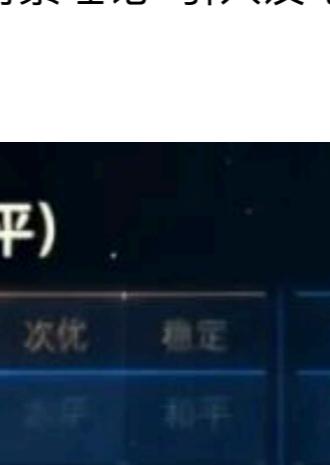


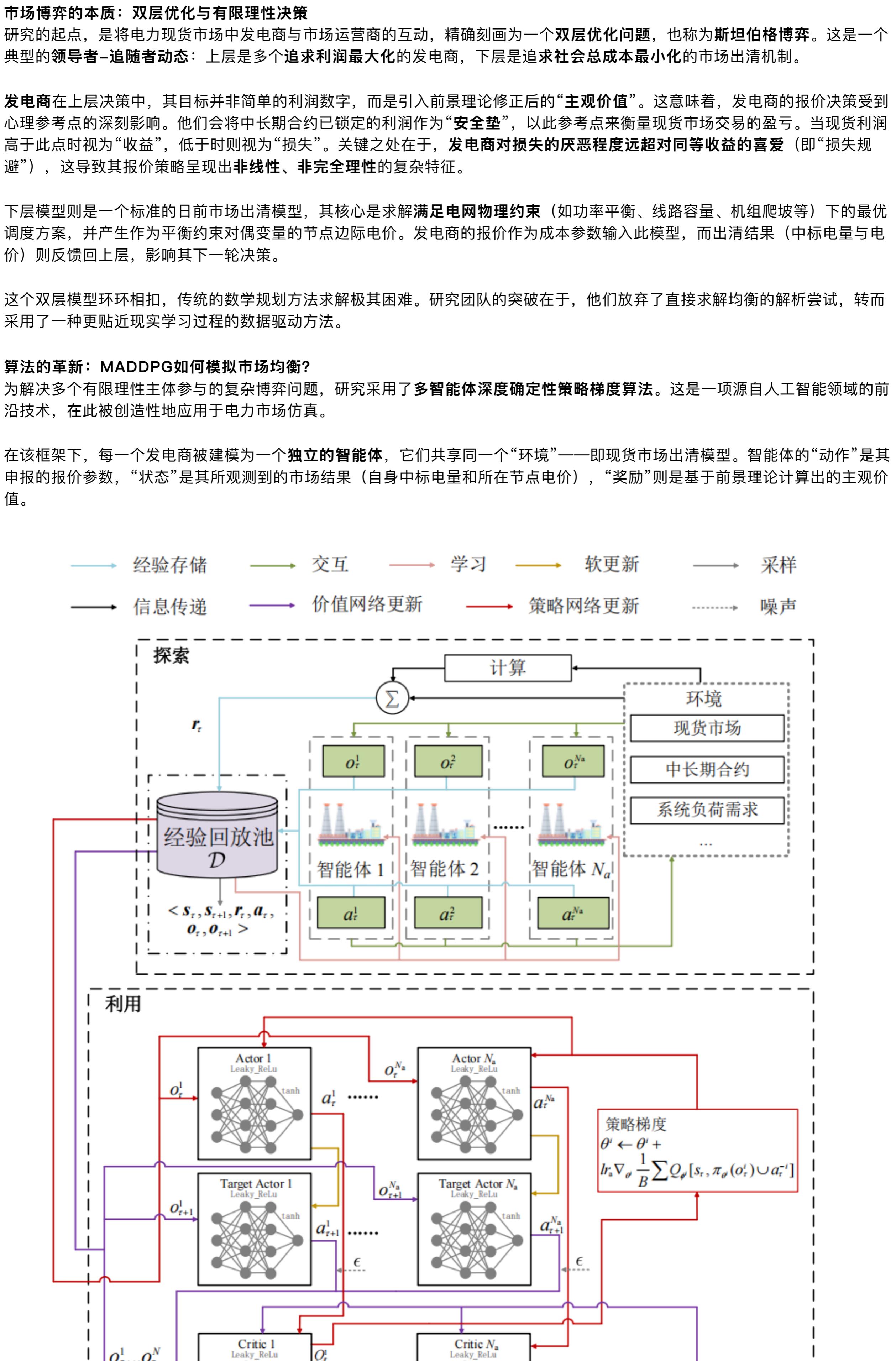
原文链接：[中长期交易如何重塑现货电价？一篇AI算法揭示的电力市场博弈真相](#)

所有的模型、算法与仿真，都服务于一个目标：理解并引导市场力量，在保障电力系统安全可靠运行的前提下，发现更有效率的电价信号，推动能源资源的优化配置。



在中国电力市场“中长期交易+现货市场”的双轨制框架下，一个核心问题始终牵动着行业神经：中长期合约如何影响发电商在现货市场中的报价行为？这种影响又将如何传导至最终电价？

研究团队通过创新的双层优化模型与多智能体深度强化学习算法，对这一问题进行了量化解构。该研究不仅构建了一个接近真实市场的博弈仿真环境，还首次将行为经济学中的“前景理论”引入发电商决策建模，揭示了中长期交易对现货市场运行的深层影响机制。



市场博弈的本质：双层优化与有限理性决策

研究的起点，是将电力现货市场中发电商与市场运营商的互动，精确刻画为一个双层优化问题，也称为斯坦伯格博弈。这是一个典型的领导者-追随者动态：上层是多个追求利润最大化的发电商，下层是追求社会总成本最小化的市场出清机制。

发电商在上层决策中，其目标并非简单的利润数字，而是引入前景理论修正后的“主观价值”。这意味着，发电商的报价决策受到心理参考点的深刻影响。他们会将中长期合约已锁定的利润视为“安全垫”，以此参考点来衡量现货市场交易的盈亏。当现货利润高于此点时视为“收益”，低于时则视为“损失”。关键之处在子，发电商对损失的厌恶程度远超对同等收益的喜爱（即“损失规避”），这导致其报价策略呈现出非线性、非完全理性的复杂特征。

下层模型则是一个标准的日前市场出清模型，其核心是求解满足电网物理约束（如功率平衡、线路容量、机组爬坡等）下的最优调度方案，并产生作为平衡约束对偶变量的节点边际电价。发电商的报价作为成本参数输入此模型，而出清结果（中标电量与电价）则反馈回上层，影响其下一轮决策。

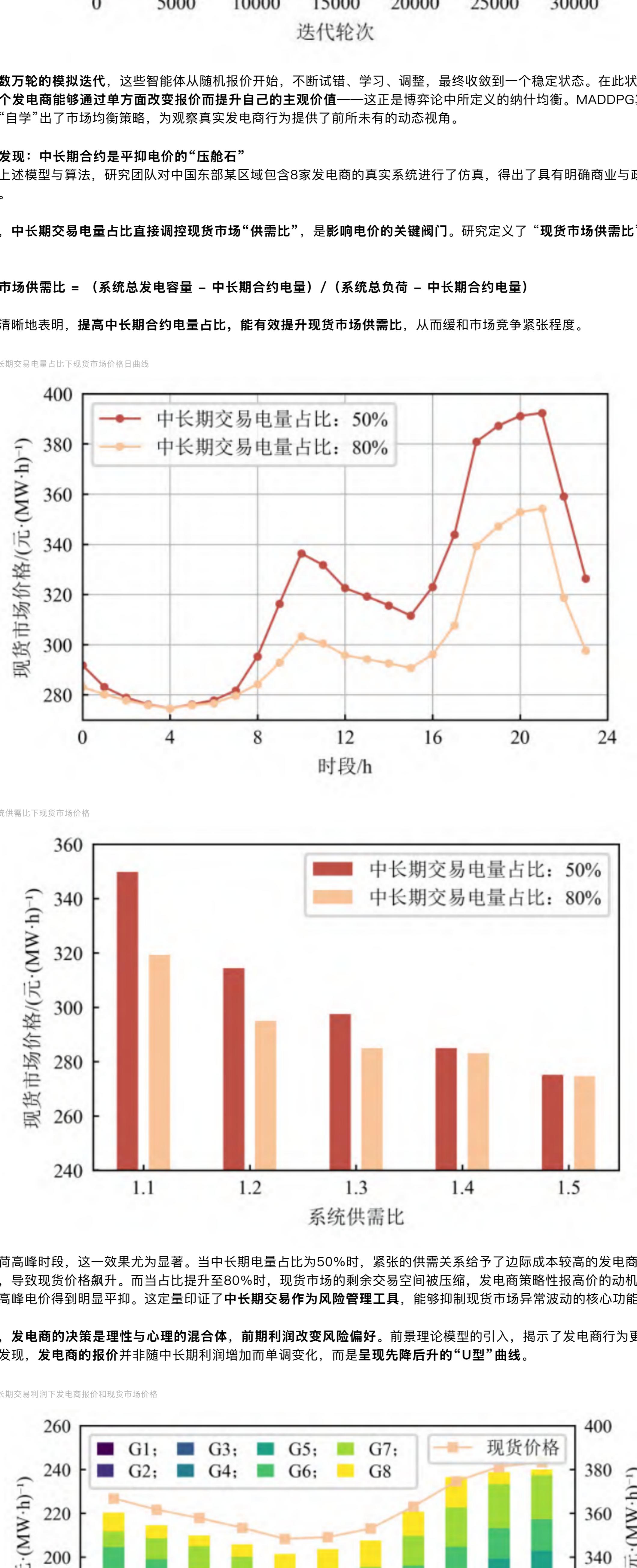
这个双层模型环环相扣，传统的数学规划方法求解极其困难。研究团队的突破在于，他们放弃了直接求解均衡的解析尝试，转而采用了一种更贴近现实学习过程的数据驱动方法。

算法的革新：MADDPG如何模拟市场均衡？

为解决多个有限理性主体参与的复杂博弈问题，研究采用了多智能体深度确定性策略梯度算法。这是一项源自人工智能领域的前沿技术，在此被创造性地应用于电力市场仿真。

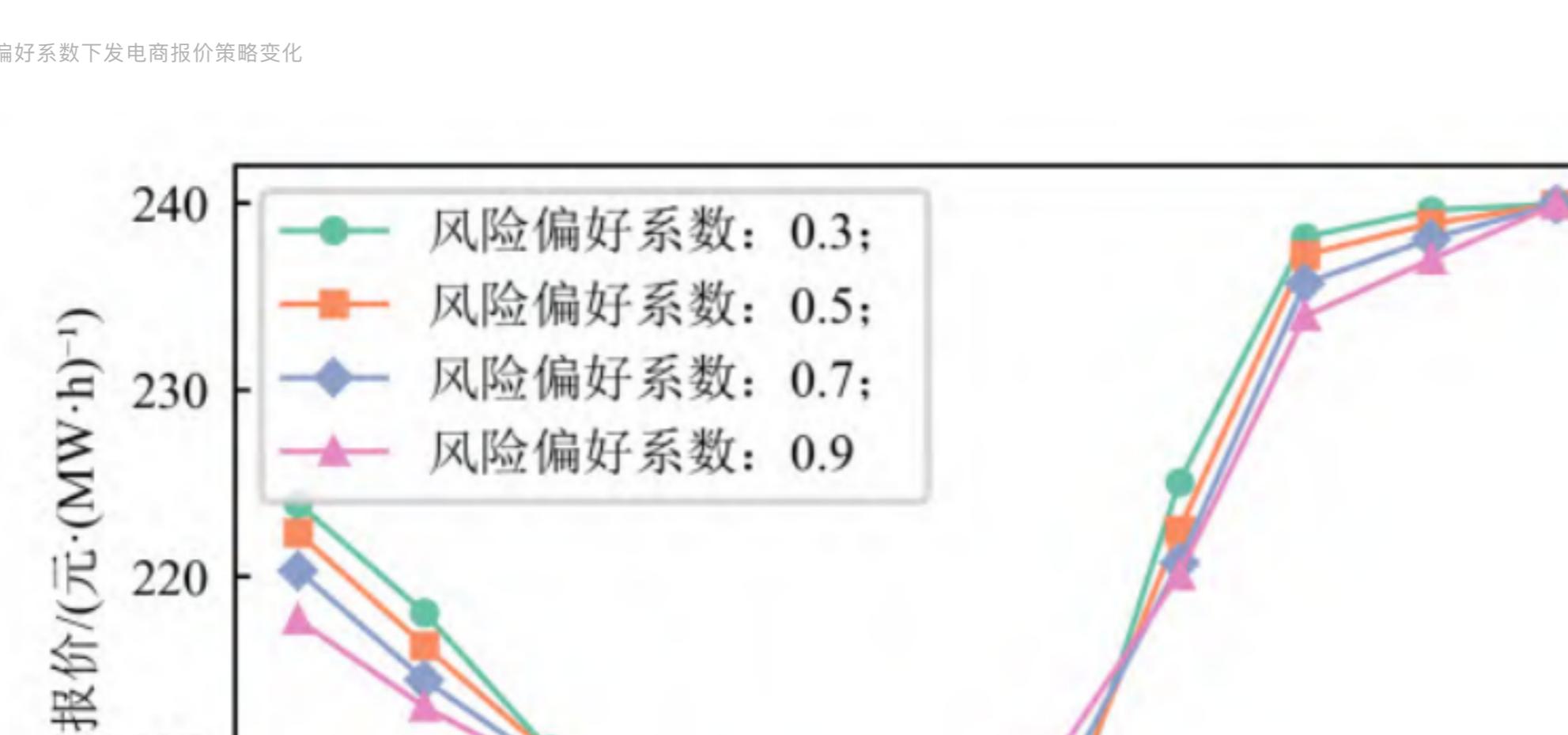
在该框架下，每一个发电商被建模为一个独立的智能体，它们共享同一个“环境”——即现货市场出清模型。智能体的“动作”是其申报的报价参数，“状态”是其所观测到的市场结果（自身中标电量和所在节点电价），“奖励”则是基于前景理论计算出的主观价值。

→ 经验存储 → 交互 → 学习 → 软更新 → 采样  
→ 信息传递 → 价值网络更新 → 策略网络更新 → 噪声



算法的精妙之处在于其“中心化训练，去中心化执行”的架构。在训练阶段，一个中央处理器收集所有智能体的经验（状态、动作、奖励、新状态），并利用这些全局信息为每个智能体训练一个“评论家”网络，以评估其策略的优劣。同时，每个智能体自身的“演员”网络则根据评论家的指导，学习如何改进报价策略。训练完成后，每个发电商智能体便可仅凭自身局部观测，独立做出报价决策。

MADDPG 算法各发电商报价策略变化曲线



通过数万轮的模拟迭代，这些智能体从随机报价开始，不断试错、学习、调整，最终收敛到一个稳定状态。在此状态下，没有任何一个发电商能够通过单方面改变报价而提升自己的主观价值——这正是博弈论中所定义的纳什均衡。MADDPG算法成功地让AI代理“自学”出了市场均衡策略，为观察真实发电商行为提供了前所未有的动态视角。

核心发现：中长期合约是平抑电价的“压舱石”

基于上述模型与算法，研究团队对中国东部某区域包含8家发电商的真实系统进行了仿真，得出了具有明确商业与政策含义的核心结论。

首先，中长期交易电量占比直接调控现货市场“供需比”，是影响电价的关键阀门。研究定义了“现货市场供需比”这一指标，即：

现货市场供需比 = (系统总发电容量 - 中长期合约电量) / (系统总负荷 - 中长期合约电量)

仿真清晰地表明，提高中长期合约电量占比，能有效提升现货市场供需比，从而缓和市场竞争紧张程度。

不同中长期交易电量占比下现货市场价格



当发电商从中长期市场获得少量利润时，他们对现货收益抱有较高期望（参考点较高），倾向于报高价追逐利润。当中长期利润适当增加时，他们感觉“安全垫”变厚，对损失的恐惧减弱，反而更愿意报低价以确保中标。然而，当中长期利润非常高，几乎覆盖全部预期利润时，现货交易的任何结果都被视作“额外收益”，损失规避心理的影响降至最低，他们又会尝试报高价以博取更多盈余。

不同风险偏好系数下发电商报价策略变化



最后，市场结构决定了话语权分配，边际机组是推高电价的主力。仿真结果直观展示了不同成本结构的发电商在市场中的差异化策略。低成本机组（通常是基荷电源）倾向于按真实成本报价，以确保满发。而高成本的边际机组则拥有更大的报价自由度，它们是拉动整体现货市场价格上涨的主要力量。当中长期合约占比提高，整个现货市场的竞争空间收缩，边际机组的市场力被削弱，这是电价得以降低的结构性原因。

商业启示：给市场设计者与发电商的策略地图

这基于AI的均衡分析，不仅是一项学术成果，更为电力市场相关方提供了可操作的策略地图。

对于市场运营与监管机构而言，研究提供了量化评估政策效果的“沙盘”。例如，在规划中长期合约交易比例时，可以预测其对现货价格峰值的影响。在监测市场运力时，可以重点关注边际机组在供需紧张时段的行为。仿真模型本身可以发展为一种市场规则测试平台，在新规则出台前预先评估其能否有效抑制不合理竞价，引导市场形成良性均衡。

对于发电企业而言，研究揭示了在“中长期+现货”组合交易中优化收益的心理与策略平衡。它提示发电商：不能仅基于物理成本制定报价，必须将已有的中长期头寸作为决策的心理和财务起点，评估自身的风险偏好状态。同时，需密切关注全网供需比及中长期合约总比例，以此判断当前市场环境下策略性报价的空间与风险。在参与中长期市场时，也应意识到不同的签约比例将直接影响后续在现货市场中的博弈地位和行为模式。

碧蓝观察：更复杂的市场与更智能的算法

本文聚焦于中长期交易与现货市场的纵向互动。未来的研究之路将通向更广阔的场景：当输电阻塞成为常态，节点电价差异将如何影响博弈？发电商之间的差异化市场力及潜在合谋行为如何建模？当可再生能源、分布式资源、储能、负荷聚合商等新型主体大规模涌入，多类型主体在电-碳-绿电耦合市场中的博弈将何等复杂？

在算法层面，如何提升大规模智能体训练的效率和稳定性，如何将更复杂的市场规则与物理约束无缝嵌入强化学习环境，都是值得探索的方向。这项研究已经开启了一扇门，让我们得以用计算实验的视角，洞察电力市场这一复杂巨系统的运行规律。随着算法与算力的不断进步，基于人工智能的市场仿真与均衡分析，必将成为电力市场精细化设计与稳健运营不可或缺的智慧工具。

最终，所有的模型、算法与仿真，都服务于一个目标：理解并引导市场力量，在保障电力系统安全可靠运行的前提下，发现更有效的电价信号，推动能源资源的优化配置。

参考文献：李晓刚, 刘旗源, 沈源昊, 吴敏, 陈中阳, 刘冬源. 考虑中长期交易的电力现货市场发电商竞价均衡分析[J/OL]. 中国电力.

-END-



关注碧蓝能源，了解每个工作日最新鲜的新能源电力动态分析



★ 星标指南

1. 点击右上角

2. 点击“设为星标”

不错过每一篇文章