

侯英娜, 黄国庆, 费霞丽, 等. 基于管网实时在线模型的爆管预警应用[J]. 净水技术, 2023, 42(8):190-197.

HOU Y N, HUANG G Q, FEI X L, et al. Application of pipe burst warning in water supply network based on real-time hydraulic model[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(8):190-197.

基于管网实时在线模型的爆管预警应用

侯英娜^{1,*}, 黄国庆¹, 费霞丽¹, 曲扬², 白妙顺³, 郑楚飞⁴, 舒诗湖⁵

(1. 厦门市水务集团有限公司, 福建厦门 361000; 2. 上海慧水科技有限公司, 上海 200090; 3. 上海市工程设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200092; 4. 四创科技有限公司, 福建福州 350108; 5. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要 随着智慧水务建设的推进, 实现从传统基于人工经验的生产运行向数据驱动下的运营决策转变成为必然趋势。利用机理模型和数据模型建立供水实时在线水力模型系统, 打造城市供水管网的数字孪生, 是厦门市水务集团数字化转型的重要成果之一。文中在实时在线模型的基础上, 探索了爆管预警分析与处置的模型应用研究。研究和实践结果表明, 基于实时在线模型的数字水务建设, 在实时监控、事件侦测与警告以及首创的模型移动端应用等方面具有显著的优势, 有效提升了供水运营效率。

关键词 实时在线水力模型 供水管网 模型应用 爆管预警 应急处置

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)08-0190-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.08.024

Application of Pipe Burst Warning in Water Supply Network Based on Real-Time Hydraulic Model

HOU Yingna^{1,*}, HUANG Guoqing¹, FEI Xiali¹, QU Yang², BAI Miaoshun³, ZHENG Chufei⁴, SHU Shihu⁵

(1. Xiamen Municipal Water Group Co., Ltd., Xiamen 361000, China;

2. Shanghai Huishui Technology Co., Ltd., Shanghai 200090, China;

3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

4. Istrong Technology Co., Ltd., Fuzhou 350108, China;

5. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract Along with the advancement of digital water, the transition of water utilities from the experience-based operation to data-driven decision making becomes inevitable. As an important achievement of Xiamen Municipal Water Group's digital transformation, the real-time hydraulic model system was built for "digital twin" of the urban water supply network, by using of both mechanism and data models. Model application for analysis and disposal of pipe burst warning were discussed based on real-time model in this paper. The results showed significant advantages on real-time monitoring, events detection and alarms as well as originally mobile application of hydraulic model etc., with water operation performance improved.

Keywords real-time hydraulic model water supply network model application pipe burst warning emergency measure

供水管网是城市重要的基础生命线, 是维持城市正常运转、工业生产、人民日常生活的必备设施。随着城镇化进程的快速推进, 城市供水管网的规模也在不断扩大, 供水企业面临的运营场景更加复杂。水力模型开始被逐渐应用于供水管网的日常运营维

护, 尤其是物联网技术的不断成熟, 实时在线水力模型应运而生。实时模型可以通过数据自动更新和实时模拟计算, 实现管网运行状况的动态更新, 使供水管网的“数字孪生”成为可能。所谓水行业的数字孪生, 即是利用多源实时数据与模型相结合, 对水系统特定部分的数字表示^[1]。在传统行业数字化转型和智能化升级逐渐成为关注重点的情况下, 数字孪生技术是实现这一目标的重要途径^[2]。探索利

[收稿日期] 2023-03-03

[通信作者] 侯英娜(1983—), 女, 高级工程师, 主要从事供水规划科研管理工作, E-mail: 18559039296@163.com。

用数字孪生技术对提高管网爆管的预警效率具有重要意义,管网爆管不仅会导致水资源的浪费,更严重的是对城市的公共安全构成威胁。事实上,爆管是供水企业面临的重大公共安全事件之一。

随着厦门城市化的快速发展,城市供水的管理矛盾日益突出,特别是在2017年金砖国家领导人厦门会晤和每年在厦门举办的中国国际投资贸易洽谈会等重大会议期间,都对供水保障提出了更高的要求。近年厦门市政水务集团信息化、物联网的加快建设,利用海量数据来保障供水安全,优化供水效率,逐步实现智慧水务成为工作焦点。

当前供水管网实时在线水力模型的建设已经取得长足发展,国内有很多城市都正在探索或者已经尝试建设了实时在线模型,并已在实际应用中取得了一些成果。例如广州市建立了中心城区DN300以上供水管网实时在线水力模型,在无人值守情况下,连续24 h,每15 min进行一次水力模拟校验,从而使得该模型运行精度高、稳定性好,并在模型系统基础上开发了辅助调度模块,调度员可在线模拟水泵调整时的管网运行状态,充分发挥管网水力模型在管网实时运行调度中的指导作用^[3]。陈捷^[4]将实时在线水力模型运用于供水规划中,在新建水厂输水管、新建单元配水管、新建区域联络管3种供水规划场景下进行了应用研究,结果表明在线模型能更科学、高效地为解决实际问题提供决策依据。

在供水管网日常运营过程中,爆管是威胁城市供水安全的重要因素,研究探索有效预防爆管、减少爆管事故的发生频次,并在爆管事故发生后能够快速地甄别和定位以便快速处置的方法和手段是十分必要的。闫涛等^[5]利用历史监测数据采用自适应卡尔曼滤波结合平均低通滤波对管网供水量进行实时估计,根据监测值与估计值的差值预警爆管。深圳水务集团利用随机森林算法建立了多因子爆管预测模型,并将分析结果绘制成爆管预测图,并将预测图应用于日常管网的巡检维护^[6]。深圳某原水调水工程的管道采用基于相位敏感光时域反射仪(ϕ -OTDR)原理的分布式振动光纤监测系统和准分布式光纤光栅压力传感系统,可以对压力管道的漏水进行有效监测,并对爆管发出预警^[7]。目前有关实时在线模型、爆管等研究都相对独立,但爆管问题是城市供水安全的重要课题,实时在线模型的爆管预

警可以有效改善以往爆管预警方法时效性差的缺陷,从而使得供水企业能够更高效地确定爆管事故位置,并快速制定爆管处置方案,提高了处置效率。本文将厦门水务为例,构建供水管网实时在线水力模型,探讨利用实时在线模型进行爆管预警的方法,并以一次重大爆管为例验证了爆管处置方法的有效性。

1 实时在线模型建设

1.1 厦门本岛供水格局

厦门市本岛共有高殿水厂和莲坂水厂两座水厂,总供水能力为90万t/d,2019年两水厂最高日供水量合计69.7万t。高殿水厂位于本岛的北部是主要供水水源,通过长岸路、嘉禾路、金尚路和环岛干道4条主输水管道由北向南供水。莲坂水厂位于本岛的中部,生产能力为5万t/d。本岛区域内共有11个管网泵站,全部为封闭区域增压泵站。DN100及以上管道总长约为1400 km,供水管网已形成较为完善的环状管网系统。厦门本岛区域供水格局如图1所示。

1.2 模型建设

厦门水务在2016年开始建设本岛管网模型,模型建设中收集了地理信息系统(GIS)管网数据、营收水量数据、水厂和管网的压力流量数据。通过管网数据的导入,管网拓扑结构的检查、整理和简化,用水量的时间和空间分配,管网模型的校核,在2017年完成了本岛管网模型的建立。在建设模型之前,厦门水务集中资源对管网GIS数据进行了完善,因此,具备了高质量的供水管网GIS数据,为离线模型的构建打下了坚实基础。同时,离线模型构建过程中,也对GIS数据进行了进一步梳理,尤其是对管网拓扑结构以及阀门状态等做了细致检查。在数据完善的基础上,建成的离线模型共包含66855个节点,54328段管道,14706万个阀门,纳入精度统计的测压点共计60个,水厂、泵站和管网测流点共计4个。校核完成的模型,80%数量的测压点平均误差在 ± 1.5 m以内,100%测压点平均误差在 ± 2.0 m内,100%测流点的平均误差在10%以内。

1.3 技术路线

厦门水务同步开展了离线模型与实时在线模型的建设,实时在线模型系统是建立在系统数据库和核心计算引擎的基础之上,与数据采集与监视控制



图 1 厦门本岛区域供水格局概览

Fig. 1 Current Water Supply Situation in Xiamen Island

(SCADA)系统的供水调度数据、营收系统的用户水量数据、GIS 管网拓扑数据建立了数据交互,作为智慧管网运营的核心驱动。系统主要分为 3 个模块,数据清洗、实时计算、数据存储。

数据清洗模块:实时数据是在线模型的基础,模型系统的计算、预警、报警等都依赖于实时数据的准确性。但是,实时数据在产生、传输、保存过程中都会出现不同的错误。数据清洗模块针对数据丢失、数据波动、数据异常、数据延迟等问题进行处理,从而减少数据对模型的影响。

实时计算模块:利用经过清洗的数据,实时计算模块进行迭代求解,更新水力计算和水质计算。它利用当前的系统状态、输入数据和水力学方程进行迭代收敛,得到最能反映当前水力条件的解。这个迭代过程实现了实时更新和调整。

数据存储模块:实时在线模型系统的数据不仅有模型计算结果,还有实时数据、基础信息数据、管

网拓扑数据等。由于模型需要频繁更新和迭代,版本控制是存储模块的一个重要功能,它允许管理多个模型版本。另外,实时在线模型需要处理大规模的数据和高并发的请求。因此,系统采用分布式存储,将模型数据分片存储在多个节点上,并提供了复制、故障恢复和负载均衡等机制。

在线水力模型系统技术路线如图 2 所示。

基于实时水力模型系统的构建,实现了仿真模型在移动端的应用,打通了桌面端、网页(WEB)端和移动端,实时在线模型的使用场景不仅突破了传统离线模型仅在有限授权的 PC 端使用局限,实现多部门、多用户的 WEB 端应用,还进一步拓展到管网运维的一线,实时水力模型的跨平台一体化应用如图 3 所示。建设完成的实时模型,实现了所有管径 DN100 及以上管网的 5 min 步长在线计算。该系统具有管网动态监测、事件侦测和预警、实时模拟与优化调度、预案历史库管理等功能。

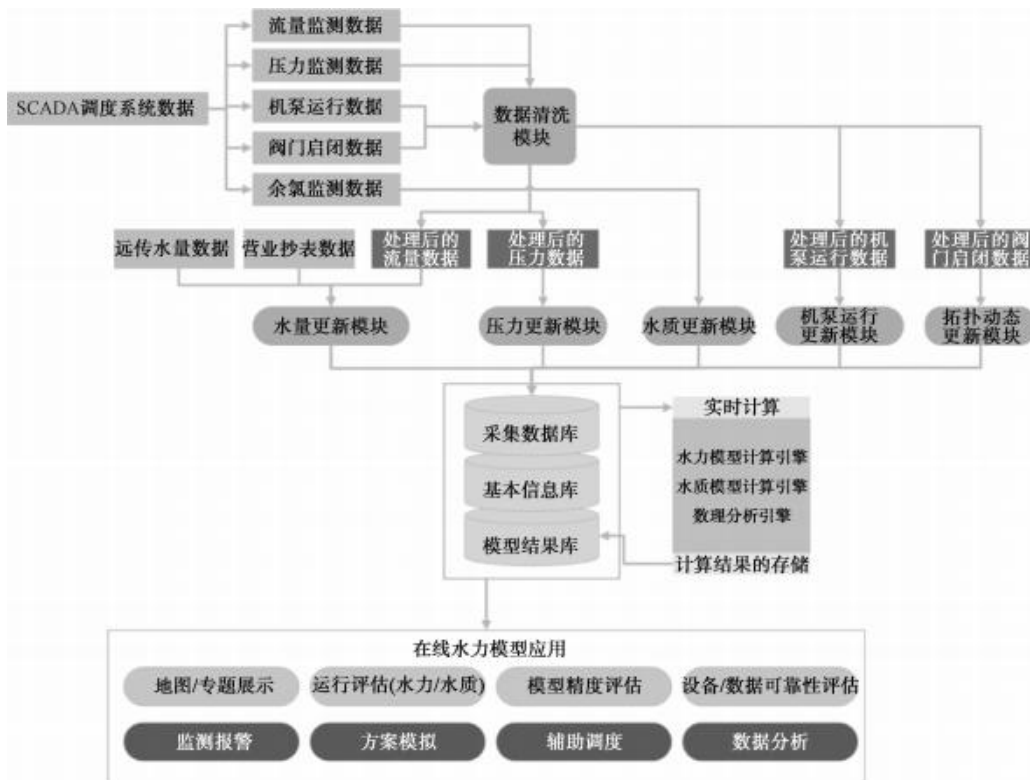


图2 实时水力模型系统技术路线

Fig. 2 Technical Routes of Real-Time Hydraulic Model

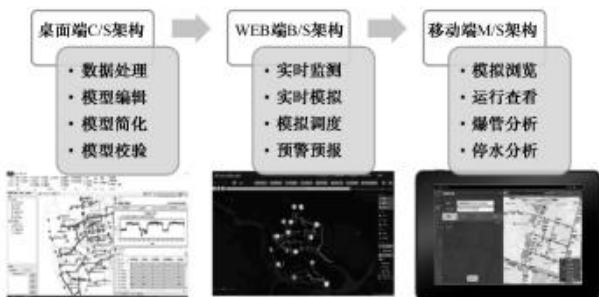


图3 实时水力模型的跨平台一体化应用

Fig. 3 Applications of Real-Time Hydraulic Model in Multi-Platforms

2 爆管预警算法与应用

2.1 爆管预警算法

在线模型系统通过实时监控管网流量、压力等的在线监测值和模拟值的差异,可以快速地探查并定位爆管事件。当系统分析结果满足疑似爆管的触发条件时,会通过等多种形式报警并告知调度中心和相关运维部门,便于一线人员能够在第一时间了解并探查事故现场,节省响应时间,提升应急处置的主动性。系统判断爆管主要依据监测点的压力变化,爆管预警的主要判断流程如图4所示。

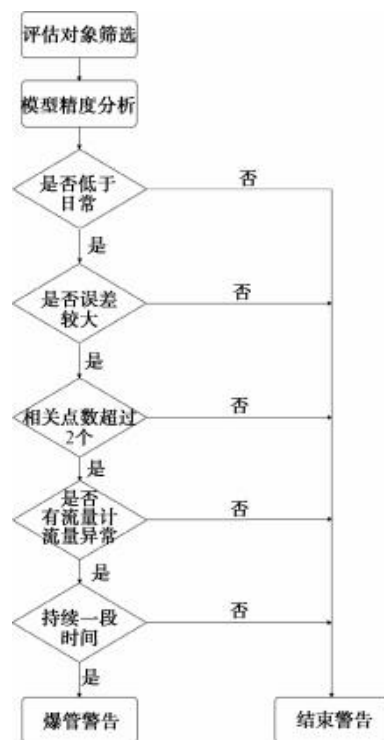


图4 爆管预警判断流程

Fig. 4 Flow Chart of Pipe Burst Warning Analysis

在日常运营过程中,供水企业对于监测点的维护力度不同,会出现监测点数据异常、数据缺失等情况,因而在进行爆管判断之前需要对设备进行评估,爆管判断必须立足于可靠度较高的监测设备。此外,模型的精度表明了模拟值与实测值的差异,代表当前模型反映现实管网的真实程度。爆管的准确预警很大程度上取决于模型的精度,因此,模型系统实时对模型的精度进行评分,当模型实时精度满足不低于连续 7 d 模型平均精度时,系统才会发出爆管预警。

在上述基础上,在线系统才能更为准确地判断出爆管事件,爆管预警的触发条件主要如下。

(1) 压力监测点 a 在某时刻出现实测压力值低于日常运营数据包络线的下限值。

(2) 压力监测点 a 在此时刻监测值与模拟值产生的误差较大。

(3) 出现与监测点 a 压力下降高度相关的其他异常监测点数量超过 2 个。

(4) 管网流量计 b 在此时刻流量异常,并对该流量计下游进行追踪,管网流量计 b 下游降压最大处为爆管点。

(5) 持续一段时间出现上述情况。

当同时满足上述条件时,管网流量计 b 和压力监测点 a 及与其高度相关的其他监测点整体触发为一个爆管预警事件,若不满足上述条件,则结束预警。

2.2 爆管事件预警和处置

在 2021 年 9 月,厦门市政水务集团遭遇了一次 DN500 管道爆裂事件。这是集团首次在应急处置方面成功地应用了实时在线模型,以提升应对爆管事件的效率。从模型发出爆管预警开始,到制定快速应急方案,再到通过模型系统向用户发送停水短信,整个过程得以高效地完成。

图 5 是一起爆管事件的系统报警界面,当日上午 9:40 左右系统发出岛内西南地区疑似爆管报警,片区内 13 处测压点的监测值较模拟值下降了 10 m 左右,持续时间 5 min 以上。

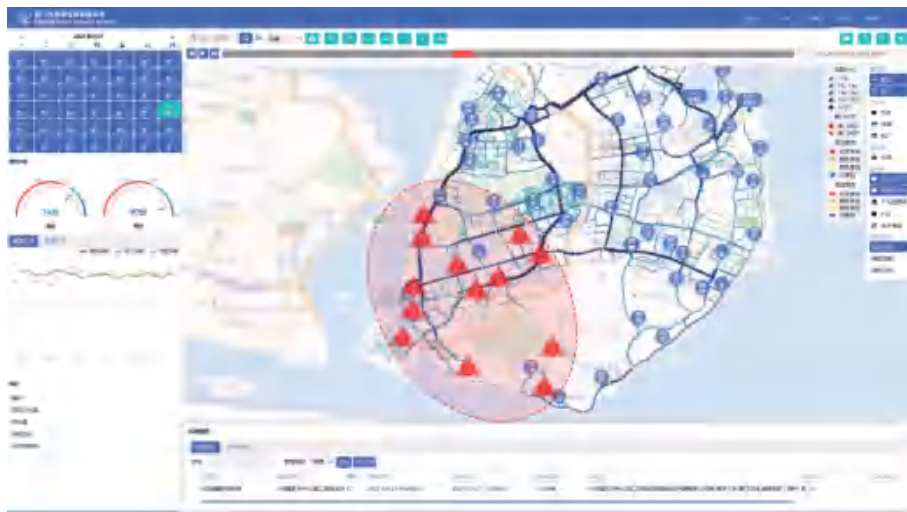


图 5 事件报警界面

Fig. 5 Page of Events Warning

针对此次爆管预警事件,利用在线模型系统进行流量压力的相关分析和下游追踪模拟分析,缩小现场勘察定位范围,确定了在湖滨西路西侧附近小学 DN500 管线发生爆管,如图 6 所示。

根据此次爆管事件位置,运用在线模型进行调度仿真模拟,调节爆管管线上游高殿水厂西区的出厂压力值以便进行后续的关阀处置,同时分析降压前后对用户用水压力的影响,以求把影响范围降到最低。当设定水厂压力降低 4 m 时,分析结果如图

7 所示。

从降压前后的方案对比示意图上可见,除某公园附近供水压力有所降低,低压区范围略有扩大外,管网其他地区供水压力的影响微小。考虑到爆管为突然性偶然事件,紧急程度较高,通常管道修复时间较短,结合上述模拟结果,决定对高殿水厂西部出厂进行短时间的降压。

继而进行关阀分析和停水区域分析,根据管网拓扑结构及阀门分布位置,爆管维修需关闭 3 个阀

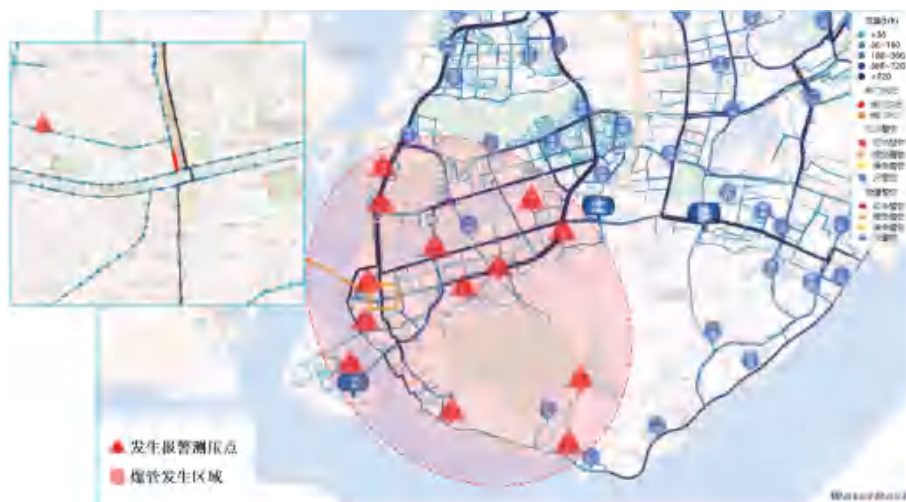


图6 爆管事件定位

Fig. 6 Orientation of Pipe Burst Events

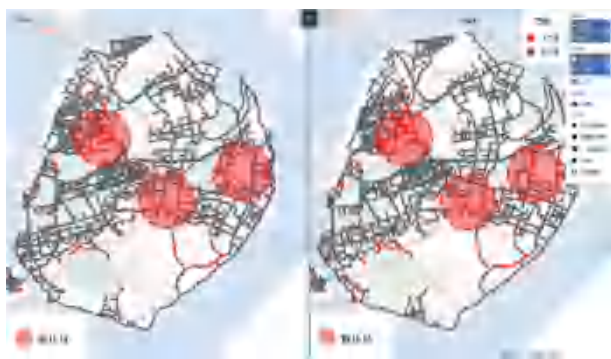


图7 出厂降压前后管网模拟压力分布

Fig. 7 Pressure Distribution of Pipe Network before and after Decreasing the Pressure of WWTP

门(图8)。

经过仿真模拟分析, 关阀前后的用户端水压变化如图9所示。关阀后, 爆管路段上的附近管网局部压力降低至14 m以下, 其余管网压力分布较关阀前无重大变化, 可以保证其余区域正常供水, 供水管网整体运行未受影响。

3 实时在线模型系统优点

传统的离线模型, 存在数据更新繁琐滞后、应用场景单一、软件操作学习成本高等缺点, 因此, 没有在城市供水系统中得到广泛应用。实时在线模型建立在监测手段、物联网、移动通信、计算机科学等技术基础之上, 其优势主要如下。

(1) 实时水力模型的快速更新。由于传统离线模型只能在孤立的桌面端软件里运行, 它跟管网GIS和SCADA数据之间是隔开的。因此, 每一次模

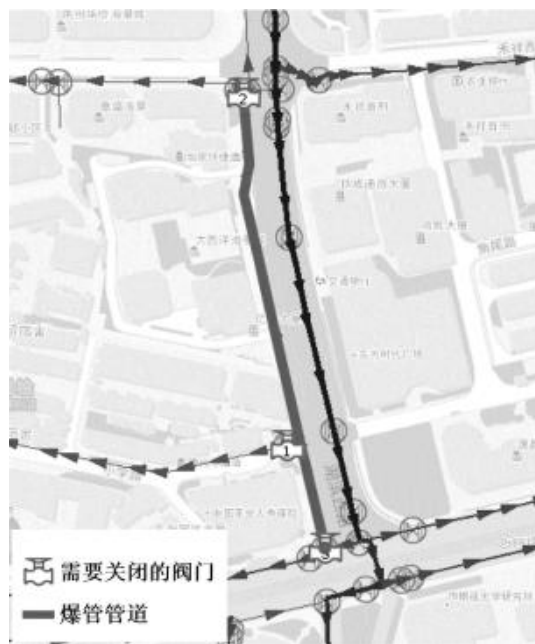


图8 拟关闭阀门位置

Fig. 8 Location of Valves Intended to Close

型的更新都是非常繁琐而耗时的过程^[8], 它涉及GIS数据的更新和校验, SCADA数据的导出和处理, 模型的更新率定困难一直是阻碍模型推广应用的重要成因。国际水协(IWA)倡导在水泵、阀门、传感器等各类供水设备之间实现“对话”的智慧(数字)控制技术^[9]。通常在供水企业, 阀门的工作状态和操作记录等信息每月更新一次, 且缺少必要的数据库质量审查。为配合不同的供水调度方案或者工程需要而进行的阀门操作, 有时可能是不必要的, 甚



图9 关阀后停水影响范围

Fig. 9 Impacted Zone after Valves Closed

至是错误的。但由于缺乏有效和快速的判别依据,类似情况很难有所改善。频繁的阀门操作可能会导致爆管、水质或客户投诉等问题。由图3可知,实时在线模型系统建设过程中特别强调了机泵运行和阀门数据的动态管理,现场的重大阀门操作及状态得以实时同步到系统,这对于实时水力模型的运行和精度保障是非常关键的,也更有利于模型维护,保证模型实时反映管网真实情况。

(2)通过打通桌面端、WEB端和移动端,可以将实时在线模型的使用场景拓展到更多的使用场景,突破了原有的传统离线模型只能在有限授权的PC端下使用的局限性,真正实现多部门多用户、随时随地使用在线模型,更有利于将模型进一步推广到管网运维的生产一线。

(3)利用模型集成的大数据分析,为供水系统的中长期运营优化提供辅助决策。实时模型系统通过流量、压力等数据的相关性分析,以及管网在线监测点模拟值与实测值的对比分析等,提高了爆管应急响应效率。

(4)基于模型的处置手段辅助分析,避免了过去仅靠工程师经验处理的主观性,使处置方案更加科学合理,减少对周边供水压力的影响范围。

综上,实时在线模型比传统离线模型具有更广泛的应用场景。近些年供水企业的远传水表数量增长迅猛,未来将实时在线模型与用户实时用水量数据结合,使得模型能够更加真实地反映现实工况将成为未来研究的重点。

4 结论与展望

本文基于厦门水务的实时在线模型,开展了爆管预警分析应用探索。从厦门水务的应用实践可以

看出,文中提出的爆管预警算法能够快速识别管网爆管,实时水力模型系统实现了对管网运行的动态监测和实时模拟,能够帮助供水企业提高处置爆管的效率,平均停水时间减少了25%。融入到供水企业日常的生产运营和管理活动中,对提升城市供水安全具有重要意义。

一方面,管网监测数据的质量对爆管预警的准确性有着重大的影响,而在现实管网中,由于通讯、设备稳定性等问题,错误数据是难以避免的。随着管网上监测设备愈来愈多,这种情况愈加明显。在做好设备维护管理的同时,做好监测数据的预处理,将会有效提高预警的准确性。另一方面,本文中的爆管预警算法依赖于模型数据的实时性,因此,改进实时在线模型的计算效率将提高爆管预警的时效性。随着实时在线模型在供水企业的推广使用,模型将成为管网科学运行的重要工具。

参考文献

- [1] PEDERSEN A N, BORUP M, BRINK-KJAER A, et al. Living digital twins of urban water systems: Towards multi-purpose value creation using models and sensors [J]. *Water*, 2021, 13(5): 592. DOI:10.3390/w13050592.
- [2] 陈健. 水务行业利用数字孪生实现智慧水务的途径研究 [J]. *知识经济*, 2022(2): 17-18.
CHEN J. Research on routes to realize smart water by digital twinning in water industry [J]. *Knowledge Economy*, 2022(2): 17-18.
- [3] 许刚, 王建平, 袁永钦, 等. 大规模供水管网实时在线校验水力模型的构建与应用 [J]. *给水排水*, 2013, 39(6): 116-118.
XU G, WANG J P, YUAN Y Q, et al. Construction and application of real-time hydraulic verification model for large-scale water supply network [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2013, 39(6): 116-118.
- [4] 陈捷. 在线实时水力模型在供水规划中的应用 [J]. *净水技术*, 2022, 41(s1): 360-364.
CHEN J. Application of online real-time hydraulic model in water supply planning [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(s1): 360-364.
- [5] 闫涛, 杜坤, 李贤圣, 等. 自适应卡尔曼滤波在供水管网爆管预警的应用 [J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(8): 99-106.
YAN T, DU K, LI X S, et al. Burst identification of water distribution system using adaptive Kalman filter [J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(8): 99-106.
- [6] 戴雄奇, 王博彦, 林峰, 等. 供水管网爆管率预测与影响因素分析 [J]. *供水技术*, 2020, 14(1): 1-5.

- DAI X Q, WANG B Y, LIN F, et al. Prediction of burst rate and analysis of influencing factors in water supply network[J]. Water Technology, 2020, 14(1): 1-5.
- [7] 朱新民, 陈春浩, 卢正超, 等. 基于分布式振动光纤和压力传感技术的管道爆管预警方法[J]. 水利水电技术, 2016, 47(12): 82-86.
- ZHU X M, CHEN C H, LU Z C, et al. Distributed vibration optical fiber and pressure sensing technologies-based method for early warning of pipeline burst [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016, 47(12): 82-86.
- [8] 孙晨刚. 供水管网水力模型系统在特大型城市供水调度中的应用[J]. 净水技术, 2016, 35(4): 81-87.
- SUN C G. Application of hydraulic model system of water supply distribution network in water supply control for the supercity[J]. Water Purification Technology, 2016, 35(4): 81-87.
- [9] SAMI W, WHITE C, WEBB R, et al. Digital water: Industry leaders chart the transformation journey[EB/OL]. (2019-06-11) [2023 - 03 - 03]. [https://www. wateronline. com/doc/digital-water-industry-leaders-chart-the-transformation-journey - 0001](https://www.wateronline.com/doc/digital-water-industry-leaders-chart-the-transformation-journey-0001).

(上接第 179 页)

有效的臭气密闭和收集以及多级臭气处理工艺的选用,能够满足较为严格的臭气排放控制标准,做到稳定达标。

参考文献

- [1] 胡维杰, 邱凤翔, 卢骏营. 上海市白龙港污泥干化焚烧工程工艺设计与思考[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 54-58.
- HU W J, QIU F X, LU J Y. Process design and consideration of Shanghai Bailonggang sludge drying and incineration project[J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 54-58.
- [2] 邹博源, 陈广. 城镇污水处理厂臭气污染与除臭技术研究进展[J]. 净水技术, 2020, 39(5): 109-115.
- ZOU B Y, CHEN G. Research progress of odor pollution and deodorization technology in urban WWTP[J]. Water Purification Technology, 2020, 39(5): 109-115.
- [3] 吕燕. 上海城镇污水处理厂臭气治理的运行思考[J]. 城市道桥与防洪, 2019(6): 161-163, 19.
- LÜ Y. Thinking of odor treatment of municipal wastewater treatment plant in Shanghai[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(6): 161-163, 19.
- [4] 董磊. 上海天山污水厂污泥深度脱水工程除臭设计[J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 90-93.
- DONG L. Deodorization design of sludge dewatering project in Shanghai Tianshan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 90-93.
- [5] 吕瑞滨, 沈怡雯, 汪喜生, 等. 石洞口污水处理厂污泥处理除臭及运行管理探讨[J]. 净水技术, 2020, 39(s1): 161-163, 198.
- LÜ R B, SHEN Y W, WANG X S, et al. Summary of sludge treatment deodorization and operation management of Shidongkou wastewater treatment plant [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(s1): 161-163, 198.
- [6] 胡煜. 上海市廊下污水处理厂除臭提标改造工程设计[J]. 中国市政工程, 2019(3): 70-73.
- HU Y. Design of deodorization & upgrading project of Shanghai Langxia sewage treatment plant [J]. China Municipal Engineering, 2019(3): 70-73.
- [7] 周立, 李桥龙, 陈晓华, 等. 北京槐房埋地式污水厂除臭通风一体化系统设计[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 55-60.
- ZHOU L, LI Q L, CHEN X H, et al. Design of integrated system of deodorization and ventilation for Beijing Huaifang underground WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 55-60.
- [8] 江顺启, 李春江, 刘国标. 组合式废气净化(除臭)技术在污泥干化项目中的应用[J]. 广东化工, 2021, 48(13): 303-304, 307.
- JIANG S Q, LI C J, LIU G B. Application of combined waste gas purification (deodorization) technology in sludge drying project [J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(13): 303-304, 307.