

复杂条件下的城市地下管线测量方法探析

付 勇

(山东建勘集团有限公司, 山东 济南 250031)

摘 要 随着地下空间开发利用日益密集, 地下管线网络越发复杂, 管线探测工作面临诸多技术挑战。传统探测方法在复杂城市环境下存在精度不高、效率低下等问题, 制约了城市精细化管理和安全施工的发展。本文探讨了复杂条件下城市地下管线测量的难点和问题, 分析了多频电磁探测、地质雷达穿透成像和无损检测声波定位等先进技术在管线探测中的应用, 并结合实际案例阐述了综合测量方法的实施效果, 以为相关人员提供借鉴。

关键词 城市地下管线; 多频电磁探测技术; 地质雷达穿透成像技术; 无损检测声波定位技术; 惯性陀螺定位技术

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.19.016

0 引言

城市地下管线是现代城市基础设施的重要组成部分, 涵盖供水、排水、燃气、电力和通信等多种类型。然而, 由于管线的多样性和埋藏较深, 探测工作面临着巨大的挑战。传统的探测方法已无法满足复杂条件下的城市地下管线测量需求。因此, 研究高效、可靠的地下管线探测方法尤为重要, 对城市的发展具有重要的现实意义。

1 城市地下管线概述

城市地下管线是指城市范围内供水、排水、燃气、热力、电力、通信、广播电视、工业等管线及其附属设施, 是保障城市运行的重要基础设施和“生命线”。随着城市化进程的加速推进, 城市地下管线网络日益复杂, 管线种类不断增多, 空间分布愈发密集。城市地下管线按照功能可分为给水管线、排水管线、燃气管线、热力管线、电力管线、通信管线等多种类型, 各类管线在材质、埋深、走向等方面存在显著差异^[1]。

2 复杂条件下的城市地下管线测量难点

2.1 管线类型识别精度低

城市地下管线种类繁多且材质多样化, 包括钢铁、铸铁、混凝土、塑料、陶瓷等不同材质, 导致各类探测技术对不同管线的灵敏度存在显著差异。电磁探测技术在金属管线探测中表现优异, 探测信号可清晰反映金属管线的位置和走向, 但在非金属管线如PVC水管、陶瓷污水管的探测中则效果欠佳, 反馈信号微弱难以捕捉, 使技术人员难以准确识别管线类型和走向。老旧城区中的管线经过长期使用, 金属管材可能出现氧化、腐蚀或钝化现象, 改变了原有的电磁响应特性,

导致探测设备接收到的信号与预期标准信号存在偏差, 增加了管线类型判定的复杂性。

2.2 深层管线定位精度差

地下管线埋设深度增加导致探测信号在传播过程中能量损耗加剧, 电磁波或雷达波在土壤介质中衰减明显, 接收到的反射信号强度与地表探测设备的距离呈指数关系递减, 使深度超过3 m的管线探测信号微弱且失真严重。城市地层结构复杂多变, 深层管线周围可能存在砂石层、粘土层或填埋层等不同介质, 电磁波或雷达波在这些介质交界处发生反射、折射或散射现象, 改变了信号传播路径, 造成探测数据解译过程中深度计算偏差大。城市区域深层管线探测常受到上层管线的屏蔽效应影响, 浅层金属管线对电磁波形成较强反射或吸收, 减弱了探测信号继续向下传播的能量, 导致深层管线信号被掩盖而无法准确捕捉^[2]。

2.3 复杂环境信号衰减大

现代城市电磁环境复杂, 高压输电线路、变电站、通信基站等设施产生的强电磁场与管线探测使用的电磁信号频段重叠, 产生干扰信号掩盖了管线反射的有效信号, 降低了信噪比并增加了数据解译的困难度。城市地下水文环境变化明显, 不同区域土壤含水率差异大, 高含水率区域的土壤电导率显著增高, 探测电磁波能量被迅速吸收导致有效探测深度减小, 而地下水位的季节性变化也使同一区域在不同时期的探测结果存在较大差异。同时, 城市中的工业活动频繁, 许多工厂在生产过程中, 通常在一定区域会产生各种电磁噪声和辐射。而这些电磁干扰源在一定范围内会扰乱管线探测信号频率, 使得原本微弱的管线反射信号更加难以捕捉。此外, 城市中诸如地铁沿线、大型交

通枢纽等特殊区域, 这些区域的电磁环境条件恶劣, 并且电磁产生的频率用常规方法不能进行干预控制。在多种信号相互干扰、交织影响下, 加剧了探测信号的衰减能力受到影响继而导致探测能力下降的现象, 给管线探测工作带来了一定的影响。

2.4 地下障碍物干扰测量

由于城市地下环境复杂性较高, 存在着较多的非管线类障碍物, 如废弃建筑基础、地下桩基、混凝土块等, 其与地下管线的材质电磁特性存在明显不同, 在测量过程中严重干扰了测量信号。例如: 金属障碍物和管线形成类似的电磁响应, 造成测量仪器发生误判现象, 将障碍物错误识别为管线或者管线定位时存在位置偏差。同时, 由于城市内部地下障碍物分布存在不规则性特点, 物理性质无法精准测量确定, 对地下管线测量过程中探测信号遇到障碍物时存在反射、折射、散射的情况, 信号传播路径变得更加复杂, 也使得信号解析难度升高。例如: 地质雷达在探测过程中, 如果探测位置存在障碍物, 回波信号和管线回波信号会相互重叠, 无法精准判定管线的位置以及形态。

2.5 数据处理与分析难度大

由于城市地下空间复杂性比较高, 并且地下管线测量时产生的数据体量巨大, 包含测量仪器原始数据、中间处理数据以及最终成果数据。例如: 三维激光扫描测量后获取大量点云数据, 其数据体量大, 包含大量的冗余信息以及噪声。因为城市地下管线测量环境复杂度高, 存在多方面因素干扰造成数据质量难以有效提升。例如: 地下空间存在较多的电磁干扰性因素, 管线探测仪器获取数据时容易存在偏差; 地质条件复杂的区域内地质雷达数据极易出现信号失真的现象。在地下管线测量过程中, 不同测量数据的格式、特点有所差异, 需结合实际情况采取适宜的处理以及分析方法才能深度挖掘数据价值, 从而提高复杂条件下城市地下管线测量精度。例如: 采用地质雷达技术探测地下管线时, 经过滤波、增益调整、反演的多样化处理方式能够精准提取管线信息; 三维激光扫描数据处理系统中, 利用点云配准、分类、建模的功能提高数据利用价值。上述数据的提取和分析能够保证数据充分利用, 但对测量人员的专业技能和素质也有更高要求, 需熟练掌握各种软件操作技巧, 但也使得数据分析与处理的过程中存在较高难度。

3 复杂条件下的地下管线测量技术

3.1 多频电磁探测技术

多频电磁探测技术基于电磁感应原理探测地下管线, 其核心优势在于利用不同频率电磁波在各类地下介

质中的传播特性差异实现精确定位。低频电磁波具备较强的地层穿透能力, 可深入 4~5 m 范围内探测大型金属管道, 在城市主干供水网和燃气主管探测中表现出色, 即使在干扰较大的环境下依然能获取清晰的目标信号; 而中频电磁波则在管线密集区域发挥重要作用, 其适中的穿透深度和较高的空间分辨率使探测设备能够有效区分相互平行或交叉的多条管线, 减少虚假信号的干扰, 为复杂路段下的管网探测提供准确数据^[3]。

3.2 地质雷达穿透成像技术

地质雷达穿透成像技术采用高频电磁脉冲探测地下结构, 其工作原理是向地下发射短脉冲电磁波, 当电磁波遇到电性质差异较大的介质界面时产生反射, 接收天线捕获这些反射信号并转化为直观的地下剖面图像。探测管线时选择合适的天线频率至关重要, 中高频天线能提供厘米级的空间分辨率, 适合对浅层小口径管线进行精细探测, 图像上可清晰分辨出管线的精确位置与走向, 甚至能识别出管线周围的局部异常结构; 而中低频天线虽然分辨率略低, 但探测深度可达 3~4 m, 在深层大型管道探测中具有明显优势。

3.3 无损检测声波定位技术

无损检测声波定位技术利用声波在地下传播特性识别管线位置, 区别于电磁探测方法, 其对金属和非金属管线均有良好的探测效果。管道泄漏声波探测利用高灵敏度地表声学传感器阵列捕获管道泄漏点产生的特征声学信号, 分析声波在地层中的传播规律和能量衰减分布, 精确确定泄漏源位置, 该方法在复杂电磁环境中探测供水管网和燃气管道具有独特优势, 能有效避开高压电缆和变电设施产生的电磁干扰。而针对主动式声波探测方式而言, 则采用可控震源产生特定频率的声学信号, 通过这些信号在管道与周围土体之间形成明显的声阻抗差异, 导致管线位置处地表振动呈现特征分布。且在信号处理的过程中, 利用信号系统通过分析振动幅度和相位关系, 能够在一定的范围内确定管线位置和埋深, 这种方法对深埋管线和特殊材质管道的探测效果显著, 能够在传统电磁探测技术难以应用的场景下提供可靠结果^[4]。

3.4 惯性陀螺定位技术

在复杂条件下城市地下管线测量过程中, 采用惯性陀螺定位技术能提高地下管线的定位测量精度。它以惯性测量作为基本原理, 通过陀螺仪、加速度计等惯性敏感元件精准测量载体的角速度和加速度, 再利用积分运算的方式得出载体的具体位置、速度以及姿态信息。复杂条件下城市地下管线测量时将惯性测量

设备安装测量工具内,随着探索工具逐步向下移动,能够精准标记管线的位置,掌握管线的轨迹和方向变化情况。

惯性陀螺定位技术应用价值较高,测量精度高,其主要优势是不依赖外部信号,在地下信号屏蔽严重、电磁干扰较强的复杂条件下依然能够保证测量数据具备较高的精度。例如:对于城市核心地带或者地下设施分布密集度较高的区域,其他测量技术因为信号干扰性比较强,无法达到精准测量的效果。而在该条件下,使用惯性陀螺定位技术能够连续、精准地获取管线三维坐标信息。同时,它还能够精准完成数据采样和处理,即使地下管线出现微小变化也能够快速分析数据,使得地下管线测量的精确性和效率得到全面提升。

3.5 示踪线探测技术

由于城市化发展速度加快,城市管线敷设量逐步增加,为提高管线的运维管理水平,通常在管线敷设过程中同时埋设示踪线。城市地下管线中示踪线主要由金属导线或者带有特殊标记的线缆组合形成。对于城市地下空间的管线测量来说,利用示踪线探测仪发射特定频率信号,示踪线接收信号后产生响应,探测仪利用接收响应信号的方式确定示踪线位置,进而间接得出地下管线的走向以及位置信息。示踪线探测技术操作简单、成本低,能够快速确定管线的大致位置。针对某些地下管线运行时间长、资料缺失的情况,示踪线探测技术能够提高探测的精度和效率。同时,示踪线探测技术应用过程中不受地下介质电性、磁性方面因素影响,即使复杂电磁干扰较强的条件下依然能够满足探测精度需求。但是示踪线的完好性、连通性对探测结果存在直接影响,所以应用过程中应确保示踪线的质量合格。

4 城市地下管线测量案例分析

某特大型城市中心区地下管线勘测项目采用多种探测技术开展综合测量,选取面积约2.5 km²的复杂城区进行详细探测。该区域包含商业中心、老旧小区区和新建高层建筑区,地下管线密集且类型多样。勘测团队采用多频电磁探测、地质雷达和声波定位三种技术对相同区域进行测量,记录各技术的探测效果如表1所示。

数据分析表明,多频电磁探测技术在金属管线探测方面表现最佳,平均定位精度达到17.6 cm,探测覆盖率高达93.8%,但在非金属管线探测方面精度下降至48.6 cm,覆盖率仅为42.3%。地质雷达技术展现出较

为均衡的探测能力,对金属和非金属管线的探测覆盖率分别为86.2%和83.5%,在非金属管线探测方面优于电磁技术。声波定位技术在深层管线探测方面具有明显优势,最大探测深度可达4.5 m,超过其他两种技术,但总体定位精度较低,平均为35~37 cm。三种技术在不同管线类型和埋设环境中各具优势,单一技术难以满足复杂城区全面探测需求,综合应用多种技术互补是提高探测精度和覆盖率的关键^[5]。

表1 不同探测技术在城市复杂环境下的管线探测效果比较

探测技术类型	管线类别	平均定位精度 (cm)	探测覆盖率 (%)	最大探测深度 (m)
多频电磁探测	金属管线	17.6	93.8	3.5
	非金属管线	48.6	42.3	1.8
地质雷达探测	金属管线	24.8	86.2	2.6
	非金属管线	27.2	83.5	3.0
声波定位技术	金属管线	36.6	72.2	4.2
	非金属管线	35.2	76.8	4.5

5 结束语

复杂条件下城市地下管线测量面临管线类型识别精度低、深层管线定位精度差、复杂环境信号衰减大等多重挑战。多频电磁探测技术在金属管线探测方面具有明显优势,地质雷达穿透成像技术对各类管线探测均衡性较好,无损检测声波定位技术在特殊环境下展现独特价值。单一技术难以满足全面探测需求,综合应用多种测量技术互为补充才能有效提高探测精度和覆盖率。多技术联合探测策略能够有效克服复杂环境干扰,适应不同管线材质和埋设深度的探测要求。

参考文献:

- [1] 柏春强.复杂条件下城市地下管线测量方法研究[J].智能城市,2024,10(06):126-128.
- [2] 章瑞,苏俊良.复杂条件下的城市地下管线测量方法[J].价值工程,2024,43(05):153-155.
- [3] 唐吉林.城市地下管线测绘测量技术方法[J].城市建设理论研究(电子版),2024(03):175-177.
- [4] 徐晓,杨建峰,王晓杰.复杂条件下的城市地下管线测量方法探讨[J].科学技术创新,2022(10):41-44.
- [5] 李远文.数字化技术在城市地下管线测量中的应用[J].智能城市,2021,07(23):71-72.