



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102721722 B

(45) 授权公告日 2014. 07. 09

(21) 申请号 201210207869. 4

(22) 申请日 2012. 06. 20

(73) 专利权人 扬州大学

地址 225009 江苏省扬州市大学南路 88 号

(72) 发明人 杨卫波

(74) 专利代理机构 南京中新达专利代理有限公司 32226

代理人 孙鸥 朱杰

JP 2003004680 A, 2003. 01. 08,

CN 102879425 A, 2013. 01. 16,

杨卫波 等. 土壤源热泵地下埋管传热强化与控制的试验研究. 《走中国创造之路——2011 中国制冷学会学术年会论文集》. 2011,

杨卫波 等. 地源热泵地下岩土热物性现场热响应测试方法研究. 《流体机械》. 2011, 第 39 卷 (第 9 期),

审查员 刘文颖

(51) Int. Cl.

G01N 25/20 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102288638 A, 2011. 12. 21,

CN 101393149 A, 2009. 03. 25,

CN 102116749 A, 2011. 07. 06,

EP 1944594 A2, 2008. 07. 16,

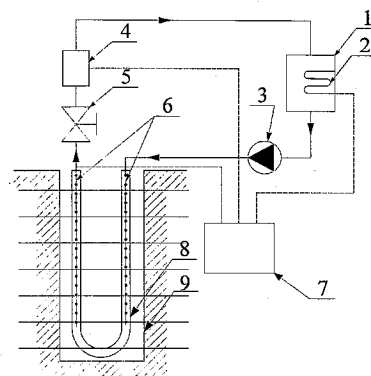
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54) 发明名称

一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法

(57) 摘要

一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法。本发明涉及一种地下岩土分层热物性现场热响应测试装置。本发明埋U型管, 光纤温度传感器插入U型管两支管内, 连接U型管与地上测试装置循环水管道进出口, 测量不同深度层U型管的两支管即进水支管与出水支管内水温度, 保持加热器功率恒定, 记录不同时刻且不同深度层U型管两支管内水温、循环水流量、加热器加热功率的测量数据, 得到各层土壤的导热系数、容积比热及钻孔热阻值。本发明解决了过去无法获得不同深度处的岩土热物性分布, 无法提高测试精度、改善地下埋管优化设计方法等缺陷。本发明可获得不同深度处的地下岩土热物性值及土壤岩土类型、地下水含量与渗流情况, 灵敏度高、抗干扰性强、耐腐蚀、安装尺寸小、无电源要求, 测试成本低。



1. 一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法,所述测试系统包括保温水箱、可调电加热器、水泵、电磁流量计、流量调节阀、光纤温度传感器及数据采集装置,且可调电加热器、电磁流量计及光纤温度传感器通过信号传输线与数据采集装置连接,其特征在于它的实施步骤如下:

- (1) 在埋管现场钻测试孔,插入 U 型管,并用回填材料进行回填;
- (2) 对地下土壤按深度方向分层,将光纤温度传感器插入 U 型管的两支管内;
- (3) 连接 U 型管与地上测试装置循环水管道进出口;

(4) 静置至少 48 小时后,测量不同深度层 U 型管两支管内水温度,以获得各层土壤的初始温度;

(5) 开启电加热器和循环水泵,并保持加热器功率恒定,同时以一定时间间隔记录不同时刻的测量数据:不同深度层 U 型管两支管内水温、循环水流量、加热器加热功率,测试约 48 小时后停止;

(6) 对每层土壤,利用线热源理论对测试数据进行处理,并结合参数优化技术得到各层土壤的热物性值,具体如下:

根据线热源理论,对每层土壤有:

$$T_{f,k} = m_k \ln \tau + b_k \quad (1)$$

$$m_k = Q_k / (4 \pi \lambda_k L_k) \quad (2)$$

$$b_k = \frac{Q_k}{4 \pi \lambda_k L_k} \left[\ln \left(\frac{4 \lambda_k}{(\rho c)_k} \right) - 0.5772 \right] + \frac{Q_k}{L_k} R_{b,k} + T_{ff,k} \quad (3)$$

$$Q_k = cm[(T_{fi,k} - T_{fo,k}) - (T_{fi,k+1} - T_{fo,k+1})] \quad (4)$$

式中,下标 k 表示土壤的层数, Q_k 为第 k 层土壤的换热量, W; L_k 为第 k 层土壤的深度, m; λ_k 为第 k 层土壤的导热系数, W/(m·K); $(\rho c)_k$ 为第 k 层土壤的容积比热, J/(m²·K); $R_{b,k}$ 为第 k 层的单位长度钻孔热阻, (m·K)/W; $T_{f,k}$ 为第 k 层的流体平均温度, °C; $T_{fi,k}$, $T_{fi,k+1}$ 分别为第 k 层土壤深度范围内 U 型管进水支管的进、出口温度, °C; $T_{fo,k+1}$, $T_{fo,k}$ 分别为第 k 层土壤深度范围内 U 型管出水支管的进、出口温度, °C; $T_{ff,k}$ 为第 k 层土壤的原始平均温度, °C; c 为流体质量比热, kJ/(kg·°C); \dot{m} 为循环流体质量流量, kg/s;

针对每层土壤,通过实验测试所获得的 Q_k 及不同时刻埋管流体平均温度 $T_{f,k}$ 值,在温度-时间对数坐标轴上拟合出式 (1) 即可得到 m_k ,从而根据方程 (2) 得到各深度层土壤的导热系数 λ_k ;再将 λ_k 值代入式 (1),以 $(\rho c)_k$ 与 $R_{b,k}$ 为优化变量,以式 (5) 作为优化函数,利用参数估计法即可得出各层土壤的容积比热与钻孔热阻值;

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n (T_{(f,k)_{cal}} - T_{(f,k)_{exp}})^2 \quad (5)$$

式中, $T_{(f,k)_{cal}}$ 为计算得到的第 k 层流体平均温度, $T_{(f,k)_{exp}}$ 为测试得到的第 k 层流体平均温度, n 为土壤总层数, N 为数据采集次数。

2. 根据权利要求 1 所述的一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法,其特征在于所述步骤 (2) 中,土壤分层根据具体情况设置深度,各层深度可以相同,也可以不同,且每层土壤中 U 型管进水与出水支管至少各布置 3 个温度测点。

3. 根据权利要求 1 所述的一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法,其特征在于所述步骤(6)中,数据处理时应舍去前 10h 的测试数据,且每层流体平均温度为该层所有温度测点的平均值。

一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法

技术领域

[0001] 本发明属于地源热泵空调利用技术领域,具体涉及到一种可测定地下不同深度处岩土热物性参数的一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法。

背景技术

[0002] 在本发明之前,现有地下岩土热物性现场热响应测试方法通常是在恒热流工况下,将测量测试孔埋管循环液进出口温度、流量及加热功率,通过一定的传热模型对测试数据进行反演得到埋管现场平均岩土热物性值。而实际情形是,由于地下埋管埋设较深,在此深度范围内岩土类型分布通常是不均匀的,且不同深度处土壤含湿量与地下水渗流速度也不一样,导致其热物性沿深度方向变化较大,这对精确确定埋管深度有很大影响。因此,现在的测试方法无法获得不同深度处的岩土热物性分布,也就无法做到提高测试精度、改善地下埋管优化设计方法。

发明内容

[0003] 本发明的目的就在于克服上述缺陷,提出一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法。

[0004] 本发明的技术方案是:

[0005] 一种地下岩土分层热物性现场热响应测试方法,其特征在于,所述测试系统包括保温水箱、可调电加热器、水泵、电磁流量计、流量调节阀、光纤温度传感器及数据采集装置,保温水箱内设有可调电加热器,且可调电加热器、电磁流量计及光纤温度传感器通过信号传输线与数据采集装置连接,它的实施步骤如下:

[0006] (1) 在埋管现场,按照实际设计情况钻测试孔,选取与插入 U 型管,并用回填材料进行回填;

[0007] (2) 对地下土壤进行深度方向分层,根据温度测点布置要求将光纤温度传感器插入 U 型管两支管内,以测量不同深度层土壤原始温度及运行时的流体温度;

[0008] (3) 连接 U 型管与地上测试装置循环水管道进出口,并用绝热材料做好外露管道绝热保护工作;

[0009] (4) 静置至少 48 小时后,测量不同深度层 U 型管的两支管即进水支管与出水支管内水温度,以获得各层土壤的初始温度;

[0010] (5) 开启电加热器和循环水泵,并保持加热器功率恒定,同时以一定时间间隔记录不同时刻的测量数据:不同深度层 U 型管两支管内水温、循环水流量、加热器加热功率,测试约 48 小时后停止;

[0011] (6) 利用下述方法对测试数据进行处理得到各层土壤的导热系数、容积比热及钻孔热阻值,具体为:

[0012] 根据线热源理论,对每层土壤有:

[0013] $T_{f,k} = m_k \ln \tau + b_k$ (1)

$$[0014] \quad m_k = Q_k / (4 \pi \lambda_k L_k) \quad (2)$$

$$[0015] \quad b_k = \frac{Q_k}{4\pi\lambda_k L_k} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_k}{(\rho c)_k} \right) - 0.5772 \right] + \frac{Q_k}{L_k} R_{b,k} + T_{ff,k} \quad (3)$$

$$[0016] \quad Q_k = cm[(T_{fi,k} - T_{fo,k}) - (T_{fi,k+1} - T_{fo,k+1})] \quad (4)$$

[0017] 式中,下标 k 表示土壤层数, Q_k 为第 k 层土壤的换热量, W; L_k 为第 k 层土壤的深度, m; λ_k 为第 k 层土壤的导热系数, W/(m·K); $(\rho c)_k$ 为第 k 层土壤的容积比热, J/(m³·K); $R_{b,k}$ 为第 k 层单位长度钻孔热阻, (m·K)/W; $T_{f,k}$ 为第 k 层流体平均温度, °C; $T_{fi,k}$, $T_{fi,k+1}$ 分别为第 k 层土壤深度范围内 U 型管进水支管的进口、出口温度, °C; $T_{fo,k+1}$, $T_{fo,k}$ 分别为第 k 层土壤深度范围内 U 型管出水支管的进口、出口温度, °C; $T_{ff,k}$ 为第 k 层土壤的原始温度, °C; c 为流体质量比热, kJ/(kg·°C); \dot{m} 为循环流体质量流量, kg/s;

[0018] 针对每层土壤,通过测试所获得的 Q_k 及不同时刻埋管流体平均温度 $T_{f,k}$ 值,在温度-时间对数坐标轴上拟合出式 (1) 即可得到 m_k ,从而根据方程

[0019] (2) 得到各深度层土壤的导热系数 λ_k ;再将 λ_k 值代入式 (1),以 $(\rho c)_k$ 与 $R_{b,k}$ 为优化变量,以式 (5) 作为优化函数,利用参数估计法即可得出各层土壤的容积比热与钻孔热阻值;

$$[0020] \quad F = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^n (T_{(f,k)_{cal}} - T_{(f,k)_{exp}})^2 \quad (5)$$

[0021] 式中, $T_{(f,k)_{cal}}$ 为计算得到的第 k 层流体平均温度, $T_{(f,k)_{exp}}$ 为测试得到的第 k 层流体平均温度, n 为土壤总层数, N 为数据采集次数。

[0022] 所述步骤 (2) 中,土壤分层根据具体情况设置深度,各层深度可以相同,也可以不同,每层土壤中 U 型管进水与出水支管各至少布置 3 个温度测点。所述步骤 (6) 中,数据处理时应舍去前 10h 的测试数据,且每层流体平均温度为该层所有温度测点的平均值。

[0023] 本发明能测出埋管深度范围内岩土热物性沿深度方向的变化规律——即地下岩土分层热物性值,提高测试精度、改善地下埋管优化设计方法;本发明采用插于 U 型管内的光纤温度传感器测得不同深度处的土壤原始温度及运行时循环流体温度,利用线热源拟合法与参数优化技术导出不同深度处的岩土热物性值,其有益效果在于:

[0024] (1) 可获得不同深度处的地下岩土热物性值,为地源热泵地下埋管换热器的优化设计提供了更为精确的数据。

[0025] (2) 可获得不同深度处的土壤原始温度值及土壤岩土类型、地下水含量与渗流情况,为钻孔深度的优化提供了可靠依据。

[0026] (3) 光纤温度传感器具有灵敏度高、抗干扰性强、耐腐蚀、安装尺寸小、无电源要求等优点,在复杂地质条件下测试温度精度较高。

[0027] (4) 测试完毕后,插于 U 型两支管内的光纤温度传感器可以回收再利用,节省了测试成本。

[0028] 本发明的其它具体优点和效果将在下面继续说明。

附图说明

[0029] 图 1——本发明测试系统原理示意图。

[0030] 图 2——本发明测试中第 k 层土壤光纤温度计分层布置大样示意图。

[0031] 图中各标号表示：

[0032] 保温水箱 1、可调电加热器 2、水泵 3、电磁流量计 4、流量调节阀 5、光纤温度传感器 6、数据采集装置 7、U 型管 8、测试孔 9。

具体实施方式

[0033] 本发明的技术思路就是针对目前地下岩土热响应测试方法只能测试得到深度范围内岩土热物性的平均值、而无法获得各深度处的分层热物性值，提供一种能够同时测量钻孔深度范围内不同深度层地下岩土热物性值的地下岩土分层热物性现场热响应测试方法。

[0034] 本发明所述测试系统结构包括保温水箱 1、可调电加热器 2、水泵 3、电磁流量计 4、流量调节阀 5、光纤温度传感器 6 及数据采集装置 7，其中可调电加热器 2 在保温水箱 1 内，可调电加热器 2、电磁流量计 4 及光纤温度传感器 6 通过信号传输线与数据采集装置 7 连接；保温水箱 1 的出口与水泵 3 的进口连接，水泵 3 的出口与 U 型管 8 的进口连接，U 型管 8 的出口通过流量调节阀 5 与电磁流量计 4 的进口连接，电磁流量计 4 的出口与保温水箱 1 的进口连接；U 型管 8 的两支管是指右边的为进水支管，口为进口，左边的为出水支管，口为出口；U 型管 8 插于测试孔 9 中。

[0035] 本发明的具体测试方法为：

[0036] (1) 在埋管现场，按照实际设计情况钻测试孔，选取 U 型管 8，将 U 型管 8 插入测试孔 9 中，并按设计要求选取回填材料进行回填；

[0037] (2) 如附图 2 所示，对地下土壤进行深度方向分层，并将光纤温度传感器 6 插入 U 型管 8 的两支管内，每层深度范围内进水支管与出水支管内至少各布置 3 个测点，以测量不同深度层土壤原始温度及运行时的流体平均温度；

[0038] (3) 连接 U 型管与地上测试装置循环水管道进出口，并用绝热材料做好外露管道绝热保护工作；

[0039] (4) 静置至少 48 小时后，测量不同深度层 U 型管两支管内水温度，以获得各层土壤的初始温度；

[0040] (5) 开启电加热器和循环水泵，并保持加热器功率恒定，同时以一定时间间隔记录不同时刻的测量数据：不同深度层 U 型管两支管内水温、循环水流量、加热器加热功率，测试约 48 小时后停止；

[0041] (6) 利用下述方法对测试数据进行处理得到各层土壤的导热系数、容积比热及钻孔热阻值，具体为：

[0042] 根据线热源理论，对每层土壤有：

$$[0043] \quad T_{f,k} = m_k \ln \tau + b_k \quad (1)$$

$$[0044] \quad m_k = Q_k / (4 \pi \lambda_k L_k) \quad (2)$$

$$[0045] \quad b_k = \frac{Q_k}{4\pi\lambda_k L_k} \left[\ln \left(\frac{4\lambda_k}{(\rho c)_k} \right) - 0.5772 \right] + \frac{Q_k}{L_k} R_{b,k} + T_{ff,k} \quad (3)$$

$$[0046] \quad Q_k = cm[(T_{fi,k} - T_{fo,k}) - (T_{fi,k+1} - T_{fo,k+1})] \quad (4)$$

[0047] 式中，下标 k 表示土壤层数， Q_k 为第 k 层土壤的换热量，W； L_k 为第 k 层土壤的深度，m； λ_k 为第 k 层土壤的导热系数，W/(m·K)； $(\rho c)_k$ 为第 k 层土壤的容积比热，J/(m³·K)； $R_{b,k}$

R_k 为第 k 层单位长度钻孔热阻, $(m \cdot K)/W$; $T_{f,k}$ 为第 k 层流体平均温度, $^{\circ}C$; $T_{fi,k}$, $T_{fi,k+1}$ 分别为第 k 层土壤深度范围内 U 型管进水支管的进口、出口温度, $^{\circ}C$; $T_{fo,k+1}$, $T_{fo,k}$ 分别为第 k 层土壤深度范围内 U 型管出水支管的进口、出口温度, $^{\circ}C$; $T_{ff,k}$ 为第 k 层土壤的原始温度, $^{\circ}C$; c 为流体质量比热, $kJ/(kg^{\circ}C)$; \dot{m} 为循环流体质量流量, kg/s ;

[0048] 通过实验测试所获得的 Q_k 及不同时刻各层埋管流体平均温度 $T_{f,k}$ 值, 在温度 - 时间对数坐标轴上拟合出式 (1) 即可得到 m_k , 从而根据方程 (2) 得到各深度层土壤的导热系数 λ_k 。再将 λ_k 值代入式 (1), 以 $(\rho c)_k$ 与 $R_{b,k}$ 为优化变量, 以式 (5) 作为优化函数, 利用参数估计法即可得出各层土壤的容积比热与钻孔热阻值;

$$[0049] \quad F = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^n (T_{(f,k)cal} - T_{(f,k)exp})^2 \quad (5)$$

[0050] 式中, $T_{(f,k)cal}$ 为计算得到的第 k 层土壤流体平均温度, $T_{(f,k)exp}$ 为测试得到的第 k 层土壤平均水温, n 为土壤总层数, N 为数据采集次数。

[0051] 本发明将钻孔深度范围内的土壤划分成若干层, 通过在各深度层 U 型管两支管内布置若干光纤温度测点, 在恒加热功率条件下, 测量各深度层中流体的温度值、流量及加热功率。基于测试数据, 对各层土壤采用线热源模型对数据进行处理, 利用线热源拟合法并结合参数优化技术, 从而得到不同深度处地下岩土导热系数、容积比热及钻孔热阻值。

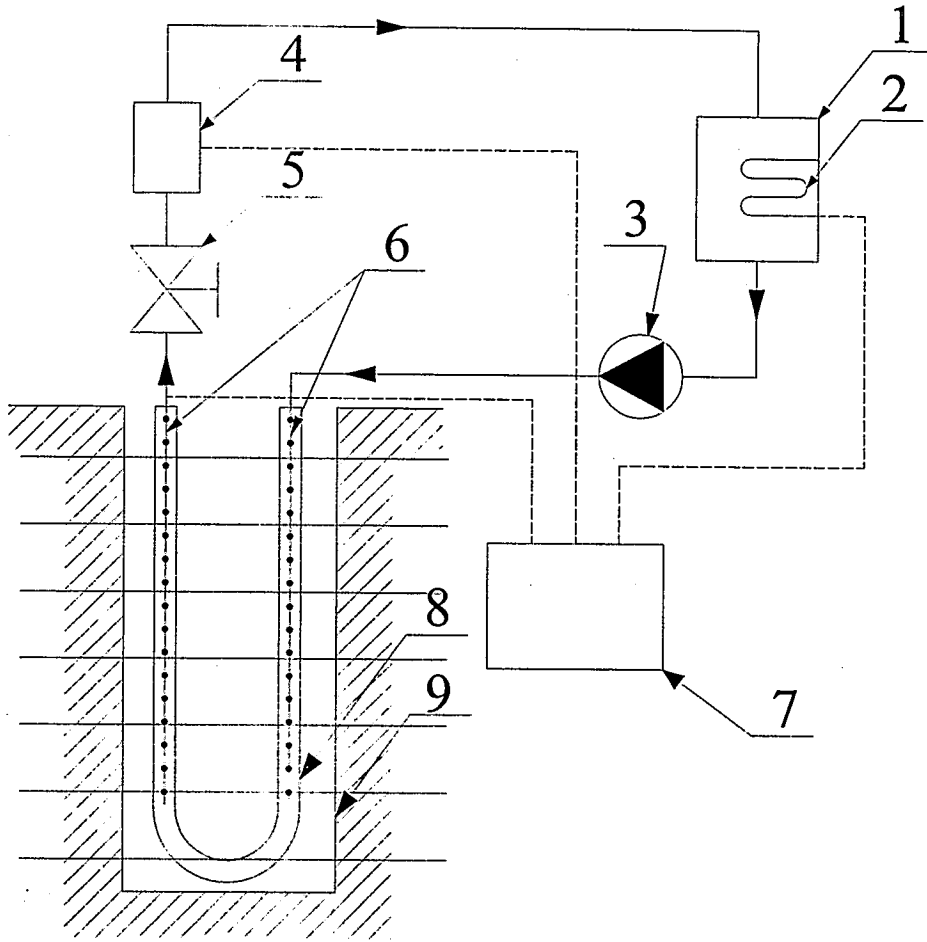


图 1

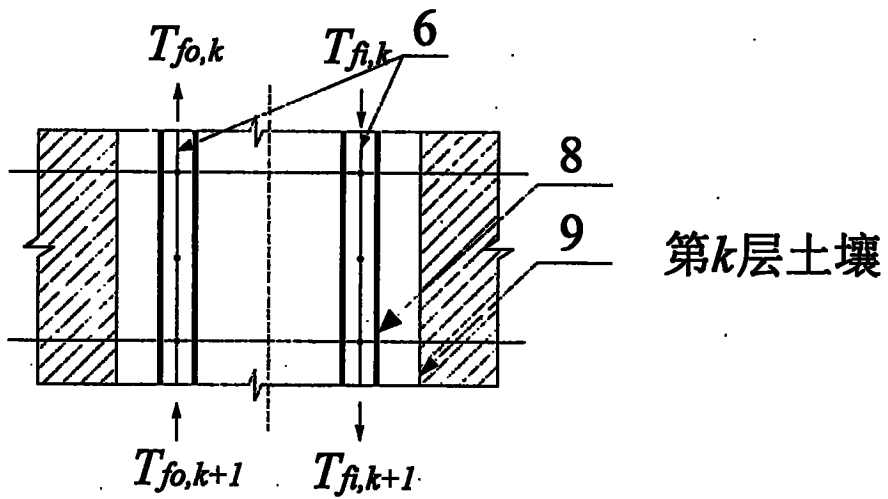


图 2