基于用电行为习惯的家庭节能用电策略研究

提出一种基于用户用电习惯的家庭用电策略，该策略把用户习惯作为首要考虑因素，首先统计电器的开、闭时刻信息，通过聚类算法求得用户对电器的n种用电习惯，根据聚类中的对象数量对用电习惯进行优先级排序；然后基于用电习惯构建用户满意度函数，结合分时电价环境下的费用函数制定用电策略目标函数，通过调节目标函数中电费和满意度的权重系数，对应生成多种节能效果不同的用电方案；最后利用粒子群算法对目标函数进行寻优，找出用电方案中电器的最佳开启时间。实验结果表明，该策略可明显减少用户的用电费用，同时结合用电习惯保证了用户对方案的满意度；该策略可引导用户用电时间向用电低谷段靠近，为电网负荷均衡起到了削峰填谷的作用。

张中超　叶伟灵／广东电网有限责任公司河源供电局

张中超／工程师

关键词／Keywords

用电行为·
用户满意度·
家庭用电节能策略·
粒子群算法·
分时电价·

0　引言

随着智能用电技术的发展，通过监测控制技术获取家庭用电信息已成为可能。这些数据不仅具有海量、高频和分散等特点，而且数据之间存在关联性和相似性，同时，数据中还隐藏着用户的用电行为习惯和电器的运行状态（如开启、运行和关闭）。如何充分利用这些数据信息进行能效评估，发掘用户对某电器的使用习惯，并基于此有针对性地制订家庭用电节能策略是本文研究的重点。

目前，国内外学者在家庭用电节能策略方面已经进行了大量研究。文献[1-3]针对智能小区提出一种用电模式，为用户提供科学用电策略，积极地影响用户的电力消费习惯，达到节能和削峰填谷的目的。文献[4] 针对空调系统使用直接膨胀系统和周期停机控制方法执行节能程序，并提供不同的能耗节约模式供用户选择，人性化地实现了家庭空调系统能源的节约。文献[5-6]分别通过定制的用电反馈信息和电力消耗反馈模型，尝试改变用户对能源的使用和与能源有关的行为，以帮助家庭用户更好地控制能源消费，实现能源节约。

本文首先对家用电器的开、闭时刻信息进行分类统计，利用聚类算法对电器开启时刻处理得出用户的用电习惯；然后结合分时电价的环境，为用户制定节能用电策略函数，提供多种用电方案，用户根据自身习惯和当天的实际情况选择用电方案。本研究通过为用户提供科学合理的节能策略，积极地影响用户的消费习惯，不仅可为家庭节约用电成本，还为电网的负荷均衡起到了一定的作用，达到节能和削峰填谷的目的。

1　总体框架设计

根据用户行为习惯和电器的运行特性，本文将总体框架分为三个模块，如图1所示。

第一模块为用电习惯的获取。首先对用户电器的开启、关闭时刻信息进行统计、聚类分析，生成k个类簇，对应k种用电习惯。然后对用电习惯进行优先级排序，为用户提供用电方案时应尽量靠近优先级高的习惯时间，以提高方案的满意度。

第二模块为节能用电数学模型的构

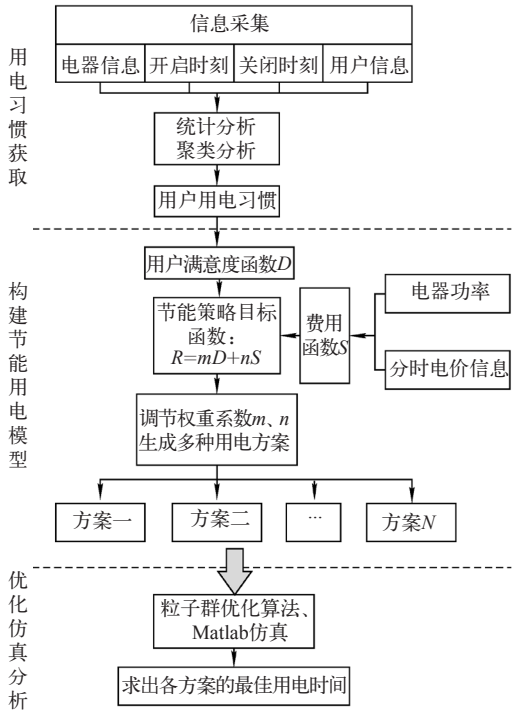

图1　总体框架图

建。首先根据用电习惯制订用户满意度函数，并结合分时电价的信息构建节能用电数学模型，建立策略目标函数，并作归一化处理。然后调节目标函数中的权重系数，为用户提供多种不同节能效果的用电方案。

第三模块为优化仿真实验。首先分析分时电价环境，确定用电费用函数，然后利用粒子群优化算法对不同的方案进行寻优，求出不同方案下电器的最佳开启时间。

2　用户用电习惯的获取

每个家庭都有自己的生活作息习惯，用户对不同电器也有不同的使用习惯，如何从海量的用户用电数据中挖掘出每种电器的使用习惯是本研究的前提条件。

本文对电器的开启时刻进行统计，从大量数据中挖掘出用户对某一电器的使用习惯，首先利用K-means算法对电器的开启时刻进行聚类分析，聚类结果中一个类簇代表一种用电行为习惯，类簇中对象个数越多，说明用户在该类簇对应的时间域内使用电器的概率越大，即越习惯在该时间域使用电器；然后根据类簇中对象数量对用电习惯进行优先级排序：第一用电习惯，第二用电习惯，…，第k用电习惯；最后计算每个类簇中所有对象的均值，该值对应的时刻为电器习惯开启时间。

3　构建家庭用电数学模型

3.1　用电费用函数S

在分时电价环境下，不同时段电价水平不同，居民的家庭用电费用S的计算公式为

$$S=\sum_{i=1}^{k}\int_{T_i}^{T_i+\Delta t_i}P_i\Delta t_i Q(t)\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中，P_i为电器的功率；T_i为电器i的开启时刻；Δt_i为电器i的用电时长；$Q(t)$为电价量随时间的变化函数。

由上述电费支出公式可知，总电费是多个电器的费用加权和，电器的功率是无法改变的，用电时长缩短会影响用户的正常生活，所以在分时电价环境下，要想减少电费支出，只能改变用电时段的电价，即改变用电的使用时段，调节用电时间域至分时电价低水平阶段。

3.2　用户满意度函数D

用户对节能方案的满意度是衡量本研究实用性的重要依据，方案越靠近用户的习惯，用户的满意度越高，故用户的满意度可用方案和习惯的电器开启时刻之差来表示。为了保证用户的满意度，本研究只选取前三个用电习惯进行研究。

设A_i，B_i，…，N_i分别为电器A，B，…，N对应第i用电习惯的开启时间；A_t，B_t，…，N_t为本策略用电方案开启时间；d_1、d_2和d_3分别为用电方案的电器开启时间与用户第一用电习惯、第二用电习惯和第三用电习惯开启时间的距离差，其计算公式为

$$\begin{aligned}d_1&=|A_1-A_t|+|B_1-B_t|+\cdots+|N_1-N_t|\\d_2&=|A_2-A_t|+|B_2-B_t|+\cdots+|N_2-N_t|\\d_3&=|A_3-A_t|+|B_3-B_t|+\cdots+|N_3-N_t|\end{aligned} \tag{2}$$

用户满意度D的函数可表示为

$$D=\alpha d_1+\beta d_2+\gamma d_3 \tag{3}$$

式中，α、β和γ分别为d_1、d_2和d_3的系数，表示用户对第一用电习惯、第二用电习惯和第三用电习惯的依赖程度，一般$\alpha>\beta>\gamma$，且满足$\alpha+\beta+\gamma=1$。

通过调节α、β和γ值的大小，可以体现用户对不同习惯的依赖程度，从而生成基于不同习惯依赖度的用电方案。

3.3 用电策略目标函数的制定

本研究在为用户提供用电方案的同时，充分考虑用户的用电习惯，故此用电策略目标函数由两个因素决定：一个是电费支出S，用来衡量方案是否节省费用；另一个是用户满意度D，用来衡量方案与用户的习惯方案的距离差，此因素决定用户对方案的满意度，方案越靠近用户的习惯时间，用户越满意，越容易接受。

由式（3）可知用电满意度D以时间为单位，而电费支出S以货币为单位。为了解决两个因素单位不匹配的问题，本文采用无量纲的表示方式，首先分别对用户满意度D和电费支出S进行归一化处理，即

$$\overline{D}=\frac{D-D_{\min}}{D_{\max}-D_{\min}} \tag{4}$$

式中，$D_{\max}$、$D_{\min}$分别为通过调节电器开启时间得到用户满意度的最大值和最小值。

$$\overline{S}=\frac{S-S_{\min}}{S_{\max}-S_{\min}} \tag{5}$$

式中，$S_{\max}$、$S_{\min}$分别为在分时电价环境下，方案中电器使用时长不变条件下改变用电时段时电费支出的最大值和最小值，显然$S_{\max}$出现在波峰电价时段，$S_{\min}$出现在波谷电价时段。

经归一化处理后，用电策略目标函数可表示为

$$R=m\overline{D}+n\overline{S} \tag{6}$$

式中，m、n分别为满意度$\overline{D}$、用电费用$\overline{S}$权重系数，且满足$m+n=1$。

其中，m、n的取值不同，对应用电方案的用户满意度、节能效果也不同。m越大，表明方案越接近用户的用电习惯，满意度越高；n越大，表明节能效果越佳，其用户满意度则相对较低。

3.4 方案节能效果与m、n的关系

本研究可以通过调节m、n的值生成节能效果不同的用电方案，结合分时电价的价格特点，节能效果优良的方案其用户满意度则相对较低，故用户需要综合考虑满意度和节能效果选择m、n的值，从而确定用电方案。本研究把节能效果初步分为五个等级，各等级与m、n的值关系如表1所示。

表1 节能效果与m、n的关系表

节能效果	m	n
优	0.1	0.9
良	0.3	0.7
好	0.5	0.5
一般	0.7	0.3
次	0.9	0.1

4 用电方案算法寻优

基于用户习惯的节能策略目标函数寻优是一个多目标优化问题，其寻优的结果既要减少电费支出，还要保证用户的满意度，故本研究采用多目标寻优的常用算法——粒子群优化算法对目标函数进行寻优，以R取最小值为目标值。

在粒子群算法中适应度函数的变量为用电方案中各电器的开启时间，A_i，B_i，…，N_i，对于给定m、n目标函数R，粒子群通过迭代求得取最小值时的电器开启时间A_i'，B_i'，…，N_i'，算法具体步骤如下。

1）初始化粒子种群大小PopSize、粒子的维数Dim，粒子的维数为电器个数；设置最大迭代次数MaxIter；并限定粒子的最大寻优范围$X_{\max}$，保证粒子在一天24 h内寻求最优解。

2）随机初始化粒子位置，粒子群的初始化可表示为

$$X=\text{rand(PopSize，Dim)}X_{\max}$$

然后迭代更新粒子位置。

3）计算每次迭代中个粒子的适应度函数R，

确定粒子i的自身历史最优位置P_i和全局最优位置G_i。然后通过跟踪自身历史最优值P_i和群体最优值G_i来更新自己的速度和位置，进行下一次迭代。粒子i速度的更新公式为

$$V = wV' + c_1r_1(P_i - X_{\text{present}}) + c_2r_2(G_i - X_{\text{present}})$$

式中，w为惯性权重系数；c_1、c_2为学习因子，控制粒子向自身最优位置和全局最优位置靠近学习强度；r_1、r_2为0～1之间的随机数，用来防止算法陷入局部最优；V'为粒子当前的速度；X_{presend}为粒子当前的位置。

4）根据粒子速度更新粒子位置，即

$$X'=X_{\text{presend}}+V$$

5）检查迭代次数是否达到最大值MaxIter或寻优结果是否满足规定条件。若满足迭代终止；否则，重复步骤3）～步骤5）。

6）迭代终止，得出各维粒子的最优位置，即各电器的最佳开启时间A'_t，B'_t，…，N'_t。

5 实例分析

5.1 电价环境及用户用电信息

分时电价环境是本研究的环境基础，本实例以广东省某地区实行的峰谷分时电价为例，具体时段划分如表2所示。

表2 广东省某地区分时电价方案

	低谷时段	平时段	高峰时段
时间区间	0:00~8:00	8:00~14:00 17:00~19:00 22:00~24:00	14:00~17:00 19:00~22:00
电价水平/(元kW·h)	0.314	0.628	1.036

由于家庭耗电费用是各电器的费用加权和，提供的节能策略中各电器使用方案相互独立，故本算例以一种电器为例进行分析。以广东某家庭两年内使用洗衣机的数据为例，该数据包括洗衣机开启时刻、关闭时刻信息，通过对开启时刻数据进行聚类分析可以得出：

1）本数据聚类出五个类簇，代表五种不同的用电习惯。

2）其中五个类簇中对象个数分别为90、60、30、12和8，后两类包含对象数目较少，属于稀少类，不具有代表性，故本文只考虑个数较多的前三个用电习惯做为研究对象进行分析。

3）计算类簇中心可得，用户第一用电习惯时间为20:15，第二用电习惯时间为8:10，第三用电习惯时间为14:40。

用户对洗衣机的用电习惯在分时电价环境下的分布情况如图2所示。

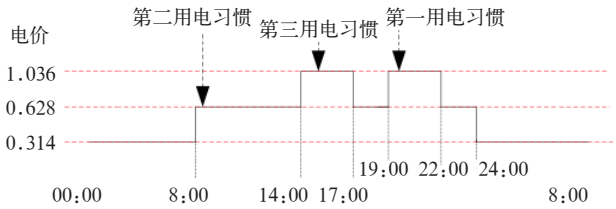

图2 某用户用电习惯与分时电价关系图

5.2 费用函数和用户满意度实例仿真

为了便于研究分析本文中的时间，以分钟为单位进行累计标记，00:00为时间起点，按分钟累计，如8:00记为480 min，则上述洗衣机的第一用电习惯的值为1 215，第二、第三用电习惯时间值为490、880。

（1）耗电费用函数S

假设洗衣机的使用时长为60 min，平均功率为400 W，电费计量单位1度=1 kW·h，如若每度电的费用为x元，则洗衣机耗电t分钟的用电费用为$(400/1\ 000)(t/60)x$。在广东省分时电价方案的背景下，洗衣机以时刻t为起点工作1 h的费用函数$S = 0.4\int_t^{t+60} Q(t)\,\mathrm{d}t$，其中，$Q(t)$为电价随时间$t$的变化函数$S$。利用Matlab对费用函数仿真结果如图3所示。

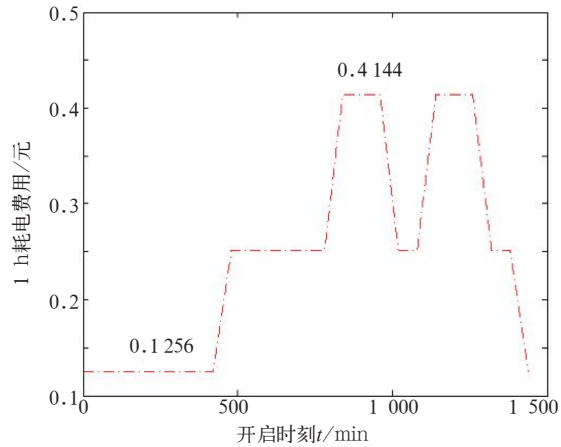

图3 洗衣机在不同时间点开启1 h的费用函数S

图3为分时电价环境下在不同时刻开启洗衣机运行1 h的耗电费用。由图3可知，在波谷电价时段运行洗衣机1 h的费用最低为0.125 6元；在波峰时段1 h的耗电费用最高为0.414 4元。两个费用相差很大。由此可见，在耗电费用空间内作适当调整可以满足减小费用的需求。

为了满足无量纲的要求，对费用函数进行归一化处理：$\overline{S}=(S-0.125\,6)/(0.414\,4-0.125\,6)$。

（2）用户满意度函数D

假设三个用电习惯的权重系数分别为0.6、0.3和0.1，则在任意时刻t开启洗衣机时，用户的满意度为

$$D=0.6|t-1\,215|+0.3|t-490|+0.1|t-880|$$

用Matlab对用户满意度进行仿真，如图4所示。

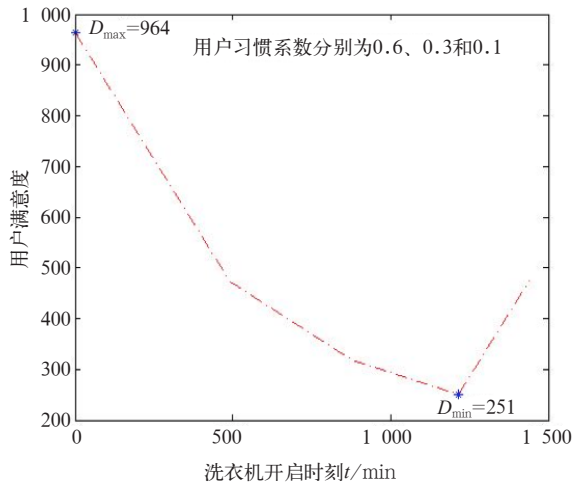

图4 用户习惯满意度D

图4中，t=1 215时刻函数的值最小，该时间点与用户的三个习惯开启时间点综合距离最小，如此刻开启洗衣机最容易为用户所接收，即用户满意度最大；在t=0即0:00开启洗衣机时，其行为与用户的用电行为习惯相差最大，故用户满意度最小。

用户满意度的最小值、最大值分别为D_{min}=251，D_{max}=964。

同样对D进行归一化处理：$\overline{D}=(D-251)/(964-251)$。

5.3 目标函数寻优

利用粒子群算法对目标函数寻优，求得不同方案下洗衣机的最佳开启时间，实验设定粒子群数目为10，由于粒子寻优范围为0～1 440，最大寻优速度V_{max}=20；学习因子$c_1=c_2=2$；最大迭代次数设为MaxIter=50。当迭代次数达到最大值时寻优终止。

图5～图7为m、n取不同的值时粒子群算法对目标函数的寻优结果。

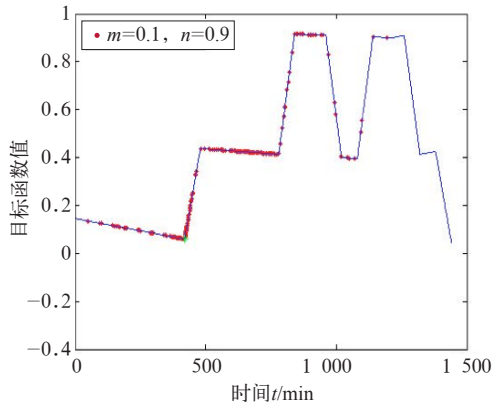

图5 当m=0.1，n=0.9时的粒子寻优结果

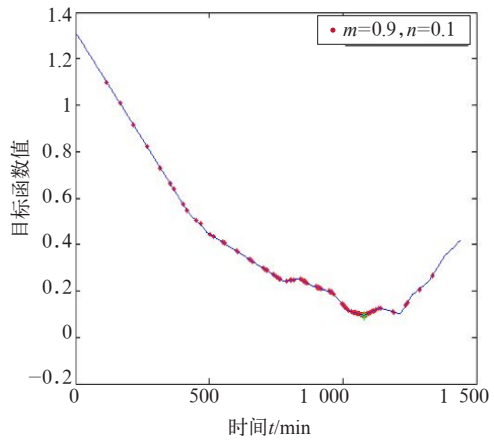

图6 当m=0.9，n=0.1时的粒子寻优结果

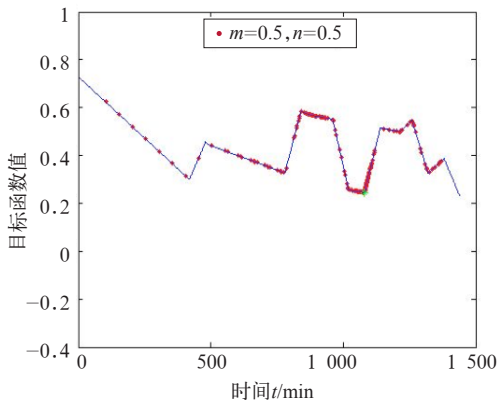

图7 当m=0.5，n=0.5时的粒子寻优结果

图5为m=0.1，n=0.9时的用电方案，由于权

重系数$m<n$，考虑用电习惯的影响，目标函数最小值取在波谷电价与平时段交界处，即洗衣机的最佳开启时间为t=420。此方案最佳大大减少了费用支出，但与用户的习惯用电时间差距最大。

图6为m=0.9，n=0.1时的用电方案，该方案比较充分地考虑了用户的用电习惯，对费用的节省要求不高，故最佳开启时间在第一用电习惯时间附近。此方案用户满意度最高，但节能效果不明显。

图7为m=0.5，n=0.5时的用电方案，此时最佳开启时间为t=1 080，该方案兼顾两个目标，在节省用电费用的同时，保证了用户的满意度，更易于被用户接受。

三种方案下对应具体情况如表3所示。

表3 不同节能效果对应的开启时间－电价表

m、n 的取值	最佳开启时间	开启时刻电价 /（元 /kW·h）
m=0.1，n=0.9	7:00	0.314
m=0.5，n=0.5	18:00	0.628
m=0.9，n=0.1	19:20	1.036

由此可见，本策略提供的用电方案与用户的习惯相比，大大节省了用电费用，同时兼顾了用户的用电行为习惯，效果良好。

6 结束语

所提出的这种节能策略，在考虑用电习惯的基础上通过调整节能效果生成多种用电方案供用户选择，体现了一种新的用电模式。该策略在分时电价的环境下，从用户的用电习惯出发，统计分析用户对电器的使用习惯，通过习惯用电时间和推荐用电时间的差来描述用户的满意度，结合分时电价下的用电费用制订用电策略模型，然后调节模型中满意度和费用的权重系数对应生成不同节能效果的用电方案。这种方法提供的用电方案不仅保证了用户的满意度，降低了用电成本，还起着引导用户用电向低峰时段靠拢的作用，从而实现削峰填谷的目的。

参考文献

[1] 黄海涛．居民分时阶梯电价联合优化模型研究[J]．电网技术，2012，36(10)：253-258．

[2] 方江晓，周晖，黄梅，等．基于统计聚类分析的短期风电功率预测[J]．电力系统保护与控制，2011，39(11)：67-73，78

[3] 谢江宏，王进平，上官明霞．一种智能小区用户用电模式的探索与研究[J]．华东电力，2013(1)：157-159．

[4] 王雁凌，程倩．基于节能降耗的发电权交易模型[J]．电力系统保护与控制，2010，38(18)：28-32．

[5] Abrahamse W，Steg L，Vlek C．The effect of tailored information goal setting and tailored feedback on household energy use energy related behaviors and behavioral antecedents [J]．Journal of Environmental Psychology，2007，27(4)：265-276．

[6] Fischer C．Feedback on household electricity consumption：a tool for saving energy[J]．Energy Efficiency，2008，1(1)：79-104．

[7] Silva D，Vieira S，Lima C，et al．Home energy saving adviser system power engineering[C]．Energy and Electrical Drives，2011 International Conference on Power Engineering，2011．

[8] 曾鸣，李娜，王涛，等．兼容需求侧资源的负荷预测新方法[J]．电力自动化设备，2013，33(10)：59-62，73．

[9] 张素香，刘建明，赵丙镇，等．基于云计算的居民用电行为分析模型研究[J]．电网技术，2013，37(6)：1542-1546．

（收稿日期：2018－06－21）EA