

DOI: 10.7667/PSPC161708

分时电价环境下的办公建筑空调负荷双层柔性优化控制策略

王庆泽¹, 陈星莺^{1,2}, 颜庆国³, 徐石明⁴, 廖迎春^{1,2}, 余昆^{1,5}

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省配用电与能效工程技术研究中心, 江苏 南京 211100; 3. 国网江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 4. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 5. 南京河海科技有限公司, 江苏 南京 210098)

摘要: 空调系统是办公建筑中电力能源消耗较大的终端设备, 其不合理的运行方式导致用电效率低下, 实现空调系统的用电优化已成为电力需求响应的重要研究内容之一。为了降低用户用电费用和提高空调系统能效, 提出了分时电价环境下的办公建筑空调负荷双层柔性优化控制策略。在上层模型中, 考虑室外温度变化和分时电价信息, 通过柔性调节空调系统的预冷时间和设定温度, 实现兼顾用电费用最省和用户舒适度最优的效果, 并将得到的空调系统冷负荷量输出给下层模型。在下层模型中, 根据多台冷水机组性能(Coefficient of Performance, COP)特性的不同, 优化负载率的分配, 达到冷水机组总体能效最大的效果。采用粒子群算法求解双层模型, 通过算例仿真, 比较空调系统在不同运行模式下的结果, 验证了所提策略可以有效地提高冷水机组的效率, 降低用电费用。

关键词: 能效; 空调负荷; 分时电价; 双层优化策略; 热舒适度

Two-layer flexible optimal strategy for air-conditioning of office building under TOU price

WANG Qingze¹, CHEN Xingying^{1,2}, YAN Qingguo³, XU Shiming⁴, LIAO Yingchen^{1,2}, YU Kun^{1,5}

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Jiangsu Engineering Research Center for Distribution & Utilization and Energy Efficiency, Nanjing 211100, China; 3. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 4. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China; 5. Nanjing Hehai Science and Technology Ltd., Nanjing 210098, China)

Abstract: The air-conditioning system of office building is a large power consumption terminal equipment, whose unreasonable operation mode leads to low energy efficiency. Realizing the optimization of the air-conditioning system has become one of the important research contents of the electric power demand response. To reduce electric bill and improve energy efficiency of the air-conditioning system, two-layer flexible optimal strategy for air-conditioning of office building under TOU price is put forward. In the upper level, the operation mode of the air-conditioning system is optimized in order to minimize the users' electric bill and ensure user's comfort according to the information of outdoor temperature and TOU price, and the cooling load of the air-conditioning is output to the lower level model. In the lower level, the distribution mode of load among the multi water chillers is optimized in order to maximize the power efficiency according to the characteristics of each chiller. The PSO algorithm is employed to solve the two-layer optimization model. The experimental results under different modes of air-conditioning show that the strategy can improve the efficiency of chillers and save the electric bill.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577051).

Key words: energy efficiency; air-conditioning load; time-of-use price; two-layer optimization strategy; thermal comfort

0 引言

随着社会与经济的发展, 城市中办公建筑的数量不断增加, 而空调系统在办公建筑总能耗中占有

较大比例, 一些大中城市空调负荷已占到夏季尖峰负荷的 30%~40%^[1-2]。办公建筑通常选用水冷式中央空调系统, 其具有良好的制冷效果, 主要由冷却塔、冷水机组、空气处理机组和送风管道等组成。其中冷水机组的耗电量比例最大, 可达整个空调系统的 80%以上^[3-4]。当前办公建筑空调系统能效较低的主要原因有两个^[5-6]: 1) 空调系统的温度设定不合理; 2) 冷水机组的负载率分配不合理。因此, 如何

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577051); 国网公司科技项目(SGJS0000YXJS1501044); 国家发改委物联网专项“基于物联网的智能用电综合管理与能效提升技术研发及产业化”

对空调系统温度设定和冷水机组负载率协同优化以提高空调系统能效并降低用户用电费用,具有重要的研究意义。

空调负荷属于温控负荷,具有能量转化及储存的特点^[7],国内外学者对楼宇空调负荷的优化运行已有相关的研究。文献[8]实测分析了在一幢中等密度办公楼应用预冷和室内设定温度重置策略的效果,结果表明在没有引起人员不舒适的情况下,高峰负荷期间空调机组电力负荷大幅降低。文献[9]实测分析了需求响应控制策略对建筑能耗的影响,并比较了在不同费率条件下的经济性,结果表明预冷策略可以降低整个运行费用的10%~20%。文献[10]利用需求响应快速评估软件对加州炎热地区大型商业建筑空调的错峰策略进行了研究,结果表明指数型和阶梯型预冷策略更加有效。随着电力市场改革政策的落地实施,分时电价作为需求响应的重要措施之一,已经逐渐全面普及和推广^[11-13]。文献[14-16]研究了分时电价下节省用电费用和降低能耗的优化策略。其中文献[14]提出了依靠空调系统控制器的先进计算能力,使用环境参数给居民提供最优的舒适度/费用比,降低空调能耗。文献[15]根据室外温度的预测值和电力公司发布的电价信号对空调系统的运行进行控制,研究了同时优化用电费用和用户舒适度的多目标优化方法。文献[16]提出了利用高级计量体系实施商务楼中央空调远程周期性控制的优化模型,在满足人体热舒适度要求的同时,更加注重节电节能。上述文献基于实际建筑测量和建筑能耗分析软件对空调系统进行了研究,在优化目标中考虑了人体热舒适度,验证了预冷策略的有效性,但是未在分时电价环境下将空调系统温度优化设置与冷水机组的负载率优化分配结合起来进行考虑。

与传统的空调系统开关控制相比,柔性控制通过空调系统设备层加载优化策略,能更好地兼顾用电费用和舒适度^[17]。基于上述考虑,本文以办公建筑空调系统为主要控制对象,在分时电价环境下,提出了办公建筑空调系统温度设置和冷水机组负载率分配的双层柔性优化模型。在上层模型中,控制空调系统的预冷时间和设定温度,以最小化办公建筑的用电费用;在下层模型中,控制冷水机组的负载率,通过合理的负荷分配,以最大化冷水机组的性能系数(COP)。最后通过算例验证了本文策略的有效性。

1 双层优化模型

当前,空调系统耗电量在办公建筑总能耗的比重越来越大,且空调负荷属于温控负荷,对其采取

合适的控制策略,可以取得兼顾用户用电费用和用电舒适度的效果,提高空调系统的用电效率。在分时电价环境下,预冷是一种不需要增加任何设备但效果显著的控制策略,利用建筑蓄热物质的储能特性,通过在低电价时段预冷蓄热物质降低蓄热物质的温度,而在高电价时段,通过适当提高室内温度设定值来节省空调运行费用。空调系统双层优化模型如图1所示。

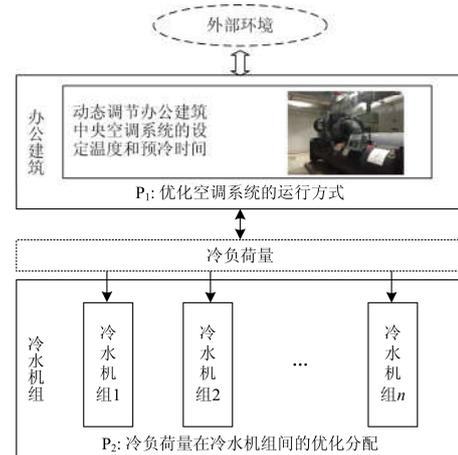


图1 空调系统的双层优化模型

Fig. 1 Two-layer optimal control model

空调系统的双层优化模型由两个相互关联的子模型 P_1 和 P_2 组成,其中, P_1 为上层优化模型, P_2 为下层优化模型。在上层模型中,基于热平衡法建立空调房间模型,并计及房间内蓄热物质的蓄热作用,在分时电价环境下优化空调系统的设定温度和预冷时间,取得兼顾用户用电费用和用电舒适度的效果。在下层模型中,根据上层模型中得到的空调负荷量,考虑冷水机组的性能差异,对办公建筑中央空调冷水机组负载率进行优化分配,以提高中央空调系统的性能系数。上层模型优先做出决策,通过调整室内设定温度以改变冷负荷量的值影响下层,下层在上层决策信息的基础上根据目标与约束作出响应,并将最佳响应反馈给上层,通过上下层模型之间的往复迭代,最终实现双层优化模型的最优化。

2 空调系统模型

2.1 办公建筑内部冷负荷计算

本文采用根据热平衡法建立的空调系统能耗模型^[18]来描述在空调系统的作用下室内温度和室外温度、空调冷负荷之间的关系。

$$q_{\text{sys}}(t) + Ah_1(T_{\text{io}}(t) - T_i(t)) + mC_p(T_o(t) - T_i(t)) + E = 0 \quad (1)$$

$$MC_m \frac{\partial T_{io}(t)}{\partial t} + Ah_o(T_{io}(t) - T_o(t)) + Ah_i(T_{io}(t) - T_i(t)) = 0 \quad (2)$$

式中: $q_{sys}(t)$ 是空调系统送到室内的冷量以抵消室内增加的热量; $Ah_i(T_{io}(t) - T_i(t))$ 是外部蓄热物质传到室内空气的对流热量, 其中, A 是外部蓄热物质表面的面积, h_i 是外部蓄热物质与室内空气的对流系数, $T_i(t)$ 是室内空气温度, $T_{io}(t)$ 是蓄热物质温度; $mC_p(T_o(t) - T_i(t))$ 是通过门、窗、缝隙等渗透进入室内空气的热量, 其中, $m = a l \Delta P^{1/n}$, ΔP 是外围护结构内外压力差, n 为系数, 与门窗气密程度有关, 在 1~2 之间, 气密性越好越接近 2, 气密性越差越接近 1, l 为门窗等缝隙长度, a 为单位长度缝隙漏风特性系数; C_p 是空气的热容^[19]; E 为制冷期间建筑内部热源产生的总的热量, 假定为一常数;

$MC_m \frac{\partial T_{io}(t)}{\partial t}$ 是外部蓄热物质温度变化引起的热量变化, 其中, M 是外部蓄热物质质量, C_m 是外部蓄热物质的热容; $Ah_o(T_{io}(t) - T_o(t))$ 是外部蓄热物质传到室外空气的对流热量, h_o 是外部蓄热物质与室外空气的对流系数, $T_o(t)$ 是室外温度。

由研究可知, 三角函数曲线可以拟合室外温度变化^[18], 令室外温度为 $T_o(t) = T_o' + \Delta T_o' \sin(\omega t + \varphi)$, 可求得空调系统正常工作时段 $t_1 \sim t_2$, 蓄热物质温度的变化和冷负荷量变化如式(3)和式(4)所示。

$$T_{io}(\omega t)_1 = \frac{\lambda_o}{\lambda_i + \lambda_o} T_o' + \frac{\lambda_o}{\lambda_i + \lambda_o} T_i(\omega t) + C_1 e^{\frac{-(\lambda_i + \lambda_o)\omega t}{\omega \tau}} + \frac{\lambda_o \Delta T_o'}{\sqrt{(\lambda_i + \lambda_o)^2 + \omega^2 \tau^2}} \sin(\omega t + \varphi - \beta_1) \quad (3)$$

式中: C_1 是常数; $\beta_1 = \tan^{-1}(\omega \tau / (\lambda_o + \lambda_i))$, 它的取值是 0 到 $\pi/2$, $\omega = 2\pi/24h$, $\tau = MC_m / \rho C_p q_v$, 是基于通风率的时间常数, ρ 是空气密度; $\lambda_o = h_o A / \rho C_p q_v$, 是外部蓄热物质与室外空气的对流传热系数; $\lambda_i = h_i A / \rho C_p q_v$, 是外部蓄热物质与室内空气的对流传热系数。

$$q_{sys}(\omega t)_1 = -\rho C_p q_v \left\{ \frac{E}{\rho C_p q_v} + \frac{mC_p(T_o - T_i(\omega t))}{\rho C_p q_v} + \frac{\lambda_i \lambda_o}{\lambda_i + \lambda_o} (T_o' - T_i(\omega t)) + \frac{\lambda_i \lambda_o}{\sqrt{(\lambda_i + \lambda_o)^2 + \omega^2 \tau^2}} \cdot \Delta T_o' \sin(\omega t + \varphi - \beta_1) + C_1 \lambda_i e^{\frac{-(\lambda_i + \lambda_o)\omega t}{\omega \tau}} \right\} \quad (4)$$

预冷控制一般发生在正常工作的前几个小时, 假定预冷时间为 $t_0 \sim t_1$, 内部热增益为 0, 存在渗透空气热量, 由热平衡方程求得空调冷负荷如式(5)。

$$q_{sys}(\omega t)_2 = -\rho C_p q_v \left\{ \frac{mC_p(T_o' - T_i(\omega t))}{\rho C_p q_v} + \frac{\lambda_i \lambda_o}{\lambda_i + \lambda_o} (T_o' - T_i(\omega t)) + \frac{\lambda_i \lambda_o}{\sqrt{(\lambda_i + \lambda_o)^2 + \omega^2 \tau^2}} \cdot \Delta T_o' \sin(\omega t + \varphi - \beta_1) + C_1 \lambda_i e^{\frac{-(\lambda_i + \lambda_o)\omega t}{\omega \tau}} \right\} \quad (5)$$

在 $t_2 \sim t_0 + 24$ 时段内, 内部热增益为 0, 空调系统关闭, 存在外部通风系统, 通风率恒定为 q_v , 可以忽略渗透空气热量, 由热平衡方程求得墙体温度如式(6)。

$$T_{io}(\omega t)_2 = \frac{1 + \lambda_o}{\lambda_o} T_o' - \frac{1}{\lambda_o} T_i(\omega t) + C_2 e^{\frac{-\lambda_o \omega t}{\omega \tau}} + \frac{(1 + \lambda_o) \Delta T_o'}{\sqrt{\lambda_o^2 + \omega^2 \tau^2}} \sin(\omega t + \varphi - \beta_2) \quad (6)$$

式中: C_1 、 C_2 的值可根据蓄热物质温度不会突变的物理性质得到。

2.2 空调系统用电量模型

为保证空调系统的制冷能力, 办公建筑通常配备多台冷水机组, 设冷水机组台数为 N , 则中央空调冷水机组的制冷能力可按式(7)计算。

$$L_{cool}(t) = \sum_{i=1}^N COP_i(t) \alpha_i(t) P_{R,i} \quad (7)$$

式中: $\alpha_i(t)$ 为 t 时刻第 i 台冷水机组的负载率; $P_{R,i}$ 为第 i 台冷水机组的额定功率; COP 指机组的实际制冷量(单位 kW, 为热量单位)与实际耗电量(单位 kW, 为电力功率单位)的比值, 其大小反映了机组的运行状况, 是中央空调重要的能效指标。其与负载率的关系为

$$COP_i(t) = a_i + b_i \alpha_i(t) + c_i [\alpha_i(t)]^2 \quad (8)$$

式中, a_i 、 b_i 、 c_i 为系数, 与冷水机组特性有关。

由热平衡方程可知, 中央空调工作期间需满足式(9)。

$$q_{sys}(t) = \gamma L_{cool}(t) \quad (9)$$

式中, γ 表示耗散系数, 一般为 0.8~0.9, 此处取 0.8。

由式(7)一式(9)可得到

$$q_{sys}(t) = \gamma \sum_{i=1}^N (a_i \alpha_i(t) + b_i [\alpha_i(t)]^2 + c_i [\alpha_i(t)]^3) P_{R,i} \quad (10)$$

求解该方程, 可得到空调系统的用电量为

$$P_{air}(t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t) P_{R,i} \quad (11)$$

2.3 人体热舒适度模型

本文选用 ISO-7730 标准中规定的 PMV-PPD 指标来描述和评价人体热舒适度, PMV 指标代表了同一环境绝大多数人的冷热感觉, 分为七级, -3 代表最冷, 3 代表最热^[20]。如表 1 所示。

表 1 人体冷热感觉与 PMV 指标的关系

冷热感觉	热	温暖	微温	中性	偏凉	凉	冷
PMV 指标	3	2	1	0	-1	-2	-3

在我国, 根据《采暖通风与空气调节设计规范》(GB 50019-2003)^[21]中的夏季空调设计条件, PMV 范围为: $-1 \leq PMV \leq +1$ 。

PMV 的计算极为复杂, 必须迭代计算, 为简化计算, 本文采用文献[22]提出的评价热环境的无因次指标来计算 PMV 值, 如式(12)所示。

$$PMV = 0.13(1 + K_1)T_i + 0.13K_2T_{i0} - 5.97 \quad (12)$$

$$K_1 = \frac{\sum_{j=2}^6 A_j}{\sum_{j=1}^6 A_j} \quad (13)$$

$$K_2 = A_0 / \sum_{j=1}^6 A_j \quad (14)$$

式中, A_j 为是房间 j 表面的面积。

从式(12)可以看出, PMV 值的大小受室内空气温度和室内墙体表面温度共同影响。如果要保持 PMV 值不变, 在升高室内温度设定值时, 必须降低室内墙体表面温度值。

3 空调系统的双层优化模型

3.1 上层优化模型

1) 优化目标

对办公建筑空调系统的优化应该考虑分时电价信息和室外温度变化, 动态优化室内温度设定值, 取得兼顾用户用电费用最省和用户舒适度最优的效果。所以上层优化目标中同时考虑用电费用和用户热舒适度, 优化阶段包含两部分, 一是预冷阶段 $t_0 \sim t_1$, 二是正常工作阶段 $t_1 \sim t_2$ 。

$$\min f = \min \sum_{t=t_0}^{t=t_2} \{\omega p(t)P_{\text{air}}^*(t) + (1-\omega)PMV^*(t)\} \quad (15)$$

$$P_{\text{air}}^*(t) = \frac{P_{\text{air}}(t)}{P_{\text{air,B}}} \quad (16)$$

$$PMV^*(t) = \frac{PMV(t)}{PMV_B} \quad (17)$$

式中: ω 为用电费用与热舒适度的权重系数; $P_{\text{air,B}}$ 为空调系统功率的基准值; PMV_B 为热舒适度的基准值, 基准值的大小是在室内温度和蓄热物质温度

均为 26°C 的情况下确定的。

2) 优化约束

(1) 空调系统设定温度约束

$$T_{\min} \leq T_{\text{set}} \leq T_{\max} \quad (18)$$

式中, T_{\min} 、 T_{\max} 分别为空调系统可设定温度的下限和上限。

(2) 人体热舒适度约束

$$-1 \leq PMV \leq 1 \quad (19)$$

(3) 空调系统功率约束

$$0 \leq P_{\text{air}} \leq P_{\max} \quad (20)$$

式中, P_{\max} 为空调系统在一个时间单位内空调系统的最大允许功率。

3.2 下层优化模型

中央空调多台冷水机组的总能耗与部分负荷下各设备之间的负荷分配方案密切相关, 因此, 需要考虑各机组性能差异, 寻找可行的节能方案。COP 最优化法是在系统负荷一定的条件下, 最大化冷水机组群的 COP 值, 使得机组处于最优运行状态, 从而提高系统性能, 达到能效最优^[23]。

1) 优化目标

假设 N 台冷水机组均处于运行状态, 其中第 i 台 ($i=1, 2, \dots, N$) 冷水机组 t 时刻的可优化功率为

$$W_i^a(t) = (\alpha_i(t) - \alpha_i^0)W_{R,i} \quad (21)$$

式中: $\alpha_i(t)$ 为 t 时刻机组的负载率; α_i^0 为负载率下限, 为了避免在优化过程中, 因离心式冷水机组的负载率太低而发生涌浪的情况, 一般以空调设计容量的 50%~70% 为可接受范围, 此外取 60%; $W_{R,i}$ 为机组额定容量, kW。

设定每小时重新对负载率进行分配, 通过 COP 最优化方法计算满足室内舒适度和负荷优化量要求的每台冷水机组的预期负载率, 进而达到空调冷水机组整体高性能运行的目的。负载率优化分配的目标是优化后冷水机组的总体 COP 值最大, 即

$$\max \sum_{i=1}^N COP_i(t) \quad (22)$$

2) 优化约束

(1) 目标负荷约束

设 t 时刻第 i 台冷水机组预期负载率为 $\alpha_i^e(t)$,

预期优化率为 $\eta_i^e(t)$, 两者关系为

$$\eta_i^e(t) \times W_i^a(t) = (\alpha_i(t) - \alpha_i^e(t))W_{R,i} \quad (23)$$

每台冷水机组的预期优化量为

$$W_i(t) = \alpha_i^e(t) \times W_i^a(t) \quad (24)$$

式中, $W_i(t)$ 表示 t 时刻第 i 台冷水机组预期优化量, 单位为 kW。

预期优化量需满足目标优化量要求:

$$\sum_{i=1}^N W_i(t) = q_{\text{sys}}(t) \quad (25)$$

式中, $q_{\text{sys}}(t)$ 为 t 时刻的目标负荷优化量, 单位为 kW。

(2) 冷水机组负载率约束

第 i 台冷水机组预期负载率 $\alpha_i^e(t)$ 不能低于负载率下限值:

$$\alpha_i^0 \leq \alpha_i^e(t) \leq 1 \quad (26)$$

式中, $\alpha_i^e(t)$ 表示 t 时刻第 i 台机组的预期负载率。

3.3 求解方法

本文双层优化模型的上下两层均采用 PSO 算法来求解^[24-25]。上层通过控制变量的值来引导下层, 下层在上层决策方案给定的情况下搜索自己的最佳方案, 并将自己的最佳方案反馈给上层; 为了达到双层优化的效果, 上层模型再根据下层的反馈信息调整其方案, 重新做出决策, 然后在上下层之间交互迭代, 同时优化双层模型的上下层, 最终求得双层模型的最优解。求解流程如图 2 所示。

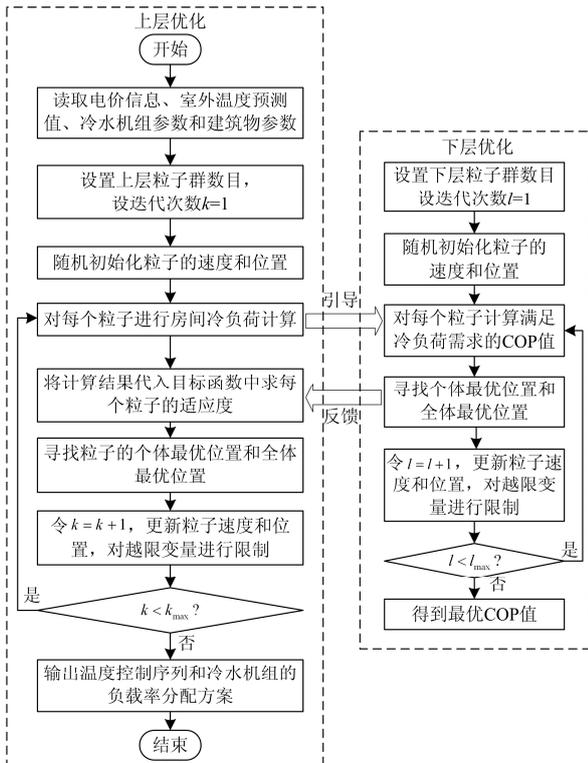


图 2 双层模型的求解流程

Fig. 2 Solving process of two-layer model

4 算例分析

4.1 算例描述

1) 建筑信息。本文以南京某一大型办公建筑为

例, 建筑面积为 17 280 m², 建筑尺寸长宽高分别为 48 m×30 m×36 m, 建筑围护结构外墙采用钢筋混凝土, 墙厚 240 mm, 密度 2600 kg/m³, 比热容为 0.96 kJ/(kg·K), 夏季外墙对外部空气对流传热系数 $h_0 = 4.74 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 对内部空气对流传热系数 $h_1 = 2.46 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。取办公建筑标准空调房间, 房间尺寸长宽高为 8 m×6 m×3 m, 夜间通风率为 $q_v = 450 \text{ m}^3/\text{h}$, 内部热增益 $E = 500 \text{ W}$ 。渗透进入室内空气的热量, 其中 ΔP 取 6.42 kg/m², n 取 1, l 取 2 m, a 取 5.3。空气的密度为 1.29 kg/m³, 比热容为 1.005 kJ/(kg·K)。

2) 中央空调信息。办公建筑采用水冷式中央空调, 装有 3 台额定容量相同但 COP 曲线不同的冷水机组, 额定制冷量为 400 kW, 负载率下限为 60%, 冷水机组 COP 曲线如图 3 所示, 其函数分别为

$$\begin{aligned} COP_1 &= -7.9457a_1^2 + 13.9097a_1 - 0.8151 \\ COP_2 &= -8.1547a_2^2 + 14.6922a_2 - 1.5475 \\ COP_3 &= -5.7545a_3^2 + 9.7558a_3 + 1.1975 \end{aligned} \quad (27)$$

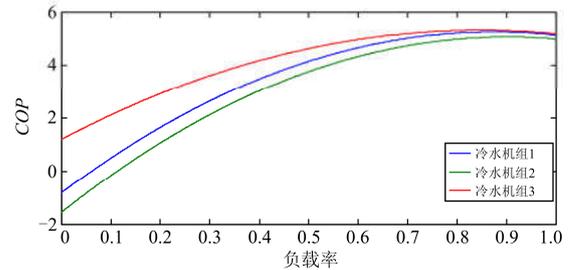


图 3 3 台冷水机组 COP 与负载率的关系

Fig. 3 Relationship between COP and load rate of 3 chillers

3) 气象信息。选取夏季某一天, 温度曲线如图 4 所示。对室外温度进行正弦函数拟合, 得到室外温度波动值 $\Delta T'_0 = 3.85 \text{ }^\circ\text{C}$, 室外空气温度平均值 $T'_0 = 31.08 \text{ }^\circ\text{C}$, $T'_0(t) = 31.08 + 3.85 \sin(\frac{\pi}{12}(t-10))$ 。

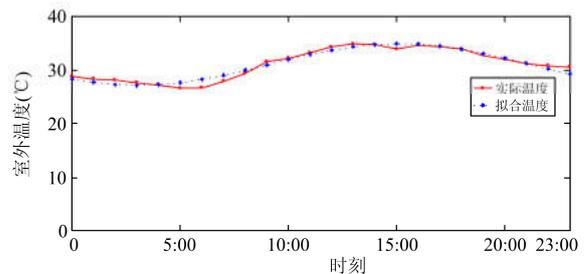


图 4 室外温度拟合曲线

Fig. 4 Curve of outdoor temperature

4) 电价信息。峰时段为 8:00~21:00, 电价 1.2 元/kWh; 谷时段为 21:00~次日 8:00, 电价 0.6 元/kWh。

4.2 结果分析

设定上下两层粒子种群数量均为 50, 最大迭代次数均为 500, 将用电费用与舒适度的权重系数取为 0.5, 预冷时间段为 6:00~8:00, 预冷期间设定温度为 19℃, 由于粒子群算法的随机性, 取 10 次计算结果的平均值作为最终解, 以下从用电费用、舒适度和能效 3 个方面进行分析。

1) 用电费用分析

为了比较分时电价环境下预冷策略的效果, 在相同的条件下对空调系统运行在传统的恒温控制模式和不采取预冷策略模式下的结果对比, 如表 2 所示。

表 2 不同运行模式下的仿真结果

运行模式	用电费用/元	平均 PMV
恒温控制模式	6141.6	0.8124
不采取预冷策略	5662.8	0.9136
采取预冷策略	5583.6	0.9152

从表 2 可知, 空调系统运行在恒温模式下用户的用电费用最高, 但舒适度也是最好的。与恒温控制模式相比, 在不采取预冷策略的情况下, 单纯根据室外温度变化, 对空调系统的设定温度进行动态优化, 使得用电费用降低了 7.79%, 用户的热舒适度指标虽然有所降低, 但并不会影响人体的热舒适度感觉。

与恒温控制模式和不采取预冷策略相比, 预冷策略使得空调系统的用电费用分别节省了 9.08%和 1.39%。这是因为预冷策略下考虑了分时电价和楼宇的储能特性。在低电价时段对房间内的蓄热物质进行了预冷, 将制冷量提前储存在蓄热物质中; 而在高电价时段, 蓄热物质中储存的冷量释放到房间内, 从而降低了高电价时段的空调系统用电量。

2) 舒适度分析

不同运行模式下空调系统的设定温度和房间的 PMV 值如图 5 所示。

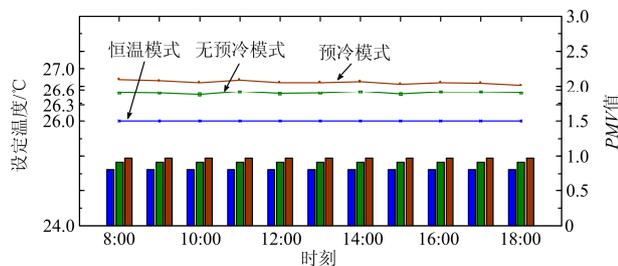


图 5 不同运行模式下的设定温度与 PMV 值

Fig. 5 Setting temperature and PMV in different operation modes

由图 5 可知, 未采取预冷策略时优化后的室内温度设定值基本上在 26.5℃上下浮动, 而采取预冷策略后优化后的室内温度设定值在 26.7℃上下浮动, 虽然设定温度升高了, 但是 PMV 指标仍在规定的范围内, 不会引起人体的不舒适感觉。采取预冷策略后设定温度较高, 是因为空调系统在低电价时段对房间进行了预冷, 在工作期间这部分冷量会释放出来, 可以减少空调系统的制冷量。此外, 3 种运行方式下空调房间的 PMV 指标都较平稳, 说明在 3 种运行方式下, 室内人员不会出现忽冷忽热的现象, 采取优化策略虽然稍微降低了 PMV 指标值, 但是优化后的室内温度设定值仍能够满足房间内人员的舒适度要求。

3) 能效分析

COP 是中央空调系统重要的能效指标, 因此, 选取 COP 值作为中央空调能效的度量值。双层优化前后空调系统的日平均总体 COP 如图 6 所示。

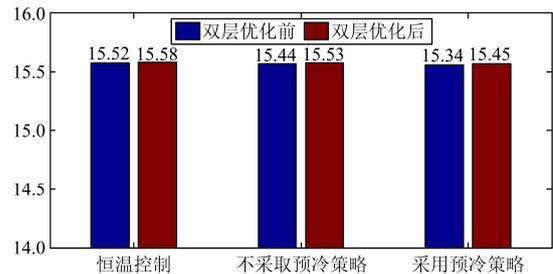


图 6 双层优化前后不同运行模式下平均 COP

Fig. 6 Average value of COP in different operation modes before and after two-layer optimization

由图 6 可知, 在不同模式下采取双层优化, 空调系统的日平均总体 COP 得到了不同程度地提高, 其中恒温控制模式、不采取预冷策略和采用预冷策略 3 种模式下冷水机组总体 COP 分别提高了 0.38%、0.51%和 0.63%, 说明双层优化可以有效提升办公建筑空调负荷能效, 对于促进社会节能减排具有实际意义。

3 种模式下双层优化前后冷水机组总体 COP 逐时变化曲线如图 7 所示。

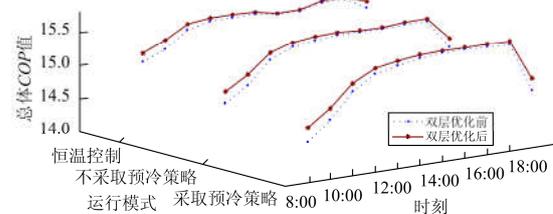


图 7 优化前后 COP 曲线

Fig. 7 COP curves before and after optimization

由图 7 可知, 双层优化策略使冷水机组在 3 种运行模式下, 各个时刻的总体 COP 值都有所增加, 可以提高空调系统的整体用电效率, 降低空调系统的电能消耗量。

下面选取预冷模式下对空调系统能效与冷水机组负载率优化分配作进一步分析。通过求解预冷策略模式下双层优化模型得到的中央空调冷水机组预期负载率和冷水机组的逐时总体 COP 的结果如表 3 所示。

表 3 冷水机组负载率和总体 COP 值

Table 3 Load rate of every chiller and overall COP

时刻	负载率			总体 COP
	机组 1	机组 2	机组 3	
8:00	0.70	0.73	0.60	14.8398
9:00	0.73	0.75	0.64	15.0735
10:00	0.77	0.80	0.71	15.3949
11:00	0.81	0.84	0.76	15.5667
12:00	0.83	0.86	0.79	15.6259
13:00	0.86	0.88	0.82	15.6652
14:00	0.88	0.91	0.86	15.6732
15:00	0.89	0.91	0.87	15.6697
16:00	0.86	0.89	0.83	15.6704
17:00	0.85	0.88	0.82	15.6619
18:00	0.72	0.75	0.64	15.0496

由表 3 可知, 负载率从高到低依次为机组 2、机组 1 和机组 3, 总体是按照冷水机组新旧程度进行负荷优化量的分配, 相对较旧的 3 号冷水机组的负载率总是低于 1 号和 2 号机组。较新机组承担较多的负荷量, 冷水机组总体 COP 基本保持在 15 以上, 实现了冷水机组的整体高效运行, 减少了冷水机组的总体用电量。

5 结论

空调系统作为办公建筑耗电量最大的用电设备之一, 在分时电价环境下对其进行合理地控制是办公建筑用户实现需求响应的重要手段之一。本文提出的双层柔性优化模型综合考虑了室外温度、电价信息、用户舒适度和中央空调冷水机组性能差异, 以最小化用户用电费用和最大化冷水机组的总体 COP 为目标进行了优化。算例结果表明, 与恒温控制相比, 本文提出的双层柔性优化控制策略可以有效地提高冷水机组的用电效率, 降低用户用电费用, 同时对于促进社会节能减排具有实际意义。

参考文献

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2014[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

- [2] 黎灿兵, 尚金成, 朱守真, 等. 气温影响空调负荷的累积效应导致能耗的分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 30-33.
LI Canbing, SHANG Jincheng, ZHU Shouzhen, et al. An analysis of energy consumption caused by air temperature-affected accumulative effect of the air conditioning load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 30-33.
- [3] 林顺富, 郝朝, 汤晓栋, 等. 基于数据挖掘的楼宇短期负荷预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 83-89.
LIN Shunfu, HAO Chao, TANG Xiaodong, et al. Study of short-term load forecasting method based on data mining for buildings[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 83-89.
- [4] 宋宏坤, 唐国庆, 卢毅, 等. 江苏省夏季空调负荷分析及需求侧管理措施的削峰效果测算[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 88-91.
SONG Hongkun, TANG Guoqing, LU Yi, et al. Analysis on summer air-conditioning loads composition in Jiangsu Province and estimation of peak load shifting effect by DSM measures[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 88-91.
- [5] YORDANOVA S, MERAZCHIEV D, JAIN L. A two-variable fuzzy control design with application to an air-conditioning system[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23(2): 474-481.
- [6] 孙晓禹, 李锐. 冷水机组联合运行策略仿真与分析[J]. 建筑节能, 2015(4): 37-41.
SUN Xiaoyu, LI Rui. Simulation and analysis of operation strategies in the multiple chillers system[J]. Building Energy Efficiency, 2015(4): 37-41.
- [7] 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.
- [8] XU P, HAVES P, PIETTE M A, et al. Peak demand reduction from pre-cooling with zone temperature reset in an office building[J]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
- [9] MORGAN S, KRARTI M. Impact of electricity rate structures on energy cost savings of pre-cooling controls for office buildings[J]. Building and Environment, 2007, 42(8): 2810-2818.
- [10] 殷荣欣. 加州炎热气候地区大型商业建筑的错峰策略研究[M]. 上海: 同济大学, 2009.

[11] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.

[12] 徐永丰, 吴洁晶, 黄海涛, 等. 考虑负荷率的峰谷分时电价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 96-103.
XU Yongfeng, WU Jiejing, HUANG Haitao, et al. Time-of-use tariff model considering load factor[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 96-103.

[13] 黄海涛, 吴洁晶, 顾丹珍, 等. 计及负荷率分档的峰谷分时电价定价模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 122-129.
HUANG Haitao, WU Jiejing, GU Danzhen, et al. Pricing model of time-of-use electricity tariff considering customers classified by load factor[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 122-129.

[14] THOMAS A G, JAHANGIRI P, WU D, et al. Intelligent residential air-conditioning system with smart-grid functionality[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2240-2251.

[15] 张延宇, 曾鹏, 李忠文, 等. 智能电网环境下空调系统多目标优化控制算法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1819-1826.
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, LI Zhongwen, et al. A multi-objective optimal control algorithm for air conditioning system in smart grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1819-1826.

[16] 辛洁晴, 吴亮. 商务楼中央空调周期性暂停分档控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 49-54.
XIN Jieqing, WU Liang. Hierarchical strategies for duty cycling control of air conditioners in business buildings[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 49-54.

[17] 李恒强, 徐石明, 陈璐, 等. 楼宇中央空调柔性调控参与电网调峰实证研究[J]. 南方电网技术, 2016, 10(10): 51-58.
LI Hengqiang, XU Shiming, CHEN Lu, et al. Empirical research on flexible control of central air-conditioning of buildings for peak load regulation[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(10): 51-58.

[18] YANG L, LI Y. Cooling load reduction by using thermal mass and night ventilation[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(11): 2052-2058.

[19] 钱以明. 高层建筑空气渗透特性和渗透空气量[C] // 上海制冷学会一九八九年年会论文集, 1989.
QIAN Yiming. High rise building air permeability characteristics and air volume[C] // Shanghai Refrigeration Association 1989 Annual Conference Proceedings, 1989.

[20] OLESEN B W, PARSONS K C. Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730[J]. Energy and Buildings, 2002, 34(6): 537-548.

[21] 中国建筑科学研究院. 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准: JGJ 134—2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
China Academy of Building Research. Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter area: JGJ 134—2001[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2001.

[22] 叶海, 魏润柏. 热环境客观评价的一种简易方法[J]. 人类工效学, 2004, 10(3): 16-19.
YE Hai, WEI Runbo. A simple method for objective evaluation of thermal environment[J]. Ergonomics, 2004, 10(3): 16-19.

[23] CHANG Y C, TU H C. An effective method for reducing power consumption-optimal chiller load distribution[C] // Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on: IEEE, 2002, 2: 1169-1172.

[24] AI Qian, FAN Songli, PIAO Longjian. Optimal scheduling strategy for virtual power plants based on credibility theory[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0017-x

[25] 文娟, 谭阳红, 雷可君. 基于量子粒子群算法多目标优化的配电网动态重构[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 73-78.
WEN Juan, TAN Yanghong, LEI Kejun. Multi-objective optimization of distribution network dynamic reconfiguration based on integer coded quantum particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 73-78.

收稿日期: 2016-10-14; 修回日期: 2017-02-23

作者简介:

王庆泽(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能用电; E-mail: qzwang856@163.com

陈星莺(1964—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博导, 研究方向为配用电规划与评估、智能配电网运行分析、配电网智能调度与控制、高效用电与节能、能源管理与能源经济等。E-mail: xychen@hhu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)