm 以内,与实际测量值的相对误差不大于 5%。

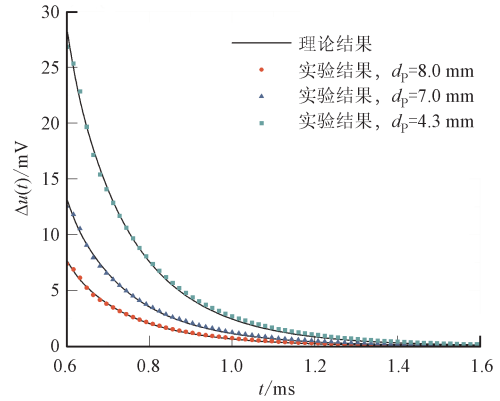


图 7 不同压力管-排管间距下脉冲涡流检测信号实验结果与理论结果的对比

Fig. 7 Comparison of experimental and theoretical results of pulse eddy current detection signals under different pressure tube-calandria tube spacings

表 2 不同压力管-排管间距实际值与检测值的对比  
Table 2 Comparison between actual and measured values of different pressure tube-calandria tube spacing

| 实际间距/mm    | 检测间距/mm    | 误差/mm | 相对误差/% |
|------------|------------|-------|--------|
| 10.10±0.01 | 10.60±0.01 | 0.50  | 5.0    |
| 8.02±0.01  | 8.30±0.01  | 0.28  | 3.5    |
| 7.02±0.01  | 7.20±0.01  | 0.18  | 2.6    |
| 5.54±0.01  | 5.70±0.01  | 0.16  | 2.9    |
| 4.34±0.01  | 4.20±0.01  | -0.14 | -3.2   |
| 2.56±0.01  | 2.50±0.01  | -0.06 | -2.3   |

### 3.3 排管-LISS 管间距检测结果

按照 2.2 节中步骤,实验标定反演结果  $x_2^*$  与排管-LISS 管间距  $d_L$  之间的函数关系。不同排管-LISS 管间距下,脉冲涡流检测信号差分信号  $\Delta u(t) = u(t) - u_r(t)$  的实验值与理论计算值的对比如图 8 所示。由图可见,理论曲线与测量曲线吻合良好,验证了参数反演结果  $\mathbf{x}^*$  均为式(7)的最优解。

以反演结果  $x_2^*$  为自变量,排管-LISS 管的间距  $d_L$  为函数值,利用指数函数对其变化规律进行拟合,得到两者之间的函数关系式

$$d_L = 1.53 \times 10^8 e^{-9.52x_2^*} \quad (8)$$

图 9 给出了实验得到的不同排管-LISS 管间距  $d_L$  下的参数反演结果  $x_2^*$  及其拟合曲线。

实验标定获得式(8)后,便可通过反演结果  $x_2^*$  来确定排管-LISS 管的间距  $d_L$ 。其与游标卡尺测量实际值之间的误差列于表 3。由表可见,检测值与真实值之间的误差在  $\pm 1.1$  mm 以内,相对误差不大于 2%,验证了本文所提的基于参数反演的检测方法能够精确检测排管-LISS 管的间距。

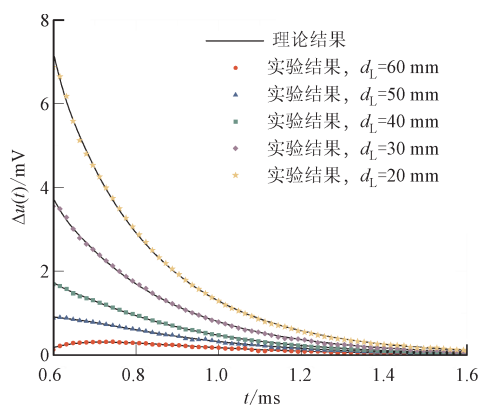


图8 不同排管-LISS管间距下脉冲涡流检测信号实验结果与理论结果的对比

Fig. 8 Comparison of experimental and theoretical results of pulse eddy current detection signals under different calandria-LISS tube spacings

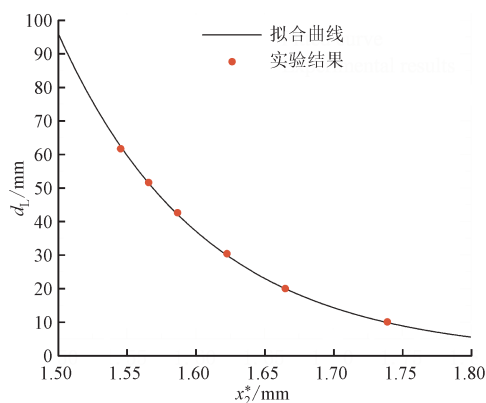


图9 反演结果  $x_2^*$  与排管-LISS管间距的函数拟合关系

Fig. 9 Fitting relationship between the inversion result  $x_2^*$  and the spacing of calandria-LISS tube

表3 不同排管-LISS管间距实际值与检测值的对比  
Table 3 Comparison of actual and detected values of spacing between different calandria-LISS tubes

| 实际间距/mm  | 检测间距/mm  | 误差/mm | 相对误差/% |
|----------|----------|-------|--------|
| 60.0±0.2 | 61.1±0.2 | 1.1   | 1.8    |
| 50.0±0.2 | 50.8±0.2 | 0.8   | 1.6    |
| 40.0±0.2 | 40.8±0.2 | 0.8   | 2.0    |
| 30.0±0.2 | 29.7±0.2 | -0.3  | -1.0   |
| 20.0±0.2 | 19.6±0.2 | -0.4  | -2.0   |

## 4 结 论

本文提出了一种基于参数反演的脉冲涡流检测方法,能够解决 CANDU 堆压力管-排管-LISS 管间距的精确测量问题。该方法通过建立双层套管脉冲涡流解析模型,将间距检测转化为最小二乘反演问题,利用数值迭代算法直接求解压力管-排管间距。

通过实验标定建立管壁厚度与间距的指数函数关系,实现了排管-LISS 管间距的间接精确测量。

实验结果表明:压力管-排管间距检测误差控制在±0.5 mm 以内,排管-LISS 管间距检测误差不超过±1.1 mm,完全满足工程精度要求。该方法具有3大优势:一是通过参数反演理论实现了非接触式精确测量;二是采用直接与间接测量相结合的策略,解决了多层套管间距检测的技术瓶颈;三是检测结果数值稳定、可靠性高,为 CANDU 堆安全运行提供了重要的技术保障。

## 参考文献:

- [1] SHOKRALLA S, SULLIVAN S, MORELLI J, et al. Modelling and validation of eddy current response to changes in factors affecting pressure tube to calandria tube gap measurement [J]. NDT & E International, 2015, 73: 15-21.
- [2] LULOFF M S. Concerning the exact solution for an internal transmit-receive eddy current probe at arbitrary locations and orientations within two non-concentric conductive tubes [J]. NDT & E International, 2020, 116: 102298.
- [3] LULOFF M S, CONTANT S, MORELLI J, et al. Simultaneous extraction of multiple parameters from a transmit-receive eddy current probe above a layered planar conductive structure [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, 2020, 3(4): 041104.
- [4] KLEIN G, MORELLI J, KRAUSE T W. Analytical model of the eddy current response of a drive-receive coil system inside two concentric tubes [J]. NDT & E International, 2018, 96: 18-25.
- [5] BAPAT H M, PADMANABHAN M, BANDYOPADHYAY M. Measurement of annular gap between pressure tube and calandria tube during in-service inspection of 220 MW Indian pressurized heavy water reactors (PHWRs) using eddy current technique [J]. Non-Destructive Evaluation, 2016, 22(6): 341-347.
- [6] 宾伟淇, 孙杰, 王亚星, 等. 超高压管式反应器内壁纵向裂纹的脉冲涡流检测 [J]. 无损检测, 2025, 47(7): 68-74.
- [7] BIN Weiqi, SUN Jie, WANG Yaxing, et al. Pulse eddy current detection of longitudinal cracks on inner wall of ultra-high pressure tubular reactor [J]. Nondestructive Testing, 2025, 47(7): 68-74.
- [7] SAKATA T, KISHIGAMI S, OGAWA Y, et al. Quantitative assessment of heavy-duty anticorrosion

- coating thickness via near-infrared measurements [J]. NDT & E International, 2023, 138: 102893.
- [8] 许鹏, 耿明, 方舟, 等. 基于复合电磁的高速轨道缺陷检测方法研究 [J]. 机械工程学报, 2021, 57(18): 57-65.
- XU Peng, GENG Ming, FANG Zhou, et al. Study on high-speed rail defect detection method based on combination of EC and MFL testing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(18): 57-65.
- [9] 沈功田, 李建, 武新军. 承压设备脉冲涡流检测技术研究及应用 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 49-58.
- SEHN Gongtian, LI Jian, WU Xinjun. Research and application of pulsed eddy current testing technology for pressure equipment [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 49-58.
- [10] ULAPANE N, ALEMPIJEVIC A, VALLS MIRO J, et al. Non-destructive evaluation of ferromagnetic material thickness using pulsed eddy current sensor detector coil voltage decay rate [J]. NDT & E International, 2018, 100: 108-114.
- [11] WEN Dongdong, FAN Mengbao, CAO Binghua, et al. Extraction of LOI features from spectral pulsed eddy current signals for evaluation of ferromagnetic samples [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(1): 189-195.
- [12] GUO Wei, GAO Bin, TIAN Guiyun, et al. Physic perspective fusion of electromagnetic acoustic transducer and pulsed eddy current testing in non-destructive testing system [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2020, 378(2182): 20190608.
- [13] XIE Shejuan, TIAN Mingming, XIAO Pan, et al. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques for simultaneous surface and volumetric defects inspection [J]. NDT & E International, 2017, 86: 153-163.
- [14] CHEN Xingle, LI Jingwen, WANG Zhaohui. Inversion method in pulsed eddy current testing for wall thickness of ferromagnetic pipes [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(12): 9766-9773.
- [15] CHEN Xingle, LEI Yinzhaohao. Electrical conductivity measurement of ferromagnetic metallic materials using pulsed eddy current method [J]. NDT & E International, 2015, 75: 33-38.
- [16] CHEN Xingle, LIU Xiaoqian. Pulsed eddy current-based method for electromagnetic parameters of ferromagnetic materials [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 6376-6383.
- [17] LI Yong, YAN Bei, LI Da, et al. Gradient-field pulsed eddy current probes for imaging of hidden corrosion in conductive structures [J]. Sensors and Actuators: A Physical, 2016, 238: 251-265.
- [18] WANG Zhenwei, YU Yating. Thickness and conductivity measurement of multilayered electricity-conducting coating by pulsed eddy current technique: experimental investigation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(9): 3166-3172.
- [19] HUANG Pingjie, LUO Xuwei, HOU Dibo, et al. Lift-off nulling and internal state inspection of multilayer conductive structures by combined signal features in pulsed eddy current testing [J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2018, 33(3): 272-289.
- [20] WAQAR M, MEMON A M, SABIH M, et al. Composite pipelines: analyzing defects and advancements in non-destructive testing techniques [J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 157: 107914.
- [21] LI Zhen, MENG Zhaozong, WU Changcheng, et al. A new microwave cavity resonator sensor for measuring coating thickness on carbon fibre composites [J]. NDT & E International, 2022, 126: 102584.
- [22] XIE Shejuan, YANG Shuyan, TIAN Mingming, et al. A hybrid nondestructive testing method of pulsed eddy current testing and electromagnetic acoustic transducer techniques based on wavelet analysis [J]. NDT & E International, 2023, 138: 102900.
- [23] DUAN Zhirong, XIE Shejuan, HUANG Lei, et al. Quantitative sizing of compound location defects based on PECT-EMAT hybrid testing methods [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 178: 109267.
- [24] 田明明, 解社娟, 韩捷, 等. 基于小波分析的脉冲涡流/电磁超声复合无损检测方法 [J]. 中国机械工程, 2019, 30(16): 1925-1930.
- TIAN Mingming, XIE Shejuan, HAN Jie, et al. A hybrid PECT/EMAT NDT based on wavelet analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 30(16): 1925-1930.
- [25] WAN Benli, CHEN Xingle. Gap measurement of double-layer metal tube based on analytical solution of eddy current array under transmit-receive mode [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-10.

(编辑 李慧敏)