

论述与研究

应用计算流体力学优化清水池水力效率

刘文君, 崔磊

(清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084)

摘要: 为确定计算流体力学(CFD)用于清水池水力效率计算的可行性而建立了 CFD 中试模型,得到了清水池数学模型的液龄分布函数和累计液龄分布函数。改变模型流场设置,包括挡板数量、挡板长度、穿孔板和导流墙,分别建立相应的扩展数学模型对流场进行模拟和比较。通过对上述改进流场水力效率的措施进行整合,建立了四挡板和七挡板优化数学模型,明显提高了整个流场的水力效率,使得流场接近活塞流的理想状况。

关键词: CFD 模型; 清水池; 水力效率; 停留时间

中图分类号: TU991.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2005)05-0001-05

Application of Computational Fluid Dynamics for Optimization of Hydraulic Efficiency of Clearwell

LIU Wen-jun, CUI Lei

(Dept. of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Pilot-scale modeling computational fluid dynamics (CFD) was conducted to determine the feasibility in the use of CFD for calculating hydraulic efficiency of clearwell, and both the retention time distribution function and accumulated distribution function were obtained in mathematic model of the clearwell. The model's flow field was modified, including the quantity and length of baffle plate, perforated plate, and guiding wall, and the corresponding extended mathematic model was set up respectively to simulate and compare the flow field. By means of re-arranging the measures for improving hydraulic efficiency, and setting up the optimized mathematic model with four and seven baffle plates, the hydraulic efficiency of whole flow field was improved significantly, so that the flow field approached the ideal plug flow.

Key words: CFD model; clearwell; hydraulic efficiency; retention time

给水处理中清水池的水力效率是影响消毒效果和消毒副产物生成量的主要因素之一^[1]。一般采用示踪的方法确定清水池的水力效率与清水池内部结构之间的关系^[2~4],但通过示踪试验测定清水池时间分布函数费时费力,而且有时受限于现场条件可

能无法实现。随着计算机技术和计算流体力学(CFD)方法的不断进步,对流场和传质的高精度数值模拟已成为可能。通过 CFD 模拟计算可以很容易、精确且直观地得出清水池内水流流态和速度的分布情况,揭示出很多物理模型无法表达的信息,如

局部流速、短路流形态、单个颗粒停留时间和运行轨迹等。

CFD(Computational Fluid Dynamics)就是利用计算机求解流体流动的各种守恒偏微分方程组的技术,其中涉及流体力学尤其是湍流力学、计算方法以及计算机图形处理等技术。流体的流动可用 Navier—Stokes 方程描述,因此 CFD 中最基本的数学物理模型即为粘性流体的 Navier—Stokes 方程。

1 CFD 方法的原理

1.1 数学模型的整体框架

建立模型的步骤分为数学描述、数值求解、边界和初始条件设置三部分。建立数学模型后以迭代求解、数据采集与后处理、检验模拟准确度三部分作为数学模型的解析。流程图见图 1。

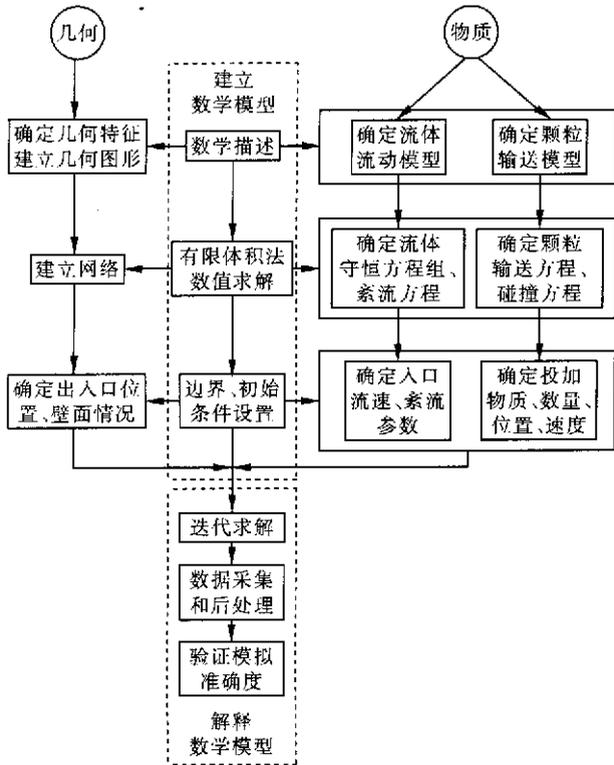


图 1 数学模型整体框架

Fig. 1 Mathematical model frameworks

1.2 两相流数学模型基本概念

① 连续相(水相)紊流模型

采用紊流 RNG $k-\epsilon$ 模型。它最重要的两个方程就是关于它最重要的两个参数——动能 k 和能量耗散 ϵ 的方程。

② 分散相(示踪剂)水力输送模型

采用欧拉—拉格朗日分散相模型,对颗粒的运行轨迹和停留时间进行模拟,其最重要的方程是颗粒在流场中的受力方程。

1.3 数学模型涉及的相关公式

CFD 软件根据以 Navier—Stokes 方程为基础的流体流动和能量平衡关系进行计算求解,使用者可以根据自己的模型选择特定的平衡关系包含到自己的模型中。实际上,根据模型合理选择特定的平衡关系是一种合理的简化。在 Fluent 软件中,这些平衡关系来源于 Navier—Stokes 方程中关于质量、能量和动量的守恒,还有如热量传递、物质混合或反应、 $k-\epsilon$ 紊流模型等。

1.4 建立网格

如上所述,描述流场的一系列偏微分方程通过有限体积方法将流场划分为众多小区域后,再由求解器进行计算求解。网格的密度和质量可以由用户自己决定,并且影响最终的求解过程。过于粗糙的网格,往往只给出流场一些简单的轮廓,而无法给出详细且精确的结果,甚至无法揭示出流场的本质特征。当设置好模型几何图形的边界条件后,就可以用上面提到的平衡方程和边界条件对所有网格进行迭代计算,从而得到特定问题的收敛解。

1.5 网格精度

由于网格决定着模型的准确度,所以生成合理的网格是建立数学模型的一个关键步骤。生成网格不但要考虑其细密程度来提高模拟过程的细节准确程度,又要避免由于网格过于复杂带来的漫长计算时间。一般来说,需要找到一个最优化的网格密度来满足模型的计算精度和计算时间,再提高精度也不会更多地反映出需要的流场细节,而减少精度又会掩盖住流场的本质特征。

1.6 网格结构

基于有限体积方法,对于那些流场特性变化不明显的区域,网格精度可以降低,而对于变化显著的地方(如边界层、拐角处等),需要提高网格精度,减小有限体积,从而提高反映该区域流场特性变化的详细信息的准确性。从基于本试验中实际物理模型建立的七挡板几何模型网格图可以看出边界层和拐角处的网格设置较细密。表 1 给出该网格的基本几何信息。

表1 七挡板数学模型网格几何信息

Tab.1 Geometrical parameters of mathematical model of seven baffle plates

网格信息	设置条件	网格信息	设置条件
入口管径/m	0.05	网格/个	30 611
入口管长/m	0.3	节点/个	15 907
池长/m	3	最小体积/m ³	4.618E-05
池宽/m	1	最大体积/m ³	6.817E-05
挡板长/m	2.5	总体积/m ³	3.03

1.7 物理原型

CFD模拟的中试清水池几何尺寸和水力特性见表2。

表2 物理模型几何尺寸和水力特性

Tab.2 Geometrical and hydraulic parameters of physical model

项目	数值
长度/m	3
宽度/m	1
高度/m	0.6
管径/mm	50
HRT/s	2 497.5
流量/(m ³ ·s ⁻¹)	4.44×10 ⁻⁴
进口流速/(m·s ⁻¹)	0.226 6
自由液面高度/m	0.37

无论对于物理模型还是数学模型,确定流场的 t_{10}/T 值和RTD曲线都需要进行示踪试验。示踪试验方法见文献[3]。

1.8 设置边界和初始条件

对于数值模拟的求解过程,正确设置边界和初始条件是使模拟得到收敛,特别是得到稳态解的重要保障。

① 进口流速

确定进口处的流速需要根据质量守恒的原则,即单位时间内三维物理模型进入流场的质量/体积等于单位时间二维数学模型进入流场的质量/体积,有以下公式:

$$U_{2D} = \frac{U_{3D} \cdot \{3D \text{ 进水管截面}\}}{H \cdot D} \quad (1)$$

式中 U ——平均流速

H ——二维入水槽高度

D ——二维入水槽宽度

物理模型入口管径为0.05 m,流量为1.6 m³/h,水面高度为0.37 m。

可以算得二维模型的入口处进水平均流速 $U_{2D} =$

$$\frac{1.6/3600}{0.37 \times 0.05} = 0.024 \text{ m/s.}$$

② 确定紊流模型参数

入口处紊流动能 k 定义为:

$$k = aU^2 \quad (2)$$

单位质量的能量耗散率 ϵ 定义为:

$$\epsilon = \rho c_{\mu} \frac{k^2}{R_{\mu} \mu} \text{ 或 } \epsilon = 1.5k^{1.5} / \Gamma_H \quad (3)$$

式中 ρ ——流体密度

μ ——流体粘度

c_{μ} ——常数,0.09

R_{μ} ——紊流和流体粘度之比

Γ_H ——水力半径

流场边界条件设置见表3。

表3 数学模型边界条件设置

Tab.3 Boundary conditions of mathematical model

变量	进口	出口	墙面(外墙和挡板)
类型	入口速度	出口压强	无滑壁面
速度 $U/(m \cdot s^{-1})$	0.014 8		0
紊流动能 k	6.58E-07	0	0
能量耗散 ϵ	2.814E-11	0	0
压强 p/Pa		101 325	
对颗粒作用	分散	逃逸	分散

1.9 求解过程

计算过程可以不将颗粒相对于流体(连续相)的影响考虑在内,也可以考虑颗粒对流体的作用效果。这两种算法分别称为非耦合计算和耦合计算。由于考虑到颗粒相浓度很小,和连续相比,颗粒对流体的作用可以忽略,所以采用两相非耦合模型进行计算。

1.10 数据采集和后处理

模型的两相经过求解计算后,可以得到每个控制体积内两相的各项属性,包括流体的流速、压强,颗粒的流速以及颗粒的轨迹和在流场中的停留时间。对物理原型的采样方法适当简化,即以相同的时间步长对颗粒出口情况进行统计来得到其时间停留密度曲线和累计液龄分布函数曲线。 t_{10} 则由 $F(t)$ 上最接近 $F(t)=0.1$ 的两个点线性插值求得。

2 模拟结果和准确度验证

2.1 流场的模拟

模拟的流场速度等值线图表明,通过流场进、出口的流体流速变化明显。流场内部,特别是挡板间的长流道部分流体均匀流特性较好,拐角部分流速

变慢且越远离挡板速度越小。挡板的设置可以增强流体的均匀性,但同时也会造成短路流。从拐角部分矢量图的局部放大图可以看出,在靠近外墙的部分造成了很多与流体速度逆向的短路流。短路流的存在会影响示踪剂在流场内的停留时间,进入短路流的颗粒需要很长时间才能摆脱,重新回到主流体的行进过程当中。

2.2 示踪剂的模拟

对于单个粒子来说,进入流场后,随着流体流动,直至从出口处逃逸。从典型单个粒子在流场中受到短路流影响的轨迹可以看出,颗粒进入挡板拐角处外侧和拐角后流体内侧速度很小的短路流后,增加了其停留时间,可见由于挡板设置造成的短路流对于流场的水力运输效率产生了负面的影响。表 4 给出了物理模型和数学模型的一些水力效率评价参数比较。从 CFD 模拟计算结果与中试示踪试验结果比较可以看出,CFD 模拟计算结果与试验实际测出的液龄分布函数和累计液龄分布函数基本一致。结果可以接受,但二者得出的 t_{10}/T 值误差为 26.7%,因此还需进一步提高 CFD 的精度。

表 4 数学模型与物理模型模拟效果比较

Tab. 4 Comparison between mathematical model and physical model

项目	t/s	t_{10}/T	t_{50}/T	t_{90}/T
物理模型	2 497.5	0.635	0.855	1.067
数学模型	2 497.5	0.805	0.906	1.225
相对误差/%	0	26.7	6	14.8

3 CFD 模型的应用

3.1 挡板设置对水力效率的影响

① 挡板长度

挡板长度是影响水力效率的一个重要因素,如果挡板设置过短,会在流场拐角处造成较大程度的短路流。如果挡板设置过长,拐角处的过流断面过窄,使得流体流速增加,也在一定程度上增加了流体的紊流程度,同样不利于颗粒在流场内的输送。新物理模型的挡板取 2.5 m,比原来减少了 0.25 m。从网格图及其速度等值线图可知,在拐角部分共 7 块区域中,形成了流速很小的短路流。从该区域的局部速度矢量线图可以看出,这部分短路流使部分颗粒在其中循环流动,增加了颗粒的水力停留时间,使累计液龄分布函数的坡度变缓,即由于流场偏离活塞流的状态,使颗粒的停留时间离散化。将挡板

未减短前的试验作为基准试验,将减少挡板长度的停留时间函数与基准试验的比较可知,由于挡板宽度减少而增加了流场中的短路流对颗粒输送的影响,颗粒的累计液龄分布函数曲线显著偏离活塞流,呈现了较大的离散程度, t_{10}/T 值降至 0.667,降低了 17.4%。

② 挡板数量

Gil F. Crozes 研究了挡板数量对水力效率的影响,其试验表明 t_{10}/T 值对于 L/W 值呈对数关系^[4]。为了验证挡板长度设置对挡板数量设置的影响,建立了设置 1~7 个挡板的流场数学模型,同时每个模型的挡板设置均为 2.5 m,即比基准试验的短 0.25 m,得到的关于挡板数量和 t_{10}/T 的关系见表 5。

表 5 短挡板流场 t_{10}/T 值

Tab. 5 t_{10}/T values in flow field of short baffles

项目	一挡板	二挡板	三挡板	四挡板	五挡板	六挡板	七挡板
t_{10}/T	0.639	0.669	0.667	0.670	0.669	0.673	0.667

挡板数的增加,提高了流场的 L/W 值。从 t_{10}/T 关于 L/W 的变化曲线可见,当挡板设置过短时,影响 t_{10}/T 值的主要因素不再是挡板的数量。这时即使提高挡板数量也不能再提高 t_{10}/T 值,而需要优化挡板长度。

3.2 导流墙的设置

为了避免短路流对流场水力效率的影响,将拐角处的墙体几何形状修改为流线形。从拐角处速度等值线图可以看到,导流墙的设置使得拐角处外侧的短路流得以消除,此模型的 t_{10}/T 值由修改前的 0.67 增加到 0.80,提高了 19.3%。从两者的累计停留时间函数图形比较可以看出,设置导流墙不但提高了颗粒的 t_{10}/T 值,而且降低了设导流墙之前较晚离开水池的那部分颗粒停留时间的分散程度。

3.3 穿孔板设置

除了用导流墙消除短路流的影响外,还可以用穿孔板减少流场内短路流的影响区域,设置穿孔板可延伸挡板至外墙。同时,由于流体经过拐角后水力断面变小,使得流速增加,提高了流体的紊流程度。在设置了穿孔板后,除能够减少拐角处短路流的影响之外,还可以在在一定程度上减弱流体颈缩位置紊流程度的增加。

从设置穿孔板前后拐角部分的短路流和颈缩部分的速度矢量图比较可知,穿孔板达到了预期的目

的,且设置穿孔板模型的 t_{10}/T 值也由原来的0.67提高到0.75,增加了11.6%,从两模型累计停留时间函数比较可知,对于穿孔板来说,其对于水力效率的提高同样包括提高颗粒 t_{10}/T 值与减少停留时间分散程度的作用,但由于仍然存在小部分短路流,所以对于降低较晚离开流场的颗粒停留时间的分散程度不如导流墙。

4 采用 CFD 数学模型优化清水池设计

4.1 四挡板流场优化模型

基于前面对影响清水池水力效率各因素的分析,建立了一个通过 CFD 计算优化的清水池模型。它包含了上面分析过的所有提高水力效率的因素,如挡板的数量、导流墙、穿孔板的合理配置。另外,为了减少出入口处速度梯度过大、紊流程度较大对颗粒传输的影响,还在出入口处设置了发散墙。由于挡板数量较少时优化潜力更大,故挡板数量设置为4个。从速度等值线图可以看出,入口处的紊流程度降低。观察整个流场的速度等值线还可以看出,流场的绝大部分区域的速度处于 $(6.41 \sim 7.70) \times 10^{-3}$ m/s 的范围内,相比基准试验来说,紊流程度也得到了很大的削减。

将该优化模型的时间累计函数与原四挡板物理模型试验的累计时间函数比较, t_{10}/T 值从未优化前的0.67提高到优化后的0.83,增加了23.3%。

4.2 七挡板流场优化模型

在挡板长度设置较短情况下,由于短路流的大量存在,挡板数量对于 t_{10}/T 值的影响并不明显。为了再次验证挡板数量对于流场 t_{10}/T 值的影响,再次对七挡板流场进行了优化。从速度矢量线图可知,在七挡板情况下流场更加均匀,挡板拐角后内侧的短路流的面积更小。七挡板优化模型的 t_{10}/T 值也由优化前基准试验的0.80提高到0.87,增加了8.4%。从四挡板优化模型和七挡板优化模型的时间累计函数比较可以看出,挡板数量的增加对于 t_{10}/T 值的提高和整个流场紊流程度的削减均有有益的提高。

5 结论

① 采用 CFD 模拟计算清水池内流体力学特征是可行的,精度可以达到要求。

② CFD 模拟计算表明:挡板长度会影响整个流场的水力效率。减短挡板长度, t_{10}/T 值降低了17.4%。而挡板长度过短时, t_{10}/T 不再随着挡板数量的增加而增大。若挡板设置过短,会在挡板每个拐角的外侧形成短路流,增加流场的紊乱程度,增大颗粒停留时间的分散性。

③ 穿孔板可以减少流体拐角处外侧的短路流的作用面积,还有利于减少拐角处流体颈缩带来的速度突变对流场水力效率的不利影响,对减少流场的紊乱程度和颗粒停留时间的分散度有益,并将 t_{10}/T 值提高了11.6%。

④ 导流墙的设置,基本上消除了流场内流体在挡板拐角处外侧形成的短路流情况,这对于提高流场的 t_{10}/T 值和减少颗粒停留时间的分散度均有明显影响,模拟试验中 t_{10}/T 提高了19.3%。

⑤ 通过对上述改进流场水力效率的措施进行整合优化,建立四挡板和七挡板优化数学模型,明显提高了整个流场的水力效率,使得流场接近活塞流的理想状况, t_{10}/T 分别达到了0.83和0.87。另外,通过对四挡板优化模型和七挡板优化模型比较,验证了挡板数量与流场 t_{10}/T 值的正相关性。

参考文献:

- [1] Hass C N. Disinfection under dynamic conditions: modification of Hom's Model for decay[J]. Environ Sci Technol, 1994, 28(6): 1367-1369.
- [2] 刘文君,张金松,刘丽君,等. 清水池改进原理与应用[J]. 给水排水, 2004, 30(5): 10-12.
- [3] 金俊伟,刘文君. 影响清水池 t_{10}/T 值的因素试验研究[J]. 给水排水, 2004, 30(12): 36-39.
- [4] Crozes Gil F, Hagstrom James P, Clark Mark M, et al. Improving Clearwell Design for CT Compliance[M]. USA: Amer Water Works Assn, 1998.

作者简介:刘文君(1968—),男,湖南桂阳人,副教授,研究方向为水质科学与技术。

电话:(010)62782196

传真:(010)62785687

E-mail: wjliu@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2005-01-18