

文章编号: 0253-4339(2012)04-0016-07

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.04.016

地源热泵岩土导热系数测试影响因素分析

王沅浩¹ 颜亮² 冯琛琛¹ 王新轲¹

(1 西安交通大学 建筑节能研究中心 西安 710049; 2 中国建筑上海设计研究院有限公司 上海 200063)

摘要 建立了地源热泵岩土导热系数现场测试系统的三维数值模型, 基于所建数值模型分析了测试时间、舍弃初始小时数、钻孔半径、岩土体初始温度、加热器输入功率等因素对岩土导热系数测试结果的影响。研究表明: 热响应测试时间应大于70h; 对于柱热源模型, 随着钻孔尺寸的增大, 辨识得到的导热系数逐渐减小; 岩土初始温度对岩土导热系数辨识结果没有影响, 但采用参数估计法作为辨识方法时, 岩土初始温度的测试精度对辨识结果有较大影响; 对于纯导热模型, 加热器输入功率对岩土导热系数辨识结果没有影响。

关键词 工程热物理; 地源热泵; 热响应测试; 影响因素; 数值模拟

中图分类号: TK529; TQ051.5

文献标识码: A

Analysis of Influencing Factors on Soil Thermal Conductivity Test in Ground Source Heat Pump

Wang Fenghao¹ Yan Liang² Feng Chenchen¹ Wang Xinke¹

(1. Building Energy Research Center, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China; 2. China Shanghai Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200063, China)

Abstract A three dimensional numerical model of ground source heat pump system was established. The effects of testing time, starting time, borehole radius, initial ground temperature and heat injection rate on identified thermal conductivity of the deep ground soil were analyzed based on the numerical model. The simulation results showed that thermal response test time should be more than 70 h; For cylinder-source model, with the increase of the size of the borehole, the identified thermal conductivity gradually decreased; The initial temperature of ground soil has no effect on the result of thermal conductivity identification, but the testing precision of the initial temperature has larger effects to identification results when the parameter estimation method is adopted; For pure thermal conductivity model, heat injection rate has no effect on thermal conductivity identification results.

Keywords Engineering thermophysics; Ground source heat pump; Thermal response test; Influencing factor; Numerical simulation

由于地源热泵系统具有高效节能、经济环保、安全可靠、一机多用、使用寿命长等优点, 近几十年来地源热泵市场日趋活跃。

在地源热泵系统应用中, 地埋管换热器的设计是最关键的部分, 合理设计地埋管换热器的前提是准确测量地下岩土的热物性参数。常用的地下岩土热物性测试方法主要有岩土类型辨别法、稳态平板测试法、探针法及热响应测试法^[1]等。其中, 热响应测试法是目前公认的最为有效的测试岩土热物性参数的方法^[1-2]。所谓的热响应测试是用加热器以恒定的热功率给循环工质加热, 按一定的时间间隔记录实验井进出口工质温度, 根据现场测试获得温度随时间变化的动态数据, 结合传热模型及算法确定岩土导热系数。常用的参数辨识方法有线热源模型结合最小二乘法^[1], 线热源模型结合参数估计

法^[2], 柱热源模型结合参数估计法^[3]。

由于现场测试工况、地埋管换热器的结构、测试仪器的精度以及外在环境等诸多因素的影响, 岩土导热系数的测试结果存在较大的不确定性^[4]。Austin建立一个二维瞬态有限差分模型, 利用参数估计法分析了岩土比热容、岩土远处未扰温度、钻孔深度、测试时间等因素对导热系数的影响^[1]。Sanner等研究了不同埋管形式和管材对热响应测试结果的影响, 研究表明采用双U型埋管测试得到的岩土导热系数小于单U型埋管^[5]。Turgut等利用湖水在一年四季中自然涨落研究了地下水水位对热响应测试的影响^[6]。Signorelli等利用数值模型结合参数估计分析了测试时间、钻孔有效长度、地下水渗流、气候条件等对岩土热物性参数测试的影响, 指出地下水渗流对地埋管换热器的性能

影响较大^[7]。胡平放等利用实验和数值模拟的方法研究了测试时间、比热容等对导热系数、热阻的影响^[8]。周亚素等实验分析了测试时间、循环水流量及温度、钻孔深度、吸放热方式等对热响应测试结果的影响^[4]。王华军等对岩土热响应测试的季节效应作了分析,指出地下岩土导热系数测试结果和气候条件等有关,气候条件可能会影响到岩土中水分迁移,从而影响岩土导热系数的测试^[9]。于明志等分析了测试时间、U型管管腿间距等对岩土导热系数测试结果的影响^[10]。虽然以上研究取得了一定成果,但还不够充分。

通过建立地源热泵岩土导热系数测试系统的三维数值模型,基于所建数值模型分析了测试时间、舍弃初始小时数、钻孔半径、岩土体初始温度、加热器输入功率等因素对辨识结果的影响,为地源热泵岩土导热系数测试提供指导和参考。

1 数值模型的建立

1.1 假设条件

由于U型竖直埋管地下换热器的几何形状和岩土传热的复杂性,为了减少网格数量,降低计算的难度,作如下假设:

1) 岩土是均匀的,而且在整个传热过程中岩土的热物性不变; 2) 忽略岩土中水分迁移的影响; 3) 忽略U型管管壁与回填材料、回填材料与岩土之间的接触热阻; 4) 忽略地表温度波动对岩土温度的影响,认为岩土温度均匀一致; 5) 忽略钻孔间传热影响。

1.2 模拟对象

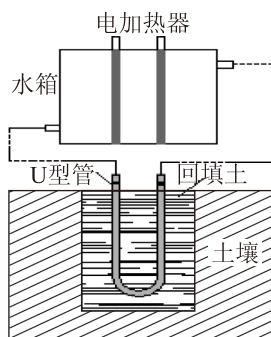


图1 数值模拟系统示意图

Fig.1 The scheme of numerical simulation system

所建数值模型包括的几何实体有: U型管内的水、U型管、回填材料、岩土体、保温水箱和加热器,各部分尺寸如下: 钻孔半径(r_b)为60mm, 钻孔深(L)为50m; U型管内径为25mm, U型管管壁厚为3.5mm, U型管两管中心距为60mm; 加热器直径

为10mm; 水箱尺寸为400mm×400mm×400mm。竖井中心和岩土外表面之间的径向距离为3m。

模拟区域内的岩土被视为圆柱体,考虑到模拟区域内的几何形状、传热情况均关于U形管两只管脚中心线所在的平面对称,因而只需建立实际模型的一半即可,如图1所示。

1.3 控制方程

描述水在U型管和水箱内流动换热的连续性方程、动量方程和能量方程以及描述管壁、岩土和回填土中的传热的导热微分方程可以统一写成如下通用形式^[11]:

$$\frac{\partial(\rho f)}{\partial t} + \text{div}(\rho u f) = \text{div}(G_f \text{grad} f) + S_f \quad (1)$$

式中: ρ —U型管内流动介质的密度, kg/m³; f —通用物理量; u —U型管内流动介质的速度, m/s; G_f —扩散通量; S_f —源项。

1.4 边界条件

1) 初始条件: $t = 0$, $T(x, y, t) = T_0$, $u = 0$

2) 进出口: 进口采用定速度进口边界条件, 出口选用压力出口边界。同时, 地埋管的出口和水箱的进口、水箱的出口和地埋管的进口形成耦合界面, 耦合界面具有相同的特征参数。

3) 壁面: U形管壁面为固定壁面, 该壁面和回填材料相连的壁面组成耦合壁面, 从而将管中水的流动和U型管管材、回填材料、岩土体的传热耦合起来, 耦合边界上热流密度连续。岩土体的远端半径定义为绝热边界条件。岩土体表面与空气接触表面设为第三类边界条件。对称面定义为SYMMERY类型边界条件。

1.5 数值模拟方法

式(1)中的各微分方程相互耦合, 具有很强的非线性特征, 目前多采用数值模拟的方法进行求解。利用CFD商业软件—FLUENT进行求解。求解器采用分离求解器, 方程线性化方式为隐式格式, 非稳态计算方式, 动量和能量均采用二阶格式, 松弛因子均采用默认值。

粘性流体常见运动方式是湍流, 湍流是一种极为复杂的非稳定流动。在实际工程中的流动几乎全部是湍流流动。模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型。对流项差分格式采用QUICK格式, 压力速度耦合采用SIMPLE算法中的压力隐式分裂算子的压力速度耦合格式(PISO算法)。同时观察求解变量随迭代次数的变化趋势, 以保证计算结果收敛。数值模型的

基本参数设置见表1。

表1 主要参数设置

Tab.1 The main parameters

名称	参数设置
岩土热物性	导热系数 $\lambda=1.8\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
	热容 $c=1600\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
	密度 $\rho=1645\text{kg}/\text{m}^3$
回填土热物性	同上
流体速度	0.7m/s
加热器功率	1.6 kW
流体初始温度	$T_f=288.6\text{K}$
岩土初始温度	$T_0=288.6\text{K}$
模拟时间	200h

2 热响应测试参数辨识方法

2.1 线热源模型结合最小二乘法

1945年, Ingersoll根据Kelvin提出的线源理论建立了线热源模型, 用于求解地源热泵埋管换热器的传热问题。线热源模型进行了如下假设: 地下岩土被视为初始温度均匀的无限大介质; 岩土热物性在测试过程中不变; 忽略沿深度方向的热传导(包括地表面传热); 并忽略钻孔内结构尺寸和回填材料的影响, 将地埋管换热器看作是一个放/吸热量恒定的无限长线热源, t 时刻距离线热源中心 r 处的温度函数可用式(2)来表示:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q_l}{4\pi\lambda_s} \int_{r^2/4\alpha t}^{\infty} \frac{e^{-S}}{S} dS \quad (2)$$

式中: $T(r, t)$ — t 时刻距离线热源中心 r 处岩土的溫度, K; T_0 —岩土初始温度, K; q_l —单位长度线热源热流密度, W/m; λ_s —钻孔周围岩土的导热系数, W/(m·K); α —岩土热扩散率, m^2/s 。

当 $\alpha t/r^2 \geq 5$ 时, 式(2)可简化为:

$$T(r, t) - T_0 = \frac{q_l}{4\pi\lambda_s} \left[\ln t + \ln \left(\frac{4\alpha}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (3)$$

式中: γ —欧拉常数, $\gamma=0.5772$ 。

假设钻孔热阻为 R_b , 且钻孔内充分换热(可近视为稳态)。则钻孔壁面的温度与管内流体的平均温度存在以下关系:

$$T_f - T_b = q_l R_b \quad (4)$$

式中: T_f —埋管内流体平均温度, K; 近似取埋管换热器进出口平均温度, $T_f = (T_{in} + T_{out})/2$; T_b —钻孔壁面温度, K; R_b —钻孔热阻, (K·m)/W。

令 $R=R_b$, 根据式(3)和(4)可得埋管内流体的平均温度为:

$$T_f = \frac{q_l}{4\pi\lambda_s} \ln(t) + \left\{ q_l \left[\frac{1}{4\pi\lambda_s} \left(\ln \left(\frac{4\alpha}{r_b^2} \right) - \gamma \right) + R_b \right] + T_0 \right\} \quad (5)$$

当 $t=t_1$ 时, $T_f=T_{f1}$; 当 $t=t_2$ 时, $T_f=T_{f2}$, 则有:

$$T_{f2} - T_{f1} = \frac{q_l}{4\pi\lambda_s} \cdot \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (6)$$

从而可得导热系数的表达式为:

$$\lambda_s = \frac{q_l}{4\pi} \cdot \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_{f2} - T_{f1}} = \frac{q_l}{4\pi k} \quad (7)$$

式中: k —直线斜率, $k = \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_{f2} - T_{f1}}$ 。

即在温度-时间对数坐标轴上利用最小二乘法拟合出式(6), 从而可得直线的斜率 k , 进而能计算出岩土导热系数 λ_s 值。

2.2 线热源模型结合参数估计法

由式(2)可知, 当 $\alpha t/r^2 \geq 5$ 时, t 时刻钻孔壁面温度可表示为:

$$T_b - T_0 = \frac{q_l}{4\pi\lambda_s} \cdot Ei \left(\frac{r_b^2 \rho_s c_s}{4\lambda_s t} \right) \quad (8)$$

结合式(4), 可知埋管内流体平均温度的表达式为:

$$T_f = T_0 + q_l \left[R_b + \frac{1}{4\pi\lambda_s} \cdot Ei \left(\frac{r_b^2 \rho_s c_s}{4\lambda_s t} \right) \right] \quad (9)$$

式中: $Ei(x)$ —指数积分函数, $Ei(x) = \int_x^{\infty} \frac{e^{-S}}{S} dS$ 。

式(9)中包含3个未知参数: 岩土导热系数 λ_s , 钻孔热阻 R_b 和容积比热容 $\rho_s c_s$, 因而无法直接对式(9)进行解析求解, 但是可以利用最优化技术来处理此类问题。通过利用参数估计法来求解式(9)中的3个未知参数。此方法的目标是通过不断调整参数辨识传热模型中岩土导热系数、钻孔热阻和容积比热容的数值, 其中岩土容积比热容($\rho_s c_s$)量级为 10^6 , 保持在该量级上进行参数估计。寻找到由传热模型计算出的流体平均温度与模拟或实测的流体平均温度之间的差值最小, 此时对应的三个热物性参数值即为最终的优化值, 其优化目标函数为:

$$f = \sum_{i=1}^N (T_{cal,i} - T_{sim,i})^2 \quad (10)$$

式中: N —实测的数据组数; $T_{cal,i}$ —第 i 时刻由选定的参数辨识模型计算出的埋管内流体平均温度值, K; $T_{sim,i}$ —第 i 时刻模拟或实测得到的埋管内流体平均温度值(近似取埋管进出口流体温度的平均值), K。

2.3 柱热源模型结合参数估计法

1947年, Carslaw提出了柱热源模型, 柱热源模型除了将地下埋管换热器视为一个具有一定半径的理想单管以外, 其余假设和线热源模型一致。同理, 钻孔周围的传热也是一个一维轴对称问题, 1954年, Ingersoll给出了恒热流条件下的柱热源模型解析解为:

$$T_b - T_0 = \frac{q_l}{\lambda_s} G(For, p) \quad (11)$$

式中: For —傅里叶(Fourier)数, 其计算式为 $For = \alpha t / r^2$; p —地下岩土计算点至圆柱中心距离与圆柱半径比值, $p = r / r_0$ 。

对于 $p=1$ (即钻孔孔壁处) 时的 G 函数特征解精度最高, 因而令 $p=1$, 结合式(4)可知埋管内流体的平均温度表达式为:

$$T_f = T_0 + q_l \left[\frac{G(For, 1)}{\lambda_s} + R_b \right] \quad (12)$$

同理式(12)中同样包含3个未知参数: 钻孔周围岩土导热系数 λ_s , 钻孔热阻 R_b 和容积比热容 $\rho_s c_s$, 同理利用参数估计法可求得以上3个未知参数。

3 模型验证

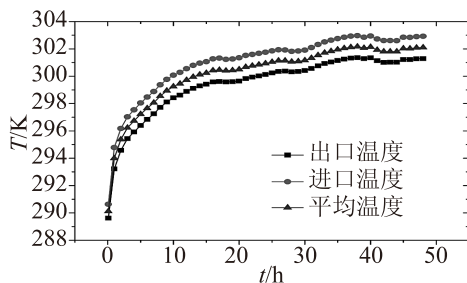


图2 实测热响应曲线

Fig.2 The measured thermal response test curve

为了验证所建模型的正确性, 搭建了地源热泵实验台, 设计开发了一台移动式热响应测试车。该实验台主井深度为50m, 在主井内敷设贴有热电偶的单U型PE管, PE管的外径为32mm, 管壁厚3.5mm。在进行岩土初始平均温度测试后, 开启电加热器, 将电加热器功率设定为2.1kW, 同时通过控制变频水泵和阀门开度设定环路流量为1.10m³/h, 数据采集频率为1min/次, 测试持续时间为48h。得到热响应曲线如图2所示。

根据第2节所述方法, 利用实测数据辨识得到岩土导热系数、钻孔热阻和岩土体积比热容, 将以上数据分别反带入式(5)、(8)、(11)可计算得到不同测试时间下对应的计算流体平均温度, 如图3所

示。线热源模型和柱热源模型计算温度与模拟得到温度残差见图4。

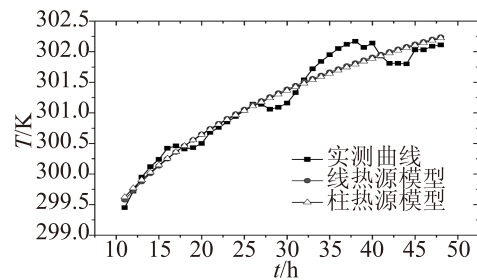


图3 计算流体平均温度与实测流体平均温度对比

Fig.3 The contrast of the calculated and measured average fluid temperature

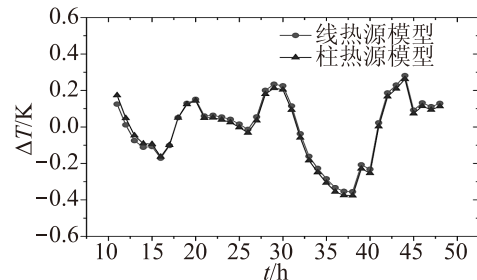


图4 计算流体平均温度与实测流体平均温度残差

Fig.4 The residual of the measured and calculated average fluid temperature

从图3和图4可以看出, 柱热源与线热源模型计算得到的管内平均流体温度与实测值吻合良好, 温度残差在0附近波动, 线热源模型和柱热源模型计算值与实测值的最大残差为0.41K, 出现在测试时间为38h处, 这可能与实验过程处于过渡季节, 且气候波动较大有关。测试结果说明了所建模型和参数辨识过程的正确性。

4 计算结果及讨论

4.1 测试时间对导热系数辨识结果的影响

Austin等在1998年提出典型钻孔条件下的热响应测试时间为50h^[1], Gehlin等推荐测试时间为60h^[12]。Witte等出于实验目的测试时间长达250h, 而他们的商业测试时间为50h^[13]。美国采暖制冷与空调工程师学会(ASHRAE)手册推荐的测试时间为36~48h^[14], 而国际地源热泵协会(IGSHPA)的指导意见为大于48h^[15], 我国《地源热泵系统工程技术规范》(GB 50366—2005)中规定, 岩土热响应实验应连续不间断, 持续时间不宜少于48h^[16]。

利用所建数值模型, 首先分析了测试时间对导热系数辨识结果的影响, 计算结果如图5所示。由图5可知, 基于线热源模型的2种算法辨识得到的导热系数结果接近, 运行70h后在1.70~1.74 W/(m·K)范围波动, 而基于柱热源模型计算的结果与线

热源模型相比差异较大,运行70h后在1.56~1.65 W/(m·K)范围波动。计算结果表明这三种参数辨识方法测试时间均要求70h以上,辨识结果才能趋于稳定。热响应测试时间比目前研究结果长约10~20h,这可能是由于目前的研究多为实验研究,由于传感器的精度和灵敏度等影响,在温度变化缓慢时并不能很好的反应这一实际情况,因而测试结果可能存在一定的误差。

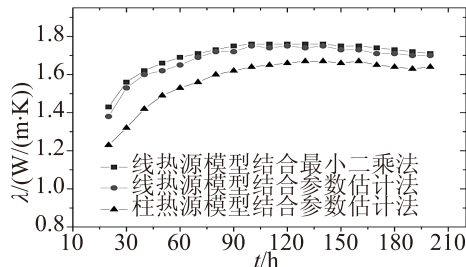


图5 测试时间对导热系数辨识结果的影响
Fig.5 The influence of test time on ground thermal conductivity

在实际的热响应测试过程中,测试持续时间不能过长,因为测试时间过长会使岩土中含湿量发生变化,即发生热湿迁移现象。文献[17]研究表明:随着测试持续时间的增加,辨识得到的岩土导热系数越小,钻孔内热阻越大。虽然在实际的设计中随着测试时间的增加,得到埋管的长度越长,打井数量越多,满足了地源热泵系统的安全可靠性,但是热响应测试本身会消耗大量的电能以及人力成本,而且测试结果会导致地源热泵空调系统的初投资增加。

4.2 舍弃初始小时数对导热系数辨识结果的影响

在热响应参数辨识的理论模型中,作了一些简化和假设:1) $at/r^2 > 5$; 2) 钻孔内为稳态导热。而在热响应初期测试得到的数据显然不能满足以上两点,需要对初始测试的数据点舍弃,但是舍弃多少小时合适,目前并没有统一规范。通过对舍弃不同的初始小时数进行分析,得到结果如图6所示,由图6可知,在舍弃前40h以前,随着舍弃数据点的增加,辨识得到的导热系数逐渐增大,而在舍弃前40h后,测试得到的岩土导热系数较为稳定,此时舍弃前40h与舍弃前5h辨识得到的导热系数相差约为3%。显然,在热响应初期,钻孔内并未达到稳态,舍弃时间点较少会引起一定误差。因此在热响应测试过程中,建议进行较长时间的热响应测试,舍弃前40h数据点,以提高热响应的精度。

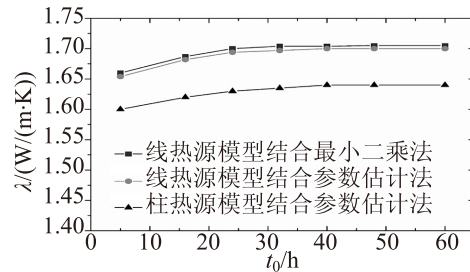


图6 舍弃初始小时数对导热系数辨识结果的影响
Fig.6 The influence of abandoned initial hours on ground thermal conductivity

4.3 钻孔半径对导热系数辨识结果的影响

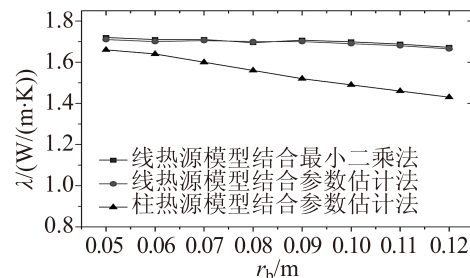


图7 钻孔半径对导热系数测试结果的影响
Fig.7 The influence of borehole diameter on ground thermal conductivity

图7给出了不同钻孔半径对导热系数测试结果的影响,从图7可以看出,钻孔半径对基于线热源模型的两种测试方法几乎没有影响,其导热系数计算结果稳定在1.70 W/(m·K)左右。但对于柱热源模型结合参数估计法,随着钻孔半径的增大,辨识得到的导热系数越小, $r=0.05$ 与 $r=0.12$ 辨识得到的导热系数相差达到16.08%。究其原因,可能和模型及假设简化有关,因为线源模型假定的热流是施加在 $r=0$ 处,而柱热源模型假定的热流是施加在 $r=r_b$ 处。

4.4 岩土初始温度对导热系数辨识结果的影响

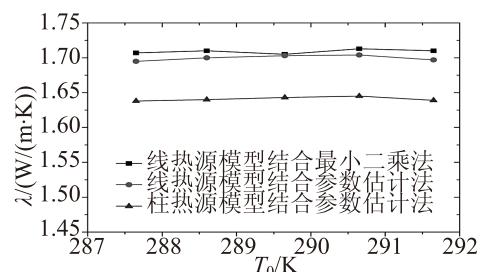


图8 岩土初始温度对导热系数测试的影响
Fig.8 The influence of initial ground temperature on ground thermal conductivity

我国地域辽阔,从东到西、从南到北的气候条件差异很大,同时地下岩土初始温度也有较大差异,能达到5K以上。因而研究不同参数辨识方

法在不同区域的热响应测试的适应性, 具有重要意义。在其它设置条件不变的情况下, 改变地下岩土初始温度值, 其对测试得到的岩土导热系数影响见图8。由图8可知, 岩土初始温度值对岩土导热系数的辨识结果几乎没有影响。这表明这三种参数辨识方法均具有良好的地域普适性。

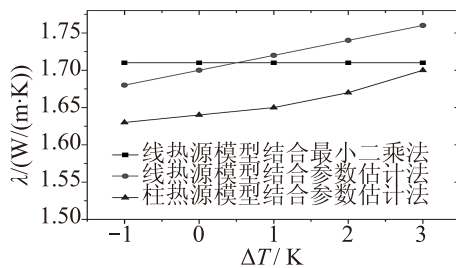


图9 岩土初始温度测试误差对导热系数的影响
Fig.9 The influence of actual temperature measurement errors on ground thermal conductivity

由参数辨识模型及方法可知, 参数估计法在参数辨识时需要测试岩土初始温度值, 并将这一值作为已知参数输入模型求解岩土导热系数。而岩土初始温度沿深度方向存在温度梯度, 在测试过程中极易发生误差。图9给出了如果岩土初始温度测试出现误差, 对导热系数辨识结果的影响。由图9可知, 线热源模型结合最小二乘法由于其在参数辨识过程中不需要测量地下岩土的初始温度, 故岩土初始温度测试结果对导热系数辨识结果没有影响。对于线热源模型结合参数估计法, 若以设定初始温度288.6K为准, 若测试得到的岩土初始温度误差为1K, 辨识得到的导热系数偏差约10%~12%, 同时如果测试得到的岩土初始温度高于真实值, 则辨识得到的导热系数偏大, 反之亦然。而柱热源模型结合参数估计法得到结果的变化规律与线热源模型结合参数估计法相似, 若测试得到的岩土初始温度偏差1K, 辨识得到的导热系数变化约6%~18%。因而在对地源热泵设计时, 基于参数估计法的两种岩土热响应参数辨识方法, 岩土初始温度测试发生偏差将会造成地源热泵埋管长度设计时误差的累积。

4.5 加热器输入功率对导热系数辨识结果的影响

在热响应测试过程中, 需要保持加热器输入功率恒定, 但是并没有规定热响应测试过程中加热器输入功率的大小。美国采暖制冷与空调工程师学会 (ASHRAE) 推荐加热功率应为每米钻孔50~80W, 大致为实际U型管换热器高峰负荷值。分析不同加热器输入功率对导热系数辨识结果的影

响, 如图10所示。

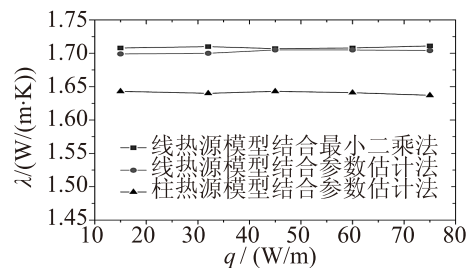


图10 加热器输入功率对导热系数测试的影响
Fig.10 The influence of heater injected power on ground thermal conductivity

由图10可知, 在不同的加热器输入功率下, 三种方法辨识得到的结果几乎维持不变。这表明加热器的输入功率对岩土导热系数辨识结果没有影响。但在实际的热响应测试中, 文献[4]的研究结果表明, 随着加热器输入功率的增加, 测试得到的岩土导热系数越大, 这可能是因为地下水渗流引起的, 由于地下埋管一般埋深在50~200m, 或多或少存在地下水渗流, 地下水流动会影响到钻孔内外的传热过程, 从而影响岩土热物性的测试结果。因此, 在进行热响应测试时, 必须要考虑地下水渗流的影响。文献[18-19]研究表明, 如果地下水渗流速度过大, 通过文中方法辨识得到岩土的导热系数将不能直接用于地源热泵系统的设计, 因为文中的参数辨识方法均是基于纯导热理论模型, 而地下水渗流较大时是以对流换热方式为主。因而在无地下水渗流或渗流速度较小时, 可以不考虑加热器输入功率的影响, 但是对于地下水渗流较大时, 必须保证地埋管的进口温度与热泵机组的名义工况一致, 如果地下水渗流过大时, 不能应用这三种参数辨识方法进行数据处理, 可采用阶梯形功率进行放热或吸热, 然后结合参数估价法处理^[20]。

5 结论

- 1) 测试时间对计算结果有一定的影响, 测试时间应大于70h, 辨识得到的导热系数较为稳定。
- 2) 舍弃较长的初始测试小时数(40h), 辨识得到的岩土导热系数较为稳定。
- 3) 钻孔半径对基于线热源模型的两种岩土热响应参数辨识方法影响不明显, 但对柱热源模型, 钻孔半径越大, 辨识得到的岩土导热系数越小。
- 4) 岩土初始温度对岩土导热系数辨识结果没有影响。但对于参数估计法需要测试岩土的初始温度, 如果岩土初始温度测试出现1K的偏差, 则测试得到的导热系数将有6%~18%的偏差, 故在地源

热泵系统设计时会造成测试误差的累积。

5) 对于纯导热模型, 加热器输入功率对岩土导热系数辨识结果没有影响。但是对于实际的热响应测试, 可能由于地下水渗流等原因, 辨识得到的导热系数随着加热器输入功率的增加而增大。因而在实际热响应测试过程中, 应当充分考虑加热器输入功率对测试结果的影响。

本文受中央高校基本科研业务费专项资金(xjj20100078)项目资助。(The project was supported by the Fundamental Research for the Central Universities (No. xjj20100078).)

参考文献

- [1] Austin W A. Development of an In situ System for Measuring Ground Thermal Properties [D]. Stillwater, Oklahoma: Oklahoma State University, 1998.
- [2] M Z Yu, X F Peng, X D Li, et al. A simplified model for measuring thermal properties of deep ground soil[J]. Experimental Heat Transfer, 2004, 17 (2): 119-130.
- [3] 赵军, 段征强. 基于圆柱热源模型的现场测量地下岩土热物性方法[J]. 太阳能学报, 2006, 27 (9): 934-936. (Zhao Jun, Duan Zhengqiang. A Method for in Situ Determine Underground Thermal Properties Based on the Cylindrical Heat Source Method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2006, 27 (9): 934-936.)
- [4] 周亚素, 雷鸣. 现场测定土壤导热系数的影响因素分析[J]. 东华大学学报, 2009, 35 (4): 482-485. (Zhou Yasu, Lei Ming. Influence Factors Analysis on In situ Test of Ground Thermal Conductivity[J]. Journal of Donghua University, 2009, 35 (4): 482-485.)
- [5] Burkhard S, Byoung YC. Ground Source Heat Pump Research in South Korea[C]//Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 2005: 24-29.
- [6] Turgut B. Ground water level influence on thermal response test in Adana, Turkey[J]. International Journal of Energy Research, 2008, 32 (7): 629-633.
- [7] Sarah S, Simone B, Daniel P, et al. Numerical evaluation of thermal response tests[J]. Geothermics, 2007, 36 (2): 141-166.
- [8] 胡平放, 雷飞, 孙启明. 岩土热物性测试影响因素的研究[J]. 暖通空调, 2009, 29 (3): 123-126. (Hu Pingfang, Lei Fei, Sun Qiming. Study on influence factors for thermo-physical property of soil[J]. HV&AC, 2009, 29 (3): 123-126.)
- [9] 王华军, 王恩宇, 赵军. 地源热泵地下热响应实验的季节效应分析[J]. 暖通空调, 2009, 39 (2): 14-18. (Wang Huajun, Wang Enyu, Zhao Jun. Seasonal effect on in-situ thermal response tests for ground-source heat pump [J]. HV&AC, 2009, 39 (2): 14-18.)
- [10] 于明志, 方肇洪. 现场测量深层岩土热物性方法[J]. 工程热物理学报, 2002, 23 (3): 354-356. (Yu Mingzhi, Fang Zhaozhong. A method for in situ determining the thermal properties of deep ground[J]. Journal of engineering thermophysics, 2002, 23 (3): 354-356.)
- [11] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- [12] Gehlin, EA Signhild, Goran Hellstrom. Comparison of Four Models for Thermal Response Test Evaluation[J]. ASHRAE Transactions, 2003, 109 (1): 131-142.
- [13] HJL Witte, GJ van Gelder, JD Spitler. In-situ measurement of ground thermal conductivity: The Dutch Perspective[J]. ASHRAE Transactions, 2002, 108 (1): 859-867.
- [14] ASHRAE. 2007 ASHRAE handbook on HVAC applications [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 2007.
- [15] IGSHA (International Ground Source Heat Pump Association). Closed-Loop/Geothermal Heat Pump Systems - Design and Installation Standards (2007 Edition) [M]. USA: Oklahoma State University, 2007.
- [16] 中华人民共和国建设部. 地源热泵系统工程技术规范[S]. GB/50366—2005. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [17] 王书中, 由世俊, 张光平, 等. 热响应测试在土壤热交换器设计中的应用[J]. 太阳能学报, 2007, 28 (4): 405-410. (Wang Shuzhong, You Shijun, Zhang Guangping, et al. Application of geo-thermal response test in the design of ground heat exchanger[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2007, 28 (4): 405-410.)
- [18] T Katsura, K Nagano, S Takeda, et al. Heat transfer experiment in the ground with ground water advection[C]// IEAs 10th Energy Conservation Thermal Energy Storage Conference Ecstock'2006. New Jersey: the Richard Stockton College, 2006.
- [19] Chiasson A D, Rees S J, Spitler J D. A preliminary assessment of the effects of ground-water flow on closed loop ground-source heat pump systems[J]. ASHRAE Transactions, 2000, 106 (1): 380-393.
- [20] H J L Witte, A J van Gelder. Geothermal Response Tests using controlled multi power level heating and cooling pulses (MPL-HCP): Quantifying groundwater effects on heat transport around a borehole heat exchanger[C] // IEAs 10th Energy Conservation Thermal Energy Storage Conference Ecstock'2006. New Jersey: the Richard Stockton College, 2006.

通讯作者简介

王泮浩, 男(1972-), 博士生导师, 教授, 西安交通大学建筑节能研究中心主任, 13227006940, E-mail: fhwang@mail.xjtu.edu.cn. 研究方向: 建筑节能与可再生能源利用技术。

About the corresponding author

Wang Fenghao (1972-), male, Ph.D. / Professor, Head of Building Energy Research Center, Xi'an Jiaotong University, 13227006940, E-mail: fhwang@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: Building energy efficiency and renewable energy technology.