

基于改进遗传算法的家庭用电调度优化方法

黄飞, 李永福, 高杨, 夏磊, 廖庆龙, 戴健, 向洪

引用本文

黄飞, 李永福, 高杨, 夏磊, 廖庆龙, 戴健, 向洪. [基于改进遗传算法的家庭用电调度优化方法](#)[J]. 计算机科学, 2024, 51(6A): 230600096-6.

HUANG Fei, LI Yongfu, GAO Yang, XIA Lei, LIAO Qinglong, DAI Jian, XIANG Hong. [Scheduling Optimization Method for Household Electricity Consumption Based on Improved Genetic Algorithm](#) [J]. Computer Science, 2024, 51(6A): 230600096-6.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[计及风电的发电商报价多智能体模型](#)

Multi-agent Based Bidding Strategy Model Considering Wind Power

计算机科学, 2024, 51(6A): 230600179-8. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230600179>

[基于深度强化学习的自学习排课遗传算法研究](#)

Study on Genetic Algorithm of Course Scheduling Based on Deep Reinforcement Learning

计算机科学, 2024, 51(6A): 230600062-8. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230600062>

[神经网络模型轻量化方法综述](#)

Lightweighting Methods for Neural Network Models:A Review

计算机科学, 2024, 51(6A): 230600137-11. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230600137>

[基于ART优化选择策略的遗传算法生成测试数据方法](#)

Method of Generating Test Data by Genetic Algorithm Based on ART Optimal Selection Strategy

计算机科学, 2024, 51(6): 95-103. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230100012>

[曲线曲面局部最小二乘渐进迭代逼近](#)

Local Progressive and Iterative Approximation for Least Squares B-spline Curve and Surface Fitting

计算机科学, 2024, 51(1): 225-232. <https://doi.org/10.11896/jsjcx.230700152>

基于改进遗传算法的家庭用电调度优化方法

黄飞¹ 李永福¹ 高杨² 夏磊¹ 廖庆龙¹ 戴健¹ 向洪¹

1 国网重庆市电力公司电力科学研究院 重庆 401123

2 重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065

(huangfei_87@163.com)

摘要 用电高峰期的用电需求给电力系统带来了巨大压力,因此优化家庭用电调度变得尤为为重要。针对用电高峰期用户端存在的用电经济性及舒适度不够的问题,提出了一种基于改进遗传算法的家庭用电调度优化方法。首先以分时电价为基础,建立综合考虑用电经济性与用户满意度的家用电器调度模型,然后对不同类型的电器采取不同的编码方式来替代传统遗传算法的单一编码,并用带惩罚函数的适应度函数来约束各个电器用电任务所需时长等,以对传统遗传算法进行改进和用电行为优化。结果表明,所提算法可有效地依据分时电价实现用电负荷调度优化,在满足用户用电舒适度情况下为用户提供经济性的用电方案,且复杂度较低,能有效解决用电高峰期的用电经济性和舒适度问题。

关键词:微电网调度;需求响应;家庭用电;多约束条件;混合编码;遗传算法

中图分类号 TP393

Scheduling Optimization Method for Household Electricity Consumption Based on Improved Genetic Algorithm

HUANG Fei¹, LI Yongfu¹, GAO Yang², XIA Lei¹, LIAO Qinglong¹, DAI Jian¹ and XIANG Hong¹

1 Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China

2 School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

Abstract In response to the problems of insufficient electricity economy and comfort at the customer side during the peak consumption period, an improved genetic algorithm based on optimization method for household electricity scheduling is proposed. The traditional genetic algorithm is improved and the electricity consumption behavior is optimized by adopting different coding methods for different types of appliances instead of the single coding of the traditional genetic algorithm, and using the fitness function with penalty function to constrain the time required for each appliance's electricity consumption task. The results show that the proposed algorithm can effectively realize the optimization of electricity load scheduling based on time-of-use tariff, and provide customers with economical electricity consumption solutions with low complexity, it can effectively solve the problem of economic and comfort level of power consumption during the peak period of power consumption.

Keywords Microgrid scheduling, Demand response, Household electricity, Multiple constraints, Hybrid coding, Genetic algorithm

1 引言

随着智能化时代的到来,日常生活中越来越多地需要电力系统的供应和维护^[1]。智能电器和电动汽车等新兴的电器产品也为人们的生活提供了极大便利^[2]。但是,这使得用户的用电负荷逐年攀升,在电网端常常会出现高峰用电和尖峰用电的情况,电力系统面临着巨大的负荷压力和严峻的挑战^[3]。在夏季高温地区的用电高峰时段,常会出现供电不足的情况,这给电网的安全运行带来了挑战。为了降低电网的高峰负荷,部分地区采用分时电价的形式为可能出现高峰负荷或尖峰负荷的时段赋予不同的电价值^[4]。作为目前实现需求侧管理的一种有效手段,分时电价通过发挥价格杠杆作用,利用峰谷时段存在的电价差,促使用户自觉改变用电方式,从

而有效缓解高峰期用电紧张的局面,达到移峰填谷的目的^[5]。这种情况下,用户完成当日用电任务所需电费会比常规定价要高出许多,调整电器的用电时段又会使用户的用电舒适度大打折扣。

如何在满足用户用电需求的情况下为用户提供用电费用更低的用电方案,涉及电网的需求响应问题。需求响应(Demand Response, DR)是通过引入激励或是电价机制来引导用户改变用电行为,实现峰值负荷搬移,使电力系统的运行更加灵活可靠^[6]。根据不同用户的用电任务为用户提供用电舒适度高、总电费低的用电方案,是智能信息化时代电网需求响应的重要研究方向。

目前关于家庭用电优化调度问题的研究已有许多不同的有效方案,如将一天分为若干个时间片段,由此可在离散的时

基金项目:国家电网公司总部科技项目(5700-202141454A-0-0-00)

This work was supported by the National Grid Corporation Headquarters Technology Project(5700-202141454A-0-0-00).

通信作者:高杨(1172506421@qq.com)

间内实现用电任务的调度,同时减少运算量,提高计算效率^[7]。

文献[8]从不同种类电器的工作原理入手,建立了用户对电器运行时间以及温度的不满意度模型,并使用粒子群算法实现调度过程。文献[9]建立了用户用电费用和不满意度模型,并采用遗传算法实现10种电器的调度优化,得到了在满足用户舒适度条件下,所需用电费用更低的用电方案。文献[10]提出了一种基于效用理论的家庭负荷用电优化策略,可在保障用户满意度的基础上实现良好的优化效果。文献[8-10]均可依照所给信息为用户提供合理的调度方案,但所涉及模型中考虑的电器种类较少,均存在使用场景较为单一、普适性不够的问题。

文献[11]首先对家庭能源管理系统进行建模,并使用蝙蝠算法和花粉算法进行优化,以降低消费者的电费并提高用户的舒适度。文献[12]提出了一种基于负荷协同控制的家庭柔性负荷优化调度策略,以最小化用电成本为优化目标,使用粒子群算法进行求解,以提高家庭负荷的综合效益。文献[13]构建了风力发电与光伏发电的家庭能源系统框架,以获得系统控制期内经济效益最高的管理策略为优化目标,使用遗传算法对该模型进行求解。文献[14]提出了一种基于深度强化学习的高效需求响应调度算法,用于实现家用电器的优化调度。文献[11-14]提出的模型考虑场景较全面、普适性较好,但所提方法存在计算复杂度高、收敛速度慢或运行时间过长的问题。

文献[15]提出了一种从负荷侧考虑对电网峰值调度有贡献度的用电激励机制,采用基于小生境的混沌粒子群优化算法对该多目标优化模型进行求解,以实现电器的优化调度。文献[16]建立了家用电器调度模型,并使用局部粒子群算法实现18个用电任务的调度优化。文献[17]分别以经济性和用户用电舒适度为优化目标,提出了一种基于遗传算法的用电任务调度优化方法,减少了15.9%的电费支出。文献[15-17]提出的模型解决了用电场景过于单一、普适性不够的问题,在设计相对应模型的求解算法时,兼顾考虑了计算复杂度以及收敛速度问题,但文献[15-17]最终寻找到的最优解相比原始方案的提升效率不高。

总的来说,现有方法存在调度场景较为单一、所用方法及计算复杂度过高,以及得到的调度方案改善效果较差等问题。本文在现有研究的基础上提出了一种以分时电价为基础,统筹考虑用户满意度以及用电费用的多家用电器优化调度模型,将用电任务分为可中断运行用电任务以及连续运行用电任务两大类,并由用户确定调度区间范围,同时将各个用电任务的可调度时间限制在用户期望的时间范围内,将其作为模型的强约束条件,在此约束条件下以寻找最低电费的用电方案为优化目标进行调度优化。遗传算法是一种启发式搜索算法,受到自然界进化过程的启发,常用于解决优化问题。它通过模拟生物进化中的遗传、变异和适应度选择等操作,逐步寻找问题的最优解。传统遗传算法通常使用单一编码来表示问题的解空间,但在本研究中,为提高传统遗传算法的性能,以混合编码的形式处理不同类型用电任务的编码方法替代传统遗传算法的单一编码,并设计带惩罚函数的适应度函数来约束各个电器用电任务所需时长。经过仿真对比,所提模型和改进算法可依据分时电价有效实现用电负荷调度优化,在满足用电舒适度的情况下为用户提供更为经济性的

用电方案,同时复杂度较低。

2 家用电器调度模型

家用电器种类繁多,主要的区分点在于不同电器的运行模式以及完成对应用电任务的运行时长。为了便于后续的优化操作,本文依据电器的运行模式,将待调度的家用电器分为可中断运行电器与连续运行电器两大类。

2.1 可中断运行电器调度模型

可中断电器指在确定电器的开启时段后,在该电器完成其对应的用电任务前,该电器的运行状态可以被打断。根据可中断运行电器完成对应用电任务所需时段长度及运行时段范围,得到可中断运行电器 a 的调度模型,其描述如下^[17]:

$$x_a^h = \{0, 1\}, \sum_{h=1}^m x_a^h = r_a \quad (1)$$

约束条件1:

$$\begin{cases} h \in [t_a, t_a + r_a] \\ x_a^h = 0, h \notin [s_a, e_a] \\ x_a^h = \{0, 1\}, t_a \in [s_a, e_a - r_a] \end{cases} \quad (2)$$

其中, x_a^h 表示电器 a 在时段 h 内的工作状态; $x_a^h = 1$ 表示电器 a 工作, $x_a^h = 0$ 表示电器 a 不工作; s_a 表示电器 a 的最小可工作时段序号, e_a 表示电器 a 的最大可工作时段序号,均可由用户依据调度时间确定; t_a 表示电器 a 的首次开启运行时段序号, t_a 的取值需要大于等于电器 a 的最小可工作时段 s_a ,同时需要小于等于 $e_a - r_a$,以保证电器 a 有足够的完成应用电任务的工作时段; r_a 表示完成调度任务电器 a 的运行时段总数。约束条件表示在用户规定的可运行时段之外,该电器不可工作。对于可中断运行电器 a ,在该电器的可运行时段内, a 的开闭状态可不连续,运行可被打断。

约束条件2:

$$m = (T_{\text{start}} - T_{\text{end}}) / t_{\text{min}}, T_{\text{start}} < T_{\text{end}} \quad (3)$$

其中, t_{min} 表示可中断运行电器开启一次的最低运行时长,由用户确定; T_{start} 为用户设置的调度时间区间范围的起始值, T_{end} 为调度时间区间范围的终止值,所有电器的优化调度工作均在由用户确定的区间范围内进行; m 为根据电器最短运行时长以及调度区间范围划分的时段数。该约束条件用于限制可中断运行电器的最短运行时长,避免频繁开闭的情况。

2.2 连续运行电器调度模型

连续运行电器指一旦确定电器的开启时段,在完成对应的用电任务之前,该电器的运行状态不可被改变,否则将严重地降低其服务质量^[17]。

根据连续运行电器完成对应用电任务所需时段长度及运行时段范围,得到连续运行电器 b 的调度模型具体描述如下:

$$x_b^h = \{0, 1\}, \sum_{h=1}^m x_b^h = r_b \quad (4)$$

约束条件如下:

$$\begin{cases} x_b^h = 0, h \notin [s_b, e_b] \\ x_b^h = 1, h \in [t_b, t_b + r_b] \end{cases} \quad (5)$$

本模型中各符号的含义与可中断运行电器调度模型中所提出的类似,本模型的约束条件表示在用户规定的可运行时段之外,该电器不可工作。对于连续运行电器 b ,在该电器的可运行时段内, b 的开闭状态必须连续,运行不可被打断。

结合两种电器的调度模型,进一步得到综合考虑用电经济性与用户满意度为优化目标的调度模型具体描述如下:

$$\min \text{Cos } t = \min \left(\sum_{a=1}^i \sum_{h=1}^m x_a^h p_a k_h + \sum_{b=1}^j \sum_{h=1}^m x_b^h p_b k_h \right) \quad (6)$$

约束条件如下:

$$\begin{cases} [s_a, e_a] \in [u_a, d_a] \\ [s_b, e_b] \in [u_b, d_b] \end{cases} \quad (7)$$

其中, $Cost$ 表示调度方案的总电费; p_a 和 p_b 分别表示电器 a 和 b 的运行功率; k_h 表示依据待优化调度地区公布的分时电价计算出的与时段 h 对应的分时电价; i 与 j 分别表示可中断运行电器 a 的个数与连续运行电器 b 的个数; $[u_a, d_a]$ 与 $[u_b, d_b]$ 分别表示用户希望的电器 a, b 运行的时段区间。约束条件用于确保各个电器的可调度时间均处在用户满意的时间区间内。

3 基于遗传算法的家用电器调度算法设计

本章介绍了适用于本文所提出的用电场景下遗传算法的主要改进点。

作为智能优化领域中普适性较强的一类优化算法,遗传算法一经提出就得到了广泛的应用。传统遗传算法的基本流程图如图 1 所示。

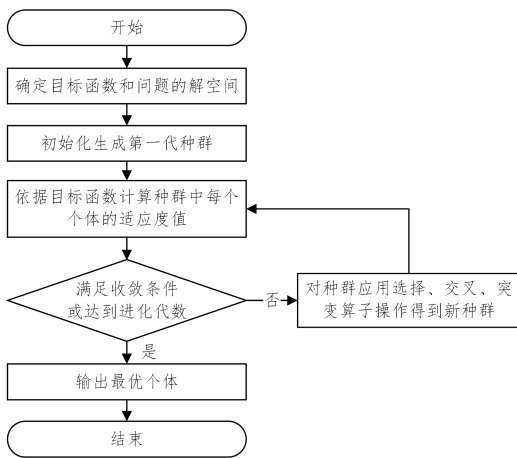


图 1 遗传算法的基本流程图

Fig.1 Basic flow chart of genetic algorithm

传统遗传算法在求解函数极值、解决最优化问题时都有

$$initialpop = \begin{pmatrix} x_{a_1}^1, x_{a_1}^2, \dots, x_{a_1}^m, x_{a_2}^1, x_{a_2}^2, \dots, x_{a_2}^m, \dots, x_{a_i}^1, x_{a_i}^2, \dots, x_{a_i}^m & y_{b_1}, y_{b_2}, y_{b_3}, \dots, y_{b_j} \\ \vdots & \vdots \\ x_{a_1}^1, x_{a_1}^2, \dots, x_{a_1}^m, x_{a_2}^1, x_{a_2}^2, \dots, x_{a_2}^m, \dots, x_{a_i}^1, x_{a_i}^2, \dots, x_{a_i}^m & y_{b_1}, y_{b_2}, y_{b_3}, \dots, y_{b_j} \end{pmatrix} \quad (10)$$

其中, $initialpop$ 为依据各类限制条件以及电器种类随机生成的电器运行方案,大小为 $i * (m + j)$; $initialpop$ 的每一行对应一种用电方案。

3.2 目标函数设计

在遗传算法中,评价一个个体优劣程度的主要指标是该个体的目标函数值。遗传算法在进化搜索中基本不利用外部信息,仅以适应函数为依据,利用群体中每个个体的适应度值来进行搜索。因此适应函数的选取将直接影响遗传算法的收敛速度和寻优效果^[20]。在确定算法的目标函数之前,需要处理每种电器的约束条件。

对于家用电器调度中的各类约束条件,在本例中主要为电器 a 与电器 b 完成各类用电任务所需的工作时长。以惩罚函数的形式进行约束,惩罚函数的表达式如下:

$$punish = \sum_{n=1}^{i+j} (|r_n - \sum_{h=1}^m k_n^h|) \quad (11)$$

其中, $punish$ 表示电器 i 对应的惩罚项, r_n 为电器 n (共 $(i + j)$ 个)完成对应用电任务理应占用的时段数, $\sum_{h=1}^m k_n^h$ 为电器 n 完

较好的表现,能够快速找到精度较高的最优解。但传统遗传算法也常存在诸如使用场景受限、多约束场景下导致计算复杂度陡增等问题^[18]。

本文将遗传算法应用于家用电器的优化调度场景中,从传统遗传算法的编码方式、种群构建形式、目标函数及遗传算子发生概率入手,提出了一种改进的遗传算法,详细改进方案如下文所示。

3.1 算法编码

传统遗传算法的编码方式通常依据问题的形式确定某一种单独的编码方式,常见的编码方式有二进制编码和实数编码等^[19]。结合可中断运行电器以及连续运行电器的运行特点,本文提出了二进制编码与实数编码混合的编码方式。

1) 可中断运行电器

可中断运行电器的运行特点是电器开启后其运行状态可变,因此选择二进制编码作为可中断运行电器的编码方式,以字符串“1”与“0”的组合表示该可中断运行电器的运行方案。

$$Chrom_{a_i} = \{x_{a_i}^1, x_{a_i}^2, x_{a_i}^3, \dots, x_{a_i}^m\} \quad (8)$$

其中, $Chrom_{a_i}$ 表示电器 a (共 i 个)在时段 1—时段 m 内的关闭状态, $Chrom_{a_i}$ 的长度与时段的个数相对应,都为 m 。

2) 连续运行电器

连续运行电器的运行特点是电器开启直到完成对应用电任务,其运行状态保持不变。考虑到遗传算法存在交叉重组以及突变等遗传操作,选择实数编码作为连续运行电器的编码方式,以保证所得用电方案均贴合连续运行电器所给的约束条件。以每个连续运行电器的开启时段组合表示可中断运行电器的运行方案。

$$Chrom_b = \{y_{b_1}, y_{b_2}, y_{b_3}, \dots, y_{b_j}\} \quad (9)$$

其中, $Chrom_b$ 表示所有连续运行电器 b (共 j 个)的开启时段集合, y_{b_j} 表示连续运行电器 b_j 的开启时段序号,为正整数。

根据提出的可中断运行电器和连续运行电器的编码方式,按照如下排列方式对其进行组合,可以得到算法迭代前初始种群形式为:

成对应用电任务实际占用的时段数。

综合 2.2 节中确定的目标函数以及本节中提出的惩罚函数形式,可以得到目标函数为:

$$Obj = Cost + \mu * punish \quad (12)$$

其中, Obj 表示一种调度方案的目标函数值, μ 为惩罚系数,该值由用户确定。每种方案的适应度值与算法计算出的目标函数值相对应,本例中的对应关系为:电费越低的方案,适应度值越高。

3.3 遗传算子设计

本文提出的算法采用了传统遗传算法的选择和交叉算子,而突变算子则在一定程度上有所变化。接下来,将对突变算子进行详细介绍。

3.3.1 突变算子操作

突变算子对于遗传算法寻优效果的贡献主要体现在两方面:一方面,突变算子会大幅改变算法原有的寻优方向;另一方面,突变算子也是算法跳出局部最优的关键要素^[21]。在家用电器调度模型中,由于不同电器的编码方式不同,因此对于

一个基因串上不同点位的基因,应存在两种突变算子进行突变操作。

对于可中断运行电器,使用传统二进制突变算子执行突变操作;对于连续运行电器,如果依旧使用传统二进制突变算子,则会使经过算法优化之后的调度方案不满足约束条件。为了使得到的调度方案中,连续运行电器能够满足“可运行范围”且“连续运行”的约束,考虑使用改进后的实值突变算子,对于随机选取的突变点,突变后的基因 y_{b_j} 为:

$$y_{b_j} = rand(u_b, d_b) \quad (13)$$

该方法将突变后该点位可能得到的数值范围限制在 $[u_b, d_b]$,进而保证突变后所得调度方案中,每一种可中断运行电器的开启运行时段都位于对应电器的可工作时段区间范围内。

3.3.2 突变算子发生概率

以 p_m 表示突变算子的发生概率。 p_m 的取值关系到算法能否跳出局部最优,如果 p_m 取值过小,则在算法运行的前期,算法的收敛速度会很慢;相反,如果 p_m 取值过大,导致一个基因串上多个点位发生突变,则在算法运行的后期,算法会出现很大波动、难以收敛的情况^[22]。

为了使突变操作的发生概率对算法的收敛过程更加有利,选择将突变算子的发生概率设置为动态变化的, p_m 的变化情况如式(14)所示:

$$p_m = \frac{p}{gen + 1} \quad (14)$$

其中, p 为用户输入的初始突变概率, gen 为迭代次数,初始值为 0,随着迭代次数的增加,突变算子的发生概率逐渐降低。

3.4 算法描述

结合提出的编码规则和目标函数,得到简要的算法描述如下:

步骤 1 根据用户需求,将一天划分为若干个时段,确定用电任务的类型、个数等所需数据。

步骤 2 以分时电价为基础,根据划分好的时段,确定各个时段对应的电价值。

步骤 3 依据 3.1 节提出的编码规则对种群进行初始化。

步骤 4 依据 3.2 节提出的目标函数对种群中的个体进行评估并赋予不同的适应度值。

步骤 5 依据适应度值对初始种群进行选择、交叉、突变操作,得到下一代种群。

步骤 6 重复步骤 4—步骤 5,直到算法达到迭代次数。

4 实验仿真与分析

4.1 数据获取

本实验用例选取为:在 0:00—24:00 内实现 20 个用电任务的优化调度。考虑到频繁的开启与关闭会对电器的寿命造成较大的损害,设置可中断电器的开启最低运行时长 $t_{\min} = 15 \text{ min}$,依据式(3),可将一天划分为 96 个连续的时间段,时间 0:00—24:00 依次对应于时段 1—时段 96。

以某地统一的电费分时段收费标准为本例的电价定价标准,以该地区不同时间的用电总负荷为分段标准,将一天划分为 4 个不同种类的负荷段:低谷时段、平段、高峰时段、尖峰时段。时段划分以及电价的详细数据如表 1 所列^[23]。

表 1 电价划分标准

Table 1 Tariff classification standard

负荷分段	对应时间	对应电价/(元每千瓦时)
低谷时段	23:00—7:00	0.3583
平段	7:00—11:00, 12:00—14:00, 21:00—23:00	0.5283
高峰时段	11:00—12:00, 14:00—15:00, 17:00—21:00	0.6283
尖峰时段	15:00—17:00	0.8380

本仿真实例中,可中断运行电器共 4 种,将每次用电任务当作不同的设备,可中断运行用电任务共 7 个,相关信息如表 2 所列。连续运行电器共 9 种,将每次用电任务当作不同的设备,连续用电任务共 13 个,相关信息如表 3 所列^[24]。

表 2 可中断用电任务

Table 2 Interruptible electricity tasks

用电任务(可中断运行)	可运行范围	运行时长/h	运行负荷/kW
空调 1	5:00—9:00	3	1.8
空调 2	5:00—8:30	2.5	1.3
空调 3	20:30—24:00	3	1.3
消毒柜 1	0:00—24:00	3	0.6
电动汽车 1	0:00—24:00	6	2
电动汽车 2	0:00—24:00	6	2
空气净化器	0:00—24:00	12	0.06

表 3 连续运行用电任务

Table 3 Uninterruptible electricity tasks

用电任务(连续运行)	可运行范围	运行时长/h	运行负荷/kW
洗衣机	0:00—7:30	1	0.38
电热水器 1	0:00—7:00	0.5	2
电热水器 2	7:00—20:30	0.5	2
电水壶	0:00—7:00	0.5	1.2
吸尘器	6:00—20:30	1	1.4
电视机	17:00—22:30	2	0.1
台式电脑	9:00—22:30	8	0.4
自动按摩浴缸	20:30—23:00	0.5	1.3
电饭锅 1	5:00—10:00	0.5	0.85
电饭锅 2	10:30—15:00	0.5	0.85
电饭锅 3	16:00—20:30	0.5	0.85
电磁炉 1	10:30—15:00	0.5	2
电磁炉 2	16:00—20:30	0.5	2

各个用电任务的运行范围均可由用户确定,并以该时间作为用户满意的运行时间,进而提升用户在调度优化过程中的参与度。综合表 1—表 3 所列数据,以本文所提算法实现 20 个用电任务在 96 个时间段内的调度优化,以得到在满足各类限制条件以及采用分时电价的定价策略下,用电费用最低的用电方案。

4.2 参数设置

本仿真实例涉及的遗传算法的主要参数设置如下:初始种群大小为 60,迭代次数为 200,以轮盘赌选择为选择算子,交叉算子选用均匀交叉,交叉重组操作的发生概率 p_c 为 0.8,初始突变算子的发生概率 p 为 0.1,惩罚系数 μ 的取值为 0.8。

4.3 实验设置

本文的仿真实验在一台配置良好的电脑上进行,该电脑搭载了处理器为 i5-11400,主频为 2.6GHz 的 CPU。该电脑还拥有 16.0GB 的内存,运行着基于 x64 架构的 64 位操作系统。针对实验仿真,采用了 MATLAB R2019a 作为仿真平台。

4.4 结果分析

本文采用混合编码的方式处理不同类型的电器,与传统

算法采用单一进制编码的方式相比,本文采用的混合编码的方式减少了1235位需要的编码位数,降低了算法的计算复杂度。本文算法和文献[25]所提算法的收敛过程图如图2所示,可以看出,本文所提算法在80代左右就可以寻找到初始种群之外的最优解,可见算法的收敛性能较好。文献[25]中的算法的收敛速度要略优于本文算法,但寻优效果与本文算法相比较差。

为了进一步验证本文所提算法的性能,分别使用文献[25]所提算法与改进穷举法实现相同场景下的家用电器调度优化,所得结果如表4所列。可以看出,本文算法寻找到的最优解相

比改进穷举法以及文献[25]所提算法都有一定程度的提升。

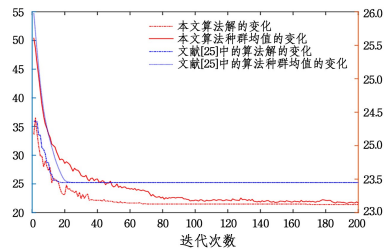


图2 两种算法的收敛过程

Fig. 2 Convergence process of two algorithms

表4 不同算法优化效果对比

Table 4 Comparison of optimization effects of different algorithms

	种群大小	迭代次数	收敛代数	优化前电费/元	优化后电费/元	舒适度下降率/%	电费下降率/%
改进穷举法	60	1000	800	28.7000	24.2188	0	15.6
文献[15]中的算法	60	120	20	28.3417	22.0907	10.6	21.2
文献[17]中的算法	60	200	40	28.4659	23.1299	5.0	18.7
文献[25]中的算法	60	200	60	28.3074	23.4499	0	17.2
本文算法	60	200	80	28.1562	21.3073	0	24.0

图3给出了应用本文算法优化前后不同电价部分对应的功率之和。由图3可见,以随机用电的方式进行电器调度得到的方案的各个部分比较均匀,且电价较高的部分6与部分7功率之和较大;使用本文方法得到的用电方案,大部分功率集中于电价较低的部分1,2,8,9,完成相同的用电任务为用户节省了约24%的用电费用。可见,本文方法可以快速有效地为用户提供电费更低的用电方案,实现负荷搬移。

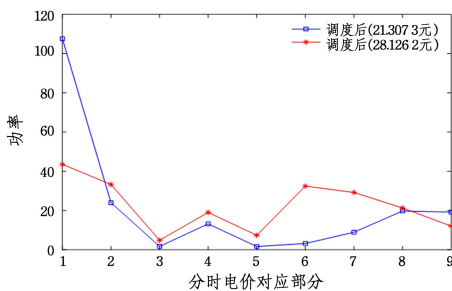


图3 调度前后功率分布情况

Fig. 3 Power distribution before and after dispatch

结束语 家庭用电调度优化问题是微电网调度领域的一个基本问题,对该问题进行研究,可以有效解决现阶段部分地区在高峰时段出现供电不足、用户用电难等问题,具有重要的研究意义。为了解决现有研究存在的优化场景单一、调度用户可参与部分少、调度方法计算复杂度过高以及寻优效果不好等问题,本文首先对家用电器的用电器类型做了分类,并依据不同的家用电器信息以及用户希望的电器运行信息进行建模,得到综合考虑用户满意度以及方案电费的家用电器调度模型,之后以不同的编码方式对不同类型的用电器进行编码,降低了所使用方法的计算复杂度,同时以惩罚函数处理各类用电任务涉及的诸多约束条件,提出基于改进遗传算法的家庭用电调度优化方法对模型进行求解。

实验结果表明,本文算法在高质量解、收敛速度方面均优于改进穷举法以及文献[25]中的算法,基于这些结果,本文算

法为家庭用电调度优化问题提供了一种行之有效的解决方案。

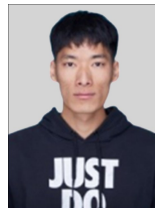
参考文献

- [1] YANG X D, ZHANG Y B, HE H B, et al. Real-Time Demand Side Management for a Microgrid Considering Uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3401-3414.
- [2] YANG X D, ZHANG Y B, ZHAO B, et al. Automatic Demand Response Method for Electric Vehicle Charging and Discharging with Collaborative Optimization on Both Supply and Demand Sides [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(1): 10.
- [3] YANG Y B, YAN Q G, WANG D, et al. Modeling and Optimization Simulation Analysis of Intelligent Power Consumption for Residential Customers [J]. Power System Automation, 2016, 40(3): 6.
- [4] WANG S X, ZHANG S T, WANG K, et al. Multi-Objective Optimal Operation of Distributed Energy Storage with Customer Demand Response Under Time Share Tariff[J]. Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 125-132.
- [5] OU M Y, CHEN C W, TAN Y D, et al. Electric Vehicle Charging Load Optimization Based on Peak-Valley Time-Sharing Tariff Guidance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 6.
- [6] ZHANG Y Y, QU A Y, YU L T, et al. Optimal Operation of CHP Microgrid with Demand Response and Electric Vehicle Dispatch[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 10.
- [7] SONG Z Y, QIN T, NIU Q Y, et al. A Review of Home Energy Management System Based on Intelligent Appliance Management[J]. Building Energy Efficiency, 2021, 49(9): 171-177.
- [8] LI Q, WANG L, MA L L, et al. Optimization Study of Home Energy Management Scheduling taking into Account User Dissatisfaction[J]. Journal of Qingdao University: Engineering and Technology, 2019, 34(1): 6.
- [9] ASSI M, HARATY R A, THOUMI S, et al. Scheduling House-

- hold Appliances using Genetic Algorithms[C] // International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies(3ICT). Sakheer, Bahrain, 2022.
- [10] WANG B Y, ZHOU J Y, ZHUNAG B, et al. Research on Multi-Level Load Satisfaction Modeling and Electricity Consumption Optimization Strategy for Smart Homes Based on Utility Theory[J]. Smart Grid, 2017, 5(1):6.
- [11] KHALID R, JAVAID N, RAHIM M H, et al. Fuzzy Energy Management Controller and Scheduler for Smart Homes-Science direct[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2019, 21:103-118.
- [12] HE Z H, ZHAO Y, LIU J N, et al. Optimal Scheduling of Household Load Based on the Operating Characteristics of Power-Using Equipment[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(3):145-149.
- [13] ZHENG X K, YANG S, WANG H B. Energy Optimization Management of Home Energy System Based on Genetic Algorithm[J]. Wireless Interconnection Technology, 2020, 17(5):2.
- [14] LI H P, WAN Z Q, HE H B. Real-Time Residential Demand Response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, PP(99):1-1.
- [15] LIU W, WANG J, GONG C S, et al. Study on the Optimization Strategy of Family Energy System Based on Incentive Mechanism[J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2021, 39(5):525-530.
- [16] WU D Q, LAI J S, YANG J H, et al. Optimal Control Strategy for Household Electric Load Based on Local Particle Swarm Algorithm[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2019, 36(6):8.
- [17] SHI L J, SHI J F, YANG Q H, et al. Operation Optimization of Household Smart Electricity Devices Based on Time-Sharing Tariff[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24):8.
- [18] YANG C R, QIAN Q, WANG F, et al. Application of Improved Adaptive Genetic Algorithm in Function Optimization[J]. Computer Application Research, 2018, 35(4):1042-1045.
- [19] DUAN Y Q, HE J L. Genetic Algorithm and its Improvement [J]. Journal of Power Systems and Automation, 1998, 10(1):14.
- [20] DEB K. Genetic Algorithm in Search and Optimization: The Technique and Applications[C] // Proceedings of International Workshop on Soft Computing and Intelligent Systems. 1999:58-87.
- [21] ZHANG L J, MAO Z H, LI Y D. Mathematical Analysis and Improvement Strategies of Mutation Operators in Genetic Algorithms[J]. Journal of Electronic Science, 1996(6):590-595.
- [22] CHEN L, WANG Z W, MO Y L, et al. Improved Adaptive Replication, Crossover and Mutation Genetic Algorithms[J]. Computer Simulation, 2022, 39(8):323-326.
- [23] LU Q, XIE P J, LENG Y J, et al. Optimization of Electricity Consumption Task Scheduling for Home Smart Electricity Consumption[J]. East China Power, 2014(5):6.
- [24] YANG J, HUANG G, WEI C. Privacy-Aware Electricity Scheduling for Home Energy Management System[J]. Peer-to-Peer Networking and Applications, 2018, 11:309-317.
- [25] HUANG G Q. Research on electricity consumption scheduling strategy for home energy management system [D]. Shanghai: Shanghai Electric Power Institute, 2017.



HUANG Fei, born in 1987, master, senior engineer. His main research interests include smart distribution grid technology and so on.



GAO Yang, born in 1998, postgraduate. His main research interests include application of intelligent optimization algorithms in power system optimization and so on.