不规则园林池塘水力循环的运行优化

袁文麒,张维佳,王绍春

(苏州科技学院环境工程与科学系,江苏 苏州 215011)

摘要:园林池塘水面变化极不规则,采用有限体积法求解实施人工水力循环措施的园林池塘水体流动数学模型,研究不同运行工况背景下水流的流场情况。针对原运行工况水体滞流、水流均匀性差及中心水域流速过小问题,提出优化运行工况并进行模拟计算及分析。结果表明:通过调节水力循环系统的出水口流量,使其中一个出水口流量为另一出水口的 1/3,此时水流最均匀,为最佳运行工况。

关键词:水力循环;园林池塘;数学模型;有限体积

中图分类号:O357.5 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-6933(2008)03-0001-03

Optimization of hydraulic circulation in irregular garden waters

YUAN Wen-qi, ZHANG Wei-jia, WANG Shao-chun

(*Department of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou* 215011, *China*)

Abstract: The shape of water bodies in classical gardens is irregular. In order to analyze the flow field in irregular garden waters under different pumping system operating conditions, a mathematical hydrodynamic model was solved using the finite volume method. To avoid such problems under original conditions as the stagnancy of water, non-uniform flow, and the extremely small velocity in central waters, optimum conditions were identified and further studied. The results indicate that, by regulating the hydraulic circulation system, an optimal condition with uniform flow can be obtained under which the discharge at one outlet is 1/3 of the discharge at the other outlet.

Key words: hydraulic circulation; garden waters; mathematical model; finite volume method

拙政园是苏州古典园林的代表,园中的水体被誉为园林之魂。为了与园中景观相协调,园中池塘水体变化极不规则,复杂的池塘情况使得水流流动变得复杂,产生环流、绕流等,这些水流特征对人工水力循环措施水流均匀流动具有重要的影响。本文运用 FLUENT 商用软件,采用有限体积法[1],对园林不规则池塘中水流流动进行数值模拟分析,着重对运行工况的优化给出定量分析结果。

1 园林池塘水体流动控制方程

园林池塘水流动控制方程包括水动力学控制方程和湍流模型输运方程[2-3]。

连续性方程:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial (hU)}{\partial x}+\frac{\partial (hV)}{\partial y}=0$$

运动方程:

$$\begin{cases}\dfrac{\partial (hU)}{\partial t}+\dfrac{\partial (hUU)}{\partial x}+\dfrac{\partial (hUV)}{\partial y}=-gh\dfrac{\partial (h+z_b)}{\partial x}+\dfrac{1}{\rho}(\tau_x^s-\tau_x^b)+fVh+\dfrac{1}{\rho}\left[2\dfrac{\partial}{\partial x}\left(h\mu\dfrac{\partial U}{\partial x}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}h\mu\left(\dfrac{\partial U}{\partial y}+\dfrac{\partial V}{\partial x}\right)\right]\\ \dfrac{\partial (hV)}{\partial t}+\dfrac{\partial (hUV)}{\partial x}+\dfrac{\partial (hUU)}{\partial y}=-gh\dfrac{\partial (h+z_b)}{\partial y}+\dfrac{1}{\rho}(\tau_y^s-\tau_y^b)-fUh+\dfrac{1}{\rho}\left[2\dfrac{\partial}{\partial y}\left(h\mu\dfrac{\partial V}{\partial y}\right)+\dfrac{\partial}{\partial x}h\mu\left(\dfrac{\partial U}{\partial y}+\dfrac{\partial V}{\partial x}\right)\right]\end{cases}$$

基金项目:国家高技术研究发展计划(863)(2003AA601070);江苏省"十五"社会发展重点项目(BS2004048)

作者简介:袁文麒(1982—),男,江苏苏州人,硕士研究生,研究方向为水污染控制。E-mail:blueround@163.com

标准 $k\sim\varepsilon$ 湍流模型输运方程：

$$\begin{cases}\dfrac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\dfrac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}=\dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\dfrac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\dfrac{\partial k}{\partial x_j}\right]+\\ \qquad G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_k\\ \dfrac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\dfrac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}=\dfrac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\dfrac{\mu_t}{\sigma\varepsilon}\right)\dfrac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\\ \qquad C_{1\varepsilon}\dfrac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\dfrac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon\end{cases}$$

$$U=\frac{1}{h}\int_{z_b}^{h+z_b}u\,\mathrm{d}z\qquad V=\frac{1}{h}\int_{z_b}^{h+z_b}v\,\mathrm{d}z$$

式中：h 为水深；U、V 为沿水深的平均流速；x、y 为平面坐标；t 为时间；g 为重力加速度；ρ 为水的密度；μ 为动力黏度系数；μ_t 为湍流黏度系数；τ_x^s，τ_y^s 分别为表面风应力在 x、y 方向上的分量；τ_x^b、τ_y^b 分别为流体应力在 x、y 方向上的分量；G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项；G_b 为由于浮力引起的湍动能 k 的产生项；Y_M 为可压湍流中脉动扩张的贡献；$C_{1\varepsilon}$、$C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数；σ_k 和 σ_ε 分别为湍动能 k 和耗散能 ε 对应的 Prandtl 数；S_k、S_ε 为用户自定义的源；z_b 为底部高程；f 摩擦系数；u_i 时均流速。

2 计算模型及离散

调查表明，拙政园园林水面占整个园林面积的 3/5，水体长期处于滞流状态，园林水系相对独立于周围河道水体，园林池塘内水体呈静止状态，水体水量约 4 000 m^3，水面面积约 6 150 m^2，平均水深 0.65 m。水体内布置由 1 个取水口、3 个出水口和 1 个辅助提升泵组成的人工水力循环管道系统，如图 1 所示。在该系统作用下，园林池塘水流流动。

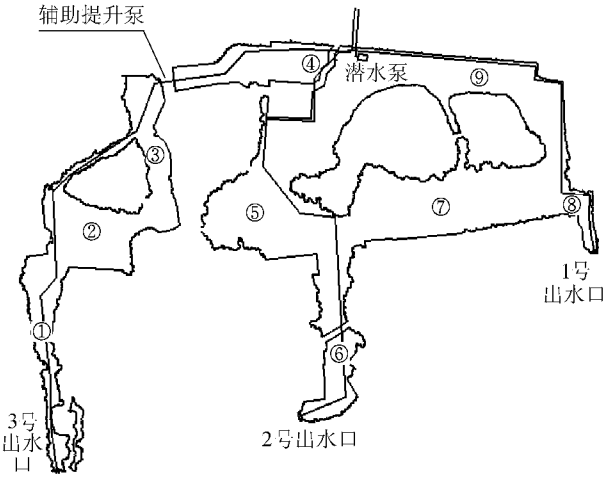

图 1 人工水力循环管线布置

有限体积方法可以求解复杂的初、边值的微分方程，导出的离散方程可以保证具有守恒特性，而且离散方程系数物理意义明确，能够适应园林池塘复杂的边界离散，故本文采用有限体积方法对不规则园林池塘水流数学模型进行求解。有限体积数值模拟中，网格划分是关键一步。为保证计算精度，采用非结构网格离散计算区域。非结构网格的节点以一种不规则的方式布置在流场中[4]。这种网格虽然生成过程比较复杂，但却有着极大的适应性，尤其对具有复杂边界的流场计算问题特别适用[5]。整个计算区域网格离散共 1 751 530 个单元，889 416 个节点。

计算中的边界条件：池塘边界的速度为 0，各出水口原运行工况，见表 1；各出水口优化运行工况，见表 2。出口压力假定为 0。物性参数为：20℃时，水的密度为 998.2 kg/m^3，动力黏度为 1.005×10^{-3} Pa·s。

原运行工况，出水口流速为 5.70×10^{-2} m/s；优化运行工况，出水口流速为 8.55×10^{-2} m/s。园林池塘水面极不规则，外界条件变化复杂，采用标准 $k\sim\varepsilon$ 湍流模型，方程组求解采用 SIMPLE 算法，能够对水流模拟计算更符合实际情况。

表 1 原运行工况出水口流速 $\times10^{-2}$m/s

工况	出水口			辅助提升泵
	1 号	2 号	3 号	
一	0.00	0.00	2.85	2.85
二	5.70	0.00	2.85	2.85
三	0.00	5.70	2.85	2.85
四	5.70	5.70	2.85	2.85

表 2 优化运行工况出水口流速 $\times10^{-2}$m/s

工况	出水口			辅助提升泵
	1 号	2 号	3 号	
优化一	8.55	0.00	4.99	4.99
优化二	0.00	8.55	4.99	4.99
优化三	7.13	7.13	4.99	4.99
优化四	8.55	2.85	4.99	4.99
优化五	8.55	5.70	4.99	4.99
优化六	2.85	8.55	4.99	4.99
优化七	5.70	8.55	4.99	4.99

3 不规则池塘水流计算

3.1 原运行工况

经有限体积法模拟计算，原运行工况下各水域的流场及平均流速见图 2 及表 3 所示。可以看出不规则园林池塘中的水流速度场非常复杂。运行工况一，不能实现水质水量的均匀交换；工况二、三，整体水量交换时间加快，水流对各水域基本能够产生影响，整个水体的水量基本能够流动，水质交换基本能够实现，但在局部水域仍有死水滞流区域；运行工况四，整体水量交换时间加快，水流对各水域产生影响加大，水量与水质交换增大。但在园林池塘中心⑦水域中(图 1)，水流情况却较运行工况二、三有明显下降，严重影响该水域流动。

3.2 优化运行工况

经有限体积法模拟计算，优化运行工况下各水

图 2　原运行工况流速场

表 3　原运行工况各水域平均流速　$\times 10^{-3}$m/s

工况	水域								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
一	2.48	0.82	1.44	1.26	0	0	0	0	0
二	2.48	0.82	1.44	1.27	0.30	0	0.36	2.70	0.98
三	2.48	0.82	1.44	1.27	0.61	2.42	0.36	0	0.48
四	2.48	0.82	1.44	1.35	0.63	1.83	0.16	1.82	1.06

域的流场及平均流速见图 3 及表 4 所示。可以看出,在优化运行工况条件下,加大了出水口流量,不规则园林池塘水流情况随之得到明显改变。调节闸阀,由原先全开或全闭状态改变为各出水口出流开启和关闭程度按适当比例调节,从而改善池塘中水流存在死水滞流水域及池塘中心水域⑦ 水流流速过小等问题。

表 4　优化运行工况各水域平均流速　$\times 10^{-3}$m/s

工况	水域								
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
优化一	3.71	0.92	1.51	3.90	0.37	0.00	0.39	4.08	1.43
优化二	3.71	0.92	1.51	3.81	0.76	3.99	0.57	0.00	0.76
优化三	3.71	0.92	1.51	4.09	1.12	3.23	0.12	3.82	2.09
优化四	3.71	0.92	1.51	4.27	1.21	4.29	0.48	1.52	1.44
优化五	3.71	0.92	1.51	4.09	1.35	4.32	0.36	3.13	2.08
优化六	3.71	0.92	1.51	3.99	0.92	1.24	0.31	4.94	1.81
优化七	3.71	0.92	1.51	3.81	1.10	2.53	0.19	4.98	2.28

优化运行工况是在原运行工况条件下,提高及调节各出水口流量。

a. 优化运行工况一～三在原运行工况二～四的出水口启闭条件下,增加出水口流量。可以看出,整体水量交换时间加快,水流流动均匀性提高,死水水域面积减小。但是,受出水口出流情况影响,水流与出水口启闭相关的水域,在优化运行工况一、二条件下,死水滞流水域的存在不可避免 ;在优化运行工况三条件下,园林池塘中心水域⑦的流速仍然较小。主要原因为 :在 1 号、2 号出水口同时以相同流量出流时,该水域水流方向相反,相互叠加抵消。

b. 优化运行工况五、七为在优化运行工况三的基础上,对各出水口出流量进行调节,使其中一个出水口流量为另一出水口流量的 2/3。可以看出,在优化运行工况五、七条件下,水流在④～⑨水域流动相对均匀 ;在园林池塘中心水域⑦,水流平均流速得到提高,水流情况得到适当改善,但改善程度一般。主要原因为 :在 1 号、2 号出水口出流不相同条件下,水流在此处叠加,总水流方向为出流较大的出水口处的水流方向,但出流较小出水口流量仍然较大,因此,此处水流改善并不十分理想。

c. 优化运行工况四、六为在优化运行工况三的基础上,对各出水口出流量进行调节,使其中一个出水口流量为另一出水口流量的 1/3。可以看出,受出水口出流情况直接影响的水域,水流在该水域流

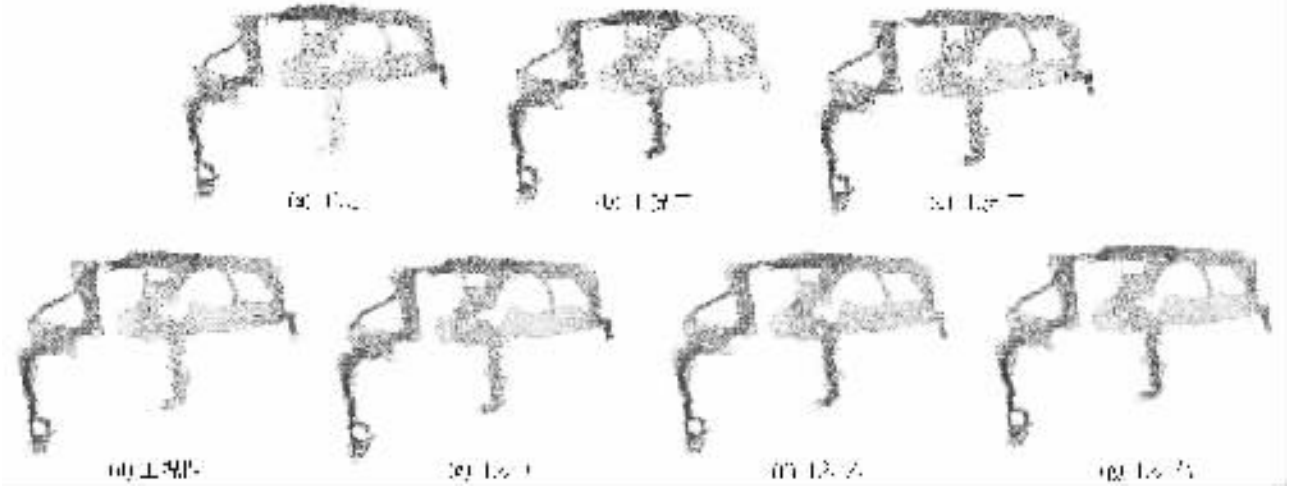

图 3　优化运行工况流速场

(下转第 45 页)

3 结论与建议

太浦河直接连通黄浦江，而黄浦江是目前太湖流域唯一一条敞开式、受潮汐影响甚为明显的河流，沿线承担着向上海、嘉兴等重要城市供水的任务。随着长三角经济社会的快速发展，人民对提高生活质量、保障供水安全、改善水生态环境的呼声越来越高，2010 年上海将举办世博会，更需要一个可靠、安全、优美的水环境[2]。通过太浦河闸泵联合调度，太浦河可持续大流量向下游供水，改善了下游水源地水质。

开展太湖雨洪资源利用，进一步对太湖下游地区水环境进行研究、太浦河闸泵优化调度方案研究以及太浦河下游地区应对水污染突发事件应急预案的研究。

平原河网区水流运动复杂，工程调度和管理尤为重要，还需要在原型试验的基础上，通过模型模拟提出适宜的工程措施和调度方案，并兼顾区域防洪安全、供水安全和水环境改善的需要[3]。此外黄浦江上游水源地三支来水的水污染问题严重，各级地方政府应加强水污染治理。

参考文献：

[1] 韩昌来. 黄浦江上游水源地的水环境特征及保护对策[J]. 中国给水排水，2004，20(12)：104-106.

[2] 吴浩云，胡艳. 引江济太调水试验工程对黄浦江上游水环境的影响分析[J]. 河海大学学报：自然科学版，2005，33(2)：144-147.

[3] 王超，卫臻，张磊，等. 平原河网区调水改善水环境实验研究[J]. 河海大学学报：自然科学版，2005，33(2)：136-138.

（收稿日期：2007-01-22 编辑：舒 建）

（上接第 3 页）

速仍然保持适当数值，未出现死水滞流水域；园林池塘中心水域⑦，水流平均流速得到提高，水流情况明显改善。主要原因为：出流较小的出水口流量较小，在保持该出水口所直接影响水域有一定流速下，对中心区域相互叠加水域影响较小。因此，可以使整个水域水流更为均匀，达到削峰平谷的作用。

d. 从表 4 可见，各优化运行工况下，①～④水域的平均流速变化不大；但在⑤～⑨水域，由于运行工况不同，各水域平均流速有较大变化。在总出水口流量相同条件下，各水域水流平均速度相近，说明水流分布均匀。对优化运行工况一～七中的⑤～⑨水域进行方差计算，计算结果见图 4 所示。可以看出，优化工况四、六，方差数值最小，水流在水域中的均匀性最优；优化运行工况三，方差数值最大，水流在⑤～⑨水域流动均匀性最差。

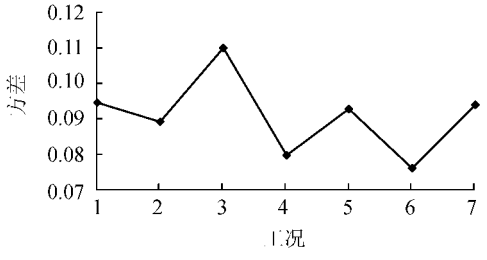

图 4 各优化运行工况方差值

4 结 论

a. 采用有限体积方法，对不规则园林池塘在不同工况条件下的水流情况进行计算分析并作比较。

b. 不同运行工况下，水流是不同的，优化运行工况四、六的水流流动最为均匀。

c. 采用非结构网格离散计算区域，使得数值模拟方法能适应边界条件极其复杂的不规则园林池塘水流计算，计算精度较高。

d. 由于各水域水流速度较小，实验仪器设备不能达到流速测量的精度，所以未能测定园林池塘在水力循环系统作用下各水域的实际流速。根据现场示踪观察，实际水流与计算结果较为符合。

参考文献：

[1] 姚征，陈康民. CFD 通用软件综述[J]. 上海理工大学学报，2002，24(20)：137-144.

[2] 白玉川，杨建民，黄本胜. 二维水沙数学模型在复杂河道治理中的应用[J]. 水利学报，2003，26(9)：25-30.

[3] 周雪漪. 计算水力学[M]. 北京：清华大学出版社，1995：3-5.

[4] 朱自强，李津. 计算流体力学中的网格生成方法及其应用[J]. 航空学报，1998，19(2)：152-158.

[5] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京：清华大学出版社，2004：26-28.

（收稿日期：2007-02-01 编辑：舒 建）