

地源热泵不同运行模式埋管进出口 温度模拟及实验验证

储国成¹, 余跃进¹, 蔡宗良²

(1. 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042 2. 南京民用建筑设计院有限责任公司, 江苏 南京 210004)

[摘要] 目前地源热泵在中国已大规模应用,但如何在使用地源热泵中节能仍需研究.不同的建筑,地源热泵运行的模式不同.从地源热泵连续、间歇运行两种模式进行分析,得出不同运行模式影响埋管的进出口温度,进出口温差对地埋管的换热有很大影响.建立了地源热泵不同运行模式的实验模型,并采用实验方法进行验证,将模拟的结果与实验测试的数据进行比较,证明了模拟的实用性,对工程实际应用有一定的帮助.

[关键词] 地源热泵,不同运行模式,埋管进出口温度,脉冲热流,实验验证

[中图分类号] TU 831 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2008)03-0030-05

Experimental Research and Simulation on Inlet and Outlet Water Temperatures of Borehole for Ground Source Heat Pump With Different Operation Modes

Chu Guocheng¹, Yu Yuejin¹, Cai Zongliang²

(1. School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

2. Nanjing Design Institute of Civil Architecture LTD. CO., Nanjing 210004, China)

Abstract At present, the ground source heat pump is widely used in China, but how to save energy source by using GSHP should be investigated. There are some different operation modes to different architectures. The continuous operation and intermittent operation are analyzed in this paper. The inlet & outlet water temperatures of the borehole were influenced by different operation modes of GSHP. So is the heat transfer capability. The experimental modes about the different operation modes have been established and validated by experiment method and compared with the result and dates. It proves the utility of simulation and gives some help to the practical use of the project.

Key words ground source heat pump (GSHP), different operation modes, inlet and outlet water temperatures of the borehole, heat pulse, validated by experiment method

我国对土壤源热泵的研究起步较晚,80年代末,我国才开始对土壤源热泵的探索研究,大规模的研究只是到近几年才开始.据文献资料报道,国内最早的土壤源热泵研究开始于1989年^[1].地源热泵技术在我国应用前景虽然很广阔,但是由于起步较晚,国内对地源热泵系统的认识还不是很全面,只知道它是一种节能系统,至于如何节能、在何种条件下运行比较节能、系统具体是如何工作的,都不是很了解.而在这种设计者和用户都不了解系统的情况下,所设计和施工的地源热泵系统则会偏离其最佳的节能工况,从而造成应用中的盲目现象.

1 地源热泵不同运行模式

地源热泵运行分成全天连续运行和间歇运行模式,有些建筑(如酒店、宾馆、医院等),地源热泵系统需要全天连续运行;对于办公建筑和一些居住建筑,例如,办公楼或学校等,空调机组一般只需白天运行,

收稿日期: 2008-03-16

基金项目: 江苏省建设厅资助项目.

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

而夜晚则处于停机状态, 这种建筑就必然地采用间歇运行模式; 不同的运行模式对地下温度场的影响很不一样, 连续运行时地源温度场不容易得到恢复, 间歇运行时能够让地源温度场有充足的时间进行恢复, 也就减轻了土壤的负担. 地源热泵的不同运行模式影响着地埋管的换热, 不同的运行模式给机组带来的直接影响就是埋管进出口温度的变化.

2 地源热泵不同运行模式传热模型的建立

2.1 埋管换热器连续运行模式下脉冲热流的温度响应

地源热泵系统在连续运行时, 由于室外气温的变化等因素使得热泵负荷随时间发生变化, 导致单位孔深的热流量 $q(\tau)$ 是时间的函数, 这样的随时间变化的热流可以用一系列连续的矩形脉冲热流来近似, 然后将其转化为系列阶跃热流, 并使用叠加原理得到 $q(\tau)$, 用公式表示为:

$$q(\tau) = \sum_{n=1}^N (q_n - q_{n-1}) H e(\tau - \tau_n), H e(\tau - \tau_n) = \begin{cases} 1 & \tau - \tau_n \geq 0 \\ 0 & \tau - \tau_n < 0 \end{cases} q_0 = 0$$

即: 当 $\tau \leq \tau_1$ 时, $q(\tau) = 0$ 当 $\tau_n < \tau \leq \tau_{n+1} (n = 1, 2, \dots, N - 1)$ 时, $q(\tau) = q_n$; 当 $\tau > \tau_N$ 时, $q(\tau) = q_N$. 脉冲热流量的叠加:

$$T_b(\tau) = T_o + \sum_{n=1}^N (q_n - q_{n-1}) R_s(\tau - \tau_n), q_0 = 0$$

其中, 钻孔周围土壤热阻 $R_s(\tau - \tau_n)$ 可由式 $R_s = \frac{1}{4\pi \lambda_s} \ln \left(\frac{r_b^2}{4\alpha_s \tau} \right)$ 得出.

2.2 埋管换热器间歇运行模式下脉冲热流的温度响应 [2-4]

在工程实际应用中, 地源热泵系统往往根据建筑功能的需要而采用间歇运行模式, 这里先考察一个比较简单情况. 如图 1 所示, 假设热泵的间歇工况是周期性的, 一个周期为 t 脉冲持续的时间为 kt 其中 $0 < k < 1$ 表示运行份额, 脉冲热流量为 q/k 平均热流量为 q 则在整个运行期间 τ 中, 由平均热流量和脉冲热流量对钻孔壁温度作用的结果分别为 ΔT_1 和 ΔT_2 用公式近似表示为:

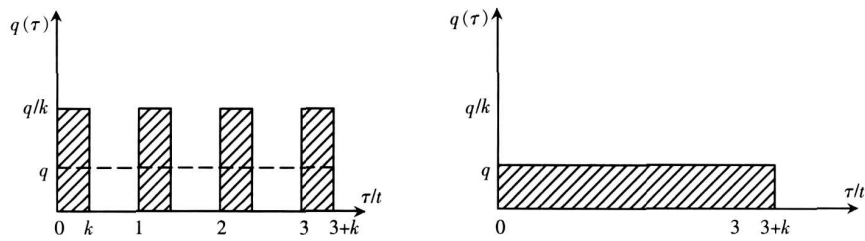


图 1 周期性脉冲热流及其简化计算
Fig.1 Injection pulses period and its simplification

$$\Delta T_1 = T_b(\tau) - T_o = \frac{q}{4\pi \lambda_s} \left[\ln \frac{4\alpha_s \tau}{r_b^2} - \gamma \right],$$
$$\Delta T_2 = T_b(\tau) - T_o = \frac{q}{4\pi \lambda_s} \left\{ \left(\frac{1}{k} - 1 \right) \left[\ln \frac{4\alpha_s kt}{r_b^2} - \gamma \right] + \ln k - \frac{\ln / \Gamma (k + 1) /}{k} \right\}, kt > \tau_b,$$

令修正值 $\beta = \ln k - \frac{\ln / \Gamma (k + 1) /}{k}$, 可知 β 取决于 k , 如表 1 所示.

表 1 修正值 β 的取值

Table 1 Values of correction tem β

k	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
β	- 1.8	- 1.2	- 0.84	- 0.62	- 0.45	- 0.32	- 0.22	- 0.13	- 0.06	0

周期性脉冲热流对钻孔壁温度作用的结果为 ΔT , 它是平均热流量 ΔT_1 和脉冲热流量 ΔT_2 共同作用的结果, 即:

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2$$

由此可见, 地源热泵系统运行一段时间后, 钻孔壁的温升既取决于这段时间持续的平均定热流的大

小, 也取决于单个热脉冲的强度及脉冲持续的时间.

2.3 埋管换热器内流体的进、出口温度^[5 6]

设单位孔深换热量为 q 孔深 H , 则埋管换热器的换热量为:

$$qH = C_{pf}m(T_{fin} - T_{fout}) = C_{pf}Q_fV_f(T_{fin} - T_{fout}).$$

采用文献 [5] 流体进、出口温度的平均值作为埋管换热器内循环流体的温度, 即:

$$T_f(\tau) = \frac{T_{fin}(\tau) + T_{fout}(\tau)}{2}.$$

联立两式, 可得埋管换热器进、出口温度分别为:

$$T_{fin}(\tau) = T_f(\tau) + \frac{q(\tau)H}{2C_{pf}Q_fV_f}, \quad T_{fout}(\tau) = T_f(\tau) - \frac{q(\tau)H}{2C_{pf}Q_fV_f}$$

流体平均温度由 $T_f(\tau) - T_b(\tau) = q(\tau)R_b$ 求解.

3 地源热泵不同运行模式实验分析

本实验进行了定流量连续运行和间歇运行研究, 埋管井深为 60 m, 埋管管径为 DN32, 流量为 0.8 m³/h, 各阶段的具体时间安排如表 2 所示.

表 2 实验测试阶段时间安排

Table 2 Scheme of the experiment phase

测试阶段	阶段号	测试时间	流量/(m ³ /h)	开停机比	热泵运行方式
全天连续运行	一	08 01. 29~ 08 02. 02	0. 8	全开	全天连续运行
昼开夜停运行	二	08 02. 05~ 08 02. 11	0. 8	1: 1	昼开夜停运行

为了便于实验分析研究, 将地源热泵的不同运行模式的温度和性能变化作出图形如下:

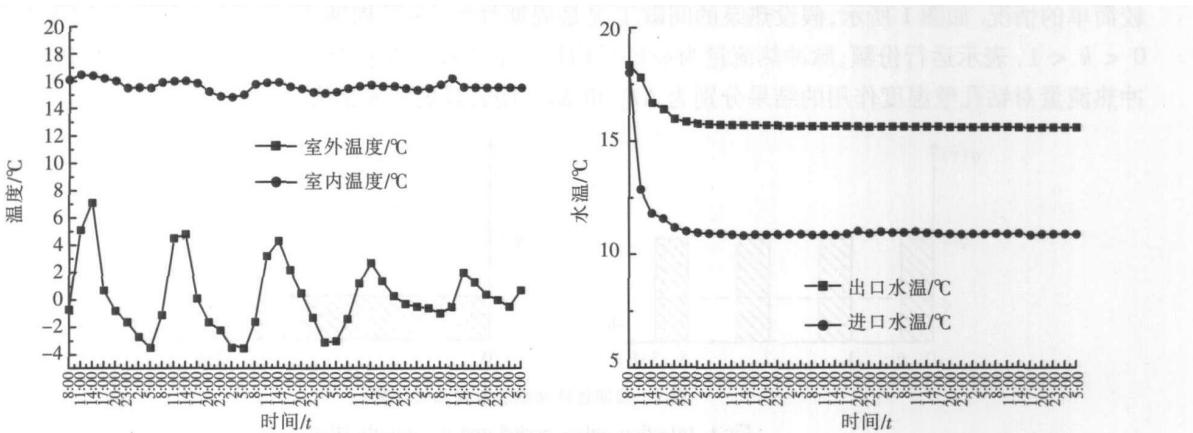


图 2 0.8 m³/h 流量全天连续运行温度变化

Fig.2 Different temperature of all-days operation at 0.8 m³/h flow rate

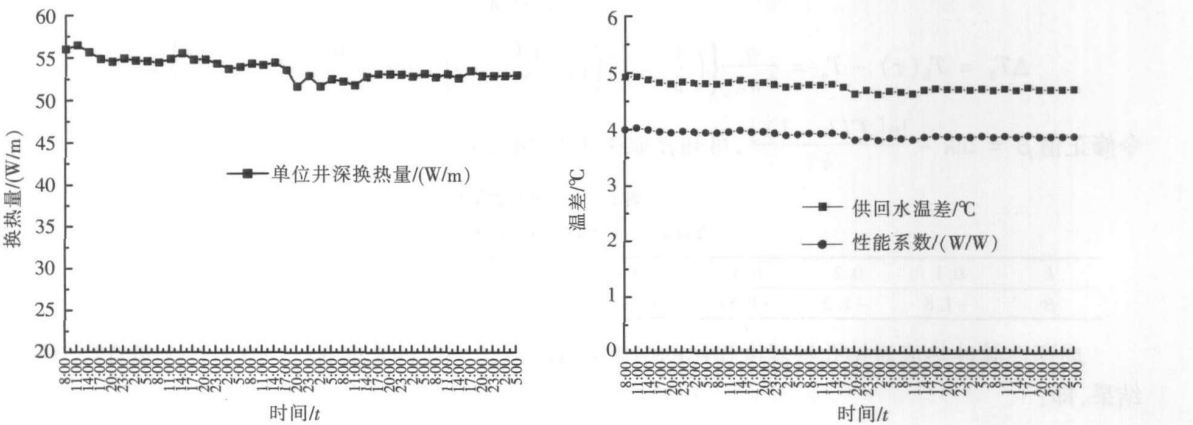


图 3 0.8 m³/h 流量全天连续运行性能测试结果

Fig.3 System performance of all-days operation at 0.8 m³/h flow rate

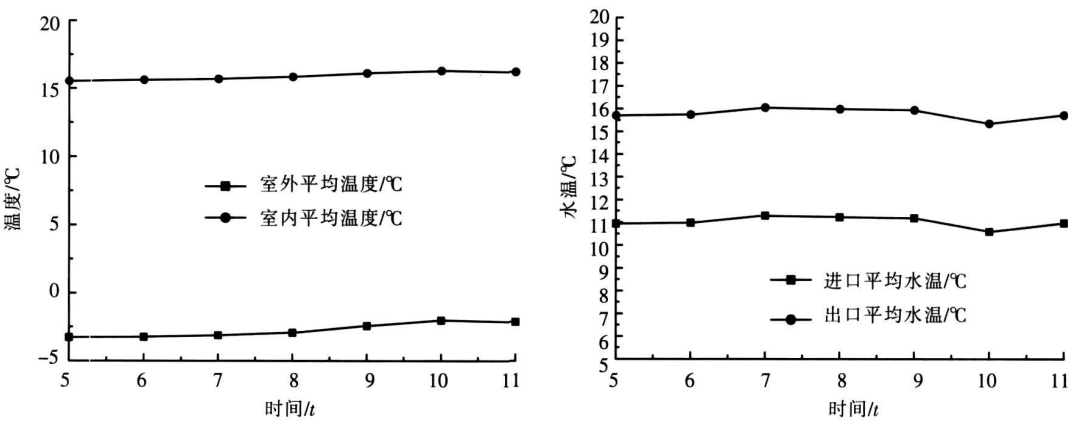


图 4 0.8 m³/h 流量日运行 12 h 温度变化
Fig.4 Different temperature of 12 hours operation each day at 0.8 m³/h flow rate

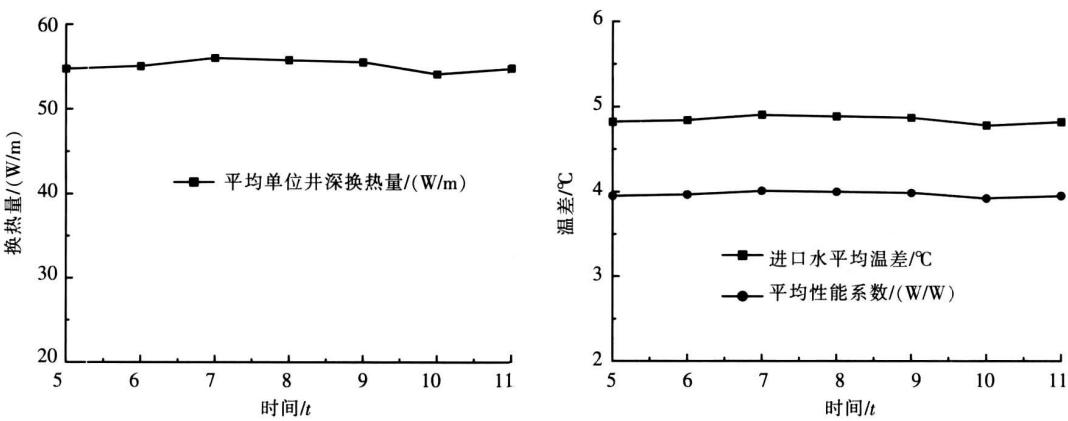


图 5 0.8 m³/h 流量日运行 12 h 性能测试结果
Fig.5 System performance of 12 hours operation each day at 0.8 m³/h flow rate

从测试结果可以看出, 图 2 图 3 中室外气温的波动引起空调房间室内气温随之发生相应的改变, 其中以昼夜之间的温差变化较为明显, 从而间接的影响了地下 U 型埋管换热器的进口水温. 在测试的 5 d (计 120 h) 里, 可以看出, 埋管换热器进、出水温均呈降低的趋势, 这是因为系统运行时不断将地下热量向空调房间释放的缘故. 在热泵系统运行前期, 换热器的进口水温下降幅度较快, 在达到 10.78°C 后温度下降的幅度越来越慢, 逐渐平缓下来. 图 3 分析了单位井深换热热量和系统制冷系数 COP 随运行时间的变化关系. 从图中可以看出, 在热泵系统连续运行一段时间后, 由于从土壤吸收的热量在钻井附近越来越少, 来不及补充, 使地温下降, 换热性能降低, 影响了埋管换热器的进、出水温差, 使其有减小的趋势, 而单位井深换热热量和制冷系数 COP 也发生相应的变化, 在测试期间, 单位井深换热热量平均为 50.66 W/m, 制冷性能系数 COP 平均值为 3.91 W/W.

图 4 图 5 是热泵系统日运行 12 h 的数据曲线图, 该测试工况下单位井深换热热量随进口水温的变化出现小范围的波动, 最大值为 55.86 W/m, 出现在 2008 年 2 月 7 日. 在测试期间单位井深换热热量变化较小, 幅度在 ±1.25 W/m 以内, 平均单位井深换热热量为 55.14 W/m, 平均制冷性能系数 COP 值为 3.95 W/W.

4 U 型埋管换热器在不同运行模式下埋管进出口温度传热模型的实验验证

求解上述数学模型, 需要先确定钻孔和管材几何参数; 管材、回填材料和土壤热物性参数、管内循环流体参数及单位孔深换热热量等, 从而模拟出随时间变化的流体进、出口温度, 以下将介绍各参数的确定值.

(1) 埋管、钻孔等几何参数

- 埋管外径 $d_{po} = 0.032\text{ m}$; 埋管内径 $d_{pi} = 0.026\text{ m}$; 壁厚 $\delta = 0.003\text{ m}$;
- 钻孔直径 $d_b = 0.11\text{ m}$; 钻孔深度 $H = 60\text{ m}$;
- U 型埋管支管中心至钻孔中心之间的距离 $D = 0.03\text{ m}$.

(2) 管材、回填材料及土壤等热物性参数

管材导热系数 $\lambda_p = 0.45 \text{ W /mK}$;
钻孔内回填材料导热系数 $\lambda_g = 2.4 \text{ W /mK}$;
钻孔外土壤导热系数 $\lambda_s = 2.52 \text{ W /mK}$;
土壤导温系数 $\alpha_s = 9.2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 / \text{s}$
土壤原始温度 $T_0 = 18.9^\circ\text{C}$.
带入上述数据,对地源热泵埋管进出水温度进行了模拟,并与实测值进行了比较,比较结果如图 6 所示.

5 结论

从模拟的图形可以看出,该模型模拟的结果与机组的实际运行时埋管进出口温度变化趋势吻合较好,在各阶段中两结果所表现出偏差的情况,这除了模型本身与实际情况存在着一定差别而产生的误差以外,还与输入的定解条件并非与实际条件完全吻合以及实验台自身存在一定的缺陷有关.但是可以看出,该偏差在实际工程允许的精度范围以内.因此,该套模型是可行的,可以为地源热泵系统的模拟、设计和计算提供很大的帮助.

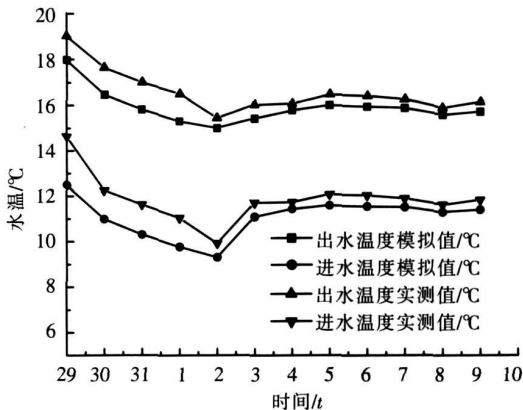


图 6 进出口温度模拟与测试值比较
Fig.6 Comparison of simulated and experimental results for inlet and outlet water temperatures

[参考文献] (References)

[1] 吕灿仁, 马一太. 运用热泵提高低温地热采暖系统能源利用率的分析 [J]. 天津大学学报, 1982(4): 1-8
Lv Chanren Ma Yitai. Improve the use of low-temperature geothermal heat pump heating system of energy efficiency[J]. Journal of Tianjing University, 1982(4): 1-8 (in Chinese)
[2] Ingersoll L R, Plass H J. Theory of the ground pipe heat source for the heat pump[J]. HPAC, 1948, 20(7): 119-122
[3] 崔萍, 刁乃仁, 方肇洪. 地热换热器间歇运行工况分析 [J]. 山东建筑工程学院学报, 2001(4): 52-56
Cui Ping Diao Nairen Fang Zhaozhong. Discontinuous operation of geothermal heat exchangers[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering 2001(4): 52-56 (in Chinese)
[4] Fang ZH, Diao NR, Cui P. Discontinuous operation of geothermal heat exchangers[J]. Tsinghua Science and Technology, 2002, 7(2): 194-197
[5] 刘宪英. 地源热泵冬夏暖冷联供试验研究 [J]. 水利电力施工机械, 2000, 30(4): 1-4
Liu Xianying. Warm and cold for the pipe study in winter and summer of the ground source heat pump[J]. Water Power Construction Machinery, 2000, 30(4): 1-4 (in Chinese)
[6] Arif H, Ozay A. Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system [J]. Energy Conversion and Management 2003, 44: 527-548

[责任编辑: 刘 健]