

# 基于大数据的非侵入式负荷分解技术研究

刘世成<sup>1</sup>, 刘沅昆<sup>2</sup>, 武昕<sup>2</sup>, 郑英刚<sup>3</sup>, 韩笑<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 华北电力大学, 北京 102206; 3. 中能瑞通(北京)科技有限公司, 北京 100101)

**摘要:** 随着智能电网的不断发展,提高用户的用电体验和电力营销的精细化管理变得越来越重要。作为居民用户用电行为模式识别的关键技术,非侵入式分解技术成为近年来研究的热点。文章在综述国内外非侵入式负荷分解关键技术的基础上,分析了面向用户的非侵入式负荷分解技术的研究内容,进而对涉及的研究方法进行了系统性的阐述,指出了研究的技术难点,并对未来技术的研究方向进行了展望。最后,对全文进行了总结,指出非侵入式负荷分解技术将会提高电能利用效率,促进电力资源的优化配置。

**关键词:** 非侵入式; 负荷分解; 大数据; 负荷特征库; 用电数据

## 0 引言

为了提高用户的用电体验和精细化管理电力营销,全面掌握电力用户的用电行为特征越来越重要。通过非侵入式负荷分解技术,可以为居民用户提供详实的家庭能效信息,帮助用户分析家庭能耗构成,使用户了解自身行为习惯对于家庭能效的影响,从而引导用户自觉地采取节能措施,并养成节能行为习惯,同时为用户提供个性化的用电设备节能控制策略服务。

非侵入式负荷分解于20世纪80年代由MIT团队的Hart G. W. 首次提出,目的是为了降低负荷监测的硬件成本,以便使电力公司在使用尽可能少设备的情况下获取较为具体的电能数据<sup>[1]</sup>。1997年,美国电科院开展了“非侵入式负荷监控系统”(Non-Intrusive Appliance Load Monitoring System, NIALMS)项目,该项目构建了多处理器的电力负荷暂态事件检测系统,用于对整个建筑负荷进行跟踪与分解<sup>[2]</sup>。Srinivasan

等开发了一种基于神经网络的非侵入式检测方法<sup>[3]</sup>,但该方法无法在不同电压下对不同的负荷进行分类研究<sup>[4]</sup>。2012年J.F.Martins等人基于S变换提出一个新的非侵入式电力负荷监测模式,并提出了相应的监测步骤<sup>[5]</sup>。2011—2014年,Tsai M. S. 等总结了非侵入式负荷分解的发展,并提出将暂态过程电流作为特征,利用遗传算法进行特征优化,该方法对暂态过程的识别具有良好的效果<sup>[6]</sup>。

在国内,非侵入式电力负荷分解研究起步相对较晚,但近年来发展迅速。2009年,牛卢巧提出了一种信号预处理算法——基于滑动窗的双边累积和(CUSUM)暂态事件自动检测算法,该方法可用来进行暂态过程的检测,从而为暂态过程的判别创造了条件<sup>[7-8]</sup>。同年,黎鹏基于功率信号,对系统稳态时非侵入式负荷分解做了相关研究,提出了最优求解法和表格法,在负荷较少时,能够有效实现系统稳态时的非侵入式负荷分解<sup>[9-10]</sup>。2013年,余贻鑫等从负荷印记入手,阐述了非侵入式负荷分解的基本原理和求解方法<sup>[11]</sup>。2014年,林锦波基于聚类融合,提出了基于聚类的负荷识别方法,并建立了相应的负荷曲线分类深度学习模型,取得了较好的效果<sup>[12]</sup>。

基金项目: 国家电网公司科技项目“主动配电系统前瞻技术研究”(DZ71-15-004)。

本文在综述国内外非侵入式负荷分解关键技术的基础上,分析了面向用户的非侵入式负荷分解技术研究内容,进而对涉及的研究方法进行了系统性阐述,指出了技术研究的难点,并对未来技术的研究方向进行了展望。

## 1 面向用户的非侵入式负荷分解技术研究内容

随着智能电网的不断发展,面向用户的服务显得越来越重要,如何获得用户的有效用电数据,并通过数据分析,准确地了解用户的用电行为并提供节能建议,是未来电力服务的重要环节,同时也对电力部门的统筹规划、用户能效评估和节能策略研究具有重要意义。非侵入式负荷分解技术研究内容包括居民用户用电设备的负荷特性特征库建立、面向居民用户的非侵入式负荷分解技术研究、居民用户用电数据采集方案研究3个方面。

### 1.1 居民用户用电设备的负荷特征库建立

居民用户用电设备的负荷特性特征库是整个项目的基础,基于负荷特性样本数据分析提取各种用电设备的负荷特征,将样本数据和特征数据存储到负荷特性特征库中。

通过对居民用户用电设备的了解,结合用电设备的用电特征,可确定影响用户用电设备的相关电力数据,包括负荷、电压、电流、电量等数据信息,规划建设用电设备负荷特征库,并采集用户常用用电设备的负荷特征数据,进行用电设备的负荷特征提取。随着科学技术和生活水平的不断提高,用户用电设备的类型和数量不断发生变化,因此用户用电设备特征库的建立是一个不断完善和优化的过程,需要对用户的用电设备特征库进行持续不断的补充和优化。

### 1.2 面向居民用户的非侵入式负荷分解技术研究

面向居民用户的非侵入式负荷分解技术研究包括用户用电数据的负荷分解技术和负荷分解模型两部分内容,依托负荷特征库中的特征数据,利用相应的模型算法和机器学习技术,实现基于非侵入式用户用电设备负荷分解的模型算法。

为了实现居民用户的非侵入式负荷分解,需要研究非侵入式用电负荷分解算法,包括基于负荷信号时频分析的非侵入负荷分解技术研究、基于暂稳态信号分析的非侵入负荷辨识算法研究、基于系统辨识理论的非侵入负荷辨识技术研究以及基于模式识别与机器学习的负荷分解技术研究;需要研究居

民用户用电负荷分解模型及设计,包括决策算法模型、相似度快速负荷识别算法模型、用电设备迭代式特征搜索算法模型等;需要实现基于大数据的负荷分解,主要步骤包括数据清洗、数据接入、数据分析建模、模型评估等过程。

### 1.3 居民用户用电数据采集方案研究

居民用户用电数据采集方案研究主要结合目前电力用户用电信息采集系统的建设和应用现状,设计切实可行的数据采集、数据传输和数据存储方法,为下一步居民用户用电设备的负荷分解应用提供数据支撑。

为了使面向居民用户的非侵入式负荷分解技术的研究成果得到应用,需要对实际用户的用电负荷数据进行高密度采集,具体需要研究居民用户用电负荷数据采集的方法、传输策略以及存储规则等,以满足基于大数据负荷分解数据的应用示范要求。

### 1.4 基于大数据负荷分解数据的应用示范

基于大数据负荷分解数据的应用示范对居民用户非侵入式负荷分解模型进行实际的数据验证,确保数据分解的准确性和可用性,并分析用户的用能特征,包括高耗能电器识别、建立居民用户用电行为标签和居民用户用电节能建议等,为进一步完善居民用户的互动化、需求侧响应等应用提供有效支撑,为居民用户的精细化管理奠定基础。

基于大数据负荷分解数据的应用范围非常广泛,对智能电网的发展、用户互动化服务、需求响应支撑和用户节能等方面具有十分重要的意义。该技术可以从多个方面展示数据的实用价值,首先通过实际的用户验证,进行数据采集方案的可行性验证、用户用电负荷分解模型的可用性验证以及基于用户用电负荷分解的结果数据进行居民用户能效分析与用能建议,包括分析居民高耗能的用电设备、根据用户的用电行为特征建立居民用电行为特征标签、分析用户用电设备用能信息、反映居民用户的节能成效、为用户提供节能建议等。

### 1.5 研究内容间的关联性分析

上述各研究内容之间是相互衔接和支撑的:居民用户用电设备的负荷特征库为面向居民用户的非侵入式负荷分解技术研究和基于大数据负荷分解数据的应用示范提供基础数据支撑;面向居民用户的非侵入式负荷分解技术研究是基于负荷特征库的理论研究部分,实现该项目的负荷分解算法和模型设

计实现,为基于大数据负荷分解数据的应用示范提供理论基础;居民用户用电数据采集方案研究实现用户的数据获取,用于验证分解模型的准确性,为基于大数据负荷分解数据的应用示范提供实际的运行数据;基于大数据负荷分解数据的应用示范是负荷分解的应用部分,可实现居民用户能效分析与用能建议等。研究内容间的关联关系如图 1 所示。

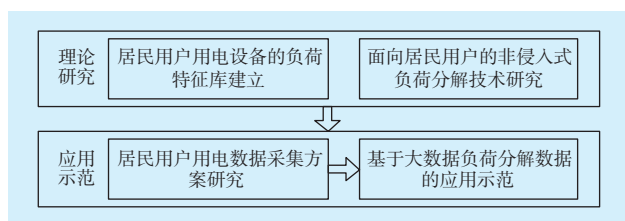


图 1 研究内容间的关联关系

Fig.1 Relevance relationship of research aspects

## 2 非侵入式负荷分解技术研究方法

### 2.1 居民用户用电设备的负荷特征库建立方法

建立居民用户用电设备负荷特征库是非侵入式负荷分解技术的重要研究内容。电器设备种类繁多,规格型号不一,其各工作状态体现的用电负荷特征数据亦不相同。

#### 2.1.1 负荷分解数据需求

根据居民用户用电设备运行的过程,将数据分为暂态数据和稳态数据两大类,暂态数据主要指设备启动、设备停止、设备模式切换时的状态数据,稳态数据主要指设备稳定运行时的状态数据。用电设备根据用户用电设备工作状态的不同,可分为以下 3 种类型。

1) 启/停二状态设备(ON/OFF)。这类用电设备只有运行和停机两种分立的用电状态,如白炽灯、电热水壶等。

2) 有限多状态设备。这类用电设备通常具有有限多个分立的工作状态,与之相对应的用电功率间是离散的,不同的功率水平即标志着不同的工作状态,如洗衣机、微波炉、电磁炉等。

3) 连续变状态设备。这类用电设备的稳态区段功率无恒定均值,而是在一个范围内连续变动的,无一致性的启、停功率阶跃,如变频空调、变速热泵、电动缝纫机等。

#### 2.1.2 负荷特征库规划设计

负荷特征库主要分为样本负荷数据和负荷特征

数据,样本负荷数据包括采样的负荷数据和电量数据,负荷数据包括电压、电流、功率等基础负荷数据,电量数据包括电量曲线数据等。通过算法提取样本负荷数据特征形成负荷特征库,规模应用后可对负荷运行的监测数据进行建模分析,提取大量数据的特征,确定数据是否添加至样本库,用电设备样本库的数据需要不断增加和完善。负荷特性特征库规划设计如图 2 所示。

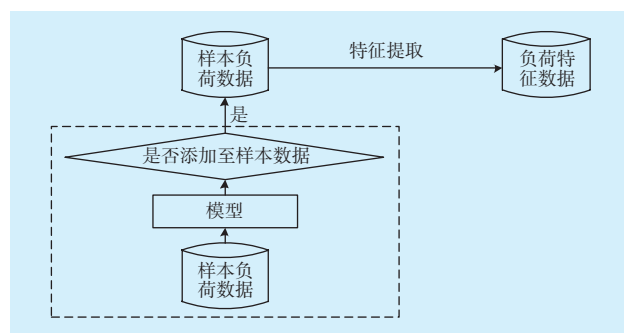


图 2 负荷特性特征库规划设计

Fig.2 Planning diagram of load feature library

以居民用户家庭用电网络为监测对象,在入户端进行电力数据采集,先验得到不同居民负荷设备的用电数据,提取特征并形成负荷特征数据库。

#### 2.1.3 数据获取方式

数据的获取方式主要分为自行数据采样和合作数据采样两种方式。自行数据采样是通过采样设备对电器设备的各状态负荷进行采样;合作数据采样是指通过与家电企业、家电联盟等机构合作进行数据采样。本文主要采用自行数据采样的方式获取数据,研究自行采样的样本数据获取方法。

开展采样方法的研究工作,对采样装置选购、采样数据范围、采样频度等要点进行研究。利用采样设备对典型家用电器各种工作状态下的负荷特征数据采样,并将采样结果存入数据库,为形成负荷特性特征库积累基础数据。数据采集流程如图 3 所示。

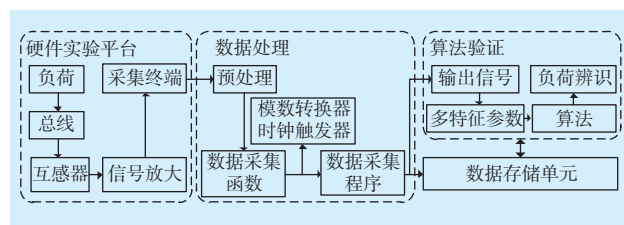


图 3 数据采集流程

Fig.3 Flowchart of data acquisition



#### 2.1.4 用电设备负荷特征提取

基于负荷特性特征库中的负荷特性数据,分析负荷特性数据呈现的形态特点,研究负荷特性特征的提取、融合算法,建立初始的负荷特性特征库。负荷特征的提取是否能够准确且有针对性地提取出来,在很大程度上决定了非侵入式负荷辨识方法成功与否。

从家用负荷硬件电路的角度出发,找出不同种类家用负荷以及同种类家用负荷中的差别点与共同点,分析并提取出具体的负荷特征。选取典型的多种家用负荷,分析出多种家用负荷中硬件电路中的不同,同时进行暂态特征与稳态特征分析,找出多种家用负荷明显存在差异的负荷特征。任意电器从启动到关停的完整工作过程都是由若干过渡区段和稳态区段构成的,负荷特征贯穿电器的过渡区段、稳态区段及整体运行过程,是家用电器识别的重要指标。在深入研究电器工作原理(包括内部电路结构、工作规律、运行控制策略)的基础上,结合家电拥有率、用户使用习惯等预测类指标进行家用电器负荷特性分析工作。

#### 2.1.5 特征库持续完善和补充

由于用户用电设备数量不断变化,设备型号多种多样,新的用电产品不断出现,用电设备的状态特征信息多种多样,因此用户用电设备特征库需要不断完善。设备在运行过程中由于各种各样的原因,用电设备的特征信息存在变化或相互影响的情况,用户用电设备的特征信息库及特征信息影响参数等信息需要持续优化。

### 2.2 面向居民用户的非侵入式负荷分解技术研究方法

本技术包括非侵入式用电负荷分解算法研究、居民用户用电负荷分解模型设计、基于大数据的负荷分解实现 3 个部分的内容。

#### 2.2.1 非侵入式用电负荷分解算法研究

研究基于模式识别与机器学习的负荷分解技术,研究如何建立负荷分解模型,对负荷进行分解,识别负荷组成。研究在多种分解算法产生不同结果的情况下,如何融合各算法结果,进行决策选取最优的结果。

利用非侵入式方法获取用户负荷数据信息,基于大数据负荷特征样本库,研究用户的负荷分解方法,实现用户负荷数据的分解。负荷分解过程包括数据特征提取、数据拟合算法、数据向量相似度分析

等关键步骤。数据特征提取可实现用户各种用电设备不同状态的特征量数据的提取,数据拟合算法可实现各种用电设备不同状态数据的最优组合方法,数据向量相似度分析可实现组合向量与目标向量的相似度分析,确定负荷分解组合的有效性。

#### 2.2.2 居民用户用电负荷分解模型设计

根据面向居民用户负荷分解技术的研究成果,依托电力大数据平台,完成电力用户负荷分解模型的研究。数据分解包括负荷数据分解、电压数据分解、电流数据分解、电量数据分解,利用负荷数据、电压数据、电流数据、电量数据之间的内在关联关系,可更加准确地实现用户负荷的分解。

#### 2.2.3 基于大数据的负荷分解实现

主要包括以下几个方面。

1) 数据清洗。通过采集设备对用户的负荷进行监测,并对数据进行必要的清洗,去除无效或异常的数据,并将监测的负荷数据按照统一的数据规范存储到数据库或分布式文件系统中,作为负荷分解使用的数据对象。

2) 数据接入。通过 ETL 技术将监测的负荷信息与负荷样本数据接入大数据平台,并对数据质量进行正确性、完整性、一致性、完备性、有效性验证。

3) 数据分析建模。在大数据平台上基于负荷特性特征库样本数据信息,完成数据的分析与建模工作。选择算法完成数据样本信息的特征识别,建立特征识别模型。

4) 模型评估。在大数据平台上,利用样本数据对模型进行验证与评估,分析模型负荷分解结果,分析模型识别的准确率,不断完善模型,提高模型的可靠程度和精准程度。

### 2.3 居民用户用电数据采集方案研究

目前国家电网公司所辖各网省电力公司已全部实现电力用户用电信息采集,以建设“全覆盖、全采集、全预付费”采集系统为基本方针,基本完成预定的目标。本文以用电信息采集的总体方案为基础,严格遵循采集设备的通信协议、技术规范和形式规范,实现居民用户用电数据的高密度采集,同时数据存储到大数据平台中,后续利用大数据平台实现居民用户用电负荷数据的分解和应用。

#### 2.4 基于大数据负荷分解数据的应用示范

对用户负荷进行分解获取详细的负荷构成,通过对负荷数据进行处理分析,掌握居民用电习惯及

其主要影响因素间的规律,从而为用户提供更有效的用电服务,提出合理的用电建议,指导用户科学用电、节约用电,提高用户的电能使用效率,为用户节能提供依据,提高用户节能意识,引导用户主动节能,提升社会能效水平。

通过选取部分验证用户,进行居民用户用电负荷数据的采集,利用面向居民用户的非侵入式负荷分解技术的研究成果,进行负荷分解数据的验证、居民用户能效分析和提出用能建议。

#### 2.4.1 负荷分解数据验证

通过比对用电记录与用负荷分解模型得到的负荷分解结果,验证模型的实用效果,得出模型实用程度与分解准确率。

#### 2.4.2 居民用户能效分析与用能建议

根据居民负荷分解后的结果,结合家电设备能耗标准,分析各家电设备的实际能耗情况;分析居民用电习惯对家电能耗的影响程度。综合两方面内容,给用户提出用能建议报告。

用户用能分析主要是建立用户的用电设备档案,分析用户主要用电设备的用电情况、用电占比情况、用电量的历史趋势;分析居民高耗能用电设备及其能耗使用情况;根据居民用户的用电行为特征建立居民用电行为特征标签。

通过分析同一地区或同一类型用户用电设备用能信息,可反映居民用户的节能成效,为用户提供节能建议、设备更新和用能指导,对电网公司可以起到削峰填谷的作用,同时居民用户可以节约费用支出,可以起到解决能源问题和保护环境的作用。

### 3 非侵入式负荷分解的关键技术难点及展望

#### 3.1 关键技术难点

1) 建立居民用户用电负荷特征库。建立居民用户用电负荷特征库是本文研究的关键点和难点,用户用电设备种类繁多、型号不统一,随着科学技术的进步和生活水平的提高,用户用电设备在不断增加,如何建立应用于目前,同时适用于未来发展的特征库,是非侵入式技术研究的关键点,同时也是研究的难点所在。

2) 居民用户用电负荷分解算法模型设计。由于居民用户用电设备多样,用电网络复杂,并且多种用电设备同时运行,之间存在互相干扰的情况,设计适用于复杂用电环境的用户负荷分解模型是技术难点

之一。

#### 3.2 展望

1) 非侵入式居民用户用电负荷分解。非侵入式居民用户用电负荷分解技术和方法将会成为研究热点。在不对用户的任何设备进行做改动,并且保证用户正常用电的情况下实现居民用户用电负荷的分解,将会极大地提高系统的可用性和便捷性。

2) 基于用电负荷分解的居民用户用能分析。基于非侵入式居民用户用电负荷分解数据的用户用能行为分析具有举足轻重的作用,根据居民用户的用电行为特征建立居民用电行为特征标签,分析居民用户用电设备的用能信息,可反映居民用户的节能成效,并为用户提供节能建议。

### 4 结语

随着电网的发展,全面掌握电力居民用户的用电行为特征将越来越重要,作为关键技术之一的非侵入式负荷分解技术引起了广泛关注。

本文在综述国内外非侵入式负荷分解关键技术的基础上,分析了面向用户的非侵入式负荷分解技术研究内容的主要方面:

- 1) 居民用户用电设备的负荷特征库建立;
- 2) 面向居民用户的非侵入式负荷分解技术;
- 3) 居民用户用电数据采集方案研究;
- 4) 基于大数据负荷分解数据的示范应用。

进而由以上各研究方向对涉及的研究方法进行系统性阐述,指出了研究的难点,对未来技术的研究方向进行了展望。非侵入式负荷分解技术将会在提高电能利用效率、促进电力资源优化配置等方面发挥越来越重要的作用。

#### 参考文献:

- [1] HART G W. Non-intrusive appliance load monitoring[J]. Proceedings of IEEE, 1992, 80(12): 1870-1891.
- [2] EPRI. Nonintrusive appliance load monitoring system(NIALMS) [R]. 1997.
- [3] SRINIVASAN D, NG W S, LIEW A C. Neural-network-based signature recognition for harmonic source identification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 398-405.
- [4] CHANG H H, YANG H T. Applying a non-intrusive energy-management system to economic dispatch for a cogeneration system and power utility[J]. Applied Energy, 2009, 86(4): 2335-

- 2343.
- [5] MARTINS J F, LOPES R, LIMA C, et al. A novel nonintrusive load monitoring system based on s-transform[C]// Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2012/2013 International Conference on IEEE, 2012: 973-978.
- [6] TSAI M S, LIN Y H. Development of a non-intrusive monitoring technique for appliance identification in electricity energy management[C]// Advanced Power System Automation and Protection(APAP), 2011 International Conference on IEEE, 2011: 108-113.
- [7] 牛卢璐. 基于暂态过程的非侵入式负荷监测[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [8] 牛卢璐, 贾宏杰. 一种适用于非侵入式负荷监测的暂态事件检测算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9): 30-35.
- NIU Lu-lu, JIA Hong-jie. Transient event detection algorithm for non-intrusive load monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(9): 30-35.
- [9] 黎鹏, 余贻鑫. 非侵入式电力负荷在线分解[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2009, 42(4): 303-308.
- LI Peng, YU Yi-xin. Nonintrusive method for on-line power load decomposition[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(4): 303-308.
- [10] 黎鹏. 非侵入式电力负荷分解与监测[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [11] 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 Yi-xin, LIU Bo, LUAN Wen-peng. Nonintrusive residential load monitoring and decomposition technology[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(4): 1-5.

- [12] 林锦波. 聚类融合与深度学习在用电负荷模式识别的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.

编辑 邹海彬

收稿日期: 2016-11-20



刘世成

#### 作者简介:

刘世成(1978-),男,山东淄博人,高级工程师,从事电力系统及其自动化方面的研究工作;

刘沅昆(1988-),男,山东泰安人,工程师,从事配用电大数据应用方面的研究工作;

武昕(1986-),女,山西吕梁人,博士,讲师,从事电力系统信息处理与智能用电方面的研究工作;

郑英刚(1977-),男,山东青岛人,工程师,从事电力数据采集方面的研究工作;

韩笑(1989-),女,陕西渭南人,工程师,从事智能电网大数据方面的研究工作。

## Research on Non-Intrusive Load Decomposition Technology Based on Big Data

LIU Shi-cheng<sup>1</sup>, LIU Yuan-kun<sup>2</sup>, WU Xin<sup>2</sup>, ZHENG Ying-gang<sup>3</sup>, HAN Xiao<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. China PowerTelecommunication (Beijing) Technology Co., Ltd, Beijing 100101, China)

**Abstract:** With the rapid development of smart grid, improving users' experience on using electricity and subtle management on electricity marketing has become more and more important. As the key technology of users' behavior, non-intrusive load decomposition technology has been a hot spot now. On the basis of an overview of related non-intrusive load decomposition technology, main aspects of its research are stated. Furthermore, systematic methods are proposed, relevant difficulty presented and future trend of research discussed meanwhile. The article is summarized ultimately and non-intrusive load decomposition technology will play an important role on improving electricity utilization efficiency and optimizing the allocation of resources of electricity.

**Key words:** non-intrusive; load decomposition; big data; load feature library; utilization data