

南水北调东线工程东平湖至济南段水流模拟建模研究

李大勇¹, 董增川¹, 陈 方²

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098 ;
2. 太湖流域管理局水文水资源监测局, 江苏 无锡 214024)

摘要 : 针对南水北调东线胶东输水干线东平湖至济南段输水工程 , 建立水流模拟的水动力学模型。在对输水线渠道及众多水工建筑物概化的基础上 , 着重探讨建模过程中的 5 个关键性问题 : ①上、下游边界及初始条件处理 ; ②进洪闸及分水闸的入出流过程处理 ; ③新建渠道沿线渗漏量动态化处理 ; ④输水线上倒虹吸、闸的过流量衔接模拟 ; ⑤迭代求解中非线性方程过闸流量的解析化处理。最后 , 在假定的两种工况条件下进行模拟计算 , 结果表明沿线各断面计算水位、流量与设计水位、流量拟合较好 , 并指出工程运行后应根据实测水位和流量资料对已建模型作进一步调试。

关键词 输水线概化 ; 水流模拟 ; 边界处理 ; 水动力学模型 ; 南水北调东线工程

中图分类号 : TV135.3 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-764X(2006)02-0001-04

Hydrodynamic modeling of South-to-North Water Transfer East Route Project from Dongping Lake to Jinan City // LI Da-yong¹, DONG Zeng-chuan¹, CHEN Fang²(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. Hydrology and Water Resources Monitoring Bureau of Taihu Basin Administration, Wuxi 214024, China)

Abstract : A hydrodynamic model for current simulation was established for the South-to-North water transfer project from Dongping Lake to Jinan City. Based on the generalization of water transfer channels and hydraulic structures, five critical problems were discussed : 1. simulation of the upper and lower boundaries and initial condition ; 2. simulation of flood-intake gate and flood diversion gate ; 3. dynamic simulation of leakage of the newly-built channel ; 4. simulation of excess flow of inverted siphon and gate along the water transfer route ; 5. deduction of analytic formulas for excess flow in nonlinear equation by iteration algorithm. The numerical calculation under the assumption of two operation conditions shows that the calculated results of water level and discharge fit well with the design values. Finally, it is proposed that the model developed needs for further adjustment based on measured data after the operation of the project.

Key words : generalization of water transfer route ; current simulation ; boundary treatment ; hydrodynamic model ; South-to-North Water Transfer East Route Project

东平湖至济南段输水工程是南水北调东线胶东输水干线的首段工程^[1], 对缓解济南市水资源供需矛盾、解决玉清湖水库因引黄泥沙能力不足而引起的供水水源问题、打通东平湖洪水东排出路、冲刷小清河及改善沿线环境都有积极的作用。为了充分发挥输水系统在不同工况组合条件下的综合功能, 输水沿线布置了众多的桥梁、渡槽、倒虹吸、进洪闸门及分水闸门等水工建筑物, 使得局部水流流态比较复杂, 给实际的水流模拟工作带来了很大困难。本文立足于这一实际问题, 探讨了建模过程中 5 个关键性问题, 使建立的水动力学模型既能正确模拟这些工程措施的规模、位置, 又能模拟这些工程措施

的控制运行方式, 满足了输水系统不同工况组合下的功能需求。

1 输水系统水流控制方程组

输水系统水流控制满足一维非恒定流圣维南方程组, 即

连续方程 :

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_L \tag{1}$$

动力方程 :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{1}{K^2} \frac{Q|Q|}{A} = q_L v_x \tag{2}$$

水流控制方程组中各变量的含义、方程的离散方法及离散后形成的线性方程组递推系数见文献[23]

值得说明的是,输水渠道采用的是人工梯形断面 $\frac{\partial A}{\partial t}$ 有如下关系:

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \left(B + \frac{S}{2} \Delta Z \right) \frac{\partial Z}{\partial t}$$

式中: S 为两侧边坡之和; ΔZ 为 Δt 时段内水位的增量; B 为河道水面宽; $\frac{S}{2} \Delta Z \frac{\partial Z}{\partial t}$ 为非线性项,在模拟计算中用上一时段值代替,以消除由于计算时间过长引起的水量平衡误差。

2 输水系统的概化

东平湖至济南段输水沿线布置了众多交叉式水工建筑物,从建筑物构建的位置、方式对水流流态影响的实际程度出发,对输水干线进行了概化,达到既简化计算又不影响水流局部流态的目的。概化后输水沿线布置倒虹吸 10 座、进洪闸 4 座、分水闸 4 座、防洪闸 2 座、渠首引水闸 1 座、节制闸 1 座及泄水闸 2 座,具体位置见图 1。值得特别说明的是,浪溪河泄水闸和北大沙河泄水闸由于与相应的倒虹布置在同一闸室内,图 1 中并未标出,而在实际模拟过程中给予了考虑。

在对输水干线进行概化的过程中,依据以下 3 条原则布设节点:①在河道断面面积突变处设节点;②在闸门、倒虹吸等控制建筑物上、下游设节点;③在集中入流及水工建筑物与输水干线通过河道相连的连接处设节点。整个输水干线共布置节点 51 个。

为了与实际输水干线河道水流特性尽量保持一致,在比较顺直的河道布设断面少些,而在河道走向变化大的地方相对布设较多的断面。整个输水干线共布置断面 107 个,当然也可以根据实际情况适当的增加或减少。

从断面划分可知,模型中选用的空间步长不等,为了满足计算的稳定性和迭代的收敛性要求,本模型中 $\Delta t = 450 \text{ s}$ 。

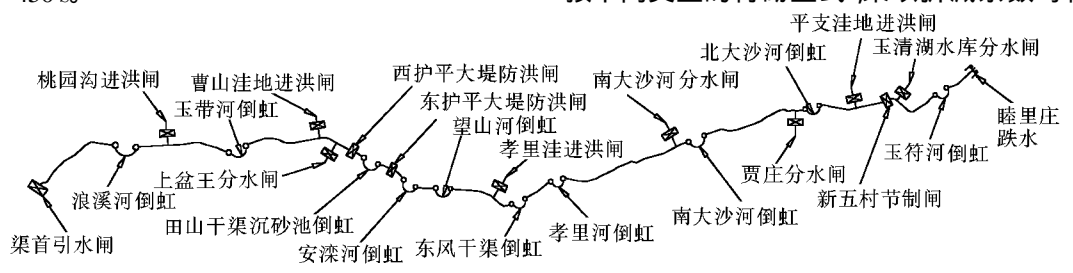


图 1 东平湖至济南段输水干线概化示意图

3 建模过程中关键性问题的处理

3.1 上、下游边界及初始条件处理

本模型建立在东平湖优化调度模型和区域供水量分析模型基础之上,这主要是针对计算的上、下游边界条件而言。模型上边界条件采用东平湖渠首引水闸的引水流量过程,下边界为已知的水位关系。模型中用计算时段内区域水资源供需分析得到的需水量过程插值推出水位过程。

计算过程中初始条件引起的误差会在计算中逐渐消除,为了使模型较快地达到计算稳定,节点、断面的初始水位和流量选用计算稳定后某一时段的输出结果。

3.2 进洪闸、分水闸的入出流过程处理

输水干线中设有桃园沟进洪闸、曹山洼地进洪闸、孝里洼进洪闸及平安洼进洪闸,它们的入流过程采用产汇流模型的计算结果,而上盆王分水闸、南大沙河分水闸、贾庄分水闸及玉清湖水库分水闸,它们的取水口出流则根据工程尺寸和闸上下游水位控制模拟,然后用区域供需分析得出的实际需水过程来校核。对于浪溪河泄水闸及北大沙河泄水闸,由于这两座水工构筑物兼有分水和进洪的功能,可以采用上述两种情况分别处理。

3.3 输水沿线渗漏量的动态化处理

为了保证将宝贵有限的长江水安全地输送到供水区,满足用户用水要求,对于新建的输水线在模拟过程中必须考虑沿途水量损失。采用如下公式模拟:

$$S = 0.0116K(b + 2h_r \sqrt{1 + S_0^2}) \quad (3)$$

式中: S 为单位渠长的渗漏流量, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{km})$; K 为渠床渗透系数, m/d ; b 为渠底宽, m ; h_r 为渠段的时段平均计算水深,计算中采用渠段首末断面水深的平均值, m ; S_0 为边坡系数; r 为考虑边坡侧向毛管渗吸的改正系数,其值为 1.1 ~ 1.4,视土质情况及毛管作用强弱选用。

考虑地下水对输水渠道渗漏的顶托影响,按式(3)计算的自由渗漏量乘以顶托影响校正系数即为顶托渗漏情况下不同渠段单位渠长的时段渗漏量;按不同类型的衬砌型式,乘以折减系数可得各渠段

单位渠长的时段渗漏量,在不同渠段上把上述计算得到的值乘以模拟计算的空间步长,即近似得到不同渠段上各计算断面上的时段渗漏量,即对应模型递推系数 D_i 中 Δx_{iQL} 项。

3.4 输水线上倒虹吸、闸的过流量衔接模拟

3.4.1 闸的过流量模拟

模型中闸采用宽顶堰平面闸处理,孔流与堰流的区分可通过闸门开启高度 e 与闸上节点水位和闸底坎高程之差 H 的比值来近似判别,当 $\frac{e}{H} \geq 0.65$ 时为堰流,当 $\frac{e}{H} < 0.65$ 时为孔流。限于篇幅,本文仅说明闸门出流为孔流时的处理方式。当闸下节点水深 t 大于临界水跃跃后水深 h_c'' 时,为闸孔淹没出流,当 t 小于或等于 h_c'' 时,为闸孔自由出流。 h_c'' 采用下式近似计算^[4]:

$$h_c'' = \frac{\epsilon' e}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{16 \mu_1^2 H_0}{\epsilon'^3 e}} - 1 \right) \tag{4}$$

式中: H_0 近似处理为闸上游节点水位与闸底坎高程之差,即 $H_0 \approx H$; ϵ' 为闸孔垂向收缩系数,由 e/H 值查手册确定; μ_1 为闸孔自由出流流量系数, $\mu_1 = \delta \epsilon' \sqrt{1 - \epsilon' e/H}$,其中 δ 为闸门的流速系数,它与闸坎形式、闸门底缘形状和相对开度有关,可按不同的闸坎形式查表^[3]确定。

闸孔自由出流的流量计算公式为

$$Q = \mu_1 e B \sqrt{2gD_0} \tag{5}$$

式中: B 为闸门净宽, m ; D_0 为包括行近流速水头的闸前水深,实际模拟计算中忽略闸前行近水头,用闸上节点水位与闸底坎高程之差代替,即 $D_0 \approx H$ 。

闸孔淹没出流的流量计算公式为

$$Q = \mu_s B \sqrt{2gH^{3/2}} \tag{6}$$

式中: μ_s 为闸孔淹没出流流量系数,由下式确定,即

$$\mu_s = \begin{cases} 2.05 \left(\frac{e}{H} \right)^{1.34} \left(1 - \frac{t}{H} \right)^{0.83} & \frac{e}{H} \leq 0.3 \\ 2.75 \left(\frac{e}{H} \right)^{1.58} \left(1 - \frac{t}{H} \right)^{0.83} & \frac{e}{H} > 0.3 \end{cases}$$

在模拟计算中,把式(5)与式(6)统一改写为

$$Q = \mu'' e B \sqrt{2gH} \tag{7}$$

式中:闸孔自由出流时,系数 $\mu'' = \mu_1$;闸孔淹没出流时,系数 $\mu'' = \mu_s H/e$ 。

3.4.2 倒虹吸的过流量模拟

为了与式(7)形式上保持一致,倒虹吸的过流量公式可以写成

$$Q = \xi H B \sqrt{2gH_s} \tag{8}$$

式中: ξ 为倒虹吸的流速水头损失系数; H_s 为倒虹吸上下节点水位之差。倒虹吸的模拟同闸门堰流的

淹没式出流相类似,只不过它的过水面积是固定的,具体处理方式借鉴朱琰等的研究成果^[5]。

3.5 迭代求解中非线性方程过闸流量的解析化处理

把进洪闸和分水闸当作支流处理,整个输水系统可以看作树状河网。采用双消元法形成节点水位方程组,对方程组中的非线性方程过闸流量 Q_g 项直接采用解析式处理,常可避免直接把过闸流量公式线性化带来的误差偏大、计算结果有时明显不合理、计算工作量大及计算时间过长的弊端。

以图2为例,闸作为特殊河段, N_1 为闸上节点, N_2 为闸下节点。 N_1, N_2 的节点方程为

$$K_{N_{1,l}} Z_{N_1} + K_{N_{1,2}} Z_{N_0} = K_{N_{1,R}} + Q_g \tag{9}$$

$$K_{N_{2,l}} Z_{N_2} + K_{N_{2,2}} Z_{N_3} = K_{N_{2,R}} - Q_g \tag{10}$$

$$Q_g = \mu'' e B \sqrt{2gH} \tag{11}$$

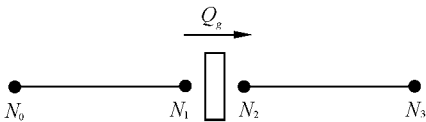


图2 过闸流量示意图

3 个方程求解 3 个未知数 Z_{N_1}, Z_{N_2}, Q_g 。式(9)

~(11)最终可简化为

$$Z_{N_1} = r_1 + Q_g/K_{N_{1,l}} \tag{12}$$

$$Z_{N_2} = r_2 - Q_g/K_{N_{2,l}} \tag{13}$$

$$Q_g = \begin{cases} C \sqrt{Z_{N_1} - Z_0} & Z_{N_1} > Z_{N_2} \\ -C' \sqrt{Z_{N_2} - Z_0} & Z_{N_1} < Z_{N_2} \end{cases} \tag{14}$$

式中: $r_1 = R_1/K_{N_{1,l}}$, r_1 为正, $R_1 = K_{N_{1,R}} - K_{N_{1,2}} Z_{N_0}$; $r_2 = R_2/K_{N_{2,l}}$, r_2 为正, $R_2 = K_{N_{2,R}} - K_{N_{2,2}} Z_{N_3}$; Z_0 为闸底坎高程; $C = \mu' e B \sqrt{2g}$, 其中 $\mu' = Z_{N_1} - Z_0$; $C' = \mu'' e B \sqrt{2g}$, 其中 $\mu'' = Z_{N_2} - Z_0$; $K_{N_{1,l}}, K_{N_{1,2}}, K_{N_{1,R}}, K_{N_{2,l}}, K_{N_{2,2}}, K_{N_{2,R}}$ 均为节点平衡方程组中的系数。

当 $Z_{N_1} > Z_{N_2}$, 为正向流时,将式(12)代入式(14),即得

$$Q_g = C \sqrt{r_1 + Q_g/K_{N_{1,l}} - Z_0}$$

令 $P = r_1 - Z_0, W = 1/K_{N_{1,l}}$, 由节点方程组系数特性分析可知 W 为负,因此上式只有 P 为正值时有解,求解可得

$$Q_g = \frac{C^2 W + \sqrt{(C^2 W)^2 + 4 C^2 P}}{2}$$

反向流与此类似,不再赘述。用上面给出的解析式方法求得过闸流量 Q_g ,把 Q_g 代入节点方程,消除非线性方程中的未知因素,进而用迭代法求得各节点水位直至达到允许的误差范围为止。

4 模拟结果及分析

东平湖至济南段输水工程还处于施工阶段,不具有任何运行后实测的流量或水位资料,因此只能在假定的工况条件下进行模拟计算。

第一种工况假定上边界条件为设计的恒定流量过程 $50\text{ m}^3/\text{s}$,下边界为睦里庄跌水处恒定设计水位过程 27.74 m ,而输水干线其他的进洪闸与分水闸假定为零流量过程,防洪闸及节制闸按全敞开处理。模型时间跨度为 7 d ,考察模型运算稳定后任意时段内所选取断面的水力要素计算值与设计值的吻合程度,此工况相当于用设计资料调试模型,部分断面对比结果见表 1。

表 1 选取断面水力要素设计值与模型计算值对比

断面位置	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		水位/m	
	设计值	计算值	设计值	计算值
渠首引水闸—浪溪河倒虹 (8+115)	50	49.92	38.65	38.63
东护平大堤防洪闸下游 (33+046)	50	49.70	35.30	35.28
望山河倒虹下游 (38+313)	50	49.65	34.15	34.12
南大沙河倒虹上游 (63+378)	50	49.42	31.99	31.97
睦里庄跌水 (89+891)	50	49.19	27.74	27.73

模型中动态计算的输水沿线渗漏损失约为 $0.81\text{ m}^3/\text{s}$,而输水干线末端流量计算值为 $49.19\text{ m}^3/\text{s}$,两者之和约为 $50\text{ m}^3/\text{s}$,由于沿途没有任何其他水量进入,水量与渠首端进水量基本保持守恒,同时沿线各断面的计算水位、流量与设计水位、流量拟合得较好,说明所建模型从量上能够满足下游需水的要求。

第二种工况模拟时间假定为 30 d ,上边界假定为变流量过程,变动范围为 $30\sim 40\text{ m}^3/\text{s}$;下边界假定为变水位过程,变动范围为 $26.2\sim 27.74\text{ m}$,假定桃园沟进洪闸、孝里洼进洪闸、南大沙河分水闸及玉清湖水库分水闸皆为变流量过程,变动范围分别为 $3\sim 5\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $2\sim 5\text{ m}^3/\text{s}$ 、 $1\sim 3\text{ m}^3/\text{s}$ 及 $4\sim 6\text{ m}^3/\text{s}$,其他的进洪闸与分水闸与上述 4 闸的情况类似,为了计算方便,这里假定为零流量过程,而新五村节制闸按 2 孔出流处理,防洪闸由上下节点水位控制出流方式。计算稳定后,部分断面水位和流量变化过程见图 3~6。

5 结 语

a. 本文重点在于探讨东平湖至济南段输水系统水流模拟的建模过程,文中只是在假定的简单工况条件下进行计算,旨在说明建模思想的可行性。

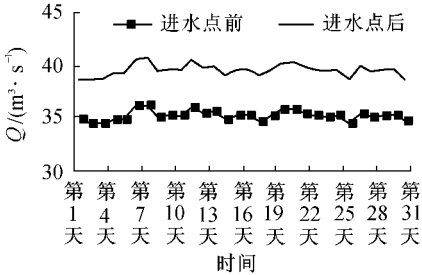


图 3 桃园沟进水点前后断面日均流量过程线

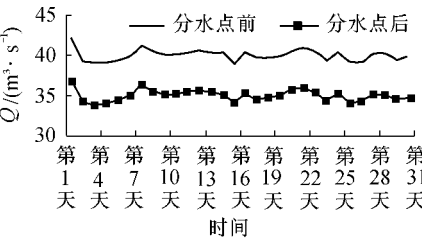


图 4 玉清湖分水点前后断面日均流量过程线

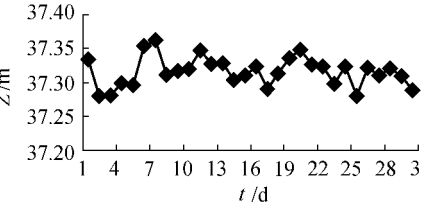


图 5 桃园沟进水点处断面日均水位过程线

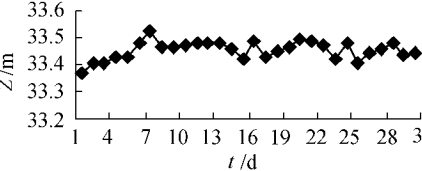


图 6 孝里洼进水点处断面日均水位过程线

b. 对于新建的东平湖至济南段输水干线而言,闸、倒虹吸等水工建筑物实际的运行控制方式复杂多变,只能在工程运行后针对具体问题进行具体分析,以增加模型的灵活性和适应性。

c. 工程运行后,在取得同步监测水位和流量资料的基础上,需要对已建模型作进一步调试。

参考文献:

[1] 罗辉,赵晓星,崔莉.东平湖水环境分析与调水水质保障对策[J].山东水利,2000(12):18-22.
[2] 王船海,李光炽.实用河网水流计算[M].南京:河海大学出版社,1994:55-70.
[3] 李大勇,刘凌,董增川.改善张家港地区水环境引水方案的对比研究[J].水利水电科技进展,2004,24(6):17-20.
[4] 武汉水利电力学院水力学教研室.水力计算手册[M].北京:水利出版社,1980:160-164.
[5] 朱琰.太湖流域实时洪水预报调度系统研究[D].南京:河海大学,2003.

(收稿日期 2005-04-22 编辑 骆超)