

DOI:10.11918/202103086

中央空调冷冻水系统设备节能优化方法

于军琪¹,高之坤²,赵安军¹,虎 群²

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院,西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 信息与控制工程学院,西安 710055)

摘 要: 针对中央空调冷冻水系统运行能耗高、系统设备参数难以随负荷变化而动态调节的问题,采用一种结合穷举法的自适应并行人工免疫算法(Adaptive parallel artificial immune algorithm combined with exhaustive method, EM-APAIA)优化系统设备在不同负荷下的运行参数,以降低冷冻水系统的运行能耗。首先建立了系统内各设备的功耗模型,以所有设备功耗最小作为冷冻水系统的优化控制目标。其次,采用 EM-APAIA 对冷冻水供水温度、冷冻水泵的运行台数和转速比等运行参数进行优化。在该算法中,对初始化方式、移民算子和变异概率进行了改进以及引进穷举法机制,增强了算法对冷冻水系统设备运行参数的优化能力。最后对某一实际中央空调冷冻水系统进行了仿真实验。结果表明:与常规设置相比,使用 EM-APAIA 对系统内各设备运行参数优化后,系统总能耗降低 14.8%;同时相对于其他对比算法,该算法能得到更好的控制策略,且收敛速度快、稳定性强,可用于中央空调冷冻水系统内各设备的控制优化。

关键词: 中央空调冷冻水系统;最佳运行性能;穷举法;人工免疫算法;控制优化

中图分类号: TU83 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2022)12-0143-08

Equipment energy-saving optimization method for central air-conditioning chilled water system

YU Junqi¹, GAO Zhikun², ZHAO Anjun¹, HU Qun²

(1. School of Building Services Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. College of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Due to the high-energy consumption of chilled water system in the central air-conditioning and the difficulty in dynamic adjustment for system equipment parameters with load changes, an adaptive parallel artificial immune algorithm combined with exhaustive method (EM-APAIA) was proposed to optimize equipment operating parameters under different loads, so as to reduce the operation energy consumption of chilled water system. First, the power consumption model of each piece of equipment in the system was established, and the minimum power consumption of all the equipment was taken as the optimal control objective of the chilled water system. Then, EM-APAIA was used to optimize the operation parameters of the chilled water supply temperature, the number of chilled water pumps, and the speed ratio. In the algorithm, the initialization method, migration operator, and mutation probability were improved, and the exhaustive method mechanism was introduced, enhancing its ability to optimize the equipment operating parameters for the chilled water system. Finally, a simulation experiment was carried out on an actual chilled water system of central air-conditioning. Results show that compared with the conventional setting, the total energy consumption of the system was reduced by 14.8% after its equipment operating parameters were optimized by EM-APAIA. The algorithm not only achieved better control strategy than the comparison algorithms, but also exhibited fast convergence speed and strong stability, which can be better applied to the control optimization of the equipment in central air-conditioning chilled water system.

Keywords: central air-conditioning chilled water system; optimal operating performance; exhaustive method; artificial immune algorithm; control optimization

近年来,中央空调系统在现代大型建筑中得到广泛应用,以提供舒适的室内热环境^[1]。冷冻水系统作为最主要的耗能设备,其运行能耗约占空调系

统总能耗的 60%^[2-3]。而冷冻水系统设备根据最大空调负荷设计,当系统处于部分负荷情况下,各设备未能随环境参数和负荷需求的逐时变化而动态调节,导致设备运行效率低下,存在很大的节能空间^[4]。因此,如何对系统中各设备运行参数进行优化,以提高冷冻水系统的运行能效非常重要。

Chang^[5]提出冷水机组负荷优化分配的节能措施,并采用拉格朗日法(Lagrange method, LM)进行

收稿日期:2021-03-22

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0704100);咸阳机场三期扩建工程绿色能源站智能管控咨询与顾问项目(20210103)

作者简介:于军琪(1969—),男,教授,博士生导师

通信作者:赵安军,zhao_anjun@163.com

了优化。然而在低负荷情况下,此方法并不能收敛,因此,采用遗传算法 (Genetic algorithm, GA)^[6-7] 来求解这个问题。Lee 等^[8-9] 研究表明粒子群算法 (Particle swarm optimization, PSO) 和差分进化算法 (Differential evolution, DE) 对此问题的求解效果更好。此外, Yu 等^[10] 提出一种分布式混沌分布估计算法 (Distributed chaotic estimation of distribution algorithm, DCEDA) 也是解决此问题的有效方法之一。除冷水机组外,也有研究针对冷冻水系统中冷冻水泵的优化进行展开。Olszewski^[11] 采用 GA 分别将水泵功耗最小、流量平衡以及效率最大作为优化目标进行优化,结果表明功耗最小策略是最有效的节能策略。于军琪等^[12] 提出一种分布式估计方法 (Distributed probability estimation algorithm, DPEA) 对水泵进行台数配置和转速比优化,保证系统运行在较高效率区间。

综上所述,已有研究为冷冻水系统的分析和优化提供了可行的方法和方向,可以应用于实际运行,实现可观的节能效果。然而,一些研究主要集中在水泵和冷水机组各子系统设备的优化上,缺乏基于实际供冷需求下不同设备间协同匹配运行的系统分析^[13-14]。因此,从设备高效运行和冷冻水系统全局节能角度出发,建立冷冻水系统整体设备能耗模型,以模型可控输入变量为优化参数,引入结合穷举法的自适应并行人工免疫算法对系统设备运行参数进行优化,实现系统设备整体高效运行。

1 问题描述

1.1 系统设备功耗模型

如图 1 所示,典型的冷冻水循环系统主要由冷水机组、冷冻水泵组等设备组成。组内设备通过并联方式连接,从而创建一些相同的约束条件,包括泵组的相同压差和冷水机组的冷冻水供回水温度等。在系统中,冷水机组工作后进行冷冻水供水,通过冷冻水泵组控制冷冻水流量,经输送管道送到终端设备,与室内空气不断进行热交换,完成工作后的冷冻水回到冷水机组,由此完成不断的循环^[15]。因此,为实现冷冻水系统的节能优化,首先应建立冷机、冷冻水泵的功耗模型。

冷水机组是冷冻水系统中主要的冷却设备,其能耗受蒸发温度、冷凝温度和冷负荷的影响^[16],而蒸发温度与冷冻水供水温度有关,冷凝温度与冷却水进水温度有关。因此影响冷机运行能耗的因素复杂,涉及到多个变量输入,参考文献[17]后,建立了冷机功耗模型:

$$P_{\text{chiller}} = c_1 + c_2 (T_{\text{cwr}} - T_{\text{chws}}) + c_3 (T_{\text{cwr}} - T_{\text{chws}})^2 + c_4 (T_{\text{cwr}} - T_{\text{chws}}) Q_e + c_5 Q_e + c_6 Q_e^2 \quad (1)$$

式中: P_{chiller} 为冷机的功耗, c_1 、 c_2 、 c_3 、 c_4 、 c_5 、 c_6 为冷机的性能系数; T_{chws} 为冷冻水供水温度, T_{cwr} 为冷却水进水温度, Q_e 为冷机承载负荷。

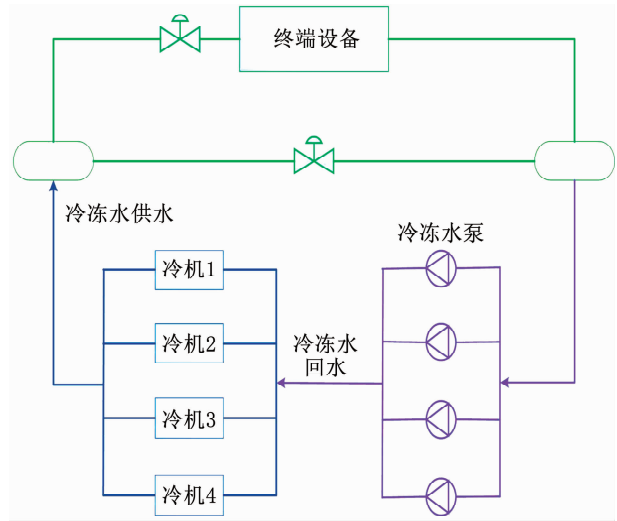


图 1 冷冻水循环系统

Fig. 1 Chilled water circulation system

冷冻水泵为冷冻水系统中的水流提供动力,根据水泵功耗与流量之间的强相关性,冷冻水泵功耗模型表示为

$$P_{\text{chiller pump}} = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2 + a_3 Q^3 \quad (2)$$

式中: $P_{\text{chiller pump}}$ 为冷冻水泵的功耗, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为冷冻水泵的性能系数, Q 为冷冻水泵的流量。

根据水泵的相似率^[18]有

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{n}{n_0} = w \quad (3)$$

式中: Q_0 为冷冻水泵的额定流量, n_0 为水泵的额定转速, n 为水泵的实际转速, w 为水泵的转速比。

则水泵在任意转速下的模型可以表示为

$$P_{\text{chiller pump}} = a_0 + a_1 \cdot w \cdot Q_0 + a_2 \cdot w^2 \cdot Q_0^2 + a_3 \cdot w^3 \cdot Q_0^3 \quad (4)$$

1.2 冷冻水系统设备优化问题定义

对于冷冻水系统设备优化问题可描述为在满足负荷需求下,调节各设备运行参数,使系统设备总能耗最小,数学公式为

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^h P_{\text{chiller},i} + \sum_{i=1}^m P_{\text{chiller pump},i} \right) \quad (5)$$

式中: $P_{\text{chiller},i}$ 为第 i 台冷机的功耗, h 为冷机的运行台数, $P_{\text{chiller pump},i}$ 为第 i 台冷冻水泵的功耗, m 为冷冻水泵的运行台数。

考虑到控制变量需满足易调节,与冷冻水系统设备能耗相关程度高,本文将冷冻水供水温度、冷冻水泵的转速比和运行台数等运行参数作为此优化问题的优化控制变量。为保证冷冻水系统安全稳定运

行,使计算出的最优参数组合符合系统设备的实际运行规律,寻优过程应满足以下不等式约束和等式约束条件。其中不等式约束主要包括冷冻水供水温度约束、冷机流量约束、冷冻水泵转速约束、系统设备运行台数约束,如式(6)所示。等式约束主要为冷水机组内部工质循环的能量平衡关系,如式(7)所示。

$$\begin{cases} T_{chws}^{\min} \leq T_{chws} \leq T_{chws}^{\max} \\ G_e^{\min} \leq G_e \leq G_e^{\max} \\ n_{\min} \leq n \leq n_{\max} \\ h_{\min} \leq h \leq h_{\max} \\ m_{\min} \leq m \leq m_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

$$Q_e = Q \cdot c_{\text{water}} (T_{chwr} - T_{chws}) \quad (7)$$

式中: G_e 为通过冷机的冷冻水流量, c_{water} 为冷冻水比热容, T_{chwr} 为冷冻水回水温度。

2 优化算法

2.1 人工免疫算法

人工免疫算法 (Artificial immune algorithm, AIA)^[19-20]是一种受生物免疫机制启发而提出的新型启发式随机搜索算法,具有参数少、全局搜索能力强等特点。在 AIA 中,待优化问题等效于抗原,待优化问题的可行解等效于抗体,可行解的好坏等效于免疫系统中抗体与抗原的亲合度。其主要包含 3 个模块^[21]:识别抗原,生成初始抗体种群;依据抗体与抗原的亲合度评价抗体;利用克隆、变异、抑制、种群刷新等各种免疫操作使抗体进化,实现对最优解的寻优搜索。

2.2 结合穷举法的自适应并行人工免疫算法

但传统的 AIA 采用单种群方式进行进化,将其直接应用于冷冻水系统设备控制优化求解,易陷入局部最优以及算法寻优时间过长。有些并行人工免疫算法^[22]采用双种群并行进化的方式,但多采用相对单一的随机方式初始抗体种群,通过移民算子进行种群间个体交换后,难以打破种群内部平衡,其保持种群多样性的效果不明显,并不能很好地解决陷入局部最优、算法寻优时间长等问题。为此,需要对并行人工免疫算法进一步改进。

首先,本文设计的 EM-APAIA 分别采用随机和固定步长两种不同的方式生成初始抗体种群。前者是指在可行解(冷冻水供水温度值)空间内随机产生的初始解,具有较强的随机性。后者是将温差设定为一个常数 T ,并将其作为固定步长,以最低冷冻水温度为初始值,在供水温度约束范围内均匀生成 u 个冷冻水供水温度设定值,固定步长方式产生的

种群 G 为

$$G = \begin{bmatrix} T_{chws}^{\min} \\ T_{chws}^{\min} + \Delta T \\ T_{chws}^{\min} + 2 \cdot \Delta T \\ \dots \\ T_{chws}^{\min} + (u - 1) \cdot \Delta T \\ T_{chws}^{\max} \end{bmatrix} \quad (8)$$

分别采用随机和固定步长方式生成两个初始抗体种群,使两个种群在产生之初就具有不同的特征,通过移民算子进行种群间个体交换后,能够打破种群内部平衡,增强种群多样性,使种群向着更高级别进行进化。

其次,在传统移民算子的基础上提出了一种新的移民算子。首先计算出两个种群内每个个体亲和度,根据亲和度大小将两种群内的个体平均分成大、中、小 3 段。按照设定好的种群间个体交换规模 $c\%$ 进行交叉交换,即取两个种群的大段个体的 $c\%$ 代替对方种群亲和度小段个体的 $c\%$,取两个种群的亲和度中段个体的 $c\%$ 与对方种群亲和度中段个体的 $c\%$ 进行相互交换。具体的种群间个体交换如图 2 所示。

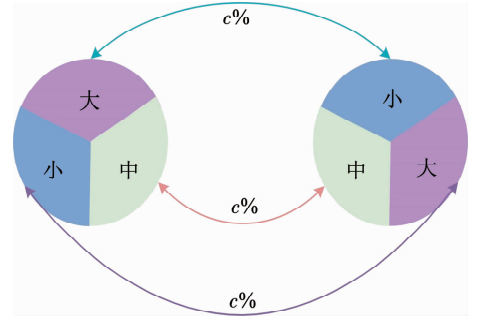


图 2 种群间个体交换

Fig. 2 Individual exchange between populations

此外,在 AIA 中,变异操作是指抗体种群中个体完成克隆操作后进行突变,以加强算法的局部搜索能力,而如何确定变异概率(突变的抗体数量)对于提升算法性能有很大作用。原因在于,变异概率越大,算法的局部搜索能力越强,但变异概率较小时,更有利于种群中优良个体保存,加快全局最优解的搜索速度^[23]。为此,本文根据种群个体每代最大、最小以及平均亲和度函数值之间的关系对两种群个体的变异概率进行自适应调整,即当种群个体亲和度趋于一致时,提高变异概率,以跳出局部最优;反之当群体多样性保持得比较好时,则降低变异概率,有利于优良个体的保存。为进一步提高种群间个体的多样性,对两个抗体种群选用了不同的自适应变异概率计算公式,即:

$$P_{m1} = k_1 \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\alpha_{\text{arg}} - \alpha_{\text{min}}}{\alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{arg}}}\right) \tag{9}$$

$$P_{m2} = k_2 e^{-\left(\frac{\alpha_{\text{arg}} - \alpha_{\text{min}}}{\alpha_{\text{max}} - \alpha_{\text{arg}}}\right)^2 / 2k_3} \tag{10}$$

式中： α_{max} 为每代群体中最大的亲和度函数数值， α_{arg} 为每代群体的平均亲和度值， α_{min} 为每代群体中最小的亲和度函数数值， k_1 、 k_2 、 k_3 为变异概率调整系数。

同时,考虑到冷冻水系统设备的控制时序,应使得产生冷量的冷机和运输冷量的冷冻水泵运行状态相匹配。即每一个优化控制周期内,先优化冷机的冷冻水供水温度,再根据冷冻水供水温度对冷冻水泵的运行台数、转速进行优化,以进一步挖掘节能潜力。由于冷冻水泵运行台数为整数值且受到系统设计总台数的限制,为减小最优解验证工作量,缩短寻优时间,对冷冻水泵部分的优化可采用穷举法(Exhaustive method, EM)进行优化,其寻优流程如图 3 所示。

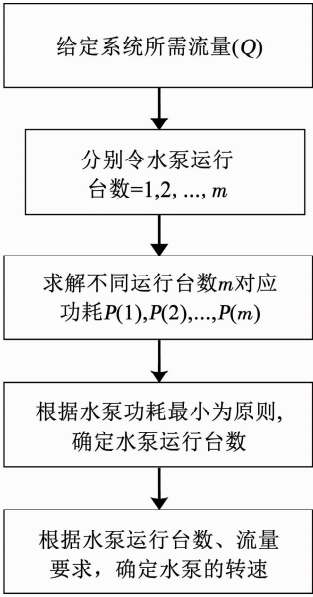


图 3 冷冻水泵运行工况寻优流程

Fig. 3 Optimization process of chilled water pump

从而,EM-APAIA 的迭代优化过程如下。首先,采用随机和固定步长方式分别初始抗体种群 1、2,使种群 1 中抗体即冷冻水供水温度值在约束范围内随机分布,种群 2 中的冷冻水供水温度值在约束范围内均匀分布,初始化完成后,两种群独立寻优 z 次。然后,采用移民算子对两个种群间的个体交换,进行种群间交流。进而,两种群再次独立进化 q 次后,判断是否满足终止条件,若不满足,再次使用移民算子进行种群间个体交换,继续独立进化。反之,优化结束。具体实现 EM-APAIA 的流程如图 4 所示。

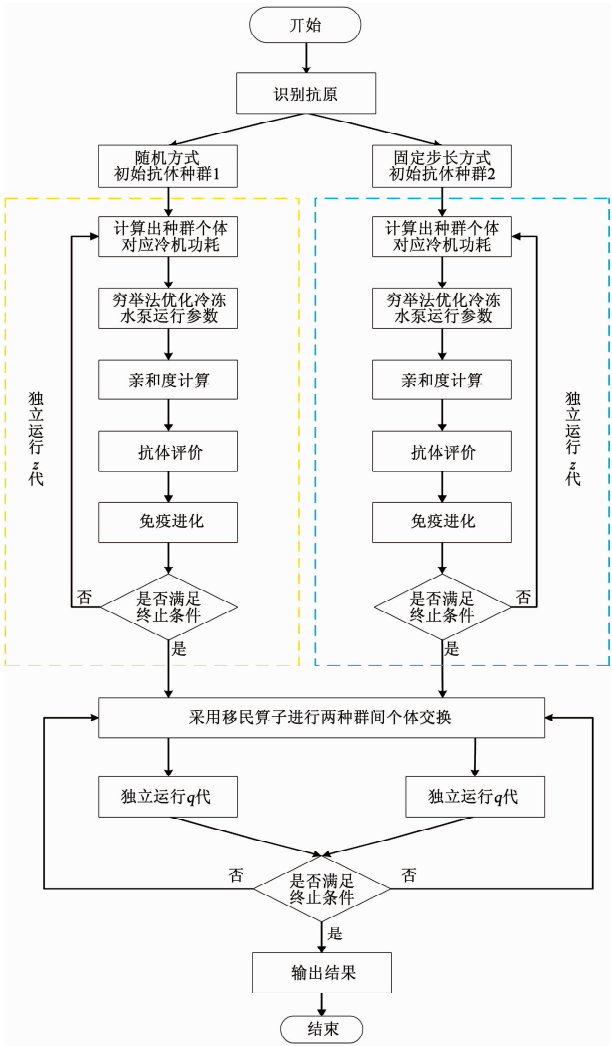


图 4 EM-APAIA 流程图

Fig. 4 Flow chart of EM-APAIA

3 仿真实验

3.1 案例描述

本文的研究对象为北方某城市大型商场空调冷冻水系统,该系统主要设备包括 3 台离心式冷机和 4 台冷冻水泵,相关参数见表 1。系统配备了一套完整的中央节能控制设备,但在投入运行初期只针对冷冻水泵部分运行参数采用了基于变频调速控制技术的优化控制,其他运行参数采用固定设定值的常规配置方式,其中冷冻水供水温度设定为 7℃,冷冻水回水温度设定为 12℃,冷却水进水温度设定为 35℃。同时,考虑到设备不能频繁启动、响应具有过程性等特点,为更好满足实际应用,采用实际逐时负荷数据进行仿真优化。由于系统长期运行,各设备的设计温度和流量存在差异,导致系统设备实际特性与出厂时额定特性并不相同。因此,通过采集到的此商场 2019 年 7 月冷冻水系统各设备实时数据,并利用 1stOpt15PRO 软件对系统中冷机、冷冻

水泵进行灰箱建模,得到参数辨识的性能指标及冷机、冷冻水泵的实际性能参数分别见表 2、3。从表 2 可以看出,冷冻水泵、冷机参数辨识的均方差(Root mean squared error, RMSE)分别为 0.510 4、0.813 8,

相关系数之平方(R^2)和决定系数(DC)均接近于 1。因此,采用此方法得到的模型精度可用于冷冻水系统各设备的优化计算。

表 1 系统设备额定参数
Tab.1 Rated parameters of system equipment

冷机				冷冻水泵		
设备台数	额定功率/kW	制冷量/kW	冷凝侧流量变化范围/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	设备台数	额定流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	功率/kW
3	340.5	1 934	240 ~ 380	4	280	74

表 2 设备参数辨识的性能指标

Tab.2 Performance indexes for equipment parameter identification

评价指标	冷机			冷冻水泵		
	RMSE	R^2	DC	RMSE	R^2	DC
结果	0.813 8	0.997 2	0.997 1	0.510 4	0.955 2	0.955 3

表 3 系统设备性能参数

Tab.3 Performance parameters of system equipment

设备名称	性能参数
离心式冷机	$c_1 = 173.65, c_2 = -15.926$
	$c_3 = 0.407, c_4 = 3.85 \times 10^{-3}$
	$c_5 = 0.017, c_6 = 3.5 \times 10^{-6}$
冷冻水泵	$a_1 = 35.17, a_2 = 0.147 2$
	$a_3 = -2.299 5 \times 10^{-4}, a_4 = 7.030 8 \times 10^{-7}$

3.2 参数分析

为找到 EM-APAIA 算法在求解冷冻水系统优化问题中的最佳参数值,进行了不同参数设置下的计算实验,并选取系统负荷需求分别为 5 222、3 481、2 320 kW 作为计算实例。为消除偶然性,对每个实验工况分别进行 30 次独立实验,得到 EM-APAIA 的参数值、优化结果的最大值、最小值和平均值见表 4。

实验结果表明,不同参数设置下的最优解几乎相等,而相同参数设置下的最优解几乎相同。这说明 EM-APAIA 具有较好的鲁棒性和较强的稳定性。此外,在 3 个实验工况中,独立运行次数为 5,克隆数目为 15,独立进化次数为 5 的算法参数组性能最好,因此将该组参数用于以下进一步的实验分析过程。实验中所使用的 EM-APAIA 的参数值见表 5。

表 4 不同参数设置下的 EM-APAIA 最优结果对比

Tab.4 Comparison of optimal results of EM-APAIA under different parameter settings

z	N_c	q	负荷需求(5 222 kW)			负荷需求(3 481 kW)			负荷需求(2 320 kW)		
			Max	Min	Mean	Max	Min	Mean	Max	Min	Mean
5	10	5	1 185.96	1 185.88	1 185.91	742.28	742.03	742.17	523.17	523.11	523.15
5	15	5	1 185.87	1 185.87	1 185.87	742.03	742.03	742.03	523.10	523.10	523.10
5	20	5	1 185.93	1 185.89	1 185.90	742.91	742.18	742.23	523.22	523.18	523.19
4	10	4	1 185.97	1 185.92	1 185.95	742.12	742.10	742.11	523.15	523.10	523.12
4	15	4	1 185.94	1 185.87	1 185.88	743.15	742.09	743.03	523.33	523.15	523.27
4	20	4	1 185.99	1 185.93	1 185.95	742.57	742.03	742.17	523.18	523.12	523.15
3	20	4	1 185.93	1 185.88	1 185.90	742.15	742.07	742.11	524.21	524.10	524.17
4	20	5	1 185.93	1 185.87	1 185.91	743.21	742.15	743.09	523.78	523.53	523.62
5	20	3	1 185.96	1 185.93	1 185.95	742.17	742.03	742.13	523.18	523.12	523.16

表 5 EM-APAIA 算法参数设置

Tab.5 Parameter settings of EM-APAIA

符号	说明	取值
maxgen	算法迭代次数	30
z	独立运行次数	5
sizepop	算法种群规模	100
N_c	克隆数目	15
q	独立进化代数	5
k_1	变异概率调整系数 1	0.8
k_2	变异概率调整系数 2	0.6
k_3	变异概率调整系数 3	5.0

3.3 仿真结果

考虑到商业建筑工作特点,每天商场营业时间为 09:00 – 21:00,因此商场空调系统采用间歇运行方式,08:00 开始提前制冷。本文采用此商场 2019 年 8 月 10 日实际逐时负荷数据作为实验工况进行寻优计算。得出不同实验工况下,系统设备优化参数值见表 6。由表 6 可知,在整个中央空调冷冻水系统运行周期内,冷冻水泵长时间维持 2 台或者 3 台连续运行,并未频繁进行运行台数调节,但在整个运行期间,却始终在不停的调节水泵运行转速比,从而

确保冷冻水系统流量和压差满足系统运行的要求。

将优化之后冷冻水系统各设备的能耗与常规配置方式下的结果进行比较,得出冷水机组、冷冻水泵组不同时刻下能耗对比图,如图 5、6 所示。从图中可以看出,优化后冷水机组在不同时刻的能耗相比于优化前整体处于下降趋势,但由图 6 可得,冷冻水泵在大多数情况下的能耗相比于优化前却有所上升。结合表 7 优化前、后冷冻水系统总能耗对比可以看出,虽然优化后冷冻水泵能耗有所上升,但冷冻水系统优化后总能耗仍处于下降趋势。这是因为当冷冻水供水温度优化后,造成冷冻水泵运输流量增大,使得冷冻水泵能耗上升。可以得出,传统的“大温差小流量”的优化方式虽然有利于水泵的节能优化,但是针对整个系统而言,不是最好的优化方式。同时从表 7 可以看出,与优化前相比,EM-APAIA 在不同时刻下,系统总体可节能38.142 7 ~ 262.696 6 kW。

表 6 不同时刻冷冻水系统设备优化参数值

Tab.6 Optimal parameters of chilled water system at different time points

时刻	冷负荷需求/ kW	冷冻水供水 温度/℃	水泵运行 台数	水泵转 速比
08:00	2 465	7.686 1	2	0.816 4
09:00	3 500	6.836 2	2	0.968 4
10:00	3 700	6.673 8	2	0.992 5
11:00	4 050	7.997 4	3	0.963 8
12:00	4 080	7.987 2	3	0.968 5
13:00	3 900	8.057 8	3	0.942 3
14:00	3 750	6.636 1	2	0.998 9
15:00	3 890	8.062 9	3	0.941 1
16:00	3 875	8.073 6	3	0.940 0
17:00	3 680	6.692 8	2	0.990 7
18:00	4 000	8.021 9	2	0.783 0
19:00	4 105	7.981 5	3	0.973 0
20:00	3 550	6.797 8	2	0.975 0
21:00	2 180	8.013 1	2	0.781 2

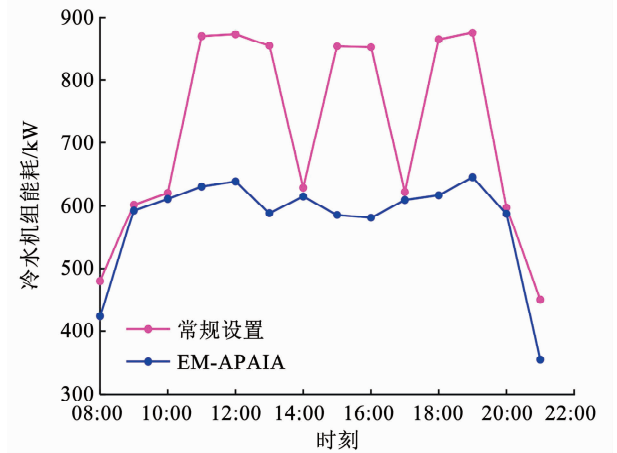


图 5 冷水机组能耗对比

Fig.5 Comparison of energy consumption of chillers

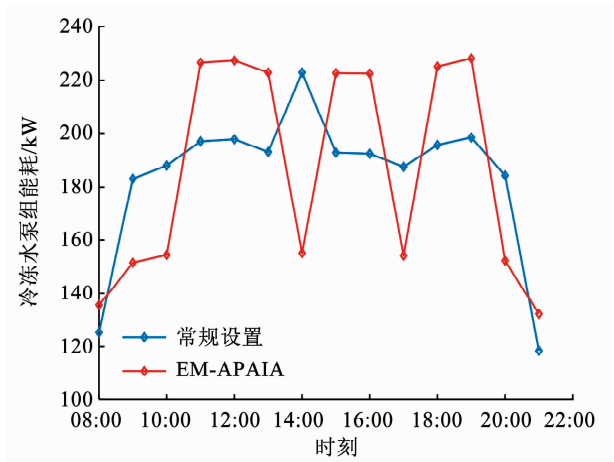


图 6 冷冻水泵组能耗对比

Fig.6 Comparison of energy consumption of pumps

表 7 不同时刻下优化前、后能耗对比

Tab.7 Comparison of energy consumption at different time points kW

时刻	冷负荷需求	优化前 总能耗	优化后 总能耗	节能
08:00	2 465	605.578 9	559.197 3	-46.381 6
09:00	3 500	774.985 3	744.300 8	-52.184 6
10:00	3 700	802.278 9	765.523 0	-41.098 5
11:00	4 050	1 067.218 9	856.935 5	-231.220 4
12:00	4 080	1 071.045 2	865.846 1	-226.029 0
13:00	3 900	1 048.201 4	811.598 5	-258.079 6
14:00	3 750	811.598 5	770.094 0	-44.745 1
15:00	3 890	1 046.940 2	808.528 7	-259.921 7
16:00	3 875	1 045.050 1	803.917 1	-262.696 6
17:00	3 680	799.529 6	763.612 6	-38.142 7
18:00	4 000	1 060.858 6	841.976 4	-54.320 3
19:00	4 105	1 074.239 9	873.239 5	-221.746 9
20:00	3 550	781.767 4	750.047 3	-46.824 3
21:00	2 180	569.371 8	487.402 8	-90.120 6

由图 7 可知,中央空调冷冻水系统采用 EM-APAIA 优化后的运行工况与常规配置方式相比,冷机节能效果最明显,约减少其运行能耗的 18.9%。同时,冷冻水泵的能耗虽有所上升,但采用 EM-APAIA 优化后的最优运行工况运行,系统的总能耗降低 14.8%。因此,合理的降低冷机的运行能耗,可以最大限度的提升冷冻水系统的运行效率。

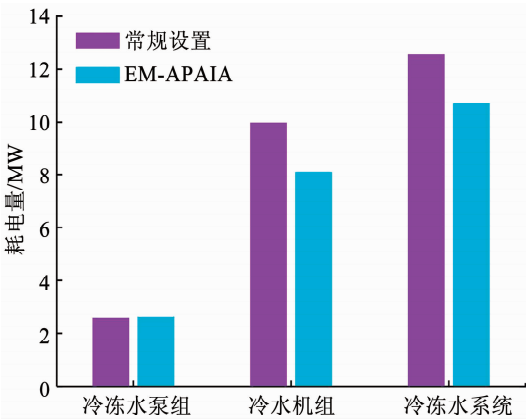


图 7 优化前、后能耗整体对比

Fig.7 Overall comparison of energy consumption before and after optimization

3.4 性能分析

为验证 EM-APAIA 算法性能,对此冷冻水系统典型工况进行了进一步优化计算,并将优化结果与 PSO、AIA 进行了比较。3 种算法对应优化结果见表 8,收敛曲线如图 8 所示。由表 8 可以得出,与 PSO 相比,EM-APAIA 在不同负荷需求下可节能 0.04~3.65 kW。与 AIA 相比,EM-APAIA 算法在不同负荷需求下可节能 0.19~35.69 kW。同时从图 8

中可以看出,3 种算法优化后的冷冻水供水温度随迭代次数的增加,总体呈收敛趋势。相比于 PSO、AIA,EM-APAIA 算法在更短的时间内使系统趋于最优。同时,相较于 PSO、AIA,EM-APAIA 获得的收敛迭代曲线更为平坦。因此,EM-APAIA 能够得到更好的冷冻水系统优化控制策略,具有很好的稳定性和收敛性。

表 8 PSO、AIA、EM-APAIA 优化结果对比
Tab. 8 Comparison of optimal results of PSO, AIA, and EM-APAIA

负荷需求		PSO(A)		AIA(B)		EM-APAIA(C)		节能大小	
		参数值	总能耗/kW	参数值	总能耗/kW	参数值	总能耗/kW	C-A	C-B
5 222 (90%)	T_{chws}	7.572 9		7.682 0		7.548 3			
	m_r	4.000 0	1 186.24	4.000 0	1 189.65	4.000 0	1 185.87	-0.37	-3.78
	w	0.842 7		0.863 9		0.838 0			
4 642 (80%)	T_{chws}	7.819 9		7.833 3		7.578 4			
	m_r	3.000 0	1 031.42	4.000 0	1 047.28	3.000 0	1 029.64	-1.78	-17.64
	w	0.995 0		0.795 9		0.997 4			
4 061 (70%)	T_{chws}	8.006 5		8.216 9		7.993 6			
	m_r	3.000 0	860.24	4.000 0	895.89	3.000 0	860.20	-0.04	-35.69
	w	0.968 6		0.766 9		0.965 5			
3 481 (60%)	T_{chws}	6.856 8		6.893 4		6.852 1			
	m_r	2.000 0	742.74	2.000 0	642.22	2.000 0	742.03	-0.71	-0.19
	w	0.967 0		0.973 9		0.966 1			
2 901 (50%)	T_{chws}	7.306 3		7.278 5		6.950 8			
	m_r	2.000 0	652.57	2.000 0	652.71	2.000 0	648.92	-3.65	-3.79
	w	0.883 1		0.877 9		0.820 9			
2 320 (40%)	T_{chws}	7.819 9		7.936 7		7.783 0			
	m_r	2.000 0	523.25	2.000 0	525.62	2.000 0	523.10	-0.15	-2.37
	w	0.793 0		0.815 8		0.786 0			

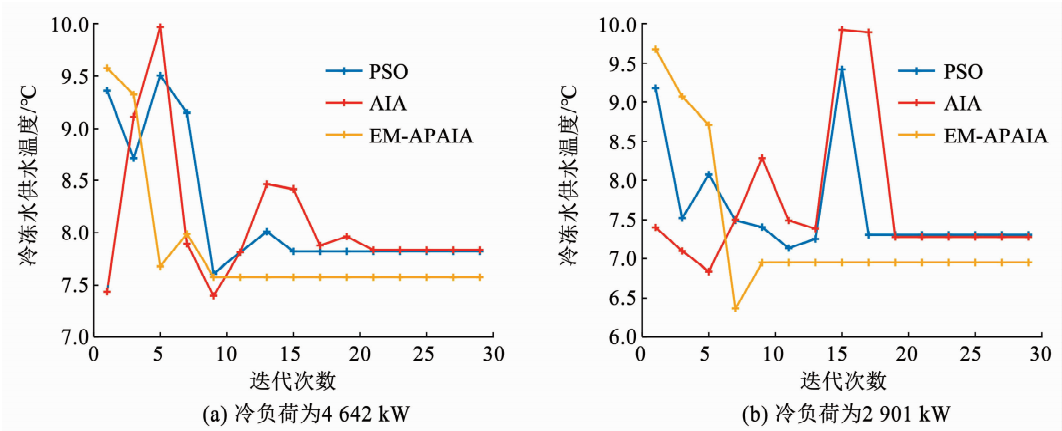


图 8 冷冻水供水温度优化迭代过程
Fig. 8 Optimization iterative process of chilled water supply temperature

4 结 论

1) 相比于常规设置,采用 EM-APAIA 对冷冻水系统设备参数优化后,系统能耗降低 14.8%,表明该算法具备节能潜力。

2) 在冷冻水系统典型工况下,与 PSO 相比,EM-APAIA 节能 0.04 ~ 3.65 kW,与 AIA 相比,其节能 0.19 ~ 35.69 kW,该算法能得到更好地控制策略。

3) 相比于对比算法,EM-APAIA 收敛速度快、稳定性强,能够更好地适用于冷冻水系统设备在线控制优化。

参考文献

- [1] 蒲清平, 李百战, 喻伟. 重庆城市居住建筑能耗预测模型[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1551
PU Qingping, LI Baizhan, YU Wei. Energy consumption forecast model of urban residential buildings in Chongqing[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(4): 1551
- [2] ZHENG Zhixin, LI Junqing. Optimal chiller loading by improved invasive weed optimization algorithm for reducing energy consumption[J]. Energy and Buildings, 2018, 161: 80. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.12.020
- [3] MU Baojie, LI Yaoyu, HOUSE J M, et al. Real-time optimization of a chilled water plant with parallel chillers based on extremum seeking control[J]. Applied Energy, 2017, 208: 766. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.072
- [4] FANG Xing, JIN Xinqiao, DU Zhimin, et al. Evaluation of the design of chilled water system based on the optimal operation performance of equipments[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 113: 435. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.11.053
- [5] CHANG Yungchung. A novel energy conservation method-optimal chiller loading[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 69(2/3): 221. DOI: 10.1016/j.epsr.2003.10.012
- [6] CHANG Yungchung. Genetic algorithm based optimal chiller loading for energy conservation[J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(17/18): 2800. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2005.02.010
- [7] CHANG Yungchung, LIN Juikun, CHUANG Menghsuan. Optimal chiller loading by genetic algorithm for reducing energy consumption[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(2): 147. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.06.002
- [8] LEE Wensheng, LIN Lungchieh. Optimal chiller loading by particle swarm algorithm for reducing energy consumption[J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8): 1730. DOI: 10.16/j.applthermaleng.2008.08.004
- [9] LEE Wensheng, CHEN Yiting, KAO Yucheng. Optimal chiller loading by differential evolution algorithm for reducing energy consumption[J]. Energy and Buildings, 2011, 43(2): 599. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.10.028
- [10] YU Junqi, LIU Qite, ZHAO Anjun, et al. Optimal chiller loading in HVAC system using a novel algorithm based on the distributed framework[J]. Journal of Building Engineering, 2020, 28: 101044. DOI: 10.1016/j.job.2019.101044
- [11] OLSZEWSKI P. Genetic optimization and experimental verification of complex parallel pumping station with centrifugal pumps[J]. Applied Energy, 2016, 178(9): 527. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.084
- [12] 于军琪, 张瑞, 赵安军, 等. 中央空调系统并联水泵节能优化群智能控制算法[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(10): 2155
YU Junqi, ZHANG Rui, ZHAO Anjun, et al. Energy saving optimization insect intelligent control algorithm for parallel pumps in central air-conditioning system[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(10): 2155. DOI: 10.7641/CTA.2020.90543
- [13] DENG Jiewen, HE Shi, WEI Qingpeng, et al. Research on systematic optimization methods for chilled water systems in a high-rise office building[J]. Energy and Buildings, 2020, 209: 109695. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.109695
- [14] YU Fuwing, CHAN Kwoktni. Energy signatures for assessing the energy performance of chillers[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(7): 739. DOI: 10.1016/j.enbuild.2004.10.004
- [15] DAI Yunchuang, JIANG Ziyang, SHEN Qi, et al. A decentralized algorithm for optimal distribution in HVAC systems[J]. Building and Environment, 2016, 95: 21. DOI: 10.1016/j.buildenv.2015.09.007
- [16] 杜佳敏, 李舒宏, 李新美. 基于 ResNet-GWO 的冷源系统节能优化[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(5): 866
DU Jiaming, LI Shuhong, LI Xinmei. Energy-saving optimization of cooling system based on ResNet-GWO[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(5): 866. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.05.011
- [17] SOUTHARD L E, LIUXiaobin, SPITLER J D. Performance of HVAC systems at ASHRAE HQ[J]. ASHRAE Journal, 2014, 56(12): 12
- [18] WANG Shiqiang, XING Jianchun, JIANG Ziyang, et al. Decentralized optimization algorithms for variable speed pumps operation based on local interaction game[J]. Journal of Control Science and Engineering, 2018, 39(6): 67. DOI: 10.1155/2018/5468398
- [19] HOUYEM H B, TOUNSI J, BACHOUCH R B. An artificial immune algorithm for HHC planning based on multi-agent system[J]. Procedia Computer Science, 2019, 164: 251. DOI: 10.1016/j.procs.2019.12.180
- [20] DENG Liyuan, YANG Ping, LIU Weidong. Artificial immune network clustering based on a cultural algorithm[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2020, 1: 128. DOI: 10.1186/s13638-020-01779-1
- [21] 张卫祥, 齐玉华. 基于人工免疫算法的软件输出域覆盖测试[J]. 南京大学学报(自然科学), 2018, 54(4): 742
ZHANG Weixiang, QI Yuhua. Software testing for output domain coverage based on artificial immune algorithm[J]. Journal of Nanjing University(Natural Science), 2018, 54(4): 742. DOI: 10.13232/j.cnki.jnju.2018.04.009
- [22] 高阳阳, 陈双艳, 余敏建, 等. 改进人工免疫算法的多机协同空战目标分配方法[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(2): 354
GAO Yangyang, CHEN Shuangyan, YU Minjian, et al. Target allocation method of multi-aircraft cooperative air combat based on improved artificial immune algorithm[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(2): 354. DOI: 10.1051/jnwpu/20193720354
- [23] LAKSHMIA K, VASANTHARATHNAB S. Gencos wind-thermal scheduling problem using artificial immune system algorithm electrical[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 112. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.06.036