

2025.02.11

量化电动汽车有序充电效益：浙江省案例研究

高驰

cgao@raponline.org

睿博能源智库

项目描述

本报告呈现了睿博能源智库（RAP）全球研究项目“量化电动汽车智能充电效益”的中国项目模型研究成果。建模分析由卓尔德环境研究中心（Draworld Environment Research Center）张树伟博士提供技术支持。同时，特别感谢Max Dupuy与Julia Hildermeier两位专家对本研究提出的宝贵建议，以及何泉在文本校对上的支持。

文中若有任何错误或遗漏，由作者本人全权负责。



1

模型描述

模型顶层结构



	交通蒙特卡洛模型	电力模型：调度优化	电力模型：容量规划与经济调度
输入	电动汽车特性、充电习惯	电动汽车灵活性潜力曲线、全社会负荷曲线	负荷曲线、电力资源成本、已有电力资源容量等
方法	蒙特卡洛模拟	数学优化模型	数学优化模型
目标	电动汽车灵活性潜力曲线	负荷曲线优化、可再生能源消纳	最小化电力系统成本

模型中层描述

电动汽车充电灵活性潜力曲线

描述:

- 模型采用多主体建模方法(agent-based model)，在不损害充电需求的前提下，基于以下参数量化充电灵活性潜力曲线：
 - 电动汽车充电行为
 - 电动汽车保有量预测
 - 电动汽车能力参数

步骤:

- 1.将输入参数转换为概率分布
- 2.通过概率分布抽样模拟充电过程
- 3.基于单次充电的可用窗口推导灵活性
- 4.叠加充电过程生成聚合充电灵活性曲线
- 5.确定总充电灵活性的上下边界

模型中层描述

调度优化

描述:

- 从系统运营中心/调度中心的视角优化电动汽车充电行为
- 调度中心所关注的目标:
 - 降低峰值负荷
 - 平滑负荷曲线
 - 平滑净负荷曲线

步骤:

- 将充电灵活性潜力曲线作为主要优化约束条件，设定优化目标。包括：
 - 最小化峰值负荷
 - 最小化平均爬坡速率
 - 最小化净负荷峰谷差
- 在2040年最高峰负荷日场景下，求解给定目标与约束条件的数学优化问题

模型中层描述

容量规划及经济调度规划

模型描述:

- 模拟2040年全年电力系统小时级运行状况
- 该模型通过优化电力系统投资和运行的决策来达成最小化电力系统总成本的优化目标。模型涵盖了电力系统的经济和物理约束分析。

步骤:

- 收集成本、已有容量、可再生能源禀赋和负荷等相关信息
- 在满足电力负荷需求及电动汽车充电灵活性约束条件的前提下，求解电力系统投资决策与运行决策的最优组合，实现电力系统总成本最小化。

容量规划与经济调度模型详解：输入参数

- 输入参数（预测值）：
 - 负荷
 - 可变成本与固定成本
 - 现有资源容量
 - 资源可扩展性
 - 例如：小型燃煤电厂预计在2040年前被淘汰，因此无法被扩展
- 输入参数（基于现状）：
 - 容量扩展限制
 - 可变可再生能源容量系数
 - 各资源碳排放强度系数
 - 电动汽车充电灵活性潜力曲线

容量规划与经济调度模型详解：约束

模型核心约束条件：

- 电力平衡约束：电力供应量和电力需求量必须在所有时刻相等
- 电动汽车充电约束：累积充电量必须在电动汽车充电灵活性潜力曲线边界之内，且保持单调递增。
- 发电资源运行约束：保证实时出力及容量扩展不超出规定上限

容量规划与经济调度模型决策变量详解：核心决策变量

- 电动汽车小时级充电电量
- 各资源容量扩展量
- 各资源小时级发电量



2

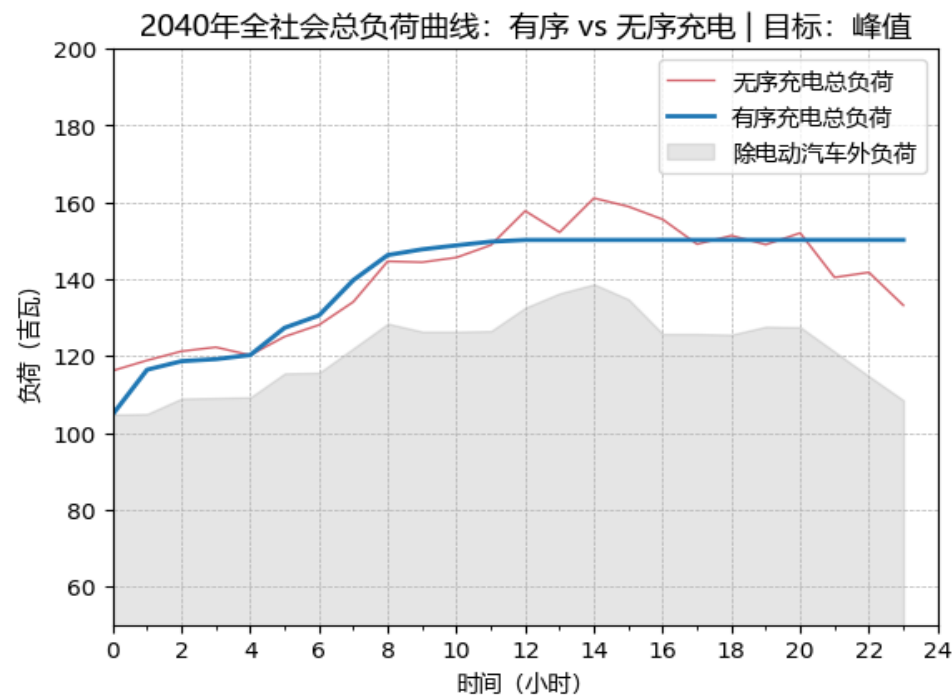
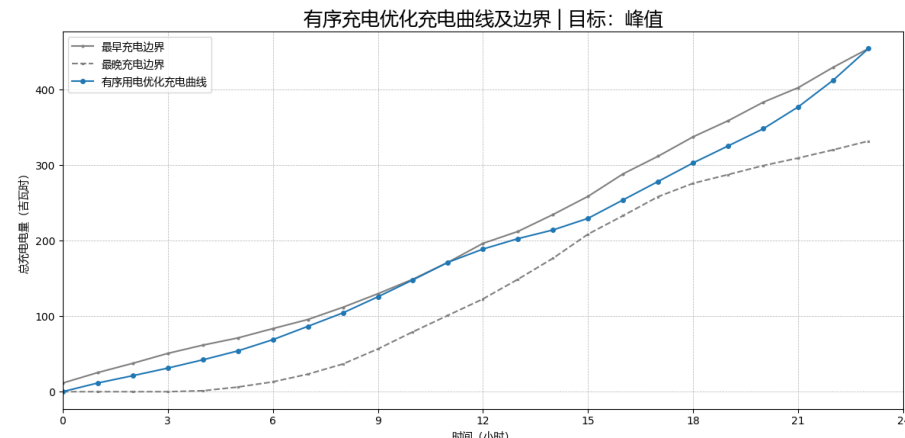
调度优化模型结果讨论

调度优化模型简述

- 调度优化分析从电网调度中心的角度出发，测算有序充电能够提供的调控价值。研究聚焦三大优化目标：
 - 全系统峰荷削减
 - 全系统爬坡率优化
 - 净负荷峰谷差缩小
- 分析聚焦于2040年浙江省的预测用电高峰日场景。在充电灵活性潜力曲线的约束条件下，模型对各项目标进行了独立优化。

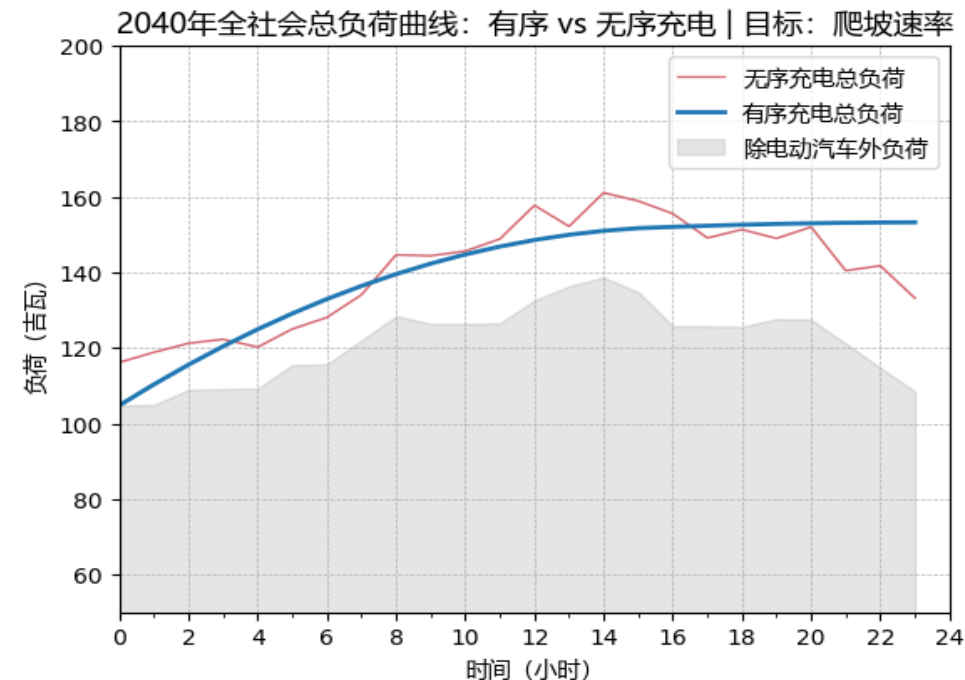
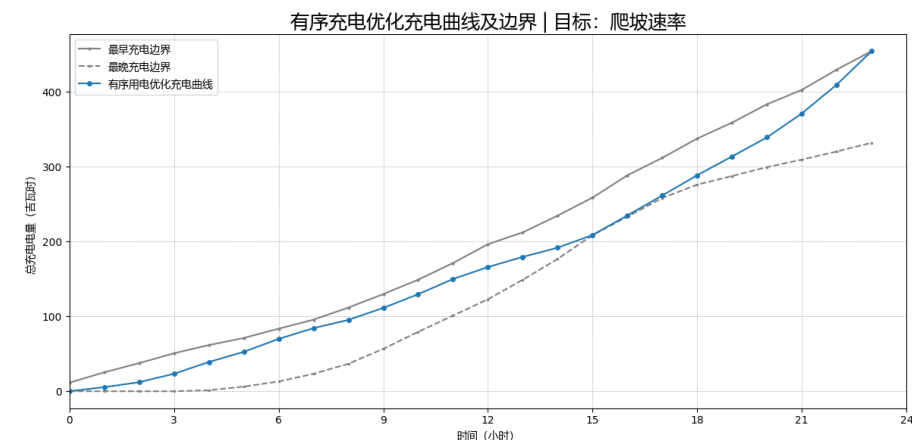
全系统峰荷削减

- 全系统峰荷指特定时段内电网电力需求的最高点。
- 上图展示了预测最高需求日的累积充电负荷曲线及充电灵活性潜力曲线。
- 下图对比了有无电动汽车有序充电调控时的系统负荷曲线（叠加其他用电需求）。
- 有序充电策略使系统整体峰荷降低7%。



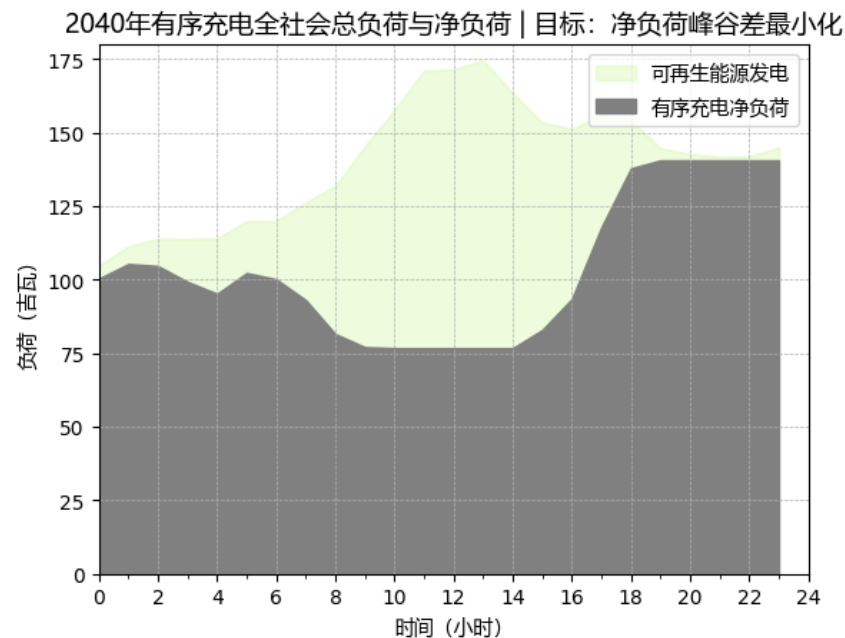
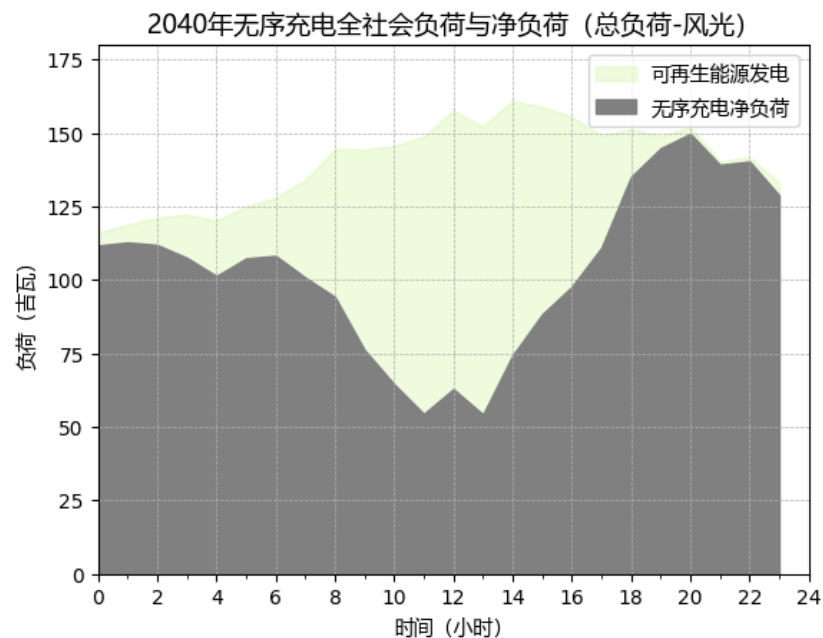
全系统爬坡率优化

- 爬坡速率指系统整体负荷曲线随时间变化的增减速度。
- 上图展示了用电高峰日的累积充电负荷曲线与充电灵活性潜力曲线。
- 下图对比了无序充电与有序充电模式下的负荷曲线（叠加其他用电需求）。
- 有序充电策略使平均爬坡速率降低55%。



净负荷峰谷差削减

- 净负荷峰谷差指扣除可再生能源发电后，电力需求最大值与最小值之间的差距，反映需由可调度资源满足的负荷需求。
- 有序充电策略使净负荷峰谷差缩小33%，实现更平滑的净负荷曲线。



总结表格

优化结果 优化目标	峰值负荷削减%	平均爬坡速率削减%	净负荷峰谷差削减%
削减峰值负荷	6.8%	52.33%	-4.5%
削减平均爬坡速率	4.9%	55.35%	-1.2%
最小化净负荷峰谷差	-8.4%	-13.25%	33.1%

小结

- 从电力系统调度中心视角分析：电动汽车有序充电作为系统性调节资源，可在不损害用户充电需求的前提下，通过降低机组爬坡速率、削减系统峰荷、缩小净负荷峰谷差等途径，显著提升电网调度稳定性。
- 实现这些快速响应的前提是广泛采用智能自动化充电控制技术。该技术可以充分释放电动汽车的灵活性潜力。
- 虽然削减爬坡速率与峰值存在协同增益效应，但需要注意的是，最小化净峰谷差的目标可能导致峰荷与爬坡速率的逆向抬升，需要建立多目标协同优化机制。

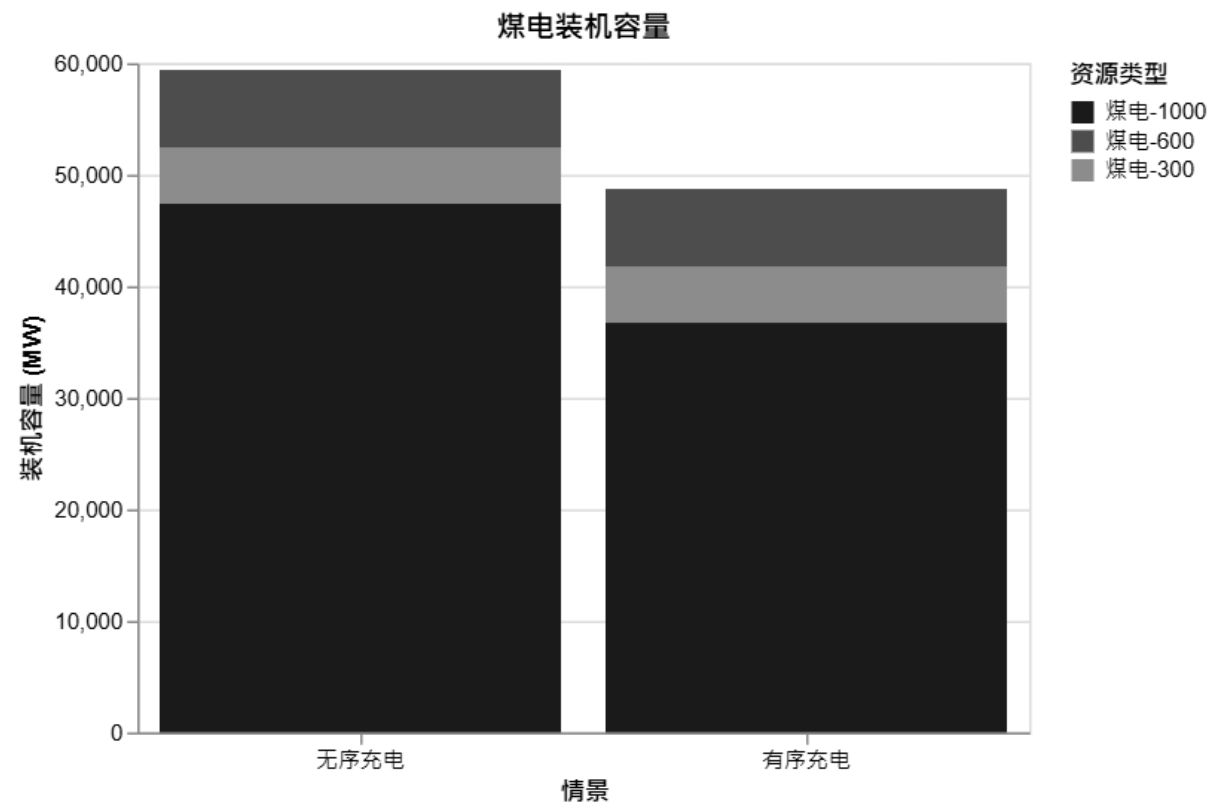


3

容量规划与经济调度模型

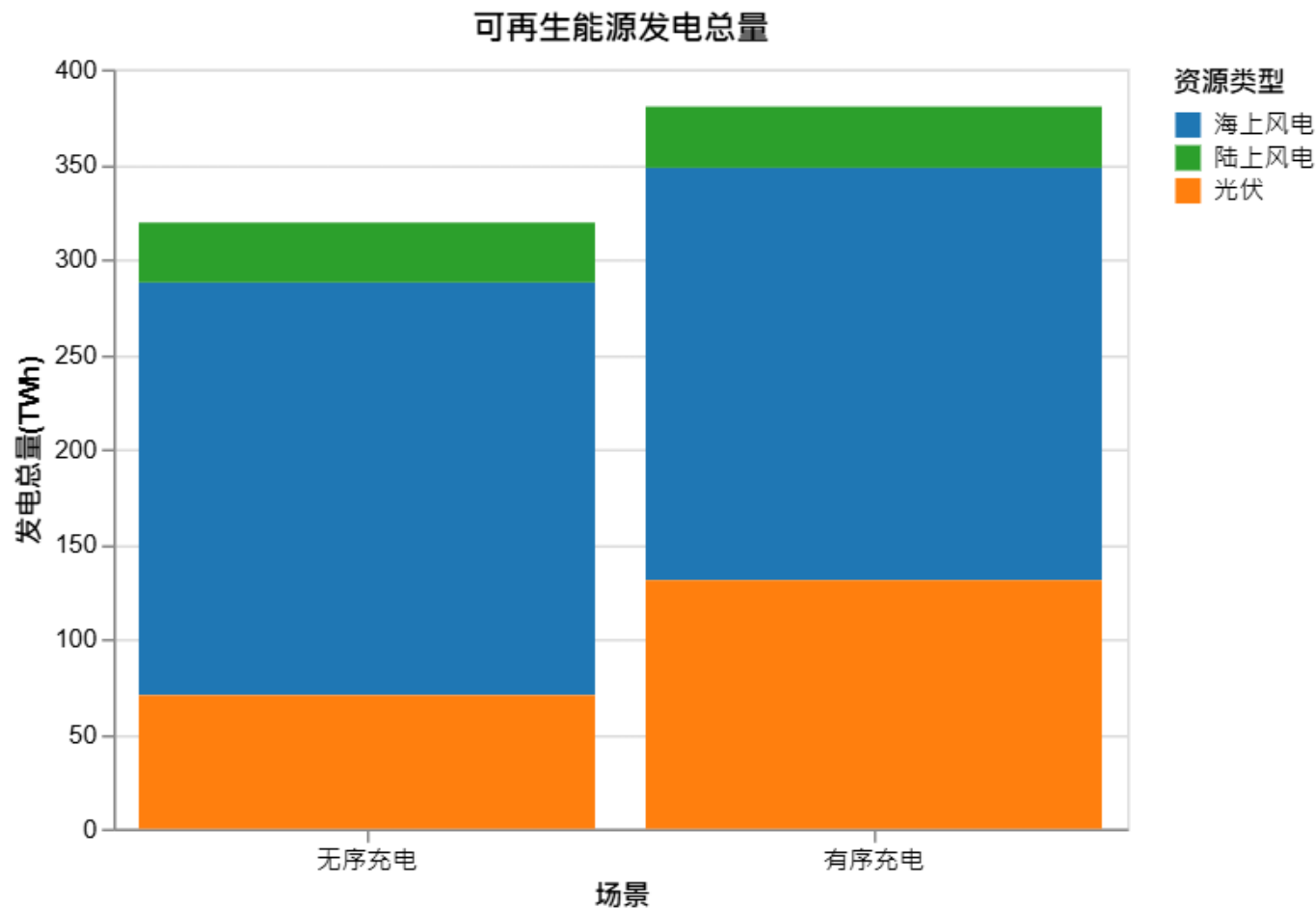
煤电容量削减

- 有序充电（右图）导致了煤电装机容量减少17%。
- 煤电机组按额定容量分为三类（大型、中型、小型）。
- 容量削减的主要原因：
 - 充电时段与可再生能源大发时段重合，优先利用零燃料成本电源。



可再生能源消纳

- 有序充电策略推动可再生能源发电量提升19%。
- 研究涵盖了三类可再生能源：海上风电、陆上风电及光伏发电，其中光伏贡献较为突出。
- 关键机制解析：
 - 充电时段与风光发电曲线智能匹配。
 - 提高可再生能源利用率，增强项目投资经济性。



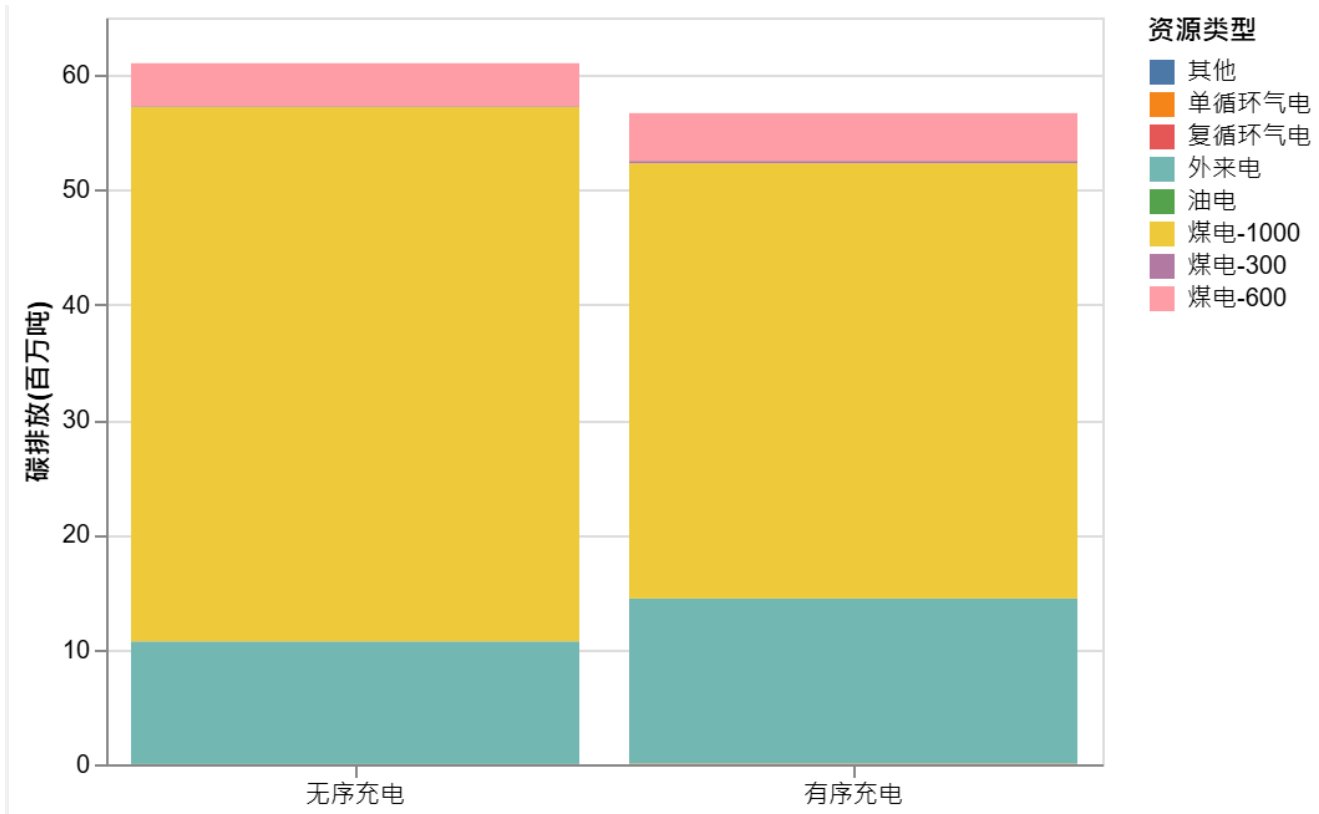
成本削减

- 有序充电策略实现社会总成本降低20亿元。
- 实施有序充电的情景特征:
 - 投资成本增加：可再生能源装机容量提前投资。
 - 运行成本下降：可再生能源边际成本趋零优势充分发挥。
- 投资成本增加额被运行支出减少额抵消，实现净节约。

	投资成本（亿元）	运行成本（亿元）
有序充电	1350	1390
无序充电	1300	1460

碳排放削减

- 外购电力按国家能源局政策要求，假设含50%可再生能源电量。
- 总减排量达430万吨，较无序充电情景减少7%。
- 减排主要来源于煤电发电量下降。



小结

- 从系统规划视角看，有序充电可作为一种协同优化解决方案，在降低电网投资成本、提升可再生能源消纳比例、削弱对煤电依赖及减少碳排放等方面展现多维度效益。研究表明，该模式能够通过负荷形态重构实现源网荷储协同优化。
- 尽管现有制度框架已着手缓解充电负荷对电网运行的冲击，但对电动汽车集群作为调节资源的运作机制尚未健全，仍存在一些制度空白。
- 可以进一步通过车网协同规划、分时电价、以及自动充电策略来解锁电动汽车充电的灵活性。