

演化博弈结合系统动力学的电力市场运行态势仿真分析

喻洁¹, 鄢鹏阳², 钱长钰³

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏省 南京市 210096;

2. 东南大学软件学院, 江苏省 南京市 210096;

3. 国网滁州供电公司, 安徽省 滁州市 239000)

Simulation Analysis of Power Market Operation Dynamics Using Evolutionary Game Theory and System Dynamics

YU Jie¹, YAN Pengyang², QIAN Changyu³

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

2. College of Software Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu Province, China;

3. State Grid Chuzhou Power Supply Company, Chuzhou 239000, Anhui Province, China)

ABSTRACT: Under the dual-carbon goals and the advancement of power market reform, government carbon regulation policies play a crucial role in guiding the structural transformation of power generation and ensuring the stability of power market operations. However, there is a lack of quantitative analysis models and simulation methodologies in this area. This study employs an evolutionary game algorithm to analyze the bidding strategy choices of power generation clusters under different government carbon regulation scenarios. Additionally, system dynamics and dissipative structure theory investigate power market operational trends. Based on the carbon emission characteristics of power generation equipment, power generation enterprises are categorized into low-carbon clusters (low-carbon coal-fired power generation enterprises) and traditional clusters. A tripartite evolutionary game model involving low-carbon clusters, traditional clusters, and government entities is established, considering factors such as fuel costs, bidding strategies, and carbon emission quotas. Key market operation indicators are defined based on the strategic choices of each entity, and system dynamics simulations are

conducted to analyze their variations. Furthermore, dissipative structure theory is employed to assess the overall market operation trends. The case study is based on a simulation using data from a provincial electricity market. The results demonstrate that during the initial phase of carbon regulation policy implementation, the government, by increasing subsidies and strengthening regulatory measures to guide traditional clusters in upgrading and retrofitting, can not only effectively enhance the power supply efficiency and capacity of the electricity market but also reduce the overall operational entropy of the market, thereby promoting stable and balanced market operations. The proposed model and methodology can effectively analyze the operational dynamics of the electricity market, providing forward-looking and practical decision-making support for the long-term stable and efficient operation of the electricity market.

KEY WORDS: market operation situation; three-party evolutionary game; system dynamics; government regulation of carbon emissions; dissipative analysis

基金项目: 国家自然科学基金项目智能电网联合基金项目: “基于制度有效性理论的综合能源系统运营机制及关键技术研究” (U1966204); 国家自然科学基金面上项目: “基于信息驱动的综合能效电厂弹性能量管理与运营策略研究” (51977032)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China and the Intelligent Grid Joint Fund “Comprehensive Energy System Operation Mechanism and Key Technology Research Based on the Theory of Institutional Effectiveness” (U1966204); the National Natural Science Foundation of China’s General Program “Research on Information-driven Comprehensive Energy Efficiency Power Plant Flexible Energy Management and Operation Strategy” (51977032).

摘要: 在双碳目标与电力市场化改革推进背景下, 政府碳监管政策对于发电侧结构化变革以及电力市场运行稳定性具有引导作用, 但是缺乏量化分析模型和仿真方法。文章基于演化博弈算法分析了不同政府碳监管情况下的发电集群竞价策略选择, 并通过系统动力学方法和耗散结构理论分析电力市场运行态势。按照市场发电侧发电设备碳排放特性, 将发电商群体分为低碳集群(低碳型燃煤发电商群体)和传统集群两类。综合考虑燃料成本、竞价策略、碳排放限额等因素建立了低碳集群-传统集群-政府部门三方演化博弈模型, 基于各方主体策略选择定义市场运行关键指标, 通过系统动

力学仿真市场运行关键指标变化情况,最后基于耗散结构理论,分析市场综合运行态势。算例基于某省级电力市场相关数据进行仿真,结果表明,在碳监管政策实施初期,政府通过加大补贴力度和加强监管力度,引导传统集群进行升级改造,不仅能够有效提升电力市场供电效率和能力,而且能够降低市场整体运行熵值,有利于市场稳定均衡运行。采用所提模型和方法可有效分析市场电力市场运行态势,为电力市场长期稳定、高效运行提供更具前瞻性与实用性的决策依据。

关键词: 市场运行态势;三方演化博弈;系统动力学;政府碳排放监管;耗散性分析

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0032

0 引言

在“双碳减排”的时代大背景下,电力市场的运行方式将不可避免地发生变革^[1]。在发电侧,燃煤火电方面,针对火电机组已经实施碳配额政策,燃煤发电商需要满足碳排放限值要求^[2-3];在用电侧,国家发展改革委发布《关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知》,规定工商业全部进入市场购电^[4],使得市场主体数激增,市场交易范围扩大,市场环境日益复杂。在低碳转型方面,国家发改委在《“十四五”现代能源体系规划》^[5]中提出要加快推动能源绿色低碳转型^[6]。与此同时,近两年面临的例如燃煤短缺^[7]等市场外部因素的影响,进一步增加了市场运行的不确定性,对于市场态势的分析和把控带来了挑战。因此,有必要从宏观角度对于电力市场运行态势展开研究,分析市场运行态势指标变化情况,研究市场内外因素对于市场相关态势指标的影响和整体稳定性。

目前针对电力市场运行态势进行仿真分析的相关成果主要聚焦于电力市场运营关键指标构建、市场主体策略选择和市场运行仿真分析,基于指标实际运行数据和市场主体策略选择从而分析评估市场的运行态势。

在电力市场运营关键指标构建方面,文献[8]建立了多类型多场景下的互联电力系统市场运行指标,从多个角度反应电力市场的运行和管理状态。在国内具体省级电力市场运行指标构建方面,文献[9]选取了多元化市场评估关键指标,分析了广西市场2018年运营状况;文献[10]和文献[11]均针对电力现货市场运行设计了不同的多层次评价指标体系。文献[12-14]分别通过不同的指标赋权方法,应用于电力市场运营状态的建模和评估。但是仅从指标构建的角度分析省级电力市场运行态势,严重依赖于市场历史运行数据,缺乏从场景出发的

情景分析和预判性的市场态势分析,难以分析市场中长期时段的变化趋势。

在市场主体策略选择方面,演化博弈基于有限理性和有限信息,常用于分析能源市场中多利益主体复杂经济行为的决策问题^[15-16]。文献[17]和文献[18]基于演化博弈理论,分别分析了区域综合能源市场零售侧竞价策略选择和需求侧用户需求响应的动态过程。文献[19]提出了一个绿色证书-碳排放权-电力联合市场的演化博弈模型,分析了提高可再生能源消费率和降低碳排放方面的有效性。文献[20]通过演化博弈模型,分析了电力生产商的行为策略,并强调了社会影响、经济参数和网络拓扑结构对市场有效性的重要影响。演化博弈分析的意义在于分析和比较稳定环境下某些博弈关系的长期稳定趋势,但是其无法有效模拟市场内外影响因素的实时动态变化对能源市场的长期运行态势的影响,难以对复杂的市场环境进行长期态势仿真。

在市场运行仿真分析方面,系统动力学模型作为一种可用于复杂经济系统分析的定量反馈方法,其与演化博弈特性一致,可以对电力市场复杂中长期运行态势进行建模。文献[21]基于系统动力学模型探究了发电行业碳减排政策与市场交易机制的长期协同效应。文献[22]构建了基于系统动力学的碳减排政策及影响研究模型,分析了电力市场、碳排放市场、绿证市场和发电权市场之间的相互作用。同时,系统动力学基于其自身可以复杂系统建模的特点,可以作为动态博弈过程和进化稳定性策略评估的科学工具^[23]。文献[24]结合演化博弈和系统动力学模型探究了可再生能源补贴、环境感知和可再生能源配额等关键因素对绿色电力交易行为演变的影响。文献[25]基于系统动力学和演化博弈分析了监管者、电力零售商和消费者之间的动态演化策略,提出了促进动态定价实施的政策建议。上述研究表明演化博弈结合系统动力学更准确地描述能源市场中各主体行为的长期动态变化,为观察电力市场长期运行态势提供有效分析依据。

在整体稳定性分析方面,耗散性分析基于耗散结构理论,研究系统从相对无序状态演变到更加平稳有序状态的规律^[26],在生物学、化学等领域中取得了广泛运用。然而该理论在电力行业应用较少,文献[27]构造并优化光伏产业链风险熵流指标体系,构建耗散结构评判模型判定目前我国光伏行业是否处于耗散结构的状态。文献[28]基于耗散结构理论,研究了新能源产业系统的开放性、远离平衡

态、协同效应与涨落机制。但现有文献中暂无采用耗散结构分析电力市场演化规律的研究成果。

综上所述, 尽管目前电力市场运行态势进行仿真分析等方面已有一些研究成果, 但是仍缺乏从宏观层面系统研究省级电力市场整体运行态势的模型。本文根据燃煤火电发电设备碳排放特性, 将燃煤发电商群体分为低碳发电集群(低碳型燃煤发电商群体)和传统发电集群(传统型燃煤发电商群体)。其中低碳集群特性为发电产生的碳排放较少, 如安装碳捕集装置、引入高效燃烧技术和热电联产技术、电厂内部配置清洁能源系统等, 碳排放值低于 0.5881t/(MW·h), 而传统集群特性为发电产生更多的碳排放, 碳排放量高于 0.8902t/(MW·h)^[29]。在此基础上, 本文建立了低碳集群-传统集群-政府部门三方演化博弈模型。根据三方演化博弈模型复制动态方程组, 采用 Vensim 仿真工具构建了电力市场运行态势系统动力学仿真模型, 分析市场运行关键态势指标, 基于指标仿真结果分析其对市场耗散性影响, 形成多维度的市场运行综合态势分析。算例仿真部分从多角度探究市场了运行态势指标变化特征和市场态势均衡情况。算例结果表明市场传统集群升级改造成本、政府碳补贴政策 and 煤价波动等内外部因素的变化会改变市场运行态势的均衡性, 需要采取相应措施才能使得市场运行在合理区间, 为后续研究及政策制定提供有力支撑。

1 电力市场运行态势指标

在市场运行态势建模方面, 本文考虑的电力市场运行综合态势包括市场发电侧结构演化态势和市场用电侧购电态势两个方面, 包含传统集群市场份额、申报电量平衡系数、用电需求满足率、成交电价波动率 4 个指标, 具体如下:

1) 传统集群市场份额。

传统集群市场份额表征发电侧市场成交电量比例的变化情况, 进一步说明传统集群与低碳集群竞争时是否有竞争力。其计算公式为

$$M^{\text{tr}}(t) = \frac{Q_{\text{tr}}^{\text{clear}}(t)}{Q_{\text{tr}}^{\text{clear}}(t) + Q_{\text{lc}}^{\text{clear}}(t)} \quad (1)$$

式中: $M^{\text{tr}}(t)$ 表示传统集群市场份额; $Q_{\text{tr}}^{\text{clear}}(t)$ 表示传统集群成交电量; $Q_{\text{lc}}^{\text{clear}}(t)$ 表示低碳集群成交电量, 相对应低碳集群市场份额为 $1-M^{\text{tr}}(t)$ 。

2) 申报电量平衡系数。

申报电量平衡系数反映了市场申报阶段的供需情况, 其计算公式为

$$K(t) = \frac{Q_{\text{lc}}^{\text{bid}}(t) + Q_{\text{tr}}^{\text{bid}}(t)}{Q_{\text{DM}}^{\text{bid}}(t)} \quad (2)$$

式中: $K(t)$ 分别表示申报电量平衡系数; $Q_{\text{DM}}^{\text{bid}}(t)$ 表示用电侧申报电量; $Q_{\text{lc}}^{\text{bid}}(t)$ 表示低碳集群申报电量; $Q_{\text{tr}}^{\text{bid}}(t)$ 表示传统集群申报电量。当申报电量平衡系数小于 0.6 时, 此时发电侧电量严重短缺, 需要增加其他发电机组以满足用电需求。

3) 用电需求满足率。

用电需求满足率反映了市场成交阶段的用电侧成交电量情况, 其计算公式为

$$R(t) = \frac{Q_{\text{lc}}^{\text{clear}}(t) + Q_{\text{tr}}^{\text{clear}}(t)}{Q_{\text{DM}}^{\text{bid}}(t)} \quad (3)$$

式中: $R(t)$ 表示用电需求满足率; $Q_{\text{lc}}^{\text{clear}}(t)$ 表示低碳集群成交电量; $Q_{\text{tr}}^{\text{clear}}(t)$ 表示传统集群成交电量。该指标同时反映了用电侧实际用电量中传统发电量占比, 数值总小于等于 1。

4) 成交电价波动率。

成交电价波动率表征了用电侧成交电价的波动情况, 反映了市场的稳定程度, 其计算公式为

$$V_p(t) = \frac{|\rho^{\text{clear}}(t) - \rho^{\text{clear}}(t-1)|}{\rho^{\text{clear}}(t-1)} \quad (4)$$

式中: $V_p(t)$ 表示第 t 个仿真时间点成交电价波动率; $\rho^{\text{clear}}(t)$ 表示成交电价; $\rho^{\text{clear}}(t-1)$ 表示上个时间点的成交电价。

2 基于电力市场运行态势指标的市场整体耗散性分析

由于电力市场结构复杂且影响因素众多, 实际研究或工程应用中无法充分考虑到所有影响因素, 故而对于市场整体的耗散结构分析较为困难。本文将耗散结构理论中“熵”概念和定律引入电力市场的研究中, 定义“电力市场均衡熵”的概念。电力市场均衡熵的意义在于描述电力市场与外部环境进行各种资源交换的一种状态, 表征电力市场整体运行的稳定性, 其值越大, 表征电力市场的无序性越大, 即越不稳定。结合上文定义的电力市场运行态势指标, 对于电力市场均衡熵给出如下定义:

首先, 根据各指标的变化对于电力市场稳定性的影响将各指标分为波动性指标和均衡性指标, 如表 1 所示。

基于传统集群市场份额变化量反映市场的稳定程度, 市场份额变化量越小, 市场越稳定, 公式如式(5)所示:

$$V_M^{\text{tr}}(t) = |M^{\text{tr}}(t) - M^{\text{tr}}(t-1)| \quad (5)$$

表1 电力市场运行态势指标分组情况
Table 1 Grouping of power market operation dynamics indicators

类别	具体指标
波动性指标	传统集群市场份额变化量、成交电价波动率
均衡性指标	申报电量平衡系数、用电需求满足率

式中： $V_M^{\text{tr}}(t)$ 为市场份额变化量， $V_M^{\text{tr}}(1)=0$ 。

其次，定义单个指标的熵值如下：

$$S_{\text{index}}(t) = -\text{index}(t) \ln |\text{index}(t)| \quad (6)$$

式中： $S_{\text{index}}(t)$ 为指标 index 在 t 月的熵值，index 可以为 $V_M^{\text{tr}}(t)$ 、 $V_p^{\text{clear}}(t)$ 、 $R(t)$ 或 $K(t)$ 。

最后通过结合多个指标熵值综合表示电力市场均衡熵如下所示：

$$S(t) = pS_{V_p}(t) + qS_{V_M}(t) + nS_K(t) + kS_R(t) \quad (7)$$

式中： $S(t)$ 为 t 月的电力市场月度均衡熵，其为多个电力市场指标熵值加权之和， $0 < p < 1$ ， $0 < q < 1$ ， $0 < n < 1$ ， $0 < k < 1$ 且 $p+q+n+k=1$ 。

当 t 为月度时间时， $S(t)$ 即为电力市场月度均衡熵。基于此可以推导第 t 年的电力市场年度均衡熵 $S_y(t)$ 如下：

$$S_y(t) = \sum_{i=1}^{12} S_{y(t)}(i) / 12 \quad (8)$$

式中： $S_{y(t)}(i)$ 为第 t 年第 i 月的电力市场月度均衡熵， $S_y(0)=S(0)=0$ 。

利用上述所定义的电力市场均衡熵，结合熵变原理可建立电力市场演化方向判别模型，分析电力市场演变规律。熵值变化量公式如式(9)所示：

$$\Delta S(t) = S(t+1) - S(t) \quad (9)$$

式中： $\Delta S(t)$ 为 t 时刻的熵值变化量； $S(t+1)$ 为电力市场第 $t+1$ 时段的熵值； $S(t)$ 为第 t 时段的熵值， $S(0)=0$ 。 ΔS 值可大于、等于或小于零，根据熵变值的大小变化可判断系统演变的方向和内部稳定的程度。

1) 当 $\Delta S > 0$ 时表示系统无序程度增加，系统结构处于失稳状态。这在电力市场中具体表现为市场存在供不应求或能源短缺等问题，这时要通过对应的有效措施加以调控。

2) 当 $\Delta S < 0$ 时表示系统处于最小熵产生的状态，系统的有序程度增加系统，处于一个良性循环状态之中，这时电力市场的资源配置得到了高效利用，实现了社会与自然和谐共生，电力系统向着理想的运行模式转化。

3) 当 $\Delta S = 0$ 时表明一定时间间隔内熵值无变化，系统状态与起始状态一样。这在是一种完全理想化的市场运行模式，即在电力系统内竞价规则完善且能源得到充分的循环利用。

3 基于发电侧演化博弈的市场运行态势系统动力学仿真分析模型

3.1 市场环境

1) 市场用电侧结构。

在省级电力市场中，用电侧的购电量即为省级工商业的实际需求电量或实际用电量。

2) 市场碳减排政策。

政府碳排放监管部门针对两类发电商群体分别配置一定的碳排放限额，当碳排放超出限额时，将进行针对性罚款。

3) 市场竞价机制。

低碳集群和传统集群两类发电商群体忽略个体间参数特性和竞价策略上的差异，分别作为一个整体，在市场中同台竞价，同时由交易中心依据设定两类发电商群体申报电量上限。

3.2 发电侧演化博弈模型

3.2.1 演化博弈场景

在电力市场仿真分析研究中，演化博弈常被用来研究市场参与者的行为，通过模拟市场主体策略选择的演化过程来分析市场竞争环境和演化态势。本研究通过演化博弈算法构建低碳集群-传统集群-政府部门三方演化博弈模型，分析各主体在市場中的策略选择，具体场景设置如下：

1) 低碳集群在电力市场中的竞价策略分为激进型报价 $\rho_{\text{lc}}^{\text{bid,Ra}}(t)$ 和保守型报价 $\rho_{\text{lc}}^{\text{bid,Ro}}(t)$ 两种类型，二者分别基于自身发电成本乘高报价系数和低报价系数进行报价。低碳集群中选择这两种报价策略的比例分别为 $x(t)$ ， $1-x(t)$ ($0 \leq x(t) \leq 1$)。

2) 传统集群在电力市场中的博弈策略可选升级改造和维持现状两种类型，传统集群中选择这两种策略的比例分别为 $y(t)$ ， $1-y(t)$ ($0 \leq y(t) \leq 1$)。其中传统集群升级改造的方式包括但不限于废气净化、加装碳捕集装置与废气封存和升级智能化系统等，在本文中升级改造方式为升级智能化系统，升级改造后碳排放量减少。

3) 传统集群参与市场竞价时有 4 种报价类型，如表 2 所示。具体而言，传统集群选择维持现状时，若政府不监管发电侧碳排放，此时由于发电成本更低，传统集群倾向于相对最低的“1 型报价 $\rho_{\text{tr}}^{\text{bid,1}}(t)$ ”；若政府监管发电侧碳排放，此时发电侧存在碳排放限额及碳排放超额惩罚，传统集群将倾向于相对较低的“2 型报价 $\rho_{\text{tr}}^{\text{bid,2}}(t)$ ”。传统集群选择升级改造时，即使政府不监管发电侧碳排放，但由于存在升级改造成本，传统集群仍将倾向于相对较高的“3

型报价 $\rho_{tr}^{bid,3}(t)$ ”；若此时政府监管发电侧碳排放，此时传统集群还将面临碳排放超额的惩罚成本，传统集群将倾向于相对最高的“4型报价 $\rho_{tr}^{bid,4}(t)$ ”。

表2 传统集群4种报价类型的具体情况
Table 2 Specific details of the four bidding types in traditional clusters

报价类型	设备低碳改造	是否监管碳排放	报价倾向	报价系数
1型	否	否	最低	1.1~1.3
2型	否	是	较低	1.3~1.5
3型	是	否	较高	1.5~1.7
4型	是	是	最高	1.7~1.9

4) 政府作为决策主体在博弈过程中角色为监管发电商群体的碳排放情况，可以选择监管与不监管两种策略，选择监管概率为 $z(t)$ ，不监管的概率为 $1-z(t)$ ($0 \leq z(t) \leq 1$)。

5) $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 为低碳集群选择激进型竞价策略，传统集群选择升级改造，政府相关部门监管发电侧碳排放情况下低碳集群、传统集群的收益和政府监管部门的社会效益。 $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ 至 $(\alpha_8, \beta_8, \gamma_8)$ 含义同理可知，此处不再赘述。由以上得到低碳集群、传统集群及政府监管部门的收益矩阵，见表3。

表3 传统集群-低碳集群-政府碳排放监管三方演化博弈收益矩阵
Table 3 Payoff matrix of the tripartite evolutionary game among traditional cluster, low-carbon cluster, and government carbon emission regulation

博弈参与者及其策略选择概率		各方收益	
		政府监管 碳排放(z)	政府不监管 碳排放($1-z$)
低碳集群 高报价(x)	传统集群 升级改造(y)	$(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$	$(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$
	传统集群 维持现状($1-y$)	$(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)$	$(\alpha_4, \beta_4, \gamma_4)$
低碳集群 低报价($1-x$)	传统集群 升级设备(y)	$(\alpha_5, \beta_5, \gamma_5)$	$(\alpha_6, \beta_6, \gamma_6)$
	传统集群 维持现状($1-y$)	$(\alpha_7, \beta_7, \gamma_7)$	$(\alpha_8, \beta_8, \gamma_8)$

3.2.2 市场参与主体收益函数计算

两类发电群体收益由其参与市场竞价交易后，根据市场成交电量电价与各自发电成本计算得出。

1) 两类发电商群体申报电量计算。

两类发电商群体申报电量可由式(10)计算。

$$\begin{cases} Q_{lc}^{bid}(t) = Q_{lc}^{bid,limit}(t) \\ Q_{tr}^{bid}(t) = Q_{tr}^{bid,limit}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中： $Q_{lc}^{bid}(t)$ ， $Q_{tr}^{bid}(t)$ 分别表示低碳集群和传统集群的申报电量； $Q_{lc}^{bid,limit}(t)$ ， $Q_{tr}^{bid,limit}(t)$ 表示交易中心设置的两类发电集群申报电量上限。当传统发电集群选择升级为低碳发电集群时，传统发电集群装

机规模下降，低碳发电集群装机规模上升，交易中心将对两类发电集群申报电量上限同步调整。

2) 两类发电商群体申报电价计算。

本文所考虑的两类发电商群体在竞价方面显著不同的地方在于发电成本不同，其中低碳集群由于发电过程相对更加复杂，因此发电成本相对更高，因此本文考虑按成本报价。两类发电集群的报价函数分别如式(11)所示。

$$\begin{cases} \rho_{lc}^{bid,i}(t) = k_{lc}^{bid,i} \cdot C_{lc}(t), & i \in \{R_o, R_a\} \\ \rho_{tr}^{bid,j}(t) = k_{tr}^{bid,j} \cdot \begin{cases} C_{tr}(t), & j \in \{1, 2\} \\ C_{lc}(t), & j \in \{3, 4\} \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

式中： k_{lc}^{bid,R_o} 、 k_{lc}^{bid,R_a} 分别为低碳集群保守型和激进型报价时的系数； $k_{lc}^{bid,i}$ 分别为传统集群“ i 型”报价时的报价系数，其中 $k_{tr}^{bid,1} < k_{tr}^{bid,2} < k_{tr}^{bid,3} < k_{tr}^{bid,4}$ ； $C_{lc}(t)$ 、 $C_{tr}(t)$ 分别表示低碳集群和传统集群发电电成本。

3) 两类发电商群体成交电量计算。

假设市场电量总需求为 $Q_{DM}(t)$ ，报价低的优先成交，则两类发电商群体成交电量按式(12)计算：

$$\begin{cases} Q_{lc}^{clear}(t) = Q_{lc}^{bid}(t) \\ Q_{tr}^{clear}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear}(t)\}, \\ \rho_{lc}^{bid}(t) \leq \rho_{tr}^{bid}(t) \\ Q_{lc}^{clear} = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear}(t)\} \\ Q_{tr}^{clear} = Q_{tr}^{bid}(t) \\ \rho_{lc}^{bid}(t) > \rho_{tr}^{bid}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中： $Q_{lc}^{clear}(t)$ 、 $Q_{tr}^{clear}(t)$ 分别表示低碳集群和传统集群成交电量。

4) 两类发电集群成交电价计算。

本文中市场采用 MCP 出清机制，最后成交的机组报价为市场成交电价，其计算公式如(13)所示：

$$\rho_{clear}(t) = \max\{\rho_{lc}^{bid}(t), \rho_{tr}^{bid}(t)\} \quad (13)$$

式中： ρ_{clear} 为市场的成交电价。

5) 各市场参与主体收益计算。

在政府不监管碳排放的情况下，发电集群碳排放不受限制，两类发电群体的收益 α 和 β 主要为售电收益与售电成本之差；在政府监管发电侧碳排放下，低碳集群碳排放超出自身限额 $E_{lc}^{limit}(t)$ 的部分将被政府处以 π_{lc} 元/t 的罚款，传统集群碳排放超出自身限额 $E_{tr}^{limit}(t)$ 的部分将被政府处以 π_{tr} 元/t 的罚款。政府碳排放监管部门的社会效益 γ 来自发电侧两类发电群体碳排放超出限额部分的罚款，当政府选择不监管时，政府碳排放监管部门的社会效益为零。不同策略选择下的各市场参与主体的收益矩阵

见表3,具体计算过程见附录A所示。

3.2.3 演化博弈稳定均衡性分析

演化博弈中,复制动态方程的主要作用是描述和分析策略在种群中的动态演化过程。该方程可以体现个市场主体的策略调整,并可以用于预测市场主体的长期行为演化和最终稳定状态。本文首先基于各主体在不同策略选择下的期望收益,计算各市场主体的平均期望收益,基于各期望收益计算其复制动态方程,最后根据复制动态方程和 Lyapunov 稳定性理论的间接法判断演化博弈中各主体策略选择的稳定性及稳定条件。介于篇幅限制,具体推导公式见附录B。

3.3 电力市场运行态势系统动力学模型

在电力市场仿真中,系统动力学被广泛应用于分析市场供需、价格走势、市场成员竞价行为等市场中长期层面的宏观趋势。在市场运行关键指标仿真问题中,可以分析出市场中长期的多指标多因素的变化趋势。本研究基于演化博弈模型构建低碳集群-传统集群-政府部门三方演化博弈模型,结合系统动力学方法仿真电力市场运行态势指标变化情况,构建系统动力学模型。该模型包含市场申报成交计算子系统、博弈主体收益计算子系统、发电侧演化博弈子系统、市场运行态势指标计算子系统共计4个子系统,各子系统存量流量图分别如附录C中附图C1—C4所示。

3.3.1 市场申报成交计算子系统

市场申报成交计算子系统用于计算低碳集群和传统集群在市场中的申报电量、电价数据,为博弈主体的收益计算提供基础。市场申报成交计算子系统中函数关系分为发电成本计算、申报电量电价计算和成交电量电价计算共计3个模块。

1) 两类燃煤发电商群体申报电量计算。

发电成本计算模块反映了燃煤价格与两类发电集群发电成本之间的关系,传统集群发电成本包含燃料成本 $C_{tr}^{fuel}(t)$ (燃煤成本)和除燃料外的其他成本 $C_{tr}^{other}(t)$ 两部分,其中通过燃煤发电设备的转换效率 η_{tr} 将燃煤价格折算为燃料成本。低碳集群的发电成本核算过程较为繁琐,考虑为传统集群的 μ 倍。本模块中变量间的具体函数关系如式(14)所示:

$$\begin{cases} C_{tr}(t) = C_{tr}^{fuel}(t) + C_{tr}^{other}(t) \\ C_{tr}^{fuel}(t) = \eta_{tr} \cdot P^{coal}(t) \\ C_{lc}(t) = \mu \cdot C_{tr}(t) \end{cases} \quad (14)$$

2) 申报电量电价计算模块。

低碳集群和传统集群申报电量均取申报电量

上限,具体计算方式如式(10)所示,申报电价按照发电成本乘以报价系数进行计算,如式(11)所示。

3) 成交电量电价计算模块。

市场根据低碳集群和传统集群申报电量电价按照 MCP 机制计算市场成交电价和两类发电商群体各自的成交电量,市场成交电价按式(13)计算,两类发电商群体各自的成交电量按式(12)进行计算。

3.3.2 博弈主体收益计算子系统

博弈主体收益计算子系统用于计算三方博弈支付矩阵中的各个元素,为发电侧演化博弈子系统提供数据支持,模块中的函数见附录A中式(A3)(A4)所示。

两类发电商群体的基础碳排放限额根据用电量需求量 $Q_{DM}(t)$ 乘上电碳折算系数 k_{C-E} 折算,同时根据上个时间点的碳排放限额按比例进行分配得到,且由于传统集群升级改造后排碳量降低,因此需要在基础碳排放限额的基础上进行动态调整,此处设置升级改造后的传统火电集群排碳量与低碳发电集群一致,如式(15)所示:

$$\begin{cases} E_{lc}^{limit}(t) = k_{C-E} \cdot Q_{DM}(t) \cdot \frac{E_{lc}^{limit}(t-1)}{E_{lc}^{limit}(t-1) + E_{tr}^{limit}(t-1)} + \\ y(t) \cdot k_{C-E} \cdot Q_{DM}(t) \cdot \frac{E_{tr}^{limit}(t-1)}{E_{lc}^{limit}(t-1) + E_{tr}^{limit}(t-1)} \cdot \frac{\lambda_{lc}}{\lambda_{tr}} \\ E_{tr}^{limit}(t) = [1 - y(t)] \cdot k_{C-E} \cdot Q_{DM}(t) \cdot \frac{E_{tr}^{limit}(t-1)}{E_{lc}^{limit}(t-1) + E_{tr}^{limit}(t-1)} \end{cases} \quad (15)$$

3.3.3 发电侧演化博弈子系统

发电侧演化博弈子系统通过求解演化博弈复制动态方程组,用于计算低碳集群、传统集群和政府监管之间的博弈结果,本模块中变量间的具体函数见附录B中式(B4)—(B6)所示。

3.3.4 市场运行态势指标计算子系统

市场运行态势指标计算子系统用于计算市场运行态势指标,表征系统的运行态势。本模块中电量电价基于演化博弈模型博弈结果,按期望值进行计算。低碳集群申报电价期望值 $\bar{\rho}_{lc}^{bid}$ 、传统集群申报电价期望值和 $\bar{\rho}_{tr}^{bid}$ 、低碳集群成交电量期望值 $\bar{Q}_{lc}^{clear}$ 、传统集群成交电量期望值 $\bar{Q}_{tr}^{clear}$ 、两类集群成交电价期望值 $\bar{\rho}_{clear}$ 计算方式分别见式(16)—(19):

$$\begin{cases} \bar{\rho}_{lc}^{bid}(t) = x(t) \cdot \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) + [1 - x(t)] \cdot \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) \\ \bar{\rho}_{tr}^{bid}(t) = y(t) \cdot z(t) \cdot \rho_{tr}^{bid,1}(t) + y(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot \\ \rho_{tr}^{bid,2}(t) + [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot \rho_{tr}^{bid,3}(t) + \\ [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot \rho_{tr}^{bid,4}(t) \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{lc}^{clear}(t) = & x(t) \cdot y(t) \cdot z(t) \cdot Q_{lc}^{clear,1}(t) + x(t) \cdot y(t) \cdot \\ & [1 - z(t)] \cdot Q_{lc}^{clear,2}(t) + x(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot \\ & Q_{lc}^{clear,3}(t) + x(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot \\ & Q_{lc}^{clear,4}(t) + [1 - x(t)] \cdot y(t) \cdot x(t) \cdot Q_{lc}^{clear,5}(t) + \\ & [1 - x(t)] \cdot y(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot Q_{lc}^{clear,6}(t) + \\ & [1 - x(t)] \cdot [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot Q_{lc}^{clear,7}(t) + \\ & [1 - x(t)] \cdot [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot Q_{lc}^{clear,8}(t) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}_{tr}^{clear}(t) = & x(t) \cdot y(t) \cdot z(t) \cdot Q_{tr}^{clear,1}(t) + x(t) \cdot y(t) \cdot \\ & [1 - z(t)] \cdot Q_{tr}^{clear,2}(t) + x(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot \\ & Q_{tr}^{clear,3}(t) + x(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot \\ & Q_{tr}^{clear,4}(t) + [1 - x(t)] \cdot y(t) \cdot x(t) \cdot Q_{tr}^{clear,5}(t) + \\ & [1 - x(t)] \cdot y(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot Q_{tr}^{clear,6}(t) + \\ & [1 - x(t)] \cdot [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot Q_{tr}^{clear,7}(t) + \\ & [1 - x(t)] \cdot [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot Q_{tr}^{clear,8}(t) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \bar{\rho}_{clear}(t) = & x(t) \cdot y(t) \cdot z(t) \cdot \rho_{clear}^1(t) + x(t) \cdot y(t) \cdot \\ & [1 - z(t)] \cdot \rho_{clear}^2(t) + x(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot \\ & \rho_{clear}^3(t) + x(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot \rho_{clear}^4(t) + \\ & [1 - x(t)] \cdot y(t) \cdot x(t) \cdot \rho_{clear}^5(t) + [1 - x(t)] \cdot \\ & y(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot \rho_{clear}^6(t) + [1 - x(t)] \cdot \\ & [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot \rho_{clear}^7(t) + [1 - x(t)] \cdot [1 - y(t)] \cdot \\ & [1 - z(t)] \cdot \rho_{clear}^8(t) \end{aligned} \quad (19)$$

式中： $Q_{lc}^{clear,i}$ 、 $Q_{tr}^{clear,i}$ 、 $\rho_{clear}^i(t)$ ($i \in [1, 8]$, $i \in N$) 分别对应正文表 3 中 8 种不同策略选择下低碳集群、传统集群成交量和市场成交电价。以 $Q_{lc}^{clear,1}$ 为例，其表示低碳集群选择保守型竞价策略，传统集群选择维持现状，政府相关部门选择不监管发电侧碳排放时的低碳集群成交量，其余参数同理。

虽然市场中还存在诸如核电、风、光、水电等非燃煤发电主体，但现阶段火电依然承担主要负荷，因此最终按照需求电量的 80% (式(10)中 0.8 的物理与实际意义) 折算。两类发电商群体的申报电量上限根据用电量需求量 $Q_{DM}(t)$ 乘上 0.8 进行折算，同时根据上个时间点的申报电量上限按比例进行分配得到，且由于传统集群升级改造自身进行升级改造，在此过程中不仅碳排放量会下降而且发电效率得到提升，发电容量增加，因此需要在基础申报电量上限的基础上进行动态调整，如式(20)所示：

$$\begin{cases} Q_{lc}^{bid}(t) = Q_{lc}^{bid,limit}(t) = \\ \quad 0.8(1 + y(t)) \cdot Q_{DM}(t) \cdot (1 - S^{tr}(t-1)) \\ Q_{tr}^{bid}(t) = Q_{tr}^{bid,limit}(t) = \\ \quad 0.8(1 - y(t)) \cdot Q_{DM}(t) \cdot S^{tr}(t-1) \end{cases} \quad (20)$$

根据市场成交电价期望值、两类发电商群体成

交电量期望值和两类发电商群体申报电价期望值，计算本文所提电力市场运行态势指标。

4 模拟仿真

本文仿真采用 Vensim PLE 的 9.3.5 版本进行算例分析，首先在该软件中搭建本文构建的系统动力学模型，如附录 C 中附图 C1—C4 所示，然后输入变量之间的函数关系，再设置仿真的初始条件即可进行模拟计算。仿真区间为 36 个步长，以月度为最小单位。求解器设置为 RK4Auto (四阶龙格库塔)，由于模型中含有较为复杂的积分微分运算，为提高计算精度和模型可解性，求解器步长设为仿真工具支持的最小求解步长(time step)，为 0.0078125。发电侧低碳集群-传统集群-政府碳排放监管三方演化博弈模型中初始概率或比例设为 $x_0=0.5$, $y_0=0.5$, $z_0=0.5$ 。

4.1 仿真参数设置

算例整体以某省电力市场相关数据为背景，参数设置一部分来源于某省电力市场实际数据，一部分来源于相关参考文献，剩余较难获取的数据以合理假设的方式给出。

1) 发电侧参数设置。

发电侧参数设置主要涉及两类集群发电成本参数、机组特性参数、电价申报特性参数的设置。

① 低碳集群和传统集群发电成本参数。

传统集群发电成本由直接发电成本和低碳升级改造成本两部分构成。其中传统集群机组除燃料外的其他成本折算度电成本为 0.1 元/(kW·h)，低碳集群度电成本约为传统集群度电成本的 1.5 倍，即式(14)中的 μ 设为 1.5。传统集群升级改造为低碳集群的成本，即附录 A 中式(A3)中的 θ 设为 0.4 元/(kW·h)^[30]。煤价按 2020—2022 年环渤海动力煤价格指数进行计算，如图 1 所示。

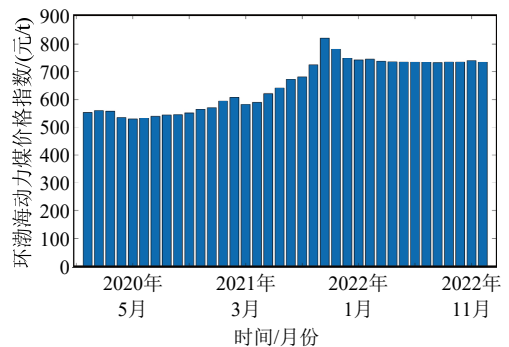


图 1 环渤海动力煤价格指数(2020—2022 年)

Fig. 1 Bohai-rim steam coal price index (2020—2022)

② 低碳集群和传统集群机组特性参数。

低碳集群和传统集群机组特性参数包含发电

燃料转换效率和发电碳排放系数两部分。其中传统集群机组和低碳集群的燃煤发电转换效率分别为 $0.000303\text{t}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 和 $0.0004\text{t}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[31]。传统集群机组和低碳集群燃煤碳排放系数分别为 $0.976\text{t}/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 和 $0.4483\text{t}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ^[32]。

③低碳集群和传统集群报价系数参数。

如 3.2.1 节中所述, 低碳集群参与市场有保守型和激进型两种竞价策略, 传统集群参与市场按照自身是否进行设备升级改造和政府是否监管碳排放共有 4 种竞价策略, 两类集群不同竞价策略对应的报价系数参数设置如表 4 所示。

表 4 低碳集群和传统集群报价系数参数 Table 4 Bidding coefficient parameters for low-carbon cluster and traditional cluster		
集群类型	竞价策略	竞价系数
低碳集群	激进型竞价	1.7
	保守型竞价	1.3
传统集群	1 型竞价	1.2
	2 型竞价	1.4
	3 型竞价	1.6
	4 型竞价	1.8

2) 用电侧参数设置。

用电侧参数为用电侧需求电量, 随着国家发展改革委《关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知》文件的发布, 市场中用电侧需求电量即为全省全部工商业的需求电量。因此现有历史市场交易数据将失去参考意义, 本文按 2020 至 2022 年某省全省月度用电量数据乘 0.7, 作为历史月度工商业需求电量。实际数据如图 2 所示。

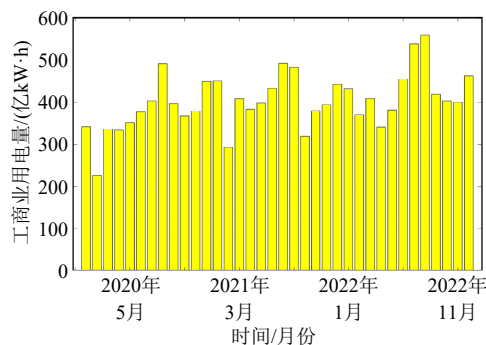


图 2 某省全省工商业月度用电量估算数据(2020—2022 年)
Fig. 2 Monthly electricity consumption estimates for industrial and commercial sectors in a province (2020—2022)

3) 交易侧参数设置。

发电侧初始申报容量上限总和设为 340 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$ (为 2020 年 1 月市场购电侧需求电量), 两类发电集群初始申报容量上限分别为 170 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$, 仿真过程中申报容量上限按照式(20)进行调整。

4) 监管侧参数设置。

监管侧参数主要为政府碳排放监管部门针对

两类发电商群体设置的碳排放限额, 发电侧初始碳排放限额设为 0.4 亿 $\text{t}/\text{月}$, 两类集群初始碳排放限额均为 0.2 亿 $\text{t}/\text{月}$, 电碳折算系数 $k_{\text{C-E}}$ 设为 $1/3000$, 仿真中具体碳排放限额按照式(15)进行调整。当两类发电集群碳排放超出限额时, 低碳集群和传统集群将被政府处以 40 元/ t 的罚款, 即附录中式(A4)中 $\pi_{\text{lc}}=\pi_{\text{tr}}=40$ 元/ t ^[33]。

4.2 电力市场运行态势仿真结果分析

根据 4.1 节中的参数设置对电力市场运行态势进行仿真, 电力市场运行态势指标和电力市场整体耗散性指标仿真结果如下。

1) 电力市场运行态势指标仿真结果。

本文基于传统集群市场份额、申报电量平衡系数、用电需求满足率、成交电价波动率 4 个指标综合反映电力市场运行态势, 其仿真结果如下。

①传统集群市场份额仿真结果。

传统集群市场份额仿真结果如图 3 所示。在当前场景和参数设置下, 市场在运行一段时间后, 两类发电集群市场份额都将趋近于稳定状态, 传统集群市场份额约为 49.375%, 传统集群和低碳集群市场份额几近相当且几乎不变, 说明此时市场处于稳定状态。

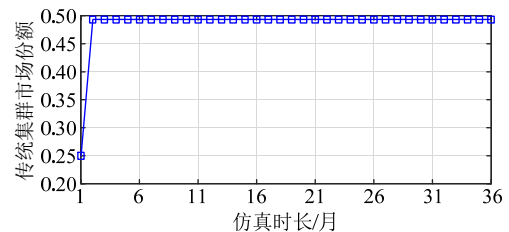


图 3 传统集群市场份额仿真结果
Fig. 3 Simulation results of market share for the traditional cluster

②申报电量平衡系数。

申报电量平衡系数仿真结果如图 4 所示。仿真结果表明, 在当前的参数设置下, 申报电量平衡系数基本遵循交易中心市场设定。

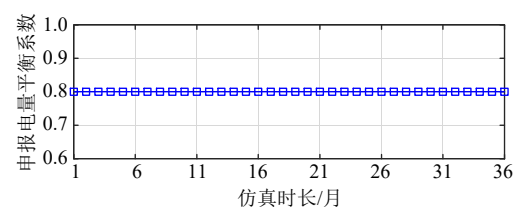


图 4 申报电量平衡系数仿真结果
Fig. 4 Simulation results of the declared electricity balance coefficient

③用电需求满足率。

用电需求满足率仿真结果如图 5 所示。仿真结果表明, 在当前的参数设置下, 用电需求满足率基

本遵循交易中心市场设定,即燃煤机组提供购电侧约 80%的用电需求。

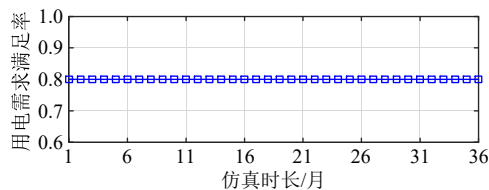


图 5 用电需求满足率仿真结果

Fig. 5 Simulation results of electricity demand satisfaction rate

④成交电价波动率变化趋势。

成交电价波动率仿真结果如图 6 所示。仿真结果表明,在当前的参数设置下,由于煤价处于高位叠加低碳集群倾向于选择激进型竞价策略的比例增多,因此前两年市场成交电价将处于小幅波动趋势,而后各集群策略选择趋于稳定且煤价较为稳定,成交电价波动率变化幅度下降。

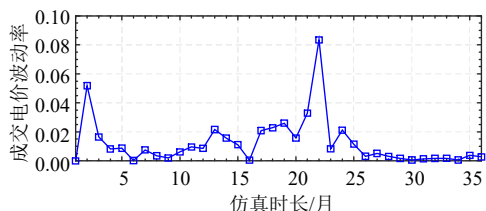


图 6 成交电价波动率仿真结果

Fig. 6 Simulation results of transaction electricity price volatility

2) 电力市场整体运行耗散性指标仿真结果。

基于前文 4 个指标的模拟仿真的结果,再根据 4 个指标对电力市场整体稳定性的影响程度的大小,取式(9)中 $p=0.2$, $q=0.25$, $n=0.25$, $k=0.3$,对电力市场熵值及熵值变化量(熵变)进行仿真分析,结果如图 7 所示。

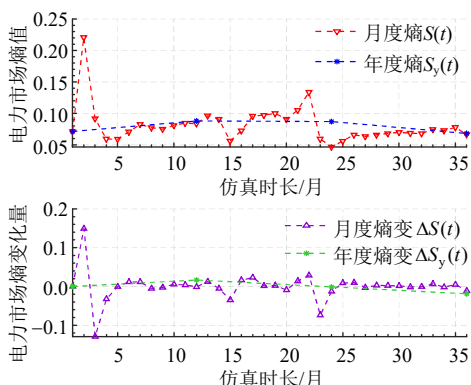


图 7 电力市场熵值及熵变计算结果

Fig. 7 Calculation results of power market entropy and entropy variation

基于图 7 对电力市场熵值逐月进行分析,市场熵值仅在第 2 个月和第 22 个月发生较大波动,其他时段市场熵值均在 0.05~0.1 之间波动。说明市场

各方面不确定因素的影响会引发不稳定状态出现,在本文中表现为传统集群市场份额的波动和燃煤价格大幅上涨时,熵值出现尖峰;从年度熵的结果来看,年度熵值在基本处在 0.05~0.1 之间上下浮动,熵变围绕 0 值上下波动且逐渐减小为负值,从市场中长期发展的角度来分析,电力市场将处于一个熵减的良性循环状态之中,系统的有序程度增强,并将趋于稳定。

4.3 多元因素敏感性仿真结果分析

4.2 节已经分析本文默认参设置下的市场运行态势仿真结果,本节将对演化博弈初值、传统集群升级改造单位容量成本两个要素展开敏感性分析,探究电力市场内外关键影响因素下市场运行态势的变化情况。

1) 演化博弈初值敏感性分析

由于 Vensim PLE 软件不支持三维图和蒙特卡洛抽样,因此难以绘制任意初值条件下的演化博弈相位图。本部分以 (x_0, y_0, z_0) 分别取 $(0.3, 0.3, 0.3)$ 、 $(0.8, 0.8, 0.8)$ 、 $(0.5, 0.1, 0.9)$ 、 $(0.5, 0.9, 0.1)$ 、 $(0.1, 0.5, 0.9)$ 、 $(0.9, 0.5, 0.1)$ 、 $(0.1, 0.9, 0.5)$ 和 $(0.9, 0.1, 0.5)$ 加上基准参数 $(0.5, 0.5, 0.5)$, 共 9 种场景展开对比,分析展示电力市场运行态势指标变化。

①博弈初值对传统集群市场份额影响分析。

不同博弈初值场景下传统集群市场份额仿真结果如图 8 所示。

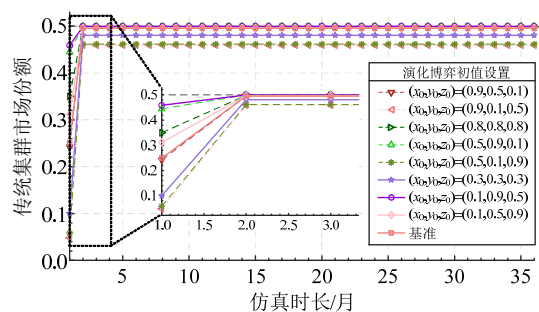


图 8 不同博弈初值下传统集群市场份额仿真结果

Fig. 8 Simulation results of traditional cluster market share under different game initial values

从图 8 的敏感性分析仿真结果可以看出,在不同博弈初值条件下,传统集群市场份额这一变量将快速达到稳定状态,且 y_0 越小,传统集群市场份额越高,说明传统集群初始改造比例会影响传统集群最终的策略选择和市场份额占比。

②博弈初值对成交电价波动率影响分析。

不同博弈初值下成交电价波动仿真结果如图 9 所示。图 9 的敏感性分析仿真结果表明,在不同博弈初值条件下,成交电价波动率仅在仿真初期会产生剧烈波动,但最后均将稳定在相同的状态,不同

博弈初值即市场主体中选择不同策略的初始比例对于达到稳定状态的市场电价波动几乎没有影响。

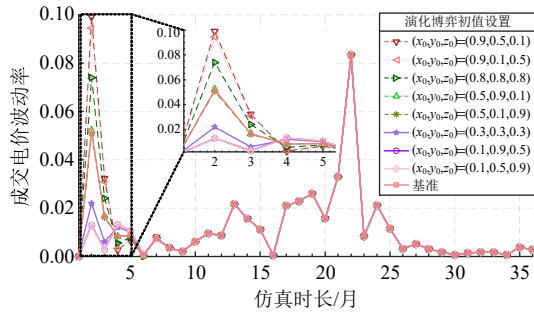


图9 不同博弈初值下成交电价波动率仿真结果

Fig. 9 Simulation results of transaction price volatility under different game initial values

③ 博弈初值对市场均衡熵变化量影响分析。

不同博弈初值下电力市场的年度熵变和月度熵变仿真结果如图10所示。

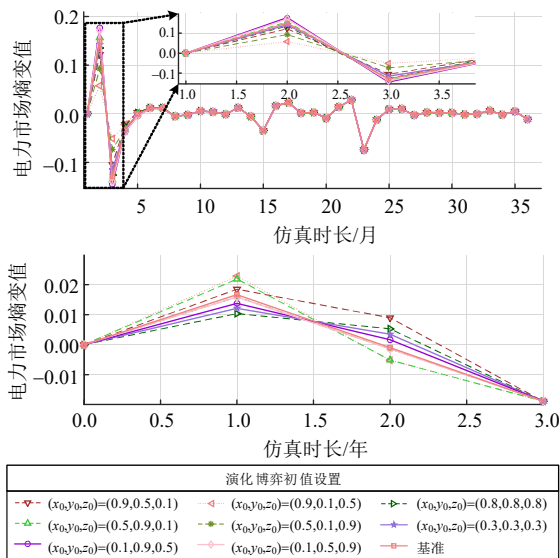


图10 不同博弈初值下电力市场均衡熵变化量仿真结果

Fig. 10 Simulation results of power market equilibrium entropy variation under different game initial values

图10中不同博弈初值下的电力市场均衡熵值变化量仿真表明,在不同的博弈初始条件下,电力市场仅前5个月的熵变有所不同,后续变化趋于一致,说明不同博弈初值仅在市场初期对影响市场稳定性,在市场运行半年后,市场主体通过实施碳监管、传统集群选择升级改造等措施进行调节最终均趋于稳定状态。在低碳机组相同初始报高价比例下,政府初始监管概率增大时,市场熵变减小,说明在市场运行初期,加强市场监管能够增强市场运行的稳定性。从年度熵变进行分析,传统集群的设备升级概率增大对市场稳定性有显著的积极影响,尤其是在市场碳监管概率大时效果明显,原因是设备升级有助于提高生产效率和减少排放,同时市场供给侧容量更加充裕,有利于市场的长期稳定。总

体而言市场整体年度熵变逐渐减小且由正变为负,表明市场在不同博弈初值下均可由最开始的不稳定状态逐渐转化为良性运行状态,实现良性循环。

2) 传统集群升级改造单位成本敏感性分析。

传统集群升级改造单位容量成本敏感性分析用于仿真不同传统集群升级改造单位容量成本 θ 时市场运行态势变化情况。分别取 θ 为0.0005、0.001、0.005、0.01、0.1、0.2、0.3、0.5、0.6元/(kW·h),加上基准场景共计10个场景进行对比分析。其中 (x_0, y_0, z_0) 为(0.5, 0.5, 0.5), $k_{C-E}=1/3000$, $\pi_u=60$ 元/t, 分析展示电力市场运行态势指标变化。

① 升级改造成本对传统集群市场份额影响分析。

不同升级改造单位成本下传统集群市场份额仿真结果如图11所示。

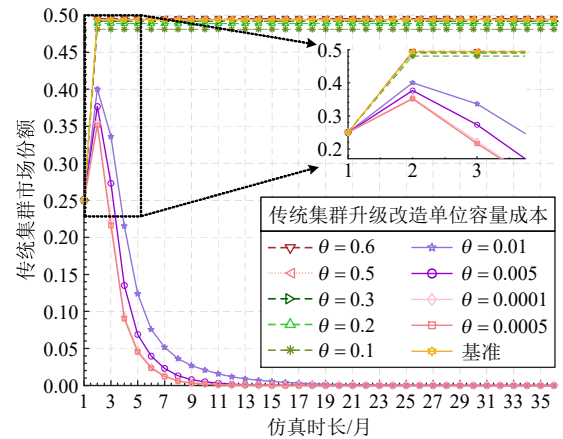


图11 不同升级改造成本下传统集群市场份额仿真结果

Fig. 11 Simulation results of traditional cluster market share under different upgrade and renovation costs

根据图11仿真结果进行分析,在 $\theta \leq 0.01$ 元/(kW·h)的情况下(传统集群升级改造单位电量成本大幅降低或政府给予补贴),传统集群将有一定比例选择升级改造转化为低碳集群,且随着时间的变化,传统集群市场份额逐渐减小,最终接近于零。同时,随着 θ 的减小,传统集群市场份额减小为0的时间越短。这表明,政府通过提供升级改造补贴,降低燃煤机组升级改造成本,能够有效促进传统集群向低碳集群的转型,且补贴力度越大,传统集群转型意愿越强。

② 升级改造成本对申报电量平衡系数影响分析。

不同升级改造成本下申报电量平衡系数仿真结果如图12所示。图12表明,随着 θ 的减小,申报电量平衡系数从0.8逐渐增大至峰值1.15,且到达峰值的时间随 θ 减小而减小。在 $\theta \leq 0.01$ 元/(kW·h)情况下,降低燃煤机组升级改造成本,能够有效促进燃煤机组升级改造,显著提高发电侧申报电量,市场申报阶段从供小于求逐渐呈现出供大于求的

趋势。这说明, 政府通过提供升级改造补贴降低传统集群改造成本能够激励传统发电集群升级改造从而提升发电能力, 从而改善市场供应能力。

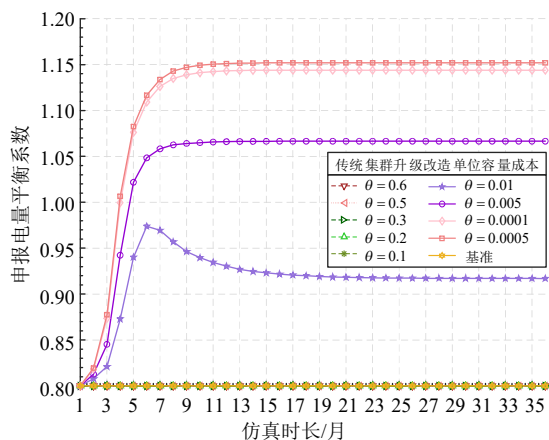


图 12 不同升级改造成本下申报电量平衡系数仿真分析
Fig. 12 Simulation analysis of declared power balance coefficient under different upgrade and renovation costs

③升级改造成本对用电需求满足率影响分析。

不同升级改造成本下用电需求满足率仿真结果如图 13 所示。在 $\theta \leq 0.01$ 元/(kW·h) 情况下, 电需求满足率在初始阶段迅速上升, 并在中期和长期阶段保持稳定。但上升速度和最终稳定水平随着改造成本的降低而逐渐提高, 直至用电满足率达到 100%。这表明当政府通过提供升级改造补贴显著降低传统集群升级改造单位电量成本时, 传统集群升级改造在满足用电需求方面具有较大的潜力, 以低碳集群为主的发电机组将承担更多的用电需求电量, 充分满足购电侧的用电需求, 能够有效提高市场整体的供电效率和稳定性。

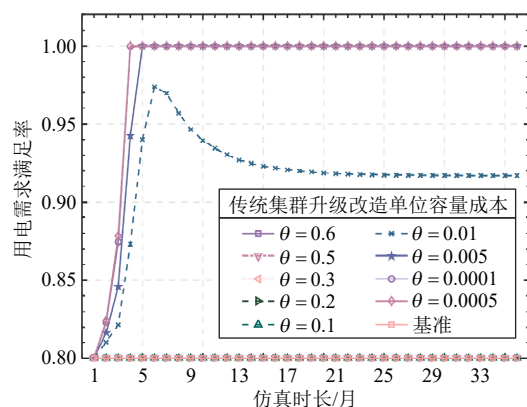


图 13 不同升级改造成本下用电需求满足率仿真分析
Fig. 13 Simulation analysis of electricity demand satisfaction rate under different upgrade and renovation costs

④升级改造成本对市场均衡熵变化量影响分析。

不同升级改造成本下市场均衡熵变化量仿真结果如图 14 所示。根据市场月度熵变值进行分析可得, 在仿真初期不同升级改造成本下市场熵值变

化量正负波动均比较大, 在仿真时长 10 个月, 市场达到稳定状态, 此时不同 θ 对于市场熵值变化几乎没有影响。这是由于仿真初期三方博弈主体策略选择未达到稳定均衡状态, 导致发电集群市场份额、成交电价产生剧烈波动, 进而造成了市场的不稳定。进一步分析仿真初期市场熵值得其增量随 θ 减小而减小, 说明市场未达到稳定状态时, 传统集群升级改造成本的降低能够有效降低市场熵值, 增强市场稳定性。

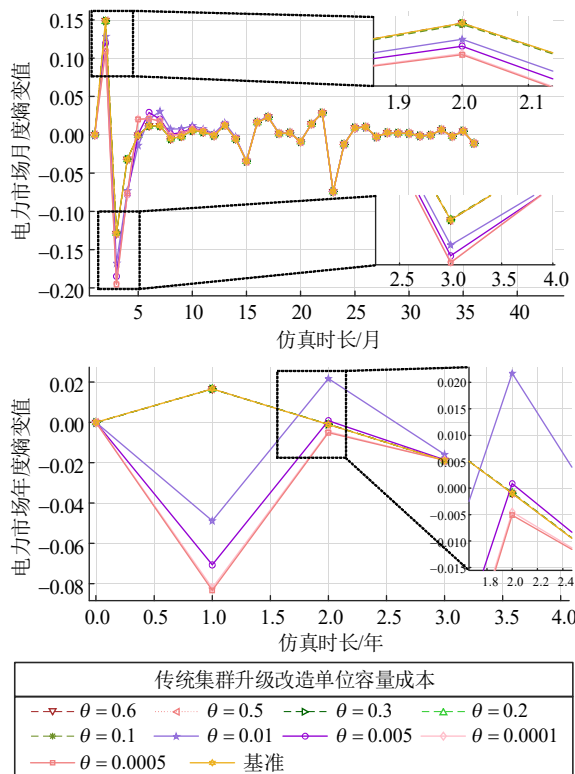


图 14 升级改造成本下市场均衡熵变化量仿真分析
Fig. 14 Simulation analysis of market equilibrium entropy variation under upgrade and renovation costs

进一步分析年度均衡熵变化量, 在仿真初期, 当升级改造成本系数 $\theta > 0.1$ 时, 市场熵变 > 0 波动加剧, 当升级改造成本系数 $\theta < 0.1$ 时, 市场熵变小于 0, 市场趋于稳定状态, 且随 θ 减小而增强。其主要原因是 $\theta > 0.1$ 时传统集群因高改造成本选择升级的比例较低, 导致发电侧容量供给不足, 进而影响市场用电满足率和申报电量平衡系数。此外, 市场初期传统集群市场份额占比较大, 碳排放较高, 随着政府碳监管政策的实施部分传统集群选择改造, 进一步加剧了市场的不稳定性。因此, 在碳监管政策的实施过程中, 应该综合考虑电力市场的中长期发展趋势, 在政策实施前期加大升级改造补贴力度, 降低传统集群升级改造成本, 能够有效引导发电集群升级改造, 提升电力市场整体资源利用效率和配置, 有利于市场长期稳定运行。

5 结论

本文分析了政府碳监管背景下传统发电集群低碳转型对电力市场运行态势的影响。应用演化博弈模拟两类发电集群,结合系统动力学推导市场运行趋势,最后基于仿真结果提出了“电力市场均衡熵的概念”为探究电力市场运行状态提供了参考。

文中详细推导了发电侧低碳集群-传统集群-政府碳排放监管三演化博弈模型,以演化博弈复制动态方程组为核心,推导了对应系统动力学中各变量的函数关系,在算例分析部分,以江苏电力市场相关数据为背景,重点对不同博弈初始状态、不同升级改造成本下的多维态势指标走势进行了敏感性分析,以此为数据基础,通过年度熵和月度熵分析了市场整体稳定性。算例结果表明在本文参数条件下,不同的博弈初值对市场运营初期稳定性有较大影响,市场主体的不同策略尤其是补贴力度和升级改造意愿选择将会直接在短期内造成市场不稳定。在政府积极实施碳监管的背景下,政府通过补贴燃煤机组升级改造和加强监管力度,引导燃煤机组提升升级改造比例,提升市场整体发电效率和减少碳排放,减小市场整体熵值,有利于市场的长期稳定。

本文创新性地将系统动力学模型与演化博弈理论相结合,构建了发电侧演化博弈的电力市场运行态势仿真与耗散性分析模型,能够动态模拟发电企业在电力市场中的博弈行为及其对市场运行态势的影响,为评估市场的长期稳定性提供了新的视角和方法。考虑到新能源全面入市政策文件已经发布,未来可进一步结合新能源全面入市、售电公司营销策略变化等市场内外因素对电力市场稳定均衡性进行分析,为电力市场长期稳定、高效运行提供更具有前瞻性与实用性的决策依据。

附录见本刊网络版(<http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml>)。

参考文献

- [1] 黄国日, 尚楠, 梁梓杨, 等. 绿色电力消费与碳交易市场的链接机制研究[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 668-678.
HUANG Guori, SHANG Nan, LIANG Ziyang, et al. Research on the linkage mechanism between green power consumption and the carbon market[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 668-678(in Chinese).
- [2] 马丽娜, 章建明, 和晓东. 浅析电力市场与碳市场协同发展的必要性[J]. 电器工业, 2022(9): 76-79.
- [3] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1741-1750.
KANG Chongqing, DU Ershun, GUO Hongye, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741-1750(in Chinese).
- [4] 国家发展改革委. 关于进一步深化燃煤发电上网电价市场化改革的通知[EB/OL]. (2021-10-11)[2024-04-18]. <https://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=18280>.
- [5] 国家发展改革委, 国家能源局. 国家发改委 国家能源局关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知[EB/OL]. (2022-01-29)[2024-06-21]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-03/23/content_5680759.htm.
- [6] 王睿琛, 蔡娜, 高航, 等. 面向新型电力系统的电力市场主体统一身份模型设计及应用[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4160-4168.
WANG Ruichen, CAI Na, GAO Hang, et al. Design and application of unified identity model for power market subjects of novel power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4160-4168(in Chinese).
- [7] 李政麒, 蔡晔, 曹一家, 等. 美国得州“2·15”停电事故分析及对中国新型电力系统供电充裕度的启示[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(5): 17-24.
LI Zhengqi, CAI Ye, CAO Yijia, et al. Analysis of “2·15” blackout in Texas and its enlightenment to China’s new power system supply adequacy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5): 17-24(in Chinese).
- [8] 赵雯, 黄恒孜, 庞靖宇, 等. 基于数据挖掘的多场景互联电力运行指标体系研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 63-68.
ZHAO Wen, HUANG Hengzi, PANG Jingyu, et al. Research on multi-scenario interconnected power operation index system based on data mining[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 63-68(in Chinese).
- [9] 韦远康, 秦丽娟, 韦丁, 等. 广西电力市场运营秩序评估的关键指标分析[J]. 广西电力, 2020, 43(3): 22-25, 37.
WEI Yuankang, QIN Lijuan, WEI Ding, et al. Analysis of key indexes of the operation order evaluation of Guangxi electric power market[J]. Guangxi Electric Power, 2020, 43(3): 22-25, 37(in Chinese).
- [10] 和识之, 何翔路, 姜素华, 等. 南方(以广东起步)电力现货市场“月结算”试运行关键监测指标及市场力分析[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 175-184.
HE Shizhi, HE Xianglu, LOU Suhua, et al. Key monitoring indicators and market power analysis in “Monthly Settlement” trial operation of southern China electricity spot market (starting with Guangdong Province)[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 175-184(in Chinese).
- [11] 张粒子, 王进. 适应我国高集中度电力现货市场的发电侧市场力辨识方法[J]. 电网技术, 2024, 48(7): 2823-2832.
ZHANG Lizi, WANG Jin. A method for identifying market power on the generation side adapting to China’s high concentration electricity spot market[J]. Power System Technology, 2024, 48(7): 2823-2832(in Chinese).
- [12] 章枫, 赵雅雪, 周子青, 等. 基于级差最大化 AHP-熵权法的日前市场运营状态评估[J]. 浙江电力, 2020, 39(12): 90-98.
ZHANG Feng, ZHAO Yaxue, ZHOU Ziqing, et al. Operation status evaluation of day-ahead electricity market based on AHP-entropy weight method with maximum variance[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(12): 90-98(in Chinese).
- [13] 施建华, 荆朝霞, 陈达鹏. 广东电力市场评价指标与方法模型研究[J]. 广东电力, 2020, 33(8): 111-119.
SHI Jianhua, JING Zhaoxia, CHEN Dapeng. Research on evaluation indexes and method model of Guangdong power market[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(8): 111-119(in Chinese).
- [14] 周鹏程, 孟诗语, 吴南南, 等. 计划与市场双重体制下电力市场运营态势指标体系[J]. 山东电力技术, 2019, 46(4): 1-7.

- ZHOU Pengcheng, MENG Shiyu, WU Nannan, et al. Electricity market operation situation index system under the dual system of planning and market[J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(4): 1-7(in Chinese).
- [15] ABAPOUR S, NAZARI-HERIS M, MOHAMMADI-IVATLOO B, et al. Game theory approaches for the solution of power system problems: a comprehensive review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2020, 27(1): 81-103.
- [16] 张益岗, 王小君, 孙庆凯, 等. 基于复杂网络演化博弈的可再生能源技术扩散仿真分析[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1573-1582. ZHANG Yigang, WANG Xiaojun, SUN Qingkai, et al. Simulation analysis of renewable energy technology diffusion based on complex network evolutionary game[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1573-1582(in Chinese).
- [17] 喻洁, 曹阳, 鄢鹏阳, 等. 考虑用户需求响应博弈推演的区域综合能源运营策略[J]. 电网技术, 2024, 48(9): 3745-3757. YU Jie, CAO Yang, YAN Pengyang, et al. Integrated regional energy operation strategy considering user demand response game deduction[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3745-3757(in Chinese).
- [18] 曹阳, 喻洁, 李扬, 等. 基于演化博弈的区域综合能源市场零售侧竞争策略选择方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 104-113. CAO Yang, YU Jie, LI Yang, et al. Evolutionary game based competition strategy selection method for retail side of regional integrated energy market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 104-113(in Chinese).
- [19] WANG Ran, LI Yanhe, GAO Bingtuan. Evolutionary game- based optimization of green certificate- carbon emission right-electricity joint market for thermal-wind-photovoltaic power system[J]. Global Energy Interconnection, 2023, 6(1): 92-102.
- [20] ZHENG Junjun, WANG Juan, YU Liukai. How to improve the effectiveness of Chinese green certificate market? A complex network and social influence analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 380: 134943.
- [21] 李璐, 张泽端, 毕贵红, 等. “双碳”目标下基于系统动力学的发电行业碳减排政策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(12): 69-81. LI Lu, ZHANG Zeduan, BI Guihong, et al. Carbon emission reduction policy in the power generation sector based on system dynamics with “dual carbon” targets[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(12): 69-81(in Chinese).
- [22] 王玉珠. 多种市场型碳减排政策下发电企业交易策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.
- [23] ZHU Chaoping, FAN Ruguo, LIN Jinchai. The impact of renewable portfolio standard on retail electricity market: a system dynamics model of tripartite evolutionary game[J]. Energy Policy, 2020, 136: 111072.
- [24] WANG Xinru, LONG Ruyin, CHEN Hong. How to promote the trading in China's green electricity market? based on environmental perceptions, renewable portfolio standard and subsidies[J]. Renewable Energy, 2024, 222: 119784.
- [25] DONG Jun, JIANG Yuzheng, LIU Dongran, et al. Promoting dynamic pricing implementation considering policy incentives and electricity retailers' behaviors: an evolutionary game model based on prospect theory[J]. Energy Policy, 2022, 167: 113059.
- [26] 季学林. 基于熵与耗散结构理论的中国烟草产业组织结构再造研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [27] 王玲俊, 王英. 基于耗散结构的光伏产业链风险演化条件机制研究[J]. 软科学, 2018, 32(1): 21-26. WANG Lingjun, WANG Ying. Research on the condition mechanism of photovoltaic industry chain risk evolution based on dissipative structure theory[J]. Soft Science, 2018, 32(1): 21-26(in Chinese).
- [28] 王宣, 阚玉金, 刘凯玉. 基于耗散结构理论的新能源产业系统研究[J]. 电工钢, 2022, 4(5): 46-50. WANG Xuan, KAN Yujin, LIU Kaiyu. Research on new energy industry system based on dissipative structure theory[J]. Electrical Steel, 2022, 4(5): 46-50(in Chinese).
- [29] 生态环境办公厅. 关于印发《火电行业建设项目温室气体排放环境影响评价技术指南(试行)》的通知[EB/OL]. (2024-05-29) [2025-01-08]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk06/202405/t20240529_1074379.html.
- [30] 栗楠, 周朝阳, 司纪朋, 等. 国内外 CCUS 发展对比分析与启示建议[J]. 中国电力企业管理, 2021(34): 54-56.
- [31] 刘晓畅. 风力致热-地源热泵双热源供暖系统仿真研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2020.
- [32] 范宏, 刘巧宏, 周嘉新, 等. 气电联合系统的协同规划方法及应用[J]. 水电能源科学, 2019, 37(7): 205-208, 61. FAN Hong, LIU Qiaohong, ZHOU Jiaxin, et al. Research on collaborative planning method of combined gas-electric systems[J]. Water Power Energy Science, 2019, 37(7): 205-208, 61(in Chinese).
- [33] 刘元欣, 罗旭, 张为荣, 等. 碳排放配额分配规则对煤电收益的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(3): 334-346. LIU Yuanxin, LUO Xu, ZHANG Weirong, et al. Impact of carbon allowance allocation rules on the revenue of coal power sector[J]. Climate Change Research, 2023, 19(3): 334-346(in Chinese).



喻洁

在线出版日期: 2025-07-23.

收稿日期: 2025-01-09.

作者简介:

喻洁(1975), 女, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力市场、电力优化调度、虚拟发电厂、电网规划等, E-mail: yujie@seu.edu.cn;

鄢鹏阳(2000), 男, 通信作者, 硕士, 主要研究方向为电力市场、人工智能、负荷预测, E-mail: 2453424380@qq.com.

(责任编辑 王金芝)

附录 A

在正文 3.2.3 节中，介于篇幅限制未能对各主体不同情况下演化博弈函数进行收益函数进行展开，故在此进行补充。在政府不监管碳排放的情况下，发电集群碳排放不受限制，两类发电群体的收益主要为售电收益与售电成本之差；在政府监管发电侧碳排放下，低碳集群碳排放超出自身限额 $E_{lc}^{limit}(t)$ 的部分将被政府处以 π_{lc} 元/t 的罚款，传统集群碳排放超出自身限额 $E_{tr}^{limit}(t)$ 的部分将被政府处以 π_{tr} 元/t 的罚款；在政府不监管碳排放下，碳排放不设限制。

首先基于正文表 3 中的不同策略选择情况，对市场成交电价、电量进行计算。

不同情形下市场成交电价情况如(A1)所示：

$$\begin{cases} \rho_{clear}^1(t) = \max\{\rho_{lc}^{Ra}(t), \rho_{tr}^4(t)\}, \rho_{clear}^2(t) = \max\{\rho_{lc}^{Ra}(t), \rho_{tr}^3(t)\} \\ \rho_{clear}^3(t) = \max\{\rho_{lc}^{Ra}(t), \rho_{tr}^2(t)\}, \rho_{clear}^4(t) = \max\{\rho_{lc}^{Ra}(t), \rho_{tr}^1(t)\} \\ \rho_{clear}^5(t) = \max\{\rho_{lc}^{Ro}(t), \rho_{tr}^4(t)\}, \rho_{clear}^6(t) = \max\{\rho_{lc}^{Ro}(t), \rho_{tr}^3(t)\} \\ \rho_{clear}^7(t) = \max\{\rho_{lc}^{Ro}(t), \rho_{tr}^2(t)\}, \rho_{clear}^8(t) = \max\{\rho_{lc}^{Ro}(t), \rho_{tr}^1(t)\} \end{cases} \quad (A1)$$

式中： $\rho_{clear}^i (i \in [1,8], i \in N)$ 分别对应正文表 3 中 8 种不同策略选择下的市场成交电价。以 ρ_{clear}^1 为例，其表示低碳集群选择保守型竞价策略，传统集群选择维持现状，政府相关部门选择不监管发电侧碳排放时的市场成交电量，其余 7 中情况同理。

不同情形下的低碳集群与传统集群市场成交电量计算(A2)所示：

$$\begin{cases} \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) \leq \rho_{tr}^{bid,4}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,1}(t) = Q_{lc}^{bid}(t), Q_{tr}^{clear,1}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear,1}(t)\} \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) > \rho_{tr}^{bid,4}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,1}(t) = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear,1}(t)\}, Q_{tr}^{clear,1}(t) = Q_{tr}^{bid}(t) \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) \leq \rho_{tr}^{bid,3}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,2}(t) = Q_{lc}^{bid}(t), Q_{tr}^{clear,2}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear,2}(t)\} \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) > \rho_{tr}^{bid,3}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,2}(t) = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear,2}(t)\}, Q_{tr}^{clear,2}(t) = Q_{tr}^{bid}(t) \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) \leq \rho_{tr}^{bid,2}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,3}(t) = Q_{lc}^{bid}(t), Q_{tr}^{clear,3}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear,3}(t)\} \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) > \rho_{tr}^{bid,2}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,3}(t) = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear,3}(t)\}, Q_{tr}^{clear,3}(t) = Q_{tr}^{bid}(t) \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) \leq \rho_{tr}^{bid,1}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,4}(t) = Q_{lc}^{bid}(t), Q_{tr}^{clear,4}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear,4}(t)\} \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ra}(t) > \rho_{tr}^{bid,1}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,4}(t) = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear,4}(t)\}, Q_{tr}^{clear,4}(t) = Q_{tr}^{bid}(t) \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) \leq \rho_{tr}^{bid,4}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,5}(t) = Q_{lc}^{bid}(t), Q_{tr}^{clear,5}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear,5}(t)\} \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) > \rho_{tr}^{bid,4}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,5}(t) = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear,5}(t)\}, Q_{tr}^{clear,5}(t) = Q_{tr}^{bid}(t) \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) \leq \rho_{tr}^{bid,3}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,6}(t) = Q_{lc}^{bid}(t), Q_{tr}^{clear,6}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear,6}(t)\} \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) > \rho_{tr}^{bid,3}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,6}(t) = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear,6}(t)\}, Q_{tr}^{clear,6}(t) = Q_{tr}^{bid}(t) \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) \leq \rho_{tr}^{bid,2}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,7}(t) = Q_{lc}^{bid}(t), Q_{tr}^{clear,7}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear,7}(t)\} \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) > \rho_{tr}^{bid,2}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,7}(t) = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear,7}(t)\}, Q_{tr}^{clear,7}(t) = Q_{tr}^{bid}(t) \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) \leq \rho_{tr}^{bid,1}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,8}(t) = Q_{lc}^{bid}(t), Q_{tr}^{clear,8}(t) = \min\{Q_{tr}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{lc}^{clear,8}(t)\} \\ \text{if } \rho_{lc}^{bid,Ro}(t) > \rho_{tr}^{bid,1}(t), \text{ then } Q_{lc}^{clear,8}(t) = \min\{Q_{lc}^{bid}(t), Q_{DM}(t) - Q_{tr}^{clear,8}(t)\}, Q_{tr}^{clear,8}(t) = Q_{tr}^{bid}(t) \end{cases} \quad (A2)$$

式中：与 A1 中 $\rho_{clear}^i (i \in [1,8], i \in N)$ 含义类似， $Q_{lc}^{clear,i}, Q_{tr}^{clear,i} (i \in [1,8], i \in N)$ 分别对应正文表 3 中 8 种不同策略选择下低碳集群、传统集群成交电量。

根据上述不同情况下的市场成交电量与成交电价，计算不同策略选择下各市场主体的收益情况。两类发电群体收益情况具体计算公式如(A3)所示：

$$\begin{cases}
\alpha_1(t) = [\rho_{\text{clear}}^1(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{lc}}^{\text{clear},1}(t) - \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{lc}}^{\text{clear},1}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{lc}}^{\text{limit}}(t)] \\
\beta_1(t) = [\rho_{\text{clear}}^1(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{clear},1}(t) - \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{tr}}^{\text{clear},1}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{tr}}^{\text{limit}}(t)] - \theta \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{bid,limit}}(t) \\
\alpha_2(t) = [\rho_{\text{clear}}^2(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{lc}}^{\text{clear},2}(t) \\
\beta_2(t) = [\rho_{\text{clear}}^2(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{clear},2}(t) - \theta \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{bid,limit}}(t) \\
\alpha_3(t) = [\rho_{\text{clear}}^3(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{lc}}^{\text{clear},3}(t) - \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{lc}}^{\text{clear},3}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{lc}}^{\text{limit}}(t)] \\
\beta_3(t) = [\rho_{\text{clear}}^3(t) - C_{\text{tr}}(t)] \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{clear},3}(t) - \pi_{\text{tr}} \cdot \max[0, Q_{\text{tr}}^{\text{clear},3}(t) \cdot \lambda_{\text{tr}} - E_{\text{tr}}^{\text{limit}}(t)] \\
\alpha_4(t) = [\rho_{\text{clear}}^4(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{lc}}^{\text{clear},4}(t) \\
\beta_4(t) = [\rho_{\text{clear}}^4(t) - C_{\text{tr}}(t)] \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{clear},4}(t) \\
\alpha_5(t) = [\rho_{\text{clear}}^5(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{lc}}^{\text{clear},5}(t) - \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{lc}}^{\text{clear},5}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{lc}}^{\text{limit}}(t)] \\
\beta_5(t) = [\rho_{\text{clear}}^5(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{clear},5}(t) - \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{tr}}^{\text{clear},5}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{tr}}^{\text{limit}}(t)] - \theta \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{bid,limit}}(t) \\
\alpha_6(t) = [\rho_{\text{clear}}^6(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{lc}}^{\text{clear},6}(t) \\
\beta_6(t) = [\rho_{\text{clear}}^6(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{clear},6}(t) - \theta \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{bid,limit}}(t) \\
\alpha_7(t) = [\rho_{\text{clear}}^7(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{lc}}^{\text{clear},7}(t) - \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{lc}}^{\text{clear},7}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{lc}}^{\text{limit}}(t)] \\
\beta_7(t) = [\rho_{\text{clear}}^7(t) - C_{\text{tr}}(t)] \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{clear},7}(t) - \pi_{\text{tr}} \cdot \max[0, Q_{\text{tr}}^{\text{clear},7}(t) \cdot \lambda_{\text{tr}} - E_{\text{tr}}^{\text{limit}}(t)] \\
\alpha_8(t) = [\rho_{\text{clear}}^8(t) - C_{\text{lc}}(t)] \cdot Q_{\text{lc}}^{\text{clear},8}(t) \\
\beta_8(t) = [\rho_{\text{clear}}^8(t) - C_{\text{tr}}(t)] \cdot Q_{\text{tr}}^{\text{clear},8}(t)
\end{cases} \quad (\text{A3})$$

政府碳排放监管部门的社会效益来自发电侧两类发电群体碳排放超出限额部分的罚款，当政府选择不监管时，社会效益为零。不同策略选择下政府碳排放监管部门社会效益情况如(A4)所示：

$$\begin{cases}
\gamma_1(t) = \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{lc}}^{\text{clear},1}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{lc}}^{\text{limit}}(t)] + \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{tr}}^{\text{clear},1}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{tr}}^{\text{limit}}(t)], \gamma_2(t) = 0 \\
\gamma_3(t) = \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{lc}}^{\text{clear},3}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{lc}}^{\text{limit}}(t)] + \pi_{\text{tr}} \cdot \max[0, Q_{\text{tr}}^{\text{clear},3}(t) \cdot \lambda_{\text{tr}} - E_{\text{tr}}^{\text{limit}}(t)], \gamma_4(t) = 0 \\
\gamma_5(t) = \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{lc}}^{\text{clear},5}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{lc}}^{\text{limit}}(t)] + \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{tr}}^{\text{clear},5}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{tr}}^{\text{limit}}(t)], \gamma_6(t) = 0 \\
\gamma_7(t) = \pi_{\text{lc}} \cdot \max[0, Q_{\text{lc}}^{\text{clear},7}(t) \cdot \lambda_{\text{lc}} - E_{\text{lc}}^{\text{limit}}(t)] + \pi_{\text{tr}} \cdot \max[0, Q_{\text{tr}}^{\text{clear},7}(t) \cdot \lambda_{\text{tr}} - E_{\text{tr}}^{\text{limit}}(t)], \gamma_8(t) = 0
\end{cases} \quad (\text{A4})$$

式中：\$(\alpha_1(t), \beta_1(t), \gamma_1(t))\$ 至 \$(\alpha_8(t), \beta_8(t), \gamma_8(t))\$ 分别对应于正文表 3 中低碳集群、传统集群和政府部门不同策略选情况择下 \$t\$ 时刻的收益，即 \$(\alpha_1(t), \beta_1(t), \gamma_1(t))\$ 为低碳集群选择激进型竞价策略，传统集群选择升级改造，政府相关部门监管发电侧碳排放情况下低碳集群、传统集群的收益和政府监管部门的社会效益。\$(\alpha_2(t), \beta_2(t), \gamma_2(t))\$ 至 \$(\alpha_8(t), \beta_8(t), \gamma_8(t))\$ 含义同理可知。\$\lambda_{\text{lc}}\$ 表示低碳集群碳排放系数，即低碳集群每发一度电产生的碳排放数值；\$\lambda_{\text{tr}}\$ 表示传统集群碳排放系数，即传统集群每发一度电产生的碳排放数值；\$\theta\$ 表示传统集群选择设备升级改造时单位容量的升级成本。

附录 B

在 3.2.3 节中，鉴于篇幅限制，未对演化博弈稳定均衡性进行展开分析，在此对于本文所构建的演化博弈场景稳定均衡性进行分析。首先是基于各主体在不同策略选择下的期望收益，然后计算各市场主体的平均期望收益，基于各期望收益计算其复制动态方程，最后根据各主体的复制动态方程和 Lyapunov 稳定性理论的间接法判断各主体在演化博弈中的稳定性。其具体计算公式和过程如下：

1) 市场主体期望收益计算。

根据表3.1，低碳集群选择激进型竞价策略时期望收益 \$E_{\text{lc}}^{\text{Ra}}(t)\$ 为

$$\begin{aligned}
E_{lc}^{Ra}(t) &= y(t) \cdot z(t) \cdot \alpha_1(t) + y(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot \alpha_2(t) + [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot \alpha_3(t) + \\
&\quad [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot \alpha_4(t) = \\
&\quad y(t) \cdot z(t) \cdot [\alpha_1(t) - \alpha_2(t) - \alpha_3(t) + \alpha_4(t)] + y(t) \cdot [\alpha_2(t) - \alpha_4(t)] + \\
&\quad z(t) \cdot [\alpha_3(t) - \alpha_4(t)] + \alpha_4(t)
\end{aligned} \tag{B1}$$

低碳集群选择保守型竞价策略时期望收益 $E_{lc}^{Ro}(t)$ 为

$$\begin{aligned}
\bar{Q}_{lc}^{clear}(t) &= x(t) \cdot y(t) \cdot z(t) \cdot Q_{lc}^{clear,1}(t) + x(t) \cdot y(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot Q_{lc}^{clear,2}(t) + \\
&\quad x(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot Q_{lc}^{clear,3}(t) + x(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot Q_{lc}^{clear,4}(t) + \\
&\quad [1 - x(t)] \cdot y(t) \cdot x(t) \cdot Q_{lc}^{clear,5}(t) + [1 - x(t)] \cdot y(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot Q_{lc}^{clear,6}(t) + \\
&\quad [1 - x(t)] \cdot [1 - y(t)] \cdot z(t) \cdot Q_{lc}^{clear,7}(t) + \\
&\quad [1 - x(t)] \cdot [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot Q_{lc}^{clear,8}(t) + \\
&\quad [1 - y(t)] \cdot [1 - z(t)] \cdot \alpha_8(t) = \\
&\quad y(t) \cdot z(t) \cdot [\alpha_5(t) - \alpha_6(t) - \alpha_7(t) + \alpha_8(t)] + y(t) \cdot [\alpha_6(t) - \alpha_8(t)] + \\
&\quad z(t) \cdot [\alpha_7(t) - \alpha_8(t)] + \alpha_8(t)
\end{aligned} \tag{B2}$$

低碳集群平均期望 $\bar{E}_{lc}(t)$ 为

$$\bar{E}_{lc}(t) = x(t) \cdot E_{lc}^{Ra}(t) + [1 - x(t)] \cdot E_{lc}^{Ro}(t) \tag{B3}$$

2) 复制动态方程计算。

低碳集群复制动态微分方程为

$$\begin{aligned}
F(x) &= \frac{dx}{dt} = x(t) \cdot [E_{lc}^{Ra}(t) - \bar{E}_{lc}(t)] = x(t) \cdot [1 - x(t)] \cdot [E_{lc}^{Ra}(t) - E_{lc}^{Ro}(t)] = \\
&\quad x(t) \cdot [1 - x(t)] \cdot \left\{ \begin{aligned} &[\alpha_1(t) - \alpha_2(t) - \alpha_3(t) + \alpha_4(t) - \alpha_5(t) + \alpha_6(t) + \alpha_7(t) - \alpha_8(t)] \cdot y(t) \cdot z(t) + \\ &[\alpha_2(t) - \alpha_4(t) - \alpha_6(t) + \alpha_8(t)] \cdot y(t) + [\alpha_3(t) - \alpha_4(t) - \alpha_7(t) + \alpha_8(t)] \cdot z(t) \\ &+ \alpha_4(t) - \alpha_8(t) \end{aligned} \right\} = \\
&\quad x(t) \cdot [1 - x(t)] \cdot [A_1(t) \cdot y(t) \cdot z(t) + A_2(t) \cdot y(t) + A_3(t) \cdot z(t) + A_4(t)]
\end{aligned} \tag{B4}$$

同理可以求出传统集群复制动态者微分方程为

$$\begin{aligned}
F(y) &= \frac{dy}{dt} = y(t) \cdot [E_{tr}^{Up}(t) - \bar{E}_{tr}(t)] = y(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot [E_{tr}^{Up}(t) - E_{tr}^{Ma}(t)] = \\
&\quad y(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot \left\{ \begin{aligned} &[\beta_1(t) - \beta_2(t) - \beta_5(t) + \beta_6(t) - \beta_3(t) + \beta_4(t) + \beta_7(t) - \beta_8(t)] \cdot x(t) \cdot z(t) + \\ &[\beta_2(t) - \beta_6(t) - \beta_4(t) + \beta_8(t)] \cdot x(t) + [\beta_5(t) - \beta_6(t) - \beta_7(t) + \beta_8(t)] \cdot z(t) \\ &+ \beta_6(t) - \beta_8(t) \end{aligned} \right\} = \\
&\quad y(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot [B_1(t) \cdot x(t) \cdot z(t) + B_2(t) \cdot x(t) + B_3(t) \cdot z(t) + B_4(t)]
\end{aligned} \tag{B5}$$

式中： $E_{tr}^{Up}(t)$ 表示传统集群升级改造期望收益； $E_{tr}^{Ma}(t)$ 表示传统集群维持现状期望收益； $\bar{E}_{tr}(t)$ 表示传统集群平均期望收益。

以及政府碳排放监管部门复制动态者微分方程为

$$\begin{aligned}
F(z) &= \frac{dz}{dt} = z(t) \cdot [E_{gov}^Y(t) - \bar{E}_{gov}(t)] = z(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot [E_{gov}^Y(t) - E_{gov}^N(t)] = \\
&\quad z(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot \left\{ \begin{aligned} &[\gamma_1(t) - \gamma_3(t) - \gamma_5(t) + \gamma_7(t) - \gamma_2(t) + \gamma_4(t) + \gamma_6(t) - \gamma_8(t)] \cdot x(t) \cdot y(t) + \\ &[\gamma_3(t) - \gamma_7(t) - \gamma_4(t) + \gamma_8(t)] \cdot x(t) + [\gamma_5(t) - \gamma_7(t) - \gamma_6(t) + \gamma_8(t)] \cdot y(t) \\ &+ \gamma_7(t) - \gamma_8(t) \end{aligned} \right\} = \\
&\quad z(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot [C_1(t) \cdot x(t) \cdot y(t) + C_2(t) \cdot x(t) + C_3(t) \cdot y(t) + C_4(t)]
\end{aligned} \tag{B6}$$

式中： $E_{gov}^Y(t)$ 表示政府部门针对发电侧碳排放进行监管期望社会效益； $E_{gov}^N(t)$ 表示政府部门不监管发电侧碳排放期望社会效益； $\bar{E}_{gov}(t)$ 表示政府部门平均期望社会效益。

3) 演化博弈均衡性分析。

令 $F(x) = F(y) = F(z) = 0$ ，可解得其在三维空间 $N\{(x, y, z) | 0 \leq x, y, z \leq 1\}$ 上的局部均衡点。多群体多策略演化博弈的均衡稳定性只在其纯策略处取得，即 x, y, z 至少存在一个等于 0,1。显然(0,0,0)、(0,0,1)、(0,1,0)、(0,1,1)、(1,0,0)、(1,0,1)、(1,1,0)、(1,1,1)均为其局部均衡点，且解得的其他局部均衡点均为混合策略，因此只需讨论这 8 个点的渐近稳定性，其余均为非渐近稳定状态。同理根据 Lyapunov 稳定性理论的间接法判断，复制者动态微分方程组的 Jacobi 矩阵如式(3.22)及式(3.23)所示。

$$J_{rd} = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(x)}{\partial x} & \frac{\partial F(x)}{\partial y} & \frac{\partial F(x)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} & \frac{\partial F(y)}{\partial y} & \frac{\partial F(y)}{\partial z} \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} & \frac{\partial F(z)}{\partial y} & \frac{\partial F(z)}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (B7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial F(x)}{\partial x} = [1 - 2 \cdot x(t)] \cdot [A_1(t) \cdot y(t) \cdot z(t) + A_2(t) \cdot y(t) + A_3(t) \cdot z(t) + A_4(t)] \\ \frac{\partial F(x)}{\partial y} = x(t) \cdot [1 - x(t)] \cdot [A_1(t) \cdot z(t) + A_2(t)] \\ \frac{\partial F(x)}{\partial z} = x(t) \cdot [1 - x(t)] \cdot [A_1(t) \cdot y(t) + A_3(t)] \\ \frac{\partial F(y)}{\partial x} = y(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot [B_1(t) \cdot z(t) + B_2(t)] \\ \frac{\partial F(y)}{\partial y} = [1 - 2 \cdot y(t)] \cdot [B_1(t) \cdot x(t) \cdot z(t) + B_2(t) \cdot x(t) + B_3(t) \cdot z(t) + B_4(t)] \\ \frac{\partial F(y)}{\partial z} = y(t) \cdot [1 - y(t)] \cdot [B_1(t) \cdot x(t) + B_3(t)] \\ \frac{\partial F(z)}{\partial x} = z(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot [C_1(t) \cdot y(t) + C_2(t)] \\ \frac{\partial F(z)}{\partial y} = z(t) \cdot [1 - z(t)] \cdot [C_1(t) \cdot x(t) + C_3(t)] \\ \frac{\partial F(z)}{\partial z} = [1 - 2 \cdot z(t)] \cdot [C_1(t) \cdot x(t) \cdot y(t) + C_2(t) \cdot x(t) + C_3(t) \cdot y(t) + C_4(t)] \end{cases} \quad (B8)$$

代入具体参数，可得 8 个局部均衡点处的 Jacobi 矩阵求解分别如式(B9)至式(B16)所示。

$$J_{rd}|_{(0,0,0)} = \begin{pmatrix} A_4(t) & 0 & 0 \\ 0 & B_4(t) & 0 \\ 0 & 0 & C_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_4(t) - \alpha_8(t) & 0 & 0 \\ 0 & \beta_6(t) - \beta_8(t) & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_7(t) - \gamma_8(t) \end{pmatrix} \quad (B9)$$

$$J_{rd}|_{(0,0,1)} = \begin{pmatrix} A_3(t) + A_4(t) & 0 & 0 \\ 0 & B_3(t) + B_4(t) & 0 \\ 0 & 0 & -C_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_3(t) - \alpha_7(t) & 0 & 0 \\ 0 & \beta_5(t) - \beta_7(t) & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma_7(t) + \gamma_8(t) \end{pmatrix} \quad (B10)$$

$$J_{rd}|_{(0,1,0)} = \begin{pmatrix} A_2(t) + A_4(t) & 0 & 0 \\ 0 & -B_4(t) & 0 \\ 0 & 0 & C_3(t) + C_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_2(t) - \alpha_6(t) & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_6(t) + \beta_8(t) & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_5(t) - \gamma_6(t) \end{pmatrix} \quad (B11)$$

$$J_{rd}|_{(0,1,1)} = \begin{pmatrix} A_1(t) + A_2(t) + A_3(t) + A_4(t) & 0 & 0 \\ 0 & -[B_3(t) + B_4(t)] & 0 \\ 0 & 0 & -[C_3(t) + C_4(t)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_1(t) - \alpha_5(t) & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_5(t) + \beta_7(t) & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma_5(t) + \gamma_6(t) \end{pmatrix} \quad (B12)$$

$$J_{rd}|_{(1,0,0)} = \begin{pmatrix} -A_4(t) & 0 & 0 \\ 0 & B_2(t) + B_4(t) & 0 \\ 0 & 0 & C_2(t) + C_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha_4(t) + \alpha_8(t) & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2(t) - \beta_4(t) & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3(t) - \gamma_4(t) \end{pmatrix} \quad (B13)$$

$$J_{rd}|_{(1,0,1)} = \begin{pmatrix} -[A_3(t) + A_4(t)] & 0 & 0 \\ 0 & B_1(t) + B_2(t) + B_3(t) + B_4(t) & 0 \\ 0 & 0 & -[C_2(t) + C_4(t)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha_2(t) + \alpha_6(t) & 0 & 0 \\ 0 & \beta_1(t) - \beta_3(t) & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma_3(t) + \gamma_4(t) \end{pmatrix} \quad (B14)$$

$$J_{rd}|_{(1,1,0)} = \begin{pmatrix} -[A_2(t) + A_4(t)] & 0 & 0 \\ 0 & -[B_2(t) + B_4(t)] & 0 \\ 0 & 0 & C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha_2(t) + \alpha_6(t) & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_2(t) + \beta_4(t) & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_1(t) - \gamma_2(t) \end{pmatrix} \quad (B15)$$

$$J_{rd}|_{(1,1,1)} = \begin{pmatrix} -[A_1(t) + A_2(t) + A_3(t) + A_4(t)] & 0 & 0 \\ 0 & -[B_1(t) + B_2(t) + B_3(t) + B_4(t)] & 0 \\ 0 & 0 & -[C_1(t) + C_2(t) + C_3(t) + C_4(t)] \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\alpha_1(t) + \alpha_5(t) & 0 & 0 \\ 0 & -\beta_1(t) + \beta_3(t) & 0 \\ 0 & 0 & -\gamma_1(t) + \gamma_2(t) \end{pmatrix} \quad (B16)$$

根据 J_{rd} 特征值的正负来逐个分析各局部均衡点成为稳定均衡点的条件, 如表 B1 所示。由表 B1 可知, 8 个局部均衡点在一定条件下均有可能成为稳定均衡点。并且由空间几何关系可知, 每个均衡点均与其在正四面体上相邻的 3 个均衡点互为互斥均衡点。换言之, 市场层面的最优博弈策略即稳定均衡点会因实际参数的取值而在此 8 个局部均衡点中产生。

表 B1 局部均衡点分析
Table B1 Local equilibrium point analysis

局部均衡点坐标	物理意义	稳定均衡条件	互斥均衡点
(0,0,0)	(保守, 维持, 不监管)	$\alpha_4(t) < \alpha_8(t), \beta_6(t) < \beta_8(t), \gamma_7(t) < \gamma_8(t)$	(0,0,1), (0,1,0), (1,0,0)
(0,0,1)	(保守, 维持, 监管)	$\alpha_3(t) < \alpha_7(t), \beta_5(t) < \beta_7(t), \gamma_7(t) > \gamma_8(t)$	(0,0,0), (0,1,1), (1,0,1)
(0,1,0)	(保守, 升级, 不监管)	$\alpha_2(t) < \alpha_6(t), \beta_6(t) > \beta_8(t), \gamma_5(t) < \gamma_6(t)$	(0,0,0), (0,1,1), (1,1,0)
(0,1,1)	(保守, 升级, 监管)	$\alpha_1(t) < \alpha_5(t), \beta_5(t) > \beta_7(t), \gamma_5(t) > \gamma_6(t)$	(0,0,1), (0,1,0), (1,1,1)
(1,0,0)	(激进, 维持, 不监管)	$\alpha_4(t) > \alpha_8(t), \beta_2(t) < \beta_4(t), \gamma_3(t) < \gamma_4(t)$	(0,0,0), (1,0,1), (1,1,0)
(1,0,1)	(激进, 维持, 监管)	$\alpha_2(t) > \alpha_6(t), \beta_1(t) < \beta_3(t), \gamma_3(t) > \gamma_4(t)$	(0,0,1), (1,0,0), (1,1,1)
(1,1,0)	(激进, 升级, 不监管)	$\alpha_2(t) > \alpha_6(t), \beta_2(t) > \beta_4(t), \gamma_1(t) < \gamma_2(t)$	(0,1,0), (1,0,0), (1,1,1)
(1,1,1)	(激进, 升级, 监管)	$\alpha_1(t) > \alpha_5(t), \beta_1(t) > \beta_3(t), \gamma_1(t) > \gamma_2(t)$	(0,1,1), (1,0,1), (1,1,0)

局部均衡点(0,0,0)的实际意义为低碳集群选择保守型竞价策略,传统集群选择维持现状(不升级改造),政府相关部门选择不监管发电侧碳排放时的市场状态,此时各市场主体的策略选择都稳定不再发生变化。其稳定均衡条件 $\alpha_4(t) < \alpha_8(t), \beta_6(t) < \beta_8(t), \gamma_7(t) < \gamma_8(t)$ 表示局部均衡点状态下各市场主体的收益均最大化,任意市场主体策略的改变均无法使该主体自身获得更高的收益。即其他条件不变的情况下低碳集群选择激进型报价时其收益小于保守型报价时的收益($\alpha_4(t) < \alpha_8(t)$),此时即为互斥均衡点(1,0,0);传统集群选择升级改造时的收益小于不升级改造时的收益($\beta_6(t) < \beta_8(t)$),此时即为互斥均衡点(0,1,0);政府相关部门选择监管碳排放时的收益小于不监管碳排放时的收益($\gamma_7(t) < \gamma_8(t)$),此时即为互斥均衡点(0,0,1)。其他各局部均衡点的分析同理。

附录 C

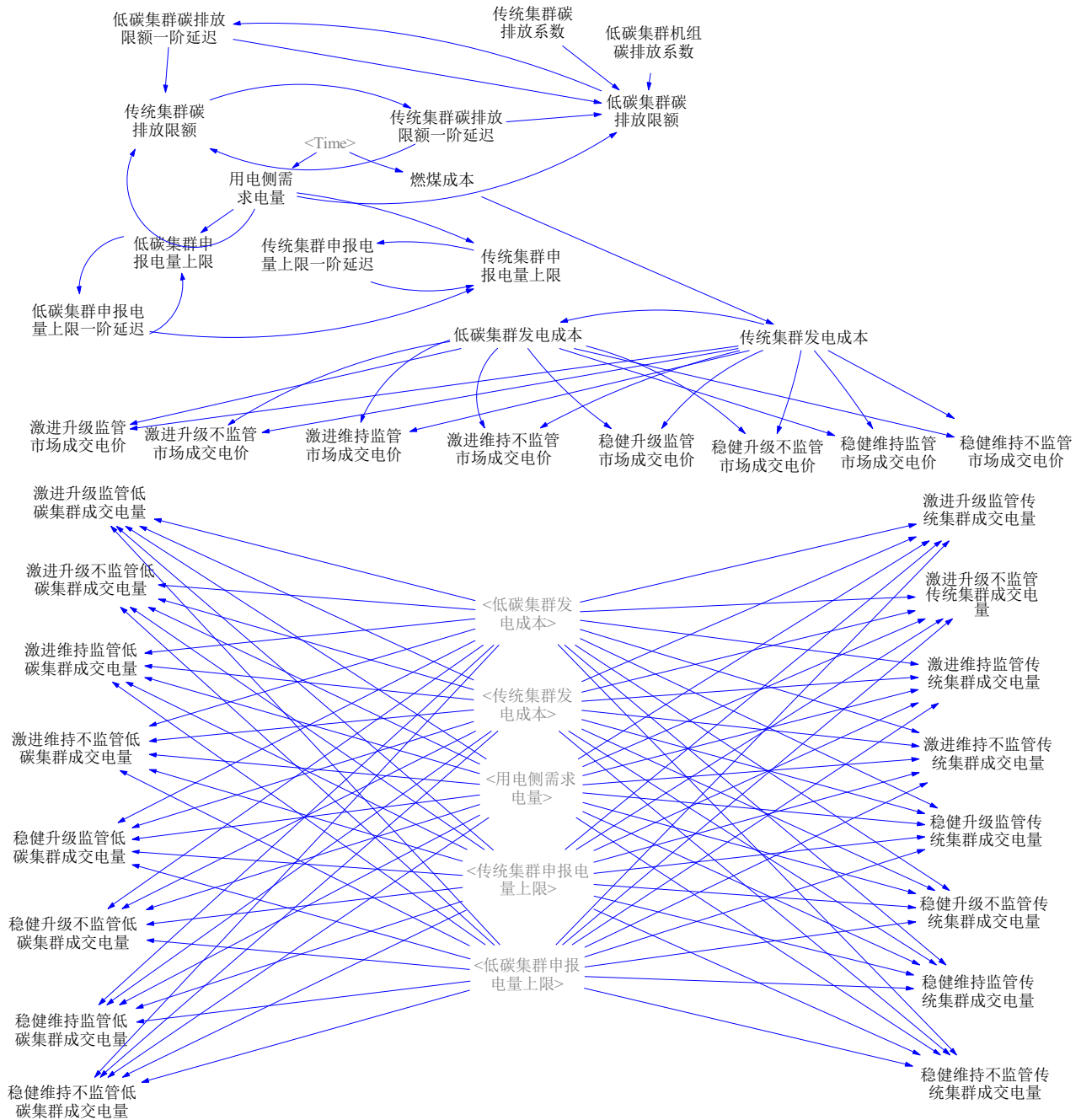


图 C1 电力市场申报成交计算子系统存量流量图

Fig. C1 Stock and flow diagram of the power market bid transaction calculation subsystem

图 C1 中,激进和保守分别表示低碳集群选择激进型竞价策略和保守型竞价策略,升级和维持分别表示传统集群选择升级改造和维持现状,监管和不监管分别代表政府相关部门选择监管发电侧碳排放和不监

管发电侧碳排放。其分别与正文表 3 中的 8 种情况相对应，下文同理。

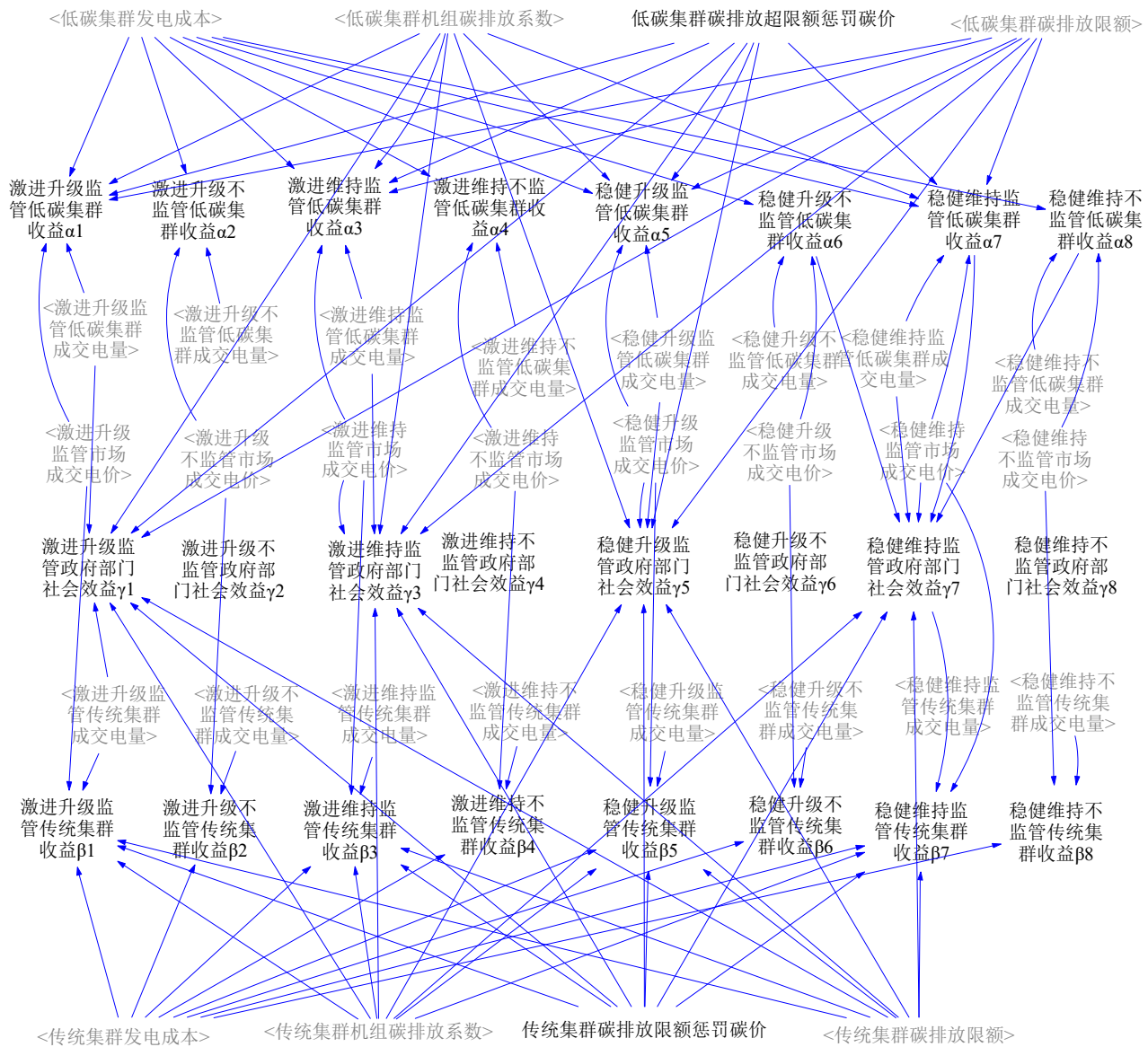


图 C2 电力市场博弈主体收益计算子系统存量流量图

Fig. C2 Stock and flow diagram of the power market game participant revenue calculation subsystem

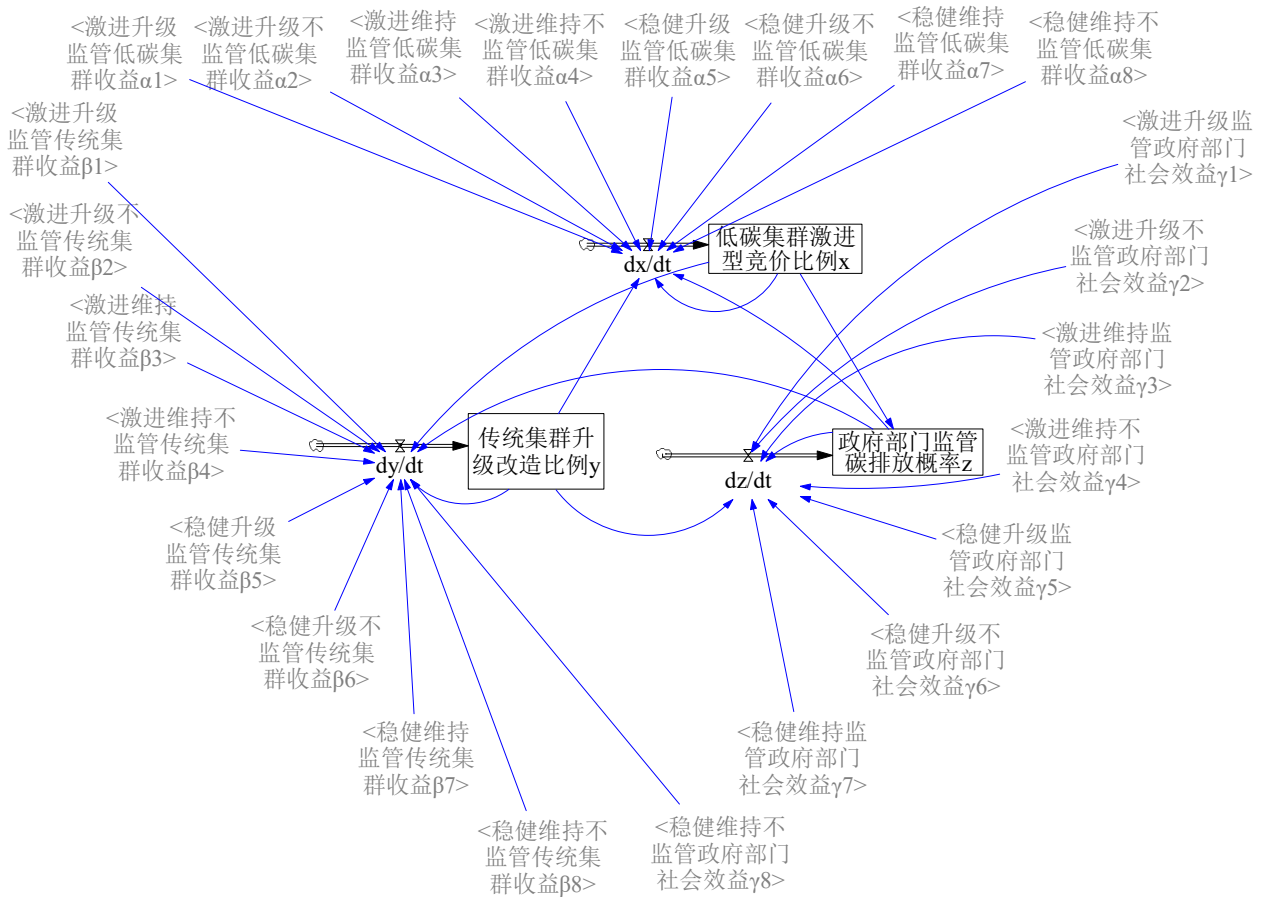


图 C3 电力市场发电侧演化博弈子系统存量流量图

Fig. C3 Stock and flow diagram of the power market generation-side evolutionary game subsystem

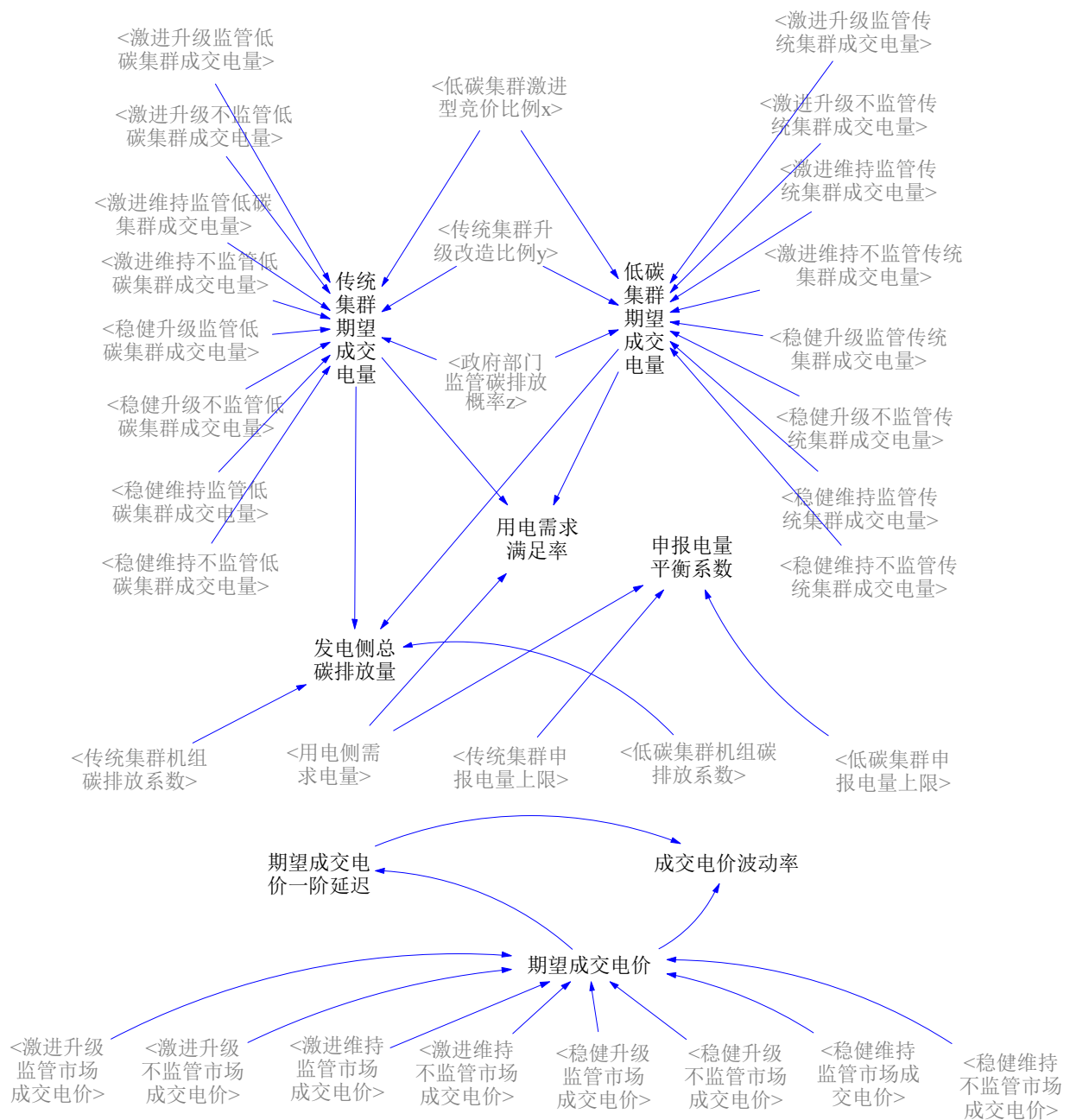


图 C4 电力市场运行态势指标计算子系统存量流量图

Fig. C4 Stock and flow diagram of the power market operation status indicator calculation subsystem