

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.01.014

基于水力模型优化污水泵站的启停水位

于晨晖^{1,2}, 张梦瑶^{1,2}, 李 彭¹, 张 浩³, 樊力纲³, 李 杰², 何义亮¹

(1. 上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240; 2. 兰州交通大学 环境与市政工程学院, 甘肃 兰州 730070; 3. 江苏常州经济开发区管委会农业农村工作局, 江苏常州 213100)

摘 要: 泵站是排水系统输水过程中的重要环节, 对泵站启停水位的优化研究可提高排水管网对水量的调蓄能力, 同时提高水泵的使用效率。以典型工业聚集区 H 镇为例, 采用 InfoWorks ICM 构建该镇排水管网模型, 利用两座泵站的实测数据进行率定和校核, 并选用纳什效率系数和百分标准偏差评价模拟结果与监测点实测数据的吻合度, 结果表明模型与 H 镇污水管网实际情况基本相符。在可信模型的基础上, 根据对 H 镇运南、镇北和 C 北泵站现状运行情况的分析, 提出各泵站启停水位的改进方案, 采用模型对方案进行模拟, 最终得到最优方案: 运南泵站开启水位为 -2.40 m, 闭水水位不高于 -5.99 m; 镇北泵站开启水位为 -1.30 m, 闭水水位不高于 -3.96 m; C 北泵站仍以现状水泵开停水位进行液位控制, 为后续研究区域排水系统的优化运行提供了依据。

关键词: InfoWorks ICM 模型; 污水管网; 泵站; 启停水位优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)01-0081-08

Optimization of Start-Stop Water Levels of Sewage Pumping Station Based on Hydraulic Model

YU Chen-hui^{1,2}, ZHANG Meng-yao^{1,2}, LI Peng¹, ZHANG Hao³, FAN Li-gang³, LI Jie², HE Yi-liang¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Jiangsu Changzhou Economic Zone Management Committee, Changzhou 213100, China)

Abstract: Pumping station is an important link in the process of transporting water in sewage system. Optimization of pump start-stop water levels can improve the capacity of water regulation and storage of the drainage network and the efficiency of the pump. Sewage pipeline network model of a typical industrial town H was built by using InfoWorks ICM. The measured data of two pumping stations were used for calibration and verification, and the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient and the percentage standard deviation were used to evaluate the consistency between the simulation results and the measured data at the monitoring points. The results showed that the model was basically consistent with the actual situation of the sewage pipeline network in H town. On the basis of the credible model, according to

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07202-01)
通信作者: 李彭 E-mail: lipeng2016@sjtu.edu.cn

analysis of the current operation of Yunnan pumping station, Zhenbei pumping station and C Bei pumping station in H town, improvement schemes for start-stop water levels of each pumping station were proposed. The model was used to simulate the scheme and the optimal scheme was finally obtained, which was as follows: the start water level of Yunnan pumping station was -2.40 m and its stop water level was not higher than -5.99 m; the start water level of Zhenbei pumping station was -1.30 m and its stop water level was not higher than -3.96 m; C Bei pumping station was still controlled by the current start and stop water levels of the pump. The results provide a basis for the subsequent optimal operation of the drainage system in the research area.

Key words: InfoWorks ICM model; sewage pipeline network; pumping station; optimization of start-stop water level

随着我国城市化的快速发展,对污水处理厂和城镇排水系统都提出了新要求。以企业众多、空间分布分散、污水排放情况复杂的工业聚集区污水管网为代表的复杂排水管网,面临着高水位运行、污水溢流等严重问题^[1],对排水系统和污水厂的稳定运行提出了更加严峻的挑战。泵站是连接污水管网和污水处理厂的重要单元,污水泵站的优化运行是在进水随时间变化的情况下,根据泵站的入流量,在保证安全、可靠输送污水的前提下,通过泵站的灵活调度,降低成本,实现经济与社会效益的最大化。其中,污水泵站以最佳启停水位运行可以在确保管网中的污水平稳输送进污水厂的同时,提高管网的调蓄能力,减少水泵的启停次数,提升水泵的运行效率。因此,确定泵站的最佳启停水位十分必要。

目前,国内大部分污水泵站的启停水位根据规范进行设计计算。泵站排放水位过高时,污水管网可能处于满管状态,通水能力降低,管网内流速减小,淤积严重;泵站排放水位过低时,可能会导致水泵抽水不抽水^[2],不利于水泵的养护管理,同时也导致了水泵的频繁开启。不同地区的管网覆盖率、污水收集量、污水厂进水水质特点等实际情况各不相同,应结合各个地区污水管网的实际情况,因地制宜地确定该地区污水泵站的最佳启停水位。以江苏H镇镇区排水片区为研究区,采用InfoWorks ICM软件对研究区内排水管网进行建模,根据管网动态评估H镇污水管网现状运行情况,优化H镇上三座污水泵站集水池的启停水位,以期为其他地区泵站的优化运行提供参考。

1 工程概况

1.1 研究区概况

H镇是一个具有1 000多年历史的江南水乡古

镇,总面积 46.68×10^4 km²,现辖15个行政村,6个社区,常住人口10.26万人,各类企业2 500余家,空间分布分散,是太湖流域内的典型工业聚集区。研究区内排水体制均为雨污分流制,但工业废水和生活污水混合排放,由B、Q两座污水处理厂共同完成污水处理工作。B污水厂的设计规模为 2×10^4 m³/d,占地3.7 hm²。Q污水厂设计规模为 1×10^4 m³/d,占地约2.5 hm²,出水基本达到国家一级A排放标准。

该镇污水系统布局^[3]如图1所示。

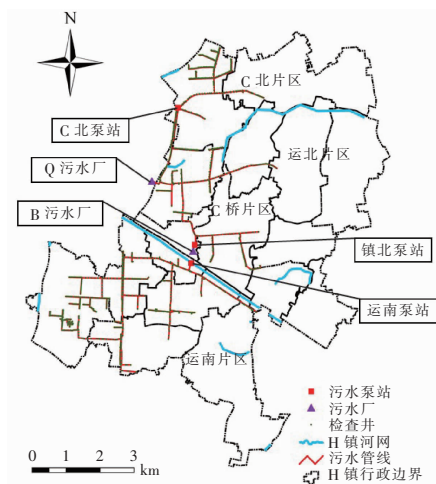


图1 H镇污水系统布局

Fig. 1 Layout of sewage system in H town

污水系统分为运南片区和运北片区,其中运南片区污水收集管网覆盖率较高,污水通过管网收集后经运南泵站提升进入B污水厂进行后续处理。运南泵站设计规模 2×10^4 m³/d,占地面积1 600 m²,进水管管径为1 200 mm,下游管底标高为 -4.53 m,泵站包括一台设计流量为567 m³/h的水泵和一台设计流量为1 134 m³/h的备用泵。运北

片区又分C北片区和C桥片区。C北片区管网收集的污水进入C北泵站,提升进入Q污水厂处理后排入水体。C北泵站设计规模为 $0.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,进水管管径为800 mm,下游管底标高为-4.36 m,泵站包括两台设计流量均为 $85 \text{ m}^3/\text{h}$ 的水泵,1用1备。C桥片区管网收集的污水经镇北泵站提升后进入B污水厂处理。镇北泵站设计规模为 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,占地面积 220 m^2 ,进水管管径为1200 mm,下游管底标高为-3.40 m,泵站包括两台设计流量均为 $460 \text{ m}^3/\text{h}$ 的水泵,1用1备。

1.2 目前存在问题

随着城市的进一步开发,H镇人口逐渐增多,污水量也随之增加。虽然近年来政府对污水管网的建设不断重视和加强,污水覆盖率也持续提升,但是现有管网数据缺失严重,管网质量情况不明。经过翔实的调研分析,H镇污水系统存在如下问题:

① 工业废水和生活污水混排,污水中工业废水占比较高,水质水量波动大,导致污水处理厂需要应对较大的冲击负荷,影响污水厂的稳定运行。

② 泵站现有的运行模式与排水情况不匹配。现有泵站运行模式下的管网水位普遍过高,上游管段大面积满管流,管段中水流流速减缓,沉积物厚度增加,管网淤堵问题严重。

为解决上述问题,根据收集的资料和实地勘察的数据对H镇污水管网进行建模,通过模型模拟泵站集水池在不同水位运行时管网情况,优化泵站的运行水位,确定集水池的最佳启停水位,从而达到优化水量和水质的目的,减小污水厂进水的冲击负荷,确保污水厂进水稳定。

2 现状污水管网模型构建

2.1 建模工具介绍

排水系统模型能够作为模拟城市排水管网运行状态的有力工具^[4],实现城市排水各个环节的最优化^[5]。排水系统经历50多年发展后应用比较广泛的建模软件有Wallingford模型公司开发的ICM^[6],丹麦水力研究所(DHI)开发的MOUSE^[7]和美国环保署(EPA)开发的SWMM^[8]。其中,本研究中选用的InfoWorks ICM采用一维和二维水动力学模型,可以进行多方位多种情境设计下的模拟^[9],为市政给排水系统提供完整的系统模拟工具,进而准确、快速地进行模拟、分析和方案优化等工作^[10]。

采用InfoWorks ICM建模研究的流程见图2。

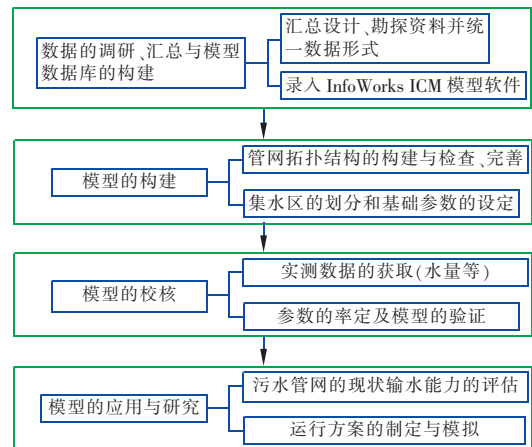


图2 研究流程

Fig. 2 Flow chart of study

2.2 管网模型建立

为了满足InfoWorks ICM模拟的输入要求,需对研究区域合理概化,根据物探资料、部分竣工图纸和现场调研数据,进行数据的标准化录入和拓扑结构的检查及修正,对于检查井的出水口和井深问题,管道的连接性、管径和高程等问题进行识别后,结合现场核查修正,通过反复检验保证数据的准确性和系统的连通性。为了早流污水模块的计算,每个管道的对应起点(检查井)必须对应一个特定的服务区,基于排水管网基础数据,利用泰森多边形法划分每个节点对应的服务区,该划分法考虑就近原则,无需考虑地形及实际的地块规划等信息^[11](排水户及检查井对应服务区明确时,则应根据实际情况划分服务区),最终共创建1136个子服务区。对H镇工业废水量约占全村95%的61家重点排污企业单独设定服务区,最终的概化模型见图3。

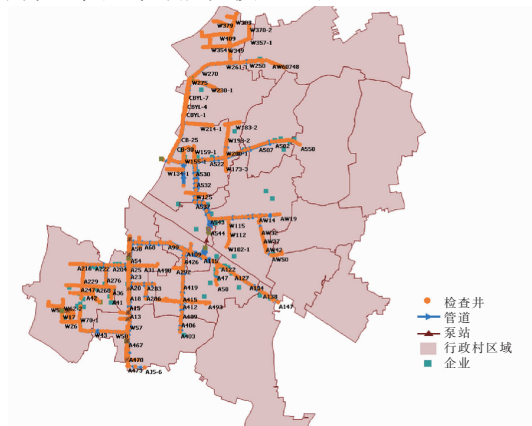


图3 H镇排水系统模型示意

Fig. 3 Diagram of sewage system model in H town

模型包含1 209个节点信息,其中检查井1 181个,集水池9个,因倒虹管而设置的独立节点18个,B污水厂初沉池作为污水的出水口1个;1 202根管线信息,长度50 045 m,其中1 035根分流管合计45 635 m,167根合流制截流管合计4 410 m。

2.3 模型初始参数的设置

为了更加真实地模拟管道中污水的流动状态,依据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006,2016年版),结合调研情况并参考InfoWorks ICM用户手册中对排水管渠粗糙系数的取值方法,对管道粗糙系数 n 进行设置作为模型参数。污水事件和工业废水事件的设置也是污水模拟的重要环节。H镇城镇人口约10万,日均用水量为120 L/(人·d),农村人口约3万,日均生活用水排放量为80 L/(人·d),参照《全国饮用水源地基础数据调查源强系数》,日均旱流污水量按日均用水量的85%折算,最终确定污水定额为97 L/(人·d)。根据对H镇61家重点排污企业的调研,取50 d累计流量数据折算其平均入流量,设定重点排污企业61个单独服务区对应的工业废水事件。

2.4 模型参数率定和校核

受现场条件限制,本次研究水力模型校核的监测点位选择运南泵站与镇北泵站,选用这两座泵站2018年7月和8月各自累计的流量进行模型的总人口数参数的率定和模型的校核,模型率定前后相关参数的变化值^[12]如表1所示。模型校核结果与流量计实测流量曲线对比如图4所示。

表1 模型率定参数值

Tab.1 Calibration parameter values of the model

模型参数		初始取值	率定后结果
人口数/人	运南片区	26 374.185	25 349.845
	运北片区	21 751.673	9 379.287
人口密度/(人·hm ⁻²)		16.382	12.023

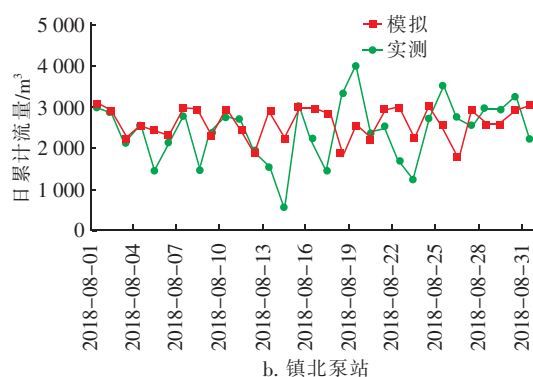
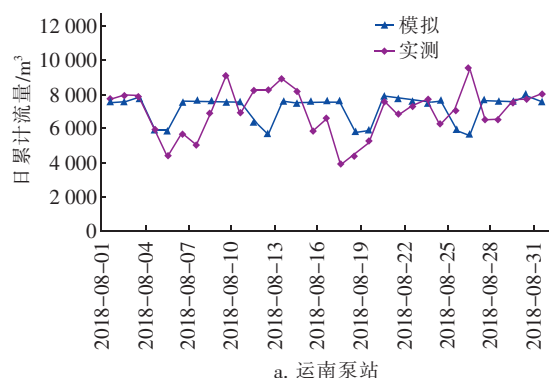


图4 模型校核结果与流量计实测流量曲线对比

Fig.4 Comparison of model checking results and measured flow curve

选用纳什效率系数(Nash-Sutcliffe efficiency coefficient)和百分标准偏差评价模拟结果与监测点实测数据的吻合度。结果表明,运南泵站和镇北泵站于2018年7月的日累计流量率定前的纳什效率系数分别为-0.219和-17.860,率定后8月两座泵站日累计流量的纳什效率系数分别为-0.196和-0.254,率定后纳什效率系数值更接近于0,模拟结果接近实测值的平均值水平^[13],运南泵站百分标准偏差值为21.33%,镇北泵站百分标准偏差值为31.38%(人工干预泵站运行情况导致部分日期日累计流量偏差较大),因此认为本次研究建立的水力模型是可信的。

我国老旧镇区较多,污水管网建设年代久远、运管情况较差、基础数据缺失、监测系统未构建的情况较为普遍,但这些镇区却对管网系统优化运行有着迫切的需求,在现场诸多不利条件下如何开展研究,对研究人员提出了不小的挑战。以上对模型的校核方式提供了一种在不利条件下提高模型精准度的方法,对模型在实际工程中的应用具有一定的参考价值,随着污水系统运管的规范化,模型的应用前景将会更加广泛,提供更为高效实用的优化方案,为我国污水系统建设提供科学有效的技术支持。

3 泵站启停水位优化研究

3.1 现状泵站运行情况

H镇B污水厂2018年8月—2019年1月日进水量频率月分布情况如图5所示。统计发现2018年8月—10月污水厂日进水量多在 $(0.9 \sim 1.2) \times 10^4 \text{ m}^3$ 区间段,2018年11月—2019年1月污水厂日进水量多在 $(0.5 \sim 0.7) \times 10^4 \text{ m}^3$ 区间段。2018年10月进水量最高的一天超过 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3$,9月

最低不到 $1\,000\text{ m}^3$ 。可见,污水厂进水量波动较为明显,由于污水厂与排水管网的最末端相连,其进水也一定程度反映了排水管网的汇水情况,当地企业发展速度快,污水排量也随之增加,原有污水管网系统已无法很好地应对污水量变化,用水高峰时段管道溢流风险较高,排水管网和污水厂的稳定运行均面临着很大的挑战。

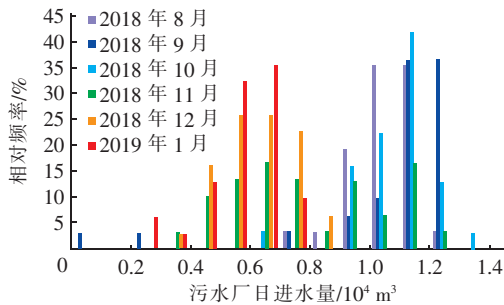


图5 污水厂日进水量频率月分布情况

Fig.5 Monthly distribution of daily frequency of water intake of sewage treatment plant

根据 InfoWorks ICM 模拟 H 镇排水高峰时段运南泵站和镇北泵站情况,其上游管道的水位剖面图如图 6 所示,泵站在现行启停水位下上游管道水位普遍较高,污水管网大面积满管,溢流风险高,管网应对污水变化的能力下降,与实际调研情况相符。根据实际情况,依规范设计的泵站启停水位优化的空间较大,通过 InfoWorks ICM 对泵站不同水位运行情况的模拟,能够有效研究出泵站的最佳启停水位。

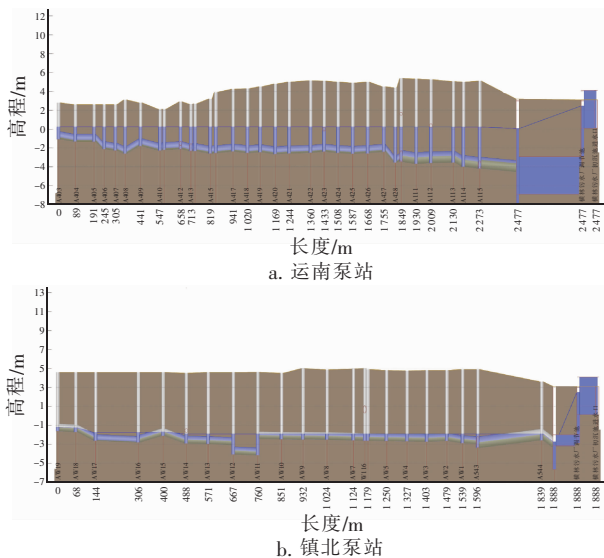


图6 泵站上游管道排水高峰时段纵断面水位情况

Fig.6 Longitudinal section water level in the upstream pipeline of the pumping station during peak hours

在 InfoWorks ICM 中定义动态调蓄容积为同一时刻某片区管网内总入流与总出流体积之差,可以直观地反映出污水管网中存储水量的状况。为了研究泵站的最佳启停水位,在模拟方案制定前先计算不同排放水位下各泵站纳水片区上游管道的动态调蓄容积(计算至极限排放水位),根据排放水位和管网储量之间的关系优化泵站启停水位。各泵站上游管道动态调蓄容积见图 7。

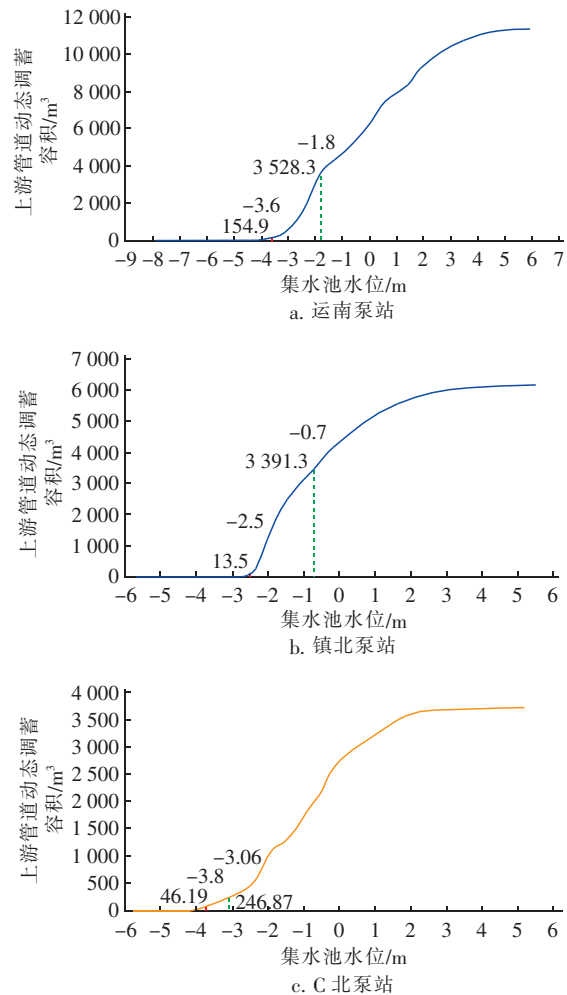


图7 各泵站上游管道动态调蓄容积

Fig.7 Dynamic storage capacity of the upstream pipeline of each pumping station

可见,各泵站上游管道动态调蓄容积随集水池水位的增加而增加,若按《泵站设计规范》(GB 50265—2010)中的规定以泵站集水池进水干管的设计标高运行时(图 7 中红色虚线所示位置),上游管道的动态调蓄容积都非常小,说明管网此时持续以很小的储量运行,管道的储水能力无法完全发挥。随着排放水位的增高,管道可利用的调蓄容积也增

加,进水管的过流能力完全发挥,也减少了泵的启闭次数,可降低能耗。但是仅根据管道动态调蓄容积优化泵站启停水位不全面,一般集水池的设计最高水位由进水管的充满度来确定,实际运行中当排放水位过高时,管道水位随之抬高,临近泵站的管线必然会发生顶托现象,管线溢流的风险增大,所以需要综合管线的负荷情况研究泵站的最佳启停水位。

经过对泵站上游管道动态调蓄容积的分析,在满足最小有效容积的前提下,设定运南泵站水泵排水量为 $500 \text{ m}^3/\text{h}$,镇北泵站水泵排水量为 $450 \text{ m}^3/\text{h}$,采用试算分析法,模拟运南、镇北泵站不同开启和关闭水位时纳水片区的管网情况。因为 C 北泵站属于小型污水泵站,且纳水片区管线状态良好,所以根据《泵站设计规范》(GB 50265—2010)对 C 北泵站以开启和关闭时的现状水位、设计水位和管顶标高三种情形运行情况进行模拟筛选。

3.2 模拟结果与分析

① 运南泵站启停水位的优化结果

在调研和建模的过程中,发现运南片区的管线整体埋深较大,如果采用设计水面标高作为启停水位会使泵站集水池储蓄空间的利用率较低。

运南泵站集水池水位与进水管极限流量的关系见图 8,可见,以进水管设计水位作为泵站的启停水位时,进水管的极限流量较低,即管道的过流能力无法完全发挥,随着启停水位的提高,进水管的极限流量逐渐增大,但增大的限度需要综合考虑管道的运行能力。

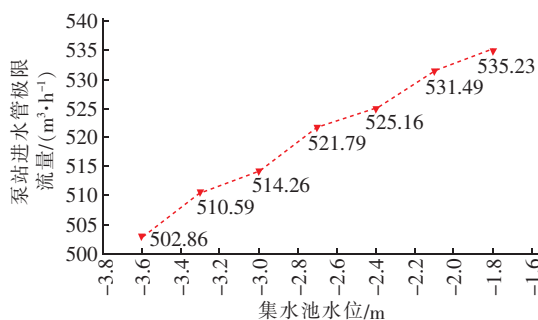


图8 运南泵站集水池水位与进水管极限流量的关系

Fig. 8 Relationship between water level of catchment tank and limit flow of inlet pipe in Yunnan pumping station

模拟过程中发现,采用开启水位为 -2.40 m ,闭水水位不高于 -5.99 m 运行时,上游管道的充满度较高,动态调蓄容积可增加约 $1\,629.31 \text{ m}^3$,集水池的有效调蓄容积也可增加约 110.4 m^3 ,进水管的极

限流量可达 $525.16 \text{ m}^3/\text{h}$ 。此时运南片区主干管最高水位水力状况剖面图如图 9 所示,虽然前端临近泵站的管线会有小部分在排水高峰时段出现满流情况,但考虑到管线埋深较大,此种情形认为可行。

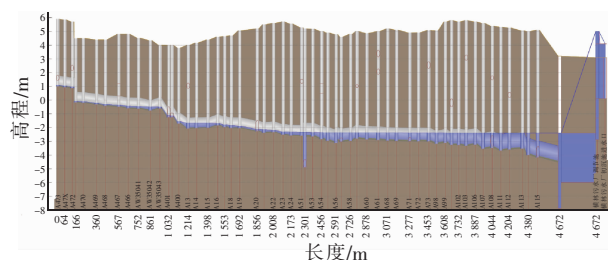


图9 运南片区主干管最高水位水力状况剖面图

Fig. 9 Hydraulic profile of the highest water level of main pipe in Yunnan area

运南泵站集水池水位变化见图 10,可以看出,对泵站启停水位进行优化后,集水池水位变化的幅度和频率都有较好的改善,有利于污水厂进水水量和水质的稳定控制。

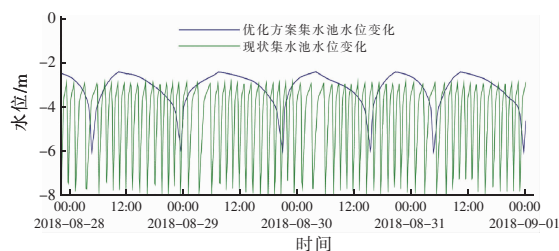


图10 运南泵站集水池水位变化

Fig. 10 Water level change of catchment tank in Yunnan pumping station

② 镇北泵站启停水位的优化结果

镇北泵站向 B 污水厂提升输送运北片区中 C 桥片区收集的污水。镇北泵站的集水池水位与进水管极限流量的关系如图 11 所示。

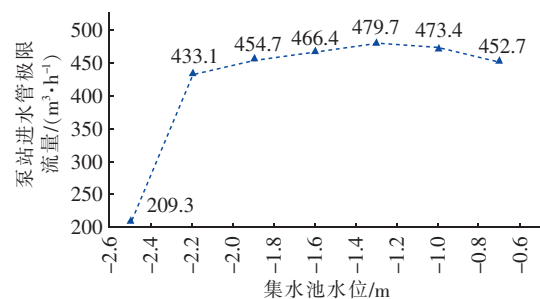


图11 镇北泵站集水池水位与进水管极限流量的关系

Fig. 11 Relationship between water level of catchment tank and limit flow of inlet pipe in Zhenbei pumping station

以进水管设计水位为泵站的启停水位时,进水管的极限流量极低,管道的过流能力难以完全发挥,而且会让水泵频繁启闭。当开启水位逐渐增大至 -1.30 m 时,泵站进水管的极限流量增大至 $479.7\text{ m}^3/\text{h}$,之后便开始回落。

模拟过程中,采用开启水位为 -1.30 m ,闭水水位不高于 -3.96 m 运行时,管道过流能力的利用率达到最大,上游管道的动态调蓄容积可增加约 $2\,734.2\text{ m}^3$,集水池的有效调蓄容积也可增加约 128.9 m^3 ,进水管的极限流量可达 $479.7\text{ m}^3/\text{h}$ 。

运北片区主干管最高水位水力状况剖面图见图12,虽然在排水高峰时段前端临近泵站的管线会有小部分出现满流情况,但考虑到管线埋深较大,此种情形认为可行。

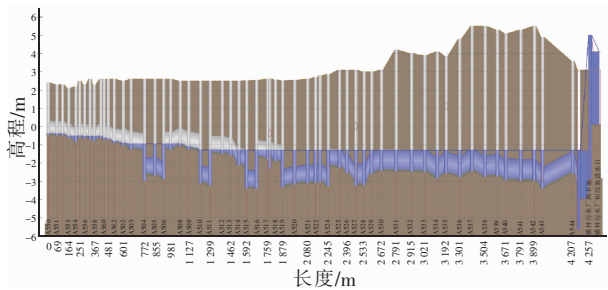


图12 运北片区主干管最高水位水力状况剖面图

Fig. 12 Hydraulic profile of the highest water level of main pipe in Yunbei area

③ C北泵站启停水位的优化结果

C北片区的污水管线连同C北泵站都属于新建污水系统,泵站为自动控制。C北泵站集水池水位与进水管极限流量的关系见图13,分析可知,泵站开启水位从设计方案中最高水位 -3.06 m 至设计水位 -3.80 m ,上游管道动态储蓄容积仅增加 200.68 m^3 。由于进水管管径较小,且泵站额定流量也较小,进水管极限流量也未有大的变化。

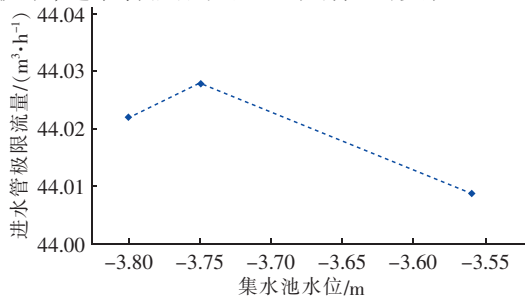


图13 C北泵站集水池水位与进水管极限流量的关系

Fig. 13 Relationship between water level of catchment tank and limit flow of inlet pipe in C Bei pumping station

C北片区主干管最高水位水力状况剖面图如图14所示,可见,该片区主干管坡度较大,制定的三个方案中泵站的启停水位对管道水位的影响均较小,所以仍以现状水泵开停水位进行液位控制便可满足C北泵站的优化运行。

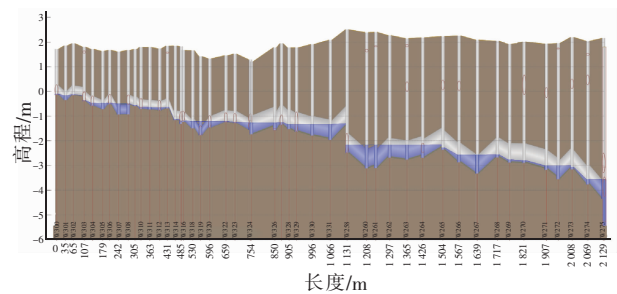


图14 C北片区主干管最高水位水力状况剖面图

Fig. 14 Hydraulic profile of the highest water level of main pipe in C Bei area

4 结论

① 利用InfoWorks ICM建立了H镇污水管网模型,选用纳什效率系数和百分标准偏差验证了模型与H镇污水管网实际情况基本相符。对于数据质量较低的管网情况,建立模型时进行数据的标准化录入后,需对数据资料的正确性进行识别与排查,结合现场核查修正以保证数据的准确性。

② 利用H镇污水管网模型,模拟运南泵站、镇北泵站和C北泵站在不同开启和关闭水位下管道内的污水情况,认为运南泵站在开启水位 -2.40 m 、闭水水位不高于 -5.99 m ,镇北泵站在开启水位 -1.30 m 、闭水水位不高于 -3.96 m ,C北泵站仍以现状水泵开停水位进行液位控制时,即可在完全发挥出管道的过流能力的情况下,避免管线溢流风险,改善污水厂进水水量波动较大的现状,完成对泵站启停水位的优化。

③ 本研究中相较于根据规范设计计算污水泵站的启停水位,运用InfoWorks ICM模拟分析管网动态储量、泵站流量与启停水位之间的关系可以充分利用集水池的储蓄空间,在提高管道可利用调蓄容积的同时不会增加管线溢流风险,使管道的储水能力得到充分发挥,也避免了泵站水泵的频繁开停,降低了能耗。

本研究利用InfoWorks ICM模型设计出污水泵站优化启停水位,有利于城镇污水收集效能的显著提升,可为城镇污水行业的效益提升提供参考,实现污水处理的提质增效。

参考文献:

- [1] 李咏梅,周琪. 工业园区污水治理的现状与发展方向[J]. 给水排水,2016,42(3):1-3.
LI Yongmei, ZHOU Qi. The present status and the developing trend of wastewater treatment in industrial park[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(3):1-3(in Chinese).
- [2] 黄群初,陈金锥. 污水泵站集水池相关设计水位的确定[J]. 水科学与工程,2016(6):44-45.
HUANG Qunchu, CHEN Jinzhui. Determination of design water level of sump in sewage pumping station[J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2016(6):44-45(in Chinese).
- [3] 于晨晖,李彭,张浩,等. 基于 InfoWorks ICM 模型对污水管网输水能力评价及泵站排水量优化[J]. 净水技术,2019,38(9):60-67,82.
YU Chenhui, LI Peng, ZHANG Hao, et al. Evaluation of diversion capacity of sewage pipeline network and optimization of drainage capacity of pump station based on InfoWorks ICM model[J]. Water Purification Technology, 2019, 38(9):60-67, 82(in Chinese).
- [4] 陈圆,张亚雷,FOONG Ying-Chyung,等. 英国排水管网建模技术实例分析[J]. 中国给水排水,2009,25(22):17-19,24.
CHEN Yuan, ZHANG Yalei, FOONG Ying-Chyung, et al. Modelling techniques of drainage network in UK[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(22):17-19, 24(in Chinese).
- [5] SHEPHARD J M. A review of current investigations of urban-induced rainfall and recommendations for the future[J]. Earth Interactions, 2005, 9(12):1-27.
- [6] ARTINA S, BOLOGNESI A, LISERRA T, et al. Simulation of a storm sewer network in industrial area: comparison between models calibrated through experimental data[J]. Environmental Modelling and Software, 2007, 22(8):1221-1228.
- [7] MARK O, LACOURSIÈRE J O, VOUGHT L B M, et al. Application of hydroinformatics tools for water quality modeling and management: case study of Vientiane, Lao P. D. R[J]. Journal of Hydroinformatics, 2010, 12(2):161-171.
- [8] RAI P K, CHAHAR B R, DHANYA C T. GIS-based SWMM model for simulating the catchment response to flood events[J]. Hydrology Research, 2017, 48(2):384-394.
- [9] 王竞茵,张朝升,荣宏伟,等. 水力模型在城市排水系统规划设计中的应用[J]. 环境科学与技术,2014,37(7):173-176,200.
WANG Jingyin, ZHANG Chaosheng, RONG Hongwei, et al. Application of hydraulic model in planning design of drainage system[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(7):173-176, 200(in Chinese).
- [10] 王海潮,陈建刚,张书函,等. 城市雨洪模型应用现状及对比分析[J]. 水利水电技术,2011(11):10-13.
WANG Haichao, CHEN Jiangang, ZHANG Shuhan, et al. Application status and comparative analysis of urban storm water models[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011(11):10-13(in Chinese).
- [11] 王滢,周小伟. InfoWorks ICM 在山地丘陵城市内涝治理中的应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(19):118-123.
WANG Ying, ZHOU Xiaowei. Application of InfoWorks ICM in control of urban waterlogging in mountainous and hilly cities[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19):118-123(in Chinese).
- [12] 于晨晖. 基于 InfoWorks ICM 的工业聚集区污水系统现状评估及安全输水和水质调控的优化研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.
YU Chenhui. Study on Status Assessment of Wastewater System in Industrial Cluster and Optimization of Safe Water Conveyance and Water Quality Control Based on InfoWorks ICM [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019(in Chinese).
- [13] 徐袞,潘兴瑶,李永坤,等. 已建区排水管网评估及多尺度分区改造策略[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(2):123-131, 139.
XU Jiameng, PAN Xingyao, LI Yongkun, et al. Evaluation of drainage network and multi-scale zoning optimization strategy in a built-up area[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(2):123-131, 139(in Chinese).

作者简介:于晨晖(1992-),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向为管网优化与污水处理理论。

E-mail:yuchenhui1992@126.com

收稿日期:2020-06-05

修回日期:2020-08-10

(编辑:孔红春)