

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.03.025

明满流耦合水动力模型在南水北调工程中的应用

王衍超, 金生, 李娜

(大连理工大学 建设工程学部水利水电学院, 大连 116024)

摘要: 建立了适用于具有复杂内边界的、长距离调水明满流交替的一维非恒定流水力系统, 并基于明渠和管道连接的长距离输水工程, 设计了既有明渠流又有压力流的耦合流动模型。为了精确模拟流动的水力特性, 分析明满交替流对工程运行的安全性和稳定性带来复杂的影响, 采用圣维南方程组和 Preissmann 窄缝法计算了有压管流和自由表面流以及这两种状态的过渡流等问题, 并加入水库、泵站、分水口、暗涵及闸堰等水工建筑物。利用该模型较好地解决了南水北调中线工程北京段遇到明满流耦合计算的问题。

关键词: 明满交替流; 圣维南方程; Preissmann 窄缝法; 非恒定流; 南水北调工程

中图分类号: TV 68 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0514-04

Application of hydrodynamic system of the free surface pressure flow in the South to North Water Diversion Project

WANG Yan chao, JIN Sheng, LI Na

(School of Water Conservancy and Hydropower, Dalian university of technology, Dalian 116024, China)

Abstract: One dimensional unsteady free surface pressure flow hydrodynamic system is developed which is suitable for the long distance water diversion project with complex inner boundaries. Based on the long distance water diversion project with open channels and pipes, the coupled flow system with both open channel flow and pressure flow is designed. In order to simulate the hydraulic characteristics accurately and analyze the effects of free surface pressure flow on the stability and safety of the project, Saint Venant equations and Preissmann slit method were used to calculate the pressure flow, free surface flow, and the transition flow, and reservoirs, pump stations, diversions, culverts, sluices, and other hydraulic structures were added into the system. The system can solve the problems caused by the free surface pressure flow in Beijing section of the South to North Water Diversion Project.

Key words: free surface pressure flow; Saint Venant equations; Preissmann slit method; unsteady flow; South to North Water Diversion Project

在长距离调水系统尤其是管网耦合渠网的输水方式中, 水力操作引起的水力过渡过程非常复杂, 流量调节和事故检修工况中均可能出现明满交替流现象, 其进行数值模拟一直是长距离输水系统管道联合渠道输水模拟中的一个重点和难点。随着南水北调等其他长距离调水工程的修建, 明满交替流的研究也越发重要。

传统的明满交替流主要解法有刚性水体法^[1]、激波拟合法^[2]和窄缝法^[3], 其中刚性水体法的核心是假设水体是刚性不可压缩的均匀非恒定流, 气泡中的气体可以压缩; 激波拟合法将有压流与明渠流分开计算, 然后计算分界面的速度和位置, 从而将两者联系起来; 窄缝法是假设在管道的顶部开一个窄缝, 这样满流和明流就都可以都采用圣维南方程

组求解^[4]。三种方法中窄缝法在实际工程中应用较广泛, 不过其计算很难稳定, 关键在于选择适当的计算格式^[5]。通过比较多种格式的计算稳定性, 发现 Preissmann 隐式差分方法最优, 因为它计算简单, 并且能较好地吻合原型观测结果^[6,7]。

跨流域的长距离调水系统, 除了考虑明满交替流之外, 还要考虑水库、闸堰、倒虹吸、暗涵、分水口等多种类型的内边界条件, 因为它们可以调配水量、满足沿程地形要求、控制水流过程^[8-10]。本文在利用窄缝法模拟明满流交替非恒定流时, 加入上述水工建筑物, 建立适用于具有复杂内边界的长距离调水明满流交替的一维非恒定流水力系统, 通过对南水北调中线工程北京段一期工程不同流量下全线非恒定

流过程的计算模拟,验证系统的合理性,并进一步模拟极端条件下的检修工况。

1 数学模型

为了研究明满交替流的计算方法,需要分析有压管流控制方程和无压明渠流控制方程。

有压管流控制方程^[11]如下。

连续性方程

$$\frac{\partial H}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{c^2 \partial V}{g \partial x} + V \sin \varphi = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + J = 0 \quad (2)$$

无压明渠流控制方程^[12]如下。

连续性方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + V \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{A \partial V}{B \partial x} + V \sin \varphi = 0 \quad (3)$$

动量方程

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial z}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + J = 0 \quad (4)$$

式中: H 为压力水头; z 为水位; V 为断面平均流速; c 为波速; A 为过水断面面积; B 为水面宽; x 为横坐标; t 为时间; φ 为管道倾角; J 为摩阻水头损失; g 为重力加速度。

通过比较式(1)~式(4)可以看出,如果将无压明渠流中的水位 z 看作是有压管流中的水头 H ,将无压明渠流里的波速 $\sqrt{\frac{gA}{B}}$ 看作是有压管流中的波速 c ,则无压明渠流控制方程和有压管流控制方程在形式上完全吻合。由此,可将有压管流与无压明渠流写成统一的形式^[13]。

连续性方程

$$\frac{\partial z}{\partial t} + V \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{A \partial V}{B \partial x} + V \sin \varphi = 0 \quad (5)$$

动量方程

$$\frac{\partial V}{\partial t} + g \frac{\partial z}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial x} + J = 0 \quad (6)$$

式中: z 在无压时为水位,在有压时为压力水头。其余符号含义同前。

假设在有压的时候管道的上面有一个窄缝,窄缝的宽度由波速 c 计算确定,根据 $c = \sqrt{\frac{gA}{B}}$ 得: $B = \frac{gA}{c^2}$,其中 B 即为窄缝的宽度。宽度是一个简单的过渡,采用方程(5)和(6)计算有压管流时不考虑窄缝对过水面积和湿周等的影响。

为了离散方程,考虑到水量的交换及局损,将方程写成守恒的形式。

连续性方程

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_0 \quad (7)$$

动量方程

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Qu)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\partial Z_0}{\partial x} + \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{4/3}} + \frac{|Q| Q}{gA^2 C^2 \Delta x} \right) = 0 \quad (8)$$

其中: Q 为流量; Z_0 为底高程; q_0 为交换流量; C 为局部损失

系数; n 为管段糙率; Δx 为管段的长度,离散时为控制体体积的长度。其余符号含义同前。

应用交错网格对动量方程在单元上离散,连续方程在节点上离散,用 i 标示单元, I 标示节点。通过半隐式格式对式(7)和式(8)进行离散,动量方程中的对流项采用迎风格式差分,离散后的方程如下。

连续性方程

$$Q_i^{t+\Delta t} - Q_i^t + E_I h_i^{t+\Delta t} = D_I \quad (9)$$

动量方程

$$a_i Q_i^{t+\Delta t} + b_i Q_i^t + c_i^k Q_i^k = p_i + \theta g A_i (h_i^{t+\Delta t} - h_i^t) \quad (10)$$

式中: E_I 、 D_I 、 a_i 、 b_i 、 c_i 均为相应的离散系数,具体值及含义见文献[7]。式(9)和式(10)即为长距离输水明满流耦合的水动力数学模型。

2 模型应用

南水北调中线工程北京段是南水北调中线工程的终点,也是中线工程中最重要的一环。其一期工程南起惠南庄泵站,向北到达第九水厂,整个管线沿线由PCCP管、永定河倒虹吸、西四环暗涵、卢沟桥暗涵、团城湖明渠、京密引水渠和部分东干渠组成,其中既有有压管流又有明渠流,并且管线连接复杂,既有双线并行又有单线独立输水。沿线有众多的分水口、水库、调压池、节制闸等建筑物,且分水口规模不一,节制闸开度不同,给整个工程的模拟带来困难。为了保证渠道运行安全稳定,要求管渠内的流量、水位变化速率控制在一定的范围内,且调控过程中水力过渡时间越短越好,因此必须在整体上对管渠系统的安全运行进行研究,得到相关的水力响应规律。

本算例模拟了南水北调北京段的调水过程。初始模型包含最完备的管线及各种水工建筑物,以该模型为基础,各个工况只需修改初始条件和边界条件,就可以建立不同的方案,完成南水北调水力模拟系统的构建。

2.1 参数率定

为了精确的模拟整个调水系统,首先需要率定出管道的糙率^[15]。

由于我国首次采用直径4 m的PCCP管,管径的糙率随生产工艺和管径的不同而不同,所以必须通过与实测数据的对比来确定管段的糙率^[14]。假定PCCP管的糙率为0.011,其它管段为0.014,明渠段为0.017,根据已有的实测数据,以自流工况为基础来率定糙率。

工况一:自流工况。当总干渠PCCP管(以下简称总干渠)来流量小于24 m³/s,无需惠南庄泵站的提升,水便可以流到下游水厂。根据2013年11月21日监测,总干渠来流量为12.25 m³/s,三厂分水量为1.86 m³/s,第九水厂分水量为10.15 m³/s,其他水厂不分水,此时总干渠起始点的水头为59.23 m。把这些量作为边界条件输入到系统中,便可以计算出整个管线的流量和水头分布。

工程中在关键点设置了测量设备来检测水头变化,通过比较实际监测的数据与系统计算数据(表1)可以得出,计算数据与实测数据吻合较好,所选糙率能准确切合实际,系统可靠度较高。

表 1 压力比较

Tab. 1 Comparison of the pressure

水头	实测数据/m	计算数据/m
总干渠起点	59.23	59.23
大宁调压池	57.67	57.88
团城湖	49.09	48.85
龙背村	48.95	48.90

2.2 模拟计算

为了指导调水工作的进行,现模拟初期的应急工况。

工况二: 加压工况。此时各分水口水量增加, 总干渠来流量也相应增加, 需开启惠南庄泵站加压供水, 输水管道保持有压输水状态。总干渠起点惠南庄泵站给定 38 06 m³/s 的流量, 来流在第三水厂分出 1. 736 m³/s, 在城子水厂和田村山水厂分别分出 1 m³/s 和 1 967 m³/s, 而在第九水厂分出 14 467 m³/s, 郭公庄水厂分出 2 894 m³/s, 多余的水量 16 m³/s 全部分配给密云水库。系统模拟结果显示, 稳态时, 大宁调压池的水位维持在 56 62 m 不变, 团城湖水位维持在 49 m 不变, 满足供水要求。

工况三: 应急检修工况。在加压工况下, 假定在总干渠 1 号和 2 号连通井之间的左路管线出现爆管现象, 需要关闭控制该左路管线的上下游阀门(图 1 中 1 号连通井 2 号蝶阀和 2 号连通井 1 号蝶阀), 以便于进行相应管路的检修维护工作。此时, 总干渠来流减少到正常流量的 70%, 为保证正常水厂需水量, 需要紧急启用大宁水库泵站, 从大宁水库抽调总干渠缺少的 30% 水量配给到大宁调压池, 再输送到各水厂。

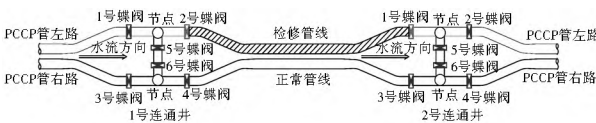


图 1 检修工况需闭合闸门示意图(阴影部分两端的)

Fig. 1 Schematic diagram of the gate needed to be closed under the maintenance condition (the ends of the shaded part)

检修工况下, PCCP 管道检修段由原来的双排管同时运行切换至单根管线运行, 因此需要校验 1 号连通井和 2 号连通井之间 PCCP 右侧管运行过程中的管道压力分布、压力极值, 同时需要关心调压池的水位波动情况和下游团城湖的水位变化。模拟结果表明, 正常供水时检修管段承受的最大水压力为 28 175 m, 而检修工况下 1 号连通井和 2 号连通井之间非检修管段承受的最大水压力为 29. 564 m(图 2), 是正常工况的 1. 05 倍, 小于极限要求的 1. 4 倍, 管道能保持安全运行。由于供给大宁调压池的流量来源从总干渠 PCCP 管切换至大宁水库, 调压池水位在流量调整的过程中发生了一定范围的水位波动(图 3), 但是变化的幅度和持续时间都不会对管道运行产生大的影响, 而且大宁调压池下游沿线水厂取水未受影响, 团城湖水位继续维持在 49 m, 保证了城子和田村山分水口, 以及下游京密分水口和第九水厂的供水需求。

3 结语

本文采用一维水动力学方程组结合窄缝法建立了一维调

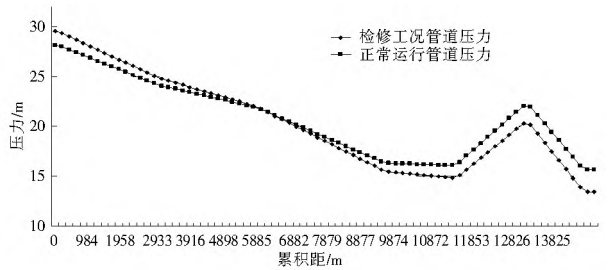


图 2 检修工况和正常运行工况下 PCCP 左侧管路的管道压力分布

Fig. 2 Pressure distribution of the left PCCP pipe under the maintenance and normal conditions

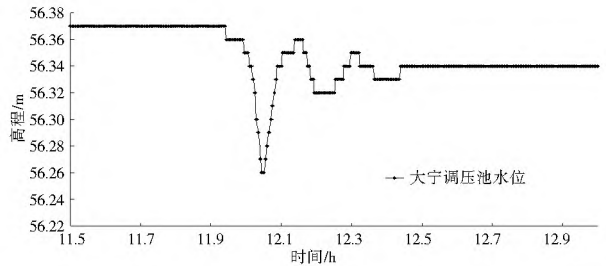


图 3 大宁调压池的水位变化

Fig. 3 Variation of water levels in the Daning regulation reservoir

调水明满流耦合模型, 利用实测数据拟合了系统的参数, 然后将系统应用到南水北调中线工程北京段的水力特性计算中。计算结果表明该系统能够很好的应用到实际工程中, 对南水北调中线工程后期的工程调度及其他大型明满流交替输水工程具有一定的指导作用。南水北调工程的工程量大, 且影响因素繁多, 要想更加精确的模拟流网的水力特性, 还需要更加详细的数据资料。

参考文献(References):

[1] Singhal A, Kirimidjian A S. Method for probabilistic evaluation of seismic structural damage [J]. J. Struct. Engng. ASCE, 1996, 122(12): 1459-1467.

[2] Der Kiureghian, A. Probabilistic modal combination for earthquake loading [C]. 7th WCEE, 1980, Vol. 6, Pt. 0 : 729-739.

[3] Takada T, Yamaguchi K. Two step seismic limit state design procedure based on nonlinear LRFD and dynamic response analysis [J]. Structural Safety, 2002, 24: 397-415.

[4] 陈乃祥, 孔庆蓉, 樊红刚, 等. 明满交替流特征隐式格式法计算模型在工程中的应用研究[J]. 水力发电学报, 2005, 24 (5): 85-89. (CHEN Nai-xiang, KONG Qing-rong, FAN Hong-gang, et al. Research on characteristic implicit method applied for calculating mixed free surface to pressure flow in model of project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24 (5): 85-89. (in Chinese))

[5] 李辉, 陈乃祥, 樊红刚. 具有明满交替流动的三峡右岸地下电站的动态仿真[J]. 清华大学学报, 1999, 39(11): 29-31. (LI Hui, CHEN Nai-xiang, FAN Hong-gang. Transient simulation with dynamic for right bank underground hydropower station of the Three Gorges [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 1999, 39(11): 29-31. (in Chinese))

[6] 樊红刚, 陈乃祥, 杨琳, 等. 明满交替流计算研究方法及其实

- 验证[J]. 工程力学, 2006, 23(6): 16-20. (FAN Hong gang, CHEN Naixiang, YANG Lin, et al. Numerical simulation and experimental verification of transient mixed free surface pressure flow [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(6): 16-20. (in Chinese))
- [7] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (GENG Yan fen. A coupled hydraulic numerical models on the urban rain flood[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [8] 张成, 傅旭东, 王光谦. 复杂内边界长距离输水明渠的一维非恒定流数学模型[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(6): 16-20 (ZHANG Cheng, FU Xudong, WANG Guangqian. One dimensional numerical model for unsteady flows in long route open channel with complex inner boundary conditions [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2007, 5(6): 16-20. (in Chinese))
- [9] 李大鸣, 林毅, 刘雄, 等. 具有闸、堰的一维河网非恒定流数学模型及其在多闸联合调度中的应用[J]. 水利水电技术, 2010, 41(9): 47-51. (LI Daming, LIN Yi, LIU Xiong, et al. Numerical model of one dimensional unsteady flow for river networks with sluices and weirs and its application to combined regulation of multi sluices [J]. Engineering Mechanics, 2010, 41(9): 47-51. (in Chinese))
- [10] 李强. 长距离输水系统明满流及水力控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2006 (LI Qiang. Study on free surface pressurized flow and water level modulation hydraulic control in the long distance water diversion system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese))
- [11] 徐文卓. 长距离输水系统明满流及水位调节时的水力控制研究[D]. 天津: 天津大学, 2007 (XU Wen zhuo. Study on free surface pressurized flow and water level modulation hydraulic control in the long distance water diversion system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese))
- [12] 王常红. 长距离输水隧洞水力特性数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2008 (WANG Chang hong. Numerical simulation study on hydrolic characteristics in long distance water diversion tunnels [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [13] 赵丹祿. 雨水管网水动力模拟及城市暴雨积水分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2012 (ZHAO Dan lu. Storm sewer network hydrodynamic simulation and urban storm waterlogging analysis [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012. (in Chinese))
- [14] 刘进, 王东黎, 杨进新. 南水北调中线 PCCP 管道的摩阻损失计算分析[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 6(1): 231-234. (LIU Jin, WANG Dongli, YANG Jinxin. Friction loss for the PCCP pipe of the South to North Water Transfer (Middle Route) Project [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 6(1): 231-234. (in Chinese))
- [15] 清华大学水力学教研组编. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995. Hydraulic teaching and research group. Hydraulics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1995. (in Chinese)

(上接第 496 页)

- [5] 张铮, 吴燕, 胡保安, 等. 堆场疏浚淤泥沉降规律计算[J]. 南水北调与水利科技, 2013(2): 142-146. (ZHANG Zheng, WU Yan, HU Baolan, et al. Research on Settlement Regularity of Dredged Sludge. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013(2): 142-146. (in Chinese))
- [6] 王永周, 陈美, 邓维用. 我国微波干燥技术应用研究进展[J]. 干燥技术与设备, 2008, 6(5): 219-224. (WANG Yongzhou, CHEN Mei, DENG Weiyong. Research and development of the application of microwave drying technology at Home [J]. Drying Technology & Equipment, 2008, 6(5): 219-224. (in Chinese))
- [7] Chandrasekaran S, Basak T, Srinivasan R. Microwave heating characteristics of graphite based powder mixtures. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, 48: 22-27.
- [8] Dai Q, Jiang X, Wang F, et al. PCDD/Fs in wet sewage sludge pyrolysis using conventional and microwave heating [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2013, 104: 280-286.
- [9] Soysal Y, Öztekin S, Eren Ö. Microwave drying of parsley: modelling, kinetics, and energy aspects [J]. Biosystems Engineering, 2006, 93(4): 403-413.
- [10] Idris A, Khalid K, Omar W. Drying of silica sludge using microwave heating [J]. Applied thermal engineering, 2004, 24(5): 905-918.
- [11] 吴龙, 吴中华, 李吕勇, 等. 城市污泥热风与微波干化特性研究[J]. 干燥技术与设备, 2012(5): 259-267. (WU Long, WU Zhonghua, LI Lv yong, et al. Study on drying characteristics of sewage sludge using hot air and microwave [J]. Drying Technology & Equipment. 2012(5): 259-267. (in Chinese))
- [12] Menendez J A, Inguanzo M, Pis J J. Microwave induced pyrolysis of sewage sludge [J]. Water research, 2002, 36(13): 3261-3264.
- [13] 周健, 李志刚, 杨士伟, 等. 微波功率、辐射时间及污泥量对污泥微波干燥效能的综合影响研究[J]. 环境工程学报, 2010(10): 2378-2380. (ZHOU Jian, LI Zhigang, YANG Shiwei, et al. Study on comprehensive influence of microwave power, radiating time and sludge mass on microwave drying efficiency of sludge [J]. Journal of Environmental Engineering, 2010(10): 2378-2380. (in Chinese))