

连续油管缺陷漏磁激励线圈结构优化设计

黄成橙, 王 轲, 王 鹏*

长江大学机械工程学院, 湖北 荆州

收稿日期: 2025年7月22日; 录用日期: 2025年8月14日; 发布日期: 2025年8月25日

摘 要

含缺陷连续油管存在极大安全隐患, 对其进行定期检测是降低安全隐患的重要手段。目前, 漏磁检测是运用最为广泛、技术最为成熟的无损检测技术, 连续油管漏磁检测技术存在磁化效率低、遗漏小缺陷等问题。为了提高被测件磁化强度, 增强缺陷漏磁信号的畸变量, 基于亥姆霍兹线圈磁场叠加原理与实际工况, 提出了一种C型双线圈激励结构的漏磁检测方案, 通过有限元仿真和单因素分析法, 系统地研究了激励线圈结构参数对缺陷漏磁信号的影响规律, 梳理出其中的关键影响因素及影响水平, 并运用响应面法对激励线圈结构参数进行了优化设计, 优化后结构对缺陷漏磁信号的畸变量提升了29%以上, 可为连续油管缺陷检测提供理论依据与技术支持。

关键词

连续油管, 漏磁检测, 优化设计, 响应面法

Optimized Design of Magnetic Flux Leakage Excitation Coil Structure for Coiled Tubing Defect Detection

Chengcheng Huang, Ke Wang, Peng Wang*

School of Mechanical Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

Received: Jul. 22nd, 2025; accepted: Aug. 14th, 2025; published: Aug. 25th, 2025

Abstract

Defective coiled tubing poses significant safety risks, making regular inspection an important measure to reduce hazards. Currently, magnetic flux leakage (MFL) testing is the most widely used and technically mature non-destructive testing (NDT) method. However, coiled tubing MFL testing faces

*通讯作者。

文章引用: 黄成橙, 王轲, 王鹏. 连续油管缺陷漏磁激励线圈结构优化设计[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(4): 476-490.
DOI: 10.12677/met.2025.144047

issues such as low magnetization efficiency and missed small defects. To enhance the magnetization intensity of the tested component and increase the signal peak-to-peak value of defect MFL signals, a C-type dual-coil excitation structure is proposed based on the magnetic field superposition principle of Helmholtz coils and actual operating conditions. Through finite element simulation and single-factor analysis, the influence of excitation coil structural parameters on defect MFL signals is systematically investigated. Key influencing factors and their levels are identified, and the excitation coil structure is optimized using response surface methodology (RSM). The optimized structure improves the signal peak-to-peak value by more than 29%, providing theoretical basis and technical support for coiled tubing defect detection.

Keywords

Coiled Tubing, Magnetic Flux Leakage, Optimization Design, Response Surface Methodology

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

连续油管是一种长达几千米的无接头管材, 材质通常为低碳钢, 其在操作性、可靠性、经济性等方面均优于传统油管, 是石油勘探和开采过程中的重要工具, 但其工作环境恶劣, 容易形成各种缺陷[1]-[4]。对连续油管进行定期检测, 有助于及时发现缺陷并采取相应措施, 对于降低作业风险、提高连续油管的使用寿命等方面具有重要意义[5] [6]。

漏磁检测是一种适用于铁磁性材料的无损检测技术, 其通过检测被测件表面或近表面的磁场畸变来识别缺陷[7]-[9]。相较于其他检测方法, 漏磁检测实施方式简单, 检测过程无需对管道表面做细致清理, 也无需使用耦合剂, 并且具有较高的可靠性与检测灵敏度, 但对微小裂纹的检测效果欠佳, 这在一定程度上限制了其实际应用[10]。基于上述问题, 本文提出了一种 C 型双线圈激励结构漏磁检测方案, 并对激励线圈结构参数进行优化设计, 提高被测件磁化强度, 以提升缺陷漏磁检测信号的畸变量。

2. 亥姆霍兹线圈磁场叠加理论

单线圈磁化结构示意图如图 1 所示, 由毕奥 - 萨法尔定律可知, 磁化线圈在轴线任意一点 A 处磁场强度:

$$dB = \frac{\mu_m}{4\pi} \frac{NIdl}{r^2} \quad (1)$$

式中: μ_m 为磁导率, N 是线圈匝数, I 是电流大小, dl 是线元长度, r 是线元到所求点的距离。

线圈在任意位置产生的磁场强度:

$$B_1 = \int dB_x = \int dB \cos \theta = \int \frac{\mu_m}{4\pi} \frac{NIdl}{r^2} \cos \theta \quad (2)$$

将 $\cos \theta = \frac{R}{r} = \frac{R}{(R^2 + a^2)^{1/2}}$ 带入上式, 式中: R 为线圈半径, a 是所求点到线圈的距离, 可得:

$$B_1 = \frac{\mu_m NR^2 I}{2(R^2 + a^2)^{3/2}} \quad (3)$$

最大磁场强度的值为:

$$B_1 = \frac{\mu_m NI}{2R} \quad (4)$$

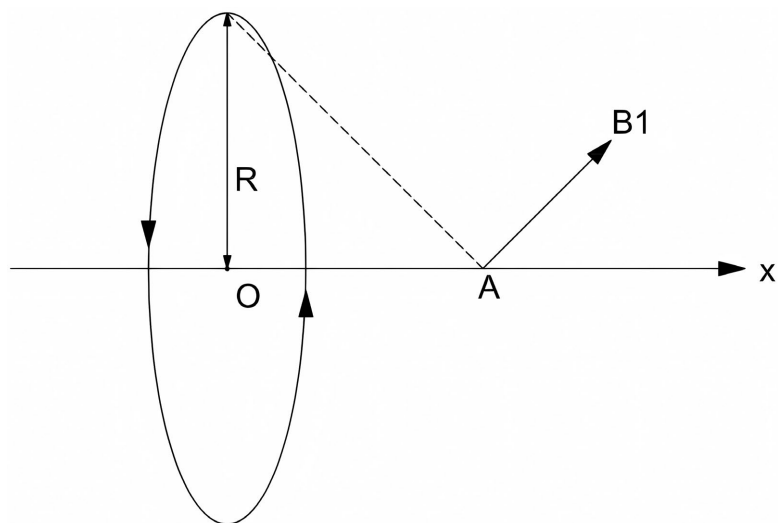


Figure 1. Magnetization schematic diagram of single excitation coils

图 1. 单线圈磁化结构示意图

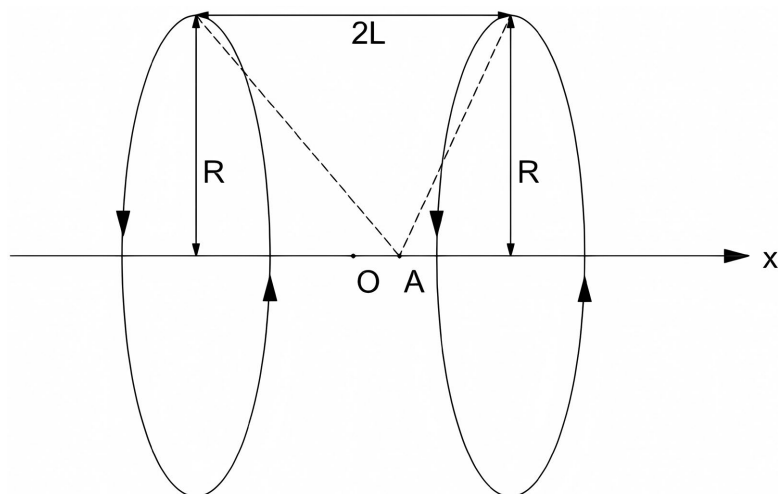


Figure 2. Magnetization schematic diagram of double excitation coils

图 2. 双线圈磁化结构示意图

图 2 展示了双线圈结构示意图, 两相同的线圈对称布置于坐标原点两侧, 两线圈间的间距为 $2L$, 当通入大小相等方向相同的电流 I 时, 其在空间任意一点 A 处产生的磁场强度可通过叠加原理计算得出。

双激励线圈在距原点为 a 处的 A 点合成磁感应强度 $B_{\parallel}$:

$$B_{\parallel} = B_1 + B_2 = \frac{\mu_m NR^2 I}{2(R^2 + (L+a)^2)^{3/2}} + \frac{\mu_m NR^2 I}{2(R^2 + (L-a)^2)^{3/2}} \quad (5)$$

当要求得到更均匀的磁场, 则要使 $B_{\parallel}(a)$ 的各阶导数在 $a=0$ 时为零, 即:

$$\left.\frac{d^2B_{\parallel}}{da}\right|_{a=0}=\frac{\mu_mNI}{2}\left[\frac{30L^2}{\left(R^2+L^2\right)^{7/2}}-\frac{6}{\left(R^2+L^2\right)^{5/2}}\right]=0$$

由上式可知，当 $2L = R$ 时， $B_{\parallel}(a)$ 的二阶导数在 $a = 0$ 时为零，此时两线圈的间距等于线圈的半径 R ，两线圈产生的磁场强度最大位置在原点，其大小为：

$$B_{\parallel}=\frac{16}{5\sqrt{5}}\frac{\mu_mNI}{2R}$$

由以上分析可知，双激励线圈相比单激励线圈能在连续油管中产生分布范围更广和强度更高的磁场，且双线圈结构激励的磁场强度约为单线圈的 1.4 倍。同时，靠近检测范围内的磁场变化率将减小，降低了连续油管中的涡流强度，增加了被测件的磁化强度。

3. 漏磁检测模型建立与信号分析

单根连续油管长达几千米，为方便检测装置装取，提出一种 C 型双线圈激励结构的漏磁检测方案。以 2 英寸连续油管为研究对象，用 COMSOL 多物理场仿真软件建立如图 3 所示模型，为节省计算资源，连续油管和激励线圈仅建立了一半模型结构。并以连续油管轴向方向为 x 轴方向，竖直方向为 z 轴方向建立如图所示的笛卡尔坐标系。模型具体尺寸参数如表 1 所示。

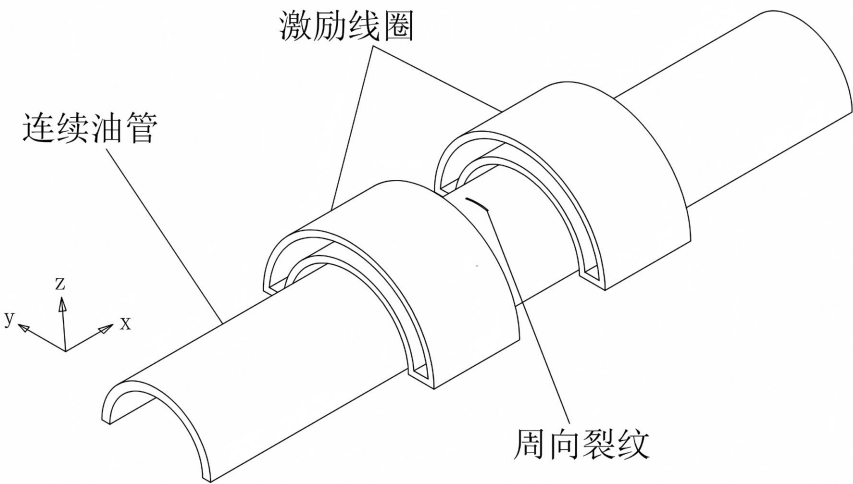


Figure 3. Magnetic flux leakage detection model diagram of C-type double-excitation coils
图 3. C 型双线圈激励漏磁检测模型图

Table 1. Model dimension parameters
表 1. 模型尺寸参数

模型名称	直径/mm	长/mm	宽/mm	深/mm
连续油管(外/内)	50.8/44	300	--	--
激励线圈(外/内)	87.2/55.8	40	--	--
周向裂纹	--	5	0.5	1

在 COMSOL 材料库中选择低碳钢、铜、空气这三种材料，分别赋给连续油管、激励线圈、空气域，相关材料参数如表 2 所示。

Table 2. Properties of materials
表 2. 材料属性

模型名称	材料名称	相对磁导率	电导率 S/m	相对介电常数
连续油管	低碳钢	700	1.0×10^7	1
激励线圈	铜	1	5.9×10^7	1
缺陷	空气	1	50	1
空气域	空气	1	50	1

网格划分是有限元仿真分析的关键步骤，在划分网格时需要考虑实际需求，重点计算区域的网格需要适当加密，非重点计算区域达到基本要求即可，网格划分结果如图 4 所示，图中隐去了空气域。

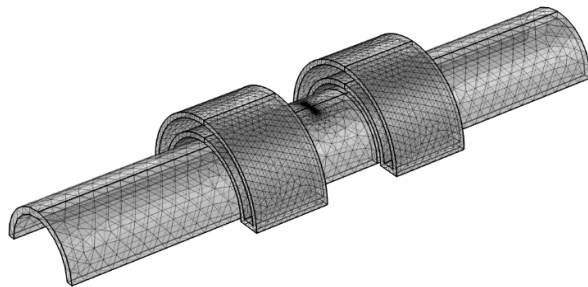


Figure 4. Mesh division diagram
图 4. 网格划分图

网格划分完成后，需要对求解器设置。为模拟连续油管在激励线圈中的运动，在求解器中添加参数化扫描，扫描范围包含缺陷前后 10 mm 区域，步长为 1 mm；模型使用了铜质激励线圈，应在求解器中添加线圈几何分析，对线圈进行初步分析；模型采用正弦波电流作为激励信号，应在求解器中添加频域分析，频率为 300 Hz；使用默认稳态求解器中 MUMPS 求解器，运行程序进行求解。

取在两激励线圈对称面上且位于连续油管正上方 1 mm 处的点为信号检测点，提取该点磁场强度信息，选取具有显著变化特征的轴向磁场分量(B_x)和径向磁场分量(B_z)作为判断标准，对连续油管缺陷特征信号进行分析[11]。 B_x 、 B_z 特征信号如图 5 所示：

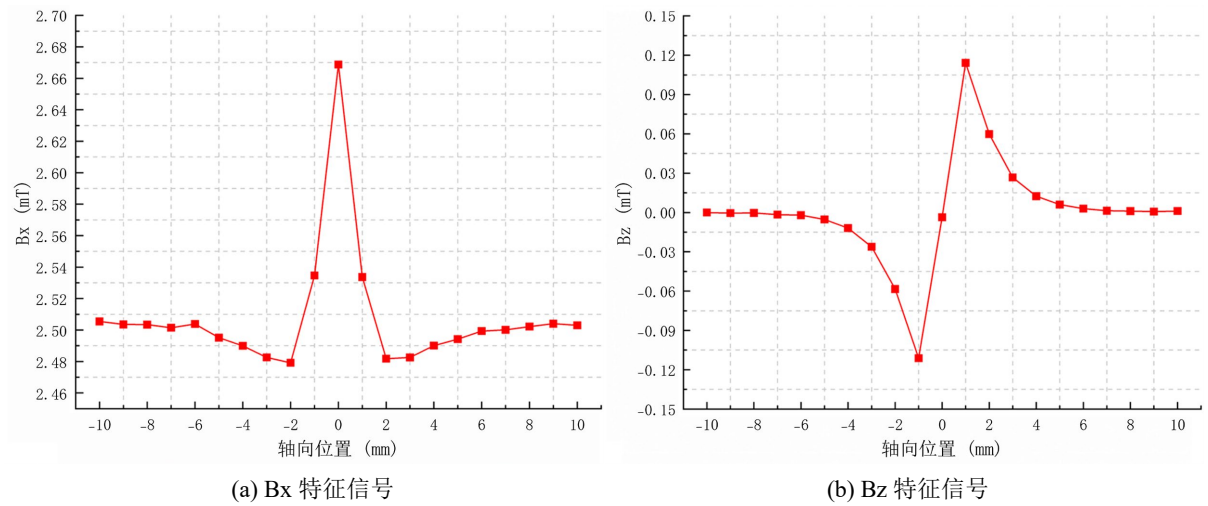


Figure 5. Crack characteristic signal diagram
图 5. 裂纹信号特征图

为了分析缺陷特征信号的优劣,引入灵敏度 S_x 和畸变量 ΔB_z [12] [13],其具体定义如下:

$$S_x = \frac{\max(B_x) - B_{x_0}}{B_{x_0}} \times 100\% \quad (8)$$

$$\Delta B_z = B_{z_{\max}} - B_{z_{\min}} \quad (9)$$

式中: B_{x_0} 为初始磁场,称为背景磁场, S_x 为周向裂纹灵敏度, ΔB_z 为畸变量。 S_x 和 ΔB_z 越大,则表明缺陷特征信号越优。

4. 激励线圈结构参数对缺陷特征信号的影响

本文所讨论的激励线圈结构参数包含线圈匝数、线圈间距、线圈长度及内外径间距,如图6所示,设定激励线圈的线径为0.6 mm,电流大小为1 A,频率为300 Hz,相位角为0°,通过单因素分析法探究激励线圈结构参数与缺陷特征信号之间的关系,为激励装置的优化设计、提供理论依据。

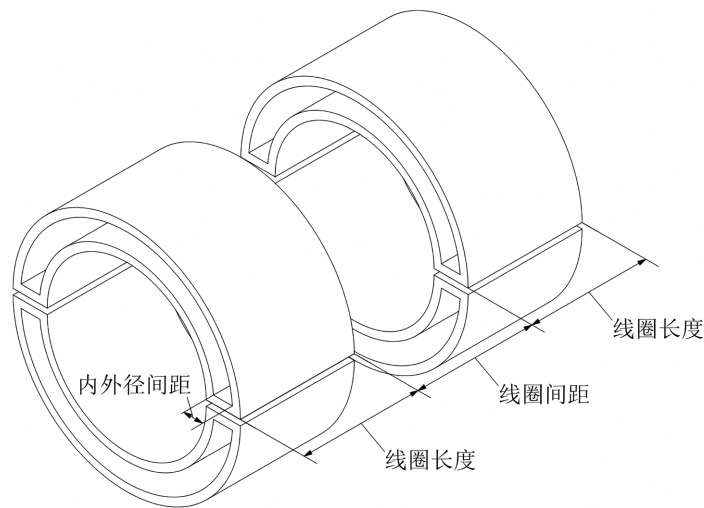


Figure 6. Model diagram of c-type double - excitation coils
图 6. C 型双线圈模型图

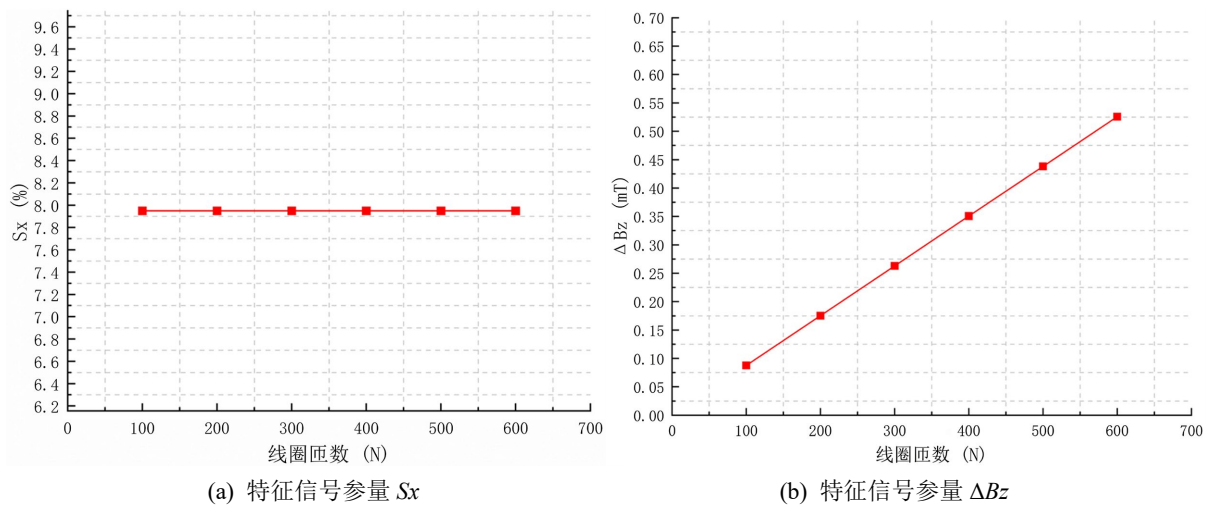


Figure 7. Diagram of circumferential crack characteristic signal parameters under different numbers of turns of excitation coils
图 7. 不同激励线圈匝数周向裂纹特征信号参量图

4.1. 激励线圈匝数对裂纹缺陷特征信号的影响

其他条件不变, 取不同激励线圈匝数(100 匝、200 匝、300 匝、400 匝、500 匝、600 匝)进行仿真分析, 提取相应的缺陷特征信号, 计算相应的特征信号参量, 绘制缺陷特征信号参量和激励线圈匝数的关系曲线, 如图 7 所示。

由图 7 可以看出, 增加激励线圈匝数, 灵敏度 S_x 保持不变, 畸变量 ΔB_z 随着线圈匝数的增加而呈线性增大, 但在实际应用中, 激励线圈匝数增加会导致线圈电感增大, 会出现设备发热、电磁干扰等问题 [14] [15]。基于实际情况考量, 本文线圈匝数 N 取 300 匝。

4.2. 激励线圈间距对缺陷特征信号的影响

其他条件不变, 研究六种不同间距(14 mm, 18 mm, 22 mm, 26 mm, 30 mm, 34 mm)的磁场特性, 提取缺陷特征信号, 计算相应的特征信号参量, 绘制缺陷特征信号参量和激励线圈间距的关系曲线, 如图 8 所示。

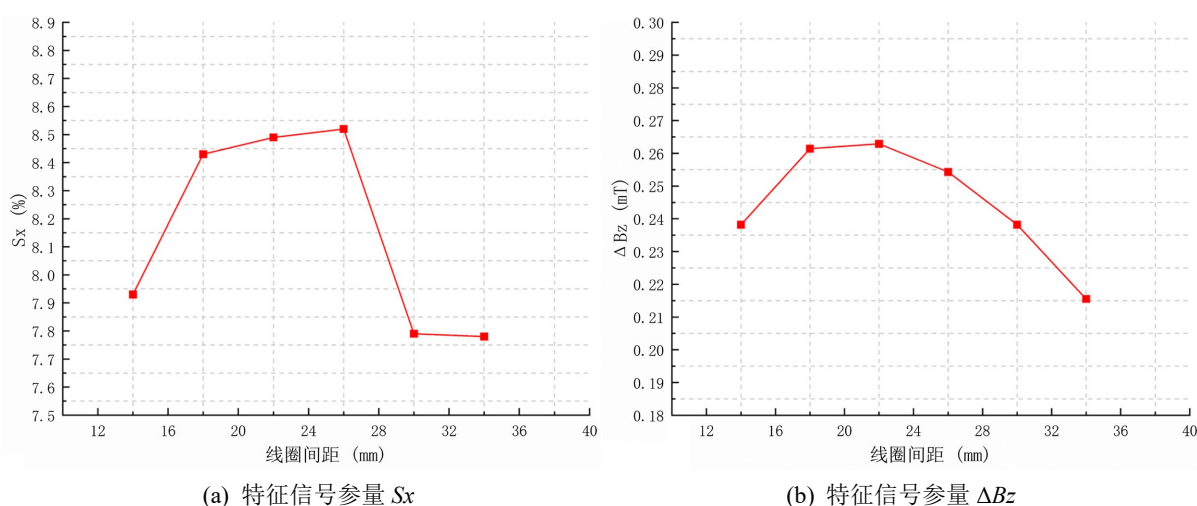


Figure 8. Diagram of characteristic signal parameters of circumferential cracks under different excitation coil spacings

图 8. 不同线圈间距周向裂纹特征信号参量图

由图 8 可知, 随着激励线圈间距增大, 灵敏度 S_x 先增大后减小, 当线圈间距为 26 mm 时, 灵敏度 S_x 达到最大值; 畸变量 ΔB_z 同样是先增大后减小, 在线圈间距为 22 mm 时达到最大值。

4.3. 激励线圈长度对缺陷特征信号的影响

其他条件不变, 分别对不同激励线圈长度(20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm)进行仿真分析, 提取缺陷的特征信号, 计算相应的特征信号参量, 绘制缺陷特征信号参量和激励线圈长度的关系曲线, 如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 线圈匝数不变, 当线圈长度从 20 mm 开始逐步增加到 40 mm, 灵敏度 S_x 在激励线圈长度为 35 mm 时达到最大值, 而畸变量 ΔB_z 在逐渐减小, 激励线圈长度为 20 mm 时 ΔB_z 最大。

4.4. 激励线圈内外径间距对列纹缺陷特征信号的影响

其他条件不变, 取不同激励线圈内外径间距(6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm)仿真分析, 提取相应的缺陷特征信号, 计算相应的特征信号参量, 绘制缺陷特征信号参量和激励线圈内外间

距的关系曲线,如图10所示。

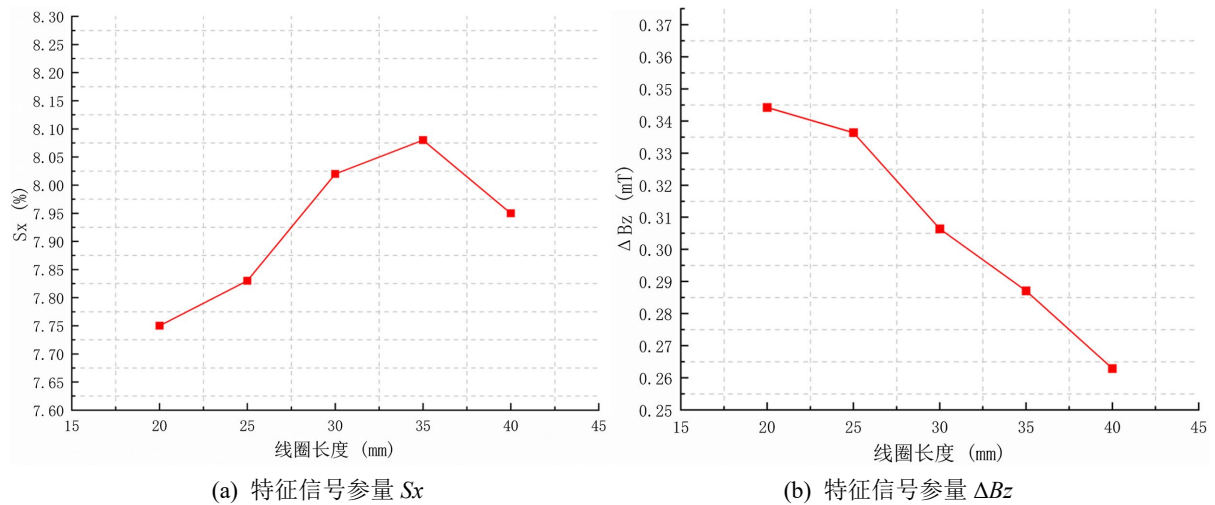


Figure 9. Diagram of circumferential crack characteristic signal parameters under different excitation coil lengths

图9. 不同激励线圈长度周向裂纹特征信号参量图

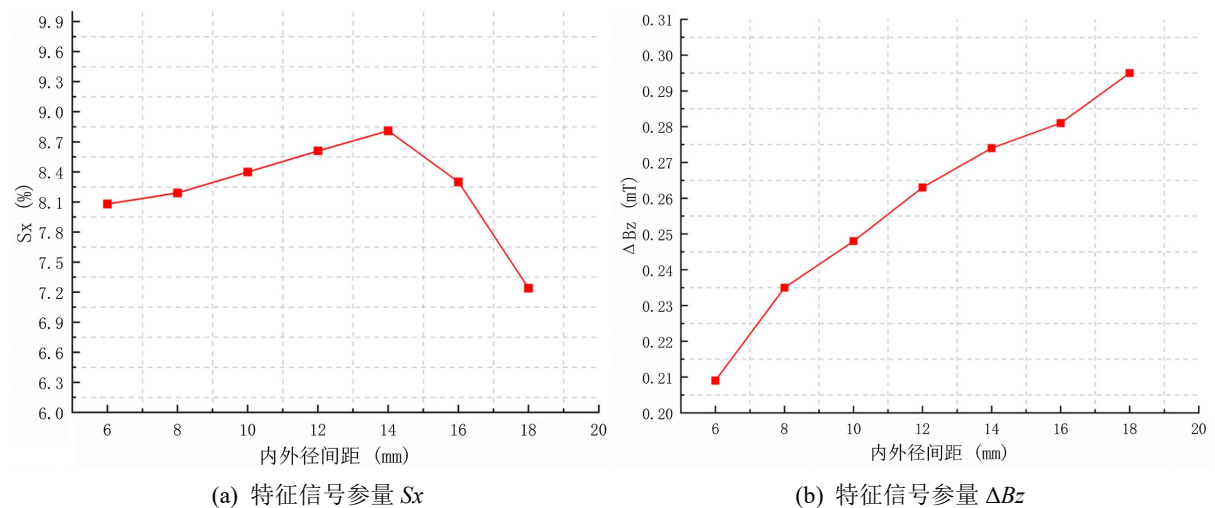


Figure 10. Diagram of characteristic signal parameters of circumferential cracks under different inner and outer diameters of coils

图10. 不同激励线圈内外径间距周向裂纹特征信号参量图

由图10可知,灵敏度 S_x 随激励线圈内外径间距增大而先增大后减小,在内外径间距为14 mm时达到最大值,而畸变量 ΔB_z 随线圈内外径间距的增大而增大。

5. 激励线圈结构参数优化设计

连续油管在实际检测中不可避免会发生机械振动,这将会引起提离距离改变,从而导致 B_x 信号与 B_z 信号发生波动。 B_x 信号本身存在背景磁场 B_{x0} ,当信号发生波动时,缺陷特征容易被背景磁场掩盖,使特征信号准确性降低; B_z 信号虽然也会发生波动,但其背景磁场为零,缺陷特征信号不容易被掩盖,因此选择能反映缺陷尺寸的 B_z 信号作为缺陷检测和评估的主要依据[16]。基于此,本文以缺陷特征信号参量 ΔB_z 最大化为优化目标。

激励线圈结构优化设计中，激励线圈间距 d 、激励线圈长度 L 和激励线圈内外径间距 R 为自变量，将缺陷特征信号参量 ΔB_z 设为响应值，选择中心复合设计(Central-Composite Design, CCD)试验设计方法进行响应面优化试验设计，基于前文单因素变量分析结果，确定结构参数选取范围，建立三因素三水平的 CCD 试验设计，试验因素水平如表 3 所示。

Table 3. Levels of CCD test factors
表 3. CCD 实验因素水平

因素	下水平(-1)	中水平(0)	上水平(1)
激励线圈长度 L/mm	20	30	40
激励线圈间距 d/mm	14	24	34
激励线圈内外径间距 R/mm	6	12	18

通过 CCD 试验分析响应值重要因素的最优水平以及各个自变量相互影响作用，用 Design Expert 软件设计响应面模型，根据试验因素水平表生成 20 组 CCD 试验，并通过仿真计算出 20 组 CCD 试验的响应值 ΔB_z ，如表 4 所示。基于二阶数学模型对实验数据进行多元线性回归处理，建立了以缺陷特征信号参量 ΔB_z 为目标函数的二阶多项式回归方程，其数学表达式如式(10)所示。

Table 4. CCD test design and response values
表 4. CCD 实验设计及响应值

序号	L/mm	d/mm	R/mm	$\Delta B_z/\text{mT}$
1	20	34	6	0.3018
2	20	34	18	0.3155
3	30	24	12	0.3113
4	46.8179	24	12	0.3154
5	30	24	12	0.3113
6	13.1821	24	12	0.3206
7	30	7.18207	12	0.2976
8	30	24	12	0.3113
9	30	24	12	0.3113
10	20	14	6	0.3049
11	40	34	6	0.2958
12	40	14	6	0.2995
13	40	14	18	0.2962
14	30	40.8179	12	0.3052
15	30	24	12	0.3113
16	40	34	18	0.3157
17	30	24	12	0.3113
18	20	14	18	0.2988
19	30	24	1.90924	0.2905
20	30	24	22.0908	0.3021

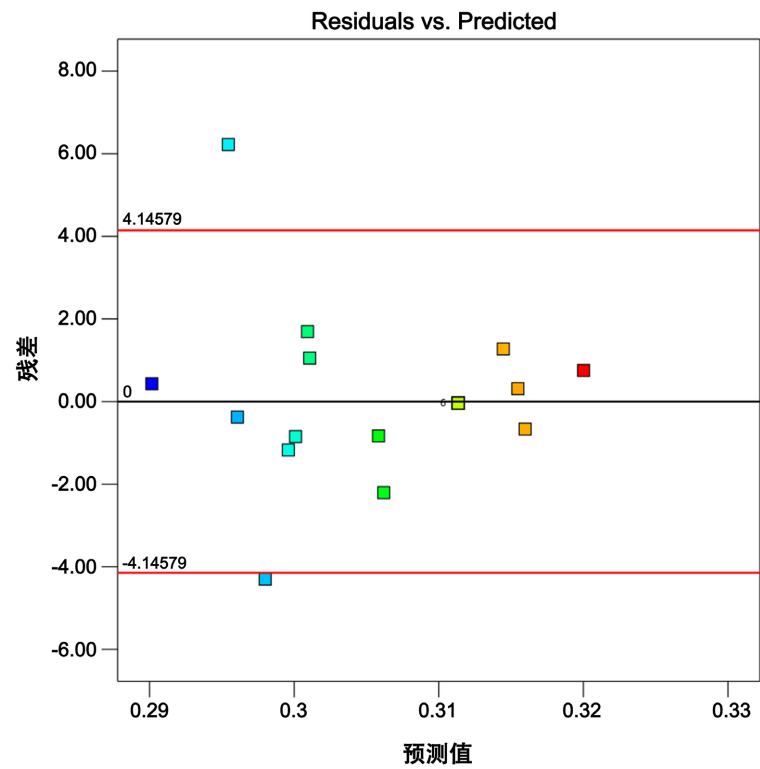


Figure 11. Distribution diagram of residuals and predicted values
图 11. 残差与预测值分布图

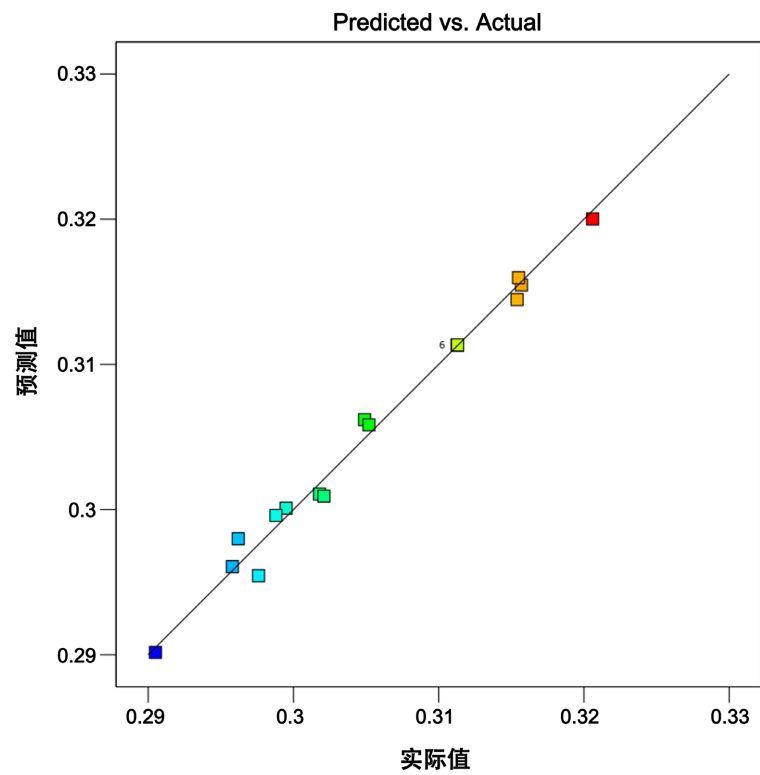


Figure 12. Distribution chart of predicted and actual values
图 12. 预测值与实际值分布图

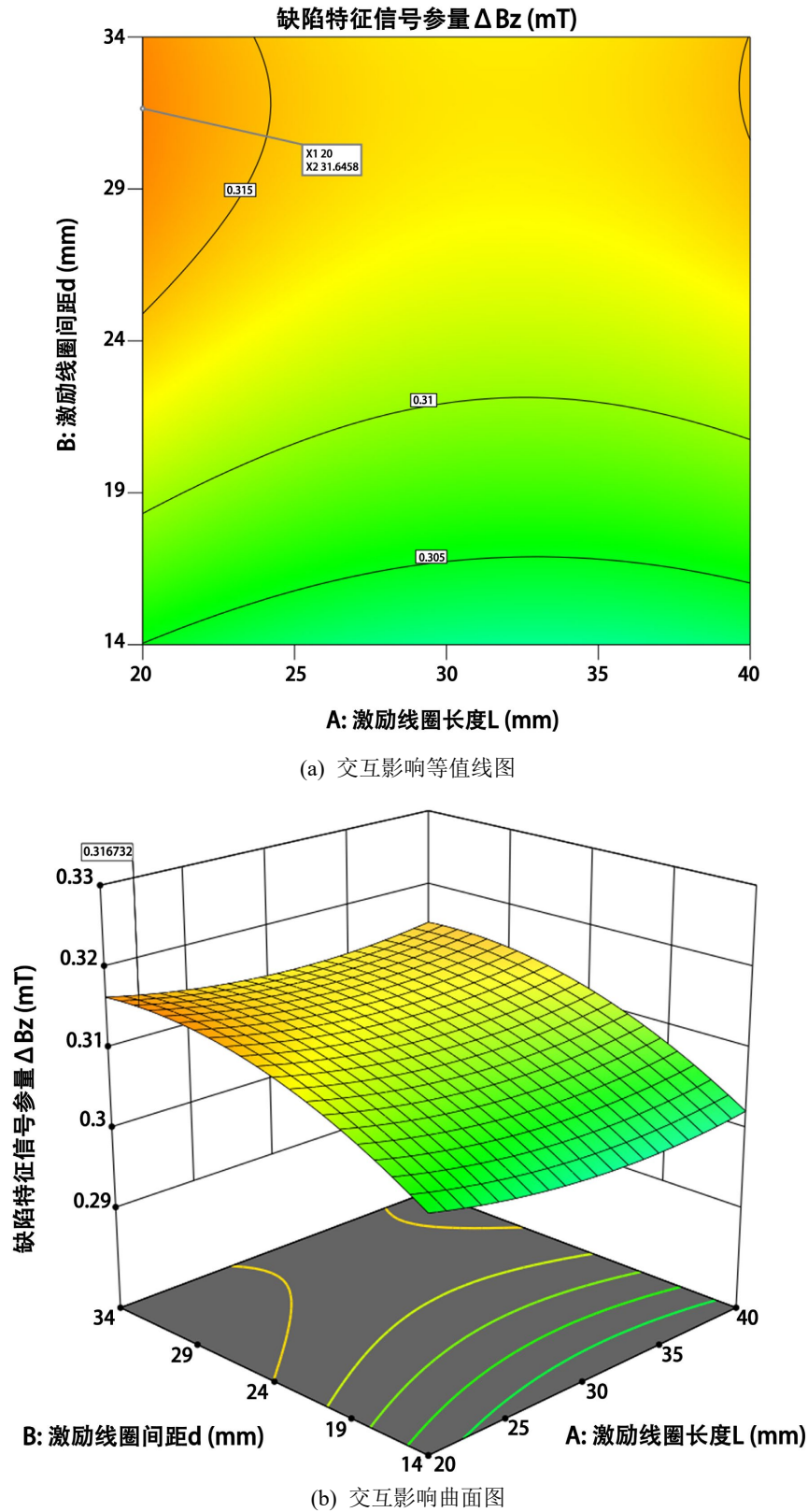


Figure 13. Interaction effect diagram of parameters L and d on defect characteristic signal parameters
图 13. 参数 L 、 d 对缺陷特征信号参量交互影响图

$$\Delta Bz = 0.31 - 1.651e^{-3}L + 3.089e^{-3}d + 3.021e^{-3}R + 2.754e^{-4}Ld + 1.125e^{-3}LR + 5.375e^{-3}dR + 2.086e^{-3}L^2 - 3.783e^{-3}d^2 - 5.586e^{-3}R^2 \quad (10)$$

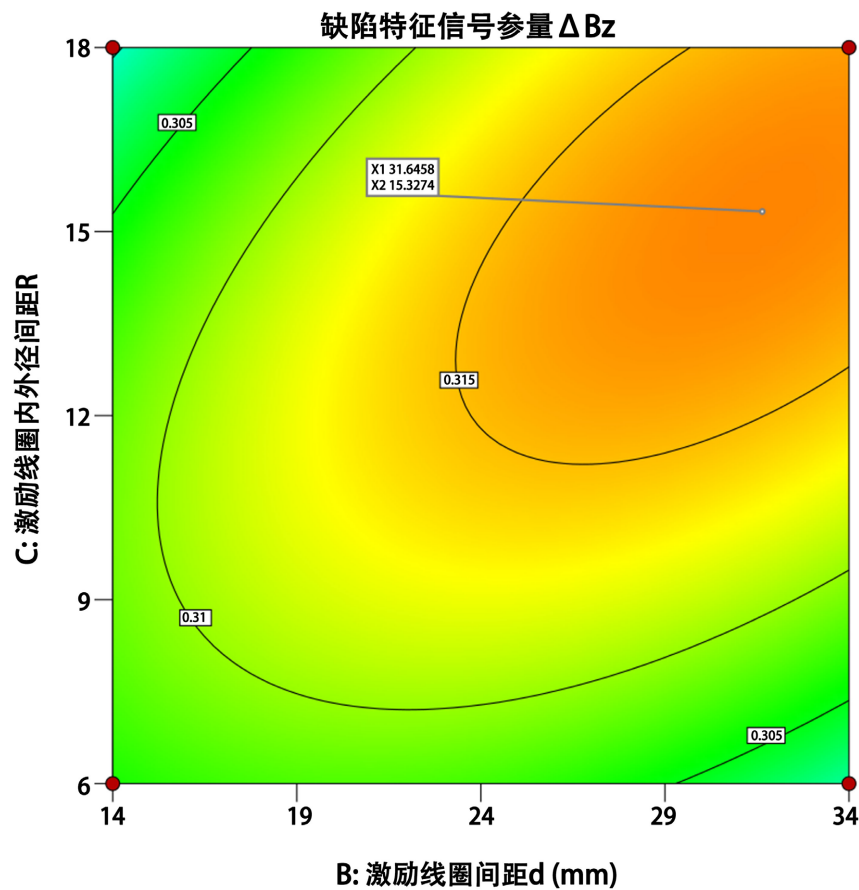
数学模型有效性可通过残差分析进行评估。图 11 展示了响应值的残差与预测值分布情况，其中残差呈现随机分布特征，表明模型具有良好的适应性；通过分析图 12 展示的缺陷特征信号参量预测值与实测值相关性散点图可以发现，两组数据呈现出良好的线性吻合特征，其数据点主要集中分布在基准对角线附近，这一分布规律充分验证了所建立数学模型的预测精度满足要求[17][18]。

分析表 4 的数据可知，缺陷特征信号参量 ΔBz 主要受激励线圈内外径间距 R 和激励线圈间距 d 的影响，而激励线圈长度 L 对其影响相比前两项较小，因此可以先确定激励线圈长度 L 的值。对回归方程(10)进行分析，可以得到关于激励线圈长度 L 和激励线圈间距 d 对缺陷特征信号参量的交互影响图，如图 13 所示。

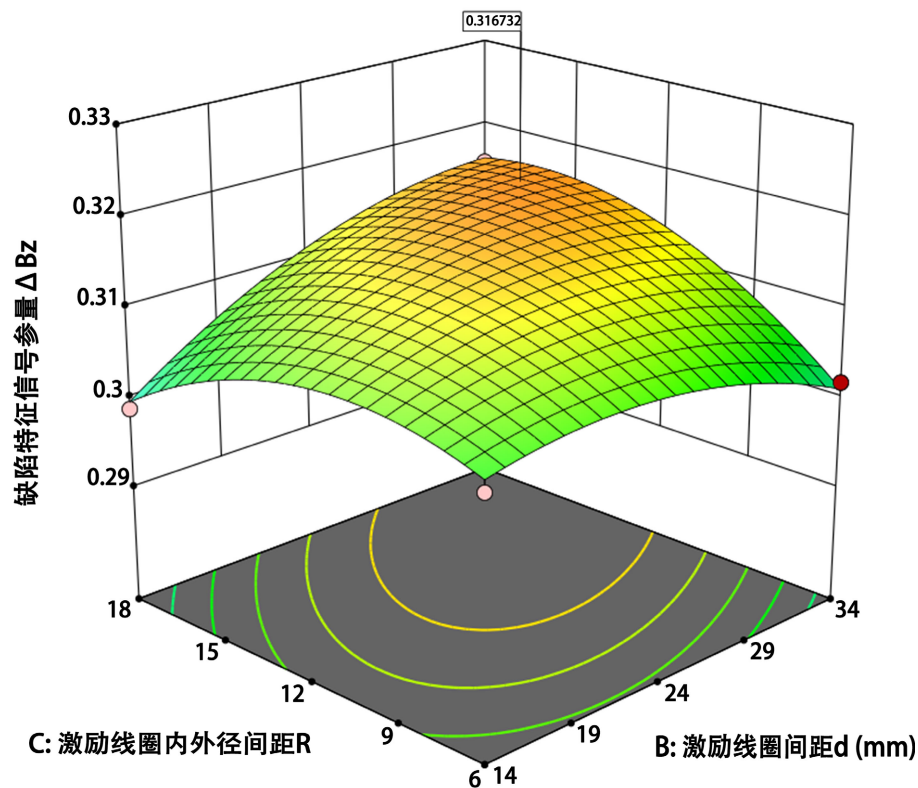
在图 13 中，二维等高线图采用三色梯度表征方式：蓝色区域对应低值区间，绿色区域代表中间值范围，红色区域则代表高值。通过分析图 13 可以看出缺陷特征信号参量 ΔBz 随着激励线圈间距的增大先逐渐增大后增幅减小，而随着激励线圈长度的增加缺陷特征信号参量 ΔBz 缓慢减小。由图 13(a)和图 13(b)可知 $L = 20$ mm 为最优解。

将公式(10)中 L 固定为 20 mm，可得到交互影响图如图 14 所示。

从图 14 中分析可知， d 和 R 的最优解分别为 31.6609 和 15.3274 mm。为方便制作线圈，取 $d = 32$ mm， $R = 15$ mm。综上可得，优化后的激励线圈参数分别为 $L = 20$ mm， $d = 32$ mm， $R = 15$ mm。



(a) 交互影响等值线图



(b) 交互影响曲面图

Figure 14. Interaction effect diagram of parameters R and d on defect characteristic signal parameters
图 14. 参数 R 、 d 对缺陷特征信号参量交互影响图

6. 优化效果验证

为验证激励线圈结构参数优化结果的合理性，将对单线圈激励结构、优化前双线圈激励结构、优化后双线圈激励结构三种不同结构方案，各方案的参数如表 5 所示，通过仿真对比各激励线圈结构对连续油管典型缺陷(周向裂纹、轴向裂纹、通孔、腐蚀坑)特征信号参量 ΔBz 的影响情况，不同缺陷尺寸如表 6 所示。

Table 5. Structural parameters table of different excitation coil schemes
表 5. 不同激励线圈方案结构参数表

	方案一	方案二	方案三
激励线圈长度 L/mm	40	40	20
激励线圈间距 d/mm	--	22	32
激励线圈内外径间距 R/mm	15	12	15

Table 6. Table of different types of defect sizes
表 6. 不同类型缺陷尺寸表

缺陷类型	缺陷尺寸/mm
周向裂纹	长 × 宽 × 深: $5 \times 0.5 \times 1$
轴向裂纹	长 × 宽 × 深: $5 \times 0.5 \times 1$
通孔	直径: 2
腐蚀坑	直径 × 深: 3×1

提取检测点处的径向特征信号，可得不同类型缺陷的径向特征信号，如图 15 所示。将仿真信号数据代入公式(9)可得各缺陷特征信号参量 ΔB_z ，三种结构方案计算结果及对比如表 7 所示。

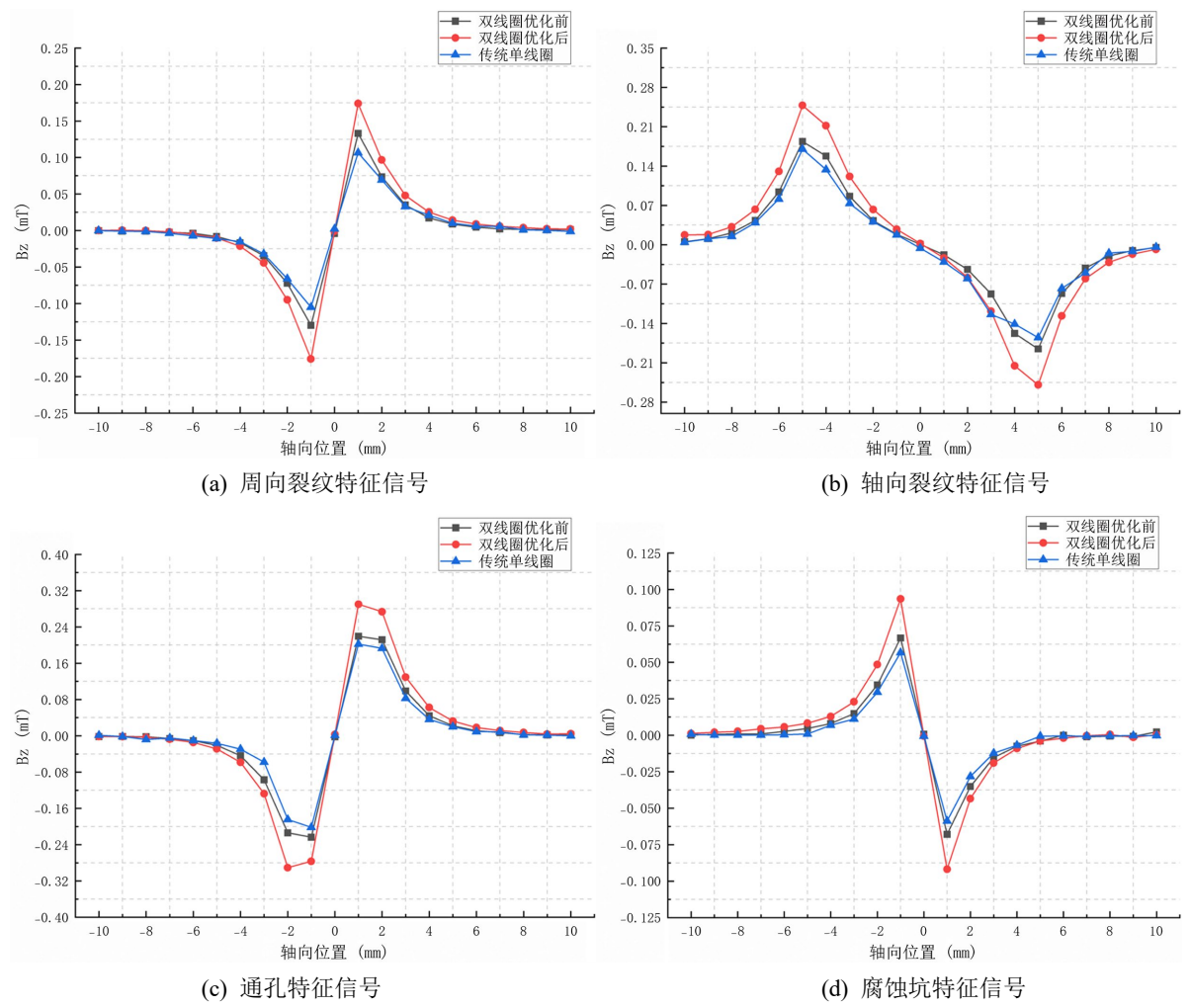


Figure 15. Comparison diagram of characteristic signals for different defects
图 15. 不同缺陷特征信号图对比

Table 7. Optimization effect of different defects
表 7. 不同缺陷的优化效果

缺陷类型	方案一 $\Delta B_z/\text{mT}$	方案二 $\Delta B_z/\text{mT}$	方案三 $\Delta B_z/\text{mT}$	方案三相较于 方案一对比结果	方案三相较于 方案二对比结果
周向裂纹	0.21	0.26	0.35	66.67%	34.62%
轴向裂纹	0.34	0.37	0.50	47.05%	35.14%
通孔	0.40	0.44	0.57	42.50%	29.55%
腐蚀坑	0.12	0.13	0.19	58.33%	46.15%

通过图 15 可以看出，三个方案在缺陷处的信号趋势基本相同，但方案三对应的缺陷信号幅值高于其他两个方案。通过表 7 可以看出，优化后的 C 型双线圈激励结构(方案三)相较于单线圈激励结构(方案一)，缺陷特征信号参量 ΔB_z 提升了 42%以上；相较于优化前 C 型双线圈激励结构(方案二)，缺陷特征信号参

量 ΔB_z 提升了 29% 以上。由此可知, 优化后的 C 型双线圈激励结构对不同类型的连续油管缺陷漏磁信号畸变量均具有一定的提升能力。

7. 结论

针对当前漏磁检测技术存在磁化效率低、易漏检小缺陷的问题, 本文基于亥姆霍兹线圈磁场叠加理论, 提出了一种便于现场装卸的 C 型双线圈励磁结构。通过有限元仿真、单因素分析法和响应面法对激励线圈结构参数进行优化设计, 在确定线圈匝数 $N=300$ 匝后, 其他参数优化结果: 线圈长度 $L=20$ mm, 线圈间距 $d=32$ mm, 线圈内外径间距 $R=15$ mm。验证结果表明, 优化后的 C 型双线圈结构相比传统的单线圈结构和优化前的双线圈结构, 对四种常见的不同类型连续油管缺陷漏磁信号的畸变量分别提升了 42% 以上和 29% 以上, 显著增强了检测信号的强度, 证明了连续油管缺陷漏磁激励线圈结构优化设计的合理性。

基金项目

本研究得到了长江大学校级一般教学研究项目[JY2022036]的支持。

参考文献

- [1] 郑伟. 连续油管的主要失效形式及原因分析[J]. 科学技术创新, 2019(11): 32-33.
- [2] 万夫, 周兆明, 张健, 等. 基于在线检测数据优化连续油管疲劳寿命预测[J]. 钻采工艺, 2020, 43(6): 9-12, 6.
- [3] Yang, Y. and Liu, S.H. (2022) Study on Natural Crack Initiation and Propagation of Coiled Tubing with Spherical Defect. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, **22**, 648-657. <https://doi.org/10.1007/s11668-022-01352-6>
- [4] 黄云, 易柳舟, 伍诗豪, 等. 基于有限元分析的连续油管寿命研究及预测模型[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 520-523.
- [5] Padron, T. and Craig, S.H. (2018) Past and Present Coiled Tubing String Failures—History and Recent New Failures Mechanisms. *Society of Petroleum Engineers*, **15**, 63-66.
- [6] 吴志平, 陈振华, 戴联双, 等. 油气管道腐蚀检测技术发展现状与思考[J]. 油气储运, 2020, 39(8): 851-860.
- [7] Feng, B., Wu, J., Tu, H., Tang, J. and Kang, Y. (2022) A Review of Magnetic Flux Leakage Nondestructive Testing. *Materials*, **15**, Article 7362. <https://doi.org/10.3390/ma15207362>
- [8] Wang, R.B., Kang, Y.H., Tang, J., et al. (2023) Analysis of the Mechanism of Leakage Magnetic Field Generated by Internal Defects. *Journal of Nondestructive Evaluation*, **42**, Article No. 31.
- [9] 莫丽, 雍浩, 李长俊, 等. 油气管道组合缺陷漏磁检测信号数值模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(1): 5-10.
- [10] 左万君, 戴西斌, 吴昌玉. 漏磁检测在管道损伤探测中的应用[J]. 无损检测, 2024, 46(3): 56-63.
- [11] 杨理践, 石萌, 耿浩. 长输油气管道内检测技术[J]. 沈阳工业大学学报, 2024, 46(5): 676-684.
- [12] 周兆明, 张佳, 谷翠琳. 基于交流电磁场裂纹缺陷识别仿真研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2018, 14(12): 146-151.
- [13] 刘阳. 基于高分辨率磁传感器阵列的缺陷成像智能检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2021.
- [14] 任仙芝, 任尚坤, 樊清泉. 基于磁导率无损检测传感器的试验设计研究[J]. 中国测试, 2018, 44(7): 132-136, 147.
- [15] 陈晨, 孙宏达, 文青山, 等. 基于 ACFM 法的蒸压釜釜齿裂纹检测及优化研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(2): 36-40, 46.
- [16] Yuan, X., Li, W., Yin, X., Chen, G., Zhao, J., Jiang, W., et al. (2020) Identification of Tiny Surface Cracks in a Rugged Weld by Signal Gradient Algorithm Using the ACFM Technique. *Sensors*, **20**, Article 380. <https://doi.org/10.3390/s20020380>
- [17] 蔡锦云, 刘忠, 王罡, 等. 基于响应面法的纹磨机辅助拉尾绳装置优化设计[J]. 工程设计学报, 2024, 31(2): 178-187.
- [18] 张震全, 聂伟荣, 王鹤. 采用响应面法的硅基 MEMS 后坐保险机构优化设计[J]. 探测与控制学报, 2025, 47(2): 22-29.