# 太阳能辅助空气源热泵采统 多地区适用性研究

王汉伟<sup>1</sup>,朱 兵<sup>1</sup>,吴冬梅<sup>2</sup> (1.贵州大学电气工程学院,贵州 贵阳 550025; 2.贵州新能源开发投资股份有限公司,贵州 贵阳 550000)

[摘 要]为探究太阳能辅助空气源热泵系统在不同太阳能资源等级地区的适用性,根据年太阳辐照量的不同,依次选取太阳能资源等级为I—IV级的拉萨、张家口、杭州、贵阳作为研究对象,使用TRNSYS软件进行系统的模拟。选择热泵功率、水箱容积、电辅热功率、集热器面积、集热器方位角和倾斜角6个参数作为优化变量,以生命周期成本为目标函数,利用粒子群优化算法得到各地区的最佳设备参数,并对优化后的系统进行经济性、敏感性分析。研究结果表明:拉萨和张家口地区的太阳能辅助空气源热泵系统最优运行方式为热泵搭配集热器,而杭州和贵阳地区的系统最优运行方式则为热泵搭配电辅热;其中,贵阳地区的热泵运行效率最高,为2.94,拉萨地区的系统运行效率最高,为2.26,杭州地区的系统单位制热量成本低,为0.48元/kW;选用相对灵敏度分析可知,热泵功率对各个地区系统的生命周期成本均具有显著影响。所得结果可为太阳能辅助空气源热泵系统的优化设计提供相应的理论依据。

[关 键 词]太阳能;空气源热泵;粒子群算法;TRNSYS软件 [中图分类号]TK519 [文献标识码]A [DOI编号]10.19666/j.rlfd.202110221

[引用本文格式] 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 Hanwei, ZHU Bing, WU Dongmei. Research on multi-regional applicability of solar energy-asisted air source heat pump system[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(5): 18-26.

## Research on multi-regional applicability of solar energy-asisted air source heat pump system

WANG Hanwei<sup>1</sup>, ZHU Bing<sup>1</sup>, WU Dongmei<sup>2</sup> (1. The Electrical Engineering College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Guizhou New Energy Development Investment Co., Ltd., Guiyang 550000, China)

Abstract: In order to explore the applicability of solar energy-asisted air source heat pump system in areas with different solar resource levels, TRNSYS software is applied to carry out systematical simulation, by taking regions with solar resource levels of I~IV (Lhasa, Zhangjiakou, Hangzhou and Guiyang) as the research object. Six parameters including the rated power of heat pump, the tank volume, the rated power of electric auxiliary heating, the collector area, the collector azimuth and the tilt angle are selected as the optimization variables, and the life cycle cost of the system is selected as the optimization objective function. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is applied to obtain the optimum equipment parameters, and economic and sensitivity analysis on the optimized system are executed. The research results suggest that, in Lhasa and Zhangjiakou, the optimal operation mode of the system is heat pump with heat collector, while in Hangzhou and Guiyang, the optimal operation mode of the system is heat pump with electric auxiliary heating. Moreover, the heat pump in Guiyang has the highest operating efficiency (2.94), the system in Lhasa has the highest operating efficiency (2.26), and the system in

基 金 项 目: 贵州省科技支撑计划项目(2017YFB0902100)

Supported by: Science and Technology Support Plan Project of Guizhou Province (2017YFB0902100)

通信作者简介:朱兵(1966),女,高级工程师,硕士生导师,主要研究方向为供热系统规划、分析、运行与控制技术,452179224@qq.com。

收稿日期: 2021-10-26

第一作者简介: 王汉伟(1997),男,硕士研究生,主要研究方向为供热系统规划、分析、运行与控制技术,425211635@qq.com。

Hangzhou has the lowest cost per unit of heat (0.48 yuan/kW). The relative sensitivity analysis results show that the rated power of heat pump has a significant effect on the life cycle cost of the system in all regions. The conclusions can provide corresponding theoretical basis for optimal design of solar energy-asisted air source heat pump system. **Key words:** solar energy; air source heat pump; PSO; TRNSYS software

太阳能辅助空气源热泵(SASHP)系统因其普 遍适用性在国内外广泛应用<sup>[1]</sup>,通过2种不同的热 源形式弥补单一供热的不足,进行多能协同规划设 计<sup>[2]</sup>,进而实现系统节能空间和经济效益最大化<sup>[3]</sup>。

Liu 等人<sup>44</sup>以高寒地区西宁市供暖季为例,将 SASHP 系统和空气源热泵(SAHP)系统进行综合 对比,发现前者的系统能效比(CCOP)比后者高43%, SASHP 系统的能效主要受太阳辐射的影响。曾乃晖 等<sup>[5]</sup>发现在西昌地区 SASHP 系统优化后,能效比 (CCOP sys) 普遍提高,系统全年运行费用减少,系 统全年节省电能达 9.11%, 表明寻求 SASHP 系统设 备参数的最优是必要的。在曾乃晖的研究中对优化 变量进行敏感性分析得到影响大小依次为: 热泵功 率>集热器面积>水箱容积>集热器倾角。但是在魏 泽辉等<sup>[6]</sup>对 SASHP 系统的研究中,最大影响参数是 集热器面积,然后依次为集热器倾角>热泵功率>水 箱容积。Long 等人印的研究结果表明,太阳能集热 器面积和水箱容积是西藏 SASHP 系统设计的优先 考虑因素,可见热泵功率、集热器面积、水箱容积 和集热器倾角等参数的影响等级并不一致。这三者 分别以西昌、巴彦淖尔、拉萨作为案例地点,拉萨 地区属于太阳能最丰富地区, 西昌和巴彦淖尔属于 太阳能较丰富地区;同时,研究中分别将全生命周

期成本、太阳能平均保证率费用年值和太阳能供热 比例作为目标函数:可见地区差异和目标函数的不 同会得到不同的结论。

虽然广大学者研究了 SASHP 系统的能耗、效能等性能参数,但同一组优化参数在多地区是否均能适用,尚须深入研究。因此,本文针对此问题研究了不同太阳能资源富集程度地区的 SASHP 系统最优运行方式,并对单位制热量成本和运行能效比进行了分析,采用相对灵敏度分析了各地区不同参数的影响等级,确定了不同地区对 SASHP 系统的设计思路,以期为后续研究带来一定的参考价值。

## 1系统构成

## 1.1 地区参数

本文选取贵阳、杭州、张家口和拉萨4个不同 太阳能资源等级<sup>[8]</sup>的地区作为研究对象,其相应的 气象参数见表1。

在 12 月 1 日─3 月 1 日对建筑进行供暖,供热 系统末端采用上侧风机盘管进行送风供暖,室内供 暖温度设定为 20 ℃。通常在模拟过程中,为了保 持研究对象的一致性,并未对各地区的建筑围护结 构作相应的修改<sup>[9]</sup>。图 1 为经过 TRNBuild 插件计 算后的 4 个地区供热负荷。

-						
等级	太阳能条件	选取地区	年日照小时/h	年太阳辐照量/((kW·h)·m <sup>-2</sup> )	年平均温度/℃	年平均湿度/%
Ι	资源丰富区	拉萨	3 015	1 988	9.5	33
II	资源较富区	张家口	2 752	1 631	9.3	42
III	资源一般区	杭州	1 876	1 205	17.8	68
IV	资源匮乏区	贵阳	1 664	1 013	14.8	76







图 1 4 个地区采暖季供热负荷 Fig.1 The heating load of each region in heating season

由图1可知,张家口地区热负荷变化较为稳定, 而其余3个地区存在较大负荷波动。负荷数据集整 合后的极限值和累计值可为设备的约束条件计算 提供依据,具体见表2。

表 2 4 个地区采暖季供热负荷极限值和累积值 单位: kW Tab.2 The limit value and cumulative value of heating load of four regions in heating season

地区	最大逐时热负荷	最小逐时热负荷	供暖季累计热负荷
贵阳	58.9	0	74 152
杭州	58.7	0	68 083
张家口	101.4	25.3	144 696
拉萨	81.6	2.3	95 804

## 1.2 供热系统

图 2 为 SASHP 系统供热原理。由图 2 可知, 系统主要由空气源热泵、太阳能集热器、电辅热和 蓄热水箱构成。当房间温度低于设定温度时,阀 门 5 打开,负荷侧水泵启动,热水从水箱送到风机 盘管内进行供热,冷却后的回水进入水箱;当温度 测点 1 (水箱温度)低于 45 ℃时,集热水泵打开, 由 SASHP 系统进行加热。



图 2 SASHP 供热系统示意 Fig.2 Schematic diagram of the SASHP heating system

SASHP 系统首先判断逐时太阳能辐射量,当其 大于 100 kJ/(h·m<sup>2</sup>)时,阀门 1 打开,阀门 2 关闭, 冷水进入集热器内进行加热;若温度测点 4 (集热 器出口水温)低于 45 ℃,阀门 3 打开,阀门 4 关 闭,空气源热泵启动,冷水继续进入空气源热泵内 进行二次加热;若集热器出口水温高于 45 ℃,阀 门 3 关闭,阀门 4 打开,空气源热泵关闭;当温度 测点 3 低于 45 ℃时,电辅热启动进行补热,否则 关闭电加热,热水直接回到水箱中。

图 3 为 SASHP 系统相应的控制逻辑。图 3 中: *T*<sub>1</sub>—*T*<sub>4</sub> 为温度测点,对应图 2 中位置;*V*<sub>1</sub>—*V*<sub>4</sub> 为阀 门启停信号,1 为打开,0 为关闭,对应图 2 中位 置;  $T_{up}$  为水箱设定温度,本文取 45 °C;  $\Delta T_{low}$  为启 动温差,设定温度与水箱温度之差大于  $\Delta T_{low}$  时, 进行加热,否则停止加热;  $\Delta T_{up}$  为停机温差,水箱 温度与设定温度之差小于  $\Delta T_{up}$  时,进行加热,否则 停止加热;  $S_{pump}$  为水泵启停信号, $S_{solar}$  为集热器启 停信号, $S_{ashp}$  为热泵启停信号, $S_{aux}$  为电辅热启停信 号,启停逻辑均为1打开,0关闭。

## 2 数学模型

本文选用 TRNSYS 软件进行 SASHP 系统的供 热模拟,该软件更适合进行完整系统的仿真<sup>[10]</sup>,用 户可以通过更改外部文件的方法,达到和实际运行

相近的结果。SASHP系统中的主要模块包括空气源 热泵模块TYPE\_917、太阳能集热器模块TYPE\_71、 蓄热水箱模块TYPE\_158等。



图 3 SASHP 系统设备启停控制逻辑 Fig.3 Start and stop control logic of device in the SASHP system

#### 2.1 空气源热泵

流体经过空气源热泵获得的热量和热泵自身 消耗的电功率之比为热泵的效率,即能效比 *C*<sub>COPASHP</sub>。当不同室外温度下对应的相对湿度超过 界限值时,热泵内部的蒸发器上会发生结霜,进而影 响制热效率。综合考虑,空气源热泵的数学模型为:

$$C_{\text{COPASHP}} = \frac{Q_{\text{liq}}}{(P_{\text{compressor}} + P_{\text{blower}})(1-\kappa)}$$
(1)

式中:  $Q_{\text{liq}}$ 为传递给流体的热量,即空气源热泵的制 热量, kJ/h;  $P_{\text{compressor}}$ 为压缩机功率, kW;  $P_{\text{blower}}$ 为 风机功率, kW;  $\kappa$ 为结霜除霜损失效率。

表 3 为模拟中取值逻辑<sup>[11-12]</sup>。表 3 中: *H*<sub>RH</sub>表 示空气源热泵入口空气的相对湿度,%;*T*<sub>a</sub>表示空 气源热泵入口空气的干球温度,℃。

#### 2.2 太阳能集热器

本文计算模型采用 HP400 真空管太阳能集热器,集热器效率为流体经过集热器的吸热总量与集 热器表面的太阳总辐射之比,其数值由最小二乘法 拟合集热器面积和归一化温差的瞬时效率曲线计 算得到。而在实际计算中集热器的温度分布不均且 难以测量,通常根据入口温度计算归一化温差,其 数学模型<sup>[13-14]</sup>为:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{T_i - T_{amb}}{R_{Rad}} - a_2 \cdot \frac{(T_i - T_{amb})^2}{R_{Rad}}$$
(2)

式中: $\eta$ 为太阳能集热器的集热效率; $\eta_0$ 为拦截效 率,本文中取 0.75<sup>[15]</sup>; $a_1$ 为一阶效率系数,即曲线 斜率,本文取 1.18 kJ/(h·m<sup>2</sup>·K)<sup>[15]</sup>; $a_2$ 为二阶效率系 数,即曲线曲率,本文取 0.009 5 kJ/(h·m<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>)<sup>[15]</sup>;  $T_i$ 为集热器入口流体的温度,  $\mathbb{C}$ ; $T_{amb}$ 为集热器所 处的环境温度,  $\mathbb{C}$ ; $R_{Rad}$ 为投射到集热器表面的总 太阳辐射, kJ/(h·m<sup>2</sup>)。

表 3 不同结霜条件下融霜时间及融霜损失效率 Tab.3 Defrosting cycle and frosting-defrosting loss efficiency of different frosting conditions.

结霜条件	除霜时间/min	结霜除霜损 失效率 κ/%
$H_{\rm RH} {\geqslant} 0.118  9T_{\rm a}^2 - 1.84T_{\rm a} + 82.64$	20	36
$H_{\rm RH} {\geqslant} 0.069 \ 8 T_{\rm a}^2 - 1.09 T_{\rm a} + 69.28$	30	35
$H_{\rm RH} \ge 0.065 V_0 T_{\rm a}^2 - 0.85 T_{\rm a} + 58.29$	40	31
$H_{\rm RH} \ge 0.015  7T_{\rm a}^2 - 0.66T_{\rm a} + 44.27$	50	24
$H_{\rm RH} < 0.015 \ 7T_{\rm a}^2 - 0.66T_{\rm a} + 44.27$		0

## 2.3 蓄热水箱

水箱是供热系统中的储热单元,同时具有平衡 两侧流量的作用。蓄热水箱的热量来源一是热泵加 热后的热水,二是水箱自身经太阳辐射获得的热 量。蓄热水箱热量的去处是用户端消耗的热水热量 和水箱自身的散热。水箱的蓄热能力为<sup>[16]</sup>:

$$Q_{\text{tank}} = \rho V c_p \frac{\mathrm{d}T_{\text{s}}}{\mathrm{d}t}$$
(3)

式中: $\rho$ 为水的密度, kg/m<sup>3</sup>; V 为水箱的容积, m<sup>3</sup>;  $c_p$ 为水的定压比热容, J/(kg· $\mathbb{C}$ );  $T_s$ 为水温在时间 t内的温度变化。

## 3 优化模型

## 3.1 目标函数

计算综合性成本时往往选择全生命周期成本 CLCC 作为评判参数。该参数是用于分析 SASHP 系 统的主要经济指标之一<sup>[17]</sup>。CLCC 包括设备的初投 资、设备的维护费用、设备的运行费用以及设备回 收对应的剩余价值,计算公式为:

$$C_{\rm LCC} = C_{\rm CRF} \cdot n \cdot C_{\rm in} + C_{\rm om} - C_{\rm rc} \tag{4}$$

式中: C<sub>CRF</sub> 为资本回收系数; n 为设备寿命,年; C<sub>in</sub> 为设备的初投资,元; C<sub>om</sub> 为设备的运行费用, 元; C<sub>rc</sub> 为设备回收对应的剩余价值,元。

资本回收系数 CCRF 的计算公式为:

$$C_{\rm CRF} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$
(5)

式中: i 为利率, 取 8%<sup>[17]</sup>。

设备的初投资如式(6)所示,表4为计算过程中 SASHP系统各装置的计算成本<sup>[1]</sup>。

 $C_{in} = C_{ashp} \cdot P_{ashp} + C_{solar} \cdot A_{solar} + C_{aux} \cdot P_{aux} + C_{tank} \cdot V_{tank}$  (6) 式中:  $C_{ashp}$  为空气源热泵的单位输入功率成本, 元/kW;  $P_{ashp}$  为空气源热泵的输入功率, kW;  $C_{solar}$ 为太阳能集热器的单位集热面积成本,元/m<sup>2</sup>;  $A_{solar}$ 为集热器的面积, m<sup>2</sup>;  $C_{aux}$  为电辅热单位输入功率 的成本,元/kW;  $P_{aux}$  为电辅热的输入功率, kW;  $C_{tank}$  为蓄热水箱的单位容积成本,元/kW;  $V_{tank}$  为 蓄热水箱的容积, m<sup>3</sup>。

表 4 各设备计算成本 Tab.4 Computational cost for each equipment

设备名称	单位成本	寿命/年
空气源热泵	2 000 元/kW	15
集热器面积	800 元/m <sup>2</sup>	15
电辅热	160 元/kW	15
水箱容积	500 元/m3	15

设备的运行费用包括供热过程中消耗的电量 和设备维护费用,故可用式(7)表示:

$$C_{\rm om} = C_{\rm e} \cdot \sum_{n=1}^{n} W_{\rm P} + C_{\rm in} \cdot \psi \tag{7}$$

式中:  $C_e$ 为电价,元/(kW·h);  $W_P$ 为 SASHP 系统的 年耗电量, kW·h;  $\psi$ 为设备的维护费用系数,通常 取设备初投资的 2%<sup>[18]</sup>。

设备回收对应的剩余价值通常采用固定资产残 值进行计算,占初投资的3%~5%<sup>[17]</sup>,可用式(8)表示:

$$C_{\rm rc} = C_{\rm in} \cdot r \tag{8}$$

式中:r为剩余价值在初投资中的占比,本文中取4%。 3.2 优化变量

本文选择 SASHP 系统中 6 个重要的参数作为优 化变量,分别为热泵功率  $P_{ashp}$ 、电辅热功率  $P_{aux}$ 、集 热器面积  $A_{solar}$ 、水箱容积  $V_{tank}$ 、方位角  $\theta$  和倾角  $\beta$ 。

$$X = [P_{\text{ashp}}, P_{\text{aux}}, A_{\text{solar}}, V_{\text{tank}}, \theta, \beta]^{\mathrm{T}}$$
(9)

依据《太阳能集中热水系统选用与安装》<sup>[19]</sup>、 《民用建筑节水设计标准》<sup>[20]</sup>、《空气源热泵辅助的 太阳能热水系统(储水箱容积大于 0.6 m<sup>3</sup>)技术规 范》<sup>[21]</sup>,优化变量相应的约束条件为:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \cdot \frac{Q_{h,max}}{C_{COPASHP}} \leqslant P_{ashp} \leqslant \frac{Q_{h,max}}{C_{COPa}} \\ 0 \leqslant P_{ele} \leqslant \frac{Q_{h,max}}{\eta_{ET}} \\ 1 \leqslant A_{solar} \leqslant \frac{Q_{h,max}f}{J_{T}\eta_{cd}(1-\eta_{L})} \\ 1 \leqslant V_{tank} \leqslant 45 \end{cases}$$
(10)

式中:  $Q_{h,max}$  为供暖季节内建筑每小时的最大热负荷, kW/h; f 为太阳能保障率, %;  $J_T$  为集热器接收 到的太阳能辐射总量, kW/(m<sup>2</sup>·h);  $\eta_{cd}$  为太阳能的集 热效率, 本文中取 0.48<sup>[15]</sup>;  $\eta_L$  为集热器的损失效率, 本文取 0.2<sup>[15]</sup>;  $\eta_{ET}$  为电辅热的热转换效率。

#### 3.3 粒子群算法

在前人的研究<sup>[22]</sup>中,大都采用 Hooke-Jeeves 算 法对多参数进行优化。但 SASHP 系统多参数优化 问题属于典型的非线性、不可微和多极值问题, Hooke-Jeeves 算法容易陷入局部最优,即优化结果 很大程度上取决于设定的初始值,而粒子群算法更 适合在此类优化中寻找全局最优<sup>[23]</sup>。粒子群算法基 于粒子种群的信息共享机制,每个粒子通过随机的 速度和位置初始化在网格上,粒子在迭代过程中, 通过追踪个体极值和全局极值,来进行所有粒子信 息的相互交换,选择较优的粒子进入下一轮迭代, 最终收敛于全局最优解。

粒子群算法的优化过程[24]可分为以下步骤。

1)生成数量为*m*的粒子组 $x_i=(x_i^1, x_i^2, ..., x_i^D)$ , 其中 $i \in [1, m]$ , *D*为粒子群所处维度。 $x_i$ 为每个粒子 对应的1组优化参数,即 $x_i$ 为热泵功率 $P_{ashp}$ 、电辅 热功率 $P_{aux}$ 、集热器面积 $A_{solar}$ 、水箱容积 $V_{tank}$ 、方 位角 $\theta$ 和倾角 $\beta$ 的方案取值。记录此时迭代次数 k=0。

2)将x<sub>i</sub>代入目标函数,计算粒子组的适应度函数 F(x<sub>i</sub>),即该组参数的全生命周期成本。粒子个体经过的局部最优位置记为 Pbesti,整个群体粒子经过的局部最优位置记为 Gbest,则:

$$\begin{cases} P_{\text{best}i} = (P_i^1, P_i^2, \dots, P_i^D) \\ G_{\text{best}} = (P_g^1, P_g^2, \dots, P_g^D) \end{cases}$$
(11)

3)采用以下算法规则更新粒子的位置和速度 信息,生成新一代种群 x<sup>k+1</sup>, k=k+1,并计算粒子适 应度 F(x<sup>k+1</sup>)。

$$v_{i}^{d} = \omega v_{i}^{d} + c_{1} r_{1} (p_{i}^{d} - x_{i}^{d}) + c_{2} r_{2} (p_{g}^{d} - x_{i}^{d})$$
  

$$x_{i}^{d} = x_{i}^{d} + \alpha v_{i}^{d}$$
(12)

式中: *d*=1, 2, ..., *D*, 表示第*d* 维; *r*<sub>1</sub>和 *r*<sub>2</sub>为[0,1]范 围内变换的随机数; *c*<sub>1</sub>、*c*<sub>2</sub>称加速常数, 是调整自 身经验和社会经验在其运动中所起作用的权重; ω为惯性权重,即粒子能保持前一时刻运动状态的 能力; α为收缩系数,目的是控制速度的权重。

4)比较各粒子的位置信息,更新粒子的局部最 优与全局最优位置信息。

$$P_{\text{best}i} = \begin{cases} x_i^k & F(x_i^{k+1}) < F(x_i^k) \\ x_i^{k+1} & F(x_i^{k+1}) > F(x_i^k) \end{cases}$$
(13)

$$G_{\text{best}} = \min(x_i^{k+1}) \tag{14}$$

5) 判断迭代次数 k 是否满足收敛条件,满足则终止搜索,输出最优运行方案  $G_{\text{best}}=\min(x_i^{k+1})=[P_{\text{ashp}}, P_{\text{aux}}, A_{\text{solar}}, V_{\text{tank}}, \theta, \beta], 即系统最优运行的设备参数。$ 图 4 为 SASHP 供热系统运行优化的流程。

## 4 仿真及结果分析

在 TRNSYS 中搭建系统并设定好相应的数学 模型,调用 TRNOPT 插件中的粒子群算法对系统进行 优化。仿真开始时,蓄热水箱中的水温设置为45℃, 空气源热泵打开,太阳能集热器关闭,电辅热关闭。

## 4.1 优化结果

以 CLCC 为目标函数,采用粒子群算法,得出 SASHP 系统最佳设备参数见表 5,其中列出了 4 个

不同地区的供热系统优化结果。



图 4 SASHP 供热系统运行优化流程 Fig.4 Operation optimization process of the SASHP heating system

在 SASHP 供热系统的设计阶段,理想情况是 充分地利用太阳能,在太阳能不足时利用空气源热 泵进行供热,最后用电辅热进行补热。图 5 为 4 个 地区最佳设备参数在约束范围内的取值。

表 5 4 个地区最佳设备容量和运行参数 Tab.5 The optimum equipment capacity and operating parameters in four regions

地区	空气源热泵功率/kW	电辅热功率/kW	倾斜角/(°)	方位角/(°)	集热器面积/m <sup>2</sup>	水箱容积/m <sup>3</sup>	最优运行方式
贵阳	9.2	12	77	-10	1	1	热泵+电辅热+小水箱
杭州	9.4	1	80	-9	1	4	热泵+电辅热+小水箱
张家口	16.0	0	44	1	5	14	热泵+集热器+大水箱
拉萨	12.0	0	64	-4	34	1	热泵+集热器+小水箱





由图 5 可以看出,在以空气源热泵为核心的 SASHP 系统中,不同地区用以维持最小 CLCC 的方 式大不相同。太阳能资源等级为 I 级的拉萨地区和 II 级的张家口地区选择约束下限的空气源热泵功 率,优先增加集热器面积进行光热转换;太阳能资 源等级为III级的杭州地区和IV级的贵阳地区选择 合适的空气源热泵功率,搭配电辅热进行热量的补 充,其中贵阳地区需要较大的电辅热功率。供热水 箱的主要作用是用于储热和调温,从表 5 中可以看 出,贵阳和拉萨地区最优运行方式均为小水箱。其 原因是这 2 个地区在供暖季的温差较小,对供热的 需求无明显波动。而张家口地区在供暖季初期和后 期水箱温度高于设定的存储温度(45 ℃),在供暖

中期气温出现明显下降,最低温度为-20 ℃,最低温度与最高温度的温差达 30 ℃,因此需要大容积的水箱进行热量的存储,以避免水箱水温处于较低温度。

## 4.2 经济性分析

在各地区的最佳设备容量下,各设备的 CLCC 占 比也有所不同。图 6 为不同地区最优参数下各部分 CLCC 占比。图 6 中: LCC\_KW 为 SASHP 系统的年 运行费用; LCC\_AUX 为电辅热的初投资; LCC VOLUME 为水箱的初投资; LCC AREA 为集 热器的初投资; LCC\_AIR 为热泵的初投资。由图 6 可知:使用最大集热面积的拉萨地区运行费用占比 (能耗占比)最少,为21%,其CLCC占比最大的部 分是太阳能集热器的初投资费用,其次是空气源热 泵的初投资费用;张家口地区 CLCC 占比最大的为空 气源热泵的初投资费用,为 52%,其次为水箱的初 投资费用: 杭州地区占比最大的为空气源热泵的初 投资费用,为53%,其次为水箱的初投资费用;贵阳 地区占比最大的为空气源热泵的初投资费用,为 53%,其次为电辅热的初投资费用。所以进行初投资 时应根据不同地区的设备初投资占比进行选择。





为了更准确地评判 SASHP 供热系统在 4 个地区的效益,选用热泵单位制热量成本 C<sub>COHASHP</sub>(热泵制 热量与热泵 C<sub>LCC</sub> 之比)、集热器单位制热量成本 C<sub>COHsolar</sub>(集热器制热量与集热器 C<sub>LCC</sub> 之比)、系统单 位制热量成本 C<sub>COHsys</sub>(系统总制热量与系统总 C<sub>LCC</sub> 之比)、热泵 C<sub>COPASHP</sub>(热泵制热量与热泵能耗之比) 和系统 C<sub>COPsys</sub>(系统总制热量与系统总能耗之比) 5 个指标进行对比分析。图 7 为各地区单位制热量成 本和运行 C<sub>COP</sub>。由图 7 可知,贵阳和张家口地区的热 泵单位制热量成本最低,为 0.083 2 元/kW,拉萨地区 的热泵单位制热量成本最高,为0.1147元/kW。这是由于热泵在不同地区的运行效率不同,贵阳地区的空气源热泵运行效率最高,热泵 Ccop为2.94,拉萨地区的空气源热泵效率最低,热泵 Ccop为2.83。太阳能集热器的单位制热量成本随太阳能资源富集程度的增加而降低,在贵阳地区最高,为3.95元/kW,在拉萨地区最低,为0.32元/kW。相较于其他地区,SASHP系统的单位制热量成本在张家口地区最低,为0.48元/kW。由图7可知,集热器面积逐渐增大的4个地区中,系统Ccop与太阳能富集程度成正相关,太阳能最丰富的拉萨地区系统Ccop可以达到2.26。虽然增加集热器面积会得到更高的系统Ccop,但是相应的Clcc成本显著增加,且集热器单位制热量成本远大于热泵单位制热量成本,因此,在实际的SASHP系统设计中针对不同目标应做不同的取舍。



图 7 4 个地区单位制热量成本和运行 C<sub>COP</sub> Fig.7 The unit heat producing cost and operating C<sub>COP</sub> in four regions

#### 4.3 敏感性分析

为了进一步定量化分析设备容量和运行参数对 C<sub>LCC</sub>的影响,对热泵功率 P<sub>ashp</sub>、电辅热功率 P<sub>aux</sub>、 集热器面积 A<sub>solar</sub>、水箱容积 V<sub>tank</sub>、方位角θ 和倾角 β 6 个优化变量进行敏感性分析,以期评判优化变 量对 C<sub>LCC</sub>的影响先后等级。本文选用相对灵敏度 S<sub>i</sub> 作为评判指标<sup>[25]</sup>(式(15)),使各优化变量随最优值 进行[10%,5%,-5%,-10%]的变化,得到相应的 C<sub>LCC</sub> 变化值,用以计算 S<sub>i</sub>。

$$S_{i} = \frac{\partial(f_{i}) / f_{iPSO}}{\partial(\pi_{i}) / \pi_{iPSO}}$$
(15)

式中: $\partial(f_i)$ 为第*i*个优化变量引起的  $C_{LCC}$  变化值;  $f_{iPSO}$ 为第*i*个优化变量最优值对应的  $C_{LCC}$ ; $\partial(\pi_i)$ 为 第*i*个优化变量的变化值; $\pi_{iPSO}$ 为第*i*个优化变量 最优值。



Fig.8 Relative sensitivity of optimized variables

图 8 为各优化变量相对于系统 C<sub>LCC</sub> 的相对灵 敏度。由图 8 可知: 4 个地区的热泵功率均为最高 敏感等级,且远大于其他变量的相对灵敏度,说明 热泵功率在最优值附近变化会导致系统 C<sub>LCC</sub> 大幅 度增加;除热泵功率外,贵阳地区的电辅热功率具 有较大影响,尽管电辅热单位设备容量成本不高,但 是对能耗影响最大,即明显增加运行费用;水箱容积 在杭州地区为第 2 敏感等级,在其他地区为第 3 敏 感等级,说明热能的存储对 C<sub>LCC</sub> 的影响相对较大; 集热面积仅在拉萨地区具有较大影响,是由于其余 3 个地区均采用较小的集热面积且拉萨地区具有最 富集的太阳能资源;倾斜角和方位角仅在拉萨地区 影响明显,同样是由于拉萨地区需要较大的集热器 面积,因此在实际的 SASHP 系统运行中,应着重考 虑这 2 个因素,避免不必要的经济和能源损失。

## 5 结 论

第5期

本文将4个不同太阳能富集程度的地区作为研 究对象,在 TRNSYS 软件中采用粒子群算法对 SASHP 系统的6个变量进行最优化计算,并进行了 经济性分析和各变量的敏感性分析。研究结果可为 太阳能辅助空气源热泵系统的优化设计提供相应 的理论依据。

1)从优化结果来看,太阳能资源等级为 I 级的 拉萨地区、II 级的张家口地区在空气源热泵的基础 之上优先选择增加集热器面积;III级的杭州地区、 IV级的贵阳地区则优先选择电辅热补充热量。

2) 从经济性分析来看,贵阳地区空气源热泵运行 C<sub>COP</sub> 最高,为 2.94,对应的热泵单位制热量成本最小,为 0.083 2 元/kW; SASHP 系统的 C<sub>COP</sub> 与太阳能富集程度成正相关,拉萨地区系统 C<sub>COP</sub> 达到 2.26,对应的集热器单位制热量成本最低,为

0.32 元/kW; 整个 SASHP 系统的单位制热量成本主要取决于热泵的设备容量,热泵容量越大单位制热量成本越低,在张家口地区最低,为 0.48 元/kW。

3)从敏感性分析来看,考虑 C<sub>LCC</sub> 最优的 SASHP 系统中,热泵功率在4个地区均为第1敏感等级。 电辅热功率在贵阳地区有较大影响,水箱容积在杭 州、张家口地区有较大影响,倾斜角和方位角在拉 萨地区影响较大。

### [参考文献]

- [1] LI W, RONG J, NAN H A, et al. Review of the advances in solar-assisted air source heat pumps for the domestic sector[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 247: 11470.
- [2] 宫飞翔,李德智,田世明,等.综合能源系统关键技术 综述与展望[J].可再生能源,2019,37(8):1229-1235.
   GONG Feixiang, LI Dezhi, TIAN Shiming, et al. Review and prospect of core technologies of integrated energy system[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(8): 1229-1235.
- [3] 刘艳峰,周位华,罗西,等.川西高山峡谷区空气源热 泵多源互补供热系统热源方案比选及优化设计[J].太 阳能学报,2021,42(10):478-486. LIU Yanfeng, ZHOU Weihua, LUO Xi, et al. Comparison and optimal design of multi-source complementary heating system based on air source heatpump in alpine canyon area of western Sichuan[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(10): 478-486.
- [4] LIU Z, LIU Y, WU D, et al. Performance and feasibility study of solar-air source pump systems for low-energy residential buildings in alpine regions[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120735.
- [5] 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 Naihui, YUAN Yanping, SUN Liangliang, et al. Optimization on air source heat pump assisted solar water heating system based on TRNSYS[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(5): 1245-1254.
- [6] 魏泽辉,高世杰,闫素英,等.基于极差分析与费用 年值法的太阳能-空气源热泵互补供热系统的正交优 化[J].可再生能源,2019,37(8):1146-1151.
  WEI Zehui, GAO Shijie, YAN Suying, et al. Orthogonal experimental of the solar heating system assisted with air source heat pump based on annual cost and solar fraction[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(8): 1146-1151.
- [7] LONG T, QIAO Z, WANG M, et al. Performance analysis and optimization of a solar-air source heat pump heating system in Tibet, China[J]. Energy and Buildings, 2020, 220(1): 110084.
- [8] 国家市场监督管理总局,中国国家标准化管理委员会. 太阳能资源评估方法: GB/T 37526—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019: 1. GB/T 37526—2019, Assessment method for solar energy resource[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019: 1.
- [9] 程友良,刘萌,刘志东,等.不同地区住宅能耗与太阳 能吸收式空调系统匹配性分析与模拟研究[J].可再生 能源,2020,38(2):179-186.

CHENG Youliang, LIU Meng, LIU Zhidong, et al. Analysis and simulation of the matching residential energy consumption and solar absorption air conditioning system in different areas[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(2): 179-186.

- [10] PANAGIOTIDOU M, LU A. Comparison of multi-objective optimisation tools for building performance simulation with TRNSYS 18[C]//Comparison of Multi-objective Optimisation Tools for Building Performance Simulation with TRNSYS 18. 2018: 1.
- [11] VILLA-ARRIETA M, SUMPER A. A model for an economic evaluation of energy systems using TRNSYS[J]. Applied Energy, 2018, 215: 765-777.
- [12] ZHU J, SUN Y, WEI W, et al. A novel temperaturehumidity-time defrosting control method based on a frosting map for air-source heat pumps[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 54: 45-54.
- [13] 王伟, 吴旭, 孙育英, 等. 不同除霜周期对空气源热泵 运行性能影响的实测研究[J]. 暖通空调, 2018, 48(6):
  1-7.
  WANG Wei, WU Xu, SUN Yuying, et al. Influence of different defrosting cycles on operating performance of

air-source heat pumps[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2018, 48(6): 1-7.

- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.太阳能集热器热性能试验方法: GB/T 4271—2007[S].北京:中国电力出版社,2007:1. State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, People's Republic of China, National Standardization Administration of China. Test methods for the thermal performance of solar collectors: GB/T 4271— 2007[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 1.
- [15] Kingspan Solar. THERMOMAX HP400 evacuated tubes[Z/OL]. (2016-02-18)[2021-10-26]. https://www.docin. com/p-1460426800.html.
- [16] HAMMADI S H. Tempering of water storage tank temperature in hot climates regions using earth water heat exchanger[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 6: 157-163.
- [17] LIU Y, ZHOU W, LUO X, et al. Design and operation optimization of multi-source complementary heating system based on air source heat pump in tibetan area of western Sichuan, China[J]. Energy and Buildings, 2021, 242: 110979.
- [18] CHATURVEDI S K, GAGRANI V D, ABDEL-SALAM T M. Solar-assisted heat pump: a sustainable system for

low-temperature water heating applications[J]. Energy Conversion & Management, 2014, 77: 550-557.

- [19] 中国建筑标准设计研究院.太阳能集中热水系统选用 与安装[M].北京:中国计划出版社,2006:1. China Architectural Standards Design and Research Institute. Solar energy central hot water system selection and installation[M]. Beijing: China Planning Press, 2006:1.
- [20] 中国建筑设计研究院. 民用建筑节水设计标准: GB 50555—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 1. China Architectural Design and Research Institute. Standard for water saving design in civil building: GB 50555—2010[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010: 1.
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 空气源热泵辅助的太阳能热水系统(储水箱容积大于 0.6 m<sup>3</sup>)技术规范: GB/T 26973—2011[S]. 北京:中国标准出版社, 2011: 1.
  State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, People's Republic of China, National Standardization Administration of China. Specification of solar water heating systems assisted with air-source heat pump(for capacity of water tank more than 0.6 m<sup>3</sup>): GB/T 26973—2011[S]. Beijing: China Standards Press, 2011: 1.
  [22] 张楗雄,曹小林,代微,等.太阳集热器与空气源热泵联
- 合供热系统研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 29-34. ZHANG Jianxiong, CAO Xiaolin, DAI Wei, et al. Research of combining solar collector andair-source heat pump heating system[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(1): 29-34.
- [23] 冯茜,李擎,全威,等.多目标粒子群优化算法研究综述[J]. 工程科学学报,2021,43(6):745-753.
   FENG Qian, LI Qing, QUAN Wei, et al. Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(6): 745-753.
- [24] 刘荣, 荀志国, 吕青, 等. 基于 PSO 算法的供热系统锅炉 集群运行参数优化[J]. 热能动力工程, 2020, 35(2): 26-31. LIU Rong, XUN Zhiguo, LYU Qing, et al. Optimization of Operation parameters of heating system boiler cluster based on PSO algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 26-31.
- [25] BORNATICO R, PFEIFFER M, WITZIG A, et al. Optimal sizing of a solar thermal building installation using particle swarm optimization[J]. Energy, 2012, 41(1): 31-37.

(责任编辑 杨嘉蕾)