



清华大学电子工程系  
Department of Electronic Engineering



城市科学与计算研究中心  
Research Center of Urban Science and Computing

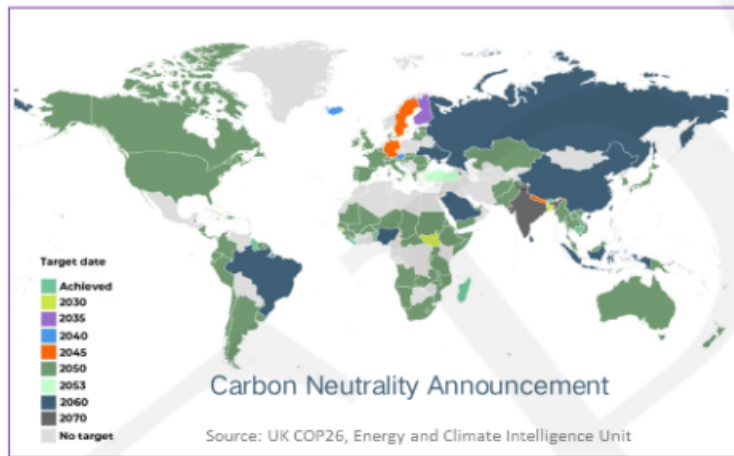
# 数智协同赋能新型电力系统

李勇教授，教育部长江学者  
清华大学电子工程系、城市科学与计算研究中心



<https://fi.ee.tsinghua.edu.cn>

## 碳中和是国际社会共识和中国郑重承诺



碳中和与绿色低碳转型已是国际共识，迄今已有151个国家提出碳中和战略目标，覆盖了全球88%碳排放、90%GDP、85%人口。

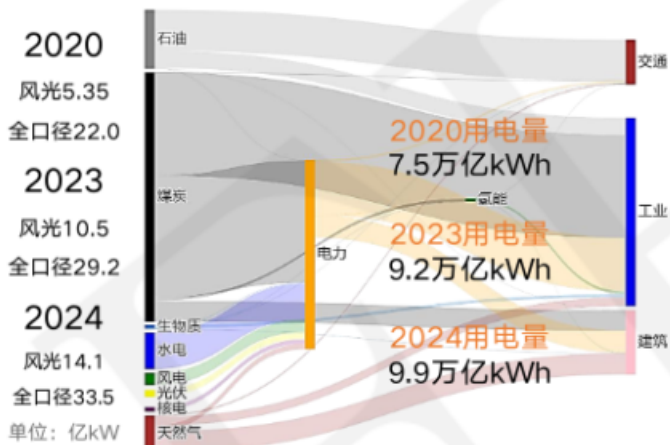
“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。”——第七十五届联合国大会一般性辩论，2020.09.22

# 产业趋势：双碳目标驱动能源生产与利用革命

双碳战略与能源独立目标驱动下，全球新能源占比持续提高，  
新能源的**随机性**、**波动性**带来挑战与机会

现阶段下中国能源供需平衡图（2020）

碳中和下中国能源供需平衡图（2060）



2050~

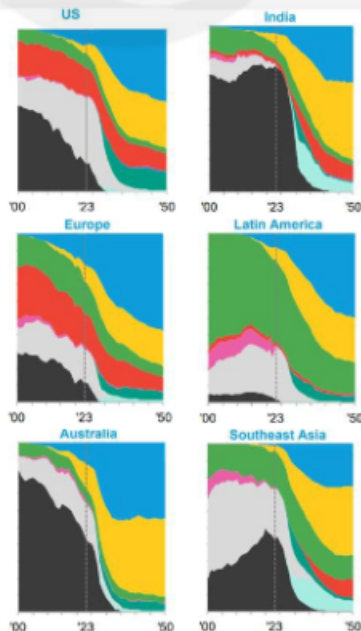
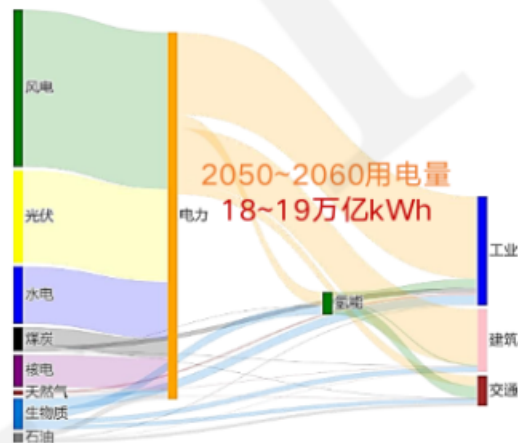
2060

风光

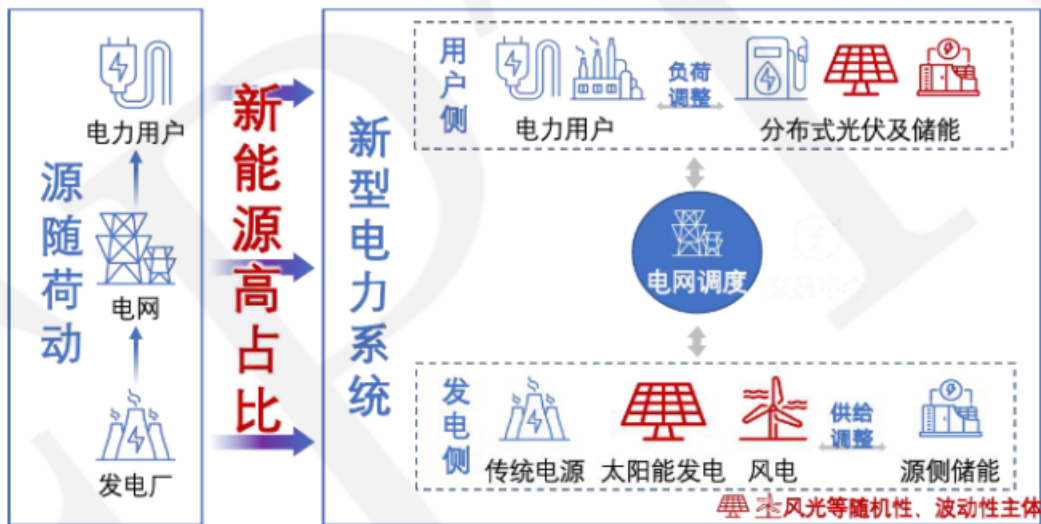
50亿kW

全口径

70亿kW



## 研究挑战：新型电力系统是高度复杂、随机波动的复杂系统

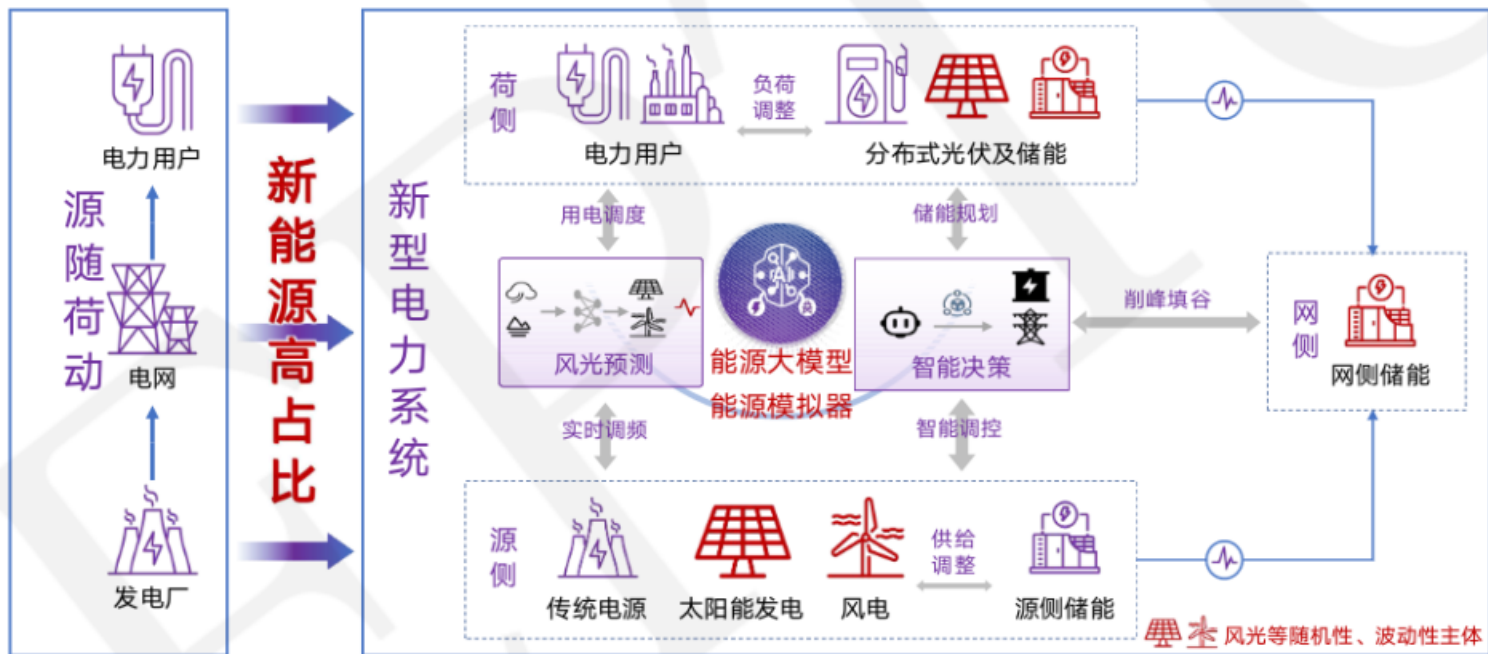


随着新能源在电力系统中占比的增加，新能源的波动性使得电力系统从能源结构单一，高度可控的系统逐渐变为高度复杂，随机波动的复杂系统

需要以数字化表达、智能化决策与协同化运行的技术体系赋能新型电力系统！

## 核心技术：能源模拟器与能源大模型

未来新能源高占比挑战电力系统**供需平衡**，亟需构建**支撑智能调控的电力数智孪生系统**



## 研究基础：城市模拟器



基于第一性原理的  
大规模城市居民活动模拟



步骤一

基于AIGC技术的居民活动轨迹模拟

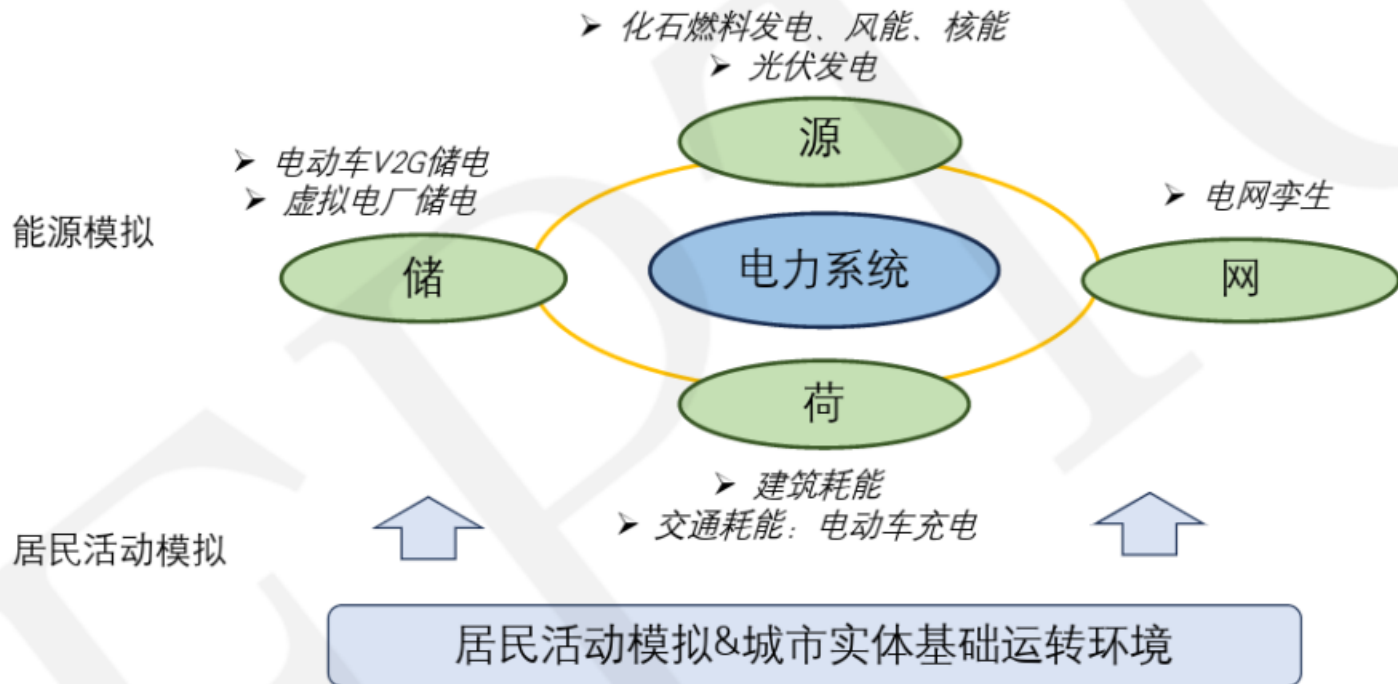


步骤二

细粒度居民-城市实体交互模拟

## 核心技术1：能源模拟器

研究目标：基于城市模拟器构建人类活动到能源链条的映射，实现能源链条全环节模拟。



# 能源模拟器：总体框架



发电



用电



电网模型  
模拟数据

$$0 = -P_i + \sum_{k=1}^N |V_i||V_k|(G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})$$

$$0 = -Q_i + \sum_{k=1}^N |V_i||V_k|(G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})$$

电路理论和  
功率流计算

模拟



EV

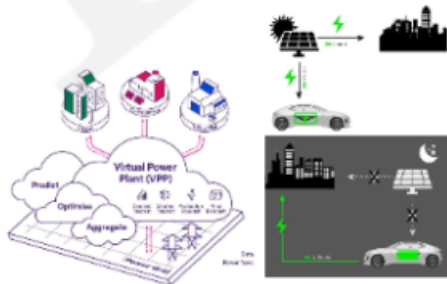


分布式光伏

反事实场景



分析电网操作



支持电网关联决策

结果

# 能源模拟器：电网拓扑生成

## □ 分层聚类方法

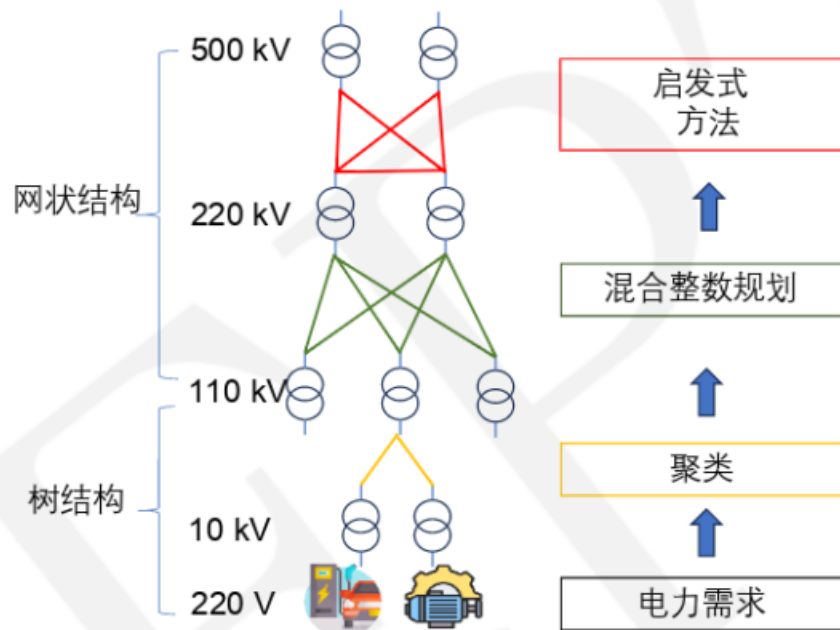


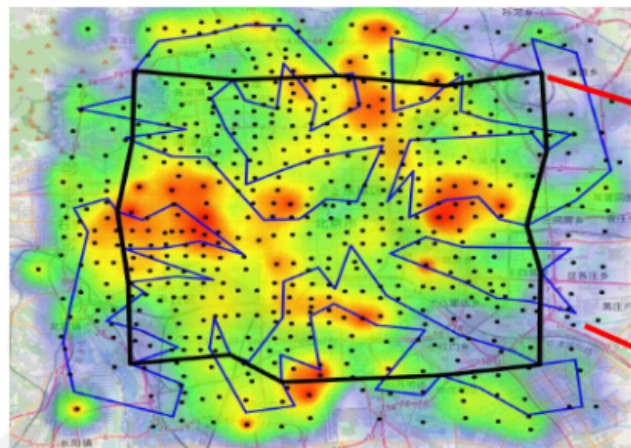
Table 2. Validation of transformer substation numbers

Voltage	500kV	220kV	110kV	10kV
Generated grid	9	100	535	33047
Ground truth [2]	10	82	374	59108

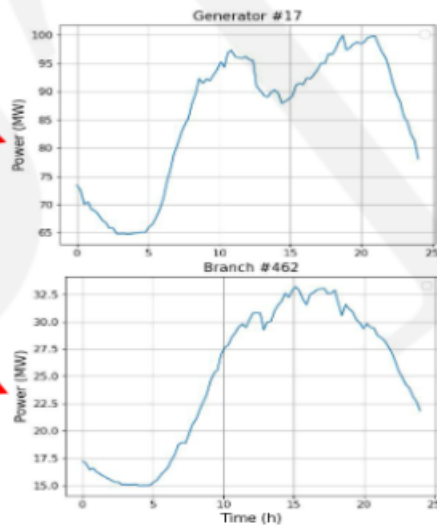
拓扑验证

# 能源模拟器：基于电路理论的潮流计算

## □ 变压器和输电线路上的城市范围仿真结果

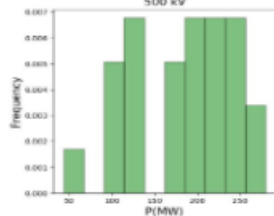
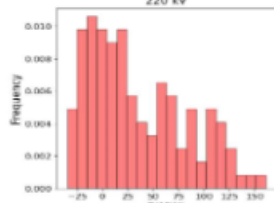
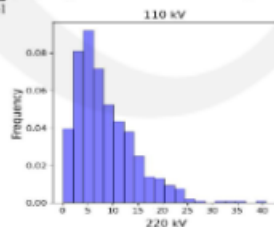


500 kV line    220 kV line    110 kV station



$$0 = -P_i + \sum_{k=1}^N |V_i||V_k|(G_{ik} \cos \theta_{ik} + B_{ik} \sin \theta_{ik})$$

$$0 = -Q_i + \sum_{k=1}^N |V_i||V_k|(G_{ik} \sin \theta_{ik} - B_{ik} \cos \theta_{ik})$$



## 能源模拟器：屋顶光伏供能模拟

总体目标

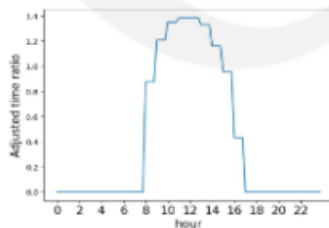
根据建筑物表面积推断建筑物逐日的光伏产量。

方法

使用以下映射函数 [1]。

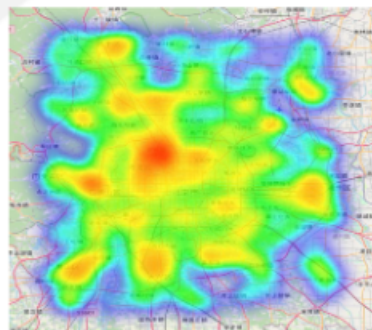
$$E_p = H_A \times S \times K_1 \times K_2 \times r_p(t)$$

光伏能源  $\uparrow$   $E_p$   
 太阳辐射能  $\downarrow$   $H_A$   
 占地面积  $\uparrow$   $S$   
 系统效率 = 80%[1]  $\uparrow$   $K_1$   
 调整后的时间比例[2]  $\rightarrow$   $r_p(t)$   
 光伏转换效率=16%[1]  $\downarrow$   $K_2$



结果

官方日产量总和 [1]: 192M kWh / 天  
 模拟日产量总和: 226M kWh / 天



## 能源模拟器：建筑用能模拟

总体目标 根据建筑物占用率和建筑物属性推断建筑物在各天内的能源使用情况。

方法 使用以下映射方程。

建筑*i*在*t*时刻的用电量

$$E_i(t) = C_i(N_i(t), H_i, S_i) \times N_i(t) \times r_e(t) \times S_i$$

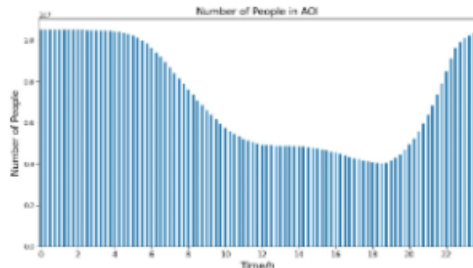
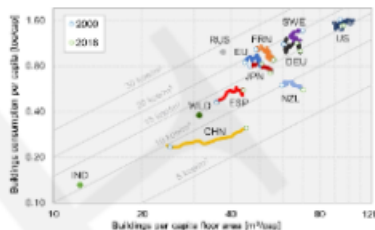
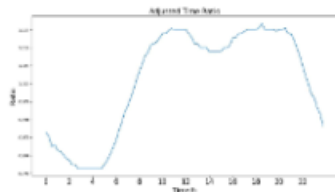
动态耗电曲线 [2]

建筑占地面积

人均建筑面积能源使用量 [1]

$$C(N_i(t), H_i, S_i) = 0.0013 \frac{H_i \times S_i}{N_i(t)} + 0.05$$

模拟得到的时间步 *t*时建筑物内人数



[1] M González-Torres, Luis Pérez-Lombard, Juan F Coronel, Ismael R Maestre, and Da Yan. 2022. A review on buildings energy information: Trends, end-uses, fuels and drivers. Energy Reports 8 (2022), 626–637.

[2] [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/03/content\\_5566580.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-12/03/content_5566580.htm)

## 能源模拟器：电动车用能模拟

总体目标

模拟电动汽车的电力使用及其充电行为，从而推断电动汽车充电站的充电负荷。

数据输入

电动汽车的模拟瞬时速度；  
北京5238个充电站的位置、充电桩数量和容量数据[1]。

方法

平均速度

### 1) 电力使用模拟 [1]

$$f(V_{\text{trip}}) = \begin{cases} -23.12 \times 10^{-3} \times V_{\text{trip}} + 0.439 & V_{\text{trip}} \leq 6.70 \\ -8.14 \times 10^{-3} \times V_{\text{trip}} + 0.338 & 6.70 \leq V_{\text{trip}} \leq 12.71 \\ -0.38 \times 10^{-3} \times V_{\text{trip}} + 0.240 & 12.71 \leq V_{\text{trip}} \leq 21.75 \\ 2.11 \times 10^{-3} \times V_{\text{trip}} + 0.185 & 21.75 \leq V_{\text{trip}} \leq 60.00, \end{cases}$$

每单位距离消耗电能

### 2) 充电行为建模

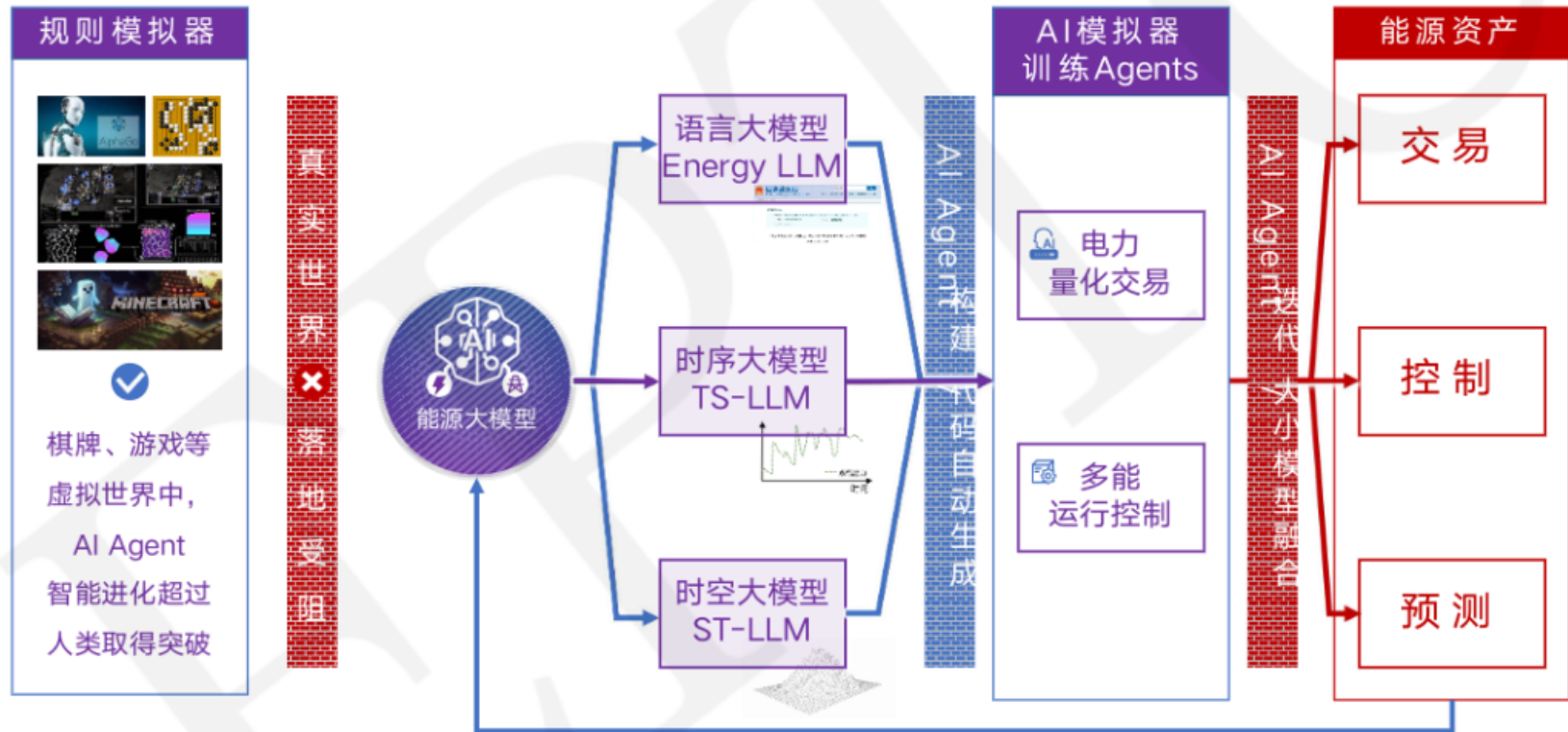
- 从在线地图资源抓取充电站统计数据，包括北京充电基础设施的分布、数量和容量。
- 将充电决策概率表示为与剩余电池容量成反比的函数[2]，并将电动汽车与最近的充电站匹配。

[1] [https://www.daas-auto.com/supermarket\\_data\\_De/845.html](https://www.daas-auto.com/supermarket_data_De/845.html)

[1] Xu, Yanyan, 等. “通过将充电曲线与城市出行相结合来规划电动汽车需求.” 自然能源 3.6 (2018), 484-493.

[2] 安德雷纳奇, 娜塔西娅·和玛丽亚·皮亚瓦伦蒂尼. “关于私人电动汽车充电行为的文献综述.” 应用科学 13.23 (2023): 12877.

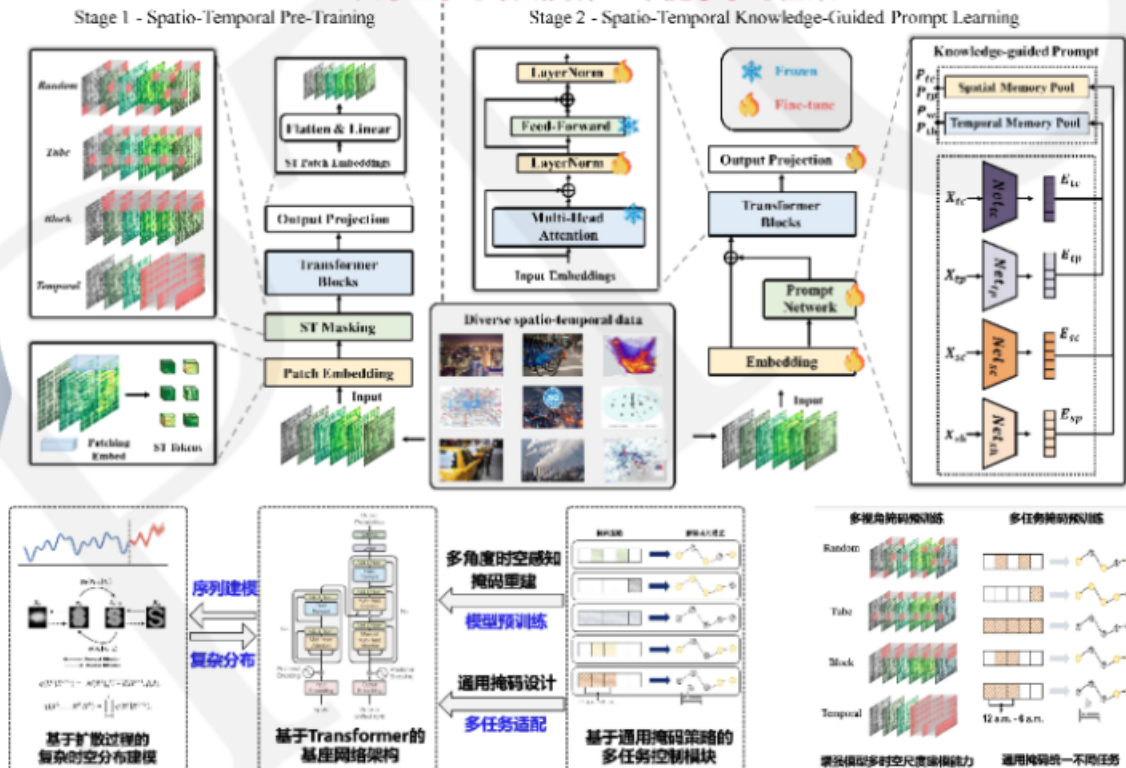
## 核心技术2：能源大模型——整体架构



# 能源大模型：模型结构

-  移动数据
-  人口数据
-  气象数据
-  能源数据
-  地理数据
-  环境数据
-  交通数据
-  活动数据
- .....

## 1、时空学习领域的第一个提示学习框架



## 2、Auto-Aggressive + DiT结构的融合

## 3、通用掩码与训练

# 能源大模型：研究成果

2018年至今

发表时空智能领域**CCF-A类**论文**85篇**，**CSRankings**排名**世界第一**  
**3篇**奠基性论文位列同期引用**第一**，超**1500次**

Rank	Author	Count
1	DeepMind	1500+
2	University of Toronto	1000+
3	Stanford University	800+
4	MIT	700+
5	Google Research	600+

ACM Transactions on Knowledge Discovery from Data

流量预测 DGCRN



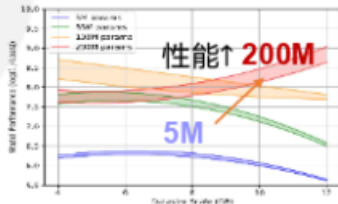
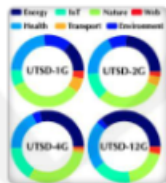
轨迹预测 DeepMove



隐私保护 PMF

2023年

研发**国际首个通用时空基础模型 UniST**，奠定能源大模型的基石



13亿+  
数据

时空GPT  
模型

20+  
城市应用

2024年

突破**能源大模型**关键技术，首次提出跨尺度**天气+气候+能源协同预测技术**，获**ACL 2024 (CCF-A类)**杰出论文奖



# 能源大模型：新能源发电预测达到国内外SOTA水平

能源大模型有效建模复杂气象模式，  
赋能电网调度/新能源场站/分布式能源**精准功率预测**

全球多源气象模型

多权威数据源+大模型数据源

ECMWF

GFS

ICON

GSM

GraphCast

盘古

国家气象局

风鸟

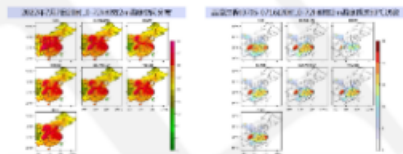
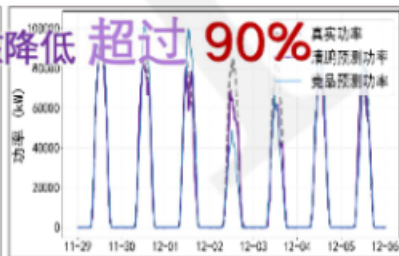
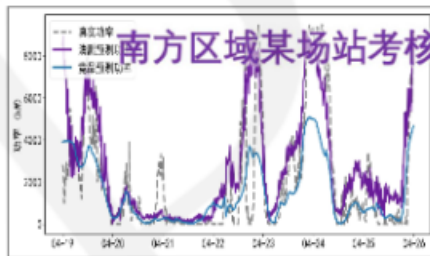
.....

能源时空大模型

有效建模复杂物理时空规律

大小模型协同

精准建模设备特性



风功率预测

华北准确率

最优小模型

84.57

清华能源大模型

93.06  
(15.31%↑)

光功率预测

南网准确率

最优小模型

76.27

清华能源大模型

85.12  
(14.77%↑)



主办单位：数字中国建设峰会组委会  
 主办单位：国网福建省电力有限公司

海上风电出力预测

第一名



# 能源大模型：AI电力交易员超越人类水平

## 山西市场多场站月度月内交易实证

在中国最早正式运行的电力现货省份，支持多类型场站**月度月内实盘交易**



# 能源模拟器和能源大模型支撑电力系统智能决策优化

动作：电力系统决策策略



V2G电动车充放电



能源模拟器



能源治理

虚拟电厂调度



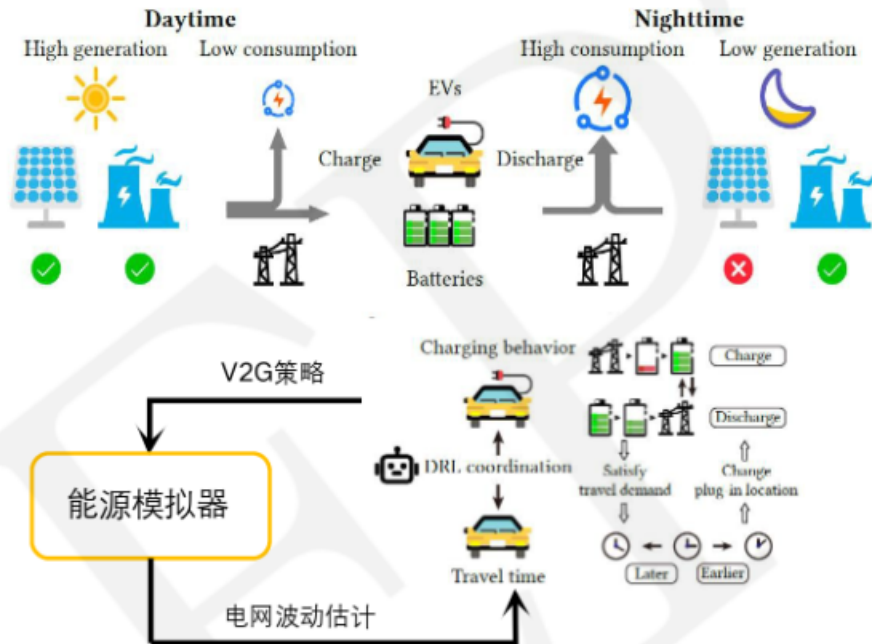
光伏规划



回报：短期/长期政策结果

## 决策优化支撑一：电动车充放电策略优化

总体目标 基于能源模拟器，使用能源大模型优化车对网（V2G）策略以增强电网稳定性。



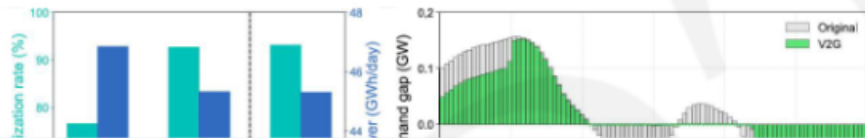
V2G：调整电动车的充电时间，从而实现电网的削峰填谷。

我们的尝试：

结合深度强化学习优化最佳V2G策略

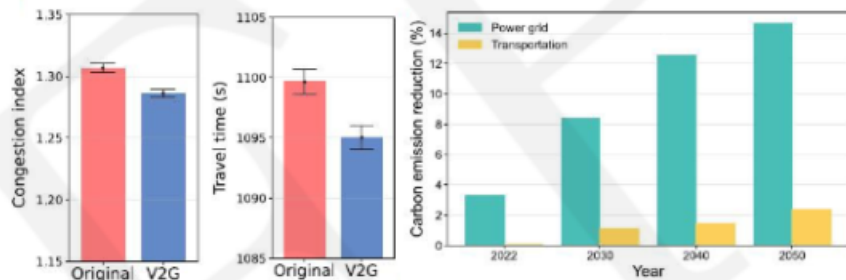
## 决策优化支撑一：电动车充放电策略优化

- V2G策略在节能方面表现出色



所提V2G策略可以大大提高光伏电力的利用率，从而大幅节省非光伏

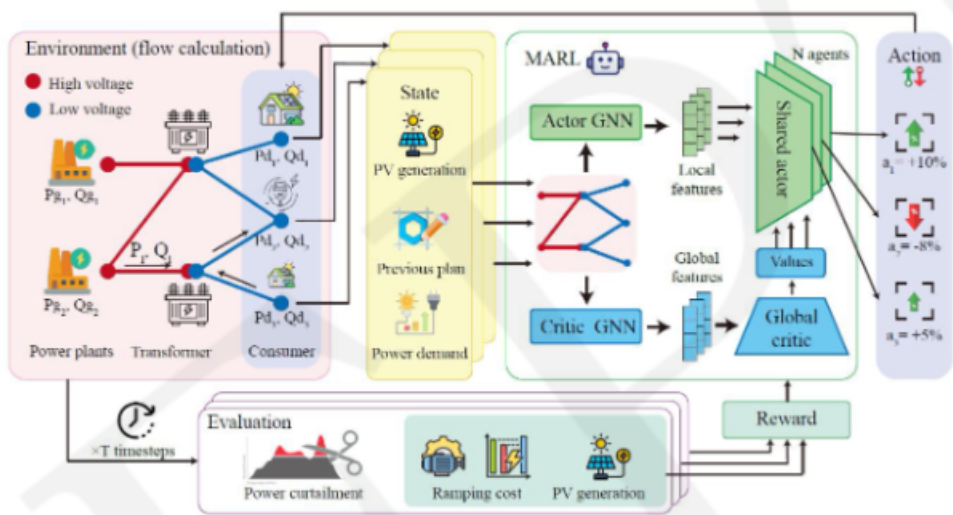
论文产出: Qianyue Hao, Qinglai Guo, Yong Li et al. City-scale Vehicle-to-grid Coordination with Real-world Data via Deep Reinforcement Learning. 投稿至 *Nature Sustainability*.



所提方法可以实现V2G策略理论潜力的98.3%。为每个城市每年节省1.16万吨二氧化碳。

## 决策优化支撑二：光伏规划

在分布式用户节点上部署屋顶光伏系统，以最大限度地提高太阳能发电量并最大限度地降低电网运营成本。

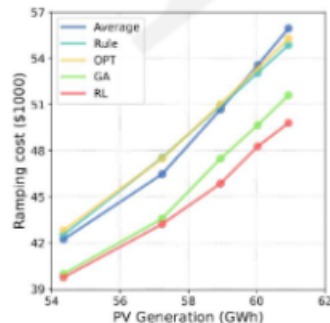


问题建模：连续规划过程

状态：AOI 的静态功率需求、当前光伏发电量概况和当前光伏装机率。

动作：调整当前部署比例。

奖励：光伏发电成本奖励和电网运行成本奖励的加权总和

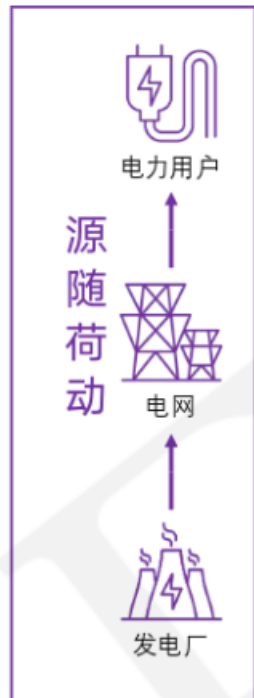


所提方法在光伏发电容量和爬坡成本方面都实现了帕累托最优。

Sibo Li, Yong Li et al. Multi-Agent Reinforcement Learning for Rooftop Photovoltaic Planning in Power Grids. 投稿至 *AAAI (CCF A类会议)*.

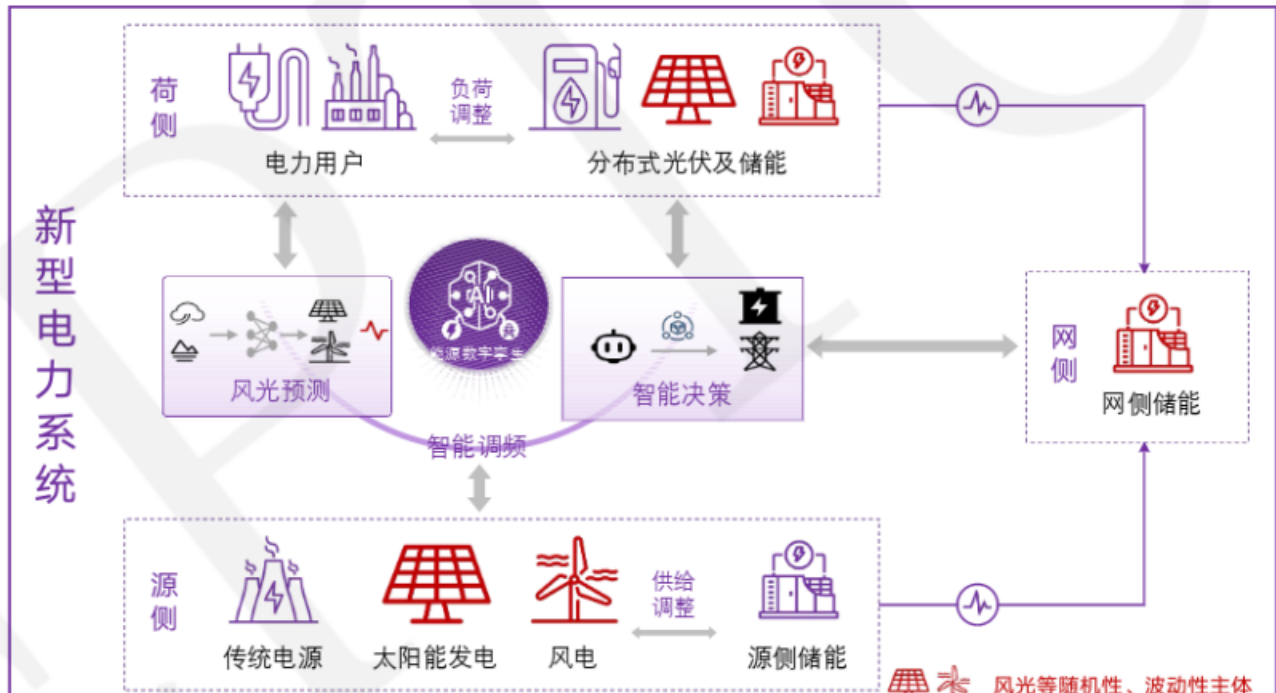


## 传统调频



新能源高占比

## 新型电力系统智能调控



风光等随机性、波动性主体

新能源高占比的新型电力系统供需实时平衡挑战大，  
以数智孪生系统为核心的源网荷储一体化智能调频是必然趋势



清华大学电子工程系  
Department of Electronic Engineering, Tsinghua University



城市科学与计算研究中心  
Research Center of Urban Science and Computing

<https://fi.ee.tsinghua.edu.cn>

