

FLUENT 软件在水利工程中的应用

叶 茂, 伍 超, 陈云良, 张 挺, 周 勤

(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: 简要介绍 FLUENT 软件, 回顾其在流场计算中的应用。以电站进水口、宽尾墩和阶梯溢流坝、双弯曲型溢洪道 3 类工程项目为例, 叙述该软件在水利工程中的应用情况。针对水利工程问题边界复杂、水气混掺、自由面较多的特点, 分析模型建体、自由面处理和网格划分等主要问题, 并采用与模拟形状基本相同的体型、网格线与水流动向基本一致、边界位置远离紊动剧烈区域的方法予以解决。数值模拟表明, FLUENT 软件可以处理复杂体型和具有多个自由面的水气二相流问题。

关键词: FLUENT 软件; 水利工程; 数值模拟; 水气二相流

中图分类号: TV131.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2006)03-0078-04

Application of FLUENT to hydraulic projects/YE Mao, WU Chao, CHEN Yun-liang, ZHANG Ting, ZHOU Qin (State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The software FLUENT and its application to flow field simulation were briefly introduced. In combination with three kinds of projects for power stations, including the intake, the stepped overflow dam with flaring gate pier, and the double-bend spillway, the applications of FLUENT to hydraulic projects were presented in detail. In consideration of some characteristics of hydraulic projects, such as complex boundary, water-air mixing, and several free water surfaces, some main problems about modeling, free water surface treatment, and grid generation were discussed and solved by adoption of the shape type of the model similar to that of hydraulic structures to be simulated, determination of grid line coinciding with flow direction, and selection of boundary positions far away from the region of turbulent fluctuation. Numerical simulation indicates that FLUENT is able to deal with the water-air two-phase flow problem with complex shape types and several free surfaces.

Key words: software FLUENT; hydraulic project; numerical simulation; water-air two-phase flow

近年来,随着计算机性能的提高和数值计算方法的改进,CFD(computational fluid dynamics)技术得到了飞速的发展。目前已开发多种 CFD 商业软件,相比而言,FLUENT 软件的功能更全面,适用性也更广,它将不同领域的计算软件组合起来,成为 CFD 计算机软件群,包括前处理、数值求解和后处理三大模块,核心部分是 N-S 方程组的求解模块^[1-2]。

王福军^[3]介绍了该软件的 5 个应用实例:①圆环内自然对流换热模拟;②轴流泵叶轮的性能预测;③风机的优化设计;④温室自然通风模拟;⑤河流跌坎分析。这 5 个实例的计算结果与实际情况相吻合,证明了 FLUENT 软件具有强大的计算功能,可以处理空气、水流的传热和运动问题。

从现有的研究成果来看,FLUENT 软件的应用主要针对空气流场。田铨等^[4]模拟了地铁专用轴流风机的内部流场;李磊等^[5]模拟了两种风向条件下

街区风速分布和 CO 质量浓度的分布情况;杨伟等^[6]计算了大气边界层中单栋高层建筑的定常风流场;赵琴^[7]对空调室内的温度场进行了数值模拟。目前,该软件在空气流场中的应用已比较成熟。

1 FLUENT 软件在水利工程中的应用现状

FLUENT 软件在水流流场中的应用不同于单纯的空气流场。水利工程问题边界复杂,水气混掺,存在多个自由水面,需要采用二相流模型,数值模拟的成果还不多。Salaheldin 等^[8]对垂直圆墩周围的三维流场进行了数值模拟;刘加海等^[9]在水槽中对二维规则波进行了数值模拟;韩龙喜等^[10]在环形水槽中对三维流场进行了数值模拟。

目前,作者所在实验室在该软件的应用方面做了许多研究工作,Chen 等^[11]采用 $k-\epsilon$ 双方程紊流模型,对阶梯溢流坝流场进行了三维紊流数值模拟,得

出溢流坝沿程的自由水面位置、速度大小和分布以及阶梯面上的压力等重要流场特性。刁明军等^[12]采用 VOF 法对挑流消能从库区到下游水垫塘进行了水气二相流数值模拟,得到射流的空中轨迹线、水垫塘的自由水面和计算域的压力、流速、紊动能及紊动能耗散率分布。杨忠超等^[13]结合向家坝水电工程,采用 VOF 法和 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型对多股多层水平淹没射流进行三维数值模拟,得出中孔和表孔联合泄洪时消力池的流速和紊动能分布。近期的研究课题所涉及的研究体型更复杂,科研课题和工程实际结合得更紧密,开始运用并行机计算。在国家自然科学基金和教育部博士点基金的支持下,陈云良等^[14]根据某电站进水口 1:50 模型试验结果,对进水口流场进行了计算,研究来流、复杂地形边界等对进水口流态的影响。张挺等^[15-16]对索风营电站 X 形宽尾墩和阶梯溢流坝联合消能的三维流场进行数值计算,给出压力特性、流速分布、阶梯及墩后水气两相流的部分特性。周勤等^[17]对小南海水库双弯曲型溢洪道原型流场进行三维数值模拟,得出溢洪道沿程水面线和速度等重要水力参数。

2 典型算例

目前,FLUENT 软件在水利工程中的应用已逐步展开,数值模拟同试验研究相比,具有成本低、方案变化快、无测量仪器干扰、无比尺效应和数据信息完整等优势,可作为模型试验的有力补充,如进水口模型试验在高水位时,无法用常规仪器测量进口周围的流速,而数值计算则可得到全域流场特性。本文结合典型工程算例,就复杂水气交界面的处理、模型建体和网格划分等问题作详细介绍。

2.1 立轴漩涡

2.1.1 特点

库区周围地形复杂,进水口前出现吸气立轴漩涡,呈倒圆锥体形,存在很难求解的旋转自由水面;漩涡具有游离性,上半部曲线斜率变化大,水流方向从水平迅速转向竖直,涡尾处尺度远小于周围水体,三维数值模拟尚未见报道。

2.1.2 存在问题

在国内某电站进水口模型试验中,出现了间隙性吸气漩涡。在计算机中重现立轴漩涡,主要存在以下问题:①模拟区域大。模拟范围包括部分库区、引水渠、进水口和有压隧洞,长 350 m,宽 180 m。②天然地形对流场影响明显。库区地形复杂,对漩涡产生与否存在直接影响,需要输入足够多的断面资料。③数据工作量大。共采集 35 个断面数据,每个断面的节点数为 50~60。④漩涡尺度远小于模

拟区域。漩涡表面直径约为 2 m,与整个区域尺度相比很小,造成网格稀密相差悬殊。⑤漩涡形状模拟。空心区类似旋转的倒锥体,表面曲线的斜率变化大,涡尾尺度很小。

2.1.3 解决措施

天然地形的建体,如果在 GAMBIT 中采用逐一输点、点连成线、线形成面、面构成体的方法,将是一项相当繁琐的工作,而且容易出错。为了提高建体的效率和准确性,先采用 AutoLISP 语言对 AutoCAD 进行二次开发,从电子地形图中读出断面资料,并生成数据文件,然后采用 FORTRAN 语言对断面数据进行编程处理,产生与 GAMBIT 所对应的 JOURNAUL 语句,读入 GAMBIT,即可完成天然地形的建体工作。

由于 VOF 模型根据网格中水和气的体积分数来决定水气交界面的位置,水面线的尺寸与网格的间距密切相关,交界面附近的网格过稀,如网格节点沿水面法线方向的间距为 1 m,则计算的水面线位置至少有 0.5 m 的误差,直接影响流场的压力和流速特性。在没有立轴漩涡的区域,库水位为水平面,只需对水面线上下各 0.2 m 的范围采用 0.05 m 间距加密,即可很好地确定水面的位置。然而,漩涡区的网格加密则没有如此简单。由于立轴漩涡的尺度很小,需对产生漩涡的位置进行重点加密,使网格节点的间距小于涡尾的尺寸,才能准确地再现漩涡的形状;此外,漩涡具有游离性,加密区域难于确定,如果区域过大,必然增加计算网格,使得数值模拟速度快的优势荡然无存,因此需要先对未加密的网格进行计算,确定产生漩涡的位置,然后在此基础上进行加密。

漩涡区采用与自由水面弯曲形状基本一致的结构化网格,可以更准确地模拟出水面线的位置。为构造曲线网格,将产生漩涡的位置设计成近似倒圆台连接圆柱,如图 1 所示。漩涡曲线斜率变化大的部分用近似倒圆台模拟,涡尾用圆柱模拟,网格的形状和密度均能达到模拟要求。因此,对于这种有特

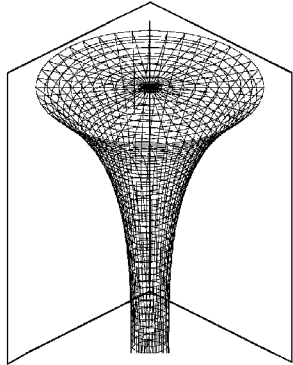


图 1 网格示意图

殊形状要求的数值模拟,需要预先构造与漩涡形状基本一致的体型,才能使模拟出的漩涡形状与实际情况更加吻合。模拟得到的漩涡区粒子运动轨迹见图2,液滴颗粒沿圆周切线方向运动,半径逐渐减小,高度也逐渐降低,其轨迹为螺旋漩涡状。

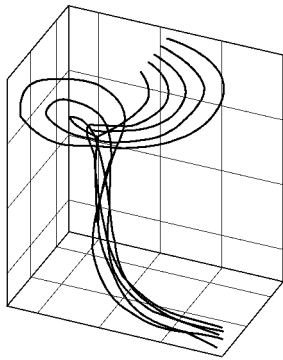


图2 粒子运动轨迹示意图

2.1.4 小结

天然地形复杂,建体繁琐,自编程序可减少工作量,提高准确度。构造近似倒圆台连接圆柱的体型,采用结构化网格加密,可更好地模拟立轴漩涡的形状。

2.2 宽尾墩和阶梯溢流坝

2.2.1 特点

宽尾墩后紧接阶梯溢流坝,体型极其复杂,网格数量多;墩后形成窄而高的纵向耸立水翅,存在多个水气交界面,出墩挑射水舌跌落于阶梯上,水舌与坝面之间形成掺气空腔,对如此复杂自由水面的三维数值模拟尚未见其他报道。

2.2.2 存在问题

根据水力学模型试验,某电站确定了宽尾墩与台阶坝面、消力池联合消能的方案,共有4个闸墩、5个孔。为详细了解流场情况,对单体进行了三维数值模拟。由于溢流坝包括47级台阶,模型试验不可能在每级台阶的不同位置均布置测压管,因此不能完全确定坝面负压的位置。通过数模计算,发现在第一级阶梯水流与坝面脱体处存在负压,随后在试验中重新布置测压管,在同一位置验证了计算结果的正确性。

主要问题如下:①墩后水翅。由于宽尾墩上部斜面和中部收缩的作用,墩后形成水翅,其顶部、两侧和底部均与大气接触,存在4个水气交界面。②阶梯掺气空腔。宽尾墩末端设置1.46 m高的挑坎,使闸室后的水舌近似自由抛物体跌落于下游阶梯面上,在前几级台阶面上形成无水區。③消力池水气混掺。水流经溢流坝后最大流速约为30 m/s,在消力池中产生纵向旋滚,水气混掺剧烈。④网格数量多。宽尾墩体型复杂,墩后存在多个水气交界

面,网格总数超过60万,一般需在并行机上计算。⑤边界条件涉及气、液、固3种边界。

2.2.3 解决措施

为模拟台阶上的掺气空腔,需采用水气两相流,将墩末至前几级阶梯这一区域加密到一定程度,具体措施是在宽尾墩后5 m范围内对网格进行局部加密。水舌上、下表面各形成一个近似抛物线形的水气交界面,若采用非结构化网格,难以模拟其形状,因此挑射水舌位置的网格应与水流方向基本一致,采用结构化网格。宽尾墩后挑射水舌和阶梯掺气空腔模拟结果如图3所示,阶梯坝面掺气形成空腔,挑射水舌近似抛物线型。

FLUENT软件提供多种边界条件,适用于水利工程的主要有压力进口、速度进口、壁面、压力出口、自由出流和对称边界6种。壁面和对称边界输入参数少,容易确定;进口边界条件通常为已知,按实际情况输入即可满足计算要求;但是出口边界则不然,即使与实际情况相一致,消力池中的水面位置也可能得出不合理的结果。计算表明,如果将计算区域延长,即出口边界沿水流方向移动足够距离,则可减小边界条件对消力池的影响,得到稳定的水面位置。究其原因,主要是消力池中水流上下旋滚,紊动剧烈,而出口边界位置选在消力池的出口处,计算区域较短,紊流发展不充分,造成流场不够稳定。因此,建议出口边界不要选在紊动剧烈的位置,以减小其对流场的不利影响。

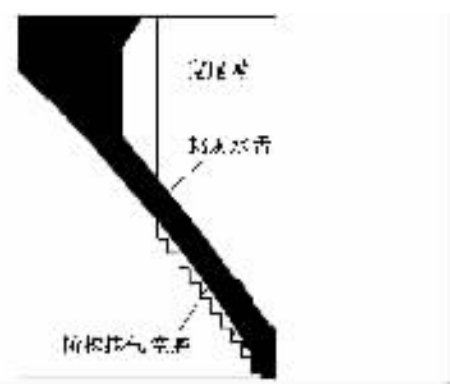


图3 墩后挑射水舌和阶梯掺气空腔模拟示意图

2.2.4 小结

将墩末至前几级阶梯这一区域局部加密,可再现台阶坝面的掺气空腔。采用与水流方向基本一致的结构化网格,可更好地确定挑射水舌的水气交界面。出口边界远离紊动剧烈的区域,计算结果更加稳定。

2.3 双弯曲型溢洪道

2.3.1 特点

在较短距离内存在两个弯道,曲率半径小,坡度大且存在变坡,使得弯道内凹岸水位明显高于凸岸;溢洪道内水流流态复杂,沿程水面弯曲且波动较大,

具体位置难以准确模拟。

2.3.2 存在问题

某天然水库由地震形成,泄洪冲沟呈S形走向,根据工程实际要求,必须尽量保存地震遗址和周围环境,因此不得不采用双弯曲型溢洪道。第一个弯道曲率半径114.0 m,轴线纵坡1:21.0;第二个弯道曲率半径108.5 m,轴线纵坡1:5.5。

主要问题如下:①水面弯曲波动。溢洪道内沿程水面弯曲且波动较大,如果网格线与流动方向倾斜交叉,可能出现误差增大的假扩散现象。②横向水面差较大。在较短距离内存在两个弯道陡坡,造成横向水面超高叠加。③消力池水气混掺。消力池前的流速达20 m/s,池中水流产生纵向旋滚,紊动剧烈。

2.3.3 解决措施

为准确模拟水面位置,需将水面附近的网格设计与水面弯曲形状一致的曲面。图4为第一个弯道的网格示意图,对水气交界面上、下各0.6 m区域进行加密,相邻节点沿水深方向的间距为0.15 m。边界条件可以采用与宽尾墩和阶梯溢流坝相同的处理方法,将出口边界的位置沿水流方向后移一定距离,避开紊动剧烈的区域,即可得到稳定的消力池水位。

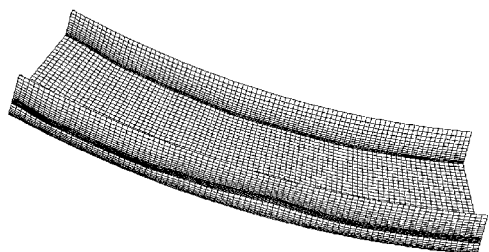


图4 第一个弯道网格示意图

2.3.4 小结

采用与水面弯曲形状基本一致的结构化网格,可更好地确定水面的位置。延长计算区域,出口边界避开紊动剧烈的位置,计算的收敛性更好。

3 结 语

作为一种应用广泛的流体力学软件,FLUENT软件在水利工程中的应用正逐步展开。从电站进水口、宽尾墩和阶梯溢流坝、双弯曲型溢洪道这几种典型工程的模拟情况来看,该软件可用于复杂体型和具有多个自由水面的水气二相流问题,计算结果能够满足实际工程需要。

水气交界面的网格构造是建体的关键,除网格密度要求外,建议网格线与水流方向一致,对于立轴漩涡这类体型特殊的情况,需要构造与漩涡形状基本相同的体型。

出口边界选择水气混掺剧烈、紊动尚未充分发

展的位置,会导致计算水面难以稳定,建议避开这一区域。

数值模拟可以提供更多的流场信息,与模型试验具有相辅相成的作用。

参考文献:

- [1] 李勇,刘志友,安亦然.介绍计算流体力学通用软件——FLUENT[J].水动力学研究与进展,2001,16(2):254-258.
- [2] 刘霞,葛新锋.FLUENT软件及其在我国的应用[J].能源研究与利用,2003(2):36-38.
- [3] 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,2004:254-267.
- [4] 田铖,张欢,由世俊,等.利用FLUENT软件模拟地铁专用轴流风机的内部流场(一):对称翼叶片轴流风机[J].流体机械,2003,31(11):13-15.
- [5] 李磊,胡非,程雪玲,等.FLUENT在城市街区大气环境中的一个应用[J].中国科学院研究生院学报,2004,21(4):476-480.
- [6] 杨伟,顾明.高层建筑三维定常风场数值模拟[J].同济大学学报,2003,31(6):647-651.
- [7] 赵琴.FLUENT软件的技术特点及其在暖通空调领域的应用[J].计算机应用,2003,23(12):424-425.
- [8] SALAHELDIN T M, IMRAN J, CHAUDHRY M H. Numerical modeling of three-dimensional flow field around circular piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 130(2):91-100.
- [9] 刘加海,杨永全,张洪雨,等.二维数值水槽波浪生成过程及波浪形态分析[J].四川大学学报:工程科学版,2004,36(6):28-31.
- [10] 韩龙喜, WAI Wing-hong. 加长型环形水槽水流特性的数值模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2003,31(6):639-643.
- [11] CHEN Qun, DAI Guang-qing, LIU Hao-wu. Volume of fluid model for turbulence numerical simulation of stepped spillway overflow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7):683-688.
- [12] 刁明军,杨永全,王玉蓉,等.挑流消能水气二相流数值模拟[J].水利学报,2003(9):77-82.
- [13] 杨忠超,邓军,杨永全,等.多股多层水平淹没射流数值模拟研究[J].水利学报,2004(5):31-38.
- [14] 陈云良,伍超,叶茂,等.水电站进水口水流流态的研究[J].水动力学研究与进展,2005,20(3):340-345.
- [15] 张挺,伍超,卢红,等.X型宽尾墩+阶梯溢流坝流场三维数值模拟[J].水利学报,2004(8):15-20.
- [16] ZHANG Ting, WU Chao, LIAO Hua-sheng, et al. 3D numerical simulation on water and air two-phase flows of the steps and flaring gate pier[J]. Journal of Hydrodynamics: Ser. B, 2005, 17(3):338-343.
- [17] 周勤,伍超,赵元弘,等.“S”型溢洪道水流特性试验与数值模拟研究[J].水力发电学报,2005,24(3):88-92.

(收稿日期:2005-03-09 编辑:高建群)