

# 基于SWMM的城市闸泵群 防洪排涝滚动优化控制研究

买伊伊, 刘攀, 罗鑫燃, 周立浩

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北武汉 430072)

**摘要:**充分发挥管网调蓄能力,是应对城市内涝的重要手段。已有研究均针对于削减系统溢流量单一目标设计调度策略,缺乏考虑闸门开闭频繁造成的电力损耗和故障风险。为此,提出一种以削减系统溢流量和闸门开闭次数为优化目标的闸泵滚动优化控制模型,以美国诺福克海牙街区为对象开展实例研究。相比于静态调度,优化控制模型溢流削减率达到31.2%;相比于以削减溢流量为单一目标的调度方案,在保证排水系统溢流量基本不增加的同时,闸门开闭次数减少了59.80%。提出的方法能够为城市内涝时排水系统的调度方案的制定提供理论依据和科学指导。

**关键词:**城市内涝;滚动优化;SWMM;闸泵调度

**中图分类号:**TV737

**文献标识码:**A

**DOI:**10.12396/znsd.221118

买伊伊, 刘攀, 罗鑫燃, 等. 基于SWMM的城市闸泵群防洪排涝滚动优化控制研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(4): 208-214+220. DOI: 10.12396/znsd.221118.

MAI Y Y, LIU P, LUO X R, et al. Optimal rolling control of urban sluice pump group to decrease flood risk of a drainage system based on SWMM[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(4): 208-214+220. DOI: 10.12396/znsd.221118.

## Optimal Rolling Control of Urban Sluice Pump Group to Decrease Flood Risk of a Drainage System Based on SWMM

MAI Yi-yi, LIU Pan, LUO Xin-ran, ZHOU Li-hao

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University,  
Wuhan 430072, Hubei Province, China)

**Abstract:** Improving the regulation and storage capacity of pipe networks is an important research topic in relieving urban waterlogging disasters. Studies have been conducted to design scheduling strategies with the single objective of reducing system overflow, lacking consideration of the loss and risk caused by frequent gate openings and closings. To address this issue, this paper proposes an optimal rolling control model for an urban sluice pump group drainage system with the optimization goal of reducing system overflow and gate opening and closing times, using the neighbourhood of The Hague in Norfolk as an exemplary study. The overflow volume of the optimal rolling control model is 31.2% lower than the value of static scheduling. The gate opening and closing times of this model are 59.8% lower than the dispatching scheme with the single goal of reducing the overflow, while the overflow of the drainage system has been reduced. The proposed method is helpful for the formulation of a dispatching scheme of urban drainage system in case of waterlogging.

**Key words:** urban water-logging; rolling optimization; SWMM; controlling of gate and pump

收稿日期: 2022-05-31

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1865201; 51861125102); 科技部重点领域创新团队(2018RA4014)。

作者简介: 买伊伊(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为城市防涝。E-mail: 2020202060004@whu.edu.cn。

通讯作者: 刘攀(1978-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为水库调度。E-mail: liupan@whu.edu.cn。

## 0 引言

随着全球气候变暖及城市迅速发展,城市暴雨发生频繁,城市内涝已成为威胁城市可持续发展的重要灾害之一<sup>[1]</sup>,我国许多城市出现了“逢雨必涝,遇涝必摊”的局面<sup>[2]</sup>。据统计,2008到2018共计十年内,国内年均城市内涝灾害发生次数占洪涝、台风、干旱等灾害次数的43.41%<sup>[3]</sup>,带来了巨大的经济损失,内涝治理问题已成为我国城市化进程中亟待解决的难题。

解决城市内涝灾害的主要途径有两种:工程性措施和非工程类措施。工程性措施<sup>[4]</sup>建设周期长、投资成本高、受当地土地利用等限制,短期内无法实现;非工程性措施如城市建设排水系统监测网构建城市内涝预警体系,建立城市排水系统优化调度模型等,可有效缓解城市内涝。城市排水系统通常是在静态条件下设计,传统的控制内涝方法也依赖于静态控制,即排水系统按照降雨发生前设定的规则运行,在应对复杂多变的环境时,排水系统中调蓄池以及排水系统管道本身的存储容量未达到充分利用,会造成资源浪费。因此,建立城市排水系统优化调度模型在内涝治理的作用备受关注<sup>[5]</sup>。董欣等<sup>[6]</sup>在昆明市开展了联合调度研究,以最小化溢流量为目标提取各控制设施在不同降雨条件下的操作规则;王浩正等<sup>[7]</sup>提出了一种基于马斯京根概念模型的控制优化模型,通过在线调蓄和策略优化实现合流制溢流的削减;梁益闻<sup>[8]</sup>利用洪水演进的水动力模型法模拟平原河网城市地区,构建了城市河湖闸泵群防洪排涝优化调度模型,得到逐时段最优开度组合;Giuseppina等<sup>[9]</sup>提出了一种配备传感器和一系列由分布式实时系统控制的电动移动闸门的排水网络,结合gossip-based算法,有效利用城市排水管网的蓄水能力;Lund等<sup>[10]</sup>提出了一种基于凸优化的代理模型,动态决定何时让雨水进入下水道系统,以及何时在地上基础设施中储存和输送多余的雨水,有效减少系统合流制溢流。以上研究取得了较好的研究效果,但其均仅以减少排水系统溢流量为目标,调度方案忽视了排水系统闸泵开闭的不利影响,如闸门频繁开闭会造成闸门系统的电力大量损耗,以及造成闸门无响应、部件磨损较快等故障风险,降低闸泵调度方案的实际可行性。

因此,提出一种基于SWMM的城市闸泵滚动优化控制的排水防涝模型:将SWMM作为城市排水系统模拟的过程模型,耦合遗传算法搜索最佳控制策略<sup>[11, 12]</sup>,以最大限度发挥管网调蓄能力和降低闸泵损耗,提高调度方案可实施性作为优化目标,对比不同调度方法的优劣性,探讨控制闸泵启闭次数的必要性。本研究模型系统选用了不同重现期设计暴雨作为预测降雨输入,结合计算结果对优化调度模型的合理性进行分析,对城市防涝提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 优化调度

本研究采用SWMM5模型模拟城市排水系统。基于Python编程软件实现SWMM5模型动态链接库的调用<sup>[13, 14]</sup>,采用遗传算法对排水系统模型闸泵控制指令的优化,优化流程如图1所示,主要包括排水系统模型和调度模型两个模块,两个模块的

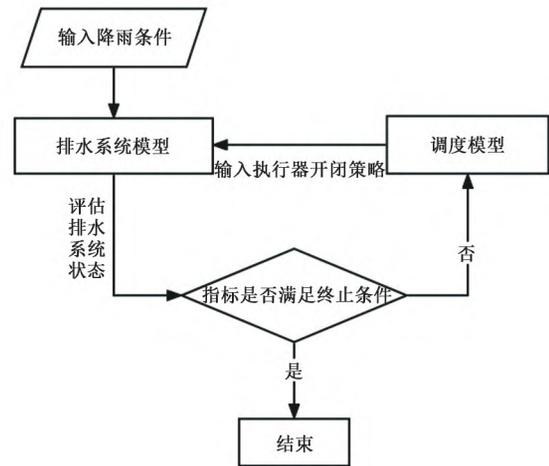


图1 闸泵群优化调度模型流程图

Fig.1 Flow chart of optimal control model of sluice pump group

耦合过程为循环结构。

#### 1.1.1 排水系统模型构建

本研究的排水系统采用SWMM模型,由地表产流模型、地面径流模型、管渠汇流模型三部分组成<sup>[15]</sup>。其中,采用霍顿入渗法计算产流,采用非线性水库模型计算流域汇流,运用动力波法求解完整的一维圣维南方程组对管网汇流进行计算。

霍顿入渗公式如下:

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (1)$$

式中: $f$ 为下渗率,mm/min; $f_c$ 为稳定下渗率,mm/min; $f_0$ 为初始下渗率,mm/min; $k$ 为衰减系数(与土壤性质有关); $t$ 为时间,min。

非线性水库连续性方程如下:

$$\frac{\partial d}{\partial t} = i - e - f - q \quad (2)$$

式中: $i$ 为降雨强度,mm/min; $e$ 为地表蒸发率,mm/min; $f$ 为下渗率,mm/min; $q$ 为径流率,mm/min; $d$ 为子汇水区水深。

利用圣维南方程组模拟管渠汇流过程,由质量方程式(3)和动量方程式(4)组成:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = 0 \quad (4)$$

式中: $\frac{\partial Q}{\partial t}$ 为当地加速度; $\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right)$ 为对流时加速度; $gA \frac{\partial h}{\partial x}$ 为重力作用; $gAS_f$ 为水流摩擦阻力; $S_0$ 为管渠坡度; $\frac{\partial Q}{\partial x}$ 为单元体中进出流量变化; $\frac{\partial A}{\partial t}$ 为单元体中水体体积变化; $q$ 为旁侧入流量。

#### 1.1.2 调度模型构建

为充分利用城市排水系统管网设施容蓄能力,本研究建立城市闸泵群防洪排涝优化调度模型。城市排水系统的调度指系统中的哪些执行器(例如闸门和泵站)应该改变,何时改变它们,以及它们应该改变到什么设置。调度模型的优化目标为保证城市管网溢流量最小和控制期内执行器(闸门、水泵)开闭次数最小,目标函数表达为:

$$\min W = \min \left\{ \sum_i^P \omega_i \text{flooding}_i \right\} \quad (5)$$

$$\min T = \min \left\{ \sum_j^Q \mu_j \text{times}_j \right\} \quad (6)$$

式中:  $W$ 为考虑各溢流点影响权重的排水系统总溢流量,  $\text{m}^3$ ;  $P$ 为溢流节点总数, 个;  $\omega_i$ 为第  $i$  个节点的溢流权重;  $\text{flooding}_i$ 为第  $i$  个节点的溢流量;  $T$ 为控制期内考虑各执行器总开闭次数;  $Q$ 为执行器总数, 个;  $\mu_j$ 为第  $j$  个执行器的重要程度权重;  $\text{times}_j$ 为第  $j$  个调控设施在控制期内的开闭次数。

为了均衡系统溢流量和执行器开闭总次数, 通过权重法将溢流量目标和执行器开闭次数目标合成单目标, 具体表达为:

$$\min Z = \min(\alpha W + \beta T) \quad (7)$$

式中:  $\alpha$ 与 $\beta$ 分别为溢流量与执行器开闭次数的权重系数。

### 1.1.3 滚动优化方法

采用了遗传算法对排水系统模型闸泵控制指令的优化, 并在排水系统模型中实施经算法优化的最优决策, 调度模型具体优化过程如图2所示。考虑调度期为  $N$ , 图中箭头表示可以调用SWMM模型中的输入输出文件以及系统状态, 对模拟结果进行数值分析, 利用遗传算法逐时段优化排水系统各闸门控制操作进行动态决策。

(1) 在第  $i$  个优化步骤内, 得出控制时域两个时间步长内的最佳闸门控制方案为  $M_1, M_2$ , 然后将控制时域内第一个时间步长的决策  $M_1$  用于SWMM模型模拟运行;

(2) 在第  $i+1$  个优化步骤内, 控制时域向后移动一个时间步长, 优化两个时间步长内的最佳闸门控制方案  $M_2', M_3'$ , 然后将控制时域内第一个时间步长的决策  $M_2'$  用于SWMM模型模拟运行。

优化模型按照步骤在调度期内逐步滚动优化, 能够全面了解排水系统运行状况, 充分调度排水系统富余存储容量, 最大程度的减少城市内涝。

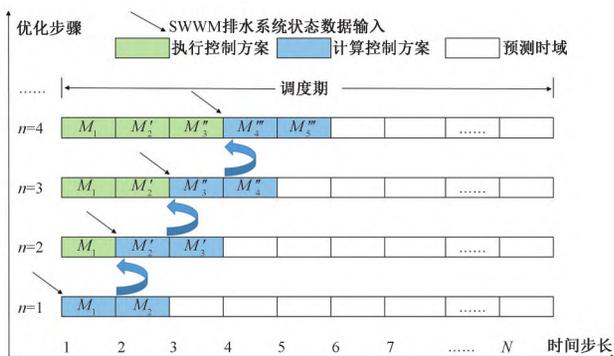


图2 调度模型滚动优化过程图

Fig.2 Rolling optimization process of scheduling model

## 1.2 静态调度

传统的排水系统没有利用闸泵群进行控制, 即设置排水系统中闸门开度始终为1, 泵站不开启。

## 1.3 常规调度

常规调度采用规则控制法, 是城市排水系统中应用最广泛、最简单的控制策略之一<sup>[5]</sup>。规则控制法的策略是离线建立

的, 即在降雨发生前根据从业人员的经验或者往年降雨数据统计指定预定的控制规则, 因此规则控制法的性能较依赖于经验, 不能灵活应对突发事件。

规则控制法包括“if-then”规则(其中“if”部分取决于系统的当前状态;“then”部分表示相应执行器的控制动作)。控制策略的规则是预先定义的并且不改变, 控制动作也只取决于排水系统的当前状态。

## 2 研究区域与数据

### 2.1 研究区域

研究区域位于美国弗吉尼亚州诺福克市。该市地势低洼, 是美国仅次于新奥尔良的沿海洪水最易受灾地区<sup>[16]</sup>。该市管网数据较为齐全且公开可获取, 因此选择诺福克市为本研究的研究区域<sup>[17]</sup>。

由于诺福克市城市管网规模较大, 组成复杂, 故本研究选取诺福克市的海牙街区作为研究区域, 海牙街区面积约7.8  $\text{km}^2$ , 是诺福克许多最具历史意义的建筑和文化景点的所在地, 它毗邻市政府大楼和地区医院, 是城市连通性的关键。海牙地区其靠近市中心, 是市最容易发生洪水的地区之一, 是诺福克城市的关键街区, 其地理位置及管网系统分布如图3所示。

在SWMM模型中, 研究区域管网系统为分流制雨水管网, 不考虑污水流入。本研究区域共具有165个子汇水区, 209个雨水井节点和210条雨水管道。调度模型的决策变量分别为排水系统中3个调蓄池S1、S2和S3的出口闸门为R1、R2、R3的闸门开度和水泵P1的开闭情况。

针对研究区域, 假设<sup>[18]</sup>如下:

- (1) 不考虑蒸发;
- (2) 调蓄池内无渗漏;
- (3) 模拟开始时研究管网内水量为0;
- (4) 不考虑降水预报的误差。

### 2.2 降水数据

针对研究区域, 结合该市的降雨频率统计数据, 本研究使用了降雨历时为12 h, 重现期分别为1、2和5 a的设计暴雨。不同设计频率的日暴雨分别如图4表示。

## 3 结果和分析

### 3.1 不同控制方法结果对比分析

本研究调度模型通过控制排水系统中3个调蓄池的出口闸门R1、R2和R3开度调节水泵P1启闭实现缓解系统排涝压力的目标。本节分别以1 a一遇、2 a一遇、5 a一遇设计暴雨径流条件下对研究区域排水管网防洪排涝优化调度进行模拟分析, 调度期为24 h, 控制时域和时间步长根据排水系统特性分别取30 min和15 min, 溢流量和各节点权重系数均取为1, 其中 $\beta=0$ 代表目标函数不考虑闸门开闭次数, 只考虑排水系统溢流量。

为说明本研究优化调度模型的结果, 以常规调度和静态方法作为对比方案。常规调度规则表示为: 当调蓄池水位或者水泵的上游节点水位达到最大水位90%时开启闸门或者水泵, 调蓄池下游节点水位大于最大水位的80%时关闭闸门或者水泵。

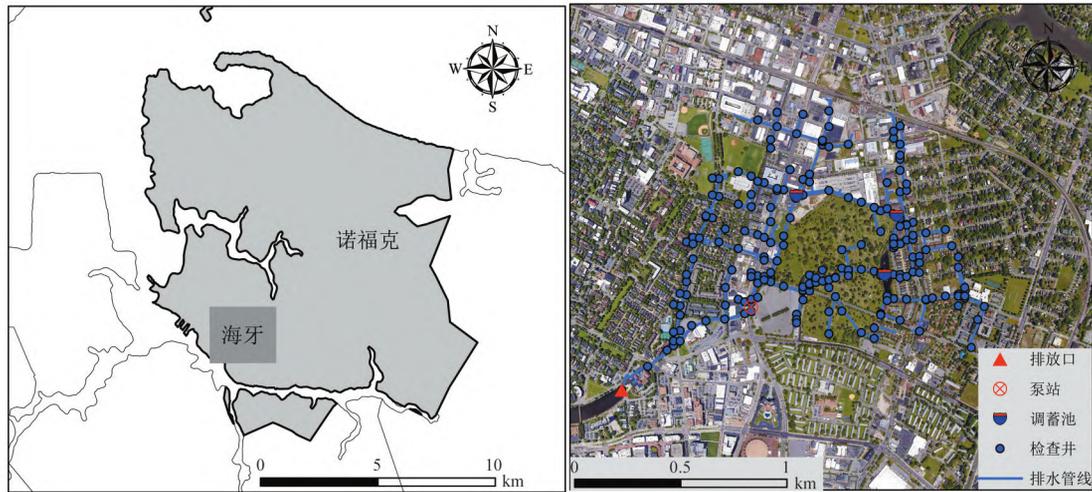


图3 研究区域地理位置图

Fig.3 Geographic view of the studied drainage network

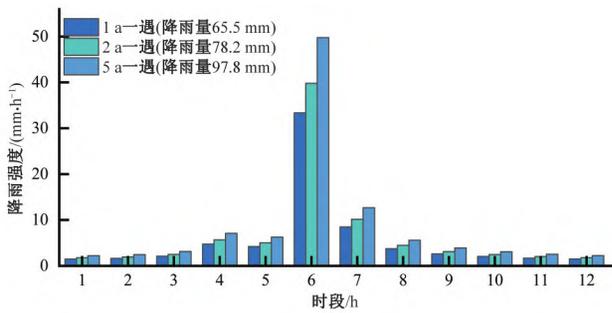


图4 不同重现期降雨过程

Fig.4 Rainfall in different recurrence periods

本节重点对比分析两年一遇降雨条件下的各调蓄池的深度历时曲线、排水系统的洪流量、出流量和蓄水容量历时曲线结果,如图5、6所示。

图5展示了优化调度、静态方法和规则控制法3种工况下调蓄池的深度过程曲线。可以看出,经过优化调度后,在高峰时调蓄池STU1和调蓄池STU2深度明显低于其他两种控制方法下调蓄池的深度,这增加了上游节点与调蓄池水面的高度差,导致上游管道内流速加快,缓解了调蓄池上游排水管网的排水压力,将雨水排到调蓄池下游;但与其他调蓄池相反的是优化调度情况下调蓄池STU3的深度高于静态方法、规则控制

法情况下的深度,原因是调蓄池STU3位于调蓄池STU1的下游,优化调度情况下调蓄池STU3容纳了一部分来自于调蓄池STU1下游的雨水,导致调蓄池STU3高于其他两种情况。相比于其他两种方法,优化调度方法并没有增加调蓄池STU1下游的排水压力,同时还减少了STU3下游管网的排水压力。以上分析得出,优化调度方法可以通过控制闸门调整调蓄池容纳水量,能够达到最大程度减少管网系统排水压力的目的。

图6展示了整个排水系统的洪流量,出水口流量和蓄水量随时间变化的过程曲线。根据洪流量过程曲线图可以看出,相比于静态方法和规则控制法,优化调度在调度前期没有明显起到控制洪量的作用,原因是前期排水系统内水量集中在调蓄池上游各节点,调蓄池内水量较少,无法控制调蓄池闸门起到调节系统洪水的作用。相比于静态控制,优化调度和规则控制法均完全削减掉了第二个洪峰流量,减少了系统的溢流量。

以静态方法的结果作为基准场景,优化调度和规则控制法的控制结果对比如表1所示。

由表1可知,优化调度能提高管网的排水能力,显著减少排水系统的溢流量,相比于静态方法,3种不同降雨情境下溢流削减率分别为12.5%,31.2%和20.9%,均高于常规调度情况。

同时优化调度情况下,控制方案还能够减少管网溢流节点

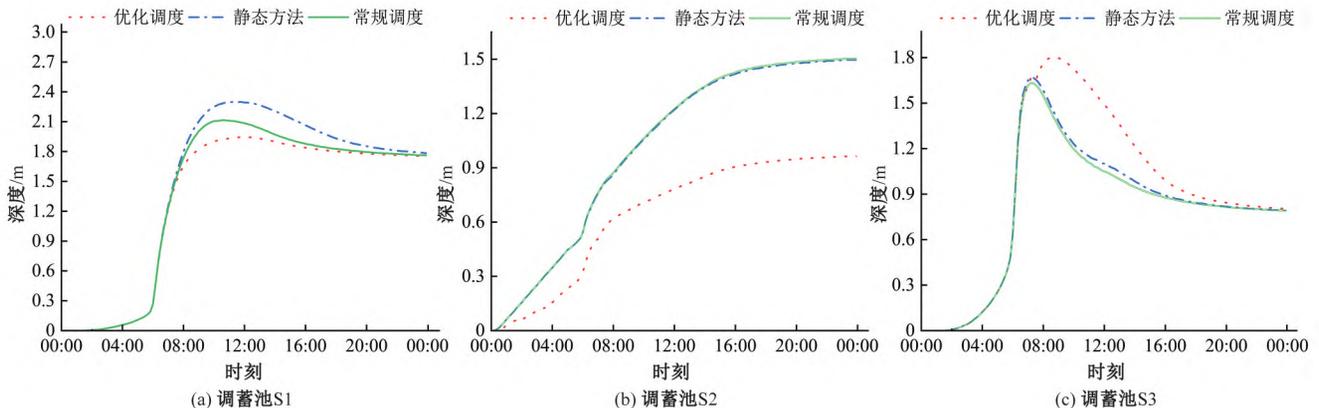


图5 2 a-一遇降雨条件下,各调蓄池深度历时曲线

Fig.5 Change curve of water level of storage tank with 2-year return period

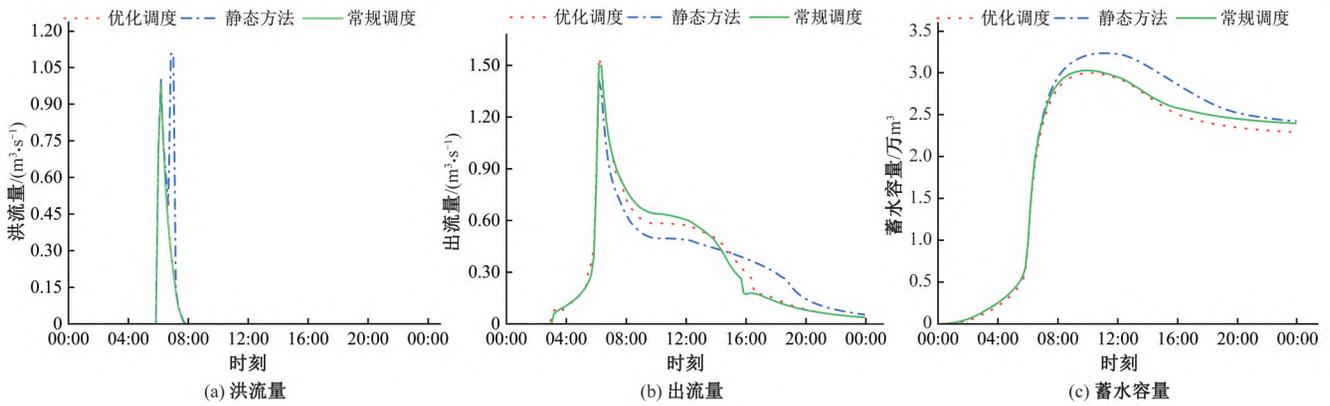


图6 2 a一遇降雨条件下,排水系统洪流量、出流量、蓄水容量过程曲线

Fig.6 The curve of flooding, outflow and storage drainage system with 2-year return period

表1 静态调度、优化调度、常规调度控制结果

Tab.1 The result of optimal control, conventional control, and static control

降雨重现期	调度方法	溢流量/ m <sup>3</sup>	溢流时间/ h	蓄水量/ m <sup>3</sup>
1 a一遇	静态调度	1 441.29	1.5	26 595.46
	常规调度	1 441.29	1.5	26 595.46
	优化调度	1 261.12	1.4	25 273.66
2 a一遇	静态调度	3 598.65	1.7	32 177.69
	常规调度	2 889.11	1.7	30 131.18
	优化调度	2 475.87	1.7	29 828.71
5 a一遇	静态调度	9 135.14	5.0	38 490.69
	常规调度	7 691.78	2.2	37 335.96
	优化调度	7 225.89	2.3	38 217.40

的总溢流时长,加快雨水管网中多余雨水排出的速率,提高排水管网排水能力,削减系统蓄水容量,可以为后期的洪水预留出更大的调蓄空间,相当于扩建城市管网管径,可以容纳更多的雨水。

### 3.2 控制时域、时间步长对调度结果影响分析

本研究优化调度模型为滚动优化,设置不同的控制时域、时间步长,这两个参数决定了每个优化步骤内计算的控制策略的大小,因此决定了遗传算法将要搜索的解决方案空间大小,优化调度模型的复杂程度也会随着改变。

由图7可知,本节研究了同种外部条件下,控制时域分别为0.5, 1, 1.5, 2, 2.5和3 h情况下的调度模型。随着控制时域的增加,模型的复杂度随之增加,模型优化时间逐渐升高,控制时域为3 h的模型优化时间为12 h,是控制时域为0.5 h的模型优化时间的两倍。可以从图7中看到,随着控制时域的逐步增加,系统的溢流量呈现逐渐减少的改变趋势。由于未将闸门开闭次数考虑入目标函数,随着控制时域的增加,闸门开闭次数逐渐增多。

综上所述,控制时域越长,在一个优化步骤内将考虑更长的时间段内各闸门执行器的控制策略,能够更大程度上削减排水系统的溢流量,但同时模型优化计算时间也越长,因此在实例中需均衡考虑计算成本和溢流削减率两者的关系来选择合适的控制时域。

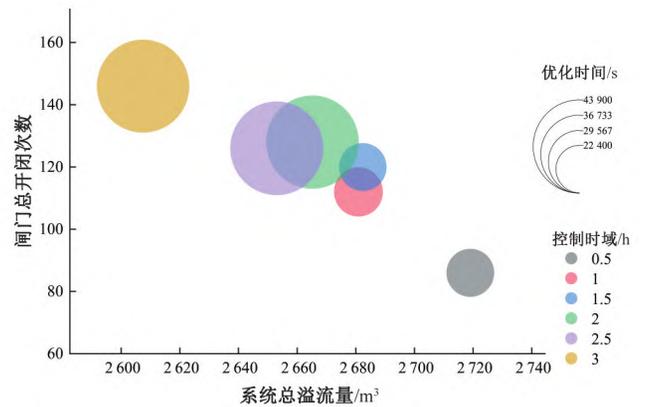


图7 不同控制时域对计算时间、闸门开闭次数、系统总溢流量的影响 (重现期为2 a一遇,时间步长为15 min)

Fig.7 The Wall-clock run times, the gate opening and closing times and total overflow of different control horizon (2-year return period at 15-minute time steps)

降雨条件为两年一遇情况下,不同时间步长条件下系统各项指标如图8所示。由图8可知,在相同的控制时域下,时间步长越小,在同一个优化步骤内需要计算的闸门开闭策略数量也

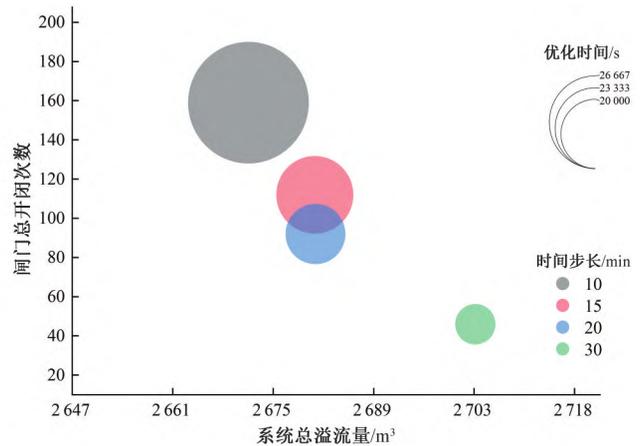


图8 不同时间步长对计算时间、闸门开闭次数、系统总溢流量的影响 (重现期为2 a一遇,控制时域为1 h)

Fig.8 The Wall-clock run times, the gate opening and closing times and total overflow of different time steps (2-year return period at 1-hour control horizon)

就越多,考虑现有优化步骤对系统整个调度期内溢流量的影响,调度模型优化时间就越长,系统溢流量呈现减少的趋势。同时,在相同的时间内,闸门开闭次数越多。

同样的,要确定调度模型的最佳控制时域和时间步长,需要综合考虑计算成本、闸门开闭和系统溢流削减率3个指标,根据当地管理倾向选择合适的调度参数。

### 3.3 $\beta$ 值对调度结果影响分析

3.1节和3.2节中,调度模型均只考虑了排水系统的溢流量作为目标函数,得到整个调度期内所有闸门、水泵的逐时段开度组合。两年一遇重现期的降雨情况下,经优化调度后海牙街区排水系统的闸泵开闭过程曲线如图9所示。可以看出调度目

标仅为降低城市排水系统溢流量时,闸门开闭曲线改变较频繁,短时间内开闭动作较多。

如图10所示,闸门开度改变节点处计闸门开闭次数增加一次。在实际调度过程中,闸门在启闭过程中受力较大,频繁启闭容易引起系统故障,会出现闸门开闭不到位、卡死的现象,造成机械磨损,同时闸泵的频繁开闭会导致控制系统耗电量的增加,提高了调度方案的经济成本。因此,排水系统执行器的开闭次数也是需要纳入考虑的重要目标。

若存在调度策略能使系统溢流量达到最小,但是排水系统执行器闸门开闭频繁,容易产生故障且损耗较高,此调度策略也不适用于排水系统的实际调度过程。

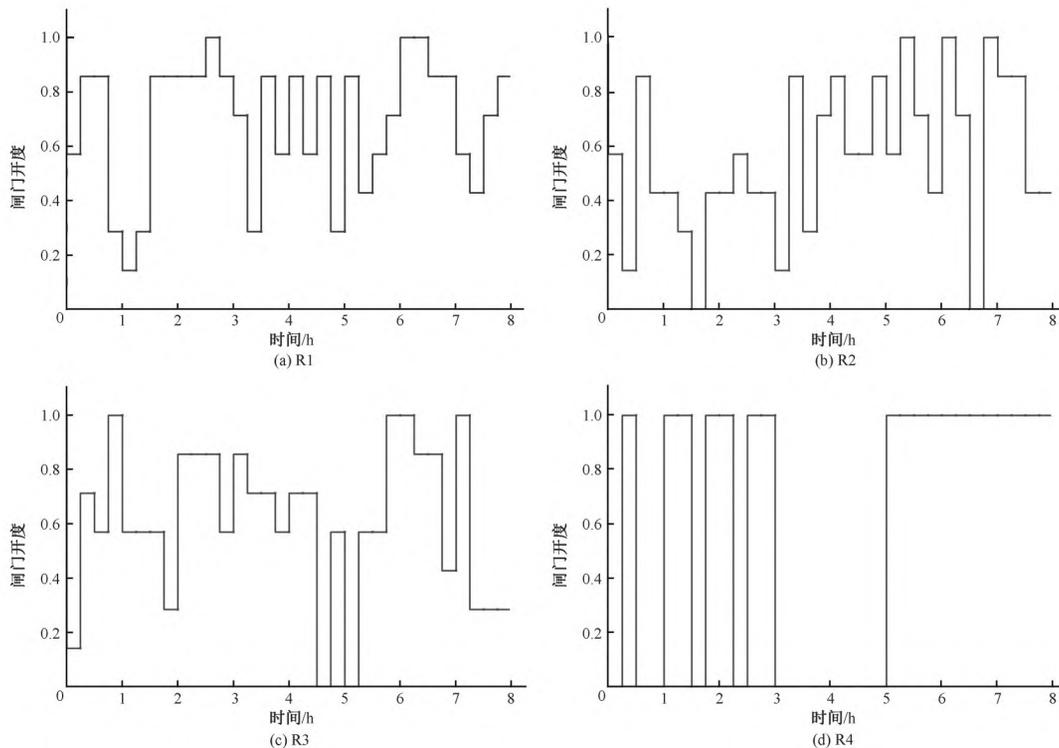


图9 不同执行器的开度过程线

Fig.9 The curve of gate opening of different actuator

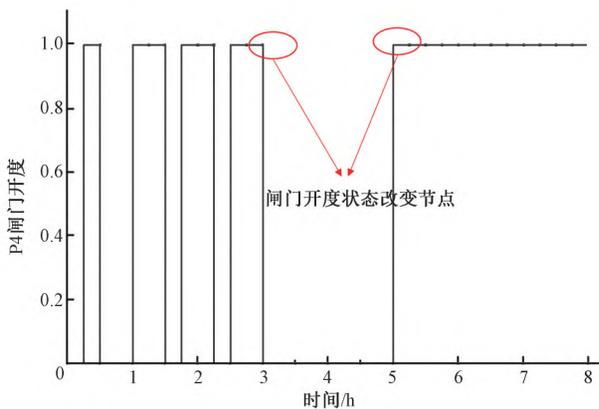


图10 闸门开度状态改变

Fig.10 The change of gate opening state

因此,本节讨论将控制期内执行器总开闭次数考虑进目标函数内,具体如式(7)所示,分析不同的 $\beta$ 值对调度结果的影响。

3种不同重现期降雨条件下,具有不同的 $\beta$ 值的调度模型下的优化策略的系统溢流量和3个闸门R1、R2、R3以及水泵P1在调度期内的开闭次数如图11所示。可以发现,调度模型同时考虑系统溢流量和闸门开闭时,随着 $\beta$ 值的增大,排水系统各执行器开闭总次数呈现先减少后平稳的趋势,系统总溢流量呈现先增加后降低逐渐平稳的趋势。当 $\beta$ 值足够大时,此时优化调度模型与静态结果相似。

相比于不考虑闸门开闭次数的调度方案,考虑闸门开闭次数的调度模型在降雨为1 a一遇、2 a一遇、3 a一遇的闸门次数削减率最高分别可达到52.08%,46.99%,59.80%,可有效降低排水系统中闸门开关控制频次,降低闸泵系统故障的风险。综上所述,要选择调度模型目标函数合适的 $\beta$ 值需要同时考虑降雨条件和系统溢流量和闸门开闭次数的权衡。

## 4 结论和展望

本文开展了基于SWMM的城市防洪闸泵优化控制模型研

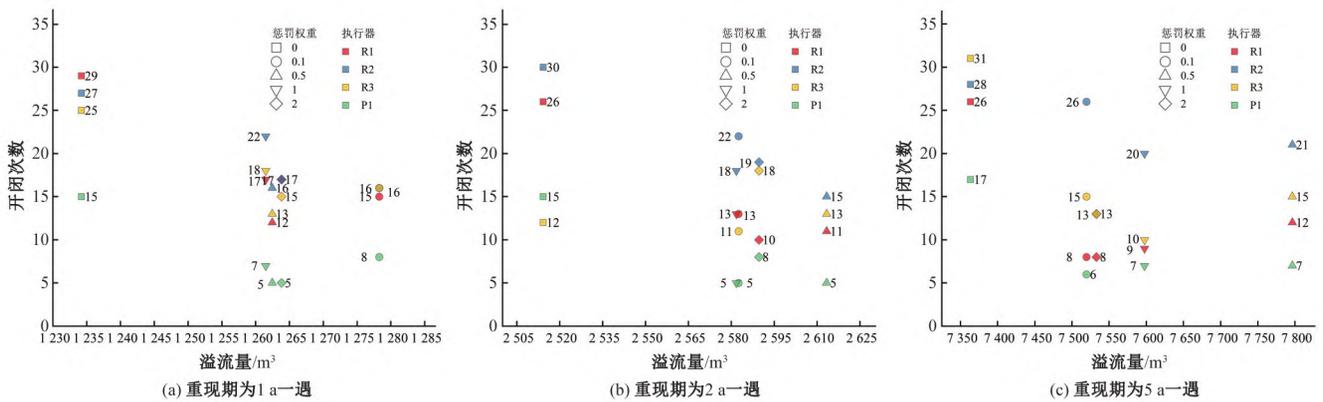


图11 不同惩罚权重系数对闸门开闭次数、系统总溢流量的影响

Fig.11 The gate opening and closing times and total overflow of different penalty weight coefficient

究,提出一种同时考虑系统溢流量与闸泵群开闭次数的耦合遗传算法的滚动优化调度模型,以诺福克市海牙街区为研究对象,结果表明。

(1)相比于静态控制,常规调度溢流量削减率最高能达到19.8%,溢流时间削减率和蓄水量削减率最高分别能达到56.7%和6.36%;优化调度溢流量削减率可达到31.2%,溢流时间削减率和蓄水量削减率最高分别能达到53.3%和7.30%。优化调度相比于其他两种调度方法能够更合理利用排水系统存储容量,溢流量最少,能显著缓解排水系统的排水压力。

(2)在相同的降雨条件下,调整不同的控制时域和时间步长参数对优化调度结果进行分析,可以得出控制时域越长或者时间步长越小,优化调度模型越复杂,排水系统溢流量越小,而优化时间越长。

(3)在相同降雨情况下,目标函数考虑闸门开闭次数时,闸门开闭次数的权重系数越大,优化调度模型计算的策略中闸门开闭次数越小,系统总溢流量总体呈现先增加,后趋于平稳的状态。调度人员可以根据不同情况排水系统溢流量和闸门开闭次数的倾向,灵活调整目标权重,选择合适的优化调度方案作为实际调度决策的依据,能够做到保证城市溢流量基本不增加的同时,减少排水系统内闸泵的开闭次数,降低闸门系统故障的风险。

以上结果表明,对城市闸泵群采取优化调度对改善城市内涝情势具有积极作用,能够充分利用排水系统本身的存储容量提升应对洪涝灾害的能力。本文不考虑降雨的误差,后续工作中,模型输入将采用预测降雨数据,研究城市排水系统实时控制对城市排涝能力的影响。

参考文献:

[1] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.中国城市洪涝问题及成因分析[J].水科学进展,2016,27(4):485-491.  
ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016,27(4):485-491.  
[2] 全星.广州市某河涌流域城市排水系统实时控制模型研究[D].广州:华南理工大学,2020.  
QUAN X. Study on real-time control model of urban drainage system in one river catchment of Guangzhou city [D]. Guangzhou: South

China University of Technology, 2020.  
[3] 谭玲,姚韩之,李廉水,等.城市暴雨洪涝灾害直接经济损失的文献计量分析[J].灾害学,2020,35(3):179-185.  
TAN L N, YAO W Z, LI L S, et al. Direct economic loss assessment of urban storm flood disasters based on bibliometric analysis [J]. Journal of Catastrophology, 2020,35(3):179-185.  
[4] 陈秋伶,林凯荣,陈文龙,等.多尺度海绵城市系统雨洪控制研究[J].水利学报,2022,53(7):1-14.  
CHEN Q L, LIN K R, CHEN W L, et al. Study on storm flood control in multi-scale sponge city system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(7):1-14.  
[5] GARCIA L, BARREIRO-GOMEZ J, ESCOBAR E, et al. Modeling and real-time control of urban drainage systems: A review [J]. Advances in Water Resources, 2015,85:120-132.  
[6] DONG X, HUANG S, ZENG S. Design and evaluation of control strategies in urban drainage systems in Kunming city[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017,11(4).  
[7] 王浩正,邱依婷,韩冠宇,等.基于马斯京根方法的概念模型在排水系统中的应用[J].中国给水排水,2021,37(13):113-120.  
WANG H Z, QIU Y T, HAN G Y, et al. Construction and application of conceptual model based on muskingum method in urban drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2021,37(13):113-120.  
[8] 梁益闻.城市河湖闸泵群防洪排涝优化调度模型研究[D].武汉:华中科技大学,2018.  
LIANG Y W. Research on optimal scheduling model of urban river sluice pump group drainage system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018.  
[9] GAROFALO G, GIORDANO A, PIRO P, et al. A distributed real-time approach for mitigating CSO and flooding in urban drainage systems [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017,78:30-42.  
[10] LUND N S V, BORUP M, MADSEN H, et al. CSO reduction by Integrated model predictive control of stormwater inflows: A simulated proof of concept using linear surrogate models[Z]. 2020:56.  
[11] 刘攀,郭生练,李玮,等.遗传算法在水库调度中的应用综述[J].水利水电科技进展,2006(4):78-83.  
LIU P, GUO S L, LI W, et al. A review of application of genetic algorithm to reservoir operation [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006(4):78-83. (下转第220页)

规模效率。从省际层面来看,山西、甘肃、陕西和宁夏是由于其纯技术效率较低导致农业水利投资无效。青海、山东、河南和四川省是由于其规模效率较低导致农业水利投资无效。

(4)经济发展水平和财政分权度与农业水利投资效率呈正相关,农村居民收入水平和农村居民文盲率与其呈负相关。可以从促进经济发展、提高农民受教育水平和改变农民收入结构等方面入手,提高农业水利投资效率。

基于上述结论,提出以下建议:

第一,优化黄河流域农业水利投资配置。高度重视黄河流域不同省份之间农业水利投入和产出的差异,以农业生产需求为导向,有针对性地调节农业水利资源投放以及农业水利设施的数量,合理划分农业水利设施的覆盖范围,努力做到无遗漏式全覆盖,实现资源利用最大化。

第二,完善黄河流域农业水利投资项目的管理制度。一方面,明确农业水利建设资金分配负责人,保证资金分配方案合理透明,同时设立绩效评价机制,以督促相关部门合理利用资金。另一方面,鼓励农民积极参与农业水利投资项目的建设,并完善农业水利投资项目资金违规使用的举报渠道,进而提高农业水利投资资金的利用效率。

第三,营造有利于黄河流域农业水利投资效率提升的外部环境。首先,利用好流域自身地理优势,将其生态资源转化为生态资产,促进流域经济高质量发展,从而克服该流域沿线省份农业水利投资发展不平衡的困难。其次,改善农业生产环境,提高农民农业收入占比,进而提升农民对农业水利建设的重视程度。最后,重视农村教育,提高农村居民受教育水平,从而促进农业水利工程建设。

#### 参考文献:

- [1] MACMILLAN, ZHU. The Impact of China's Economic Reforms on Agricultural Productivity Growth [J]. *Journal of Economic Surveys*, 1989, 3(4): 781-809.
- [2] 西奥多·W·舒尔茨. 改造传统农业[M]. 北京: 商务印书馆, 2010: 102-118.

- [3] 许朗, 凌玉, 耿献辉, 等. 农田水利投资与农业经济增长的动态关系: 基于全国省级面板VAR模型[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(3): 458-461.
- [4] 王学渊. 基于DEA和SFA方法的中国省区灌溉用水效率比较研究[J]. *统计与决策*, 2010(8): 44-47.
- [5] 蒋育燕. 广东农田水利财政投资效率分析[J]. *华南农业大学学报(社会科学版)*, 2016, 15(4): 118-126.
- [6] 刘其涛. 我国农田水利基础设施投资效率现状及动态效率研究[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(23): 303-307.
- [7] 杨明明, 武鹏林. 基于考虑非期望产出的超效率SBM-Malmquist模型的水利建设投资效率评价[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(3): 128-131.
- [8] 柴盈. 南方地区农田水利政府支出效率及地方性制度比较分析[J]. *农业经济问题*, 2014, 35(6): 46-53+111.
- [9] 陈邦尚, 李伟. 我国农田水利投资主体的责任与意愿分析[J]. *农村经济*, 2018(4): 93-98.
- [10] 汤洁娟. 农田水利工程效率及其影响因素分析: 基于DEA-Tobit模型多阶段实证[J]. *求索*, 2014(6): 85-89.
- [11] 刘海英, 李新, 王强. 利益相关者的交互效应对牧区水利治理效率的影响研究: 基于内蒙古412户牧民的调查[J]. *中国农村水利水电*, 2018(11): 145-150+154.
- [12] 唐娟莉, 倪永良. 中国省际农田水利设施供给效率分析: 基于三阶段DEA模型的检验[J]. *农林经济管理学报*, 2018, 17(1): 23-35.
- [13] 朱云章. 中部粮食主产区农田水利投资绩效分析: 以河南省为例[J]. *科学经济社会*, 2011, 29(2): 58-62.
- [14] 罗芳, 孙彩虹, 田苗, 等. 粮食主产区农田水利投资绩效与政府干预效应分析: 基于Malmquist-FGLS两阶段模型[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(8): 323-329.
- [15] APARICIO J, RUIZ J L, Sirvent I. Closet targets and minimum distance to the Pareto-efficient frontier in DEA [J]. *Journal of Productivity Analysis*, 2007, 28(3): 209-218.
- [16] 刘华军, 乔列成, 孙淑惠. 黄河流域用水效率的空间格局及动态演进[J]. *资源科学*, 2020, 42(1): 57-68.
- [17] TOBIN J. Estimation of relationships for limited dependent variables [J]. *Econometrica*, 1958, 26(1): 24-36.

#### (上接第214页)

- [12] 刘攀. 水库洪水资源化调度关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- LIU P. Key technology problems of flood water resources utilizing in reservoir operation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005.
- [13] RIANO-BRICENO G, BARREIRO-GOMEZ J, RAMIREZ-JAIME A, et al. MatSWMM-An open-source toolbox for designing real-time control of urban drainage systems [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 83: 143-154.
- [14] SADLER J M, GOODALL J L, BEHL M, et al. Leveraging open source software and parallel computing for model predictive control of urban drainage systems using EPA-SWMM5 [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2019, 120: 104-118.
- [15] 陈晓燕, 张娜, 吴芳芳, 等. 雨洪管理模型SWMM的原理、参数和应用[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(4): 4-7.

- CHEN X Y, ZHANG N, WU F F, et al. Stormwater Management Model (SWMM): Principles, Parameters and Applications [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4): 4-7.
- [16] SADLER J M, GOODALL J L, BEHL M, et al. Exploring real-time control of stormwater systems for mitigating flood risk due to sea level rise [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124-137.
- [17] ZAHURA F T, GOODALL J L, SADLER J M, et al. Training machine learning surrogate models from a high-fidelity physics-based model: Application for real-time street-scale flood prediction in an urban coastal community [J]. *Water Resources Research*, 2020, 56(10): 1-15.
- [18] SHISHEGAR S, DUCHESNE S, PELLETIER G. An integrated optimization and rule-based approach for predictive real time control of urban stormwater management systems [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 577: 124-137.