

地下换热器变热流传热模拟研究

汤昌福^{1,2}, 张文永^{1,2}, 朱文伟^{1,2}, 俞显忠^{1,2}, 刘桂建³

(1. 安徽省煤田地质局勘查研究院, 安徽合肥 230088; 2. 合肥市浅层地热能工程技术研究中心, 安徽合肥 230088;
3. 中国科学技术大学地球与空间科学学院, 安徽合肥 230026)

摘要: 基于均一入口流体温度假设和叠加原理建立了地下换热器变热流情形地下传热模拟半解析方法, 并进行了验证, 研究了热不平衡和热干扰对地下换热器动态特性的影响. 研究表明, 地下换热器各钻孔换热能力与热干扰大小有关. 若地下换热器每年往地下排放的热量大于从地下吸取的热量, 地下换热器出口流体温度呈现逐年上升的趋势. 工程实例运行模拟表明, 地下换热器连续运行 10 a, 其出口流体温度与第一年相比上升了约 0.8 °C; 地下换热器钻孔受到的热干扰越大, 散热能力越差.

关键词: 地下换热器; 变热流; 叠加原理; 模拟

中图分类号: TK529 **文献标识码:** A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.06.009

引用格式: Tang Changfu, Zhang Wenyong, Zhu Wenwei, et al. Heat transfer simulation for ground heat exchangers with varying heat fluxes[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(6): 485-489.

汤昌福, 张文永, 朱文伟, 等. 地下换热器变热流传热模拟研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(6): 485-489.

Heat transfer simulation for ground heat exchangers with varying heat fluxes

TANG Changfu^{1,2}, ZHANG Wenyong^{1,2}, ZHU Wenwei^{1,2}, YU Xianzhong^{1,2}, LIU Guijian³

(1. Exploration Research Institute, Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Hefei 230088, China;
2. Hefei Research Center of Shallow Geothermal Engineering and Technology, Hefei 230088, China;
3. School of Earth and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Based on the superposition principle and uniform inlet fluid temperature assumption, the semi-analytical solution to heat transferring of ground heat exchangers (GHEs) with varying heat fluxes was built and validated. The effects of load imbalance and heat interference were further examined. Results indicate that the heat transfer capacity for individual boreholes in GHE depends on the strength of heat interference. If the heat rejected into the ground is greater than the heat absorbed from the ground, the outlet fluid temperature of GHE increases gradually every year. Case study indicates that the outlet fluid temperature of GHE, compared with that in the first year, increases about 0.8 °C in the 10th year. The capacity of heat rejection for the GHE becomes smaller with stronger heat interference.

Key words: ground heat exchanger; varying heat flux; superposition principle; simulation

收稿日期: 2015-03-16; 修回日期: 2015-06-04

基金项目: 住房城乡建设部软科学项目(2015-R1-012), 安徽省住房城乡建设科学技术计划项目(2015YF-06)资助.

作者简介: 汤昌福, 男, 1982年生, 博士. 研究方向: 资源与环境保护. E-mail: cftang@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 刘桂建, 博士/教授. E-mail: lgj@ustc.edu.cn

0 引言

近年来土壤源热泵技术在我国建筑节能中获得越来越多的应用^[1]. 与普通空调系统相比, 土壤源热泵系统具有高效节能的优点. 土壤源热泵系统运行效率与地下换热器(GHE)流体出口温度有关, 在进行土壤源热泵设计和运行管理时, 都要求其出口温度保持在一定范围之内. 因此, 建立可靠的地下换热器传热模拟方法, 准确预测系统运行特性, 指导地下换热器设计和运行管理, 有助于土壤源技术优势的发挥.

目前地下换热器传热模拟方法主要包括数值方法和半解析方法两种. 在实际工程应用中, 地下换热器通常由多个钻孔组成, 模拟时需要考虑各钻孔之间产生的热干扰. Eskilson^[2]、Zhang^[3]、李新国等^[4]、高青等^[5]分别运用有限差分、有限元等数值方法研究了多钻孔地下换热器换热特征. 研究表明, 与单个钻孔相比, 多钻孔地下换热器地下换热更加复杂, 影响因素众多. 地下换热器换热能力不仅和岩土热物性有关, 还和钻孔间距、钻孔布置方式等因素有关. 由于受到热干扰的影响, 管群中各钻孔的换热能力比单个钻孔情形要小. Eskilson^[2]在数值模拟结果的基础上提出了一种半解析模拟方法—g 函数方法, 基于叠加原理模拟了地下换热器换热特征. 然而, Eskilson 的 g 函数方法假设各钻孔热流密度相同, 不能用于研究地下换热器各钻孔的传热差异性. Malayappan 等^[6]的研究还发现, 采用 g 函数方法计算地下换热器长度会产生 5%~6% 的误差.

与数值方法相比, 半解析方法具有计算速度快的优点, 在地下换热器实际工程设计和模拟中得到了广泛应用. 然而, 目前还缺乏一种合理的地下换热器模拟半解析方法, 不仅可以模拟地下换热器换热特性, 还可以研究地下换热器各钻孔的传热差异. 汤昌福等^[7]基于均一入口温度假设建立了地下换热器传热模型, 并运用拉普拉斯变换和 Stehfest 数值反演方法研究了地下换热器及各钻孔传热特性. 然而, 该研究假设地下换热器入口温度保持不变, 与实际情形不符. 本文在前期工作^[7]的基础上, 基于均一入口温度假设建立了变热流情形地下换热器传热模拟半解析新方法, 新方法更贴近于工程实际.

1 基本数学方法

1.1 地下换热器传热物理模型

图 1 为多埋管地下换热器示意图. 假设地下传

热模型满足:

(I) 无限大均质地层, 地下岩土导热系数为 λ , 体积热容为 ρc ; 地下岩土初始温度均匀分布, 等于 T_0 .

(II) 地下换热器由 N 个钻孔组成, 钻孔半径为 r_b , 钻孔深度 H ; 钻孔内稳态传热, 总热阻为 R_b , 第 i 个钻孔位置坐标为 (x_{wi}, y_{wi}) ; 地下换热器循环流体质量流量为 \dot{m}_f .

(III) 地下换热器各钻孔入口流体温度相同, 等于 T_{in} ; 出口流体平均温度为 T_{out} . 第 i 个钻孔出口温度 $T_{out,i}$; 钻孔内流体平均温度 $T_{f,i}$. 地下换热器出口流体平均温度 T_{out} 根据流体质量流量加权平均计算,

$$T_{out} = \frac{\sum_{i=1}^N (\dot{m}_{fi} T_{out,i})}{\sum_{i=1}^N \dot{m}_{fi}} = \sum_{i=1}^N T_{out,i} / N \quad (1)$$

(IV) 地下换热器地下负荷随建筑负荷不断变化, 热流密度可近似表示为一系列方形脉冲: $(t_m, Q_m), m=1, 2, \dots, M_0$; 钻孔 i 热流密度近似表示为 $(t_m, q_{i,m}), m=1, 2, \dots, M_0$.

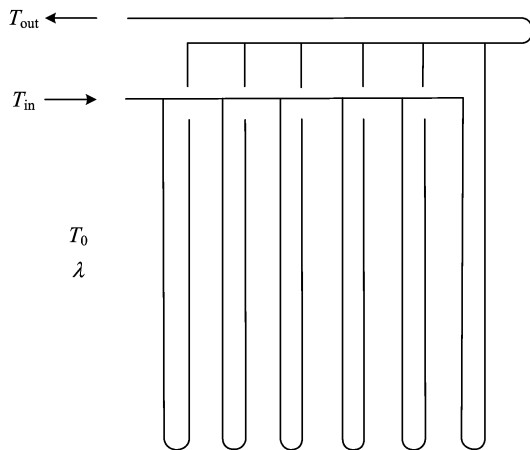


图 1 多钻孔地下换热器示意图

Fig. 1 Schematic for GHE with multiple boreholes

1.2 地下换热器地下传热数学模型

任意时刻 t ($t_{M-1} < t < t_M$) 钻孔 i 孔壁温度可以通过空间和时间叠加获得^[1],

$$\Delta T_{b,i} = T_{b,i}(t) - T_0 = \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \Delta q_{j,m} \cdot \Delta T_{uj}(r_{ij}, t - t_{m-1}) \quad (2)$$

式中, $\Delta q_{j,m} = q_{j,m} - q_{j,m-1}$, q 为钻孔热流密度; T_b 为钻孔壁 ($r=r_b$) 温度, r_{ij} 为钻孔 i 到钻孔 j 的距离,

$$r_{ij} = \sqrt{(x_{wj} - x_{wi})^2 + (y_{wj} - y_{wi})^2} \quad (3)$$

式(2)中 ΔT_u 为源函数, 本文采用无限长线热源

函数^[1],

$$\Delta T_u(r, t) = \left(\frac{1}{4\pi\lambda H} \right) \cdot Ei \left(\frac{r^2}{2t} \frac{\rho c}{\lambda} \right) \quad (4)$$

式中, Ei 为累积分函数. 进一步根据钻孔内稳态传热假设, 可以得到钻孔 i 内流体平均温度

$$\begin{aligned} \Delta T_{f,i} &= T_{f,i}(t) - T_0 = \Delta T_{b,i} + q_i(t)R_b = \\ & q_i(t) \cdot R_b + \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^M \Delta q_{j,m} \cdot \Delta T_{uj}(r_{ij}, t - t_{m-1}) \end{aligned} \quad (5)$$

此外, 流体平均温度 $T_{f,i}$ 、进口温度 T_{in} 、出口温度 $T_{out,i}$ 及热流密度 q_i 满足^[7],

$$T_{f,i} = T_{in} - q_i/\beta \quad (6)$$

$$T_{out,i} = T_{in} - 2q_i/\beta \quad (7)$$

式中, $\beta = 2\dot{m}_f c_f$. 将式(6)代入式(5), 可以得到时刻 $t_M (M=1, 2, \dots, M_0)$ 钻孔 $i (i=1, 2, \dots, N)$ 进口流体温度方程,

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^N \Delta q_{j,M} \cdot \Delta T_{uj}(r_{ij}, t_M - t_{M-1}) + \\ & \Delta q_{i,M} \cdot R_{bt} - \Delta T_{in,M} = \\ & \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{M-1} \Delta q_{j,m} \cdot \Delta T_{uj}(r_{ij}, t_M - t_{m-1}) + \\ & \sum_{m=1}^{M-1} \Delta q_{i,m} \cdot R_{bt} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, $R_{bt} = R_b + 1/\beta$. 对任意时刻 M , 式(8)共包括 N 个方程, 共有 $N+1$ 个变量: $\Delta q_{1,M}, \Delta q_{2,M}, \dots, \Delta q_{N,M}, \Delta T_{in,M}$. 此外, 各钻孔热流密度满足

$$\sum_{i=1}^N \Delta q_{i,M} = \Delta Q_M \quad (9)$$

因此, 式(8)和(9)构成了一个封闭的方程组. 将式(8)和(9)进一步写成矩阵形式,

$$\mathbf{A}^M \Delta \mathbf{q}^M = \mathbf{b}^M \quad (10)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}^M &= \begin{pmatrix} (\Delta T_{u1,M} + R_{bt}) & \cdots & \Delta T_{u1N,M} & -1 \\ \vdots & \ddots & \Delta T_{u2N,M} & \vdots \\ \Delta T_{uN1,M} & \cdots & (\Delta T_{uNN,M} + R_{btN}) & -1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ \Delta \mathbf{q}^M &= \begin{pmatrix} \Delta q_{1,M} \\ \vdots \\ \Delta q_{N,M} \\ \Delta T_{in,M} \end{pmatrix}, \\ \mathbf{b}^M &= \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{M-1} \Delta q_{j,m} \cdot \Delta T_{uj}(r_{1j}, t_M - t_{m-1}) + \sum_{m=1}^{M-1} \Delta q_{1,m} \cdot R_{bt} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^N \sum_{m=1}^{M-1} \Delta q_{j,m} \cdot \Delta T_{uj}(r_{Nj}, t_M - t_{m-1}) + \sum_{m=1}^{M-1} \Delta q_{N,m} \cdot R_{bt} \\ \Delta Q_M \end{pmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

运用 Gauss 消元法求解式(10), 可以依次得到时刻 $t_M (M=1, 2, \dots, M_0)$ 各钻孔进口温度 $\Delta T_{in,M}$ 及热流密度 $\Delta q_{1,M}, \Delta q_{2,M}, \dots, \Delta q_{N,M}$. 进一步, 可以根据式(7)和(1)计算各钻孔出口流体温度 $T_{out,i,M}$ 及地下换热器出口流体平均温度 $T_{out,M}$.

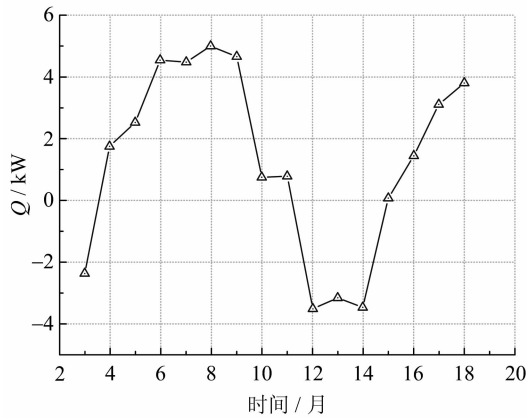
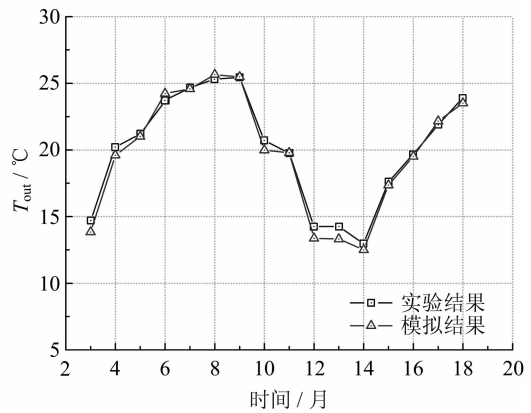
2 结果和讨论

首先将模拟结果与 Hern^[8] 的实验结果进行对比, 以验证新方法的正确性, 在此基础上进一步分析了地下换热器长期运行(10 a)的动态特征. 模拟需

要输入的基本参数包括岩土热物性参数(初始温度、导热系数、体积热容)、地下换热器钻孔参数(钻孔布置形式、钻孔间距、钻孔直径、钻孔深度、钻孔内热阻)、循环流体参数以及地下换热器热流密度. 其中, 岩土热物性参数一般通过岩土现场热响应测试获取^[1].

2.1 模拟方法验证

Hern 建立的实验平台^[8] 位于美国 Oklahoma 州立大学, 为复合式土壤源热泵系统(土壤源热泵+冷却塔), 地下换热器共包括 4 个垂直钻孔, 循环流

(a) 地下换热器月平均热流密度^[9]

(b) 模拟结果与实验结果对比

图 2 地下换热器传热模拟平均热流密度及模拟结果

Fig. 2 The average heat flux and the result of heat transfer simulation for GHE

体为水. 该实验平台为两栋小型建筑制冷和供热, 夏季制冷期为 6~9 月, 冬季供热期为 12~2 月. 测试从 3 月份开始, 测试期间, 仅使用了其中 3 个钻孔 (直线布置), 且未开启冷却塔. 地下换热器月平均热流密度 (吸热为负、放热为正) 及流体出口平均温度如图 2 所示. 计算采用的基本参数如表 1 所示.

表 1 地下换热器传热实验参数

Tab. 1 Experimental parameters of heat transfer for GHE

地下初始温度/°C	17.3	钻孔间距/m	6.1
岩土导热系数 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	2.55	钻孔直径/mm	114
岩土体积热容 ($kJ \cdot K^{-1} \cdot m^{-3}$)	2 012	钻孔内总热阻 ($m \cdot K \cdot W^{-1}$)	0.162
流体流量 ($kg \cdot s^{-1}$)	0.631	钻孔深度/m	74.68

根据地下换热器月平均热流密度, 运用建立的半解析方法模拟得到地下换热器流体平均出口温度, 并和实验结果进行了对比 (图 2(b)). 可以发现, 模拟结果和实验结果基本保持一致, 证明了方法的正确性.

2.2 地下换热器传热分析

根据已有的地下换热器月平均热流密度 (图 2(a)), 模拟了地下换热器连续运行 10 a 的动态特征. 从图 3 可以发现, 由于地下换热器每年往地下排放的热量大于从地下吸取的热量, 因此造成了地下产生热堆积, 地下换热器出口温度呈现逐年上升的趋势. 例如, 连续运行 10 a 后, 地下换热器 8 月出口流体温度与第一年 8 月相比升高了约 0.8 °C. 此外, 表 2 还给出了第 10 a 地下换热器各钻孔月平均热流密度情况, 可以发现, 由于中间钻孔受到的热干扰

程度大, 其周围热堆积现象较为严重, 周围岩土温度较高, 造成吸热工况时, 从地下吸取的热量比两侧钻孔大, 放热工况时, 往地下排放的热量比两侧钻孔要小.

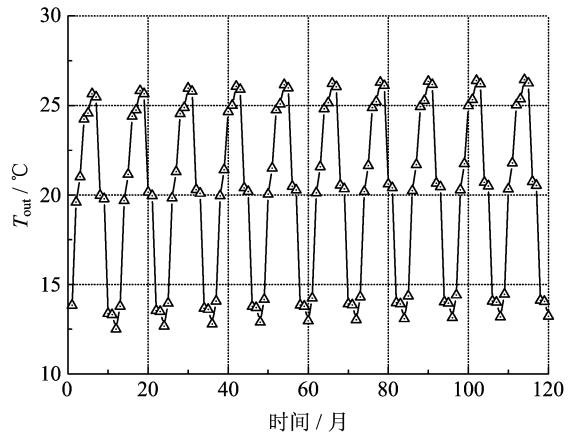


图 3 地下换热器月平均出口温度

Fig. 3 Monthly average outlet fluid temperatures for GHE

表 2 第 10 年各钻孔热流密度

Tab. 2 The heat fluxes of individual boreholes in the 10th year

月份	两侧孔/kW	中间孔/kW	月份	两侧孔/kW	中间孔/kW
三月	-0.787	-0.794	九月	1.572	1.519
四月	0.584	0.585	十月	0.272	0.210
五月	0.843	0.841	十一月	0.282	0.222
六月	1.520	1.508	十二月	-1.152	-1.206
七月	1.503	1.477	一月	-1.039	-1.078
八月	1.681	1.641	二月	-1.148	-1.169

3 结论

基于地下换热器各钻孔入口温度相同假设, 建

立了地下换热器地下传热模拟半解析方法. 该方法可以研究各钻孔之间热干扰效应以及变热流密度情形. 研究结果表明:

(I) 地下换热器出口温度模拟结果和实验结果基本保持一致, 证明了模拟方法的正确性;

(II) 地下换热器全年运行模拟结果表明, 由于地下热堆积的影响, 地下换热器出口温度呈现逐年升高的趋势. 工程实例运行模拟表明, 地下换热器连续运行 10 a, 其出口流体温度与第一年相比上升了约 0.8 °C.

(III) 地下换热器各钻孔换热能力与其所受到的热干扰大小有关, 热干扰越大, 钻孔周围热堆积越严重, 越不利于钻孔排热.

参考文献(References)

- [1] 刁乃仁, 方肇洪. 埋管地源热泵技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [2] Eskilson P. Thermal analysis of heat extraction boreholes [D]. Lund, Sweden: Lund Institute of Technology, 1987.
- [3] Zhang Q. Heat transfer analysis of vertical U-tube heat exchange in a multiple borehole field for ground source heat pump systems [D]. Lexington, USA: University of Kentucky, 1999.
- [4] Li Xinguo, Zhao Jun, Zhou Qian. Numerical simulation on the ground temperature field around U pipe underground heat exchangers [J]. Acta Energetica Sinica, 2004, 21(3): 703-707.
李新国, 赵军, 周倩. U型垂直埋管换热器管群周围土壤温度数值模拟[J]. 太阳能学报, 2004, 21(3): 703-707.
- [5] Gao Qing, Li Ming, Yan Yan. Operation strategy on the heat transfer enhancement in the underground multi-boreholes [J]. Acta Energetica Sinica, 2006, 27(1): 83-89.
高青, 李明, 闫燕. 地下群井换热强化与运行模式影响规律[J]. 太阳能学报, 2006, 27(1): 83-89.
- [6] Malayappan V, Spitler J D. Limitations of using uniform heat flux assumptions in sizing vertical borehole heat exchanger fields [C]//Proceedings of Climatic 2013, Czech: Prague, 2013: 16-19.
- [7] Tang Changfu, Zhang Wenyong, Zhu Wenwei, et al. Heat transfer analysis of a multi-borehole heat exchanger of ground source heat pump systems [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014, 44(11): 921-925.
汤昌福, 张文永, 朱文伟, 等. 土壤源地热泵埋管换热器管群换热分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2014, 44(11): 921-925.
- [8] Hern S. Design of an experimental facility for hybrid ground source heat pump systems [D]. Oklahoma, USA: Oklahoma State University, 2004.
- [9] Spitler J D, Cullin J, Bernier M, et al. Preliminary intermodel comparison of ground heat exchanger simulation models [C]// Proceedings of the 11th International Conference on Thermal Energy Storage. Stockholm, 2009: 14-17.
- [10] Cullin J R. Improvements in design procedure for ground source hybrid ground source and hybrid ground source heat pump systems [D]. Oklahoma, USA: Oklahoma State University, 2008.