

中文引用格式:张艳辉,张雨燕,胡宇佳,等. GMM 聚类与高密度电阻法的道路塌陷隐患探测研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(10):115-123.

英文引用格式:ZHANG Yanhui, ZHANG Yuyan, HU Yujia, et al. Research on detection of subgradecollapse hazards based on GMM clustering and high-density resistivity method [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(10):115-123.

GMM 聚类与高密度电阻法的道路塌陷 隐患探测研究*

张艳辉 副教授, 张雨燕, 胡宇佳, 罗志彬, 赵维刚** 教授
(石家庄铁道大学 安全工程与应急管理学院, 河北 石家庄 050043)

中图分类号:X928.03

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.10.1430

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助(42104079);国能朔黄铁路发展有限责任公司技术开发项目(GJNY-20-230);河北省自然科学基金面上项目资助(D2025210007);石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC202458)。

【摘要】 为解决道路塌陷隐患探测中高密度电阻法分辨率不足和异常识别精度有限的问题,开展基于高密度电阻法的道路塌陷隐患探测分辨率测试和基于高斯混合模型(GMM)聚类的异常识别方法研究。文中正演采用有限差分法,反演采用高斯-牛顿法,通过数值模拟测试不同电极间距的配置对探测分辨率的影响;结合管网漏损诱发道路塌陷的背景,设计地下病害在不同发展阶段的地电模型,采用 GMM 聚类分析方法优化高密度电阻法的反演结果。结果表明:调整电极间距和测量参数能显著提高探测分辨率,在 4.5 m 深度下,缩小电极间距能够有效刻画 1 m 尺度的地下病害体的位置和形态,且 0.5 m 电极间距能够兼顾探测精度与计算效率,即探测目标异常体尺度的 1/2 左右。对于同样埋深的异常体,低阻病害的电阻率值恢复效果优于高阻病害,为不同病害目标探测提供参数优化依据。通过管网漏损诱发的地下空洞模型测试,揭示了高密度电阻法在探测不同阶段漏水病害的可行性,而基于 GMM 的聚类分析进一步提高了异常区域的识别精度。

【关键词】 高斯混合模型(GMM)聚类; 高密度电阻法; 道路塌陷; 隐患探测; 分辨率

Research on detection of subgradecollapse hazards based on GMM clustering and high-density resistivity method

ZHANG Yanhui, ZHANG Yuyan, HU Yujia, LUO Zhibin, ZHAO Weigang

(School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University,
Shijiazhuang Hebei 050043, China)

Abstract: To address the issues of insufficient resolution in the high-density electrical resistivity method and limited accuracy in anomaly identification for road collapse hazard detection, resolution tests for road collapse hazard detection based on high-density electrical resistivity method and investigation of an anomaly identification method using GMM clustering were conducted. Forward modeling was performed using the finite difference method, while inversion process was carried out using the Gauss-Newton method.

* 文章编号:1003-3033(2025)10-0115-09; 收稿日期:2025-05-11; 修稿日期:2025-07-01

** 通信作者:赵维刚(1973—),男,河北石家庄人,博士,教授,主要从事交通基础设施损伤检测、智慧运维方面的研究。E-mail:zhaowg@stdu.edu.cn。

Numerical simulations were conducted to assess the effect of different electrode spacing configurations on detection resolution. In the context of pipeline leakage-induced road collapse, geoelectric models for underground anomalies at various stages of development were designed, and GMM clustering analysis was applied to optimize the inversion results of the high-density electrical resistivity method. The results demonstrate that adjusting the electrode spacing and measurement parameters can significantly improve detection resolution. At a depth of 4.5 meters, the location and shape of underground anomalies at a scale of 1 meter can be effectively characterized by reducing the electrode spacing. An electrode spacing of 0.5 meters can balance detection accuracy and computational efficiency, corresponding to half the scale of the target anomaly. For anomalies buried at the same depth, the resistivity recovery of low-resistance anomalies is superior to that of high-resistance anomalies, providing the basis for parameter optimization for detecting various anomaly types. The feasibility of high-density electrical resistivity method to detect leakage-induced detects at different stages is demonstrated through tests on underground cavity models induced by pipeline leakage, while the identification accuracy of anomaly regions is further enhanced by the GMM-based clustering analysis.

Keywords: Gaussian mixture model (GMM) clustering; high-density resistivity method; road collapse; hazards detection; resolution

0 引言

道路塌陷是全球面临的严峻安全挑战,近年来,在快速城镇化背景下,我国道路塌陷事故的发生频率和影响程度都显著增加^[1]。据全国(包括港澳台)地下管线事故统计报告,2019年10月—2020年9月与地下管线相关的路面塌陷事故1 008起,导致105人死亡^[2]。道路塌陷不仅带来了巨额修复成本,还会严重影响交通运输正常运行,对社会经济发展造成负面影响。因此,有效探测和预警道路塌陷隐患,对保障城市安全和稳定发展具有重要意义。

目前,国内外学者在道路塌陷的研究中主要集中在其致因分析与探测技术上。道路塌陷的成因复杂,主要包括地下管网漏损、降雨、施工扰动等因素,其中,管网漏损诱发占比最高^[3]。随着渗水口周围的水土流失和空洞的发展,管道上方的土拱结构逐渐失稳,最终导致道路塌陷。此外,极端天气也会加剧路基的不稳定性,夏季的流域性暴雨和冬季的冻土区条件都会增加塌陷事故发生风险。多因素的耦合作用,使得城市道路塌陷的预测和防治长期处于被动局面。地球物理是研究道路结构损伤的重要手段,目前常用的方法有钻探法、探地雷达法和高密度电阻法。钻孔法一孔之见的弊端使其无法准确勘察出地下病害的分布及形态^[4]。探地雷达具有分辨率高、探测效率高优点,但其信号在富水环境中衰减较为敏感,探测深度受限^[5]。高密度电阻法作为一种广泛应用于地质勘探和工程检测的技术,由于

其非破坏性、覆盖范围广、数据采集量大以及对含水具有较高的敏感性等特点,在地下空洞、富水区等异常体的探查中显示出极大潜力^[6]。GANIYU等^[7]通过电阻率测量和土壤分析的综合调查,明晰了存在病害路段的土壤物性参数。XIE Jia等^[8]采用高密度电阻法探测某采石场采空区,有效识别了地层分布及导致地面塌陷的异常区域特征。尽管高密度电阻法在理论和实践中展示了其优越性,但在实际应用中仍面临一些技术难题,电阻率成像背后隐藏着许多不确定性^[9]。电极距等关键参数的选择对反演结果的分辨率有着决定性影响^[10],不同的探测目标需要针对性地调整测量参数以实现最佳探测效果。而目前针对高密度电阻法对于不同尺度地下异常的分辨率缺乏系统研究,这也限制了其在实际工程中的应用。因此,如何厘清测量参数和探测精度之间的约束关系,优化测量参数设计方案,对于提高高密度电阻法在道路塌陷隐患诊断中的探测效率和精度具有重要现实意义。

鉴于此,笔者拟构建典型路基隐蔽病害模型,通过数值模拟系统评估高密度电阻法的隐患探测分辨率情况,并引入高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)聚类,显著提升异常区域的识别精度,以期道路隐蔽病害探测提供有效方法。

1 高密度电阻法 2.5D 正反演技术

2.5D 正反演技术结合了二维模型的计算效率与三维模型的精度。假设地下结构在一个方向上具

有规律性,简化计算同时考虑第 3 个方向的变化,以提高模型的逼真度^[11]。

1.1 有限差分法正演

采用有限差分法进行正演,高斯-牛顿法进行反演。有限差分法是将偏微分方程离散化为线性代数方程组,从而通过数值方法求解。在二维情况下,电位 V 的泊松方程可离散化为:

$$\frac{V_{i+1,j} - 2V_{i,j} + V_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{V_{i,j+1} - 2V_{i,j} + V_{i,j-1}}{\Delta y^2} = \frac{I\delta_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (1)$$

式中: $V_{i,j}$ 为在网格点 (i,j) 处的电位值, V ; Δx 和 Δy 为网格的空间步长, m ; I 为电流强度, A ; δ_{ij} 为狄拉克函数; σ_{ij} 为对应点的电导率, S/m 。这种离散化方式将连续介质转化为离散网格,将偏微分方程转化为易于求解的代数方程组。

通过求解该方程组,可获得模型中各点的电位分布。为提高计算效率和精度,采用自适应网格细化技术,在电极分布密集的区域精细划分网格,将每个电极间距细分为 4 个网格单元。经过测试,结果表明:此网格划分能够在保证探测精度的同时有效提高计算效率。对于外围区域,网格逐步放大,增长因子设定为 1.3,进一步提升计算效率。该策略不仅显著降低了计算复杂度,还确保了电极附近区域的高精度计算。

1.2 高斯-牛顿法反演

在地球物理勘探中,反演通常被表述为最优化问题,目标是通过迭代调整模型参数向量 $\mathbf{m}$,使模型预测数据与观测数据之间的误差最小化。最终构建反演目标函数如下:

$$\phi(\mathbf{m}) = \phi_d(\mathbf{m}) + \beta\phi_m(\mathbf{m}) \quad (2)$$

式中: $\phi_d(\mathbf{m})$ 为数据拟合项; $\phi_m(\mathbf{m})$ 为模型项; β 为模型项的正则化参数,用于平衡数据拟合精度与模型复杂度。

数据拟合项衡量模型预测数据与观测数据之间的差异,其定义为^[12]:

$$\phi_d(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{W}_d F[\mathbf{m}] - d_{\text{obs}}\|_2^2 \quad (3)$$

式中: $\mathbf{W}_d$ 为数据加权矩阵,用于平衡不同数据点的权重; $F[\mathbf{m}]$ 为模型参数向量 $\mathbf{m}$ 的正演响应; d_{obs} 为观测数据。在数值模拟过程中,观测数据通常由正演计算得到的电压 d_{tw} 与模拟的测量噪声 ε 构成,其中, ε 为从正态分布中生成的随机噪声,标准差为 σ_1 ,即 $\varepsilon \sim N(0, \sigma_1)$,其中,噪声标准差 σ_1 通过以

下公式计算:

$$\sigma_1 = \sqrt{(\varepsilon_r \cdot |d_{\text{tw}}|)^2 + \eta^2} \quad (4)$$

式中: ε_r 为相对误差; η 为噪声水平。通过最小化数据拟合项,确保反演结果尽可能符合观测数据。

模型项表达式如下^[12]:

$$\phi_m(\mathbf{m}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{W}_m(\mathbf{m} - \mathbf{m}_{\text{ref}})\|_2^2 \quad (5)$$

式中: $\mathbf{W}_m$ 为模型加权矩阵; $\mathbf{m}_{\text{ref}}$ 为参考模型,包含地下结构的先验信息。模型正则项 $\beta\phi_m(\mathbf{m})$ 可以对模型参数进行约束,避免反演结果过于复杂或不稳定。

采用高斯-牛顿优化算法求取目标函数的极小值,每次优化迭代时,模型参数向量的更新公式为:

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k - (\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \beta \mathbf{W}_m^T \mathbf{W}_m)^{-1} \mathbf{J}^T (F[\mathbf{m}_k] - d_{\text{obs}}) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{J} = \partial F[\mathbf{m}] / \partial \mathbf{m}$ 为雅可比矩阵; $\mathbf{H} = \mathbf{J}^T \mathbf{J}$ 为海森矩阵的近似。文中采用共轭梯度法来近似求解每次迭代中的线性系统,从而提高处理大规模问题的效率。此外,用拟牛顿法算法近似计算海森矩阵的逆,进一步加速共轭梯度法的收敛过程^[13]。迭代直至模型参数的更新量满足预设的收敛条件为止。

2 道路塌陷隐患探测数值模拟

管道渗漏是道路塌陷最直接的原因,管道渗漏会引起管道周围出现富水、空洞,最终导致塌陷事故发生^[14]。富水、空洞及路基软化都会引起电阻率的明显变化,使其呈现低阻或高阻异常。因此,通过构建不同深度、不同尺度的高低阻模型来进行高密度电阻法在道路塌陷隐患探测中的分辨率测试。在装置选择方面,采用偶极-偶极阵列,相较于温纳阵列,其在横向分辨率上表现更为优异^[15],且在空洞勘测中具有更高适用性^[16]。

以二维道路模型为基础开展一系列的数值模拟,模型采用典型的多层结构^[17]。模型的宽度为 20 m,深度为 7 m,包含 3 层结构:第 1 层为路面层,厚度 0.2 m,电阻率为 $500 \Omega \cdot m$;第 2 层为路基层,厚度 0.4 m,电阻率为 $200 \Omega \cdot m$;第 3 层为底基层,电阻率为 $100 \Omega \cdot m$ 。通过设置不同的电阻率异常体来模拟空洞或富水病害。

2.1 不同电极间距下 1 m 异常体的分辨率测试

为测试不同类型、不同深度小规模异常体的探测能力,设计高低阻相间的阶梯状正方形电阻率(ρ)异常体,模型具体设计如图 1 所示,用于模拟不

同埋深的空洞或地下水侵蚀区域,其中,色标值表示对应的异常区域取对数后的电阻率值,具体参数见表1。

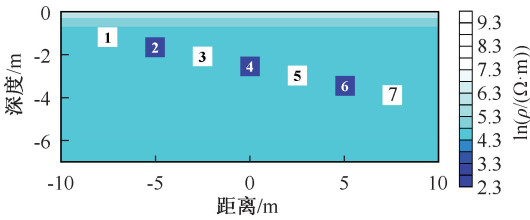


图1 分辨率测试模型
Fig.1 Resolution testing model

表1 地下异常体块属性

Table 1 Underground abnormal block properties				
块体	x 坐标/m	y 坐标/m	尺寸	$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$
1	(-8, -7)	(-0.6, -1.6)	1×1	10 000
2	(-5.5, -4.5)	(-1.1, -2.1)	1×1	10
3	(-3, -2)	(-1.6, -2.6)	1×1	10 000
4	(-0.5, 0.5)	(-2.1, -3.1)	1×1	10
5	(2, 3)	(-2.6, -3.6)	1×1	10 000
6	(4.5, 5.5)	(-3.1, -4.1)	1×1	10
7	(7, 8)	(-3.6, -4.6)	1×1	10 000

为确保高密度电阻法在探测路基中小尺度(1 m×1 m)病害时电极间距的合理选取,现采用数值模拟法研究其在不同间距条件下对高低阻异常的探测效果。针对图1中设计的模型,在表面布设40 m

的测线,测线内分别布设电极间距为0.2、0.3、0.5、1 m的电极,选用偶极-偶极装置类型采集数据。为保证勘探深度达到7 m,最大间隔系数 N 分别设定为60、50、40、20。通过有限差分法的正演计算后,添加5%的高斯随机噪声以模拟真实测量的电压数据。基于高斯-牛顿反演算法处理各布设条件下的电阻率反演结果,重构病害区域的电阻率分布。通过对比实际地电模型与不同电极间距反演结果,评估电极布设密度对隐蔽病害检测精度的影响。

测试结果如图2所示,在0.3 m的电极间距条件下,反演结果能够准确定位病害区域,病害形状和电阻率异常区域的范围清晰可见;0.5 m电极间距时,异常体位置相对原始模型发生偏差,但边界仍非常清晰,保持了较高的分辨率;随着电极间距增大至1 m,对于同样深度的异常体,其反演的电阻率值与设定的电性参数值相差较大,而深部的异常体由于分辨率限制,其位置也产生较大偏差。结果表明:密集电极布设可显著提高反演分辨率和病害检测精度,高密度阵列在隐蔽病害的精确定位中具有优势。然而,电极间距的一味减小并不意味着反演效果的提升(图2a),当电极间距缩小至0.2 m时,尽管浅部异常体的形态和位置在0.2 m间距下相较于0.3 m间距更加精确,但整体反演结果的分辨率并未显著提高。

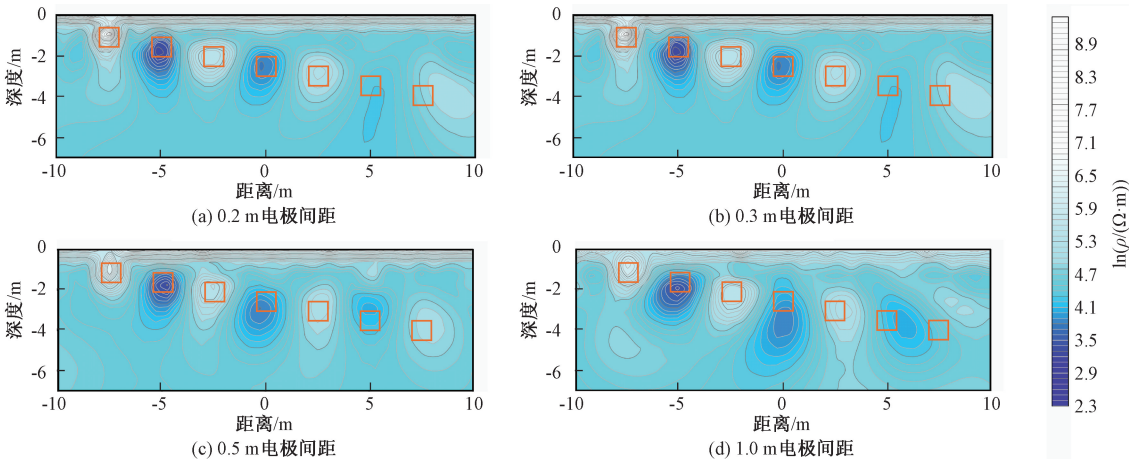


图2 不同间距布设的反演结果
Fig.2 Inversion results of different spacing arrangements

此外,通过计算不同电极距的反演结果与原始模型电阻率值之间的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE),来评估反演结果的拟合程度。不同电极间距的RMSE评估如图3所示,缩小电极间距可降低RMSE,但过度加密电极反而会导致RMSE增大。这可能是由于密集采样点更容易捕捉到背景

噪声,从而在反演过程中修正阶段引入较大误差。综上所述,综合考虑反演结果的分辨率、拟合误差和计算效率,0.5 m的电极间距足以分辨1 m尺度的异常体,并在RMSE评估中表现较优,计算效率也较为理想。具体应用中,仍应根据实际需求合理选择电极间距,通常建议为探测目标异常体尺度的1/2左右。

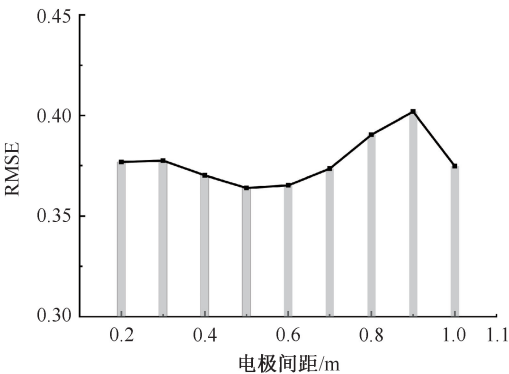


图 3 不同电极间距的 RMSE 评估

Fig. 3 RMSE evaluation of different electrode spacing

2.2 高阻异常体不同深度的分辨率测试

高阻异常体常与地下空洞相关,而富水区域随着水土流失会逐渐演化为空洞,进而对道路结构造成严重威胁。本文以高阻异常为例,进一步探究了高密度电阻法对不同埋深、不同尺度高阻异常体的探测能力。首先在道路层状结构基础上,增加 4 个不同尺度的正方形高阻异常体,边长分别为 1、2 和

3 m,模型设计如图 4 所示。然后基于此模型,在表面布设 40 m 的测线,电极间距为 0.5 m。选用偶极-偶极装置类型进行采集,并设定最大间隔系数分别为 40。将正演数据施加 5% 的高斯随机噪声后分别进行反演,结果如图 4 所示。由图 4 可知:1 m×1 m 高阻异常体在浅埋层时具有较高分辨率,异常体的位置和形态都能较好地分辨出来,但在埋深到 4 m 深度时异常体的形态变得模糊,但依然有所响应,当深度大于 4 m 时,异常体分辨能力极差。相比之下,2 m×2 m 和 3 m×3 m 的高阻异常体在相同深度下保持了较好的分辨能力,尤其是 3 m×3 m 尺度的异常体,其成像效果最为显著。然而,当与相邻高电阻异常体距离较近时,异常轮廓不清晰。所有的反演结果都显示,随着异常体深度的增加,异常体中心的异常幅值恢复能力越差。综上所述,高密度电阻法在高阻异常体的探测中表现出较优效果。在测线长度为 40 m、电极间距为 0.5 m 的布设条件下,探测埋深 4 m 的异常体时,能够有效分辨出 2 m×2 m 及以上尺度异常体的位置和形态。

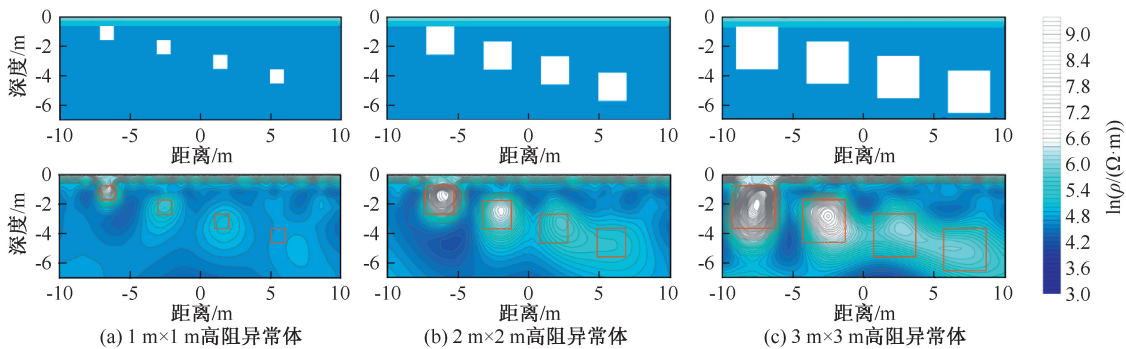


图 4 不同尺度和深度的高阻异常体模型反演结果

Fig. 4 Inversion results of high-resistance anomalous body models at different scales and depths

3 不同阶段道路塌陷隐患探测模型测试

鉴于管道破裂是造成道路塌陷的主要诱因,采用数值模拟方法模拟该工程背景下的塌陷发展过程,进而分析高密度电阻法探测不同阶段隐患的能力。根据戴自立等^[18]关于管道破裂导致道路塌陷的问题,针对不同渗水状态,分别建立相应的路基地电模型。通过改变地下介质的电性参数来表征塌陷隐患不同发展阶段,并开展数值模拟测试。模型中的道路结构参数与第 2.1 节所述一致。

设置供水管道的埋深为 3 m,半径为 1 m。在路基结构背景模型中,管道周围的土层保持正常状态,假设电阻率均匀分布,背景电阻率为 100 Ω·m,管

道内含水的电阻率为 10 Ω·m。第 1 个阶段,管道刚刚出现破损,水开始从破损点渗漏。随后,在正演地电模型中逐步引入管道破裂后的水体渗漏效应,模拟渗漏对周围介质电阻率的影响。第 2 个阶段,随着渗漏的持续,管道破损点周围的土体趋于饱和,此时,电阻率降低至 80 Ω·m。同时,缺陷上方形成椭圆形的砂水混合区,其电阻率设为 20 Ω·m。第 3 个阶段,水流持续冲刷土体并打破了砂水混合区上方的土层平衡,水流进一步冲刷土体并向两侧堆积,最终形成一个半椭圆形的冲蚀坑,设该区域的电阻率为 10 000 Ω·m。不同阶段的模型设置如图 5 所示,由图 5 可知:供水管道电阻率成像结果中呈现出连续性的大规模的低阻异常体,而对于微小水体

扩散的渗漏初始阶段,整体影响范围较小,尚未引起明显的电阻率变化。在土体流失并发生缓慢位移的阶段,可明显观察到渗漏区域的扩大,土体的饱和程度加深,砂水混合区的位置也较为明确。然而,周围疏松土体的表现仍不够明显,呈现出一种模糊的低

阻区域。在土体稳定冲刷的阶段,冲蚀坑的电阻率特征与周围低阻区域有显著差异,模型中空洞的位置和形态清晰地反映了出来。尤其是在空洞区域,电阻率成像的分辨率显著高于其他低阻区域,两侧的堆积土体也表现出与背景土体不同的低阻状态。

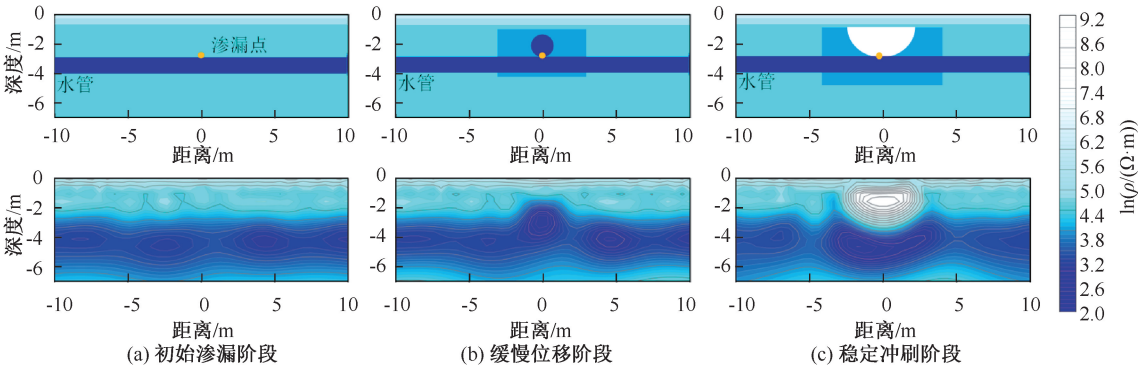


图5 水管破裂致塌不同阶段模型测试

Fig. 5 Model tests of different stages of road collapse caused by water pipe rupture

4 GMM 聚类在塌陷隐患探测中的应用

为进一步提高识别塌陷隐患的精度,本文引入 GMM 进行聚类分析。将 GMM 聚类应用于反演得到的电阻率数据,能够有效处理反演结果中存在的复杂性与不确定性。通过使用期望最大化 (Expectation-Maximization, EM) 算法来估计模型参数, GMM 可对每个数据点计算其属于某个特定聚类的概率^[19]。这种概率性描述使得 GMM 能够更好地划分不同地质状态,特别是在边界模糊的区域中表现出更高的精度。首先,预处理反演后的电阻率数据,消除测量噪声并转换为适合 GMM 输入的格式,进而提高模型训练的精度和稳定性。然后,使用贝叶斯信息准则 (Bayesian Information Criterion, BIC) 客观选择最佳聚类数目,以平衡模型复杂度与数据拟合程度,确保模型的有效性和简洁性。接着,应用 GMM 训练和预测预处理后的数据,使用期望最大化算法优化模型参数,获取每个数据点的聚类标签和聚类中心,从而深入理解地下介质的电性分布状态及其地质状态。最后,将 GMM 聚类结果映射至网格中,绘制聚类后的电阻率分布图,以便更直观地识别各个阶段地下介质状态,包括正常土层、饱和区域、砂水混合区以及冲蚀坑等不同类型的地质结构,有助于确定地下隐患的范围和性质。

将上文水管破裂致塌模型重新进行反演聚类,结果如图 6 所示,对于浅层高阻覆盖层,通过聚类分析,其边界和范围得到了更为清晰的刻画。聚类结果展示了管道破裂导致水渗漏所引发的地质变化过

程,特别是在砂水混合区和低阻水管区域,尽管受限于反演的分辨率,深层的效果不如浅层显著,但相较于反演结果,聚类方法能够更准确地描述水管区域的结构和形态。试验结果表明:结合反演模拟和 GMM 聚类分析的综合方法能够更精确地刻画地下介质状态的演化过程,从而为城市道路塌陷隐患探测和预警提供智能化支持。相比传统电阻率反演方法, GMM 聚类在复杂背景和噪声条件下表现出更高的敏感性和鲁棒性,有助于更有效地识别和防范潜在的工程安全隐患。

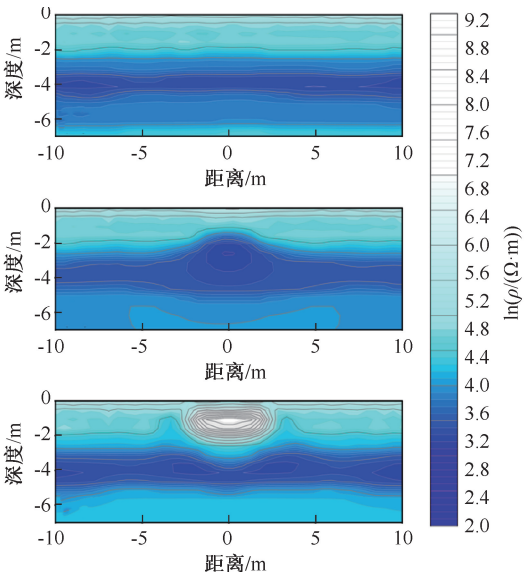


图6 水管破裂致塌模型反演 GMM 聚类剖面

Fig. 6 GMM inversion profiles of road collapse models caused by water pipe rupture

5 实际工程验证

某校内路段由于长期服役及负载作用,混凝土路面产生了多处裂缝(图 7a)。现场勘探结果表明:路面主要病害为一条长约 12 m 的纵向裂缝,裂缝两侧存在约 1 cm 的沉降。裂缝一端设置有井盖,且井盖周围的路面已出现脱空现象。尽管已进行修复,该位置仍存在约 1.5 cm 的沉降。为进一步分析裂缝下方路基的病害发展情况,采用直流电法仪进行无损检测。测线布设如图 7 b 所示,测线全长 12 m,电极间距为 0.5 m,共布设 24 个电极。由图 7b 可

知:高密度电阻法在实际应用于道路路基检测时,面临无法直接将电极接入土层的问题。由于土层上存在混凝土覆盖层,其电阻较高且硬度较大,电极接地需要借助导电介质。为此,将湿润土、黏土和盐水按照 1 : 1 : 1.2 的比例混合,制成导电介质。首先标定测线的电极位置,放置适量的导电介质后插入电极。随后倒入少量盐水以确保混凝土表面与导电介质接触良好。通过调节盐水的量,确保接地电阻控制在 20 kΩ 以内,从而为后续测量提供稳定的电接触条件。测量过程采用偶极装置,供电电压为 200 V,隔离系数为 7。

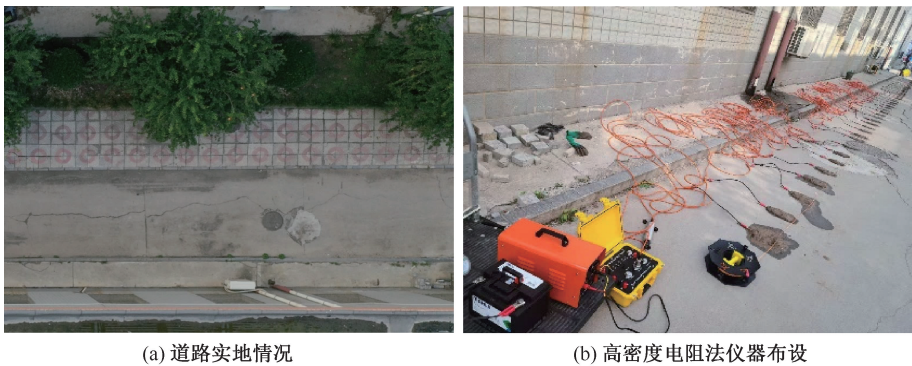


图 7 道路病害及高密度电阻法仪器布设现场

Fig. 7 Field conditions of road diseases and deployment of high-density resistivity equipment

试验共采集了 84 组实测数据,通过对测量得到的视电阻率数据进行高斯-牛顿反演计算,经过 20 次迭代,获得如图 8a 所示的地下电性结构图。经过 GMM 聚类处理后可使其中异常体的边界更清

晰(图 8b)。现场勘探发现,测线-4.5 和+4.5 m 处的纵向裂缝宽度明显大于其他区域,且在 2.5 m 处存在横向裂缝。

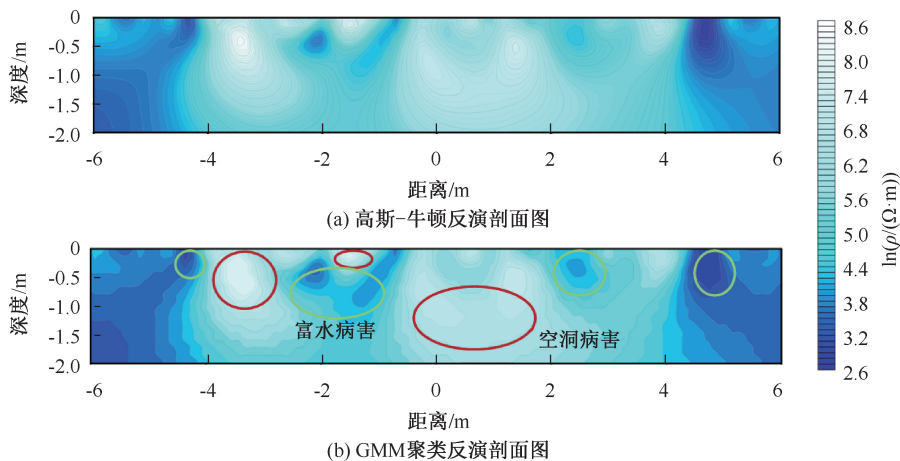


图 8 实测数据反演电阻率剖面图及聚类效果

Fig. 8 Inverted resistivity profile and clustering results from field measurement data

在反演聚类结果图中,这些位置对应的区域出现了显著的低阻异常,推测可能是由于道路表面混凝土裂缝导致地表水渗入下部路基土壤,从而导致

路基电阻率降低,呈现出与数值模拟中富水病害相似的特征。在-3 和 0~2 m 处的高阻区域恰好对应道路中出现的空洞病害,可能是由于水分渗入导致

路基结构遭到破坏,进而形成较大的空洞。位于-1.5 m处的高阻区域与道路井盖下方检修区域位置相吻合,井盖周围存在多条裂缝,且出现明显沉降。根据电阻率剖面图,土体的富水区域周围已发展出多个空洞,表明病害已经导致下方的路基处于极其危险的状态,极有可能引发路面塌陷事故。通过实际勘探数据与实测反演结果的对比验证,进一步证明了高密度电阻法在该应用背景下的有效性与适用性。

6 结 论

1) 在针对1 m小尺度隐蔽病害体的探测中,通过将电极间距从1 m缩小至0.5 m,能够显著提高对深层隐蔽病害体的探测能力。当电极间距进一步缩小至0.2 m时,探测分辨率的提升非常有限。而0.5 m的电极间距在保持较高分辨率的同时,能够

有效分辨1 m尺度的异常体,兼顾了探测精度与计算效率。因此,在实际应用时选择电极间距为探测目标异常体尺度的1/2左右更佳。

2) 对于高阻异常体的探测,结果表明:在测线长度为40 m、电极间距为0.5 m的布设条件下,高密度电阻法能够有效探测到埋深为4 m、尺度为1 m的异常体,并且能够准确反映浅层(0.6~3 m范围内)异常体的位置和形态。相比之下,尺度为2和3 m的异常体在6 m埋深下仍有反映,但成像边界出现一定的模糊现象。

3) 基于GMM的聚类分析法,能够有效提升对于浅层高阻覆盖层的边界刻画能力,并有效区分水管破损模型中的富水区域、正常路基及潜在空洞区域。实际工程勘探数据的反演结果进一步佐证了数值模拟结果的准确性,也验证了高密度电阻法在道路塌陷隐患探测中应用的有效性和适用性。

参 考 文 献

[1] 李泽霖. 城市道路路基缺陷雷达无损检测智能判别与评估方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2023.
LI Zelin. Intelligent identification and evaluation method for radar non destructive testing of urban road subgrade defects[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.

[2] 中规协地下管线专业委员会. 全国地下管线事故统计分析报告[R/OL]. (2020-12-04). <https://www.lingpiankeji.com/newsitem/278381568>.

[3] 王巍, 徐成龙, 曹兵, 等. 城市道路地下病害体多种检测方法综合应用探究[J]. 城市勘测, 2023(增1): 110-114.
WANG Wei, XU Chenglong, CAO Bing, et al. Comprehensive application of multiple detection methods for underground diseases on urban roads[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2023(S1):110-114.

[4] 黄斌. 高密度电法在某公路岩溶路基勘察中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2021(9):96-98.
HUANG Bin. Application of high-density electrical method in the investigation of karst roadbed on a certain highway[J]. New Technologies and New Products of China, 2021(9):96-98.

[5] 何胜, 董高峰, 张永兴, 等. 基于地质雷达技术的西宁市湿陷性黄土道路塌陷检测研究[J]. 物探化探计算技术, 2024,46(4):473-480.
HE Sheng, DONG Gaofeng, ZHANG Yongxing, et al. Research on collapse detection of collapsible loess road in Xining city based on GPR technology[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2024,46(4):473-480.

[6] 师学明, 黄崇钰, 王瑞, 等. 基于深度学习 SSD 算法的高密度电法智能解译方法技术研究[J]. 工程地球物理学报, 2024,21(1):1-11.
SHI Xueming, HUANG Chongyu, WANG Rui, et al. High density electrical apparent resistivity anomaly intelligent interpretation method based on SSD target detection algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024,21(1):1-11.

[7] GANIYU S A, OLADUNJOVE M A, OLOBADOLA M O, et al. Investigation of incessant road failure in parts of Abeokuta, Southwestern Nigeria using integrated geoelectric methods and soil analysis[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80;DOI: 10.1007/s12665-021-09446-4.

[8] XIE Jia, LIU Yang, LU Yulong, et al. Application of the high-density resistivity method in detecting a mined-out area of

a quarry in Xiangtan city, Hunan province[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: DOI: 10.3389/fenvs.2022.1068956.

[9] YIN Chunhung, HO Shuchou, CHIH Pinglin. Appraisal of the spatial resolution of 2D electrical resistivity tomography for geotechnical investigation[J]. *Applied Sciences*. 2020, 10: DOI:10.3390/app10124394.

[10] 方易小锁, 孟永东, 田斌, 等. 高密度电阻率法对不同电极排列的分辨率响应研究[J]. *地球物理学进展*, 2019, 34(6): 2 421–2 428.

FANG Yixiaosuo, MENG Yongdong, TIAN Bin, et al. Study on resolution response of different electrode arrangements by high density resistivity method[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(6): 2 421–2 428.

[11] 蒋亮, 邓居智, 陈辉, 等. 基于有限差分的 2.5 维直流电阻率法的改进[J]. *东华理工大学学报: 自然科学版*, 2013, 36(增 1): 68–72.

JIANG Liang, DENG Juzhi, CHEN Hui, et al. Improvement of 2.5D dc resistivity based on the finite difference method[J]. *Journal of East China Institute of Technology: Natural Science*, 2016, 36(S1): 68–72.

[12] COCKETT R, KANG S, HEAGY L J, et al. SimPEG: an open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications[J]. *Computers & Geosciences*. 2015, 85: 142–154.

[13] LINDSEY J H, ROWAN C, SEOGI K, et al. A framework for simulation and inversion in electromagnetics [J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 107: 1–19.

[14] 赵丽媛. 地下管线渗漏引发城市道路塌陷形成机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
ZHAO Liyuan. Study on the formation mechanism of urban roads collapse caused by underground pipeline leakage[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023.

[15] 赵荣春, 吕玉增, 张智, 等. 基于 2.5D 有限元的高密度电法不同装置勘探效果研究[J]. *煤田地质与勘探*, 2024, 52 (4): 128–136.

ZHAO Rongchun, LYU Yuzeng, ZHANG Zhi, et al. Exploring the detection performance of different array configurations for Multi-electrode resistivity method tomography using a 2.5D finite element method[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52 (4): 128–136.

[16] YONATAN G D, PING Yuchang, JORDI M P. Uncertainty of the 2D resistivity survey on the subsurface cavities[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(7): DOI: 10.3390/app11073143.

[17] 曾雄鹰, 王佳龙, 梁晓东, 等. 基于双频高动态探地雷达技术的道路地下病害检测研究[J]. *地球物理学进展*, 2022, 37(5): 2 225–2 232.

ZENG Xiongying, WANG Jialong, LIANG Xiaodong, et al. Research on road underground disease detection by dual-frequency GPR based on high-dynamic range technology[J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(5): 2 225–2 232.

[18] 戴自立, 彭凌豪, 包扬娟. 地下水力管线外渗引起的道路塌陷机理模型试验[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(10): 49–60.

DAI Zili, PENG Linghao, BAO Yangjuan. Model test investigation on the mechanism of ground collapse induced by underground hydraulic pipe leakage[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(10): 49–60.

[19] 余浩, 高镜涛, 潘险险, 等. 基于改进高斯混合模型的变电站负荷聚类算法[J]. *全球能源互联网*, 2024, 7(5): 591–601.

YU Hao, GAO Yixing, PAN Xianxian, et al. Substation load clustering algorithm based on improved Gaussian mixture model[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2024, 7(5): 591–601.



作者简介: 张艳辉 (1991—), 男, 河北邯郸人, 博士, 副教授, 主要从事电磁法正反演技术、地下病害检测等方面的研究。E-mail: global_em@163.com。