

平流式沉淀池内水流运动的数值模拟

白玉华 朱 勇 马林伟 刘百仓

摘 要 给出了描述沉淀池内水流运动的控制方程, 采用基于有限体积法求解原理的商用软件 Fluent6.1 求解了 k-epsilon 双方程模型, 速度与压强解耦采用了 SIMPLE 算法, 计算结果与已验证的其它模拟资料吻合良好。基于 Fluent 平台可以进行二次程序开发, 如进一步加入沉降模型, 而水动力学计算是进行后序工作的基础, 本文指出了基于 Fluent 进行平流式沉淀池流速场模拟的准确可靠性。计算结果表明池内存在两处死水区: 在挡板后存在一个较大的回流区, 该处的旋涡逆时针旋转; 另一个回流区在出水堰底板附近, 该处的旋涡顺时针旋转。

关键词 沉淀池 有限体积法 数值模拟 k-epsilon 模型

国内水环境污染问题日益突出, 水处理工艺需要多级保障, 而沉淀池仍然是水处理过程中不可缺少的一个重要环节。近年来随着计算技术的发展, 利用计算流体力学 (CFD) 技术研究沉淀池内的水流运动规律已成为可能。在工程应用方面, 较为方便快捷的方式是利用专门或通用的软件, 而在沉淀池模拟技术方面, 专门的软件在国内几乎是空白, 国外亦较少, 且并不完善。目前, 国内在此方面的研究工作甚少, 曾光明等^[1,2]利用涡量-流函数方法对沉淀池悬浮物分布进行了模拟, 求解过程中利用的是差分方法; 蔡金榜等^[3]采用三角形有限单元离散方法, 并使用了 k- ϵ 湍流模型, 对沉淀池进行了模拟。商用软件方面, 屈强等^[4]利用 Fluent 软件中的 k- ϵ 湍流模型分析了两种类型沉淀池内水流的流态, 指出折流式沉淀池内的流态不如尺寸相同的平流式沉淀池的水流特征。平流式沉淀池在我国南方地区广泛采用, 现阶段各个水厂主要通过烧杯实验或原型测量来确定沉淀池的去除率, 对池内水流流动的特点认识较缺乏, 为了进一步深入了解其内部水流运动的特点, 本文采用了 Fluent 软件对其进行研究。商用软件 Fluent 目前在国内外各领域都得到了广泛的应用, 鉴于此, 本文采用 Fluent 软件进行平流式沉淀池内水流运动规律的研

究, 考察其对沉淀池内水流运动规律模拟的准确性, 为相关研究人员进行后序沉淀模型方面的研究提供基础。

1 数学模型及计算方法

平流式沉淀池计算模型如图 1 所示, 池长为 L , 池深为 H , 挡板下方进水口高度为 H_{in} , 出水口处堰高为 H_w , 挡板后回流区的长度为 X_1 , 出口堰底板附近回流区的长度为 X_2 。具体的几何尺寸与文献^[5]一致。

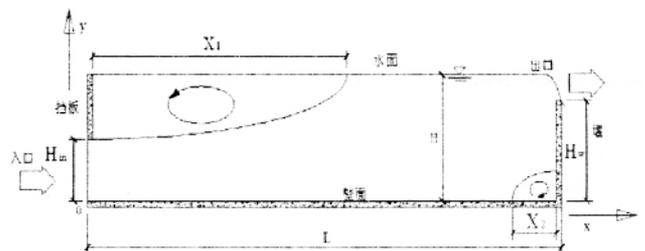


图 1 平流式沉淀池模型及坐标系示意图

平流式沉淀池正常运行时, 可采用定常二维粘性不可压缩流体运动的控制方程来描述沉淀池内水流的运动规律, 流体运动基本方程组为:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

动量方程:

$$u_j \frac{u_i}{x_j} = f_j - \frac{1}{x_j} + \nu \frac{u_i^2}{x_j x_j}, \quad (i, j=1, 2) \quad (2)$$

其中 $f_1 = 0, f_2 = -g$

式中, 其中 u_i 为池内水流速度 (m/s)、 P 为压强 (Pa)、 V 为粘性系数 (Pa·s)。

由文献 [6] 中的分析可知, 沉淀池内水流流动的雷诺数均在 3000 以上, 采用层流模型计算时会不稳定, 需要采用改进的层流模型或湍流模型。为了能够描述沉淀池内水流的流动状态, 求解 k - ϵ 双方程湍流模型。

湍动能及其耗散率:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{H}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho Y_M + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{H}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_3 G_b) - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S \quad (4)$$

其中, G_k 为速度梯度产生的湍动能, G_b 为浮力产生的湍动能, Y_M 用于可压缩流动计算中, S_k 、 S 为用户自定义的源项。

定解条件:

(1) 速度入口: 采用与 Imam et al [5] 相同的入口边界条件 $u=u_0$

(2) 速度出口: $H_w < y < H$ 速度出口 u 由质量守恒求得, $=0$

(3) 自由表面: $\frac{u}{y} = 0, \epsilon = 0$

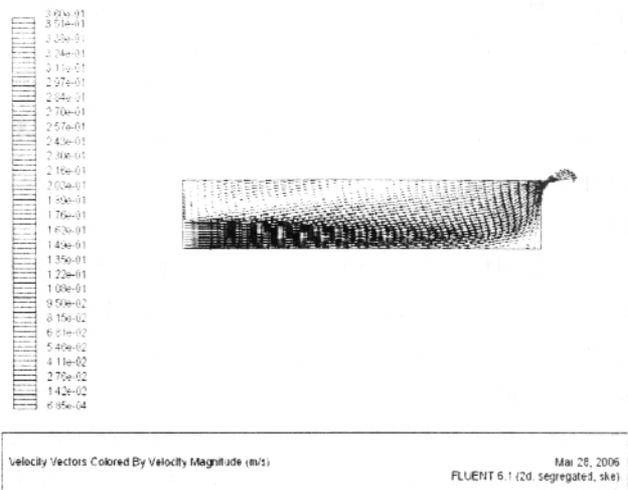
(4) 壁面边界: $u=0, \epsilon = 0$

为了提高计算的精度及效率, 采用结构化非均匀网格, 在物理量变化较大的位置布置较密的网格。如在入口处及出口附近需布置较密的网格, 以精确的捕捉到空间区域内各处的物理量。为了检验网格的依赖性, 采用了三套网格 $22 \times 63, 42 \times 78, 52 \times 124$, 计算结果表明网格数达到 42×78 时已经足够了, 与文献 [6] 中的结论相一致。

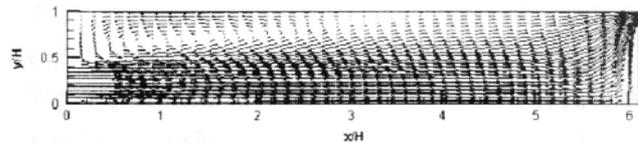
采用的求解方法为有限体积法, 目前, 有限体积法应用得非常普遍, 具有在局布小单元内满足质量守恒及动量守恒, 且适用于结构网格及非结构网格, 计算速度也较快等优点。

2 计算结果及讨论

对方程求解时, 控制精度为: 连续性方程 10^{-5} , 动量方程、湍动能及湍动能耗散率为 10^{-4} 。迭代次数达到 1150 次时得到收敛解。

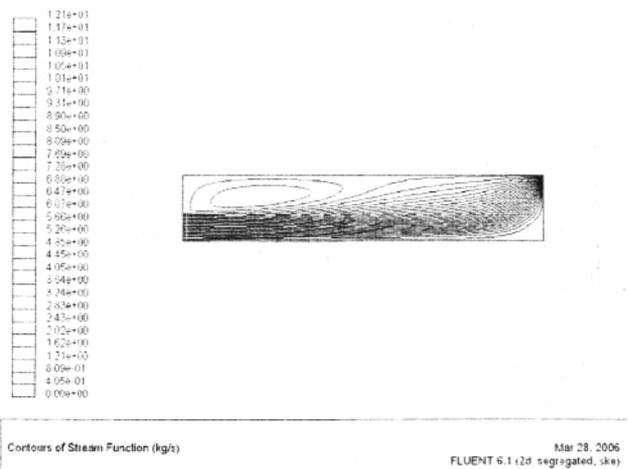


(a) 本文计算结果

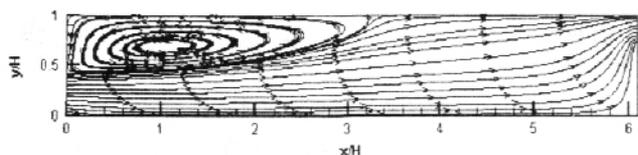


(b) 文献 [6] 的结果

图 2 模型池内速度场 (Re=10900)



(a) 本文计算结果



(b) 文献 [6] 的结果

图 3 模型池内流线分布

图 2 中 (a) 和 (b) 给出了沉淀池内的速度场分布情况的本文计算值与文献 [6] 的比较, 图 3 是其相应的流线分布比较, 池内存在两处旋涡, 第一

个位于挡板后方, 逆时针旋转, 对其下方的水流具有卷吸作用; 第二处旋涡在出口堰底板附件, 顺时针旋转, 由图 2 可见该处水流几乎处于停滞状态。从图 2 至图 3 计算结果的比较可以明显看出, 两者的计算结果吻合良好, 因而计算结果与实验结果吻合也十分良好。

目前国内外在管网优化运行与调度方面, 均与自动控制相结合, 以达时时寻求某种程度上的最优工况。对于水处理构筑物而言, 结合自动控制优化运行与管理将会是一个很有前景的发展方向, 因为通过传感在线控制或结合模糊数学模型进行控制需要相当数量的数据检测, 而利用本文中所述的方法可以不设或只设少许检测点即可。当前之所以尚未能广泛应用可能主要有以下几个原因: (1) 较缺少对各种水处理构筑物不同运行工况下的模拟与实测值的验证; (2) 计算速度与计算技术与工程实际应用尚有一定的距离; (3) 控制模型与计算流体动力学模型之间的耦合问题。

研究沉淀池内的污染物传质扩散均要基于流场, 在流场的计算为正确的前提下, 本文的目的是提出模拟沉淀池内湍流流动的方法, 今后的研究中对低浓度的污染物可考虑采用加入沉淀模型的方法, 对高浓度的污染物可采用两相流模型, 从而针对不同特点的水质进一步优化时, 设计中应采用池子的长深比, 挡板的位置及安装角度等。通过这种理论进行优化设计的方法, 可进一步挖掘沉淀池的潜力, 提高污染物的去除率, 对于节省水处理的成本具有重大的经济意义。

3 结论

(1) 本文进行了沉淀池内水流流动规律研究的

建模工作, 并且采用商用软件 Fluent 求解了 k-epsilon 双方程模型, 使用 SIMPLE 算法对速度与压强进行解耦, 计算结果与实验资料吻合良好;

(2) 本文指出了基于 Fluent 进行平流式沉淀池流速场模拟的准确可靠性。计算结果表明池内存在两处死水区: 在挡板后存在一个较大的回流区, 该处的旋涡逆时针旋转; 另一个回流区在出水堰底板附近, 该处的旋涡顺时针旋转。基于 Fluent 平台可以进行二次程序开发, 如进一步加入沉淀模型, 而水动力学计算是进行后序工作的基础, 因而本文为进行相关领域的研究人员提供了进一步深入研究的基础;

(3) 本文采用湍流模型对沉淀池内的水流流态进行了模拟, 将来进一步与自动控制相结合起来, 以达到寻求某种程度上的最优工况, 如能得以实现, 将具有重大的经济意义。

参考文献

- 1 曾光明, 葛卫华, 秦肖生, 黄国和, 刘鸿亮. 数值模拟方法在二维沉淀池优化设计中的应用 [J]. 环境工程, 2002, 20 (4): 10-13.
- 2 曾光明, 葛卫华, 秦肖生, 黄国和, 李建兵. 污水厂二维沉淀池水流和悬浮物运动数值模拟 [J]. 中国环境科学, 2002, 22 (4): 338-341.
- 3 蔡金傍, 段祥宝, 朱亮. 沉淀池水流数值模拟 [J]. 重庆建筑大学学报, 2003, 25 (4): 64-69.
- 4 屈强, 马鲁铭, 王红武, 袁宏宇. 折流式沉淀池流态模拟 [J]. 中国给水排水, 2005, 21 (45): 58-61.
- 5 Imam, E., McCorquodale, J.A., and Bewtra, J.K. Numerical modeling of sedimentation tanks [J]. J.Hydr. Engrg., ASCE, 1983, 109: 1740-1754.
- 6 刘百仓, 马军, 黄社华, 陈大宏. 模拟沉淀池流速场的层流模型扩展性研究 [J]. 中国给水排水, 2007, 23 (11): 102-104.

作者通讯处: 白玉华 朱勇 马林伟 610081 成都市星辉中路 11 号 中国市政工程西南设计研究院
刘百仓 150090 哈尔滨工业大学市政环境工程学院



美国: 污水处理厂让污水变饮用水

美国加利福尼亚州奥兰治县污水处理厂最近开始投入使用, 每天可将 7000 万加仑 (31823 万升) 污水转化为饮用水。这是迄今世界规模最大、最先进的污水处理厂。

这一污水净化系统造价 4.9 亿美元, 占地 8 万多平方米, 由大量管道、水泵、存储和过滤设备组成。整个工程历时 4 年。

当地官员说, 污水经过一系列复杂净化程序后, 纯净程度与蒸馏水相当, 完全可以作为饮用水。当地官员希望, 污水处理厂能尽快得到卫生部门颁发的证书, 证明水质达到饮

用水标准。

净化后的水将注入奥兰治县地下水盆地, 淡化当地地下水含盐量, 补充饮用水资源, 以减少对外来水资源的依赖。预计届时当地将有约 230 万人受益。

这种净化水成本约为每吨 0.45 美元, 略高于从加利福尼亚州北部引进水价格。但当地官员说, 随着引进水价格不断攀升, 这种净化水的价格将越来越具有竞争力。

(摘自“新民晚报”, 2008-1-28)