

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2015.04.040

南水北调中线渠系蓄量补偿运行控制方式

吴辉明^{1,2}, 雷晓辉², 秦 韬², 许 浩^{1,2}, 王 浩²

(1. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 南水北调中线渠系采用闸前常水位的运行方式, 即渠道下游常水位运行方式的水位控制点位于下游渠道的节制闸闸前。采用下游常水位运行方式, 有利于按照最大过水流量进行渠道设计, 使得渠道的超高最小, 从而施工成本最少。在分析闸前常水位运行方式的响应与恢复特性、蓄量补偿时间的基础上, 提出了闸前常水位运行控制方式, 并设计了蓄量补偿的前馈控制策略和水位流量串级的水位反馈控制器。以南水北调中线总干渠的部分渠道为研究对象, 在典型工况下进行运行控制仿真, 并把计算结果与流量主动补偿和常规下游常水位运行控制进行对比, 从而验证了本文闸前常水位运行控制算法的合理性。

关键词: 南水北调中线; 下游常水位; 蓄量补偿; 流量主动补偿

中图分类号: TV 122.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)04-0788-05

Operation control of storage compensation of canal system in the Middle Route of South to North Water Diversion Project

WU Huiming^{1,2}, LEI Xiaohui², QIN Tao², XU Hao^{1,2}, WANG Hao²

(1. Institute of architecture and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The canal system in the Middle Route of the South to North Water Diversion project has the operation mode of constant water level before the sluice gate, which means that the water level control point of the operation mode with constant downstream water level is located before the sluice gate in the downstream channel. The operation mode with constant downstream water level is beneficial for the channel design with the maximum water flow, minimum super high, and low cost. In this paper, according to the response, recovery characteristics, and storage compensation time of the operation mode with constant water level before the sluice gate, the operation control method for constant water level before the sluice gate was proposed, and the feedforward control strategy of storage compensation and water level feedback controller with cascade levels of water flow were designed. The channels of the main canal in the Middle Route of South to North Water Diversion Project were used for the research object, operation control simulations were performed under typical conditions, and the calculation results were compared with those of water flow compensation and conventional operation control method with constant downstream water level, which confirmed the reliability of operation control algorithm.

Key words: South to North Water Diversion Project; constant downstream water level; storage compensation; water flow compensation

南水北调中线采用闸前常水位的运行方式, 沿线没有水库, 渠道运行中允许水位小波动, 运行条件要求较高。闸前常水位运行方式所需的渠段蓄水量的变化与供水计划变化引起的渠段蓄水量的变化趋势恰好相反, 所以渠道系统的过渡和稳定需要的时间较长。为了实现闸前常水位的自动控

制, 需要提高控制的响应速度、缩短系统的稳定时间。王念慎^[1,2]等人用现代控制理论构建了常水位和等体积实时控制模型, 并进行了模型验证, 发现等水位控制比等体积控制简单, 且计算速度更快、精度更高。20世纪90年代, 武汉大学王长德运用水利自动闸门的控制原理, 解决了水利自动闸门

收稿日期: 2014-08-18 修回日期: 2015-07-03 网络出版时间: 2015-07-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150724.1127.010.html>

基金项目: 国家科技重大专项“南水北调水质水量联合调控与应急处置关键技术与运行示范”(2012ZX07205)

作者简介: 吴辉明(1991-), 男, 湖南安化人, 主要从事水力学方面研究。E-mail: 690668536@qq.com

通讯作者: 雷晓辉(1974-), 男, 北京人, 教授级高级工程师, 主要从事水文学资源与水力学方面研究。E-mail: rain_fields@qq.com

运行不稳定问题^[3]。之后,王长德^[4]又针对闸门过流的过程,假设闸门能任意速度进行调节,提出了P+PR与比威尔控制算法相结合的控制方式。近年来,国内学者尝试用现代控制理论^[5]、智能控制理论^[6]及模糊控制理论^[7]研究渠道运行系统。中国水利水电科学研究院用状态空间法仿真及实验研究了引黄济青工程等容量控制^[8]。本文基于蓄量补偿原理,构建基于蓄量补偿的下游常水位运行模型。

1 蓄量补偿下游常水位运行方式

1.1 基于蓄量补偿的前馈控制策略

中线闸前常水位控制方式属于需求型渠系,渠池内蓄量与流量变化趋势相反,渠段入渠流量变化必须大于或小于渠段出流流量变化,以补偿渠道蓄量的变化,达到水位稳定,这对渠道前馈控制策略提出了较高的要求。针对南水北调中线工程存在严重的时间滞后问题,本文采用提前蓄量主动补偿前馈控制方法,保证适时、适量供水。主动蓄量补偿需要解决两个主要问题:(1)确定蓄量补偿提前的时间;(2)制定渠段上游节制闸的流量过程。本文前馈流量控制策略在考虑渠道水位变幅约束条件、水流传播时间、水位波动等影响因素下,得出蓄量补偿的时间,并计算出整个渠道在过渡过程中各节制闸的流量过程。

1.2 蓄量补偿基本原理

1.2.1 蓄量补偿流量过程计算

对于单渠段,蓄量补偿示意图见图1。

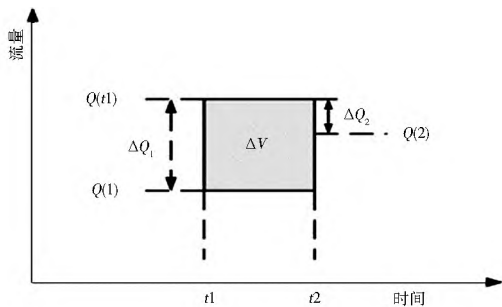


图1 蓄量补偿示意图

Fig.1 Schematic diagram of storage compensation

$$\Delta Q_1 = \frac{\Delta V}{T} \quad (1)$$

$$T = t_2 - t_1 \quad (2)$$

$$\Delta Q_2 = Q(1) + \Delta Q_1 - Q(2) \quad (3)$$

式中: ΔQ_1 为初始流量需要在 t_1 时刻的改变量; ΔV 为初始状态和目标状态下的蓄量差; T 为扰动波传播的时间; t_1 为初始时刻; t_2 为需水量发生变化的时刻; $Q(1)$ 为渠池的初始流量; $Q(2)$ 为渠池下游在 t_2 时刻的需水量。

在 t_2 时刻需要进行第二次的渠池入流调整,调整量为 ΔQ_2 ,以平衡最终的渠池入流、出流。

在多渠段、多用水工况下,所对应的蓄量补偿公式根据单渠段、单需求工况推导,各工况的初始和稳定条件根据恒定流计算确定。

$$\Delta Q_{1,m,k} = \frac{\sum_{i=m}^n \Delta V_{i,k}}{\sum_{i=m}^n T_{i,k}} \quad (4)$$

$$t_{1,m,k} = t_{2,m,k} - \sum_{i=m}^n T_{i,k} \quad (5)$$

$$\Delta Q_{2,m,k} = Q_{1,m,k} + \Delta Q_{1,m,k} - Q_{2,m,k} \quad (6)$$

$$t_{2,m,k} = t_{2,k} \quad (7)$$

式中: n 为用水需求发生变化的渠池编号; $\Delta Q_{1,m,k}$ 为渠池 m 相应需求 k 做的第一次流量调整; $\Delta Q_{2,m,k}$ 为渠池 m 相应需求 k 做的第二次流量调整; $t_{1,m,k}$ 为 $\Delta Q_{1,m,k}$ 调整的时刻; $t_{2,m,k}$ 为 $\Delta Q_{2,m,k}$ 调整的时刻; $\Delta V_{i,k}$ 为用水需求 k 渠池的稳定蓄水量和初始蓄水量的差; $T_{i,k}$ 为需求 k 对渠池 i 影响的滞后时间。

1.2.2 蓄量补偿时间的计算

因为水波在传播过程中会发生衰减、反射、叠加等现象,所以确定水波的传播时间比较困难。本文采用明渠水波运动公式,计算水波到达节制闸的时间,其动力波公式如下:

$$\Delta T_D = \frac{L}{v+c} \quad (8)$$

$$\Delta T_w = \frac{L}{\frac{dQ}{B dx}} \quad (9)$$

式中: ΔT_D 为动力波的传播时间,即水波前缘到达的最小传播时间; L 为渠段的长度; v 为渠道的平均流速; c 为渠道的平均波速; ΔT_w 为运动波的传播时间,即绝大部分水波到达所需要的时间; B 为渠道水面宽度; x 为渠道水深; Q 为流量。

从蓄量补偿实现的过程看,蓄量补偿的时间既不是水流的前缘也不是绝大部分波到达下游的时间,而应该是波群主体到达下游的时间,所以蓄量补偿的时间的范围应为: $\Delta T_w < T < \Delta T_D$ 。

蓄量补偿时间可以通过渠池蓄量的变化量 ΔV 与渠池初始和稳定的流量差来估算:

$$T = \frac{\Delta V}{Q(2) - Q(1)} \quad (10)$$

式(10)计算虽然具有一定的滞后时间,但该公式具有结构简单、计算量小等优点。国外有研究表明^[9],在其研究的水流变化范围内, T 的取值范围都满足 $\Delta T_w < T < \Delta T_D$ 。另外,该公式可以很方便地用于不规则断面的渠道,还可以使 ΔQ_2 为零,从而使蓄量公式变得更加简单,同时还可以与渠道水位变幅、水位波动等限制条件相结合。

1.3 蓄量补偿算法的改进

从式(10)可以得出,前馈控制的蓄量补偿时间 T 的长短是由渠道的需水前后变化确定,即当渠道的需水计划确定后,就有唯一的蓄量补偿方式。而实际渠道运行过程中,前馈控制的蓄量补偿时间 T 的大小往往受到多种因素的影响。本文依据总干渠各渠段进、出流量的变化及渠段初、末状态体积的改变,可以将渠道运行过程当中渠池的蓄水体积变化归结为“充水”、“泄水”两种情况。

1.3.1 冲水控制策略

设 V_i 表示渠池稳定状态下的蓄水体积, V_0 表示初始状态的蓄水体积,则 $\sum V_i > \sum V_0$; Q_{i0} 表示渠池上游闸门的初始过闸流量, Q_{i1} 表示上游闸门的稳定状态下的过闸流量。该渠池为冲水渠池,下游闸门流量的变化应滞后于上游闸门,充水控制策略见图2。

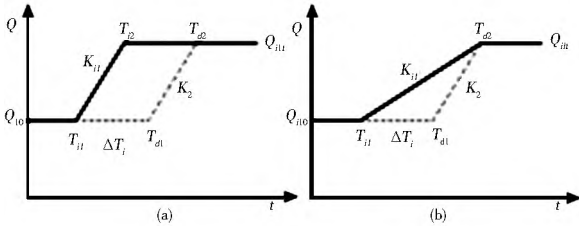


图 2 节制闸充水策略过流示意图

Fig. 2 Schematic diagram of flushing flow of the gate

k_2 由水位波动准则计算出来的供水计划的斜率, k_{i1} 是由水位波动准则计算出来的当前渠池的上游闸门的过闸流量的斜率。提前蓄量补偿的时间采用下式计算:

$$T_{i2} = \frac{Q_{i2} - Q_{i1}}{k_{i1}} + T_{i1} \quad (11)$$

$$(T_{d2} - T_{i2} + T_{d1} - T_{i1}) \times \frac{Q_{i1} - Q_{i0}}{2} = \sum_{i=n}^m \Delta V_i \quad (12)$$

$$\Delta T_i = T_{d2} - T_{i1} \quad (13)$$

根据水位降幅的限制条件, 确定渠池上游节制闸的最小过渡时间 $\Delta T_{i\min}$, 如果 $\Delta T_i > \Delta T_{i\min}$, 则该渠池的上游节制闸流量过程便确定了下来; 如果 $\Delta T_i < \Delta T_{i\min}$, 则取 $\Delta T_i < \Delta T_{i\min}$, 计算公式如下:

$$T_{i1} = T_{d2} - \Delta T_i \quad (14)$$

$$T_{i2} = \frac{Q_{i2} - Q_{i0}}{k_{i1}} - T_{i1} \quad (15)$$

把式(14)、式(15)代入式(12)联合求解就可得到 k_{i1} , 从而求得 T_{i2} 。如果 $T_{i2} \leq T_{d2}$, 则上游节制闸的过闸流量便确定了下来; 如果 $T_{i2} > T_{d2}$, 则取 $T_{i2} = T_{d2}$, 并采用下式重新计算 T_{d1} :

$$T_{d1} = \frac{2 \sum_{i=n}^m \Delta V_i}{Q_{i1} - Q_{i0}} + T_{i1} \quad (16)$$

这时下游端的过闸流量就不再适用, 需要将 T_{d1} 代入重新计算, 直到所有节制闸的过闸流量都得到满足。

1.3.2 泄水控制策略

设 V_t 表示渠池稳定状态下的蓄水体积, V_0 表示初始状态的蓄水体积, 则 $\sum V_t > \sum V_0$; Q_{10} 表示渠池上游闸门的初始过闸流量, Q_{11} 表示上游闸门的稳定状态下的过闸流量。泄

水控制策略见图 3。

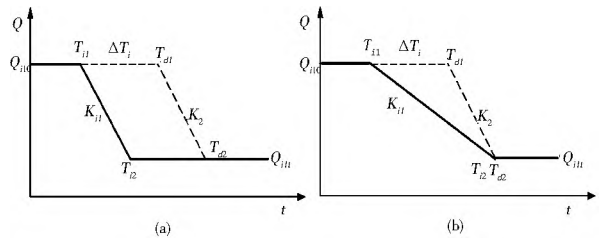


图 3 节制闸泄水策略过流示意图

Fig. 3 Schematic diagram of discharge flow of the gate

对于泄水控制策略中, 渠池上游闸门的流量过程确定与冲水控制策略中的计算步骤公式完全一样。以上是单渠池的前馈控制算法, 对于多需求, 只需要将各个需求单独计算, 最后叠加即可。

2 蓄量补偿计划计算实例

本节对多渠道有需水流量变化情况进行了渠池蓄量补偿下游常水位运行仿真计算, 并把计算结果与流量主动补偿^[4]和常规下游常水位^[12]运行的计算结果进行对比分析, 以讨论各个运行方式的优缺点。

2.1 计算渠段参数及控制性能指标

本次仿真渠道选择为陶岔渠首至十二里河涵洞式渡槽(97+584)之间的 6 个渠池作为研究对象, 仿真渠道的整体参数见表 1, 正常渠段计算节点间距为 500 m, 糙率系数取 0.015, 计算时间步长取 $\Delta t = 1 \text{ min}$ 。假设渠系上游端水位保持不变, 下游为给定水位边界, 其流量在 6.5 h 的时候经过 2 h 的变化, 由 $250 \text{ m}^3/\text{s}$ 线性增加为 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

评价渠道运行控制效果优劣的性能指标有很多, 如水位指标^[13]、流量指标^[11]、闸门运动指标^[15]等。它们一般只衡量某一方面的控制效果, 而且不同指标量之间是互相制约的。只能根据需要选取某一种或几种性能指标来对渠道运行控制的效果进行分析比较。

渠系运行控制的目的是减少渠系内水位波动从而保证分水口稳定分水, 水位指标可以充分反映控制器的优劣。

表 1 渠池参数

Tab. 1 Canal parameters

渠池编号	节制闸		长度/m	设计流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	加大流量 $/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	渠底高程	
	上端	下端				上端/m	下端/m
1	陶岔渠首	刁河节制闸	14 605	350	420	139.38	138.799
2	刁河节制闸	湍河节制闸	21 828	350	420	138.799	139.25
3	湍河节制闸	严陵河节制闸	12 327	350	420	139.25	138.53
4	严陵河节制闸	西赵河节制闸	21 112	350	420	138.53	135.45
5	西赵河节制闸	淇河节制闸	4 849	350	420	135.45	135.04
6	淇河节制闸	十二里河节制闸	22 295	350	420	135.04	135.255

(1) 水位最大绝对误差(MAE)。

$$MAE = \frac{\max(|h_t - h_{\text{target}}|)}{h_{\text{target}}} \quad (17)$$

式中: h_t 为 t 时刻的观测水位; h_{target} 为目标水位。

为了跟踪目标水位的变化, 闸门运动过于频繁, 常导致

闸门密封性能下降或损坏。为此, 过闸流量和闸门运动应有一定的指标控制。

(2) 流量变化绝对值积分(IAQ)。

$$IAQ = \sum_{t_1}^{t_2} (|Q_t - Q_{t-1}|) - |Q_{t_1} - Q_{t_2}| \quad (18)$$

式中: Q_i 为 t 时刻的过闸流量; $|Q_{i1} - Q_{i2}|$ 为初始时刻与最终时刻流量差。

(3) 绝对闸门开度积分 (IAW)。

$$IAW = \sum_{t_1}^{t_2} (|W_i - W_{i-1}|) - |W_{i1} - W_{i2}| \quad (19)$$

式中: W_i 为 t 时刻的闸门开度。

2.2 仿真结果

同一仿真工况下, 渠道蓄量补偿、流量主动补偿以及常规下游常水位运行方式下, 部分渠段的节制闸开度变化过程、过闸流量过程, 目标水位及目标水位差响应过程, 见图 4 - 图 11, 3 种运行方式下, 渠道的各项控制性能指标见表 2。

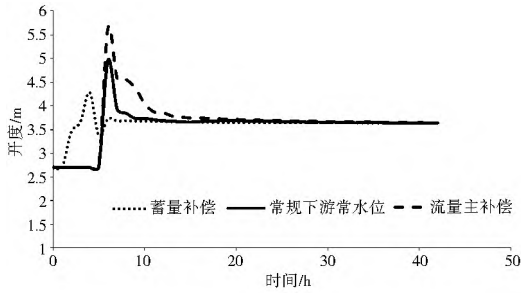


图 4 渠池 2 上游闸门开度变化过程

Fig. 4 Variation of the upstream gate opening of canal 2

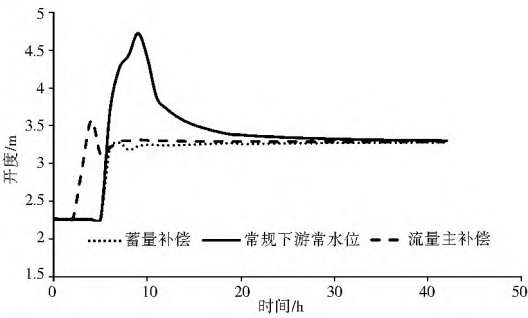


图 5 渠池 4 上游闸门开度变化过程

Fig. 5 Variation of the upstream gate opening of canal 4

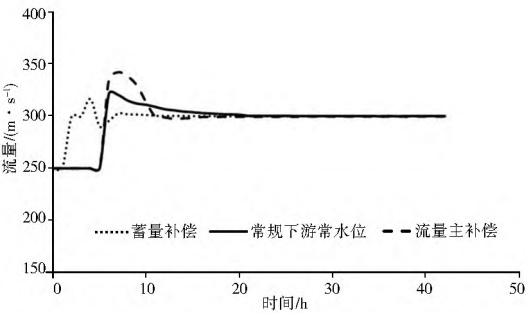


图 6 渠池 2 上游流量变化过程

Fig. 6 Variation of the upstream flow of canal 2

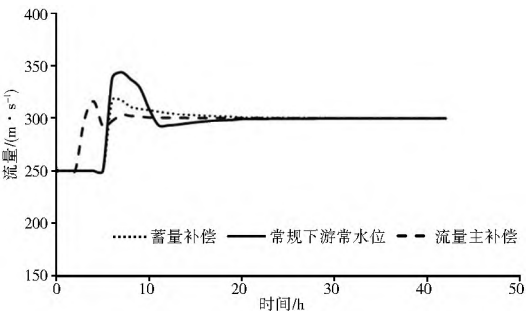


图 7 渠池 4 上游流量变化过程

Fig. 7 Variation of the upstream flow change of canal 4

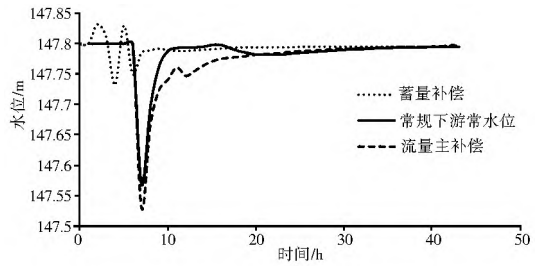


图 8 渠池 2 目标水位变化过程

Fig. 8 Variation of the target water level of canal 2

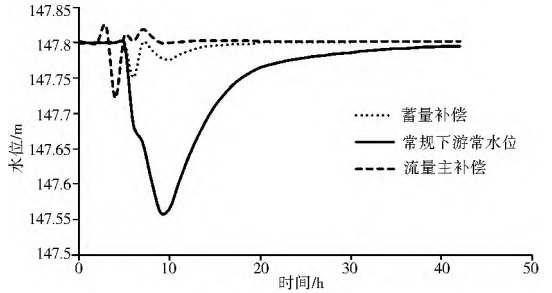


图 9 渠池 4 目标水位变化过程

Fig. 9 Variation of the target water level of canal 4

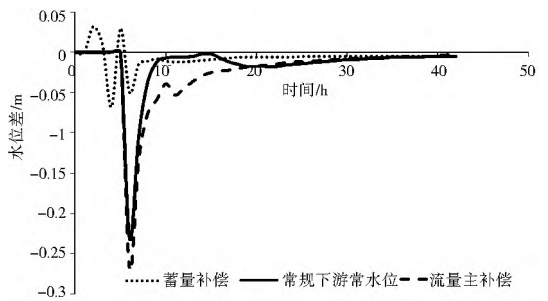


图 10 渠池 2 目标水位差变化过程

Fig. 10 Variation of the upstream target level of canal 2

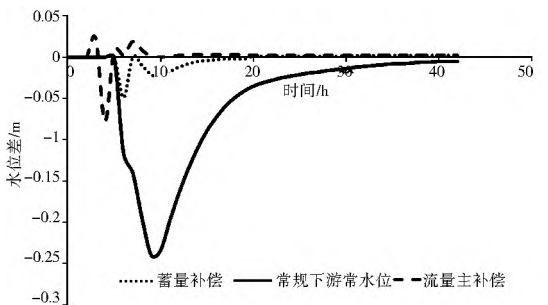


图 11 渠池 4 目标水位差变化过程

Fig. 11 Variation of the upstream target level of canal 4

结果分析: (1) 运用蓄量补偿法最大水位差为 0.112 5 m, 流量变化绝对值最大为 59 228 m³/s, 绝对闸门开度最大为 1.584 2 m。闸门最大超调量为 43.74%, 流量最大超调量为 5.6%, 第 3 个渠池稳定时间最长, 稳定时间为 19 h, 第 6 个渠池最快稳定, 稳定时间为 7 h。(2) 运用常规下游常水位法最大水位差为 0.324 m, 流量变化绝对值最大为 101.535 m³/s, 绝对闸门开度最大为 4.728 m。闸门最大超调量为 77.47%, 流量最大超调量为 14.62%, 第 2 个渠池稳定时间最长, 稳定时间为 36 h, 第 5 个渠池最快稳定, 稳定时间为 16 h。(3) 运用流量主动补偿法最大水位差为 0.257 m,

表 2 渠池运行控制性能指标

Tab. 2 Control performance indexes of canal operation

运行方式	渠段标号	MAE (%)	IAQ / (m ³ · s ⁻¹)	IAW / m	闸门最大超调 (%)	流量最大超调 (%)	稳定时间 / h
蓄量补偿	1	0.034	59.228	0.251	20.5	5.6	17
	2	0.019	42.627	1.64	24.69	4.3	16
	3	0.005 3	34.612	0.24	19.70	5.4	19
	4	0.043	13.096	1.404	27.06	1.86	16
	5	0.108	2.43	1.582	43.74	2.71	12
	6	0.112 5	0.371	0.184	13.8	0.027	7
常规下游常水位	1	0.156	45.407	2.73	62.04	7.36	35
	2	0.0162	34.943	4.728	77.47	5.75	36
	3	0.008	101.535	2.844	43.38	14.62	34
	4	0.188	55.368	1.526	37.90	4.85	18
	5	0.028	7.194	0.032	22.22	1.12	16
	6	0.324	1.869	0.554	23.65	0.33	20
流量主动补偿	1	0.183	90.634	4.004	80.66	14.14	27
	2	0.017 5	59.245	6.012	84.79	11.25	20
	3	0.257	57.409	4.862	35.01	6.51	21
	4	0.19	54.226	1.692	22.31	5.27	22
	5	0.034	39.157	0.240	29.25	5.71	22
	6	0.108	1.151	1.282	13.92	0.107	25

流量变化绝对值最大为 90.634 m³/s, 绝对闸门开度最大为 6.012 m。闸门最大超调量为 84.79%, 流量最大超调量为 14.14%, 第 1 个渠池稳定时间最长, 稳定时间为 27 h, 第 2 个渠池最快稳定, 稳定时间为 20 h。通过水位控制指标、流量控制指标、闸门开度控制指标三个指标综合评定, 蓄量补偿法效果最好, 流量主动补偿法次之, 常规下游常水位法最差。

3 结论

在南水北调中线渠系闸前常水位运行方式下, 本文通过对渠池特性和闸前常水位运行恢复特性的分析, 在蓄量补偿的基础上结合渠道水位变幅和水位波动等限制条件进行了改进。反馈控制采用水位-流量反馈控制, 并对控制器进行了改进, 避免了渠池间的解耦环节。同时选取一个正常供水工况运用蓄量补偿法、流量主动补偿法、常规下游常水位法分别进行数值仿真模拟, 并将模拟计算结果进行了比较。结果证明蓄量补偿闸前常水位控制方式合理可行。

(1) 在流量补偿下游常水位运行方式下, 渠系各个闸门几乎同时开调, 在一定程度上改善了渠系的响应和恢复特性, 但由于在流量主动补偿阶段, 需要各渠段上游流量变化都要超过其下游流量的变化, 致使渠系上游流量有较大的超调, 且越往上游, 流量的超调量越大。

(2) 在常规下游常水位运行方式下, 由于下游端蓄量变化趋势与所要求的蓄量正好相反, 上游端被迫需要超量补偿下游端出流的变化, 从而引起闸门超调, 稳定时间很长, 而各级渠池均需要通过上游闸门来调节渠池蓄水量的变化, 造成闸前常水位运行方式下整个渠道过渡时间长, 反应滞后。

(3) 在蓄量补偿下游常水位运行方式下, 充分考虑了渠段入流、出流变化引起的蓄量变化以及水流的传播特性, 合

理的安排入流过程, 越往渠系上游, 闸门的启调时刻越提前, 即渠道上游节制闸超前调节, 大大缩短了各渠池的稳定时间, 且水位控制指标、流量控制指标、闸门开度控制指标远远小于流量主动补偿法和常规下游常水位法, 大大改善渠道的运行与恢复特性, 满足实际生产需求。

参考文献(References):

- [1] 王念慎, 郭军, 董兴林. 明渠瞬变流最优等容量控制[J]. 水利学报, 1989(12): 12-20. (WANG Niannshen, GUO Jun, DONG Xing Lin. Optimal constant volume control for transient flow in open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989(12): 12-20. (in Chinese))
- [2] 王念慎, 郑大琼, 任钟淳, 等. 长距离明渠输水工程实时控制研究[J]. 河海大学学报, 1998(26) (WANG Niannshen, ZHENG Daqiong, REN Zhongchun, et al. Real time control of water stage in long distance open channel water conveyance[J]. Journal of Hohai University. 1998(26). (in Chinese))
- [3] WANG Changde, Clemmens A J, Hart W E, Dynamic response of automatic water level controller, Theory[J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 1990, 116(6): 769-783.
- [4] 王长德, 柯善青, 冯晓波. P+PR 控制器用于比威尔算法. 武汉水利电力大学学报(工学版), 2000, 33(2): 11-15. (WANG Changde, KE Shaqing, FENG Xiaobo. Using P+PR controller in to Blval control algorithm for automatic operation of open channel[J]. Wuhan Univ of Hydr & Electronic Eng, 2000, 33(2): 11-15. (in Chinese))
- [5] 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. (in Chinese))
- [6] 尚涛, 安宁, 刘永. 渠道自动运行鲁棒控制的理论及其动态仿真研究[J]. 武汉大学学报, 2003, 37(2): 78-84. (SHANG Tao, AN Ning, LIU Yong. Research on theory and dynamic simulation of robust control for channel automatic operation[J]. J Wuhan Univ, 2003, 37(2): 78-84. (in Chinese))
- [7] 阮新建, 袁宏源, 王常德. 灌溉明渠自动控制设计方法研究[J]. 水利学报, 2004, 8: 21-25. (RUAN Xinjian, YUAN Hongyuan, WANG Changde. Design of irrigation canal automatic control[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(8): 21-25. (in Chinese))
- [8] Brian T W, Albert J C. Performance of Historic Downstream Canal Control Algorithms on ASCE Test Canal[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 128(6): 372-375.
- [9] 杨桦, 王长德, 冯晓波. 模糊控制在渠道运行系统中的应用[J]. 武汉大学学报(工学版), 2003, 36(1): 45-49. (YANG Hua, WANG Changde, FENG Xiaobo. Application of fuzzy control to canal operation systems[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(1): 45-49. (in Chinese))
- [10] 管光华, 王常德, 范杰, 等. 鲁棒控制在多渠段自动控制的应用[J]. 水利学报, 2004, 36(11): 1379-1391. (GUAN Guanghua, WANG Changde, FAN Jie, et al. Application of robust controller in automatic control of multi section channel system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 36(11): 1379-1391. (in Chinese))

(下转第 802 页)

- on constructed wetlands in pig farm [J]. Transactions of the CSAE, 1995 (4): 96-100. (in Chinese)
- [11] Sakar S, Yetilm ezsoy K, Kocak E. Anaerobic digestion technology in poultry and livestock waste treatment a literature review [J]. Waste Management & Research, 2009, 27(1): 3-18.
- [12] 邓良伟, 陈铭铭. IC 工艺处理猪场废水试验研究 [J]. 中国沼气, 2001, 19(2): 12-15. (DENG Liangwei, CHEN Geming. Treatment of pig wastewater using internal circulation reactor [J]. China Biogas, 2001, 19(2): 12-15. (in Chinese))
- [13] Obaja D, Mace S, Mat a Alvarez J. Biological nutrient removal by a sequencing batch reactor (SBR) using an internal organic carbon source in digested piggery wastewater [J]. Bioresource Technology, 2005, 96(1): 7-14.
- [14] 邓良伟, 姚爱莉, 梅自立. SBR 工艺处理猪场粪污的实验研究 [J]. 中国沼气, 2008, 18(1): 8-11. (DENG Liangwei; YAO Aili; MEI Zili. Treatment of piggery waste with the sequencing batch reactor [J]. China Biogas, 2008, 18(1): 8-11. (in Chinese))
- [15] 杨虹, 李道棠, 朱章玉, 等. 集约化养猪场冲栏水的达标处理 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(3): 558-560. (YANG Hong, LI Dao tang, ZHU Zhangyu, et al. ABR-ICEAS system for piggery wastewater treatment [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(3): 558-560. (in Chinese))
- [16] 邓良伟, 郑平, 陈子爱. Anarwia 工艺处理猪场废水的技术经济性研究 [J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2004, 30(6): 628-634. (DENG Liangwei, ZHENG Ping, CHEN Ziai. Technological and economical potential of anaerobic adding raw wastewater intermittent aeration process for treatment of piggery wastewater [J]. Journal of Zhejiang University: Agric. & Life Sci., 2004, 30(6): 628-634. (in Chinese))
- [17] 蒋敏. ABR+ BCO+ 人工湿地工艺处理养猪场废水的应用研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012. (JIANG Min. Study on ABR/ BCO/ Constructed Wetland Process Treating Wastewater of Pig Breeding Farm [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012 (in Chinese))
- [18] 万金保, 陈琳, 吴永明, 等. IOG SBBR 人工湿地组合工艺在猪场废水处理中的应用 [J]. 给水排水, 2011, 37(7): 47-51. (WAN Jirbao, CHEN Lin, WU Yongmin, et al. IOG SBBR- the combination of artificial wetland technology application in swine farm wastewater treatment [J]. Water Supply and Drainage, 2011, 37(7): 47-51. (in Chinese))
- [19] Suzuki K, Tanaka Y, Kuroda K, et al. Removal and recover of phosphorous from swine wastewater by struvite accumulation device [J]. Bioresource Technology, 2007, 98(8): 1573-1578.
- [20] 宋永会, 钱锋, 弓爱君, 等. 钙型天然斜发沸石去除猪场废水中营养物的实验研究 [J]. 环境工程学报, 2011, 5(8): 1701-1706. (SONG Yonghui, QIAN Feng, GONG Aijun, et al. Experimental study on nutrients removal from swine wastewater by natural Ca-type clinoptilolite [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(8): 1701-1706. (in Chinese))
- [21] 张冬梅. 猪场废水氮磷 MAP 回收工艺及其对传统厌氧-好氧处理系统的影响研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013. (ZHANG Dongmei. MAP Precipitation Recycling of N and P from Swine Wastewater and Its Impacts on Traditional Anaerobic and Aerobic Processes [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese))
- [22] 王瑞, 魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1705-1719. (WANG Rui, WEI Yuan song. Pollution and control of tetracyclines and heavy metals residues in animal manure [J]. Journal of Agro Environment Science, 2013, 32(9): 1705-1719. (in Chinese))
- [23] Moral R, Perez Murcia M, Perez Espinosa A, et al. Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from South eastern Spain [J]. Waste Management, 2008, 28: 367-371. (in Chinese))
- [24] 罗炳林, 覃遵镜, 田凤文. 沼气综合利用的模式设计与经济效益 [J]. 中国西部科技, 2004(7): 72-74. (LUO Binglin, TAN Zunjing, TIAN Fengwen. Comprehensive utilization of biogas model design and economic benefits [J]. Science and Technology in Western China, 2004(7): 72-74. (in Chinese))

(上接第 792 页)

- [11] Litrico X, Malaterre P O, Baume J P. Automatic tuning of PI controllers for an irrigation canal pool [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2007, 133(1): 27230.
- [12] Robert S. Gooch, Eduardo Bautista, Robert J. Strand. Automated scheduling of open channel deliveries: potential and limitations [C]. SCADA and Related Technologies for Irrigation District Modernization, II. Phoenix, Arizona: USCID, 2007. 23-32.
- [13] 崔巍, 陈文学, 郭晓晨, 等. 长输水渠道前馈控制时间研究 [J]. 水利学报, 2009, 40(11): 1345-1350. (CUI Wei, CHEN Wexue, GUO Xiaochen, et al. Anticipation time estimation for feedforward control of long canal [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(11): 1345-1350. (in Chinese))
- [14] Bautista E, Clemmens A J. Volume compensation method for routing irrigation canal demand changes [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(6): 494-503.
- [15] 姚雄, 王长德, 丁志良, 等. 渠系流量主动补偿运行控制研究 [J]. 四川大学学报, 2008, 40(5): 38-45. (YAO Xiong, WANG Changde, DING Zhiliang, et al. Study on canal system operation based on discharge active compensation [J]. Journal of Sichuan University, 2008, 40(5): 38-45. (in Chinese))