

城市区域复杂条件下地下管线探测技术研究

文 / 徐尧楠 芜湖市勘察测绘设计研究院有限责任公司

摘要：城市区域复杂条件下地下管线探测的难点主要集中在三个方面：一是对非金属管线进行探测时，相较于金属管线探测的难度较大；二是密集管线区分的难度较大，且存在信号干扰；三是深埋与非开挖管线探测方面存在瓶颈。为有效应对上述探测难点，本文从地球物理综合探测技术、非物理探测技术创新应用、智能探测系统与算法优化3个方面着手，探讨了城市区域复杂条件下地下管线探测技术的实践应用，供参考。

关键词：地下管线探测；城市区域；复杂条件；物理综合探测

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.22.034

引言

城市地下管线是保障城市运行的“生命线”，其探测工作正面临日益严峻的技术挑战。随着非金属材质管线的普及、密集区管线交叉重叠现象加剧，以及深埋管线与非开挖技术的广泛应用，传统电磁探测方法已难以满足精准定位需求。复杂电磁干扰、信号衰减及无出露点等难题，对探测技术的精度与可靠性提出了更高要求，亟需通过技术创新提升城市地下空间管理的安全保障能力。

一、城市区域复杂条件下地下管线探测难点分析

(一) 非金属管线探测难题

以PE燃气管、PVC给排水管、混凝土排污管为代表的非金属管线成为城市地下管网中的一大亮点，对传统的非磁性探测手段带来了挑战^[1]。根本上的矛盾是探测介质特性与物理原理的冲突，特别是对以电磁感应法为代表的一类间接探测手段而言，依靠介质的导电性或导磁性产生可检测到的二次场，而多数非金属物质如高电阻率、无磁性的绝缘介质缺乏有效电磁响应，仪器检测不到信号，造成“漏探”。如图1所示，为某地下管线分布情况。从中可以看到，不同颜色代表的不同类型管线排布情况错综复杂，给探测工作带来了很大挑战。

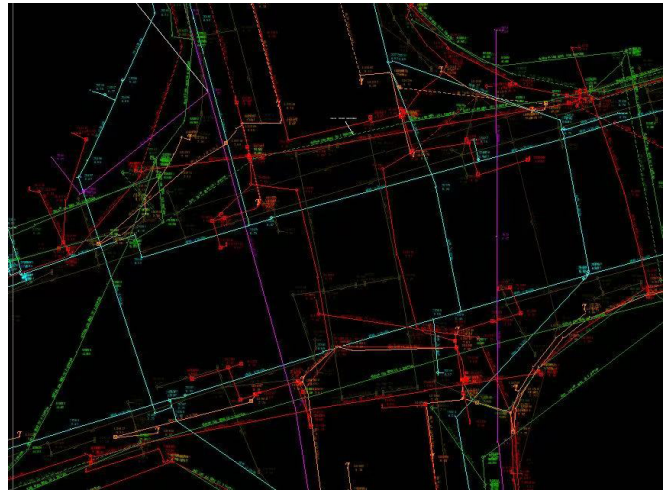


图1 某地地下管线排布情况

可以采用介电常数差为基础的地质雷达法，但由于管线口径与埋深、周边土壤含水状况的影响，对于小口径或深埋管线，双曲线反射信号微小、容易湮没于杂波中；对于饱和水土层，电磁波能量的衰减严重，有效探测深度大受影响，造成对非金属管线探测很大程度上依赖于已敷设金属示踪线或探测雷达的运气，缺乏可靠的、普适的、有效的确定性方法^[2]。因此不同探测手段的非金属管线探测如表1所示，都存在明显的不足。这些不足都极大地制约了管网信息完整性与准确性。

表1 非金属管线主要探测方法及其局限性

| 探测方法 | 基本原理 | 主要局限性 |
|-------|------------------------|------------------------------|
| 电磁感应法 | 利用电磁感应原理，探测导体产生的二次场 | 对非金属绝缘体完全无效，无法产生感应信号 |
| 地质雷达法 | 发射高频电磁波，通过分析反射波波形与时差成像 | 受土质含水量影响大；深部信号衰减严重；小口径管线反射微弱 |
| 声波振动法 | 向管道施加特定频率声波，在地表接收振动信号 | 信号随深度和距离衰减快；易受环境噪声干扰；定位精度较低 |
| 示踪线法 | 预埋金属线，对其进行电磁法探测 | 依赖前期规划预埋；老旧管道无此设施；线缆断裂则失效 |

(二) 密集管线区分与信号干扰

在城市核心区、道路交叉口等区域，地下空间资源紧张，各类管线常以多层、并行、交叉的方式密集分布，形成复杂的“管线簇”^[3]。在此条件下，探测工作面临严重的信号叠加与干扰问题。对于金属管线，当采用主动源法向特定管线施加信号时，交变磁场会在邻近的并行金属管线上诱发感应电流（即“互感”），使其也携

带相同频率的信号并辐射电磁场。多个相同频率的信号源叠加，导致接收机无法区分目标管线与干扰管线，产生定位偏差甚至误判。另一方面，密集交叉的管线网络会对探测信号形成屏蔽效应。浅层管线就像一层“金属屏蔽网”，会吸收和反射大部分电磁波能量，使得投向深层管线的信号强度大幅减弱，深层管线的响应信号因而难以被有效识别和提取^[4]。此外，城市环境

本身就是一个巨大的干扰源，来自高压线、轨道交通、通信基站的环境电磁噪声，以及地下建筑结构（如桩基、人防工程），都会淹没本就微弱的有效信号，极大降

低了信噪比和探测结果的可靠性。如表 2 所示，密集管线区内多种干扰类型共同作用，极大降低了探测结果的可信度和精度。

表 2 密集管线区主要干扰类型及影响

| 干扰类型 | 产生原因 | 对探测的主要影响 |
|--------|-------------------|-----------------------------|
| 互感干扰 | 相邻金属管线间电磁感应 | 产生多个同频信号源，导致定位偏差、深度误判和管线误识别 |
| 屏蔽干扰 | 上层金属管线网络对信号的吸收与反射 | 阻挡信号传递至深层，掩盖深层管线响应，造成漏探 |
| 环境电磁噪声 | 电力电缆、轨道交通、通信设施等 | 形成高强度背景噪声，降低信噪比，淹没目标管线的微弱信号 |
| 结构体干扰 | 地下桩基、人防工程、金属护坡等 | 产生强烈且不规则的非管线异常响应，形成假目标，误导解释 |

（三）深埋与非开挖管线探测瓶颈

针对城市地下管线日益复杂的情况，随着城市地下空间的掘进及非开挖施工（例如顶管、定向钻）的广泛应用，深埋管线（指埋深大于 5 米）的探测以及非开挖敷设管线的探测正成为行业的技术难题和瓶颈^[5]。深埋管线首先遇到的是衰减问题。无论是主动源的电磁波、电磁感应信号，还是被动源的二次场，其强度与距离的平方成反比。非开挖管线的被动源（例如水平定向钻敷设的燃气、通信管道）是在没有开挖开敞沟槽情况下敷设管道（甚至管道始终全敷设在硬化路面下方），一般

全线无管线检查井、阀门等出露口，因而发射机的信号很难直接耦合在管线上，所以主动源法直接“无处可施”。非开挖管线对于惯性导航、探地雷达也存在着各种问题：惯性定位通常要求在管线敷设（尤其非开挖敷设管道）过程中安装并嵌入专用探测单元，后续敷设过程中难以直接补测跟踪，更无法实现敷设后的跟踪；地质雷达对目标体进行扫描时也局限于一定深度，因此难以看清非开挖管线的全路径轨迹，导致无法连续追踪，也难以保证跟踪精度。深埋及非开挖管线探测面临的问题以及难度见表 3 所示。

表 3 深埋与非开挖管线探测技术瓶颈

| 技术瓶颈 | 问题本质 | 导致的后果 |
|--------|--------------------|------------------------------|
| 信号急剧衰减 | 场强与传播距离的平方或立方成反比 | 深部有效信号微弱，信噪比极低，无法被仪器有效识别与定位 |
| 无信号施加点 | 非开挖管线缺乏露出地表的特征点 | 无法使用直接法连接发射机，主动源探测技术失效 |
| 轨迹追踪中断 | 现有技术探测深度有限或无法全程覆盖 | 无法连续、完整地获取非开挖管线的三维轨迹，存在轨迹空白段 |
| 深度验证困难 | 超出常规探杆触探和开挖验证的合理范围 | 探测成果缺乏可靠的校核手段，深度精度无法保证 |

二、针对性地下管线探测技术及应用策略

（一）地球物理综合探测技术

面对城市复杂条件下非金属管线识别难、密集管线干扰大、深埋管线信号弱等核心挑战，单一地球物理方法往往难以取得可靠成果，必须采用多方法协同的综合探测技术体系。其中，地质雷达法作为探测非金属管线的关键技术，其理论基础为电磁波在介质中的传播特性，通过分析反射信号的时延与波形特征来反演地下目标体的空间位置与性质。该方法的核心参数计算依赖于电磁波在介质中的传播速度，其计算公式如下：

$$v = c / \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

式（1）中， v 表示电磁波在介质中的传播速度（单位： m/ns ）； c 为真空中的光速，取值为 $0.3m/ns$ ； ϵ_r 为介质的相对介电常数，是一个无量纲数，其取值取决于地下介质的类型与含水量。式（1）的运用原理是，通过已知介质参数计算波速，进而根据雷达图像中反射波的双程走时准确计算目标体深度。具体实施时，首先通过已知深度目标体（如埋深的金属板）或钻孔标定法获取现场介质的实际波速，然后在雷达剖面中识别出管线产生的双曲线反射同相轴，精确读取其双程走时 t （单位： ns ），最终利用深度计算公式 $h = (v \times t) / 2$ 求得管线的埋藏深度（其中， h 表示深度（单位： m ）； t 为时间（单位： ns ））。为便于理解，现通过一组典型介质条件下

的计算示例演示该过程：

（1）步骤一：确定介质波速。假设通过现场标定获得三种常见介质的介电常数：干燥沙土（ $\epsilon_1=4$ ）、潮湿黏土（ $\epsilon_2=16$ ）、饱和含水层（ $\epsilon_3=36$ ）。分别计算其波速：①干燥沙土： $0.3/\sqrt{4} = 0.15m/ns$ ；②潮湿黏土： $0.3/\sqrt{16} = 0.075m/ns$ ；③饱和含水层： $0.3/\sqrt{36} = 0.05m/ns$ 。

（2）步骤二：计算管线深度。在雷达图像上测得某管线的反射双程走时 $t=10ns$ ，分别计算其在上述三种介质中的埋深：①干燥沙土： $h = (0.15 \times 10) / 2 = 0.75m$ ；②潮湿黏土： $h = (0.075 \times 10) / 2 = 0.375m$ ；③饱和含水层： $h = (0.05 \times 10) / 2 = 0.25m$ 。将上述计算过程与结果系统整理后得到表 4。从中可以看到，不同介质中基于地质雷达法的管线深度计算结果清晰表明，介电常数的变化对电磁波速和深度解释结果影响极为显著。对表 4 的数据分析可知，在相同的反射时间下，介质含水量增加导致其介电常数增大，电磁波传播速度随之急剧降低，最终计算得到的管线深度值也显著减小。这从原理上解释了地质雷达在饱和含水层中有效探测深度大幅降低的原因，同时也凸显了现场准确标定介质波速对于提升非金属管线探测精度的极端重要性。若直接采用默认波速或经验值而忽略介质电性的空间变异性，必将引入巨大的深度解释误差。因此，在实际工程应用中，必须

将地质雷达与高密度电阻率法、电磁感应法等其他物探方法相结合，通过综合比对与相互验证，才能在城市复

杂环境中实现对地下管线，尤其是非金属管线的精准、可靠探测。

表4 不同介质条件下地质雷达深度计算结果

| 介质类型 | 相对介电常数 (ϵ_r) | 波速 v (m/ns) | 双程走时 t (ns) | 计算深度 h (m) |
|-------|-------------------------|---------------|---------------|--------------|
| 干燥沙土 | 4 | 0.15 | 10 | 0.75 |
| 潮湿黏土 | 16 | 0.075 | 10 | 0.375 |
| 饱和含水层 | 36 | 0.05 | 10 | 0.25 |

(二) 非物理探测技术创新应用

当地球物理方法因介质复杂性或信号衰减而面临瓶颈时，不依赖于岩土介质物理参数的非物理探测技术提供了全新的解决方案。这类技术通过直接与管线本身发生作用或利用其内部空间，有效规避了地下复杂环境的干扰，尤其适用于深埋、非开挖和非金属管线的精确定位与轨迹测绘。其中，基于惯性测量单元 (IMU) 的陀螺仪定位技术代表了该领域的尖端发展方向，其通过内置的传感器直接记录管线的空间姿态变化，从而实现无需地表探测的精准三维轨迹复原。该技术的核心在于通过积分运算处理惯性数据，其位置解算的误差传播模型可用以下公式进行表征：

$$P_e = P_0 + \int (v + \delta v) dt + \int \int (a + \delta a) dt^2 \quad (2)$$

式 (2) 中， P_e 表示 t 时刻的估算位置 (单位：m)； P_0 表示初始已知位置 (单位：m)； v 表示载体的真实速度 (单位：m/s)； δv 表示速度测量误差 (单位：m/s)； a 表示载体的真实加速度 (单位：m/s²)； δa 表示加速度测量误差 (单位：m/s²)。式 (2) 的原理是，通过对加速度进行一次和二次积分来推算位置，但其测量误差也会随时间不断累积，导致定位精度逐渐降低。误差 δv 和 δa 主要来源于 IMU 中陀螺仪和加速度计的零偏稳定性、标度因数误差等。在实际应用中，必须定期通过已知点进行零偏校正，以抑制误差的发散。为量化分析不同精度等级的惯性单元在长距离探测中的误差累积情况，假设探测载体在管线内以 0.5m/s 的恒定速度运动，分别计算其运行 300 米后，在三种典型精度 IMU 下的定位误差：

(1) 步骤一：确定误差参数。选取三种 IMU 模型：消费级 ($\delta a = 100\mu g$, $\delta v = 0.01m/s$)、战术级 ($\delta a = 10\mu g$, $\delta v = 0.001m/s$)、导航级 ($\delta a = 1\mu g$, $\delta v = 0.0001m/s$)。运动时间 $t = 300m / 0.5m/s = 600s$ 。

(2) 步骤二：计算位置误差。忽略高阶小量，位置误差主要由速度误差和加速度误差的积分项构成，可简化为： $P_{error} \approx \delta v \times t + 0.5 \times \delta a \times t^2$

①消费级 IMU: $P_{error} \approx 0.01 \times 600 + 0.5 \times 100e^{-6} \times 9.8 \times 600^2 \approx 6 + 88.2 = 94.2m$;

②战术级 IMU: $P_{error} \approx 0.001 \times 600 + 0.5 \times 10e^{-6} \times 9.8 \times 600^2 \approx 0.6 + 8.82 = 9.42m$;

③导航级 IMU: $P_{error} \approx 0.0001 \times 600 + 0.5 \times 1e^{-6} \times 9.8 \times 600^2 \approx 0.06 + 0.882 = 0.942m$ 。

根据上述结果可知，不同精度惯性测量单元 (IMU) 在 600 秒运行时间后的累计定位误差计算结果清晰表明，传感器精度对轨迹复原的准确性起着决定性作用。

(三) 智能探测算法优化

针对城市地下管线探测中信号微弱、干扰复杂及多源数据融合的难题，智能算法优化聚焦于提升数据信噪比与解译精度。核心优化原理在于利用深度神经网络强大的非线性映射能力，将原始低信噪比数据映射到高信噪比特征空间，实现端到端的信号增强与目标识别。优化细节在于：在编码器-解码器结构中嵌入卷积块注意力模块 (CBAM)，该模块通过通道注意力与空间注意力两级机制，使网络优先聚焦于包含管线双曲线特征的通道与空间区域。通道注意力通过全局平均池化与全连接层学习各特征通道的权重，抑制无关背景噪声通道；空间注意力则通过卷积层学习一个空间权重掩膜，强化目标区域的响应。经此优化，模型在信噪比低于 -5dB 的雷达图像中，对管线目标的交并比 (IoU) 仍能保持在 0.85 以上。

结语

综上所述，面对城市复杂环境的地下管线探测的技术难题是不识别非金属材质、管线密集区干扰和深埋管线定位困难三大难题。而本文提出采用“地球物理综合探测+非物理技术开发+智能算法优化”的地球物理综合探测模式，能极大解决此难题，提高探测的准确度和准确性，并将应用于城市的地下空间数字管理。

参考文献

[1] 沈旭甜, 张娟. 复杂环境下地下综合管线探测技术方法研究 [J]. 建设科技, 2025, (15): 41-43+47.
 [2] 蔡为. 复杂条件下城市地下管线探测与关键技术分析 [J]. 科技资讯, 2025, (13): 177-179.
 [3] 施浩. 市政道路地下管线探测与力学特性数值模拟研究 [J]. 现代工程科技, 2025, 4(11): 109-112.
 [4] 张永术. 分析复杂条件下地下金属管线探测技术的优势及应用 [J]. 世界有色金属, 2022, (03): 182-184.
 [5] 狄红伟, 张赞萍, 王小杰. 复杂地质条件下地下金属管线探测技术应用研究 [J]. 世界有色金属, 2021, (16): 208-209.