

文章编号:0253-4339(2021)04-0043-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.04.043

基于天牛须-粒子群优化算法的大型中央空调系统节能控制

陈 阳 姚 晔

(上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘 要 大型公共建筑中央空调系统送风末端数量多,负荷需求变化大,常用的控制方法虽能满足末端需求,却存在能耗巨大的问题。为此本文构建了一个空调系统送风和冷冻水系统的优化控制模型,以系统能耗为优化目标,使用天牛须搜索-粒子群优化(BAS-PSO)混合算法求解该问题,提高系统节能率,改善了传统 PSO 的缺陷。同时将该模型用于上海市某公共建筑集中式空调系统的空气调节子系统进行优化控制,结果表明:BAS-PSO 与原有控制方案——定送风温度控制相比,最大节能量达 252.02 kW,节能率为 20%,而现场测试显示,使用该优化控制能在负荷率为 0.55 时达到 14.6%的节能率,节能 153.15 kW,证明该优化控制模型及优化算法有可靠的应用前景。

关键词 中央空调系统;优化控制;粒子群优化算法;天牛须搜索算法

中图分类号:TB61⁺1; TB657.5; TP311 **文献标识码**:A

Study on Energy-saving Control of Large Central Air-conditioning System Based on BAS-PSO

Chen Yang Yao Ye

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract There are many air supply terminals in the central air-conditioning system of large-scale public buildings, and the load demand varies greatly. Although the commonly used control methods can meet the terminal load demand, their energy consumption is large. In this study, an optimal control model for the air supply and chilled water system of a central air-conditioning system was established. The energy consumption of the system is considered as the optimization goal, and the hybrid algorithm of beetle antennae search-particle swarm optimization algorithm (BAS-PSO) is used to solve this problem, which not only saves energy but also improves the defects of traditional PSO. Considering the air handling subsystem of a centralized air-conditioning system in a public building in Shanghai as an example, modeling and optimization control solutions were carried out. The results show that the maximum energy saving of BAS-PSO is 252.02 kW, and the energy saving rate is approximately 20% compared with the original control scheme, that is, constant air supply temperature control. The experimental test results show that the optimization algorithm can achieve a 14.6% energy saving rate, saving 153.15 kW of energy, which proves that the optimal control model and optimization algorithm have reliable application prospects.

Keywords central air-conditioning system; optimal control; particle swarm optimization algorithm (PSO); beetle antennae search algorithm (BAS)

随着经济社会的发展和生活水平的不断提高,人们对室内环境的需求随之提高,建筑能耗需求也进一步增加。公共建筑能耗中有 40% 以上属于空调系统耗能^[1],因此也存在巨大的节能潜力,受到越来越多研究人员的关注。

考虑到建筑空调的应用场景,一般基于多目标优化建立控制策略将室内热舒适与能耗相结合^[2-3]。而随着成本降低,暖通空调系统数据的获得越来越容易,利用“无模型”控制寻找复杂数据间的控制逻辑更加高效^[4-6]。T. Chaudhuri 等^[7]构建了一个热舒适

驱动的室内气候控制框架,主要包括利用前馈神经网络建立的 HAVC 系统能耗模型、预测热舒适指数模型以及优化送风温度算法。A. Ghahramani 等^[8]设计了一种无需历史运行数据的自适应混合元启发式算法的无模型控制策略,混合算法融合了 K 临近爬山算法、回归决策树和递归暴力算法。此外,Liu Tao 等^[9]利用深度强化学习进行建筑能耗模型预测。S. Valovcin 等^[10]针对住宅建筑能耗模拟软件的评估误差,使用聚类及多元线性回归进行了后处理技术开发,提高了能耗预测的准确性。周志豪^[11]利用聚类

算法建立了灰箱模型和神经网络模型的混合模型,提高了能耗预测的准确性。

对能耗模型进行优化求解与控制,以 HVAC 系统最优状态运行,从而达到最终降低能耗的目的。黄荣庚等^[12]为预测地铁站环控系统能耗建立了 ARMA 模型。宁玉飘等^[13]使用运行数据性能包络线法对冷水机组的负荷分配进行优化。张帆等^[14]通过引入高斯变异等方式改进蚁群算法优化的性能。

公用建筑常用的大型集中式空调系统末端多、维度高、结构复杂,且不同区域的负荷需求差异较大。近年兴起的启发式优化算法较适合求解这类问题,如遗传算法、粒子群优化算法 (particle swarm optimization algorithm, PSO)、模拟退火方法等。其中 PSO 适合求解实数问题,算法简便求解计算速度较快,但在应用过程中容易出现过早陷入局部最优值、稳定性不佳等问题,为此,本文从空气调节系统节能出发,提出一种将天牛须搜索算法 (beetle antennae search algorithm, BAS) 与 PSO 相结合的混合优化算法,以上海市某大型公共建筑集中空调系统的空气调节子系统为例,建立了能耗优化模型,用 BAS-PSO 求解能耗最低运行状态,并验证了混合算法的寻优效果与计算稳定性。

1 优化控制模型建立

1.1 研究对象

大型公共建筑集中式空调系统一般占地面积大、负荷需求高且波动较大、涉及部件众多,控制复杂且能耗大,容易造成资源浪费。本文以上海市某公共建筑大型集中式空调系统空气调节子系统为研究对象,如图 1 所示,选取其中 1 个泵组及其对应空气处理设备 (air handling unit, AHU) 进行建模。4 个型号相同的水泵组成 1 个泵组,负责输送冷冻水,对应 64 个相同的变频 AHU,从而调节一部分区域的温度变化。原系统采用定送风温度控制,这种控制策略简单,能够保证现场运行的稳定性,但设定的送风温度一般为设计工况下的最优点,与实际工况存在偏差。当区域负荷较低时,风机以最低频率运行,送风温度固定可能会使制冷量大于热负荷需求导致室内温度过低,造成明显的能源浪费及热舒适问题。

1.2 主要部件能耗模型

AHU 表面换热器的换热模型如下^[15]:

$$K_i = \left(\frac{1}{A_i G_{a,i}^m \xi_i^n} + \frac{1}{B_i G_{w,i}^z} \right)^{-1} \quad (1)$$

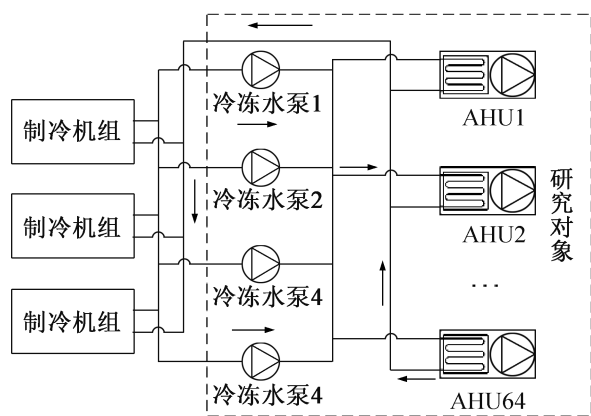


图 1 集中式空调系统

Fig.1 The central air-conditioning system

$$\begin{aligned} Q_i &= K_i Area_i (\bar{T}_{a,i} - \bar{T}_{w,i}) = G_{a,i} (h_{a,E,i} - h_{a,L,i}) \\ &= G_{w,i} c_w (T_{w,L,i} - T_{w,E,i}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:下标 i 表示研究对象中第 i 台 AHU 的换热器, a 和 w 表示空气侧和水侧, E 和 L 分别表示入口和出口; K_i 为传热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; G_a 为空气体积流量, m^3/s ; G_w 为冷冻水质量流量, kg/s ; ξ_i 为空气侧析湿因子; Q_i 为换热量, kW ; $Area_i$ 为表面式换热器传热面积, m^2 ; $\bar{T}_{a,i}$ 和 $\bar{T}_{w,i}$ 分别为换热器空气侧和水侧的算数平均温度, K ; h_a 为空气比焓, kJ/kg ; c_w 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_w 为水的温度, K ; A_i 、 B_i 、 m 、 n 、 z 为经过实验测得的系数。上述设备参数的具体数值由厂商模拟实验提供。

冷冻水泵和 AHU 风机的能耗模型由厂家提供标准工况下的流量-能耗曲线拟合得出,计算如下:

$$\begin{aligned} P_{\text{pump}} &= \beta_{\text{pump}} (a_0 + a_1 G_w + a_2 G_w^2 + a_3 G_w^3) \\ G_{w,\min} &< G_w < G_{w,\max} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} P_{\text{fan}} &= \beta_{\text{fan}} (b_0 + b_1 G_a + b_2 G_a^2 + b_3 G_a^3) \\ \alpha_{\text{fan}} G_{a,\max} &< G_a < G_{a,\max} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:下标 pump 和 fan 分别表示水泵及风机; P 为功率, kW ; β 为校正系数; a_i 、 b_i ($i = 0, 1, 2, 3$) 为回归方程系数;由于电机工作的限制, G_w 存在上下限 $G_{w,\max}$ 、 $G_{w,\min}$, G_a 同理,且研究对象的送风对象为室内环境,室内空气调节对送风量和送风分布有一定要求,因此一般送风量下限为最大风量的 20% ~ 40%^[16],即 α_{fan} 的取值范围,本文取 $\alpha_{\text{fan}} = 40\%$ 。

在该研究对象中,冷冻水泵以泵组的形式出现,其中水泵型号相同,流量上限 $G_{w,\max}$ 为 111.1 kg/s ,下限 $G_{w,\min}$ 为 27.8 kg/s 。根据需求侧换热量计算出冷冻水总流量后,在各水泵间平均分配流量。但由于水泵在低流量状态长时间工作会影响能效和设备状态,因此还涉及流量较低时水泵台数

的启停问题。

1.3 空气调节子系统能耗优化模型

以空气调节子系统能耗最小为优化目标,根据 AHU 与冷冻水泵组之间的耦合关系,建立空气调节子系统的能耗优化目标函数:

$$\begin{aligned} \min P_{\text{tot}} &= \sum_{m=1}^{N_{\text{AHU}}} P_{\text{fan},m}(\mathbf{G}_{\text{a},g}) + \sum_{n=1}^{N_{\text{pump}}} P_{\text{pump},n}(\mathbf{G}_{\text{w},g}) \\ &= P_{\text{fan}}(\mathbf{t}_{\text{a},L}) + P_{\text{pump}}(\mathbf{t}_{\text{a},L}) \\ \text{s.t.} \quad &\alpha_{\text{fan}} G_{\text{a},\text{max},m} < G_{\text{a},m} < G_{\text{a},\text{max},m} \\ &G_{\text{w},\text{min}} < G_{\text{w},n} < G_{\text{w},\text{max}} \\ &\mathbf{t}_{\text{a},L}[m] \in [14, 20] \\ &Q[m] + c^+ + c^- = Q_{\text{need}}[m] \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{t}_{\text{a},L}$ 为多个 AHU 送风温度组成的 N_{AHU} 维向量,表示解空间中的一组可行解,℃; $\mathbf{G}_{\text{a},g}$ 和 $\mathbf{G}_{\text{w},g}$ 分别为可行送风温度解对应的风机及水泵流量组成的向量,kg/s; P_{tot} 为系统总能耗,kW; N_{AHU} 、 N_{pump} 分别为子系统中 AHU 和冷冻水泵的数量, m 和 n 为对应编号; $\mathbf{t}_{\text{a},L}[m]$ 为第 m 台 AHU 的送风温度,℃; $Q_{\text{need}}[m]$ 为第 m 台 AHU 对应的末端负荷需求,W; c^+ 、 c^- 表示较小的偏差量。约束条件包括对送风温度、AHU 风机流量、冷冻水泵流量的限制,以及换热量应尽量满足末端需求。

2 基于 BAS-PSO 的优化方法

2.1 基本粒子群优化算法 (PSO)

粒子群优化算法 (PSO) 基于种群的优化算法,由 J. Kennedy 等^[17]首次提出。该算法与生物智能和遗传算法有许多联系,主要受鸟群和鱼群运动的启发,其随机性又与遗传算法有许多相似之处,在计算速度和所占内存方面具有一定优势。PSO 假设粒子具有位置和速度两个属性,一群数量为 m 的粒子在 d 维优化问题解空间中参照自身历史最优和群体最优,并按照一定的随机性进行最优解搜索,Y. Shi 等^[18]提出的基本 PSO 的形式如下:

$$x_{i,d}^{k+1} = x_{i,d}^k + v_{i,d}^k \quad (6)$$

$$v_{i,d}^{k+1} = \omega \cdot v_{i,d}^k + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (P_{i,d}^k - x_{i,d}^k) + c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (P_{g,d}^k - x_{i,d}^k) \quad (7)$$

式中:下标 i 为粒子编号; d 表示维度; $x_{i,d}$ 、 $v_{i,d}$ 分别为第 i 个粒子当前在第 d 维所处位置和速度; k 为迭代次数; ω 、 c_1 、 c_2 分别为惯性因子、自我学习因子、种群学习因子; $P_{i,d}^k$ 为当前粒子在前 k 次迭代中最优位置的第 d 维; $P_{g,d}^k$ 为所有粒子在前 k 次迭代中最优位置的第 d 维; rand 为 $[0, 1]$ 之间的随机数,每个 rand 均随机生成。

2.2 基本天牛须搜索算法 (BAS)

BAS 是一种生物启发式优化算法,其基本仿生学原理为天牛根据两根触角感知到的食物气味浓淡来决定自己下一时刻的前进方向^[19]。参照该行为方式抽象出 BAS 算法的计算流程:

1) 假设一只天牛由质心和左右两须组成,如图 2 所示。天牛在 d 维优化问题解空间中运动,初始化质心位置 $x^0 = [x_1, x_2 \dots x_d]$ 、朝向(定义为天牛的右须指向左须) $\vec{dir}$ 、两须之间的距离 d_0 。

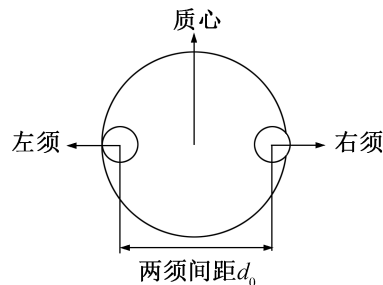


图 2 天牛简化模型

Fig.2 Simplified beetle model

2) 计算天牛右须和左须位置:

$$\begin{cases} x_{\text{left}}^k = x^k + d_0 \cdot \frac{\vec{dir}}{2} \\ x_{\text{right}}^k = x^k - d_0 \cdot \frac{\vec{dir}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

3) 更新天牛位置:

$$\begin{aligned} x^{k+1} &= x^k - \vec{dir} \cdot \text{step} \cdot \text{sign} \\ \text{sign} &= \text{sign}(f(x_{\text{left}}^k) - f(x_{\text{right}}^k)) \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $f(x)$ 为 x 的适应度函数; step 为步长; sign 为判断符号的函数。

2.3 天牛须搜索-粒子群优化算法 (BAS-PSO)

BAS 和 PSO 虽然均为简洁高效的仿生寻优算法,但 BAS 更侧重个体搜索,PSO 强调种群,在面对优化问题较复杂、解空间维度较高等情况时,容易出现陷入局部最优解、早熟收敛等问题^[19]。针对该现象,本文将 BAS 融入 PSO 中,把 PSO 中的粒子替换为天牛,在保持群优化搜索学习全局最优的基础上增加了个体独立学习周围信息的能力,种群按图 3 所示流程向最优解方向移动。

3 优化仿真结果及分析

根据 1.3 小节中的能耗优化目标,选取 $P_{\text{tot}}(\mathbf{t}_{\text{a},L})$ 为适应度函数,AHU 的送风温度 $\mathbf{t}_{\text{a},L}$ 为优化

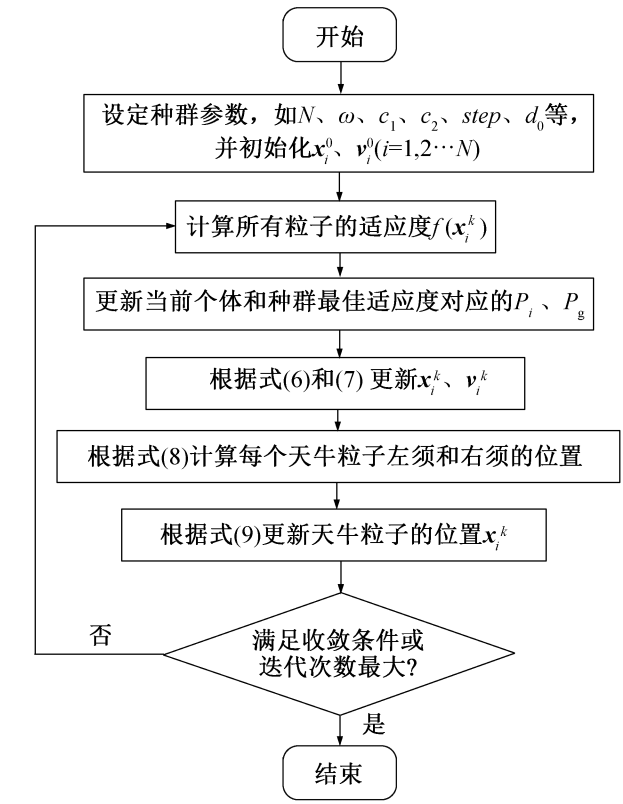


图 3 BAS-PSO 算法流程图
Fig.3 Flow chart of BAS-PSO algorithm

量,对系统进行一定简化:假设进入 AHU 的冷冻水水温 $t_{w,E}$ 均为总管供水温度;由于 AHU 的工作状态较为稳定,用式(1)和式(2)计算传热系数 K 需要进行迭代,计算量大且变化并较小,因此可将每个 AHU 换热器的 K 值看作常数。根据送风区域的温湿度、负荷等实际测量值以及 BAS-PSO 算法提供的优化值进行能耗计算与寻优,如图 4 所示。

首先将 BAS-PSO 和 PSO 应用于上述一个冷冻水泵泵组及其对应 64 个 AHU 的场景中,由于机组正常运行时的负荷需求一般小于设计的额定冷量,因此设置每个区域对应需求负荷为额定量的 70%,即负荷率为 0.7,粒子数为 20, ω 、 c_1 、 c_2 、 $step$ 、 d_0 分别为 0.8、0.5、0.8、1、2/3,迭代回数 1 000。分别计算 50 次,能耗对比结果如图 5 所示。在 0.7 负荷率下进行 50 次寻优,使用 BAS-PSO 的系统能耗平均值为 930.6 kW,标准差 8.4,计算结果大于 945 kW 的仅有 4 次;而使用 PSO 的系统能耗平均值为 957.7 kW,标准差为 9.9,计算结果大于 945 kW 的有 45 次。

根据图 5 及上述分析可知,使用 BAS-PSO 比 PSO 更节能,在前文使用场景下能平均减少 27.1 kW 的能量消耗;相比 PSO,BAS-PSO 计算结果的标准差更小,多次计算结果更小,即优化性能更稳定,若参与

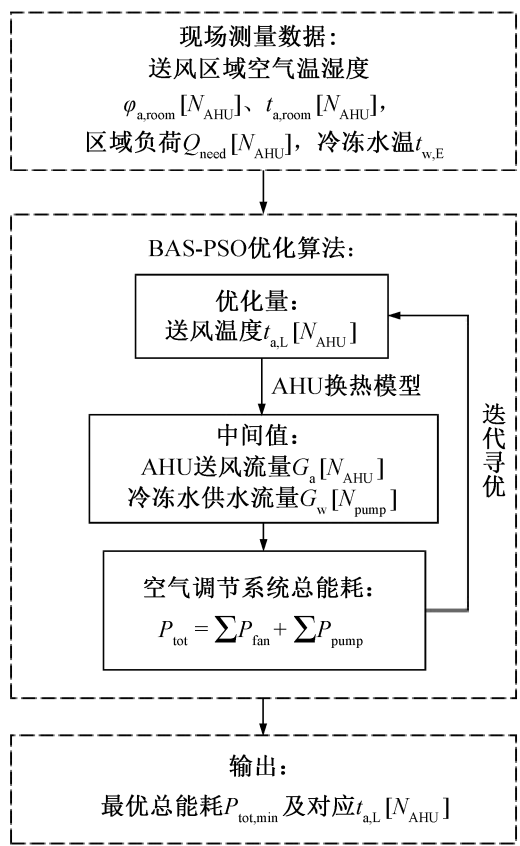


图 4 优化策略
Fig.4 Optimization strategy

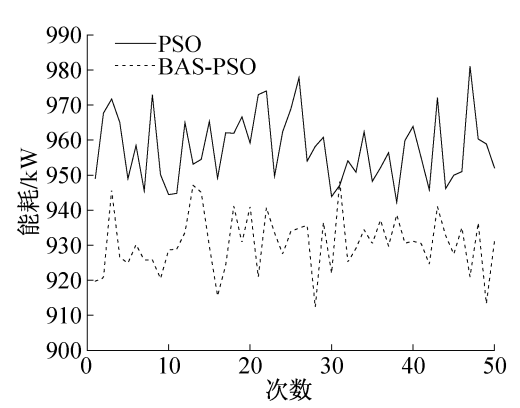


图 5 同负荷率下 PSO 与 BAS-PSO 50 次寻优效果对比
Fig.5 Comparison of optimization for PSO and BAS-PSO at the same load rate in 50 times

实际应用场景能够有效保证系统的正常运行。计算过程中还发现,使用 PSO 进行能耗优化时粒子非常容易在计算早期落入局部最优值并无法跳出,如图 5 中 PSO 曲线的最高点 981 kW,在该次寻优计算中,粒子群在第 122 回迭代时已经寻得该最优值,而剩余 878 回迭代计算并未寻得能耗更低的解,但使用 BAS-PSO 却能够以更快的速度找到能耗更低的点。统计可知,在这 50 次寻优中,BAS-PSO 有 21 次在

100 回迭代以内寻得最低能耗,而使用 PSO 寻得最低能耗的迭代回数集中在约 150,BAS-PSO 在寻优速度上也具有一定优势。

考虑到实际场景要对更大规模的空气调节系统进行能耗优化控制,以上文 1 个泵组及其对应的 64 个 AHU 为基准进行成倍扩充,模拟大型集中式空调系统整体的优化控制。根据现场调研,本文研究的集中式空调系统仍采用定送风温度模式运行,设定温度为 19℃。负荷率为 0.7 时成倍增加泵组及 AHU 情况下的能耗结果如图 6 所示,三条图线分别代表使用原控制策略以及 PSO、BAS-PSO 两种优化控制策略。由图 6 可知,随着维度增加,系统复杂程度提高,BAS-PSO 的节能效果也越加凸显。经计算,BAS-PSO 与定送风温度相比节能率最高可达 22.9%,平均节能率为 21.2%;与 PSO 相比节能率最高可达 7.3%,平均节能率为 4.7%。

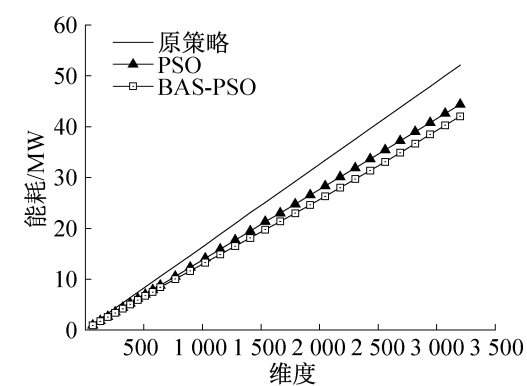


图 6 变维度下三种方式寻优效果对比

Fig.6 Comparison of optimization for three methods under variable dimensions

空调系统现场运行主要根据送风区域负荷分布情况进行调整,因此,图 7 和图 8 分别对比了在大多数送风子系统工作状态下,总平均负荷率相同但区域间负荷率分布不同时,原控制策略与 BAS-PSO 和 PSO 与 BAS-PSO 优化控制方式的能耗大小。一般情况下,负荷率低于 0.3 时系统将不再采用定送风温度的控制方式。因此仿真设定了两组多区域负荷分布,服从正态分布,即 $Q[m]:N(\mu,\sigma^2)$; μ 为平均负荷率,取值范围 $[0.3,1]$; σ 为标准差,第 1 组 $\sigma=0.15$,第 2 组 $\sigma=0.2$ 。

由图 7 可知,使用 BAS-PSO 的节能效果显著,且随平均负荷率的增加而提高。无论 1 组或 2 组,在平均负荷率 $[0.3,0.5]$ 段,节能率低于 15%,但中高负荷段的节能率约为 18%。1 组全负荷段最大节能率 20.0%,节能 252.02 kW,平均节能率 14.8%;2 组全段最大节能率 19.0%,节能 222.83 kW,平均

节能率 15.3%。而在上海市某建筑的空气调节子系统进行对比实验结果显示,本文建立的优化模型符合实际运行工况,在夏末秋初工况下使用 BAS-PSO 在负荷率为 0.55 时进行优化控制相比原定送风温度控制能实现 14.6% 的节能率,节能 153.15 kW。

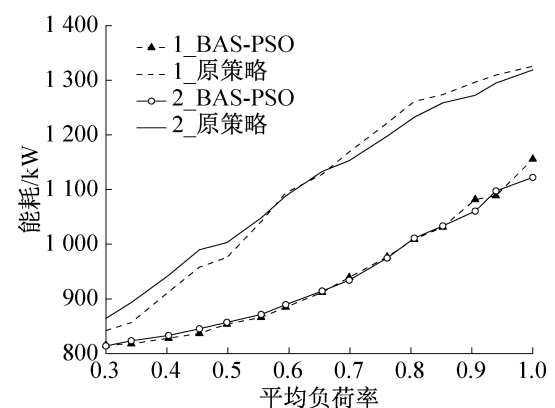


图 7 变负荷率下原策略与 BAS-PSO 寻优效果对比
Fig.7 Comparison of optimization for original control strategy and BAS-PSO under different load rates

基本 PSO 及 BAS-PSO 优化控制对比如图 8 所示,节能效果和趋势与图 7 相似,均随平均负荷率的增加而增加,具体对比如表 1 所示。在 1 组负荷分布下混合算法相比 PSO 节能率最高可达 4.2%,平均节能率为 2.7%,2 组负荷分布下相比 PSO 混合算法的最大节能率为 4.8%,平均节能率为 3.1%。结合图 7 中 BAS-PSO 与定送风温度控制的节能率对比,可以推测末端送风区域负荷分布越不均匀,如 2 组标准差更大,负荷分布越分散,BAS-PSO 的节能及优化效果越明显。由图 8 可明显看出,无论区域负荷分布状况如何,BAS-PSO 优化的波动并不明显,且寻优效果更好。

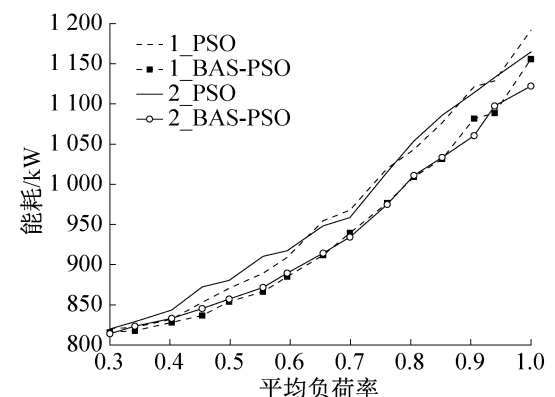


图 8 变负荷率下 PSO 与 BAS-PSO 寻优效果对比
Fig.8 Comparison of optimization for BAS-PSO and PSO under different load rates

表 1 变负荷率下 BAS-PSO 相比 PSO 节能率统计
Tab.1 Statistics of energy saving rate of BAS-PSO
compared with PSO under variable load rates

负荷率	1 组节能率/%	2 组节能率/%
0.30	0.6	0.7
0.35	0.5	0.7
0.40	0.5	1.2
0.45	1.9	3.1
0.50	1.9	2.6
0.55	2.6	4.3
0.60	2.7	3.0
0.65	4.5	3.6
0.70	2.9	2.5
0.75	4.2	4.0
0.80	3.3	4.1
0.85	4.2	4.8
0.90	3.5	4.8
0.95	3.6	3.1
1.00	3.0	3.6
全段平均节能率	2.7	3.1

4 结论

本文提出一种结合 BAS 和 PSO 的天牛须搜索-粒子群优化算法 (BAS-PSO), 能够实现稳定高效的节能优化控制。得到如下结论:

- 1) 建立了多区域集中式空调系统空气调节子系统的能耗优化控制模型, 并将优化量设为输入量, 降低模型复杂度, 且符合实际的控制逻辑。
- 2) BAS-PSO 与 PSO 相比寻优效果显著, 计算稳定性好, 且程序设计并不复杂, 能够方便高效地应用于工程实践中。
- 3) BAS-PSO 优化面对大型复杂空调系统时节能效果几乎不受影响, 在负荷率为 0.7 时与传统定送风温度控制相比平均节能率达 21.2%, 相比 PSO 优化节能率也能达到 4.7%。
- 4) 送风负荷需求及区域间负荷分布对混合算法 BAS-PSO 的节能效果有一定影响。负荷率为 0.3~0.5 的低负荷段节能率低于 0.5~1.0 的中高负荷段, 但与传统定送风温度控制相比仍可达到约 15% 的平均节能率, 相比 PSO 优化也可节能约 3%; 且区域间负荷分布差异越大, BAS-PSO 相比于 PSO 的寻优效

果越好越稳定。
5) 在上海市某建筑的空气调节子系统进行的对比实验结果显示, 夏末秋初工况下的工作时间使用 BAS-PSO 优化控制算法相比原定送风温度控制在负荷率为 0.55 的情况下节能率为 14.6%, 与仿真结果较为接近。

参考文献

[1] 程亨达, 陈焕新, 李正飞, 等. 多联机系统制热工况下的制冷剂充注量故障诊断模型——基于多层卷积神经网络[J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 40-47. (CHENG Hengda, CHEN Huanxin, LI Zhengfei, et al. Fault diagnosis model for refrigerant charge of variable refrigerant flow system under heating conditions based on multi-layer convolution neural network [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(1): 40-47.)

[2] KIM H, HONG T. Determining the optimal set-point temperature considering both labor productivity and energy saving in an office building [J]. Applied Energy, 2020, 276: 115429.

[3] LI X, MALKAWI A. Multi-objective optimization for thermal mass model predictive control in small and medium size commercial buildings under summer weather conditions [J]. Energy, 2016, 112: 1194-1206.

[4] LEE J M, HONG S H, SEO B M, et al. Application of artificial neural networks for optimized AHU discharge air temperature set-point and minimized cooling energy in VAV system[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 153: 726-738.

[5] NASRUDDIN, SHOLAHUDIN, SATRIO P, et al. Optimization of HVAC system energy consumption in a building using artificial neural network and multi-objective genetic algorithm[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019, 35: 48-57.

[6] DENG Zhipeng, CHEN Qingyan. Simulating the impact of occupant behavior on energy use of HVAC systems by implementing a behavioral artificial neural network model[J]. Energy and Buildings, 2019, 198: 216-227.

[7] CHAUDHURI T, SOH Y C, LI H, et al. A feedforward neural network based indoor-climate control framework for thermal comfort and energy saving in buildings [J]. Applied energy, 2019, 248(8): 44-53.

[8] GHAHRAMANI A, KARVIGH S A, BECERIK-GERBER B. HVAC system energy optimization using an adaptive hybrid metaheuristic[J]. Energy and Buildings, 2017, 152: 149-161.

[9] LIU Tao, TAN Zehan, XU Chengliang, et al. Study on deep reinforcement learning techniques for building energy consumption forecasting[J]. Energy and Buildings, 2020,

- 208; 109675.
- [10] VALOVICIN S, HERING A S, POLLY B, et al. A statistical approach for post-processing residential building energy simulation output [J]. *Energy and buildings*, 2014, 85: 165–179.
- [11] 周志豪. 基于混合模型的中央空调冷源系统运行能耗优化[J]. *建筑热能通风空调*, 2020, 39(3): 1–7, 15. (ZHOU Zhihao. Optimization of central air conditioning cold source system based on hybrid model [J]. *Building Energy & Environment*, 2020, 39(3): 1–7, 15.)
- [12] 黄荣庚, 龙静, 潘志刚, 等. 基于 ARMA 模型的地铁站环控系统能耗预测[J]. *制冷学报*, 2019, 40(1): 88–93. (HUANG Ronggeng, LONG Jing, PAN Zhigang, et al. Energy prediction method for metro HVAC systems based on the ARMA model [J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(1): 88–93.)
- [13] 宁玉飘, 晋欣桥, 王逸骏, 等. 基于运行数据包络线的冷水机组运行优化策略研究[J]. *制冷学报*, 2020, 41(4): 68–74. (NING Yupiao, JIN Xinqiao, WANG Yijun, et al. Optimal operation strategy of multiple chiller system based on the best-performance line of history data [J]. *Journal of Refrigeration*, 2020, 41(4): 68–74.)
- [14] 张帆, 李壮举. 改进蚁群算法的中央空调冷冻水系统优化控制[J]. *计算机工程与设计*, 2019, 40(5): 1311–1315. (ZHANG Fan, LI Zhuangju. Central air conditioning chilled water system optimization control based on improved ant colony algorithm [J]. *Computer Engineering and Design*, 2019, 40(5): 1311–1315.)
- [15] YAO Ye, YU Yuebin. Modeling and control in air-conditioning systems [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017.
- [16] 赵荣义, 范存养, 薛殿华, 等. 空气调节 [M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (ZHAO Rongyi, FAN Cunyang, XUE Dianhua, et al. *Air conditioning* [M]. 4th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.)
- [17] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks. Perth: IEEE Press, 1995: 1942–1948.
- [18] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]//1998 IEEE international conference on evolutionary computation proceedings. Piscataway: IEEE Press, 1998: 69–73.
- [19] 刘超, 王宸, 钟毓宁. 基于天牛须改进粒子群算法的平面度误差评定研究[J]. *计量学报*, 2021, 42(1): 9–15. (LIU Chao, WANG Chen, ZHONG Yuning. A particle swarm optimization algorithm based on beetle antennae search for flatness error evaluation [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2021, 42(1): 9–15.)

通信作者简介

姚晔,男,副教授,博士生导师,上海交通大学制冷与低温工程研究所,13641943577, E-mail: yeyao10000@sjtu.edu.cn。研究方向:公共建筑环控系统智能优化控制技术;高效除湿技术等。

About the corresponding author

Yao Ye, male, associate professor, Ph. D. supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, +86 13641943577, E-mail: yeyao10000@sjtu.edu.cn. Research fields: intelligent optimization control technology for environmental control system of public buildings; high efficiency dehumidification technique.