

文章编号: 1671-6612 (2019) 04-425-08

# 串、并联式太阳能空气源热泵供热系统性能 数值研究与对比

李海林 李绍勇 韩喜莲 吴宗礼

(兰州理工大学土木工程学院 兰州 730050)

**【摘要】** 为解决北方地区冬季采暖和空气污染等问题,太阳能与热泵等新型节能减排技术得到了越来越多的关注与应用。鉴于此,提出了串、并联式太阳能空气源热泵供热系统(Heating System of Solar Assisted Air Source Heat Pump, HSSAASHP)设计方案及其运行模式。以兰州地区某办公楼作为供热对象,基于 TRNSYS (Transient System Simulation Program) 对其串、并联式 HSSAASHP 分别进行了组态和运行状况进行了数值模拟及性能分析。结果表明:串、并联式 HSSAASHP 在理论上都是可行的,且前者在节能方面表现优于后者。此外,基于粒子群算法(Particle Swarm Algorithm, PSA)来优化串并联式 HSSAASHP 的部分关键参数,进一步降低其运行成本,从而获得节能、降耗和减排的综合效益。

**【关键词】** 太阳能;空气源热泵;混合供热系统;粒子群算法;节能减排

中图分类号 TU83 文献标识码 A

## Numerical Study and Comparison on the Performance of the Series-type and Parallel-type Heating Systems of Solar Assisted Air Source Heat Pump

Li Hailin Li Shaoyong Han Xilian Wu Zongli

(School of civil engineering, Lanzhou university of technology, Lanzhou, 730050)

**【Abstract】** In order to solve the problems of winter heating and outdoor air pollution in North China, some new energy-saving and emission reduction technologies, such as solar energy and heat pump, are getting more and more attention and application. In view of this, this paper proposes a design scheme and the related running modes of the series-type and parallel-type heating systems of solar assisted air-source heat pump. Considering an office building in Lanzhou area as the heating object, based on TRNSYS software, the configuration, the corresponding operational situations and performance analysis of these two heating systems are carried out, respectively. The results indicate that both systems are feasible in theory, and the former is superior to the latter in energy saving. In addition, some key parameters of the series-type HSSAASHP are optimized by means of particle swarm algorithm (PSA) to further reduce its operating cost. Thus, the comprehensive benefits of energy saving, consumption reduction and emission reduction can be achieved.

**【Keywords】** solar energy; air source heat pump; hybrid heating system; particle swarm algorithm; energy-saving and emission reduction

基金项目: 甘肃省自然科学基金(编号: 1508RJZA109)

作者(通讯作者)简介: 李海林(1993-),男,硕士研究生, E-mail: 544292308@qq.com

收稿日期: 2018-08-02

## 0 引言

太阳能可视为永不枯竭的清洁能源,也是最重要的可再生能源。在建筑能耗中,生活热水、供热采暖和制冷等能耗约占45%<sup>[1]</sup>,是建筑节能的重点领域,而其中民用建筑的用热需求,如供暖热水及生活热水的制备,其温度值较低,恰好对应了太阳能能流密度低的特点。因此,在建筑的热需求方面利用太阳能这种廉价、丰富且持久的可再生能源与不同形式系统进行整合,来解决建筑能耗问题,就能够大幅降低当今社会对常规能源的依赖<sup>[2]</sup>,从而获得良好的节能减排效益。

传统太阳能热水系统以电辅助加热器来克服太阳能热利用的不稳定性,而太阳能热泵混合系统是将热泵作为太阳能供热系统的一部分,从而进一步降低对电力资源的依赖;同时也可克服太阳能热利用的不稳定性。且理论上,将电辅助替换为热泵辅助,使得太阳能热泵混合系统的运行更加稳定与高效<sup>[3]</sup>。太阳能热泵系统根据太阳能集热器与热泵蒸发器的结合方式,可分为直膨式和非直膨式两大类,而非直膨式又可分为串联、并联和混联式<sup>[4]</sup>,分别是指太阳能与水源热泵、太阳能与空气源热泵和太阳能与双源(空气源和水源)热泵的组合方式。

目前国内外学者对于太阳能与热泵混合系统或是新型热泵系统已做了许多理论分析与实验研究。其中, Bagarella G 等人<sup>[5]</sup>研究了混合式热泵并行系统和选择系统的差别;截止温度该怎么选择,不同的截止温度对系统有何影响;是否并行系统就比选择系统更节能。结果表明,当选用额定功率为10.8kW的大容量热泵时,两种系统无差别;当选用额定功率为3.9kW的小容量热泵时,模拟结果显示截止温度为-1℃时有最小能耗,且并行系统比选择系统的节能效果高5%。Deng W S 等人<sup>[6]</sup>进行了改进的直膨式太阳能热泵热水器与传统太阳能热泵热水器的加热时间与性能系数(Coefficient of Performance, COP)的研究与比较;并讨论了制冷剂流量分配,蒸发器与集热器的面积分配,太阳辐射及室外空气温度对改进型系统的影响。将改进型与传统型系统相比较,前者在低太阳辐射下有更好的性能;改进型系统可同时吸收太阳能与空气能,为系统运行保持更高的

蒸发温度和具有更好的COP与加热能力。但是,环境温度在低太阳辐射条件下对改进型系统影响大,环境温度的降低会恶化该系统性能。Amir A S 等人<sup>[7]</sup>对安装于加拿大某住宅的两级变容量空气源热泵进行了夏季与冬季对照试验,并进行了TRNSYS模拟。结果显示在供冷模式下:室外温度在16~33℃间,COP在4.7~5.7之间变化;而供热模式下:室外温度在-19~9℃,COP在1.79~5.0之间变化。朱霞等人<sup>[8]</sup>对热泵在前,集热器在后的串联式系统,即HP(Heat Pump)+SC(Solar Collector)与集热器在前,热泵在后的串联式系统SC+HP进行了研究与对比。主要结论是太阳能热泵系统中的SC与HP串联结合的先后顺序对系统中的热泵性能有较大影响。在南京冬季典型晴天下,当集热器的面积一定时,随着太阳辐射强度的增加,HP+SC系统中热泵的性能优于SC+HP系统中热泵的性能,热泵COP最大可提高6.65%。由此可见,太阳能与热泵的组合方式将能够充分发挥节能减排的潜力。

为了解决民用建筑物冬季采暖和室外空气污染等问题,本文将太阳能与空气源热泵组合为联合供热系统,提出A、B、C和D四种运行模式;且受到文献[4]与[8]的研究思路启发,将系统中的SC与HP冷凝器进行适当的组合,该HSSAASHP分为串联式和并联式,如图1所示。借助TRNSYS软件,分别对两系统进行组态和仿真运行,并对比其供热性能与耗电表现。对于节能表现更佳的串联式HSSAASHP,以系统运行成本为目标函数,进一步运用粒子群算法(Particle Swarm Algorithm, PSO)对SC面积和安装角度、蓄热水箱体积和HP额定功率等关键参数进行优化,从而降低其运行成本,彰显绿色节能与降耗减排的设计理念和目的。

## 1 HSSAASHP 组成及其运行模式

基于兰州地区太阳能辐射量的优势与气候条件,对该市某办公楼的HSSAASHP进行了设计。其主要设备包括太阳能集热单元、空气源热泵单元、蓄热水箱、循环水泵和温度测量、控制元件等主要设备,其工艺流程图如图1所示。

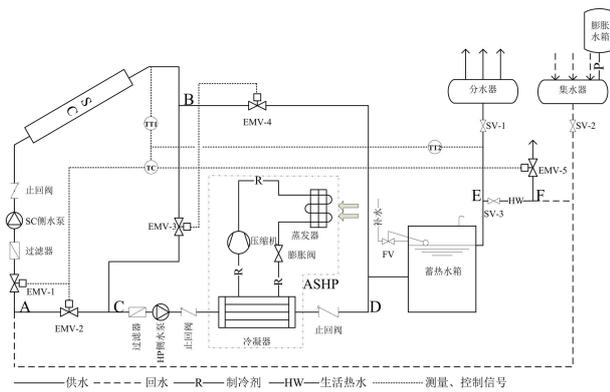


图 1 串、并联式 HSSAASHP 系统运行工艺图

Fig.1 The Operation chart of series-type and parallel-type HSSAASHP

通过太阳能集热单元与空气源热泵单元, HSSAASHP 能够分别获取可再生绿色能源—太阳能与空气能, 来共同加热采暖供水, 保证所需的供水温度达标, 满足该办公楼所需的热负荷, 并降低整个联合供热系统的运行能耗。

### 1.1 HSSAASHP 运行模式

根据气象条件的变化, 该 HSSAASHP 分为冬季采暖模式, 包括 A、B 和 C 三种方式, 以及夏季与过渡季节制备热水模式 D。当冬季采暖模式运行时, 预先手动开启截止阀 SV-1 和 SV-2 和关闭截止阀 SV-3。当夏季与过渡季节制备热水模式运行时, 预先手动开启截止阀 SV-3 和关闭截止阀 SV-1 和 SV-2。

**供热模式 A:** 当太阳辐射充足, SC 出水温度  $T_{out} \geq 40^\circ\text{C}$  时, 温度控制器 TC 发出指令, 使得电磁二通阀 EMV-1 和 EMV-4 得电开启, EMV-2、EMV-3 和 EMV-5 失电关闭, 且热泵 STOP。SC 出水直接流经管路 BD 进入蓄热水箱后, 通过分水器流经办公楼的采暖子系统释放热量, 返回集水器再次进入 SC 加热, 循环往复。

**供热模式 B:** 当太阳辐射不足, SC 出水温度  $T_{out} < 35^\circ\text{C}$  时, 温度控制器 TC 发出指令, 使得热泵 START 和 EMV-5 关闭。同时, 依据  $T_{out}$  大小, 温度控制器 TC 发出指令, 对其余 4 个电磁二通阀开启或关闭。

若  $T_{out}$  低, 则 EMV-1 和 EMV-3 得电开启, 而 EMV-2 和 EMV-4 失电关闭。供热回水流向为 A—SC—B—C—ASHP 冷凝器—D—蓄热水箱, 先后由 SC 与 ASHP 加热, 即串联式; 若  $T_{out}$  较高, 则

EMV-1、EMV-2 和 EMV-4 得电开启, 而 EMV-3 失电关闭。供热回水流向分别为 A—SC—B—D—蓄热水箱和 A—C—ASHP 冷凝器—D—蓄热水箱, 分别由 SC 与 ASHP 加热后, 在蓄热水箱汇合, 即并联式。

**供热模式 C:** 当无太阳辐射时, 温度控制器 TC 发出指令, 使得 EMV-2 得电开启, EMV-1、EMV-3、EMV-4 和 EMV-5 失电关闭, 且热泵 START。供热回水流向为 A—C—ASHP 冷凝器—D—蓄热水箱。

**制备热水模式 D:** 为充分发挥系统效益, SC 在夏季与过渡季节单独运行, 为办公楼及其附近居民区用户提供生活热水。温度控制器 TC 发出指令, 使得热泵 STOP 和 EMV-1、EMV-4 得电开启, 而 EMV-2、EMV-3 失电关闭。SC 出水流经管路 BD 进入蓄热水箱, 温度测量变送器 TT2 检测蓄热水箱的温度  $T_{tank}$ , 并将其值传送于温度控制器 TC。若  $T_{tank} < T_{tank,set} = 50^\circ\text{C}$ , TC 发出指令, 使得 EMV-5 失电关闭, 则蓄热水箱出水流经管路 EFA, 通过 SC 侧水泵循环进入 SC, 吸热温升, 然后流经管路 BD 进入蓄热水箱, 出水再流经管路 EFA 进入 SC, 循环往复, 直至  $T_{tank} \geq T_{tank,set}$ 。TC 发出指令, 使得 EMV-5 得电开启, 向楼宇用户及附近居民区供应热水。随着热水的不断供应, 蓄热水箱的液面会逐渐下降。当降至设定值时, 浮球式进水阀 FV 自动开启, 为蓄热水箱补水, 直至液面恢复设定值, FV 自动关闭。

### 1.2 串、并联式 HSSAASHP 的切换

本文引入一个切换温度  $T_{switch}$  概念来实现 HSSAASHP 串、并联式的转换, 根据  $T_{switch}$  大小, 串、并联式进行自动切换的条件式如下:

$$\text{HSSAASHP} \begin{cases} \text{并联式} : 30^\circ\text{C} \leq T_{switch} = T_{out} < 40^\circ\text{C} \\ \text{串联式} : T_{switch} = T_{out} < 30^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

这样, 在冬季采暖期间, HSSAASHP 依据  $T_{switch}$  可自动地进行串、并联式的切换, 在本质上是将供热模式 B 做了进一步划分。

### 1.3 基于 TRNSYS 的 HSSAASHP 组态

为了建立一个共同的比较基础, 两系统均采用兰州地区气象数据, 同类模块采用相同设计数据, 保证相同的供热时间表与供热温度等。

此外, 两系统采用相同工作时间曲线, 即一天

当中的 6 时至 18 时，以此来模拟某办公室低温地  
暖辐射供热，虽然该时间曲线并不完全符合实际情  
况，但足以满足本文的不同系统的效益比较。

### 1.3.1 并联式 HSSAASHP 组态

并联式 HSSAASHP 中关键是 SC 单元的循环  
控制，ASHP 与 ASHP 侧水泵的启停控制。前者是  
通过 SC 单元进出口温差对 SC 侧水泵的启停控制  
来实现，组态原理如图 2 所示。

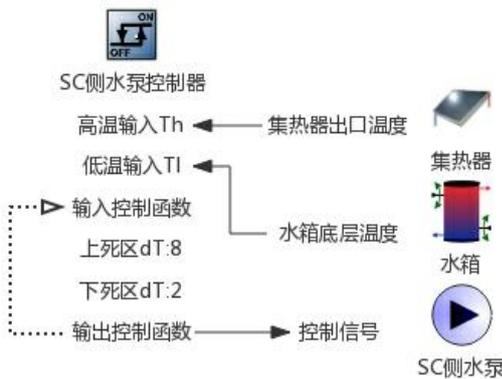


图 2 SC 单元循环控制连接图

Fig.2 The connection diagram of SC unit cyclic control

对于 SC 单元侧循环水泵的控制：当 SC 单元  
进出口温差大于 8℃时，该水泵 START，直至进出  
口温差小于 2℃时，水泵 STOP。

ASHP 与 ASHP 侧水泵的启停控制则由设定供  
水温度 40℃与实时水箱顶层温度的差值变化来实  
现，二者的启停是同步的，组态原理如图 3 所示。



图 3 ASHP 控制连接图

Fig.3 The control connection diagram of ASHP

为保证供水温度保持在 35℃至 45℃之间，计  
算器模块对输出控制函数  $\gamma_T$  与负荷函数  $\gamma_{time}$  进  
行计算，输出的 ASHP 控制信号如下：

$$\gamma_{HP} = INT[0.5(\gamma_T + \gamma_{time})] \quad (2)$$

式 (2) 中 INT 为取整函数，即只有当温度控

制函数输出与负荷函数输出同时为 1 时，计算器输  
出函数值 1，ASHP 与 ASHP 侧水泵同时 START，  
否则，计算器输出函数值 0，ASHP 与 ASHP 侧水  
泵同时 STOP。

### 1.3.2 串联式 HSSAASHP 组态

串联式 HSSAASHP 中与并联式不同的在于  
ASHP 侧水泵的控制。组态原理如图 4 所示。



图 4 串联式 HSSAASHP 的 ASHP 侧水泵控制连接图

Fig.4 The control connection diagram of ASHP side pump in Series-type HSSAASHP

图 4 中计算器模块对 SC 侧循环水泵控制器的  
输出函数与负荷函数进行计算，输出的 ASHP 侧水  
泵控制信号如下：

$$\gamma_P = INT \{0.5[\gamma_{time} + NOT(\gamma_{sc})]\} \quad (3)$$

式 (3) 中 INT 为取整函数，NOT 为逻辑非函  
数，即当 SC 单元侧水泵 STOP，输出函数 0，同时  
负荷曲线函数输出为 1 时，计算器输出函数值 1，  
ASHP 侧水泵 START，否则，ASHP 侧水泵 STOP。

这里需要说明的系统关键模块如下：

(1) Type1b 模拟平板太阳能集热器的热性能，  
集热器面积统一设置为 4m<sup>2</sup>，流体比热设置为  
4.19kJ/(kg·K)，其它数据均采用默认设置。

(2) Type4c 模拟可内置辅助加热器的分层水  
箱，设置 6 个等大小的节点，以此来模拟蓄热水箱  
内部由上而下水温逐渐降低的温度分层现象。水箱  
上部温度高，用于取水，下部温度低，用于换热。  
这样的方式将进一步提高系统的换热能力。

(3) Type2b 微分控制器用来实现对 2 个循环  
水泵和 ASHP 的 START/STOP 控制，控制函数的  
输出 0 或 1 取决于差值函数  $(T_H - T_L)$  与两个死区温差  
Upper dead band dT 与 Lower dead band dT 的比较。  
控制函数的新值取决于上一时间步骤中输入控制

函数的值。控制器通常将输出信号函数连接至输入信号函数提供滞后效应。

(4) Type11b 调温阀将加热的液体与较冷的供水混合, 避免流向负荷的水温高于设定温度。

(5) Type14b 建立一条与时间相关的强制函数, 并具有重复模式。该函数由一组离散的数据点组成, 每个数据点对应函数在一个周期内的不同时刻的值。设置  $n=24$ , 以此模拟每天 24h 负荷侧供水流量。

## 2 数值模拟结果与分析

在兰州地区气象数据条件下, 选取供热季节典型日 1 月 22 日, 数值模拟串、并联式 HSSAASHP 的蓄热水箱顶层温度变化, ASHP 和两个循环水泵 START/STOP 状况, 分析相应的运行能耗。

图 5 所示为该典型日的室外温度与太阳能辐射强度的实时变化, 可见 9 时至 18 时为太阳辐射时间, 13 时至 16 时处于峰值, 而室外温度的变化相较太阳辐射的变化略有滞后。

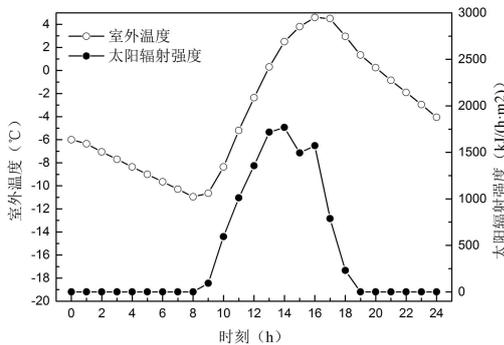


图 5 供热期间典型日室外温度与太阳辐射强度逐时变化图

Fig.5 Hourly variation diagram of typical outdoor temperature and solar radiation intensity during heating period

在 1 月 22 日气象条件下, 串、并联式 HSSAASHP 蓄热水箱顶层温度变化及 ASHP 启停状况分别如图 6, 图 7 所示。

分析图 6 和图 7 可知, 在供热时间段内, 串联式系统中的 ASHP 启停次数频繁, 致使水箱顶部温度波动剧烈。而并联系统的 ASHP 启停仅为 3 次, 水箱顶部温度变化也更加平缓。这是由于在太阳能与热泵联合供热模式下, 并联式系统在结构形式上表现出的天然优势, 即 SC 单元与 ASHP 分别加热部分供热回水, 蓄热水箱发挥了其混合储热作用,

储存了部分热量为下一时段的先混合后供热做好了准备, 使得 ASHP 不用频繁启停。

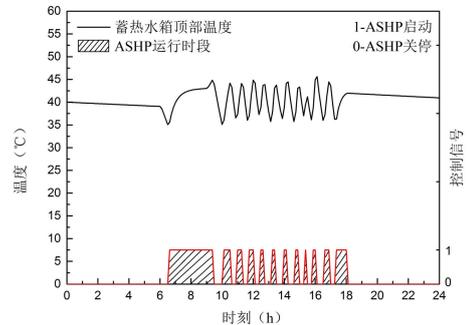


图 6 串联式 HSSAASHP 中蓄热水箱顶部温度变化与 ASHP 启、停和运行状况

Fig.6 The variation of temperature at the top of regenerative tank and the state of start, stop and running of ASHP in series-type HSSAASHP

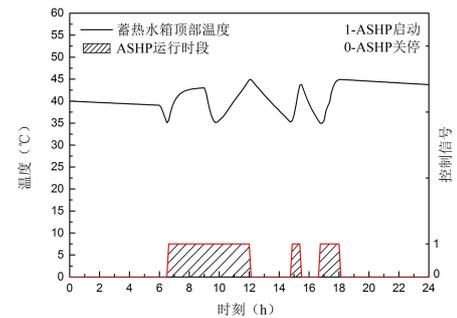


图 7 并联式 HSSAASHP 中蓄热水箱顶部温度变化与 ASHP 启、停和运行状况

Fig.7 The variation of temperature at the top of regenerative tank and the state of start, stop and running of ASHP in parallel-type HSSAASHP

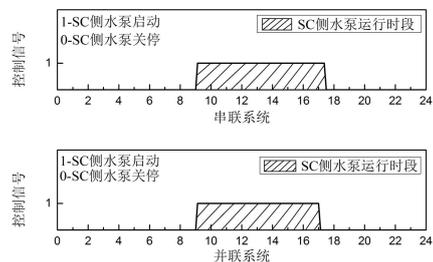


图 8 串、并联式 HSSAASHP 的 SC 侧水泵启、停信及其运行状况

Fig.8 The states of start, stop and running of SC side pump of series and parallel HSSAASHP

如图 8 所示为两系统 SC 侧水泵启停信号, 对照该典型日太阳辐射强度变化情况, 两系统的集热

器收集太阳能时间,均在当日太阳辐射较好的 9 时至 17 时,串联式系统有微弱优势,差别不大。

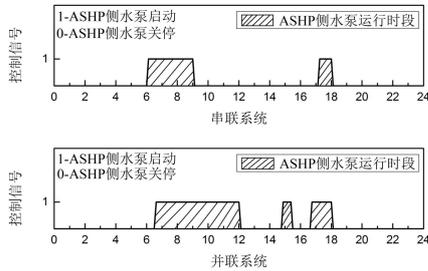


图 9 串、并联式 HSSAASHP 的 ASHP 侧水泵启、停及其运行状况

Fig.9 The states of start, stop and running of ASHP side pump of series and parallel HSSAASHP

图 9 所示是两系统 ASHP 侧水泵启停信号,串联式系统中 ASHP 侧水泵运行时间仅为 4h,而并联式系统则有 7h 左右。这是由于串联系统中 ASHP 侧水泵只有在热泵单独供热模式下运行从而节约电能,相较之下,并联式系统中 ASHP 侧水泵则要在热泵单独供热模式及太阳能热泵联合供热模式下运行。从图中也可看出串联系统在 6 时至 9 时与 17 时至 18 时由热泵单独供热,对比该典型日太阳辐射强度的实时情况,说明在无太阳辐射情况下由热泵独立承担供热负荷。

两种系统运行下的主要性能参数,包括太阳能保证率和 ASHP 的 COP 值等,及耗电表现如表 1 所示。

表 1 典型日两系统运行状况的主要参数

Table 1 The main parameters of the Operation condition of typical Daily two Systems

参数名称	系统类型	
	串联式系统	并联式系统
SC 侧水泵耗能/kJ	247.5	243.75
ASHP 侧水泵耗能/kJ	112.5	225
ASHP 耗能/kJ	22013.40	24623.98
总耗能 kJ	22373.40	25092.73
收集太阳能/kJ	45017.69	42552.09
太阳能保证率	0.67	0.63
COP	3.75~4.74	4.19~4.77
供水平均温度/℃	40.46	40.90

从表 1 的两系统相关性能参数的比较可见,串联式系统与并联式系统各有优势,串联式系统中

SC 单元对水流进行预加热使热泵冷凝器入口温度有所升高,理论上会影响热泵性能,结果也表明串联式系统中热泵 COP 在 3.75~4.74,而并联式系统则为 4.19~4.77。但在供热季节典型日的系统运行能耗方面,SC 侧水泵耗能串联式系统略高于并联式系统,ASHP 侧水泵耗能串联式系统为并联式系统的二分之一,ASHP 耗能串联式系统同样小于并联式系统,致使串联式系统相较并联式系统节能 2719kJ,同时多收集 2465kJ 太阳能,太阳能保证率因此也略高一些。

### 3 基于粒子群算法的串联式系统参数优化

通过以上分析对比,串联式 HSSAASHP 在节约运行能耗方面更有优势。而 HSSAASHP 的经济性不仅要考虑运行能耗,同时还取决于各个主要设备的结构参数、布局方式及运行维护费用等因素。因此本文利用粒子群算法对串联系统的 SC 角度和面积,集热水箱体积,热泵额定功率等关键参数进一步优化,使 HSSAASHP 的经济性更具优势。

粒子群算法是受鸟类觅食启发而提出的一种进化算法<sup>[9,10]</sup>,该算法分为带惯性权值的粒子群算法与带收缩因子的粒子群算法。两种方法在测试函数中表现出各自优势,但惯性权值方法中的一般设置惯性权值递减,致使寻优后期探索新区域能力下降,而收缩因子方法则不存在此不足。因此本文选择带收缩因子的粒子群算法,以串联式 HSSAASHP 运行成本 COST 为目标函数,关键参数 SC 面积、SC 安装倾角、蓄热水箱体积和 ASHP 额定功率作为输入变量,忽略维护费用,构建的 min COST 表达式如下:

$$COST = C + X \tag{4}$$

$$C = A_{SC} \times M_1 + V_{\text{tank}} \times M_2 + P_{\text{ASHP}} \times M_3 \tag{5}$$

$$X = LIFETIME_{\text{system}} \times Y \tag{6}$$

$$Y = (E_1 + E_2 + E_3) \times M_4 \tag{7}$$

式中,  $A_{SC}$  为 SC 集热面积,  $m^2$ ;  $V_{\text{tank}}$  为蓄热水箱体积,  $m^3$ ;  $P_{\text{ASHP}}$  为 ASHP 额定功率, kW;  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  为 SC 单位面积价格, 元/ $m^2$ 、蓄热水箱单位体积价格, 元/ $m^3$ 、ASHP 单位容量价格, 元/kW;  $LIFETIME_{\text{system}}$  为系统使用年限, 年;  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  为 SC 侧水泵耗电量, kWh、ASHP 侧水泵耗电量, kWh、ASHP 耗电量, kWh;  $M_4$  为当地电

价, 元/kWh。

基于上式和粒子群算法, 构建的优化串联式 HSSAASHP 关键参数的算法流程, 如图 10 所示。

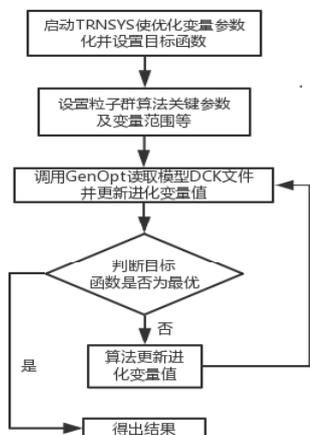


图 10 基于 PSA 串联式 HSSAASHP 关键参数的优化流程图

Fig.10 The optimization flowchart of key parameters of series-type HSSAASHP based on PSA

在供热季节本年 11 月至次年 3 月内, 编程运行图 10 所示的关键参数优化算法流程, 获取的串联式 HSSAASHP 优化前后的关键参数及运行成本如表 2 所示。

表 2 串联式 HSSAASHP 优化前后数据对比

Table 2 Comparison of the former and optimized data for series-type HSSAASHP

优化参数 (变化范围)	优化前	优化后
$A_{sc}/m^2(2-8)$	4	3.78
$\theta/^\circ(0-90)$	45	58.8
$V_{tank}/m^3(0.1-1)$	0.3	0.302
$P_{ASHP}/kW(0.9, 1.15, 1.75)$	1.15	0.9
$COST/¥$	16792	15148

由表 2 数据可见, 对于串联式 HSSAASHP 而言, 理论上 SC 面积越大, 节能效益越显著; 而 SC 面积的增加也需要更大的蓄热水箱  $V_{tank}$  来匹配。表中数据显示优化后 SC 面积减小, SC 安装角度  $\theta$  增大, 蓄热水箱体积  $V_{tank}$  基本不变, 热泵额定功率降低, 使得费用减少 1600 余元。总之, SC 面积与  $V_{tank}$  需要合理匹配; 也说明 SC、蓄热水箱与热泵的初始成本会极大影响串联式 HSSAASHP 运行成本的优化结果。

采用优化后的数据, 再次数值模拟串联式 HSSAASHP 在典型日蓄热水箱顶层温度变化及 ASHP 启停状况, 如图 11 所示。

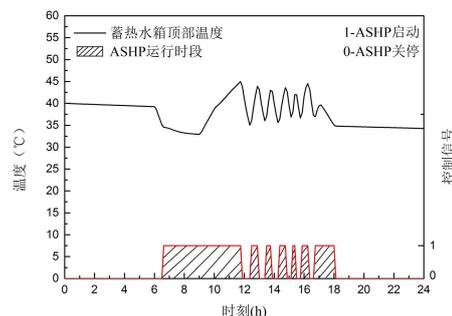


图 11 优化后串联式 HSSAASHP 中蓄热水箱顶部温度变化与 ASHP 启、停及其运行状况

Fig.11 The variation of temperature at the top of regeneration tank and the states of start, stop and running of ASHP in optimized series-type HSSAASHP

图 11 与优化前的图 6 相比较, 可知优化后的串联式系统热泵启停次数减少了, 水箱顶部温度波动较平缓。但是由于优化后 ASHP 额定功率减小, 即 ASHP 型号规格下降, 导致 COP 由原来的 3.75~4.74 变化为 3.75~4.24, 下限值降低了。

#### 4 结论

(1) 本文基于 TRNSYS 建立太阳能空气源热泵联合供热串联系统与并联系统, 对比分析得出, 串联式 HSSAASHP 中热泵 COP 为 3.75~4.74, 相较并联式 HSSAASHP 的 4.19~4.77 有略微差距, 但在耗能方面, 仅模拟典型日一天即节能 2719kJ, 且串联式有更高的太阳能保证率。

(2) 串、并联式 HSSAASHP 在太阳能热泵联合运行模式下, 表现出各自优势, 因此本文引入可在特定状况下切换两种系统形式的切换温度  $T_{switch}$ , 将有利于系统效益的发挥。今后将会对串、并联式自动切换的 HSSAASHP 运行效果进一步探索。

(3) 针对节能方面更佳的串联式 HSSAASHP, 利用粒子群算法优化其 SC 面积, SC 安装角度, 蓄热水箱体积及 ASHP 额定功率等关键参数, 使系统运行成本降低 1600 余元, 同时从优化结果得出太阳能热泵系统虽然较之传统太阳能系统节能效益显著, 仅在 1 月即可节约近 632.5kWh 电能, 但 SC 与 ASHP 的初始成本制约了系统应用的普及与其节能效益的进一步放大。

## 参考文献:

- [1] 郑瑞澄.太阳能热利用与建筑一体化[M].北京:中国建筑工业出版社,2014:5-6.
- [2] Sansaniwal S K, Sharma V, Mathur J. Energy and exergy analyses of various typical solar energy applications: A comprehensive review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2018,82:1576-1601.
- [3] Sterling S J, Collins M R. Feasibility analysis of an indirect heat pump assisted solar domestic hot water system[J]. Applied Energy, 2012,93(5):11-17.
- [4] 魏翠琴,王丽萍,贾少刚,等.太阳能热泵应用现状与性能分析[J].制冷与空调,2017,31(2):159-163.
- [5] Bagarella G, Lazzarin R, Noro M. Annual simulation, energy and economic analysis of hybrid heat pump systems for residential buildings[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,99:485-494.
- [6] Deng W, Yu J. Simulation analysis on dynamic performance of a combined solar/air dual source heat pump water heater[J]. Energy Conversion & Management, 2016,120(PES):378-387.
- [7] Amir A S, Alan S F, Rakesh K. Performance of two-stage variable capacity air source heat pump: Field performance results and TRNSYS simulation[J]. Energy & Buildings, 2015,94:80-90.
- [8] 朱霞,梁彩华,张小松.两种太阳能热泵采暖系统的性能模拟与对比[J].制冷技术,2010,30(4):18-22.
- [9] 钱锋.粒子群算法及其工业应用[M].北京:科学出版社,2013:28-29.
- [10] 王威,冯炼,孙亮亮,等.基于粒子群算法的太阳能-双热源热泵供暖系统优化[J].制冷与空调,2017,31(3):235-239.