

面向智能楼宇的互动节电系统设计与实现

将智能楼宇空调负荷视作柔性负荷，对其参与电网互动设计并研发了互动节电系统。通过对空调系统部署双向互动通信网络、互动设备及其互动软件，从而构建起用户参与电网互动的系统平台。此互动节电系统根据收集到的用户使用行为、环境温湿度、空调系统与电网负荷等数据，依据预先设置的约束条件，自动形成互动节电策略。此策略由互动节电系统向空调系统各运行环节下达运行指令，运行结果将通过互动设备反馈至互动节电系统。通过运行此系统，对国内某智能楼宇进行实证分析，验证在不影响用户舒适度的前提下，智能楼宇中央空调互动节电潜力很大。

李如意¹ 汪会财² 侯兴哲² 刘永光¹ 刘永相^{2/1} 许继集团有限公司
2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院

事实上，智能楼宇空调系统向用户提供冷、热需求，具有大功率、大滞后和需求柔性的特征，其能耗需求在某一特定时段存在可调节空间，这使得其成为用户参与电网互动，实现用户侧空调系统负荷的节能运行方式之一^[7]。

一直以来，与电力需求侧相关节能工作更多集中于电网设备本身节能及节能优化运行研究。例如更换高效变压器、改造线路、加装无功补偿和优化电网运行方式等^[8-9]，鲜有关于用户主动参与电网互动节电研究。

本文以国内某智能楼宇空调系统负荷为研究对象，设计并研发了一套面向智能楼宇的空调系统负荷互动节电系统，提出了相应的互动体系，包括互动对象、互动策略等。

0 引言

炎热夏季的用电高峰期，用户侧空调系统的运行是造成电网缺口的重要电力负荷。据统计，在我国的部分大中城市，夏季高峰时段的空调系统负荷比例达 30%~40%^[1]，个别城市甚至超过 50%，且空调系统能耗占到建筑总能耗的 40%以上^[2]。此类用电负荷的季节性增长，一方面使得高峰时段城市电力供应难以满足需求，出现拉闸限电，影响用户体验^[3-5]；另一方面，电力公司需按照最高负荷需求对电网基础设施进行相应比例的扩容，从而降低电网设备的利用率。

若能就此类负荷进行精细化管理，将能实现电网高峰期间削峰，而这又有利于降低电网自身损耗。文献^[6]提出当电网线路负荷峰谷差降低时，电网本身线路损耗亦有所下降。

1 系统总体架构

智能楼宇空调系统负荷互动节电系统涵盖互动终端、监控单元、控制中心及支撑双向互动的通信网络，系统架构如图 1 所示。每台配电变压器计量点处，均安装 1 台互动终端；每台运行设备参数由监控单元采集并传输至控制中心。

在实际运行过程中，控制中心一方面监测此智能楼宇空调系统各设备运行状态及环境温湿度；另一方面通过互动终端实时监测由电网下发的电网运行状态数据。当某互动终端监测到电网负荷高峰用电调控需求时，由互动终端传输至控制中心，控制中心预先设置的约束条件自动计算出空调系统可中断负荷容量、可中断时间及



李如意/高级工程师

关键词/Keywords

智能楼宇 ·
空调负荷 ·
互动节电 ·
实证分析 ·

其相应的互动节电策略，并由控制中心向各设备监控单元下发运行指令。

2 系统功能

智能楼宇互动节电系统能够以友好的 Web 界面实现用户管理、权限管理、模块管理和数据库管理等基本管理功能，实现某时间（段）配电变压器、空调系统机组及新风机组的负荷数据查

询和统计以及以饼状图、柱状图、曲线及报表等形式直观显示，实现对重要设备的远程控制。

能够实现将系统的实时运行状态、互动策略、运行策略、能耗情况及分析结果通过友好的 Web 页面方式发布，让物业管理人员、数据分析人员能够远程查看空调系统运行状态和能耗状况，不同策略对用能情况的影响，并分析出空调系统对需求响应的贡献度。系统功能如图 2 所示。

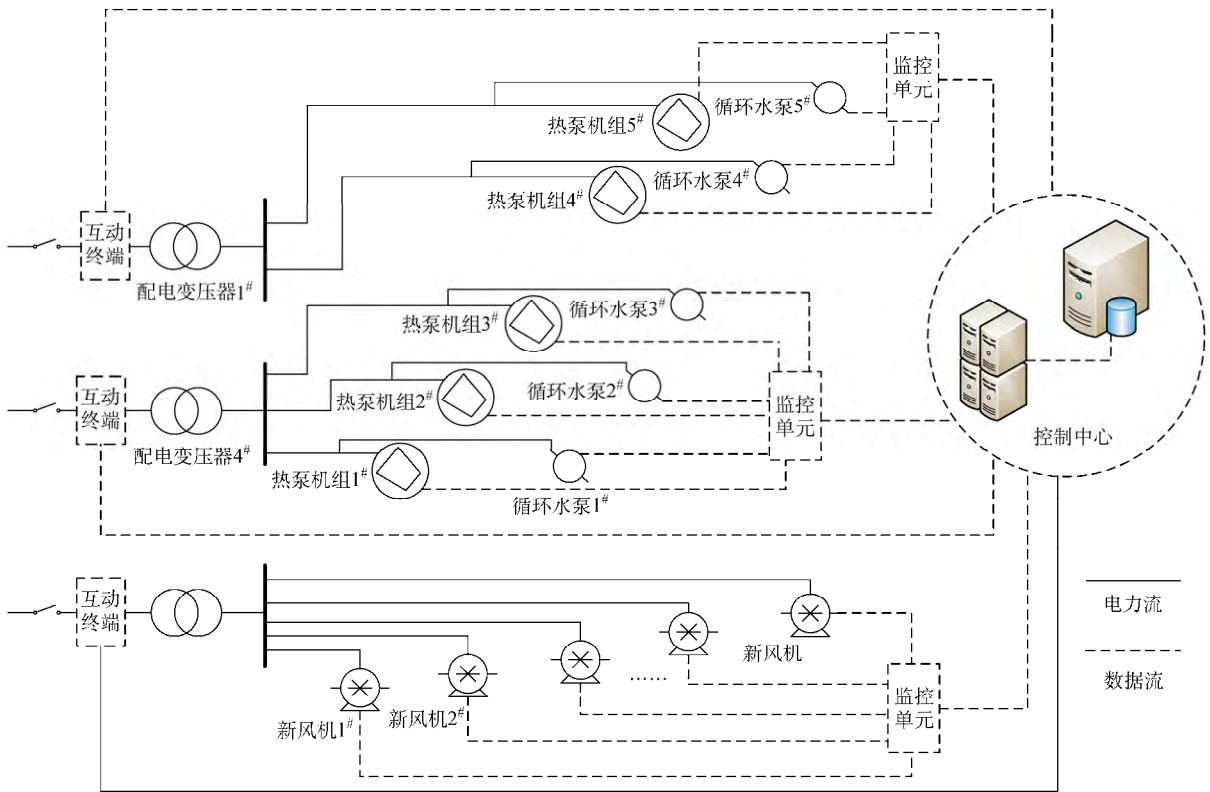


图 1 互动节电系统架构

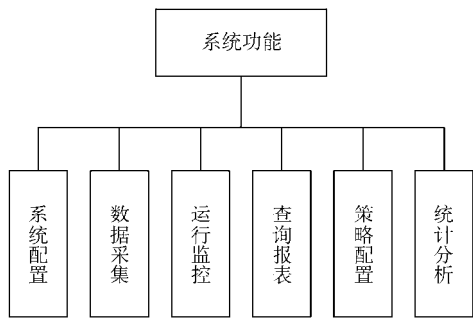


图 2 互动节电系统功能

2.1 常规功能

图 2 系统功能中，前四者为系统常规功能，实现数据的正常采集、监视以及查询功能。其中，

系统配置涉及系统的监控单元采集、告警参数配置以及用户管理等功能；数据采集，实现对监控单元、互动终端数据采集参数及存储数据格式的设置；运行监控，实现对水阀、冷冻泵、主机蝶阀、主机、新风机和变频器的运行状态监视；查询报表，实现对实时负荷、实时状态、空调系统出回水温度、水阀开度、配电变压器日用电量以及室内外温湿度的数据查询。

为便于进行能耗分析，不仅需监测设备的用电量数据，而且需监测设备的运行状态数据，例如新风机的水阀开度、机组起停等离散式数据。具体监测指标体系如表 1 所示。

表 1 互动节电系统监测指标体系

序号	监测对象	监测量
1	配电变压器	电压、电流、有功功率、无功功率和功率因数
2	热泵机组	出回水温度、电压、电流及机组起停
3	新风机	水阀开度、回风温湿度和运行状态
4	室内外环境	温湿度

2.2 策略配置

2.2.1 互动策略配置

策略配置是本互动节电系统的核心内容，涉及单项设备节电互动策略、系统节电互动日运行计划及系统运行策略管理（增加、修改和删除）等。互动策略为制冷主机的起停、新风机的起停及阀度的调节、水泵的变频调节、风机盘管的起停等，具体策略配置如表 2 所示。

表 2 策略配置表

序号	互动对象	可执行策略
1	制冷机组	开、关（On/Off）
2	循环水泵	开、关（On/Off）、流量调节
3	新风机	开、关（On/Off）及阀度（0%，20%，80%，100%）
4	风机盘管	开、关（On/Off）

制定针对空调系统主机和新风机组的控制策略，包括控制执行时间和执行动作。

2.2.2 互动节电策略影响条件

互动节电策略是指在不牺牲用户舒适度的前提下，达到节约用电目的的策略。影响互动节电策略的因素主要有人体舒适温度、电网负荷数据及智能楼宇空调系统自身运行情况。在实际的用户参与电网互动过程中，电网负荷数据，即电网峰谷平时段及其大小数值只是起到互动节电起止时段、互动容量需求等需求的诱发作用。而智能楼宇能够提供多大的互动节电容量及互动节电起止时间取决于智能楼宇空调系统运行情况和人体舒适度。因此，本文以此二者作为其互动节电的约束条件。

(1) ISO-PMV 舒适度约束

在 PMV-PPD 计算评价指标系统中，ISO 7730 推荐，当室内环境保持舒适时，PPD<10%，

-0.5<PMV<0.5。根据文献[11]提供的 ISO-PMV 舒适度指标可知，ISO-PMV 舒适度指标计算公式为

$$\begin{aligned} PMV = & \left[0.303 \exp(-0.036M) + 0.0275 \right] \\ & \times \left\{ M - W - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99 \times \right. \\ & \left. (M - W) - P_a] - 0.42 \times (M - W - 58.15) \right. \\ & \left. - 1.73 \times 10^{-5} \times M \times (5876 - P_a) - 0.0015 \right. \\ & \left. \times M \times (34 - T_a) - 3.96 \times 10^{-8} \times F_{cl} \times [(T_{cl} + \right. \\ & \left. 273)^4 - (T_r + 273)^4 - F_{cl} \times H_c \times (T_{cl} - T_a)] \right\} \end{aligned}$$

式中，M 为人体代谢活动率，W/m²；W 为人体所做机械功，一般情况下为 0 W；P_a 为空气中水蒸气份压力，P_a；T_a 为室内空气温度，℃；F_{cl} 为服装面积系数；T_{cl} 为衣服外表温度，℃；T_r 为平均辐射温度，℃。

由于 ISO-PMV 指标体系涉及指标较多，为简化处理。本文以室内空气温度、相对湿度为终端研究对象，依据文献[10]和 ISO 7730 推荐值，计算出当地对应舒适温度、相对湿度区间。并将此值在智能楼宇互动节电系统中进行设置。

(2) 空调系统负荷分配系数

对于公共建筑、商业建筑等大型楼宇，中央空调系统制冷系统、水系统均大多是以多台设备同时运行。对于水泵来讲，流量越小消耗的能量就越少，其输入功率与对应管道的流量的 3 次方成正比。

$$\begin{aligned} P &= \sum_{i=1}^n P_i = K \sum_{i=1}^n m_i^3 \\ m &= \sum_{i=1}^n m_i \end{aligned}$$

式中，P 为水泵总功率，kW；P_i 为 i 水泵功率，kW；m 为水泵总流量，m³/s；m_i 为 i 水泵流量，m³/s。

因此，只有 m₁ = m₂ = … = m_i 时，水泵系统消耗功率最小。制冷系统亦如此。

2.2.3 互动节电效果分析

此功能是为验证分析互动节电策略执行后

的节电效果、舒适度。本系统所产生的互动节电量计算公式为

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2$$

式中， ΔQ_1 为互动节电产生的空调系统节电量，kW·h； ΔQ_2 为互动节电产生的电网节电量，kW·h。

前者在把相似日负荷作为基准线的基础上，直接比较空调系统（制冷机、水泵等动力设备）的负荷功率；后者可参照文献[6]计算。在进行负荷基准线的选择时，须尽量考虑互动节电策略实施前后的气候条件、工况的相似性。

2.2.4 互动节电策略执行流程

由互动节电系统将制定好的互动策略下发至互动终端设备。

智能楼宇空调系统负荷互动策略执行的核心思想为：在不影响用户舒适度的前提下，互动节电系统根据互动终端设备收集到的电网实时负荷、环节温度和用户空调实时负荷，主动调整空调系统运行策略以适应电网高峰负荷时运行状态的要求。同时，要求能够随时强制终止控制策略的执行。智能楼宇互动节电策略执行流程如图 3 所示。

3 互动实证分析

3.1 实例概况

本文涉及的智能楼宇建筑面积约 50 000 m²，屋层面积约 40 000 m²。采用 U 形布局，共有 10

层，地下 1 层，地上 9 层。楼宇的中央空调系统，含有 5 台 345 kW 的热泵主机，5 台 37 kW 的冷冻水循环水泵，19 台新风机，750 个风机盘管。热泵机组、冷冻水循环泵、新风机和风机盘管均部署了双向互动通信网络，使得这些设备同智能楼宇互动节电系统相连，实现远程运行监控操作。室外环境温湿度是通过太阳能光伏组件监测，室内温湿度是通过在楼宇各楼层走廊部署的温湿度传感器获取。

智能楼宇互动节电系统界面如图 4 所示。

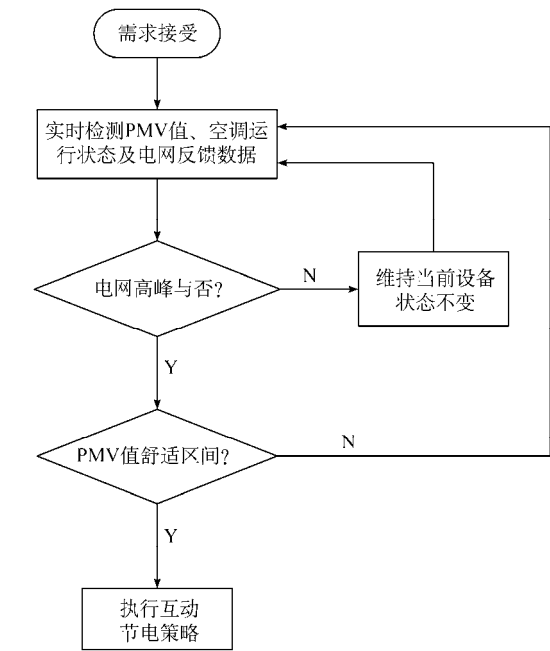


图 3 互动节电策略执行流程

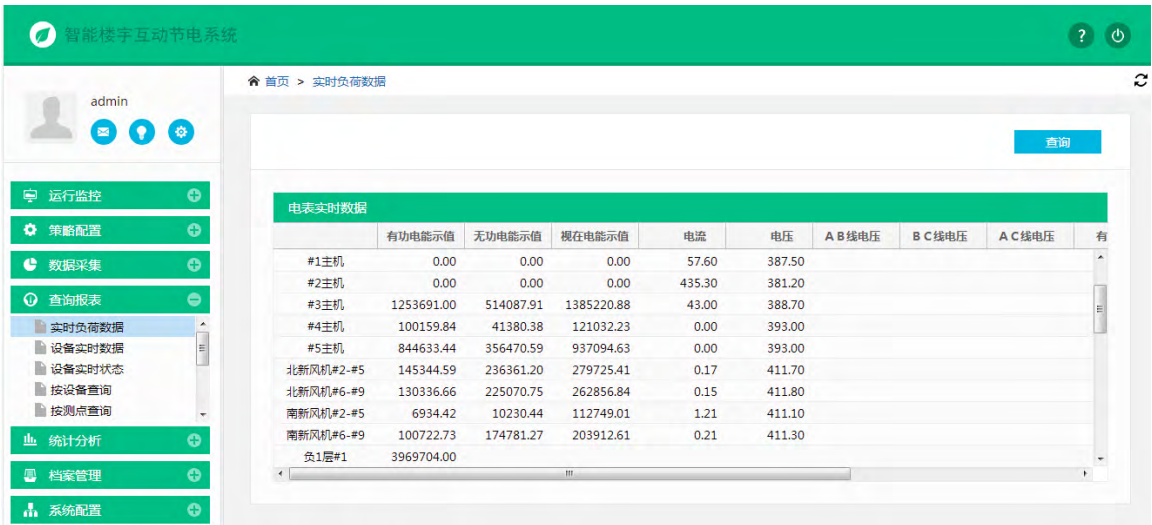


图 4 互动节电系统界面

3.2 互动节电实证分析

本系统曾于某负荷日就互动节电系统进行了模拟演练。该地区此日电网负荷曲线如图 5 所示。

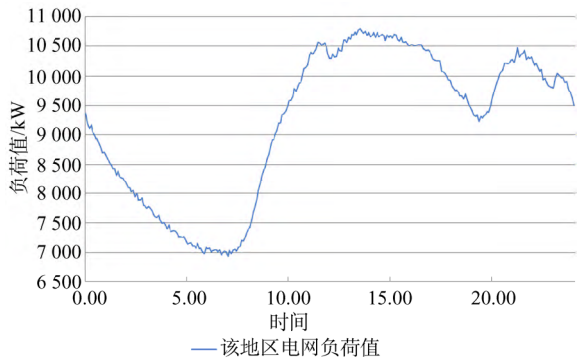


图 5 负荷曲线图

由图 5 可知，该地区电网负荷存在 2 个高峰，白天峰值出现在 13:30，并且负荷在其前后一段时间内持续运行。

此楼宇互动节电系统于 13:00 左右收到互动需求后，立即按照预先参数设置，判断是否启动互动策略，并最终反馈至电网。此负荷日互动过程如图 6 所示。

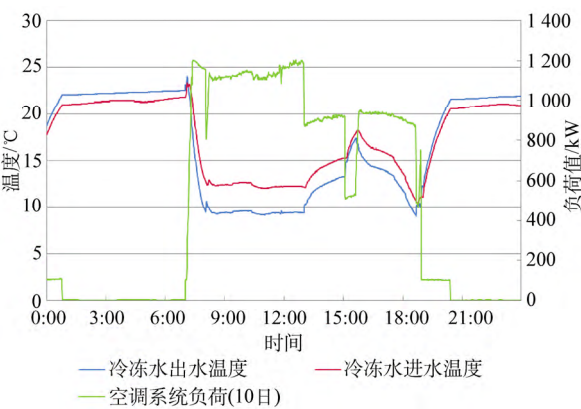


图 6 互动节电过程

由图 6 可知，此次互动节电模拟演练时间分两个阶段：第一阶段起始时刻为 13:00 左右，持续 2 h；第二阶段起始时刻为 15:00，持续 0.5 h，此时空调系统的出回水温度相接近。随后平滑启动制冷机组，以不影响用户舒适度。

(1) 互动节电措施实施后 PMV 舒适度影响
2013 年 8 月 10 日互动节电策略执行后的结果如图 7 所示。

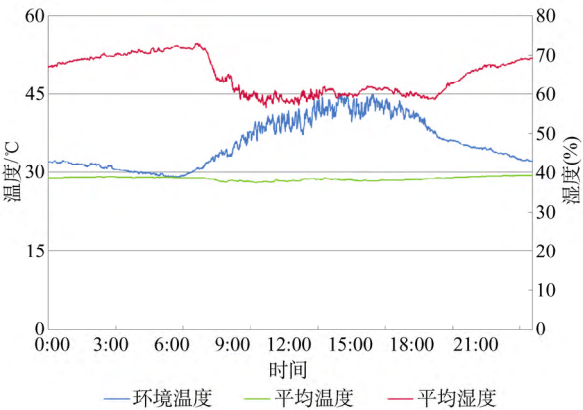


图 7 互动节电实施前后温湿度

图 7 中的环境温度来源于室外屋顶温度监测，平均温湿度来源于室内监测。由图 7 可知，在实施了互动节电措施后，室内温湿度出现不同程度的浮动，但并未超出 PMV 舒适度值。

(2) 互动节电措施实施后节能情况

由图 7 可知，相较于类似温湿度的 8 月 9 日而言，8 月 10 日在 13:00 和 15:00 两个时刻负荷明显下降，同时，用电量也降低很大。第一阶段实现用电负荷下降约 225 kW，节约电量约 450 kW·h；第二阶段实现用电负荷在前阶段基础上下降约 400 kW，节约电量 200 kW·h。节电效益分析如图 8 所示。

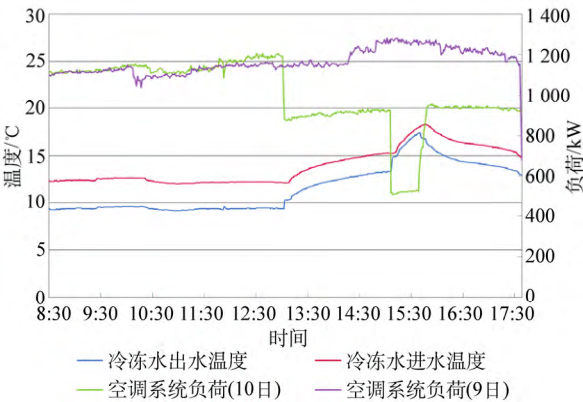


图 8 互动节电效益分析

由以上情况可以看出在夏季用电高峰期间，关停或缓慢下降部分制冷机组，建筑物室内温湿度并不会立即浮动至人体所不能接受区域。本文在计算节约电量时，并未考虑由负荷峰谷差导致的电网本身损耗减少的电量及空调设备均衡分配导致的节约电量。

4 结束语

本文结合柔性负荷的特点对智能楼宇空调系统负荷参与电网互动的可行性、互动的方式和互动的内容进行了深入论述,并设计了相应的互动节电系统。通过具体运行案例,验证了此系统中智能楼宇空调系统负荷在满足冷舒适环境参数空间内存在一定节能潜力。结果表明,在夏季用电高峰期间,空调系统负荷参与电网互动所产生的节电效果明显,且不会影响到用户体验。

截止 2015 年 8 月,已安全运行 2 年有余。运行结果表明,该系统达到了预期的互动效果。

参考文献

[1] 艾臻,黄宇淇,杨晞,等.基于需求响应的中央空调负荷调控技术研究[C].北京:2012年电力通信管理暨智能电网通信技术论坛论文集,2012:391-395.

[2] 清华大学建筑节能研究中心.中国建筑节能年度发展研究报告 2015[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.

[3] 董博,张粒子,程瑜,等.电力市场初期供电公司优化错峰避峰计划的研究[J].继电器,2006,34(13):72-76.

[4] 宋宏坤,王冬利.集中空调系统周期性暂停用电技术研究[J].电力需求侧管理,2004 6(2):12-14.

[5] 辛洁晴,吴亮.商务楼中央空调周期性暂停分档控制策略[J].电力系统自动化,2013,37(5):49-54.

(上接第 62 页)

主要在构建电力营销业务的企业级智能终端应用管理平台的必要性,以及其业务架构等方面进行粗浅地探讨,希望对于构建电力营销业务的企业级终端应用管理平台起到抛砖引玉的作用。

参考文献

[1] 陈学志.基于移动平台的电力营销系统应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2014:32-33.

[2] 马骊.SG186 电力营销应用系统的电费管理模块研究与实现[D].北京:华北电力大学,2012:

[6] 汪卫华,张慧敏,陈方.用削峰填谷方法提高供电企业效益的分析[J].电网技术,2004,28(18):79-81.

[7] 雍静,文允,曾礼强.夏季空调热舒适响应空间及节能潜力研究[J].四川建筑科学研究,2012,38(3):304-308.

[8] 董佳霖.电网节能降损关键技术效果测量与实证研究[D].天津:天津大学,2013.

[9] 张勇军,陈超,廖民传.配电网节能改造优化建模研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(15):60-64.

[10] JGJ 134-2010 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S].

[11] Humphreys Michael A, Fergus Nicol. J. The validity of ISO-PMV for predicting comfort votes in every-day thermal environments[J]. Energy and buildings, 2002, 34(6):667-684.

作者简介

李如意(1965-),男,高级工程师,从事智能用电信息化相关研究工作。

汪会财(1985-),男,工程师,从事用电能效与电动汽车充电技术。

侯兴哲(1965-),男,副高,从事电能计量工作。

刘永光(1974-),男,工程师,从事计量、用电信息采集、用户能效管理等相关研究工作。

刘永相(1978-),男,工程师,从事用电能效与电动汽车充电技术。

(收稿日期:2015-12-10) EA
(编辑:史海疆)

4-5.

[3] 刘文军.基于智能电表的居民用电营销系统功能设计研究[D].北京:华北电力大学,2014:12-14.

作者简介

黄家祺(1986-),男,硕士,中级工程师,主要研究方向:智能电网规划,电力信息通信技术。

(收稿日期:2015-12-10) EA
(编辑:史海疆)