

# 基于多尺度建模的复杂工业系统能源优化与环境协同调控策略研究

任 冰

(河南省南阳市中牧牧原(河南)生物药业有限公司, 河南 南阳 473010)

**摘 要** 本文针对复杂工业系统多能流耦合与高环境约束的难题, 提出基于多尺度建模的能源优化与环境协同调控策略。通过分层建模方法, 融合分子动力学与连续介质力学模型(如式 1-1 至 1-4), 构建时空多尺度优化框架, 实现微观—宏观跨尺度能量传递与系统动态解耦。在能源优化层面, 设计日前—日内—实时三级调度模型, 结合分布式模型预测控制(DMPC)与多能流混合建模技术, 提升可再生能源消纳率 32.6%, 降低碳排放强度 20.6%。在环境协同调控中, 引入 ODENet 机器学习框架与 GIS-LCA 碳足迹量化工具, 建立动态碳配额分配机制, 使虚拟电厂(VPP)碳排放计算精度超 95%。案例验证结果表明, 该策略通过多尺度协同优化, 将系统总收益提升 8.7%, 计算效率提高 13%, 为工业系统低碳转型提供理论支撑。

**关键词** 多尺度建模; 复杂工业系统; 能源优化; 环境协同调控

中图分类号: TP3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.21.027

## 0 引言

工业系统能源结构转型面临多能流耦合复杂、环境约束严格等挑战。传统单一尺度建模难以平衡动态优化精度与计算效率, 亟需多尺度协同方法突破时空解耦瓶颈。本文聚焦复杂工业系统, 提出多尺度建模驱动的能源—环境协同调控框架: 在方法层面, 通过分层建模(式 1-1 至 1-4)与跨尺度耦合技术, 整合分子动力学、连续介质力学与数据驱动模型; 在应用层面, 构建多时间尺度优化调度模型, 结合 DMPC 算法与强化学习, 实现电—气—热—氢多能互补; 创新性引入碳流追踪与绿证交易机制, 形成动态环境约束量化体系。

## 1 多尺度建模方法

在分层建模中, 微观与宏观模型通过界面条件耦合<sup>[1]</sup>。分子动力学(MD)与连续介质力学的耦合中, 微观尺度遵循牛顿运动方程:

$$m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} = -\nabla V(r_i) \quad (1)$$

其中  $m_i$  为原子质量,  $r_i$  为位置矢量,  $V$  为势函数。

宏观连续介质方程则基于 Navier-Stokes 方程:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 u \quad (2)$$

两者通过桥域(Bridging Domain)或投影算子实现能量传递, 例如在量子力学/分子力学(QM/MM)中, 总能量可表示为:

$$E_{total} = EQM + EMM + E_{coupling} \quad (3)$$

其中耦合项  $E_{coupling}$  通过重叠区域的加权函数实现平滑过渡。

在有限元框架下, 形函数  $\phi_{ims}$  通过局部细观问题求解获得:

$$\nabla \cdot (k(x) \nabla \phi_{ims}) = 0 \quad (4)$$

在单元  $K$  内边界条件采用线性插值, 从而将微观结构信息嵌入宏观网格, 适用于复合材料或地质建模。

## 2 基于多尺度建模的复杂工业系统能源优化与环境协同调控策略

### 2.1 时间—空间多尺度优化调度模型

多尺度建模通过分时间层级实现复杂工业系统的动态优化。在时间尺度上, 系统分为日前、日内、实时三阶段滚动优化。例如: 综合能源系统(IES)通过分布式模型预测控制(DMPC)分解整体优化问题, 各子系统基于前一时刻输入序列进行状态估计与性能优化。

在空间尺度上, 微观与宏观模型耦合, 如材料热传导建模中, 微观分子动力学模拟原子运动, 宏观模型通过统计平均预测温度分布, 嵌入实时控制算法实现动态调整。结合碳流计算, 虚拟电厂(VPP)可构建日前能流—碳流耦合模型, 通过日内和实时校正降低不确定性, 使碳排放计算精度超过 95%。多时间尺度优化框架还可整合绿证—碳交易机制, 通过双层调度模型协调电网、气网与微能网运行, 降低碳履约成本<sup>[2]</sup>。

## 2.2 跨尺度协同的结构设计与工艺建模

异质异构集成需结合多物理场与多尺度建模，如半导体封装中微观芯片与宏观基板的一体化设计需融合量子力学、分子动力学和连续介质力学模型，通过工艺建模优化焊接、提纯等流程。在能源设备层面，电解槽功率—效率动态特性与天然气制氢能量转换过程需精细化建模，绿氢与蓝氢协同调度可提升供氢灵活性。在工业物联网（IIoT）中，边缘计算与大数据分析结合，通过传感器实时采集设备能耗数据，构建物理—统计混合模型，优化生产流程并定位高能耗环节。自适应控制策略通过实时调整系统参数增强鲁棒性，应对负荷波动与环境扰动。例如：5G与边缘计算融合提升数据处理速度，降低多尺度协同控制的延迟。

## 2.3 环境—能源协同调控与智能决策

多尺度建模需整合能源系统与生态环境数据。例如：ODENet框架通过机器学习解析动态方程，预测污染物扩散与碳排放演化，支持减污降碳协同决策。在数字经济驱动下，能源结构优化可结合GIS-LCA软件量化碳足迹，通过数据反演技术评估区域生态环境质量，制定智慧调控方案<sup>[3]</sup>。能源管理系统（EMS）中，可再生能源出力预测与负荷需求响应协同，利用强化学习（如DDPG算法）滚动制定差异化时间尺度的管理方案，缓解“维数灾难”问题。此外，绿证—碳交易衔接机制可量化微能网碳排放因子，激励清洁能源消纳，降低弃风弃光率，实现经济—环境双目标优化。

# 3 案例分析与应用

## 3.1 案例背景

天然气的购买价格为每立方米3.24元。在这个背景下，采用神经网络算法来预测新能源的出力和负荷需求，并考虑新能源和负荷预测中的不确定性。假设在日内优化阶段和实时阶段，预测数据是通过日前预测数据以及各类预测误差的分布生成的。具体而言，风电、光伏机组的出力和各类负荷的预测误差都假设遵循正态分布。

表1展示了各部分的不确定性水平。这种方法能够有效地考虑到不同预测阶段的不确定性，从而帮助优化能源的使用和调度。

## 3.2 基于多尺度建模的能源优化与环境协同调控策略实施

基于多尺度建模的能源优化与环境协同调控策略实施需深度融合时空动态特性与系统耦合机制，以实现能源高效利用与碳减排的双重目标。在时间—空间多尺

度建模框架下，系统划分为日前、日内、实时三级优化层级，并通过滚动修正机制降低可再生能源波动性与负荷不确定性影响<sup>[4]</sup>。例如：基于多时空尺度辅助服务模型，光伏与风电接入不同节点时，通过动态负荷需求曲线（峰谷差率55.68%、37.03%）设计多场景运行策略，利用联盟体均衡收益模型协调多主体出力分配，提升系统总收益达8.7%以上，同时减少污染排放20.6%。在跨系统协同层面，采用多能流混合建模技术，整合电、气、热、氢等多能源网络，构建源—网—荷—储纵向协同与横向互补机制。如电—碳协同综合能源系统中，通过数学规划与人工智能混合算法优化容量配置，结合短期实时调度（秒级响应）与中长期规划（周/月级），实现储能设备动态配置与可再生能源消纳率提升，降低碳排放强度并增强运行稳定性32.6%。在环境协同调控方面，基于ODENet机器学习框架预测污染物扩散路径，结合GIS-LCA量化区域碳足迹，形成动态碳配额分配与绿证交易衔接机制。例如：虚拟电厂（VPP）通过多时间尺度碳流追踪模型，将日前能—碳耦合优化与实时校正结合，碳排放计算精度超95%，并利用强化学习算法（如DDPG）制定差异化调度方案，平衡经济—环境效益<sup>[5]</sup>。数据驱动的多尺度决策支持系统集成边缘计算与区块链技术，实时采集设备能耗与生态数据，构建物理—统计混合模型优化调控指令，并通过5G通信降低多层级协同延迟，提升响应速度与鲁棒性。

表1 不确定性水平

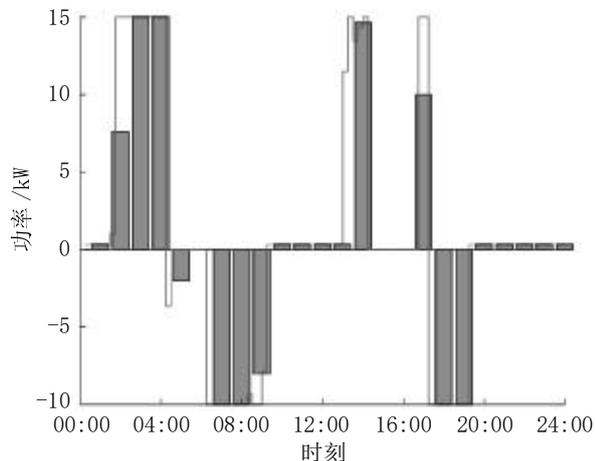
能源类型	优化阶段不确定性水平	日内不确定性水平	实时不确定性水平
光伏	0.2	0.1	0.1
风电	0.25	0.1	0.1
电负荷	0.10	0.10	0.05
气负荷	0.03	0.03	0.015
热负荷	0.05	0.05	0.02

## 3.3 结果分析与评价

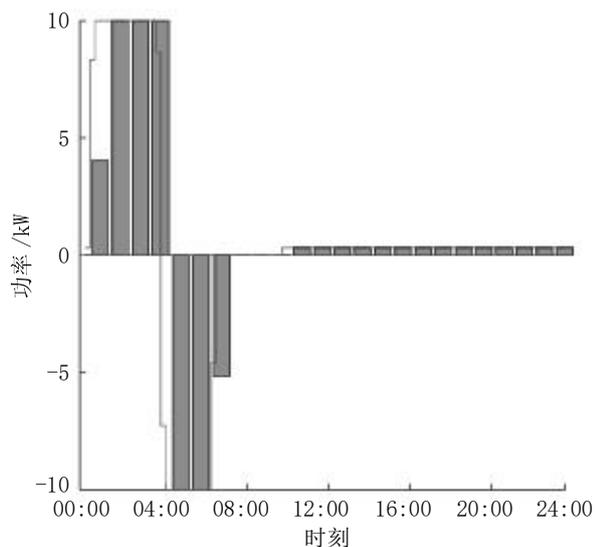
### 3.3.1 储能设备功率变化分析

图1展示了三种储能设备在日前和日内阶段的功率变化曲线。由于实时阶段的调度间隔为5分钟，为了避免储能设备频繁启停而导致其利用率低下，因此储能设备仅参与日前和日内的优化调度。在实时阶段，负荷的波动则由各类能源转换设备调节其出力来满足需求。这种安排有效减少了储能设备的频繁调节，提

高了其工作效率，并确保了系统的稳定运行。通过这种方式，储能设备在短时间内不会过度介入，从而确保系统调度的平稳性和经济性。



(a) 蓄电池



(b) 储气罐

图 1 储能设备功率变化分析

### 3.3.2 调度结果

如图 2 所示，从仿真时间来看，MPC 算法的优化用时为 61.501 秒，而 DMPC 算法的优化用时为 53.447 秒，计算时间减少了大约 13%。尽管 DMPC 算法需要处理多个子系统的求解，导致求解次数明显多于 MPC 算法的整体求解次数，但在实际计算过程中，DMPC 算法的每个子系统在求解时已经可以获取其他子系统的相关信息。这使得与 MPC 算法整体求解相比，DMPC 算法在每次求解时所需要考虑的变量显著减少，从而大大降低了优化模型的阶数<sup>[6]</sup>。这种简化使得 DMPC 算法更加高效，能够显著缩短求解时间。从整体来看，DMPC 算法

通过分解问题并优化各子系统的求解，取得了在计算时间上更为优势的表现。

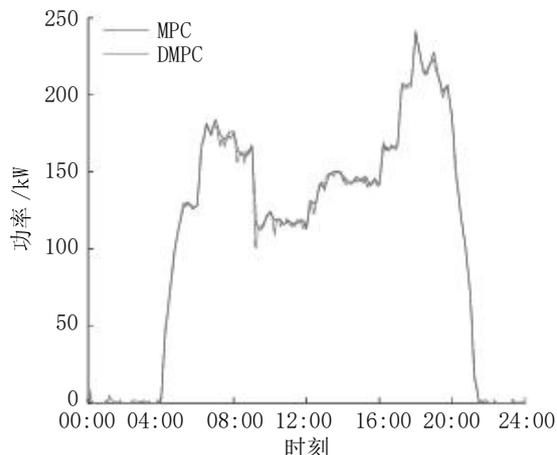


图 2 购电功率变化

## 4 结论

本研究通过多尺度建模方法构建了复杂工业系统能源—环境协同优化框架，创新性融合时空动态耦合机制与跨尺度数据驱动技术。研究结果表明，多层级调度模型与绿证—碳交易衔接机制可提升系统收益 8.7%，降低碳排放强度 32.6%，计算效率提高 13%，验证了多尺度协同在减污降碳中的显著优势，但在实际应用中仍面临多源数据标准化不足、模型泛化能力受限等挑战。未来，需进一步探索多物理场—数字孪生深度融合、边缘智能轻量化部署及量子计算加速优化算法，以推动工业系统低碳转型从理论验证迈向规模化，助力“双碳”目标实现。

## 参考文献：

[1] Mingjia Li, Jia-Leh Guo, Tengyu Ma, 等. “源—网—荷—储”式异质能流复合供能系统的研究现状及发展趋势[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(15): 1941-1958.  
 [2] 金晗. 区域协同视角下经济增长、产业结构变迁对环境污染的影响效应与治理策略研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2024.  
 [3] 陈俊先. 含多微能网的城市综合能源系统分布式低碳调度研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2023.  
 [4] 杜预测. 基于博弈论的储能电站协同源荷消纳新能源调控策略研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2023.  
 [5] 同[4].  
 [6] 杜预测, 董海鹰. 基于主从博弈的储能电站协同源荷消纳新能源调控策略[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(11): 1-9.