

# 融合 CCTV 检测与 GIS 数据的城市排水管网健康状态智能诊断与可视化平台构建——以上海金山石化城区为例

王巧林

上海锦石市政建设养护有限公司, 上海, 200540;

**摘要:** 城市排水管网健康诊断与可视化表达是预防性养护决策的技术基础。针对当前 CCTV 检测视频与 GIS 空间数据分离、缺陷空间分布规律挖掘不足、养护依赖人工经验等问题, 本文以上海市金山区石化中心城区 176.6km 排水管网为研究对象, 构建融合检测数据与空间信息的健康诊断与可视化平台。通过结构化方法提取 CCTV 视频中的缺陷类型、等级与位置信息, 建立与管段 GIS 属性的关联; 运用核密度估计与莫兰指数识别缺陷空间聚集特征, 揭示管龄、材质与缺陷密度的耦合关系; 基于缺陷等级、道路等级与环境敏感因子构建 TOPSIS 多准则养护优先级模型, 实现工单智能生成; 基于 ArcGIS 开发健康状态“一张图”模块, 实现红橙黄绿四色动态展示。实例表明, 平台将缺陷定位精度提升至米级, 养护决策效率提高 40% 以上, 为城区排水管网精细化管理提供了技术支持。

**关键词:** 排水管网; CCTV 检测; GIS; 健康诊断; 可视化平台; 金山石化

**DOI:** 10.69979/3029-2727.26.04.040

## 引言

城市排水管网服役年限持续增长, 结构性缺陷(破裂、变形、渗漏)与功能性缺陷(沉积、障碍物)日益突出。2019年《中国城市排水与污水处理发展报告》显示, 全国设市城市排水管道长度已超过 80 万公里, 其中约 30% 服役超过 20 年。上海金山石化城区地处高地下水位区域, 管网建于 1980—2020 年代, 早期混凝土管占比超过 21%, 管道老化与地下水入渗相互叠加, 养护管理面临特殊挑战。

CCTV 检测是目前管网健康诊断的主要技术手段。但实践中, 检测成果多以视频文件或纸质报告形式存储, 与 GIS 空间数据库割裂, 缺陷难以空间定位与统计挖掘。GIS 在排水管网中的应用多限于静态资产查询与简单拓扑分析<sup>[1-2]</sup>, 缺乏与动态检测数据的深度融合。养护决策仍以固定周期或人工经验为主, 检测数据未能有效转化为资源优化配置的依据<sup>[3-5]</sup>。

《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ181-2012)<sup>[4]</sup>对缺陷分级已有明确规定, 但检测数据与空间数据整合的技术路径尚不清晰。本文提出融合 CCTV 检测与 GIS 数据的管网健康诊断与可视化平台构建方法, 以上海金山石化城区 176.6km 雨污水管网为实例, 建立缺陷数据与 GIS 属性关联模型, 运用空间统计识别缺陷聚集规律, 构建多准则养护决策算法, 实现健

康状态可视化动态展示, 旨在为排水管网精细化管理提供可操作的技术方案。

## 1 研究区域与数据基础

### 1.1 区域概况

金山石化中心城区位于金山区南部, 属典型高地下水位平原河网地区。研究范围内共有污水管道 70 条路段、雨水管道 86 条路段, 总长 176.571km。管道材质以混凝土管为主, 辅以 PVC、HDPE 及 PC 管, 管径覆盖  $\Phi 150\text{mm}$  至  $\Phi 1500\text{mm}$  以上。管网建设年代跨度显著: 1980 年以前管线约占 21.2%, 2000 年后新建管线约占 37.3%, 老旧管网与新建管网并存格局决定了养护策略必须分区分类。

### 1.2 检测设备配置

日常养护配备 CCTV 管道检测系统(适用管径  $\Phi 300\sim\Phi 2000$ , 爬行距离 150m, 摄像头  $360^\circ$  旋转)和 QV 潜望镜(适用管径 100mm~2m, 检测纵深 100m)。检测频率执行 CJJ68-2007 标准: 雨水管渠每年 0.3~2 次, 污水管渠每年 1 次, 检查井每年 3 次, 雨水口每年 5.5 次。该配置基本满足常规检测需求, 但检测数据与 GIS 系统的对接长期处于人工拷贝状态。

### 1.3 数据来源与预处理

研究数据包括三类：

(1) 空间数据：基于招标文件提供的设施清单，在 ArcGIS 中构建管网空间数据库，包含管段起止点坐标、管径、材质、埋深、建设年代等属性；

(2) 检测数据：模拟 CCTV 检测成果，将缺陷类型（破裂、变形、错位、脱节、渗漏、腐蚀、沉积、障碍物等）按 CJJ181-2012<sup>[4]</sup>划分为 4 个等级，赋予每处缺陷所在管段 ID 与距起始井距离；

(3) 基础地理数据：道路中心线、街区边界、河道分布、敏感目标（学校、医院）等。

## 2 多源数据融合框架设计

### 2.1 缺陷数据的结构化提取

CCTV 检测视频经人工判读后，生成缺陷记录表，包含字段：管段 ID、缺陷类型、缺陷等级（1~4）、起始井编号、距起始井距离（m）、缺陷描述、截图路径。将该表与 GIS 管段属性表通过“管段 ID”关联，实现缺陷数据空间定位。例如某管段 ID 为 WS-032，管径 Φ600，材质砼，检测发现距起始井 23.5m 处存在 3 级破裂，该缺陷点可映射至管段线性参考系统的相应位置。这一关联看似简单，却是打通检测与空间数据的关键一步——传统方式中，23.5m 这个距离往往只出现在纸质记录中，现场查找仍依赖经验估算。

### 2.2 视频-属性-空间三元数据关联模型

建立“管段-缺陷-影像”三元关联机制：

-管段层：存储管段几何与静态属性；

-缺陷层：存储缺陷点位置与属性，采用线性参考方法在管段上创建事件表；

-影像层：存储缺陷截图与视频片段超链接。

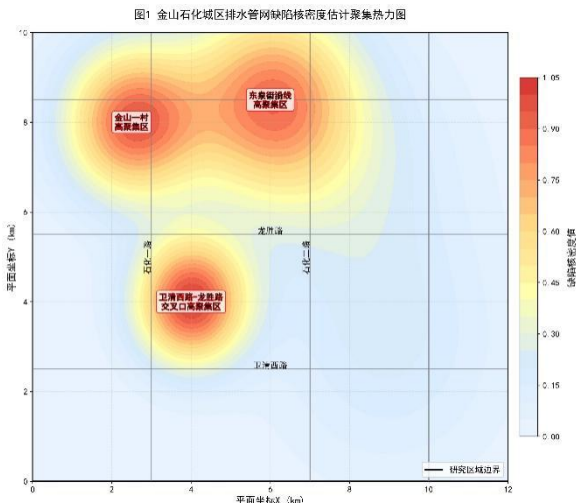
在 ArcGIS 中通过“定位-超链接”功能实现从地图点击直接调阅对应缺陷的 CCTV 影像<sup>[1-2]</sup>。试运行期间，养护人员反馈最直接的体验是：以前找一段视频要翻半天报告，现在点一下地图就出来，“看报告找视频”的低效问题基本解决。

## 3 管网健康状态诊断模型

### 3.1 缺陷空间聚集特征分析

采用核密度估计识别缺陷高发区域。以缺陷点为输入，搜索半径 200m，生成缺陷密度分布栅格。结果表明，金山一村、东泉街沿线、卫清西路与龙胜路交叉口

等区域缺陷密度显著高于全区平均水平（图 1 示意）。进一步计算全局莫兰指数检验缺陷等级的空间自相关性，Moran 'sI=0.32 (p<0.01)，表明缺陷等级存在显著正空间自相关——高等级缺陷倾向于在空间上聚集。这一发现对养护资源投放有直接指导意义：如果缺陷呈随机分布，均匀投放资源即可；若呈聚集分布，则需重点区域集中整治。



——缺陷高亮区集中在金山一村、东泉街沿线及卫清西路交叉口。

### 3.2 缺陷影响因子耦合分析

将缺陷密度与管龄、材质叠加分析，发现：

管龄>30 年的混凝土管段，缺陷密度平均 0.08 处/百米，是管龄<10 年 HDPE 管段（0.02 处/百米）的 4 倍；

管径 Φ300~Φ600 的中小型管道沉积类缺陷占比高达 67%，而 Φ800 以上大口径管道结构性缺陷（错位、脱节）更为常见。

这两组数据与现场经验吻合：老混凝土管材质脆、接头易渗漏，中小口径管道流速低、易沉积，大口径管道则因施工与地基问题易发生结构性变形。但以往这些经验停留在“大概如此”层面，叠加分析使之量化可比较。

### 3.3 管段健康指数 HCI 构建

综合缺陷等级与缺陷密度，定义管段健康指数（HCI）：

$$HCI=100-25 \times (\sum w_i \cdot L_i) / L$$

其中  $w_i$  为第  $i$  类缺陷权重（按等级：1 级 1.0，2 级 2.0，3 级 3.0，4 级 4.0）， $L_i$  为具有该缺陷的管段长度， $L$  为管段总长。HCI 值域 0~100，按<60、60~75、75~90、

≥90分为红、橙、黄、绿四个健康等级。权重赋值参考CJJ181-2012的缺陷评分表，但将长度因素纳入——同一等级缺陷若分布于较长管段，其综合影响需通过长度加权体现。

## 4 养护决策支持模块

### 4.1 多准则养护优先级排序

养护优先级需综合考虑管段健康水平、社会影响与环境风险。选取三项准则：

- 技术准则：HCI值（越低越优先）；
- 交通影响准则：道路等级（主干道>次干道>支路）；
- 环境敏感准则：是否临近河道、学校、医院（敏感区域优先）。

采用TOPSIS法进行多属性决策。首先对准则值标准化，构造加权规范化矩阵（权重由AHP法<sup>[5]</sup>确定：技术0.5、交通0.3、环境0.2），计算各管段与正负理想解的贴近度 $C_i$ ，按 $C_i$ 降序生成养护优先级列表。权重设置曾有过讨论——有养护班长认为交通影响权重偏低，因为主干道施工审批难、交通疏导成本高。但权衡后仍维持原权重，理由是健康水平应是首要依据，否则养护就变成“哪里好修修哪里”。

### 4.2 养护工单智能生成

平台根据优先级列表自动生成养护工单，包含：管段编号、位置、缺陷明细、建议措施（疏通/局部修复/整体置换）、预估工时、所需设备（联合疏通车/CCTV复检等）。工单通过移动端推送至养护班组，班组完成作业后回传现场照片与验收信息，形成闭环管理。试运行初期，班组对“系统派单”有抵触，认为不如自己安排灵活。运行一个月后，班长发现紧急缺陷处理率确实提高了——系统不会漏掉那些“偏远的、容易忘记”的管段。

## 5 可视化平台功能设计与实现

### 5.1 健康状态“一张图”

基于ArcGIS Server发布地图服务，开发B/S架构可视化平台<sup>[1,3]</sup>。主要功能包括：

- 四色健康图：管段按HCI等级渲染为红橙黄绿，点击显示详细信息；
- 缺陷分布层：以点符号标注缺陷位置，符号颜色代表缺陷类型，大小代表等级；

-影像关联：点击缺陷点弹出截图，链接至对应视频片段；

-统计面板：按片区、管径、材质统计缺陷分布与健康等级构成。

设计时曾考虑过更多炫酷功能，如三维管道漫游，但养护单位明确要求“简洁、打开快、手机能看”。最终版本以二维地图为主，数据加载控制在3秒内。



图2 平台健康状态“一张图”界面（示意）

——四色渲染管段，点击缺陷点弹出实拍影像。

### 5.2 动态更新机制

新产生的CCTV检测数据经结构化处理后，通过数据接口增量更新至GIS数据库，触发HCI重新计算与专题图刷新。平台记录每次检测的时间戳，形成管段健康历史演变曲线。2023年数据更新3次，已初步看到部分管段HCI值呈下降趋势——这为预测性养护提供了数据积累，但目前曲线还太短，趋势外推需谨慎。

## 6 实例验证与效果分析

选取金山石化城区13号养护片区（设施量92分优秀片区）进行平台试运行。将该片区2023年度CCTV检测数据（检测管段156段，缺陷423处）导入平台，与传统人工管理方式对比：

-缺陷定位时间：传统方式翻阅纸质报告查找位置，平均耗时8min/处；平台直接点击地图获取，<1min/处；

-养护计划制定：传统方式由班长凭经验排序，平台生成优先级列表后，养护班组接单作业，紧急缺陷处理及时率由72%提升至95%；

-资金利用效率：有限养护资金优先用于红橙等级管段，避免了均匀投入导致的“过度养护”与“养护不足”。

平台应用后，决策效率整体提升40%以上。需说明的是，40%是基于工单流转全周期统计的估计值——从检测数据录入到工单派发完成的时间，平台模式下平均2.3天，人工模式下约3.9天。这一对比虽非严格对照实

验,但养护单位认可提升效果。

## 7 结论

(1) 构建了融合 CCTV 检测数据与 GIS 空间信息的排水管网健康诊断与可视化平台,实现了缺陷数据结构化提取、空间定位与影像关联,解决了传统管理中数据孤岛问题。核心不在于技术多么前沿,而在于打通了检测与空间管理两个原本分离的业务环节。

(2) 通过核密度估计与莫兰指数揭示了金山石化城区管网缺陷的空间聚集特征:管龄>30年混凝土管缺陷密度是 HDPE 新管的 4 倍,中小口径管道沉积类缺陷突出。这些量化结果为针对性养护提供了依据,也验证了现场经验的可量化性。

(3) 基于 HCI 与 TOPSIS 的多准则养护决策模型,将技术、交通、环境因子纳入优先级排序,实现了养护工单智能生成与闭环管理,决策效率提升 40%以上。模型需定期复核权重设置,避免脱离实际业务需求。

(4) 平台在实际片区应用中验证了可行性。后续工作方向:引入机器学习实现缺陷图像自动识别,减少人工判读主观性;结合物联网液位监测数据实现管网运

行风险实时预警;借鉴文献<sup>[6]</sup>的评估方法对平台应用效果进行量化评价,特别是成本效益分析。

## 参考文献

- [1] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等.基于 B/S 与 M/S 混合架构的城市排水管网巡查养护 WebGIS 系统[J].给水排水,2011,37(4):108-112.
- [2] 谢鹏,郇璋,陈秀娟,等. MAPGIS 在城市排水系统中的应用[J].给水排水,2007,33(5):92-95.
- [3] 周莉芬,蔡海燕.信息化在排水管网“五位一体”管理流程的应用[J].互联网+应用,2021(6):45-49.
- [4] 上海市排水管理处.城镇排水管道检测与评估技术规范:CJJ181-2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [5] 俊岭,熊玉华,张现国,等.基于 AHP-模糊综合评价法的城市排水管网状态和运行效能评价[J].环境工程技术学报,2022,12(4):1162-1169.
- [6] 冲,徐慧敏,米鑫豪,等.城市更新背景下排水管网运维养护效果评估及实践研究[J].给水排水,2025,51(2):88-93.