

文章编号: 1671-6612 (2022) 02-227-05

# 土壤源热泵地埋管群动态负荷模拟换热性能分析

张渊博

(中铁第一勘察设计院集团有限公司 西安 710043)

**【摘 要】** 建立了土壤源热泵地埋管换热器五根管群流固耦合全尺寸三维传热动态模型, 结合实际工程的动态负荷对夏季放热和冬季吸热工况进行了一年期和十年期变负荷间歇动态模拟, 分析了全年冷、热负荷平衡时管群之间的热干扰影响及土壤温度变化情况。

**【关键词】** 土壤源热泵; 地埋管换热器; 管群; 数值模拟; 变负荷间歇运行

中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Analysis of Heat Transfer Performance of Buried Pipe Cluster of Ground Source Heat Pump under Dynamic Load Simulation Zhang Yuanbo

(China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd, Xi'an, 710043)

**【Abstract】** A full-scale three-dimensional heat transfer dynamic model with fluid-solid coupling for a group of five buried pipes of a ground source heat pump has been established, and the dynamic simulation model was used in a project case to simulate intermittent operation of one year and ten years with variable loads in the conditions of heat release in summer and heat absorption in winter, the effects of thermal disturbances between pipes of a group and changes in ground temperature were analyzed when the balance of cooling and heat loads throughout the year.

**【Keywords】** ground source heat pump; ground heat exchanger; buried pipe cluster; numerical simulation; intermittent operation with variable loads

作者(通讯作者)简介: 张渊博(1986.02-), 男, 硕士研究生, 工程师, E-mail: zhangybo1986@163.com  
收稿日期: 2022-02-05

## 0 引言

土壤源热泵在国外起步较早, 进入 20 世纪 90 年代, 土壤源热泵的应用和发展进入了一个新的发展阶段。土壤源热泵在欧美的热泵装置市场占有率大约是 3%, 每年见诸报道的土壤源热泵实际应用工程项目和研究报告不断增加, 而且在 1993 年成立了国际土壤源热泵协会(IGSHPA)。主要研究工作集中在埋管换热器的换热机理、强化换热及热泵系统与埋地换热器匹配和安装布置技术等方面<sup>[1,2]</sup>, 而且同时研究不同热物性的回填材料对地下换热器的影响。目前, 以欧美为主要代表的土壤源热泵系统市场的主要研究工作, 已经转向了土壤源热泵系统与整个空调系统的结合运行的研究及商

业化、市场化中一些亟待克服问题的解决。

相对于土壤源热泵在国外的迅猛发展, 我国对于土壤源热泵系统的研究与应用起步较晚。国内最早的土壤源热泵系统研究开始于上世纪八十年代, 但也仅仅是最近十几年才出现大规模的研究和应用。同济大学进行了为期多年的一项土壤-太阳负荷热源的研究, 其主要针对长江中下游地区含水率较高的土壤的蓄热放热特性进行测试。同期, 在同济大学自建的大型土壤源热泵实验台上进行了冬季供热等方面的研究<sup>[3]</sup>。山东建筑大学从冷热平衡的角度定性给出了只有在建筑冷热负荷基本平衡的地区使用地源热泵的资源价值最高<sup>[4]</sup>。土壤源热泵技术在我国虽然起步较晚, 但是前景非常广阔。

而且随着热泵及其各种动力装置的研究制造和热泵系统的试验研究工作的深入开展,热泵技术将在我国的建筑领域得到越来越广泛的应用,在建筑节能以及环境保护等工作中都将发挥日益重大的作用。

在土壤源热泵地埋管换热器的设计与研究中,其地下换热器的换热能力是关键所在,现阶段地埋管换热研究大部分仅限于单根管,规模以上的管群换热研究很少。本文针对这一问题,利用 CFD 技术,建立了土壤源热泵地埋管换热器五根管群流固耦合全尺寸三维传热动态模型,结合实际工程的动态负荷对夏季放热和冬季吸热工况进行了一年期和十年期变负荷间歇动态模拟,分析了全年冷、热负荷平衡时管群之间的热干扰影响及土壤体温度变化情况。

## 1 土壤源热泵地埋管换热器管群换热模型的建立

### 1.1 模型建立所需的假设

地埋管换热器的换热是一个复杂的三维非稳态传热,传热过程涉及到对流换热、导热,且影响传热的因素繁多而复杂。欲精确模拟实际工况并求解的难度非常大,为了简化起见,对传热模型作如下假设<sup>[5,6]</sup>:

- (1) 岩土是均匀的;
- (2) 认为埋管周围是无限大空间,埋管所处区域同一深度大地原始温度一致且不考虑地面换热;
- (3) 岩土和回填材料热物理参数不变;
- (4) 不考虑热湿迁移的影响;
- (5) 忽略管壁与回填材料、回填材料与钻孔壁的接触热阻。

### 1.2 几何模型的建立

本文根据实际情况建立了同实际单 U 型管地下换热器形状完全相同的大小比例为 1:1 的三维模型。整个模型由三大部分组成: U 型管内循环流体,回填材料和土壤。U 型管外径 0.032m,管长 100m;回填井深 103m,半径 0.09m,五个回填井呈十字布置,周围四个钻孔与中心钻孔的中心距 5m,土壤半径 10m。整个模型如图 1、图 2 所示。

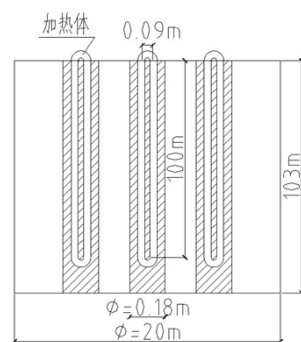


图 1 模型剖面尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of model section size

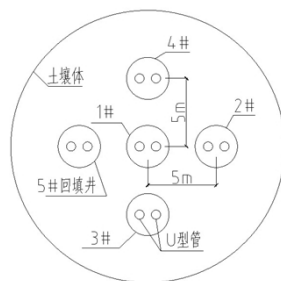


图 2 模型平面示意图

Fig.2 Schematic diagram of model plan

## 2 地埋管换热器的设计

### 2.1 工程概况及全年动态负荷计算

该建筑位于西安市,建筑面积 3176m<sup>2</sup>,地上三层;建筑房间功能:办公室、宿舍(高标准)、餐厅等;热源形式:土壤源热泵系统。

运用 DeST 软件计算该建筑动态负荷,全年冷热负荷情况如图 3、图 4 所示。

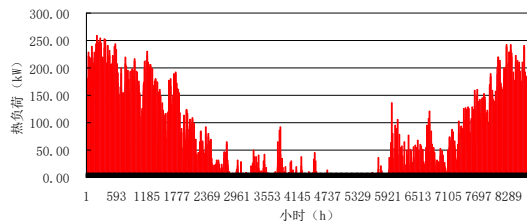


图 3 建筑全年逐时热负荷

Fig.3 Hourly heat load of building throughout the year

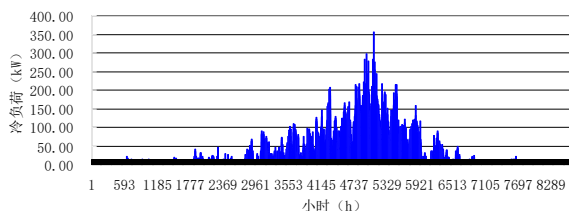


图 4 建筑全年逐时冷负荷

Fig.4 Hourly cooling load of building throughout the

2.2 埋管换热器设计

埋管换热器的长度应能满足地源热泵系统最大释热量和最大吸热量的要求，即设计的埋管埋深对应的峰值每延米换热量在要求的范围内，还应同时满足热泵机组长期运行的要求，也就是累计释热量和吸热量的要求<sup>[7]</sup>。

结合西安地区气候特点，为保证室内舒适性，该系统夏季的运行时间为 5 月 1 日至 9 月 30 日，冬季的运行时间参照西安冬季供暖时间，为 11 月 15 日至次年 3 月 15 日。

根据地源热泵系统最大释热量和吸热量的计算公式计算出该土壤源热泵系统全年的累计释热量和吸热量分别为 210836.11kW、208696.23kW。为保证系统长期运行后土壤的温度不明显变化，采取冬季完全由土壤源热泵系统从地下取热供暖，对夏季冷负荷进行调峰处理，以保证冬夏季取热量和释热量达到平衡，夏季峰值的释热量削减部分由冷却塔承担的方案。平衡后的冬夏季吸热量和释热量及土壤源热泵系统需要承担的建筑负荷如表 1 所示，冷却塔冷却水承担的建筑负荷为 1788.63kW，峰值负荷为 167.69kW。

表 1 冷热平衡后埋管承担的释热吸热量及所承担建筑月负荷统计

Table 1 Statistics of heat release and heat absorption by buried pipes and monthly load of building after balance of cooling load and heat load

| 月份 | 冷热平衡后埋管承担的释热吸热量月负荷 |             |            |            | 热泵承担的建筑月负荷  |             |            |            |
|----|--------------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|
|    | 月累计吸热量 (kW)        | 月累计释热量 (kW) | 峰值吸热量 (kW) | 峰值释热量 (kW) | 月累计热负荷 (kW) | 月累计冷负荷 (kW) | 峰值热负荷 (kW) | 峰值冷负荷 (kW) |
| 1  | 64820.98           | 0.00        | 196.79     | 0.00       | 85327.45    | 0.00        | 259.05     | 0.00       |
| 2  | 46629.26           | 0.00        | 175.29     | 0.00       | 61380.69    | 0.00        | 230.75     | 0.00       |
| 3  | 19189.57           | 0.00        | 146.62     | 0.00       | 25260.29    | 0.00        | 193.00     | 0.00       |
| 4  | 0.00               | 0.00        | 0.00       | 0.00       | 0.00        | 0.00        | 0.00       | 0.00       |
| 5  | 0.00               | 14213.48    | 0.00       | 121.86     | 0.00        | 11879.96    | 0.00       | 101.86     |
| 6  | 0.00               | 33034.79    | 0.00       | 224.65     | 0.00        | 27611.25    | 0.00       | 187.77     |
| 7  | 0.00               | 79907.95    | 0.00       | 224.65     | 0.00        | 66788.93    | 0.00       | 187.77     |
| 8  | 0.00               | 67150.52    | 0.00       | 224.65     | 0.00        | 56125.98    | 0.00       | 187.77     |
| 9  | 0.00               | 14389.41    | 0.00       | 140.33     | 0.00        | 12027.01    | 0.00       | 117.29     |
| 10 | 0.00               | 0.00        | 0.00       | 0.00       | 0.00        | 0.00        | 0.00       | 0.00       |
| 11 | 18663.46           | 0.00        | 143.41     | 0.00       | 24567.75    | 0.00        | 188.77     | 0.00       |
| 12 | 59392.97           | 0.00        | 184.64     | 0.00       | 78182.27    | 0.00        | 243.05     | 0.00       |
| 合计 | 208696.23          | 208696.15   | ——         | ——         | 274718.45   | 174433.12   | ——         | ——         |

计算时按《地源热泵系统工程技术规范》的规定：夏季运行期间，埋管换热器的出口最高温度宜低于 33℃；冬季运行期间，不添加防冻剂的埋管换热器进口最低温度宜高于 4℃。该建筑所需要的土壤源热泵系统埋管换热器的埋管数为 50 根，夏季最大岩土延米换热量为 44.93W/m，冬季最大岩土延米换热量为 39.36W/m。

3 埋管换热器管群数值模拟及分析

3.1 系统参数设置

埋管换热系统传热过程包括管中流体的对

流换热、管壁的导热、管壁与回填材料及回填材料中的导热、回填材料与土壤及土壤中的导热。其流场、温度场求解涉及质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程等。本文选用 Fluent 软件进行动态计算分析。

模拟对象的物性参数参照在西安长安区进行热响应实验所测得，具体数值如表 2 所示。

经过实地勘测，管内流体及周围土壤的初始温度为 289.4K。模型中的加热体加热量根据动态负荷计算设定。

表 2 物性参数

Table 2 Thermophysical property parameters

| 序号 | 材料名称 | 密度 $\text{kg/m}^3$ | 导热系数 $\text{W/(m}\cdot\text{K)}$ | 比热容 $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ | 动力粘度 $\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ |
|----|------|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1  | 水    | 998.2              | 0.6                              | 4182                             | 0.001003                          |
| 2  | PE 管 | 940                | 0.42                             | 2300                             | —                                 |
| 3  | 回填土  | 1650               | 1.7868                           | 1048                             | —                                 |
| 4  | 土壤   | 1540               | 1.5007                           | 1807                             | —                                 |

### 3.2 一年期变负荷间歇运行计算分析

土壤源热泵全年运行为非稳态过程, 主要分析土壤源热泵系统间歇运行一年的地埋管换热性能的变化, 包括管群内不同地埋管的换热差异以及延米换热情况。计算时间从第一年的 5 月 1 日起至次年的 4 月 30 日, 步长为 1 天。管内流体速度稳定在  $0.62\text{m/s}$ , 初始温度为  $289.4\text{K}$ 。

由于热干扰影响, 中心地埋管换热器与周围四根地埋管换热器管内流体温度是不相同的, 流体温差如图 5 所示。该地埋管系统的单根埋管天平均延米换热量变化如图 6 所示。

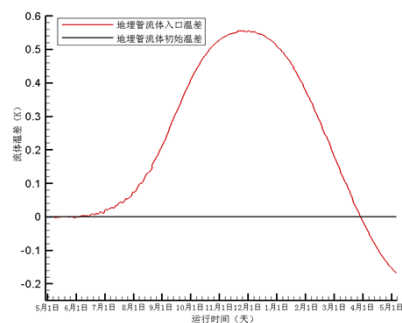


图 5 1#井与 2#井地埋管换热器流体的进口温差变化图

Fig.5 Inlet temperature difference of ground heat exchanger fluid in well 1# and well 2#

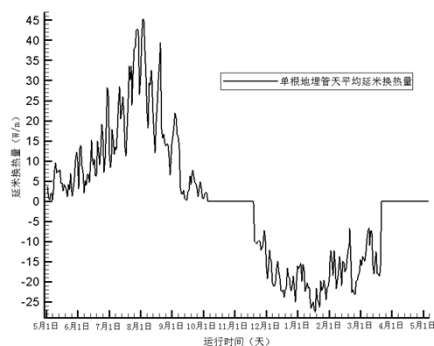


图 6 地埋管换热器天平均延米换热量变化图

Fig.6 Heat exchange rate of ground heat exchanger per linear meter per day over time

由图 5 可见, 随着系统运行的持续进行, 开始出现热干扰现象, 中心地埋管换热器的流体进口温度也相应高于周围四根地埋管换热器, 直到夏季运行后的间歇期最后一天, 温差达到最大值  $0.5544\text{K}$ 。然后随着冬季供暖工况的进行, 1#管井与 2#管井地埋管换热器流体进口温差逐渐减小, 进入间歇期后, 2#管井地埋管换热器的流体温度因为其周边土壤的温度恢复速度快于 1#管井周围土壤, 而高于 1#管井地埋管换热器流体温度, 间歇期结束时两者温差最大, 为  $-0.1683\text{K}$ 。由图 6 可见, 夏季 8 月 1 日最大天平均延米换热量为  $45.18\text{W/m}$ , 冬季 1 月 12 日最大延米换热量为  $-27.55\text{W/m}$ 。

### 3.3 十年期变负荷间歇运行计算分析

为了与工程实际更加贴近, 对该管群系统进行十年期变负荷间歇运行模拟计算。为方便模拟计算, 以一月为计算步长, 地埋管承担的释热量与吸热量以月平均计。

由于存在热干扰影响, 中心地埋管换热器与周围四根地埋管换热器管内流体温度是不相同的, 1#井地埋管换热器与 2#井地埋管换热器流体的进口温差变化如图 7 所示。十年期变负荷间歇运行 120 个月的土壤体温度变化如图 8 所示。

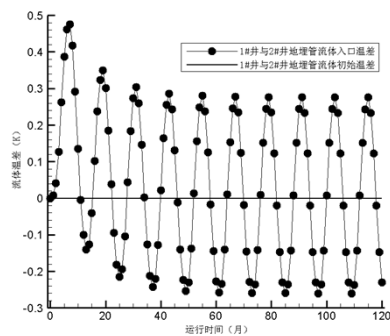


图 7 1#井与 2#井地埋管换热器流体的进口温差变化图

Fig.7 Ten-year change of inlet temperature difference of ground heat exchanger fluid in well 1# and well 2#

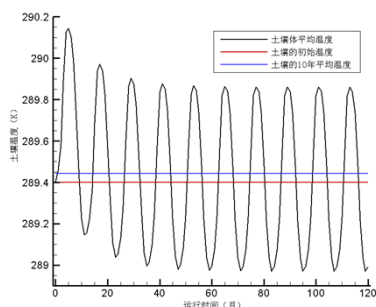


图8 十年期变负荷间歇运行土壤体平均温度变化图

Fig.8 Ten-year change of average ground temperature under intermittent operation with variable load

由图7可见,由于管井间的热干扰影响,1#管井与2#管井地埋管换热器的流体进口温差变化呈震荡波曲线。受第一年系统运行结束土壤温度不能恢复到初始289.4K的影响,两根地埋管内流体第一年的温差正向幅度最大,负向幅度最小,然后逐年的温差正向幅度减小,温差负向幅度增大,直到温差基本稳定,正向稳定在0.2758K左右,负向稳定在-0.2605K左右。从图8可以看出第一年土壤体的最高温度和最低温度都高于第二年,然后依次逐渐降低,直到趋于平衡。由此可以看出土壤体的内部热量变化基本平衡,随着土壤源热泵系统的长期运行不会对土壤的温度环境造成较大的改变。土壤十年的平均温度仍略高于土壤初始温度,平均温度为289.4419K,温升为0.0419K。

#### 4 结论

(1) 通过建立全尺寸五根地埋管管群数值模型,可以更加贴近工程实际的进行长周期变负荷的动态数值模拟,以便为工程设计提供参考。

(2) 虽然管群的各个地埋管之间存在热干扰影响,但是经过长期的运行模拟计算后发现热干扰对管内流体的温度变化影响比较小,不会影响系统的换热性能。

(3) 在冬季吸热量和夏季放热量基本平衡的情况下,系统越长时间的运行,土壤体运行周期内的平均温度变化会越小,其对整个土壤的热环境的影响越小。

#### 参考文献:

- [1] Shonder J A, V D Baxter, P J Hughes, et al. A comparison of vertical ground heat exchanger design software for commercial applications[J]. ASHRAE Trans, 2000,106(1):831-842.
- [2] 袁秋凤. 土壤热泵垂直U型埋管换热器传热分析[D]. 武汉:华中科技大学,2005.
- [3] 李元旦,张旭,周亚素. 土壤源热泵冬季工况下启动特性的实验研究[J]. 暖通空调,2001,31(1):17-20.
- [4] 苏登超,陈明九. 地源热泵空调技术的地域性特征[J]. 工程建设与设计,2007,(1):10-13.
- [5] Yavuzturk C, Spitler J D, Rees S J. A transient Two-Dimension a finite volume model for the simulation of vertical U-Tube ground heat exchangers[J]. ASHRAE Transactions, 2001,107(2):617-625.
- [6] Deerman J D, Kavanaugh S P. Simulation of vertical U-Tube Ground-Coupled heat pump systems using the cylindrical heat source solution[J]. ASHRAE Transactions, 1991,97(1):287-295.
- [7] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册第二版(下册)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008:2394-2406.