

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.
ZHANG B H, ZHANG Z, LEI X H, et al. Safety of control gate for open channel water transfer project based on hydrodynamic coupling[J].
South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(4): 821-832. (in Chinese)

基于水动力耦合的明渠调水工程节制闸安全调控

张保航^{1,2}, 张召³, 雷晓辉^{1,2,3}, 李汉元⁴, 魏宏郁^{1,2}

(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; 4. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对明渠调水工程中流量切换时, 由于调控不当导致闸前水位突破水位上下限的问题, 提出安全调控可行域的概念及其划分原则, 通过一维水动力模型耦合二分法建立明渠调水工程节制闸的安全调控模型, 实现流量切换时节制闸调控开度、安全水位和调控时间区间的计算, 进而得到节制闸的安全调控可行域和调控方案, 并以南水北调中线工程陶岔渠首至淇河节制闸 4 个节制闸开展实例研究。研究过程中根据各节制闸流量变化情况, 分别设置 12 种工况进行计算, 结果表明: 经模型计算的调控方案调控后, 闸前水位控制在安全水位区间内, 划分的安全水位区间-II 较水位区间-I 起到了降低水位变幅的作用, 模型运算速度快, 最长时间为 8.99 s。给出了柔性调度方案, 使得调度更为灵活, 面向实际工程更实用、操作性强, 为调水工程的调度决策提供了支撑。

关键词: 一维水动力学模型; 安全调控可行域; 二分法; 节制闸

中图分类号: TV66 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0080

由于降雨的时空分布不均匀性, 我国水资源量从东南到西北方向地区递减^[1], 呈现水资源分配不均的现象, 因此修建大型调水工程成为解决此局部水资源短缺的主要手段^[2]。调水工程中输水形式大多以明渠为主^[3-4], 节制闸作为在调水工程中应用最广泛的可调控建筑物之一^[5-6], 常被用于辅助水资源的传输和控制, 但此类含有多个内部节点的复杂水力系统调控过程有着非线性和响应状态大时滞的特点, 水情状态感知难度大, 从而增加了工况切换时的调控难度^[7-8]。

此前不少学者对水力系统调控展开过相应研究。张成等^[9-10]建立一维水动力仿真模型, 通过模拟分析得出中线总干渠波动传播时间、渠池平衡时间与闸门的个数、位置有着密切关系。龙岩等^[11]基于 AHP-灰色定权聚类方法建立三角白化权函数, 确定了中线工程闸门同步调控的应急调控策略。孔令仲等^[12]建立多级串联渠道的离散线性状态空间方程, 设计用于多级串联渠池的线性预测控制算法, 能够在分水变化前对闸门进行控制, 实现了节制闸的前馈控

制。Overloop 等^[13]基于积分时滞模型设计了渠道预测控制算法, 通过仿真模拟证明了其在渠池水位调控上的优越性。王坤等^[14]利用 MIKE11 软件将 HD 和 NAM 模型耦合建立雨洪演进模拟模型, 并通过多级闸门的调控设计多种调度模式, 提高了雨洪资源利用率。Zhu 等^[15]通过一维水动力模型与 NSGA-II 算法耦合, 以闸门调控次数最少和渠池水位变幅最小为目标建立优化调控模型, 生成梯级闸群调控方案。郑和震等^[16]通过一维水动力模型耦合动态规划法生成梯级泵站调度策略, 实现了泵站高效经济运行。

上述研究通过建立仿真模型或优化模型开展水力系统调控研究, 大多属于固定时刻调控, 即理想化的刚性调度。然而, 节制闸和泵站均属于大型水力机械, 实际调控时不可能在固定时刻瞬时完成, 调度人员更需要的是有调控阈值范围的柔性调度。因此, 本研究提出安全调控可行域的概念, 以节制闸为对象, 保证闸前水位安全为调度目标建立安全调控模型, 使调度工作变得更灵活, 对保障工程安

收稿日期: 2023-02-17 修回日期: 2023-07-17 网络出版时间: 2023-08-08

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20230807.1629.012>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52209046)

作者简介: 张保航(1999—), 男, 河南新乡人, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: 577095887@qq.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

全运行有重要意义。

1 研究方法

针对明渠调水工程中流量突变导致水位超限的问题,建立一维水动力模型实现对明渠调水工程各断面水情状态的感知,将一维水动力模型耦合二分法建立安全调控模型实现对节制闸的安全调控可行域及调控方案的快速计算。

1.1 一维水动力模型

1.1.1 基本控制方程

一维水动力模型的基本控制方程是由法国科学家 B. Saint Venant 在 1871 年提出的圣维南方程组,包括连续方程和动量方程^[17-18]。方程组为

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{|Q|Q}{AC^2R} = 0 \quad (2)$$

其中: B 为过水断面表面宽度, m ; Z 为水位, m ; t 为时间, s ; Q 为流量, m^3/s ; x 为沿主流向的渠道纵向距离, m ; q 为旁侧入流或出流, m^3/s ; α 为动量校正系数; A 为过水面积, m^2 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; C 为谢才系数; R 为水力半径, m 。

在输水系统中,水流通过节制闸时水力特性或几何形状发生了明显变化,此类节点被称为内部边界^[19]。圣维南方程组没有对内部边界进行刻画,故需要根据节制闸的过流特性去选择它的控制方程。选择连续方程和过闸流量公式作为控制方程。

连续方程为

$$Q_i = Q_{i+1} \quad (3)$$

式中: Q_i 和 Q_{i+1} 为闸前和闸后断面的流量, m^3/s 。

过闸流量公式^[20] 为

$$Q = MeB \sqrt{2gH} \quad (4)$$

式中: Q 为过闸流量, m^3/s ; M 为综合流量系数; e 、 B 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 。

1.1.2 模型求解方法

圣维南方程组是一阶拟线性双曲线型微分方程组,一般无法直接求其解析解。本研究采用有限差分法求解,使用稳定性好、计算精度高、收敛速度快的 preissmann 四点带权隐式差分格式^[20] 对其进行离散。离散网格形式见图 1。

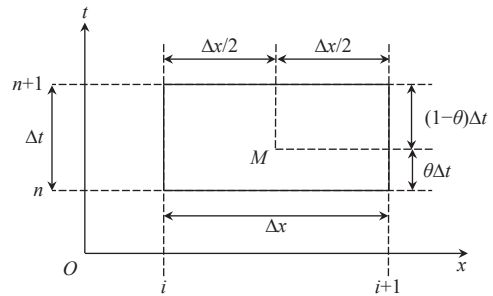


图 1 preissmann 四点偏心格式

Fig. 1 Schematic diagram of preissmann's four-point eccentricity scheme

1.2 安全调控可行域

对于设置节制闸的明渠调水工程来讲,闸前常水位运行是调水工程常用的运行方式^[21],闸前水位通常需要调度人员重点关注,因此将闸前上、下限运行水位(记为 $Z_{上}$ 和 $Z_{下}$) 作为水位超限阈值。工程运行中,当上游流量增大时,上游形成涨水顺波向下游传播,水波传播到下游闸前时会引起水位壅高。若不及时调控,闸前水位有突破上限的风险,需增大开度以增加节制闸过水流量,使水位下降。但水波从上游传播到下游需要一定时间,调控过早,水波或者波的主体未能传播至下游导致闸前水位下降突破下限;调控过晚,水波传播至下游,未能及时调控导致闸前水位壅高突破上限。同理,上游流量减小的情况亦是如此。因此,调控时间是调度过程中需要重点考虑的因素。

通过改变上游流量并调控节制闸开度,由一维水动力模型计算得到闸前水位变化过程,以闸前水位不突破上、下限前提下的临界调控时刻为最早、最晚调控时间^[22],分别记为 $T_{早}$ 和 $T_{晚}$ 。由 $[Z_{上}, Z_{下}]$ 和 $[T_{早}, T_{晚}]$ 组成的区域称为安全调控可行域,节制闸在 $[T_{早}, T_{晚}]$ 区间内进行调控,闸前水位会在 $[Z_{下}, Z_{上}]$ 区间内运行。以上游流量增大为例作安全调控可行域,见图 2。

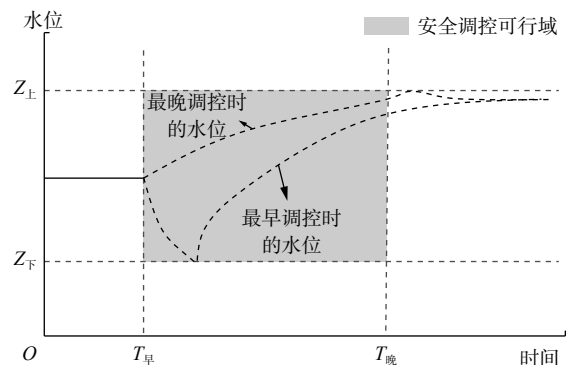


图 2 安全调控可行域

Fig. 2 Safety regulation feasible domain diagram

调水工程通常会根据防洪要求去划分水位上下限(简称[上限水位-I,下限水位-I])。通过安全调控可行域的划分原理可知,调控时最大水位变幅发生在 $T_{早}$ 、 $T_{晚}$ 时刻处,且严格约束在 $[Z_{上}, Z_{下}]$ 之间,最大变幅基本与限制水位一致,两者存在直接关系。由图2不难发现,若将 $Z_{上}$ 降低会导致 $T_{晚}$ 提前,将 $Z_{下}$ 升高会导致 $T_{早}$ 延迟,故不同的限制水位会影响调控时间。本文以工程安全为导向做调控研究,为减小水位变幅,将限制水位区间缩减,但节制闸在对应开度下的调节能力有限,划分水位过低或过高将导致模型无可行解。经测试,采用以下规则进行水位

$$\begin{aligned} \text{流量增大时} & \begin{cases} Z_{II上} = (Z_{调整} + Z_{不调整})/2 & (Z_{调整} + Z_{不调整})/2 < Z_{I上} \\ Z_{II上} = Z_{I上} & Z_{II上} \geq Z_{I上} \\ Z_{II下} = Z_{初始} - Z_{变幅} \end{cases} \\ \text{流量减小时} & \begin{cases} Z_{II上} = Z_{初始} + Z_{变幅} \\ Z_{II下} = (Z_{调整} + Z_{不调整})/2 & (Z_{调整} + Z_{不调整})/2 > Z_{I下} \\ Z_{II下} = Z_{I下} & Z_{II下} \leq Z_{I下} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} & \begin{cases} Z_{II上} = (Z_{调整} + Z_{不调整})/2 & (Z_{调整} + Z_{不调整})/2 > Z_{I下} \\ Z_{II下} = Z_{I下} & Z_{II下} \leq Z_{I下} \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $Z_{II上}$ 、 $Z_{II下}$ 为新划分的水位上、下限,m; $Z_{I上}$ 、 $Z_{I下}$ 为根据工程防洪要求划分的水位上、下限,m; $Z_{初始}$ 为初始水位,m; $Z_{调整}$ 和 $Z_{不调整}$ 为调整和不调整后稳定的水位,m; $Z_{变幅}$ 为约束的水位变幅,m。

1.3 二分法

二分法适用于求解可行域内数据量很大的问题,基本逻辑是将可行域两端点1/2处取值计算,与目标值 Y_m 进行比较,使区间两端点函数值逐步逼近目

区间划分,模型有可行解且有效降低水位变幅,以下简称[上限水位-II,下限水位-II]。规则具体如下:当流量增大时,最终稳定水位由调控开度所决定,无法严格地对 $Z_{上}$ 进行约束,因此对于 $Z_{上}$ 的确定将调控后和不调控稳定水位的平均值作为 $Z_{上}$,若平均值大于上限水位-I则取后者作为限制水位,将初始水位减去约束的水位变幅(以下简称 $Z_{变幅}$)作为 $Z_{下}$ 。同理上游流量减小的情况,将调控后和不调控稳定水位的平均值作为 $Z_{下}$,初始水位加上 $Z_{变幅}$ 作为 $Z_{上}$ 。通过调整 $Z_{变幅}$ 可以严格控制上、下限的约束水位。以上划分水位区间的原则为

标值 Y_m 进而得到目标解 X_m 的方法^[23]。假设 $[a, b]$ 为可行域的闭区间,先计算两端点 a 、 b 处的值,再将 a 、 b 值1/2处 c 取值计算 Y_c ,并与目标值 Y_m 比较,若 Y_c 大于 Y_m 则说明目标解 X_m 在 $[a, c]$ 区间内,若 Y_c 小于 Y_m 则说明目标解 X_m 在 $[c, b]$ 区间内,然后继续在两端点1/2处取值计算,依次迭代求解直至等于或无限逼近目标解 X_m 。二分法基本步骤流程见图3。

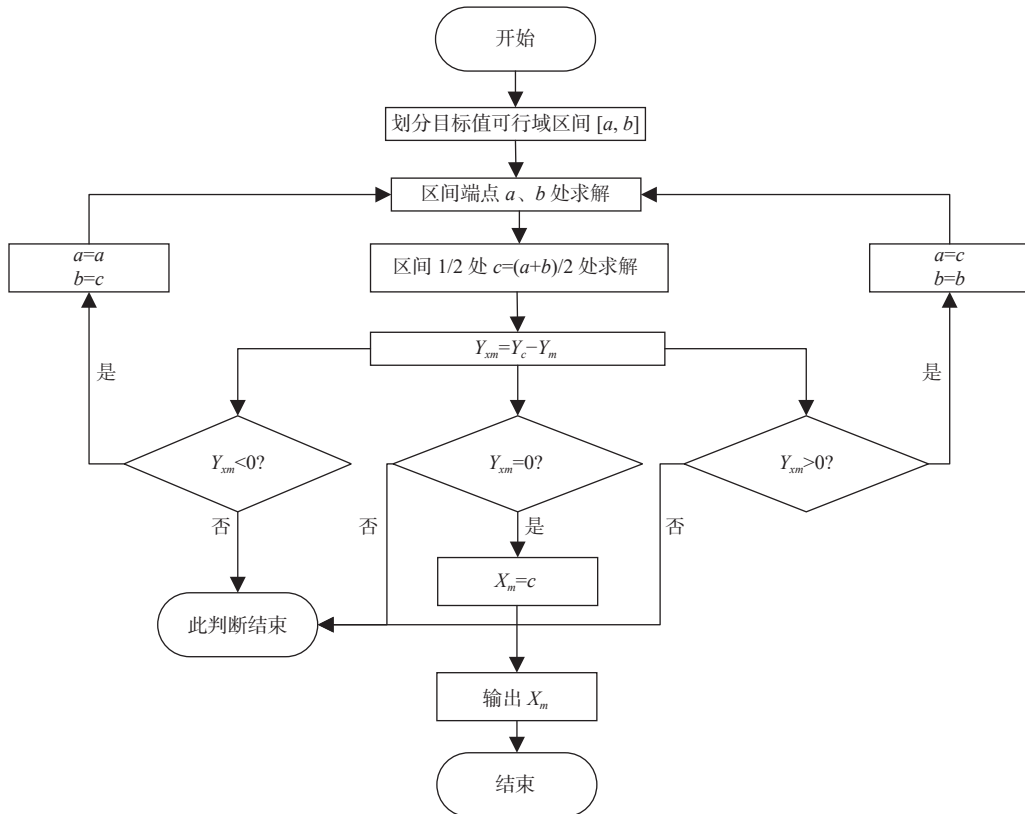


图3 二分法基本步骤流程

Fig. 3 Flowchart of the basic steps of bisection method

1.4 安全调控模型

明渠调水工程节制闸的安全调控模型是一维水动力模型耦合二分法实现安全调控可行域和调控方案快速计算的模型,安全调控可行域的确定在于闸前水位区间和调控时间,调控方案的制定在于确定闸门调控开度和调控时间。模型计算流程如下:

求解目标开度:由所需计算工况得到可行时间域区间 $[t_1, t_2]$,基于闸门过流公式(4)和流量变化量对目标开度进行求解,并调用一维水动力模型对不

调控和调控后闸前稳定水位进行计算。

划分水位限制区间:判断流量变化情况,根据公式(5)和(6)对水位区间进行划分得到 [上限水位- II, 下限水位- II]。

计算安全调控时间:调用一维水动力模型对 $[t_1, t_2]$ 两端点及区间 1/2 处进行计算,根据计算结果对可行时间域区间二等分,再对新的可行域端点及区间 1/2 处进行计算,依次迭代直至得到目标调控时间。模型计算流程图见图 4。

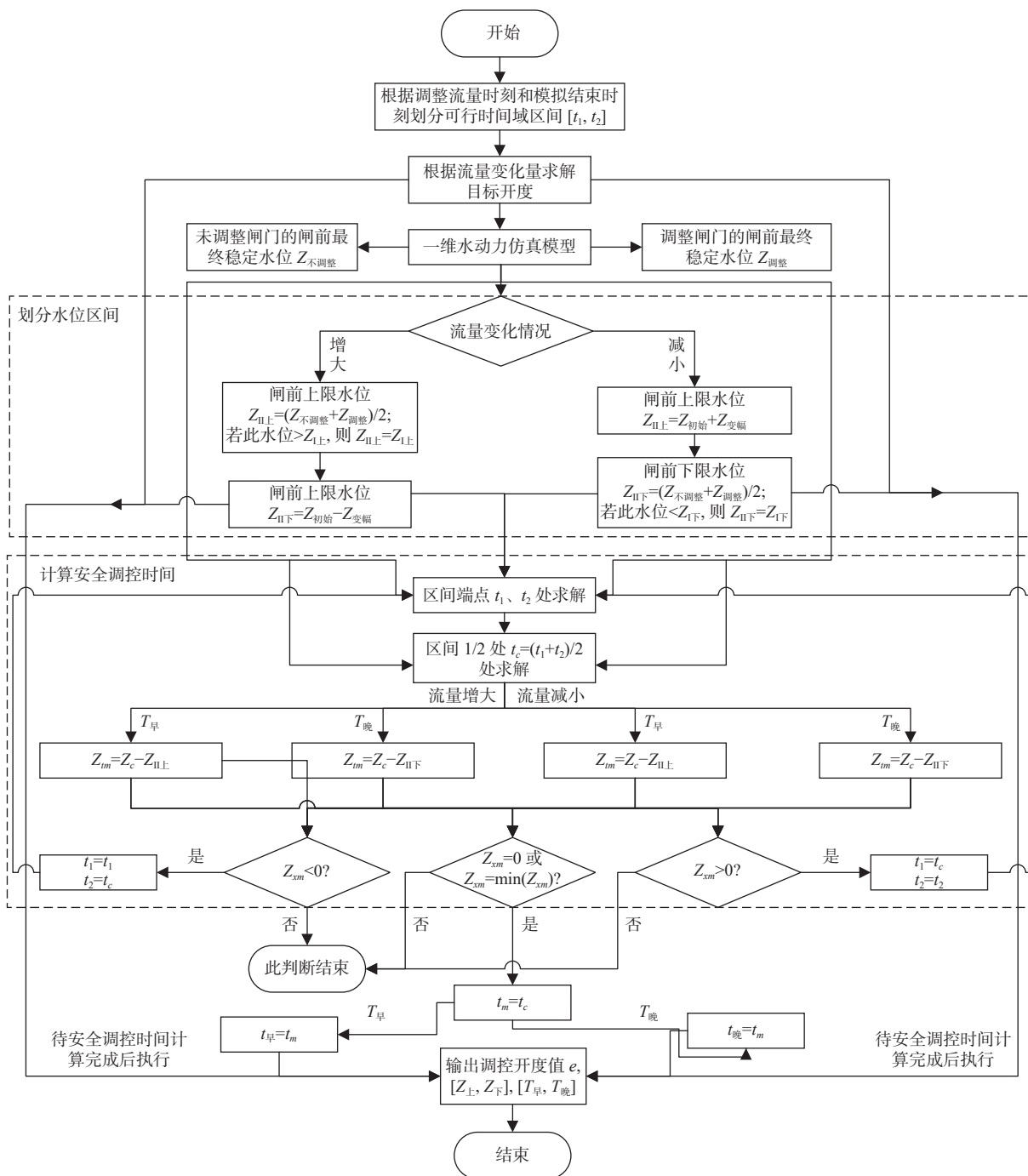


图 4 安全调控模型计算流程

Fig. 4 Safety regulation model calculation flow chart

1.4.1 目标函数

以闸前最大(最小)水位与上限水位或下限水位差值最小为目标函数,同时对闸前水位进行约束,目标函数分为流量增大和减小的情况,数学表达式为

$$\text{流量增大时} \quad \begin{cases} T_{\text{早}} = T(\min[Z_{\text{tm}} - Z_{\text{H下}}]) \\ T_{\text{晚}} = T(\min[Z_{\text{tm}} - Z_{\text{H上}}]) \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{流量减小时} \quad \begin{cases} T_{\text{早}} = T(\min[Z_{\text{tm}} - Z_{\text{H上}}]) \\ T_{\text{晚}} = T(\min[Z_{\text{tm}} - Z_{\text{H下}}]) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $T_{\text{早}}$ 、 $T_{\text{晚}}$ 为最早、最晚调控时间, h ; Z_{tm} 调控时刻闸前最大(最小)水位, m 。

1.4.2 约束条件

约束条件包括闸前水位和调控时间约束,其数学表达式为

$$Z_{\text{下}} \leq Z_{\text{早}}、Z_{\text{晚}} \leq Z_{\text{上}} \quad (9)$$

$$T_{\text{流量调整时刻}} \leq T_{\text{早}}、T_{\text{晚}} \leq T_{\text{边界时刻}} \quad (10)$$

式中: $Z_{\text{早}}$ 、 $Z_{\text{晚}}$ 分别为最早、最晚调控时间闸前最大(最小)水位, m 。 $T_{\text{流量调整时刻}}$ 、 $T_{\text{边界时刻}}$ 分别表示上游流量调整时刻和整个模拟过程的边界时刻, h 。

1.4.3 决策变量

决策变量采用节制闸的调整时间,对调整时间进行离散化,离散的步长越小,计算结果越精确,计算量也会越大。离散化的数据量:模拟的总时长为

Q_d , 上游流量调整时间为 Q_q , 选取采用 J 作为决策变量的离散精度,则调控时间解域中共包含 $(Q_q - Q_d)/J$ 个数据量。

2 研究区域概况

南水北调中线工程为解决地区性缺水问题,工程全长 1 432 km, 从丹江口水库取水地跨河南、河北、天津和北京, 向沿线十几座大中城市供水, 最终自流到北京市团城湖输水工程^[24]。输水主要采用明渠自流的方式^[25-26], 沿线共有 61 座节制闸, 是典型的明渠调水工程闸控系统^[17]。其中陶盆渠首至淇河节制闸段的 4 个节制闸作为整个调水工程的渠首段, 设计、加大流量(大于 300 m³/s)和流量变化量大, 实际工程中沿线供水计划多变, 该段流量调整较为频繁且调控难度大, 是整个输水线路的关键区段, 为保障各城市供水发挥了重要作用。

本文研究对象选取南水北调中线工程陶盆渠首至淇河节制闸 4 个节制闸, 分别为刁河节制闸、湍河节制闸、严陵河节制闸和淇河节制闸(下文以闸站编号简称)。研究区域示意图见图 5, 研究区域内各节制闸基本工程信息见表 1。

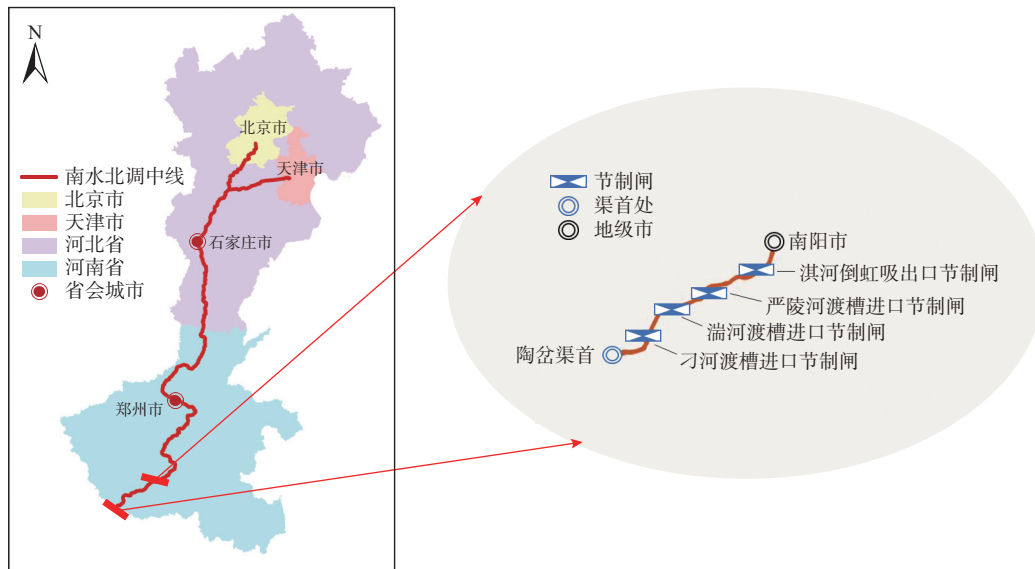


图 5 研究区域

Fig. 5 Research area

表 1 各节制闸基本工程信息

Tab. 1 Basic engineering information of each control gate

闸站编号	节制闸名称	总干渠桩号	设计流量/(m ³ ·s ⁻¹)	加大流量/(m ³ ·s ⁻¹)	设计水位/m	预警水位/m
JZZ1号	刁河节制闸	14+620	350	420	146.80	147.66
JZZ2号	湍河节制闸	36+444	350	420	145.65	146.47
JZZ3号	严陵河节制闸	48+781	340	420	144.74	145.57
JZZ4号	淇河节制闸	74+640	340	410	143.07	143.88

3 模拟计算实例

3.1 工况设置

以 JZZ1-4 号为研究对象,分别以上下游节制闸流量和水位作为上、下边界,中间以节制闸作为内边界。JZZ1-3 号上游初始流量(采用设计流量)为 350 m³/s, JZZ4 号由于上游分水的原因,上游初始流量为 340 m³/s。上游流量变化量以 10 m³/s 为间隔单位,包括 15、25、35、45、55、65 m³/s,分为流量增大和减小两种情况共 12 种工况,工况设置见表 2。

3.2 结果及讨论

3.2.1 计算成果表

模型计算了 JZZ1-4 号的调控开度、闸前安全调控水位和调控时间,见表 3 至表 5。JZZ1-4 号设置水位变幅 $Z_{\text{变幅}}$ 为 0.10 m,但经模型计算发现 JZZ4 号上游流量减小时设置 $Z_{\text{变幅}}$ 为 0.10 m,约束水位过于严格,导致无可行解,因此对于 JZZ4 号上游流量减小时设置 $Z_{\text{变幅}}=0.15$ m 进行计算。

JZZ1-4 号的调控过程可查表 3 和表 5 得到,安全调控可行域可查表 4、表 5 得到。例如 JZZ2 号上

游流量增大 45 m³/s 时,最早调控过程为上游流量变化后 0 h 由初始开度 5.28 m 调控为 6.05 m,最晚调控过程为上游流量变化后 3.7 h 由 5.28 m 调整为 6.05 m,安全调控可行域为 [0, 3.7] h, [145.55, 145.83] m。

表 2 各节制闸流量变化工况设置

Tab. 2 Each control gate flow change

condition setting

单位: m³/s

上游初始流量	流量变化量	变化后流量			
		JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号
350 (JZZ4号为340)	+65	415	415	415	405
	+55	405	405	405	395
	+45	395	395	395	385
	+35	385	385	385	375
	+25	375	375	375	365
	+15	365	365	365	355
	-15	335	335	335	325
	-25	325	325	325	315
	-35	315	315	315	305
	-45	305	305	305	295
	-55	295	295	295	285
	-65	285	285	285	275

表 3 各节制闸调控开度计算成果

Tab. 3 Each control gate control opening calculation results

上游初始流量/(m ³ ·s ⁻¹)	流量变化量/(m ³ ·s ⁻¹)	初始开度/m				调控开度/m			
		JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号	JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号
350 (JZZ4号为340)	+65					4.50	6.39	6.35	5.50
	+55					4.37	6.22	6.21	5.41
	+45					4.24	6.05	6.06	5.31
	+35					4.11	5.88	5.91	5.21
	+25					3.98	5.70	5.76	5.11
	+15					3.85	5.53	5.61	5.02
	-15	3.65	5.28	5.39	4.87	3.45	5.02	5.16	4.72
	-25					3.32	4.85	5.01	4.63
	-35					3.19	4.67	4.86	4.53
	-45					3.06	4.50	4.71	4.43
	-55					2.93	4.33	4.56	4.33
	-65					2.80	4.16	4.42	4.24

3.2.2 调度过程分析

当上游流量变化后,节制闸的最早、最晚调控过程即在最早、最晚调控时间调整到目标开度。图 6、图 7 给出 JZZ1-4 号上游流量±65 m³/s 的调度过程。由图可知 JZZ1-4 号最早、最晚调度过程呈区间形

式,在此调控区间内任意时刻调控,闸前水位始终被限制在水位区间内。

当上游流量增大时,最早调控结果显示:闸前水位在调控后突然下降,随着上游流量增大的过程逐渐传播至闸前,闸前水位随之升高,之后趋于稳定。

最晚调控结果显示: 随着上游增大的流量过程逐渐传播至闸前, 闸前水位逐渐上升, 水位在即将突破水位上限时进行调控后骤然下降, 之后趋于稳定。

表 4 各节制闸闸前安全调控水位计算成果

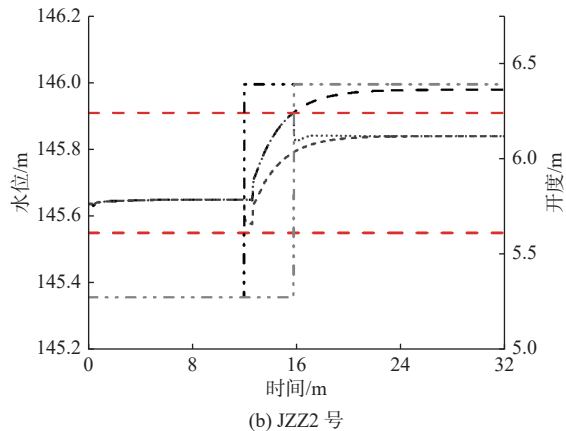
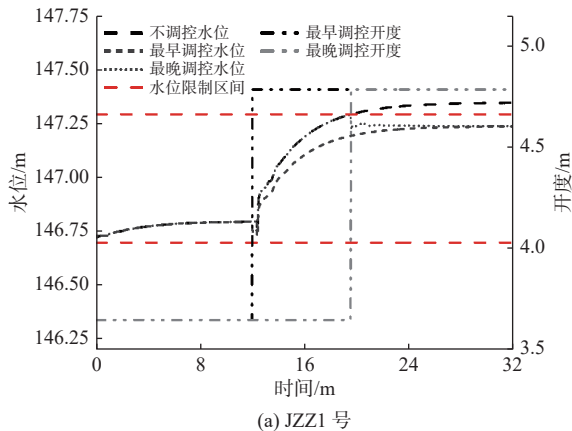
Tab. 4 Each control gate before the safety control water level calculation results

上游初始流量/(m ³ ·s ⁻¹)	流量变化量/(m ³ ·s ⁻¹)	上限水位/m				下限水位/m			
		JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号	JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号
350 (JZZ4号为340)	+65	147.29	145.91	145.33	143.62				
	+55	147.22	145.87	145.24	143.55				
	+45	147.14	145.83	145.15	143.48				
	+35	147.07	145.79	145.06	143.41	146.70	145.55	144.64	142.97
	+25	146.99	145.75	144.97	143.35				
	+15	146.91	145.71	144.88	143.28				
	-15					146.68	145.59	144.60	143.09
	-25					146.61	145.56	144.50	143.00
	-35					146.53	145.52	144.41	142.96
	-45	146.90	145.75	144.84	143.22	146.46	145.49	144.31	142.90
	-55					146.38	145.46	144.21	142.84
	-65					146.31	145.42	144.11	142.77

表 5 各节制闸安全调控时间计算成果

Tab. 5 Each control gate safety control time calculation results

上游初始流量/(m ³ ·s ⁻¹)	流量变化量/(m ³ ·s ⁻¹)	最早调控时间/h				最晚调控时间/h			
		JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号	JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号
350 (JZZ4号为340)	+65	0	0	0	0	7.57	3.80	7.23	8.40
	+55	0	0	0	0	7.53	3.73	7.30	8.40
	+45	0	0	0	0	7.50	3.70	7.40	8.43
	+35	0	0	0	0	7.47	3.70	7.47	8.43
	+25	0	0	0	0	7.43	3.63	7.53	8.50
	+15	0	0	0	0	7.40	3.60	7.60	8.67
	-15	0	0	0	0	7.07	3.47	7.83	7.97
	-25	0	0	0	0	7.03	3.40	7.90	8.07
	-35	0	0	0	0	6.93	3.37	8.00	8.10
	-45	0	0	0	0.17	6.80	3.30	8.10	8.13
	-55	0	0	0	0.73	6.67	3.27	8.17	8.13
	-65	0.40	0.53	0	0.77	6.53	3.20	8.27	8.13



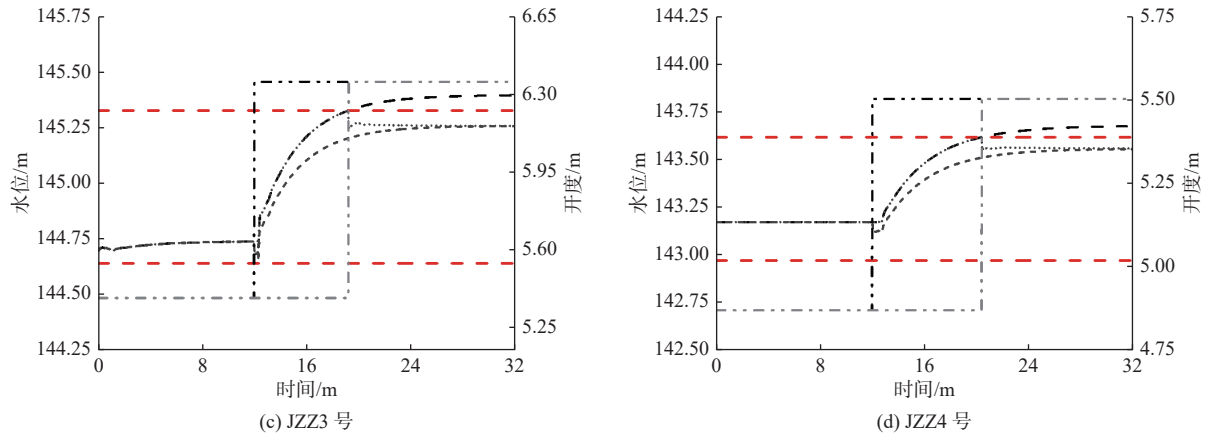


图 6 各节制闸上游流量增大 $65 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的闸前水位及开度变化过程

Fig. 6 The change process of the water level and opening before the gate when the upstream flow of each control gate increases by $65 \text{ m}^3/\text{s}$

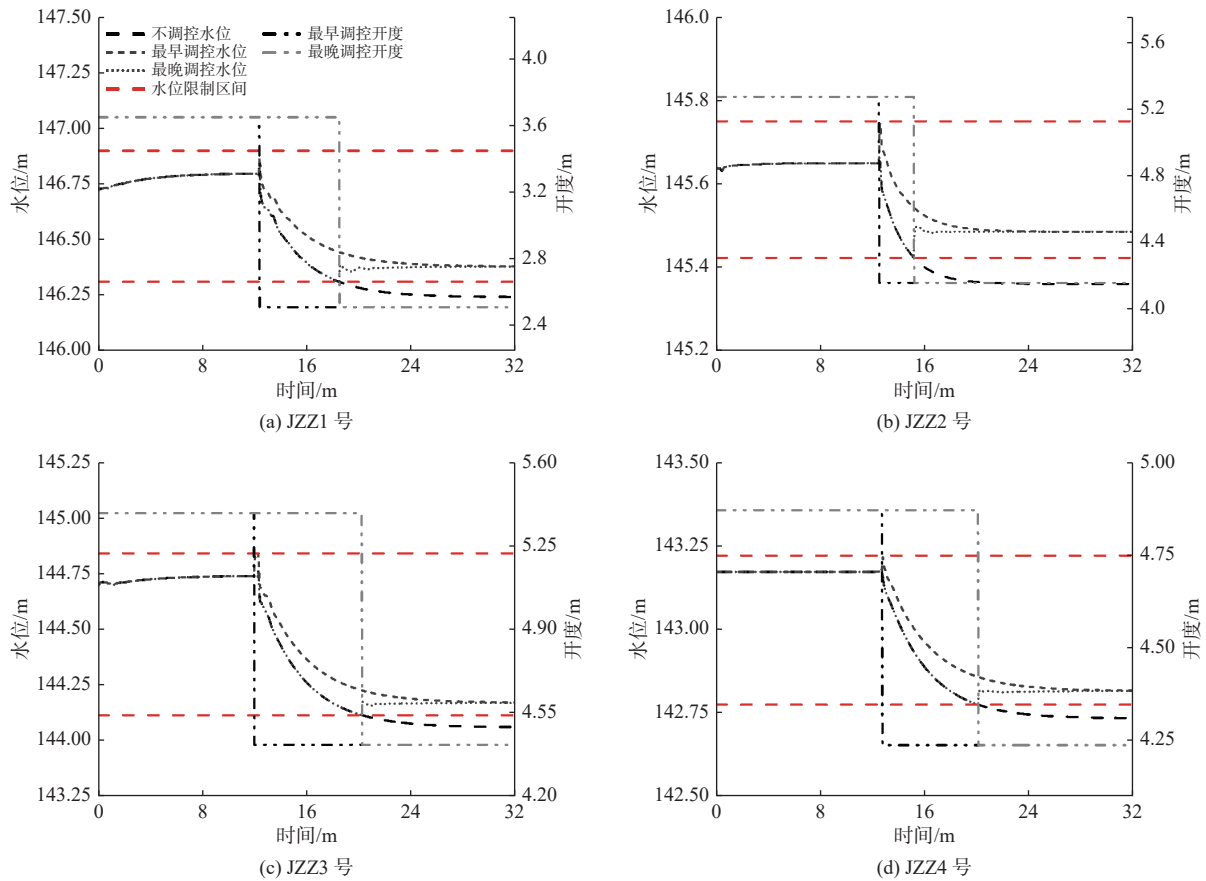


图 7 各节制闸上游流量减小 $65 \text{ m}^3/\text{s}$ 时的闸前水位及开度变化过程

Fig. 7 The change process of the water level and opening before the gate when the upstream flow of each control gate decreases by $65 \text{ m}^3/\text{s}$

当上游流量减小时,最早调控结果显示:闸前水位在调控后突然上升,随着上游流量减小的过程逐渐传播至闸前,闸前水位随之下降,之后趋于稳定。最晚调控结果显示:随着上游减小的流量过程逐渐传播至闸前,闸前水位逐渐下降,水位在即将突破水位下限时进行调控后骤然上升,之后趋于稳定。

为验证模型调控方案在实际调度中的合理性,基于本模型对 2020 年 5 月上旬刁河节制闸上游流

量从 350 变化到 $371 \text{ m}^3/\text{s}$ 的工况进行计算,刁河节制闸实际调控时刻在上游流量变化后 5 h 处,而此次调控时间区间为流量变化后 $[0, 7.4] \text{ h}$,水位限制区间为 $[146.70, 146.95] \text{ m}$ 。由刁河节制闸实际调度过程表明,实际调控时间和闸前水位变化过程均在安全调控可行域内,本模型计算的调度方案合理,实际调度过程见图 8。

选取各节制闸上游流量变化 $65 \text{ m}^3/\text{s}$ 的工况为

例,分析水位区间-II减小水位变幅的作用,将中线节制闸的预警水位作为水位上限-I,由于中线节制闸对下限水位没有明确要求,故在此以设计水位-(预警水位-设计水位)作为水位下限-I。计算结果见图9,由图可知,以水位区间-II为水位约束,较水位区间-I约束时各闸前水位最大值减小,最小值增大,起到了水位变幅减小的作用。

3.2.3 模型运算时长

通过调用 Fortran 中的 CUP_TIME 时间函数对模型运算时间进行统计,见表6。模型最长运算时间为 8.99 s,运算速度快,可满足实际工程中流量突然切换时的调控需求。

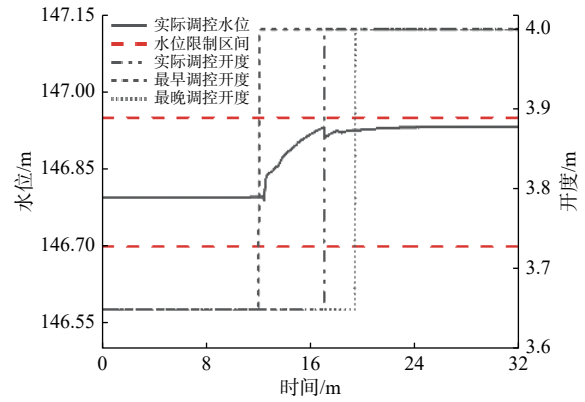


图8 JZZ1号实际调控过程

Fig. 8 JZZ#1 Actual regulatory process

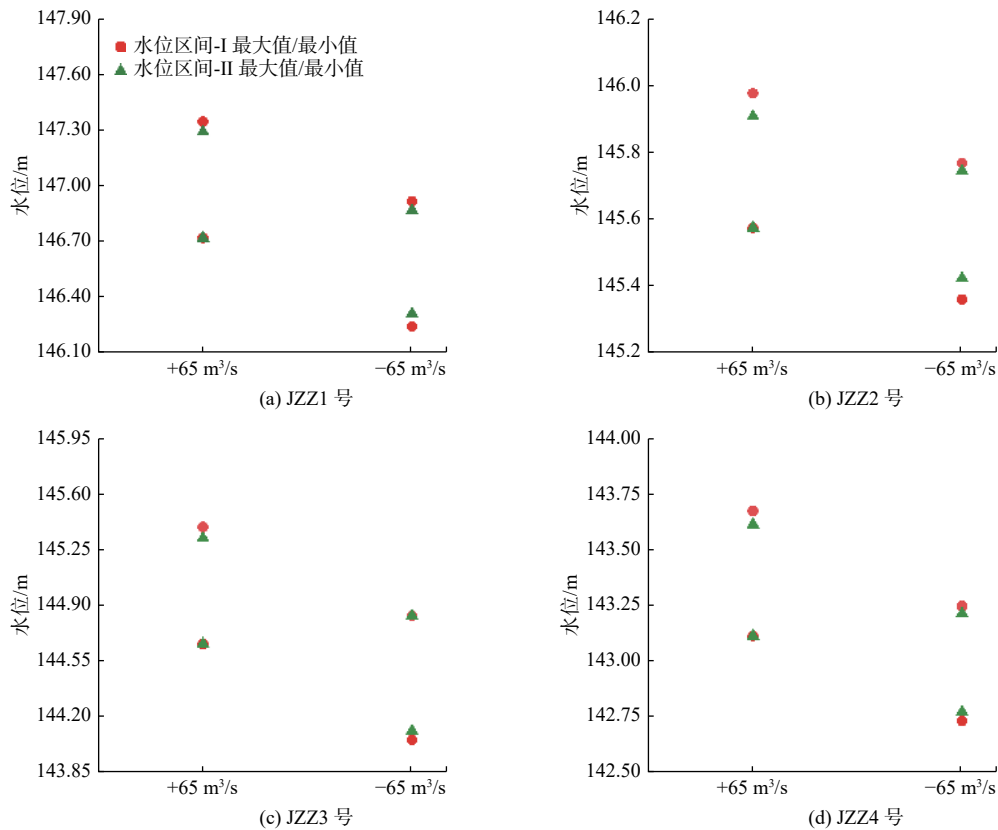


图9 各节制闸上游流量变化 65 m³/s-减小水位变幅效果

Fig. 9 Variable effect of decreasing amplitude of water level by changing 65 m³/s of upstream flow of each control gate

表6 模型各工况计算时间

Tab. 6 Calculation schedule of each working condition of the model

初始流量/(m ³ ·s ⁻¹)	流量变化量/(m ³ ·s ⁻¹)	计算时间/s			
		JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号
350 (JZZ4号为340)	+65	7.96	7.61	7.57	8.99
	+55	8.06	8.33	8.15	7.75
	+45	8.12	8.05	8.91	7.77
	+35	8.02	8.16	8.35	8.10
	+25	8.74	7.91	8.25	8.81

表 6(续)
Tab. 6 (Continued)

初始流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	流量变化量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	计算时间/s			
		JZZ1号	JZZ2号	JZZ3号	JZZ4号
	+15	7.78	8.64	8.67	7.93
	-15	8.76	8.34	7.65	8.65
	-25	8.39	8.15	8.99	7.68
	-35	8.52	7.51	8.00	8.96
	-45	8.88	7.66	8.30	7.69
	-55	8.04	8.97	7.97	8.54
	-65	8.78	7.55	8.51	8.57

4 结论

通过一维水动力模型耦合二分法建立明渠调水工程节制闸安全调控模型,实现了明渠调水工程上游流量切换时节制闸的安全调控,并以南水北调中线工程陶盆渠首至淇河节制闸 4 个节制闸开展实例研究,主要结论如下:

通过模型计算的调控方案调控后,闸前水位在安全水位区间内运行,且模型划分的水位区间-II 进行约束,水位变幅较水位区间-I 约束时减小。

模型耦合了二分法,使得安全调控可行域得到了快速计算,最长运行时间为 8.99 s。此模型可解决上游流量切换时的闸门调控问题,给出了柔性调度方案,使得调度更为灵活,面向实际工程更实用、操作性强。

在实际工程中可通过上游流量监测判断流量变化情况,计算各节制闸的调度方案,可实现多闸逐级联调的效果。

参考文献:

- [1] 张金男,周惠成,吴剑,等. 卫星遥感降雨数据在嫩江石灰窑以上流域洪水预报中的可利用性[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(6): 1093-1103. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0112.
- [2] 王超,孔令仲,朱双,等. 考虑湖泊调蓄的引江济淮工程旬水量调度方案[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1109-1116. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0109.
- [3] 陈铭瑞,靳燕国,刘爽,等. 明渠突发水污染事故段及下游应急调控[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1188-1196. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0117.
- [4] YAN P R, ZHANG Z, LEI X H, et al. A simple method for the control time of a pumping station to ensure a stable water level immediately upstream of the pumping station under a change of the discharge in an open channel[J]. *Water*, 2021, 13(3): 355. DOI: 10.3390/w13030355.
- [5] 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.
- [6] 樊甲伟,管光华,朱哲立. 鄂北调水工程长倒虹吸事故水力响应及应急调度[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(4): 795-804. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0083.
- [7] 孔令仲. 大型明渠输水工程常态控制与应急调控算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019. DOI: 10.27461/d.cnki.gzjdx.2019.002165
- [8] REDDY J M. Local Optimal control of irrigation canals[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1990, 116(5): 616-631. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:5(616).
- [9] 张成,傅旭东,王光谦. 南水北调中线工程总干渠非正常工况下的水力响应分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 33(6): 8-12, 20. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2007.06.004.
- [10] 张成,贺莉,傅旭东,等. 南水北调中线总干渠水力响应特征[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2010, 50(9): 1350-1352. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2010.09.014.
- [11] 龙岩,雷晓辉,徐国宾,等. 基于AHP-灰色定权聚类的长距离输水工程闸门应急调控方式研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(4): 184-188. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0113.
- [12] 孔令仲,王浩,雷晓辉,等. 基于线性预测控制算法

- 的明渠实时控制研究[J]. *水利学报*, 2020, 51(3): 326-334. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20190505.
- [13] OVERLOOP P, CLEMMENS A J, STRAND R J, et al. Real-time implementation of model predictive control on maricopa-stanfield irrigation and drainage district's WM Canal[J]. *Journal of Irrigation & Drainage Engineering*, 2010, 136(11): 747-756. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000256.
- [14] 王坤, 杨同春, 徐征和, 等. 多级闸门调控下徒骇河流域雨洪资源利用[J]. *南水北调与水利科技*, 2017, 15(2): 50-57. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.02.008.
- [15] ZHU J, ZHANG Z, LEI X H, et al. Optimal regulation of the cascade gates group water diversion project in a flow adjustment period[J]. *Water*. 2021, 13(20): 2825. DOI: 10.3390/w13202825. DOI: 10.3390/w13202825
- [16] 郑和震, 张召, 吴辉明, 等. 梯级泵站输水系统日优化调度及经济运行研究[J]. *水利学报*, 2016, 47(12): 1558-1565. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2015.1350.
- [17] 金思凡, 初京刚, 李昱, 等. 南水北调中线京石段冬季调度策略[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(2): 365-377. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2021.0039.
- [18] MU J B, ZHANG X F. Real-time flood forecasting method with 1-D unsteady flow model[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(2): 150-154. DOI: 10.1016/S1001-6058(07)60041-9.
- [19] 赵鸣雁, 孔令仲, 郑艳侠, 等. 串联渠池闸门同步关闭情况下关闸时间对闸前水位雍高影响[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(6): 157-163,170. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2018.0166.
- [20] 王船海, 李光炽, 向小华, 等. 实用河网水流计算[M]. 南京: 河海大学出版社, 2015.
- [21] 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(S1): 110-121. DOI: 10.16058/j.issn.1005-0930.2015.s1.012.
- [22] 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/OL]. *中国农村水利水电*: 1-15[2023-02-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20221012.1804.006.html>.
- [23] 李飞, 雷贤卿, 崔静伟, 等. 圆度误差的二分法逼近搜索评定[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(2): 20-23,5. DOI: 10.15926/j.cnki.issn1672-6871.2014.02.010.
- [24] 位文涛, 靳燕国, 张召, 等. 南水北调中线工程流量监测站点倒挂数据清洗模型及应用[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(6): 1158-1167. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2022.0114.
- [25] 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.
- [26] 孔令仲, 雷晓辉, 张召, 等. 多级串联明渠调水工程多目标水位预测控制模型研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(4): 471-482. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20210836.

Safety of control gate for open channel water transfer project based on hydrodynamic coupling

ZHANG Baohang^{1,2}, ZHANG Zhao³, LEI Xiaohui^{1,2,3}, LI Hanyuan⁴, WEI Hongyu^{1,2}

(1. College of Water Resources and Hydropower, 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; 4. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The open channel water transfer project is an important means to solve the problem of regional water shortage. However, during the operation of the project, the upstream flow changed frequently due to the variable demand for water supply along the line, resulting in complex and changeable water conditions along the line. The control gate is one of the main control buildings in the water transfer project and the water level in front of the gate is the key object of that needs the dispatcher to pay attention to. If the regulation is not proper, the water level may exceed the limit, which not only poses a threat to the safe operation of the water transfer project but also affects the

efficient water supply of the project. Therefore, it is of great significance to study the safety regulation of control gates in open channel water transfer project.

To solve the problem that the water level in front of the gate breaks and the upper and lower limits of the water level due to improper regulation during flow switching in an open channel water transfer project, the concept and transfer principle of the feasible area of safety regulation and control of the gate control system in open channel water transfer project is proposed. The control scheme of the control gate is calculated based on the dichotomy-coupled one-dimensional hydrodynamic model. The regulation opening, safe water level, and regulation time interval of the control gate are calculated during flow switching. The model can quickly calculate the control opening, safe water level, and control time interval of the control gate when the upstream flow is switched, and the feasible domain and control scheme of the control gate was obtained.

Four control gates from the first Taocha Canal to the Qi River in the Middle Route of the South-to-North Water Transfers Project were studied, and 12 working conditions were set respectively for calculation. The results showed that when the upstream flow changes, the interval regulation scheme calculated by the model could strictly control the water level within the safety water level interval, and the transfer principle of the safety water level interval played a role in reducing the amplitude of the water level. The calculation speed of the model was fast. CUP_TIME function in Fortran was called to test each working condition, and the maximum calculation time was 8.99 s.

The control scheme calculated by the model makes the scheduling more flexible and practical and can reduce the operation error of the scheduler. The calculation speed of the model can meet the regulation demand of sudden change of flow in the middle and upper reaches of the project. In the project, upstream flow monitoring can be used to judge flow changes. By calculating the scheduling scheme of each control gate, the effect of multi-gate cascades can be realized. It provides support for the dispatching decision of the water transfer project and has important significance for maintaining the smooth operation of the water transfer project.

Key words: one-dimensional hydrodynamic model; feasible domain of safety control; bisection method; control gate