

城市地下管线的探测关键技术探究

徐 伟

广州国测规划信息技术有限公司 广东 广州 510630

摘 要: 城市地下管线作为城市运行的“生命线”，其精准探测至关重要。本文深入探究了城市地下管线探测的关键技术，包括非开挖探测技术（如电磁法与地质雷达联合、惯性陀螺仪定位等）、智能化探测技术（如无人机搭载传感器、机器人爬行器等）及多源数据融合技术。同时，分析了当前技术面临的非金属管线探测精度不足、深层管线定位困难等挑战，并展望了量子传感、5G+AI实时监测等未来发展方向。

关键词: 城市地下管线；探测；关键技术

引言：城市地下管线是保障城市正常运转的“隐形脉络”，涵盖给水、排水、燃气等诸多关键类型。但随着城市快速发展，地下管线布局愈发复杂，传统探测技术受材质差异、埋深变化、环境干扰等因素制约，精度与效率受限。精准探测地下管线位置、走向及状态，对城市规划、建设与维护意义重大。故而，深入探究城市地下管线探测关键技术，成为当下亟待解决的重要课题。

1 城市地下管线探测技术基础

1.1 地下管线分类与探测需求

(1) 管线类型：城市地下管线是城市运行的“生命线”，主要涵盖给水、排水、燃气、电力、通信等核心类型。其中，给水管线用于输送生活及生产用水，多采用钢管、球墨铸铁管等材质；排水管线分为雨水管和污水管，常见材质为混凝土管、HDPE管；燃气管线输送天然气、液化气等易燃易爆气体，以钢管为主；电力管线负责电能传输，包含电缆沟、直埋电缆等形式；通信管线承载信息传输功能，多为光缆、电缆套管铺设。(2) 探测难点：地下管线探测受多重因素制约，难点突出。一是材质差异大，金属管线与非金属管线（如混凝土、PVC管）的物理特性差异显著，导致探测信号响应不同；二是埋深变化大，城市不同区域管线埋深从几十厘米到数米不等，深层管线信号衰减严重；三是复杂环境干扰，城市密集建筑群、交通繁忙路段、地下构筑物及其他管线的相互叠加，会对探测信号产生严重干扰，影响探测精度^[1]。

1.2 传统探测技术原理与局限性

(1) 电磁感应法：核心原理是利用金属管线在交变磁场中的感应电流产生二次磁场，通过接收二次磁场信号确定管线位置和走向。该技术操作简便、成本较低，但仅适用于金属管线，对非金属管线无效，且在高压电力线、大型金属构筑物附近抗干扰能力弱，易出现信号失

真。(2) 地质雷达法：基于电磁波传播原理，向地下发射高频电磁波，电磁波在不同介质界面产生反射信号，通过分析反射信号的传播时间和幅度确定管线位置。其优势是分辨率高，可识别非金属管线，但设备购置及使用成本高，探测结果易受地下含水量、土壤介质均匀性影响，在复杂地质条件下精度下降。(3) 井下探测法：通过打开地下管线检查井盖，采用人工目视观察、测量工具检测等方式获取管线信息。该技术直观准确，但依赖人工操作，效率极低，且受检查井盖分布限制，无法覆盖全部管线，同时在井下作业存在缺氧、有毒气体等安全隐患。

2 城市地下管线关键探测技术深度解析

2.1 非开挖探测技术

(1) 电磁法与地质雷达的联合应用：针对单一技术局限性，将电磁法的金属管线强识别能力与地质雷达的非金属适配优势结合，通过协同数据采集实现优势互补。作业时先以电磁法快速锁定金属管线大致范围，再用地质雷达对该区域及周边进行精细化扫描，精准区分管线及周边构筑物。该联合模式有效提升复杂环境下的探测精度，尤其适用于管线密集区域，解决了单一技术易漏测、误测的问题。(2) 惯性陀螺仪定位技术：依托惯性测量单元(IMU)感知载体姿态变化，通过积分运算获取管线三维坐标，核心优势为无源定位，无需依赖外部信号。在隧道、盾构管廊等封闭空间或信号屏蔽区域，可精准追踪管线走向与埋深，且不受地下介质、电磁干扰影响。其定位精度可达厘米级，为深埋、复杂走向管线探测提供了可靠方案，弥补了传统有源探测技术的场景短板。(3) 声波反射法：利用声波在不同介质中传播速度与反射特性的差异，向地下发射特定频率声波，通过接收管线界面的反射信号定位管线位置。该技术专为非金属管线（如PVC管、混凝土管）设计，克服了电磁

法对非金属管线无效的缺陷。作业时受土壤含水量影响较小,操作简便、成本适中,适合在小区、市政道路等非金属管线密集区域推广应用^[2]。

2.2 智能化探测技术

(1) 无人机搭载传感器探测:通过无人机平台搭载高分辨率电磁传感器、激光雷达等设备,实现大面积区域的快速扫描探测。其优势在于突破地面交通、建筑物遮挡限制,作业效率较传统地面探测提升5-10倍,可快速完成城市新区、郊区等大范围管线普查。结合GPS定位技术,能同步实现探测数据的坐标匹配,为后续数据建模奠定基础,大幅缩短普查周期。(2) 机器人爬行器:采用模块化设计,搭载高清摄像头、超声探伤传感器等设备,可在管线内部自主或遥控爬行。针对给水管、燃气管等狭窄管线空间,能近距离获取管壁内腐蚀、破损、接口渗漏等精细化缺陷信息,同时规避人工井下作业的安全风险。部分高端机型具备自主避障功能,可适应弯曲管线走向,实现全断面检测,为管线维护提供精准的缺陷定位数据^[3]。(3) 人工智能辅助识别:基于深度学习算法构建管线图像识别模型,对探测获取的雷达图像、摄像头影像等数据进行自动化解析。通过大量管线样本训练,模型可精准识别管线类型、走向、缺陷位置及周边障碍物,替代传统人工判读模式。该技术大幅提升数据处理效率,减少人为判读误差,尤其适用于大规模探测数据的快速筛查,为探测结果的精准性提供算法支撑。

2.3 多源数据融合技术

(1) GIS+BIM集成建模:整合地理信息系统(GIS)的空间定位能力与建筑信息模型(BIM)的三维可视化优势,将探测获取的管线数据与地形、建筑物、地下构筑物等空间信息融合,构建全要素三维管线模型。模型可直观呈现管线空间分布、埋深、材质等属性,支持管线碰撞检测、维护路径规划等功能,实现管线的动态管理与全生命周期管控,为城市管线规划、改造提供可视化决策依据。(2) 多传感器数据融合算法:通过卡尔曼滤波、贝叶斯估计等算法,对电磁、雷达、声波等多类传感器获取的探测数据进行冗余校正与互补融合。该算法可过滤环境干扰导致的异常数据,强化有效信号特征,显著提升探测结果的鲁棒性与可靠性。在复杂地质环境或管线密集区域,能有效解决单一传感器数据失真问题,为高精度管线探测提供核心算法保障。

3 城市地下管线关键技术实施流程与优化策略

3.1 探测前准备阶段

(1) 资料收集与现场踏勘:资料收集需全面整合城

市管线历史档案、规划图纸、竣工资料及GIS/BIM基础数据,重点梳理管线类型、材质、埋深、建设年代等核心信息,明确历史探测存在的盲区与争议区域。现场踏勘采用“全域排查+重点标注”模式,实地核查地形地貌、地面构筑物、地下管线井盖分布情况,同步记录周边高压电力设施、大型金属构件等干扰源位置,形成踏勘报告并标注风险区域,为后续探测方案设计提供基础依据。通过资料与现场信息的双向核验,可有效规避因历史数据缺失或地形变化导致的探测偏差。(2) 探测方案设计与设备选型:方案设计需结合探测区域管线特征、环境条件及精度要求,划分探测单元并明确探测方法—管线密集区采用电磁法与地质雷达联合探测,非金属管线区域重点部署声波反射设备,封闭空间管线优先选用惯性陀螺仪定位技术。设备选型遵循“适配性+冗余性”原则,根据探测方法匹配高精度传感器、数据采集终端等设备,同时配备备用设备及校准工具;针对复杂环境,额外配置电磁屏蔽装置、噪声抑制设备等辅助器材。方案需同步制定质量控制标准、安全作业规范及应急处置预案,确保探测过程有序可控^[4]。

3.2 探测实施阶段

(1) 分区探测与数据采集规范:实施过程严格遵循“分区推进、逐点核查”流程,按照预设探测单元划分作业区域,采用网格化扫描方式开展探测,避免漏测。数据采集需统一规范操作标准,明确传感器参数设置、探测点间距、数据记录格式等要求—地下管线定位点间距不超过5米,复杂区域加密至2-3米,同步记录探测时间、坐标、环境参数等辅助信息。采集过程中需实时核查数据质量,对信号微弱、数据异常的区域及时重复探测,确保原始数据的完整性与准确性。分区探测完成后,进行跨区域数据衔接核验,避免区域间数据断层或冲突。(2) 复杂环境下的抗干扰措施:针对电磁干扰严重区域,采用电磁屏蔽罩包裹传感器探头,调整探测频率避开干扰频段,同时利用多传感器数据互补削弱干扰影响;在交通繁忙路段或施工区域,采用便携式设备开展分段探测,避开振动干扰时段,必要时设置临时防护设施保障作业安全。对于地下水位较高、土壤介质不均匀的区域,提前对探测区域进行排水处理,选用适配高含水率环境的探测设备,通过增加信号发射功率提升探测信号穿透力。通过“物理屏蔽+参数优化+环境预处理”的组合措施,有效降低复杂环境对探测精度的影响。

3.3 数据处理与成果输出

(1) 数据清洗与异常值剔除:采用“自动筛选+人工复核”的双流程数据清洗模式,先通过预设阈值过滤明

显异常数据(如超出合理埋深范围、信号强度突变的数据),再利用统计分析、聚类算法识别潜在异常值。对疑似异常数据,结合现场探测记录、踏勘资料进行追溯核查,确认是干扰导致的异常则予以剔除,若为真实管线数据则保留并补充标注。清洗完成后,对数据进行标准化处理,统一坐标体系与数据格式,形成规范的数据集,为后续建模分析奠定基础^[5]。(2)三维管线建模与碰撞分析:基于清洗后的标准化数据,依托GIS+BIM集成平台构建三维管线模型,精准还原管线的空间位置、走向、埋深及附属设施信息,实现管线全要素可视化呈现。模型构建完成后,开展碰撞分析,通过算法检测管线与地下构筑物、其他管线、地面建筑物基础等的空间冲突,标注碰撞位置、冲突类型及风险等级。针对发现的碰撞隐患,输出详细的分析报告并提出优化整改建议,为管线改造、维护决策提供数据支撑。同时,模型支持动态更新,可对接后续探测数据实现管线全生命周期的动态管理。

4 城市地下管线探测技术挑战与发展趋势

4.1 当前技术瓶颈

(1)非金属管线探测精度不足:现有声波反射法、地质雷达法等针对非金属管线的探测技术,易受土壤介质、含水量等环境因素影响,信号衰减快且反射特征模糊,难以精准定位管线埋深、走向及缺陷,尤其对薄壁PVC管、老旧混凝土管的探测误差较大,漏测、误测问题突出。(2)深层管线定位困难:随着城市地下空间开发加深,埋深超5米的深层管线日益增多。传统探测技术的信号穿透力有限,深层管线反射信号微弱,叠加浅层管线及地下构筑物的干扰,难以有效区分目标管线信号,导致深层管线定位精度大幅下降,无法满足城市深层地下空间规划建设需求。(3)数据安全与共享机制缺失:管线数据涉及城市公共安全核心信息,当前缺乏统一的数据加密与安全管理标准,存在数据泄露风险;同时,各部门、各单位的管线数据格式不统一,未建立跨领域共享平台,导致数据孤岛现象严重,无法实现探测数据的高效复用与协同管理。

4.2 未来发展方向

(1)量子传感技术与地下空间“透明化”:量子传感技术凭借超高灵敏度优势,可突破传统传感器的探测极限,精准捕捉深层、非金属管线的微弱信号,结合三维建模技术推动地下空间“透明化”建设,实现全类型、全深度管线的精准探测与可视化呈现。(2)5G+AI的实时监测与预警系统:依托5G高速传输能力,构建覆盖全域的管线实时监测网络,结合AI算法对探测数据进行实时分析,精准识别管线泄漏、破损等隐患并自动预警,实现管线故障的早发现、早处置,提升城市管线运维的智能化水平。(3)标准化探测流程与行业规范完善:推动制定统一的探测技术标准、数据格式标准及质量控制规范,规范探测设备选型、操作流程及成果验收环节;建立跨部门数据共享平台,明确数据共享权限与安全责任,打破数据壁垒,提升管线探测与管理的整体效率。

结束语

城市地下管线探测关键技术的探究,是保障城市安全、高效运行的重要基石。通过对传统技术的改进与新型技术的研发,我们不断突破探测精度与效率的瓶颈。未来,随着量子传感、5G+AI等前沿技术的融入,地下管线探测将迈向更高水平的智能化与精准化。我们应持续推动技术创新,完善行业标准,加强数据共享,以更好地应对城市化进程中的管线探测挑战,为城市的可持续发展保驾护航。

参考文献

- [1]朱旭红,刘航羽,陈骁,等.地下管线探测技术在市政工程建设中的应用[J].城市勘测,2024,(01):173-177.
- [2]王文龙.地下管线探测对市政工程的作用分析[J].中国建筑金属结构,2021,(08):132-133.
- [3]李育强,孙士辉,李奕洁,等.城市新型地下管线的探测技术及其应用研究[J].工程建设与设计,2023,(09):144-146.
- [4]聂清帅.城市地下管线疑难探测的方法及应用分析[J].运输经理世界,2020,(16):155-156.
- [5]陈竞.复杂条件下城市地下管线探测技术的应用[J].科技视界,2021,(15):147-148.