

工学硕士学位论文

基于需求响应的家庭用电负荷控制策略研究

刘宝石

哈尔滨理工大学

2014 年 3 月



国内图书分类号: TM73

工学硕士学位论文

# 基于需求响应的居民用电负荷控制策略研究

硕 士 研 究 生: 刘宝石

导 师: 韦琦

申请学位级别: 工学硕士

学 科、专 业: 信号与信息处理

所 在 单 位: 电气与电子工程学院

答 辩 日 期: 2014 年 3 月

授予学位单位: 哈尔滨理工大学

Classified Index: TM73

Dissertation for the Master Degree in Engineering

Research on Household Electricity Load  
Control Strategy Based on Demand Response

|                                     |                                                |
|-------------------------------------|------------------------------------------------|
| <b>Candidate:</b>                   | Liu Baoshi                                     |
| <b>Supervisor:</b>                  | Wei Qi                                         |
| <b>Academic Degree Applied for:</b> | Master of Engineering                          |
| <b>Speciality:</b>                  | Signal and Information Processing              |
| <b>Date of Oral Examination:</b>    | March, 2014                                    |
| <b>University:</b>                  | Harbin University of Science and<br>Technology |

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于需求响应的居民用电负荷控制策略研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文研究工作做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：刘启石

日期：2014年3月27日

## 哈尔滨理工大学硕士学位论文使用授权书

《基于需求响应的居民用电负荷控制策略研究》系本人在哈尔滨理工大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归哈尔滨理工大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解哈尔滨理工大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门提交论文和电子版本，允许论文被查阅和借阅。本人授权哈尔滨理工大学可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于

保 密 ☐ ，在 年解密后适用授权书。

不保密 ☒ 。

(请在以上相应方框内打√)

作者签名：刘启石

日期：2014年3月27日

导师签名：韦琦

日期：2014年3月27日

# 基于需求响应的居民用电负荷控制策略研究

## 摘 要

随着电力改革的逐步深入,打破垄断、引入良好的竞争机制、优化电网的资源配置、提高电力市场的运行效率成为我国电力改革的方向。一个发展良好的电力市场必不可少的是需求侧的电价反馈。微观经济学相关理论指出,当价格由供需两侧共同决定的时候,市场的收益最大,因此未来电网引入需求响应机制是必然的。需求响应项目鼓励用户积极参与电网的管理,对需求响应信号做出积极的响应,从而实现维护电力系统稳定运行,解决用电高峰电力供应不足及用电低谷电力资源利用率过低的问题。那么普通的家庭用户,在实施的需求响应项目中应该如何更好地根据价格信号控制家庭负荷、管理好家庭能源,从而在减少能源消耗和电价花费的基础上更进一步的实现削峰填谷以及优化资源配置,这是未来电力市场能否成功的关键问题之一。

首先,本文介绍了需求响应的概念、实施所需的技术条件与国家现有的相关政策。针对我国在某些省市对大工业用户已经实施的需求响应项目及国外现行较成熟的需求响应项目做了详细的研究分析。

其次,结合已有的技术条件和需求响应项目实施情况,针对我国居民用户的家用电器负荷的使用习惯,提出分时电价需求响应项目。对参与该项目的家庭负荷进行分类分析,针对不同负荷的不同特点提出不同的控制目标函数。根据目标函数设计家庭能源管理优化算法,并对该算法进行可行性分析。

最后,在 MATLAB 平台下,对不同的负荷控制目标函数,本文对家庭能源控制优化算法进行编程仿真验证。针对单用户目标、多用户目标、控制优化算法的多个约束条件以及实施的需求响应项目的价格高低等对家庭能源控制结果会产生影响的各种因素进行仿真分析。仿真结果显示本文提出的基于需求响应的控制策略可以达到控制家庭负荷用电、优化资源配置、削峰填谷、节约电费的效果。

**关键词** 需求响应; 负荷分析; 能源管理; 优化算法

# **Research on Household Electricity Load Control Strategy Based on Demand Response**

## **Abstract**

With the gradual deepening of the electricity reform, breaking monopoly, introducing competition mechanism good, optimizing resource allocation grid and improving the operating efficiency of the electricity market become the direction of electricity reform in China. The price feedback of electricity demand-side is essential for a good market. Microeconomics theory pointed that the biggest be gained in market when the energy price on a common decision of the supply and demand sides. Therefore, the introduction of grid demand response(DR) mechanisms is inevitable in future. In order to maintain stable operation of the power system, solve the peak power shortage and low power consumption low resource utilization problems, demand response programs encourage users to actively participate in the management grid and make a positive response to demand response program. How ordinary home users respond to demand the implementation of the project could be better to control household load and manage home energy based on price signals. so that reducing energy consumption and electricity cost while further achieving load shifting and optimizing the allocation of resources. This problem is one of the key issues which will determine the electricity market success or not in the future.

First, this paper introduces the concept of demand response, the DR implement required to technical conditions and country's existing policies about DR. Detailed analysis be made about DR which ones have been implemented in large industrial users in some provinces of China's and foreign country.

Second, According to the habits of residents of China use home appliances, TOU DR project was proposed combined with the existing technical conditions and demand response project implementation. Classification analysis was made in home loads which involved in the TOU project. Different control objective functions were proposed for the different characteristics of different loads. According to the objective function this paper designs a home energy management optimization algorithm, and calculate feasibility analysis of the

algorithm.

Finally, According to load control objective function, this paper program and simulate home energy control optimization algorithm in MATLAB platform. Including single-user, multi-user, constraints of optimization algorithm and the price level of demand response programs et al, various factors which ones could affect the simulation results of home energy control the will be analyzed. The results show household electricity load control, optimize resource allocation, load shifting and electricity savings can be achieved through the control strategy this paper proposed based on demand response.

**Keywords** Demand response; Load analysis; Energy management; Optimization algorithm

# 目 录

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 摘 要.....                  | I     |
| Abstract .....            | II    |
| <br>第 1 章 绪论.....         | <br>1 |
| 1.1 课题研究的背景.....          | 1     |
| 1.2 课题研究意义.....           | 2     |
| 1.3 国内外需求响应研究现状.....      | 3     |
| 1.4 课题研究内容.....           | 5     |
| 第 2 章 引入需求响应的技术条件.....    | 7     |
| 2.1 需求响应的定义与应用.....       | 7     |
| 2.2 需求响应技术支持.....         | 8     |
| 2.2.1 先进计量技术.....         | 9     |
| 2.2.2 远程通信技术.....         | 10    |
| 2.2.3 智能控制技术.....         | 13    |
| 2.3 本章小结.....             | 14    |
| 第 3 章 居民负荷特性及用电舒适度分析..... | 15    |
| 3.1 引言.....               | 15    |
| 3.2 居民负荷特性.....           | 15    |
| 3.2.1 家用电器负荷.....         | 15    |
| 3.2.2 分布式电源及储能设备.....     | 17    |
| 3.3 居民用电舒适度分析.....        | 19    |
| 3.3.1 环境舒适度.....          | 20    |
| 3.3.2 时间舒适度.....          | 25    |
| 3.4 本章小结.....             | 25    |
| 第 4 章 优化算法设计.....         | 26    |
| 4.1 引言.....               | 26    |
| 4.2 用电设备调度策略.....         | 26    |
| 4.2.1 问题描述.....           | 26    |
| 4.2.2 用电负荷调度策略.....       | 27    |
| 4.3 差值最小化算法.....          | 30    |

|                     |    |
|---------------------|----|
| 4.3.1 算法目标函数.....   | 30 |
| 4.3.2 算法仿真程序流程..... | 31 |
| 4.4 仿真结果与分析.....    | 33 |
| 4.4.1 单用户仿真.....    | 33 |
| 4.4.2 多用户仿真.....    | 36 |
| 4.5 本章小结.....       | 39 |
| 结论.....             | 40 |
| 参考文献.....           | 41 |
| 攻读硕士期间发表的学术论文.....  | 45 |
| 致谢.....             | 46 |

# 第 1 章 绪论

## 1.1 课题研究的背景

进入 21 世纪,随着科技的进步和经济的发展,全球对电力能源的需求量也逐年递增,而且电力缺口有逐渐增大的趋势。电力负荷峰谷差进一步增大,各地对能源需求的增长远超电力生产能力的增长,供需双方的矛盾日益加深,同时很多新的问题一一出现,如煤炭资源紧张,电力需求量快速增长引起的电网容量不足及环境污染等。这些问题导致了在电力需求高峰时候频繁的功率限制和停电。传统应对方法如高峰时部分区域拉闸限电和启动备用发电机组不仅会增加发电的成本,给人民日常生活带来不便同时还会造成环境污染。

与传统方法相比,需求响应(Demand Response, DR)具有反应迅速、成本小及保护环境等优点。更能使电力系统的运行的经济性和安全性得到进一步的提高。通过不同的激励引导用户在系统用电高峰或者系统稳定性受到威胁时减少用电负荷,在用电低谷时段增加用电,从而保护电力系统供电可靠性并提高系统的资源利用率。长远来看还可以减少电厂及输电线路的投资压力,并且提高服务质量,更进一步的带来节能减排和降低环境污染的社会效益。而对于用户来讲需求响应项目会使供需价格趋于稳定,规避了价格转移的风险,并且是需求响应带来的环境效益的直接受益者<sup>[1]</sup>。

需求无论对发电公司还是用户的作用都十分突出,并且其能带来的多方面效益已经得到国外需求响应项目的实际应用当中得到证明,但是在我国目前需求响应项目实践非常少,只有几个城市有过探索尝试。2011 年我国首个智能电网需求响应示范与可行性研究项目在天津泰达经济技术开发区展开。全国仅有上海等少数几个城市探索实行峰谷电价等需求响应机制。这种情况与我国电力市场的现状有关,我国的电力市场开放程度不高,仅限于电网和发电厂参与市场。我国用户侧庞大的需求响应资源完全没有得到开发,其作用远远未得到体现。当然,我国也在不断学习国外的经验教训,积极探索电力改革之路。随着电力改革的不断深化,电力市场体制的逐步完善,智能电网的不断建设,我国的电力系统也将由以前的供应侧管理逐渐转为供应侧和需求侧共同管理。电力市场的建设者和众多专家学者,也正在积极研究探讨需求响应项目实践需要的相关政策机制与技术条件。

## 1.2 课题研究意义

需求响应使得终端用户可以参与到电力系统的运营中来。例如通过智能电网中的远程双向通信技术可以实行实时电价项目，让用户迅速得知当前电价信息，让用户根据当前电价以及个人习惯来合理制定每天不同时间段的用电计划，从而节约电费的同时尽可能的满足用户用电需求。而家用局域网中的智能控制中心能自动对环境变化及激励信号做出响应，只需要用户提前设定，系统就可根据优化程序自动控制家庭用电负荷可以给用户带来极大的便利。同时，电力系统可以根据全部用户的历史数据做出的预测以及实时用电情况，调整各时段电价来引导用户改变用电模式，从而维护电力系统的安全稳定运行。

我国的清洁能源发展也十分迅速，如风力发电和光伏发电。但这些能源的波动性、随机性和间歇性使它们并网运行时威胁到电力系统的安全稳定。通过需求响应就能很好地解决这一难题。以光伏发电为例，随着光伏发电系统的电量输出的变化，可以通过需求响应中的实时电价项目调整当前电价，从而使终端用户根据电价引导调整用电负荷，最终实现发电和用电的平衡。由此可见需求响应不仅能够维护电网运行、优化资源配置，还能促进新能源产业的发展建设。

随着智能电网的技术不断进步，分布式电源以及储能设备并入大电网运行已经能够实现无缝连接。电力来源的多元化给用户更多的选择的同时也给需求响应对负荷的调度带来了新的问题。需求响应项目的参与用户如何在根据响应信号来制定储能装置的充放电时间，以便能够达到最佳的节约花费目标，对于峰谷电价的参与用户可以考虑在高峰放电低谷充电的方式，但对于可中断负荷的参与用户来说，这个策略显然是不可行的，因为他们必须达到一定的负荷削减量才能得到价格补偿。需求响应还能促进电力系统供需两侧的双向互动，用户可以在用电高峰期向电网出售储能装置的富余电力而获得收益从而减少高峰时段系统的发电量。因此，如何根据用户的习惯和电力系统的实际情况来设计需求响应机制，发挥需求响应的最大作用值得深入研究。在智能电网基础上的需求响应研究已经成为国际研究热点之一，我国在需求响应方面的理论和实践都要落后于国外。因此面对不断发展的智能电网需求侧响应项目，本文针对智能电网用户端如何在需求响应项目的框架下进行负荷管理，改变用电模式的研究具有十分重大的意义。

### 1.3 国内外需求响应研究现状

美国在 20 世纪七十年代率先提出用户需求侧的管理这一概念。2001 年美国加州电力危机爆发,此次危机过后随着全球经济的迅速发展,全球面对频发的电力危机,需求侧响应逐渐登上了各国电力市场建设的舞台。自 2001 年以后,国外在需求响应方面的研究步伐逐渐加快。国际能源机构(International Energy Agency--IEA)于 2003 年发布了第一份需求侧响应的研究报告,报告总结了一些国家需求响应发展过程中获得的成果和遇到的问题<sup>[2]</sup>。国际能源组织需求侧响应专项工作小组在 2006 年编写发布了需求侧响应指南书,同年美国能源部也发布了需求侧响应专项研究报告。美国电力市场是世界发展最成熟的电力市场,目前各类需求响应在多个地区都有市场化项目的运行。美国最新研究表明,美国现行的各种能源方案中,与需求响应有关的能源贡献容量约达到 37500MW,大约相当于美国夏季的总用电计划需求量的 5%<sup>[3]</sup>。2009 年 2 月美国签署了《美国复苏与再投资法案》,美国能源部将获得 45 亿美元的投资,用于促进 DR 设备的发展,推进智能电网技术的研究。欧盟委员会在 2010 年发布了 3 个 2020 年欧洲气候和能源目标时指出需求响应是帮助欧盟委员会实现这些目标的一个重要手段,这将大力加快需求响应的在欧洲的发展速度。随着需求响应的不断研究和实践,用户需求侧响应研究有了新的内容。在智能电网中技术的不断进步,用户与电力公司不仅可以进行实时双向通信,还可以通过智能控制技术更好的维护系统和控制负载,因此需要设计更灵活的需求响应策略以充分发挥先进技术的有利作用。

目前国际上有很多关于需求响应电价设计及 DR 下的用电设备调度的研究成果。文献[4][5]都采用了分布式梯度算法解决最小化电费成本和功耗限制引起的用户不满的问题,从而实现社会整体效益最大化的目标。实际过程是通过算法设计电价促使用户更合理调度其用电设备以减少发电峰荷,从而减少电力公司总发电成本,增加总体收益。其中文献[5]对几种常用的家电设备建立了函数模型,还考虑了电动汽车等充电设备的调度,但其没有考虑推迟用电设备使用对用户的影响。文献[6]则是对 DR 中的实时电价定价策略进行研究,通过能量管理控制器对用电设备进行调度,实现供应端的利益最大。文中注意到了推迟电器使用降低了用户满意度的问题,但对功率可调的家用电器该如何调度没有考虑到。文献[7][8]研究了针对电力出现短缺情况时基于激励的需求响应项目的定价机制。文献[9][10][11][12]运用博弈论的相关知识对需求响应进行研究。其中文献[9]还提出了一种分布式策略,利用用户的需求响应降低高峰时段

负载率从而弥补电力短缺。但这几篇文章都没有考虑清洁能源参与需求响应时对用户和系统的影响,也并未提出具体设备的调度方法。文章[12]提出了一种基于 VCG 拍卖机制的设计方法使得电力系统中资源得到合理分配,达到效益最大,作者同样没有将功率可调节设备考虑到分配中去。

国外对需求响应机制下的负荷调度问题研究成果也很多,文献[13][14]基于实时电价需求响应项目和电价预测提出了功率可调节的用电设备的调度策略,文章中考虑了设备可延时使用的情况。其中文献[13]研究在电费最小和电器延迟时间最小两个目标综合考虑的调度策略,并提出了一种自治住宅能耗调度框架。而[14]则提出了电价不确定时的调度策略,但没有提出针对具体家电的调度措施。文献[15]同样基于电价不确定情形研究了可推迟使用的设备的调度问题。文献[16]提出了一个基于家庭局域网的需求响应框架。文献[17]针对需求响应对发电厂扩建计划决策的影响进行建模研究,引入一个指数函数对新发电机组的建设做全面的评估。文献[18]提出了一种基于需求响应的工业能量管理系统,并且以钢铁工业为例说明了该系统的工作过程。文献[19]设计了一种适用于需求响应的基于自适应神经模糊推理的能量管理系统,其控制采用的是分支界定调度算法。

国内在需求侧响应方面的研究起步较晚,2004 年刚开始接触到需求响应相关的理论<sup>[20]</sup>,但研究和实践发展速度迅猛,华北电力大学、上海交通大学和哈尔滨工业大学等高校都在积极研究探索需求侧响应的理论和实践机制,需求响应相关的研究成果也在逐年增多。目前我国在电力市场管理方面没有全面开放,用户需求响应的实践还没有形成规模。我国在投入实际应用的需求响应仅有可中断负荷,峰谷电价,季节性丰枯电价等。文献[21][22][23]介绍了需求响应的概念、分类、所涉及的技术以及国外电力市场中需求响应项目的实践和运行机制等内容。文献[24]详细介绍了需求侧竞价的相关理论知识,并结合国际上的实际案例阐述了其实施模式,并探讨了其在电力市场中的实施机制。

国内对需求响应的价格和机制研究成果较多,文献[25]提出了一种基于上网与销售两种电价联动的经济学优化模型,并根据相关的实例分析提出电价联动方案的建议。文献[26]根据峰谷分时电价下用户响应的历史数据,用响应数据建立矩阵表示用户对价格信号的响应程度,综合考虑了用户用电满意度,提出了一种峰谷分时电价的优化决策模型。文献[27]则根据用户满意度建立了需求侧竞价的价格决策模型。文献[28]则提出了一个基于舒适度的家庭能源管理算法,但是没有考虑新能源对家庭能源的影响。而[29][30][31]则研究解决了建立可中断负荷项目的数学模型和价格决策模型的问题。文献[32]总结了当前国

际上智能电网方面的一些研究成果,探索了智能电网中实施需求响应的相互作用,并提出了一些关于智能电网与需求响应发展的建议。文章[33]基于对偶分解算法提出了一种分布式算法,用于实时电价的定价策略。文献[34]详细介绍了需求响应期权的原理、交易形式及其价值,并提出了智能电网下多种用户需求响应的期权形式。文献[35]建立了协调优化模型,在智能电网下将紧急需求响应项目加入系统备用。

近年来智能电表的大范围使用,先进计量技术的逐渐普及,也促进了智能控制技术的发展,国内对于需求响应视角下智能控制系统的相关研究也慢慢重视起来。文献[36]设计并实现了基于高级计量架构(AMI)的面向家庭用户的家庭能源管理软件系统,并搭建了硬件平台。文献[37]研究了在分时电价项目下,新能源汽车蓄电池的集中充电策略。文献[38]设计了用户端能源管理框架,从软硬件层面实现对用户的需求响应和需量控制。文献[41]在建立人体舒适度调节空间的基础上研究空调系统实现需求侧管理的方法。

国内也在探究用一些新的算法和策略进行需求响应研究,如模式分类算法和经济学方法等。文献[39]运用粒子群算法对别墅用户的需求响应做出决策,达到节能的目的。文献[40]将遗传算法交叉验证和支持向量回归的方法用于实施电价的预测,并在此基础上通过混合整数规划的方法帮助用户进行用电决策。文献[42]通过博弈论方法研究了实施电价的定价机制,并提出了一种用于家庭能源调度的分布式在线学习算法。文献[43]通过博弈论中的双寡头模型来研究供电商和用户之间的相互作用,从而提出需求响应项目方案。

## 1.4 课题研究内容

本课题研究来源于哈尔滨科技创新人才研究专项资金(RC2013LX007003)。

本文的主要研究内容如下:

1. 本文首先对需求响应的概念与内容做了论述,系统阐述了需求响应对电力供需两侧的影响及其对于电力系统和用户的重要作用 and 巨大效益。详细的介绍了课题的研究背景以及国内外关于需求响应的研究成果,并细致分析了各个研究的优缺点。

2. 详细研究了国外电力市场实施的需求相应项目实例,通过这些实例引出了家庭能源管理系统所需要的技术基础及标准。从计量、通信、控制三个方面,分析了现行的主要技术手段及该技术在需求响应中的作用和影响。

3. 对普通家庭用户的用电负荷分为两类,分别进行负荷特性数学分析。对

于用户用电舒适度分为环境舒适度和时间延迟舒适度两方面进行建模分析，根据分析结果确定环境参数和时间参数两个约束条件的设定。

4. 对于家庭能源管理调度问题进行数学模型分析，建立差值最小化算法公式。在 MATLAB 平台上，针对差值最小化算法应用于家庭能源调度问题进行编程，针对单用户、多用户，不同的分时电价价格比和不同的时间约束条件进行细致的仿真，并对仿真结果做出分析。

## 第 2 章 引入需求响应的技术条件

### 2.1 需求响应的定义与应用

需求响应的定义由美国首先提出，是指通过提高价格或其他激励措施促使电网终端用户主动改变固有的用电习惯，从而达到在电力价格高涨或者电力系统可靠性受到威胁时利用先进智能化计量装置降低用电负载的短期行为。

按照电力终端用户根据价格信号或激励机制做出的响应方式的不同，可以将需求响应可以分为基于价格和基于激励两种。基于价格的需求响应项目是通过改变电力价格的方式促使终端用户自主做出用电时间和方式的改变，包括分时电价(TOU)、尖峰电价(CPP)、实时电价(RTP)等<sup>[44-46]</sup>。基于激励的需求响应项目是指 DR 运营机构根据电力供需情况制定相应政策，使得用户在系统需要或电力紧张时减少电力需求，以此获得直接补偿或其他时段的优惠电价，包括直接负荷控制、需求侧竞价、紧急需求响应计划、可中断负荷控制、容量/市场辅助服务计划等<sup>[47-48]</sup>。

这两种需求响应是可以相互促进实施的，国外很多公司都是两种需求响应共同实施，以达到更好的效益。英国实行的是分时电价和可中断负荷项目，其中分时电价提供给用户多种不同的分时电价，可中断负荷则提供 3 种合同形式给用户：快速备用、短期运行备用和稳定电网频率响应。芬兰的分时电价包含 6 种不同的时段电价：电力高峰时段的峰、平电价，中等时段的峰、平电价以及低谷时段的平、谷电价。而可中断负荷项目则根据提前通知时间和可中断持续时间的不同将合同划分成 5 种类型，合同规定一年内用户中断用电时间需要达到 240 h，但对用户的中断次数是有限制的。挪威需求响应有可中断负荷控制和需求侧竞价，可中断负荷控制根据提前通知时间和中断持续时间可分为：(1)提前 15 min 通知用户，中断持续时间无限制，削减 5% 负荷；(2)提前 2 h 通知用户，中断持续时间无限制，削减 25% 负荷；(3)提前 15 min 通知用户，中断持续时间 2 h，削减 75% 负荷。若用户违反协议用电，则用户在模式(1)、(2)、(3)时的电价分别是 2.75 欧元/kWh、10.83 欧元/kWh 和 32.63 欧元/kWh。需求侧竞价即电力调频容量市场项目，需求侧资源可以与发电机组竞价从而实现电力平衡。西班牙也是分时电价和可中断负荷项目共同实施，法国的分时电价项目也独有特色，电价的高低由电价标记颜色和用电的峰谷时段共同决定。

需求响应在欧美的广泛建设源于其对电力系统和用户的众多有利的作用，需求响应在用电高峰时对负荷的削减作用十分巨大，美国电力市场十分成熟，有多种需求响应项目的实际应用经验，表 2-1 是在美国实施的不同的需求响应项目实现的负荷削减情况<sup>[49]</sup>。通过表格 2-1 我们能更直观的了解需求响应的负荷削减效果：

表 2-1 需求响应在美国实现的负荷削减(MW)

Tab.2-1 Demand Response load reductions achieved in the United States

| 类型                  | 项目名称            | 工商用户  | 居民   | 批发市场  | 其他   | 合计    |
|---------------------|-----------------|-------|------|-------|------|-------|
| 基于价格的<br>需求响应<br>项目 | 尖峰电价            | 401   | 30   | 100   | 88   | 619   |
|                     | 结合 DLC<br>的尖峰电价 | 129   | 8    | 0     | 13   | 150   |
|                     | 实时电价            | 1117  | 4    | 0     | 0    | 1121  |
|                     | 分时电价            | 2132  | 100  | 35    | 19   | 2286  |
|                     | 其他              | 242   | 142  | 1000  | 56   | 1440  |
| 基于激励的<br>需求响应<br>项目 | 需求侧竞价<br>/回购计划  | 1251  | 0    | 2570  | 17   | 3838  |
|                     | 直接负荷控<br>制      | 1687  | 5568 | 793   | 957  | 9005  |
|                     | 紧急需求响<br>应      | 1375  | 163  | 11493 | 11   | 13042 |
|                     | 可中断负荷           | 9524  | 50   | 1033  | 371  | 10978 |
|                     | 容量备用            | 3530  | 1124 | 4110  | 53   | 8817  |
|                     | 调频服务            | 0     | 0    | 10    | 0    | 10    |
|                     | 其他              | 46    | 0    | 1560  | 0    | 1606  |
| 总计                  |                 | 21434 | 7181 | 22712 | 1585 | 52912 |

## 2.2 需求响应技术支持

需求侧资源的开发需要先进智能电网技术的支持。需求响应项目的开展和推广很大程度上取决于智能电网基础设施建设的先进程度。需求响应需要智能电网技术可以支持的功能包括：能够分时段测量并有远程通信功能的智能电表；高速度高可靠性高安全性的电力通信技术，用来通知用户端需求响应事件的发生，并能够近乎实时的通知用户最新的电价信息和各家用电器用电量；能够根据历史数据及实时获得的负荷数据，分析一般情境下的负荷削减获得的效益，同时为供电侧和需求侧提供负荷削减建议及电价预测信息；在用户侧拥有方便快捷的可以实现用电负荷的自动化控制的控制中心或者植入式的能源调度控制系统。以上的这些功能可以归类为先进计量技术、电力通信技术及与软硬

件相关的智能控制技术。先进计量技术与电力通信技术构成了高级计量架构(Advanced Metering Infrastructure, AMI), 通信技术与智能控制技术构成了能源管理系统。

## 2.2.1 先进计量技术

高级计量架构 AMI 是智能电网的核心组成部分, 是能够在智能电表和电力公司之间实现自动通信的系统, 它能够给电力公司提供电表实时测量到的电力系统和用户终端用电的各种电能参数, 同时也帮助用户了解电价变化和家用电器的用电情况, 实现更明智的用电。AMI 系统可以在检查电网线路、监控电能质量、防窃电、支持响应型需求响应项目、处理停电事故以及提升顾客服务质量等方面起到重要作用。高级计量架构 AMI 通常由 4 个部分组成, 如图 2-1 所示, 包括智能电表, 远程通信网络, 数据收集系统和包含数据处理功能的主机系统。

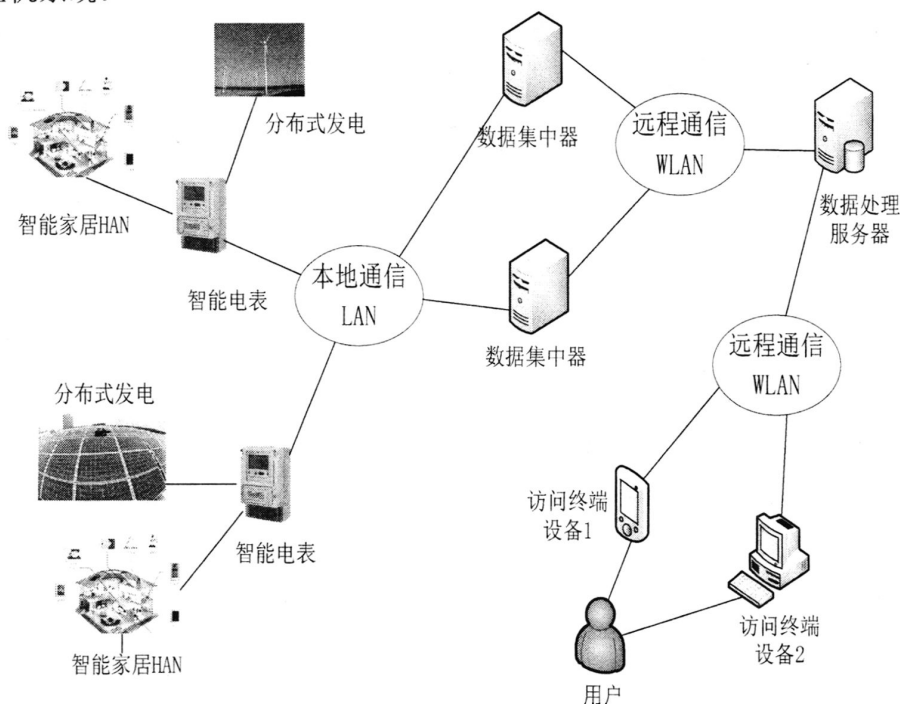


图 2-1 AMI 组成图

Fig.2-1 AMI system structure diagram

终端智能电表测量到的用户用电或其他计量任务的相关数据发送到数据集中器中, 通过远程通信网络将数据传送到主机系统进行数据处理, 电力公司再

通过获得的分析数据进行决策。AMI 的数据管理系统使得电力公司对大量数据的存储和分析能力大大提升。在需求响应项目中，在计量时间间隔及电价波动的时间都大大缩短后，终端用户的计量数据量将大幅度增长，例如计量时间从每月缩短为每小时后，一个终端用户的一年采集数据量便从 12 个增长到 8760 个。AMI 的数据管理系统还可以进行快速的数据处理，通过强大的数据分析能力电力公司更清晰的掌握系统和用户用电情况，这为更合理高效的管理电力系统提供了便利，对电力机制的改进及电价的制定提供了更准确参考数据，更有力的促进需求响应项目的实施。

智能电表是 AMI 系统基础设施中最重要的一环，近年来，智能电表的发展也十分迅速，技术也十分成熟。相对于传统的机电式电表，为了适应智能电网和新能源的使用智能电表具备更先进的功能，包括双向多种费率的计量、用户终端控制功能，计量精度也得到了有效提高，并具有双向通信功能，可以用多种数据传输模式来传递信息。终端用户可以根据自身的用电习惯和需求响应项目来设定具体参数来进行用电管理。为了配合 AMI 系统的建设，建立智能电表网络，智能电表还支持实时读取，远程控制的功能；通过集成在电表内的传感和测量技术，智能电表还可以实现电力系统窃电检测、电能质量检测和故障定位等功能。智能电表这些智能化功能对智能电网和需求响应的发展都有积极的促进作用。

### 2.2.2 远程通信技术

智能电网的通信技术分为单向通信技术和双向通信技术两类，通信网络按照适用范围可以分为用于电力生产过程的通信网络和面向用户服务的通信网络，如图 2-2、2-3 所示。通信技术的选择使用主要由当地的地理和人口来决定，例如在沿海大城市，人口密度高，数据采集量大，这种环境要求必须有完备的网络基础设施，要安装数据集成装置和数据路由装置，这样才能满足大数据的存储和发送的需求。单向通信通常是指远程抄表，但现在通信技术迅猛发展，单向通信逐渐被取代，未来的电力通信趋势必然是双向通信方式。完全的双向通信可以供电测和需求侧都能同时接受和发送数据，是需求响应供应侧和需求侧双侧互动的前提。当前 AMI 系统的远方通信主要形式有：光纤通信、电力线通信、无线电 RF、GPRS 和 3G/4G 移动通信等。

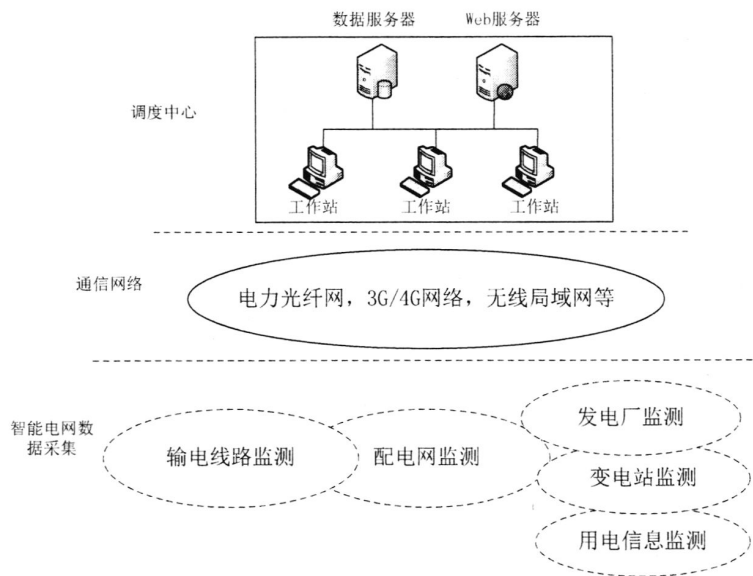


图 2-2 智能电网生产过程的监测通信网络架构

Fig.2-2 Monitoring communication network architecture of smart grid production process

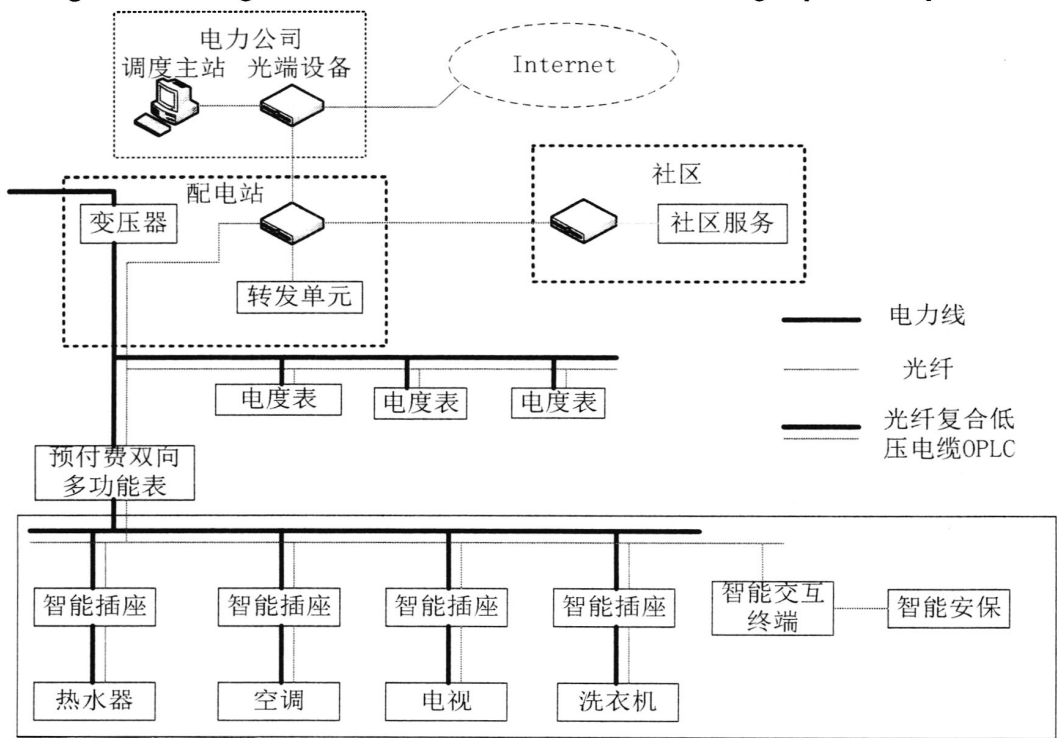


图 2-3 智能电网用户服务的通信网络架构

Fig.2-3 Communication network architecture of smart grid user service

(1) 光纤通信是以光导纤维作为传输介质,以光波作为信息载体的先进通信技术。光纤通信具有速度快,安全性高,抗干扰和性价比高的优势,十分适用于电力通信。目前光纤通信技术发展应用十分的成熟,有较为统一的国际标准,使用范围也十分的广泛。我国现在已经拥有世界上规模最大的电力专用光纤通信网络。但是我国光纤通信也有一些缺点,“骨干网强、接入网弱”、“高电压端强,低端弱”的问题亟待解决。另外采用光纤通信作为智能电网的电力通信技术,还需要解决“最后一公里”的问题,即从通信服务提供商的机房交换机到用户终端设备之间的连接问题。

(2) 电力载波通信 (Power Line Communication, PLC): PLC 电力载波通信是电力系统特有的通信技术,通过载波方式如在电压和电流信号中加入通信信号来实现电力通信,它的优点是不需要额外架设通信线路,利用原有的电力线即可实现传输。PLC 具有一定的局限性,但是 PLC 系统特别适用于交通不便架设线路困难的农村地区。有的供电公司的供电系统覆盖范围同时包含了农村和城市两种环境,这种情况下采用 PLC 通信技术可以在全部服务区中通过一种通信技术就建立一个统一完整的先进计量系统。智能控制技术的发展也给 PLC 的发展带来了新的前景,在家庭区域网 HAN 中大家都看好无线通信技术,但是墙对无线信号的衰减问题难以解决,于是不用重新架设线路的 PLC 通信进成为了最佳选择方案之一,同时其成本也远远低于无线通信。

(3) 射频无线电通信 (Radio Frequency, RF): RF 信号一般频率较高,使用 RF 进行电力通信的过程是使用一个固定的频率的射频信号通过一个非公共网络实现智能电表的通信功能。20 世纪 90 年代末,美国在供电网络中大幅度推广自动抄表系统,而这些系统的通信都采用固定无线电频率 RF 通信。有些 RF 网络具有“自愈”功能,“自愈”功能对于维护配电网络稳定运行具有重要的作用,配电网有时因为环境因素因素如雷击,暴风雨或人为原因等影响到正常的网络通信。当遇到这些影响因素时,RF 网络可以通过“自愈”功能,自动调节通信线路保持通信畅通。一般情况下从智能电表等终端到电力公司主机系统间都有多条通信路径,当使用中的通信路径因为意外断开时,终端会自动切换至其他通信路径保证正常的通信,这些先进 RF 网络具有通信功能强和覆盖面宽的优点。

(4) 第三代移动通信技术:第三代移动通信技术 3G 是指支持高速率数据传输的蜂窝移动通信技术。目前 3G 存在四种标准:CDMA2000、WCDMA、TD-SCDMA、WiMAX。3G 移动通信最主要的特征是以其传输容量大,通信质量和数据传输速率高,因此能提供更多更高级的服务如处理音频、图像、视频

流等多种媒体形式, 3G 能够支持多种传输速率, 在静止, 慢速移动, 高速移动环境中分别支持至少 2Mbps(兆比特/每秒)、384kbps(千比特/每秒)以及 144kbps 的传输速度。很多公司企业都将 3G 用于视频会议, 产品生产过程的实时监控等。3G 技术的高传输速率和安全性、可靠性也十分适合智能电网采用其用以终端和主机间的远程通信。

## 2.2.3 智能控制技术

需求响应需要智能控制技术的支持, 当用户收到响应信号, 通过智能控制技术可以根据用户和电力公司的协议或者用户设定的价格和使用时间等其他条件, 自动削减家庭用电负荷, 这能给用户的家用电器调度带来极大的便利。对于参与需求响应项目的用户来说, 当接收到系统发来的需求响应信号时, 便可使用智能控制技术通过程序的设定自动削减负荷获得收益, 这可以提高用户参与需求响应的积极性。目前家庭区域网络 (Home Area Network, HAN) 是发展最快的智能控制技术, HAN 原本是为了增强数字设备之间的互动和交流发展出来的, 现在 HAN 也逐渐成为了智能电网的一部分, 参与到了家庭用电负荷的自动调度当中。HAN 分为广域网和局域网两个部分, 局域网除了发送和接收电价信息还包含设备控制功能, 广域网则负责连接各 HAN 局域网和电价等信息的传输。HAN 的智能控制功能使得用户通过实现设定的程序控制他们的电视、电脑以及空调、热水器等用电设备。

从 2003 到 2009 年, 欧洲安装 HAN 自动化系统的用户每年都以 20% 的速度增长, HAN 系统的运行需要先进计量装置的辅助, 这大大促进了 AMI 的发展建设。但是新的发展机会也带来了新的难题, 电力公司及其支持者希望电力公司安装的智能电表可以作为 HAN 系统的网关。因为在给 HAN 系统提供计量装置时, 使用电力公司提供的智能电表作为网关可以是智能电表直接成为电力公司计量系统的一部分, 电力公司可以直接对家庭负荷控制和需求响应实施必要的统一管理和控制, 方便电力系统的运营和维护。而非电力公司的 AMI 顾问以及 HAN 方案提供商则持反对意见, 他们更希望由自己提供网络设备作为 HAN 的网关转换器。

现在已有使用 AMI 之外的通信系统来为 HAN 提供网络服务的案例。美国加州能源委员会对修改建筑节能标准的提议当中有一项就是推广使用智能热水器, 而对智能热水器的单向通信技术采用的就是调频无线电通信。但这一提议遭到了美国三大电力公司的一致反对, 他们希望在自己建设的 AMI 系统中能够用系统本身的通信技术为用户提供数据传输和负荷控制服务。

## 2.3 本章小结

本章对需求响应的概念、分类做了详细的介绍，并对国外电力市场中一些现行的需求相应项目的实施方式方法做了阐述。对于需求响应所依赖的电网技术分为计量技术，通信技术，控制技术三种做了分别介绍，而且对国际上现行的各种计量、通信、控制主流技术从概念、结构、优缺点以及在需求响应中所起到的作用做了详细的论述。

## 第 3 章 居民负荷特性及用电舒适度分析

### 3.1 引言

本文上一部分介绍了需求响应所需要的通用技术条件，在实际的需求响应项目中，要实现需求响应的目的，对于居民用户来讲，实际上是通过家庭用电设备的调度来响应需求响应项目信号的。一个家庭用户中有很多的用电负荷，我们在负荷调度的时候要充分考虑到不同用电负荷的不同特性。本部分就是研究分析居民用电负荷的不同性质，根据它们不同的用电特性，来设计随机调度的策略，以达到更好的削峰填谷，能耗调峰的效果。

### 3.2 居民负荷特性

我们假设一个家庭中大多数的用电设备使用时间都是可推迟或可提前的，但是基于用户的用电舒适度，可改变的时间的长短是不相同的，并且每个家庭中至少拥有一个储能装置，如家用太阳能系统或者电动汽车中的储蓄电池。每个居民用户的电器都处于家庭网络(HAN)联网中接受中央控制器的统一控制。消费者将自己的用电要求上传给 HAN 中的控制系统，控制中心则根据用电要求衡量用户对设备使用时间的舒适度要求，同时综合智能电网中传过来的电价等关于需求相应项目的信息，根据内嵌的算法优化结果，得到负荷用户要求的控制策略。下面，将根据家用电器的负荷特性来分类建模。得到的分析结果有助于我们得到符合用户期望目标的控制策略。

#### 3.2.1 家用电器负荷

需求响应项目中负荷控制的通常情况是：将一天分成  $t=1,2,\dots,T$  个离散的时间段。假设用户在某一时段  $t$  需要使用设备  $m$  完成一项工作，设备  $m$  为了完成这一项工作任务需要消耗大小为  $\gamma_m$  的电量，当用户收到需求响应信号时，需要运行或关闭某个设备，智能控制中心会对设备  $m$  自动执行控制指令。本文使用电量需求向量： $z(t)=(z_1(t), z_2(t), \dots, z_m(t), \dots)$  来描述用户的设备用电需求，其向量中的  $z_m(t)$  即该向量的第  $m$  个分量就是用户对用电设备  $m$  的需求信息。例如，在时段  $t$  用户想要运行设备  $m$ 。那么我们令： $z_m(t)=\gamma_m$ ，反之，要想关闭设备  $m$  则有： $z_m(t)=0$ 。但是在需求响应下用户的用电需求不会得到立刻执

行, 控制中心会通过通信网络调查当前的电价, 而在某个合适的时刻执行该任务。本文使用电量分配向量  $l(t) = (l_1(t), l_2(t), \dots, l_m(t))$  来表示在时刻  $t$  设备得到分配的用电量, 设备  $m$  的电量为  $l_m(t)$ 。控制中心的目标是在尽可能使得用户满意的情况下使用用户的平均电费最少。由此可见, 控制中心可能会改变设备  $m$  的使用时间(提前或推迟), 不考虑控制系统在用户设定完成一天用电计划后提前完成任务的情况, 因为提前完成任务对用户满意度的影响较少。若  $m$  是功率可调节设备, 考虑用户满意度, 控制系统可能不直接中断或延迟  $m$  的使用而只是降低使用功率, 但不管是推迟还是降低功率, 控制系统内部会产生一个设备的延迟队列。

家用电器的使用通常有相互联系, 例如使用电饭煲通常意味着同一时段需要使用吸油烟机。另外家用电器的延迟时间设置通常根据不同的用户习惯而改变, 所以设备转移概率通常是未知的。延迟设备的使用对用户产生的影响大小我们需要用一个量来衡量。用户将在智能控制中心中设定其用电计划, 当计划中的设备使用需求因为需求响应得不到立刻满足时。推迟时间越长则用户满意度越低, 设备  $m$  延迟队列长度的值用  $\alpha_m U(x)_m$  表示, 其中  $\alpha_m$  代表用户对设备  $m$  延迟的忍受度。 $\alpha_m$  的值越大, 表示用户对  $m$  设备的延迟的忍耐度越低。例如有紧急工作需要使用电脑时, 对电脑的推迟使用会迅速降低用户的用电满意度, 此时用户对电脑的  $\alpha_m$  值较大, 此时对热水器, 电视等其他用电设备的延迟, 对用户的满意度则影响较小, 此时这些用电设备的  $\alpha_m$  就较小, 及用户对该延迟忍耐度较大。对于设备  $m$  不满意函数  $U(x)_m$  则满足以下两个特性:

(1)  $U(x)_m$  是增函数。在需求响应下, 系统推迟使用的设备越多, 设备的推迟使用时间越长, 用户不满意度越高;

(2)  $U(x)_m$  是正函数, 用户不满意度通过正数衡量, 不满意度越高, 数值越大。

设备的延迟使用实际上等同电力推迟消耗, 可以用从  $t$  时段转移到  $t+1$  时段的用电量来表示延迟队列长度。若原计划中  $t$  时段里的用电总量为  $x(t)$ , 则  $t+1$  时段的延迟队列总长度可以表示为:

$$\alpha U(x) = x(t+1) = x(t) + z(t) - l(t) \quad (3-1)$$

其中  $l(t) \leq x(t)$ 。从以上分析可以说居民负荷一般都具有可推迟的特性。而该特性对满意度和需求响应有直接的影响, 本文将在后面的时间满意度中详细论述如何设定用电设备的运行可转移时间, 以最大限度的满足用户的用电需求。

### 3.2.2 分布式电源及储能设备

现在我们研究储能设备在家庭能源管理中的调度问题,国内外现在家庭常用储能设备大多数为太阳能发电系统的储蓄电池,电动汽车的储蓄电池及其他自己购买的储蓄电池,储能设备可以在电价较低时段(用电低谷)充电储蓄电能,在电价较高时段(用电高峰)释放电能,既能进一步削峰填谷,更能大幅度节省用电成本。虽然现阶段在我国用户自备储蓄电池使用成本较高,但长远来看,随着储蓄电池技术的进步,以及分布式电源的设备技术和政策的逐步推行普及,用户自用储能设备将有很大的发展前景。本文着重探讨 3KW 的家用太阳能系统作为分布式电源参与家庭能源调度问题。

太阳能具有无污染无噪音的特点,可以为我们创造一个绿色,安逸的生活环境。我国特别重视太阳能这一新能源的开发利用,2007 年我国提出的《可再生能源中长期发展规划》中要求我国在 2020 年太阳能发电装机容量达到 1.8GW,2050 年时达到 600GW。2010 年国务院提出的《关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》和“十二五”规划都做出了加快太阳能资源利用、拖动太阳能光伏发电产业的决定。2013 年,保定市一户普通居民安装的光伏发电系统成功并入国家电网,成为河北第一个用光伏系统自发电并实现余电上网的家庭。无锡市也批准了 19 个分布式光伏发电系统建设项目,其中 3 个申报项目为居民家用式光伏发电站,其余为企业申报项目,其中有 2 家企业实现了并网运行。

2013 年初国家电网在《关于做好分布式电源并网服务工作的意见》中,充分肯定了分布式电源对社会可持续发展的积极促进作用,积极支持分布式电源接入大电网项目的快速发展。意见规定对包括太阳能在内的各类单个并网点装机容量小于 6kW 的分布式电源将以 10kv 以下电压等级接入大电网,国家电网公司承担公共电网的改造费用,并免费提供关口计量装置和发电量计量电能表。可以说未来分布式能源的发展会呈现一个高速递增的趋势,因此在家庭能源调度问题中,必须考虑到分布式电源及其储能设备对负荷控制的影响。

目前个人家庭光伏电站装机容量大部分都低于 10 千瓦。普遍流行的装机容量为 3kW 或 5kW,其配件和装机容量等系统参数如表 3-1 所示,以江苏地区 3kW 的分布式家用光伏发电系统为例,一套 3kW 光伏发电系统的在使用年限内究竟能给用户带来多少收益,我们通过具体计算来了解。3kW 光伏发电系统需要安装 16 块 190W 的电池板,总投资约 30000 元。江苏地区每年有效发电时间可以达到 1340 小时(平均每天发电 3.7 小时),该系统年发电总量约为

4000 度(平均每天发电约 11 度)。在自发自用, 余电上网的情况下, 普通家庭平均每月用电量为 300 度, 每月原平均电费=230 度 x0.5283 元/度+70 度 x0.5783 元/度≈162 元(不考虑峰谷电价), 年平均电费=1944 元。光伏系统年发电量约为 4000 度, 若计算国家对光伏发电的补贴, 每年的收益为=4000 度-3600×(0.45+0.42 元)/度=388 元, 成本回收时间=30000 元÷2332 元/年≈13 年。而太阳能系统一般质保期为 25 年, 则在回收成本后可获得利润为 4000 度/年×(0.45+0.42 元)元/度 x12 年=46560 元。

表 3-1 3kW 太阳能装机容量的系统参数

Tab.3-1 the system parameters of 3KW solar capacity

| 3.0KW 家用太阳能供电系统 |                                                                                                                                         |      |                                     |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------|
| 主要配件            | 参数                                                                                                                                      | 数量   | 备注                                  |
| 太阳能电池组件         | 36v190w                                                                                                                                 | 16 块 | 单晶硅组件, 尺寸: 1580*808*35,连接方式 2 串 8 并 |
| 太阳能组件支架         | 热浸镀锌钢结构                                                                                                                                 | 1 组  | 通用性型材和连接件, 美观耐用, 安装简单, 运输方便         |
| 蓄电池             | 12V160AH                                                                                                                                | 8 支  | 前置端子胶体免维护蓄电池, 4 串 2 并连接             |
| 控制逆变一体机柜        | 48V/3KW/ 单 相<br>220V                                                                                                                    | 1 台  | 19 英寸标准机柜, 控制逆变蓄能一体, 装有承重脚轮, 移动方便   |
| 汇流箱             | L8-S10A                                                                                                                                 | 1 台  | 8 路防雷光伏汇流箱                          |
| 安装配件            | 配套                                                                                                                                      | 1 套  | 组件与汇流箱连接线, 蓄电池连接线, 紧固配件等            |
| 单价(套)           | 30000 元                                                                                                                                 |      |                                     |
| 系统说明            | 1.该系统最大输出功率为 3kW, 可供家庭里电视, 电脑, 空调(功率 1P), 微波炉, 电饭煲, 冰箱, 洗衣机, 风扇, 照明等使用, 每日平均发电量为 12kWh, 不同区域有差异; 2.如该配置发电量不能满足或超出日常使用, 可以增减太阳能组件和蓄电池容量。 |      |                                     |

因此安装光伏发电无论对于国家还是个人都是十分有利的事情, 未来将会得到大面积的普及, 所以我们在考虑面对需求响应的家庭负荷调度问题时, 应该考虑到光伏发电系统对家庭负荷调度的影响。

研究光伏发电系统对能源调度的影响, 最重要的是要对储蓄电池进行数学

建模,以便计算其充放电时间,从而对储能设备在能源管理中的对功率转移影响进行仿真分析。当储蓄电池充电时,由于存在线路损耗等原因,蓄电池转换效率小于 1,即太阳能电池板的发电量只有一部分转变成储能。蓄电池放电时的转换效率同样小于 1。用  $\eta_c, \eta_d \in [0,1]$  来表示储能设备的充放电效率。可以得到电池的充放电状态方程:

$$e(t+1) = e(t) + \eta_c e_c(t) - e_d(t) \quad (3-2)$$

其中  $e(t)$  是  $t$  时段结束时储能设备中的电量,  $e_c(t)$  是  $t$  时段光伏系统发电量,  $e_d(t)$  是  $t$  时段储能设备的放电量,储能设备在单位时间内其充放电量都有上限值,本文将充放电的上限值表示为:

$$0 \leq e_c(t) \leq e_c^{\max}, 0 \leq e_d(t) \leq e_d^{\max} \quad (3-3)$$

家庭总用电量应与其购电量和储蓄电池放电量之和相等,用  $G(t)$  来表示家庭的购电量,则有如下关系式:

$$G(t) + \eta_d e_d(t) = \sum_{m=1}^M l_m(t) + e_c(t) \quad (3-4)$$

储蓄电池为了避免所害电池的使用寿命,应尽量避免同时充放电,因此可以得到:

$$e_c(t) = (\eta_c)^{-1} \max\{e(t+1) - e(t), 0\} \quad (3-5)$$

$$e_d(t) = \max\{e(t) - e(t+1), 0\} \quad (3-6)$$

那么,减去光伏发电家庭从大电网中的购电量是:

$$G(t) = \sum_{m=1}^M l_m(t) + (\eta_c)^{-1} \max\{\Delta e(t), 0\} - \eta_d \max\{-\Delta e(t), 0\} \quad (3-7)$$

### 3.3 居民用电舒适度分析

居民用户的用电舒适度是由很多方面综合决定的,本文将用户舒适度分为两个方面来分析,一个是环境舒适度,如房间的温度、湿度、空气流速和热水温度等,一个是时间舒适度,指的是用户的用电设备在提前或者推迟使用时间的情况下,可转移时间如何设置才能够尽可能的满足用户的用电需求。家用电器中能影响感官舒适度的电器是加热通风冷却(Heating, Ventilation, and Cooling, HVC)装置,一般情况指的是空调、热水器等,通常这类装置也是功率可调节的装置。在居民用户中,空调是耗电最多的家用电器之一,空调这一负荷的调度策略的好坏对需求响应目标能否实现有十分重大的影响,而且空调直接影响室内环境,对用户的环境舒适度有直接影响,所以在影响环境舒适度

的相关用电负荷中本文将主要研究空调的调度策略。

### 3.3.1 环境舒适度

丹麦的 P.O.Fanger 教授提出了预期平均投票数(Predicted Mean Vote, PMV)用来评价表征人体的热反应(冷热感觉), 表述同一环境中大多数人的平均冷热感觉。目前美国的 ASHRE 44-2004 和国际通用的 ISO7730 标准中均采用该指标来判断环境的热舒适是否合格, PMV 评判指标已成为国际上通用的热舒适评价指标。公式 3-8 是 PMV 的计算公式:

$$\begin{aligned} PMV = & [0.303 \exp(-0.036M) + 0.028] \{M - W - 3.05 \times 10^{-3} \times \\ & [5733 - 6.99(M - W) - P_a] - 0.42[(M - W) - 58.15] - \\ & 1.72 \times 10^{-5} M \times (5867 - P_a) - 0.0014M \times (34 - t_a) - \\ & 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} \end{aligned} \quad (3-8)$$

其中  $M$  是人体能量代谢率, 根据人体活动量的不同而改变,  $W/m^2$ ;

$W$  是人所作的机械功,  $W/m^2$ ;

$P_a$  是人体周围空气的水蒸汽分压力, Pa;

$f_{cl}$  是穿衣时外表面积与裸身人体表面积之比, 称作服装面积系数;

$t_{cl}$  是衣服外表面温度,  $^{\circ}C$ ;

$\bar{t}_r$  是房间平均温度,  $^{\circ}C$ ;

$h_c$  是对流换热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;

$t_a$  是人体周围温度,  $^{\circ}C$ 。

参数  $P_a, f_{cl}, t_{cl}, h_c$ , 计算方法如公式3-9至公式3-12所示:

$$P_a = \phi_a \times \exp[16.6536 - 4030.183 / (t_a + 235)] \quad (3-9)$$

$$f_{cl} = 1.00 + 1.290 I_{cl}, \text{ 当 } I_{cl} \leq 0.078 \text{ 时}; \quad (3-10)$$

$$f_{cl} = 1.05 + 0.645 I_{cl}, \text{ 当 } I_{cl} > 0.078 \text{ 时};$$

$$h_c = 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25}, \text{ 当 } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} > 12.1\sqrt{v_a} \text{ 时} \quad (3-11)$$

$$h_c = 12.1\sqrt{v_a}, \text{ 当 } 2.38(t_{cl} - t_a)^{0.25} < 12.1\sqrt{v_a} \text{ 时}$$

$$t_{cl} = t_{msk} - I_{cl}(R + C) \quad (3-12)$$

式中:  $\phi_a$  是空气相对湿度, %;

$I_{cl}$  是衣服的基本热阻, clo;

$v_a$  是空气流速, m/s;

$t_{msk}$  是皮肤温度, 36.5℃;

$R$  是人体辐射热交换损失热量;

$C$  是人体对流热交换损失热量;

人体只有在人体产热与散热平衡时才会感觉舒适, 根据人体热舒适方程,  $S = M - W - R - C - E$ , 即  $S=0$  时人体感到舒适, 因此得到  $t_{cl}$  计算方法见公式3-13:

$$t_{cl} = 36.5 - 0.028(M - W) - I_{cl}(M - W - E) \quad (3-13)$$

式中汗液蒸发和呼吸时所带走的热量  $E$  计算公式如下:

$$E = L + E_{res} + E_d + E_{sw} \quad (3-14)$$

其中:  $L$  是吸入冷空气是产生的热损失,  $W/m^2$ ;

$$L = 0.0014W(34 - t_a) \quad (3-15)$$

$E_{res}$  是呼出水分产成的热损失,  $W/m^2$ ;

$$E_{res} = 1.72 \times 10^{-5} M(5867 - Pa) \quad (3-16)$$

$E_d$  是皮肤无汗时的热量损失,  $W/m^2$ ;

$$E_d = 3.05 \times 10^{-3} (254t_a - 3335 - Pa) \quad (3-17)$$

$E_{sw}$  是皮肤出汗时的热量损失,  $W/m^2$ .

$$E_{sw} = 0.45(M - W - 58.15) \quad (3-18)$$

PMV 指标评价的是同一环境中绝大多数人的热感觉, 通过估算人体活动的代谢率、服装的基本热阻和所处环境的一些的参数可以估计出 PMV 的值, 但由于人与人存在生理差异, PMV 指标并不能代表所有人的热感觉, 所以 Fanger 教授又提出预期不满意百分率—PPD 指标来表示对环境热感觉不满意的人数在总人数中所占的百分数。PMV-PPD 分度值对照表如表 3-1 所示:

表 3-2 PMV-PPD 分度值对照表

Tab.3-2 Graduation comparison table of PMV-PPD

| 热感觉 | 冷    | 凉   | 微凉  | 适中 | 微暖  | 暖   | 热    |
|-----|------|-----|-----|----|-----|-----|------|
| PMV | -3   | -2  | -1  | 0  | 1   | 2   | 3    |
| PPD | 100% | 75% | 25% | 5% | 25% | 75% | 100% |

PMV 值与 PPD 值之间的数学关系式用公式(3-19)表示。

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0.03353 \times PMV^4 - 0.2179 \times PMV^2) \quad (3-19)$$

PPD 和 PMV 之间的关系曲线如图 3-1 所示。图中  $PMV=0$ ,  $PPD=5$  的点是室内环境处于最佳冷热程度的点, 但由于人的感觉存在差异, 在最佳温度环境

中仍会有 5%感到不舒适。ASHERE44-2005 及 ISO7730 标准中对 PMV-PPD 的推荐范围为:PPD<10%，即 PMV 值处在-0.5~+0.5 之间，意味着人群中对环境冷热程度不满意人数在总人数的 10%以下即判定为该环境热舒适合格。

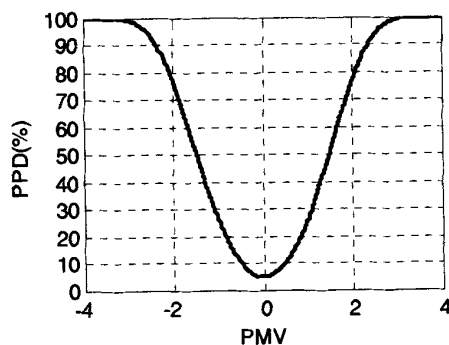


图 3-1 PMV,PPD 关系图

Fig.3-1 Relationship between PMV and PPD

本文通过 PMV-PPD 评价指标的计算公式，编写 MATLAB 程序，从而得到用户室内舒适温度范围。根据计算结果在智能控制中心的程序中设定温度，在接受到需求响应信号是，即可自动控制空调的使用方式。根据我国颁布的《采暖通风与空气调节设计规范》和《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》，夏季空调的设计应采用 PMV-PPD 指标评价其制冷加热功能对室内环境热舒适的影响。热舒适度满足要求的 PMV-PPD 评价标准为 $-1 \leq PMV \leq +1$ ， $PPD \leq 25\%$ 。要计算室内热舒适指标 PMV-PPD 需要确定人体新陈代谢率  $M$ 、人体机械效率  $\eta$ 、衣服热阻  $I_{cl}$ 、室内空气流速  $v_a$ 、室内空气温度  $t_a$ 、室内空气相对湿度  $\phi_a$  这 6 个参数：

(1)  $M$ 的取值:人体通过分解自身的脂肪和蛋白质等物质而释放出能量的速率称为新陈代谢率，人体新陈代谢是人体热量的主要来源。在人体处于不同的活动中时，新陈代谢速率相差很大，因此对所处环境的舒适温度的要求也不同，活动越剧烈人体新陈代谢越快，产生热量越多，所需环境温度越低。因此在设定室内舒适温度时，应该首先根据室内人员平时的活动量确定 $M$ 的值。表3-2为一些通常活动中人的新陈代谢率。在公司办公室工作环境和家庭室内环境中，通常人体的活动强度较低，可以按照坐着休息时计算 $M$ 值，由表3-2得  $M=58.15 \text{ W/m}^2$  (1.0met)，这也符合ISO 7730标准规定的人体新陈代谢率  $M < 1.2\text{met}$  ( $69.78 \text{ W/m}^2$ )。本文取坐着休息时 $M=58.15 \text{ W/m}^2$  (1.0met)。

(2)  $\eta$ 的取值：人体机械效率  $\eta$  是人体内能转化的外部功与新陈代谢率之

比，即 $\eta = \frac{W}{M} \times 100\%$ ，一般情况下 $\eta$ 的取值范围在0-20%之间。在不同活动中人体机械效率同样相差很大。因本文所计算的环境为室内，所以本文取值为坐着休息以及其他轻微活动时得 $\eta=0$ ；

(3)  $I_{cl}$  的取值：本文的研究所选取环境为夏季，按ISO7730标准规定夏季的服装热阻值 $0.5\text{clo}(0.08\text{m}^2 \cdot \text{k/w})$ ；

表3-3：新陈代谢率  
Tab.3-3 metabolism rate

| 活动强度     | 新陈代谢率 $M(\text{W/m}^2)$ |
|----------|-------------------------|
| 躺着       | 46                      |
| 坐着休息     | 58                      |
| 站着休息     | 70                      |
| 坐着活动     | 70                      |
| 站着活动(慢走) | 93                      |
| 中等活动     | 165                     |

为了使室内舒适温度的选择更准确，使用户在需求响应下对空调的用电满意度得到最大满足，室内环境参数的设定范围要大一些，这样可以在舒适度允许的范围内选取室内温度范围的上下极限值。具体计算参数的选择如表 3-3 所示。

表 3-4 PMV 计算参数的设定  
Tab.3-4 PMV calculation parameters set

| 参数                    | 参数值        |
|-----------------------|------------|
| 室内平均温度( $t_a = t_r$ ) | 16-30℃     |
| 室内空气流速( $v_a$ )       | 0.1-0.6m/s |
| 室内相对湿度( $\phi_a$ )    | 30%-70%    |
| 人体代谢活动率( $M$ )        | 1.0 met    |
| 夏季服装热阻( $I_{cl}$ )    | 0.5 clo    |

由公式(3-7)可知，要计算 PMV-PPD 的值，需要知道室内环境的温度、相对湿度、空气流速的变化范围。因为三个参数的变动时室内温度也要产生相应的变动才能满足舒适度评价标准的要求。根据 PMV-PPD 评价标准，设定三个参数的计算范围，通过公式对 PMV-PPD 指标进行计算。然后选取好作为参照

的室内温度，计算得到的 PMV 和 PPD 值如过超出了规范要求舒适度范围，那么对照参考值再重新选择室内温度值计算，这样即可得出满足舒适要求的温度范围，如图 3-2 所示：

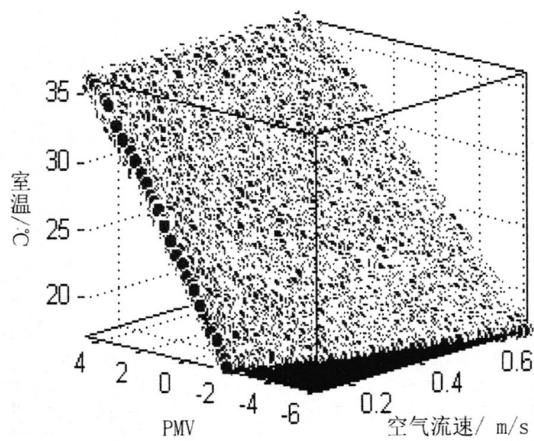


图 3-2 a) PMV 与湿度、温度、空气流速四维关系图

Fig.3-2 a) Four-dimensional relational diagram of PMV, humidity, temperature and air velocity

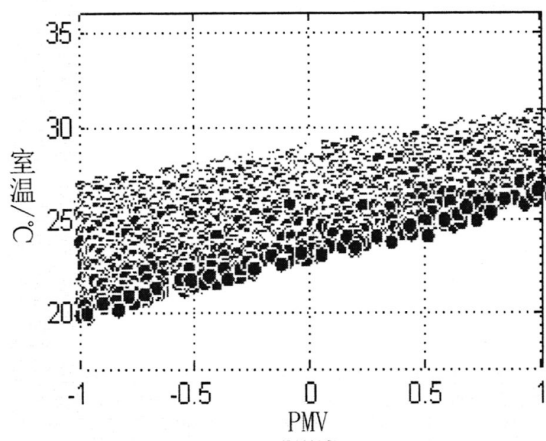


图 3-2 b) PMV 与室温关系图

Fig.3-2 b) relational diagram of PMV and room temperature

根据图 3-2 中 b)所示，在满足标准环境的舒适度的前提之下( $-1 \leq \text{PMV} \leq +1$ ,  $\text{PPD} \leq 25\%$ ),虽然有三个可调的环境参数，但是只有在温度范围约为  $20\text{--}31^\circ\text{C}$  时才能满足不同环境参数下的舒适度要求，当温度超出这个范围，不论其他参数取何值，都不能达到 PMV、PPD 的这两个舒适度衡量指标的标准范

围。因此在本文中我们将空调的温度调节的上下限范围选择在  $21-30^{\circ}\text{C}$  时都可以满足用户舒适度要求。

### 3.3.2 时间舒适度

对于用户使用家用电器的时间容忍程度，我们称之为用户用电的时间舒适度，本文用转移能力参数  $K$  来表示。在接受需求响应信号或者尖峰用电时间段，对于设备  $m$  的一次启停，我们设定三个与时间相关的任务参数，分别是设备  $m$  的用户允许开始时间  $s$ 、允许结束时间  $f$  和完成用户用电需求所需要的设备  $m$  持续工作时间  $l$ 。其中  $s$  和  $f$  不等同于任务的开始时间和结束时间，而是  $f-s \geq l$ 。本文中转移能力参数  $K$  的计算公式，见式 3-20：

$$K = (f - s) / l \quad (3-20)$$

用户根据需求响应项目信号和用电的需求，通过智能控制中心，通过调整设备  $m$  的  $s$ 、 $f$ 、 $l$  三个参数的值，自主设定转移能力参数  $K$  的大小，从而达到满足用户时间舒适度的要求。每一个家庭里面有各种不同的用电设备，每一个用电设备的一次启停，我们都需要对其设定  $K$  值。而对于需求响应来讲， $K$  值越大，智能控制系统能够自由选择的工作时间范围越大，从而当需求侧得到控制用电的信号时，通过算法控制中心在自由选择用电设备使用时间时会使得用电设备同时工作的概率减小，从而减小设备耗电的叠加，达到良好的调峰的效果。但是  $K$  值不能设定的无限大，因为  $K$  值太大，将会大大改变用户的用电习惯。对于一些用电任务来讲，如晚饭时间需要使用的抽油烟机、电饭煲等，过大的  $K$  值使得用户晚餐时间变得不确定，这是用户所不能忍受的。因此  $K$  值的选定要根据不同用电设备所担任任务的重要性让用户自己设定。

## 3.4 本章小结

本章将家用负荷分为电器负荷和储能符合两类，通过数学模型分析了两种负荷的特性，同是详细介绍了新型能源太阳能系统的特性及其相关采纳数，并把其作为需求响应信号需要考虑调度的一种符合来进行分析。本章还将用户满意度分为环境舒适度和时间舒适度两方面进行了计算分析，并给出本文的舒适标准。

## 第 4 章 优化算法设计

### 4.1 引言

上一章对家庭负荷以及用户舒适度进行了详细的研究分析，本章将根据这些分析结果设计各类家庭负荷的调度策略及控制算法。由于用户感官舒适和用电习惯的存在，以及未来需求相应项目的丰富，这将导致用户在不同时间段进行用电决策的目标是不同的。除了考虑现行的电价之外，用户还要考虑未来不同时间段实行的电价来进行用电决策。所以要找到一个简单的目标函数，根据该目标函数设计家庭能源调度算法，通过该算法不仅满足用户的舒适度，又能够使节能与节省用电花费是激励相容的，并且能够帮助用户进行简单的用电决策。

### 4.2 用电设备调度策略

#### 4.2.1 问题描述

我们将家庭电器的调度周期(通常为 1 天)分成  $n$  个时隙，每一个时隙可以实施一个不同的时隙电价(通常为 1 小时)。家电的每一次使用可以被当成一个单独的任务插入到这些时隙当中。有一些任务是持续的，它们的电力消耗持续一整天，比如电冰箱。其他的则是灵活调度的，比如洗衣机。一个任务一旦开始，那么这个任务一定是一个整体，不可以被中断，所以我们要把一个家用电器的一次启停当成一个单独的任务，多次启停则当成多次的不同的任务。这样我们就把所有的家用负荷建立成为一个离散的任务集合。

对于一个单独的调度任务  $i$ ，我们将它的约束表述为  $d_i = (s_i, f_i, r_i, l_i) \in D$ ， $1 \leq i \leq n$ 。其中  $D$  是所有任务的集合， $s_i$  和  $f_i$  分别是任务  $i$  的用户允许开始时间和允许结束时间，但是它们不等同于任务的开始时间和结束时间。 $r_i$  是任务  $i$  所代表的家用电器的能耗(W/h)， $l_i$  是任务  $i$  的持续时间，本文中  $0 < l_i \leq 24$ 。引入转移能力参数  $K = (f_i - s_i) / l_i \geq 1$  这一约束条件来表述用户的时间舒适度要求。直观的来讲  $K$  的值越大，用户对该任务的延迟时间容忍度越高，则该任务具有较高的转移能力。本文的任务目标是最优化的安排  $d_i \in D$  使得  $d_i$  占用连续的时隙  $t_j, t_{j+1}, \dots, t_{j+l_i}$  并且对  $d_i$  的调度符合

$j \geq s_i$  和  $j + l_i - 1 \geq f_i$ 。

任务调度描述所用参数如表 4-1 所示：

表 4-1 任务参数表

Tab.4-1 Task Parameters

| 参数符号         | 意义                  |
|--------------|---------------------|
| $d_i$        | 任务 i 的时间约束集合        |
| $D$          | 所有 d 的集合            |
| $s_i$        | 任务 i 的开始时间          |
| $f_i$        | 任务 i 的结束时间          |
| $l_i$        | 任务 i 的持续时间          |
| $r_i$        | 任务 i 的能耗/小时         |
| $K$          | 任务 i 的转移系数          |
| $t_j$        | j 所指向的时隙            |
| $c_j$        | 时隙 $t_j$ 内所有任务的电价花费 |
| $P()$        | 用户电价花费函数            |
| $T_j$        | $t_j$ 时隙室内的温度       |
| $T_{out,j}$  | $t_j$ 时隙室外的温度       |
| $\Delta T_u$ | 空调关闭时室内单位时间内上升的温度   |
| $\Delta T_d$ | 空调开启时室内单位时间内下降的温度   |
| $T_d$        | 不影响用户舒适度的室内最低温度     |
| $T_u$        | 用户可容忍的最高室内温度        |

## 4.2.2 用电负荷调度策略

不同的家用电器要考虑不同的调度策略。根据家用电器的不同功能，要考虑不同的随机调度策略，以达到更好的节能效果。我们可以将家用电器根据目标分为两类，第一类是为了完成我们的单次用电需求，开启后不能停止的电器成为即插即用型，比如电脑，烹饪设备，通常用户主动关闭即表示本次用电目标结束。第二类是即使多次启停，我们仍然能够在规定的时间空间满足用电需求的电器，比如根据 PMV-PPD 的计算结果，只要将家庭环境温度保持在 21-30 度之间就能够满足用户的感官舒适度。那么即便多次启停空调，我们只要将

室内温度保持在需要的舒适范围之内就不会影响用户的舒适度。这一类设备可以视为功率可调设备，多为 HVC 设备。

即插即用型设备除了对用户的可延迟时间这一舒适度参数产生影响之外，并不对感官舒适度产生影响，其功耗也只跟其单次任务使用时间有关。因此其调度策略是只需根据用户的使用时间和可转移时间来调度设备，由算法直接选择调度方案即可，无需根据其他的约束条件来改进调度方案。家庭用户的 HVC 设备主要有热水器，空调，排风机，冰箱。其中冰箱是持续型设备，需要全天使用，空调是这四种电器中耗电最多的，因此这里我们主要改进空调的调度方案。

通常空调的使用方式是常开的，即开启后空调持续制冷，这种方式室温是恒定的，能耗也是恒定的，本文选取室外温度比较高的 10-21 点对空调采用一般使用方式时的能耗进行仿真，如图 4-1 所示：

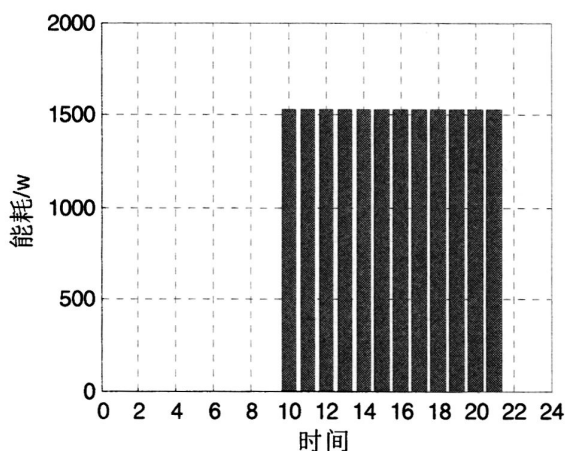


图 4-1 空调一般情况下用电能耗

Fig.4-1 Air conditioning electricity consumption of normal mode

本文将空调的开启方式改进为间歇式开启，由用户自主选择室内温度的上下限。空调开启后，当室温达到温度的下限时关闭空调。当室温自然上升到用户设定的室温上线时开启空调降低室温。这样循环开启空调，既能维持室内的舒适温度，又能够缩短空调的使用时间来节约能耗。

因为我们在离散的时隙内进行调度，所以我们仅需要计算空调在一个时隙的能量消耗总量。根据牛顿热交换定律得到空调关闭时环境的散热函数，如公式 4-1 所示：

$$Dip(T_j) = T_j + (T_{out,j} - T_j)e^{-\frac{60}{\tau}} \quad (4-1)$$

这里  $T_j$  是时隙  $t_j$  时的室内温度,  $T_{out,j}$  是时隙  $t_j$  时的室外平均温度,  $\tau$  是热扩散系数, 如果一个房屋的扩散系数值小, 那么它具有较好的隔热保温性能。  $Dip(T)$  是一个数值大小取决于室内外温差的指数函数。本文中  $\tau$  取值为 48.5, 这意味着房间在一个小时内要损失 27% 的热量。结合  $Dip(T)$  我们可以计算出时隙  $t_j$  时为了达到目标温度  $T_{tgt}$ , 空调开启后室内温度需要的制冷量  $\Delta T$  如 4-2 式所示:

$$\Delta T = T_j - T_{tgt} + (T_{out,j} - T_{tgt})e^{-\frac{60}{\tau}} \quad (4-2)$$

$T_{tgt}$  中包含两个温度参数:  $T_d$  是用户舒适度中允许的温度下限,  $T_u$  是家庭用户在没有不适感的情况下所允许的阈值温度, 即温度上限。在空调制冷的情况下  $T_d \leq T_u$ , 在适用面积中空调满功率运行一小时所能下降的温度为  $8^\circ\text{C}$ , 由此可以得到达到  $T_d$  空调所需要的运行时间。

根据对 PMV-PPD 指标计算, 本文选取  $T_d = 22^\circ\text{C}$ ,  $T_u = 27^\circ\text{C}$ , 室外温度变化如图 4-2 红色线条所示, 开启空调后, 室内温度变化情况如图 4-2 蓝色线条所示, 在开启空调后室内温度下降至  $22^\circ\text{C}$ , 然后关闭空调, 待室内温度上升至  $27^\circ\text{C}$  时, 再次开启空调, 然后分别以  $22^\circ\text{C}$  和  $27^\circ\text{C}$  作为空调的开关温度, 在空调使用时间内循环开启空调。这种空调调度策略下的空调能耗如 4-3 所示, 与图 4-1 对比可以看出空调能耗可以节约 50% 左右:

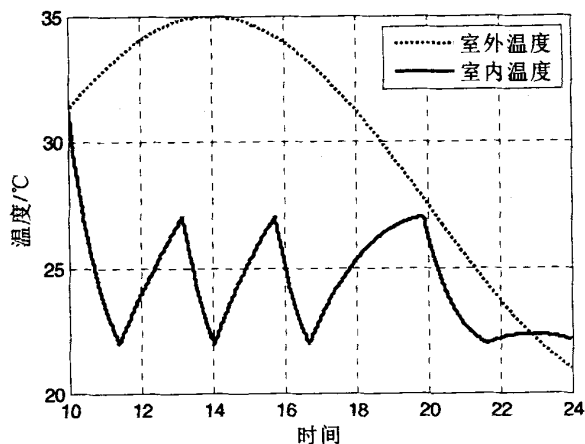


图 4-2 空调优化控制模式下的室内温度变化

Fig.4-2 Room temperature change when air conditioning in optimal control mode

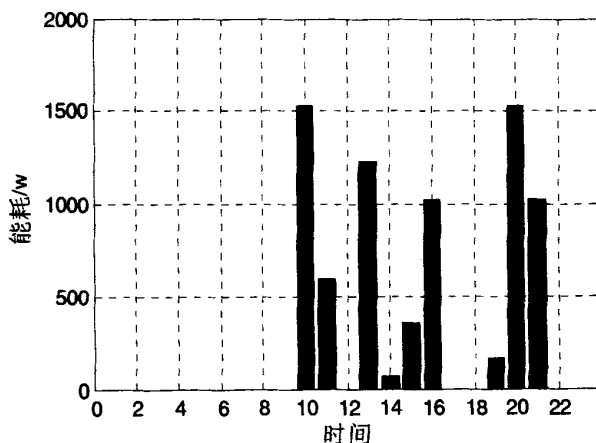


图 4-3 空调优化控制模式下的用电情况

Fig.4-3 Electricity consumption when air conditioning in optimal control mode

## 4.3 差值最小化算法

### 4.3.1 算法目标函数

居民用户通常会把减少花费当成目标来考虑家庭管理问题。我们引入一个价格函数  $prc(t_j)$  来表示  $t_j$  时隙内所有家用电器的总花费，那么我们的调度目标是安排每一个符合约束的任务  $i$  使得  $\sum_{d_i \rightarrow M_k, k=j, \dots, j+l_i-1} prc(t_k) r_i$  的值最小，以至于使得我们一天的总花费  $\sum_{j \in 1 \dots n} prc(t_j) r_j$  最小。但是，如果把该函数作为目标函数会出现两个问题：

第一，全局调峰的目标不容易获得，统一的定价方案不能提供用户一个激励使用户转移用电时间或者直接削减用电负荷，所以本文的  $prc(t)$  是一个分时需求响应项目，分别在三个不同的时间段实行三个不同的电价。但是考虑一个简单的情况，如果任意一个任务是没有时间约束条件的，即可以完美的转移或者分时电价中峰谷时段电价差异过大，那么用户将把任务全部转移到电价最低的时间段，这样我们就起不到消除能耗尖峰的效果，只是把它转移了。因此，分时电价的定价需要根据国外实际经验确定，同样对于用电负荷的时间约束的影响要考虑到

第二，最小化电力花费这一目标不能规避风险。需求响应项目的电价是全天的计划，我们通常提前知道电价。对于根据电价制定好的用电计划来说，两

个外部因素使用户的不能确定的规避风险：断电和计划外的电器使用。对于家庭用户，计划外的停电导致了调度任务结束和丢失，从而使得用电计划失去时效性。另外如果停电事件是完全随机的，那么风险规避可以定义为使得用户所有时段内的电力消耗的最大值最小。对于电力提供者，非期望的电器使用可能会导致计划好的能源调度方案失去作用并且对需求侧的能源消耗预测出现错误。如果计划外的电器使用概率是相同的，那么电力提供的风险规避可以被定义为全部家庭用户总的能耗峰值最大值最小。

由此可见电力公司与用户对于需求响应能耗调峰的目标是一致的。但为了保证无论任何情况发生，需求响应都尽可能的起到削峰填谷的作用，同时参与需求响应的用户电费比正常用电要少。所以本文定义家庭能源调度问题为：给定一个任务集合  $d_i = (s_i, f_i, r_i, l_i) \in D$ ，其中  $1 \leq i \leq n$ ，对于集合中的任意一个任务找到一个调度安排： $d_i \rightarrow (t_j, t_{j+1}, \dots, t_{j+l_i-1})$  服从条件  $j \geq s_i$  并且  $j+l_i-1 \geq f_i$ ，使得：

$$\min_{\{d_i \in D \rightarrow t_{j=1 \dots n}\}} C = \max_{k=1 \dots n} \sum_{\forall d_i \rightarrow t_k} \text{Prc}(t_k) r_i - \min_{k=1 \dots n} \sum_{\forall d_i \rightarrow t_k} \text{Prc}(t_k) r_i \quad (4-3)$$

$C$  是一天所有时段中最高花费和最低花费的差。差值最小化算法(MTD)寻找不同调度任务方案的最大值和最小值做差，然后将差值最小的方案最为最终的调度方案，该算法可以同时符合调峰和规避风险的需求。因为我们将我们的最优化目标定义在花费域中，我们的方式对于用户来说是正向激励的，因为将一天中单个时段的最高花费和最低花费的差值最小的方案作为优化策略同样会减少花费。即便没有时间约束的情况下，也不会过度的将高峰时段用电电器全部转移到低谷时段，因为在差值相同的情况下，用户会选择满足用电需求的方案。有的用户会选择关闭部分用电设备，这样既能减少花费，又能减少高峰时段能耗，在分时电价的基础上花费的差值最小可以在能耗域内促使用户形成一个理想的较为平稳的用电曲线。

#### 4.3.2 算法仿真程序流程

本文在 MATLAB 平台下，对 MTD 算法进行编程仿真，来求证根据需求响应信号及用户舒适度约束来控制家用负荷，是否能够达到削峰填谷，优化电力资源配置，减少用户电力耗费的目的。因为每种家用电器在不同用户中使用情况不同，比如有的家庭有空调，有部分家庭没有空调，且使用时间也不相同，但是在多用户中每种家用电器的使用概率近似符合正态分布，比如在午饭时间 11-13 点之间，与午饭相关的家用电器的使用就负荷使用概率在 12 点左

右达到最高值的正态分布。类似的，其他电器也不符合概率密度不同的正太分布。因此本文在仿真程序中对于家用电器随机调度中使用的随机数都设置为正太分布。仿真程序流程如图 4-4 所示：

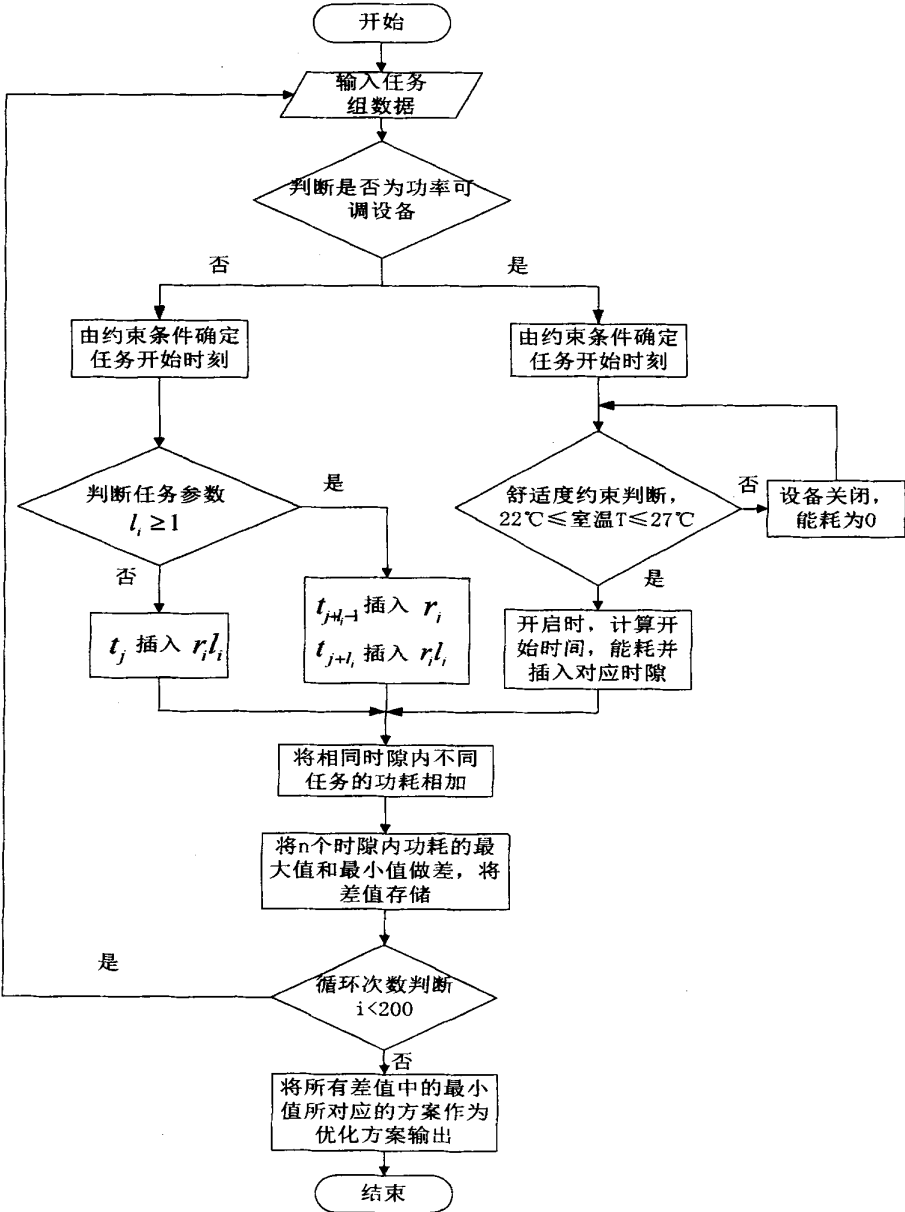


图 4-4 MTD 算法程序流程图

Fig.4-4 MTD algorithm flowchart

首先要对每一个家用电器来建立任务组模型，输入负荷任务集合的四个约

束参数  $s_i, f_i, r_i, l_i$ 。然后程序将负荷分为两类来分别计算，一类是功率不可调节设备，一类是功率可调节设备。根据用户的舒适度约束，判断负荷的启停状态，计算启停时间，及运行时间。将所有负荷根据运算结果插入时隙内，对于产生叠加任务的时隙进行加法运算。根据每个用户负荷在  $l_i$  内可转移次数，确定程序所需循环次数，然后通过多次循环，输出不同的能耗及电力花费结果，根据 MTD 算法运算得到优化方案，输出计算结果。

## 4.4 仿真结果与分析

为了得到较为真实的仿真结果，根据对居民用户的调查，设计了一个包含了 15 种常用家用电器的居民用户的用电模型，由于一些电器在一天内会重复使用，因此最终本文定义了一个包含 25 个任务的集合。基于用户的需求，25 个任务的转移能力从 0 到 6 小时不等。另外本文根据国外需求响应的实践经验设计了一个基于价格的需求响应项目：峰谷分时电价，该项目将一天分为 3 个时段执行不同的电价，不同时段的价格比为 1:3，该比例的选取也是根据国外施行的峰谷电价比例选取。该分时电价项目的具体电价内容见表 4-2：

表 4-2 TOU 项目

Tab 4-2 TOU project

| 时段              | 价格        |
|-----------------|-----------|
| 高峰时段(17 时-23 时) | 1.51 元/小时 |
| 平常时段(7 时-16 时)  | 0.51 元/小时 |
| 低谷时段(0 时-6 时)   | 0.18 元/小时 |

### 4.4.1 单用户仿真

在本文基于分时电价这一需求响应项目，根据负荷分析所得到的即插即用式用电负荷和功率可调用电负荷的不同控制策略以及差值最小化算法 (MTD)，首先针对单个用户家庭进行仿真，仿真过程中选取了常用的家用电器 17 种建立任务组(洗衣机、热水器、电视、电脑、灯、电饭煲、吸油烟机、微波炉、电磁炉、浴霸、吹风机、熨斗，空调、风扇、烧水器、冰箱、吸尘器)，仿真结果如图 4-5 中 a)，b)所示：

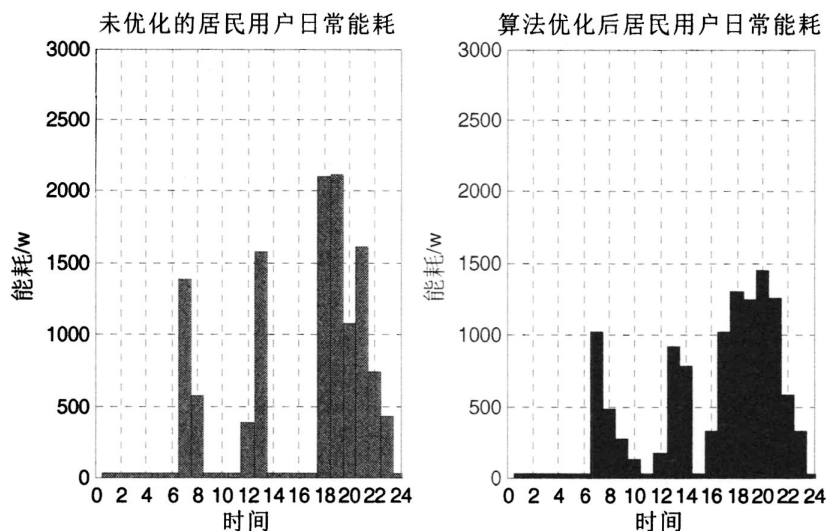


图 4-5 a) 优化前后用电量对比

Fig4-5 a) The comparison of electricity consumption before and after optimization

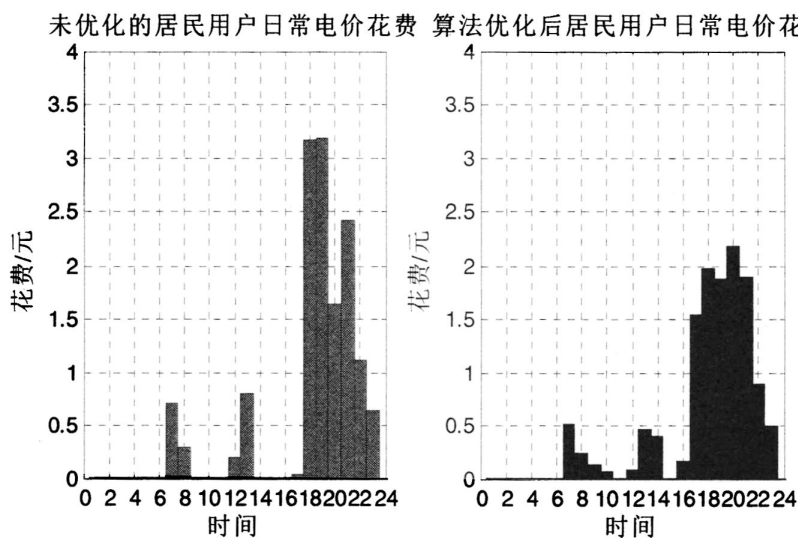


图 4-5 b) 优化前后电费对比

Fig.4-5 b) The comparison of cost consumption before and after optimization

通过图 4-5 中 a)图是单用户优化前后的能耗对比，从结果上可以看出一个明显的调峰效果，能耗峰值明显减少。图 4-5 中 b)图是 MTD 优化前后的用户用电花费对比，从结果上高峰时段花费由，从图中可以看出通过 MTD 算法的优化实现了一个明显的成本调峰。

单用户仿真得到的分时段统计数据如表 4-3 所示：

表 4-3 单用户仿真数据

Tab 4-3 Single-user simulation data

| 时段       | 低谷时段  | 平常时段   | 高峰时段    |         |
|----------|-------|--------|---------|---------|
| 时间       | 0-6 点 | 7-16 点 | 17-23 点 | 合计      |
| 优化前能耗(W) | 201.2 | 4087.5 | 8094.1  | 12382.8 |
| 优化后能耗(W) | 201.2 | 4187.5 | 7209.4  | 11569.3 |
| 优化前花费(元) | 0.04  | 2.1    | 12.2    | 14.34   |
| 优化后花费(元) | 0.04  | 2.1    | 10.9    | 13.04   |

上述仿真结果是在一定的约束条件下得到的，在仿真中，峰谷分时电价比以及可转移时间的长短都会对仿真结果产生印象。下面探究这两个约束条件对优化结果的影响。

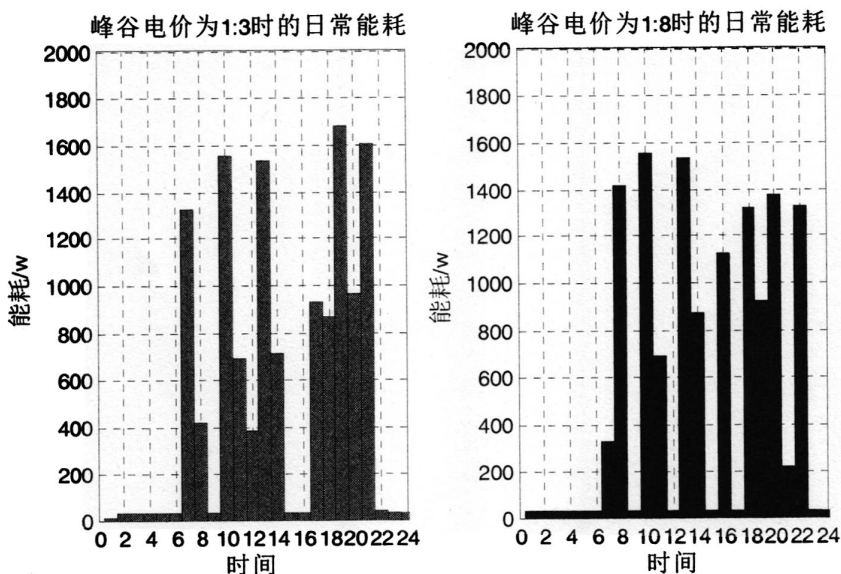


图 4-6 峰谷电价比不同时的优化结果对比

Fig.4-6 The comparison of simulation results under different TOU

图 4-6 是对 TOU 峰谷价格比的高低对用户的影响进行的仿真，分别选取低谷电价和尖峰电价比为 1:3 和 1:8 两种情况的仿真结果，通过仿真可以看到

通过在用电高峰采用一个更高的电价，可以更好地劝阻用户在高峰时段用电，通过对照也可以看出，在更好地峰谷电价比的情况下优化结果会得到一个类似于错峰效果的影响。因此，正确的设置的基于价格的需求响应项目可以平滑用户用电能耗曲线，达到调峰的目的。

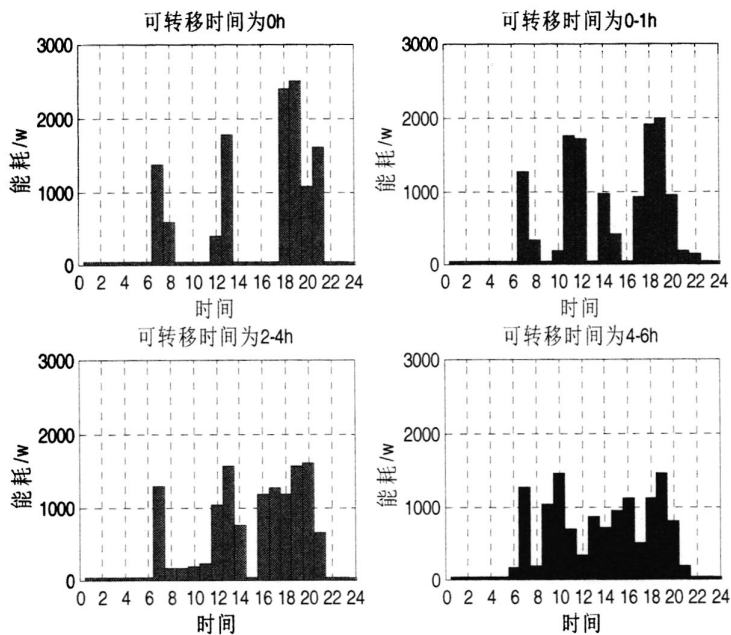


图 4-7 不同转移系数时优化结果对比

Fig.4-7 The comparison of simulation results under different transfer time

图 4-7 是展示转移系数对优化结果的影响，由公式  $S_i = l_i / s_i - f_i \leq 1$  可知，转移系数和任务的可转移的时间是息息相关的。本文分别仿真了当可转移时间分别为 0 小时，0-1 小时，2-4 小时，4-6 小时情况下的能耗结果。根据对结果的分析，可以得到两个明显的结论：(1). 算法优化的结果与转移系数是有很大关联的，转移系数越大，算法优化的结果越好，即调峰的结果越好。(2). 在现实生活当中，若家用电器的用电时间改变一小时，会很大程度上改变用户的用电习惯，当转移时间小于 2 小时，调峰的效果并不十分理想，因此要达到较为理想的家庭用电管理的目标，必须将需求响应项目与优化算法相结合。

#### 4.4.2 多用户仿真

单用户仿真结果一定程度证明了 MTD 算法的有效性，但由于选取的数据

具有单一性，不能证明在面对多用户不同电器使用情况下，对负荷的控制优化依然有效。因此本文建立了一个 100 户家庭的小区程序模型，模型中每个家庭用户的电器使用情况是随机的，对该模型进行负荷控制的优化仿真，结果见图 4-8,4-9:

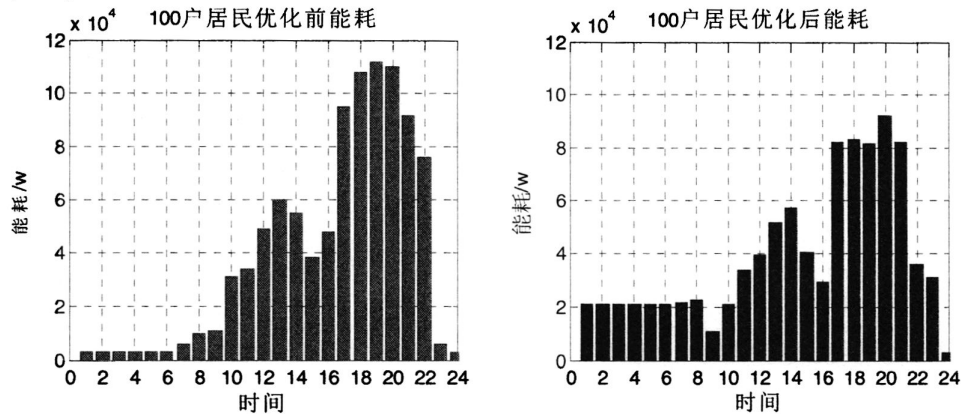


图 4-8 多用户优化前后能耗对比

Fig.4-8 The comparison of before and after optimize for Multi-user energy consumption

优化结果显示，在采用分时电价基础上，从图中可以看出，经 MTD 算法优化后全天用电能耗曲线不仅更平滑，而且高峰能耗得到了明显下降，这意味着不仅电力系统的可靠性的到了大幅度的提高，节能减排的目的也得以实现。MTD 算法对能耗调峰的结果比较理想，这对供电公司及供电系统是有益的。对于家庭用户来讲，居民更关注的是能否降低电力花费，因此针对本文实行的分时电价，对于用户每个时段的电力花费进行了计算，结果如图 4-9 所示：

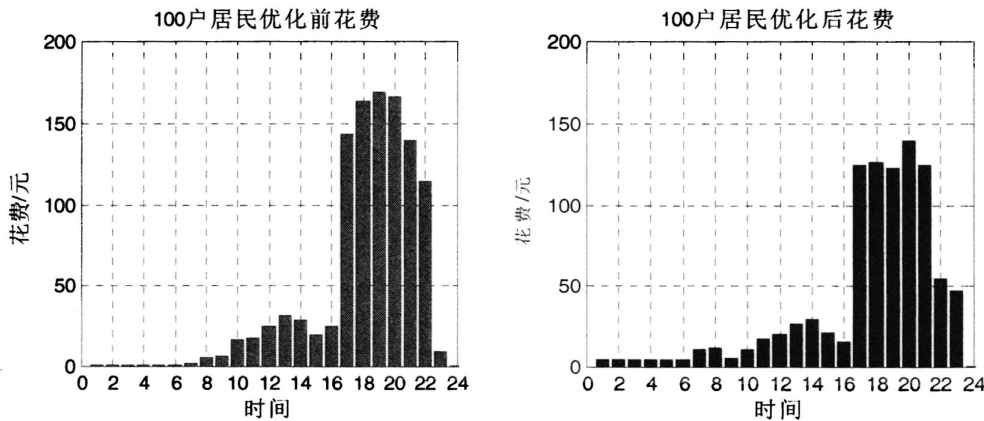


图 4-9 多用户优化前后电费对比

Fig.4-9 The comparison of before and after optimize for Multi-user cost

对数据进行计算, 结果显示: 高峰时段电费得到了明显下降, 100 户居民高峰时段(17-23 点)点电费优化前为 904.4 元, 优化后为 739.5 元, 平谷时段(0-16 点)从优化前 176.1 上升到 189.8。优化前 100 居民日电费总额为 1080.5 元, 优化后日电费总额为 929.3 元, 优化前后费用总额度降低了 14%。因此, MTD 算法对能耗和费用的减少, 无论对供电侧还是用电侧来说都是正向激励, 可以说 MTD 算法是激励相容的。多用户仿真的分时段统计数据如表 4-4 所示:

表 4-4 多用户仿真数据  
Tab 4-4 Multi-user simulation data

| 时段       | 低谷时段   | 平常时段   | 高峰时段     |          |
|----------|--------|--------|----------|----------|
| 时间       | 0-7 点  | 8-16 点 | 17-23 点  | 合计       |
| 优化前能耗(W) | 26125  | 336013 | 598967   | 961105   |
| 优化后能耗(W) | 149680 | 305295 | 489719.6 | 944694.6 |
| 优化前花费(元) | 4.7    | 171.4  | 904.4    | 1080.5   |
| 优化后花费(元) | 34.1   | 155.7  | 739.5    | 929.3    |

为了验证算法的有效性, 在多用户情形下进行了一百次仿真, 根据仿真结果, 绘制日能耗总额与日花费总额曲线图, 结果如图 4-10 中 a)、b)所示:

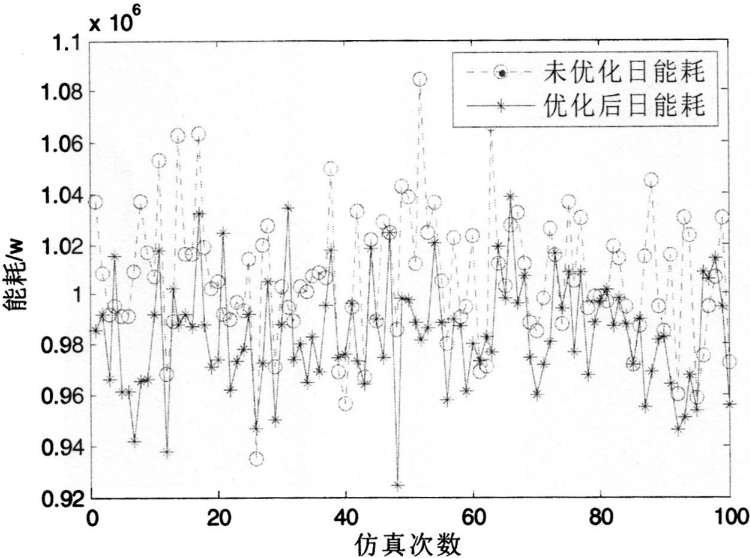


图 4-10 a) 多次优化前后日用电量总额对比

Fig4-10 a) The comparison of total daily electricity consumption before and after several optimizations

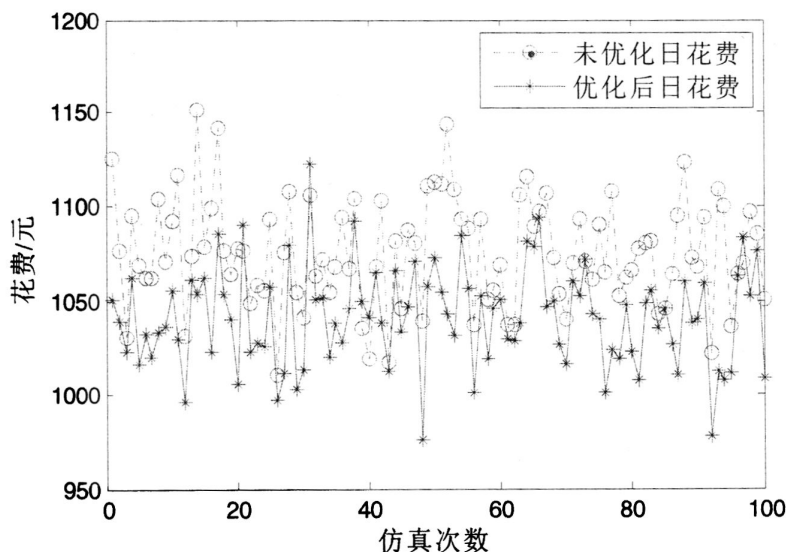


图 4-10 b) 多次优化前后日花费总额对比

Fig4-5 b) The comparison of total daily electricity cost before and after several optimizations

由仿真结果可以看出，优化后的日用电量总额和日花费总额曲线基本处在未优化曲线之下，说明算法优化后的用电量和花费绝大部分都得到了降低。但由于计划外用电的存在，极少数情况下，优化后的用电量比花费要高，一百次仿真中计划外用电出现了 22 次，但是优化后花费比优化前花费高的次数只有 6 次，说明 MTD 对花费的降低要比对能耗的降低更明显，即便在因为计划外用电导致优化后用电量比优化前用电量高，但是优化后的电费依然比优化前的电费少，说明算法的能量调峰效果十分明显，这对提高用户参与需求响应的积极性有很大的好处。

## 4.5 本章小结

本章基于需求响应分时电价项目，将用户家用电器负荷参数化，建立负荷任务组模型，提出了家庭用电负荷控制策略，根据策略的优化目标设立目标函数，提出了MTD优化算法。根据MTD算法进行MATLAB编程仿真。对单用户、多用户的能耗，电费进行优化对比，并且研究了环境舒适度，转移能力参数对仿真结果的影响。结果显示MTD算法能够基于需求相应项目达到削峰填谷，减少用电量和用户电费，优化资源配置的效果，可以说MTD算法达到了家庭能源控制的目标。

## 结论

随着经济的发展,能源需求迅速增长,峰谷负荷差的进一步加大,电力供需矛盾突出,需求响应越来越得到重视,各国都在大力推广需求响应项目的建设发展。在这种前提下,本文针对家庭用户接受到需求响应信号后如何控制用电负荷的问题进行研究,研究过程中主要做了以下工作:

1. 根据需求响应的分类以及不同类型需求响应项目在国外实施情况和实际作用,针对我国智能电网实际技术特点和需求相应在我国的发展情况,确定了针对居民用户用电负荷控制的研究方向。

2. 对家庭用电负荷建立模型,分析了负荷特性,研究了家用太阳能系统参与需求相应项目时对负荷调度的影响。将用户舒适度分为环境舒适度和时间舒适度,前者通过国际通行的 PMV-PPD 标准来衡量,后者通过时间转移参数  $K$  来判断。

3. 根据对负荷及舒适度的分析结果,确定了用电负荷的调度策略,根据优化目标,确定目标函数,研究设计了 MTD 优化算法来进行符合优化调度,并对单用户、多用户、峰谷电价比、时间转移参数多种情况进行了仿真。仿真结果证明了该算法的有效性: (1)使用 MTD 算法可以获得明显的成本调峰和能耗调峰; (2)需求相应项目可以使家庭能源管理的结果更加的优化。(3)控制策略满足了用户的舒适度设置,保证了用户的用电满意度。

未来研究方向:

(1) 继续研究更有效的控制策略,采用更有效的算法,并研究更复杂的负荷调度情况,如在大电网意外断电时使用太阳能供电和电动车蓄电池供电的控制优化方案。

(2) 继续探寻更加合理高效的需求响应项目,并针对参与需求响应多个项目时的调度策略。设计一个用户友好型的软件管理界面,使家庭参与需求响应更加的积极,也使得普通家庭再使用软件进行用电负荷管理时更加便利高效。

## 参考文献

- [1] 曾鸣. 电力需求侧响应原理及其在电力市场中的应用[M]. 北京:中国电力出版社. 2010. 4:10-27.
- [2] 王冬容. 电力需求侧响应理论与实证研究[D]. 北京:华北电力大学, 2011.
- [3] Clark W, Gellings. 智能电网促进节能与需求响应[M]. 北京:中国电力出版社. 2011:88-90.
- [4] GATSIS N, GIANNAKIS G. Cooperative multi-residence demand response scheduling[C]. Information Sciences and Systems(CISS), 2011 45th Annual Conference on Baltimore, MD: IEEE, 2011:1-6.
- [5] Li N, CHEN L, LOW S. Optimal demand response based on utility maximization in power networks[C]. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. San Diego, CA:IEEE, 2011:1-8.
- [6] CHEN C, KISHORE S, SNYDER L. An innovative RTP-based residential power scheduling scheme for smart grids[C]. Acoustics, Speech and Signal pow-Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference 2011:5956-5959.
- [7] CARON S, KESIDIS G. Incentive-based energy consumption scheduling algorithms for the smart grid[C]. Smart Grid Communications, 2010 First IEEE International Conference on. Gaithersburg, MD:IEEE, 2010:391-396.
- [8] CHEN L, LI N, LOW S et al. Two market models for demand response in power networks[J]. Smart Grid Communications, 2010 First IEEE International Conference on. Gaithersburg, 2010:397-402.
- [9] LI D, JAYaweera S, NASERI A. Auctioning game based demand response scheduling smart grid[C]. Online Conference on Green Communications, IEEE. New York, NY:IEEE, 2011:58-63.
- [10] CARAMANIS M, FOSTER J. Uniform and complex bids for demand response and wind generation scheduling in multi-period linked transmission and distribution markets[C]. Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on. New York, NY: IEEE, 2011:4340-4347.
- [11] PASCHALIDIS I, LI B, CARAMANIS M. A market-based mechanism for

- providing demand-side regulation service reserves[C]. Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC), 2011 50th IEEE Conference on. Orlando, FL:IEEE, 2011:21-26.
- [12] SAMADI P, SCHOBBER R, WONG V. Optimal energy consumption scheduling using mechanism design for the future smart grid[C]. Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2011 IEEE International Conference on. New York, NY:IEEE, 2011:369-374.
- [13] MOHSENIAN-RAD A, LEON-GARCIA A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments[J]. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2010, 1(2):120-133.
- [14] REN D, LI H, JI Y. Home energy management system for the residential load control based on the price prediction[C]. Online Conference on Green Communications (GreenCom), 2011 IEEE. New York, NY:IEEE, 2011:1-6.
- [15] KIM T, POOR H. Scheduling power consumption with price uncertainty[J]. Smart Grid, IEEE Transactions on, 2011, 2(3):519-527.
- [16] M. PIPATTANSOMPOM, M. KUZLU, S. RAHMAN. Demand Response Implementation in a Home Area Network [J]. Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), DC. 2012:1-8.
- [17] MAHDI SAMADI, MOHAMMAD HOSSEIN JAVIDI, Mohammad Sadegh GHAZIZADEH. Modeling the effects of demand response on generation expansion planning in restructured power systems [J]. Journal of Zhejiang University-Science C(Computers and Electronics), 2013 14(12):966-976.
- [18] YUEMIN DING, SEUNG HO HONG. A model of demand response energy management system in industrial facilities. IEEE SmartGridComm 2013 Symposium-Demand Side Management, Demand Response, Dynamic Pricing. 2013:241-246.
- [19] OZTURK YUSUF, JHA PRAKASH, LEE GORDON, SUNIL KUMAR. A personalized home energy management system for residential demand response. 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. POWERING 2012:1241-1246.
- [20] 王明俊. 需求侧响应在国外电力削峰填谷中的应用[J]. 上海节能, 2004 2:47-50.
- [21] 王冬容. 激励型需求侧响应在美国的应用[J]. 电力需求侧管理, 2010, 13 卷

- (1 期):74-77.
- [22] 王冬容. 价格型需求侧响应在美国的应用[J]. 电力需求侧管理, 2010, 2 卷(4 期):74-77.
  - [23] 曾鸣, 王冬, 荣陈真. 需求侧响应的技术支持[J]. 电力需求侧管理, 2010, 12 卷(12 期):8-11.
  - [24] 周明, 李庚银, 倪以信. 电力市场下电力需求侧管理实施机制初探[J]. 电网技术, 2005, 29(5):6-11.
  - [25] 曾鸣, 孙昕, 赵庆波, et al. 上网侧和销售侧峰谷分时电价联动与整体优化的方法及实证分析[J]. 电力需求侧管理, 2004, 5(4):9-13.
  - [26] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20):10-14.
  - [27] 李晖, 康重庆, 夏清. 考虑用户满意度的需求侧管理价格决策模型[J]. 电网技术, 2004, 28(23):3-8.
  - [28] JIN XIAO, JIAN LI, RAOUF BOUTABA, JAMES WON-KI HONG. Comfort-aware home energy management under market-based demand-response[C]. 2012 8th international conference on network and service management:10-18.
  - [29] 王建学, 王锡凡, 王秀丽. 电力市场可中断负荷合同模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9):11-16.
  - [30] 李莉, 谭忠富, 王建军, et al. 可中断负荷参与备用市场下的可靠性风险电价计算模型[J]. 电网技术, 2009, 33(4):1-8.
  - [31] 方勇, 李渝曾. 电力市场中激励性可中断负荷合同的建模与实施研究[J]. 电网技术, 2004, 28(17):
  - [32] 张钦, 王锡凡, 付敏, et al. 需求响应视角下的智能电网[J]. 电力系统自动化 2009(017):9-55.
  - [33] 徐伟强, 冯兆丽, 黄炯, et al. 基于改进对偶分解的智能电网快速实时定价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(21):42-47.
  - [34] 张钦, 王锡凡, 王建学. 智能电网下需求响应期权分析[J]. 电力系统自动化 2011, 35(6):6-13.
  - [35] 于娜, 于继来. 智能电网环境下需求响应参与系统备用的风险协调优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2010(021):77-82.
  - [36] 章鹿华, 王思彤, 易中林, 袁瑞铭, 周晖, 殷庆铎. 面向智能用电的家庭综合能源管理系统的设计与实现[J]. 电测与仪表, 2010 47(537):35-38.

- [37] 石磊, 刘皓明. 分时电价下 PHEV 智能集中充电策略[J]. 电力需求侧管理 2012(2):13-18.
- [38] 荆超. 智能电网用户端能源管理框架及关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011:13-24.
- [39] 何珍栋, 刘静纨, 史常凯, 郭哲. 别墅电力用户需求响应智能决策方法研究[C]. 第九届国际绿色建筑与建筑节能大会论文集, 2013:1-9.
- [40] 吴伟坡. 基于实时电价的智能家庭能源优化控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2013:3-7.
- [41] 文充. 满足舒适要求的空调系统需求响应及错峰运行策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011:17-30.
- [42] 曹俊. 面向需求响应的定价策略与用电设备随机调度算法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013:3-6
- [43] YANG JIE, ZHANG GUOSHAN, MA KAI. Demand response based on stackelberg game in smart grid[C]. Proceed of the 32nd Chinese control conference 2013:8820-8824.
- [44] LUH P, HO Y, MURALIDHARAN R. Load adaptive pricing: an emerging tool for electric utilities [J]. Automatic Control , IEEE Transactions on, 1982, 27(2):320-329.
- [45] TANG Y, SONG H, HU F, et al. Investigation on TOU pricing principles[C]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, 2005 IEEE/PES. Dalian:IEEE, 2005:1-9.
- [46] 丁宁, 吴军基, et al. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23):9-12.
- [47] 李海英, 李渝曾, 张少华. 一种激励相容的输电阻塞管理模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19):36-40.
- [48] 段登伟, 刘俊勇, 刘继, et al. 基于激励原理的可中断负荷[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2005, 37(3):143-148.
- [49] 潘小辉, 王蓓蓓, 李扬. 国外需求响应技术及项目实践[J]. 电力需求侧管理, 2013 15(1):58-62.

## 攻读硕士期间发表的学术论文

- [1] Baoshi Liu, Qi Wei. Home Energy Control Algorithm Research Based on Demand Response Programs and User Comfort. 2013 2<sup>nd</sup> International Conference on Measurement, Information and Control. 2013(2): 995-999.

## 致谢

在硕士研究生学习期间，导师韦琦教授一直悉心教导我，无论在生活还是学习中都给我了很多的指导和帮助。整个毕业论文课题研究期间，从选题、开题，中期考核一直最后的论文书写，韦琦老师耐心无私的指导使我感动万分。韦琦老师对待学术严谨的态度，渊博的学术知识，生活中对学生的无私奉献的精神都值得我用一生的时间铭记、学习。在此我要对韦琦老师在研究生期间所给予的指导和关怀致以最真诚的谢意。

感谢已经毕业的师兄师姐们，在我研究生学习道路上给予正确指引，使我快速的融入到实验室这个大家庭中，同时也感谢他们在我学习中有问题时悉心为我答疑解惑。

感谢我的同学在学习和生活上对我的帮助和启发，是你们的陪伴让我能够更快乐的前行。

感谢我的父母和亲人们多年以来对我的支持和无私的付出，没有你们，我就不能在学校安心的读书学习。

最后感谢哈尔滨理工大学对我多年来的培育之恩，感谢我的辅导员张路杨和尹鹏凯老师，感谢多年以来众多的授课老师们。我将牢记“知行统一，博厚悠远”的校训，在平时的工作和生活中做一个优秀的理工人。

# 基于需求响应的居民用电负荷控制策略研究

作者: [刘宝石](#)  
学位授予单位: [哈尔滨理工大学](#)

引用本文格式: [刘宝石](#) [基于需求响应的居民用电负荷控制策略研究](#)[学位论文]硕士 2014