

文章编号：1671-6612（2025）06-814-08

基于树种优化算法的 多冷水机组系统最优负荷分配策略研究

李新美¹ 胡远洋² 李舒宏² 林 浩¹ 黄奕然¹ 雍玲玉¹

(1. 南京福加自动化科技有限公司 南京 210046;

2. 东南大学能源与环境学院 南京 210096)

【摘要】 多冷水机组冷负荷分配不当会带来很大的能源浪费，传统数学方法求解受限且难以推广，元启发式算法亟需算法拓展和更多应用案例。为探究树种优化算法解决机组最优负荷分配问题的表现并提供更多的案例研究。通过与其余三种算法的比较，首次探究了树种优化算法在解决经典案例上的表现。同时，基于实测数据拟合了机组性能系数，并研究了所述算法在不同负荷率下的节能效果。结果表明，树种优化算法具有良好解决机组最优负荷分配问题的能力，与遗传算法和粒子群算法相比，最大节能分别为23.97%和2.64%。对于实际案例，相比于原始策略，最高可节能34.03%，平均可节能23.28%，该方法对于多机组系统的节能具有重要的价值。

【关键词】 多机组系统；冷负荷；分配策略；树种优化算法；节能

中图分类号 TU831.3 文献标志码 A

Research on Optimal Load Distribution Strategy for Multi-chiller System Using the Tree Seed Optimization Algorithm

Li Xinmei¹ Hu Yuanyang² Li Shuhong² Lin Hao¹ Huang Yiran¹ Yong Lingyu¹

(1.Nanjing Fuca Automation Technology Co., Ltd, Nanjing, 210046;

2.School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing, 210096)

【Abstract】 Improper cooling load distribution in multi-chiller systems results in significant energy waste, while traditional mathematical methods are constrained and challenging to generalize. Besides, meta-heuristic algorithms require further development and additional application cases. This study aims to evaluate the performance of the Tree Seed Optimization Algorithm (TSA) in solving the optimal load distribution problem and providing additional case studies. It compares the TSA with three other algorithms, evaluating its performance in solving classical cases for the first time. Additionally, the chiller's performance coefficients are fitted using measured data, and the algorithm's energy-saving effect is analyzed under varying load rates. The results demonstrate the TSA's effectiveness in solving the optimal load distribution problem. Compared to the Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO), the TSA achieves maximum energy savings of 23.97% and 2.64%, respectively. In practical scenarios, the TSA achieves a maximum energy saving of 34.03% and an average saving of 23.28% compared to original strategy. This method holds significant value for energy savings in multi-chiller systems.

【Keywords】 Multi-chiller system; Cooling load; Distribution strategy; Tree seed optimization algorithm; Energy conservation

作者简介：李新美（1973-），男，本科，工程师，E-mail: lixm@fuca-china.com

通讯作者：林 浩（1988-），男，本科，工程师，E-mail: linh@fuca-china.com

收稿日期：2025-01-21

0 引言

建筑能耗占世界总能耗的 30%以上, 在建筑能耗中, 中央空调的能耗占主体地位, 因此减小中央空调的能耗对建筑节能以及全球能耗的减小具有重要意义^[1,2]。另一方面, 冷水机组的能耗是中央空调能耗的主要部分^[3,4]。因此, 有效减小冷水机组能耗是实现中央空调系统节能的有效举措。

多数中央空调系统都配备两台或更多的冷水机组, 这种设计有两个明显的缺点。首先, 选型负荷过大, 导致实际运行时, 中低负荷运行时间过长而降低了其能效^[5]。其次, 对于多冷水机组系统, 其总能耗因负荷分布和运行工况的不同而不同, 常规启停调节存在较大的能源浪费^[6]。因此, 如何在满足多机组系统供冷需求的同时, 得到最节能的负荷分配策略, 已成为众多学者研究的焦点。该问题也被称为最佳冷水机组负荷 (Optimal Chiller Loading, OCL) 问题。

最初, 传统的数学方法如拉格朗日方法 (Lagrangian Method, LM) 和广义梯度下降方法 (Generalized Reduced Gradient, GRG) 被用于解决 OCL 问题^[7,8]。然而, LM 在低负载需求下经常无法收敛, 而 GRG 有时无法得到全局最优解。此外, 这两种方法都以其复杂性和低效率而很少使用^[8,9]。随着计算机的发展, 元启发式算法因其专业壁垒低和计算能力强而被研究人员广泛用于解决 OCL 问题。Chang 等^[10]分别拟合了一个酒店的四机组并联系统和一个半导体工厂的三机组并联系统的性能系数, 并通过遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 得到了最优负荷分配策略。在之后的研究中, 他们将其应用拓展至一个六机组并联系统中, 并强调了 GA 相对于 LM 的有效性^[11]。上述案例逐渐成为经典案例, 供更多学者测试所引入方法解决最优机组负荷分配问题的表现, 以验证方法的有效性。包括粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)^[12]、差分进化算法 (Differential Evolution, DE)^[13]和模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA)^[14]等, 其解决 OCL 问题的详细过程可在对应文献中找到。然而, 经典案例的存在虽为后续学者验证算法有效性提供了有效途径, 但也导致研究者过于关注经典案例, 却忽视了 OCL 策略在实际系统中的节能表现。同时, 由于经典案例的数量局限性, 也需要引入更多实际案例以拓宽

OCL 问题的验证途径。

树种优化算法 (Tree Seed Algorithm, TSA) 是一种基于自然界树木繁殖和种子传播机制的元启发式算法。它在求解多元函数极值问题时具有很高的计算效率和速度, 与其他算法相比, 具有算法原理简单、易于编程的优点^[15,16]。目前已被应用于解决一系列非线性和复杂的优化问题, 包括非线性滞回参数优化、置换编码优化等^[17,18]。除需引入更多的案例进行研究外, OCL 问题的发展还需更多简易的算法引入, 而 TSA 还未被用于解决 OCL 问题。

综上所述, 解决 OCL 问题对于建筑节能至关重要, 传统的数学方法求解受限且难以推广, 元启发式算法的研究亟需算法引入和案例研究。因此, 本文基于经典案例, 通过和已有研究的对比, 首次研究了 TSA 解决 OCL 问题时的表现。另一方面, 基于实测数据, 拟合了各机组的性能系数, 并探究了不同负荷率下相比于原始负荷分配策略的节能效果, 实现了机组冷负荷的节能分配, 为后续 OCL 问题的发展和实际多机组系统的节能负荷分配奠定了基础。

1 系统与数学模型

1.1 系统简介

图 1 描述了多冷水机组系统的解耦图。在一次循环中, 冷水机组并联连接, 每个机组配备一个冷冻水泵, 为各自的冷冻水循环提供动力。经各机组冷却后的冷冻水在二次循环中由二次泵加压, 输送到单独的冷却盘管吸收热量后, 返回一次循环, 再分配给各冷水机组冷却, 完成整个冷冻水循环。

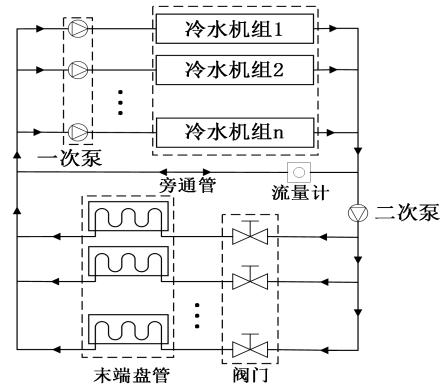


图 1 多机组系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-chiller system

1.2 目标函数及约束

OCL 问题的核心目标是通过优化不同性能曲

线的冷水机组的冷负荷分配，使每台冷水机组的总能耗最小。因此，该问题的目标函数是多机组系统中所有机组的能耗之和，如式（1）所示。对于单个机组 i ($P_{\text{chiller},i}$) 的能耗，当机组的冷冻水出水温度和冷却水进水温度保持相对稳定时，可将其建模为其部分负荷比 (PLR_i) 的凸函数，如式（2）所示^[10,11]。

$$P_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{chiller},i} \quad (1)$$

$$P_{\text{chiller},i} = a + b \times PLR_i + c \times PLR_i^2 + d \times PLR_i^3 \quad (2)$$

式中： P_{total} 和 $P_{\text{chiller},i}$ 分别为系统总能耗和冷水机组 i 的能耗，kWh； PLR_i 为冷水机组 i 的负荷率， a, b, c, d 为冷水机组 i 的性能系数， $i=1,2,3, \dots, n$ 。

同时，多机组系统需满足末端冷负荷需求。因此，OCL 问题中的约束之一为末端冷负荷等于各机组冷负荷之和，如式（3）所示。此外，为避免各机组工作在低负荷率区，每台冷水机组的 PLR 不能低于 0.3。因此，调节变量 PLR 的约束如式（4）所示。其中，式（2）只适用于冷水机组 i 的运行状态。如果冷水机组 i 的 PLR 为 0，说明冷水机组 i 处于关机状态，则相应计算出的冷水机组 i 的能耗 P_i 应为 0。

$$\sum_{i=1}^n PLR_i \times Q_{i,\text{rated}} = Q_{\text{need}} \quad (3)$$

$$0.3 \leq PLR_i \leq 1 \text{ or } PLR_i = 0 \quad (4)$$

式中： $Q_{i,\text{rated}}$ 为制冷机 i 的额定制冷量，kW； Q_{need} 为末端所需的冷负荷，kW。

表 1 经典案例各机组性能系数及额定制冷量^[10]

Table 1 Performance coefficients and rated cooling capacities of each chiller in the classic case^[10]

案例	机组编号	a	b	c	d	额定冷量/kW
案例 1	1	399.345	-122.12	770.46	0	4502
	2	287.116	80.04	700.48	0	4502
	3	-120.505	1525.99	-502.14	0	4502
	4	-19.121	898.76	-98.15	0	4502
	5	-95.029	1202.39	-352.16	0	4396
	6	191.750	224.86	524.04	0	4396
案例 2	1	104.09	166.57	-430.13	512.53	1583
	2	-67.15	1177.79	-2174.53	1456.53	1583
	3	384.71	-779.13	1151.42	-63.20	3517
	4	541.63	413.48	-3626.50	4021.41	3517

1.3 树种优化算法

树种优化算法是 Kiran 等人^[15]在 2015 年提出的一种启发于树木生长和繁殖策略的元启发式算法。该算法设计了两种搜索方式不断迭代变化以得到多元非线性函数极值问题的最优解。它引入了一个称为搜索趋势 (ST) 的控制参数，该参数在 [0,1] 的范围内变化。当 ST 较低时，使用式（5）更新种子位置，此时为全局搜索，防止算法过早收敛到局部最优。反之，当 ST 较大时，按式（6）更新种子位置，此时为局部搜索，可使算法快速收敛。

$$S_{i,j} = T_{i,j} + \alpha(T_{i,j} - T_{r,j}) \quad (5)$$

$$S_{i,j} = T_{i,j} + \alpha(B_j - T_{r,j}) \quad (6)$$

式中： $T_{i,j}$ 和 $S_{i,j}$ 分别为第 j 维更新前后的种子 i ，其中， j 与寻优变量的维度保持一致； α 为 [-1,1] 范围的随机数； B_j 为第 j 维的当前最优解； $T_{r,j}$ 为第 j 维不同于当前位置 i 的种子。

2 案例介绍

2.1 经典案例

诸多学者均通过和经典案例对比，以验证他们所研究的方法解决 OCL 问题的有效性^[10-13,18]。本文所研究的经典案例 1 为台湾新竹科技园内某半导体工厂的六机组并联系统，经典案例 2 为台湾北部某酒店的四机组并联系统。通过对比分析 TSA 是否能在经典案例下均得到最优解以验证该算法的有效性。表 1 给出了两个案例各制冷机组的性能曲线系数及额定制冷量^[10]。需要指出的是，为保证单位的统一，原文献中的冷负荷单位：冷吨 (RT)，已按照 $1\text{RT}=3.517\text{kW}$ 进行了换算。

2.2 实际案例

一个位于广东省的地铁站多机组系统被用于实际案例研究, 该系统配备了三个机组, 经调研得知, 该多机组系统原始的负荷分配策略为基于当下冷负荷进行加减机操作。具体而言, 当需要提供冷负荷时, 先开启机组3, 当机组3不能提供所需冷负荷时, 再开启机组1, 最后再开启机组2。通过实际案例的应用, 对比基于TSA得出的OCL策略相比于原始负荷分配策略的节能表现, 验证OCL策略的节能效果, 并为OCL问题的解决提供更多

的案例研究。

对该系统的机组进行运行数据收集和性能系数拟合。以式(7)所示的回归系数(R^2)衡量拟合效果, 拟合的各机组性能系数及 R^2 如表2所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_{i,pre})^2}{\sum_{i=1}^n \left(y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i\right)^2} \quad (7)$$

式中: R^2 为回归系数; n 为测试样本数; y_i 和 $y_{i,pre}$ 分别为样本*i*的实际值和预测值。

表2 实际案例各机组性能系数及拟合表现

Table 2 Performance coefficients and fitting performance of each chiller in the actual case

机组	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	额定冷量/kW	R^2
1	0.26	279.52	-376.47	443.48	1351	0.98
2	3.62	137.61	328.39	-296.16	1351	0.96
3	0.79	116.85	25.29	-7.79	903	0.97

3 结果分析

3.1 经典案例比较

以每台制冷机的PLR为决策变量, 采用TSA求解2.1节所述两个经典案例中各系统总负荷下的最优负荷分配策略, 各工况进行30次独立实验。同时, 将结果与三种现有文献中的方法进行比较, 分别为GA^[11], PSO^[12]和改进麻雀搜索算法(Improved Sparrow Search Algorithm, ISSA)^[19]。

表3和表4分别展示了各算法在经典案例1和经典案例2的不同系统负荷率下的最优负荷分配策略及能耗, 第一列表示系统冷负荷水平, 第二列表示对应的冷水机组编号。第3-6列分别显示了GA、PSO、ISSA和TSA在解决OCL问题时的各冷水机组的最优PLR组合结果以及优化后系统的总能耗。

表3 不同算法在经典案例1中的机组负荷分配及能耗

Table 3 Chiller load distribution and energy consumption of different algorithms in the classic case 1

总负荷/kW	机组	GA ^[11]		PSO ^[12]		ISSA ^[19]		TSA	
		PLR	P/kWh	PLR	P/kWh	PLR	P/kWh	PLR	P/kWh
24120 (90%)	1	0.7052		0.8026		0.8127		0.8127	
	2	0.7693		0.7799		0.7496		0.7496	
	3	0.9868	4766.33	0.9996	4739.78	1.0000	4738.58	1.0000	4738.58
	4	0.9868		0.9998		1.0000		1.0000	
	5	0.9794		0.9999		1.0000		1.0000	
	6	0.8842		0.8183		0.8386		0.8386	
22780 (85%)	1	0.6207		0.7606		0.7277		0.7277	
	2	0.7742		0.6555		0.6562		0.6561	
	3	0.9927	4459.16	1.0000	4423.04	1.0000	4421.65	1.0000	4421.65
	4	0.9589		1.0000		1.0000		1.0000	
	5	0.9956		1.0000		1.0000		1.0000	
	6	0.7595		0.6835		0.7165		0.7165	

续表 3 不同算法在经典案例 1 中的机组负荷分配及能耗

Table 3 Chiller load distribution and energy consumption of different algorithms in the classic case 1

总负荷/kW	机组	GA ^[11]		PSO ^[12]		ISSA ^[19]		TSA	
		PLR	P/kWh	PLR	P/kWh	PLR	P/kWh	PLR	P/kWh
21440 (80%)	1	0.8099		0.6591		0.6427		0.6427	
	2	0.5474		0.5798		0.5627		0.5626	
	3	0.9878	4185.87	0.9991	4147.69	1.0000	4143.71	1.0000	4143.71
	4	0.9624		0.9979		1.0000		1.0000	
	5	0.9897		0.9921		1.0000		1.0000	
	6	0.5029		0.5710		0.5945		0.5945	
20107 (75%)	1	0.5797		0.7713		0.0000		0.0000	
	2	0.5621		0.7177		0.7150		0.7150	
	3	0.9428	3940.60	0.3000	3921.07	1.0000	3842.55	1.0000	3842.55
	4	0.7908		0.9991		1.0000		1.0000	
	5	0.9951		1.0000		1.0000		1.0000	
	6	0.6339		0.7187		0.7934		0.7934	
18760 (70%)	1	0.5831		0.6418		0.0000		0.0000	
	2	0.5767		0.6621		0.5835		0.5835	
	3	0.5230	3706.22	0.3301	3642.55	1.0000	3546.44	1.0000	3546.44
	4	0.9497		0.9906		1.0000		1.0000	
	5	0.9521		0.9990		1.0000		1.0000	
	6	0.6207		0.5806		0.6217		0.6217	

表 4 不同算法在经典案例 2 中的机组负荷分配及能耗

Table 4 Chiller load distribution and energy consumption of different algorithms in the classic case 2

总负荷/kW	机组	GA ^[10]		PSO ^[20]		ISSA ^[19]		TSA	
		PLR	P/kWh	PLR	P/kWh	PLR	P/kWh	PLR	P/kWh
9179 (90%)	1	0.9925		0.9900		0.9909		0.9909	
	2	0.9487	1862.18	0.9100	1857.30	0.9059	1857.30	0.9059	1857.30
	3	1.0000		1.0000		1.0000		1.0000	
	4	0.7366		0.7600		0.7565		0.7565	
	1	0.8611		0.8300		0.8287		0.8289	
	2	0.8132	1457.23	0.8100	1455.66	0.8055	1455.66	0.8056	1455.66
8159 (80%)	3	0.8809		0.9000		0.8967		0.8966	
	4	0.6859		0.6900		0.6879		0.6879	
	1	0.6292		0.7300		0.7265		0.7262	
	2	0.7605	1183.80	0.7400	1178.14	0.7401	1178.14	0.7402	1178.14
	3	0.7557		0.7200		0.7216		0.7216	
	4	0.6360		0.6500		0.6484		0.6485	
7140 (70%)	1	0.5956		0.6000		0.6036		0.6035	
	2	0.6982	1001.62	0.6600	998.53	0.6576	998.53	0.6576	998.53
	3	0.5710		0.5600		0.5648		0.5648	
	4	0.5874		0.6100		0.6077		0.6077	

续表4 不同算法在经典案例2中的机组负荷分配及能耗

Table 4 Chiller load distribution and energy consumption of different algorithms in the classic case 2

总负荷/kW	机组	GA ^[10]		PSO ^[20]		ISSA ^[19]		TSA	
		PLR	P/kWh	PLR	P/kWh	PLR	P/kWh	PLR	P/kWh
5100 (50%)	1	0.5962		0.6100		0.6066		0.6068	
	2	0.3636	907.72	0.0000		0.0000	820.07	0.0000	820.07
	3	0.4423		0.5700		0.5684		0.5683	
	4	0.5758		0.6100		0.6087		0.6087	
4080 (40%)	1	0.3335		0.0000		0.0000		0.0000	
	2	0.3157	856.30	0.0000		0.0000	651.07	0.0000	651.07
	3	0.3246		0.5600		0.5551		0.5551	
	4	0.5436		0.6000		0.6049		0.6049	

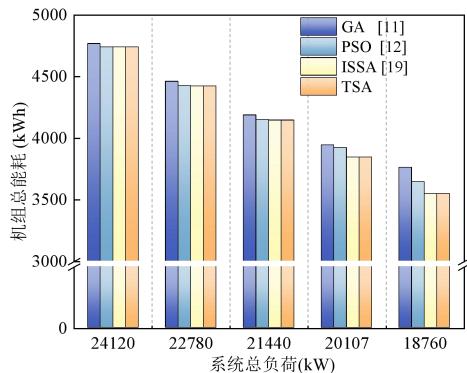


图2 各算法在案例1不同工况下的机组总能耗

Fig.2 Chiller Energy Consumption of different algorithms under various working conditions in case 1

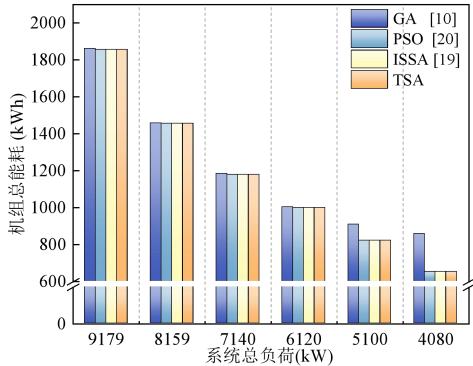


图3 各算法在案例2不同工况下的机组总能耗

Fig.3 Chiller Energy Consumption of different algorithms under various working conditions in case 2

图2和图3分别给出了上述四种算法在经典案例1和经典案例2中,不同系统冷负荷下的总能耗。结合表3和表4可以发现,在案例1中,GA和PSO可能会陷入局部最优解,而在案例2中,仅GA会陷入局部最优会导致该算法与其

他算法得出的最优冷负荷分配方案不同,从而产生更高的系统总能耗。综合来看,在两个案例的不同工况下,GA得到的能耗最高,其次是PSO,ISSA和TSA在两个案例的各工况下均能得到最优解。

在案例1中,当系统负荷率分别为90%、85%、80%、75%和70%时,相比于GA,TSA分别节能27.75kWh、37.51kWh、42.16kWh、98.05kWh和159.78kWh,相对节能率为0.58%至4.31%。与PSO相比,TSA分别节能0.95kWh、1.39kWh、3.98kWh、78.52kWh和96.11kWh,相对节能率为0.03%至2.64%。在案例2中,当系统负荷率分别为90%、80%、70%、60%、50%和40%时,相比于GA,TSA可分别节能4.88kWh、1.57kWh、5.66kWh、3.09kWh、87.65kWh和205.23kWh,相对节能率为0.26%至23.97%。因此,TSA在解决OCL问题方面表现出强大的能力,特别是在较低负载水平下。在所有工况下,TSA均可得到和已有算法相同的最优解,验证了其解决OCL问题的有效性。

3.2 实际案例节能表现

将表2所示的机组性能系数代入TSA,并分别计算系统负荷率在0.4-0.9的不同工况下的最优负荷分配结果。图4和图5展示了应用TSA进行调控前后各机组在不同系统冷负荷下的负荷率,可以看出基于OCL策略的机组使用更灵活,在系统负荷为2163kW的工况下,原始负荷分配策略仅使用两台机组,而OCL策略使用了全部机组。此外,即使均使用两台机组,OCL策略会选择使用机组2而非机组1以降低系统能耗。另一方面,即使使用机组相同,基于OCL策略的机组负荷分配更加经

济，在系统负荷为 1442kW 的工况下，虽两策略均使用了机组 1 和机组 3，但原始策略的机组 3 工作于满负荷率下，而基于 OCL 策略的机组 3 的负荷率为 0.9 左右。产生上述差异的原因是由于 OCL 策略始终在满足系统约束的前提下，以多机组系统总能耗最低为目标，最优分配各机组负荷。

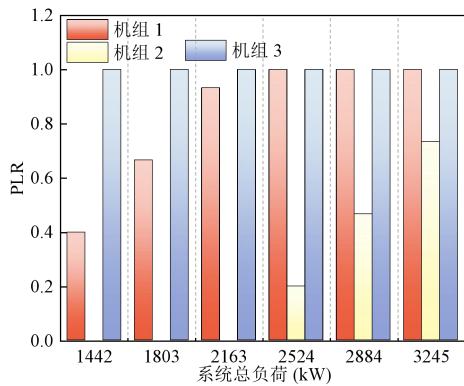


图 4 原始策略在不同冷负荷下的各机组 PLR

Fig.4 PLR of each chiller under different cooling loads for the original strategy

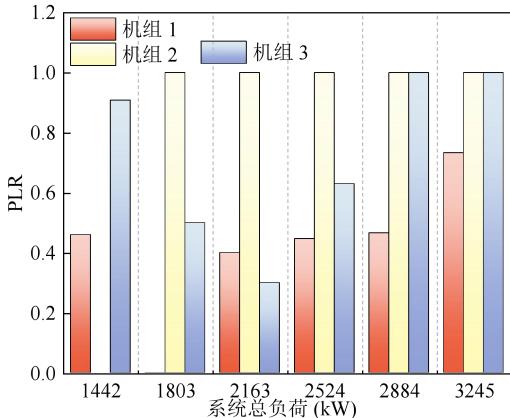


图 5 基于 TSA 的 OCL 策略在不同冷负荷下的各机组 PLR

Fig.5 PLR of each chiller under different cooling loads for the OCL strategy based on TSA

图 6 展示了不同系统负荷下基于 TSA 调控前后的能耗和所述策略相比于原始策略的节能率。可以看出，相比于原始的基于负荷机械开关机的策略，通过 TSA 得到的 OCL 的调控策略在系统冷负荷为 2163kW 时便显现出 31.91% 的节能率，随着系统冷负荷的增加，节能效果更加明显，在系统冷负荷为 2524kW 时达到最高，节能率为 34.03%，基于表 2 的机组参数可知，此时系统负荷率为 0.7。此后随着系统冷负荷的增加，节能率略有减小，当

系统冷负荷为 3245kW 时，节能率为 24.76%。

另一方面，当系统冷负荷为 1442kW 时，节能效果较差，结合图 4 和图 5，可以发现这是由于该工况下系统总负荷较小，而原始的策略更侧重于使用机组 3，导致高负载下更为耗能的机组 1 工作于较低负荷率下，因此原始策略的机组使用方案与基于 TSA 进行 OCL 调控策略相似，从而显现出较低的能耗。

总而言之，应用上述策略对机组节能具有很大的意义，在系统高负荷时，相比于原始机械的开关机策略的节能率更明显，在本案例研究的 6 种系统总负荷下，可使得机组平均节能 23.28%。

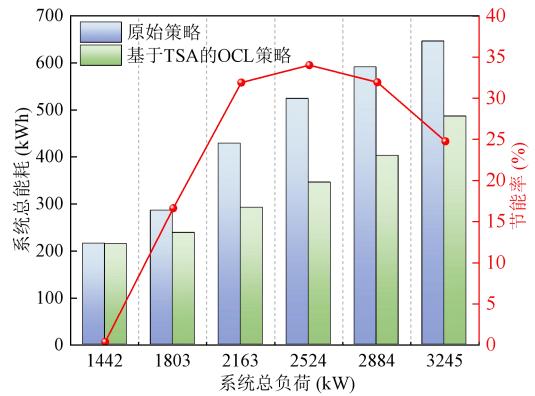


图 6 两种策略在不同冷负荷下的能耗表现

Fig.6 Energy consumption performance of two strategies under different cooling loads

4 结论

本研究采用 TSA 进行多机组系统的负荷分配，并基于经典案例对 GA、PSO、ISSA 和 TSA 进行了比较，验证了 TSA 解决 OCL 问题的有效性。此外，基于实测数据，研究了基于 TSA 得到的 OCL 策略在实际案例中的节能效果，主要结论如下：

(1) TSA 在解决 OCL 问题上表现出很强的能量，在经典案例中，TSA 在所有工况下均得到最低的能耗。与 GA 和 PSO 相比，最大节能率分别为 23.97% 和 2.64%；

(2) 在实际案例中，相比于原始策略，基于 TSA 的最优负荷分配策略在系统总负荷率为 0.7 时表现出最高的节能率，节能率为 34.03%；

(3) 在实际案例中，相比于原始策略，OCL 策略可实现较高程度的节能，在本文涉及的 6 种工况下，平均节能率为 23.28%，该方法具有显著的

节能效果和重要的工程意义。

参考文献:

- [1] 徐伟, 倪江波, 孙德宇, 等. 我国建筑碳达峰与碳中和目标分解与路径辨析[J]. 建筑科学, 2021, 37(10):1-8, 23.
- [2] K Song, Y Ahn, J Ahn, et al. Development of an energy saving strategy model for retrofitting existing buildings: A Korean case study[J]. Energies, 2019, 12:1626.
- [3] M Mehregan, A Naminezhad, S Vakili, et al. Building energy model validation and estimation using heating and cooling degree days (HDD-CDD) based on accurate base temperature[J]. Energy Sci Eng., 2022, 10:3638-3649.
- [4] F Yu, K Chan. Energy signatures for assessing the energy performance of chillers[J]. Energy Build, 2005, 37:739-746.
- [5] Z Yang, Z Yu, L Yu, et al. Research on frequency conversion technology of metro station's ventilation and air-conditioning system[J]. Appl. Therm. Eng., 2014, 69: 123-129.
- [6] D Chen, X Hu, D Meng, et al. Optimal consumption modeling of multi-chiller system using a robust optimization algorithm with considering the measurement, control and threshold uncertainties[J]. J Build Eng, 2020, 30:101263.
- [7] Y Chang, H Tu. An effective method for reducing power consumption-optimal chiller load distribution[J]. Int. Conf. Power Sys. Tech., 2002, 2:1169-1172.
- [8] Z Geem. Solution quality improvement in chiller loading optimization[J]. Appl. Therm. Eng., 2011, 31:1848-1851.
- [9] Y Chang. A novel energy conservation method-optimal chiller loading[J]. Electric Power Syst. Res., 2004, 69: 221-226.
- [10] Y Chang, J Lin, M Chuang. Optimal chiller loading by genetic algorithm for reducing energy consumption[J]. Energy Build, 2005, 37:147-155.
- [11] Y Chang. Genetic algorithm based optimal chiller loading for energy conservation[J]. Appl. Therm. Eng., 2005, 25:2800-2815.
- [12] A Ardkani, F Ardkani, S Hosseini. A novel approach for optimal chiller loading using particle swarm optimization[J]. Energy Build, 2008, 40:2177-2187.
- [13] W Lee, Y Chen, Y Kao. Optimal chiller loading by differential evolution algorithm for reducing energy consumption[J]. Energy Build, 2011, 43:599-604.
- [14] Y Chang. An innovative approach for demand side management-optimal chiller loading by simulated annealing[J]. Energy, 2006, 31(12):1883-1896.
- [15] M S Kiran. TSA: Tree-seed algorithm for continuous optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2015, 42:6686-6698.
- [16] 孟宪秋. 树种优化算法改进及其应用研究[D]. 长春: 吉林财经大学, 2022.
- [17] Z Ding, J Li, H Hao, et al. Nonlinear hysteretic parameter identification using an improved tree-seed algorithm[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2019, 46:69-83.
- [18] A C Cinar, S Korkmaz, M S Kiran. A discrete tree-seed algorithm for solving symmetric traveling salesman problem[J]. Engineering Science and Technology, 2020, 23:879-890.
- [19] Z Li, J Guo, X Gao, et al. A multi-strategy improved sparrow search algorithm of large-scale refrigeration system: Optimal loading distribution of chillers[J]. Appl. Energ., 2023, 349:121623.
- [20] W Lee, L Lin. Optimal chiller loading by particle swarm algorithm for reducing energy consumption[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8-9):1730-1734.