

泵站正向进水前池流态的数值模拟

周龙才, 刘士和, 丘传忻

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉, 430072)

摘要: 应用正交曲线坐标系下的二维水深平均数学模型对泵站的前池流态进行了数值模拟。采用 Poisson 变换生成正交网格, SIMPLEX 方法求解离散方程。根据模拟出的流速场图和断面平均流速分析了泵站正向进水前池扩散角以及开机决策对前池流态的影响, 结论与由试验经验所得的泵站设计理论完全一致。

关键词: 泵站; 正向前池; 水流流态; 数值模拟

中图分类号: TV131 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-6254(2004)01-0023-05

0 引言

前池是泵站的进水建筑物, 其作用是保持引渠的水平顺地扩散到进水池, 向泵站的每台机组进水孔口均匀地直接供水。前池或进水池设计不当时, 会在池中产生离壁、回流和旋涡, 不仅会增大能量消耗而且还会恶化水流条件。一旦形成的旋涡进入泵内, 叶片切割旋涡时将各叶片的负荷将发生变化, 致使水泵效率降低, 甚至引起水泵汽蚀, 机组振动并产生噪音, 危及水泵的运行安全。在多泥沙的水源泵站, 前池及进水池内不良的水力条件还会引起冲刷和淤积^[1]。

在许多大型泵站的设计、改造过程中, 为获得良好的前池水流流态, 常需要对前池的布置形式以及尺寸、整流措施、防淤措施、运行方案等进行试验研究, 以确定最优方案。随着电子计算机和数值计算技术的发展, 用数值模拟与物理模型试验相结合的方法解决实际工程问题越来越普遍。目前, 采用平面二维数学模型和三维紊流模型进行泵站前池流态及其改造措施研究的越来越多^[2-3], 所得的成果对改善泵站前池运行条件起到了很好的指导作用。在此, 作者采用平面二维数学模型对泵站正向进水前池内的流态进行模拟。

1 数学模型

大型泵站进水前池的平面尺寸一般比水深大许多倍, 因此可以采用沿水深平均的二维浅水方程描述水流的运动规律^[2]。为处理流动区域的不规

则边界, 采用贴体坐标生成计算网格。

1.1 贴体坐标

目前, 生成贴体坐标网格的方法用得较多的是求解微分方程的方法。采用 Poisson 方程进行贴体坐标变换时, 求解对应于计算平面 (ξ, η) 的物理平面 (x, y) 上网格点的方程为:

$$\begin{cases} \alpha x_{\xi\xi} - 2\beta x_{\xi\eta} + \gamma x_{\eta\eta} + J^2(Px_{\xi} + Qx_{\eta}) = 0 \\ \alpha y_{\xi\xi} - 2\beta y_{\xi\eta} + \gamma y_{\eta\eta} + J^2(Py_{\xi} + Qy_{\eta}) = 0 \end{cases} \quad (\xi, \eta) \in D \quad (1)$$

式(1)中的 P 、 Q 是调节因子, 其作用是调整实际物理平面上曲线网格形状及疏密程度。Thomas 和 Middlecoff 提出了一种确定 P 、 Q 的方法^[4]:

$$\begin{cases} P = \phi(\xi, \eta)(\xi_x^2 + \xi_y^2) \\ Q = \psi(\xi, \eta)(\eta_x^2 + \eta_y^2) \end{cases} \quad (2)$$

在区域内部, 分别沿 $\xi = \text{const}$ 曲线、 $\eta = \text{const}$ 曲线对各点按 η 、 ξ 作线性插值得 ϕ 、 ψ 值。这种方法可以保持在边界处网格线的正交性。

$$\phi = -\frac{x_{\xi}x_{\xi\xi} + y_{\xi}y_{\xi\xi}}{x_{\xi}^2 + y_{\xi}^2} \quad (3)$$

$$\psi = -\frac{y_{\eta}y_{\eta\eta} + x_{\eta}x_{\eta\eta}}{x_{\eta}^2 + y_{\eta}^2} \quad (4)$$

1.2 二维水深平均非恒定流控制方程

采用正交曲线坐标系下二维水流运动的水深平均方程。

作者简介: 周龙才(1972-), 男, 湖北随州人, 讲师, 博士, 主要从事水泵及水泵站的教学与科研工作。

连续性方程：

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial}{\partial \xi} (Hu C_\eta) + \frac{1}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial}{\partial \eta} (Hv C_\xi) = 0 \quad (5)$$

ξ 方向和 η 方向的动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \frac{v^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \\ = -\frac{g}{C_\xi} \frac{\partial z}{\partial \xi} - \frac{gn^2}{H^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} u + Fu \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{C_\xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{uv}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \frac{u^2}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \\ = -\frac{g}{C_\eta} \frac{\partial z}{\partial \eta} - \frac{gn^2}{H^{4/3}} \sqrt{u^2 + v^2} v + Fv \end{aligned} \quad (7)$$

式中， ξ 、 η 表示正交曲线坐标系中的两个正交曲线坐标； u 、 v 分别为 ξ - η 曲线坐标系下沿 ξ 方向和沿 η 方向的流速； H 表示水深； z 表示水位； n 为糙率； C_ξ 、 C_η 表示正交曲线坐标系中的拉梅系数， F_u 、 F_v 为紊动粘性项，在正交曲线坐标系中，有：

$$\begin{cases} F_u = \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \sigma_{\xi\xi}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \sigma_{\xi\eta}) + \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \sigma_{\eta\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right] \\ \quad / (C_\xi C_\eta) \\ F_v = \left[\frac{\partial}{\partial \xi} (C_\eta \sigma_{\xi\eta}) + \frac{\partial}{\partial \eta} (C_\xi \sigma_{\eta\eta}) + \sigma_{\xi\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} - \sigma_{\xi\xi} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right] \\ \quad / (C_\xi C_\eta) \end{cases} \quad (8)$$

式中， $\sigma_{\xi\xi}$ 、 $\sigma_{\xi\eta}$ 、 $\sigma_{\eta\eta}$ 为紊动应力，有

$$\begin{cases} \sigma_{\xi\xi} = 2\nu_t \left(\frac{1}{C_\xi} \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{v}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} \right) \\ \sigma_{\eta\eta} = 2\nu_t \left(\frac{1}{C_\eta} \frac{\partial v}{\partial \eta} + \frac{u}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right) \\ \sigma_{\xi\eta} = \nu_t \left(\frac{1}{C_\eta} \frac{\partial u}{\partial \eta} + \frac{1}{C_\xi} \frac{\partial v}{\partial \xi} - \frac{u}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\xi}{\partial \eta} - \frac{v}{C_\xi C_\eta} \frac{\partial C_\eta}{\partial \xi} \right) \end{cases} \quad (9)$$

ν_t 表示紊动粘性系数，在此取 $\nu_t = \alpha \bar{u} h$ 。

1.3 方程的离散化方法

采用如图 1 所示的交错网格，在主节点 (i, j) 上给出网格生成点坐标 $x_{i,j}$ 、 $y_{i,j}$ ，水位 $z_{i,j}$ （或水深 $H_{i,j}$ ），糙率 $n_{i,j}$ ，紊动粘性系数 $\nu_{i,j}$ ，河道或水池底高程 $z_{b,i,j}$ 等。流速 $u_{i,j}$ 位于主节点

左方，流速 $v_{i,j}$ 位于主节点下方。图中带斜纹的区域分别为速度 u 和 v 的控制容积。

在图 1 所示的交错网格上采用迎风格式对关于 u 、 v 的动量方程式 (6)、(7) 进行控制体积内的积分，最终有：

$$a_p u_p = a_E u_E + a_W u_W + a_N u_N + a_S u_S + b_p + A_p (z_w - z_e) \quad (10)$$

$$a_p v_p = a_E v_E + a_W v_W + a_N v_N + a_S v_S + b_p + A_p (z_s - z_n) \quad (11)$$

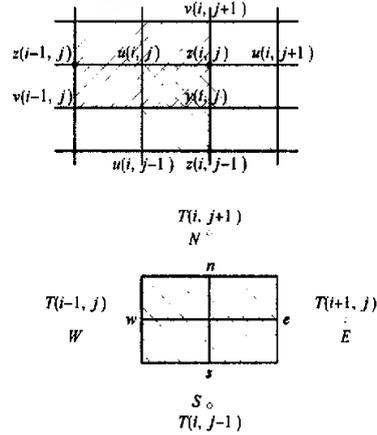


图 1 交错网格布置图

对此两类方程，一般引入松弛系数求解。本文取两者的松弛因子都为 0.5。

1.4 数学模型的求解

1.4.1 求解代数方程的 ADI 方法

对方程式 (10) 和 (11)，可以统一表示为如下形式：

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_S T_S + a_N T_N + b \quad (12)$$

对此方程先逐行（或逐列）进行一次扫描，再逐列（或逐行）进行一次扫描，由两次扫描组成一轮迭代，称为交替方向隐式迭代法（ADI 方法）。每次扫描得到一组三对角系数矩阵的方程组，用追赶法求解；在采用 ADI 方法的同时，采用双块修正方法以加快解的收敛^[5]。

1.4.2 压力修正方程

设 u^* 、 v^* 、 z^* 为原来的解，改进后的解为 $u = u^* + u'$ ， $v = v^* + v'$ ， $z = z^* + z'$ ，将其代入由动量离散方程式 (10)、(11)，注意到在图 1 的求解格式中 u 、 v 和 z 的位置关系，最终得到如下的近似关系：

$$u'_w = \frac{A_w}{a_w - \sum a_{nb}} (z'_w - z'_p) = d_w (z'_w - z'_p) \quad (13)$$

$$v'_s = \frac{A_s}{a_s - \sum a_{nb}} (z'_s - z'_p) = d_s (z'_s - z'_p) \quad (14)$$

代入由连续性方程式(5)的离散式,可得到:

$$a_p H'_p = a_E H'_E + a_w H'_w + a_N H'_N + a_s H'_s + b \quad (15)$$

1.4.3 SIMPLEX算法

关于 u 、 v 和 z (或 H) 的计算,采用 SIMPLEX 算法。其计算步骤如下:

- ①假定一个速度分布,记为 u^0 、 v^0 ,以此计算动量离散方程中的系数和常数项;
- ②假定一个水位分布场 z^0 ;
- ③依次求解两个动量方程,得到 u^* 、 v^* ;
- ④求解压力修正方程(15),得到 H' ;
- ⑤据 H' 由式(13)、(14)改进速度值;
- ⑥利用改进后的速度场重新计算动量方程离散系数,并用改进后的水位作为下一层迭代计算的初值。重复上述步骤,直到获得收敛的解。

2 正向进水前池流态模拟

2.1 前池模型及处理

研究的正向进水前池模型如图2所示。

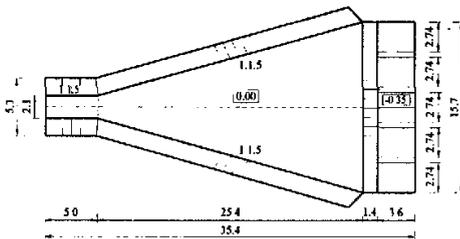


图2 计算前池模型图 $\alpha=30^\circ$

泵站安装了5台机组,单泵设计流量 $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$

设计流量运行时引渠末端水位为 1.05 m 。计算中假定单泵运行流量不变,引渠末端水位不变。为了获得合理的出口速度(以水泵端为进口),将引水渠端延长 5 m 的平直段,在计算区域内布置 101×51 个网格点,计算网格如图3所示。

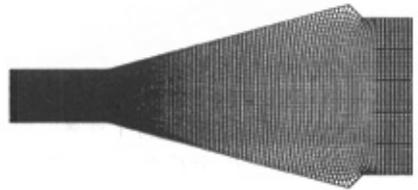


图3 计算网格 ($\alpha=30^\circ$, 引渠端延长 5 m)

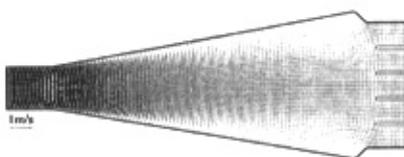
2.2 扩散角对前池水流流态的影响

正向进水前池的来水方向和进水池的进水方向一致,其主要特点是形状简单,施工方便,池中水流较平稳。但由于受水固固有扩散角的限制,前池的扩散角不能过大,当水泵机组较多时,需要增加池长,工程量也因之增大。因此,如何在保证水流流态良好情况下尽量减少池长,确定前池的扩散角 α 是关键。为模拟扩散角对前池内水流流态的影响,在此计算前池扩散角 $\alpha \geq 20^\circ$ 的各种情况。

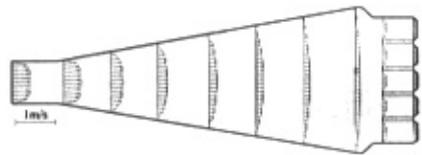
图4、5、6分别为设计流量下前池设计扩散角 α 取 20° 、 30° 和 45° 时的速度矢量图和断面垂线平均流速分布图。从图中可以看出,当扩散角 $\alpha > 20^\circ$ 时,在主流两侧形成回流区。随着扩散角的增大,回流区增加。特别是扩散角 $\alpha = 45^\circ$ 时,池长较短,来水不能及时扩散,水流直冲中部,然后折向两侧,引起两侧较大的回流区。此结果与实验经验所得出的泵站前池设计理论完全一致^[1]。

2.3 开机决策对前池水流流态的影响

为分析泵站开机运行方案对前池流态的影

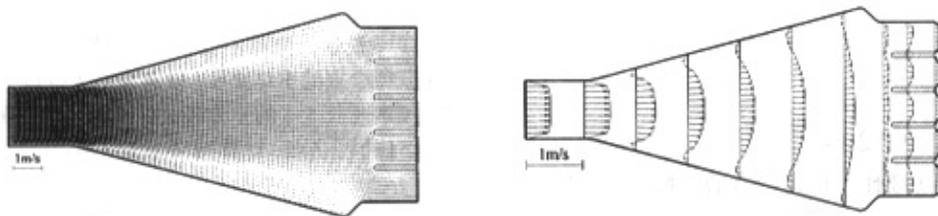


(a) 前池速度矢量图



(b) 断面垂线平均流速分布图

图4 扩散角 $\alpha=20^\circ$ 开5台机组时的计算结果



(a) 前池速度矢量图

(b) 断面垂线平均流速分布图

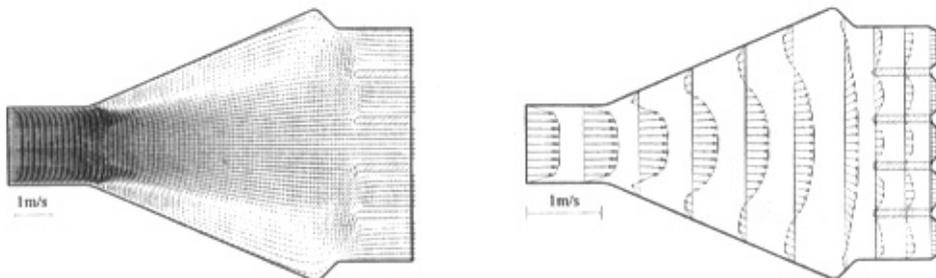
图5 扩散角 $\alpha=30^\circ$ 开5台机组时的计算结果

响,对泵站不同的开机情况进行了计算。图7~10是前池扩散角 $\alpha=30^\circ$ 开机1台、2台时,选择开中间的泵与边侧泵时的水流速度矢量图和断面垂线平均流速分布图。从图中可看出,如只开机1台时,开边侧机组会在前池内另一侧形成比较

大的回流及旋涡区,而且旋涡是充分发展的,在没有运行的机组进水池内会产生速度很小的旋涡。

3 结论

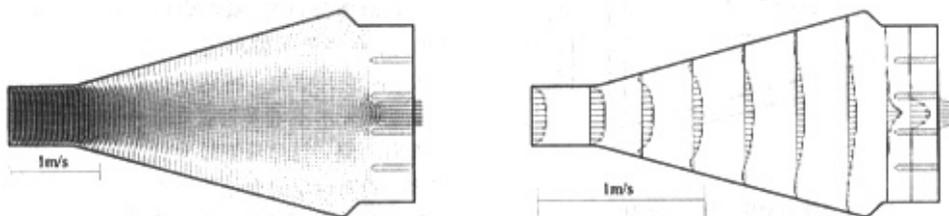
应用正交曲线坐标系下的二维水深平均数学



(a) 前池速度矢量图

(b) 断面垂线平均流速分布图

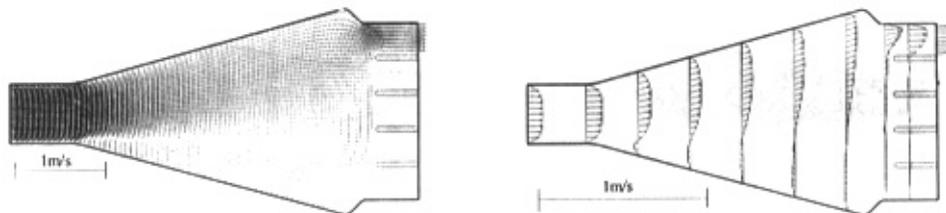
图6 扩散角 $\alpha=45^\circ$ 开5台机组时的计算结果



(a) 前池速度矢量图

(b) 断面垂线平均流速分布图

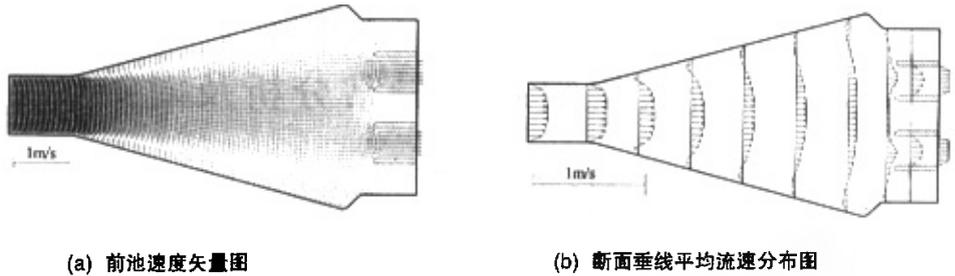
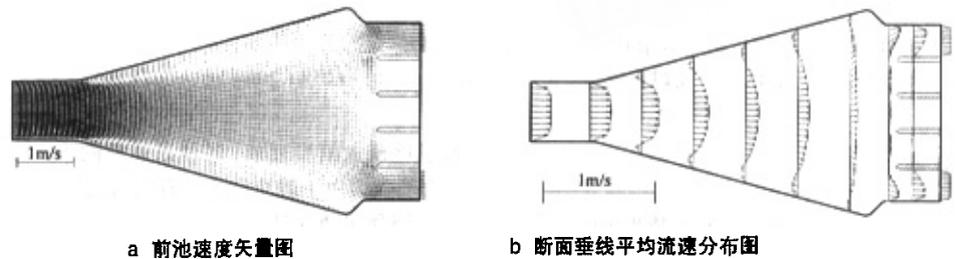
图7 扩散角 $\alpha=30^\circ$ 开中间一台机组时的计算结果



(a) 前池速度矢量图

(b) 断面垂线平均流速分布图

图8 扩散角 $\alpha=30^\circ$ 开边侧一台机组时的计算结果

图9 扩散角 $\alpha = 30^\circ$ 开中间两台对称机组时的计算结果图10 扩散角 $\alpha = 30^\circ$ 开边侧两台对称机组时的的计算结果

模型对大型泵站的进水流场进行了数值模拟。计算表明前池扩散角对水流流态有较大的影响,扩散角较大时,必须考虑前池的整流措施,这与由实验经验所得出的泵站前池的设计理论是一致的;其次,模拟了不同的开机决策下的流态,建议在泵站运行中,尽量对称地运行靠近中间的机组,以防引起水流偏流,产生回流和旋涡。应用数值计算来模拟大型泵站的进水流态,从而为改善泵站的进水条件提供预见性的建议或措施,这无论是对泵站的设计还是对泵站的改造都有重要的现实意义。

不过,由于进水池内的流动是三维的,采用水深平均模型简化为二维流动后,计算所得到的流场只是深度平均流场,不能反映流动参数的纵

向变化。因此,需要进一步考虑纵向流动参数的纵向变化时,水深平均模型不再适用,必须采用三维流动模型。

参考文献:

- [1] 丘传忻. 泵站工程. 武汉大学出版社, 2001: 214-221.
- [2] 魏文礼, 等. 抽水站进水前池水流流态数值模拟. 西北水资源与水工程, 1998(4): 6-10.
- [3] 张贤明, 吉庆丰. 泵站前池流态的数值模拟. 灌溉排水, 2001(1): 35-38.
- [4] 朱自强, 等. 应用计算流体力学. 北京航空航天大学出版社, 1998(8): 210-213.
- [5] 陶文铨. 数值计算传热学. 西安交通大学出版社, 1988: 165-171.

Numerical Simulation of Flow Patten in the Front Inflow Forebay of Pumping Station

ZHOU Long-cai, LIU Shi-he, QIU Chuan-xin

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, 430072, China)

Abstract: The 2-D average water depth mathematical model in orthogonal curve-linear coordinate system is used for the numerical simulation of the flow pattern in the front inflow forebay of pumping station. The orthogonal grid is generated by Poisson equation, the pool bottom elevation data of the grid points is given by quadrilateral interpolation method, and the equations is solved by SIMPLEC method. The influence of the change of divergent angle and the selection of running pumps on the flow pattern in the forbay is analyzed by the simulated velocity field and the average vertical velocity, the conclusion is selfsame with the design theory of forebay which based on experiments.

Key words: Pumping Station; Front inflow forebay; Flow pattern; Numerical Simulation