

开式湖水源热泵系统温排水热扩散模拟研究

郝小充¹ 余跃进¹ 张 宏² 翁 雯¹ 毛炳文¹

(1. 南京师范大学 能源与机械工程学院 江苏 南京 210042;

2. 南京中兴软件有限责任公司 江苏 南京 210012)

[摘要] 针对南京某湖水源热泵项目,该方法利用标准 $k-\varepsilon$ 紊流模型对热泵系统运行时温排水的热扩散进行了三维数值模拟。重点研究了深度不均湖体中,排水口位置对温排水热扩散效应的影响。通过分析比较得出,排水位置对水平方向温排水热扩散影响较大,而对垂直方向热扩散影响比较微弱,高温区集中于排水口附近的小区域;在允许范围内将取水口设置于排水口上游可以降低“热短路”造成的影响;在排水口附近采取喷水或跌水措施,可以降低热泵系统尾水造成的湖体环境温升,研究结果为开式湖水源热泵系统设计提供参考。

[关键词] 开式湖水源热泵,排水位置,温排水,湖水深度,数值模拟

[中图分类号] TK529 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2011)02-0047-06

The Numerical Simulation of the Thermal Discharge in the Open-Loop Lake Water Heat Pump Systems

Hao Xiaochong¹, Yu Yuejin¹, Zhang Hong², Weng Wen¹, Mao Bingwen¹

(1. School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China;

2. ZTE Software Co., Ltd., Nanjing 210012, China)

Abstract: Combined the experience of a lake water heat pump project in Nanjing, based on the standard $k-\varepsilon$ turbulence model, the temperature field of the thermal discharge into the lake water body was computed. The effect of the thermal diffusion caused by the different locations of the outfall was mainly researched when the lake-depth is uneven. By comparison and analysis, there is a greater influence as to the horizontal distribution than vertical direction, and the high temperature zone concentrates on a small area near the outfall, the short-circuiting can be avoided when the water intake is located on the upstream the outfall, the influence on-environment can be reduced with some measures such as sprinkler system and waterfall. The results provide reference for lake-water heat pump systems design.

Key words: open-loop lake water heat pump, drainage position, thermal discharge, lake water-depth, numerical simulation

我国南方地区地表水资源丰富,长江中下游地区、珠江三角洲地区和东南沿海地区的地表水总量在全国地表水总量中所占的比例将近 70%,而且水质相对较好,冬季水体基本无结冰期,适宜性较好,是清洁的天然冷热源,因此地表水源热泵具有广阔的利用前景^[1]。湖水源热泵的应用方案的可行性已经在实际应用中得到证明,但其推广呈现出很大的盲目性^[2-3]。湖泊属于静水水体,湖水流动性相对较弱,热泵系统温(冷)排水造成的受纳水域温升(降)会对热环境容量小,生态系统比较脆弱的湖水水体造成严重的影响。湖泊形成必须具备两个基本条件:一是洼地即湖盆,二是湖盆中所蓄积的水体,因此湖泊深度往往有很大不均匀性,在这种情况下,取排水口位置合理选取会对系统运行效率以及水体环境产生更大影响。针对这种情况,本文结合南京某工程项目,运用 fluent 软件模拟温排水热扩散范围及湖体温升程度与排水口位置之间的关系,进而为湖水源热泵空调系统的设计提供参考。

1 工程概况

1.1 湖水源热泵工作原理

根据热泵机组与湖水连接方式的不同,可将湖水源热泵分为如图 1 所示两类:开式湖水源热泵系统和

收稿日期: 2011-02-05.

通讯联系人: 余跃进,教授,研究方向:建筑节能. E-mail: dlkj@njnu.edu.cn

闭式湖水源热泵系统,开式系统是指从地下或地表中抽水后经过换热器直接排放的系统,无论是在制热还是制冷过程中均以水为热源和冷却介质,即用切换工质回路来实现制热和制冷的运行。位于严寒地区,冬季制热工况时,湖水热交换器内应采用防冻液作为循环介质;闭式系统是指在水中安置一组闭式循环的换热盘管,该组盘管一般水平或垂直埋于湖水中,通过与湖水换热来实现能量转移。

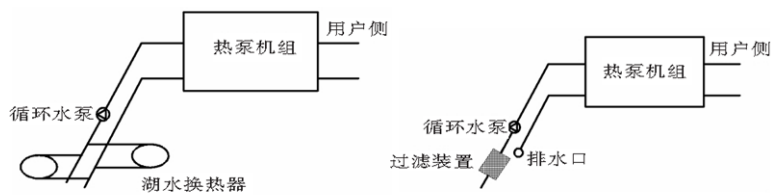


图1 (a) 闭式湖水源热泵系统图

(b) 开式湖水源热泵系统图

Fig.1 The system diagram of lake water heat pump

1.2 建筑及气候概况

江苏省南京市某湖水源热泵项目是以各式公馆为主,集住宿、休闲、度假为一体的大型综合建筑群体。要求所有建筑具有冬季供暖,夏季供冷,并提供生活热水。总建筑面积 $20\,8312\text{ m}^2$,分一、二、三、四期先后建设。建筑周围湖体水面达 55 万 m^2 ,库容 353.65 万 m^3 。内湖与外湖由大坝隔断,坝顶高程为 29.40 m ,坝体附近常水位 27.0 m ,近岸端水深 3 m 。项目所在地区多年平均气温为 15.73°C ,1月平均气温 2.18°C ,7、8月平均气温 28.13°C ,极端最高气温 38.2°C ,极端最低气温 -13.1°C 。多年平均降水量为 $1\,102.2\text{ mm}$,多年平均蒸发量为 $1\,385.7\text{ mm}$ 。

1.3 冷热源方案

根据工程资料,项目园区周围湖水水质条件达到水源热泵系统要求,根据美国制冷学会ARI320标准,开式系统水源热泵对水温的要求是 $5^\circ\text{C} \sim 38^\circ\text{C}$,在水温 $10^\circ\text{C} \sim 22^\circ\text{C}$ 之间运行时能效比较高。工程当地气候条件较温暖且湖水水质良好,开式系统的换热效率比闭式系统高,初投资较低,且适合于大容量的系统。本文采用开式湖水源热泵结合埋地盘管作为该区域提供冬季采暖和夏季供冷的主要技术方案,利用冷负荷系数法计算得湖水源热泵系统负担夏季冷负荷为 $13\,903\text{ kW}$,冬季热负荷为 $10\,658\text{ kW}$,取水口设置于外湖,排水口设置于内湖岸。

2 模拟分析

根据国家《地表水环境质量标准》有关规定,江河、湖泊等具有适用功能的地面水域,人为造成的环境水温变化应限制在夏季周平均最大温升 $\leq 1^\circ\text{C}$,冬季周平均最大温降 $\leq 2^\circ\text{C}$ 。夏季运行时,超温水体单位面积散热量比自然水体大,这使得废热能通过超温水体表面散出。冬季运行时,弱温水体^[4]单位面积散热量比自然水体小,其净得热量为正值,这使水温得到一定恢复,这部分热量来源于太阳短波辐射和天空长波辐射。

2.1 湖体自然水温

确定模型初始条件,需要了解湖体初始温度。南京地区典型年气象数据^[5]变化如图2所示。参考文献[6,7]计算得:本工程所用湖水最热月温度为 27°C ,最冷月平均温度为 5°C 。一般来说,如果地表水体深度小于 3 m ,水体就不会由于温度差异而产生分层现象。而深 $4.5 \sim 9.0\text{ m}$ 的浅水池或湖泊所承受的负荷不应超过 0.034 kW/m^2 或其水体不应产生温度分层现象^[8]。本工程湖水温度不考虑水体分层的影响。冬季极端情况下可以使用辅助加热设备,本文主要对夏季温扩散情况进行模拟分析。

2.2 取排水温差

水源热泵机组水流量,取排水温差等因素都会影响整个系统的节能性以及初投资。取排水温差与进出水流量关系如下:

$$Q = m\rho C_p \Delta t,$$

式中 Q 为负荷 $/\text{kW}$; Δt 为取排水温差 $/^\circ\text{C}$; m 为流量 $/(\text{m}^3/\text{s})$ 。

结合文献[8,9]综合考虑,计算得制冷期取排水温差 5°C ,流量为 $0.695\text{ m}^3/\text{s}$ 。

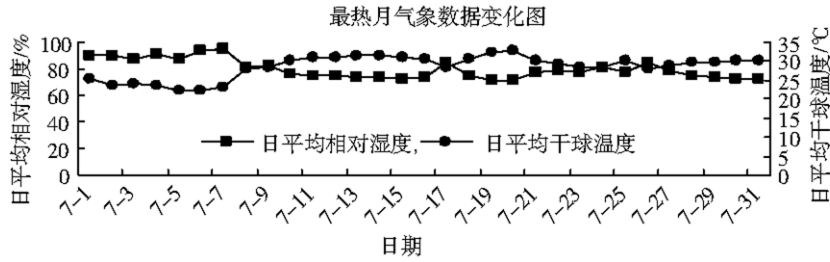


图 2 制冷期最热月温湿度数据变化图

Fig.2 Temperature and humidity data changing trend diagram of the hottest days in cooling season

2.3 温排水热扩散模拟

2.3.1 物理模型

计算区域为 $200 \times 100 \text{ m}^2$ 的内湖湖体; 大坝近端水深 27 m, 远端为 3 m, 湖体水温为 27°C ; 排水流量为 $0.695 \text{ m}^3/\text{s}$, 排水温度为 32°C ; 热泵系统排水口为 $2 \times 0.5 \text{ m}^2$ 的矩形排水管, 设置在水面以下 1 m, 大坝泄水口简化为 $10 \times 0.5 \text{ m}^2$ 的矩形口. 进行流速场和温度场的数值模拟计算. 开式湖水热泵系统的排水量较小, 湖水速度场一般在较短的时间内便会达到稳定, 可以将流动按定常流处理. 网格划分如图 3 所示.

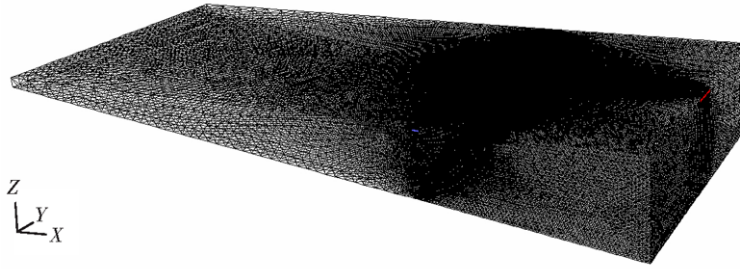


图 3 计算区域网格划分

Fig.3 Grid of the calculation region

2.3.2 数学模型

根据工程实际情况采用不可压缩标准 $k - \varepsilon$ 紊流模型^[10, 11], 控制方程采用有限体积法进行离散. 控制方程

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_e \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} + \rho \overline{F_i}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + c_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - c_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_e}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial x_j} \right] + \frac{Q_R}{c_p}. \quad (5)$$

系数表达式

$$\begin{aligned} \mu_e &= \mu + \mu_t; \mu_t = \rho c_\mu k^2 / \varepsilon; G_k = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right)}; \\ Q_R &= Q_R^q + Q_R^s \delta^s; Q_R^s = -k_s (T_s - T_\infty). \end{aligned} \quad (6)$$

式中 x_i 为直角坐标; u_i 为三维流速; t 为时间; ζ 为水位; F 为柯氏力; T 为温度; k 为紊动动能; ε 为紊动动能耗散率; q 为单位面积的流量源汇; ρ 为水的密度; g 为重力加速度; μ_e 为紊流有效黏性系数; μ 为分子黏性系数; μ_t 为紊动黏性系数; σ_T 为紊流普朗特数; c_p 为定压比热; Q_R^q 为单位时间内排放到系统内的单位质量

流体上的热量源汇; Q_R^S 为单位时间内单位质量流体向大气的散热量; δ^S 为间断函数, 在水面 $\delta^S = 1.0$, 在水面以下 $\delta^S = 0.0$; k_s 为水面综合散热系数; T_s 为水体表面温度; T_∞ 为环境水温; κ 为卡门常数; $C_\mu = 0.09$, $C_1 = 1.44$, $C_2 = 1.92$; $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\epsilon = 1.3$.

定解条件

(1) 假设条件

- 1) 水面采取刚盖假设, 自由水面固定不变, 水面切向流速等于风与水面的摩擦速度;
- 2) 采用 Boussinesq 假设, 认为温度不同引起的密度变化很小, 可以忽略;
- 3) 不考虑岩土与水体间以及岩土中的质交换;
- 4) 忽略自然因素引起的湖泊水流进出.

(2) 初始条件

$$u(x, y, z, t_0) = v(x, y, z, t_0) = w(x, y, z, t_0) = 0; T_0(x, y, z, t_0) = 300.$$

(3) 边界条件

1) 固壁: 从水体热平衡诸因素影响程度看, 由土壤进入水中的热量不大, 采用绝热边界条件; 河床及岸采用黏性无滑移边界条件;

2) 水面: $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$, 考虑风速以及外加热量后水体超温时对散热系数的影响, 将气象数据带入 Gunnerberg

经验公式计算得制冷期平均水面综合散热系数 $K_s = 40.7 \text{ W/m}^2$;

3) 温排水口: 排水流速 V 为 0.695 m/s ; 排水温度 T 为 32°C ;

4) 大坝泄水口: 相对湖体水量, 排水量极小, 采用自由出流边界条件.

2.4 模拟结果与分析

模拟热泵系统连续运行一周后湖体温排水热扩散情况如图 4、5、6 所示.

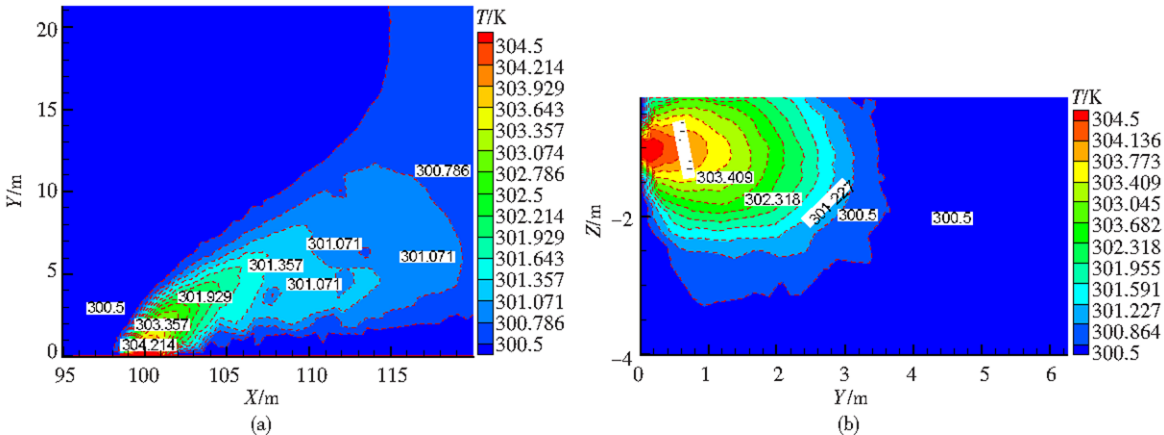


图 4 Y=100 m 处水温分布图(水面以下 1 m)

Fig.4 Temperature field at 100 m along the Y axis(at 1 m below the water surface)

2.4.1 模拟排水口选取

- (1) 在岸边水深 15 m 即沿 Y 轴方向 100 m, 距水面 1 m 处设置温排水口进行模拟;
- (2) 在岸边水深 19.8 m 即沿 Y 轴方向 140 m, 距水面 1 m 处设置排水口进行模拟;
- (3) 在岸边水深 24.6 m 即沿 Y 轴方向 180 m, 距水面 1 m 处设置排水口进行模拟.

2.4.2 结果分析

(1) 图 4、5、6 对比可以看到, 图 4(a) 所示水深 15 m 处水平面超温区域(超过国家标准允许温升 1°C) 面积最大, 集中于温排水口附近 $20 \times 10 \text{ m}^2$ 范围内. 水深 19.8 m 及水深 24.6 m 处水平扩散区域分别为 $10 \times 8 \text{ m}^2$ 和 $5 \times 8 \text{ m}^2$, 随深度增加有减小趋势.

(2) 图 4、5、6(b) 主要反应了湖体垂向温扩散情况, 3 种情况下垂直方向超温深度相当, 大约为 2.5 m, 表明深度对温扩散垂直方向扩散范围影响不大. 由温度包络线可见湖体 90% 以上温升在 0.5°C 以下, 除此之外, 超温区集中在表层, 有利于在系统运行间隙的热量散失, 从而使湖水温度场得到更好地恢复.

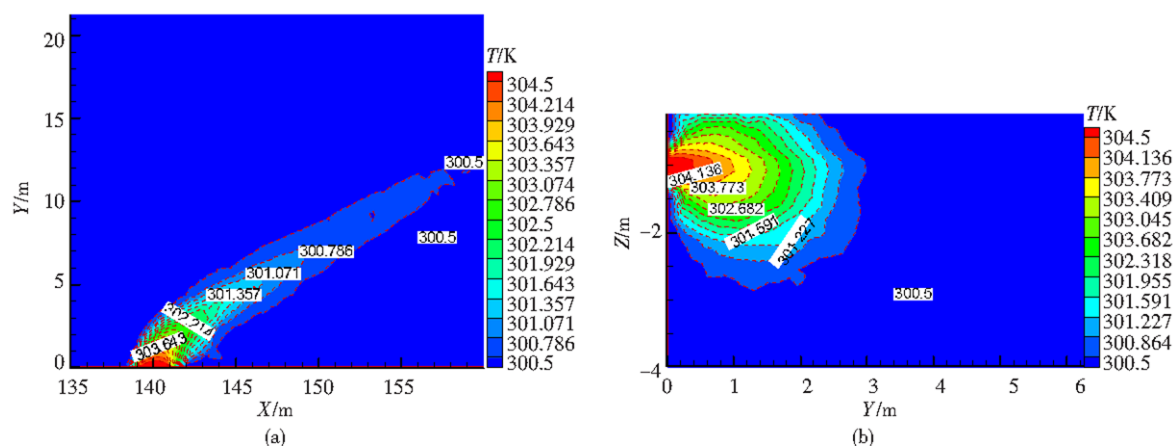
图5 $Y=140$ m处水温分布图(水面以下1 m)

Fig.5 Temperature field at 140 m along the Y axis(at 1 m below the water surface)

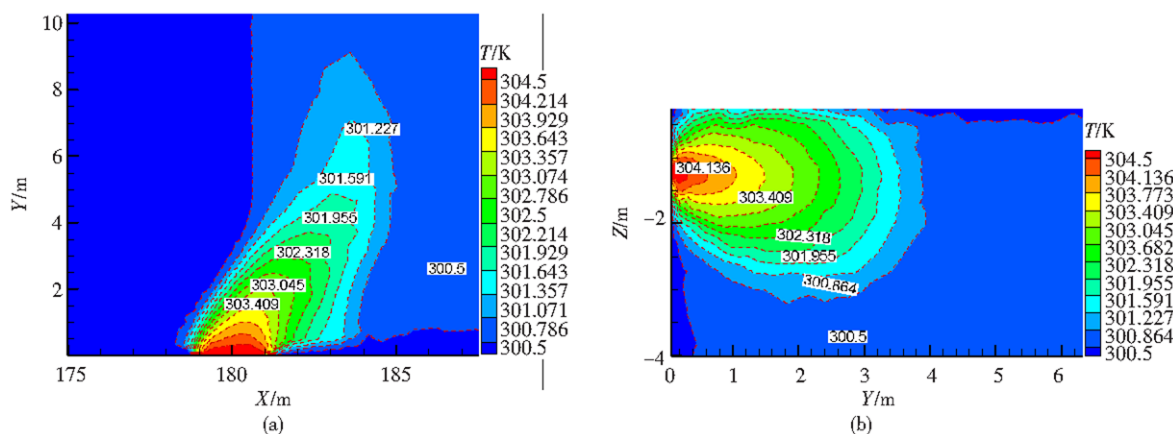
图6 $Y=180$ m处水温分布图(水面以下1 m)

Fig.6 Temperature field at 180 m along the Y axis(at 1 m below the water surface)

(3) 如图4、5、6所示,当水深不均时,可根据实际情况将排水口设置于水深较大的位置,本工程中大坝附近水深达27 m,排水口若设置于距大坝20 m处,温度场模拟结果显示排水口附近水面超温范围为 40 m^2 ,垂向超温范围2.5 m,相对扩散范围较小,对环境的影响程度降低。

(4) 温排水热扩散方向偏向于大坝泄水口处,且高温区集中于排水口附近 4 m^2 范围,说明本工程在排水口附近加设喷水等设施对湖泊温升有一定抑制作用。

3 总结

本文结合工程对开式湖水热泵系统不同位置排水口对温排水热扩散影响进行模拟研究,结论如下:

(1) 湖体水平超温范围与排水口所在湖体深度有一定关系,湖体深度较大,水平超温范围相对减小,但湖体深度对垂直方向的温扩散影响甚微。水深15 m、19.8 m、24.6 m处超温范围分别为1%、0.4%、0.2%。根据本模型的模拟结果,随排水口位置水位逐次增加4.8 m,水平超温面积逐次降低约50%。

(2) 利用三维数学模型对温排水热扩散进行数值模拟,系统连续运行稳定后,除超温区域以外湖体温升最大为 0.5°C ,满足国家环保标准规定及温水鱼类的生存条件。模拟结果是建立在忽略土壤与湖体热交换基础之上,并且考虑机组连续运行情况,所以实际湖体温扩散范围要更小,温升会更低。

(3) 在一定范围内,排水口应尽量靠近水体表面,当水深不均时,应尽量在保证取水温度不受影响同时靠近水深较大的位置设置排水口,从而给湖水中生物以较大的生存空间。建议本工程排水口设置于坝体附近,从而使热量更快速地排入外湖,资金允许情况下可考虑设置喷水设施以降低湖水温升,从而维护内湖更加脆弱的生态环境,达到节能环保要求。

[参考文献](References)

- [1] 聂会元, 吴艳菊, 王勇. 中国气候区淡水源热泵适应性分析[J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(3): 112-120.
Nie Huiyuan, Wu Yanju, Wang Yong. Analysis of adaptability for water surface heat pumps in China climatic region[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(3): 112-120. (in Chinese)
- [2] 中国建筑工业出版社. GB50366-2005. 地源热泵工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
China Architecture and Building Press. GB50366-2005. Technical code for ground-source heat pump system[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 杨森, 施明恒. 生态住宅自然能源利用系统的研究[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2001, 1(4): 27-30.
Yang Sen, Shi Mingheng. Research of natural energy using systems of ecological house[J]. Journal of Nanjing Normal University: Engineering and Technology Edition, 2001, 1(4): 27-30. (in Chinese)
- [4] 陈晓, 张国强, 彭建国, 等. 开式地表水源热泵在湖南某人工湖的应用研究[J]. 制冷学报, 2006, 27(3): 10-13.
Chen Xiao, Zhang Guoqiang, Peng Jianguo, et al. Utilization of artificial lake as heat source-sink for open-loop surface water heat pump system in hunan[J]. Journal of Refrigeration, 2006, 27(3): 10-13. (in Chinese)
- [5] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集[M]. 北京: 中国建工出版社, 2005.
The Meteorological Room of Meteorological Information Center of China Meteorological Administration, Building Science Department of Tsinghua University. Meteorological Data for Chinese Thermal Environment Analysis[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2005. (in Chinese)
- [6] O. Buyukalaco. Experimental investigation of seyhan river and dam lake as heat source-sink for a heat pump[J]. Energy, 2003, 28(3): 157-169.
- [7] 白振营. 一个计算湖泊(水库)自然水温的新公式[J]. 水文, 1999, 28(3): 29-32.
Bai Zhenying. A new formula for calculating the water temperature of natural lakes (reservoirs) [J]. Hydrology, 1999, 28(3): 29-32. (in Chinese)
- [8] 范亚明. 湖库塘开式水源热泵的水体传热与系统性能研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境学院, 2009: 59-60.
Fan Yaming. Study on thermal performance of lake and open-loop lake-source heat pump system[D]. Chongqing: College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, 2009: 59-60. (in Chinese)
- [9] 黄向阳, 吴拓. 湖水源热泵系统冷排水对湖泊水质的影响试验研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 34-37.
Huang Xiangyang, Wu Tuo. Study on effects of cold discharge of lake water source heat pump systems on lake water quality [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 34-37. (in Chinese)
- [10] 郝瑞霞, 韩新生. 潮汐水域电厂温排水的水流和热传输准三维数值模拟[J]. 水利学报, 2004, 25(8): 66-70.
Hao Ruixia, Han Xinsheng. Quasi 3-D numerical model for flow and heat transport of power plant cooling water discharged into coastal area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 25(8): 66-70. (in Chinese)
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析 - CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Wang Fujun. Computational Fluid Dynamics-Principle and Application of CFD Software[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]