

泵站前池底坎整流数值模拟研究

成 立,刘 超,周济人,汤方平

(扬州大学水利与建筑工程学院,江苏 扬州 225009)

摘要 基于 N-S 方程和标准的 $k-\epsilon$ 紊流模型,采用交错网格系统,对泵站前池底坎整流的流动进行数值模拟.准确预测了底坎整流的流动场结构.数值分析结果表明底坎分离流动主要经历了阻水、边界层分离、再附和充分发展四个过程.研究发现水流过坎后漩滚区长度决定了底坎的设置位置.文中提出的数值方法,可用于准确预报坎后的漩长长度和底坎位置.通过计算结果与实验资料相比较,表明模拟结果是可信的.

关键词 泵站;前池;底坎;数值模拟

中图分类号:TV131.2+1;TV675

文献标识码:A

文章编号:1000-1980(2001)03-0042-04

泵站前池流态的好坏直接关系机组运行的状态,前池流态紊乱将导致泵站进水和流道进口处产生漩涡,引起水泵效率大幅度下降,严重时使得机组发生水力振动,影响机组安全^[1].底坎作为一种形式简单、施工方便的整流措施,消除漩涡和回流效果明显.基于紊流模型的数值模拟技术,研究底坎整流流场结构,特别是分析了底坎的主要特征参数,并与有关经验公式和实验资料进行了比较.

1 控制方程与紊流模型

泵站前池流动处于复杂的紊流状态,雷诺数通常大于 10^4 ,为不可压流动.应用雷诺时均方程和标准 $k-\epsilon$ 紊流模型方程^{[2][3]},可得到定常直角坐标下不可压水流的控制方程.

连续性方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \nu_t \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

紊动能方程

$$u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \epsilon \quad (3)$$

紊动能耗散率方程

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

式中: u_i ($i=1,2$)——沿 x, y 方向的速度分量; p ——压力; ν ——水的运动粘性系数; ν_t ——紊动粘性系数,
 $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$ 经验系数 $C_\mu = 0.09$; $C_{1\epsilon} = 1.44$; $C_{2\epsilon} = 1.92$; $\sigma_\epsilon = 1.30$; $\sigma_k = 1.0$.

2 计算区域和边界条件

2.1 计算区域及网格

计算区域及网格如图 1 所示. y 方向为水深方向.

收稿日期:2000-04-20

基金项目:扬州大学自然科学基金资助(F0011128)

作者简介:成立(1975—),男,江苏盐城人,助教,硕士,主要从事泵站水力学试验和数值模拟研究.

①高秋生.应用 $k-\epsilon$ 紊流模型计算水泵站前池流场.第四届泵站工程学术讨论会,1992.

2.2 边界条件

a. 进口 计算流场的进口设在上游足够远处,可认为是充分发展的流动,入口流速在水深方向为对数式分布. $k = 0.005 U_{in}^2$, U_{in}^2 为入口紊动能 $\epsilon = C_u k^{1.5} / L$, L 为紊流特征长度,这里取水深.

b. 出口 流场出口设在下游较远处,认为流动已成单向状态,即下游流动状况对计算区域的解影响很小,速度梯度为零.

c. 固体壁面 由于壁面附近的粘性底层中的速度梯度很大,且该层的粘性效应很重要,因而不能采用适合高雷诺数情况的计算模型.解决的方法是在粘性底层的外缘规定相应的边界条件,即应用经验性的边壁定律.计算中采用目前常用的经验定律即壁面定律:

$$\frac{U}{U_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(Y^* E)$$

式中: U ——平行于壁面的合速度; U_τ ——阻力速度; Y^* ——无因次量, $Y^* = Y U_\tau / \nu$; Y ——到壁面的距离; κ ——卡门常数; E ——表征糙率的参数,对水力光滑壁面, $E = 9$.在 Y^* 的区域, k, ϵ 边界条件为 $k = U^2 / C_u^{0.5}$, $\epsilon = U^3 / k Y$.

d. 自由表面 由于自由表面上通常有风成剪应力,机理相当复杂,在工程计算中,为了方便,近似简化成对称边界条件处理,即各个变量沿水深方向的梯度为零.

3 离散求解方法

3.1 方程的离散

采用有限控制体积法将方程离散化,计算网格采用交错网格,将压力 p 、紊动能 k 、紊动能耗散率 ϵ 布置于控制体中心,速度矢量布置于控制体表面,离散格式采用幂函数形式.

3.2 计算方法

采用 SIMPLE 算法,为了使迭代过程稳定收敛,离散方程采用欠松弛技术迭代求解,松弛系数: $a_u = a_v = 0.5$ $a_k = a_\epsilon = 0.7$ $a_p = 0.8$ $a_{vt} = 0.7$.具体的计算步骤如下:首先假定初始压力场,用它求解动量方程,得出一个速度场,然后建立每个计算单元的连续性误差,求解压力校正方程,调整压力和流速场,获取满足连续性方程的解,此时用新求出的压力场作为新的初始压力猜测值,重复上述过程直至得到收敛结果.

4 数值模拟结果与分析

4.1 底坎整流基本特征

底坎整流是利用涡旋作用,通过掺混水流,增强相互紊动能的扩散,使得水体动量重新分配,从而在下游不远处获得在纵向和垂向都很均匀的流速分布.底坎整流作用主要体现在它的坎后分离流动,底坎分离流动主要经历了阻水、边界层分离、再附和充分发展四个过程.在坎后水流分离再附过程中,水流流场结构发生急剧变化,并伴有极强的能量耗散.底坎流场沿水流方向结构如图 2 所示.

坎上游水流由于底坎阻挡作用,形成壅水,除部分水流在坎前受阻形成较小的回流区,主流则沿坎向上流动,由于过水面积减少,水体趋于收缩,压力减少,流速急剧升高.水流过坎后,断面突然扩大,造成水流在 S 点产生边界层分离,坎下形成强烈的漩滚区.分离后剪切层迅速扩散,在坎下某处与边界再附.因而沿水流方向,可分为分离区、再附区和发展区,垂直于水流方向可分为主流区、剪切层区和回流区.主流区位于剪切层区上方,在该区中紊流强度低,并且受剪切层区的扩散

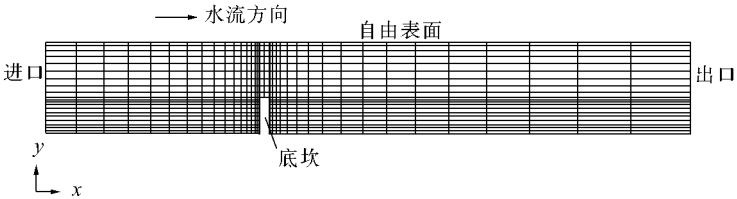


图 1 计算区域及网络
Fig.1 The domain and meshes of computation

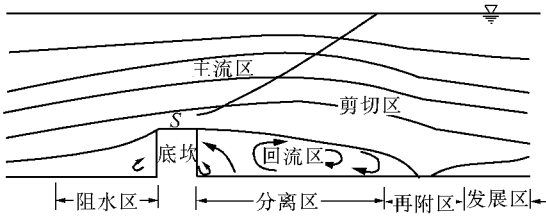


图 2 底坎整流流场结构
Fig.2 Sketch of flow field for the bottom sill

和卷吸作用不断减少.剪切层区是边界层分离的紊动混掺区,该区受逆压梯度作用,紊动强度和流速梯度都很大,流场变化迅速.上游的来流在该区中被卷吸混掺,与周围水体通过对流和紊动扩散进行动量的再分配,从而达到在再发展区中水流的平顺.再附区是剪切层再附于壁面的区域,剪切层在该区分叉,一部分水体被折冲向上游,以维持剪切层的卷吸作用,其余水体向下游在壁面形成边界层.再发展区是主流进行内部结构调整的区域,主流在此区域内达到正常的流动状态.往往剪切层的长度和混掺强度决定了底坎整流作用效果.

4.2 流速分布图和漩长分析

为便于和实验结果比较,本文选取了文献[3]提供的3种流动条件,有关参数由表1给出.网格结点数为100×30.

图3为三种流动的流速场数值模拟结果.由图可见,模拟的底坎流场与前人的研究成果相吻合.图4为流动3的流线图.数值模拟表明底坎越高,坎后回流区愈长,水流在坎上端点处发生分离流动.有关研究表明,水流过坎后漩长直接决定了底坎的设置位置,冯旭松^[3]曾从理论上系统研究了坎后流动,总结出了漩长经验计算公式:

$$L = \frac{1}{\frac{1}{12h_p} + \frac{\lambda}{B}} \left(\frac{1}{2} + \ln \frac{H}{H - h_p} \right)$$

其中: h_p ——坎高; B ——池宽; H ——池深; λ ——阻力系数.

对于3种流动,坎后漩长的数值模拟值与实验值、经验值的比较由表2给出,结果吻合较好,表明计算结果是可信的.

表1 数值模拟流动参数

Table 1 Parameters used by numerical simulation

前池水深 H/m	坎高 h_p/m	顶宽 B/m	坎前流速 $U/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
0.22	0.04	0.04	0.19
0.22	0.06	0.04	0.24
0.22	0.08	0.04	0.24

表2 底坎坎后数值模拟漩长长度与实验值及经验值比较

Table 2 Comparison of computed values with experimental values and empirical values

坎高 h_p/m	漩长数值模拟值 L_C/h_p	漩长实验值 L_E/h_p	漩长经验值 L/h_p
0.04	7.5	8.5	8.75
0.06	7.33	7.67	8.00
0.08	10.12	10.78	11.12

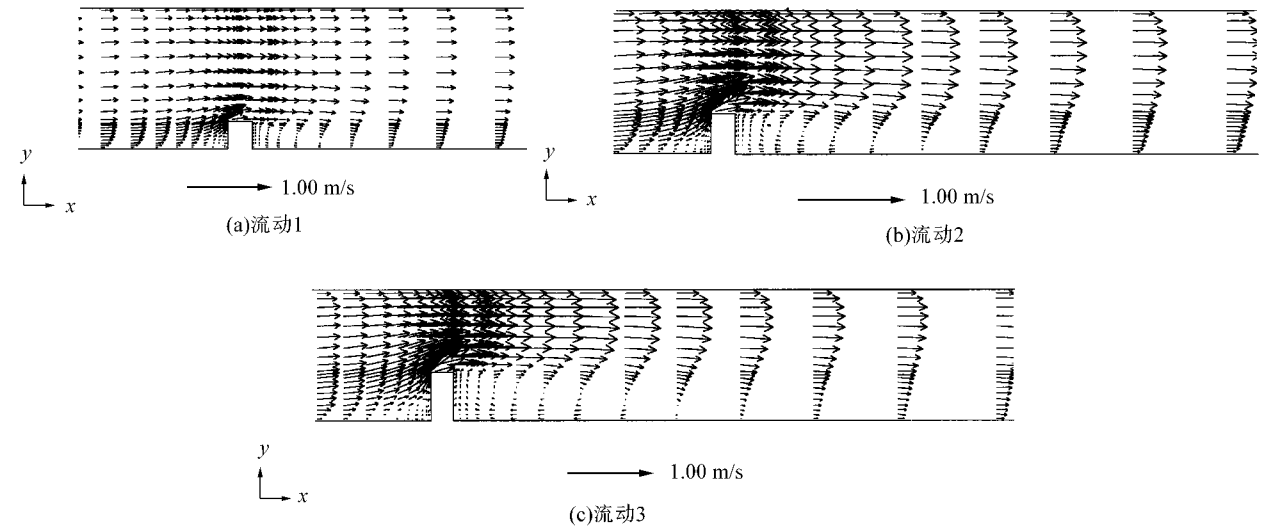


图3 三种流动流速场

Fig.3 Velocity fields of three flows

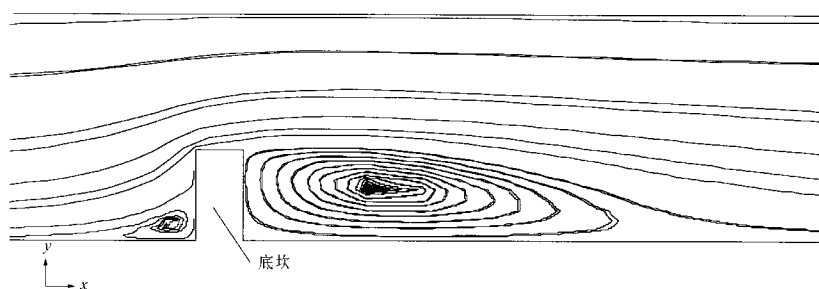


图 4 底坎整流流场流线

Fig.4 Streamline of the flow field for the bottom sill

5.1 计算模型的选择

二维的紊流模型能较好的预报出底坎的沿水流方向的整流流场结构,并能较为准确地计算坎后的漩长。但是泵站前池的流动,特别是加底坎后的流动,是非常复杂的,而且呈现出很强的三维性,因此针对具体的泵站前池,需要采用三维紊流模型,考虑池边边界的影响,对整个流动状况进行数值模拟。

5.2 底坎位置和高度

从数值模拟的结果看,底坎的位置和高度对泵站前池整流效果有较大的影响。坎越高,整流效果越明显,当然,坎过高又会影响泵站进水池过水能力。同时底坎的位置决定于底坎坎后的漩长,漩长又与坎高和过坎流速有关,因而在应用时要综合考虑,以使能在较短的距离内实现流速场的均匀分布,缩短前池长度,降低工程投资。坎的位置和高度可通过数值计算和必要的试验进行优化。

5.3 底坎整流水力损失

水流绕底坎的流动,可看作一种前台阶和后台阶流动的组合,而其水力损失主要表现为局部水力损失,坎后回流区是造成损失的主要区域。由于原流态较差,脱流区和大尺度回流的存在,使得进水的局部和沿程损失均很大,而底坎的采用,消除脱流和漩涡,改善了流态,减少了进水损失,过坎局部水力损失与减少的进水总损失相互抵消,因此底坎整流水力损失一般较小,通常仅占总水头的 1% ~ 5%。

参考文献:

- [1] 田家山,仲付维.排灌泵站前池流态及其改善措施的研究[J].河海大学学报,1983(2).
- [2] 金忠青.N-S 方程的数值解和紊流模型[M].南京:河海大学出版社,1989.193~206.
- [3] 冯旭松.泵站前池底坎整流及坎后流动分析[D].扬州:扬州大学,1996.

Numerical Simulation of Sill Flows in the Forebay of Pumping Station

CHENG Li, LIU Chao, ZHOU Ji-ren, TANG Fang-ping

(College of Hydraulic and Construction, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: Based on the solution of the Navier-Stokes equations and the standard $k-\epsilon$ turbulent model, numerical simulation on flows through the sill applied for the sump of the pumping station has been carried out by use of the staggered grid system. The structure of the flows is predicted accurately. The numerical analysis results show that the flow undergoes hindrance separating separation of boundary layer clinging and sufficient development. It is also indicated that the location of the sill is determined by the length of the swirl. The numerical method presented in this paper can be used to predict the length of the swirl and the location of the sill. The calculated results are in good agreement with the experimental data.

Key words: pumping station; forebay; bottom sill; numerical simulation