

# 一维河网不稳定流模型在黄河下游 枯季水量调度中的应用\*

任汝信 童国庆 李静

( 山东黄河河务局, 济南 250013 )

**提 要** 随着黄河下游工农业生产的不断发展, 人民群众生活质量不断提高, 黄河水资源供需矛盾越来越突出. 确保黄河不断流必然面临着越来越大的压力, 必须提高水量调度的快速反映能力. 本文讨论了一维河网不稳定流数值计算模型在黄河下游枯水演进中的数学基础、实现方法和在此基础上建立的枯季水量调度软件的应用. 从对八十年代以来的枯水年份的模拟情况来看, 流量拟合结果均能达到乙级以上, 这对于水资源短缺的黄河下游的引黄调度具有重要的参考价值.

**关键词** 不稳定流模型 一维河网 枯水调度 黄河下游  
**分类号**

## 1 概述

黄河下游河道山东段河道长628km. 其中, 山东省上界到高村水文站属游荡型河段, 河道宽浅、散乱, 主溜摆动频繁. 高村水文站到陶城铺河段是从游荡型向弯曲型转变的过渡型河段, 河道特点是河道平面变化比较大, 河道上宽下窄. 陶城铺到利津水文站属弯曲性河段, 最窄处艾山卡口仅275m. 利津以下河段是摆动频繁的河口尾闾段. 自1999年春季黄委会首次对黄河下游实施黄河水量统一调度以来, 通过采取限制引水指标、轮灌、集中供水等调度措施, 取得了显著成效, 保证了城乡居民生活用水, 缓解了各地旱情, 确保了黄河不断流, 改善了生态环境, 取得了很大的社会效益. 但目前水量调度仍然停留在传统的经验分析的基础上, 缺乏科学的分析预测模型, 给山东黄河水资源调度带来了很大的困难, 远远不能适应当前形势的发展. 迫切需要建立一套能够为枯季引黄调度提供参考的演进系统, 本文讨论了一维河网不稳定流数值计算模型在黄河下游枯水演进中的数学基础、实现方法和在此基础上建立的枯季水量调度软件的应用情况.

## 2 枯水演进影响因素

本软件所模拟的河段位于泺口水文站到利津水文站之间, 河道长 167.8km. 该河段枯季水流的演进受多种因素的影响, 主要是灌溉引水、枯水形状、断面形态等. 由于受黄河

\* 2003-08-02 收稿;2004-09-16 收修改稿. 任汝信, 男, 高级工程师.

大堤的约束,黄河从冻口到利津段基本没有区间加水,该河段有 28 座引黄涵闸,枯水期一般流量较小,因此灌溉引水对枯水演进影响较大,枯水期断面一般淤积,使有效过水断面变小,水位抬高,引水量越多,则进入下一子河段的流量越小.枯水形状是影响枯水演进的另一重要因素,形状较瘦的水流,其在演进过程中受到的调蓄作用就较明显,即洪峰的削减率大,反之洪峰的削减率小.大量的分析资料表明,主槽断面形状是影响枯季水流演进的最主要因素.因此断面资料的完整、准确和软件模拟时所采用的断面资料与真实值接近的程度对模型拟合的精度有很大的影响.

### 3 冻口-利津河段河网的拓扑概化

圣维南方程组又称渐变非恒定流方程,它仅适用于一个单位的河道.这意味着仅仅在河道的两 endpoints 有一些特殊的结点,在这两端点之间都是一般的自由水流河段.特殊的结点类型有:河网的交汇点、边界条件、闸坝堰等.在本模型中,特殊的结点存在于那些引水涵闸所在的虚拟断面.对这些特殊的结点,需要应用两个特殊的方程(即后面的方程 7 和方程 8).

由于这些原因,河网被概化成特殊的结点和子河段.复杂的河网由一系列特殊的结点和子河段组成.圣维南方程组仅适用于子河段.

在黄河下游河道两观测断面之间存在着一个或多个引黄涵闸,引黄涵闸附近没有观测断面,而模型理论的适用却需要引黄涵闸上下游各存在一个断面,为此需引进“虚拟断面”的概念.即当两个实际断面之间存在一个或多个引黄涵闸时,为了问题处理的方便,引入两个虚拟断面将引黄涵闸隔开,见图 1 所示,图 1 可以概化为表格矩阵.

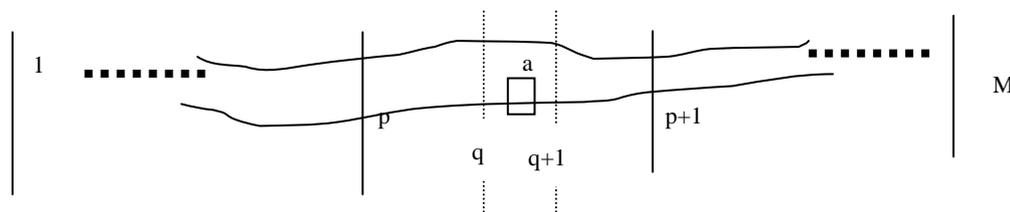


图 1 河段断面划分示意图

(1、p、p+1、M 分别表示第 1、p、p+1、M 个实际断面; q、q+1 表示第 q、q+1 个虚拟断面; a 表示引黄涵闸.)

Fig.1 The sketch map of reach section

冻口-利津河段河道有 23 个河道统测断面(即实际断面),两个连续的实际断面之间的河段是一个实际子河段.有的子河段上有一个或多个引黄涵闸,有引黄涵闸的子河段假设存在两个虚拟断面,认为涵闸存在两个虚拟断面之间;多个涵闸作为一个引水点来考虑.所研究的河段有 19 个子河段有引黄涵闸,这样共有 38 个虚拟断面.有涵闸引水的结点被处理为特殊结点,称之为奇异点,奇异点存在于两个虚拟断面之间.两虚拟断面之间的河段为虚拟子河段,其余为实际子河段.虚拟断面的断面形态数据由与其邻近的上下两实际断面及河道距离差分而得,虚拟子河段的河段长度认为等于零.实际子河段适用圣维南方程组,虚拟子河段适用引水平衡方程.

表 1 概化后的矩阵表格

Tab. 1 The table of generalized matrix

段 面	断面类型 (0 虚拟) ; (1 实际) (0 不是) (1 上边界) (2 下边界)	是否边界	边界类型 ( 1:Z-t ) (2:Q-t) (3:Z-Q)	入流河段	出流河段
1	1	1	2		1 ~ 2
...		0			
p	1	0		p-1 ~ p	p ~ p+1
q	0	0		p ~ q	q ~ q+1
q+1	0	0		q ~ q+1	q+1 ~ p+1
p+1	1	0		q+1 ~ p+1	p+1 ~
...		0			
M	1	2	3	M-1 ~ M	

#### 4 控制微分方程和计算方法的实际处理

##### 4.1 扩展的圣维南方程

扩展的圣维南方程组<sup>[1]</sup>由质量与动量守恒方程组成：

$$\partial(A + A_0) / \partial t + \partial Q / \partial s - qs - qg - qo = 0 \tag{1}$$

$$\partial Q / \partial t + \partial(\beta Q^2 / A) \partial s + gA(\partial Z / \partial s + S_f + S_{ec}) + L = 0 \tag{2}$$

式中  $Z$  为水位； $Q$  为流量； $s$  为沿水流方向的距离； $t$  为时间； $A$  为有效过水断面面积； $A_0$  为无效过水断面面积，主要是为了考虑河湾等，在这些地方水流速度很小以致于可以忽略，只起蓄水作用，故该量仅在连续方程中出现。 $qs$ 、 $qg$  和  $qo$  是沿着河槽单位直线距离的旁侧入流或出流(入流为正，出流为负)。 $qs$  是地表水， $qg$  是壤中流， $qo$  是漫岸或堤单宽流量。摩擦比降  $Sf$  用曼宁公式计算：

$$Sf = n^2 |Q| Q / A^2 R^{4/3} = |Q| Q / K^2 \tag{3}$$

$$K = AR^{2/3} / n \tag{4}$$

式中  $R$  是水力半径， $n$  是糙率， $A$  是面积。 $\beta$  为动量修正系数。 $L$  为侧向水流动量， $L = Ls + Lg + Lo$ ，包括地表径流  $Ls$ ，河道与地下水交换引起的动量变化  $Lg$ ，漫岸或堤流量引起的动量变化。本研究中忽略侧向水流动量的影响。 $Sec$  为侧收缩系数。

##### 4.2 扩展的圣维南方程的牛顿迭代法

方程 (1) 和 (2) 用四点隐式差分来离散化，离散后的非线性方程组为：

$$A1_j \times Z_j^{k+1} + B1_j \times Q_j^{k+1} + C1_j \times Z_{j+1}^{k+1} + D1_j \times Q_{j+1}^{k+1} = E1_j \tag{5}$$

$$A2_j \times Z_j^{k+1} + B2_j \times Q_j^{k+1} + C2_j \times Z_{j+1}^{k+1} + D2_j \times Q_{j+1}^{k+1} = E2_j \tag{6}$$

式(5)是连续方程的离散，(6)是动量方程的离散。

##### 4.3 特殊结点的处理

由于涿口-利津河段没有旁侧入流，故特殊结点包括：

(1) 边界点:本模型的率定中所使用的上边界是涿口站的流量过程，下边界可以使用下列三种方式：①利津站的水位过程；②利津站的流量过程；③利津站的水位流量关系。因

为在实际的使用中, 利津站的水位流量关系容易求得, 也比较稳定, 所以模型的下边界条件常采用水位流量关系. 上边界的洛口站的入流过程为预报值.

(2) 引水点: 引水点适用以下引水平衡方程:

$$Q_j^n = Q_{j+1}^n + Q_{j+1}^n \quad (7)$$

$$Z_j^n = Z_{j+1}^n \quad (8)$$

式中, 下标j表示空间变量, 上标n表示时间变量.

#### 4.4 系统方程的装配

河网系统的线性迭代方程由两部分组成:(1) 对于所有子河段扩展的圣维南方程组的迭代方程,(2) 所有特殊结点的迭代方程. 如一个河网分成M个小河段, 第j个小河段分为JK[j]-1个子河段, 共有2JK[j]个未知量和2(K[j]-1)个迭代方程, 这M个小河段共有 $2\sum JK[i]$ 个未知变量和 $2\sum (JK[i]-1)$ 个方程.

对于M个子河段的河网具有2M个入流和出流数, 如上边界条件只有一个出流, 则只有一个方程. 一个闸, 一个入流和一个出流, 有两个方程, 根据这个解释可以知道具有2M个数目入流和出流的河网, 共有2M个特殊结点的方程, 因此该河网共有 $2\sum (JK[i]-1) + 2M = 2\sum JK[i]$ 个方程, 这正好与未知变量的数目一致, 说明该系统是可解的[2].

#### 4.5 系统方程解的分析(高斯消元法)

对于一个复杂的河网系统, 未知变量通常是一个很大的数目, 幸运地系统矩阵是非常稀疏的, 对于圣维南方程适用的子河段和小河段, 系统方程矩阵每行只有四个元素非零, 其它都是零元素, 对于闸、上、下边界条件组成的矩阵每行最多只有四个元素非零, 对于河流的交汇点, 如入流与出流总数目是n+m, 则在质量守恒方程中有n+m个元素非零, 动量方程中非零元素仍是四个, 考虑到这些因素, 用两个矩阵来描述河网系统方程, 第一个矩阵用来存贮河网系统非零元素, 另一个矩阵用来存贮非零元素是哪个变量, 最后一行用来存贮一行有几个非零元素[3]. 这两个矩阵用特殊的高斯消元法求解, 在求解过程中主元可在所有行列中寻找, 也可只在列中寻找, 一般仅在列中寻找主元的解的精度已经相当高, 可满足要求, 而且在解的过程中元素的增加相比之下要少得多了.

## 5 实际水流模拟

利用以上一维河网不稳定流原理, 以冻口水文站入流过程为上边界条件, 利津水文站的水位流量关系为下边界条件, 以该河段的涵闸引水为水量交换条件, 忽略河段间的蒸发、下渗和虹吸引水, 开发了冻口~利津河段的枯水演进调度系统. 利用该系统对断流影响较小的1985年4~5月份和1988年3~5月份冻口~利津河段的径流、引水进行了模拟, 模拟结果误差分析方法采用“确定性系数”法<sup>①②</sup>, 经误差分析, 利津水文站1985年和1988年流量预报的确定性系统数为0.95和0.85, 分别达到甲级和乙级水平. 因此, 利用一维河网不稳定流模型建立的枯水演进系统对于实际应用的效果是较好的, 能够应用于实际水量调度中. 1985年、1988年模拟情况详见图2、图3.

① 中华人民共和国水电部. 水文情报拍报办法. 1964, 12

② 中华人民共和国水电部. 水文情报预报规范(SD138-85), 1985

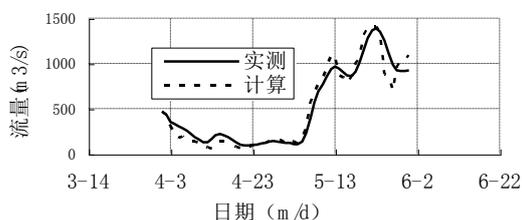


图2 1985年利津水文站流量拟合结果

Fig.2 The fit result of runoff at Lijin station in 1985

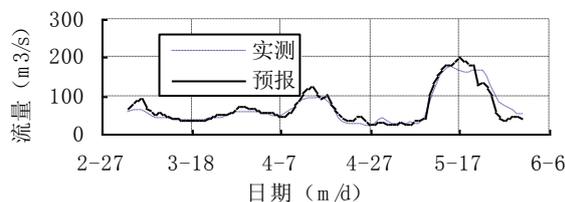


图3 1988年利津水文站流量拟合结果

Fig.3 The fit result of runoff at Lijin Station in 1988

## 6 结论

黄河下游的水流演进一般采用马斯京根等水文学的方法,不能反映黄河多泥沙的物理特点,其演进参数  $k$  和  $x$  规律性差. 本文使用一维河网非恒定流理论来拟合黄河下游枯季水流,考虑了河道糙率、断面形态下垫面条件,各演进参数都有明显的物理意义. 从对八十年代以来的枯水年份的模拟情况来看,流量拟合结果均能达到乙级以上,这对于水资源短缺的黄河下游的引黄调度具有重要的参考价值.

## 参 考 文 献

- 1 李致家. 通用一维河网不恒定流软件的研究. 水利学报, 1998, 8
- 2 王德耀. 计算水力学理论与应用. 南京: 河海大学出版社, 1989
- 3 Cung J A, *et al.* Practical Aspects of Computational River Hydraulics, Pitman advanced Publishing Program on River Hydraulics. Pitman Advanced Publishing Program, 1982, 20-50

# Application of One-dimensional Unsteady Channel Model in Water Dispatching of Low Water Evolution of Lower Reaches of the Yellow River

REN Ruxin, TONG Guoqing & LI Jing

(Yellow River Shandong Bureau, YRCC, Jinan 250013, P.R.China)

## Abstract

With the development of agricultural and industrial production, and with the improvement of stand of living in the lower reach Yellow River, there is an increasing contradiction between water demand and water supply. It is essential to raise agile responding ability of water dispatching which makes sure that there is not zero-flow in the Yellow River. The mathematical foundation, implementation and software application for water dispatching of the numerical method for one-dimensional unsteady channel flow in low water evolution of lower reach as of the Yellow River are discussed in the paper. From the simulation results of low water in the 1980s, the flows fitted well, reaching to second level, which is important to dispatch water resources in Yellow River.

**Keywords:** Unsteady channel flow model; one-dimensional channel; water dispatching of low water; the lower reach as of the Yellow River