



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102663243 B

(45) 授权公告日 2015. 01. 07

(21) 申请号 201210089228. 3

(22) 申请日 2012. 03. 30

(73) 专利权人 常熟南师大发展研究院有限公司
地址 215500 江苏省苏州市常熟市常熟东南
经济开发区金都路 8 号 1 幢

(72) 发明人 钱华 张磊 郑晓红

(74) 专利代理机构 南京知识律师事务所 32207
代理人 汪旭东

(51) Int. Cl.

G06F 19/00 (2011. 01)

(56) 对比文件

JP 特开 2008-90514 A, 2008. 04. 17, 全文.

CN 102243192 A, 2011. 11. 16, 全文.

范蕊等. 热渗耦合作用下地下埋管换热器的传热分析. 《暖通空调》. 2006, 第 36 卷 (第 2 期), 参见第 6 页左栏引言第 1 行 - 第 10 页倒数第 13 行及图 1-9.

张行洋等. 地源热泵地埋管周围土壤温度特性研究. 《制冷与空调》. 2011, 第 11 卷 (第 3 期),

第 43-47 页.

袁艳平等. 地源热泵地埋管换热器传热研究 (3): 变热流边界条件下单 U 形地埋管换热器的非稳态传热特性. 《暖通空调》. 2009, 第 39 卷 (第 12 期), 第 10-15 页.

陆观立. 地下水渗流对土壤源热泵地埋管换热特性影响研究. 《中国优秀硕士学位论文全文数据库工程科技 II 辑》. 2010, (第 3 期), 第 58 页第 5. 2. 1 节第 1-20 行.

审查员 秦春芳

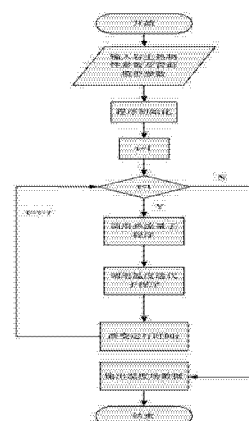
权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 2 页

(54) 发明名称

热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟方法

(57) 摘要

本发明提供了一种热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟方法, 用于热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟, 创新性地视土壤与地下水之间热交换为内热源, 简化方程中内热源项。通过初始输入管群模型条件及岩土热物性数据、迭代步长 r , 采用隐式迭代计算, 进而获取设定渗流速度和土壤参数情况下土壤各处温度值。本发明能够方便地取得大规模管群周围土壤温度分布随渗流变化情况, 对计算机硬件要求低, 通用性强, 有效缩短运算时间, 并扩大计算管群的规模。



1. 一种热渗耦合作用下地源热泵地理管温度场数值模拟方法,其特征在于包括以下步骤:

步骤1:输入模型条件及岩土热物性数据作为算法的初始参数;

步骤2:初始化管群模型及土壤的相关参数,包括:步骤1中所提到各项参数;

步骤3:初始化循环指针 $\tau=1$, $\Delta \tau=r$, r 为时间 τ 的变化步长,系统运行时间 τ 的变化范围为 $1 \sim t$, t 为设定的系统运行截止时间;

步骤4:判断 $\tau \leq t$, 如果是,则转入步骤5; 如果否,则转入步骤8;

步骤5:调用热流量子程序, 计算得到热流场的分布情况;

步骤6:调用温度迭代子程序, 计算得到温度场的分布情况;

步骤7:改变运行时间 τ , 执行 $\tau=\tau+r$, 回到步骤4, 进入下一个子循环;

步骤8:输出温度场计算数值结果,进而获取设定渗流速度和土壤参数情况下土壤各处温度值;

所述步骤1 模型条件及岩土热物性数据包括管群排列方式、管群数量、管群边界条件设置、土壤初始温度为 t_0 、土壤导热系数为 λ 、土壤比热容为 c 、地下水比热容为 c_w 、土壤密度为 ρ 、恒定热流值为 q 、土壤含水率 ω 和地下水渗流速度 u ;

所述热流量子程序的步骤如下:

步骤A:热流场初始化,各个网格节点处初始赋值为零;

步骤B:初始化循环指针 $i=1$, i 的变化步长为1;

步骤C:初始化循环指针 $j=1$, j 的变化步长为1;

步骤D:判断 $j \leq N$, 如果是,则转入步骤E; 如果否,则转入步骤G, N 值表示纵向网格数,由热流场初始化时得到;

步骤E:通过计算模型计算判断该点是否为埋管节点,如果是,则转入步骤F; 如果否,则执行 $j=j+1$, 转入步骤D;

步骤F:记录节点赋值,执行 $j=j+1$, 转入步骤D;

步骤G:执行 $i=i+1$;

步骤H:判断 $i \leq M$, 如果是,则转入步骤I; 如果否,则转入步骤C, M 值表示横向网格数,由热流场初始化时得到;

步骤I:将热流场数据传递返还给主程序;

所述温度迭代子程序的步骤如下:

步骤a:温度场初始化,各个网格节点处初始赋值为初始地温 t_0 ;

步骤b:初始化循环指针 $i=1$, i 的变化步长为1;

步骤c:判断 $i \leq M$, 如果是,则转入步骤d; 如果否,则转入步骤h, M 值表示横向网格数,由温度场初始化时得到;

步骤d:初始化循环指针 $j=1$, j 的变化步长为1;

步骤e:判断 $j \leq N$, 如果是,则转入步骤f; 如果否,则执行 $i=i+1$, 转入步骤c, N 值表示纵向网格数,由温度场初始化时得到;

步骤f:通过计算模型计算该点处温度值,模型计算可通过下式得到:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) T_{i,j}^{t+r/2} &= \frac{ar}{2(\Delta x)^2} T_{i+1,j}^{t+r/2} + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) T_{i-1,j}^{t+r/2} \\ &+ \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t) + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta y)^2}\right) T_{i,j}^t + \frac{qr}{2\Delta x\Delta y\rho c} \end{aligned}$$

步骤 g :记录 $(\tau + r/2)$ 时刻温度场数据,然后执行 $j=j+1$, 转入步骤 e ;

步骤 h :初始化循环指针 $j=1$, j 的变化步长为 1 ;

步骤 i :判断 $j \leq N$, 如果是,则转入步骤 j ;如果否,则转入步骤 n, N 值表示纵向网格数,由温度场初始化时得到 ;

步骤 j :初始化循环指针 $i=1$, i 的变化步长为 1 ;

步骤 k :判断 $i \leq M$, 如果是,则转入步骤 l ;如果否,则执行 $j=j+1$, 转入步骤 i, M 值表示横向网格数,由温度场初始化时得到 ;

步骤 l :通过计算模型计算该点处温度值,然后执行 $i=i+1$, 转入步骤 j ;模型计算可通过下式得到 :

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta y)^2} + \frac{wuc_w r}{2c}\right) T_{i,j}^{t+r} &= \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^{t+r} + T_{i,j-1}^{t+r}) + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) (T_{i+1,j}^{t+r/2} + T_{i-1,j}^{t+r/2}) \\ &+ \frac{wuc_w r}{2c} T_{i-1,j}^{t+r} + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta x)^2}\right) T_{i,j}^{t+r/2} + \frac{qr}{2\Delta x\Delta y\rho c} \end{aligned}$$

步骤 m :记录 $(\tau + r)$ 时刻温度场数据,然后执行 $i=i+1$, 转入步骤 k ;

步骤 n :将温度场数据传递返还给主程序。

热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟方法

技术领域

[0001] 本发明属于地源热泵技术应用与节能领域,尤其涉及在考虑土壤渗流影响的情况下地源热泵埋管群的土壤温度场的确定方法。

背景技术

[0002] 从一些实际工程来看,地下水渗流对地埋管的传热特性有较大影响,会增大土壤和循环液体的换热系数,使得按不考虑渗流情况的纯导热模型所设计的埋管长度过长,浪费资源,增加成本。因此地源热泵系统方案设计时必须考虑地下水渗流情况。而对于大规模管群情况,由于计算范围较大,一般商业软件模拟时间太长,不利于实际工程参考。本发明可以在相对较短的运算时间这一显著的改进后,实现埋管与周围在热渗耦合情况下,通过隐式数值迭代方法,计算出大规模管群周围土壤温度分布随渗流变化的情况,为实际的工程设计及研究提供相应的参考依据。

[0003] 因此,本发明提出一种热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟新的方法。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟方法,本发明能够方便地取得大规模管群周围土壤温度分布随渗流变化情况,有效缩短运算时间,并扩大计算管群的规模。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明的技术方案如下:

[0006] 一种热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟方法,其特征在于包括以下步骤:

[0007] 步骤1:输入模型条件及岩土热物性数据作为算法的初始参数;

[0008] 步骤2:初始化管群模型及土壤的相关参数,包括:步骤1中所提到各项参数;

[0009] 步骤3:初始化循环指针 $\tau=1$, $\Delta \tau=r$, r 为时间 τ 的变化步长,系统运行时间 τ 的变化范围为 $1 \sim t$, t 为设定的系统运行截止时间;

[0010] 步骤4:判断 $\tau \leq t$,如果是,则转入步骤5;如果否,则转入步骤8;

[0011] 步骤5:调用热流量子程序,计算得到热流场的分布情况;

[0012] 步骤6:调用温度迭代子程序,计算得到温度场的分布情况;

[0013] 步骤7:改变运行时间 τ ,执行 $\tau = \tau + r$,回到步骤4,进入下一个子循环;

[0014] 步骤8:输出温度场计算数值结果,进而获取设定渗流速度和土壤参数情况下土壤各处温度值。

[0015] 其中条件及岩土热物性数据包括管群排列方式、管群数量、管群边界条件设置、土壤初始温度为 t_0 、土壤导热系数为 λ 、土壤比热容为 c 、土壤比热容为 c_w 、土壤密度为 ρ 、恒定热流值为 q 、土壤含水率 ω 和地下水渗流速度 u 。

[0016] 子程序热流量子程序的步骤如下:

- [0017] 步骤 A :热流场初始化,各个网格节点处初始赋值为零 ;
- [0018] 步骤 B :初始化循环指针 $i=1$, i 的变化步长为 1 ;
- [0019] 步骤 C :初始化循环指针 $j=1$, j 的变化步长为 1 ;
- [0020] 步骤 D :判断 $j \leq N$, , 如果是,则转入步骤 E ;如果否,则转入步骤 G, N 值表示纵向网格数,由热流场初始化时得到 ;
- [0021] 步骤 E :通过计算模型计算判断该点是否为埋管节点,如果是,则转入步骤 F ;如果否,则执行 $j=j+1$, 转入步骤 D ;
- [0022] 步骤 F :记录节点赋值,执行 $j=j+1$, 转入步骤 D ;
- [0023] 步骤 G :执行 $i=i+1$;
- [0024] 步骤 H :判断 $i \leq M$, , 如果是,则转入步骤 I ;如果否,则转入步骤 C, M 值表示横向网格数,由热流场初始化时得到 ;
- [0025] 步骤 I :将热流场数据传递返还给组程序。
- [0026] 子程序温度迭代子程序的步骤如下 :
- [0027] 步骤 a :温度场初始化,各个网格节点处初始赋值为初始地温 t_0 ;
- [0028] 步骤 b :初始化循环指针 $i=1$, i 的变化步长为 1 ;
- [0029] 步骤 c :判断 $i \leq M$, , 如果是,则转入步骤 4 ;如果否,则转入步骤 h, M 值表示横向网格数,由温度场初始化时得到 ;
- [0030] 步骤 d :初始化循环指针 $j=1$, j 的变化步长为 1 ;
- [0031] 步骤 e :判断 $j \leq N$, , 如果是,则转入步骤 f ;如果否,则执行 $i=i+1$, 转入步骤 c, N 值表示纵向网格数,由温度场初始化时得到 ;
- [0032] 步骤 f :通过计算模型计算该点处温度值,模型计算可通过下式得到 :
- [0033]

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta x)^2} + \frac{wuc_v r}{2\Delta xc}\right) T_{i,j}^{t+\tau/2} = & \frac{ar}{2(\Delta x)^2} T_{i+1,j}^{t+\tau/2} + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2} + \frac{wuc_v r}{2\Delta xc}\right) T_{i-1,j}^{t+\tau/2} \\ & + \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t) + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta y)^2}\right) T_{i,j}^t + \frac{qr}{2\Delta x \Delta y \rho c} \end{aligned}$$

- [0034] 步骤 g :记录 $(\tau + r/2)$ 时刻温度场数据,然后执行 $j=j+1$, 转入步骤 e ;
- [0035] 步骤 h :初始化循环指针 $j=1$, j 的变化步长为 1 ;
- [0036] 步骤 i :判断 $j \leq N$, , 如果是,则转入步骤 j ;如果否,则转入步骤 n, N 值表示纵向网格数,由温度场初始化时得到 ;
- [0037] 步骤 j :初始化循环指针 $i=1$, i 的变化步长为 1 ;
- [0038] 步骤 k :判断 $i \leq M$, , 如果是,则转入步骤 l ;如果否,则执行 $j=j+1$, 转入步骤 i, M 值表示横向网格数,由温度场初始化时得到 ;
- [0039] 步骤 l :通过计算模型计算该点处温度值,然后执行 $i=i+1$, 转入步骤 j ;模型计算可通过下式得到 :
- [0040]

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta y)^2} + \frac{wuc_w r}{2c}\right) T_{i,j}^{t+r} &= \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^{t+r} + T_{i,j-1}^{t+r}) + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2}\right) (T_{i+1,j}^{t+r/2} + T_{i-1,j}^{t+r/2}) \\ &+ \frac{wuc_w r}{2c} T_{i-1,j}^{t+r} + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta x)^2}\right) T_{i,j}^{t+r/2} + \frac{qr}{2\Delta x \Delta y \rho c} \end{aligned}$$

[0041] 步骤 m: 记录 $(\tau + r)$ 时刻温度场数据, 然后执行 $i = i + 1$, 转入步骤 k;

[0042] 步骤 n: 将温度场数据传递返还给主程序。

[0043] 本发明提出一种热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟方法, 其程序主要包括三部分: 主运行程序、热流场计算子程序和温度迭代计算子程序。

[0044] 运行主程序, 输入模型条件及岩土热物性数据, 包括: 管群排列方式, 管群数量, 管群边界条件设置, 土壤初始温度为 t_0 , 土壤导热系数为 λ , 土壤比热容为 c , 土壤比热容为 c_w , 土壤密度为 ρ , 恒定热流值为 q , 土壤含水率 w , 地下水渗流速度 u , 系统运行时间等作为算法的初始参数; 初始化程序中生成的管群模型、热流场及温度场; 设定程序迭代的时间步长, 并初始化循环指针; 先调用热流场子程序, 通过计算模型计算判断该点是否为埋管节点, 若是, 则将热流参数赋值于该节点, 若否, 则将零赋值于该点, 得到热流场分布情况, 并返回主程序; 将热流场与前一迭代时刻得到温度场进行叠加; 接着, 调用温度迭代子程序, 运用式 (1) 进行横向网格隐式迭代, 计算 $(\tau + r/2)$ 时刻温度场数据

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) T_{i,j}^{t+r/2} &= \frac{ar}{2(\Delta x)^2} T_{i+1,j}^{t+r/2} + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) T_{i-1,j}^{t+r/2} \\ &+ \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t) + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta y)^2}\right) T_{i,j}^t + \frac{qr}{2\Delta x \Delta y \rho c} \end{aligned} \quad (1)$$

[0045] 运用式 (2) 进行纵向网格隐式迭代, 计算 $(\tau + r)$ 时刻温度场数据

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta y)^2} + \frac{wuc_w r}{2c}\right) T_{i,j}^{t+r} &= \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^{t+r} + T_{i,j-1}^{t+r}) + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2}\right) (T_{i+1,j}^{t+r/2} + T_{i-1,j}^{t+r/2}) \\ &+ \frac{wuc_w r}{2c} T_{i-1,j}^{t+r} + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta x)^2}\right) T_{i,j}^{t+r/2} + \frac{qr}{2\Delta x \Delta y \rho c} \end{aligned} \quad (2)$$

[0047] 得到温度场的分布情况, 并返回主程序; 运行至预定结束时刻输出温度场计算数值结果, 进而获取设定渗流速度和土壤参数情况下土壤各处温度值。

[0048] 本发明的优点如下。

[0049] (1) 提出了一种新的算法对渗流影响下土壤温度场的计算速度快。渗流影响下温度场计算双向隐式算法如下:

[0050] 横向迭代计算:

[0051]

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) T_{i,j}^{t+r/2} &= \frac{ar}{2(\Delta x)^2} T_{i+1,j}^{t+r/2} + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) T_{i-1,j}^{t+r/2} \\ &+ \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t) + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta y)^2}\right) T_{i,j}^t + \frac{qr}{2\Delta x \Delta y \rho c} \end{aligned}$$

[0052] 纵向迭代计算:

[0053]

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta y)^2} + \frac{WUC_w r}{2c}\right) T_{i,j}^{t+r} = & \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^{t+r} + T_{i,j-1}^{t+r}) + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2}\right) (T_{i+1,j}^{t+r/2} + T_{i-1,j}^{t+r/2}) \\ & + \frac{WUC_w r}{2c} T_{i-1,j}^{t+r} + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta x)^2}\right) T_{i,j}^{t+r/2} + \frac{qr}{2\Delta x \Delta y \rho c} \end{aligned}$$

[0054] 可见,土壤温度场的确定需要确定迭代时间步长 r ;本发明采用隐式计算方法,所得结果对时间步长 r 的取值变化影响不敏感。先给定纵向网格变量 j ,改变横向网格变量 i 在各自的范围内进行遍历,每一组值计算出 $(\tau + r/2)$ 时刻对应的温度值;而后给定横向网格变量 i ,改变纵向网格变量 j 在各自的范围内进行遍历,每一组值计算出 $(\tau + r)$ 时刻对应的温度值。

[0055] (2) 这一确定方法对热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟方法提供了一种新的算法,将土壤与地下水换热量视为内部换热,简化热源项,可以在短时间内快速的计算出渗流影响下的土壤温度场,为地源热泵地埋管的设计及研究提供了一定的参考依据。

附图说明

[0056] 图 1 是本发明热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值计算方法主程序框图。

[0057] 图 2 是管群区域内埋管处热流赋值计算框图。

[0058] 图 3 是管群区域内温度场数值迭代计算框图。

具体实施方式

[0059] 一种热渗耦合作用下地源热泵地埋管温度场数值模拟方法。

[0060] 主程序运行:

[0061] 步骤 1:输入模型条件及岩土热物性数据,包括:管群排列方式,管群数量,管群边界条件设置,土壤初始温度为 t_0 ,土壤导热系数为 λ ,土壤比热容为 c ,土壤比热容为 c_w ,土壤密度为 ρ ,恒定热流值为 q ,土壤含水率 ω ,地下水渗流速度 u 作为算法的初始参数;

[0062] 步骤 2:初始化管群模型及土壤的相关参数,包括:步骤 1 中所提到各项参数;

[0063] 步骤 3:初始化循环指针 $\tau = 1$, $\Delta \tau = r$, r 为时间 τ 的变化步长,系统运行时间 τ 的变化范围为 $1 \sim t$, t 为设定的系统运行截止时间;

[0064] 步骤 4:判断 $\tau \leq t$,如果是,则转入步骤 5;如果否,则转入步骤 8;

[0065] 步骤 5:调用热流量子程序,计算得到热流场的分布情况;

[0066] 步骤 6:调用温度迭代子程序,计算得到温度场的分布情况;

[0067] 步骤 7:改变运行时间 τ ,执行 $\tau = \tau + r$,回到步骤 4,进入下一个子循环;

[0068] 步骤 8:输出温度场计算数值结果,进而获取设定渗流速度和土壤参数情况下土壤各处温度值。

[0069] 热流子程序调用运行:

[0070] 步骤 1:热流场初始化,各个网格节点处初始赋值为零;

[0071] 步骤 2:初始化循环指针 $i = 1$, i 的变化步长为 1;

[0072] 步骤 3:初始化循环指针 $j = 1$, j 的变化步长为 1;

[0073] 步骤 4:判断 $j \leq N$,如果是,则转入步骤 5;如果否,则转入步骤 7, N 值表示纵向

网格数,由热流场初始化时得到;

[0074] 步骤5:通过计算模型计算判断该点是否为埋管节点,如果是,则转入步骤6;如果否,则执行 $j=j+1$, 转入步骤4;

[0075] 步骤6:记录节点赋值,执行 $j=j+1$, 转入步骤4;

[0076] 步骤7:执行 $i=i+1$;

[0077] 步骤8:判断 $i \leq M$, 如果是,则转入步骤9;如果否,则转入步骤3,M值表示横向网格数,由热流场初始化时得到;

[0078] 步骤9:将热流场数据传递返还给组程序。

[0079] 温度迭代子程序调用运行:

[0080] 步骤1:温度场初始化,各个网格节点处初始赋值为初始地温 t_0 ;

[0081] 步骤2:初始化循环指针 $i=1$, i 的变化步长为1;

[0082] 步骤3:判断 $i \leq M$, 如果是,则转入步骤4;如果否,则转入步骤8,M值表示横向网格数,由温度场初始化时得到;

[0083] 步骤4:初始化循环指针 $j=1$, j 的变化步长为1;

[0084] 步骤5:判断 $j \leq N$, 如果是,则转入步骤6;如果否,则执行 $i=i+1$, 转入步骤3,N值表示纵向网格数,由温度场初始化时得到;

[0085] 步骤6:通过计算模型计算该点处温度值,模型计算可通过下式得到:

[0086]

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) T_{i,j}^{t+\tau/2} = & \frac{ar}{2(\Delta x)^2} T_{i+1,j}^{t+\tau/2} + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2} + \frac{wuc_w r}{2\Delta xc}\right) T_{i-1,j}^{t+\tau/2} \\ & + \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^t + T_{i,j-1}^t) + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta y)^2}\right) T_{i,j}^t + \frac{qr}{2\Delta x \Delta y \rho c} \end{aligned}$$

[0087] 步骤7:记录 $(\tau + r/2)$ 时刻温度场数据,然后执行 $j=j+1$, 转入步骤5;

[0088] 步骤8:初始化循环指针 $j=1$, j 的变化步长为1;

[0089] 步骤9:判断 $j \leq N$, 如果是,则转入步骤10;如果否,则转入步骤14,N值表示纵向网格数,由温度场初始化时得到;

[0090] 步骤10:初始化循环指针 $i=1$, i 的变化步长为1;

[0091] 步骤11:判断 $i \leq M$, 如果是,则转入步骤12;如果否,则执行 $j=j+1$, 转入步骤9,M值表示横向网格数,由温度场初始化时得到;

[0092] 步骤12:通过计算模型计算该点处温度值,然后执行 $i=i+1$, 转入步骤10;模型计算可通过下式得到:

[0093]

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{ar}{(\Delta y)^2} + \frac{wuc_w r}{2c}\right) T_{i,j}^{t+\tau} = & \frac{ar}{2(\Delta y)^2} (T_{i,j+1}^{t+\tau} + T_{i,j-1}^{t+\tau}) + \left(\frac{ar}{2(\Delta x)^2}\right) (T_{i+1,j}^{t+\tau/2} + T_{i-1,j}^{t+\tau/2}) \\ & + \frac{wuc_w r}{2c} T_{i-1,j}^{t+\tau} + \left(1 - \frac{ar}{(\Delta x)^2}\right) T_{i,j}^{t+\tau/2} + \frac{qr}{2\Delta x \Delta y \rho c} \end{aligned}$$

[0094] 步骤13:记录 $(\tau + r)$ 时刻温度场数据,然后执行 $i=i+1$, 转入步骤11;

[0095] 步骤14:将温度场数据传递返还给主程序。

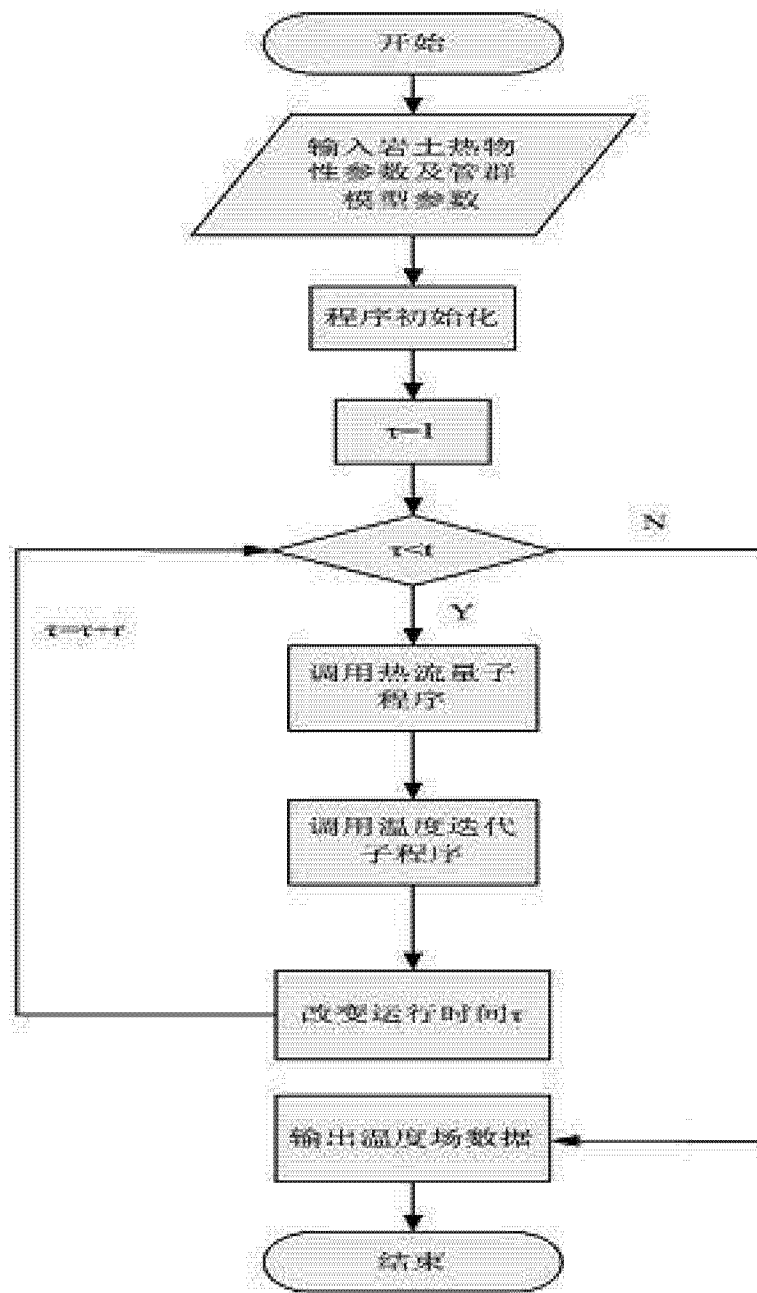


图 1

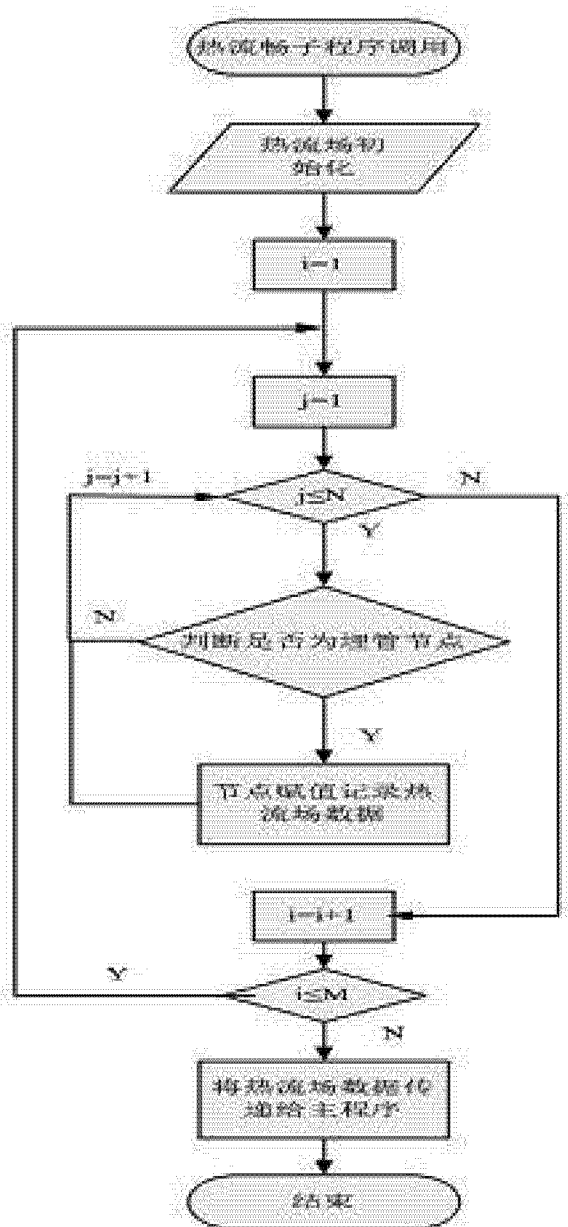


图 2

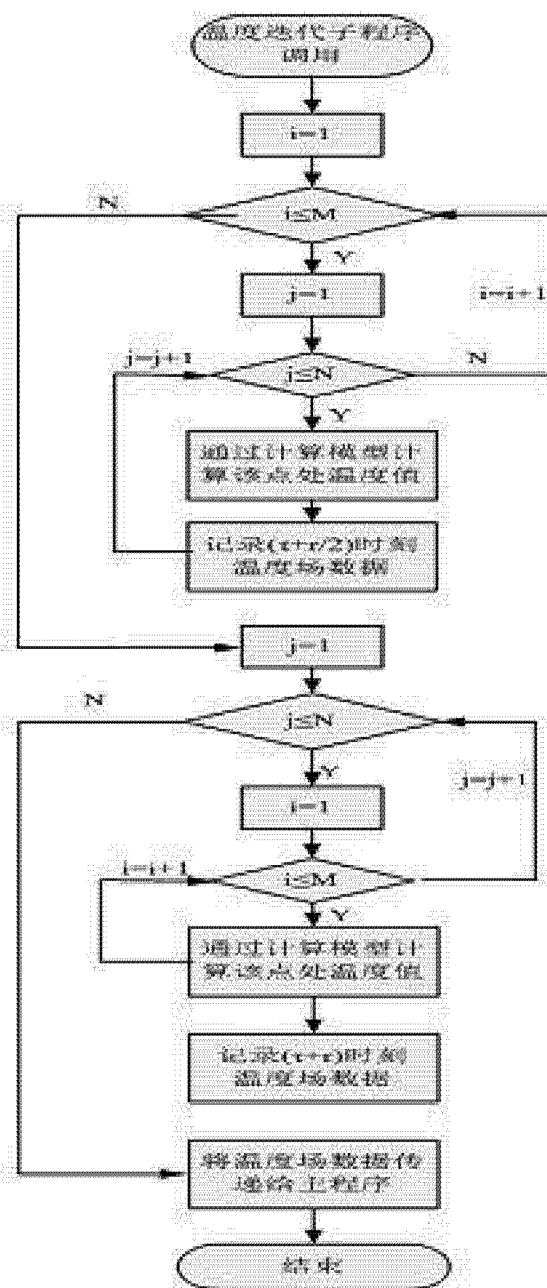


图 3