

# 串联渠系多渠池蓄量平衡控制模式研究

管光华<sup>1</sup>, 李慧滢<sup>1</sup>, 苏海旺<sup>2</sup>, 桑国庆<sup>3</sup>

(1.武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2.中水北方勘测设计研究  
有限责任公司, 天津 300222; 3.济南大学 水利与环境学院, 济南 250022)

**摘要:**【目的】解决渠道控制中以单个渠段蓄量为控制对象时, 存在调蓄容量有限、相邻渠池间的蓄量变化无法相互调节的问题。【方法】提出一种等下游水深的多渠池蓄量平衡运行方式, 并建立了基于蓄量变化的闸门目标流量计算方法, 采用南水北调东线济平干渠为工程背景进行建模仿真验证。【结果】多渠池蓄量平衡模式下, 对蓄量差乘以一定权重系数能有效降低闸门流量超调、缩短稳定时间; 在正常运行工况下, 该算法较常规下游常水位控制模式对渠首水库造成的调蓄压力更小, 各无量纲性能指标整体较优, 系统稳定时间最长缩短 10 h; 考虑流量变化较大的工况时, 针对济平干渠渠池长度差异将近 10 倍现状, 发现增设节制闸减小单渠池长度后, 该算法整体稳定时间进一步减小, 各无量纲性能指标均不同程度提高。【结论】多渠池蓄量控制优于单个渠池蓄量控制, 此算法为多渠池蓄量控制的进一步研究奠定基础。

**关键词:** 渠系控制; 运行方式; 控制蓄量; 变目标水深; 南水北调东线济平干渠段

中图分类号: TV68

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019437

OSID:



管光华, 李慧滢, 苏海旺, 等. 串联渠系多渠池蓄量平衡控制模式研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(2): 84-92.

GUAN Guanghua, LI Huiying, SU Haiwang, et al. Study on the Control Mode of Storage Balance of Multi-channel Pools in Series Channel Systems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(2): 84-92.

## 0 引言

【研究意义】明渠输水是国内外调水工程和灌溉工程中被广泛使用的调水方式。实现调水工程的渠系自动化控制, 是解决智能化管理、优化配水、灵活供水及应对紧急情况的有效措施<sup>[1]</sup>。渠道的运行控制系统是控制器根据渠道水位、流量等信息, 按照一定的控制逻辑操控渠道闸门, 以达到控制渠池状态的目的。渠池响应特性研究<sup>[2-4]</sup>、模型预测控制<sup>[5-8]</sup>、神经网络<sup>[9-11]</sup>等多种方式也逐渐应用到明渠输水系统中。渠道运行控制系统的算法主要采用 PID 算法<sup>[12-14]</sup>、MPC 算法等。渠道运行方式<sup>[15]</sup>包括上游常水位、下游常水位、等体积法及控制蓄量法等, 其中控制蓄量法最为灵活, 能快速响应渠道变化, 适应性较强, 因此控制蓄量法的研究十分有意义。【研究进展】基于控制蓄量的运行方式, 多名学者结合实际渠系, 对不同的蓄量控制方式进行了研究并取得了一定的成果<sup>[16-24]</sup>。著名的中亚利桑那调水工程 (CAP) 的运行方式就是

由一般意义上的等体积运行方式发展而来的控制体积法, 数 10 年的成功运行证明该种方式可以加快渠系的反应速度, 减小时滞性<sup>[16]</sup>。姚雄等<sup>[17]</sup>初步设计了一种基于蓄量适时控制的多渠段串联仿真模型; 丁志良对姚雄的算法进行了改进<sup>[18]</sup>, 建立了一种基于闸门调节的串联渠系多渠池蓄量控制算法仿真模型; 崔巍等<sup>[19]</sup>基于闸前常水位和蓄量控制相联合的运行方式, 对南水北调中线穿黄工程关于控制蓄量运行方式进行了数值模拟和研究分析; 管光华等<sup>[20]</sup>将耦合水位差控制应用于 CAP 工程, 验证了其在长距离渠道中的优势。崔巍等<sup>[12]</sup>用蓄量偏差代替水位偏差, 动态调节渠道蓄量以实现闸前常水位运行方式; 钟镭等<sup>[21]</sup>提出了一种基于渠池蓄量平衡的闸前变目标水位算法, 实现了下游常水位和控制蓄量运行方式的转换, 减少了闸门的回调。

【切入点】多个渠池的蓄量相当于一个中小型水库的容积, 对于大型渠道系统, 其蓄量已超过大型水库的库容标准, 对其进行充分利用可以提高渠道系统调控的灵活性。对于渠池蓄量控制已有较多研究, 但是现有的研究中多以单个渠池蓄量为控制对象, 没有考虑多个渠池之间的蓄量调节, 忽略了单渠池调节的

收稿日期: 2019-12-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51979202, 51009108); 江西省水利厅科技项目 (201820ZDKT23); 湖北省水利重点科研项目 (HBSLKY201902)  
作者简介: 管光华 (1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事灌溉排水自动化及量水理论研究。E-mail: GGH@whu.edu.cn

容量有限性，并且传统意义上控制蓄量法的水位支枢点和控制点都在渠道内<sup>[15]</sup>，为日常监测和管理带来不便。【拟解决的关键问题】因此考虑多渠池蓄量较灵活的调节能力，以串联渠系多渠池的蓄量为控制对象，以多个渠池的蓄量平衡为目标，提出了一种等下游水深多渠池蓄量平衡运行方式，既保证渠道各时刻总蓄量不变，同时要求各渠池的下游目标水深一致。通过仿真软件<sup>[25]</sup>对南水北调东线济平干渠段渠道建模，进行流量增加、减少及周期性变化 3 种工况的仿真计算，并与常规下游常水位<sup>[26]</sup>的

控制效果进行对比分析。

## 1 多渠池蓄量平衡算法

多渠池蓄量平衡，即渠道在正常运行过程中的任意时刻，都能保持相对稳定的蓄水量。其以渠池的蓄量为基础，通过调节各渠池的进、出口流量，修正渠池实际蓄水量与目标蓄水量的偏差。此时目标蓄量是根据某种规则或需求由控制中心求出，实际蓄量由水深及断面尺寸等数据计算得到。

多渠池蓄量平衡调节算法示意如图 1 所示。

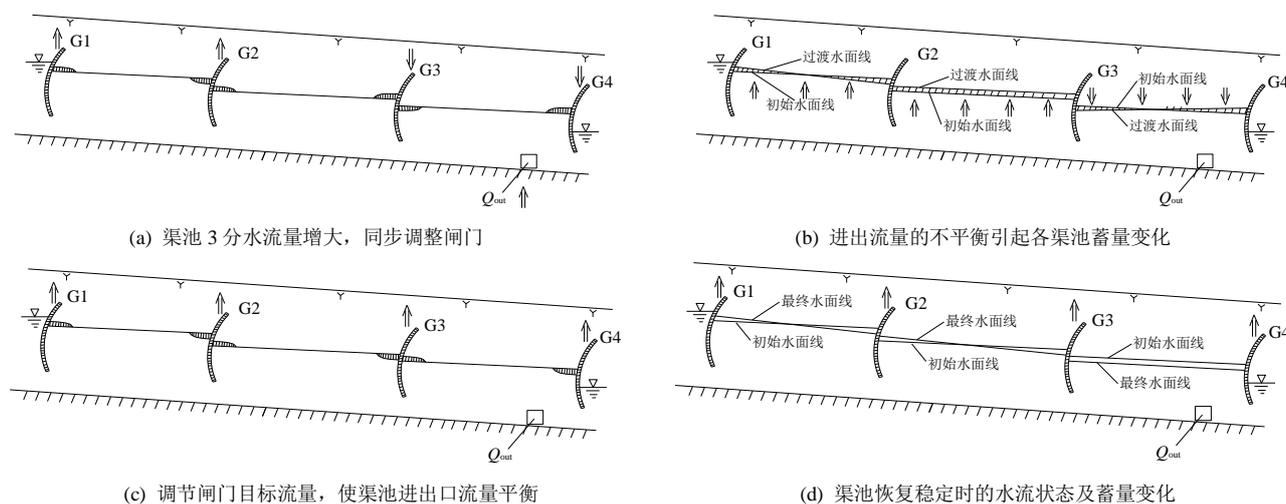


图 1 多渠池蓄量平衡调节算法示意

Fig.1 Schematic diagram of multi channel pool storage balance regulation algorithm

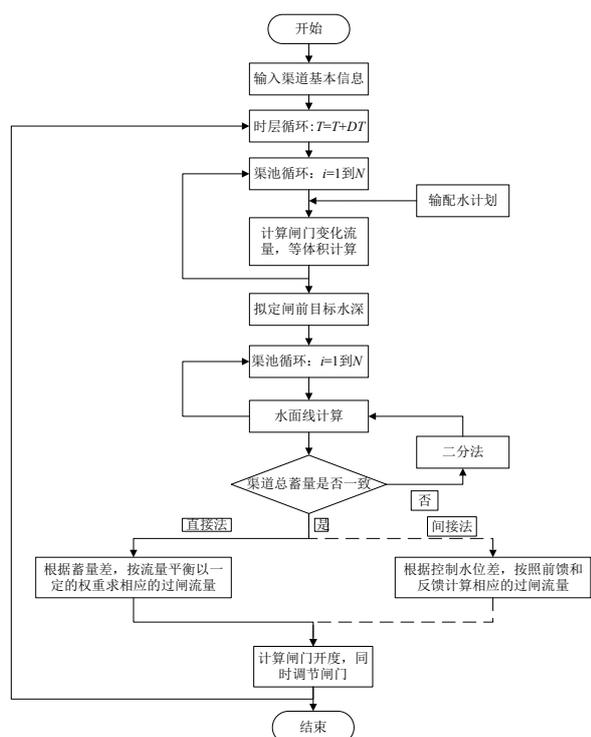


图 2 多渠池蓄量平衡控制模式流程

Fig.2 Flow chart of multi channel pool storage balance control mode

这种串联渠道的多渠池蓄量平衡等下游水深运行方式的核心在于：一是保证任意时刻渠道总蓄水量相对稳定；二是保证目标流量下各个渠池的闸前目标水深相等。另外，为使渠道有较好的鲁棒性，该运行方式下每小时调节 1 次闸门。这种运行方式的关键在于求目标流量下的闸前目标水深。

控制蓄量运行时会导致上、下游水位的波动，为保证渠系能够安全稳定的运行，进行以下约束：①渠系系统的各个渠段是串联的，相邻渠段通过节制闸连接，且节制闸为各渠段中除分水口外进出流量的控制点；②为防止水位降速过快，导致渠道的衬砌破坏，渠道中水位降速不得超过允许值，现有文献中一般采用 0.15 m/h 和 0.3 m/d<sup>[29]</sup>；③为防止运行过程中渠系漫顶，渠道中水位不能超过加大水位。

该算法的具体设计见如图 2。

### 1.1 确定闸前目标水深

#### 1.1.1 渠池蓄量和等体积下游水深计算

首先根据渠池的过流断面水深和断面尺寸，可求出渠池初始蓄水量  $V_0$ 。其次对于特定的、流态为缓流的渠段，在沿程流量和渠池蓄量固定的情况下，渠段的下游水深是定值，故可根据渠段变化后的流量试算

出等体积下的下游水深, 根据恒定流水面线计算式即可求出等体积运行下的水面线, 下游水位由下游水深加渠底高程可得。

### 1.1.2 闸前目标水深计算

根据已计算出的等体积下游水深缩小试算范围, 按照二分法试求各个水深对应的蓄量, 当蓄量总和与初始总蓄量相同或者差值在某一精度范围内, 即可认为此时的水深就是所要求的目标水深。

令各渠池等体积计算后的下游水深为  $H_{d\_t}(i)$ , 目标水深为  $H_{d\_T}$ , 目标蓄量为  $V_{i,t\_target}$ , 定义水深变量  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ :

$$\begin{aligned} H_1 &= \min(H_{d\_t}(i)), \\ H_2 &= \max(H_{d\_t}(i)), \\ H_3 &= (H_1 + H_2) / 2. \end{aligned} \quad (1)$$

求目标水深为  $H_3$  时各渠池的蓄量  $V(i)$ , 并与初始时刻的蓄量  $V_0(i)$  比较:

$$\text{若 } \sum_1^n V(i) < \sum_1^n V_0(i), \text{ 令 } H_1 = H_3, \quad (2)$$

若  $\sum_1^n V(i) > \sum_1^n V_0(i)$ , 令  $H_2 = H_3$ 。

循环计算, 直到试算蓄量总和与初始蓄量总和的差的绝对值在所要求的精度范围内, 即:

$$|\sum_1^n V(i) - \sum_1^n V_0(i)| < M. \quad (3)$$

此时  $H_{d\_t} = H_3$ ,  $V_{i,t\_target} = V(i)$ 。其中  $M$  为控制精度, 当  $M$  较小时, 即要求的控制精度较高时, 计算需要的循环次数较大, 当  $M$  较大时, 即要求的控制精度较低时, 试算蓄量综合与初始蓄量总和相差过大, 不能保证各个渠池闸前目标水深是完全一致的, 以通过试算, 本渠道模型中  $M$  取为  $100 \text{ m}^3$ 。

### 1.2 确定闸门的流量

该方式下的流量变化可分为 2 个阶段: 调整渠池间的蓄量和恢复渠池的进出口流量平衡。若规定渠道中的渠池按上游至下游方向依次编号为  $1, 2, \dots, i, \dots, n$ , 渠首进口闸门流量  $Q_1$  和沿程各闸门的过流流量变化量  $\Delta Q_i$  可按式 (4) 计算:

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{\text{down}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{out}}(i) \\ \Delta Q_n &= \frac{\Delta V_n}{3600} + Q_{\text{out}}(n) + Q_{\text{down}}, \\ \Delta Q_i &= \frac{\Delta V_i}{3600} + \Delta Q_{i+1} + Q_{\text{out}}(i), \quad 2 \leq i < n \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\Delta Q_n$  为最下游闸门  $n$  的过流流量变化量;  $Q_{\text{out}}(i)$  为渠池  $i$  的分水口流量;  $Q_{\text{down}}$  为渠池最下游的出口流量;  $\Delta V_i$  为渠池  $i$  的蓄量差。

为避免蓄量的过度调整, 快速调节蓄量至目标蓄量, 对蓄量差乘权重系数  $\theta$ , 即:

$$\Delta V_i = (V_{i,t} - V_{i,t\_target}) \times \theta. \quad (5)$$

以济平干渠渠道为仿真渠段, 充分考虑系统性能与系统稳定时间,  $\theta \approx 0.538$  最优。

### 1.3 计算闸门开度

闸门开度可通过过流公式反算得到。文中采用亚利桑那调水工程 (CAP) 过流公式:

$$Q = \mu b e \sqrt{2g(y_u - y_d) + \frac{Q^2}{A_u^2}}, \quad (6)$$

式中:  $y_u$  为闸门上游 (m);  $y_d$  为下游水深 (m);  $A_u$  为闸前过水断面面积 ( $\text{m}^2$ );  $\mu$  为流量系数, 数值根据水流状态的不同会有一些的变化, 需通过水力试验或现场测试确定。美国 ASCE 协会于 2002 年成立了专门的渠道闸门流量测量委员会, 专门就闸门测流及其率定方面的问题开展研究<sup>[27]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 工程背景

南水北调东线济平干渠段, 是向胶东输水的首段渠道。济平干渠共有 1 座渠首引水闸、3 座节制闸, 可将渠道分成 4 个渠池 (图 3, 图中  $Q_u$  为渠池入池流量,  $Q_d$  为渠池出池流量), 渠道具体参数见表 1。该渠道是从东平湖取水, 计算时近似认为引水闸的动作不影响闸前水深, 以此作为渠系的上游边界条件; 渠道末端接入小清河, 以下游流量需求作为下游边界条件。

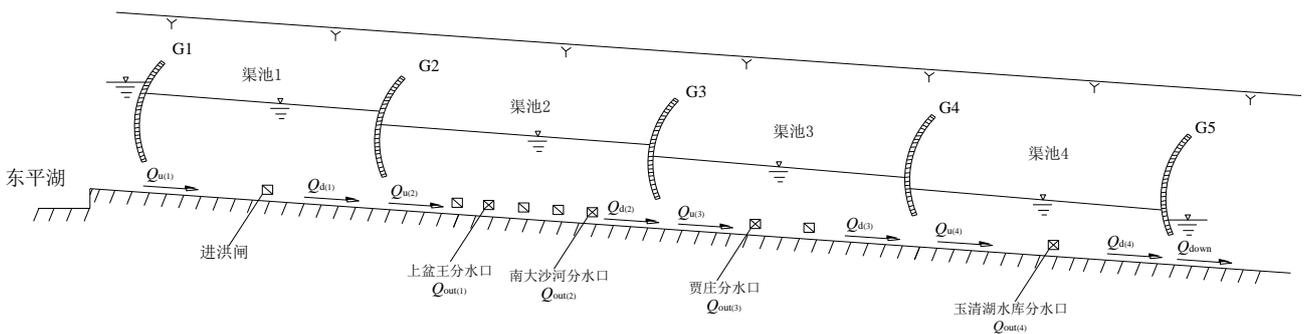


图 3 济平干渠渠道建模示意

Fig.3 Jiping main channel modeling diagram

表 1 济平干渠各渠段整体参数

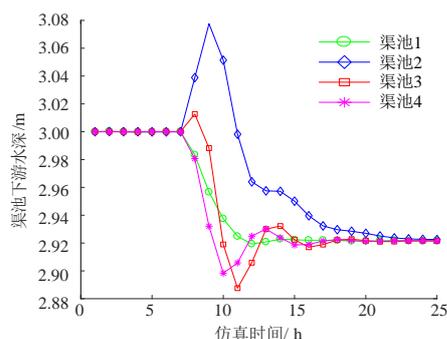
Table 1 Overall parameter table of each canal

section of Jiping main canal						
渠池序号	子渠段数	长度/m	设计水深/m	设计流量/ ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	渠底高程/m	
					$Z_u$ 上端	$Z_d$ 下端
1	11	24 312	3	50	36.1	33.76
2	18	45 184	3	50	33.66	28.95
3	4	12 125	3	50	28.85	27.47
4	2	4 905	3	50	26.87	26.54

## 2.2 多渠池蓄量平衡算法仿真验证

### 2.2.1 $\theta$ 合理性验证

对渠池 2 做以下工况设计：初始末端流量  $30 \text{ m}^3/\text{s}$ ，



(a) 不考虑权重系数

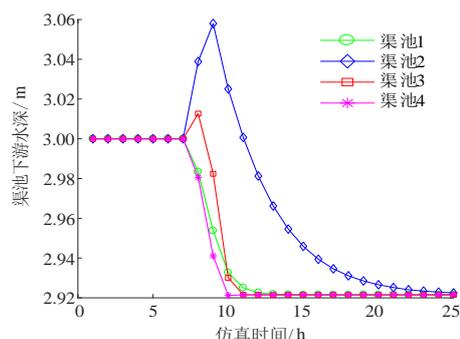
南大沙河分水口流量在 6~8 h 内由  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  增到设计流量  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，时间步长 1 h，仿真时间 24 h，初始闸前水深为设计水深 3 m。

1) 考虑下游流量变化，不考虑蓄量叠加

流量变化从下游向上游计算，但不考虑  $t_1$  时刻的流量变化引起  $t_{1+1}$  时刻的蓄量变化。计算式为式 (1) 和式 (2)。渠池下游水深变化见图 4 (a)。

2) 同时考虑下游流量变化和蓄量叠加

流量变化也从下游向上游计算，但考虑  $t_1$  和  $t_{1+1}$  时刻间的蓄量叠加，主要变化是对蓄量差乘了权重系数。计算式为式 (1)、式 (2) 和式 (3)。 $\theta$  取值为 0.538。渠池下游水深变化见图 4 (b)。



(b) 考虑权重系数

图 4 渠池下游水深变化过程

Fig.4 Change process of water depth in the downstream of channel pool

通过添加权重系数，使得渠道分水时刻的前一个小时的流量变化所引起的该时刻的蓄量变化也被考虑进去了，由图 4 可知，系统的超调量有所降低，渠池的振荡情况有所减弱，且能快速调整渠池蓄量，表明权重系数的加入能够使得渠道系统性能变好。特别说明，本文之后的仿真过程中均考虑权重系数。

### 2.2.2 多种工况设置

在工程的实际应用中，用户的用水需求是灵活多变的，所以在本次仿真中，以需水流量的增大、减小以及周期性变化来模拟现实工况。根据渠道沿程分水口流量的变化，主要分为以下 3 种工况：

工况一：需水流量增加。初始玉清湖水库分水口流量  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，上盆王分水口流量  $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ ；5 h 开始变化，最终玉清湖水库分水口  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，上盆王分水口为设计流量  $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ ，变化时间为 1 h。

工况二：需水流量减少。初始玉清湖水库分水口流量  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ，南大沙河分水口流量  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ；5 h 时开始变化，最终玉清湖水库分水口  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，南大沙河分水口  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ 。变化时间均为 1 h。

工况三：需水流量周期性变化。玉清湖水库分水口分出的流量是向玉清湖水库补给，考虑到玉清湖水库的水量调节情况，设置的流量变化工况为：玉清湖

水库分水口初始流量  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ，2 h 时开始变化，先在 2 h 内增至设计流量  $9 \text{ m}^3/\text{s}$ ，维持 4 h 不变后又在 2 h 内减小为  $3 \text{ m}^3/\text{s}$ ，同样保持 4 h 不变后在 2 h 内恢复至初始状态  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

各工况的末端出流均为设计流量的 40%，即  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ ；各渠池起始下游水深均为设计水深 3.0 m，初始条件均为下游常水位运行下流量未发生改变的恒定流状态，时间步长均为 1 h，未考虑闸门死区、水位死区以及闸门控制精度的影响；为充分分析等下游水深的多渠池蓄量平衡运行方式的特点，同时进行常规下游常水位仿真分析。本文采取管光华等<sup>[28]</sup>提出的无量纲性能指标来反映渠道运行控制效果，无量纲性能指标包括了最大绝对误差 (MAE)、无量纲化水位误差平方积分 (NISE)、无量纲化绝对流量变化积分 (NIAQ)、无量纲化绝对闸门开度积分 (NIAW) 以及渠池稳定时间 (ST)。

### 2.2.3 多种工况仿真分析

分别应用等下游水深多渠池蓄量平衡运行方式和常规下游常水位运行方式，对济平干渠针对不同工况进行仿真计算。经整理后各控制性能指标如图 5 所示，其中 x 轴用  $i-j$  描述， $i$  为工况， $j$  为方法 (1 表示多渠池蓄量平衡模式，2 表示常规下游常水位)，如

1-2 表示工况一下的常规下游常水位运行。因渠池 2 渠段最长, 问题最突出, 可选为典型渠池分析, 经整

理, 其统计性能指标如表 2 所示。

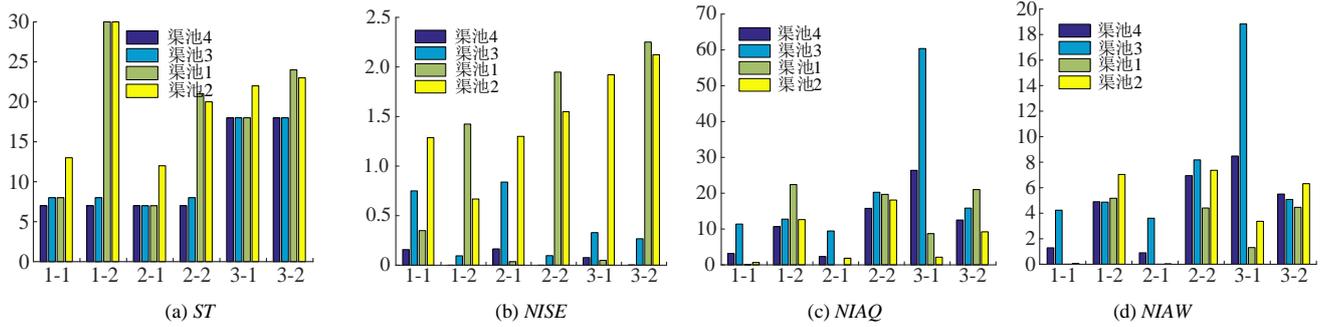


图 5 各工况各方法下不同渠池的无量纲性能指标

Fig.5 Dimensionless performance indexes of different channels and pools under different working conditions and methods

表 2 不同运行方式不同工况下渠池 2 的无量纲性能指标统计

Table 2 Statistics table of dimensionless performance indexes of channel pool 2 under different operation modes and working conditions

工况	运行方式	MAE	NISE/10 <sup>-3</sup>	NIAQ/10 <sup>-3</sup>	NIAW/10 <sup>-3</sup>	ST/h
工况一	多渠池蓄量平衡	0.059	1.286	0.671	0.06	13
	常规下游常水位	0.051	0.668	12.646	7.04	30
工况二	多渠池蓄量平衡	0.051	1.300	1.853	0.03	12
	常规下游常水位	0.047	1.548	18.103	7.37	20
工况三	多渠池蓄量平衡	0.055	1.921	2.145	3.368	22
	常规下游常水位	0.047	2.123	9.229	6.316	23

1) 各工况下即使渠池 2 有明显的水位滞后, 多渠池蓄量平衡运行方式依然显著优于常规的下游客水位运行; 2 种控制模型下水位指标 MAE 和 NISE 都较小, 说明对水位的控制效果较好; 在渠池 1、渠池 2 中, 多渠池蓄量平衡运行方式下的辅助指标 NIAQ 和 NIAW 优于常规的下游客水位运行, 但在渠池 3、渠池 4 中下游常水位运行方式稍优于多渠池蓄量平衡运行方式, 这是因为渠段 4 的流量变化接近首端, 下游水深并未改变, 使得在下游常水位运行下渠池 4 水位基本不变化, 而多渠池蓄量平衡运行方式同时调整所有渠池, 且闸门 3 处的流量变幅相对更大。

2) 正常情况下多渠池蓄量平衡运行方式的各时刻渠道总蓄量是相对恒定的, 在渠首只反映流量变化的量, 而下游常水位运行时还须反映各渠池蓄量的改变量, 一定程度上增加了对渠首的调蓄压力, 降低了运行的灵活性。

3) 多渠池蓄量平衡算法的下游目标水深变化与流量变化相反, 且下游水深的变幅相对较大, 需重点控制。渠池 2 下游水深的滞后性导致了渠池 3 的闸门调节明显增多 (NIAW 增大), 为使各渠池性能指标更优, 有必要针对渠池 2 做进一步的研究。

### 2.3 针对特长渠池的算法优化研究

为比较影响, 现考虑特大流量变化, 即多渠池蓄量平衡算法在济平干渠渠道上的计算极限 (下游目标

水深与初始水深的差值接近 0.3 m)。具体工况设计如下: 初始仅有玉清湖水库分水口流量 3 m<sup>3</sup>/s, 约为设计流量的 33%; 5 h 开始变化, 最终玉清湖水库分水口 6 m<sup>3</sup>/s, 约为设计流量的 67%; 贾庄分水口和南大沙河分水口均为设计流量的 50%, 分别为 1.7 m<sup>3</sup>/s 和 1.5 m<sup>3</sup>/s, 变化时间 3 h。

#### 2.3.1 调节时间与调节量改变分析

渠池 2 的水深变化滞后, 可能是因为渠池 3、渠池 4 的蓄量变化集中在闸门 3 处反映, 导致相对较大的流量变幅, 现对闸门的目标流量变化量的计算式调整为:

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta V_i}{3600 \times m} + \Delta Q_{i+1}, \quad i \geq 2. \quad (7)$$

仿真结果如图 6 所示, 随 m 的增大蓄量的变幅开始减小, 渠池 2 下游水深的超调开始减小, 但变化的滞后性并没有改变, 稳定时的时间并没有变, 相反渠池 3、渠池 4 的稳定时间成倍延长了。

#### 2.3.2 节制闸增加效果分析

考虑到济平干渠各渠池长度差异较大 (上游至下游长度比值为 5 : 9 : 2.5 : 1), 渠池 2 长度超过 45 km, 故作以下 2 种变化:

1) 变化 1: 将渠池 2 分为 2 个子渠池, 在东风干渠倒虹吸处添加节制闸 (从上游至下游长度比为 5 : 4.4 : 4.9 : 2.5 : 1), 整个渠段由原来的 4 个渠池

变为 5 个渠池。

2) 变化 2: 将渠池 1 分为 2 个子渠池, 渠池 2 分为 4 个子渠池。在渠池 1 的浪溪河倒虹吸处、渠池 2 的安滦河倒虹吸、东风干渠倒虹吸、司庄进洪闸处分别添加闸门(从上游至下游长度比为 2 : 2.9 : 2.4 : 1.9 : 2.8 : 2 : 2.5 : 1), 整个渠段由原来的 4 个渠池变为 8 个渠池。

仿真结果见图 6, 选取各变化下原渠池 2 的最不性能指标结果汇总表 3。

表 3 原渠池 2 最不性能指标统计

Table 3 Statistics table of the worst performance indexes of the original channel pool 2

工况	性能指标			
	MAE	$NIAW/10^{-3}$	$NIAQ/10^{-3}$	ST/h
未改变	0.131	7.417	14.721	18
变化 1	0.067	5.251	13.610	11
变化 2	0.022	2.959	11.632	9

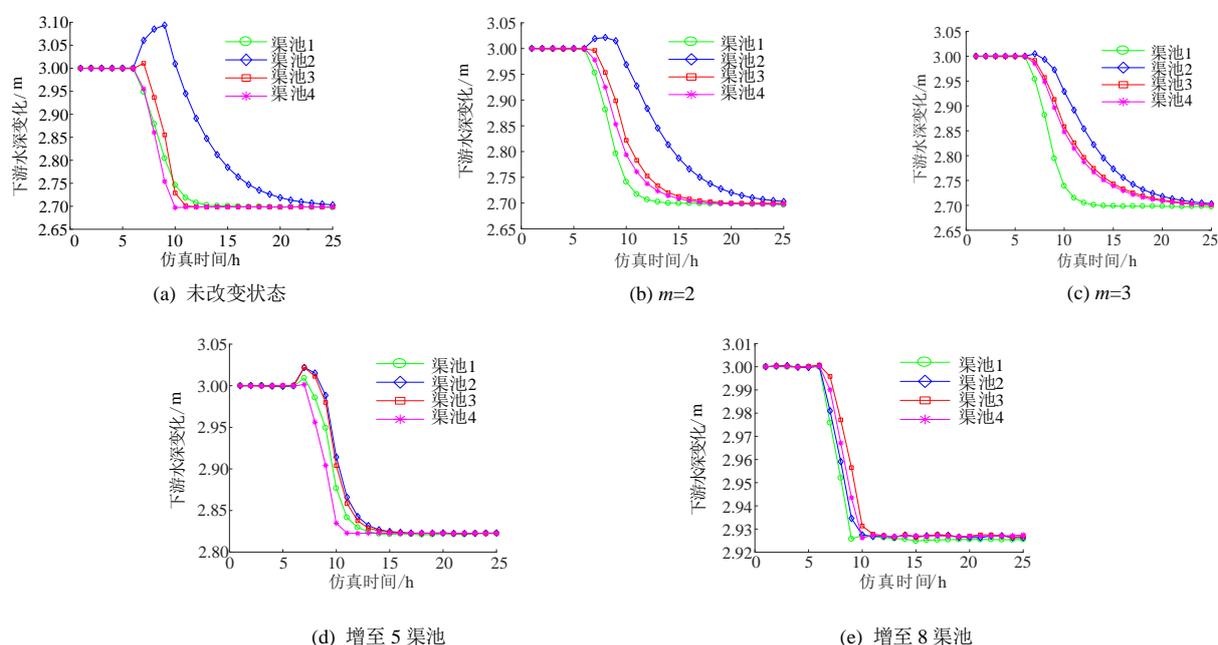


图 6 各变化下各渠池下游水深变化过程

Fig.6 Change process of water depth downstream of each channel pool under each change

### 3 讨论

在现有运行方式中控制蓄量法灵活性高、适应性强<sup>[17]</sup>, 但是国内外关于蓄量控制方面的研究相对较少, 且多以单个渠池的蓄量为控制对象, 没有考虑到相邻渠池间蓄量变化的相互补充能力, 调蓄容量较为有限<sup>[12,19,21]</sup>。本研究在前人研究的基础上从直接法的角度出发, 以多渠池的蓄量为控制对象, 充分考虑相邻渠池间的蓄量补充作用, 对串联渠道的多渠池蓄量平衡运行方式进行了探索研究, 证实了多渠池

1) 同种工况下, 减少渠池长度后, 各渠池的蓄量改变量明显减少, 未改变渠池数前蓄量最大变化为 7.28 万  $m^3$ , 变化 1 中将渠池 2 划为 2 个渠池后蓄量最大变化骤降为 3.03 万  $m^3$ , 变化 2 中变为 8 个渠池后蓄量最大变化仅为 1.58 万  $m^3$ , 随渠池长度的减小, 各渠池的蓄量变化更为均匀, 闸门处的流量变幅更小, 下游水深变化的滞后性显著改善。

2) 随渠池长度的减小, 所有性能均成倍提升: 整体稳定时间大幅度减少, 从 4 个渠池的 18 h 初稳定到 5 个渠池的 11 h 初, 再到 8 个渠池的 9 h 初; 水位性能指标 MAE 和 NISE 也显著降低, 对水位的控制效果更好; NIAQ 值也显著下降, 原始渠道的最大值为  $14.721 \times 10^{-3}$ , 变为 5 个渠池后减小到  $13.610 \times 10^{-3}$ , 而 8 个渠池时仅为  $11.632 \times 10^{-3}$ 。

3) 同工况下原始渠道的目标水深为 2.70 m, 变为 5 个渠池后目标水深增为 2.82 m, 8 个渠池后目标水深达到 2.93 m, 水位变幅的减小使渠池可接受的流量变化范围更大。

蓄量调节的优势。

1) 本研究中设定的各渠池的下游目标水深是近乎完全相等的, 但是在仿真中发现, 仅调节渠池 1、渠池 2 要比调节整个渠道的效果优, 而降低各渠池的蓄量变化量能有效提升控制性能。以渠池蓄量变化量为优化目标来优化下游目标水深, 可在今后进一步探讨。

2) 济平干渠有多处进洪闸, 若遇紧急情况, 可由多渠池蓄量平衡模式过渡到下游常水位运行, 增大渠池蓄水量, 缓解洪水压力, 故以后可就不同运行策

略的多种运行方式转换做进一步的研究。

## 4 结论

1) 提出了一种串联渠系多渠池蓄量平衡控制模式, 此控制模式考虑了相邻渠池间的蓄量补充, 具有保证渠道各时刻总蓄量不变的同时使各渠池的下游目标水深一致的特点, 其原理具有简单、快速、鲁棒性好、水位变幅小等优点, 适用于我国灌区的渠系运行调度及输配水工程的运行管理。

2) 多渠池蓄量平衡算法可以使渠池快速恢复稳定; 减少渠首水库的调蓄压力; 各无量纲性能指标整体较优; 该种运行方式下目标水深变化方向与流量变化方向相反, 下游水深变幅相对较大, 实际运行中应注意水位降幅。

3) 根据蓄量变化计算闸门目标流量变化时, 对蓄量差乘以一定权重系数能有效降低流量超调, 减少稳定时间。

4) 针对含有特长渠池的渠道系统, 本文应用了改善各渠池长度差异性的方法, 将原渠池 2 分为 2 个子渠池后下游水深变化的滞后性显著改善, 渠道的整体稳定时间大幅度减小; 各无量纲性能指标均不同程度的提高; 下游实际水深和目标水深的差值减小, 使渠道能适应更大的流量范围; 若进一步缩小渠池间长度的差异性, 所有指标均又显著提升, 下游水深变幅亦相对减小。

### 参考文献:

- [1] 美国内务部垦务局. 现代灌区自动化管理技术实用手册[M]. 高占义, 等译. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] VAN OVERLOOP P J, MILTENBURG I J, BOMBOIS X, et al. Identification of resonance waves in open water channels[J]. *Control Engineering Practice*, 2010, 18(8): 863-872.
- [3] BELAUD G, LITRICO X, CLEMMENS A J. Response time of a canal pool for scheduled water delivery[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2013, 139(4): 300-308.
- [4] 李抗彬, 沈冰, 李智录, 等. 基于非恒定水流模拟的灌区明渠水力响应特征分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(10): 107-114.  
LI Kangbin, SHEN Bing, LI Zhilu, et al. Open channel hydraulic response characteristics in irrigation area based on unsteady flow simulation analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(10): 107-114.
- [5] AYDIN B E, VAN OVERLOOP P J, RUTTEN M, et al. Offset-free model predictive control of an open water channel based on moving horizon estimation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*,

2017, 143(3): B4016005. DOI:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0001085.

- [6] HORVÁTH K, GALVIS E, VALENTÍN M G, et al. New offset-free method for model predictive control of open channels[J]. *Control Engineering Practice*, 2015, 41: 13-25.
- [7] VAN OVERLOOP P J, HORVÁTH K, EKIN AYDIN B. Model predictive control based on an integrator resonance model applied to an open water channel[J]. *Control Engineering Practice*, 2014, 27: 54-60.
- [8] TIAN X, AYDIN B E, NEGENBORN R R, et al. Model predictive control for water level control in the case of spills[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2017, 143(3): B4016006.
- [9] 韩延成, 高学平. 基于 RBF 人工神经网络的下游常水位自适应渠道输水控制研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(8): 202-206.  
HAN Yancheng, GAO Xueping. Research of self-adapting canal downstream constant level control based on RBF neural network[J]. *Journal of Northwest a & F University (Natural Science Edition)*, 2007, 35(8): 202-206.
- [10] 韩延成, 高学平, 涂向阳, 等. 基于 CMAC 神经网络的自适应渠道输水自动控制研究[J]. *灌溉排水学报*, 2007, 26(2): 76-79.  
HAN Yancheng, GAO Xueping, TU Xiangyang, et al. Self-adapting canal automation control method based on CMAC neural network[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2007, 26(2): 76-79.
- [11] 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 Xinjian, JIANG Zhaoxiong, YANG Fang. Neural control of channel operation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(1): 114-118.
- [12] 崔巍, 陈文学, 穆祥鹏. 长距离明渠调水工程蓄量动态调节控制算法研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2015, 13(6): 421-427.  
CUI Wei, CHEN Wenxue, MU Xiangpeng. Dynamic regulation algorithm of volumes for long distance water Division canal[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2015, 13(6): 421-427.
- [13] 黄凯, 管光华, 刘大志, 等. 串联渠系 PID 改进积分与微分环节仿真研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(2): 1-11.  
HUANG Kai, GUAN Guanghua, LIU Dazhi, et al. Simulation for PID controller of modified integral and differential on tandem canal system[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2017, 36(2): 1-11.
- [14] 范杰, 王长德, 崔巍, 等. 渠道运行系统中的模糊 PID 联合控制研究[J]. *灌溉排水学报*, 2003, 22(4): 59-62.  
FAN Jie, WANG Changde, CUI Wei, et al. Fuzzy-PID combined control strategy for canal operation system[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2003, 22(4): 59-62.

- [15] 吴保生, 尚毅梓, 崔兴华, 等. 渠道自动化控制系统及其运行设计[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 746-755.  
WU Baosheng, SHANG Yizi, CUI Xinghua, et al. Automatic canal control system and its operation and design[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 746-755.
- [16] 王长德. 美国中亚利桑那调水工程[N]. 中国水利报, 2007-03-09.  
WANG Changde. The Central Arizona project [N]. China Water Conservancy News, 2007-03-09.
- [17] 姚雄, 王长德, 李长菁. 基于控制蓄量的渠系运行控制方式[J]. 水利学报, 2008, 39(6): 733-738.  
YAO Xiong, WANG Changde, LI Changjing. Operation mode of serial canal system based on water volume control method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(6): 733-738.
- [18] DING Zhiliang, WANG Changde, TAN Guangming, et al. Operation mode of canal system based on water volume control method[C]// Measuring Technology and Mechatronics Automation, International Conference on. IEEE, 2009: 823-827.
- [19] 崔巍, 姚雄, 陈文学, 等. 南水北调中线穿黄工程控制蓄量运行方式研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 85-91.  
CUI Wei, YAO Xiong, CHEN Wenxue, et al. Controlled-storage operation of canal crossing Yellow River of South-to-North Water Transfer Project[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 85-91.
- [20] GUAN G, CLEMMENS A J, KACERER T F, et al. Applying water-level difference control to central Arizona project[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2011, 137(12): 747-753.
- [21] 钟铎, 管光华, 廖文俊, 等. 基于渠池蓄量平衡的闸前变目标水位算法[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(9): 857-862.  
ZHONG Ke, GUAN Guanghua, LIAO Wenjun, et al. Algorithm with variable downstream target depth based on balance of water volume in canal pond[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(9): 857-862.
- [22] 管光华, 廖文俊, 毛中豪, 等. 渠系前馈蓄量补偿控制时滞参数算法比较与改进[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 72-80.  
GUAN Guanghua, LIAO Wenjun, MAO Zhonghao, et al. Comparison and improvement of time delay parameter algorithm for feedforward volume compensation control in canal system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(24): 72-80.
- [23] 管光华, 廖文俊, 毛中豪, 等. 大型输水渠系蓄量非叠加非充分补偿优化算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 60-66.  
GUAN Guanghua, LIAO Wenjun, MAO Zhonghao, et al. Optimization algorithm for non-superimposed inadequate volume compensation in large-scale water conveyance canal system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2019, 47(9): 60-66.
- [24] 李臣明, 赵丽华, 吴学文, 等. 基于水位、流量预测信息的水闸群调节方法[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(3): 70-74.  
LI Chenming, ZHAO Lihua, WU Xuewen, et al. Adjust methods of floodgates based on flow forecast information[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(3): 70-74.
- [25] 武汉大学. 输水渠道系统运行仿真与控制软件 V1.0: 中国, 2011SR034392[P]. 2011-06-03.
- [26] 尚毅梓, 吴保生, 李铁键, 等. 闸前常水位输水渠道的运行过程调控[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(12): 1 915-1 919.  
SHANG Yizi, WU Baosheng, LI Tiejian, et al. Operational control for canal flow to maintain constant downstream depth[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2010, 50(12): 1 915-1 919.
- [27] CLEMMENS A J, STRELKOFF T S, REPLOGLE J A. Calibration of submerged radial gates[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(9): 680-687.
- [28] 管光华, 钟铎, 廖文俊, 等. 基于无量纲性能指标的渠系控制器参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 90-99.  
GUAN Guanghua, ZHONG Ke, LIAO Wenjun, et al. Optimization of controller parameters based on nondimensional performance indicators for canal systems[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(7): 90-99.
- [29] 崔巍, 陈文学, 穆祥鹏, 等. 明渠运行前馈控制改进蓄量补偿算法研究[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(3): 12-17.  
CUI Wei, CHEN Wenxue, MU Xiangpeng, et al. Revised volume-compensation algorithm for feedforward control of canal[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(3): 12-17.

## Study on the Control Mode of Storage Balance of Multi-channel Pools in Series Channel Systems

GUAN Guanghua<sup>1</sup>, LI Huiying<sup>1</sup>, SU Haiwang<sup>2</sup>, SANG Guoqing<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072, China;

2. Beifang Investigation, Design & Research CO.LTD, Tianjin 300222, China;

3. School of Water Conservancy and Environment, Ji'nan 250022, China)

**Abstract:** **【Background】** Open channels have been widely used to transfer water in many projects. Automatically controlling them is a prerequisite in realizing intelligent management, optimizing water distribution, and achieving flexible water supply in emergency. Traditional automatic control systems normally use water level, flow rate, or storage pool as objective to control the channel operation based on some logic analysis. Existing control operation modes include keeping the upstream and downstream water levels constant, equal-volume method and control-volume method, with the control-volume method being most flexible and able to quickly respond to any changes. The disadvantage of the control-volume method is that it only uses the volume of a single channel section as its control objective. Therefore, its storage capacity is limited, and it cannot complement adjacent channels.

**【Objective】** The objective of this paper is to resolve the inferiorities of the control-volume method, including limited storage capacity, inability to adjust the changes in the storage capacity between adjacent channels when using the storage capacity of a single section as the control objective. **【Method】** The proposed method was based on the balanced operation mode of multi-channel pool storage capacity with equal downstream water depth. We established a robust and easy-to-implement model to calculate the gate target flow based on the change in storage capacity, which not only keeps the total storage capacity of the channel unchanged, but also makes the downstream target water depth in each channel pool consistent. As a validation and verification, we applied the model to Jiping main canal on the east route of the south-north water transfer project. **【Result】** In the multi-channel pool storage balance mode, multiplying the storage difference by a weight coefficient can effectively reduce the gate flow overshoot and shorten the time it takes the system to stabilize. Under normal operating conditions, the regulation pressure on the head reservoir in the canal calculated by the proposed method was lower than that calculated by the conventional downstream constant water level control mode. Overall, the proposed method improved all dimensionless performance indexes, with the system stabilization time reduced by up to 10 hours. Considering that the difference in pool lengths in a canal could be more than 10 times, it is found that when there are large flow changes, adding a control gate to reduce the length of a single pool can further reduce the overall stabilization time and improve all dimensionless performance indexes. **【Conclusion】** Multi-channel pool storage control works better than the single channel pool storage control system, and the method we proposed lays a foundation for its further study and improvement.

**Key words:** canal control; operation mode; water volume control; variable control water depth; the Jiping canal of the east route of the South-to-North water transfer project

责任编辑: 白芳芳