

Research on underground pipeline and geological exploration technology in surveying and mapping engineering

Fang'an Luo

Power China Guizhou Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550000, China

Abstract

Traditional surveying and mapping means have been difficult to meet the needs of modern engineering for accurate perception of underground space, especially in the reconstruction of old urban areas, rail transit construction and other scenes, the dislocation laying of underground pipelines and unknown geological hidden dangers interweave, bringing potential threats to the safety of engineering. Although the current underground exploration technology has made great progress, there are still technical bottlenecks in the signal analysis in complex electromagnetic environment and the collaborative processing of multi-source heterogeneous data. In addition, the dynamic evolution characteristics of geological structure make the traditional static mapping mode face adaptive challenges. This structural contradiction between technology supply and engineering demand is promoting the transformation of underground exploration technology system to the direction of intelligence and integration. How to establish a technical path that combines the detection accuracy and operation efficiency has become an urgent topic to be broken through in the field of surveying and mapping engineering.

Keywords

surveying and mapping engineering; underground pipeline; geological exploration; technology optimization

测绘工程中的地下管线与地质勘探技术研究

罗方安

中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司, 中国·贵州 贵阳 550000

摘要

传统测绘手段已难以满足现代工程对地下空间精准感知的需求,尤其在老旧城区改造、轨道交通建设等场景中,地下管线错位敷设与未知地质隐患相互交织,给工程安全带来潜在威胁。当前地下探测技术虽取得长足进步,但在复杂电磁环境下的信号解析、多源异构数据的协同处理等方面仍存在技术瓶颈,加之地质构造动态演变特性,使得传统静态测绘模式面临适应性挑战。这种技术供给与工程需求之间的结构性矛盾,正推动着地下探测技术体系向智能化、集成化方向转型,如何建立兼顾探测精度与作业效率的技术路径,已成为测绘工程领域亟待突破的课题。

关键词

测绘工程; 地下管线; 地质勘探; 技术优化

1 引言

现代城市的地下空间如同错综复杂的生命体,其内部管网系统承载着城市运转的命脉,地质构造则构成支撑城市发展的自然基底。测绘工程作为透视地下世界的技术窗口,既要应对管线材质多样、敷设年代跨度大带来的信号识别难题,又需破解地质体各向异性导致的探测结果不确定性。现有技术体系在解决浅层探测与深层地质分析的协同性方面尚存改进空间,不同探测设备的物理场响应机制差异导致数据融合困难,这使得工程实践中难以构建完整的地下三维模型。面对日益增长的城市地下空间开发需求,研究如何提升多源数据融合的智能化水平,探索新型物理探测方法与数

字建模技术的结合路径,对降低工程风险、优化施工方案具有现实意义,同时也为构建数字孪生城市提供基础支撑。

2 测绘工程中地下管线与地质勘探的挑战

城市地下管线网络密集且相互交错,不同材质的管线对电磁信号反射差异显著,给探测设备选择带来困扰。金属材料管线容易产生强信号干扰,非金属管道的微弱回波常被周边介质吸收,探测深度超过五米时信号衰减加剧导致定位精度下降。地质勘探过程中,复杂岩土结构直接影响物探方法的有效性,喀斯特地貌区溶洞与基岩界面形成的异常场特征易与目标体混淆,地下水动态变化更会改变地层介电常数。数据处理环节需要融合多源异构数据,电磁法、地震波法、地质雷达等不同原理设备产生的数据格式差异显著,三维建模时坐标系转换误差容易造成空间位置偏移^[1]。人工智能算法虽能提升异常识别效率,但面对非标准数据仍需

【作者简介】罗方安(1987-),男,布依族,中国贵州贵阳人,本科,工程师,从事测绘工程研究。

依赖人工经验修正。技术装备迭代速度超出预期，多频电磁波探测仪与分布式光纤传感器的应用要求技术人员同步更新知识体系，而新型设备的现场验证周期往往滞后于工程进度。行业技术标准更新频率与装备研发速度存在时间差，部分前沿探测方法缺乏统一的操作规范，实际应用中常出现参数设置争议。

3 测绘工程中地下管线与地质勘探的关键技术

3.1 地下管线测绘技术

地下管线测绘技术依托多物理场耦合探测原理，在复杂城市环境下构建精准的地下管网三维模型。电磁感应法利用交变电磁场原理，通过发射线圈激发目标管线产生二次磁场，接收端解析磁场强度衰减规律，可识别埋深 2 米内金属管线的平面位置，其定位精度受管线材质与相邻管线间距影响，通常横向偏差控制在管径的 10% 以内。针对非金属管线探测难题，探地雷达采用 800MHz 至 2.5GHz 的宽频带电磁脉冲，通过时域反射信号解析介电常数突变界面，配合极化方向优化技术可有效识别直径 30 厘米以上的 PVC 或混凝土管道走向。新型惯性导航定位单元集成微机电陀螺仪与加速度计，在管径 100 毫米以上的直埋管线内部实施轨迹测量时，每千米累积误差不超过 0.3 米，其封闭空间定位能力为管网三维拓扑重构提供关键数据支撑。多源异构数据融合算法采用贝叶斯概率框架，将电磁异常数据、地质雷达剖面与惯性导航轨迹进行时空配准，通过协方差矩阵动态调整不同传感器的权重分配，确保复杂交叉管网的节点坐标解算收敛速度提升 40% 以上。实际作业中需根据地下介质导电率差异动态调整电磁频率参数，在含水率超过 20% 的黏土地层中建议采用低于 100kHz 的工作频率以降低信号衰减，同时结合极化滤波技术抑制地铁轨道等强干扰源的影响^[2]。

3.2 地质勘探技术

地质勘探技术以多尺度物理场响应解析为核心，在地层结构探测中形成分层识别的技术体系。地震波法采用可控震源激发 20Hz 至 200Hz 的弹性波，根据纵波速度在 200m/s 至 6000m/s 范围内的时差特征，结合三分量检波器阵列接收的波形畸变特征，可分辨 5 米以浅的软弱夹层与基岩界面。高密度电阻率法配置 48 道以上电极系统，采用温纳装置在 10 米测线范围内生成二维反演模型，通过视电阻率值在 $10\Omega \cdot m$ 至 $1000\Omega \cdot m$ 区间的梯度变化，可识别地下水位波动带与岩溶发育区。瞬变电磁法发射 10kHz 至 300kHz 的阶跃脉冲磁场，基于 $10\mu s$ 至 $50ms$ 时间窗口内的感应电动势衰减曲线，可探测 50 米深度内电性界面突变位置。钻孔雷达搭载 100MHz 中心频率的天线组，在孔径 75mm 的勘察孔内实施跨孔探测时，其电磁波在灰岩地层中传播速度稳定在 0.12m/ns 附近，异常反射信号可有效揭示 3 米范围内的裂隙发育带。全波形反演算法引入正则化因子优化目标函数，将地震波走时与振幅信息同步参与迭代计算，配合速

度模型的空间约束条件，使砂卵石地层的层位识别分辨率提升至 0.5 米级。实际作业中需根据岩土体泊松比调整震源激发能量，在饱和砂层勘察时宜采用 500J 以上锤击震源以确保有效波穿透深度，同时结合极化滤波技术消除高压线缆的电磁干扰。

3.3 数据融合与协同处理技术

数据融合与协同处理技术构建在多源异构数据时空配准的基础上，依托自适应权重分配算法实现地下信息的精准重构。时空基准统一模块采用 GPS 秒脉冲同步机制，将探地雷达剖面数据与惯性导航轨迹的时间戳偏差控制在 1 毫秒以内，空间坐标转换运用七参数布尔莎模型消除不同坐标系间的旋转平移误差。数据清洗环节配置小波阈值去噪算法，针对电磁法采集的 2000Hz 至 5000Hz 高频干扰信号，选用 sym8 小波基函数进行 6 层分解，保留有效异常特征的同时将信噪比提升 15dB 以上。多模态数据融合框架引入改进的 D-S 证据理论，设计基本概率分配函数时将地质雷达介电常数异常与电阻率法低阻区域进行置信度耦合，在灰岩溶洞识别中将误判率降低至 8% 以内。三维网格化处理采用 0.5 米尺寸的克里金插值算法，结合结构张量分析确定各向异性变异函数参数，使管线点云数据与地质剖面的空间耦合精度达到厘米级^[3]。智能解译模型训练时加载迁移学习框架，利用预训练的 U-Net 网络提取地质雷达图像中 2ns 至 20ns 时窗内的多次波特征，结合半监督学习策略将标注样本量缩减至传统方法的 30%。实时协同系统开发遵循 OGC 传感物联标准，构建包含 50 个以上属性字段的时空数据库，支持 WMS 与 WFS 双协议并发访问，确保地震波速数据与管线拓扑关系的动态关联更新效率维持在秒级响应水平。

4 测绘工程中地下管线与地质勘探的优化策略

4.1 技术优化

技术人员应优先升级物探设备的抗干扰能力，采用多频段电磁信号融合探测技术，针对不同地质条件动态调整发射频率，有效区分金属管线与非金属管道的反射特征。数据处理环节可引入自适应滤波算法，结合地质构造参数建立三维噪声模型，逐步剔除电磁干扰与地层散射造成的异常信号。对于复杂管网区域，建议同步开展微动监测与高密度电阻率法联合勘探，利用岩土介质的力学响应差异辅助判断管线埋深，同时搭建跨平台数据校验机制，通过多源探测结果的相互验证降低误判风险。设备操作人员需定期参与地质解译专项培训，重点掌握断层破碎带与人工填土区的波形识别技巧，现场作业时根据实时数据调整测线布置方案。技术团队还应建立管线材质数据库，收录不同管径与埋设年代管道的典型电磁响应图谱，为后续数据对比提供参考依据。系统集成方面可尝试将探地雷达与惯性导航单元组合应用，利用厘米级定位精度修正管线平面位置偏差，同时开发具备地层分层解析功能的数据处理软件，实现地质剖面与管线轨迹的

立体可视化呈现。

4.2 管理优化

管理部门应推动跨部门协同作业框架,将规划、施工、运维各阶段数据纳入统一平台管理,市政档案与实时探测结果需建立动态比对机制。针对管线资料分散问题,研发部门可开发支持多源数据融合的智能系统,利用区块链技术确保历史探测记录的不可篡改性。人员培训体系应区分探测设备操作、地质解译、数据建模等专业方向,推行持证人员年度技能复核制度。设备管理环节需建立全生命周期追踪系统,对探地雷达阵列、多频电磁接收机等核心装备实施定期性能标定,异常设备自动触发维修预警。工程现场管理可引入移动端质量监控模块,关键节点探测数据实时上传至云端分析,异常数据自动冻结后续操作权限。针对复杂地质条件,管理部门应制定分级响应预案,喀斯特地貌区勘探需配置具备岩溶识别算法的处理模块。管线探测质量控制需设置双人背靠背校验环节,重点区域实施三维点云数据与二维剖面交叉验证^[4]。

4.3 政策与法规支持

立法机构应制定专门的地下管线管理法规,明确新建工程竣工测绘数据入库的法定时效,对既有管线数据缺失区域设定补充探测的强制年限。行业主管部门需牵头编制全国统一的地质勘探数据采集标准,针对喀斯特地貌、冻土层等特殊地质单元设立差异化的探测精度指标。地方政府可建立管线档案动态更新机制,将道路开挖审批与地下空间数据核验挂钩,施工单位提交的管线改迁方案必须附带三维地质模型验证文件。标准化组织应定期修订物探设备技术规程,统一电磁法探测仪的频率范围和地震波法的检波器布设间距,老旧设备淘汰周期写入行业指导目录。财政政策需配套专项经费保障机制,对采用分布式光纤监测系统的地下管廊项目给予税收优惠,智能探测装备研发纳入高新技术企业认定范围。保险行业可开发地质勘探责任险种,将勘探精度误差导致的工程损失纳入承保范围。司法部门需明确地下管线产权纠纷中勘探数据的证据效力,建立具备物探资质的第三方鉴定机构名录。

4.4 人才培养与团队建设

测绘工程领域的人才培养与团队建设需紧扣技术迭代与现场需求的双向互动。专业机构应当构建跨学科导师带教制度,安排物探工程师与地质工程师组成联合指导小组,定

期组织城市地下空间探测专题研修班,重点解析非开挖施工区域的管线交越特征与岩土力学参数关联性。技术团队可建立管材质识别能力分级认证体系,要求勘探人员掌握聚乙烯管道的电磁衰减规律与混凝土管道的雷达回波特征差异,定期开展地下管线三维建模竞赛强化空间认知能力。企业人力资源部门应当完善轮岗交流机制,推动数据处理工程师深入勘探现场参与管线点云数据采集,促使理论算法与实测波形形成有效反馈。高校可联合测绘院所开发虚拟仿真训练平台,模拟强电磁干扰环境下多源传感器数据融合过程,帮助学员掌握复杂地层中管线轨迹的追踪技巧。技术管理部门需要制定动态知识更新方案,针对新型智能探地雷达的时频分析功能组织专项研讨,同步更新地下管线探测规范解读案例库。团队建设过程中可引入项目复盘机制,在完成大型管网普查任务后组织多专业联合分析会,系统梳理地质构造误判与管线属性识别偏差的产生根源。行业组织应当推动建立区域技术协作网络,定期举办地下管线安全预警技术沙龙,促进不同单位间共享特殊埋深管线的探测经验与数据处理心得。

5 结语

地下管线与地质勘探技术的革新正在重塑测绘工程的实施范式,物理探测与数字建模的深度耦合为破解地下空间认知难题开辟了新路径。当前技术发展需重点突破多源数据融合的算法瓶颈,构建适应不同地质条件的探测参数优化体系,同时应重视探测装备的模块化设计以提升工程适应性。建议在行业标准层面建立统一的数据交换格式和质量评价体系,推动探测技术与 BIM、GIS 平台的深度集成。未来技术演进将更注重人工智能在异常识别中的应用,通过机器学习算法挖掘隐蔽地质特征的关联规律。

参考文献

- [1] 黄东海.城市地下管线探测中物探技术的应用[J].工程建设与设计,2022,(19):128-130.
- [2] 张晶.测绘新技术在地质工程勘察中的运用[J].世界有色金属,2019,(14):183-184.
- [3] 李蓓蓓.探讨地下管线测量中现代测绘的应用[J].大众标准化,2022,(12):146-148.
- [4] 姜自健,赵家齐,田博文,等.微析测绘新技术在地质测绘工程中的应用[J].居业,2021,(02):5-6.