

面向非干预式负荷监测的居民负荷微观特性研究

郑小霞, 刘庆强, 林顺富, 李东东, 张铭

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 非干预式负荷监测技术是未来负荷监测的重要发展方向, 基于此技术开发创新性服务产品需要对非干预式负荷监测技术应用基础展开详细研究。建立了非干预式负荷监测应用体系; 提出体系中负荷识别算法的实现原理; 由于负荷特性研究是非干预式负荷监测的基础, 各类创新性服务产品的开发必须以负荷特性研究为基础。对居民负荷的微观特性进行深入研究, 基于实测波形提取了典型电器的多个微观特征参数, 如波峰系数、瞬时功率峰值和有效值、 $V-I$ 特性曲线面积及中心线斜率等, 并提出了各负荷特性特征值的计算方法。该成果为后续的基于非干预式负荷监测的用电可视化服务研究工作打下基础。
关键词: 非干预式负荷监测; 居民负荷; 负荷识别; 负荷特性; 用电可视化

Research of the microscopic signatures of residential loads for NILM

ZHENG Xiao-xia, LIU Qing-qiang, LIN Shun-fu, LI Dong-dong, ZHANG Ming

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Nonintrusive load monitoring (NILM) is an important development direction of the future load monitoring, the development of innovative service product based on NILM needs to carry out a detailed study on application base of NILM. First, the application system of NILM is established; second, the realization principle of identification algorithm in system is proposed. The study of load signatures is the foundation of NILM, the development of all kinds of innovative service product must be based on the load signature research. At last, this paper conducts the research on the microscopic signatures of the typical residential loads and builds their electrical modeling. Several microscopic signature values are extracted from measured current waveforms, such as crest factor, peak and rms values of transient power, area and slope factor of $V-I$ curve, etc, and the calculation method of the load signature values is proposed. Research work and achievement lay the foundation for subsequent electricity visualization research based on NILM.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207088).

Key words: nonintrusive load monitoring; residential load; load identification; load signature; power consumption visualization

中图分类号: TM93 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0062-09

0 引言

清洁高效、使用便捷、应用广泛的电力能源现已成为能源技术革命的中心, 成为各行各业的主要能源消耗形式, 因此实现电力能源的节约节能是实现节能减排的一重要环节。随着节能理念被越来越多的人所接受, 人们节能意识的不断增强, 电力节能技术的发展受到了广泛的关注^[1]。

居民家庭的用电监测, 就是在配电板及用电器等位置设置传感器, 通过无线通信、电力线载波或以太网等方式采集电力消耗量, 并实时显示给用户, 是家庭能源管理系统 (Home Energy Management System, HEMS) 的普遍形式^[2]。现有的用电监测系统在功能上主要分为两类: 一类是只能显示整个家庭的用电量, 而不能显示具体电器的用电消耗量, 这类系统结构简单、成本低且易于实现, 但显示信息单一, 不能指导用户采取具体的节能措施; 另一类是采用分立式传感器监测电器, 不仅能显示整个家庭的用电量, 也能显示具体电器的用电量和用电时间等, 它能够设置每个电器的用电水平, 并规划

基金项目: 国家自然科学基金 (51207088); 上海市重点实验室电站自动化技术实验室 (04DZ05901); 上海电力学院科研基金 (Z-2012-045)

和指导用户采取具体的节能措施, 这类系统是用电监测服务产品未来的发展方向^[3-4]。但是采用分立传感器造成系统硬件成本高、网络结构复杂且不利于用户维护, 不利于技术产品的市场推广和应用。

非干预式负荷监测技术(Non-Intrusive Load Monitoring, NILM)有望解决这一难题^[5]。NILM通过在配电板处安装集中式监测装置, 利用居民负荷特性来识别并细化每个电气设备的操作信息和用电消耗量, 实现集中式监测方案, 具有现有两类监测方案的优点, 即采用集中式传感器降低硬件成本和系统复杂度, 且结合智能负荷识别技术, 能将总用电信息细化至每个电器级别, 指导用户用电, 达到削峰填谷和节能降耗的目的^[6-7]。

实现居民用电的集中式监测方案需要三部分工作内容: 1) 建立非干预式负荷监测体系; 2) 负荷特性研究, 负荷特性是用电设备耗电时特有的电气特征, 主要包括用电设备的电流、有功和无功、谐波、瞬时功率、开关暂态、 $V-I$ 曲线等特性^[8-9]; 3) 负荷识别算法研究。负荷特性研究作为实现非干预式负荷监测技术应用的关键, 决定了居民用电的集中式监测方案的可行性与准确性。

本文第二部分建立了非干预式负荷监测体系, 详细阐述了非干预式负荷监测的应用实现原理, 并基于负荷特性数据库提出负荷识别算法的实现原理; 第三部分对居民负荷特性进行深入研究, 并基于实测波形提取了典型电器的多个微观特征参数, 如波峰系数、瞬时功率峰值和有效值、 $V-I$ 特性曲线面积及中心线斜率等。为后续的基于非干预式负荷监测的用电可视化服务研究工作打下基础。

1 非干预式负荷监测体系

相较于传统的负荷监测方法, 非干预式负荷监测系统的优点如下:

(1) 便于安装维护, NILM 只需要在电力入口处安装表计即可;

(2) 便于数据采集, NILM 不需要侵入系统就可以方便地采集到系统内任一负荷的有用信息;

(3) 便于数据分析, NILM 可以在主站进行数据采集和分析。

非干预式负荷监测系统是未来负荷监测的一个重要发展方向, 并且随着电力系统的不断发展, 会衍生出更多的作用和功能, 开发出其他创新性的产品和服务, 如负荷的分类与识别、监测重要设备的运行状态等^[10-11], 其应用体系如图 1 所示。

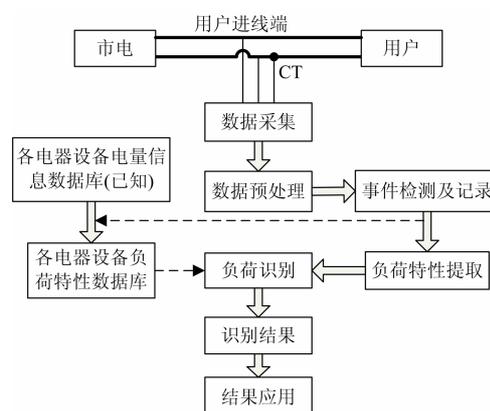


图 1 非干预式负荷监测应用体系结构图

Fig. 1 NILM service system structure

各模块功能如下。

1) 数据采集模块

本模块采集居民进线端节点下所有负荷总的电压电流信息, 采样频率为 2 000 Hz。

2) 数据预处理模块

本模块主要对数据进行预处理, 为后续工作中数据的应用降低计算量, 处理工作主要有电压电流相位调节、数据归一化处理、滤波等。

3) 事件检测及记录模块

本模块监测居民中是否有家用电器状态发生改变(如设备的开启与关断等), 当检测到有事件发生则继续下一步, 若没有则继续监测直到有事件发生。

4) 负荷特性提取模块

本模块是在已检测到有事件发生的条件下对采集到的电量信息进行负荷特性的提取, 其提取的负荷特性主要有 PQ 、谐波特性、 $V-I$ 特性等。

5) 负荷识别模块

本模块在有事件发生的条件下, 依据采集的电压电流信息计算提取负荷特性与已经建立的各用电设备的负荷特性数据库对负荷进行识别, 识别出是哪一负荷状态发生改变, 及改变的状态。

其实现算法原理如下。

已知

$$\Psi = [\psi_1, \psi_2, \psi_3, \dots, \psi_P]^T$$

$$\psi_i = \{f_{i,1}, f_{i,2}, f_{i,3}, \dots, f_{i,M}\}$$

实测数据获得的特征矩阵为

$$\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_M\}$$

所求状态相量为

$$\vec{\mathbf{X}} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_R]^T$$

函数描述为

$$\min_{\vec{X}} \varepsilon_j = m_j(\Theta, Y) = m_j((\Psi^T \vec{X}), Y) =$$

$$m_j\left(\sum_{i=1}^R (x_i \times \psi_i), Y\right) =$$

$$m_j\left(\sum_{i=1}^R (x_i \times f_{i,j}), Y_j\right)$$

其中： Ψ 为进线端节点下所有电器设备的负荷特性矩阵； $f_{i,j}$ 为设备 i 的 j 负荷特性值； M 为数据库中负荷特性的种类数； P 为进行端节点下所有电器设备数； Y 为基于实测数据提取出的各负荷特性值； \vec{X} 为负荷的状态向量（0 表示关断状态，1 表示开状态）；函数 $m_j(\Theta, Y)$ 的功能是求解实测数据与已知负荷特性数据库在负荷特性 j 下的最小差值的状态向量 \vec{X} 。

上述问题可以转化为求解最小二乘问题，可以参照文献[12]采用的基于优化最小二乘支持向量机进行求解或采用智能算法进行直接求解，如神经网络、遗传算法等。

6) 识别结果

本模块主要是对识别结果的存储记录模块，进一步实现负荷识别的应用服务或者开发其他创新性产品。

7) 结果应用模块

本模块是对非干预式负荷监测技术的应用模块，如用电可视化服务、用电设备状态监测服务等。其实际应用意义重大，以用电可视化服务为例，本服务可以将总的用电量细分到各个电器上，实现各电器设备的用电明细化，对用户节能起指导意义。

8) 各电器设备负荷特性数据库

本模块是非干预式负荷监测应用的基础及关键，从负荷识别算法中也可以看出，负荷识别是以负荷特性为基础进行识别的，本模块也是决定整个体系精确的一个关键因素，因此需要对各负荷特性进行深入研究。

2 居民负荷特性分析

居民家庭中电器种类繁多，本文挑选居民中常见且典型的电器进行负荷特性的深入研究。根据文献中一项对欧洲12国家的家用电器拥有情况及使用模式的调查显示，冰箱、洗衣机、洗碗机、电视、DVD、电脑等电器的家庭占有比较高^[13]。

结合我国实际情况，根据《中国建筑节能年度发展研究报告》中涉及到的针对北京各类型近千户住宅基本情况及行为模式的调研结果，统计得到各主要家用电器的住户拥有率如图2所示。

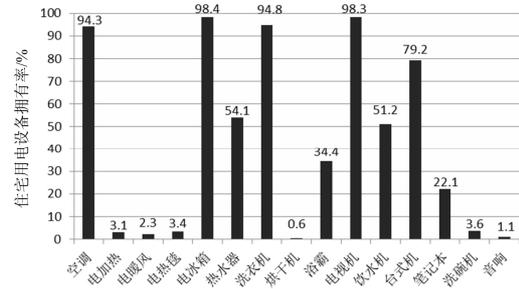


图2 北京住宅用电设备拥有率统计图

Fig. 2 Ownership rate charts of Beijing residential electrical appliance

由以上调研结果的分析，并考虑到居民中普遍存在但没有统计进入图2的用电设备及用电设备的耗电量大小、家用电器使用频率等因素，确定本研究的主要对象为：空调、电冰箱、洗衣机、热水器、电视机、台式机、笔记本电脑、饮水机、微波炉、电加热、电磁炉、荧光灯。选取的电器设备信息如表1所示。

表1 居民电器信息表

Table 1 Residential electrical appliance information table

设备名称	额定功率/W	容量/规格/品牌	设备型号
空调	930	分体挂壁式房间空调	KFRd-26 GW
电冰箱	890	冷冻/冷藏 46/104 L	新飞BCD-150
洗衣机	120-240	洗/脱容量 4 kg/3 kg	XPB42-80063
热水器	1 100-2 000	海尔 60 L 储水式	FCD-HX60E
电视机	70	产品规格 21 寸	T2168K
台式机	--	戴尔	Optip X520
笔记本	--	戴尔	N4050
饮水机	550	温热型加热 18.9 L/桶	YD-
微波炉	1 180	格兰仕	P70D20TL-D4
电加热	1 000-3 000	电膜式加热	NDYC-21
电磁炉	1 200	规格 436×256 (mm)	D22
荧光灯	11	环形灯管	86D

2.1 电流曲线特性

对以上研究范围内的典型居民电器，对其电流进行实测研究。记录电器正常工作状态电流的变化情况。电力测量仪器采用日置 8860 记录仪，采样周期为 2 000 Hz。实测结果如图3所示。

由图3可以看出不同电器的电流波形存在明显差异。电加热器、热水器、饮水机是线性负荷，其电流近似正弦波，但幅值不同。电冰箱、电磁炉、空调、洗衣机近似线性负荷，其电流相差较大；荧光灯、电视机、笔记本、微波炉、台式机为非线性

负荷, 其中荧光灯、电视机、笔记本、台式机电流畸变严重, 不同的用电设备电流曲线差异明显。

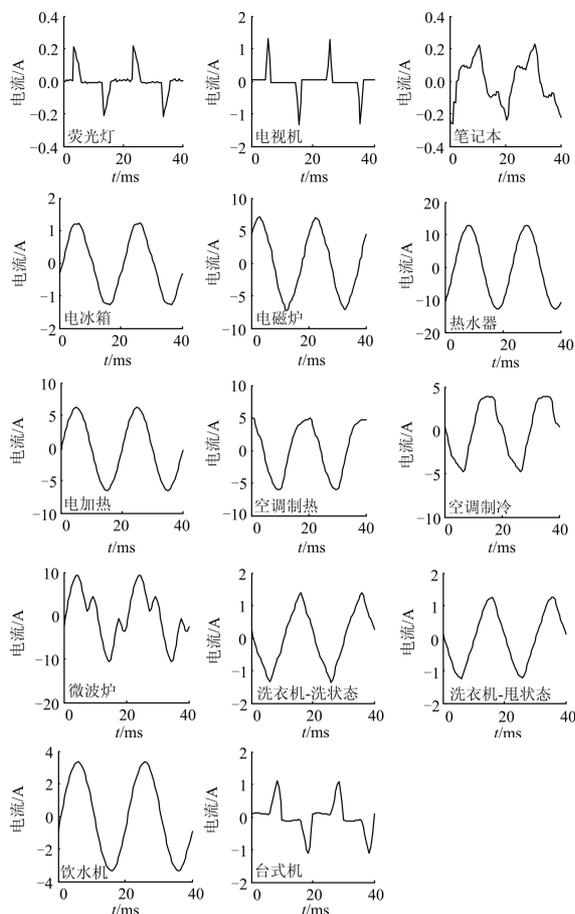


图3 各用电设备稳态电流曲线

Fig. 3 Electrical appliance steady-state current graph

为反映各用电器电流波形的差异, 计算提取出各个电器的电流波形的均方根值、幅值和波峰系数, 其计算公式如下。

$$\text{均方根 } I_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^N i(k)^2}$$

$$\text{幅值 } I_p = \max(i(k)), 0 \leq k < N$$

$$\text{波峰系数 } I_{\text{CF}} = \frac{I_p}{I_{\text{rms}}}$$

提取出电流曲线特性的特征值如表2所示。

由表2可以看出, 对于线性负荷其波峰系数接近1.4, 非线性程度越大, 波峰系数越大, 荧光灯、电视机、台式机依据波峰系数参数易于识别; 不同的电器其峰值不同, 电磁炉、热水器、电加热与微波炉依据幅值易于识别; 热水器与微波炉依据均方根易于识别。若依据三个参数组合进行负荷识别, 各用电器的特征参数差异明显, 在技术上可以实现

负荷识别。

表2 各用电设备稳态运行下电流曲线特征值

Table 2 Current curve eigenvalues in the steady-state operation of all electrical equipment

名称	均方根	幅值	波峰系数	名称	均方根	幅值	波峰系数
荧光灯	0.08	0.22	2.87	空调制热	3.92	5.06	1.29
电视机	0.35	1.30	3.74	空调制冷	3.05	3.92	1.29
笔记本	0.13	0.23	1.75	微波炉	5.81	9.36	1.61
电冰箱	0.87	1.23	1.41	洗衣机洗	0.83	1.39	1.68
电磁炉	4.76	7.10	1.49	洗衣机甩	0.81	1.26	1.55
热水器	9.08	12.79	1.41	饮水机	2.34	3.35	1.43
电加热	4.45	6.26	1.41	台式机	0.47	1.11	2.39

2.2 谐波特性

不同的用电设备非线性程度不同, 谐波含量不同, 电流的畸变程度越厉害, 其谐波含量越丰富。谐波含量分析是反映设备非线性的一个重要指标, 因此采用文献[14]中谐波计算方法对各设备的电流数据进行快速傅里叶变换分析, 其谐波含量对比如图4、图5所示, 其中设备顺序见图中THD表示顺序。

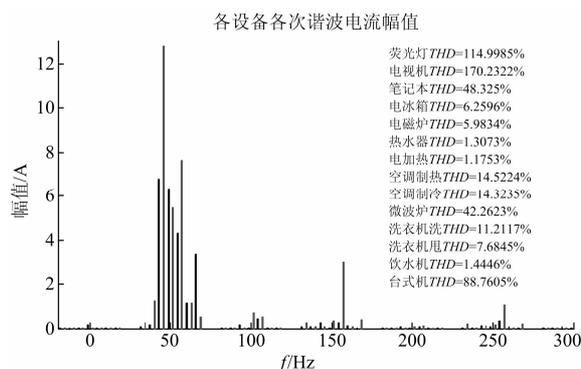


图4 各用电设备谐波分析图

Fig. 4 Electrical appliance harmonic analysis chart

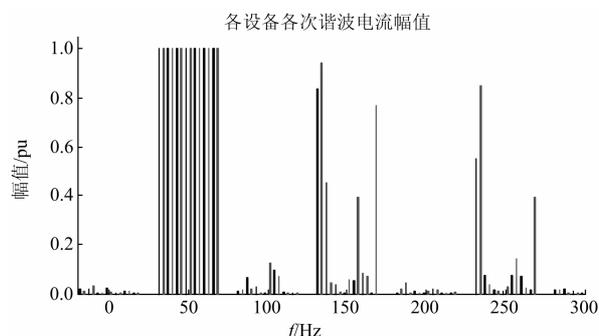


图5 各用电设备谐波对比图(以基波归一化)

Fig. 5 Electrical appliance harmonic comparison chart (fundamental normalized)

由图 4、图 5 可以看出，不同的用电设备其谐波含量不同，荧光灯、电视机、笔记本、台式机谐波含量丰富，电流畸变程度厉害，以 3 次谐波、5 次谐波、7 次谐波为主；不同的设备各次谐波幅值相差较大，微波炉 3 次谐波幅值达到 4 A，空调电流中 2 次谐波幅值较大。

基于上述分析，提取各次谐波的幅值及 THD 作为谐波特性的特征。

2.3 PQ 特性

有功功率和无功率是描述用电设备耗电特性的最常用的指标。根据文献[15]所定义有功功率及无功功率的求解算法，计算公式如下。

$$P = \sum_{k=0}^{\infty} P_k = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos(\Phi_k)$$

$$Q = \sum_{k=0}^{\infty} Q_k = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \sin(\Phi_k)$$

其中： U 和 I 为用电设备工作时电压与电流的有效值； Φ 为用电设备正常工作时功率因数角； k 为谐波次数。

依据文献[16]以上所述设备的有功无功功率如图 6 所示。各次谐波有功功率（去除基波有功功率）如图 7 所示。各次谐波无功功率（去除基波无功功率）如图 8 所示。

图 6 中数字对应用电设备的标号，对应关系如表 3 所示。

表 3 标号与设备名称对应表
Table 3 Label of the appliance name

标号	1	2	3	4	5	6	7
设备	荧光 灯	电视 机	笔记 本	电冰 箱	电磁 炉	热水 器	电加 热
标号	8	9	10	11	12	13	14
设备	空调 制热	空调 制冷	微波 炉	洗衣 机洗	洗衣 机甩	饮水 机	台式 机

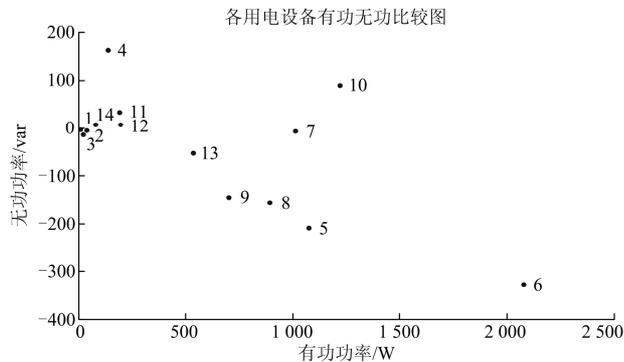


图 6 各设备有功无功对比图

Fig. 6 Active and reactive power comparison of each appliance

由图 6 可以看出对于大功率设备在 PQ 图上差别明显，易于识别；而荧光灯等设备由于功率较小，因此在 PQ 图上较近，PQ 特性相似性高。

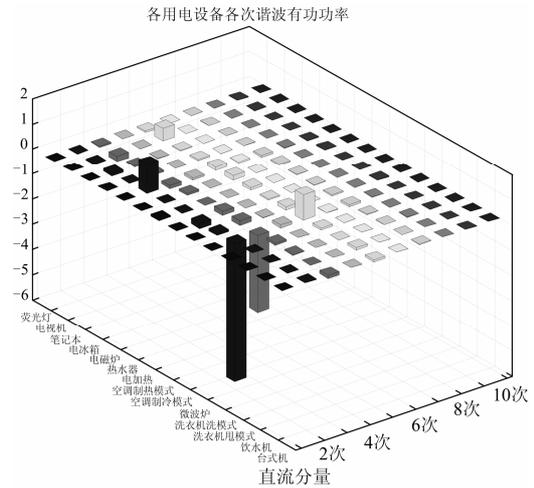


图 7 各设备各次谐波有功功率

Fig. 7 Each harmonic active power of each appliance

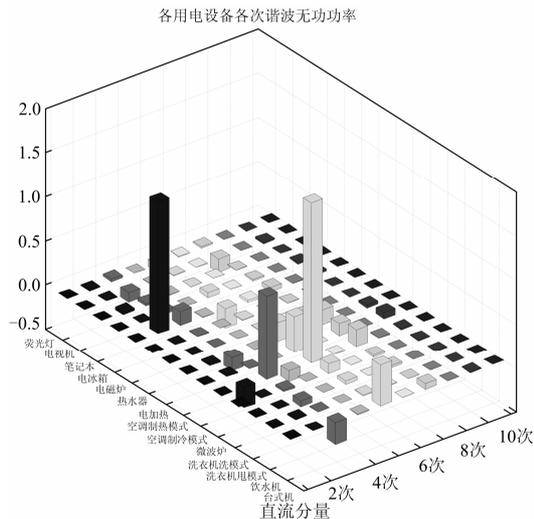


图 8 各设备各次谐波无功功率

Fig. 8 Each harmonic reactive power of each appliance

由图 7、图 8 可以看出，电磁炉与微波炉 2 次谐波有功、无功功率较大，且微波炉 3 次、5 次谐波有功、无功功率也较大；空调、洗衣机 3 次谐波无功功率也较明显。

基于上述分析，提取 PQ、直流分量、2 次、3 次、4 次、5 次、6 次及 7 次谐波功率作为 PQ 特性的特征值。

2.4 瞬时功率波形特性

瞬时功率波形定义为电压与电流的乘积，如下式所示。

$$p(t) = u(t) \times i(t)$$

本文选取用电设备正常工作时一个周期内的电压电流数据, 计算绘制出各设备的瞬时功率波形, 如图 9 所示。

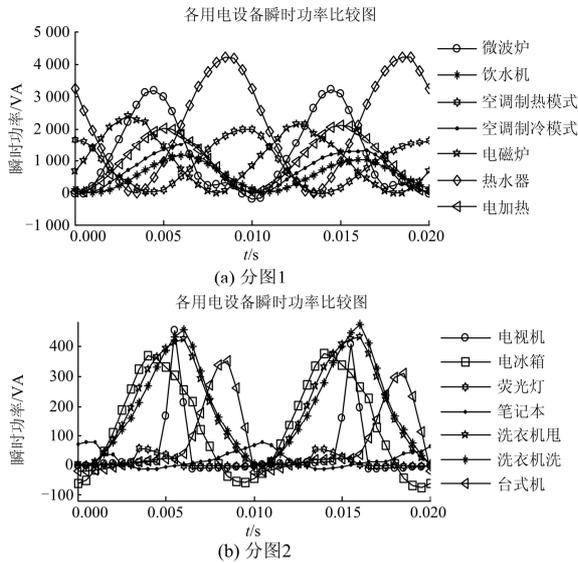


图 9 各用电设备瞬时功率对比图

Fig. 9 Instantaneous power waveforms of typical residential appliances

由图 9 可以看出不同用电设备的瞬时功率波形相差较大, 各用电设备在一个周期内瞬时功率波形幅值不同, 且相差较大。

基于上述分析, 计算瞬时功率波形的幅值, 双峰面积作为瞬时功率波形的特征, 计算公式如下所示。

$$\text{双峰面积为 } S_{pw} = \int_0^T p(t)dt = \frac{T}{N} \sum_{k=0}^N p(k)$$

$$\text{幅值为 } P_p = \max(p(k)), \quad 0 \leq k < N$$

提取瞬时功率波形特征值数据如表 4 所示。

由表 4 可以看出, 各设备瞬时功率曲线的幅值特征明显, 热水器幅值高达 4 218.5 VA, 荧光灯幅值为 58.3 VA, 数值间差异巨大, 易于实现负荷识别。

表 4 瞬时功率波形特征值

Table 4 Instantaneous power waveform signatures

名称	双峰面积	幅值	名称	双峰面积	幅值
荧光灯	0.2	58.3	空调制热	17.8	1 994.1
电视机	0.8	452.4	空调制冷	14.0	1 585.7
笔记本	0.4	79.0	微波炉	24.4	3 216.4
电冰箱	2.8	376.4	洗衣机洗	3.9	472.2
电磁炉	21.5	2409.7	洗衣机甩	3.9	430.7
热水器	41.6	4217.5	饮水机	10.7	1 147.6
电加热	20.3	2126.4	台式机	1.6	350.4

2.5 电流包络线特性

对于电动机负载, 如空调、洗衣机等, 其电流波形具有纹波特性。为了捕捉到它们的动态特性, 提取设备运行时电流的包络线来反映设备的运行特性, 如图 10 所示。

由图 10 可以看出, 不同的设备其电流包络线完全不同, 电视机、空调、微波炉、洗衣机洗状态启动时有短时的脉冲电流; 空调、洗衣机具有明显的波纹; 电磁炉、洗衣机甩状态、空调等设备由关到开启再到稳态所需时间较长。选取电流包络线的脉冲电流幅值(取绝对值), 稳态运行时平均值及开启时阶跃高度作为电流包络线的特征值。

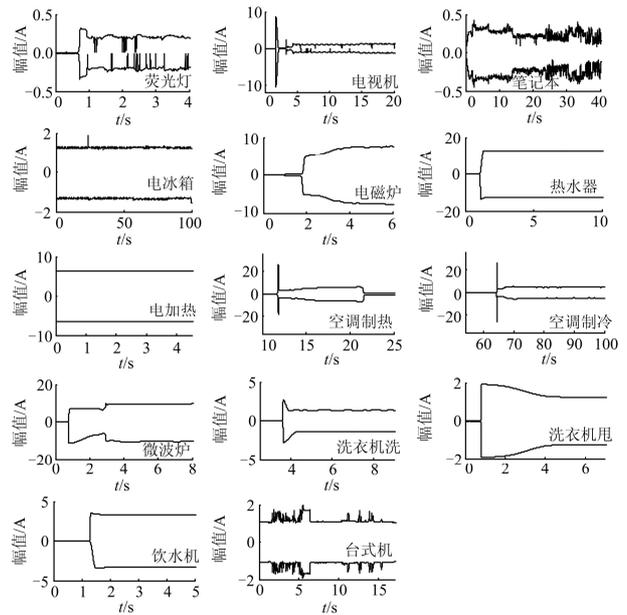


图 10 用电设备电流包络线

Fig. 10 Electrical appliance current envelope

2.6 V-I 特性

以一个周期(20 ms)内的电压数据作为横坐标, 电流数据作为纵坐标绘制 V-I 曲线, V-I 曲线可以从图形角度反映出设备谐波含量的高低^[17], 对于电阻负载其 V-I 图形是一条直线; 感性容性负载其 V-I 曲线是一个椭圆; 若只对 3 次谐波电流绘制 V-I 曲线其必有两个交点。因此 V-I 曲线可以从图形角度反映出电流中所含谐波成分的高低, 若绘制的 V-I 曲线有交点其谐波含量必然很高; 若图形与椭圆形相差很大, 则其谐波含量必然很高。绘制各电器设备的 V-I 曲线, 如图 11 所示。

由图 11 可以看出不同设备的 V-I 曲线相差明显, 空调、微波炉、洗衣机、微波炉电器, 其 V-I 曲线具有交点; 各电器 V-I 曲线的面积各不相同;

各电器 V-I 曲线中心线倾斜角不同。计算提取 V-I 曲线的中心线斜率、封闭区域面积、交叉点个数作为 V-I 曲线的特征点，如表 5 所示。其中心线定义如图 12 所示。

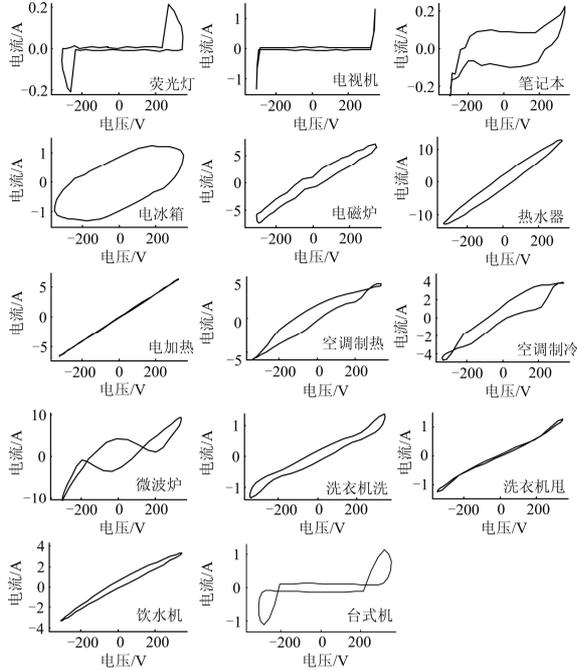


图 11 各设备 V-I 曲线图

Fig. 11 V-I curves of each appliance

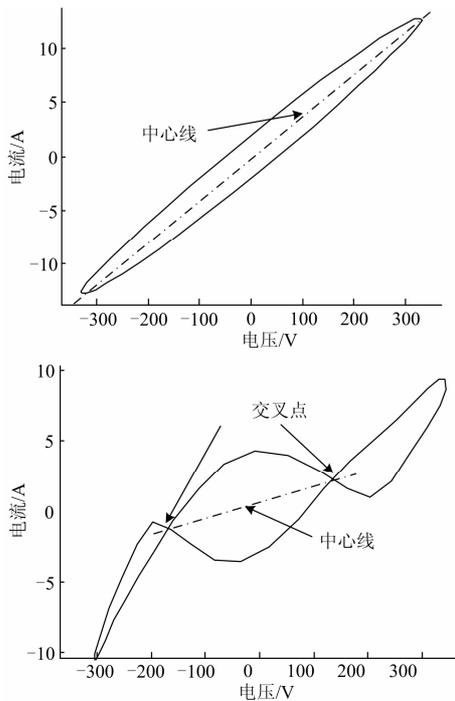


图 12 V-I 曲线特征点定义图

Fig. 12 The V-I curve feature points defined

表 5 V-I 曲线特征值

Table 5 V-I curve characteristic value

名称	斜率/ (mA/V)	区域 面积	交 点	名称	斜率/ (mA/V)	区域 面积	交 点
荧光灯	0.00	33.5	0	空调 制热	14.05	978.5	2
电视机	0.00	48.2	2	空调 制冷	12.87	907.2	2
笔记本	0.05	92.9	0	微波 炉	11.42	604.3	2
电冰箱	2.70	1022.0	0	洗衣 机洗	4.04	204.6	0
电磁炉	20.38	1299.8	0	洗衣 机甩	2.94	34.9	2
热水器	38.89	2063.1	0	饮水 机	10.27	332.3	0
电加热	19.76	52.1	0	台式 机	0.44	44.2	2

由表 5 可以看出，依据 V-I 曲线是否有交点可以将电视机、空调、微波炉和台式机与其他电器设备区分开，再结合区域面积或斜率特征可以将各个电器设备识别出。

2.7 开关暂态特性分析

各电器开启到达稳态所需的时间有所差异，开启时电流的变化形式各不相同，对于电阻负载直接进入稳态，对于非线性负载电流启动时会有脉冲电流。各设备的开关暂态波形如图 13 所示。

由图 13 可以看出热水器、饮水机、电磁炉等设备其过程短暂；电视机、微波炉等所需时间较长；开启过程伴随有脉冲电流出现；洗衣机电视机用电电器伴随有衰减电流。

基于上述分析选取脉冲电流和暂态过渡时间作为开关暂态特性的特征值，如表 6 所示。

表 6 开关特性特征值

Table 6 Switching characteristics signature

名称	脉冲 峰值	过渡 时间/s	名称	脉冲 峰值	过渡 时间/s
荧光灯	0.34	0.25	空调制热	25.64	0.14
电视机	10.51	2.7	空调制冷	25.61	0.11
笔记本	0.38	60	微波炉	25.56	2.2
电冰箱	1.25	—	洗衣机洗	2.7	3.8
电磁炉	4.62	0	洗衣机甩	1.95	3.2
热水器	12.75	0	饮水机	3.37	0
电加热	6.02	0	台式机	1.11	120

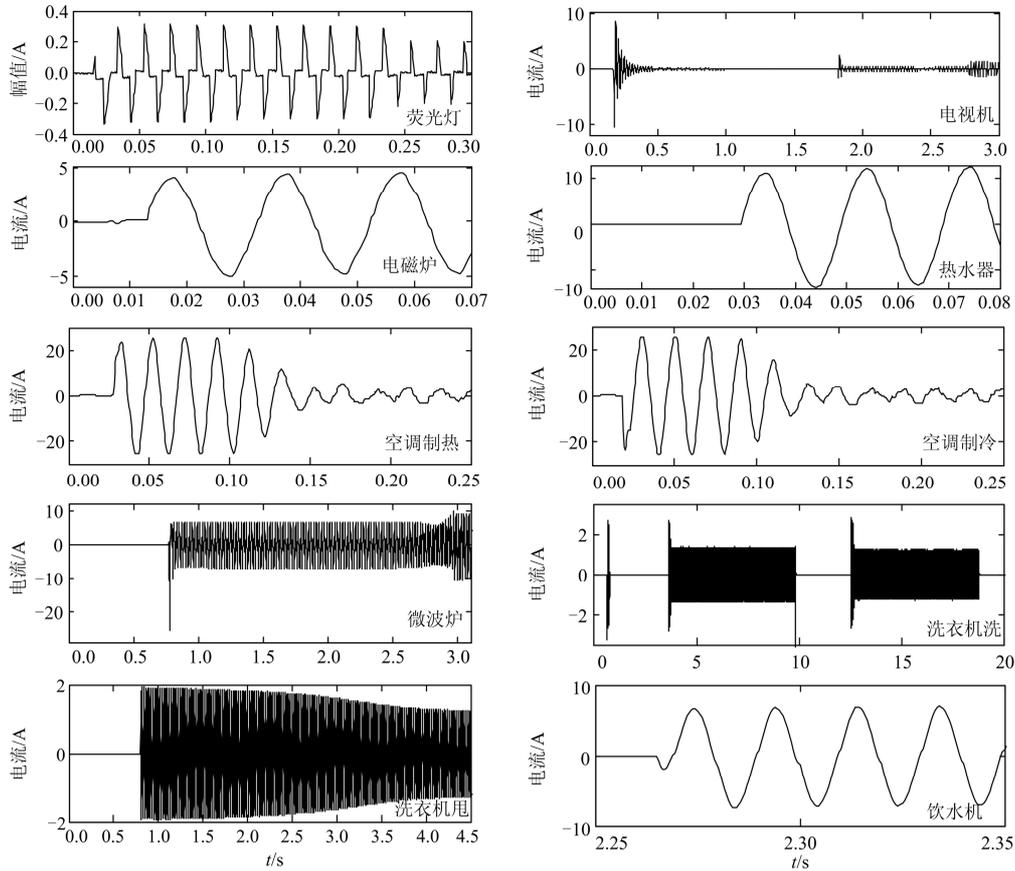


图 13 开关特性对比图

Fig. 13 Switching characteristics comparison chart

2.8 小结

本节对居民负荷用电特性进行了详细分析, 从各负荷微观特性上的差异可以看出负荷识别在技术上是可行的, 并给出了各负荷特征值的计算方法, 为后续工作中对负荷识别算法实现打下基础。

3 总结

本文首先建立了非干预式负荷监测体系结构, 对各模块实现的功能进行详细阐述, 并基于负荷特性数据库提出负荷识别算法的实现原理; 其次对居民家庭中常见负荷的 7 种负荷特性 (谐波特性、 PQ 特性、 $V-I$ 特性、瞬时功率特性等) 进行详细分析, 结果表明各电器设备的各负荷特性存在着明显的差异, 基于负荷特性数据库完成负荷识别在技术上是可行的; 最后在负荷特性分析过程中提出各个负荷特性特征值的计算方法, 为非干预式负荷监测体系的应用打下基础。

本文的负荷特性研究还为后续的创新性产品和服务开发研究工作特别是负荷的分类与识别, 及

基于负荷识别技术实现用电可视化的研究工作打下基础。下一步的工作重点是在负荷微观特性研究基础上对基于非干预式负荷监测的用电可视化集中式监测方案的实现展开深入研究, 搭建家庭用电模拟系统, 验证非干预式负荷监测系统的优越性及用电可视化技术的节能效果。

参考文献

- [1] 孙中权. 电力节能技术的研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 227-229, 231.
SUN Zhong-quan. Research and application of power saving technology[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 227-229, 231.
- [2] 梁明, 李学瑞, 石永华, 等. 智能家居能耗管理的研究进展[J]. 日用电器, 2012(12): 38-42.
LIANG Ming, LI Xue-rui, SHI Yong-hua, et al. The research progress of smart home energy management[J]. Electrical Appliances, 2012(12): 38-42.
- [3] 李东东, 崔龙龙, 林顺富. 家庭智能用电系统研究及

- 智能控制器开发[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 123-129.
- LI Dong-dong, CUI Long-long, LIN Shun-fu. Study of smart power utilization system and development of smart controller for homes[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 123-129.
- [4] 牟龙华, 朱国锋, 朱吉然. 基于智能电网的智能用户端设计[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 53-56.
- MOU Long-hua, ZHU Guo-feng, ZHU Ji-ran. Design of intelligent terminal based on smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 53-56.
- [5] HART G W. Prototype nonintrusive appliance load monitor[J]. Proceedings of IEEE, 1992, 80(12): 1870-1891.
- [6] MARTINS J F, LOPES R, LIMA C, et al. A novel nonintrusive load monitoring system based on the S-Transform[C] // Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2012 13th International Conference on, 2012: 973-978.
- [7] RAHIMI S, CHAN A D C, GOUBRAN R A, et al. Nonintrusive load monitoring of electrical devices in health smart homes[C] // Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2012 IEEE International, 2012: 2313-2316.
- [8] LEE W K, FUNG G S K, LAM H Y, et al. Exploration on load signatures[C] // Proc Int Conf Elect Eng, Japan, Jul, 2004, 2: 690-694.
- [9] LIANG Jian, NG S, KENDALL G, et al. Load signature study—part I: basic concept, structure, and methodology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(2): 551-560.
- [10] LAI Yi-sheng, CHEN Yung-chi, TSAO Shiao-li, et al. A novel search scheme for nonintrusive load monitoring systems[C] // Industrial Technology (ICIT), 2012 IEEE International Conference on, 2012: 102-107.
- [11] CHANG Hsueh-hsien, CHEN Kun-long, TSAI Yuan-pin, et al. A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2012, 48(2): 764-771.
- [12] 秦业, 袁海文, 袁海斌, 等. 基于优化最小二乘支持向量机的电能质量扰动分类[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 209-214.
- QIN Ye, YUAN Hai-wen, YUAN Hai-bin, et al. Classification of power quality disturbances based on optimized least squares support vector machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 209-214.
- [13] DE ALMEIDA A. Report with the results of the surveys based on questionnaires for all countries[R]. Intelligent Energy-Europe, EIE /05 /124 /SI2. 419657.
- [14] 张鹏, 李红斌. 一种基于离散小波变换的谐波分析方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 252-259.
- ZHANG Peng, LI Hong-bin. A novel algorithm for harmonic analysis based on discrete wavelet transforms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 252-259.
- [15] ARRILLAGA J, WATSON N R, CHEN S. Power system quality assessment[M]. New York: Wiley, 2000.
- [16] 滕召胜, 罗志坤, 孙传奇, 等. 基于小波包分解与重构算法的谐波电能计量[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 200-206.
- TENG Zhao-sheng, LUO Zhi-kun, SUN Chuan-qi, et al. Harmonic energy measurement based on wavelet packet decomposition reconstruction algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 200-206.
- [17] LAM H Y, FUNG G S K, LEE W K. A novel method to construct taxonomy of electrical appliances based on load signatures[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2007, 53(2): 653-660.

收稿日期: 2013-06-23; 修回日期: 2013-08-12

作者简介:

郑小霞(1978-), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为智能电网用户侧方向的研究、风力发电故障诊断和运行维护研究; E-mail: zxxkx@126.com

刘庆强(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能用电;

林顺富(1983-), 男, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 从事智能电网用户侧方向的研究(电能质量分析、智能用电及节能等)。