

高水头船闸阀门段体型优化三维数值模拟

杨忠超, 杨 斌, 陈明栋, 胡雪梅

(重庆交通大学内河航道整治技术交通行业重点实验室, 重庆 400074)

摘要 采用动网格技术和 VOF 方法对阀门开启过程进行非恒定流三维紊流数值模拟, 分析阀门段水流急变分离的流态、流速、压力等水力特性参数的时空演化规律, 分析出现空蚀危险的区域和时刻。针对阀门后突扩体顶板和升坎凸弧处出现的较低负压问题, 提出 8 种体型方案, 并分析体型参数对流速、流态、压强分布的影响, 遴选出最佳体型。分析结果表明, 方案 3 的顶板压强最大, 方案 8 的升坎凸弧处压强最大。

关键词 高水头船闸 阀门 紊流数值模拟 动网格 空蚀 体型优化

中图分类号 U641.3+3

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2010)02-0010-04

Three dimensional numerical simulation of figure optimization of valves of high head locks//YANG Zhong-chao, YANG Bin, CHEN Ming-dong, HU Xue-mei (Key Laboratory Inland Waterway Regulation Engineering of Ministry of Communications, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract : The dynamic mesh technology and the VOF method were employed to conduct 3D numerical simulation of unsteady flows for the opening process of valves of high head locks. The spatial and temporal evolution rules of hydraulic parameters such as flow pattern, flow velocity and pressure were analyzed. The region and time with the occurrence of cavitation erosion were discovered. As for the low negative pressure problem on the ceiling and the end of rise step, 8 design schemes for the figure optimization were proposed. The effect of the figure parameters on the flow velocity, flow pattern and pressure distribution were analyzed. Accordingly, the optimization figure was selected. The results show that the pressure on the ceiling is the largest for the third design scheme and the pressure on the end of rise step is the largest for the eighth design scheme.

Key words : high head lock ; valve ; numerical simulation of turbulent flows ; dynamic mesh ; cavitation erosion ; shape-type optimization

由近年国内、外船闸建设状况可知, 越来越大的船闸规模及越来越高的水头是现代船闸的发展趋势。船闸输水阀门每天频繁操作, 工作条件复杂, 在非恒定高速水流作用下, 极易在阀门段、分流口等部位形成空化, 严重时可能导致阀门及输水廊道空蚀破坏, 威胁建筑物及通航安全, 因此, 输水系统阀门段的空化问题是高水头船闸设计的关键技术难题^[1-4]。乌江银盘枢纽船闸设计最高通航水头达 36.46 m, 为目前国内已建和在建船闸中最高水头, 是世界排名第 3 的单级船闸。在物理模拟试验和数值计算中, 阀门段空腔内均出现负压, 尤其在升坎反弧处水流脱离边壁, 负压尤为明显。并且, 该处负压接近廊道边壁, 容易对建筑物造成空蚀破坏。

采用数值模拟手段研究阀门廊道中的流场特性

具有优化体型方便、节约财力、节省时间、不存在比尺效应等优点, 是物理模型试验研究的有力补充手段。王玲玲等^[5]、戴会超等^[6]、马峥等^[7]采用 $k-\epsilon$ 双方程模型对三峡船闸充水系统阀门段进行二维数值模拟; 王智娟等^[8]采用三维数学模型在阀门开度 $n = 0.4$ 时对银盘船闸阀门段体型进行优化。这些研究成果加深了对阀门水力学的理解, 为高水头船闸阀门设计提供了科学依据。

在整体埋深及廊道尺寸受限的情况下, 通过局部体型修改来优化其压力条件是解决空化空蚀问题的有效途径。本文提出一系列体型, 采用动网格技术对其进行非恒定流三维数值模拟, 分析阀门段水流急变分离的流态、流速、压强的时空变化规律, 遴选出最佳体型。

基金项目 交通部西部建设项目(200532800030) 重庆市教委基金(KJ050408) 重庆市科委基金(CSTC2006EA6008)

作者简介 杨忠超(1972—), 男, 四川眉山人, 副研究员, 博士, 从事水力学、河流动力学和计算流体力学研究。E-mail: yangzc998@.com.cn

1 计算模型

1.1 控制方程

计算模型选用在紊流计算中得到公认的雷诺时均法 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型。采用有限容积法对偏微分方程进行积分,方程离散中对流、扩散项采用二阶向后全隐式格式,时间项采用一阶向后差分格式。为了反映压力对速度的影响,采用压力-速度耦合求解的 SIMPLER 算法,同时采用多重网格技术加速求解。线性化的方程组求解运用点隐式高斯-塞德尔迭代方法。

连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \tag{2}$$

k 方程

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu + \nu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \epsilon \tag{3}$$

ε 方程

$$\frac{\partial (\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu + \nu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \rho \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{4}$$

其中 $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ $C_{1\epsilon} = 1.42 - \frac{\eta \left(1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3}$

$$\eta = \frac{Sk}{\epsilon} \quad S = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

式中: ρ 和 ν 分别为体积分数的密度和分子黏性系数; ν_t 为紊流黏性系数; k 为紊动能; ϵ 为紊流耗散率; G_k 为生成项; $i = 1, 2, 3$, 即 $\{x_i = x, y, z\}$, $\{u_i = u, v, w\}$; j 为求和下标。

方程中通用模型常数 $\eta_0 = 4.28, \beta = 0.015, C_\mu = 0.085, C_{2\epsilon} = 1.68, \sigma_k = 0.7179, \sigma_\epsilon = 0.7179$ 。

1.2 计算阀门段廊道

以乌江银盘船闸充水阀门段廊道体型建立计算模型。计算区域以阀门井为中点,上游至廊道进水口,约长 38 m,下游至廊道水平分流口,约长 49 m。阀门井宽 4.5 m,模型总长约 91 m。由于阀门启动后就存在门楣缝隙,故建立模型时在门楣处预留约

2 cm 的狭缝以模拟狭缝射流。采用四面体和六面体混合网格进行剖分,对阀门区和突扩段网格进行加密。银盘船闸阀门段廊道及计算网格剖分见图 1。

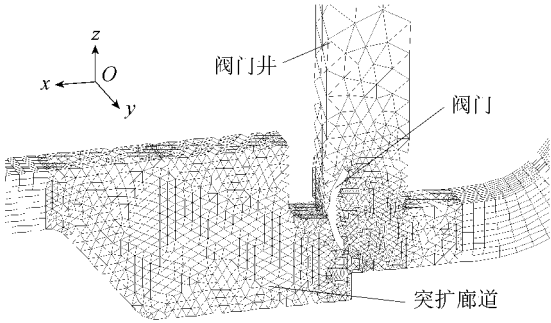


图 1 银盘船闸阀门段廊道及计算网格剖分示意图

1.3 边界条件处理

1.3.1 自由表面

对于阀门井存在的自由表面,采用三维 VOF 法进行计算。

1.3.2 进、出口条件

进、出口均为压力边界条件。进口采用进口廊道底至水库水面静水压力分布。实际随着阀门开启过程,出口随闸室水深增加而压力增大,上、下游出口压力差减小。但为了模拟最不利工况,保持出口最低压力不变,即出口按下游河道水面至出口廊道底的静水压力分布设定。

1.3.3 阀门开启

阀门开启速度采用 UDF 文件(笔者采用速度随时间变化规律)使阀门实现连续的开启过程。阀门开启过程中采用动网格技术调整和更新阀门运动后的网格,确保计算网格质量。

1.3.4 固壁边界条件

固壁边界条件由壁函数方法给定。

2 设计方案结果分析

图 2 表明在阀门开启过程中,突扩体腔内逐步形成 2 个明显的旋涡,逆时针旋涡位于主流上方的上突扩内,顺时针旋涡位于底扩跌坎后的三角区域,2 个旋涡方向相反。在上游高水压作用下,阀门下底缘与廊道底板之间形成高速射流,射流斜冲下突扩体底板后,主流附底板而下冲击升坎,在升坎末端由于断面减小,流速显著增加,且由于流向改变,形成脱壁。从流速来看,主流在阀门开度 $n = 0.4$ 时流速最大,约为 24.7 m/s,升坎凸弧末端脱壁流速在阀门开度 $n = 0.8$ 时达到最大,为 25.22 m/s。

从图 3 和图 4 可见,随着阀门开度增加,在突扩体顶板和升坎凸弧处形成 2 个低压区。在阀门开度 $n = 0.5$ 时,顶板压强(Ⅱ点)达到最小,为

- 7.31 kPa 在阀门开度 $n = 0.6 \sim 0.8$ 时升坎凸弧处(IV 点)的负压达到最低,为 - 120.75 kPa,故存在较高的空蚀破坏风险,需进一步对体型进行优化。

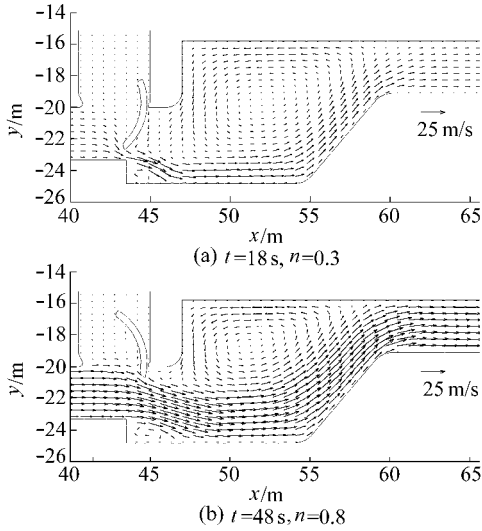


图 2 设计方案阀门廊道中的剖面流场

- 1 $P = -60$ kPa

2 $P = 20$ kPa

3 $P = 40$ kPa

4 $P = 60$ kPa

5 $P = 80$ kPa

6 $P = 100$ kPa

7 $P = 120$ kPa
- 8 $P = 140$ kPa

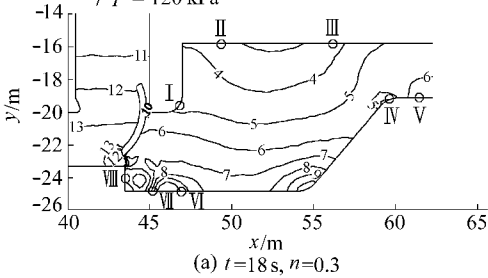
9 $P = 160$ kPa

10 $P = 180$ kPa

11 $P = 420$ kPa

12 $P = 440$ kPa

13 $P = 460$ kPa



- 1 $P = -60$ kPa

2 $P = -20$ kPa

3 $P = 20$ kPa

4 $P = 40$ kPa

5 $P = 60$ kPa

6 $P = 80$ kPa

7 $P = 100$ kPa
- 8 $P = 140$ kPa

9 $P = 180$ kPa

10 $P = 200$ kPa

11 $P = 240$ kPa

12 $P = 280$ kPa

13 $P = 460$ kPa

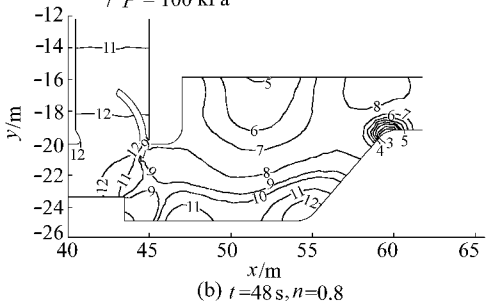


图 3 设计方案阀门不同开度时廊道中的剖面水压 P 分布

3 优化方案结果分析

3.1 优化方案

为了探索阀门段廊道几何参数对腔体内压力分布的影响,解决腔体内的负压问题,尤其是升坎凸弧

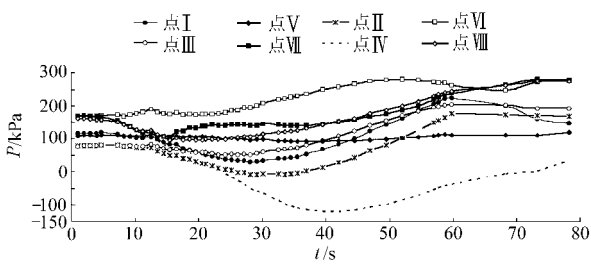


图 4 设计方案突扩体关键点水压随时间变化曲线
高负压的难题,从突扩体长度、上突扩高度、下跌坎高度,以及升坎倾角进行调整,在设计方案之外提出了 8 个方案(见表 1,表中参数含义见图 5)。

表 1 各比选方案几何参数

比选方案	L_1/m	L_2/m	H_0/m	H_1/m	H/m	X/m	$a/(\text{^\circ})$	$b/(\text{^\circ})$
设计方案	7.0	6.2	1.5	4.2	9.0	7.5	49.8	54.1
方案 1	7.0	6.2	1.0	4.2	8.5	7.5	46.7	54.1
方案 2	6.0	7.2	1.5	4.2	9.0	7.5	43.5	54.1
方案 3	6.0	6.2	2.0	3.0	8.3	6.6	45.3	52.6
方案 4	7.0	6.2	1.5	3.0	7.8	6.6	41.7	52.6
方案 5	6.0	6.2	1.5	3.0	7.8	6.6	41.7	52.6
方案 6	6.0	6.2	1.0	3.0	7.3	6.6	37.7	52.6
方案 7	6.0	6.2	2.0	2.0	7.3	5.3	37.7	51.0
方案 8	6.0	6.2	1.5	2.0	6.8	5.3	33.4	51.0

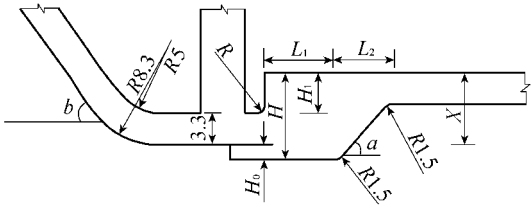


图 5 阀门段优化几何参数示意图(单位: m)

3.2 流场分析

廊道几何参数调整以后腔体内的流态发生显著变化。图 6 比较了阀门开启过程中阀门开度 $n = 0.3$ 时流态。除设计方案、方案 3 和方案 6 外,其余方案在阀门开启初期,腔体内首先形成一个顺时针旋涡,但这个旋涡不稳定,约在 $n = 0.35$ 时旋涡从升坎凸弧处被挤出空腔体,同时在跌坎下形成稳定的小范围的顺时针旋涡,在流股上方形成较大范围的逆时针旋涡。由于腔体几何参数不同,旋涡的形体、大小及位置略有不同。

3.3 压力分析

从 II 点压强变化来看, $n < 0.2$ 时各方案的压强基本没有变化,当 $n > 0.3$ 时腔体内旋涡开始形成,强度不断增大,顶板处压强减小, $n = 0.5 \sim 0.6$ 时压强达到最低,随后压强逐渐回升。保持下突扩高度 H_0 不变,比较设计方案、方案 2、方案 3 和方案 8,可见增大上突扩高度 H_1 有利于增大顶板压强。比较设计方案、方案 1 和方案 2 组,方案 3、方案 4、方案 5 和方案 6 组,方案 7 和方案 8 组,可见保持上突扩高

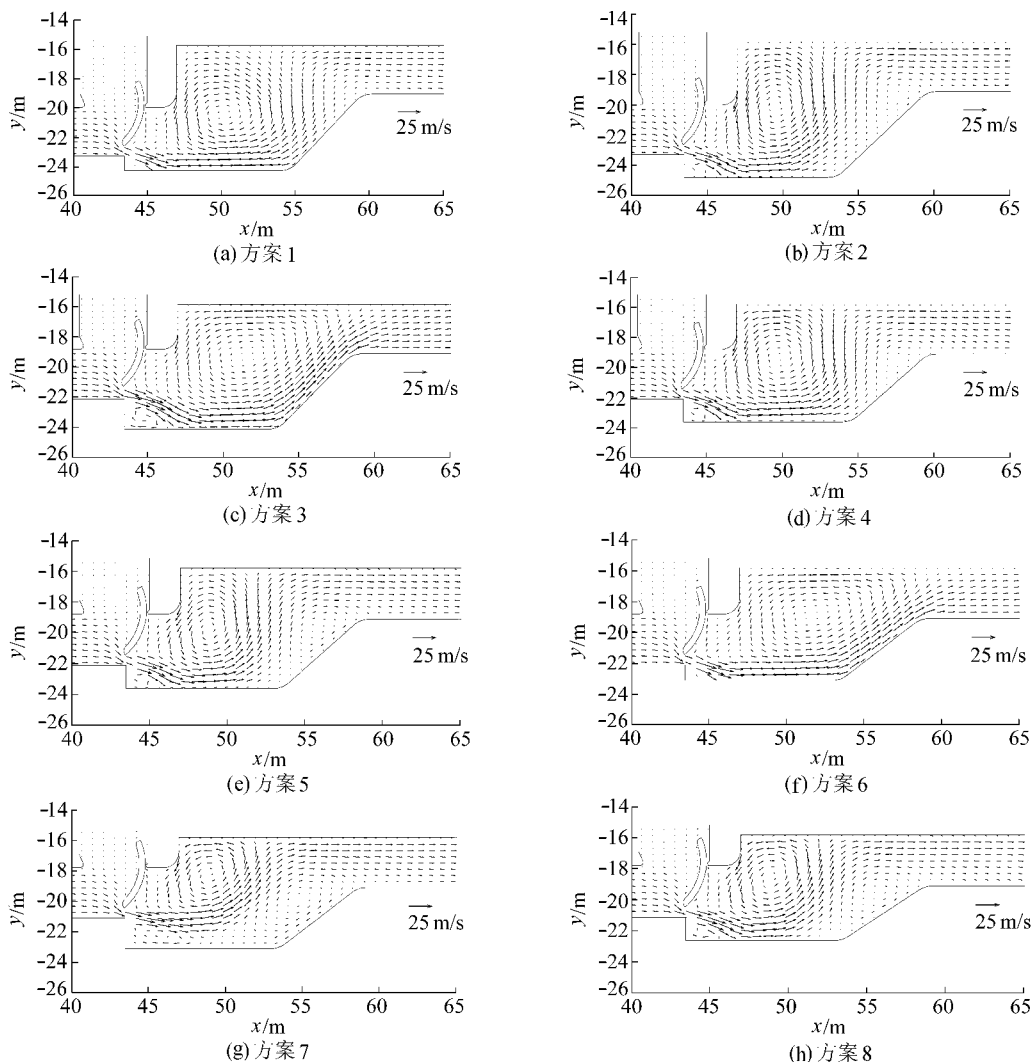


图 6 不同方案的流场比较($t = 18\text{ s}$, $n = 0.3$)

度 H_1 不变,增大下突扩 H_0 ,亦可增大顶板压强。但是受 a 和 b 角度的影响, H_1 和 H_0 最大的设计方案顶板压强却不是最大,而是方案 3 时顶板压强最大,基本未出现负压,最小为 3.25 kPa;方案 6 的顶板压强最小,达到 -41.95 kPa。

空蚀空化最危险区位于突扩体升坎凸弧处(Ⅳ点)。从Ⅳ点的压强过程线(图 7)来看,在 $n < 0.2$ 时,各方案压强变化较小,当 $n > 0.3$ 时腔体内旋涡形成,升坎凸弧处形成脱壁流,压强开始下降,约 $n = 0.6 \sim 0.8$ 之间达到最低,随后压强逐渐回升。从图 6 可见,设计方案、方案 3 和方案 6 没有发生初生旋涡被挤出突扩体的现象,故Ⅳ点的压强从 $n = 0.25$ 时逐渐降低,其余方案在初生旋涡被挤出突扩体瞬间时Ⅳ点的压强出现明显的陡降。从体型参数分析,当 H_0 不变时,比较设计方案、方案 2、方案 4 和方案 8,增大 H_1 , a 角变大,Ⅳ点的压强变低。其原因是 a 角越大,升坎凸弧处水流脱壁越严重,造成压强越低;当 H_1 不变时,比较设计方案、方案 1 和方案 2 组,方案 3、方案 4、方案 5 和方案 6 组,可见

增大 H_0 可提高Ⅳ点的压强。其原因是增大下突扩有助于跌坎处生成旋涡,消能较充分,从而减小了升坎凸弧处的流速。对于方案 7 和方案 8,倾角 a 对Ⅳ点的压强影响较明显, a 越小,压强越大,原因是小倾角减小了脱壁流强度。对比所有方案,方案 8 的Ⅳ点压强最大,最低值为 -63.59 kPa,比设计方案提高了 57.68 kPa。

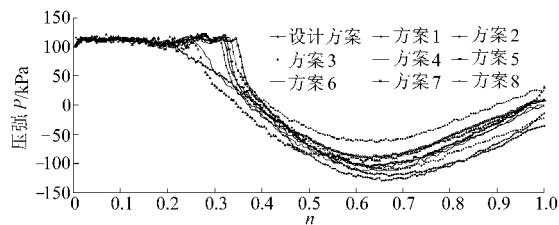


图 7 阀门开启过程中各方案Ⅳ点的压强比较

4 结 语

采用动网格技术和 VOF 方法对高水头船闸阀门开启过程进行非恒定流三维紊流数值模拟,分析阀门段水流急变分离的流态、流速、(下转第 57 页)

[5] 梅亚东. 梯级水库优化调度的有后效性动态规划模型及应用[J]. 水科学进展, 2000, 11(2): 195-198.

[6] 张玉新, 冯尚友. 多目标动态规划逐次迭代算法[J]. 武汉水利电力学院学报, 1988(6): 72-82.

[7] 黄强, 颜竹丘. 应用大系统递阶控制理论解梯级水电站水库群长期最优调度[J]. 水电能源科学, 1993, 11(2): 80-87.

[8] 王少波, 解建仓, 汪妮. 基于改进粒子群算法的水电站水库优化调度研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(3): 12-15.

[9] 马光文, 王黎. 遗传算法在水电站优化调度中的应用[J]. 水科学进展, 1997, 8(3): 275-280.

[10] 钟登华, 熊开智, 成立芹, 等. 遗传算法的改进及其在水库优化调度中的应用研究[J]. 中国工程科学, 2003, 5(9): 22-26.

[11] AHMED J A, SARMA A K. Genetic Algorithm for optimal operating policy of a multipurpose reservoir [J]. Water Resources Management, 2005, 19: 145-161.

[12] 梁伟, 陈守伦, 何春元, 等. 基于混沌优化算法的梯级水

电站水库优化调度[J]. 水电能源科学, 2008, 26(1): 63-66.

[13] 邱林, 田景环, 段春青, 等. 混沌优化算法在水库优化调度中的应用[J]. 中国农村水利水电, 2005(7): 17-19.

[14] 刘起方, 马光文, 刘群英, 等. 对分插值与混沌嵌套搜索算法在梯级水库联合优化调度中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 140-150.

[15] 唐巍, 郭镇明, 唐嘉亨, 等. 复杂函数优化的混沌遗传算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, 21(5): 1-5.

[16] 王文川, 程春田, 徐冬梅. 基于混沌遗传算法的水电站优化调度模型及应用[J]. 水力发电学报, 2007, 26(6): 7-11.

[17] 李兵, 蒋慰孙. 混沌优化方法及其应用[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(4): 613-615.

[18] 骆晨钟, 邵惠鹤. 用混沌搜索求解非线性约束优化问题[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(8): 54-57.

[19] 姚俊峰, 梅炽, 彭小奇, 等. 混沌遗传算法及其应用[J]. 系统工程, 2001, 19(1): 70-74.

(收稿日期 2009-08-16 编辑 高建群)

(上接第 13 页)

压强等水力特性参数的时空演化规律, 分析出现空蚀危险的区域和时刻。针对阀门后突扩体顶板和升坎凸弧处出现较低负压问题, 提出一系列的体型方案, 分析了体型参数对流速、流态、压强分布的影响。分析结果表明, 方案 3 的顶板压强最大, 升坎凸弧处方案 8 的压强最大。数值模拟对阀门体型优化具有方案变化快、经济省的优点, 是物理模型试验研究的有力补充手段。

参考文献:

[1] 李云, 胡亚安, 宣国祥. 通航船闸水力学研究进展[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1996, 11(2): 232-239.

[2] 阎诗武. 船闸廊道输水阀门振动研究进展[J]. 水利水运工程学报, 1998(2): 109-118.

[3] 周华兴. 高水头船闸阀门空化问题的研究[J]. 水运工程, 1993(11): 28-33.

[4] 王玲玲, 高飞. 三峡永久船闸输水系统输水特性研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2002, 30(4): 96-99.

[5] 王玲玲, 戴会超, 王琼. 三峡船闸水力学数值实验室的研制及应用[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(1): 100-103.

[6] 戴会超, 王玲玲. 三峡永久船闸阀门段廊道水力学数值模拟[J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 88-92.

[7] 马峥, 张计光, 陈红勋, 等. 三峡永久船闸输水廊道水动力学特性研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2007, 22(2): 175-181.

[8] 王智娟, 江耀祖, 吴英卓, 等. 银盘船闸阀门段体型优化三维数值模拟研究[J]. 人民长江, 2008, 39(4): 91-93.

(收稿日期 2009-05-21 编辑 高建群)

(上接第 52 页)

在施工程序上, 下游堆石区填筑超前于上游, 并设定预沉降期, 待“增模区”沉降基本稳定后再填筑高程 426.50 m 以上的堆石区。宜兴抽水蓄能电站上水库主坝运行 2 年多来的安全监测结果表明坝体变形微小, 应力变形性状良好, 大坝稳定安全, 取得了显著的经济效益, 也促进了工程技术进步。2009 年 5 月专家组对“宜兴抽水蓄能电站上水库建设关键技术研究”项目研究成果的鉴定意见认为下游堆石区的优化是该项目研究成果的主要创新点之一, 对此给予了充分肯定。本工程下游堆石区优化的经验在类似工程中具有推广应用价值。

参考文献:

[1] 曹克明, 汪易森, 徐建军, 等. 混凝土面板堆石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 129-134.

[2] 刘斯宏, 肖贡元, 杨建州, 等. 宜兴抽水蓄能电站上库堆石料的新型现场直剪试验[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 772-776.

[3] 肖贡元. 宜兴抽水蓄能电站上库主坝堆石料的特殊研究[J]. 水利水电科技进展, 2005, 25(6): 49-51.

[4] 国家电力监管委员会大坝安全监察中心. 江苏宜兴抽水蓄能电站上水库水工建筑物安全监测资料分析报告[R]. 杭州: 国家电力监管委员会大坝安全监察中心, 2009.

[5] 肖贡元, 傅方明. 江苏宜兴抽水蓄能电站上库主坝设计特点[J]. 水力发电, 2009, 35(2): 49-53.

(收稿日期 2009-07-10 编辑 高建群)