

# 基于动态谐波导纳参数的 非侵入式负荷监测数据模拟生成方法

王谱宇<sup>1</sup>, 丁一帆<sup>1</sup>, 陈鉴祥<sup>1</sup>, 刘兴江<sup>2\*</sup>, 方凯杰<sup>3</sup>, 程含渺<sup>3</sup>, 张小平<sup>4</sup>

- (1. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094; 2. 中国电子科技集团公司第18研究所天津电源研究所, 天津市南开区 300384; 3. 江苏省电力有限公司营销服务中心, 江苏省南京市 210019; 4. 伯明翰大学工程学院, 英国伯明翰 B15 2TT)

## Non-invasive Load Monitoring Data Simulation Generation Method Based on Dynamic Harmonic Admittance Parameters

WANG Puyu<sup>1</sup>, DING Yifan<sup>1</sup>, CHEN Jianxiang<sup>1</sup>, LIU Xingjiang<sup>2\*</sup>, FANG Kaijie<sup>3</sup>,  
CHENG Hanmiao<sup>3</sup>, ZHANG Xiaoping<sup>4</sup>

- (1. School of Automation, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, Jiangsu Province, China;  
2. 18th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nankai District, Tianjin 300384, China;  
3. Marketing Service Center, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu Province, China;  
4. School of Engineering, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom)

**ABSTRACT:** Non-invasive load monitoring (NILM) technology has great significance in advancing the intelligence of power system management and guiding users towards more rational electricity usage plans. However, the accuracy of its monitoring results is limited by the scale and authenticity of the electrical load datasets. In addition, the existing public datasets lack sufficient sample quantity and variety, and the comprehensiveness and authenticity of self-constructed datasets also need improvement. To address these issues, this paper proposes a method for simulating residential load data applicable to NILM. First, limited original electrical load data obtained from sampling are subjected to standardize preprocessing and fast Fourier transform (FFT) calculations to derive their dynamic harmonic admittance parameters. Then, an admittance transformation method is introduced to process the dynamic admittance parameters, constraining them within the first/fourth quadrant for easier simulation verification. After that, the processed admittance is utilized at various harmonic orders along with source parameters to deduce a mathematical model of electrical load harmonic admittance. Next, a simulation

model is established to generate standard current waveforms for this electrical load. Compared with other methods, the proposed approach demonstrates satisfying fitting effects across multiple scenarios, ranging from simple on/off loads to multi-stage continuously varying loads, from microsecond-level periodic currents to hour-long duration processes, and from single-type load simulations to multi-type load usage scenario constructions. It shows significant merits over existing data generation methods in terms of fidelity, comprehensiveness, and scope of application. Finally, random variables following probability distributions are further introduced into the dynamic parameters to simulate the random errors of actual loads, enabling the generation of electrical load interval currents that account for practical errors, and effectively enhancing the scientific validity and richness of the generated data. This can serve as a reliable source of datasets for NILM.

**KEY WORDS:** non-invasive load monitoring (NILM); data sets; residential load data generation; dynamic harmonic admittance parameters; admittance transfer; current range

**摘要:** 非侵入式负荷监测(non-invasive load monitoring, NILM)技术在推动电力系统管理智能化及引导用户用电计划合理化方面具有重要意义,但其监测结果的准确性受到用电负荷数据集规模与真实度的制约。现有公共数据集中样本数量与种类以及自建数据集的广泛性与真实性均有待提升。针对上述问题,该文提出一种可应用于非侵入式负荷监测的

基金项目: 江苏省自然科学基金(面上项目)(BK20242048); 国防科技重点实验室基金项目(JCJQLB05406)。

Project Supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province (General Project)(BK20242048); Foundation of Key Laboratory of Science and Technology for National Defense (JCJQLB05406).

居民负荷数据模拟生成方法。首先,通过对采样得到的有限原始电气负荷数据进行规范化预处理及快速傅里叶变换计算,得出其动态谐波导纳参数;其次,提出导纳转移方法将动态导纳参数进行处理,将其约束至一/四象限内以便于仿真验证,利用处理后得出的各谐波次数下导纳与电源参数推导电气负荷谐波导纳数学模型;再次,搭建仿真模型以模拟生成此电气负荷的标准电流波形。通过与其他方法的比较,评估提出的方法具有在多场景中(从简单开关负荷到多阶段连续变化负荷、从微秒级周期电流到小时级长时间段过程电流、从单一类型负荷模拟到多种类负荷用电场景构建)均有良好拟合效果,对比现有数据生成方法,在拟真性、广泛性及应用范围上具有显著优势;最后,在动态参数中进一步引入服从概率分布的随机变量,以模拟实际负荷的随机误差,可生成计及实际误差的电气负荷区间电流,极大地提升了所生成数据的科学性与丰富性,可作为非侵入式负荷监测中数据集的可靠来源。

**关键词:** 非侵入式负荷监测;数据集;居民负荷数据模拟生成;动态谐波导纳参数;导纳转移;区间电流

## 0 引言

在我国“碳达峰·碳中和”目标下,电力行业面临巨大的低碳转型压力。非侵入式负荷监测(non-invasive load monitoring, NILM)技术作为新兴绿色节能技术<sup>[1]</sup>,是实现能源领域绿色低碳与节能减排的有效途径<sup>[2]</sup>。NILM于20世纪80年代由Hart提出<sup>[3]</sup>,通过对由电力入口处原始电压电流数据中提取出的负荷特征进行识别,从而精确获取负荷的数量、种类、工作状态与能耗情况等信息<sup>[4]</sup>。利用NILM技术实现居民用户用电可视化,有利于用户了解家庭内不同时段各电器设备的具体能耗情况<sup>[5-6]</sup>,据此制定合理的用电计划,完善能源消费结构,减少家庭电费开支<sup>[7-8]</sup>;有利于电力供应单位加强负荷侧管理<sup>[9-11]</sup>、减少电能浪费、推动智能电网建设进程<sup>[12-13]</sup>;有利于推进整个社会的节能减排、缓解能源危机、提高用电安全性,实现多方共赢<sup>[14-15]</sup>。

NILM典型流程<sup>[16]</sup>可分为数据采集与处理、事件检测、特征提取、负荷特征数据库建立、负荷辨识及电量分解,如图1所示。

在典型流程框架中,特征库建立与负荷辨识作为非侵入式负荷监测的重要环节,对于整体监测效果的准确性与可靠性与泛化性能具有直接影响<sup>[17]</sup>。而特征库的全面性与负荷辨识过程的精确度受限于所使用数据集的广泛性与真实性。因此,作为特征库的数据来源与负荷辨识算法的训练与评估依

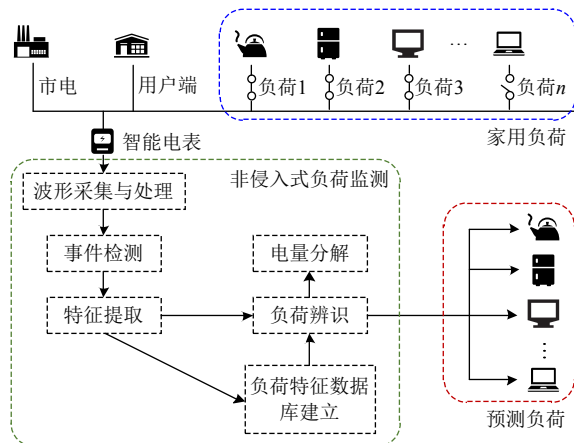


图1 NILM典型流程

Fig. 1 Typical flow chart of NILM

据,高质量的数据集能显著提升非侵入式负荷监测的效率与效果。目前关于非侵入式负荷辨识的研究所使用的数据集主要有公共数据集与自建数据集两大来源。

公共数据集因具有较高的可靠性与权威性而广泛应用于相关领域。例如以下4个公共数据集及其应用:

1) K. Anderson等公布的BLUED数据集记录了一户居民8天内的高频/低频电压电流数据,并提供了各设备的状态转换标签<sup>[18]</sup>;

2) J. Kolter与M. Johnson建立并公布了REDD数据集,涵盖了6座居民楼的电压与总表/分表有功功率的高频/低频电器数据,采集时间持续几天至数月不等<sup>[19]</sup>;

3) J. Kelly和W. Knottenbelt建立了UK-DALE公共数据集,采集并记录了5座居民楼的有功功率、电压与电流波形数据,并包含设备状态切换信息、住户人员构成及能源构成信息,持续时间为2个月至4.3年<sup>[20]</sup>;

4) F. Jazizadeh等公布了EMBED数据集,记录了3户居民住宅中(包含共21类约40个电器设备)的总表/分表电压、电流、有功功率、无功功率与频率数据在高频/低频采集模式下的变化情况,同时提供了各设备的状态转换标签与房屋入住率信息<sup>[21]</sup>。

上述4个公共数据集能提供家用负荷在长时间尺度上的暂态/稳态特征,适用于负荷分解算法中的测试集来源,但数据数量的有限性制约了以此为基础的负荷监测的泛用性与普适性。J. Gao提供的PLAID数据集<sup>[22]</sup>与M. Kahl提供的WHITED数据集<sup>[23]</sup>分别记录了多种开关负荷单独运行时的电压

电流高频数据，常作为针对单一负荷辨识的模式识别算法的训练集与测试集，但电器种类较少，且不包含连续变化负荷，不具备广泛性。

自建数据集包括实测数据集与模型生成数据集：东南大学的施雨松针对电动自行车充电负荷辨识问题采集数十辆电动自行车充电时的电压电流数据，以此自行建立数据集<sup>[24]</sup>，但存在数据集规模有限，代表性欠佳的缺陷；D.He等及西南交通大学的刘杰根据实际电路拓扑结构及原理对常见家用负荷进行分类并建立电路拓扑模型，通过计算机仿真生成具有代表性的负荷电流波形数据<sup>[25-26]</sup>，但电路结构的理想化导致其与实际负荷电流波形之间存在较大差异。

针对现有数据集在广泛性、丰富性与拟真性上存在的缺陷，本文提出一种应用于NILM的居民负荷数据模拟生成方法，通过对实测负荷数据进行规范化预处理、谐波分解及阻抗转移计算，建立基于动态负荷谐波导纳参数的数学模型，并以此为依据建立居民负荷泛用模型，解决现有数据集在样本规模与种类广泛性上的缺陷。通过计算机仿真生成数据与电器实测数据的对比，评估此模型在多场景下的拟真性、广泛性。最后，引入随机变量，生成计及实际误差的电气负荷区间电流以满足NILM技术对数据科学性与丰富性的需求。

## 1 动态谐波导纳参数提取

动态谐波导纳参数是通过采样所得负荷电流数据进行分段、规范化预处理、谐波分解等步骤后提取得到的各次谐波导纳关于时间(采样点)的函数，其提取步骤如图2所示。

### 1.1 周期电压电流采样

为了确保基准相角的一致性，本文在工频周期内电压波形最大值点处开始采样。采样时间为周期的整数倍，以确保每个周期的电流信号均能进行谐波分解计算。

引入皮尔逊相似系数以表征电流波形在相邻周期间的差异，记为相邻周期波形相似度，如式(1)所示。

$$f(x_i) = \frac{E[(x_i - E(x_i))(x_{i-1} - E(x_{i-1}))]}{\sqrt{D(x_i)}\sqrt{D(x_{i-1})}} \times \left(1 - \frac{|\max(x_i) - \max(x_{i-1})|}{\max(\max(x_i), \max(x_{i-1}))}\right) \quad (1)$$

式中： $i=1,2,\dots,N_c$ 为周期电流序列个数的动态索引；

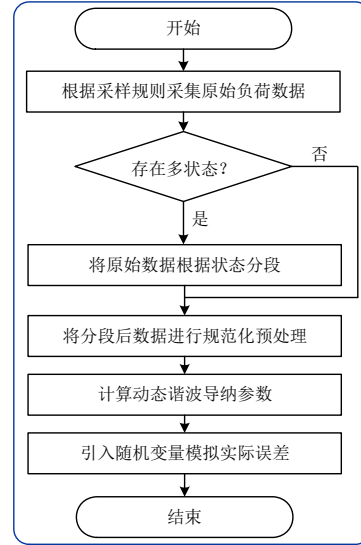


图2 动态谐波导纳参数提取步骤流程图

Fig. 2 Flow chart of extraction steps for dynamic harmonic admittance parameters

$x_i$ 为当前周期的电流序列； $x_{i-1}$ 为前一个相邻周期的电流序列； $N_c$ 为原始负荷数据周期电流序列个数。

利用式(1)对原始负荷数据进行状态变化监测，若相邻周期波形相似度 $f(x_i) \geq 0.9$ 时，判定负荷运行状态未发生改变，将 $x_i$ 与 $x_{i-1}$ 划分至同一个运行状态内；若 $f(x_i) < 0.9$ 时，判定负荷运行状态发生改变，记录状态改变发生周期序列索引 $i_p$ ，并将 $x_i$ 划分至新的运行状态内。其判断依据如式(2)所示：

$$\begin{cases} f(x_i) \geq 0.9, & \text{运行状态连续} \\ f(x_i) < 0.9, & \text{运行状态变化} \end{cases} \quad (2)$$

监测结束后，若原始负荷数据中存在多种运行状态，则根据记录的索引 $i_p$ ，将原始数据分段，得到多段运行状态如式(3)所示：

$$y(p) = \{x_{i_{p-1}}, x_{i_{p-1}+1}, \dots, x_{i_p}\}, p = 1, 2, \dots, N_p \quad (3)$$

式中： $y(p)$ 为运行状态持续周期段； $p$ 为负荷运行状态改变发生次数的动态索引； $i_p$ 为负荷运行状态改变发生的周期序列动态索引； $N_p$ 为负荷运行状态改变发生次数；

各运行状态的启/停时间 $T_{\text{on}}/T_{\text{off}}$ 可由 $2\pi f^* i_{p-1}$ 与 $2\pi f^* i_p$ 计算得出。

### 1.2 原始数据规范化预处理

考虑到实测电气数据波形的复杂性与不精确性，首先需要在不改变主要特征(幅值、相位、变化趋势等)的情况下对电流波形进行处理，处理步骤如图3所示。

1) 标么化：若电流幅值随时间变化而变化，则读取单周期电流采样数据的绝对值极值作为该

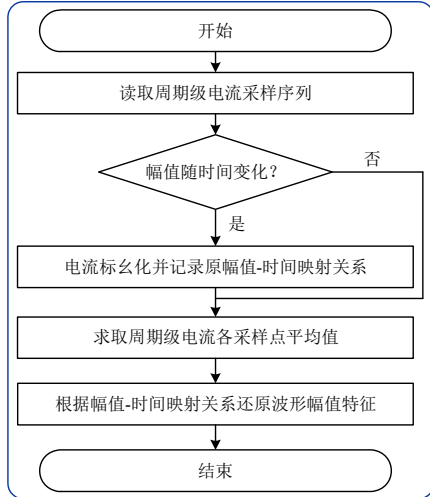


图3 原始数据规范化预处理步骤流程图  
Fig. 3 Flow chart of raw data normalized preprocessing steps

周期的幅值，以此作为基准值将电流标么化，计算过程如式(4)所示：

$$x_{i-pu} = \frac{x_i}{\max(|x_i|)}, m=1,2,\dots,N_c \quad (4)$$

式中： $x_i$ 为原始电气负荷周期电流序列； $x_{i-pu}$ 为标么化周期电流序列； $m$ 为采样周期个数的动态索引； $N_c$ 为采样周期数； $N_s$ 为每个工频周期内采样点个数。

2) 平均化：为减少计算量，将具有类似波形特征(谐波比例)的周期电流波形进行平均化处理，即对上述多个周期的电流序列，根据采样点顺序，依次进行平均值的计算，最后得出平均化周期电流序列  $x_{avg}$ ，计算过程如式(5)所示：

$$x_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^{N_c} x_{i-pu}}{N_c} \quad (5)$$

3) 还原：结合步骤1)中读取的幅值序列与周期级平均电流波形，重新构造电流波形。还原后周期电流序列  $x_{i-r}$ ，记为规范周期电流序列  $x_{i-N}$ ，其计算过程如式(6)所示：

$$x_{i-N} = x_{i-r} = \max(|x_i|) \times x_{avg} \quad (6)$$

### 1.3 快速傅里叶变换

对规范周期电流序列  $x_{i-N}$  进行快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT)<sup>[27]</sup>即可得到其第  $k$  阶谐波的分量：

$$\dot{I}_k = I_k \angle \varphi_{ik} \quad (7)$$

式中  $I_k$ 、 $\varphi_{ik}$  为第  $k$  阶谐波电流幅值与相角。

为简化软件仿真模型并使其具有泛用性，结合波形采样规则，定义各次电压幅值与相位：

$$V_k = \begin{cases} V_N, & k=0 \\ \sqrt{2}V_N, & \text{其他} \end{cases} \quad (8)$$

$$\varphi_{vk} = \begin{cases} 0, & S_{vk}=1 \\ \pi, & S_{vk}=0 \end{cases} \quad (9)$$

式中： $V_k$ 为第  $k$  阶谐波电压幅值； $V_N$ 取我国居民用电标准电压 220V； $\varphi_{vk}$ 为第  $k$  阶谐波电压相角； $S_{vk}$ 为电压方向参数，默认值为 1，代表正方向。

因此，各次谐波电压向量表示为

$$\dot{V}_k = V_k \angle \varphi_{vk} \quad (10)$$

此外，需计算各次电流谐波占比  $\eta_k=I_k/I_1$ ，并定义谐波主成分次数集合  $m$ ，以便于后续仿真操作进行，其判别依据如式(11)所示。

$$\begin{cases} k \in m, & \eta_k \geq 1\% \\ k \notin m, & \eta_k < 1\% \end{cases} \quad (11)$$

### 1.4 谐波阻抗/导纳计算

首先计算出单个周期内第  $k$  阶谐波导纳的幅值与相角为：

$$Y_k = I_k / V_k \quad (12)$$

$$\varphi_{yk} = \varphi_{ik} - \varphi_{vk} \quad (13)$$

式中  $Y_k$ 、 $\varphi_{yk}$  为第  $k$  阶谐波导纳向量的幅值与相角，则该次谐波导纳向量表达为  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  形式。

根据导纳的定义，进一步求出居民负荷各次谐波电阻、电抗参数表达式如下：

$$R_k = 1 / G_k = 1 / (Y_k \cos \varphi_{yk}) \quad (14)$$

$$X_k = -1 / B_k = 1 / (-Y_k \sin \varphi_{yk}) \quad (15)$$

式中： $R_k/X_k$ 分别为第  $k$  次谐波电阻/电抗参数； $G_k/B_k$ 为电导/电纳参数。

FFT 分解后观察第  $k$  阶谐波导纳向量  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  的分布情况：若  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  位于第二、三象限，即  $G_k < 0$ ， $R_k < 0$ ，考虑到 Simulink 仿真软件中不存在负电阻，故基于导纳转移方法，引入式(9)中电源方向参数  $S_{vk}$ ，通过调节该参数的取值将谐波导纳向量约束至第一、四象限(如图 4 所示)以便于仿真验证，导纳转移具体方法为：

1) 当  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  位于第一象限时， $G_k > 0$ ， $R_k > 0$ ， $B_k > 0$ ， $X_k < 0$ ，此时电阻参数为正，不需要进行导纳转移，电抗参数为负，表现为容性；

2) 当  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  位于第二象限时， $G_k < 0$ ， $R_k < 0$ ， $B_k > 0$ ， $X_k < 0$ ，此时电阻参数为负，电抗参数为负，表现为容性；令式(9)中电压方向参数  $S_{vk}$  为 0，即将该次谐波供电电压源反相，则此时  $\varphi_{vk}$  由 0 变为  $\pi$ ，

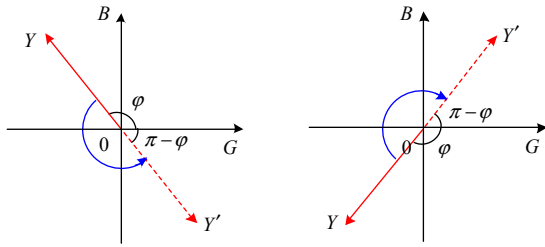


图4 导纳转移示意图

Fig. 4 Diagram of admittance transfer

反相后电阻  $R_k=1/Y_k \cos(\varphi_{yk}-\pi)=-1/Y_k \cos \varphi_{yk}>0$ , 电抗参数  $X_k=-1/Y_k \sin(\varphi_{yk}-\pi)=1/Y_k \cos \varphi_{yk}$  与反相前电抗方向相反为正, 表现为感性, 因此  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  从第二象限转移至第四象限;

3) 当  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  位于第三象限时,  $G_k<0, R_k<0, B_k<0, X_k>0$ , 此时电阻参数为负, 电抗参数为正, 表现为感性; 令式(9)中电压方向参数  $S_{vk}$  为 0, 即将该次谐波供电电压源反相, 则此时  $\varphi_{vk}$  由 0 变为  $\pi$ , 反相后电阻  $R_k=1/Y_k \cos(\varphi_{yk}-\pi)=-1/Y_k \cos \varphi_{yk}>0$ , 电抗参数  $X_k=-1/Y_k \sin(\varphi_{yk}-\pi)=1/Y_k \cos \varphi_{yk}$  与反相前电抗方向相反为负, 表现为容性, 因此  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  从第三象限转移至第一象限;

4) 当  $Y_k \angle \varphi_{yk}$  位于第四象限时,  $G_k>0, R_k>0, B_k<0, X_k>0$ , 此时电阻参数为正, 不需要进行导纳转移, 电抗参数为正, 表现为感性。

根据上述导纳转移步骤, 更新电阻、电抗参数:

$$R_{tk} = \begin{cases} 1/(Y_k \cos \varphi_{yk}), & R_k > 0 \\ -1/(Y_k \cos \varphi_{yk}), & R_k < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$X_{tk} = \begin{cases} -1/(Y_k \sin \varphi_{yk}), & R_k > 0 \\ 1/(Y_k \sin \varphi_{yk}), & R_k < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中  $R_{tk}, X_{tk}$  分别为更新后的电阻、电抗参数。

计算各次谐波的电感/电容参数, 如式(18)、(19)所示:

$$L_{tk} = \frac{X_{tk}}{\omega} = \frac{X_{tk}}{2\pi f} \quad (18)$$

$$C_{tk} = \frac{1}{\omega X_{tk}} = \frac{1}{2\pi f X_{tk}} \quad (19)$$

式中  $L_{tk}/C_{tk}$  分别为第  $k$  次谐波电感/电容参数。

求取所有周期的各次谐波导纳参数序列  $\{R_{tk0}, R_{tk1}, \dots, R_{tki}\} \{L_{tk0}, L_{tk1}, \dots, L_{tki}\}$  及  $\{C_{tk0}, C_{tk1}, \dots, C_{tki}\}$ , 其中  $i$  为周期个数动态索引, 以时间  $t=i/f$  为自变量, 各次谐波导纳参数为因变量, 利用多项式拟合将离散的谐波导纳参数序列转换为连续的时变函数  $R_{tk}(t), L_{tk}(t), C_{tk}(t)$ , 此即为动态谐波导纳参数。

### 1.5 随机误差模拟

实际情况中, 同类型(包括种类与型号)负荷样本间由于生产工艺、储存情况等客观因素影响, 存在一定程度上的个体差异。经大量计算验证, 同类型负荷谐波导纳参数近似服从正态分布。若将服从正态分布的随机变量引入动态谐波导纳参数中, 则可得到一个电流波形区间, 此区间即为该负荷任意一种潜在的电流波形组成的集合, 且由于随机误差引起的电流波形差异都应反映在此区间范围内, 此方法有利于提高负荷数据的随机性、拟真性与丰富性。具体步骤为:

1) 对一定数量同类型负荷进行谐波导纳参数计算, 得出各次谐波导纳参数序列的均值  $\mu$  和标准差  $\sigma$ ;

2) 在动态谐波导纳参数中引入随机变量  $x$ , 根据正态分布概率密度对随机变量  $x$  赋值, 并将其引入动态谐波导纳参数中, 其概率密度  $f(x)$  表达式如式(20)所示:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (20)$$

动态谐波导纳参数表达式更新为:

$$R'_{tk}(t) = R_{tk}(t) + x_{rk} \quad (21)$$

$$L'_{tk}(t) = L_{tk}(t) + x_{lk} \quad (22)$$

$$C'_{tk}(t) = C_{tk}(t) + x_{ck} \quad (23)$$

式中:  $R_{tk}/L_{tk}/C_{tk}$  与  $R'_{tk}/L'_{tk}/C'_{tk}$  分别为更新前后的电阻/电感/电容参数;  $x_{rk}/x_{lk}/x_{ck}$  为电阻/电感/电容参数中对应的随机变量。

最终多个负荷模型根据时序组合相互叠加即可构建长时间段居民用电场景。

## 2 基于动态谐波导纳参数的负荷仿真模型

基于动态参数的居民负荷数据模拟生成系统基本结构如图5所示。

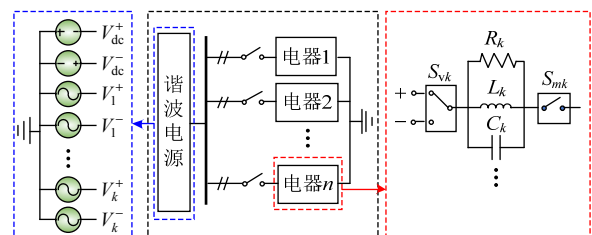


图5 基于动态谐波导纳参数的居民负荷数据模拟生成系统基本结构

Fig. 5 Basic structure of residential load data simulation generation system based on dynamic harmonic admittance parameters

图5中： $V_{dc+/-}$ 为用于生成电流直流分量的正向/反向直流电压源； $V_{k+/-}(k=1,2\cdots 15)$ 分别为用于生成各次谐波电流的相应频率正向/反向的交流电压源； $S_{vk}$ 为电源方向选择开关； $S_{mk}$ 为谐波主成分选择开关，若该次谐波分量占总成分比例大于1%，则开关状态为开通；若该次谐波分量占总成分比例小于1%，则开关状态为关断； $R_k$ 、 $L_k$ 、 $C_k$ 均为时变量。具体模型实现过程如下：

谐波电源等效模型：电源的幅值与相位参考式(8)、(9)。

电器等效模型：根据计算得到的动态谐波导纳参数  $R'_{ik}/L'_{ik}/C'_{ik}$  可分别对电器负荷模型中基础元件可变电阻  $R_k$ /可变电感  $L_k$ /可变电容  $C_k$  赋值；电源方向选择开关  $S_{vk}$  的控制信号，根据1.4节中导纳转移方法给出；谐波主成分选择开关  $S_{mk}$  的控制信号，则根据1.3节式(11)中谐波主成分次数集合  $m$  给出，若该次谐波属于  $m$ ，则输出开通过信号；上述元件按图5组合后可构成单次谐波导纳等效模型，若将各次单次模型输出端相连即可得到电器等效模型。

最后将多个电器仿真模型输出端相连并接地形成回路，在连接点处可测得多复合负荷的电流仿真数据。

### 3 仿真验证

#### 3.1 仿真效果评价指标

##### 3.1.1 决定系数

评价指标(evaluation index, EI)中，决定系数也称为拟合优度，本文写作  $E_{I-R^2}$ ，常用作线性/非线性回归的拟合效果评估指标<sup>[28]</sup>。 $E_{I-R^2}$  由下式计算：

$$E_{I-R^2} = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \quad (24)$$

式中： $y$  为样本真实值； $\hat{y}$  为预测值。

$E_{I-R^2}$  越接近1，代表真实值与预测值由自变量引起的变动相关程度越高，能一定程度上反映曲线拟合效果。

##### 3.1.2 非线性相关系数

为描述非线性回归曲线拟合优度，A. Afifi 效仿线性回归中相关系数的定义，提出一种非线性相关系数  $E_{I-R_{NL}}$ ，作为曲线相关性的评价指标<sup>[29]</sup>。其表达式如下：

$$E_{I-R_{NL}} = \frac{\sum (y - \bar{y})(\hat{y} - \bar{\hat{y}})}{\sqrt{\sum (y - \bar{y})^2 \sum (\hat{y} - \bar{\hat{y}})^2}} \quad (25)$$

式中： $\bar{y}$  为真实值的平均值； $\bar{\hat{y}}$  为预测值的平均值； $E_{I-R_{NL}}$  的取值范围为(0,1]，越接近1表明真实值与预测值呈更好的正线性相关关系。

##### 3.1.3 曲线回归统一拟合优度

张世强<sup>[30]</sup>将残差平方和与相对误差有机地结合在一起，提出新的回归曲线优劣标准，其定义如下：

$$E_{I-R_{NL}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum y^2}} \quad (26)$$

其几何意义清晰且计算简单， $E_{I-R_{NL}}$  愈接近于1，表示曲线  $\hat{y}$  的拟合优度愈好。

##### 3.1.4 角余弦系数

若将真实值  $y$  与预测值  $\hat{y}$  视为  $N$  维空间中的向量，两者之间的夹角  $\theta$  越小，则可认为用  $\hat{y}$  估计  $y$  效果越好，可定义辅助拟合优度指标角余弦系数  $E_{I-FR}$ ：

$$E_{I-FR} = \cos \theta = \frac{\sum y\hat{y}}{\sqrt{\sum y^2} \sqrt{\sum \hat{y}^2}} \quad (27)$$

##### 3.1.5 微元交并比

交并比(intersection of union, IoU)通过计算“预测框”和“真实框”的交叠率，即它们的交集和并集的比值以解释2个图像的重合程度<sup>[31]</sup>。本文在  $I_{oU}$  的基础上提出一种可反映曲线间拟合程度的评价指标微元交并比  $E_{I-IoU}$  指标，其原理如图6所示。

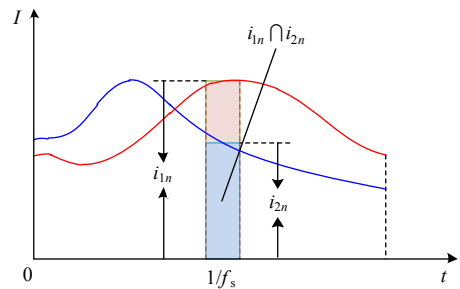


图6  $E_{I-IoU}$  计算原理图

Fig. 6 Calculation principle of  $E_{I-IoU}$

对周期级电流波形、时间轴与纵轴围成的两个曲边梯形框进行分析：由于时间轴与纵轴的限制相同，唯一变量即为波形曲线边界，故  $E_{I-IoU}$  反映的形状框重合程度也可表示两条波形曲线的贴合程度。考虑到实测及仿真所获得的数据均为离散点，则可将上述曲边梯形进一步细分为一系列宽度为  $1/f_s$  的小矩形( $f_s$  为实测及仿真的采样频率)，则整段波形曲线的交集/并集值可由每一组小矩形的交集/并集值求和得到。则其计算公式如下：

$$E_{I_{toU}} = \sum_{n=1}^N \frac{\min[|i_r(n)|, |i_f(n)|]}{\max[|i_r(n)|, |i_f(n)|]} \quad (28)$$

式中： $i_r$ 为电流实测值数列； $i_f$ 为电流仿真值数列。

### 3.2 算例分析

本文利用如图 7 所示的录波插座对数常见种居民电气负荷的电流波形进行了采样，作为算例分析的数据来源。设备详细参数见附录 A。



图 7 录波插座

Fig. 7 Wave Record Socket

对 PLAID 公共数据集中 11 种电器数据进行 FFT 分解与谐波主成分分析，结果如图 8 所示。图中，横轴为谐波次数，纵轴为谐波分量累计占比。当谐波分量累计占比超过 90%时，定义该次及以下的谐波为主要谐波分量的选取范围，更高次谐波可忽略不计。由图可知，在大部分家用电器中，主要谐波分量大多分布在 15 次谐波之前，而谐波含量较高的电器如笔记本电脑、荧光灯的主要谐波分量的范围上界可达 30 次左右。因此，在数据采样设备采样频率限制下，为兼顾方法的运算速度与模拟精度，在实际仿真中，只选择电气负荷前 15 次谐波分量及直流分量作为主要研究对象。经大量仿

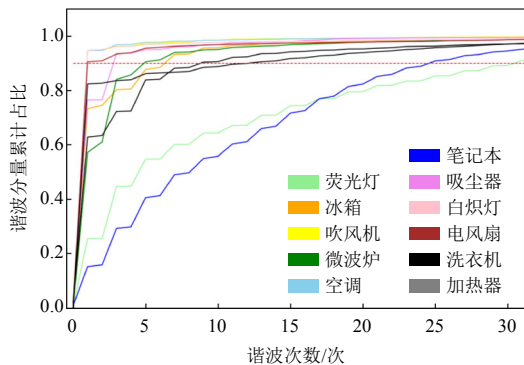


图 8 PLAID 中电器谐波分布情况

Fig. 8 Harmonic distribution of electric appliance in PLAID

真实验，发现荧光灯及笔记本电脑负荷在只考虑前 15 次谐波的情况下，也能获得较高的准确度，故认为此选取原则具有可行性。

基于负荷开启时电流幅值的时变特征，可将常见居民用电负荷分为以下 3 类：

1) 开关负荷：其工作期间稳态电流波形不随时间变化，保持在某一数值附近。例如无保温功能的电热水壶、白炽灯等；

2) 多状态负荷：其电流根据幅值大小分为多个阶段，在各阶段内电流幅值不随时间变化。例如多档位电吹风等；

3) 连续变化负荷：其电流幅值随时间变化，且表现出非线性特点。例如空调、带有连续调光功能的台灯等。

其中多状态负荷可视为多个开关负荷的叠加，这两种负荷对应到等效阻抗模型中，可视为恒阻抗负荷；连续变化负荷需要计算多个周期的谐波阻抗值，进行非线性拟合得到阻抗关于时间的变化函数。为了评估所提出基于动态参数的居民负荷数据模拟生成方法的有效性与可靠性，本文将针对单状态负荷(可视为多个单周期波形叠加)与连续变化负荷，分别在工频周期尺度及长时间段尺度上对算例进行仿真验证，并在此基础上对后续区间电流生成与多负荷用电场景构建进行模拟试验。

#### 3.2.1 单负荷周期级波形仿真

分别使用本文提出的动态谐波导纳参数(dynamic harmonic admittance parameters, DHAP)方法与文献[32]提出的模型驱动(model driven, MD)方法对电阻类(R)、阻感类(X)、带有功率因数校正电路的电子类(P)、无功功率因数校正电路的电子类(NP) 4 种常见家用负荷种类实测周期电流波形进行拟合及数据生成以考察其波形模拟效果，并基于 3.1 节的评价指标对比分析两中方法的拟合效果。其中本文以 NP 类负荷作为重点研究对象进行详细论述，其余 3 类负荷仿真结果可在附录 B 获得。

NP 类负载包括笔记本电脑等常用家庭电气设备。图 9 为某品牌笔记本电脑正常工作时的电压电流波形。笔记本属于无功功率因数校正电路的电子类负载，其电流波形较陡，整体电流波形表现为周期性脉冲波形，其谐波含量非常高。

经计算，笔记本电脑工作时稳态电流中谐波成分为直流分量(2.60%)、基波(25.62%)、3 次谐波(17.38%)、5 次谐波(17.04%)、7 次谐波(11.16%)、

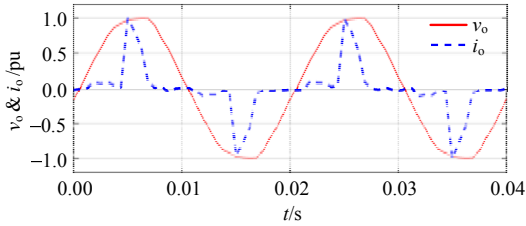


图9 笔记本实测电压电流波形

Fig. 9 Measured voltage and current waveform of laptop

9次谐波(7.16%)、11次谐波(5.17%)、13次谐波(5.72%)、15次谐波(7.15%)。由此可知,谐波主成分选择开关状态为

$$S_{mk} = \begin{cases} 1, & k=0,1,3,5,7,9,11,13,15 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

计算各次谐波阻抗具体参数及电源方向选择开关  $S_{vk}$  状态如表1所示。

表1 笔记本电脑仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulation model of a laptop

谐波次数	电阻 $R_k/\Omega$	电感 $L_k/H$	电容 $C_k/F$	电源方向 $S_{vk}$
0	14 545.45	$1e^8$	$1e^{-16}$	1
1	2 228.59	$1e^8$	$5.34e^{-7}$	1
3	4 198.73	$1e^8$	$2.35e^{-7}$	1
5	7 949.13	$1e^8$	$1.86e^{-7}$	1
7	16 254.85	2.28	$1e^{-16}$	-1
9	8 526.90	5.47	$1e^{-16}$	-1
11	17 783.27	$1e^8$	$2.27e^{-8}$	-1
13	16 647.12	2.77	$1e^{-16}$	1
15	8 062.94	4.23	$1e^{-16}$	1

图10为使用MD方法/DHAP方法时的电冰箱仿真电流波形。经计算,MD法生成波形拟合效果指标  $E_{I-IoU}=0.852$ ,  $E_{I-R^2}=0.104$ ,  $E_{I-F_{NL}}=0.614$ ,  $E_{I-R_{NL}}=0.053$ ,  $E_{I-FR}=0.602$ ; DHAP法生成波形拟合效果指标  $E_{I-IoU}=0.936$ ,  $E_{I-R^2}=0.939$ ,  $E_{I-F_{NL}}=0.980$ ,  $E_{I-R_{NL}}=0.758$ ,  $E_{I-FR}=0.970$ 。对于NP类负荷,MD方法已不具备高效拟合实测波形的能力,各项指标均大幅低于DHAP法。

其余3类负荷的计算仿真过程与此类似,最终MD法与DHAP法对周期级电器电流仿真波形拟合效果对比如表2所示。

由表2可知,由DHAP获得的不同种类家用负荷电流仿真波形与原始波形相关程度与重合程度均明显高于MD方法,说明本文方法具有更好的拟合效果、更可靠的负荷数据生成能力与更强的泛用性以应用于各种电气负荷的数据生成。

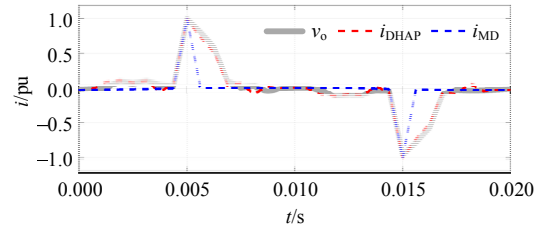


图10 笔记本仿真电流波形

Fig. 10 Simulation current waveform of a laptop

表2 不同方法仿真效果指标

Table 2 Simulation effect index of different methods

算例 指标\方法	1.R类负载		2.X类负载		3.P类负载		4.NP类负载	
	MD	DHAP	MD	DHAP	MD	DHAP	MD	DHAP
$E_{I-IoU}$	0.937	0.983	0.889	0.974	0.839	0.979	0.852	0.936
$E_{I-R^2}$	0.993	0.999	0.953	0.998	0.914	0.986	0.104	0.939
$E_{I-F_{NL}}$	0.999	0.999	0.990	0.999	0.966	0.995	0.614	0.980
$E_{I-R_{NL}}$	0.918	0.969	0.783	0.956	0.707	0.883	0.053	0.758
$E_{I-FR}$	0.997	0.999	0.977	0.999	0.960	0.996	0.602	0.970

在单负荷周期波形的基础上引入服从正态分布的随机变量。首先,本文对PLAID共用数据集同种规格(额定功率约36W)共68组电风扇负荷稳态周期级电流波形进行采样,如图11所示。

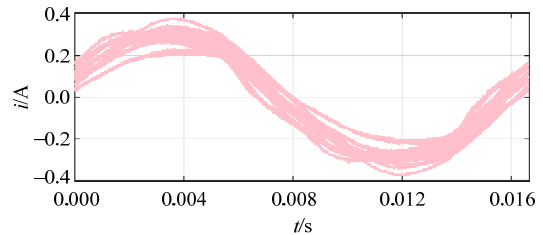


图11 PLAID中电风扇周期电流波形

Fig. 11 Periodic current waveform of fans in PLAID

经快速傅里叶变换谐波分解可知,电流中谐波主成分为基波、3次谐波、5次谐波,其中基波与5次谐波表现出感性特性,可由并联RL组合等效生成,3次谐波表现出容性特性,可由并联RC组合等效生成。可知,谐波主成分选择开关状态为

$$S_{mk} = \begin{cases} 1, & k=1,3,5 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

假设各参数服从误差分布区间上的正态分布,根据式(27)—(30),计算得出概率分布参数:

- ◆  $R_1 \sim N[2\ 161.5, 229\ 920.3]$ ;
- ◆  $R_3 \sim N[24\ 490.0, 41\ 130\ 844.4]$ ;
- ◆  $R_5 \sim N[59\ 625.0, 290\ 418\ 402.8]$ ;
- ◆  $L_1 \sim N[1.64, 0.006\ 4]$ ;
- ◆  $L_5 \sim N[48.5, 164.7]$ ;
- ◆  $C_3 \sim N[6.6e-08, 3.5e-16]$ 。

由此可计算各次谐波阻抗具体参数及电源方

向选择开关  $S_{vk}$  状态如表 3 所示。

表 3 仿真模型参数

Table 3 Parameters of simulation model

谐波次数	电阻 $R_k/\Omega$	电感 $L_k/H$	电容 $C_k/F$	电源方向 $S_{vk}$
1	$R_1$	$L_1$	$1e^{-16}$	1
3	$R_3$	$1e^8$	$C_3$	1
5	$R_5$	$L_5$	$1e^{-16}$	-1

经 120 次仿真后，生成电流波形范围如图 12 所示，图中红色虚线为电流波形的上、下限。生成区间电流平均有功功率为 35.92 W，最大电流幅值 0.32 A，最小电流幅值 0.23 A，位于实测波形误差限度范围之内。因此，基于本文动态参数方法搭建的居民负荷模型不仅能拟合已有实测波形的能力，也能遵循误差规律自主生成从未采集过但符合理论及现实依据的电流波形，极大提升了所生成数据的丰富程度。

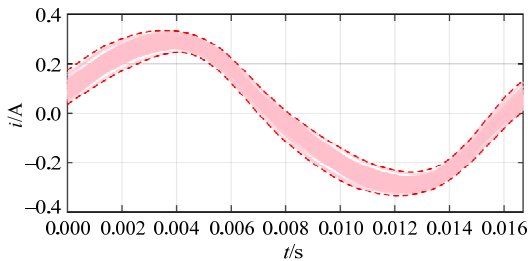


图 12 区间电流波形

Fig. 12 Current range waveform

### 3.2.2 单负荷长时间连续变化波形仿真

本文方法不仅能生成周期级短时间跨度的波形数据，以运用于简单开关负荷的数据生成，还可以拟合生成长时间段的动态波形，进一步对连续变化负荷进行波形数据生成，这是现有其他方法所不具备的能力。本文展示了一台某品牌立式空调的电流采样结果，实测电流波形经 1.2.2 节中规范化预处理后的电流波形如图 13 所示。

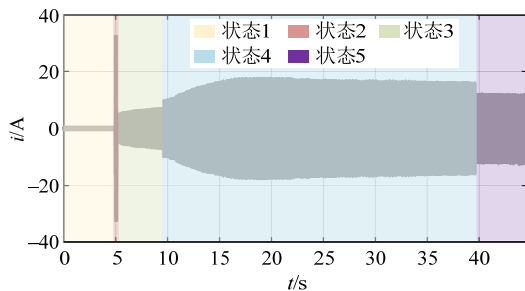


图 13 立式空调实测电流波形

Fig. 13 Measured current waveform of a vertical air conditioner

由图 13 可知，在长达 44.6s 的运行时间内，电流波形可大致分为 5 个部分，分别对应空调 5 种不

同的工作状态：

1) 状态 1 为待机状态，电流成分主要为线路噪声，持续时间段为[0, 5]s；

2) 状态 2 为开机瞬间状态，电流成分主要为脉冲电流，持续时间段为(5, 5.1]s；

3) 状态 3/4/5 均为空调正常运行时的稳态电流，通过幅值大小予以区分，其中：①状态 3 持续时间段为(5.1, 9.6]s；②状态 4 持续时间段为(9.6, 39.6]s；③状态 5 持续时间段为(39.6, 44.6]s。

各状态标幺化平均电流波形如图 14 所示。

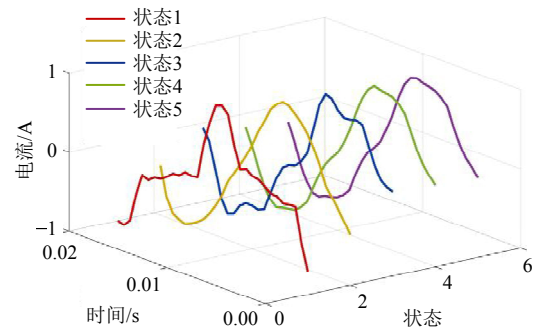


图 14 状态 1 周期级平均电流波形

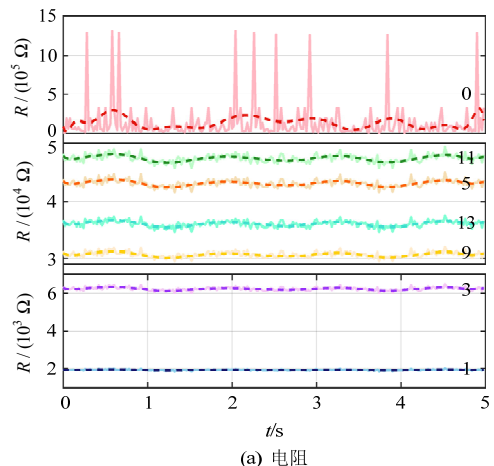
Fig. 14 Average current waveform at cycle level of State 1

由于各状态之间存在电流幅值的突变，若不将其分割开，则会造成 Simulink 仿真失败。本文以状态 1 为重点研究对象予以计算仿真，其余状态的计算机仿真结果可在附录 C 获取。

经计算，状态 1 周期级电流波形中谐波主成分为直流分量(3.51%)、基波(50.67%)、3 次谐波(23.71%)、5 次谐波 11.73%)、9 次谐波(3.70%)、11 次谐波(2.00%)、13 次谐波(2.26%)。由此可知，谐波主成分选择开关状态为

$$S_{mk} = \begin{cases} 1, & k=0,1,3,5,9,11,13 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (31)$$

计算得到  $R$ 、 $L$ 、 $C$  的具体参数并进行多项式拟合得到时变函数曲线如图 15(a)–(c)所示。



(a) 电阻

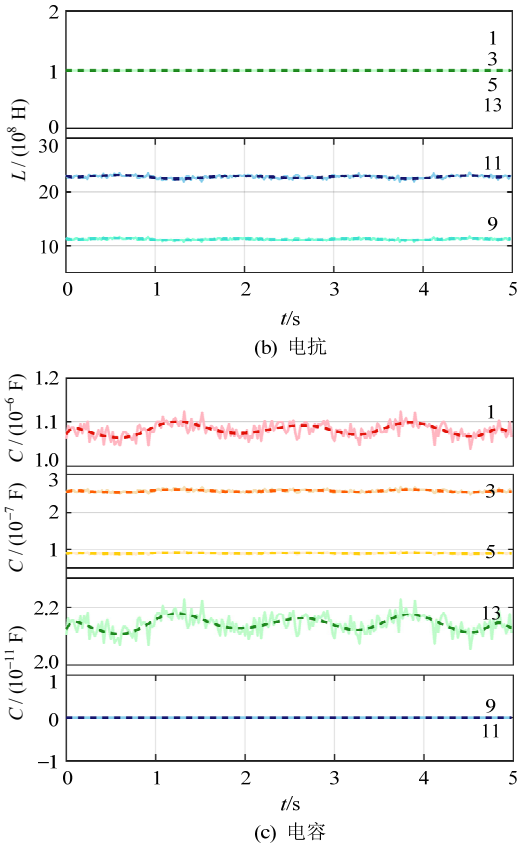


图 15 状态 1 动态参数及拟合曲线

Fig. 15 Dynamic parameters and fitting curves of State 1

电源方向选择开关  $S_{vk}$  状态如表 4 所示。

表 4 状态 1 电源方向

Table 4 Source direction of State 1

谐波次数	0	1	3	5	7	11	13
电源方向 $S_{vk}$	1	-1	-1	-1	-1	-1	1

通过上述状态 1 计算结果与附录 C 内容, 已获得了状态 1~5 的各自独立仿真结果, 现在根据时序改变状态开关的通断将 5 个状态进行时序组合, 仿真得到最终电流仿真波形如图 16 所示。

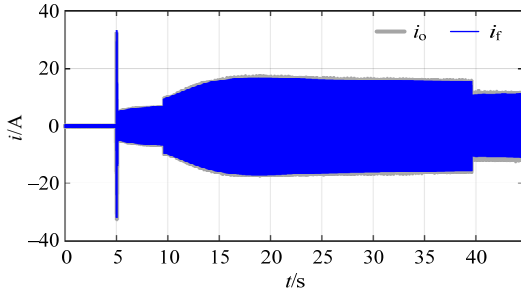


图 16 全过程电流仿真波形

Fig. 16 Overall process current simulation waveform

仿真过程中每个周期原始波形与仿真波形的拟合程度可由交并比  $E_{I-IoU}$  与决定系数  $E_{I-R^2}$  反映, 如图 17 所示, 状态 1~2、状态 2~3 切换瞬间拟合效果较差, 这是因为状态切换时电流幅值突变过大;

其余状态拟合效果较好。45 s 整体仿真过程平均  $E_{I-IoU}$  为 0.936, 平均  $E_{I-R^2}$  为 0.982, 平均  $E_{I-I_{NL}}$  为 0.993, 平均  $E_{I-R_{NL}}$  为 0.873, 平均  $E_{I-FR}$  为 0.991。说明所生成波形与原始波形的相关程度与重合程度均能够满足其作为负荷辨识算法数据库来源要求。

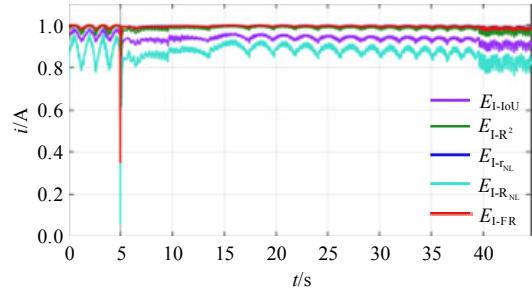


图 17 全过程电流拟合效果

Fig. 17 Overall process current fitting result

基于 3.2.1、3.2.2 节中单种类电器负荷模型, 本文通过对其进行时序组合, 构建了涉及多种负荷开关状态叠加的居民用电场景。假定场景时间跨度为夏季某日 19:30—22:00 共 150 min, 使用的电器包括电视机 1 台、笔记本电脑空调 1 台、电热水壶 1 个及立式空调 1 台, 根据用户用电行为习惯与电气负荷使用规律, 确定各电器开关状态情况如表 5 所示。

表 5 电器开关状态

Table 5 The on/off state of electrical appliances

电器种类	负荷种类	开关状态情况
电视机	开关负荷	19:45—21:10
笔记本电脑	开关负荷	20:30—21:20
电热水壶	开关负荷	20:40—20:45
空调	连续变化负荷	19:30—22:00 运行间隔 600 s

图 18 为 4 种电器负荷模型及底噪模型叠加后的仿真波形, 其中灰色区域  $i_{sum}$  为总电流;  $i_1$  为空调电流;  $i_2$  为电热水壶电流;  $i_3$  为电视机电流;  $i_4$  为笔记本电脑电流;  $i_5$  为底噪。

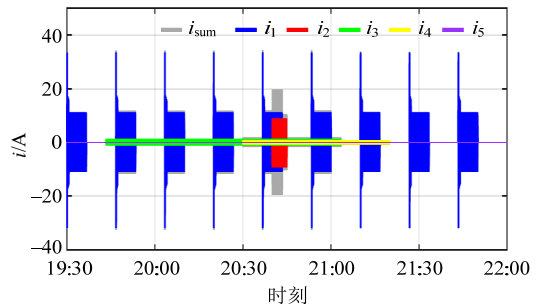


图 18 电器用电情况仿真波形

Fig. 18 Simulation waveform of power consumption

由图 18 可知, 各电器电流波形与总电流波形符合基本电流叠加定理, 总电流波形规律符合用户用电行为习惯与电气负荷使用规律, 可作为电量分解的训练数据。

#### 4 结论与展望

本文提出一种基于动态谐波导纳参数的居民负荷数据模拟生成技术, 该技术通过对少量实测负荷数据进行谐波分解、阻抗转移等分析处理, 计算得到负荷动态谐波导纳参数, 并以此为基础建立居民负荷数学及仿真模型。经过在 Simulink 平台仿真验证可知:

1) 针对简单开关负荷与连续变化负荷电流数据模拟生成, 本文提出的 DHAP 方法均保持较高的精确度与拟真度;

2) 本文方法适应各时间跨度等级, 在面向单一负荷种类辨识的周期级电流生成与面向复杂电情况电量分解的长时间段多负荷叠加电流生成均有良好的表现;

3) 引入的随机变量能够有效产生计及个体差异的负荷区间电流。

基于上述结论, 本文所提出方法具有以下优势:

1) 利用仿真模拟的方法生成数据, 不再受制于实际数据采样条件, 解决了现有数据集在样本规模与种类广泛性上的缺陷, 同时相较于建立实测数据集, 仿真模拟在经济型上更具优势;

2) 提出基于动态谐波导纳参数的数据模拟生成方法, 并通过大量仿真验证所生成数据在多负荷种类、多时间尺度(包括工频周期尺度及长时间尺度)的拟真性、广泛性及应用范围;

3) 引入服从正态分布的随机变量, 模拟同类型负荷样本间的个体差异, 在保证科学性的同时, 提高了所生成数据的丰富性。

因此, 本文方法所生成的负荷数据能够作为 NILM 中数据集的可靠来源。

#### 参考文献

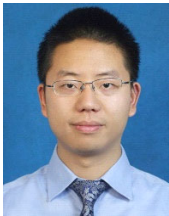
- [1] 魏广芬, 赵航, 胡春华, 等. 基于香农熵加权投票算法的集成式非侵入式负荷识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(24): 8876-8887.  
WEI Guangfen, ZHAO Hang, HU Chunhua, et al. An ensemble non-intrusive load identification method based on Shannon entropy weighted voting algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(24): 8876-8887(in Chinese).
- [2] 武昕, 焦点, 高宇辰. 基于非侵入式用电数据分解的自适应特征库构建与负荷辨识[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 101-109.  
WU Xin, JIAO Dian, GAO Yuchen. Construction of adaptive feature library and load identification based on decomposition of non-intrusive power consumption data [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(4): 101-109(in Chinese).
- [3] HART G W. Nonintrusive appliance load monitoring [J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(12): 1870-1891.
- [4] 邓晓平, 张桂青, 魏庆来, 等. 非侵入式负荷监测综述[J]. 自动化学报, 2022, 48(3): 644-663.  
DENG Xiaoping, ZHANG Guiqing, WEI Qinglai, et al. A survey on the non-intrusive load monitoring[J]. Acta Automatica Sinica, 2022, 48(3): 644-663(in Chinese).
- [5] 邓旭晖, 陈中, 杨凯, 等. 基于多任务学习卷积网络的非侵入式负荷监测方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8): 189-197.  
DENG Xuhui, CHEN Zhong, YANG Kai, et al. Non-intrusive load monitoring method based on multi-task learning convolutional network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8): 189-197(in Chinese).
- [6] 宋旭帆, 周明, 涂京, 等. 基于  $k$ -NN 结合核 Fisher 判别的非侵入式负荷监测方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 73-80.  
SONG Xufan, ZHOU Ming, TU Jing, et al. Non-intrusive load monitoring method based on  $k$ -NN and kernel fisher discriminant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 73-80(in Chinese).
- [7] CHANG H H, CHEN Kunlong, TSAI Y P, et al. A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2): 764-771.
- [8] 陆俊, 朱炎平, 彭文昊, 等. 计及用电行为聚类的智能小区互动化需求响应方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 113-120.  
LU Jun, ZHU Yanping, PENG Wenhao, et al. Interactive demand response method of smart community considering clustering of electricity consumption behavior [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 113-120(in Chinese).
- [9] 肖潇, 栾文鹏, 刘博, 等. 基于电器粗糙归类的无监督 NILM 结果自主标注[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2462-2473.  
XIAO Xiao, LUAN Wenpeng, LIU Bo, et al. Autonomous labeling of unsupervised NILM results based on rough classification of appliances[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2462-2473(in Chinese).

- [10] 王谱宇, 耿路路, 刘兴江, 等. 基于在线特征库的非侵入式负荷特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3489-3500.  
WANG Puyu, GEN Lulu, LIU Xingjiang, et al. Non-intrusive load feature extraction method based on online feature library[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3489-3500(in Chinese).
- [11] 陈鑫沛, 余涛, 杨家俊, 等. 基于设备行为关联图的非侵入式多标签负荷分解改进方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(1): 95-104.  
CHEN Xinpei, YU Tao, Yang Jiajun, et al. An improved non-invasive multi-label load disaggregation method based on appliance behavior correlation graph [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(1): 95-104(in Chinese).
- [12] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8.  
YU Yixin, LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8(in Chinese).
- [13] 袁博, 葛少云, 刘洪. 压缩感知在非侵入式负荷监测中的应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6416-6431.  
YUAN Bo, Ge Shaoyun, LIU Hong. Application prospect of compressed sensing in non-intrusive load monitoring [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6416-6431(in Chinese).
- [14] 余贻鑫, 刘博, 栾文鹏. 非侵入式居民电力负荷监测与分解技术[J]. 南方电网技术, 2013, 7(4): 1-5.  
YU Yixin, LIU Bo, LUAN Wenpeng. Nonintrusive residential load monitoring and decomposition technology [J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(4): 1-5(in Chinese).
- [15] 娄藕蝶. 非侵入式负荷特征提取与识别研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.  
LOU Oudie. Research on non-intrusive load feature extraction and load recognition[D]. Nanjing: Southeast University, 2018(in Chinese).
- [16] 程祥, 李林芝, 吴浩, 等. 非侵入式负荷监测与分解研究综述[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3108-3117.  
CHENG Xiang, LI Linzhi, WU Hao, et al. A survey of the research on non-intrusive load monitoring and disaggregation[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3108-3117(in Chinese).
- [17] SINGH S, MAJUMDAR A. Deep sparse coding for non-intrusive load monitoring[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4669-4678.
- [18] ANDERSON K, OCNEANU A, BENITEZ D, et al. Blued: A fully labeled public dataset for event-based non-intrusive load monitoring research[C]//Proceedings of the 2nd KDD Workshop on Data Mining Applications in Sustainability. Beijing, China: ACM, 2012: 12-16.
- [19] KOLTER J, JOHNSON M. Redd: a public data set for energy disaggregation research[C]//The 1st SustKDD Workshop on Data Mining Applications in Sustainability. San Diego, USA: ACM, 2011: 1-6.
- [20] KELLY J, KNOTTENBELT W. The UK-DALE dataset, domestic appliance-level electricity demand and whole-house demand from five uk homes[J]. Scientific Data, 2015, 2: A150007.
- [21] JAZIZADEH F, AFZALAN M, BECERIK-GERBER B, et al. Embed: a dataset for energy monitoring through building electricity disaggregation[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Future Energy Systems. Karlsruhe, Germany: ACM, 2018: 230-235.
- [22] GAO J, GIRI S, KARA E, et al. Plaid: a public dataset of high-resolution electrical appliance measurements for load identification research : demo abstract [C]//Proceedings of the 1st ACM Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Buildings. Memphis, USA: ACM, 2014: 198-199.
- [23] KAHL M, UI HAQ A, KRIECHBAUMER T, et al. WHITED - a worldwide household and industry transient energy data set[C]//3rd International Workshop on Non-Intrusive Load Monitoring. 2016.
- [24] 施雨松. 基于非侵入式方法的电动自行车充电负荷辨识方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2021.  
SHI Yusong. Research on identification method for electric bicycle charging load based on non-intrusive load monitoring[D]. Nanjing: Southeast University, 2021(in Chinese).
- [25] HE Dawei, DU Liang, YANG Yi, et al. Front-end electronic circuit topology analysis for model-driven classification and monitoring of appliance loads in smart buildings[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2286-2293.
- [26] 刘杰. 基于模型驱动的非侵入式家用电器识别方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
LIU Jie. Research on model-driven non-intrusive household appliance identification method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019(in Chinese).
- [27] LE T, KANG H, KIM H. Household appliance classification using lower odd-numbered harmonics and the bagging decision tree[J]. IEEE Access, 2020, 8: 55937-55952.
- [28] 徐秦, 薛茜, 徐睿. 浅论曲线拟合中的相关指数  $R^2$  [J]. 中国卫生统计, 1992, 9(6): 44-45.  
XU Qin, XUE Qian, XU Rui. Brief discussion on correlation index  $R^2$  in curve fitting[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 1992, 9(6): 44-45(in Chinese).

- [29] AFIFI A, AZEN S. Statistical analysis: a computer oriented approach[J]. New York: Academic Press, 1979: 182-188.
- [30] 张世强. 曲线回归的拟合优度指标的探讨[J]. 中国卫生统计, 2002, 19(1): 9-11.  
ZHANG Shiqiang. Approach on the fitting optimization index of curve regression[J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2002, 19(1): 9-11(in Chinese).
- [31] ZHOU Dingfu, FANG Jin, SONG Xibin, et al. IoU Loss for 2D/3D Object Detection[C]//2019 International Conference on 3D Vision (3DV). Quebec City: IEEE, 2019: 85-94.
- [32] KLEMENJAK C, GOLDSBOROUGH P. Non-intrusive load monitoring: a review and outlook[J]. 2016.

## 附录

<http://ntps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231493>



王谱宇

在线出版日期: 2023-10-26。

收稿日期: 2023-07-13。

## 作者简介:

王谱宇(1989), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为交直流混合电力系统的分析、控制与保护, 非侵入式负荷辨识, puyu.wang@hotmail.com;

丁一帆(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为用户侧非侵入式负荷辨识, yifan.ding.njust@qq.com;

陈鉴祥(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为用户侧非侵入式负荷辨识, jianxiang.chen0210@qq.com;

\*通信作者, 刘兴江(1965), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为电能源技术、化学电池、电化学电容器、薄膜太阳能电池, xjliu@nklps.org;

方凯杰(1993), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为非侵入式负荷辨识、非线性优化算法与电力需求侧响应, kaijiefang@126.com;

程含渺(1988), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为数字化电能计量技术研究, 非侵入式负荷辨识技术与应用, chenghanmiao@whu.edu.cn;

张小平(1967), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为柔性交流输电系统和直流电网的实时仿真、保护和控制, 全球电力能源互联网, 能源联合体/共同体(Energy Union), 智能电网及负荷辨识, 风能和海浪能可再生能源发电的控制, 能量质量, 智能用户, 电力市场分析, x.p.zhang@bham.ac.uk。

(责任编辑 马晓华, 邱丽萍)