



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.032

聂艳华, 黄国兵, 崔旭, 等. 南水北调中线工程应急调度目标水位研究[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(4): 198-202. NIE Yan hua, HUANG Guo bing, CUI Xu, et al. Research on the target water level in emergency dispatch of the South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(4): 198-202. (in Chinese)

# 南水北调中线工程应急调度目标水位研究

聂艳华<sup>1</sup>, 黄国兵<sup>1</sup>, 崔旭<sup>2</sup>, 刘孟凯<sup>1</sup>

(1. 长江科学院 水力学研究所, 武汉 430010; 2. 中国水电建设集团 国际工程有限公司, 北京 100048)

**摘要:**以南水北调中线工程为例, 建立一维应急调度数值模型, 选取典型渠段作为算例, 研究中线工程总干渠突发事件应急调度时输水明渠节制闸前目标水位的设定对渠道节制闸水位壅高、渠段退水量等参数指标的影响。研究表明: 目标水位的设置直接影响到渠道退水量、渠道最高水位壅高。闸前目标水位越高, 渠道水位壅高越高, 但渠道退水量越小。为提高应急调度的安全经济性应在保证不发生漫顶事故的前提下, 尽量加大事故上游渠段节制闸前目标水位。本研究成果可为中线工程应急预案的建立提供参考。

**关键词:** 南水北调中线工程; 应急调度; 目标水位; 数值模型

**中图分类号:** TV68 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0198-05

## Research on the target water level in emergency dispatch of the South to North Water Diversion Project

NIE Yan hua<sup>1</sup>, HUANG Guo bing<sup>1</sup>, CUI Xu<sup>2</sup>, LIU Meng kai<sup>1</sup>

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Sinohydro Corporation Limited, Beijing 100048, China)

**Abstract:** In this paper, we took the middle route of South to North Water Diversion Project as an example, and built a one dimensional emergency dispatch numerical model of the project. On this basis, we selected some typical canal sections as cases for simulation, so as to study the impact of target water level on the canal parameters (such as water level and discharge volume) in the process of emergency dispatch. The results showed that the target water level directly affected the amount of water discharge and the highest water level before the sluice. The higher the target water level, the higher the water level rise, but the smaller the water discharge volume. To improve the safety and economy of emergency dispatch, efforts should be made to increase the target water level before the sluice as much as possible under the premise of ensuring safety. This research can provide some reference for the contingency plans of the S-N project.

**Key words:** the middle route of South to North Water Diversion Project; emergency dispatch; target water level; numerical model

## 1 研究背景

### 1.1 工程概况

南水北调中线工程是平衡水资源空间分布不均, 优化水资源配置的重大工程。中线一期工程供

水目标以北京、天津、河北、河南等主要城市生活、工业供水为主, 兼顾生态和农业用水。总干渠渠首陶岔闸多年平均调水量 95 亿  $m^3$ , 渠首引水设计流量为 350  $m^3/s$ , 加大流量 420  $m^3/s$ , 全线长 1 432 km (含天津干渠), 穿越长江、淮河、黄河、海河四大流

收稿日期: 2016-05-23 修回日期: 2016-12-18 网络出版时间:  
网络出版地址:

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509015; 51309015); 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2016016/SL)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51509015; 51309015); The Yangtze River Scientific Research Institute of central Public Welfare Institutes for Basic Business(CKSF2016016/SL)

作者简介: 聂艳华(1983-)男, 湖北荆门人, 工程师, 主要从事输水调度方面研究。E-mail: yuanay111@126.com

域。工程具有全程自流输水和没有在线调节水库的特点,渠道设计运行采用闸前常水位的控制方式。

中线工程总干渠参与运行调度的控制建筑物主要包括:63座节制闸、55座退水闸、1座泵站和81座分水闸。沿线节制闸将总干渠分割为63个串联渠段,整个渠系是一个串联系统,各渠段为串联系统中的元件。当渠道发生突发事件需要段时间大幅度改变流量时,需要采取相应的应急调度闸门控制措施进行闸门调度。

## 1.2 应急调度研究

目前关于输水工程调度的研究运用数值模拟的手段较多,主要是结合实际工程,研究不同的运行方式、结构特征条件下渠道的水力响应过程。在应急调度方面,张成<sup>[1]</sup>以南水北调中线工程总干渠典型渠段作为研究对象,模拟分析了非正常工况下渠段的水力响应特征及退水闸的退水作用。研究发现退水闸的启用能够较好减小水位的壅高幅度,有效降低水流的漫溢危险。此研究考虑了退水闸在输水工程应急调度中的关键作用,但仅对发生事故的单个渠段闸门关闭时产生的水位壅高进行了研究,而退水闸对整个渠道的扰动影响以及该如何何时开启或关闭才能对应急调度更有利值得进一步探究;袁健<sup>[2]</sup>模拟了事故工况下的渠道水力响应过程,得到节制闸前的控制水位对渠道水位壅高和渠段的退水量有直接影响,闸前控制水位越高渠道水位壅高也越大的结论。该研究考虑了节制闸前控制水位的影响,但并不全面,在串联渠道与沿线分退水口的耦合作用机制下,渠道各要素都是彼此关联相互影响的,渠道水位壅高与闸门的关闭速率、退水闸的开启关闭方式都有关系,需要综合考虑各种因素比较分析;Soler & Joan<sup>[3]</sup>研究了一种快速有效关闭输水渠道闸门前馈算法,这种方法基于序贯二次规划,可快速计算闸门运动轨迹,通过保持在检查点的水深度保持不变顺利完成从初始开度到最后开度的运作。但研究并未对多种类、渠段闸门联合应急控制进行阐述;杨敏<sup>[4]</sup>对节制闸联合控制中的同步控制法和顺序控制法进行了研究,对不同控制方法下长距离明渠输水系统在增流量和减流量工况下的各闸闸前水位、闸后水位、水力过渡时间等水力特性进行了分析比较,该研究对下游应急关闭的减流量过程有一定阐述,但研究仅包括节制闸的两种控制方式,并不全面,也未考虑分、退水闸的耦合作用;史哲<sup>[5]</sup>通过物理模型试验研究了节制闸紧急关闭时宽浅渠道内水力特征参数的变化,但研究仅限于单个渠段的节制闸关闭方式,未对多闸门联动的水力响应特征进行

研究。总之,现有关于渠道应急调度的研究成果较少,有待进一步深入研究。

中线工程总干渠是采用“闸前常水位”的控制方式,在应急调度的渠道非恒定流响应过程中,要求闸前水位壅高不超过壅高安全水位(一般为闸前加大水位+0.3 m 超高),且渠道稳定时的闸前水位要达到控制目标水位。此目标水位是人工预先根据渠道的实际情况设定,在事故段上游渠段,可适当抬高目标水位,上游渠段充分利用部分渠道蓄容容纳部分下泄水体,减少进入事故渠段的水量,缓解事故段节制闸前的水位上涨压力,便于事故段闸门快速关闭;事故段下游可适当降低目标水位,当上游来流切断后可利用渠段本身的部分蓄容水量延长下游各分水口门的供水时间。然而如何选择合适的目标水位,还有待深入研究,本文即以南水北调中线一期工程总干渠为例,重点研究应急工况下渠道目标水位对调度过程中渠道水力特性的影响。

## 2 数学模型

### 2.1 基本方程

采用描述渠道非恒定流的 Saint-Venant 方程组作为基本方程,将描述过闸水流状态的节制闸过闸流量方程作为耦合条件加入处理。过闸流量方程拟采用 Henry 公式,基本可以保证在各种开度下流量的连续性,对一些特殊情况下仍然存在的不连续现象通过将流量系数划分为更多分段函数的方式处理。

### 2.2 基本方程的离散

采用收敛快、稳定性好的普莱士曼 (Preismann) 隐式差分格式进行离散,建立求解域网格方程组,结合渠道上下游边界条件联立求解。

### 2.3 初始条件与边界条件处理

论文研究对象是正常运行条件下突发事件的输水明渠,因而模型的初始条件应为正常输水时渠道上下游的水位流量条件,即稳定流状态。事故发生后的应急调度需要一个调度目标,此目标也应为稳定状态,应急调度的本质应是从一个稳定状态向另一个目标稳定状态过渡的非恒定流过程。合理边界条件的选取是数学模型计算的前提,直接影响计算结果的正确性。本模型模拟的输水渠道上游源头为丹江口水库,在正常工况下,由于水库水位变化速度远慢于渠道水位的变化速度,且渠首流量变化所引起的水库水位变化基本可以忽略,因此可作为一个恒定值。若模拟中需要考虑渠首水位变化时,也可用实际的渠首闸前水位变化过程做为边界条件。

下边界条件可以是已知的末端水位,也可以是已知的流量过程。另外,正常状态下渠系的水力波动主要由分水闸流量变化引起,而分水口的流量变化一般由下游用水需求计划确定,因此,渠首取水口的引水流量及各节制闸过闸流量可根据其下游渠道的需求过程进行调节,即可确定模拟计算的上下游流量边界条件。渠道应急调度时的流量边界是人为调控的前馈量,需要通过分水闸、退水闸的配合,制定各节制闸前馈流量边界计划。总的来说应急调度模拟的模型边界条件必须根据不同的闸门控制组合和控制方式来最终确定。

### 3 数值计算分析

经过分析发现,节制闸前目标水位特别是事故上游渠段闸前目标水位对渠道应急调度影响较大,尤其是对渠道闸前水位变化、最大水位壅高、渠道退水量等应急调度关键性控制指标的影响。在对南水北调中线工程设计参数分析后发现,以穿黄倒虹吸工程为分段,在穿黄节制以南渠道设计水位与加大水位相差 0.5 m 左右,穿黄闸以北各闸较小均为 0.3 m 左右,这与渠道沿线的地质、工程结构等特点有关,在选择节制闸前目标水位时,考虑到渠道控制中波动及水力传递滞后性等因素,一般建议取值应小于加大水位。

本文利用建立的南水北调中线工程应急调度数学模型,分别选取中线渠道上游 10 号澎河节制闸至 11 号沙河节制闸以及下游 51 号漠道沟节制闸至 52 号唐河节制闸之间的两段渠池发生事故来进行应急调度模拟。模拟工况下总干渠渠首按设计流量 350 m<sup>3</sup>/s 供水,事发段上游各分水口门正常供水。

#### 3.1 澎河节制闸(10号)~沙河节制闸(11号)案例

事故渠段临近上下游各渠段参数如表 1 所示。

本文设定了 5 种工况,模拟在中线工程上游澎河节制闸至沙河节制闸渠池发生突发事件时,事故段以上节制闸前目标水位分别选取设计水位、设计水位+0.3 m 及设计水位+0.5 m 三种不同方案;下游漠道沟节制闸至唐河节制闸之间渠池发生事故时,分别选取闸前目标水位为设计水位、设计水位+0.3 m 两种不同方案。事故段及下游渠段闸前目标水位均保持设计水位。为使模拟结果有相同参照点,上游 3 种工况下渠道事故段节制闸关闭时间均取为 40 min,下游三种工况关闭时间取为 30 min。其他分水闸、退水闸控制规则亦相同。具体模拟方案见表 2。

表 1 10 号~11 号节制闸渠段建筑物过闸流量及闸上水位(部分)

Tab. 1 Discharge volume and water level of structures of the 10 th~11 th sluices

渠系建筑物	桩号 / km	闸上水位 / m	过闸流量 / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	设计流量 / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	加大流量 / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )
澧河节制闸 9	209.455	134.586	320.0	330.0	400.0
四家营分水闸	213.957	133.968	10.0	10.0	-
郑家佐分水闸	231.962	133.27	0.0	30.0	-
澎河退水闸	231.987	133.27	0.0	160.0	-
澎河节制闸 10	232.085	133.059	310.0	320.0	380.0
沙河退水闸	241.723	132.32	0.0	160.0	-
沙河节制闸 11	241.972	132.245	310.0	320.0	380.0
马庄分水闸	259.090	129.7	0.0	4.0	-
高庄分水闸	265.876	129.42	5.0	5.0	-
玉带河节制闸 12	266.443	129.368	305.0	315.0	375.0

表 2 事故段以上节制闸前目标水位模拟方案

Tab. 2 Simulation scenarios of sluice target level before the accident section

序号	事故段	事故段上游目标水位	事故段及下游渠段目标水位	闸门控制规则	事故闸关闭时间 / min
1	澎河闸至沙河闸渠池	设计水位	设计水位	相同	40
2	澎河闸至沙河闸渠池	设计水位+0.3 m	设计水位	相同	40
3	澎河闸至沙河闸渠池	设计水位+0.5 m	设计水位	相同	40
4	漠道沟闸至唐河闸渠池	设计水位	设计水位	相同	30
5	漠道沟闸至唐河闸渠池	设计水位+0.3 m	设计水位	相同	30

表 3 为澎河闸至沙河闸渠段突发事故时,按不同的闸前目标水位进行应急调度,总干渠内的闸前水位最大壅高值及出现时间,图 1 为不同工况下渠道总退水量。由表中不同方案下闸前水位最大壅高趋势可以看出,事故段上节制闸前水位(澎河节制闸)的最大壅高值随节制闸前目标水位的增高而增大,且达到最大壅高所需时间较为接近。图 1 中则给出了渠道总退水量随控制水位变化的趋势,即随控制水位增高而减小,并且减小幅度显著。

表 3 澎河闸至沙河闸渠段事故时的闸前最大壅高及总退水量

Tab. 3 The largest water level rise and total water discharge volume when an accident appeared between Peng River sluice and Sha River sluice

闸前目标水位	设计水位	设计水位+0.3 m	设计水位+0.5 m
位置(闸号)	10	10	10
闸前水位最大壅高/m	0.57	0.67	0.76
闸前最大壅高时间/min	86	85	86

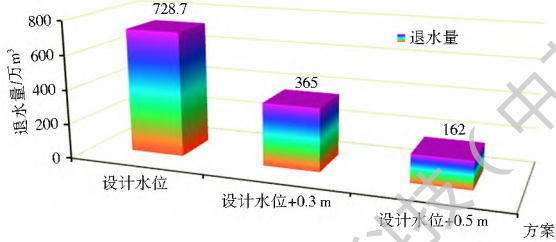


图1 不同方案渠道退水量对比

Fig.1 Comparison of the water discharge volume across different scenarios

图2为上游事故案例中事故段上节制闸前( 澎河节制闸) 水位变化过程。可以看到, 在节制闸紧急关闭过程中, 闸前水位快速上升, 启用退水闸后, 闸前水位回落至控制水位附近。闸前目标水位越低, 闸前水位上升速率及壅高越小, 降落幅度越大。

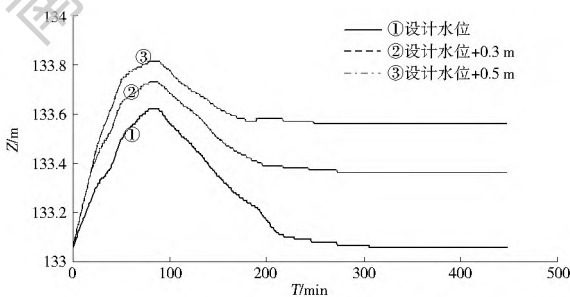


图2 不同闸前目标水位方案的澎河节制闸前水位变化

Fig.2 Variation of water level before Peng River sluice in different target level scenarios

一般来说, 在工程应急调度过程中, 期望得到的调度结果是闸前水位壅高更低, 渠道总退水量更小。结合上述模拟结果来看, 两者规律正好相反, 综合考量安全及经济性, 设计水位+ 0.3 m 的目标水位方案更为合理。

### 3.2 漠倒沟节制闸( 10号) ~ 唐河节制闸( 11号) 案例

事故渠段临近上下游各渠段参数见表4。

表5为渠道下游漠倒沟闸至唐河闸渠段突发事件时, 选用两种不同闸前目标水位方案, 分别为设计水位、设计水位+ 0.3 m。(渠道下游设计水位与加大水位差值仅为0.3 m)。为便于比较, 事故段节制闸关闭时间也均取为30 min。由该表可以看出, 随着目标水位的增大, 渠道退水量大幅度减少, 但渠道上游最大水位壅高虽有所升高, 但升高幅度较小, 这与同上游事故案例模拟所得结果基本相同。仅就此两种方案比较而言, 设计水位+ 0.3 的目标水位方案更合理。

在突发事故后渠道的应急调度过程中, 节制闸前水位壅高与渠道安全控制息息相关, 渠道总退水量则是经济考量参数, 两者之间存在博弈, 一般认为

表4 51~ 52号节制闸渠段建筑物过闸流量及闸上水位( 部分)

Tab.4 Discharge volume and water level of structures of the 51 st 52 nd sluices

渠系建筑物	桩号 / km	闸上水位 / m	过闸流量 / (m³·s⁻¹)	设计流量 / (m³·s⁻¹)	加大流量 / (m³·s⁻¹)
沙河(北) 节制闸 50	1 016.094	72.674	155.0	165.0	190.0
留营分水闸	1 029.516	71.740	10.0	16.0	—
中管头分水闸	1 034.770	71.515	20.0	20.0	—
漠道沟节制闸 51	1 035.647	71.421	125.0	135.0	160.0
唐河退水闸	1 043.570	70.900	0.0	67.5	—
唐河节制闸 52	1 044.881	70.585	125.0	135.0	160.0
大寺城洞分水闸	1 060.120	69.870	0.0	2.0	—
高昌分水闸	1 069.120	69.540	0.0	3.0	—
放水河节制闸 53	1 070.578	69.437	125.0	135.0	160.0

表5 漠倒沟闸至唐河闸渠段事故时的闸前最大壅高及总退水量

Tab.5 The largest water level rise and total water discharge volume when an accident appeared between Modaogou River sluice and Tang River sluice

闸前目标水位	设计水位	设计水位+ 0.3 m
最大壅高出现位置( 闸号)	50	50
闸前水位最大壅高/m	0.41	0.46
闸前最大壅高出现时间/min	71	72
总干渠退水量/ 万 m³	875.7	141.7

应在保证工程安全的前提下尽量考虑调度方案的经济性。结合上述数值模拟结果及分析, 可得到结论如下: 在不影响渠道安全的前提下( 渠道水位最大壅高不超过安全水位, 保证渠道不漫溢), 应尽量加大事故上游渠段节制闸前目标水位, 将事故上游渠段内多余的水尽量蓄在渠道内, 减小退水量, 提高应急调度措施的经济性。根据中线工程的结构特点, 结合本文的模拟分析, 在本文模拟工况下推荐采用节制闸前设计水位+ 0.3 m 的目标水位方案, 可兼顾工程安全性和经济性。实际运用中需利用工程运行数据对数学模型进行反复率定, 并结合后的渠道反馈特点对该目标水位进行调整优化。

## 4 结论

本文以南水北调中线一期工程总干渠为例, 采用数值模拟的手段, 通过案例计算及数据分析, 研究了应急工况下渠道目标水位的设定对渠道各项水力参数的影响, 研究表明: 目标水位的设置直接影响到渠道退水量、渠道最高水位壅高。闸前目标水位越高, 渠道水位壅高越高, 但渠道退水量越小。因而在

实际的工程调度中应在保证不发生漫顶事故的前提下,尽量加大事故上游渠段节制闸前目标水位,将事故上游渠段内多余的水尽量蓄在渠道内,减小退水量,提高应急调度措施的经济性。通过对本文模拟工况的比较分析,在当前条件下,推荐设计水位+0.3 m的闸前目标水位方案。

#### 参考文献(References):

- [1] 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,2007,5(6):8-12,20.(ZHANG Cheng,FU Xirong,WANG Guangqian. Hydraulic response in abnormal operation modes of the Middle Route of the South to North Water Diversion Project[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2007,5(6):8-12,20.(in Chinese))
- [2] 树锦,袁健.大型输水渠道事故工况的水力响应及应急调度[J].南水北调与水利科技,2012(5):161-165.(SHU Jin,YUAN Jian. Hydraulic response and emergency dispatch under

abnormal operation modes of large scale water diversion channel[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2012(5):161-165.(in Chinese))

- [3] Soler J, Gomez M, Rodellar J. 2013. Application of the GoRoSo feedforward algorithm to compute the gate trajectories for a quick canal closing in the case of an emergency[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, (12): 1028-1036.
- [4] 杨敏,周芳.节制闸联合调度控制下明渠输水系统水力控制研究[J].西安理工大学学报,2010,26(2):201-206.(YANG Min,ZHOU Fang. 2010. A study of hydraulic control of the open channel water diversion System under combined control of all check sluices[J]. Journal of Xi'an University of Technology,2010,26(2):201-206.(in Chinese))
- [5] 史哲,马吉明,郑双凌.节制闸控制下宽浅渠道内的非恒定流[J].南水北调与水利科技,2007,5(6):21-24.(SHI Zhe,MA Jiming,ZHENG Shuangling. The unsteady flow in the wide shallow open channel with controlling gates [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology,2007,5(6):21-24.(in Chinese))