

搅拌器内转轮半径对气液混合影响的数值模拟研究

刘玉玲, 李东旭, 李盼盼, 魏文礼

(西安理工大学 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 研究转轮半径这一因素对搅拌器内气液两相混合流特性的影响, 可为搅拌器的设计与优化提供依据。采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型结合多参考系法对单叶轮气液搅拌器内的气液混合过程进行了模拟计算。通过模拟计算得到了搅拌器在相同通气率、相同转轮转速、不同转轮半径下的气液流动速度场以及不同方向、不同截面上气含率的分布规律, 分析了不同转轮半径对搅拌器内三维流场及气含率分布的影响。模拟结果表明: 在通气率不发生改变的情况下, 转轮半径大小的改变对搅拌器内的气含率分布的影响较小, 而对速度分布有一定的影响。

关键词: 搅拌器; 转轮半径; 气液两相流; 气含率分布; 流场分布; 数值模拟

中图分类号: TQ051.7

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)02-0014-05

Numerical simulation of gas-liquid mixing flow under the influence of radius in a stirred tank

LIU Yuling, LI Dongxu, LI Panpan, WEI Wenli

(State Key Laboratory Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Research on the numerical simulation of gas-liquid mixing flow under the influence of radius in a stirred tank could provide references for the design of stirred tanks. The RNG $k-\varepsilon$ turbulence model as well as multiple reference frame method was used to simulate the mixing process of gas and liquid in the single impeller stirred tank to obtain the mixing of two phases of actual flow in a stirred tank with the same ventilation rate and rotational speed, and different radiuses. The influences of different impeller's radiuses on the distribution regularities of velocity magnitude and gas holdup in different sections were analyzed. The results of simulation showed that the changing in radius almost caused no effects on the air volume fraction, while the velocity distribution was affected to a certain extent.

Key words: stirred tank; impeller radius; gas-liquid flow; gas holdup; flow field distribution; numerical simulation

1 研究背景

作为一种常用的设备单元, 气液搅拌反应器在石油、化工、生物等领域的应用均十分广泛。近几十年来, 随着计算机技术的不断提高和计算流体力学(CFD)的快速发展, 使得 CFD 技术在搅拌反应器的仿真模拟上得到了广泛应用并取得长足进步, 国内外诸多研究者做了该方面的研究工作。钱蛟龙等^[1]通过使用 FLUENT 软件对沉淀搅拌槽内的三维流场进行了模拟, 进而分析了桨叶离底高度对槽

内流场产生的影响; 对搅拌轴的功率也进行了计算, 结果表明搅拌桨离底高度的增加利于达到更好的混合效果。白晓莉等^[2]对不同桨叶类型的 3 种搅拌器在有挡板和搅拌速率不同的工况下的搅拌特性进行了模拟研究并做了相应的实验验证, 最终对搅拌性能的影响因素进行了详尽分析。郑瑜等^[3]的研究结果表明: 径向和轴向上的剧烈流动会产生于闭式涡轮搅拌器内, 这种流场能够使得搅拌器内的物料得以充分混合。庞向飞等^[4]进行的 CFD 仿真模拟则以 PY 型直叶涡轮搅拌槽为原型, 模拟结果和

收稿日期: 2016-11-25; 修回日期: 2017-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578452、51178391); 陕西省工业科技攻关项目(2016GY-180); 陕西省科学研究计划项目(2014K15-03-05); 陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室开放基金项目(106-221223)

作者简介: 刘玉玲(1969-), 女, 陕西合阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 水污染控制理论与技术、环境水力学。
通讯作者: 魏文礼(1965-), 男, 陕西大荔人, 博士, 教授, 主要从事环境水力学、水污染控制理论与技术研究。

实验数据吻合良好;对搅拌槽中的高黏度流体流场的模拟结果表明影响流场分布的因素主要包括叶轮位置、搅拌转速以及物料性质。Sun Haiyan 等^[5]、Wang Weijing 等^[6]的数值模拟研究结果也与实验结果吻合良好。刘作华等^[7]对比研究了液相、气液两相流宏观不稳定频率的变化趋势,结果表明:液体的宏观不稳定频率与搅拌浆转速呈线性关系;气液混合流体的宏观不稳定特征频率消失,出现了谱带现象,流场拟序结构尺度变化导致混沌混合特性得到增强。宋月兰等^[8]将实验与模拟两种方法相结合,研究了一种 3 层新型组合桨搅拌槽内气液两相流的流场、气含率以及搅拌功率的特性,进而研究了搅拌转速和通气流量两个影响因素对搅拌功率和气含率造成的影响具有何种规律。李伟等^[9]通过研究得出结论:搅拌转速对液相速度分布造成的影响不能忽略而通气量对液相速度分布几乎不产生影响;尤其在叶片端面位置,二者对径向速度沿轴向的分布有明显影响并且通气量对液相径向速度变化的影响效果更加显著。方德明等^[10]用 CFD 技术对搅拌器结构进行设计和改进并取得了较好的效果,为搅拌器的设计和优化提供了参考依据。在以上所述文献的基础上,本文采用 CFD 方法对单叶轮搅拌器内气液两相流动进行仿真模拟,研究搅拌桨叶半径变化对搅拌槽内的气含率分布及流速分布的影响。

2 数学模型及计算方法

描述水流的时均控制方程的质量守恒和动量守恒方程以及 RNG $k - \varepsilon$ 紊流模型的方程如下^[11]:质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = & -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - & \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u'_i u'_j) + \rho g_i \quad (2) \\ -\rho \overline{u'_i u'_j} = & \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (3) \end{aligned}$$

式中: ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; $x_i, x_j (i, j = 1, 2, 3)$ 为笛卡尔坐标, m ; u_i 和 $u_j (i, j = 1, 2, 3)$ 表示 i 方向和 j 方向的时均速度, m/s ; p 为压强, kPa ; g_i 表示质量力分量; μ_t 为湍动黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; μ 为分子黏性系数; $u'_i u'_j$ 分别为 i, j 方向的脉动速度,

m/s 。

湍动能 k 的方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍动能耗散率 ε 的方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - \\ & C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5) \end{aligned}$$

式中系数及表达式:

$$\begin{aligned} \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \sigma_k = \\ 0.7179, \quad C_1 = 1.42 - \frac{\tilde{\eta}(1 - \tilde{\eta}/\tilde{\eta}_0)}{1 + \beta \tilde{\eta}^3}, \quad \tilde{\eta} = Sk/\varepsilon, \quad \tilde{\eta}_0 = \\ 4.38, \quad \beta = 0.015, \quad S = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2}, \quad S_{ij} = \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad \sigma_\varepsilon = 0.7179; \quad C_2 = 1.68; \quad C_\mu = \\ 0.0845 \text{ 为经验常数; } \sigma_k \text{ 为与湍动能 } k \text{ 对应的 Prandtl} \\ \text{数; } \sigma_\varepsilon \text{ 为耗散率 } \varepsilon \text{ 对应的 Prandtl 数; } S_{ij} \text{ 为平均应变} \\ \text{率。} \end{aligned}$$

本文采用欧拉-欧拉多相流模型模拟搅拌器内的气液两相流动,其中主项为分散相气体,次相为连续相水;采用多参考系(MRF)法将叶片所在计算区域分为两个部分,叶片所在区域为旋转参考系,除此之外包括挡板所在的区域则为静止参考系,对静止区域和旋转区域分别求解方程;此外,采用 VOF 法捕捉自由水面。控制方程传送项采用速度压力耦合的 PISO 算法,离散格式采用二阶迎风,所有残差收敛标准均采用 10^{-4} 。

3 物理模型及边界条件

3.1 计算区域与网格

数值模拟采用的搅拌器模型如图 1 所示,其半径为 R ,高为 $3.125R$;叶轮中心距离底面的高度是模型总高度的 30% (即 $0.2175R$),叶片尺寸长为 $0.225R$,宽为 $0.16R$,厚为 $0.025R$;中心转轴直径为 $0.0625R$;通气孔分布于底面半径为 $R/3$ 的环形面上。为了更好地进行网格划分,提高网格质量,对搅拌器内的环形分布器进行简化处理即将通气孔设于底部,直径为 $0.0125R$,并且在建模时对转轮叶片及槽内挡板进行无厚度处理。

由于叶片所在区域的体型相对复杂,采用网格分块划分的方法;搅拌器内部流场的复杂性对网格

质量要求比较高,因此除底部通气孔附近区域采用非结构网格外,其他区域的网格划分均采用结构化

网格,并且在叶片中心区域进行网格加密。网格划分如图1(b)~(d)所示。

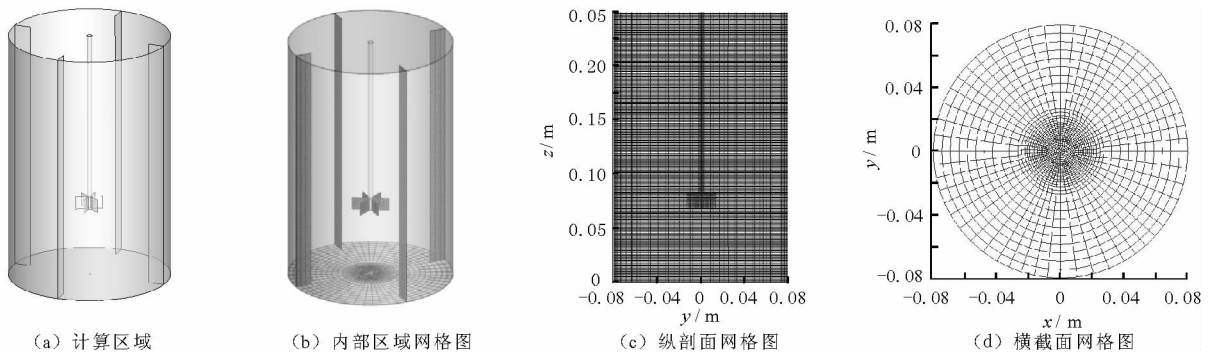


图1 计算区域和网格

3.2 边界条件

模拟计算中,通气孔采用通气速度为 0.5 m/s 的进口边界;定义流体的流动为非定常流动;对转速 n 为 450 r/min ,叶片半径分别为 0.0180 m 、 0.0225 m 、 0.0270 m 的3种工况进行模拟计算;叶片采用无滑移旋转边界;采用标准壁面函数对底面与边壁进行处理。

可以看出,搅拌桨叶附近区域的流动相对剧烈,径向涡旋总产生于叶轮周围区域并迅速向边缘扩展。模拟的单层六直叶涡轮属于径向流搅拌,所产生的速度场呈现对称分布的特征,旋转的叶轮产生径向射流,这种径向发展的射流在流动过程中夹带着周围流体撞击到槽壁后分为两部分,一部分沿着槽壁向上流动,一部分则沿着槽壁流向底部。流体流至液面或槽底后,转向径向流回轴中心,分别向下或向上流回叶轮区;该现象反映了六直叶涡轮的双循环流动形式。

4 数值模拟结果与分析

4.1 流场分布

搅拌器中心截面的流线图如图2所示。由图2

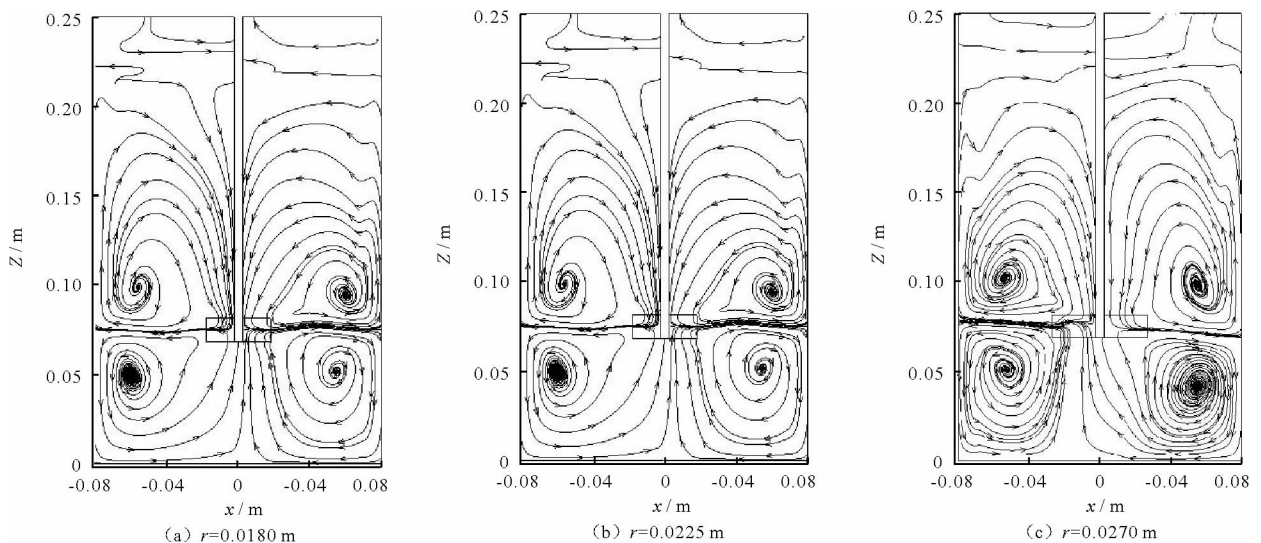


图2 搅拌器中心截面的流线图

4.2 速度分布

为清楚地描述搅拌器内的速度分布,选取与 z 轴平行并在 zx 平面上的3条直线,其距离 z 轴分别为 0.02 、 0.04 、 0.06 m ,得到3种不同转轮半径工况下此3条直线上的流速分布,如图3所示。

在转速、通气速度及其他边界条件一致而转轮半径不同的情况下,流速分布及大小变化有一定的规律。比较并分析图3(a~c)可知,搅拌器内部的高流速区域主要是集中在搅拌桨叶附近,在近液面区域流速非常小,因此可以说明搅拌桨输出的大部

分能量耗散在桨叶附近,而远离桨叶、靠近液面的区域没有得到较好的混合。随着转轮半径的增大,搅拌桨叶处的流速随之增大,并且流速变化范围也随之增大。

此外,从分析比较的结果可以得知,叶轮所在处的流动比较剧烈,并且伴随径向涡旋产生,而距离转

轮中心越远的位置处流速越小,流动相对缓慢。

4.3 气含率分布

同样地,为清楚地描述搅拌槽器内的气含率分布,选取与 z 轴平行并在 zx 平面上的 3 条直线,其距离 z 轴分别为 0.02、0.04、0.06 m,得到 3 种不同转轮半径工况下此 3 条直线上的气含率分布如图 4 所示。

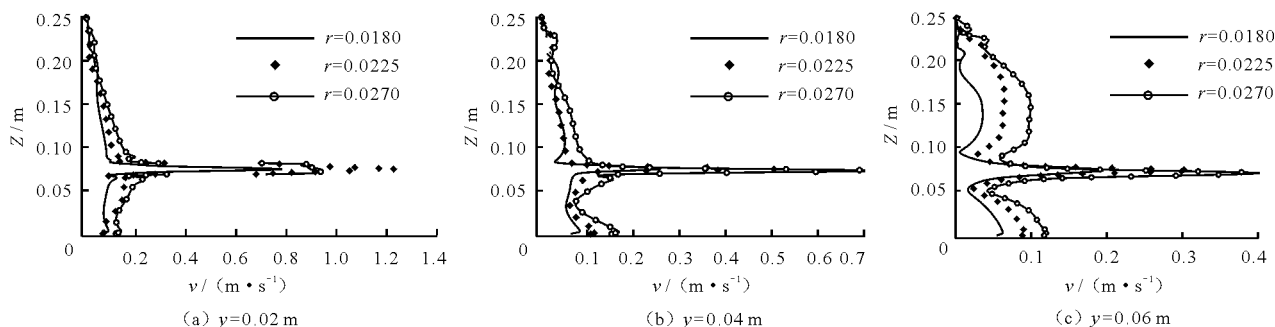


图 3 不同转轮半径 3 条直线上的速度分布图

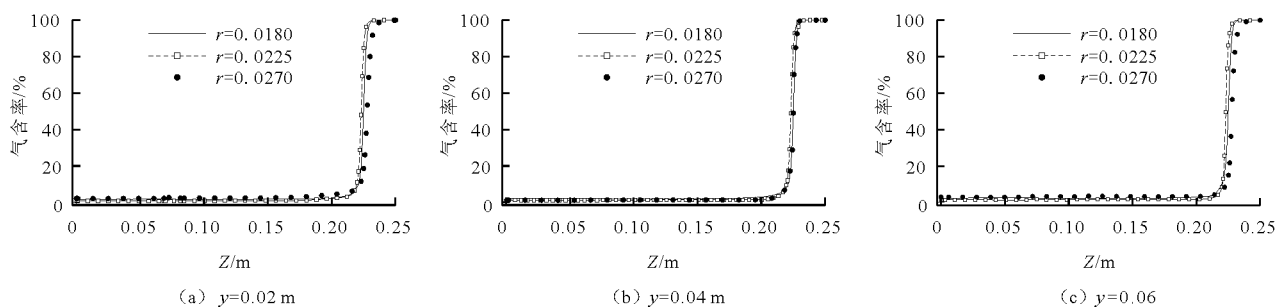


图 4 不同转轮半径 3 条直线上的气含率分布图

气含率是气液搅拌反应器内的一个重要特征参数,它反映了气体的分散、传质特性,在气液搅拌反应器的设计、放大和改造中有着重要的指导作用。图 4 表示在转速相同、叶轮安装高度相同、叶轮半径不同的条件下,径向气含率沿轴向上的分布。从图 4 中的变化规律可以看出,在 z 轴上 0~0.2 m 范围内气含率值很小,为 1%~2% 左右,并且随着高度的增加气含率几乎不发生变化;此外可以看出,转轮半径的增大对该范围内气含率无明显影响。在 0.20~0.22 m 高度范围内气含率开始有所增加;在 0.22 m 界面处由于水面刚好位于 0.22 m 高度处并与大气充分接触,气含率变化十分明显;此时转轮半径的大小对气含率也无明显影响。在 0.22~0.25 m 高度范围内气含率为 100%,因为在自由液面以上分布的均为空气。

5 结 论

使用 CFD 方法,采用 RNG 湍流模型结合多参考系法对转轮半径不同的单层六直叶涡轮内气液两

相流进行数值模拟计算,得到如下结论:

(1) 单层六直叶涡轮中的气液两相流混合产生对称分布的速度场具有双循环流动的特点。

(2) 转轮半径的大小对流速分布有一定影响。在搅拌桨叶附近区域的流速随着转轮半径的增大而增大;并且距离转轮中心越远的位置处,流速越小。

(3) 转轮半径的大小对搅拌器内气含率分布的影响甚微。

参考文献:

- [1] 钱蛟龙, 雷泽勇. 沉淀搅拌槽三维流场数值模拟[J]. 机械工程师, 2015(3): 30-32.
- [2] 白晓莉, 唐克伦, 李辉, 等. 基于 Fluent 的搅拌器三维流场数值模拟及其实验研[J]. 机械工程师, 2015(4): 17-21.
- [3] 郑瑜, 刘雪东, 刘文明. 闭式涡轮搅拌器搅拌釜内流场的数值模拟[J]. 化工机械, 2010, 37(2): 197-200.
- [4] 庞向飞, 梁红野, 陈彦泽. 直叶涡轮搅拌槽中流场的数值模拟[J]. 石油化工设备, 2003, 32(5): 1-4.

- [5] Sun Haiyan, Wang Weijing, Mao Zaisha. Numerical simulation of the whole three-dimensional flow in a stirred tank with anisotropic algebraic stress model[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2002, 10(1): 15-24.
- [6] Wang Weijing, Mao Zaisha. Numerical simulation of gas-liquid flow in a stirred tank with a Rushton impeller[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2002, 10(4): 385-395.
- [7] 刘作华, 宁伟征, 孙瑞祥, 等. 搅拌槽内液相/气-液两相流体宏观不稳定性的对比[J]. 化工进展, 2010, 29(S2): 100-105.
- [8] 宋月兰, 高正明, 李志鹏. 多层新型浆搅拌槽内气-液两相流动的实验与数值模拟[J]. 过程工程学报, 2007, 7(1): 24-28.
- [9] 李伟, 刘跃进, 孔丽娜, 等. Rushton 搅拌釜内的气含率分布及其流动特性的模拟[J]. 化工学报, 2011, 62(10): 2691-2698.
- [10] 方德明, 陈涛, 杨象岳, 等. 基于 CFD 流场分析的反应釜搅拌器结构改进[J]. 轻工机械, 2014, 32(2): 95-98.
- [11] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2006.
- [12] 刘玉玲, 赵小军, 魏文礼. 搅拌槽内气液流动大涡数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2014, 31(3): 381-386.
- [13] Kerdouss F, Bannari A, Proulx P, et al. Two-phase mass transfer coefficient prediction in stirred vessel with a CFD model[J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32(8): 1943-1955.
- [14] Khopkar A R, Tanguy P A. CFD simulation of gas-liquid flows in stirred vessel equipped with dual Rushton turbines: influence of parallel, merging and diverging flow configurations[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(14): 3810-3820.

(上接第 13 页)

- [7] 张静, 柯东胜, 方宏达, 等. 汕头港海域氮、磷营养盐环境容量及排放总量控制的研究[J]. 大连海洋大学学报, 2012, 27(3): 247-254.
- [8] 王艳, 魏爱泓, 张丽, 等. 苏北灌河口邻近海域氮、磷污染物环境容量研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2015, 45(6): 78-84.
- [9] 王晓玮, 赵骞, 赵仕兰. 海洋环境容量及入海污染物总量控制研究进展[J]. 海洋环境科学, 2012, 31(5): 765-769.
- [10] Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. Learning representations by back propagating errors[J]. Nature, 1986, 323: 533-536.
- [11] Hornik K, Stinchcombe M, White H. Multilayer feedforward networks are universal approximators. Neural Networks, 1988, 2(5): 359-475.
- [12] Nakatsuji K, Yamanaka R, Nishida S. Numerical simulation of seasonal baroclinic circulation and dispersion process of COD in the Bohai Sea. The First Asian and Pacific Coastal Engineering Conference, Dalian, China. Dalian University of Technology Press, 2001, 369-378.
- [13] 朱静, 陈新永, 孙丽. 曹妃甸海域水环境容量计算与陆源污染控制研究[J]. 中国水运, 2014, 14(6): 152-155.
- [14] 赵俊生, 王桂云, 陈则实, 等. 海洋环境有效利用的分析研究——北部湾广西沿岸海域[M]. 北京: 海洋出版社, 2002.
- [15] 林卫清, 卢士强, 矫吉珍. 长江口及毗邻海域水质和生态动力学模型与应用研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(5): 522-531.
- [16] 李明昌, 张光玉, 司琦, 等. 海域组合单元水质模型多污染源浓度优化反演方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(增): 150-158.