

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.01.010

一、二维耦合数学模型在水利枢纽通航水流条件研究中的应用

崔冬,刘新成,潘丽红

(上海市水利工程设计研究院,上海 200063)

摘要 针对目前数值模拟中水利枢纽控制结构物的调度运行与其上下游平面流场难以同时兼顾的研究现状,采用一、二维耦合数学模型成功模拟了大治河西水利枢纽 3 种调度运行工况下的平面流场,分析了通航水流条件,为大治河新建二线船闸平面布置的合理性分析提供依据,也为相关研究提供参考。

关键词 :一、二维数学模型;耦合计算;通航水流条件;大治河西水利枢纽

中图分类号 :U641.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)01-0035-05

Application of 1D and 2D coupled mathematical model in navigation flow condition of hydro-junction//CUI Dong,LIU Xin-cheng,Pan Li-hong/Shanghai Water Engineering Design and Research Institute,Shanghai 200063,China)

Abstract :Because of the difficulty of simultaneously taking the operation of a hydro-junction and the surrounding detailed flow field into account in a mathematical simulation,the flow of the Dazhi River western hydro-junction in three different running conditions is simulated successfully with a 1D and 2D coupled mathematical model.The navigation flow condition is analyzed.The results can provide evidence for the rationality analysis of the layout of the Dazhi River second lock and a correlation study.

Key words :1D and 2D mathematical model;coupling calculation;navigation flow condition;western hydro-junction of Dazhi River

随着数值模拟技术的快速发展,一维数学模型^[1-2]及二维数学模型^[3-5]逐渐被应用到水利枢纽的水动力问题研究中,但若单独使用则各有所不足。其中一维数学模型可以较为方便地设置水利枢纽控制结构物的各种调度规则,但由于其对水流运动的 2 个方向进行了平均,无法得到水利枢纽上下游详细的平面流场分布,而局部流态往往是研究中关注的要点;二维数学模型在计算局部流态方面有较大的优势,但目前还无法灵活地设置水利枢纽结构物各种复杂的调度规则。针对这种情况,一种新的计算模式(即一、二维耦合数学模型)应运而生,其中一维模型主要用来模拟水利枢纽控制结构物的调度规则,二维模型用来模拟水利枢纽上下游的平面流场,两者通过内部连接关系进行耦合,综合了一、二维模型各自的优势,实现了水利枢纽调度运行与平面流场计算的较好结合。本文拟以大治河西水利枢纽工程为例,采用一、二维耦合数学模型的方法,研究一线船闸及新建二线船闸在节制闸不同调度运行工况

下的通航水流条件,为大治河新建二线船闸平面布置的合理性分析提供依据,同时也为相关研究提供参考。

1 工程概况

大治河西水利枢纽建于 1979 年,位于上海市浦东大片骨干河道大治河西端,距黄浦江边约 1000 m,是大治河衔接黄浦江的控制结构,包括 1 座净宽 60 m 的节制闸和 1 座 V 级航道(300 t 级)的一线船闸(300 m×20 m)。近年来随着经济的迅速发展,迫切需要新建二线船闸^[6]。结合相关规划,新建二线船闸闸址位于现有节制闸南侧,平面布置为中心线与节制闸中心线平行,中心距离为 135 m(图 1);规模为Ⅲ级(1000 t 级船型),闸首和闸室同宽,净宽 34 m,闸室有效长度为 300 m。

2 模型介绍

该次研究涉及一线船闸、新建二线船闸及节制

作者简介:崔冬(1982—),女,江苏徐州人,助理工程师,硕士,从事河口海岸工程研究。E-mail:cuid@swedri.com

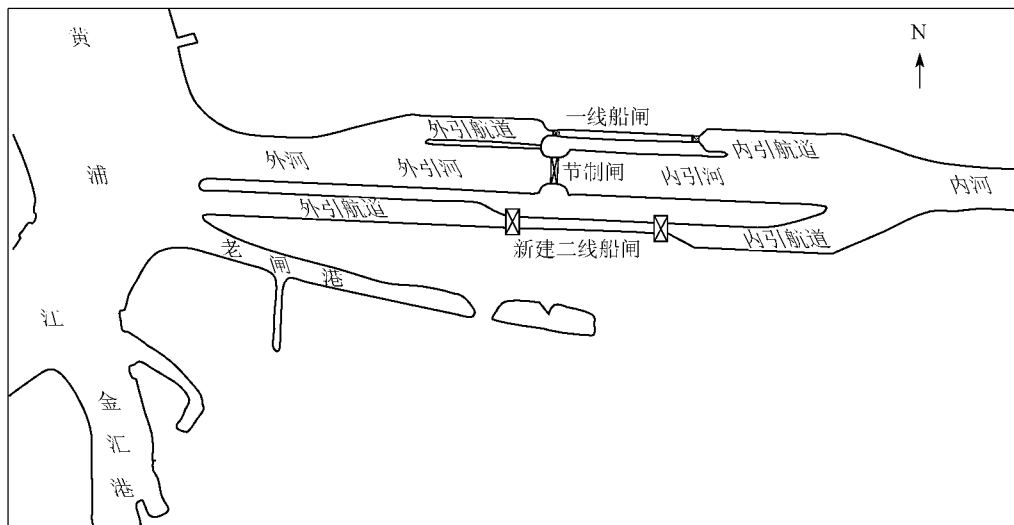


图1 工程方案示意图

闸3组控制结构(共包括5个闸门、4个输水阀门)的联合调度。笔者利用DHK(丹麦水力学研究所)研发的MIKE FLOOD计算模型,实现一维(MIKE 11)和二维(MIKE 21)的耦合运算,同时实现水利枢纽的实时调度与平面流场的计算模拟。

2.1 基本公式

2.1.1 一维模型基本方程

水流连续方程:

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial s} = 0 \quad (1)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2 \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial s} + \left(gA - B \frac{Q^2}{A^2} \right) \frac{\partial h}{\partial s} = \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial s} - g \frac{|Q|Q}{AC^2R} \quad (2)$$

式中: B 为断面宽度; h 为总水深, $h = \eta + d$,其中 η 为水位, d 为基准面到床面的距离; Q 为流量; s 为水流纵向距离; A 为断面面积; g 为重力加速度; C 为谢才系数; R 为水力半径。

2.1.2 二维模型基本方程

水流连续方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

水流运动方程:

$$\frac{\partial U_x}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_x}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_x}{\partial y} = f U_y - g \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + N_x \left(\frac{\partial^2 U_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_x}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial U_y}{\partial t} + U_x \frac{\partial U_y}{\partial x} + U_y \frac{\partial U_y}{\partial y} = -f U_x - g \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + N_y \left(\frac{\partial^2 U_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U_y}{\partial y^2} \right) \quad (5)$$

式中: t 为时间; x, y 为直角坐标系坐标; U_x, U_y 分

别为 x, y 方向上的垂线平均流速; f 为柯氏力参数, $f = 2\Omega \sin\phi$ (Ω 为地球旋转角速度, ϕ 为纬度); ρ 为水体密度; N_x, N_y 分别为 x, y 方向的水平紊动黏性系数; τ_x, τ_y 分别为波流共同作用下床面剪切应力在 x, y 方向的分量。

2.1.3 一、二维模型耦合

一、二维模型之间通过MIKE FLOOD模型建立连接关系,计算中通过双扫描耦合计算方法进行自动耦合^[7]。一、二维模型连接处具体耦合过程(图2)为:MIKE 11模型从MIKE 21模型中提取 n 时步的总水深 h_n ,计算出 n 时步的流量 Q_n ;MIKE 11模型内部预测器再根据 Q_n 及 h_n ,应用式(6)预测出 $n+1/2$ 时步的流量 $Q_{n+1/2}$,并作为源项提供给MIKE 21模型;MIKE 21模型再根据 $Q_{n+1/2}$ 计算出 $n+1$ 时步的总水深 h_{n+1} ,依此类推。

$$\frac{\partial Q_{n+1/2}}{\partial t} = - \left(gA \frac{\partial h_n}{\partial s} + g \frac{Q_n |Q_n|}{AC^2R} \right) \quad (6)$$

2.2 模型范围

二维模型分别建立了大小2套模型,大模型主

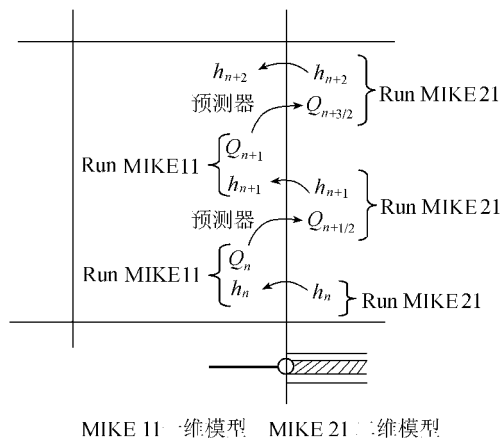


图2 MIKE 11-MIKE 21 双扫描耦合计算方法

要用来进行模型的率定验证及为小模型提供开边界条件;小模型主要用于模拟工程方案平面流场。大模型计算范围为黄浦江松浦大桥至吴淞口段,小模型计算范围如图 3 所示。模型均采用无结构三角形网格,网格剖分灵活方便,能较为精细地刻画该工程区域的岸线条件及水工建筑物的轮廓。小模型单元格个数为 15 650,节点个数为 8 764。为保证计算精度,工程区域采用网格局部加密技术,单元格边长由 15 m 逐渐过渡到 3 m(图 4)。

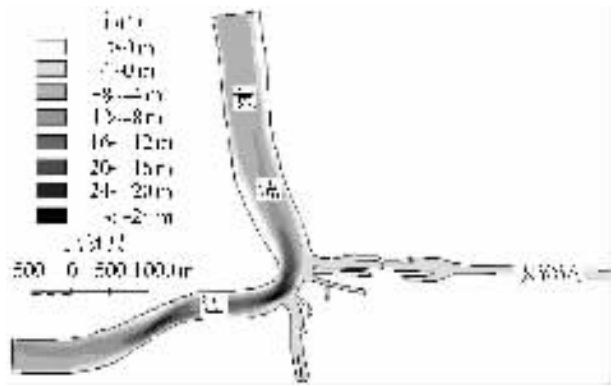


图 3 二维小模型计算范围及地形

该次计算中一维模型主要用来模拟水工建筑物的调度运行,因此仅在一线船闸(300 m×20 m)节制闸(净宽 60 m)、新建二线船闸(300 m×34 m)所处位置建立了一维模型(图 4),其上下游分别与二维模型连接,并在相应位置设置了闸门及调度方式。

计算过程中,二维小模型的上下游边界条件由大模型提供,一维模型的上下游边界条件通过耦合计算得到。

2.3 模型的率定和验证

采用 2002 年 10 月 6 日 15 时至 2002 年 10 月 10 日 3 时黄浦江全潮过程的实测资料对模型进行率定和验证。部分率定和验证结果如图 5 及图 6 所示,符合《水利工程水利计算规范》^[8]中感潮河段水力学计算的要求。

3 计算工况及闸门调度方式设置

3.1 计算工况

为研究节制闸不同运行工况对船舶过闸流态的影响,按照节制闸的功能和用途共进行了 3 大类工况的计算,分别为节制闸排涝及预降内河水位工况

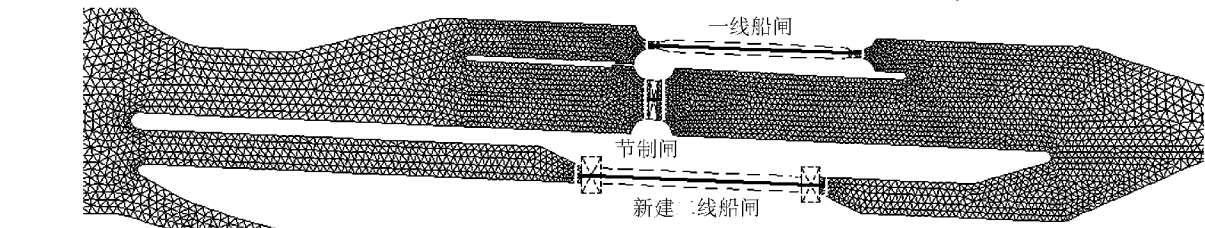


图 4 二维模型网格剖分及一、二维模型连接示意图

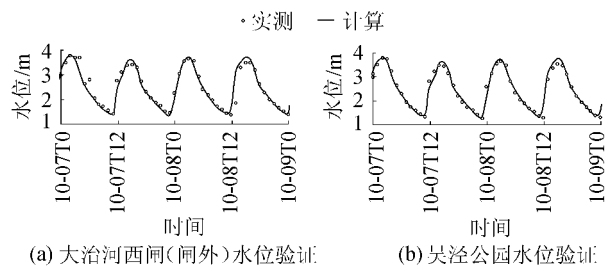


图 5 水位率定验证结果

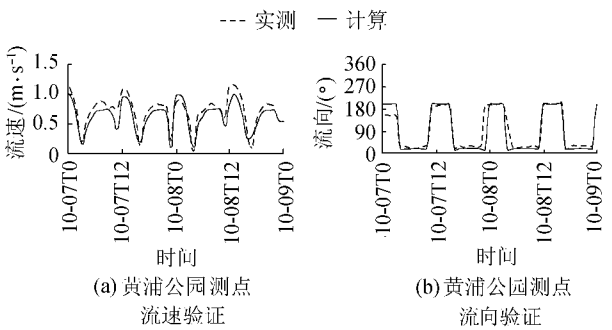


图 6 流速、流向的率定验证结果

(文中外河侧指枢纽西端近黄浦江一侧、内河侧指枢纽东端大治河一侧,下同)节制闸关闭工况、节制闸引水工况。3 大类工况与内河侧不同水位的组合,构成 7 组具体工况,见表 1。外河侧计算潮型见图 7。最高潮位为 3.8 m(上海吴淞基面,下同),最低潮位为 1.4 m,潮差为 2.4 m。

表 1 计算工况及相应的水位组合

节制闸运行工况	对应内河水位/m	组成工况简称	计算方案编号
节制闸排涝及预降内河水位	3.75	排涝 3.75 m 工况	1-1
	2.8	排涝 2.8 m 工况	1-2
	2.0	排涝 2.0 m 工况	1-3
节制闸关闭	2.8	关闸 2.8 m 工况	2-1
	2.0	关闸 2.0 m 工况	2-2
节制闸引水	2.5	引水 2.5 m 工况	3-1
	3.0	引水 3.0 m 工况	3-2

3.2 闸门调度方式设置

该次研究共涉及一线船闸、新建二线船闸及节制闸 3 组控制结构物的联合调度,调度运行相对复杂。在模型设置中,主要依据内外河水位差及闸室内外水位差来设置各个闸门的启闭。

节制闸闸门的启闭设置相对简单。节制闸排涝及预降内河水位工况中,当外河水位低于内河水位时

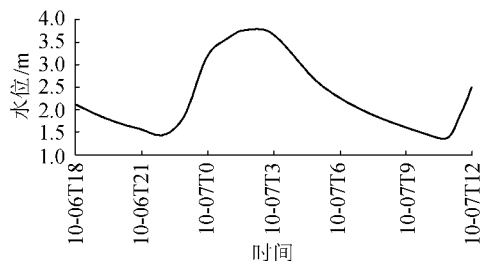


图7 计算潮型(2002年)

节制闸闸门开启,否则闸门关闭;节制闸关闭工况中,节制闸闸门始终关闭;节制闸引水工况中,当外河水位高于内河水位时节制闸闸门开启,否则闸门关闭。在节制闸闸门开启过程中,通过调节闸门开度,控制节制闸最大流量,以保持上下游水流的平稳。

船闸在节制闸3种不同调度运行工况下均同时运行。船闸闸门的启闭与船舶过闸过程密切相关,船舶由外河通过船闸到达内河的过程依次为①外闸首输水阀门打开,外引航道向闸室灌水;②外闸首输水阀门关闭,外闸首闸门开启,船舶从外引航道进入闸室;③外闸首闸门关闭,内闸首输水阀门打开,闸室向内引航道泄水;④内闸首输水阀门关闭,内闸首闸门开启,船舶出闸室进入内引航道。船舶由内河通过船闸到达外河的过程与此相反。其中,船闸灌泄水历时与输水阀门尺度及闸室内水位差等因素有关。

4 计算结果分析

为使船舶在正常操作条件下安全通通过闸《船闸总体设计规范》^[9]中规定:Ⅲ级船闸引航道口门区平行航线的纵向流速应不大于 2.0 m/s ,垂直航线的横向流速应不大于 0.3 m/s ,回流流速应不大于 0.4 m/s ;Ⅴ级船闸平行航线的纵向流速应不大于 1.5 m/s ,垂直航线的横向流速应不大于 0.25 m/s ,回流流速应不大于 0.4 m/s ;引航道内纵向流速一般应

不大于 0.5 m/s ,横向流速一般应不大于 0.15 m/s 。以下将参照此项规定来分析二线船闸建成后其引航道及口门区是否满足通航水流条件,同时还将分析节制闸在不同状态下是否会给船闸运行带来影响,据此来分析新建二线船闸平面布置的合理性。

针对节制闸排涝及预降内河水位工况与引水工况在内外河水位差接近最大的时刻,分别就一、二线船闸同时灌水、同时泄水的2种状态绘制了枢纽上下游的平面二维流场图,如图8~11所示,限于篇幅,每种工况只选用1种内河水位。

4.1 节制闸排涝及预降内河水位工况

由排涝工况流场图(图8~9)可以看出:在节制闸排涝及预降内河水位过程中,节制闸开启,内、外河连通,在水位差的作用下,内河水体不断向外河排放,节制闸内、外引河流速均较大,当内、外河水位分别为 3.75 m 和 1.50 m 时,节制闸内引河最大流速超过 0.5 m/s ,外引河最大流速超过 1.0 m/s 。

由于节制闸与船闸引航道之间有分隔堤,因此节制闸排涝时对引航道内流态影响不大,引航道内流态主要受船闸灌、泄水过程影响。一、二线船闸由内河向闸室灌水时,外闸首关闭,内闸首开启,内引航道水体开始流动,但流速不大,一般不超过 0.3 m/s ,且基本为平行航线的纵向流速,引航道口门区无不良流态出现(图8);一、二线船闸由闸室向外河泄水时,内闸首关闭,外闸首开启,内引航道水位主要受节制闸排水影响,外引航道水体开始流动,但流速一般不超过 0.5 m/s (图9)。在闸室灌、泄水过程中,一线船闸外引航道口门区及二线船闸外引航道与老闸港及黄浦江交汇处有回流及横流出现,但流速不大,回流流速均不超过 0.4 m/s ,横流流速均不超过 0.25 m/s ,满足通航水流条件。

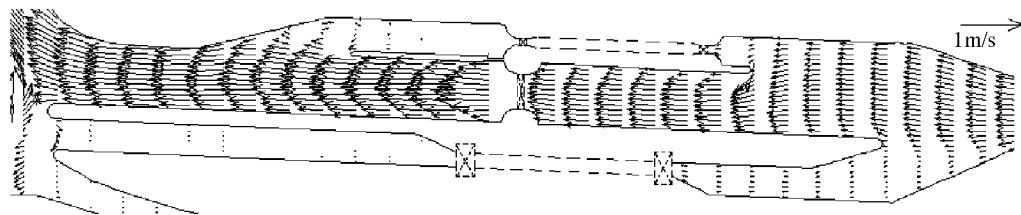


图8 方案1-I(排涝 3.75 m 工况)一、二线船闸同时灌水(内河向闸室)流场

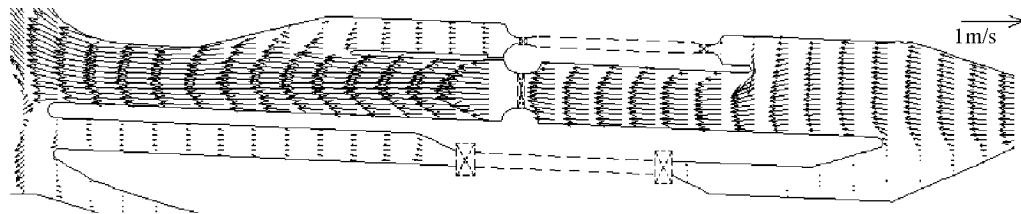


图9 方案1-I(排涝 3.75 m 工况)一、二线船闸同时泄水(闸室向外河)流场

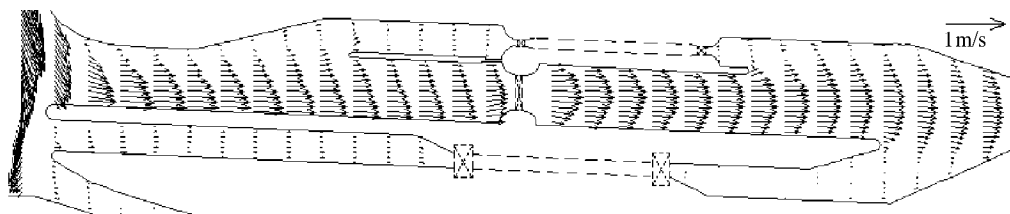


图 10 方案 3-K (引水 2.5 m 工况) 一、二线船闸同时灌水 (外河向闸室) 流场

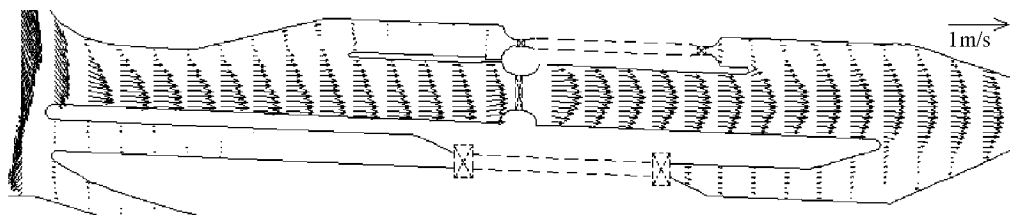


图 11 方案 3-K (引水 2.5 m 工况) 一、二线船闸同时泄水 (闸室向内河) 流场

4.2 节制闸关闭工况

该工况节制闸闸门关闭,内河水位基本稳定,流速近似为零。闸室灌、泄水过程中,内、外引航道均无不良流态出现,仅二线船闸外引航道与老闸港及黄浦江交汇处有横流出现,但横流流速不超过 0.25 m/s ,满足通航水流条件(限于篇幅,图略)。

4.3 节制闸引水工况

在节制闸引水过程中,节制闸开启,内、外河连通,在水位差的作用下,外河水体不断向内河排放,节制闸内、外引河流速均较大,当内、外河水位分别为 2.5 m 和 3.75 m 时,节制闸内、外引河最大流速均可超过 0.5 m/s ;引水过程中,一线船闸外引航道口门区会产生一定的横流,但横流流速不大,不超过 0.2 m/s ,不影响船舶的通航;引水过程中,二线船闸与节制闸内、外引河相对独立,无不良流态出现(图 10~11)。

5 结 语

应用一、二维耦合数学模型研究了大治河西水利枢纽在 3 种不同调度工况下一、二线船闸的通航水流条件。从水流数值模拟结果看,在计算水文条件下,节制闸的运行对船闸运行不会带来显著影响,一、二线船闸水流条件均满足通航要求。同时一、二维耦合数学模型在大治河西水利枢纽通航水流条件研究中的成功应用也说明了一、二维耦合数学模型在模拟水利枢纽复杂调度运行工况下的平面流场方面是可行的。但鉴于水利枢纽水流运动的复杂性,建议对工程实施后的局部流场加强观测,以进一步检验模型的可靠性。

参考文献:

[1] 童朝锋. 有闸分汊河口的水动力模拟[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2002, 30(5): 103-106.

[2] 孟祥玮, 戈龙仔, 刘红华. 三峡库区汛期日调节通航水流条件一维数学模型[J]. 水道港口, 2004, 25(3): 140-149.
[3] 陈阳, 李焱. 船闸引航道内水面波动的二维数学模型研究[J]. 水道港口, 1998, 9(3): 21-27.
[4] 王本龙, 何刚强, 王瑟澜, 等. 苏州河河口水闸垂直二维流动精细数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(S1): 48-51.
[5] 包中进, 汪德. 有限体积法数学模型在开潭水利枢纽工程中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2004, 32(5): 565-568.
[6] 上海市水利工程设计研究院. 大治河西枢纽新建二线船闸工程项目建议书[R]. 上海: 上海市水务规划设计研究院, 2006.
[7] DHI. MIKE FLOOD user manual[M]. Copenhagen, Denmark: MIKE BY DHI, 2007.
[8] SL104—95 水利工程水利计算规范[S].
[9] JTJ305—2001 船闸总体设计规范[S].

(收稿日期 2008-04-08 编辑: 方宇彤)

· 简讯 ·

热烈祝贺《水利水运工程学报》创刊 30 周年

《水利水运工程学报》创刊于 1979 年, 该刊系水利部主管、南京水利科学研究院主办的学术性科技期刊, 国内外公开发行人。主要报道水利水电、水运、海洋工程和土木建筑等工程的规划、可行性研究、设计、科研、施工、监理, 以及管理工作中的新理论、新技术、新方法和新材料等。该刊为全国中文核心期刊和中国科技核心期刊, 已被国内外多家检索机构和数据库收录, 如美国《剑桥科学文摘(自然科学)》(CSA(Natural Science))等, 深受水利水电、水运交通及海洋工程领域广大科技人员和院校师生的欢迎。在《水利水运工程学报》创刊 30 周年之际, 衷心祝贺该刊越办越好!

(本刊编辑部供稿)