



浙江大学 电气工程学院
COLLEGE OF ELECTRICAL ENGINEERING, ZHEJIANG UNIVERSITY



电力市场和碳市场的交互作用

文福拴, IEEE Fellow

浙江大学电气工程学院/浙江大学海南研究院 教授

深圳市人工智能与机器人研究院 主任研究员

Energy Conversion and Economics (SPERI, IET, Wiley) 主编

《电力系统自动化》 副主编

致谢



本报告的部分内容系国网电力科学研究院薛禹胜老师委托的科研项目的工作，与香港中文大学(深圳) 赵俊华教授、华南理工大学余涛教授、华北电力大学刘念教授的研究团队一起合作完成。

薛禹胜老师确定了项目研究架构和研究内容，黄杰教授级高工作为负责专家参与了项目研究的全过程。特此致谢。

新型电力系统：概念的演变



- 2021年3月16日，中央财经委员会第九次会议指出“构建以**新能源为主体**的新型电力系统”，但没有解释“**新能源为主体**”的含义、也没有给出实现“新型电力系统”的时间计划。对于“新能源为主体”，一般理解为：以年度计来自新能源的发电量要占到总发电量的50%以上。（水电、核电不属于新能源）
- 2022 年 4月2日，国家能源局、科学技术部印发了《“十四五”能源领域科技创新规划》，其中指出：“引领**新能源占比逐渐提高**的新型电力系统建设”。

能源互联网：不同的理解



- 2020年3月，国家电网公司确定战略目标：“建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业”
- 国外和国内学术界对“能源互联网”的理解：不同类型的能源（电、气、热等）通过能源中心 (energy hub) 变换和互联而实现的综合能源系统
- 国家电网公司所谓的“能源互联网”：含新能源发电的电力系统。
- 刘振亚时代的定义：能源互联网=智能电网+特高压输电+新能源发电

需求侧响应 与 辅助服务：区别与联系



- 需求侧响应可以采用行政手段获取，如采用邀约方式，但这样很难确定适当的价格水平；也可以采用市场竞价方式。
- 在需求侧可以参与电力市场特别是辅助服务市场的情况下，按用户响应的速度和容量，可考虑参与不同类型的辅助服务（调频、调峰、备用等）。
- 不需要同时研究 需求侧响应 和 辅助服务 的获取机制。

“源网荷储” vs “源网荷+储”



- “源网荷储”这种说法在国内电力系统非常流行，在项目名称和学术论文中经常出现。
- 国际上很少有人这样讲（中国大陆学者投稿的文章中比较多见）。
- 这种说法不合适，因为“储”和“源网荷”不能并列。
- “源网荷”都是电力系统的环节。
- “储”是电力系统中的设备，可以应用于“源网荷”各个环节。
- “源网荷+储”更为合适。

合同分解：中国特色的研究问题



- 在国内电力（“电量”）市场环境下，“合同分解”是个重要问题。
 - 涉及到合同分解的机构可能为电力交易中心或中调/系统控制中心，目前多数由电力市场交易机构负责。
 - 在国外电力市场中不存在合同分解问题。
- 国内的电力市场长期以来是“**电量市场**”，不是“**电力市场**”。
 - 国外的电力市场改革从一开始就是面向建立“**电力市场**”的。
 - 在国内，则首先搞年度、季度、月度电量竞争，这就导致合同分解问题
 - 如何适当地把长期合同分解到日前市场是个重要问题，因为日前市场电价是波动的，分解结果对长期合同双方的利益可能有明显影响
 - 在零售侧刚放开时，国内短时间内就注册了上万家电力零售公司，这在相当程度上是因为“**电量市场**”。
 - 在国外的**电力**市场中，电力零售公司的数量很有限。
 - 在真正的**电力**市场环境下，电力零售公司从事的业务具有很高的技术含量。

调峰市场：中国特色的辅助服务品种



- 在国内的电力辅助服务市场中，“调峰市场”是个主要类型
 - 国家电力监管委员会2006年发布了“并网发电厂辅助服务管理暂行办法”，要求对于发电公司提供的某些类型的辅助服务给予经济补偿；其中明确了辅助服务的品种，包括“调峰”辅助服务。
- 在国外的电力辅助服务市场中，不存在“调峰市场”。
 - 没有必要；
 - 无法合理确定“调频市场”、“调峰市场”和“备用市场”之间的适用区间，三个市场存在重叠。

新型市场 以及 不同市场之间的边界确定



1. 新型市场：**惯性市场**（惯性产品的定义、需求量的确定、提供方和需求方、交易机制）；**灵活调节市场**（已经在美国加州和中部ISO采用）
2. 针对新型电力系统环境下的容量市场设计（化石能源机组承担系统调节任务）：应该通过容量市场收回多大比例的投资成本？容量市场机制是否针对所有类型的发电机组一视同仁？
3. 不同类型市场之间边界的适当确定（不同类型市场之间不能有重叠边界要清晰，但可以衔接）：调频市场，调峰市场，备用市场，惯性市场，灵活调节市场

电力市场与碳市场联合出清的可能性



1. 电力市场是离散市场；
2. 碳市场是连续市场；
3. 电力市场和碳市场二者独立运作，**不存在联合出清的可能性**；
4. “电碳协同”指两个市场的共同参与主体（如发电公司）分别在电力市场和碳市场中进行报价，电力市场与碳市场出清结果通过市场主体的报价行为相互影响，呈现一定程度的协同特征。



浙江大学 电气工程学院
COLLEGE OF ELECTRICAL ENGINEERING, ZHEJIANG UNIVERSITY

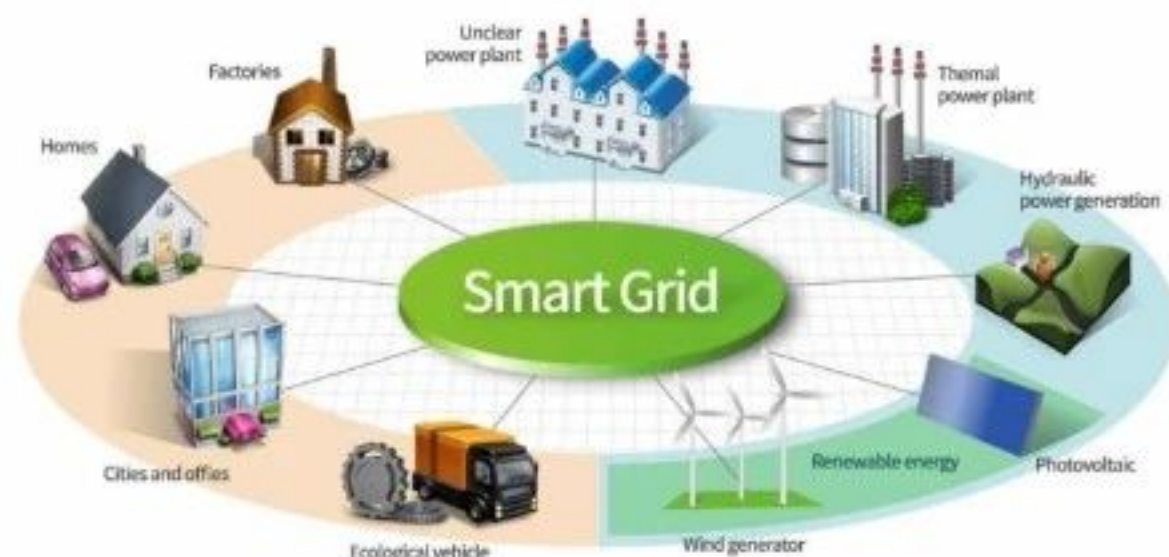


提纲

1. 电力行业与“30·60”双碳目标
2. 研究现状
3. 研究问题与实施方案



1. 电力行业与“30·60”双碳目标



影响供需

影响价格



- 电力行业作为典型的能源密集型领域和重要的温室气体排放源，是各国碳市场的重点管控对象，也是我国首个进入碳市场的行业。全国碳排放权交易市场（上海）于2021年7月16日启动。
- 我国电力市场建设仍在进行中。在新型电力系统建设背景下，以风电和光伏发电为代表的间歇性可再生能源发电的渗透率会快速增加，这对电力市场和碳市场的设计和运行会产生明显的影响。
- 系统研究和分析电力市场和碳市场之间的交互影响，以及这两个市场的参与者的相关策略是实现新型电力系统和落实国家“30·60”双碳目标必要且紧迫的任务。
- 我国的电力市场改革已经开展了20多年（1997年启动），现在还没有成熟运行的电力市场（国外的电力市场多数在电力工业市场化改革启动后5年内完成投运）

2. 研究现状



- 碳排放价格在电力市场中的**成本转嫁**问题
- 碳市场对电力**市场集中度**的影响
- 碳市场的建设对电力市场**需求响应**的作用
- 碳市场对电力市场的**投资**（尤其是**民营投资**）**引导**问题
-

- 电力行业在碳市场中的**计量方法**
- 电力市场**容量**对碳价格的影响
- 电力市场价格对碳价格的**反向影响机制**
- 电力市场中发电公司**集中度**对碳价格的影响
-

- 应用背景以**欧洲国家**为主
- 国内目前以**理论研究**为主



宏观经济理论建模

可计算一般均衡模型 (CGE)

动态可计算一般均衡模型 (DCGE)

过多理论假设与现实不符
部分模块简化过度

基于代理的
机器学习模型

有监督学习(supervised learning)

强化学习(reinforcement learning)

受训练和测试数据集限制
有时难以收敛, 可解释性差
(ChatGPT 的启发?)

实验仿真的
建模方法

经济学实验

计算机仿真

混合实验

耗时, 对人员专业性要求较强
仿真对象通常基于理论建模

方法种类

具体模型

各自问题

□ 在“30·60目标”战略背景下，碳市场具有举足轻重的地位。电力企业特别是发电企业是碳市场重要参与者。发电企业要参与电力市场、碳市场、燃料市场等多个市场的复杂交易活动。

□ 一方面，需要考虑不同时间尺度、不同交易对象的多市场间的相互耦合，问题非常复杂；另一方面，多种不确定因素的存在使得对复杂交易进行决策在建模和计算方面都非常困难。

因此，要协调电力企业特别是发电企业在不同性质、不同时间尺度又相互交错的多个市场中的决策达到综合效益最优是一个非常重要的研究问题。

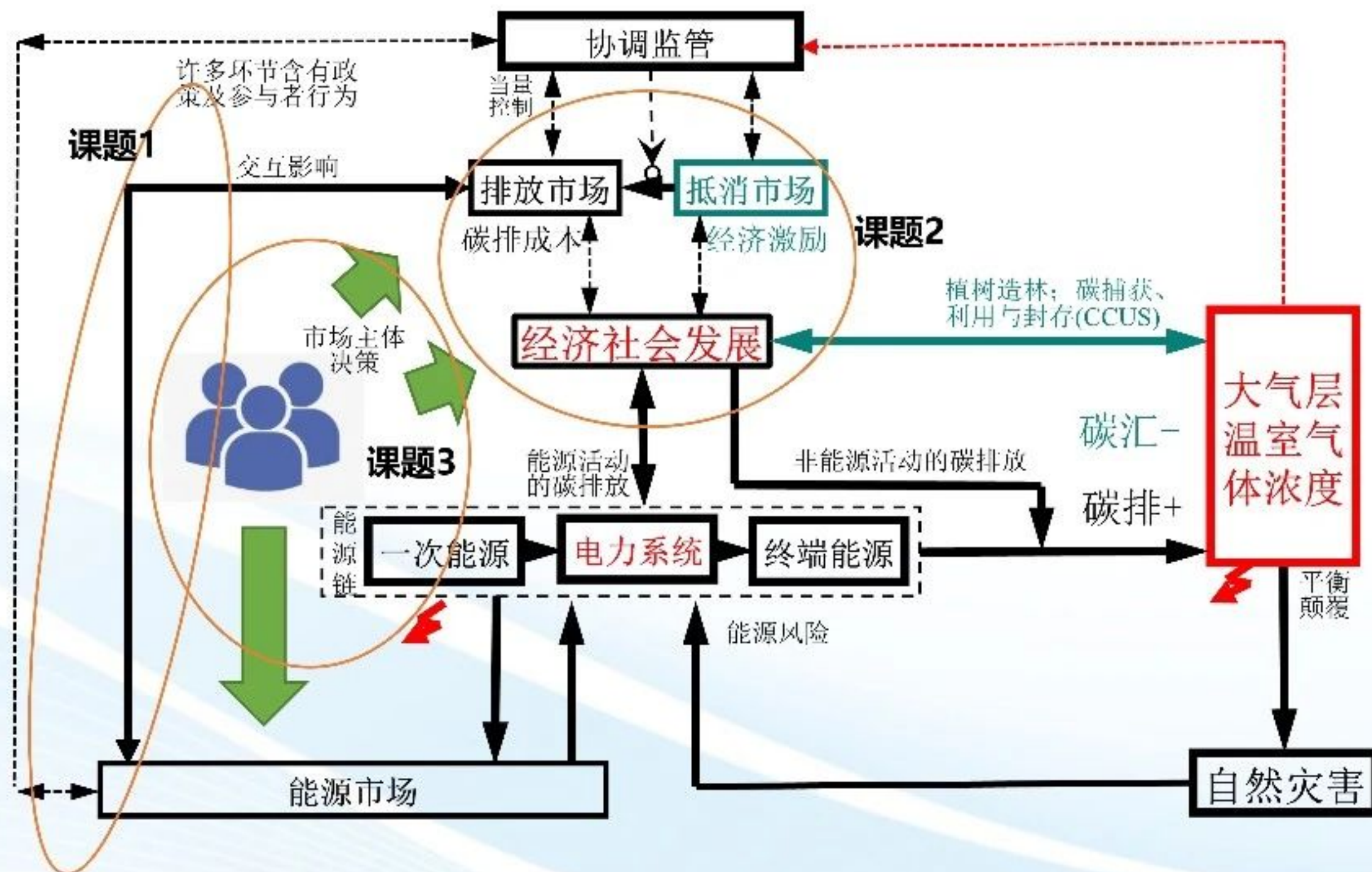


3. 研究问题与实施方案



• 研究项目：碳市场及其与电力市场的交互机理及协同优化技术

- **研究问题1** 研究碳排放市场、碳抵消市场与电力市场间的交互机理
- **研究问题2** 研究基于人机混合实验的碳市场-电力市场-实体经济联合仿真中的行为分析方法，并研究多市场间的政策交互影响
- **研究问题3** 研究多市场间的协同机制与市场主体的多阶段决策方法



上图取自薛禹胜老师的学术报告

- 课题1: **碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场之间的数据分析以及多市场动态经由微观行为的宏观交互机理研究**;
- 课题2: **对理性行为统计建模, 对非理性行为设置扰动, 通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响**;
- 课题3: **发电企业在多个市场中的协同决策, 多个市场间的机制协同, 以及不确定因素的影响研究**

3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析

主要研究内容

- (1) 研究同时建立碳排放市场和绿证市场的**必要性与可行性**，以及这两个市场之间可能存在的**重叠效应**；
- (2) 研究电力市场（计及发电权交易、辅助服务市场、需求响应市场等）、碳市场与实体经济间的**耦合关系**；基于行为仿真研究电力市场与碳市场间的**交互影响**；基于可计算一般均衡（Computational General Equilibrium, CGE）**模型**建模电力-碳市场对实体经济的影响，对不同政策、外部市场风险、系统风险等对这些市场及市场主体博弈行为的冲击进行建模分析；
- (3) 考察不同类型电力市场与碳市场间的**跨市场价格传导机制**。

研究目标

- 通过碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场之间的数据分析，厘清多市场动态经由微观行为的宏观交互机理。
- 得到电力市场与碳市场间交互影响与交互机理的研究结果。

- 为电力市场、碳市场与经济系统（钢铁、建材、石化等纳入碳市场的实体行业）分别建立仿真模型
- 对电力市场和碳市场，分别根据市场规则建立市场出清模型；对经济系统构建动态CGE模型
- 电力与碳市场中的市场主体行为，将基于课题2中的人机混合仿真产生
- 监管扰动将主要通过改变电力与碳市场出清模型中的市场规则参数设定（如配额分配方法、价格上下限等）进行考虑
- 外部经济环境的扰动可通过修改动态CGE模型中的外生变量（如进出口、国际国内资金成本等）进行考虑



3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析



- 基于市场及交易数据，通过市场主体聚类，专家问卷访谈，知识提取等方法，获得典型交易行为模式

3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析

动态CGE模型

- 将传统CGE模型与差分方程组结合，提出动态CGE模型，为除电力以外参与碳市场的7大实体行业（石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、航空）建模
- 对每个行业，其生产者/消费者行为均采用效益/效用最大化模型
- 将生产者与消费者模型的解与区域贸易及市场出清模型联立可将CGE模型转化为代数方程组
- 对部分系统变量（如资本存量、劳动力、土地、资本效率等），利用差分方程组构建其动态模型，并采用数值方法求解，将数值解代入CGE模型的代数方程组中
- 对最终形成的动态CGE模型利用牛顿法求解，可得市场均衡点的动态变化轨迹（轨迹均衡点）

生产者效益最大化模型

$$\begin{aligned} \max: & \pi_{r,j} = p_{r,j} \cdot Q_{r,j} - (\sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i,j} + \sum_v \omega_{r,v} \cdot V_{r,v,j}) - T_{r,j}^z \\ \text{s. t. } & Q_{r,j} = LEO_{1rj} \{ M_{r,j}, R_{r,j}, CES_{2vae} [CES_{3va} (K_{r,j}, L_{r,j}, CES_{3e} (ele_{r,j}, CES_{4fos} (coal_{r,j}, gas_{r,j}, oil_{r,j})))] \} \end{aligned}$$

消费者效用最大化模型

$$\begin{aligned} \max: & DEM_r^d = A_r^d \cdot \prod_i (X_{r,i}^d)^{\alpha_{r,i}^d} \\ \text{s. t. } & \sum_{v=1}^V (\omega_{r,v} \cdot V_{r,v}) + \sum_j (pld_r \cdot QLAND_{r,j}) + \sum_{s,j} (p_{r,s}^e \cdot QRES_{r,j,s}) + T_r^{cab} - T_r^d = \sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i}^p + S_r^p \\ & T_r^d + \sum_j T_{r,j}^z + \sum_j T_{r,j}^m = \sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i}^e + S_r^e \end{aligned}$$

区域贸易与市场出清模型

$$\begin{aligned} X_{f,i} &= CES_{s1} \{ D_{f,f,i}, CES_{s2} [F_{1,f,i}, \dots, F_{f',f,i}, CES_{s3} (P_{1,f,i}, \dots, P_{p',f,i})] \} \\ X_{p,i} &= CES_{s1} \{ F_{1,p,i}, \dots, F_{f,p,i}, CES_{s2} [D_{p,p,i}, CES_{s3} (P_{1,p,i}, \dots, P_{p',p,i})] \} \\ Q_{r,i} &= \sum_d X_{r,i}^d + \sum_f F_{r,f,i} + \sum_p P_{r,p,i} - \sum_f F_{f,r,i} - \sum_p P_{p,r,i} - STK_{r,i} \end{aligned}$$

解析解

解析解

联立

动态CGE模型（代数方程组）

牛顿法

轨迹均衡点

数值解

状态变量动态模型（差分方程组）

3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析 动态CGE模型

- CGE模型根据基准年的“投入产出表”来构建社会核算矩阵（Social Accounting Matrix, SAM），再通过SAM确定CGE模型中的经济变量（e.g. 市场劳动力总量、居民年度总消费、各产业年度总产量...）并以此求解模型中的参数（e.g. Leontief 生产函数中的比例系数、Cobb-Douglas函数中的常替代弹性系数）。

投入	产出	产 品 部 门	中 间 使 用								
			农业	林业	畜牧业	渔业	农、林、牧、 渔服务业	煤炭开采和洗 选业	石油和天然气 开采业	黑色金属矿采 选业	
产品部门		代码	010001	020002	030003	040004	050005	060006	070007	080008	
中 间 投 入	农业	010001	128187.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	林业	020002	4758.71	5338.15	0.00	0.00	0.00	8332.70	0.00	0.00	
	畜牧业	030003	0.00	0.00	311182.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	渔业	040004	0.00	0.00	0.00	17816.97	0.00	0.00	0.00	0.00	
	农、林、牧、渔服务业	050005	1205.07	0.00	0.00	0.00	38778.92	0.00	0.00	0.00	
	煤炭开采和洗选业	060006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	314207.26	27.72	42551.91	
	石油和天然气开采业	070007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71814.38	912.06	0.00	
	黑色金属矿采选业	080008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.30	1873.91	
	有色金属矿采选业	090009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	非金属矿采选业	100010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.90	72.90	7.12	
	农副食品加工业	130111	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	饲料加工业	130112	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
人	植物油加工业	130113	10293.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	制造业	130114	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	皮革及皮革加工业	130115	2485.18	0.00	422805.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	水产品加工业	130116	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	其他食品加工业	130117	0.00	0.00	80916.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	方便食品制造业	140118	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	液体乳及乳制品制造业	140119	0.00	0.00	28782.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	调味品、发酵制品制造业	140220	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	其他食品制造业	140221	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	酒及酒精制造业	150222	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	汇总
		商品	活动	要素		居民	企业	政府 补贴	预算外	政府	国外	资本 账户	存货 变动	
				劳动力	资本									
1	商品		中间 投入			居民 消费			公共部 门自筹 消费	政府 消费	出口	固定资 本形成	存货 净变动	总需求
2	活动	国内 总产出												总产出
3	要素	劳动力	劳动者 报酬											要素 收入
4		资本		资本 报酬										要素 收入
5	居民			劳动 收入	资本 收入	企业的 转移 支付	政府 补贴		政府的 其他 支付	国外 收益				居民 总收入
6	企业				资本 收入									企业 总收入
7	政府补贴		生产 补贴						政府的 补贴 支出					
8	预算外		预算外 收费											预算外 总收入
9	政府	关税	政府 生产税			个人 所得税	企业 直接税				国外 收入	政府的 债务 收入		政府 总收入
10	国外	进口			国外资 本投资 收益					对国外 的支付				外汇 支出
11	资本账户					居民 储蓄	企业 储蓄		预算外 账户 结余	政府 储蓄	国外 净储蓄			总储蓄
12	存货变动											存货 变动		存货 净变动
汇总		总供给	总产出	要素 支出	要素 支出	居民 支出	企业 支出		预算外 支出	政府 支出	外汇 收入	总投资	存货 净变动	

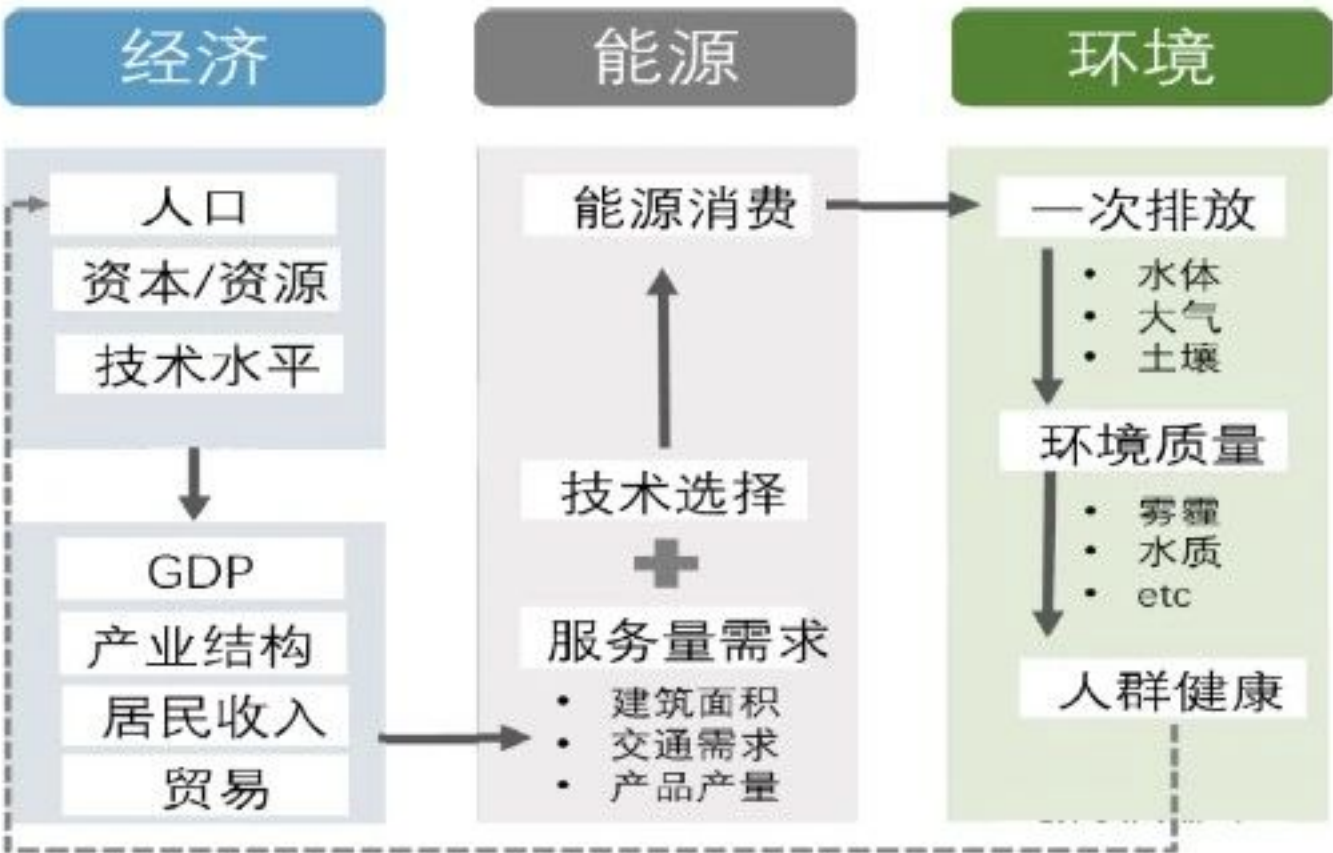
3.1 不同市场间的交互影响



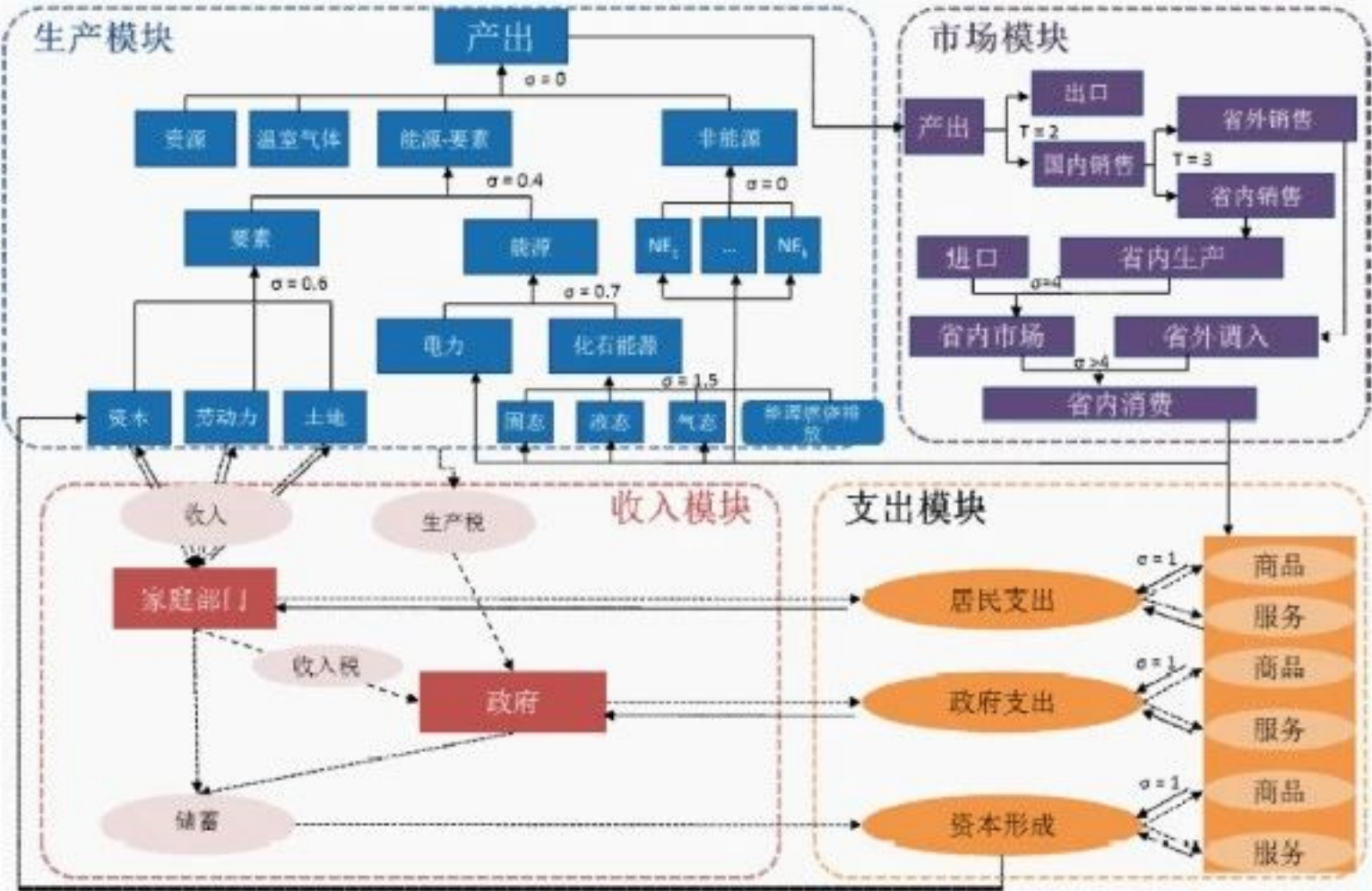
课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析

动态CGE模型

- ❑ 将CGE模型扩展，加入动态模块。
- ❑ 与许多传统CGE模型仅考虑经济相比，改进模型综合考虑了经济、能源和环境三者间的交互关系，其建模逻辑是经济决定能源消费，能源消费产生环境排放，而环境又会影响经济的整体结构和运行。
- ❑ 利用该模型为纳入碳市场的除电力以外的7个工业行业建模。（石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、航空）



改进（动态）CGE 系统建模



改进（动态）CGE 整体结构

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

课题概述

主要研究内容

- (1) 研究典型电力企业（火电、水电、风电、太阳能发电等）参与碳市场的**供需模型**，包括市场**碳配额设定模型**、市场主体**碳计量模型**以及**主体的效用模型**，建立电力企业参与碳市场的理性行为模型，并给出非理性行为的扰动设置；
- (2) 研究对电力市场和碳市场的**联动仿真方法**，建立考虑潮流约束的电力市场仿真模型，以此为基础建立碳流仿真的碳市场模型，应用**人机混合实验**方法对电力-碳市场进行仿真；研究电力市场和碳市场的交互政策和行为博弈；
- (3) 利用CGE模型构建实体经济模型，结合电力-碳市场联动仿真与CGE模型，研究电力-碳市场政策对实体经济的综合影响。

研究目标

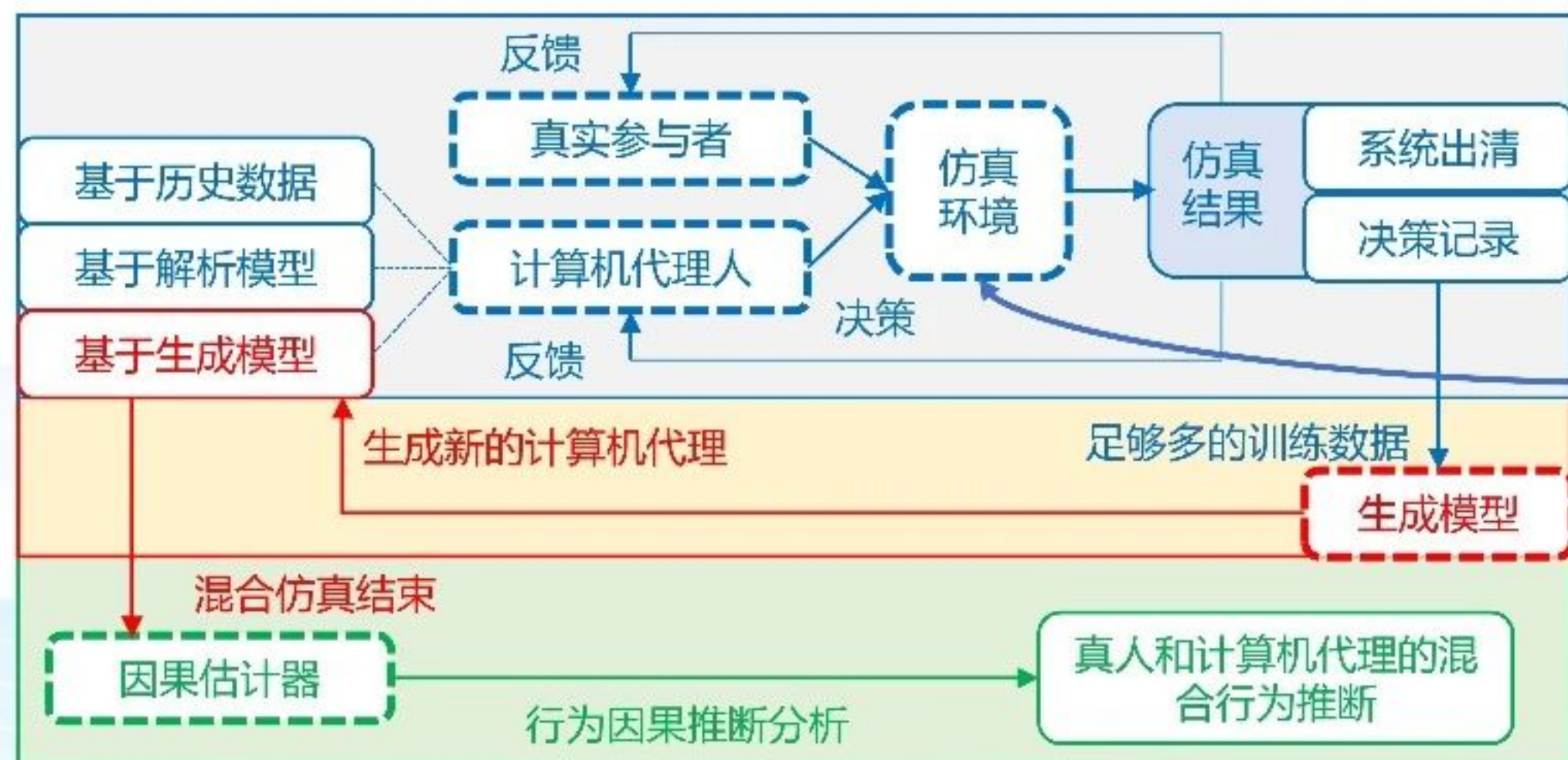
- (1) 提出在碳市场中，电力企业的非理性行为扰动设置方法；建立电力企业参与碳市场的理性行为统计模型；
- (2) 提出实时反馈的人机混合实验的电力市场和碳市场仿真方法；
- (3) 建立基于CGE模型的电力-碳市场对实体经济的综合影响分析方法。

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

仿真方法



- 将人机混合实验与因果分析相结合
- 基于专家知识和历史数据构建因果网络，利用混合实验验证因果关系

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

混合实验方法

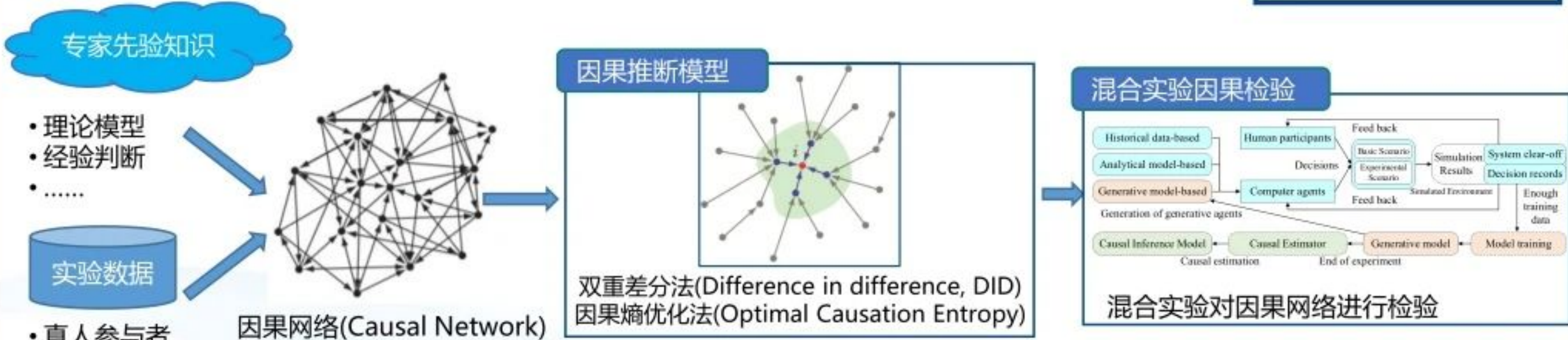
- 分析框架的3个核心模块为：混合仿真、机器学习生成模型和因果分析模型
- 在构建混合仿真环境时，需要对物理系统运行机制和社会系统运行机制给出清晰的定义
- 混合仿真的参与者分为2类，分别是真实参与者和计算机代理
- 对于真实参与者而言，需充分了解实验规则、各自收益（成本）计算方式、各自决策的可行范围和可能出现的结果，并要求其在实验过程中能够秉持认真的态度以最大化任务目标的状态参与实验
- 将计算机代理分为3类：基于历史数据的代理、基于解析模型的代理和基于实验数据由生成模型产生的代理

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

因果推断模型



因果推断与混合仿真的融合

- 为克服现有因果推断方法无法完全排除伪因果关系的问题，提出将因果推断与人机混合仿真融合的研究思路
- 首先基于专家先验知识，给出因果网络的初始结构
- 基于历史交易行为数据，利用DID或因果熵优化法完善补充因果网络
- 对于因果网络中存疑的因果关系，利用混合仿真验证其真伪

因果熵优化法

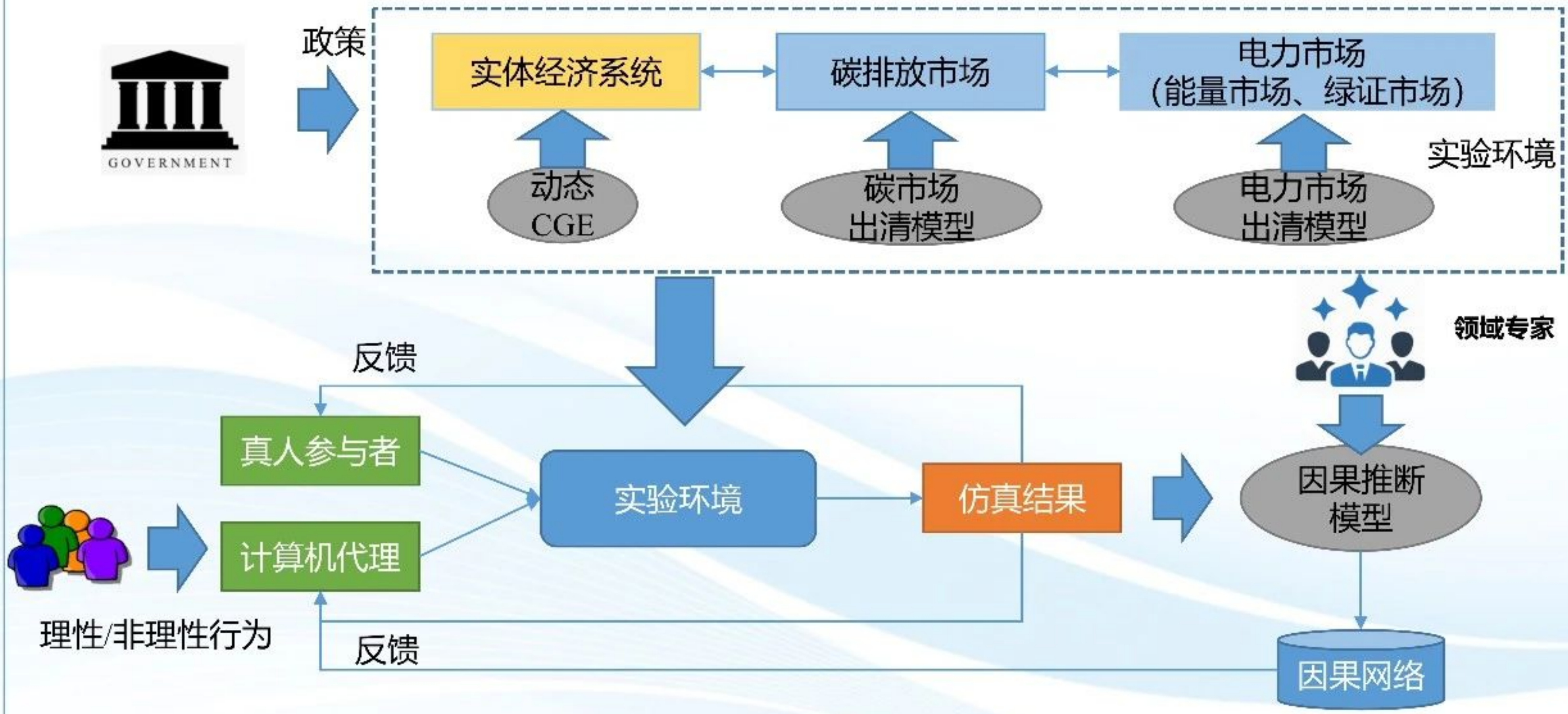
- 因果熵优化法利用信息论中的熵(Entropy)和互信息(Mutual Information)的概念对因果网络节点间的因果性大小进行测度。
- 该方法通过两两节点间求解因果熵(Causation Entropy)最大化的优化问题来进行因果推断。
- 求得因果熵最大的因果网络中的节点，被认为是有因果关系的两个变量。

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

“电力-碳-经济”模型与混合仿真的交互

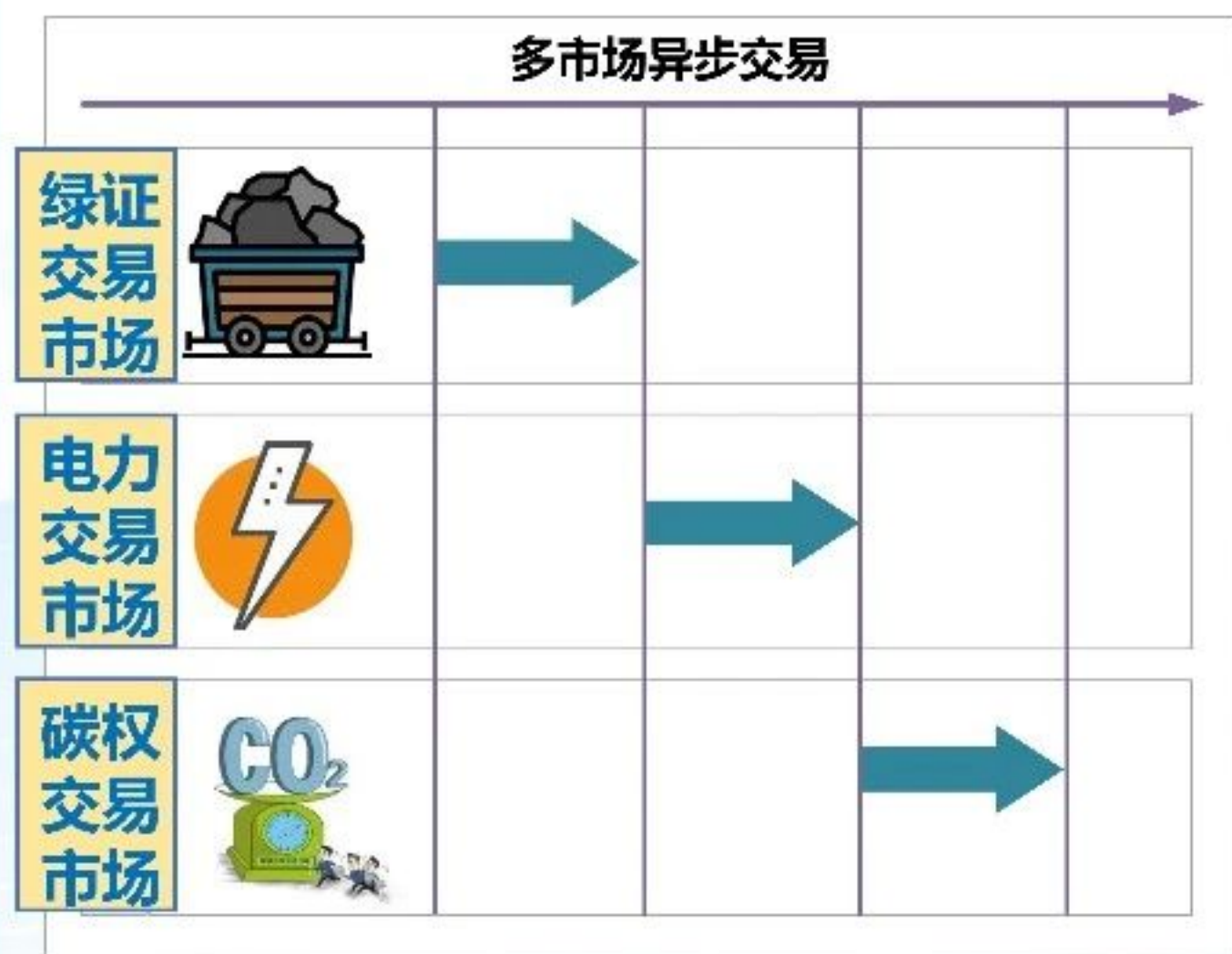


3.3 多市场间协同机制和决策方法



课题3：考虑不确定因素的发电企业多市场间协同机制和决策方法研究

研究内容1：开展**多市场协调机制与决策**问题研究，重点攻关**多市场间的协同机制与多阶段决策方法**，并研究不确定因素的影响。



□ **绿证交易市场 (TGC市场)**：绿色证书的需求方（配额的承担主体）与绿色证书的供给方（配额的供给方）进行绿证交易的场所。

□ **电力交易市场 (ET市场)**：电力市场是需求驱动性市场；碳市场是政策驱动性市场，市场需求主要来源于政府或企业强制性限排规定。

□ **碳权交易市场 (CT市场)**：对于碳排放权配额分配理论和规则的研究，传统中有3种分配方式，包括政府免费发放碳配额、根据历史情况推算碳配额和政府公开拍卖碳配额。

3.3 多市场间协同机制和决策方法



课题3：考虑不确定因素的发电企业多市场间协同机制和决策方法研究

2) 各市场同步交易与异步交易模式研究



各市场异步交易模式研究

首先，建立各市场异步交易问题的数学模型，基于动态贝叶斯博弈理论及演化博弈论分析市场均衡解的性质；然后，采用近似动态规划法（ADP）处理多阶段序贯决策和随机性问题，其中，利用蒙特卡洛法和深度学习方法进行场景生成，并基于生成的样本在多市场出清模型中进行离线训练；最终，训练完成后进行在线决策。

各市场同步交易模式研究（异步市场的一个特例）

首先，建立各市场同步交易问题的数学模型，基于静态贝叶斯博弈理论及演化博弈论分析市场均衡解的性质，并基于逆优化方法，利用交易历史数据进行对手建模 (Opponent Modelling)；然后，建立多主多从的双层优化投标决策模型；最后，使用场景法处理随机问题，采用KKT条件转化为单层问题或直接采用群智能启发式算法进行求解

与课题1-2构建的市场仿真模型的接口

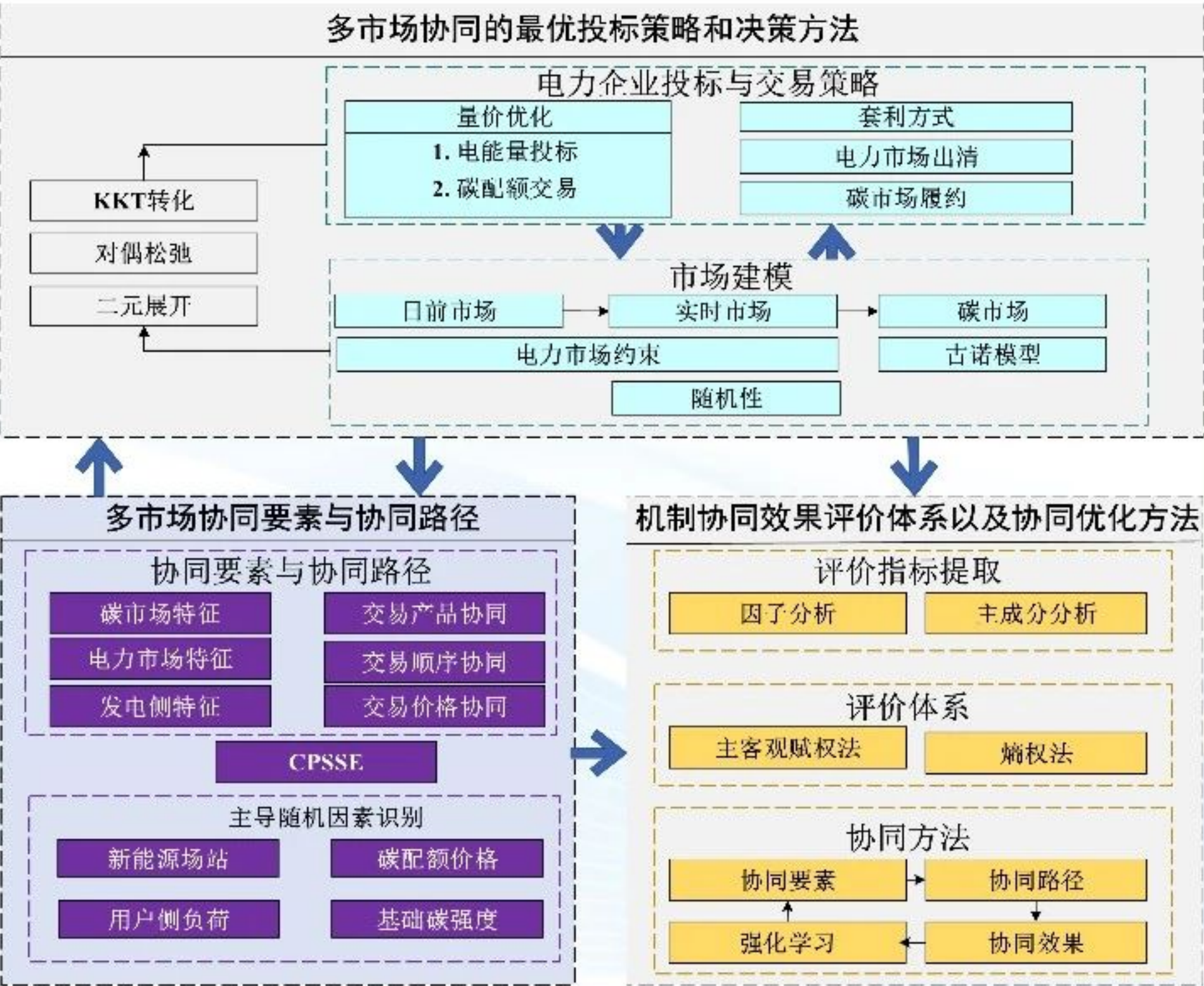
课题1-2构建的“电力-碳-经济”仿真模型将用于模拟市场主体采取不同决策下的市场出清结果（如左图红圈部分）

课题3构建的决策模型，其结果可输入课题2构建的混合仿真方法中，作为部分计算机代理的决策依据

3.3 多市场间协同机制和决策方法



课题3：考虑不确定因素的发电企业多市场间协同机制和决策方法研究



技术难点

考虑了不确定性的发电企业多市场协同的最优投标策略和决策方法

- **研究对象：**发电企业起到了连接电力市场与碳市场协同交互作用
- **研究结构：**投标策略和决策方法是多市场机制协同研究的必要基础
- **技术难度：**首先需要解决不确定性建模问题，然后构建由多个市场构成的两阶段模型，之后进行松弛化简以降低问题求解规模和难度



浙江大学 电气工程学院
COLLEGE OF ELECTRICAL ENGINEERING, ZHEJIANG UNIVERSITY



谢谢大家!



文福拴 教授

手机: 135-6023-8146

邮箱: wenfs@hotmail.com

主页: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7102815249>

<http://ee.zju.edu.cn>





关注国电南自 关注电力科技

创造者
创造 | 担当 | 搏击

IESLab 积成

积成电子股份有限公司



智能电网调度解决方案



复杂大电网全电磁暂态仿真平台



智能配电网解决方案



智能变电站解决方案



智能用电信息采集与管理解决方案



低压精品台区解决方案



新能源发电自动化解决方案



电动汽车智能充电解决方案





综合能源数字孪生系统





电力系统保护与控制

Power System Protection and Control



点分享

点收藏

点点赞

点在看



浙江大学 电气工程学院
COLLEGE OF ELECTRICAL ENGINEERING, ZHEJIANG UNIVERSITY



电力市场和碳市场的交互作用

文福拴, IEEE Fellow

浙江大学电气工程学院/浙江大学海南研究院 教授

深圳市人工智能与机器人研究院 主任研究员

Energy Conversion and Economics (SPERI, IET, Wiley) 主编

《电力系统自动化》 副主编

致谢



本报告的部分内容系国网电力科学研究院薛禹胜老师委托的科研项目的工作，与香港中文大学(深圳) 赵俊华教授、华南理工大学余涛教授、华北电力大学刘念教授的研究团队一起合作完成。

薛禹胜老师确定了项目研究架构和研究内容，黄杰教授级高工作为负责专家参与了项目研究的全过程。特此致谢。

新型电力系统：概念的演变



- 2021年3月16日，中央财经委员会第九次会议指出“构建以**新能源为主体**的新型电力系统”，但没有解释“**新能源为主体**”的含义、也没有给出实现“新型电力系统”的时间计划。对于“新能源为主体”，一般理解为：以年度计来自新能源的发电量要占到总发电量的50%以上。（水电、核电不属于新能源）
- 2022 年 4月2日，国家能源局、科学技术部印发了《“十四五”能源领域科技创新规划》，其中指出：“引领**新能源占比逐渐提高**的新型电力系统建设”。

能源互联网：不同的理解



- 2020年3月，国家电网公司确定战略目标：“建设具有中国特色国际领先的能源互联网企业”
- 国外和国内学术界对“能源互联网”的理解：不同类型的能源（电、气、热等）通过能源中心 (energy hub) 变换和互联而实现的综合能源系统
- 国家电网公司所谓的“能源互联网”：含新能源发电的电力系统。
- 刘振亚时代的定义：能源互联网=智能电网+特高压输电+新能源发电

需求侧响应 与 辅助服务：区别与联系



- 需求侧响应可以采用行政手段获取，如采用邀约方式，但这样很难确定适当的价格水平；也可以采用市场竞价方式。
- 在需求侧可以参与电力市场特别是辅助服务市场的情况下，按用户响应的速度和容量，可考虑参与不同类型的辅助服务（调频、调峰、备用等）。
- 不需要同时研究 需求侧响应 和 辅助服务 的获取机制。

“源网荷储” vs “源网荷+储”



- “源网荷储”这种说法在国内电力系统非常流行，在项目名称和学术论文中经常出现。
- 国际上很少有人这样讲（中国大陆学者投稿的文章中比较多见）。
- 这种说法不合适，因为“储”和“源网荷”不能并列。
- “源网荷”都是电力系统的环节。
- “储”是电力系统中的设备，可以应用于“源网荷”各个环节。
- “源网荷+储”更为合适。

合同分解：中国特色的研究问题



- 在国内电力（“电量”）市场环境下，“合同分解”是个重要问题。
 - 涉及到合同分解的机构可能为电力交易中心或中调/系统控制中心，目前多数由电力市场交易机构负责。
 - 在国外电力市场中不存在合同分解问题。
- 国内的电力市场长期以来是“**电量市场**”，不是“**电力市场**”。
 - 国外的电力市场改革从一开始就是面向建立“**电力市场**”的。
 - 在国内，则首先搞年度、季度、月度电量竞争，这就导致合同分解问题
 - 如何适当地把长期合同分解到日前市场是个重要问题，因为日前市场电价是波动的，分解结果对长期合同双方的利益可能有明显影响
- 在零售侧刚放开时，国内短时间内就注册了上万家电力零售公司，这在相当程度上是因为“**电量市场**”。
 - 在国外的**电力**市场中，电力零售公司的数量很有限。
 - 在真正的**电力**市场环境下，电力零售公司从事的业务具有很高的技术含量。

调峰市场：中国特色的辅助服务品种



- 在国内的电力辅助服务市场中，“调峰市场”是个主要类型
 - 国家电力监管委员会2006年发布了“并网发电厂辅助服务管理暂行办法”，要求对于发电公司提供的某些类型的辅助服务给予经济补偿；其中明确了辅助服务的品种，包括“调峰”辅助服务。
- 在国外的电力辅助服务市场中，不存在“调峰市场”。
 - 没有必要；
 - 无法合理确定“调频市场”、“调峰市场”和“备用市场”之间的适用区间，三个市场存在重叠。

新型市场 以及 不同市场之间的边界确定



1. 新型市场：**惯性市场**（惯性产品的定义、需求量的确定、提供方和需求方、交易机制）；**灵活调节市场**（已经在美国加州和中部ISO采用）
2. 针对新型电力系统环境下的容量市场设计（化石能源机组承担系统调节任务）：应该通过容量市场收回多大比例的投资成本？容量市场机制是否针对所有类型的发电机组一视同仁？
3. 不同类型市场之间边界的适当确定（不同类型市场之间不能有重叠边界要清晰，但可以衔接）：调频市场，调峰市场，备用市场，惯性市场，灵活调节市场

电力市场与碳市场联合出清的可能性



1. 电力市场是离散市场；
2. 碳市场是连续市场；
3. 电力市场和碳市场二者独立运作，**不存在联合出清的可能性**；
4. “电碳协同”指两个市场的共同参与主体（如发电公司）分别在电力市场和碳市场中进行报价，电力市场与碳市场出清结果通过市场主体的报价行为相互影响，呈现一定程度的协同特征。



浙江大学 电气工程学院
COLLEGE OF ELECTRICAL ENGINEERING, ZHEJIANG UNIVERSITY

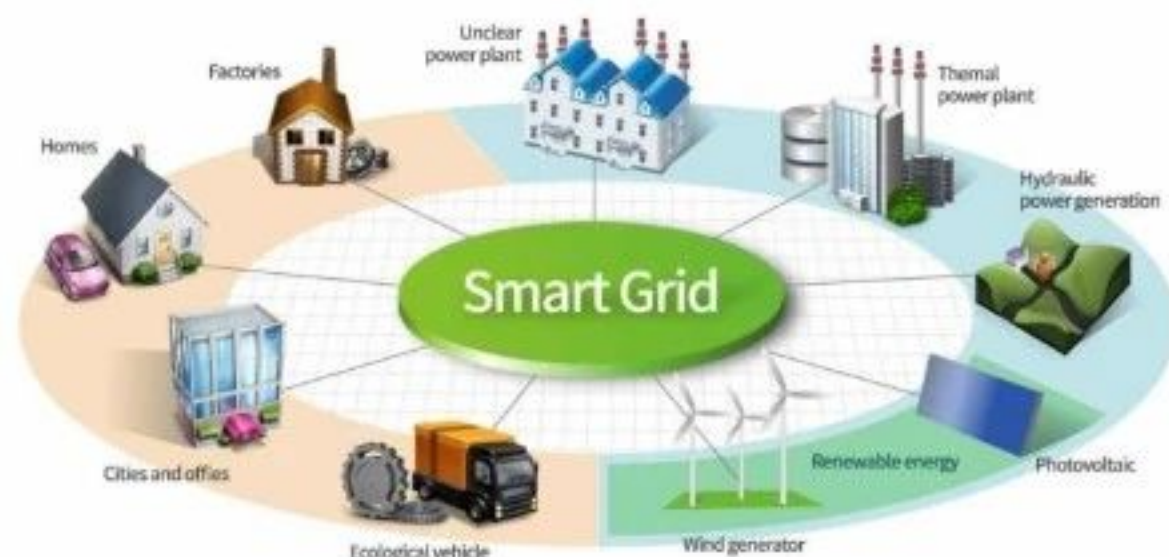


提纲

1. 电力行业与“30·60”双碳目标
2. 研究现状
3. 研究问题与实施方案



1. 电力行业与“30·60”双碳目标



影响供需



影响价格



- 电力行业作为典型的能源密集型领域和重要的温室气体排放源，是各国碳市场的重点管控对象，也是我国首个进入碳市场的行业。全国碳排放权交易市场（上海）于2021年7月16日启动。
- 我国电力市场建设仍在进行中。在新型电力系统建设背景下，以风电和光伏发电为代表的间歇性可再生能源发电的渗透率会快速增加，这对电力市场和碳市场的设计和运行会产生明显的影响。
- 系统研究和分析电力市场和碳市场之间的交互影响，以及这两个市场的参与者的相关策略是实现新型电力系统和落实国家“30·60”双碳目标必要且紧迫的任务。
- 我国的电力市场改革已经开展了20多年（1997年启动），现在还没有成熟运行的电力市场（国外的电力市场多数在电力工业市场化改革启动后5年内完成投运）

2. 研究现状



- 碳排放价格在电力市场中的**成本转嫁**问题
- 碳市场对电力**市场集中度**的影响
- 碳市场的建设对电力市场**需求响应**的作用
- 碳市场对电力市场的**投资**（尤其是**民营投资**）**引导**问题
-

- 电力行业在碳市场中的**计量方法**
- 电力市场**容量**对碳价格的影响
- 电力市场价格对碳价格的**反向影响机制**
- 电力市场中发电公司**集中度**对碳价格的影响
-

- 应用背景以**欧洲国家**为主
- 国内目前以**理论研究**为主



宏观经济理论建模

可计算一般均衡模型 (CGE)

动态可计算一般均衡模型 (DCGE)

过多理论假设与现实不符
部分模块简化过度

基于代理的
机器学习模型

有监督学习(supervised learning)

强化学习(reinforcement learning)

受训练和测试数据集限制
有时难以收敛, 可解释性差
(ChatGPT 的启发?)

实验仿真的
建模方法

经济学实验

计算机仿真

混合实验

耗时, 对人员专业性要求较强
仿真对象通常基于理论建模

方法种类

具体模型

各自问题

□ 在“30·60目标”战略背景下，碳市场具有举足轻重的地位。电力企业特别是发电企业是碳市场重要参与者。发电企业要参与电力市场、碳市场、燃料市场等多个市场的复杂交易活动。

□ 一方面，需要考虑不同时间尺度、不同交易对象的多市场间的相互耦合，问题非常复杂；另一方面，多种不确定因素的存在使得对复杂交易进行决策在建模和计算方面都非常困难。

因此，要协调电力企业特别是发电企业在不同性质、不同时间尺度又相互交错的多个市场中的决策达到综合效益最优是一个非常重要的研究问题。

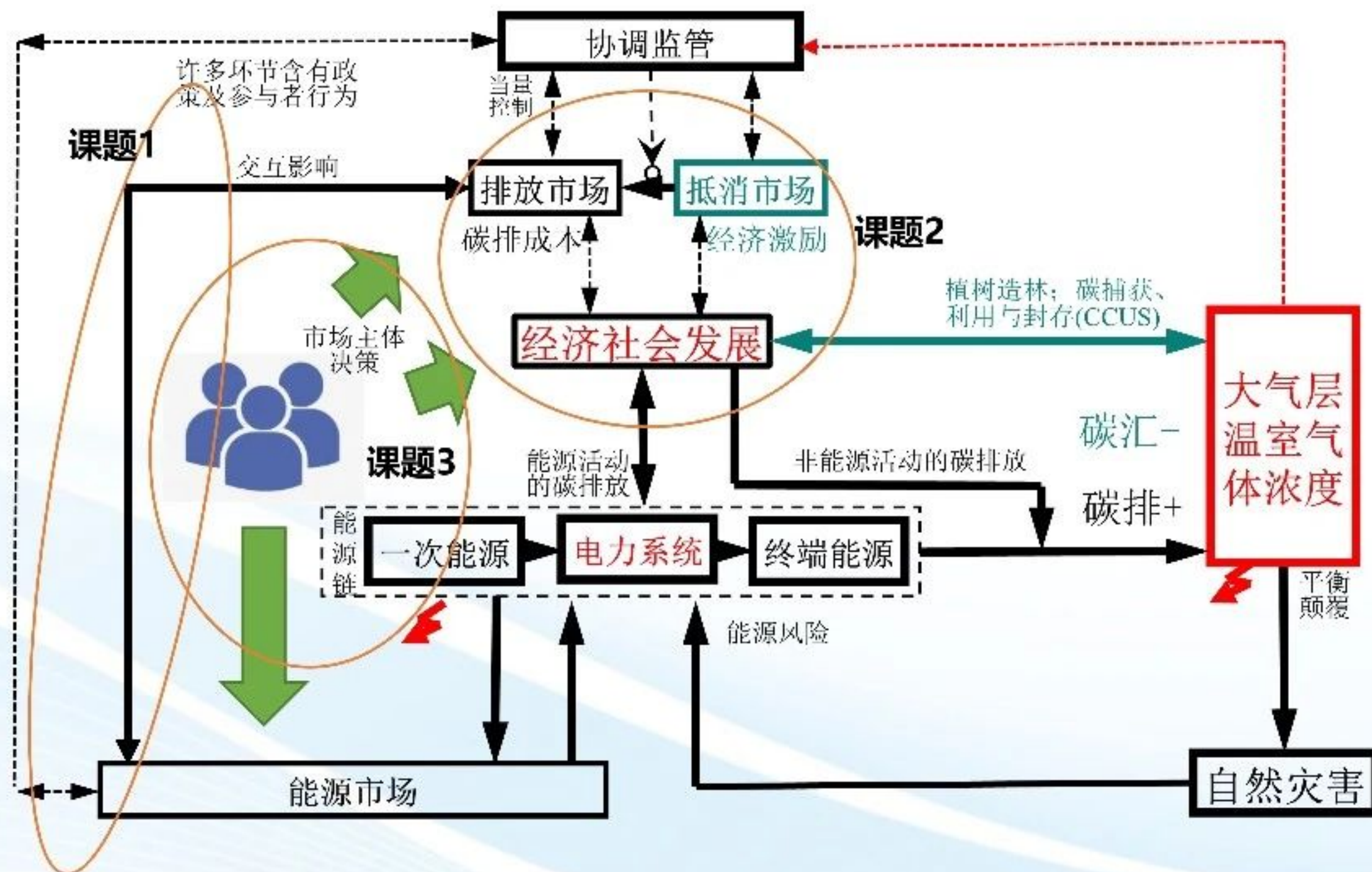


3. 研究问题与实施方案



• 研究项目：碳市场及其与电力市场的交互机理及协同优化技术

- **研究问题1** 研究碳排放市场、碳抵消市场与电力市场间的交互机理
- **研究问题2** 研究基于人机混合实验的碳市场-电力市场-实体经济联合仿真中的行为分析方法，并研究多市场间的政策交互影响
- **研究问题3** 研究多市场间的协同机制与市场主体的多阶段决策方法



上图取自薛禹胜老师的学术报告

- 课题1: **碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场**之间的数据分析以及多市场动态经由微观行为的宏观**交互机理研究**;
- 课题2: 对理性行为统计建模, 对非理性行为设置扰动, 通过**混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响**;
- 课题3: 发电企业在**多个市场中的协同决策**, 多个市场间的**机制协同**, 以及**不确定因素的影响研究**

3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析

主要研究内容

- (1) 研究同时建立碳排放市场和绿证市场的**必要性与可行性**，以及这两个市场之间可能存在的**重叠效应**；
- (2) 研究电力市场（计及发电权交易、辅助服务市场、需求响应市场等）、碳市场与实体经济间的**耦合关系**；基于行为仿真研究电力市场与碳市场间的**交互影响**；基于可计算一般均衡（Computational General Equilibrium, CGE）**模型**建模电力-碳市场对实体经济的影响，对不同政策、外部市场风险、系统风险等对这些市场及市场主体博弈行为的冲击进行建模分析；
- (3) 考察不同类型电力市场与碳市场间的**跨市场价格传导机制**。

研究目标

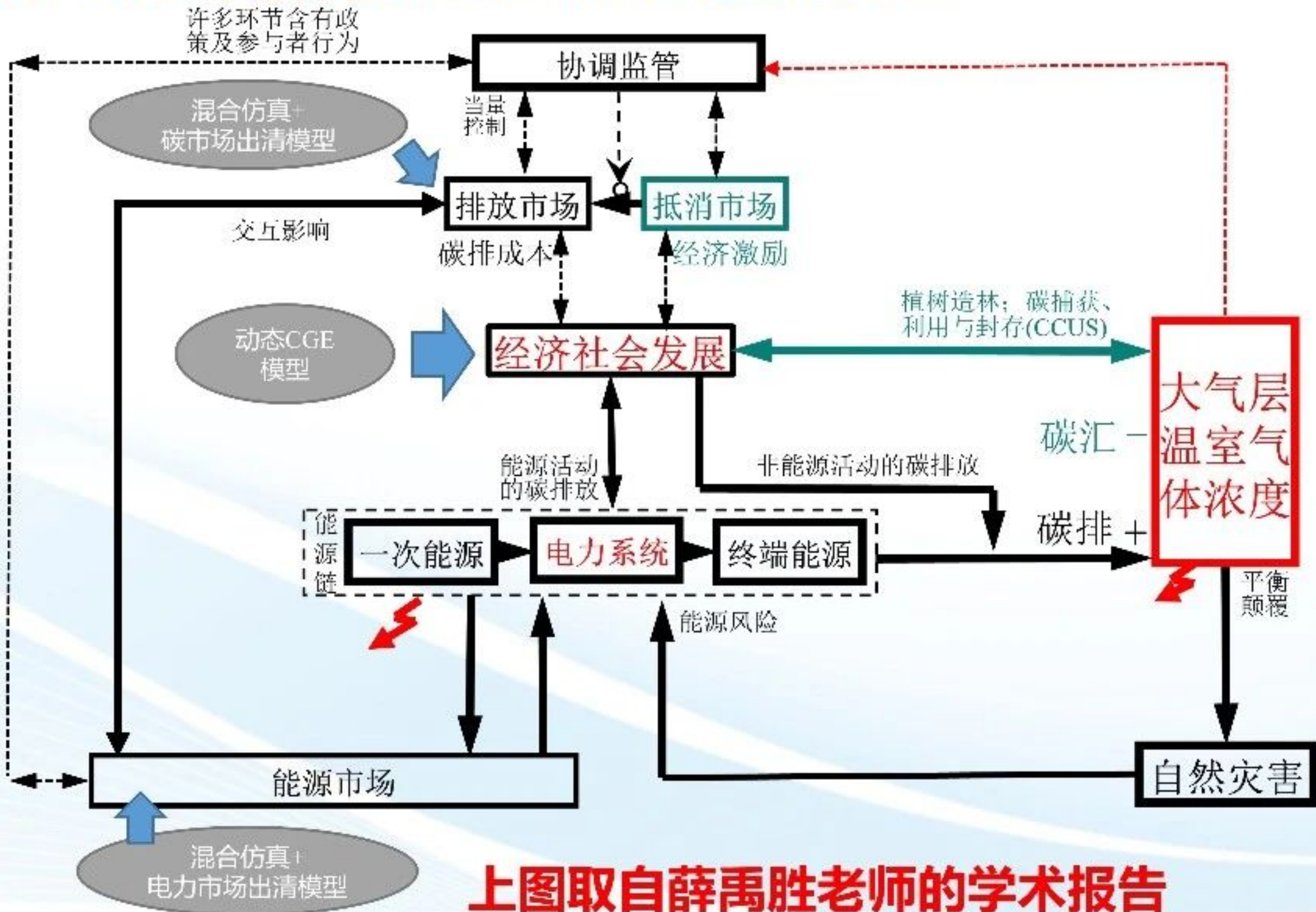
- 通过碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场之间的数据分析，厘清多市场动态经由微观行为的宏观交互机理。
- 得到电力市场与碳市场间交互影响与交互机理的研究结果。

3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析

- 为电力市场、碳市场与经济系统（钢铁、建材、石化等纳入碳市场的实体行业）分别建立仿真模型
- 对电力市场和碳市场，分别根据市场规则建立市场出清模型；对经济系统构建动态CGE模型
- 电力与碳市场中的市场主体行为，将基于课题2中的人机混合仿真产生
- 监管扰动将主要通过改变电力与碳市场出清模型中的市场规则参数设定（如配额分配方法、价格上下限等）进行考虑
- 外部经济环境的扰动可通过修改动态CGE模型中的外生变量（如进出口、国际国内资金成本等）进行考虑



上图取自薛禹胜老师的学术报告

3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析



- 基于市场及交易数据，通过市场主体聚类，专家问卷访谈，知识提取等方法，获得典型交易行为模式

3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析

动态CGE模型

- 将传统CGE模型与差分方程组结合，提出动态CGE模型，为除电力以外参与碳市场的7大实体行业（石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、航空）建模
- 对每个行业，其生产者/消费者行为均采用效益/效用最大化模型
- 将生产者与消费者模型的解与区域贸易及市场出清模型联立可将CGE模型转化为代数方程组
- 对部分系统变量（如资本存量、劳动力、土地、资本效率等），利用差分方程组构建其动态模型，并采用数值方法求解，将数值解代入CGE模型的代数方程组中
- 对最终形成的动态CGE模型利用牛顿法求解，可得市场均衡点的动态变化轨迹（轨迹均衡点）

生产者效益最大化模型

$$\begin{aligned} \max: & \pi_{r,j} = p_{r,j} \cdot Q_{r,j} - (\sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i,j} + \sum_v \omega_{r,v} \cdot V_{r,v,j}) - T_{r,j}^z \\ \text{s. t. } & Q_{r,j} = LEO_{1rj} \{ M_{r,j}, R_{r,j}, CES_{2vae} [CES_{3va} (K_{r,j}, L_{r,j}, CES_{3e} (ele_{r,j}, CES_{4fos} (coal_{r,j}, gas_{r,j}, oil_{r,j})))] \} \end{aligned}$$

消费者效用最大化模型

$$\begin{aligned} \max: & DEM_r^d = A_r^d \cdot \prod_i (X_{r,i}^d)^{\alpha_{r,i}^d} \\ \text{s. t. } & \sum_{v=1}^V (\omega_{r,v} \cdot V_{r,v}) + \sum_j (pld_r \cdot QLAND_{r,j}) + \sum_{s,j} (p_{r,s}^e \cdot QRES_{r,j,s}) + T_r^{cab} - T_r^d = \sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i}^p + S_r^p \\ & T_r^d + \sum_j T_{r,j}^z + \sum_j T_{r,j}^m = \sum_i p_{r,i} \cdot X_{r,i}^e + S_r^e \end{aligned}$$

区域贸易与市场出清模型

$$\begin{aligned} X_{f,i} &= CES_{s1} \{ D_{f,f,i}, CES_{s2} [F_{1,f,i}, \dots, F_{f',f,i}, CES_{s3} (P_{1,f,i}, \dots, P_{p',f,i})] \} \\ X_{p,i} &= CES_{s1} \{ F_{1,p,i}, \dots, F_{f,p,i}, CES_{s2} [D_{p,p,i}, CES_{s3} (P_{1,p,i}, \dots, P_{p',p,i})] \} \\ Q_{r,i} &= \sum_d X_{r,i}^d + \sum_f F_{r,f,i} + \sum_p P_{r,p,i} - \sum_f F_{f,r,i} - \sum_p P_{p,r,i} - STK_{r,i} \end{aligned}$$

解析解

解析解

联立

动态CGE模型（代数方程组）

牛顿法

轨迹均衡点

数值解

状态变量动态模型
(差分方程组)

3.1 不同市场间的交互影响



课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析 动态CGE模型

- CGE模型根据基准年的“投入产出表”来构建社会核算矩阵（Social Accounting Matrix, SAM），再通过SAM确定CGE模型中的经济变量（e.g. 市场劳动力总量、居民年度总消费、各产业年度总产量...）并以此求解模型中的参数（e.g. Leontief 生产函数中的比例系数、Cobb-Douglas函数中的常替代弹性系数）。

投入	产出	产品部门	中间使用								
			农业	林业	畜牧业	渔业	农、林、牧、渔业服务业	煤炭开采和洗选业	石油和天然气开采业	黑色金属矿采选业	
产品部门		代码	010001	020002	030003	040004	050005	060006	070007	080008	
中 间 投 入	农业	010001	128187.62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	林业	020002	4758.71	5338.15	0.00	0.00	0.00	8332.70	0.00	0.00	
	畜牧业	030003	0.00	0.00	311182.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	渔业	040004	0.00	0.00	0.00	17816.97	0.00	0.00	0.00	0.00	
	农、林、牧、渔业服务业	050005	1205.07	0.00	0.00	0.00	38778.92	0.00	0.00	0.00	
	煤炭开采和洗选业	060006	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	314207.26	27.72	42551.91	
	石油和天然气开采业	070007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	71814.38	912.06	0.00	
	黑色金属矿采选业	080008	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.30	1873.91	
	有色金属矿采选业	090009	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	非金属矿采选业	100010	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	48.90	72.90	7.12	
	农副食品加工业	130111	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	饲料加工业	130112	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
人 工	植物油加工业	130113	10293.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	制造业	130114	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	皮革及皮革加工业	130115	2487.18	0.00	422805.58	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	水产品加工业	130116	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	其他食品加工业	130117	0.00	0.00	80916.92	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	方便食品制造业	140118	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	液体乳及乳制品制造业	140119	0.00	0.00	28782.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	调味品、发酵制品制造业	140220	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	其他食品制造业	140221	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	酒及酒精制造业	150222	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	汇总
		商品	活动	要素 劳动力	要素 资本	居民	企业	政府 补贴	预算外 消费	政府 消费	国外 出口	资本 账户	存货 变动	汇总
1	商品		中间投入			居民消费			公共部门消费	政府消费	出口	固定资本形成	存货净变动	总需求
2	活动	国内总产出												总产出
3	要素 劳动力		劳动者报酬											要素收入
4	要素 资本		资本利得											要素收入
5	居民			劳动收入	资本收入		企业的转移支付	政府补贴		政府的其他支付	国外收益			居民总收入
6	企业				资本收入									企业总收入
7	政府补贴		生产补贴							政府的补贴支出				
8	预算外		预算外消费											预算外总收入
9	政府	关税	政府生产税			个人所得税	企业直接税				国外收入	政府的债务收入		政府总收入
10	国外	进口			国外资本投资收益					对国外的支付				外汇支出
11	资本账户					居民储蓄	企业储蓄		预算外账户结余	政府储蓄	国外净储蓄			总储蓄
12	存货变动											存货变动		存货净变动
汇总		总供给	总产出	要素支出	要素支出	居民支出	企业支出		预算外支出	政府支出	外汇收入	总投资	存货净变动	

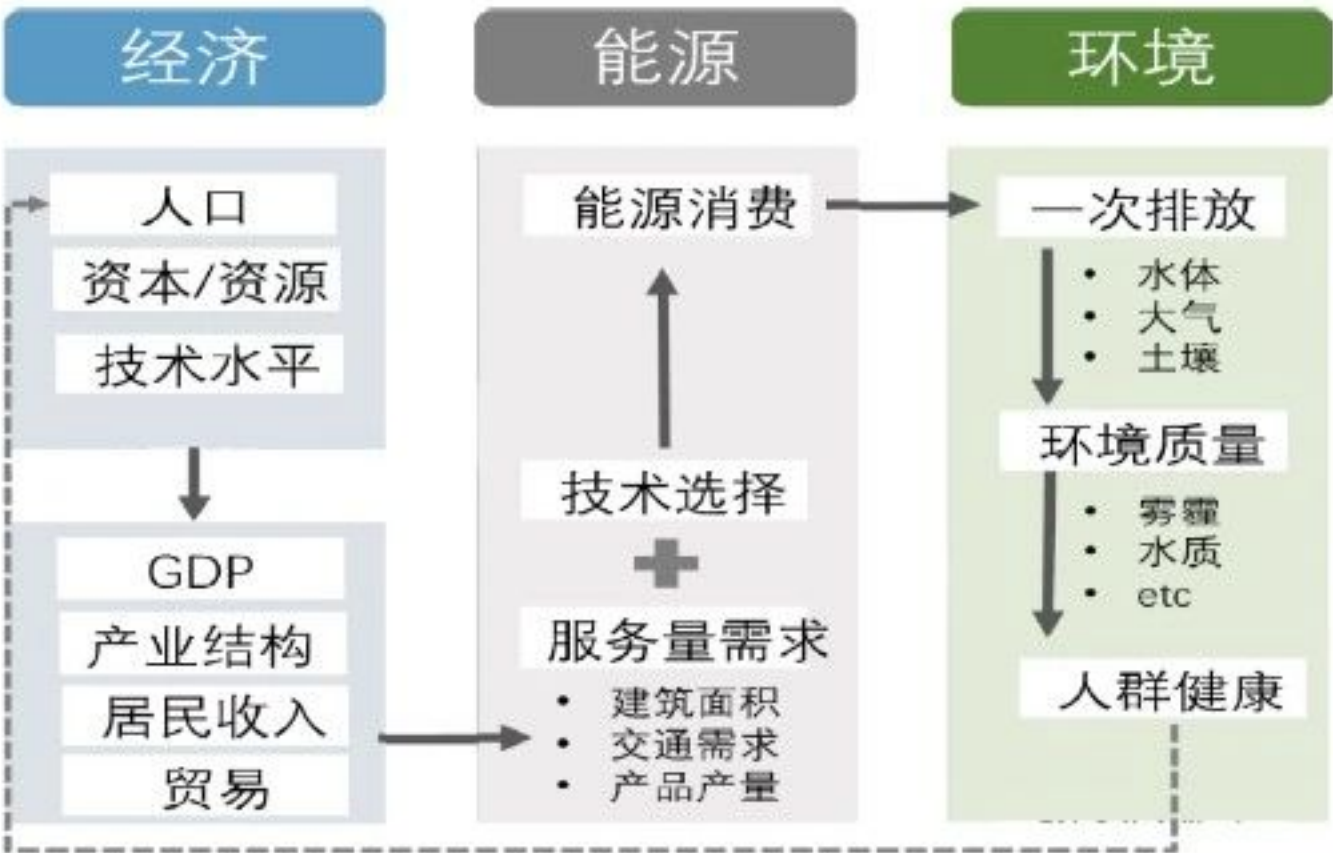
3.1 不同市场间的交互影响



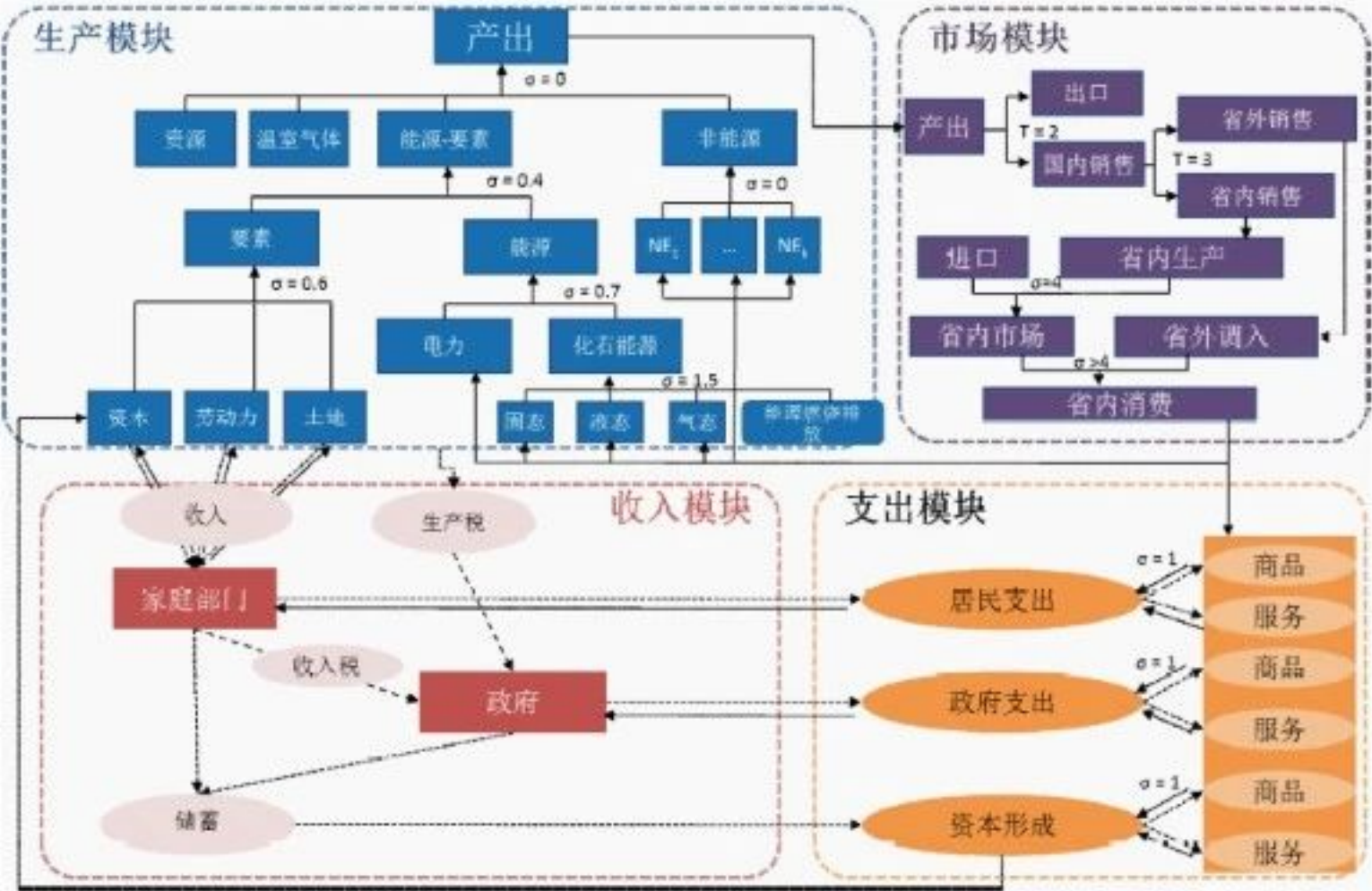
课题1：碳排放市场-碳抵消市场-电力（能源/综合能源）市场的交互影响分析

动态CGE模型

- ❑ 将CGE模型扩展，加入动态模块。
- ❑ 与许多传统CGE模型仅考虑经济相比，改进模型综合考虑了经济、能源和环境三者间的交互关系，其建模逻辑是经济决定能源消费，能源消费产生环境排放，而环境又会影响经济的整体结构和运行。
- ❑ 利用该模型为纳入碳市场的除电力以外的7个工业行业建模。（石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、航空）



改进（动态）CGE 系统建模



改进（动态）CGE 整体结构

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

课题概述

主要研究内容

- (1) 研究典型电力企业（火电、水电、风电、太阳能发电等）参与碳市场的**供需模型**，包括市场**碳配额设定模型**、市场主体**碳计量模型**以及**主体的效用模型**，建立电力企业参与碳市场的理性行为模型，并给出非理性行为的扰动设置；
- (2) 研究对电力市场和碳市场的**联动仿真方法**，建立考虑潮流约束的电力市场仿真模型，以此为基础建立碳流仿真的碳市场模型，应用**人机混合实验**方法对电力-碳市场进行仿真；研究电力市场和碳市场的交互政策和行为博弈；
- (3) 利用CGE模型构建实体经济模型，结合电力-碳市场联动仿真与CGE模型，研究电力-碳市场政策对实体经济的综合影响。

研究目标

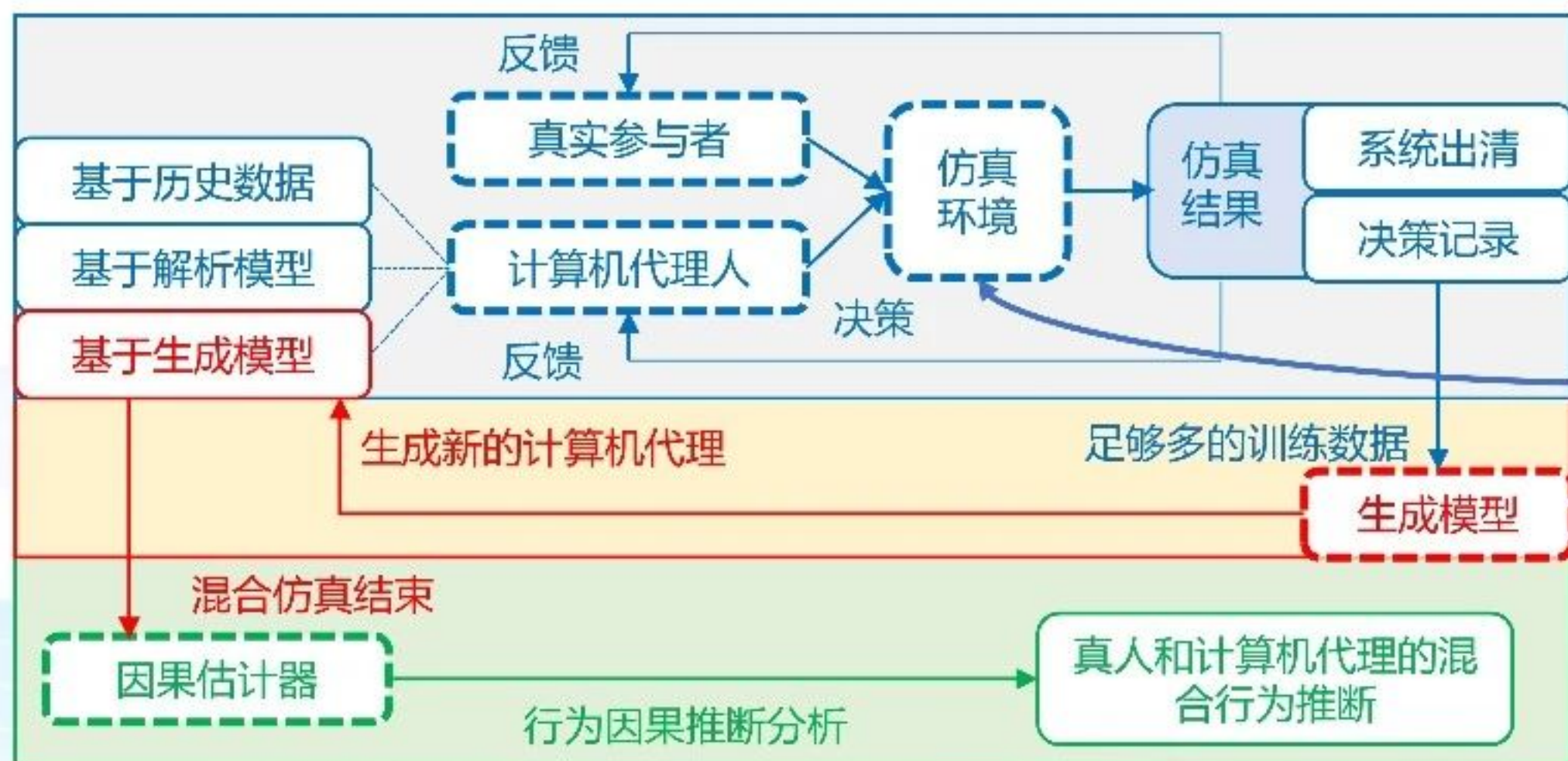
- (1) 提出在碳市场中，电力企业的非理性行为扰动设置方法；建立电力企业参与碳市场的理性行为统计模型；
- (2) 提出实时反馈的人机混合实验的电力市场和碳市场仿真方法；
- (3) 建立基于CGE模型的电力-碳市场对实体经济的综合影响分析方法。

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

仿真方法



- 将人机混合实验与因果分析相结合
- 基于专家知识和历史数据构建因果网络，利用混合实验验证因果关系

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

混合实验方法

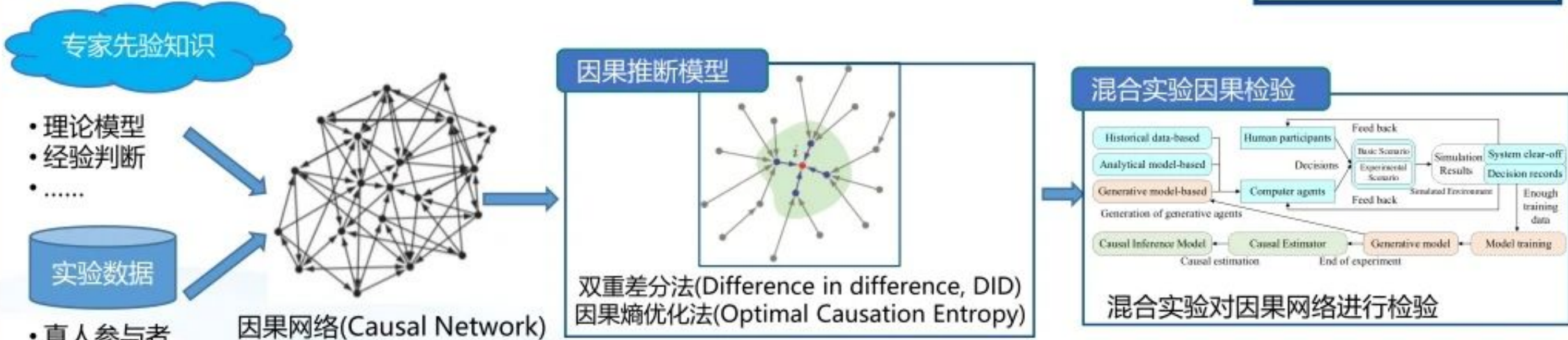
- 分析框架的3个核心模块为：混合仿真、机器学习生成模型和因果分析模型
- 在构建混合仿真环境时，需要对物理系统运行机制和社会系统运行机制给出清晰的定义
- 混合仿真的参与者分为2类，分别是真实参与者和计算机代理
- 对于真实参与者而言，需充分了解实验规则、各自收益（成本）计算方式、各自决策的可行范围和可能出现的结果，并要求其在实验过程中能够秉持认真的态度以最大化任务目标的状态参与实验
- 将计算机代理分为3类：基于历史数据的代理、基于解析模型的代理和基于实验数据由生成模型产生的代理

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

因果推断模型



因果推断与混合仿真的融合

- 为克服现有因果推断方法无法完全排除伪因果关系的问题，提出将因果推断与人机混合仿真融合的研究思路
- 首先基于专家先验知识，给出因果网络的初始结构
- 基于历史交易行为数据，利用DID或因果熵优化法完善补充因果网络
- 对于因果网络中存疑的因果关系，利用混合仿真验证其真伪

因果熵优化法

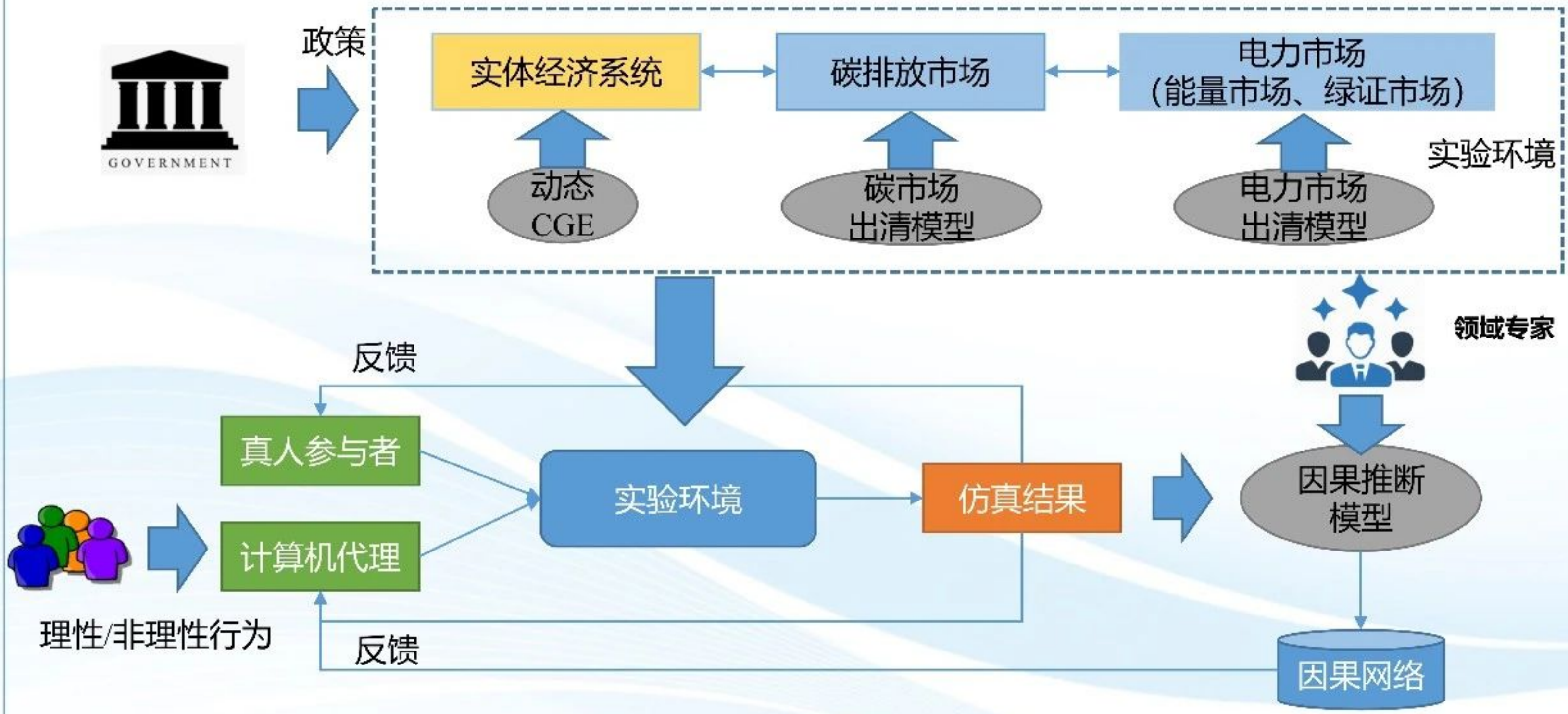
- 因果熵优化法利用信息论中的熵(Entropy)和互信息(Mutual Information)的概念对因果网络节点间的因果性大小进行测度。
- 该方法通过两两节点间求解因果熵(Causation Entropy)最大化的优化问题来进行因果推断。
- 求得因果熵最大的因果网络中的节点，被认为是有因果关系的两个变量。

3.2 政策及博弈行为的综合影响



课题2：对理性行为统计建模，对非理性行为设置扰动，通过混合仿真探索政策及博弈行为的综合影响研究

“电力-碳-经济”模型与混合仿真的交互

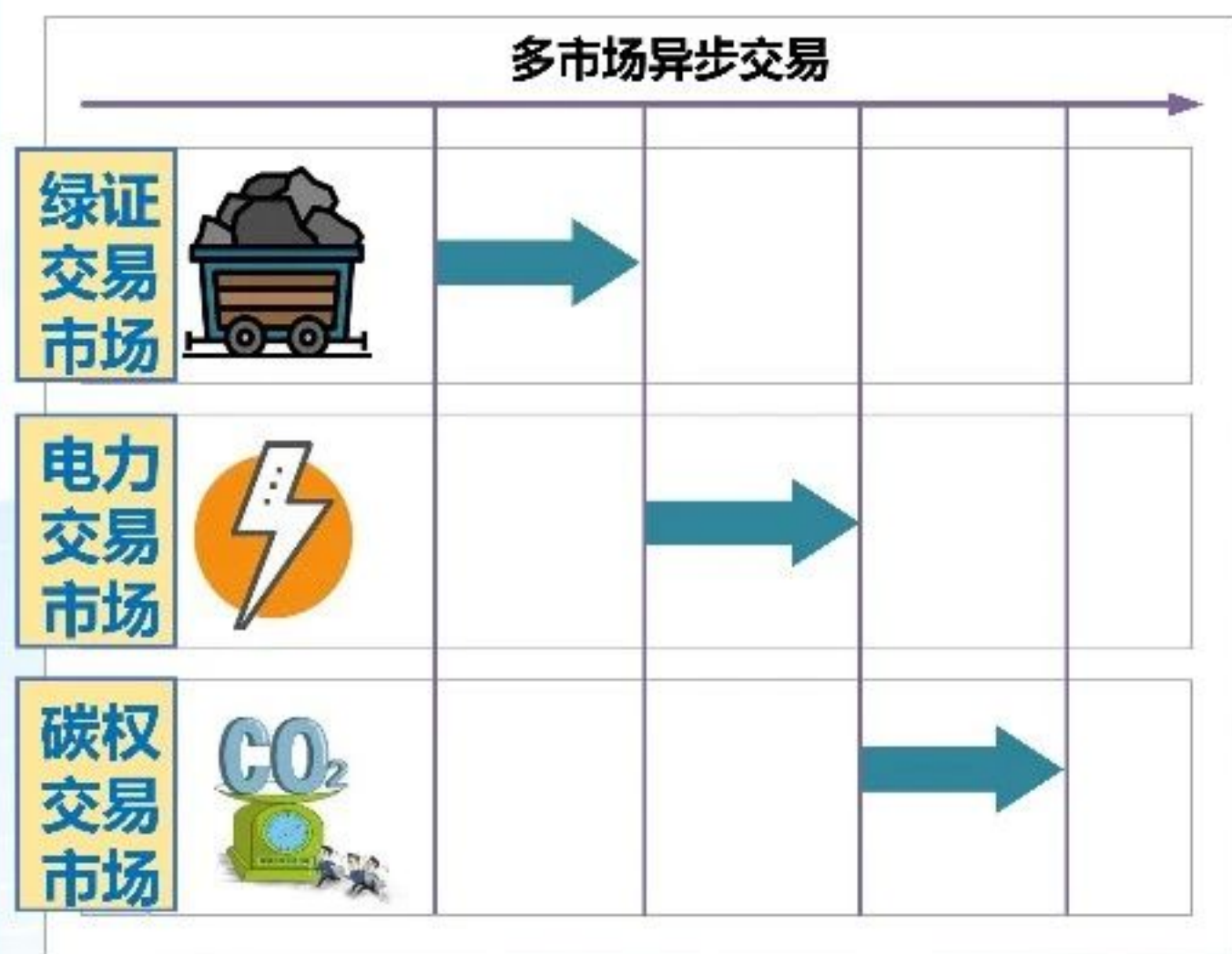


3.3 多市场间协同机制和决策方法



课题3：考虑不确定因素的发电企业多市场间协同机制和决策方法研究

研究内容1：开展**多市场协调机制与决策**问题研究，重点攻关**多市场间的协同机制与多阶段决策方法**，并研究不确定因素的影响。



□ **绿证交易市场 (TGC市场)**：绿色证书的需求方（配额的承担主体）与绿色证书的供给方（配额的供给方）进行绿证交易的场所。

□ **电力交易市场 (ET市场)**：电力市场是需求驱动性市场；碳市场是政策驱动性市场，市场需求主要来源于政府或企业强制性限排规定。

□ **碳权交易市场 (CT市场)**：对于碳排放权配额分配理论和规则的研究，传统中有3种分配方式，包括政府免费发放碳配额、根据历史情况推算碳配额和政府公开拍卖碳配额。

3.3 多市场间协同机制和决策方法



课题3：考虑不确定因素的发电企业多市场间协同机制和决策方法研究

2) 各市场同步交易与异步交易模式研究



• 各市场异步交易模式研究

首先，建立各市场异步交易问题的数学模型，基于动态贝叶斯博弈理论及演化博弈论分析市场均衡解的性质；然后，采用近似动态规划法（ADP）处理多阶段序贯决策和随机性问题，其中，利用蒙特卡洛法和深度学习方法进行场景生成，并基于生成的样本在多市场出清模型中进行离线训练；最终，训练完成后进行在线决策。

• 各市场同步交易模式研究（异步市场的一个特例）

首先，建立各市场同步交易问题的数学模型，基于静态贝叶斯博弈理论及演化博弈论分析市场均衡解的性质，并基于逆优化方法，利用交易历史数据进行对手建模(Opponent Modelling)；然后，建立多主多从的双层优化投标决策模型；最后，使用场景法处理随机问题，采用KKT条件转化为单层问题或直接采用群智能启发式算法进行求解

• 与课题1-2构建的市场仿真模型的接口

课题1-2构建的“电力-碳-经济”仿真模型将用于模拟市场主体采取不同决策下的市场出清结果（如左图红圈部分）

课题3构建的决策模型，其结果可输入课题2构建的混合仿真方法中，作为部分计算机代理的决策依据

3.3 多市场间协同机制和决策方法



课题3：考虑不确定因素的发电企业多市场间协同机制和决策方法研究

研究内容2：开展发电侧主体的多市场协同决策，及市场机制协同方法研究。

➤ **研究内容2-1：**研究考虑不确定性的发电企业多市场协同的最优投标策略和决策方法。

■ **研究目的2-1：**解决发电企业在耦合了碳市场的电力市场中的量价投标策略，与在碳市场中的碳排放配额交易策略，为发电企业在多市场运行策略提供参考。

➤ **研究内容2-2：**研究多市场协同要素与协同路径，识别发电企业多市场决策所面临的主要不确定性因素。

■ **研究目的2-2：**分析电力市场与碳市场之间的协同原理，分析出可能影响发电企业在多市场决策结果的主要不确定性因素。

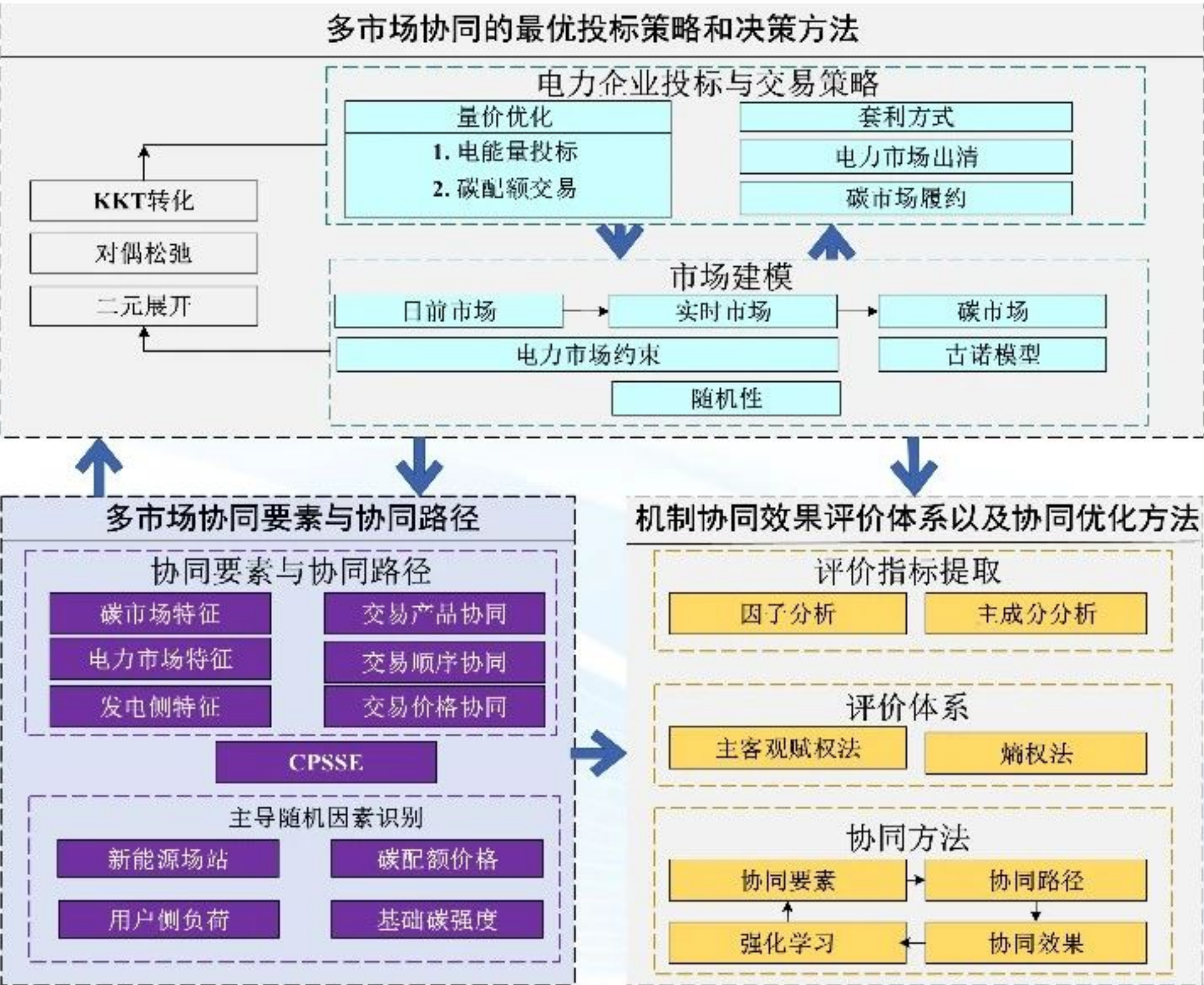
➤ **研究内容2-3：**研究多市场机制协同效果评价指标体系，发展计及发电企业决策行为的多市场机制协同优化方法。

■ **研究目的2-3：**分析电力市场与碳市场相互影响的协同效果，提出有效的多市场间协同机制。

3.3 多市场间协同机制和决策方法



课题3：考虑不确定因素的发电企业多市场间协同机制和决策方法研究



技术难点

考虑了不确定性的发电企业多市场协同的最优投标策略和决策方法

- **研究对象：**发电企业起到了连接电力市场与碳市场协同交互作用
- **研究结构：**投标策略和决策方法是多市场机制协同研究的必要基础
- **技术难度：**首先需要解决不确定性建模问题，然后构建由多个市场构成的两阶段模型，之后进行松弛化简以降低问题求解规模和难度



浙江大学 电气工程学院
COLLEGE OF ELECTRICAL ENGINEERING, ZHEJIANG UNIVERSITY



谢谢大家!



文福拴 教授

手机: 135-6023-8146

邮箱: wenfs@hotmail.com

主页: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=7102815249>

<http://ee.zju.edu.cn>