

排热工况下湖水源热泵系统的水体水温计算方法

王 勇¹, 吴 浩¹, 刘 勇¹, 范 维²

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045;
2. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘 要:湖水源热泵利用水体的水温在系统排热或排冷工况下将发生动态变化,水体的水温变化超过水体所能承受的排热或排冷量时,将导致湖水源热泵系统运行不正常甚至瘫痪。在二维初始水温模型的基础上,利用质量和能量方程,建立了水源热泵系统利用水体水温变化的动态模型。通过水流方程与温度方程耦合求解得到水体在带负荷状况下的水温变化模型方程。该计算方法不仅可以为湖水源热泵系统的可行性研究奠定理论基础,也可作为计算利用水体最大热承载能力的前期研究基础。

关键词:水源热泵; 水温; 耦合; 热承载; 动态

中图分类号: TU831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2010)04-0062-04

Calculation Method of Water Temperature in the Condition of Heat Rejection for Lake-Water Source Heat Pump Systems

WANG Yong¹, WU Hao¹, LIU Yong¹, FAN Wei²

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. College of Material and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The temperature of water used for surface water source heat pump (WSHP) could make dynamic changes in the condition of heat or cold rejection. When the water temperature is over the amount of heat or cold rejection that water can take, WSHP system will run irregularly even paralyze. Based on two-dimensional model of the initial water temperature, dynamic model of water used for WSHP was proposed with mass equation and energy equation. And with flow equation coupled with temperature equation, the equation of water temperature changes in load was obtained.

Key words: water source heat pump (WSHP); water temperature; coupling; heat carrying capacity; dynamic

湖水源热泵以湖水或水库等非流动水体作为热泵的低位冷热源。冬季通过热泵将室内侧的冷量排入到水体,夏季通过热泵将室内侧的热量排入到水体。由于水体的水温冬季高于空气温度,而夏季水体水温低于空气温度,是一种较好的节能空调系统^[1-2],该系统在中国得到了迅速发展^[3-4]。

但是,建筑内的空调负荷向水体正常转移的前提是水体热容量具备接纳建筑负荷的能力,冷热负荷转移过程中,水体的水温将发生变化,这直接导致

取水温度发生变化。而对于湖水源热泵而言,取水温度是影响系统能耗的关键参数^[5]。若系统运行过程中,水体水温变化过高或过低,均严重影响水源热泵机组的效率^[6],甚至系统瘫痪。

相对传统空调而言,湖水源热泵节能运行的前提是保持湖体取水温度控制在一定的范围内。当建筑负荷通过热泵向水体转移的冷热量超过一定范围,即取水温度超过节能运行的温度限值,此时水体能够承受的冷热量,可定义为水体的最大热承载能

收稿日期: 2009-12-20

基金项目: 国家科技部“十一五”科技攻关项目(2006BAJ01A06); 重庆市科委重大科技专项应用产品(CSTC, 2008AB7110)

作者简介: 王勇(1971-),男,副教授,博士,主要建筑节能、新能源开发与利用研究,(E-mail)wyfree@263.net。

力。当热泵系统排热、排冷量超过此热承载能力,则该系统无法正常运行。而计算水体热承载能力的基础是确定水体带负荷下的水温变化规律。

由于地理、建筑规模等条件限制,国外对开式水源热泵系统的研究较少(不含海水源热泵系统),其主要的研究对象是小型的闭式水源热泵系统以及地下水源热泵系统^[7]。导致针对水源热泵向相对滞留水体进行水温变化研究较少^[8],温排水对水温的影响也主要集中在电厂和流动水体^[9-10]。中国最近几年开始大规模应用^[11],目前已有学者开始进行水源热泵排热工况下水温变化对环境的影响分析,但仍针对的是流动水体^[12-13]。对于相对滞留的水体在热泵排热工况下的水温变化规律研究相对较少^[14-15],导致应用中出现诸多问题。因此,有必要对湖水源热泵系统利用水体在负荷工况下的水温变化规律进行研究。为此,建立了 1 种湖水源热泵排热工况下水体水温变化的计算方法,该方法可以成为判断湖水源热泵应用水体合理性的理论基础。

1 模型建立

要解决水体热容量与热泵系统向水体进行排热和排冷,必须建立能量和质量平衡方程才能准确求解水体水温在系统负荷影响下的变化规律。为此应建立相应的控制方程。该控制方程存在如下假设和简化条件:

- 1) 水体为滞留水体,除取水和排水外,水体不存在自然的出流和进流。
- 2) 水体水面采用刚盖假设,自由水面固定不变,法线速度为零。
- 3) 不考虑岩土与水体间以及岩土中的质交换。
- 4) 壁面与水底采用黏性无滑移条件、无质量交换。
- 5) 为简化计算,太阳辐射强度、空气温度、湿度、风速等气象参数采用月平均值。

1.1 控制方程

控制方程的建立原则是首先建立水源热泵系统利用水体的初始水温模型控制方程,水源热泵运行过程的物理模型即是向水体释放热量,其数学模型就是在初始水温模型中的控制方程中添加源项,即在质量守恒方程和能量守恒方程中分别添加质量源项和能量源项。控制方程为:

连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{\rho} q(x, z, t) \quad (1)$$

水位方程: $\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\int_{-h}^{\xi} u dz \right) = 0 \quad (2)$

动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

压力方程:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (4)$$

水温方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(E_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - u \frac{\partial T}{\partial x} - w \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial \varphi_z}{\partial z} + \frac{1}{\rho} S(x, z, t) \quad (5)$$

各源项计算式分别为:

$$q(x, z, t) = \begin{cases} +m(x, z, t)/V(x, z) & \text{排水口所在节点单元} \\ -m(x, z, t)/V(x, z) & \text{取水口所在节点单元} \\ 0 & \text{其它区域} \end{cases} \quad (6)$$

$$s(x, z, t) =$$

$$\begin{cases} q(x, z, t)\Delta T & \text{排水口所在节点单元} \\ 0 & \text{其它区域} \end{cases} \quad (7)$$

其中: $q(x, z, t)$ 为排水口或进水口节点单元的质量源项, kg/m^3 ; $S(x, z, t)$ 为排水口节点单元的能量源项, $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{C}$; φ_z 为穿过 z 平面的太阳辐射通量, W/m^2 ; $m(x, z, t)$ 为取、排水的质量流量 (kg/s), 其计算式为:

$$m(x, z, t) = \frac{Q_d}{c_p \Delta T} \left(\frac{EER + 1}{EER} \right) \quad (8)$$

$V(x, z)$ 为取、排水口附近计算微单元的体积, m^3 ; ΔT 为取、排水温差, C ; Q_d 为水源热泵系统承担的冷负荷, W ; EER 为水源热泵机组制冷能效比。

其它各参数: u, w 分别为 x, z 向的流速分量, m/s ; ξ 为水位(水面至基准面的垂向距离); h 为湖底至基准面的垂向距离; p 为压力; μ_x, μ_z 分别为 x, z 向的紊动粘滞系数, m^2/s ; E_x, E_z 分别为紊动扩散系数的 x, z 向分量, m^2/s , 且 E_x, E_z 与 μ_x, μ_z 之间有关系 $E_x = \frac{\mu_x}{\sigma_t}, E_z = \frac{\mu_z}{\sigma_t}$, σ_t 是温度普朗特数, 取 0.85。

1.2 定解条件

1) 自由表面

由于水表面与大气存在热交换,在方程求解时,水表面作为自由表面,由此建立方程的边界条件。水体采用钢盖假定,即水深和液面不随时间变化,有

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, w = 0。$$

对水流方程,有风时

$$\mu_z \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_{wx}}{\rho} \quad (9)$$

$$\tau_{wx} = \rho_a f(v) |v| v_w \quad (10)$$

式中: τ_{wx} 为风对水面剪切应力在 x 向的分量; ρ_a 为空气密度; v 为水面 10 m 以上风速,近似采用《中国建筑热环境分析专用气象数据库》里的数据; v_w 为风速在 x 向的分量,计算过程中近似按 $0.707 v$ 处理; $f(v)$ 为风函数($\text{W/m}^2 \cdot \text{mmHg}$), $f(v) = 9.2 + 0.46v^2$ 。

无风时 $\tau_{wx} = 0$

2) 湖底及四周壁面

对水流方程,设为无滑移边界, $u = w = 0$ 。对水温方程,设置为绝热边界。

3) 进口边界

对水体而言,进口即是热泵系统向水体的排水口,该进口边界只发生在排水口节点单元,所以对水流方程而言,就是给定排水质量流量(即源项计算式);对水温方程,给定温度 T ,就是给定排水温度。

4) 出口边界

同理,水体出口就是热泵系统的取水口,该出口边界只发生在取水口节点单元,对水流方程,就是给定取水质量流量;对水温方程,有 $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$,取水水温就等于取水口处湖水水温(根据本文研究的湖泊类型——小型热分层型湖泊和水库,可认为湖泊和水库没有自然的出流和入流,其入流就是系统排水,出流就是系统取水)。

5) 初始条件

给定水源热泵系统开始运行时的温度场和流速场,即 $T(x, z, 0) = T_0(x, z)$; $u(x, z, 0) = u_0(x, z)$; $w(x, z, 0) = w_0(x, z)$ 。该时刻的温度场和流速场可以通过自然条件下的水流和水温模型求解得到,也可以通过实测得到。

1.3 模型求解

水流方程与温度方程耦合求解。计算中先求解水流方程得出 u, w ,再求解水温方程。对水流方程采用交错网格、交替方向、分部差分求解,水温方程的求解分 2 步完成,在 X 方向用追赶法解方程得出 $T_{i,j}^{n+1/2}$,再在 Z 方向用追赶法解方程式得出 $T_{i,j}^{n+1}$ 。然后用新的水温方程修正动量方程,直到各方程的误差余量小于容许值。

2 模型的验证

2.1 工程概况

以重庆市开县人民医院水源热泵工程实测资料

验证建立的带负荷的水流水温模型。

重庆市开县人民医院属移民迁建项目业务综合楼工程,建设地点为开县新城伯承路以西的安康水库东侧,该水库平时作为休闲湖体,如图 1 所示。该综合楼项目总建筑面积 $54\,411.2\text{m}^2$,其中地下 $3\,722.15\text{m}^2$,地上 $50\,689.05\text{m}^2$ 。夏季总冷负荷为 $2\,912.71\text{kW}$,冬季总热负荷为 $1\,117.15\text{kW}$ 。该工程为湖水源热泵系统,夏季利用湖水作为空调系统的冷却水,冬季利用湖水作为空调系统的低位热源。

安康水库距离医院机房大约 300 m,其水容量常年维持在约 $16\sim 22\text{m}^3$,水体表面积约 $34\,768\text{m}^2$,水体深度常年保持在 $5\sim 7.5\text{m}$ 。取、排水口位置如图 1 所示,取、排水口之间水平方向上距离约 160 m,取水口位于水下 6 m 处。

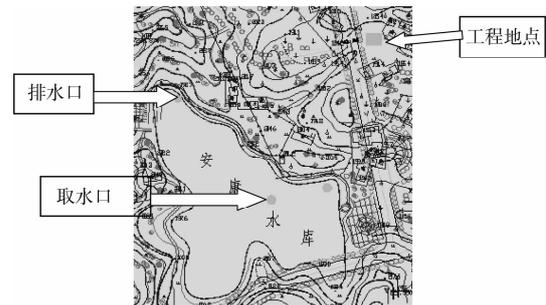


图 1 水库与工程位置及取、排水口位置图

2.2 计算验证

利用该文的数学模型,按照实际测得到的进水、排水温差以及系统向水体的连续平均排热负荷为输入条件,求解出对应实测时间的湖心水温分布。计算结果与实测水温分布如图 2 所示:

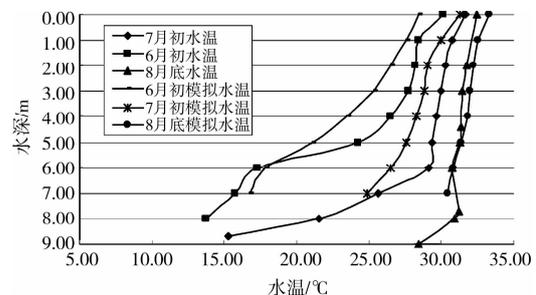


图 2 计算水温分布与实测水温分布比较

从图 2 可看出,6 月初时计算水温较实测水温有较大的误差,在水深为 $2\sim 5\text{m}$ 时误差为 $2\sim 3\text{℃}$;7 月初时误差较 6 月初时要小,在 6m 水深时误差最大,为 2.58℃ ,其它深度处误差在 1.0℃ 左右;8 月底时误差进一步缩小,在 0.5℃ 以内。其原因分析如下:在 4 月份到 8 月底这段时间内,模型计算过程中输入的边界条件和实际情况差异较大,因为实际运行过程中,如流量、温差等参数是不断变化的,

且热泵系统是非连续运行的,降雨也会影响湖水的温度分布。在计算中,对这些条件作了简化处理。

从图2可知,如果只考虑供冷结束时的水温分布,则计算值和实测值吻合得很好。建立的模型,可用于确定在供冷期结束时,水体水温达到极限温度。以该温度分布为基础,就能够计算水体所能够承受的负荷,为下一步计算水体的热承载能力奠定计算分析基础。

3 结论

1)水源热泵在运行过程中,建筑的冷热负荷通过热泵的能量转移导致水体水温结构发生变化。从计算和实测的数据看,案例中的湖体取水水温从6月运行初的17℃变化到8月底的32℃,水体的容量相对建筑的排热负荷偏小。

2)尝试了1种利用控制方程建立稳定负荷状况下的水温变化模型,并可求解其水温变化规律,其一定条件下可以较好的应用于实际工程。

3)从计算结果和实际测试数据看,热泵运行工况下的湖水温度变化影响因素较多,变工况的运行以及气象条件的变化均影响其温度分布,对于其计算方法还应根据不同情况进行修正。

参考文献:

- [1] ANTERO A M. Lakes as a heat source in cold climate [C]//International Congress of Refrigeration, Washington D C,2003:1-8.
- [2] TIM P, JOYCE W S. Lake-source cooling [J]. ASHRAE Journal, 2002,44(4):437-439.
- [3] 吕悦,莫然,周沫,等.中国地源热泵技术应用发展情况调查报告(2005—2006)[J].工程建设与设计,2007(09):4-11.
LV YUE, MO RAN, ZHOU MO, et al. China GSHP technology application development report (2005—2006) [J], Construction & Design for Project, 2007(09):4-11.
- [4] 狄彦强,王庆强.水源热泵的应用与发展[J].制冷与空调,2005,6(5):1-4.
DI YANQING, WANG QINGQIN G. Discussion about the application and development of water source heat pumps[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2005,6(5):1-4.
- [5] 李文.长江流域湖水水源热泵系统能效分析研究[D].重庆:重庆大学,2008.
- [6] 张成宇,张欢.水源热泵机组特性模拟与实验研究[J].煤气与热力,2006,26(3):45-48.
ZHANG CHENG-YU, ZHANG HUAN. Simulation and experimental study on characteristics of water source heat pump unit[J]. Gas & Heat,2006,26(3):45-48.
- [7] KAREN R. DEN BRAVEN. Regulation for open-loop ground-source heat pumps in the United States[C]//ASHRAE Water Meeting, Atlantic City,2002.
- [8] BUYU KALACA O, EINCI F, YILMAZ T. Experimental investigation of Seyhan River and dam lake as heat source-sink for a heat pump [J]. Energy, 2003, 28(2):157-169.
- [9] T E L. Langford. Thermal discharges and pollution [M]. Encyclopedic of Ocean Sciences, 2009
- [10] 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.
- [11] 付圣东,刘金祥,陆桂良,等.地表水源热泵若干常见问题分析[J].制冷空调,2007,113(28):64-66.
FU SHENG-DONG, LIU JIN-XIANG, LU GUI-LIANG, et al. Analysis of common problems in earth's surface water heat pump [J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery. 2007, 113(28):64-66.
- [12] 张文字,龙惟定.上海世博园地表水地源热泵的应用及环境影响分析[J].暖通空调,2007,37(2):28-41.
ZHANG WEN-YU, LONG WEI-DIING. Application of surface water source heat pump systems in Shanghai Expo and the environment effect analysis [J]. HV&AC,2007,37(2):28-41.
- [13] 潘洁,刘传聚.地表水源热泵应用中的热污染隐患[J].上海节能,2007(3):287-290
PAN JIE, LIU CHUAN-JU. Risk of heat pollution in surface water heat pump systems[J]. Shanghai Energy Conservation,2007(3):287-290.
- [14] 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,2006,3(27):10-13
CHEN XIAO, ZHANG GUO-QIANG, PENG JIAN-GUO, 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, 3(27):10-13.
- [15] 黄向阳,杜国军.湖水源热泵冷排水对湖泊水温的影响模拟研究[J].水科学与工程技术,2009(4):44-46.
HUANG XIANG-YANG, DU GUO-JUN. Study on the effects of cold discharge of lake water source heat pump systems on lake water temperature[J]. Water Sciences and Engineering Technology,2009(4):44-46.

(编辑 胡玲)