

基于水文水动力模型的城市雨水工程课程设计探索与实践

张 伟^{1*}, 孙慧超², 刘苗苗¹, 罗乙兹¹, 朱鹏飞¹

¹北京建筑大学环境与能源工程学院, 北京

²北京建筑大学教务处, 北京

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月8日

摘 要

海绵城市建设和城市内涝治理领域需求和问题的极端复杂性和不确定性决定了城市雨水工程课程设计题目的综合性和任务的系统性, 但传统课程设计缺乏交叉学科和数学模型等新工具的有效支撑。研究提出了基于水文水动力模型的城市雨水工程课程设计和实践方法。该课程设计主要任务是以城市水文水动力模型为基础工具, 实现城市雨水系统规划设计方案优化、运行维护方案推求等工程实践问题的有效解决。本文以基于地理信息系统的规划设计项目基础数据处理与解析、基于水文水动力模型的雨水系统运行效果评估与方案优化、基于多情景模拟的泵站运行规则优化与确定这三个具体案例阐述了课程设计的具体应用场景, 教学实践表明, 该方法开展课程设计可达到预期教学目标, 有效培养学生识别发现、综合分析并系统解决复杂工程问题的能力。

关键词

海绵城市, 水文水动力模型, 课程设计, 课程建设, 数学模型

Exploration and Practice of Urban Stormwater Engineering Course Design Based on Hydro-Hydrodynamic Model

Wei Zhang^{1*}, Huichao Sun², Miaomiao Liu¹, Yizi Luo¹, Pengfei Zhu¹

¹School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

²Academic Affairs Office, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

Received: June 3, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 8, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张伟, 孙慧超, 刘苗苗, 罗乙兹, 朱鹏飞. 基于水文水动力模型的城市雨水工程课程设计探索与实践[J]. 教育进展, 2026, 16(7): 140-150. DOI: 10.12677/ae.2026.1671349

Abstract

The high complexity and uncertainty of the needs and problems in sponge city construction and urban waterlogging management determined the comprehensiveness of urban rainwater engineering course design topics and the systematic nature of the tasks. However, traditional course designs lack effective support from new tools such as interdisciplinary approaches and mathematical models. This study proposes a method for urban rainwater engineering course design and practice based on hydrological and hydrodynamic models. The main task of this course design is to use urban hydrological and hydrodynamic models as a foundational tool to effectively solve engineering practice problems, such as optimizing urban rainwater system planning and design schemes and deducing operation and maintenance plans. This paper illustrates the specific application scenarios of the course design through three concrete cases: processing and analysis of planning and design project base data using Geographic Information Systems, evaluation and optimization of the rainwater system's operational performance based on hydrological and hydrodynamic models, and optimization and determination of pump station operational rules based on multi-scenario simulations. Teaching practice shows that using this method for course design can achieve the expected educational objectives and effectively cultivate students' ability to identify, analyze comprehensively, and systematically solve complex engineering problems.

Keywords

Sponge City, Hydrological and Hydrodynamic Models, Course Design, Curriculum Development, Mathematical Models

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

城市雨水工程是近年来海绵城市建设和城市内涝治理持续推进下日益受到重视的专业课程, 涉及环境科学与工程、市政工程、城市规划、建筑学、道路交通、地理信息系统等多个学科与领域, 具有典型的交叉学科特征[1]。作为这门课程隶属实践环节, 城市雨水工程课程设计也因而具有更为完备知识体系的要求, 采用传统方式开展课程设计实践教学, 缺少交叉学科融会贯通, 缺乏新技术手段有效支撑, 更欠缺现今人工智能和数智化赋能的数字底座支持[2]。针对目前教学实践需求, 近年来在人工智能赋能人才培养路径、基于模型支撑的项目式学习模式、最优化理论在实践教学中的应用等方面已开展了有益探索和实践[3]-[6], 在此背景下, 研究探索基于数学模型的城市雨水工程课程设计实践教学成为一种必然的选择[7]。

近年来海绵城市建设和城市内涝治理工作的持续推进, 对数学模型在城市排水领域应用与推广确实提供了重要需求与丰富应用场景[8]。值得注意的是, 现行国家标准《室外排水设计标准》(GB50014-2021)中明确规定了, 在汇水面积大于2平方公里时, 应采用数学模型法来确定雨水设计参数, 以考虑降雨和地面渗透时空分布不均匀性及管网汇流过程[9]。然而, 令人遗憾的是, 现行相关专业人才培养课程体系中尚未明确如何采用数学模型实现城市雨水系统设计, 在相关专业主流教材中也尚未明晰如何基于数学模型开展雨水系统规划与设计的详细步骤。值得注意的是, 《给水排水设计手册》第三版第5册中给出一个采用数学模型校核城市雨水管渠系统设计方案的典型案例, 尽管这本身已是重要进步, 但在现今视域下, 城市雨水系统已远不止雨水管渠系统本身, 而是涵盖了源头减排、排水管渠、超标雨水径流控制

(排涝除险)等多个子系统、并需与水利防洪系统科学合理衔接的一整套复杂系统[10]。因此如何基于数学模型进行城市雨水系统设计在现有人才培养体系中仍是一项有待深入探究的重要课题。

笔者所在教学团队基于城市雨水领域二十余年“本-硕-博”人才培养实践探索,并依托中国建设教育协会资助课题支持,提出了基于水文水动力模拟仿真全流程支持的城市雨水工程课程设计方法。该课程设计要求学生熟练应用水文水动力模型软件构建城市雨水系统复杂模型,并基于模型模拟开展系统问题诊断、运行效果评估、设计方案优化、关键构筑物运行规则推求等环节,旨在帮助学生理论课程学习的知识体系基础上,强化培养其基于数学模型等新工具发现并解决复杂工程问题的能力,进而辅助系统化思维和分析能力的全面提升。

2. 基于水文水动力模拟仿真的课程设计

城市水文水动力模型是城市区域水文过程和径流产汇流水动力过程模拟的一类数学模型的统称,应用较多的模型软件有 SWMM、InfoWorks ICM、MIKE Urban 等[11]。其中,雨水管理模型(Stormwater Management Model, SWMM)是国际城市排水领域最为常用的模型软件之一,在城市排水系统辅助规划设计、运行管理和效果评估等方面应用广泛。值得说明的是,SWMM 作为一个完全开源共享的软件工具,相对于其他人机交互更为便捷的商业软件而言,显然更具备二次开发等方面的技术优势,因此其常作为城市雨水工程课程设计的辅助数学模型工具。

本文提出的基于水文水动力模型的城市雨水工程课程设计的核心内容包括:

- (1) 数据处理: 基于地理信息系统(GIS 等)项目基础数据处理解析;
- (2) 模型构建: 城市雨水系统的水文水动力模型构建与不确定性分析;
- (3) 问题诊断: 基于数学模型的雨水系统水力瓶颈识别与系统问题诊断;
- (4) 方案优化: 基于数学模型的雨水系统设计方案优化与效果预评估;
- (5) 运行改进: 基于模型分析的雨水泵站等关键构筑物运行规则确定与优化。

3. 城市雨水工程课程设计典型案例

在城市雨水工程课程设计长期教学实践中,笔者教学团队逐步形成了涉及新老城区-排水分区-建筑小区等多空间尺度的系列课程设计题目库与案例库。设计题目既有针对新城新区的雨水系统规划,也有聚焦老城旧区有机更新为目标的老旧排水系统提质增效;既有围绕老城旧区排水系统积水/溢流/污染等多重问题的诊断与综合施策,也有关注以海绵城市建设为目标的排水系统源头-过程-末端系统化综合设计;既有新建建筑小区、公建园区的海绵城市建设方案与施工图设计,也有老城区老旧小区改造为主要目标的既有排水系统修复与改造方案设计。

除此之外,还有课程设计的题目与任务涉及到雨水泵站的水泵运行规则和方案确定等最优化问题、水文水动力模型参数的局部/全局敏感性分析、基于贝叶斯理论的模型不确定性分析等延伸性重要科学问题的深入探究。

以下我们以基础数据处理与解析、运行效果评估与方案优化、泵站运行规则优化与确定三类典型题目为例,阐述基于数学模型的城市雨水工程课程设计探索与实践。

3.1. 基于地理信息系统的项目基础数据处理与解析

城市雨水系统传统规划设计项目的基础资料大多为城市下垫面用地规划、高程图等,资料类型通常以 dwg 格式 CAD 图纸形式呈现,传统规划设计中基本形成了一套较为完备数据资料处理与分析方法。随着近年来测绘、卫星遥感等技术手段进步,以及与多学科交叉融合[12],城市信息模型(CIM)相关领域突飞猛进,城市雨水排水系统的规划设计基础资料形式和内容更为丰富,相当多数据以地理信息系统栅

格化数据和卫星遥感数据形式呈现,这确为精准、科学分析项目实际条件提供了重要基础,但也对技术人员开展规划设计工作提出新要求和挑战。

以城市雨水工程课程设计题目库中“西南某山地丘陵城市雨水系统规划设计”这一具体设计题目为例,详细阐述项目基础数据解析全过程。本设计对象为我国西南丘陵地区的LZ市,设计区域面积为654.16 km²,其中城市建成区面积为173.75 km²。整体地势北低南高,北部坡度较缓,中部沿江地区和南部区域坡度较大。中心城区土地利用类型主要包括建筑、林地、草地、水系、耕地和裸地六种主要类型。研究区域内道路分为快速路、主干路、次干路和支路四个等级。

项目基础数据采用数字地形数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),分辨率为30 m × 30 m,坡度数据是基于DEM数据采用ArcGIS处理获得。土地利用类型数据则是基于武汉大学杨杰和黄昕教授发布的1990~2022年中国年度土地覆盖数据,分辨率为30 m × 30 m [13]。研究区域各等级路网分布数据来源于天地图(<https://www.tianditu.gov.cn/>)矢量地图WMTS服务,并通过ArcGIS对其进行矢量化处理。

学生通过基础数据处理与分析,可形成如图1所示项目基础数据解析结果。高精度基础数据解析结果可为学生提出并完善规划设计方案提供重要数据支撑,同时矢量化数据也为其导入城市水文水动力模型提供便利条件,有效支撑后续基于模型的规划设计方案评估和深度优化。

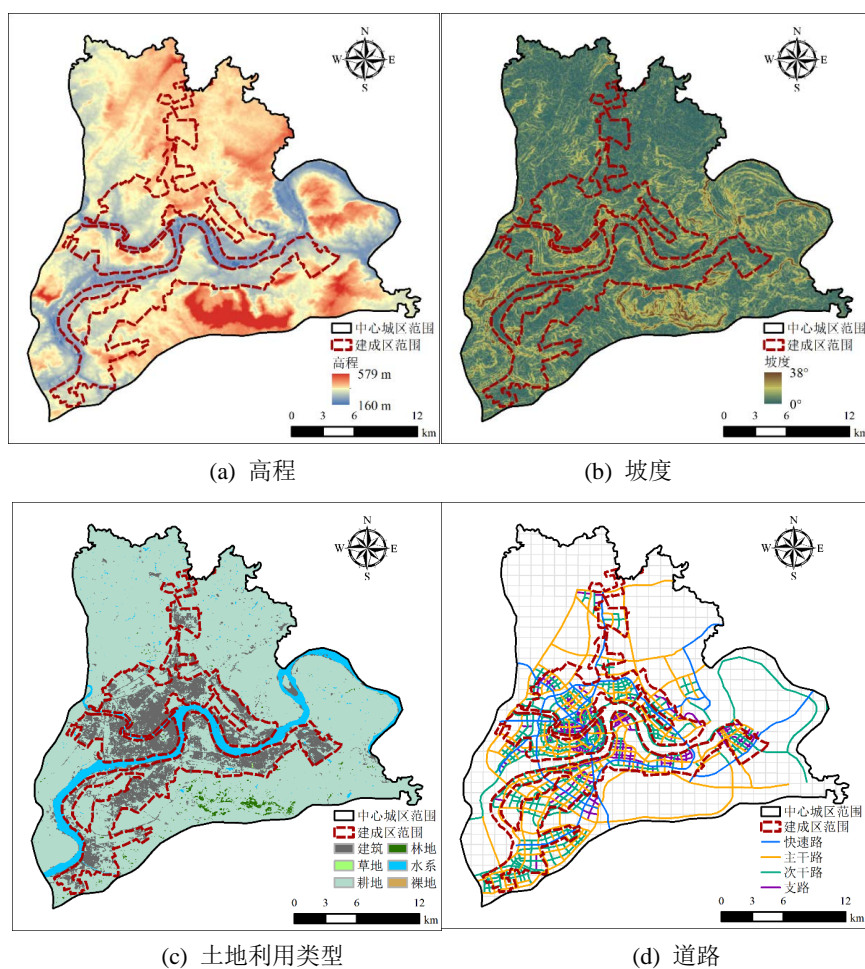


Figure 1. Project basic data analysis results
图1. 项目基础数据解析结果

3.2. 基于水文水动力模拟的效果评估与方案优化

基于水文水动力模型的排水系统效果评估和方案优化，按照课程设计应用场景可分为两大类：第一类是针对新建区的雨水系统规划设计和方案评估。首先通过构建水文水动力模型并进行设计情景下的模拟分析，评估基于传统水力计算方式获得的雨水系统设计方案在考虑水文产汇流及水动力过程条件下，是否可满足规划与设计的要求；如模拟评估结果不满足所有设计目标与具体指标要求，则可采用水力性能指数等方法进行系统诊断[14]，确定需重点关注的水力瓶颈管段和关键节点，进而制定优化策略和思路，对优化后设计方案再次进行模拟评估，直至评估结果满足全部规划设计目标要求为止。

第二类是针对建成区/已建区改造方案效果评估和方案确定。其整体思路同第一类情景，差异主要体现在水文水动力模型构建是采用现状排水系统数据，一般通过排水设施普查(如管网普查等)获得，而非传统水力计算得出的设计方案和图纸。这里特别注意的是，由于现状雨水系统存在建设年限、运维保养、管网调查时间和数据可靠性等多因素交互影响，因此对现状雨水系统的模拟分析与问题诊断，通常存在更多不确定性和更高复杂性。图2给出基于水文水动力模型进行雨水系统评估与方案优化基本思路。

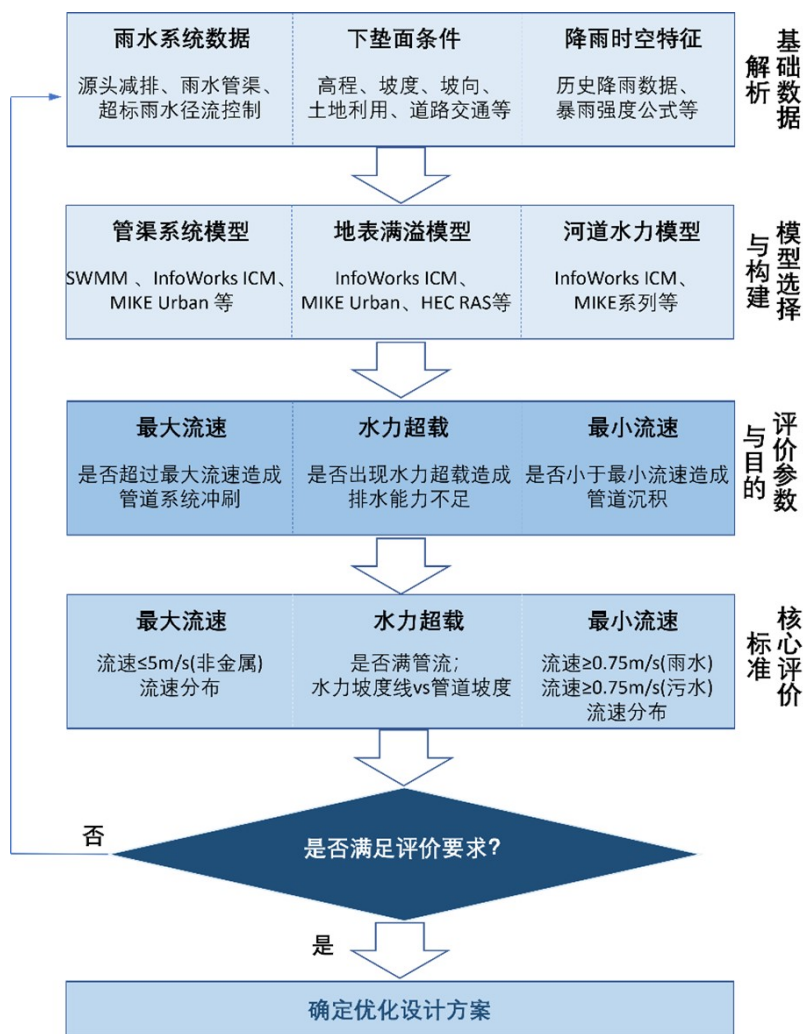


Figure 2. Optimization idea for stormwater system assessment and planning design plan based on hydrological and hydrodynamic models

图2. 基于水文水动力模型雨水系统评估与规划设计方案优化思路

以城市雨水工程课程设计题目库中“我国东北 DH 市排水(雨水)防涝规划设计”这一具体设计题目为例,详细阐述基于水文水动力模拟效果评估全过程。该课程设计题目的核心任务是在东北 DH 市现状管网现状踏勘和梳理基础上,采用 InfoWorks ICM 模型构建该城市建成区雨水系统的水文水动力模型,对排水管网排水能力进行系统评估与科学诊断,识别水力瓶颈管段、明确现状管网关键问题,并为提出具有针对性的雨水管网工程改造方案和规划提供量化依据。模拟评估中主要采用超负荷状态、最大/最小流速等指标进行诊断评估。

(1) 水力超载评估

重力雨水管渠在实际运行中可能形成水力状态分为三种情况:第一种是尚未满管、未形成有压流的状态,如图 3(a)所示,此时水力状态 $K < 1$;第二种是管渠出现满管、并形成有压流状态,但水力坡度小于管底坡度,如图 3(b)所示,此时水力状态 $K = 1$;第三种则是管区域出现满管并形成有压流,同时水力坡度超过管底坡度,此时水力状态 $K = 2$,如图 3(c)所示。水力状态为 1 或 2 均认为已超过其排水能力,视为“水力超载”状态,显然 $K = 2$ 状态水力超载程度更高。

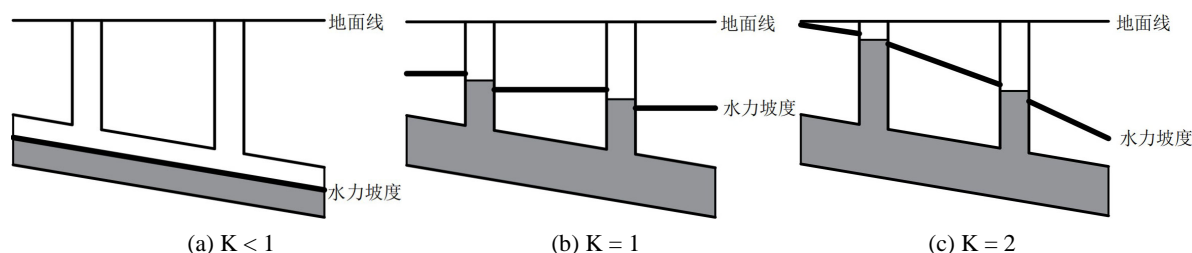


Figure 3. Determination standard for stormwater sewer surcharge capacity
图 3. 雨水管道超载能力判定标准

(2) 最大/最小流速评估

按照现行国家标准《室外排水设计标准》(GB50014-2021)中规定“雨水管渠按满管流设计,最小设计流速为 0.75 m/s,非金属管道最大设计流速为 5 m/s。”当管道内流速小于最小流速时,污染物易沉积,管道输水能力不足;当管道内流速大于最大流速时,管道易产生冲刷,损坏管道结构。

为分析管道整体流速分布规律,从瞬时流速和持续时间两个要素出发,在某评价最小流速在中,流速小于或等于某值,持续时间达到某值的管道长度占管道总长度的百分比如下:

$$P_{vl} = \frac{\sum_{i=1}^m L_{vl}^i}{\sum_{j=1}^n L_j} \times 100\%$$

式中: P_{vl} 是管段流速小于或等于 v , 持续时间达到 l 的管段长度占整个系统管道总长度的百分比, %; L_{vl}^i 是管道流速小于或等于 v , 持续时间达到 l 的第 i 条管段的管长; m 是流速大于 v 的管段数量; n 是管段的总数量。

最大流速的统计方法与最小流速类似,具体不再赘述。模拟分析中大多采用多种重现期设计降雨条件下进行情景分析,并根据水力计算时采用的设计标准(对应重现期)进行具体诊断。

按照 DH 市历史降雨资料,确定了 1 年一遇、2 年一遇、3 年一遇、5 年一遇等多种设计降雨条件,对 DH 市现状排水管网排水能力进行模拟分析,并统计分析水力超载和最大/最小流速分析诊断情况(表 1)。

DH 市按照城市规模和人口数量属于中等城市,按照现行国标设计标准应为 2 年一遇,因此重点分析这一设计降雨条件下管网超载状态。可以看出,近 80% 的现状管网均呈超载状态,反映出 DH 市现状排

水管渠系统排水能力严重不足,远不能实现设计标准下雨水径流顺畅排放,存在严重潜在致涝致灾风险,也进一步凸显编制 DH 市排水(雨水)防涝规划的重要性和迫切性。

Table 1. DH city current status drainage network drainage capacity assessment
表 1. DH 市现状排水管网排水能力评估情况

项目	1 年一遇		2 年一遇		3 年一遇		5 年一遇	
	K = 1	K = 2	K = 1	K = 2	K = 1	K = 2	K = 1	K = 2
管段长度(m)	69,477	15,304	79,949	21,410	82,969	24,080	86,609	27,159
占比(%)	54.79	12.07	63.05	16.89	65.43	18.99	68.3	21.42
超载率(%)	66.86		79.94		84.42		89.72	

同时结合管网流速分布情况进一步分析评估结果(表 2)。从多种重现期条件下管网流速评估结果看,尽管也存在少量管道流速短时间内超过不冲流速(5 m/s)的情况,但管道流速低于不淤流速(0.75 m/s)问题更为严峻。以 2 年一遇降雨情况为例,管道内流速小于不淤流速持续 30 min 以上管段占比达 87.93%,这些管段存在严重淤积、甚至堵塞的潜在风险。与此同时,这一重现期条件下,流速超过最大不冲流速且持续 30 min 以上管段仅占 0.17%,这一占比虽然不高,但长期出现流速冲刷可能造成管网局部病害,必然对雨水管道长期安全运行造成潜在风险隐患。

Table 2. Evaluation results of the current drainage pipe network flow velocity in DH city
表 2. DH 市现状排水管网管道流速评估结果

项目	1 年一遇				2 年一遇			
	<0.75 m/s		>5 m/s		<0.75 m/s		>5 m/s	
	≥30 min	≥60 min	≥30 min	≥60 min	≥30 min	≥60 min	≥30 min	≥60 min
管道数量(条)	2587	1908	3	1	2482	1837	10	4
比例(%)	97.99	72.27	0.11	0.04	94.02	69.58	0.38	0.15
管道长度(m)	97108	67073	20	1	92136	63575	182	51
比例(%)	92.67	64.01	0.02	0	87.93	60.67	0.17	0.05
项目	3 年一遇				5 年一遇			
	<0.75 m/s		>5 m/s		<0.75 m/s		>5 m/s	
	≥30 min	≥60 min	≥30 min	≥60 min	≥30 min	≥60 min	≥30 min	≥60 min
管道数量(条)	2415	1798	12	5	2345	1794	14	10
比例(%)	91.48	68.11	0.45	0.19	88.83	67.95	0.53	0.38
管道长度(m)	89500	62011	244	96	86945	61399	267	197
比例(%)	85.41	59.18	0.23	0.09	82.97	58.59	0.25	0.19

学生根据水力超载和流速评估结果可对拟进行改造设计的雨水管网完成系统性水力性能诊断,进而精准识别水力瓶颈管段和流速异常节点,为进一步优化设计方案提供针对性依据,提出改造优化方案,随后对优化后方案再次进行模拟分析,至雨水管道设计方案模拟运行结果均符合设计规范要求为止,最终确定设计方案,并依据最终方案完成初步设计或施工图设计图纸绘制。

3.3. 基于多情景模拟的泵站运行规则优化与确定

重力流排放在城市雨水系统设计中是一种理想状态,对地势平坦、无明显地形变化的城市区域而言,因管道设计坡度和管道埋深要求的双重限制下,必然要采用雨水提升泵站实现雨水径流有效输送。此外,在我国南方许多城市由于受纳水体长年处于高水位,且高于雨水管道排口标高,必然要通过雨水泵站进行提升以实现雨水径流顺畅排放至受纳水体,因此雨水泵站成为城市雨水管渠系统中不可或缺的重要组成部分。

一般情况下,雨水泵站中无论选择何种类型的水泵,必然要涉及多台水泵启闭规则确定这一关键问题。由于运行阶段水泵运行规则受管网特征、运行条件、降雨特征等复杂因素共同影响,科学合理确定运行规则经常成为困扰泵站设计人员和运行维护人员的难题。这一困境随着水文水动力模型理论与技术日益成熟与推广应用出现了“转机”。笔者教学团队多年前就已将基于模型模拟推求泵站运行规则纳入课程学习内容,尤其是在一些涉及南方地势平台地区的设计题目,都将泵站水泵运行规则确定和规则优化作为核心设计任务之一。

以城市雨水工程课程设计题目库中“我国南方 SH 市某排水分区雨水管渠系统改造规划设计方案”这一具体设计题目为例,阐述细论述基于模型模拟实现雨水泵站水泵运行规则确定和优化的全过程。设计泵站为该排水分区末端排江的雨水排放泵站,泵站的规模以流量表示为 $1.2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。所选泵为 1600ZLB(Q)-6 型轴流式水泵,共计 8 台(6 用 2 备),泵房形式按照合建式自灌式,干式雨水泵房进行设计,形式为矩形半地下式泵房。设计泵站分为地上和地下两层,地下有格栅、集水池、出水池以及泵房等,上层有值班室、配电室及电动间等(图 4)。表 3 给出了泵站各水泵初始运行规则。

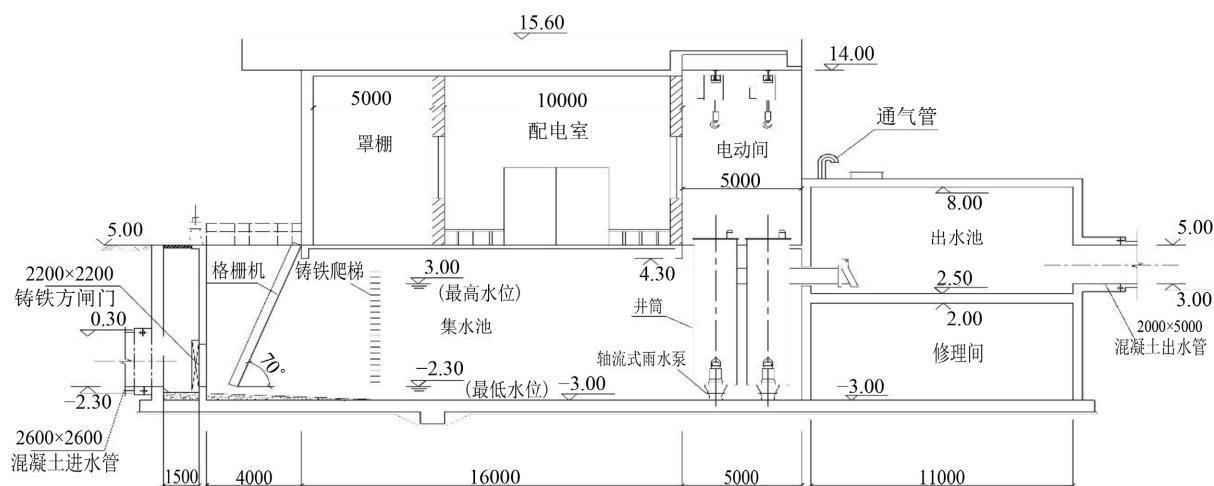


Figure 4. Stormwater pump station design section

图 4. 雨水泵站设计断面示意图

Table 3. Pump station pump operation rules adjustment

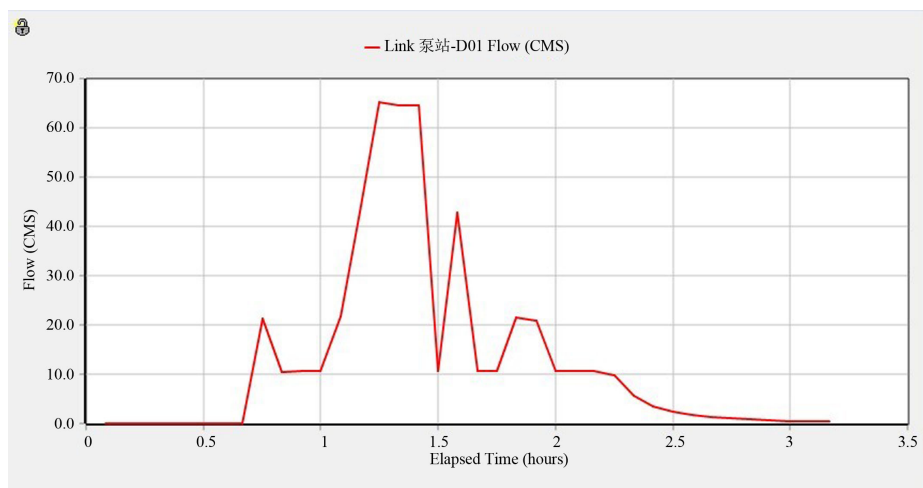
表 3. 泵站水泵运行规则调整

规则方案	水泵编号						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	
规则 1 (初始)	开泵水位	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5
	关泵水位	2.0	1.5	1.0	1.0	0.5	0.0

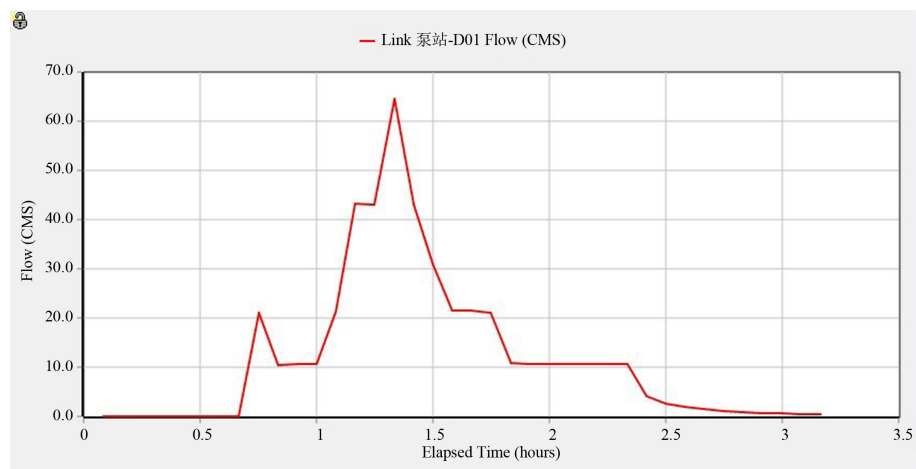
续表

规则 2 (调整)	开泵水位	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5
	关泵水位	2.0	1.5	1.1	0.7	0.4	0.0
.....	开泵水位	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	关泵水位	.....	.....	.....	.....	.....	.....
规则 n (最终)	开泵水位	5.0	4.7	4.4	4.1	3.8	3.5
	关泵水位	0.0	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5

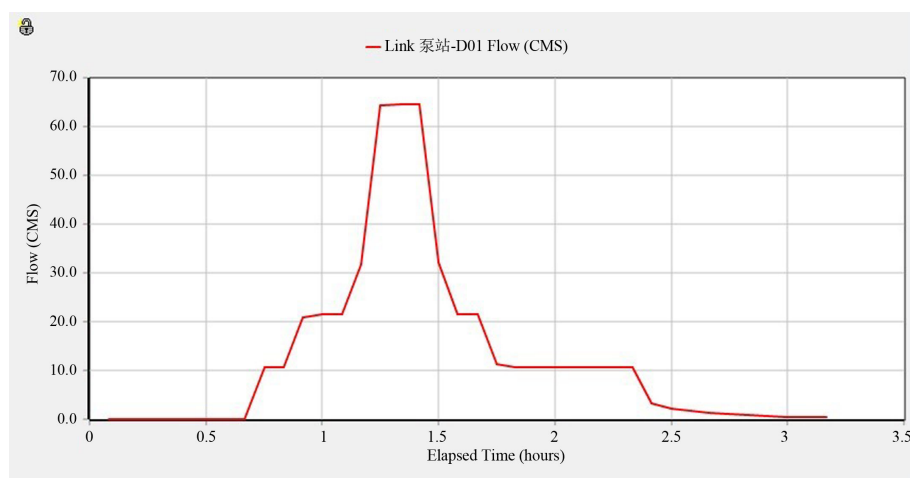
首先根据泵站设计时确定的水泵运行初步规则进行模拟分析，设计区域内设计降雨条件下出现大量节点漫溢(积水)。其原因可能是由于导致某些节点转输负荷比较大，也有可能是是由于末端泵站水泵的运行规则设置不合理所致。最初运行规则下泵站 - 出水口流量变化曲线如图 5(a)。可以发现流量变化极不均匀，出现忽高忽低等情况，原因是水泵的启闭深度设置不合理，导致部分水泵出现了多次启闭的情况；同时可以看到运行曲线出现多个“尖锐”峰值，说明出现多台水泵短时间内频繁启闭情况，也对泵站实际运行造成困难。



(a) 规则 1 (初始)



(b) 规则 2 (调整)



(c) 规则 n (最终)

Figure 5. Pump station outlet flow process curve**图 5.** 泵站出水口流量过程曲线

基于此,调整水泵启闭水位更改运行规则(表 3),以减少泵启闭次数,而且能够在降雨峰值时全部运行,保障雨水顺利排放。图 5(b)泵站 - 出水口流量变化曲线可以看出,泵站运行明显改善,但仍存在流量峰值时刻部分水泵短时启动随即停车的情况,不利于泵站运行操作。因此,针对泵站运行存在问题进一步持续调整运行规则,直至确定水泵运行最终规则,如图 5(c)所示。

确定水泵运行最终规则后,再次进行模型模拟,最初模拟分析时的节点漫溢情况也极大改善,极少数因雨水管网排水能力不足所导致的漫溢或水力瓶颈管段,则可通过进一步调整管径、坡度等进一步优化完善设计方案。学生通过模型分析辅助确定水泵运行规则,可更真切加深对工程问题的理解,在传统培养中可能存在学生认为“工程实践止于施工图”的错误理解,运行维护阶段对工程项目效果落地是关键环节,也可借助此类设计题目丰富对模型工具应用场景的理解和认知。

4. 结论与展望

本文结合海绵城市建设和城市内涝治理等领域实际需求,提出基于水文水动力模型的城市雨水工程课程设计方法,结合笔者教学团队实践与探索,突出环境工程与计算机科学与工程、地理信息系统、水文水资源等专业有效交叉融合,以规划设计项目基础资料解析、规划设计方案效果预估与方案优化、泵站运行规则推求与确定三个典型情景为例,详细展示基于模型的课程设计方法与实施路径。教学实践表明,该课程设计方法可系统性锻炼学生综合运用理论知识、新软件新工具的能力,可着力提升培养学生发现识别、综合分析并系统解决复杂工程问题的能力,为更好地实现毕业达成度和继续深造打下坚实的基础。

本研究提出的“基于模拟仿真的复杂工程问题导向教学模式”,经长期教学实践验证其在环境工程等相关专业学生综合能力提升方面具有显著有效性,同时其通过交叉学科思维方式和多专业新技术手段综合应用解决复杂问题能力培养的方法也将为其他工科专业人才培养提供可参考的可行路径。

基金项目

中国建设教育协会教育教学科研课题“面向国家战略和行业重大需求导向的海绵城市课程范式探索与实践”(2023082);北京市教育科学“十四五”规划 2023 年度一般课题“北京高校分类发展视域下高水

平特色型大学拔尖创新人才培养模式的探索与实践”(CDDDB23220)。

参考文献

- [1] 张伟, 车伍, 李俊奇, 等. 海绵城市建设工程应用导向的延续性培养模式在环境工程专业的探索与实践[J]. 教育教学论坛, 2018(6): 126-128.
- [2] 王今雨, 高海峰, 安健, 等. 人工智能赋能的数字逻辑实验平台构建与实现[J]. 实验技术与管理, 2025, 42(7): 232-239.
- [3] 肖海文, 翟俊, 王涛, 李伟民, 陈忠礼. 新工科背景下环境工程毕业设计“创新型”人才培养模式及实践[J]. 高等建筑教育, 2025, 34(2): 72-78.
- [4] 郭庆, 乔翠兰, 黎俊玲, 崔鸿. 论学科视角下生成式人工智能何以赋能教学——以科学项目式学习为例[J]. 中国电化教育, 2026(1): 75-83.
- [5] 卢彦越, 夏璐. 最优化方法在给排水工程课程设计中的应用[J]. 广西民族大学学报(自然科学版), 2008, 14(4): 94-97.
- [6] 李树平, 陆志波. 优化计算在排水管网课程设计教学中的实践应用[J]. 教育教学论坛, 2025(31): 45-48.
- [7] 张伟, 王建龙, 孙慧超. 工程教育认证背景下数学模型在城市雨水课程和实践教学中的应用的探索[J]. 教育教学论坛, 2018(47): 122-124.
- [8] 李俊奇, 李小静, 刘迪, 等. 海绵城市建设在中国: 十年耕耘, 百城绽放[J]. 中国给水排水, 2024, 40(10): 1-8.
- [9] 张辰, 支霞辉, 朱广汉, 等. 新版《室外排水设计规范》局部修订解读[J]. 给水排水, 2012, 38(2): 34-38.
- [10] 张伟, 车伍. 海绵城市建设内涵与多视角解析[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 19-26.
- [11] 徐宗学, 叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟: 原理、模型与展望[J]. 水利学报, 2021, 52(4): 381-392.
- [12] 宋亚男, 宋子寅, 徐荣华. 多学科交叉融合的工程人才培养模式探索与实践[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(9): 23-25, 31.
- [13] Yang, J. and Huang, X. (2021) The 30 M Annual Land Cover Dataset and Its Dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, **13**, 3907-3925. <https://doi.org/10.5194/essd-13-3907-2021>
- [14] 董鲁燕, 李田, 钱静. 应用水力性能指数法制定排水管网达标改造方案[J]. 中国给水排水, 2011, 27(17): 96-100.