

DOI:10.11784/tdxbz201509062

岩土热响应试验不确定性研究及敏感性分析

张雪丹^{1,2}, 姜益强¹, 姚 杨¹, 邓仕明²

(1. 哈尔滨工业大学市政环境工程学院, 哈尔滨 150090; 2. 香港理工大学屋宇设备工程学系, 香港 999077)

摘要: 针对岩土热响应试验数据处理中的不确定性问题, 开发了柱热源传热模型数值反演解与信赖域反射优化算法相结合的地下岩土热物性参数估计程序。该程序能够有效地避免求解过程陷入局部最优解, 并为后续不确定性研究提供底层模型。对地理管进出水温度、热传输功率、地下原始温度等模型输入参数的不确定性通过查阅文献、理论思考和基于专业经验的假设进行合理量化, 采用 Monte Carlo 方法进行模拟, 将热响应试验的模型输入参数不确定性传播到输出参数评估结果中, 得到了地下岩土导热系数与钻孔热阻之间的二元联合分布, 并使用 Copula 函数进行复现。最后对传热模型中影响温度输出的可变参数进行 Lasso 敏感性分析, 证明导热系数与热阻的影响最大。

关键词: 热响应试验; 参数评估; 地下换热器; 不确定性; 敏感性

中图分类号: TU18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0493-2137(2017)03-0306-07

Uncertainty Study and Sensitivity Analysis of Soil-Rock Thermal Response Test

Zhang Xuedan^{1,2}, Jiang Yiqiang¹, Yao Yang¹, Deng Shiming²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Department of Building Service Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: In order to solve the uncertainty in data interpretation involved in soil-rock thermal response test (TRT), a parameter estimation program was developed by employing numerical inversion of cylindrical source model combined with a trust region reflective algorithm, which can avoid being trapped in local optimum and provide underlying model for subsequent uncertainty study. Uncertainties of input parameters, including inlet and outlet temperatures of ground heat exchanger, heat transfer rate and undisturbed ground temperature, etc, were reasonably quantified through literature reviews, theoretical considerations and educated guesses. Then, Monte Carlo stochastic simulation was applied to propagate input parameters uncertainties to output parameters of TRT. A mapping of ground thermal conductivity and borehole thermal resistance was then obtained, and their inherent correlation was presented by a bivariate joint distribution constructed by Copula function. In the end, the influence of variable parameters on the mean temperature of heat transfer fluid was analyzed by Lasso method. The result shows that ground thermal conductivity and borehole thermal resistance are the most influential parameters.

Keywords: thermal response test; parameter estimation; ground heat exchanger; uncertainty; sensitivity

地源热泵技术以其经济高效节能环保的显著优势近年来受到国内外广泛关注, 研究热度居高不下且市场热度日趋活跃。作为一项可再生能源利用技术, 发展地源热泵系统也符合可持续发展政策, 是对我国传统的过分依赖化石燃料的能源策略的有效抑制手

段。地下换热器作为地源热泵系统的最主要部分, 是该项技术研究的重点和难点之一, 其设计好坏直接决定系统成败^[1]。因此只有通过研究地下换热器与岩土介质间的复杂传热机理, 确定地理管与地下岩土的热物理性质, 选取准确性及可靠性较高的传热模型, 才

收稿日期: 2015-09-22; 修回日期: 2015-12-03.

作者简介: 张雪丹 (1986—), 女, 博士研究生, dreamscometrue2008@163.com.

通讯作者: 姜益强, jyj7245@sina.com.

网络出版时间: 2016-04-13. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1127.N.20160413.1126.002.html>.

基金项目: 黑龙江省自然科学基金资助项目(E201435); 香港理工大学研究委员会资助项目(G-UA28).

Supported by the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province, China (No. E201435) and the Hong Kong Polytechnic University Research Committee Funding Scheme (No. G-UA28).

能找到最优方法来确定地下换热器的尺寸及结构设计,并对整个系统的长期运行特性进行预测和分析。

目前工程上常用的获取工程现场岩土热物性的方法为热响应试验,其原理是通过向地下注入或提取一定热量,观测传热介质的实际温度响应,并与传热模型模拟值进行对比,满足两者方差和为最小值条件时对应的岩土热物性数值,即为所求。热响应试验参数评估的过程,工程中常采用对数斜率法或双参数估计法进行求解。然而,一方面该方法获取的热物性参数仅为解集中的一组值,且易陷入局部最优解^[2];另一方面由于地下岩土的复杂结构和测试环境的不稳定性,需要进行深度的不确定性分析。

热响应试验技术发明初期,常采用简单的误差分析来表征测量仪器以及测试结果的不确定性^[3],如 Raymond 等^[4]通过调整热传输功率、岩土导热系数、岩土体积比热容以及钻孔热阻等参数的上下限以及不同组合,基于线热源模型计算了传热介质温度对参数变化的敏感性以及不确定性。以上仅仅用最大可能误差来描述热响应试验精度问题的方法,不能表征岩土热物性的分散性及其内部联系,不能满足精细化设计需求,因此近年来各国学者的思维触角开始伸向岩土热物性不确定性的相关研究,总体来说还处于初期探索阶段。其中 Li 等^[5]基于无限长柱热源模型对热响应试验进行了敏感性分析,并阐明了该分析对现场测试的指导意义。然而该文使用冷冻参数法对调研参数进行局部敏感性分析,且仅研究了温度测量不确定性对测试结果的影响,总体来说还不够深入。Zhang 等^[6]基于无限长线热源模型也进行了热响应试验的不确定性分析并应用于实际地埋管换热器可靠性设计,而本文作为后续研究,将侧重单纯热响应试验过程中的不确定性研究及传热模型的参数敏感性分析。首先引入 Baudoin^[7]基于拉普拉斯变换得到的柱热源模型数值反演解,其优势在于能够求解整个温度场信息。其次,编制了基于信赖域反射算法的快速参数估计程序,结合概率论与数理统计原理,采用 Monte Carlo 方法模拟了测量不确定性到岩土热物性参数不确定性的传播过程。最后引进 Lasso 算法进行了传热模型参数全局敏感性分析,为现场热响应试验及进一步地源热泵地下换热器不确定性设计提供理论指导。

1 模拟方法

1.1 参数估计方法

岩土热响应试验的参数估计以温度响应的计算

值与实测值之间的最小方差和为目标函数

$$f = \min \sum_{i=1}^n [(T_{i,cal})_i - (T_{i,exp})_i]^2 \quad (1)$$

式中 $(T_{i,cal})_i$ 、 $(T_{i,exp})_i$ 分别为第 i 时刻地下换热器进出口传热流体平均温度的模型计算值和实测值。

参数估计的流程如图 1 所示,各符号物理意义将在第 2 节中具体解释。

采用信赖域内点反射法进行参数寻优估计,程序经过遍历法验证,能够有效避免陷入局部最优解^[6]。该算法的原理是通过仿射尺度变换沿反射路径产生严格可行的迭代点列,而无需确定由有效变量构成的集合。Coleman 等^[8]确定了该算法全局二次收敛性结论,数值实验的结果也表明这种算法适用于解决约束二次规划问题,并且具有鲁棒性。

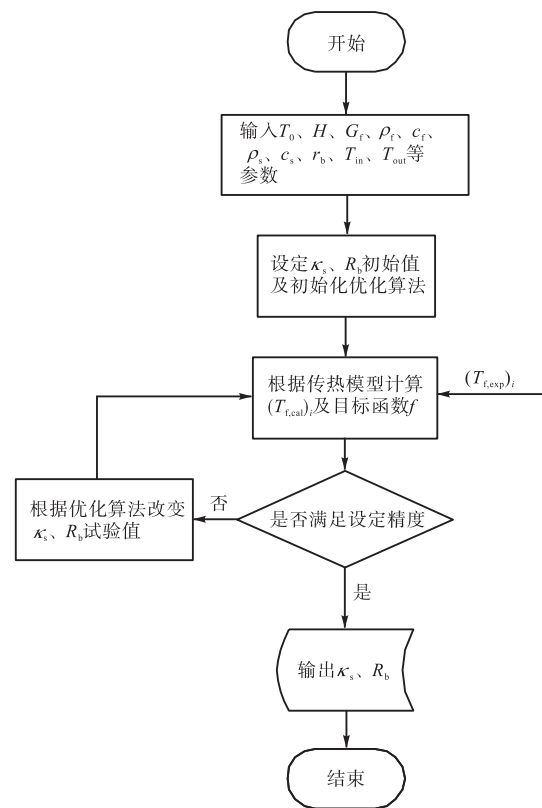


图 1 参数估计流程

Fig.1 Flowchart of parameter estimation

1.2 Monte Carlo 实验

Monte Carlo 模拟方法原理如图 2 所示。假定模型包含 m 个输入参数 $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$, 每一个输入参数 x_i 对应的概率分布为 D_i 。随后,通过计算机采样分配给不同输入参数概率分布为 D_i 的 n 个样本值,则模型输出 y 可经由其与输入 x 之间的函数计算获得,此时,模型输入与输出之间的映像关系 $[x, y]$ 即可生成。此即为样本数据携带的参数不确定性通过

底层模型传播到模型输出的过程. 本文中采用拉丁超立方方法获取采样数据^[9], 该法概念简洁易于实现, 且相较于其他采样方法在方差估计方面具有很好的鲁棒性.

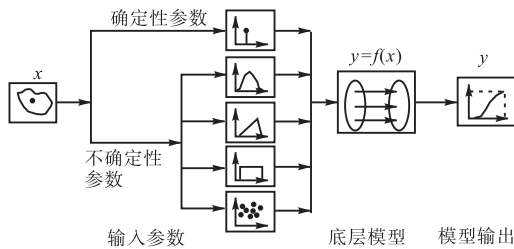


图 2 Monte Carlo 模拟示意

Fig.2 Schematic of Monte Carlo simulation

针对热响应试验参数估计的不确定性分析, Monte Carlo 模拟的基本步骤如下. 首先选定具有不确定性的输入参数, 如温度响应数据、热传输功率等, 并对不同不确定性参数进行概率分布设计, 这也是不确定性计算过程的主要成本来源. 其次, 利用底层模型, 结合优化算法对每一组样本值进行模拟计算. 热响应试验的待估参数通常为岩土导热系数以及钻孔热阻, 假定样本个数为 n , 则模型输出结果为 n 个成对的参数估计值. 最后, 根据统计学原理对热响应试验参数估计结果进行分析, 找到其内在联系并设法复现, 以期在今后的系统设计中进一步应用.

1.3 Lasso 算法

敏感性分析即令输入参数在可能的取值范围内变动并研究和预测其对输出结果的影响程度, 工程上可为模型指标精简、合理安排计算以及提高计算效率提供依据. 从作用范围上可以分为局部敏感性分析和全局敏感性分析两类^[10]. 前者考察单一变量对模型的影响程度, 对于模型已知的情况, 可进行敏感性分析的基础是模型中各个参数变量存在一阶偏导. 本文数学模型采用数值反演解, 在参数取值邻域的可导性上不满足要求. 而且全局敏感性分析可以检验多个变量对输出产生的影响并分析各变量之间的相互作用, 受到更多研究的关注和青睐. 本文选取 Tibshirani^[11]提出的 Lasso (least absolute shrinkage and selectionator operator) 算法进行敏感性分析, Sun 等^[12]证明这是一种在建筑设计计算中之行之有效的大规模指标集合精简算法. Lasso 的基本思想是在回归系数的绝对值之和小于一个常数的约束条件下, 使残差平方和最小化, 从而能够产生某些严格等于 0 的回归系数, 得到解释力较强的模型.

值得注意的是, 敏感性分析作为后处理过程, 考察传热模型的正向输出受多种输入参数的影响, 而参数估计技术是以传热模型的反演形式作为底层模型, 以获取实际工程所需岩土热物性及其不确定性. 敏感性分析过程的模型输出为地下换热器进出口传热流体平均温度. 输入参数除了参数估计过程中的基础参数外, 也加入了参数估计结果数据, 即岩土导热系数与钻孔热阻. 设输入参数的影响及其不确定性线性回归模型表达为

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_m x_{im} \quad (2)$$

式中: y_i 为传热流体平均温度, $i = 1, 2, \dots, n$; β_j 为线性回归系数, $j = 0, 1, \dots, m$; x_{ij} 为待分析影响参数. Lasso 参数筛选过程表示为

$$\beta_{\text{Lasso}} = \arg \min_{\beta} \left\{ \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \sum_{j=1}^m \beta_j x_{ij})^2 + \lambda \sum_{j=1}^m |\beta_j| \right\} \quad (3)$$

式中 λ 为调和数, 其大小决定指标集合精简的程度. 对输入参数进行 Lasso 精简后采用方差分析法定义敏感度指标. 输出参数总平方和 (SST) 及回归平方和 (SSR) 易于计算, 而 SSR 可进一步分解为每一个参数的贡献份额 (SS_j), 则第 j 个参数的敏感度指标 SI_j 定义为

$$SI_j = \frac{SS_j}{SST} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)用于量化不同输入参数对模型输出不确定性的影响, 所有参数的敏感度指标之和小于或等于 100%, 这是由于 Lasso 算法将部分回归系数小的参数压缩为 0 的缘故.

2 传热模型数学描述

岩土热响应试验的服务对象为竖直埋管换热器, 钻孔内结构最主要有 U 型管和套管式两种, 其中套管式结构工程上较少采用. 以单个钻孔单 U 型埋管换热器为例, 几何结构如图 3 所示, 内部由竖直安装的单 U 型或双 U 型高密度聚乙烯埋管及回填材料组成, 以保证换热器与地下岩土之间的热接触. 地下岩土假定为均匀的各向同性介质且温度恒定, 在忽略地下水流动的情况下, 采用 Fourier 方程描述钻孔外热传导过程, 即

$$\rho_s c_s \frac{\partial T(r, \varphi, z)}{\partial \tau} = \kappa_s \nabla^2 T(r, \varphi, z) \quad (5)$$

式中: $T(r, \varphi, z)$ 为空间坐标点 (r, φ, z) 的温度; τ 为时

间； $\rho_s c_s$ 为岩土体积比热容； κ_s 为岩土导热系数。

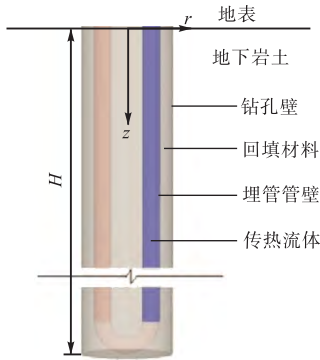


图3 单个钻孔地下换热器几何结构

Fig.3 Geometry of single borehole ground heat exchanger

在解决地下换热器传热问题时，常采用柱坐标系 (r, φ, z) ，拉普拉斯算子 ∇ 表示为

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (6)$$

当假定钻孔为圆柱热源时，忽略钻孔本身热容以及埋管内对流传热引起的轴向热流，则热传导方程可简化为径向的一维方程，这即是 Carslaw 等^[13]提出的柱热源模型，边界条件和初始条件分别为

$$-\kappa_s \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_b} \cdot 2\pi r = q_1 \quad (7)$$

$$T(r, 0) = T_0 \quad (8)$$

式中： q_1 为热响应试验热传输功率； r_b 为钻孔半径； T_0 为岩土初始温度。

Ingersoll 等^[14]将该模型引入到地下换热器传热计算领域，并给出解析解。但其中包含非常复杂的积分形式，Ingersoll 也仅仅给出了典型半径下的拟合方程，不能很好地反映整个温度场信息。因此引入 Baudoin^[7]基于拉普拉斯变换得到的柱热源模型数值反演解，如下：

$$T(r, \tau) = T_0 + \frac{q_1}{2\pi\kappa_s r_b} \sum_{j=1}^{10} \left[\frac{V_j}{j} \frac{K_0(\omega_j r)}{\omega_j K_1(\omega_j r_b)} \right] \quad (9)$$

$$\omega_j = \sqrt{\frac{j \rho_s c_s \ln 2}{\kappa_s \tau}} \quad (10)$$

$$V_j = \sum_{k=\text{Int}(\frac{j+1}{2})}^{\min(j,5)} \frac{(-1)^{j-5} k^5 (2k)!}{(5-k)!(k-1)!k!(j-k)!(2k-j)!} \quad (11)$$

式中 K_0 、 K_1 分别为 0 阶和 1 阶第二类虚宗量 Bessel 函数。

由方程(9)可知，该解能够计算任何时间、任何

半径处的温度值，且适用于快速计算。

热响应试验获得的主要测试数据为传热流体在埋管换热器进出口处的温度，而传热模型的计算结果为钻孔外的温度场分布，这时需要考虑钻孔内部的传热过程，尤其是热阻的确定。假定钻孔内部为稳态传热，则有

$$T_{f,cal}(\tau) = q_1 R_b + T(r_b, \tau) \quad (12)$$

式中 $T(r_b, \tau)$ 为钻孔壁 r_b 处的温度分布。联立方程(9)与(12)，以钻孔壁平均温度为中间媒介即可将钻孔内外传热过程有机结合，计算出基于模型的传热流体平均温度 $T_{f,cal}$ ，即

$$T_{f,cal} = T_0 + \frac{q_1}{2\pi\kappa_s r_b} \sum_{j=1}^{10} \left[\frac{V_j}{j} \frac{K_0(\omega_j r)}{\omega_j K_1(\omega_j r_b)} \right] + q_1 R_b \quad (13)$$

热传输功率则由下式计算：

$$q_1 = G_f \rho_f c_f (T_{in} - T_{out}) / H \quad (14)$$

式中： G_f 为传热流体体积流量； $\rho_f c_f$ 为传热流体体积比热容； T_{in} 、 T_{out} 分别为埋管进出口流体温度； H 为钻孔深度。

采用 Marcotte 和 Pasquier^[2]提出的 p 线性平均温度法计算流体平均温度实验值，即

$$T_{f,exp} = \frac{p((T_{in} - T_0)^{p+1} - (T_{out} - T_0)^{p+1})}{(p+1)((T_{in} - T_0)^p - (T_{out} - T_0)^p)} + T_0 \quad (15)$$

式中幂指数 $p \rightarrow -1$ 时对于热响应试验典型工况的拟合度最高。

3 算例分析

3.1 热响应试验数据

本文中应用的热响应试验数据来源于文献[4]。该测试使用单 U 配置埋管，温度测量精度为 0.1℃，流量为 1%，由图 4 可见，测试数据波动较小，具有良

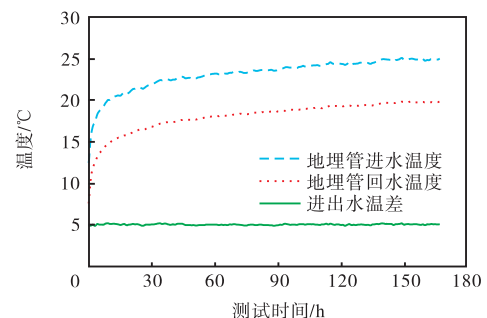


图4 热响应试验传热流体温度响应实测值

Fig.4 Experimental fluid temperatures in thermal response test

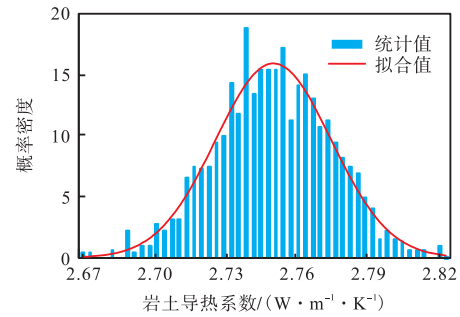
好的稳定性. 测试钻孔长 140 m, 半径为 0.076 m, 岩土体积比热容为 $2.25 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, 平均传热功率计算值为 $66.5 \text{ W}/\text{m}$, 岩土初始温度测定为 7.5 . 基于前述柱热源模型的常规确定性参数估计的结果为岩土导热系数值 $2.75 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 钻孔热阻值 $0.055 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. 测试总时长 167 h, 参数评估以接近稳态的第 13 h 为计算起点. 全文采用以上基准数据进行模拟分析.

3.2 参数不确定性传播

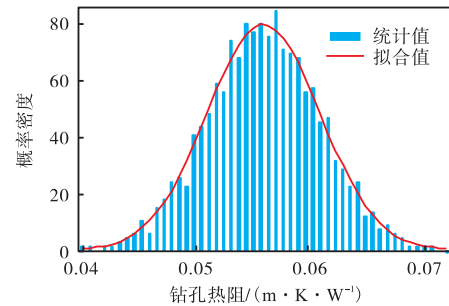
进行随机模拟之前, 最重要的步骤是对参数进行不确定性的设计和量化, 这也是后续研究和分析的基础. 对于独立的不确定性参数, 通过查阅文献、理论思考以及基于专业经验的合理假设直接指定概率分布即可. 而对于模型中间参数, 如热传输功率, 其本身不能够直接测量而是通过间接计算获得, 则需要将其进一步分解到能够分配概率的最小单元.

由式(13)可知, 使用优化算法进行参数估计时, 主要测量参数有地理管进出口水温以及流量. 根据最小不确定度要求, 测试装置不确定度应小于测量结果允许偏差的 $1/3$ ^[15]. 因此对于数据不确定性的处理, 采用测试结果加标准差为 $1/3$ 、测试仪器最大允许的随机高斯噪声. 较之文献[2, 5]直接加入等于传感器精度值的噪声的做法, 更为有据可循. 而热传输功率由式(14)计算而来, 由于原文缺少时变流量测量值, 这里根据其计算结果, 在平均值基础上加入 $\pm 3\%$ 的允差, 与原作者的计算结果保持一致. 如数据充分, 则应根据传热介质流量和温度测量值的概率分布进行热传输功率的核密度估计. 此外, 岩土热扩散率是根据钻孔施工过程中采集的岩土结构和成分加权估算平均值, 此处选取基准值的 $\pm 20\%$ 进行不确定性计算. 另外一个重要参数是岩土初始温度, 同样由间接法测得, 其不确定度设定为 ± 1 ^[16]. 本文 Monte Carlo 模拟过程中所有不确定性参数的概率分布均设定为正态分布, 实际工程中若设计人员可获得相关仪器的不确定性测定信息, 宜使用实测值进行计算. 事实上, 参数不确定性的量化是不确定性研究的主要成本来源, 而在地源热泵系统设计领域发展还不成熟, 因此需要更多学者和研究人员的共同努力, 以期建设不确定性数据库并编入现行标准规范, 为今后的可靠性设计推广提供指导.

采用 1 000 个样本进行 Monte Carlo 模拟即可满足要求^[6], 岩土导热系数以及钻孔热阻的统计规律如图 5 所示, 参数不确定性以其概率分布量化, 岩土导热系数以及钻孔热阻拟合概率分布的统计参数见表 1, 其中 μ 为样本均值, σ 为样本标准差.



(a) 岩土导热系数概率密度



(b) 钻孔热阻概率密度

图 5 参数估计结果统计规律

Fig.5 Statistical regularities of estimated parameters

表 1 岩土热物性参数概率分布统计参数

Tab.1 Statistical parameters of probability distributions of soil-rock thermal properties

热物性参数	统计参数	分布类型
综合导热系数	$\mu = 2.749 5, \sigma = 0.025 0$	正态分布
钻孔热阻	$\mu = 0.054 8, \sigma = 0.004 8$	正态分布

文中使用的热响应试验数据无论是仪器精度还是数据稳定性都较高, 然而在此情况下, 热响应试验参数估计的不确定性仍然维持在较高水平, 岩土导热系数及钻孔热阻的分布极差分别占平均值的 7.5% 和 40%. 另外, 由于参数之间的高度相关性, 参照图 6(a)中的 Monte Carlo 模拟计算值, 可知不能将图 5 中拟合概率分布直接应用.

采用 Copula 函数对参数估计结果进行二元联合分布函数复现. 图 6(b)为二元正态 Copula 分布拟合, 其线性相关矩阵参数为

$$\begin{bmatrix} 1.000 0 & -0.970 4 \\ -0.970 4 & 1.000 0 \end{bmatrix}$$

图 6(c)为二元 t-Copula 分布拟合, 其自由度为 $4.027 7 \times 10^6$, 线性相关矩阵参数为

经过检验, 两个函数的平方欧式距离分别为 0.004 4 和 0.004 9, 所构造的 Copula 函数均可用于热响应试验中双参数估计随机结果的分布拟合和数值复现, 其中二元正态 Copula 函数平方欧式距离较小,

表现相对较好。

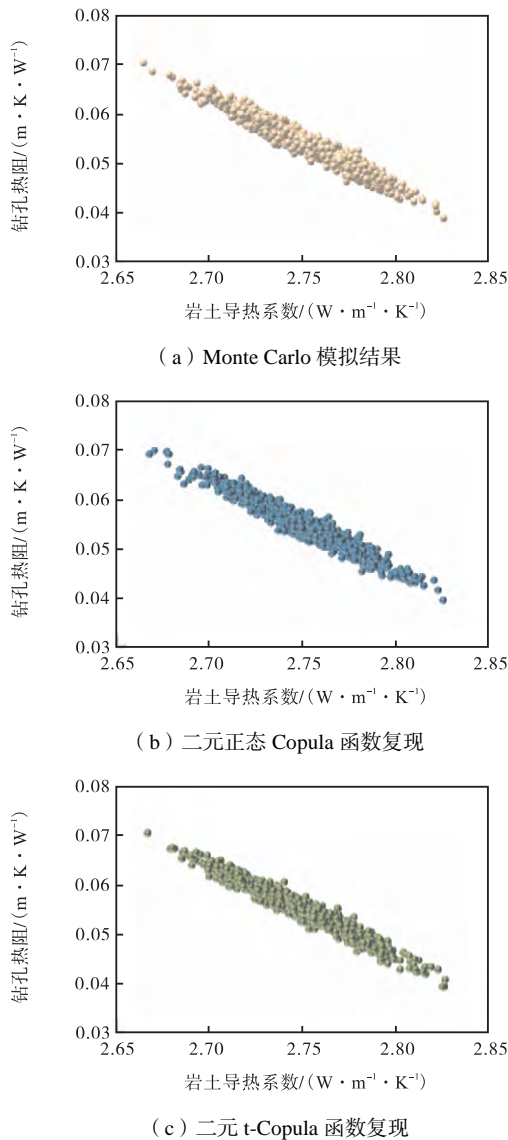


图 6 Monte Carlo 模拟结果及 Copula 函数复现

Fig.6 Monte Carlo simulation results and Copula function replicate

$$\begin{bmatrix} 1.000 0 & -0.972 4 \\ -0.972 4 & 1.000 0 \end{bmatrix}$$

3.3 参数敏感性分析

使用 Lasso 算法进行参数敏感性分析,与 Monte Carlo 模拟使用相同的数据,主要参数变量为岩土导热系数、岩土体积比热容、钻孔热阻、热响应试验热传输功率以及岩土初始温度.由于钻孔半径为结构参数,且在实际工程中基本不变,因此忽略该参数不确定性对传热介质温度响应输出的影响.

敏感性分析结果如图 7 所示,岩土体积比热容、热传输功率以及岩土初始温度等参数对地埋管换热器内传热介质进出口平均温度的敏感度指标被 Lasso 算法压缩为 0,而岩土导热系数以及钻孔热阻两个参

数的敏感度指标先降低后升高,尤其在测试初期和末期变化较大.可见热响应试验中选取这两个参数进行参数评估是合理的.对热响应试验参数估计进行不确定性分析,也同时为进一步的地下换热器尺寸可靠性设计提供数据支撑.

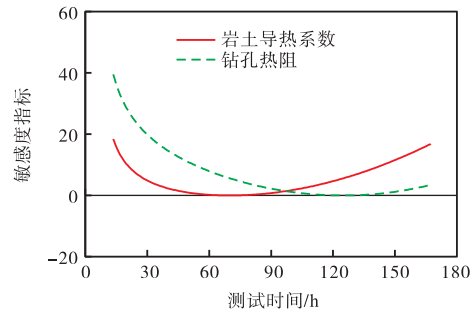


图 7 敏感度指标随测试时间的变化

Fig.7 Variation of sensitivity indices with time

4 结 语

热响应试验技术已然成为规范的地源热泵系统重要设计参数获取方法,对其进行深入的不确定性分析对地下换热器设计具有一定的指导意义.本文基于圆柱热源模型数值反演解,结合实例分析,通过 Monte Carlo 模拟方法计算出热响应试验参数估计的不确定性结果,给出了地下岩土导热系数以及钻孔热阻概率分布及 Copula 二元联合分布函数.所构造的两个函数的平方欧式距离分别为 0.004 4 和 0.004 9,二元正态 Copula 函数表现较好.同时采用 Lasso 方法对测试参数进行全局敏感性分析.结果表明,除去不可变的结构性参数外,岩土导热系数以及钻孔热阻对地下岩土温度场变化的影响最大,侧面证明以其为目标进行热响应试验参数估计的意义以及对其进行不确定性分析的必要性.全过程的研究思路也可为进一步基于不确定性进行地源热泵系统可靠性设计奠定理论基础和提供方法参考.

参考文献：

[1] 马最良,姚 杨,姜益强,等.热泵技术应用理论基础与实践[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.
Ma Zuiliang, Yao Yang, Jiang Yiqiang, et al. *Theoretical Basis and Practice of Heat Pump Technology Application* [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010(in Chinese).

[2] Marcotte D, Pasquier P. On the estimation of thermal resistance in borehole thermal conductivity test [J]. *Re-*

- newable Energy*, 2008, 33(11): 2407-2415.
- [3] Austin W A, Yavuzturk C, Spitler J D. Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties[J]. *ASHRAE Transactions*, 2014, 106(1): 365-379.
- [4] Raymond J, Therrien R, Gosselin L, et al. A review of thermal response test analysis using pumping test concepts [J]. *Ground Water*, 2011, 49(6): 932-945.
- [5] Li M, Lai A C K. Parameter estimation of in-situ thermal response tests for borehole ground heat exchangers [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2012, 55(9/10): 2615-2624.
- [6] Zhang X, Huang G, Jiang Y, et al. Ground heat exchanger design subject to uncertainties arising from thermal response test parameter estimation[J]. *Energy and Buildings*, 2015, 102: 442-452.
- [7] Baudoin A. Stockage Intersaisonnier de Chaleur Dans le Sol par Batterie D'échangeurs Baïonnette Verticaux: Modèle de Prédimensionnement[D]. Reims: Université de Reims, 1988.
- [8] Coleman T F, Li Y Y. An interior trust region approach for nonlinear minimization subject to bounds[J]. *SIAM J Optimiz*, 1996, 6(2): 418-445.
- [9] Helton J C, Davis F J. Latin hypercube sampling and the propagation of uncertainty in analyses of complex systems[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2003, 81(1): 23-69.
- [10] 蔡毅, 邢岩, 胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2008, 44(1): 9-16.
- Cai Yi, Xing Yan, Hu Dan. On sensitivity analysis [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2008, 44(1): 9-16(in Chinese).
- [11] Tibshirani R. Regression shrinkage and selection via the lasso: A retrospective[J]. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B: Methodological*, 1996, 58(1): 267-288.
- [12] Sun Y, Gu L, Wu C F J, et al. Exploring HVAC system sizing under uncertainty[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 81: 243-252.
- [13] Carslaw H S, Jaeger J C. *Heat Conduction in Solids*[M]. Oxford: Clarendon Press, 1948.
- [14] Ingersoll L R, Zobel A C. *Heat Conduction with Engineering and Geological Application*[M]. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1954.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1059.1—2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine (AQSIQ) of the People's Republic of China. JJF 1059.1—2012 Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement[S]. Beijing: The Standards Press of China, 2012(in Chinese).
- [16] Ouzzane M, Eslami-Nejad P, Badache M, et al. New correlations for the prediction of the undisturbed ground temperature[J]. *Geothermics*, 2015, 53: 379-384.
- (责任编辑: 田 军)