

城市地下管道物探中的多物理场耦合反演技术研究

刘光勇*

(福建泉州勘测设计院有限公司,福建泉州 362012)

摘要:城市地下管道探测精度不足制约着市政设施安全运维与地下空间开发。本文针对复杂城市环境下的多源干扰问题,提出融合电磁场、重力场及地震波场等多源物理场数据的耦合反演技术,通过建立多物理场联合约束模型与自适应正则化反演算法,突破传统单一物理场探测的局限性。工程验证表明,该方法可实现埋深识别精度 $\pm 0.1\text{m}$ 、水平定位误差 $\pm 0.2\text{m}$ 的技术指标,较传统单一物理场探测方法水平定位精度提升40%,在管径 $\leq 300\text{mm}$ 的非金属管道识别中表现出显著优势,且对5m范围内电力线缆干扰具有良好抑制效果。研究成果为高精度城市地下管线普查、老旧管网修复提供了新的技术路径,其多源数据融合框架对城市地下空间数字化治理具有推广价值。

关键词:城市地下管道物探;多物理场耦合;反演技术;探测精度

中图分类号:TU990.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)03-0052-8

0 引言

随着城市化进程的快速推进,城市地下管道系统愈发庞大复杂。地下管道作为城市的“生命线”,其准确探测对于城市规划、建设与维护至关重要^[1]。然而,当前城市地下管道探测面临诸多挑战,如复杂地质条件干扰、管道材质多样等,传统探测方法难以满足高精度探测需求。多物理场耦合反演技术整合多种物理场信息,有望突破这些局限^[2]。本文将深入研究该技术的原理,通过实际案例分析其在城市地下管道探测中的应用效果,以期在城市地下管道探测提供更可靠的技术支持。

1 多物理场耦合反演技术原理

1.1 多物理场基础理论

1.1.1 电磁类探测方法基本原理

频率域电磁感应法基于电磁感应现象,利用发射线圈向地下输1Hz-10kHz的交变电流产生一次磁场,地下金属管道等导体在交变磁场中产生涡流并形成二次磁场,接收线圈通过解析二次磁场的幅值和相位变化来确定地下导体的位置、

走向和埋深等空间分布参数。该方法在探测金属管道时灵敏度高,可通过选择特征频率(如V8系统的多频同步扫频技术)抑制干扰,但探测非金属管道时需依赖管道内部的金属构件或主动示踪标记,如内置电磁标识器。此外,还可依据偶极子理论推导出的水平管道感应磁场强度随距离衰减的规律进行埋深反演,即感应磁场强度与发射电流、真空磁导率、角频率、等效截面积等相关,且随管道到接收点距离的增加呈立方衰减,同时伴有相位变化^[3]。

1.1.2 重力勘探原理

重力勘探是基于地球及其附近物体的引力作用产生的一种物理场。在城市地下管道探测中,重力勘探的原理是利用不同物质密度的差异。地下管道与周围岩土体的密度不同,这种密度差异会导致局部重力异常。当土体结构中存在密度较大的管道(如金属管道)时,该区域的重力值会相对增大;而密度较小的管道(如塑料管道)则会使重力值相对减小。通过高精度的重力测量仪器,可以检测到这些微小的重力异常变化。对采集到的重力数据进行分析处理和反演计算,能够推断出地下管道的分布、埋深等信

息,为城市地下管道的探测提供依据^[4]。

1.1.3 地震勘探原理

地震波场原理基于地震波在不同介质中传播特性的差异。当人工激发地震波(如使用震源锤敲击地面)后,地震波会在地下介质中传播。地下管道与周围岩土体的弹性性质(如弹性模量、密度等)不同,会导致地震波传播速度、振幅和相位等发生变化。例如,地震波遇到管道时,会发生反射、折射和散射等现象。通过布置在地面的地震检波器接收这些变化后的地震波信号,对信号进行分析处理,可获取地下管道的位置、形状、埋深等信息。利用地震波场原理进行地下管道探测,能够有效探测较深位置的管道,为城市地下管道的全面探测提供重要手段^[5]。

1.2 多物理场耦合机制

1.2.1 物理场之间的相互作用

城市地下管道探测涉及的电磁、重力和地震波场之间存在复杂的物理关联性^[6]。金属管道因其高导电性和高密度特性,在不同场域中表现出显著响应:在电磁感应场中,交变磁场激发管道产生涡流并形成二次磁场;在重力场中,高密度金属管道与周围介质的密度差异会引发局部重力异常;在地震波场中,管道与土体的波阻抗差异导致地震波发生反射和散射。这种跨场域响应特性为多物理场联合反演提供了物性基础。

值得注意的是,各场域间存在间接耦合关系:地震波传播过程中产生的机械振动会改变介质孔隙结构,导致电导率和磁导率的动态变化,从而影响电磁感应信号的幅值与相位^[7];重力场差异引发的土体应力状态变化会改变地震波的传播路径和衰减特性^[8]。这些耦合效应虽未直接改变介质密度分布,但通过影响介质的弹性模量和泊松比,间接影响地震波场参数。

1.2.2 耦合模型的建立

为了描述多物理场(如电磁、重力和地震波)之间的相互作用及其与地下管道的响应关系,需要建立一个综合的耦合模型。该模型将各个物理场之间的相互作用和地下管道分布等因素纳入到一个统一的数学框架中,使得多物理场

数据能够通过反演过程准确地恢复地下管道的位置、形状和其他参数。

假设在研究区域,地下介质的特性可以用弹性模量、密度等宏观参数来描述。同时,在电磁场中,地下管道的存在会引起物体的磁场变化,这主要由材料的导电率、孔隙率等因素决定。重力场的变化则与管道的密度和分布有关,而地震波场的传播特性又与管道的弹性模量、密度以及介质的位移敏感性有关。因此,多物理场耦合模型可以分为以下几个部分:

(1)电磁场-重力场耦合:在电磁场中,地下管道的存在会导致地面的磁场发生变化。这种变化与地下介质的导电率和孔隙率有关。同时,重力场的测量结果也可以用来反映地下管道密度的分布。磁感应强度可以表示为:

$$B = \mu_0 \cdot (J + Z_1) \quad (1)$$

式中, B 为磁感应强度, J 为电流密度, Z_1 为磁感应强度, μ_0 为真空磁导率。

(2)地震波场-其他场耦合:地震波场传播速度与接触面之间的弹性模量和密度有关,公式为:

$$v = \sqrt{\frac{M_2}{\rho}} \quad (2)$$

式中, v 为地震波场传播速度, M_2 为剪切模量, ρ 为密度。

同时,地震波的衰减幅度也受到地下管道对介质位移引起的地震波屏蔽效应的影响,公式为:

$$D = \alpha \cdot d \quad (3)$$

式中, D 为地震波屏蔽值, α 为地震波的吸收系数, d 为地下管道的直径。耦合模型可以通过以上公式关联地震波场与地下管道分布。

(3)多场耦合方程组:为了综合考虑各个物理场之间的互动关系,可以构建以下方程组:

$$\begin{cases} \Delta B = k_1 \cdot \sigma + M_p \\ \Delta g = g_0 - (\rho_p/V) \\ v = v_0 \cdot (M/\rho)^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ΔB 为磁场变化量, Δg 为重力场变化, v_0 为初始地震波传播速度, k_1 为比例系数, σ 为

电导率, M_p 为极化磁矩, g_0 为初始重力值, ρ_p 为目标体密度, V 为体积, M 为模型定义量。

(4) 反演关系表达: 通过上述耦合方程组, 可以将多物理场数据与地下结构参数建立联系。例如, 利用电磁场变化率、重力场变化率和地震波传播速度之间的关系, 可以表达为:

$$M = f_1(\Delta g, v) \quad (5)$$

式中, f_1 表示为变量间的映射关系。

M 与式(4)定义中相同, 用于构建多物理场数据与地下结构参数的反演关系。从而得到一个综合的反演公式, 即通过测量的多物理场数据来估算地下管道的分布特性。

此外, 可借助有限元法(FEM)或边值正确定积分法(BIE)等高级建模方法, 改进模型数学表达形式, 更精准描述物理场相互作用及地下管道分布对参数的影响。

耦合模型是研究多物理场与地下结构关系、获取地下结构空间信息的关键和基础, 合理建模能将多维度数据转化为有意义的地下管道分布特性, 为城市地质灾害评估等提供科学依据。

1.3 反演算法

1.3.1 反演的基本概念

反演是指通过观察到的测量数据, 推断出潜在在未知的模型参数或结构特性的一种技术。反演过程通常涉及将实验观测值与理论模型之间建立数学关系, 并对该关系进行逆向求解。反演问题在科学实验、工程分析等领域具有广泛应用价值, 尤其是在处理不确定性和非线性系统时。

在城市地下管道探测中, 反演技术需要解决以下关键问题: 如何从有限、噪声污染的测量数据中提取信息; 如何建立多物理场之间的耦合关系; 以及如何有效地求解复杂的非线性方程组。这些问题使得传统的直接计算方法难以应对, 从而促发了基于反演算法的研究。

1.3.2 基于优化算法的反演方法

遗传算法是一种基于自然选择和遗传机制的优化算法, 广泛应用于参数估计、模式识别等领域。其核心思想是模拟生物进化过程: 通过选择、交叉和变异操作, 不断优化候选方案以适应

目标函数(如最小误差或最大信息量)要求, 具体目标函数如下所示:

$$\text{Objective Function} = \sum (w_i^{-2} (x_i - x_{\text{true},i})^2) \quad (6)$$

式中, w_i 为权重因素, x_i 表示某一位置的预测值, $x_{\text{true},i}$ 表示该位置的实际或真实值通过迭代优化过程, 逐步逼近最优参数估计, 最终得到地下管道分布的空间特性。这种基于遗传算法的反演方法具有全局搜索能力, 可有效处理复杂非线性系统。

1.3.3 多物理场耦合反演算法的实现

在城市地下管道探测中, 多物理场耦合反演算法的实现主要包含以下步骤: 首先, 对多物理场测量数据(如磁感应、重力变化和地震波速度)进行预处理^[9], 以去噪和滤波以提高信噪比。接着, 将处理后的数据编码为染色体, 作为反演优化的初始种群。然后, 利用遗传算法进行优化迭代: 选择适应度最高的个体; 执行交叉变异操作, 生成多样化的后代组合; 通过适应度函数评估候选方案, 最终逼近最佳参数配置。在实现过程中, 有限元法或边值正确定积分法等数学建模方法可用于描述各物理场间耦合作用及地下结构对参数的影响。该算法能够有效处理复杂非线性系统, 并通过多维度测量数据定位地下管道分布, 为城市地质评估和工程规划提供科学依据, 其优势在于提高识别精度和应对复杂的地质条件。

2 多物理场耦合反演技术在城市地下管道探测中的应用案例

2.1 案例区域概况

该研究区域位于我国东部二线城市的一个老城区, 面积约为 5km^2 , 地表主要覆盖厚度约 $1-2\text{m}$ 的第四纪松散堆积物, 以粉质黏土和粉土为主, 其压缩性中等, 承载力特征值约为 $100-120\text{kPa}$ 。地下共有砂质黏土层(厚度 $5-8\text{m}$)和粉细砂层(厚度 $10-15\text{m}$), 此外还存在一些小断裂构造对地下管道探测造成干扰, 同时地下水位较高, 一般地面以下 $1-2\text{m}$ 左右^[10]。

该区域地下管道分布复杂且密集,包括给水管道(铸铁管和塑料管,总长度 30km)以及燃气管道(钢管,总长度 20km)。其中部分管道因年代久远存在破损和堵塞问题,增加了探测难度。

2.2 数据采集与处理

2.2.1 多物理场数据采集设备及方法

在多物理场数据采集过程中,为获取全面且准确的地下管道信息,选用了不同类型的设备,分别对电磁、重力和地震波场数据进行采集,具体如下:

(1)电磁数据采集:采用加拿大凤凰公司生产的 V8 多功能电法仪,该仪器基于电磁感应原理,具备高分辨率和高灵敏度的特点,可精确测量地下电磁场变化。本次数据采集采用瞬变电磁法,其工作原理是通过发射机向地下发射不同频率(10Hz、100Hz、1000Hz 等)的交变电流,地下管道在交变电流产生的交变磁场中产生感应电流,进而产生二次磁场,接收机负责记录这些二次磁场的信号。在采集过程中,为确保数据的准确性和可靠性,按 5m 间距布置电极,以均匀覆盖探测区域。选择多个不同频率是为了获取不同深度和不同特性的地下信息。同时,对每个测量点进行多次重复测量,最后取平均值作为该点的测量结果,以此减少测量误差,提高数据

质量。

(2)重力数据采集:使用美国 Scintrex 公司生产的 CG-5 重力仪,具有高精度和高稳定性,基于弹簧弹性形变测量重力变化。采集前对仪器校准调试,按 10m 间距布置测量点,同时测量高程数据以消除地形影响,并定期重复测量以确保数据一致性^[11]。

(3)地震波数据采集:选用美国 Geometrics 公司生产的 StrataView-3D 地震仪,具备高采样率和高分辨率。采用共偏移距反射法,按 3m 间距布置检波器,震源锤激发地震波,记录反射、折射和散射波信号。每个震源点多次激发并叠加处理数据,同时设置速度检波器测量地震波传播速度。

通过以上设备和方法的综合运用,全面、准确地采集了研究区域内的多物理场数据,为后续数据处理和反演分析提供了可靠基础。

2.2.2 数据预处理

在获取多物理场原始数据后,由于测量环境等因素影响,数据中存在噪声干扰,需进行预处理以提高数据质量^[12],数据预处理流程如图 1 所示。

对于电磁数据,采用带通滤波器去除高频和低频噪声,保留有效频段内的信号,同时利用滑动平均滤波法平滑数据曲线,减少随机噪声影响。

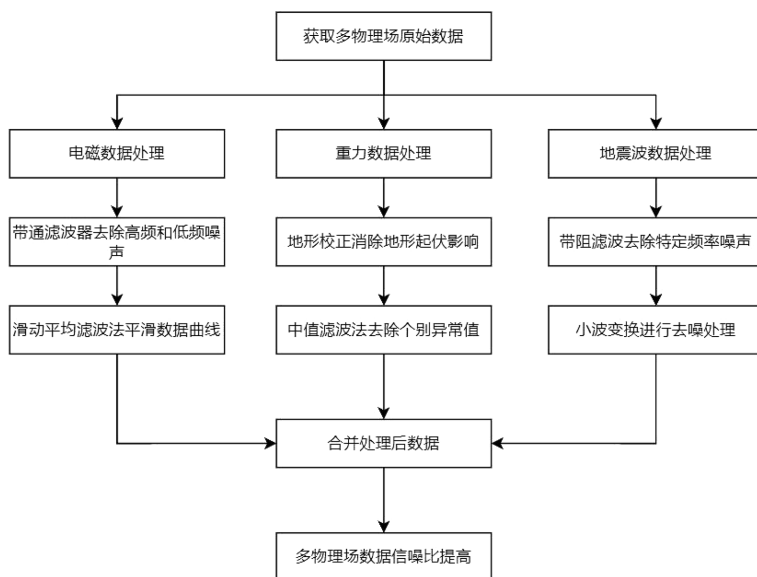


图 1 数据预处理流程

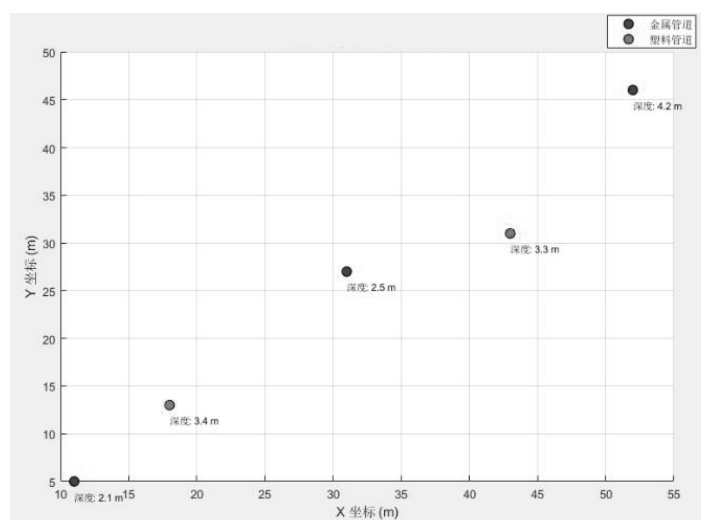


图 2 地下管道的多物理耦合反演结果可视化展示

重力数据处理时,首先通过地形校正消除地形起伏对重力测量的影响,再采用中值滤波法去除个别异常值,保证重力数据的准确性^[13]。

地震波数据则先进行带阻滤波,去除环境振动等产生的特定频率噪声,然后使用小波变换进行去噪处理,分解信号到不同尺度,去除噪声所在的高频分量,保留有效地震波信号。

经过上述去噪、滤波等预处理操作,多物理场数据的信噪比得到显著提高,为后续多物理场耦合反演分析奠定良好基础。

2.3 多物理场耦合反演结果分析

2.3.1 反演结果的可视化展示

在多物理场耦合反演技术的应用中,反演结果的可视化是理解地下管道分布和验证技术有效性的重要环节。在该案例中,多物理场耦合反演结果的可视化展示是通过 MATLAB 编程实现的,旨在直观呈现地下管道的位置、走向和埋深信息,如图 2 所示。

通过绘制管道的位置、类型和埋深信息,帮助研究人员和工程技术人员快速评估地下管道的实际分布情况,从而为城市地下空间的规划、建设和维护提供科学依据。

2.3.2 与传统探测方法结果对比

为了验证多物理场耦合反演技术在城市地下管道探测中的优势,本文将多物理场耦合反演

技术的结果与传统探测方法的结果进行了对比分析^[14]。

在对比分析中,多物理场耦合反演技术通过整合电磁、重力、地震波等多种物理场信息,并利用耦合模型与反演算法来获取地下管道的综合信息,从而实现更全面和精准的探测效果。而传统探测方法则以电磁感应法为主,主要依赖单一的电磁信号进行探测。在对比指标方面,重点关注探测精度、分辨率、对复杂管道结构的识别能力以及抗干扰能力^[15],数据对比如表 1、图 3 所示。

为验证多物理场耦合反演技术的有效性,选取同一试验区分别采用多物理场耦合技术与传统单一物理场方法(电磁感应法、重力法、地震波法)进行对比,并通过开挖验证(验证管道占比 80%)与第三方检测数据(激光扫描)确认真值。对比指标涵盖探测精度、分辨率、复杂结构识别能力及抗干扰性^[15],结果如表 1、图 3 所示。

由表 1 可知,多物理场耦合反演技术通过综合分析多种物理场信息,在探测精度、分辨率、复杂管道结构识别能力和抗干扰能力方面均优于传统探测方法。它能显著降低管道埋深和水平位置的测量误差,识别更小直径的管道,准确区分交叉或重叠的复杂管道结构,并对金属和非金属管道均表现出良好的探测效果^[16],克服了传

表 1 多物理场耦合技术与传统方法性能对比

评价指标	多物理场耦合技术	传统电磁感应法	重力法	地震波法
埋深误差(金属)	±0.1m(开挖验证)	±0.3m(开挖验证)	±1.2m	±0.8m
水平位置误差	±0.2m(激光扫描)	±0.5m(激光扫描)	±2.5m	±1.0m
分辨率	可识别直径≥0.1m管道(图 3a)	可识别直径≥0.3m管道	仅适用于直径≥2m目标体	可识别直径≥0.5m管道
复杂结构识别能力	可区分交叉/重叠管道(图 3b)	交叉管道误判率>60%	不适用	需多角度震源叠加
抗干扰能力	金属/非金属管道均适用	易受地下金属杂物干扰	受地形噪声影响显著	受环境振动噪声限制
典型应用场景	综合密度、电导率、波速差异	高导电金属管道探测	大型地下空洞探测	深层地质构造成像

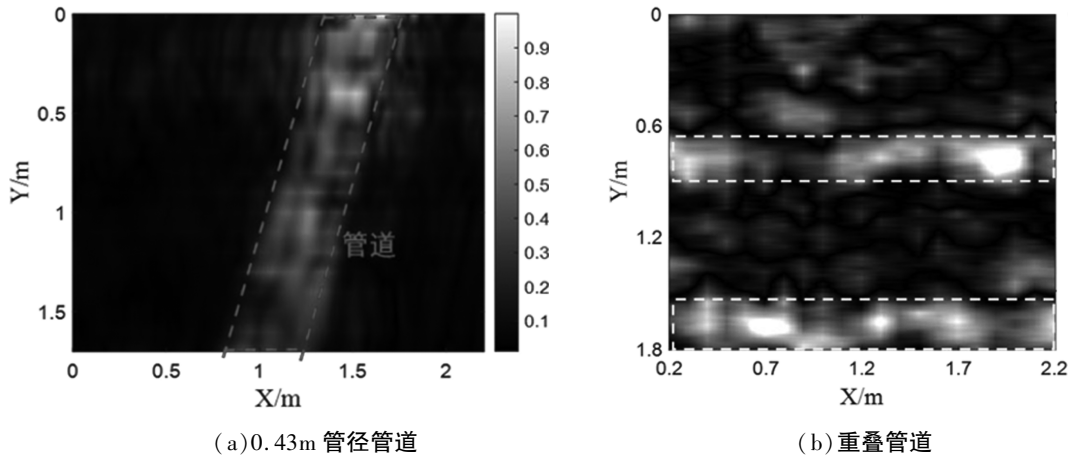


图 3 案例采集结果图

统方法在非金属管道探测中的不足。

通过对比分析可以看出,多物理场耦合反演技术在探测精度、分辨率、复杂管道结构识别能力和抗干扰能力等方面均优于传统探测方法。该技术能够为城市地下管道探测提供更可靠、准确的信息,尤其适用于复杂地质条件和多种材质管道的探测。

3 结语

本文通过对多物理场耦合反演技术的深入研究,验证了其在城市地下管道探测中的显著优势。该技术通过整合电磁、重力和地震波等多种物理场信息,显著提高了探测精度和分辨率,能够准确识别复杂管道结构,并有效应对不同材质

管道的探测需求。与传统探测方法相比,多物理场耦合反演技术在探测精度、抗干扰能力和适用范围等方面表现出色,尤其在复杂地质条件下更具优势。研究表明,该技术为城市地下管道的精准探测提供了可靠的技术支持,为城市规划、建设和维护提供了重要的科学依据,具有广阔的应用前景。未来,随着技术的进一步发展和优化,多物理场耦合反演技术有望在更多领域发挥重要作用。

参考文献(References):

- [1] 李骄阳. 地下管线物探原理及探测方法分析[J]. 江西建材, 2022, 42(11): 43-44+48.
- [2] 刘岩. 地下管线探测中疑难管线探测研究[J]. 西

- 部资源, 2020, 17(06): 158 - 160.
- [3] 翁敏. 近岸海底管线探测方法与应用分析[J]. 珠江水运, 2024, 32(22): 115 - 117.
- [4] 路海滨. 物探技术在煤矿地质探测中的应用研究[J]. 能源与节能, 2024, 29(04): 261 - 264.
- [5] 张伊飞. 龙岗岩溶场区地震波数值模拟及层析成像研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [6] Gallardo L A, Meju M A. Structure - coupled multiphysics imaging in geophysical sciences. *Reviews of Geophysics*, 2021, 49(01): 100 - 120.
- [7] 程丰浩, 孙春耕, 刘靖, 等. 伺服阀控气动系统的反演自适应控制研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(12): 232 - 239.
- [8] 谢一凡, 吴吉春, 王益, 叶逾, 谢春红, 鲁春辉. 一种模拟节点达西流速的多尺度有限元 - 有限元模型[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(01): 107 - 114.
- [9] 谢一凡, 吴吉春, 薛禹群, 谢春红. 一种模拟节点达西渗透流速的三次样条多尺度有限单元法[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(09): 1727 - 1732.
- [10] 李守巨, 上官子昌, 刘迎曦, 于贺. 地下水渗流模型参数识别的模拟退火算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(A01): 5031 - 5036.
- [11] 周凌峰, 王媛, 冯迪. 求解非均质渗流场的改进数值流形方法[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(07): 1288 - 1296.
- [12] 赵文凤, 谢一凡, 吴吉春. 一种模拟节点达西渗透流速的双重网格多尺度有限单元法[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(08): 1474 - 1481.
- [13] 姚磊华. 遗传算法和高斯牛顿法联合反演地下水渗流模型参数[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(08): 885 - 890.
- [14] 唐明健, 唐和生. 基于物理信息的深度学习求解矩形薄板力学正反问题[J]. 计算力学学报, 2022, 39(01): 120 - 128.
- [15] 兰鹏, 李海潮, 叶新宇, 张升, 盛岱超. PINNs 算法及其在岩土工程中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(03): 586 - 592.
- [16] 陆至彬, 瞿景辉, 刘桦, 何畅, 张冰剑, 陈清林. 基于物理信息神经网络的传热过程物理场代理模型的构建[J]. 化工学报, 2021, 72(03): 1496 - 1503.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 刘光勇, 1989 年生, 男, 江西赣州人, 福建泉州勘测设计院有限公司, 工程师, 主要研究方向为工程测量。Email: chanchu1927@163.com

Research on Multi – Physics Field Coupling Inversion Technique in the Geophysical Exploration of Urban Underground Pipeline

LIU Guangyong *

(Fujian Quanzhou Survey and Design Institute Co. , Ltd, Quanzhou 362012)

Abstract: The lack of detection accuracy of urban underground pipelines restricts the safe operation and maintenance of municipal facilities and the development of underground space. Aiming at the problem of multi-source interference in complex urban environment, this paper proposes a coupled inversion technology that integrates the data of multiple physical fields, such as electromagnetic field, gravitational field and seismic wave field. By establishing a joint constraint model of multiple physical fields and an adaptive regularization inversion algorithm, the limitation of traditional single physical field detection is solved. Engineering verification shows that this method can achieve the technical indicators of buried depth identification accuracy of ± 0.1 m and horizontal positioning error of ± 0.2 m, which improves the horizontal positioning accuracy by 40%, compared with the traditional single physical field detection method. It has significant advantages in the identification of non-metal pipes with diameter ≤ 300 mm, and has better suppression effect on power cable interference within 5 m. The research results provide a new technical path for high-precision urban underground pipeline survey and old pipe network repair, and its multi-source data fusion framework could promote the digital governance of urban underground space.

Key words: urban underground pipeline geophysical exploration; multi-physical field coupling; inversion technology; detection accuracy