DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180874

考虑分时电价的地源热泵系统随机运行优化策略

陈 程[1]，陈星莺[1,2]，张健钊[1]，余 昆[1,2]，甘 磊[1,2]

(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)

摘要：地源热泵电采暖相较于其他采暖系统具有更高的社会效益及经济效益。为提高地源热泵系统的用电能效，提出了一种基于分时电价的地源热泵随机运行优化策略。提出了一种用户热负荷计算方法。在此基础上，以兼顾用电费用最省和热舒适度最优为优化目标，基于机会约束规划理论，建立了计及不确定性的地源热泵系统随机运行优化模型。采用改进 PSO 算法进行求解，得到地源热泵系统的优化控制策略及热泵机组的负载率分配策略。以某校园教学楼采暖系统进行算例仿真，结果表明所提出的模型及控制策略能够在满足舒适度要求的基础上，提高校园地源热泵系统用电能效，降低用电费用。

关键词：电能替代；地源热泵；机会约束规划；随机优化；PSO

Stochastic operational optimal strategy for ground source heat pump system under TOU price

CHEN Cheng[1], CHEN Xingying[1,2], ZHANG Jianzhao[1], YU Kun[1,2], GAN Lei[1,2]

(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)

Abstract: Using ground source heat pump for electric heating brings more social and economic benefits than other heating systems. To improve the energy efficiency of ground source heat pump system, stochastic operational optimal strategy for ground source heat pump system under TOU price is put forward. A method for calculating the thermal load of users is proposed. On this basis, the stochastic operational optimal model of ground source heat pump system is established according to the principle of Chance-Constrained Programming (CCP), which aims to minimize electricity consumption and maximize the thermal comfort. The improved PSO algorithm is used to resolve the model to obtain the optimal control strategy of ground source heat pump system and the load distributive strategy of heat pump units. The analysis of example, a campus heating building heating system, shows that the model and the control strategy proposed in this paper can improve the energy efficiency of electric heating system on campus and lower the cost of electricity consumption without reducing the thermal comfort.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1766203), National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901100), and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Supply and Demand Friendly Interactive System between Urban Customer and Power Grid”.

Key words: alternative energy; ground source heat pump; chance constrained programming; stochastic optimization; PSO

0 引言

随着社会经济的快速发展，不合理的能源结构带来了很多环境问题，温室气体的排放和化石燃料储备的枯竭迫使人类从可再生能源中产生未来能源需求[1]。电能替代战略被视为治理能源结构不合理的重要手段，“煤改电”是电能替代战略重要组成部分。电采暖作为电能替代在生产生活领域的重要形式，对于优化能源结构、防治大气污染、解决雾霾问题起着至关重要的作用[2-4]。在保证用户需求的前提下，如何优化电采暖设备的运行方式，以降低用户用电费用，同时减少高峰期用电，有效降低电网峰谷差，具有重要的意义。

电采暖的应用在国外出现相对较早，北欧国家

基金项目：国家自然科学基金重点项目资助(U1766203)；国家重点研发计划资助(2016YFB0901100)；国家电网公司科技项目资助“城区用户与电网供需友好互动系统”

中电采暖设备装机占比 50%以上，而在美国更是高达 80%以上[5]。国外多采用地源热泵供暖系统和蓄热式电锅炉等先进的供热设备，而在国内电采暖的应用刚处于起步阶段。文献[6]研究了电采暖技术的环境效益，证明了电采暖相对于传统的燃煤供暖技术具有污染少、能效高的优点。文献[7-8]研究了电暖器、电锅炉、热泵、电热膜、蓄热地板等多种电采暖技术的运行效益，结合建筑楼宇供暖的实际需求比对各类电采暖设备的运行成本费用，结果表明地源热泵的能量转化效率高，并且在转化能量的过程中对环境没有污染，是目前最清洁、最高效的能源利用方法。地源热泵系统利用地下浅层地热资源既能供热又能制冷，具有高效节能、低运行成本和良好的环保效益等优点，在大型公共建筑节能中应用潜力巨大，随着地源热泵理论、技术和配套产业的发展进步以及国家政策鼓励支持，地源热泵研究应用将更加广泛，并朝着区域化、规模化、热源多元化发展，从而提升节能性和经济性，提高综合效率[9]，因此本文以地源热泵系统为研究对象。目前对制冷采暖设备的优化控制策略也有较多的研究。文献[10]提出了大量空调负荷的聚合模型，设计了新的聚合控制策略，在不影响终端用能的前提下，能够完全响应控制目标，总的能量消耗减少了 30%。文献[11]在分时电价环境下提出空调负荷双层柔性优化控制策略，有效地提高空调冷水机组的用电效率，降低用户用电费用；文献[12]利用环境温度预测和实时策略修正来控制空调以保证舒适性，提出了可控负荷能力评估方法、动态调控策略生成方法和负荷调控关键指标评价方法；文献[13]提出了智能电暖网的概念，实现了区域范围内分散式电采暖设备的协同优化。上述文献对制冷设备和分布式采暖设备的优化控制方法进行了深入的研究，而对冬季集中采暖设备的优化控制研究较少。

基于上述考虑，本文以地源热泵系统为控制对象，对用户的热负荷进行估计，考虑日前室外温度预测的不确定性，以兼顾用电费用和热舒适度为优化目标，基于机会约束规划理论提出计及温度不确定性的地源热泵系统运行优化模型，同时考虑多台热泵机组性能曲线的不同，建立了电采暖系统热泵机组负荷分配优化模型，并采用改进 PSO 算法对模型进行求解，通过算例验证了本文策略的有效性。

1　地源热泵能耗模型

地源热泵主要是由户外的地热换热系统、热泵机组和室内热分配系统构成。能量流如图 1 所示。

用电设备主要包括三大类：热泵机组、地热换热系统和室内热分配系统中的循环水泵及风机。地源热泵的耗电量主要根据用户的制冷(热)量需求确定，因此需先对用户的热负荷进行计算。

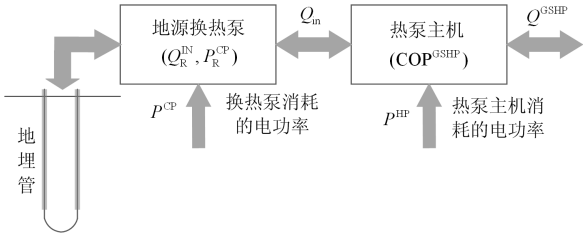


图 1　地源热泵能量流示意图

Fig. 1 Ground source heat pump energy flow diagram

1.1　热负荷计算

地源热泵的供暖对象一般为一个用户群，但由于相同条件下每个房间的热负荷情况几乎相同，因而本文仅针对单个房间进行热负荷建模分析。以此为前提，对应到一个用户群的热负荷，只需将单个房间的热负荷值对应增加房间数或按面积折算。

基于热平衡的原理对一个房间的热负荷进行计算[14]，为简化热负荷计算模型，本文仅考虑透过房屋的围护结构即墙壁传导进来的热量。

围护结构对建筑采暖耗热量指标以及电采暖耗热量指标的影响，由墙体传热量、屋顶传热量、窗户传热量、门传热量和太阳辐射的热量 5 个部分组成，如图 2 所示，式(1)—式(6)为传热的计算模型。

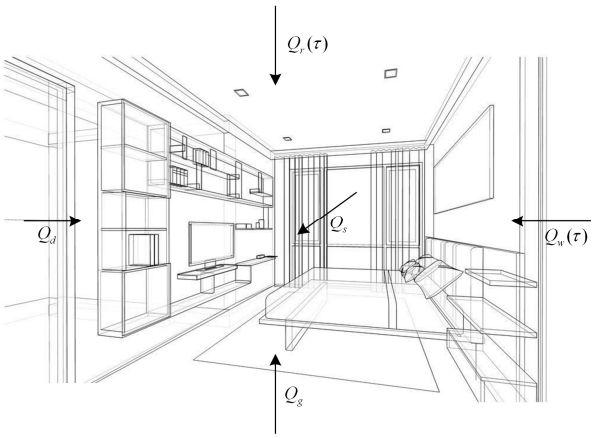


图 2　房间传热示意图

Fig. 2 Room heat transfer diagram

$$Q_{c1}(\tau)=Q_w(\tau)+Q_r(\tau)+Q_g(\tau)+Q_d(\tau)+Q_s(\tau) \quad (1)$$

$$Q_w(\tau)=\sum_{i=1}^{n}k_{wi}\gamma(T_{\text{out}}(\tau)-T_{\text{in}}(\tau)) \quad (2)$$

$$Q_g(\tau)=\sum_{i=1}^{n}k_{gi}f_{gi}\gamma(T_{\text{out}}(\tau)-T_{\text{in}}(\tau)) \quad (3)$$

$$Q_d(\tau)=\sum_{i=1}^{n}k_{di}f_{di}\gamma(T_{\text{out}}(\tau)-T_{\text{in}}(\tau)) \quad (4)$$

$$Q_r(\tau)=k_rf_r(T_{\text{out}}(\tau)-T_{\text{in}}(\tau)) \quad (5)$$

$$Q_s(\tau)=-\sum_{i=1}^{n}q_iSC_if_{gi} \quad (6)$$

式中：Q_w、Q_r、Q_g、Q_d分别表示透过房屋墙体、上屋顶、地板和门传入的热量，单位为 W；Q_s 表示透过玻璃窗的太阳辐射热量，单位为 W；系数 k 表示传热系数，单位为 W/(m^2·℃)；f 表示房屋的实际供暖面积，单位为 m^2；T_{out} 表示室外平均温度，T_{in} 表示室内平均温度，单位为℃，用户根据热平衡定律计算房间内的供暖量，对于为了反映整个供暖周期的电采暖设备的实际能耗，采用室外的平均温度和室内平均设定的供暖温度来计算温差；系数 SC 表示房屋玻璃窗的总的遮阳系数，单位为 W/m^2，其值与用户所在地的实际天气气候条件以及窗的朝向密切相关；q 表示单面窗户传递的热量；计算公式中下标 w、r、g、d 分别表示墙体、屋顶、地板和门；下标 i 表示各个朝向；τ 表示时间；γ 表示朝向修正系数。

1.2 地源热泵系统能耗模型

在地源热泵中热泵机组用来实现室内外之间的热量交互。国际上一般采用能效比(Coefficient Of Performance, COP)指标来衡量热泵机组工作效率，其本质含义是提供单位热量消耗的电能，记房间内供热量 Q，则热泵的耗电量 P^{GSHP} 计算公式为

$$P^{\text{GSHP}}(\tau)=Q(\tau)/COP(\tau) \quad (7)$$

COP 和负载率的关系如式(8)所示。

$$COP(\tau)=k_0+k_1\frac{Q(\tau)}{Q_R}+k_2\left(\frac{Q(\tau)}{Q_R}\right)^2 \quad (8)$$

式中：$COP(\tau)$为地源热泵机组实际运行状态下的 COP 值；$Q(\tau)/Q_R$ 表示负载率；Q_R 为额定输出功率，$Q(\tau)$为 τ 时刻的输出功率；k_0、k_1、k_2 分别为地源热泵的性能参数。

2 计及不确定性的地源热泵系统运行优化模型

2.1 地源热泵系统运行温度调节优化模型

1) 目标函数

地源热泵运行的前提是必须满足用户的舒适度需求，因而本文优化目标兼顾考虑经济性指标和舒适度指标两个因素。其中，经济性指标采用系统的运行费用来度量；舒适度指标选用 ISO-7730 中的 PMV-PPD(Predicted Mean Vote-Prsdicted Percentage of Dissatisfied)指标进行计算，该指标代表了人群对周围热环境的模糊感知程度以及人员对舒适度的不满意程度来度量，量值如表 1 所示。

表 1 ISO-7730 中的 PMV-PPD 指标

Table 1 PMV-PPD indicator in ISO-7730

热感觉	冷	凉	微凉	适中	微暖	暖	热
PMV	−3	−2	−1	0	1	2	3

为了对 PMV 指标进行简化计算[15]，本文采用式(9)进行计算。

$$PMV(\tau)=0.13(1+K_1)T_{\text{in}}(\tau)+0.15K_2T_{\text{out}}(\tau)-8.07 \quad (9)$$

式中，K_1、K_2 表示相关系数。

预测平均评价(Predicted Mean Vote, PMV)，是以人体热平衡的基本方程式以及心理生理学主观热感觉的等级为出发点，考虑了人体热舒适感诸多有关因素的全面评价指标，为 ISO7730 中用于评价热舒适度的指标。ISO7730 标准中给出的推荐范围是 −0.5≤PMW≤0.5，根据中国国家标准[16]及设计规范[17]中的规定，PMV 的取值范围是[−1,1]。

模型的目标函数如式(10)所示。

$$\min E\left\{\sum_{\tau=1}^{T}\omega p(\tau)P^{\text{GSHP},*}(\tau)+\sum_{\tau=1}^{T}(1-\omega)PMV^*\right\} \quad (10)$$

$$P^{\text{GSHP},*}(\tau)=\frac{P^{\text{GSHP}}(\tau)}{P_B^{\text{GSHP}}} \quad (11)$$

$$PMV^*(\tau)=\frac{PMV(\tau)}{PMV_B} \quad (12)$$

式中：E 为期望；ω 为用电费用与热舒适度的权重系数，取值范围为[0,1]，其值越接近 1，说明用户越关注用电费用，反之，用户更为关注热舒适度；$p(\tau)$为 τ 时刻的电价；$P^{\text{GSHP},*}(\tau)$为 τ 时刻电采暖系统用电功率的标幺值，其实际值为 $P^{\text{GSHP}}(\tau)$，基准值为 P_B^{GSHP}；$PMV^*(\tau)$为 τ 时刻舒适度的标幺值，其实际值为 $PMV(\tau)$，基准值为 PMV_B。

2) 约束条件

由于地源热泵系统的日前优化是基于外界环境温度的预测结果进行的，而温度预测值具有一定的不确定性，从而导致地源热泵系统对应的用电量以及舒适度指标具有一定的不确定性。因此，本文采用机会约束规划[18-19]理论将这些不确定性因素建立至模型的约束条件中，即允许所做决策在一定程度上不满足约束条件，但所做决策使约束条件成立的概率要大于等于一定的置信水平。

(1) 热舒适度约束

室内温度直接影响着用户的热舒适度，考虑到

外界温度的不确定性变化，热舒适度的机会约束条件如式(13)所示。

$$P\left\{\left|PMV(\tau)\right| \le PMV_{\max}\right\} \ge \beta_{\mathrm{PMV}} \tag{13}$$

式中：$P\{\cdot\}$为约束条件成立的概率；$PMV_{\max}$为用户可接受的热舒适度边界值；β_{PMV}为预先给定的热舒适度约束置信水平。

(2) 电采暖设备设定温度约束

$$P\left\{T_{\min} \le T_{\mathrm{set}}(\tau) \le T_{\max}\right\} \ge \beta_{\mathrm{T}} \tag{14}$$

式中：$T_{\min}$、$T_{\max}$分别为电采暖设备所允许设定温度的下限和上限；β_{T}为预先给定的设定温度约束置信水平。

(3) 电采暖设备设定功率约束

$$P\left\{0 \le P^{\mathrm{GSHP}}(\tau) \le P_{\max}^{\mathrm{GSHP}}\right\} \ge \beta_{\mathrm{P}} \tag{15}$$

式中，$P_{\max}^{\mathrm{GSHP}}$为电采暖设备的最大允许功率；β_{P}为预先给定的功率约束置信水平。

2.2 地源热泵机组负荷分配优化模型

1) 目标函数

一般用户中，地源热泵系统会配置多台热泵机组，本节结合了多台地源热泵机组制热效果的特性差异，通过对地源热泵系统中不同机组的负载进行优化分配，从而使得地源热泵系统的整体能效比COP最优，假设N台热泵机组均处于运行状态，其中第i台$(i=1,2,\cdots,N)$热泵机组τ时刻的可优化功率为

$$W_i^{\alpha}(\tau) = (\alpha_i(\tau) - \alpha_i^0)W_{R,i} \tag{16}$$

式中：$W_i^{\alpha}(\tau)$为τ时刻第i台热泵机组的可优化功率；$\alpha_i(\tau)$为τ时刻地源热泵机组的负载率；α_i^0为地源热泵机组工作时负载率下限，取值范围为50%~70%；$W_{R,i}$为地源热泵机组的额定功率。

对地源热泵机组在每个时刻的负载率进行优化分配，使得一天中地源热泵系统整体的运行效率最优，目标函数如式(17)所示。

$$\max \sum_{i=1}^{N} COP_i^{\mathrm{GSHP}}(\tau) \tag{17}$$

式中，$COP_i^{\mathrm{GSHP}}(\tau)$表示$\tau$时刻第$i$台热泵机组的能效比。

2) 约束条件

(1) 目标负荷约束

记τ时刻热泵机组中第i台的预期负载率为$\alpha_i^e(\tau)$，其预期优化率为$\eta_i^e(\tau)$，两者的关系如式(18)所示。

$$\eta_i^e(\tau) \times W_i^{\alpha}(\tau) = (\alpha_i(\tau) - \alpha_i^e(\tau))W_{R,i} \tag{18}$$

每台热泵机组的预期优化量如式(19)所示。

$$W_i(\tau) = \alpha_i^e(\tau) \times W_i^{\alpha}(\tau) \tag{19}$$

式中，$W_i(\tau)$表示τ时刻第i台热泵机组的预期优化量。

预期优化量需满足目标优化量要求，如式(20)所示。

$$\sum_{i=1}^{N} W_i(\tau) = Q_c(\tau) \tag{20}$$

式中，$Q_c(\tau)$为τ时刻的目标负荷优化量。

(2) 负载率约束

第i台热泵机组的预期负载率$\alpha_i^e(\tau)$不能低于负载率下限值，如式(21)所示。

$$\alpha_i^0 \le \alpha_i^e(\tau) \le 1 \tag{21}$$

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

2.3 算法实现

粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO)的本质是群体智能算法，它利用速度与位置的更新策略，致使算法简单易操作[20]，在微电网经济运行及实时能量管理、电力系统经济调度、冷热电联供系统运行优化[21]等电力领域得到了大量应用。

采用粒子群算法迭代求解时，粒子根据式(22)和式(23)更新速度和位置。

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^{k} + c_1 r_1\left(p_{id}^{k} - x_{id}^{k}\right) + c_2 r_2\left(p_{gd}^{k} - x_{id}^{k}\right) \tag{22}$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^{k} + v_{id}^{k+1} \tag{23}$$

式中：w为惯性权重；c_1、c_2为学习因子；r_1、r_2为随机数。

为了使得算法尽快收敛，本文采用式(24)所示的方法对惯性权重进行修正。

$$w = w_s - \frac{w_s - w_e}{k_{\max}}k \tag{24}$$

式中：w_s为初始权重；w_e为终止权重；k、$k_{\max}$分别为当前迭代次数和最大迭代次数。

并采用如式(25)和式(26)所示的反余弦方法更新学习因子c_1、c_2。

$$c_1 = c_{1s} + \left(c_{1e} - c_{1s}\right)\left(1 - \frac{\arccos\left(-2t/t_{\max} + 1\right)}{\pi}\right) \tag{25}$$

$$c_2 = c_{2e} + \left(c_{2e} - c_{2s}\right)\left(1 - \frac{\arccos\left(-2t/t_{\max} + 1\right)}{\pi}\right) \tag{26}$$

式中：c_{1s}、c_{2s}为初始值；c_{1e}、c_{2e}为终止值。

基于PSO算法求解上述模型的主要步骤如图3所示。

3 算例分析

3.1 基础数据

选取某校园的教学楼进行仿真研究，该校园包含3栋教学楼，假设教学楼均为长方体，每栋教学楼每层有25间教室，共5层，每间教室供暖面积平

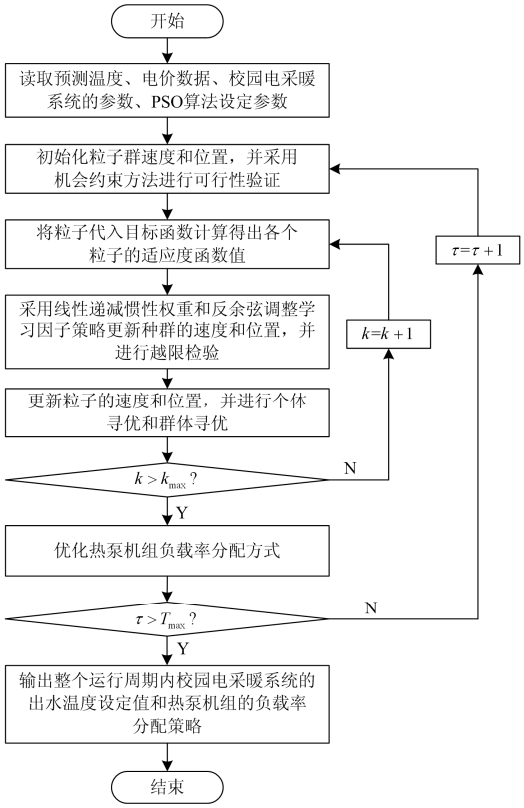


图 3 PSO 算法流程图

Fig. 3 PSO algorithm flow chart

均为 70 m^2，窗户面积为 6 m^2，建筑外围护结构为混凝土框架结构，墙体厚度为 300 mm，内外墙无保温材料，塑钢窗双层玻璃，该教学楼的供热面积约为 30 000 m^2，工作时间为 6:00—22:00，采用恒温供暖方式对教学楼进行供暖，式(2)—式(6)计算热负荷时的系数参照民用建筑空调设计标准进行选取[22]；该教学楼配备的 3 台热泵机组额定功率均为 400 kW，性能系数不同，3 台热泵机组的 COP 曲线如图 4 所示，其负载率下限取为 60%；机会约束条件的置信度取为 0.9，热泵机组的出水温度范围取为 [40,50]，日前预测的室外温度变化曲线如图 5 所示。

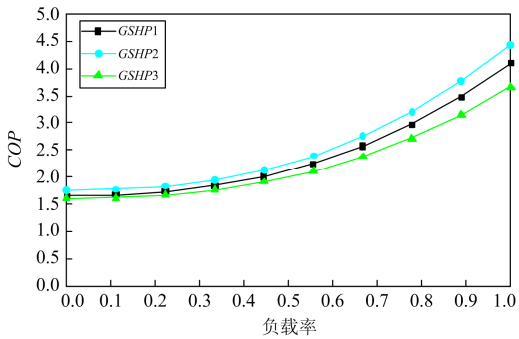


图 4 热泵机组 COP 曲线

Fig. 4 Heat pump unit COP curve

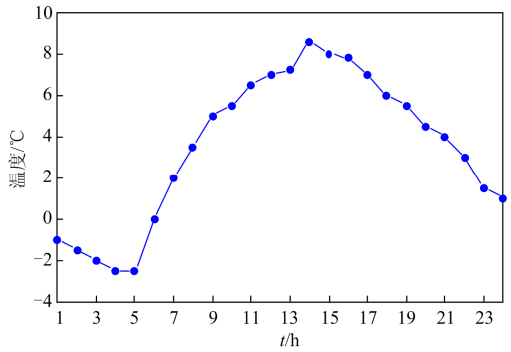


图 5 室外温度逐时变化曲线

Fig. 5 Outdoor temperature hourly change curve

分时电价数据如表 2 所示[23]。

表 2 分时电价

Table 2 TOU price

电价	时段	电价/(元/kWh)
谷时段	0:00—8:00	0.365
平时度	8:00—12:00 17:00—21:00	0.687
峰时段	12:00—17:00 21:00—24:00	0.869

3.2 结果分析

采用 PSO 算法求解本文模型时，本文设定粒子种群数量为 300，算法的最大迭代次数设定为 500，粒子的初始权重 w_s 为 0.85，终止权重 w_e 为 0.35，初始学习因子 c_{1s} 和 c_{2s} 分别为 2.80，0.45，终止迭代时值为 1.30，2.30，目标函数中的权重系数 w 取为 0.5。下面从校园用户的用电费用、用户舒适度以及热泵机组能效 3 个方面进行分析。

1) 用电费用

为了方便比较通过优化温度设定所达到的效果，在同等条件下，对地源热泵系统运行结果进行对比，如表 3 所示。

由表 3 可以看出：地源热泵系统在对温度进行优化控制后用电费用较低，与常态的恒温控制模式相比较，地源热泵系统采用温度动态优化设定之后，用户的用电费用降低了 10.43%，效果较好。

表 3 用电费用对比

Table 3 Electricity cost comparison

运行模式	用电费用对比
优化模式	5 392.58
恒温模式 (46℃)	6 020.50

在这两种模式下的热泵机组出水温度设定策略和用电量如图 6 所示。

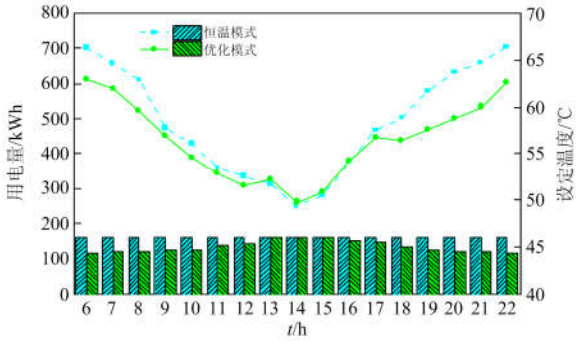


图 6 地源热泵电采暖系统逐时设定温度与用电量

Fig. 6 Hourly setting temperature and electricity consumption of ground source heat pump electric heating system

由图 6 可以看出：优化后的地源热泵系统的设定温度基本上在 44℃上下浮动，较恒温模式下设定的温度 46 ℃约低了 2 ℃，且地源热泵系统的设定根据室外温度变化进行动态设定，所以，优化后地源热泵系统的用电量较恒温设定方案减少了许多，地源热泵系统的用电负荷高峰得到大幅减少，用户全天用电量水平更为平稳，峰谷差得以降低，负荷波动性削弱。

2) 舒适度分析

在地源热泵系统的不同运行模式下，教学楼内房间内的 PMV 指标如图 7 所示。

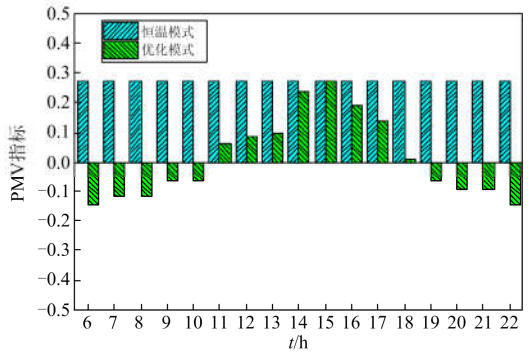


图 7 逐时 PMV 指标

Fig. 7 Hourly PMV indicator

由图 7 可以看出：总体上各个时刻的 PMV 指标均在区间[−0.5,0.5]内，即室内人员会得到较好的供暖体验，因此用户具有较高的供暖舒适满意度。在本文提出的优化控制模式下，地源热泵系统的温度设定值随外界环境温度波动而动态改变，当外界环境温度升高的时候，地源热泵系统将适当调整设定温度值，保证用户可以在适应的 PMV 指标内，即不影响用户是舒适度体验的前提下，减少地源热泵系统的用电量，进而减少用户的用电费用。

3) 能效分析

根据 COP 最大化法优化地源热泵系统热泵机组的负载率分配方式，优化结果如图 8 所示。

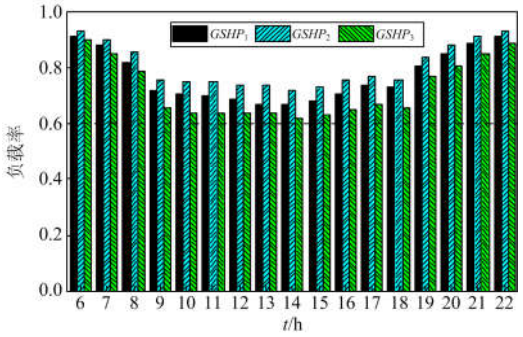


图 8 热泵机组负载率分配方式

Fig. 8 Rate distribution of heat pump unit load

由图 8 可以看出：按照电采暖系统热泵机组的性能好坏程度进行热负荷量的优化分配，负载率由高到低依次是 $GSHP_2$、$GSHP_1$、$GSHP_3$，总体上是依据 *COP* 最大化法，实现了地源热泵系统的高效运行，提高了地源热泵系统的用电能效。

校园电采暖系统的逐时总体 *COP* 值如图 9 所示，平均 *COP* 值如图 10 所示。

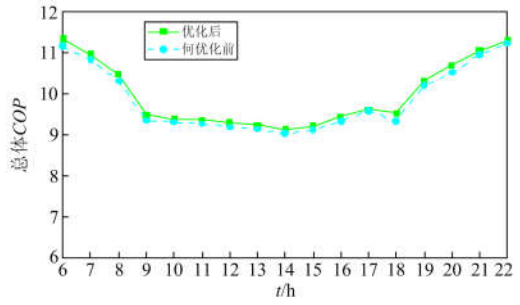


图 9 热泵机组逐时总体 COP 曲线

Fig. 9 Hourly overall COP curve of heat pump unit

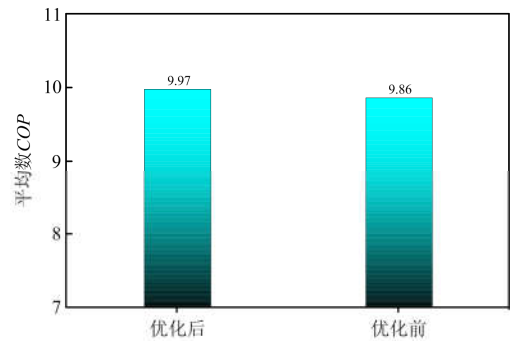


图 10 平均 COP 值对比

Fig. 10 Average COP value comparison

由图 9 可知，各个时段内的总体 *COP* 值优化后较优化前有了明显的提高；由图 10 可知，优化后的平均 *COP* 值较优化前提高了 1.12%，因此，该方法

可以提高校园电采暖系统的整体用电效率，降低用电量，节省用电费用，同时对于促进社会的节能减排也具有实际意义。

4　结论

本文对地源热泵系统的运行策略进行了研究，首先，基于热平衡原理对热负荷进行计算，并给出了地源热泵系统的能耗模型。然后，以兼顾用电费用和热舒适度为优化目标，基于机会约束规划理论建立计及日前温度不确定性的地源热泵系统的优化模型；考虑到多台热泵机组性能曲线的不同，建立了地源热泵系统热泵机组优化模型，采用改进 PSO 算法对模型进行求解。最后，算例仿真结果表明：本文的控制策略能够在满足舒适度要求的基础上，提高校园电采暖系统用电能效，降低用电费用，对于电采暖系统的运行具有一定的可行性与借鉴意义。

参考文献

[1] 高鑫, 杜爱霞, 胡彩娥, 等. 北京市新建住宅小区电能替代分析及策略研究[J]. 供用电, 2017, 34(8): 52-57.
GAO Xin, DU Aixia, HU Caie, et al. Study on the analysis and strategy of electricity replacement in new residential district in Beijing[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(8): 52-57.

[2] 曲子清, 辛洁晴, 吴亮, 等. 商业用户电能采暖替代技术选型的边界条件论证[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 48-54.
QU Ziqing, XIN Jieqing, WU Liang, et al. Argument on boundary conditions of selection electric energy substitution technologies with electric heating for commercial customers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 48-54.

[3] CISEK P, TALER D. Numerical and experimental study of a solid matrix electric thermal Storage unit dedicated to environmentally friendly residential heating system[J]. Energy & Buildings, 2016, 130: 747-760.

[4] XU C, WANG C, XU G, et al. Thermodynamic and environmental evaluation of an improved heating system using electric-driven heat pumps: a case study for Jing-Jin-Ji region in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 165: 36-47.

[5] 李立新, 顾波. 电能替代应上升为国家战略[N]. 中国电力报, 2014-03-06.

[6] 王涌, 曹志猛, 马红, 等. 乌鲁木齐市采用电采暖供热的可行性研究[J]. 新疆电力技术, 2010(4): 6-7.
WANG Yong, CAO Zhimeng, MA Hong, et al. Feasibility study on using electric heating and heating in Urumchi[J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2010(4): 6-7.

[7] 张剑, 吴亮, 袁新润, 等. 分散电采暖在天津地区的应用分析[J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(6): 33-36.
ZHANG Jian, WU Liang, YUAN Xinrun, et al. Application analysis of distributed electric heating in Tianjin[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(6): 33-36.

[8] 何希庆, 王周选, 李晓江, 等. 电采暖水源热泵等采暖系统的运行效果分析[J]. 电力需求侧管理, 2012, 14(3): 28-32.
HE Xiqing, WANG Zhouxuan, LI Xiaojiang, et al. Analysis of operation effect of heating system such as electric heating warler-source heat pump etc.[J]. Power Demand Side Management, 2012, 14(3): 28-32.

[9] 胡金强. 地源热泵系统热平衡分析及其在大型公共建筑中的应用[J]. 制冷技术, 2015, 35(2): 63-67.
HU Jinqiang. Analysis of heat balance in ground source heat pump system and its application in large scale public buildings[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2015, 35(2): 63-67.

[10] 黎华林, 陈红坤, 徐坤, 等. 风电与蓄热电采暖的联合运行及其效益分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(8): 82-88.
LI Hualin, CHEN Hongkun, XU Kun, et al. Combined operation of wind power and REH and its benefit analysis[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(8): 82-88.

[11] 王庆泽, 陈星莺, 颜庆国, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 43-50.
WANG Qingze, CHEN Xingying, YAN Qingguo, et al. Two-layer flexible optimal strategy for air-conditioning of office building under TOU price[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 43-50.

[12] 李天阳, 赵兴旺, 肖文举. 面向峰谷平衡的商业楼宇空调负荷调控技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 96-102.
LI Tianyang, ZHAO Xingwang, XIAO Wenju. Regulation technology of air-conditioning load in commercial buildings for balance of power grid peak and valley[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 96-102.

[13] 范帅, 郑琨琪, 郭炳庆, 等. 分散式电采暖负荷协同优化运行策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 20-29.
FAN Shuai, JIA Kunqi, GUO Bingqing, et al. Collaborative optimal operation strategy for decentralized electric heating loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 20-29.

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

[15] 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 Runbai. A simple method for objective evaluation of thermal environment[J]. Chinese Ergonomics, 2004, 10(3): 16-19.

[16] 中国标准化与信息分类编码研究所. 中等热环境 PMV 和 PPD 指数的测定及热舒适条件的规定: GB/T18049—2000[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
China Institute of Standardization and Information Classification and Coding. Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort: GB/T18049—2000[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2001.

[17] 中国建筑科学研究院. 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB50736—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
China Academy of Building Research. Design code for heating ventilation and air conditioning of civil buildings: GB50736—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[18] 周玮, 孙恺, 孙辉, 等. 基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 70-77.
ZHOU Wei, SUN Kai, SUN Hui, et al. Bi-level optimization model for load supplying capability in active distribution network based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 70-77.

[19] 贾晨, 吴聪, 张超, 等. 基于电热系统联合规划的城市商住混合区能源站优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6): 30-36.
JIA Chen, WU Cong, ZHANG Chao, et al. Optimum configuration of energy station in urban hybrid area of commerce and residence based on integrated planning of electricity and heat system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 30-36.

[20] 方贤, 铁治欣, 崔仕文, 等. 基于粒子群优化双支持向量机的 SCR 烟气脱硝效率预测模型[J]. 热力发电, 2018, 47(1): 53-58.
FANG Xian, TIE Zhixin, CUI Shiwen, et al. Model for predicting SCR flue gas denitration efficiency based on particle swarm optimization and twin support vector machine[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(1): 53-58.

[21] FU X, HUANG S, LI R, et al. Electric power output optimization for CCHP using PSO theory[J]. Energy Procedia, 2016, 103: 9-14.

[22] 马最良, 姚杨. 民用建筑空调设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.

[23] 辛昊, 严正, 许少伦. 基于多代理系统的电动汽车协调充电策略[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 48-54.
XIN Hao, YAN Zheng, XU Shaolun. Multi-agent system based coordinated charging strategy for electric vehicles[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 48-54.

收稿日期：2018-07-16；　　修回日期：2018-12-04

作者简介：

陈　程(1994—)，男，硕士研究生，研究方向为用电系统优化；E-mail: chencheng941101@163.com

陈星莺(1964—)，女，通信作者，博士，教授，博导，研究方向为配用电系统与电力市场、能源管理与能源经济等。E-mail: xychen@hhu.edu.cn

(编辑　周金梅)