



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



基于多策略改进麻雀搜索算法的并联冷机系统节能优化

于军琪, 薛志璐, 赵安军, 杨思远, 宗悦

引用本文:

于军琪,薛志璐,赵安军,杨思远,宗悦. 基于多策略改进麻雀搜索算法的并联冷机系统节能优化[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1810–1818.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1554>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进烟花算法的并联冷机负荷分配优化

Load distribution optimization of parallel chillers based on improved firework algorithm

控制与决策. 2021, 36(11): 2618–2626 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0823>

嵌入Circle映射和逐维小孔成像反向学习的鲸鱼优化算法

Whale optimization algorithm for embedded Circle mapping and one-dimensional oppositional learning based small hole imaging

控制与决策. 2021, 36(5): 1173–1180 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1362>

基于动态行为选择的和声搜索算法

Harmony search algorithm based on dynamic behavior selection

控制与决策. 2021, 36(3): 577–588 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0597>

基于自适应正态云模型的灰狼优化算法

Grey wolf optimization algorithm based on adaptive normal cloud model

控制与决策. 2021, 36(10): 2562–2568 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0233>

求解约束优化问题的改进果蝇优化算法及其工程应用

Improved fruit fly optimization algorithm for solving constrained optimization problems and engineering applications

控制与决策. 2021, 36(2): 314–324 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0557>

基于多策略改进麻雀搜索算法的并联冷机系统节能优化

于军琪^{1†}, 薛志璐¹, 赵安军², 杨思远¹, 宗悦¹

(1. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院, 西安 710300;

2. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 西安 710000)

摘要: 针对并联冷机系统负荷分配优化问题, 提出一种基于多策略的改进麻雀搜索算法, 以系统功耗最小为优化目标, 以各冷机的部分负荷率为优化变量进行求解. 在改进算法中, 首先, 针对基本麻雀搜索算法初始解的质量差且不均匀问题, 引入混沌序列机制对位置初始化; 然后, 针对算法初期易早熟导致搜索精度低的问题, 提出将粒子群算法中的速度概念引入发现者的位置更新公式中, 提高算法的寻优精度. 为了避免算法长期陷入局部最优, 结合狼群算法猛狼的跟随策略优化跟随者的位置, 自适应调整个体权重提高算法的收敛速度; 接着, 选取两个测试案例对所提出算法的性能进行详细测试, 并与其他常用算法对比, 改进的麻雀搜索算法在案例中最高分别可节能 17.8% 和 23.97%; 最后, 运用实际系统仿真平台验证所提出改进算法收敛快、运行时间短、鲁棒性好的优点.

关键词: 负荷分配; 节能; 麻雀搜索算法; 混沌序列; 粒子群算法; 狼群算法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1554

引用格式: 于军琪, 薛志璐, 赵安军, 等. 基于多策略改进麻雀搜索算法的并联冷机系统节能优化[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1810-1818.

Optimization of parallel chillers system based on multi-strategy improved sparrow search algorithm for energy saving

YU Jun-qi^{1†}, XUE Zhi-lu¹, ZHAO An-jun², YANG Si-yuan¹, ZONG Yue¹

(1. College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710300, China; 2. College of Construction Equipment Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710000, China)

Abstract: Aimed at the optimal chiller loading problem in parallel chillers systems, a multi-strategy-based improved sparrow search algorithm is proposed. The aim of the optimization problem is to minimize chillers power consumption, and the partial load ratio of each chiller is used as the optimization variable. In the improved algorithm, firstly, the chaotic sequence mechanism is introduced to improve the quality and diversity of the initial solution. Secondly, in order to enhance the optimization accuracy, the speed concept in the particle swarm algorithm is proposed to update producer position. To avoid the algorithm from falling into a local optimum for a long time, the following strategy of the wolf pack algorithm is combined to update scrounger position and adjust the individual weight adaptively to improve the convergence speed of the algorithm. Finally, two test cases are selected to confirm the performance of the proposed algorithm in detail, and compared with other commonly used algorithms, the improved sparrow search algorithm can save up by 17.8% and 23.97%, respectively. By using the actual system simulation platform, it is verified that the improved algorithm has the advantages of fast convergence, short running time and good robustness.

Keywords: load distribution; energy-saving; sparrow search algorithm; chaotic sequence; particle swarm algorithm; wolf pack algorithm

0 引言

随着人们对建筑室内环境舒适度要求的不断提高, 在满足不同用户对舒适度要求的同时能源浪费问

题也持续加剧, 导致中央空调系统能耗在建筑总能耗中的占比为 25%~40%^[1]. 冷水机组作为空调系统的主要能源消耗单元之一, 其能耗约占空调系统总能

收稿日期: 2022-09-01; 录用日期: 2023-04-13.

基金项目: 基于双碳目标的大型公建智慧能源管理系统设计方法研究项目(Z20220231); 西宁曹家堡机场三期扩建工程智慧能源管理系统咨询技术服务项目(20220113).

责任编辑: 张国山.

[†]通讯作者. E-mail: junqiyu@126.com.

耗的40%^[2]。因此,对并联冷机系统的运行工况进行精准调控,可提高系统的灵活性^[3],从而极大地降低空调中冷水机组的运行能耗,提高能源利用率。

近年来,诸多学者做出了大量有关冷水机组负荷分配(optimal chiller loading, OCL)问题的研究。Chang^[4-5]将拉格朗日法(Lagrange method, LM)应用于并联冷机系统负荷分配优化问题,又引入遗传算法(genetic algorithm, GA)有效地解决了LM在低负荷需求下无法收敛的问题,但是算法复杂且不能有效节能。随后有学者引入了粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)^[6]求解OCL问题可有效地降低系统能耗。Coelho等^[7]提出了一种基于高斯分布函数的改进萤火虫算法(improved firefly algorithm, IFA)来最小化并联冷机系统的能耗。Zheng等^[8]提出了改进入侵杂草优化算法(improved invasive weed optimization, EIWO)用于求解此优化问题,相较于其他算法收敛性得到了改善,且能够达到较显著的节能效果。此外,于军琪等^[9]提出了一种改进烟花算法(improved fireworks algorithm, IFWA)用于解决并联冷机负荷分配优化问题,也是有效方法之一。但是,大部分智能优化算法均是基于集中搜索环境求解的,对于复杂且规模较大的中央空调系统而言,分布式搜索方式的搜索效率更高,更适用于OCL问题的求解。

由Xue等^[10]针对麻雀觅食和反捕食行为提出的麻雀搜索算法(sparrow search algorithm, SSA)是一种分布式搜索方法,其具有全局寻优、可调参数少、鲁棒性好、易于实现等优点,在解决优化问题中显示出了优越性,如旅行商问题^[11]、图像分割^[12]、电网优化^[13]、轨迹优化^[14]等,因此,SSA算法可用于求解OCL优化问题。但是,由于SSA算法采用随机初始化方式不能令初始解更均匀地分布于整个可行解空间,易导致算法初始种群解的质量差,迭代过程中易陷入局部最优,造成收敛速度慢、寻优性能差的问题。针对上述不足,宋冬然等^[15]引入了Prim算法对种群初始化,同时结合鸡群算法对传统麻雀算法进行改进,提高了算法的收敛速度以解决大型海上风电厂的布置优化问题。江妍等^[16]结合分数阶微积分算法改进了麻雀搜索算法,提高了算法的收敛速度,同时将其应用于图像处理保证了肺部图像的分割精度。谢国民等^[17]将樽海鞘群算法引入至麻雀搜索算法,并应用于变压器的故障诊断,提高了算法的收敛能力,获得了更高的故障诊断精度。陈炫儒等^[18]采用自适应 t 分布和萤火虫算法提高了基本麻雀算法的收敛精度和寻优性能,并对10个基准函数测试,测试结果表明了改进算法

求解PID控制器参数整定问题的有效性。然而,由于OCL为连续优化问题,以上改进算法虽有效地改善了麻雀算法的部分性能,但是,对于高维复杂的连续优化问题,其在寻优精度和收敛速度方面仍需进一步研究。

鉴于此,本文提出一种基于多策略的改进麻雀搜索算法对OCL问题进行求解。主要内容如下:1)采用混沌序列方式产生初始种群,使得种群初始位置在解空间中分布更加均匀;2)引入不同搜索策略更新不同个体位置公式,以平衡该算法的全局和局部搜索能力,避免陷入局部最优,提高算法的寻优速度和精度;3)选用两个案例与几种常用的优化算法进行对比实验,并在实验平台进一步分析所提出改进算法的性能,同时采用非参数检验方法对比4种优化算法。实验结果表明,所提出改进算法能够取得更好的并联冷机负荷分配控制策略且性能更佳。

1 问题描述

典型的并联冷机系统结构如图1所示:并联冷机系统由两个或多个冷水机组组成,以并联或串联管道连接到公共分配系统^[19],且各冷水机组相互独立工作。在中央空调系统中,可通过调控由不同容量和不同特性冷水机组组成的并联冷机系统的运行工况来满足系统末端负荷需求,为了保证建模具有简洁性,本文暂不考虑冷量在管道内的损失,仅针对冷水机组的运行功耗进行优化,从而使得并联冷机系统功耗达到最佳的优化效果。

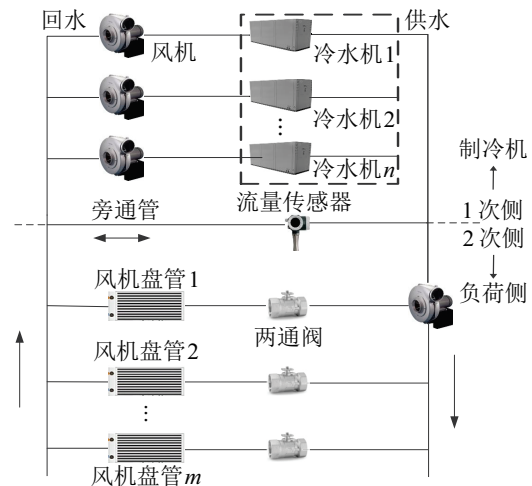


图1 典型并联冷机系统结构

离心式冷水机组的功耗与部分负荷率(part load ratio, PLR)间的函数^[20]表示如下式所示:

$$P_i = a_i + b_i \cdot \text{PLR}_i + c_i \cdot \text{PLR}_i^2 + d_i \cdot \text{PLR}_i^3 \quad (1)$$

其中: PLR_i 为第 i 台冷水机组的部分负荷率, a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 为第 i 台冷水机组的性能系数, P_i 为第 i 台冷水机

组的功耗.

在并联冷机系统中,最佳冷水机组负荷分配问题是在满足系统末端负荷需求的情况下,达到每台冷水机组功耗和最小的优化目标,从而获得最佳的性能^[21].但是,当冷水机组的PLR值低于0.3时,处于低效率状态,因此,冷水机组的PLR值不应小于0.3.并联冷机系统负荷分配问题的目标函数和约束条件^[8]如下式所示:

$$\begin{cases} P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^k P_i, \\ \text{Obj}_j = \min(P_{\text{total}}), \\ \text{CL} = \sum_{i=1}^k \text{PLR}_i \cdot \text{RT}_i, \\ \text{PLR}_i \in (0.3, 1) \text{ or } \text{PLR}_i = 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中: P_{total} 为并联冷机系统的总功耗, k 为并联冷水机组的台数, Obj_j 为并联冷机系统最小目标功耗, CL 为并联冷机系统的制冷量, RT_i 为第 i 台冷水机组的额定制冷量.

2 优化方法

2.1 麻雀搜索算法

麻雀搜索算法是一种主要由发现者、跟随者、侦察者3部分构成的随机全局搜索算法.发现者主要是判断食物所在的方向和位置,并带领跟随者逐渐向食物位置逼近的个体,同时,还要巡视周围是否有捕食者出现,具有较好的全局搜索能力.发现者位置更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot M}\right), R_2 < \text{ST}; \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L, R_2 \geq \text{ST}. \end{cases} \quad (3)$$

其中: t 为当前迭代次数; M 为最大迭代次数; $X_{i,j}^t$ 为第 t 代第 i 只麻雀在第 j 维中的位置; $\alpha \in (0, 1]$ 中的随机数; Q 服从正态分布且为随机数; L 为一个 1 行 d 列的全 1 矩阵; R_2 为预警值且 $R_2 \in (0, 1]$; ST 为安全阈值,其范围为 $[0.5, 1]$.当 $R_2 < \text{ST}$ 时,表明麻雀种群未发现捕食者的存在,可向适应度更好的位置进行搜索.

跟随者是在发现者的带领下对觅食区域进行局部搜索的个体,适应度好的个体会尽早发现食物,直至搜索到最优解或达到最大迭代次数,算法终止.跟随者的位置更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst}}^t - X_{i,j}^t}{i^2}\right), i > \frac{n}{2}; \\ X_{\text{pbest}}^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_{\text{pbest}}^{t+1}|, \text{ otherwise}. \end{cases} \quad (4)$$

其中: n 为种群规模, X_{worst}^t 为第 t 次迭代种群中最差

个体所处的位置, X_{pbest}^{t+1} 为第 $t+1$ 次迭代发现者所处的最优位置. A 为一个 1 行 d 列的矩阵且其元素为 1 或 -1 的随机值, $A^+ = A^T(AA^T)^{-1}$.当 $i > \frac{n}{2}$ 时,表明跟随者中适应度极差的个体没有获得食物,需飞往其他区域进行觅食.

侦察者是麻雀种群中随机选择部分个体作为意识到危险的麻雀,一旦发现捕食者出现,种群会做出反捕食行为.其位置更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{gbest}}^t + \beta \cdot |X_{i,j}^t - X_{\text{gbest}}^t|, f_i > f_g; \\ X_{i,j}^t + K \cdot \left| \frac{X_{i,j}^t - X_{\text{worst}}^t}{(f_i - f_w) + \varepsilon} \right|, f_i \leq f_g. \end{cases} \quad (5)$$

其中: X_{gbest}^t 为当前种群中适应度最高个体所处的位置; β 为步长控制参数,是一个服从均值为 0 、方差为 1 的正态分布的随机数; $K \in [-1, 1]$ 为麻雀移动方向的随机数; f_i 为当前麻雀个体的适应度值; f_g 为当前全局最优的适应度值; f_w 为当前种群中最差的适应度值; ε 为极小的常数,一般取 10^{-50} ,用于避免分母出现 0 .当 $f_i \leq f_g$ 时,表明这部分麻雀个体发现有捕食者出现,需要尽快离开当前区域.

2.2 改进的麻雀搜索算法

为了使得算法求解 OCL 问题的性能更优,本文提出一种基于多策略的改进麻雀搜索算法 (multi-strategy improved sparrow search algorithm, MISSA),并将改进的麻雀搜索算法用于求解以并联冷机的 PLR 序列作为优化变量,系统末端负荷需求作为约束条件,实现该系统功耗最小的负荷分配问题.

2.2.1 混沌序列初始化

由于基本麻雀搜索算法初始种群是通过随机方式生成的,不能确保个体初始位置在搜索空间中均匀分布,影响算法的搜索速度和寻优性能.在求解 OCL 问题时,每个冷水机组的 PLR 序列组成的向量与麻雀个体的位置一一对应,考虑到冷水机组的优化变量 PLR 值会受到小范围边界约束的特点,在 MISSA 的初始化过程中引入混沌序列方式,以确保初始解的均匀分布.

混沌序列方式是指在满足 PLR 边界约束的确定性条件下,先随机产生初始个体,再利用混沌机制提升种群个体在可行解空间中分布的均匀性,且具有遍历性、非重复性、初始值敏感性等特点^[22],因此,可用于解决 OCL 问题中初始解的不均匀性.混沌机制采用立方映射在麻雀个体上,如下式所示:

$$X_{i,j}^{t+1} = \text{mod}(X_{i,j}^t + 4\delta^3 - 3\delta, 1), \delta \in (0.3, 1). \quad (6)$$

其中: δ 为混沌因子,即 $(0.3, 1)$ 的随机数; $X_{i,j}^t \in [\text{lb}, \text{ub}]$, ub 、 lb 分别为搜索空间的上下界.

2.2.2 改进发现者的位置更新

求解OCL问题时,如何精准地控制运行并联冷机系统以最小化不同冷负荷下的功耗才是关键. SSA寻优初期,发现者迅速向全局最优值的位置集中,导致种群多样性下降,使得算法较早地收敛于局部最优解,从而造成搜索精度不高^[23]. 因此,本文在发现者的位置更新公式中引入粒子群算法中“速度”的概念^[24],更有效地实现麻雀个体的位置信息交流能力,从而避免算法过早收敛于最优解. 改进后的发现者位置更新公式为

$$v_{i,j}^{t+1} = \omega_1 \times v_{i,j}^t + c_1 \times r_1 \times (X_{pbest}^t - X_{i,j}^t) + c_2 \times r_2 \times (X_{gbest}^t - X_{i,j}^t). \quad (7)$$

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot \exp\left(\frac{-i}{\alpha \cdot M}\right) + v_{i,j}^{t+1}, & R_2 < ST; \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L, & R_2 \geq ST. \end{cases} \quad (8)$$

其中: c_1 、 c_2 为学习因子, r_1 、 r_2 是范围为 $[0, 1]$ 的随机数, ω_1 为惯性权重, $v_{i,j}^{t+1}$ 、 $X_{i,j}^{t+1}$ 分别为第 i 个麻雀个体在第 j 维中的速度和位置.

惯性权重 ω_1 可表示麻雀个体继承前速度的能力,在发现者的速度更新公式上加入非线性递减惯性权重,以提高算法寻优精度. 非线性递减惯性权重更新公式为

$$\omega_1 = \omega_{start} - (\omega_{start} - \omega_{end}) \times \left(2 \times \frac{t}{M} - \left(\frac{t}{M}\right)^2\right), \quad (9)$$

其中 ω_{start} 、 ω_{end} 分别为惯性权重的最大值和最小值.

2.2.3 改进跟随者的位置更新

狼群算法中猛狼以较大步长向头狼靠近,同时,以“强者生存”的更新机制求解优化问题,具有更好的全局搜索能力^[25]. 而SSA算法在求解复杂优化问题时易出现迭代后期种群多样性迅速下降,陷入局部最优难以跳出的问题,从而限制了算法的搜索效率. 因此,本文结合狼群算法中猛狼的跟随策略来更新跟随者的位置,即跟随者以变化步长迅速向发现者靠近,并搜索食物,提升种群跳出局部最优解的能力. 改进后的跟随者位置更新公式为

$$\lambda = 2 - \left(\frac{t}{M}\right)^2, \quad (10)$$

$$X_{i,j}^{t+1} = \omega_2 \times X_{i,j}^t + \lambda \times \frac{X_{pbest}^{t+1} - X_{i,j}^t}{|X_{pbest}^{t+1} - X_{i,j}^t|}. \quad (11)$$

其中 λ 为变化步长.

由式(4)跟随者位置更新公式可知,第 i 只麻雀个体的位置会根据第 $i-1$ 只麻雀个体位置进行更新,

对先前个体的依赖性较强,若跟随者的位置是局部最优解,则易陷入局部最优,出现停滞. 为了更好地权衡SSA算法后期的搜索能力与开发能力,同时引入自适应惯性权重调整跟随者位置,它决定了先前个体对当前个体的影响程度. 当 ω_2 值较大时,有助于提升搜索能力;当 ω_2 值较小时,有助于具体的开发能力. 公式如下式所示:

$$\omega_2 = \exp\left(1 - \frac{M+t}{M-t}\right). \quad (12)$$

所提出改进算法中,式(4)与(11)更新策略的结合,可有效增强迭代后期种群的多样性,并提高算法的收敛速度.

所提出改进的麻雀搜索算法流程如图2所示.

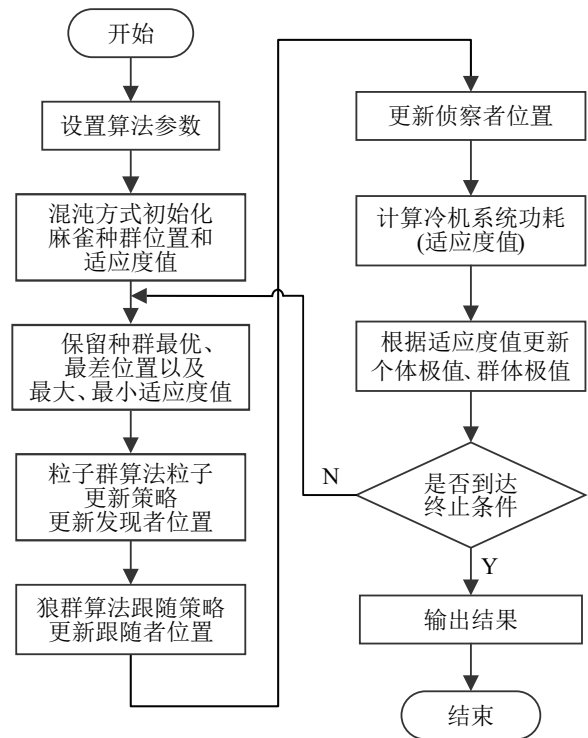


图2 MISSA算法流程

3 测试案例和仿真结果分析

3.1 测试案例

本文选择源自半导体工厂的两个实际案例来验证所提出改进的麻雀搜索算法可用于求解并联冷机实际负荷分配问题^[26-27]. 在供冷时期,人体舒适度为 $22.2^\circ\text{C} \sim 26^\circ\text{C}$,针对该建筑,案例1给出3台制冷量均为800 RT的冷水机组系统,案例2中给定制冷量为450 RT和1000 RT各两台的冷水机组,以上案例代表了典型的并联冷机系统类型. 案例1冷水机组的容量和型号均相同,但是由于运行时间长,冷水机组间的冷水温度、流量的差异以及特性曲线并不完全相同. 案例2由不同制冷量的冷水机组组成,它的特性曲线也不同. 各冷水机组的性能参数如表1所示.

表1 并联冷机系统中各设备性能参数

案例	冷机编号	a_i	b_i	c_i	d_i	额定制冷量/RT
案例1	1	100.95	818.61	-973.43	788.55	800
	2	66.598	606.34	-380.58	275.95	800
	3	130.09	304.5	14.377	99.8	800
案例2	1	104.09	166.57	-430.13	512.53	450
	2	-67.15	1 177.79	-2 174.53	1 456.53	450
	3	384.71	-779.13	1 151.42	-63.20	1 000
	4	541.63	413.48	-3 626.50	4 021.41	1 000

3.2 参数测试

通过查阅资料以及设置不同参数进行大量实验,对比分析参数测试结果,寻找求解并联冷机负荷分配优化问题的最优参数值.分别选择案例1中负荷为960 RT,案例2中负荷为1 740 RT作为测试示例.基于

30次独立实验得到了不同参数测试下的运行结果. MISSA算法的参数值、最小值及其平均值如表2所示.其运行结果表明,在两种工况下,种群规模为50,发现者占种群规模的比重为0.4,安全阈值为0.85时算法性能最好,因此,本文将采用该组最优参数值进行下一步分析. MISSA算法的参数值如表3所示.

表2 不同参数设置下的MISSA算法最优结果对比

n	P	ST	案例1(960 RT)		案例2(1 740 RT)	
			最小值	平均值	最小值	平均值
50	0.2	0.85	692.29	692.52	998.54	998.57
	0.4	0.85	692.25	692.38	998.53	998.54
100	0.2	0.85	692.26	692.65	998.53	998.56
	0.4	0.85	692.25	692.52	998.54	998.55
150	0.2	0.85	692.26	692.81	998.54	998.55
	0.4	0.85	692.26	692.63	998.54	998.58

表3 案例研究中MISSA算法参数设置

符号	说明	取值
c_1	学习因子	2
c_2	学习因子	2
M	算法迭代次数	100
n	种群规模	50
v_{max}	速度最大值	0.5
v_{min}	速度最小值	-0.5
pop_{max}	麻雀个体位置变化的最大值	1
pop_{min}	麻雀个体位置变化的最小值	0
P	发现者占种群规模的比重	0.4
ST	安全阈值	0.85
ω_{start}	惯性权重最大值	0.9
ω_{end}	惯性权重最小值	0.4

3.3 仿真结果分析

本研究基于不同工况下的冷水机组进行测试,再经过相同迭代次数后与其他常用的几种智能优化算法的优化结果进行比较. MISSA算法与GA^[5]、

PSO^[6]、IFA^[7]算法的优化对比结果分别如表4和表5所示.为了消除偶然性,以上所得优化结果均为基于30次独立运行获得的实验结果的众数,用于验证所提出MISSA算法在求解OCL问题上的有效性.

由表4可见,MISSA的优化结果与GA、PSO、IFA的优化结果相比,在不同负荷的情况下,MISSA较GA算法可节能2.83 kW~149.93 kW.再通过比较PSO、IFA、MISSA三种算法的优化结果可知,在负荷为1 200 RT时,MISSA算法相比于PSO算法可节能1.26 kW,且仍然比IFA的节能效果好,验证了MISSA算法在求解OCL问题上的可行性.

由表5可见,基于案例2中不同的负荷需求,相比于GA优化结果,MISSA可节能1.57 kW~205.23 kW,尤其当负荷为1 160 RT时,节能可达到23.97%.同时,当负荷为2 610 RT时,MISSA的优化结果较PSO、IFA的优化结果更好.实验结果表明MISSA比其他3种算法更节能.

表4 GA、PSO、IFA与MISSA在案例1中算法结果对比

负荷需求	冷机序号	GA (A)		PSO (B)		IFA (C)		MISSA (D)		节省P/kW		
		PLR	P/kW	PLR	P/kW	PLR	P/kW	PLR	P/kW	D-A	D-B	D-C
2160 (90%)	1	0.8050		0.7300		0.7253		0.7245				
	2	0.9323	1590.96	0.9700	1583.81	0.9747	1583.81	0.9755	1583.80	-7.16	-0.01	-0.01
	3	0.9631		1.0000		1.0000		1.0000				
1920 (80%)	1	0.7017		0.6600		0.6591		0.6642				
	2	0.7954	1406.03	0.8600	1403.20	0.8585	1403.20	0.8564	1403.20	-2.83	0.00	0.00
	3	0.9035		0.8800		0.8825		0.8794				
1680 (70%)	1	0.6900		0.6000		0.5962		0.6009				
	2	0.6784	1250.06	0.7400	1244.32	0.7450	1244.33	0.7435	1244.32	-5.74	0.00	-0.01
	3	0.7318		0.7600		0.7588		0.7556				
1440 (60%)	1	0.5217		0.0000		0.0000		0.0000				
	2	0.7407	1107.75	0.8900	993.60	0.8853	993.60	0.8856	993.60	-114.15	0.00	0.00
	3	0.5381		0.9100		0.9147		0.9144				
1200 (50%)	1	0.4882		0.0000		0.0000		0.0000				
	2	0.4437	971.21	0.7400	833.58	0.7430	832.33	0.7448	832.32	-138.89	-1.26	-0.01
	3	0.5682		0.7605		0.7570		0.7552				
960 (40%)	1	0.3055		0.0000		0.0000		0.0000				
	2	0.3185	842.18	0.5700	692.25	0.5700	692.25	0.5748	692.25	-149.93	0.00	0.00
	3	0.5764		0.6300		0.6300		0.6252				

表5 GA、PSO、IFA与MISSA在案例2中算法结果对比

负荷需求	冷机序号	GA (A)		PSO (B)		IFA (C)		MISSA (D)		节省P/kW		
		PLR	P/kW	PLR	P/kW	PLR	P/kW	PLR	P/kW	D-A	D-B	D-C
2610 (90%)	1	0.9925		0.9900		0.9913		0.9903				
	2	0.9487	1862.18	0.9100	1857.30	0.9059	1857.30	0.9094	1857.28	-4.90	-0.02	-0.02
	3	1.0000		1.0000		1.0000		1.0000				
	4	0.7366		0.7600		0.7563		0.7551				
2320 (80%)	1	0.8611		0.8300		0.8287		0.8234				
	2	0.8132	1457.23	0.8100	1455.66	0.8054	1455.66	0.8025	1455.66	-1.57	0.00	0.00
	3	0.8809		0.9000		0.8967		0.9000				
	4	0.6859		0.6900		0.6880		0.6884				
2030 (70%)	1	0.6592		0.7300		0.7261		0.7314				
	2	0.7605	1183.80	0.7400	1178.14	0.7400	1178.14	0.7396	1178.14	-5.66	0.00	0.00
	3	0.7557		0.7200		0.7217		0.7184				
	4	0.6360		0.6500		0.6486		0.6497				
1740 (60%)	1	0.5956		0.6000		0.6036		0.6099				
	2	0.6982	1001.62	0.6600	998.53	0.6577	998.53	0.6605	998.53	-3.09	0.00	0.00
	3	0.5710		0.5600		0.5647		0.5620				
	4	0.5874		0.6100		0.6077		0.6063				
1450 (50%)	1	0.5962		0.6100		0.6070		0.6075				
	2	0.3636	907.72	0.0000	820.07	0.0000	820.07	0.0000	820.07	-87.65	0.00	0.00
	3	0.4423		0.5700		0.5683		0.5694				
	4	0.5758		0.6100		0.6086		0.6072				
1160 (40%)	1	0.3335		0.0000		0.0000		0.0000				
	2	0.3157	856.30	0.0000	651.07	0.0000	651.07	0.0000	651.07	-205.23	0.00	0.00
	3	0.3246		0.5600		0.5551		0.5543				
	4	0.5436		0.6000		0.6049		0.6057				

4 平台验证

4.1 平台介绍

从实验角度发现,采用MISSA算法优化并联冷机系统可获得显著的节能效果,但是,实验中的结果

是在Matlab R 2021 b软件平台仿真得到的,并不能完全反映其在实际系统中的应用效果.为了进一步验证所提出算法的潜力,将以上算法应用于实际并联冷机控制系统平台进行实验,该平台为半实物仿真测试

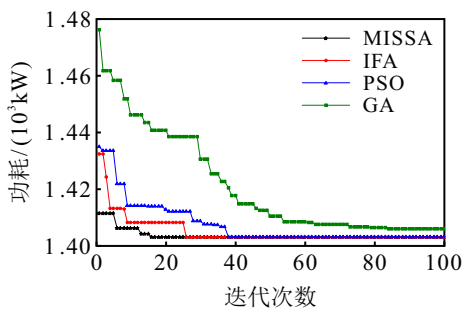
验证平台. 分布式仿真平台用于仿真外部系统环境的变化. 半实物仿真测试验证平台的无中心计算节点CPN(computing process node)控制器硬件可存储各设备的大量信息,且各CPN间可相互通信. 如图3所示,包括冷水机组、冷却泵、冷却塔等,在每个设备中嵌入一个CPN,完成设备间的通信,获取冷机的运行状态等信息,并对末端系统进行仿真,通过自主协同工作完成优化控制. 从以下4个角度对所提出算法的优化性能进行对比分析.



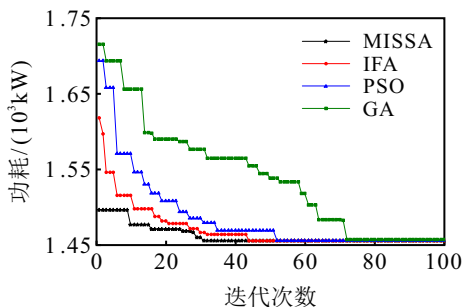
图3 并联冷机控制系统实验平台

4.2 收敛性

通过以上实验平台验证,得到如图4所示的两个案例功耗的迭代情况. 由图4可见,当负荷需求为2320 RT时,MISSA算法在30代左右可完成迭代取得最小功耗值. 尤其当负荷需求为1920 RT时,MISSA算法在15代左右可使得系统功耗趋于最优. 因此,MISSA算法在实际应用中较GA、PSO、IFA算



(a) 负荷为1920 RT



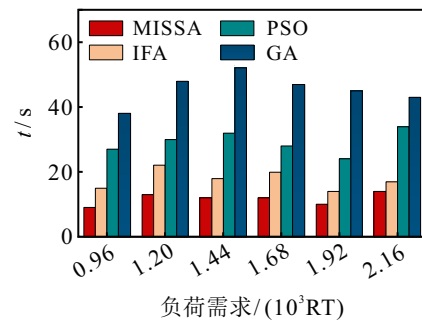
(b) 负荷为2320 RT

图4 4种算法收敛性对比

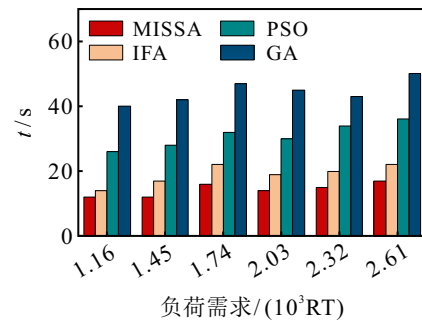
法收敛性更好.

4.3 计算复杂度

从时间复杂度和空间复杂度出发,选取运行时间、执行算法所占的内存作为计算复杂度的评价指标,用于验证MISSA算法的可行性,并在不同负荷需求下对两个案例中的GA、PSO、IFA和MISSA四种算法进行独立实验,分别计算各算法迭代100次,独立运行30次的平均运行时间,对比结果如图5所示. 各算法所占内存大小的测试对比结果如图6所示. 实验结果表明,相比于其他3种算法,MISSA由于引入惯性权重和跟随策略,其运行时间更短,所占内存相对更小,寻优速度更快.



(a) 案例1四种算法运行时间对比



(b) 案例2四种算法运行时间对比

图5 算法运行时间对比

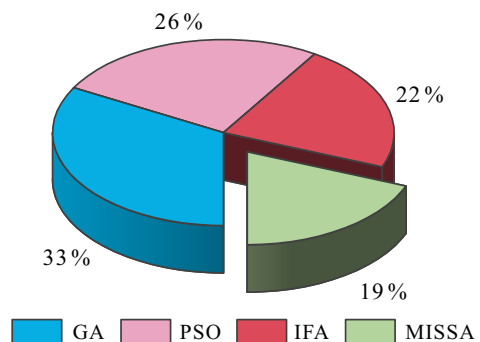
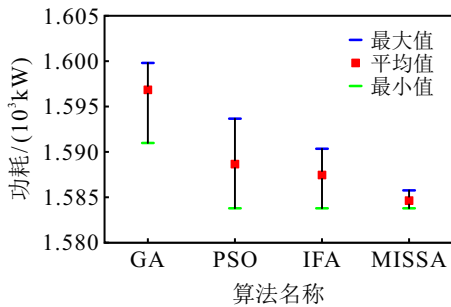


图6 4种算法内存比率对比

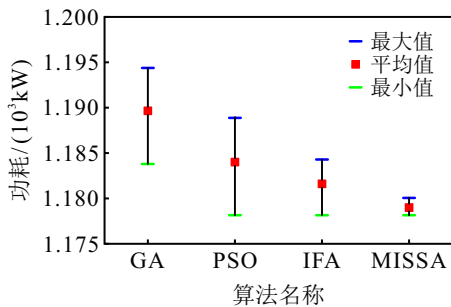
4.4 鲁棒性

为了验证所提出算法的鲁棒性,在负荷需求为2160 RT、2030 RT时,分别对GA、PSO、IFA和MISSA四种算法进行30次独立实验,得到优化结果的最大值、最小值和平均值如图7所示. 由图7可见,不同负

荷需求下MISSA得到的优化结果的最大值和平均值明显比GA、PSO、IFA算法的更优,且最小值与平均值、最小值与最大值的差值也是4种算法中最小的。因此,进一步验证了MISSA算法具有良好的鲁棒性。



(a) 负荷为2160 RT



(b) 负荷为2030 RT

图7 4种算法鲁棒性对比

4.5 非参数检验

在负荷需求为1920 RT、2320 RT下选取迭代前30次所得到的功耗对GA、PSO、IFA、MISSA四种算法进行Wilcoxon秩和检验^[28-29],非参数检验的结果如表6所示。由表6可见,渐近显著性 p 值均小于0.05。因此,可表明MISSA算法与其他3种算法所得到的优化结果显著不同。

表6 GA、PSO、IFA与MISSA非参数检验结果对比

负荷需求	对比算法	样本量	渐近显著性
1920 RT/2320 RT	GA与MISSA	30	< 0.001
	PSO与MISSA	30	< 0.001
	IFA与MISSA	30	< 0.001

5 结论和展望

本文提出了一种基于多策略的改进麻雀搜索算法用于求解OCL问题。以冷水机组系统最低功耗为优化目标,每台冷机的PLR作为优化参数进行求解。通过实际工程案例进行实验验证了所提出算法的有效性。结论如下。

1) 相比于GA、PSO、IFA算法,MISSA算法可获得更好的并联冷机负荷分配策略,在两个案例中最高可节能205.23 kW,提高了能源利用率,从而验证了所提出算法在求解OCL问题上的有效性。

2) 将GA、PSO、IFA、MISSA四种算法应用于实

际的并联冷机系统实验仿真平台,实验结果表明,MISSA算法的收敛性、计算复杂度以及鲁棒性更具优越性。

3) 通过Wilcoxon秩和检验所得结果,进一步表明了MISSA算法在求解OCL问题上的可行性。

综上,所提出改进麻雀搜索算法在实际的并联冷机负荷分配优化中的效果相对更好。在未来工作中,将进一步对大型公共建筑室内人员舒适度进行建模,结合管道内冷量损失对空调冷水管网水力动态平衡调节问题进行详细研究,根据冷量和供回水压差平衡的原则对系统中调节阀的开度进行精准控制以综合考虑对整个供冷系统进行优化,从而达到节能降耗的目标。

参考文献(References)

- [1] Shi H S, Chen Q. Building energy management decision-making in the real world: A comparative study of HVAC cooling strategies[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 33: 101869.
- [2] Yu F W, Chan K T. Energy signatures for assessing the energy performance of chillers[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(7): 739-746.
- [3] Gao Z K, Yu J Q, Zhao A J, et al. Optimal chiller loading by improved parallel particle swarm optimization algorithm for reducing energy consumption[J]. International Journal of Refrigeration, 2022, 136: 61-70.
- [4] Chang Y C. A novel energy conservation method—Optimal chiller loading[J]. Electric Power Systems Research, 2004, 69(2/3): 221-226.
- [5] Chang Y C. Genetic algorithm based optimal chiller loading for energy conservation[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(17/18): 2800-2815.
- [6] Lee W S, Lin L C. Optimal chiller loading by particle swarm algorithm for reducing energy consumption[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8/9): 1730-1734.
- [7] Coelho L D S, Mariani V C. Improved firefly algorithm approach applied to chiller loading for energy conservation[J]. Energy and Buildings, 2013, 59: 273-278.
- [8] Zheng Z X, Li J Q. Optimal chiller loading by improved invasive weed optimization algorithm for reducing energy consumption[J]. Energy and Buildings, 2018, 161: 80-88.
- [9] 于军琪, 王福, 赵安军, 等. 基于改进烟花算法的并联冷机负荷分配优化[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2618-2626.
(Yu J Q, Wang F, Zhao A J, et al. Load distribution optimization of parallel chillers based on improved firework algorithm[J]. Control and Decision, 2021, 36(11): 2618-2626.)

- [10] Xue J K, Shen B. A novel swarm intelligence optimization approach: Sparrow search algorithm[J]. *Systems Science & Control Engineering*, 2020, 8(1): 22-34.
- [11] Zhang Z, Han Y. Discrete sparrow search algorithm for symmetric traveling salesman problem[J]. *Applied Soft Computing*, 2022, 118: 108469.
- [12] Liu T T, Yuan Z, Wu L, et al. An optimal brain tumor detection by convolutional neural network and enhanced sparrow search algorithm[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers—Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 2021, 235(4): 459-469.
- [13] Li L L, Xiong J L, Tseng M L, et al. Using multi-objective sparrow search algorithm to establish active distribution network dynamic reconfiguration integrated optimization[J]. *Expert Systems with Applications*, 2022, 193: 116445.
- [14] Xu H, Cai G B, Zhang S X, et al. Hypersonic reentry trajectory optimization by using improved sparrow search algorithm and control parametrization method[J]. *Advances in Space Research*, 2022, 69(6): 2512-2524.
- [15] 宋冬然, 晏嘉琪, 夏鄂, 等. 基于改进麻雀搜索算法的大型海上风电场电缆布置优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(12): 134-143.
(Song D R, Yan J Q, Xia E, et al. Optimization of cable layout for large-scale offshore wind farms based on an improved sparrow search algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(12): 134-143.)
- [16] 江妍, 马瑜, 梁远哲, 等. 基于分数阶麻雀搜索优化 OTSU 肺组织分割算法[J]. *计算机科学*, 2021, 48(S01): 28-32.
(Jiang Y, Ma Y, Liang Y Z, et al. Lung tissue segmentation algorithm: Fractional order sparrow search optimization for OTSU[J]. *Computer Science*, 2021, 48(S01): 28-32.)
- [17] 谢国民, 蔺晓雨. 基于改进 SSA 优化 MDS-SVM 的变压器故障诊断方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(2): 459-467.
(Xie G M, Lin X Y. Transformer fault diagnosis method based on improved SSA optimized MDS-SVM[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(2): 459-467.)
- [18] 陈炫儒, 吴立飞, 杨晓忠. 基于改进麻雀搜索算法的分数阶 PID 参数整定[J]. *控制与决策*, 2024, 39(4): 1177-1184.
(Chen X R, Wu L F, Yang X Z. Fractional order PID parameter tuning based on improved sparrow search algorithm[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(4): 1177-1184.)
- [19] Teimourzadeh H, Jabari F, Mohammadi-Ivatloo B. An augmented group search optimization algorithm for optimal cooling-load dispatch in multi-chiller plants[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2020, 85: 106434.
- [20] Farnaz S, Morteza N H, Behnam M I, et al. Optimal chiller loading for saving energy by exchange market algorithm[J]. *Energy and Buildings*, 2018, 169: 245-253.
- [21] Qi M, Li J Q, Han Y Y, et al. Optimal chiller loading for energy conservation using an improved fruit fly optimization algorithm[J]. *Energies*, 2020, 13(15): 3760.
- [22] Arora S, Anand P. Chaotic grasshopper optimization algorithm for global optimization[J]. *Neural Computing and Applications*, 2019, 31(8): 4385-4405.
- [23] Li J H, Lei Y S, Yang S H. Mid-long term load forecasting model based on support vector machine optimized by improved sparrow search algorithm[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 491-497.
- [24] Su B Q, Lin Y T, Wang J, et al. Sewage treatment system for improving energy efficiency based on particle swarm optimization algorithm[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 8701-8708.
- [25] 刘永兰, 李为民, 吴虎胜, 等. 基于狼群算法的无人机航迹规划[J]. *系统仿真学报*, 2015, 27(8): 1838-1843.
(Liu Y L, Li W M, Wu H S, et al. Track planning for unmanned aerial vehicles based on wolf pack algorithm[J]. *Journal of System Simulation*, 2015, 27(8): 1838-1843.)
- [26] Duan P Y, Li J Q, Wang Y, et al. Solving chiller loading optimization problems using an improved teaching-learning-based optimization algorithm[J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 2018, 39(1): 65-77.
- [27] Coelho L D S, Klein C E, Sabat S L, et al. Optimal chiller loading for energy conservation using a new differential cuckoo search approach[J]. *Energy*, 2014, 75: 237-243.
- [28] 付华, 刘昊. 多策略融合的改进麻雀搜索算法及其应用[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 87-96.
(Fu H, Liu H. Improved sparrow search algorithm with multi-strategy integration and its application[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(1): 87-96.)
- [29] 刘岩, 贾丽洁. 非参数统计中两样本比较方法研究[J]. *燕山大学学报*, 2006, 30(5): 392-394.
(Liu Y, Jia L J. Study on two samples location parameter of non-parameter statistics[J]. *Journal of Yanshan University*, 2006, 30(5): 392-394.)

作者简介

于军琪(1969—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能建筑与建筑节能等研究, E-mail: junqiyu@126.com;

薛志璐(1998—), 女, 硕士生, 从事建筑用能预测以及冷源系统控制优化等研究, E-mail: xz11580791995@163.com;

赵安军(1975—), 男, 副教授, 博士, 从事智能建筑、能耗检测与评估等研究, E-mail: zhao_anjun@163.com;

杨思远(1999—), 男, 硕士生, 从事建筑能耗预测、能源系统运行分析等研究, E-mail: yangsy7979@163.com;

宗悦(1997—), 女, 硕士生, 从事建筑负荷预测与节能技术等研究, E-mail: zyue1997@163.com.