

智能家居用电优化调度建模及蚁群算法求解

王伟杰, 喻 瑛, 孙晓辉, 张 康
(上海大学, 上海 200072)

摘 要:智能家居用电任务调度是基于智能家居平台,考虑用户习惯、电器属性等多项约束,对多种操作类型的电器设备实施用电安排的一种运行调度。智能家居用电任务调度具有广阔的研究前景,但是缺乏有效的调度算法。文中将家庭用电设备按可中断与不可中断设备分类,针对用电分时段计费条件下的智能家居调度问题,以最小化日用电费用为目标,构建了数学模型;并设计了蚁群算法求解,且进行了 MATLAB 编程仿真。实验结果表明,该优化算法能很好地优化用电任务调度,达到减少用电费用、激励用户侧合理分配家居用电的目的,进而对电网负荷峰值的缓解有一定的帮助。

关键词:智能电网;用电任务调度;蚁群算法;智能家居

中图分类号:TP39

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2017)02-0195-05

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2017.02.045

Modeling of Household Energy Consumption Scheduling and Its Solving with Ant Colony Algorithm

WANG Wei-jie, YU Ying, SUN Xiao-hui, ZHANG Kang
(Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract:Electricity consumption task scheduling for smart household is an operational scheduling which can arrange operational tasks of multiple electrical equipments based on smart household platform, with user habits, electrical properties and other constraints taken into consideration. Electricity consumption task scheduling for smart household has a broad prospect of research, but lacks of effective scheduling algorithm. Therefore, the household tasks are classified into interruptible and no-interruptible devices with relevant attributes. Aiming at a problem of smart household scheduling in the condition of different time periods, the mathematical model is built with the goal of minimizing the cost of electricity for one day. And an ant colony algorithm is designed to solve it and the simulation is carried out by MATLAB. According to experimental results, the improved algorithm can optimize the household consumption scheduling with certain efficiency and reach the purpose of reducing the cost of electricity and motivating the lateral distribution of household electricity for users, which can be helpful for releasing of peak power load to some extent.

Key words: smart grid; energy consumption scheduling; ant colony algorithm; smart household

0 引 言

信息技术的日新月异、用户对高质可靠电能的需求增长,以及日渐严峻的环境、资源问题,促进了智能电网的形成与发展^[1]。智能电网和传统的电网相比优点更多,相较于后者智能电网不仅仅更加安全和稳定,而且减少了能源成本。同时,对于新能源的利用也更符合当今可持续发展的主题。Yu Yixin 等^[2]提到了应当重视“智能配电和智能用电”的问题,对智能电网的原动力、特征、主要技术组成、意义和挑战及具体实施等方面进行了述评。

智能电网的发展也促进了需求响应机制的进步,为其提供了更为安全稳定和多变的技术平台。何永秀等^[3]调研了智能电网下的居民需求响应,调研结果表明:在智能电网下,居民的各项需求也在发生变化,相应的需求响应机制也随之改变。这种基于智能电网的需求响应机制一般采纳基于激励与时间的价格方案^[4],并且以价格为激励信号,在智能家居调度管理系统的协助下,激励用户参与需求响应(DR)机制,通过自动或者手动调整用电需求,实现自助式“削峰填谷”,以达到降低成本、节约能耗、减少碳排放等目标。

收稿日期:2016-03-29

修回日期:2016-07-26

网络出版时间:2017-01-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71201097);上海市2015年度“科技创新行动计划”高新技术领域(15511109700)

作者简介:王伟杰(1995-),男,硕士研究生,研究方向为项目调度;喻 瑛,副教授,研究方向为不确定理论及其应用、项目优化调度、可靠性研究。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20170110.0941.018.html>

智能家居调度系统是支持居民用户参与智能电网需求响应的主要技术平台,也是实现电网和用户互动机制的技术桥梁。智能家居用电调度系统是基于用户家居使用习惯、家居设备属性以及电网负荷等多项约束考虑而提出的一种智能化的家庭能源管理系统。该系统能够依照居民的使用习惯及当时的用电情况,智能地控制家居设备的启停,实现对不同电器进行安全、方便、高效的调度。

P. Samadi 等^[5]针对考虑负载不确定性的需求侧管理,以家庭用电费用支出最小化为目标,提出了实时家庭用电调度模型。T. T. Kim 等^[6]研究了最小化用电支出的不可中断负载和可中断设备的用电调度,从而减少了电费。Lu Qing 等^[7]将改进遗传算法应用于家庭智能用电调度上,对于用电负荷峰值和用电费用问题进行了优化。

根据上述研究,文中以最小化日用电费用为目标,在分时段计费的用电机制下,针对智能家居调度问题,构建了相应的数学模型,并设计了蚁群算法^[8]对模型进行求解,分别求出单个家庭以及多个家庭在相应约束条件下最小用电费用的电器调度策略,合理规划了家居设备用电,减少了用电支出,缓解了电网负荷峰值。

1 问题描述及其数学模型

1.1 问题描述

将用电任务调度优化时间范围设定 24 小时,假定 24 小时内的电价分时段设定。在用电负荷峰值制定高电价,在用电负荷谷值制定低电价。同时,为避免被平移负荷在低谷时段“撞车”,在各时段设置用电阈值,一旦该时段负荷超过阈值则触发低高电价转换开关,在该时段启用高电价。

依据设备调度的可行性,将电器设备划分为可调度设备和不可调度设备,诸如电脑、电视机这些用户控制比较随意的电器为不可调度设备,而诸如洗碗机、洗衣机、热水器等运行较有规律的电器为可调度设备。按照设备运营的可中断性,可调度设备又分为:可中断设备和不可中断设备。不可中断设备一经调用则持续运行至结束,如洗衣机等;而可中断设备可以间歇式运行,如空调等。设备的中断性和不可中断性可由用户设置。同时,用户还可依据使用习惯,事先安排待调度家电的调度时间范围。

综合以上几点,智能家居调度问题即为:依据相关设置(如设备的可中断性设置、调度时间设置等),确定在一定时域内(通常为一天),不可中断设备的启动时刻,和不可中断设备的运行时段,达到在该时域用电花费或能耗最低等目标。

1.2 数学模型

(1) 模型变量。

X :不可中断连续型用电设备集合;

Y :可中断用电设备集合;

x :某不可中断用电设备, $x \in X$;

y :某可中断设备, $y \in Y$;

H_x :设备 x 的可运行时段范围的起始时刻;

T_x :设备 x 的可运行时段范围的结束时刻;

$[H_x, T_x]$:设备 x 的可运行时段范围, $1 \leq H_x \leq T_x \leq 24$, x 在 $[H_x, T_x]$ 时段内一旦启动运行就不能中断,其运行是连续的;

H_y :设备 y 的可运行时段范围的起始时刻;

T_y :设备 y 的可运行时段范围的结束时刻;

$[H_y, T_y]$:设备 y 的可运行时段范围, $1 \leq H_y \leq T_y \leq 24$, y 在 $[H_y, T_y]$ 时段内启动后运行可以中断暂停,其运行是不连续的;

S_x^i : x 启动运行的起始时刻;

S_y^i : y 启动运行的起始时刻;

E_x^i :设备 x 的终止时刻;

x_t :设备 x 在第 t ($0 \leq t \leq 24$) 小时的运行状态, 1 表示运行, 0 表示未运行;

y_t :设备 y 在第 t ($0 \leq t \leq 24$) 小时的运行状态, 1 表示运行, 0 表示未运行;

p_x :表示设备 x 的额定功率;

p_y :表示设备 y 的额定功率;

E_0 :设定一个用电量阈值;

R_h :低电价;

R_h :高电价;

C :一天的用电费用。

(2) 模型。

模型描述如下:

$$\min C = \min \sum_{i=1}^{24} R_i * E_i \quad (1)$$

$$R_i = \begin{cases} R_h, & \text{if } 0 \leq E_i \leq E_0 \\ R_h, & \text{if } E_0 \leq E_i \end{cases} \quad (2)$$

$$E_i = \sum_{x \in X, y \in Y} (x_i * p_x + y_i * p_y) \quad (3)$$

$$H_x \leq S_x^i \leq T_x \quad (4)$$

$$H_y \leq S_y^i \leq T_y \quad (5)$$

$$1 \leq E_x^i - S_x^i \leq T_x - H_x + 1 \quad (6)$$

$$1 \leq \sum_{i=1}^{24} y_i \leq T_y - H_y + 1 \quad (7)$$

其中,式(1)为模型目标,为最小化一天的用电费用;式(2)~(7)是目标函数的约束,式(2)是电价差异化公式,式(3)为每小时功率的计算公式,式(4)~(5)保证设备在规定运行时段范围内运行,式(6)~(7)为

设备运行时长约束。

2 蚁群算法设计

2.1 蚁群算法的基本思想

蚁群算法^[8]是基于蚂蚁觅食原理的一种优化进化算法。生物学的研究表明,蚂蚁在觅食过程中,会在途经路径留下一一种被命名为信息素的物质,在一定范围内可吸引附近同样觅食的蚂蚁伙伴循味而来。在信息素保持期间,被吸引而来的蚂蚁越多,该路径上的信息素浓度也越浓,也就会吸引更多的蚂蚁靠近。如此循环往复便形成了一种正反馈,在正反馈的促进下所形成的信息素浓度最高的一条路径便是最佳路径。且路径上的信息素浓度会随着时间的推进逐渐消退^[9]。

用蚁群算法解决具体优化问题可以描述为:将待优化问题的可行解用蚂蚁的行走路径表示,待优化问题的解空间即为整个蚂蚁群体的所有路径。在较短的路径上,蚂蚁留下的信息素较多,进而导致更多的蚂蚁选择该路径,并留下更多的信息素。最终,整个蚂蚁群将集中到最佳路径上,此时对应的路径即为待优化问题的最优解^[9]。

2.2 蚁群算法解决问题原理

设整个蚂蚁群体中蚂蚁数量为 m , 这里最小不可分单位是 1 h, 将 24 h 比作 24 个待填满的“空穴”, “空穴”填满, 代表设备该小时内运行, “空穴”为空, 表示该小时内可调度而未调度的设备。每台设备有 n 个“空穴”(n 为 24), 蚂蚁是否选择填满某台设备的某个“空穴”, 取决于该“空穴”的信息素浓度。该信息素浓度指的是, 从一台设备转移到另一台设备时, 蚂蚁选择每个“空穴”所遵从的概率信息。用 $\tau(t)$ 表示信息素浓度。在初始时刻, 各“空穴”上的信息素浓度相同, 设 $\tau(0) = 0.01$ 。

蚂蚁 $k(k = 1, 2, \dots, m)$ 根据每台设备各“空穴”上的信息素浓度决定下一个待填满的“空穴”, 对于不可中断设备, 只要确定好每台设备的初始“空穴”位置, 根据设备运行时长, 依次填满剩余“空穴”即可; 对于可中断型设备, 则需要分别根据信息素浓度所提供的概率大小, 分别选择待填满的“空穴”, 决定设备是否运行^[10]。

设 $P^k(t)$ 表示第 t 次迭代时, 蚂蚁 k 选择的“空穴”, 即从一台设备转向另一台设备时所面临的概率, 计算公式为:

$$P^k = \frac{[\tau(t)]^\alpha * [\eta(t)]^\beta}{\sum [\tau(t)]^\alpha * [\eta(t)]^\beta} \tag{8}$$

其中, $\eta(t)$ 为启发函数, 表示蚂蚁选择某个“空穴”的期望程度; α 为信息素重要因子; β 为启发函数重要因子。

这里 α 和 β 越大, 表明启发函数所起的作用越大, 蚂蚁选择某“空穴”的期望程度也越大。

当所有蚂蚁完成一次循环后, 各个“空穴”上的信息素浓度将依据式(9)~(11)进行实时更新, 即^[11-12]:

$$\tau(t + 1) = (1 - \rho)\tau(t) + \Delta\tau \tag{9}$$

$$\Delta\tau = \sum_{k=1}^m \Delta\tau^k \tag{10}$$

$$\Delta\tau^k = \rho \frac{1/C_k}{\sum_{i=1}^m 1/C_i} \tag{11}$$

其中, $\Delta\tau^k$ 表示第 k 只蚂蚁在某台设备某个“空穴”的信息素浓度; $\Delta\tau$ 表示所有蚂蚁在所有设备“空穴”释放信息素的浓度值之和; C_k 表示第 k 只蚂蚁所代表的调度成本(即调度过程中的总用电费用)。

2.3 蚁群算法解决问题步骤

(1) 初始化参数。

对参数进行初始化, 如设备可运行时段、设备额定功耗、设备运行时长等设备参数, 蚂蚁数量 m 、信息素重要程度因子 α 、启发函数重要程度因子 β 、信息素挥发因子 ρ 、初始信息素浓度 τ 、最大迭代次数等算法参数, 以及各小时高低电价、高低电价转化触发阈值等系统参数^[13]。

(2) 构建解空间。

将各只蚂蚁置于第一台设备处, 对于每只蚂蚁按照公式, 计算其下一个待填满“空穴”(即待调度设备的待调度时间), 直到所有蚂蚁访问完所有设备^[14]。

(3) 更新信息素浓度。

计算每个蚂蚁的用电费用, 记录当前迭代次数中的最优解, 同时对信息素浓度进行更新。

(4) 判断终止条件。

3 算例分析

3.1 算例假设和约束

使用 MATLAB 计算最优电费。将一天划分成为八个时段, 如表 1 所示, 每个时段的长短不同。

表 1 时段划分表和 24 h 高低电价表

时段编号	开始时刻	结尾时刻	高价/ (元/kwh)	低价/ (元/kwh)
1	0	2	10	6
2	2	4	10	4
3	4	9	10	2
4	9	12	6	4
5	12	15	9	6
6	15	18	6	4
7	18	20	9	6
8	20	24	12	8

高低电价功率触发阈值设置为 3.5 kw。

根据一般家庭用电情况,将家用电器进行划分(该算例中抽取了两类六台设备,设备顺序为洗碗机、热水器、电炉、吸尘器、空调、洗衣机),设备信息如表 2 所示。

表 2 设备信息

序号	设备	设备类型	运行时 段/h	用电量 /kw	额定功 率/(kw/h)	运行时 长/h
1	洗碗机	不可中断	[15,23]	1	0.25	4
2	热水器	不可中断	[8,16]	1.5	0.25	6
3	消毒柜	不可中断	[6,14]	4.5	1.5	3
4	吸尘器	不可中断	[7,15]	3	1.5	2
5	浇花机	可中断	[10,18]	6	1.5	4
6	洗衣机	可中断	[16,24]	10	2.5	4

3.2 算例结果分析

3.2.1 单个家庭用户

令蚂蚁数分别为 10,20,30,采取精英选择策略。结果如表 3 和图 1 所示。

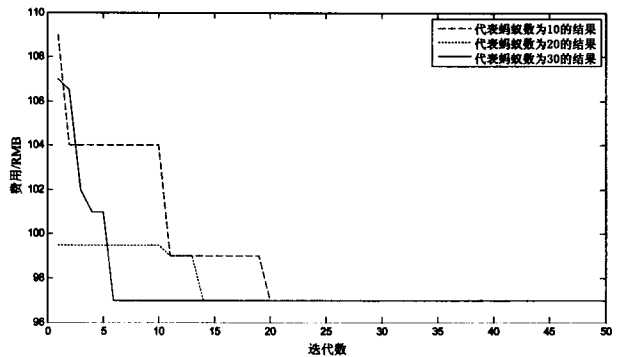


图 1 单个家庭用户运行结果

表 3 单个家庭用户运行结果

蚂蚁数	迭代数为 50 时的最优解	连续型设备的起始时刻/h								可中断设备的运行时刻 (上下两行代表两台不同的设备)/h			
		16	10	11	10	10	12	14	16				
10	97	16	10	11	10	10	12	14	16				
						17	18	19	20				
20	97	16	9	9	12	10	11	12	13				
						16	17	20	23				
30	97	16	9	7	11	10	11	12	13				
						17	18	19	20				

可以看出,虽然蚂蚁数量不同,但最终结果都会收敛于同一个值,蚂蚁数越大,收敛速度越快。

功率触发阈值设置为 $bt = 17.5\text{ kw}$ 。

3.2.2 多个家庭用户

令蚂蚁数分别为 10,20,30,采取精英选择策略。结果如表 4 和图 2 所示。

增加待调度的家庭用户数为 5 户,并将高低电价

表 4 多个家庭用户运行结果

蚂蚁数	迭代数为 50 时的最优解	连续型设备的起始时刻/h				可中断设备的运行时刻/h							
		1	2	3	4	1				2			
10	522	18	8	9	8	10	11	14	17	16	18	20	21
		17	8	10	8	10	12	13	17	16	19	21	22
		15	9	11	12	11	12	13	14	16	17	18	19
		17	10	11	11	10	12	13	15	16	17	18	20
		15	8	7	12	10	12	13	15	16	17	18	19
		16	8	11	10	10	12	15	17	17	18	20	22
20	518.5	16	9	10	12	10	11	12	17	18	19	20	22
		16	8	10	12	11	12	15	16	16	17	18	20
		18	10	7	10	11	12	13	16	17	18	22	23
		15	9	8	7	10	11	13	14	17	18	21	23
		19	9	8	11	11	13	14	15	17	18	19	20
		19	10	6	7	10	11	12	13	16	18	19	20
30	516	15	10	11	9	10	14	16	17	17	19	22	23
		18	9	6	8	10	11	12	17	17	18	19	21
		19	8	9	12	10	11	12	13	17	18	19	21

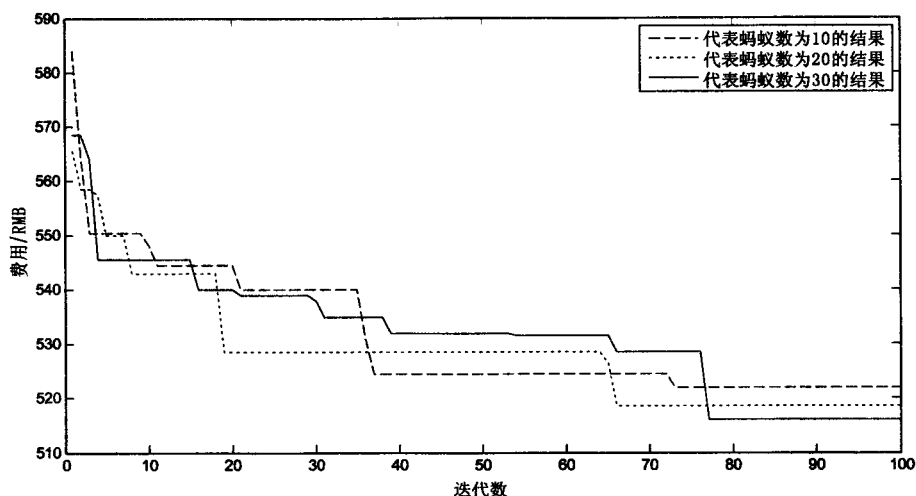


图2 多个家庭用户运行结果

将智能家居调度算法与随机调度算法进行比较,文中所提出的算法可将用电费用降低8%左右。

4 结束语

文中将用电设备分成可中断和不可中断类型,在用电分时段计价并按功率阈值划分高低价的条件下,构造了一个寻求最优用电费用的模型,并设计了一个蚁群算法进行求解,通过 MATLAB 进行仿真。仿真结果表明,该优化算法应用于解决智能家居用电任务调度,能够有效地搜索最优值,达到减少用电费用、激励用户侧合理分配家居用电的目的,进而对电网负荷峰值的缓解也有一定的帮助。

文中仅考虑了单目标优化问题,智能家居用电任务调度下的多目标优化问题将是下一个研究方向。

参考文献:

- [1] Zhao Z, Lee W, Shin Y, et al. An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1391-1400.
- [2] Yu Y, Luan W. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [3] 何永秀,王冰,熊威,等. 基于模糊综合评价的居民智能用电行为分析与互动机制设计[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 247-252.
- [4] Tsui K M, Chan S C. Demand response optimization for smart home scheduling under real-time pricing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1812-1821.
- [5] Samadi P, Mohsenian H, Wong V W S, et al. Tackling the load uncertainty challenges for energy consumption scheduling in smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 1007-1016.
- [6] Kim T T, Poor H V. Scheduling power consumption with price uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3): 519-527.
- [7] Lu Q, Xie P, Leng Y, et al. Optimization of energy consumption scheduling for household smart electricity consumption[J]. East China Electric Power, 2014, 42(5): 816-821.
- [8] 段海滨,王道波,朱家强,等. 蚁群算法理论及应用研究的进展[J]. 控制与决策, 2004, 19(12): 1321-1326.
- [9] 史峰,王辉. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2011.
- [10] 张丽,刘希玉,李章泉. 基于蚁群算法的聚类优化[J]. 计算机工程, 2010, 36(9): 190-191.
- [11] 张纪会,高齐圣,徐心和. 自适应蚁群算法[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(1): 1-3.
- [12] 蔡自兴,徐光祐. 人工智能及应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [13] 李士勇,赵宝江. 一种蚁群聚类算法[J]. 计算机测量与控制, 2007, 15(11): 1590-1592.
- [14] 段海滨,王道波,于秀芬. 几种新型仿生优化算法的比较研究[J]. 计算机仿真, 2007, 24(3): 169-172.