

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.02.013

# 湖水源热泵系统排热工况下散点排水 对湖体温度场的影响

陈金华<sup>a</sup>, 袁娟娟<sup>b</sup>

(重庆大学 a. 三峡库区生态环境教育部重点实验室;

b. 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**采用流体计算软件建立三维湖体模型,模拟设计日下湖体自然水温,用实测水温进行修正作为初始条件;根据别墅群全年逐时负荷的模拟结果,采用动态取排水温和水量作为边界条件;以典型气象年数据为基础,通过用户自定义函数输入水面换热边界;分别对某别墅群水库水源热泵系统的排放水管网采用与雨水排水管网相结合的散点排水以及采用传统的集中排水方式进行了动态数值模拟,得到供冷季逐时排热工况下湖体温度场的分布情况,分散排水优势明显。分析模拟结果表明:集中排水方案水体周温升 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,分散排水方案水体周温升 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;水体水道狭长体积有限的区域在连续排水的情况下,有明显热累积现象。连续运行条件下,散点排水取水口水温的模拟结果表明:7~10月,位于常年水位 $4.6\text{ m}$ 水深下的取水口取水温度在 $27\sim 23.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,可实现热泵系统高效运行。

**关键词:**水源热泵;散点排水;数值模拟;动态负荷;温度分布

**中图分类号:**TU831 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)02-0079-07

## Influence of Distributed Drainage on Reservoir Water Temperature Field Under Reservoir Water Source Heat Pump System

Chen Jinhua<sup>a</sup>, Yuan Juanjuan<sup>b</sup>

(a. Key laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education;

b. School of Urban Construction & Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** By adopting fluid calculation software to establish three-dimensional reservoir model and simulating reservoir's natural temperature on design day, the measured temperature was used to correct and treated as the initial condition. According to the annual hourly calculation load of villa-cluster, dynamic water temperature and flow were used as boundary conditions. Inputted water surface heat transfer conditions were identified by user-defined function based on the data of typical meteorological year. For the distributed drainage combining the discharge network and rainwater pipe network and traditional integrated drainage of reservoir water source heat pump system, dynamic numerical simulation of the water temperature field was conducted. The results show that water's temperature rises  $0.33\text{ }^{\circ}\text{C}$  weekly when integrated drainage is adopted and the temperature rises  $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}$  when distributed drainage is adopted. There is obvious heat accumulation phenomenon when continuous drainage in narrow area works. The simulation of intake water temperature shows that below perennial water level  $4.6\text{ m}$  depth, the intake

收稿日期:2012-06-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50838009);中美新能源清洁能源国际合作项目(2010DFA72740-05);重庆市科技攻关计划项目(CSTC 2011AC7129)

作者简介:陈金华(1973-),男,副教授,主要从事建筑环境与能源应用研究,(E-mail)c66578899@126.com。

water temperature is between 27~23.5°C from July to October, in which the heat pump system operates efficiently.

**Key words:** water source heat pump; distributed drainage; numerical simulation; dynamic loads; temperature distribution

湖水水体作为一种天然冷热源,实现了热泵系统高效比运行,产生良好节能效益<sup>[1]</sup>。以重庆为例,地表水水源热泵系统得到了大力推广和广泛应用,依托辖区内的水系及湖库塘资源,已建和在建地表水水源热泵项目有 25 个<sup>[2]</sup>。目前,水源水质<sup>[3-4]</sup>、系统性能研究<sup>[5-8]</sup>和系统排水对水体的影响<sup>[9-11]</sup>是本领域研究重点。温排水对于自然水体的影响研究,国外文献多集中于发电厂类研究<sup>[12-13]</sup>,国内学者多针对二维水温计算方法<sup>[9]</sup>、特定排水方式下的温度场特性研究<sup>[10]</sup>及不同排水方式的评价研究<sup>[11]</sup>。针对滞留水体(湖库塘水)水源热泵系统在动态负荷边界条件下的研究较少。

地表水系可分河流和湖泊(水库、池塘),前者为流动水体,而后者为滞留水体。两者的热承载能力大不相同<sup>[14]</sup>。前者热承载能力大,流动性好,可以依靠流动的水较快地带走热量,因此排放水对于水体的局部和总体温升影响一般都不大;而水库水流动性差,热容量有限,对于空调系统持续不断的排放水,长期运行后,湖体的承载能力是否会超出其自恢复能力的极限就要另当别论了,这直接关系到系统的运行效率以及对周围环境的影响。随着系统的运行,温排水排入源水水体后,水体温度会发生改变。建筑负荷是全年动态变化的,导致取水温度、热泵机组能效比、系统实际排热量相互影响也是动态变化的。而目前的文献研究中采用的边界条件多是在设计负荷下的,较少考虑多因素的影响动态过程。

笔者采用以实测水温修正后的设计日下湖体自然水温为初始条件,根据某别墅群全年逐时负荷的模拟结果,采用动态取排水作为数值模拟的边界条件;以典型气象年数据为基础,通过用户自定函数输入水面换热边界;对别墅群水库水源热泵系统的排放水管网采用与雨水排水管网相结合的散点排水方式进行了动态数值模拟,得到了供冷季排热工况下湖体温度场的分布情况。

## 1 控制方程及数值计算模拟流程图

非稳态、常物性、不可压缩流体湍流的湍流基本控制方程组包括:

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0;$$

$$\begin{aligned} \text{动量方程: } & \rho \left[ \frac{\partial u}{\partial \tau} + \frac{\partial (uu)}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} + \frac{\partial (uw)}{\partial z} \right] + \\ & \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \rho \left[ \frac{\partial v}{\partial \tau} + \frac{\partial (vu)}{\partial x} + \frac{\partial (vv)}{\partial y} + \right. \\ & \left. \frac{\partial (vw)}{\partial z} \right] + \frac{\partial p}{\partial y} = \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \rho \left[ \frac{\partial w}{\partial \tau} + \frac{\partial (wu)}{\partial x} + \right. \\ & \left. \frac{\partial (wv)}{\partial y} + \frac{\partial (ww)}{\partial z} \right] + \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right); \end{aligned}$$

能量方程:

$$\rho_p \left[ \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} + \frac{\partial (wT)}{\partial z} \right] = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + S_T;$$

其中,对于热泵系统排水口有:  $S_T = S_{TP} = q_{xyzt} \cdot \Delta T_h$ ; 对于水体表面有:  $S_T = S_{TS} = \varphi_n, \varphi_n$  的计算方法依据文献<sup>[14]</sup>。

上述方程组中:  $u, v, w$  分别为  $x, y, z$  方向的速度瞬时值,是时均值和脉动值之和;  $\rho$  为水体的密度;  $c_p$  为水体的定压比热容;  $P$  为压力;  $T$  为热力学温度; 动量方程中忽略体积力,能量方程忽略耗散项;  $S_T$  为源项;  $q_{xyzt}$  为排水口的质量源项;  $\varphi_n$  为水体表面的热交换量;  $\Delta T_h$  为热泵系统的取排水温差。

$$\Delta T_h \text{ 由式 } \Delta T_h = \frac{Q_{lh}}{m_{xyzt} c_p} \left( \frac{EER_h + 1}{EER_h} \right) \text{ 确定, 式}$$

中:  $Q_{lh}$  为建筑的逐时冷负荷;  $m_{xyzt}$  为各排水口的设计质量流量;  $EER_h$  为计算时刻下机组的能效比时均值。当  $\Delta T_h \geq 5^\circ\text{C}$  时,  $m_{xyzt}$  为各排水口的设计流量; 当  $\Delta T_h < 5^\circ\text{C}$  时,以  $\Delta T_h = 5^\circ\text{C}$  反算各排水口的流量。研究表明<sup>[15]</sup>,热泵机组的性能系数对源水侧进水温度最为敏感。因此,利用实际的取水温度对机组的 EER 进行阶段性修正,为简化计算,以水温变化  $1^\circ\text{C}$  为修正区间范围。所有物理量单位均为国际单位。

数值模拟流程图如图 1。

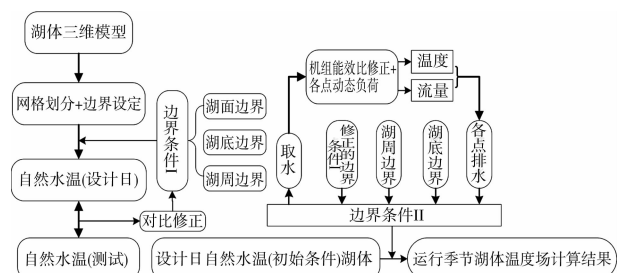


图 1 水库水源热泵夏季排水工况下水体水温模拟流程图

## 2 项目概况

本项目为大型别墅区,总建筑面积为 56 320 m<sup>2</sup>,包含 113 栋别墅,紧邻重庆市土溪水库。土溪水库属国家中型水库,常年蓄水 1 260 万 m<sup>3</sup>,水面面积 2.232 km<sup>2</sup>,各项水质指标均满足《地表水水源热泵系统适应性评估标准》的建议值。水库常年控制水位标高为 786.6 m,而别墅的机房标高范围为 787.9~797.2 m,最不利取水高差为 10.6 m。

本项目利用水库水作为空调系统的冷源和热汇,采用“集中取水-分散排水”的方式。将温排水管网与给排水专业的雨水管网相结合,一方面节约了管材及施工费用,另一方面散点排水形式也是一种新的尝试。因为对于热容量有限的湖体,如何使温排水对湖体温度场的影响降到最小对系统高效运行和减小环境影响而言是至关重要的。

图 2 是本项目水库水源热泵系统取、排水口位置示意图,黄色的曲线是湖底勘测高程,图的左部区域为水库水体,右部区域为别墅群。O 点为集中取水点,峰值取水量为 576.5 m<sup>3</sup>/h,点 1~22 为温排水的散点排水口,所接的末端雨水管管径均为 DN300,散点排水量见表 1,集中排水量见表 2。

表 1 散点排放水点的设计排水流量 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>

排放水点编号	排放量	排放水点编号	排放量	排放水点编号	排放量	排放水点编号	排放量
1	5.5	7	11.0	13	7.0	19	50.5
2	11.0	8	59.4	14	24.5	20	8.7
3	14.5	9	37.8	15	21.0	21	50.0
4	55.3	10	27.9	16	24.5	22	14.0
5	43.4	11	2.8	17	21.0		
6	24.4	12	11.0	18	51.3		

表 2 集中排放水点的设计排水流量 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>

排放水点编号	排放量	排放水点编号	排放量	排放水点编号	排放量
1	154.1	18	201.5	21	220.9

注:散点排水与集中排水 2 种方式的排水水量不变,只对排水点数量和位置进行了调整。

## 3 湖体模型

要分析水体热容量及热泵排水对水体的影响,建立准确的能量和质量平衡方程是必须的<sup>[9]</sup>。同时,排水工况下,准确的河床模型是耦合求解速度与温度场的前提。根据航拍图(图 3)所示,土溪水

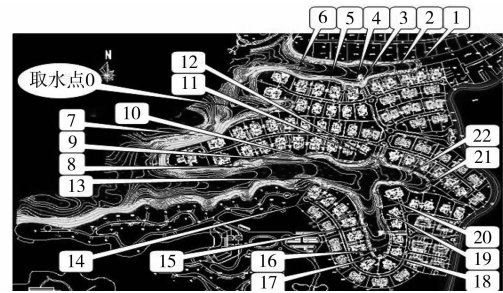


图 2 水库水源热泵系统取、排水口位置示意图

库水体较大,水库全尺寸建模难度大。而且设计的取、排水侧,取水口距离水体中间分界线(图中黑线)的垂直距离约 87 m,最近排水口也距其约 62 m,水体以中间为分界线有其合理性。此外,考虑到后期开发,假设左半水体仍可作为未来水源热泵的冷热源,也利于后期边界条件的设定。据此,水体模型以中间界线为限,建立右水体模型。依据所掌握的勘测水位线,分层建立所利用的部分水体的准确的河床模型。依次选择标高为 786.6、782.56、780、778.5、777、776.5、775.5、774.5、773.5 和 773 m 的 10 个勘测特征面建立湖体模型。最终建立的模型由 10 个特征面组成的 9 个体层构成。模型俯视图如图 4 所示。

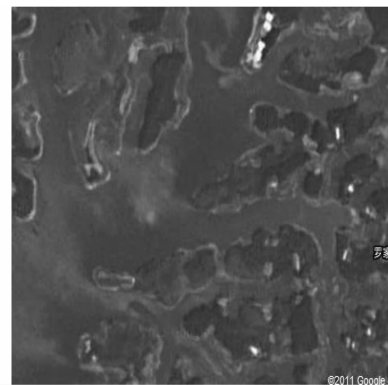


图 3 土溪水库卫星航拍图(分界线右边水体为建模区域)



图 4 计算水体区域模型

考虑到水体模型尺寸较大,而管径较小,实际划分网格时分块划分,并进行网格过渡,最远处网格尺寸参照文献<sup>[16]</sup>的计算值,以保证计算质量。

## 4 定解条件

如图 1 所示,排水工况下的温度场模拟以自然水温为初始条件,将建筑的逐时负荷作为能量源项加入数学模型,由于模型假设水面高度不变,取排水量保持平衡,因此无需添加质量源项。

水面边界条件:以典型气象年数据为准,按照文献<sup>[14]</sup>的方法动态输入水面边界。

水底土壤-水体边界条件:以该地区的空调季节的土壤平均温度为准,设为定温边界,参照文献<sup>[17]</sup>中的 3.2 m 以下土壤层的温度取值 23.25 °C。

水体-水体交界面处的边界条件:即利用湖体与未利用湖体的交界面。在此界面上,存在着复杂的热量和水体的交换,结合水体模型建立过程中是以整个水体的中间界线作为“水体-水体”的界面。再考虑到后期发展,假定左侧水体也作为水源热泵的冷热源。此时,在工程上,可以将本界面看作一种近似的“对称边界”,此假定满足工程上的近似及最不利的思想。因此,在具体模拟中,将利用湖体与未利用湖体的交界面设为“对称型边界条件”。

排水口边界条件:排水口设为速度型入口边界,水流速度和温度由建筑逐时负荷根据控制方程计算得到,作为逐时动态边界输入,不考虑排水在管道中的自然温降或温升。

利用动态水温及水量边界条件进行湖体水温模拟,代替常用的静态峰值负荷作为边界条件,特别是对于供冷能力本来就较弱的浅层湖体,传统的采用峰值负荷及设计水温不变的稳态边界会削弱湖体可利用价值及潜能。因为就实际工程来说,系统大部分时间都处于部分负荷率工况<sup>[18]</sup>。因此,排水口边界条件动态输入建筑的逐时负荷更加趋于真实情况。

取水口边界条件:设为压力出口条件,以满足连续性方程。逐时取水口的温度作为对机组 EER 进行修正的依据。

## 5 温度场模拟结果及分析

### 5.1 自然水温模拟结果及修正的初始化温度场

利用前述物理模型和边界条件,在设计日气象参数下,系统不向水体排热时,对模型进行数值求解。取水口所在位置处沿水深的水温模拟结果、实测水温及修正后的结果如图 5 所示。

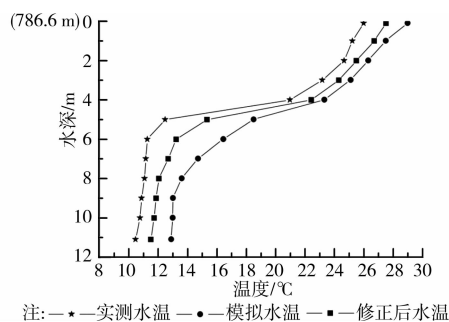


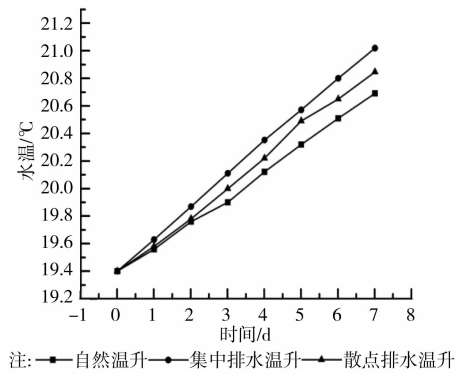
图 5 取水口所在位置处沿水深的水温模拟结果、实测水温及修正后的水温曲线

图 5 表明:模拟水温与实测值有一定差距。其中在 0.1~4 m 的水深范围内模拟结果平均偏高 2.22 °C, 5~8 m 的水深范围内模拟水温平均偏高 4.30 °C, 9~11 m 的水深范围内模拟水温平均偏高 2.24 °C。可以看出,中间水层的模拟结果偏差略大,表层和底层的模拟结果与实测的误差较小。主要原因是由于缺乏太阳辐射等实测数据,以典型气象年的数据为边界输入;实际情形下,深层水流动性差,水温的季节性行变化有较大延迟;此外,风速、降水等因素也会影响实际水温,这部分在模拟计算时做了简化处理。以实测所获得的平均水温数据对各水层的水温进行初始化修正,经过迭代计算修正水温变化梯度,修正后的水温曲线比初次模拟结果更加接近于实测值,0.1~11 m 的平均水温偏差为 1.36 °C。以修正后的温度场作为排水工况下水体温度场分析的初始化条件,计算结果将会更加安全。

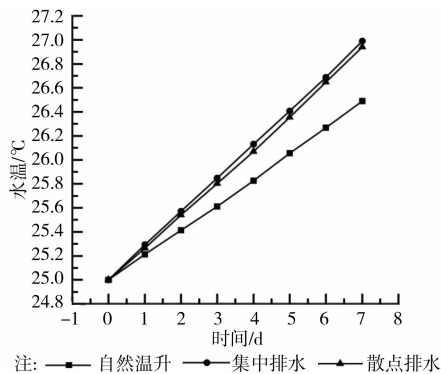
### 5.2 系统排水对水体水温的影响结果及分析

5.2.1 设计工况下周温升曲线(最大) 相同的物理模型和控制边界条件下,对集中排水和散点排水的 2 种排水方式在设计工况下水体温升进行数值计算。水体模型的整体平均温度变化曲线(图 6(a))和取水点处的温度变化曲线(图 6(b))如下所示。

从图 6(a)可以看出,在自然状态下,水体模型的周温升为 1.29 °C。因为是以设计日条件下的气象数据作为边界条件输入水体,因此水温呈上升趋势,模拟的周温升稍高于文献<sup>[19]</sup>所述的重庆市湖水的水温特征。集中排水方案下,水体的周温升为 0.33 °C;分散排水方案下,水体的周温升为 0.16 °C。人为温升均小于《地表水水源热泵系统适应性评估标准》的规定,但是分散排水下,水体的温升较小。图 6(b)表明:集中排水和分散排水方案下,取水口处的水温相差很小,两者相差仅 0.04 °C。主要是因为集中排水的 3 个排水口距离取水口的位置较远,因而排水对于取水口的影响与分散排水相差不大。



(a) 水体模型的整体平均温度(周)变化曲线



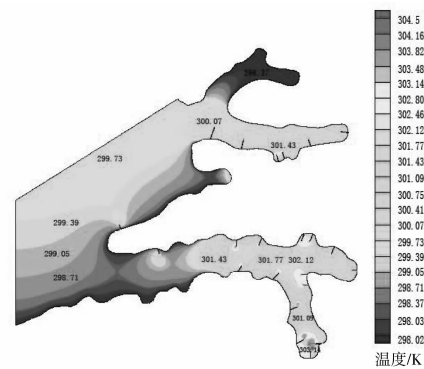
(b) 取水点处的温度变化(周)曲线

图6 设计工况下周温升曲线

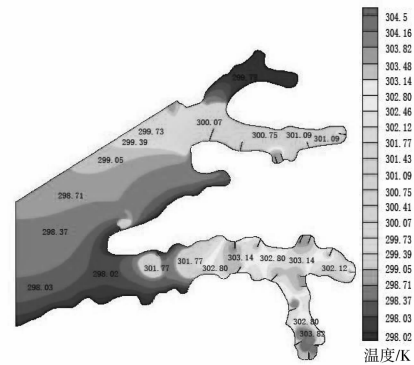
由于分散排水通过雨水管排入水体,温排水基本排入了水体表层,这在一定程度上利于温水的散热,尤其在夜间。集中排水易造成局部温排水水量较大,局部区域温升随时间不断增高,不利于温排水的散热。设计工况下,系统运行1周表明:2种排水方式取水口的水温相差不大,集中排水方案高 $0.04^{\circ}\text{C}$ ;但是水体的周温升,分散排水方式低于集中排水方式。

5.2.2 分散排水方式下温度场发展 将7、8、9、10月份的建筑逐时模拟负荷输入模型,气象参数以月平均值输入。对水体的排水状态下的温度场发展情况进行模拟计算,结果如图7所示。

图7表明:离各排水口较远的区域,即取水口上方的水体,7月初的水温为 $26.76^{\circ}\text{C}$ 左右,而10月底的水温为 $25.71^{\circ}\text{C}$ ;右下角的排水区域在7月初的水温在 $28.43\sim 30.14^{\circ}\text{C}$ 之间,10月底,相同水体位置的温度在 $29.8\sim 30.82^{\circ}\text{C}$ ,且水温较高的区域较大;右上角的排水区域7月初水温在 $27.07\sim 28.43^{\circ}\text{C}$ ,10月底的水温在 $27.75\sim 29.8^{\circ}\text{C}$ 。文献[19]测量的重庆某典型湖体水温数据表明:在7~10月,湖体水温基本呈下降趋势。模拟结果表明:分散排水形式下,水体中心未受排水影响的区域水



(a) 7月初排水管所在平面的温度场



(b) 10月底排水管所处平面的温度场

图7 分散排水下温度场的发展

体同样呈现水温下降的趋势,利于取得较低温度的水;而右下角的排水区域集中了较多的排水量,为设计负荷下排水量的 $39.98\%$ ,此处水道狭长,水容积也有限,流动性差,故造成了10月底较明显的热累积;比较右上部的排水区域,排水量为设计值的 $26.73\%$ ,此部分的水体水道较短,热积累并不明显。

模拟结果表明:对于水库类滞留水体,水体自身的流动性差,易造成局部水体的热积累,在水道狭长的浅水区域更明显;同时,由于流动性差,热扩散作用也将变得缓慢,远离排水区域的水体水温变化所受影响并不明显。需指出:自然降水、水库水位线变化等因素并未在边界条件中体现,在实际中由于雨水的补充,可以使水体的流动性加强,故热积累过程可能有所减弱;此外,本项目源水侧排放水所接的雨水管管径均为 $\text{DN}300$ ,在建筑负荷较小的时间段,冷却水量小,排水管为非满管流,流速很小,也会造成热扩散缓慢。在考虑管网结合时,亦需要注意此问题。

5.2.3 运行工况下取水温度的变化 热泵系统的性能系数对于取水温度较敏感<sup>[20]</sup>,因而,取水侧设计对于热泵系统的高效稳定运行具有重要意义。项目取水管设在标高 $782\text{ m}$ 处,即位于水库常年水位线 $4.6\text{ m}$ 以下,采用文献[16]提出的线性取水方式。

在前述模型和边界条件下,7~10月份的空调运行季节内,取水管口处取水温度变化曲线如图8所示。

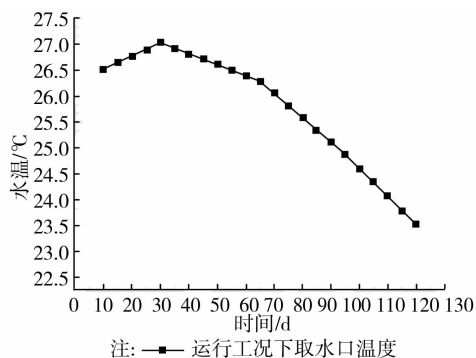


图8 运行工况下取水口温度变化曲线

在供冷季系统整个运行期内,取水温度在27~23.5°C之间变化。模拟结果表明:在7~10月份的空调运行季内,取水温度能保证热泵系统的高效运行。

## 6 结论

针对某别墅群的水库水源热泵系统,结合水体的实测数据,对自然水温模拟的边界条件进行修正后作为水体的初始化水温。根据全年逐时负荷模拟结果,采用动态水温及水量为边界条件,以典型气象年数据为基础,对其夏季散点排水工况下的水体水温进行了模拟分析。

1) 提出集中取水、结合室外雨水管网分散排水的有别于常规集中排水的滞留水体水源热泵系统取排水方式,可减少室外管网、节约投资、减低施工难度。

2) 设计工况下水体水温与自然状态下的水温比较表明:采用分散排水方案水体的周温升0.16°C,较采用集中排水方案水体的周温升0.33°C更优,能较好的实现排水的散热。

3) 设计工况下,系统运行1周后,采用集中排水方案时取水口的水温仅比采用分散排水时高0.04°C,表明湖体体量较大时,取排水口距离的合理设置可以使得取水口水温所受影响较小。

4) 对分散排水方案,在7~10月份建筑动态负荷边界条件下,水体水道狭长、水体积有限的区域在连续排水的情况下,有热累积现象,但局部的热累积现象并没有造成取水口明显的温升。

5) 对分散排水方案连续运行条件下取水口水温的模拟结果表明,7~10月份,位于常年水位4.6 m水深下的取水口取水温度在27~23.5°C之间,可实现热泵系统的高效运行。

## 参考文献:

- [1] 罗惠珠. 重庆市应用湖库水水源热泵系统条件分析[J]. 四川环境, 2010, 29(2): 70-74.  
Luo H Z. Analysis of conditions to apply heat pump system of lake or reservoir water source in chongqing [J]. Sichuan Environment, 2010, 29(2): 70-74.
- [2] 谢厚礼, 刘宪英. 重庆地区地表水地源热泵的应用及建议[J]. 暖通空调, 2011, 41(6): 58-61.  
Xie H L, Liu X Y. Application and suggestion for surface water source heat pumps in Chongqing area[J]. HV&AC, 2011, 41(6): 58-61.
- [3] 秦增虎, 童明伟, 项勇. 江水源热泵水质标准实验及传热特性分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(3): 71-74.  
Qin Z H, Tong M W, Xiang Y. Water quality standard test and heat transfer analysis of river water source heat pump [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(3): 71-74.
- [4] 贾遵锋, 丁勇. 江水源热泵系统应用中的江水水质分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 53-56.  
Jia Z F, Ding Y. Analysis of river water quality in the application of river source heat pump system[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(6): 53-56.
- [5] Wei W D, Meng T, Li L, et al. Theoretical research and optimization in variable condition of water source heat pump [C]//2009 International Conference on Energy and Environment Technology, ICEET 2009: 479-482.
- [6] Qu S L, Luo H Q. Study on analogue simulation of the influences of thermal parameters on the performance of water source heat pump under variable working condition[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 71-78: 3789-3793.
- [7] Palahansk M M, Wang G, Liu M. Optimal supply water temperature control of water source heat pump [C]. International Solar Energy Conference, 2005, 317-323.
- [8] Smish A. Water-source heat pump economically controls concrete temperature [J]. Concrete Construction-World of Concrete, 1990, 35(2): 234-236.
- [9] 王勇, 吴浩, 刘勇, 等. 排热工况下湖水源热泵系统的水体水温计算方法[J]. 土木工程与环境工程, 2010, 32(4): 62-65.  
Wang Y, Wu H, Liu Y, et al. Calculation method of water temperature in the condition of heat rejection for lake-water source heat pump systems [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering,

- 2010, 32 (4):62-65.
- [10] 黄向阳,周健,姜文超,等. 湖水源热泵系统温排水数学模型研究及应用[J]. 安全与环境学报, 2010(3):62-65.  
Huang X Y, Zhou J, Jiang W C, et al. Study on mathematical model of thermal discharge from lake water source heat pump systems and its application[J]. Journal of Safety and Environment, 2010(3):62-65.
- [11] 周健,干丽莎,刘月红,等. 湖水源热泵系统尾水排放方式对水域温升分布的影响[J]. 中国给水排水, 2010(19):54-57.  
Zhou J, Gan L S, Liu Y H, et al. Influence of discharge modes of lake water-source heat pump tail water on temperature rise distribution in lake[J]. China Water & Wastewater, 2010(19):54-57.
- [12] Hamrick J V. Analysis of water temperatures in Conowrngo Pond as influenced by the Peach Bottom atomic power plant thermal discharge [ J ]. Environmental Science&Policy, 2000(3):223-230.
- [13] Yi L C, Hsiao H Y, Hsing J L. Effectof a thermal discharge from a nuclear power plant on phytoplankton and periphyton in subtropical coastal waters [ J ]. Journal of Sea Research, 2009, 61(4): 197-205.
- [14] 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, 2009.
- [15] Youssef, Mohammad Z. Experimental and mathematical analysis of three ground- coupled heat exchangers [D]. North Carolina State University, 1990.
- [16] 陈金华,刘猛. 湖水源热泵空调系统取水方式性能分析[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2009, 36(12): 79-83.  
Chen J H, Liu M. Performance analysis of water-intaking mode for lake-source heat pump air-conditioning system[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(12): 79-83.
- [17] 李良福. 气象因素与土壤性质耦合效应对土壤电导的影响[D]. 重庆:西南大学, 2010: 143.
- [18] Ding Y, Li B Z, Yao R M, et al. Part load operation coefficient of air-conditioning system of public building [J]. Energy and Buildings, 2010(42): 1902-1907.
- [19] Fan G D, Zhang Z, LUO J, et al. The characteristics of lakes of water source heat pump systems in Chongqing[C]//International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring, CDCIEM 2011: 1848-1852.
- [20] Fan G D. Analysis of the water intake technology of open-lakes water source heat pump system in Chongqing [J]. Advanced Materials Research, 2011 (250-253):3168-3172.

(编辑 胡 玲)