

智能工程与智能体在 DSM 补偿机制建模中的应用

胡兆光¹, 谭显东¹, 单葆国², 李存斌¹, 徐敏杰³

(1. 华北电力大学工商管理学院, 北京市 昌平区 102206; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京市 宣武区 100761; 3. 北京交通大学电气工程学院, 北京市 西城区 100044)

Application of Intelligent Engineering and Agent to DSM Compensation Mechanism Modelling

HU Zhao-guang¹, TAN Xian-dong¹, SHAN Bao-guo², LI Cun-bin¹, XU Min-jie³

(1. School of Business Administration, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China;
2. State Power Economic Research Institute, Xuanwu District, Beijing 100761, China;
3. College of Electrical Engineering, Beijing Jiao Tong University, Xicheng District, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: Establishing DSM compensation mechanism is one of the typical uncertain issues in electric power economy, which is difficult to be modeled by traditional mathematic models. The theory of intelligent engineering and agent are adopted to study it. Firstly, the issue of establishing DSM compensation mechanism is defined as the second type issue in IE. Secondly, an open-agent system is designed, which consists of a government agent, 15 sectoral agents and human experts. Thirdly, the goal, structure and behavioral strategy of each agent are analyzed, and the optimum intelligent path of the issue is found out after the involvements of agents. Then a simulation procedure is designed. Finally, the paper provides a case study based on China economic data of 2000 and 2002. The analysis results show that drawing DSM funds by proper percentage of electricity charge is feasible in China.

KEY WORDS: intelligent engineering; agent; demand side management; compensation mechanism; consumer price index

摘要: 建立 DSM 补偿机制问题是电力经济中典型的半结构化问题, 传统数学模型很难解决, 该文将智能工程与智能体理论结合起来研究了此问题。文中首先将建立 DSM 补偿机制问题归纳为智能工程理论中的第 2 类问题, 然后构建了一个多智能体系统, 并设计了各智能体的目标、结构以及行为策略, 通过智能体之间的交互来确定该问题的最理想智能路径, 接着给出了系统的仿真流程, 最后在 2000 年和 2002 年实际经济数据的基础上作了实例分析。研究结果表明以电

费附加方式按照适当的比例提取 DSM 资金用于 DSM 补偿在中国切实可行。

关键词: 智能工程; 智能体; 需求侧管理; 补偿机制; 居民消费价格指数

0 引言

电力经济中存在着众多半结构化问题, 因涉及到大量的不确定因素, 很难用传统的数学模型来解决, 建立 DSM 补偿机制问题也属于这类, 国内外对此主要从定性方面进行研究, 回答建立 DSM 补偿机制的必要性及可以通过哪些方式来建立 DSM 补偿机制等^[1-3], 但很少从定量的角度分析其影响。关于建立我国 DSM 补偿机制, 有关专家建议在电费中附加一定的比例来筹集资金, 用于 DSM 补偿。但该比例应该为多大, 这是需要回答的问题。因为如果每千瓦时用电新加的附加费多了, 将会严重改变我国的经济状态, 如物价水平、人民生活乃至整个国民经济等; 如果新加的附加费少了, 虽然对经济状态的改变较小, 但所筹集的资金数量有限, 达不到开展 DSM 工作的要求。

以智能空间和智能路径为核心, 结合了人工智能(AI)、神经网络(NN)和模糊系统(FS)的智能工程(IE)理论正好为解决该问题提供了新思路^[4-6]。利用智能工程理论, 可以把建立 DSM 补偿机制问题归纳为智能空间中的问题求解, 即确定改变经济状态的最合适的智能路径。随着人工智能技术的发展, 智能体(agent)以其自治性、反应性、预动性及社会性等优点被广泛应用于研究经济系统的变化, 在电

基金项目: 美国能源基金会项目(G-0601-08211); 国家自然科学基金项目(70572090)。

Project Supported by Energy Foundation of U.S (G-0601-08211), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (70572090).

力系统中得到广泛的研究^[7-9],如研究电力市场中的发电商投标报价^[10-15]、电力市场模拟^[16-17]、协商与谈判^[18-19]、技术支持系统^[18-20]、分时电价^[21]以及电力系统故障诊断等^[22-23]。本文将结合智能工程与智能体理论来研究DSM补偿机制问题。

1 智能工程理论基础

智能工程将事物的发展变化概括为智能空间中的状态变化,其主要定义包括状态、智能路径、智能空间、问题、 α -优越解等^[4]。

在问题 B 的智能路径集合 P_B 中存在着较好的智能路径,也存在着较差的智能路径,所以可以在 P_B 上定义一个“优越解”的模糊子集 F_B ,所有智能路径 $p_s(p_s \in P_B)$ 对 F_B 的隶属函数为 $\mu_{F_B}(p_s)$, p_s 的隶属度越大表示 p_s 越优越,反之越差。利用 F_B 的 α 截集表示问题 B 的 α -优越解 $x(\alpha)$:

$$x(\alpha) = \{p_s | \mu_{F_B}(p_s) \geq \alpha, p_s \in P_B\} \quad \alpha \in [0,1] \quad (1)$$

式中: α 越大, α -优越解所包含的智能路径就越优越,数量也越少。问题 B 的最优智能路径就是使得 α 为最大的智能路径,这可以是一条,也可以是多条。

根据目标状态 S_t 是否已知,问题 B 可以分为第一类问题和第二类问题。如果 S_t 已知,则 B 是第一类问题,为目标固定的路径寻优问题,解此类问题的关键在于找到一个最理想 α -优越解 p_s ,使得初始状态 S_0 通过 p_s 能够到达或者尽可能到达 S_t ;如果 S_t 未知,则 B 是第二类问题,为目标自由的路径寻优问题,解此类问题的关键在于找到一个最理想 α -优越解,使得 S_0 通过 p_s 能够到达满意状态。

2 基于智能工程理论的DSM补偿机制建模思路

利用状态集合 $S=(s_1, s_2, \dots, s_{31})$ 描述我国的经济状态,具体包含31个元素,均为变量,其中 s_1 为居民消费价格指数(CPI)变动幅度, $s_2 \sim s_{16}$ 分别为15个行业(具体划分见第3节中行业智能体所代表的行业)的产品价格变动幅度 $\Delta p_i(i=1, 2, \dots, 15)$, $s_{17} \sim s_{31}$ 分别为15个行业用电量的变化 $\Delta e_{di}(i=1, 2, \dots, 15)$ 。

S_0 为建立DSM补偿机制前,我国经济的初始状态,是一有序集合,记为

$$S_0=(s_{0,1}, s_{0,2}, \dots, s_{0,31}) \quad (2)$$

S_t 是建立DSM补偿机制后,我国经济的目标状态,记为

$$S_t=(s_{t,1}, s_{t,2}, \dots, s_{t,31}) \quad (3)$$

则建立DSM补偿机制问题 B 可以描述成:

$$B = \langle S_0, S_t, P_B \rangle \quad (4)$$

式中 P_B 为建立DSM补偿机制的路径集合, S_t 未知,所以该问题 B 属于第二类问题。求解问题 B ,就是在 P_B 中寻找一个 α -优越解,使得我国经济从初始状态 S_0 到达一个满意状态——物价在规定范围内上涨,筹集的DSM资金最多,补偿给各类用户后产生的节电效果最好。这种满意状态可以用居民消费价格指数CPI的涨幅来度量,当电价提高的越多,筹集的DSM资金就越多,补偿给各类用户后产生的节电效果也就越好,CPI涨幅也就越大。可见当CPI的涨幅越趋向于规定的上限, S_0 就越趋向于满意状态。为此,定义建立DSM补偿机制问题 B 的智能路径对“优越解”模糊子集 F_B 的隶属函数为

$$\mu_{F_B}(p_s) = \begin{cases} 0, & \delta_{\text{CPI MAX}} - \delta_{\text{CPI}}(p_s) < 0 \\ 1, & \delta_{\text{CPI MAX}} - \delta_{\text{CPI}}(p_s) = 0 \\ 0.9, & 0 < \delta_{\text{CPI MAX}} - \delta_{\text{CPI}}(p_s) \leq \mu \\ \frac{0.9 \times \delta_{\text{CPI}}(p_s)}{\delta_{\text{CPI MAX}}}, & \delta_{\text{CPI MAX}} - \delta_{\text{CPI}}(p_s) > \mu \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\delta_{\text{CPI MAX}}$ 表示CPI上涨的上限; $\delta_{\text{CPI}}(p_s)$ 表示不同智能路径所导致的CPI上涨的幅度; μ 代表一个很小的正数,本文取0.000 01。显然隶属度为1的智能路径使得CPI的上涨恰好等于允许的上限,这在现实社会中很难实现,所以退而求其次,取隶属度为0.9的智能路径就为本问题的 α -优越解($\alpha=0.9$),它为最理想智能路径,其对应的目标状态 S_t 为理想状态。

在问题 B 中,从 S_0 到 S_t 的主要过程是:政府提高电价,并把多收的这部分电费补偿给各类电力用户用于技术改造,各类用户将对此做出反应,从而使经济状态从 S_0 到 S_t 。

3 确定最理想智能路径的开放智能体系统框架

问题 B 中最理想智能路径的确定涉及到两类智能体:政府智能体和行业智能体。目前多数智能体或多智能体系统建成后,外界就不进行干预,让其完全在智能体间的自发交互中演化,考虑到当前智能体技术还不能模拟人的全部智能,所以智能体应该是开放的,专家可以对其进行调整与干预,专家干预的主要方面包括智能体的演化过程、推理规则、运行时间及智能体的主要参数等。所以,基于开放智能体的思想,最理想智能路径的确定还涉及

到专家参与。图 1 是确定最理想智能路径的开放智能体系统框架，其中行业智能体具有 15 个，见表 1。

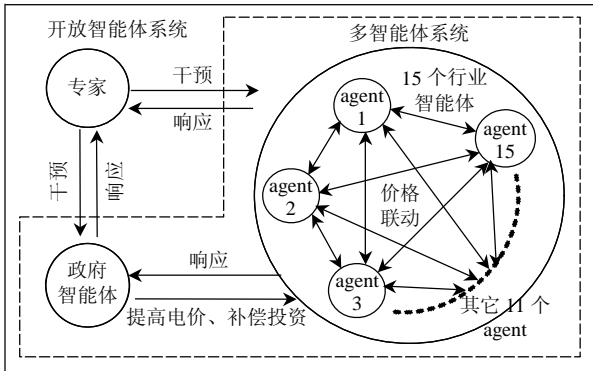


图 1 确定最理想智能路径的开放智能体系统框架
Fig. 1 Structure of open-agent system determining the optimal intelligent path

表 1 15 个行业智能体的具体名称
Tab. 1 Name of 15 sectoral agents

智能体代号	智能体名称
agent 1	农业
agent 2	采掘业
agent 3	食品制造业
agent 4	纺织、缝纫及皮革产品制造业
agent 5	炼焦、煤气及石油加工业
agent 6	化学工业
agent 7	建筑材料及其他非金属矿物制品业
agent 8	金属产品制造业
agent 9	机械设备制造业
agent 10	其他制造业
agent 11	建筑业
agent 12	运输邮电业
agent 13	商业饮食业
agent 14	其他服务业
agent 15	电力热力的生产和供应业

政府智能体与行业智能体之间的交互主要体现在前者要提高后者的电价，并利用增收的电费补偿给后者用于节能改造以及后者的响应三方面；行业智能体之间的交互主要体现在用电成本上升所带来的行业生产成本及产品价格的联动上涨方面；政府智能体、行业智能体与专家之间的交互主要体现在专家的干预及智能体对此的响应上。专家、政府智能体及行业智能体之间的联系在第 4 节的行为分析中将详细介绍。

4 智能体设计

4.1 政府智能体

(1) 政府智能体的目标。

为了建立 DSM 的补偿机制，有效地推动 DSM 工作的开展，政府希望在不影响我国经济正常运行的前提下尽量筹集更多的 DSM 资金，其目标可以

表示为

$$\max Y = f(r) \tag{6}$$

$$\text{s.t. } \delta_{\text{CPI}} \leq \delta_{\text{CPIMAX}}$$

$$r > 0$$

$$\delta_{\text{CPI}} > 0$$

式中 Y 代表政府征收的 DSM 资金数量，它是电费附加比例 r 的函数。约束条件为居民消费价格指数的变动幅度 δ_{CPI} 不能大于允许的上限 δ_{CPIMAX} 。

(2) 政府智能体行为。

政府智能体的结构如图 2 所示，包含了目标、推理机、规则库、感知器、效应器、数据库 6 部分组成。它首先按一定比例提高电价，通过效应器直接作用于外部环境；然后通过感知器从外部环境中获取行业智能体产品价格的变动信息；接着推理机根据此信息计算 δ_{CPI} ，并按照规则库中的规则确定电价调整策略；之后通过效应器作用于外部环境，并根据各行业智能体新的响应信息确定新一轮的电价调整策略；最后直到满足目标为止。

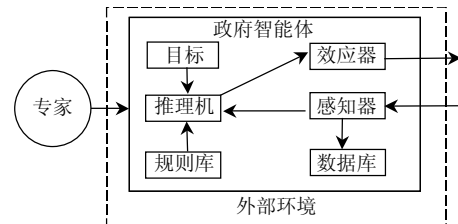


图 2 政府智能体的结构

Fig. 2 Structure of government agent

推理机计算 δ_{CPI} 的公式为

$$\delta_{\text{CPI}} = \sum_{i=1}^n \Delta p_i w_i \tag{7}$$

式中： Δp_i 表示第 i 行业产品价格的变动幅度， w_i 表示对第 i 行业产品的消费占全社会消费的比重。

多收的电费全部用作 DSM 补偿，政府智能体需要对该资金进行分配，分别补偿给各行业智能体以用作技术改造。资金分配问题需要考虑的因素很多，本文采用简化处理的办法，假设政府按公平的原则，将资金平均补偿给各行业。

政府智能体作为开放智能体，外界专家完全可以干预和调整政府智能体的电价调整和资金分配策略。

(3) 政府智能体电价调整策略。

政府智能体确定电价调整策略的规则可以表示为：

如果 $\delta_{\text{CPIMAX}} - \delta_{\text{CPI}} > \mu$ ，则按照适当的步长增加电价调整幅度 r 的值；

如果 $0 \leq \delta_{\text{CPIMAX}} - \delta_{\text{CPI}} \leq \mu$ ，则此时的电价调整幅

度 r 就是政府智能体的选择;

如果 $\delta_{CPI_{MAX}} - \delta_{CPI} < 0$, 则按照适当的步长减小电价调整幅度 r 的值。

4.2 行业智能体

(1) 行业智能体的目标。

作为盈利主体, 行业智能体的长期目标一直是利润最大化。对于政府提高电价, 行业智能体的短期目标将是在电价上涨前和上涨后利润不变, 即 $R_i = R_{i0}$, 其中 R_i 表示行业智能体 i 在电价调整后的利润, R_{i0} 表示它在电价调整前的利润。

(2) 行业智能体的行为。

行业智能体的结构如图3所示, 与政府智能体的结构大致相同, 不同之处在于政府智能体是利用专家规则进行推理, 而行业智能体是利用定量模型进行推理。

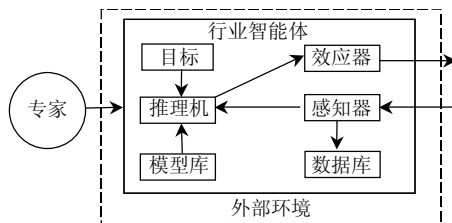


图3 行业智能体的结构

Fig. 3 Structure of sectoral agent

电力作为各行业的中间投入, 电价的变动将会直接影响各行业的生产成本, 各行业的生产成本将影响到自身的销售价格, 销售价格的变动又会影响到以这些产品为中间投入的行业的生产成本, 从而又会导致其销售价格的变化, 这样不断反复交叉影响, 直到最后各行业产品的价格处于均衡状态为止。所以各行业智能体的行为应该是(以行业智能体 i 为例): 首先通过感知器从外部环境中获取电价及其它行业产品价格的变动信息; 接着推理机根据此信息利用模型库中的模型进行推理, 确定其产品价格上涨的幅度(Δp_i), 并通过效应器直接作用于外部环境; 其他行业智能体根据此价格变动信息(Δp_i)调整自身的产品销售价格; 行业智能体 i 根据此时的外部环境又重新确定自身的调价策略, 直到最后各行业智能体的产品价格处于均衡状态为止。

因为电价上升, 行业智能体第二个行为就是减少用电量, 可以用该智能体的用电量的价格弹性来描述。行业智能体用电量的价格弹性指电价的相对变动所引起的用电量的相对变动, 数值上等于用电量的变动率与对应的电价的变动率的比值, 其计算公式为

$$\varepsilon_i = -\frac{\partial e_{di}/e_{di}}{\partial p_e/p_e} \quad (8)$$

式中: ε_i 代表智能体 i 用电量的价格弹性; e_{di} 表示智能体 i 的用电量; p_e 代表电价。等式右边分子部分表示其用电量的变化率, 分母部分表示电价的变化率。从该式可以看出在不同的电价水平上, 计算的价格弹性将有所不同。一般来说, 价格水平越高, 弹性值越小, 价格水平越低, 弹性值越大。本文利用1995—2005年各行业的用电量、增加值及电价数据建立计量模型确定了各行业智能体用电量的价格弹性, 表2和表3分别列出了在2000年和2002年电价水平下各智能体用电量的价格弹性。

表2 2000年行业智能体用电量的价格弹性

Tab. 2 Power price elasticity of sectoral agent in 2000

智能体代号	价格弹性	智能体代号	价格弹性
agent 1	0.00	agent 9	0.36
agent 2	0.60	agent 10	0.25
agent 3	0.37	agent 11	0.48
agent 4	0.12	agent 12	9.59
agent 5	0.18	agent 13	0.82
agent 6	0.42	agent 14	0.87
agent 7	0.32	agent 15	0.26
agent 8	0.27		

表3 2002年行业智能体用电量的价格弹性

Tab. 3 Power price elasticity of sectoral agent in 2002

智能体代号	价格弹性	智能体代号	价格弹性
agent 1	0.00	agent 9	0.27
agent 2	0.54	agent 10	0.19
agent 3	0.32	agent 11	0.40
agent 4	0.09	agent 12	7.78
agent 5	0.14	agent 13	0.64
agent 6	0.34	agent 14	0.73
agent 7	0.26	agent 15	0.21
agent 8	0.20		

由于政府将筹集的DSM资金又补偿给各行业智能体用于节能改造, 因此行业智能体的第三个行为将是运用该资金开展节能改造工作, 由此而产生一定的节能效果。智能体对资金使用方式的不同, 将带来不同的节能效果, 对此, 本文采用专家判断法确定各行业智能体利用资金的节能效果。

(3) 智能体的产品价格调整策略。

根据投入产出的价格形成理论^[24], 行业智能体总产值由中间投入价值与增加值构成。

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} + D_j = X_j \quad (9)$$

式中: X_j 代表智能体 j 的总产值, X_{ij} 代表智能体 i 对智能体 j 的中间投入, D_j 表示智能体 j 的增加值。式(9)可转换为

$$\sum_{i=1}^n p_i x_{ij} + D_j = p_j x_j \quad (10)$$

式中 p_i 表示智能体 i 的产品价格, p_j 表示智能体 j 的产品价格, x_j 表示智能体 j 的总产出, x_{ij} 表示智能体 j 对智能体 i 的中间消耗。

式(10)两边同除以 x_j 可得到

$$\sum_{i=1}^n p_i a_{ij} + d_j = p_j \quad (11)$$

式中 a_{ij} 表示直接消耗系数, d_j 表示增加值率。假设智能体 n (本文为电力) 的产品价格变化为 Δp_n (Δp_n 即为政府智能体目标函数中的 r), 引起别的智能体产品价格变化为 Δp_1 、 Δp_2 、...、 Δp_{n-1} , 并假设价格的相互影响是通过成本变化来传递的, 各智能体的增加值率不受价格变动影响。根据式(11)可得:

$$\begin{cases} a_{11}(\Delta p_1 + p_1) + a_{21}(\Delta p_2 + p_2) + \dots + a_{n1}(\Delta p_n + p_n) + d_1 = \Delta p_1 + p_1 \\ a_{12}(\Delta p_1 + p_1) + a_{22}(\Delta p_2 + p_2) + \dots + a_{n2}(\Delta p_n + p_n) + d_2 = \Delta p_2 + p_2 \\ \vdots \\ a_{1,n-1}(\Delta p_1 + p_1) + a_{2,n-1}(\Delta p_2 + p_2) + \dots + a_{n,n-1}(\Delta p_n + p_n) + d_{n-1} = \Delta p_{n-1} + p_{n-1} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)经变化可推导出行业智能体的产品价格调整策略:

$$\begin{bmatrix} \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \\ \vdots \\ \Delta p_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-a_{11} & -a_{21} & \dots & -a_{n-1,1} \\ -a_{12} & 1-a_{22} & \dots & -a_{n-1,2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{1,n-1} & -a_{2,n-1} & \dots & 1-a_{n-1,n-1} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_{n1} \\ a_{n2} \\ \vdots \\ a_{n,n-1} \end{bmatrix} \Delta p_n \quad (13)$$

5 仿真流程

根据各智能体的行为, 图 4 显示了模拟智能体之间交互的仿真流程。必要时, 专家可以对整个过程进行干预。

6 实例分析

针对我国政府建立 DSM 补偿机制问题, 假设政府允许的居民消费价格指数波动上限为 0.05 个百分点, 在 Excel 2003 中使用 VBA 编程开发上述模型的仿真程序, 按如下两个实验进行模拟:

实验一: 用 2000 年中国的投入产出数据确定各智能体的初始值及参数。

实验二: 用 2002 年中国的投入产出数据确定各智能体的初始值及参数。

经过模拟, 实验一的结果是政府智能体将电

价在原来的基础上提高 0.752% 最为合适, 可以筹集资金 62.44 亿元, 因电价上涨而减少的用电量共计 5.023 TW·h, 如果将所筹集的资金全部用于行业的设备改造等方面, 2000 年可以节电约 41.7 TW·h; 实验二的结果是政府智能体将电价提高 0.719% 最为合适, 可以筹集资金 62.03 亿元, 因电价上涨而减少的用电量共计 4.809 TW·h, 如果将所筹集的资金全部用于行业的设备改造等方面, 2002 年可以节电约 41.4 TW·h; 两个实验中各行业智能体的产品价格调整策略及减少的用电量见表 4。

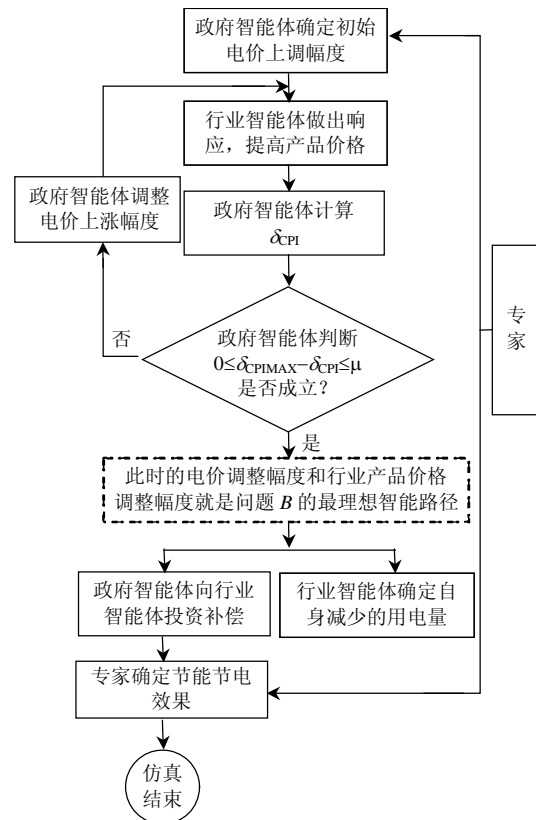


图 4 仿真流程

Fig. 4 Procedure of simulation

从表 4 可以得出如下结论:

(1) 当模型取不同的初始值和参数时, 模拟结果存在着一定的差异, 但差异较小, 表明该模型具有较强的稳定性。

(2) 受政府智能体提高电价的影响, 价格波动较大的行业有采掘业、炼焦煤气石油加工业、化学工业、建筑材料及其他非金属矿物制品业、金属产品制造业, 其他行业价格波动较小。

(3) 在政府很小幅度提高电价的情况下, 用电量将有所减少, 但减少不多, 其中运输邮电业减少量最大, 采掘业、电力热力的生产和供应业、化学工业等次之, 其他行业均很小。农业用电量几乎

不受电价小幅变动的影响。

表4 两个实验中各行业智能体的响应结果

Tab. 4 Response of sectoral agent in two simulations

智能体 代号	实验一		实验二	
	产品价格 变幅/%	用电量 变化/TW·h	产品价格 变幅/%	用电量 变化/TW·h
agent 1	0.036	0.000 0	0.024	0.000 0
agent 2	0.085	-0.482 0	0.064	-0.447 1
agent 3	0.039	-0.076 6	0.029	-0.071 1
agent 4	0.050	-0.039 1	0.043	-0.036 3
agent 5	0.079	-0.026 2	0.064	-0.024 3
agent 6	0.137	-0.538 6	0.075	-0.499 7
agent 7	0.115	-0.176 0	0.077	-0.163 3
agent 8	0.150	-0.383 4	0.082	-0.355 7
agent 9	0.084	-0.161 9	0.052	-0.150 2
agent 10	0.083	-0.141 0	0.049	-0.130 0
agent 11	0.077	-0.047 3	0.052	-0.046 6
agent 12	0.052	-1.883 6	0.033	-1.856 3
agent 13	0.041	-0.248 9	0.030	-0.245 3
agent 14	0.044	-0.416 8	0.029	-0.410 7
agent 15	0.752	-0.401 2	0.719	-0.372 2

7 结论

建立 DSM 补偿机制问题是电力经济中典型的半结构化问题,传统的数学方法很难解决此问题,本文结合了智能工程与智能体理论,通过研究智能体之间的交互来确定该问题的最理想智能路径,为有关部门决策提供科学的参考依据。研究表明以电费附加方式按照适当的比例提取 DSM 资金用于 DSM 补偿不会造成我国各行业产品价格及整个社会物价的明显波动,不会影响我国经济的正常运行,也不会对行业的生产经营状况、经济效益等造成明显影响,但对我国的节能降耗具有显著效果。

本文的研究成果已经集成在国家电网公司重点实验室——“电力供需研究实验室”之中,为实验室的政策模拟提供了有效的方法。我们可以看到中国电力工业的发展过程中存在着很多类似于建立 DSM 补偿机制的半结构化问题,这为智能工程及智能体技术提供了广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 胡兆光. 需求侧管理在中国的应用与实施[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 41-44.
Hu Zhaoguang. Application of demand side management to china [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 41-44(in Chinese).
- [2] Vashishtha S, Ramachandran M. Multicriteria evaluation of demand side management (DSM) implementation strategies in the Indian power sector[J]. Energy, 2006, 31(12): 2210-2225.
- [3] 王敬敏, 王李平. 河北省电力需求侧管理专项资金运作机制研究[J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(1): 68-70.
Wang Jingmin, Wang Liping. Research of DSM special fund operation mechanism in Hebei province[J]. Power DSM, 2007, 9(1): 68-70(in Chinese).
- [4] 胡兆光, 方燕平. 智能工程及其在电力发展战略研究中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 45-49.
Hu Zhaoguang, Fang Yanping. Intelligent engineering and its application to power development strategy study[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 45-49(in Chinese).
- [5] 周篁. 基于智能工程的风电发展政策研究方法[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 58-61.
Zhou Huang. A research on developing strategy for wind power generation based on intelligent engineering[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 58-61(in Chinese).
- [6] 胡兆光. 电力可持续发展的基准限研究[J]. 中国电力, 2004, 37(4): 1-4.
HU Zhaoguang. Study on the baseline space of sustainable power development[J]. Electric Power, 2004, 37(4): 1-4(in Chinese).
- [7] 袁家海, 丁伟, 胡兆光. 基于 AGENT 的计算经济学及其在电力市场理论中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(7), 47-51.
Yuan Jiahai, Ding Wei, Hu Zhaoguang. A critical study of agent based computational economics and its application in research of electricity market theory[J]. Power System Technology, 2005, 29(7): 47-51(in Chinese).
- [8] 刘梅招, 杨莉, 甘德强. 基于 Agent 的电力市场仿真研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 76-80.
Liu Meizhao, Yang Li, Gan Deqiang. A study on agent based electricity market simulation[J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 76-80(in Chinese).
- [9] 刘红进, 袁斌, 戴宏伟, 等. 多代理系统及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 26(10): 45-52.
Liu Hongjin, Yuan Bin, Dai Hongwei, et al. Multi-agent system and its application in power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 26(10): 45-52(in Chinese).
- [10] Watanabe I, Yamaguchi N, Shiina T, et al. Agent-based simulation model of electricity market with stochastic unit commitment [C]. International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Iowa, USA, 2004.
- [11] Zou Bin, Yan Maosong, Xie Xianya. The comparisons between pricing methods on pool-based electricity market using agent-based simulation[C]. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT2004), HongKong, China, 2004.
- [12] Bunn D W, Oliveira F S. Agent-based simulation—an application to the new electricity trading arrangements of England and Wales[J]. IEEE Trans on. Computation, 2001, 5(5): 493-503.
- [13] 任玉珑, 刘贞, 粟增德. 基于多主体的发电企业二阶段博弈模型仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(17): 6-11.
Ren Yulong, Liu Zhen, Su Zengde. Simulation for two-phase game model of power plants based on multi-agent[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(17): 6-11(in Chinese).
- [14] 宋依群. 电力市场的多代理模型[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 80-83.
Song Yiqun. Multi-agent model of electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(8): 80-83(in Chinese).
- [15] 邹斌, 李庆华, 言茂松. 电力拍卖市场的智能代理仿真模型[J]. 中

- 国电机工程学报, 2005, 25(15): 7-11.
- Zou Bin, Li Qinghua, Yan Maosong. An agent based simulation model on pool-based electricity market using locational marginal price[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 7-11(in Chinese).
- [16] Yu Jing, Zhou Jianzhong, Yang Junjie, et al. Agent-based retail electricity market: modeling and analysis[C]. Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Shanghai, China, 2004.
- [17] 康重庆, 江健健, 夏清. 基于智能个体信念学习的电力市场模拟的理论框架[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 10-15.
- Kang Chongqing, Jiang Jianjian, Xia Qing. Theoretical fundamental and concepts of electricity market simulation based on agents' belief learning[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 10-15(in Chinese).
- [18] 袁家海, 胡兆光. 基于 Agent 的电力合约市场协商模拟系统[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 50-52.
- Yuan Jiahai, Hu Zhaoguang. A multi-agent based negotiation simulation system for electricity contract market[J]. Power System Technology, 2005, 29(11): 50-52(in Chinese).
- [19] 韩正华, 周渝慧, 吴俊勇, 等. 基于博弈论的电力市场双边交易 Agent 谈判策略[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 20-26.
- Han Zhenghua, Zhou Yuhui, Wu Junyong, et al. Negotiation strategy based on game theory with agent for bilateral bargaining of power market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 20-26(in Chinese).
- [20] 郭创新, 单业才, 曹一家, 等. 基于多 Agent 技术的电力企业开放信息集成体系结构研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 64-70.
- Guo Chuangxin, Shan Yecai, Cao Yijia, et al. Studies on power enterprise of information integration based on multi-agent system technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 64-70(in Chinese).
- [21] 袁家海, 李蒙, 胡兆光. 基于多 Agent 模拟方法的大用户峰谷电价响应研究[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 44-49.
- Yuan Jiahai, Li Meng, Hu Zhaoguang. Research on large customer response under time-of-use electricity pricing policy based on multi-agent system simulation[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 44-49(in Chinese).
- [22] 赵伟, 白晓民, 丁剑, 等. 基于协同式专家系统及多 Agent 技术的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 1-7.
- Zhao Wei, Bai Xiaomin, Ding Jian, et al. A new fault diagnosis approach of power grid based on cooperative expert system and multi-agent technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 1-7(in Chinese).
- [23] 王刚军, 郭志忠. 配电管理多代理模型及应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 57-60.
- Wang Gangjun, Guo Zhizhong. A multi-agent model and its application in the distribution management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 57-60(in Chinese).
- [24] 刘起运, 陈璋, 苏汝劼. 投入产出分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2006.

收稿日期: 2007-10-05。

作者简介:

胡兆光(1955—), 男, 山东青岛, 博士, 博士生导师, 从事电力技术经济、需求侧管理、智能工程等方面的研究, huzhaoguang@chinasperi.com.cn;

谭显东(1979—), 男, 四川彭州, 博士研究生, 研究方向为电力经济管理、电力经济政策模拟, tanxiandong@chinasperi.com.cn。

(编辑 郭联哲)