DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.02.003

扭曲型挑坎挑流的数值模拟

陈日东,刘顺东,周晓泉,黄 尔

(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 610065)

摘要:采用 RNG K-ε 湍流模型与 VOF 多相模型对扭曲型挑坎挑流进行水气两相流三维数值模拟,模拟了挑坎里的自由水面与挑流的空中轨迹线,得到计算域的速度、压强、湍动能 K 与湍动能耗散率 ε 的分布、内外挑距与水舌宽度,并与物理模型的试验结果进行比较,两者吻合良好,验证了该数值模拟方法的可靠性、合理性。

关键词:扭曲型挑坎;挑流;水气两相流;VOF 多相模型

中图分类号:TV135.2+3 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-7647(2008)02-0008-05

Numerical simulation of jet flow from contorted jet bucket//CHEN Ri-dong, LIU Shun-dong, ZHOU Xiao-quan, HUANG Er (*State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu* 610065, *China*)

Abstract: The RNG K-ε turbulent model and VOF multi-phase model were applied to simulate the water-air two-phase jet flow from a contorted jet bucket to a plunge pool. The free surfaces of the contorted jet bucket and jet trajectory were simulated, and the jet trajectory length and nappe width as well as the distribution of velocity, pressure, turbulent kinetic energy K and turbulent dissipation rate ε in the computation domain were obtained. Comparison with the model tests shows that the simulated results are in good accordance with the test data, and the numerical simulation method in this paper is highly reliable and rational.

Key words: contorted jet bucket; jet flow; water-air two-phase flow; VOF multi-phase model

挑流消能是水利工程中常用的消能方式,具有工程结构简单、投资少的优点,一直是消能工程的首选方案,特别是在高坝(尤其是峡谷山区高拱坝)水利工程中,几乎全部都是用挑流来消能的。由于挑射水流的绝大部分机械能(约为总能量的 60% ~ 80%)消刹在下游冲坑水垫中,所以高速水流对基岩破坏很大[1]。在优化挑坎设计中,需要注意的2 个问题是:①如何使高速水流在空中更好地扩散、卷吸、混掺消能;②如何合理地控制水流的入塘形状,减少水流对水垫塘基岩的冲刷破坏。在众多的挑坎中,扭曲型挑坎的挑流水舌具有横纵向扩散大、挑距分布广、入水展度宽等优点,因此为大多数工程所采用。

本文结合铅厂水电站冲沙底孔挑坎的模型试验及其优化设计,获取了流动的信息,并依此进行了一系列的数值模拟。

模拟中采用在工程中广泛使用的 RNG K-ε 湍流模型。由于经挑坎的水流速度快,有大量的水气混杂,水体的破裂及气体的掺入很难用常规的多相流模型来进行模拟,为此,进行适当的简化。假设水体不破碎,水气间无混杂存在,就可以采用 VOF 多相模型来跟踪自由水面[2],这样模拟的结果虽然可能与实际有出入,但大致的趋势是可信的。笔者将模拟结果与试验结果进行比较,得到较好的验证。

1 物理模型试验

铅厂水电站位于云南省昆明市禄劝县金沙江一级支流普渡河干流上,是普渡河干流八级梯级开发方案中的第 5 级。电站所处河道系山区性河流,河床天然状态下由砂卵石组成,下游冲刷状况直接危及枢纽的安全。因此,研究水库冲沙底孔挑流冲刷问题、提出消能与防冲的措施建议是河工模型试验的主要目的和内容之一。

试验在比例为 1:50 的物理模型上进行,模型根据佛劳德数相似准则设计,用有机玻璃制作。模型闸门后的冲沙底孔由进口引渠段、泄槽段和出口段组成。矩形进水口尺寸为 10 cm × 13 cm。以进水口外壁底部作为坐标原点,外壁 $z = 0$ cm。进口引渠段底部 $L_x = 79.83$ cm,坡度 $i = 0$;顶部前段直线段 $L_x = 47.72$ cm,坡度 $i = 0$;后段压坡长 $L_x = 12.67$ cm,坡度 $i = 1:6$。泄槽段前段为二次曲线,控制方程是

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0792)

作者简介:陈日东(1984—),男,福建仙游人,硕士研究生,从事水力学及河流动力学研究。E-mail:chenridong1984@163.com

$y = -0.0057(x-79.83)^2$，$L_x = 29.24$ cm；后段直线段 $L_x = 88.96$ cm，坡度 $i = 1:6$。进口引渠段和泄槽段的 $L_z = 10$ cm。出口段为扭曲型挑坎。挑坎入口端底部是与前端压坡相切、$R = 71$ cm、转角为 8.13°、$L_z = 10$ cm 的反弧段。挑坎出口端为扭曲面。竖直平面出口段的控制方程：外壁为 $\frac{(x-208.29)^2}{52.864^2} + \frac{(y-15.27)^2}{33.852^2} = 1$，内壁为 $\frac{(x-208.29)^2}{29.878^2} + \frac{(y+10.7)^2}{7.884^2} = 1$。外壁 $L_x = 39$ cm，挑角为 35°；内壁 $L_y = 26$ cm，挑角为 25°。俯视平面上，内壁是前端与入口端相切、$R = 125.16$ cm、转角为 12°的圆弧段。模型底孔闸门后的结构布置及模型尺寸如图 1、图 2 所示。

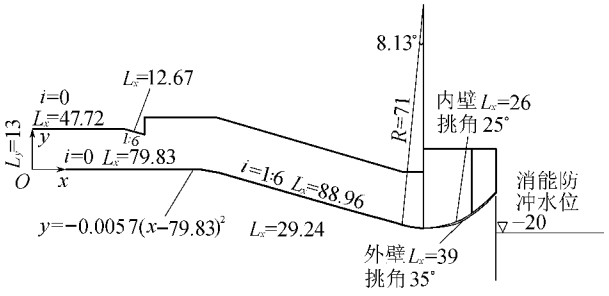

图 1　模型底孔闸门后的结构布置侧视图(单位：cm)

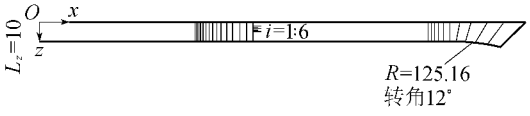

图 2　模型底孔闸门后的结构布置俯视图(单位：cm)

模型试验是在消能防冲水位、设计水位、正常蓄水位、校核水位 4 种特征水位下进行的。为了便于比较流量与挑距、水舌宽度的关系，下游水位统一控制为消能防冲水位下的下游水位，即相对高程 $y = -20$ cm，入水水位势能为零。由于扭曲型挑坎对水流分股的作用，使挑流在空中形成内挑、外挑、最远挑距的 3 股连续水流，因此试验分别对挑流的内挑距、外挑距、最远挑距、水舌宽度和入水平均速度进行测量，其中内挑距测量相对于挑坎内壁出口、外挑距测量相对于挑坎外壁出口、最远挑距相对于挑坎出口中点。消能率为 1 减去入水平均动能与闸门进口处动、势能和之比。图 3 为内挑距、外挑距、最远挑距的相对位置测量示意图。表 1 为扭曲型挑坎原型试验数据。

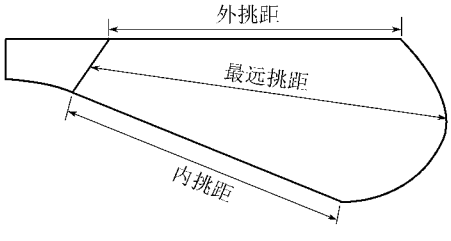

图 3　挑距的相对位置测量示意图

为了比较扭曲型挑坎与一般挑坎(挑坎出口端底部 $R = 71$ cm、挑角为 25°、$L_z = 10$ cm 的反弧段)的挑距、水舌宽度与消能率的关系，试验条件与上述相同。试验数据如表 2 所示。

表 1　扭曲型挑坎原型挑流测量数据

水位工况	上游水位/m	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	内挑距/m	外挑距/m	最远挑距/m	水舌宽度/m	消能率/%
消能防冲	42.45	648.77	51.0	58.4	68.5	29.6	34.8
设　计	43.75	668.22	53.5	62.3	73.4	30.5	31.2
正常蓄水	45.00	687.66	54.6	64.9	76.1	32.0	33.8
校　核	47.05	707.11	58.9	71.3	81.2	34.1	32.9

表 2　一般挑坎原型挑流测量数据

水位工况	上游水位/m	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	挑距/m	水舌宽度/m	消能率/%
消能防冲	42.45	648.77	64.2	10.3	13.6
设　计	43.75	668.22	65.5	11.0	15.5
正常蓄水位	45.00	687.66	68.4	12.0	14.3
校　核	47.05	707.11	71.1	12.6	12.8

物理模型试验总结：

a. 扭曲型挑坎对水流分股的作用使挑流在空中形成内挑、外挑、最远挑距的 3 股连续水流。对于闸门后是窄而高的进水口，合理的分股现象有利于高速水流在空中扩散与混掺消能，但是也造成了挑流流量分布不均匀状况，不利于对下游基岩冲刷的保护，因此应根据实际情况统筹设计。一般采用圆弧形设计的挑流鼻坎，在高水头、大流速的条件下很难同时保证反弧长度与出口挑角满足要求。将反弧挑坎在竖直平面内的形状改为椭圆曲线，能够同时保证反弧长度与出口挑角满足要求，可以根据实际情况灵活设计，应注意的是这样设计将会导致横纵向的速度比增大，对下游两岸产生冲刷。

b. 扭曲型挑坎相对于一般挑坎而言，在水舌入水宽度与消能率方面有很大的改进，因此在地形条件允许的情况下可设计采用扭曲型挑坎，以达到更好的消能和入水效果。

2　数学模型

紊流模型的实质是用各种方式补充微分方程或关系式来封闭时均雷诺方程组，根据补充的微分方程数目，将紊流模型划分为零方程模型、单方程模型、双方程模型和多方程模型。本文采用实际工程中广泛应用的双方程紊流模型对流场进行数值模拟。

关于双方程的选取，考虑到扭曲型挑坎弯曲壁面的固壁条件，若采用标准的 K-ε 模型进行模拟时会出现一定的失真，故采用工程中广泛应用的 RNG K-ε 模型，这是由于在标准的 K-ε 模型中，对于

Reynolds 应力的各个分量，μ_t 是各向同性的标量。而在弯曲流线情况下，μ_t 应该是各向异性的。在 RNG K-ε 模型中，通过大尺度运动和修正后的黏度项体现小尺度的影响，而使这些小尺度运动有序地从控制方程中去除，从而能够有效地模拟带有强旋转或带弯曲壁面的流动。

控制方程如下：

连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 \tag{1}$$

水体积控制方程

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + \nabla \cdot (a_w \boldsymbol{v}) = 0 \tag{2}$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{v}) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}\boldsymbol{v}) = \nabla \cdot ((\mu + \mu_t) \nabla \boldsymbol{v}) - \nabla p \tag{3}$$

K 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho K) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} K) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla K \right) + G_k - \rho \varepsilon \tag{4}$$

ε 方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{K}(C_{1\varepsilon} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon) \tag{5}$$

式中：p 为修正压力；ρ 和 μ 分别为容积分数平均密度和分子黏性系数，$\rho = a_w \rho_w + (1 - a_w)\rho_a$，$\mu = a_w \mu_w + (1 - a_w)\mu_a$，下标 w 和 a 分别表示水和空气；$\mu_t$ 为湍流黏性系数，由湍动能 K 和湍动能耗散率 ε 求得，$\mu_t = \rho C_\mu K^2/\varepsilon$，$C_\mu = 0.085$；$G_k$ 为由平均速度梯度引起的湍流产生项；σ_k，σ_ε，$C_{1\varepsilon}$，$C_{2\varepsilon}$ 为经验常数[3]，$\sigma_k = 0.717\ 9$，$\sigma_\varepsilon = 0.717\ 9$，$C_{1\varepsilon} = 1.42 - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3}$，$C_{2\varepsilon} = 1.68$，$\eta = \frac{SK}{\varepsilon}$，$S = (2S_{i,j}S_{i,j})^{0.5}$，$\eta_0 = 4.38$，$\beta = 0.015$，$S_{i,j} = 0.5\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$。

3 模拟方法与边界条件

随着计算机技术的迅猛发展，CFD 技术已成为模拟各种流体流动强有力的工具。由美国 Fluent 公司推出的 Fluent 软件以其功能全面、适用性广等优点广泛应用于国内外众多科研单位。本文拟采用 Fluent 软件对扭曲型挑坎水气两相射流进行模拟计算。

考虑到挑坎前后水流边界条件的差别，即挑坎前是有边壁限制的明渠流，挑坎后是自由射流，所以如对整个底孔出流进行整体模拟时：一是由于网格划分不一致，会导致时间步长的选取偏小，从而耗时长，时间的代价太高；二是 VOF 计算格式和速度压力耦合算法的选取不能统一，从而不能保证计算结果的精度，由于在各试验工况下底孔出流的流速较大，挑坎出口 $Fr = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{gh}} \approx 4.8$，可以忽略下游物理量对上游物理量的影响，将冲沙底孔分为 2 段进行模拟，即段 1 从闸门后到挑坎出口的明渠流，段 2 从挑坎出口到消能防冲水位下的下游水位的自由射流（没有设置水垫塘），从而避免整体模拟的缺点。

各段的求解模型与边界条件：

a. 段 1。该求解区域用结构网格进行网格划分，使用 RNG K-ε 湍流模型，近壁使用加强壁面函数方法，采用 VOF 的隐式格式进行计算，速度压力的耦合方法为 SIMPLEC 法。网格的粗化细化方法为：用水相等值线对网格进行细化，用水相梯度对网格粗化；用多重网格法[4]加快收敛。时间步长的控制为：首先用 VOF 的显式格式进行计算，采用变时间步长的方法，随着网格粗化细化过程的结束，再采用隐式格式进行计算，时间步长为当前的时间步长，这样就能保证网格与时间步长变化一致。初始流场设为全空气，水从进口流入。边界条件：水流进口为均匀的速度进口；空气进口为压力进口。由于挑坎出口处水流为自由出流，压力处处一样，可以视为环境压力，所以挑坎出口设为压力出口。壁面为无滑移条件的壁面。当进出口水流流量差与进口水流流量比小于 0.1% 时认为流动达到稳定，结束计算。

b. 段 2。该求解区域仍采用结构网格及段 1 的模型；采用 VOF 的显式格式进行计算，压强速度的耦合方法为 PISO 算法。网格的粗化细化方法为：用速度和水相等值线对网格细化，湍动能 K 与湍动能耗散率 ε 梯度对网格粗化；采用多重网格法加快收敛。时间步长用变步长的方法。初始流场设为全空气，水流从挑坎出口流入。边界条件：水流进口为用户自定义的速度进口，因为 2 个计算段在这里相接，所以用段 1 计算出的出口的物理量进行赋值；空气进口为压力进口，出口为压力出口。当进出口水流流量差为负值，且与进口水流流量比小于 0.1% 时，即认为射流卷吸过程已经稳定，结束计算。

段 1、段 2 的边界设置如图 4、图 5 所示。

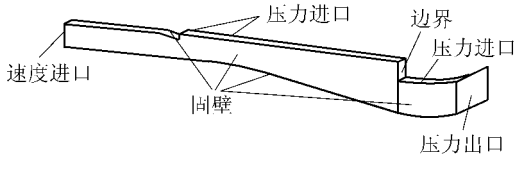

图 4 段 1 边界设置

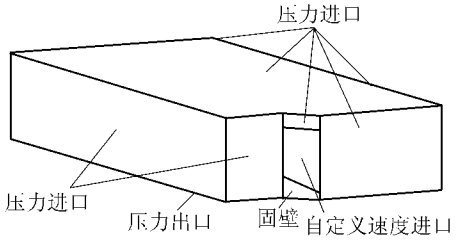

图 5　段 2 边界设置

4　模拟结果与试验结果的比较和分析

4.1　挑流的特征物理量

在铅厂冲刷底孔的 4 个特征水位条件下进行 1:1的原型模拟，表 3 为模拟的各个特征水位工况下的结果(水舌水相 VOF 值为 0.01 ~ 1[6])。

表 3　数值模拟挑流特征物理量

水位工况	上游水位/m	流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	内挑距/m	外挑距/m	最远挑距/m	水舌宽度/m	消能率/%
消能防冲设计	42.20	648.77	47.9	57.6	68.8	27.6	29.4
	42.45	668.22	49.6	61.9	72.5	28.6	28.7
正常蓄水校核	43.75	687.66	51.0	65.8	74.8	29.9	30.8
	45.00	707.11	55.1	70.7	81.2	31.8	29.9

4.2　挑流水舌形状、速度及湍流特征量分布

扭曲型挑坎的分股作用造成水舌各物理量在空中不均匀地变化。图 6、图 7 为正常蓄水位下挑流水舌(VOF 值为 0.01 ~ 1)的轴视图与沿挑距方向的变化情况。图 8、图 9 为正常蓄水位下挑流水舌右视图和俯视图。图 10、图 11 为正常蓄水位下挑流沿挑距和水舌展宽方向的湍动能 K 与湍动能耗散率 ε 的变化。

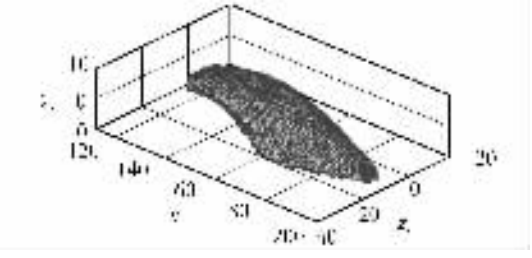

图 6　挑流水舌轴视图

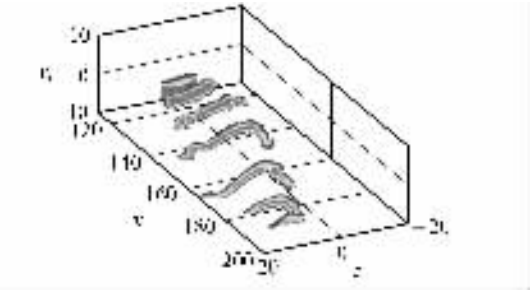

图 7　挑流水舌沿挑距方向变化情况

挑流的速度和压强(静压强与动水压强)较大值分布在水舌本身，而湍动能 K 与湍动能耗散率 ε 则

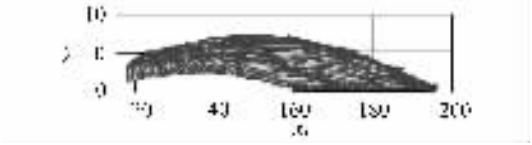

图 8　挑流水舌右视图

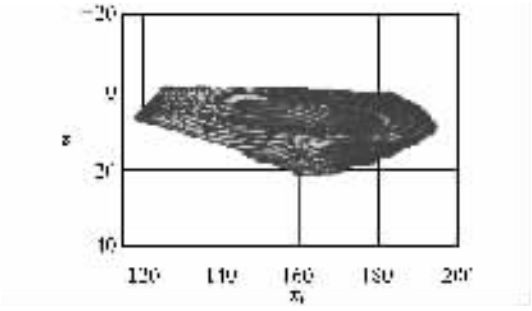

图 9　挑流水舌俯视图

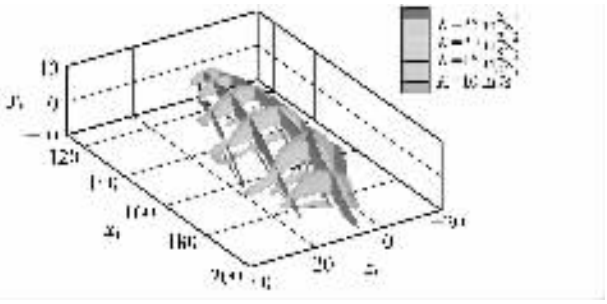

图 10　湍动能 K 变化

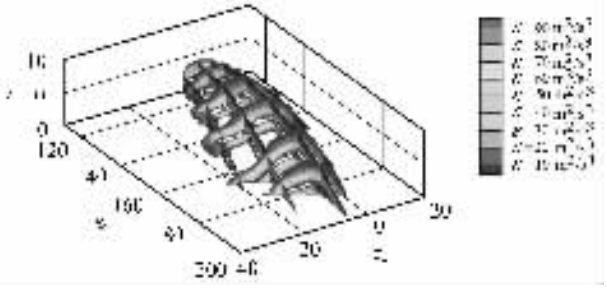

图 11　湍动能耗散率 ε 变化

分布在水舌水气交界面处，因此数值模拟时可以利用挑流的这一特性进行网格自适应，以加速数值计算收敛。

4.3　挑流特征物理量计算与试验结果的比较

由图 12 可以看出：用 VOF 多相模型计算挑流

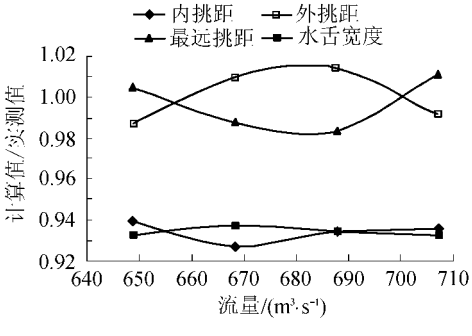

图 12　挑流特征物理量比值与流量的关系

外挑距、最远挑距有较好的结果，而内挑距和水舌宽度的计算结果误差较大，原因是分股产生外挑距与最远挑距的水流水舌较厚，VOF 多相模型较近似于真实流动，但是由于挑流水舌的湍动能与湍动能耗散率的分布都集中在水气交界处，水气混掺剧烈，水体已经破碎，所以对于水舌较薄的内挑距的水流流态分布以及各股水流之间的流态分布，模拟计算结果与物理模型试验结果有差距，即数值模拟计算的水舌要比物理模型试验的厚 10% 左右，计算结果有误差。

数值模拟总结：

a. 由于挑坎前后水流边界条件的差别，挑坎前是有边壁限制的明渠流，挑坎后是自由射流，所以要选取不同的 VOF 计算格式和速度压力耦合算法，使计算结果的精度更高。对于明渠流，应选用 VOF 隐式格式和 SIMPLEC 法；而对于自由射流，应选用 VOF 的显式格式和 PISO 算法。这是基于以下两方面的考虑：①如果采用隐式格式，虽然时间步长可以大幅度增加，但同时也会导致计算误差加大，这对于变化剧烈的高速水流来讲是不适宜的；②在瞬态计算的每个时间步内，用 PISO 算法时不需要迭代。PISO 算法的精度取决于时间步长，当步长较小时不进行迭代也可保证计算有足够的精度。压力方程，明渠流选用 Body Force Weighted 计算，自由射流选用 PRESTO！计算[7]。

b. 挑流的数值模拟中，初始网格的划分以及网格自适应的好坏是计算准确与否、收敛快慢的关键。初始网格应为初步计算时能确定水气交界面的粗网格。在确定水气交界面的初步计算时选用 VOF 显式格式，变时间步长进行计算。当进出口质量流量差与进口质量流量之比小于 1% 时，用 VOF 隐式格式、网格自适应、较小的时间步长进行计算。当自适应后的网格数与初始网格数之比超过 10 时，用 VOF 显式格式、更小的时间步长、动态网格自适应以及多重网格法进行计算，直至达到精度要求。要注意合理地控制网格的最大个数，防止因为网格过分细化，全局 Courant 数太大，使得计算发散。图 13 为挑流水舌初始网格俯视图，图 14 为挑流水舌网格自适应后俯视图。

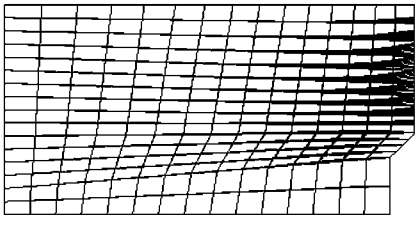

图 13　挑流水舌初始网格俯视图

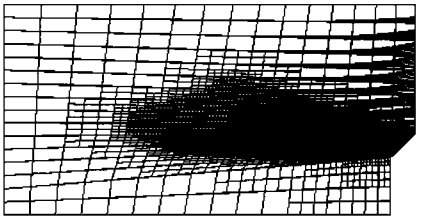

图 14　挑流水舌网格自适应后俯视图

c. 由于网格自适应，如果采用固定的时间步长，除非时间步长取很小的值，否则计算一般是不收敛的。这样耗时长，时间代价太高。而利用变时间步长可以很好地解决这一问题。对于 VOF 的隐式格式，由于只能采用固定的时间步长，可以先进行显式格式计算，选定一个合适的时间步长，然后再用固定的时间步长进行计算。初始时间步长可任意选取，只需满足 Courant 条件。

5　结　论

对数值模拟结果与物理模型试验结果进行比较，两者吻合较好，验证了该数值模拟方法的可靠性、合理性。RNG K-ε 模型与 VOF 多相模型的挑流数值模拟可以作为挑流物理模型试验的一种补充。特别是在挑坎设计的初期，通过数值模拟来确定合理的推荐方案和比选方案，使物理模型试验更具代表性和可靠性。

参考文献：

[1] BARATA J M，GINGOLD R A. On the analysis of impinging jet on ground effects[J]. Experiments in Fluids，1993，15(1)：117-129.

[2] 王志东. 三维自由面湍流场数值模拟及其在水利工程中的应用[D]. 南京：河海大学，2003.

[3] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2 版. 西安：西安交通大学出版社，2001：374.

[4] 刘超群. 多重网格及其在计算流体力学中的应用[M]. 北京：清华大学出版社，1995：30-64.

[5] Fluent Inc. Fluent user defined function manual[R]. New Hampshire：Centerra Resource Park 10 Cavendish Court Lebanon，2006：342-360.

[6] 吴持恭. 明渠水气二相流[M]. 成都：成都科技大学出版社，1989.

[7] Fluent Inc. Fluent user's guide manual[R]. New Hampshire：Centerra Resource Park 10 Cavendish Court Lebanon，2006：1172-1250.

（收稿日期：2007-06-20　编辑：高建群）