

文章编号: 1671-6612 (2026) 02-210-08

地源热泵在不同运行 模式下土壤温度场分布特征研究

郭文嘉¹ 李春晓¹ 李锐¹ 曹刚¹ 郑万冬² 李家兴²

(1. 国网冀北电力有限公司廊坊供电公司 廊坊 065000;

2. 天津大学 天津 300354)

【摘要】 土壤温度场是保障地源热泵高效、稳定且长期可靠运行的核心基础, 直接影响着系统的制冷供热性能和能耗水平。基于此, 对地源热泵双 U 型埋管及周边土壤建立了二维非稳态数值模型, 并进行了实验验证。利用该模型, 分析了连续运行模式下不同参数对土壤温度的影响, 并对比了连续运行模式、启停比为 1:1 和 1:2 的间歇运行模式下土壤温度的年变化趋势。结果显示: 在不受气候影响的深层土壤中, 温度随土壤深度变化较小, 随导热系数增大先升高后逐渐趋于稳定; 近孔区域土壤受热干扰强烈, 在恢复阶段温度回升较快, 而远孔区域响应迟缓; 间歇运行下的土壤在恢复期结束后具有更好的温度恢复效果, 较长的恢复时间更有利于埋管换热器的长期性能稳定。

【关键词】 地源热泵; 连续运行; 间歇运行; 数值计算; 土壤温度; Fluent

中图分类号 TU83 文献标志码 A

Distribution Characteristics of Soil Temperature Fields in Ground Source Heat Pumps under Different Operating Modes

Guo Wenjia¹ Li Chunxiao¹ Li Rui¹ Cao Gang¹ Zheng Wandong² Li Jiaying²

(1. State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd, Langfang Power Supply Company, Langfang, 065000;

2. Tianjin University, Tianjin, 300354)

【Abstract】 Soil temperature distribution serves as the core foundation for ensuring the efficient, stable, and long-term reliable operation of ground-source heat pumps, directly impacting the system cooling and heating performance as well as energy consumption levels. Based on this, this paper establishes a two-dimensional unsteady numerical model for the double U-shaped ground-coupled heat exchanger and surrounding soil of a ground-source heat pump system, which is experimentally validated. Using this model, the study analyzed how different parameters affect soil temperature under continuous operation mode and compared the annual temperature trends in soil under continuous operation, intermittent operation with a 1:1 start-stop ratio, and intermittent operation with a 1:2 start-stop ratio. Results indicate: In deep soil unaffected by climate, temperature varies little with depth, initially rising then stabilizing as thermal conductivity increases. Near-pore zones exhibit strong thermal disturbance with rapid recovery phase temperature rise, while far-pore zones respond slowly. Intermittent operation yields superior temperature recovery after the recovery phase, with longer recovery times enhancing long-term performance stability of buried pipe heat exchangers.

【Keywords】 Ground source heat pump; Continuous operation; Intermittent operation; Numerical simulation; Soil temperature; Fluent

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目 (项目编号: B3010525Z016)

作者简介: 郭文嘉 (1983-), 女, 本科, 高级经济师, E-mail: 52348304@qq.com

通讯作者: 郑万冬 (1986-), 男, 博士, 教授, E-mail: wdzheng@tju.edu.cn

收稿日期: 2025-09-08

0 引言

能源与环境问题是当前全球可持续发展进程中亟待解决的核心议题。目前,我国建筑能耗占社会总能耗的三分之一,其中,暖通空调能耗占到建筑能耗的 60%以上^[1]。在“30、60”双碳目标的约束下,推动建筑能源系统向清洁、高效方向转型已迫在眉睫。地源热泵作为一种利用地下浅层地热能实现供暖制冷的高效技术,能够有效降低能源消耗并减少环境污染^[2]。我国拥有全球第二大增强型地热系统技术潜力,技术可开发的地热资源量占全球总量的 8%^[3],这一丰富的资源基础,为推动地源热泵技术替代传统燃煤锅炉与散煤燃烧提供了重要条件^[4]。

土壤作为地源热泵系统中重要的蓄热体和传热介质,其温度特性直接影响其与地埋管的传热效率,进而影响整个热泵系统的制冷/供热性能和运行稳定性^[5]。因此,研究地埋管周围土壤的温度特性对地源热泵系统的优化设计、运行效率提升具有重要理论意义^[6]。目前,国内大量学者已通过数值模拟、实验测试及现场监测等多种方法,对地埋管换热过程中土壤温度特性开展了广泛研究。张琪等人^[7]应用 Feflow 软件建立了地埋管换热器内、外温度场数学模型,对供暖季、供冷季土壤温度场空间分布特性,以及地埋管内流体进、出口温度变化特性展开了研究。吴暄等人^[8]通过实验测试对地源热泵单工况(单一蓄热或放热)和热泵双工况(蓄热和放热过程)两种运行模式下的土壤温度特性展开研究,结果表明,相比热泵单工况下的蓄热或取热,热泵双工况冷热交替运行模式可显著降低土壤温升率。成雷振等人^[9]采用现场监测对邯郸某示范基地双 U 型地埋管地源热泵供暖制冷工程 5 年的土壤温度数据进行分析。结果表明,地埋管换热区内外土壤温度随大气和供能需求变化而波动。刘卫等人^[10]以竖直 U 型地埋管周围土壤为研究对象,基于有限元分析法建立三维非稳态传热物理模型。研究表明,地埋管周围土壤温度和单位井深换热量均随热泵运行时间增加而增加且趋于稳定。

目前学者侧重于热泵连续运行工况下的土壤温度特性研究,对热泵系统连续运行模式以及不同启停比下的间歇运行模式下的土壤年温度变化的对比研究较少。为此,本文建立了地源热泵双 U 型地埋管及周边土壤的二维非稳态数值模型,并进

行了实验验证。利用该模型分析了连续运行模式下不同参数对土壤温度的影响,并对连续运行模式、启停比为 1:1 和 1:2 的间歇运行模式下土壤温度的年变化趋势进行了对比研究。

1 模型建立

1.1 模型假设

本文针对地源热泵地埋管及周边的土壤层建立 Fluent 仿真模型,分析地埋管内流体温度及土壤温度分布情况,为简化模型,进行以下假设:

(1) 假设管内流体为不可压缩牛顿流体,运动流态为紊流;

(2) 假设管内流体入口温度、速度分布均匀;

(3) 假设土壤初始温度分布均匀并仅随深度方向变化^[11];

(4) 假设管内流体及土壤的物性参数不随时间发生变化;

(5) 忽略管内流体流动时由于粘性作用而造成的能耗以及各接触面的接触热阻;

(6) 由于地下水位较低,不考虑水分迁移对热量传递的影响,假设埋管与土壤之间的热量传递过程为纯导热^[11,12]。

1.2 几何模型

基于上述假设,本节沿地源热泵地埋管的深度方向建立了其与周边土壤的流动传热二维模型。如图 1 所示,几何模型包括地埋管内流体、两根 U 型地埋管和周边土壤,地埋管埋在土壤钻孔中。

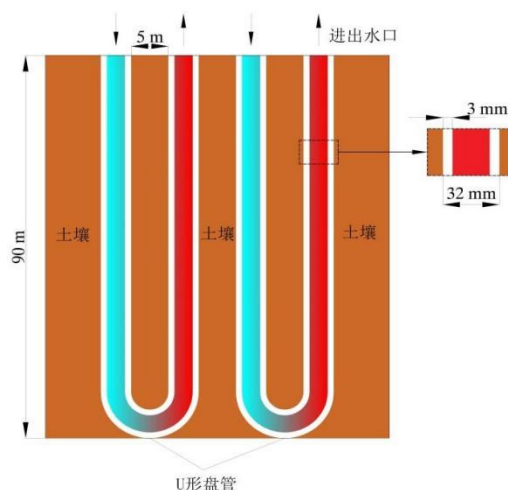


图 1 地源热泵双 U 型地埋管几何模型

Fig.1 Geometric model of double U-shaped ground loop for ground source heat pump

几何模型参数设置如下：钻孔深度为 90m，两钻孔间距为 5m，土壤区域外边界距管井为 3m，地埋管采用高密度聚乙烯管，其外径和壁厚分别为 32mm 和 3mm，地埋管两支管中心距为 50mm，钻孔直径为 200mm。

地源热泵系统各个材料物性参数如表 1 所示。

表 1 地源热泵系统各个材料物性参数

Table 1 Physical properties of material used in the ground source heat pump system

	密度/(kg/m ³)	定压比热 /[J/(kg·K)]	导热系数 /[W/(m·°C)]
地埋管	1860	840	0.441
土壤	2000	1425	1.754
水	1000	4180	0.585

1.3 控制方程

本节对地埋管内的流体和土壤分别建立控制方程。其中，地埋管内流体的流动传热过程满足质量守恒方程、动量守恒方程、能量守恒方程^[13]，具体方程如式 (1) - (5) 所示。

(1) 质量守恒方程

$$\rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中： ρ 为密度，kg/m³； u 、 v 为速度矢量 u 在 x 、 y 方向的分量，m/s。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho uu) = \text{div}(\mu \cdot \text{gradu}) - \frac{\partial P}{\partial x} + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \text{div}(\rho vu) = \text{div}(\mu \cdot \text{gradv}) - \frac{\partial P}{\partial y} + S_v \quad (3)$$

式中： S_u 和 S_v 是动量守恒方程的广义源项。

(3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\alpha}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\alpha}{c_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + S_T \quad (4)$$

式中： c_p 为比热容； T 为温度； α 为流体的传热系数； S_T 为粘性耗散项。

针对土壤，由于实际工况下地埋管在土壤中的传热过程是非稳态传热，其传热方程为：

$$\rho_e c_e \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_e \frac{\partial T_e}{\partial y} \right) + q_v \quad (5)$$

式中： ρ_e 、 c_e 和 q_v 分别为土壤的密度、比热和内热源。

1.4 边界条件的确定

模型的边界条件主要包括流体入口边界条件、流体出口边界条件、土壤导热边界条件以及流体-固体耦合传热边界条件。其中，流体出口边界采用自由流出条件，假定出口断面上网格节点参数值不对出口边界邻近节点产生影响。土壤径向远端边界设为绝热条件，而上表面边界则认为地表导入土壤的热量近似等于土壤与空气的自然对流换热量。在 Fluent 中，流体与固体之间的共轭传热通过将相应界面设置为“耦合”类型来实现，其余具体参数如表 2 所示。

表 2 边界条件设置

Table 2 Setting of boundary conditions

边界条件	数值
夏季环境温度/°C	31.6
冬季环境温度/°C	-5.0
春、秋季环境温度/°C	17.0 ^[14]
夏季流体入口温度/°C	35.0
冬季流体入口温度/°C	5.0
流速/(m/s)	1.0
湍流动能	0.1
湍流动能耗散率	2.7
土壤下表面温度/°C	17.0

1.5 网格划分及模型求解

模型的网格划分方法如图 2 所示。考虑到地埋管的水平尺寸远远小于其竖直尺寸，采用细长形网格以提高计算效率并适应几何特征。此外，针对地埋管底层中存在的半圆环形弯管结构，为保证网格质量，在该区域沿着弯管路径增加了节点密度，从而实现复杂局部流动的有效模拟。

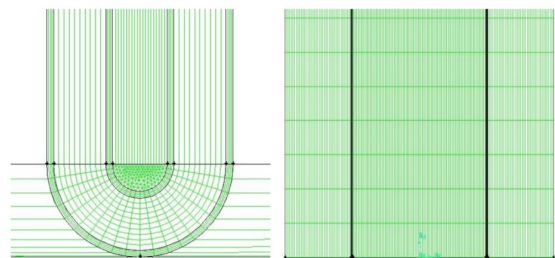


图 2 网格划分方法

Fig.2 Grid division method

在非稳态导热数值计算中,瞬态温度分布受时间步长影响显著,本研究每个时间步内设置最大迭代次数为 200,以确保计算的收敛性,并在此基础上完成迭代求解。

由于本研究涉及的土壤温度场模拟计算域较大,时间步长较长,为确保数值模型的可靠性,对网格划分间距和时间步长进行了独立性验证。图 3 给出了网格划分间距分别为 0.3m (对应网格数 91200 个)、0.5m (网格数 55920 个)、0.8m (网格数 29460 个)、时间步长为 100s-300s 范围内地埋管流体出口温度随时间的变化情况。结果显示,在时间步长为 300s 时,网格数从 29460 增加至 55920,流体出口温度明显上升,而继续将网格数增加至 91200,流体出口温度平均仅提高 0.3℃。在时间步长方面,当网格数为 55920 个时,对比 100s、200s 和 300s 三种工况,出口温度变化几乎一致。综合考量计算精度与计算资源消耗,本研究中土壤温度场模拟的网格划分间距设为 0.5m,时间步长设为 300s。

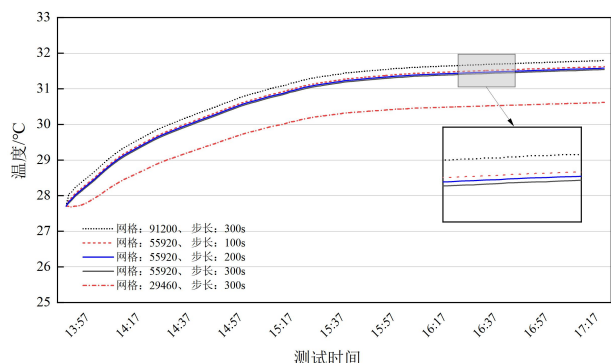


图 3 网格及时间步长无关性检验

Fig.3 Grid and time step independence test

1.6 模型验证

为了验证模型的准确性,本文对模拟得到的出口流体温度与实际工程下的运行数据进行了对比。整个实验在 8 月制冷季进行。在试验阶段,地埋管内流体流速约为 1m/s,流体进口温度约为 34.5℃。在数值模拟中,将水、地埋管、回填材料及土壤的初始温度均设为 17℃,时间步长设定为 60s。模型验证结果如图 4 所示。

如图 4 所示,当测试时间在 15:37 之前,模拟值与实验值的相对误差较大,超过 10%。这是因为模拟初始条件设定为 17℃,此时地埋管内流体和土壤还没有达到热平衡,因此偏差较大。随着计算

进行,模拟值和实验值的相对误差越来越小,最终稳定在 3%以内。这种误差在工程是允许的,所以认为模型是合理的。

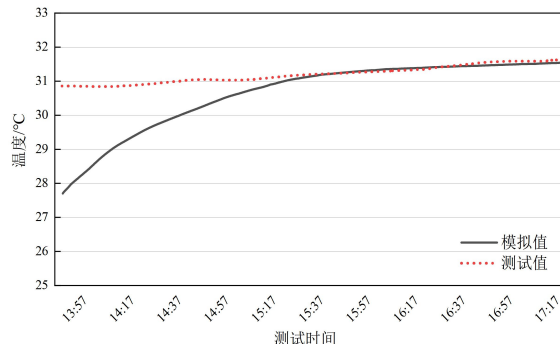


图 4 模型验证

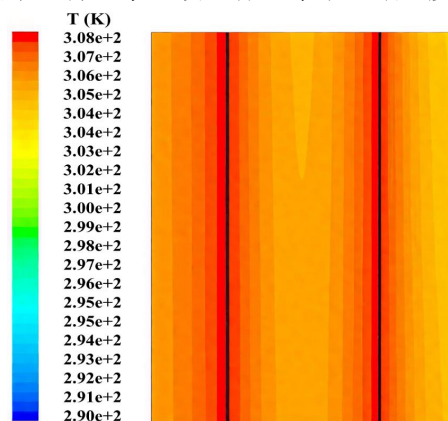
Fig.4 Model validation

2 结果与讨论

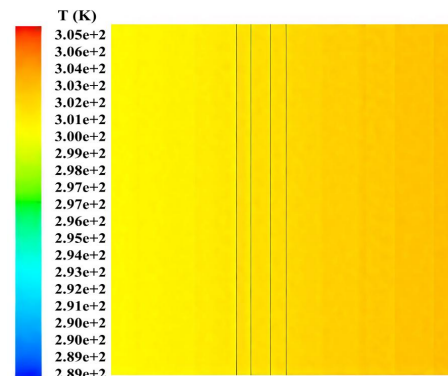
2.1 连续运行模式土壤温度模拟结果分析

2.1.1 连续运行模式下土壤年温度变化

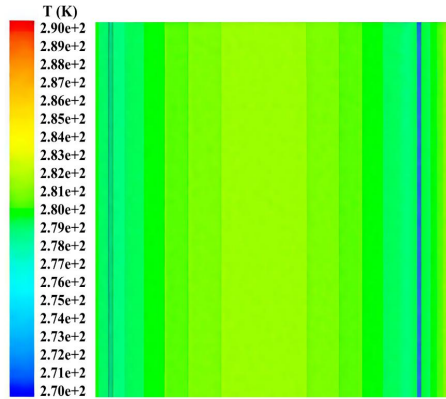
在连续运行模式下,制冷季设定为 5 月 15 日至 9 月 15 日,供暖季为 11 月 15 日至次年 3 月 15 日,均为 120 天。其余时间为土壤温度恢复期。图 5 给出了地源热泵连续运行一年中土壤温度变化。



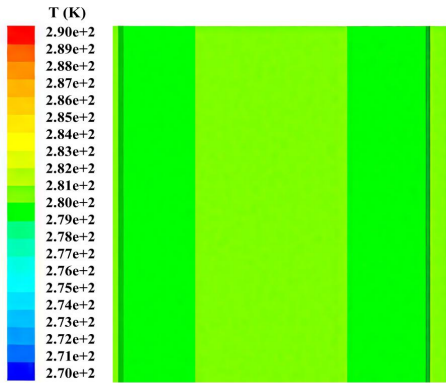
(a) 9 月 15 日



(b) 11 月 14 日



(c) 3月15日



(d) 5月15日

图5 连续运行一年中土壤温度变化

Fig.5 Changes in soil temperature over a year of continuous operation

如图 5 (a) 所示, 在制冷季结束时, 钻孔外侧土壤温度随着与钻孔距离的增加而逐渐降低, 其中, 钻孔周围的土壤温度达到 34.9℃, 接近模型设置的流体入口温度, 这表明地埋管内的流体已经难以继续通过土壤散热。图 5 (b) 展示了土壤恢复期时的土壤温度, 此时钻孔周围的土壤温度相比制冷季降低了 8℃, 降幅明显。

在供暖季, 地埋管换热器不断从周围土壤中吸取热量, 导致土壤温度整体降低。如图 5 (c) 所示, 在供暖季结束时, 两钻孔中间对称点处的土壤温度降至 7℃, 并自该处向换热器方向呈逐渐下降趋势。如图 5 (d) 所示, 经过第二个恢复期后, 土壤各区域温度均有不同程度回升。

2.1.2 土壤深度对土壤温度的影响

本节对不同径向处土壤温度沿土壤深度方向的变化展开研究。将地源热泵连续制冷四个月, 距离钻孔底部 0~90m 深度处的土壤温度如图 6 所示。

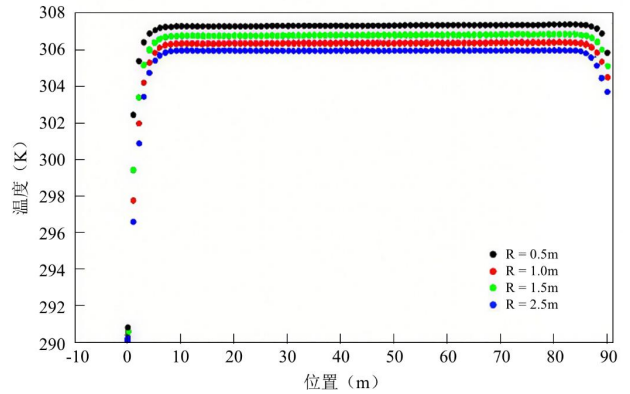


图6 不同径向处土壤温度随土壤深度的变化

Fig.6 Variations in soil temperature with depth at different radial locations

如图 6 所示, 从水平径向分析, 在离地埋管水平距离越小的土壤能够与地埋管充分换热, 因此温度越高。其中, 径向距离为 0.5m 处的土壤比 2.5m 处的土壤温度约高 1.2℃。从深度方向分析, 不同径向处土壤温度随土壤深度的变化趋势大致相同。在距离钻孔底部 0~5m 深度范围内, 土壤温度随着土壤深度的增加而增大。这是由于制冷季环境温度低于换热后的土壤温度, 土壤向环境散热, 温度降低, 随着深度的增加与空气的换热变弱, 温度上升。在距离钻孔底部 5~85m 深度范围内, 土壤温度几乎不随土壤深度的增大发生变化, 当径向距离为 1.0m 时, 深度为 5~85m 的土壤温度仅在 0.3℃ 范围内波动。当深度超过 85m 后, 土壤温度出现回落。两端温度变化受边界条件设置的影响。

2.1.3 地埋管水平距离对土壤温度的影响

根据分析, 本节选择不受上下表面边界条件影响的 60m 深、水平距离钻孔不同位置处的土壤为研究对象, 分析地埋管水平距离对土壤温度的影响。模拟结果如图 7 所示。

如图 7 所示, 在连续运行 20 天时, 水平距离钻孔 0.5m 处的土壤温度上升约 13℃, 远远高于其他四个位置的土壤温度; 土壤温度梯度随着与钻孔径向距离的增加而减小, 这表明距地埋管换热器径向距离越远的土壤受到的影响越小, 这与图 6 的趋势是相同的。水平距离钻孔 0.5m 处的土壤在 60 天时温度达到 32.8℃, 之后温度增幅趋于平缓, 后续 60 天内仅上升 1.2℃; 而 1.5~2.5m 处的温度在整个制冷季内都表现出相对较快的上升趋势。

制冷季于第 120 天结束, 随后进入为期 60 天

的土壤热恢复期。如图 7 所示, 水平距离钻孔 0.5m 处的土壤温度在恢复期 5 天内迅速下降约 1°C, 而水平距离钻孔 1.5m、2.0m 和 2.5m 处的土壤响应则呈现继续逐渐增大后逐渐减小的趋势。分析其原因, 在恢复期开始时, 尽管系统已停止向土壤放热, 但邻近钻孔区域的土壤在运行期间吸收了热量, 其温度仍处于较高状态。这部分热量将以导热方式继续向远处扩散。由于土壤导热能力有限, 距离较远的区域在恢复期前期仍处于热量输入大于散失的状态, 因此温度在最初阶段不降升高。随着时间推移, 当来自上游的余热传递减弱, 同时该区域向更远土壤的散热逐渐占据主导, 温度才开始缓慢下降, 最终与周边区域趋于平衡。热惯性效应在水平距离钻孔 1.5~2m 范围内作用效果明显。

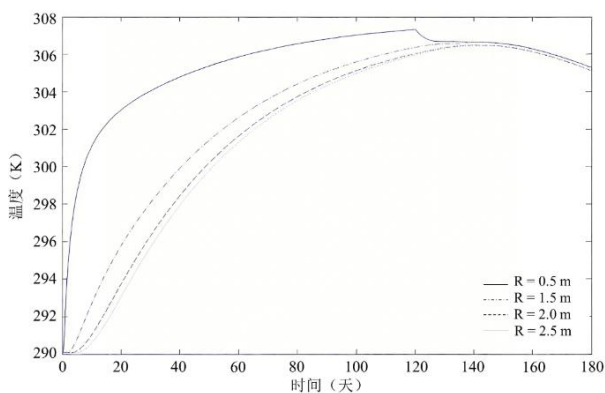


图 7 60m 深不同径向处土壤温度随时间的变化

Fig.7 Changes in soil temperature over time at different radial locations at a depth of 60 meters

2.1.4 下降管侧与上升管侧流体对土壤温度的影响

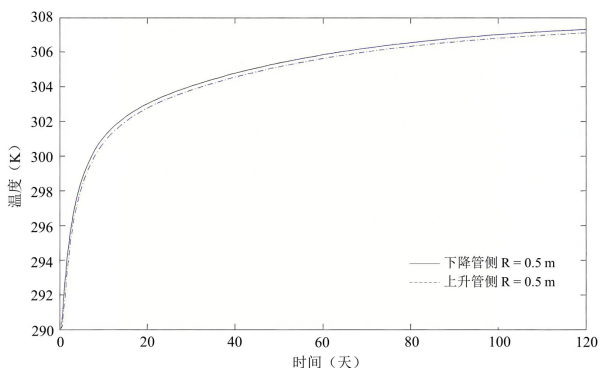


图 8 60m 深下降管侧与上升管侧附近土壤温度随时间的变化

Fig.8 Changes in soil temperature over time near the downpipe and uppipe sides at a depth of 60 m

高温流体在 U 型管中完成一整个换热流程。图 8 给出了 60m 深, U 型管下降管侧与上升管侧水平距离钻孔 0.5m 处土壤温度随时间的变化。如图 8 所示, 下降管侧和上升管侧周围的土壤温度随时间变化趋势相同, 均在 0~15 天迅速上升, 第 15 天之后上升趋势逐渐变缓。同时, 由于管内热水在流动过程中不断向周围土壤放热, 温度下降, 使得地埋管下降管侧的水温高于上升管侧的水温, 因此下降管侧周围土壤温度受到的影响要大于上升管侧, 这种差距随着时间推移逐渐扩大, 最大温度差约为 0.3°C。

2.1.5 土壤导热系数对土壤温度的影响

土壤的导热系数是影响其温度场分布的关键因素。为分析该参数对土壤温度变化的具体影响, 本节在固定其他边界条件的前提下, 对不同导热系数下的工况进行了模拟。图 9 给出了不同土壤导热系数下 60m 深, 水平距离钻孔 1m 处土壤温度随时间的变化。

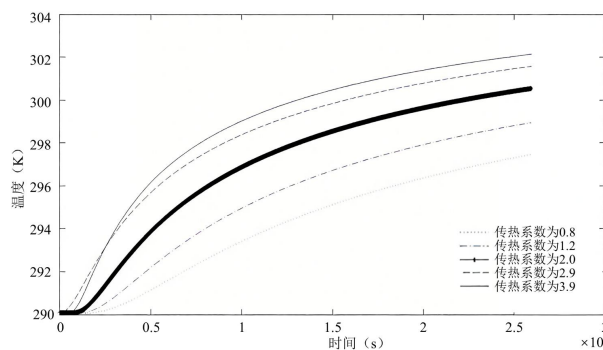


图 9 不同土壤导热系数时 60m 深水平距离钻孔 1m 处土壤温度随时间的变化

Fig.9 Changes in soil temperature over time at a distance of 1 m from the borehole at a depth of 60 m for different soil thermal conductivities

如图 9 所示, 在其他条件相同的情况下, 各种传热系数下的土壤温度均随着土壤的传热系数的增加而升高。但是传热系数的变化对温度的影响不同, 当传热系数从 0.8W/(m·°C) 逐步提高至 2.9W/(m·°C) 时, 同一时刻土壤温度上升接近 2°C; 而当其进一步增至 3.9W/(m·°C) 时, 升温幅度仅为约 0.8°C。由此可见, 土壤传热系数对其导热能力的影响呈非线性特征, 随着系数增大, 温度提升效果逐渐趋于饱和。

2.2 间歇运行模式土壤温度模拟结果分析

本节分别按照启停比为 1:1 和 1:2 两种运行方式模拟了不同运行时间内土壤温度变化情况，图 10 给出了启停比 1:1 模式下制冷季结束后土壤温度分布。图 11 给出了启停比 1:2 模式下运行 14 天和运行 30 天后的土壤温度分布。

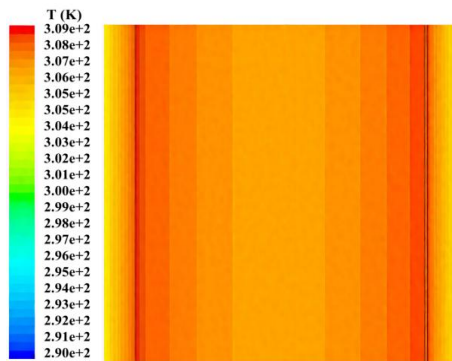
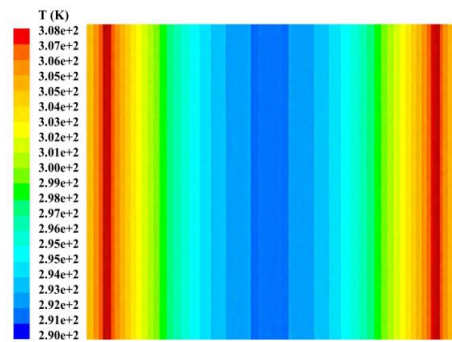
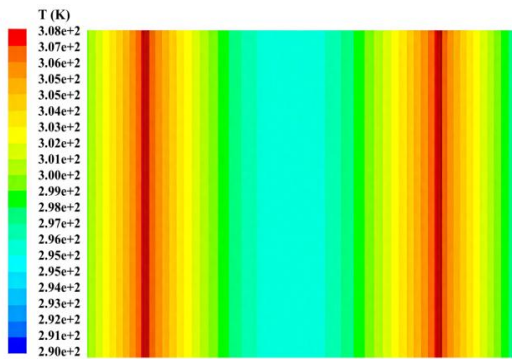


图 10 启停比 1:1 模式下制冷季结束后土壤温度分布
Fig.10 Soil temperature distribution at the end of the cooling season in 1:1 on-off mode



(a) 运行 14 天后土壤温度分布



(b) 运行 30 天后土壤温度分布

图 11 启停比 1:2 模式下土壤温度分布

Fig.11 Soil temperature distribution in 1:2 on-off mode

如图 5、图 10 和图 11 所示，两种间歇运行模式下土壤温度的分布规律与连续运行时基本一致，

均表现为钻孔附近温度最高，并随距离增大逐渐降低。但不同的是，间歇运行工况下的土壤温度梯度较连续运行时更为平缓，且在恢复期结束后显示出更良好的温度恢复效果。

将连续运行模式、启停比为 1:1 及启停比为 1:2 的间歇运行模式 60m 深处水平距离钻孔 0.5m 处的土壤温度进行对比，模拟结果如图 12 所示。

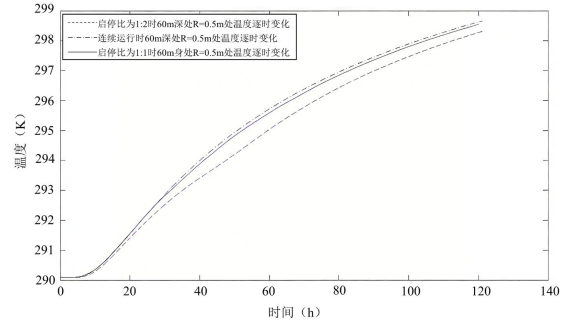


图 12 60m 深水平距离钻孔 0.5m 处土壤温度逐时变化
Fig.12 Hourly changes in soil temperature at a depth of 0.5 m in a horizontal borehole 60 m deep

如图 12 所示，三种运行模式下土壤温度均随时间推移而升高，连续运行模式与启停比为 1:1 的间歇运行模式下的土壤温度较为接近，温差较小，而这两种模式与启停比为 1:2 的运行模式之间则出现较大温差，最大达到 1℃。因此，可以认为采用间歇运行方式能够有效减缓土壤温升，且停机恢复时间越长，越有利于地埋管换热器的长期性能稳定。

3 结论

本文以地源热泵双 U 型地埋管及周边土壤为研究对象，建立二维非稳态数值模型，并进行了实验验证。最后利用该模型对地源热泵的连续运行模式下土壤深度、地埋管水平距离、进水侧与出水侧流体、土壤导热系数对土壤温度的影响，并对连续运行模式、启停比为 1:1 和 1:2 的间歇运行模式下土壤温度的年变化趋势进行了对比研究，主要得出以下结论：

(1) 在不受地表气候影响的深层土壤中，温度随深度变化较小。土壤温度随导热系数增大而升高，并在导热系数超过 2.9W/(m·℃)后逐渐趋于稳定。

(2) 水平方向上，距钻孔不同距离处的土壤对地埋管换热响应的敏感度不同。近孔区域土壤受

热干扰强烈,在恢复阶段温度回升较快;而远孔区域响应迟缓,因热惯性作用在恢复期内表现出明显滞后,该效应在水平距离钻孔1.5~2 m范围内尤为显著。

(3) 在一个制冷季的运行中,间歇运行下的土壤温度与连续运行模式一致,但温度梯度更为平缓,且在恢复期结束后具有更好的温度恢复效果,较长的恢复时间更有利于地埋管换热器的长期性能稳定。

参考文献:

- [1] 中国建筑节能协会,重庆大学城乡建设与发展研究院. 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J]. 建筑,2024,(2):46-59.
- [2] 吉彦彬,武昌. 地源热泵与传统供热模式的节能性比较分析[J]. 绿色建造与智能建筑,2025,(7):28-30.
- [3] International energy agency. The future of geothermal energy[R]. 2024.
- [4] 国家发展改革委. 推动热泵行业高质量发展行动方案[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202504/content_7016926.htm.
- [5] 吴暄,刘卫,路子业,等. 土壤蓄热-放热过程中地埋管周围土壤温度特性模拟[J]. 农业工程学报,2017,33(3): 204-213.
- [6] 张华,郝术仁,刘丽虹,等. 地埋管地源热泵系统长期运行对换热区域地温场影响分析[J]. 地质与资源, 2025,34(2):246-254.
- [7] 张琪,刘铮. 基于 Feflow 数值模拟的地源热泵地埋管管群长期运行特性研究[J]. 建筑节能(中英文),2025,53(2): 48-53.
- [8] 吴暄,路子业,刘卫,等. 单/双工况运行下地埋管周围土壤温度特性实验研究[J]. 太阳能学报,2019,40(6):1780-1789.
- [9] 成雷振,王海敏,王仁霞,等. 地源热泵系统长期运行土壤温度变化特征分析[J]. 节能,2025,44(3):38-40.
- [10] 刘卫,徐博荣,刘鹏,等. 竖直 a 双 U 型地埋管传热特性研究[J]. 建筑技术,2021,52(11):1388-1391.
- [11] 张永,缪小平,朱正亮. 地源热泵垂直埋管周围土壤温度场数值模拟及分析[J]. 洁净与空调技术,2010,(4):16-19.
- [12] M. Piechowski. Heat and mass transfer model of a ground heat exchanger: Validation and sensitivity analysis[J]. International Journal of Energy Reservation, 1998,22(11):965-979.
- [13] 赵学端,廖其奠. 粘性流体力学[M]. 北京:机械工业出版社出版,1993.
- [14] 高峰,伍小亭. 天津市肿瘤医院肿瘤科研中心工程暖通空调系统方案分析[J]. 暖通空调,2009,39(5):112-117.