

水冷壁管腐蚀脉冲涡流检测聚焦探头特性研究^{*}

陶爱军¹, 杨帆^{1,3}, 付跃文¹, 黄文丰¹, 邢仁飞¹, 汤陈怀², 曹爱松²

(1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌, 330063)

(2. 上海市特种设备监督检验技术研究院 上海, 200062)

(3. 佛山市地铁运营有限公司 佛山, 528000)

摘要 为了解决水冷壁管向火面腐蚀减薄检测时聚焦探头不同摆放方式影响检测灵敏度的问题,从数值仿真与试验两方面进行分析。首先,在仿真中对传统圆柱形激励线圈径向、横向、纵向摆放方式时水冷壁管中的涡流形态及磁通密度分布进行分析,对 xyz 三维磁通量进行定量计算来判断检测灵敏度;其次,在试验中使用隧道磁阻传感器作为探头接收单元,分别计算每种激励线圈摆放方式下 xyz 三维检测灵敏度;最后,引入加权秩和比法对3种激励摆放方式进行优劣排序。结果表明,聚焦探头3种摆放方式中横向摆放具有最优的检测效果,该研究有助于水冷壁管检测的高灵敏度脉冲涡流探头的设计,可进一步提高水冷壁管腐蚀检测灵敏度。

关键词 脉冲涡流;检测灵敏度;加权秩和比;聚焦探头;水冷壁管

中图分类号 TG115.28;TH878

引言

水冷壁管常用于吸收工业锅炉内的高温,起到冷却、保护等作用。由于服役条件恶劣,燃料煤中的硫元素、氯元素以及硫酸盐极易导致管道外壁腐蚀^[1],需要对其进行定检以防止造成人员伤亡与财产损失^[2]。目前,常用的壁厚检测手段为超声测厚^[3],但超声检测手段对试件表面有光洁度和耦合剂的要求,因此有研究者设计了电磁方法^[4-5]作为新的检测手段。

脉冲涡流检测(pulsed eddy current testing,简称PECT)是涡流检测方法中的新兴分支,由于其具有非接触式、宽频谱等特点被广泛应用于航空、船舶以及特种设备检测^[6]。PECT探头主要由激励线圈与接收单元组成,接收单元通常为磁传感器或线圈。磁传感器一般选择有霍尔效应的传感器^[7]、各向异性磁阻(anisotropic magnetoresistance,简称AMR)^[8]、巨磁阻(giant magnetoresistance,简称GMR)^[9]和隧道磁阻(tunnel magnetoresistance,简称TMR)^[10]等。TMR相较于其他磁传感器,因具有宽动态范围、高灵敏度、低磁滞及低功耗等特点而被广泛使用。传统的PECT探头采用圆柱形线圈激励,但这种激励正下方产生的感应涡流中存在涡流密度

极弱的区域,即“检测盲区”,对局部小缺陷易漏检^[11]。PECT探头的聚焦特性会影响对试件局部范围内缺陷的检测灵敏度,具有感应涡流场在探头下方聚集效果的探头为聚焦探头^[12-13]。通过对圆柱形线圈在管道上方沿径向、横向、纵向3种摆放方式空间分辨力的研究,可知径向摆放涡流场最弱,横向摆放涡流聚焦效果好,纵向摆放更有利于测量全管平均壁厚^[14]。

水冷壁管尤其是带鳍片的水冷壁管具有和普通管道不同的结构特点,笔者通过使用圆柱形激励线圈的3种摆放形式对水冷壁管进行检测。其中,径向摆放时为非聚集探头,横向和纵向摆放时为聚集探头。利用TMR对 xyz 方向磁场的检测灵敏度定量分析,借助统计学经典评价模型对检测结构进行分析,对3种激励线圈的摆放方式进行了分档排序。

1 检测原理

脉冲涡流采用的是方波激励,频率一般为几赫兹到几十赫兹。在激励电流关断时刻,激励线圈中激发的1次磁场会快速衰减,从而在被检试件上感应出瞬时涡流。瞬时涡流衰减过程又会产生与1次磁场相反的2次磁场,2次磁场能够在检测线圈或传

^{*} 国家自然科学基金资助项目(52067016)

收稿日期:2022-06-30;修回日期:2022-08-25

感器上得到输出感应电压。当被检试件出现壁厚减薄、裂缝、通孔等缺陷时,感应电压就会发生变化,通过对感应电压的信号处理能够得出缺陷的各种信息。脉冲涡流检测原理示意图如图 1 所示。

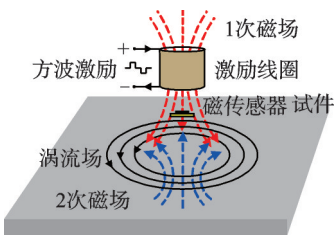


图1 脉冲涡流检测原理示意图

Fig.1 Schematic figure of pulsed eddy current testing

2 数值仿真

2.1 仿真模型的建立

使用 COMSOL 6.0 有限元分析软件进行数值仿真。圆柱形线圈 3 种摆放方向的脉冲涡流检测仿真模型见图 2。网格为四面体与自由六面体组成,

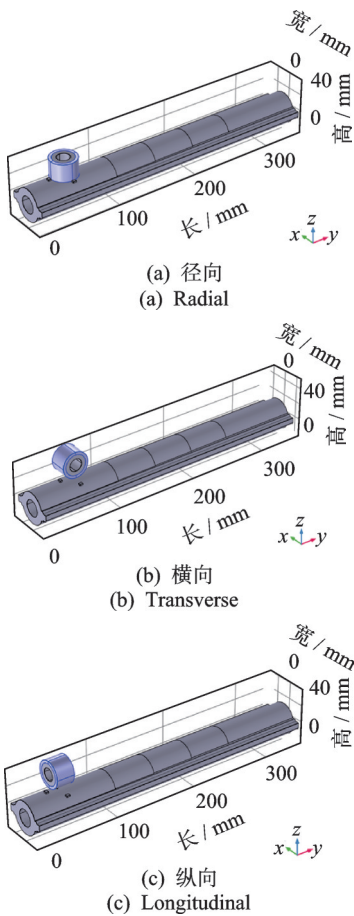


图2 圆柱形线圈 3 种摆放方向的脉冲涡流检测仿真模型
Fig.2 Pulsed eddy current testing simulation model for three directions of cylindrical coil

网格最大单元为 2 mm。为减少网格数量,带鳍片的膜式水冷壁管试件简化为 1 根两边带连接槽的管道,管道上半部分为 5 个不同厚度的阶梯,以模拟实际管道向火面 4 个厚度的减薄缺陷。探头为圆柱形,里层为铁氧体磁环,外层包裹铜线,激励参数及试件尺寸和试验中的一致。在线圈下方 xyz 方向上设置长方体来模拟 TMR 摆放,后处理时用于计算磁场信息。使用 8 V 电压激励,设置单阶跃下降信号,测量时间与实际检测时电压下降沿关断时间一致。计算时间从 10^{-6} s 到 $10^{-1.2}$ s,计算步长指数式增加,即底数不变,指数每增加 0.05 采样 1 次, $37.5\ \mu\text{s}$ 为关断时间,这是激励源关断并开始测量的时间点。

2.2 仿真结果

选择第 0.126 s 显示管内磁通密度分布与涡流密度分布,该时间下涡流已渗透管壁内。磁通密度分布如图 3 所示。涡流密度分布切面图如图 4 所示。图 3(a)为圆柱形线圈径向摆放时管内磁通密度分布,探头正下方是磁通密度较弱的区域,在管道轴向方向出现局部密集区域。图 3(b,c)分别为圆柱形线圈横向与纵向摆放时管内磁通密度,其分布形态相近。线圈横向摆放相较于纵向摆放时,磁通

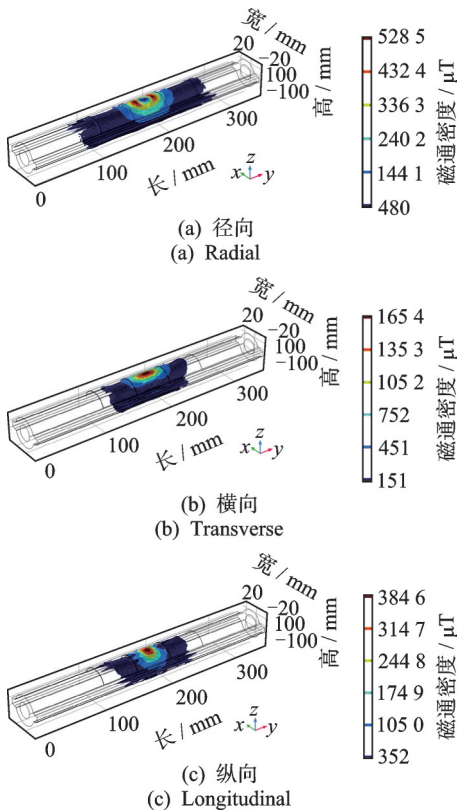


图3 圆柱形线圈 3 种摆放方向管内磁通密度分布图
Fig.3 Distribution of magnetic flux density in the tube with (for) three directions of cylindrical coil

密度在管道减薄阶梯处的聚集效果更好,但磁通密度更小,径向与纵向摆放时管道边缘连接槽的磁通密度远大于横向摆放时。

图 4(a)为圆柱形激励线圈径向摆放时管内涡流密度分布,探头正下方涡流密度弱,形成环形涡流场。图 4(b,c)分别为圆柱形激励线圈横向、纵向摆放时管内涡流密度分布,两者涡流形态相近,但线圈横向摆放时管内涡流密度小于纵向摆放时。横向摆放时涡流沿管轴扩散,而纵向摆放时沿管周扩散。由于管边缘存在不规则连接槽,绕管周流动的涡流容易聚集于连接槽后流向其他管,不利于缺陷检测信号的识别。径向摆放与纵向摆放时可见涡流聚集于连接槽处,而横向摆放时涡流聚集在壁厚减薄处,能更好地获得缺陷面的平均壁厚信息。

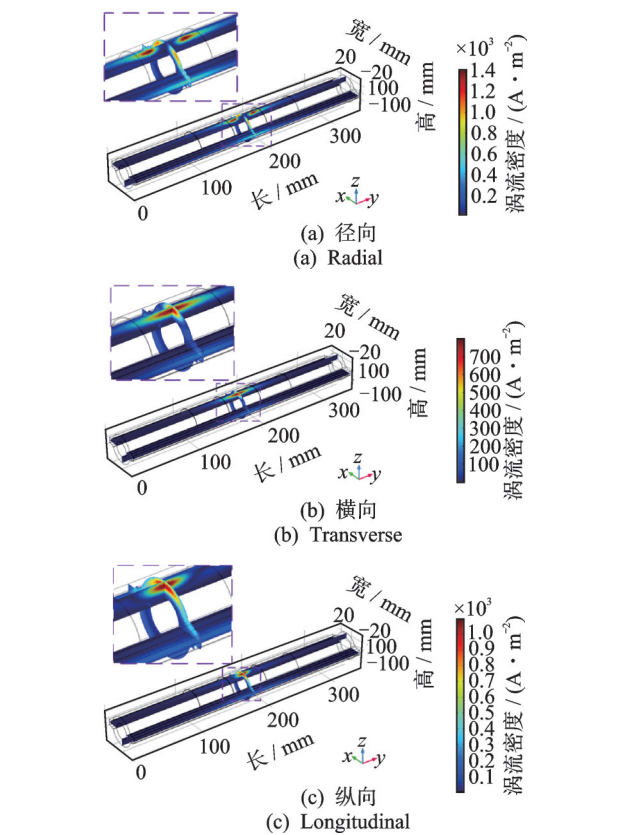


图 4 圆柱形线圈 3 种摆放方向管内感应涡流密度切面图
Fig.4 Induced eddy current density in the tube with three directions of cylindrical coil

以相同的提高高度对不同厚度进行检测,采用空间磁场分布计算特定面的磁通量大小。TMR 敏感方向面为 1.4 mm×3.8 mm 的矩形,因此计算穿过该面 xyz 三轴方向磁通量大小。图 5 显示为圆柱形线圈不同摆放位置磁通量计算结果,采用单对数坐标是为了更好地显示磁通量差异。图 5(a)~(c)

为圆柱形线圈径向摆放时磁通量变化;图 5(d)~(f)为圆柱形线圈横向摆放时磁通量变化;图 5(g)~(i)为圆柱形线圈纵向摆放时磁通量变化。

为定量描述各维度的检测效果,取 TMR 敏感方向面的面积计算磁通量,近似计算 TMR 测量到某一维度下的磁场强度,通过比较不同厚度检测时磁通量的变化量,计算对该缺陷减薄量的检测灵敏度。具体计算方法如下:探头从试件由厚到薄依次扫描,设该面积为 A ,穿过 TMR 敏感方向面的磁场强度为 B ,则测量第 i 个厚度 T_i 时的磁通量 Φ_i 为

$$\Phi_i = \iint_A B dA \tag{1}$$

其中: A 的大小为 1.4 mm×3.8 mm。

测量第 $i+1$ 个厚度时,计算相应的磁通量,与第 i 个厚度的磁通量作差并归一化,得到磁通变化率。试件相邻厚度检测磁通变化率为仿真中计算的检测灵敏度 S_{sim} ,即

$$S_{sim} = \frac{\Phi_i - \Phi_{i+1}}{\Phi_i} \tag{2}$$

利用圆柱形激励线圈不同摆放方式检测不同厚度水冷壁管缺陷时,仿真中激励线圈不同摆放方向检测灵敏度汇总表见表 1,均为 0.04 s 时刻计算的结果,此时磁场基本稳定。

表 1 仿真中激励线圈不同摆放方向检测灵敏度汇总表
Tab.1 Detection sensitivity of different directions of the excitation coil in the simulation

摆向	测向	减薄	减薄	减薄	减薄
		6.60%	13.11%	17.95%	19.82%
径向	x 轴	0.172 6	0.313 0	0.411 1	0.478 4
	y 轴	0.123 0	0.259 7	0.371 2	0.436 9
	z 轴	0.209 5	0.368 0	0.475 1	0.545 4
横向	x 轴	0.194 9	0.333 3	0.427 4	0.444 4
	y 轴	0.203 0	0.378 6	0.493 4	0.533 4
	z 轴	0.244 1	0.419 8	0.527 2	0.558 5
纵向	x 轴	0.089 7	0.181 7	0.240 2	0.292 4
	y 轴	0.257 9	0.417 9	0.522 0	0.627 7
	z 轴	0.258 7	0.392 3	0.456 2	0.505 2

3 实际试验设计与结果

3.1 试验平台

脉冲涡流检测试验平台如图 6 所示。平台由信号发生器、采集卡、计算机、探头以及试件组成。信号发生器发送占空比为 50% 的双极性方波激励信号,激励频率为 4 Hz,激励电压为 ±8 V,采用 16 位

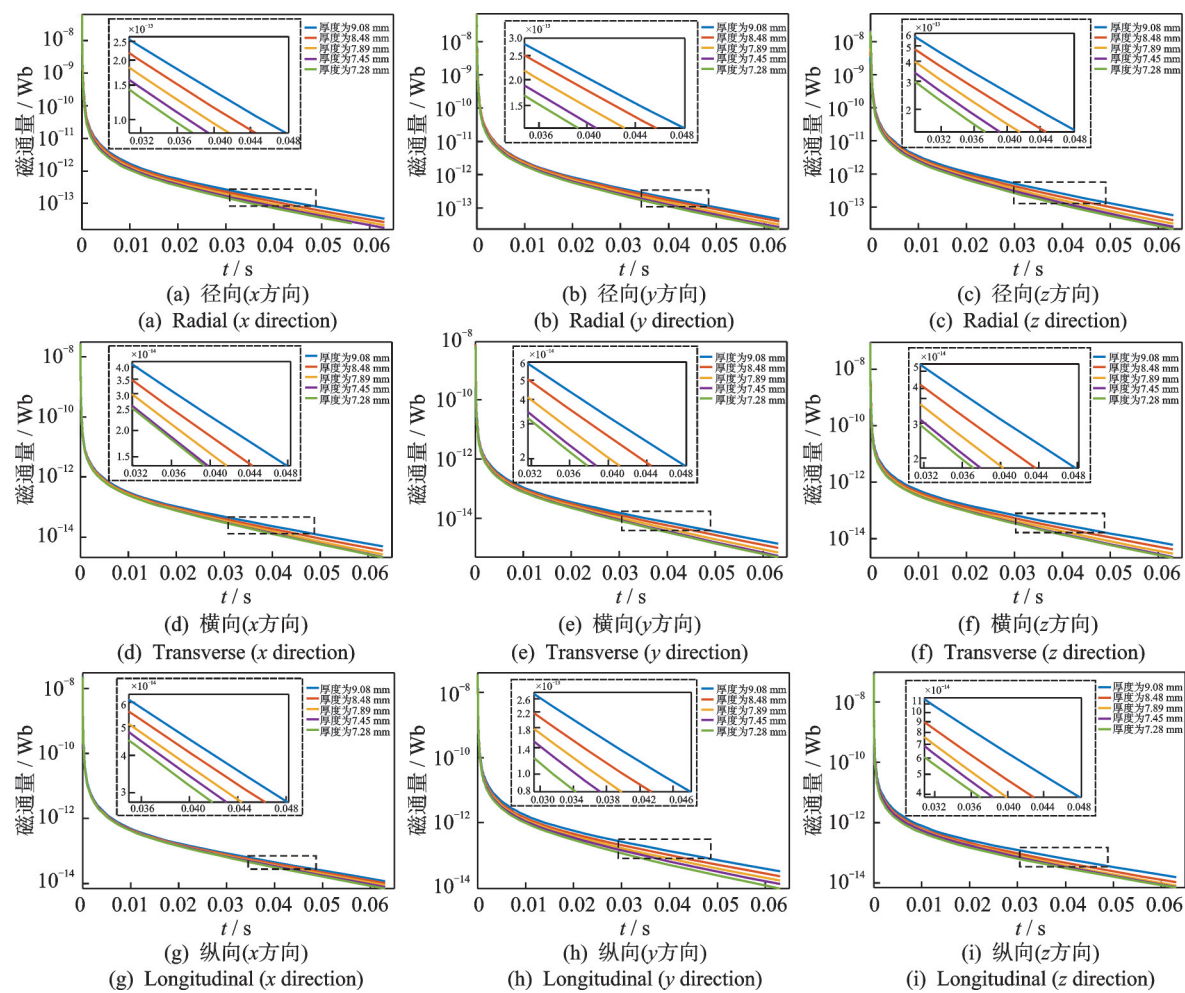


图5 圆柱形线圈不同摆放位置三维方向磁通量变化

Fig.5 Variation of magnetic flux in the three-dimensional direction for different positions of the cylindrical coil

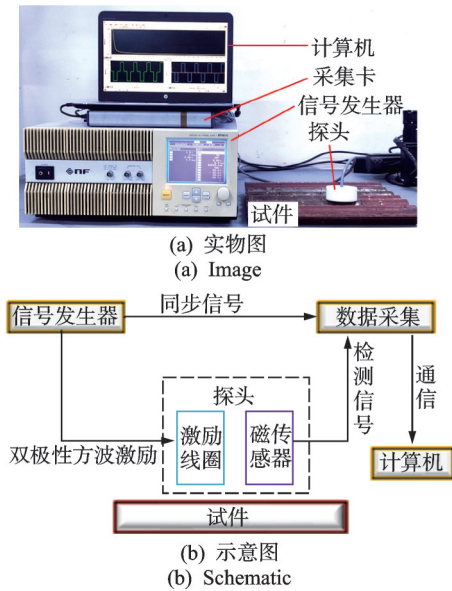


图6 脉冲涡流检测试验平台

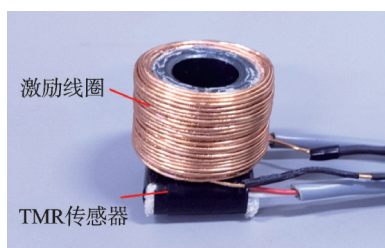
Fig.6 Experimental platform for pulsed eddy current

采集卡,采样频率为 100 kHz,采集并存储数据,最后发送到计算机上进行数据处理。

3.2 探头与试件

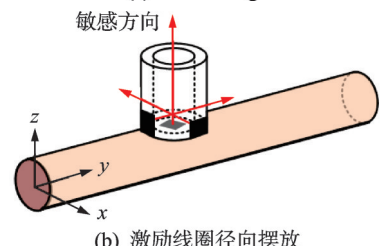
探头由 1 个圆柱形线圈作为激励单元,接收单元为 TMR 传感器。圆柱形激励线圈中心为铁氧体磁环,磁环内径为 15 mm,外径为 25 mm,激励线圈绕制线径为 0.80 mm,匝数为 84,电阻为 0.49 Ω,电感为 423.15 μH,高度为 20.80 mm。TMR 敏感方向在正向磁场下产生正向输出电压,工作电压为 1~7 V,灵敏度为 12 mV/(V·Oe),对 ±50 Oe 下磁场变化敏感。根据不同激励线圈摆放位置,TMR 选择较好的接收位置测量 xyz 三方向的磁场变化。探头实物和摆放示意图如图 7 所示。

试验所用试件为水冷壁管试件中的 1 条阶梯减薄管,只在向火面设置减薄缺陷。试件管尺寸如图 8 所示。管道内径为 20.14 mm,外径为 38.30 mm,材质为碳钢,边缘与其他水冷壁管相连,管道内壁有螺纹。未减薄处厚度为 9.08 mm,设置减薄厚度阶梯 4 个,厚度分别为 8.48,7.89,7.45 和



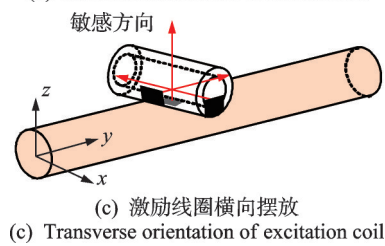
(a) 探头实物图

(a) Probe image



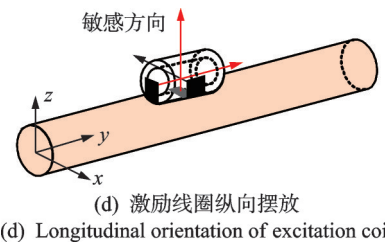
(b) 激励线圈径向摆放

(b) Radial orientation of excitation coil



(c) 激励线圈横向摆放

(c) Transverse orientation of excitation coil



(d) 激励线圈纵向摆放

(d) Longitudinal orientation of excitation coil

图 7 探头实物和摆放示意图

Fig.7 Probe image and orientation diagram

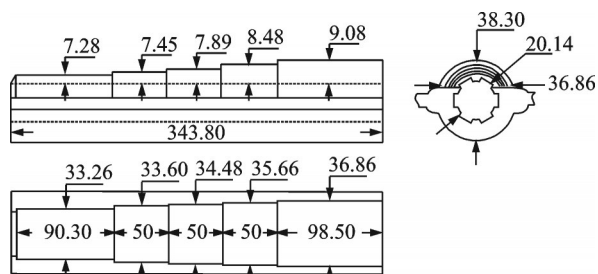


图 8 试件管尺寸图(单位:mm)

Fig.8 Dimension of experimental tube (unit:mm)

7.28 mm, 较未减薄处减薄率分别为 6.60%, 13.11%, 17.95% 和 19.82%。其中, 相邻厚度 (7.45 mm 与 7.28 mm) 减薄率最小为 2.2%。

3.3 信号处理

为定量描述不同激励线圈摆放位置对检测效果的影响, 首先定义检测灵敏度计算方法。在测量时,

试件中感应涡流衰减产生的 2 次磁场信息被 TMR 接收并以电压形式呈现。在磁场变化稳定后取最厚处 (无缺陷处) 的电压值作参考电压, 每次检测电压与其作差并进行归一化, 即可得到不同厚度变化率所对应的检测电压变化量, 即检测灵敏度。相同厚度变化率对应的电压变化量越大, 则检测效果越好, 反之则越差。

具体计算方法如下: 检测不同厚度 T_1 , T_2 和 T_3 水冷壁管时 ($T_1 > T_2 > T_3$), 壁厚较薄的管内涡流衰减相较于厚管速度快, 因此 TMR 接收到的磁场衰减速度快; 衰减信号稳定后, 电压值从小到大依次排列, 对应壁厚从薄到厚; 选择电压稳定时刻 t_0 , 取得无缺陷处检测电压为 V_1 , 同时取得厚度 T_2 和 T_3 对应的检测电压 V_2 和 V_3 。检测灵敏度计算方法示意图如图 9 所示。厚度 T_2 相较于厚度 T_1 的检测灵敏度为

$$S_{T_1-T_2} = (V_1 - V_2) / V_1 \quad (3)$$

同样, 厚度 T_3 相较于厚度 T_1 的检测灵敏度为

$$S_{T_1-T_3} = (V_1 - V_3) / V_1 \quad (4)$$

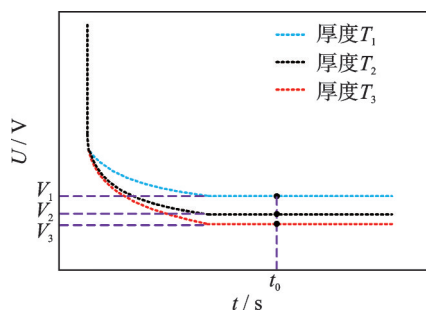


图 9 检测灵敏度计算方法示意图

Fig.9 The calculation method of detection sensitivity

3.4 试验结果

图 10 为激励线圈不同摆放时 TMR 接收 xyz 方向检测结果。由图可知, 探头对所有厚度均可有效检测。试验中激励线圈不同摆放方式检测灵敏度汇总见表 2, 均为在电压关断后 0.035 s 时刻计算的结果, 此时感应电压基本保持平稳。由表可知, y 轴测量方向的灵敏度不如 x 轴和 z 轴方向灵敏度高。

4 评价方法

激励线圈不同摆放方式对检测灵敏度的对比方法采用秩和比法 (rank-sum ratio, 简称 RSR), 这是一种集古典参数统计与近代非参数统计优点于一体的统计分析方法, 早期用于医疗卫生、管理领域中的

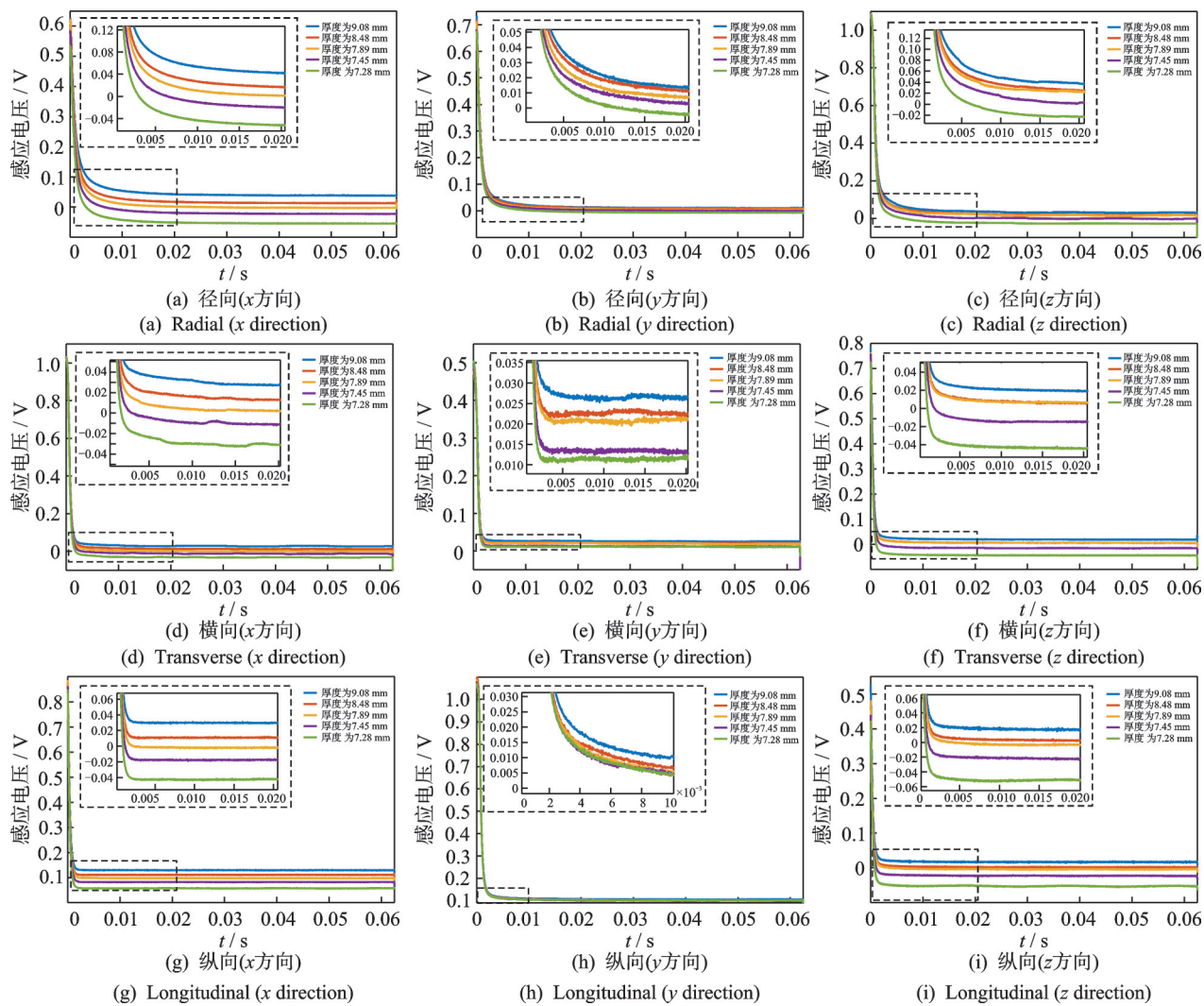


图 10 激励线圈不同摆放时 TMR 接收 xyz 方向检测结果
Fig.10 Result of TMR receiving xyz direction with different orientation of excitation coil

表 2 试验中激励线圈不同摆放方式检测灵敏度汇总
Tab.2 Detection sensitivity of different orientation of excitation coils in the experiment

摆向	测向	减薄	减薄	减薄	减薄
		6.60%	13.11%	17.95%	19.82%
径向	x 轴	0.642 1	1.055 1	1.569 8	2.405 5
	y 轴	0.020 1	0.031 5	0.069 9	0.077 1
	z 轴	0.356 8	0.501 1	0.978 9	1.821 2
横向	x 轴	0.527 8	0.924 3	1.410 7	2.143 7
	y 轴	0.180 0	0.215 9	0.525 4	0.580 6
	z 轴	0.620 5	0.662 0	1.677 4	3.043 0
纵向	x 轴	0.614 9	1.078 3	1.609 0	2.430 3
	y 轴	0.001 6	0.021 9	0.033 1	0.040 1
	z 轴	0.861 1	1.251 8	2.435 8	4.301 6

综合评价^[15],近年被用于电气电力等工程领域中^[16]。为了更加客观地进行评价,对指标加权后再进行 RSR 分析,称为加权秩和比法(weighted

rank-sum ratio,简称 WRSR)^[17],其基本思想是在一个由 N 个评价对象、 P 个评价指标组成的 $N \times P$ 矩阵 X 中,加权后通过秩转换获得无量纲统计量 WRSR,通过 WRSR 值对评价对象进行优劣排序或分档排序,WRSR 值越大则表明综合评价越优。

首先,对样本进行编秩,编秩方法有整次秩和比法与非整次秩和比法。在矩阵 X 中, X_{ij} 为第 i 行第 j 列元素,整次秩和比法分别对上述矩阵的每个指标列进行编秩。

指标中数值越大表示越优的为正向指标,反之则为负向指标。本次评价采用正向指标进行编秩。编秩是对数据进行排序,顺序的号作为“秩”。对正向指标从小到大进行编秩,负向指标从大到小进行编秩。当数据的值相同时编平均秩,得到一个秩矩阵 R 为

$$R = (R_{ij})_{N \times P} \tag{5}$$

非整次秩和比法使用类似线性插值的方式对指标进行编秩,用于改进上述方法的不足,因此秩次值

与原指标值之间存在定量的线性对应关系。对正向指标秩的计算式为

$$R_{ij} = 1 + (N - 1) \times \frac{X_{ij} - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{Nj})}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{Nj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{Nj})} \quad (6)$$

对负向指标秩的计算式为

$$R_{ij} = 1 + (N - 1) \times \frac{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{Nj}) - X_{ij}}{\max(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{Nj}) - \min(X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{Nj})} \quad (7)$$

第*i*个评价对象RSR值的计算式为

$$R_{\text{RSR},i} = \frac{1}{NP} \sum_{j=1}^P R_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (8)$$

评价指标加权常用熵权法。熵权法不具备判断实际背景,仅考虑指标数据的离散度,能客观地对不同指标类别自动分配权重,在综合评价中更有解释性。

第*j*个指标的熵权 w_j 需要满足

$$\sum_{j=1}^P w_j = 1 \quad (9)$$

熵权法的计算方法首先构建正向化矩阵,即 $N \times P$ 矩阵,并将矩阵进行标准化为矩阵 Z , Z 中每一个元素 z_{ij} 为

$$z_{ij} = X_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^N X_{ij}^2} \quad (10)$$

其次,计算第*j*项指标下第*i*个样本所占比重,将其视为相对于熵计算过程中使用的概率。计算概率矩阵中的每一个元素 p_{ij}

$$p_{ij} = z_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^N z_{ij}^2} \quad (11)$$

然后,计算每个指标信息熵和信息效用值,归一化得到每个指标的熵权。第*j*个指标对应的信息熵 e_j 的计算公式为

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^N p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, P) \quad (12)$$

e_j 越大,即信息熵越大,则对应的信息越少。信息效用值 d_j 定义为

$$d_j = 1 - e_j \quad (13)$$

信息效用值越大,对应的信息就越多。通过将信息效用值进行归一化,即可得到每个指标对应的熵权 w_j

$$w_j = d_j / \sum_{j=1}^P d_j \quad (14)$$

加权后第*i*个评价对象WRSR值的计算式为

$$W_{\text{WRSR},i} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^P w_j R_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (15)$$

按照从小到大的顺序编制WRSR频率分布表,列出各组频数 f_i ,计算各组累计频数 F_i ,则累计频率 p_i 为

$$p_i = F_i / n \quad (16)$$

累计频率 p_i 通过查询“百分数与概率单位对照表”,求出对应概率单位Probit值。以所得出的Probit值为自变量,WRSR值为因变量,可计算出线性回归方程为

$$W_{\text{WRSR}} = a + bP_{\text{Probit}} \quad (17)$$

按照回归方程计算的WRSR估计值,对评价对象进行分档排序,分档数量由实际情况决定,一般为3档。

5 算例结果

5.1 仿真算例结果

算例计算时采用SPISSPRO软件进行WRSR分析。将数值仿真得到的4个减薄百分比对应的xyz方向共12个指标,采用熵权法进行权重计算与分配。仿真指标权重见表3。

表3 仿真指标权重

Tab.3 Index weights in numerical simulation				
轴	减薄 6.60%	减薄 13.11%	减薄 17.95%	减薄 19.82%
<i>x</i>	0.078 6	0.078 0	0.078 0	0.078 4
<i>y</i>	0.083 7	0.079 5	0.078 4	0.087 9
<i>z</i>	0.079 3	0.089 0	0.110 8	0.078 4

通过数值仿真得到激励线圈3种摆放方式、xyz三方向磁场信息以及4个厚度变化率,共36个数据进行WRSR分析,采用非整次秩和比法,分析结果分为3档。表4为计算得到的仿真WRSR分布表。利用表4数据计算得到回归方程为

$$y = -0.272 + 0.179 P_{\text{Probit}} \quad (18)$$

表5为仿真分档排序表。其中:百分位数临界值

表4 仿真WRSR分布表

Tab.4 WRSR distribution in numerical simulation	
WRSR值	Probit值
0.578 7	4.569 3
0.633 9	5.430 7
0.899 4	6.383 0

和概率单位 Probit 临界值根据分档数量而定,该 2 项是固定值且完全一一对应;WRSR 临界值是根据概率单位 Probit 临界值代入回归方程计算得到。表中列举出分档排序临界值,通过该表对径向、横向及纵向摆放的激励线圈进行排序,档级越高则表现越好。

表 5 仿真分档排序表

Tab.5 Numerical simulation grading sort

档次	百分位 临界值	Probit 临界值	WRSR 临界值 (拟合值)
1	<15.9	<4	<0.443 0
2	15.9~84.1	4~6	0.443 0~0.800 3
3	>84.1	>6	>0.800 3

按照回归方程推算出对应的 WRSR 估计值,数值仿真中 3 种激励摆放方向排序结果见表 6。其中:横向摆放为第 3 档,排序第 1,证明横向摆放优于另外 2 种摆放方式;纵向与径向摆放方向同为第 2 档,无显著差异。

表 6 数值仿真中 3 种激励摆放方向排序结果

Tab.6 Results of three orientation directions ordering in numerical simulation

摆放方式	WRSR 估计值	WRSR 排序	档级
横向	0.867 5	1	3
纵向	0.701 2	2	2
径向	0.550 7	3	2

5.2 试验算例结果

对试验结果采用同样的熵权法进行权重计算,指标权重见表 7。

表 7 试验指标权重表

Tab.7 Index weights in experimental

轴	减薄 6.60%	减薄 13.11%	减薄 17.95%	减薄 19.82%
<i>x</i>	0.058 4	0.057 6	0.058 1	0.057 6
<i>y</i>	0.111 2	0.128 4	0.119 9	0.122 0
<i>z</i>	0.064 5	0.089 8	0.066 5	0.065 9

将试验中所得 36 个数据采用与仿真相同的 WRSR 分析方法,WRSR 分布见表 8。根据表 8 所得数据计算得到回归方程为

$$y=-0.078+0.13P_{\text{Probit}}$$

(19)

表 9 为试验分档排序表。表 10 为试验中 3 种激励摆放方向排序结果。其中:横向摆放排序第 1,档级为 3 档,证明横向摆放更优于另外 2 种摆放;纵向和径向均为第 2 档,与仿真结果基本一致。

表 8 试验 WRSR 分布表

Tab.8 WRSR distribution in experimental

W_{WRSR}	P_{Probit}
0.494 6	4.569 3
0.669 8	5.430 7
0.732 5	6.383 0

表 9 试验分档排序表

Tab.9 Experimental grading sort

档次	百分位临界值	Probit 临界值	WRSR 临界值(拟合值)
1	<15.9	<4	<0.442 3
2	15.9~84.1	4~6	0.442 3~0.702 4
3	>84.1	>6	>0.702 4

表 10 试验中 3 种激励摆放方向排序结果

Tab.10 The results of sorting the three orientation directions in the experiment

摆放方式	WRSR 估计值	WRSR 排序	档级
横向	0.752 2	1	3
纵向	0.628 4	2	2
径向	0.516 3	3	2

6 结 论

- 1) 仿真研究分析了圆柱形激励线圈摆放方向对磁场与涡流场在管内分布形态的影响,考虑到水冷壁管尺寸因素,聚焦特性更好的圆柱形线圈横向摆放具有更好的检测能力。分别计算 xyz 三维检测灵敏度,通过 WRSR 综合评价法进行定量评价,结果表明,横向摆放排序第一。
- 2) 试验中 3 种圆柱形激励线圈摆放方向均能对减薄率最小为 2.2% 的壁厚进行识别。对 xyz 三维检测结果计算灵敏度数值后再进行 WRSR 法分析,得知圆柱形线圈横向摆放灵敏度更优,仿真与试验结果相一致。
- 3) 研究采用的 WRSR 综合评价法具有普适性,可应用于无损检测中复杂指标下的综合评价。该研究有助于水冷壁管检测的高灵敏度脉冲涡流探头的设计,能进一步提高水冷壁管腐蚀检测灵敏度,利用 TMR 可实现三维磁场特征提取,获得更多的缺陷信息。

参 考 文 献

[1] 宋洋, 赵国仙, 张思琦, 等. 某锅炉用水冷壁管腐蚀分析[J]. 全面腐蚀控制, 2021, 35(2): 135-141.

SONG Yang, ZHAO Guoxian, ZHANG Siqi, et al. Corrosion analysis of a boiler water wall tube[J]. Total

- Corrosion Control, 2021, 35(2): 135-141.(in Chinese)
- [2] 徐伟,李武荣.循环流化床锅炉水冷壁泄漏分析[J].中国特种设备安全,2015(增刊1):72-76,80.
XU Wei, LI Wurong. Analysis of the causes of circulating fluidized bed boiler water wall leakage [J]. China Special Equipment Safety, 2015(suppl): 72-76, 80. (in Chinese)
- [3] 戴德林,杨启章.用超声测厚法检查水冷壁管内壁腐蚀[J].北京电力技术,1979(6):28-31,41.
DAI Delin, YANG Qizhang. Inspection of water-wall tube inner wall corrosion by ultrasonic thickness measurement method [J]. North China Electric Power, 1979(6): 28-31, 41.(in Chinese)
- [4] 宋小春,康宜华,武新军.水冷壁管漏磁/超声无损检测机器人设计[J].无损检测,2005,27(1):17-20.
SONG Xiaochun, KANG Yihua, WU Xinjun. Design of an NDT robot for water wall tube using magnetic flux leakage and ultrasonic testing[J]. Nondestructive Testing, 2005, 27(1): 17-20.(in Chinese)
- [5] 李杰.远场涡流检测技术在锅炉水冷壁管检测中的应用[J].大众标准化,2021(1):245-247.
LI Jie. Application of far field eddy current detection technology in boiler water wall tube detection[J]. Popular Standardization, 2021(1): 245-247.(in Chinese)
- [6] SOPHIAN A, TIAN G Y, FAN M B. Pulsed eddy current non-destructive testing and evaluation: a review [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(3): 500-514.
- [7] SHIN Y K. Numerical modeling of the hall sensor signal used in pulsed eddy current testing and comparison of its characteristics with a coil sensor signal[J]. Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 2016, 36(6): 490-495.
- [8] TAMHANE D, PATIL J, BANERJEE S, et al. Feature engineering of time-domain signals based on principal component analysis for rebar corrosion assessment using pulse eddy current[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(19): 22086-22093.
- [9] KIM J, YANG G, UDPA L, et al. Classification of pulsed eddy current GMR data on aircraft structures[J]. NDT & E International, 2010, 43(2): 141-144.
- [10] YE C F, LAURETI S, MALEKMOHAMMADI H, et al. Swept-frequency eddy current excitation for TMR array sensor and pulse-compression: feasibility study and quantitative comparison of time and frequency domains processing[J]. Measurement, 2022, 187: 110249.
- [11] YU Z H, YANG F, FU Y W, et al. Investigation of focusing properties of probes for pulsed eddy current testing [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21 (23) : 26830-26838.
- [12] 杨帆,余兆虎,付跃文,等.基于U形磁导体聚焦探头的脉冲涡流检测研究[J].传感技术学报,2022,35(2):267-276.
YANG Fan, YU Zhaohu, FU Yuewen, et al. Investigation of pulsed eddy current testing based on the focusing probe of U-shaped magnetic conductor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2022, 35 (2) : 267-276.(in Chinese)
- [13] YANG F, HUANG W F, FU Y W, et al. Investigation on pulsed eddy current testing of metal corrosions based on focusing probe [C] //2021 IEEE Far East NDT New Technology & Application Forum (FENDT). Kunming, China: IEEE, 2021: 53-57.
- [14] FU Y, UNDERHILL P R, KRAUSE T W. Factors affecting spatial resolution in pulsed eddy current inspection of pipe [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2020, 39(2): 34.
- [15] 田凤调.秩和比法及其应用[J].中国医师杂志,2002,4(2):115-119.
TIAN Fengdiao. Rank sum ratio and its application[J]. Journal of Chinese Physician, 2002, 4(2): 115-119.(in Chinese)
- [16] 郑陆海,李新强,郭鑫鑫.一种基于加权秩和比法的光伏并网逆变器多性能指标评价方法研究[J].电器与能效管理技术,2019(13):25-28.
ZHENG Luhai, LI Xinqiang, GUO Xinxin. Research on multiple performance indexes of grid-connected photovoltaic inverters based on a weighted rank-sum ratio method [J]. Electrical and Energy Management Technology, 2019(13): 25-28.(in Chinese)
- [17] 朱保军,咸日常,范慧芳,等.WRSR与改进朴素贝叶斯融合的变压器故障诊断技术研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(20):120-128.
ZHU Baojun, XIAN Richang, FAN Huifang, et al. Transformer fault diagnosis technology based on the fusion of WRSR and improved naive Bayes [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 120-128. (in Chinese)



第一作者简介:陶爱军,男,1997年2月生,硕士生。主要研究方向为电磁无损检测技术。

E-mail:tao_aijun@163.com

通信作者简介:付跃文,男,1967年1月生,博士、教授。主要研究方向为电磁无损检测技术与信号处理。

E-mail:fuyuewen@126.com