

地源热泵地埋管换热器传热研究(3): 变热流边界条件下单 U 形地埋管 换热器的非稳态传热特性^{*}

西南交通大学 袁艳平[☆] 雷 波 曹晓玲 张 丹

摘要 采取数值计算与解析计算相结合的方法,研究变热流边界条件下单 U 形地埋管换热器的非稳态传热特性。以钻孔壁为边界,将计算区域分为两个部分,钻孔内区域采用稳态解析计算模型,钻孔外土壤区域采用有限容积法。研究了埋管出口流体温度、钻孔瞬时平均壁温、单位长度吸热量以及距钻孔一定距离处土壤温度分布随运行时间的变化规律。计算结果为地源热泵系统的动态模拟、优化设计及改进提供了参考。

关键词 地源热泵 U 形埋管 变热流边界 非稳态传热 解析计算 数值计算

Heat transfer of ground heat exchanger for GSHP(3): transient heat transfer characteristic of U-type ground heat exchanger with variable heat flow boundary

By Yuan Yanping[★], Lei Bo, Cao Xiaoling and Zhang Dan

Abstract Studies the transient heat transfer characteristic with numerical calculation method and analytic solution. Divides the calculation area into two parts based on the boundary of borehole wall, the calculation method is steady analytic solution for the area in the borehole, and the finite volume method for the soil area. Obtains the variety patterns of outlet water temperature, transient borehole wall temperature, heat exchange capacity per length and temperature distribution in certain distances from the pipe. The result can be used as a reference for the dynamic simulation, optimum design and improvement of GSHP.

Keywords ground-source heat pump, U-type buried pipe, variable heat flow boundary, transient heat transfer, analytic solution, numerical calculation

★ Southwest Jiaotong University, Chengdu, China

①

0 引言

众多研究者对地埋管换热器的传热过程进行了相关的解析和数值计算。Deerman 和 Kavanaugh 利用圆柱源理论对 U 形埋管传热过程进行了数值模拟,并和实验结果进行了对比分析,在文献中还提及了利用连续测量数据估计土壤有效导热系数的方法^[1]。Yavuzturk 等人忽略了地

表面温度波动的影响和管脚的末端效应,将地埋管换热器传热过程简化为二维传热,并利用有限容积法对二维埋管温度场进行了计算^[2],埋管管壁边界条件简化为恒热流边界条件,将左侧热流定义为总热流的 60%,右侧热流定义为总热流的 40%,在计算的过程中,总热流量取一个恒定值。Bi Yuehong

^{*} 中国博士后面上资助项目(编号:20080431241),四川省青年科技基金项目(编号:09ZQ026-076),北京市重点实验室开放课题(编号:2008K09),西南交通大学科学研究基金项目(编号:2008B17)

①[☆] 袁艳平,男,1973 年 6 月生,博士后,副教授
610031 四川省成都市西南交通大学机械工程学院
(0) 13880871068
E-mail: ypyuan@home.swjtu.edu.cn
收稿日期:2009-01-22

等人采用非均匀网格利用有限差分法对地埋管换热器进行了模拟计算^[3],模型为二维,热流量在计算过程中为恒定值。Katsunori Nagano 等人也将地埋管换热器传热过程简化为非稳态导热问题^[4],并以边界元数值方法编制了地源热泵模拟软件,在计算的过程中,总热流量也近似取为一个恒定值。该项研究成果的特别之处在于,该软件可以对地源热泵的寿命周期 CO₂ 产生量进行计算。但是在实际工况中,随着管内流体和土壤间传热过程的进行,管内流体和土壤间的温差会变小,从而换热量会变小,也就是说实际传热过程是一个变热流传热过程,所以取恒热流边界将会带来一定程度的计算误差。

Lei 通过建立双圆柱坐标系将三维非稳态传热问题转化为二维非稳态传热问题^[5],对竖直埋管的温度场进行了数值模拟,忽略了土壤埋深方向的传热,假定管内流体同一断面上温度相等。Rottmayer 等人利用有限差分法对地埋管换热器的三维传热进行了数值求解^[6],但是该方法忽略了土壤埋深方向的传热,假定管内流体同一断面上温度相等,而且为划分网格方便,利用非圆管代替圆管。而在实际工况下,土壤的传热同时发生在水平方向和竖直方向,因此这两种方法也会有一会程度的误差。

Lee 等人采用三维隐式差分格式将所有区域离散求解^[7]。每个钻孔用长方体近似代替(矩形边长等于钻孔直径),将钻孔内传热视为准稳态过程,孔壁施加的热流量通过钻孔壁温度数值计算得到,并由此计算土壤温度和钻孔温度,两个相互耦合的计算区域采用不同时间步长反复迭代求解。

Gopal Bandyopadhyay 等人采用解析和半解析的方法研究了短时间内地埋管换热器热响应^[8],将 U 形埋管换热器等效为与钻孔同轴的单个圆管,通过 Gaver-Stehfest 数值运算法则求出流体平均温度和钻孔壁温度,这一研究成果可以用于分析介质导热系数的测量,减少热反应测试的时间。Zeng Heyi 等人考虑流体轴向的传热以及 U 形管两管脚间的“热短路”现象,建立了地埋管换热器钻孔内传热的准三维模型^[9],该准三维模型忽略了钻孔内轴向导热,只考虑横截面上钻孔壁与埋管之间的热流,在已知钻孔壁温度情况下得出流体沿埋深

方向温度分布的解析解,在此基础上得到不同构造的单、双 U 形管钻孔内的热阻解析式。

杨卫波等人以钻孔壁为界将 U 形埋管的换热区域划分为钻孔内外两部分,并分别采用稳态与非稳态传热来分析求解,钻孔外利用变热流圆柱源理论模型,近似计算第 t_n 时刻远界土壤温度与埋管井壁温度的差值,从而求出土壤温度场分布^[10-11]。王景刚等人也依据变热流圆柱源理论,建立了耦合地面热泵机组和地埋管换热器特性的解析模拟模型,对地源热泵的冬季和夏季运行特性进行了模拟^[12]。以上两种方法均属基于变热流圆柱源理论的解析计算。

作为本文的系列研究基础,文献^[13]对国内外地源热泵地埋管换热器传热研究进行了综述分析,文献^[14]建立了地源热泵地埋管换热器传热计算的完全数学模型,在此基础上,本文拟采取数值计算与解析计算相结合的方法,研究变热流边界条件下单 U 形埋管换热器的非稳态传热特性,探讨埋管出口流体温度、钻孔瞬时平均壁温、单位埋管吸热量以及距钻孔一定距离处土壤温度分布随运行时间的变化规律。

1 数理模型、计算参数及求解方法

1.1 土壤区传热控制方程(二维非稳态导热问题)

针对二维直角坐标系($x-y$),建立如下控制方程:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + S \quad (1)$$

式中 τ 为时间, s; t 为土壤温度, °C; λ 为土壤导热系数, W/(m·K); ρ 为土壤密度, kg/m³; c 土壤比热容, J/(kg·K); S 为源项。

将源项线性化处理得

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_P \Delta V \quad (2)$$

采用全隐式离散控制方程:

$$a_{PtP} = a_{WtW} + a_{EtE} + a_{NtN} + a_{StS} + a_{PtP}^0 + S_u \quad (3)$$

$$a_P^0 = \rho c \frac{\Delta V}{\Delta \tau} \quad (4)$$

$$a_P = a_P^0 + a_W + a_E + a_N + a_S - S_P \quad (5)$$

式(2)~(5)中 $\bar{S}$ 为源项 S 在控制容积中的平均值; S_u, S_P 为系数; ΔV 为控制容积的体积; a 为离散系数; 下标 P 代表控制容积节点, W 代表控制容积西侧节点, E 代表控制容积东侧节点, N 代表控制容

积北侧节点, S 代表控制容积南侧节点; t_P^0 为前一时
刻主节点 P 的温度值; a_P^0 为离散后主节点变量系数
与时间有关项; $\Delta\tau$ 为一个时间步长, s 。

计算区域示意图 1, 节点示意图 2。

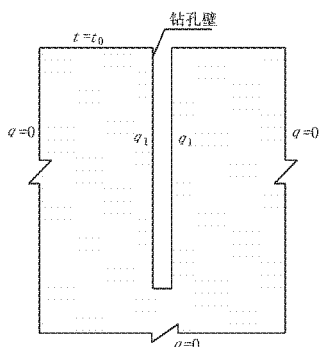


图 1 计算区域示意

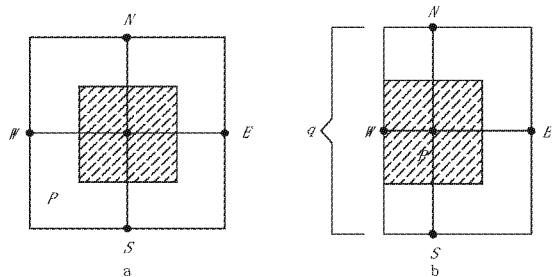


图 2 节点示意

如图 2 所示, 对于不同节点有

$$a_W = \frac{\lambda A_W}{\delta x_{WP}}; a_E = \frac{\lambda A_E}{\delta x_{PE}}; a_N = \frac{\lambda A_N}{\delta x_{PN}}; \\ a_S = \frac{\lambda A_S}{\delta x_{PS}}; S_u = 0; S_P = 0 \quad (6)$$

$$a_W = 0; a_E = \frac{\lambda A_E}{\delta x_{PE}}; a_N = \frac{\lambda A_N}{\delta x_{PN}}; \\ a_S = \frac{\lambda A_S}{\delta x_{PS}}; S_u = q A_W \lambda; S_P = 0 \quad (7)$$

式(6), (7)中 δx_{WP} 为控制容积中心节点 P 到西
侧相邻节点 W 的距离, m ; A_W 为控制容积西侧界
面面积, m^2 , 其余可类推; q 为西侧界面热流密度,
 W/m 。

同理可得其他节点的表达式。

1.2 钻孔区计算模型

对模型进行以下简化: 忽略埋管与回填材料及
回填材料与孔洞壁间的接触热阻; U 形管内流体
的流速均匀一致; 回填土、土壤以及管内流体的热
特性参数恒定; 任意截面管内流体温度均匀恒定,
仅沿深度方向变化; 忽略深度方向上的热传递影
响, 认为 U 形管仅在半径方向发生换热; 忽略热湿
迁移的影响, 认为土壤中的传热为纯导热问题。

基于以上简化, 对于埋管深度方向上 z 深度处
的微元体 dz , 根据能量平衡可得如下控制方程组:

$$\left. \begin{aligned} M \frac{dt_{f1}(z)}{dz} &= q_1 + q_{12} = \frac{1}{R_{f1}^{\Delta}} [t_b - t_{f1}(z)] + \frac{1}{R_{f12}^{\Delta}} [t_{f2}(z) - t_{f1}(z)] \\ M \frac{dt_{f2}(z)}{dz} &= q_2 - q_{12} = \frac{1}{R_{f2}^{\Delta}} [t_b - t_{f2}(z)] - \frac{1}{R_{f12}^{\Delta}} [t_{f2}(z) - t_{f1}(z)] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

定解条件:

$$t_{f1}(0) = t_{f1}, t_{f1}(H) = t_{f2}(H) \quad (9)$$

式(8), (9)中 M 为循环流体热容量, $M = c_p \dot{m}$, 其
中 c_p 为流体的比定压热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$, $\dot{m}$ 为 U
形管内循环流体的质量流量, kg/s ; $t_{f1}(z)$, $t_{f2}(z)$ 分
别为深度 z 处 U 形管进出管脚截面内流体温
度, $^\circ C$; t_b 为孔壁温度, $^\circ C$; R_{f1}^{Δ} , R_{f2}^{Δ} 分别为 U 形支
管进、出流体支管与孔壁间等效传热热阻, $R_{f1}^{\Delta} = R_{f2}^{\Delta}$,
 $m \cdot ^\circ C/W$; R_{f12}^{Δ} 为进、出流体两支管间的等效传热
热阻, $m \cdot ^\circ C/W$, 具体计算见文献[15]; H 为钻孔
深度, m ; t_{f1} 为流体进口温度, $^\circ C$; q_1 , q_2 分别为进、

出两支管与钻孔壁之间的换热量, W/m ; q_{12} 为进、
出两支管间的换热量, W/m 。

$$\left. \begin{aligned} \text{令 } \theta_1(z) &= t_b - t_{f1}(z), \theta_2(z) = t_b - t_{f2}(z), a = \\ &= \frac{1}{MR_{f1}^{\Delta}}, b = \frac{1}{MR_{f12}^{\Delta}}, \text{ 得} \\ -\frac{d\theta_1}{dz} &= a\theta_1 - b(\theta_1 - \theta_2) \\ \frac{d\theta_2}{dz} &= a\theta_2 + b(\theta_2 - \theta_1) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $\theta_1(0) = t_{f1} - t_b$, $\theta_1(H) = \theta_2(H)$ 。

采用 Laplace 变换方法对式(10)求解, 可得出
口温度 $\theta_2(0)$ 为

$$\theta_2(0) = \frac{[-(a+2b)\sinh(\sqrt{a^2+2ab} \cdot H) + \sqrt{a^2+2ab}\cosh(\sqrt{a^2+2ab} \cdot H)]\theta_1(0)}{-a\sinh(\sqrt{a^2+2ab} \cdot H) - \sqrt{a^2+2ab}\cosh(\sqrt{a^2+2ab} \cdot H)} \quad (11)$$

进而可求出埋管出口温度 t_{fout} 及单位埋管吸热量 q_1

$$t_{\text{fout}} = t_b - \theta_2(0) \quad (12)$$

$$q_1 = \frac{M(t_{\text{fout}} - t_{\text{fin}})}{2H} \quad (13)$$

计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数

土壤导热系数/(W/(m·K))	2.4	钻孔直径/m	0.12
土壤比热容/(J/(kg·K))	1 600	U形管内径/m	0.032
土壤密度/(kg/m³)	1 930	U形管外径/m	0.04
循环流体流速/(m/s)	0.6	两支管间距/m	0.025
流体密度/(kg/m³)	998.2	U形管长度/m	30
流体比定压热容/(J/(kg·K))	3 800	流体进口温度/℃	6
管壁导热系数/(W/(m·K))	0.42	土壤初始温度/℃	15
流体导热系数/(W/(m·K))	0.48	流体运动黏度/(m²/s)	1.0048×10^{-6}
回填土导热系数/(W/(m·K))	2.6		

计算流程如图 3 所示。

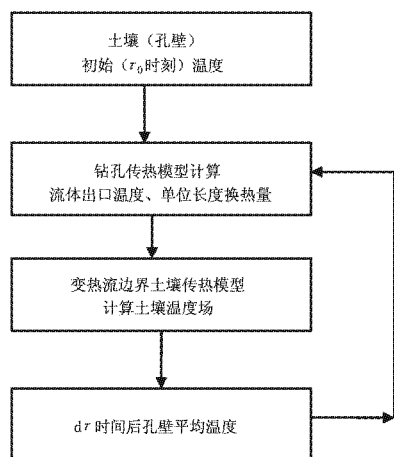


图 3 计算流程

2 结果分析

2.1 连续运行工况

图 4 为连续运行 5 h 单位长度换热量随时间的变化情况。从图中可以看出,热流量呈现单调递减的趋势,而且随着时间的递增,减小的幅度越来越小。由于钻孔内为稳态模型,因此热流量从 0 增

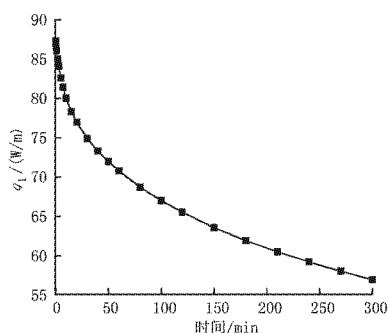


图 4 连续运行 5 h 热流量随时间的变化

至最大值的瞬变过程未能模拟出来,这也是本算法的一个局限之处,从其他类似研究工作来看,这一时间段很短,而且工程实际中不太关心这一瞬变过程,因此这种局限性可忽略不计。从图 5 可以看出,钻孔断面平均温度随时间的变化趋势与换热量的变化趋势相类似。

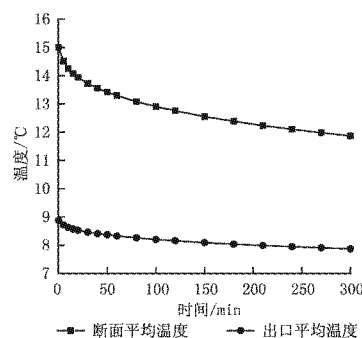


图 5 连续运行 5 h 钻孔断面平均温度和出口流体温度随时间的变化

图 6 和图 7 为连续运行 16 h 单位长度换热量、钻孔断面平均温度和出口流体温度随时间的变化情况,其变化趋势与前 5 h 相类似。随着取热过程的进行,钻孔断面平均温度呈现逐步降低的趋势,此时土壤的温度呈现逐步上升的趋势,所以管内流体与土壤的温差减小,换热作用也减小,因此出口流体温度和单位长度换热量也随之减小。

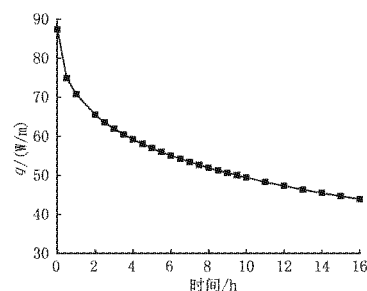


图 6 连续运行 16 h 热流量随时间的变化

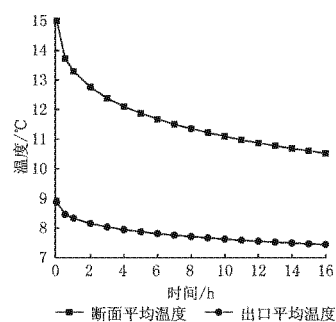


图 7 连续运行 16 h 钻孔断面平均温度和出口流体温度随时间的变化

图 8 为连续运行 16 h 距钻孔断面不同距离处土壤温度随时间的变化,各点埋深均为 1 m,与钻孔断面的距离分别为 0.1, 0.3, 0.6 和 0.8 m。随着取热过程的进行,各点温度均呈现不同程度的下降趋势,而且降幅趋缓,离钻孔越近的土壤温度变化越大,也就是受钻孔热流影响越大,在 0.8 m 处,在整个 16 h 内温度基本上不发生变化,由此可以判定地埋管换热器连续运行 16 h,埋深 1 m 处热作用半径约为 0.8 m。

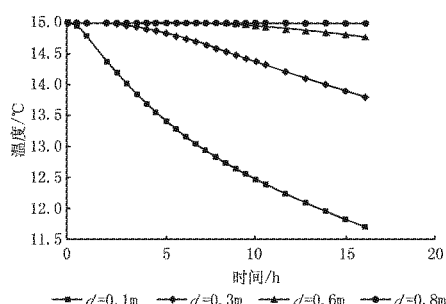


图 8 连续运行 16 h 距钻孔断面不同距离处土壤温度随时间的变化

2.2 间歇运行工况

图 9 为间歇运行 48 h 热流量随时间的变化。在 0~16 h 时间段和 25~40 h 时间段,随着取热过程的进行,热流量也随着时间的递增而减小,在两个时间段热流量分别从 87.325 4 W/m 和 63.987 2 W/m 下降到 43.922 7 W/m 和 36.438 1 W/m,而且减小的幅度越来越小,这一点从图中数据点的疏密程度可以看出。在经过 8 h 的停机后,热流量从 43.922 7 W/m 增加至 63.987 2 W/m,增幅为 45.68%,这是因为在停机期间,土壤温度得到了一定程度的恢复,土壤和管内流体的温差加大,换热强度加大,从而取热量也增加,单位长度换热量增加,这说明间歇运行对于恢复地源热泵的热特性有着重要的作用。

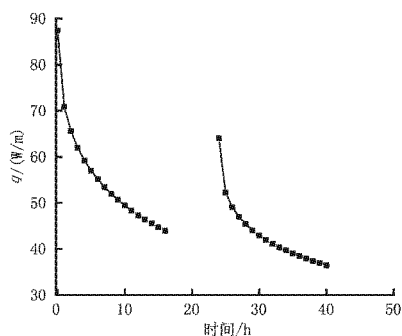


图 9 间歇运行 48 h 热流量随时间的变化

图 10 为间歇运行 48 h 钻孔断面平均温度和出口流体温度随时间的变化。在经过 8 h 的停机后,土壤温度得到了一定程度的恢复,钻孔断面平均温度从 10.53 °C 上升到 12.59 °C,而此时由于土壤和管内流体的温差加大,换热作用加强,因此出口温度也从 7.45 °C 上升到 8.10 °C。

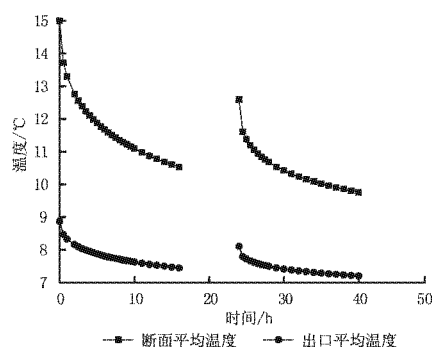


图 10 间歇运行 48 h 钻孔断面平均温度和出口流体温度随时间的变化

3 结论

3.1 将计算区域分为两个部分,对于钻孔内区域和钻孔外土壤区域分别采取稳态解析计算模型和有限容积法进行传热计算。在计算过程中,先利用钻孔壁初始时刻温度计算出口流体温度、单位长度换热量,然后计算变热流边界条件下土壤温度场,再计算该时刻钻孔壁平均温度,循环计算流体出口温度、单位长度换热量,作为下一时刻土壤区域的热流边界,逐步递进计算。从本文来看,该计算方法可提供一种快速简便的数值计算方法。

3.2 随着取热过程的进行,土壤的温度呈现逐步上升的趋势,钻孔断面平均温度也呈现逐步下降的趋势,所以管内流体与土壤的温差减小,换热作用也减小,因此出口流体温度和单位长度换热量也随之减小,而且随着时间的递增,减小的幅度越来越小。

3.3 随着取热过程的进行,距钻孔断面不同距离处各点土壤温度均呈现不同程度的升高趋势,而且降幅趋缓,在 0.8 m 处,温度基本上不发生变化,由此可以判定连续运行 16 h,热作用半径约为 0.8 m。

3.4 在经过 8 h 的间歇后,单位长度热流量从 43.922 7 W/m 增加至 63.987 2 W/m,增幅为 45.68%,这说明间歇运行对于恢复地源热泵的热特性有着重要的作用。

3.5 在计算的过程中,由于热流逐渐下降,因此在某一个较小的时间段内采取恒热流边界,尽管是可取的近似处理方法,但仍会带来一定的误差,会造成热流下降速度略有提高。而且由于钻孔内为稳态模型,因此热流量从 0 增至最大值的瞬变过程没能模拟出来,这也是本算法的一个局限之处。

参考文献:

- [1] Deerman J D, Kavanaugh S R. Simulation of vertical U-tube ground-coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution [G]//ASHRAE Trans, 1991, 97(1): 287-294
- [2] Yavuzturk C, Spitler J D, Ree S J. A transient two-dimensional finite volume model for the simulation of vertical U-tube ground heat exchangers [G]//ASHRAE Trans, 1999, 105(2): 465-474
- [3] Bi Yuehong, Chen Lingen, Wu Chih. Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(2): 183-189
- [4] Katsunori Nagano, Takao Katsura, Sayaka Takeda. Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26 (14/15): 1578-1592
- [5] Lei T K. Development of a computational model for a ground-coupled heat exchanger [G]//ASHRAE Trans, 1993, 99(1): 149-159
- [6] Rottmayer S P, Beckman W A, Mitchell J W. Simulation of a single vertical U-tube ground heat exchanger in an infinite medium [G]//ASHRAE Trans, 1997, 103(2): 651-659
- [7] Lee C K, Lam H N. Computer simulation of borehole ground heat exchangers for geothermal heat pump systems [J]. Renewable Energy, 2008, 33(6): 1286-1296
- [8] Gopal Bandyopadhyay, William Gosnold, Michael Mann. Analytical and semi-analytical solutions for short-time transient response of ground heat exchangers [J]. Energy and Buildings, 2008, 40 (10): 1816-1824
- [9] Zeng Heyi, Diao Nairen, Fang Zhaohong. Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(23): 4467-4481
- [10] 杨卫波, 施明恒. 地源热泵中 U 型埋管传热过程的数值模拟 [J]. 东南大学学报, 2007, 37(1): 78-83
- [11] Yang Weibo, Shi Mingheng, Liu Guangyuan. A two-region simulation model of vertical U-tube ground heat exchanger [J]. Applied Energy, 2008, 86(10): 2005-2012
- [12] 王景刚, 马一太, 张子平, 等. 地源热泵的运行特性模拟研究 [J]. 工程热物理学报, 2003, 24(3): 361-366
- [13] 袁艳平, 雷波, 余南阳, 等. 地源热泵埋管换热器传热研究(1): 综述 [J]. 暖通空调, 2008, 38 (4): 25-32
- [14] 袁艳平, 雷波, 余南阳, 等. 地源热泵埋管换热器传热研究(2): 传热过程的完全数学描述 [J]. 暖通空调, 2009, 39(7): 9-12
- [15] 曲云霞. 地源热泵系统模型与仿真 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004

(上接第 4 页)

参考文献:

- [1] 何雪冰, 刘宪英. 北方地区应用地源热泵应注意的问题 [J]. 低温建筑技术, 2004(2): 85-86
- [2] 于明志, 方肇洪, 李明钧. 土壤冻结对地下换热器传热的影响 [J]. 山东建筑工程学院学报, 2001, 6(1): 42-46
- [3] 杨卫波, 施明恒, 刘光远, 等. 基于显热容法的地源热泵埋管换热器周围土壤冻结特性研究 [J]. 暖通空调, 2008, 38(4): 6-10
- [4] 岳建军, 徐向荣. 土壤源热泵系统在内蒙古地区的应用分析 [J]. 制冷与空调, 2009, 9(1): 24-27
- [5] 王华军, 赵军, 沈亮. 地源热泵系统长期运行特性的实验研究 [J]. 华北电力大学学报, 2007, 24(2): 52-54
- [6] 钱程, 徐伟. 严寒地区土壤源热泵系统的运行性能分析 [J]. 建筑科学, 2008, 24(12): 77-80
- [7] Gu Y, O'Neal D L. Modeling the effect of backfills on U-tube ground coil performance [G]//ASHRAE Trans, 1998, 104 (2): 356-365
- [8] 张旭芝. 高原多年冻土涵洞温度场及地基土冻融变形规律研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2007
- [9] Li S Y, Lai Y M, Zhang M Y, et al. Minimum ground pre-freezing time before excavation of Guangzhou subway tunnel [J]. Cold Regions Science and Technology, 2006, 46(3): 181-191
- [10] 余延顺, 马最良, 姚杨. 固相增量法在土壤蓄冷与释冷过程数值模拟中的应用 [J]. 暖通空调, 2005, 35 (8): 20-24
- [11] 徐学祖, 王家澄, 张立新. 冻土物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001