

文章编号:1000-582X(2012)08-006-05

有限容积的湖水源热泵冬季供暖运行分析

童明伟,秦增虎,张二峰

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

摘要:分析了在冬季采暖时重庆大学主教学楼增设湖水源热泵的可行性,对湖水水温水质情况进行了测定,发现水质富营养化较为严重,在湖水进入换热器之前需要对湖水进行净化处理。分析了湖体的热承载能力,并在冬季供暖运行工况下对湖体的逐时温度进行了模拟计算。当重庆1月份内气温平均为 $5\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,湖水作为蒸发器的循环水不断向热泵机组提供能量,假定湖水初始温度为 $13.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,对1月份逐时水温运行的数值模拟表明:到第24 d的时,湖水的温度已降低到 $4.04\text{ }^{\circ}\text{C}$,蒸发器表面就可能出现结冰而引起机组的冰堵,这将危及换热设备安全,因此必须设置辅助加热器才能保证主楼的采暖。

关键词:湖水源热泵;热承载能力;热交换;数值模拟

中图分类号:TU831.8

文献标志码:A

Operating analysis on finite volume of lake-water source heat pump in winter heating

TONG Mingwei , QIN Zenghu , ZHANG Erfeng

(Key Laboratory of Low-grade Energy Technology and System Ministry of Education,
Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The feasibility of the main teaching building of Chongqing University additional lake water source heat pump during the winter heating is analyzed and the water temperature and quality of the artificial lake are determined, that the water is more serious eutrophication, and it must be purified before the water enters heat exchangers. Heat carrying capacity of lake is analyzed and hourly temperature of the lake is simulated during the winter heating operating conditions. When the average temperature is $5\sim 8\text{ }^{\circ}\text{C}$ in January in Chongqing, the lake as an evaporator cycle water provide energy to heat pump constantly, assumed initial temperature of water is $13.7\text{ }^{\circ}\text{C}$, hourly water temperature is simulated in January. The water temperature has dropped to $4.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ at 24 d, the evaporator surface may be frozen and cause the phenomenon of ice-clogging, which will endanger the safety of heat transfer equipment, therefore, auxiliary heater must be set to ensure the main building heating.

Key words: lake-water source heat pump; heat capacity; heat transfer; numerical simulation

收稿日期:2012-02-09

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划重点项目(2007BAB21B02-1-1)

作者简介:童明伟(1945-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事工程热物理及传热传质研究,
(E-mail)tmw1016@163.com。

利用各种廉价的低品位热源或清洁可再生能源为建筑物供冷或供热,已经是建筑节能的重要环节。湖水源热泵技术作为一种可再生能源技术,具有高效节能、运行稳定可靠、环境效益显著等优点,与燃(油)煤锅炉采暖系统相比节能达 30%~40%^[1]。国内外已有利用湖水发展水源热泵技术的应用实例^[2-4],Cornell 大学应用开式系统为校园园区供冷,能耗降低了 80%^[5];Toronto 地区采用 Toronto 的湖水作为乡镇办公建筑的夏季冷源,能耗比采用传统空调系统降低了 90%^[6];湖南湘潭市中心区采用地表人工湖水源热泵进行区域供冷供暖,年运行费用节省 40%以上^[7]。

重庆坐拥长江、嘉陵江以及众多的淡水湖泊,地表水冷热资源异常丰富,合理利用地表水资源,开发出高能效的空调系统对建筑节能具有重大意义。但针对重庆地区发展地表水源热泵技术的应用实例并不太多,有一部分尚处于建设和可行性研究阶段。重庆大学主教学楼筹划增设湖水源热泵空调工程项目。为了深入了解该湖水源热泵空调系统应用的预期效果,笔者对系统在冬季采暖的水体热承载能力以及其运行工况进行了研究。

1 工程概况

重庆大学主教学楼是集教学、科研、办公为一体的综合教学楼。主楼地上 27 层,地下 3 层,为现浇钢筋混凝土框-核心筒结构;裙楼地上 5 层,地下 2 层,为现浇钢筋混凝土结构。占地面积 1.2 万 m²,建筑面积 7 万 m²,建筑高度 121.5 m。位于主教学楼附近的人工湖,距主教学楼约有 100 m,湖体常年储水量在 3 万多 m³,常年水温 5~25℃,平均水深为 3 m,水质较好。该工程空调系统拟采用地表水水源(人工湖)作为主教学楼裙楼空调系统的低位冷热源。

2 湖水源水温水质分析

2.1 水温分析

根据相关的气象数据分析^[8-9],重庆市全年室外气温波动较大,冬季日平均温度最低约为 5.5℃,夏季日平均温度最高约为 31.7℃。最热月平均气温 26~29℃,最冷月平均气温 4~8℃,其最热月的日最高温度与日最低温度分别为 37.7℃和 28.2℃,最冷月的日最高温度与日最低温度分别为 13.6℃和 3.4℃。以上数据显示,重庆地区气候条件必将对传统空调设备的运行稳定性、机组制冷、制热量以及系统的耗电量造成不利影响。由于没有该人工湖

的水文资料,笔者自 2009 年 11 月至 2010 年 5 月对人工湖的湖水表面温度及室外温度进行了近半年的测试,每次测试均进行多天,且为每天 07:00 和 22:00 各测量 1 次,取平均值。图 1 给出了 2009 年 11 月至 2010 年 5 月人工湖的湖水水体温度及室外温度变化规律。

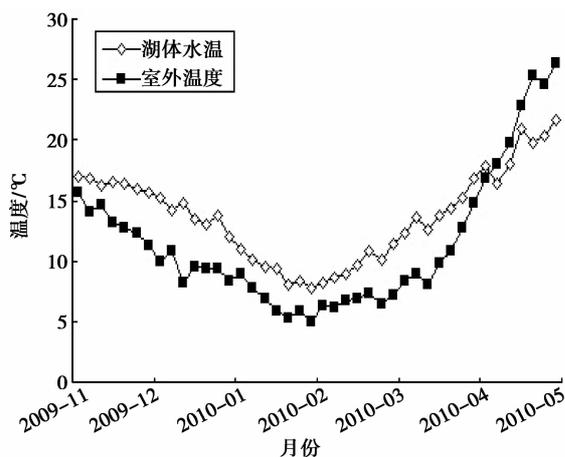


图 1 湖水水体温度及室外温度变化规律

由图 1 可见,在冬季湖水水温最低温度为 7.8℃,测试期间水温在 8~22℃范围内变化,湖水水温低于 10℃时大约有 30 d。由于该人工湖属小型浅水湖,全年整个水体水温分布比较一致,因此没有考虑水温分层情况。

2.2 湖水水质分析

为检测该人工湖湖水水质情况以及是否符合《地源热泵系统工程技术规范》(GB50366—2005)对采用地表水的水源热泵机组推荐的水质要求,笔者对湖水水样进行了检测分析与化验。根据检测报告可知,该湖水水体腐蚀作用不强,结垢趋势属轻度水平,具有一定的铁锈生成条件。水中重金属离子含量很少,铁离子、钙离子与磷酸根将有可能形成沉淀。湖水含盐量较高,水质富营养化程度较为严重,这与湖中养殖有不少鱼类有关,而这种水质容易诱发生水生植物以及藻类大量繁殖,其中硅藻类最多^[10],但其属于常见藻类并无毒害。因此在湖水进入换热器之前需要进行净化处理。

3 计算模型

该工程拟采用开式系统使用此人工湖作为冬季空调系统的热源,在水体的底部区域取水,经热交换器换热后再将湖水在离取水点一定距离的地点排入湖中,取排水口的位置分布如图 2 所示。在冬季供暖模式下,为确保实际工程中不会出现因湖水蓄热

能力不足而导致湖水源热泵效率下降的状况,需要对有限容积的湖水源热泵冬季应用可行性做出如下科学验证:在极端情况下,空调系统运行过程中持续的从湖体取热是否会使湖水温度明显下降而导致湖水的“冷热收支”不平衡。

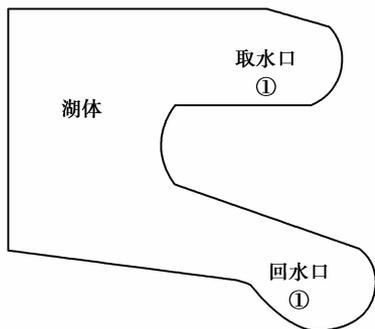


图 2 取排水口在湖体的位置分布

3.1 热交换基本原理

在系统实际运行过程中,湖水存在的热交换过程主要包括:1)水源热泵系统从湖体的取热 Q_{HAVC} ; 2)湖水吸收的太阳辐射 Q_{solar} ; 3)湖水表面与空气的热湿交换 Q_{air} ; 4)湖水与湖底及四壁的热交换 Q_{soil} 。以上热交换过程中,过程 1)、2)主要发生在白天,过程 3)、4)全天都一直存在,它们的综合效果可能会是整个湖体的平均水温有所降低。

根据以上分析,建立湖水的能量平衡方程式^[11]:

$$\rho VC \frac{dt_w}{\tau} = Q_{\text{HVAC}} + Q_{\text{solar}} + Q_{\text{air}} + Q_{\text{soil}}, \quad (1)$$

其中: ρ 为湖水的密度,取近似值 $1\,000\text{ kg/m}^3$; V 为湖水体积,湖水平均深 3 m ,表面积为 $11\,000\text{ m}^2$,因此湖水的体积为 $33\,000\text{ m}^3$; τ 为时间, s ; Q_{HAVC} 为水源热泵系统当前小时内吸收的热量, kJ ; Q_{solar} 为湖水当前小时内吸收的太阳辐射热量, kJ ; Q_{air} 为湖水当前小时内与空气热湿交换的热量, kJ ; Q_{soil} 为湖水当前小时内与土壤换热获得的热量, kJ 。

3.2 湖水吸收的太阳辐射 Q_{solar}

太阳的日照总辐射经过水面反射后,除表层吸收一部分以外,其余部分透射入水体内部。在穿透过程中,部分被湖水吸收,部分透射到湖底,部分又被湖底反射到湖水中。采用《中国建筑热环境分析专用气象数据库》的数据, ρ_w 为湖水表面对太阳短波辐射的反射率,根据经验值取为 0.1 ,穿透水体的太阳光主要为可见光, α 为湖水对太阳辐射的吸收率,一般取 0.65 , τ 为湖水对太阳辐射的透射率,取值为 0.25 。而仅考虑湖底的一次反射时,湖水底部土壤的反射率 ρ_{soil} 可近似取值为 0.1 。

则湖水吸收的太阳辐射量 Q_{solar} 为

$$Q_{\text{solar}} = I(\alpha + \tau\rho_{\text{soil}})A/1\,000, \quad (2)$$

其中: I 为照射到湖水表面的太阳总辐射, W/m^2 ; α 为湖水的吸收率; τ 为湖水的透射率; ρ_{soil} 为湖水底部土壤的反射率; A 为湖水表面积,取值 $11\,000\text{ m}^2$ 。

3.3 湖水与空气的热交换 Q_{air}

此人工湖属于小型浅水湖,1年中湖内水温分布比较均匀,水温梯度很小,因此湖水与空气的显热交换为

$$Q_{\text{air},1} = h(t_w - t_a)A/1\,000, \quad (3)$$

其中: h 为湖水表面与空气的显热交换系数, $h = 5.7 + 3.8v$,其中 v 表示周围空气的流速,在冬季周围空气的流速为 0.95 m/s ^[12], $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A 为湖水表面积,取 $11\,000\text{ m}^2$; t_a 为主体空气温度,取冬季最冷月平均温度 $8.1\text{ }^\circ\text{C}$; t_w 为湖水表面温度(近似于湖水平均温度),取冬季湖水平均温度 $13.7\text{ }^\circ\text{C}$ 。

湖水与空气的潜热交换为

$$Q_{\text{air},2} = rh_d(d_a - d_h)A/1\,000, \quad (4)$$

其中: r 为汽化潜热, kJ/kg ; d 为空气的含湿量, kg/kg ; h_d 为湿交换系数, $h_d = h/C_a$,其中 C_a 为干空气的比热, $\text{kJ/(kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ 。而 $C_a = 1.01\text{ kJ/(kg} \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ 。

则湖水与空气的全热交换热量为

$$Q_{\text{air}} = Q_{\text{air},1} + Q_{\text{air},2}. \quad (5)$$

3.4 湖水与土壤的热交换 Q_{soil}

3.4.1 湖水与四壁的热交换

对于大空间自然对流换热的过程,湖水与四壁热交换可简化为竖平板层流状态考虑,因此其关系式为

$$\begin{aligned} N_u &= 0.59(G_r P_r)^{1/4} \\ &= 0.59 \left(\frac{g\alpha\Delta t l^3}{\nu^2} P_r \right)^{1/4}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$N_u = \frac{hl}{\lambda}. \quad (7)$$

冬季湖水的平均温度为 $13.7\text{ }^\circ\text{C}$,此时湖水参数分别为: $P_r = 8.40$, $\lambda = 58.3 \times 10^{-2}\text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, $\alpha = 13.9 \times 10^{-8}\text{ m}^2/\text{s}$, $\nu = 1.174 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$, $\Delta T = 5\text{ }^\circ\text{C}$, $l = 3\text{ m}$ 。

可计算得 $h_{\text{soil},1} = 26.40\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

3.4.2 湖水与湖底的热交换

湖水与湖底热交换可简化为水平平板层流状态考虑,因此其关系是应为

$$N_u = 0.54^* (G_r^* \cdot P_r)^{1/4}, \quad (8)$$

$$G_r^* = G_r \cdot N_u, N_u = \frac{hl}{\lambda}, \quad (9)$$

可计算得 $h_{\text{soil},2} = 23.66\text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

重庆市全年的平均温度按照 $24.2\text{ }^\circ\text{C}$ 计算,一定

深度下的土壤温度几乎等于全年空气温度,考虑到湖水水深在 3 m 左右,该深度下的土壤温度会略高于全年空气温度,为了安全考虑,土壤温度按照 28 ℃ 取值。则湖水与土壤的换热量计算为

$$Q_{\text{soil}} = \frac{1}{1\,000} [h_{\text{soil},1} (t_{\text{soil}} - t_{\text{water}}) F + h_{\text{soil},2} (t_{\text{soil}} - t_{\text{water}}) A], \quad (10)$$

其中: F 为湖壁面面积,取值为 3 200 m²; t_{soil} 为土壤温度,取值 28 ℃。

3.5 空调系统取热

系统为主教学楼 5 层裙楼提供热量,冬季设计热负荷为 1 076 kW,日累计负荷为 40.3 kW。采用的是 1 台 30HXC350A-HP2 型螺杆式冷水机组,若 COP 按照 4.54 计算空调系统蒸发器的吸热量,热泵机组自湖体中的取水量为 220 m³/h,湖水冬季需承担的热负荷为 1 380 kW。

3.6 数学模型

根据式(1)~(10)计算分析,湖水的逐时温度可以按照下式计算:

$$\begin{aligned} \rho VC \frac{dt_w}{\tau} &= Q_{\text{HVAC}} + Q_{\text{solar}} + Q_{\text{air}} + Q_{\text{soil}} \Rightarrow \\ \rho VC (t'_w - t_w) &= \tau [Q_{\text{HVAC}} + Q_{\text{solar}} + h(t_{\text{air}} - t_w) A + \\ &\quad rh_d (d_a - d_h) A + Q_{\text{soil}}] \Rightarrow \\ t'_w &= \frac{3\,600}{1\,000 \rho VC} \times [Q_{\text{HVAC}} + Q_{\text{solar}} + h(t_{\text{air}} - t_w) A + \\ &\quad rh_d (d_a - d_h) A + Q_{\text{soil}}] + t_w. \quad (11) \end{aligned}$$

4 模型设置及结果分析

湖水初始温度为冬季平均温度 13.7 ℃,计算时间为 1 个月(最冷月份 1 月),计算时间步长为 1 h,期间的数据以 1 h 数据线性插值得到;湖水温度分布比较均匀,水温梯度很小,忽略水平方向和竖直方向的温度分布;室外气象参数采用《中国建筑热环境分析专用气象数据库》的数据中本地区典型年的逐时温度;湖面风速采用重庆市典型年数据;在冬季湖面风速平均为 0.95 m/s;计算时间内每天的空调系统排热量均相等,计算周期内不会出现降雪、冰冻等极端恶劣天气。

湖水得热分析:由于重庆冬季太阳辐射量占全年辐射量只有 10% 左右,月平均总太阳辐射微弱,仅为 105 MJ/m³,因此对于辐射强度的日变化仅采用平均强度计算^[13]。而根据重庆市气象数据分析可知,在 1 月份重庆市日气温变化一般不超过 3 ℃,计算宜采用均值。空调系统取热为主要的散热环节,与空气和土壤的换热为主要的得热阶段,但是随

着空气温度的变化和太阳辐射的变化,湖水并非总处于散热状况,而是有的时间以散热为主,有的时间以得热为主。

湖水水温分析:应用文中数学模型计算所得湖水温度与实测温度相比误差小于 8%,计算模型能够较为真实的预测空调系统从湖水取热的湖水温度变化。图 3 为制热运行期间进水温度的变化情况。

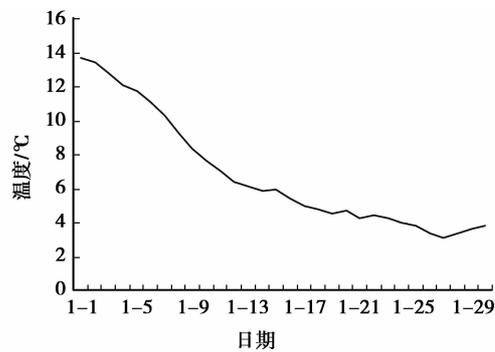


图 3 制热运行期进水温度的变化

以 13.7 ℃ 为起始计算温度,计算 1 月份逐时水温,可知:随着气温的下降和不断的取热,整个湖体温度逐渐降低,平均每天降低了 0.42 ℃,当模拟运行到第 24 d 的时候,湖水温度降低到 4.04 ℃。而在重庆气温平均为 5~8 ℃ 的 1 月份内,当蒸发器出口温度降低到 4 ℃ 时,蒸发器表面温度极有可能已经降至 0 ℃ 以下,蒸发器表面会出现结冰而引起机组的冰堵,严重时损坏换热设备。

在冬季实际应用中一旦出现降雪、冰冻等极端恶劣天气,湖水温度将会明显下降。

由于工程所在地湖水较浅,水流动性差,为了避免湖水提供的低位能源不足以及冬季连续超低温天气而引起的湖水温度偏低,在此空调系统中应设置辅助电加热器作为备用,确保系统万无一失。

5 结论

通过对有限容积的湖水水温、水质测定以及在冬季供暖模式下湖体的蓄热能力模拟计算可得出如下结论。

1) 冬季湖水水温在 8~22 ℃ 范围内变化,最低温度为 7.8 ℃,湖水水温低于 10 ℃ 时大约有 30 d。湖水水质较好,水体腐蚀作用不强,但水质富营养化程度较为严重,容易诱发水生植物以及藻类大量繁殖,因此在湖水进入换热器之前需要进行净化处理。

2)在冬季供暖运行工况下,以 13.7℃为起始计算温度,计算 1 月份逐时水温,整个湖体的温度会逐渐降低,当模拟运行到第 24 d 的时候,湖水的温度已降低到 4.04℃,蒸发器表面可能出现结冰而引起机组的冰堵,这将危及换热设备安全,必须采用辅助电加热器等相应的补救措施。

参考文献:

- [1] 沈长亮,吴祥生,庄春龙. 土壤源-湖水源热泵系统及工程应用实例[J]. 后勤工程学院学报,2009,26(1):17-21.
SHEN Changliang, WU Xiangsheng, ZHUANG Chunlong. Ground source and lake source heat pump system and project application [J]. Journal of Logistical Engineering University,2009,26(1):17-21.
- [2] Buyukalaca O, Ekinci 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.
- [3] Aittomaki A. Lakes as a heat source in cold climate [C]//Proceedings of the 21st IIR International Congress of Refrigeration, Aug. 17-22,2003, Washington, D. C., USA. [S. l.]:[S. n.],2003:1-8.
- [4] Kavanaugh S P, Pezent M C. Lake water applications of water-to-air heat pumps [J]. ASHRAE Transactions, 1990,96(1):813-820.
- [5] Cornell University. Lake source cooling:an idea whose time has come [EB/OL]. [2010-12-01]<http://www.news.cornell.edu/Chronicle/00/7.27.00/LSC.html>.
- [6] Chiasson A D, Spitler J D, Rees S J, et al. A model for simulating the performance of a shallow pond as a supplemental heat rejecter with close-loop ground-source heat pump systems [J]. ASHRAE Transactions,2006,106(2):107-121.
- [7] Chen X,Zhang G Q,Peng J G. The performance of an open-loop lake water heat pump system in south China [J]. Applied Thermal Engineering, 2006 (26):2255-2261.
- [8] 丁勇,李百战,罗庆,等. 重庆市自然资源在改善室内热湿环境中的作用 [J]. 重庆大学学报:自然科学版,2007,30(9):127-133.
DING Yong, LI Baizhan, LUO Qing, et al. Effect of natural resource on improving indoor thermal environment in Chongqing [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2007, 30(9):127-133.
- [9] 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:中国建筑工业出版社,2005.
- [10] 陈金华,付祥钊,丁勇,等. 重庆市开县人民医院湖水源热泵空调系统[J]. 暖通空调,2008,38(4):86-89.
CHEN Jinhua, FU Xiangzhao, DING Yong, et al. Lake water source heat pump air conditioning system of Kaixian Country People's Hospital of Chongqing Municipality [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning,2008,38(4):86-89.
- [11] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 3 版. 北京:高等教育出版社,1998.
- [12] 李艳,耿丹,董新宁,等. 1961-2007 年重庆风速的气候变化特征[J]. 大气科学学报,2010,33(3):336-340.
LI Yan, GENG Dan, DONG Xinning, et al. Climate change of wind speed in Chongqing from 1961 to 2007 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences,2010,33(3):336-340.
- [13] 李怀玉. 重庆地区淡水源热泵技术应用研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.

(编辑 陈移峰)