

基于改进粒子群算法的中央空调系统 节能优化控制

杨 秀¹, 刘欣雨¹, 孙改平¹, 田英杰²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200080)

摘 要: 建筑的中央空调系统等设备用电能源消耗大, 导致建筑能耗持续增长。为解决上述问题, 首先根据中央空调工作原理, 建立中央空调系统各设备能耗的数学模型, 并选取决策变量; 然后以中央空调系统总能耗最小为目标, 以各变量上下限、设备之间的耦合关系、能量守恒等作为约束条件, 建立中央空调系统节能优化模型; 其次, 将室内实时所需冷负荷与室内设定温度作为已知量, 各决策变量作为输入量, 中央空调系统总能耗作为输出量, 降低模型的复杂程度; 接着提出一种基于动态权重系数与加速因子的改进粒子群算法 (IPSO), 对各决策变量进行协同优化控制, 搜寻中央空调系统节能优化模型的最优解; 最后, 通过仿真分析对比 IPSO 与标准粒子群算法, IPSO 结果更优、收敛性更好, 优化后的空调系统总能耗较优化前显著降低, 验证了所提模型与方法的有效性。

关 键 词: 中央空调; 节能优化; 协同控制; 改进粒子群算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.007 中图分类号: TM925 文章编号: 1673-9140(2023)03-0065-11

Energy-saving optimization control of central air-conditioning system based on improved particle swarm algorithm

YANG Xiu¹, LIU Xinyu¹, SUN Gaiping¹, TIAN Yingjie²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200082, China; 2. State Grid Shanghai Electrical Power Research Institute, Shanghai 200080, China)

Abstract: The central air conditioning system and other equipment in buildings consume a large amount of electrical energy, leading to the continuous increase in energy consumption in the construction sector in our country. To address the above-mentioned issue, firstly, a mathematical model is established for the energy consumption of each equipment in the central air conditioning system based on its working principle, and the decision variables are selected. Then, with the objective of minimizing the total energy consumption of the central air conditioning system, an energy-saving optimization model for the central air conditioning system is established, taking into account the constraints such as variable bounds, coupling relationships between equipment, and energy conservation principles. Next, the real-time indoor cooling load and the set temperature are taken as known values, while the decision variables are taken as input variables, and the total energy consumption of the central air conditioning system is taken as the output variable to reduce the complexity of the model. Subsequently, an improved particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed based on dynamic weight coefficients and acceleration factors. The method achieves collaborative optimal control of the decision variables to search for the optimal solution of the energy-saving optimization model for the central air conditioning system. Finally, the ISPO

收稿日期: 2021-05-06; 修回日期: 2021-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51807114)

通信作者: 刘欣雨 (1997—), 女, 硕士研究生, 主要从事综合能源系统、需求侧响应等研究; E-mail: 1355961333@qq.com

algorithm is compared with the standard particle swarm optimization algorithm through simulation analysis. The results show that IPSO achieves superior performance and better convergence. The optimized total energy consumption of the air conditioning system is significantly reduced compared to the pre-optimized state, thus validating the effectiveness of the proposed model and method.

Key words: central air-conditioning; energy saving optimization; collaborative control; improved particle swarm algorithm

随着中国经济高速化发展,城市中建筑规模不断扩大,中央空调系统作为建筑主要耗能设备之一,其用电在城市用电中占很大比例^[1]。为响应“双碳”目标^[2],对中央空调系统进行节能优化控制策略研究,可以大大降低其自身能耗,能很好地实现降低空调运行费用、节能减排的目的。

目前对于空调系统的优化控制研究主要针对分体式空调,分体式空调建模包括空调所属建筑物的热力学建模与空调机组的电热转化2个部分,前者最常用的模型为等效热参数(equivalent thermal parameter,ETP)模型,适用于居民或小型商业建筑建模^[3-4];后者是指电与制冷量的转化关系,与压缩机有关^[5]。而对于大型中央空调而言,其制冷量除了与压缩机有关以外,还与空调系统本体各设备有关。为了实现对空调系统的优化调控,需要对其建立适用的模型。文献[6]对中央空调终端室内温度变化进行建模,提出了一种局部终端温度调节的控制策略。文献[7]在文献[6]的基础上提出了弹性温度可调裕度概念,并提出一种新型的中央空调集群需求响应双层优化控制策略。文献[8]基于等效热参数模型与状态队列模型,提出一种改进温度调节方法,对空调集群中的个体进行设定温度上下限的分离控制。文献[9]引入离散傅里叶变换概念,对负荷进行分类,提出一种基于DFT负荷分类的温度控制策略。文献[10]结合温度控制与启停控制,设计多个室内温度设定点的可调整的温度方案,并且以节能效果最佳为目标进行建模。以上文献在建立空调机组电热转化模型时,未考虑中央空调内部能量转换情况,所建模型较为简单,无法真实反映中央空调的电热转换,并且最终都是对室内温度进行控制,可控变量单一,无法对中央空调进行精准调控。

在实际的工程应用中,中央空调的电热转换模型涉及众多设备,如送风系统的风机设备与水系统的冷冻水泵、制冷机、冷却水泵与冷却塔等设备,各

循环之间会进行能量转换,可控变量更多,相应的空调系统的建模也会更加复杂,其模型复杂度主要表现在设备之间的耦合、多个变量以及多个约束等方面^[11]。已往关于中央空调系统节能优化的研究,通常是在对空调系统各个设备进行建模之后,再确定决策变量,然后建立优化模型,通过智能优化算法对模型进行求解,最后制定相应的控制策略^[12-13]。文献[14]采用改进粒子群算法计算出空调水系统在不同冷负荷下的最佳运行工况,确保空调系统始终在最佳工况下运行,实现空调水系统节能的目的。文献[15-16]提出改进并行粒子群算法与分布式概率估计算法分别对空调系统中的冷却水系统与冷冻水泵进行节能优化控制。文献[17]提出采用深度确定性策略梯度算法对传统冷源系统进行节能优化控制,在满足流量需求的同时做到能耗最小。

上述研究对于中央空调系统的节能优化研究提供了可靠的方向与方法,但均是对水系统中的设备进行控制。文中将包含送风系统与水系统的中央空调系统作为研究对象,分别建立送风机、冷冻水泵、制冷机、冷却水泵和冷却塔的能耗模型,并将送风温度、冷冻水供回水温差等多运行参数作为优化决策变量,以中央空调系统总能耗最小为目标,并对粒子群算法的惯性权重系数以及加速因子做动态改进,提出一种基于改进粒子群算法的中央空调系统节能优化模型,进一步挖掘中央空调系统的节能潜力。以上海某栋办公建筑为例,进行仿真分析,验证所提策略与方法的有效性与可行性。

1 中央空调工作原理

将包含送风机、冷冻水泵、制冷机、冷却水泵、冷却塔以及表冷器的中央空调系统作为研究对象。对中央空调系统进行建模之前,首先需要了解中央

空调的工作原理^[18],如图 1 所示。其工作过程就是通过各设备不停地进行各个换热循环,将热量不断地从室内转移到室外的过程。

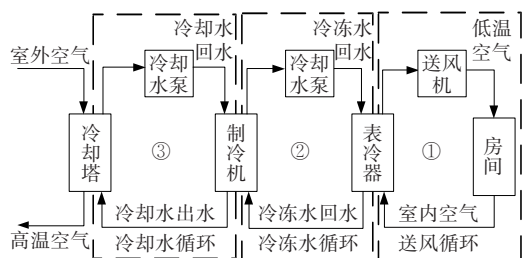


图 1 中央空调工作原理

Figure 1 Central air-conditioning working principle

1) 送风循环:中央空调工作过程中,通过送风机将冷却的低温空气送入室内,降低室内温度。室内热量由高温空气带到表冷器中,再通过冷冻水循环,由冷冻水带走高温空气中的热量,此时冷冻水回水温度会上升。

2) 冷冻水循环:冷冻水由制冷机提供,冷冻水因为吸收热量,回水温度上升,在制冷机内冷冻水与冷却水实现热量转换,冷却水出水温度会上升,冷冻水温度会下降,继续进行下一个循环。

3) 冷却水循环:冷却水由冷却塔提供,冷却水因与冷冻水进行热量交换而使得冷却水出水温度升高,其在冷却塔内同外界空气实现热量交换,实现冷却水回水温度降低,进而再进入下一个循环。

2 中央空调各设备能耗数学模型

根据中央空调工作原理,分别搭建中央空调系统各设备能耗数学模型。

2.1 风机模型

风机的能耗与送风量有关,其能耗模型如下:

$$P_{fan} = \frac{\eta_a m_{a,N}}{\alpha_{fan} \rho_{air}} \quad (1)$$

$$\eta_a = a_1 + b_1 \beta_a + c_1 \beta_a^2 + d_1 \beta_a^3 + e_1 \beta_a^4 \quad (2)$$

$$\beta_a = \frac{m_a}{m_{a,N}} \quad (3)$$

$$m_a = \frac{Q_s}{1.01(T_N - T_s)} \quad (4)$$

$$\Delta T_{fan} = \frac{P_{fan}}{1.01 m_a} \quad (5)$$

式(1)~(5)中, P_{fan} 为风机功率,kW; η_a 为部分负荷因数; α_{fan} 为风机总效率; ρ_{air} 为空气密度; $m_{a,N}$ 为风机额定流量,kg/s; $a_1 \sim e_1$ 为风机特性拟合系数; β_a 为风机部分负荷率; m_a 为风机实际风量,kg/s; Q_s 为室内冷负荷,kW; T_N 为室内设定温度,°C; T_s 为送风温度,°C,1.01表示干空气定压比热,kJ/(kg·°C); ΔT_{fan} 为风机送风温升,°C。

风机功率由送风流量确定,由式(4)可知,在室内冷负荷与室内设定温度已知的情况下,送风温度的变化会引起送风流量的变化,故选取送风温度作为后续模型中的决策变量。

2.2 冷冻水泵模型

冷冻水泵的运行功率与冷冻水流量有关,其能耗模型如下:

$$P_e = \eta_e P_{e,N} \quad (6)$$

$$\eta_e = a_2 + b_2 \beta_e + c_2 \beta_e^2 + d_2 \beta_e^3 \quad (7)$$

$$\beta_e = \frac{m_e}{m_{e,N}} \quad (8)$$

$$m_e = \frac{1.01 m_a (T_1 - T_2)}{C_p \Delta T_e} \quad (9)$$

式(6)~(9)中, P_e 为冷冻水泵功率,kW; η_e 为冷冻水泵部分负荷因数; $P_{e,N}$ 为冷冻水泵额定功率; $a_2 \sim d_2$ 为冷冻水泵特性拟合系数; β_e 为冷冻水泵部分负荷率; m_e 为冷冻水流量,kg/s; $m_{e,N}$ 为冷冻水泵额定功率,kg/s; T_1 为表冷器进风温度,°C; T_2 为表冷器出风温度,°C; C_p 为水的比热,kJ/(kg·°C); ΔT_e 为冷冻水供回水温差,°C。

冷冻水泵功率由冷冻水流量实时确定,由式(9)可知,冷冻水供回水温差会引起冷冻水流量的改变,故选取冷冻水供回水温差作为后续模型中的决策变量。

2.3 制冷机模型

制冷机提供系统所需冷量,其模型可根据 3 条性能曲线 η_{ch1} 、 η_{ch2} 、 η_{ch3} 来描述,其能耗模型如下:

$$P_{ch} = \frac{Q_{avail}}{C_{COP,N}} \eta_{ch2} \eta_{ch3} \quad (10)$$

$$Q_{avail} = Q_N \eta_{ch1} \quad (11)$$

式(10)、(11)中, P_{ch} 为制冷机功率,kW; Q_{avail} 为制冷机可用冷量,kW; $C_{COP,N}$ 为制冷机额定能效比; Q_N 为

制冷机额定冷量, kW; η_{ch1} 表示冷量随温度变化的关系曲线; η_{ch2} 表示 E_{EIR} 和温度的关系曲线, E_{EIR} 为轴功率和制冷量的比值, 定义为能效比的倒数, 均随冷冻水出水温度和冷却水回水温度变化; η_{ch3} 表示 E_{EIR} 和部分负荷率的关系曲线, 如下:

$$\eta_{\text{ch1}} = a_3 + b_3 T_{\text{eo}} + c_3 T_{\text{eo}}^2 + d_3 T_{\text{ci}} + e_3 T_{\text{ci}}^2 + f_3 T_{\text{eo}} T_{\text{ci}} \quad (12)$$

$$\eta_{\text{ch2}} = a_4 + b_4 T_{\text{eo}} + c_4 T_{\text{eo}}^2 + d_4 T_{\text{ci}} + e_4 T_{\text{ci}}^2 + f_4 T_{\text{eo}} T_{\text{ci}} \quad (13)$$

$$\eta_{\text{ch3}} = a_5 + b_5 \beta_{\text{ch}} + c_5 \beta_{\text{ch}}^2 \quad (14)$$

$$\beta_{\text{ch}} = \frac{Q_e}{Q_{\text{avail}}} \quad (15)$$

$$Q_e = C_p m_e \Delta T_e \quad (16)$$

式(12)~(16)中, $a_3 \sim f_3$ 、 $a_4 \sim f_4$ 、 $a_5 \sim c_5$ 分别为3条性能曲线的特性拟合系数; T_{eo} 为制冷机冷冻水出水温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{ci} 为冷却水回水温度, $^{\circ}\text{C}$; β_{ch} 表示制冷机部分负荷率; Q_e 为制冷机制冷量, kW。

由制冷机模型可知, 制冷功率会因为冷冻水出水温度与冷却水回水温度的改变而改变, 故选取冷冻水出水温度和冷却水回水温度作为后续模型中的决策变量。

2.4 冷却水泵与冷却塔模型

冷却水泵采用定频水泵, 且冷却水泵与冷却塔消耗的功率较小, 为了降低模型的复杂程度, 将冷却水泵功率与冷却塔功率做简化处理, 均取额定功率, 如下:

$$P_c = P_{c,N} \quad (17)$$

$$P_{\text{ct}} = P_{\text{ct},N} \quad (18)$$

式(17)~(18)中, P_c 为冷却水泵功率, kW; $P_{c,N}$ 为冷却水泵额定功率, kW; P_{ct} 为冷却塔功率, kW; $P_{\text{ct},N}$ 为冷却塔额定功率, kW。

2.5 表冷器全热效率模型

表冷器将空气循环与冷冻水循环联系起来, 不产生功率消耗, 对其效率模型进行描述, E_g 表示表冷器的全热交换效率:

$$E_g = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{\text{eo}}} \quad (19)$$

式中, T_2 为表冷器出风温度, 若不考虑管道温升, 则 $T_2 = T_{\text{so}}$ 。考虑到风机温升的影响, T_1 可计算如下:

$$T_1 = T_N + \Delta T_{\text{fan}} \quad (20)$$

3 中央空调系统节能优化模型

3.1 目标函数

基于前文建立的空调系统各设备能耗模型, 文中的优化目标为在满足冷负荷需求的情况下, 空调系统总能耗最小, 其目标函数如下:

$$\min P = \min(P_{\text{fan}} + P_e + P_{\text{ch}} + P_c + P_{\text{ct}}) \quad (21)$$

3.2 约束条件

将送风温度、冷冻水供回水温差、冷冻水出水温度以及冷却水回水温度等运行参数作为模型的优化决策变量。由于设备之间的耦合关系, 各变量应满足以下等式与不等式约束。

1) 风机约束。

$$T_{\text{Smin}} \leq T_s \leq T_{\text{Smax}} \quad (22)$$

$$m_{\text{amin}} \leq m_a \leq m_{\text{amax}} \quad (23)$$

式(22)~(23)中, T_{Smin} 、 T_{Smax} 分别表示送风温度的下限和上限, $^{\circ}\text{C}$; m_{amin} 、 m_{amax} 分别表示送风流量的下限和上限, kg/s。

2) 冷冻水泵约束。

$$\Delta T_{\text{emin}} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{\text{emax}} \quad (24)$$

$$m_{\text{emin}} \leq m_e \leq m_{\text{emax}} \quad (25)$$

式(24)~(25)中, ΔT_{emin} 、 ΔT_{emax} 分别表示冷冻水供回水温差的 下限和上限, $^{\circ}\text{C}$; m_{emin} 、 m_{emax} 分别表示冷冻水流量的 下限和上限, kg/s。

3) 制冷机约束。

$$T_{\text{eomin}} \leq T_{\text{eo}} \leq T_{\text{eomax}} \quad (26)$$

$$T_{\text{cimmin}} \leq T_{\text{ci}} \leq T_{\text{cimmax}} \quad (27)$$

式(26)~(27)中, T_{eomin} 、 T_{eomax} 分别表示冷冻水出水温度的 下限和上限, $^{\circ}\text{C}$; T_{cimmin} 、 T_{cimmax} 分别表示冷却水回水温度的 下限和上限, $^{\circ}\text{C}$ 。

4) 能量守恒约束。

空调系统制冷机制冷量应与散热量相等:

$$Q_e = C_p m_e (T_{\text{ei}} - T_{\text{eo}}) \quad (28)$$

$$Q_c = Q_e + P_{\text{ch}} \quad (29)$$

$$Q_c = C_p m_c (T_{\text{co}} - T_{\text{ci}}) \quad (30)$$

式(28)~(30)中, T_{ei} 为冷冻水回水温度, $^{\circ}\text{C}$; Q_c 为空调系统散热量, kW; T_{co} 为冷却水出水温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

出于设备安全考虑, 空调的冷冻水供回水温差

与冷却水供回水温差不能太大,因此需要对冷冻水回水温度和冷却水出水温度进行约束,有:

$$T_{ei\min} \leq T_{ei} \leq T_{ei\max} \quad (31)$$

$$T_{co\min} \leq T_{co} \leq T_{co\max} \quad (32)$$

式(31)~(32)中, $T_{ei\min}$ 、 $T_{ei\max}$ 分别表示冷冻水回水温度的下限和上限, $^{\circ}\text{C}$; $T_{co\min}$ 、 $T_{co\max}$ 分别表示冷却水出水的下限和上限, $^{\circ}\text{C}$ 。

5) 表冷器全热交换效率约束。

$$E_{g\min} \leq E_g \leq E_{g\max} \quad (33)$$

式中, $E_{g\min}$ 、 $E_{g\max}$ 分别表示表冷器全热交换效率的下

限和上限。

3.3 系统节能优化模型

本文搭建的空调系统节能优化模型如图 2 所示,输入量为室内已知实时冷负荷与室内设定温度,输出量为空调系统总能耗。本文的目标就是在满足室内实时冷负荷需求的前提下,协同控制送风温度、冷冻水供回水温差、冷冻水出水温度和冷却水回水温度等 4 个决策变量,最小化中央空调系统总能耗,并采用改进粒子群算法对模型进行求解。

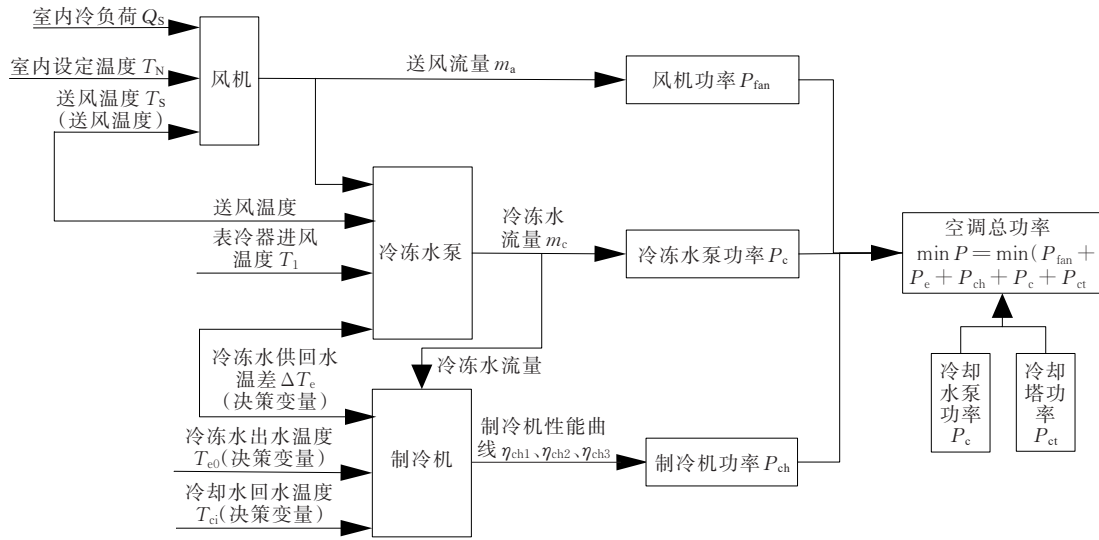


图 2 中央空调系统节能优化模型

Figure 2 Energy-saving optimization model of central air-conditioning system

4 基于改进粒子群算法的优化方法

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法是一种基于随机初始解的智能优化算法^[19],该算法流程简单且参数少,相比于其他算法较易实现。粒子通过自身与群体中的寻优经验来更新下一步的速度与位置,如下:

$$v_{id} = \omega v_{id} + c_1 r_1 (P_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (G_{id} - x_{id}) \quad (34)$$

$$x_{i(d+1)} = x_{id} + v_{id} \quad (35)$$

式(34)~(35)中, d 为空间的维度,即变量的个数; i 为粒子的个数; v_{id} 、 x_{id} 分别为第 i 个粒子的速度和的位置; P_{id} 为第 i 个粒子的局部最优位置, G_{id} 为粒子群的全局最优位置; ω 为惯性权重系数, c_1 、 c_2 为加速因子,通常取 2, r_1 、 r_2 为 0 到 1 之间的随机数。

大量实验证明惯性权重系数 ω 的值较大时,粒子的全局搜寻能力较强,较小时局部搜寻能力较强;加速因子 c_1 的值过大,粒子容易在局部位置停留, c_2 值过大,则容易陷入局部最优^[20]。为了改善这些问题, ω 与 c_1 、 c_2 值的选取很重要。故文中对 ω 与 c_1 、 c_2 的值进行动态调整,提出一种随种群动态调惯性权重系数与加速因子的改进粒子群(improved particle swarm optimization, IPSO)算法,在粒子群迭代早期阶段能够较快地在全局范围内搜寻,在后期能精准地找到全局最优位置。改进的 ω 和 c_1 、 c_2 为

$$\omega(j) = \omega_{\max} (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \frac{(T_{\max} - j)}{T_{\max}} \quad (36)$$

$$c_1(j) = c_{11} - (c_{11} - c_{12}) \times (j/T_{\max}) \quad (37)$$

$$c_2(j) = c_{21} + (c_{22} - c_{21}) \times (j/T_{\max})$$

式(36)~(37)中, ω_{\max} 、 ω_{\min} 分别为 ω 的最大值与最

小值; j 为当前迭代次数; T_{\max} 为最大迭代次数; c_{11} 、 c_{12} 和 c_{22} 、 c_{21} 分别为 c_1 、 c_2 的最大值与最小值。

将式(36)、(37)代入到式(34)中,可以得到改进的粒子速度更新公式:

$$v_{id} = \omega(j)v_{id} + c_1(j)r_1(P_{id} - x_{id}) + c_2(j)r_2(G_{id} - x_{id}) \quad (38)$$

采用IPSO对文中所搭建的空调系统能耗模型进行优化求解,求解流程如图3所示。

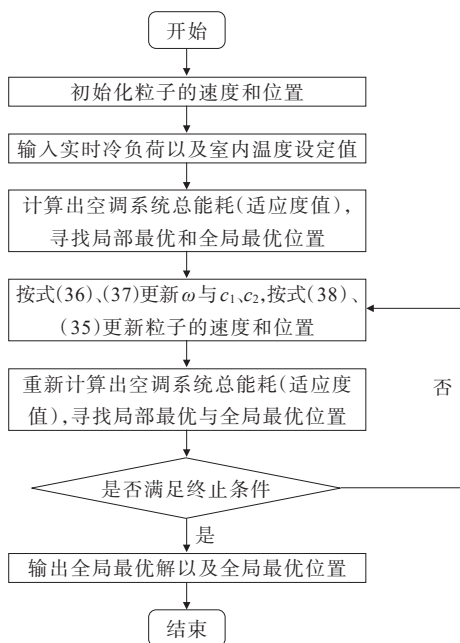


图3 IPSO求解模型流程

Figure 3 IPSO solving model flow chart

5 仿真分析

5.1 算例描述

以上海市某栋典型办公建筑为例,建筑面积为 8361 m^2 ,工作时间是7:00—18:00,其夏季某日室内设定温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,根据中央空调所属建筑物瞬时得热量公式^[21]计算出保持室内温度恒定所需实时冷负荷预测值如图4所示。空调制冷机采用电制冷方式,制冷机额定制冷量为 721 kW ,额定能效比为6.04,送风机最大送风流量为 $40.64\text{ m}^3/\text{s}$,冷冻水泵额定功率为 7.93 kW ,冷却水泵额定功率为 9.17 kW ,冷却塔额定功率为 8.82 kW 。

此时该建筑空调各设备运行参数如下:送风温度 T_s 为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷冻水供回水温差 ΔT_e 为 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷冻水出水温度 T_{e0} 为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷却水回水温度 T_{ci} 为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,各

设备运行参数未进行协同优化前对应的空调系统各设备能耗以及总能耗如图5所示。

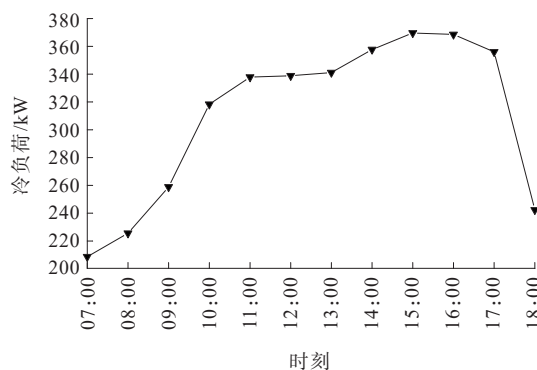


图4 室内日实时冷负荷预测

Figure 4 Real-time prediction of daily indoor cooling load

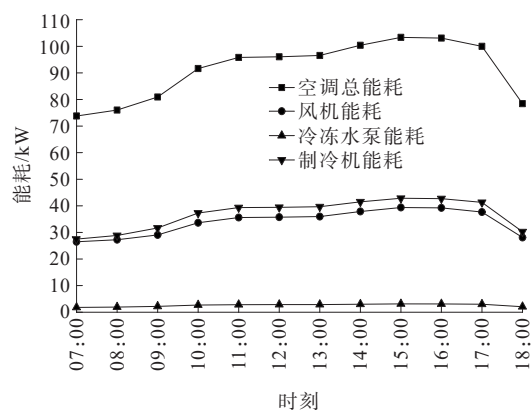


图5 协同优化前空调系统整体能耗

Figure 5 Overall energy consumption of the air conditioning system before co-optimization

5.2 影响空调系统能耗的主要变量分析

文中需要控制的变量为 T_s 、 ΔT_e 、 T_{e0} 和 T_{ci} 。选取下午2:00的工况,只改变其中一个变量,分析此时各决策变量对空调能耗的影响。采用灵敏度分析方法来分析各时段各决策变量对空调系统总能耗的影响程度。

1) 各变量对空调系统能耗的影响。

图6为改变单决策变量而其他变量保持不变时,空调系统各设备能耗与总能耗的变化。由图6可知,减小风机的送风温度,增大冷冻水供回水温差,增大冷冻水出水温度以及减小冷却水回水温度,均能达到减小空调系统的总能耗的目的。由此可知,一个设备达到最优运行状态时,整个系统的运行状态可能不是最优的,系统仍有进一步节能优化的空间。

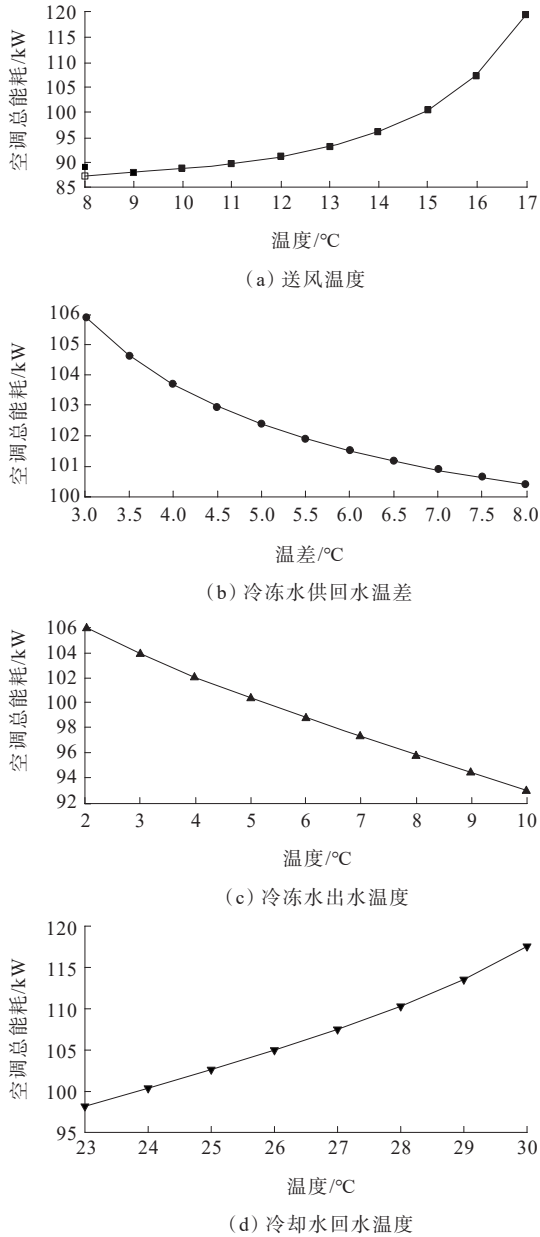


图 6 各决策变量变化时空调系统总能耗

Figure 6 Total energy consumption of air-conditioning system when each decision variable changes

2) 灵敏度分析。

灵敏度分析是研究与分析一个系统(或模型)的状态或输出变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度的方法^[22]。运用灵敏度分析方法可以体现文中 4 个变量对空调系统总能耗的影响程度,用公式定义为

$$\Delta P = \left| \frac{P_{\delta} - P_0}{P_0} \right| \times 100\% \quad (39)$$

式中, ΔP 为空调系统总能耗灵敏度,用百分数表示; P_0 为常规控制策略下的总能耗; P_{δ} 为决策变量增量为 δ 时空调系统的总能耗,这里 δ 取 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。不同时段下

各决策变量对应空调系统总能耗灵敏度如图 7 所示。

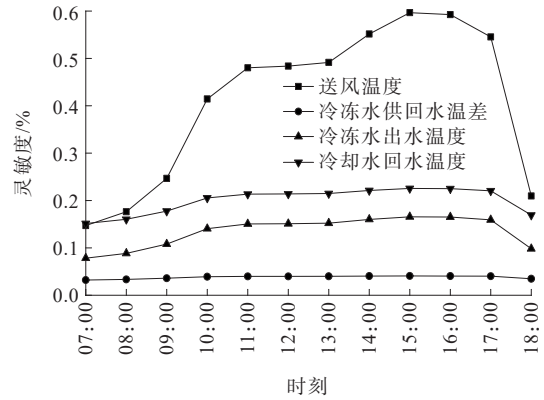


图 7 空调系统总能耗灵敏度

Figure 7 Total energy consumption sensitivity of air conditioning system

由图 7 可知,冷冻水供回水温差对空调系统总能耗影响最小,送风温度对其影响最大,冷冻水出水温度与冷却水回水温度对其影响程度较大。

5.3 基于 IPSO 的协同优化控制策略

根据搭建的空调系统能耗模型,考虑多变量协同作用,采用 IPSO 方法对模型进行优化求解,算法各个参数值的设置如表 1 所示。

表 1 IPSO 参数设置

Table 1 IPSO parameter setting

符号	说明	取值
c_{11}, c_{22}	加速因子 c_1, c_2 的最大值	2
c_{12}, c_{21}	加速因子 c_1, c_2 的最小值	0.5
ω_{\max}	惯性权重 ω 的最大值	0.9
ω_{\min}	惯性权重 ω 的最小值	0.4
T_{\max}	最大迭代次数	250
s_{pop}	种群规模	200
v_{\max}	速度最大值	1
v_{\min}	速度最小值	-1

空调系统能耗与各设备能耗如图 8 所示,结合图 4 可知,当系统所需冷负荷增加时,空调系统各设备能耗几乎也呈现递增趋势,然而增长的趋势不完全相同。风机与制冷机能耗占比大,因此增长的趋势较快,增长的幅度也较大。冷冻水泵能耗占比小,增长的趋势较慢,增长的幅度也较小。然而最终无论空调系统对应各设备运行参数如何变化,空调系统的总能耗都会随着室内冷负荷需求增加而稳定上升。

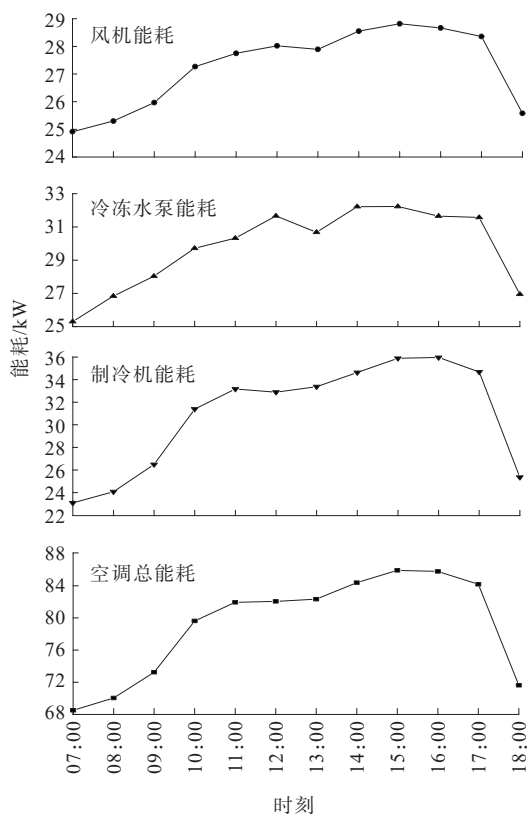


图8 协同优化控制下空调系统整体能耗

Figure 8 Overall energy consumption of air-conditioning system under collaborative optimal control

图9为IPSO算法得到的空调系统最优运行策略。由图9可知,当系统冷负荷需求增加时,制冷机需要增加制冷量,而冷却水回水温度一直保持在 23°C ,因此冷冻水出水温度会降低,制冷机能耗会增加。为了减小空调系统总能耗,送风温度会降低,冷冻水供回水温差会增大,以此在满足冷负荷需求的前提下最大限度降低空调系统总能耗。

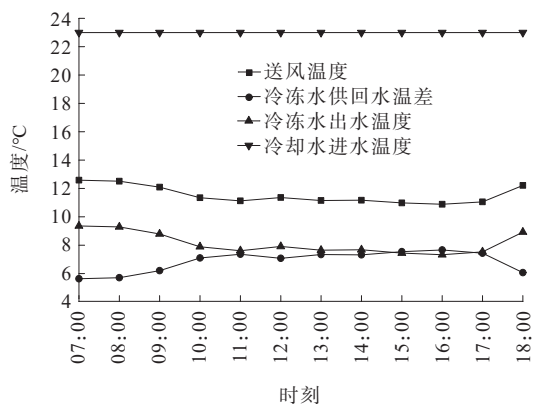


图9 空调系统最优运行策略

Figure 9 Optimal operation strategy of the air-conditioning system

5.4 IPSO算法的最优解校核

对于文5.3采用IPSO算法求解的最优解,为了评估设备在该工作状态运行时能耗是否最低,选取下午2:00时的冷负荷需求状态,其最优解如表2所示,分别改变各设备的工作点,其他设备同时进行协同优化,然后将优化后的空调总功率与文5.2的单决策变量控制下的结果进行比较,并与表2中的最优解进行比较,如图10所示,进一步验证文5.3所求得最优解是否为空调的最优工况点。

表2 下午2:00时的各设备运行参数最优解

Table 2 Optimal solution for each equipment operating parameter at 2:00 PM

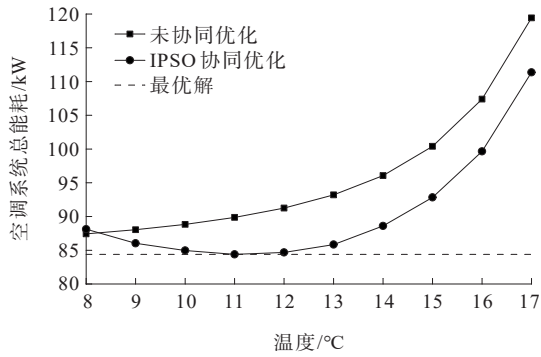
冷负荷需求状态	单位	最优解
送风温度	$^{\circ}\text{C}$	11.12
冷冻水供回水温差	$^{\circ}\text{C}$	7.38
冷冻水出水温度	$^{\circ}\text{C}$	7.61
冷却水进水温度	$^{\circ}\text{C}$	23.00
空调总功率	kW	84.387

由图10可知,单决策变量控制下的空调系统总能耗都高于协同优化控制方法下的空调系统总能耗,因此文中所提的IPSO协同优化控制方法有更好的节能效果。并且从图10与表2中的最优解比较可知,送风温度在 $11.0\sim 11.5^{\circ}\text{C}$ 、冷冻水供回水温差在 $7.0\sim 7.5^{\circ}\text{C}$ 、冷冻水出水温度在 $7.0\sim 8.0^{\circ}\text{C}$ 以及冷却水进水温度在 23.0°C 时,空调系统总能耗最小,由表2可知,各变量最优解均在以上区间内,因此也进一步验证了IPSO算法的准确性。

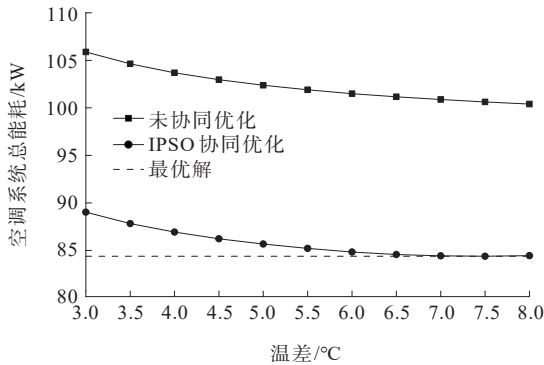
5.5 节能效果分析

1) IPSO、PSO算法性能对比。

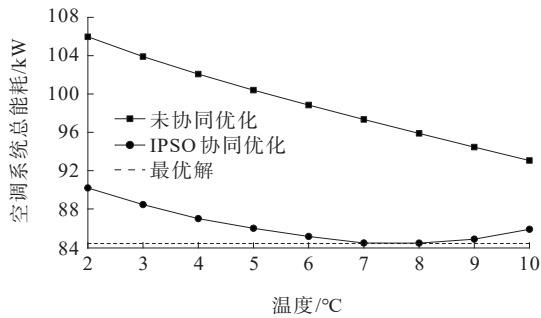
表3为采用PSO算法(惯性权重取0.9,加速因子均取2)与文中所提IPSO算法下几个工况的能耗结果对比。由表3可知,IPSO算法结果更优。图11为采用PSO与IPSO算法对上午9:00与下午2:00时的工况进行求解的收敛曲线。从图11中可知,IPSO算法在20代以内便能找到最优结果,而PSO算法却要在近100代才能找到最优结果,因此本文所提IPSO算法具有更好的收敛性。



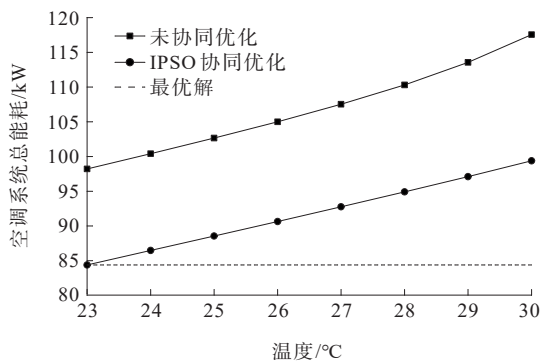
(a) 送风温度



(b) 冷冻水供回水温差



(c) 冷冻水出水温度



(d) 冷却水回水温度

图 10 IPSO 最优解校核

Figure 10 IPSO optimal solution calibration

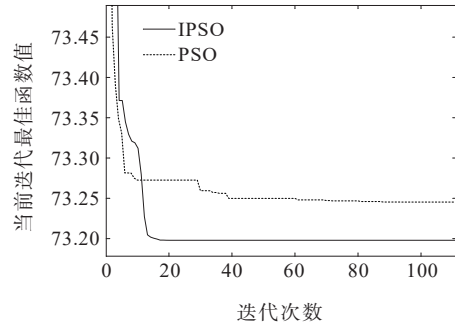
2) IPSO 算法下节能效果分析。

将 IPSO 优化后与协同优化前的空调系统能耗与各设备能耗相比,并对节能效果进行分析,如图 12

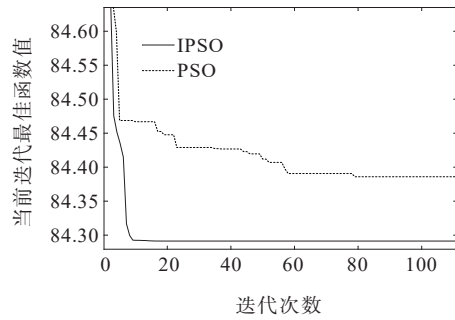
表 3 IPSO、PSO 算法下能耗对比

Table 3 Comparison of energy consumption under IPSO and PSO optimization methods kW

时刻	IPSO 能耗	PSO 能耗	节能
09:00	73.19	73.25	0.06
12:00	81.97	82.06	0.09
14:00	84.29	84.39	0.10
16:00	85.68	84.79	0.11



(a) 09:00 时的冷负荷需求



(b) 14:00 时的冷负荷需求

图 11 PSO 与 IPSO 收敛曲线对比

Figure 11 PSO and IPSO convergence curve

所示。可知,采用 IPSO 优化后的空调系统运行总能耗明显降低,能达到一定的节能效果。优化后的风机能耗减小,且变化幅度也较小,变化趋势比较平滑,有利于设备的安全运行;制冷机是空调系统中耗能较大的设备,优化后的制冷机能耗不仅有所下降,且变化趋势和空调系统总能耗的变化趋势一致;而优化后冷冻水泵能耗却有所升高,这是因为其能耗占比小,故会牺牲其节能空间来达到空调系统总能耗最小的目的。

图 13 为优化后空调系统总能耗较优化前减少的能耗。由图 13 可知,优化后的空调系统小时能耗可以节省约 7.16%~16.87%,日平均用电节能率可达 13% 左右。从整个中央空调系统来看,采用 IPSO 优化后的中央空调系统节能效果显著。

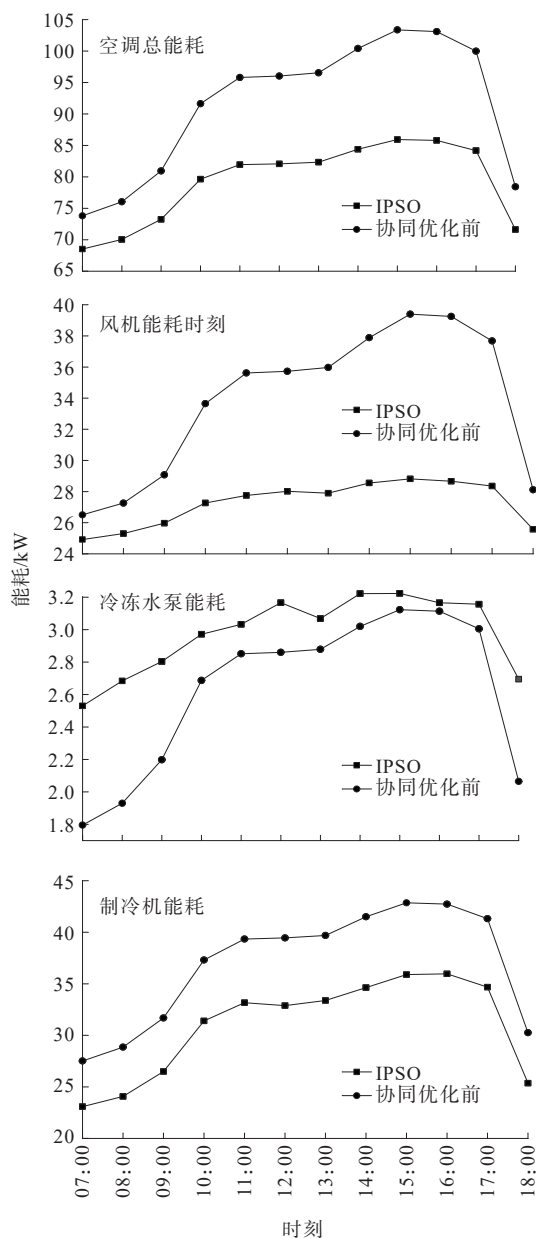


图12 协同优化前后整体能耗对比

Figure 12 Comparison of overall energy consumption before and after co-optimization

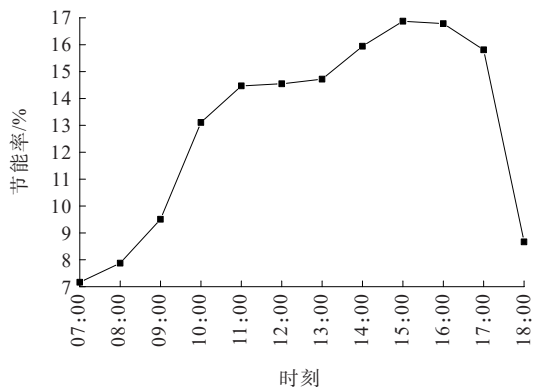


图13 协同优化后空调系统节能率

Figure 13 Energy saving rate of air conditioning system after synergistic optimization

6 结语

根据构建的空调系统各设备能耗模型,建立了以空调系统总能耗最小为目标的节能优化模型。在满足室内实时冷负荷的需求下,采用IPSO算法搜寻各设备的最佳运行参数,使得空调系统的运行能耗最低。以上海某栋办公建筑为例,进行仿真分析,首先对其各个决策变量对空调系统总能耗的影响程度进行分析,然后采用IPSO对其运行参数进行协同优化控制,对比分析仿真结果,主要得到以下结论:

1) 影响中央空调系统总能耗的主要设备是风机和制冷机,因此在满足室内所需冷负荷的情况下会优先调节风机和制冷机来达到减小能耗的目的;

2) 基于IPSO协同优化控制方法下的结果优于PSO算法,且收敛速度更快;相比优化前,采用IPSO算法后的空调系统小时能耗以及日平均能耗均有所下降,日平均节能率可达13%,小时节能率最高可达16.87%,节能效果更加显著。

参考文献:

- [1] 张勇军,李其霖,黄健昂.冰蓄冷空调直接供冷电费贯序削减趋优控制方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):92-99.
ZHANG Yongjun, LI Qilin, HUANG Jian'ang, et al. An optimal control method of ice-storage air conditioning based on sequential reduction in direct cooling cost[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(3):92-99.
- [2] 成润坤,岳赛雅,张国维,等.双碳及能源安全背景下中国电煤月度需求组合预测[J].智慧电力,2022,50(9):1-7.
CHENG Runkun, YUE Saiya, ZHANG Guowei, et al. Combination forecasting of monthly thermal coal demand in China under carbon pea, carbon neutrality and energy security[J]. Smart Power, 2022, 50(9):1-7.
- [3] JIN X L, WU Q W, JIA H J. Local flexibility markets: literature review on concepts, models and clearing methods [J]. Applied Energy, 2020, 261:114387.

- [4] 李世辉,王琪,贾晓卜,等.考虑热泵负荷和分布式光伏的配微网协调调度[J].中国电力,2022,55(9):29-37.
LI Shihui, WANG Qi, JIA Xiaobo, et al. Coordinated scheduling of distribution networks and microgrids considering heat pump load and distributed photovoltaic [J]. Electric Power, 2022, 55(9): 29-37.
- [5] 包宇庆,成丽珉.空调负荷二阶等效热参数模型参数辨识方法[J].电力系统自动化,2021,45(11):37-43.
BAO Yuqing, CHENG Limin. Parameter identification method of second-order equivalent thermal parameter model for air conditioning loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(11): 37-43.
- [6] 杨梓俊,丁小叶,陆晓,等.面向需求响应的变频空调负荷建模与运行控制[J].电力系统保护与控制,2021,49(15):132-140.
YANG Zijun, DING Xiaoye, LU Xiao, et al. Inverter air conditioner load modeling and operational control for demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 132-140.
- [7] 兰宇.基于弹性温度裕度调节的中央空调集群需求响应优化控制策略研究[D].天津:天津大学,2018.
LAN Yu. Research on demand response optimization control strategy of cluster central air conditioning based on elastic temperature margin adjustment[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [8] 周磊,李扬,高赐威.聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5579-5589.
ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [9] 李滨,黎智能,陈碧云.基于DFT的智能园区中央空调负荷调控策略[J].电网技术,2020,44(7):2549-2559.
LI Bin, LI Zhineng, CHEN Biyun. DFT-based intelligent park central air-conditioning regulation strategy[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2549-2559.
- [10] 朱宇超,王建学,曹晓宇.中央空调负荷直接控制策略及其可调度潜力评估[J].电力自动化设备,2018,38(5):227-234.
ZHU Yuchao, WANG Jianxue, CAO Xiaoyu. Direct control strategy of central air-conditioning load and its schedulable potential evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 227-234.
- [11] 陈阳.大型集中空调系统智能优化节能控制研究[D].上海:上海交通大学,2021.
CHEN Yang. Research on intelligent optimization energy saving control of large central air conditioning system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2021.
- [12] 吴伟伟,范东叶,朱文平,等.中央空调系统优化运行研究综述[J].建筑热能通风空调,2019,38(7):37-41+19.
WU Weiwei, FAN Dongye, ZHU Wenping, et al. Operation optimal analysis of central air-conditioning system[J]. Building Energy & Environment, 2019, 38(7): 37-41+19.
- [13] CHEN J Y, SUN Y J. A new multiplexed optimization with enhanced performance for complex air conditioning systems[J]. Energy and Buildings, 2017, 156: 85-95.
- [14] 李建维.中央空调水系统节能运行优化技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2016.
LI Jianwei. Research on optimization technology for energy saving operation of air conditioning water system [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [15] 于军琪,高之坤,赵安军,等.改进并行粒子群算法用于冷却水系统节能优化[J].控制理论与应用,2022,39(3):421-431.
YU Junqi, GAO Zhikun, ZHAO Anjun, et al. Improved parallel particle swarm algorithm for energy-saving optimization of cooling water system[J]. Control Theory & Applications, 2022, 39(3): 421-431.
- [16] 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):2155-2162.
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): 2155-2162.
- [17] 闫军威,黄琪,周璇.基于DDPG的冷源系统节能优化控制策略[J].控制与决策,2021,36(12):2955-2963.
YAN Junwei, HUANG Qi, ZHOU Xuan. Energy-saving optimization control strategy of cold source system based on DDPG algorithm[J]. Control and Decision, 2021, 36(12): 2955-2963.
- [18] 朱峰.空调负荷需求响应特性及其调控策略研究[D].南京:东南大学,2016.
ZHU Feng. Research on demand response characteristic and control strategy of air conditioning load[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

- 预测方法研究[J]. 自动化仪表,2022,43(4):86-91+96.
- YANG Yu, NIU Honghai, LI Bing, et al. Research on probabilistic prediction method for wind power based on integrated learning[J]. Process Automation Instrumentation, 2022,43(4):86-91+96.
- [13] 徐鹏超,李琰,赵艳雷. 基于自适应变异蝙蝠优化BP神经网络的短期风电功率预测[J]. 电测与仪表,2021,58(4):121-127.
- XU Pengchao, LI Yan, ZHAO Yanlei. Short-term wind power prediction based on BP neural network with adaptive mutation bat optimization algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021,58(4): 121-127.
- [14] YANG X, MA X, KANG N, et al. Probability interval prediction of wind power based on KDE method with rough sets and weighted Markov chain[J]. IEEE Access, 2018,6:51556-51565.
- [15] JÜRGEN S. Deep learning in neural networks: an overview [J]. Neural Netw, 2015,61: 85-117.
- [16] DABROWSKI J J, ZHANG Y F, RAHMAN A. ForecastNet: a time-variant deep feed-forward neural network architecture for multi-step-ahead time-series forecasting [C]//The 27th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP), Bangkok, Thailand, 2020.
- [17] 叶瑞丽,郭志忠,刘瑞叶,等. 基于置信区间估计及储能装置优化配置的风电场可靠出力研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):85-91.
- YE Ruili, GUO Zhizhong, LIU Ruiye, et al. Reliable power output based on confidence interval estimation and optimal ESS configuration of wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(5):85-91.
- [18] 庞昊,高金峰,杜耀恒. 基于时间卷积网络分位数回归的短期负荷概率密度预测方法[J]. 电网技术,2020,44(4):1343-1350.
- PANG Hao, GAO Jinfeng, DU Yaoheng. A short-term load probability density prediction based on quantile regression of time convolution network[J]. Power System Technology, 2020,44(4):1343-1350.
- [19] 谢俊,王璐,傅旭华,等. 考虑风电功率概率分布不确定性的含风电配电网无功规划方法[J]. 电力自动化设备, 2016,36(6):40-47.
- XIE Jun, WANG Lu, FU Xuhua, et al. Reactive power planning with consideration of wind power probability distribution uncertainty for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016,36(6):40-47.
- [20] WAN C, XU Z, PINSON P. Probabilistic forecasting of wind power generation using extreme learning machine[J]. IEEE Transactions Power Systems, 2014,29(3):1033-1044.
- [21] 贾睿,杨国华,郑豪丰,等. 基于自适应权重的 CNN-LSTM&GRU 组合风电功率预测方法[J]. 中国电力,2022, 55(5):47-56+110.
- JIA Rui, YANG Guohua, ZHENG Haofeng, et al. Combined wind power prediction method based on CNN-LSTM& GRU with adaptive weights[J]. Electric Power, 2022,55(5): 47-56+110.
-
- (上接第75页 = Continued from page 75)
- [19] 刘迪,张强,吕干云. 量子粒子群算法在配电网重构中的改进和应用[J]. 电测与仪表,2022,59(3):58-65.
- LIU Di, ZHANG Qiang, LÜ Ganyun. Improvement and application of quantum particle swarm optimization in distribution network reconfiguration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022,59(3):58-65.
- [20] 滕志军,吕金玲,郭力文,等. 基于动态加速因子的粒子群优化算法研究[J]. 微电子学与计算机,2017,34(12): 125-129.
- TENG Zhijun, LÜ Jinling, GUO Liwen, et al. Research on particle swarm optimization based on dynamic acceleration coefficients[J]. Microelectronics & Computer, 2017,34(12):125-129.
- [21] 邵凡,张艳,鲁燕. 中央空调冷水机组群控优化方法研究 [J]. 电力需求侧管理,2016,18(4):6-10.
- SHAO Fan, ZHANG Yan, LU Yan. Study on optimal group control of chillers for central air conditioner[J]. Power Demand Side Management, 2016,18(4):6-10.
- [22] 王晨旭,唐飞,刘涤尘,等. 基于双层代理模型的概率-区间潮流计算及灵敏度分析[J]. 电工技术学报,2022,37(5):1181-1193.
- WANG Chenxu, TANG Fei, LIU Dichen, et al. Probabilistic-interval power flow and sensitivity analysis using double layer surrogate method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022,37(5):1181-1193.