

# 现场测试地下岩土平均热物性参数方法

于明志, 方肇洪

(山东建筑工程学院 地源热泵研究所, 山东 济南 250014)

**摘要:** 平均热物性参数的大小对钻孔的数量及钻孔的深度具有显著的影响, 进而影响地源热泵系统的初投资。为了能够在现场测量地下岩土的 average 热物性参数, 利用一套现场测量设备测量了对地下埋管回路施加的热流与回路中循环水温度随时间的变化, 使用自行开发的软件, 采用参数估计方法, 计算并确定了地下岩土的 average 热物性参数。

**关键词:** 地热换热器; 岩土平均热物性参数; 测量方法

中图分类号: TK124; TU833<sup>+</sup>.3 文献标识码: A

## 1 引言

众所周知, 使用热泵可以提高能源的利用效率。由于地层深处(约大于 7 m)温度常年维持不变, 远远高于冬季的室外温度, 而又大大低于夏季室外温度, 因此地源热泵的效率大大提高, 还具有低噪音、占地面积少、不排放污染物、不抽取地下水、运行及维修费用低廉、寿命长等许多优点<sup>[1~3]</sup>。

设计地源热泵系统的地热换热器需要知道地下岩土的 average 热物性参数。如果物性参数不准确, 则设计的系统可能不能满足负荷需要, 也可能规模过大, 从而大大增加初投资, Kavanaugh 的研究结果表明<sup>[4]</sup>, 当地下岩土的导热系数或导温系数发生 10% 的偏差, 则设计的地下埋管长度偏差为 4.5% ~ 5.8%。埋管长度的偏差将导致钻孔总长度的变化, 而钻孔的成本是很高的。

确定地下岩土物性参数的传统方法是首先根据钻孔时取出的样本确定钻孔周围的地质构成, 再通过有关手册确定每一层的导热系数。然而地下地质结构构成复杂, 难以得到整个孔深方向地质结构的详细资料, 即使同一种岩石成分, 其 average 热物性参数相差也比较大。如石灰石导热系数范围为 1.1 ~ 5.4 W/(m·°C), 石英沙岩为 3.1 ~ 7.8 W/(m·°C), 湿泥板岩为 0.9 ~ 4.0 W/(m·°C), 花岗岩为 2.1 ~ 4.6 W/(m·°C)<sup>[5]</sup>。也可以通过热探针等手段对钻孔取样进

行分析, 但也不能正确测得这些参数, 因为取出的样本一般是一些碎屑, 且由于水分散失、挤压等原因结构已与在地下时发生了较大变化, 其物性参数与地下岩土物性参数并不相等, 因此只有在现场直接测量才能正确得到地下岩土的 average 热物性参数。

埋管中流体与周围土壤的换热是一个三维非稳态传热过程, 其计算非常复杂, 为了工程上的方便, 可以采用简化计算方法。目前计算地热换热器与周围岩土换热较为成熟的模型有线热源模型和柱热源模型<sup>[6~7]</sup>。在这些模型中, 均将钻孔中两根管子折合成一根当量管, 这样可以利用一维模型计算地热换热器的传热过程。Gu 等人给出了竖直埋设 U 型管当量管径的计算方法<sup>[8]</sup>, 利用这些模型可以较为方便地估算深层岩土的 average 热物性参数, 但是线热源模型和柱热源模型过于简化, 在计算钻孔内传热热阻时, 将埋管的上升管和下降管合并成一根管子, 与实际相差较大。

## 2 测量方法

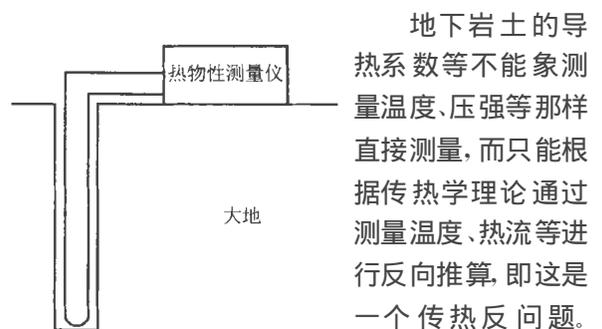


图 1 深层岩土热物性测量仪安装示意图

地下岩土的导热系数等不能象测量温度、压强等那样直接测量, 而只能根据传热学理论通过测量温度、热流等进行反向推算, 即这是一个传热反问题。在将要埋设地热换热器的现场钻孔, 在钻孔中埋设埋管并按设计要求回填(最好按照将要设计的地热换热器的要求埋设, 该钻孔中的埋管将来可以作为地热换热器的一个支路使

收稿日期: 2001-09-12; 修订日期: 2001-12-05

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Y99F02)

作者简介: 于明志(1970-)男, 山东莱西人, 山东建筑工程学院讲师

用), 回路中充满水并与测量装置联结。让水在回路中循环流动, 自某一时刻起对水加热一定的时间长度(数天), 并测量回路中水的温度及其所对应的时间, 最后根据已知的数据, 利用传热学理论反算钻孔周围岩土的平均热物性参数。测量装置的安装如图1所示。对上述传热过程可以作如下假设: (1) 钻孔中的回填材料及周围岩土的物性参数均匀一致(因为设计所需的参数是平均参数); (2) 埋管与周围岩土的传热是一个二维非稳态传热过程, 沿长度方向传热量忽略不计(因为加热时间只有数天, 孔径较小, 一般约 0.1 m, 钻孔长度一般大于 50 m); (3) 埋管与周围岩土的换热强度维持不变(可以通过控制加热功率完成)。

这样该问题可以描述如下:

图2是埋设地热换热器地下回路钻孔的横断面示意图, 钻孔中安装有两根圆管(地下回路的上升管和下降管), 圆管中有流动的循环工质。工质与周围岩土换热是一个恒热流强度二维无限大空间非稳态传热过程。为了计算周围岩土的平均热物性参数, 可以采用参数估计结合非稳态传热模型的方法, 将通过传热模型得到的流体温度变化与实际测量的流体温度变化进行对比, 通过调整数值传热模型中周围岩土的平均热物性参数, 当计算得到的温度变化与实测的结果温度变化误差最小时, 即方差和  $f = \sum_{i=1}^N (T_{cal, i} - T_{exp, i})^2$  取得最小值时, 调整后的平均热物性参数数值即是所求的结果。

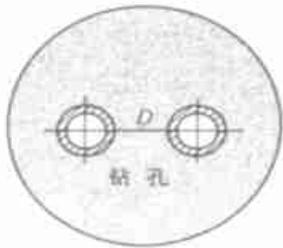


图2 钻孔断面图

示意图, 钻孔中安装有两根圆管(地下回路的上升管和下降管), 圆管中有流动的循环工质。工质与周围岩土换热是一个恒热流强度二维无限大空间非稳态传热过程。为了计算周围岩土的平均热物性参数, 可以采用参数估计结合非稳态传热模型的方法, 将通过传热模型得到的流体温度变化与实际测量的流体温度变化进行对比, 通过调整数值传热模型中周围岩土的平均热物性参数, 当计算得到的温度变化与实测的结果温度变化误差最小时, 即方差和  $f = \sum_{i=1}^N (T_{cal, i} - T_{exp, i})^2$  取得最小值时, 调整后的平均热物性参数数值即是所求的结果。

其中:  $T_{cal, i}$ —第  $i$  时刻由模型计算出的埋管中流体的平均温度;  
 $T_{exp, i}$ —第  $i$  时刻实际测量的埋管中流体的平均温度;  
 $N$ —实验测量数据的组数。  
 方差和  $f$  的最小值可以通过单纯形法、最速下降法、共轭梯度法、拉格朗日乘子法等最优化技术求得。

其中:  $T_{cal, i}$ —第  $i$  时刻由模型计算出的埋管中流体的平均温度;

$T_{exp, i}$ —第  $i$  时刻实际测量的埋管中流体的平均温度;

$N$ —实验测量数据的组数。

方差和  $f$  的最小值可以通过单纯形法、最速下降法、共轭梯度法、拉格朗日乘子法等最优化技术求得。

### 3 传热模型

#### 3.1 二维准非稳态传热模型

由上面讨论可知, 埋管中流体与周围土壤的换热是一个二维非稳态传热过程, 其计算非常复杂, 为了工程上的方便, 应当对其进一步进行简化。如本文前言中提到的线热源和柱热源模型等。

为了更好地符合实际情况, 钻孔内可以按二维传热问题处理。埋管中的流体(水)与周围岩土热交换的传热热阻包括流体与地下埋管管壁的对流换热热阻, 管壁、钻孔中回填材料以及地下岩土到无穷远处的导热热阻。由于钻孔直径相对较小, 钻孔内回填材料、管材和流体的热容量相比钻孔外面岩土的热容量是个小量, 当时间尺度足够大(约大于 10 h)时, 钻孔内的传热可以近似看成稳态导热过程。其钻孔内的传热热阻为<sup>[9]</sup>:

$$R_0 = 0.5 \left\{ \frac{1}{2\pi k_b} \left[ \ln\left(\frac{d_b}{d_2}\right) + \ln\left(\frac{d_1}{2D}\right) + \frac{k_b - k_s}{k_b + k_s} \cdot \ln\left(\frac{d_b^4}{d_b^4 - D^4}\right) \right] + \frac{1}{\pi d_1 h} + \frac{1}{2\pi k_k} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \right\} \quad (1)$$

其中:  $D$ —上升管与下降管轴心之间的距离;  $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_b$ —埋管内径、外径、钻孔直径;  $k_p$ 、 $k_b$ 、 $k_s$ —管壁、回填材料、岩土的导热系数;  $h$ —流体与管壁之间的对流换热系数;  $R_0$ —钻孔内的传热热阻。

利用上述钻孔内的热阻代替线热源模型中钻孔内热阻。而线热源模型中钻孔内的热阻包括流体与当量管的对流换热热阻、当量管管壁导热热阻以及钻孔填料导热热阻:

$$R_0 = \frac{1}{\pi D_1 h} + \frac{1}{2\pi k_p \ln(D_2/D_1)} + \frac{1}{2\pi k_b \ln(d_b/D_2)} \quad (2)$$

其中  $D_1$ 、 $D_2$  为当量管的内外径。

这样可以得到埋管中流体与周围岩土换热过程的二维准非稳态模型:

$$T_f = T_{ff} + q_1 \cdot \left[ R_0 + \frac{1}{4\pi k_s} \cdot Ei\left(\frac{d_b^2}{16\alpha_s \tau}\right) \right] \quad (3)$$

其中:  $Ei(x)$  为指数积分函数。

$T_f$ —埋管内流体平均温度;  $T_{ff}$  无穷远处土壤温度(也是土壤的初始温度);  $q_1$ —热流强度;  $\alpha_s$ —岩土的热扩散系数;  $\tau$ —时间。

利用式(3)可以计算出  $T_{cal, i}$  的数值。

#### 3.2 二维非稳态传热模型

如果要更进一步提高对地下岩土热物性测量的准确性, 计算中则可以采用二维非稳态传热模型, 即在二维准非稳态传热模型的基础上去掉对钻孔内进行稳态处理的假设。对于该模型, 目前尚未有解析解可以描述其传热过程, 我们只能通过数值计算方

法进行求解。

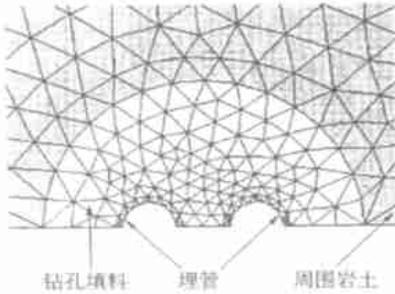


图 3 地下埋管、钻孔及周围岩土网格划分

目前发展较为成熟且被广泛应用的数值计算方法主要有有限差分法和有限单元法。在规则区域的结构化网格上, 有限差分法十分简便有效, 但是对不规则区域的适应性很差, 而有限单元法最大的优点就是对不规则几何区域的适应性好。由于钻孔中两根埋管不同心, 因此很难用有限差分方法进行较好地划分网格; 采用有限元方法, 可以选取直径足够大的区域代替钻孔周围土壤的无限大空间, 钻孔区域网格划分如图 3 所示(由于对称性, 可以只分析一半区域空间)。网格采用三角形网格, 越接近埋管的区域, 网格划分越细(为清晰起见, 图 3 中划分的网格较疏, 且只显示了钻孔及其周围的部分区域, 实际划分的网格建议应细密一些)。

在采用上述二维准非稳态传热模型或二维非稳态传热模型的基础上, 结合参数估计方法, 可以计算获得钻孔周围地下岩土的导热系数等平均热物性参数。具体计算步骤如下:

首先应确定地热换热器及钻孔的几何条件, 以及管材、回填材料等的物性参数, 在此基础上, 用假设的地下岩土平均导热系数等热物性参数, 由模型计算出各时刻埋管内流体的平均温度, 与实验测得各时刻的温度值进行对比, 并计算出两者的方差和, 再修改热物性参数进行重新计算, 再计算新的方差和, 如此反复进行, 直到方差和取得极小值, 则此时的岩土平均热物性参数即为所求解的值。

#### 4 现场测量装置

根据上述原理, 设计了深层岩土热物性测量仪(如图 4 所示)。测量仪主要部件由加热器、循环水泵、温度测量装置、流量测量装置、信号变送装置、微机控制与处理装置等构成。加热器中的加热元件为电热管, 功率范围为 0~6 kW。温度采用 Pt100 铂电

阻测量。测量仪中的管路与地热换热器地下回路相接, 循环水泵驱动流体在回路中循环流动, 流体经过加热器加热后流经地下回路与地下岩土进行换热, 测得的出、入口流体温度、流体流量、加热功率等经信号变送传至微机。利用前面所介绍的方法对测得的数据进行处理, 经计算后可以得到地下岩土平均导热系数等平均热物性参数。

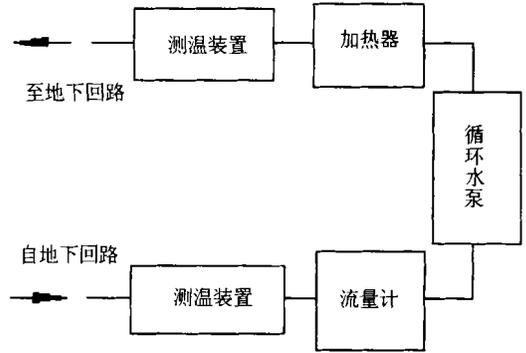


图 4 测量仪内部主要结构简图

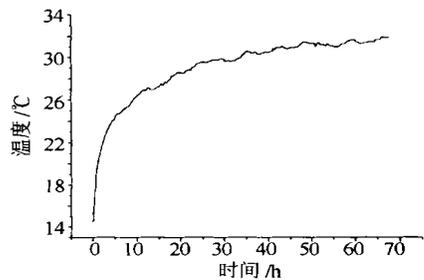


图 5 地下回路中流体平均温度的变化曲线

#### 5 现场测量实例与结果讨论

作者利用自行研制的深层岩土热物性测量仪及开发的软件对山东建筑工程学院学术报告厅地源热泵空调系统工程现场的地下岩土平均热物性参数进行了现场测量, 我们采用的传热模型是二维准非稳态传热模型。地下埋管及其它条件如下:

钻孔孔径 115 mm, 埋管内径 25 mm、外径 32 mm, 管间距 70 mm, 地下岩土初始温度 14.5 °C, 管壁导热系数为 0.33 W/(m °C), 钻孔回填材料导热系数 1.5 W/(m °C), 加热功率 46 W/m。测得的流体平均温度随时间的变化如图 5 所示。

由图 6 可以看出, 测试时间不同, 计算出的钻孔周围地下岩土的导热系数不同。大约当测试时间达到 50 h 后, 测出的导热系数趋于稳定, 维持在

1.530~1.538 W/(m·°C) 范围之内。因此作者建议测试时间可以选取 60 h 左右, 这样既可以保证获得正确的导热系数, 又可以避免测试时间过长。

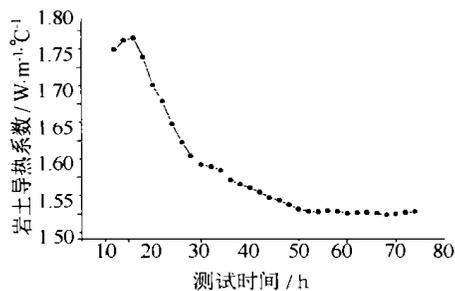


图6 测试时间对测量结果的影响

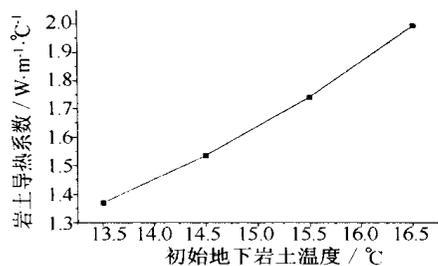


图7 岩土初始温度对测试结果影响

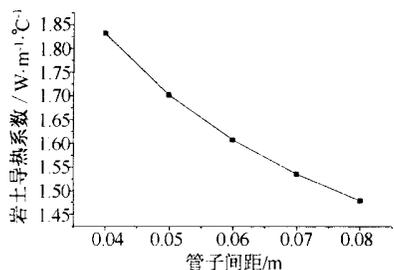


图8 管子间距对测试结果的影响

在维持其它条件不变的情况下, 改变地下岩土初始温度值, 其对计算的岩土导热系数的影响见图7。当初始温度变化 1 °C 时, 计算出的导热系数变化约 12%~14.6%, 根据 Kavanaugh 的研究<sup>[4]</sup>, 设计的地热换热器埋管长度变化大约要超过 5%。因此测量地下初始温度一定要准确, 测量深度最好大于 10 m, 而且钻孔刚刚完成时不宜立即测量, 应过数天后使地下温度场均匀后再测量。

维持其它条件不变, 只改变埋管上升管与下降管之间的间距, 其对计算的岩土导热系数的影响见图8。当管间距变化约 0.01 m, 计算出的导热系数变化约 4%~8%。由图中可以看出, 间距越大, 计算出的导热系数越小, 这是由于间距越大, 钻孔内的热阻越小, 在总热阻不变的情况下, 周围岩土的热阻大, 即导热系数小。因此如何正确确定管子间距是现场测量地下岩土平均热物性参数的一个问题。在安装地热换热器时, 管子间距越大越好, 因为钻孔内热阻越小, 越有利于地热换热器的工作。

上述分析是基于二维非稳态模型进行的, 而实际上钻孔内部的传热也是一个非稳态传热过程, 目前作者正在进行基于二维非稳态传热模型的现场测试深层岩土平均热物性参数的研究。

参考文献:

- [1] SULATISKY M T, GVAN DER KAMP. Ground-source heat pumps in the candian prairies[J]. *ASHRAE Transactions*. 1991, 97(1): 374-385.
- [2] IARRY M, FETTKETHER. Geothermal system meets space heating requirements[J]. *ASHRAE Journal* 1992, 98(3): 43-45.
- [3] CANE R L D, FORGAS D A. Modeling of ground-source heat pump performance[J]. *ASHRAE Transaction*. 1991, 97(1): 909-925.
- [4] STEPHEN P, KAVANAUGH. Field tests for ground thermal properties: methods and impact on ground-source heat pump design[J]. *ASHRAE Transactions* 1992, 98(2): 607-615
- [5] BOSE J E. Soil and rock classification for the design of ground-coupled heat pump systems-field manual[R]. Epri CU-6600, Oklahoma; International Ground Source Heat Pumps Association, 1989.
- [6] YU M Z, FANG Z H. The influence of soil freezing on heat transfer of geothermal heat exchangers[A]. *CSPE-JSPE-ASME, International Conference on Power Engineering* [C]. Xi'an; TUP and Springer, 2001. 1442-1449.
- [7] KAVANAUGH S P, RAFFERTY K. Ground-source heat pumps: Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings [M]. Atlanta; American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1997.
- [8] GU YIAN, O'NEAL DENNIS L. Development of an equivalent diameter expression for vertical U-Tube used in ground-coupled heat pumps [J]. *ASHRAE Transactions*. 1998, 104(2): 347-355.
- [9] 崔萍, 刁乃仁, 方肇洪. 地热换热器 U 型埋管的传热模型及热阻计算, 待发表.

(辉 编辑)

(5). —485~488

Wavelet analysis represents a new tool of mathematical analysis. The use of this numerical calculation method for the transient thermodynamic calculation and analysis of vapor-liquid two-phase flows is of major practical significance. The comparison of the transient calculation results of vapor-liquid two-phase flows by a wavelet numerical method with those of Mini-TRAC calculation method has shown that the wavelet numerical method is fully suited to perform the transient calculation of coupled differential equations for vapor-liquid two-phase flows. **Key words:** wavelet analysis, numerical calculation, vapor-liquid two-phase flow

现场测试地下岩土平均热物性参数方法 = **A Method for the On-site Testing of Average Thermo-physical Parameters of Underground Rock Soil** [刊, 汉] / YU Ming-zhi, FANG Zhao-hong (Shandong Architectural Engineering Institute, Jinan, China, Post Code: 250014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). —489~492

The magnitude of average thermo-physical parameters exerts a significant influence on the number and depth of holes to be drilled, thus affecting the capital investment outlays for a ground-source heat-pump system. To realize the on-site measurement of the average thermo-physical parameters of underground rock soil, a set of on-site measuring equipment was put into use. With its help measurements were taken of the heat flow an underground embedded pipe loop is subjected to and of the temperature change of the circulating water in the loop with the passage of time. Moreover, a piece of software developed by the authors was utilized to calculate and determine the average thermo-physical parameters of the underground rock soil by using a parameter-evaluation method. **Key words:** geothermal heat exchanger, average thermo-physical parameter of rock soil, measuring method

多背压凝汽器的平均冷凝温度 = **The Mean Condensation Temperature of a Multi-pressure Condenser** [刊, 汉] / XU Zhi-ming, YANG Shan-rang, LUO Zhen, et al (Northeast Institute of Electric Power Engineering, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). —493~495

Through a theoretical analysis the authors have derived a relationship for calculating the mean condensation temperature of a multi-pressure condenser, which has taken into account the variation of heat transfer factor with the change of condenser construction scheme and cooling water inlet temperature. Analyzed is the influence of the heat transfer area and the circulation ratio of various stages on the mean condensation temperature. Moreover, with the mean condensation temperature of the multi-pressure condenser serving as a target function an optimized construction of the condenser has been worked out. **Key words:** multi-pressure condenser, condensation temperature, circulation ratio, optimization

大型火电机组表面式加热器动态数学模型研究与开发 = **Research and Development of a Mathematical Model for the Surface Heater of a Large-sized Thermal Power Plant** [刊, 汉] / WANG Jian-mei, LIU Guang-lin, CAI Kai, et al (Wuhan University, Wuhan, China, Post Code: 430072) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(5). —496~498

With a simulation supporting system STAR-90 serving as a platform developed is a fairly accurate mathematical model to study a regenerative heating system. The model is capable of not only meeting a given static precision, but also accurately reflecting and reproducing the major features of various operating conditions of a specific regenerative heating system. Furthermore, it is also feasible to employ the above mathematical model for the research of certain dynamic characteristics of heaters. **Key words:** heater, mathematical model, dynamic characteristics, regenerative heating system