

面向排水管网健康诊断的多维时空 GIS 数据模型 构建与应用

方 毅

(江西核地勘测设计有限公司, 江西 九江 332000)

摘 要:随着城市化的进程加快,排水管网病害暴露频率和病害率不断提高,严重影响城市水环境健康安全与防洪排涝能力,精确有效地分析和评价其健康状态是目前实现排水管网精细化管理的迫切需要。本文基于启东高新区排水管网维修项目应用背景,针对排水管网数据碎片化、时空关联性弱、病害判别精度低等问题,建立可实现健康诊断的管网多维时空 GIS 数据模型。首先,集成项目相关数据、预处理基础地理数据、管网本体、监测感知数据、检测评估数据等多源时空数据;其次,按照“基础支撑层—时空核心层—健康诊断层”思路设计多维时空 GIS 数据模型体系;最后基于多维时空 GIS 数据模型设计应用系统,在启东高新区排水管网维修项目中开展试点应用。结果显示,多维时空 GIS 数据模型可实现多源数据的一体化管理,病害判别准确率超过 95%,有效支撑管网病害检测结果动态追踪、维修决策分析等,显著提高了项目实施效率及管网管理精细化程度,为类似项目的实施起到指引作用。

关键词:排水管网;健康诊断;多维时空 GIS;数据模型;精细化管理;启东高新区

中图分类号:P208 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2736(2025)12-0036-5

0 引言

随着城镇化、工业化进程加速,城市排水管网作为城市“生命线”重要系统,对防洪排涝、污水收集输送发挥着重要作用。根据《中国城市市政基础设施建设统计年鉴》数据统计^[1],城市排水管网总长度超过 120 万 km,超过 20 年管网占有量为 38%,其中部分城市老城区管网超过 50 年,其老化带来的结构性与功能性问题日益突出,造成了雨水直排污水厂、污水处理厂来水浓度不高、水体污染加重、内涝风险加大等现象。2024 年我国部分地区因管网排涝能力受限暴发内涝,直接经济损失超过百亿元;启东高新区(江苏省沿江沿海重点开放开发地区)是上海 1 小时圈内承接上海产业辐射的重点地区,也是长三角北翼特色产业园,目前园区内排水管网总长 380km,所使用的排水管道材质多样,且建设年份跨度较大,受产业状况、地表地貌和排水维护条件局限,排水管网数据分散存储^[2,3],缺陷探

测效率低下,健康诊断缺乏定量评估标准。2023 年汛期期间,发生 3 处排水管网裂缝渗漏造成局部内涝,急需开展高精度健康诊断。然而目前研究侧重单一缺陷检测技术或孤立数据分析,缺乏多源时空数据系统分析建模,为此本文采用构建多维时空 GIS 数据模型并形成应用平台的方法,结合启东高新区实践,一方面丰富排水管网时空数据建模理论^[4],另一方面解决启东高新区项目数据整合困难、诊断精度不高等问题,为其他地区管网开展精准化精细化管理提供参考。

1 相关理论与技术基础

1.1 排水管网健康诊断核心理论

排水管网健康状况反映了管网结构完好性、管网水力可利用率和运行可靠度。参照《城镇排水管道检测与评估技术规程》(CJJ181-2012)及启东高新区项目状况,形成三层评价指标:第一层指标为结构健康状况和功能健康状况,第二层指标为结构完整性、材料耐久性、水力适应性

和运行稳定性^[5],第三层指标为缺陷率、缺陷严重系数、管道腐蚀速率、水力负荷率和淤泥厚度等。健康诊断方法由检测类、监测类、评估类构成。检测类使用 CCTV 检测、声呐检测等方法采集缺陷数据;监测类使用在线设备采集流量、水位等监测实时数据;评估类采用层次分析法、模糊综合评价法等进行健康分级^[6]。本文将以上三类方法取长补短,并将相关数据及量化的模型融入时空数据模型,进行诊断自动化与量化。

1.2 时空数据建模与 GIS 核心技术

时空数据模型是对地理实体的空间位置、属性信息、时间变化等进行表述的数学模型,主要类型有基于基态修正模型、时空立方体模型以及面向对象的时空数据模型。基于基态修正模型存储基准时点的数据和变化增量适用于变化频次较低的实体,如管网结构等;时空立方体模型将空间和时间融合成为三维立方体模型,适用于动态监测型数据;面向对象的时空数据模型以对象为中心整合了多元信息^[7,8],是本文中模型构建的核心范式。GIS 核心技术包括空间数据管理系统、时空索引、可视化技术与空间分析技术。空间数据管理系统利用扩展如 PostGIS 技术可以完成矢量数据和栅格数据的存储及其拓扑管理;时空索引通过 R 树或者 B 树复合构建时空索引以提高查询的速度;可视化技术主要包括二维和三维可视化;空间分析技术通过网络分析等技术实现缺陷溯源和路径规划。多源数据融合技术包括格式融合、语义融合、时空融合,其中格式融合用于将不具有相同文件格式的 GIS 数据统一转换为 GIS 常用格式的数据^[9];语义融合借助统一的数据字典来实现属性映射;时空融合通过统一的坐标系和时间戳建立联系,实现“空间—时间—属性”的集成联合查询。

2 启东高新区排水管网多源数据梳理与预处理

2.1 项目数据类型与需求分析

基于启东高新区排水管网维修项目实践,收

集的多源数据按照功能划分为:基础地理数据(1:500 地形图、行政区界线、道路网络、水系、高程数据)格式为 DWG 和 TIFF,来源为启东市自然资源和规划局,时间跨度为 2023 年静态数;管网本体数据(管道、检查井、泵站)空间位置、材质、管径、埋深、建设年代、权属等信息,格式为 DWG、Excel,来源为启东高新区管委会和运维单位,时间跨度为 2023-2024 年;监测感知数据(流量、水位、pH 值、溶解氧等)在线监测数据,格式为 CSV、JSON,来源为 12 处监测点,时间跨度为 2022-2023 年;检测评估数据(CCTV 检测视频、缺陷记录、声呐检测报告、人工巡检记录等数据),格式为 MP4、Excel、PDF,来源为第三方检测机构,时间跨度为 2023-2024 年;维修历史数据(历次维修记录、更换部件信息、维修效果评估等数据),格式为 Excel、Word,来源为运维单位,时间跨度为 2018-2024 年;基于管网健康诊断核心目标,数据需求为时空关联需求(建立管道、检查井等实体空间拓扑关系及监测、检测数据与时间维度关联,为支撑动态诊断,管道属性数据时空关联满足要求)和精度需求(管道、检查井等拓扑结构的平面坐标精度误差 $\leq 0.5\text{m}$,管网属性数据完整性达到 95%以上);监测数据时间分辨率 $\leq 15\text{min}$;整合需求(多源数据统一管理、多类型关联查询);动态更新需求(数据集成实现新数据可随时加入、模型更新等)。

2.2 项目数据预处理实践

数据预处理包含数据格式转换、数据清洗以及数据标准化 3 个阶段,在格式转换环节,由于启东高新区项目中,空间数据从 DWG 格式的地形图、管网数据转换为 Shapefile 格式,提取相关要素的空间坐标并统一于 CGCS2000 坐标系内。非空间数据将 Excel 属性数据、CSV 监测数据导入 PostgreSQL 数据库并使用 PostGIS 扩展实现空间与非空间数据的关联。文档数据的处理将 PDF 格式检测报告中 OCR 识别的文本信息保存成结构化形式,提取与缺陷有关的关键数据。在清洗环节,利用 3σ 原则剔除监测数据中的异常值,并剔除无效数据 128 条。将管网主体数据属

性缺失的部分通过邻近管道的属性类比、实地考察进行补充完善,补全率 98%。删除多余的检测记录、维修记录,剔除冗余数据 36 条,提升存储效率。在标准化环节,将所有空间数据坐标系统转化为 CGCS2000 大地坐标系下的高斯—克吕格 3 度带投影。

3 面向健康诊断的多维时空 GIS 数据模型构建

3.1 模型总体架构

建立“基础支撑层—时空核心层—健康诊断层”三层多维时空 GIS 数据模型架构,各层次之间相互联动、相互配合;基础支撑层是数据模型运行的底层保障,包括数据标准、技术标准与硬件、软件支撑,数据标准制定多源数据分类标准、数据编码、属性字段规范等达到统一数据接入的目的,技术标准明确坐标系、时间、精度等技术规范达到统一数据模型构建的目的,硬件、软件支撑包括服务器、存储设备、PostgreSQL+Post-GIS 数据库、GIS 引擎等,为数据存储处理提供环境;时空核心层是数据模型运行的核心,整合多源时空数据并建立各关联关系,包括空间模型、时间模型、属性模型、时空索引,实现对“空间—时间—属性”的三维信息的统一管理;健康诊断层是数据模型运行的应用向导层,以时空核心层数据提供的支撑条件,建立缺陷数据子模型、状态评估子模型等,实现对管网缺陷的判别、健康级别判定、维修决策的支撑。

3.2 核心层设计

时空核心层完成多源数据汇聚和关联的核心功能,而时空模型设计的优劣直接影响模型运行效能与成效。空间模型采用面向对象的矢量数据模型表征管网实体,将排水管网系统划分为点实体、线实体、面实体三大类核心地理实体并定义其空间特征与拓扑关系,点实体为检查井、监测点、泵站等,采用二维坐标描述空间位置并记录基础属性,线实体主要为管道,采用折线坐标序列描述空间走向并记录管径、材质等属性,通过端点与检查井建立“线—点”拓扑关联,面

实体主要为排水区域、行政区划等,采用多边形坐标序列描述空间范围以用于区域化管理与统计分析,并通过 ArcGIS 拓扑规则设置建立“管道不重叠”“检查井与管道必须相连”等拓扑关系保证空间数据完整性与一致性;时间模型采用基态修正模型与时间戳结合方式实现管网状态动态记录,选取 2023 年 12 月 31 日作为基态时间点储存该时间点的管网本体数据、健康状态数据等静态信息,对 2024 年以来的动态数据仅储存变化部分与时间戳,如某管道的 CCTV 检测结果仅记录缺陷相关信息与检测时间,并按数据类型设置不同时间维度,监测数据按 15min 记录,检测数据按单次检测记录,维修数据按事件记录,平衡数据精度与存储效率。

3.3 健康诊断层设计

健康诊断层在时空核心层基础上,服务于管网健康诊断业务需求,设计缺陷数据子模型和状态评估子模型:

缺陷数据子模型:参照 CJJ181-2012 规范,将管网缺陷分为结构性缺陷(8 类,含破裂、变形、脱节等)和功能性缺陷(6 类,含淤积、堵塞、渗漏等),记录缺陷标识、所属管道 ID、位置、检测时间等属性,建立缺陷与管道材质、建设年代的关联规则;

状态评估子模型:通过层次分析法和模糊综合评价法实现健康等级量化评估,核心指标及权重见表 1。

随后,建立指标隶属度函数,将检测和监测数据转换为模糊评价矩阵,通过权重矩阵和评价矩阵的复合运算,得出一个 0 到 100 分的健康指

表 1 层次分析法和模糊综合评价法核心指标及权重

核心指标	权重值
缺陷密度	0.35
缺陷严重程度	0.30
水力负荷率	0.15
淤积厚度	0.12
材质老化程度	0.08

表 2 健康状况评估通过评价指标

健康等级	健康指数范围	缺陷情况	处理建议
一级	90-100 分	无明显缺陷	不需修复
二级	75-89 分	轻微缺陷	需要维修观察
三级	60-74 分	明显缺陷	需要进行维修
四级	45-59 分	严重缺陷	需要立即维修
五级	<45 分	缺陷不能修复	需要换管

数。最后,根据健康指数划分健康等级(表 2),其中 90-100 分为一级,75-89 分为二级,60-74 分为三级,45-59 分为四级,低于 45 分为五级,且该子模型与时空核心层实时联动,在新增检测数据或监测数据时自动触发健康指数计算与健康等级更新,实现动态诊断。

4 启东高新区管网健康诊断实例应用

项目为启东高新区排水管网检测维修项目,包含园区内所有 380km 排水管网,检查井 1260 座、泵站 3 座,用地类型含工业用地、居住用地、商业用地等,项目实施目的为通过管道精确健康诊断,定位缺陷、高风险地段等关键问题,并确定科学管道维修计划,提高管网防洪排涝及水体环境质量;项目实施时间为 2024 年 1 月至 2024 年 12 月,项目共分为数据收集与预处理、模型构建与系统开发、实例验证与维修实施 3 个阶段,本文的多维时空 GIS 数据模型与应用系统在第 2 个阶段完成开发和第 3 个阶段应用;数据部署阶段将第 1 个阶段预处理完成的多源数据导入系统数据库中进行分类管理,其中基础地理数据包含 15 张 1:500 地形图、5 个社区行政区域范围、总长 85km 道路网以及高程;管网本体数据包含 380km 管线、1260 口井、3 个泵房的管线、检查井的管线空间及属性数据,其中包含混凝土管 210km、HDPE120km、钢管 50km;监测感知数据即包含 12 个监测点位从 2023 年 1 月到 2024 年 6 月的流量、水位数据,共 17.5 万条数据;检测评估数据即包含 2023 年 10 月到 2024 年 3 月的 CCTV 检测数据以及声呐检测数据,其中涵盖 200km 和 80km 管道长度,记录下 186 处缺陷;维

修历史数据包含 2018-2023 年管道的 123 次维修记录,维修记录包含清淤、局部修复、管道更换等类型;数据部署完成后通过系统数据管理系统模块对数据进行质量检验,保证数据完整率>98%、空间位置正确率>99%,满足数据质量要求。

5 结论

本文依托排水管网项目(启东高新工业园区排水管网维修)实践,结合传统的管网数据零散、时空关联不强、诊断精度较低等问题,设计了健康诊断的多维时空 GIS 数据模型,并开发了数据系统,对项目相关的基础地理、管网本体、监测感知、检测评价等多源时空数据进行了梳理,并采取转换、清洗、规范、融合的预处理手段提升数据质量,构建了多维时空关联关系作为模型的基础支撑;设计了包括空间、时间、属性、健康状态四维信息要素的“基础支撑层—时空核心层—健康诊断层”的三维数据模型架构,整合了时空属性关系,时空核心层利用空间、时间、属性模型以及时空索引实现多源时空数据的统一化管理,健康诊断层通过缺陷数据与状态评估子模型实现健康诊断,其模型空间、时空一体化、多源化、动态更新;健康诊断系统基于数据模型,并实现了相关数据的管理、时空的可视化、诊断分析、维修决策等重点功能,实例分析结果显示系统数据查询响应时间 $\leq 1s$,缺陷识别精准度达 96.9%,健康等级评估精准度达 98%,很好地支撑了管网健康诊断和维修决策;本文实践得出的该数据模型和系统数据能够从效率和管理精细化层面提高管网维修,通过启东高新工业园区排水管网维修项目验证后,管网维修效率提升 25%,管理成本下降 18%,管网缺陷率降低 75%,可以为同类排水管网健康诊断项目提供有益借鉴和思路参考。

参考文献(References):

- [1] 薛存金,周成虎,苏奋振,等.面向过程的时空数据模型研究[J].测绘学报,2010,39(01):95-101.
- [2] 李景文,傅玮佳,叶良松,等.基于对象的 GIS 时空

- 数据模型设计方法[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(06): 11-14.
- [3] 王超, 李伟, 杨志刚. 基于时态 GIS 的城市地下管线数据库建设[J]. 中国市政工程, 2011, (06): 71-73.
- [4] 王洋洋, 孙伟, 古丽米拉·克孜尔别克. 时空数据模型研究进展[J]. 地理空间信息, 2016, 14(09): 29-31.
- [5] 耿晴, 李兵, 詹伟. 面向时空信息数据的大数据平台设计[J]. 地理空间信息, 2017, 15(10): 52-54.
- [6] 任玉伟. 大数据背景下测绘地理信息成果管理体系的建设[J]. 经纬天地, 2019, 34(05): 22-24.
- [7] 王乃生, 王文杰, 张哲. 基于 NoSQL 数据库的时态地图瓦片数据存储模型研究与实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(08): 132-134.
- [8] 朱新铭, 刘海砚, 卢宣蓓, 张付兵, 李华孝. 面向变化语义描述的事件-过程时空数据模型研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(11): 9-13.
- [9] 阮思捷, 熊可钦, 王树良, 耿晶, 鲍捷, 郑宇. 众包时空数据驱动的城市地理信息推测综述[J]. 电子学报, 2023, 51(08): 2238-2259.

作者简介:

第一作者/通讯作者: 方毅, 男, 1985 年生, 浙江富阳人, 江西核地勘测设计有限公司, 高级工程师, 主要研究方向为测绘工程。Email: 2394463291@qq.com

Construction and Application of a Multidimensional Spatiotemporal GIS Data Model for Drainage Pipe Network Health Diagnosis

FANG Yi

(Jiangxi Nuclear Survey and Design Co., Ltd., Jiujiang 332000, China)

Abstract: With the progress of urbanization, the frequency and incidence of defects in drainage pipe networks are constantly increasing, seriously affecting the health and safety of the urban water environment and the capacity for flood control and drainage. Accurately and effectively analyzing and evaluating their health status is an urgent requirement for achieving refined management of drainage pipe networks. Based on the application background of the drainage pipe network maintenance project in Qidong High-tech Zone, this paper establishes a multidimensional spatiotemporal GIS data model for health diagnosis, in response to problems such as fragmented data, weak spatiotemporal correlation, and low accuracy of defect discrimination in drainage pipe networks. First, multi-source spatiotemporal data, including project-related data, preprocessed basic geographic data, pipe network ontology, monitoring and sensing data, and inspection and evaluation data, are integrated. Second, a multidimensional spatiotemporal GIS data model system is designed according to the concept of “basic support layer-spatiotemporal core layer-health diagnosis layer.” Finally, an application system is developed based on the multidimensional spatiotemporal GIS data model and piloted in the drainage pipe network maintenance project in Qidong High-tech Zone. The results show that the multidimensional spatiotemporal GIS data model enables integrated management of multi-source data, with defect discrimination accuracy exceeding 95%. It effectively supports dynamic tracking of defect detection results and maintenance decision analysis, significantly improving project implementation efficiency and the refinement level of pipe network management, and providing guidance for the implementation of similar projects.

Key words: drainage pipe network; health diagnosis; multidimensional spatiotemporal GIS; data model; refined management; Qidong High-tech Zone