

薄壁堰泄流能力的数值模型计算及模拟 自由水面的评价

徐玲君¹, 陈刚¹, 李国栋¹, 薛阳²

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 620020)

[摘要] **【目的】**研究数值模拟技术对矩形薄壁量水堰自由水面和泄流量的模拟能力。**【方法】**应用基于CFD的流体分析软件FLUENT, 采用带自由表面的 $k-\epsilon$ 气液两相紊流数学模型, 并使用自定义UDF函数处理入口条件, 对整个流场进行数值模拟计算, 得到了整个流场的流态分布图、泄流量、自由水面和压力分布等水力参数。**【结果】**将模拟得到的自由水面和泄流量与实测值进行对比, 二者吻合良好, 说明所选数值模型能够准确模拟矩形薄壁量水堰的流场特性。**【结论】**本研究采用的数值模拟技术, 能成功模拟矩形薄壁量水堰的自由水面和泄流能力, 可以为量水堰的水力设计提供参考依据。

[关键词] 矩形薄壁堰; 泄流能力; 数值模拟; 自由水面

[中图分类号] TV131.4

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)01-0225-06

Numerical simulation about Rectangle Sharp-crested Weir and evaluation of free-surface

XU Ling-jun¹, CHEN Gang¹, LI Guo-dong¹, XUE Yang²

(1 College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

2 State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 620020, China)

Abstract: **【Objective】** The research studied the accuracy of numerical simulation about the free surface and flow discharge of Rectangle Sharp-crested Weir. **【Method】** FLUENT software based on CFD to progress numerical simulation is used. The $k-\epsilon$ turbulent model with free surface is used to solve the free surface, and UDF function is adopted on inlet. The whole flow field is simulated. The hydraulic parameters of the whole flow field such as flow pattern, flow discharge, free surface and pressure distribution are obtained. **【Result】** The free surface and flow discharge are compared with measurement and they are in good agreement with each other. The selected model can simulate the flow characteristics of measuring weir accurately. **【Conclusion】** The comparison of measurement and simulation results gives the conclusion: The numerical simulation about discharge capacity and free-surface in this paper is successful, and it can provide reference for hydraulic design of the measuring weir.

Key words: Rectangle Sharp-crested Weir; discharge capacity; numerical simulation; free-surface

矩形薄壁量水堰^[1]是一种在实验室或小型工程中广泛应用的量水设备^[2], 具有水位流量关系稳定、价格低廉、量测精度较高的优点^[3-4]。矩形薄壁量水堰的堰流理论^[5-6]已很成熟, 其泄流量计算有高精

度的经验公式, 自由水面形状也有精确的测量结果^[7-8], 为数值模拟提供了理想的研究模型^[9-10]。

随着计算技术的快速发展和商业软件的推广应用, 流体数值模拟^[11-12]逐步由高校、科研院所的研究

* [收稿日期] 2009-05-14

[基金项目] 陕西省教育厅科学研究计划项目(08JK404)

[作者简介] 徐玲君(1983—), 女, 四川眉山, 在读博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。

工具向工程领域的辅助设计手段转换,对于水利工程问题,泄流能力和自由水面的计算^[13]是最基本的。目前对量水堰的研究大多利用模型试验和原型观测的方法,对自由水面和泄流能力的研究也大多依靠经验公式(见参考文献[3]),但是仅凭这些经验公式无法对量水堰的流场特性进行全面了解,而且对其的数值模拟研究也比较少见。

为了了解量水堰的流场特性,本研究以矩形薄壁量水堰为例,采用流体体积模型法(Volume of fluid, VOF)对矩形薄壁堰及其流场进行了全场数值模拟^[14-15]。将模拟结果和实测值进行对比分析后可以看出:模拟出的自由水面、泄流量和水舌厚度均与实测结果相符,说明本研究的数值模拟方法可以给出较为全面的量水堰流场特性,可以为量水堰的自由水面和泄流量的数值模拟提供参考依据。现将研究结果报道如下。

1 计算模型

1.1 网格划分

在本研究中,矩形薄壁量水堰模型是用计算流体力学(CFD)的专用软件 FLUENT 的前处理器 Gambit 来完成的。图 1 是矩形薄壁量水堰的结构简图,主要由上游渠道、矩形薄壁量水堰以及下游渠道组成,在划分网格时,本着网格划分要疏密适当的原则,在靠近水气交界面处的计算区域需要有足够密的网格单元,以便于更加精确地捕捉到自由水面和更好地模拟水流流动情况。整个流场全部采用结构网格,网格数量为 11 万,这样的网格质量较高,便于组织数据结构,适用于各种算法,处理效率高。

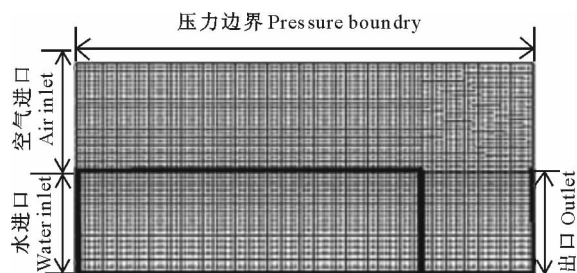


图 1 矩形薄壁量水堰整体流场的网格示意图
Fig. 1 Whole grid of measuring weir flow field

1.2 控制方程

模型中采用二维 $k-\epsilon$ 紊流数学模型,基本控制方程如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j}; \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon; \quad (3)$$

ϵ 方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \epsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}; \quad (4)$$

式中: ρ 为密度, t 为时间, x_i, x_j 为坐标分量, u_i, u_j 是 x_i, x_j 方向的瞬时速度分量; ν 为水的运动粘性系数, p 为修正压力, k 和 ϵ 分别为紊动能和紊动耗散率, μ 为流体动力粘度, μ_t 为湍动粘度; G_k 为平均梯度产生的湍动能生成项, G_b 为浮力产生的湍动能生成项, $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$ 和 $C_{3\epsilon}$ 为经验常数, σ_k 与 σ_ϵ 分别是 k 和 ϵ 的对应的有效普朗特数。

1.3 初始边界条件及自由水面处理

在进行计算时,正确设置边界条件是非常必要的,为了使进水口处的水流平稳,进水口选在距离矩形薄壁量水堰 3 倍堰高处。水流入口采用压力进口边界条件,给定进口水位,用 UDF 自定义函数定义水流进口处的压力分布,其呈三角分布状态。所有空气进口采用压力进口,水气交界面的压力为大气压值。设置出口为压力出口边界,出口处均为大气压值。对所有固壁边界条件都认为是无滑移边界条件,采用标准壁面函数对其进行处理。

采用多相流模型 VOF 法迭代生成自由水面,在确定自由水面具体位置时采用几何结构重建格式,较好地追踪了水气两相流动的自由水面。

1.4 计算方法

压力速度耦合采用 PISO^[16] 算法。PISO 算法在每一时间步内的计算精度均高于 SIMPLE 和 SIMPLC 算法^[16],减少了收敛所需 CPU 的时间,与 VOF 方法结合可以更精确地模拟自由水面,使其更适用于非定常流动的计算。在求解过程中,由于模拟流场中重力加速度不可忽略,因此对压力项的离散采用 Body Force Weighted 选项,对动量等的离散均在开始计算时采用一阶迎风格式,使计算易于收敛,待计算偏向稳定后改为二阶迎风格式,由此获得更高的计算精度,使计算结果更贴近真实情况。模拟计算采用非恒定算法,时间步长取决于网格的空间尺寸和流速大小,本研究的计算步长取 0.005~0.01 s。在进出口流量差小于 3% 时,可以认为计算

收敛,此时流态为稳定状态。

2 计算结果与分析

2.1 水流流态

图 2 给出了堰上水头 H 为 0.25 m 时模拟得到的水流流态。由图 2 可以看出,水流在渠道上游基本呈现明渠水流状态,而在堰后发生急剧变化,从堰顶开始几乎呈现一种自由跌落状态,致使堰壁之后



图 2 $H=0.25$ m 时矩形薄壁量水堰前后水流流态变化

Fig. 2 Flow pattern change of rectangle sharp-crested weir when $H=0.25$ m

2.2 泄流能力

无侧收缩,非淹没矩形薄壁量水堰的流量计算公式为:

$$Q = m_0 b \sqrt{2g} H^{\frac{3}{2}}; \quad (5)$$

式中: Q 为流量, b 为断面宽度, g 为重力加速度, H 为堰上水头; m_0 为包括行进流速影响在内的流量系数, $m_0 = m(1 + \frac{\alpha v_0^2}{2gH})^{\frac{3}{2}}$,其中 α 为相应断面的动能修正系数, v_0 为相应断面的初始速度, m_0 可以按照以下公式计算:

巴赞公式:

$$m_0 = (0.405 + \frac{0.0027}{H}) \left[1 + 0.55 \left(\frac{H}{H+P_1} \right)^2 \right]; \quad (6)$$

式中, P_1 为堰高。此式适用条件为 $0.2 \text{ m} < P_1 < 1.13 \text{ m}$, $b < 2 \text{ m}$, $0.1 \text{ m} < H < 1.24 \text{ m}$ 。

雷保克公式:

$$m_0 = 0.4034 + 0.0534 \frac{H}{P_1} + \frac{0.0007}{H}; \quad (7)$$

此式适用条件为 $0.15 \text{ m} < P_1 < 1.22 \text{ m}$, $H < 4P_1$, m_0 的变化范围约为 $0.41 \sim 0.48$ 。

图 4 给出了堰上水头与流量的关系曲线,巴赞公式和雷保克公式的流量对比,在图中可以得到清晰显示。

的水流形如舌状。图 3 为各水位的水面线,由于矩形薄壁量水堰对水流不起控制作用,因此水面线为一条光滑的降落曲线。在靠近矩形薄壁量水堰处,由于堰壁的阻挡和导流作用,底部水流向上涌,表层水流继续前进,同时水面逐渐下降,流线从堰后开始发生急剧弯曲,离心惯性力对建筑物表面的压强分布及过流能力均有一定影响。

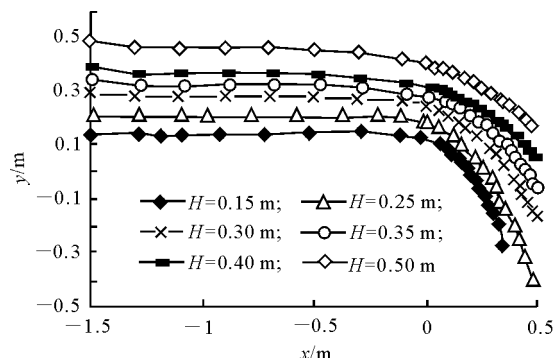


图 3 堰上水头不同时水面线的比较

Fig. 3 Comparison of water level about different water heads of weir

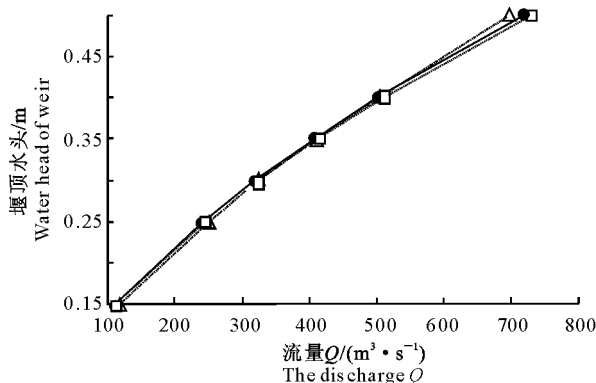


图 4 堰上水头与流量的关系曲线

—△—, 模拟值; —●—, 雷保克公式计算值; —□—, 巴赞公式计算值

Fig. 4 Relation curve between waterhead and flow

—△—, The calculated value; —●—, The measured value of T. Rehbock;

—□—, The measured value of Bazin

2.3 自由水舌形态

VOF 方法处理水和气的交界面时,一般是通过计算流场中水和空气的组成,最终求解自由水面的问题。VOF 模型涉及到多相流理论,其最大的优点是通过引入简单的流体模型来解决多相流问题,而不是采用复杂的多流体模型。通过 VOF 法可以提高模拟自由水面的精度和准确性。图 5 是实测自由水面与通过数值模拟得到的自由水面比较图,表 1 是由各堰上水头高度数值模拟得到的自由水面与实测自由水面的数据对比,表中 H 为堰上水头,对表 1

分析时,将各个对比值相对于堰上水头 H 无量纲化,这样便于看出在不同堰上水头时自由水面模拟值和实测值的对比。由图 5 和表 1 可以看出,数值

模拟的自由水面精度和准确度均在一定程度上符合实测结果。

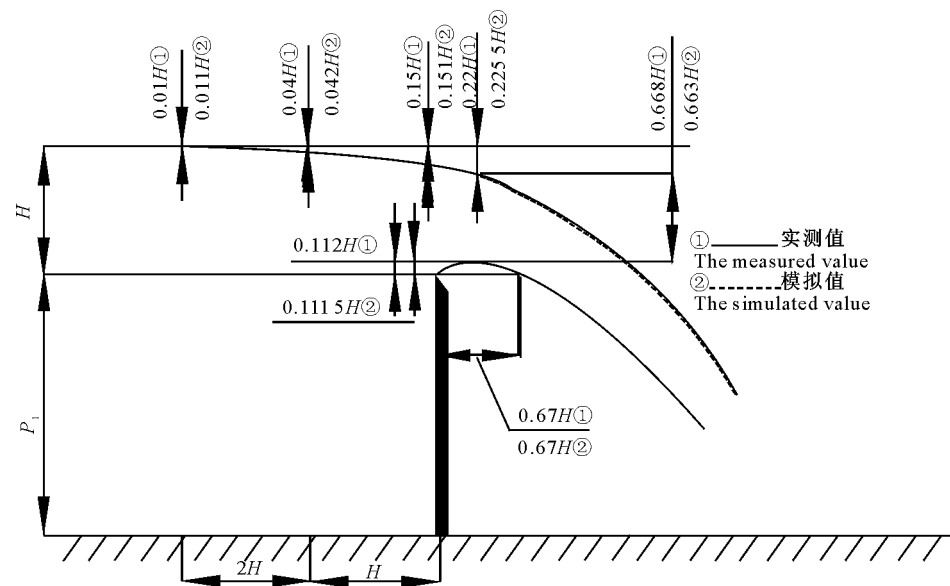


图 5 实测自由水面与模拟自由水面的对比

Fig. 5 Free surface comparison between simulation and measurement

表 1 各堰上水头高度时自由水面计算值与实测值的对比

Table 1 Water tongue comparison between simulation and measurement

位置 Position	实测值 Measured value	不同堰上水头(H)时的数值模拟结果 Simulation of different weir crest water heads(H)					
		0.15 m	0.25 m	0.30 m	0.35 m	0.40 m	0.50 m
堰前 2H 处水面降落高度 Descent height of water surface of 2H before weir	0.010H	0.013H	0.014H	0.011H	0.012H	0.010H	0.011H
堰前 H 处水面降落高度 Descent height of water surface of H before weir	0.040H	0.042H	0.047H	0.039H	0.041H	0.038H	0.040H
堰上水头(H)处水面降落高度 Descent height of water surface of weir crest(H)	0.150H	0.150H	0.153H	0.149H	0.152H	0.147H	0.149H
水舌下缘到与堰顶平齐的位置的距离 Distance between under margin and Pinzi position of weir crest	0.670H	0.672H	0.674H	0.670H	0.671H	0.669H	0.668H
水舌下缘顶点到水舌上缘的厚度 Thickness about under vertex to top vertex of water tongue	0.668H	0.660H	0.667H	0.659H	0.665H	0.658H	0.661H
水舌下缘最高点到堰顶的距离 Distance between highest point of under vertex to weir crest	0.112H	0.111H	0.114H	0.109H	0.112H	0.108H	0.110H

2.4 流速分布规律

由于模型试验受试验手段和设备的限制,对流场中各点流速的测量一直无法令人满意,但是数值模拟可以较好地解决该问题。图 6 为流场的流速矢量图,中间的直线为量水堰,其中 y 方向为量水堰堰上水头高度, x 方向为水流流向。从图 6 可以看出水流流速的具体方向与趋势,可见随着水流的跌落,流速在急剧增加,这在一定程度上与模型试验中的

流速吻合。

2.5 压力分布规律

图 7 为 $H=0.25$ m 时整个矩形薄壁量水堰流场的压力分布图。由图 7 可以看出,水舌处压力均为大气压强,堰壁并未出现负压值,因此不会对矩形薄壁量水堰产生不良影响。图 8 为堰壁的压强分布图。从图 8 可以看出堰壁上为静水压强分布。

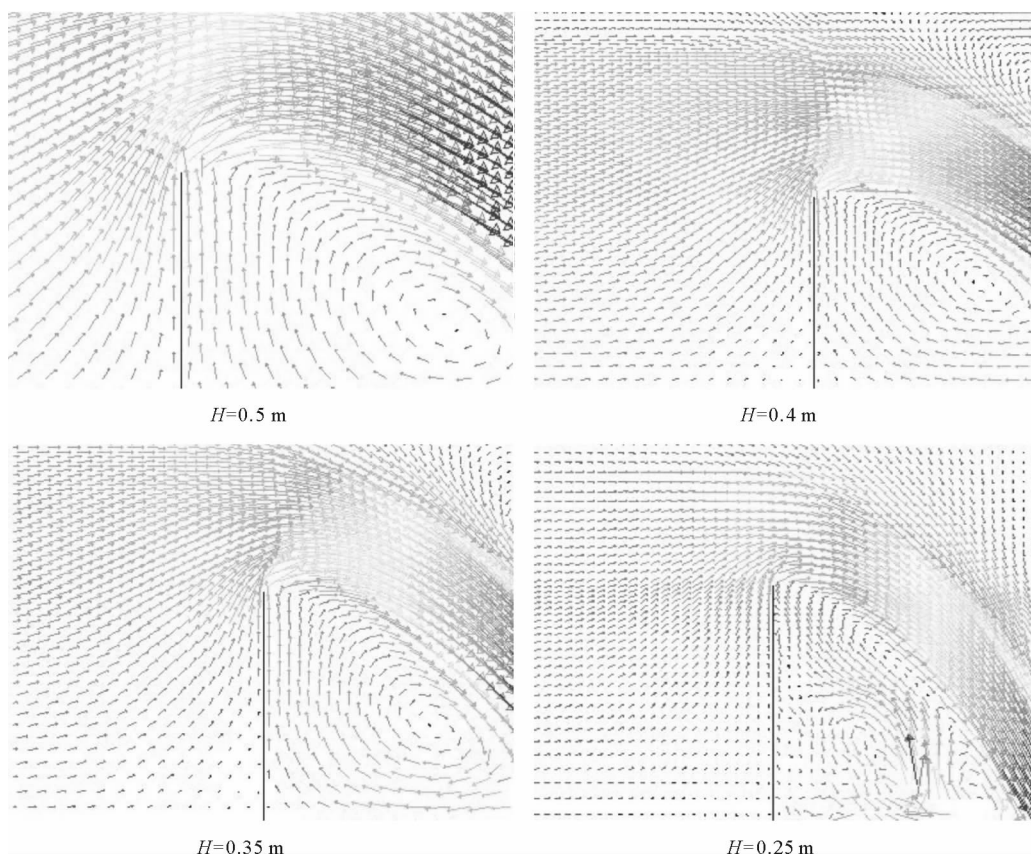


图 6 矩形薄壁量水堰在不同堰上水头高度时流场流速的矢量图

Fig. 6 Velocity vector of flow field about different weir water heads

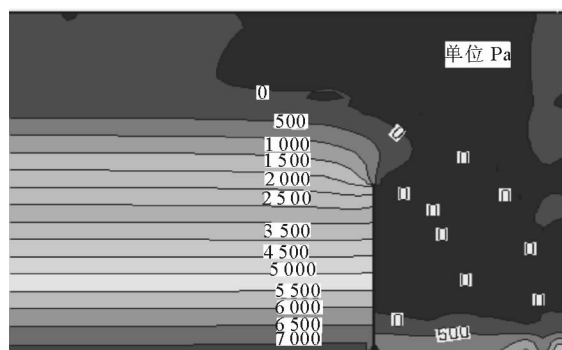
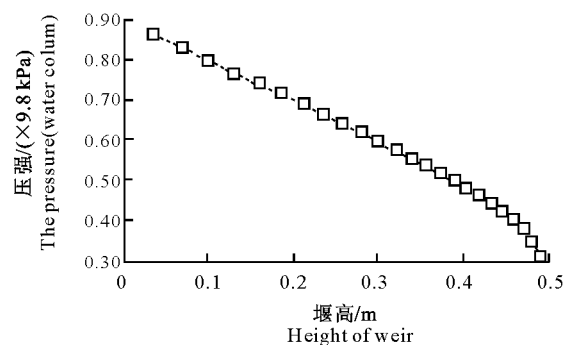
图 7 $H=0.25$ m 时矩形薄壁量水堰流场压力的分布Fig. 7 Pressure distribution chart of rectangle sharp-crested weir when $H=0.25$ m

图 8 矩形薄壁量水堰堰壁压强的分布

Fig. 8 Pressure distribution of sharp-crested weir

3 结 语

本研究采用 VOF 法和 $k-\epsilon$ 模型,对矩形薄壁量水堰流场进行了数值模拟,数值模拟可以在一定程度上再现水舌的具体形态,并且可以获得整个流场的水流流态、泄流量、自由水面、流速分布和压力分布等水力参数,得到的模拟值与实测值吻合良好,说明本研究所选的模型能够准确模拟量水堰的水流

特性。相对于模型试验而言,数值模拟能更容易获取流速的分布规律,可以更全面地为量水堰的水力设计提供可靠依据,但需说明的是,本研究对边壁条件进行了一定程度上的简化,相对于实际情况还有一定差异,因而还需要对其进行进一步研究。

【参考文献】

- [1] 彭儒武. 矩形薄壁堰贴壁流的试验研究 [J]. 山东农业大学学

- 报, 2002, 18(2): 197-202.
- Peng R W. Experimental study on rectangle sharp-crested weir [J]. Journal of Shandong Agricultural University, 2002, 18(2): 197-202. (in Chinese)
- [2] 李善征, 张春义, 吴敬东. 明渠堰槽测流技术综述 [J]. 北京水利, 2003, 12(1): 23-25.
- Li S Z, Zhang C Y, Wu J D. Technical summary of the flow measurement of open channel [J]. Beijing Water Resources, 2003, 12(1): 23-25. (in Chinese)
- [3] 李永祥, 李春华, 刘沛清. 明槽非恒流矩形薄壁堰流量公式的研究 [J]. 水力发电学报, 1997, 22(2): 41-49.
- Li Y X, Li C H, Liu P Q. Calibration of unsteady flow over the rectangular sharp crested weir [J]. Hydroelectric Engineering, 1997, 22(2): 41-49. (in Chinese)
- [4] 李建忠, 宁利中. 高速水力学 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994.
- Li J Z, Ning L Z. High speed hydraulics [M]. Xi'an: Industrial University Press, 1994. (in Chinese)
- [5] 华东水利学院. 水力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- East China College of Hydraulic Engineering. Hydraulics [M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [6] 徐正凡. 水利学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- Xu Z F. Hydraulics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987. (in Chinese)
- [7] 天津大学水力学教研室. 水力学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- Tianjin University Hydraulics Stuff Room. Hydraulics [M]. Beijing: People Education Press, 1981. (in Chinese)
- [8] 吴宗仁, 陈永宽. 港口及航道工程模型试验 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- Wu Z R, Chen Y K. Model test study on waterway and port [M]. Beijing: People's Communications Press, 1993. (in Chinese)
- [9] 夏毓常, 张黎明. 水工水力学原型观测与模型试验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- Xia Y C, Zhang L M. Prototype observation and model test study on hydraulic engineering and hydraulics [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese)
- [10] 水利水电科学研究院, 南京水利科学研究院. 水工模型试验 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- Institute of Water Resources and Hydropower Research, Nanjing Hydraulic Research Institute. Hydraulic model test [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Engineering Press, 1985. (in Chinese)
- [11] 黄国鲜, 周建军, 林斌良. 河道演变三维数值模拟计算网格的选择和生成研究 [J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006, 21(5): 565-571.
- Huang G X, Zhou J J, Lin B L. Selection and generation of numerical model grid of hydrodynamics [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, Issue A, 2006, 21(5): 565-571. (in Chinese)
- [12] Bradshaw P, Ferriss D H, Atwell N P. Calculation of boundary layer development using the turbulent energy equation [J]. Journal of Fluid Mech, 1967, 28: 593-616.
- [13] Nee V W, Kobaszny L S G. The calculation of the incompressible turbulent boundary layer by a simple theory [J]. Phys of Fluid, 1969(12): 473.
- [14] 许协庆. 自由面重力流的一种有限元解法 [J]. 水利学报, 1981, 14(4): 16-18.
- Xu X Q. A finite element solution free-surface gravity flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1981, 14(4): 16-18. (in Chinese)
- [15] 郑邦民. 溢流体形的数值模拟 [J]. 中国科学: A 辑, 1985, 32(3): 35-36.
- Zheng B M. Numerical simulation of overflow shape [J]. Chinese Science, Issue A, 1985, 32(3): 35-36. (in Chinese)
- [16] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- Wang F J. Computational fluid dynamics analysis [M]. Beijing: Qinghua University Press, 2004. (in Chinese)