

曝气池内气液混合液两相流力学特性的数值模拟

魏文礼, 李盼盼, 白朝伟, 刘玉玲

(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: 采用欧拉-欧拉多相流模型和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对曝气池内气液两相流力学特性进行数值模拟研究。速度与压力的耦合求解采用了 Phase-Coupled-SIMPLE 算法。对中心截面 ($y=0.025\text{ m}$) 在 ($z=0.71\text{ m}$) 测线上垂向速度的模拟值与实验值进行比较分析, 结果吻合较好。结果表明: 当表观气速较小时, 进口气速对曝气池上方混合液的垂向速度影响较小; 当表观气速较大时, 整个曝气池中心截面 ($y=0.025\text{ m}$) 呈现中心垂向速度大, 靠近两侧边壁的垂向速度小, 且为负值的规律。并且发现气泡在上升的过程中由于附壁效应容易产生摆动, 表观气速越大, 附壁效应越明显。通过对曝气池内不同气体速度下池内力学特性的分析研究, 以期对曝气池的设计运行提供参考。

关键词: 曝气池; 气液两相流; 垂向速度; 数值模拟

中图分类号: 131.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)06-0127-05

Numerical simulation the hydraulic characteristics of gas-liquid two-phase mixture flow in an aeration tank

WEI Wenli, LI Panpan, BAI Zhaowei, LIU Yuling

(Shaanxi Provincial Key Laboratory of ecological water conservancy project in Northwest Arid Region,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The paper used Euler-Euler multi-fluid model and standard turbulence model to simulate the mechanical property of gas-liquid mixture in an aeration tank. The coupling solution of velocity and pressure used Phase-Coupled-SIMPLE algorithm. The following results are that the comparison results of simulated vertical velocity and the experimental data along the line $z=0.71\text{ m}$ in the center section ($y=0.025\text{ m}$) are in good agreement. the inlet gas velocity has less impact on the vertical speed of upper mixture fluid in the aeration tank when the superficial gas velocity is smaller. But when the superficial gas velocity is larger, the middle section of the whole aeration tank shows the law that the vertical velocity close to the center is great, and that close to both side walls is small and negative values. The rising bubbles can easily appear swing due to wall attachment effect, and the greater the superficial gas velocity, the more obvious is the wall attachment effect. The analysis result of mechanical properties in the aeration tank at different gas velocities can provide some reference value for the design and operation of aeration tank.

Key words: aeration tank; gas-liquid flow; vertical velocity; numerical simulation

随着经济社会的发展, 水体污染问题越来越严重, 污水处理问题也越来越受到重视。其中在各种污水处理方法中, 活性污泥法是处理生活污水、城市污水以及有机工业废水最常用的工艺。曝气池是一种活性污泥法污水处理工艺, 是活性污泥系统的核

心设备, 而在当前污水处理技术领域中, 活性污泥法^[1-2]是应用最为广泛的处理污水技术之一。

Wei Feng 等^[3]和王树立等^[4]通过实验的方法对曝气池内液体的流速和含气率进行了测量分析。庄健等^[5]以标准氧总转移系数作为评价指标, 在小

收稿日期: 2015-07-09; 修回日期: 2015-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578452、51178391); 陕西省科学研究计划项目(2014K15-03-05); 陕西省教育厅重点实验室科学研究计划项目(15J5063)

作者简介: 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。

试装置中对不同曝气密度的曝气系统充氧性能进行评价。结果表明曝气系统标准氧总转移系数随曝气密度增大而显著增大,但同时需要考虑到曝气系统的微孔曝气器布置方式。而随着计算流体力学的发展,越来越多的学者采用数值模拟的方法对曝气池进行研究^[6-8]。于江忠等^[9]采用非稳态 VOF 模型及标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟,在相同膜片直径、曝气强度、不同孔眼数量情况下,对比了曝气池内气相体积分数、气液两相流场速度以及流动规律。结果表明,在模拟工况下,孔眼数量为 15 时,曝气效果最好。肖柏青等^[10]采用大涡模拟和欧拉-拉格朗日方法建立了曝气池两相流数学模型。基于模型实验得到的工程上常用的微孔曝气盘的气泡尺寸分布,在数值模拟中设定了 3 种气泡尺寸分布方案,比较了不同的气泡尺寸设定方案对计算曝气池内水流流速和气含率等参数的影响。结果表明气泡尺寸对水流流场具有较大的影响,而对气含率分布的影响在大部分区域不明显,只在气含率峰值附近影响较显著。

本研究以文献[11]的曝气池模型为基础,利用 CFD 软件 fluent 15.0 进行模拟。采用欧拉-欧拉双流模型结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,对曝气池内气液两相流进行模拟,分析其流场特性、垂向速度及其湍动能的分布规律,并且发现模拟值与实验值吻合较好,以期对曝气池的设计运行提供更多参考。

1 数学模型

欧拉双流模型的守恒方程由质量守恒方程和动量守恒方程组成^[12-14]。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{q=1}^n \dot{m}_{pq} \quad (1)$$

式中: t 为时间; n 为相数; α_q 、 ρ_q 和 $\vec{v}_q$ 分别为 q 相的体积分数、密度和速度。 $\dot{m}_{pq}$ 为 p 相到 q 相的质量传递。因此,从质量守恒方程可得:

$$\dot{m}_{pq} = -\dot{m}_{qp} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{pp} = 0 \quad (3)$$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} +$$

$$\sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq}) + \alpha_q \rho_q (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \quad (4)$$

式中: p 为所有相共享的压力; $\vec{R}_{pq}$ 为相间相互作用

力; $\vec{F}_q$ 为外部体积力; $\vec{F}_{lift,q}$ 为升力; $\vec{F}_{vm,q}$ 为虚拟质量力; $\vec{v}_{pq}$ 为 p 相相对于 q 相的速度; $\vec{\tau}$ 为第 q 相的压力应变张量,其计算公式为:

$$\vec{\tau} = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \vec{v}_q^T) + \alpha_q (\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I} \quad (5)$$

式中: μ_q 为 q 相的剪切力黏度; λ_q 为 q 相的体积黏度; $\vec{I}$ 为单位张量。

q 相的剪切力黏度 μ_q 的计算公式为:

$$\mu_q = \rho_q C_\mu \frac{k_q^2}{\varepsilon_q} \quad (6)$$

式中: C_μ 为常数,其值为 0.09; k_q 为 q 相的紊动动能; ε_q 为 q 相的紊动动能的耗散率。

q 相的紊动动能 k_q 和耗散率 ε_q 可以通过 $k-\varepsilon$ 紊流模型获得,其方程如下:

标准 $k-\varepsilon$ 模型是从实验中总结得出的半经验公式,主要基于紊流动能 k 和紊动能耗散率 ε ,它是目前工程流场计算中使用最广泛的紊流模型。紊流动能 k 和紊动能耗散率 ε 是两个基本未知量,方程分别为: k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (7)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

式中: u_i 是速度在 i 方向上的分量; ρ 为流体密度; μ 为分子运动粘度; μ_t 为湍动粘度,它可表示 k 和 ε 的函数: $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, 经验常数 $C_\mu = 0.09$; G_k 是因平均梯度影响湍动能 k 的产生项; G_b 为由浮力作用引起的紊动能产生项; Y_M 为可压缩的湍流脉动因膨胀而产生的对总耗散率的影响。 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数,分别为 1.44、1.92 和 0.09, $\sigma_k = 1.0$ 和 $\sigma_\varepsilon = 1.3$, 分别为与湍动能和耗散率对应的 Prandtl 数。

以上方程组构成了求解曝气池流场分布规律的封闭方程组,根据实际工况施加相应的边界条件后,构成该方程组的定解问题。

2 数值模拟

2.1 计算模型

模拟采用的模型尺寸为 0.2 m × 0.04 m × 1 m

的矩形曝气池,模型区域图见图1。在曝气池底部均匀布置直径为0.3 mm的31个孔以便于均匀曝气,初始液面高度为1m,气体表观速度分别为0.7、2.4、4.2、5.6和8.0 cm/s 5种工况,气泡直径为4 mm,采用欧拉-欧拉多相流模型结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟。模拟数据的测量均在中心截面 $z=0.71$ cm 的测线上。

2.2 网格划分

初始计算网格由 GAMBIT 软件生成,由于进口通气孔的尺寸较整体模型尺寸很小,进口的小圆形与整个矩形底面的网格很难衔接,故使得底部0.05 m以下为非结构化网格,其余部分为结构化网格,网格总单元数为73156个,如图2所示。

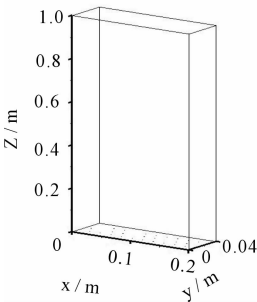


图1 计算区域图

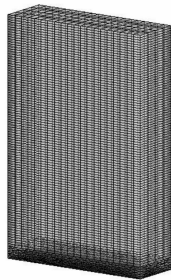


图2 计算网格图

2.3 边界条件及求解方法

进口为速度进口,进口气体的表观速度分别为0.7、2.4、4.2、5.6和8.0 cm/s 5种工况,并假设气泡均匀准入,不考虑气泡破裂和聚合。出口采用只允许气体通过的“degassing”出口边界条件,“degassing”出口边界条件建立的模型只有水的区域,所以网格数量较之“pressure outlet”出口边界较少^[15],有的模型甚至网格减少一半^[16],因此本模拟选择“degassing”出口边界条件较合理。模型底面和四周区域固体壁面上的边界条件按“标准壁面函数”给定。

采用欧拉(Euler)多相流模型结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,模型的离散采用有限体积法,速度与压力耦合方程组求解时使用 Phase Coupled SIMPLE 算法,计算时间步长为0.005 s,将计算5s后的结果作为欧拉模型的初始计算环境,5s后加上拖曳力和上升力继续计算,其中拖曳力系数为0.984,上升力系数为0.03^[11]。

3 结果分析与讨论

3.1 垂向速度比较分析

采用欧拉-欧拉双流体模型结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型进行模拟研究,对中心截面处 $z=0.71$ m 测线上的垂向速度与实验值进行比较,如图3所示。

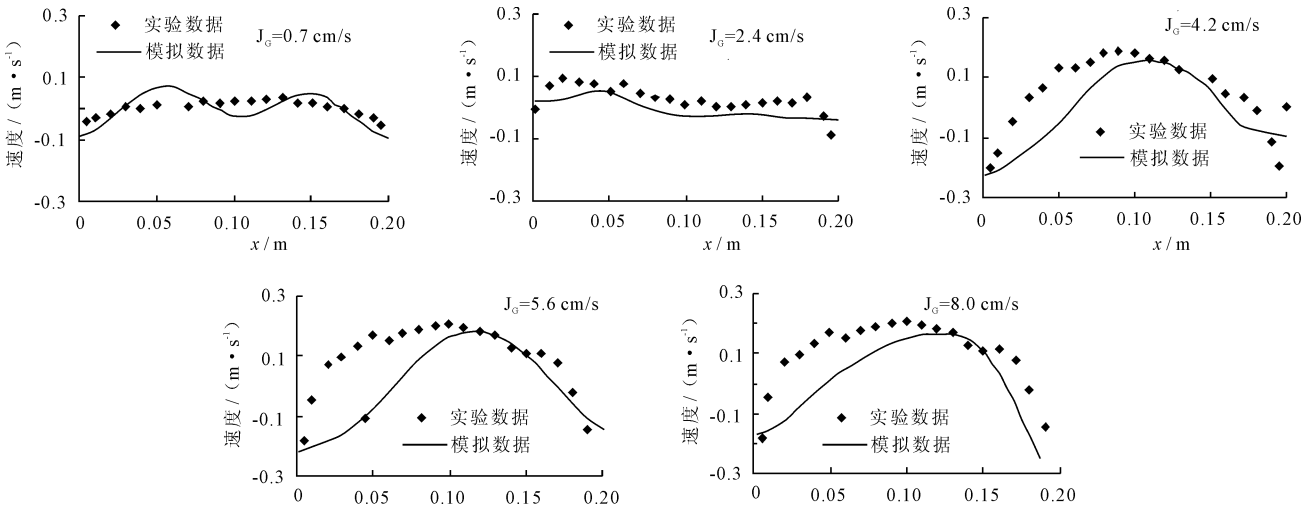


图3 数值模拟与试验的垂向速度值比较

如图3所示,5种表观进口速度工况下模拟的垂向速度与实验值的吻合较好。进口表观气速为0.7 cm/s的模拟数值在实验值的附近出现了微小的均匀的波动,表观气速为2.4 cm/s的模拟数值与实验值吻合较好,但还是在边壁处出现了差异,边壁处流体特性的模拟一直是数值模拟的难点,与壁面

的处理及网格的划分都有密切的关系。表观气速为4.2和5.6 cm/s时较好的模拟了其垂向速度的峰值,但是峰值左侧的数值差异较大,峰值稍向右偏移,这也是由于气泡上升过程中的周期性变化及左右摆动引起的。表观气速为8.0 cm/s的模拟值和实验值趋势一致,整体吻合较好。从不同表观气速的

垂向速度比较值可以发现,当选取中心截面较高位置($z=0.71\text{ m}$)时,表观气速较小时其垂向速度值也较平缓,没有出现较大的波动,这是由于较小的进口气速对曝气池上方的气体影响甚微。而当表观气速超过 4.2 cm/s 时测线上的垂向速度出现了明显的峰值,表现出中间大两边小,并且中间流速大的位置速度为正值,而靠近两侧边壁的速度为负值,虽然曝气池底面为均匀曝气孔曝气,但由于边壁处和中心位置的压强不同,导致气流中心还是在曝气池中心位置,曝气池内整体的流速分布就是中间位置气速大,两侧边壁混合液的速度小,由于水流的回流速度产生负值。

3.2 流场分析

选取曝气池表观气速为 0.7 、 4.2 和 8 cm/s 3 种工况,分析其中心截面的流线分布图,如图 4 所示。

如图 4 所示,当表观气速为 0.7 cm/s 时,在曝气池底部形成两个左右对称的回流,在曝气池上方没有大的涡流。而表观气速为 4.2 cm/s 的流线图在曝气池底部形成一个小回流,中间位置靠左壁形成一个大的逆时针旋流,在曝气池右上方形成一个小回流,整体流线紊乱,这也是由于曝气池底面均匀曝气,使得曝气池内气泡在上升的过程中由于附壁效应发生摆动,表观气速为 8 cm/s 的流线图更明显的表现了这一现象,在曝气池底面中间位置气泡向上流动,左右两侧形成两个不对称的旋流,再向上流动左右两侧又分别产生两个不对称的小的旋流,整个曝气池内的流线图旋流较多,流线紊乱。观察 3 个不同表观气速的流线图发现表观气速越大产生的附壁效应越明显,这也是由于气体上升速度越大,水流的紊动越明显,水流的左右摆动也越大。

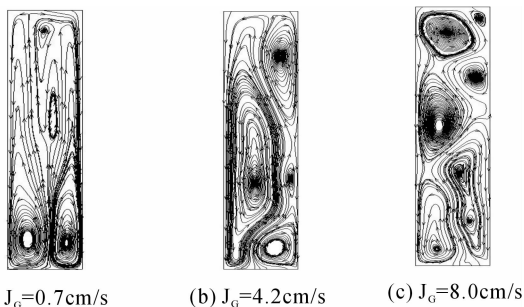


图 4 中心截面的流线图

3.3 流速云图的比较

选取曝气池表观气速为 0.7 、 4.2 和 8 cm/s 三种工况,分析其中心截面的垂向速度分布云图,如图 5 所示。

图 4 的流线和图 5 的流速云图都同时显示了气泡的流动情况,当表观气速为 0.7 cm/s 时,在曝气池下方的中心流速较大,气泡继续向上流动由于附壁效应使得其分成两股气流靠近边壁向上流动。而表观气速为 4.2 cm/s 时从曝气池底部就一直靠近右侧边壁流动,在中上方位置又慢慢的开始向左偏离。从表观气速为 8 cm/s 的垂向速度云图发现,在曝气池底层即气体刚从通气孔出来的时候混合液的垂向速度很大,稍向上流动气泡主流向左边壁靠拢偏移,进而向上又向相反的方向偏移。可以发现表观气速越大混合液在上升的过程中越易产生摆动,产生的附壁效应越明显。

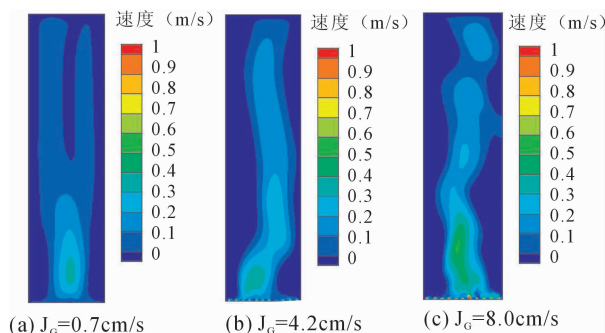


图 5 中心截面的垂向速度云图

4 结 语

本研究采用欧拉-欧拉双流体模型结合标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型对曝气池内气液两相流进行模拟研究,对特征断面的垂向速度模拟值与试验值进行比较,发现数值模拟能较好的模拟曝气池内的气液两相流动。

当曝气速度较小时,气体对曝气池上方的流速影响甚微,当曝气速度大于 4.2 cm/s 时,曝气池内流速呈现出中间流速大,两侧边壁流速小,且为负值。

曝气池内气泡在上升的过程中会发生摆动,产生明显的附壁效应,通过不同表观气速的流线图及流速云图的分析发现,表观气速越大附壁效应越明显。

参考文献:

- [1] 张自杰,林荣忱,顾夏声. 排水工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [2] 代学民,王霞,马云霞,等. 浅谈活性污泥法的发展和演变[J]. 河北建筑工程学院学报, 2004, 22(2): 25-27.
- [3] Wei Feng, Wen Jiangping, Fan Jinghua, et al. Local hydrodynamics of gas-liquid-nanoparticles three-phase fluidization[J]. Chemical engineering science, 2005, 60(24): 6887-6898.
- [4] 王树立,张敏卿,范敏英. 鼓泡塔内气液两相流速度分

- 布[J]. 抚顺石油学院学报, 1997, 17(3): 27-30+63.
- [5] 庄健,王洪臣,刘国华,等. 曝气密度对曝气系统充氧性能的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(7): 50-54.
- [6] Gimbut J, Rielly C D, Nagy Z K. Modelling of mass transfer in gas-liquid stirred tanks agitated by Rushton turbine and CD-6 impeller: a scale-up study [J]. Chemical engineering research and design, 2009, 87(4): 437-451.
- [7] Achouri R, Mokni I, Mhiri H, et al. A 3D CFD simulation of a self-inducing Pitched Blade Turbine Downflow[J]. Energy conversion and management, 2012, 64(12): 633-641.
- [8] Yang Ning, Wu Zongying, Chen Jianhua, et al. Multi-scale analysis of gas-liquid interaction and CFD simulation of gas-liquid flow in bubble columns[J]. Chemical engineering science, 2011, 66(14): 3212-3222.
- [9] 于江忠,单继宏,孙毅,等. 微孔曝气器膜片最优开孔数的数值模拟[J]. 机械制造, 2014, 52(1): 10-12.
- [10] 肖柏青,张法星,戎贵文. 气泡尺寸对曝气池内气液两相流数值模拟的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 2006-2010.
- [11] Simonnet M, Gentric C, Olmos E, et al. CFD simulation of the flow field in a bubble column reactor: Importance of the drag force formulation to describe regime transitions [J]. Chemical engineering and processing: process intensification, 2008, 47(9-10): 1726-1737.
- [12] 吴莹莹. 氧化沟流场和溶解氧 CFD 模拟研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2009.
- [13] 张士乔,尹则高,毛根海. 弯曲圆形管道紊流的数值模拟[J]. 水力发电学报. 2005, 24(3): 61-65.
- [14] 周俊波,刘洋. FLUENT 6.3 流场分析从入门到精通[M]. 机械工业出版社, 2012.
- [15] Zhang D, Deen N G, Kuipers J A M. Numerical simulation of the dynamic flow behavior in a bubble column: a study of closures for turbulence and interface forces [J]. Chemical engineering science, 2006, 61(23): 7593-7608.
- [16] Dhotre M T, Niceno B, Smith B L. Large eddy simulation of a bubble column using dynamic sub-grid scale model [J]. Chemical engineering journal, 2008, 136(2-3): 337-348.

(上接第126页)

- [2] 张明,柏绍光. 对数正态分布参数估计的积分变换矩法应用[J]. 人民长江, 2011, 42(19): 21-23.
- [3] 肖可以,宋松柏. 最大熵原理在水文频率参数估计中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 197-205.
- [4] 金光炎. 水文频率分析述评[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 319-327.
- [5] 谢平,郑泽权. 水文频率计算有约束加权适线法[J]. 武汉水利电力大学学报, 2000, 33(1): 49-52.
- [6] 周爱霞,张行南. 优化适线法在水文频率分析中的应用[J]. 人民长江, 2007, 38(6): 38-39.
- [7] 韩振英. 遗传优化电子适线法推算最大设计洪峰流量[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007, 4(1): 44-47.
- [8] 任伯帜,龙腾锐. P-III型分布参数估计的改进混合遗传优化适线法[J]. 重庆大学学报, 2005, 28(4): 85-85+89.
- [9] 刘力,周建中,杨俊杰,等. 粒子群优化适线法在水文频率分析中的应用[J]. 水文, 2009, 29(2): 21-23.
- [10] 姚德仓,宋松柏. 设计洪水频率曲线的粒子群优化适线法研究[J]. 水土保持通报, 2007, 27(6): 112-115.
- [11] 李宏伟,宋松柏. 蚁群算法在水文频率曲线参数计算中的应用[J]. 人民黄河, 2009, 31(4): 38-40.
- [12] 陈南祥,甘甜,杜青辉. SCEM-UA 优化算法在水文频率分析中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(8): 210-214.
- [13] 宋松柏,康艳. 3种智能优化算法在设计洪水频率曲线适线法中的应用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(2): 205-209.
- [14] Cuevas E, Cienfuegos M, Zaldívar D, et al. A swarm optimization algorithm inspired in the behavior of the social-spider, Expert Systems with Applications, 2013, 40(16): 6374-6384.
- [15] 王文川,雷冠军,尹航,等. 基于群居蜘蛛优化算法的水库防洪优化调度模型及应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 48-51.