

文章编号:1002 - 5634(2001)03 - 0035 - 05

# 取水前池复杂流动数值模拟

刘超, 成立, 汤方平

(扬州大学水利建筑工程学院, 江苏 扬州 225009)

**摘要:**为消除取水前池的水流在扩散过程中产生的回流、旋涡,提出了在前池中设置多组底坎的措施.对设置底坎前后的复杂流动进行三维紊流数值模拟计算,并通过物理模型试验加以验证.计算结果和试验结果十分吻合,有效地消除了回流和旋涡,流态显著改善.这一研究成果已经成功地在工程中应用.

**关键词:**泵站;前池;底坎;紊流;数值模拟

中图分类号:TV675;TV131.2<sup>+1</sup> 文献标识码:A

多机组的水电站、泵站取水前池内的水流流动形式是扩散的.水流在扩散流动过程中极易产生脱壁,形成回流和旋涡.这对水力机组的运行有很大的影响,严重时产生机组振动,危及机组的安全运行.在前池中设立组合底坎,可成功地消除前池中的大尺度回流和旋涡,具有独特有效的整流效果.本文通过三维紊流数值计算,求解设坎前后泵站前池水流三维流场,并用物理模型试验结果加以验证.

所研究的工程包括 2 座水泵站,每座泵站均安装有 10 台机组,设计抽水流量均为 25 m<sup>3</sup>/s. 泵站

PS1、泵站 PS2 各有一个取水涵洞,原设计方案两个泵站的取水前池打通,形成一个双进水闸、双出口的单一前池,如图 1 所示.

## 1 数学模型<sup>[1]</sup>

### 1.1 控制方程

通常前池中的水流为充分发展的紊流,描述紊流运动的时均方程是

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

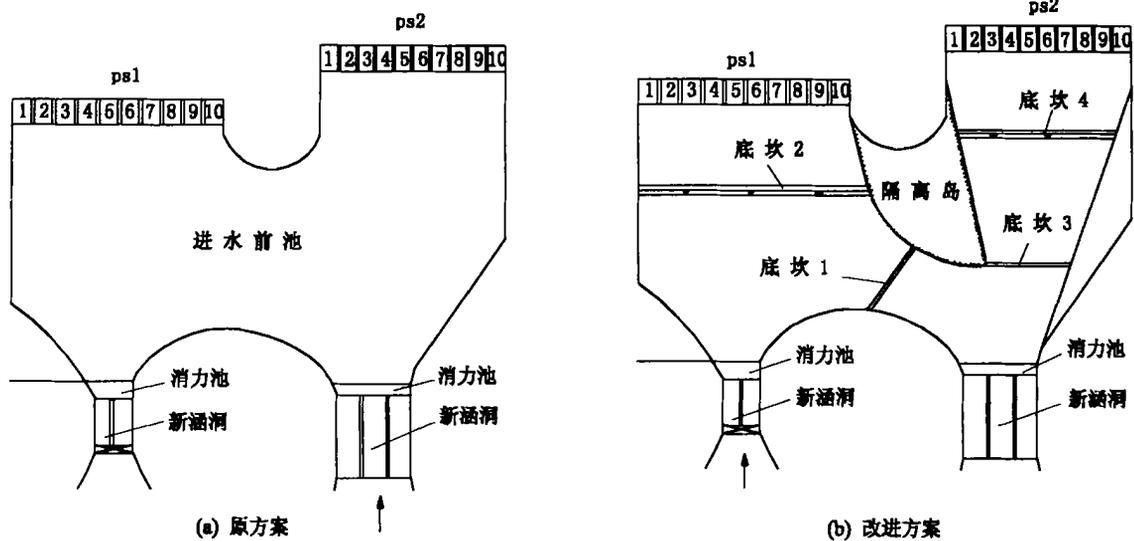


图 1 泵站平面布置图

收稿日期:2001 - 06 - 21;修订日期:2001 - 08 - 03

基金项目:江苏省重点实验室开放基金资助项目.

作者简介:刘超(1950 - ),男,江苏滨海人,扬州大学副校长、教授.主要从事泵、泵站工程研究.

雷诺方程

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

式中  $\overline{u_i u_j}$  ——紊动应力,即雷诺应力。

求解上述方程组的关键是找到一个好的紊流模式,准确表达紊动应力。

### 1.2 紊流模型

针对研究的对象,采用标准的  $K-\epsilon$  紊流模型。

$K-\epsilon$  紊流模型中的若干经验系数的选取,直接影响计算结果,所研究的对象是一个复杂的具有自由水面的流动,不仅要计算原设计流动,还要找出改善流动、消除回流的方法,因而远比一般流动要复杂得多,对上述系数的选用尤为重要。计算中,根据大量的试验结果和多年的研究经验,合理确定了有关的经验系数的取值。

## 2 网格和算法

### 2.1 网格划分

采用交错网格,标量布置于网格结点上,矢量则布置于控制体表面,网格采用具有 CAD 接口的三维实体造型技术,部分网格划分及计算符号如图 2 所示。

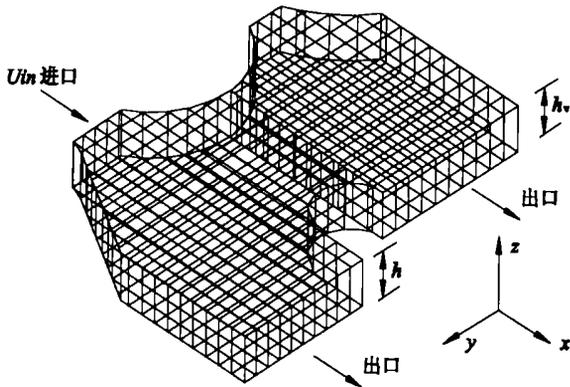


图 2 计算域网格剖分和计算符号

### 2.2 算法

采用压力校正法,先假定压力场,求解动量方程,建立每个计算单元的连续性误差,然后求解压力校正方程,调整压力场,重新迭代计算,直至满足收敛的标准要求。

为了使迭代过程稳定收敛,计算中采用欠松弛技术,合理选定松弛系数,使计算的稳定性明显增加。

## 3 边界条件

### 3.1 进口和出口

进口为涵洞,进口断面处的流动已是充分发展的紊流,且比较均匀,故认为此断面处水流横向和纵

向的分速为 0,即  $U = U_{in} V = W = 0$ 。单位紊动能  $K$  取  $0.005 U_{in}^2$ ,紊动耗散率取  $C_u K^{1.5} / L$ ,  $C_u = 0.09$ ,  $L$  为紊流特征长度<sup>[2]</sup>,这里取水深  $H$ 。

同进口情况类似,认为出口水流流动已成单向状态,不考虑出口下游对计算区域的解的影响,出口边界条件是  $\partial U / \partial Y = 0, \partial P / \partial Y = 0$ ,  $K$  取值与进口相同。

### 3.2 自由水面

取水前池内的流速较低,其水面波动较小,近似简化成对称边界条件处理,即各个变量沿  $Z$  方向的梯度均为 0<sup>[3]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial z} = 0$$

为  $u_i, K$ , 等。

### 3.3 固体壁面及网格处理

水流在固体壁面附近形成粘性底层,其中速度梯度很大,不能用高雷诺数情况的计算模型来求解近壁处流速,可以通过常用的壁面定理求得,并以此作为下一次迭代计算的边界条件。

如图 3 所示为近壁网格和流速分布,粘性底层结点 2 处的值已由前一次迭代求得,而粘性底层内的结点处的速度值可由壁面定理求出

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

式中  $U$  ——阻力速度;  $Y^* = Y U_* / \nu$ ;

$Y$  ——结点到壁面的距离;

$\nu$  ——卡门常数;

$E$  ——糙率常数,这里为水力光滑壁面,取

$$E = 9.$$

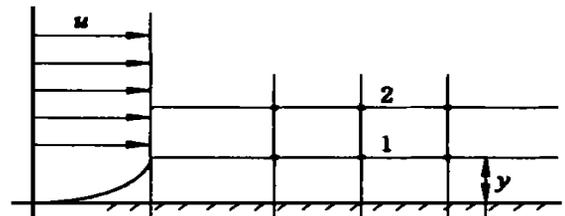


图 3 近壁流速计算

一般在  $Y^* = 30 \sim 100$  的范围内可得足够精确的结果。在这个范围内取  $K = U_*^2 / C_u^{0.5}$ ,  $\nu = U_*^3 / K Y$ 。因为粘性底层的速度梯度大,边壁处的网格布置较密。

### 3.4 固体边界网格处理

前池有不规则斜坡,考虑到斜坡范围较小,对前池整体流动影响不大,故用阶梯形的边界取代实际边界,如图 4 所示。

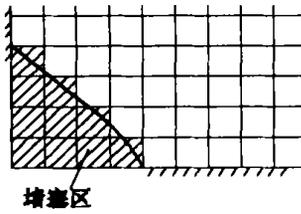
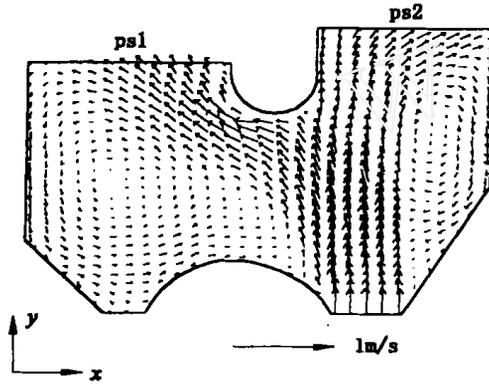
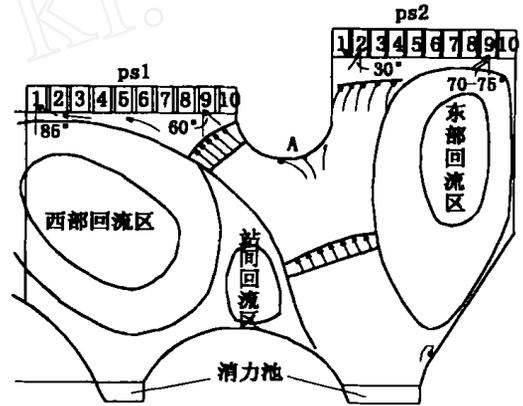


图 4 近壁网格



(a) 计算流态



(b) 实验流态

图 5 原设计前池方案计算流场、实验流态

从图 5(a)和图 5(b)的结果比较可知,计算所得前池流态与模型试验所得的流态十分一致.不仅在泵站 PS1 前池而且在泵站 PS2 前池右侧均存在 1 个大尺度回流.在 PS1 前池回流区占据整个前池的 4/5 的范围,在站前形成强烈的横向流. PS2 前池主流受 PS1 前池水流的影响,明显向 PS2 站的左侧偏移,主流呈“Y”型,这完全出乎设计者的意料.

#### 4.2 改进设计平面流场

改进后的设计方案平面图如图 1(b)所示.将两

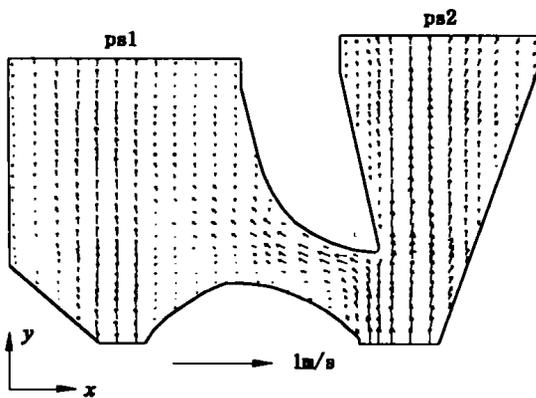
### 4 计算结果和分析

#### 4.1 原设计平面流场

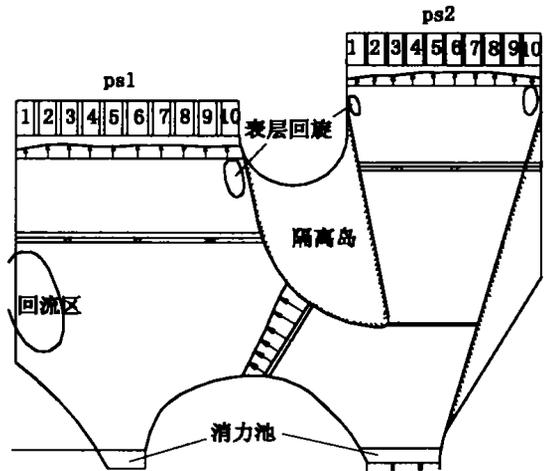
原设计取水前池平面图如图 1(a)所示,旧涵洞关闭弃置不用,只有新涵洞进水.涵洞进水设计流量为  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ .泵站 PS1 和泵站 PS2,设计抽水流量均为  $25 \text{ m}^3/\text{s}$ .图 5(a)为前池流动计算结果(平面流场);图 5(b)为物理模型的试验结果(平面流态),模.原型比尺为 1:18.模型按弗汝德准则设计<sup>[4]</sup>.

站之间隔离岛延伸,是原设计的 3 倍,事实上形成两个取水前池,以减少相互间的影响.并在两个分开的前池中各增设两道底坎整流,以最大限度的消除回流.

图 6(a)为计算平面流场,图 6(b)为实验平面流场.二者比较,流态一致,大尺度回流在前池内都已消除.泵站建成后实际运行情况证明前池内没有旋涡,水流十分平顺.计算、试验与原型三者流态一致.



(a) 计算流场



(b) 实验流态

图 6 改进后的前池方案计算流场、实验流态

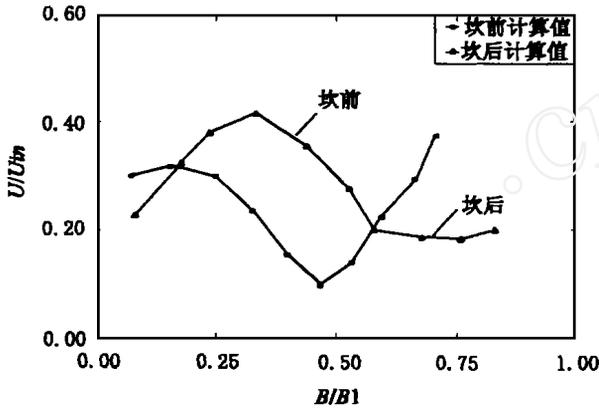
4.3 断面流速

4.3.1 坎前后横断面流速

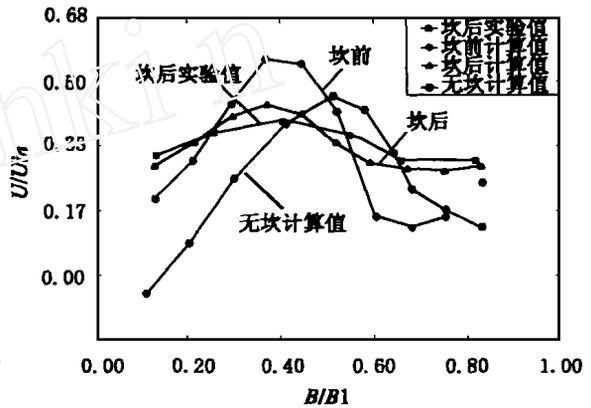
图 7a, b, c, d 分别为底坎 1(S1), 底坎 2(S2), 底坎 3(S3), 底坎 4(S4) 前后特征断面的流速分布曲线, 坎前断面选取在坎前 1 倍坎高的距离, 坎后断面为 12 倍坎高处, 无坎流速所取流速断面与有坎流速断面相同. 坎 1 和坎 3 的结果表明, 前池水流在经过

第一道坎整流后, 流速分布已明显改善. 水流沿横向重新分布, 坎后流速开始趋向均匀.

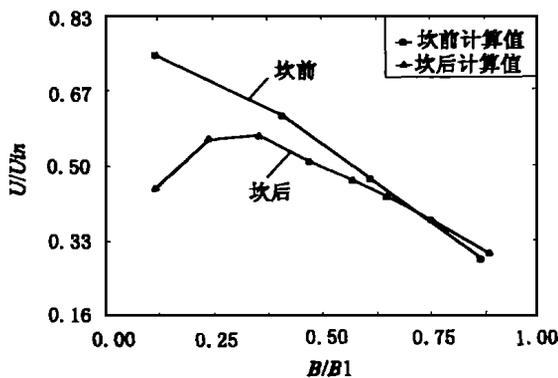
但是, 由于特殊的进口位置使脱壁情况及产生的回流影响强烈, 第一道底坎整流后的效果还不能令人满意, 为此在两前池第一道坎后分别增设第二道底坎, 坎 2 和坎 4.



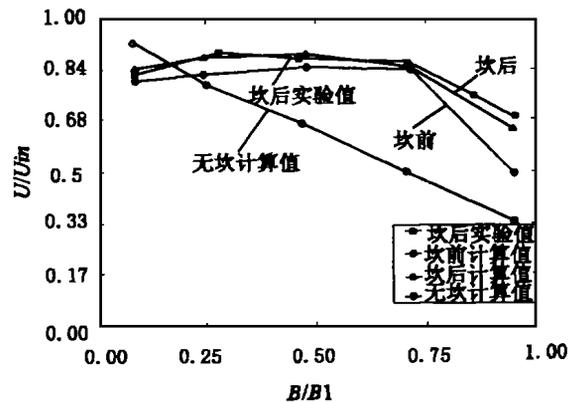
(a) 底坎1前后流速分布



(b) 底坎2前后流速分布



(c) 底坎3前后流速分布



(d) 底坎4前后流速分布

$U_{in}$ —进口断面平均流速,  $B_1$ —断面宽度, 相对水深  $h/h_w = 0.2$

图 7 四道底坎前后断面流速分布

图 7(b), (d) 的结果表明, 经过第二道底坎整流后, 坎后断面流速已基本均匀, 与无坎时流速分布相比, 可知整流效果非常显著.

4.3.2 坎后纵断面流速

图 8(a), (b), (c), 分别为 S2, S3, S4 三道底坎坎上纵断面流速分布和坎后漩滚流动情况.

从图中可以看出, 坎上速度明显增大. 这是因为底坎使其顶上的过流断面突然减小, 流体内部的能量迅速转换, 部分压能转换为动能, 在这个转换的过程中, 破坏了坎前脱壁回流的压力场, 从而使水流得以调整, 重新分布. 断面收缩引起水流内部能量转换进而改变流动结构的影响的大小取决于坎的高度 ( $h_p$ ) 和水深 ( $h_w$ ) 的比值  $h_p/h_w$ , 该比值越大, 这种

影响也越大, 反之, 这种影响越小.

4.3.3 坎后漩滚

底坎在沿水流的纵向的长度(坎宽)较小, 因此, 水流过坎后, 过水断面突然扩大, 水流垂向突然扩散, 导致坎后产生一个漩滚区. 该区域内充满旋涡, 水流在该区域内有强烈的紊动混掺作用, 继续进行能量交换, 从而使水流结构得到进一步调整. 漩滚对水流调整的影响取决于紊动强度和漩滚区的大小, 故取决于坎高 ( $h_p$ ) 及水深  $h_w$ .

根据文献[5], 坎后漩滚长度

$$l = 6 h_p + 12 h_p \ln \frac{h_w}{h_w - h_p}$$

数值计算结果与上述公式的计算结果相符.

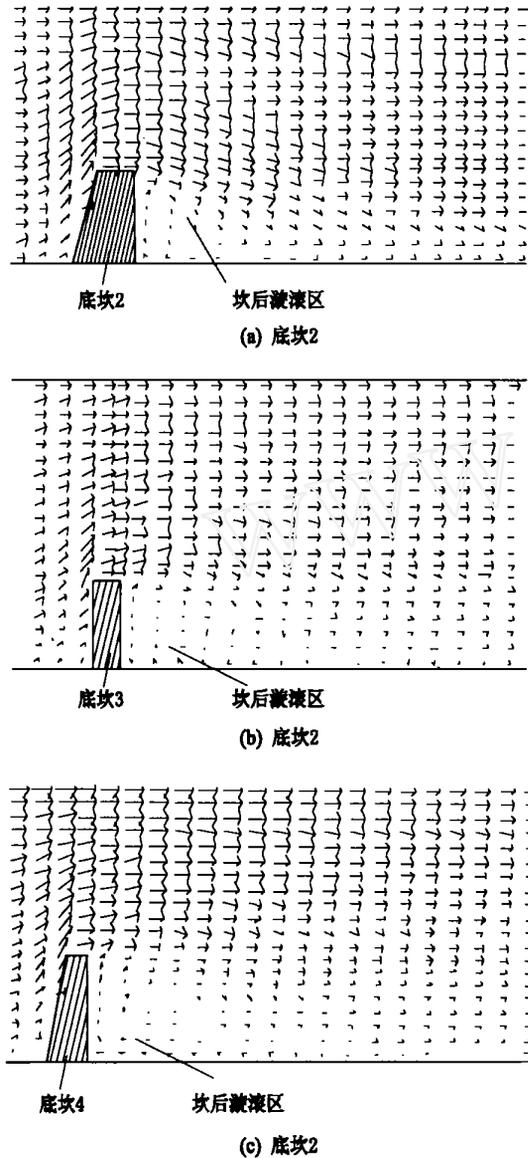


图 8 腐蚀坎后纵断面流速分布

通常,底坎距泵吸水池的最小距离应大于这一数值,取  $(1.3 \sim 1.5) l_v$ 。

#### 4.3.4 坎前后的水头损失

计算结果和实测结果均表明过坎水流因淤滚区紊动混掺产生的水头损失很小,约  $1 \sim 5 \text{ cm}$ ,占总扬程不到  $1\%$ ,对泵站效率影响甚小。

## 5 结 语

1. 文中采用的紊流模型用于前池三维动流计算其结果是令人满意的.尤其是对增设底坎前池三维紊流计算同样获得了十分准确的结果,不仅为分析现有工程问题,而且为解决现有工程中的回流等问题提供了非常实用的方法。

2. 采用三维紊流数值模拟计算,辅以小比尺的物理模型,能够得到取水前池完全流场,可以代替大比尺物理模型,节省时间和研究经费,其结果具有足够的准确性和实用性,可以作为工程设计的重要参考依据。

3. 前池中增设底坎是消除回流和旋涡的极为有效的措施,不仅在取水前池中可推广应用,而且也可用于改善其它扩散流动。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] J. B. Vos. The Development of A Computational Model for A 2 - D Turbulent Flow[R]. 1984.
- [3] M. Ramirez and G. Trapaga. Comparison between Tree Numerical Methods to Describe a Free Surface Problem [J]. *PHOENICS Version*, 1998, (3): 406-428.
- [4] 江苏机电排灌工程研究所. 郑集泵站整体模型试验研究报告[R]. 1994.
- [5] 冯旭松. 泵站前池底坎整流及坎后流动分析[J]. *江苏水利*, 1998, (1): 1-5.

### Numerical Simulation of three - dimensional turbulent flow for pumping forebay

LIU Chao<sup>1</sup>, Chen Li<sup>2</sup>, TANG Fang-ping<sup>2</sup>  
(Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** The paper brings up the Combined - sills are made in the forebay to eliminate the circulation and vortex of the diffusing flow. Numerical Simulation of three - dimensional turbulent flow is applied to the complicate flow before and after sills. The results are validated by the hydraulic model test. The computational results are in good agreement with the experimental data. The flow pattern is obviously improved. The Combined - sills has been successfully applied to the pumping project.

**Key words:** pumping station; forebay; sill; turbulent; numerical simulation