

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.24.020

“厂站网池”一体化调度实时预报预警系统

张彦晶

(上海市城市排水有限公司, 上海 200233)

摘要: 在智慧水务建设背景下,为实现排水设施智能化运行目标,开发出“厂站网池”一体化调度实时预报预警系统。该系统通过ICM建立离线模型,采用ICM Live配置在线模型,通过场景开发成预报预警系统,实时展示重要泵站、污水厂、调蓄池等排水设施雨量、水位以及流量等在线监测信息,提前3 h对泵站水位、进厂流量、管道负荷以曲线或主题图的形式进行预报预警,当预警信息出现后,按预设运行方案进行模拟,其结果可为生产运行调度提供参考。

关键词: 厂站网池; 一体化调度; 实时预报预警

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)24-0108-07

Real-time Forecast and Early Warning System for Integrated Scheduling of “WWTP, Pump Station, Sewer Network, and Initial Storm-water Storage Tank”

ZHANG Yan-jing

(Shanghai Urban Drainage Co. Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Under the background of smart water management system, in order to achieve the goal of intelligent operation of drainage facilities, the real-time forecast and early warning system for integrated scheduling of “WWTP, pump station, sewer network, and initial storm-water storage tank” has been developed. The system establishes an offline model through ICM, and uses ICM Live to configure an online model to develop a forecast and early warning system through software development scenarios. The system platform displays real-time online monitoring information such as rainfall, water level and flow of important pump stations, the sewage treatment plants, storage tanks and other drainage facilities. It can forecast and warn the water level of pump stations, incoming flow of WWTP and pipeline load in the form of curve or theme graphs 3 hours in advance. When the warning information appears, the simulation will be carried out according to the preset operation plan, and the simulation results can provide reference for operation scheduling.

Key words: WWTP, pump station, sewer network and initial storm-water storage tank; integrated scheduling; real-time forecast and early warning

《上海市城市总体规划(2017—2035年)》指出,为使上海能在2035年成为拥有更具适应能力和韧性的生态城市,成为引领国际超大城市绿色、低碳、

可持续发展的标杆,城市基础设施的智慧化、信息化必不可少。《上海加强城市管理精细化“三年行动计划”》(2018年)指出,超大城市管理要像绣花一样精

基金项目: 上海城投(集团)有限公司2019年科技创新计划项目

细,必须引入智能化手段,借助现代科技,做强“头部”和“神经末梢”,使各类事关服务、管理、安全的数据在一个平台上汇总并及时分析预测,为改进城市公共服务管理、提升超大城市治理能力水平提供强有力的科技支持。

排水设施作为城市基础设施的重要组成部分,可称之为城市的生命线,实现城市排水设施智能化运行是实现排水设施精细化管理的一个重要手段。为此,在国家政策导向、城市环境变化以及自身业务发展需求的驱动下,以实现排水设施智能化运行为目标,研究采用 ICM Live 和 Web 技术,开发以虹桥污水厂为典型区域的“厂站网池”排水设施智能化运行平台,提前 3 h 对排水设施状态进行预报预警,其结果可供生产运行参考。同时,该平台建设过程中遇到的问题、解决方法、使用技术和成果对今后上海市中心城区竹园、白龙港、石洞口三大片内干线、污水厂、泵站和调蓄池等排水设施乃至全国其他城市排水设施实时调度的建设具有借鉴意义。

1 研究对象概况

虹桥污水处理厂服务范围总面积约 67 km²,服务人口为 50 ~ 55 万人。虹桥污水处理厂进水包括 3 部分:①蟠龙污水支线,主要输送青浦区(G15 以东东西虹桥和蟠龙古镇)沿线和闵行区沿线的污水;②天山污水支线,主要输送原天山污水处理厂服务范围内的污水;③六支流污水支线,主要输送纪一、纪二等华漕镇北片污水。这三部分污水在绥宁路处 61#井汇合,进厂总管沿绥宁路敷设,由南向北进入虹桥污水处理厂。

研究区域内排水系统分布见图 1。



图 1 研究区域内排水系统分布
Fig.1 Distribution of drainage systems in the study area

61#交汇井上方是溢流井,超出虹桥污水处理厂处理能力的污水可通过溢流井进入六支流支线接至吴闵外排过江管,最终排至白龙港污水处理厂。

2 实时预报预警系统构建

2.1 技术路线

系统平台架构建设分 3 部分:InfoWorks ICM 构建离线模型、ICM Live 建立在线模型和网页开发嵌入智慧平台。InfoWorks ICM 构建离线模型包括管网基础资料和设施运行规则调研、厂站网池模型建立、模型率定和验证;ICM Live 建立在线模型包括水位水量监测数据实时采集、降雨雷达数据接入、在线模型参数配置、数据库表输出;网页开发嵌入智慧平台是将实时模型模拟结果输出嵌入智慧平台展示,实现网页端在线预警、辅助调度、模型分析和运行方案调度等功能,为城市排水实时调度运行提供智能化服务^[1-2]。

技术路线见图 2。

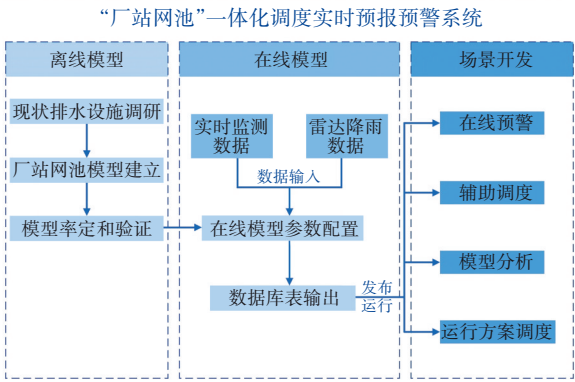


图 2 实时预报预警系统构建技术路线
Fig.2 Technical route of real-time forecast and early warning system construction

2.2 离线模型

① 排水设施调研

为保证模型质量便于后续检查,研究区域内所有泵站按照设计调查表调研,内容包括泵站进水管管底标高、出水管管底标高、泵站前池示意图以及泵站纵剖面设计图。

② 厂站网池模型建立

排水系统数据以 GIS 形式导入 InfoWorks ICM 建立模型,模型系统涵盖雨水系统、污水系统、合流系统(古北污—芙蓉江之间),雨水管总长超过 400 km,污水管总长超过 350 km,合流管较少;虹桥污水

处理厂处理水量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, $5 \times 10^4 \text{ m}^3$ 调蓄池含 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ 在线调蓄池、南北各 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 离线调蓄池; 雨水泵站 25 座、污水泵站 14 座、合流泵站 1 座, 总计 182 台泵机。

模型网络见图 3。



图 3 模型网络

Fig.3 Model network

该系统运行复杂, 具有“厂站网池”一体化调度的代表性。

为使建模参与者、调度平台使用者更直观快速地了解整个项目研究范围内的排水系统情况, 包括但不限于主干管网排布、流向、重要构筑物分布和关键节点等要素, 本研究特绘制系统概略图(见图 4), 便于后续模型检查、改进和运行方案的设计等工作开展。

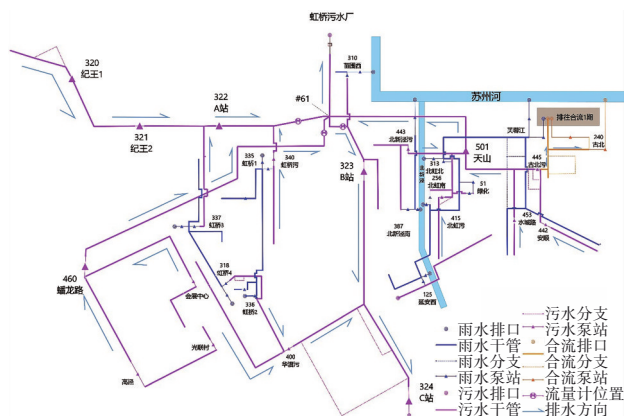
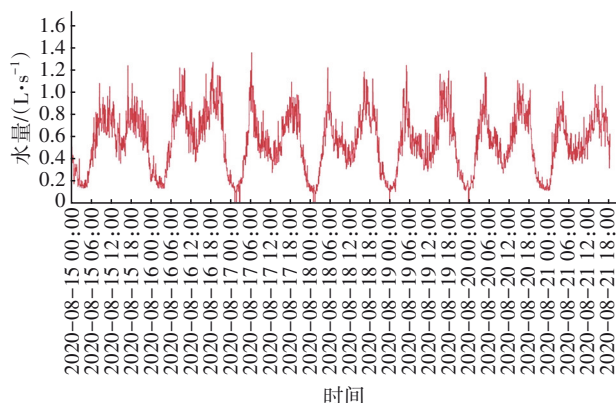


图 4 系统概略图

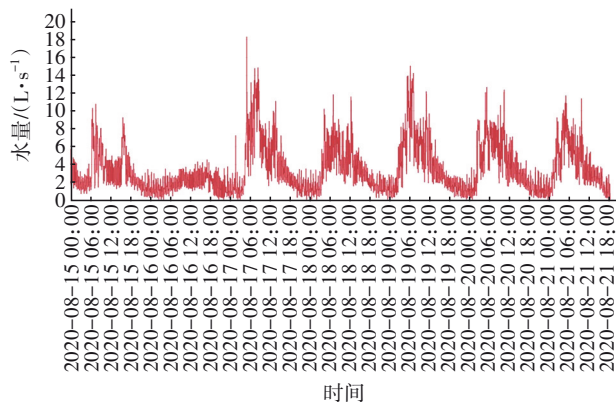
Fig.4 System simplification

③ 模型率定和验证

为提高模型预测准确度, 旱天率定和验证均以 7 d 为一个周期, 包含工作日和非工作日。研究区域内居民和企事业单位用水量间隔 5 min 连续一周变化情况如图 5 所示。



a. 连续一周居民用水量变化



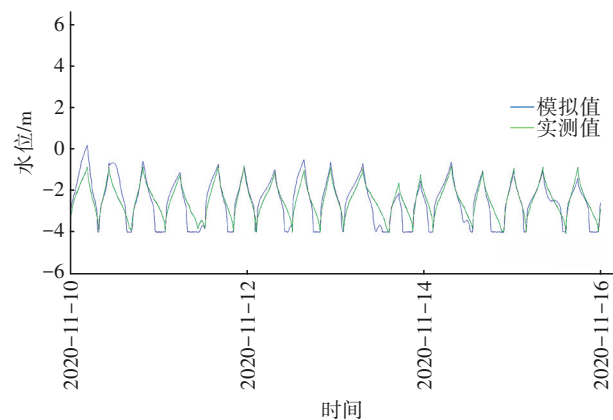
b. 连续一周企事业单位用水量变化

图 5 研究区域内连续一周用水量变化曲线

Fig.5 Continuous one-week variation curve of water consumption of study area

模型率定和验证采用的泵站前池水位、泵站流量、污水厂进厂流量以及支线上关键点流量数据直接从 SCADA 系统在线读取。产流模型选用固定径流系数模型, 取值为 0.6; 汇流模型选用 SWMM 模型, 取值为 0.02。

图 6 为纪一泵站在典型旱天、雨天运行时的模型率定结果。



a. 旱天模型率定结果

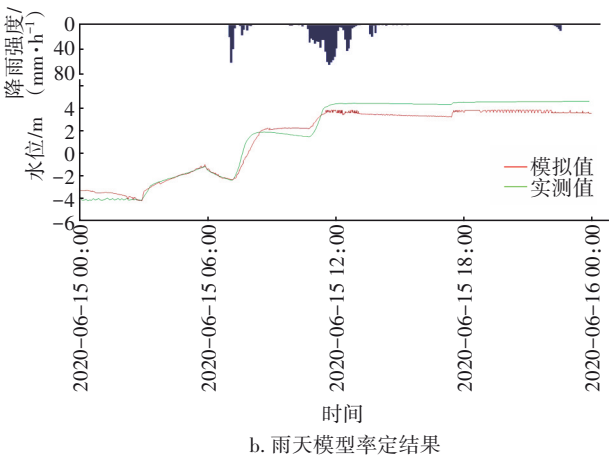


图6 纪一泵站旱天和雨天时模型率定结果
Fig.6 Validation results of model calibration of Ji Yi pumping station in dry and rainy days

泵站流量在某周期旱天的率定验证结果如表 1 所示。根据《城镇内涝防治系统数学模型构建和应用规程》(T/CECS 647—2019)要求,模拟和实测的总水量偏差不应大于 20%,时间序列数据模拟和实测的峰现时间偏差不应大于 1 h,峰值偏差不应大于 25%,时间序列数据纳什效率系数不应小于 0.5,由此可知,本研究建立的离线模型具有一定可靠性。其中,B 泵站流量差异较大,分析原因是上游排水管网存在混接现象,并与河道相通,有外水涌入管网,在模型中未考虑河水涌入情况,因此造成实测流量与模拟水量相差过大;水城和北虹污为污水转输泵站,受上游雨水泵站截污泵的截流影响,部分雨水泵站截污泵在旱天未运行或运行较少,导致模拟水量较实际偏小。

表 1 模型率定验证结果

Tab.1 Results of model calibration and verification

泵站	总水量及偏差			瞬时峰值及偏差			峰值时间			纳什系数
	实测/m ³	模拟/m ³	模拟与实测的水量偏差/%	实测/(m ³ ·s ⁻¹)	模拟/(m ³ ·s ⁻¹)	模拟与实测的峰值偏差/%	实测	模拟	相差绝对时间/min	
纪一	32 100	27 660	13.8	0.20	0.20	0	6:50	6:50	0	0.74
纪二	95 304	83 234	12.7	0.44	0.44	0	10:05	10:00	5	0.86
A 泵站	432 702	412 617	4.6	1.08	1.08	0	0:10	0:10	0	0.32
B 泵站	44 109	44 853	-1.7	1.62	0.47	70.99	14:15	14:30	15	-7
虹桥枢纽污	23 908.5	19 716	17.5	0.11	0.10	0.29	0:50	0:50	0	0.55
北新泾南	5 762.4	5 819	-1.0	0.06	0.06	0	11:05	11:05	0	0.99
北虹南	1 612.8	1 603.2	0.6	0.16	0.16	0	8:00	8:05	5	0.99
安顺	18 495	18 570	-0.4	0.25	0.25	0	1:30	1:35	5	0.96
水城	13 029.6	5 706	56.2	0.097	0.097	0	1:35	1:40	5	0.05
古北污	41 118	40 488	1.5	0.178	0.178	0	2:15	2:20	5	-1.33
北新泾污	37 120.5	37 069.8	0.1	0.11	0.11	0	2:05	2:05	0	0.98
北虹污	22 638	11 946	47.2	0.11	0.11	0	7:30	8:20	50	0.05
苗圃西	3 024	3 240	-7.1	0.03	0.03	0	8:00	8:20	20	0.4

2.3 在线模型配置

① 雷达降雨数据

实时气象雷达数据覆盖上海地区(30.55°~31.95°N,120.75°~122°E),空间分辨率0.01°,预报时效为0~4 h,降雨数据间隔 10 min,气象数据预报频率 20 min 更新一次,采用 Fortran 二进制存储经纬度网格数据。

② 参数表配置

在线预报预警系统由旱天运行模式和雨天运行模式组成。后台每分钟滚动读取雷达降雨数据,计算并生成降雨预警信息,该信息将用于模型旱天/

雨天模式的切换。旱天模式下,系统每天 08:00 固定运行模拟,频率为 24 h 更新一次,运行的预热期(过去至当前时间的时长)为 1 h,预报期(当前时间至未来的时长)为 3 h,旱天模式模拟的成果将为雨天模式模拟提供热启动初始条件。当后台生成降雨预警信息,系统将变更运行频率,由 24 h 加快至 30 min,便于及时根据气象预报的更新,动态更新和预报降雨条件下排水系统的水量变化情况。

为保证预报预警结果可靠,形成在线模型运行维护的闭环,利用 ICM Live 中的警告定义列表功能,以实测点位的水位、总水量为指标,定义误差预警

规则,当模拟值和实测值的偏差超过阈值时,后台在滚动模拟过程中自动生成误差预警信息,可供进一步的分析和操作。

在线模型中泵站前池水位、泵站流量、水泵启闭状态、污水厂进厂流量以及支线上关键点流量数据均从公司SCADA数据系统实时直接读取过来。泵站前池水位、水泵启闭状态数据在运行预热期参与模型计算,以提升模拟准确性;流量等数据则用于模拟结果比对。在线模型运行输出结果保存到模型数据库中,后经网页开发从模型数据库中读取模型结果进行展示。

③ 数据库表输出

在线预报预警系统每次模拟生成的模型结果,在筛选关键对象后,自动输出至预先配置的数据库中,输出成果包括预先统计生成的预警列表信息、管道流量/充满度信息、检查井水位/冒溢水量信息、泵站流量信息等。

2.4 在线模型试运行

在线模型在配置部署完成后,发布试运行。试运行显示,正常工况旱天和降雨模式小雨时即在虹桥厂进水闸门关闭前,在线实时模型预报结果可信度较高;当虹桥厂进水闸门关闭后,在线实时模型预报结果与SCADA数据系统实测结果相差甚远。

分析显示,造成在线模型误差的潜在原因有几个方面:

① 泵站运行数据缺失或异常。例如,蟠龙路泵站运行数据时有时无,且数据精度等方面与其他泵站存在一定的偏差;天山污水厂的泵站运行数据长时间为同一个值。

② 雨污混接问题未摸排清楚。在降雨期间,六支流上游存在泵站开启而水位不下降的现象,调研显示同时存在污水排入河道的情况。

③ 泵站运行调度规则不完善。部分泵站的运行规则不明确,且在实际过程并未按运行规则运行,导致模型预报期采用的泵站运行调度规则与实际情况有一定偏差。

④ 雷达预报降雨数据与实测数据存在明显偏差,在有无降雨、降雨量等方面存在较大差异。

2.5 场景开发

围绕“智慧排水”创新管理的需求,将虹桥区域在线模型与智慧排水平台深度耦合,在“厂站网池”调度管理功能的基础上,开发包括在线预警、辅助

调度曲线、流量预警以及运行方案调度等模块功能,通过雷达降雨数据,实现提前3 h对泵站水位、进厂流量、管道负荷以曲线或主题图的形式进行预报预警功能,提升智能化综合排水“预测性”调度管理能力。

① 在线预警

平台读取在线模型输出在Oracle库中的预警通知,在预警列表中默认显示当天泵站相关的预警信息,按照不同的设施类型,如泵站、污水厂、调蓄池、冒溢点,同时按照不同预警指标类型,如水位、流量、雨量等预警信息进行筛选。调度人员可查看报警信息简报,包括起止时间、报警原因、峰值及峰值时间,报警点位曲线和关联点位的曲线等,便于分析报警产生原因或对周边排水设施产生的影响。具体功能见图7。



图7 在线预警功能

Fig.7 Online warning function

平台通过多种图例呈现不同排水设施的实时运行状态:红色图标表示运行状态,绿色图标表示关闭状态,灰色图标表示无信号;当在线模型触发新的预警信息后,对应图标闪烁红色光圈作为提示。该功能帮助调度人员关注排水系统中潜在的风险点或预警信息,如泵站前池液位预警、污水厂进厂流量预警、冒溢点预警、雷达降雨预警等,并进行跟进和分析。

② 辅助调度

在运行曲线界面,可以按照模拟时间、设备类型,如泵站、冒溢点、污水厂、调蓄池,选择查看实测雨量、雷达预报雨量、实测开泵数、预测开泵数、实测水位、预测水位、实测流量和预测流量等结果。以污水厂为例(见图8),2021年9月2日晚上18:05触发在线模型模拟预报未来3 h设施状态,当鼠标移动时,显示当前时刻预报雨量0.01 mm,实测开泵

数 2 台、预测开泵数 2 台、实测在线调蓄池水位为 -5.37 m、预报在线调蓄池水位为 -5.61 m、实测进厂流量为 2.49 m³/s、预测进厂流量为 2.78 m³/s。

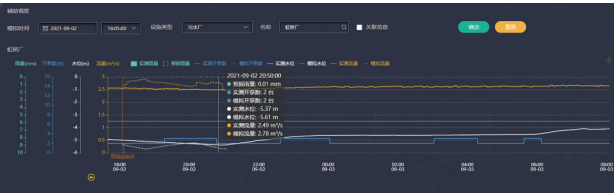


图 8 污水厂运行模拟曲线与实测曲线对比

Fig.8 Comparison of simulation curve and measured curve of sewage treatment plant operation

③ 模拟分析

该功能可实现管道负荷专题和水位预警专题在 GIS 上叠加显示,使得调度人员可实时掌控所有管线和设施的动态输送能力。管道负荷专题通过不同颜色展示管道负荷状态,包括非满管无压、满管无压和满管有压等。水位预警专题将不同类型预警点位进行统一动态播放,预警点类型包括泵站、调蓄池、污水厂和冒溢点。预警指标包括水位和流量,其中水位预警包括泵站前池水位预警和冒溢点冒溢水位预警,流量预警包括污水厂流量预警。以 B 泵站为例,泵站前池水位预警模拟与实测

结果对比如图 9 所示。

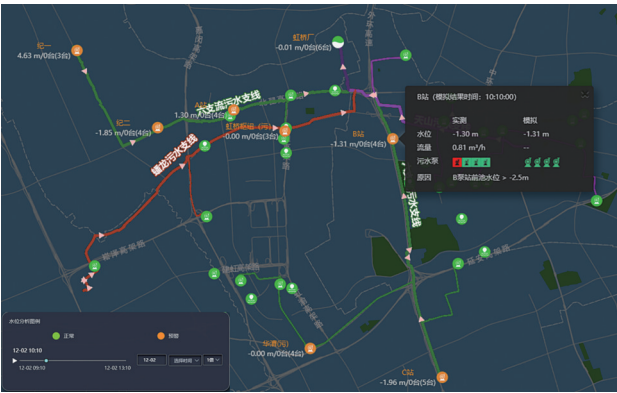


图 9 泵站前池水位预警模拟与实测结果对比

Fig.9 Comparison of simulation and actual measurement results of water level in the fore pool of pump station

④ 运行方案调度

总体思路:分析虹桥污水处理厂 3 条污水支线的流量,通过虹桥污水处理厂内调蓄池和现状支水分流,保障进厂流量相对稳定。当虹桥污水处理厂预测流量超过设定值,且液位超过阈值时,将会输出预警信号,及时对虹桥污水处理厂及 B 泵站等分流设施发出提示信息,根据不同运行工况采取相应措施(见图 10)。

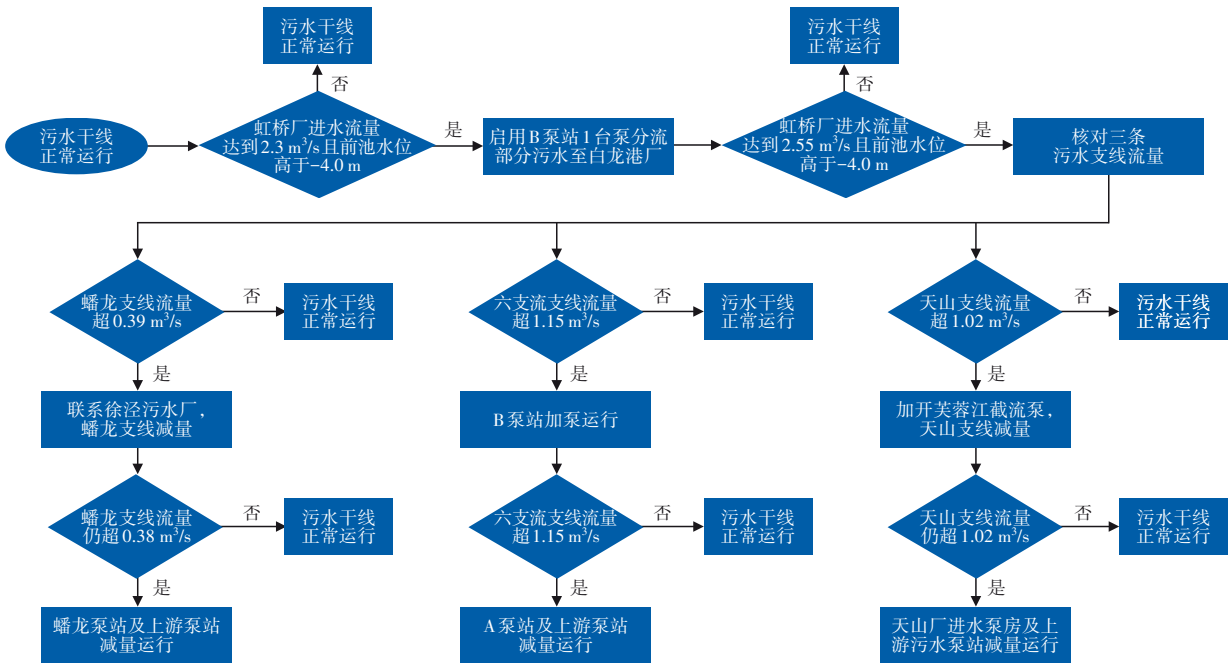


图 10 不同工况运行调度方案

Fig.10 Operation scheduling scheme under different working conditions

不同运行工况采取相应措施:

① 当 3 条支线瞬时总流量超过虹桥厂的正常

设计规模(2.3 m³/s),但调蓄池仍有调蓄空间($H_{前池} \leq 4.0$ m)时,优先启用虹桥污水处理厂内调蓄池调

蓄,并在B泵站做好加泵准备;

② 当3条支线瞬时总流量超过虹桥厂的正常设计规模($2.3 \text{ m}^3/\text{s}$),虹桥厂调蓄池无调蓄空间($H_{\text{前池}} > 4.0 \text{ m}$)时,启用B泵站1台污水泵,将部分污水分流至白龙港污水处理厂;

③ 当3条支线瞬时总流量继续增加,超过虹桥厂 $Q_{\text{总}}$ ($2.55 \text{ m}^3/\text{s}$),且厂内调蓄池无调蓄空间时,利用平台分析各支线的流量情况并采取以下措施:当蟠龙支线流量超正常运行水量10%,即超过 $0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,与徐泾污水厂联系,削减蟠龙支线的输送水量;当六支流支线流量超正常运行水量10%,即超过 $1.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,通过白龙港分公司调度,增加B泵站开泵台数,将部分污水转输到白龙港污水处理厂处理,削减六支流的输送水量;当天山支线流量超正常运行水量10%,即超过 $1.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,通过竹一分公司调度,增加芙蓉江泵站截流泵开泵台数,将部分污水通过合流一期转输到竹园污水处理厂处理,削减天山污水支线的输送水量。

当采取上述措施后,三条支线瞬时总流量继续增加,超过虹桥厂 $Q_{\text{总}}$ ($2.55 \text{ m}^3/\text{s}$)时,继续落实以下措施:当蟠龙支线流量超过 $0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,与徐泾片区污水管网调度联系,将蟠龙路泵站上游部分污水泵站限流,削减蟠龙污支线污水量;当六支流流量超过 $1.15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,对支线上游的纪一、纪二和A泵站限流,削减六支流输送水量;当天山支线流量超过 $1.02 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,通过白龙港、市南、竹一等分公司调度,对片区内的污水泵站,雨水泵站截流设施限流,削减天山污水支线的输送水量。

3 结论

“厂站网池”一体化调度实时预报预警系统根据当前泵站、污水厂采集的实时数据,结合降雨强度,预报整个管网超负荷状态。强降雨来临时,调度人员提前做出预判,将干线运行水位尽可能降低,留出一定空间准备给强降雨,避免“手忙脚乱”。对于积水点,在做出干预后,系统仍然显示严重冒溢时,车辆抢险人员提前到达事发地进行强排,缩

短积水时间、避免严重洪涝的发生。对于污水厂而言,提前做好厂内相应设施准备,充分利用各个调蓄设施,做好厂网系统协调。该系统的应用,能从“事后补救”转变为“事前预防”,调度人员根据预测结果判断未来降雨的影响范围,及时做出合适的调度操作。

该一体化调度实时预报预警系统是真正落实到排水调度应用的尝试,只考虑正常工况,如旱天、雨天情况,目前该阶段尚有难点需攻关,所以暂不考虑突发或特殊状况。在实时模型运行过程中,部分泵站存在模型模拟值与实测值出现较大差异、水泵频繁启闭等问题,因此,反复验证离线模型,提高实时模型精度,更好地应用调度平台,将是今后继续研究的方向。

参考文献:

- [1] 罗亭,付朝晖,陈洪洪. 污水厂群应急联合调度——珠海香洲区污水系统规划案例[J]. 中国给水排水, 2021,37(6):17-23.
LUO Ting, FU Zhaohui, CHEN Honghong. Emergency joint dispatching for sewage treatment plants: a case study on the sewage system planning in Xiangzhou District, Zhuhai[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(6):17-23(in Chinese).
- [2] 时珍宝,谭琼. 基于水力模型的排水系统防涝应急调度预案制定[J]. 中国给水排水, 2020,36(15):93-99.
SHI Zhenbao, TAN Qiong. Formulation of emergency dispatching plan for waterlogging prevention of drainage system based on hydraulic model[J]. China Water & Wastewater, 2020,36(15):93-99(in Chinese).

作者简介:张彦晶(1971—),女,辽宁丹东人,硕士,高级工程师,主要从事排水信息化、智慧排水、排水模型等研究工作。

E-mail:penghaiqinting@163.com

收稿日期:2021-12-03

修回日期:2022-10-24

(编辑:衣春敏)