

多群体复制动态模型下发电商竞价策略的分析

黄仙, 王占华

(华北电力大学自动化系, 北京 102206)

摘要: 我国电力市场化改革首先是在发电侧引入竞争机制, 发电商作为独立的经济实体, 通过竞价上网参与市场竞争, 面临的关键问题是如何采用最优的报价策略获得最大收益。根据电力市场中发电机组状况的差异, 应用演化博弈论中的多群体复制动态博弈模型对发电商有差别的、有限理性的竞价策略进行了模拟, 分析了发电商在竞价过程中竞价策略的自发演化过程及演化稳定策略, 并通过算例对模型进行了定量评价。结果表明, 不仅多群体复制动态博弈模型能较充分地反映出发电商报价的动态过程, 同时还说明只有合理的竞价规则才能促进发电侧电力市场的健康发展。

关键词: 电力市场; 竞价策略; 演化博弈论; 复制动态; 演化稳定策略

Analysis of generation companies' bidding strategies based on multi-population replicator dynamics

HUANG Xian, WANG Zhan-hua

(Dept of Automation, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In China, electric power market reform starts with the generation-side introduced competition mechanism first. As an independent economic entity, power generation company participates in market competition by price bidding. How to obtain maximum profit by bidding strategies is one of their key issues. The evolutionary game theory of multi-population replicator dynamics model is applied to simulate generation companies' discriminatory and bounded rationality bidding strategies according to different generating set status in a power market. The spontaneous forming process of the generation companies' bidding strategies and evolutionarily stable strategies are both analyzed. A practical case is set to verify the model's ability and reliability. The results not only demonstrate the multi-population replicator dynamics model can describe the dynamic process of generation companies' bidding quite well, but also suggest reasonable price competition rules must be constituted so as to ensure and promote the healthy development of the generation-side power market.

Key words: power market; bidding strategies; evolutionary game theory; replicator dynamics; evolutionarily stable strategy

中图分类号: O225; F407.61 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)12-0027-05

0 引言

目前在电力市场中运用博弈论进行研究的问题有很多^[1], 但大都应用于发电侧电力市场, 从博弈方完全理性出发, 在信息充分的前提下找到博弈的均衡解, 国内外有关发电公司竞价的研究文献很多^[2-5]。但对现实中的决策行为者来说, 完全理性是很难的。当社会经济环境和决策问题较复杂时, 人的理性局限非常明显, 要保证博弈分析的理论和应用价值, 必须对有限理性博弈方之间的博弈进行分析。而演化博弈论从这一点出发, 认为博弈方在多数情况下并不能对环境的变化做出最优反应, 其决策一般来自于博弈历史而非理性的计算结果, 这种分析方法与发电企业竞价行为更加接近, 结果也更加接

近于现实情况。在目前我国尚未成熟的电力市场中, 纳什均衡点不一定能够出现, 这就给传统博弈论的应用造成了不便, 而基于生物进化理论的演化博弈论则对市场成熟阶段和市场发展初期都适用, 具有重要的研究价值。

1 发电企业竞价过程的演化博弈原理

为使发电侧电力市场运营良好, 必须研究作为市场主体之一的发电企业行为及其竞价策略。目前一些电力市场中, 采用报价制确定上网电价, 即发电企业在不同时段向交易中心报价, 交易中心根据电力负荷预测和这些报价, 采用低价先调的原则选择各发电企业上网电量。

由于发电企业的竞价过程是在一个具有不确定

性和有限理性的系统里进行,同时,发电企业之间的策略又是相互影响的,因此运用演化博弈模型来分析发电企业竞价过程中竞价策略^[6-9]的自发形成过程。自发演化而来的一个竞价策略对应于演化博弈模型的一个演化稳定策略(ESS)。

1.1 多群体复制动态模型^[10,11]

Selten 引入角色限制行为而把群体分为单群体与多群体,不同群体根据个体可供选择的纯策略集不同来划分。多群体时,不同群体中的个体有不同纯策略集、不同群体平均支付及不同群体演化速度。由于多群体模仿者动态公式推导比较复杂^[12,13],下面直接给出多群体模仿者动态方程:

$$dx_i^j/dt = [f(s_i^j, x) - f(x^j, x^{-j})] * x_i^j \quad (1)$$

其中:上标 $j(j=1,2,\dots,K)$ 表示第 j 个群体,其中 K 表示有 K 个群体; x_i^j 表示第 j 个群体中选择第 $i(i=1,2,\dots,K)$ 个纯策略的个体数占该群体总数的百分比; x^j 表示群体 j 在某时刻所处的状态, x^{-j} 表示第 j 个群体以外的其他群体在 t 时刻所处的状态; s_i^j 表示群体 j 中个体行为集中的第 i 个纯策略; x 表示混合群体的混合策略组合, $f(s_i^j, x)$ 表示混合群体状态为 x 时群体 j 中个体选择纯策略 s_i^j 时所能得到的期望支付; $f(x^j, x^{-j})$ 表示混合群体的平均支付。

多群体模型并不是对单群体模型的简单改进,由单群体到多群体涉及到一系列的如均衡及稳定性等问题的变化。Selten 证明了“在多群体博弈中演化稳定均衡都是严格纳什均衡”的结论,这就说明在多群体博弈中,传统的演化稳定均衡概念就显示出其局限性了。

1.2 发电商竞价行为的演化博弈模型

为说明问题简单起见,本文将电力市场中参与竞价的机组根据机组性能分成两类(可以拓展到两种以上类型的情况。只是增加了数学模型的分析难度^[14]),每一类作为一个群体与其他群体进行博弈,即考虑的为 2×2 非合作重复博弈,其阶段博弈的矩阵式表述如表 1。其中, p 和 $1-p$ 分别表示发电商 A 在一次博弈中采取策略 A_1 和 A_2 的概率, q 和 $1-q$ 分别表示发电商 B 采取策略 B_1 和 B_2 的概率(其中:概率也可以解释为群体博弈中选取该策略的发电商比例)。

表 1 2×2 非对称博弈收益矩阵

Tab.1 Payoff matrix of a 2×2 asymmetric game

	$B_1(q)$	$B_2(1-q)$
$A_1(p)$	a_{11}, b_{11}	a_{12}, b_{12}
$A_2(1-p)$	a_{21}, b_{21}	a_{22}, b_{22}

其中: $a_{ij} (i, j=1,2)$ 表示为发电商 A 中的个体支付; $b_{ij} (i, j=1,2)$ 表示为发电商 B 中的个体支付; 由于博弈是非对称的, 有 $a_{ij} \neq b_{ij} (i, j=1,2)$ 。

值得注意的是,这里并不需要假设阶段博弈的支付参数 $a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_{11}, b_{12}, b_{21}, b_{22}$ 对两个发电商构成共同知识。实际上,发电商甚至可以不知道自己的支付参数,他们只需对既往的对局结果加以统计便可以得到上述各种平均支付水平的有关信息。因此这里的博弈参数仅供研究者用来做比较静态分析以及对经济行为进行预测时使用。

假设发电商的理性层次较低、学习速度较慢,他们只是简单地依据过去多次博弈之所得而调整各自对两种策略的选择概率,这种动态调节机制类似于生物进化中生物性状和行为特征的动态演化过程的“复制动态”。如果统计结果表明某一特定策略的平均支付高于混合策略的平均支付,则他将倾向于更多地使用这种策略,假设其使用频率的相对调整速度与其支付超过平均支付的幅度成正比,则 A、B 对 p 和 q 的调整方程为:

$$dp/dt = p(1-p)[(a_{12}-a_{22})-(a_{12}-a_{11}+a_{21}-a_{22})q] \quad (2)$$

$$dq/dt = q(1-q)[(b_{21}-b_{22})-(b_{21}-b_{22}+b_{12}-b_{11})q] \quad (3)$$

令 $a_1 = a_{12} - a_{22}$, $a_2 = a_{21} - a_{11}$, $b_1 = b_{21} - b_{22}$, $b_2 = b_{12} - b_{11}$, 将式(2)和式(3)化简,则得到如式(4)所示的动态系统:

$$\begin{cases} dp/dt = p(1-p)[a_1 - (a_1 + a_2)q] \\ dq/dt = q(1-q)[b_1 - (b_1 + b_2)p] \end{cases} \quad (4)$$

一般地,我们称其为动态复制系统。

1.3 发电商竞价过程的演化稳定性分析

显然,对任意的初始点 $(p(0), q(0)) \in [0,1] \times [0,1]$, 有 $(p(t), q(t)) \in [0,1] \times [0,1]$, 因此动态复制系统的解曲线上任意一点 (p, q) 均对应着演化博弈的一个混合策略偶 $((1-p) \oplus p, q \oplus (1-q))$ 。很显然这个动态系统有五个均衡点,即:

$$E_1(0,0), E_2(1,0), E_3(0,1), E_4(1,1),$$

$$E_5(a_1/(a_1+a_2), b_1/(b_1+b_2))$$

该动态系统的雅可比行列式如下:

$$J = \begin{bmatrix} (1-2p)[a_1 - (a_1+a_2)q] & -p(1-p)(a_1+a_2) \\ -q(1-q)(b_1+b_2) & (1-2q)[b_1 - (b_1+b_2)p] \end{bmatrix}$$

依次分析上述 5 个局部平衡点对应的雅可比矩阵特性,若该平衡点是稳定的,即为系统的演化稳定策略,判别标准为^[15]: ①局部平衡点对应的雅可比矩阵的行列式大于零且其迹小于零时,该局部平衡点是渐进收敛的; ②当该矩阵的行列式大于零,且矩阵的迹等于零时为焦点; ③当该矩阵的行列式小

于零时, 则为鞍点。

2 算例分析

设区域电力市场中有 6 个有限理性的火力发电商, 容量不同的两类发电机组进行竞价。设市场中交易电价的上限价格为 300 元/MWh, 下限价格为 100 元/MWh, 发电商上网报价最多允许 5 段, 中标的发电商按照其报价进行结算。机组 i 的报价策略可以转化成求收益最大化的问题:

$$\text{目标函数: } \max U_i = R \cdot P_i - C_i(P_i) \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (5)$$

式中: U_i 为机组 i 的收益函数; R 为市场出清价格 (单位: 元); P_i 为发电厂 i 的出力或发电量 (单位: MW); $C_i(P_i)$ 为发电厂 i 的成本函数 (单位: 元/h)。

约束条件: $B_i(S_i, P_i) = R$ 且

$$\sum_{i=1}^5 P_i = Q \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (6)$$

式中: $B_i(S_i, P_i)$ 为每个发电商向交易中心提供的报价曲线函数; S_i 为机组 i 的报价策略向量; Q 为市场需求 (单位: MW)。

设第一类发电机组竞价容量段为 [200 MW, 500 MW], 发电成本函数为:

$$C_i(P_i) = 8150 + 92.13 P_i + 0.176 P_i^2 \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (7)$$

此时, 发电商采取方案 A 和方案 B 两种报价方案, 如表 2 所示 (单位: 容量段/MW, 价格/(元/h))。

表 2 发电商基于方案 A、B 的报价策略

Tab.2 Generation companies' bidding scheme based on scenario A and B

参数	方案 A				
容量段	[200, 260]	(260, 320]	(320, 380]	(380, 440]	(440, 500]
价格	204	209	214	220	225
参数	方案 B				
容量段	[200, 260]	(260, 320]	(320, 380]	(380, 440]	(440, 500]
价格	198	202	208	212	219

设第二类发电机组竞价容量段为 [80 MW, 220 MW], 发电成本函数为:

$$C_i(P_i) = 9255.18 + 104.72 P_i + 0.204 P_i^2 \quad (i=1,2,\dots,5) \quad (8)$$

此时, 发电商采取方案 C 和方案 D 两种报价方案, 如表 3 所示 (单位: 容量段/MW, 价格/(元/h))。

表 3 发电商基于方案 C、D 的报价策略

Tab.3 Generation companies' bidding scheme based on scenario C and D

参数	方案 C				
容量段	[80, 108]	(108, 136]	(136, 164]	(164, 192]	(192, 220]
价格	214	217	221	225	230
参数	方案 D				
容量段	[80, 108]	(108, 136]	(136, 164]	(164, 192]	(192, 220]
价格	202	206	213	217	220

根据以上报价方案构造如表 4 所示竞价收益矩阵。

表 4 发电商的竞价收益矩阵

Tab.4 Payoff matrix of generation companies' bidding scheme

	方案 C	方案 D
方案 A	11 256.34, 5 623.4	5 197.5, 7 564.9
方案 B	6 231.27, 3 348.8	5 645.3, 1 267.6

值得注意的是, 这里并不需要假设上述收益矩阵中的结果对各发电商构成共同知识。实际上发电商甚至可以不知道自己的收益参数, 他们只需对既往的价格结果加以统计便可以得到上述各平均收益水平的有关信息。

设第一类发电商中采用报价方案 A 的机组比例为 p , 则采用报价方案 B 的机组比例为 $1-p$; 设第二类发电商中采用报价方案 C 的机组比例为 q , 则采用报价方案 D 的机组比例为 $1-q$ 。

对于第一类发电商来说, 在采用两种不同报价方案的发电商期望得益 u_1^1, u_1^2 及第一类发电商的平均得益 \bar{u}_1 为:

$$\begin{aligned} u_1^1 &= 11256.34q + 5197.5(1-q) = 5197.5 + 6058.84q \\ u_1^2 &= 6231.27q + 5645.3(1-q) = 5645.3 + 585.97q \\ \bar{u}_1 &= u_1^1 \cdot p + u_1^2 \cdot (1-p) = 5472.87pq - \bar{u}_1 447.8p + 585.97q + 5645.3 \end{aligned}$$

于是可知第一类发电商的复制动态方程为:

$$F(S_A) = p(u_1^1 - \bar{u}_1) = p(1-p)(5472.87q - 447.8) \quad (9)$$

对于式 (9) 来说, 当 $q=0.082$ 时, 复制动态方程始终为 0, 即博弈处于稳定状态。而当 $q \neq 0.082$ 时, 有 $p=0$ 和 $p=1$ 两个稳定状态, 其中: 当 $q < 0.082$ 时, 有 $F'(0) < 0, F'(1) > 0$, 即 $p=0$ 是演化稳定策略; 当 $q > 0.082$ 时, 有 $F'(0) > 0, F'(1) < 0$, 即 $p=1$ 是演化稳定策略。图 1 中的三个相位图分别给出了上述三种情况下 p 的动态趋势及稳定性。

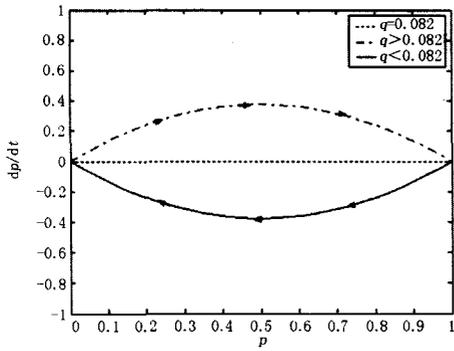


图1 第一类发电商的复制动态相位图
Fig.1 Phase diagram of replicator dynamics of the first kind of generation companies

同理可得第二类发电商的复制动态方程为：

$$F(S_C) = q(1-q)(1081.2-4022.7p) \quad (10)$$

对于式(10)来说，当 $p=0.269$ 时，复制动态方程始终为零。即博弈处于稳定状态；而当 $p \neq 0.269$ 时，有 $q=0$ 和 $q=1$ 两个稳定状态，其中：当 $p < 0.269$ 时，有 $F'(0) > 0$ ， $F'(1) < 0$ ，即 $q=1$ 是演化稳定策略；当 $p > 0.269$ 时，有 $F'(0) < 0$ ， $F'(1) > 0$ ，即 $q=0$ 是演化稳定策略。图2中的三个相位图分别给出了上述三种情况下 q 的动态趋势及稳定性。

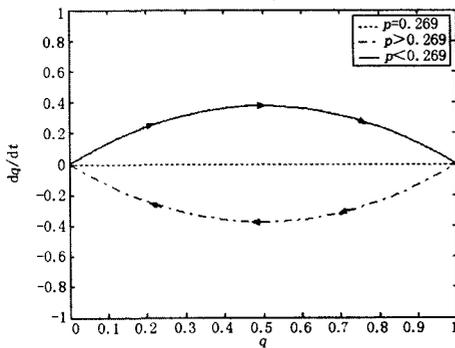


图2 第二类发电商的复制动态相位图
Fig.2 Phase diagram of replicator dynamics of the second kind of generation companies

进一步对于上述两类发电商群体类型比例变化的复制动态关系用一个坐标平面图表示，如图3所示。由图3的箭头方向可以看出， $(p=0.269, q=0)$ 和 $(p=0.269, q=1)$ 分别是此博弈的演化稳定策略，当初始情况位于A、B区的时候博弈会收敛至 $(p=0.269, q=1)$ ；当初始情况位于C、D区的时候博弈会收敛至 $(p=0.269, q=0)$ 。

由本算例的结果可知，发电商采用多群体复制动态演化博弈模型进行分析，通过对竞价历史数据

的统计分析处理，可以定量地计算出市场中的竞争对手的策略走向，从而可以调整本身的报价策略以寻求最大利益。

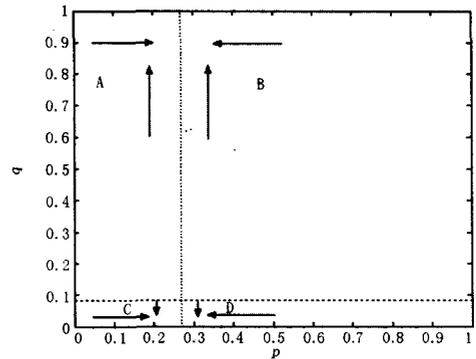


图3 两类发电商竞价的复制动态过程及稳定性示意图
Fig.3 Illustration of replicator dynamics and stability of the two kinds of generation companies

3 结束语

考虑到发电商报价过程中信息不完全和参与人的有限理性，本文采用符合上述条件的演化博弈理论和方法对发电商报价策略进行了分析。并且结合算例，根据各个发电商机组状况的差异，用有差别的有限理性博弈方群体的成员，相互之间进行随机配对对发电商每一台机组的报价策略作了博弈分析，以获得最大收益。作为电力市场的管理者，其有相对于发电商更加完备的有关电力市场参与者的信息，同时也更加关心电力市场的绩效问题，而本文的分析方法则为电力市场的管理者提供了一种市场分析方法，从而有效地预测市场动向，采取适当的管理方法。

参考文献

- [1] 刁勤华, 林济铿, 倪以信, 等. 博弈论及其在电力市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(1): 19-23; 25(2): 13-18.
DIAO Qin-hua, LIN Ji-keng, NI Yi-xin, et al. Game Theory and Its Applications in Power Markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 19-23; 25(2): 13-18.
- [2] 高洁, 盛昭瀚. 演化博弈论及其在电力市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 18-21.
GAO Jie, SHENG Zhao-han. Elementary Groping for Evolutionary Game Theory and Its Application in Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(18): 18-21.
- [3] KANG A, Dong-Joo KIM B Balho H, et al. Supplier Bidding Strategy Based on Non-cooperative Game

- Theory Concepts in Single Auction Power Pools [J]. Electric Power System Research, 2007, (77):630-636.
- [4] Jong-hae PARK, KIM B H, et al. A Continuous Strategy Game for Power Transactions Analysis in Competitive Electricity Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4):847-855.
- [5] YANG Zheng-lin, SONG Yan-min, CAO Rong-zhang, et al. Analysis on Bidding Strategy of Power Provider by Game Theory[A]. In: International Conference on Power System Technology[C]. 2006.
- [6] Messerschmidt L, Engelbrecht A P. Learning to Play Games Using a PSO-based Competitive Learning Approach[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2004, 8(3):280-288.
- [7] Xiong G F, Hashiyama T, Okuma S. An Evolutionary Computation for Supplier Bidding Strategy in Electricity Auction Market[A]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. 2002.83-88.
- [8] Cau T D H, Anderson E J. A Co-evolutionary Approach to Modelling the Behaviour of Participants in Competitive Electricity Markets[A]. In: Proceedings of IEEE PES Summer Meeting 2002[C]. Chicago: 2002.1534-1540.
- [9] 曾次玲, 张步涵, 谢培元. 进化博弈论在发电报价策略研究中的应用[J]. 继电器, 2005, 33(2): 13-17. ZENG Ci-ling, ZHANG Bu-han, XIE Pei-yuan. Application of Evolutionary Game Theory in Power Supply Bidding Strategies[J]. Relay, 2005, 33(2): 13-17.
- [10] 蒙特, 等. 博弈论与经济学[M]. 张琦, 译. 北京: 经济管理出版社, 2004. Montet, et al. Game Theory & Economics [M]. ZHANG Qi, Trans. Beijing: Economic Management Publishing House, 2004.
- [11] 威布尔 W. 演化博弈论[M]. 王永钦, 译. 上海: 上海人民出版社, 2006. Weibull W. Evolutionary Game Theory[M]. WANG Yong-qin, trans. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2006.
- [12] Selten R. A Note on Evolutionary Stable Strategies in Asymmetric Animal Conflicts[J]. 1980, 84: 93-101.
- [13] Mayard Smith J. Evolution and the Theory of Games [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1982.
- [14] Friedman D. On Economic Applications of Evolutionary Game[J]. Theory Journal of Evolutionary Economics, 1998, 8(1):15-43.
- [15] Gintis H. Game Theory Evolving[M]. Princeton University Press, 2000.

收稿日期: 2008-08-01; 修回日期: 2008-10-10

作者简介:

黄仙(1966-), 男, 博士, 主要研究方向为复杂系统分析、系统综合评价与决策等;

王占华(1980-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为演化博弈论及其在电力市场中的应用. E-mail: wangzh-1980@163.com

(上接第 22 页 continued from page 22)

- WANG Hui, WANG Yao-nan, XU Wei-dong. Investigation of a Power Flow Controller of SSSC Based on Self-Turning PI Controller with Fuzzy Logic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7):65-69.
- [9] 王庆红, 胡国根. 一种基于 48 脉波电压源逆变器的静止同步串联补偿器的设计与建模[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5):61-66. WANG Qi-hong, HU Guo-gen. Modeling and Control Design of a 48-step Inverter Based Static Synchronous Series Compensator[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5):61-66.
- [10] Haro P Z, Ramirez J M. SSSC's Adaptive Neural Control[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Vancouver(Canada):2006.
- [11] Fawzi A L. Influence of Mode of Operation of the SSSC on the Small Disturbance and Transient Stability of a Radial Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2):935-942.
- [12] Ahmadian T M, Kazemi A. A Decoupling Technique to Improve the Efficacy of the Vector Control Model for SSSC[A]. In: IEEE Power India Conference[C]. Bombay(India): 2006.
- [13] Wei Qiao, Harley G, Ganesh K. A Fault-Tolerant P-Q Decoupled Control Scheme for Static Synchronous Series Compensator[A]. In: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Montreal(Canada): 2006.
- [14] 姜旭, 肖湘宁, 赵洋. H 桥级联式 SSSC 阻抗补偿域及准稳态模型[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4):136-143. JIANG Xu, XIAO Xiang-ning, ZHAO Yang. Impedance Compensation Domain and Quasi-Steady State Model of H-Bridge Cascaded SSSC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4):136-143.

收稿日期: 2008-09-27; 修回日期: 2009-03-16

作者简介:

李胜(1976-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为柔性直流输电, 电力电子技术在电力系统中的应用等; E-mail: lisheng-2002@sohu.com

张建华(1952-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统运行、分析与控制及应急管理的研究;

蒋程(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用。