

Integration of UAV aerial survey and ground-penetrating radar measurement pipelines and smart city adaptation

Jianqiang Kang

China Shaanxi Nuclear Industry Group Surveying and Mapping Institute Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710000, China

Abstract

As the “lifeline” of urban infrastructure, underground pipelines have become critical for precise detection, efficient management, and intelligent adaptation in smart city development. Drone aerial survey technology, with its extensive spatial data acquisition capabilities, complements ground-penetrating radar’s precision underground detection advantages. This paper analyzes the core requirements for integrating these technologies in pipeline inspection through three dimensions: technical integration pathways, smart city scenario adaptation, and application assurance systems. Targeted recommendations are proposed to facilitate the implementation of integrated technologies throughout the entire lifecycle management of underground pipelines.

Keywords

UAV aerial survey; ground-penetrating radar; technology integration; underground pipeline detection; smart city adaptation

无人机航测与探地雷达融合测管线及智慧城市适配

康健强

中陕核工业集团测绘院有限公司, 中国·陕西 西安 710000

摘要

地下管线作为城市的“生命线”，随着智慧城市建设的深入推进，其精准探测、高效管理与智慧化适配成为了极其关键的课题。而无人机航测技术凭借大范围、高效率的空间信息获取能力，与探地雷达具备的地下结构精细探测优势得以形成互补。本文便围绕这两者融合应用于地下管线探测的核心需求，从技术融合路径、智慧城市场景适配、应用保障体系三个维度展开了分析，重点提出了具有针对性的建议，以此推动融合技术在地下管线全生命周期管理中的落地应用。

关键词

无人机航测；探地雷达；技术融合；地下管线探测；智慧城市适配

1 引言

在新型城镇化与智慧城市建设的双重驱动之下，城市地下管线的规模在持续地扩张，其类型涵盖了供水、排水、燃气、电力、通信等多个领域，承担着城市运行的核心功能。但现阶段传统的地下管线探测手段存在着明显局限，如人工探测效率低下且单一的地面物探技术易受到复杂地质条件的干扰，以及常规航空遥感难以穿透地表获取地下的信息。而这些问题会导致管线数据更新滞后、定位偏差大，不仅影响着城市规划建设的科学性，还可能因管线破损引发泄漏、爆炸等安全事故。

无人机航测技术以其灵活机动、快速覆盖、低成本的优势，当前已被广泛地应用于地表地形测绘、基础设施巡检等领域；探地雷达则通过发射高频电磁波探测地下介质分

布，能够精准识别管线的位置、走向及埋深。若将两者融合应用于地下管线探测，即可实现“天上一地下”空间信息的一体化获取，进而打破传统探测技术的局限性。同时融合技术获取的高精度管线数据，将作为智慧城市中地下空间管理、应急响应、智慧管网建设的核心基础。基于此，研究无人机航测与探地雷达的融合路径及智慧城市适配策略，对于提升城市基础设施管理水平、推动智慧城市高质量发展而言具有重要的现实意义。

2 无人机航测与探地雷达融合测管线的技术路径优化

2.1 构建一体化设备集成方案

结合实际情况来看，推动无人机平台与探地雷达设备的轻量化、模块化集成是技术融合的首要前提。建议优先选择多旋翼无人机作为搭载平台，原因是其具备垂直起降、悬停稳定的特点，能够满足复杂城市环境下的定点探测需求^[1]。在设备集成设计上，可以采用标准化的接口实现探地雷达与

【作者简介】康健强（1999-），男，中国陕西西安人，本科，助理工程师，从事测绘工程研究。

无人机飞控系统、导航定位模块（如GNSS）的无缝对接，以确保探测过程中无人机的飞行姿态、位置信息与雷达探测数据的同步采集。同步优化探地雷达的天线设计，积极地研发小型化、低功耗的专用天线，目的是降低对于无人机载重能力的要求，进而延长单次飞行探测时间。此外还可以在无人机上增设高清可见光相机与红外热像仪，使其与探地雷达数据形成互补，经由地表纹理、温度异常等特征来辅助判断地下管线的走向与潜在泄漏点，最终能够提升探测结果的可靠性。

2.2 完善数据融合处理体系

数据融合在实现“空天地”信息一体化之中为核心环节，此时需从数据预处理、融合建模、成果输出三个层面构建完善的体系。首先在数据预处理阶段，需要开发专用的数据校准工具，针对于无人机航测数据进行畸变差校正、影像拼接与地理坐标匹配，同时对探地雷达数据进行杂波抑制、信号去噪处理，以消除电磁干扰与飞行抖动对数据质量的影响^[2]。其次在融合建模环节，应该引入三维地理信息系统（GIS）技术，即将无人机获取的地表三维模型作为基础框架，再经由坐标匹配将探地雷达探测到的地下管线数据嵌入其中，构建起“地表—地下”一体化的三维管线模型，助力于管线空间位置与周边环境直观呈现的实现。最后在成果输出方面，要设计标准化的数据格式，为融合后的管线数据能够直接对接城市规划、市政管理等常用软件平台提供助力，有效地避免数据转换过程中的信息丢失，进而提升数据应用的便捷性。

2.3 优化现场探测作业流程

基于城市复杂环境的特点，需优化探测作业流程来提升融合技术的应用效率。为此在作业前应开展详细的现场勘查，而勘察时要根据管线分布密度、地表建筑遮挡情况划分探测区域，制定出个性化的飞行计划。一般对于管线密集的老城区，可以采用低空低速的网格状飞行路径，如此能够确保探地雷达密集的覆盖探测区域；对于开阔的新城区则可采用高空高速的航线设计，目的是提高整体的探测效率。实际作业的过程中，还需利用无人机的实时图传功能，再结合地面监控终端对飞行姿态与雷达数据进行动态地监测。一旦发现数据异常或飞行风险，就要及时地调整飞行参数。当作业完成后迅速建立“现场初判—室内精校—成果核验”的三级质量控制流程，在现场通过快速数据处理初步地判断出管线位置准确性，然后在室内利用专业软件进行精细化地分析，接着联合市政部门通过人工开挖验证等方式核验成果，以确保探测数据的精度满足工程应用的需求^[3]。

3 融合技术在智慧城市中的适配应用

3.1 适配智慧管网建设需求

智慧管网在智慧城市基础设施当中为核心组成部分，而融合技术获取的高精度管线数据需与智慧管网的监测、管

理需求保持深度地适配。一方面需要将融合探测的管线三维模型与物联网（IoT）技术结合，在管线上布设压力、流量、温度等传感器，之后将实时监测数据接入三维模型，从而实现管线运行状态的可视化监控。例如在供水管道监测中，通过融合模型可直观查看管道的埋深、管径与周边地质条件，再结合传感器数据来判断管道是否存在泄漏风险及泄漏可能的位置，为维修调度提供精准的依据。另一方面基于融合数据构建管网水力模型、热力模型等仿真工具，模拟极端天气、管线改造等场景下的管网运行状态，以此为管网规划扩建、应急调度提供决策支持，有助于提升智慧管网的精细化管理水平。

3.2 支撑城市规划与建设适配

只有融合技术获取的管线数据与城市规划、建设流程进行深度地融合，才能够提升规划建设科学性合理性。就城市规划阶段来说，应将三维管线模型纳入到规划信息平台之中，务必保证规划人员能够清晰地掌握规划区域内的地下管线分布，以避免新建项目与既有管线发生冲突，减少“马路拉链”现象的出现。而在工程建设阶段，要利用融合数据生成施工区域的管线剖面图，在其中明确管线与施工基坑、桩基的相对位置关系，进而为施工方案设计提供依据。同步通过无人机定期地对施工区域进行航测，然后配合探地雷达数据监测施工过程中管线的位置变化，便能及时地发现管线偏移、损坏等问题，保障了施工安全。此外在项目验收阶段，需要将融合探测的管线数据作为验收依据，经由对比设计图纸来核验管线施工的准确性，为工程质量提供保障。

3.3 适配城市应急响应需求

在城市应急管理当中，融合技术的快速探测能力与三维管线模型的直观性具有重要的应用价值，实践中一定要针对各类应急场景优化适配策略。像管线泄漏、爆炸等突发事件，建议建立应急探测快速响应机制，一旦接到事故报警就立即调度搭载探地雷达的无人机赶赴现场，保证在最短的时间内完成事故区域的管线探测，此时可以通过融合模型快速地定位事故点位置、判断影响范围，为救援队伍提供实时的数据支持，有效地缩短应急处置的时间。针对地震、洪涝等自然灾害，则可以利用无人机航测与探地雷达融合技术，对受灾区域的地下管线进行全面地探测，重点是评估管线的受损情况，再结合地表建筑损毁数据构建灾害损失评估模型，便能为灾后重建规划、管线抢修优先级划分提供依据，最终得以提升城市应急响应的精准性与高效性。

3.4 推动跨部门数据共享适配

由于智慧城市建设强调着多部门协同，因此融合技术获取的管线数据需打破部门壁垒，实现跨领域的共享应用^[4]。其关键在于城市政府要牵头建立统一的地下管线数据共享平台，在其中将融合探测的管线数据与规划、市政、应急、电力、通信等部门的业务数据进行整合，制定出数据共享管

理办法,且明确各部门的数据访问权限、更新责任与使用规范。比如规划部门可通过平台获取最新管线数据用于项目审批,应急部门在处置突发事件时可实时地调用管线数据与各部门应急资源,进而实现协同调度。与此同时,利用区块链技术对数据共享过程进行全程追溯,能够确保数据的安全性与完整性,进而避免因数据泄露、篡改而引发的风险。

4 融合技术推广应用的保障

4.1 加强政策与标准支撑

为融合技术的推广与应用提供重要保障的重点是政策与标准的完善,其要求政府相关部门出台专项的扶持政策,务必将无人机航测与探地雷达融合测管线技术纳入到智慧城市建设重点推广技术目录之中,面对采用融合技术开展管线探测的市政项目给予资金补贴或税收优惠,降低技术的应用成本。另外还要加快制定技术标准体系,务必明确融合探测的设备技术指标、数据采集规范、质量验收标准与数据共享格式,尽快统一行业内的技术要求,以避免因标准不统一导致的技术应用混乱。

4.2 推动产学研用协同创新

产学研用的深度协同有利于加速融合技术的迭代升级与成果转化。而在产学研用协同之中,政府占据主导位置,它需要搭建产学研用合作平台,以整合高校、科研机构、企业的资源优势。随后高校与科研机构需聚焦融合技术的核心难点开展攻关、企业则负责技术成果的产业化转化、市政、规划等应用单位的任务是提出实际的需求^[5]。

4.3 强化专业人才培养建设

现阶段,专业人才的短缺制约着融合技术的推广应用,所以需构建多层次的人才培养体系。具体来说:高等教育方面建议高校在测绘工程、地理信息科学、市政工程等专业增设无人机航测、探地雷达应用、智慧城市管理等相关课程,培养出更多具备跨学科知识的复合型人才;职业培训方面要针对现有市政、测绘行业从业人员开展融合技术的专项培训,重点为其讲解设备操作、数据处理与成果应用等实操技能,进而提升行业的整体技术水平。

4.4 提升安全与风险管理能力

融合技术在实践应用过程中面临着飞行安全、数据安全等多重风险,因而建立全方位的风险防控体系。从飞行安全方面来看,关键是要加强无人机操作人员的资质管理,确保相关人员能够严格执行飞行前的设备检查与风险评估流程,同时在复杂城市环境中推广避障雷达、差分定位等技术,以降低碰撞风险。在数据安全方面则需制定数据分级分类管理办法,尤其是对涉及城市核心基础设施的管线数据要进行加密存储与传输,务必防止数据泄露的情况出现。

5 结语

无人机航测与探地雷达的融合应用,为地下管线探测提供了“空天地”一体化的全新技术方案,此举有效地突破了传统探测手段的局限,其获取的高精度管线数据更是智慧城市基础设施智慧化管理的核心支撑。实践中为推动这一融合技术的落地与适配,需从技术路径优化、智慧城市场景对接、保障体系构建三方面协同发力,即通过设备集成、数据处理与作业流程的完善提升技术应用效率、通过智慧管网、城市规划、应急响应等场景的适配实现技术价值转化以及通过政策标准、产学研协同、人才培养与风险防控的支撑为技术推广保驾护航。未来随着技术的不断迭代与应用场景的持续拓展,无人机航测与探地雷达融合技术将在智慧城市建设中发挥出更大的作用,终将为提升城市治理能力、保障城市安全运行提供有力的保障。

参考文献

- [1] 刘瑞斌,郭亮,刘小杰,等.无人机航测技术在洞庭湖四口河道测量中的应用[J].水资源研究,2023,12(05):486-493.
- [2] 马超,高兴国,张胜凯,等.无人机航测在送电线路工程中的辅助应用[J].测绘通报,2024,(S2):42-45+55.
- [3] 谢欢.基于无人机LiDAR和航测影像的山区河道三维地形建模应用[J].广东水利水电,2024,(04):98-103.
- [4] 胡智峰.无人机航测技术在木里矿区生态整治中的应用[J].中国煤炭地质,2024,36(09):73-78.
- [5] 李思琦,李传宇.无人机航测、探地雷达与管道成像技术在农村污水管网审计中的应用[J].中国审计,2025,(11):57-59.