

1-14-2022

Optimization of Household Electricity Consumption Period Based on Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization

Xiuying Yan

1. School of Construction Equipment Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;;2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;;

Miaomiao Dang

2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Optimization of Household Electricity Consumption Period Based on Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization

Abstract

Abstract: Aiming at the household power load scheduling optimization, three objectives of the cost of electricity, satisfaction and user-side fluctuation degree are taken into comprehensive account. *An improved adaptive weight multi-objective particle swarm optimization (IAW-MOPSO) algorithm is proposed to realize the scheduling optimization of household power load. The local improvement ability and global search ability of particle swarm optimization are balanced by updating the inertia weight of particle fitness value.* The simulation results of five groups show that the proposed optimization strategy reduces the electricity charge by 29%, ensures the stability of electricity consumption in the peak period, and obviously increases the user satisfaction, which verifies the validity of the proposed model and the superiority of the algorithm.

Keywords

home energy management, electricity dispatch, multi-objective optimization, adaptive weight, satisfaction

Recommended Citation

Yan Xiuying, Dang Miaomiao. Optimization of Household Electricity Consumption Period Based on Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(1): 70-78.

基于改进多目标粒子群算法的家庭用电时段优化

闫秀英^{1,2}, 党苗苗²

(1. 西安建筑科技大学 建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 信息控制与工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为解决家庭用电负荷的调度优化问题, 综合考虑用电成本、满意度以及用户侧波动程度 3 个目标进行优化。提出改进自适应权重多目标粒子群算法(improved adaptive weighted multi-objective particle swarm optimization, IAW-MOPSO)求解模型, 通过对粒子的适应度值分段更新惯性权重, 均衡了粒子群算法的局部改良能力和全局搜索能力, 在保证得到全局最优解的同时完成对家用电器的优化调度。结果表明: 该优化策略降低了 29% 的电费, 保障了高峰时期用电的稳定性, 用户满意度明显增加, 验证了所提模型的有效性以及算法的优越性。

关键词: 家庭能源管理; 用电调度; 多目标优化; 自适应权重; 满意度

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2022) 01-0070-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0681

Optimization of Household Electricity Consumption Period Based on Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization

Yan Xiuying^{1,2}, Dang Miaomiao²

(1. School of Construction Equipment Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. School of Information and Control Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Aiming at the household power load scheduling optimization, three objectives of the cost of electricity, satisfaction and user-side fluctuation degree are taken into comprehensive account. An improved adaptive weight multi-objective particle swarm optimization (IAW-MOPSO) algorithm is proposed to realize the scheduling optimization of household power load. The local improvement ability and global search ability of particle swarm optimization are balanced by updating the inertia weight of particle fitness value. The simulation results of five groups show that the proposed optimization strategy reduces the electricity charge by 29%, ensures the stability of electricity consumption in the peak period, and obviously increases the user satisfaction, which verifies the validity of the proposed model and the superiority of the algorithm.

Keywords: home energy management; electricity dispatch; multi-objective optimization; adaptive weight; satisfaction

引言

“能源时代”家庭电器用电量在社会总用电量的比重显著增加, 传统电网的基础设施已无法满足用户的电力需求。为应对这一挑战, 现代人们在高强度生产和高水平生活中对电力的需求可通过智

能电网满足^[1-3]。智能电网的逐渐完善, 一方面帮助电网为用户提供高效合理的供电服务, 一方面直接与用户对接, 挖掘用电习惯和负荷类型, 提高了用电效率。智能电网^[4-8]系统在不断完善的的同时兼顾了功能的多样化。它可以有效促进社会能源的二次分配, 保障电力系统稳定运行, 也可以推动一系

收稿日期: 2020-09-09

修回日期: 2021-02-17

基金项目: 国家十三五科技支撑项目子课题(2016YFC0700208-03); 陕西省低能耗建筑节能创新示范工程项目研究(2017ZDXM-GY-025);

第一作者: 闫秀英(1980-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为建筑智能化。E-mail: 55746411@qq.com

列新兴产业发展。因此家庭能源管理系统(home energy management system, HEMS)借此契机, 从智能电网向用户侧延伸并得到迅猛发展, 其亟待解决的关键问题是考虑用户侧的多种用电情况并针对性地制定合理的用电方案, 在优化用户用电成本的同时也要适可兼顾用户的用电体验^[9]。通过自动需求响应(demand response, DR)^[10-12]技术, 不仅可以实现电网侧与用户侧的信息共享, 让家庭用户用电满意, 而且使电力资源合理利用, 调动了用户的积极性。因此降低用户的用电费用, 缓解电网侧的供电压力, 为低碳生活的可持续发展提供有力支撑是本领域研究重点。

通过采集用户的用电数据并进行相应的分析, 制定相应的用电优化方案, 从而实现用户侧的舒适性和经济性的目标^[13]。国内外针对家庭用电负荷调度问题均已有了相关研究。文献[14]建立了能源消耗和生产的模型, 实现了削峰填谷和降低用户电耗的目的, 却忽略了用电满意度的问题。文献[15]提出了一种基于动态抗体记忆库的免疫优化算法, 实现了对多类负荷的综合电能优化, 该算法全局搜索能力强且优化效率也令人满意, 但未考虑到峰谷差的问题。文献[16]提出了一种基于粒子校正的混合粒子群优化算法, 可以同时实现对多种负荷的协调调度, 以多用户在不同用电情况下的配电网侧波动性最小为准则, 最终解决了高峰期用电量大的问题, 但对用户侧用电体验方面缺乏考虑。文献[17]基于智能用电双向互动技术, 在满足用户侧电力需求的基础上, 尽可能提高用户对电器的使用体验, 制定了智能家电管理控制策略, 但没有考虑用户用电高峰期和低谷期的波动程度。对当前国内外家庭用电智能管理系统的现状进行研究, 发现绝大部分的研究都把工作重心放在了实现经济效益最大化的核心目标上, 却很少关注到用户侧的用电满意度以及家庭用电负荷的尖峰波动、电力调度安排不合理的问题。

针对忽略用户的用电习惯问题, 综合考虑家庭用户在用电过程中的费用支出、用电满意度, 以及

用户侧负荷波动程度等问题, 建立了智能家庭用电时段优化调度模型。对粒子群优化算法中的权重进行实时更新, 以提高算法的鲁棒性和稳定性, 最终采用改进的多目标粒子群算法对不同类型的用电负荷进行调度优化。

1 家庭智能用电系统

1.1 居民用电负荷分析

为合理管控家用电器, 将用电设备分为刚性负荷和柔性负荷。刚性负荷是指设备可使用的时间比较严格, 在允许时段范围外的时间或者强行停止使用会明显降低用户满意度的家庭用电负荷, 例如电灯、电视、电脑等。因此对于此类设备, 尽可能不做任何调度, 但可以通过使用智能插座或者遥控器对其进行控制, 属于可控但不可调度的负荷(使用时间具有一定的随机性和不确定性)。柔性负荷是指可使用的用电时段比较灵活的家庭用电负荷, 随时停止运行都不会影响用户体验, 是家庭能源管理系统的主要调控对象。根据柔性负荷在运行时段是否可以随时关停, 又可细分可中断负荷和不可中断负荷。其中可中断负荷是指在满足最小运行时间的前提下可以随时开启或关闭, 可以灵活地分配工作时段, 如空调和扫地机器人等。不可中断负荷在运行时需保证连续工作, 不可随意停止, 否则会损耗不可中断设备性能, 如电饭煲、洗碗机、洗衣机等。

1.2 用电负荷的基本类型

(1) 可中断负荷

可中断负荷只要在规定的时间段内完成工作任务即可, 用户可依据自身生活习惯或特殊情况随时关停正在工作的负荷, 同时并不会影响负荷性能。其用电量由使用时间长度和功率大小共同决定, 因此可中断负荷 a 在第 b 个工作时间段为

$$e_a^b = x_a P_a \quad (1)$$

式中: x_a 为可中断负荷 a 的工作状态的模型矢量; e_a^b 为设备 a 在第 b 个时间段的用电功率; P_a 为可中

断负荷 a 的额定功率。由于设备 a 为可中断负荷，在其工作限制时段内，约束条件为

$$f_a^b = \begin{cases} \{0,1\}, & b \in [\alpha_a, \beta_a] \\ 0, & b \notin [\alpha_a, \beta_a] \end{cases} \quad (2)$$

式中： $[\alpha_a, \beta_a]$ 为设备 a 的允许运行时间； f_a^b 为设备 a 在 b 时段的运行状态， f_a^b 为 0 表示可中断负荷 a 在第 b 个时段处于停止工作状态， f_a^b 为 1 表示可中断负荷在第 b 个时段处于工作状态； α_a 和 β_a 为用户设置好的可中断负荷允许工作时段的下限和上限。可中断负荷运行时间的约束条件为

$$\sum_{b=1}^{48} x_a^b = t_a \quad (3)$$

$$t_a \leq \beta_a - \alpha_a$$

式中： t_a 为可中断负荷 a 的运行时长。

(2) 不可中断负荷

不可中断负荷在工作时段内一经运行用户就不可以随意关停，在使用时必须连续工作，直到完成任务才可以停用设备。可中断负荷 a 在其第 b 个工作时间段为

$$e_a^b = x_a P_a, \quad b \in [1, 48] \quad (4)$$

式中： e_a^b 为设备 a 在第 b 个时间段的用电功率； P_a 为不可中断负荷 a 的额定功率。由于设备 a 为不可中断负荷，在其工作限制时段内约束条件为

$$f_a^b = \begin{cases} \{0,1\}, & b \in [t_a^{\text{start}}, t_a^{\text{stop}}] \\ 0, & b \notin [t_a^{\text{start}}, t_a^{\text{stop}}] \end{cases} \quad (5)$$

式中： $[t_a^{\text{start}}, t_a^{\text{stop}}]$ 为设备 a 的允许运行时间； f_a^b 为设备 a 的运行状态； t_a^{start} 为不可中断负荷开始工作的开启时间； t_a^{stop} 为不可中断负荷结束工作的关停时间。不可中断负荷运行时间的约束条件为

$$\alpha_a \leq t_a^{\text{start}} \leq t_a \leq t_a^{\text{stop}} \leq \beta_a \quad (6)$$

$$t_a^{\text{stop}} = t_a^{\text{start}} + t_a$$

式中： t_a 为不可中断负荷 a 的工作时长。

2 家庭能源调度优化模型构建

从经济性和舒适性等方面考虑，兼顾用户用电

的满意度，分别构建家庭用电费用模型、用户满意度模型和用户侧负荷波动程度模型，为家庭用电时段的调度优化奠定基础。

2.1 用电费用模型

用户侧使用的用电负荷决定了用电成本。根据柔性负荷在实际生活中所使用的情況，建立用电费用模型。因此模型优化的目标是在工作时段 $[\alpha_a, \beta_a]$ 内，满足用电计划的前提下用电费用达到最小；在不同时段内电价的约束条件下，建立电价的矩阵变量。把第 t 小时电价记作 p_t ， E_t 表示用户在一天中第 t 小时的用电量，则

$$\begin{cases} E_t = \sum_{b \in T} \sum_{a \in A} e_a^b \\ b = (t-1) \cdot h + 1 \\ t = 1, 2, \dots, 24 \end{cases} \quad (7)$$

式中： A 为所有家用电器集合，即为总用电负荷数目；将每小时均分成 h 个的时段； $T=24$ h。在用电费用最低的情况下，则模型的目标函数为

$$C = \min \sum_{t=1}^{24} p_t E_t \quad (8)$$

式中： C 为用户的用电成本。家用电器在参与用电调度的时间内需避免发生用电过程中的电路意外跳闸，任何时间段内的电能约束为

$$\sum_{a \in A} e_a^b \leq E_{\max} / h \quad (9)$$

2.2 用户满意度模型

为了在电器调度后尽量满足用户的满意度，提高家庭用户的用电体验，以用电设备等待时间的长短来评判用户满意度。因此想要提高用户满意度则需要要求用电负荷在允许工作时段 $[S_a, F_a]$ 内尽快地完成工作。结束时间越往后延迟等待时间就会增加，会直接降低用户的满意度，用户满意度与柔性设备工作结束时间呈负相关性，即柔性负荷在可运行时段结束任务的时间越晚，用户满意度就会越差，当在其他时段工作时，用户满意度则降为 0。因此满意度函数为

$$S_a = 1 - \frac{S_a^d - S_a^r}{F_a - S_a^r} \quad (10)$$

式中: S_a^d 为理想的可开启时间; S_a^r 为电器的实际的开启时间。同时使用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 确定各电器对于用户的关键程度。设电器 a 的权重为 W_a , 所有电器总的用户满意度记为 S , 可以得到:

$$S = \sum_{a \in A} S_a \cdot W_a \quad (11)$$

为了让用户体验到家庭用电时段优化模型的实用性和经济性, 将用户可接受的总满意度记为 G , 结合用电费用最低模型:

$$\sum_{a \in A} S \cdot W_a > G \quad (12)$$

2.3 用户侧负荷波动程度模型

相对于用户侧而言, 进行优化调度的主要目的是实现高峰期的用电稳定, 本课题选用电力用户单日用电总负荷的峰谷差作为度量用户侧的负荷波动程度, 因此若单日负荷波动程度越小, 用电则越平稳。将每日分成 48 个时间段, 每个时间段为 30 min。优化目标函数如下:

$$d = \max_{1 \leq i \leq T} \sum_{a=1}^A e_a^b - \min_{1 \leq i \leq T} \sum_{a=1}^A e_a^b \quad (13)$$

式中: e_a^b 为电器 a 在第 b 个工作时段的用电功率; A 为电器总和; $a=1$ 表示第一个用电设备。式(13)最终结果越小则表示用户侧的负荷波动程度越小, 对平抑高峰负荷效果越好, 可以较好地实现削峰填谷的目的。

2.4 多目标处理

对多目标优化采用平方和加权的方法进行处理, 分别求出每个目标函数的最优值 f_i 。由于不可以同时达到每个目标最优的情况, 尽量保证趋近理想情况, 所以构造加权评价函数, 将多目标优化问题转化为单目标问题进行优化, 即

$$F(X) = \sum_{i=3}^n W_i \left[\frac{f_i(X) - f_i}{f_i} \right]^2 \quad (14)$$

通过式(14)求出多目标优化的最优解。 W 为权重系数, 可以反映出各个目标在优化过程的重要程度, 据此可构建本文多目标优化问题的统一函数:

$$F(X) = W_C \left(\frac{C_{\min}}{C_{\min} \Delta} - 1 \right) + W_S \left(\frac{S_{\max}}{S_{\max} \Delta} - 1 \right) + W_d \left(\frac{d_{\min}}{d_{\min} \Delta} - 1 \right) \quad (15)$$

式中: $C_{\min} \Delta$, $S_{\max} \Delta$, $d_{\min} \Delta$ 分别代表用电费用、用户满意度以及用户侧波动程度的最优值。

3 粒子群算法及其改进

3.1 标准粒子群算法

PSO 是经典的智能算法, 该算法是基于群中个体的相互协作和信息共享来寻找最优解, 相比于其他算法没有太多繁杂的参数, 比较容易实现。本文提出一种改进权重策略的多目标粒子群优化算法 (IAW-MOPSO) 对整体粒子的适应度进行考量, 不仅可以解决多个目标优化问题, 而且优化速度也比较快, 同时在全局最优解的搜索原理上结合了非支配排序思想和帕累托最优适度分配的方法, 利用粒子间的协作关系不断更新粒子的最优解, 进而求解多目标问题^[18], 最终选出适应度最优的粒子集合。

粒子群算法的核心就是通过自身与群体中较优的经验来更迭下一步的运动, 最终确定粒子的全局最优值和局部最优值。其更新过程为

$$\begin{cases} v_{i+1} = wv_{i+1} + c_1 \cdot rand \cdot (P_{best_i} - X_i) + \\ c_2 \cdot rand \cdot (g_{best_i} - X_i) \\ X_{i+1} = X_i + v_{i+1} \end{cases} \quad (16)$$

式中: v_i 为粒子的速度; X_i 为粒子的位置; P_{best_i} 为每个粒子到目前为止发现的最好位置; g_{best_i} 为全部群体中得到的最好位置; $rand()$ 是介于 $[0, 1]$ 的随机数; v_{i+1} 为第 $i+1$ 个粒子速度; X_{i+1} 为第 $i+1$ 个粒子的位置; c_1 和 c_2 为学习因子; w 为粒子群的动态权重值。使用非线性变化更新惯性权重:

$$w_q = \frac{w_{\max} - [q(w_{\max} - w_{\min})]}{t_{\max}} \quad (17)$$

式中: q 为当前迭代次数; w_q 为第 q 次迭代更新的权重值; $w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 为由人为设定 w 的最大值和最小值; $t_{\max}$ 为最大迭代次数。

3.2 粒子群算法改进

粒子群算法与其他智能算法相比在求解优化过程中参数设置比较简单, 相比于其他仿生算法更加简单易懂, 其不同点是粒子群算法由于不需要编码, 没有其他仿生算法中由于编码带来的求解精度限制。但其仍然存在普遍智能算法对单目标优化结果更好, 进行多目标优化时容易陷入局部最优的问题。针对该问题, 本文对标准粒子群进行改进, 其中惯性权重 w 是多目标粒子群算法中最重要的参数, 随着 w 增加会提高算法的全局搜索能力, 减小会提高算法的局部搜索能力。改进后的粒子群算法使得家庭用电时段得到优化, 用户侧可以以此为依据对电器的运行状态进行调整。本算法改进过程如下:

- (1) 计算所有粒子的当前适应度值;
- (2) 更新迭代新一代粒子, 并统计群体中适应度值大于和小于平均适应度值的粒子;
- (3) 利用非线性动态惯性权重更新 w , 提高 PSO 的局部和全局搜索能力:

$$w = \begin{cases} w_{\min} - \frac{(f_{\text{mean}} - f_{\min})\Delta w}{(f_v - f_{\min})}, & f_{\text{mean}} \leq f_v \\ w_{\max}, & f_{\text{mean}} > f_v \end{cases} \quad (18)$$

$$\Delta w = (w_{\max} - w_{\min})$$

式中: $w_{\max}$, $w_{\min}$ 分别为 w 的最大值和最小值; f_{mean} 为粒子当前的适应度值; f_v 和 $f_{\min}$ 分别为当前全部粒子的平均适应度值和最小适应度值; w 随着粒子的适应度值变化而改变。

当粒子的 f_{mean} 趋于局部最优或者一致时 w 增加, 反之减小。 f_{mean} 优于 f_v 的粒子, 与其对应的 w 较小, 从而保护了该粒子; 而低于 f_v 的粒子, 与其对应的 w 较大, 使得该粒子会朝较好的搜索区域移动。

3.3 调度模型求解过程

本文针对智能家庭的用电时段优化调度策略, 采用改进自适应权重多目标粒子群算法进行研究。在求解多目标问题的时候, 可以通过 Pareto 分层排序原则选出最优个体, 最终得到 Pareto 最优解集合。具体多目标调度操作流程如下:

step 1: 编码策略。 编码策略采用二进制编码方式, 每个粒子均代表多目标问题的一个可行解, 所有粒子被设计为“ ab ”维 0-1 矩阵 $X = (x_{ij})_{ab}$, 其中 x_{ij} 表示第 i 个柔性负荷选择第 j 个时段作为工作时段, $\sum_{j=1}^a x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, b$ 表示每个设备选择一个时段进行运行。粒子速度用 $v = (v_{ij})_{ab}$ 表示;

step 2: 系统和算法初始化。 确定需要调度的负荷模型, 并输入各个负荷的运行时刻、功率、以及模型等基本参数。设定粒子群规模 P_{size} , 最大迭代次数 $t_{\max}$ 等算法参数, 同时初始化粒子种群和外部档案集, 每个粒子随机分布在可行解空间并被赋予一个给定范围内的初始速度;

step 3: 确定极值。 计算各个粒子的适应度值将历史最优的位置记为个体极值, 并在外部档案集中找到全局最优解, 与个体最优相比较, 选出最佳的解记为全局极值;

step 4: 根据式(16)更新粒子的速度和位移;

step 5: 根据式(18)更新权重;

step 6: 更新位置。 根据适应度更新历史最优 p_{best} 和全局最优 g_{best} , 对比当前粒子的适应度值与之前确定的最优解, 如果当前更优则进行极值替换;

step 7: 更新外部档案集。 保留当前找到的最优解集, 然后将最新一次迭代找到的最优解集和当前最优解集合并, 再次选出非支配的最优解集;

step 8: 判断是否满足终止条件。 如果满足条件, 则算法终止迭代, 输出最优解集, 即为优化后的家电用电时段; 反之返回 step 4 继续优化。如图 1 所示。

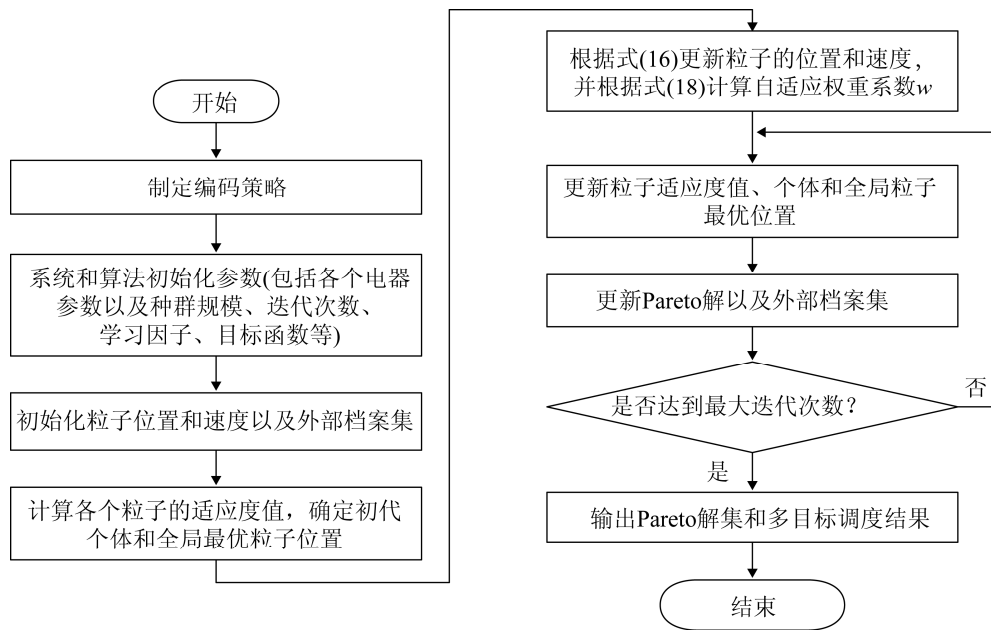


图 1 改进 MOPSO 算法流程图

Fig. 1 Improved MOPSO algorithm flow chart

4 算例仿真与分析

4.1 实验场景及参数设置

为了验证上述模型, 本文将家庭用户的模拟调度周期设为 1 d, 调度步长为 0.5 h, 每个时段电力侧给出的电量均限制在 3 kW 以内, 以普通家庭用户作为研究对象, 额定电压和额定电流分别设定为 220 V 和 20 A。同一种柔性设备有多个允许工作时段, 将具备多个工作区间的设备分别看成单个柔性设备进行调度, 并为家庭用户安装智能交互端, 用以实现用户侧与供电侧的双向信息互动。同一种电器的重要程度随用户不同而发生变化, 采用 AHP 得到电器之间的重要性指标, 各个电器工作的基本参数见表 1, 分时电价见表 2。

4.2 多目标优化分析

通常只针对单一目标优化时, 势必会对其他的目标造成一定程度的影响, 几乎不会同时达到最优。为了证明改进自适应权重多目标粒子群算法用于家庭用电设备调度的优越性, 本文以用电费用、用户满意度和波动程度为目标进行多目标优化。通过多次计算, 选取优化效果较好的参数作为本节参

数配置, 即种群规模 $P_{size}=200$, 迭代次数 $P_{ite}=200$, 外部档案集规模设定为 $z=40$, 惯性权重参数设定为 $W_{max}=0.9$ 和 $W_{min}=0.4$, 加速因子参数分别设置为 $c_1=0.9$ 和 $c_2=0.1$ 。

表 1 家用电器工作参数

Table 1 Household electric appliance working parameters

设备名称	允许工作时段	重要性指标	工作时长/h	额定功率/(kW/h)
电饭煲	16:00–19:00	0.108 4	1.0	0.8
洗衣机	09:00–24:00	0.048 8	1.0	1.4
洗碗机	20:00–24:00	0.024 1	0.5	1.5
热水器 1	00:30–07:00	0.070 1	2.0	2.0
热水器 2	17:00–22:00	0.100 8	2.0	2.0
电动车	01:00–24:00	0.096 0	5.0	2.0
空调 1	16:00–24:00	0.045 3	4.0	1.0
空调 2	01:00–06:00	0.045 3	4.0	1.0
扫地机器人	16:00–22:00	0.021 9	1.0	0.6

表 2 分时电价方案

Table 2 Time-sharing pricing scheme

时段编号	电价(元)	最大功率限制/kW
1~16	0.288	3
17~44	0.568	3
45~48	0.288	3

柔性负荷调度优化后的运行结果如表 3 所示。从表 3 可以看出优化后柔性负荷的工作时间有了很大调整。从图 2 可以看出若优化前不考虑用电费用、用电系统的峰谷差等, 只按用户自身意愿无序用电, 用电时段主要集中在 6 点、17 点以及 20 点等, 其余时段用电较小, 峰谷差比较明显, 用电系统不稳定; 优化后综合考虑电费等因素, 用电时段主要集中在 2 点到 7 点, 18 点到 23 点, 峰谷差比较小, 不会有明显的高峰或者低谷。因此使用该算法优化用电时在不影响用户满意度的前提下, 并起到了削峰填谷、减少费用开支的目的。

表 3 家用电器优化运行结果

Table 3 Optimized operation results of household electric appliances

设备名称	原始工作时段编号	优化后工作时段	时间	工作电量/kW
电饭煲	32~38	34~36	17:00~18:00	0.80
洗衣机	18~48	38~40	19:00~20:00	1.40
洗碗机	40~48	40~42	20:00~21:00	0.75
热水器 1	1~14	10~14	05:00~07:00	4.00
热水器 2	34~44	16~20	18:00~20:00	4.00
电动车	2~48	34~46	17:00~23:00	10.00
空调 1	32~48	40~48	20:00~24:00	4.00
空调 2	2~12	4~10	02:00~05:00	4.00
扫地机器人	32~44	38~40	16:00~20:00	0.60

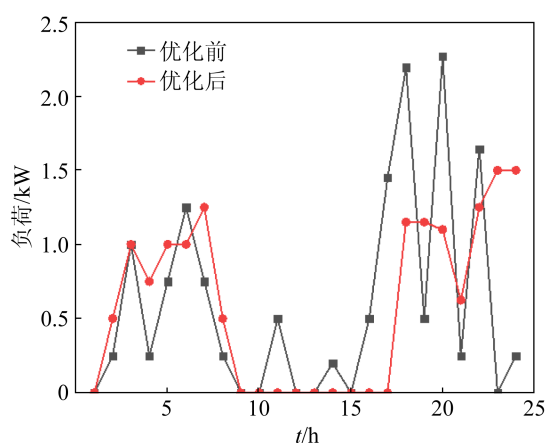


图 2 优化后用电情况对比

Fig. 2 Comparison of electricity consumption after optimization

由于传统粒子群算法迭代后期收敛速度较慢, 容易陷入局部最优, 本文提出的改进粒子群算法在

优化过程中引入了“自然选择”的思想, 通过保留适应度较优的粒子, 加快淘汰迭代过程中偏离最优解的粒子。每次迭代更新过程中会不断更新较优的粒子替换之前产生的粒子, 处理的结果是, 在每次迭代中适应度高的粒子数量将不断增加, 适应度低的粒子将被淘汰。最终让整个群体不断更加快速地朝着最优的位置靠近。采用各方法优化后的目标值对比如图 3 所示。从图 3 可以看出优化后用电负荷和用电费用降低、满意度增加。柔性负荷在调度过程中会适当改变用户的用电行为, 不可避免会影响到用户侧的用电体验, 改进的优化方法虽然不能保证各个目标同时达到最优值, 但是基本实现了 3 个目标总体最大程度的优化, 保障了用电的经济性和舒适性, 符合调度优化的实际应用情况。

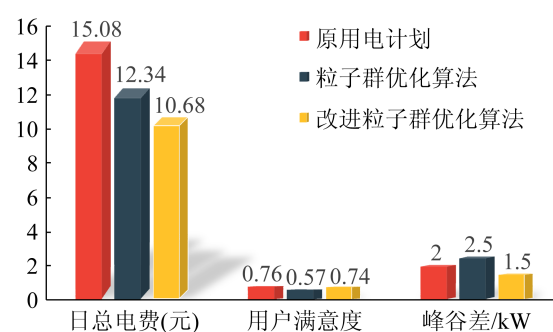


图 3 优化目标值对比情况

Fig. 3 Comparison of optimized target values

针对所选择典型的家庭用户, 本文在尽量不改变用户生活习惯的前提下对部分可控电器进行调度优化, 各个电器的允许工作时间段是固定的。因此改变所有电器的用电功率, 结果如表 4 所示。当家用电器功率均上涨之后, 均超过原计划用电功率下电费 12.33 元, 会明显高于原计划的费用, 尤其当电器功率均上涨 10% 时, 电费相比于原计划上涨了 19.87%, 用户用电体验会显著降低, 满意度就会比较低, 此时峰谷差较高; 当电器功率均下降后, 电费会减少很多, 当电器功率均下降最大至 10% 时, 电费相比于原用电计划下降了 17.92%, 用户的用电体验比之前好很多, 满意度也比较高, 此时峰谷差也比较适中。所以电器的功率会主要影响到用电费用以及用户满意度, 不会过多影响峰谷差,

当电器的耗电量增大, 用户的用电支出就越高, 用户满意度越低; 反之, 用户的用电收支越低, 用户满意度越高。

表 4 电器功率对优化结果的影响

Table 4 Influence of electrical power on optimization results

电器功率 增减/%	用电费用 (元)	用户满意度	峰谷差/kW
-10	10.12	0.64	2.25
-9	10.36	0.63	1.92
-8	10.57	0.62	1.83
-7	10.78	0.59	2.15
-6	11.15	0.58	2.01
-5	11.42	0.56	2.17
-4	11.64	0.55	1.76
-3	11.87	0.55	1.86
-2	11.92	0.52	1.88
-1	12.02	0.50	2.26
0	12.33	0.48	1.92
+1	12.52	0.47	1.68
+2	12.75	0.43	1.79
+3	13.01	0.35	2.15
+4	13.27	0.28	1.83
+5	13.53	0.23	2.63
+6	13.79	0.23	2.54
+7	14.05	0.22	2.61
+8	14.31	0.17	2.43
+9	14.57	0.16	2.58
+10	14.78	0.16	2.60

综合考虑不同情况的优化结果, 分别对用电费用、满意度和用电负荷进行对比分析。可以看出用户按原计划用电时, 没有任何顾虑的情况用户满意度就会比较高, 但相应的用电费用会增加, 这种情况下缴纳的用电费用为 15.08 元, 负荷峰谷差适中; 若是单方面考虑电费最小时, 家用电器会被调整到分时电价的低谷时段使用, 此时用户的电费达到最低, 比原计划用电减少了 34%, 但必然会严重影响用户的用电习惯, 会存在一些需要配合的家电错峰使用, 导致负荷峰谷差最大, 生活习惯的改变也会使用户的满意度达到最小; 反之, 如果只考虑用户满意度最大时, 用户几乎保持原有的用电习惯, 此时用户的用电费用和原用电计划的费用相差不会很多, 所产生的用电费用为 15.88 元, 用户的支出

会达到最高, 此时负荷峰谷差为 2.5 kW。很明显可以看出若单一考虑用电费用或用户满意度都无法同时达到舒适性和经济性最优, 仅能保证所优化的目标达到最优, 其他目标的效果就会受到影响。

选取改进后模型较优一组的实验结果与传统多目标模型进行对比, 改进后的模型在减少改变用户用电习惯改变的同时, 保障了用户对日常的用电需求, 避开了用电高峰时段, 降低了电费, 负荷峰谷相差最低。此时, 用电费用比原计划用电的情况下降低了 29%, 用电费用为 10.68 元, 经济性和满意度都达到相对较好的结果。进一步验证了所提模型对解决家庭用电负荷调度问题的优越性。5 种不同模型下的优化调度结果如表 5 所示。

表 5 不同情况下的优化调度结果

Table 5 Optimal scheduling results in different situations

优化目标	电费支出(元)	满意度	负荷/kW
原计划用电	15.08	0.76	2.0
用电费用最低	10.02	0.34	3.0
用户满意度最大	15.88	0.82	2.5
传统多目标模型	12.34	0.57	2.5
改进多目标模型	10.68	0.74	1.5

5 结论

本文重点依据家庭用户的一些用电习惯, 以此建立家庭用电时段电能优化调度模型, 该模型既考虑到了用户侧的生活舒适性, 也考虑到了家庭电力使用的经济性, 同时兼顾电力负荷波动因素, 更加贴近实际, 实用性也较高。通过比较已有种群的均值大小进而确定合适的惯性权重值, 提出了改进自适应权重的多目标粒子群算法, 加强了算法的局部搜索能力, 避免了算法过早收敛的同时也保存了种群的多样化。合理指导用户错峰用电, 促进了居民用电有序化和智能化的发展, 有效验证了模型的准确性和该算法的优越性。

考虑到未来分布式电源逐渐普及和用户群体用电需求的多样性, 本文已为智能家庭用电时段的调度优化提供了一定的理论支持, 后续研究可将分布式电源接入, 从户间能源调度角度进一步完善家庭群组的能源管理调度。

参考文献:

- [1] Sandhu H, Kumar M. Sizing and Analysis of Renewable Energy and Battery Systems in Residential Microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid (S1949-3061), 2017, 7(1): 393-404.
- [2] Thellufsen J Z, Sorknaes P. The Electricity Market in a Renewable Energy System[J]. Energy (S0360-5442), 2018, 162: 148-157.
- [3] Pudleiner D, Pielli K. Energy Efficiency as a Means to Expand Energy Access: A Uganda Roadmap[J]. Energy Policy (S0301-4215), 2018, 120: 354-364.
- [4] 张东霞, 苗新, 刘丽平, 等. 智能电网大数据技术发展研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 2-12.
Zhang Dongxia, Miao Xin, Liu Liping, et al. Research on the Development of Smart Grid Big Data Technology[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 35(1): 2-12.
- [5] 彭小圣, 邓迪元, 程时杰, 等. 面向智能电网应用的电力大数据关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 503-511.
Peng Xiaosheng, Deng Diyu, Cheng Shijie, et al. Key Technologies of Power Big Data for Smart Grid Applications [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2015, 35(3): 503-511.
- [6] Kang Q, Feng S, Zhou M, et al. Chiheb and Ammari Optimal Load Scheduling of Plug-in Hybrid Electric Vehicles Via Weight-Aggregation Multi-Objective Evolutionary Algorithms[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1558-0016), 2017, 18(9): 2557-2568.
- [7] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 2-8.
Xin Yaozhong, Shi Junjie, Zhou Jingyang, et al. Status and Technology Prospect of Smart Grid Dispatching Control System[J]. Power System Automation, 2015, 39(1): 2-8.
- [8] Yuan W, Zhang D, Lu H, et al. A Data-Driven and Optimal Bus Scheduling Model with Time-Dependent Traffic and Demand[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1558-0016), 2017, 18(9): 2443-2452.
- [9] 黄莉, 卫志农, 韦延方, 等. 智能用电互动体系和运营模式研究[J]. 电网技术, 2013, 37(8): 165-172.
Huang Li, Wei Zhinong, Wei Yanfang, et al. Study on Intelligent Power Consumption Interactive System and Operation Mode[J]. Power Grid Technology, 2013, 37(8): 165-172.
- [10] Marzband M, Azarnejadian F, Savaghebi. Smart Transactive Energy Framework in Grid-Connected Multiple Home Microgrids under Independent and Coalition Operations[J]. Renew Energy (S0960-1481), 2018, 126: 95-106.
- [11] Olsen D J, Sarker M R, Ortega-Vazquez M A. Optimal Penetration of Home Energy Management Systems in Distribution Networks Considering Transformer Aging[J]. Transactions on Smart Grid (S1949-3053), 2016(99): 1.
- [12] 孙国强, 李逸驰, 卫志农, 等. 智能用电互动体系构架探讨[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 68-74.
Sun Guoqiang, Li Yichi, Wei Zhinong, et al. Discussion on the Framework of Intelligent Power Consumption Interaction System[J]. Power System Automation, 2015, 39(17): 68-74.
- [13] Deng R L, Chen J M, Cao X H, et al. Sensing-Performance Tradeoff in Cognitive Radio-enabled Smart Grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid (S1949-3053), 2013, 4(1): 302-310.
- [14] Iqbal Z, Javaid N, Khan M R, et al. A Smart Home Energy Management Strategy Based on Demand Side Management[C]//2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. Crans-Montana, Switzerland: IEEE, 2016: 858-862.
- [15] 盛万兴, 张波, 邸宏宇, 等. 一种基于动态抗体记忆库的免疫优化算法在自动需求响应中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4199-4206.
Sheng Wanxing, Zhang Bo, Di Hongyu, et al. Application of Immune Optimization Algorithm Based on Dynamic Antibody Memory in Automatic Demand Response[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2014, 34(25): 4199-4206.
- [16] 陆俊, 彭文昊, 朱炎平, 等. 基于粒子校正优化的智能小区需求响应调度策略[J]. 电网技术, 2017(7): 338-345.
Lu Jun, Peng Wenhao, Zhu Yanping, et al. Intelligent Residential Demand Response Scheduling Strategy Based on Particle Correction Optimization[J]. Power Grid Technology, 2017(7): 338-345.
- [17] 汤奕, 鲁针针, 宁佳, 等. 基于电力需求响应的智能家电管理控制方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 93-99.
Tang Yi, Lu Zhenzhen, Ning Jia, et al. Intelligent Household Appliances Management and Control Scheme Based on Power Demand Response[J]. Power System Automation, 2014, 38(9): 93-99.
- [18] 张进峰, 杨涛宁, 马伟皓. 基于多目标粒子群算法的船舶航速优化[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(4): 787-794.
Zhang Jinfeng, Yang Taoning, Ma Weihao. Ship Speed Optimization Based on Multi-Objective Particle Swarm Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(4): 787-794.