

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.017

基于PC-SWMM和CFD模拟分析的雨水泵站设计

江 浩¹, 赵伟杰², 田 沁³

(1. 南京市城市建设投资控股<集团>有限责任公司, 江苏 南京 210000; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 江苏分公司, 江苏 南京 210000; 3. 南京城建城市运营集团有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 传统推理法在泵站设计中未系统考虑流域降雨和地面渗透能力的时空分布不均匀性以及管网汇流过程等影响因素,导致泵站建设规模的确定不够科学合理。为此,以南京市铁窗樑泵站改扩建工程为例,介绍了雨水泵站规模确定、水泵配置优化及流态分析的设计方法。在传统推理法计算的基础上,采用PC版暴雨管理模型(PC-SWMM)构建流域水力模型,对推理法计算结果进行论证,合理确定泵站设计规模;水泵配置采用大小泵组合方式,2台小泵布置于南北两侧、4台大泵布置于中间;同时,对水泵运行过程中实际水流状态进行数值模拟。不同设计规模工况下的模拟结果显示,通过推理法计算得到的泵站设计规模(27.0 m³/s)合理且经济;采用优化后的水泵配置及整流措施,既能保证流域排水安全与提升水环境质量,又能确保泵站高效、稳定运行。

关键词: 雨水泵站; PC-SWMM水力模型; 数值模拟; 水泵配置优化

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0118-05

Design of a Rainwater Pump Station Based on PC-SWMM and CFD Simulation Analysis

Jiang Hao¹, Zhao Weijie², Tian Qin³

(1. Nanjing Urban Construction Investment Holding <Group> Co. Ltd., Nanjing 210000, China;
2. Jiangsu Branch, China Municipal Engineering North China Design & Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210000, China; 3. Nanjing Urban Construction Urban Operation Group Co. Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: The traditional rational method fails to systematically consider the impacts of spatiotemporal heterogeneity of watershed rainfall and ground infiltration capacity, as well as the pipe network conveyance process, resulting in an unscientific and unreasonable determination of the pump station construction scale. Taking the reconstruction and expansion project of Tiechuangling pump station in Nanjing as an example, this paper introduces the design methods for determining the design scale, pump configuration optimization and flow pattern analysis of the rainwater pump station. Based on the calculation results of the traditional rational method, the PC-SWMM software was adopted to construct a watershed hydraulic model, which was used to validate the rational method results and to reasonably determine the design scale of the pump station. For pump configuration optimization, a combination of large and small pumps was adopted, with two small pumps arranged on the north and south sides, and four large pumps in the middle. In addition, numerical simulation was conducted on the actual flow conditions

通信作者: 赵伟杰 E-mail: 806190949@qq.com

during pump operation. The simulation results under different design scale conditions indicate that the pump station design scale (27.0 m³/s) calculated by the rational method is both reasonable and economical. Furthermore, with the optimized pump configuration and flow rectification measures, the drainage safety of the watershed can be ensured, the water environment quality can be improved, and the efficient and stable operation of the pump station can be guaranteed.

Keywords: rainwater pump station; PC-SWMM hydraulic model; numerical simulation; pump configuration optimization

近年来,极端暴雨天气事件频发,城市排水系统超负荷运行,导致城市内涝严重,给当地经济和生态环境造成了严重影响。铁窗棂泵站位于南京市秦淮区,与区域内其他3座泵站共同承担内秦淮河流域的防汛排涝功能。现状铁窗棂泵站排涝规模不足,强降雨时泵站上游河道水位多次超过警戒水位,严重影响片区排涝安全。

传统推理法在泵站设计中未系统考虑流域降雨和地面渗透能力的时空分布不均匀性及管网汇流过程等影响因素,导致泵站建设规模的确定不够科学合理。针对这一问题,以南京市铁窗棂泵站改扩建工程为例,采用传统推理法进行水泵规模计算,并结合PC版暴雨管理模型(PC-SWMM)构建内秦淮河流域的河道-泵站水力模型^[1-3],研究分析片区整体排涝需求,合理确定铁窗棂泵站的改扩建规模;同时,对泵站进行流态分析^[4-5],优化水泵配置及平面布置设计,以保证水泵高效、稳定运行。

1 项目概况

雨水泵站的汇水范围如图1所示。

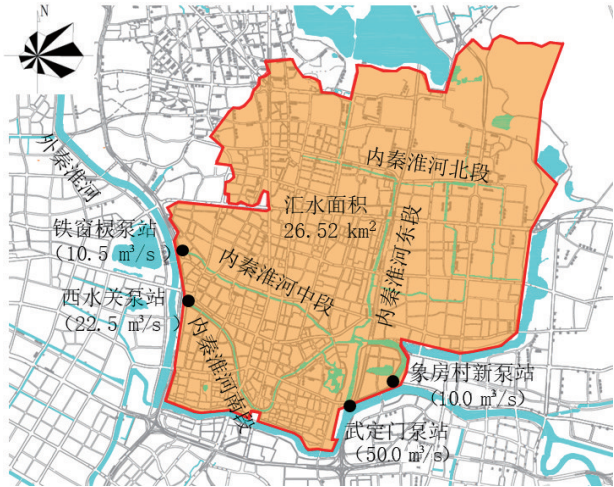


图1 雨水泵站汇水范围

铁窗棂泵站位于南京市秦淮区内秦淮河中段

末端,与西水关、象房村新及武定门3座雨水泵站共同承担内秦淮河流域的排涝任务。区域内雨水经泵站提升后排至外秦淮河,总汇水面积26.52 km²。

2 模型构建

2.1 设计标准及相关参数

南京暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{2\,783.223(1 + 0.954 \lg P)}{(t + 18.852)^{0.751}} \tag{1}$$

式中: q 为设计暴雨强度,L/(s·hm²); P 为设计暴雨重现期, a ; t 为设计降雨历时,min。

设计降雨采用芝加哥雨型,按20年一遇、降雨历时120 min设计,雨峰系数取0.4,总降雨量为110.52 mm。

2.2 下垫面

下垫面统计见表1。综合径流系数为0.556。

表1 下垫面统计

项目	面积/hm ²	占比/%	径流系数
建筑屋面	468.07	17.65	0.90
铺装路面	545.55	20.57	0.65
绿地(小区)	546.62	20.61	0.15
道路路面	523.30	19.73	0.90
绿化	498.90	18.81	0.15
水面	69.96	2.64	1.00

2.3 河道特征水位

内秦淮河流域的河道设计高水位为4.88 m,常水位为4.33 m,低水位为3.68 m。

2.4 地表产汇流参数设定

下渗模型采用Horton模型,最大渗入速率为76.0 mm/h,最小渗入速率为12.7 mm/h,渗入速率衰减系数为4 h⁻¹。地表排水参数中,不透水区曼宁系数为0.01,透水区曼宁系数为0.24。

2.5 模型率定

Nash-Sutcliffe 效率系数(NS)用于评价模拟结

果与实测结果的拟合度,其值越接近1,表明模拟值与实测值的吻合度越高。NS的计算为:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{sim},i} - Q_{\text{obs},i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs},i} - Q_{\text{av},i})^2} \quad (2)$$

式中: $Q_{\text{sim},i}$ 为第*i*个模拟值; $Q_{\text{obs},i}$ 为第*i*个实测值; $Q_{\text{av},i}$ 为实测平均值; n 为数据样本总数; i 为样本序号, $i=1,2,3,\dots,n$ 。

2.6 流态评估指标

轴向速度分布计算为:

$$r_{\text{avd}} = \frac{v - v_{\text{av}}}{v_{\text{av}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: r_{avd} 为相对轴向速度偏差,%; v 为实际轴向速度,m/s; v_{av} 为轴向速度平均值,m/s。

预旋角计算为:

$$\alpha = \arctan \frac{v_t}{v_a} \quad (4)$$

式中: α 为预旋角,(°); v_t 为切向速度分量,m/s; v_a 为轴向速度分量,m/s。

3 设计规模确定

在采用推理法计算泵站设计规模的基础上,通过水力模型对计算结果的合理性进行验证。

3.1 推理法

采用脱过系数法和城区排涝模数法对流域的排涝规模进行计算,结果分别见表2和表3。

表2 脱过系数法水力计算

项目	调蓄面积/m ²	调蓄水深/m	蓄水池有效容积/m ³	上游设计流量/(m ³ /s)	降雨历时/min	脱过系数	排涝规模/(m ³ /s)
数值	699 552.27	1.2	839 462.72	303.70	75.00	0.359	108.88

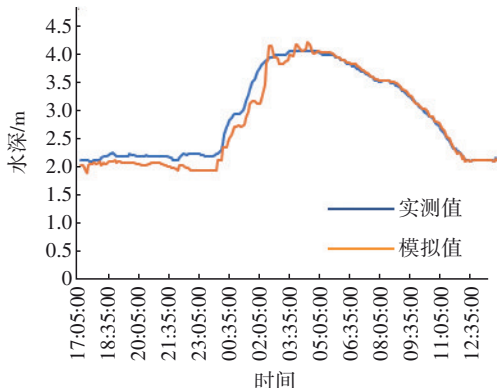
表3 城区排涝模数法水力计算

项目	排涝模数/[m ³ /(s·km ²)]	综合径流系数	设计雨量/mm	汇水面积/km ²	调蓄水位处平均水面面积/km ²	河道调蓄水深/m	设计排涝历时/min	排涝规模/(m ³ /s)
数值	4.13	0.556	110.52	26.52	0.70	1.2	120	109.67

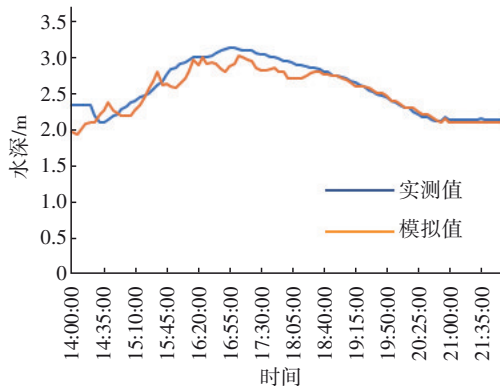
片区内西水关泵站、武定门泵站及象房村新泵站均已按规划规模建设到位,故维持现状。其中,西水关泵站规模为22.5 m³/s,武定门泵站为50.0 m³/s,象房村新泵站为10.0 m³/s。采用上述2种方法计算得到的铁窗棂泵站设计规模平均值为26.78 m³/s。本次设计结合水泵选型参数等因素,最终确定铁窗棂泵站的扩建设计规模为27.0 m³/s。

3.2 水力模型模拟

采用2022年6月24日和2023年7月19日洪武路街道监测站的实时监测降雨数据对水力模型进行率定,并根据NS评价模型的模拟结果。铁窗棂泵站前池水深的模拟值和实测值对比见图2。



a.2022年6月24日



b.2023年7月19日

图2 铁窗棂泵站前池水深的模拟值和实测值对比

通过分析计算,上述两场降雨对应的NS分别为0.82和0.76,表明模拟值与实测值吻合较好,水力模型参数设置合理,能够准确模拟片区内泵站及河道的水位变化。

为验证泵站设计规模的合理性,模型法设置了3种工况,分别对应的铁窗棂泵站设计规模为24.0、27.0及30.0 m³/s时,在内秦淮河流域4座泵站联合调度运行条件下,20年一遇降雨过程中河道的最高水位情况,具体如表4所示。

模拟结果表明,在20年一遇降雨条件下,当铁窗棂泵站设计规模为24.0 m³/s时,排涝能力不足,

无法有效降低河道高水位;当设计规模为 27.0 m³/s 时,能够将河道水位降至最高控制水位以下,保证区域排涝安全要求;当设计规模为 30.0 m³/s 时,相较于工况 2,水位降幅有限,但工程投资显著增加。因此,本次确定铁窗棂泵站的设计规模为 27.0 m³/s。

表 4 不同工况条件下河道模拟最高水位 m

项目	工况 1 最高水位	工况 2 最高水位	工况 3 最高水位	最高控制水位
铁窗棂泵站	4.94	4.73	4.72	4.88
西水关泵站	4.84	4.72	4.70	4.88
武定门泵站	4.81	4.70	4.68	4.88
象房村新泵站	4.82	4.81	4.79	4.88

4 水泵配置及数值模拟分析

4.1 水泵配置

泵站设计规模为 27.0 m³/s,采用潜水轴流泵。铁窗棂泵站除承担排涝功能外,为保障片区水环境质量,还需兼顾内秦淮河流域的河道补水退水功能。因此,本次设计采用大小泵组合的形式进行水泵配置,设置 4 台大泵(2#~5#),单泵流量 5.85 m³/s; 2 台小泵(1#、6#),单泵流量 1.80 m³/s。其中,2 台小泵布置在南北侧流道内,4 台大泵布置在中间流道内。水泵配置方案见表 5。

表 5 水泵配置方案

项目	1#水泵 流量/ (m ³ /s)	2#水泵 流量/ (m ³ /s)	3#水泵 流量/ (m ³ /s)	4#水泵 流量/ (m ³ /s)	5#水泵 流量/ (m ³ /s)	6#水泵 流量/ (m ³ /s)	控制 液位/m
补水							4.48(开
退水	1.80	0	0	0	0	1.80	启),4.18
工况							(关闭)
防汛							
排涝	1.80	5.85	5.85	5.85	5.85	1.80	≤4.88
工况							

4.2 数值模拟

本次雨水泵站的数值模拟采用计算流体动力学(CFD)方法,采用 FLUENT 软件及紊流模型对泵站进水流道和前池进行三维数值模拟,分析其典型断面的流态分布特点。泵站三维几何模型如图 3 所示。

此外,本次设计分析了泵站进水流道内和水泵吸水口下方未设置整流结构及防旋板时的水流状态,具体见图 4。可知,此时水泵吸水口下方出现附底漩涡,水面处存在水面漩涡,严重影响水泵的正常运行。

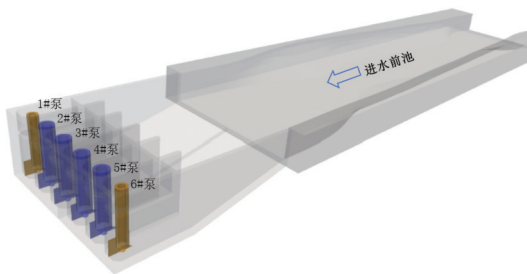
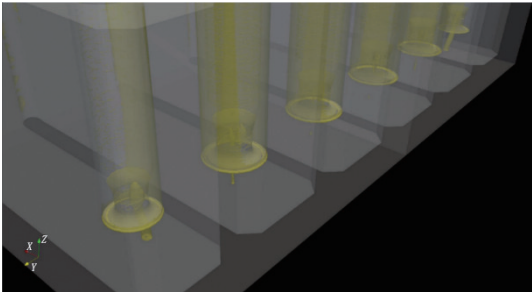
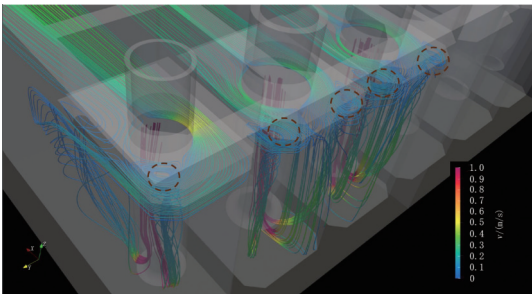


图 3 泵站三维几何模型



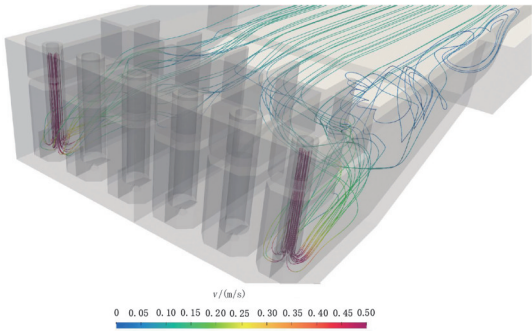
a. 水泵吸水口漩涡识别



b. 水泵水面漩涡识别

图 4 未设置整流结构及防旋板时的模拟结果

基于上述模拟分析,本次设计需在泵站进水流道内及水泵吸水口下方设置整流结构并加装防旋板。补水退水工况的模拟结果见图 5。可知,2 台小泵开启时水泵吸水口处无明显漩涡,整体水流方向一致;泵站进水前池大部分区域水流平顺、流速较小,仅在南侧直线段存在 1 个小漩涡,回流区域速度<0.2 m/s,对整体水流状态基本无影响。



a. 水泵底部漩涡识别

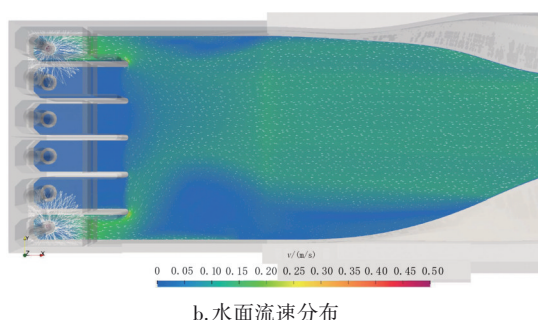


图5 补水退水工况模拟结果

防汛排涝工况的模拟结果见图6。可知,6台水泵全部开启时,水面处水流方向较为一致,未观察到明显的水面漩涡;水泵吸水口处无明显的液下漩涡,泵坑及底部的导流锥处水流平稳,流态较好。

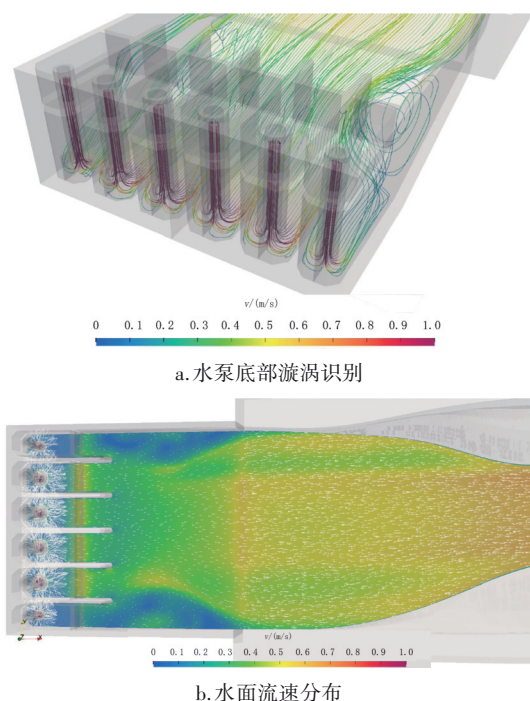


图6 防汛排涝工况模拟结果

数值模拟结果表明,在两种工况下,水流从前池向泵坑流动平顺,水面及水泵吸水口附近均未观察到明显漩涡;各水泵吸水口附近沿井筒轴向的流速分布较为均匀,水泵入流预旋角符合标准要求。因此,本次设计的各台水泵具备安全、稳定的运行条件。

5 设计方案

根据推理法计算及水力模型模拟验证,本次泵

站设计规模为 $27.0 \text{ m}^3/\text{s}$ 。依据数值模拟结果,水泵配置采用大小泵组合形式,设置2台 $1.80 \text{ m}^3/\text{s}$ 和4台 $5.85 \text{ m}^3/\text{s}$ 的潜水轴流泵。其中,小泵布置于南北侧流道,大泵布置于中间流道,并在流道内设置导流结构及防旋板,可保证不同工况下水泵的安全、稳定运行。

6 结论

本工程采用传统推理法与流域水力模型相结合的方式,充分考虑流域降雨、排水等特征,合理确定泵站设计规模。采用大小泵组合形式优化水泵配置,既保证区域排水防涝安全,又兼顾河道水环境质量的提升。同时,采用CFD对优化后的水泵配置进行数值模拟,依据模拟得到的水流流态分析泵站设计的合理性,为泵站经济、稳定运行提供保障。这种将流域水力模型验算及水泵流态数值模拟融入传统工程设计中的方法,为雨水泵站的规划、设计及运行管理提供了新的思路及方法,具有较强的指导意义。

参考文献:

- [1] 王康,李成江,李靖,等. 基于HY-SWMM的大型雨水泵站优化设计[J]. 中国给水排水, 2024, 40(6): 74-78.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 童晶晶,冯伟,储庆. 孟加拉国达卡市Rampura雨水泵站设计与模拟试验[J]. 中国给水排水, 2016, 32(12): 94-97.
- [5] 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.

作者简介:江浩(1985—),男,江苏宿迁人,硕士,高级工程师,从事市政给排水相关设计工作。

E-mail: 562744607@qq.com

收稿日期:2025-10-16

修回日期:2026-01-21

(编辑:沈靖怡)