



基于循环冷却水余热的跨季节地埋管蓄热供热系统参数匹配方法研究

冯国会, 戴晓欣, 王茜如, 黄凯良, 马金铭, 纪学磊
(沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 将循环冷却水余热与跨季节地埋管蓄热技术结合, 可为北方地区清洁供热提供补充路径。针对该类系统初步设计阶段钻孔数量和热泵容量难以快速确定的问题, 本文提出一种基于动态仿真与目标优化的关键参数匹配方法, 以沈阳地区居住建筑为研究对象, 结合当地气象条件和余热特性, 建立系统仿真模型。以费用年值和系统能效比为优化目标, 选取钻孔数量和热泵容量为关键变量, 开展45组不同供热面积与余热水平组合工况优化, 并采用非线性二阶多项式拟合得到钻孔数量、热泵容量与供热面积及源荷比之间的经验公式。结果表明, 公式预测值与模拟寻优值相对误差基本小于5%; 以35万m²供热规模为例, 优化方案较常规选型方案初投资、运行费用和费用年值分别降低21.21%、10.87%和14.12%, 系统耗电量及CO₂排放量降低约10.71%, 系统COP提高12.00%。在本文设定的气象、地质、钻孔结构、设备模型及经济参数条件下, 所建方法可为循环冷却水余热跨季节地埋管蓄热供热系统快速选型提供参考。

关键词: 循环冷却水余热; 跨季节蓄热; 参数匹配; 动态仿真; 目标优化

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0753

中图分类号: TK 529

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-11

Study on a Parameter Matching Method for a Seasonal Borehole Thermal Energy Storage Heating System Based on Waste Heat from Circulating Cooling Water

FENG Guohui, DAI Xiaoxin, WANG Xiru, HUANG Kailiang, MA Jinming, JI Xuelei
(School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168,
Liaoning, China)

Abstract: Combining waste heat from circulating cooling water with the seasonal borehole thermal energy storage technology can provide an alternative pathway for clean heating in northern China. Aiming at the difficulty in rapidly determining the borehole number and heat pump capacity during the preliminary design stage of such systems, this paper proposes a key parameter matching method based on dynamic simulation and objective optimization. Taking residential buildings in Shenyang as the research object, a system simulation model is established considering local meteorological conditions and characteristics of waste heat. With the annual cost and system coefficient of performance (COP) as optimization objectives, the borehole number and heat pump capacity are selected as key variables. Optimizations of

收稿日期: 2026-09-01; 修改稿日期: 2026-09-18。

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

第一作者: 冯国会 (1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为相变储能、可再生能源利用研究, E-mail: fengguohui888@163.com。通信作者: 冯国会, 教授, 研究方向为相变储能、可再生能源利用研究, E-mail: fengguohui888@163.com。

引用本文: 冯国会, 戴晓欣, 王茜如, 等. 基于循环冷却水余热的跨季节地埋管蓄热供热系统参数匹配方法研究[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-11.

Citation: FENG Guohui, DAI Xiaoxin, WANG Xiru, et al. Study on a Parameter Matching Method for a Seasonal Borehole Thermal Energy Storage Heating System Based on Waste Heat from Circulating Cooling Water[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-11.

45 combined working conditions with different heating areas and waste heat levels are carried out. Nonlinear second-order polynomial fitting is adopted to obtain empirical formulas for the relationships among borehole number, heat pump capacity, heating area and source-load ratio. The results show that the relative error between the predicted values of the formulas and the simulation optimization values is generally less than 5%. Taking a heating scale of 350 000 m² as an example, compared with the conventional selection scheme, the optimized scheme reduces the initial investment, operating cost and annual cost by 21.21%, 10.87% and 14.12%, respectively. The system power consumption and CO₂ emission decrease by approximately 10.71%, while the system COP increases by 12.00%. Under the meteorological, geological, borehole structure, equipment model and economic parameters set in this paper, the proposed method can provide references for the rapid type selection of heating systems adopting circulating cooling water waste heat and seasonal borehole thermal energy storage.

Keywords: waste heat from circulating cooling water; seasonal thermal energy storage; parameter matching; dynamic simulation; multi-objective optimization

在国家“双碳”目标驱动下,推动城镇供热向低碳化转型已成为国家重大战略要求^[1]。我国工业领域余热资源丰富,且高品位余热大多已实现利用,而大量 100℃ 以下的低品位余热被排放到大气中,造成了能源浪费和环境热污染^[2]。将低品位余热引入城镇供热体系,结合跨季节蓄热技术,是提高余热利用率、解决北方地区供暖难题的关键突破^[3]。

在地埋管储热系统参数敏感性分析方面,张长兴等^[4]引入 DST 模型开展全寿命周期仿真,提出钻孔最优组合方法。杨曙川等^[5]搭建湖/河水跨季节/日储热仿真系统,发现钻孔间距和深度对系统性能影响显著。张辉等^[6]研究发现,埋管间距和土壤导热系数是影响 BTES 系统效率的主要因素。王茜如等^[7]研究发现,为保证取热量与 BTES 系统效率,钻孔间距宜控制在 2.5~4.5m,钻孔深度不宜小于 60m。在工业余热应用于跨季节蓄热系统研究方面,Guo 等^[8-10]在内蒙古赤峰的生活实验室验证了工业余热耦合太阳能进行跨季节储热的可行性,以及大规模 BTES 系统接入区域供热管网后能显著提高系统效率。在参数优化研究方面,Yang 等^[11]利用三维数值模拟与 NSGA-II 算法对太阳能中深层地埋管蓄热系统进行多目标优化,得到钻孔参数与循环流量是影响系统全寿命周期平准化热价的关键因素。肖超群等^[12]使用改进鲸鱼优化算法对地源热泵耦合系统进行双目标优化,以实现系统节能。

Minwoo 等^[13]基于 NSGA-II 算法对太阳能地源热泵系统多目标优化,优化系统的设计参数和制冷剂。王春林等^[14]利用 Hooke-Jeeves 算法优化得到集热面积与储

热体积、水箱容积及循环流量间的协同优化区间。张俊月等^[15]针对工业余热跨季节储热系统揭示了储热体积与循环流量的匹配特性。在参数匹配方法研究方面,郭放等^[16]建立了太阳能采暖系统模型,发现单位集热面积匹配的最优储热体积并非定值,与系统总集热面积相关。徐天硕^[17]研究发现,水箱容积和集热器有效集热面积的比值在 0.08 时,太阳能收益最高。Khalajzadeh 等^[18]构建了二阶拟合方程,定量揭示了管径、进口温度等参数对换热性能的显著影响。王春林等^[19]研究发现在蓄热水箱容积与太阳能集热器的集热面积比值为 50~150 L/m²时,采暖系统的集热效率较高。

目前,地埋管蓄热系统研究主要集中于太阳能耦合地源热泵系统的参数优化及运行性能分析,而针对余热驱动下的参数匹配、不同供热规模与余热水平下系统关键参数定量规律及工程初步设计经验公式的研究较少。针对上述问题,本文提出并建立了基于循环冷却水余热的跨季节地埋管蓄热供热系统参数匹配方法,以沈阳地区居住建筑为研究对象,利用 TRNSYS 动态仿真平台对地埋管钻孔数量和热泵容量进行优化,并基于多工况优化结果拟合关键参数经验公式,为沈阳地区及相近边界条件

下循环冷却水余热跨季节蓄热供热系统快速选型提供方法参考。

1 系统建模与模型验证

1.1 系统模型构建

本研究选取严寒C区典型城市沈阳地区作为主要案例地区，基于沈阳市典型气象年数据，对5~40万m²范围内不同供热规模的居住建筑进行全年逐时热负荷模拟，得到各工况采暖季热负荷需求。

与太阳能、空气源热能等热源相比，工业余热具有受天气影响小、热量集中、温度相对稳定等特点，适合作为跨季节蓄热系统的稳定热源。但低品位工业余热温度通常难以满足严寒地区建筑供热需求，且余热排放时段与建筑采暖需求存在季节错位，因此需要借助地埋管跨季节蓄热和热泵提温实现高效利用。沈阳地区作为老工业基地，拥有大量的冶金、化工、装备制造企业和城市集中供热系统，结合该地区的工业情况，工业余热类型包括烟气余热、蒸汽余热、工艺废水余热和循环冷却水余热等。相比高温烟气余热，循环冷却水余热温度水平较低但排放连续、流量稳定、水质相对可控，适合作为跨季节蓄热系统的热源输入。因此，本文研究对象限定为50~60℃循环冷却水余热，温度变化趋势如下图1所示。

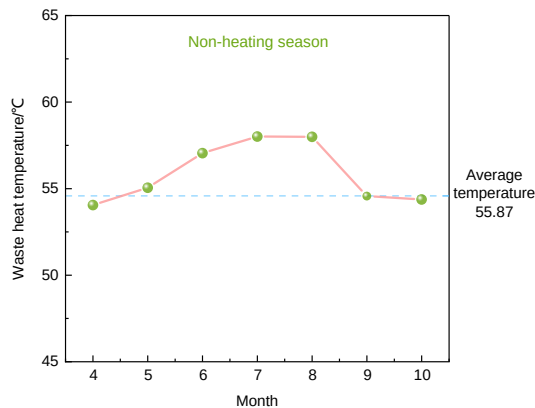


图1 非采暖季余热温度变化图
Fig. 1 Temperature variation of waste heat in non-heating season

基于工业余热的跨季节地埋管蓄热供热系统原理图如图2所示，该系统的工作原理为非采暖季循环冷却水余热侧循环泵运行、余热经换热器传递至地埋管储热体；采暖季余热侧循环泵关闭，余热侧

流量为零，地埋管储热体向热泵源侧供热，经热泵提温后供给建筑用户。本文不考虑采暖季工业余热直接供热或工业余热与地埋管联合供热模式。通过选型计算，构建了该系统的建模图如图3所示。

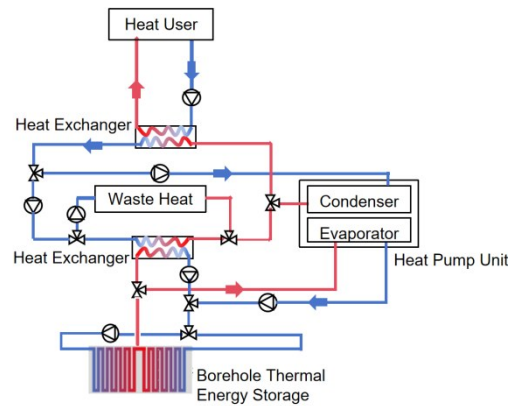


图2 余热-地埋管跨季节系统原理图
Fig. 2 Schematic diagram of waste heat-borehole seasonal thermal energy storage system

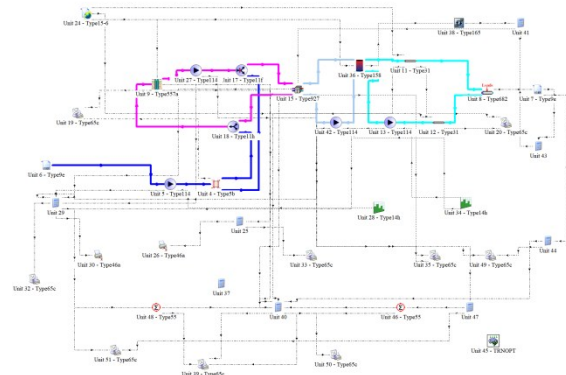


图3 余热-地埋管跨季节系统建模图
Fig. 3 Modeling diagram of waste heat-borehole seasonal thermal energy storage system

系统主要物理参数如下表1所示。

表1 储热体参数设置

Table 1 Input parameters of thermal storage model		
参数	数值	单位
土壤导热系数	1.8	W/(m·K)
土壤体积热容	2050	kJ/(m ³ ·K)
初始地温	8.6	℃
钻孔半径	0.06	m
埋管类型	单U	-
U管外半径	0.016	m
U管内半径	0.013	m

1.2 地理管换热器模型验证

为验证地理管换热器模块 (Type 557) 在理想化传热条件下的计算合理性与理论一致性, 选用 Bandos 等^[20] 推导标准化后的有限长线源模型 (Finite Line Source, FLS) 工程解析解对其进行验证。该模型在纯导热且假设土壤为均质各向同性介质的条件下, 利用镜像虚实热源叠加法推导出含互补误差函数的积分型温度解析表达式, 可准确描述恒定热流边界下的地温场响应。钻孔壁的过余温度 (实际温度与初始地温之差) 理论计算公式如下:

$$\theta(r_b, z, t) = T(r_b, z, t) - T_{init} = \frac{q}{4\pi k} \int_0^H \left(\frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{r_1}{2\sqrt{at}}\right)}{r_1} - \frac{\operatorname{erfc}\left(\frac{r_2}{2\sqrt{at}}\right)}{r_2} \right) dz' \quad (1)$$

式中: q 为单位管长换热功率, W/m ; k 为土壤导热系数 $W/(m \cdot K)$; a 为土壤热扩散率, m^2/s ; H 为地理管深度, m ; r_1 、 r_2 , 分别表示计算点到真实热源与虚拟热源的距离, m 。

验证工况设定为: 向地理管施加恒定的单位管长换热功率 $40W/m$, 连续运行 $720 h$ (1个月)。将 TRNSYS 模拟得出的钻孔壁温度与上述公式计算的理论值进行对比, 结果如图4所示。

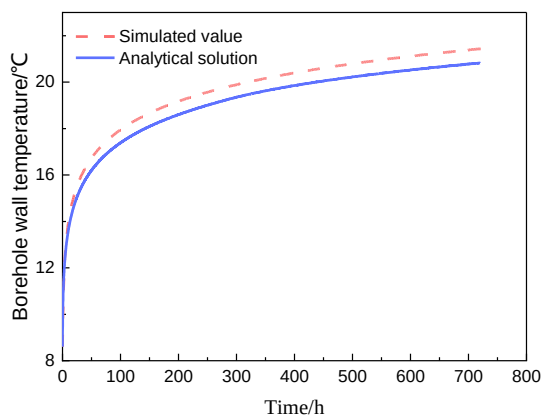


图4 钻孔壁温度模拟值与解析解对比

Fig. 4 Comparison of simulated and analytical solutions for average soil temperature near boreholes

从图中可以看出, TRNSYS 的模拟值曲线与式 (1) 计算出的解析解曲线总体变化趋势一致, 二者具有较好的一致性。经计算, 在整个验证周期内两者的最大相对误差小于 5%, 均方根误差 (RMSE)

仅为 $0.5592^\circ C$ 。该误差表明建立的数值模型在求解地下介质非稳态传热模型时能够合理反映钻孔周围土壤的非稳态传热响应, 为后续系统动态模拟提供了一致性基础。

1.3 时间步长独立性检验

时间步长的选取在进行长周期模拟时十分重要, 会直接影响计算结果的精度及求解效率, 较大的步长可能导致模型无法精准捕捉余热波动和热泵机组启停的瞬态热响应; 而较小的步长可能会导致计算量急剧增加。因此, 在开展长周期模拟前, 必须进行时间步长独立性检验。

本文以系统运行的前两年 (第 2160 至 17520 小时) 作为测试区间, 分别设定步长为 1h、0.5h、0.25h 和 0.1h 进行仿真模拟, 并以第二年运行结束时的土壤平均温度作为关键评价指标, 对比结果如下图5所示。通过对比不同步长的模拟结果发现, 当步长由 1h 减小至 0.5h 时, 土壤平均温度的变化量为 $0.0248^\circ C$; 当步长进一步减小至 0.25h 时, 结果变化量在 $0.007^\circ C$ 以内, 此时相对误差 $< 0.05\%$ 。综合考虑计算精度和模拟时间, 本文采用 0.5h 作为地理管跨季节蓄热系统模拟运行的时间步长。

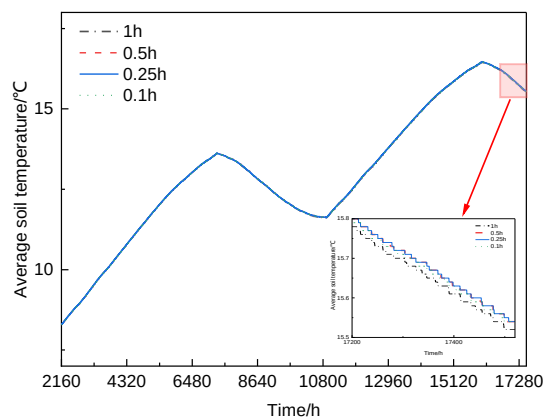


图5 时间步长独立性检验图

Fig. 5 Validation chart for time-step independence

2 系统优化

2.1 优化软件与优化算法

本研究使用 GenOpt 软件对 TRNSYS 软件中的供热系统模型进行参数优化处理, 其工作原理是通过迭代调用外部模拟程序, 实现最优解的自动搜索。可通过 TRNOPT 插件在 Simulation Studio 界面设定寻优变量边界、范围与目标函数等, 利用

GenOpt的迭代计算实现系统寻优。优化过程本文选用Hooke-Jeeves模式搜索法,该算法无需计算目标函数导数,显著提升了优化效率,确保了优化结果的可靠性。

2.2 优化变量

本研究选取系统关键参数作为优化变量,地埋管储热体方面选取钻孔数量 N_b ,热泵机组方面选取热泵容量 Q_{hp} 作为核心优化变量,各优化变量的定义如下表2所示。钻孔深度 H_b 和钻孔间距 D_b 虽会影响地埋管蓄取热性能,但其取值同时受场地面积、施工工艺、钻孔成本和布孔方式等工程因素约束。结合已有研究中钻孔深度不宜小于60 m、钻孔间距宜取2.5~4.5 m的建议范围,并根据前期优化搜索结果,在设定的参数边界内,钻孔深度趋向于80 m,钻孔间距稳定在4 m左右,二者未表现出随供热面积与源荷比变化的稳定匹配规律。因此,本

文将钻孔深度和钻孔间距作为固定设计参数处理,分别取80 m、4 m。

表2 优化变量定义表

Table 2 Definition of optimization variables

优化变量	符号	单位	说明
钻孔数量	N_b	根	地埋管换热器钻孔总数
热泵容量	Q_{hp}	kW	热泵机组额定制热量

为避免算法追求经济最优,导致系统不能满足用户的供热需求或系统性能的大幅度下降,因此本文将供热量、用户侧供水温度和地埋管出口温度作为运行约束,要求热泵向用户侧的供热量不低于建筑逐时热负荷,用户侧供水温度不低于38℃,地埋管出口温度不低于4℃。其中,38℃和4℃分别为本文设定的用户侧最低供水温度和地埋管出口温度控制值,并非适用于所有供热系统的统一规范限值,具体约束条件设置如下表3所示。

表3 约束条件表

Table 3 Constraints

约束类别	约束条件	物理含义
供热量约束	$Q_{hp,out}(t) \geq Q_{load}(t)$	热泵逐时供热量满足建筑热负荷
供水温度约束	$T_{supply}(t) \geq 38^\circ\text{C}$	保证用户侧供水温度满足设定要求
地埋管出口温度约束	$T_{BHE,out}(t) \geq 4^\circ\text{C}$	避免地埋管取热侧温度过低

2.2 优化目标

2.2.1 经济性目标

本文经济性指标选用费用年值作为核心优化目标,可通过下式求解:

$$Z = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} L_0 + C \quad (2)$$

式中: Z 为费用年值,即系统平均每年支出的总费用,元/年; i 为折现率或年利率,沈阳市取6%; n 为系统使用寿命,参考相关规范和工程经济学惯例,本系统使用寿命取20年; L_0 为系统总初投资,元; C 为系统年运行费用,元。

$$L_0 = C_{bore} + C_{HP} + C_{HE} + C_{pipeline} + C_{control} \quad (3)$$

式中: $C_{bore} = N_b \times H_b \times c_b$,为钻孔初投资,元; $C_{HP} = P_{HP} \times c_{HP}$,为热泵初投资,元; $C_{HE} = A_{HE} \times c_{HE}$,为换热器初投资,元; $C_{pipeline}$ 为管路系统投资费用,元; $C_{control}$ 为控制系统投资费用,元; $C_{pipeline} + C_{control}$ 可按投资比例计算,一般为总投资的10%~20%。

相关设备与经济参数设置具体如下表4所示。

2.2.2 技术性目标

本文技术性指标选取系统能效比作为优化目

表4 设备与经济参数设置

Table 4 Equipment and economic parameters

参数	符号	数值	单位
热泵模型	-	Type 927 / 性能曲线	-
水泵效率	η_p	0.75	-
钻孔单位投资	c_b	100	元/m
换热器单位投资	c_{HE}	1000	元/m ²
热泵单位投资	c_{HP}	800	元/kW
电价	c_e	0.6	元/kWh
折现率	i	6	%
使用寿命	n	20	年
管路及控制投资比例	-	10~20	%

标,系统能效比计算方法为:

$$\text{COP}_{\text{sys}} = \frac{Q_{\text{total}}}{E_{\text{total,in}}} \quad (4)$$

式中: COP_{sys} 为系统能效比; Q_{total} 为全年热泵向用户提供的总热量,kWh; $E_{\text{total,in}}$ 为全年系统总耗电量,kWh。

由于两个优化目标对关键参数的取值存在明显矛盾,为了避免单一目标优化导致参数取值趋向于设计边界,本研究采用权重系数法,通过给两个目

标函数设定权重系数，将加权后的综合目标函数 F 作为唯一优化目标。

$$F = \omega_1 Z_{\text{norm}} + \omega_2 \text{COP}_{\text{norm}} \quad (5)$$

式中： ω_1, ω_2 为权重系数； $Z_{\text{norm}}, \text{COP}_{\text{norm}}$ 分别为归一化后的费用年值和系统能效比。

由于费用年值 Z 与系统能效比 COP_{sys} 两个目标的数值量级差异巨大，直接加权求和会导致优化算法几乎完全被费用年值主导，从而失去多目标的意义，因此对两个优化目标做归一化处理：

$$Z_{\text{norm}} = \frac{Z - Z_{\min}}{Z_{\max} - Z_{\min}} \quad (6)$$

$$\text{COP}_{\text{norm}} = \frac{\text{COP} - \text{COP}_{\min}}{\text{COP}_{\max} - \text{COP}_{\min}} \quad (7)$$

式中： $Z_{\min}, Z_{\max}, \text{COP}_{\min}, \text{COP}_{\max}$ 分别是当前工况下可能的最小/最大值。

由于系统能效比 COP 取最大为最优，而软件中默认最小为最优，因此在设定优化目标时默认取负值。

本研究采用层次分析法（AHP）对两项指标进行权重分配，在当前“双碳”战略背景下，系统能效对于降低碳排放具有重要意义^[21]，因此在AHP权重分配中赋予技术性指标略高于经济性指标的相对重要度，参照 Satty 1-9 标度法^[22]构造判断矩阵 A ，将两者相对重要度设定为 1.5，介于同等重要与稍微重要之间，以此建立二阶正反交矩阵：

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/1.5 \\ 1.5 & 1 \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 & 0.6667 \\ 1.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

为求得各目标的客观权重，采用算术平均法对判断矩阵 A 进行按列归一化处理。矩阵元素归一化公式为：

$$a'_{ij} = a_{ij} / \sum_{k=1}^n a_{kj} \quad (9)$$

计算可得归一化后的矩阵为：

$$A' = \begin{bmatrix} \frac{1}{1+1.5} & \frac{2/3}{2/3+1} \\ \frac{1.5}{1+1.5} & \frac{1}{2/3+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 \\ 0.6 & 0.6 \end{bmatrix} \quad (10)$$

随后，对归一化矩阵进行按行求平均值，得出特征权重向量 W ：

$$W = [w_1, w_2]^T = [0.4, 0.6]^T \quad (11)$$

由此确立了多目标优化的最终权重分配：经济性权重（费用年值） $\omega_1=0.4$ ，技术性权重（系统能效比） $\omega_2=0.6$ 。根据矩阵理论，二阶正反交判断矩阵具有完全一致性（即其最大特征根 $\lambda_{\max}=2$ ，一致

性指标 $CI=0$ ），无需进行一致性检验，该权重分配合理有效。

为了使后续参数匹配方法具有更广泛的工程适用性，需覆盖不同供热规模与工业余热供给水平的典型场景，且为避免余热不足或余热大量浪费导致的热量短缺或热量累积，引入源荷比 R_{sh} ，计算公式如下：

$$R_{\text{sh}} = \frac{Q_w}{Q_i} \quad (12)$$

式中： Q_w 为年累计可提取工业余热总量，GJ； Q_i 为年建筑累计热负荷需求总量，GJ。

总工业余热热量可按式（13）计算：

$$Q_w = m_w \rho c_p (T_w - T_{\text{ref}}) \tau \quad (13)$$

式中： m_w 为工业余热逐时流量， m^3/h ； ρ 为载热流体密度， kg/m^3 ； c_p 为载热流体比热容， $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ； T_w 为余热温度， $^\circ\text{C}$ ； T_{ref} 为可利用余热的有效温度， $^\circ\text{C}$ ； τ 为全年非采暖季小时数，h。

总负荷需求量可按式（14）计算：

$$Q_i = \int_0^\tau A_h q(t) dt \quad (14)$$

式中： A_h 为建筑供热面积， m^2 ； $q(t)$ 为逐时供暖热指标， W/m^2 ； τ 为全年采暖季总时长，h。

本文设计了涵盖 5~40 万 m^2 的 45 种典型供热面积与工业余热热量，根据余热量的不同将其设为低余热档（ $R_{\text{sh}}=1.45\sim1.8$ ）、中余热档（ $R_{\text{sh}}=1.8\sim2.15$ ）及高余热档（ $R_{\text{sh}}=2.15\sim2.5$ ），具体工况分布如图 6 所示。供热面积对应的逐时热负荷文件基于沈阳市典型气象年数据生成，余热文件保持温度恒定，通过缩放流量实现不同余热量水平。

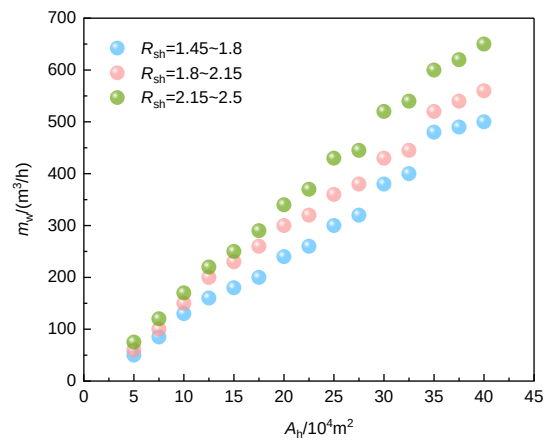


图 6 45 组典型工况的供热面积与余热流量分布
Fig. 6 Distribution of heating area and waste heat flow rate for 45 typical cases

3 优化结果分析与参数匹配方法研究

对每组 (m_w , A_h) 组合, 采用 TRNSYS 耦合 GenOpt 进行优化, 得到的各工况下的钻孔数量与热泵容量随供热面积变化的趋势图。可以看出随着供热面积的增大, 优化后的钻孔数量与热泵容量均呈现非线性增长趋势, 在供热面积较小阶段增速较快, 随规模进一步扩大后增速逐渐放缓, 整体呈现轻微的二次非线性特征, 表明系统在较大规模下具有一定的规模效益。在相同供热面积下, 源荷比较小对应的热泵容量略高于源荷比较大的工况。这是由于在本系统中, 源荷比反映非采暖季工业余热蓄热量与采暖季供热负荷的比值, 源荷比较小说明地下蓄热量相对于供热需求较为有限, 采暖季热泵需承担更大的提温供热任务, 因此需配置更大的热泵装机容量。

在钻孔数量方面, 三组源荷比工况下的差异相对较小, 且随供热面积增大差异略有扩大。总体而言, 供热面积是决定系统配置规模的主导因素, 源荷比在本研究范围内 (1.45~2.5) 为次要影响因素。

3.1 钻孔数量与供热面积参数匹配方法

在跨季节蓄热系统的参数匹配设计中, 为维持地下土壤的长期热量平衡, 供热面积与钻孔数量之间存在着紧密的耦合关系。基于 45 组工况的模拟寻优结果下的数据, 以供热面积 A_h 和源荷比 R_{sh} 为自变量, 对钻孔数量 N_b 进行了非线性曲面拟合, 拟合公式如下式:

$$N_b = z_0 + aA_h + bR_{sh} + cA_h^2 + dR_{sh}^2 + fA_hR_{sh} \quad (15)$$

式中: N_b 为钻孔数量; A_h 为供热面积, 万 m^2 ; R_{sh} 为源荷比, 无量纲; z_0 、 a 、 b 、 c 、 d 、 f 均为待定回归系数。

进行非线性曲面拟合分析后, 得到的 N_b 与 A_h 、 R_{sh} 的拟合曲线图如下图 8 所示, 得到的经验公式如下:

$$N_b = 626.9935 + 161.2663A_h - 883.2605R_{sh} - 1.0994A_h^2 + 206.8181R_{sh}^2 - 4.8071A_hR_{sh} \quad (16)$$

由拟合结果可知, 该拟合模型的决定系数 $R^2 = 0.996$, 调整后的决定系数 $R_{adj}^2 = 0.995$, 模型整体拟合效果良好。对各回归系数进行 t 检验后发现, 供热面积一次项 (a) 和二次项 (c) 的概率值分别为 2.06×10^{-18} 和 7.66×10^{-12} , 均达到极显著水平

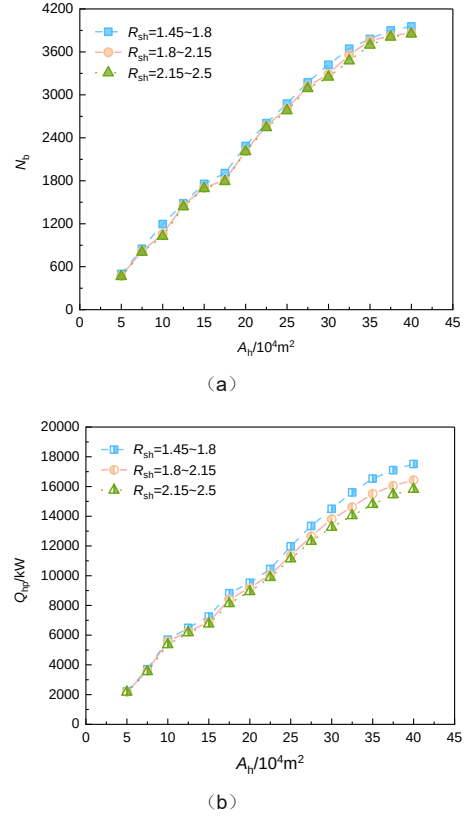


图7 各工况优化后系统参数随供热面积的变化: (a) 钻孔数量; (b) 热泵容量
Fig. 7 Variation of optimized system parameters with heating area under different conditions: (a) number of boreholes; (b) heat pump capacity

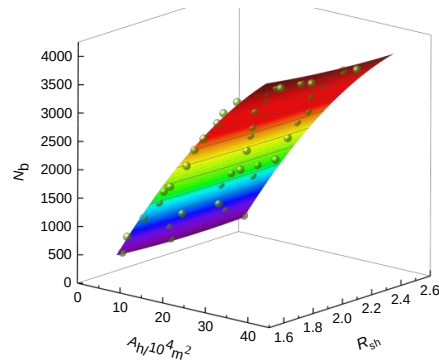


图8 N_b 与 A_h 、 R_{sh} 的拟合曲线图
Fig. 8 Fitting curve of N_b versus A_h and R_{sh}

($p < 0.001$), 是影响钻孔数量的主导因素。源荷比一次项 (b)、源荷比二次项 (d) 及交叉项 (f) 的概率值均大于 0.05, 截距 z_0 的概率值为 0.497, 在统计上未达到显著水平。但考虑到源荷比是本文“源-储-提-荷”参数匹配方法的核心变量, 直接表

征工业余热与供热负荷的关系,若将其剔除,经验公式将变为仅与供热规模相关的单因素模型,无法反应余热利用程度对系统选型的影响,失去工程指导意义。因此,本文在拟合公式中予以保留源荷比相关项,以保证经验公式物理意义的完整性与工程适用性。

3.2 热泵容量与供热面积参数匹配方法

采用相同的拟合分析方法,对 Q_{hp} 与 A_h 、 R_{sh} 的数据进行拟合,得到的经验公式如下式:

$$Q_{hp} = -1363.033 + 727.207A_h + 604.563R_{sh} - 3.054A_h^2 - 28.428R_{sh}^2 - 88.997A_hR_{sh} \quad (17)$$

式中: Q_{hp} 为热泵容量, kW; A_h 为供热面积, 万 m^2 ; R_{sh} 为源荷比, 无量纲。

拟合后发现,该回归模型调整后的决定系数 R^2 达到了 0.9948,整体拟合效果良好。对各回归系数进行 t 检验后发现,供热面积一次项 (a) 和二次项 (c) 的概率值分别为 1.58×10^{-19} 和 1.50×10^{-7} ,均达到极显著水平 ($p < 0.001$),是影响热泵容量的主导因素,热泵容量随供热面积增大而显著提升,二次项系数为微弱负值,表明随供热面积增大容量增长存在微弱放缓趋势,但量级远小于一次项,容量增长总体仍以线性增长为主导特征。供热面积与源荷比的交叉项 (f) 的概率值为 2.38×10^{-5} ,同样达到极显著水平,表明供热面积与源荷比对热泵容量存在显著的交互影响。源荷比一次项 (b)、二次项 (d) 及截距的概率值均大于 0.05,未达显著水平,保留原因同 3.1 节所述。

4 方法验证

为进一步验证本文提出的参数匹配方法的准确性,选取沈阳市某规划新建的 18 万 m^2 与 28 万 m^2 居住小区作为案例对象。为该小区设计基于工业余热的跨季节地理管蓄热系统,首先,将 $A_h=18$ 、 $A_h=28$ (未参与拟合) 代入上文得出的预测公式,直

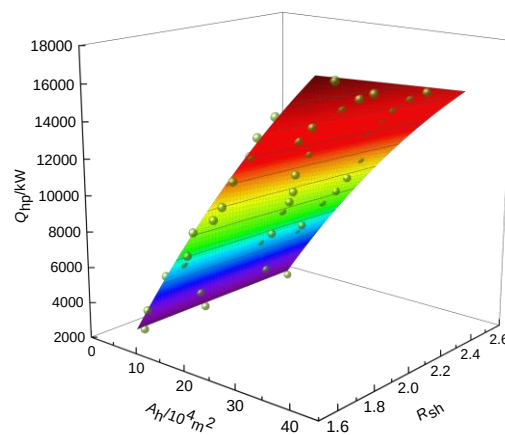


图9 Q_{hp} 与 A_h 、 R_{sh} 的拟合曲线图
Fig. 9 Fitting curve of Q_{hp} versus A_h and R_{sh}

接计算出预测值。随后,在 TRNSYS 仿真平台中重新搭建该工况的系统模型,并使用 GenOpt 软件按照相同的 AHP 多目标权重进行完整迭代寻优,获得模拟最优值。最后,对比两者偏差,结果如图 10 所示,详细数据如表 5 所示。

对比结果可以看出,利用经验公式快速计算出的钻孔数量、热泵容量与模拟寻优后的结果偏差不大,相对误差均控制在 5% 以内,初步验证了本文经验公式在所设定边界条件和拟合范围内的预测能力。为进一步考察经验公式在拟合范围边界之外的适用性,选取 45 万 m^2 作为外推验证案例,将 $A_h=45$ 代入公式,得到预测值,并与模拟寻优结果进行对比,结果如图 11 所示,详细数据如表 6 所示。

由图 11 可知,在 45 万 m^2 外推工况下,钻孔数量的相对误差为 2.59%~4.18%,热泵容量相对误差为 4.39%~5.54%,与拟合范围内的验证结果相比,45 万 m^2 外推工况下误差有所增大,因此不建议用于大幅外推设计。

为了评估本文建立的非线性回归多参数匹配方法在实际工程选型中的综合效益,本文以 35 万 m^2 供暖区域为典型工况,对传统常规选型方案 (按峰

表 5 预测值与模拟值对比结果表

Table 5 Comparison between predicted values and simulation results

A_h (万 m^2)	R_{sh}	模拟值 N_b	预测值 N_b	相对误差 R (%)	模拟值 Q_{hp} (kW)	预测值 Q_{hp} (kW)	相对误差 R (%)
18	1.61	2200	2148	2.36	9488	9058	4.53
18	1.9	2156	2077	3.66	9075	8737	3.72
18	2.34	2133	2037	4.5	8580	8246	3.89
28	1.58	3131	3190	1.88	14160	13558	4.25
28	1.87	3123	3100	0.74	13440	12972	3.48
28	2.36	2974	3030	1.88	12480	11982	3.99

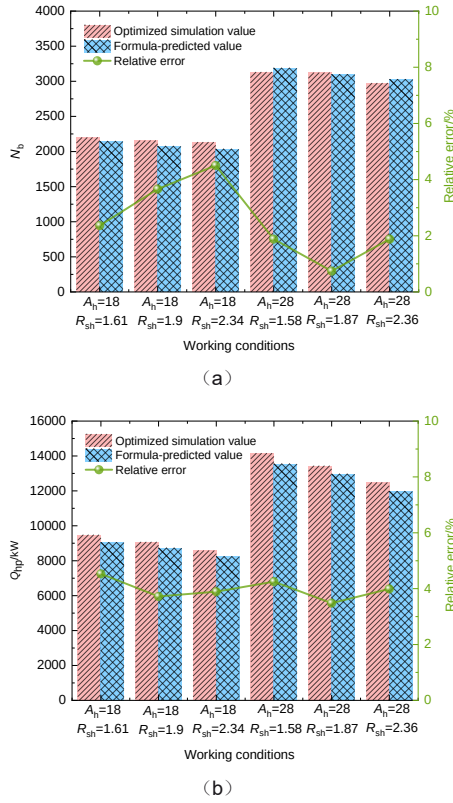


图 10 预测值与模拟值对比结果图：(a) 钻孔数量；
(b) 热泵容量

Fig. 10 Comparison between predicted values and simulation results: (a) number of boreholes; (b) heat pump capacity

值负荷选型，仅满足供热约束不做优化）与基于经验公式的选型方案进行了对比分析，对比包括了经济性（初投资、运行费用、费用年值）、能效水平（系统 COP、耗电量）及环保效益（CO₂排放量）六个关键参数，归一化后的综合效益雷达图如图 12 所示。

本研究中 CO₂排放量仅计算系统运行阶段电力消耗对应的间接碳排放，未考虑设备生产、安装、报废等环节的碳排放，不属于全生命周期碳排放分析，计算公式如下式：

$$E_{CO_2} = W \times EF \quad (18)$$

式中： E_{CO_2} 为 CO₂排放量，t CO₂； W 为系统年耗电量，MWh； EF 为区域电网碳排放因子，采用生态环境部与国家统计局联合发布的《2023 年电力二氧化碳排放因子》中东北区域电力平均二氧化碳排放因子，取值为 0.5122 kg CO₂/kWh。

由上图对比结果可以看出，采用本文的参数匹配方法的系统，在保证小区冬季供热满足用户需求

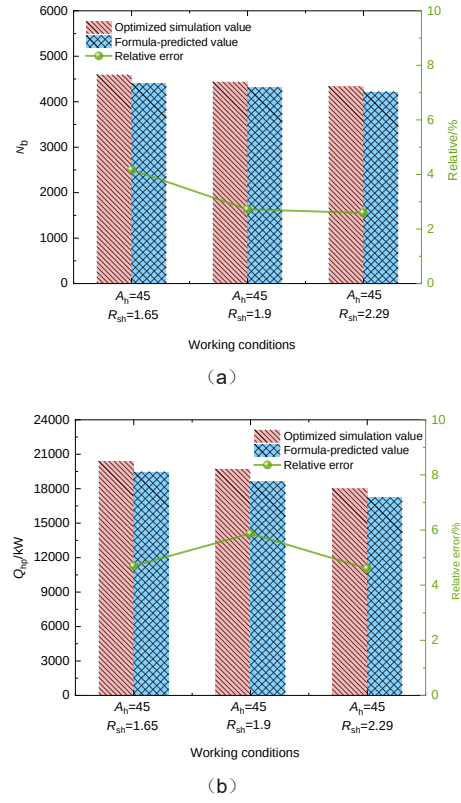


图 11 45 万 m² 工况预测值与模拟值对比结果图：(a) 钻孔数量；(b) 热泵容量

Fig. 11 Comparison between predicted values and simulation results for 450,000 m² condition: (a) number of boreholes; (b) heat pump capacity

的前提下，有效减少了初始钻孔量与热泵容量。相比于常规选型方案，35 万 m² 供暖规模下初投资可以降低约 21.21%，运行费用降低了 10.87%，费用年值降低 14.12%，由于本文采用固定电力排放因子进行运行阶段间接碳排放核算，CO₂排放量变化趋势与系统耗电量一致，优化方案的耗电量与运行阶段间接 CO₂排放量均降低约 10.71%，系统 COP 提高了 12.00%。该综合效益分析进一步印证了本文构建的参数匹配方法不仅具备快速估算工程的便捷性，更能够在不同供热规模下兼顾经济性与节能减排潜力，体现出良好的工程适应性与推广价值。

本研究的经验模型基于沈阳地区的特定气候条件及地质参数，提出的经验公式适用条件为：(1) 气候区：严寒 C 区（以沈阳为代表）；(2) 建筑类型：中小体量居住建筑（5~40 万 m²）；(3) 余热条件：50~60℃ 工业循环冷却水，源荷比 1.45~2.5；(4) 地质条件：与沈阳市类似的土壤热物性参数。对于其他气候区或不同余热温度，匹配方法可能有

表 6 45 万 m² 工况预测值与模拟值对比结果表

Table 6 Comparison between predicted values and simulation results for 450,000 m ² condition							
A_h (万 m ²)	R_{sh}	模拟值 N_b	预测值 N_b	相对误差 R (%)	模拟值 Q_{hp} (kW)	预测值 Q_{hp} (kW)	相对误差 R (%)
45	1.61	4598	4406	4.17	20400	19484	4.49
45	1.9	4437	4316	2.72	19720	18627	5.54
45	2.34	4336	4224	2.59	18020	17228	4.39

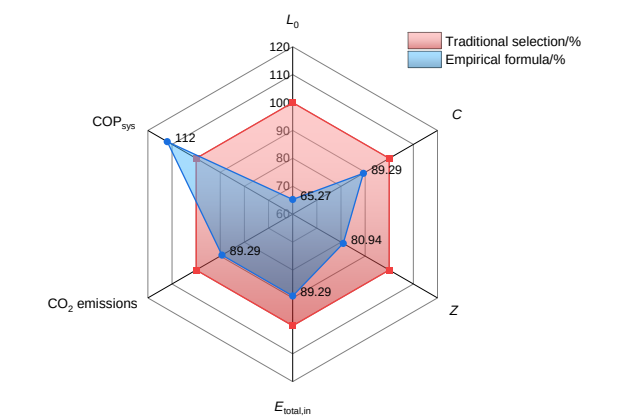


图 12 35 万 m² 工况的综合效益评估雷达图
Fig. 12 Radar chart of comprehensive benefit evaluation for a 350,000 m² Operating Condition

所变化。此外，钻孔成本、电价等经济参数也会影响最优解，实际工程中应根据当地价格水平进行修正。

5 结 论

本文针对循环冷却水余热跨季节地埋管蓄热供热系统初步设计阶段关键参数难以快速确定的问题，建立系统动态仿真模型，开展 45 组供热面积与源荷比组合工况的目标优化，并拟合得到钻孔数量和热泵容量参数匹配公式。主要得出以下研究结论：

- (1) 供热面积对钻孔数量与热泵容量配置起主导作用。随着供热面积增大，二者均呈非线性增长趋势；源荷比对热泵容量具有调节作用，源荷比较小时，热泵容量需求相对增加。
- (2) 基于优化结果建立了钻孔数量、热泵容量与供热面积及源荷比的非线性二阶多项式匹配公式，决定系数均大于 0.99。公式预测值与模拟寻优值的相对误差小于 5%，可用于系统初步设计阶段的快速选型。
- (3) 参数匹配方法可有效改善系统综合性能。以 35 万 m² 供热规模为例，与常规选型方案相比，优化方案初投资、运行费用和费用年值分别降低

21.21%、10.87% 和 14.12%，系统耗电量和 CO₂ 排放量均降低约 10.71%，系统 COP 提高 12.00%。

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.
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.

[2] 张进华, 秦强, 赵香龙, 等. 低品位工业余热利用技术及研究进展[J]. 能源科技, 2022, 20(04): 86-92.
ZHANG J H, QIN Q, ZHAO X L, et al. Technologies and research progress of low-grade industrial waste heat utilization[J]. Energy Science and Technology, 2022, 20(4): 86-92.

[3] 方豪, 夏建军, 江亿. 北方采暖新模式: 低品位工业余热应用于城镇集中供热[J]. 建筑科学, 2012, 28(S2): 11-14+17.
FANG H, XIA J J, JIANG Y. New heating mode in northern China: application of low-grade industrial waste heat to urban district heating[J]. Building Science, 2012, 28(S2): 11-14+17.

[4] 张长兴, 胡松涛, 刘玉峰. 竖直 U 形地埋管换热器优化设计[J]. 暖通空调, 2012, 42(02): 30-35.
ZHANG C X, HU S T, LIU Y F. Optimal design of vertical U-tube ground heat exchangers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2012, 42(2): 30-35.

[5] 杨曙川, 殷勇高, 李晓, 等. 基于湖/河水的跨季节/天混合储热技术实践与优化[J]. 制冷学报, 2025, 46(03): 1-10+31.
YANG S C, YIN Y G, LI X, et al. Practice and optimization of hybrid seasonal/diurnal thermal storage technology based on lake/river water[J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(3): 1-10+31.

[6] 张辉, 侯宏娟, 汉京晓, 等. 跨季节地埋管储热性能模拟及分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(05): 1148-1154.
ZHANG H, HOU H J, HAN J X, et al. Simulation and analysis on performance of seasonal borehole thermal energy storage[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 43 (5): 1148-1154.

[7] 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-term heat charging-discharging characteristics and parameter sensitivity analysis of seasonal borehole thermal energy storage system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2025, 46 (11): 3728-3738.

- [8] Guo F, Zhu X, Zhang J, et al. Large-scale living laboratory of seasonal borehole thermal energy storage system for urban district heating[J]. *Applied Energy*, 2020, 264 : 114763-114763.
- [9] Fang G, Xudong Y. 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 & Buildings*, 2021, 236.
- [10] Fang G, Xiaoyue Z, Pengchao L, et al. Low-grade industrial waste heat utilization in urban district heating: Simulation-based performance assessment of a seasonal thermal energy storage system[J]. *Energy*, 2022, 239(PE).
- [11] Bi Y, Jiang J, Dai Y. Multi-objective optimization and techno-economic assessment of solar-assisted medium-deep borehole seasonal thermal energy storage systems[J]. *Applied Energy*, 2026, 406127246-127246.
- [12] 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.
XIAO C Q, YU M. Optimization reconstruction of ground-source heat pump coupled system based on improved whale optimization algorithm[J]. *Dynamical Systems and Control*, 2025, 14(4): 401-411.
- [13] Minwoo L, Hyeon S H, Sewon L, et al. Multi-objective optimization of solar-assisted ground-source heat pumps for minimizing life-cycle cost and climate performance in heating-dominated regions[J]. *Energy*, 2023, 270.
- [14] 王春林, 郭放, 朱永利, 等. 大规模太阳能跨季节土壤储热系统设计优化[J]. *太阳能学报*, 2021, 42 (04): 320-327.
WANG C L, GUO F, ZHU Y L, et al. Design optimization of large-scale solar seasonal soil thermal storage system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2021, 42(4): 320-327.
- [15] 张俊月, 郭放, 黄海龙, 等. 工业余热跨季节储热系统优化及经济性分析[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(01): 47-53.
ZHANG J Y, GUO F, HUANG H L, et al. Optimization and economic analysis of seasonal thermal energy storage system using industrial waste heat[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(1): 47-53.
- [16] 郭放, 张俊月, 田原, 等. 太阳能采暖系统储热水箱体积匹配研究[J]. *太阳能学报*, 2020, 41(09): 219-226.
GUO F, ZHANG J Y, TIAN Y, et al. Research on volume matching of heat storage tank for solar heating system[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2020, 41(9): 219-226.
- [17] 徐天硕. 太阳能热泵热水系统的参数匹配和调度优化研究[D]. 杭州电子科技大学, 2021.
XU T S. Research on parameter matching and scheduling optimization of solar heat pump hot-water system[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2021.
- [18] Khalajzadeh V, Heidarinejad G, Srebric J. Parameters optimization of a vertical ground heat exchanger based on response surface methodology[J]. *Energy & Buildings*, 2011, 43 (6): 1288-1294.
- [19] 王春林, 郭放. 严寒C区太阳能热水采暖系统设计参数匹配的研究 [J]. *太阳能*, 2021, (06): 29-36.
WANG C L, GUO F. Study on design parameter matching of solar hot-water heating system in severe cold zone C[J]. *Solar Energy*, 2021(6): 29-36.
- [20] Bandalos V T, Montero Á, Fernández E, et al. Finite line-source model for borehole heat exchangers: effect of vertical temperature variations[J]. *Geothermics*, 2009, 38(2): 263-270.
- [21] 中共中央 国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[N]. *人民日报*, 2021-10-25(1版).
CPC Central Committee, State Council of the People's Republic of China. Opinions on completely, accurately and comprehensively implementing the new development philosophy for carbon peaking and carbon neutrality[N]. *People's Daily*, 2021-10-25 (1).
- [22] Saaty T L. *The Analytic Hierarchy Process*[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.