

保水堰的交替水流数值模拟初探

万五一¹, 李玉柱¹, 王建军²

(1. 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2. 中国水利水电第七工程局, 四川 成都 611730)

摘要: 为了对保水堰的交替水流进行数值模拟, 依据保水堰恒定流情况下的工作特性, 将保水堰的水流形态分成堰流和满流两种状态, 分别建立保水堰不同流态下的非恒定流数学模型。分析两种不同水流形态的交替机理, 建立两种水流的转换条件, 联立两种不同形态的数学模型构成保水堰的堰流和满流交替的非恒定流数学模型。利用数值计算的方法对保水堰的水流交替情况进行了模拟, 结果表明, 通过将两种流态的方程进行组合, 可以合理地模拟保水堰的水流交替过程。

关键词: 保水堰; 水力过渡过程; 交替水流; 输水工程

中图分类号: TV132

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2006)01-0020-03

Numerical simulation of alternate flow in overflow weirs // WAN Wu-yi¹, LI Yu-zhu¹, WANG Jian-jun² (1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Sinohydro Engineering Bureau 7, Chengdu 611730, China)

Abstract: According to the hydraulic property of overflow weirs under steady flow, the flow patterns of overflow weirs were classified into free overfall and submerged overfall, and numerical models for unsteady flow were established to simulate the two flow patterns respectively. Based on an analysis of the mechanism of flow pattern alternation, approximate criterion for flow pattern alternation was formulated, and a numerical model was worked out for simulation of free overfall and submerged overfall alternation by combination of the above two models. The simulation of the flow pattern alternation in overflow weirs shows that the method is reasonable and effective.

Key words: overflow weir; hydraulic transient process; alternate flow; water transfer project

在长距离跨流域调水工程中, 输水线路的保水是指通过一定的设备和特殊建筑物使有压输水线路始终保持满管的状态。通常情况下, 对长距离调水工程的压力输水线路进行充水是一个历时较长的过程(可能需要数小时, 甚至数天), 因此长距离输水管路的保水, 特别是长距离自流输水线路的保水, 是保证工程适时运行和防止有压管道产生水体脱空的重要技术^[1-3]。利用保水堰进行管路的分段保水是最近发展起来的一种新型的建筑物保水技术, 它可以有效防止管路尾部压力过高和水流脱空, 这种结构通常可用于长距离输水隧洞和低压涵洞。保水堰在运行过程中存在有水位跌落的堰流(明流)和无水位跌落的淹没过流(满流)两种情况的交替过程, 这种交替变化的水流对全线的非恒定流调节影响较大。对于流量调节的非恒定流过程, 通常可以采用水击的特征线方法^[4, 5]进行数值模拟, 但保水堰作为全线水流数值模拟的重要部分, 目前尚无确切的理论计算模型与之对应, 如何建立保水堰的边界模型是数值模拟的难题之一。本文通过分析, 引入一定的

近似判定条件, 建立了保水堰的非恒定流边界模型, 该模型可以对水流的交替变化过程进行简单的模拟, 为保水堰的堰流和满流交替非恒定流数值模拟提供一种可借鉴的方法。

1 保水堰的工作原理

保水堰的基本形式如图 1 所示。在停水的情况下, 保水堰上游管路两端的水位和保水堰的堰顶同高, 由于堰顶高出上游管道的管顶, 因此管路中的水体能够储存下来; 在小流量情况下, 保水堰可以防止管道发生水体脱空, 此时保水堰的水流为自由堰流, 堰下游形成跌落并消除多余的能量; 在大流量情况下, 堰下游的水流漫过堰顶, 整个管路形成有压的淹没水流, 此时保水堰与通气井类似, 堰上水流为满流状态。保水堰的优点是能够在各种运行状态(包括停水)下, 管路保持满管的状态, 并且可以防止停水时管路中产生过高的水击压力。

输水线路在流量调节过程中, 整个系统的水流变化相互制约。当流量增加时, 保水堰的水流可能

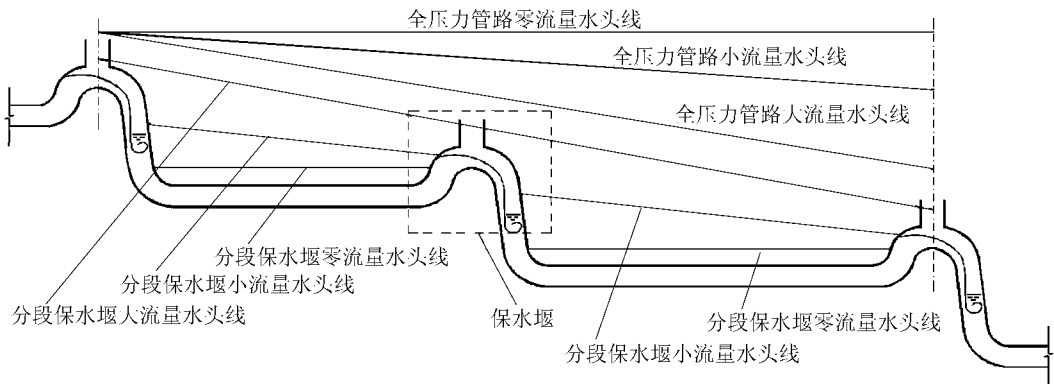


图1 保水堰工作原理示意图

从自由溢流过渡到有压流状态;当流量减小时,保水堰的水流可能从有压流状态过渡到自由溢流。保水堰在输水线路中具有跌落消能和衔接水流的作用,它的水流变化特性直接影响全线的水流调节,因此建立保水堰相应的数学模型是对非恒定流过程进行数值模拟的关键。

2 模型的建立

2.1 基本假设

如图2所示,本文研究的交替水流过程是指从堰流状态向满流状态(或从满流状态向堰流状态)过渡的情况。从计算的角度来说,保水堰从堰流状态过渡到满流状态是一个非常复杂的过程。在这种过渡过程中,随着下游水面的上升,保水堰的自由溢流逐渐向淹没溢流转变,当堰下游的水位上升至堰顶水位时,保水堰形成淹没流,当水位继续上涨时,保水堰上下游水流连成整体,水流逐渐过渡到满管水流状态。对以上现象进行数值模拟具有较大的难度,保水堰由堰流过渡到满流的临界状态需要由假设的条件进行判定,而且溢流堰的特性参数难以确定。为了对保水堰的堰流和满流交替过程进行数值分析,做如下假设:

- ①下游水位低于堰上水位时,水流为堰流状态(包括自由溢流和淹没溢流,流量系数可通过试验获得);
- ②保水堰的上、下游水位相同时,堰上水流为满流状态。

2.2 数值模型

对于图2所示的保水堰,设前一时刻保水堰的流

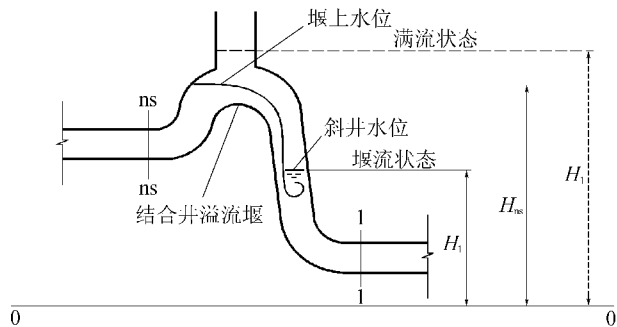


图2 保水堰流态分析示意图

量为 Q_0 在堰流情况下对应的堰上水位为 H_{ns} ,堰下游的水位为 H_1 (忽略局部阻力和流速水头),根据这两个水位的关系,可以将保水堰分成两种类型处理。

a. 当保水堰下游的水位低于堰顶水位时(有跌落)按堰流形式处理,此时的水流控制方程可写成如下形式:

$$Q_{ns,t+\Delta t} = \frac{dH_{1,t+\Delta t}}{dt} A_s + Q_{1,t+\Delta t} \quad (1)$$

$$Q_{ns,t+\Delta t} = mb \sqrt{2g} (H_{ns,t+\Delta t} - Z_y)^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

式中: H 和 Q 为水位和流量; A_s 为堰下游跌落斜井的断面积; Z_y 为保水堰的堰顶高程;下标 1 和 ns 为断面的标识号;下标 $t + \Delta t$ 为计算时刻标识(t 为前一已知时刻标识, Δt 为时间步长); m 为流量系数; b 为保水堰堰宽。

b. 当保水堰下游的水位高于堰顶水位时(无跌落)保水堰按通气井形式处理,此时的边界方程可写成如下形式:

$$Q_{ns,t} = \frac{dH_{1,t+\Delta t}}{dt} A_s + Q_{1,t+\Delta t} \quad (3)$$

$$H_{ns,t+\Delta t} = H_{1,t+\Delta t} + \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中: ζ 为保水堰满流时的局部水头损失系数; v 为输水管路水流流速。

此外,堰上游 ns 断面的特征线水流方程和堰下游 1 断面的特征线水流方程^[4]可写成如下形式:

$$H_{ns,t+\Delta t} = C_P - B_{ns} Q_{ns,t+\Delta t} \quad (5)$$

$$H_{1,t+\Delta t} = C_M + B_1 Q_{1,t+\Delta t} \quad (6)$$

式中: B 为用特征线方法计算的管道特性常数, $B = \frac{a}{gA}$, 其中 a 为水击波速, g 为重力加速度, A 为管道面积; C_P , C_M 是特征线方法计算常数,它可由 t 时刻的已知参数通过计算得到。

以上方程中包含 $t + \Delta t$ 时刻 1 断面和 ns 断面的水头和流量 4 个未知量,通常情况下初始时刻的边界可由恒定状态的水流确定,联立溢流堰水流控制方程和特征线水流方程即可求解 1 断面和 ns 断

面的水力参数。

根据以上的分析,在求解保水堰的非恒定流水力参数时,必须根据保水堰前一时刻的下游水位和溢流堰上对应水位判断保水堰的流态,通过联立求解对应的方程组可以解得保水堰水流参数的变化情况。

3 实例计算分析

利用本文建立的数学模型,对某长距离调水工程中溢流堰的交替水流进行数值模拟,图3为采用数值方法求得的由堰流状态过渡到满流状态的水位变化过程,随着流量的增加水位逐渐上升,最后保水堰的水位跌落消失,保水堰上形成淹没的有压水流。图4为由满流状态过渡到堰流状态的水位变化过程,随着堰下游的水位不断降低,保水堰上的水流产生跌落和波动,水流恒定后形成稳定的自由堰流。

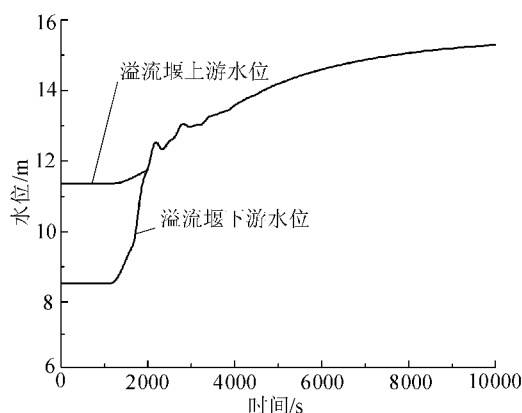


图3 从堰流到满流的水位变化过程

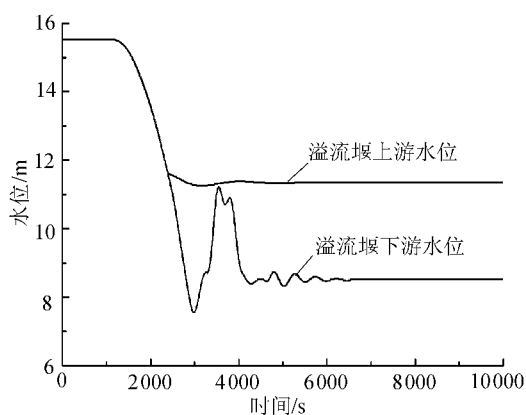


图4 从满流到堰流的水位变化过程

以上对保水堰流态变化的过程进行了数值计算,这一计算是针对某具体工程进行的,计算的水位波动与输水管路的长度、断面尺寸和糙率等相关。从结果来看,该模型计算的结果符合水流的变化规律,它能够对保水堰的水流交替过程进行初步模拟。

4 结 语

本文对保水堰的运行特性和水流交替变化规律进行了分析,基于一定的假设,建立了堰流和满流交

替的数学模型,并对保水堰的水流交替过程进行了数值模拟,结果符合水流的变化规律,表明该模型可以对保水堰交替水流变化过程进行初步模拟。由于以上的建模和计算是在一定假设条件下进行的,而且流量系数及局部阻力系数的取值需要经过试验验证和分析,因此在应用中需对参数进行适当的调整和校对。

参考文献:

- [1] 万五一. 长距离输水工程的非恒定流特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2004.
- [2] 万五一, 练继建, 崔广涛. 分段低压输水管系的水力振荡特性[J]. 水利学报, 2003(12): 34-39.
- [3] 练继建, 万五一, 王云仓. 长距离分段低压输水的水力特性[J]. 水利水电技术, 2001, 32(12): 45-46.
- [4] WYLIE E B, STREETER V L. Fluid transients[M]. New York: McGraw-Hill International Book Co, 1978.
- [5] CHAUDHRY M H. Applied hydraulic transients[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1987.

(收稿日期 2005-06-17 编辑 熊水斌)

(上接第15页)

3 结 语

本文对脉冲液体射流泵时均值基本方程中的流速系数进行了理论分析与推导,并与恒定射流的流速系数进行了比较,阐明了两者之间的关系。随着脉冲射流研究的不断深入,需要对上述理论分析进行试验研究,逐步完善脉冲液体射流泵的基本理论,使脉冲射流这一新技术在国民经济建设中发挥更大的作用。

参考文献:

- [1] 陆宏圻. 喷射技术理论及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004: 1-271, 524-557.
- [2] CROW S C, CHAMPAGNE F H. Orderly structure in jet turbulence[J]. J Fluid Mech, 1971, 48(3): 547-591.
- [3] FAVRE-MARINET M, BINDER G, HAC T V. Generation of oscillating jets[J]. Journal of Fluids Engineering, 1981, 103(10): 609-613.
- [4] ETHERINGTON C, MIMICH E. Power fluids technology and its application in the nuclear industry[J]. Nuclear Energy, 1984, 23(4): 227-235.
- [5] 高传昌. 脉冲液体射流泵基本性能的研究[J]. 水利学报, 2000(1): 28-34.
- [6] 高传昌. 脉冲液体射流泵时均值基本性能的研究[J]. 水动力学研究与进展: A辑, 2002, 17(3): 270-280.
- [7] 怀利 E B, 斯特里特 V L. 瞬变流[M]. 清华大学流体传动与控制教研组, 译. 北京: 水利电力出版社, 1983: 158-180.
- [8] 高传昌, 陆宏圻, 王世诚, 等. 气液脉冲液体在管道-容器-管道组合管路中的运动特性的研究[J]. 核科学与工程, 1999, 19(3): 234-240.

(收稿日期 2005-03-28 编辑 熊水斌)