

文章编号: 0254-0096(2004)05-0695-04

# 地源热泵系统中竖井深度的确定方法

范爱武, 刘 伟, 王崇琦

(华中科技大学能源与动力工程学院, 武汉 430074)

**摘 要:** 应用半无限大物体的热传导方程, 求得了土壤日平均温度随时间和空间的变化规律。基于对地源热泵系统中竖井现场的地质勘探数据, 计算出不同土层的热物性参数。最后根据对竖井现场地表温度连续一年的观测数据, 得到了地表日平均温度的年波幅, 并计算得出不同深度处土壤日平均温度的年波幅, 据此确定了地源热泵系统中竖井的合理深度。

**关键词:** 地源热泵; 竖井深度; 土壤温度; 年波幅

**中图分类号:** TK124; TU831      **文献标识码:** A

## 0 引 言

地源热泵技术是一种利用地下浅层热资源(也称地能, 包括地下水、土壤或地表水等)的既可供热又可制冷的高效节能空调技术。地源热泵通过输入少量的高品位能源(如电能), 实现低温位热能向高温位转移。由于土壤深处全年地温波动小, 冬暖夏凉, 其季节性性能系数有着恒温热源热泵的特性, 季节性平均性能系数较高。地能分别在冬季作为热泵供暖的热源和夏季空调的冷源, 即在冬季, 把地能中的热量取出来, 提高温度后, 供给室内采暖; 夏季, 把室内的热量取出来, 释放到地能中去。

地源热泵的最大优点是节能和无污染, 通常地源热泵消耗 1kW 的能量, 用户可以得到 4kW 以上的热量或冷量。它不向外界排放任何废气、废水、废渣, 是一种理想的“绿色技术”。从能源角度来说, 它是利用常温下土壤的热量, 这是一种用之不尽的可再生能源。因此, 虽然地源热泵系统初投资大, 但由于它具有占地面积小、节约能源、环境污染小、性能稳定等优点而日益受到国内外的广泛关注<sup>[1]</sup>。1998 年美国商业建筑中地源热泵系统已占空调总保有量的 19%, 其中新建筑占 30%, 而且当年美国供暖制冷空调工程师协会(ASHRAE)的优秀设计项目奖中就有一项授予了地源热泵工

程<sup>[2]</sup>。到 1999 年底, 美国已安装了 40 万台以上的地源热泵系统, 并以每年 10% 的速度增长。至 2000 年, 美国利用地源热泵采暖节约的能源费用达 4.2 亿美元<sup>[3]</sup>。

文献[4]中提出一种井水地源热泵系统, 即以井水为传热和蓄热介质, 抽取井中的地表水, 经过地上换热器的热交换后, 重新回灌到井中或周围的地沟中, 与土壤进行热交换, 循环利用井水供热泵使用。在这种系统中, 竖井深度的确定是设计时的一个重要内容。许多研究表明, 土壤温度日波动的最大深度不会超过 1m<sup>[5-7]</sup>, 而一年中土壤日平均温度的波动深度则要大多<sup>[8]</sup>。因此, 要确定这种地源热泵系统中竖井的合理深度, 即一年中土壤日平均温度基本保持不变的深度, 必须了解土壤日平均温度的年变化规律。本文运用传热学有关知识, 并基于对土壤结构的地质勘探以及地表温度的长期观测, 对竖井深度的确定方法作了初步的探讨。

## 1 不同深度处土壤温度年波幅的变化规律

### 1.1 土壤温度年波幅与深度之间的关系式

土壤是一种典型的多相体系, 其中除了固体颗粒外, 还有土壤水分、空气以及水蒸汽。因此, 土壤中热量传递的形式除了导热以外, 还包括由于水分的对流和相变引起的换热。不过, 对于非耕作土

收稿日期: 2003-04-04

基金项目: 教育部博士点专项基金项目(No. 2000048731)

而言, 由于其结构比较紧实, 含水量也较少, 可以忽略水分渗流对传热的影响。据 Gauthier 1994 年的研究表明, 湿分迁移对土壤传热的影响小于 0.1%<sup>[9]</sup>。因此, 为简化起见, 我们假设每一层土壤为均匀介质, 各向同性, 其热物性不随深度发生变化, 且沿水平方向没有热交换, 故可将土壤中的传热过程近似为一维半无限大物体中的导热, 其非稳态导热方程为<sup>[10]</sup>

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中,  $t$ ——温度;  $\tau$ ——时间;  $a$ ——土壤热扩散率;  $x$ ——坐标, 向下为正。

根据气象观测, 日平均气温  $T_a$  ( ) 和地表日平均温度在一年中大致呈周期性变化。文献[8]通过对位于唐古拉山北坡的一个固定观测点不同深度土壤温度的时间序列的分析, 指出不同深度土壤日平均温度的时间变化具有很好的年周期, 其变化曲线为一正弦曲线, 且浅层土壤温度的波动比深层土壤的波动大。实际上, 这种周期性变化的形式不一定是正弦波或余弦波, 因为有时天气会发生突然变化, 不过根据傅里叶 (Fourier) 调和函数, 可将很复杂的曲线用傅里叶级数描述。在诸分量中, 主分量的影响最大。同时, 天气的突变只会影响短期的气温, 而不会对全年日平均气温和地表日平均温度的年变化规律造成太大的影响。因此, 本文忽略各次级分量的影响, 假设地表日平均温度的年变化呈现一种余弦函数 (或正弦函数) 的形式, 即

$$t_F = \bar{t}_F + A_F \cos \left( \frac{2\pi}{\tau_0} \tau + \varphi_0 \right) \quad (2)$$

式中,  $\tau_0$ ——波动的周期, 对年变化而言, 为 365d;  $A_F$ ——表面温度  $t_F$  在周期平均值  $\bar{t}_F$  上下波动的幅度;  $\varphi_0$ ——初始相位角。

利用分离变量法, 可以得到边界条件由式 (2) 表达时, 土壤内部过余温度  $(x, \tau) = t(x, \tau) - \bar{t}_x$  为:

$$= A_F e^{-\sqrt{\frac{a}{\tau_0}} x} \cos \left( \frac{2\pi}{\tau_0} \tau - \sqrt{\frac{a}{\tau_0}} x + \varphi_0 \right) \quad (3)$$

其中,  $\bar{t}_x$ —— $x$  深度处的土壤平均温度。当  $x=0$  时, 式 (3) 即简化为边界条件 (2)。式 (3) 表明: 在任何深度处的土壤日平均温度都将依同一周期  $\tau_0$  波动。

从式 (3) 还可以得到深度为  $x$  处的土壤日平

均温度的年波幅  $A_x$  为

$$A_x = A_F e^{-\sqrt{\frac{a}{\tau_0}} x} \quad (4)$$

显然,  $x$  深度处土壤日平均温度的年波幅随着深度的增加呈指数函数迅速地衰减。

## 1.2 地源热泵竖井处的地质构造与土壤的热物性参数

根据地质勘深报告书<sup>[11]</sup>, 本研究中竖井周围的土壤可分为 3 层, 见表 1。从表 1 可以看出, 不同层的含水量变化较大, 而密度变化较小。

表 1 竖井周围土壤的基本性质

Table 1 The basic properties of the soil around the vertical well

深度/m	土壤的种类	含水量/%	密度 / kg m <sup>-3</sup>
<1.6	粉质粘土	28.0	1.790 × 10 <sup>3</sup>
<7.5	黄粘土	22.8	1.813 × 10 <sup>3</sup>
>7.5	强风化泥质岩	12.9	1.832 × 10 <sup>3</sup>

土壤的热物性参数主要有导热系数、比热容和热扩展率。土壤的含水量和密度对热物性参数影响很大。很多研究者对土壤热物性参数的测量进行了有益的探讨, 并总结一些比较实用的经验公式<sup>[12,13]</sup>。其中文献 [12] 将土壤的成分分为矿物质、有机质、水和空气。土壤的比热容可由各成分的比热容计算得出, 计算式如下:

$$c_{vs} = c_{vm} x_m + c_{vo} x_o + c_{vw} x_w + c_{va} x_a \quad (6)$$

式中  $x_i$  ( $i = m, o, w, a$ ) 分别表示土壤中各成份所占体积百分比  $c_{vm}$ 、 $c_{vo}$ 、 $c_{vw}$  和  $c_{va}$  为相应成分的体积比热容 [J/ (cm<sup>3</sup> · )], 其值分别为 1.926、2.512、4.186 和 0.00121<sup>[6]</sup>。对于非土壤专业的研究者来说, 测量土壤的成分有诸多不便。一般认为, 土壤比热容主要随土壤内含水量的大小而变化。因此, 本文采用文献 [13] 推荐的经验公式, 即

$$c_s = 0.96 \cdot (1 - h) + h \cdot c_w \quad (7)$$

$$\lambda_s = 0.79 + 1.98 \cdot h \quad (8)$$

式中,  $h$ ——土壤的含水量 (%),  $c_w$  和  $c_s$ ——分别水和土壤的比热容 [kJ/ (kg · K)],  $\lambda_s$ ——土壤的导热系数 [W/ (m · K)]。由于土壤的密度  $\rho_s$  从表 1 可以获得, 因此通过上面两式就可以计算出土壤的热扩散率, 见表 2。

表 2 竖井周围土壤的热物性参数

Table 2 Thermal properties of the soil around the vertical well

深度/m	比热容 / kJ (kg K) <sup>-1</sup>	导热系数 / W (m K) <sup>-1</sup>	热扩散率 / m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
< 1.6	1.862	1.344	4.032 × 10 <sup>-7</sup>
< 7.5	1.695	1.241	4.038 × 10 <sup>-7</sup>
> 7.5	1.376	1.045	4.145 × 10 <sup>-7</sup>

### 1.3 竖井周围不同深度处土壤日平均温度的年波幅

通过对竖井处地表温度连续 1a 的观测，得到其日平均温度的年波幅为 13.76。由于竖井处土壤是分层的，因此必须分别对 3 层土壤应用土壤日平均温度年波幅的指数衰减函数进行计算，即以地表日平均温度的年波幅作为第一层土壤的上边界条件，1.6m 深处土壤日平均温度的年波幅作为第二层土壤的上边界条件，7.5m 深处土壤日平均温度的年波幅作为第三层土壤的上边界条件，层层推进。计算结果表明：1.6m 深处土壤日平均温度的年波幅为 6.21；7.5m 深处的上波幅为 0.33，土壤日平均温度的年波幅为 0.1 时，深度达到 9.9m。土壤日平均温度年波幅随深度的变化规律如图 1 所示。

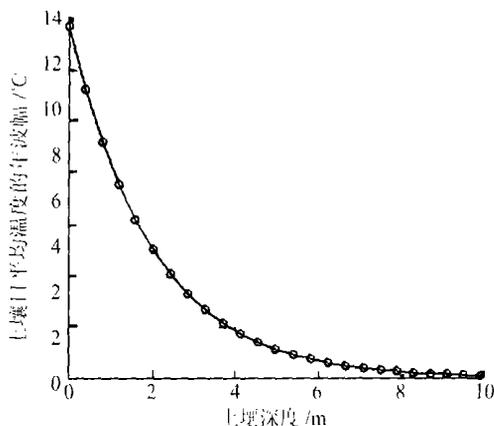


图 1 不同深度土壤温度的年波幅

Fig. 1 The annual amplitudes of soil temperatures at different depths

从图 1 可以看出，土壤温度的年波幅在靠近地表的第一层土壤内衰减最快，往下逐渐减慢。同时，每一层中的衰减都遵循指数函数的型式。

## 2 竖井深度的确定

为了保证井水的温度在热泵运行过程中不会发生太大的波动，竖井底部的土壤温度也必须大致保持恒定。从以上的计算中已经得到深度为 9.9m 时，土壤温度的年波幅只有 0.1。考虑到井水应具有一定储量，故可以将竖井的最大深度确定为 13.0~15.0m 左右。当然，具体深度还得考虑井的个数、热泵负荷的大小以及循环水回灌时在井和地沟之间的分配比例等因素。

## 3 结论

基于对土壤结构的地质勘探以及地表温度的长期观测，对土壤日平均温度年波幅随深度的变化规律进行了分析和计算，据此可以大致确定井水地源热泵系统中竖井的深度，避免了对土壤深度日平均温度长期观测的不便，实践证明这种方法也是可行的。

### [参考文献]

- [1] Kavanaugh Stephen P, Field test of a vertical ground coupled heat pump in Alabama [J]. ASHRAE Transaction, 1992, 98 (2): 155—158.
- [2] Dinse David R. Geothermal systems for school [J]. ASHRAEJ, 1998, 5: 76—80.
- [3] Kevin R. Design issue in the commercial application of GSHP system in the U. S. [R]. CHC BULLETIN, 2000, 3: 45—96.
- [4] 张昆峰. 土壤热源热泵的实验和理论研究 [D]. 华中理工大学博士学位论文, 1996.
- [5] Rosenberg Norman J. Microclimate: The Biological Environment [M]. John Wiley & Sons, 1974.
- [6] 杨梅学, 姚檀栋. 丁永建等. 藏北高原 D110 点不同季节土壤温度的日变化特征 [J]. 地理科学, 1999, 19 (6): 570—574.
- [7] 凌栋宝, 党建国, 白生菊. 土壤中的温度分布 [J]. 青海科技, 1997, 4 (3): 32—35.
- [8] 杨梅学, 姚檀栋. 藏北高原唐古拉山北坡 D105 点土壤温度的时间序列分析 [J]. 资源科学, 2003, 22(2) 77—81.
- [9] Carol Gauthier, Marcel Lacroix, Herver Bernier. Numerical simulation of soil heat exchanger storage systems for greenhouses [J]. Solar Energy, 1997, 60 (6): 333—346.

- [10] 埃克尔特 E R G, 德雷克 R M. 传热与传质[J]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [11] 中南勘探设计院. 工程技术报告书[R]. 武汉, 1992.
- [12] 雷志栋等. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [13] Yuan Xudong. Estimating soil conductivity by measuring soil humidity [A]. Advances In Energy Conversion Engineering, Proceedings of The First Conference on Energy Conversion And Energy Souces Engineering [ C ], Huazhong University of Science and Technology Press, Wuhan, China, 178—180, 1990.

## DETERMINATION OF THE VERTICAL WELL DEPTH OF A GROUND SOURCE HEAT PUMP SYSTEM

Fan Aiwu, Liu Wei, Wang Chongqi

( College of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** By applying the heat conduction equation for semi infinite substances to the soil, the variation regularity of daily mean soil temperature with respect to space and time was obtained. The thermal properties of the soil around the vertical well, which were critical in the predicting of soil temperature distribution, were calculated on the basis of geological survey data. The geological survey also showed that the soil around the vertical well could be divided into three layers with different thermal properties. The annual amplitudes of the daily mean soil temperatures at different depths were gained according to a whole year measurements of the ground temperature, by which the reasonable vertical well depth of the ground source heat pump system was determined.

**Key words:** ground source heat pump; vertical well depth; soil temperature; annual amplitude