数值模拟方法在二维沉淀池优化设计中的应用*

曾光明 葛卫华 秦肖生 黄国和 刘鸿亮

(湖南大学环境科学与工程系,长沙 410082)

摘要 简要介绍了数值方法在沉淀池悬浮物浓度计算中的应用方法,并尝试通过数值模拟过程建立起沉淀池沉降效率与几何尺寸间的关系,将其作为约束条件之一建立了一个简单的沉淀池优化设计模型。最后通过实例阐明了这种基于数值计算的优化设计模型的可行性和优势。

关键词 数值模拟 沉淀池 优化设计

1 前言

沉淀池是污水处理流程中一个必不可少的重要环节,污水处理厂的总投资中约有 25 %用于沉淀池[1]。因此对沉淀池进行优化设计,对于节省污水厂投资,减少运行费用等具有重要意义。传统沉淀池设计主要依据表面负荷进行,具有较大的主观性。故在此考虑利用数值计算方法对沉淀池内水流和悬浮物浓度进行模拟,从而建立起处理效率与沉淀池尺寸之间的非线性关系,通过优化模型的求解可以确定最佳的沉淀池设计尺寸。

2 沉淀池数值模拟方法

近二十年来,许多学者对沉淀池的模拟多集中于二维。例如 Schamber 和 Larock[2],Iman 等人[3],Adams 和 Rodi[4]等学者都应用紊流模型对二维初沉池的速率场进行了模拟研究。一般来说,沉淀池内水流流动是三维的,然而模拟过程更多的是考虑垂直截面速度对悬浮物迁移的影响,故二维模拟是可行的[5]。

2.1 计算区域

图 1 是一典型平流式矩形沉淀池的构造以及理想化计算区域。

2.2 控制方程

描绘紊流不可压缩粘性流体二维流动的方程组可以写成涡量——流函数方程组的形式(均已无量纲化),如式(1)、(2)所示[5]。

涡量方程 $$\frac{\partial \omega}{\partial t} = -\frac{\partial(u\omega)}{\partial x} - \frac{\partial(v\omega)}{\partial y} + \frac{1}{Re}\nabla^2\omega \qquad (1)$$

流函数方程 $$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = \omega \qquad (2)$$

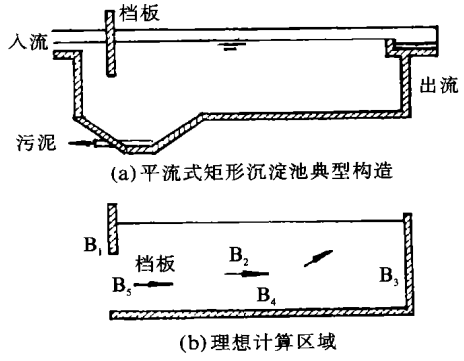

图 1 平流式矩形沉淀池示意图

其中涡量定义为 $\omega = \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x}$,流函数定义为 $\frac{\partial \psi}{\partial y} = u$, $\frac{\partial \psi}{\partial x} = -v$。

式中 u, v ——x, y 方向无量纲速度分量;

Re ——基于涡运动粘度 ν_t 的特征雷诺数。

设 H 为池深,U 为水平方向平均流速,将两者设为特征长度与特征速度,采用无量纲形式可定义 $u = u'/U$, $v = v'/U$, $Re = HU/\nu_t$,其中 u', v' 为实际流速。

2.3 控制方程离散

计算区域网格的划分如图 2 所示:

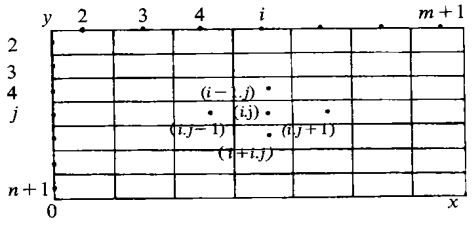

图 2 x, y 方向网格系统

图 2 展示的是一个 $m \times n$ 阶网格系统,参考图 1 中的边界,给出如下边界条件:

B_1 和 B_3 为固体非渗透表面,$\psi = 0$,ω 由具有 2

*国家自然科学基金(70171055. 50179011)、高等学校优秀青年教师科研奖励计划基金资助项目。

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

阶截差的 Woods[6] 公式确定:

$$\omega_{,1} = \frac{2(\psi_{,2} - \psi_{,1})}{(\Delta y)^2} - \frac{1}{2}\omega_{,2} \tag{3}$$

B_2 为流表面, $\psi = 1$, $\omega = 0$;

B_4 为流线, $\psi = 0$, ω 由 $\omega_{,1} = \omega^* H/U$ 确定, ω^* 为墙体涡量;

B_5 为入流区, ψ 值由(4)式[5]确定如下:

$$\psi = \begin{cases} u_c\left\{ y + 0.055\left[\left(1 - \frac{y}{0.15}\right)^{2.75} - 1\right]\right\} & 0 < y < 0.15 \\ u_c(y - 0.055) & 0.15 \le y \le H_B - 0.08 \\ u_c\left\{ y - 0.055 - 0.027\left[\frac{y - (H_B - 0.08)}{0.08}\right]^3\right\} & (H_B - 0.08) < y < H_B \end{cases} \tag{4}$$

由 $\omega = \partial u/\partial y$ 可求出 B_5 上的 ω 值:

$$\omega = \begin{cases} 11.667\left[\frac{0.15 - y}{0.15}\right]^{0.95} u_c & 0 < y < 0.15 \\ 0 & 0.15 \le y \le H_B - 0.08 \\ \frac{25}{0.08}\frac{y - (H_B - 0.08)}{0.08} u_c & (H_B - 0.08) < y < H_B \end{cases} \tag{5}$$

(4)与(5)式中, $H_B = H - H_{baffle}$, H 为沉淀池深度, H_{baffle} 为挡板淹没深度; u_c 为无量纲中心射流速率。

由于公式(1)(2)的非定常性、非线性以及复杂的边界条件,一般采取差分法求解方程组,根据情况不同可以选用不同的差分格式,本文采用交替方向隐式迎风格式离散涡量方差[7],采用高斯—赛德耳迭代法离散流函数方程[8],具体方法可以参阅有关文献。应用差分法的求解步骤是:

(a) 对求解区域划分有限差分网格;

(b) 给出边界条件,对非定常流动,还应给出 $t = 0$ 时的初始条件;

(c) 应用有限差分方法求解涡量方程(1),可以由已知的 ψ^n 求得 ω^{n+1} 的值;

(d) 利用上述求得的结果 ω^{n+1} 作为已知值,求解流函数方程式(2),可以得到新的流函数 ψ^{n+1} 值;

(e) 更新涡量边界值;

(f) 重复上述步骤,直到获得收敛的流函数值,计算流速 u, v,然后根据浓度方程计算各节处浓度值。

3 基于数值方法的沉淀池优化设计方法

常规沉淀池设计方法是先由沉降试验取得表面负荷的值 u_0,然后由(6)式确定沉淀池的表面积 A,之后再确定沉淀池的长度、宽度和深度。

$$A = \frac{Q}{u_0} \tag{6}$$

式中 Q ——污水流量。

在实际的沉淀池中,情况要比理想沉淀池复杂得多[9],使达到一定沉降效率所需要的停留时间比理论沉降时间要长,一般附加安全系数:

$$q = \left(\frac{1}{1.25} \sim \frac{1}{1.75}\right) u_0 \tag{7}$$

式中 q ——沉淀池的设计表面负荷。

由此可见根据表面负荷设计沉淀池存在相当大的主观成分,有待改进。

近年来,有些学者也提出了一些沉淀池优化设计模型,这些模型从不同角度考虑了设计沉淀池的控制因素,为更合理地设计沉淀池提供了有益的参考[10]。

沉淀池的费用多表示为其面积的函数。对初沉池,费用函数可以表示为[9]:

$$C = \alpha_1 A^{\beta_1} + \alpha_2 A^{\beta_2} \tag{4}$$

式中 C ——费用;

A ——面积;

α_1、β_1、α_2、β_2 ——费用统计系数。

函数右边第 1 项为建设费用,第 2 项为运行费用。

本研究试图通过数值计算的途径建立简单的沉淀池优化设计模型,主要步骤如下:

(a) 通过数值计算确定沉淀池长度 L、深度 H 与处理效率 η 的关系

针对具体的入水水质条件(流量 Q,悬浮物浓度 C),利用二维沉淀池数值模拟方法,通过改变沉淀池长度 L 和深度 H,计算出不同的输出浓度值 C_{out},得到一系列记录三者关系的离散的数据,设入流悬浮物初始浓度为 C_0,则效率可由下式得到:

$$\eta = \frac{C_0 - C_{out}}{C_0} \tag{9}$$

因为长度 L、深度 H 与沉降效率之间是一个复杂非线性关系。根据大量的离散数据,通过拟合,找出能反映三者之间这种关系的非线性函数:

$$\eta = f(L, H) \tag{10}$$

然后将其作为约束条件反映到优化模型中去。

(b) 优化模型的建立

由以上讨论,可以分别建立沉淀池优化的目标函数和约束条件。目标函数即费用函数,如式(8)所示,约束条件包括决策变量的上、下限约束和出水水质约束,决策变量包括沉淀池的几何尺寸,表面负荷等,这里仅需考虑几何尺寸,而不象传统的优化模型凭经验来确定表面负荷,这也许是数值计算的一个优点。于

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是,优化模型可以写为:

$$MinC = \alpha_1 A^{\beta_1} + \alpha_2 A^{\beta_2} \tag{11}$$

$$\begin{cases} H_{\min} \le H \le H_{\max} \\ r_{\min} \le \dfrac{L}{W} \le r_{\max} \\ C_{\min} \le C \le C_{\max} \\ \eta_{\min} \le \eta = f(L, H) \le \eta_{\max} \end{cases}$$

式中 W ——沉淀池宽度;

r ——沉淀池长深比。

求解这个非线性规划模型便可以得到沉淀池最优尺寸(L^*, H^*, W^*)。

4 应用实例

某工厂的工业废水量 $Q = 8\ 000\ m^3/d$,进水中悬浮物浓度 $C_0 = 1\ 600$ mg/L,处理后污水中悬浮物 C_{out} 要求不超过 70 mg/L,试作出优化设计计算。

首先根据入水水质条件,利用二维数值计算方法,通过改变沉淀池长度 L 和宽度 W,得到一系列反映效率与长宽之间的离散数据,本文共计算了 500 组数据,通过拟合,得到如下函数关系:

$$\eta = \exp\left(\frac{0.065 - H/L}{0.20}\right) \tag{13}$$

效率的最低要求为 $\eta_{\min} = (1\ 600 - 80)/1\ 600 = 95\ \%$,只考虑建设费用,参数上下限参阅有关文献[11],建立优化模型如下:

$$MinC = 0.6929A^{0.88}$$

$$\begin{cases} 4 \le L/W \le 5 \\ 95\ \% \le \exp\left(\dfrac{0.065 - H/L}{0.20}\right) \le 100\ \% \\ 1 \le H \le 3 \\ A = WL \end{cases}$$

计算结果为:

$L^* = 14$ m, $H^* = 1.5$ m,

$W^* = 2.8$ m, $A^* = 39.2\ m^2$, $C^* = 17.5$ 万元

常规设计过程如下:

取颗粒沉降速度 V_S 为 0.033 cm/s,取沉淀池深度 $H = 2$ m,长宽比 $K = 4.8$,沉淀池宽度 W 由式(14)确定[12]:

$$W = \left(\frac{HQ}{V_S K^2}\right)^{1/3} \tag{14}$$

将数据代入上式,求得沉淀池宽度 $W = 3$ m,相应的长度 $L = 14.4$ m,面积 $A = 43.2\ m^2$,由费用函数计算得建设费用为 19.1 万元。由此可见,采用数值法比传统方法节约了投资约 9.2 %,设计的尺寸更为合理与准确。

当然,实际情况要复杂的多,以上只是一个简单的例子,还需要进一步的研究和探索。利用数值方法进行沉淀池的优化设计可以不考虑表面负荷,只需在尺寸上进行优化,减少了传统设计方法的主观性,对污水处理厂沉淀池的优化设计具有一定的指导意义。

5 结论

(1) 利用二维涡量 ——流函数方程组能对沉淀池悬浮物浓度分布进行模拟,进而能够求出一定条件下的沉降效率,从而建立沉淀池尺寸与效率之间的关系,为优化设计提供依据。

(2) 利用数值方法建立沉淀池优化设计模型还是一个初步的探索,旨在找到一条新的,更为准确有效的途径,本文所阐述的模型仅仅是一个简单的示例,说明了模型建立的方法以及数值分析的应用前景,还必须经历一个反复的验证和修正的过程才能付诸实用。

参考文献

1 P. Chatellier and J. M. Cudic. A new model for wastewater treatment plant clarifier simulation. Water Research. 2000. 34(2):690～693.

2 Schamber D R and Larock B E., Numerical analysis of flow in sedimentation basins, J. Hydro. Div., ASCE, 1981. 107(5):575～591.

3 Imam. E, McCorquoudale J A and Bewtra J K., Numerical modeling of sedimentation tanks, J. Hydro. Engrg., ASCE, 1983. 109(12): 1741～1754.

4 Adams E W and Rodi W., Modeling flow and mixing in sedimentation tanks, J. Hydro. Engrg., ASCE. 1990. 116(7):895～913.

5 Emad Imam and John A. McCorquodale, Simulation of flow in rectangular clarifiers, J. Envi. Engrg. 1983. 109(3):713～730.

6 陶文铨. 计算液体力学与传热学. 北京:中国建筑工业出版社, 1991.

7 赵学端. 粘性流体力学. 北京:机械工业出版社, 1987.

8 陆金甫等. 偏微分方程差分方法. 北京:高等教育出版社, 1988.

9 章梓雄, 董曾南等. 粘性流体力学. 北京:清华大学出版社, 1998

10 Swamee P K, Tyagi A., Design of class-I sedimentation tanks, J. Envir. Engrg., ASCE, 1996. 122(1):71～73.

11 王富康等著. 工业废水和城市污水处理技术经济手册. 北京:清华大学出版社, 1992.

12 环境工程设计手册. 长沙:湖南科技出版社, 1994.

第一作者 曾光明, 男, 1962 年 12 月生。1988 年博士毕业于武汉大学(原武汉水利电力学院), 博士生导师, 教授。现在湖南大学环境科学与工程系从事教学与科研工作。

2001 - 07 - 02 收稿

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

ENGINEERING EXPERIMENT OF TREATMENT OF TOXIC ORGANIC WASTEWATER CONTAINING FORMALDEHYDE BY CATALYTIC OXIDATION PROCESS …… *Wu Chaofei et al* (7)

Abstract The wastewater containing formaldehyde belongs to the toxic organic wastewater ,and it cannot directly be disposed by biological method. So the assembled techniques including the catalytic oxidation with Fenton reagent and the filtrate with active carbon were designed owing to the wastewater treatment engineering for formaldehyde produced by the glue-washing process of Guangzhou Zhujiang Piano Manufactory and according to the composition of the wastewater. Each operating parameter was determined by both the contrastive experiment and the singlefactor 's experiment ,then was tested through the engineering scale 's reactor. After it was treated to the toxic organic wastewater containing formaldehyde ,its COD_{Cr} and the removal rate of formaldehyde can be up to 76 % and 96 % respectively ,and the removal rate of chroma is up to over 99 %. Later , it was analyzed briefly to the correlated influential factors of the catalytic oxidation with Fenton reagent applied to the glue-washing wastewater in the process of practical engineering treatment.

Keywords organic wastewater containing formaldehyde , Fenton reagent and catalytic oxidation

APPLICATION OF NUMERICAL MODELING METHOD TO THE OPTIMIZED DESIGN OF THE TWO-DIMENSIONAL SEDIMENTATION TANK …… *Zeng Guangming et al* (10)

Abstract This paper discussed the application of the numerical method to the calculation of the concentration distribution field of the suspended solid in the sedimentation tank. With the help of the numerical modeling a relationship between the sedimentation efficiency and the size of the sedimentation tank was established ,which can be used as the basis for the optimized design of the sedimentation tank. The feasibility and the advantage of the numerical method were verified with a practical example.

Keywords numerical modeling , sedimentation tank and optimized design

STUDY ON PURIFYING MINE WATER THROUGH AERATION ZONE IN SANDIFICATION AREA :A CASE STUDY IN DALIUTA MINE AREA ,SHENMU ,SHANXI ,CHINA …… *Nie Zhenlong et al* (13)

Abstract Using mine water as a resource can assuage the contradiction between water supply and water drain in a mine area. In view of the characteristics of the aeration zone and the mine water in Daliuta Colliery Area ,Shenmu ,we have done some indoor experiments with sand column. This paper discusses the feasibility of purifying the mine water through the aeration zone in a sandification area and its purification capacity.

Keywords sandification area ,aeration zone ,mine water and purification capacity

APPLICATION OF CASS PROCESS TO HYPOTHERMAL DOMESTIC SEWAGE TREATMENT …… *Sang Yimin et al* (16)

Abstract The feasibility of CASS process in hypotehermal sewage treatment was investigated in this paper. The research results indicated that as for domestic sewage treatment in low temperature (on the average ,inflow COD_{Cr} was 811. 7 mg/L ;inflow BOD_5 was 295. 7 mg/L and SS was 119. 6 mg/L) ,the average removal rates were 85. 6 % ,95. 3 % and 91 % respectively. CASS process can work in a large range of temperature (about - 5～20 ℃) ,but SV and SVI are higher in low temperature than those in common temperature ; low temperature is good for oxygen transmission and DO cyclic fluctuation is good for protecting sludge from bulking.

Keywords CASS process , hypothermal domestic sewage and application research

IMPROVING EFFICIENCY OF BIOCHEMICAL EQUIPMENT FOR TREATING WASTEWATER CONTAINING PHENOL AND CYANOGEN …… *Shi Hongwen et al* (19)

Abstract The improvement on the efficiency of the biochemical equipment by putting glucose in it to treat wastewater containing phenol and cyanogens in a gas plant was introduced in this article. The mechanism was analyzed and discussed.

Keywords wastewater containing phenol and cyanogen ,biochemical treatment ,efficiency and glucose

TREATMENT OF PYRETHROID AND HETEROCYCLIC PESTICIDES WASTEWATER WITH AN EFFECTIVE BACTERIAL FILM …… *Wang Jun et al* (21)

© 1994-2008 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net