

储能测试与评价



基于 DST 模型的埋管蓄热系统土壤参数反演方法及应用

王茜如, 冯国会, 黄凯良, 戴晓欣, 刘瞧宇, 卢伟东
(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

摘要: 准确获取土壤热物性参数是埋管蓄热 (BTES) 系统进行可靠设计与优化的基础。为解决传统热响应测试 (TRT) 要求输入恒定、无法准确估计体积热容等问题, 提出了一种基于管道地面蓄热模型 (DST 模型) 和实测运行数据的 BTES 蓄热系统实际性能反演方法, 使用基于惯性权值法的粒子群优化算法 (PSOIM), 将归一化综合均方根误差 (RMSE) 作为优化目标, 反演土壤初始温度、土壤热导率和土壤体积热容。运用该反演方法, 日均出水温度的预测误差从 1.28% 降低至 0.39%; 土壤平均温度的预测误差从 5.16% 显著降低至 0.27%。综合 RMSE 从 2.00℃ 降至 0.80℃。对验证期的独立评估进一步证实了反演模型的优越性。相较于初始参数, 反演参数预测的出水温度平均相对误差降低了 54.2%, 土壤平均温度的相对误差全程波动小于 0.5%, 平均相对误差为 0.24%。反演参数预测的综合 RMSE 为 0.58℃, 其中 $RMSE_{fluid}$ 为 0.25℃, $RMSE_{soil}$ 为 0.05℃, 预测精度提升了 71%。与采用 TRT 获得的初始参数工况相比, 优化后的反演参数使模型对系统实际性能的预测精度显著提升。本研究为利用实测数据精准反演土壤参数并有效预测系统实际性能提供了一种高效可靠的方法。

关键词: 埋管换热器; 埋管蓄热; 反演模型; 性能预测; 动态仿真

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.1167

中图分类号: TK 529

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 06-2408-10

Soil parameter inversion method and application of borehole thermal energy storage system based on DST model

WANG Xiru, FENG Guohui, HUANG Kaifang, DAI Xiaoxin, LIU Qiaoyu, LU Weidong
(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, Liaoning, China)

Abstract: Borehole thermal energy storage (BTES) technology has been identified as a key solution to the mismatch between waste heat generation and utilization. Accurate determination of the thermal physical parameters of soil is paramount for the reliable design and optimization of the BTES system. To address the limitations of the conventional thermal response test (TRT), such as the requirement for constant input and the inability to accurately estimate the volumetric heat capacity, a method for inverting the actual performance of the BTES system based on the duct ground heat storage model and measured operation data is proposed. The particle swarm optimization algorithm based on the inertia weight method was employed to minimize the normalized comprehensive root mean square error (RMSE) to invert the initial soil temperature, thermal conductivity, and volumetric heat capacity. An

收稿日期: 2025-12-29; 修改稿日期: 2026-01-21。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划资助 (2022YFC3802400)。

第一作者: 王茜如 (1996—), 女, 博士研究生, 主要从事埋管跨季节储热研究, E-mail: wangxiru1129@163.com; 通信作者: 冯国会, 教授, 主要从事相变储能、可再生能源利用研究, E-mail: fengguohui888@163.com。

引用本文: 王茜如, 冯国会, 黄凯良, 等. 基于 DST 模型的埋管蓄热系统土壤参数反演方法及应用[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(6): 2408-2417.

Citation: WANG Xiru, FENG Guohui, HUANG Kaifang, et al. Soil parameter inversion method and application of borehole thermal energy storage system based on DST model[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(6): 2408-2417.

experimental platform was established for the cross-seasonal heat storage and heating system of buried pipes. Following a three-month heat storage period, an increase in the average soil temperature was observed. The heat storage body of the buried pipes exhibited an increase from 12.81°C to 16.09°C. The average daily heat storage capacity was determined to be 344.99 kW·h, and the total heat storage capacity was found to be 32.08 MW·h. The application of the proposed inversion method reduced the prediction error of the average daily effluent temperature from 1.28% to 0.39%. The prediction error of the average soil temperature decreased significantly from 5.16% to 0.27%. Consequently, the comprehensive RMSE decreased from 2.00°C to 0.80°C. An independent assessment of the validation period further confirmed the superiority of the proposed inversion model. Compared with the initial parameters, the average relative error of the discharge temperature predicted by the inverted parameters decreased by 54.2%. The relative error of the average soil temperature fluctuated below 0.5% throughout the process, with an average relative error of 0.24%. The comprehensive RMSE for the inverted parameter predictions was 0.58°C, comprising $RMSE_{fluid}$ and $RMSE_{soil}$ of 0.25°C and 0.05°C, respectively, representing a 71% improvement in prediction accuracy. A comparison of the initial parameter conditions obtained using the TRT with the optimized inverted parameters reveals a significant enhancement in the predictive accuracy of the model for the actual system performance. This study proposes an efficient and reliable method for precisely inverting soil parameters using measured data and effectively predicting the actual system performance.

Keywords: buried pipe heat exchanger; buried pipe thermal storage; inversion model; performance prediction; dynamic simulation

太阳能和余热是良好的零碳热源,有助于“双碳”目标早日实现^[1]。然而它们的产生和利用之间存在时间不匹配的问题^[2-3]。跨季节蓄热技术在夏季储存热量以供冬季提取,可以有效解决这一难题^[4]。跨季节蓄热主要包括罐式蓄热、坑式蓄热、含水层蓄热和埋管蓄热^[5]。其中埋管蓄热也称钻孔热能存储(borehole thermal energy storage, BTES),因环境友好性和技术成熟度而得到广泛应用^[6-8]。在非采暖季节,埋管换热器将收集的热量储存在周围的土壤或岩石中,BTES系统起到地下热电池的作用。在采暖季节,从土壤中提取热量,使用BTES系统与热泵一起为建筑物提供热量,从而实现热量的跨季节储存。

在前期的研究中,土壤热导率、热容等参数已被证明是影响BTES系统性能的关键参数,应作为系统优化的首要变量^[9]。因此,准确获取这些参数是进行可靠设计与优化的基础。目前,现场热响应测试(thermal response test, TRT)是确定土壤热物性参数和土壤温度的主要工程方法。其原理是

通过对埋管内循环流体以恒定速率连续加热数十小时,监测埋管入口和出口流体的流速和温度,基于线热源模型反演土壤热特性^[10]。为了克服现场测试成本高、条件可控性差的不足,可以使用数值模型进行虚拟TRT。例如,Wagner等^[11]建立了埋管换热器三维有限元模型生成模拟热响应参数,根据导热系数和热阻的识别误差确定了初始土壤温度梯度和热扩散系数对识别结果的影响。Han等^[12]通过三维模型与沙箱实验对比,评估了无限线热源和柱热源模型在不同真实土壤热物性下的识别精度。尽管传统的TRT在不断改进,由于土壤热物性参数的真实值未知,无法准确评估识别精度^[13]。另外,TRT可以在满足一定条件时更准确地估计土壤热导率和钻孔阻力,但它无法准确估计对系统动态性能至关重要的土壤体积热容^[14]。

参数估计方法同样可以反演土壤热物性参数,方法利用优化算法不断改变辨识模型中的未知参数,使实测温度与模型温度之间的误差最小化。其优点是可以与任意识别模型相结合,同时识别多个

参数, 并且不局限于恒定的输入功率, 可以使用运行数据直接进行反演。管道地面蓄热 (duct ground heat storage model, DST) 模型作为混合模型兼具精度与计算速度, Witte^[15]首次采用 DST 模型和 Hooke-Jeeves 优化算法估计土壤和回填材料的热导率。张长兴等^[16]同样基于 DST 模型提出了一种模拟优化方法来确定土壤的最佳导热系数和热容。Zhang 等^[17]采用已知热阻的 type557b 型组件进行模拟, 并对多种优化算法的反演结果进行了比较。Guo 等^[18]使用流体出口温度的误差作为优化目标, 估计了土壤导热系数和体积热容。

上述文献大多使用广义模式搜索算法, 更易陷入局部最优, 且仅使用流体出口温度误差作为优化目标, 目标函数中未考虑土壤温度。然而, 土壤温度正是反映土壤热容贡献的关键参数。因此, 本工作提出了一种计算便捷的土壤热物性参数反演方法, 使用基于惯性权值法的粒子群优化算法 (particle swarm optimization with inertia weight method, PSOIWM) 最小化优化目标, 使用土壤平均温度和流体温度归一化后的综合均方根误差 (root mean square error, RMSE) 作为目标函数, 同时考虑土壤温度的精度和流体温度的精度。通过参数反演方法, 反演出土壤初始温度、土壤热导率和土壤体积热容, 从而获得对系统实际性能更强大的预测能力。

1 正向模型的反演

1.1 正向模型(DST模型)

DST 模型由瑞典隆德大学的 Hellstrom^[19]提出, 用于模拟由竖直地埋管换热器组成的地下热存储区。该模型将钻孔区域分解成全局问题、局部问题和稳态问题, 前两个问题采用二维轴向-径向网格通过隐式有限差分法数值求解; 稳态问题采用解析法求解, 在时间和空间上应用叠加原理计算节点的实际温度, 被应用到 TRNSYS (transient system simulation program) 瞬态模拟软件中。

对于地埋管换热器与周围岩土耦合换热问题, DST 模型把整个计算区域划分为热存储区和外围土壤区。假定所有钻孔在整个储热体内是均匀分布的, 每个钻孔径向热响应面积都相等。图 1 为计算区域内钻孔的截面图, 每个钻孔的热响应面积为:

$$A_{sr} = \frac{\sqrt{3}}{2} B^2 = \pi r_{sr}^2 \quad (1)$$

式中, A_{sr} 为单个钻孔瞬态热流影响的存储区域, m^2 ; r_{sr} 为单个钻孔瞬态热流影响的半径, m ; r_{sv} 为热存储区半径, m ; r_w 为远端半径, m ; B 为相邻钻孔间距, m 。

任意相邻的两个钻孔的间距相等, 每个钻孔的热响应半径 r_{sr} 表示为:

$$r_{sr} = 0.525B \quad (2)$$

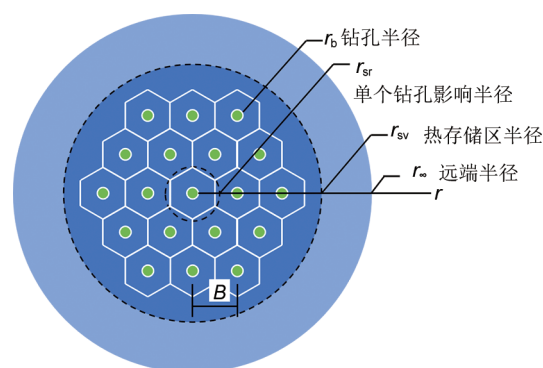


图1 DST模型区域划分示意图

Fig. 1 Schematic diagram of DST region division

1.2 反演方法

地埋管换热器正向模型需要设定相当多的参数, 包括地埋管群的几何布置、流体热物性、回填材料及土壤的热物性等。其中, 土壤初始温度、体积热容和热导率是主要影响预测结果的几个参数, 通常由岩土热物性现场测试确定。但由于引言中所述原因, 施工前期的热物性测试存在很大的不确定性, 其结果往往不能可靠地表征地埋管群整体的实际运行性能。另外, 实际工程为对比实验考虑, 其中 2 口蓄热井的深度特殊, 因此井深也作为优化参数。选取土壤热导率、土壤体积热容、土壤初始温度和蓄热井深度作为待拟合参数, 将其他参数作为已知参数, 根据实际工程数据和设计资料确定。

研究使用的参数反演方法如图 2 所示。将实际项目长期测量的入口温度和流量作为 DST 模型的输入, 通过对土壤参数的连续迭代修正, 即用不同的 k 、 c 、 t 和 h 组合反复调用 BTES 系统的 TRNSYS 模型, 确定了使目标函数 RMSE 最小的土壤参数组合。该过程由 Genopt 执行^[20], 采用 PSOIWM 算法, 其中 k 、 c 、 t 和 h 分别为土壤的热导率、体积热容、初始温度和井深, 初始值、上下限范围和优化步长见表 1。

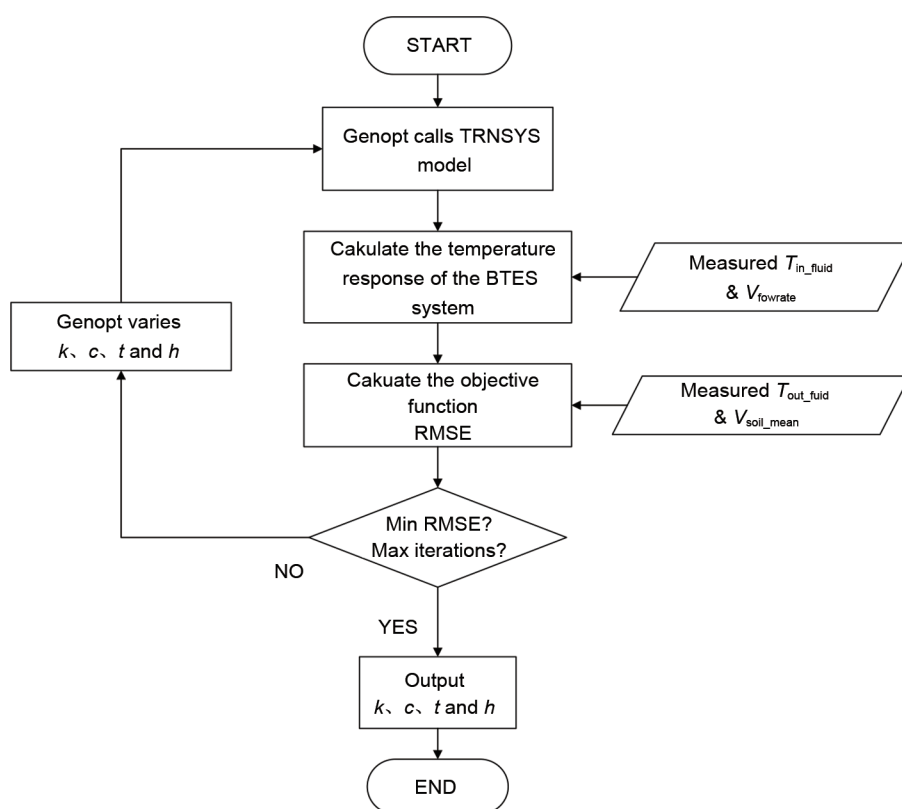


图2 土壤热物性参数反演方法流程图

Fig. 2 Inversion method of soil thermal physical property parameters

表1 优化参数范围及步长

Table 1 The range and step size of the optimized parameters

参数	初始值	下限	上限	步长	单位
c	2500	1000	4000	10	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
h	88.57	80	120	0.1	m
k	6.63	1.8	13.68	0.05	$\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$
t	13.08	10	13.5	0.05	$^{\circ}\text{C}$

目标函数RMSE由埋管换热器的实测和模拟土壤温度与出水温度之间的偏差决定。同时考虑流体和土壤温度的综合误差，并进行归一化，具体计算可以表示为：

$$\text{RMSE} = \frac{\text{RMSE}_{\text{fluid}}}{\text{RMSE}_{\text{fluid_initial}}} + \frac{\text{RMSE}_{\text{soil}}}{\text{RMSE}_{\text{soil_initial}}} \quad (3)$$

$$\text{RMSE}_{\text{fluid}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{N_t} \frac{1}{N_t} (T_{\text{out_fluid_mean}}^h - T_{\text{out_fluid_sim}}^h)^2} \quad (4)$$

$$\text{RMSE}_{\text{soil}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_{\text{probe}}} \frac{1}{N_t \times N_{\text{probe}}} [T_{\text{soil_mean}(i)}^h - T_{\text{soil_sim}(i)}^h]^2} \quad (5)$$

其中 $\text{RMSE}_{\text{fluid}}$ 和 $\text{RMSE}_{\text{soil}}$ 分别为埋管流体出口温度和土壤平均温度的均方根误差； $\text{RMSE}_{\text{fluid_initial}}$ 和 $\text{RMSE}_{\text{soil_initial}}$ 分别为开始优化迭代前，手动运

行的流体和土壤温度的初始误差。 N_t 为标定期内测量数据集的小时数； N_{probe} 为温度传感器测点数量； $T_{\text{out_fluid_mean}}$ 和 $T_{\text{out_fluid_sim}}$ 分别为流体出口温度的实测值和模拟值； $T_{\text{soil_mean}}$ 和 $T_{\text{soil_sim}}$ 分别为土壤平均温度的实测值和模拟值。

2 实际项目概况

2.1 项目概况

本研究在沈阳建筑大学中德节能示范建筑东配楼搭建了埋管跨季节蓄热供热系统实验平台。使用太阳能耦合地源热泵系统为建筑进行供暖，原理图如图3所示。图4为设备布置图。跨季节蓄热供热系统由真空管太阳能集热器、蓄热水箱、BTES系统、热泵机组、电加热器等组成，选型设计参数如表2所示。系统在非采暖季使用集热器收集太阳能，使用电加热器模拟余热资源的产生，两种热源共同向水箱蓄热，水箱再向埋管跨季节储热体中蓄热。采暖季时埋管作为地源热泵的低位热源，提取地下土壤中的热量，热泵机组和太阳能集热器共同向水箱供热，水箱再向建筑室内辐射供暖末端供热。

建设了 8 口蓄热钻井，总体积约 9700 m³。BTES 系统的钻井布局及连接设计如图 5 所示，参数信息见表 3。井#c 为 40 m，井#1、#2、#4、#5、#7 为 80 m、井#3 为 100 m、井#6 为 120 m。井#a

为测温井，深度 40 m。地埋管蓄热井和测温井的回填直径均为 0.24 m。总体施工方案为正六边形等间距布局，每口井包含两个 U 型管，地下埋管管长约 2800 m。

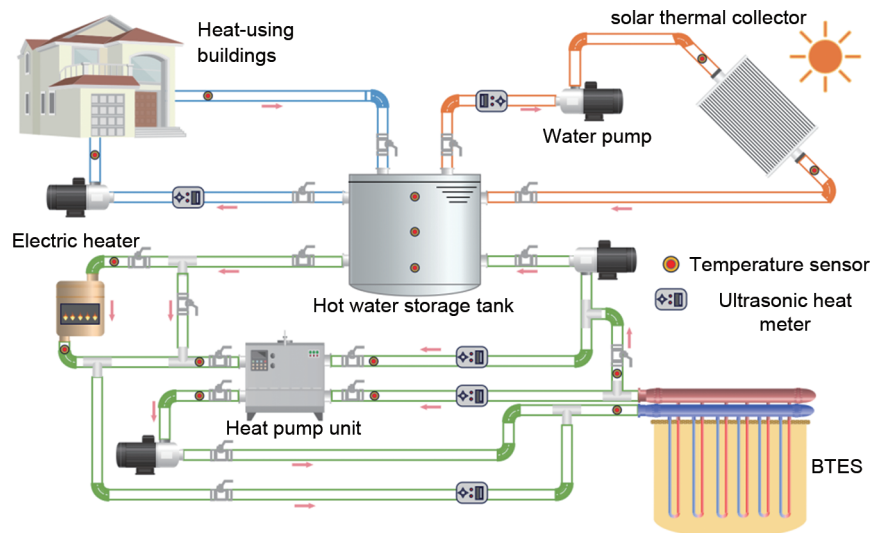


图 3 跨季节蓄热供热系统原理图
Fig. 3 The principle of the cross-seasonal heat storage heating system



图 4 设备布置图
Fig. 4 Layout of the equipment

表 2 主要设备参数

设备	参数
#1 热泵机组	GSHP-13, 名义制热量 15 kW, 制热额定功率 4.5 kW, 热源侧水流量 3.1 m ³ /h, 使用侧水流量 2.58 m ³ /h
#2 热泵机组	GSHP-20, 名义制热量 21 kW, 制热额定功率 6 kW, 热源侧水流量 2.1 m ³ /h, 使用侧水流量 3.44 m ³ /h
蓄热水箱	体积 1.5 m ³
太阳能集热器	真空管型, 总面积 42 m ²
电加热器	额定功率 10 kW

为了方便实验操作，BTES 实验系统在分集水器处特设检修井，在每根支管上均设置阀门，可以实现单根地埋管的独立控制，每一口钻井均可以切

换单 U 或双 U 使用。分集水器处每根支管上设置热量计，用于各地埋管钻井进出口流量、温度数据监测。为了监测钻井内土壤温度，使用 RS485 型土

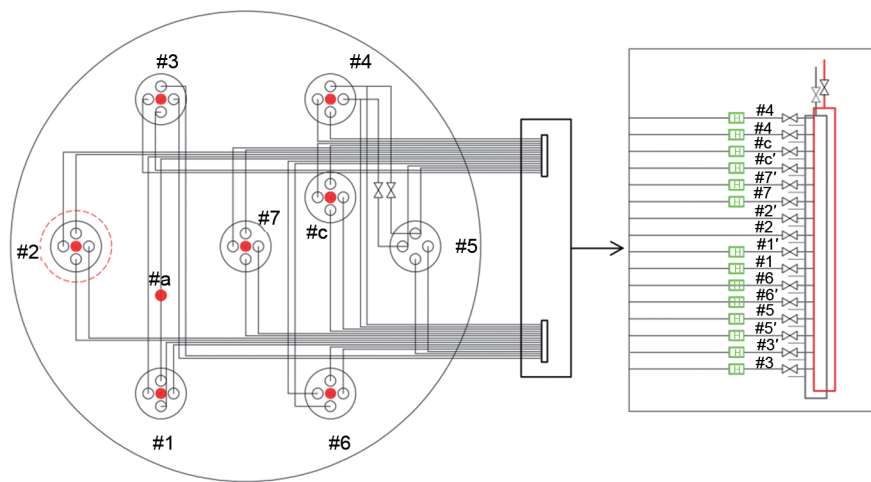


图 5 钻井布局及连接设计图
Fig. 5 Borehole layout and connection design

表 3 钻井参数信息		
Table 3 Borehole properties		
类别	参数	参数值
钻孔	深度	40、80、100、120 m
	直径	240 mm
	间距	4 m
U 型管	U 型管数量	2
	管材	PERT-II型
	内径	26 mm
	外径	32 mm
回填材料	组成	中粗砂+膨润土
	热导率	1.73 W/(m·K)

壤温度传感器实时监测土壤温度变化情况。与此同时，使用 RS485 型土壤温度水分变送器监测土壤温度和湿度变化情况，该温度数值可以与特种电缆传感器进行比对验证。传感器具体点位布置如图 6 所示，两种传感器的实物图如图 7 所示。同样，室内机房各供回水环路均设置了热量表和温度传感器，传感器点位如图 3 所示。室内机房和室外 BTES 系统分别设置控制柜，用于调节水泵、设备等的启停和云平台的数据监测。系统平台数据采集设备均使用 485 通信协议，实现模块与上位机之间的联系，建设了云平台，实现数据的自动化采集和实时监测，每隔 1 分钟采集一次数据。

2.2 实验误差分析

在本次实验测试中，相对误差作为评估测试结果可靠性的指标，其计算式如下^[21]：

$$\delta = \frac{\varphi_x M_i}{x_i} \times 100\%$$

(6)

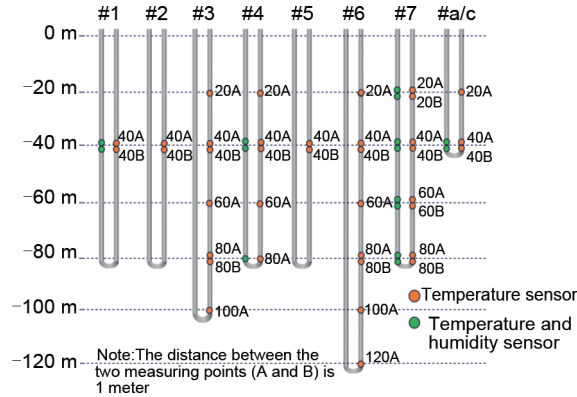


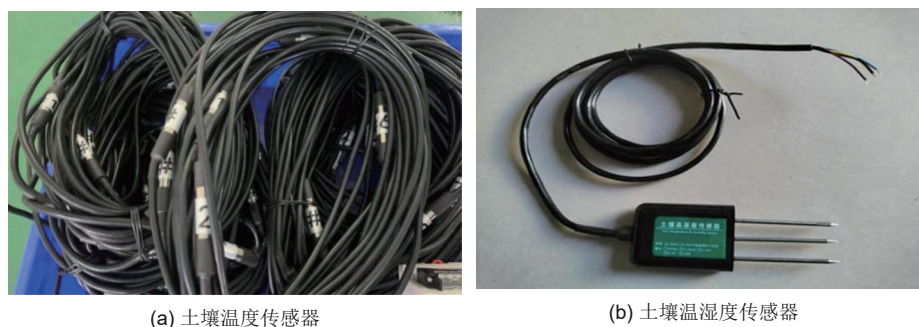
图 6 地下传感器测点布置
Fig. 6 Layout of underground sensor measurement points

其中 δ 为最大相对误差， φ_x 为仪器的精度， M_i 为测试仪器的最大测量范围值， x_i 是最小测量值。研究中观察到的实验误差主要归因于所使用测量仪器的不准确性，即超声波热量计、土壤温度传感器以及土壤温湿度传感器。相应的最大相对误差列于表 4 中。根据表 4 中列出的误差值，可以确定本次实验中测量的数据误差符合相关标准。

2.3 运行数据

实验平台使用太阳能集热器和电加热器共同向地埋管蓄热体进行蓄热，蓄热时间为 2025 年 6 月 27 日—11 月 24 日，将 5 个月的蓄热周期划分为标定期和验证期。标定期为 6 月 27 日—9 月 27 日，使用实际运行数据和反演方法反演地埋管土壤参数；验证期为 9 月 28 日—11 月 24 日，验证优化参数后的工况能否准确预测实际运行情况。

使用中心区井 a 的 4 个测点温度的平均值作为



(a) 土壤温度传感器

(b) 土壤温湿度传感器

图 7 两种传感器实物图

Fig. 7 Two kinds of sensors

表 4 实验误差

Table 4 Experimental error

仪器	测量量	测量范围	测量误差	测量最小值	最大相对误差
超声波热量计	流量	0.2~20 m ³ /h	—	—	1%
超声波热量计	温度	4~95℃	—	—	1%
土壤温度传感器	温度	-50~100℃	±0.5℃	9.37℃	8%
土壤温湿度传感器	温度	-40~80℃	±0.5℃	9.7℃	6.19%
土壤温湿度传感器	湿度	0~100%	±2%	54.32%	3.68%

土壤平均温度, 标定期的土壤温度变化情况如图 8 所示。由于传感器类型和测点位置的不同, 以及施工过程中传感器径向位置的偏移, 4 个测点的温度存在一定差异, 最大差异为 6.20%。经过 3 个月的蓄热, 各测点温度均稳定上升, 蓄热体土壤平均温度持续上升, 温度由最初的 12.81℃ 提高到 16.09℃。

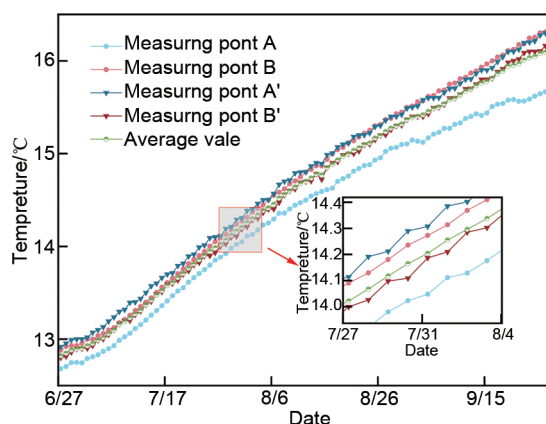


图 8 标定期土壤温度变化

Fig. 8 Soil temperature during calibration period

统计每日蓄热量情况如图 9 所示。首日蓄热在下午开始, 因此 6 月 27 日蓄热量为 139.84 kWh, 8 月 16 日由于停电, 蓄热量为 131.34 kWh。其他时

间的蓄热量与太阳辐照度有关, 最低为 8 月 28 日的 267.47 kWh, 当天为强降雨天气, 太阳辐照量仅为 0.71 kWh/(m²·d), 最高为 7 月 22 日的 417.43 kWh, 当天的太阳辐照量为 6.57 kWh/(m²·d)。标定期平均每日蓄热量为 344.99 kWh, 3 个月的总蓄热量为 32.08 MWh。

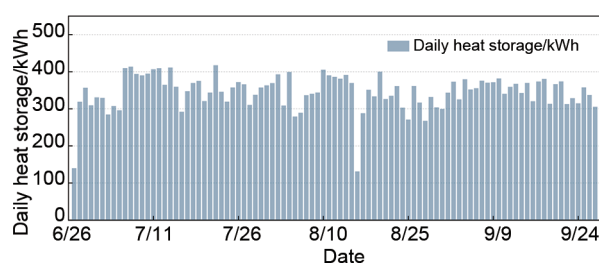


图 9 标定期每日蓄热量

Fig. 9 Daily heat storage during calibration period

3 反演结果与实际性能预测

3.1 土壤参数反演结果

使用 TRT 获得的初始参数值运行模型, 得到流体温度的初始均方根误差 $RMSE_{fluid_initial}$ 为 0.41℃, 土壤平均温度的初始均方根误差 $RMSE_{soil_initial}$ 为 0.72℃, 初始综合均方根误差即优化目标的起点为 2.00℃。使用上述方法调用 Genopt 进行优化, 使用 PSOIWM 算法, 粒子数为 40, 迭代数为 60, 得到最小化目标函数的参数优化结果见表 5。井深的初始值为各钻井深度的算术平均值, 优化结果说明深度不同的 2 口钻井对整体的影响不大。土壤温度初始值按照热响应测试方法, 通常使用静置一段时间的埋管进出口温度的均值, 由于标定期前进行过热响应测试和短期对比实验, 测得的土壤初始温度偏高。土壤热导率初始值是各钻井热响应测试的

综合结果, 体积热容则是根据经验及地下测得含水率估算得出, 优化结果说明综合了地下水和其他复杂影响后土壤实际热导率和体积热容数值更高。

表5 参数优化结果

Table 5 Parameter optimization results			
优化参数	优化前初始值	优化后参数值	单位
c	2500	3331.59	$\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$
h	88.57	81.72	m
k	6.63	7.75	$\text{kJ}/(\text{h} \cdot \text{m} \cdot \text{K})$
t	13.08	12.57	$^{\circ}\text{C}$

使用优化后(反演)参数值进行模拟, 对比标定期的出水温度, 包含实测工况、初始参数模拟工况和反演参数工况。各工况日均出水温度和进水温度如图10所示, 观察到初始参数工况在运行初期与实测数据更加契合, 之后逐渐偏离实际运行, 这是因为初始参数的土壤热导率是由几组周期数天的热响应测试得到的, 短期拟合较好, 在后期高估了土壤出水温度。初始参数工况的日均出水温度与实测温度的最大误差为2.61%, 出现在8月16日, 最小误差为0.24%, 出现在6月29日, 平均误差为1.28%。反演参数工况的日均出水温度与实测温度的最大误差为2.15%, 出现在7月3日, 最小误差为0%, 出现在8月3日, 平均误差为0.39%。

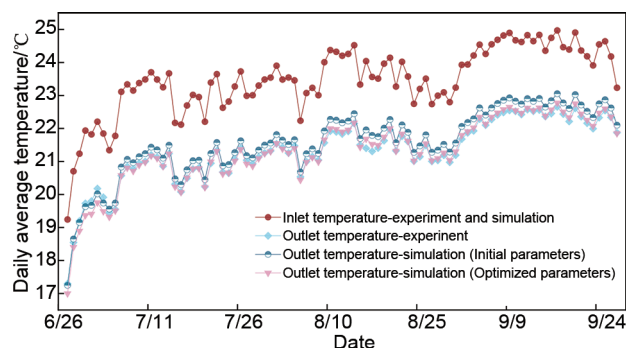


图10 标定期日均进水温度和出水温度

Fig.10 Average daily inlet water temperature and outlet water temperature during calibration period

图11为标定期土壤平均温度变化情况和RMSE计算情况。初始参数工况的土壤平均温度与实测温度的最大误差为5.66%, 出现在9月17日, 最小误差为2.26%, 出现在6月27日(运行首日), 平均误差为5.16%。反演参数工况的土壤平均温度与实测温度的最大误差为1.74%, 出现在6月27日, 最小误差为0.01%, 出现在7月6日和9月4

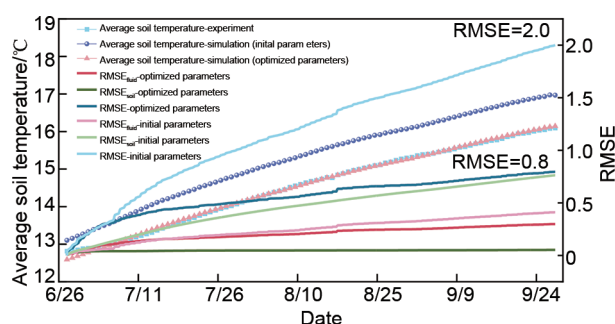


图11 标定期土壤平均温度变化和RMSE计算

Fig. 11 Soil average temperature variation and RMSE calculation during calibration period

日, 平均误差为0.27%。经过优化, RMSE从 2.00°C 降至 0.80°C , $\text{RMSE}_{\text{fluid}}$ 从 0.41°C 降至 0.30°C , $\text{RMSE}_{\text{soil}}$ 从 0.76°C 降至 0.05°C 。

3.2 反演模型的预测

为了验证反演参数的准确性及对运行数据的预测能力, 使用2025年9月27日14:00—11月24日11:00的实测运行结果作为验证期数据, 验证反演参数对地埋管出水温度和土壤平均温度的预测情况。在标定期运行结束后, 使用反演参数继续预测验证期的地埋管出水温度和土壤平均温度变化。进行了近2个月的验证期模拟, 选择10月15日—10月22日作为典型周展示出水温度对比情况, 验证期典型周的逐时地埋管出水温度如图12所示。典型周涵盖了太阳能辐照度较低和较高的日期, 进水温度、出水温度与太阳能辐照度变化趋势一致。模型在水温峰值时段的预测能力普遍低于其他时段, 但反演参数的预测出水温度更接近实测数据曲线, 明显优于初始参数的预测。相较于初始参数, 反演参数预测的出水温度平均相对误差从2.14%降低至0.98%, 降低了54.2%。同时, 最大相对误差从5.00%降至3.77%, 最小相对误差从0.10%降至0.02%。反演参数提升了预测精度, 验证了反演参数的准确性。

验证期土壤平均温度和相对误差如图13所示。实测土壤平均温度从 16.11°C 上升到 16.79°C , 模拟土壤平均温度从 16.11°C 上升到 16.81°C 。反演参数预测的土壤平均温度的相对误差在0~0.49%波动, 平均相对误差为0.24%。计算得到反演参数预测的综合RMSE为 0.58°C , 其中 $\text{RMSE}_{\text{fluid}}$ 为 0.25°C , $\text{RMSE}_{\text{soil}}$ 为 0.05°C , 反演参数的预测精度提升了71%。

综上, 本研究建立的反演模型能有效获取贴合

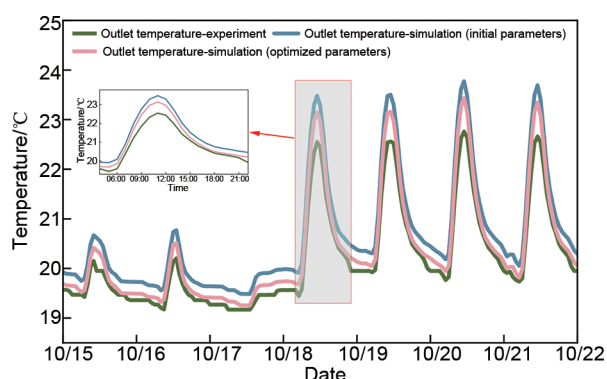


图12 验证期典型周的逐时地埋管出水温度
Fig. 12 Hourly outlet water temperature in a typical week of the verification period

实际运行数据的土壤热物性参数和初始温度, 其对地埋管出水温度和土壤平均温度的良好预测结果, 共同验证了该反演方法的可靠性与优越性。

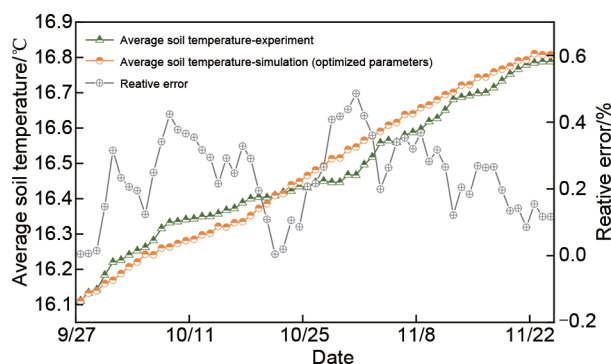


图13 验证期土壤平均温度和相对误差
Fig. 13 Average soil temperature and relative error during verification period

4 结 论

(1) 本研究提出了一种土壤热物性参数反演方法, 使用基于惯性权值法的粒子群优化算法(PSOIWM)最小化目标函数, 使用土壤平均温度和流体温度归一化后的综合RMSE作为目标函数, 反演出包括土壤初始温度、土壤热导率和土壤体积热容的热物性参数。

(2) 搭建了地埋管跨季节蓄热供热系统实验平台, 经过3个月标定期的蓄热, 地埋管蓄热体实测的土壤平均温度由12.81℃升高到16.09℃, 平均每日蓄热量为344.99 kWh, 总蓄热量为32.08 MWh。

(3) 与采用初始参数的工况相比, 优化后的反演参数使模型预测精度显著提升。日均出水温度的预测误差从1.28%降低至0.39%; 土壤平均温度的

预测误差从5.16%显著降低至0.27%。综合RMSE从2.00℃降至0.80℃, $RMSE_{fluid}$ 从0.41℃降低至0.30℃, $RMSE_{soil}$ 从0.76℃大幅降至0.05℃。反演参数有效解决了初始参数高估模型出水温度的偏差问题。

(4) 对验证期的独立评估进一步证实了反演模型的优越性。相较于初始参数, 反演参数预测的出水温度平均相对误差从2.14%降低至0.98%, 降低了54.2%。反演参数预测的土壤平均温度的相对误差全程波动小于0.5%, 平均相对误差为0.24%。反演参数预测的综合RMSE为0.58℃, 其中 $RMSE_{fluid}$ 为0.25℃, $RMSE_{soil}$ 为0.05℃, 反演参数的预测精度提升了71%。

参考文献

- [1] 江亿, 胡姗. 中国城乡能源供给系统的低碳途径[J]. 科技导报, 2023, 41(16): 6-22. DOI:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.16.001.
JIANG Y, HU S. The low carbon transition approach for China's urban and rural energy supply systems[J]. Science & Technology Review, 2023, 41(16): 6-22. DOI: 10.3981/j. issn. 1000-7857.2023. 16.001.
- [2] WANG X R, FENG G H, HUANG K L, et al. Experimental and numerical study on heat storage and extraction characteristics of single and double U-tube borehole heat exchangers for thermal energy storage[J]. Renewable Energy, 2026, 257: 124792. DOI: 10.1016/j.renene.2025.124792.
- [3] 王子逸, 徐玉杰, 周学志, 等. 跨季节复合储热系统储/释热特性[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(6): 1837-1846. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0101.
WANG Z Y, XU Y J, ZHOU X Z, et al. Storage and release characteristics of seasonal composite thermal storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(6): 1837-1846. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2020.0101.
- [4] XU J, WANG R Z, LI Y. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage[J]. Solar Energy, 2014, 103: 610-638. DOI:10.1016/j.solener.2013.06.006.
- [5] YANG T R, LIU W, KRAMER G J, et al. Seasonal thermal energy storage: A techno-economic literature review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: 110732. DOI:10.1016/j.rser.2021.110732.
- [6] YANG F, LIU M, SHEN Y, et al. Cross-seasonal storage of flue gas waste heat from power plants based on soil heat storage using buried pipes: Geotechnical thermal response experiment [J]. Energies, 2025, 18(9): 2191. DOI:10.3390/en18092191.
- [7] 徐德厚, 周学志, 徐玉杰, 等. 新型地下跨季节复合储热系统性能规律[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1768-1776.
XU D H, ZHOU X Z, XU Y J, et al. Performance law of a new composite seasonal underground thermal storage system[J].

- Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1768-1776.
- [8] 冯国会, 卢伟东, 王茜如, 等. 运行参数及间歇启停策略对地理管蓄热性能的影响[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(10): 3785-3795.
FENG G H, LU W D, WANG X R, et al. Influence of operational parameters and intermittent start-stop strategy on thermal storage performance of ground heat exchangers[J]. Energy Storage Science and Technology, 2025, 14(10): 3785-3795.
- [9] 王茜如, 冯国会, 黄凯良, 等. 季节性埋管蓄热系统长周期蓄取热特性及参数敏感性分析[J]. 工程热物理学报, 2025, 46(11): 3728-3738.
WANG X R, FENG G H, HUANG K L, et al. Long period heat storage characteristics and parameter sensitivity analysis of seasonal borehole thermal energy storage system[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(11): 3728-3738.
- [10] JIA J, LEE W L, CHENG Y D. Field demonstration of a first constant-temperature thermal response test with both heat injection and extraction for ground source heat pump systems[J]. Applied Energy, 2019, 249: 79-86. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.145.
- [11] WAGNER V, BAYER P, KÜBERT M, et al. Numerical sensitivity study of thermal response tests[J]. Renewable Energy, 2012, 41: 245-253. DOI:10.1016/j.renene.2011.11.001.
- [12] HAN Z W, ZHANG S W, LI B, et al. Study on the influence of the identification model on the accuracy of the thermal response test [J]. Geothermics, 2018, 72: 316-322. DOI:10.1016/j.geothermics.2017.11.018.
- [13] ZHANG X P, HAN Z W, JI Q, et al. Thermal response tests for the identification of soil thermal parameters: A review[J]. Renewable Energy, 2021, 173: 1123-1135. DOI:10.1016/j.renene.2020.12.028.
- [14] MCDANIEL A, TINJUM J, HART D J, et al. Distributed thermal response test to analyze thermal properties in heterogeneous lithology[J]. Geothermics, 2018, 76: 116-124. DOI: 10.1016/j.geothermics.2018.07.003.
- [15] WITTE H J L. Advances in geothermal response testing[M]// Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007: 177-192. DOI: 10.1007/978-1-4020-5290-3_9.
- [16] 张长兴, 胡松涛, 刘玉峰, 等. 基于系统优化的岩土热物性确定方法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(12): 2237-2242.
ZHANG C X, HU S T, LIU Y F, et al. Determination method for rock-soil thermal properties based on system optimization[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46(12): 2237-2242.
- [17] ZHANG X D, JIANG Y Q, YAO Y, et al. A TRNSYS-based thermal response test parameter estimation method[J]. International Journal of Electrical Energy, 2016, 4(1): 28-31. DOI: 10.18178/ijoe.4.1.28-31.
- [18] GUO F, YANG X D. Long-term performance simulation and sensitivity analysis of a large-scale seasonal borehole thermal energy storage system for industrial waste heat and solar energy [J]. Energy and Buildings, 2021, 236: 110768. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.110768.
- [19] HELLSTROM G. Ground heat storage: thermal analyses of duct storage systems[D]. Lund: Lund University, 1991.
- [20] ZHANG L, XU P, MAO J C, et al. A low cost seasonal solar soil heat storage system for greenhouse heating: Design and pilot study[J]. Applied Energy, 2015, 156: 213-222. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.07.036.
- [21] 方修睦. 建筑环境测试技术[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
FANG X M. Testing technology for building environment[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.