(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 105352108 A
(43)申请公布日 2016.02.24

(21)申请号 201510633128.6
(22)申请日 2015.09.29
(71)申请人 中国电力科学研究院
地址 100192 北京市海淀区清河小营东路15号
申请人 国家电网公司 东南大学 国网甘肃省电力公司电力科学研究院 国网甘肃省电力公司
(72)发明人 钟鸣 高赐威 陈宋宋 闫华光 朱栋 何桂雄 韩永军 蒋利民 张新鹤 郑晶晶
(74)专利代理机构 北京安博达知识产权代理有限公司 11271
代理人 徐国文
(51)Int.Cl.
*F24F 11/00*(2006.01)

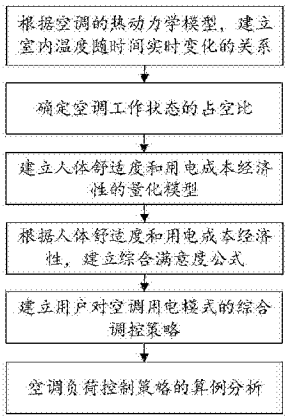
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54)发明名称

一种基于空调用电模式的负荷优化控制方法

(57)摘要

本发明提供了一种基于空调用电模式的负荷优化控制方法，所述方法包括：(1)根据定频空调的一阶热动力学模型，建立室内温度随时间变化的函数关系；(2)根据定频空调的特征，结合由用户偏好设置的室内温度控制区间，确定空调工作状态的占空比；(3)建立人体舒适满意度量化模型和用电成本经济性量化模型；(4)根据人体舒适满意度和用电成本经济性建立用户综合满意度的优化模型；(5)建立空调用电模式的综合调控策略。本发明根据电网平台实时电价的具体实施情况和定频空调的实际运行情况，拟合出了实时电价和空调的工作模式的函数关系，实现了从电网层面通过调整实时电价的变化来对空调的运行模式进行优化。




CN 105352108 A

1. 一种基于空调用电模式的负荷优化控制方法，其特征在于，所述方法包括：(1) 建立室内温度随时间变化的函数关系；

(2) 确定空调工作状态的占空比；

(3) 建立人体舒适满意度量化模型和用电成本经济性量化模型；

(4) 建立用户综合满意度的优化模型；

(5) 建立空调用电模式的综合调控策略。

2. 如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述室内温度随时间变化的函数关系为：

$$\begin{cases} T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - (T_{out}^{t+1} - T_{in}^{t})e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{RC}}}, s = 1 \\ T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - \eta PR - (T_{out}^{t+1} - \eta PR - T_{in}^{t})e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{RC}}}, s = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中：s 为空调的状态，1 表示关闭，0 表示开启；$T_{in}^{t}$ 为 t 时刻的室内温度；$T_{out}^{t+1}$ 为 (t+1) 时刻的室外温度；Δ t 为控制时间间隔，R 为空调的热阻，C 为空调的热容；η 为空调能效比；P 为空调的额定制冷消耗功率，单位是 kW，ηP 为空调的额定制冷量；$T_{RC}$ 为时间常数；t 为时间，e 为自然常数，$T_{in}^{t+1}$ 为 t+1 时刻的室内温度。

3. 如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述空调工作状态的占空比的计算包括：

设定空调的额定功率为 P，空调一个运行周期内室外环境温度为恒定值 $T_{out}$：

$$T^{+} = T_{out}(1 - \varepsilon^{\tau_{off}}) + T^{-}\varepsilon^{\tau_{off}} \quad (2)$$

$$T^{-} = (T_{out} - \eta PR)(1 - \varepsilon^{\tau_{on}}) + T^{-}\varepsilon^{\tau_{on}} \quad (3)$$

$$\tau_c = \tau_{on} + \tau_{off} \quad (4)$$

式中：$T^{+}$，T 表示控制周期内空调温度的上限和下限；$\tau_{on}$ 表示一个工作周期内，空调处于开状态的时间；$\tau_{off}$ 表示一个工作周期内，空调处于关停状态的时间；$\tau_c$ 表示一个工作周期的时间；ε 为散热函数，$\varepsilon = e^{\Delta t/RC}$；

所述空调工作状态的占空比 φ：$\varphi = \frac{\tau_{on}}{\tau_c}$。

4. 如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述人体舒适满意度量化模型：

$$\mu_1 = \begin{cases} 0 & T_{in} > T_{max} \\ aT_{in}^2 + bT_{in} + c & T_{min} \le T_{in} \le T_{max} \\ 1 & T_{in} < T_{min} \end{cases} \quad (5)$$

$\mu_1$ 表示人体舒适满意度；$T_{max}$，$T_{min}$ 分别为用户所能接受的室内温度的上限和下限；$T_{in}$ 表示室内温度的值；a, b, c 表示根据用户偏好设置的用户参数。

5. 如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述用电成本经济性量化模型：

$$\mu_2=\begin{cases}0 & \lambda P\varphi > S_{max}\\ \frac{S_{max}-\lambda P\varphi}{S_{max}-S_{min}} & S_{min} < \lambda P\varphi < S_{max}\\ 1 & \lambda P\varphi < S_{min}\end{cases} \quad (6)$$

式中：$\mu_2$表示空调的用电成本经济性；P 为空调的额定功率；$S_{min}$，$S_{max}$为用户所能接受的空调用电成本的最小值和最大值；λ 为电力公司发布的实时电价；φ为空调工作状态的占空比。

6. 如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述用户综合满意度由人体舒适满意度和用电成本经济性确定，包括：

设一天 N 个优化时段，对于每一个优化时段，都有如下式：

$\max(\alpha\ \mu_1+\beta\ \mu_2)$ (7)

约束条件：$T_{min}\leqslant T_{Ti}\leqslant T_{max}$ $S_{min}\leq\lambda P\varphi\leq S_{max}$

$\mu_1$表示人体舒适满意度；$\mu_2$表示用电成本经济性；α，β 分别表示人体舒适满意度和用电成本经济性所占用户综合满意度的权重；$T_{in}$表示室内温度；

$T_{min}$，$T_{max}$为用户所能接受的室内温度的下限和上限；$S_{min}$，$S_{max}$为用户所能接受的空调用电成本的最小值和最大值；P 为空调的额定功率；λ 为电力公司发布的实时电价，每小时变化一次；φ为空调工作状态的占空比；$\max(\alpha\ \mu_1+\beta\ \mu_2)$ 表示在每一个时段内都使得用户综合满意度最大。

7. 如权利要求 1 所述的控制方法，其特征在于，所述综合调控策略，包括：通过调整电价的大小并在综合满意度（$\mu_1+\mu_2$）最大的约束下，通过寻优找出该电价条件所对应的空调用电模式。

# 一种基于空调用电模式的负荷优化控制方法

## 技术领域

[0001] 本发明涉及电力系统及其自动化技术领域，具体涉及一种基于空调用电模式的负荷优化控制方法。

## 背景技术

[0002] 需求响应是智能电网的核心手段或技术，也是智能电网的最佳应用之一，在智能电网技术支持下，需求响应自动化将使得负荷调度真正成为可能，并在系统优化运行中扮演重要角色，从而提高能源利用效率，扩大新能源利用，而这也是智能电网建设目标之一。目前，发电侧和输电侧的电网智能化技术已经相对成熟，用电侧的智能化还有很大的差距，需求响应的智能化对于智能电网技术在用户侧的发展具有重要意义。随着需求响应等技术不断发展，电力终端用户在使用用电设备时，单纯的节约用电成本或奢侈性用电都不是恰当的用电模式，同时，家庭能源系统等相关技术不断发展也为研究用户负荷特性以及空调的用电模式提供了良好的环境和技术支撑。

[0003] 目前，虽然家庭能量管理系统已经能够根据用户的偏好自动设置空调模式，但是对于空调能耗的降低效果以及人体舒适度的提高并不明显，并且传统空调缺少从消费者心理学及人体舒适理论等方面去综合考虑用户体验，室内空调都是以恒温控制为主，使室内的环境处于一种静态的温度控制中，因此，如何构建综合考虑人体舒适因素和节能因素的家庭空调系统的智能调节控制方案，在智能电网建设和自动需求响应项目中应用，是一个亟需解决的问题。

## 发明内容

[0004] 为克服上述现有技术的不足，本发明提供一种基于空调用电模式的负荷优化控制方法。本发明以家用定频空调作为主要的研究对象，在浮动电价的环境下，充分研究了在空调使用过程中用户的舒适度和空调的用电成本，并建立基于用户空调用电模式的负荷控制模型，定义了人体舒适满意度、电费成本经济性两个参量，并且实现了对用户综合满意度的优化以及用户需求响应潜力的挖掘，从电网层面，通过调整售电价格，使得用户在特定时段选择合适的用电模式，从而实现了通过空调负荷的自动需求响应，在线调用空调负荷的可调节能力。

[0005] 实现上述目的所采用的解决方案为：

[0006] 一种基于空调用电模式的负荷优化控制方法，该方法包括如下步骤：

[0007] (1) 根据定频空调的一阶热动力学模型，建立室内温度随时间变化的函数关系；

[0008] (2) 根据定频空调的特征，结合由用户偏好设置的室内温度控制区间，确定空调工作状态的占空比；

[0009] (3) 建立人体舒适满意度量化模型和用电成本经济性量化模型；

[0010] (4) 根据人体舒适满意度和用电成本经济性建立用户综合满意度的优化模型；

[0011] (5) 建立空调用电模式的综合调控策略。

[0012] 优选的，所述室温随时间变化的函数关系为：

[0013] $$\begin{cases} T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - (T_{out}^{t+1} - T_{in}^{t})e^{-\frac{\Delta t}{T_{RC}}}, s = 1 \\ T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - \eta PR - (T_{out}^{t+1} - \eta PR - T_{in}^{t})e^{-\frac{\Delta t}{T_{RC}}}, s = 0 \end{cases} \quad (1)$$

[0014] 式中：s 为空调的状态，1 表示关闭，0 表示开启；$T_{in}^{t}$为 t 时刻的室内温度；$T_{out}^{t+1}$为(t+1)时刻的室外温度；Δt 为控制时间间隔，R 为空调的热阻，C 为空调的热容；η 为空调能效比；P 为空调的额定制冷消耗功率，单位是 kW，ηP 为空调的额定制冷量；$T_{RC}$为时间常数；t 为时间。e 为自然常数，$T_{in}^{t+1}$为 t+1 时刻的室内温度。

[0015] 优选的，所述空调工作状态的占空比的计算包括：

[0016] 设定空调的额定功率为 P，空调一个运行周期内室外环境温度为恒定值 $T_{out}$：

[0017] $$T^{+} = T_{out}(1 - \varepsilon^{\tau_{off}}) + T^{-}\varepsilon^{\tau_{off}} \quad (2)$$

[0018] $$T^{-} = (T_{out} - \eta PR)(1 - \varepsilon^{\tau_{on}}) + T^{-}\varepsilon^{\tau_{on}} \quad (3)$$

[0019] $\tau_c = \tau_{on} + \tau_{off}$ (4)

[0020] 式中：$T^{+}$，T 表示空调控制周期内空调温度的上限和下限；$\tau_{on}$表示一个工作周期内，空调处于开状态的时间；$\tau_{off}$表示一个工作周期内，空调处于关停状态的时间；$\tau_c$表示一个工作周期的时间；ε 为散热函数，$\varepsilon = e^{\Delta t/RC}$；

[0021] 所述空调工作状态的占空比φ为：$\varphi = \frac{\tau_{on}}{\tau_c}$。

[0022] 优选的，所述人体舒适满意度量化模型：

[0023] $$\mu_1 = \begin{cases} 0 & T_{in} > T_{max} \\ aT_{in}^2 + bT_{in} + c & T_{min} \le T_{in} \le T_{max} \\ 1 & T_{in} < T_{min} \end{cases} \quad (5)$$

[0024] $\mu_1$表示人体舒适满意度；$T_{max}$，$T_{min}$分别为用户所能接受的室内温度的上限和下限；$T_{in}$表示室内温度的值；a，b，c 表示根据用户偏好设置的用户参数，对于不同的用户，其值也会发生相应变化。

[0025] 优选的，所述用电成本经济性量化模型：

[0026] $$\mu_2 = \begin{cases} 0 & \lambda P\varphi > S_{max} \\ \frac{S_{max} - \lambda P\varphi}{S_{max} - S_{min}} & S_{min} < \lambda P\varphi < S_{max} \\ 1 & \lambda P\varphi < S_{min} \end{cases} \quad (6)$$

[0027] 式中：$\mu_2$表示空调的用电成本经济性；P 为空调的额定功率；$S_{min}$，$S_{max}$为用户所能接受的空调用电成本的最小值和最大值；λ 为电力公司发布的实时电价；φ为空调工作状态的占空比。

[0028] 优选的，所述用户综合满意度由人体舒适满意度和用电成本经济性确定，包括：

[0029] 设一天 N 个优化时段，对于每一个优化时段，都有如下式：

[0030] $\max(\alpha\ \mu_1 + \beta\ \mu_2)$ (7)

[0031] 约束条件：$T_{min} \leq T_{in} \leq T_{max}$ $S_{min} \leq \lambda P \varphi \leq S_{max}$

[0032] $\mu_1$表示人体舒适满意度；$\mu_2$表示用电成本经济性；α，β 分别表示人体舒适满意度和用电成本经济性所占用户综合满意度的权重；$T_{in}$表示室内温度；

[0033] $T_{min}$，$T_{max}$为用户所能接受的室内温度的下限和上限；$S_{min}$，$S_{max}$为用户所能接受的空调用电成本的最小值和最大值；P 为空调的额定功率；λ 为电力公司发布的实时电价，每小时变化一次；φ为空调工作状态的占空比；max（α $\mu_1$+β $\mu_2$）表示在每一个时段内都使得用户综合满意度最大。

[0034] 优选的，所述综合调控策略，在自动需求响应项目中，电力公司可以通过调整电价的大小，影响电费成本经济性的变化，在综合满意度（$\mu_1$+$\mu_2$）最大的约束下，通过寻优找出该电价条件所对应的空调用电模式，从而确定空调工作时的占空比，达到对空调用电模式控制，由此可以确定电价的变化所能控制的空调负荷的削减量，从而挖掘出在自动需求响应项目中定频空调的需求响应潜力。

[0035] 与现有技术相比，本发明具有以下有益效果：

[0036] 1、用户综合满意度中，创新性地定义了人体舒适满意度和空调的电费成本经济性两个参量，从而实现了考虑用户舒适度和经济性方面的多重影响的综合负荷优化控制，更加的符合实际的用户用电模式使用情况；

[0037] 2、关于人体舒适满意度的模型中，根据实际的空调用电模式的使用情况，拟合出了室内温度的实时值与人体舒适满意度的二次函数关系，有效的量化了温度对人体舒适度的影响。

[0038] 3、空调的电费成本经济性模型中，根据电网平台实时电价的具体实施情况和定频空调的实际运行情况，拟合出了实时电价和空调的工作模式（运行占空比）的函数关系，实现了从电网层面通过调整实时电价的变化来对空调的运行模式进行优化。

[0039] 4、基于用电模式的空调负荷控制策略中，提出了优化用户综合满意度的概念，并用具体的算例进行了相关阐述和说明，从而实现了对空调用电模式的优化控制，并且挖掘出了定频空调在自动需求响应项目中的较大需求响应潜力。

## 附图说明

[0040] 图 1 本发明提供的基于空调用电模式的负荷控制策略实现流程图；

[0041] 图 2 电价与占空比之间的关系；

[0042] 图 3 电价与用户满意度之间的关系。

## 具体实施方式

[0043] 下面结合附图对本发明的具体实施方式做进一步的详细说明。

[0044] 如图 1 所示，本发明实施例所提供的基于空调用电模式的负荷控制方法，主要包括六个步骤：根据定频空调的一阶热动力学模型，建立室温随时间变化的函数关系；根据定频空调的特征，结合室温控制区间，确定空调工作状态的占空比；建立主要受室内温度影响的人体舒适度和主要由电价和占空比控制的电费成本经济性的衡量公式；在以上的基础上，确定由人体舒适度和电费成本经济性共同确定的用户综合满意度，建立用户对空调用电模式的自动需求响应综合调控策略；空调负荷控制策略的算例分析。下面具体介绍各个

步骤的具体内容。

[0045] 所述给予用电模式空调负荷控制策略是在大数据环境下，考虑各种输入输出等需求响应命令的执行以及控制命令的生成等提出的一种控制策略；

[0046] 步骤 1）家庭用户和小型工商业用户的空调机组可以用简化的等效热参数模型（equivalent thermal parameters，ETP）来表示其热动力学原理，根据空调的热动力学模型可以建立室内温度 T 和时间 t 的关系：

[0047] $$\begin{cases} T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - (T_{out}^{t+1} - T_{in}^{t})e^{-\frac{\Delta t}{T_{RC}}}, s = 1 \\ T_{in}^{t+1} = T_{out}^{t+1} - \eta PR - (T_{out}^{t+1} - \eta PR - T_{in}^{t})e^{-\frac{\Delta t}{T_{RC}}}, s = 0 \end{cases} \quad (1)$$

[0048] 式中：s 为空调的状态，1 表示关闭，0 表示开启；$T_{in}^{t}$为 t 时刻的室内温度；$T_{out}^{t+1}$为（t+1）时刻的室外温度；Δ t 为控制时间间隔，R 为空调的热阻，C 为空调的热容；η 为空调能效比；P 为空调的额定制冷消耗功率，单位是 kW，ηP 为空调的额定制冷量；$T_{RC}$为时间常数；t 为时间，e 为自然常数，$T_{in}^{t+1}$为 t+1 时刻的室内温度。

[0049] 步骤 2）考虑到空调的工作特征，空调负荷控制过程中要满足用户舒适度要求，即室温区间 [T，$T^{+}$]，要求用户的室温不能超过该区间，当室温越接近于 $T^{+}$时，对应的空调负荷可关停持续时间越长，空调达到温度设定最小值 T，则进入“关停”状态，达到最大值 $T_{out}$，则进入“开启”状态，如下式：

[0050] $$S(t) = \begin{cases} 0 & T_{in}(t) \geq T^{+} \\ 1 & T_{in}(t) \leq T^{-} \\ S(t-1) & esle \end{cases} \quad (2)$$

[0051] 式中：s 表示空调的工作状态，S（t）表示 t 时刻空调的工作状态，S（t-1）表示 t-1 时刻空调的工作状态。

[0052] 设定空调的额定功率为 P，控制周期内室外环境温度为恒定值 $T_{out}$：

[0053] $$T^{+} = T_{out}(1 - \varepsilon^{\tau_{off}}) + T^{-}\varepsilon^{\tau_{off}} \quad (3)$$

[0054] $$T^{-} = (T_{out} - \eta PR)(1 - \varepsilon^{\tau_{on}}) + T^{-}\varepsilon^{\tau_{on}} \quad (4)$$

[0055] $\tau_c = \tau_{on} + \tau_{off}$ (5)

[0056] 式中：$T^{+}$，T 表示空调控制周期内温度的上限和下限；$\tau_{on}$表示一个工作周期内，空调处于开状态的时间；$\tau_{off}$表示一个工作周期内，空调处于关停状态的时间；$\tau_c$表示一个工作周期的时间；ε 为散热函数，$\varepsilon = e^{\Delta t/RC}$；

[0057] 因此，可以由上式求解出在这个负荷控制周期时间 $\tau_c$，以及空调开启 $\tau_{on}$和关停的时间 $\tau_{off}$，进而可以计算出空调在这个负荷控制周期内工作的实际功率和实际电费成本。所述空调工作状态的占空比φ为：$\varphi = \frac{\tau_{on}}{\tau_c}$。

[0058] 步骤 3）根据人体舒适满意度和空调的电费成本经济性，可以建立具体的表示人体舒适满意度 $\mu_1$，以及用电成本经济性 $\mu_2$的具体表示形式.

[0059] $$\mu_1 = \begin{cases} 0 & T_{in} > T_{max} \\ aT_{in}^2 + bT_{in} + c & T_{min} \le T_{in} \le T_{max} \\ 1 & T_{in} < T_{min} \end{cases} \quad (6)$$

[0060] $\mu_1$表示人体舒适满意度；$T_{max}$，$T_{min}$分别为用户所能接受的室内温度的上限和下限；$T_{in}$表示室内温度的值；a, b, c 表示根据用户偏好设置的用户参数。

[0061]

$$\mu_2 = \begin{cases} 0 & \lambda P\varphi > S_{masx} \\ \frac{S_{max} - \lambda P\varphi}{S_{max} - S_{min}} & S_{min} \le \lambda P\varphi \le S_{max} \\ 1 & \lambda P\varphi < S_{min} \end{cases} \quad (7)$$

[0062] 式中：$\mu_2$表示空调的用电成本经济性；P 为空调的额定功率；$S_{min}$, $S_{max}$为用户所能接受的空调用电成本的最小值和最大值；λ 为电力公司发布的实时电价；φ为空调工作状态的占空比。

[0063] 步骤 4) 记优化区间长度为 L，将其均分为时长均等的 N 个时隙。在上述基础上，以 $T_{min} \le T_{in} \le T_{max}$，$S_{min} \le \lambda P\varphi \le S_{max}$为约束条件，在一定的优化取件内，通过调整电价的变化，来对综合满意度（$\mu_1 + \mu_2$）进行优化，建立计算综合满意度的模型，如下式所示：

[0064] $\max(\alpha\ \mu_1 + \beta\ \mu_2)$ (8)

[0065]

$$s.t. T_{min} \le T_{in} \le T_{max}\ \ S_{min} \le \lambda P\varphi \le S_{max} \quad (9)$$

[0066] 式中：α，β 分别表示人体舒适满意度和用电成本经济性所占用户综合满意度的权重；$\max(\alpha\ \mu_1 + \beta\ \mu_2)$ 表示在每一个时段内都使得用户综合满意度最大。

[0067] 步骤 5) 根据以上前提，建立用户对空调用电模式的综合调控策略。在自动需求响应项目中，电网公司可以通过调整电价的大小，影响电费成本经济性的变化，在综合满意度（$\mu_1 + \mu_2$）最大的约束下，通过寻优找出该电价条件所对应的空调用电模式，从而确定空调工作时的占空比，达到对空调用电模式控制，由此可以确定电价的变化所能控制的空调负荷的削减量。可以实现在电网需求响应项目的实施过程中，通过调整电价的高低，既能使得用户的综合满意度始终保持最大化，又能达到一定的削减或增加负荷的效果。

[0068] 步骤 6) 空调负荷控制策略的算例分析：室外温度恒定，电价信号变化，空调用电模式自动调整到使得用户综合满意度最优的状态。

[0069] 空调实际运行参数及其满意度相关参数设置：$(T^+ - T) = 1℃$；空调散热函数 $\varepsilon = 0.96$；式 (6) 中 a, b, c, $T_{min}$, $T_{max}$的值分别取为 -0.0067, 0.2733, -1.8；式 (7) 中 P, $S_{min}$, $S_{max}$分别取为 2.5kw, 0, 2；式 (8) 中 N, α, β 分别取 24, 0.8, 1.2。

[0070] 选取 13:00 至 14:00 这个时间段来进行优化，$T_{out} \equiv 36℃$；电价信号 λ 变化，其他参数不变，其结果如表 1：

[0071] 表 1 电价变化，空调用电模式的自动响应结果

[0072]

| 电价λ（元/kW·h） | 空调占空比φ | 室内平均温度（℃） |
|---|---|---|
| 0.2 | 0.380 | 21.89 |
| 0.3 | 0.356 | 22.64 |
| 0.4 | 0.336 | 23.38 |
| 0.5 | 0.316 | 24.13 |
| 0.6 | 0.297 | 24.88 |
| 0.7 | 0.277 | 25.62 |
| 0.8 | 0.257 | 26.37 |
| 0.9 | 0.237 | 27.12 |
| 1.0 | 0.217 | 27.87 |
| 1.1 | 0.197 | 28.62 |
| 1.2 | 0.177 | 29.37 |
| 1.3 | 0.160 | 30 |
| 1.4 | 0.144 | 34 |

[0073] 根据表 1 的中电价调节下空调占空比，室内温度的变化关系，可以得到电价与舒适满意度，经济性满意度，以及用户综合满意度之间的关系，如表 2 展示了不同电价水平下综合满意度最优情况下的空调占空比及平均功率，借助该数值关系，电力公司可通过调整电价来改变空调功率需求，实现空调负荷调度。

[0074] 表 2 电价调整下用户满意度情况

[0075]

| 电价λ | 空调占空比φ | 空调平均功率(W) | 舒适满意度 | 经济性满意度 | 综合满意度 |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.2 | 0.38 | 950 | 0.778 | 0.774 | 1.552 |
| 0.3 | 0.356 | 890 | 0.763 | 0.679 | 1.442 |
| 0.4 | 0.336 | 840 | 0.742 | 0.596 | 1.338 |
| 0.5 | 0.316 | 790 | 0.715 | 0.525 | 1.240 |
| 0.6 | 0.297 | 742.5 | 0.682 | 0.466 | 1.148 |
| 0.7 | 0.277 | 692.5 | 0.643 | 0.419 | 1.062 |
| 0.8 | 0.257 | 642.5 | 0.598 | 0.384 | 0.982 |
| 0.9 | 0.237 | 592.5 | 0.547 | 0.361 | 0.908 |
| 1.0 | 0.217 | 542.5 | 0.490 | 0.350 | 0.840 |
| 1.1 | 0.197 | 492.5 | 0.427 | 0.351 | 0.778 |
| 1.2 | 0.177 | 442.5 | 0.358 | 0.364 | 0.722 |
| 1.3 | 0.160 | 400 | 0.295 | 0.377 | 0.672 |
| 1.4 | 0.144 | 360 | 0 | 0 | 0 |

[0076] 当电价为 1.4 元 /kW·h 时，其用电成本和设定温度已经超过了最大限度，故其舒适满意度和经济性满意度均为 0。根据表 1 的结果可得到图 2，图 2 中 :横坐标为售电价格（元 /kw·h），纵坐标分别为对应的空调占空比和对应的室内温度（℃）。

[0077] 根据表 2 可以得到图 3，图 3 中 :横坐标表示售电价格（元 /kW·h），纵坐标为所对

应的满意度的值，其中红色的曲线表示经济性满意度，黑色的曲线表示人体舒适满意度，蓝色的曲线表示综合满意度。

[0078] 由图 2 可知，浮动电价的情况下，随着电价的不断升高，为了使得用户综合满意度在新的条件下仍然最大，其空调的用电模式自动调整，空调占空比逐渐减少，空调的占空比与电价之间近乎一次函数的关系$\lambda \propto k\varphi$，空调占空比随着电价的调整范围能够达到 62%，对于单台空调 (2500W) 而言，可调范围能够达到 1552W，因而具有较大的需求响应潜力。

[0079] 由图 3 可知，在室外温度恒定，随着电价的逐步上升，经济性满意度逐步下降，且电价越高，其下降幅度越缓；人体舒适满意度也呈现一定程度的下降，且电价越高，其下降程度越快；在电价从 0.2( 元 /kW·h) 上升到 1.3( 元 /kW·h) 的过程中，综合满意度虽然是在当时电价下保持最优，但随着电价的升高，整体上也逐步下降。

[0080] 算例结果表明，该方法能够充分考虑用户舒适度和经济性方面的多重影响，并在此基础上计算用户的综合满意度的可调节能力；这种方法充分考虑了气象、电价等因素对空调用电模式的动态影响，尤其是电价对空调用电模式的控制，挖掘出了定频空调的较大需求响应潜力，为家庭能源互联网，电力市场运行，电网层面自动需求响应项目的实现提供了一种较为可行的理论支持。

[0081] 最后应当说明的是：以上实施例仅用于说明本申请的技术方案而非对其保护范围的限制，尽管参照上述实施例对本申请进行了详细的说明，所属领域的普通技术人员应当理解：本领域技术人员阅读本申请后依然可对申请的具体实施方式进行种种变更、修改或者等同替换，但这些变更、修改或者等同替换，均在申请待批的权利要求保护范围之内。

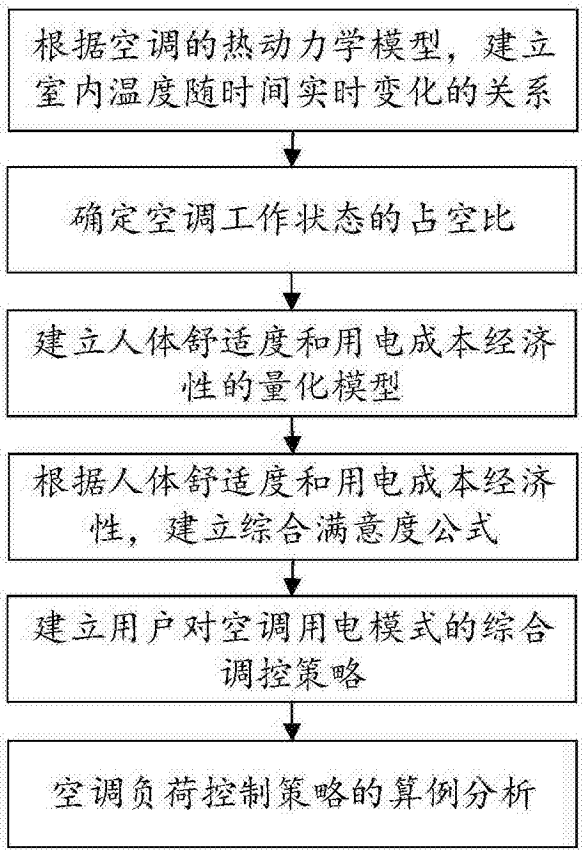

根据空调的热动力学模型，建立室内温度随时间实时变化的关系
确定空调工作状态的占空比
建立人体舒适度和用电成本经济性的量化模型
根据人体舒适度和用电成本经济性，建立综合满意度公式
建立用户对空调用电模式的综合调控策略
空调负荷控制策略的算例分析

图 1

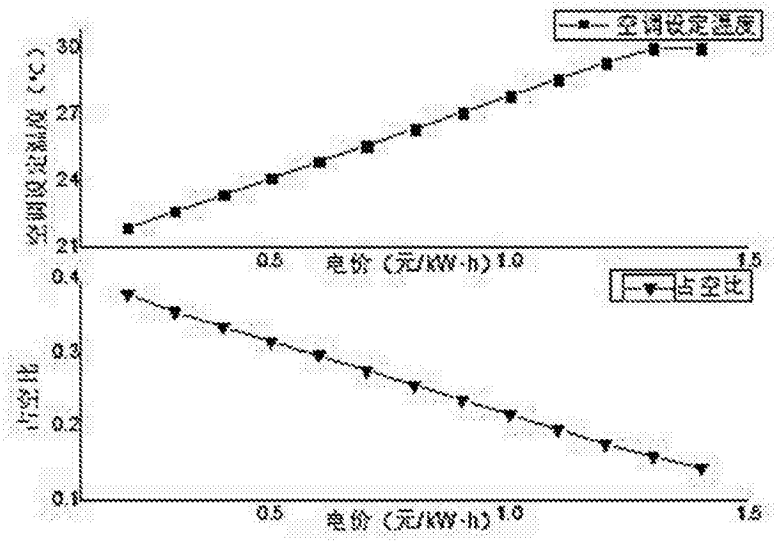

空调设定温度
占空比
电价（元/kW·h）
0.5
1.0
1.5
21
24
27
30
0.1
0.2
0.3
0.4

图 2

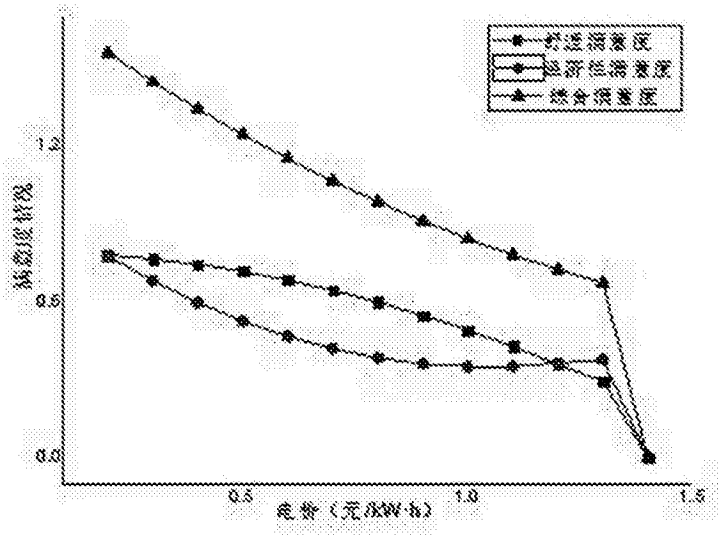



图 3