

非金属管道电阻率成像效果数值模拟研究

穆路谦, 曹志鹏, 黄思俊, 陈宝佳, 王明明

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2023年6月25日; 录用日期: 2023年8月21日; 发布日期: 2023年8月28日

摘要

非金属管道被广泛用于城市地下管线中, 是城市基础设施的重要组成部分, 但非金属管道具有非导电、非导磁和绝缘性, 在管线探测中是一个难题。本文采用数值模拟方法, 对不同间距、不同直径、不同埋深的非金属管道的电阻率成像特点进行数值模拟研究。结果表明: 当两根非金属管道横向排列间距较大时, 电阻率成像能够清晰分辨两管道位置, 但随着管道间距变小, 电阻率成像难以对两根管道进行区分。两根较粗管道, 对应两管道位置出现高阻异常区, 两高阻异常区相连通, 在两管道中间下方出现下凸的高阻异常, 对应两管道的中间位置。当两管道纵向排列时, 上下两根管道形成一个异常区, 电阻率成像难以在垂向上区分两根管道。

关键词

非金属管道, 电阻率成像, 数值模拟, 不同间距, 不同直径, 不同埋深

Numerical Simulation Study on the Imaging Effect of Non-Metallic Pipeline Resistivity

Luqian Mu, Zhipeng Cao, Sijun Huang, Baojia Chen, Mingming Wang

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: Jun. 25th, 2023; accepted: Aug. 21st, 2023; published: Aug. 28th, 2023

Abstract

Non metallic pipelines are widely used in urban underground pipelines and are an important component of urban infrastructure. However, non-metallic pipelines have non-conductive, magnetic, and insulating properties, making them a challenge in pipeline detection. This paper uses numerical simulation methods to study the electrical resistivity imaging characteristics of non-metallic pipelines with different spacing, diameter, and burial depth. The results indicate that when the horizontal spacing between two non-metallic pipelines is large, resistivity imaging can

clearly distinguish the positions of the two pipelines, but as the spacing between pipelines decreases, resistivity imaging is difficult to distinguish between the two pipelines. Two thicker pipelines have high resistance abnormal areas corresponding to the positions of the two pipelines. The two high resistance abnormal areas are connected, and a convex high resistance abnormal area appears below the middle of the two pipelines, corresponding to the middle position of the two pipelines. When two pipelines are arranged vertically, the upper and lower pipelines form an abnormal area, making it difficult for resistivity imaging to distinguish the two pipelines vertically.

Keywords

Non Metallic Pipelines, Resistivity Imaging, Numerical Simulation, Different Spacing, Different Diameters, Different Burial Depths

Copyright © 2023 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

地下管道如同人体血管贯穿整个城市，是城市基础设施的重要组成部分，对城市的发展至关重要[1] [2] [3]。地下管道由于其埋设时间、埋设单位不同，现有的城市地下管道资料大多不完整，在城市建设开挖中容易发生意外管线损坏，造成资源浪费、环境污染及威胁人身安全[4] [5] [6] [7]。传统的埋地管道主要由金属材料制成，但时间久了容易发生腐蚀老化。因此，近年来，非金属管道，如塑料管道、陶瓷管道、混凝土管道等，在供水、供热、石油、燃气等领域逐渐取代了金属管道[8] [9] [10] [11] [12]。目前，对于金属管道的探测较为成熟，但对于非金属管道的探测在实际应用中一直是一个技术难题。非金属管道探测的难点在于其具有非导电、导磁和绝缘性，使用常规的管线探测技术难以确定管道的准确位置[13] [14]。而地球物理中的电阻率成像方法因其具有浅层分辨率高，对低阻和高阻体反映灵敏的特点，近年来被引入到地下管道探测中。例如张玮等研究了地下水管网的电阻率成像结果，发现该方法可以确定水管的位置和埋深[15]。程甄等指出电阻率成像方法不仅可以探测地下水管的位置，还能够确定水管泄露点的位置[16]。黄俊革等对坑道内的电阻率成像结果进行研究，分析了坑道对电阻率成像效果的影响[17]。王磊对水文孔管道的电阻率成像进行研究发现温纳装置的分辨率较高[18]。这些研究大多关注金属管道的探测，对于非金属管道的电阻率成像效果研究较少。因此，本文针对非金属管道的电阻率成像效果进行数值模拟，研究其在不同直径、不同间距、不同埋深的电阻率成像特点，为精确探测非金属管道提供理论依据。

2. 数值模拟方法

采用 Res2dmod 电阻率成像正演模拟软件对不同直径、不同间距、不同埋深的非金属管道进行数值模拟。Res2dmod 的优点在于其可根据地质异常体的复杂程度利用有限差分法和有限元方法对地层和地质异常体进行高精度的网格化(图 1)。Res2dmod 将地层剖分为 M 行 N 列的矩形网格，每个网格可设置不同的电阻率值，然后计算网格节点的电位值。其中 ΔX_i 表示横向剖分网格的间距， ΔZ_j 表示垂向剖分网格的间距。实际建模时网格间距可根据模型的复杂程度进行设置，但一般要求前三层网格的水平剖分间距要大于垂直剖分间距。本研究结合实际管道铺设特点，在模型构建中假设地层电阻率为 $1000 \Omega \cdot m$ ，非金属管道电阻率为 $100000 \Omega \cdot m$ ，采用常用的温纳四极装置对非金属管道的探测效果进行数值模拟。

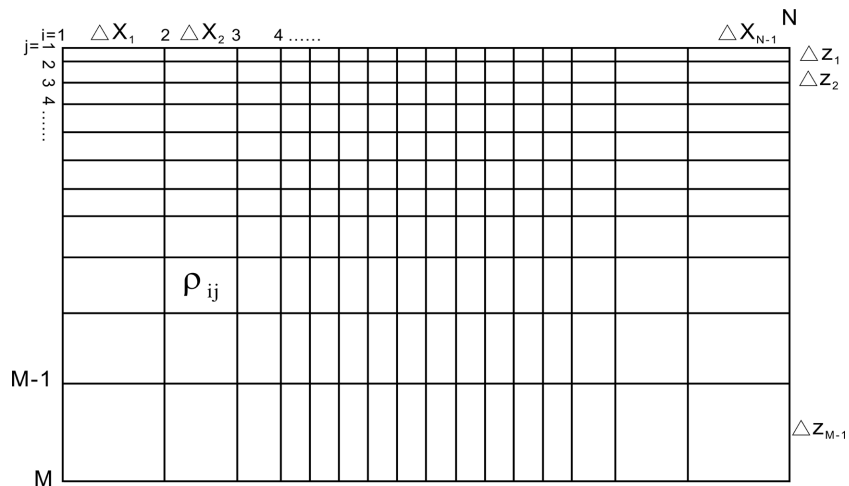
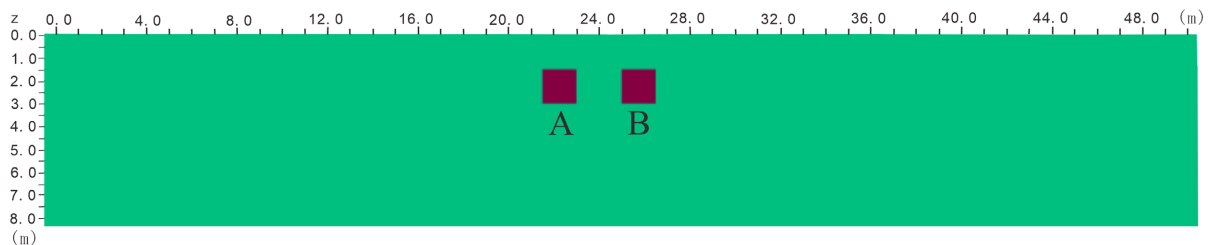


Figure 1. Res2dmod schematic diagram of resistivity imaging grid division principle
 图 1. Res2dmod 电阻率成像网格剖分原理示意图

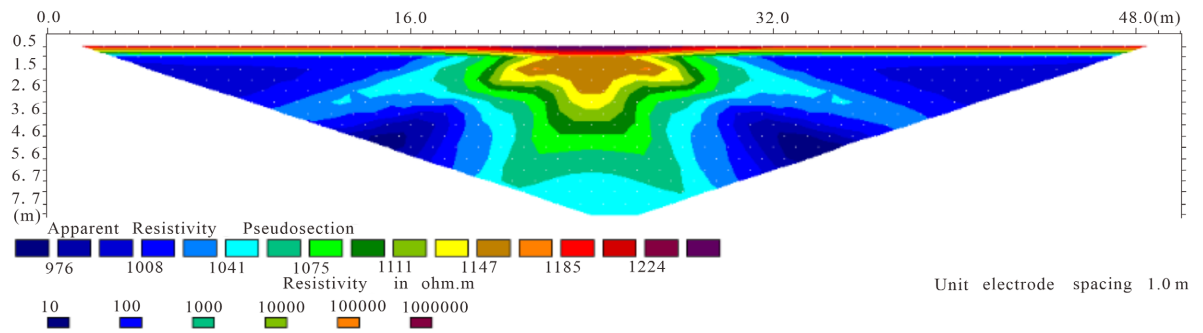
3. 结果

3.1. 不同间距管道电阻率成像

图 2(a)为横向排列的两根非金属管道，管道 A 和 B 分别位于 22 m 和 25 m 处，管道间距 3 m，管道直径均为 1.5 m，埋藏深度为 3 m。电阻率成像结果如图 2(b)所示。可以看出电阻率成像对应异常体出现两个极大值，但由于管道相距较近，异常整体呈中间下凹两侧伸出的长不规则状，两侧伸出的高阻异常的中心位置与非金属管道埋藏深度相对应。图 2(c)管道 A 和 B 分别位于横向 21 m 和 26 m 处，两根非金属管道间距为 5 m，管道直径均为 1.5 m，埋藏深度为 3 m。其电阻率成像结果如图 2(d)所示，可以看出随着管道间距的增大，电阻率成像可以对两管道进行准确的区分，对应管道出现明显的高阻异常圈闭，圈闭中心与两管道中心位置对应。



(a)



(b)

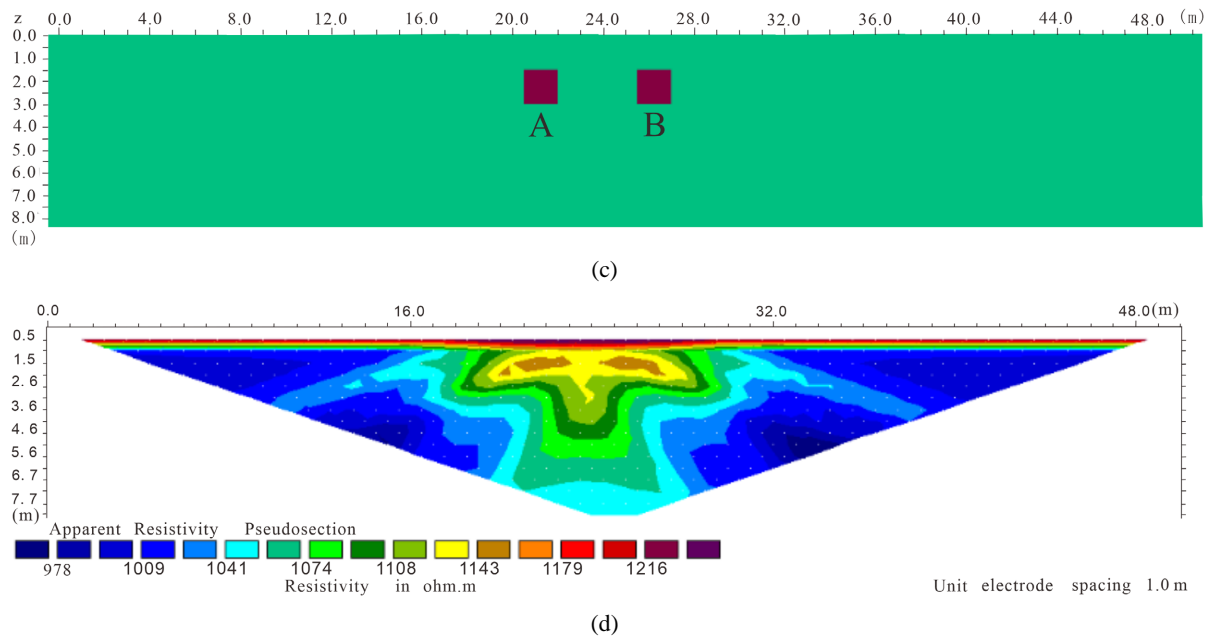
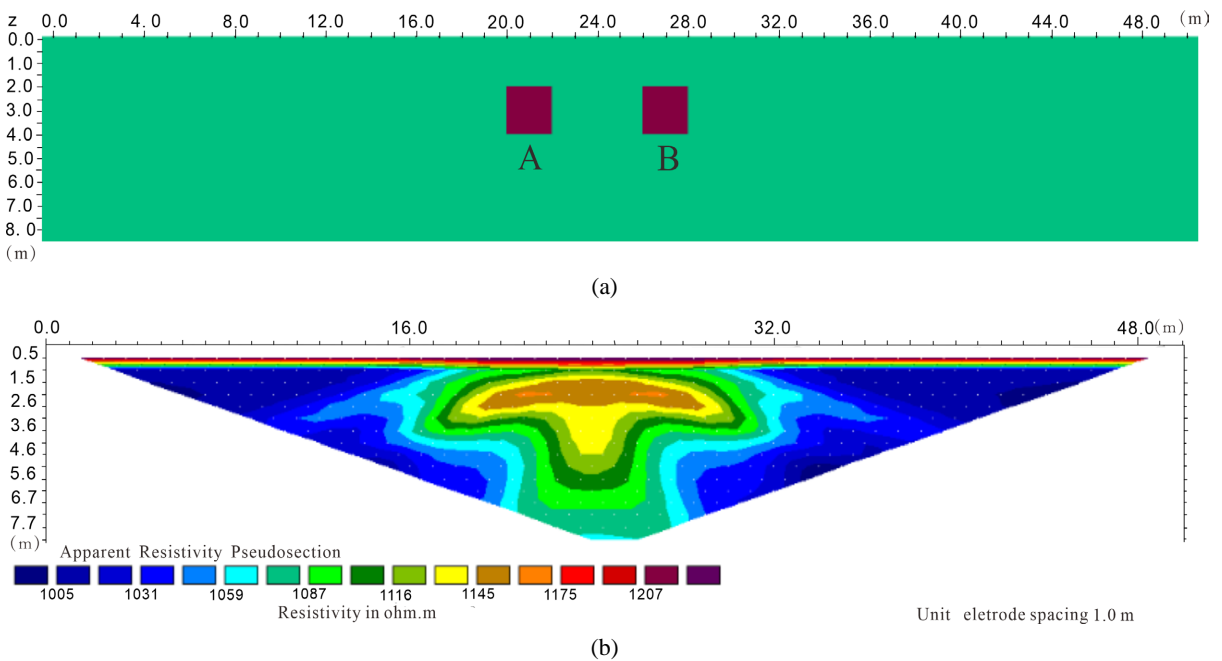
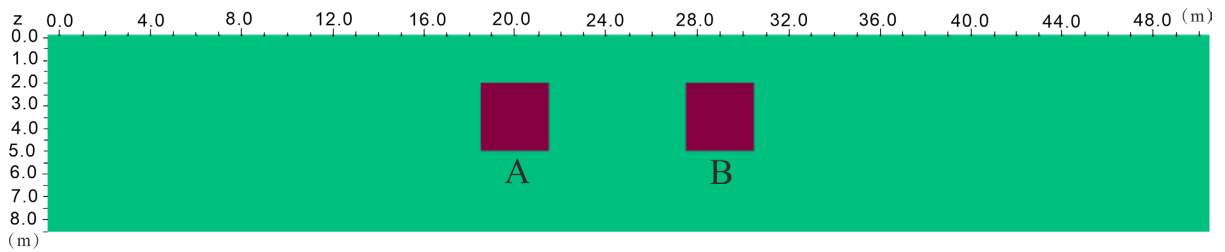


Figure 2. Electrical resistivity imaging results of pipelines with different spacing
图 2. 不同间距管道电阻率成像结果

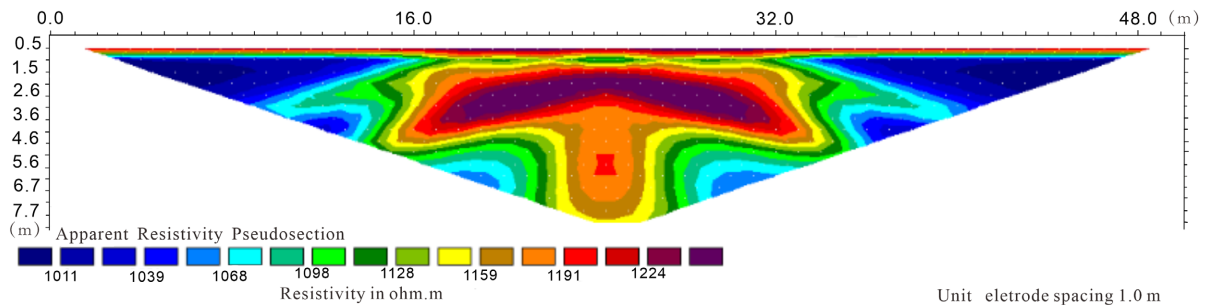
3.2. 不同直径管道电阻率成像

图 3(a)所示非金属管道 A 和 B 的直径为 2 m，管道间距为 6 m，管道 A 和 B 分别位于 21 m 和 27 m 处。图 3(b)为电阻率成像结果，可以看出对应两管道位置分别出现两个高阻异常圈闭，圈闭中心对应管道中心位置。图 3(c)所示非金属管道 A 和 B 的直径都为 3 m，管道 A 和 B 分别位于 20 m 和 29 m 处，管道间距为 9 m。图 3(d)为电阻率成像结果，可以看出对应两管道位置出现高阻异常区，两高阻异常相连通，在两管道中间下方出现下凸的高阻异常，对应两管道的中间位置。





(c)

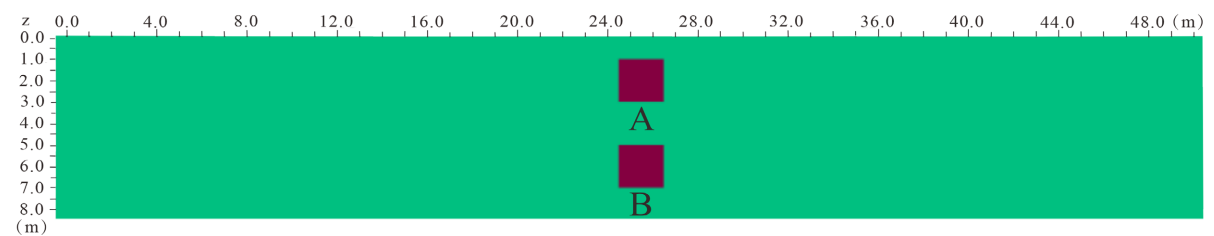


(d)

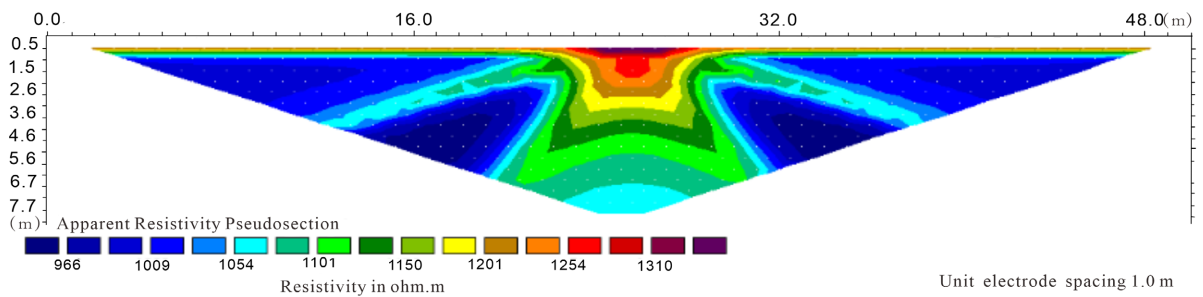
Figure 3. Electrical resistivity imaging of pipelines with different diameters
图 3. 不同直径管道电阻率成像图

3.3. 垂向排列管道电阻率成像

图 4(a)所示非金属管道 A 和 B 的直径都为 2 m，管道 A 和 B 分别位于 3 m 和 7 m 深度处。图 4(b)为电阻率成像结果，可以看出管道 A 和 B 电阻率成像为一高阻异常区，高阻异常区中心位置与管道 A 和 B 中心位置对应。但无法从电阻率成像结果上分辨管道 A 和管道 B 的垂向位置。图 4(c)所示非金属管道 A 和 B 的直径都为 2 m，管道 A 和 B 分别位于 5 m 和 9 m 深度处。图 4(d)为电阻率成像结果。可以看出对应管道 A 和 B 的中心位置下方为高阻异常区，高阻异常区中心位置与管道中心位置相对应。高阻异常区范围扩大，但无法分辨两根管道在垂向上的具体位置。



(a)



(b)

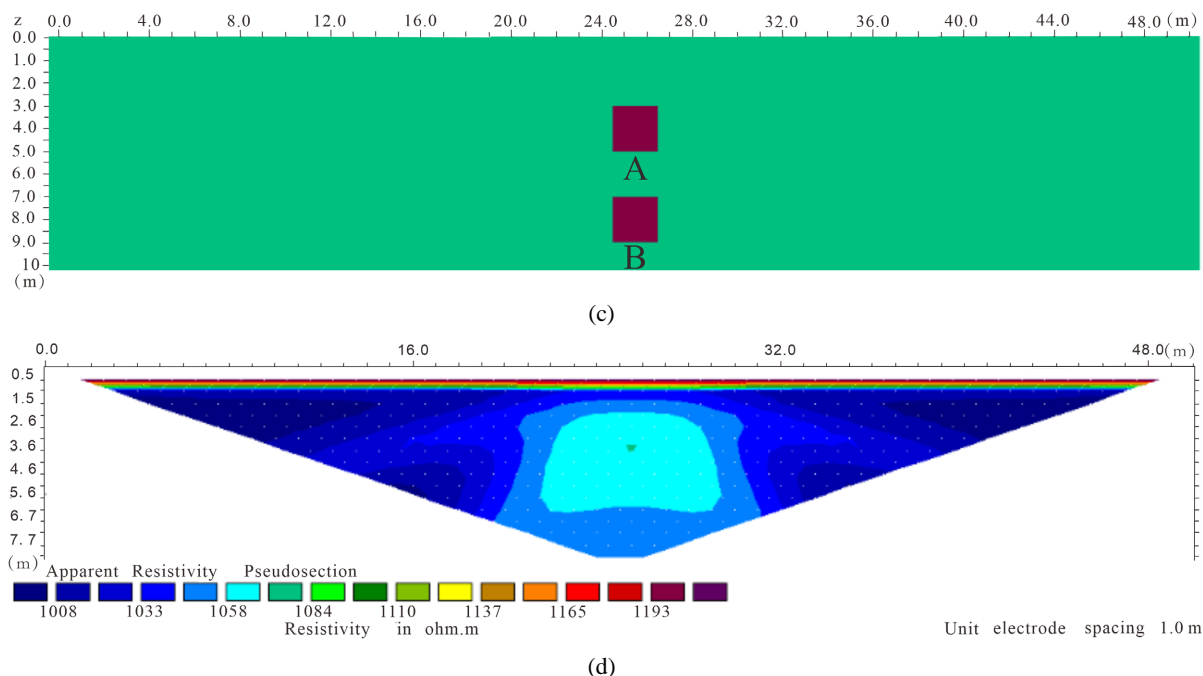


Figure 4. Electrical resistivity imaging of vertically arranged pipelines

图 4. 垂向排列管道电阻率成像图

4. 结论

1) 两根非金属管道横向排列, 当管道之间的间距较小时, 电阻率成像为连通的高阻异常区, 难以分辨两根管道的准确位置。当管道之间的间距较大时, 对应管道位置为明显的高阻异常, 电阻率成像结果能够准确分辨两管道位置。

2) 两根较粗管道, 对应两管道位置出现高阻异常区, 两高阻异常区相连通, 在两管道中间下方出现下凸的高阻异常, 对应两管道的中间位置。

3) 两根非金属管道纵向排列, 对应管道下方为一高阻异常区, 高阻异常区中心位置与两管道的中心位置相对应。随着管道埋深的增大, 高阻异常区范围扩大, 但在垂相上难以分辨两管道的位置。

基金项目

安徽省大学生创新创业训练计划项目[煤矿钻孔注浆扩散范围动态监测方法研究]; 宿州学院大学生科研项目[移动磁偶极子管线探测方法研究, ZCXM22-324; 浆液固化过程电阻率变化特征研究, YBXM23-019]。

参考文献

- [1] 陈思静, 胡祥云, 彭荣华. 城市地下管线探测研究进展与发展趋势[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(3): 1236-1247.
- [2] Xu, Y., Li, J., Zhang, M., *et al.* (2020) Pipeline Leak Detection Using Raman Distributed Fiber Sensor with Dynamic Threshold Identification Method. *IEEE Sensors Journal*, **20**, 7870-7877. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2980366>
- [3] Ge, L., Zhang, C., Tian, G., *et al.* (2021) Current Trends and Perspectives of Detection and Location for Buried Non-Metallic Pipelines. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, **34**, Article No. 97. <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00613-z>
- [4] 邱小峰. 高密度电阻率法在探测地下雨污水管道中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(1): 97-100.
- [5] Baroudi, U., Al-Roubaiey, A. and Devendiran, A. (2019) Pipeline Leak Detection Systems and Data Fusion: A Survey.

- IEEE Access*, 7, 97426-97439. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2928487>
- [6] Liu, J., Zang, D., Liu, C., Ma, Y. and Fu, M. (2019) A Leak Detection Method for Oil Pipeline Based on Markov Feature and Two-Stage Decision Scheme. *Measurement*, **138**, 433-445. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.01.029>
- [7] Zhang, H., Hu, X., Ma, D., Wang, R. and Xie, X. (2020) Insufficient Data Generative Model for Pipeline Network Leak Detection Using Generative Adversarial Networks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **52**, 7107-7120. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3035518>
- [8] 韩沙沙, 王照天, 郭凯. 地下管线探测方法综述[J]. 测绘通报, 2016(S1): 104-106+109.
- [9] Razvarz, S., Jafari, R. and Gegov, A. (2021) A Review on Different Pipeline Defect Detection Techniques. In: *Flow Modelling and Control in Pipeline Systems. Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 321, Springer, Cham, 25-57. https://doi.org/10.1007/978-3-030-59246-2_2
- [10] 丁华, 朱谷兰, 汪大鹏. 深埋管线探测方法技术分析探讨[J]. 工程地球物理学报, 2010, 7(3): 390-393.
- [11] 区福帮. 城市地下管线普查技术研究与应用[M]. 南京: 东南大学出版社, 1998: 104-123.
- [12] Li, J., Zheng, Q., Qian, Z. and Yang, X. (2019) A Novel Location Algorithm for Pipeline Leakage Based on the Attenuation of Negative Pressure Wave. *Process Safety and Environmental Protection*, **123**, 309-316. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.01.010>
- [13] Guan, M., Cheng, Y., Li, Q., *et al.* (2019) An Effective Method for Submarine Buried Pipeline Detection via Multi-Sensor Data Fusion. *IEEE Access*, 7, 125300-125309. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938264>
- [14] Wang, S., Ananthanarayanan, G., Zeng, Y. and Goel, N. (2019) High-Throughput CNN Inference on Embedded ARM Big. LITTLE Multicore Processors. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, **39**, 2254-2267. <https://doi.org/10.1109/TCAD.2019.2944584>
- [15] 张玮, 肖宏跃, 钟宙灿. 高密度电阻率法在城市地下水管网管道探测中的应用[J]. 工程勘察, 2009, 37(7): 91-94.
- [16] 程甄, 欧元超. 基于高密度电法的地下给水管网管道泄露点检测研究[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 73-76.
- [17] 黄俊革, 沈云发, 阮百尧, 鲍光淑. 坑道内金属管道对电阻率测深影响[J]. 石油地球物理勘探, 2004(S1): 52-56.
- [18] 王磊. 密度电法在水文孔管道验证中的应用[J]. 西部资源, 2019(1): 150-151.