

供水管网巡检系统时空数据模型的研究与应用

班福忱, 郭芷彤, 张 晶

(沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘 要: 针对供水管网巡检系统,通过分析供水管网巡检业务时空特性,研究类比空间模型的“面向对象法”,细化巡检对象,抽象定义管网巡检要素,完整表达供水管网巡检系统各要素时空语义,提出供水管网巡检系统的时空数据模型和数据库模型。结果表明,基于时空数据模型的供水管网巡检系统,可以实现巡检系统点、线、面基本时空对象在时空维度上有序组织,更加贴近供水企业管理与综合运营的需求,优化供水管网巡检业务,从而以智能高效管理和科学理解业务属性为应用目标,提高管网安全运行和管理水平,有效保证了供水管网高效率、低故障运行。

关键词: 供水管网; 巡检系统; 时空数据模型; 时空特性; 时空对象

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0062-06

Research and Application of Spatiotemporal Data Model of Water Supply Network Inspection System

BAN Fu-chen, GUO Zhi-tong, ZHANG Jing

(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Through analyzing the spatiotemporal characteristics of water supply network inspection, studying the object-oriented method of analogical space model, refining the inspection targets, creating the abstract definition of pipe network inspection elements, and fully expressing the spatiotemporal semantics of every element in water supply network inspection system, a spatiotemporal data model and a database model of the water supply network inspection system were proposed. The results showed that the inspection system achieved an orderly organization in the space-time dimensions for the basic point, line, and surface spatiotemporal features. The organization had satisfied the demands in water supply enterprise management and comprehensive operation, and optimized the inspection service of the water supply network. Taking the intelligent and efficient management and the scientific understanding of business attributes as the application goal, the proposed models could improve the safe operation and management level of the pipe network, and ensure a highly efficient and reliable operation of the water supply network.

Key words: water supply network; inspection system; spatiotemporal data model; spatiotemporal characteristics; spatiotemporal object

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601001); 辽宁省高等学校创新人才支持计划项目(Z2219003); 辽宁省教育厅科技计划项目(LJZ2017017); 辽宁省自然科学基金资助项目(20170540744)

城市供水管网是市政基础设施系统的重要组成部分,是城市生存与发展的基础。在供水企业中,管网管理部门为防止发生管网生产事故,通常对其管辖范围内的地下管网和附属设施进行巡检工作^[1],建立智慧化供水管网巡检系统是供水巡检业务发展的必然要求。在供水管网巡检业务领域,国内外众多学者进行了大量研究,陈听学等^[2-4]的研究偏向于管网巡检空间数据和文本信息, Lee 等^[5-7]的研究则主要针对巡检轨迹查询方面的处理方式和轨迹活动规律等。但结合巡检时空特性的研究尚未深入,导致系统缺点如下:①目前的管网巡检系统只能对空间可视化表达,没有与时间因素有效结合;②管网数据分散,没有跳出局限的空间视野,未将历史数据与实时数据相结合,且没有同时增加数据库在统计和调用过程中的存储空间及输出速度;③缺乏从时空角度的分析,难以全局把控管网改扩及其巡检路线的演变规律;④发生爆管事故时,只有应急关阀处理方式,没有依据时态特征,进行全面时空分析和分类汇总,从而降低了爆管、漏损等事件的处理效率;⑤基于空间单因素的管网巡检系统,在监控数据分析上也因为时间因素的缺失而不够准确与全面。

针对上述问题,笔者根据管网巡检对象的时空特性,综合考虑时间、空间和属性信息,结合时空数据之间内在关联,分析管网巡检对象时空特性,构建更科学的供水管网巡检系统时空数据模型,实现对供水管网时空对象的全面多维立体化分析,统筹供水管网巡检系统及其发展演变趋势。

1 供水管网巡检系统的时空特性

随着城市化进程不断发展,供水管网巡检系统逐渐展现出具有典型时空信息要素的时空特征^[8],具体表现在以下方面:①时空发展性,供水管网地下空间布局随着城市化进程不断增改和扩建;②时空序列性,巡检轨迹数据采集位置和时间信息按时间序列排列;③广度周期性,轨迹采样间隔较小,巡检数据重复性高,例如地级市管网巡检工作通常使用隔天采样的方式采集管网巡检数据;④细化离散性,受巡检人员人为操作影响,导致采样空间定位、角度误差、定位和预处理方式有所不同,连续运动轨迹被离散化表示,时间数据与空间数据分散复杂,增加了数据分析的困难性;⑤动态变化性,供水管网的巡检人员、维修人员和抢修车辆的巡检轨迹点空间位置及时刻发生变化;⑥唯一性,爆管、管网漏损、管网附

属设备故障等突发事件具有明确的空间位置,且样本数据与时间密切相关,并随着维护、应急抢修等业务开展而消失。上述时空特征,在一定程度上体现了供水管网巡检系统的时空演变规律,进而为建立时空数据模型、优化供水管网巡检系统奠定了基础。

2 供水管网巡检系统时空数据模型

2.1 概念模型

在地理空间领域研究的数据模型概念,较突出的是从“面向对象”的角度,将空间“地理本体”具体化成“地理实体”来表达复杂的地理动态现象^[9]。参照文献[9],本研究建立的时空数据概念模型见图1,将面向对象法类比应用到时间领域,结合时间因素建模,有针对性地将供水管网巡检系统分为“巡检对象”“巡检事件”和“巡检过程”。在时空轴上,通过进一步形象化定义,以“点、线、面”的表达方式,厘清管网与巡检业务在时间和空间双重维度下的内在关联,对供水管网巡检业务进行抽象描述,构建时空数据概念模型,突显模型的通用性和兼容性。

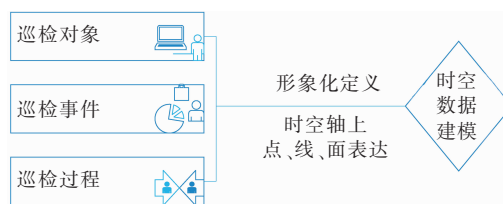


图1 时空数据概念模型

Fig.1 Spatiotemporal data conceptual model

2.2 巡检系统时空对象形象化定义

巡检时空对象是抽象集合概念,包括时间对象和空间对象^[10]。时间对象为抽象基类,不能实例化,在管网巡检业务中,可以通过有效时间定义时间对象,如供水管网巡检上班工作时间、管网发生爆管事故持续时间、管网抢维修时间等;空间对象为空间实体的抽象,与地理空间位置相关联。

时空对象的抽象化,采用面向对象的方法,根据时空对象特点给出形式化定义,将巡检要素直观地延展在时空轴内。空间上,设管网巡检系统的全体空间对象为集合 S ,任一管网空间要素 s 为 S 的一个子集,形式化定义空间对象 $S = \{X, Y, Z\}$ 。时间上,将管网巡检系统的时间对象形象化定义为 $T = \{\text{Starting Time}, \text{Terminal Time}\}$,有效时间 T 表示一维数据轴,时间参考系中的任意时间节点 t 为 T 轴上的任意一个时刻。巡检系统提取的时间数据信息

除了实时时刻 t , 还包括历史时段和现在进行时段。时段是从开始时刻 t_s 到终止时刻 t_e 的生命期 $V_s = \{t_s, t_e\}$, 为全集 T 的一个子时段集。对于一个管网空间要素 s , 在其有效时间 V_s 时段集内的变化, 表示该空间要素的时态变化。在时空维度内, 还存在着巡检属性对象(非空间实体的抽象), 将属性对象定义为 $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$ 集合。属性对象与时间对象共同构成时态对象, 表达特定时间内巡检事件的特征变化, 并将时态对象定义为 $\text{Temporal} = \{V_s, \{F_1, F_2, \dots, F_n\}\}$ 。同一空间要素 s , 在不同时间的巡检对象集合为时空要素类, 定义为 $\text{Temporal} = \{s, V_s, F\}$ 。在空间要素 s 上集成巡检时空要素类时态变化, 将时空对象形式化定义为 $ST = \{S, T, F\}$, 表达巡检过程中巡检对象时空特性的完整变化。

2.3 巡检系统时空要素属性特点及时空关系

供水管网巡检系统细化的点、线、面要素具有时空模型特有的属性特点, 包括: ①唯一性, 定义标识码 ID 以区分点、线、面类型; ②特殊性, 要素消失, 标识码 ID 也随之消失, 当出现新的要素, 随即出现属于该要素的唯一标识码; ③实时性, 要素在时间变化下引起空间和属性的变化; ④关联性, 要素之间存在拓扑约束关系。拓扑约束关系具体包括: ①点要素位于线要素上, 如巡检点位于巡检任务轨迹上、管段设备点位于管段上; ②点要素位于线要素端点处, 如道路尽头、拐弯处、十字路口等位于一条巡检路线的端点处; ③线要素不能孤立或重合, 需进行预处理; ④线要素不能有首尾相交, 必须拓展为面。

结合时空要素属性特点, 构建多维度时空关系如图2所示。将时空关系分为3大类, 即时间关系、空间关系和管网巡检属性对象。时间关系也分为3个方面, 包括: ①由时间点(以时刻 t 为代表)和时间线(以时间段 V_s 为代表, 表达巡检事件起始与终结的时间间隔线性长度)两种元素组成, 抽象为点与点、点与线、点与线3个方面的时间拓扑关系; ②用来表达事件发生、消亡的先后次序, 如环线巡检轨迹的先后顺序的时间方向关系; ③表达时间间隔的时间度量关系。空间关系类比于时间关系, 不同的是, 在空间拓扑关系上, 根据判断要素的空间位置和拓扑信息是否分离为条件, 将拓扑关系的表达方式分为两种, 即拓扑关系松耦合表达和拓扑关系紧耦合表达, 前者指空间的独立性, 只表明空间位置, 无连通性; 后者指时空要素既表达点、线、面位置, 又表达

其之间拓扑关系。本研究中时空模型的空间拓扑关系采用紧耦合表达, 形式被抽象为点和面, 如供水管网的阀门、水表等可抽象为点要素, 巡检路线轨迹中的支线以及供水管网的主管、支管等可抽象为线要素, 按照勘探的拓扑关系连通为面要素。最后, 管网巡检的属性对象以线性数轴形式结合到时空关系内, 使管网巡检中的时空对象更加立体化地展现并得到多维度全面表达。

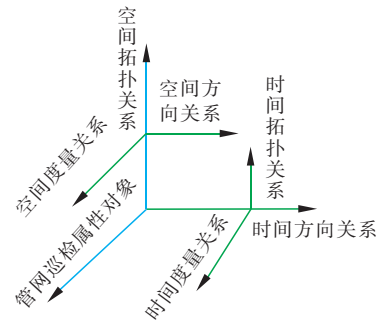


图2 多维度时空关系

Fig. 2 Multidimensional spatiotemporal relation

2.4 供水管网巡检系统时空信息集成

时空信息集成表示两个或两个以上对象(子元素)有机集合成为一个整体进行交换, 构建综合数据库^[11], 满足供水管网巡检系统管理需求, 其目的在于提高系统的整体功能。模型包含供水管网巡检系统的4个时空信息对象, 具体形式表达如下:

$$\text{STMODEL} = B(\text{ST}/\text{STDATEBASE}) \quad (1)$$

式中: B 为供水管网巡检系统时空过程集成方法; ST 为供水管网巡检系统时空对象信息; STDATEBASE 为供水管网巡检系统时空事件数据库; STMODEL 为供水管网巡检系统时空数据模型。

针对上述描述, 本研究从时空对象出发, 集成供水管网时空数据库模型, 如图3所示。

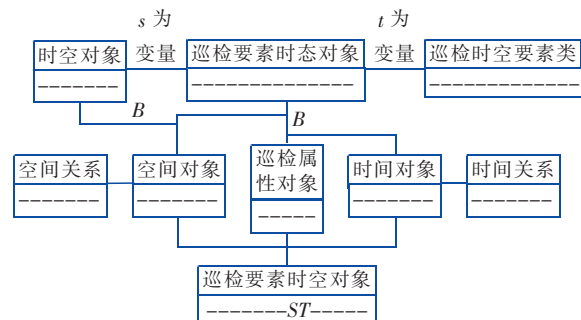


图3 供水管网巡检系统时空数据库模型

Fig. 3 Spatiotemporal database model for water supply network inspection system

2.5 供水管网巡检系统时空数据模型

以管网巡检时空对象形式化定义的“点、线、面”要素为基础时空对象,以时间和空间为变量,涵盖多维度时空关系,构建供水管网巡检系统时空数据模型,见图4。时空数据模型中的点时空对象用点要素(SCADA监测点、附属设备点、管网节点、巡检点等)的ID标识、空间坐标及时间点表达;巡检

系统的线时空对象具备线要素特点,由至少两对坐标和有效时间段描述;供水管网面时空对象是点、线时空对象的集合,通过监测定位技术采集的地下供水管网的空间拓扑几何结构,结合以空间 S 为变量的ArcGIS静态数据,空间三维立体精准表达管网拓扑结构、图形数据库结构、巡检轨迹范围等,再结合时间关系,完整表达供水管网巡检系统整个生命周期。

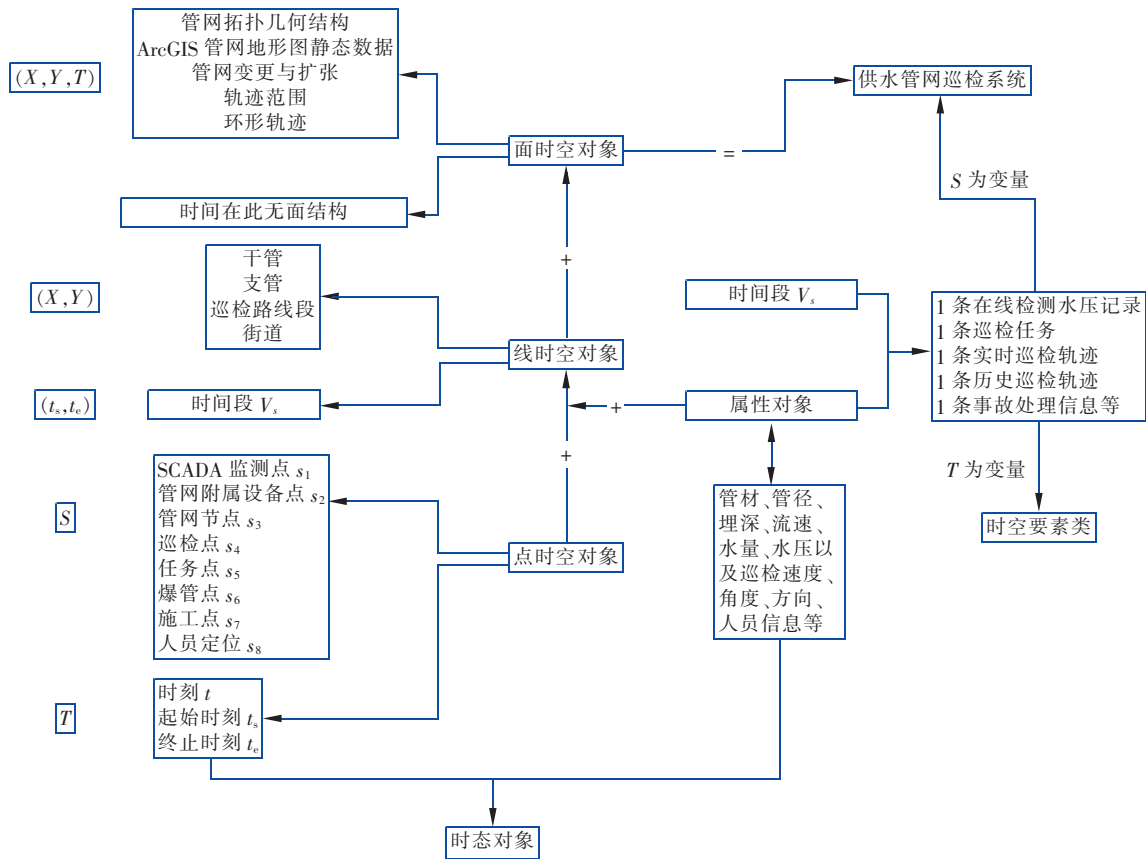


图4 供水管网巡检系统时空数据模型(STMODEL)

Fig. 4 Spatiotemporal data model for water supply network inspection system

每一个时空对象都有各自不同的属性,属性可以是一个或者多个关联在一起。点时空对象的属性包括管材、管径、埋深、管网节点水量、水压、流速以及巡检速度、角度、方向、人员信息等,这些属性与时间点 t 结合,构成管网巡检对象点的时态对象,描述管网巡检对象点的时态特征。同时,这些属性与时间线 V_s 结合,构成管网巡检线要素的时态对象,描述在一段时间内的管网巡检对象的属性特征变化,如1条在线检测水压记录、1条巡检任务、1条实时巡检轨迹、1条历史巡检轨迹等。以时间 T 为变量,构建供水管网巡检时空要素类,可以表达管道改扩

张工程进度、管网巡检活动范围、数据实时更新变化等时态特征。属性对象再以时间 T 和空间 S 为变量,表达供水管网巡检系统完整变更时态信息数据。

可以看出,以上共同表达了供水管网巡检系统的完整时态变化,整合巡检终端数据的抽象时态信息,实现对供水管网巡检系统的宏观掌控,体现供水管网巡检系统完整生命周期的时空特性。

3 时空数据模型的优化

现有供水管网巡检系统主要局限在对空间和现状的分析,多以GIS空间数据为基础,SCADA技术辅助关键点监控。巡检方式是巡检人员根据设置道

路的关键点来进行巡检,更新巡检里程等空间数据。若巡检过程中突遇供水管网故障,实时发出警报,记录故障位置和爆管点管网属性,巡检中心即刻发出工单,抢险维修人员可立即获取故障点位置和管线属性信息的工单,随后事故施工点的手持端进行到位提醒,根据具体坐标位置进行现场操作,对事故点进行关阀分析等功能。但是,面对管网和巡检系统复杂多变的时空信息,该系统难以支撑供水管网巡检系统的综合运营与宏观监管需求。依照本研究提出的时空数据模型,将现有管网巡检系统优化成具有时空特性的供水管网巡检系统,如图5所示。

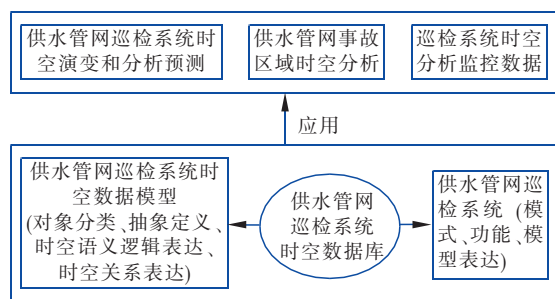


图5 供水管网巡检应用系统

Fig.5 Application system of water supply network inspection

3.1 供水管网巡检系统时空演变和分析预测

基于 STMODEL 供水管网巡检时空数据模型,系统时空要素类表达了动态系统中每一个巡检要素的变更情况,因此单个要素的时空演变可通过查询构成时空要素类的时态对象初步得到。为了得到更全面详细的整体演变情况(如扩张、改建、合并、消失、取代等),进行时空查询:首先,对空间范围查询,获取符合条件巡检要素编码的全部集合;再对时间筛选查询,得到由点时空对象构成的时态对象的属性编码;将点时空对象映射到线时空对象上,拓展空间、属性、历史变化,提供包括总量汇总、更新汇总、管网总长历史分析、设备总数分析、管长更新分析并进行相应的时空数据分析;遍历历史变更时空数据库集合,查询历史时空要素类以及实时时空要素类,得到时空信息集合,有效掌握市政管网数据历史动态变化趋势。

相对于微观的对比分析某个巡检点和管网事故点的变化情况,尤其针对管网抢先维护和改扩建的进度难以掌握的问题,基于时空数据模型的点、线、面要素以及时态对象,可回溯甚至预测到任意时刻巡检下的管网形态,可视化展现市政设施空间布局

的时空变化情况,实现对改造工程的抽象化监管。使管网巡检时空演变图从时空变迁的视角宏观、直观地展现供水管网整体运行状况,为管网的规划提供数据支持,方便研究供水管网的宏观运行演变规律,对巡检计划和运营方向设计、运行管理及评估方面具有重要的作用和现实意义。

3.2 供水管网事故区域时空分析

从管网事故产生因素分析,以供水管网爆管事故为例,同一批管材的质量以及同一片管网的施工质量、地面荷载及管道压力等,都可能引发爆管的空间集聚性^[12]。因此,基于管网巡检时空数据模型针对事故区域进行时空分析,以时间度量的取值范围为划分标准,根据爆管事故发生的时间序列数据,分析事故发生周期,在一定周期内,结合事故点要素与空间区域、管网属性数据进行叠加;确定点时空对象要素的半径取值范围和邻域空间密度阈值的取值范围,结合爆管、漏水、水压异常、异味等投诉事件,得到爆管时空散点图,辅助管理人员采取有针对性的措施,加强重点区域的科学管网巡检,从而降低事故发生的频率。

3.3 巡检系统时空监控数据分析

基于时空数据模型中时间、空间与巡检属性对象的时空关系,检索出时空关系中在邻近、上下游等尺度的 SCADA 监测点和巡检点序列。根据运行监测信息的时空关系,抽取相同时间段内(如月、季度等)相关巡检点和 SCADA 在线监测点检测数据,并进行数据汇总,计算二者在相同检测属性指标的偏差率,根据不同时间尺度的时空监测数据相互印证。对于偏差率大(可自定义配置)的检测数据,将对对比结果输出,供企业调度参考,保障巡检和管网监测数据的准确性和真实性。

4 结论

依托供水管网巡检的时空数据特点,提出了基于面向对象法的时空数据模型,充分利用巡检时空对象数据信息,实现了巡检系统点、线、面基本时空对象在时空维度上的有序组织,开发时空数据模型在供水管网巡检系统的功能应用,为供水管网巡检系统的开发设计奠定基础,有利于建立稳定、可扩展的巡检系统数据结构和开发相应功能,并解决现有系统因时空因素缺失而导致的如文内所述一系列问题,使得优化后的系统更贴近供水企业管理与综合运营的需求。

参考文献:

- [1] 邹俊华. 基于 Android 的智能巡检系统的设计与实现 [D]. 南昌:东华理工大学,2016.
Zou Junhua. Design and Application Based on Android Smart Inspection System [D]. Nanchang: East China University of Technology,2016(in Chinese).
- [2] 陈昕学,刘海军. 供水管网巡检的创新与实践[J]. 给水排水,2011,37(1):106-107.
Chen Tingxue, Liu Haijun. Innovation and practice of water supply network patrol and examine[J]. Water & Wastewater Engineering, 2011, 37(1): 106-107 (in Chinese).
- [3] 刘明春,王进,邹东. 基于 GIS & GPS 技术的供水管网巡检养护系统的实现[J]. 地理空间信息,2016,14(1):104-106.
Liu Mingchun, Wang Jin, Zou Dong. Implementation of water-supply pipe-network inspection and maintenance system based on GIS & GPS [J]. Geospatial Information,2016,14(1):104-106(in Chinese).
- [4] 陈国铭. 管网巡检系统在城市供水中的应用与成效[J]. 城镇供水,2012(1):44-45.
Chen Guoming. Application and effect of pipeline network inspection system in urban water supply [J]. City and Town Water Supply, 2012(1): 44-45 (in Chinese).
- [5] Lee J G, Han J, Li X L, *et al.* TraClass: trajectory classification using hierarchical region-based and trajectory-based clustering[A]. Proceedings of the 34th International Conference on Very Large Data Bases[C]. Toronto:Elsevier Science Publishing Co. Inc.,2008.
- [6] 韩煜星. 面向移动轨迹大数据的查询检索和挖掘算法的研究[D]. 上海:华东师范大学,2018.
Han Yuxing. Research on Query Optimization and Mining Algorithm for Big Trajectory Data [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018 (in Chinese).
- [7] 伍思集. 智能巡检系统中导航模块的设计与实现 [D]. 北京:北京邮电大学,2017.
Wu Siji. Design and Implementation of Navigation Module in Intelligent Patrol System [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017(in Chinese).
- [8] 张忠贵,吴信才,王玉岚. 面向集成管理的供水管网时空数据模型[J]. 中国给水排水,2016,32(15):71-75.
Zhang Zhonggui, Wu Xincan, Wang Yulan. Integrated management-based spatiotemporal data model for water supply network[J]. China Water & Wastewater,2016, 32(15):71-75(in Chinese).
- [9] 陈新保, Li Songnian, 李黎, 等. 基于对象—事件—过程的时空数据模型及其应用[J]. 地理与地理信息科学,2013,29(3):10-16.
Chen Xinbao, Li Songnian, Li Li, *et al.* Object-event-process-based spatiotemporal data model and its application into sea-ice dynamics [J]. Geography and Geo-Information Science, 2013, 29(3): 10-16 (in Chinese).
- [10] 张忠贵. 市政公用基础设施时空信息集成管理技术研究[D]. 武汉:中国地质大学,2014.
Zhang Zhonggui. Research on Integrated Management Technology of Municipal Infrastructure Spatiotemporal Information [D]. Wuhan: China University of Geosciences,2014(in Chinese).
- [11] 吴秋明. 集成管理理论研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2004.
Wu Qiuming. The Research about the Theory of Integration Management[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2004(in Chinese).
- [12] 张海亚,田一梅,裴亮. 基于 GIS 的供水管网爆管空间分析模型的建立与应用[J]. 中国给水排水,2010,26(19):71-73.
Zhang Haiya, Tian Yimei, Pei Liang. Development and application of spatial analysis model for pipe break of water supply system based on GIS[J]. China Water & Wastewater,2010,26(19):71-73(in Chinese).



作者简介:班福忱(1976-),男,辽宁阜新人,博士,教授,研究方向为给水排水系统优化。

E-mail:banfc@163.com

收稿日期:2019-04-12