

考虑物理特征与行为因素的家庭用能特性建模

葛少云, 李吉峰, 刘洪, 王亦然, 张鹏

(天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对常规负荷建模与预测未考虑用户的行为特性,并且需要大量历史数据作为研究基础的问题,提出一种考虑物理特征与行为因素的家庭用能特性建模方法。以家庭能源中心作为研究对象,在介绍总体分析流程的同时,归纳外部需求、内部转换以及终端能源负荷类型;考虑物理特征与行为因素,建立电器设备的用能模型,并提出模型扩展方法;在此基础上,通过非侵入式负荷分解与马尔可夫链相结合的方法分析模拟用户的用能行为。算例分析表明,所提方法具有独立刻画负荷肖像曲线的能力,不再依赖大量数据进行派生驱动。

关键词:家庭用户;负荷预测;用能细节;马尔可夫链;建模

中图分类号:TM 715

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.006

0 引言

近年来,对化石能源的过度消耗,导致我国能源在发展、使用以及环保方面承受较大的压力,亟需通过制定合理的政策,结合相应的能源转化/替代技术,达到“节能减排”的目的^[1]。可再生能源技术的使用对上述问题起到了一定的改善作用,但是随着可再生分布式能源的接入,终端用户对系统运行状态的影响越来越大。例如,一些分布式电源选择从低压侧接入配电网,故对电源出力特性进行细化建模的同时,也需要对终端负荷特性进行细致分析,电源出力与终端负荷的匹配性是衡量电源性能以及对电网运行影响的关键因素;另外,分布式光热系统接入后的性能也会受到热负荷曲线的影响。对于不同类型的终端用户,根据国家能源局于2017年1月公布的《电力工业统计数据及全社会用电量》,居民生活用电占总用电量的20%;而从能耗的角度进行分析,居民生活能耗约占社会总能耗的1/3^[2],相较于受到工艺限制的产业类负荷,家庭用户更具有“节能减排”挖掘潜力。综上所述,深入分析家庭能源中心的用能特性,其需求特性可以为上级调度系统的优化运行提供支持,其响应特性可以作为自身与上级调度进行信息交换的基础,从而合理化引导用能行为,实现“节能减排”目标。

目前对于用能负荷建模与预测方面的研究主要采用2种方法。一种为采用以历史数据结合机器学习为代表的“数据驱动”方法。文献[3]结合组合预测和概率性区间预测,提出一种基于径向基函数

(RBF)神经网络分位数回归的电力短期负荷概率密度预测方法。文献[4]考虑电价因素的影响,基于支持向量分位数回归方法,通过引入松弛变量构造拉格朗日函数,得出一天内预测时刻电力负荷的预测结果。文献[5]提出一种以1h为单位步长的负荷需求预测方法,并考虑电力需求在不同季节呈现出的特征循环行为。文献[6]提出基于人工神经网络预测的方法预测能源消耗情况。另一种为通过对用能设备物理特征机理的分析,结合用户的用能行为特性,刻画再现用户负荷特性的“机理驱动”方法。文献[7]根据传热学的基本原理,依据运行属性和自有属性负荷因素,建立典型非工业生产建筑冷热负荷计算快速预测模型。文献[8]提出未来应通过建立数学模型的方式来反映用能特征,并提出部分用能设备的建模方法。文献[9]充分考虑人员行为因素,建立照明负荷的用能模型,提出家庭照明负荷的预测方法。

上述成果为本文研究奠定了一定的基础,然而,现有研究存在以下问题:第一,“数据驱动”的预测方法考虑的都是例如天气、电价等外部因素,虽然可以为负荷预测提供技术支撑,但由于缺乏考虑设备的细致建模以及行为因素,预测精度有限,另外,对于规划初期缺少相关数据的地区,该方法很难进行;第二,目前“机理驱动”的预测方法大多只建立了部分典型设备用能模型,缺少行为特征的影响分析,难以支撑考虑终端全局设备的用户用能特性建模及分析;第三,上述预测方法没有考虑家庭用户内可能存在的用能替代以及需求响应等问题,可能造成负荷重叠累加情况。

针对目前研究所存在的问题,对于家庭用户,本文以家庭能源中心^[10]作为研究对象,首先,说明用能特性的总体分析流程,并以家庭能源中心为例,从终端需求角度归纳用能设备与能源需求;其次,充分考虑内部运行、替代因素以及外部能源价格、天气等

收稿日期:2018-05-28;修回日期:2019-01-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0903400);国家自然科学基金资助项目(51777133)

Project supported by the National Key R&D Plan of China (2017YFB0903400) and the National Natural Science Foundation of China(51777133)

因素,对家庭能源中心的用能设备进行建模;然后,通过非侵入式负荷与马尔可夫链相结合的方法,对人员的用能活动行为进行模拟;最后,综合考虑“机理驱动”方法以及人员行为因素,刻画家庭能源中心的用能肖像曲线,分析需求响应对用能曲线的影响,并结合实际算例验证本文所提方法的有效性与实用性。本文所提方法的最大优势在于具有独立刻画负荷曲线的能力,而不再依赖同类型的大量数据进行派生驱动。

1 用能特性分析流程

本文所提考虑物理特征与行为因素的用能特性预测建模方法,适用于工业、居民、行政办公等多种用户,本文以家庭用户为例,总体研究思路如下:首先,对用户的用能需求进行归纳,分析负荷构成;其次,针对用能负荷归纳用能设备,并分别从物理与能耗特性 2 个方面建立设备用能模型;同时,家庭数据中心可以通过内部设备监测,获取类似非侵入式负荷监测与分解工具可以给出的包含时空特征的用户用能行为特征;最后,通过马尔可夫链模拟用户行为,并充分结合内部设备的用能模型实现用户用能肖像的刻画。总体分析流程及与传统方法的对比如图 1 所示。

2 家庭能源中心负荷构成

“机理驱动”对于一定区域内的负荷及能耗预测评估通常采用 2 种基本方法,即自上而下方法和自下而上方法^[11]。其中,自上而下方法考虑宏观经济指标、气象参数、建筑规模等因素,对较大区域内的能耗进行预测评估,再向下分配;而自下而上方法则是考虑环境温度、建设性能、设备运行等因素,从而评估较小区域内的能耗情况,再放大评估区域尺

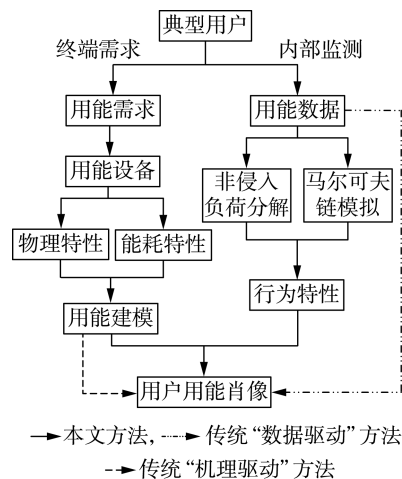


图 1 用能特性分析流程

Fig.1 Flowchart of energy consumption analysis

度。由于本文的研究对象是家庭能源中心,规模上更适宜采用自下而上方法分析负荷需求构成。因此,本文从终端需求的角度出发,构建出的家庭能源中心负荷框架如图2所示。图中椭圆形虚线代表存在能源替代的可能性,后文将会具体分析。不同需求通过实际的电器设备得到满足,而家庭能源中心通过外部电能与燃气能满足用能设备的供给。

3 家庭能源中心设备用能模型

本节将基于图 2 所示的电器设备分类,综合考虑物理与运行特性,建立相关设备的用能模型。

3.1 用电设备模型

3.1.1 暖通设备

家庭能源中心的暖通设备负责调节室内温度,其用能特性与室内外温度、房屋建筑属性以及设备运行参数有关。其中,室内温度的动态变化方程为:

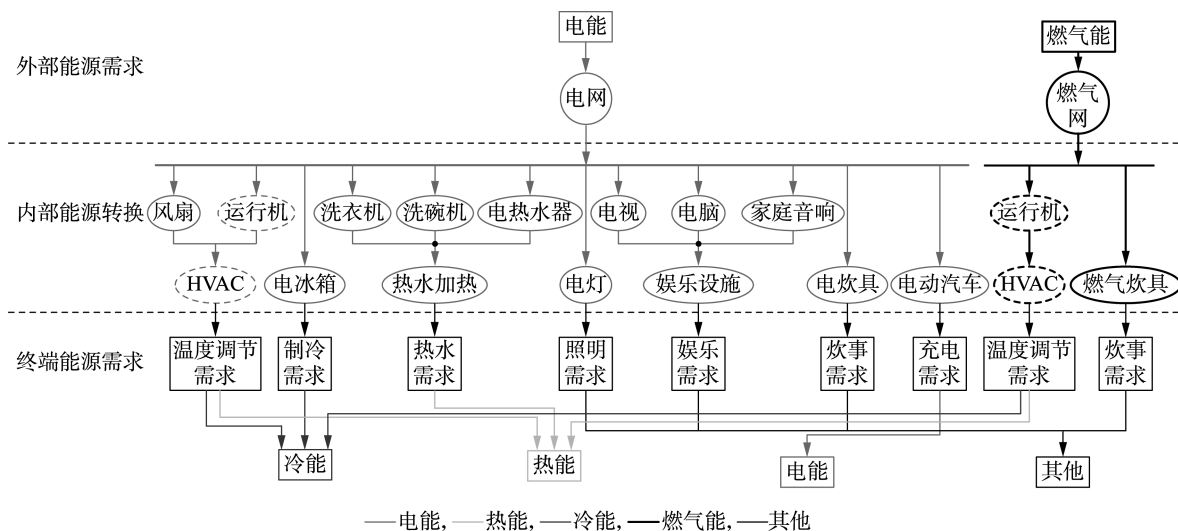


图2 家庭能源中心负荷框架

Fig.2 Load framework of household energy centre

$$m_a C_{p,air} \frac{dT_{in}}{dt} = m_{HVAC} C_{p,air} (T_{HVAC} - T_{in}) - \frac{T_{in} - T_{\infty}}{R_{eq,HVAC}} \quad (1)$$

其中, m_a 为暖通设备内空气的质量; $C_{p,air}$ 为空气的比热容; T_{in} 为室内温度; m_{HVAC} 为暖通设备的空气流量; T_{HVAC} 为暖通设备的送风温度; T_{∞} 为环境温度; $R_{eq,HVAC}$ 为建筑墙体的等效热阻, 其计算方式^[12] 如式(2)所示。

$$R_{eq,HVAC} = \left[\left(\frac{1}{h_o A_{wall}} + R_{wall} + \frac{1}{h_i A_{wall}} \right)^{-1} + \left(\frac{1}{h_o A_{window}} + R_{window} + \frac{1}{h_i A_{window}} \right)^{-1} \right]^{-1} \quad (2)$$

其中, h_o 、 h_i 分别为外部和内部的对流系数; A_{wall} 、 A_{window} 分别为墙体和窗户与外界环境的接触系数; R_{wall} 、 R_{window} 分别为墙体和窗户的热阻。

则室内温度变化的动态方程可简化表示为:

$$T_{in}(t) = [T_{in}(t-1) - A] e^{-t/\tau} + A \quad (3)$$

其中, $T_{in}(t)$ 为时段 t 的室内温度; A 与 τ 为将式(2)代入式(1)得到的折算变量。

暖通设备消耗的能源主要来源于^[12] 新风设备空气循环消耗的能源和暖通设备运行所消耗的能源 2 个方面。其中, 新风设备通过电风扇消耗电能以满足空气循环需求, 该环节消耗的电能:

$$E_{HVAC,fan}(t) = \frac{m_{HVAC} \Delta P_{eq,HVAC}}{\eta_{HVAC,fan} \eta_{HVAC,motor}} \quad (4)$$

其中, $\Delta P_{eq,HVAC}$ 为等效总压降, 计算方式为 $\Delta P_{eq,HVAC} = P_{static} + \rho v^2 / 2$, P_{static} 为压降, ρ 为空气密度, v 为空气流速; $\eta_{HVAC,fan}$ 、 $\eta_{HVAC,motor}$ 分别为风扇和发动机的运行效率。

以供暖为例, 暖通设备运行过程中消耗的能源可采用传统燃气和电力暖通系统 2 种方案进行供给。对于第 1 种供给方案, 其所需的能源为:

$$G_{furnace}(t) = \frac{m_{HVAC} C_{p,air} (T_{HVAC} - T_{in})}{\eta_{furnace}} \quad (5)$$

其中, $\eta_{furnace}$ 为暖通设备采暖效率。在这种情况下, 暖通设备运行环节消耗的能源由天然气网络供给。

对于第 2 种供给方案, 其所需的能源为:

$$E_{HVAC,heating}(t) = \frac{m_{HVAC} C_{p,air} (T_{HVAC} - T_{in})}{1 + C_{COP}} \quad (6)$$

其中, C_{COP} 为热电的能效比。

基于上述分析, 暖通设备在实际配置/运行的过程中存在 2 种方案, 电能与燃气能之间存在替代关系, 为避免后续出现负荷重复叠加问题, 本文以供热期为例, 通过对比方案的运行成本, 从经济性的角度选择合理的供给方式。供热季典型日的室外温度变化如附录中图 A1 所示, 将室内的理想温度设定为 21℃, 但考虑到温度的柔性需求以及温度变化的时

滞特性, 在理想温度的基础上设定 1℃ 的裕度区间。根据式(5)及式(6)分别计算 2 种方案下暖通设备的出力, 纯电力暖通设备以及燃气-电力混合暖通设备的电功率如附录中图 A2 所示。通过计算, 燃气-电力混合暖通设备在供给的过程中消耗 0.53 kW·h 的电力以及 18.2 kW·h 的燃气; 纯电力暖通设备在供给的过程中消耗 5.2 kW·h 的电力。通过暖通设备调节的室内温度如附录中图 A1 所示。结合附录中表 A1 所示的能源价格, 纯电力暖通设备花费 3.4 元; 燃气-电力混合暖通设备花费 4.5 元。因此, 从运行经济性的角度进行分析, 采用纯电力暖通设备的供给方式在运行经济性方面更为合理。

3.1.2 照明设备

照明设备负责满足室内人员的光照需求, 其用能特性与室内外照度、人员光照需求以及设备运行参数有关。其中, 室内照度变化方程为^[13]:

$$L_{LUX,in}(t) = \frac{L_{LF}}{100} L_{LUX,out}(t) \quad (7)$$

其中, $L_{LUX,in}(t)$ 为时段 t 的照度; L_{LF} 为采光系数, 是室内光与室外光之比; $L_{LUX,out}(t)$ 为时段 t 阴天无障碍半球水平面上的室外光照度。

在人员需要光照的时间段内, 光照度应该维持在可接受范围 $R_{light} \in [100, 150]$ Lux^[13], 在此基础上, 计算时段 t 内的房间占用率, 其计算公式如下:

$$O(t) = \frac{\sum_{n=1}^N o_n(t)}{N} \quad (8)$$

$$o_n(t) = \begin{cases} 1 & \text{有人处于活动用光状态} \\ 0 & \text{无人处于活动用光状态} \end{cases}$$

其中, N 为室内人员活动行为的状态总数。因此, 除去自然光照, 需要照明设备满足的照度水平为:

$$L_{LUX,in,artificial}(t) = \max[\max R_{light} - L_{LUX,in}(t), 0] O(t) \quad (9)$$

则照明设备为满足光照需求所消耗的电能:

$$E_{light}(t) = S_{HA,light} \frac{L_{LUX,in,artificial}(t)}{\eta_{light}} \quad (10)$$

其中, $S_{HA,light}$ 为照明面积; η_{light} 为电灯的光照效率, 与具体电灯类型有关, 例如日光灯为 50 Lm/W, LED 节能灯为 90~110 Lm/W。

3.1.3 热水器设备

热水器设备负责满足室内人员在洗衣、洗碗以及洗澡等日常行为中对热水的需求, 其用能特性与温度、用水量等因素有关。本文假定进入室内的水温为 10℃, 忽略地理因素、管道材料、季节因素对入室水温的影响, 而热水负荷使用的水温通常设定为 40~49℃^[13], 因此, 热水需求所消耗的电能:

$$E_{WT}(t) = \frac{V_{GPM,WT} c_{water} C_{p,water} (T_{out,WT} - T_{in,WT})}{D_{WT}(t)} \quad (11)$$

其中, $V_{GPM,WT}$ 为每小时消耗水的体积; $D_{WT}(t)$ 为用热水持续时间; c_{water} 为水的密度; $C_{p,water}$ 为水的比热容; $T_{in,WT}$ 与 $T_{out,WT}$ 分别为入水温度和出水温度。

3.1.4 电冰箱设备

结合相关统计研究,电冰箱一天内大约有 1/3 的时间处于运行工作状态^[12,14],运行状态可采用伯努利分布进行模拟,在明确电冰箱规格以及模拟步长后即可得到电冰箱设备在运行时段内的运行与能耗情况。

3.1.5 炊事设备

家庭能源中心的炊事设备负责满足一天内的基本烹饪活动,涉及的电炊具包括微波炉、电烤箱、电水壶等。考虑到只有在特定的活动场景下才会使用这些设备,并且单一设备使用的时间不会太久,因此,结合现有的研究^[15],将每一类炊事设备采用如图 3 所示的恒功率运行方式,结合炊事设备的额定功率 P_{ON} 即可估算该时段的电能消耗。

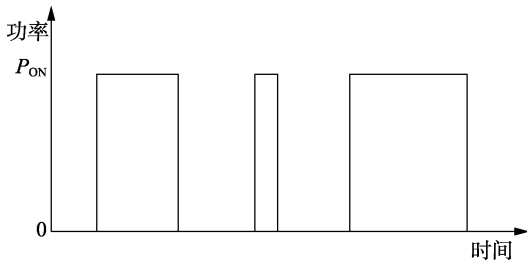


图3 炊事设备功率曲线

Fig.3 Power curve of cooking equipments

3.1.6 娱乐设备

家庭能源中心的娱乐设备负责满足一天内的娱乐活动,涉及的电器设备包括电视机、电脑、家庭音响等。不同场景(工作日/休息日)娱乐设备的能耗情况会有很大的差别,根据设备本身的运行特点,部分娱乐设备的功率曲线可以参考图 3 分析,而部分娱乐设备需要在图 3 的基础上进一步考虑待机功率。结合娱乐设备的额定功率与待机功率,即可估算该时段的电能消耗。

3.1.7 电动汽车

3.1.1—3.1.6 节主要是从“负荷需求”的角度对用能特性进行分析,而作为一种新型柔性负荷,家庭能源中心中的电动汽车负荷^[16]会同时具有“需求”与“响应”特性。电动汽车的充放电负荷会对用户的整体负荷曲线产生影响。对于本文所研究的家庭用户而言,充电策略有如下 2 种情况:优化后有序充电,即采用动态过程选择充电时段;无序随意充电,即不考虑电价等政策因素,设定到家便开始充电。

假定电动汽车由家庭中的固定一人来控制使用,并且考虑实际情况,最小充电时间设定为 1 h。

电动汽车考虑充电、放电与闲置 3 种状态,即电动汽车状态 $\Phi_t \in \{1(\text{充电}), 2(\text{放电}), 3(\text{闲置})\}$ 。在有序充电策略下,充电时段的优化目标函数为:

$$\min \int_t C_{char,t}(\Phi_t) dt \quad (12)$$

其中, $C_{char,t}$ 为时段 t 产生的充电费用。

约束条件包括:

$$C_{char,t}(\Phi_t) = \begin{cases} P_{EV, char}(t) P_E(t) & \Phi_t = 1 \\ 0 & \Phi_t \neq 1 \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{EV, char}(t) = \begin{cases} P_{EV, char,t} & \Phi_t = 1 \\ 0 & \Phi_t \neq 1 \end{cases} \quad (14)$$

$$S_{SOC, min} \leq S_{SOC}(t) \leq C_{CAP} \quad (15)$$

$$S_{SOC}(t) = S_{SOC}(t-1) + P_{EV, char}(t) - P_{EV, dischar}(t) \quad (16)$$

其中, $P_{EV, char}(t)$ 为时段 t 电动汽车充电功率; $P_E(t)$ 为时段 t 的电价; $S_{SOC}(t)$ 为时段 t 电池的剩余电量; C_{CAP} 为电动汽车的电池容量; $P_{EV, char,t}$ 为电动汽车的恒定充电功率; $P_{EV, dischar}(t)$ 为时段 t 电动汽车的放电功率。

本文后续将结合实际算例量化分析电动汽车充电行为对家庭用户整体负荷曲线的影响,以说明引导终端用户进行需求响应的必要性。

3.2 燃气能耗模型

针对本文研究的家庭能源中心,燃气能主要实现对燃气炊具的供给,每一时段用气量取决于行为活动耗气量以及燃气低热值等因素,具体计算公式为^[17]:

$$G(t) = \frac{q(t)}{H_1} \quad (17)$$

其中, $G(t)$ 为时段 t 居民住宅的用气量; $q(t)$ 为时段 t 活动所需要的热量,与燃气炊具性能相关; H_1 为燃气的低热值,本文取 35.9 MJ/m^3 。

3.3 用能模型扩展

本文所构建的用能模型既可以实现短时间尺度(d)的用能分析,也可以扩展进行长时间尺度(a)的用能分析;同时,既可以实现小范围(户)的用能分析,也可以扩展进行大范围(建筑、区域)的用能分析。由于本文所研究对象中燃气能的使用场景较为简单,因此,下文以电能为例进行模型的扩展说明。

3.3.1 时间扩展

基于 2.1 节细化的用能模型分析,时段 t 内消耗电能的计算公式为:

$$E(t) = E_{HVAC}(t) + E_{light}(t) + E_{WT}(t) + E_{refri}(t) + E_{cooking}(t) + E_{TV}(t) + E_{computer}(t) + E_{EV}(t) \quad (18)$$

其中, $E_{HVAC}(t)$ 、 $E_{refri}(t)$ 、 $E_{cooking}(t)$ 、 $E_{TV}(t)$ 、 $E_{computer}(t)$ 、 $E_{EV}(t)$ 分别为暖通设备、电冰箱、炊事设备、电视机、

电脑、电动汽车在时段 t 消耗的电能。

根据式 (18), 结合各组成部分的实际用能情况, 即可刻画一天内任意时间的用电肖像。而分别对工作日与休息日进行用能统计分析, 即可刻画 1 a 或者任意统计时间段内的用电肖像, 如式 (19) 所示。

$$E = 261 \sum_{t=1}^{24} E_{\text{wd},h}(t) + 104 \sum_{t=1}^{24} E_{\text{wed},h}(t) \quad (19)$$

其中, $E_{\text{wd},h}(t)$ 为工作日 1 h 消耗的电能; $E_{\text{wed},h}(t)$ 为休息日 1 h 消耗的电能。

3.3.2 空间扩展

本文所构建的用能分析模型主要面向单一居民用户, 而将模型中关键用户特征参数, 例如房屋面积、人数、设备功率等进行替换, 并结合设备用能模型即可快速计算其他类型居民用户的用能情况。如果存在所评估的区域较大、用户信息不完整的情况, 也可以结合蒙特卡洛方法对用户的关键特征参数进行模拟, 从而实现对区域用能特性的估算。

4 人员活动行为模拟及用能负荷肖像刻画

人员活动行为对用能特性造成的影响, 不仅体现在国家、地区间的宏观能耗差异之中, 也更多、更直接地体现在对微观案例的研究中, 特别是具有个体自主性的家庭用户。在系统形式灵活可控的情况下, 由于生活作息、偏好习惯的不同, 不同人员个体表现出的行为不同, 能耗也大不相同。分析用能行为可以直接采集家庭能源中心的用能数据, 在没有相关数据的情况下也可以通过负荷分解技术进行分析。因此, 本文采用非侵入式负荷分解与马尔可夫链相结合的方法分析家庭用户的用能行为特征, 并在此基础上提出用能肖像的刻画流程。

4.1 非侵入式负荷监测与分解

由于国内缺少类似于文献 [18] 以及 TU/EL-SEA—2007^[14] 等人员用能行为方面的细节统计数据, 因此, 本文采用非侵入式负荷监测与分解思路, 结合用户工作日与休息日一年的历史统计数据, 分析归纳用户在工作日与休息日的用能行为。分解过程采用非侵入式负荷分解思路结合累加和算法与自举法重组的方式, 通过功率曲线以及用能设备的额定容量, 即可分析出用能设备的启停情况, 从而为进一步人员行为的分析提供参考, 具体的算法流程详见文献 [19]。

通过对非侵入式负荷分解方法得到的结果进行分析, 家庭用户一天的主要日常行为如表 1 所示。另外, 为避免家庭内多成员的用能累加, 不同行为下可能存在的能源需求以及电器设备共享情况如表 2 所示。

表 1 家庭用户日常行为项目

Table 1 Household user daily behavior items

行为编号	日常行为	行为编号	日常行为
1	睡觉	6	洗碗
2	做饭	7	洗衣服
3	离开(工作)	8	电脑
4	离开(不工作)	9	阅读
5	电视		

表 2 日常行为能源需求及共享性分析

Table 2 Energy demand and sharing analysis of daily behaviors

设备类型	需求类型	日常行为编号	共享情况
HVAC	持续柔性需求	1, 2, 5—9	共享
照明设备	与室内光照强度相关	2, 5—9	共享
热水器	特定情况下	6, 7	非共享
电冰箱	周期性需求	—	共享
电炊具	特定情况下	2	非共享
电视	特定情况下	5	共享
电脑	特定情况下	8	非共享
电动汽车	特定情况下	—	非共享

4.2 马尔可夫链行为模拟

考虑到模拟人员用能行为的方法需要能够处理随机性以及具备时间相关性与空间相关性, 本文采用马尔可夫链描述并体现人员个体的随机移动^[20]与用能过程的不确定性。采用马尔可夫链进行人员行为模拟的最大优势在于, 它能够刻画人员行为在时间上的自相关性, 同时也能够保证行为活动之间的互相关性, 所设置的行为活动既能够体现时间层面的特性, 也能够体现出空间层面的特性, 兼顾人员移动行为与使用行为, 更为有效合理地反映出室内人员用能情况的随机变化, 同时又紧密关联实际情况。

马尔可夫链模型假定家庭内成员在评估时间内的活动均由表 1 内的活动构成, 评估步长表示为 $T = 1, 2, \dots, t_k, t_{k+1}, \dots$, 当评估时间由 t_k 推进为 t_{k+1} 时, 可能发生状态转移, 因此建立式 (20) 所示状态转移矩阵, 其中转移概率 $p_{ij}(t) = P\{X_{t+1} = j | X_t = i\}$ 表示人员在时段 t 处于状态 $X_t = i$ 、在时段 $t+1$ 处于状态 $X_{t+1} = j$ 的概率, 而非侵入式负荷分解结果为概率值的设定提供了依据。状态转移矩阵内包括 $p_{ii}(t)$, 表示下一时段人员的行为活动状态仍为 i 。

$$P_t = [p_{ij}(t)]_{n \times n} = \begin{bmatrix} p_{11}(t) & p_{12}(t) & p_{13}(t) & \cdots & p_{1n}(t) \\ p_{21}(t) & p_{22}(t) & p_{23}(t) & \cdots & p_{2n}(t) \\ p_{31}(t) & p_{32}(t) & p_{33}(t) & \cdots & p_{3n}(t) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1}(t) & p_{n2}(t) & p_{n3}(t) & \cdots & p_{nn}(t) \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中, n 为行为状态总数, 本文中 $n=9$ 。

不同典型日的行为活动通过状态间转移概率的

变化来复现。在每个时间步长中生成一个随机均匀数,并与转换概率进行比较,以确定每天人员行为活动状态之间发生的转换。不同状态转换示意图如附录中图 A3 所示。

4.3 家庭用能肖像刻画流程

本文所提出的面向家庭用户的用能特性分析方法是基于对内部电器设备的物理特征及运行特性的建模,并充分结合外部自然环境、电价、建筑属性以及内部的人员行为因素,分析任意时段的用能情况,从而刻画家庭用能肖像曲线,具体流程如图 4 所示。主要的实施流程如下:步骤 a,设置初始行为活动状态;步骤 b,活动状态用能分析,参考表 2,分析在该活动状态下产生的用能行为以及对应的用能设备;步骤 c,活动状态用能计算,在步骤 b 明确该活动状态下的用能设备后,基于第 3 节的设备物理与运行特性及用能模型,计算该活动状态下的耗能情况;步骤 d,模拟迭代,采用马尔可夫链模拟产生下一时段的行为活动状态;步骤 e,迭代终止校验,判断迭代时钟是否已经达到一天或者设置的预测时间段,如果是,则终止计算并输出用能肖像曲线,否则返回步骤 b。

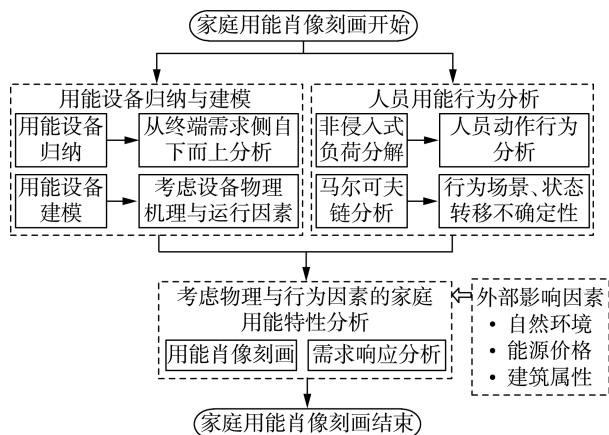


图 4 家庭用能肖像刻画流程

Fig.4 Flowchart of portrait depiction for household energy consumption

5 算例分析与对比

5.1 算例概况

本文以北方典型家庭的供暖季场景为例,进行家庭用能特性分析。家庭能源用户的用能设备及参数如表 3 所示,家庭用户的建筑参数如表 4 所示。本文将室内初始温度设定为 18°C ,温控目标温度设定为 23°C ,并考虑 1°C 弹性区间。预测的初始时刻设定为 00:00,初始状态设定为 1(睡觉状态)。

5.2 模型实证分析

家庭用户安装的智能量测装置为本文的模型提供了实证基础,由于本文量测的家庭用户不拥有电动汽车,因此,在模型实证分析部分将不考虑电动汽

表 3 用能设备及参数

设备名称	设备类型	典型参数
照明设备	日光灯	$\eta_{\text{light}} = 50 \text{ Lm/W}$
	LED 节能灯	$\eta_{\text{light}} = 100 \text{ Lm/W}$
电视机	TCL D55A810 55 英寸	120 W
计算机	华硕(ASUS)灵睿 K20	90 W
电冰箱	美的 BCD-318W	0.83 kW·h/d
电炊具	电饭煲(CFXB40FC832-75)	750 W
	微波炉(M1-L213B)	800 W
	电烤箱(T3-L383B)	1 800 W
	电磁炉(C21-SK805)	1 200 W
	电水壶(JYK-17C15)	1 800 W

表 4 用户建筑参数

参数	数值
房屋面积	93 m^2
墙体热阻	2.64 $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
窗体热阻	0.183 $\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$
内部对流系数	5 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
外部对流系数	30 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
墙窗比	17%

车的用能影响,主要是通过用能模型与量测数据对其他用能需求进行预测与分析。在此基础上,本节进一步将本文所介绍的“机理驱动”方法与常规趋势外推的“数据驱动”方法进行对比,通过平均绝对百分比误差(MAPE)以及最大相对百分比误差(MRPE)2项指标^[4]反映不同方法的预测精度。针对工作日与休息日的用电特性预测结果分析及对比分别如图 5 及图 6 所示,在家庭能源中心设定的供给模式下,室内温度变化如附录中图 A4 所示。

通过对图 5 及图 6 预测结果的分析可见,本文所提出的用能模型基本可以刻画出家庭用户的用电肖像预测,既能够反映每一时段用户的电能消耗构成细节,同时还能够反映用户的行为。具体对图 5 与图 6 的用电细节分析可知,工作日用电会在早/晚产生 2 个用电高峰,主要是由炊事活动造成的;电视、电脑等娱乐活动以及热水需求主要发生在晚间下班或放学后;为维持室内温度在舒适的区间内,暖

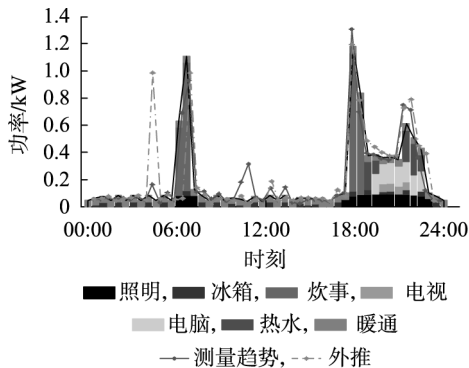


图 5 工作日用电特性分析

Fig.5 Power consumption characteristics analysis in working days

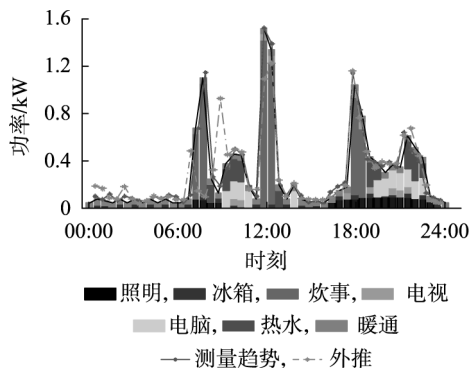


图 6 休息日电用特性分析

Fig.6 Power consumption characteristics analysis in rest days

通设备在全天均会进行温度调节或通风工作。而休息日的用电会在早/中/晚产生 3 个用电高峰,主要是由炊事活动造成的;相较于工作日,休息日的用电行为更加灵活随机,娱乐活动与热水需求在白天也可能产生。

进一步对预测误差进行分析如表 5 所示。由表中可见,本文所提出的“机理驱动”方法不但在预测精度方面明显优于常规趋势外推方法,同时还能够分析每一时段的用能构成,可以提供更多的用能信息;另外,相较于日常行为模式较为固定的工作日,休息日由于行为上的不确定性更大,因此在预测环节中产生的误差更大。本文方法存在的误差主要来源于以下 2 个方面:本文所提出的用电需求以及用电设备用能模型虽然可以包含家庭用户的大部分用电设备及需求,但并不能涵盖家庭用户的全部用能设备,因此会存在一定的误差;本文的主要出发点是在考虑用户行为特性的情况下反映家庭用户的用能需求,机理建模的精度以及与实际设备运行情况的偏差也会造成一定的误差。

表 5 不同方法预测误差对比

Table 5 Comparison of prediction errors between different methods

算法	工作日		休息日	
	MAPE/%	MRPE/%	MAPE/%	MRPE/%
本文方法	1.801 3	3.321 3	2.399 1	4.534 1
趋势外推方法	4.004 3	7.759 2	7.936 3	9.976 2

另外,家庭用户于工作日与节假日对燃气的用能需求分析结果分别如附录中图 A5 及图 A6 所示。

5.3 需求响应特性分析

在 5.2 节刻画用能肖像的基础上,本节进一步引入电动汽车,扩展分析需求响应行为对终端用户用能肖像的影响,通过分析电动汽车不同充电行为以及对用电负荷曲线产生的影响,从而分析引导电动汽车有序充电以及参与需求响应的必要性。本文以工作日为例,分析电动汽车的不同充电行为以及产生的影响,所选取的电动汽车型号为 Nissan leaf^[21],具体的参数如表 6 所示。

表 6 电动汽车参数

Table 6 Parameters of electric vehicles

参数	数值
电池容量	30 kW·h
慢充电功率	6.6 kW
快充充电功率	20 kW
放电功率	6.6 kW
最大行驶里程	172 km
充放电效率	0.9
百公里耗电量	34 kW·h

本文采用慢充的充电方式,假定电动汽车到家还剩余 20%电量,对比分析无序充电与有序充电行为对经济性以及负荷曲线的影响。考虑电动汽车用电的负荷肖像如图 7 及图 8 所示。

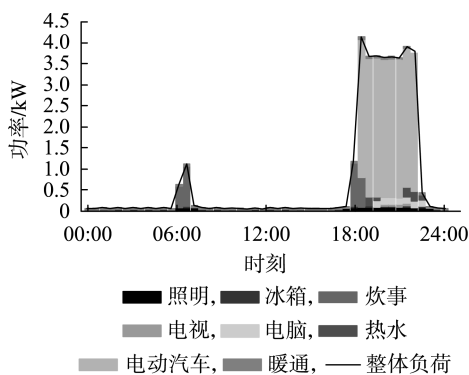


图 7 无序充电方式下用电特性分析

Fig.7 Power consumption characteristics analysis under disordered charging mode

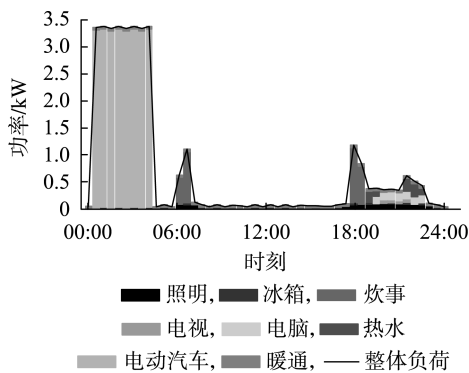


图 8 有序充电方式下用电特性分析

Fig.8 Power consumption characteristics analysis under ordered charging mode

通过图 7、图 8 可见,电动汽车的接入会对家庭用能肖像产生明显影响。采用无序充电方式会造成充电选取时段不合理,易造成负荷的“峰上加峰”,如果多个用户累计甚至可能会对区域配电网运行产生影响。对于经济性方面的分析,采用无序充电的方式由于部分充电时段处在峰值电价时段,因此充电价格为 14.78 元;而采用有序充电的方式可以起到负荷“填谷”的效果,同时,由于充电时段一直处于谷电价时段,因此充电价格为 4.8 元。

为进一步分析电动汽车充电行为产生的影响,

针对不同的充电行为结合式(19)模拟一年的电负荷特性预测曲线分别如附录中图 A7 及图 A8 所示,通过对比可见,无序充电方式下年用电峰值会高于有序充电方式,影响电网的“削峰填谷”效果,针对年负荷特性曲线计算年负荷不均衡率指标体现电动汽车充电行为的影响。通过计算,采用无序充电情况下的年负荷不均衡率指标 $\rho_1 = 0.893$;采用有序充电情况下的年负荷不均衡率指标 $\rho_2 = 0.937$ 。因此,从终端用户的层面合理、有序地引导电动汽车的充电行为可以起到“削峰填谷”、平滑负荷曲线的效果。

6 结论

本文从终端需求的角度出发,对家庭用户的用能需求进行分类,并基于家庭能源中心内用能设备的物理特征与运行特性,建立家庭内电器设备的用能模型,同时考虑了其中可能存在的能源替代问题,在此基础上,通过非侵入式负荷分解与马尔可夫链相结合的方法,对家庭成员的用能行为进行模拟,提出了一种通过用能设备“机理驱动”家庭用能负荷肖像的刻画方法。通过算例分析与对比发现,本文所提方法能够保障预测精度,同时能够提供每一时段的用能信息,在用能肖像刻画方面可以取得较好的效果。

本文方法不仅可以支撑家庭数据中心的分析,还可以结合非侵入式设备的相关信息为配电企业的优化运行与制定需求相应政策奠定基础;同时,本文方法不仅适用于家庭,未来还可以进一步应用于工商业、行政办公等其他行业,为其能源中心的科学决策提供技术手段。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术,2016,40(1):114-124.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LIU Dunan, et al. “Generation-grid-load-storage” coordinative optimal operation mode of energy internet and key technologies[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 114-124.
- [2] 孙娟. 中国典型城市住宅能耗调查与分析[D]. 上海:同济大学,2009.
SUN Juan. Investigation and analysis on energy consumption of typical urban residence in China[D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [3] 何耀耀,许启发,杨善林,等. 基于 RBF 神经网络分位数回归的电力负荷概率密度预测方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):93-98.
HE Yaoyao, XU Qifa, YANG Shanlin, et al. A power load probability density forecasting method based on RBF neural network quantile regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 93-98.
- [4] 何耀耀,刘瑞,撤奥洋. 基于实时电价与支持向量分位数回归的短期电力负荷概率密度预测方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(3):768-775.
HE Yaoyao, LIU Rui, HAN Aoyang. Short-term power load probability density forecasting method based on real time price and support vector quantile regression[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(3): 768-775.
- [5] YUKSELTAN E, YUCEKAYA A, BILGE A H. Forecasting electricity demand for Turkey: modeling periodic variations and demand segregation[J]. Applied Energy, 2017, 193: 287-296.
- [6] COLLOTTA M, PAU G. An innovative approach for forecasting of energy requirements to improve a smart home management system based on BLE[J]. IEEE Transactions on Green Communications & Networking, 2017, 1(1): 112-120.
- [7] 陈飞翔,胥建群,王晨杨,等. 能源互联网系统用户侧冷热负荷预测模型研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3678-3684.
CHEN Feixiang, XU Jianqun, WANG Chenyang, et al. Research on building cooling and heating load prediction model on user's side in energy internet system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3678-3684.
- [8] SUBBIAH R, PAL A, NORDBERG E K, et al. Energy demand model for residential sector: a first principles approach[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1215-1224.
- [9] WIDÉN J, NILSSON A M, WÄCKELGÅRD E. A combined Markov-chain and bottom-up approach to modelling of domestic lighting demand[J]. Energy & Buildings, 2009, 41(10): 1001-1012.
- [10] 张华一,文福拴,张臻,等. 计及舒适度的家庭能源中心运行优化模型[J]. 电力系统自动化,2016,40(20):32-39.
ZHANG Huayi, WEN Fushuan, ZHANG Can, et al. Operation optimization model of home energy hubs considering comfort level of customers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(20): 32-39.
- [11] 潘毅群,郁丛,龙惟定,等. 区域建筑负荷与能耗预测研究综述[J]. 暖通空调,2015,45(3):33-40.
PAN Yiqun, YU Cong, LONG Weiding, et al. Review of district building load and energy consumption prediction[J]. Journal of HV&AC, 2015, 45(3): 33-40.
- [12] MURATORI M, ROBERTS M C, SIOSHANSI R, et al. A highly resolved modeling technique to simulate residential power demand[J]. Applied Energy, 2013, 107: 465-473.
- [13] FARZAN F, JAFARI M A, GONG J, et al. A multi-scale adaptive model of residential energy demand[J]. Applied Energy, 2015, 150: 258-273.
- [14] WIDÉN J, WÄCKELGÅRD E. A high-resolution stochastic model of domestic activity patterns and electricity demand[J]. Applied Energy, 2010, 87: 1880-1892.
- [15] WIDÉN J, LUNDH M, VASSILEVA I, et al. Constructing load profiles for household electricity and hot water from time-use data - modelling approach and validation[J]. Energy & Buildings, 2009, 41(7): 753-768.
- [16] 葛少云,李吉峰,李腾,等. 配电网和城市路网关联网络的综合可靠性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(6):1568-1577.
GE Shaoyun, LI Jifeng, LI Teng, et al. Integrated analysis on reliability of power distribution network and urban road network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1568-1577.
- [17] 中华人民共和国建设部. 城镇燃气设计规范[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2006:14-15.
- [18] ELLEGÅRD K, COOPER M. Complexity in daily life—a 3D-visualization showing activity patterns in their contexts[J]. Electronic In-

ternational Journal of Time Use, 2004, 1(1): 37-59.

- [19] ZHU Zhicheng, WEI Zhiqiang, YIN Bo, et al. A novel approach for event detection in non-intrusive load monitoring[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, China: IEEE, 2017: 1-5.
- [20] 王闯, 燕达, 丰晓航, 等. 基于马氏链与事件的室内人员移动模型[J]. 建筑科学, 2015, 31(10): 188-198.
WANG Chuang, YAN Da, FENG Xiaohang, et al. A Markov chain and event based model for building occupant movement process[J]. Building Science, 2015, 31(10): 188-198.
- [21] NISSAN USA. Specifications of 2016 Nissan LEAF[EB/OL]. [2017-09-06]. <http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf/versions-specs/version.sv.html>.

作者简介:



葛少云

葛少云(1964—),男,河北曲阳人,教授,博士,主要研究方向为城市电网规划与电力系统优化运行等(E-mail: syge@tju.edu.cn);

李吉峰(1991—),男,吉林吉林人,博士研究生,主要研究方向为城市电网规划与可靠性(E-mail: lijifeng2014@163.com);

刘洪(1979—),男,天津人,副教授,博士,研究方向为城市电网规划、综合能源系统运行与规划等(E-mail: liuhong@tju.edu.cn)。

Modelling of household energy consumption characteristics considering physical features and behavior factors

GE Shaoyun, LI Jifeng, LIU Hong, WANG Yiran, ZHANG Peng

(Key Laboratory of Smart Grid, Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the problem that modelling and prediction of conventional load do not consider user behavior characteristics and need to take massive historical data as the research basic, a modelling method of household energy consumption characteristics with the consideration of physical features and behavior factors is proposed. Taking the household energy center as the research object, the overall analysis flowchart is introduced, meanwhile the external demand, internal conversion and terminal energy load type are induced. Considering the physical features and behavior factors, the energy consumption model of electrical equipment is built and its expansion method is proposed. On this basis, the user energy consumption behavior is simulated with the combination of non-intrusive load decomposition and Markov chain. Case analysis shows that, the proposed method has the ability to depict load portrait curve independently and no longer depends on massive data for derivation drive.

Key words: household user; load prediction; energy consumption detail; Markov chain; modelling

(上接第35页 continued from page 35)

Benefit allocation method for electric energy substitution based on cooperative game theory

CHEN Xingying, YU Qingyun, XIE Jun, YU Kun

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Electric energy substitution has practical significance in implementing energy saving and environmental protection policy and realizing strategic energy transition. In order to properly and reasonably allocate the benefit of electric energy substitution to power customers and encourage them to participate in electric energy substitution, an allocation method for sharing the benefits of electric energy substitution is proposed based on the cooperative game theory. The value of electric energy substitution in reducing operation cost and emission is analyzed and quantified. Nucleolus and Shapley value methods are adopted to allocate the benefit of electric energy substitution based on the cooperative game theory. Case verifies the effectiveness and rationality of the proposed method.

Key words: electric energy substitution; cooperative game theory; benefit allocation; nucleolus method; Shapley value method

附录

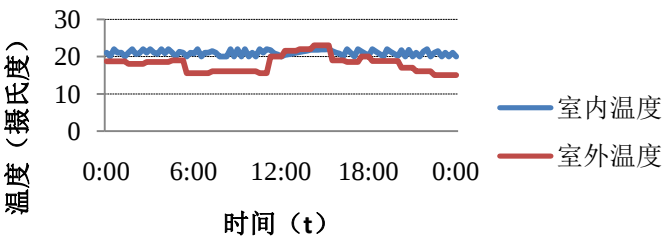


图 A1 供热季室内外温度变化曲线

Fig.A1 Temperature variation curve of indoor and outdoor during heating season

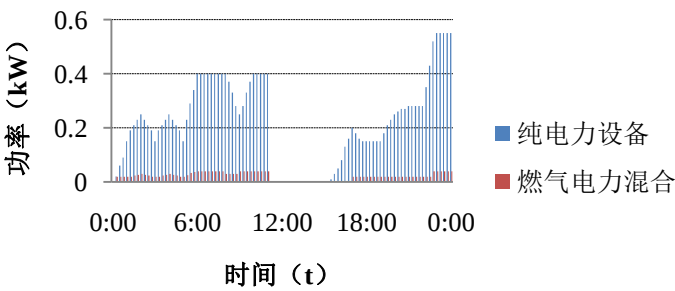


图 A2 不同暖通设备电功率对比

Fig.A2 Power comparison of different HVAC equipments

表 A1 能源价格

Table A1 Energy prices

能源类型		能源价格
电力	峰时段（11:00—15:00； 19:00—21:00）	0.80 元/（kW·h）
	谷时段（0:00—7:00）	0.20 元/（kW·h）
	平时段（其他时段）	0.50 元/（kW·h）
天然气		2.28 元/ m ³

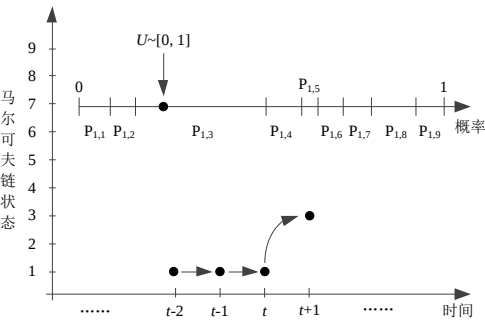


图 A3 马尔可夫链状态转移示意图

Fig.A3 State transition diagram of Markov chain

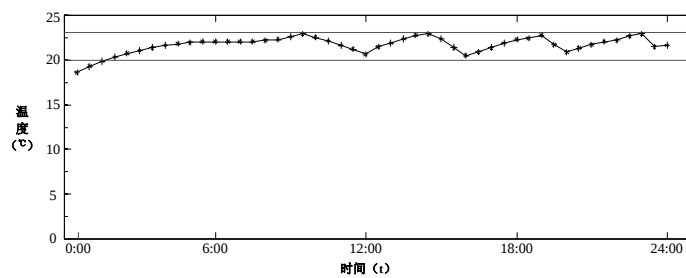
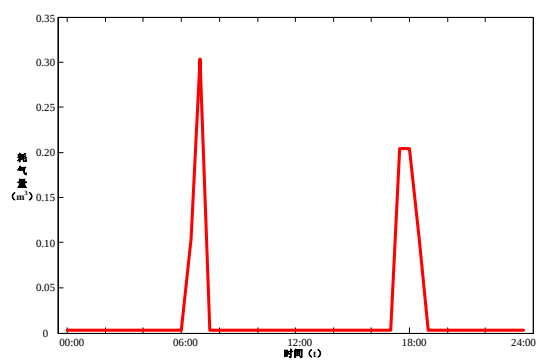


图 A4 室内温度变化曲线

Fig.A4 Indoor temperature variation curve



附录图 A5 工作日燃气用能特性曲线

Fig.A5 Gas consumption characteristic curve in working days

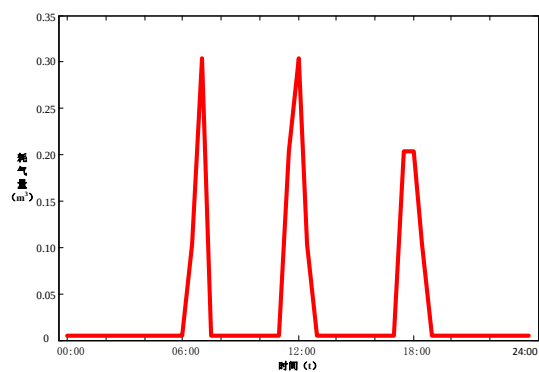


图 A6 休息日燃气用能特性曲线

Fig.A6 gas consumption characteristic curve in rest days

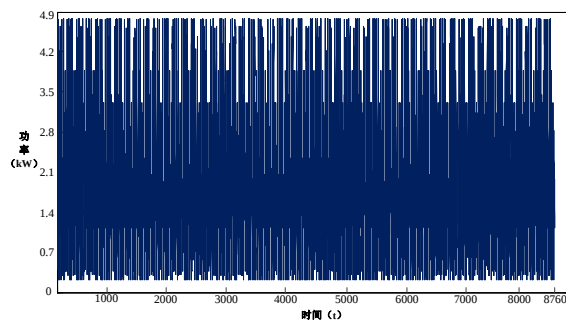


图 A7 无序充电方式下年用电特性分析

Fig.A7 Annual power consumption characteristics under disordered charging mode

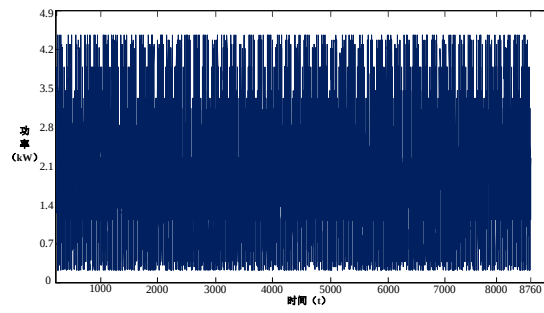


图 A8 有序充电方式下年用电特性分析

Fig.A8 Annual power consumption characteristics under ordered charging mode