

文章编号: 1001-4179(2007)01-0032-02

南水北调京石段应急供水水力控制模型研究

董延军 蒋云钟 王浩 鲁帆

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 为确保首都供水安全和奥运会的成功举办, 南水北调京石段应急供水工程计划 2007 年底将河北省 4 座大型水库原供农业、环境的用水引入北京, 因此研究确定相应的水力控制模型和算法具有非常迫切和重要的现实意义。基于从京石段的特点和渠道安全运行的角度出发, 重点讨论了京石段应急供水河北段明渠输水的水力计算模型。通过模型的计算来指导京石段应急供水运行和决策。

关键词: 京石应急供水; 非恒定流模型; 水力控制; 南水北调中线工程

中图分类号: TV131.61 文献标识码: A

1 概述

为了确保首都供水安全和奥运会的成功举办, 计划 2007 年底将河北省境内岗南、黄壁庄、王快、西大洋 4 座大型水库原供农业、环境的用水通过先期动工的南水北调中线工程京石段干渠引入北京。南水北调京石段应急供水调度的主要任务是当北京密云水库库容不足 5 亿 m³, 本地水源不能满足供水要求时, 启动应急北京供水系统。京石段应急供水工程起点为石家庄古运河暗渠, 终点北京团城湖, 河北段输水以明渠为主, 北京段以管涵为主。南水北调京石段供水对象是北京, 沿途分水口门不参加调度, 因此调度运行操作主要从渠道安全运行来考虑。控制过程中出现的壅水、跌水等现象使控制存在一定的误差, 因此渠道运行控制除了有较好的水力控制模型预测控制外, 还必须与自动化实时监控相配合来完成。本文重点讨论河北段明渠输水运行方式, 研究确定相应的水力控制模型及其计算方法。

2 渠道安全影响因素

在渠道输水过程中, 水位波动应受到严格限制。在混凝土衬砌的渠道中, 水位下降速度过快, 容易导致堤坝滑坡, 混凝土板受外水压力而遭受破坏。水位变化必须满足的约束条件为:

$$\frac{\Delta h}{\Delta t} < SH \quad (1)$$

式中 Δh 为 Δt 时间段内的水位差值; SH 为允许的水位降幅值。美国垦务局研究表明, 其限制标准为: 水位下降速度平均每小时不超过 0.15 m, 连续两小时不超过 0.30 m。这个速率适用于大多数土渠和薄膜衬砌的渠道^[1,2]。

3 京石段干渠拓扑概化

京石段干渠上主要的建筑物包括节制闸、退水闸、分水闸、进水闸等, 在应急供水工程中真正发挥作用的主要是进水闸和少数节制闸, 其余节制闸处于全开状态, 因此水力控制节点可概

化为图 1。概化图将京石段作为一个完整的渠道单元来考虑, 上游为古运河节制闸, 处于关闭状态(上游入流为 0), 下游为坟庄河节制闸, 是真正起调节控制作用的节制闸。

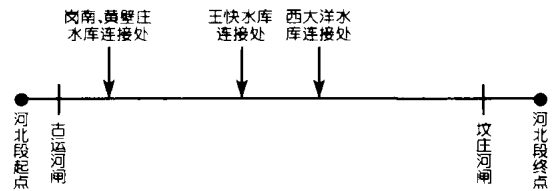


图 1 南水北调京石段水力控制节点概化

渠道水力控制模型计算是借助于求解一维渐变非恒定流基本方程组, 即圣维南方程组来完成的。圣维南方程组的应用是有一定的前提和假设条件的。由于渠道内存在着一些特殊类型的结点, 使得渠道不能完全按照圣维南方程组计算, 必须做一些相应处理。特殊的结点类型有: 分水口闸门、水库入流闸门、倒虹吸、涵洞和河网的交汇点等。在本模型中, 特殊的结点主要是水库入流与总干渠连接处和倒虹吸处。

为此, 京石段干渠被概化成特殊的结点和子河段, 圣维南方程组仅适用于子河段。倒虹吸和连接处这些结点附近, 一般情况下没有观测设施, 为了便于模型整体装配计算, 也即子河段与特殊结点统一起来进行求解, 结点上、下游需要各引入一个断面将结点隔开, 见图 2。

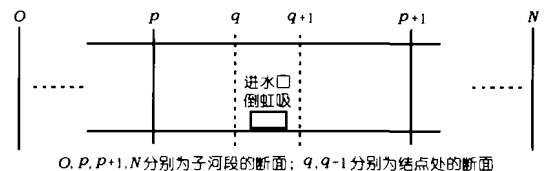


图 2 干渠拓扑化示意

京石段干渠总长 227.391 km, 有 3 个水库连接处进水口, 倒虹吸 16 座, 因此除了正常的计算断面外, 需要渠道中增加 38 个

收稿日期: 2006-09-05

作者简介: 董延军, 男, 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 工程师, 博士。

断面来处理这些特殊结点。子河段运用圣维南方程组来求解,特殊结点需要运用相容条件来求解。

4 控制模型的建立和求解

4.1 圣维南方程组的处理

描述明渠非恒定流动由连续方程和运动方程组成,即圣维南方程组。以水位 z 和流量 Q 为因变量,其基本方程为:

$$B \frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \text{ (不考虑侧向流)}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial s} + [gA - B(\frac{Q}{A})^2] \frac{\partial z}{\partial s} = (\frac{Q}{A})^2 \frac{\partial A}{\partial s} |z - g \frac{1}{AC^2 R} \frac{Q^3}{R} \quad (2)$$

由于上述圣维南方程组属于一阶拟线性双曲型偏微分方程,在一般情况下,无法求出其普遍的解析解,只能针对具体的明槽非恒定流问题,使用计算机数值求解法获得近似解。

方程组(2)用 4 点隐式差分格式(也称 Preissmann 格式)来离散化,离散后的非线性方程组为:

$$\left. \begin{aligned} z_m^{n+1} - c_{1m} Q_m^{n+1} + z_{m+1}^{n+1} + c_{1m} Q_{m+1}^{n+1} &= e_{1m} \\ a_{2m} z_m^{n+1} + c_{2m} Q_m^{n+1} - a_{2m} z_{m+1}^{n+1} + d_{2m} Q_{m+1}^{n+1} &= e_{2m} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

此式表示的是第 $m-1$ 个单元的两个非线性方程,其中相关参数可参阅文献[3]、[4]。

4.2 特殊结点处理

对于特殊结点的处理,一般采用相容性办法来解决,即连续性条件和能量条件。对于水库进水连接处,由于距离短,可不考虑能量损失和水头损失,具体表示为(4)式:

$$\begin{aligned} Z_i &= Z_{i+1} \\ Q_i + Q_f &= Q_{i+1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中 i 为上断面; $i+1$ 为下断面; Q_f 为集中进流量。

对于倒虹吸来说,需要考虑水头能量损失,具体表示为(5)式:

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_{i+1} \\ Z_i + \alpha_i \frac{(Q_i/A_i)^2}{2g} &= Z_{i+1} + \alpha_{i+1} \frac{(Q_{i+1}/A_{i+1})^2}{2g} + h_w \end{aligned} \quad (5)$$

式中 A_i 为第 i 个断面的面积; h_w 为从 i 个断面到第 $i+1$ 个断面的水头损失。考虑到倒虹吸断面面积一般变化很小,(5)式可简化为:

$$\begin{aligned} Q_i &= Q_{i+1} \\ Z_i &= Z_{i+1} + h_w \end{aligned} \quad (6)$$

4.3 方程的整体装配和求解

如果全河段有 N 个断面,那么就会有 $(N-1)$ 个非线性方程组。 $(N-1)$ 个方程组共有 $2N$ 个未知量,因此需要补充上下游两个边界条件,方程才能闭合求解。

由(3)式可见,其组成的方程组系数矩阵为一带状矩阵,因此可用追赶法(双消去法)求解。限于篇幅只介绍上边界条件为流量已知的计算过程。将上边界初始的已知条件,代入下一单元,得到如下追赶法迭代公式:

$$Q_0 = P_0 + S_0 z_0, S_0 = 0 \text{ (上边界初始条件)} \quad (7)$$

则第 i 个单元的追赶迭代方程为:

$$\begin{cases} Q_{i-1} = L_i + M_i Q_i \\ z_i = P_i + S_i Q_i \end{cases} \quad (8)$$

参数的具体含义见表 1。

最后利用下边界的条件 $a_N z_N + c_N Q_N = e_N$ 进行回代,可依次求出全河段的水位和流量。需要指出的是公式(3)中的系数,由于涉及到待求层的未知量,需要采用迭代计算。

表 1 公式(8)相关参数计算方法及含义

参数名称	子河段	水库连接处	倒虹吸
L_i	$\frac{(c_{11} + c_{11} P_0) \cdot d_{21} - c_{11} \cdot (e_{21} - P_0 \cdot c_{21})}{d_{21}(1 - c_{11} S_0) - (a_{21} + c_{21} S_0) \cdot c_{11}}$	0	h_w
M_i	$\frac{d_{21} + c_{11} \cdot a_{21}}{(a_{21} + c_{21} S_0) \cdot c_{11} - d_{21}(1 - c_{11} S_0)}$	1	1
P_i	$\frac{(c_{11} + c_{11} P_0)(a_{21} + c_{21} S_0) - (e_{21} - P_0 \cdot c_{21})(1 - c_{11} S_0)}{c_{11} \cdot (a_{21} + c_{21} S_0) - d_{21}(1 - c_{11} S_0)}$	$P_{i-1} + Q_f P_{i-1} + S_{i-1} h_w$	
S_i	$\frac{a_{21}(1 - c_{11} S_0) + (c_{21} + c_{21} S_0)}{d_{21}(1 - c_{11} S_0) - c_{11} \cdot (a_{21} + c_{21} S_0)}$	S_{i-1}	S_{i-1}

5 渠道水流实际模拟

利用以上的水力控制模型,对应急供水的各种工况进行模拟仿真。这里我们选择控制方式为上游边界条件是流量过程线,下游边界条件为闸前常水位。在模型中,上游边界没有入流,流量过程为 0。模拟按两种情况考虑:

(1) 水库与干渠连接处入流情况相同。选取 3 种典型渠道工况,按旬调度,模型仿真上下旬的水位波动过程。这 3 种调度工况分别是:① 应急需水量大,流量变化值为 $5 \sim 60 \text{ m}^3/\text{s}$;② 一般需水量,流量变化值为 $5 \sim 30 \text{ m}^3/\text{s}$;③ 需水量较小,流量变化值为 $5 \sim 10 \text{ m}^3/\text{s}$ 。选取第 1 渠段的水位波动情况并统计结果如表 2 所示。

表 2 不同工况下渠道水位波动情况对比

典型工况	时间	渠道流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	降水幅度/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	
			第 1 h	连续 2 h
5~ 60 m^3/s	上旬	5	0.20	0.31
	下旬	60		
5~ 30 m^3/s	上旬	5	0.06	0.10
	下旬	60		
5~ 10 m^3/s	上旬	5	0.04	0.08
	下旬	60		

从表 2 可看出,如果应急需水要求过大,则可能是渠道最不利运行工况,第 1 h 为 0.20 m,连续 2 h 为 0.31 m。图 3 为渠道最不利运行工况情况下水位波动过程线。

(2) 水库与干渠连接处入流情况不相同。如果干渠渠道内输水流量相同,连接处入流情况不一样,对渠道安全运行情况也是不一样的。表 3 为输水 $60 \text{ m}^3/\text{s}$ 情况下,连接处不同入流的工况(初始流为 $5 \text{ m}^3/\text{s}$)。

表 3 不同入流下渠道水位波动情况对比

水库入流情况/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)				降水幅度/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	
岗、黄入流	王快入流	西大洋入流	合计	第 1 h	连续 2 h
20	20	20	60	0.20	0.31
5	25	30	60	0.02	0.03
10	40	10	60	0.05	0.08

从表 3 结果看,流量输入不同,对干渠安全运行的影响也是非常显然的。

集, 其它指标不考虑。隶属度采用隶属度函数来表示, 本文采用如下线性函数^[4]:

$$y = \begin{cases} \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \text{ 或 } \frac{x_1 - x}{x_1 - x_0}, & x_0 < x < x_1 \\ 1 (\text{对应于 } x_1 \text{ 所属的那一等级}), & x \geq x_1 \\ 0 (\text{对应于 } x_1 \text{ 所属的那一等级}), & x \geq x_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 y 为对应于 x_0 或 x_1 所规定的那一类水的隶属度; x 为水质指标实测值; x_0 和 x_1 为某项指标相邻两类水质的标准限值。通过隶属度函数可求出 Hg、TP、TN 共 3 个单项指标对各类水的 3 行、5 阶隶属度矩阵 $[M]$, 如对吴淞口处水体水质, 可求得下面的隶属度矩阵:

	I	II	III	IV	V	
$M =$	0	0	0.98889	0.01111	0	TP
	0	0	0.90000	0.10000	0	Hg
	0	0	0	0	1	TN

计算权重, 对各参数赋予权重, 此处权重的分配根据各指标的超标情况进行加权, 超标越多, 加权越大。权重值依下式表示:

$$W_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

式中 C_i 和 S_i 分别为各指标实测含量和各类标准限值的算术平均值。在得出各单项指标的权重后, 再依下式进行均一化处理:

$$W_i = \frac{C_j / S_i}{\sum_{i=1}^m C_j / S_i} \quad (3)$$

由求出的均一权重 W_i 构成一个 1 行、3 阶矩阵 W , 将矩阵 W 和 M 相乘, 即可得综合评价结果。由模糊综合评价方法计算得到长江口 9 处水体相应各类水质的隶属度 (如表 2)。从表 2 可以看出, 吴淞口以上徐六泾、南支 SB2 (北支口) 和 SB3、浏河口和南港 SC1 为 IV 类水质, 吴淞口及其下游的南港 SC2、南槽 SP1 和 SP2 处水质则为 V 类。

5 结论

就本次长江口水质的现状评价结果看, 长江口水质污染比较严重, 以 TN、Hg 和 TP 指标为关键评价因子, 使用模糊评价方法评价, 抽样的长江口水体 IV 类水质点 5 个, V 类水质点 4 个,

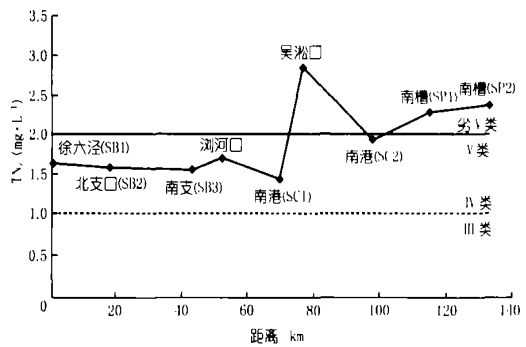


图 4 长江口表面水体 TN 含量与 GB3838- 2002 标准 TN 含量限值比较。没有优于 III 类水质的水体, 所以总体上长江口水质在 IV 到 V 类之间, 已经属于国家地面水环境质量标准 GB3838- 2002 规定的较劣等水体。虽然仅此一次抽样评价并不能断定长江口水质长期的污染水平, 但至少说明长江口水质状况已经不容乐观。从影响因素看, 影响长江口水质的主要因素为 TN 和重金属 Hg 含量超标, 长江口 9 个采样点 TN 超标均较严重 (9 处采样点均值达到 1.94 mg/L, 接近 V 类水质标准限值 2.00 mg/L), 水体富营养化程度比较高; Hg 超标也较严重 (9 测点均值达到 0.12 μg/L, IV 类水质); 从空间分布看, 吴淞口水体水质最差, 其 TN、TP 和重金属 As、Pb、Cr 含量均为 9 处采样点中最高, 且 TN、TP 含量超标严重 (分别达到 2.87 mg/L 和 0.21 mg/L), 吴淞口水体是污染长江口水质的重要原因。

参考文献:

- [1] 陈吉余, 陈沈良. 长江口生态环境变化和对河口治理的意见, 见: 中国水利学会 2002 学术年会特邀报告专辑: 34- 46.
- [2] 刘成, 王兆印, 何耘等. 长江污水排放口水域水质和底质分析. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(4): 275- 280.
- [3] 侯宇光, 杨凌真, 黄川友. 水环境保护 (水资源保护). 成都: 成都科技大学出版社, 1990: 137- 155.
- [4] 孙靖南, 邹志红, 任广平. 模糊综合评价在天然水体水质评价中的应用研究. 环境污染治理技术与设备, 2005, 6(2): 45- 48.
- [5] 胡雪峰. 上海市郊中小河流水污染现状及对策, 见: 华东师范大学博士后研究报告. 2001.

(编辑: 常汉生)

(上接第 33 页)

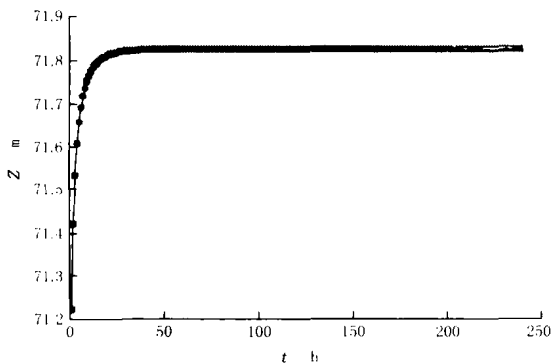


图 3 第 1 断面渠道水位波动过程线

6 结论

本文重点讨论了京石应急供水河北段明渠输水的水力计算

模型。从模型试验结果看, 不同运行工况对渠道运行调度都有显著的影响。从渠道安全运行角度讲, 尽量减少供水流量大幅度的波动, 可以通过步进的方式, 使流量逐渐增大, 这样虽然延长了供水响应时间, 但是保证了渠道运行安全。因此在兼顾供水的灵活性、缩小供水响应时间, 还要合理安排闸门运行调度, 使渠道的降水幅度控制在限制范围内。以上这些工作都是基于水力控制模型计算结果的基础上完成, 只有建立起准确有效的水力控制模型, 才能保证合理的供水决策。

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. 系统仿真学报, 2002, 12(14).
- [2] 周惠成, 蒋云钟. 北京市防洪供水系统输水预测与调度模型研究. 水利学报, 1995, 7(7): 45- 53.
- [3] 刘沛清. 计算水力学基础. 郑州: 黄河水利出版社, 2001.
- [4] 周雪漪. 计算水力学. 北京: 清华大学出版社, 1995. (编辑: 常汉生)

Research on water temperature variation of TGP reservoir before and after impoundment and its influence

YU Wen-gong^{1,2} *XIA Zi-qiang*^{1,2,3} *CIA Yu-peng*¹ *YU Guo-rong*¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology, Water Resources and Water Conservancy Project, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Resources and Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Scientific Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Observed temperature data of water released from the Three Gorges reservoir before and after the reservoir filling were analyzed on the basis of analyzing variation factors affecting the reservoir water temperature and in combination with the condition for the reservoir regulation. During the period of power generation with water retained by the cofferdam, some changes of the temperature processes of water released from the reservoir took place, resulting in temperature retarding phenomena. The influence of released water's temperature variation on the downstream river ecology and the influence scope were further analyzed, and on this basis, the Three Gorges reservoir's ecologic regulation principle was put forward, that was, the temperature process of water released from the reservoir should be possibly close to the natural process in order to create favourable conditions for the healthy development of the downstream ecologic system.

Key words: Three Gorges reservoir; temperature of water released from a reservoir; ecologic regulation; water ecologic environment

Research on hydraulic control model of Beijing– Shijiazhuang section of South to North water transfer for urgent water supply for capital Beijing

DONG Yan-jun *JIANG Yun-zhong* *WANG Hao* *LU Fan*

(Water Resources Institute of China Water Conservancy and Hydropower Science Academy, Beijing 100044)

Abstract: In order to ensure water supply safety for capital Beijing and smooth conduction of the Olympic Games in 2008, water in Gangnan, Huangbizhuang, Wangkuai and Xidayang reservoirs originally servicing agriculture and environment is planned to be transferred to Beijing in 2007 through Beijing– Shijiazhuang canal section of Middle Route Project of South to North Water Transfer constructed in advance. So, the researches on correspondent hydraulic control model and computation method are urgent and possess important real significance. In consideration of the features of Beijing– Shijiazhuang canal section and canal safe operation, the special study of hydraulic computation model for open water transfer channel of Beijing– Shijiazhuang section for urgent water supply is carried out. The model computation can guide the operation of urgent water supply and policy decision.

Key words: urgent water supply for Beijing; non– steady flow model; hydraulic control

Several considerations on comprehensive plan of the Dongting lake area

ZHONG Zhi-yu

(Design Institute, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: The Dongting lake is the second large fresh water lake in China, which is not only the production base of food grains, cotton, oil, aquatic product etc. of China, but also the important area for flood storage of the Yangtze river. Along with impoundment and operation of TGP, flood control construction after 1998 big flood and social and economic development, the situation of flood control, water resources, water ecological environment etc. have changed greatly. In order to construct healthy and harmonious Dongting lake, support and guarantee sustainable development of society and economy of the Dongting lake basin, the comprehensive plan for the Dongting lake area is needed urgently. In the light of analysis of new situation of the Dongting lake, some considerations on comprehensive plan of the Dongting lake area are suggested for discussion.

Key words: economic development; water ecological environment; comprehensive plan; Dongting lake area