

南水北调中线输水渠道的漫溢现象分析

方神光 吴保生 赵 刚

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室 北京 100084)

摘要 针对南水北调中线输水渠道缺少调节水库的现实情况,采用一维非恒定流数学模型,模拟了渠道中某一节制闸出流量以不同速率关闭而导致上游渠道中出现的水流漫溢现象。结果显示,水流漫溢现象最先发生在被关闭节制闸前。闸下出流量的变化速率越快,出现漫溢的时间也越短,闸门关闭期间的闸前水位上涨速度与闸下出流量的变化速率呈线性变化关系。实际条件下,为尽量避免出现漫溢事故,应尽量缓慢关闭闸门,延长渠道出现漫溢的时间,以留出更多的时间去启动退水闸或其他分流设施。

关键词 南水北调中线工程;节制闸;非恒定流;流量变化速率;漫溢

中图分类号 :TV133.2 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2007)04-0011-04

Analysis of overflowing phenomenon in water transfer channel of middle route of South-to-North Water Transfer Project/FANG Shen-guang, WU Bao-sheng, ZHAO Gang(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : In consideration of the fact of being lack of regulation reservoirs on the middle route of South-to-North Water Transfer Project, the overflowing phenomenon occurring in the upstream channel induced by closing down of a regulation gate at different flux change velocities was simulated by use of 1-D unsteady flow mathematical model. The results showed that the overflowing phenomenon occurred in front of the closed gate at first. With the increase of the flux change velocity of the flow passing the gate, the overflowing phenomenon occurred earlier, and the rise of water level in front of the gate during its closing period was of a linear relationship with the flux change velocity of the flow passing the gate. Therefore, under the real condition, it is necessary to close the gate as slowly as possible so that overflowing accidents could be avoided, and more time could be obtained to startup escape gates and other diversion facilities.

Key words : South-to-North Water Transfer Middle Route Project; regulation gate; unsteady flow; flux change velocity; overflowing

南水北调中线输水总干渠全长约 1267 km,设计调水规模 130 亿 m^3 ,全线输水主要依靠自流。不论从输水流量还是渠道长度而言,中线输水渠道都是以往输水或灌溉渠道所不能比拟的,且渠道中存在的大量输水建筑物和控制建筑物产生的水波扰动和反射更使渠道中的水流流态更加复杂。目前有关中线输水渠段问题的研究较多,如章晋雄等^[1]将南水北调中线输水渠道概化为明渠、分水口和节制闸,采用 Java 语言编写整个渠道的仿真平台,为渠道节制闸的设计提供了有益的建议;丁志良等^[2]取长距离输水渠道中某一渠段模拟研究其上下游闸门调节速度对水面线波动的影响;吴泽宇等^[3]对中线渠道中所有桥梁对水头损失的影响进行了详细的分析和探讨;黄国兵等^[4]对穿黄隧洞进行了水力学试验,对两种设计方案的过水特性进行了模型试验探讨。

由于中线输水渠道沿线缺少有效的调节缓冲水库,若需要对输水建筑物进行检修或出现事故而减小闸门流量或关闭时,由于渠道自身库容有限,且各渠段间距较大,若不及时采取相应的分流措施,很容易导致漫溢事故发生。为对该现象有一直观认识,本文选取须水河节制闸作为典型研究对象,该节制闸设计通过流量 $270 \text{ m}^3/\text{s}$,将节制闸、分水口和退水口处理为内边界^[5],模拟计算该节制闸逐渐关闭时从陶岔渠首至该节制闸间渠段中的水位和流量变化过程,对可能出现的漫溢现象进行分析和总结,为中线输水渠道的安全稳定运行提供参考。

1 数学模型的建立

1.1 数学模型

中线输水渠道平均底坡为 1/25 000,属于缓坡

渠道,并认为受节制闸启闭或取水口流量变化影响的渠道水流流态为非恒定渐变流,其流动特性可采用水位 z 和流量 Q 表示的圣维南(Saint-Venant)方程组表述,由连续方程和运动方程构成^[6]:

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial s} + \left(gA - B \frac{Q^2}{A^2} \right) \frac{\partial z}{\partial s} - \left(\frac{Q}{A} \right)^2 \frac{\partial A}{\partial s} \Big|_z + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = 0 \tag{2}$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; z 为水位, m ; v 为流速, m/s ; s 为沿水流方向的距离, m ; t 为时间, s ; A 为过水断面面积, m^2 ; B 为水面宽度, m ; K 为流量模数, m^3/s ; g 为重力加速度, m/s^2 。

1.2 数学模型的离散和求解

此处采用计算结果较为精确且上下游流量严格守恒的 Preismann 四点差分隐格式对圣维南方程组进行离散化处理^[7],将圣维南方程组转化为一组差分方程组,采用追赶法进行迭代求解。所用非恒定流求解计算软件为作者采用 Fortran 语言编写。由于采用的是隐式差分格式,时间步长取值灵活性较大,但同时考虑不确定的影响因素以及计算效率,此处非恒定计算的时间步长取 120 s。

1.3 初始条件和边界条件

初始时刻渠道全线中通过设计流量,其水面线分布和流量分布应用恒定流程序计算得到,各闸门的初始开度也同时由恒定流程序计算给出。

所计算的中线输水渠段起始位置为陶岔渠首,终止位置是须水河节制闸。各不同计算工况下的边界条件是上游陶岔渠首保持设计来流量 $350 \text{ m}^3/\text{s}$ 不变,下游端的边界条件是随着须水河节制闸门由闸下设计流量 $270 \text{ m}^3/\text{s}$ 逐渐关闭,即减小为零,并近似认为其出流量为线性变化,不同计算工况下的下游端流量变化速率不同,如表 1 所示。

表 1 不同工况对应的上下游端边界条件

工况	流量变化速率/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	下游端闸门关闭时间/h
1	45.0	0.10
2	18.0	0.25
3	9.0	0.50
4	4.5	1.00
5	2.25	2.00

1.4 内边界条件的处理方法

中线输水渠道中存在大量的节制闸、分水口和退水口,在采用追赶法求解非恒定圣维南方程组的离散代数方程组时,为使追赶法计算能自始至终地进行下去,必须根据具体水力特性将其作为内部边界条件进行特殊处理。内部边界条件通常都包含两

个相容条件:流量的连续性条件和能量守恒条件(或动量守恒条件)^[8],应用这两个条件即可将节制闸、分水口和退水口的影响恰当地反应在计算程序中。对闸门的出流流态和流量系数的处理方法主要应用 Swamee^[8]根据 Henry^[9]绘制的过闸流量系数试验曲线拟合出平板闸门过流的流量系数函数式。

2 等效糙率方法

在非恒定流计算中,为了简化起见,不涉及过水建筑物内部的具体水流流态,设想用一顺直渐变的虚拟明渠渠段将该过水建筑物的进出口控制断面连接起来,以代替该过水建筑物。而该过水建筑物的水头损失则通过加大该虚拟明渠段的局部糙率来体现,且不同的水头损失对应的局部糙率值不同。由于水头损失的大小是随通过建筑物的流量而变化的,因此该虚拟明渠段的糙率值应该是随通过该渠段的流量变化而变化的,它们是一一对应的关系。这一通过改变虚拟渠段糙率来替代过水建筑物对渠道中的水位和流量影响的方法即本文所说的等效糙率方法。采用等效糙率方法对非恒定流程序进行简化的首要条件是必须知道每个过水建筑物的虚拟渠段的糙率与通过流量的一一对应关系,这一工作需要通过编写等效糙率计算程序才能完成。笔者通过自己编写的计算程序得到了从陶岔渠首到河北省渠段终点每一个过水建筑物虚拟渠段的流量与等效糙率的对应数据,并将其存放于以该建筑物名称命名的数据文件中,非恒定计算中通过调用这些数据文件采用插值方法得到不同时刻虚拟渠段的糙率值。

3 计算结果分析

3.1 漫溢现象分析

图 1 给出了须水河节制闸以不同的流量变化速率减小出流量直至闸门最终完全关闭时间前堤顶最先出现漫溢的时间。从图中可以看到,闸门流量变化速率越大,出现漫溢的时间也越短,但流量变化速率继续增大时出现漫溢的时间趋向于一恒定值(2.5 h 左右)相反,流量变化速率越小,漫溢出现的时间也

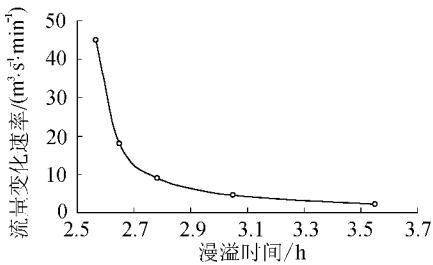


图 1 须水河闸门完全关闭时流量变化速率与渠道出现漫溢时间的变化关系曲线

越长,并最终趋向于无穷大。其原因是由于须水河上游渠段自身容量是一个有限值,闸门关闭越快,闸下出流流量减小的速率也越快,若闸门在瞬时关闭,则本应通过闸门的流量全部被截流在闸前的渠道中,由于入流量和库容值都是定值,因此出现漫溢的时间也是一个定值,因此闸门流量变化速率趋向于很大时(此时认为闸门瞬时关闭),漫溢出现的时间也趋向一个定值。闸门关闭所用时间越长,即闸下流量减小速率越小,相当于将闸门瞬时关闭时本应截流在闸前渠道内的流量泄走,相应就延长了渠道出现漫溢的时间。

3.2 闸前水位变化分析

须水河节制闸下出流流量减小会引起闸上游渠段中的水位不断上涨,计算结果显示,水位随时间的变化曲线可以大致分为两段直线,即从初始时刻开始到闸门完全关闭的时间为一段,闸门关闭后的水位变化线为另一段,两段直线的斜率不同,即水位上涨速度不同,闸门关闭期间的水位上涨速度比关闭后水位的上涨速度快。比较不同流量减小速率的水位可以看到,闸门关闭期间的水位上涨速度随闸门出流量变化速度的增大而增大,图2给出了闸门关闭期间闸前水位上涨速度和出流量变化速率间的对应关系,显示为线性变化关系,闸门关闭后的各水位上涨直线接近平行线,即水位上涨速度近似相同,计算得到其值大约为0.351 m/h。

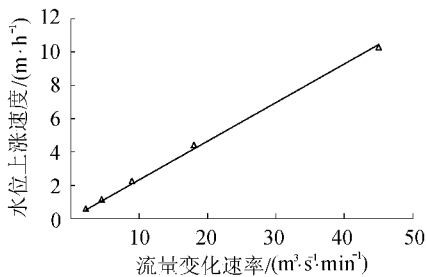


图2 须水河闸门关闭期间水位上涨速度和流量变化速率的对应关系

3.3 渠道中的水位变化和影响范围

图3给出了通过模拟计算得到的须水河节制闸

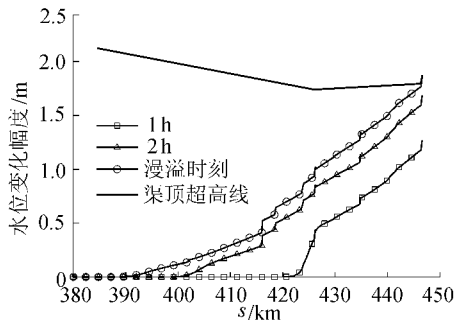


图3 流量变化速率为45 m³·s⁻¹/min时不同时刻渠道中的水位变化幅度

流量变化速率为45.0 m³·s⁻¹/min时不同时刻的沿程水位变化幅度,同时给出了初始时刻的渠顶超高线。由图中可见,最先出现漫溢的位置是在须水河节制闸前,上游方向的水位变化幅度和影响范围随时间增加而增加。图中水面线发生突变主要由输水建筑物(如倒虹吸、渡槽等)的局部水头损失引起。

由于不同时刻和不同流量变化速率时渠段中水位的影响范围不同,图4给出了模拟计算得到的不同流量变化速率在不同时刻的上游影响距离(以水位变化幅度超过0.01 m作为标准),可见同一时刻下,流量变化速率越大,对上游的影响距离也越远,其差距随时间增加而增加,漫溢时刻,计算结果显示流量变化速率小的其影响距离反而大,这主要是由于不同流量变化速率达到漫溢的时间不同造成的,虽然同一时刻流量变化速率小的影响距离小,但其最终达到渠顶漫溢所需的时间也长,影响距离也会随时间的增加而增加,因此图4中结果显示流量变化速率小的在漫溢时刻影响距离反而大。

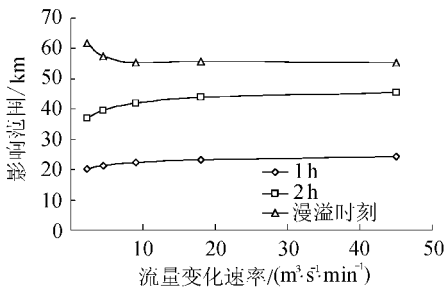


图4 不同时刻影响范围随流量变化速率的变化

3.4 渠道中沿程流量变化分析

图5给出了1h后沿程的流量变化幅度分布,可见须水河节制闸出流量减小导致上游附近渠道各断面流量相应减小,沿线流量变化趋势是流量变化速率越大,流量受到影响的渠道越远,流量受到影响的断面流量变化幅度也越大。

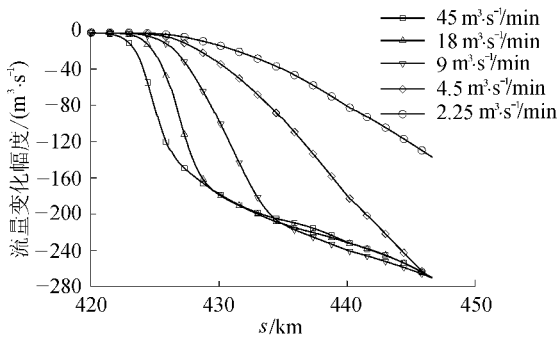


图5 不同流量变化速率在1h后的流量分布线

4 结 论

本文选取南水北调中线输水渠道中的须水河节制闸作为研究对象,数值模拟其闸下出流量以不同

的速率最终减小为零时闸前渠段中出现的水流漫溢现象,所得主要结论如下:

a. 渠道中节制闸关闭时,漫溢首先出现的位置在关闭节制闸的前端,漫溢出现的快慢与节制闸出流量减小的速率有关,节制闸关闭越快,或出流量减小得越快,漫溢出现的时间也越短。

b. 节制闸出流量的减小会导致闸前水位直线上涨,水位上涨速度与闸下出流量变化速率呈直线关系,闸门完全关闭后模拟计算得到须水河闸前水位上涨速度为 0.35 m/h 左右。

c. 得到了须水河节制闸不同流量变化速率下不同时间的影响范围,且流量变化速率越大,对上游的影响距离也越远,漫溢时刻,计算结果显示流量变化速率小的其影响距离反而大,主要是流量变化速率小的工况最终达到渠顶漫溢所需的时间长所致。

d. 在水流溢出之前,同一时刻节制闸下的流量变化速率越大,则断面流量受到影响的渠段范围也越远,各断面的流量变化幅度也越大。

显然,为尽量避免渠道出现漫溢事故,因各种原因需要关闭某一节制闸时,应尽量缓慢关闭闸门,延长渠道出现漫溢的时间,以留出更多的反应时间去启动退水闸或其他分水设施。总之,在闸门出流量

减小或关闭的情况下,必须将多余的流量在渠道漫溢发生前分流,否则会导致渠道出现溢流事故。

参考文献:

[1] 章晋雄,牛争鸣.南水北调中线输水渠道系统的仿真研究[J].系统仿真学报,2002,14(12):1588-1590.

[2] 丁志良,谈广鸣,陈立,等.输水渠道中闸门调节速度与水面线变化研究[J].南水北调与水利科技,2005,3(6):46-50.

[3] 吴泽宇,蒋为群.南水北调中线工程输水渠道桥梁水头损失影响分析[J].水利水电快报,1997,18(15):1-4.

[4] 黄国兵,王才欢.南水北调中线工程穿黄隧洞水力学试验研究[J].人民长江,1998,29(5):3-5.

[5] 魏文礼,王德意.计算水力学理论及应用[M].西安:陕西科学技术出版社,2001.

[6] 槐文信,赵明登,童汉毅.河道及近海水流的数值模拟[M].北京:科学出版社,2005.

[7] 管光华.大型渠道自动控制建模及鲁棒控制研究[D].武汉:武汉大学,2006.

[8] SWAMEE P K. Sluice-gate discharge equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineerin, 1992, 118(1):56-60.

[9] HENRY H R. Discussion of diffusion of submerged jets[J]. Transaction of ASCE, 1950, 115:687-694.

(收稿日期 2006-10-11 编辑 熊水斌)

(上接第 10 页)

5 结 语

本文提出了构建全息水资源动力模型的设想,分析了建立全息水资源动力模型的必要性和可能性,说明了全息水资源动力模型的主要构件,并对已有的一些研究工作做了简单介绍,阐述了全息水资源模型的运行理论、模型运行的必备条件和建立和谐水资源循环系统的概念。

参考文献:

[1] 杨树清.21 世纪中国和世界水危机及对策[M].天津:天津大学出版社,2004:32-46.

[2] 杜国志.新中国防洪 50 年[J].防汛与抗旱,1999(3):2-12.

[3] 丁桑岚.环境评价概论[M].北京:化学工业出版社,2001:98-134.

[4] BEVEN K J. How far can we go in distributed hydrological modeling? [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2001, 5(1):1-12.

[5] ROSS M A, TARA P D. Integrated hydrologic modeling with geographic information system[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1993, 119:129-139.

[6] 王书功,康尔泗,李新.分布式水文模型的进展及展望

[J].冰川冻土,2004,26(1):61-65.

[7] 周秀骥,吴国雄.中国气象事业发展战略研究:重大科学技术问题卷[M].北京:气象出版社,2004:57-73.

[8] 姚学祥,徐晶.2003 年淮河流域大水期间体积降水量的研究[J].气象学报,2004,62(6):803-813.

[9] 李大鸣,张红萍,李冰绯,等.多孔介质内部流动模型及数学模拟[J].天津大学学报,2002,35(6):699-704.

[10] 芮孝芳,冯平.多支流河道洪水演算方法的探讨[J].水利学报,1990(2):26-32.

[11] LI Da-ming, ZHANG Hong-ping, LI Bing-fei, et al. Basic theory and mathematical modeling of urban rainstorm water logging[J]. Journal of Hydrodynamics Ser B, 2004, 16(1):17-27.

[12] HAIDVOGEL D B, BECKMANN A. Numerical ocean circulation modeling [M]. Singapore: World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 1999:110-178.

(收稿日期 2006-04-10 编辑 熊水斌)

