

龙岩, 高伟, 张召, 等. 明渠调水工程渠池自平衡特性及扰动阈值[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(1): 10-20. LONG Y, GAO W, ZHANG Z, et al. Self balancing characteristics and disturbance threshold of open channel water diversion projects[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(1): 10-20. (in Chinese)

明渠调水工程渠池自平衡特性及扰动阈值

龙岩^{1,2}, 高伟^{1,2}, 张召³, 雷晓辉^{1,2,3}

(1. 河北工程大学水利水电学院, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;
3. 中国水利水电科学研究院水资源所, 北京 100038)

摘要: 基于一维水动力模型, 通过对渠池上游来水流量以及分水流量施加阶跃扰动, 分析渠池水情变化规律, 以工程运行过程中的水位变幅、变速等限制为约束, 开展渠道自平衡特性及水力安全扰动阈值研究, 计算不引起渠池水位超限的流量扰动范围, 并以南水北调中线工程陶岔渠首至十二里河节制闸间渠池为例开展实证研究。结果表明, 渠池的自平衡能力主要取决于节制闸过流特性: 当下游水位与节制闸开度保持不变时, 来水扰动阈值和分水扰动阈值随上游边界流量增大而递减, 自平衡能力减弱; 当上游流量边界与下游水位保持不变时, 来水扰动阈值随闸门开度增大而增大, 自平衡能力增强。为使计算结果方便在实际工程中进行应用, 基于安全扰动阈值计算结果, 构建安全扰动阈值快速计算公式。

关键词: 明渠调水工程; 安全扰动阈值; 水动力模拟; 自平衡特性; 节制闸

中图分类号: TV68 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2025.0002

人多水少、水资源时空分布不均是我国的基本水情^[1-2], 水资源短缺是我国经济社会发展面对的现实因素^[3]。在此背景下, 修建大型调水工程成为缓解水资源供需矛盾的有效手段之一^[4-5]。调水工程中输水形式大多以明渠为主, 以节制闸作为调控建筑物, 实现对输水工程流量、水位控制, 保障调水工程安全运行^[6]。明渠调水工程普遍具有多扰动特性^[7-8], 渠道运行过程存在各种系统内外的已知和未知扰动, 如来水流量变化、分水口流量变化等, 容易使渠道水位产生波动, 影响系统稳定。

为识别扰动对输水系统状态的影响, 需要模拟和分析各种可能的运行工况, 从而确定输水系统中水位、流量等关键水力参数的变化趋势, 基于数值模拟模型研究渠池的水力特性是目前主要的研究手段。崔巍等^[9-10]通过非恒定流模型对南水北调中线工程进行研究, 揭示了在不同分水流量变化下的水力控制指标的区别, 测试闸门调控方式和渠道运行条件对闸前壅水峰值水位、达到峰值水位所用时

间、水力振荡频率、水力振荡幅度等水力响应特性的影响。赵鸣雁等^[11]研究了某试验渠道节制闸关闸时间对闸前雍水的影响, 表明渠池雍水只受上下游节制闸调整动作影响, 且下游关闸时间是影响水位雍高的主导因素, 为应急情况下的闸门关闸时间的选择提供参考。张成等^[12]基于一维非恒定流模型对南水北调中线工程展开研究, 提出了区间调度的原则, 并对该策略下的水力响应指标进行分析, 结果表明区间调度能够减短水力过渡过程, 降低参与调控的节制闸数目。张保航等^[13]在一维水动力模型基础上耦合二分法对节制闸调控策略进行分析, 并构建了明渠调水工程节制闸安全调控模型, 得到流量切换时节制闸安全调控可行域, 给出了更为灵活的柔性调度方案。

上述研究主要针对流量变化下输水系统水力状态变化规律及建筑物调控策略等进行了深入分析, 然而明渠调水工程作为具有自平衡能力的被控系统^[14], 在不进行控制时, 能够通过其本身的自平衡能

收稿日期: 2024-05-28 修回日期: 2024-09-27 网络出版时间: 2024-09-29

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240929.1331.003>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFC3209404); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2022038); 河北省自然科学基金项目(E2021402039)

作者简介: 龙岩(1989—), 女, 河北保定人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事环境水力学研究。E-mail: hebeilongyan@163.com

通信作者: 张召(1992—), 男, 河北辛集人, 高级工程师, 博士, 主要从事计算水力学及数值模拟等研究。E-mail: zhangzhao@iwhr.com

力在满足工程安全运行的条件下承受一定程度的外部扰动,即对于影响渠池水位变化的各类扰动因素,理论上均存在一个阈值,当扰动低于该值时可视为安全扰动,此时不必进行闸门控制,可通过系统自平衡能力使扰动发生后的水位变化稳定在安全限制以内。针对类似问题,马强等^[15]通过数值模拟方式对诱发坡体滑体的降雨入渗阈值进行了研究。在明渠调水工程领域,白佳琦等^[16]基于水动力模型在控制水位不超限的条件下开展了明渠调水工程水力安全调控时间阈值研究,但该研究仍从调控角度出发。目前对于影响明渠调水工程水位变化的扰动因素安全阈值研究较少。

因此,本文针对明渠调水工程中来水扰动和分水扰动这2个影响水位变化的重要因素,通过对研究区域内多种工况下的安全扰动阈值进行分析,厘清影响自平衡能力的主要因素,并根据计算结果构建合适的计算公式,实现扰动阈值快速计算,为工程运行中判断是否需要启动调控提供科学依据,有助于减少闸门调控次数,提高调控效率。

1 研究区概况

南水北调中线工程是典型的明渠调水工程闸控系统,该工程输水流量大、线路长,沿途缺少调蓄工程控制建筑物和跨越建筑物众多,有着非线性和响应状态大时滞的特点以及众多的扰动因素^[17-18]。这些诸多不确定的扰动因素主要包括上游来水变化、分退水扰动、操作失误、非许可取水、局部突发暴雨等^[19]。以来水和分水扰动为例,中线干渠运行过程为缓流流态,渠池内上游入流的减少以及分水需求增加均会导致该渠池水位下降,在一定程度上对上下游所有渠池水位均会造成影响,导致各渠池水位在不同程度上下降。反之,渠池内水位会因入流增加量或分水流量减少量产生不同程度的雍高。本文以南水北调中线工程陶岔渠首闸闸后控制断面至十二里河渡槽进口节制闸闸前控制断面之间的渠池作为研究对象(图1),包含4座节制闸以及5个分水口门,见表1。

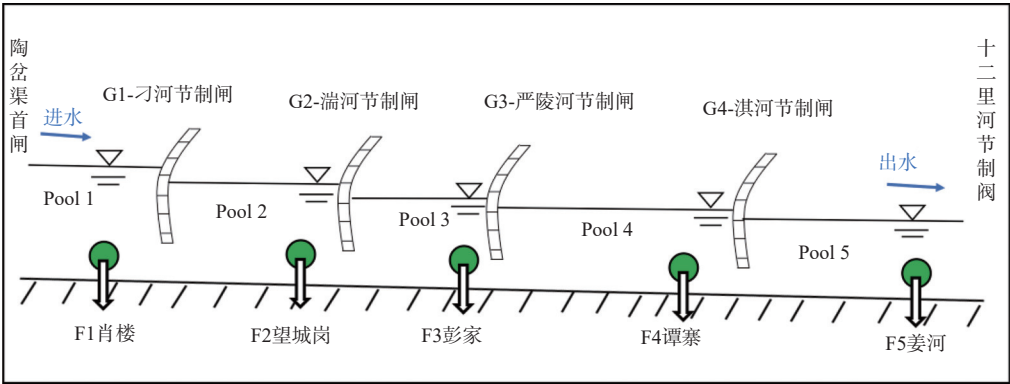


图1 研究区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of the research area

表1 各节制闸基本工程信息

Tab. 1 Basic engineering information of each control gate

编号	节制闸名称	孔数	底高程/m	设计流量/(m ³ ·s ⁻¹)	加大流量/(m ³ ·s ⁻¹)	设计水位/m	加大水位/m
G1	刁河渡槽进口节制闸	2	140.70	350	420	146.80	147.56
G2	湍河渡槽进口节制闸	3	139.25	350	420	145.65	146.37
G3	严陵河渡槽进口节制闸	2	138.53	340	410	144.74	145.47
G4	淇河倒虹吸出口节制闸	4	135.04	340	410	143.07	143.78

2 研究方法

通过构建耦合节制闸的一维非恒定流水动力模型,对工程运行中可能发生的扰动情况进行模拟,计算不同程度扰动下闸前水位变化过程,反向推求输水系统在不同工况下能够承受的扰动阈值。

2.1 明渠一维水动力模型构建

长距离输水工程的水流仿真可概化为一维水动力问题^[20]。法国科学家 B. Saint Venant 在 1871 年提出的圣维南方程组作为基本控制方程被广泛用于描述河渠一维流体运动^[21]。采用 Preissmann 四点

带权隐式差分格式对圣维南方程组进行离散,并采用追赶法求解^[22]。圣维南方程不适用描述在节制闸等内部边界,需对内边界的控制方程进行概化,并与圣维南方程进行联立求解。节制闸作为内边界进行处理时通常采用连续方程和描述其过流能力的过闸流量公式(式 1、式 2)作为控制方程。

$$Q_i = Q_{i+1} \quad (1)$$

$$Q = MeB \sqrt{2gH} \quad (2)$$

式(1)和(2)中: i 和 $i+1$ 分别为闸前、闸后断面; Q 为流量, m^3/s ; e 、 B 分别为节制闸开度和过水总宽度, m ; H 在自由出流和淹没出流的情况下分别表示闸前水深和闸前后水位差, m ; M 为综合流量系数; g 为重力加速度, m/s^2 。

模拟区域内共包含 5 个渠池(Pool 1~Pool 5)以及 4 座节制闸(G1~G4),为提高数值模型精度,选取研究区域内 2023 年监测数据对其中涉及的渠道糙率和节制闸综合过流系数 2 种重要参数进行率定。基于系统辨识^[23]的方法,以观测断面的实际监测值与模型输出值之间的偏差最小作为目标函数,识别各渠池糙率系数,反演结果见表 2。

表 2 渠道糙率反演结果

Tab. 2 Inversion results of channel roughness

渠池编号	反演后糙率	上游水位		
		最大绝对误差/m	最小绝对误差/m	平均绝对误差/m
Pool 1	0.014 0	0.02	0.01	0.002 0
Pool 2	0.017 8	0.06	0.02	0.014 0
Pool 3	0.019 3	0.02	0.01	0.001 5
Pool 4	0.019 7	0.04	0.01	0.002 0
Pool 5	0.020 8	0.02	0.01	0.004 0

工程运行过程中,节制闸综合流量系数在流态、过流方式等多种因素影响下发生变化,该系数与节制闸开度 e 、节制闸上游水深 H_0 、下游水深 H_2 以及上下游水头差 H_0-H_2 等具有较强的相关性^[24],因此以基于能量方程对节制闸综合流量系数进行反演,以 $e/(H_0-H_2)$ 为自变量 x ,使用线型、指数型、幂函数型、对数型以及二次多项式 5 种函数对节制闸综合流量系数进行曲线拟合。选取决定性系数 R^2 最接近 1 的结果作为节制闸综合流量系数的计算公式,最终结果见表 3。

表 3 各节制闸综合流量系数拟合结果

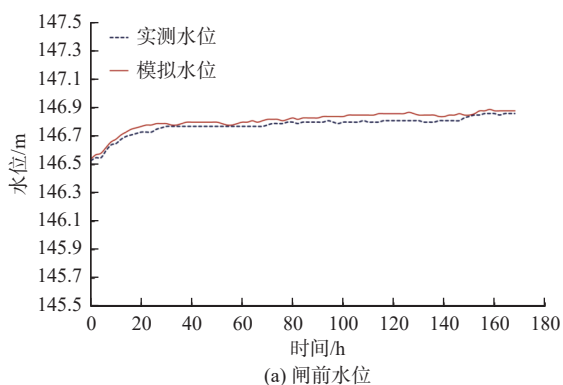
Tab. 3 Fitting results of comprehensive flow coefficient for each control gate

节制闸名称	变量 x	拟合公式	R^2
G1	$e/(H_0-H_2)$	$y=0.010\ 3x^2+0.708\ 8x+0.451\ 9$	0.989 8
G2	$e/(H_0-H_2)$	$y=-0.003\ 6x^2+1.148\ 5x-0.815\ 3$	0.991 4
G3	$e/(H_0-H_2)$	$y=-0.003\ 4x^2+1.162\ 4x-0.497\ 8$	0.997 5
G4	$e/(H_0-H_2)$	$y=0.003\ 1x^2+0.929\ 2x-0.150\ 2$	0.993 1

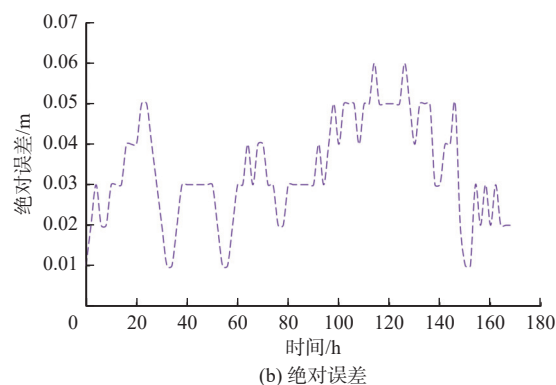
注:变量 $x>0$,根据实测数据计算得到。

为验证数值模型模拟精度,基于 2023 年 3 月 9 日 8 时至 3 月 23 日 8 时的实测数据进行计算,参数

率定后的模型仿真部分结果见图 2 至图 5,水位计算误差在 0.08 m 以内,模型精度能够满足本研究需求。



(a) 闸前水位



(b) 绝对误差

图 2 刁河渡槽进口节制闸水位模拟效果

Fig. 2 Simulation effect diagram of water level at the inlet control gate of Diaoheduo aqueduct

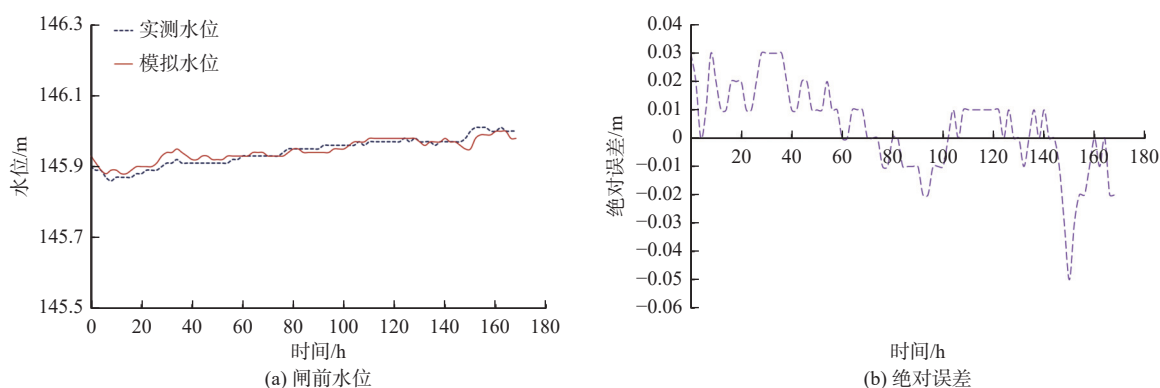


图3 湍河渡槽进口节制闸水位模拟效果

Fig. 3 Simulation effect diagram of water level at the inlet control gate of the Tuanhe aqueduct

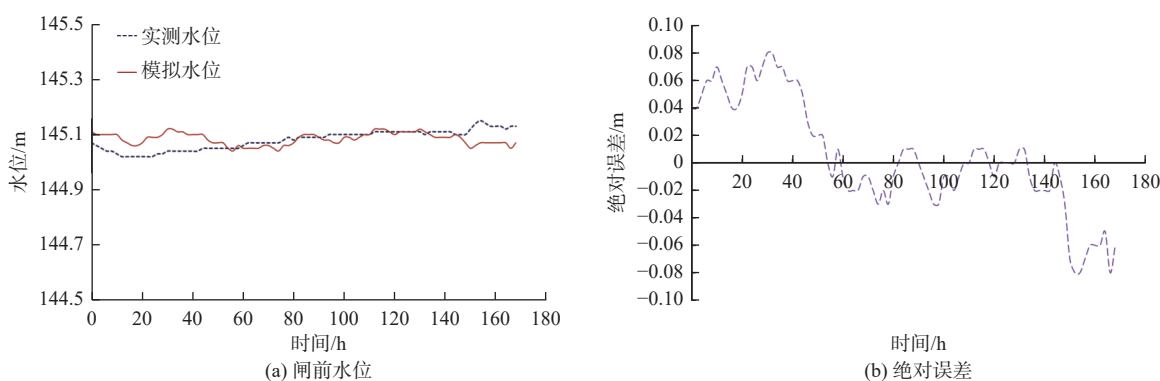


图4 严陵河渡槽进口节制闸水位模拟效果

Fig. 4 Simulation effect diagram of water level at the inlet control gate of Yanling River aqueduct

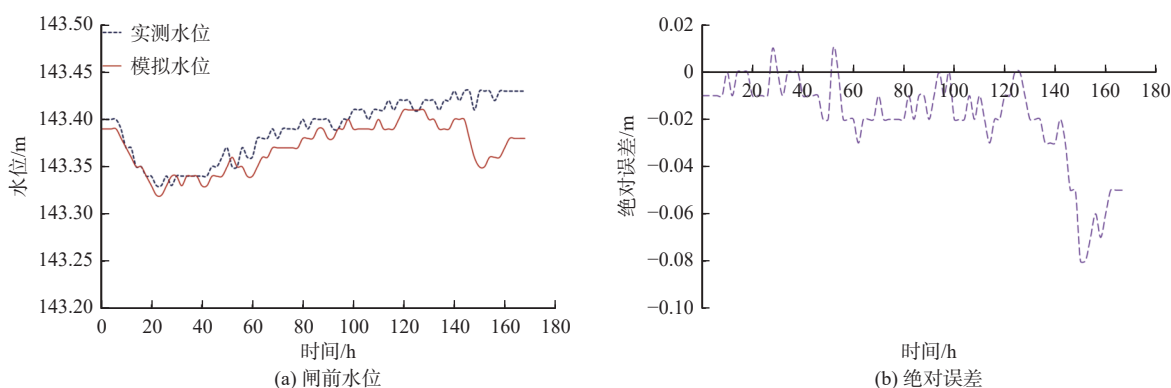


图5 淇河倒虹吸出口节制闸水位模拟效果

Fig. 5 Simulation effect diagram of water level control gate at Qihe inverted siphon outlet

2.2 自平衡能力

自平衡能力指的是若系统受到扰动时,被控对象偏离了初始的平衡状态,若没有自动控制或人工控制的介入,被控变量能够凭借被控对象内部的反馈机制,自主恢复到新的平衡状态^[25]。

对于明渠调水工程来说,一般通过以节制闸为主的调控建筑物对调度过程进行控制,从而满足调度要求。整个输水渠道被沿线节制闸划分为串联的多个渠池,进出流量通过上、下游节制闸进行控

制,渠池内的水位受上下游流量的制约,由于水位-流量互补的关系,在其内部形成了负反馈机制^[26],即当流入量增大时,水位逐渐上升,其结果又会导致流出量逐渐增加,而流出量的增加反过来抑制了水位的上升速度,反之亦然。总之,当渠池受到扰动引起进出水流量不平衡的情况时,在经过动态过程后,渠池内的水位及进出水流量将从旧的平衡状态达到新的平衡状态,2种平衡状态下的水位变幅如果处于安全变化范围以内,可将该状态下的扰动

量计为安全扰动,无需对节制闸进行调控,当扰动超出某一阈值后,水位超出限制范围,则需要调控。不同状态下的安全扰动阈值存在差别,代表其不同的自平衡能力。考虑水位限制的渠池自平衡特性见图 6。

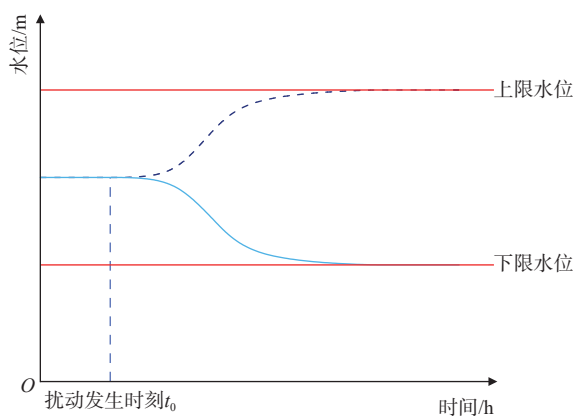


图 6 渠池自平衡特性

Fig. 6 Self balancing characteristics of channels and ponds

2.3 安全扰动阈值计算

构建 2 个串联渠池的一维水动力模拟模型,模型上游边界为串联渠池上游节制闸的过闸流量,模型下游边界为串联渠池下游节制闸的闸前水位,渠池内分水口分水流量以及中间节制闸闸门开度作为模型内部边界,建模区域见图 7。假设下游水位保持稳定,在某一时刻改变上游流量或分水口流量使其产生不同程度的增加或减少,模拟来水流量扰动或分水流量扰动对中间节制闸闸前水位的影响,结合水位约束范围,试算得到不同工况下扰动最大值,记为当前情况下安全扰动阈值。

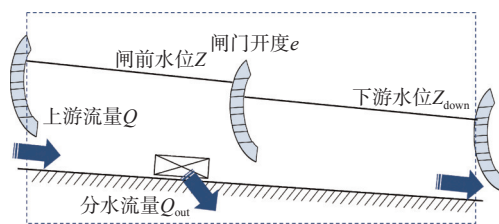


图 7 建模区域示意

Fig. 7 Modeling area diagram

以来水流量增加为例,具体计算步骤如下:

在模型其他边界条件固定不变的情况下,若上游流量 Q 在某一时刻开始增加 ΔQ ,产生阶跃扰动,节制闸闸前水位 Z 的响应过程为先迅速上升,之后上升速度逐渐减少,水位重新稳定。扰动的大小决定了重新稳定后的水位高低,通过试算法计算得到

水位重新稳定时刚好不超过水位限制的扰动量:

① 设置上游初始流量为 Q_0 ,渠池下游水位为 Z_{down} ,闸门开度为 e ,分水口流量为 Q_{out} 。

② 通过水动力模拟,得到稳定状态下初始节制闸闸前水位 Z_0 , Z_0 需满足水位约束要求。

③ 改变模型上游流量边界,使上游流量在某一时刻增加 $\Delta Q_i (i=1, 2, \dots, n)$,此时流量变为 $Q_0 + \Delta Q_i$,并一直持续至模拟时段结束,其中流量变化量初始值 ΔQ_0 设置为 $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。通过水动力模型计算,得到节制闸闸前水位在模拟时段内的变化过程。

④ 分析闸前水位变化过程,获取水位模拟结果最大值 Z_m (此处为最终稳定后的水位),将其与最高运行水位 Z_{max} 进行对比,其中,最高运行水位 $Z_{\text{max}} = Z_0 + \text{水位允许变幅}$,且 $Z_{\text{max}} \leq \text{加大水位}$ 。若 $Z_m - Z_{\text{max}} < 0$,即水位变化过程中的最大值未超过水位上限,则使流量变化量 $\Delta Q_{i+1} = \Delta Q_i + 0.1$,返回第③步重新进行迭代计算;若 $Z_m - Z_{\text{max}} = 0$,即水位变化过程中的最大值达到水位上限,此时的流量增加量 ΔQ_i 则为当前条件下上游流量安全扰动阈值,记作 ΔQ 。

⑤ 输出当前工况下的上游来水流量扰动阈值 ΔQ 。

3 实证计算

3.1 工况设置

一般情况下,南水北调中线工程需确保各节制闸闸前水位稳定维持在合理范围内,通常为目标水位以下 0.10 m 至目标水位以上 0.15 m 之间,且不得超出预设的加大水位;在闸门调整操作时,水位波动范围应控制在目标水位以下 0.15 m 至目标水位以上 0.20 m 的范围内^[27]。在常规的输水调度期间,总干渠的水位下降速度需要满足衬砌板明渠段所规定的最大允许水位降速要求,一般不超过 30 cm/d 及 15 cm/h 。因此以节制闸闸前水位作为参考,取各节制闸闸前初始水位 $\pm 0.15 \text{ m}$ 作为水位变幅约束,同时保证水位增长后不超过加大水位(目标水位上限),水位下降后不低于设计水位以下 0.15 m (目标水位下限),水位变幅不超过 15 cm/h 。

考虑输水渠道水位约束,对不同固定工况下系统所能承受的最大来水、分水扰动阈值进行研究。上游来水流量扰动阈值及分水扰动阈值计算工况设置见表 4、表 5。

表 4 来水扰动阈值计算工况设置

Tab. 4 Table for setting operating conditions for threshold calculation of water disturbance

节制闸名称	下游水位边界/m	上游流量边界/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		闸门开度/m	
		流量范围	流量间隔	开度范围	开度间隔
刁河节制闸	146.80	100~400	25	1.0~8.0	1.0
湍河节制闸	145.65				
严陵河节制闸	144.74				
淇河节制闸	143.07				

表 5 分水扰动阈值计算工况设置

Tab. 5 Table for setting of water diversion disturbance threshold calculation conditions

分水口名称	下游水位边界/m	初始分水流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	上游流量边界/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		闸门开度/m	
			流量范围	流量间隔	开度范围	开度间隔
肖楼分水口	146.80	0	100~400	20	1.0~8.0	1.0
望成岗分水口	145.65					
彭家分水口	144.74					
谭寨分水口	143.07					

3.2 扰动阈值计算结果及分析

以发生扰动后节制闸水位不超限为目标,对各类工况下的系统所能承受的来水扰动和分水扰动

阈值进行计算研究,对不符合实际情况的工况进行剔除。计算结果见图 8、图 9,其中,扰动阈值大于 0 代表流量增加阈值,小于等于 0 代表流量减少阈值。

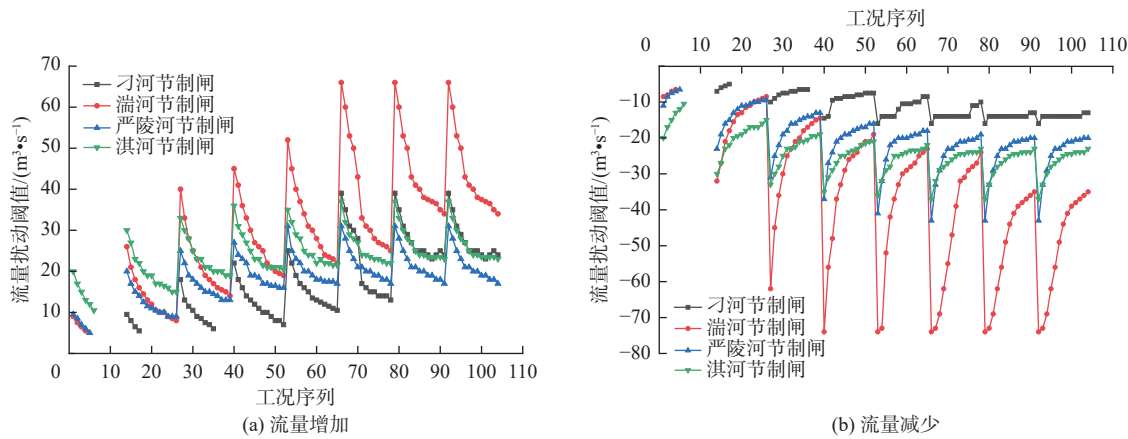


图 8 来水扰动阈值计算结果

Fig. 8 Calculation results of threshold for reducing incoming water flow rate

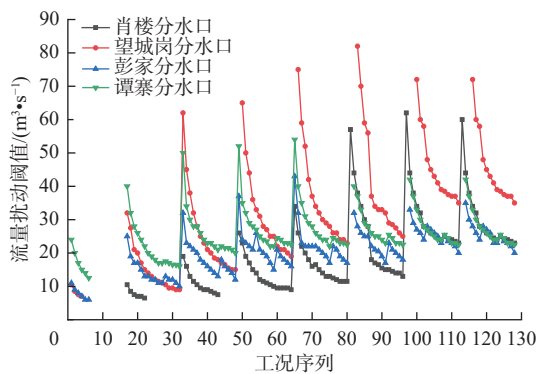


图 9 分水流量扰动阈值计算结果

Fig. 9 Calculation results of disturbance threshold for water diversion flow

由图 8 可知,来水流量增加和减少时的扰动阈值基本沿 x 轴对称分布,这表明来水流量增减对下游节制闸闸前水位变幅的影响十分相近,且在相同工况下,来水流量增加时的阈值整体略小于来水流量减少时的阈值,说明来水流量增加时对下游节制闸闸前水位变幅的影响略大于来水流量减少时的影响。分析图 9 的计算结果,分水扰动阈值的结果与来水流量减少时阈值变化规律相似。

以湍河渡槽进口节制闸所在渠段来水流量增加和减少情况为例对安全扰动阈值进行分析,绘制湍河节制闸不同开度时来水、分水流量安全扰动阈值与上游初始流量的关系图,结果见图 10。

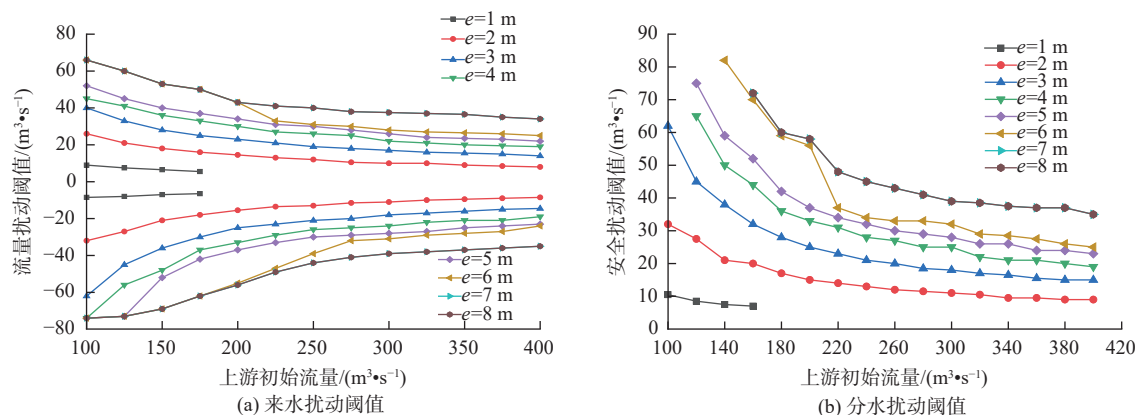


图 10 扰动阈值与初始流量关系

Fig. 10 Disturbance threshold and initial flow relationship diagram

由图 10 可知:当闸门开度与下游水位保持不变时,扰动阈值随上游边界流量增大而递减,即自平衡能力越弱,这是由于当上游流量越大时,节制闸前初始稳定水位越高,而下游边界采用常水位控制,水位比较稳定,此时闸前闸后水位差 Δh 较大,而闸门开度未发生变化,导致此时闸门综合过流系数 M 较小,根据过闸流量公式可知,较小的流量变化需要较大的水位变化来适应,此时来水流量变幅将对下游闸前水位变幅影响较大;当上游流量边界与下游水位保持不变时,扰动阈值随闸门开度增大而增大,自平衡能力越强,这是由于闸门开度越大时,闸前初始稳定水位越小,水位差 Δh 越小,闸门综合过流系数 M 越大,发生相同流量变化时引起的水位变化就越小;扰动阈值与上游流量和闸门开度均有关,且呈较好的二次函数关系;分水流量增加与来水流量降低都会导致下游节制闸闸前水位下降,通过对比发现,分水扰动阈值随上游初始流量与节制闸开度变化的趋势与上游来水扰动阈值变化趋势基本相似,同一初始工况下分水流量增加阈值与来水流量减少阈值相差基本不超过 $5 \text{ m}^3/\text{s}$,可见分水流量变幅对下游节制闸闸前水位变幅的影响与来水流

量变幅的影响基本相同。

3.3 快速计算公式

使用水力模型进行扰动阈值计算需要较长的计算时间,而利用历史数据或机理模型计算结果拟合目标函数快速计算公式的简化方法能够在保障精度的同时大大提高计算速度,更适合在实际工程中进行应用。由计算结果可知,来水、分水流量安全扰动阈值 (ΔQ 、 ΔQ_{out}) 与上游初始流量 Q_0 以及节制闸开度 e 这 2 个变量相关。由于在工程实际运行过程中调度人员出于高效、安全考虑会尽量将水保持在设计水位附近,因此本次公式拟合以下游水位处于设计水位为例,对流量增加时的扰动阈值 (ΔQ 、 $\Delta Q_{\text{out}} > 0$) 进行分析,分别按照初始流量、节制闸开度、初始流量-节制闸开度对湍河渡槽进口节制闸安全扰动阈值进行单变量及双变量公式拟合。

单变量拟合。分别取其中一个变量作为自变量,对另一个变量在不同情况下拟合自变量与扰动阈值的关系式。拟合结果见表 6 至表 9。根据阈值计算时工况条件可知,此处 $100 \text{ m}^3/\text{s} < Q_0 < 400 \text{ m}^3/\text{s}$, $1 \text{ m} < e < 8 \text{ m}$ 。

表 6 不同节制闸开度下来水安全扰动阈值公式拟合结果

Tab. 6 Fitting results of safety disturbance threshold formula for incoming water with different control gate openings

序号	节制闸开度/m	拟合公式	R^2
1	1	$\Delta Q = 0.000 2 Q_0^2 - 0.101 Q_0 + 17.075$	0.998 1
2	2	$\Delta Q = 0.000 2 Q_0^2 - 0.163 Q_0 + 38.486$	0.980 7
3	3	$\Delta Q = 0.000 3 Q_0^2 - 0.2441 Q_0 + 58.713$	0.979 3
4	4	$\Delta Q = 0.000 3 Q_0^2 - 0.2259 Q_0 + 64.271$	0.994 9
5	5	$\Delta Q = 0.000 3 Q_0^2 - 0.2552 Q_0 + 72.364$	0.990 2
6	6	$\Delta Q = 0.000 6 Q_0^2 - 0.4404 Q_0 + 105.24$	0.990 6
7	7	$\Delta Q = 0.000 5 Q_0^2 - 0.334 4 Q_0 + 93.524$	0.980 0
8	8	$\Delta Q = 0.000 5 Q_0^2 - 0.334 4 Q_0 + 93.524$	0.980 0

表 7 不同初始流量下水安全扰动阈值公式拟合结果

Tab. 7 Fitting results of water safety disturbance threshold formula under different initial flow rates

序号	初始流量/(m ³ ·s ⁻¹)	拟合公式	R ²
1	100	$\Delta Q = -1.107\ 1\ e^2 + 0.018\ 1\ e - 7$	0.983\ 3
2	125	$\Delta Q = -0.925\ 6\ e^2 + 16.039\ e - 7.633\ 9$	0.983\ 0
3	150	$\Delta Q = -0.806\ 5\ e^2 + 14.158\ e - 7.205\ 4$	0.984\ 6
4	175	$\Delta Q = -0.717\ 3\ e^2 + 13.128\ e - 7.473\ 2$	0.982\ 4
5	200	$\Delta Q = -0.803\ 6\ e^2 + 12.982\ e - 8.678\ 6$	0.982\ 9
6	225	$\Delta Q = -0.404\ 8e^2 + 8.690\ 5\ e - 2.142\ 9$	0.980\ 3
7	250	$\Delta Q = -0.369\ e^2 + 8.369\ e - 2.857\ 1$	0.973\ 3
8	275	$\Delta Q = -0.410\ 7\ e^2 + 8.660\ 7\ e - 4.607\ 1$	0.976\ 7
9	300	$\Delta Q = -0.196\ 4\ e^2 + 6.589\ 3\ e - 1.821\ 4$	0.972\ 5
10	325	$\Delta Q = -0.059\ 5\ e^2 + 5.202\ 4\ e + 0.285\ 7$	0.968\ 9
11	350	$\Delta Q = -0.071\ 4\ e^2 + 5.392\ 9\ e - 0.964\ 3$	0.970\ 1
12	375	$\Delta Q = -0.131\ e^2 + 5.809\ 5\ e - 2.107\ 1$	0.974\ 4
13	400	$\Delta Q = -0.119\ e^2 + 5.619\ e - 2.357\ 1$	0.973\ 3

表 8 不同节制闸开度分水安全扰动阈值公式拟合结果

Tab. 8 Fitting results of safety disturbance threshold formula for water diversion with different control gate openings

序号	节制闸开度/m	拟合公式	R ²
1	1	$\Delta Q_{\text{out}} = 0.000\ 7\ Q_0^2 - 0.239\ Q_0 + 27.491$	0.991\ 8
2	2	$\Delta Q_{\text{out}} = 0.000\ 3\ Q_0^2 - 0.234\ 8\ Q_0 + 49.488$	0.968\ 4
3	3	$\Delta Q_{\text{out}} = 0.000\ 7\ Q_0^2 - 0.458\ 8\ Q_0 + 91.14$	0.946\ 0
4	4	$\Delta Q_{\text{out}} = 0.000\ 8\ Q_0^2 - 0.549\ 7\ Q_0 + 113.83$	0.957\ 1
5	5	$\Delta Q_{\text{out}} = 0.000\ 9\ Q_0^2 - 0.621\ 7\ Q_0 + 128.63$	0.962\ 8
6	6	$\Delta Q_{\text{out}} = 2\text{E-}05\ Q_0^2 - 0.074\ 8\ Q_0 + 51.944$	0.981\ 0
7	7	$\Delta Q_{\text{out}} = 0.001\ Q_0^2 - 0.692\ 5\ Q_0 + 155.94$	0.961\ 0
8	8	$\Delta Q_{\text{out}} = 0.001\ Q_0^2 - 0.692\ 5\ Q_0 + 155.94$	0.961\ 0

表 9 不同初始流量分水安全扰动阈值公式拟合结果

Tab. 9 Fitting results of safety disturbance threshold formulas for different initial flow dividers

序号	初始流量/(m ³ ·s ⁻¹)	拟合公式	R ²
1	100	$\Delta Q_{\text{out}} = 4.25\ e^2 + 8.75\ e - 2.5$	1
2	120	$\Delta Q_{\text{out}} = -1.107\ 1\ e^2 + 23.693\ e - 14.7$	0.996\ 2
3	140	$\Delta Q_{\text{out}} = -e^2 + 19.2\ e - 11.5$	0.996\ 7
4	160	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.839\ 3\ e^2 + 17.518\ e - 11.304$	0.983\ 4
5	180	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.809\ 5\ e^2 + 15.81\ e - 12.429$	0.964\ 4
6	200	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.595\ 2\ e^2 + 13.738\ e - 11.143$	0.953\ 4
7	220	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.357\ 1\ e^2 + 9.214\ 3\ e - 2.142\ 9$	0.970\ 5
8	240	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.285\ 7\ e^2 + 8.214\ 3\ e - 1.642\ 9$	0.970\ 7
9	260	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.297\ 6\ e^2 + 8.154\ 8\ e - 2.428\ 6$	0.972\ 9
10	280	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.327\ 4\ e^2 + 8.327\ 4\ e - 3.714\ 3$	0.986\ 2
11	300	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.392\ 9\ e^2 + 8.678\ 6\ e - 4.571\ 4$	0.986\ 2
12	320	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.142\ 9\ e^2 + 6.214\ 3\ e - 1$	0.976\ 1
13	340	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.208\ 3\ e^2 + 6.851\ 2\ e - 3$	0.978\ 9
14	360	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.107\ 1\ e^2 + 5.785\ 7\ e - 1.321\ 4$	0.973\ 8
15	380	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.047\ 6\ e^2 + 5.261\ 9\ e - 0.928\ 6$	0.966\ 1
16	400	$\Delta Q_{\text{out}} = -0.047\ 6\ e^2 + 4.904\ 8\ e - 0.142\ 9$	0.967\ 1

双变量拟合。以初始流量 Q_0 和闸门开度 e 作为 2 个自变量,通过多元非线性拟合得到扰动阈值 ΔQ 与两者之间的关系式,具体拟合结果如式(3)、式(4)所示:

$$\Delta Q = 12.20271 - 0.1752Q_0 + 17.16209e + 2.90977E - 4Q_0^2 - 1.09642e^2 - 0.01204Q_0e \quad (3)$$

$$\Delta Q_{\text{out}} = 33.22244 - 0.36253Q_0 + 19.29282e + 6.86153E - 4Q_0^2 - 0.60821e^2 - 0.02632Q_0e \quad (4)$$

式(3)和式(4)中, $100 \text{ m}^3/\text{s} < Q_0 < 400 \text{ m}^3/\text{s}$, $1 \text{ m} < e < 8 \text{ m}$ 。根据拟合结果可知,来水、分水安全扰动阈值与初始流量和闸门开度之间存在较好的函数关系,决定系数 R^2 分别为 0.98 和 0.93。

通过安全扰动阈值计算公式与模拟模型分别对不同工况下的扰动阈值进行计算。以来水安全扰动阈值为例,按照上游初始流量从 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 到 $300 \text{ m}^3/\text{s}$,随机选择 10 组工况,下游水位边界设置为设计水位 144.74 m ,通过模型计算,得出不同初始流量下的闸门开度,并采用模型计算结果得到的安全扰动阈值与不同工况下公式计算结果进行对比,寻找不同工况下最合适的拟合公式,验证结果见图 11。

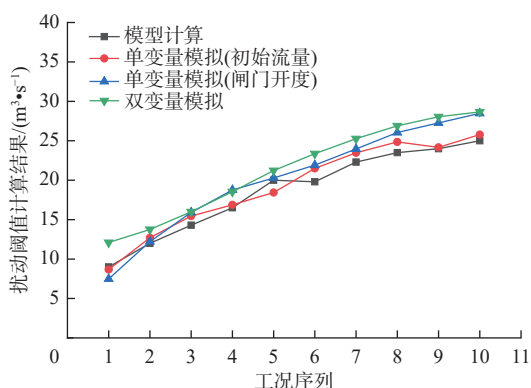


图 11 来水安全扰动阈值验证对比

Fig. 11 Comparison diagram of threshold verification for water safety disturbance

对结果进行分析,单变量拟合公式的计算效果优于双变量拟合公式,且使用上游初始流量拟合公式的计算结果与模型计算结果最为接近,平均误差只有 $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。同样,分水安全扰动阈值的验证结果与此相同,可以看出,相对于闸门开度,上游初始流量的大小对安全扰动阈值的影响更大。因此,在计算安全扰动阈值时更适合使用通过初始流量拟合的公式。

4 结论

以保障工程安全平稳运行为目标,假定串联渠池最下游水位稳定,通过模拟渠池最上游流量增减以及分水口流量变化对中间调控建筑物的影响,分析渠池水情变化特性,计算南水北调中线工程陶岔渠首至十二里河节制闸间渠池来水扰动和分水扰动阈值,并以湍河渡槽进口节制闸所在渠段为例进行实证分析。结果表明:

当上游流量边界与下游水位保持不变时,来水、分水扰动阈值随闸门开度增大而增大,即系统自平衡能力与闸门开度呈正相关关系;当闸门开度与下游水位保持不变时,来水、分水扰动阈值随初始流量增大而减小,系统自平衡能力与上游初始流量呈负相关关系。

分别选取上游初始流量和闸门初始开度作为自变量对安全扰动阈值进行单变量及双变量公式拟合,通过计算验证,结果表明扰动阈值计算时适合使用通过初始流量拟合的公式。

参考文献:

- [1] 郭旭宁,李云玲,闫佳铭,等. “双碳”战略下水循环响应与需水情势变化 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(1): 22-28. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0003.
- [2] 郭旭宁,刘为锋,邢西刚,等. 国家水网的理论内涵与战略策略关系 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(6): 1055-1063. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2023.0102.
- [3] SHAHANAB, JENSEN, LAURENT-CHARLEST, et al. Pathways to water sustainability? A global study assessing the benefits of integrated water resources management [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 343: 118179. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.118179.
- [4] 贾绍凤,梁媛. 调水工程研究评述与展望 [J]. 地球科学进展, 2023, 38(3): 221-235. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2023.009.
- [5] 徐宗学,庞博,冷罗生. 河湖水系连通工程与国家水网建设研究 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(4): 757-764. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2022.0077.
- [6] YU M, WANG C, LIU Y, et al. Sustainability of mega water diversion projects: Experience and lessons from China [J]. Science of the Total Environment, 2018, 619: 721-731. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.006.
- [7] 汤洪洁,赵亚威. 跨流域长距离调水工程风险综合评

- 价研究与应用 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(1): 29-38. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0004](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0004).
- [8] 王浩, 雷晓辉, 尚毅梓. 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): 1-8. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.001).
- [9] 崔巍, 李斯胜, 陈文学, 等. 南水北调中线分水口群不同运用方式对总干渠水力控制特性的影响 [J]. *水利学报*, 2011, 42(11): 1316-1321.
- [10] 崔巍, 王磊, 穆祥鹏, 等. 南水北调中线干渠闸门同步关闭水力响应特性 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(5): 1013-1020. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0097](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0097).
- [11] 赵鸣雁, 孔令仲, 郑艳侠, 等. 串联渠池闸门同步关闭情况下关闭时间对闸前水位雍高影响 [J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 157-163. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0166](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0166).
- [12] 张成, 倪春飞, 刘林. 输水系统闸前常水位控制下的区间调度研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(增刊 1): 110-121. DOI: [10.16058/j.issn.1005-0930.2015.s1.012](https://doi.org/10.16058/j.issn.1005-0930.2015.s1.012).
- [13] 张保航, 张召, 雷晓辉, 等. 基于水动力耦合的明渠调水工程节制闸安全调控 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(4): 821-832. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0080](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0080).
- [14] 李月强, 马芳平, 薛萍, 等. 明渠输水流量不平衡量感知及水位超限预警方法研究 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2022, 53(1): 73-82. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.008](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.01.008).
- [15] 马强, 李郑森, 解家毕, 等. 黄土边坡失稳的降雨入渗预警阈值 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2022, 20(1): 152-159. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0017](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0017).
- [16] 白佳琦, 张召, 陈铭瑞, 等. 明渠调水工程流量切换条件下的渠池水力响应特性分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2023(7): 153-159. DOI: [10.12396/znsd.221618](https://doi.org/10.12396/znsd.221618).
- [17] 王维林. 两湖段梯级泵站优化运行研究 [D]. 济南: 济南大学, 2020. DOI: [10.27166/d.cnki.gsdcc.2020.000179](https://doi.org/10.27166/d.cnki.gsdcc.2020.000179).
- [18] 崔巍, 陈文学, 姚雄. 明渠调水工程水位-流量串联反馈控制研究 [J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 2009, 42(6): 764-768.
- [19] 陈文学, 刘之平, 吴一红, 等. 南水北调中线工程运行特性及控制方式研究 [J]. *南水北调与水利科技*, 2009, 7(6): 8-12. DOI: [10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-1683.2009.06.003).
- [20] 薛萍, 廖丽莎, 廖卫红, 等. 南水北调中线工程水位的水动力-神经网络耦合预测模型 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2023, 21(6): 1116-1125. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0109](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0109).
- [21] LEI X H, TIAN Y, ZHANG Z, et al. Correction of pumping station parameters in a one-dimensional hydrodynamic model using the Ensemble Kalman filter [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 108-118. DOI: [10.1016/j.jhydrol.2018.10.062](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.062).
- [22] 王船海, 李光焱, 向小华, 等. 实用河网水流计算 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2015.
- [23] 陈晓楠, 顾起豪, 张召, 等. 南水北调中线总干渠水情数据智能清洗研究 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2024, 22(3): 436-444. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0045](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0045).
- [24] ZHANG Z, LEI X H, TIAN Y, et al. Optimized scheduling of cascade pumping stations in open-channel water transfer systems based on station skipping [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2019, 145(7): 05019011. DOI: [10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001080](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001080).
- [25] 杨开林. 长距离输水水力控制的研究进展与前沿科学问题 [J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 424-435. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20150824](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20150824).
- [26] 王艺霖, 靳燕国, 陈晓楠, 等. LSTM 神经网络和量纲分析法在弧形闸门过流计算中的对比 [J]. *南水北调与水利科技 (中英文)*, 2022, 20(3): 590-599. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0060](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0060).
- [27] 孔刚, 乔雨, 陈晓楠, 等. 南水北调中线工程应急调度仿真及策略研究 [J]. *西北水电*, 2022(3): 28-33. DOI: [10.3969/j.issn.1006-2610.2022.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-2610.2022.03.006).

Self balancing characteristics and disturbance threshold of open channel water diversion projects

LONG Yan^{1,2}, GAO Wei^{1,2}, ZHANG Zhao³, LEI Xiaohui^{1,2,3}

(1. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 3. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Open channel water diversion project is important to solve the regional water shortage problems.

However, due to the changes in water supply demand along the line and frequent changes in upstream flow during the operation of the project, the water conditions along the line are complex and variable, which can result in fluctuations in the channel water level and affect the stability of the system. As a controlled system with self balancing ability, the open channel water diversion project can withstand a certain degree of external disturbance through its own self balancing ability when not under control, while meeting the conditions of safe operation of the project. Studying the safety threshold and variation law of this disturbance is of great significance for guiding the control gates.

A one-dimensional unsteady hydrodynamic model of coupled control gates was developed to simulate potential disturbance scenarios that may arise during engineering operations. The model calculated the changes in water levels in front of the gate under various disturbance intensities. Based on the safety constraints for water levels, we determined the disturbance threshold that the water conveyance system can tolerate under different working conditions. A fast calculation formula was constructed based on the relationship between upstream flow rate, regulating gate opening, and safety disturbance threshold calculation results. It can be endured under different initial working conditions, providing a discrimination basis for whether to enable regulating gate control.

The study focuses on four control gates from the inlet cut-off gate of Diaohu aqueduct to the inverted siphon outlet of Qihe in the middle route of the South-to-North Water Transfers Project, as well as the upstream and downstream channels of each control gate. Different initial operating conditions are set for calculation. The results show that the self balancing ability mainly depends on the overcurrent characteristics of the regulating gate. When both the downstream water level and the position of the regulating gate remain unchanged, the disturbance threshold decreases as the upstream boundary flow increases, indicating a reduction in self balancing capability. In contrast, when the upstream flow boundary and downstream water level are held constant, an increase in the gate opening leads to a higher disturbance threshold, thereby enhancing the self balancing ability. The average error between the constructed fast calculation formula and the model calculation results is less than $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$.

The self balancing ability and safety disturbance threshold of the canal pool are closely related to the overcurrent characteristics of the regulating gate, which is mainly influenced by the water level difference before and after the gate, as well as the gate opening. The larger the gate opening and the initial water level difference, the higher the safety disturbance threshold, and the greater the disturbance amount that the canal pool can withstand. This study is applicable to other canal sections of the South-to-North Water Transfers Project and can provide support for scheduling decisions in water transfer projects.

Key words: open channel water diversion project; safety disturbance threshold; hydrodynamic simulation; self balancing characteristics; control gate