

相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统参数优化

于静梅,赵广,常云,刘耀鸿

(辽宁工程技术大学机械工程学院,辽宁阜新123000)

摘要:为解决相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统关键参数的设计问题,设计了基于TRNSYS软件的相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统模型。利用GENOPT软件调用Hooke-Jeeves算法,以费用年值为优化函数,针对集热器面积、空气源热泵制热量、集热器倾角、集热器方位角、相变储能箱体积以及体积因子等关键参数进行优化分析,并以单位体积下相变储能箱蓄/放热量、集热器逐月平均效率及系统性能系数 COP_s 为优化前后评价指标。结果表明:集热器面积取 187 m^2 、空气源热泵制热量取 40.5 kW 、集热器倾角取 44.1° 、集热器方位角取 -1° 、相变储能箱体积取 4 m^3 、体积因子取 0.1 时得最小费用年值,费用年值同比降低 21% ;优化后单位体积下,相变储能箱年放热量提升了 15.1% ,年蓄热量提升了 16.5% ;以系统性能系数 COP_s 为评价指标,优化后系统整体性能受环境因素影响下降,系统更趋于稳定运行。

关键词:相变储能;太阳能;空气源热泵;Hooke-Jeeves算法;系统优化;数值模拟

中图分类号:TK512.4 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.08.018

[引用本文格式]于静梅,赵广,常云,等.相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统参数优化[J].热能动力工程,2023,38(8):141-150. YU Jing-mei, ZHAO Guang, CHANG Yun, et al. Parameter optimization of heating system of phase change energy storage tank coupled with solar air source heat pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(8):141-150.

Parameter Optimization of Heating System of Phase Change Energy Storage Tank coupled with Solar Air Source Heat Pump

YU Jing-mei, ZHAO Guang, CHANG Yun, LIU Yao-hong

(School of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, China, Post Code: 123000)

Abstract: In order to solve the design problem of the key parameters of the heating system of phase change storage tank coupled with solar air source heat pump, a heating system model of phase change energy storage tank coupled with solar air source heat pump based on TRNSYS software was designed. The Hooke-Jeeves algorithm was invoked by using GENOPT software, and the annual cost value was taken as the optimization function. The key parameters such as collector area, heat produced by air source heat pump, collector inclination, collector azimuth, volume and volume factor of phase change storage tank were optimized and analyzed. The heat storage and release of phase change energy storage tank per unit volume, monthly average collector efficiency and coefficient of performance (COP_s) were used as evaluation indexes before and after optimization. The results show that the minimum annual cost value is obtained when the collector area is 187 m^2 , the heat produced by the air source heat pump is 40.5 kW , the collector inclination is 44.1° , the collector azimuth is -1° , the volume of phase change energy storage tank is 4 m^3 and the volume factor is 0.1 , which is reduced by 21% year over year; after the optimization,

收稿日期:2022-09-21; 修订日期:2022-10-21

基金项目:国家自然科学基金(51774161)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51774161)

作者简介:于静梅(1973-),女,辽宁工程技术大学副教授。

tion, the annual heat release per unit volume of phase change energy storage tank increases by 15.1%, and the annual heat storage per unit volume of phase change energy storage tank increases by 16.5%; with the COP_s as the evaluation index, the overall system performance decreases due to environmental factors after optimization, and the system tends to run more stably.

Key words: phase change energy storage, solar energy, air source heat pump, Hooke-Jeeves algorithm, system optimization, numerical simulation

引 言

太阳能空气源热泵供热系统因其普遍适用性在国内外广泛应用。针对系统中蓄热水箱蓄热量偏小,热损失偏大等问题,国内外学者对太阳能空气源热泵系统进行改进,结合相变材料的高蓄热能力、良好的热稳定性、相变温度恒定等特点将蓄热水箱中储热介质水更换为相变材料,并对相关系统进行设计。孙誉桐等人^[1]设计了添加相变储能的太阳能空气源热泵系统,结果表明,添加相变材料的储能冷凝器可提升系统运行效率、减小环境对太阳能空气源热泵系统运行的影响。闫泽滨等人^[2]设计了太阳能相变蓄热蒸发型空气源热泵复合供热系统,结果表明复合系统采用合理的控制策略能有效提升机组能效比(Coefficient of Performance, COP)。胡文举等人^[3]对低温蓄能型太阳能辅助空气源热泵系统供热与蓄热特性进行研究,结果表明,通过合理设计相变蓄能换热器可实现系统的高效运行。曾乃晖等人^[4]对空气源热泵辅助太阳能热水系统优化进行研究,结果表明,对系统中集热器面积、集热器倾角、水箱容积、热泵功率等参数进行 Hooke-Jeeves 算法优化有利于降低系统运行成本。Maturo 等人^[5]对基于太阳能和蓄热的系统实现智能建筑的能源灵活性进行设计,针对集热器面积与相变储能箱进行优化分析。

以上研究并未针对相变储能箱以及蓄热水箱的体积因子等相关参数进行优化,对于复合系统而言,不同回路的设备参数变化都会影响系统性能。本文在此基础上,采用 TRNSYS 中 GENOPT 调用 Hooke-Jeeves 算法,以费用年值为优化函数,选取相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统中集热器面积、

空气源热泵制热量、集热器倾角、集热器方位角、相变储能箱体积及蓄热水箱体积因子等 6 个关键优化变量来对系统进行参数优化,充分考虑系统性能参数以及单位体积下相变储能箱的蓄热量与放热量,得出最佳运行方案。

1 系统参数

系统模型参照北京市某宿舍所使用的太阳能空气源热泵供热系统搭建。总人数为 100 人,其中人均用水量 80 L/d,热水用水量为 8 000 L/d,最大供热负荷为 37.96 kW/h。每日运行时间 18 h,集中用水时间为 18:00 ~ 24:00,相变储能箱放热时间为 0:00 ~ 10:00 与 20:00 ~ 24:00。供热温度为 55 ℃,冷水设计温度 4 ℃,同时使用系数为 0.8,结霜工况下空气源热泵系数为 0.5。生活用水比例如图 1 所示。详细数据参照《民用建筑节能设计标准》^[6]《空气源热泵辅助的太阳能热水系统(储水箱容积大于 0.6 m³)技术规范》^[7]选择参数,详细数据如表 1 所示。

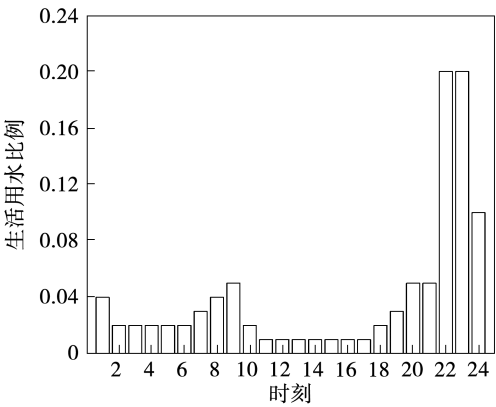


图 1 建筑全天生活用水比例

Fig.1 Proportion of water used for daily living in buildings

表 1 太阳能空气源热泵系统参数

Tab. 1 Solar air source heat pump system parameters

参 数	数 值
集热器面积/ m^2	157.40
集热器倾角/ $(^\circ)$	40
集热泵流量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	11 020
集热泵功率/W	640
工质比热容/ $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	4.19
空气源热泵额定制热量/kW	63.80
空气源热泵额定功率/kW	19.30
额定供回水温度/ $^\circ\text{C}$	45/40
额定 COP	3.30
额定室外干球温度/ $^\circ\text{C}$	7
循环热泵流量/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	4 980
循环热泵功率/W	230
蓄热水箱体积/ m^3	11.02
蓄热水箱高度/m	3
蓄热水箱热损失系数/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$	0.20

2 系统模型

2.1 TRNSYS 模型

本系统依据表 1 参数,在并联非直膨式太阳能空气源热泵供热系统的集热器回路并联相变储能箱回路,并利用 TRNSYS 软件搭建而成,其中主要部件包括真空管集热器部件、空气源热泵 (Air Source Heat Pump, ASHP) 部件、相变储能箱部件、用水负荷部件、蓄热水箱等构成。系统示意图如图 2 所示。

2.2 太阳能集热器模型

选取系统内主要部件进行数学描述,其中真空管集热器集热量为:

$$Q_f = cm_f(T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (1)$$

式中: c —流体介质的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m_{f} —真空管集热器集热工质质量流量, kg/s ; $T_{\text{f,i}}$, $T_{\text{f,o}}$ —集热器侧进、出口介质温度, K 。

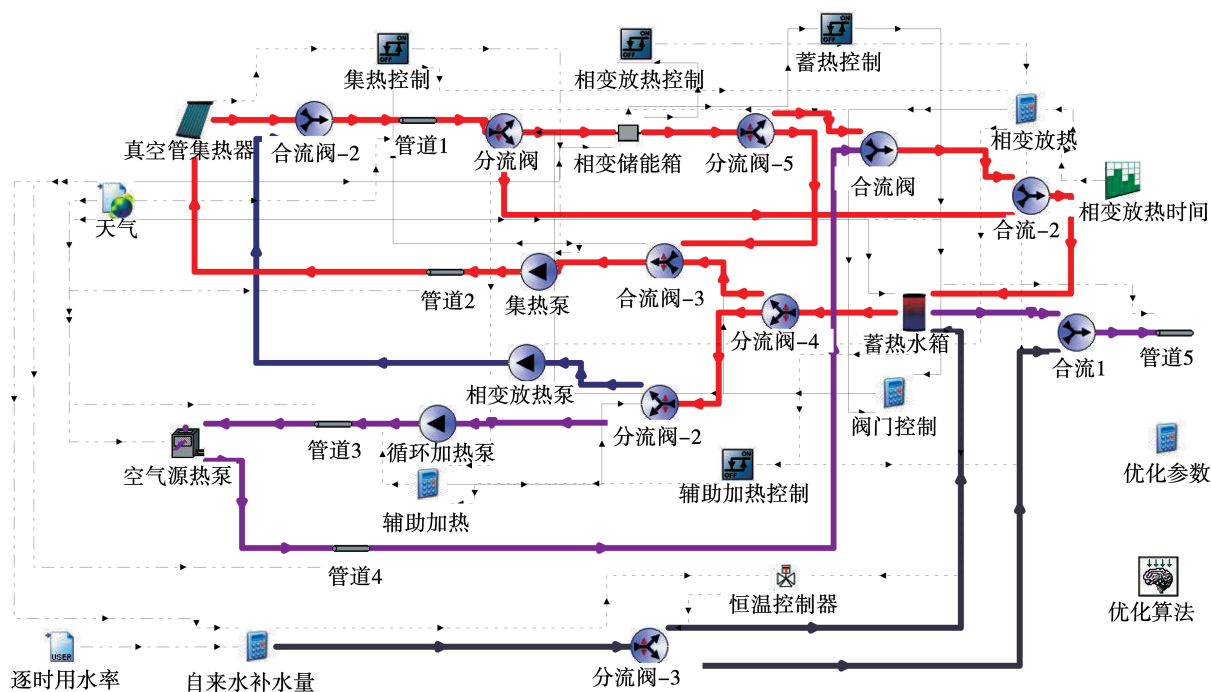


图 2 相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统

Fig. 2 Phase change energy storage tank coupled with solar air source heat pump heating system

真空管集热器的效率为:

$$\eta = a_1 - a_2 \frac{T_{f,i} - T_a}{I_T} - a_3 \frac{(T_{f,i} - T_a)^2}{I_T} \quad (2)$$

式中: a_1 —瞬时效率截距, $W/(m^2 \cdot K)$; a_2 —1 阶热损失系数, $W/(m^2 \cdot K)$; a_3 —2 阶热损失系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

T_a —环境温度,K; I_T —集热面太阳能辐射量, $\text{kJ/h}\cdot\text{m}^2$ 。

本文选用的真空管集热器为 2018TJ-0074 真空管集热器, a_1, a_2 与 a_3 的值分别为 0.73, 2.40 和 0。

集热面太阳能辐射量 I_t 由全球气象软件提供, 图 3 为北京市 2021 年全年太阳辐射量变化图。

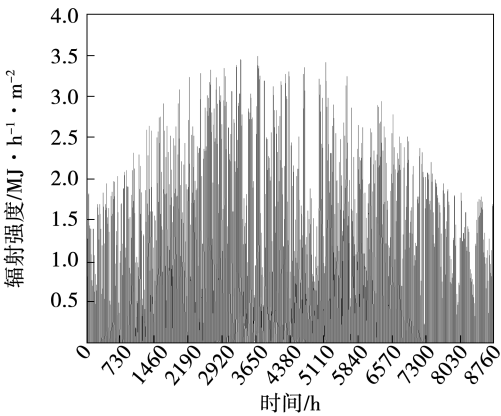


图3 北京市全年集热面太阳辐射量变化图
Fig.3 Variation of annual solar radiation on the heat-collecting surface in Beijing

2.3 空气源热泵模型

空气源热泵模型采用 TRNSYS 软件库中数学模型,本文选用机组制热模式。在制热模式下该数学模型可根据用户提供外部文件计算制热量、额定功率、机组性能参数 COP、空气出口温度及流体力质出口温度等参数。其中空气源热泵的 COP_a 为^[8]:

$$COP_a = \frac{Q_{ASHP}}{P_{ASHP}} \tag{3}$$

式中: Q_{ASHP} —空气源热泵额定制热量,kW; P_{ASHP} —空气源热泵额定功率,kW。

空气源热泵机组内蒸发器出口温度为:

$$T_{a,o} = T_a - \frac{Q_e}{m_a c_p} \tag{4}$$

式中: $T_{a,o}$ —蒸发器出口空气温度,K; Q_e —空气源热泵蒸发器从热源侧的得热量,kW; m_a —蒸发器制热工质质量流量,kg/s; c_p —空气的比定压热容,kJ/(kg·K)。

空气源热泵冷凝器供热侧出口温度为:

$$T_{L,o} = T_{h,o} + \frac{Q_{ASHP}}{cm_{1,hp}} \tag{5}$$

式中: $T_{h,o}$ —供热环路相连侧蓄热水箱管路出口温度,K; $m_{1,hp}$ —冷凝器侧载热介质流量,kg/s。

2.4 蓄热水箱模型

假设箱中冷热流体在箱内完全混合,根据能量守恒的原则,蓄热水箱内部蓄热量为:

$$Q_T = \rho V_x \frac{dT_x}{dt} \tag{6}$$

$$Q_T = Q_f + Q_{ASHP} - Q_s - Q_L \tag{7}$$

式中: ρ —水箱内工质密度,kg/m³; V_x —蓄热水箱体

积,m³; T_x —蓄热水箱内部温度,K; t —时间,s; Q_s —蓄热水箱给供热环路的热量,W; Q_L —蓄热水箱表面散热损失,W。

蓄热水箱提供给供热环路的热量为:

$$Q_s = \rho V_h (T_{h,o} - T_{h,i}) \tag{8}$$

式中: V_h —供热环路介质体积流量,m³/s; $T_{h,i}$ —供热环路相连侧蓄热水箱管路进口温度,K。

蓄热水箱表面热损失 Q_L 为:

$$Q_L = h_x A_x (T_x - T_a) \tag{9}$$

式中: h_x —蓄热水箱平均表面散热系数,W/(m²·°C); A_x —蓄热水箱外表面面积,m²。

2.5 相变储能箱参数

本研究中采用相变温度为 58 ~ 60 °C 的全精炼石蜡^[9]作为相变储能箱蓄热材料。表2给出了相变材料、相变储能箱的物性参数。

表2 相变材料、相变储能箱物性参数
Tab.2 Physical parameters of phase change materials and phase change energy storage tank

材料	参数	数值
相变材料	密度/kg·m ⁻³	843
	固相比热容/kJ·(kg·K) ⁻¹	3.2
	液相比热容/kJ·(kg·K) ⁻¹	2.8
	相变潜热/kJ·kg ⁻¹	218
	相变温度/°C	58 ~ 60
	液相导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.099
相变储能箱	固相导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.082
	体积/m ³	5
	水箱高度/m	1
	热损失系数/W·m ⁻²	0.2

2.6 相变储能箱模型假设

假设箱体内相变材料蓄热放热的瞬态过程:

- (1) 箱体外侧绝缘良好。
- (2) 箱内介质没有横向流动。
- (3) 热交换器内部介质的热性质恒定。
- (4) 相变材料的液体分数和温度分布均匀。
- (5) 罐内无加热装置。

2.7 相变储能箱模型

相变储能箱内部为盘管换热器与相变材料混合组成^[10]。相变过程主要分为固化、融化及混合态。选用液相分数作为区分,0 为固态,1 为液态,0 ~ 1 为混合态。换热器与相变材料之间换热量为:

$$Q_{hx} = m_{hx} c_{hx} (T_{hx,o} - T_{hx,i}) = m_b \frac{dh_b}{dt} \tag{10}$$

式中: m_{hx} —换热器内部流动工质的质量流量, kg/h; c_{hx} —换热器内流动工质的比热容, kJ/(kg·K); $T_{hx,o}$ —换热器出口温度, K; $T_{hx,i}$ —换热器进口温度, K; m_b —相变材料融化时质量流量, kg/s; h_b —相变材料焓值, kJ/kg。

相变储能箱出口温度为 T_b 时, 相变材料的焓值变化率为:

$$\frac{dh_b}{dt} = \begin{cases} c_s \frac{dT_b}{dt}, & T_b < T_{ml} \\ \Delta h_s \frac{d\varepsilon_b}{dt}, & T_{ml} < T_b < T_{mh} \\ c_l \frac{dT_b}{dt}, & T_{mh} < T_b \end{cases} \quad (11)$$

式中: c_s, c_l —固相和液相的比热容, kJ/(kg·K); T_b —相变材料温度, K; Δh_s —相变潜热变化量, kJ/kg; ε_b —液相分数; T_{ml}, T_{mh} —凝固温度和熔化温度, K。在熔化区 ($T_{ml} < T_b < T_{mh}$) 液相分数 ε_b 为:

$$\varepsilon_b = \frac{T_b - T_{ml}}{T_{mh} - T_{ml}} \quad (12)$$

$$T_b = (1 - \varepsilon_b) T_{ml} + \varepsilon_b T_{mh} \quad (13)$$

对公式(12)求关于时间步长的导数得:

$$\frac{d\varepsilon_b}{dt} = \frac{1}{T_{mh} - T_{ml}} \frac{dT_b}{dt} \quad (14)$$

$$\frac{dh_b}{dt} = \frac{dT_b}{dt} \times \begin{cases} c_s, & T_b < T_{ml} \\ \frac{\Delta h_s}{T_{mh} - T_{ml}}, & T_{ml} < T_b < T_{mh} \\ c_l, & T_{mh} < T_b \end{cases} \quad (15)$$

$$c_b = \begin{cases} c_s, & T_b < T_{ml} \\ c_e = \frac{\Delta h_s}{T_{mh} - T_{ml}}, & T_{ml} < T_b < T_{mh} \\ c_l, & T_{mh} < T_b \end{cases} \quad (16)$$

式中: c_b —相变材料比热容, kJ/(kg·K); c_e —混合态相变材料比热容, kJ/(kg·K)。

箱体外壁绝热, 箱体净能量变化以及液相分数变化率 ΔQ 为:

$$\Delta Q = Q_{hx} \quad (17)$$

$$\Delta \varepsilon_b = \frac{\Delta Q \Delta t}{h_s M_b} \quad (18)$$

式中: h_s —相变潜热, kJ/kg; M_b —相变材料质量, kg。

根据液相分数的变化可以得到相变储能箱的热量变化。

2.8 相变储能箱模型验证

文献[11]对盘管式相变换热器进行了详细的测试, 通过向相变储能箱进口输入恒温冷热流体来与相变储能箱内部相变材料进行热量交换。图4为基于该实验条件建立的实验模型放热特性。由图4可知, 蓄热特性与放热特性的模拟值与实验值吻合较好, 蓄热特性测试最大误差为6.2%, 最小误差为0.17%; 放热特性测试最大误差5.6%, 最小误差2.0%。证明了 TRNSYS 仿真模型的准确性。

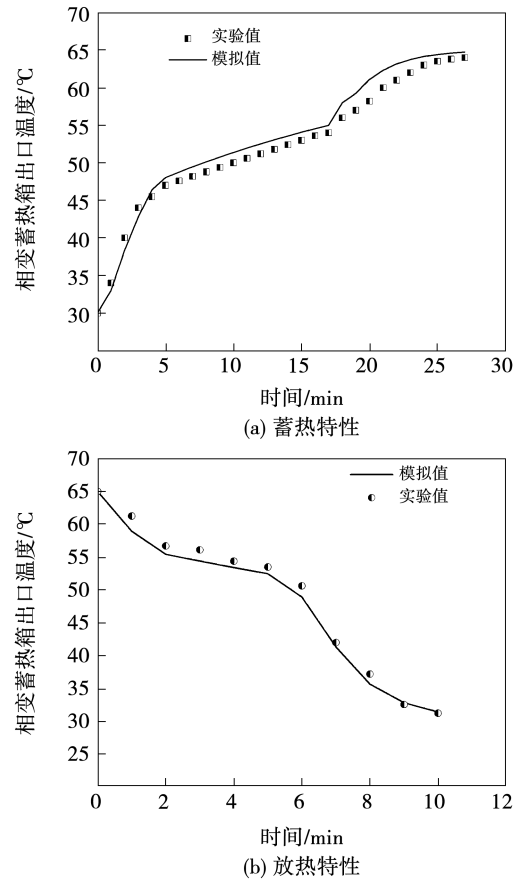


图4 数值模型蓄、放热特性与实验模型蓄、放热特性对比

Fig.4 Comparison of heat storage and release characteristics between numerical model and experimental model

2.9 系统运行策略

集热循环采用温差控制器的信号由集热器出口温度 $T_{r,o}$ 与蓄热水箱底部温差即集热器入口温度 $T_{r,i}$ 温差控制。温差上限取 8 °C, 温差下限取 2 °C。当 ΔT_r 大于 8 °C, 集热泵开启; ΔT_r 小于 2 °C, 集热泵关闭。蓄热水箱内部平均温度设定值为 58 °C, 温差

上限为 2 ℃,下限为 0 ℃。当蓄热水箱内部平均温度达到要求后,温差调节停止,否则调节信号开启,相变储能箱放热,放热时间为 0:00 ~ 10:00 与 20:00 ~ 24:00。相变蓄热温差控制器主要检测相变储能箱液相分数,液相分数小于 0.9 时,相变蓄热温差控制信号开启,否则关闭。差分上限为 0.1,差分下限为 0。相变蓄热时间控制器控制信号由集热器出口温度决定,集热器出口温度大于 55 ℃ 开启,否则关闭,运行时间为每天 10:00 ~ 20:00。

3 Hooke-Jeeves 优化算法设计

3.1 Hooke-Jeeves 算法

Hooke-Jeeves 算法是通过设计惩罚函数来避免探索方向错误,故本文选用 Hooke-Jeeves 算法来计算目标函数。TRNSYS 软件中 GENOPT 软件可以调用 Hooke-Jeeves 算法来同时优化多个变量^[12]。选择一个起点 $y^{(0)}$,变量增量 $\Delta j(j=1,2,3,\cdots,N)$,一个阶跃缩减因子 $\beta > 1$ 和一个收敛终止参数 ε ,设置起始参数 $K=0$,设置变量的边界条件。以起始参数带入的起点 $y^{(K)}$ 为基准,执行探索性移动。探索性移动的结果为 y 。Hooke-Jeeves 算法优化流程如图 5 所示。

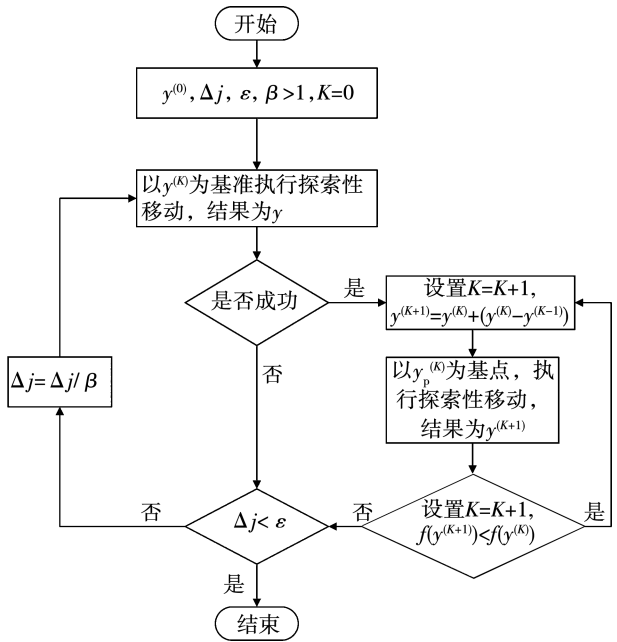


图 5 Hooke-Jeeves 算法优化流程图

Fig. 5 Flowchart of Hooke-Jeeves algorithm optimization

3.2 优化条件及参数

选取集热器面积、集热器面积对应蓄热水箱体积因子、集热器倾角、集热器方位角、空气源热泵制热量和相变储能箱体积 6 个变量来对相变储能箱耦合太阳能空气源热泵系统进行参数优化。根据北京市地理条件及环境因素,各优化变量选取区间如表 3 所示。

表 3 优化参数取值区间及步长

Tab.3 Value interval and step length of optimization parameters

参数	取值区间	步长
集热器集热面积/m ²	(125,200)	5
集热器倾角/(°)	(20,60)	2
方位角/(°)	(-10,10)	1
蓄热水箱体积因子	(0.04,0.11)	0.01
空气源热泵制热量/kW	(30,80)	2
相变储能箱体积/m ³	(2,8)	0.50

3.3 优化函数

相变储能箱耦合太阳能空气源热泵供热系统的初始投资主要用于购买太阳能集热器、空气源热泵机组、蓄热水箱、相变储能箱、管道、泵等其他附属设备。考虑当地电价 0.51 元/(kW·h),系统使用寿命 15 年等因素,系统设备的造价成本 CI 可计算为:

$$CI = A \times E_s + V_1 \times E_T + Q_{ASHP} \times E_A + V_2 \times E_C + E_p \tag{19}$$

式中: A—集热器面积, m²; E_s—集热器成本及相关建设成本, 850 元/m²; V₁—蓄热水箱体积 m³; E_T—蓄热水箱成本, 600 元/m³; E_A—空气源热泵机组额定制热量成本, 2 400 元/kW; V₂—相变储能箱体积, m³; E_C—相变储能箱成本, 7 600 元/m³; E_p—水泵及配件成本, 18 000 元。

相变储能箱耦合太阳能空气源热泵系统的运行成本主要由太阳能集热泵、空气源热泵机组和相变放热泵产生。运行成本 CO 为:

$$CO = (W_1 + W_2 + W_3 + W_4) \times E \tag{20}$$

式中: W₁—集热泵的能耗, kW; W₂—空气源热泵机组的能耗, kW; W₃—空气源热泵机组能耗, kW; W₄—相变集热泵能耗, kW; E—北京市实时电价, 0.51 元/(kW·h)。

工程经济学中常用的费用年值法^[13]来计算构造复合加热系统的目标优化函数,即:

$$Z = CO + \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} CI$$

(21)

式中: Z —费用年值,元; i —贷款年利率,5.5%; n —系统运行年限,15 a。

3.4 评价模型

为了验证系统优化前后的性能参数变化,考虑相变储能箱体积变化,采用单位体积下相变储能箱年蓄/放热量、逐月集热器集热效率^[14]、系统性能参数^[15] COP_s 为评价指标,对系统评价分析。系统性能参数 COP_s 表示为:

$$COP_s = \frac{\int_0^t (Q_f + Q_{ASHP}) dt}{\int_0^t (W_1 + W_2 + W_3 + W_4) dt}$$

(22)

4 优化实例结果及分析

4.1 优化结果

利用 GENOPT 软件调用 Hooke-Jeeves 算法从系统费用年值角度来对本系统进行单目标多参数同步优化,其中 Hooke-Jeeves 算法计算过程中网格尺寸分频为 2,以指数增量 1 增加,减少步数为 4 运行,优化结果如图 6 所示,优化变量变化如表 4 所示。

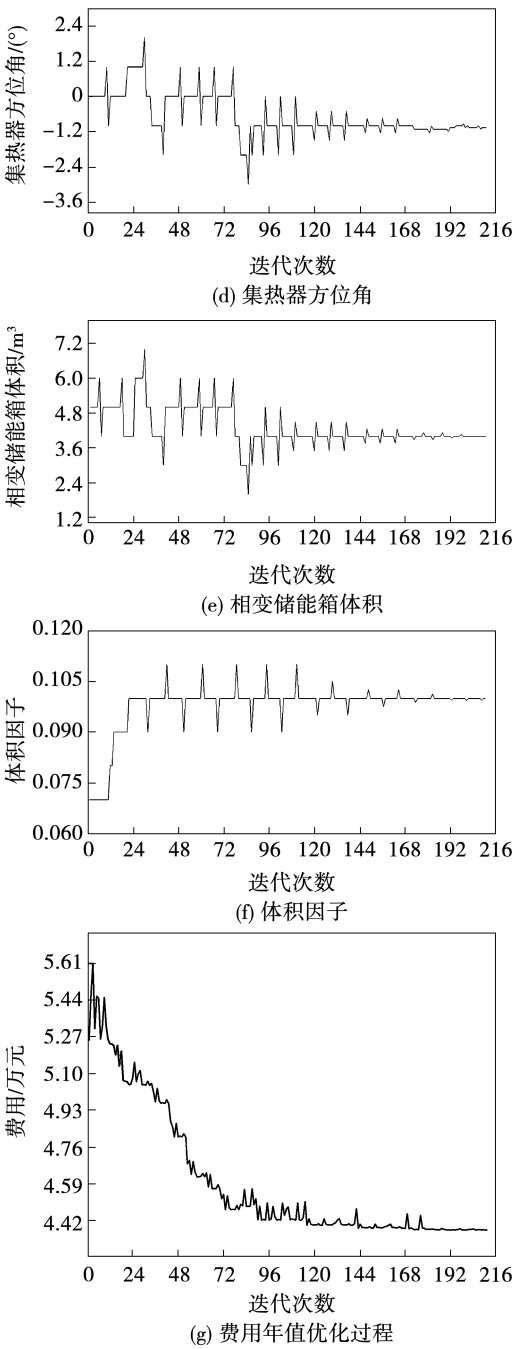
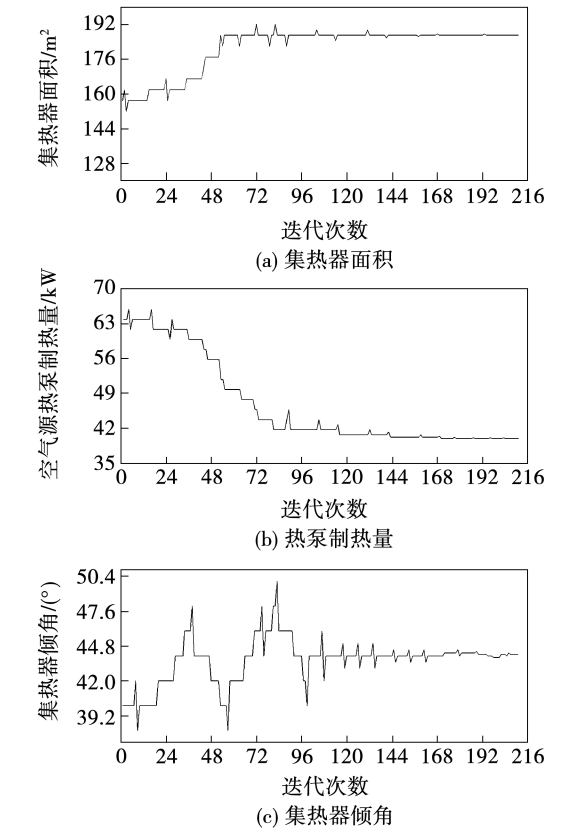


图 6 优化变量及费用年值变化

Fig.6 Annual value changes of optimization variables and costs

表 4 优化变量取值变化

Tab.4 Value changes of optimization variables

变量	优化前	优化后
集热器面积/m ²	157	187
热泵制热量/kW	63.8	40.5
集热器倾角/(°)	40	44.1
集热器方位角/(°)	0	-1
相变储能箱体积/m ³	5	4
体积因子	0.07	0.1

由图 6(a) ~ (f) 可知,迭代优化过程中,集热器面积 187 m²、空气源热泵制热量 40.5 kW、相变储能箱体积 4 m³、集热器倾角 44.1°、方位角 -1°、蓄热水箱体积因子为 0.1 时得到最优解。由图 6(g) 可知,随着迭代次数的增加,目标函数收敛明显,波动较小。系统费用年值由 56 100 元降至 43 750 元,同比降低 22%。Hooke-Jeeves 算法在实际工况下,可对系统进行优化来降低费用年值。

图 7 为优化前后单位体积下相变储能箱年蓄热量及年放热量。由图 7 可知,优化后单位体积下相变储能箱蓄热量由 6 651.5 kW 增至 7 754.4 kW,同比增加 16.5%;优化后单位体积下相变储能箱放热量由 6 617.2 kW 增至 7 621.6 kW,同比增加 15.1%;优化后相变储能箱蓄热量与放热量均有上升,说明优化算法对于提升相变储能箱储热量有明显效果,单位体积下相变储能箱热损失由优化前的 34.3 kW 增至 132.8 kW。

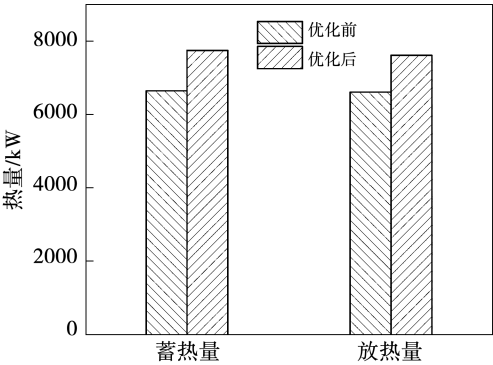


图 7 优化前后单位体积下相变储能箱年蓄热量及年放热量

Fig. 7 Annual heat storage and release of phase change energy storage tank per unit volume before and after optimization

图 8 为优化前后逐月平均集热效率变化。由图 8 可知,优化后集热器逐月集热效率上升,集热器逐月集热效率在 2 月达到 50%,为全年最高;集热器逐月集热效率最大增幅为 1 月至 2 月。优化前后对比逐月集热效率可知,优化后系统逐月集热效率均大于优化前系统逐月集热效率,优化算法对集热器性能参数增提明显,复合系统中太阳能吸收的热量增加。

图 9 为优化前后系统性能系数 COP_s 变化。由图 9 可知,优化后系统性能系数 COP_s 增加明显,可证明优化算法的可靠性。在 1 月 5 日至 1 月 7 日系

统性能系数 COP_s 为上升趋势,优化后 COP_s 增幅速度大于优化前 COP_s,而在 1 月 7 日至 1 月 9 日, COP_s 为下降趋势,优化后 COP_s 下降速度小于优化前 COP_s,说明优化后系统整体性能受环境因素影响下降,系统更趋于稳定运行。

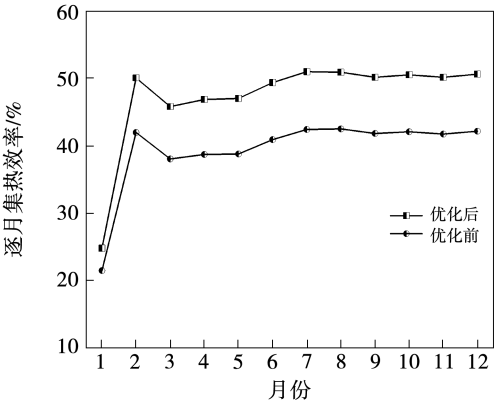


图 8 优化前后逐月平均集热效率变化

Fig. 8 Changes of monthly average heat collecting efficiencies before and after optimization

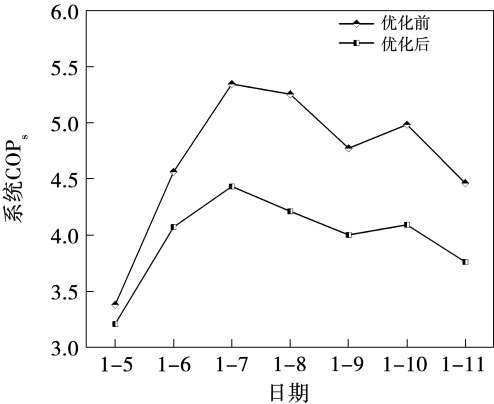


图 9 优化前后系统性能系数 COP_s 变化

Fig. 9 Changes of the COP_s before and after optimization

4.2 敏感性分析

为进一步研究优化变量对最小生命周期成本的影响,选取集热器面积、集热器倾角、相变储能箱体积、空气源热泵制热量、蓄热水箱体积因子 5 个优化变量进行敏感性分析^[16]。设优化变量为空气源热泵制热量、蓄热水箱体积因子、相变储能箱体积、集热器倾角和集热器面积,选用相对灵敏度 S_i 作为评价标准,相对灵敏度数值大小表示优化变量对目标函数的影响大小。使优化变量随最优值进行[+ 10%,

+5% , +10% , -5% , -10%] 的变化,得到相应目标函数的变化值,用以计算 S_i ,相对灵敏度为:

$$S_i = \frac{\partial(f_i)/f_{i, \text{opt}}}{\partial(\pi_i)/\pi_{i, \text{opt}}} \tag{23}$$

式中: $\partial(f_i)$ —第 i 个优化变量引起的 Z 变化值;
 $f_{i, \text{opt}}$ —第 i 个优化变量最优值对应的 Z 值; $\partial(\pi_i)$ —第 i 个优化变量的变化值; $\pi_{i, \text{opt}}$ —第 i 个优化变量的最优值。带入优化变量变化值得到对应 S_i ,如表 5 所示。

表 5 各优化变量的相对灵敏度

Tab. 5 Relative sensitivity of each optimization variable

优化变量	相对灵敏度数值
集热器面积	0.231
空气源热泵制热量	0.222
蓄热水箱体积因子	-8.30×10^{-3}
相变储能箱体积	5.96×10^{-2}
集热器倾角	4.89×10^{-3}

由表 5 可知,集热器面积的相对灵敏度最高,为 0.231;空气源热泵制热量的相对灵敏度为 0.222;蓄热水箱体积因子的相对灵敏度最低,为 -8.30×10^{-3} ;相变储能箱体积与集热器倾角的相对灵敏度分别为 5.96×10^{-2} 与 4.89×10^{-3} 。优化变量对目标函数的影响大小依次为:集热器面积 > 空气源热泵制热量 > 相变储能箱体积 > 集热器倾角 > 蓄热水箱体积因子。优化变量中集热器面积与空气源热泵制热量为目标函数的主要影响因素,太阳能空气源复合系统中增加集热器供热比重并降低空气源热泵制热比重有利于降低系统费用年值。集热器面积与空气源热泵制热量在降低设备费用年值上尤为明显,空气源热泵机组制热量变化不仅影响设备造价成本,同时也影响系统运行成本。即相变储能箱在满足夜间供热需求下,较少造价成本即可满足系统供热需求;增加蓄热水箱体积有利于降低系统费用年值。

5 结 论

本文基于 Hooke-Jeeves 算法针对相变储能箱耦合太阳能空气源热泵系统的关键参数进行优化研究,分析结果总结如下:

(1) 迭代优化过程中,集热器面积 187 m²、空

气源热泵制热量 40.5 kW、相变储能箱体积 4 m³、集热器倾角 44.1°、方位角 -1°、蓄热水箱体积因子为 0.1 时得到最优解。

(2) 太阳能空气源复合系统中增加集热器供热比重并降低空气源热泵制热比重有利于降低系统费用年值,节约成本;集热器面积与空气源热泵制热量在降低费用年值上尤为明显;相变储能箱在满足夜间供热需求下,较少造价成本即可满足系统供热需求;增加蓄热水箱体积有利于降低系统费用年值。

(3) 优化后相变储能箱蓄热量及放热量均有上升,优化算法对于提升相变储能箱储热量有明显提升;优化后集热器面积增加、集热器集热性能上升,集热器出口温度增加导致相变储能箱热损失上升。

(4) 以系统性能系数 COP_s为评价指标,优化后系统整体性能受环境因素影响下降,系统更趋于稳定运行。

参考文献:

[1] 孙誉桐,蒋绿林,范文英. 基于相变储能的太阳能空气源热泵系统的研究[J]. 可再生能源,2021,39(2):169-174.
SUN Yu-tong, JIANG Lyu-lin, FAN Wen-ying. Research on solar air source heat pump system based on phase change energy storage [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(2):169-174.

[2] 闫泽滨,马素霞,李小刚. 太阳能-相变蓄热蒸发型空气源热泵复合供热系统的设计[J]. 可再生能源,2018,36(2):209-214.
YAN Ze-bin, MA Su-xia, LI Xiao-gang. Design of solar energy-phase change heat storage evaporative air-source heat pumps compound heating system [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(2):209-214.

[3] 胡文举,胡鹏程,邵正日,等. 低温蓄能型太阳能辅助空气源热泵系统供热与蓄热特性研究[J]. 可再生能源,2021,39(11):1455-1462.
HU Wen-ju, HU Peng-cheng, SHAO Zheng-ri, et al. Experimental study on characteristics and performance of solar-assisted air source heat pump based on low temperature thermal energy storage [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(11):1455-1462.

[4] 曾乃晖,袁艳平,孙亮亮,等. 基于 TRNSYS 的空气源热泵辅助太阳能热水系统优化研究[J]. 太阳能学报,2018,39(5):1245-1254.
ZENG Nai-hui, YUAN Yan-ping, SUN Liang-liang, et al. Optimization on air source heat pump assisted solar water heating system based on TRNSYS [J]. Acta Energinae Solaris Sinica, 2018, 39(5):1245-1254.

[5] MATURO A,BUONOMANO A,ATHIENTIS A. Design for energy flexibility in smart buildings through solar based and thermal storage systems;modelling,simulation and control for the system optimization[J]. Energy,2022,260:125–140.

[6] GB 50555–2010,民用建筑节能设计标准[S].
GB 50555–2010,Design standard for water saving in civil buildings [S].

[7] GB/T 26973–2011,空气源热泵辅助的太阳能热水系统(储水箱容积大于0.6 m³)技术规范[S].
GB/T 26973–2011,Air source heat pump assisted solar water heating system (storage tank volume >0.6 m³) technical specification [S].

[8] 曾乃晖,袁艳平,孙亮亮,等. 基于聚类分析法的空气源热泵辅助太阳能热水系统气象分类研究[J]. 太阳能学报,2017,38(11):3067–3076.
ZENG Nai-hui,YUAN Yan-ping,SUN Liang-liang,et al. Meteorological classification of air source heat pump assisted solar water heating system based on cluster analysis [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica,2017,38(11):3067–3076.

[9] 周跃宽,俞 准,贺进安,等. 新型结构相变蓄热水箱模型研究及应用分析[J]. 建筑科学,2017,33(2):27–33.
ZHOU Yue-kuan,YU Zhun,HE Jin-an,et al. Model and application of a domestic hot-water tank with a novel structure comprising a phase-change material [J]. Building Science, 2017, 33 (2): 27–33.

[10] ABBASSI Y,BANIASADI E,AHMADIKIA H. Transient energy storage in phase change materials,development and simulation of a new TRNSYS component[J]. Journal of Building Engineering, 2022,50:104–118.

[11] 李南烁,汤梓聪,伍健宜,等. 翅片盘管式相变储热器传热性能研究[J]. 广东工业大学学报,2019,36(2):91–96.

LI Nan-shuo,TANG Zi-cong,WU Jian-yi,et al. An experimental research of heat transfer of finned-coil phase change heat storage unit [J]. Journal of Guangdong University of Technology,2019,36(2):91–96.

[12] NEDIC V,CVETANOVIC S,DESPOTOVIC D,et al. Data mining with various optimization methods[J]. Expert Systems with Applications,2014,41:3993–3999.

[13] WANG Zhi-guo,CHEN Hao-yu,SUN Xiao,et al. Optimizing the solar-air hybrid source heat pump heating system based on the particle swarm algorithm [J]. Energy Reports, 2022, 8 (S7): 379–393.

[14] 罗权权,李保国,朱传辉,等. 蓄能型空气式太阳能集热器热效率研究[J]. 热能动力工程,2019,34(12):116–121.
LUO Quan-quan,LI Bao-guo,ZHU Chuan-hui,et al. Study on the thermal efficiency of energy storage air solar collector [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2019,34(12):116–121.

[15] 展 浩,吴荣华,于 灏. 日间供暖太阳能热泵系统负荷分析及面积优化[J]. 热能动力工程,2022,37(5):124–130.
ZHAN Hao,WU Rong-hua,YU Hao. Load analysis and area optimization of solar heat pump system for daytime heating [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(5):124–130.

[16] 王汉伟,朱 兵,吴冬梅. 太阳能辅助空气源热泵系统多地区适用性研究[J]. 热力发电,2022,51(5):18–26.
WANG Han-wei,ZHU Bing,WU Dong-mei. Research on multi-regional applicability of solar energy-assisted air source heat pump system [J]. Thermal Power Generation,2022,51(5):18–26.

(姜雪梅 编辑)