

## 管式反应器脉冲涡流检测信号缺陷评估方法

丁春雄<sup>1</sup>, 朱庆南<sup>1</sup>, 俞燕萍<sup>1</sup>, 郑凯<sup>1</sup>, 张卿<sup>2\*</sup>

(1. 江苏省特种设备安全监督检验研究院, 江苏 南京 210009;

2. 南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

**摘要:** 脉冲涡流检测技术可用于管式反应器外表面缺陷检测, 但其外的夹套管和夹套管与反应器间的空腔会严重影响检测精度和信号表征。基于此, 提出了一种基于坐标变换的信号处理算法。首先, 建立了管式反应器的脉冲涡流检测解析模型, 并获取其检测信号表达式; 然后, 基于解析模型, 提出基于坐标变换的信号处理方法, 获取有缺陷信号与无缺陷信号的相关性曲线, 且相关性曲线的斜率和截距与反应器的损伤程度呈线性关系; 最后, 分析了夹套管对反应器缺陷定量评估的影响。结果表明, 斜率和截距在夹套管存在缺陷的情况下也能实现定量评估, 可为管式反应器的检测提供方法和技术支持。

**关键词:** 管式反应器; 无损检测; 脉冲涡流检测; 信号处理; 相关性分析

**中图分类号:** TP212

**文献标识码:** A

**doi:** 10.62756/csjs.1671-7449.2025090

**引用格式:** 丁春雄, 朱庆南, 俞燕萍, 等. 管式反应器脉冲涡流检测信号缺陷评估方法[J]. 测试技术学报, 2025, 39(6): 628-634.

DING Chunxiong, ZHU Qingnan, YU Yanping, et al. Defect evaluation of pulse eddy current signals for tubular reactors detection[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2025, 39(6): 628-634.

## Defect Evaluation of Pulse Eddy Current Signals for Tubular Reactors Detection

DING Chunxiong<sup>1</sup>, ZHU Qingnan<sup>1</sup>, YU Yanping<sup>1</sup>, ZHENG Kai<sup>1</sup>, ZHANG Qing<sup>2\*</sup>

(1. Jiangsu Special Equipment Safety Supervision and Inspection Institute, Nanjing 210009, China;

2. Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** Pulse eddy current testing (PECT) technology can be used for the detection of surface defects, but the outer jacket pipe and the cavity between the jacket pipe and the reactor seriously affect the detection accuracy and signal characterization. Thus, this paper proposes a signal processing algorithm based on coordinate transformation. Firstly, an analytical model of PECT for tubular reactors is established, and the expression of the detection signal is obtained. Then, a signal processing method based on coordinate transformation is proposed, and the correlation curves of the defective signal and the non-defective signal are obtained. Moreover, the slope and intercept of the correlation curve have a linear relationship with the degree of damage of the reactor. Finally, the influence of the jacket pipe on the quantitative assessment of reactor defects is analyzed. Results show that the slope and intercept can still achieve quantitative assessment when the jacket

收稿日期: 2025-05-30

基金项目: 江苏省特种设备安全监督检验研究院院内科技项目(KJ(Y)202507)

作者简介: 丁春雄(1987—), 男, 高级工程师, 主要从事承压类特种设备检验检测、无损检测新技术及应用研究。E-mail: dingchunxiong@163.com。

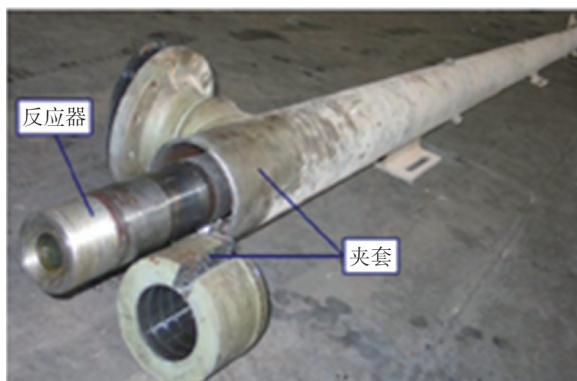
\* 通信作者: 张卿(1988—), 女, 副教授, 博士, 主要从事电磁无损检测研究。E-mail: zhangqing@njtech.edu.cn。

pipe has defects. This paper can provide methods and technical support for the detection of tubular reactors.

**Key words:** tubular reactor; nondestructive testing; pulse eddy current testing; signal processing; correlation analysis

## 0 引言

管式反应器是一种广泛应用于低密度聚乙烯生产的关键设备,由承受超高压力的反应器和夹套管组成,如图 1(a)所示。在反应器内,乙烯气体发生聚合反应,会在短时间内放出大量的热,因此,夹套内通有循环冷却水,以保持反应器内的温度在 180~270℃。夹套内的循环冷却水一旦混入 CO<sub>2</sub> 等气体,将会形成碳酸,可能导致反应器外壁被氧化腐蚀,出现腐蚀坑或腐蚀裂纹,如图 1(b)所示。



(a) 结构



(b) 外表面腐蚀缺陷

图 1 管式反应器结构图及损伤类型

Fig. 1 Structural and corrosion defects of tubular reactor

近年来,国内外发生多起因反应管外壁损伤引起的事故,造成了巨大的人力、财力损失。我国某石化公司在大修时,发现部分聚乙烯超高压管式反应管外壁存在多条裂纹,对拆卸下来的管道去除管外表面疑似水垢后,外壁可见大量蚀坑与表面裂纹<sup>[1]</sup>。因此,越来越多的企业开始对管式反应器的安全性检测予以重视,对其检测需求日益迫切。

然而,受限于管式反应器的结构,现有能对其外壁缺陷进行检测的技术很少。如图 1(a)所示,反应器外一般有十几毫米厚的夹套管,且夹套管与反应器间有空腔,这种结构导致常规无损检测技术无法得到应用。如超声检测中,空腔区域会使声波快速衰减,导致声波无法到达反应器的外壁而无法检测反应器外壁的缺陷;涡流检测中,受夹套管上趋肤效应和空腔产生的提高效应的影响,激励信号无法穿透十几毫米的夹套管实现对反应器外壁缺陷的检测。此外,反应器内空间狭小,利用内检测方式对反应器外壁缺陷进行检测非常不便。如德国巴斯夫公司针对管式反应器研发的旋转涡流内检测技术仅可检测反应器内壁缺陷,由于反应器厚度约为 19~66 mm,远超涡流检测的趋肤深度,因此,其无法实现反应管外壁缺陷的检测。因此,亟需寻找一种新的检测方法。作为涡流检测技术的分支,脉冲涡流检测技术在管式反应器外壁缺陷检测中具有一定的可行性。脉冲涡流检测技术采用方波或阶跃方式激励,激励信号中包含丰富的频率成分,如可用于设备内部缺陷检测的低频成分,避免了传统涡流只能检测设备表面缺陷的局限。同时,脉冲涡流的激励能量更强,具有很好的穿透性,能够穿透一定的金属材料 and 空腔。基于此,本文提出采用脉冲涡流检测技术对管式反应器外壁缺陷进行检测。

事实上,脉冲涡流检测技术已被广泛应用于与管式反应器结构类似的带保护层承压设备的缺陷检测中,并已有一些成熟的脉冲涡流设备。如加拿大 Eddyfi 公司开发的脉冲涡流检测仪器 Lyft<sup>[2]</sup>;中国特种设备检测研究院与华中科技大学共同开发的适用于带保温层的铁磁性材料腐蚀状态的 PECT 系统<sup>[3]</sup>;北京德朗研制的 DPEC-17 脉冲涡流检测仪等。同时,由于缺陷引起的信号一般比较微弱,为提高缺陷信息的比例,一般需对检测信号进行预处理,并基于预处理后的信号寻找能够表征缺陷的特征量。常用的预处理方式包括差分处理、单对数坐标变换和双对数坐标变换。差分处理即获取检测信号与参考信号(一般为试件无缺陷区域的信号)的差值。差分信号的特征量较为丰富,如时域中常用的峰值、峰值

时间、上升时间、差分峰值时间等<sup>[4-5]</sup>；频域中常用的频谱分离点、频谱斜率等<sup>[6-7]</sup>；与提离无关的特征量，如提离交叉点等<sup>[8]</sup>。单对数坐标变换即将表征信号幅值的直角坐标变换为对数坐标。单对数坐标下常用的特征量为晚期信号的衰减率<sup>[9]</sup>，该特征量在直角坐标系中表现为指数衰减特性，而在单对数坐标下表现为线性衰减特性，更有利于缺陷的表征。此外，为进一步放大与缺陷有关的晚期信号，也会对信号进行双对数坐标变换。然而，与带保护层的承压设备不同，管式反应器的夹套管厚度（常见为10.97 mm）远大于保护层厚度（最大厚度1.0 mm），且夹套管的材料一般为铁磁材料。这导致激励磁场在夹套管材料中快速衰减，进而严重影响检测精度和信号表征。基于此，适用于带包覆层管道检测的信号处理方法可能不适用于管式反应器。研究适用于管式反应器缺陷评估的信号处理方法尤为重要。

本文针对管式反应器的结构特点，提出了一种基于坐标变换的信号处理算法。首先，为简化分析，建立了管式反应器的脉冲涡流检测解析模型，并获取其检测信号表达式；然后，基于解析模型，分析了现有算法存在的问题，并提出基于坐标变换的信号处理方法，获取了有缺陷信号与无缺陷信号的相关性曲线，且相关性曲线的斜率和截距与损伤程度呈线性关系；最后，分析了夹套管对反应器缺陷定量评估的影响。

## 1 解析模型

当反应器内的缺陷为大面积壁厚减薄缺陷时，图1(a)所示的管式反应器可简化为图2所示的4层平板结构。其中，第1层为反应器内的空气，第2层为反应器，反应器外表面的局部大面积腐蚀缺陷被等效为均匀壁厚减薄缺陷，第3层为空腔，第4层为夹套管。同轴放置的空心激励线圈和接收线圈组成的脉冲涡流探头位于4层结构上方的第5层中，并将第5层进一步分割成3个区域：I、I-II和II区域。为

$$S(\alpha_i) = n_T n_R \frac{\text{Int}(\alpha_i r_{1T}, \alpha_i r_{2T}) \text{Int}(\alpha_i r_{1R}, \alpha_i r_{2R})}{(r_{2T} - r_{1T}) \alpha_i^2 (r_{2R} - r_{1R}) \alpha_i^2} \frac{e^{\alpha_i l_1 - \alpha_i l_{2T}} - 1}{\alpha_i (l_{2T} - l_1)} \frac{e^{\alpha_i l_1 - \alpha_i l_{2R}} - 1}{\alpha_i (l_{2R} - l_1)}, \quad (3)$$

$$R'_{k+1,k} = \frac{R_{k+1,k} + R'_{k,k-1} e^{-2\beta_k(d_{k-1} - d_k)}}{1 + R_{k+1,k} R'_{k,k-1} e^{-2\beta_k(d_{k-1} - d_k)}}, \quad (4)$$

$$R_{k+1,k} = \frac{\mu_{rk} \beta_{k+1} - \mu_{r(k+1)} \beta_k}{\mu_{rk} \beta_{k+1} + \mu_{r(k+1)} \beta_k}, \quad (5)$$

方便计算，选取圆柱坐标系 $(r, \theta, z)$ ，并设定 $z$ 轴与线圈的对称轴重合，坐标原点位于四层结构上表面。同时，假设模型中各层媒介均为线性、均匀、各向同性介质，且在模型求解过程中采用截断区域展开式法<sup>[10]</sup>对模型的求解区域进行截断， $r=h$ 为截断后求解区域的边界。

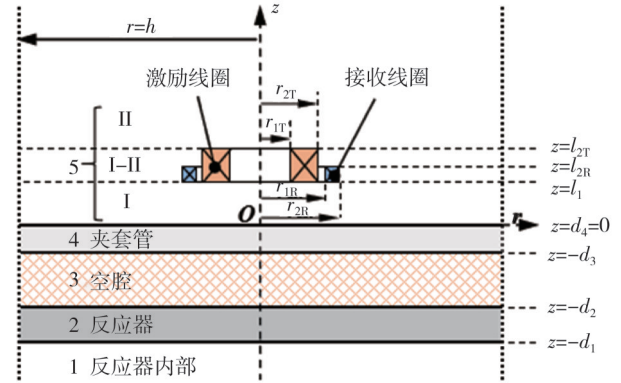


图2 脉冲涡流检测管式反应器的解析模型

Fig. 2 Analytical model for pulsed eddy current detection of tubular reactors

脉冲涡流的激励信号为方波，根据傅里叶变换，方波激励可看作一系列谐波激励的叠加，因此，首先计算得到各谐波感应电压，然后利用离散傅里叶逆变换，得到脉冲涡流的时域感应电压信号。根据文献[11]，谐波激励下接收线圈中感应电压 $\Delta U$ 的表达式为

$$\Delta U = j\pi\omega\mu_0 I \sum_{i=1}^{N_s} e^{-2\alpha_i l_1} S(\alpha_i) R'_{5,4}(\alpha_i), \quad (1)$$

$$J_1(\alpha_i h) + h \frac{\partial J_1(\alpha_i h)}{\partial h} = 0, \quad (2)$$

式中： $j$ 为虚数单位； $\omega$ 为谐波的角频率； $I$ 为谐波电流的幅值； $\mu_0$ 为真空磁导率； $N_s$ 为求和项数； $\alpha_i$ 为特征方程(2)的第 $i$ 个特征值； $l_1$ 为提离， $e^{-2\alpha_i l_1}$ 为提离系数； $S(\alpha_i)$ 为线圈系数； $R'_{5,4}(\alpha_i)$ 为广义反射系数。线圈系数 $S(\alpha_i)$ 的表达式如式(3)，广义反射系数 $R'_{5,4}(\alpha_i)$ 的表达式可通过式(4)~(5)推导。

$$\text{Int}(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} x J_1(x) dx, \quad (6)$$

$$\beta_k = \sqrt{\alpha_i^2 + j\omega\mu_0 \mu_{rk} \sigma_k}, \quad (7)$$

式中： $l_2 - l_1$ 为线圈高度； $r_1$ 、 $r_2$ 分别为线圈的内、外半径； $n$ 为线圈匝数；下标T和R分别为激励线圈和接收线圈； $d_1 - d_2$ 、 $d_2 - d_3$ 和 $d_3 - d_4$ 分别为反

反应器、空腔和夹套管的厚度;  $k$  为层数;  $R_{k+1,k}$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 为第  $k+1$  层和第  $k$  层之间的反射系数;  $R'_{k+1,k}$  ( $k=1, 2, 3, 4$ ) 为第 1 层到第  $k$  层的广义反射系数;  $R'_{2,1}=R_{2,1}$ ;  $J_1(ar)$  和  $Y_1(ar)$  分别为第一类和第二类贝塞尔函数;  $\beta_k$  为电磁波纵向波数;  $\mu_{rk}$  和  $\sigma_k$  分别为第  $k$  层的磁导率和电导率。

由于解析模型已在文献[11]中进行过实验验证, 本文不再赘述。后续, 本文将以解析模型为基础, 对适用于管式反应器缺陷识别的信号处理方法展开分析。所分析的管式反应器规格为化工

厂中常用规格, 其尺寸和材料参数如表 1 所示。此外, 根据文献[12]中对激励信号和探头参数的优化结果, 选择频率为 1 Hz, 幅值为 4 A, 占空比为 50% 的方波信号作为脉冲涡流激励信号, 选用如表 2 所示参数作为脉冲涡流探头的参数。

表 1 材料参数

Tabl. 1 Material parameters

	厚度/mm	电导率/(mS·m <sup>-1</sup> )	相对磁导率
反应器	19.05	1.6	600
夹套管	10.97	2.0	300
空腔	28.73	0	1

表 2 探头参数

Tab. 2 Probe parameter

激励线圈				接收线圈			
$r_{1T}/\text{mm}$	$r_{2T}/\text{mm}$	$(l_{2T}-l_1)/\text{mm}$	$n_T$	$r_{1R}/\text{mm}$	$r_{2R}/\text{mm}$	$(l_{2R}-l_1)/\text{mm}$	$n_R$
16	40	34	800	72	76	6	1 200

## 2 缺陷评估特征量

反应器与夹套管均为碳钢材料, 容易发生腐蚀。在工业生产中, 虽然夹套管腐蚀产生的危害远小于反应器腐蚀, 但在脉冲涡流检测中, 夹套管腐蚀会严重影响反应器腐蚀的定量分析, 因此, 需提出适用于反应器缺陷定量评估的特征量, 然后分析特征量受夹套管腐蚀缺陷的影响规律。此外, 在实际生产中, 夹套管外通常有包覆层, 但本文暂不考虑包覆层对检测信号的影响, 即将探头紧贴在夹套管上, 探头的提高高度为 0 mm。同时, 在工程实际中, 往往希望在反应器腐蚀缺陷发展不严重的阶段实现对其检测和定量, 因此, 本文仅讨论反应器壁厚减薄在 30% 范围内的情况, 即反应器的减薄量分别为设计厚度的 5%、10%、15%、20%、25% 和 30%。如表 1 所示, 反应器设计厚度为 19.05 mm, 则减薄之后的厚度分别为 18.10、17.15、16.19、15.24、14.29、13.34 mm, 参考 NB/T 47013.13-2015 标准<sup>[13]</sup>制备平板试件, 其结构和尺寸如图 3 所示。

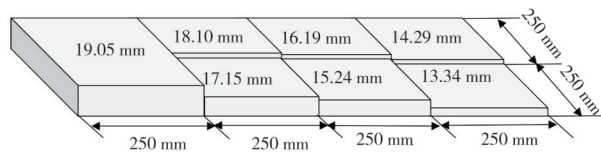


图 3 反应器试件及尺寸

Fig. 3 Reactor specimens and dimensions

### 2.1 常用方法在反应器缺陷评估中的问题

图 4 为通过解析模型计算得到的反应器无缺陷与含壁厚减薄 30% 缺陷的检测信号。由图 4 可知, 无缺陷与含缺陷信号的差别不大, 缺陷信号很难被识别出来。为放大缺陷信号与无缺陷信号的差异, 常用方法是计算两者的差分信号, 或将信号在双对数坐标系下显示, 如图 5(a) 和图 5(b) 所示。然而, 由于夹套管的存在, 能够到达反应器的电磁能量很少, 使缺陷引起的信号变化微弱, 如图 5(a) 所示, 反应器缺陷产生的差分信号峰值为  $4.0 \times 10^{-4}$  V。这导致利用差分信号的峰值、峰值时间或双对数坐标系下晚期衰减信号的差异实现缺陷定量评估的精度较差。

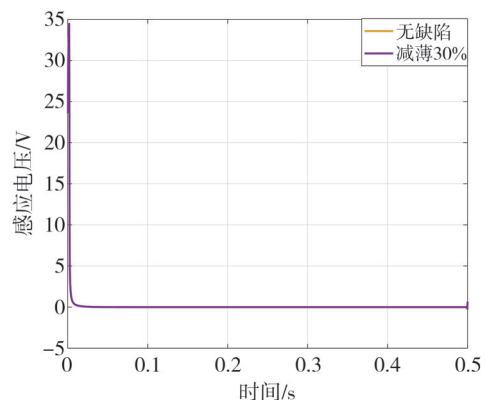


图 4 直角坐标系下的检测信号

Fig. 4 Signals in Cartesian coordinate system

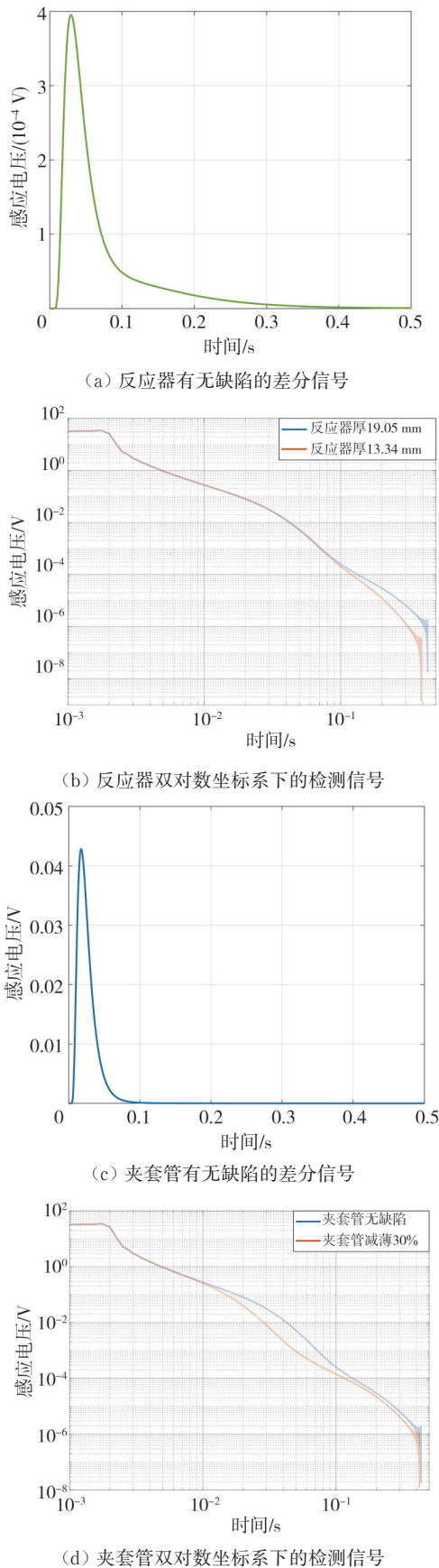


图5 常用信号处理方法

Fig. 5 Signals obtained by using the commonly-used signal processing methods

此外,图 5(c)和图 5(d)为反应器无缺陷,但夹套管减薄 30%与夹套管无缺陷的差分信号和双对数坐标系下的信号。由图 5(c)可知,夹套管缺陷产生的差分信号峰值为  $4.3 \times 10^{-2}$  V,远大于图 5(a)所示反应器缺陷产生的差分信号峰值;由图 5(d)可知,双对数坐标系下,夹套管缺陷对晚期衰减信号也有较大影响。因此,利用差分信号或双对数坐标系下晚期衰减信号的差异作为反应器缺陷评估的特征量,将受夹套管状态的影响很大。因此,寻找一种精度高且受夹套管状态影响较小的特征量非常重要。

## 2.2 基于坐标变换的反应器缺陷评估特征量

本文提出一种基于坐标变换的反应器缺陷评估特征量。由解析模型可知,反应器有无缺陷仅  $d_2$  的取值不同,因此,缺陷与无缺陷的信号之间存在非常强的相关性。为明确其中的相关性,以无缺陷信号为横坐标,以缺陷信号为纵坐标,形成相关性曲线;且为凸显缺陷信号与无缺陷信号的差异,横纵坐标均选择对数坐标系。则有缺陷信号与无缺陷信号的相关性如图 6 所示,呈线性关系,可用线性方程近似表示为

$$\lg(\Delta U_{\text{缺陷}}) = k \lg(\Delta U_{\text{参考}}) + b, \quad (8)$$

式中:  $\Delta U_{\text{缺陷}}$  为含缺陷反应器的感应电压信号;  $\Delta U_{\text{参考}}$  为不含缺陷反应器的感应电压信号;  $k$  为斜率;  $b$  为截距。

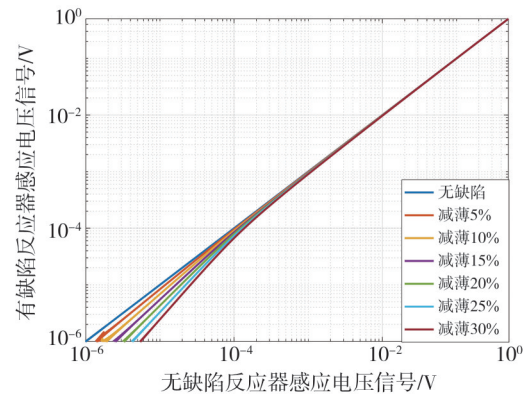


图6 反应器不同程度壁厚减薄缺陷信号与无缺陷信号的相关曲线

Fig. 6 Correlation curves between signals of wall thickness thinning defects and signal of non-defect

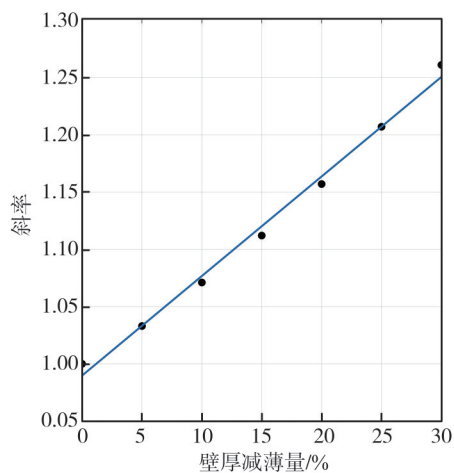
由图 6 可知,反应器减薄量不同时,相关性曲线的斜率和截距不同,则斜率和截距可用于缺陷定量。图 7(a)和图 7(b)分别为斜率与反应器的壁厚减薄量和截距与反应器的壁厚减薄量之间的关系,均为线性关系。用线性方程对其进行拟合,表达式

分别如式(9)和式(10)所示,同时,其拟合优度 $R^2$ 分别为0.993 3和0.992 8,说明斜率与反应器的壁厚减薄量和截距与反应器的壁厚减薄量之间的线性关系显著,这为后续缺陷的定量评估提供了基础。

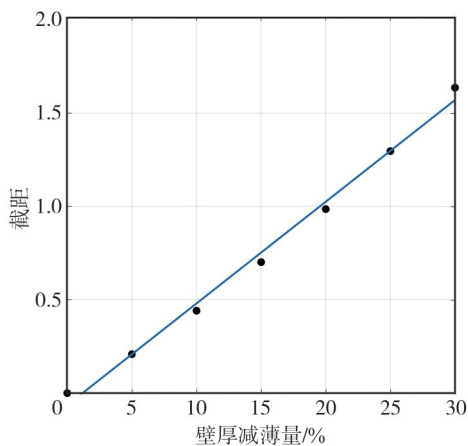
$$k = 0.8667 \times wt + 0.9897, \quad (9)$$

$$b = 5.454 \times wt - 0.06719, \quad (10)$$

式中:  $wt$ 为反应器的壁厚减薄量。



(a) 斜率随壁厚减薄量变化



(b) 截距随壁厚减薄量变化

图 7 相关性曲线的特征量

Fig. 7 Characteristic quantities of correlation curve

### 2.3 夹套管缺陷对特征量的影响

图 6 为在夹套管无缺陷情况下获取的反应器有无缺陷信号的相关性曲线。为进一步研究夹套管缺陷对反应器壁厚减薄定量的影响,将分析夹套管存在 15% 和 30% 壁厚减薄缺陷时的情况。

图 8 为夹套管存在 15% 壁厚减薄缺陷时,反应器的减薄量分别为设计厚度的 5%、10%、15%、20%、25% 和 30% 的信号相关性曲线。

比较图 8 和图 6 可知,两种情况下获取的相关性曲线有较大差异,尤其表现在相关性曲线的

后半段,而相关性曲线的前半段依然呈现一定的线性关系。夹套管存在 30% 壁厚减薄缺陷时,获取的信号相关性曲线类似,不再赘述。提取相关性曲线线性段的斜率和截距,并分析其与反应器壁厚减薄量的关系,结果如图 9 所示。

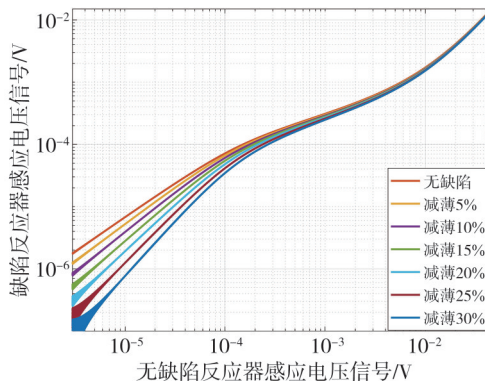
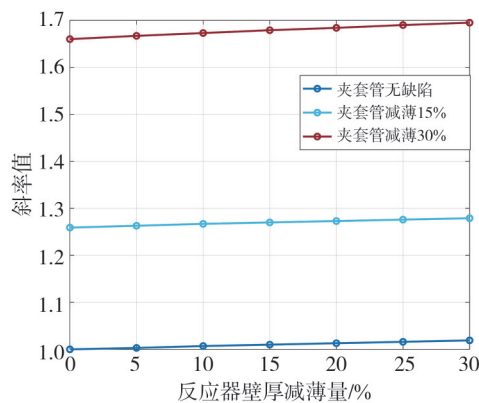
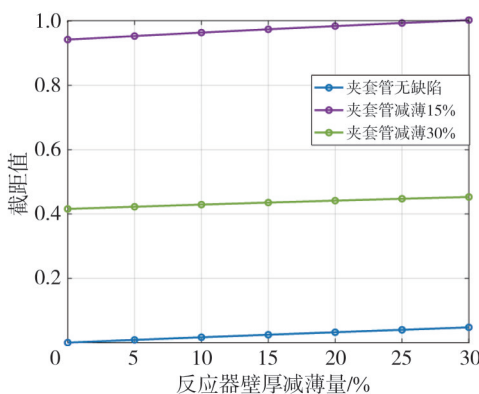


图 8 夹套管减薄 15% 时反应器有无缺陷信号的相关曲线

Fig. 8 Correlation curves when wall thickness thinning of jacketed pipe is 15%



(a) 斜率随反应器壁厚减薄量变化



(b) 截距随反应器壁厚减薄量变化

图 9 夹套管减薄时相关性曲线的特征量

Fig. 9 Characteristic quantities of correlation curve when wall thickness thinning of jacketed pipe is existed

由图 9 可知,当夹套管存在缺陷时,反应器有无缺陷的信号的相关曲线斜率和截距与缺陷损失量

依然为线性关系,且其曲线的起始点不一样。

基于此,相关性曲线的斜率和截距在夹套管存在缺陷时能实现高精度定量分析,也可同时用于反应器和夹套管缺陷的定量。

### 3 结 论

本文针对脉冲涡流缺陷评估中,夹套管和夹套管与反应器间的空腔对检测精度影响的问题,提出了一种基于坐标变换的信号处理算法。首先,建立管式反应器的脉冲涡流检测解析模型,获取其检测信号表达式;然后,基于解析模型提出基于坐标变换的信号处理方法,获取有缺陷与无缺陷信号的相关性曲线,且相关性曲线的斜率和截距与壁厚减薄程度呈线性关系;最后,分析夹套管对反应器缺陷定量评估的影响,结果表明,斜率和截距在夹套管存在缺陷的情况下,也能实现定量评估。后续将围绕夹套管外包覆层和探头提离对检测信号的影响对算法做进一步改进。同时进行实验验证,研究温度、管径、母材厚度、复杂工况等对算法精度的影响,获取温度修正,分析复合工况下的识别准确率,明确该方法适用的管径、母材厚度范围等。

#### 参考文献:

- [1] 王培. 含缺陷自增强超高压管式反应器疲劳特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [2] SOPHIAN A, TIAN G, FAN M. Pulsed eddy current non-destructive Testing and evaluation: a review [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 500-514.
- [3] 黄琛. 铁磁性构件脉冲涡流测厚理论与仪器[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [4] 李佳东, 张彦杰, 邱俊杰, 等. 带包覆层管道缺陷的脉冲涡流检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(10): 137-146.  
LI Jiadong, ZHANG Yanjie, QIU Junjie, et al. Research on pulse eddy current testing method for pipeline defects with coating layer [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(10): 137-146. (in Chinese)
- [5] 王安泉, 陈健飞, 杨勇, 等. 铁磁性材料的脉冲涡流测厚与特征量提取[J]. 无损检测, 2020, 42(11): 38-41.  
WANG Anquan, CHEN Jianfei, YANG Yong, et al. Pulsed eddy current thickness measurement and characteristic extraction of ferromagnetic materials [J]. Non-destructive Testing Technology, 2020, 42(11): 38-41. (in Chinese)
- [6] 孙国健. 基于曲面拟合与多特征量的管道和压力容器脉冲涡流壁厚检测方法研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2022.
- [7] 王安泉, 刘禹, 郝宪锋, 等. 基于功率谱密度峰值的大提离下脉冲涡流测厚方法[J]. 无损检测, 2021, 43(10): 29-33.  
WANG Anquan, LIU Yu, HAO Xianfeng, et al. Pulsed eddy current thickness measurement method under large lift based on power spectral density peak [J]. Nondestructive Testing Technology, 2021, 43(10): 29-33. (in Chinese)
- [8] UMAR DAURA L, SUN Y, GUI Y T, et al. Sensitivity and lift-off robustness of magnetic resonance circuit topologies for enhanced WPT-based ECT systems [J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(13): 24568-24578.
- [9] 闻东东, 李婉婉, 邹庆晓, 等. 脉冲涡流检测频域提离交叉点的测厚研究[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2024, 39(1): 34-43.  
WEN Dongdong, LI Wanwan, ZOU Qingxiao, et al. Thickness measurement of frequency domain lift-off point of intersection detected by pulsed eddy current testing [J]. Journal of Xuzhou Institute of Technology (Natural Sciences Edition), 2024, 39(1): 34-43. (in Chinese)
- [10] THEODOULIDIS T P, KRIEZIS E E. Eddy current canonical problems (with applications to nondestructive evaluation) [M]. Henderson: Tech Science Press, 2006.
- [11] ZHANG Q, WU X. Study on the shielding effect of claddings with transmitter-receiver sensor in pulsed eddy current testing [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(4): 99.
- [12] 徐志远. 带包覆层管道壁厚减薄脉冲涡流检测理论与方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [13] 国家能源局. 承压设备无损检测 第13部分: 脉冲涡流检测: NB/T 47013.13—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.