

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.06.013

基于HY-SWMM的大型雨水泵站优化设计

王康¹, 李成江¹, 李靖¹, 王路军²

(1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300381; 2. 洛阳鸿业信息科技有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要: 以邢台隆尧东方食品城雨水泵站为例,介绍大型雨水泵站设计规模和水泵机组配置的优化设计方法。基于鸿业暴雨排水及低影响开发模拟系统(HY-SWMM),构建雨水管网的水力模型,并采用传统推理法进行水力计算校核;水泵配置对比了大小泵搭配、高低液位启动、等差和不等差分集水池有效水深等方案。结果表明,采用模型法计算所得大汇水面积雨水泵站的设计规模较推理法可减少约20%;简单地将水泵流量按泵站规模均分、采用等差水位启动水泵是不科学的,需要采用大小泵搭配和适当高液位、不等差水位启动来避免水泵频繁启停。

关键词: 雨水泵站; HY-SWMM系统; 水力模型; 水泵配置优化; 启泵液位

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)06-0074-05

Optimization Design of Large Rainwater Pumping Station Based on HY-SWMM

WANG Kang¹, LI Cheng-jiang¹, LI Jing¹, WANG Lu-jun²

(1. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 2. Luoyang Hongye Information Technology Co. Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: This paper introduced the optimization design method for determining the design scale and pump unit configuration of large rainwater pumping stations exemplified by Longyao Dongfang Food City rainwater pumping station in Xingtai. Based on Hongye storm water drainage and low impact development simulation system (HY-SWMM), the hydraulic model of rainwater pipe network was constructed, and the hydraulic calculation was verified by traditional inference method. The water pump configuration compared the schemes such as combination of large and small pumps, start-up at high and low water levels, and the effective water depth of sump with equal and unequal differences. The design scale of a rainwater pumping station with large catchment area calculated by model method was reduced by approximately 20% compared with that calculated by inference method. It is unscientific to simply divide the flow rate of the water pump according to the scale of the pumping station, and start the pump with equal differential water level. It is necessary to use the combination of large and small pumps and start-up with appropriate high water level and unequal differential water level to avoid frequent start-up and stop of the pump.

Key words: rainwater pumping station; HY-SWMM system; hydraulic model; optimization of rainwater pump configuration; pump start-up water level

《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)(以下简称《标准》)中规定:当汇水面积大于2 km²时,应考

虑区域降雨和地面渗透性能的时空分布不均匀性和管网汇流过程等因素,采用数学模型法确定雨水设计流量。目前推理法应用较为成熟,而模型法在大型雨水泵站设计流量方面的应用尚在起步阶段。随着雨水管网设计标准的提高,泵站规模也相应扩大,根据经验可知,北方地区的雨水设计流量每平方公里约 $6\text{ m}^3/\text{s}$,对汇水面积大于 2 km^2 的地区,设计流量超过 $12\text{ m}^3/\text{s}$ 的大型雨水泵站已成常态。雨水泵站的另一个重要设计点为水泵机组的运行控制,《标准》要求污水泵站每小时启动水泵不宜超过6次,虽未对雨水泵站作出要求,但其启动次数也不宜过多。

在雨水泵站的设计中,规模确定是基础,其直接决定了泵站占地和水泵配置。而科学合理的水泵配置对泵站稳定运行、减少事故率,进而延长设备使用寿命至关重要^[1-2]。随着计算机技术的快速发展,其已逐渐应用于泵站优化研究领域^[3-6],隆尧东方食品城项目采用鸿业暴雨排水及低影响开发模拟系统(HY-SWMM)计算模型进行模拟,同时以推理法校核,针对上述两点进行重点分析,以期为大型雨水泵站设计规模和水泵配置提供借鉴。

1 项目概况

隆尧东方食品城位于河北邢台,西起滏西街,东至兴岗街,南起商贸路,北至华隆路,雨水提升泵站的服务面积为 5.58 km^2 。雨水泵站的收水范围及管网布置如图1所示。

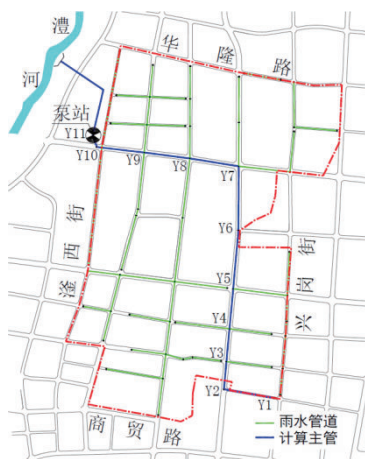


图1 雨水泵站收水范围及管网布置

Fig.1 Rainwater pump station water collection range and pipe network layout

食品城所处位置地势平坦,地面高程为 $26.7\sim 27.3\text{ m}$,雨水管网采用2年一遇的标准修建。雨水

泵站进水通过双排 $3\,600\text{ mm}\times 2\,200\text{ mm}$ 方涵,经泵站提升后排放至滏河。

2 模型建立

雨水泵站优化设计采用HY-SWMM模型模拟研究区域,当产生一定重现期下的降雨时,雨水在设定的地表基础模型上产流、汇流形成地表径流。根据地表径流在雨水排水管网中的流动过程,可得出雨水泵站集水池的入流过程线,再通过反复调整HY-SWMM模型中的雨水泵站运行参数,可得到泵站最优运行效果。

2.1 设计降雨数据

邢台暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{1\,042.245(1 + 0.698 \lg P)}{(t + 8.024)^{0.561}} \quad (1)$$

式中: q 为设计暴雨强度, $\text{L}/(\text{s}\cdot\text{hm}^2)$; P 为设计重现期, a ; t 为降雨历时, min 。

降雨采用芝加哥雨型,按2年一遇 120 min 设计,雨峰系数 0.4 ,总降雨量 59.70 mm 。

2.2 模型下垫面

模型下垫面分为4种类型,见表1。由表1可知,综合径流系数为 0.51 。

表1 下垫面情况

Tab.1 Underlying surface conditions

项目	面积/ hm^2	比例/%	径流系数
道路	86	15.3	0.85
绿地	169	30.8	0.15
居民区	102	18.1	0.65
工业区	201	35.8	0.60

2.3 地表产汇流参数设定

渗入模型采用HORTON模型,最大渗入速率为 152 mm/h ,最小渗入速率为 5.5 mm/h ,渗入速率衰减系数为 4 h^{-1} 。地表排水参数中不渗透性粗糙系数为 0.01 ,渗透性粗糙系数为 0.24 。

3 模拟结果分析

3.1 设计流量

分别采用模型法和推理法计算设计流量,其中模型法设两种工况:工况1为排水口自由出流,工况2为设置雨水泵站提升入河。其中工况2为工程实际情况,排出管为2根 $d2\,200\text{ mm}$ 钢筋混凝土管,管内底标高 22.61 m ,河道洪水位标高 23.71 m ,为半淹没出流状态。

两种方法的径流系数均采用0.51,重现期均为2 a,推理法的地面集水时间取10 min。

模型模拟了10 h降雨过程的管道流量情况,管道排出口外排流量曲线见图2。

由图2可知,工况1的管道排出口外排峰值流量为 $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$,工况2为 $24.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。选取最不利管段(图1中蓝色管线)进行推理法计算(见表2),设计流量的计算结果为 $32.04 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

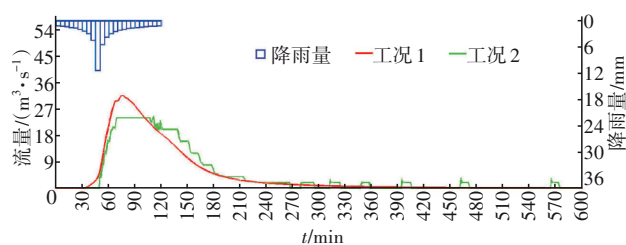


图2 排出口外排流量曲线

Fig.2 Discharge flow rate curve at the discharge outlet

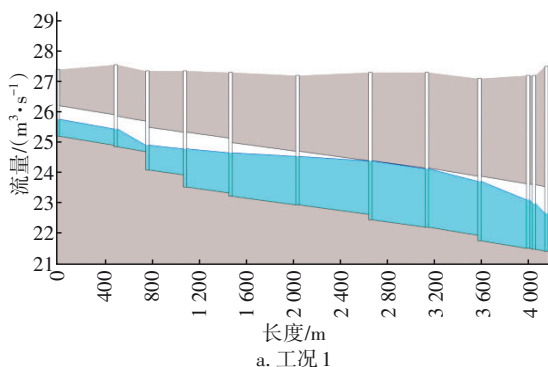
表2 雨水管渠水力计算

Tab.2 Hydraulic calculation of rainwater pipes and channels

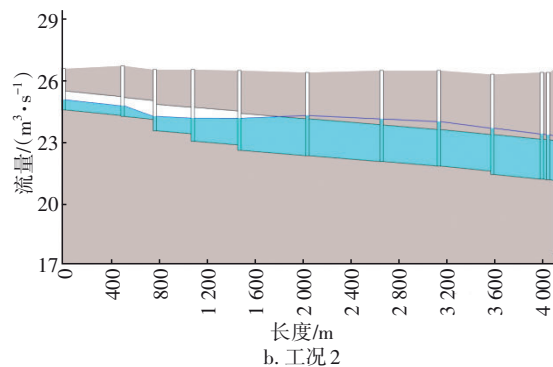
管段编号	本段汇水面积/ hm^2	累计汇水面积/ hm^2	管长/m	管内流行时间/min	降雨历时/min	降雨强度/ $(\text{L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$	设计降雨流量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	管径、宽、高/mm		水力坡度/%	排水能力/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
Y1-Y2	5.92	5.92	493	0	10	249.04	0.75	$\varnothing 1\ 000$		0.06	0.59
Y2-Y3	5.85	11.77	269	10.99	20.99	190.67	1.14	$\varnothing 1\ 300$		0.06	1.18
Y3-Y4	17.03	28.80	320	16.02	26.02	174.30	2.56	$\varnothing 1\ 800$		0.05	2.57
Y4-Y5	27.52	56.32	389	21.30	31.30	160.76	4.61	$\varnothing 2\ 400$		0.05	5.53
Y5-Y6	30.41	86.73	569	26.60	36.60	149.76	6.62	4 400	1 400	0.05	6.95
Y6-Y7	42.13	128.86	620	35.01	45.01	135.93	8.93	4 400	1 800	0.05	10.10
Y7-Y8	78.69	207.55	480	43.11	53.11	125.52	13.28	4 800	2 000	0.06	14.34
Y8-Y9	233.06	440.61	456	48.46	58.46	119.74	26.90	7 000	2 000	0.08	25.76
Y9-Y10	91.82	532.43	419	52.59	62.59	115.76	31.43	7 200	2 200	0.08	30.74
Y10-Y11	26.37	558.80	21	56.19	66.19	112.58	32.04	7 200	2 200	0.09	32.60

由表2可知,模型法在工况1下的设计流量和推理法所得结果基本一致。推理法基于满管无压流进行计算,而模型法在工况1的自由出流条件下,雨水可以通过排出口顺畅排出,管道同样为无压流。最不利管段峰值流量时断面的水深情况(见图3),表明了模型法在自由出流工况下为无压流状态,这也是两种方法计算结果接近的原因。

通过两种设计流量计算方法的比较,验证了传统推理法在地形平坦的大汇水分区同样具有其应用意义,但若将 $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为泵站设计流量,笔者认为不妥。



a. 工况1



b. 工况2

图3 最不利管段峰值流量时的断面水深

Fig.3 Section water depth at peak flow rate of the most unfavorable pipeline section

工况1是为了得到雨水系统在管道排水能力不受限的理想情况下的设计流量,但在此工况下末端有长度为1376 m(Y7~Y11)的管段在峰值流量时未达到满流,因此若以 $31.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 作为设计流量会造成工程投资浪费。

工况2采用模型对不同水泵流量和启停控制条件进行反复模拟,得到设计流量为 $24.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。在该设计流量下系统内无检查井冒水,最不利管路上仅少量管段承压,超出管顶最大深度为0.4 m,相较于

管顶 4 m 的覆土深度是完全可以接受的,这对合理确定泵站设计规模具有重要意义。相较工况 1,工况 2 的设计流量减少了 7.5 m³/s,设计规模减少约 20%,这是由于管道空间发挥了调蓄作用。结合图 3(b)可知,末端有长度为 1 996 m(Y6~Y11)的管段在峰值流量时为满流状态,经计算其管道调蓄容积为 22 005 m³。

3.2 水泵配置

泵站设计规模为 24 m³/s,采用轴流泵,集水池有效容积 2 400 m³,轴流泵最低淹没水深 3.5 m,集水池有效水深 3.3 m,总水深 6.8 m,泵站进水管管内底高出集水池内底 3.8 m。设置 3 种水泵配置方案进行模拟,见表 3。

表 3 水泵配置方案
Tab.3 Schemes of pump configuration

方案	总流量/(m ³ ·s ⁻¹)	小泵流量/(m ³ ·s ⁻¹)	小泵台数/台	大泵流量/(m ³ ·s ⁻¹)	大泵台数/台	水泵开启次数/(次·h ⁻¹)	方案特点
1	24	0	0	4	6	83	等差水位,低液位
2	24	2	2	4	5	76	不等差水位,低液位
3	24	2	2	4	5	2	不等差水位,高液位

将集水池最高水位与最低水位之差按照水泵台数均分称为等差水位设置,为方便叙述,以下简称“等差水位”,反之则为“不等差水位”。第一台水泵启动液位高出进水管管内底高差较大时称为高液位启动,反之则为低液位启动。

方案 1 水泵启动采用等差水位,方案 2 水泵启动采用不等差水位。对比方案 1 与方案 2:等差水位下各泵启动的水位差相同,因水泵台数较多所以水位差较小。在峰值流量时,由于其持续时间较短,导致水泵很快将雨水排出,水位下降后泵停止工作,紧接着进水管内雨水流入,水位上升后水泵再次启动,因而出现在高水位时水泵频繁启动的不利状态,见图 4(a)。可见等差水位设置是不科学的,高水位时需要拉大水泵启动水位差来增加集水池容积,从而延长水泵运行时间。

方案 2 采用低液位启动,方案 3 采用高液位启动。对比方案 2 与方案 3:管道峰值流量过后,随着降雨量减少,方案 2 的泵站进水量也逐渐减少,在降

雨后期(3~10 h)水泵一启动即可使集水池内水位降低,水泵随即停止工作,当进水管内雨水流入后水位上升,水泵又重新启动,与等差水位集水池高水位情况类似,导致的后果是水泵在低水位频繁启动,见图 4(b)。从水泵模拟运行结果看,水泵每小时启动 76 次,这对水泵来说是致命的。因此水泵高液位启动十分必要,但是液位过高会削弱管道排水能力,导致检查井冒水,本次高液位的启动液位标高比管内底高 0.5 m。

方案 1 水泵流量按泵站规模均分,不设置小泵,方案 3 设置 2 台小泵。对比方案 1 与方案 3:方案 1 在降雨后期(3~10 h)出现水泵频繁启动现象,这是由于进水量远小于大泵流量,大泵一启动集水池水位下降后其停止工作,当进水管内雨水流入后水位上升,水泵又重新启动。而当配置小泵后,进水量略小于小泵流量,小泵运行后水量持续补充,集水池水位缓慢下降,延长了水泵的运行时间,见图 4(c)。配备小泵有效避免了水泵频繁启动现象的发生,因此当泵站规模较大时,配置小泵能够优化泵站的运行效果。

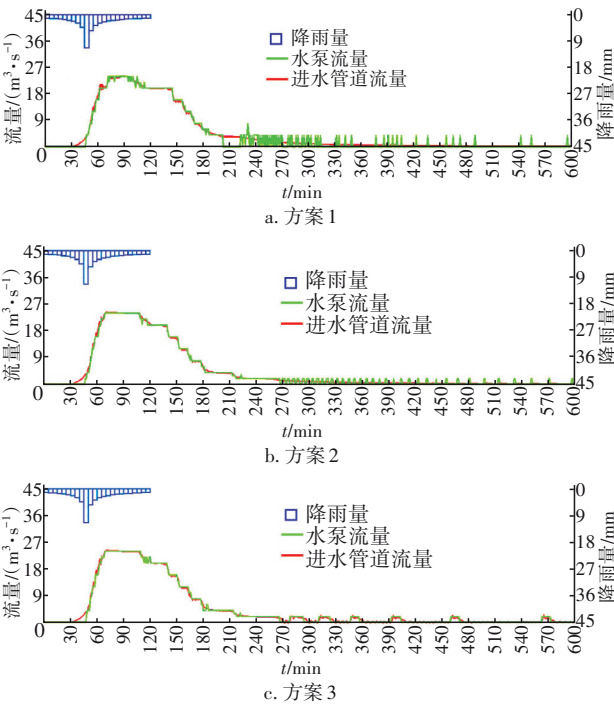


图 4 水泵和进水管流量曲线

Fig.4 Flow curve of pump and inlet pipeline

4 设计方案

根据模型模拟和推理法的计算结果,本次泵站设计流量为 24 m³/s。根据水泵配置模拟优化结果,

应采用大小泵搭配形式,设置2台 $2\text{ m}^3/\text{s}$ 、5台 $4\text{ m}^3/\text{s}$ 的轴流泵,第一台泵采用高液位启动,液位标高比管内底高 0.5 m 。

5 结语

① 传统推理法在地形平坦的大汇水分区同样有其应用意义,可用于模型法的校核。HY-SWMM模型自由出流工况模拟结果与传统推理法结果相近。

② 采用模型法计算大汇水面积雨水泵站设计规模时,若管道系统容积发挥调蓄作用可减小泵站设计规模,较推理法一般可减少约20%。

③ 简单地将水泵流量按泵站规模均分,以等差水位启动水泵是不科学的。需采用大小泵搭配和不等差水位布置,可有效避免峰值高流量和峰尾低流量时水泵频繁启动,启动次数由 83 次/h 减少至 2 次/h 。

④ 第一台水泵应采用适当的高液位启动,启动液位标高一般比管内底高 0.5 m ,但启动液位过高会削弱管道排水能力。

参考文献:

- [1] 王昊,张永祥,唐颖,等.雨水泵站水泵机组启停优化[J].哈尔滨工业大学学报,2017,49(8):98-103.
WANG Hao, ZHANG Yongxiang, TANG Ying, *et al.* Optimization of pump start-stops in rainwater pump station [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(8): 98-103 (in Chinese).
- [2] 葛学伟,邓卫东,于宁.新建下凹桥区雨水调蓄泵站的优化设计[J].中国给水排水,2023,39(14):91-95.
GE Xuewei, DENG Weidong, YU Ning. Optimal design of stormwater regulation and storage pumping station in newly-built concave bridge area [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(14): 91-95 (in Chinese).
- [3] 卓雄,格日乐,梁小光,等.利用雨水管理模型模拟推理公式法设计计算管渠系统[J].中国给水排水,2023,39(2):69-73.
ZHUO Xiong, GE Rile, LIANG Xiaoguang, *et al.* Application of simulation rational formula method of stormwater management model in design and calculation of sewer system [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(2): 69-73 (in Chinese).
- [4] 王新夏,卢兴,李浩,等.数字化模型在老城区排水管网系统改造中的应用[J].中国给水排水,2022,38(18):58-63.
WANG Xinxia, LU Xing, LI Hao, *et al.* Application of digital model in the reconstruction of old urban district drainage network system [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(18): 58-63 (in Chinese).
- [5] 王社平,尹博涵,王继斌,等.城市雨水调蓄泵站InfoWorks模拟研究及方案设计[J].中国给水排水,2019,35(20):47-52.
WANG Sheping, YIN Bohan, WANG Jibin, *et al.* InfoWorks simulation and plan design of urban rainwater storage pumping station [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(20): 47-52 (in Chinese).
- [6] 付小莉,郁片红,李君菡.城镇排水泵站进水流道水力优化设计试验研究[J].中国给水排水,2023,39(1):99-104.
FU Xiaoli, YU Pianhong, LI Junhan. Hydraulic optimization design of inlet channel of urban drainage pumping station [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(1): 99-104 (in Chinese).

作者简介:王康(1990-),男,河南安阳人,硕士,工程师,主要从事市政给排水相关设计工作。

E-mail:794330292@qq.com

收稿日期:2023-08-16

修回日期:2023-09-04

(编辑:沈靖怡)