

水电站虹吸式进水口工作过程 CFD 模拟

侯才水¹, 陈 龙², 王志寰²

(1. 福建水利电力职业技术学院水利工程系, 福建 永安 366000;
2. 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 采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 CFD 软件对水电站虹吸式进水口的虹吸形成过程(含抽真空过程)和虹吸破坏过程进行数值模拟研究, 分析了虹吸管道内压强、流速、水气界面的分布及其变化情况。研究结果表明 虹吸式进水口工作过程中驼峰顶部的压强值最低 抽真空速度与压力波动幅度成正比 虹吸破坏后驼峰两侧水体平稳性存在较大差异。

关键词 水电站 虹吸式进水口 工作过程 CFD 模拟

中图分类号 TV732.1

文献标志码 A

文章编号 1006-7647(2012)04-0010-04

CFD simulation of operating process in siphon intake of hydropower station//HOU Cai-shui¹, CHEN Long², WANG Zhi-huan²(1. Department of Hydraulic Engineering, Fujian College of Water Conservancy and Electric Power, Yong'an 366000, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract : The siphon formation process (including the vacuum process) and failure process in the siphon intake of a hydropower station were simulated with an RNG $k-\epsilon$ turbulence model and CFD software. The distribution of the pressure, velocity, and air-water interface within the siphon pipes were analyzed. The results show that : the value of the pressure is the lowest at the top of the hump during the operating process ; the vacuum pumping speed is directly proportional to the fluctuation range of pressure ; and the stability of water on both sides of the hump is quite different after the siphon failure.

Key words : hydropower station ; siphon intake ; operating process ; CFD simulation

虹吸是一种复杂的非稳态多相流现象, 在流体机械、给排水、水处理、医学等各个领域均有广泛的应用。水电站虹吸式进水口是虹吸现象在水利工程中应用的一种重要形式, 具有结构简单、运行稳定、操作方便、投资少、效益高且水流泥沙含量低等优点, 特别适用于多泥沙河流上的小型水电站和泵站。虹吸式进水口设计是否合理取决于两个标准 : 一是形成真空所需时间短 ; 二是虹吸破坏时断流过程安全可靠。

目前, 水电站虹吸式进水口设计研究的方法主要是理论分析结合工程经验和模型试验, 应用数值模拟方法对其工作过程进行研究的例子相对较少。文献[1-4]针对虹吸理论及其工程应用进行研究 ; 文献[5-7]依据流体力学知识和以往工程经验, 考虑自身工程的具体情况, 设定了虹吸式进水口的体型和参数 ; 文献[8]总结了确定虹吸式进水口结构形式、主要参数、流道尺寸、进水口淹没深度和渐变段形式等方面的注意事项和经验公式 ; 文献[9]通过模型试

验分析了几种方案下虹吸道内的流态 ; 文献[10]通过模型试验, 探讨了虹吸式进水口工作过程中的水力特性, 总结了若干试验公式。理论计算不能得到非恒定两相流不同位置处的压强和流速, 经验公式往往引入较大的安全度, 增加了工程量, 而模型试验费时费力且存在比尺效应问题^[11], CFD 模拟可有效弥补上述研究手段的不足。

本文应用 CFD 软件 Flow 3D 对水电站虹吸式进水口的虹吸形成过程(含抽真空过程)和虹吸破坏过程两个关键过程进行模拟研究, 得到虹吸管道内压强、流速、水气界面的分布和变化情况, 为虹吸式水电站的设计研究及安全稳定运行提供依据。

1 数学模型及计算方法

1.1 湍流模型

目前工程中应用最广泛的湍流模型是 RANS $k-\epsilon$ 模型, 其计算量适中且精度较高。考虑到虹吸式进水口工作时水流流线弯曲程度较大且存在高应变

率的流动,采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行三维模拟,其对应的湍动能 k 和耗散率 ϵ 输运方程分别为^[12]

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + \rho \epsilon \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\epsilon}^* \epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{2}$$

式中各符号含义见文献[12]。

1.2 自由面追踪

针对虹吸管道内水、气两相相互作用,采用 VOF 方法^[13]追踪自由水面,定义 α_a 和 α_w 分别为计算域内空气和水的体积分数, $\alpha_w = 1$ 表示该单元完全被水充满; $\alpha_w = 0$ 表示该单元完全被气充满; $0 < \alpha_w < 1$ 表示该单元存在自由液面,部分是水,部分是气。

确定水和气的界面可以通过求解以下关于 α_w 的连续方程来实现:

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_w u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{3}$$

水相和气相有共同的流速场和压力场,但湍流模型中的密度和分子黏性系数则按体积分数加权确定:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \tag{4}$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a \tag{5}$$

式中: ρ_w 和 ρ_a 分别为水和空气的密度; μ_w 和 μ_a 分别为水和空气的分子黏性系数。

1.3 求解方法及主要参数

采用 Flow 3D 软件进行计算,离散方程格式为一阶迎风格式,在非恒定湍流条件下采用压力基隐式求解。由于是虹吸现象,考虑重力作用,其值为 9.8 m/s^2 。因水、气相互作用故为两相流,流体为 20°C 的水,空气温度为 15°C ,边壁条件无滑动。

2 虹吸式进水口工作过程分析

2.1 计算条件

a. 计算体型。某虹吸式进水口电站设计水头为 16 m ,引水流量为 $12 \text{ m}^3/\text{s}$ 。虹吸式进水口流道由进口段、驼峰段和渐变段三部分组成,见图 1。进水

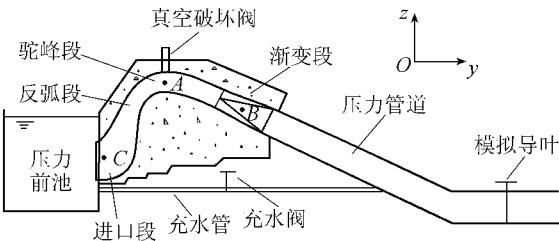


图 1 虹吸式进水口结构示意图

口矩形断面尺寸为 $2.6 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ (宽 $\times$ 高,下同),驼峰顶部矩形断面尺寸为 $2.6 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,驼峰两侧的倾角分别为 60° 和 45° ,因此驼峰的转弯夹角为 105° 。驼峰断面中心的转弯半径为 2 m ,进口段与驼峰段之间采用反弧段连接。压力管道断面为圆截面,其内径为 1 m ,驼峰段与压力管道之间采用由矩形渐变为圆形的渐变段衔接,其长度为 6.45 m 。

b. 网格划分。因虹吸管体型在 x 方向上对称,故只取一半进行分析,并采用结构化六面体网格。由于虹吸管形状不规则且边界条件不同,故将计算域划分 3 个区块,其中区块 1 模拟进口段及反弧段,区块 2 模拟压力管道,区块 3 模拟压力前池,见图 2。总有效网格数约为 475 000 个。

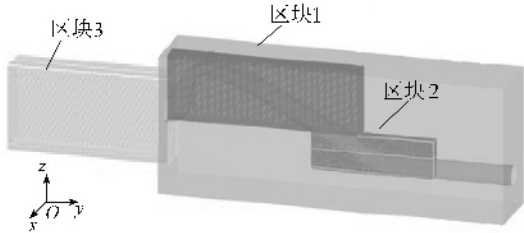


图 2 网格划分示意图

c. 边界条件。压力前池顶部为压力边界,水位为 10.9 m ,压力为 0 Pa 。抽气管和压力管道端部为速度边界,根据具体模拟工况给定速度值。其他边界为默认的对称边界条件。

d. 流体参数。虹吸式进水口工作过程模拟涉及水、气两相流,且需要考虑流体的压缩性,设水的压缩性系数为 5×10^{-10} ,空气的压缩性系数为 1×10^{-5} 。

e. 流场初始化。初始状态时水轮机导叶关闭,压力前池水位保持不变。打开充水阀,压力前池通过充水管向压力管道充水,直至水位与压力前池内水平齐平;关闭充水阀,水流静止不动。选择驼峰断面 A 点、渐变段 B 点、进口断面 C 点作为监测点,用于分析局部点的水力特性。A、B、C 三点均位于虹吸管对称剖面上,其坐标、位置如图 1 所示。

2.2 抽真空过程

a. 抽真空过程水面变化。虹吸管中黑色表示水,白色表示空气(下同),见图 3。在 $t = 0 \text{ s}$ 时反弧段和压力管道内水位齐平,随着驼峰顶部空气不断被抽走,在上下压强差和驼峰处真空吸力的作用下水面不断上升, $t = 180 \text{ s}$ 左右时反弧段的水体越过驼峰产生堰流; $t = 225 \text{ s}$ 时驼峰两侧水体液面齐平; $t = 300 \text{ s}$ 时空气基本被抽净,此后抽气速度逐渐减为零,抽真空任务完成。同时,随着抽气的进行,驼峰处负压的绝对值不断增大, $t = 300 \text{ s}$ 时驼峰顶部负压值达到最大,空气抽净后该处负压值基本稳定。

b. 局部点压强变化过程。抽真空过程中驼峰

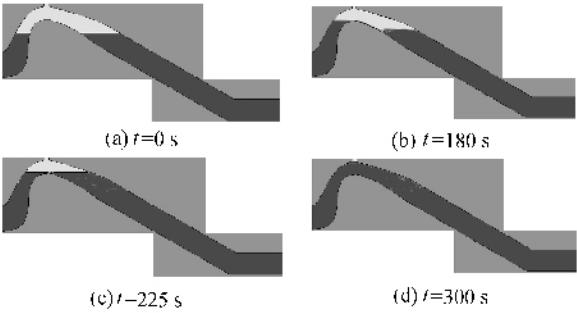


图3 抽真空过程水面变化

断面 A 点处的压强水头逐步减小,当空气被抽净后压强水头趋于稳定,且在抽气速度减至零的过程中,压强水头基本不变,最终稳定在 -1.70 m 左右,见图 4(a)。渐变段 B 点处的压强水头先变小后变大,因为该点最初处于空气中,随着抽真空的进行,空气压强逐渐减小;180 s 后该点处于水中,水位不断上升,压强水头逐渐增大;300 s 后空气基本被抽净,该点的压强水头稳定在 -0.50 m 左右;650 ~ 660 s 内抽气速度逐渐减为零,该点的压强水头基本不变,见图 4(b)。

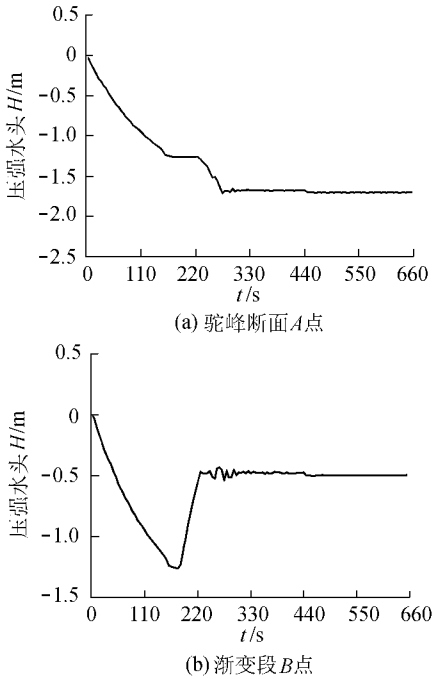
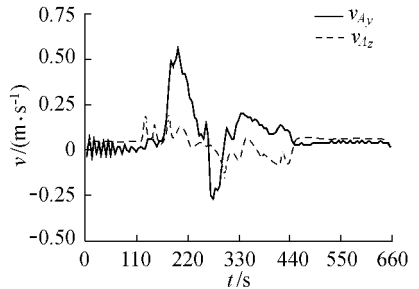
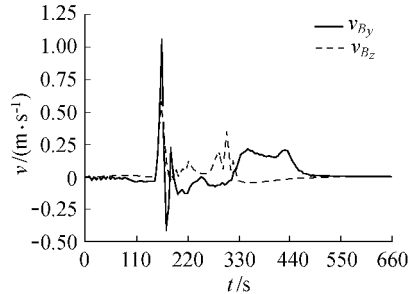


图4 抽真空过程局部点压强水头变化过程

c. 局部点流速变化过程。因驼峰断面 A 点在 270 s 时浸入水中,故 270 s 之前为空气流速,之后为水的流速。在 120 ~ 450 s 之间 A 点流速波动较大,随着抽真空的进行,于 500 s 左右时 v_{Ay} 逐渐稳定在 0.045 m/s , v_{Az} 逐渐稳定在 0.060 m/s 。抽气速度减为零后(660 s 后), v_{Ay} 和 v_{Az} 也减为零,见图 5(a)。渐变段 B 点在 180 s 后浸入水中,120 ~ 450 s 之间 B 点流速波动较大,随着抽真空的进行,渐变段内水体流动逐渐稳定并缓慢停止, v_{By} 和 v_{Bz} 在 500 s 之后接近零,见图 5(b)。



(a) 驼峰断面 A 点



(b) 渐变段 B 点

图5 抽真空过程局部点流速变化过程

2.3 虹吸形成过程

抽真空完成后封闭驼峰顶部,开启水轮机导叶,以抽真空结束状态为计算初始条件。为使虹吸迅速形成,且与水电站实际运行情况相符,将计算域中压力管道端部设为流速出口,出口流速由零逐渐增加到 1.6 m/s ,然后以这一速度出流;其他边界条件不变,计算体型和网格划分情况也不变。

a. 局部点压强变化过程。虹吸形成过程中驼峰断面 A 点、渐变段 B 点处的压强水头起初波动较大,随着计算域内水体运动渐趋恒定,波动逐渐平稳,最后 A 点压强水头稳定在 -1.863 m 左右, B 点压强水头稳定在 -0.665 m 左右,见图 6。

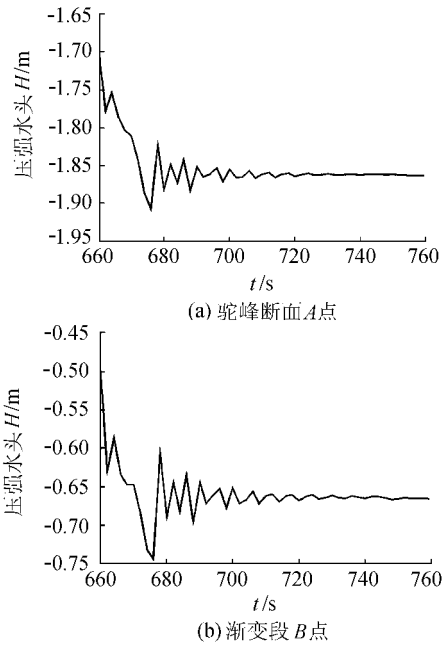
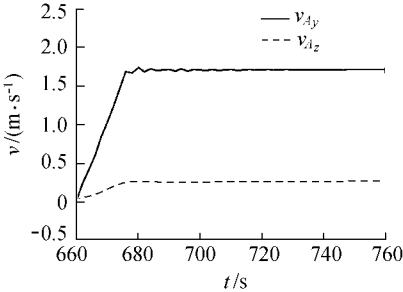
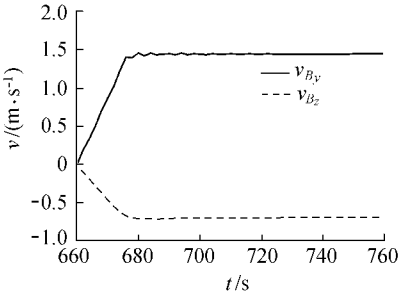


图6 虹吸形成过程局部点压强水头变化过程

b. 局部点流速变化过程。当 $t = 660\text{ s}$ 时抽气速度为零, 整个计算域内的水体几乎静止, A 点和 B 点处的流速约为零; 当 $t = 660 \sim 676\text{ s}$ 时随着压力管道端部流速逐渐增大, A 点和 B 点处的流速也逐渐增大, 700 s 后流场基本稳定。最后, v_{Ay} 稳定在 1.71 m/s , v_{Az} 稳定在 0.25 m/s , 即 A 点的流速约为 1.73 m/s ; v_{By} 稳定在 1.44 m/s , v_{Bz} 稳定在 -0.70 m/s , 即 B 点的流速约为 1.60 m/s , 见图 7。



(a) 驼峰断面A点



(b) 渐变段B点

图 7 虹吸形成过程局部点流速变化过程

2.4 虹吸破坏过程

虹吸形成后关闭压力管道端部, 同时打开真空破坏阀让空气进入, 从而使虹吸破坏。以虹吸形成后的稳定状态为计算初始条件, 真空破坏阀处设为压力边界, 压力管道末端设为流速边界, 其他边界条件不变, 计算体型和网格划分情况也不变。

a. 虹吸破坏过程水面变化。 $t = 760\text{ s}$ 时压力管道末端流速开始减小, 真空破坏阀打开, 此时进水口内仍充满水; $t = 761\text{ s}$ 时空气从真空破坏阀进入驼峰段, 进水口内的水体在重力作用下开始下降, 见图 8(a); $t = 763\text{ s}$ 时由于驼峰顶部真空度减小, 渐变段

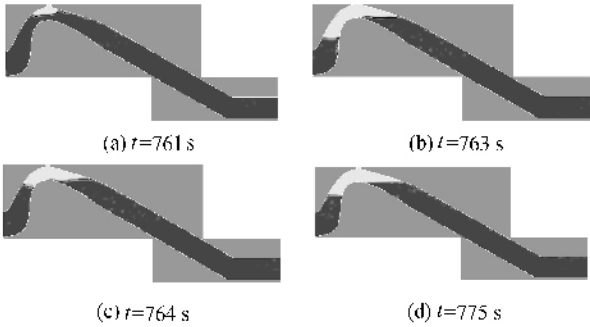
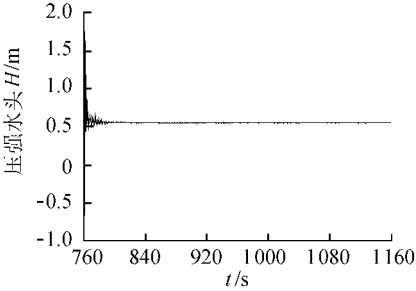


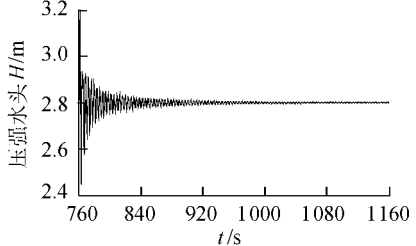
图 8 虹吸破坏过程水面变化

和压力管道内的水向反弧段溢出, 在重力作用下反弧段水位下降至最低点, 见图 8(b); $t = 764\text{ s}$ 时由于压力前池的反射作用, 反弧段水位上升至高于压力前池水位的位置, 压力管道端部流速逐渐减为零, 见图 8(c); 此后, 反弧段水体不断波动并在 $t = 775\text{ s}$ 后渐趋稳定在压力前池水位高程, 渐变段和压力管道内水体逐渐静止, 水位稳定, 见图 8(d)。可见, 整个虹吸进水口断流时间很短(大约 15 s), 断流迅速。

b. 局部点压强变化过程。在虹吸破坏过程中渐变段 B 点处的压强水头在 775 s 后经过短暂波动便渐趋平稳, 最后稳定在 0.55 m , 见图 9(a)。进口断面 C 点处的压强水头则不断波动, 这是因为反弧段水体不断上下波动所致; 随着反弧段水体波动逐渐减弱, 进口段压强趋于稳定, C 点压强水头稳定在 2.80 m , 见图 9(b)。



(a) 渐变段B点



(b) 进口断面C点

图 9 虹吸破坏过程局部点压强水头变化过程

3 结 论

a. 在虹吸式进水口工作过程中, 驼峰顶部的压强值最低。陈革强等^[3]认为驼峰顶部最大真空度出现在整根虹吸管形成正常流速后, 即虹吸稳定后。但实际模拟过程中, 笔者发现驼峰顶部真空度在抽真空之后经过一段时间的波动才达到恒定值, 即文献^[3]所认为的“最大真空度”, 因而实际最大真空度出现在虹吸稳定前的某一时刻, 其数值与恒定值存在一定偏差, 在具体工程设计过程中应加以考虑。

b. 抽真空速度与压力波动幅度成正比。为了保证压力波动不至于过大, 抽真空速度应加以控制。虹吸稳定后, 真空度的恒定值由虹吸高度(驼峰顶部高程与压力前池水位之差)和驼峰前管段中的水头损失共同组成。

(下转第 82 页)

- [29] 龚永康,陈亮,武广繁. 膨胀土裂隙电导特性[J]. 河海大学学报:自然科学版,2009,37(3):323-326.
- [30] ANNA K G, ACWORTH R I, BRYCE F J K. Detection of subsurface soil cracks by vertical anisotropy profiles of apparent electrical resistivity[J]. Geophysics,2010,75(4):85-93.
- [31] 翟小洁. 岩石在单轴受荷条件下的超声波特性研究[D]. 成都:成都理工大学,2008.
- [32] 赵明阶,吴德伦. 单轴受荷条件下岩石的声学特性模型与实验研究[J]. 岩土工程学报,1999,21(5):540-545.
- [33] 赵明阶,徐蓉. 岩石损伤特性与强度的超声波速研究[J]. 岩土工程学报,2000,22(6):720-722.
- [34] 刘俊岩. 建筑基坑工程监测技术规范实施手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [35] YESILLER N, MILLER C, INCI G, et al. Desiccation and cracking behavior of three compacted landfill liner soils[J]. Engineering Geology,2000,57(1):105-121.
- [36] PICORNELL M, LYTTON R L. Field measurement of shrinkage crack depth in expansive soils[J]. Transportation Research Record,1989:121-130.
- [37] MORRIS P H, GRAHAM J, WILLIAMS D J. Cracking in drying soils[J]. Canadian Geotechnical Journal,1992,29(2):262-277.
- [38] CHERTKOV V Y. Using surface crack spacing to predict crack network geometry in swelling soils[J]. Soil Sci Soc Am,2000,64(6):1918-1921.
- [39] 姚海林,郑少河,葛修润,等. 裂隙膨胀土边坡稳定性评价[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(增刊2):2331-2335.
- [40] 潘宗俊,谢永利,杨晓华,等. 基于吸力量测定膨胀土活动带和裂隙深度[J]. 工程地质学报,2006,14(2):206-211.
- [41] 李培勇,杨庆,栾茂田,等. 非饱和膨胀土裂隙开展深度影响因素研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):2968-2972.
- [42] 王景明,王君. 冀中南黄土潜蚀地貌与黄土构造节理[J]. 地理研究,1994,13(1):90-93.
- [43] 李志辉,龚杰. 露天裂隙发育岩体地质构造调查及评价的研究与应用[J]. 金属矿山,2009(增刊1):637-642.
- [44] 廖济川. 开挖边坡中膨胀土的工程地质特性[C]//非饱和土理论与实践学术讨论会文集. 北京:中国土木工程学会土力学及基础工程学会,1992:102-117.
- [45] 尹小涛,党发宁,丁卫华,等. 岩土 CT 图像中裂纹的形态学测量[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(3):539-544.
- [46] 张家俊,龚壁卫,胡波,等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律实验研究[J]. 岩土力学,2011,32(9):2729-2734.
- [47] 胡卸文,王治平. 黏土体裂隙效应中的分形几何现象[J]. 四川水力发电,1998,17(1):22-26.
- [48] 易顺民,黎志恒,张延中. 膨胀土裂隙结构的分形特征及其意义[J]. 岩土工程学报,1999,21(3):294-297.
- [49] 包惠明,魏雪丰. 干湿循环条件下膨胀土裂隙特征分形研究[J]. 工程地质学报,2011,19(4):478-481.

(收稿日期 2011-12-15 编辑 骆超)

(上接第 13 页)

c. 虹吸破坏后驼峰两侧水体平稳性存在较大差异. 虹吸破坏阶段空气由真空破坏阀进入驼峰后驼峰左侧(反弧段)水体在压力前池水位所在高程附近振荡,需较长时间达到平稳. 驼峰右侧(渐变段和压力管道)水体在压力管道关闭后的较短时间内达到平稳,虹吸破坏时间只需数十秒。

参考文献:

- [1] 李百齐. 虹吸管出水断流装置的流体力学相似分析[J]. 船舶力学,2003,7(5):39-44.
- [2] 袁乃荣. 虹吸现象的新解释[J]. 物理教学探讨,2001,19(5):5-6.
- [3] 陈革强,施俊跃,卢健国,等. 水库虹吸管驼峰真空度机理分析与控制[J]. 水利技术监督,2008(4):50-51,73.
- [4] 董毅,汤正军,田明云. 虹吸式轴流泵站抽真空启动探讨[J]. 水泵技术,2000(1):32-33.
- [5] 黄煌. 虹吸式进水口在三坝水电站技改工程中的应用[J]. 中国农村水利水电,2005(9):78-82.
- [6] 潘正林,程云峰. 中低水头引水式电站采用虹吸式进水技术[J]. 小水电,1996(1):21-25.
- [7] 沈晓燕. 须江水电站虹吸式进水口的设计[J]. 浙江水利科技,2000(4):40-41.
- [8] 韩伯鲤. 水电站虹吸式进水口的设计与分析[J]. 武汉水利电力学院学报,1980(4):35-42.
- [9] 黄智敏,朱红华,陆汉柱,等. 虹吸溢洪道水力特性试验研究[J]. 湖北水力发电,2002(3):30-33.
- [10] 顾谦甫,卞祖铭. 水电站虹吸式进水口试验研究[J]. 浙江水利科技,1985(2):1-4.
- [11] 党媛媛,韩昌海. 进水口漩涡问题研究综述[J]. 水利水电科技进展,2009,29(1):90-94.
- [12] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:1-17,113-142.
- [13] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boudaries[J]. J Comput Phys,1981,39(3):201-225.

(收稿日期 2011-12-15 编辑 骆超)