

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.20180023

刘孟凯, 莫庸, 杨佳, 等. 暴雨条件下的长距离渠系水力响应特性研究[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1): 151-157. LIU M K, MO Y, YANG J, et al. Hydraulic response of long distance canal system under the effect of rainstorm [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(1): 151-157. (in Chinese)

暴雨条件下的长距离渠系水力响应特性研究

刘孟凯¹, 莫庸¹, 杨佳¹, 管光华²

(1. 武汉科技大学 恒大管理学院, 武汉 430081; 2. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072)

摘要: 暴雨是常见的天气现象, 其对长距离输水渠系的适时适量供水及工程安全具有重要影响。通过建立暴雨影响下的渠系水力响应模拟模型, 分析了不同暴雨条件和渠系闸门群有无联合调度等情况下的渠系联合水力响应规律, 结果表明, 暴雨可威胁渠系的运行安全, 而恰当的渠系运行控制响应模式是改善渠系水力响应的重要方法, 有利于促进输水安全。暴雨可造成南水北调中线工程渠道内水位雍高, 雍高程度受降雨强度、降雨范围和渠道断面位置影响, 其中末端渠道下游的水位雍高最大, 连续3日暴雨可造成水位雍高0.44 m, 使渠系面临外溢风险, 而采用闸门群联合调度后, 可有效削减壅水高度, 但此时的壅水高度还受渠系控制模式和参数取值等因素影响, 且渠系风险位置也将位于降水影响区最上游端渠道。

关键词: 长距离渠系; 暴雨; 非恒定流; 数值模拟; 水力响应

中图分类号: TV91; S274.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)01-0151-07

Hydraulic response of long distance canal system under the effect of rainstorm

LIU Mengkai¹, MO Yong¹, YANG Jia¹, GUAN Guanghua²

(1. Wuhan University of science and technology, Wuhan 430081, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Rainstorm is a common weather phenomenon. It influences the timely and sufficient water supply of long distance canal system and engineering security. In this paper, we established a mathematical model to simulate the hydraulic responses under different rainstorm processes. The simulation results showed that: the rainstorm affects the operation security of the system, and the proper canal system operation can improve the security. Rainstorm can raise the water level, the extent of which depends on rainstorm intensity, rainstorm scope, and the location of the observed cross section. The maximum increase occurs down the last canal pool. A 3 day rainstorm can increase the water level by 0.44m, endangering canal safety. With joint operation of the gates, the dammed water level can be effectively reduced, but it is still influenced by the control mode of the canal system and parameter values; and the risk position will be the first canal pool in the rainstorm stricken area.

Key words: long distance canal system; rainstorm; unsteady flow; numerical simulation; hydraulic response

南水北调中线工程总干渠长 1 432 km (含天津段干渠 155 km), 全程由南至北自流, 经河南、河北两省输水至北京和天津, 共由 63 座控制性节制闸通过中央集中自动化控制模式实施输水运行控制。而

工程区域曾发生“75·8”河南暴雨、“96·8”河北暴雨等华北地区的著名历史暴雨过程。我国气象部门定义暴雨一般指每小时降雨量 16 mm 以上, 或连续 12 h 降雨量 30 mm 以上, 或连续 24 h 降雨量 50

收稿日期: 2017-05-11 修回日期: 2017-10-24 网络出版时间: 2017-12-27

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20171226.1716.042.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51779196; 51309015; 51009108; 51439006); 国家重点研发计划课题(2016YFC0401810); 2017 校青年科技骨干培育计划项目(2017xz030)

Funds: National Natural Science Foundation of China(51779196; 51309015; 51009108; 51439006); National Key Research and Development Program of China(2016YFC0401810); 2017 School Youth Science and Technology Backbone Development Program(2017xz030)

作者简介: 刘孟凯(1984-), 男, 河北沧州人, 高级工程师, 主要从事水利工程运行管理研究。E-mail: mengkailiu@whu.edu.cn

通讯作者: 管光华(1979-), 男, 江苏阜宁人, 副教授, 主要从事灌排自动化及量水理论研究。E-mail: GGH@whu.edu.cn

mm 以上的降水。暴雨洪涝灾害是河北的主要气象灾害之一,在 1984-2011 年的 28 年间,春秋两季共发生 204 次暴雨,约 7 次/年^[1];2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨,降水强度大,持续时间长,北京全市平均过程雨量达 160 mm 以上,局部达 460 mm 以上^[2]。南水北调中线工程总干渠途经上述历史暴雨地区,由于降雨将导致外水入渠,其入渠后的传播过程及对渠系造成的影响特性尚未完全揭露,易造成渠系运行过程中暴雨考虑不足或不当,而引起渠系闸门群不当联动,最终将影响渠系适时适量输水,甚至发生诱发漫堤风险。可见,暴雨可成为威胁渠系运行安全的重要安全隐患之一。

利用数值模拟手段,可在一定程度上掌控暴雨对渠系水力响应规律。且近年来,若干学者就渠道水力特性与运行控制进行了大量研究,在渠系运行控制建模与运行控制方法方面,王长德等^[3,4]对自动水位控制器的水力响应进行了分析与应用;Litrico^[5,6]为灌渠设计了 PI 控制器,并分析了补偿问题;吕宏兴^[7]对闸门调节造成的渠道非恒定流进行了分析;阮新建^[8]也建立了渠系神经网络控制方法,姚雄^[9]设计了 PID 神经网络反馈控制器;管光华^[10]引进鲁棒控制改善了渠系运行特性;丁志良^[11]分析了渠系运行过程中的水力特性,对 PID 控制器参数优化问题进行了探讨;黄会勇^[12]设计了渠系正常调度的水量及水力过程模型;韩延成^[13]利用两步法建立了运行状态恢复时间最短的优化模型;崔巍^[14]提出 PID 类控制算法在结构复杂度、计算成本和参数率定等方面优势明显。在渠系面临特殊工况情况下,刘孟凯等^[15]分析了

冬季的渠系水力响应特性;何小聪等^[16]建立了基于贝叶斯网络的暴雨洪水风险分析模型,用于评价工程抵御流域洪水的能力;王浩等^[17]针对南水北调中线干线突发水污染事故风险建立了集模拟-诊断-溯源-应急-处置为一体的响应体系;聂艳华^[18]对渠系在闸门脱落等突发事件条件下进行了水力过程分析。此外,王浩^[19]从预报、调度、模拟、控制、评价五个环节对南水北调中线面临的关键科学问题进行了分析,认为模拟模型是调度运行、决策基础,应急调度是调度的重要内容。

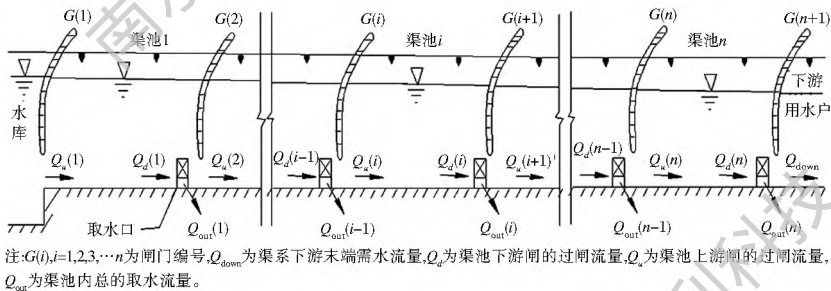
本文以南水北调中线工程总干渠京石段为工程实例,分析不同暴雨条件和渠系闸门控制模式影响下的水力响应,揭示暴雨外部干扰对渠系运行的水力影响特性与规律,为工程实际运行中的暴雨应急调度提供支撑。

1 数学模型

本文所用数学模型以武汉大学软件著作权“编号 2011SR034392”为基础,主要包括工程概化、非恒定流模拟和 PID 控制三大部分。本文将非恒定流模块中拓展为具备降水对水动力影响的功能。

1.1 工程概化

渠系由闸门分隔而成的多个渠池组成,一个渠池由两个闸门组成(包括上游闸和下游闸),见图 1。其中, Q_u 为渠池上游闸的过闸流量; Q_d 为渠池下游闸过闸流; $G(i)$ 为渠系第 i 个闸门的开度, i 为渠池和闸门编号,渠池编号与该渠池的上游闸门编号相同; Q_{out} 为分水口的取水流量, Q_{down} 为下游末端取水流量边界,均为已知的取水流量计划。



注: $G(i), i=1,2,3, \dots, n$ 为闸门编号, Q_{down} 为渠系下游末端需水流量, Q_d 为渠池下游闸的过闸流量, Q_u 为渠池上游闸的过闸流量, Q_{out} 为渠池内总的取水流量。

图 1 渠系概化示意图

Fig. 1 Sketch of the controlled canal system

$$Q_u(i) = Q_d(i) + Q_{out}(i) \quad (1)$$

$$Q_d(i) = Q_u(i+1) \quad (2)$$

1.2 非恒定流

模型采用的明渠非恒定流数学控制方程如下^[20]:

$$\text{连续方程: } B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \left(gA - \frac{BQ^2}{A^2} \right) \frac{\partial Z}{\partial x} = q(v_i - u) + \frac{BQ^2}{A^2} \left[s + \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_h \right] - \frac{gQ^2}{ACR} \quad (4)$$

式中: Z 为水位; h 为水深; Q 为流量(m^3/s); B 为水面宽(m); A 为过水断面面积, $A = (b + mh)h$, b 和 m

分别为梯形断面的底宽和边坡; C 为谢才系数; t 和 x 分别为时间变量和空间变量; q 为单位渠道长度上的入渠流量(m^2/s), $q = P \times B_1$, P 为降雨量(m/h), B_1 为渠道超高水位对应的宽度(m); v_{qi} 为侧向入流在水流方向的平均流速(m/s), 常忽略不计; u 为水流沿轴线方向的流速(m/s)。对于棱柱形渠道 $\frac{1}{B}$

$$\frac{\partial A}{\partial x} \Big|_h = 0.$$

1.3 PID 控制器

本文模型在渠系应对暴雨采取闸门群联合调度时, 采用增量式 PI 控制器, 由控制断面处的实时水位波动, 通过反馈环节产生该渠池上游端节制闸的闸门流量调节时段增量为:

$$\Delta Q = K_p(Y_T - Y_F) + K_i \int_0^t (Y_T - Y_F) dt \quad (5)$$

式中: Y_F 为实时水位; Y_T 为目标水位; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数。

2 暴雨条件下的渠系水力响应

2.1 模拟工况

本节针对 16 mm/1h、30 mm/12h、50 mm/24h、连续 2 日 50 mm/24h 和连续 3 日 50 mm/24h 等不同暴雨条件下, 分析渠系闸门群在无动作和 PID 控制器作用下的联合调度两种不同工况下的水力响应特性与规律。

以南水北调中线工程总干渠京石段工程为例, 该工程共由 14 个闸门成 13 个渠池, 设定渠首和渠末均始终保持常水位, 若本算例为渠系的一部分, 也可满足本条假定, 模拟结果将具有相似性; $Q_{down} = 40 m^3/s$, $Q_{out}(4) = 10 m^3/s$, $Q_{out}(9) = 20 m^3/s$, 各渠池输水流量占设计流量的比例见表 1; 渠系运行方式为下游闸前常水位, 控制水位为水位控制断面的渠道设计水位; 渠系全线采用统一的均匀降雨条件, 降雨起始时刻均为模拟开始后的第 24 h 后。

表 1 渠系输水流量

Tab. 1 Flow of canal system

渠池编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
设计流量 / ($m^3 \cdot s^{-1}$)	170	170	165	165	135	135	135	135	125	100	60	60	60
输水流量比 (%)	41	41	42	42	44	44	44	44	48	40	67	67	67

2.2 结果分析

本节主要用最大水位偏差和峰值出现时刻等指标来分析在渠系闸门群有无操作情况下的水力响应过程规律。定义水位偏差为渠池水力响应过程中的实时水位与初始稳定水位的差值, 其值为正代表水位上涨, 为负则代表水位下降。

2.2.1 渠系无操作条件下

在渠系所有闸门均无操作条件下, 24 h 暴雨作用下的各渠池上游端和下游端的水位偏差过程见图 2。可见, 渠池下游为涨水过程, 涨幅沿水流方向递增, 同时, 上游渠池经过短暂的波动后, 可较快恢复初始状态, 而下游渠池的恢复时间逐渐增加, 在模拟工况下, 末端渠池控制点水位恢复时间约为 400 d。各渠池的最大水位偏差均出现在渠池下游末端。因渠首闸前水位恒定, 且其闸后水位上涨, 而其闸门开度不变, 导致其过闸流量减小, 所以, 渠池 1 具有通过减小进入渠系水量来自动平衡降水入渠量的功能, 造成渠池 1 的水位上升幅度明显较其他渠池小; 因末端闸后水位恒定, 其闸前水位上升而闸门开度不变, 将造成出口流量增大, 渠系通过增大出流量, 促进上游来水和降水尽快排出; 中间渠池因各闸的闸前水位涨幅小于闸后, 均表现为过闸流量增大, 直到本渠池的多余水量全部输送至下游渠池才会逐渐恢复初始状态, 且状态恢复过程自上游向下游依次进行; 各渠池的水位上涨过程迅速, 下降过程缓慢, 如在更大的暴雨条件下具有漫堤的风险, 且险情恢复缓慢, 风险持续时间长。其他不同降雨条件下的水力响应过程具有类似规律。

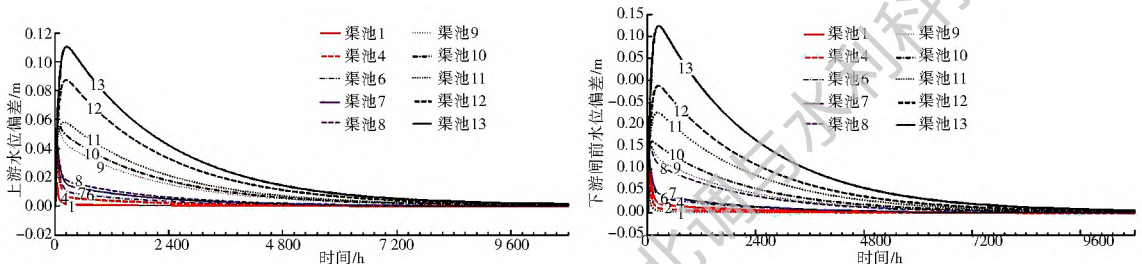


图 2 各渠池上、下游端的水位偏差响应过程示意图(暴雨条件: 50 mm/24h)

Fig. 2 The water level difference response processes at upper and lower reaches of each canal pool (Rainstorm condition: 50mm/24h)

在平面坐标下, 点绘不同暴雨条件下的(闸门距渠首距离, 闸前最大水位偏差)数据点, 并绘制散点

趋势线, 得到渠系闸前水力响应最大水位偏差见图 3。可见, 各渠池下游闸前最大水位偏差具有自渠首

向渠末逐渐增大的特点,且降雨量越大,最大水位偏差亦越大,发生连续 3 日降 50 mm/24h 暴雨时,渠系末端闸前最大水位雍高达 0.44 m;输水流量百分比越大,闸前水位最大偏差的增长曲线斜率越大,因渠系几何尺寸自上游至下游逐渐减小,因此,上游入渠暴雨在此处易造成较大的水位上涨。

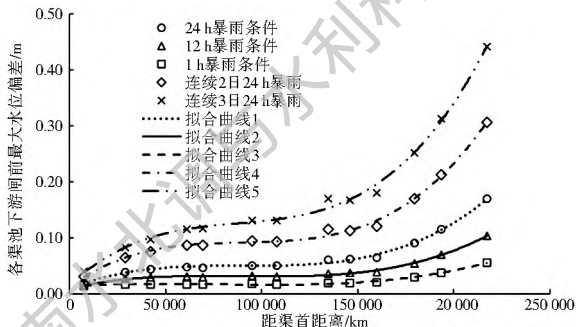


图 3 不同暴雨条件下的闸前最大水位偏差(闸门无操作)

Fig. 3 The biggest water level difference in front of each gate under different rainstorm conditions (all gates opening is constant)

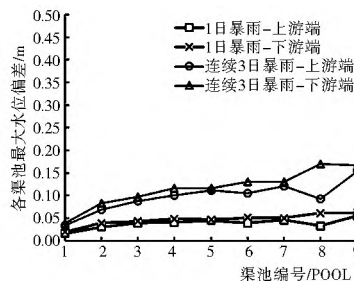
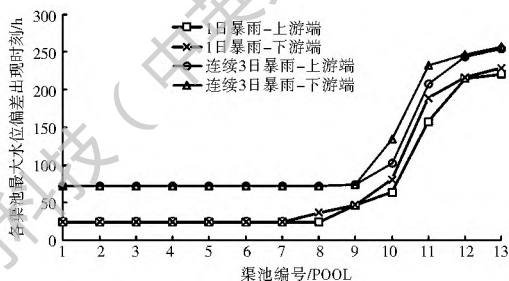


图 4 各渠池上、下游水力响应差异(闸门无操作)

Fig. 4 The hydraulic response difference between upper and lower reaches of each canal pool (all gates opening is constant)

各渠池上游端和下游端的最大水位偏差及其相应时刻对比见图 4。可见,各渠池上游端水位偏差小于下游端,上游端峰值出现时刻不晚于下游端。

通过模拟结果统计,各闸前最大水位偏差出现时刻如图 5 所示。最大水位偏差随渠池编号增大的过程线,可分为上游段和下游段两部分,上游段的各渠池在同一时刻达到本渠池的最大水位偏差,认为此段的水位偏差主要由降雨控制,因此,峰值出现时刻基本为降雨停止时刻;下游段的最大偏差达到时刻随渠池编号的增加而增加,认为此段的水位偏差由上游入渠降水量汇聚和本渠池降水量入渠量造成;随着降雨条件的加强,上游段的渠池数量逐渐增加,下游段水位偏差峰值出现时刻也逐渐逼近降雨结束时刻。在下游常水位的运行方式下,各渠池流速在排除输水流量、断面尺寸、底坡等影响因素外,流速基本呈自上游至下游逐渐减小的趋势,取各节制闸前恒定流速作为本渠池的流速代表,推算渠首



水质点流至各闸前的时间,见图 5。经对比说明,渠池暴雨期的水力响应是串联系统的综合响应,与天然河道具有较大区别。

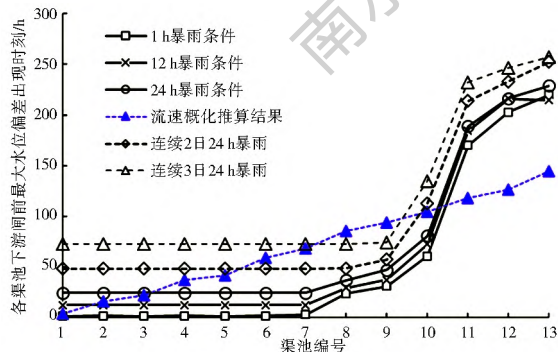


图 5 各渠池水力响应时间(闸门无操作)

Fig. 5 Hydraulic response time at each canal pool (all gates opening is constant)

增大分水口分水流量, $Q_{out}(4) = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{out}(9) = 40 \text{ m}^3/\text{s}$,分水流量分别增大 100%。经过模拟,发现第 1-5 渠池的最大水位偏差较原流量工况减小,最大降幅约 3 mm;第 6-13 渠池的最大水

位偏差较之前增大,最大增幅约 6 mm,如图 6 所示。第 1-7 渠池的最大水位偏差峰值达到时刻不变,说明流量并不能改变同时达到水位偏差峰值的渠池范围;第 9-13 渠池的最大水位偏差峰值达到时刻提前,可认为上游渠池的流速因流量增大而增大,进而加速了入渠降雨向下游输送的速度,导致在同一时间段内,下游末端汇集了更多的上游来水而造成水位微升,且峰值出现时间提前。

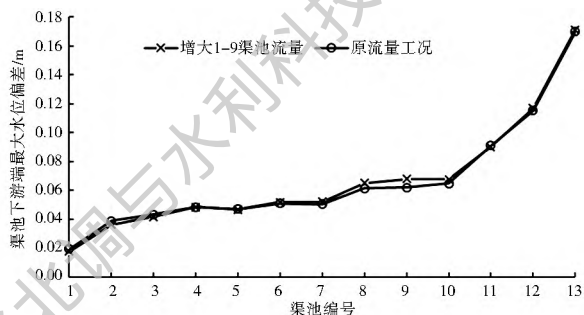


图 6 不同流量下的渠系水力响应差异(闸门无操作)

Fig. 6 Hydraulic response difference under different flow (all gates opening is constant)

模拟结果显示,其余暴雨条件下渠系也具有上

述水力响应规律。

2.2.2 渠系在PID控制器作用下

以24 h暴雨为例,渠系在PID控制器作用下,得到的渠系闸门开度过程见图7。可见,各闸门在应对暴雨时,统一采用关闸回调的过程,主要因为采用下游常水位运行方式,闸前水位在暴雨条件上具有上涨趋势,因此,闸门立即通过水位上涨幅度反馈给闸门开度进行调节,渠系闸门动作与控制点水位变化过程具有对应性。

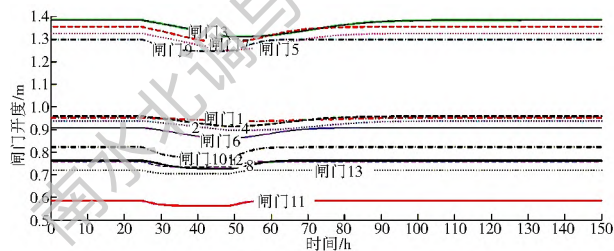


图7 闸门开度过程(闸门联动操作)

Fig. 7 The processes of gates opening(all gates operated together)

经过闸门调节后的渠系水力响应见图8,其中渠系下游断面为本算例中设定的水位控制断面。模拟结果表明,除第8和11渠池上游水位呈先降后

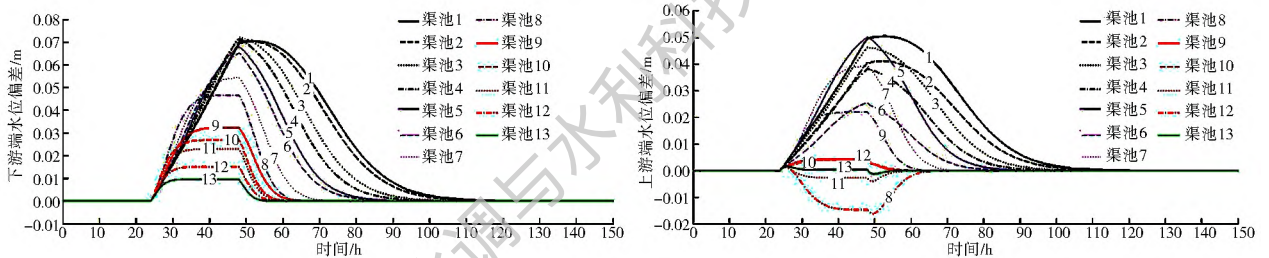


图8 闸门联动下的渠系水力响应过程(闸门联动操作)

Fig. 8 Hydraulic responses of the canal system when the gates are operated together(all gates operated together)

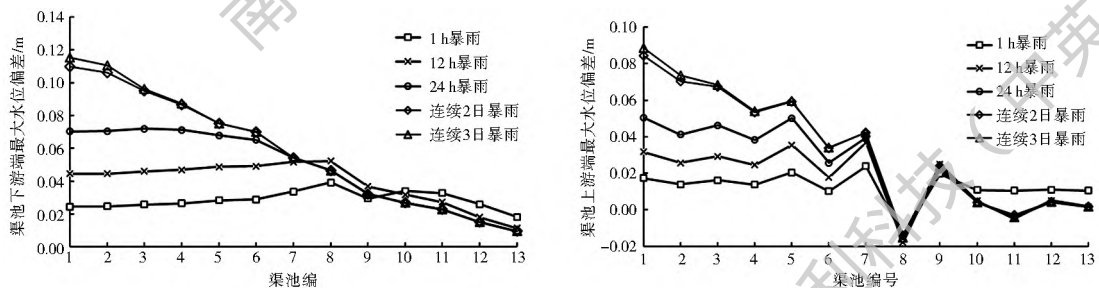


图9 各渠池上、下游水力响应差异(闸门联动操作)

Fig. 9 The differences of hydraulic response between upstream and downstream at each canal pool (all gates operation together)

在 $Q_{out}(4) = 20 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{out}(9) = 40 \text{ m}^3/\text{s}$ 的分水口分水模拟工况下,第1-9渠池流量增大,对比流量变化前后的水力响应见图10,发现最大水位偏差也随之增大,最大约5 mm。同时,上游部分渠系流量增加,对下游流量不变区域的最大水位偏差无影响。

升外,其余渠池内水位均表现为先升后降,最高水位出现在降雨结束时刻附近;闸前最大水位偏差呈现自上游至下游逐渐减小的规律;渠系自下游渠池向上游逐渐恢复平衡;各渠池上游端水位偏差小于下游端,渠系最大水位偏差小于闸门无联动响应的工况。模拟结果显示,在控制运行方式作用下,不同暴雨条件造成的渠系水力响应具有相同规律。

不同暴雨条件下的渠系各渠池上、下游端的最大水力偏差见图9。结果表明,不同暴雨条件下的渠池下游端最大水位偏差基本呈自上游至下游逐渐减小的趋势;渠池上游端水位偏差普遍小于下游端;随着暴雨条件不断增强,第1-8渠池的最大水位偏差不断增大,而第9-13渠池的最大水位偏差在逐渐减小;在暴雨量和强度不断增长的过程中,当其达到一定标准时,某一渠池下游所有渠池的水位偏差将不再受暴雨条件继续增大的影响,且这一分界点随暴雨条件增强而不断向上游渠池移动,说明渠系在闸门联动作用下的最大水位偏差具有峰值,不会随着暴雨条件增强而不断增大,从这一角度而言,闸门联动最大水位偏差控制上具有明显优势。

2.2.3 对比与分析

通过上述分析,渠系在应对暴雨条件时,不采取闸门群联合调度时,最大水位偏差出现在渠末第13渠池下游端;采取闸门群联合调度时,最大水位偏差出现在渠首第1渠池下游端。对比两种情况下的水位最大偏差值见表2,可发现,闸门联合调度可明显改

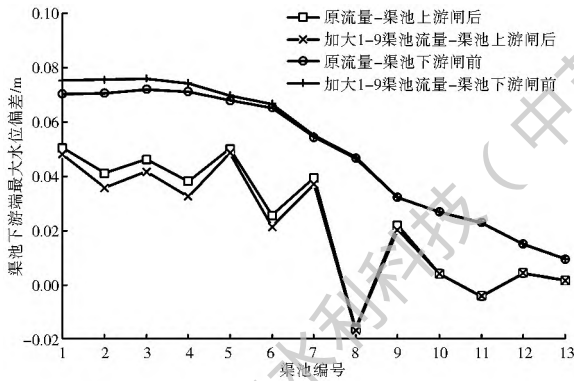


图 10 不同流量下渠系水力响应差异(闸门联动操作)

Fig. 10 Hydraulic response difference under different flow (all gates operated together)

善渠系应对暴雨条件的水力响应, 有利于运行安全。

在应对暴雨时, 若渠系无响应或操作系统故障, 将导致入渠暴雨逐级向下游输送、累积, 并构成下游渠道的漫堤风险; PID 控制器作用可针对水

位偏差及时修正各闸门的过闸流量, 实现将入渠暴雨逐渠池拦截、并依次恢复初始状态; 但应对更为严重的极端暴雨时, 对控制器的性能要求明显提高。

一般而言, 渠系闸前最大水位偏差受渠池位置、输水流量百分比、控制水位和降水条件影响。渠池位置越靠近下游、输水流量百分比越大、控制水位越高和降水量越大等均会造成闸前最大水位偏差增大。输水流量和控制水位一方面通过影响渠系流速而造成上游降雨在下游汇集时间的差异; 另一方面决定了渠系允许的水位雍高幅度。渠系流速越大, 上游入渠降雨在下游汇集越快, 同时在下流受闸门阻水影响而不能及时向下游渠池输送, 而造成水位雍高值增大; 一定程度上而言, 输水流量越大, 渠系运行水位越高, 水力响应过程中的水位波动越接近渠顶, 渠系运行安全性越差。

表 2 不同暴雨条件下的最大水位偏差对比

Tab. 2 The biggest water level difference under different rainstorm conditions

暴雨工况		16 mm/ 1h	30 mm/ 12h	50 mm/ 24h	连续 2 日 50 mm/ 24h	连续 3 日 50 mm/ 24h
渠池 13	无操作	0.06	0.10	0.17	0.31	0.44
	有操作	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
渠池 1	无操作	0.02	0.01	0.02	0.03	0.04
	有操作	0.02	0.04	0.07	0.11	0.12

3 结论

(1) 降雨条件和受影响渠池长度决定了入渠雨量, 是构成渠系漫堤风险的主要风险因子; 输水流量、控制水位、控制器参数等为渠系漫堤风险的次要风险因子。

(2) 在闸门无操作情况下, 渠系风险点在整个渠系的最末端渠池, 最大水位涨幅随降雨量增加而增加, 且越靠近下游的渠池其最大水位涨幅增速越快, 在模拟工况下最大水位涨幅高达 0.44 m; 降雨过后从上游至下游依次恢复初始状态, 耗时十分漫长。

(3) 在闸门联合操作时, 渠系风险点在受降水影响渠池的上游端, 最大水位涨幅随降雨量增加而增加, 但增加幅度明显小于闸门无操作工况; 降雨过后从下游至上游依次恢复初始状态, 耗时约 2 d。

本文通过数值模拟结果对比, 认为渠系闸门群联合调度, 可有效的控制暴雨期渠系水力响应, 减小无操作或不当操作带来的漫堤风险。同时, 因本文采用的 PID 控制参数或闸门联动操作规则非最优控制方法, 可通过研究控制最优问题, 进一步改善控制渠系的暴雨水力响应特性, 尤其需要改善极端暴

雨条件下的渠系控制策略。暴雨期, 应加强运行风险点位置的巡查, 做好调度系统运行安全隐患排查, 及时启动暴雨应对调度模式。

参考文献(References):

[1] 孙霞, 俞海洋, 孙斌, 等. 河北省主要气象灾害时空变化的统计分析[J]. 干旱气象, 2014, 32(3): 388-392. (SUN X, YU H Y, SUN B, et al. Statistical analysis of meteorological disasters in Hebei Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2014, 32(3): 388-392. (in Chinese)) DOI: 10.11755/j.issn.10067639(2014)-03-0388.

[2] 张文龙, 崔晓鹏. 近 50 a 华北暴雨研究主要进展[J]. 暴雨灾害, 2012, 31(4): 384-391. (ZHANG W L, CUI X P. Main progress of torrential rain researches in North China during the past 50 years[J]. Torrential Rain and Disasters, 2012, 31(4): 384-391. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.10049045.2012.04.014.

[3] WANG C D, ALBERT J C, WILLIAM E H. Dynamic response of automatic water level controller. I: Theory[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1990, 116(6): 769-783.

[4] CLEMMENS A J, WANG C D, REPLOGE J A. Dynamic response of automatic water level controller II: Application[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1990, 116(6): 784-796.

- [5] LITRICO X, FROMION V. Tuning of robust distant downstream pi controllers for an irrigation canal pool. *N*: Theory [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, 132(4): 359-368.
- [6] LITRICO X, FROMION V, BAUME J P. Tuning of robust distant downstream pi controllers for an irrigation canal pool. *O*: Implementation Issues [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2006, 132(4): 369-379.
- [7] 吕宏兴, 宋松柏, 马孝义, 等. 灌溉渠道闸门调控过程中的非恒定流研究[J]. *农业工程学报*, 2002, 18(6): 18-22. (LI H X, SONG S B, MA X Y, et al. Unsteady flow during regulating gate in irrigation canal [J]. *Transactions of the CSAE*, 2002, 18(6): 18-22. (in Chinese)).
- [8] 阮新建, 姜兆雄, 杨芳. 渠道运行神经网络控制[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1): 114-118. (RUAN X J, JIANG Z X, YANG F. Neural control of channel operation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(1): 114-118. (in Chinese)).
- [9] 姚雄. 长距离输水渠系自动化运行控制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008. (YAO X. Research on automatic operation and control of long distance water transfer canal system [D]. Wuhan: Wuhan University, 2008. (in Chinese)).
- [10] 管光华, 王长德, 范杰, 等. 鲁棒控制在多渠段自动控制的应用[J]. *水利学报*, 2005, 36(11): 1379-1384. (GUAN G H, WANG C D, FAN J, et al. Application of robust controller in automatic control of multi section channel system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(11): 1379-1384. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2005.11.019.
- [11] 丁志良. 长距离输水渠道水力特性及运行控制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2009. (DING Z L. Research on hydraulic characteristics and operation control of long distance water transfer channel [D]. Wuhan: Wuhan University, 2009. (in Chinese)).
- [12] 黄会勇. 南水北调中线总干渠水量调度模型研究及系统开发[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013. (HUANG H Y. Study of water supply and control model for Middle Route Main Canal of South to North Water Transfer first stage project and software system development [D]. Beijing: China Institute of Water Resources & Hydropower Research, 2013. (in Chinese)).
- [13] 韩延成, 高学平. 长距离自流型渠道输水控制的二步法研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(3): 414-418. (HAN Y C, GAO X P. Two step optimal operation and control method for long distance gravity flow delivery in canals [J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(3): 414-418. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2006.03.020.
- [14] 崔巍, 陈文学, 穆祥鹏. 明渠运行控制算法研究综述[J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(6): 113-117. (CUI W, CHEN W X, MU X P. Progress in research on open channel control algorithms [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2009, 7(6): 113-117. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.027.
- [15] 刘孟凯, 王长德, 冯晓波. 长距离控制渠系结冰期的响应分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 20-27. (LIU M K, WANG C D, FENG X B. Analysis on the hydraulic response of long distance canal control system during ice period [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(2): 20-27. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.02.004.
- [16] 何小聪, 康玲, 程晓君, 丁毅. 基于贝叶斯网络的南水北调中线工程暴雨洪水风险分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2012, 10(4): 10-13. (HE X C, KANG L, CHENG X J. Flood risk analysis in the Middle Route of South to North Water Diversion Project of China based on Bayesian Network [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2012, 10(4): 10-13. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2012.04010.
- [17] 王浩, 郑和震, 雷晓辉, 等. 南水北调中线干线水质安全应急调控与处置关键技术研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(2): 1-6. (WANG H, ZHENG H Z, LEI X H, et al. Study on key technologies of emergency regulation and treatment to ensure water quality safety of the Main Canal of Middle Routes of South to North Water Diversion Project [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2016, 48(2): 1-6. (in Chinese)) DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.02.001.
- [18] 聂艳华. 长距离引水工程突发事件的应急调度研究[D]. 武汉: 长江科学院, 2011. (NIE Y H. Study on emergency dispatching of long distance water diversion project [D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, 2011. (in Chinese)).
- [19] 王浩, 雷晓辉, 尚毅梓, 等. 南水北调中线工程智能调控与应急调度关键技术[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(2): 01-08. (WANG H, LEI X H, SHANG Y Z, et al. Key technologies of intelligent control and emergency regulation for the Middle Route of South to North Water Diversion Project [J]. *South to North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(2): 01-08. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001.
- [20] 李炜, 徐孝平. 水力学[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 2000: 1-469. (LI W, XU X P. *Hydraulics* [M]. Wuhan: Wuhan university of water conservancy and electric power press, 2000. (in Chinese)).