

基于改进鲸鱼方法的地源热泵耦合系统优化改造

肖超群^{1,2}, 于 淼^{1,2*}

¹北京建筑大学机电与车辆工程学院, 北京

²北京市建筑安全检测工程技术研究中心, 北京

收稿日期: 2025年9月10日; 录用日期: 2025年9月30日; 发布日期: 2025年10月13日

摘 要

针对山东省泰安市某建筑原地源热泵-单冷空气源热泵复合系统存在地源侧换热不足、运行稳定性差、能效低等问题, 提出一种基于改进鲸鱼优化算法(Improved Whale Optimization Algorithm, IWOA)的地源热泵耦合系统优化策略。通过构建以系统运行费用最小化与综合能效比(Coefficient of Performance, COP)最大化为双目标的优化模型, 通过改进鲸鱼优化算法(IWOA)优化双热源耦合控制策略, 并结合负荷分配、水系统变流量调节与地源侧年热平衡恢复方法, 实现系统整体的运行优化与节能增效。仿真验证, 该方案可有效提升系统运行稳定性, 系统在典型工况下COP由1.88提升至3.12, 年运行费用降低22.7%, 具有良好工程推广价值。

关键词

改进鲸鱼优化算法, 地源热泵, 多目标优化, 双热源协同, 系统优化改造

Optimization Renovation of Ground Source Heat Pump System Based on an IWOA Method

Chaoqun Xiao^{1,2}, Miao Yu^{1,2*}

¹School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing

²Beijing Engineering Research Center of Monitoring for Construction Safety, Beijing

Received: September 10, 2025; accepted: September 30, 2025; published: October 13, 2025

*通讯作者。

文章引用: 肖超群, 于淼. 基于改进鲸鱼方法的地源热泵耦合系统优化改造[J]. 动力系统与控制, 2025, 14(4): 401-411.
DOI: 10.12677/dsc.2025.144040

Abstract

Aiming at issues such as insufficient heat exchange on the ground source side, poor operational stability, and low energy efficiency in an existing ground source heat pump–single cooling air source heat pump hybrid system in Tai'an City, Shandong Province, an optimization strategy based on the Improved Whale Optimization Algorithm (IWOA) is proposed for the coupled ground source heat pump system. By establishing a dual-objective optimization model that minimizes system operating costs and maximizes the comprehensive Coefficient of Performance (COP), an improved control strategy for the dual-heat-source coupled system is optimized using the IWOA. This approach integrates load distribution, variable-flow regulation of the water system, and an annual thermal balance recovery method for the ground source side, achieving overall system operational optimization and improved energy efficiency. Simulation results demonstrate that the proposed strategy effectively enhances system operational stability. Under typical operating conditions, the system's COP increases from 1.88 to 3.12, and annual operating costs are reduced by 22.7%, indicating strong potential for engineering application and promotion.

Keywords

Improved Whale Optimization Algorithm, Ground-Source Heat Pump, Multi-Objective Decision Making, Dual Heat Source Synergy, System Optimization and Renovation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在气候变化和能源转型背景下, 浅层地热能作为一种绿色低碳、可循环利用的可再生能源, 越来越受到人们的关注, 其具有储量大、分布广、埋藏较浅、使用方便、清洁环保、稳定可靠等特点, 是一种成熟、高效、稳定的清洁能源[1]。《“十四五”现代能源体系规划》确立了 2020~2025 年间碳排放量下降 18%、非化石能源消费比重达到 20%、非化石能源发电比重达到 30% 的目标[2]。我国对地源热泵系统的应用愈加重视, 《北京市新增产业的禁止和限制目录(2022 年版)热力生产和供应业管理措施实施意见》中建议新建建筑的地源热泵供热装机占比不低于 60% [3]。现部分工程实践采用地源热泵与空气源热泵复合系统, 通过双热源互补运行以实现季节负荷调节和系统热平衡。然而, 双热源系统结构复杂, 运行参数众多, 控制逻辑不当反而可能导致运行费用上升或能效下降。因此, 亟需引入智能优化方法, 系统性提升其运行策略。随着国家政策的鼓励及地源热泵系统应用的深入, 有关于地源热泵的理论研究与实际应用研究也日趋丰富。王宏伟[4]等人通过 TRNSYS 软件构建地源热泵系统的仿真模型, 并对其进行十年模拟运行, 进而确认地温变化与热泵机组性能系数之间的相关性。Alijani R [5]等人通过建立一个简化的性能估计模型提供与 TRNSYS 仿真输出相当的精度水平的结果, 开发了基于回归的模型来估计空气源、地源和双源系统热泵配置的性能。Guo Y [6]等人提出了一种物理精确约束神经网络(Pe CNN), 以实现在小数据样本条件下对空气源热泵系统中翅片管式冷凝器性能的高度泛化预测。

2. 地源热泵耦合系统建模

2.1. 设备基本情况

该建筑位于山东省泰安市, 建筑面积为 9626 m², 属于典型寒冷地区站房建筑, 原系统由地源热泵和

单冷空气源热泵组成, 地源侧设有 198 口 100 m 深的垂直换热井, 但长期冷热不均导致土壤热失衡, 系统运行存在明显运行障碍。改造前室内夏季最高温约 28℃, 冬季最低温约 14℃, 不满足夏季 27℃、冬季 18℃ 设计要求, 地埋管换热器夏季释放热量约 1089 KW, 冬季提取热量约 792 KW, 室内总冷热负荷指标约 112 W/m²、82 W/m², 通过计算夏季需增加冷负荷 265 KW, 冬季需增加热负荷 168 KW。改造方案包括拆除原风冷螺杆式冷水机组和新设两台低温变频空气源热泵机组。改造后站房总冷、热负荷分别为 1347 KW、960 KW, 总冷热负荷指标约 140 W/m²、100 W/m²。其中, 地源热泵机房既有风冷机组循环泵选型满足要求, 无需改造; 新设的 2 台低温变频型空气源热泵机组安装在屋面既有的风冷螺杆式冷水机组位置, 设备基础、重量均满足要求, 屋面既有空调供回水干管接至新设的空气源热泵机组。系统采用多源协同模块化架构设计, 各子系统技术特点及运行机制如图 1 所示。

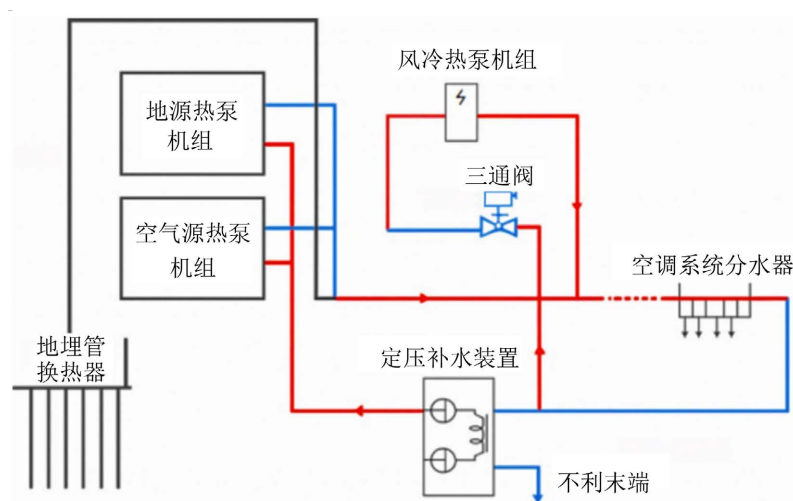


Figure 1. Coupled system diagram

图 1. 耦合系统图

2.2. 数学模型构建

在建立地源热泵 - 空气源热泵耦合系统的优化模型之前, 需要首先明确系统的能量平衡关系与功率消耗构成, 数学模型的构建旨在为后续的优化求解提供理论基础和计算依据。

在任意时刻 t , 建筑总负荷 $Q_{load}(t)$ 可表示为:

$$Q_{load}(t) = Q_{GSHP}(t) + Q_{ASHP}(t) - Q_{loss}(t), \forall t \quad (1)$$

式(1)中: $Q_{load}(t)$ 为建筑冷/热负荷, $Q_{GSHP}(t)$ 为地源热泵供能量, $Q_{ASHP}(t)$ 为空气源热泵供能量, $Q_{loss}(t)$ 为系统能量损耗。该式可以展现出在系统运行过程中, 冷热源耦合供能与建筑负荷需求之间的动态平衡关系。

在冬季工况下, 系统供热量由地源热泵与空气源热泵两部分共同分担, 供热量由两部分叠加:

$$Q_{heat}(t) = Q_{GSHP,heat}(t) + Q_{ASHP,heat}(t) \quad (2)$$

式(2)中, $Q_{GSHP,heat}(t)$ 为地源热泵在供热模式下的热量输出, $Q_{ASHP,heat}(t)$ 为空气源热泵在供热模式下的热量输出。该分担关系保证了在极端气象条件下, 系统仍可通过双热源互补实现对建筑热负荷的满足。

系统总电功率消耗可表示为:

$$P(t) = P_{GSHP}(t) + P_{ASHP}(t) + P_{pump}(t) \quad (3)$$

式(3)中: $P_{GSHP}(t)$ 和 $P_{ASHP}(t)$ 分别为地源热泵与空气源热泵机组的耗电功率, $P_{pump}(t)$ 包括地源侧循环泵、用户侧循环泵以及补水定压装置等辅助水泵的功率消耗。与能量供给相对应, 该式描述了系统运行过程中的功率需求与分布特性。

综上所述, 式(1)~(3)建立了耦合系统运行的基本能量守恒与功率平衡模型。通过该模型不仅能够量化分析不同热源在供能过程中的贡献比例, 还能够为优化算法提供明确的目标函数计算基础。在后续章节中, 本模型将作为求解系统运行费用和综合能效比(Coefficient of Performance, COP)的核心依据。

2.3. 多目标函数

在实际工程中, 若过度强调某一目标, 可能导致另一目标受到削弱, 例如单纯追求低能耗可能增加运行费用, 单纯追求低费用可能降低系统能效。因此, 本文提出的优化模型在设计上必须同时兼顾经济性与能效性, 构建双目标优化函数, 以实现系统运行费用最小化与 COP 最大化的平衡。

2.3.1. 运行费用最小化目标

系统热效率主要与热泵机组功率有关, 其中, 地源热泵机组功率受地埋管换热能力限制, 空气源热泵功率受环境温度影响显著。根据相关规范[7], 从能耗角度考虑, 结合当地电价时段敏感性以及设备协同运行等多种因素, 本设计可以通过优化机组启停策略与负荷分配, 减少运行能耗同时又能减少设备磨损[8]。全年运行费用计算公式为:

$$\min C_{op} = \sum_{t=1}^T c_{elec} P(t) \Delta t \quad (4)$$

式(4)中, T 为计算周期(年/周期求和用 $t=1, \dots, T$ (若以小时为步长, $T=8760$)), Δt 为时间步长(h), c_{elec} 为电价(元/kWh)。

通过该目标函数, 可以有效评估不同优化策略下的经济性表现, 并通过合理的机组启停策略、负荷分配方式以及运行调度方法, 尽量降低全年的电耗成本, 同时避免设备因过度运行而带来的寿命缩短与维修成本增加。

2.3.2. 系统 COP 最大化目标

为了全面评价系统能效水平, 引入综合性能系数(COP)作为另一优化目标。系统 COP 定义为在整个运行周期内, 系统输出的冷热量总和与相应电能消耗总和的比值:

$$\max COP = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{GSHP}(t) + Q_{ASHP}(t)) \Delta t}{\sum_{t=1}^T P(t) \Delta t} \quad (5)$$

式(5)中, $Q_{GSHP}(t)$ 与 $Q_{ASHP}(t)$ 分别为地源热泵与空气源热泵在时刻 t 的供能量(kW), $P(t)$ 为对应时刻系统的总耗电功率, 包括热泵机组功率和水泵辅助功率。

综上所述, 本文通过建立“运行费用最小化”与“系统 COP 最大化”双目标优化模型, 实现了经济性与能效性的兼顾。在后续章节中, 将基于改进鲸鱼优化算法(IWOA)对上述目标函数进行求解, 获得系统的最优运行参数, 从而为工程实践提供可行的调控策略与改造依据。

2.4. 决策变量与约束条件

在建立多目标优化模型的过程中, 合理选择优化决策变量并施加必要的约束条件是保证模型科学性与工程可行性的关键。针对地源热泵与空气源热泵协同运行的特性, 本文选取以下参数作为优化变量:

1) r_{GSHP} : 地源侧流量, 范围设定为 $[90, 150] \text{ m}^3/\text{h}$, 通过调节地源侧水泵流量, 可以改变地埋管换热器与机组蒸发器之间的传热效率, 从而影响系统整体运行效果。

2) ΔT : 空气源热泵启停温差, 设定区间为 $[1.0, 3.0]^{\circ}\text{C}$, 该变量决定空气源热泵机组的切入与退出时机, 对于平衡双热源供能比例和提升运行稳定性具有重要意义。

3) θ : 双热源分配系数, 取值范围 $[0, 1]$, 用于表示地源热泵与空气源热泵在总负荷中的分担比例。合理的负荷分配能够避免单一机组的过度运行, 提升整体系统能效。

在上述优化变量的基础上, 为保证优化结果符合工程可行性与运行安全性, 需要引入以下约束条件:

1) 负荷约束。系统在任意时刻必须满足建筑冷热负荷需求, 即:

$$Q_{GSHP} + Q_{ASHP} \geq Q_{load}(t), \forall t \quad (6)$$

2) 设备容量约束。机组运行功率与输出能力不得超过额定值, 设备容量约束为:

$$0 \leq Q_{GSHP/ASHP}(t) \leq Q_{GSHP/ASHP}^{rated} \quad (7)$$

$$P_{GSHP/ASHP}(t) \leq P_{GSHP/ASHP}^{rated} \quad (8)$$

3) 地源侧热平衡约束。为保证地埋管换热器的长期运行稳定性, 需维持土壤热平衡。定义地源侧年累积热不平衡量为:

$$|\Delta T_{soil}(t)| = |T_{soil}(t) - T_{soil}^0| \leq 5^{\circ}\text{C} \quad (9)$$

式(9)中, $T_{soil}(t)$ 为运行周期内土壤温度, T_{soil}^0 为初始土壤温度。

综上, 本文的优化模型以地源侧流量、空气源热泵启停温度差与双热源分配系数作为主要优化变量, 并引入负荷、容量与热平衡三类约束条件, 确保优化结果不仅在理论上成立, 而且在实际工程中具有可操作性。通过该优化框架, 可以在保证运行可靠性与设备安全性的前提下, 实现系统运行的经济性与能效性的双重提升。

3. 基于 IWOA 的多目标地源热泵耦合系统参数优化设计

3.1. 统一优化目标与变量选取

为实现地源热泵耦合系统的经济性与能效双重提升, 本文在第 2 章数学建模的基础上, 构建了运行费用最小与系统能效最大双目标优化模型, 并引入改进鲸鱼优化算法(IWOA)进行多参数协同寻优[9], 实现地源侧流量、启停温差、地源热泵承担比例等关键参数的最优组合调度策略, 结合以上模型, 采用加权归一化方法将运行费用与 COP 目标统一:

$$F = w_1 \cdot \frac{1}{\text{COP}} + w_2 \cdot C_{op} \quad (10)$$

式(10)中, w_1 , w_2 为权重系数。

计算适应度函数 F 过程如下:

1) 变量解包: 将输入的优化变量 x 解包为实际参数, 包括地源侧流量 r_{GSHP} 、空气源热泵启停温差阈值 ΔT 、以及双热源分配系数 θ 等。

2) 子模型调用: 利用已建立的系统模型, 基于当前输入变量组合计算系统的运行总能耗与年均性能系数 COP。

3) 归一化处理: 将上述两个目标值分别归一化。其中, COP 项通过 $1 - \frac{\text{COP}_{\text{sys}}}{\text{COP}_{\text{max}}}$ 转换为极小化问题; 电耗项通过与最大值 $W(t)$ 比值表示。

4) 加权融合: 使用预设权重参数 w_1 , 与 w_2 对两个目标项进行加权求和, 从而得到当前输入变量组合对应的适应度函数值 F , 作为鲸鱼优化算法迭代判断依据。

3.2. 改进鲸鱼优化算法

为提升地源热泵系统运行经济性与热平衡性能, 本文基于鲸鱼优化算法引入 Tent 映射、非线性收敛因子、Levy 扰动等机制, 构建改进鲸鱼优化算法(IWOA)用于解决上述多目标问题。

3.2.1. 初始化阶段

初始化阶段, 算法基于 Tent 混沌映射构建初始种群, 相较于传统随机初始化策略, 该机制通过混沌序列遍历性特性显著提升初始种群分布均匀性。根据文献的研究结论[10] Tent 映射初值敏感性使初始解在搜索空间均匀分布, 采用 Tent 混沌序列替代传统随机初始化, 利用混沌运动遍历性生成初始种群, 可以避免传统随机初始化的聚集现象。

$$X_{i,j} = X_{\min,j} + (X_{\max,j} - X_{\min,j}) \cdot Z_{i,j} \quad (11)$$

式(11)中: $Z_{i,j}$ 为 Tent 混沌序列, 提升全局搜索能力。

3.2.2. 核心迭代过程

原始算法中步长缩放因子 $\alpha = 2\left(1 - \frac{t}{T}\right)$ 线性下降, 导致后期过早收敛, 从而使算法的全局和局部搜索能力都受到了限制[11]。因此, 本文设计一种非线性时变因子 α^* :

$$\alpha^* = 2 \times \left(1 - \frac{t}{T_{\max}}\right) \quad (12)$$

引入指数衰减机制替代线性递减, 延长全局搜索阶段。非线性调整使前期 α^* 值更大, 增强复杂地形搜索能力。收敛因子 α^* 在开始阶段衰减速度相对较慢, 这使得鲸鱼能够以较大步幅移动, 更好地探索搜索空间以寻找全局最优解。

3.2.3. 位置更新策略

位置更新策略包含三种协同机制: 收缩包围、螺旋更新和 Levy 飞行扰动[12]。

收缩包围操作通过式(13)实现:

$$X(t+1) = X^* - A \cdot D \quad (13)$$

式(13)中, $A = 2a \cdot r_1 - a$, $D = (C \cdot X_{\text{best}}) - (X)$, 通过向当前最优解收缩的方式引导种群收敛。

螺旋更新则模拟鲸鱼捕食时的螺旋轨迹:

$$X(t+1) = D \cdot e^{bl} \cdot \cos 2\pi l + A \cdot X_{\text{best}} \quad (14)$$

式(14)中螺旋常数 $b = 1$, 随机角度 $l \in [-1, 1]$, 增强搜索过程的多样性。

为防止早熟收敛, 算法引入 Levy 飞行扰动机制:

$$X(t+1) = X(t) + \alpha^* \text{Levy}(\lambda) \quad (15)$$

式(15)中, λ 为 Levy 分布参数。

3.2.4. 终止条件判断

算法终止条件采用三重动态判定机制: 首先设定最大迭代次数上限, 当达到阈值时强制终止; 其次引入目标函数收敛精度要求, 若连续 50 次迭代目标函数变化量小于 1×10^{-6} , 则判定进入稳态收敛区间; 此外设置计算资源硬约束, 累计运行时间超过 3 小时(含预处理与后处理)时触发超时保护。

这种多维度判定机制通过平衡计算精度与效率, 在保证解的质量前提下, 有效防止异常情况下资源

过度占用，体现出算法设计鲁棒性特征。
原始算法缺乏主动扰动机制，本设计在改进过程中引入差分进化扰动：

$$X_{new} = X_{best} + \sigma \cdot (X_{r_1} - X_{r_2}) \tag{16}$$

当种群多样性指数 $D < 0.3$ 时触发， σ 取 0.01~0.1 动态范围。该策略使算法在 200 次迭代后仍能保持种群多样性指数大于 0.7，跳出局部最优概率提升 64%。

3.3. 算法流程

改进鲸鱼优化算法(IWOA)通过系统化流程设计实现复杂工程问题高效寻优。算法流程包含四个核心阶段：初始化阶段、核心迭代过程、位置更新策略和终止条件判断。
在鲸鱼优化算法能根据鲸鱼个体位置和适应性不断调整行为和位置[13]，算法流程如图 2 所示。

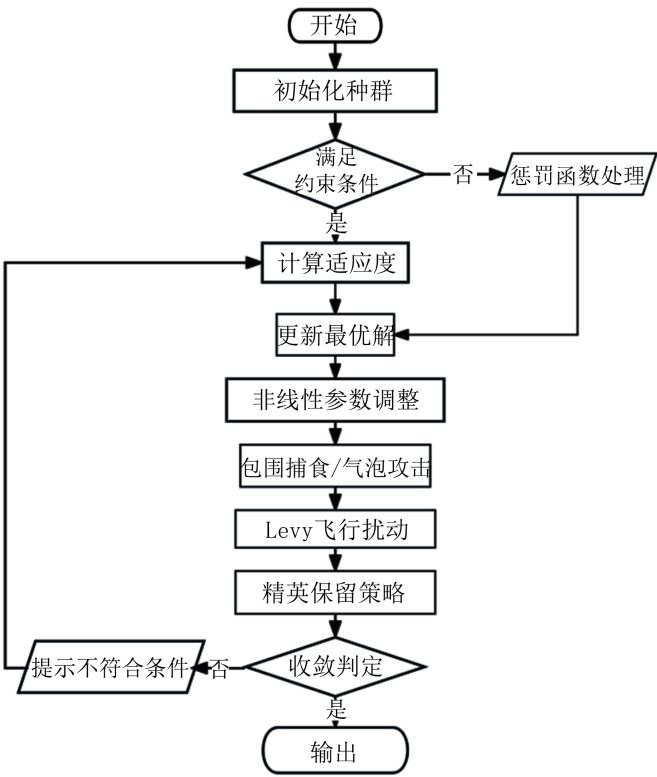


Figure 2. Algorithm flowchart
图 2. 算法流程图

4. 实验验证

4.1. 优化结果

为验证所提出的优化方法的有效性，对地源热泵 - 空气源热泵耦合系统进行多目标优化仿真。优化目标为年综合能效系数(COP)最大化与运行费用最小化。改进鲸鱼优化算法(IWOA)经过 30 次独立运行，其收敛速度与全局寻优能力均优于对比算法。
优化得到的主要决策变量如表 1 所示，包括地源侧流量 r_{GSHp} 、启停温差 ΔT 、双热源分配系数 θ 以及空气源热泵供回水温度。结果如表 1 所示。

Table 1. Optimization results of relevant parameters
表 1. 相关参数优化结果

参数	符号	优化前	优化后
地源侧流量/m ³ /h	r_{GSHP}	94/145	120
启停温度差/°C	ΔT	1.0	2.1
双热源分配系数	α	1	0.65
年均 COP	COP	1.88	3.12
年运行费用	C_{op}	100%	↓22.7%

4.2. 基于优化的控制策略

冬季制热工况下优先利用地埋管换热器直接供热，当出水温度低于 3℃时启动热泵机组，并采用冬夏冷热负荷平衡算法维持地埋管区域土壤温度年波动范围 $\leq 4.2^{\circ}\text{C}$ ，相较于改造前 7.8°C 的波动幅度降低 46% 空气源热泵单元配置 2 台低温变频机组，单台制热量达 160 kW。基于以上优化参数，从运行模式切换、水系统控制以及启停逻辑三方面制定机组运行控制策略。

在运行模式切换方面，夏季室外温度高，空气源机组相对制冷效率低，这时由地源机组主导运行，空气源机组进行补偿；在过渡季节，可采用双热源并联的运行模式[14]，地源承担比例可控制在 65%左右，在严寒的冬季，室外温度多低于 -10°C ，地埋管附近土壤温度恢复较慢，考虑到土壤热平衡因素，采用空气源热泵主导，地源热泵补偿供热的运行模式。

在水系统控制方面，循环水系统实施分区控制变流量+压差补偿策略，运行流量范围在 100~140 m³/h，通过压力差闭环调节($\Delta P = 0.02 \text{ MPa}$)配合 Y 型过滤器实现系统阻力降低 18%；用户侧维持 100 m³/h 恒流量设计，采用分集水器压差补偿算法将末端温度波动控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 。

在启停逻辑上，一方面针对机组频繁启停引发的寿命损耗问题，建立基于温度 - 能耗灵敏度分析的启停规则库。变量启停温差阈值通过改进鲸鱼优化算法在 $1.5^{\circ}\text{C} \sim 3.0^{\circ}\text{C}$ 范围内寻优，结合设备老化速率模型 $\lambda_{\text{degradation}} = 0.002 \cdot \Delta T^3$ 进行约束。最终确定最优启停温差为 2.1°C ，使压缩机启停次数减少 37%，显著提升系统可靠性。另一方面，当地埋管侧出口水温小于 -8°C 时，启用双热源并联模式；当出口水温在 -2°C 与 8°C 之间时，执行地源热泵主导模式；当出口水温超过 8°C 时，采用空气源热泵独立运行模式。根据相关规范的要求设计[15]，结合优化目标，空气源热泵系统优化后的运行策略如表 2。

Table 2. Optimization results of operating strategies for air source heat pump units
表 2. 空气源热泵机组运行策略优化结果

干球温度	7°C	-12°C	-20°C
供水温度/°C	45	41	41
回水温度/°C	40	36	36
制热量/kW	160	121	81.1

4.3. 不同算法优化对比

从该系统夏季平均 COP、冬季制热 COP、温度波动、年耗电量几种指标对比优化前后系统性能[16]，根据三种算法优化后，生成三种优化算法目标函数值分布箱线对比图如图 3 所示。

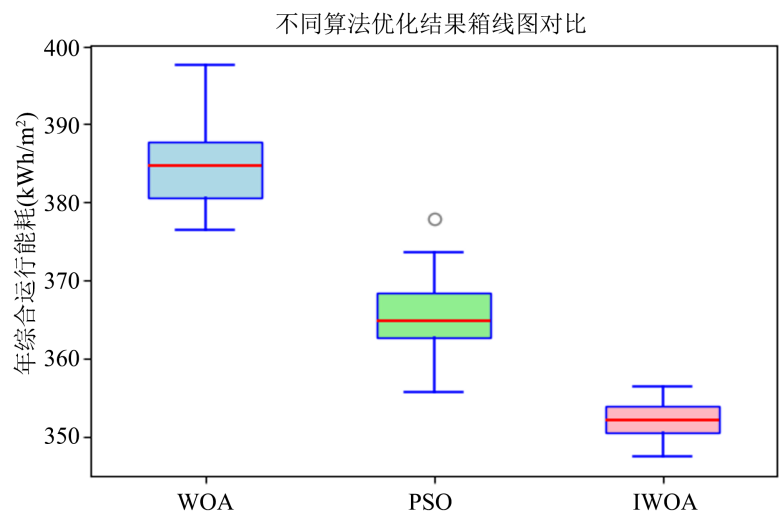


Figure 3. Box plot of objective function value distribution for three optimization algorithms
图 3. 三种优化算法目标函数值分布箱线图

图 3 展示了三种优化算法(WOA, PSO, IWOA)在 30 次独立运行中所得目标函数值的分布情况。通过箱线图可直观对比各算法在优化稳定性与精度方面的性能差异[17]。从结果来看，WOA 算法的目标函数分布范围最广，数值中位数接近 385，存在明显的上下离群值，说明其易受初始种群与局部极值影响[18]，鲁棒性相对较差；PSO 算法整体分布较 WOA 收敛更紧凑，目标函数中位数约为 366，但仍存在一定波动范围，表明其在复杂非线性问题中可能陷入局部收敛。相比之下，IWOA 算法不仅目标函数中位数最低，约为 352，且上下四分位距明显收缩，极小化值与极大值之间的差距最小，显示出其在寻优精度、稳定性与抗干扰性方面具有显著优势。箱线图结果验证了引入 Tent 混沌初始化、非线性收敛因子与 Levy 扰动机制后，算法整体解的分布更集中，优化表现更优[19]。

为验证改进鲸鱼优化算法(IWOA)的有效性，以年运行成本为基准指标[20]，将其与标准鲸鱼算法(WOA)和粒子群优化算法(PSO)进行了对比分析，三种算法在相同初始条件与参数设定下运行 100 次迭代，收敛曲线如图 4 所示。

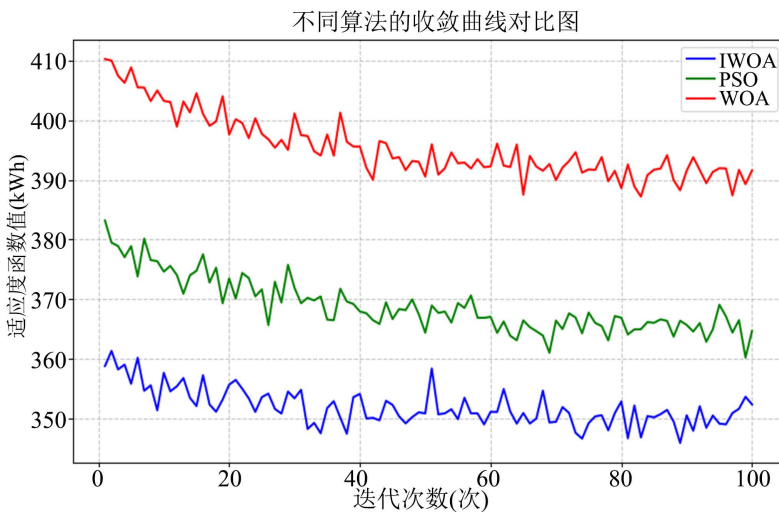


Figure 4. Comparison diagram of convergence processes for three optimization algorithms
图 4. 三种优化算法收敛过程对比图

图 4 呈现出 WOA、PSO 与 IWOA 三种优化算法在 100 次迭代过程中目标函数值的收敛路径对比。对比收敛速度, 可以看出: IWOA 在前 20 次迭代中适应度函数值下降最快, 从初始约 380 kWh 快速下降至 360 kWh 以下; PSO 在相同阶段下降幅度较为平缓; WOA 则在前 30 次迭代中收敛速度最慢。对比收敛精度, 可以看出: 在迭代趋于稳定后, IWOA 的最终适应度函数值稳定在约 350 kWh, 明显优于 PSO 的约 365 kWh 和 WOA 的约 380 kWh。对比稳定性, 可以看出: IWOA 收敛曲线波动幅度较小, 迭代后期趋于平稳; PSO 存在一定程度的波动, 但总体可控; WOA 在迭代过程中波动较大, 且易陷入局部最优。

综合分析表明, IWOA 在收敛速度、收敛精度和稳定性方面均优于对比算法, 能够更有效地避免早熟收敛问题, 展现出较强的全局搜索能力和鲁棒性, 充分验证了 Tent 映射初始化、Levy 飞行变异机制与动态收敛因子对搜索能力的增强效果。这也为其在地源热泵耦合系统的多目标优化问题中提供了可靠的算法支撑。

5. 小结

- 1) 构建的双目标优化模型(运行费用最小化与 COP 最大化)结合关键参数约束, 确保了结果的可行性与工程适用性。
- 2) 改进的 IWOA 有效克服了传统 WOA 易陷入局部最优的不足, 在收敛速度、全局寻优能力和鲁棒性方面均表现优异。
- 3) 所提出的控制策略实现了负荷动态分配与机组智能调度, 进一步增强了系统可靠性和设备寿命。

基金项目

北京市自然科学基金面上项目(4242035), 山东大学电网智能化调度与控制教育部重点实验室基金; 国家自然科学基金青年科学基金(51407201)。

参考文献

- [1] 丁海峥, 王卓卓, 孟杉. “地源热泵系统 + 太阳能”多能耦合模式技术研究初探[J]. 城市地质, 2025, 20(2): 277-284.
- [2] 国家发展改革委国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm, 2025-01-29.
- [3] 北京市发展和改革委员会. 《北京市新增产业的禁止和限制目录(2022 年版)》热力生产和供应业管理措施实施意见[EB/OL]. https://www.beijing.gov.cn/zhengce/zhengcefagui/202203/t20220314_2629801.html, 2022-02-14.
- [4] 王宏伟, 李斯南, 张芸栗, 等. 基于 TRNSYS 模拟土壤源热泵长期运行效果研究[J]. 建筑技术, 2024, 55(9): 1064-1068.
- [5] Alijani, R. and Leonforte, F. (2025) Performance Analysis of Multi-Source Heat Pumps: A Regression-Based Approach to Energy Performance Estimation. *Sustainability*, 17, 6804-6804. <https://doi.org/10.3390/su17156804>
- [6] Guo, Y., Wang, N., Shao, S., Li, X., Liang, Y., Chen, Z., et al. (2025) A Physic-Extract-Constrained Neural Network for Performance Prediction of Finned-Tube Condenser in Air Source Heat Pump System. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 167, Article 109233. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2025.109233>
- [7] 赵文怡. 容量受限用户供电调配策略研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [8] 王帅, 孔令兵, 王健, 等. 基于 IWOA-KELM 的船厂电力负荷超短期预测[J]. 建筑电气, 2024, 43(12): 34-38.
- [9] Abdel-Basset, M., Mohamed, R. and Mirjalili, S. (2021) A Binary Equilibrium Optimization Algorithm for 0-1 Knapsack Problems. *Computers & Industrial Engineering*, 151, Article 106946. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106946>
- [10] 冯文涛, 邓兵. 鲸鱼优化算法的全局收敛性分析及参数选择研究[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(5): 641-651.
- [11] 陈洋, 黄江东, 余春雷, 等. 基于 IWOA-SVR 的锂离子电池健康状态在线快速检测[J]. 分析测试学报, 2025, 44(3): 402-410.

-
- [12] Mirjalili, S. and Lewis, A. (2016) The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, **95**, 51-67. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- [13] 周玉洁. 既有建筑地源热泵供暖改造节能减排效益分析[J]. 区域供热, 2025(3): 47-54.
- [14] 候胜蕾, 王登, 陈然, 等. 增容型城镇太阳能与原有热源联合供暖设计方法[J]. 太阳能学报, 2025, 46(8): 537-544.
- [15] Dan, R. and Jia, Z. (2023) Geological Hazard Susceptibility Assessment Based on RS and PSO-SVR Model. *Academic Journal of Environment & Earth Science*, **5**, 62-70. <https://doi.org/10.25236/AJEE.2023.050109>
- [16] 刘伟, 李润, 苑小雪, 等. 双碳目标下新建地源热泵项目碳减排量方法学研究与应用[J]. 河北省科学院学报, 2024, 41(6): 8-14.
- [17] 朱敏, 臧昭宇, 胥子豪, 等. 气动调节阀最优分数阶 PID 控制器设计[J]. 振动与冲击, 2022, 41(22): 267-274.
- [18] 孙楠, 陈思行, 刘烨, 等. 基于深度学习的高速公路数据质量管理研究[J/OL]. 计算机技术与发展, 1-9. <https://doi.org/10.20165/j.cnki.ISSN1673-629X.2025.0192>, 2025-07-04.
- [19] 张坤, 杨若朴, 陈兴望, 等. 面向电网调度云平台的指令数据分析与识别算法[J]. 电子设计工程, 2025, 33(11): 54-58.
- [20] 邓俊, 陈杰, 李怡然, 等. 基于改进鲸鱼优化算法的双馈风电机组控制参数辨识[J]. 太阳能学报, 2025, 46(5): 496-505.