

# 基于 MOHSA 的智慧社区能量管理系统优化调度研究

仲海涛<sup>1</sup>, 撒奥洋<sup>2</sup>, 张智晟<sup>1</sup>

(1. 青岛大学电气工程学院, 山东 青岛 266071;  
2. 国网山东省电力公司青岛供电公司, 山东 青岛 266002)

**摘要:** 家庭负荷是电网负荷的重要组成部分。在智能电网环境下, 家庭负荷的灵活调度能够有效缓解电力供应紧张问题, 有利于需求响应在用户侧的实施。本文提出了一种基于多目标和声搜索算法的社区能量管理系统优化调度方法, 以减少用户的用电成本和平抑配电网侧负荷波动为目标, 建立了计及分布式电源、储能系统和可调度负荷的智慧社区能量管理系统模型。根据 Pareto 理论, 通过改进的多目标和声搜索算法求解, 并与其他算法进行对比。仿真结果表明, 所建模型和调度方案能够有效减少用户用电成本和平抑配电网侧负荷波动, 改进的算法具有更强的寻优性能。

**关键词:** 社区能量管理系统; 优化调度; Pareto 理论; 多目标和声搜索算法; 电力系统

**DOI:** 10.12067/ATEEE1806057      **文章编号:** 1003-3076(2019)03-0028-10      **中图分类号:** TM734

## 1 引言

电力广泛地应用于人们的生产和生活之中, 社会的发展和人们生活水平的提高对电力行业提出了更高的要求, 因此, 智能电网技术成为当前社会研究的热点<sup>[1]</sup>。在电网需求侧, 家庭用电约占社会总用电量的 40%<sup>[2]</sup>, 并且随着智能电器技术的发展, 使得家庭用电更为灵活, 具有更大的调度空间<sup>[3,4]</sup>。同时为了有效地接纳分布式电源, 提高人们的用电质量, 使用户侧能够与电网侧灵活互动, 参与到电网的需求响应调度计划, 家庭能量管理系统 (Home Energy Management System, HEMS) 应运而生<sup>[5-7]</sup>。当前对于 HEMS 的研究大体上分为三类, 即单家庭能量管理系统、楼宇能量管理系统和社区能量管理系统。其中单家庭能量管理系统主要以用户的用电成本或用电舒适度为目标对负荷进行优化调度, 相较于单个家庭, 多个家庭具有可调度负荷总量大、发电和储能设备多等优点, 而且各用户拥有的负荷类型不同, 存在较大的互动调度潜力。所以比起单个家庭, 整个楼宇或整个社区用户的协同调度能更好地和电网侧相配合, 参与到电网的需求响应计划中,

实现减小配电网侧负荷峰谷差的目的<sup>[8-10]</sup>。因此, 楼宇和社区能量管理系统成为当前的研究热点。文献[11]针对城市居民的用电特点和负荷类型建立了动态终端能量管理系统模型, 提出了需求侧智能管理方案, 对其可能的经济和社会效益进行了评估, 但仅做出了理论分析, 没有给出具体的仿真算例。文献[12]提出了智能小区多用户的日负荷需求响应调度计划, 以减少配电网侧负荷波动为目标, 但没有考虑用户的用电成本。文献[13]建立了楼宇用电负荷多目标优化调度模型, 考虑了用户的经济性和整个楼宇的负荷波动, 但用户类型较为单一, 用电设备考虑不够全面, 调度灵活性不够。社区能量管理系统优化调度问题应是针对复杂用电场景下不同类型用户的整体协同调度, 并能够使用户侧与电网侧双方共同获益。所以本文综合考虑了用户侧与电网侧的互动性, 以及社区可能存在的用户类型的差异, 构建了需求响应机制下社区能量管理系统的调度模型, 以同时优化用户侧的用电成本和配电网侧的负荷波动为目标, 采用基于 Pareto 理论的多目标和声搜索算法 (Multi-Objective Harmony Search Algorithm, MOHSA) 对模型求解, 并与多目标粒子群算

收稿日期: 2018-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51477078)

作者简介: 仲海涛 (1993-), 男, 山东籍, 硕士研究生, 研究方向为家庭能量管理系统优化调度;  
张智晟 (1975-), 男, 山东籍, 教授, 博士后, 研究方向为电力系统短期负荷预测、经济负荷分配、故障诊断和配电网自动化 (通讯作者)。

法 (Multi-Objective Particle Swarm Optimization, MOPSO) 进行对比。仿真结果表明, 所建模型及所用算法能够对减少用户用电成本和降低电网侧负荷波动同时达到较好的优化效果。

2 智慧社区能量管理系统负荷模型

本文所指的社区用户为用电时间和用电习惯相似的普通家庭用户群, 不考虑大负荷的商业用户, 不同家庭拥有的负荷类型不同, 根据各个家庭的负荷情况, 将其分为以下四种类型<sup>[12]</sup>:

- (1) 基本用户: 负荷类型只包含不可调度负荷和可调度负荷。
- (2) 光伏用户: 负荷类型在基本用户的基础上增加了光伏发电设备。
- (3) 电动汽车用户: 负荷类型在基本用户的基础上增加了电动汽车用以储能。
- (4) 综合用户: 负荷类型包含不可调度负荷、可调度负荷、光伏设备、蓄电池和电动汽车。

不可调度负荷指每个家庭中的固有负荷, 如对其进行调度会严重影响用户的用电体验, 如照明工具、计算机等; 可调度负荷指运行时间可转移或者运行可以中断的负荷, 如洗衣机、空调等; 智能电表用来实现与大电网的信息交流和能量交换; 能量控制平台可通过通信网络与社区综合能量控制平台通讯。若电网侧未向用户发出需求信号, 各用户可根据自身需求单

独进行用电调度。若电网侧根据其历史负荷数据, 或者电网中临时出现了一些增加用电的计划, 预测到未来几日电网的总体负荷波动较大, 为避免家庭用户无序用电给电网造成更大负担, 使用户侧负荷能够平稳接入电网, 电网公司会提前向一些具有调节能力的社区发出响应信号, 并以某些激励措施引导用户加入电网的需求响应调度计划, 这时用户可自愿加入, 参与响应的用户将自身用电需求发给社区综合能量控制平台, 综合能量控制平台结合电网侧和用户侧双方需求对每个用户制定出相应的用电计划, 再下发给各用户能量控制平台<sup>[14]</sup>。智慧社区能量管理系统具体结构示意图如图 1 所示。

2.1 可调度负荷模型

(1) 可中断负荷。可中断负荷是指其运行过程可中断的负荷, 家用负荷中以空调和热水器为主。本文主要考虑了夏季中负荷比重较大的空调负荷, 其工作状态与室外温度和用户设定的室内温度有关, 具体模型可表示为式(1)~式(4)<sup>[15]</sup>:

$$T_{room}(t) = T_{room}(t-1)e^{-\Delta t/(RC)} + [T_{out}(t-1) - x_{air}(t-1)QR] \cdot [1 - e^{-\Delta t/(RC)}]$$

(1)

$$x_{air}(t) = \begin{cases} 1 & T_{room}(t) > T_{room,max} \\ x_{air}(t-1) & T_{room,min} \leq T_{room}(t) \leq T_{room,max} \\ 0 & T_{room}(t) < T_{room,min} \end{cases}$$

(2)

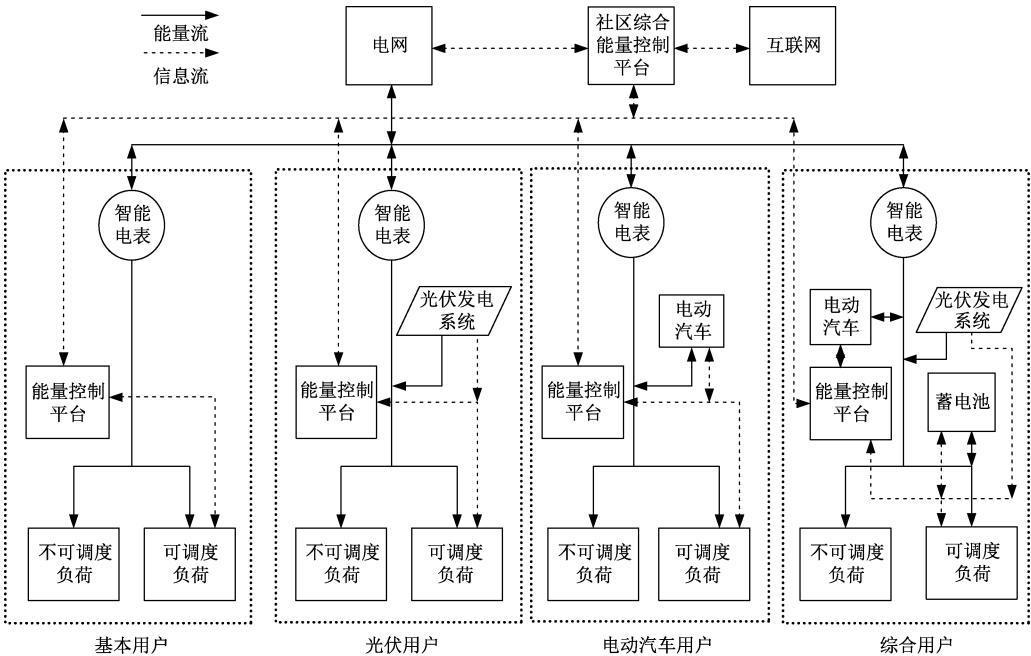


图 1 智慧社区能量管理系统结构图

Fig. 1 Structure of smart community energy management system

$$d_{\text{air}} \leq n_{\text{air}} \quad (3)$$

$$P_{\text{air}}(t) = x_{\text{air}}(t) P_{\text{air}}^N \quad (4)$$

式中,  $T_{\text{room}}(t)$ 、 $T_{\text{out}}(t)$  分别为  $t$  时段的室内温度和室外温度;  $T_{\text{room},\min}$ 、 $T_{\text{room},\max}$  分别为用户设定的室内最低温度和最高温度;  $x_{\text{air}}(t)$  为  $t$  时段空调的工作状态, 1 表示工作, 0 表示停止;  $P_{\text{air}}(t)$ 、 $P_{\text{air}}^N$  分别为空调在  $t$  时段的运行功率和其额定功率;  $\Delta t$  为一个调度时段;  $R$ 、 $C$ 、 $Q$  分别为等值热电阻、等值热电容和等值热比率;  $d_{\text{air}}$  和  $n_{\text{air}}$  分别为空调的连续运行时段数和最大连续运行时段数,  $n_{\text{air}}$  的大小应根据  $\Delta t$  的大小和用户设置的室温范围决定。

(2) 不可中断负荷。不可中断负荷是指运行时间可转移, 但一旦开启就必须连续运行直到工作完成为止的负荷, 如洗衣机、烘干机等, 其负荷模型可表示为式(5)~式(8):

$$t_{\text{off},a} - t_{\text{on},a} + 1 = d_a \quad (5)$$

$$x_a(t) = \begin{cases} 1 & t \in [t_{\text{on},a}, t_{\text{off},a}] \\ 0 & t \notin [t_{\text{on},a}, t_{\text{off},a}] \end{cases} \quad (6)$$

$$P_a(t) = x_a(t) P_a^N \quad (7)$$

$$\alpha_a \leq t_{\text{on},a} \leq t_{\text{off},a} \leq \beta_a \quad (8)$$

式中,  $t_{\text{on},a}$ 、 $t_{\text{off},a}$  为负荷  $a$  的开启时间和关闭时间;  $d_a$  为负荷  $a$  的连续工作时段数;  $x_a(t)$  为负荷  $a$  的工作状态, 1 表示工作, 0 表示停止;  $P_a(t)$  和  $P_a^N$  分别为负荷  $a$  在  $t$  时段的运行功率和其额定功率;  $\alpha_a$  和  $\beta_a$  分别为负荷  $a$  的允许运行最早时间和最晚时间。

单个用户各时段的可调度负荷值  $P_{\text{flexi}}(t)$  为:

$$P_{\text{flexi}}(t) = P_{\text{air}}(t) + \sum_{a=1}^A P_a(t) \quad (9)$$

式中,  $A$  为用户拥有的不可中断负荷的总数量。

## 2.2 蓄电池与电动汽车模型

蓄电池模型可表示为<sup>[16]</sup>:

$$SOC_{\text{bt}}(t) = \begin{cases} SOC_{\text{bt}}(t-1) + \frac{P_{\text{bt}}^{\text{ch}}(t-1)\Delta t\eta_{\text{bt}}^{\text{ch}}}{Q_{\text{bt}}} & \text{充电} \\ SOC_{\text{bt}}(t-1) - \frac{P_{\text{bt}}^{\text{dis}}(t-1)\Delta t}{Q_{\text{bt}}\eta_{\text{bt}}^{\text{dis}}} & \text{放电} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $SOC_{\text{bt}}(t)$  为蓄电池在  $t$  时段的荷电状态;  $Q_{\text{bt}}$  为蓄电池的容量;  $P_{\text{bt}}^{\text{ch}}(t)$ 、 $P_{\text{bt}}^{\text{dis}}(t)$  分别为蓄电池在  $t$  时段的充电功率和放电功率;  $\eta_{\text{bt}}^{\text{ch}}$ 、 $\eta_{\text{bt}}^{\text{dis}}$  分别为蓄电池的充电效率和放电效率。

电动汽车接入家庭微网后, 其模型与蓄电池类似, 此处不再赘述。

## 2.3 社区日负荷安排模型

将一天分为  $T$  个时段, 则社区所有用户的日负荷模型可表示为:

$$L = [L(1), L(2), \dots, L(t), \dots, L(T)] \quad (11)$$

式中,  $t$  时段的社区总负荷  $L(t)$  可由式(12)和式(13)求得:

$$L(t) = \sum_{j=1}^m P_{\text{grid}}(j, t) \quad (12)$$

$$P_{\text{grid}}(j, t) = P_{\text{must}}(j, t) + P_{\text{flexi}}(j, t) + P_{\text{bt}}(j, t) + P_{\text{ev}}(j, t) - P_{\text{pv}}(j, t) \quad (13)$$

式中,  $P_{\text{grid}}(j, t)$  为用户  $j$  在  $t$  时段与大电网的交互功率, 购电时大于 0, 售电时小于 0;  $m$  为用户的数量;  $P_{\text{must}}(j, t)$  为用户  $j$  在  $t$  时段的不可调度负荷值, 由家庭能量管理系统根据用户过去的用电习惯预测得到;  $P_{\text{bt}}(j, t)$ 、 $P_{\text{ev}}(j, t)$  分别为用户  $j$  的蓄电池和电动汽车在  $t$  时段的充放电功率, 充电时大于 0, 放电时小于 0;  $P_{\text{pv}}(j, t)$  为用户  $j$  在  $t$  时段的光伏出力。

## 3 智慧社区能量管理系统优化调度模型

本文以一天为一个调度周期, 0.5h 为一个时段, 将一天分为 48 个时段, 分别以各家庭的可调度负荷的启动时段、蓄电池和电动汽车在各时段的充放电功率为决策变量进行优化调度, 同时实现减少用户的用电成本和平抑配电网侧负荷波动两个目标。

### 3.1 目标函数

(1) 用户侧目标函数。用户侧主要考虑用户的用电成本, 由于本文研究社区的日负荷优化调度, 所以用电成本中未考虑不同类型用户的用电设备的安装成本差异, 仅包括调度日用户从电网购买电能的费用和向电网售出电能获得的收益, 以及蓄电池、电动汽车电池的折旧成本。则所有家庭的总用电成本为:

$$f_1 = \sum_{t=1}^{48} \sum_{j=1}^m \{ C_{\text{buy}}(t) P_{\text{buy}}(j, t) - C_{\text{sale}}(t) P_{\text{sale}}(j, t) + \beta [ |P_{\text{bt}}(j, t)| + |P_{\text{ev}}(j, t)| ] \Delta t \} \quad (14)$$

式中,  $C_{\text{buy}}(t)$ 、 $C_{\text{sale}}(t)$  分别为  $t$  时段的购电电价和售电电价;  $\beta$  为蓄电池的折旧系数;  $P_{\text{buy}}(j, t)$ 、 $P_{\text{sale}}(j, t)$  分别为  $t$  时段用户  $j$  从电网的购电功率和向电网的馈电功率:

$$\begin{cases} P_{\text{buy}}(j, t) = P_{\text{grid}}(j, t) & P_{\text{grid}}(j, t) > 0 \\ P_{\text{sale}}(j, t) = -P_{\text{grid}}(j, t) & P_{\text{grid}}(j, t) < 0 \end{cases} \quad (15)$$

(2) 电网侧目标函数。电网侧希望社区的整体负荷能够平滑接入电网, 因为社区的总负荷波动越



小,对电网的安全稳定运行越有利。社区的总负荷波动情况可以用日负荷的标准差  $\sigma$  来衡量,即

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{48} \sum_{t=1}^{48} [L(t) - \mu]^2} \quad (16)$$

$$\mu = \frac{1}{48} \sum_{t=1}^{48} L(t) \quad (17)$$

式中,  $\mu$  为社区日负荷的平均值。

### 3.2 约束条件

(1) 蓄电池及电动汽车约束。蓄电池在正常工作其荷电状态和充放电功率应满足如下约束:

$$\begin{cases} SOC_{bt,min} \leq SOC_{bt}(t) \leq SOC_{bt,max} \\ 0 \leq P_{bt}^{ch}(t) \leq P_{bt,max}^{ch} \\ 0 \leq P_{bt}^{dis}(t) \leq P_{bt,max}^{dis} \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $P_{bt,max}^{ch}$ 、 $P_{bt,max}^{dis}$  分别为蓄电池的最大充电功率和最大放电功率;  $SOC_{bt,min}$ 、 $SOC_{bt,max}$  分别为蓄电池的最小荷电状态和最大荷电状态。

电动汽车除满足式(18)的约束外,还应满足式(19)约束,即

$$SOC_{ev,set} \leq SOC_{ev,end} \leq SOC_{ev,max} \quad (19)$$

式中,  $SOC_{ev,end}$ 、 $SOC_{ev,set}$  分别为电动汽车离开家庭微网时的荷电状态和用户设定的最终荷电状态。

(2) 配电网侧约束。为缓解负荷高峰期时电网侧的供电压力,用户在各时段的总负荷值应限制在电网侧的允许范围内:

$$-P_{max} \leq L(t) \leq P_{max} \quad (20)$$

式中,  $P_{max}$  为配电网侧允许用户接入的负荷最大值。

## 4 求解方法

本文建立的社区能量管理系统优化调度模型是一个高维度多目标非线性规划问题,传统的非线性规划法难以对两个相互制约、此消彼长的目标同时进行优化,若将其转化为单目标问题,则由于各目标量纲不同、数量级不同、各目标权重系数难以确定,不能得到较好的全局折衷解。在电力系统的多目标优化问题中,进化算法、粒子群算法等启发式算法由于其较好的全局搜索能力得到了广泛应用,本文采用近年来新兴的和声搜索算法(Harmony Search Algorithm, HSA)对该问题进行求解,通过基于 Pareto 理论的多目标和声搜索算法得到一组较好的折衷解供决策者选择。

### 4.1 和声搜索算法

和声搜索算法是一种新的启发式全局搜索算法,它模拟了乐队通过调整各种乐器从而演奏出最

美和声的过程,各乐器可看作各个优化变量,最美和声即为所求问题的最优解,相比于粒子群和遗传等传统算法,其原理简单、参数较少、通用性强、搜索速度快、具有更强的寻优能力<sup>[17]</sup>。由于其多样的新解产生方式,使算法容易跳出局部最优,不易早熟收敛,对于处理多峰值、多维度优化问题,具有更大的优势。具体的算法步骤可描述为:

(1) 在变量约束范围内生成包含  $M$  个解向量的和声记忆库(Harmony Memory, HM)和各变量的可行域。

(2) 生成 0~1 之间的随机数  $rand1$ ,若其小于  $HM$  保留概率  $P_1$ ,则在  $HM$  中随机选择新解分量,否则在变量可行域中寻找新解分量。

(3) 生成 0~1 之间的随机数  $rand2$ ,对来自  $HM$  的新解分量,若  $rand2$  小于音调扰动概率  $P_2$ ,则以音调扰动带宽  $bw$  对新解分量进行扰动,具体扰动方程为:

$$x_b^{new} = x_b^{new'} + bw(2rand - 1) \quad (21)$$

式中,  $x_b^{new'}$  和  $x_b^{new}$  分别为扰动前和扰动后的新解分量;  $rand$  为  $[0, 1]$  之间的随机数。

(4) 判断新解分量是否在约束范围内,若满足约束,则继续执行,否则以变量边界值校正变量。

(5) 计算新解的适应度,并与  $HM$  中最差解的适应度比较,若优于最差解,则替换,反复循环直到满足迭代次数。

(6) 输出  $HM$  中的最优解,即为所求解。

### 4.2 改进和声搜索算法

由于传统 HSA 以固定  $HM$  保留概率、音调扰动概率和音调扰动带宽对新解调整,这种更新方式不能较好地体现 HSA 的寻优能力,并且存在收敛不稳定的问题<sup>[18]</sup>。本文采用各参数随着迭代次数增加而自适应减小的更新方式,在迭代前期,  $HM$  保留概率  $P_1$  较大,使算法充分利用  $HM$  中初始解的信息,并以较大概率和带宽对其扰动,增强算法的全局搜索能力,使其不易陷入局部最优;迭代后期则扰动较小,使算法在最优解附近精细搜索,并以较大概率在  $HM$  外变量可行域中寻找新解,以提高种群多样性,增加找到更优解的概率。各参数的动态表达式如下:

$$\begin{cases} P_1(n) = P_{1max} - (P_{1max} - P_{1min})(n/N) \\ P_2(n) = (1/n)^r \\ bw(n) = Z(1 - n/N) \end{cases} \quad (22)$$

式中,  $n$  为当前迭代次数;  $N$  为最大迭代次数;  $P_{1max}$ 、

$P_{lmin}$  分别为  $HM$  保留概率的最大值和最小值;  
 $r \in (0,1)$ ;  $Z$  为任意数。

4.3 多目标和声搜索算法

由于用户的用电成本和电网侧的负荷波动不可能同时达到最优,即优化一个目标的同时可能会使另一个目标变劣,而 Pareto 理论提供了一种多个目标不能同时实现最优时如何合理地比较各个目标适应度的方案,使其在一种平衡状态下向着理想解靠近,最终得到一个 Pareto 最优解集,提供多种可能的方案供决策者选择<sup>[19]</sup>。所以本文采用基于 Pareto 理论的 MOHSA 对模型进行求解。

与单目标和声搜索算法不同的是,MOHSA 不仅生成  $HM$ ,同时生成一个外部库用于存放非劣解, $HM$  只用于产生新解,其种群大小与优化目标数量有关,一般数量越多种群越多。新解产生方式与单目标算法相同,外部库大小可根据决策者需求决定,最终得到的外部库所有非劣解即为 Pareto 最优解集,具体算法流程图如图 2 所示。

在得到该问题的 Pareto 最优解集后,本文采用模糊数学法计算解集中各非劣解的满意度,选取满意度最大的解作为问题的折中解,其中各非劣解对应的各目标函数的满意度  $\varphi_i^k$  可表示为<sup>[19]</sup>:

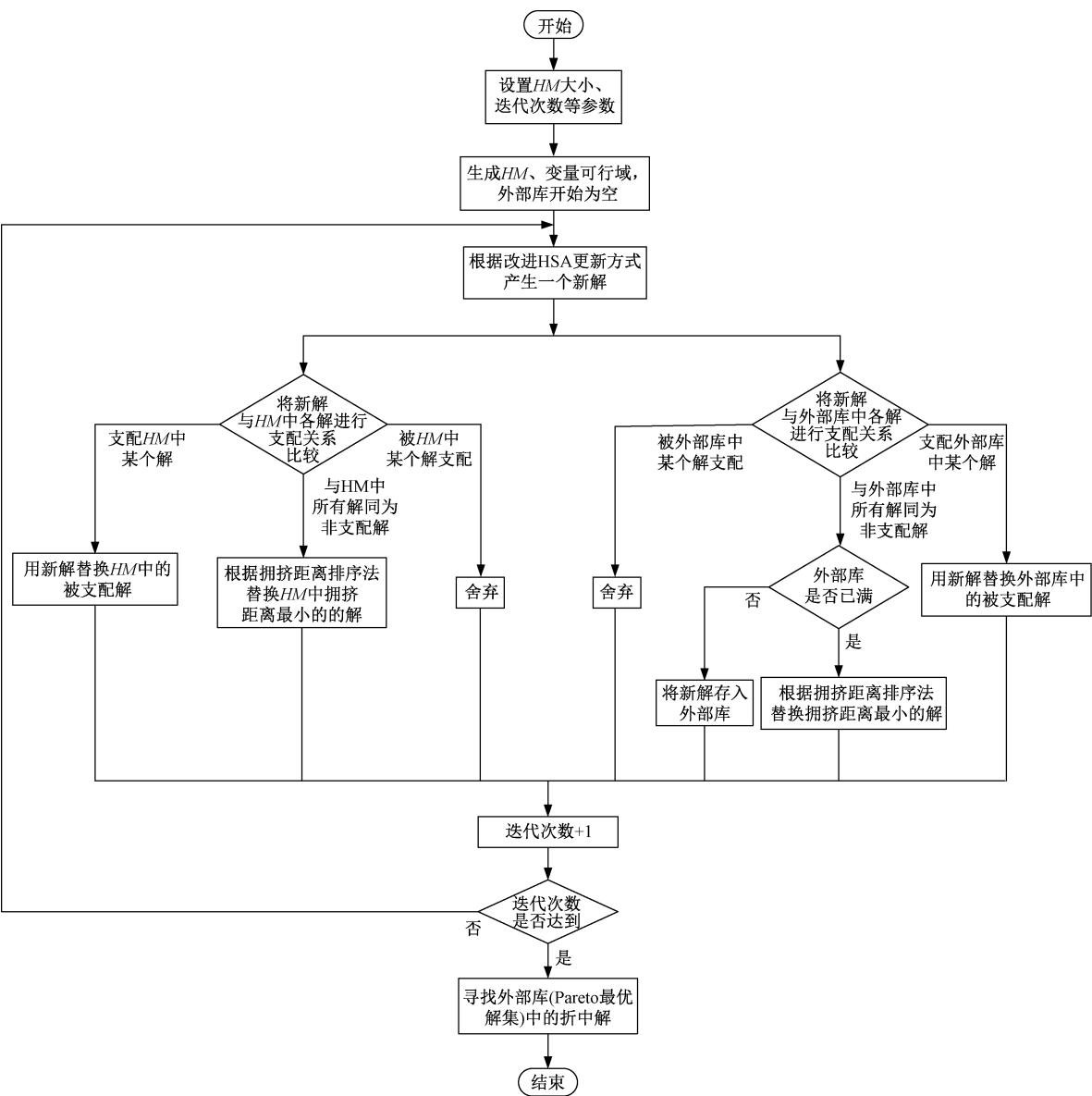


图 2 MOHSA 流程图  
Fig. 2 Flow chart of MOHSA

$$\varphi_i^k = \begin{cases} 1 & f_i^k < f^{k, \min} \\ \frac{f^{k, \max} - f_i^k}{f^{k, \max} - f^{k, \min}} & f^{k, \min} \leq f_i^k \leq f^{k, \max} \\ 0 & f_i^k > f^{k, \max} \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $f_i^k$  为第  $i$  个非劣解的第  $k$  个目标函数值;  $f^{k, \min}$   $f^{k, \max}$  分别为第  $k$  个目标函数的最小值和最大值。

则各非劣的满意度  $\varphi_i$  可表示为:

$$\varphi_i = \frac{\sum_{k=1}^K \varphi_i^k}{\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \varphi_i^k} \quad (24)$$

式中,  $K$  为目标函数的个数;  $I$  为 Pareto 解集中非劣解的个数。选取满意度最大的非劣解作为问题的折中解。

5 算例分析

5.1 算例介绍

本文取社区用户的数量为 100 户, 四种用户类型的比例为 2:3:3:2, 以夏季某日用户的用电情况为例进行仿真分析。假设所有光伏用户的光伏系统容量均为 3kW, 所有用户的总不可调度负荷值、总光伏出力及室外温度如图 3 所示。

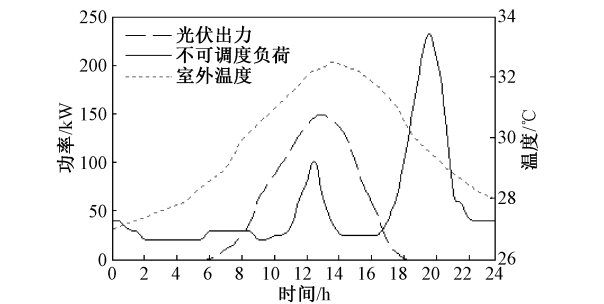


图3 室外温度、社区总光伏出力与不可调度负荷值  
Fig. 3 Outdoor temperature, total photovoltaic output and unschedulable load power of community

可中断负荷以空调为例, 不可中断负荷以洗衣机、烘干机、洗碗机和扫地机器人为例, 各电器正常工作时各参数参见文献[15], 不可中断负荷的允许工作时间为 8:00~22:00, 室内温度设置为 23~26(℃),  $n_{\text{air}}=2$ , 由于本文单位调度时长较大, 考虑到空调实际运行一个时段可能造成的温度变化, 室内温度范围设置不宜太小, 否则空调调度结果难以不超出范围。蓄电池和电动汽车模型参数见文献[16], 电池折旧费用  $\beta=0.15$  元/(kW·h),

各用户电动汽车离开与返回家庭微网时间及返回时的剩余电量均近似服从正态分布, 具体规律参见文献[12], 配电网侧允许接入最大负荷  $P_{\text{max}}=500\text{kW}$ , 电价采用分时电价, 如表 1 所示。

表 1 分时电价

Tab. 1 Time-of-use power price

时段	性质	购电价格 /(元/(kW·h))	售电价格 /(元/(kW·h))
0:00~7:00	谷时段	0.26	0.15
7:00~11:00	平时段	0.52	0.38
15:00~18:00			
22:00~24:00			
11:00~15:00	峰时段	0.85	0.65
18:00~22:00			

5.2 仿真结果

本文对以下四种用电情形进行仿真比较:

(1)用户无序用电, 即各用户将光伏发电剩余电量直接售出, 可调度负荷均按照用户过去的用电习惯运行, 电动汽车作为负载, 只充电不放电, 蓄电池不工作。

(2)单目标优化用户用电成本, 结合分时电价信息, 合理调度可调度负荷使用时段与蓄电池和电动汽车的充放电状态, 使用户的用电成本尽可能降低。

(3)单目标优化配电网侧负荷波动, 假设所有用户均加入到电网的需求响应调度计划, 所有用户以总负荷标准差最低协同调度。

(4)同时优化用户侧用电成本和配电网侧负荷波动两个目标。

其中情形 2 与情形 3 为单目标优化, 采用改进 HSA, 并与粒子群算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 和基本 HSA 进行收敛性能比较, 情形 4 为多目标优化, 分别用 MOHSA 和 MOPSO 求解, 得到两组 Pareto 最优前沿。基本 HSA 中,  $HM$  大小等于 10,  $P_1=0.97$ ,  $P_2=0.2$ ,  $bw=2$ , 迭代次数  $N=500$ ; 改进 HSA 中,  $P_{1\text{max}}=0.97$ ,  $P_{1\text{min}}=0.8$ ,  $r=0.6$ ,  $Z=3$ , 其余参数同基本 HSA; MOHSA 中,  $HM=20$ , 外部库大小为 25, 其余参数同改进 HSA; PSO 与 MOPSO 各参数同文献[20]。

单目标优化情形 2 和情形 3 时不同算法的仿真结果如表 2 所示, 收敛曲线如图 4、图 5 所示。

由表 2 可知, HSA 比传统的 PSO 算法有更好的寻优能力, 对其参数改进后, 算法精度进一步提高。通过图 4、图 5 可以看出, PSO 算法虽然收敛速度较

表 2 不同算法单目标优化结果对比

Tab. 2 Comparison of single-objective optimization results of different algorithms			
优化目标	PSO	基本 HSA	改进 HSA
用户用电成本/元	817.42	728.90	717.69
总负荷标准差/kW	39.30	28.22	26.78

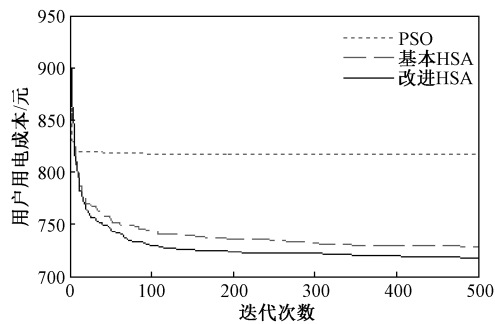


图 4 单目标优化用户用电成本各算法收敛曲线  
Fig. 4 Convergence curve of each algorithm for single-objective optimization of user's electricity cost

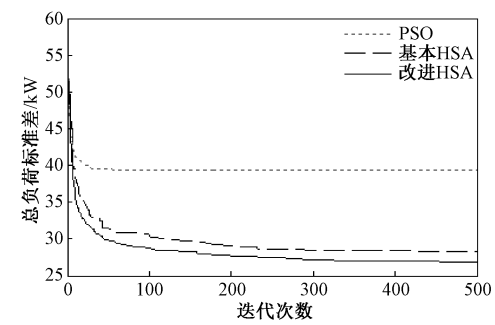


图 5 单目标优化总负荷标准差各算法收敛曲线  
Fig. 5 Convergence curve of each algorithm for single-objective optimization of total load standard deviation

快,但其搜索方向单一,容易陷入局部最优,使算法早熟收敛,而 HSA 由于多样的新解产生方式,具有更强的全局搜索能力,改进后收敛效果有明显提高。

分别使用 MOPSO 与 MOHSA 优化情形 4 后得到的折中解如表 3 所示,Pareto 最优前沿分布情况如图 6、图 7 所示。

从两种多目标算法得到的折中解和 Pareto 最优前沿的分布情况可以看出,MOHSA 得到的最优解的范围虽然没有 MOPSO 得到的最优解范围广,但整体收敛效果要优于 MOPSO,解集分布较为均匀,得到的折衷解能同时兼顾两个目标的优化。

表 3 不同算法多目标优化结果对比

Tab. 3 Comparison of multi-objective optimization results of different algorithms		
优化目标	MOPSO	MOHSA
用户用电成本/元	830.27	810.89
总负荷标准差/kW	44.53	36.23

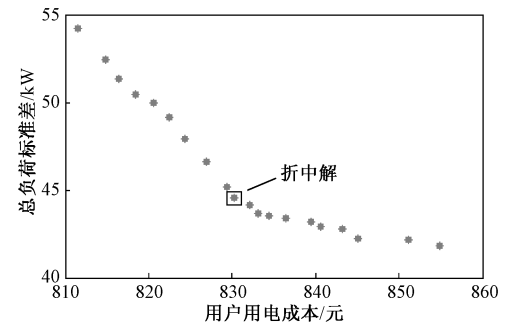


图 6 MOPSO 优化后的 Pareto 最优前沿  
Fig. 6 Pareto optimal frontier after MOPSO optimization

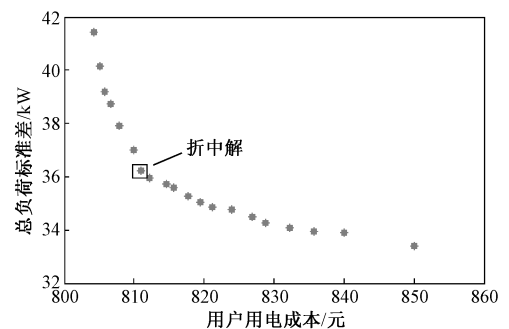


图 7 MOHSA 优化后的 Pareto 最优前沿  
Fig. 7 Pareto optimal frontier after MOHSA optimization

图 8 为情形 4 调度结果中某个家庭的室温变化曲线,其温度范围基本符合用户的设置需求。采用改进 HSA 和 MOHSA 得到的各情形下用户的总负荷波动如图 9 所示,仿真数据如表 4 所示。

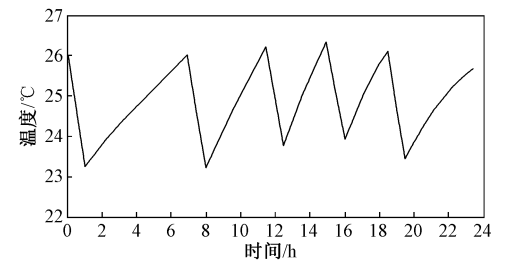


图 8 某家庭室温变化  
Fig. 8 Room temperature change in a family



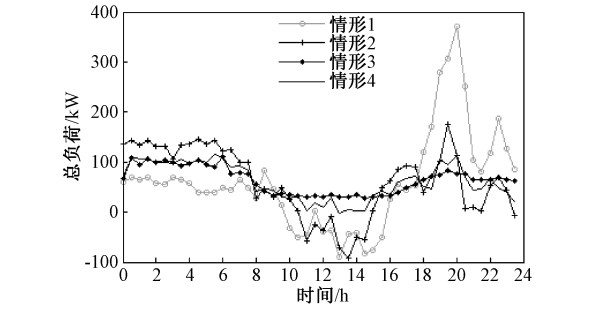


图9 各情形社区总负荷波动图

Fig. 9 Total load fluctuations of community in various situations

表4 各情形仿真结果对比

Tab. 4 Comparison of simulation results in various situations

实验情形	用户用电成本/元	总负荷标准差/kW
情形 1	912. 87	96. 22
情形 2	717. 69	71. 91
情形 3	903. 98	26. 78
情形 4	810. 89	36. 23

由图9可明显看出:

(1)以情形1方式无序用电时,负荷的峰谷差较大,因为大多数负荷集中在晚上运行,白天光伏出力较多,但用电量少,所以大多卖给了电网,不利于电网的稳定运行,且用户的用电成本较高。

(2)以情形2方式调度时,因为夜晚电价较低,所以蓄电池与电动汽车集中在夜晚充电,在负荷较多时放电以减少用电费用,同时降低了负荷峰值,但在夜间又形成一个新的高峰期,总体波动较大,相较于情形1,用电成本降低了21.4%,负荷标准差降低了25.3%。

(3)以情形3方式调度时,通过合理安排储能系统的充放电功率,将光伏剩余电量全部存储,并在用电高峰时放出以减缓电网侧压力。这时负荷总体波动较小,但用户的用电成本较高,比起情形1用电成本降低了1.0%,但负荷标准差减少了72.2%。

(4)以情形4方式调度时,用户的用电成本与负荷的波动情况均介于情形2与情形3之间,相比情形1,用电成本降低了11.2%,负荷标准差降低了62.3%。对于用户侧与电网侧,该调度方案能够使两者共同获益。

本文的仿真环境为 Matlab2014a,计算机配置为英特尔酷睿双核处理器,主频 2.3GHz,内存 4GB。不同调度情形下各算法分别运行 20 次的平均时间如表 5 所示。

表 5 不同算法运行时间			
Tab. 5 Running time of different algorithms			
实验情形	运行时间/s		
	PSO	基本 HSA	改进 HSA
情形 2	18. 47	15. 45	20. 23
情形 3	18. 68	14. 35	18. 96
情形 4	217. 43	—	126. 62

从表5可以看出,相较于 PSO,单目标优化用户用电成本与负荷标准差时,HSA 与其速度接近,改进后算法速度略有下降但搜索精度提高;多目标优化时,HSA 的速度相比 PSO 有了较大程度提高,可见本文所提算法有着更高搜索效率和优化精度。

6 结论

智慧社区的建设有利于电网需求响应计划在用户侧的实施,本文建立的智慧社区能量管理系统优化调度模型,通过灵活调度各用户的可调度负荷工作时间以及蓄电池和电动汽车在各时段的充放电功率,使分布式电源平滑接入电网,在节省用户用电成本的同时,减少了电网侧的负荷波动,实现了供电侧与用电侧的双赢。采用基于 Pareto 理论的多目标和声搜索算法求解模型,并与多目标粒子群算法对比,仿真结果分析可知,所建模型及所用算法能够得到较好的优化效果,该研究为智能社区的建设提供了一定的理论支持。但本文提出的是一种日前调度模型,没有考虑到光伏出力的预测误差、用户用电安排临时变化等不确定因素的影响,在以后的研究工作中应进一步考虑。

参考文献 (References):

[1] 朱永强, 郝嘉诚, 赵娜, 等 (Zhu Yongqiang, Hao Jiacheng, Zhao Na, et al.). 能源互联网中的储能需求、储能的功能和作用方式 (Demands, functions and action manners of energy storage in Energy Internet) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (2): 68-75.

[2] 贾艳芳, 易灵芝, 李胜兵 (Jia Yanfang, Yi Lingzhi, Li Shengbing). 基于多目标分子动理论的楼宇负荷用电调度优化 (Optimal scheduling of building load electricity consumption based on multi-objective molecular motion theory) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (5): 1549-1555.

[3] Zhang D, Shah N, Papageorgiou L G. Efficient energy consumption and operation management in a smart building with microgrid [J]. Energy Conversion & Manage-



- ment, 2013, 74: 209-222.
- [4] 王建华, 张国钢, 耿英三, 等 (Wang Jianhua, Zhang Guogang, Geng Yingsan, et al.). 智能电器最新技术研究及应用发展前景 (The latest technology research and application prospects of the intelligent electrical apparatus) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2015, 30 (9): 1-11.
- [5] 董博, 李永东, 郑治雪 (Dong Bo, Li Yongdong, Zheng Zhixue). 分布式新能源发电中储能系统能量管理 (Energy management of hybrid storage in distributed generation system) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (1): 22-25.
- [6] Pipattanasomporn M, Kuzlu M, Rahman S. An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3 (4): 2166-2173.
- [7] 张木银, 周玲, 管志成, 等 (Zhang Muyin, Zhou Ling, Guan Zhicheng, et al.). 考虑需求响应影响的含分布式电源的配电网多目标协调规划 (Multi-objective coordinated planning of distribution network with distributed generation considering influence of demand response) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (3): 16-21.
- [8] 齐晓曼, 何胜, 杨林青, 等 (Qi Xiaoman, He Sheng, Yang Linqing, et al.). 智能社区低碳能源系统运营策略研究 (Operation strategy for low-carbon energy system in smart community) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2014, 42 (12): 2717-2721.
- [9] 王澄, 徐延才, 魏庆来, 等 (Wang Cheng, Xu Yancai, Wei Qinglai, et al.). 智能小区商业模式及运营策略分析 (Analysis of intelligent community business model and operation mode) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2015, 43 (6): 147-154.
- [10] 樊飞龙, 邰能灵, 郑晓冬, 等 (Fan Feilong, Tai Nengling, Zheng Xiaodong, et al.). 基于前推回代优化算法的社区能源网络有功实时调配策略 (Real-time deployment strategy of the active power in community energy networks based on back/forward optimization algorithm) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2017, 37 (14): 4098-4108.
- [11] 刘旭娜, 肖先勇, 李长松 (Liu Xuna, Xiao Xianyong, Li Changsong). 动态终端能量管理系统及其节能削峰效益分析 (Dynamic ending energy management system and its benefits on energy-saving and peak-clipping) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2012, 40 (10): 1709-1714.
- [12] 陆俊, 彭文昊, 朱炎平, 等 (Lu Jun, Peng Wenhao, Zhu Yanping, et al.). 基于粒子校正优化的智能小区需求响应调度策略 (A scheduling strategy based on particle correction for intelligent power demand response) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (7): 2370-2377.
- [13] 颜庆国, 杨永标, 高辉, 等 (Yan Qingguo, Yang Yongbiao, Gao Hui, et al.). 智能楼宇可调资源优化控制建模及仿真分析 (Modeling and simulation analysis for intelligent building adjustable resources optimization control) [J]. 电器与能效管理技术 (Low Voltage Apparatus), 2016, (10): 31-36.
- [14] 时珊珊, 苏义荣, 改传跃 (Shi Shanshan, Su Yirong, Gai Chuanyue). 智能社区低碳能源管理系统方案研究 (Scheme for low-carbon energy management system in intelligent community) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2014, 42 (12): 2918-2921.
- [15] 万庆祝, 陈娅兰, 李正熙 (Wan Qingzhu, Chen Yalan, Li Zhengxi). 一种家庭能量管理系统的优化方法及装置 (A optimization method and device of home energy management system) [P]. 中国专利 (Chinese Patent): CN105844365A, 2016-04-08.
- [16] 张延宇, 曾鹏, 臧传治 (Zhang Yanyu, Zeng Peng, Zang Chuanyue). 智能电网环境下家庭能源管理系统优化调度算法 (A scheduling algorithm for home energy management system in smart grid) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2016, 44 (2): 18-26.
- [17] 常虹, 焦斌, 顾幸生 (Chang Hong, Jiao Bin, Gu Xingsheng). 自适应和声搜索算法及在数值优化中的应用 (Adaptive harmony search algorithm and its application to numerical optimization problems) [J]. 控制工程 (Control Engineering of China), 2012, 19 (3): 455-458.
- [18] 乔英, 高岳林, 江巧永 (Qiao Ying, Gao Yuelin, Jiang Qiaoyong). 改进的多目标和声搜索算法 (Improved harmony search algorithm for multi-objective) [J]. 计算机工程 (Computer Engineering), 2012, 38 (18): 144-146.
- [19] 张子泳, 仇梦林, 李莎 (Zhang Ziyong, Zhang Menglin, Li Sha). 基于多目标粒子群算法的电力系统环境经济调度研究 (Environmental/economic power dispatch based on multi-objective particle swarm constraint optimization algorithm) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2017, 45 (10): 1-10.
- [20] 徐晓光 (Xu Xiaoguang). 计及多目标的微网协同调度研究 (Multi-objective collaborative scheduling study for microgrid) [D]. 青岛: 青岛大学 (Qingdao: Qingdao

University), 2015.

**Research on optimal scheduling of energy management system  
based on MOHSA in smart community**

ZHONG Hai-tao<sup>1</sup>, HAN Ao-yang<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-sheng<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China;

2. Qingdao Electric Power Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Qingdao 266002, China)

**Abstract:** The home load is an important part of the grid load. Under the smart grid environment, the flexible scheduling of domestic loads can effectively alleviate the shortage of power supply and facilitate the implementation of the demand response on the user side. This paper proposed a collaborative scheduling method of smart community based on multi-objective harmony search algorithm. For reducing the user's electricity cost and load fluctuations on the distribution network side, this paper establishes a smart community energy management system model. The distributed power, energy storage system and schedulable load are considered in the model. Then, the model is solved by the improved multi-objective harmony search algorithm based on Pareto theory, and the method is compared with other algorithms. The simulation results have showed that the model and scheduling scheme can effectively reduce the user's electricity cost and load fluctuations, and the improved algorithm has stronger optimization performance.

**Key words:** community energy management system; optimal scheduling; Pareto theory; multi-objective harmony search algorithm; power system