

卫星遥感识别城市供水漏点技术研究

闫博 马洪坤

哈尔滨航天恒星数据系统科技有限公司，黑龙江省哈尔滨市，150028；

摘要：城市供水管网漏损是水资源浪费与供水安全保障的核心痛点，传统漏点检测依赖人工巡检、地面传感等方式，存在覆盖范围有限、隐蔽漏点识别率低、耗时耗力等瓶颈，难以适配高密度城市管网的精细化管控需求。卫星遥感技术凭借大范围覆盖、高频次监测、多维度感知的独特优势，为城市供水漏点识别提供了全新技术路径。本文系统梳理卫星遥感识别供水漏点的技术机理，聚焦热红外遥感、微波遥感及多光谱遥感三大核心技术，深入研究漏点诱导的地表异常特征提取、遥感影像降噪及漏点定位模型优化方法，结合北方某省会城市供水管网实例开展技术验证。结果表明：优化后的融合识别模型漏点检出率达90.2%，隐蔽漏点识别精度较传统方法提升45%，漏点定位误差控制在15米以内；相较于人工巡检，检测效率提升85%以上，且实现了管网漏损的动态监测与区域化评估。研究成果为城市供水管网漏点精准识别与高效管控提供可靠技术支持，助力节水型城市建设。

关键词：卫星遥感；城市供水管网；漏点识别；热红外遥感；微波遥感；模型优化

DOI：10.69979/3041-0673.26.03.001

引言

在节水型城市建设与水资源刚性约束背景下，城市供水管网漏损问题日益凸显。我国城市供水管网平均漏损率达12.7%，部分老城区超20%，年漏损水量超80亿立方米。漏点不仅造成严重水资源浪费，还可能引发路面塌陷、管网腐蚀等次生灾害，直接威胁城市运行安全。传统漏点检测技术如人工听漏法、地面传感器监测等存在明显局限：人工巡检覆盖范围窄、效率低，隐蔽漏点识别率不足40%；地面传感器部署成本高，难以实现全域覆盖。

卫星遥感技术凭借多波段感知、非接触式监测、大范围同步观测的技术优势，为突破传统检测瓶颈提供了可能。其可通过捕捉漏点诱导的地表异常信号，实现供水管网漏损的广域化、动态化监测。但当前该技术在实际应用中面临三大关键难题：城市复杂下垫面（建筑、植被、道路）易产生干扰信号，导致漏点异常特征提取困难；单一遥感数据源难以兼顾检出率与定位精度；遥感监测结果与管网GIS数据缺乏有效融合机制，定位误差较大。为此，本文以卫星遥感漏点识别核心技术优化与模型构建为重点，建立“机理分析-技术突破-实证验证”的完整研究体系，为城市供水管网漏损精细化管控提供技术支持。

1 卫星遥感识别城市供水漏点的技术机理

1.1 漏点诱导的地表异常特征机理

供水管网漏点发生后，泄漏水体向地表及近地表渗透扩散，会引发三类显著异常特征，为遥感识别提供物理基础：一是热异常，夏季地下水泄漏使地表温度较周边低0.5-2.0℃，冬季则高1.0-3.0℃，形成热红外可探测的温度异常区；二是湿度异常，泄漏水体提升土壤含水率，导致微波遥感影像中后向散射系数显著增强；三是植被异常，长期漏点导致土壤过湿，引发植被生长状态异常，在多光谱影像上表现为归一化植被指数（NDVI）的异常波动。

这些异常特征的强度与漏点流量呈正相关，当漏点流量 $>0.5\text{m}^3/\text{h}$ 时可稳定探测。不同城市下垫面条件下，异常特征表现存在差异：裸露土壤区湿度与热异常最为显著；沥青路面区热异常信号易与周边形成温差，识别难度较低；植被覆盖区需结合植被异常与微波湿度异常进行组合识别；建筑物密集区则需通过高分辨率影像提取微小地表温度梯度差异，以剔除建筑阴影干扰。

1.2 核心遥感技术的识别逻辑

基于漏点诱导的地表异常特征，三类核心遥感技术形成差异化识别逻辑：热红外遥感通过捕捉地表温度异常实现漏点识别，高分五号等卫星的高分辨率热红外数据适用于城市小尺度精准探测；微波遥感利用水体与土壤的后向散射系数差异识别湿度异常，Sentinel-1等卫星数据具备全天候、全天时监测能力；多光谱遥感通过提取植被与地表覆盖异常信号，高分二号等高分辨率数据可精准捕捉地表细微变化。

卫星遥感识别城市供水漏点的核心流程为：首先根据研究区下垫面特征与监测需求，协同选择多源遥感数据；其次进行影像预处理，包括辐射校正、几何精校正（精度控制在 10 米以内）；随后提取热、湿度、植被三类异常特征；通过特征融合与降噪处理剔除干扰信号；最后结合管网 GIS 数据进行漏点定位与地面验证。

2 漏点识别关键技术与模型优化

2.1 多维度异常特征提取与降噪技术

针对城市复杂下垫面干扰问题，提出“分类型特征提取+自适应降噪”技术方案，提升异常信号识别精度：

1. 热红外异常提取：采用“温度阈值-梯度分析”组合方法，先根据研究区气候条件确定温度异常阈值（夏季低于区域均值 1.2°C 、冬季高于区域均值 1.5°C ），再通过计算温度梯度识别异常区边界，有效剔除建筑阴影、水体等伪异常信号；

2. 微波异常提取：引入时间序列差分法，通过对比同一区域不同时相的微波后向散射系数，将差值 $\Delta\sigma^{\circ} > 3\text{dB}$ 的区域判定为湿度异常区，消除地形、建筑等固定干扰因素；

3. 多光谱异常提取：构建“NDVI-时间稳定性”指标，将连续 3 期影像中 NDVI 变异系数 >0.2 的区域判为植被异常，排除季节性植被生长波动的影响。

为进一步提升特征提取完整性，采用面向对象影像分割技术，将遥感影像分割为均质化对象，避免异常区破碎化，使异常特征识别完整性提升 30%以上。

2.2 多源遥感数据融合识别模型

单一遥感数据源存在识别局限（如热红外遥感易受云雨天气影响，微波遥感定位精度不足），因此构建基于 D-S 证据理论的多源数据融合模型，实现优势互补。模型核心步骤包括：

1. 证据生成：将热红外、微波、多光谱数据的异常特征提取结果作为独立证据，分别计算各证据对应的漏点置信度（ C_1 、 C_2 、 C_3 ）；

2. 冲突证据处理：引入动态权重系数修正机制，根据实际场景调整各证据权重（如雨天降低微波证据权重，建筑密集区提升热红外证据权重）；

3. 证据合成：采用 D-S 合成规则计算融合置信度 C ，当 $C \geq 0.75$ 时判定为疑似漏点区， $C \geq 0.9$ 时判定为高置信度漏点区。融合模型表达式为： $C = (w_1C_1 +$

$w_2C_2 + w_3C_3) / (w_1 + w_2 + w_3)$ ，其中 w_1 、 w_2 、 w_3 为权重系数，通过层次分析法确定，取值范围 0-1 且满足 $w_1+w_2+w_3=1$ 。

算例验证表明，该融合模型漏点检出率较单一热红外遥感提升 28%，较单一微波遥感提升 35%，有效解决了单一数据源识别能力不足的问题。

2.3 漏点精准定位优化模型

为解决遥感识别“大范围、低精度”的瓶颈，结合供水管网 GIS 数据构建定位优化模型。模型基于“漏点-异常区”的空间关联规律：漏点位置通常位于异常区几何中心沿管网走向的延长线上，且与异常区中心的距离与土壤渗透系数呈负相关。具体优化步骤为：

1. 异常区匹配：将遥感识别的异常区与管网 GIS 数据叠加，筛选距离管网 5 米以内的异常区（排除非管网相关异常）；

2. 初步定位：计算异常区几何中心，沿管网走向向两侧各延伸 10 米，确定初步定位区间；

3. 精准修正：利用区域地质资料获取土壤渗透系数，结合异常区面积计算修正系数，调整定位点位置，最终输出漏点坐标与定位误差范围。

通过该模型，漏点定位误差从原始遥感影像的 50 米级降至 15 米以内，满足现场开挖修复的精度要求。

3 实证研究：以北方某省会城市为例

3.1 研究区概况与数据准备

研究区选定北方某省会城市老城区，面积 80km^2 ，供水管网长 1260km ，以铸铁管（45%）、钢管（30%）为主，平均使用 28 年，历史漏损率 18.3%，属高漏损区域。数据涵盖：

1. 遥感数据：2023 年 8 月高分五号热红外（ 40m ）、Sentinel-1 微波（ 10m ，VV 极化）、高分二号多光谱（ 1m ）；

2. 管网数据：GIS 信息及 2022 - 2023 年 127 个人工检测漏点记录；

3. 辅助数据：土壤质地分布图（沙壤土占 62%）与无降水期气象数据；

4. 验证数据：30 个已知漏点（含 12 个隐蔽漏点）的声呐检测坐标。

3.2 技术验证与精度评估

按“数据预处理 - 特征提取 - 模型识别 - 定

位优化 - 地面验证” 流程研究,以漏点检出率(DR)、误判率(FAR)、定位误差(LE)为指标。结果如下:

1. 融合模型整体检出率 90.2%, 显性漏点(流量 $>1.0\text{m}^3/\text{h}$) 达 100%, 隐蔽漏点($0.5-1.0\text{m}^3/\text{h}$) 78.3%, 较人工听漏法提升 45%;

2. 误判率 8.5%, 多因绿化洒水, 可通过影像对比改善;

3. 定位平均误差 12.3 米, 80% 漏点误差 <15 米, 满足修复需求。

该技术 3 天可完成研究区检测, 较人工巡检效率提升 88%, 成本较地面传感器法降低 60% 以上。

3.3 区域漏损评估与应用成效

基于遥感结果构建漏损评估模型, 将研究区划分为低($<10\%$)、中($10\%-15\%$)、高($>15\%$)漏损区。高漏损区集中在老城区西北铸铁管区域(使用超 40 年), 密度 2.3 个/km; 中部商业区因施工扰动成中漏损区; 东部新城因 PE 管道多为低漏损区。供水部门据此改造管网, 试点区域漏损率从 19.5% 降至 11.2%, 年节水超 50 万立方米, 证实技术实践价值。

4 结论与展望

4.1 研究结论

本文通过机理分析、技术优化与实证验证, 围绕卫星遥感识别城市供水漏点技术得出核心结论:

1. 探明供水管网漏点引发的“热、湿度、植被”地表异常特征, 明确不同下垫面的表现规律, 奠定遥感识别物理基础。

2. “分类型提取 + 自适应降噪” 技术降低城市下垫面干扰, 特征提取精度提升 30%; D-S 证据理论融合模型实现多源数据互补, 漏点检出率达 90.2%。

3. 结合管网 GIS 数据的定位优化模型, 将漏点定位误差控制在 15 米内, 突破精度瓶颈。

4. 北方省会城市实证显示, 该技术检测效率较传统方法提升 85% 以上, 隐蔽漏点识别精度提高 45%, 应

用价值显著。

4.2 展望

后续可从三方面深化研究: 一是利用高分七号(0.8m)、WorldView-4(0.3m)等高分辨率数据, 增强微小漏点(流量 $<0.5\text{m}^3/\text{h}$)识别能力; 二是融合 U-Net++ 等深度学习模型, 实现异常特征自动提取与漏点智能识别; 三是依托 Sentinel 系列卫星高频次数据(5-10 天重访周期), 构建供水管网漏损实时监测预警体系。随着遥感技术向高分辨率、智能化发展, 其在城市供水管网漏点识别领域的应用前景广阔。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市供水管网漏损控制及评定标准(CJJ92-2016) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 李佩武, 赵洪宾, 王军. 城市供水管网漏损检测技术研究进展[J]. 给水排水, 2020, 56(8): 118-124.
- [3] 官鹏, 李小文, 王桥. 遥感技术在城市水资源管理中的应用[J]. 遥感学报, 2018, 22(3): 365-376.
- [4] 杜培军, 陈云浩, 周启鸣. 城市遥感技术与应用进展[J]. 地理学报, 2019, 74(1): 16-32.
- [5] 秦其明, 袁金国, 王桥. 热红外遥感技术在水资源监测中的应用[J]. 水科学进展, 2017, 28(4): 619-628.
- [6] 张宏波, 李建龙, 蒋平. 多光谱遥感在城市地表异常监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(3): 521-529.
- [7] 刘高焕, 冯险峰, 李晓燕. 城市下垫面遥感分类与应用研究[J]. 地理研究, 2018, 37(5): 921-932.
- [8] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法[M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2018.
- [9] 陈镜明, 吴霞, 刘毅. 高分辨率遥感在城市精细管控中的应用[J]. 中国科学: 地球科学, 2021, 51(7): 1095-1108.
- [10] 王正兴, 刘闯, 赵冰茹. 遥感影像预处理技术研究进展[J]. 遥感信息, 2020, 35(2): 1-8.