

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191165

# 基于改进 MOBCC 算法的空气源热泵水温范围设置优化研究

王世君<sup>1</sup>, 袁绍军<sup>1</sup>, 卢志刚<sup>2</sup>, 乞胜静<sup>2</sup>, 夏革非<sup>1</sup>

(1. 国网冀北承德供电公司, 河北 承德 067000; 2. 燕山大学, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** 在“煤改电”的新形势下, 空气源热泵安全经济、高效清洁, 日益成为农村电采暖的主要形式之一。针对农村的空气源热泵-散热器系统, 基于空气源热泵控制原理推导出系统热模型, 并建立了以电采暖用户的经济性和热舒适性为目标的空气源热泵的水温范围设置多目标优化模型。此外, 在传统多目标细菌群体趋药性 (Multi-objective Bacterial Colony Chemotaxis, MOBCC) 算法的基础上, 提出细菌个体寻优变步长策略和细菌群体定向变异策略, 改善了解集的收敛性和多样性。采用改进 MOBCC 算法和基于模糊隶属度函数的多目标决策方法实现优化, 算例仿真结果验证了改进 MOBCC 算法的性能和所建立模型的正确性。

**关键词:** 煤改电; 空气源热泵; 多目标优化; 水温范围设置; 改进 MOBCC 算法

## Research on optimization of water temperature range setting of air source heat pump based on improved MOBCC algorithm

WANG Shijun<sup>1</sup>, YUAN Shaojun<sup>1</sup>, LU Zhigang<sup>2</sup>, QI Shengjing<sup>2</sup>, XIA Gefei<sup>1</sup>

(1. State Grid Jibei Chengde Power Supply Company, Chengde 067000, China;

2. Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**Abstract:** Under the new situation of "coal-to-electricity", the air-source heat pump has become one of the main forms of rural electric heating because of its advantages of safety, economy, high efficiency and cleaning. For the rural air source heat pump-radiator system, a thermal model based on the air source heat pump control principle is deduced, and a multi-objective optimization model for setting the water temperature range of an air-source heat pump with the goals of economy and thermal comfort for electric heating users is established. In addition, based on the traditional Multi-Objective Bacterial Colony Chemotaxis (MOBCC) algorithm, a bacterial individual optimization step time varying strategy and a bacterial colony-oriented mutation strategy are proposed. These improve the convergence and diversity of the solution set. The improved MOBCC algorithm and multi-objective decision-making method based on fuzzy membership function are applied to achieve the optimization. The simulation results of the examples verify the performance of the improved MOBCC algorithm and the correctness of the model.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61873225) and Special Fund for Beijing-Tianjin-Hebei Corporation of Natural Science Foundation of Hebei Province (No. F2016203507).

**Key words:** coal to electricity; air source heat pump; multi-objective optimization; water temperature range setting; improved MOBCC algorithm

## 0 引言

近年来, 我国能源枯竭和环境污染形势日益严峻, 能源转型发展和大气污染防治是当前生态文明建设工作的重点。为此, 国家电网提出“电能替代”发展战略, 促进能源清洁化发展。其中, “煤改电”

工程利用电采暖设备替代传统分散燃煤锅炉, 实现了冬季的清洁高效供暖, 对节能减排具有重要意义<sup>[1-6]</sup>。

当前我国北方地区的“煤改电”工程重点在农村地区开展, 考虑到农村房屋主要为平房且户型较大, 故电采暖多选择空气源热泵、蓄热电暖器等分散采暖方式<sup>[7]</sup>。文献[8]验证了空气源热泵与散热器结合供暖方案在进行了节能保温改造的农村地区实施的可行性、经济性和节能性, 本文以此系统作为

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(61873225); 河北省自然科学基金京津冀合作专项项目资助(F2016203507)

研究对象。目前,已有较多文献对空气源热泵的优化控制进行研究。文献[9]在指出空气源热泵是实现农村“煤改电”最佳方式的同时,提出一种将空气源热泵作为虚拟电力调峰站的控制方法。文献[10]提出一种热泵负荷集群调控策略实现新能源消纳。文献[11]以供暖系统的热舒适性、经济性和节能性为优化目标,通过 Hooke-Jeeves 算法与粒子群算法结合得出空气源热泵在时间控制策略下的最优运行时间。空气源热泵的控制还可借鉴现有空调负荷的优化控制策略<sup>[12-17]</sup>。以上文献对空气源热泵的控制都是基于启停控制,而文献[18]提出一种随室外温度变化而改变供水温度的控制策略,节能效果明显,但是该控制策略仅考虑空气源热泵的供水温度,未考虑市面产品的供回水温差设计,在实际应用中具有一定的局限性。

Muller 在对细菌趋药性相关研究的基础上,提出了细菌趋药性优化算法(BC 算法)<sup>[19]</sup>,李威武等人在 BC 算法的基础上,提出了细菌群体趋药性算法(BCC 算法)<sup>[20]</sup>。BCC 算法在实际应用中体现出了优越的性能,得到了深入的研究和广泛应用<sup>[21-24]</sup>。近年来随着对多目标优化研究的深入,BCC 算法在多目标优化领域也得到了一定的发展,MOBCC 算法被提出并得到了实际应用<sup>[25-26]</sup>。本文在传统 MOBCC 算法的基础上,加入了变步长和细菌群体定向变异策略,提出了一种改进 MOBCC 算法,比传统 MOBCC 算法在解集的收敛性和分布性上具有更好的性能。

本文针对空气源热泵系统的供暖方案进行了研究,首先分析空气源热泵-散热器系统的工作原理和控制方式,并建立系统热模型。然后建立以电采暖用户的经济性和热舒适性作为优化目标、以供水温度上限和回水温度下限的温度差值作为决策变量的优化模型,该模型为多目标连续最优化问题,采用改进的多目标细菌群体趋药性算法进行求解。最后通过算例仿真验证了本文所提出的空气源热泵水温范围设置优化的可行性。

## 1 空气源热泵-散热器系统

对于农村电采暖用户空气源热泵的散热终端选择问题,为减少改造费用,通常选用散热器,构成空气源热泵-散热器供热系统。该供热系统由空气源热泵、缓冲水箱、供回水管道、循环水泵和散热器等部分构成,如图 1 所示。

### 1.1 空气源热泵的工作原理和控制方式

空气源热泵利用压缩机系统内的低温冷媒不断吸收空气中的低品位热能,将其释放到水中实现制

热,并通过管道与散热器连接实现系统的供回水

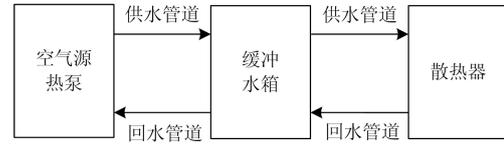


图 1 空气源热泵-散热器系统的构成

Fig. 1 Structure of air source heat pump-radiator system

循环和冷热循环。缓冲水箱的作用是增大系统的循环水量,避免空气源热泵的频繁启停,提高工作效率。

当前农村电采暖用户所采用的空气源热泵的控制方式多为水温控制法,即分别设置供水温度上限及回水温度下限作为水温设置范围,若空气源热泵处于工作状态,当回水温度升至供水温度上限时空空气源热泵停机,若空气源热泵处于停机状态,当回水温度降至回水温度下限时空气源热泵启动。

本文所提出的空气源热泵水温范围设置优化,是在合理选取空气源热泵供水温度上限的情况下,对供水温度上限与回水温度下限的温差进行优化,实现电采暖用户的经济性和舒适性兼顾。

### 1.2 空气源热泵系统的热模型

空气源热泵系统中循环水的热量变化量 $\Delta Q_w$ 与温度变化量 $\Delta T_w$ 之间的关系为

$$\Delta Q_w = Q_{\text{pump}} - Q_{\text{rad}} = c_w m \Delta T_w \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{pump}}$ 为空气源热泵的制热量; $Q_{\text{rad}}$ 为散热器的散热量; $c_w$ 为水的比热容; $m$ 为循环水的质量。

空气源热泵的制热量为

$$Q_{\text{pump}} = P \times t \times COP \quad (2)$$

式中: $P$ 为空气源热泵的额定功率; $t$ 为空气源热泵的运行时间; $COP$ 为空气源热泵的制热能效比。

当空气源热泵-散热器系统稳定运行时,散热器的散热量为

$$Q_{\text{rad}} = KF \Delta T_1 \quad (3)$$

式中: $K$ 为散热器的散热系数; $F$ 为散热器的散热面积; $\Delta T_1$ 为散热器与室内的温差。

散热器的散热面积为

$$F = 2 \times d \times h \times n \quad (4)$$

式中: $d$ 为翅片高度; $h$ 为散热器长度; $n$ 为翅片个数。

房间热损失的计算方式为

$$Q_{\text{room}} = Q_{\text{wall}} + Q_{\text{dw1}} + Q_{\text{dw2}} \quad (5)$$

式中: $Q_{\text{wall}}$ 为墙壁的热损失; $Q_{\text{dw1}}$ 为门窗传热导致的热损失; $Q_{\text{dw2}}$ 为门窗开关导致的热损失。

$$Q_{\text{wall}} = K_{\text{wall}} F_{\text{wall}} \Delta T_2 \quad (6)$$

式中:  $K_{\text{wall}}$  为墙壁的散热系数;  $F_{\text{wall}}$  为墙壁的散热面积;  $\Delta T_2$  为室内与室外的温差。

门窗传热导致的热损失为

$$Q_{\text{dw1}} = \sum K_{\text{dw}} F_{\text{dw}} \Delta T_2 \quad (7)$$

式中:  $K_{\text{dw}}$  为门窗的传热系数;  $F_{\text{dw}}$  为门窗的面积;  $\Delta T_2$  为室内与室外的温差。

门窗开关导致的热损失为

$$Q_{\text{dw2}} = \sum N \tau C_p P_s L \Delta T_2 \quad (8)$$

式中:  $N$  为门窗开关的次数;  $\tau$  为门窗开关的时间;  $C_p$  为空气的定压比热容;  $P_s$  为采暖室外温度下的空气密度;  $L$  为门窗开关时渗透的冷空气量;  $\Delta T_2$  为室内与室外的温差。

室内热量变化量  $\Delta Q_{\text{in}}$  的计算方式及其与温度变化量  $\Delta T_{\text{in}}$  的关系为

$$\Delta Q_{\text{in}} = Q_{\text{rad}} - Q_{\text{wall}} - Q_{\text{dw}} = c_{\text{air}} \rho V \Delta T_{\text{in}} \quad (9)$$

式中:  $c_{\text{air}}$  为空气的比热容;  $\rho$  为空气的密度;  $V$  为室内空气的体积。

当循环水的温度升高到供水温度的上限时, 空气源热泵停机。空气源热泵从启动到停机, 空气源热泵的运行时间为

$$t_1 = \frac{\Delta Q_w}{P_{\text{pump}} - P_{\text{rad}}} \quad (10)$$

式中:  $\Delta Q_w$  为循环水热量的变化量;  $P_{\text{pump}}$  为空气源热泵的制热功率;  $P_{\text{rad}}$  为散热器的散热功率。

当空气源热泵系统中循环水的温度低于此时段的下限时, 空气源热泵启动, 循环水的温度在某时段的下限为

$$T_w^{\text{min}} = T_{\text{gs}}^{\text{max}} - \Delta T_w \quad (11)$$

空气源热泵从停机到启动, 空气源热泵的停机时间为

$$t_2 = \frac{\Delta Q_w}{P_{\text{rad}}} \quad (12)$$

式中:  $\Delta Q_w$  为循环水热量的变化量;  $P_{\text{rad}}$  为散热器的散热功率。

## 2 空气源热泵多目标水温范围设置优化模型

以 24 个时段空气源热泵的供回水温差为决策变量, 综合考虑电采暖用户的多方位需求, 以采暖电费和采暖不舒适度为目标函数, 建立空气源热泵多目标水温范围设置优化模型。

### 2.1 目标函数

#### (1) 采暖电费

考虑家用电采暖用户的经济性需求, 本文取采暖电费为一个控制周期之内空气源热泵运行产生的

用电费用。

采暖电费最小的目标为

$$\min f_1(X) = \sum_{k=1}^{24} P^k t^k p^k \quad (13)$$

式中:  $P^k$  为空气源热泵在第  $k$  个时段的额定功率;  $t^k$  为空气源热泵在第  $k$  个时段的运行时间;  $p^k$  为第  $k$  个时段的电价。

依据国家电网河北省南部电网的销售电价表, 针对电采暖用户制定的分时电价如表 1 所示。

表 1 分时电价

Table 1 Time-of-use tariff

时段/h	电价/(元/kW·h)
0:00—8:00	0.3
8:00—20:00	0.55
20:00—24:00	0.3

#### (2) 采暖不舒适度

考虑家用电采暖用户的舒适性需求, 将采暖不舒适度定义为一个控制周期之内室内温度不舒适度与室内温度波动不舒适度之和<sup>[3]</sup>。

采暖不舒适度最小的目标为

$$\min f_2(X) = \sum_{k=1}^{24} |T_{\text{in}}^k - T_{\text{set}}| + |T_{\text{in}}^k - T_{\text{in}}^{k-1}| \quad (14)$$

式中:  $T_{\text{in}}^k$  为第  $k$  个时段的室内温度;  $T_{\text{in}}^{k-1}$  为第  $k-1$  个时段的室内温度 ( $k \geq 2$ );  $T_{\text{set}}$  为室内温度的理想值。

### 2.2 约束条件

#### (1) 供回水温差约束

以供回水的温差作为决策变量进行空气源热泵的水温范围设置优化, 供回水温差的约束为

$$\Delta T_{\text{ghs}}^{\text{min}} \leq \Delta T_{\text{ghs}} \leq \Delta T_{\text{ghs}}^{\text{max}} \quad (15)$$

#### (2) 供水温度约束

空气源热泵的运行情况受环境因素的影响, 供水温度的约束为

$$T_{\text{gs}}^{\text{min}} \leq T_{\text{gs}} \leq T_{\text{gs}}^{\text{max}} \quad (16)$$

#### (3) 室内温度约束

室内温度在作为用户舒适性目标的同时, 需要考虑室内温度的上下限满足用户的基本舒适性需求, 室内温度的约束为

$$T_{\text{in}}^{\text{min}} \leq T_{\text{in}} \leq T_{\text{in}}^{\text{max}} \quad (17)$$

## 3 改进 MOBCC 算法的描述

### 3.1 传统 MOBCC 算法的改进策略

#### (1) 细菌个体寻优变步长策略

细菌个体寻优变步长策略的原理如图 2 所示。细菌个体寻优的步长在寻优过程中按线性规律递

减, 通过设置最大步长以保证细菌个体寻优能够覆盖整个决策空间, 保证了细菌个体寻优的全局搜索能力, 同时寻优后期较小的步长也能提高细菌个体寻优的局部搜索能力。

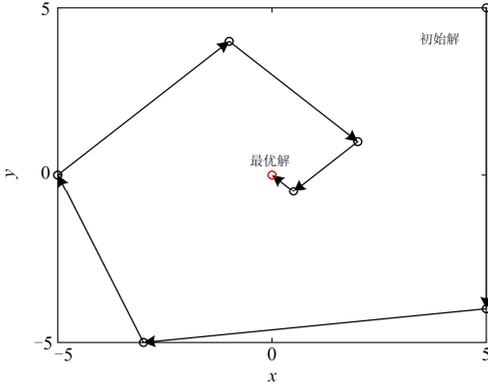


图 2 细菌个体寻优变步长策略的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the time varying step strategy in bacterial individual optimization

$n$  维空间的细菌在个体寻优过程中, 决策变量各维在某一代的变化量用球坐标系表示为

$$l_i^{(1)} = l_i \cdot \sin \varphi_{n-1} \prod_{k=1}^{n-2} \cos \varphi_k \quad (18)$$

$$l_i^{(i)} = l_i \cdot \sin \varphi_{n-1} \cdot \sin \varphi_{i-1} \cdot \prod_{k=i}^{n-2} \cos \varphi_k, \quad i = 2, 3, \dots, n-1 \quad (19)$$

$$l_i^{(n)} = l_i \cdot \cos \varphi_{n-1} \quad (20)$$

式中,  $l_i$  为细菌个体在某一代的步长。

细菌个体寻优采用变步长策略, 从而提高寻优的精确度。假设所有细菌个体在某一代的步长相同, 且在迭代过程中呈线性递减, 如式(21)所示。

$$l_t = l_{\max} - (l_{\max} - l_{\min}) \cdot \frac{t}{t_{\max}}, \quad t = 1, 2, \dots, t_{\max} \quad (21)$$

式中:  $l_{\max}$  为最大步长;  $l_{\min}$  为最小步长。表示为

$$l_{\max} = \frac{d_{\max}}{2} \quad (22)$$

$$l_{\min} = 0 \quad (23)$$

式中,  $d_{\max}$  为决策空间的矢径最大值。

则细菌个体的新位置为

$$X_i^k = X_i^k + l_i^k, \quad i = 1, 2, \dots, P, \quad k = 1, 2, \dots, D \quad (24)$$

式中:  $P$  为群体规模;  $D$  为决策变量的维数。

(2) 基于细菌群体定向变异的目标空间分布性改善策略

细菌群体定向变异的原理如图 3 所示。首先计算细菌群体中每个细菌个体在目标空间的拥挤距

离, 通过使分布性较差即拥挤距离较小的一半细菌个体向分布性较好即拥挤距离较大的另一半细菌个体定向变异, 改善细菌群体在目标空间的分布性。

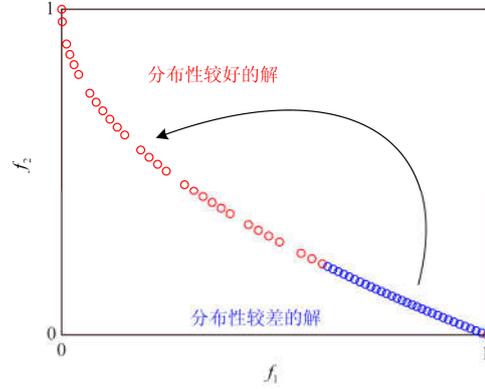


图 3 细菌群体定向变异的原理图

Fig. 3 Schematic diagram of the oriented mutation of the bacterial colony

首先计算细菌群体中每个细菌个体在目标空间的拥挤距离, 拥挤距离较小即分布性较差的一半细菌个体的位置向拥挤距离较大即分布性较好的另一半细菌个体的位置定向变异, 产生新位置为

$$X_i^k = [(2 \cdot \text{rand} - 1) \cdot 0.25 + 1] \cdot X_{P+1-i}^k \quad (25)$$

$$i = 1, 2, \dots, \frac{P}{2}, \quad k = 1, 2, \dots, D$$

式中:  $P$  为群体规模;  $D$  为决策变量的维数;  $\text{rand}$  为(0,1)内均匀分布的随机数。

### 3.2 改进 MOBCC 算法的流程

改进 MOBCC 算法的流程如图 4 所示, 具体描述如下。

#### (1) 设置系统参数

设置决策变量区间、群体规模和迭代次数等系统参数。

#### (2) 初始化空气源热泵的供回水温差

随机初始化细菌群体的位置, 即空气源热泵的供回水温差, 使其均匀分布在决策变量空间。

#### (3) 基于细菌个体趋药性的供回水温差寻优

基于细菌个体趋药性的供回水温差寻优内容详见 3.1 节中传统 MOBCC 算法的改进策略描述。

#### (4) 基于细菌群体感知的供回水温差寻优

群体寻优基于细菌群体感知, 来源于群体智能。细菌个体感知群体中比自身位置好的其他细菌个体, 并向这些细菌个体的中心移动, 则细菌个体的新位置为

$$X_i = X_i - 2 \cdot \text{rand} \cdot (X_i - \text{Center}_i) \quad (26)$$

$$i = 1, 2, \dots, P$$

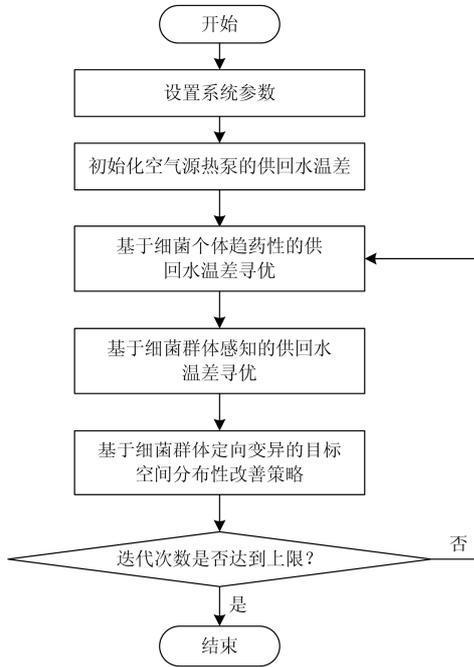


图 4 改进 MOBCC 算法的流程图

Fig. 4 Flowchart of the improved MOBCC algorithm

式中:  $P$  为群体规模;  $rand$  为(0,1)内均匀分布的随机数;  $Center_i$  为某个细菌个体的比自身位置好的其他细菌个体的中心, 其计算方式为

$$Center_i = \text{Average}(X_j | f(X_j) < f(X_i)) \quad (27)$$

$$j = 1, 2, \dots, P \wedge j \neq i$$

(5) 基于细菌群体定向变异的目标空间分布性改善策略

基于细菌群体定向变异的目标空间分布性改善策略的内容, 详见 3.1 节中传统 MOBCC 算法的改进策略的描述。

### 3.3 传统 MOBCC 算法与改进 MOBCC 算法的性能对比

传统 MOBCC 算法和改进 MOBCC 算法在求解本文的多目标优化问题时, 得到的帕累托前沿如图 5 所示。

由图 5 可知, 与传统 MOBCC 算法相比, 改进 MOBCC 算法得到的帕累托前沿更加接近真实帕累托前沿, 且在目标空间的分布性也要更优, 由此可以验证改进 MOBCC 算法在解集的收敛性和分布性上具有更好的性能。

## 4 算例分析

### 4.1 空气源热泵系统及水温范围设置优化模型的设置

房屋的建筑结构如图 6 所示。

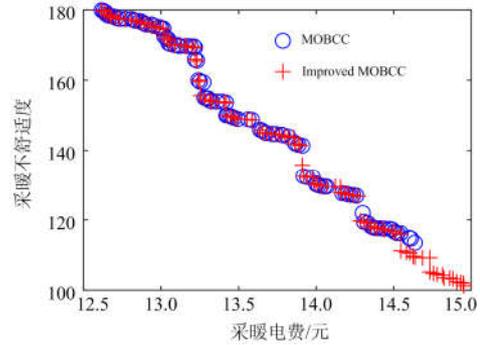


图 5 分别采用 MOBCC 算法和改进 MOBCC 算法得到的帕累托前沿的对比

Fig. 5 Comparison of the Pareto frontiers using MOBCC algorithm and improved MOBCC algorithm respectively

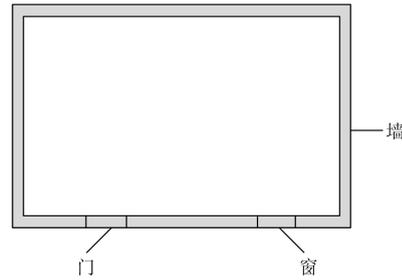


图 6 房屋的建筑结构

Fig. 6 Building structure of the house

房屋建筑的大小为  $6\text{ m} \times 10\text{ m} \times 3.5\text{ m}$ , 墙壁采用  $370\text{ mm}$  混凝土砖墙+ $50\text{ mm}$  聚苯保温板, 墙壁的散热系数取  $0.4\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 门为双层塑钢门, 大小为  $2\text{ m} \times 1\text{ m}$ , 散热系数取  $2.58\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[8]</sup>。窗户为双层塑钢窗, 大小为  $1.5\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ , 散热系数取  $2.8\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。开窗次数取  $4.97\text{ 次}/\text{h}$ , 单位时间渗透的冷空气量为  $2.5\text{ m}^3/\text{h}$ <sup>[27]</sup>。散热器散热系数取为  $6.86\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 散热面积取为  $20.75\text{ m}^2$ <sup>[28]</sup>。

室内温度的初始值设为  $16\text{ }^\circ\text{C}$ 。空气源热泵的制热功率和房屋的散热量都与室外气温的高低密切相关, 因而本文取一个控制周期, 即 24 个时段的室外气温变化曲线, 如图 7 所示。

空气源热泵的供水温度上限设置为  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , 空气源热泵-散热器系统中循环水体积取  $100\text{ L}$ , 散热器的散热系数取  $6.86\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 散热面积取  $20.75\text{ m}^2$ 。

将室内温度的理想值设置为  $T_{\text{set}} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

各个约束条件的上下限分别设置如下。

$$\Delta T_{\text{ghs}}^{\min} = 5\text{ }^\circ\text{C}, \quad \Delta T_{\text{ghs}}^{\max} = 20\text{ }^\circ\text{C}; \quad T_{\text{gs}}^{\min} = 35\text{ }^\circ\text{C},$$

$$\Delta T_{\text{gs}}^{\max} = 50\text{ }^\circ\text{C}; \quad T_{\text{in}}^{\min} = 15\text{ }^\circ\text{C}, \quad T_{\text{in}}^{\max} = 27\text{ }^\circ\text{C}.$$

### 4.2 多目标水温范围设置优化模型的求解及决策

1) 约束条件的处理

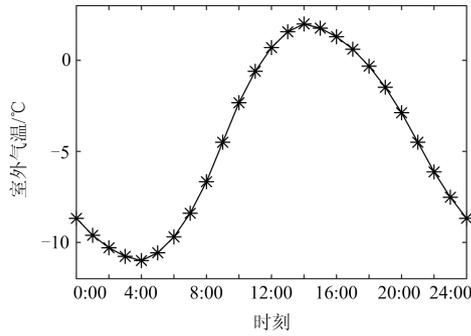


图 7 室外气温变化曲线

Fig. 7 Outdoor temperature curve

多目标优化问题的约束条件表示如下<sup>[29]</sup>。

$$h_i(X) = 0, i = 1, 2, \dots, m \quad (28)$$

$$g_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \quad (29)$$

针对带约束的多目标优化问题，定义约束违反度为

$$CV(X) = \sum_{i=1}^m h_i(X)^2 + \sum_{j=1}^n [\max(0, g_j(X))]^2 \quad (30)$$

由此可知，可行解对应的  $CV=0$ ，不可行解对应的  $CV>0$ ，则解  $X_1$  约束支配解  $X_2$  的三种情况。

(1)  $X_1$  是可行解， $X_2$  是不可行解。

(2)  $X_1$  和  $X_2$  都是不可行解，但  $X_1$  的约束违反度小于  $X_2$  的约束违反度。

(3)  $X_1$  和  $X_2$  都是可行解， $X_1$  帕累托支配  $X_2$ 。

2) 多目标水温范围设置优化模型的求解

本文采用改进 MOBCC 算法对空气源热泵的水温范围设置优化问题进行求解，得到多目标水温范围设置优化问题的帕累托前沿，如图 8 所示。

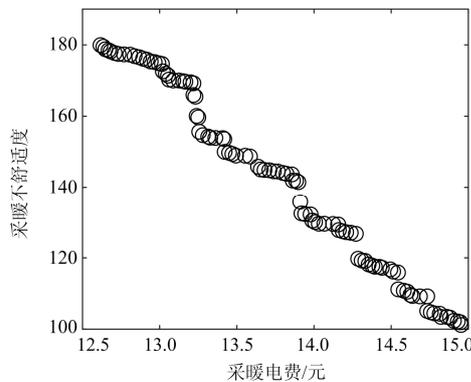


图 8 采用改进 MOBCC 算法得到的多目标水温范围设置优化问题的帕累托前沿

Fig. 8 Pareto frontier of multi-objective water temperature range setting optimization problem obtained by improved MOBCC algorithm

3) 基于模糊隶属度函数的多目标决策方法

(1) 目标满意度的定义

本文用模糊隶属度函数分别表示每个非劣解的各个目标对应的满意度，可表示为

$$\mu_i = \sqrt{\frac{f_i^{\max} - f_i(X)}{f_i^{\max} - f_i^{\min}}}, i = 1, 2 \quad (31)$$

式中， $f_i^{\max}$  和  $f_i^{\min}$  分别为求得的所有非劣解中第  $i$  个目标函数的最大值和最小值。

(2) 综合满意度的定义

在单个目标的目标满意度基础上，提出多个目标的综合满意度，并将其定义为

$$S = \sum_{i=1}^2 c_i \mu_i \quad (32)$$

式中， $c_i$  为第  $i$  个目标函数的满意度对综合满意度影响的权重，且满足

$$\sum_{i=1}^2 c_i = 1 \quad (33)$$

对于本文所建立的空气源热泵水温范围设置优化模型，赋予采暖电费和采暖不舒适度相同的重要性进行多目标决策，即设置  $c_1=c_2=0.5$ 。计算求得每个非劣解的综合满意度，并选择综合满意度最高的一个非劣解作为最终解，如图 9 所示。

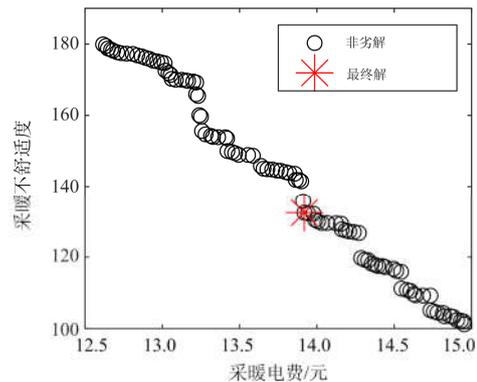


图 9 采用基于模糊隶属度函数的多目标决策方法确定的最终解

Fig. 9 Best compromise solution by the multi-objective decision making method based on fuzzy membership function

空气源热泵在一个控制周期内供水温度上限和回水温度下限的优化温差如图 10 所示，对应电采暖用户的采暖电费为 13.92 元，采暖不舒适度为 132.47。

由图 10 可知：在 11:00—14:00 之间室外气温较高的时段，优化温差最高，这是因为分时电价处于峰时电价，故在保证舒适性的前提下，可以通过降低回水温度下限减少空气源热泵的工作时间，提高用户的经济性；而在 22:00—6:00 之间室外气温

较低的时段, 优化温差最低, 这是因为分时电价处于谷时电价, 故在保证经济性的前提下, 可以通过提高回水温度下限增加空气源热泵的工作时间, 提高用户的舒适性。

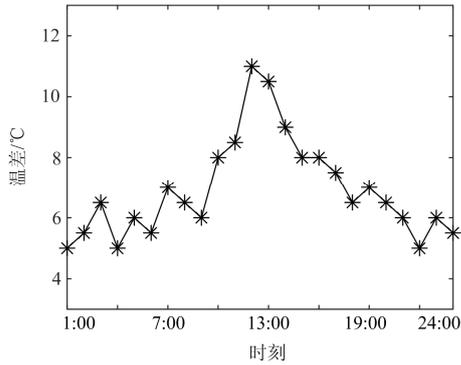


图 10 空气源热泵在一个控制周期的优化温差

Fig. 10 Optimal temperature differences of the air source heat pump in one control cycle

### 4.3 优化效果分析

在供水温度上限与回水温度下限的温差设为 5 °C、20 °C 和优化温差三种情况下, 电采暖用户的经济性和舒适性目标如表 2 所示, 室内温度变化曲线如图 11 所示。

表 2 不同温差下电采暖用户的经济性和舒适性目标

Table 2 Economic and comfort objectives for household electric heating users of different temperature differences

温差	采暖电费/元	采暖不舒适度
5 °C	15.06	96.67
20 °C	12.97	184.33
优化温差	13.92	132.48

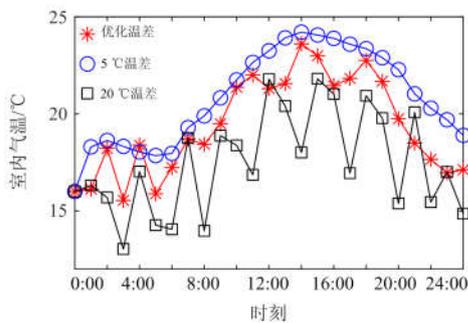


图 11 不同温差下的室内温度变化曲线

Fig. 11 Indoor temperature curve of different temperature differences

由表 2 和图 11 可知: 在恒定 5 °C 温差情况下, 电采暖用户采暖的舒适性得到了很好的满足, 但是经济性较差; 在恒定 20 °C 温差情况下, 电采暖用户

采暖的经济性较好, 但是舒适性不能得到很好的满足; 在优化温差情况下, 电采暖用户采暖的经济性和舒适性需求得以兼顾, 充分体现出本研究的实际意义。

### 4.4 供水温度上限对室内温度变化的影响

上文中供水温度的上限设置为 50 °C, 当将其改变为 48 °C 和 46 °C 时, 电采暖用户的经济性和舒适性目标如表 3 所示, 优化后的室内温度变化曲线对比结果如图 12 所示。

由表 3 和图 12 可知, 供水温度上限对室内温度的上下区间有着较大的影响, 随着供水温度上限的提高, 用户舒适性得到明显改善, 且经济性下降的程度很小。因此, 提高空气源热泵的供水温度上限是提升空气源热泵性能的重要指标之一。

表 3 不同供水温度上限的电采暖用户的经济性和舒适性目标

Table 3 Economic and comfort objectives for household electric heating users at different water supply temperature upper limit

供水温度上限	采暖电费/元	采暖不舒适度
50 °C	13.92	132.47
48 °C	13.20	161.10
46 °C	12.72	182.47

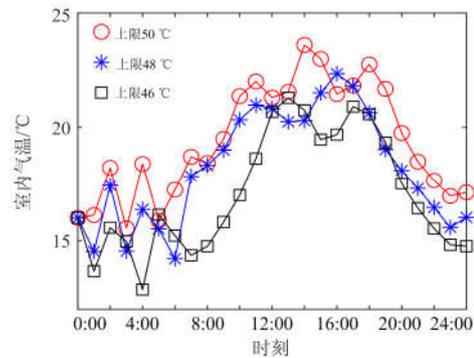


图 12 不同供水温度上限的室内温度变化曲线

Fig. 12 Indoor temperature curve of different water supply temperature upper limit

## 5 结论

本文对空气源热泵的水温范围设置优化进行了研究。首先, 对于空气源热泵-散热器系统中循环水的热量与温度的关系, 建立了空气源热泵-散热器系统的热模型。然后, 考虑电采暖用户的经济性和舒适性目标, 建立了空气源热泵-散热器系统的多目标水温范围设置优化模型。同时, 对传统 MOBCC 算法进行了改进, 细菌个体寻优采用变步长策略, 加

入了细菌群体定向变异策略,提高了 MOBCC 算法在解集收敛性和分布性上的性能。算例仿真结果表明,本文所提出的空气源热泵水温范围设置优化能够兼顾电采暖用户经济性和舒适性的多方位需求,对于空气源热泵的运行控制具有现实的可行性。

### 参考文献

- [1] 陈程, 陈星莺, 张健钊, 等. 考虑分时电价的电采暖热泵系统随机运行优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 57-64.  
CHEN Cheng, CHEN Xingying, ZHANG Jianzhao, et al. Stochastic operational optimal strategy for ground source heat pump system under TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 57-64.
- [2] 范帅, 郝琨琪, 郭炳庆, 等. 分散式电采暖负荷协同优化运行策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 20-29.  
FAN Shuai, JIA Kunqi, GUO Bingqing, et al. Collaborative optimal operation strategy for decentralized electric heating loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 20-29.
- [3] BUBER T, ROON S, GRUBER A, et al. Demand response potential of electrical heat pumps and electric storage heaters[C] // IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 10, 2013, Vienna, Austria: 8028-8032.
- [4] HAN J, MA G, HU S, et al. Analysis of electric heating load characteristics in South Hebei Power Grid[C] // 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20, 2018, Beijing, China: 1-5.
- [5] 朱赫炎, 张明理, 梁毅, 等. 煤改电电能替代工程效益分析[J]. 东北电力技术, 2017, 38(5): 43-45.  
ZHU Heyan, ZHANG Mingli, LIANG Yi, et al. Coal to electricity analysis of benefit and output ratio of power alternative project[J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(5): 43-45.
- [6] 王国强, 李俊, 杨晨, 等. 基于低品位能源梯级利用的实验教学平台[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(5): 224-227.  
WANG Guoqiang, LI Jun, YANG Chen, et al. Experimental teaching platform based on stair utilization of low-grade energy[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(5): 224-227.
- [7] 吴亮, 吴迪, 解岩, 等. 京津冀农村“煤改电”运行情况分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(4): 42-47.  
WU Liang, WU Di, XIE Yan, et al. Performance analysis of rural “coal to electricity” in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(4): 42-47.
- [8] 于涛, 乔春珍, 赵玉清. 空气源热泵+散热器低温采暖在北京农村地区应用的综合性分析[J]. 节能, 2014(12): 51-54.  
YU Tao, QIAO Chunzhen, ZHAO Yuqing. Analysis of energy saving automatic preparation well for the implementation of coal mine emulsion[J]. Energy Conservation, 2014(12): 51-54.
- [9] 乐慧. 用空气源热泵实现农村采暖的“煤改电”同时为电力削峰填谷[J]. 中国能源, 2016, 38(12): 51-54.  
LE Hui. Realization of substituting coal with electricity and enhancing the efficiency of electricity allocation by using air source heat pump[J]. Energy of China, 2016, 38(12): 51-54.
- [10] 孙毅, 陈一童, 李彬, 等. 计及用户舒适性与公平性的热泵负荷集群控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 122-128.  
SUN Yi, CHEN Yitong, LI Bin, et al. Heat pump load aggregated control strategy considering comfort and fairness of customers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 122-128.
- [11] 杨佳林, 崔红社, 姜镀辉, 等. 寒冷地区空气源热泵辐射供暖系统运行策略模拟研究[J]. 建设科技, 2018(19): 23-26, 32.  
YANG Jialin, CUI Hongshe, JIANG Duhui, et al. Simulation research on operation strategy of radiant heating system with air source heat pump in cold regions[J]. Construction Science and Technology, 2018(19): 23-26, 32.
- [12] 王庆泽, 陈星莺, 颜庆国, 等. 分时电价环境下的办公建筑空调负荷双层柔性优化控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 49-56.  
WANG Qingze, CHEN Xingying, YAN Qingguo, et al. Two-layer flexible optimal strategy for air-conditioning of office building under TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 43-50.
- [13] 刘萌, 梁雯, 张岩, 等. 计及空调负荷群控制的源-荷协同优化调度模型[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 219-227.  
LIU Meng, LIANG Wen, ZHANG Yan, et al. Cooperative generation-load optimal dispatching model considering air-conditioning load group control[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 219-227.
- [14] 高赐威, 李倩玉, 李扬. 基于 DLC 的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1546-1555.  
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1546-1555.
- [15] WANG Jixiang, CHEN Xingying, XIE Jun, et al.

- Dynamic control strategy of residential air conditionings considering environmental and behavioral uncertainties[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 1312-1320.
- [16] 韩笑, 周明, 李庚银. 计及储能和空调负荷的主动配电网多目标优化调度[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(7): 14-23.  
HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin. Multi-objective optimal dispatching of active distribution networks considering energy storage systems and air-conditioning loads[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(7): 14-23.
- [17] HUANG W, ZHANG N, KANG C, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [18] 姜镀膜, 崔红社, 杨佳林, 等. 空气源热泵辐射供暖系统控制策略模拟研究[J]. *建筑热能通风空调*, 2018, 37(11): 12-15.  
JIANG Duhui, CUI Hongshe, YANG Jialin, et al. Simulation research on control strategy of radiant heating system with air source heat pump[J]. *Building Energy & Environment*, 2018, 37(11): 12-15.
- [19] MÜLLER S D, MARCHETTO J, AIRAGHI S, et al. Optimization based on bacterial chemotaxis[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, 6(1): 16-29.
- [20] 李威武, 王慧, 邹志君, 等. 基于细菌群体趋药性的函数优化方法[J]. *电路与系统学报*, 2005, 10(1): 58-63.  
LI Weiwu, WANG Hui, ZOU Zhijun, et al. Function optimization method based on bacterial colony chemotaxis[J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2005, 10(1): 58-63.
- [21] 陈继明, 孙名好, 游聚娟, 等. 基于子空间细菌群体趋药性算法的含分布式电源的配电网无功优化[J]. *山东大学学报: 工学版*, 2014, 44(2): 49-54.  
CHEN Jiming, SUN Mingyu, YOU Jujuan, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed power supply based on subspace bacterial population chemotaxis algorithm[J]. *Journal of Shandong University: Engineering Science*, 2014, 44(2): 49-54.
- [22] WANG Hong, TAN Lijing, NIU Ben. Feature selection for classification of microarray gene expression cancers using bacterial colony optimization with multi-dimensional population[J]. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2019, 48: 172-181.
- [23] 蒋仁江, 英云龙, 张传海, 等. 含分布式发电的配网在细菌群体趋药性算法下的无功优化[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2016, 37(4): 68-72.  
JIANG Renjiang, YING Yunlong, ZHANG Chuanhai, et al. Reactive power optimization of distribution grid with DG based on the improved bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2016, 37(4): 68-72.
- [24] 马锴, 胡淑兵, 陈静, 等. 基于细菌群体趋药性算法的家用电器优化调度[J]. *燕山大学学报*, 2017, 41(2): 142-148.  
MA Kai, HU Shubing, CHEN Jing, et al. Appliances scheduling based on bacterial colony chemotaxis algorithm[J]. *Journal of Yanshan University*, 2017, 41(2): 142-148.
- [25] 陈娟, 杨倩, 文泉, 等. 面向“挑战性课程”的多目标跟踪实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2020, 37(1): 155-158.  
CHEN Juan, YANG Qian, WEN Quan, et al. Design of multi-target tracking experiment for “Challenging” courses[J]. *Experimental Technology and Management*, 2020, 37(1): 155-158.
- [26] CHENG Huilin, LU Zhigang, SUN Songqiang. Multiobjective optimization using bacterial colony chemotaxis[C] // *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems*, November 18, 2011, Guangzhou, China: 27-33.
- [27] 李京美, 付林, 狄洪发. 供暖住宅房间开窗热损失的测试与分析[J]. *暖通空调*, 2008, 38(3): 116-118.  
LI Jingmei, FU Lin, DI Hongfa. Test and analysis of heat loss through open windows in heated residential rooms[J]. *Journal of HV&AC*, 2008, 38(3): 116-118.
- [28] 杨茜. 空气源热泵-散热器低温供暖系统在农村的适用性研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2017.  
YANG Qian. Research on applicability of air source heat pump and radiators low temperature heating system in rural areas[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2017.
- [29] 王跃宣, 刘连臣, 牟盛静. 处理带约束的多目标优化进化算法[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2005, 45(1): 104-107.  
WANG Yuexuan, LIU Lianchen, MU Shengjing. Constrained multi-objective optimization evolutionary algorithm[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2005, 45(1): 104-107.

收稿日期: 2019-09-23; 修回日期: 2019-12-25

作者简介:

王世君(1972—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网规划。E-mail: cdgdcgy@163.com

(编辑 许威)