

渠道非恒定流水力学响应研究

范 杰, 王长德, 管光华, 崔 巍

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要: 输水渠道中的水位将随流量的改变而产生波动, 且由一种恒定流状态过渡到另一种恒定流状态需要经过一段稳定的时间。这一水力变化过程与渠道自身的结构特性、渠道运行方式的选择和流量变化的幅度、速率有关。通过对渠道中的非恒定流进行数值模拟, 对不同情况下渠道的水力学响应进行了研究。

关 键 词: 渠道; 非恒定流; 运行方式; 流量; 水位

中图分类号: TV133.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2006)01-0055-06

为了对水资源进行最优的配置, 需要修建许多明渠调水工程。输水渠道中的水流应尽量保持稳定, 以满足安全运行的要求。由于输水流量的改变, 渠道中的水位不可避免的要产生波动, 且这种波动在达到新的稳定状态之前要持续一段时间, 这就是渠道的水力学响应过程。它与渠道自身的结构特性、渠道运行方式的选择、流量变化的幅度和速率有关。因此, 必须选择合适的渠道运行方式, 限制流量变化的幅度和速度, 优化渠道结构设计, 控制渠道的水力学响应, 以保证渠道运行安全稳定。

1 一维明渠非恒定流的基本方程

1.1 基本方程

研究渠道的水力学问题必须对明渠的非恒定流进行数值模拟。一维明渠非恒定流通常用圣维南方程组进行描述^[1]:

(1) 连续方程

$$B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = q \quad (1)$$

(2) 动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{\partial Q}{\partial s} + (gA - B^2) \frac{\partial z}{\partial s} = B^2(i + M) - g \frac{Q^2}{A^2 C^2 R} \quad (2)$$

式中 B 为水面宽, m; Z 为水位, m; t 为时间, s; Q 为流量, m³/s; C 为谢才系数; s 为断面的距离坐标, m; q 为区间入流量, m³/s/m; g 为重力加速度, m/s²; A 为过水断面面积, m²; v 为水流沿轴线方向的流速, m/s; R 为水力半径, m; i 为渠道底坡; M 为明渠单宽、定深(常深)、断面沿程的放宽率, $M = \frac{1}{B} \frac{\partial A}{\partial s} \Big|_h$ 。

1.2 基本方程的数值解法

在求解圣维南方程组的数值方法中普莱士曼(Preismann)隐式差分格式以其精度高、无条件收敛等优点被广泛采用。此法中将求解域的 $s-t$ 平面划分成许多矩形网格, 通过对因变量(Z 和 Q) 的偏导数进行差商逼近, 得到各网格上的离散方程组:

收稿日期: 2004-12-15; 修订日期: 2005-04-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59879016); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目

作者简介: 范 杰(1979-), 男, 湖北黄石人, 武汉大学博士研究生, 主要从事渠系控制方面的研究。

E-mail: fj66@gmail.whu.edu.cn

$$a_{1i}Z_i^{j+1} - c_{1i}Q_i^{j+1} + a_{1i}Z_{i+1}^j + c_{1i}Q_{i+1}^j = e_{1i} \quad (3)$$

$$a_{2i}Z_i^{j+1} - c_{2i}Q_i^{j+1} + a_{2i}Z_{i+1}^j + d_{2i}Q_{i+1}^j = e_{2i} \quad (4)$$

式中

$$a_{1i} = 1; c_{1i} = 2 \frac{t}{s_i} \frac{1}{B_M}; e_{1i} = Z_i^j + Z_{i+1}^j + \frac{1-t}{s_i} c_{1i} (Q_i^j - Q_{i+1}^j);$$

$$a_{2i} = 2 \frac{t}{s_i} (V_M^2 B_M - g A_M); c_{2i} = 1 - 4 \frac{t}{s_i} V_M; d_{2i} = 1 + 4 \frac{t}{s_i} V_M;$$

$$e_{2i} = \frac{1-t}{s_i} a_{2i} (Z_{i+1}^j - Z_i^j) + \left[1 - 4(1-t) \frac{t}{s_i} V_M \right] Q_{i+1}^j + \left[1 + 4(1-t) \frac{t}{s_i} V_M \right] Q_i^j +$$

$$2 \frac{t V_M^2}{s_i} \frac{A_{i+1}(Z_M) - A_i(Z_M)}{s_i} - 2 \frac{t}{s_i} \frac{g n^2 Q_M^2 P_M^{4/3}}{A_M^{7/3}}$$

其中 差分中心水力参数 $M = \left(\frac{j+1+i}{2} \right) + (1-t) \frac{j+i}{2}$ (泛指水位 Z 、流量 Q 、流速 V 、水面宽度 B 、断面面积 A 、湿周 P 等); 下标 i 为空间距离层编号, 上标 j 为时间层编号, t 为权因子(一般取 0.70 ~ 0.75)。

将各网格上的方程联立, 可得到一大型稀疏非线性方程组, 通常采用双消去法(或叫追赶法)求解。

2 渠道运行方式

渠道的水力学响应与渠道的运行方式息息相关。根据渠池内水面支枢点(控制断面)位置的不同渠道有下游常水位、上游常水位、等体积和控制蓄量等运行方式^[2]。

上游常水位运行方式的支枢点位于渠池上游。这种方式要求渠岸必须水平, 以适应零流量水面线, 因此渠岸的修建费用较大, 现在已很少采用。

下游常水位运行方式的支枢点位于渠池下游(图1)。采用这种方式的渠道可按通过最大恒定流量设计, 所有流量下恒定流状态的水深不超过设计流量下的正常水深, 因此渠岸的超高最小, 从而减少了建设费用, 但其对于下游需水改变的反应速度较慢。目前许多渠道都采用这种运行方式。

等体积运行方式的支枢点位于渠池中点(图2)。当流量变化时, 水面以渠池中点为轴转动, 从而保持渠池内蓄水体积的近似相等。较上、下游常水位运行方式, 等体积运行的主要优点是能迅速改变整个渠系的水流状态。它的缺点是渠池的下游端需要增加渠岸和衬砌高度, 然而需要增加的高度仅是上游常水位运行方式所需要高度的一半。

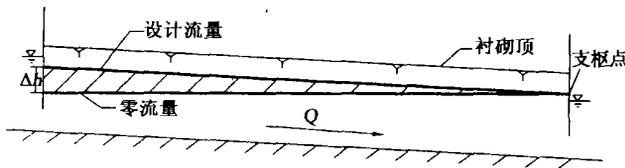


图1 下游常水位运行方式

Fig.1 Constant depth operation method in the downstream

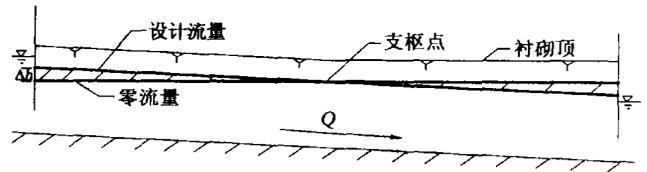


图2 等体积运行方式

Fig.2 Constant volume operation method

控制蓄量方式通过控制一个或多个渠池中的蓄水量来实现。支枢点可以在渠池内移动来改变蓄量以满足运行要求。为了保证所需的蓄量, 这种方式可能需要较大的渠道断面尺寸。

求解圣维南方程的初始条件与渠道中水流的初始状况有关, 边界条件则根据渠道运行方式的不同而不同。本文在进行渠道运行仿真研究时, 暂不考虑实际中闸门控制器的作用, 而只考虑理想状况下将不同的运行条件

归纳为求解圣维南方程时不同的边界条件(表 1)。

表 1 不同运行方式下求解圣维南方程的边界条件

Table 1 Boundary conditions of Saint Venant equation in the different operation ways

运行方式	上游常水位		下游常水位		等体积	
边界条件	上游水位 $Z_{\text{上}} = Z_{\text{常}}$	下游流量 $Q_{\text{下}} = Q(t)$	上游流量 $Q_{\text{上}} = Q(t)$	下游水位 $Z_{\text{下}}(t) = Z_{\text{常}}$	上游流量 $Q_{\text{上}} = Q_{\text{下}} = Q(t)$	下游流量

对于大型输水渠道，目前采用较多的是下游常水位和等体积运行方式^[4]。

3 渠道约束条件

为了保证渠道正常、安全的输水要求，渠道运行必须满足一定的约束条件。本文仅讨论渠道特性和水位下降对渠道运行的影响。此外渠道运行还应满足抽水泵站、分水口门、渠道蓄水、弃水、电力限制等方面的要求。

3.1 渠道特性

渠道特性约束指为了满足渠道正常运行的要求而对渠池长度、底坡、断面尺寸等要素的要求。图 1、图 2 中所示的水面线是根据恒定非均匀流计算出的水面线。

对于下游常水位运行方式，其设计流量和零流量水面线之间的水位差 $h = L \times i$ (5)

对于等体积运行方式，水位差 $h = 0.5L \times i$ (6)

式中 L 为渠池长度； i 为渠池底坡。

由式(5)、式(6)知，通过恒定非均匀流计算得到等体积运行方式下水位变幅为下游常水位运行方式的 $1/2$ ^[3]。文献[5]中进行了下游常水位运行方式的恒定流分析，得到南水北调中线节制闸间距应小于 33 km 的结论^[5]。据此，若采用等体积运行方式，节制闸间距应小于 65 km 即可。但本文通过对渠道进行非恒定流计算分析，得到的节制闸间距更小。

对于一般的输水渠道其底坡小于临界坡度，流态为缓流。以等体积运行方式为例，渠池上、下游流量同时变化时，既有渠池上游顺水波向下游传播，也有下游逆水波向上游传播，其波速为

$$c = \sqrt{\frac{gA}{B}} \quad (7)$$

式中 g 为重力加速度； A 为断面面积； B 为水面宽度。

与流速 v 叠加后顺水波和逆水波的传播速度分别为： $v + c$ ， $v - c$ 。

因此，两波相遇所经历的时间：

$$t = \frac{L}{|v + c| + |v - c|} \quad (8)$$

下游逆水波到达渠池上游所经历的时间：

$$t_1 = \frac{L}{|v - c|} \quad (9)$$

对本文第 4 节算例 1 中，流量变化时间为 60 min 的情况进行仿真。当渠长 $L = 10、30、50$ km 时，计算得 t_1 分别为 27、80、131 min。渠池上游水深变化如图 3 所示。

由图 3 可知，水流稳定后(恒定流状态)，水深的变幅与渠道长度成正比(参考式(5)、式(6))。稳定过程中水位下降的第一个拐点大约出现在 t_1 时刻处，渠池越短， t_1 越小，水流稳定时间就越短，但振荡周期较多。水深振荡变幅的最大值大于稳定后的水深变幅，且时间较短。所以通过非恒定流计算出的水位下降速率较恒定流大，故应以非恒定流分析的结果作为选择节制闸间距的依据。

3.2 水位下降

当水深不超过最大值时,水深的迅速增加危害不大。然而,即使水深保持在允许范围内,水深的迅速减小也可能危及渠道安全。通常渠道内的水压力大于或等于渠道底部或侧面的外压力,但当渠内水深迅速下降,渠道背

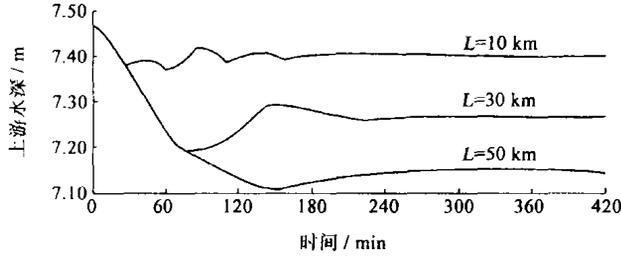


图 3 不同长度渠道的水深变化过程

Fig. 3 Process of the water depths change in the canals of different lengths

面排水缓慢时,渠中水位下降快于渠堤中的水位下降,外压力大于内压力。当两者压力差达到一定值时,就可使衬砌遭到破坏。因此,每条渠道都应该确定其水位最大允许下降速率^[3]。水位最大允许下降速率与渠堤排水、渠道衬砌有关。美国垦务局规定混凝土衬砌渠道的水位下降速率一般是 0.15 m/s,连续 2 h 不应超过 0.30 m。长江水利委员会规定南水北调中线总干渠允许降水速度是 0.2 m/s。

图 1、图 2 中阴影部分为不同流量下渠道内水体分布的变化,称之为调蓄体。以等体积运行方式为例,调蓄体与水流稳定过程之间的关系分析如下:

由图 2 可知,支枢点上游流量 Q 时的水面线与零流量水面线之间的水体积是:

$$V_Q = 0.5(L/2) h_Q \bar{B} \tag{10}$$

式中 L 为渠段长度; h_Q 为 Q 流量与零流量水面线上游端水位之差; \bar{B} 为渠段平均水面宽度。

当流量由 Q_1 变为 Q_2 时,能提供的调蓄体体积:

$$V_{供} = V_{Q1} - V_{Q2} \tag{11}$$

当上游水波还未与下游水波相遇时,下游流量变化基本不会影响到上游水体。此时段内上游流量化所引起水体的变化为

$$V_{需} = \overline{Q} t = \overline{Q} L \left[\frac{1}{|c_{水} + c|} + \frac{1}{|c_{水} - c|} \right] \tag{12}$$

式中 \overline{Q} 为所研究渠段区间(此处为支枢点至渠池上游断面)流入和流出的流量差。

通过用圣维南方程对非恒定流进行模拟可知,在水波未到达渠池中点之前,渠池中点流量基本不变。所以当上游流量按线性变化时:

$$\overline{Q} = 0.5 Q = 0.5 E t \tag{13}$$

式中 E 为流量变化速率; t 为顺、逆水波相遇所经历的时间。

将式(13)代入式(12)得

$$V_{需} = 0.5 E L^2 \left[\frac{1}{|c_{水} + c|} + \frac{1}{|c_{水} - c|} \right]^2 \tag{14}$$

当 $V_{供} > V_{需}$ 时,调蓄体体积能满足水位变化所需水量的体积,渠道中水位变化过程较为稳定,水位上下振荡不明显;当 $V_{供} < V_{需}$ 时,调蓄体体积不能满足水位变化所需水量的体积,渠道中水位振荡较为剧烈。本文第 4 节算例 1 中当 $L = 30$ km 时,渠池上游水深变化如图 4 所示。

如图 4 所示,增加流量变化的时间,减缓流量变化,可减少所需调蓄体的体积,有利于水流的稳定。此外由式(10)可知,增加渠道底坡可增加 h_Q 而加大调蓄体体积,也有利于水流的稳定,但考虑到底坡的选择主要受地形条件的约束,本文未做关于它的研究。

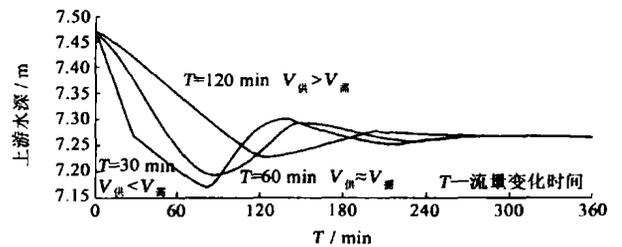


图 4 不同流量变化速率情况下渠道水深变化过程

Fig. 4 Process of the water depths change in the different discharge change rates

4 典型渠道算例分析

南水北调中线工程渠首段通过的流量最大，流量变化也相应最大。以渠首段为例，分别采用下游常水位和等体积运行方式，分析渠道对流量变化的水力学响应。渠首段断面资料如下：断面底宽 $b = 40 \text{ m}$ ，边坡系数 $m = 3$ ，糙率系数 $n = 0.015$ ，底坡 $i = 1/25000$ ，设计流量 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ ，相应正常水深 7.47 m 。

4.1 当流量由设计流量变为 80 %设计流量时，即流量由 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 变为 $480 \text{ m}^3/\text{s}$

表 2 等体积运行方式下渠道的水力学响应

Table 2 Hydraulic reactions of the canals in the constant volume operation way

流量变化时间 节制闸 间距/km	30 min			60 min			120 min		
	稳定时间 /min	水位变化		稳定时间 /min	水位变化		稳定时间 /min	水位变化	
		1 h	2 h		1 h	2 h		1 h	2 h
10	150	0.18	0.18	160	0.10	0.10	170	0.05	0.09
20	200	0.25	0.25	220	0.22	0.22	230	0.11	0.11
30	240	0.27	0.29	240	0.24	0.27	250	0.12	0.24
40	260	0.27	0.34	260	0.24	0.32	270	0.12	0.28
50	260	0.27	0.36	270	0.24	0.34	280	0.12	0.28

表 3 下游常水位运行方式下渠道的水力学响应

Table 3 Hydraulic reactions of the canals in the constant depth operation way in the downstream

流量变化速率 节制闸 间距/km	30 min			60 min			120 min		
	稳定时间 /min	水位变化		稳定时间 /min	水位变化		稳定时间 /min	水位变化	
		1 h	2 h		1 h	2 h		1 h	2 h
10	160	0.23	0.23	160	0.20	0.20	180	0.10	0.10
20	200	0.27	0.28	220	0.24	0.26	230	0.12	0.23
30	220	0.27	0.32	220	0.24	0.32	250	0.12	0.29
40	230	0.27	0.36	250	0.24	0.34	280	0.12	0.29
50	380	0.27	0.36	400	0.24	0.34	450	0.12	0.29

对于本算例，由以上仿真数据可以得到以下结论：

(1) 当渠池较短 ($< 30 \text{ km}$) 时，渠道运行方式对水位变化速率影响较大，等体积运行比下游常水位运行方式水位下降速率小很多；当渠池较长 ($> 30 \text{ km}$) 时，渠道运行方式对水位变化速率影响不大，但对最终水位变幅影响较大，等体积运行的最终水位降幅约为下游常水位运行方式的 $1/2$ ；

(2) 当渠池较短 ($< 40 \text{ km}$) 时，渠道运行方式对稳定时间影响不大，但渠池较长 ($> 40 \text{ km}$) 时，渠道运行方式对稳定时间影响较大。总体而言，等体积运行方式与下游常水位运行方式相比稳定时间较短；

(3) 稳定时间还与流量变化时间以及节制闸间距有关。流量变化越迅速，渠池越短，达到新的稳定状态所需要的时间越少。且稳定时间对渠池长度的变化很敏感，对流量变化时间不是非常敏感；

(4) 水位变化速率除与运行方式有关外，还与流量变化时间及节制闸间距有关。流量变化越迅速，渠池越短，水位变化速率越大。且水位变化速率对流量变化时间非常敏感，对渠池长度不是很敏感。

4.2 当流量由设计流量的 50 %变为设计流量时，即流量由 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 变为 $600 \text{ m}^3/\text{s}$

同样通过对渠道非恒定流仿真，可以得到类似统计表格，绘成图 5、图 6。

从图可看出当流量由 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 变为 $600 \text{ m}^3/\text{s}$ 时，可以得到上述相同的结论，且在相同条件下，等体积运行方式比下游常水位运行方式更优。具体就本算例中渠道而言，应采用等体积运行方式，为满足水位下降约束条件，节制闸间距应取 $20 \sim 30 \text{ km}$ 为宜，且流量每小时变化量不宜超过 $120 \text{ m}^3/\text{s}$ 。相应的稳定时间则不会超过 240 min 。

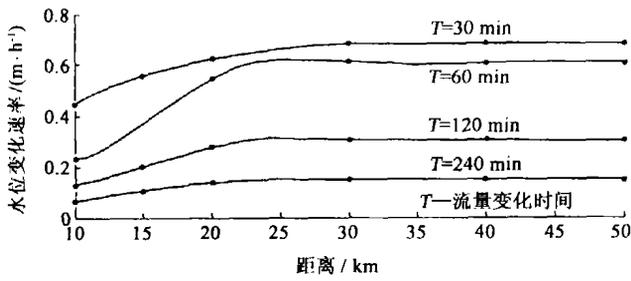


图 5 等体积运行方式下渠道水位下降速率

Fig. 5 Descending rate of the water depths in the constant volume operation way

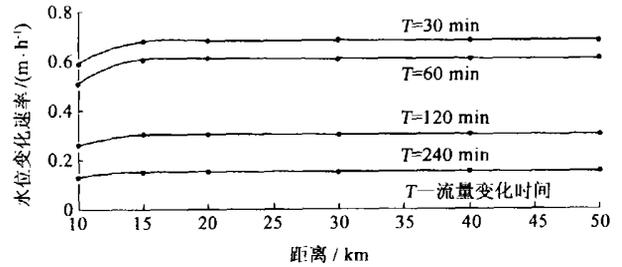


图 6 下游常水位运行方式下渠道水位下降速率

Fig. 6 Descending rate of the water depths in the constant depth operation way in the downstream

5 结 语

讨论了当渠道输水流量发生变化时, 水位下降速率、稳定时间与渠道运行方式、节制闸间距和流量变化时间之间的关系。文中分析了各因素对水流稳定过程的影响。对于具体的渠道, 为了得出量化的结论, 必须对其非恒定流情况进行仿真模拟。以确定流量的允许变化幅度和速率、节制闸适当的间距和稳定时间。由于篇幅有限, 本文仅就单渠段的水力学响应进行了分析, 也没考虑闸门控制器的影响。多渠段联合调度运行, 以及不同控制器对渠道水力学响应的影响等问题, 是以后研究工作的重点。

参考文献:

- [1] 徐正凡. 水力学[M]. 北京:高等教育出版社, 1986. 255 - 366.
- [2] Pierre O M, David C R, Jan S. Classification of Canal Control Algorithms[J]. Journal of Irrigation and drainage engineering, 1998, 1:2 - 5.
- [3] 美国内务部垦务局. 现代灌区自动化管理技术实用手册[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2004. 35 - 57.
- [4] 吴泽宇, 周 斌. 南水北调中线渠道控制计算模型[J]. 人民长江, 2000(5):1 - 2.
- [5] 张尚弘, 王兴奎. 南水北调中线工程节制闸间距研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001(9):1 - 2.

Study on the hydraulic reaction of unsteady flows in open channel^{*}

FAN Jie, WANG Chang-de, GUAN Guang-hua, CUI Wei

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Water levels in open channel fluctuate along with the change of the discharge. The change from one state of steady flow to another will take a period of time. The process of the change is affected by the characteristic of canal structure, the canal operation method, the range of discharge change and the rate of it. The hydraulic reaction of unsteady flow is also studied by means of numerical simulation of the unsteady flows in open channel in different cases.

Key words: canal; unsteady flow; operation method; discharge; water level

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 59879016).