Mine Engineering 矿山工程, 2026, 14(6), 1576-1584
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/me
https://doi.org/10.12677/me.2026.146156

Hans汉斯

带金属保护层管道缺陷的脉冲涡流响应仿真分析

胡静茜*，侯智涛，张　翅

重庆科技大学石油与天然气工程学院，重庆

收稿日期：2026年10月20日；录用日期：2026年11月11日；发布日期：2026年11月18日

摘　要

管道作为储运系统的关键承压部件，一旦因局部腐蚀、机械损伤或壁厚减薄发生失效，可能引起低温介质泄漏，并产生各类次生风险。脉冲涡流无损检测技术具有极佳的穿透能力，对于管道外部包覆结构带来的缺陷检测难度有很好的针对性。本文针对带金属保护层管道的缺陷检测问题，建立脉冲涡流有限元模型，以有缺陷与无缺陷工况下接收线圈电压的差值作为分析信号，研究内、外表面缺陷宽度、深度及传感器提离高度对差分电压特征的影响。仿真结果表明，在所研究的参数范围内，差分电压峰值随缺陷宽度和深度增大而增大；相同缺陷尺寸下，外表面缺陷的峰值高于内表面缺陷；随着提离高度增大，峰值总体减小。研究表明，差分电压峰值能够反映缺陷几何参数的变化，为带金属保护层管道的脉冲涡流缺陷分析及特征选取提供了仿真参考。

关键词

脉冲涡流，带保护层管道，有限元仿真，无损检测

Simulation Analysis of Pulsed Eddy Current Responses to Defects in Pipelines with Metallic Protective Layers

Jingxi Hu*, Zhitao Hou, Chi Zhang

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 20, 2026; accepted: November 11, 2026; published: November 18, 2026

Abstract

As critical pressure-bearing components in storage and transportation systems, pipelines may fail

*通讯作者。

文章引用: 胡静茜, 侯智涛, 张翅. 带金属保护层管道缺陷的脉冲涡流响应仿真分析[J]. 矿山工程, 2026, 14(6): 1576-1584. DOI: 10.12677/me.2026.146156

due to localized corrosion, mechanical damage, or wall thinning, potentially resulting in the leakage of cryogenic fluids and various secondary hazards. Pulsed eddy current (PEC) nondestructive testing technology exhibits excellent penetration capability, making it particularly suitable for detecting defects in pipelines with external protective layers. To address the challenges associated with defect detection in pipelines with metallic protective layers, a finite element model of pulsed eddy current testing is established in this study. The voltage difference between the receiving coil signals under defective and defect-free conditions is used as the analytical signal. The effects of defect width, defect depth, and sensor lift-off distance on the differential voltage characteristics are investigated for defects located on both the inner and outer surfaces of the pipeline. The simulation results indicate that, within the investigated parameter ranges, the peak differential voltage increases with increasing defect width and depth. For defects of identical dimensions, those located on the outer surface produce higher peak values than those on the inner surface. Furthermore, the peak differential voltage generally decreases as the sensor lift-off distance increases. The results demonstrate that the peak differential voltage can effectively reflect variations in defect geometric parameters, providing a simulation-based reference for defect characterization and feature selection in pulsed eddy current testing of pipelines with metallic protective layers.

Keywords

Pulsed Eddy Current, Pipelines with Protective Layers, Finite Element Simulation, Nondestructive Testing

Copyright © 2026 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

管道是液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)储运系统的重要组成部分，其结构完整性关系到装置的安全运行。管道服役过程中产生的局部腐蚀、机械损伤及壁厚减薄等缺陷，会削弱局部承载能力，增加泄漏与失效风险。为满足保冷和机械防护要求，管道外部通常设置保温层及保护层，但包覆结构也限制了管壁的检测可达性。因此，在尽量减少包覆结构拆除的条件下获取管道缺陷信息，是此类管道无损检测需要解决的问题。

脉冲涡流检测(Pulsed Eddy Current Testing, PECT)利用瞬态激励在导电试件中产生感应涡流，通过接收电磁响应的变化表征试件状态，具有无需耦合剂、可进行非接触检测等特点。如图 1 所示，与采用正弦波激励的涡流检测相比，脉冲激励包含较丰富的频率分量，可获取不同深度的相关信息，为表面及亚表面缺陷检测提供条件[1]。对于带保护层管道，非导电包覆层引起的提离变化以及导电保护层产生的附加电磁响应，均可能影响缺陷信号，需要结合具体结构与材料参数分析检测响应。

围绕脉冲涡流响应建模与缺陷表征，已有研究从数值计算、特征提取和参数预测等方面开展了探索。Yu [2]等通过时域数值模拟与试验研究油管和套管的检测响应，分析了不同结构及缺陷条件下涡流场的变化，为多层管状构件的响应解释提供了依据。Nafiah [3]等从扫描信号中提取特征，结合回归模型和神经网络评价裂纹深度与倾角，展示了多特征用于缺陷参数估计的可行性。

除缺陷本身外，提离变化也是影响信号解释的重要因素。Fu [4]等通过快速傅里叶变换在复平面上绘制信号动态轨迹，并分离缺陷部分，通过将各次谐波在复平面上的缺陷轨迹平移至零提离点，对其进行傅里叶逆变换，即可重构信号，减弱提离效应的影响；对于非铁磁性金属及其保护层带来的大而不均匀

的提离高度，Wang [5]等提出了基于线圈耦合模型的动态表观时间常数(D-ATC)方法，通过分析 D-ATC 曲线的时间和幅值特征，把涡流的动态变化和非铁磁性金属的几何尺寸关联起来，抑制提离效应的影响。

基于上述认识，本文采用 COMSOL Multiphysics 建立管道脉冲涡流有限元模型，设置内、外表面不同宽度和深度的缺陷，并研究提离高度变化对接收电压的影响。以无缺陷响应为参考，对相应电压进行差分处理，重点比较差分电压峰值、峰值时间和过零时间。通过观察缺陷几何参数与提离因素，分析不同特征的响应差异及适用条件，为所研究工况下的缺陷评价提供仿真依据。

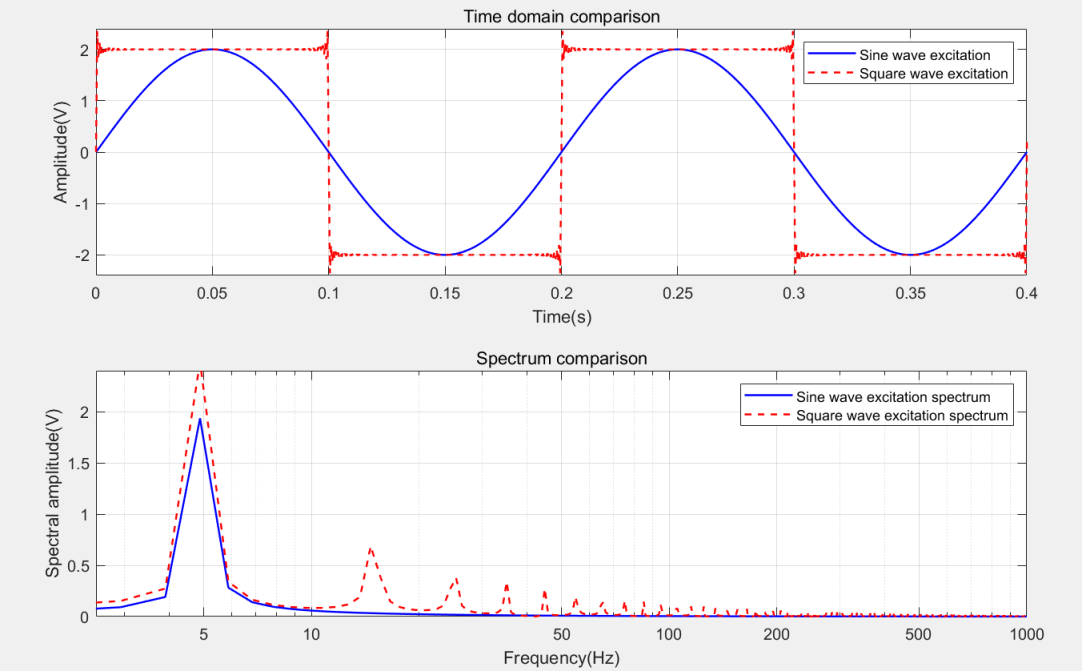


Figure 1. Comparison of time-domain and frequency-domain characteristics of different excitation signals
图 1. 不同激励时频域对比图

2. 脉冲涡流检测原理

2.1. 检测原理

在脉冲涡流检测中，在激励线圈中通入方波或脉冲电流，基于电磁感应原理，会产生感应磁场，进而在被测对象中产生感应涡流，如图 2 所示。该涡流会感应产生二次磁场，其中包含了对象中诸如厚度之类的信息，当被测对象存在缺陷时，其感应涡流和磁场会发生相应变化，采用合适的方法并设计接收元件进行接收，即可得到被测对象信息。

脉冲涡流检测以线圈与导电试件之间的电磁耦合为基础。线圈产生的磁场在试件中激发感应电流，试件的电磁响应又反作用于线圈系统，因此接收信号由激励信号、探头结构、材料属性及试件几何结构共同决定。经典线圈－导体解析模型及其级数展开方法为描述这一耦合关系提供了理论基础[6] [7]，对于包含局部缺陷和包覆层的管道，可进一步采用有限元方法计算空间电磁场及其瞬态变化。

在脉冲涡流检测中，激励线圈中的时变电流产生初级磁场，并在管壁中形成涡流。涡流产生的次级磁场与初级磁场共同作用于接收线圈，使其输出随时间变化的感应电压。该电压反映的是接收线圈磁链的变化速率，而非磁场强度本身。因此，解释电压波形时不仅需要关注磁场大小，还需要考虑磁场随时间的演变。此外，若采用电压驱动，线圈电流还受到电阻、电感及试件耦合的影响[8]。

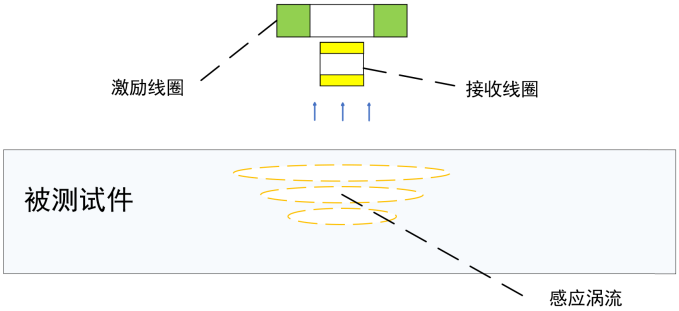


Figure 2. Schematic diagram of pulsed eddy current testing
图 2. 脉冲涡流检测示意图

2.2. 趋肤效应

交变电磁场作用于导体时，电流密度通常在靠近表面的区域较大，并随深度增加而衰减，这种现象称为趋肤效应。趋肤效应描述了电流密度衰减至表面值的 1/e 时对应的深度，通常用 δ 表示，其大小反映了电磁场衰减的快慢，数学表达式如下：

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \tag{2.1}$$

其中 δ 表示趋肤深度(m)，ω 表示角频率(rad/s)，μ 表示磁导率(H/m)，σ 表示电导率(S/m)。由该数学表达式可知，在材料电导率和磁导率固定的情况下，趋肤深度只与激励频率相关。通过改变激励频率或使激励信号包含多种频率分量，即可减轻趋肤效应带来的影响，得到更丰富的构件信息。

脉冲激励包含多个频率分量，各分量在导体中的衰减程度不同，因而整个瞬态响应不能由单一趋肤深度完整描述。从时域看，激励变化后，涡流在导体内发生扩散并伴随能量耗散，不同时间阶段对结构的敏感区域有所不同。通常早期响应更易受到近表面区域及激励过渡过程的影响，较晚阶段则可能包含更深区域的信息。

3. 有限元建模

如图 3 所示，模型主要部分由传感器(包括激励线圈和接收线圈)、金属保护层、带缺陷管道组成，采用 COMSOL 软件进行有限元分析，选取磁场为物理场。在主要模型外建立圆形空气域，内径 100 mm，外径 110 mm，并设置无限元域，模拟无限大空气环境。模型中上侧为激励线圈，下侧为检测线圈，激励信号设置为方波电压激励，大小设置为 1 V，频率 1 Hz，占空比 50%，上升和下降沿 2 ms，直接设置在激励线圈电压中。如图 4，网格采用自由三角形网格，在管道、保护层、线圈和缺陷处细化，对于缺陷与线圈及中间边界进行加密，尽可能提高仿真精度。边界条件在外侧空气域设置磁绝缘，为管道与保护层设置固定安培定律。

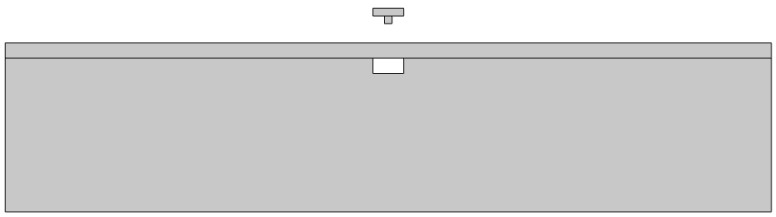


Figure 3. Pipeline inspection model
图 3. 管道检测模型

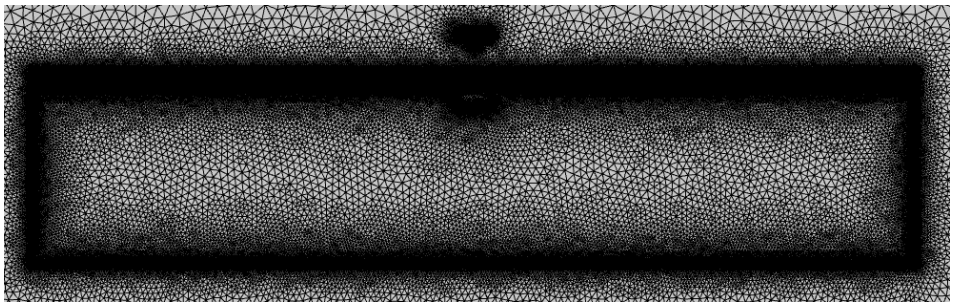


Figure 4. Mesh generation results
图 4. 网格划分结果

材料属性和规格尺寸如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Material properties
表 1. 材料属性

名称	材料类型	相对磁导率	电导率/(S·m^{-1})
线圈	铜	1	6×10^7
管道	304 不锈钢	1	1.4×10^6
保护层	铝	1	3.7×10^7
空气域	空气	1	0

Table 2. Material parameters
表 2. 材料参数

名称	宽度/mm	高度/mm	匝数
激励线圈	2	0.5	100
接收线圈	0.5	0.5	100
管道	50	10	
保护层	50	1	

4. 信号处理与分析

将无缺陷管道仿真得到的接收线圈响应电压作为参考电压，对缺陷管道仿真响应电压与参考电压相减得到的差分电压进行信号处理与分析。

4.1. 内外表面缺陷宽度分析

选取缺陷宽度 2 mm，缺陷深度 1 mm，缺陷深度保持不变，缺陷宽度变化范围：2~6 mm，按 1 mm 递增，内外表面仿真结果如图 5 与图 6 所示。

从图 5 与图 6 中可以看到，随着宽度增加，差分电压峰值增加，到达峰值时间与过零点时间几乎不变，同时，差分电压峰值的变化速率无明显波动。对比两张图可以看到，虽然变化规律趋同，但是内外表面缺陷的差分电压峰值有明显不同，外表面差分电压峰值显著高于内表面。观察并对比两张图中曲线的间距，可以发现外表面差分电压曲线明显更加规律，不规则波动更小，更容易观察。从电磁理论分析，内表面缺陷产生的感应磁场相比于外表面更小，更容易受到各类噪声的影响，所以得到的差分电压曲线更不规则。

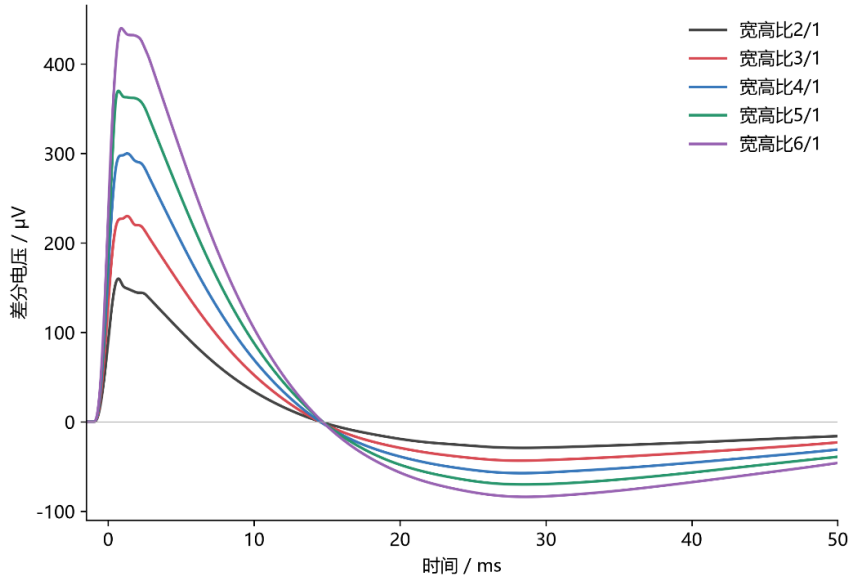


Figure 5. Simulated differential voltage responses for outer surface defects with different widths
图 5. 外表面宽度缺陷仿真差分电压图

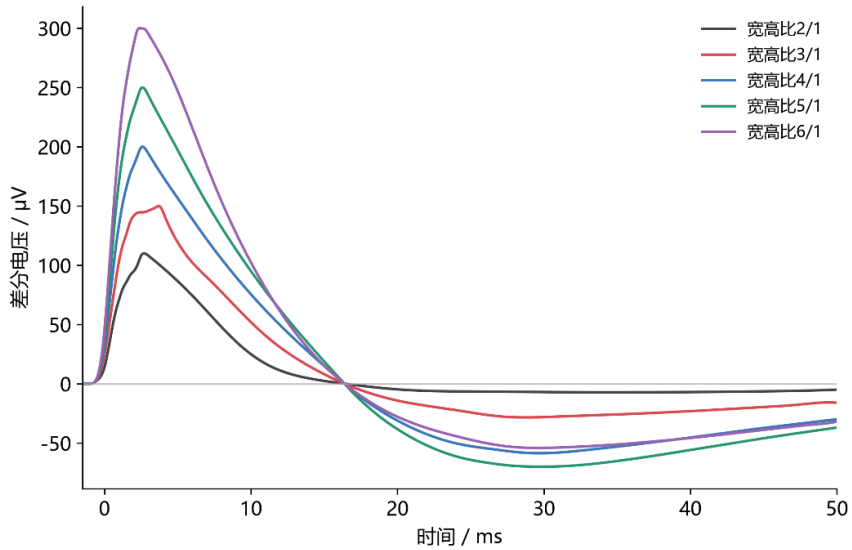


Figure 6. Simulated differential voltage responses for inner surface defects with different widths
图 6. 内表面宽度缺陷仿真差分电压图

4.2. 内外表面缺陷深度分析

选取缺陷宽度 2 mm，缺陷深度 1 mm，缺陷宽度保持不变，缺陷深度变化范围：1~5 mm，按 1 mm 递增，内外表面仿真结果如图 7 与图 8 所示。

从图 7 与图 8 中可以看到，随着深度增加，差分电压峰值增加，到达峰值时间与过零点时间几乎不变，同时，差分电压峰值的变化速率无明显波动。对比两张图可以看到，与宽度变化类似，内外表面缺陷的差分电压峰值有明显不同，且外表面差分电压峰值显著高于内表面。但宽度变化不同的是，内外表

面差分电压曲线规律性差别相较于宽度变化的图像更小，不规则波动差距不大。从电磁理论分析，虽然内表面缺陷产生的感应磁场相比于外表面更小，更容易受到各类噪声的影响，但随着深度增加，内表面缺陷距离传感器越来越近，产生的感应磁场逐渐增强，能够减少部分噪声的影响。

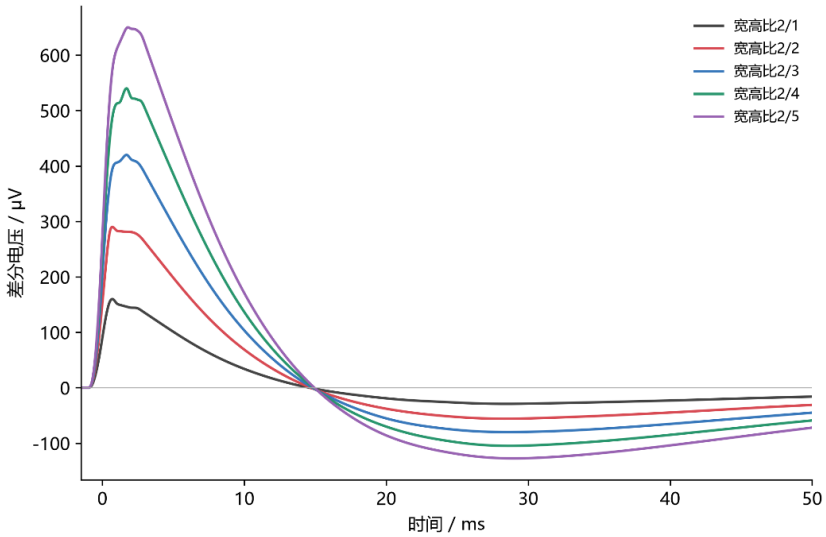


Figure 7. Simulated differential voltage responses for outer surface defects with different depths

图 7. 外表面深度缺陷仿真差分电压图

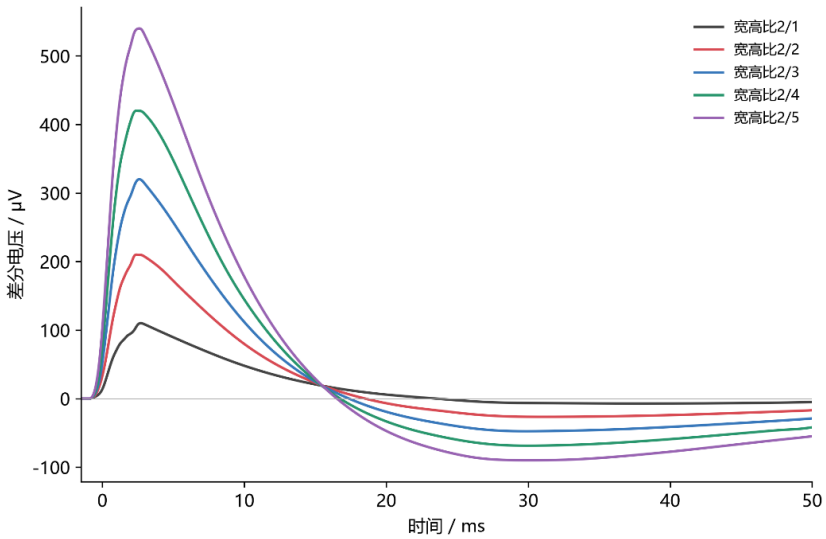


Figure 8. Simulated differential voltage responses for inner surface defects with different depths

图 8. 内表面深度缺陷仿真差分电压图

4.3. 提离高度影响分析

选取缺陷宽度 2 mm，缺陷深度 1 mm 的外表面缺陷，缺陷宽度与高度保持不变，传感器提离高度变化范围：1.25~5.25 mm，按 1 mm 递增，仿真结果如图 9 所示。

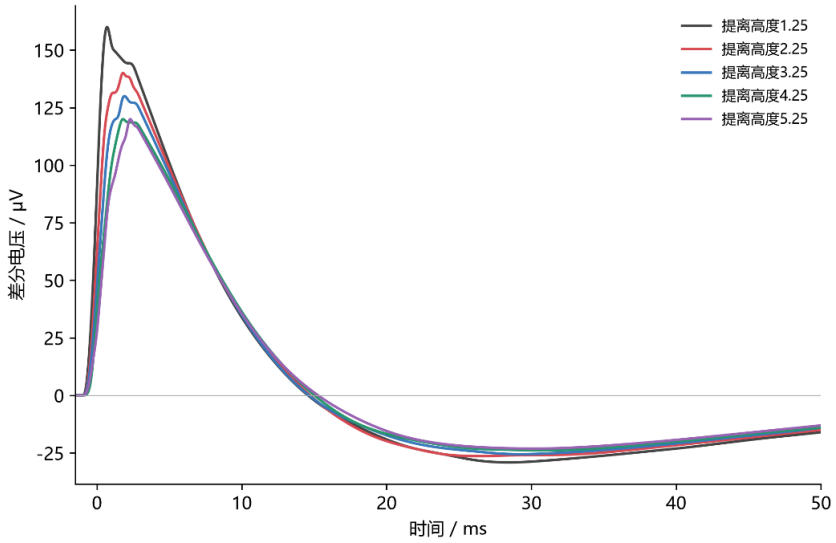


Figure 9. Simulated differential voltage responses at different lift-off distances
图 9. 提离高度变化仿真差分电压图

从图 9 中可以看到，随着提离高度增加，差分电压峰值不断下降，到达峰值时间与过零点时间相比前两类变化有明显波动，但可视为类似，同时，差分电压峰值的变化速率变化明显，随提离高度增加而显著减缓，到一定程度后变化趋于停滞。从电磁理论分析，随着提离高度增加，缺陷距离传感器越来越远，产生的感应磁场逐渐减弱，受噪声影响明显。

5. 结论

本文基于 COMSOL 建立了带金属保护层管道的脉冲涡流有限元模型，以有缺陷与无缺陷工况下接收线圈电压的差分电压作为分析对象，研究了内、外表面缺陷宽度、深度及传感器提离高度对检测响应的影响。仿真结果表明，在一定参数范围内，差分电压峰值随缺陷宽度和深度增大而增大，相同尺寸下外表面缺陷的峰值高于内表面缺陷，而提离高度增大使峰值总体减小。因此，结合提离条件，差分电压峰值可为缺陷识别与评价提供参考，但受噪声干扰较大，在未来进一步工作中，对于降噪方法有待进一步研究。

基金项目

重庆科技大学硕士研究生创新计划项目，项目批准号：YKJCX2520121。

参考文献

[1] Sophian, A., Tian, G. and Fan, M. (2017) Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing and Evaluation: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **30**, 500-514. https://doi.org/10.1007/s10033-017-0122-4

[2] Yu, X., Zhu, Y., Cao, Y. and Xiong, J. (2023) Time-Domain Numerical Simulation and Experimental Study on Pulsed Eddy Current Inspection of Tubing and Casing. *Sensors*, **23**, Article 1135. https://doi.org/10.3390/s23031135

[3] Nafiah, F., Sophian, A., Khan, M.R. and Zainal Abidin, I.M. (2019) Quantitative Evaluation of Crack Depths and Angles for Pulsed Eddy Current Non-Destructive Testing. *NDT & E International*, **102**, 180-188. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2018.11.019

[4] Fu, Y., Lei, M., Li, Z., Gu, Z., Yang, H., Cao, A., *et al.* (2017) Lift-Off Effect Reduction Based on the Dynamic Trajectories of the Received-Signal Fast Fourier Transform in Pulsed Eddy Current Testing. *NDT & E International*, **87**, 85-92. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.01.010

[5] Wang, H., Huang, J., Liu, L., Qin, S. and Fu, Z. (2022) A Novel Pulsed Eddy Current Criterion for Non-Ferromagnetic

Metal Thickness Quantifications under Large Liftoff. *Sensors*, **22**, Article 614. https://doi.org/10.3390/s22020614

[6] Dodd, C.V. and Deeds, W.E. (1968) Analytical Solutions to Eddy-Current Probe-Coil Problems. *Journal of Applied Physics*, **39**, 2829-2838. https://doi.org/10.1063/1.1656680

[7] Theodoulidis, T. and Kriezis, E. (2005) Series Expansions in Eddy Current Nondestructive Evaluation Models. *Journal of Materials Processing Technology*, **161**, 343-347. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.048

[8] Desjardins, D., Krause, T.W. and Clapham, L. (2015) Transient Response of a Driver-Pickup Coil Probe in Transient Eddy Current Testing. *NDT & E International*, **75**, 8-14. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2015.04.008