



清华大学深圳国际研究生院
Tsinghua Shenzhen International Graduate School

2022年国家自然科学基金项目交流与讨论会

—
**数据驱动的含多种储能综合能源配电系统规划方法研究
(52007123) 中期汇报**

沈欣炜

助理教授/特别研究员/博导

清华大学深圳国际研究生院

xwshen@tsinghua.edu.cn

目录

- 01 **研究内容及进展概述**
- 02 **面向配用侧储能应用的配电系统分区负荷模式识别**
- 03 **基于统计学习/考虑新型设备的IEDS不确定性规划建模**
- 04 **基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法**
- 05 **结论与展望**

▶ 研究内容目标简介



综合能源配电系统 Integrated Energy Distribution System, IEDS



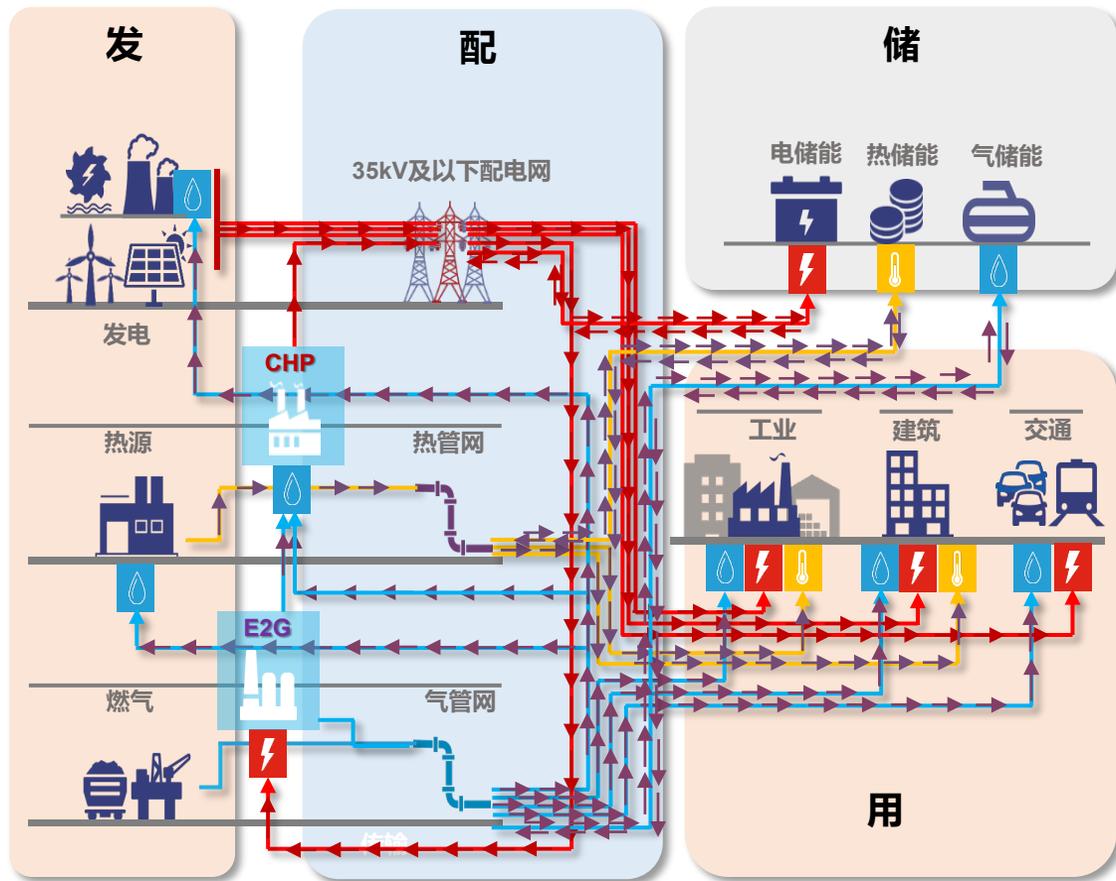
电



热



气



科学问题1：
如何充分利用相关量测数据准确量化多种储能
在IEDS中的应用效益？



研究内容1：
面向配用侧储能应用的
配电系统分区负荷模式
识别方法

科学问题2：
如何考虑多变运行场景
及不确定性对含储能
IEDS进行规划？



研究内容2：
基于统计学习/考虑新
型设备的IEDS不确定
性规划建模方法

科学问题3：
如何通过模型简化及算
法设计解决IEDS复杂
规划的计算效率问题？



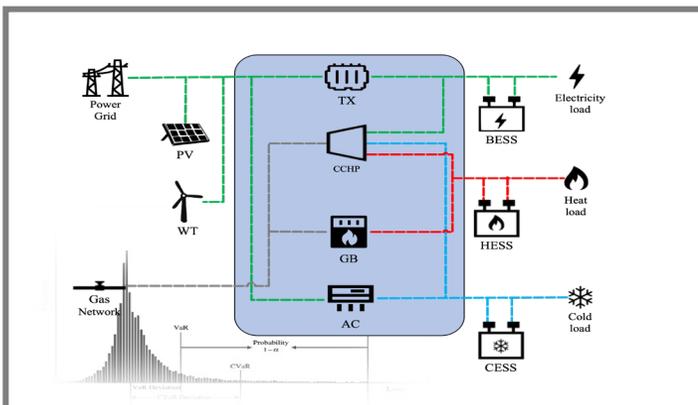
研究内容3：
基于线性化潮流与场景
“分解-协调”的IEDS
规划加速求解算法



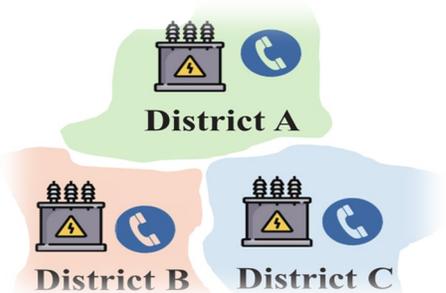
研究进展与创新点

研究内容1:

面向配用侧储能应用的配电系统
分区负荷模式识别



1.1 电/冷/热储能投资风险量化与评估

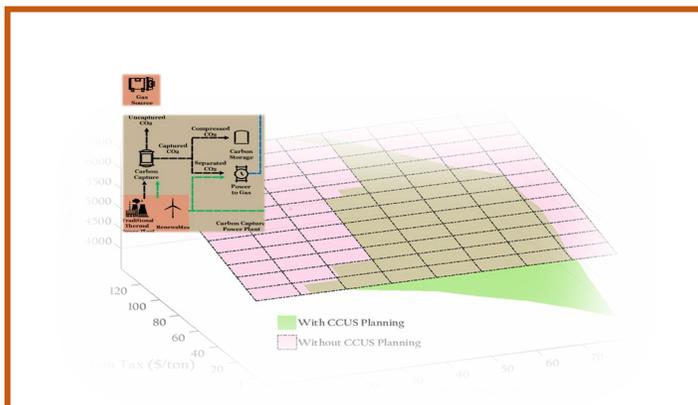


1.2 人口数据辅助配网区域负荷精准预测

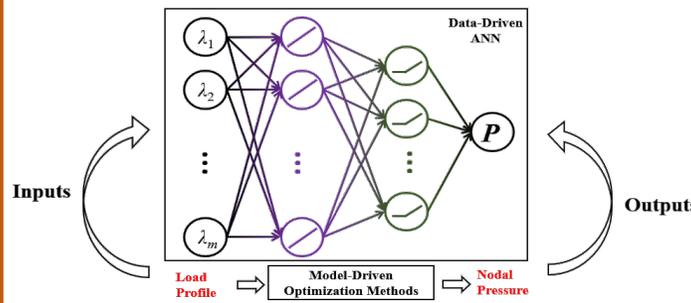
数据价值挖掘

研究内容2:

基于统计学习/考虑新型设备的
IEDS不确定性规划建模



2.1 引入CCUS和PtG实现低碳规划建模

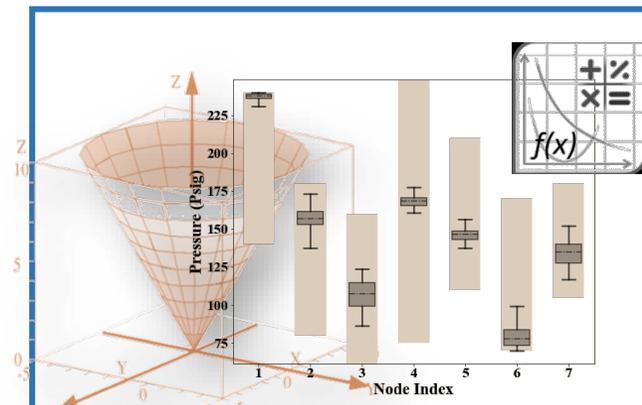


2.2 基于ANN的数据驱动优化调度建模

复杂规划建模

研究内容3:

基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法



3.1 气网最优潮流CCP求解加速10倍+

$$\min C^{INV}(x_s) + C^{OPE}(y_s) + \rho_s^v(x_s - \hat{x}^v) + r/2 \|x_s - \hat{x}^v\|^2$$

$$\text{s.t. } Ax_s \geq b,$$

$$Tx_s + Q_s y_s \geq r_s,$$

$$x_s \text{ binary}$$

$$y_s \geq 0$$

假设x随着s变化

惩罚项强制令x_s与x^v相等

$$\hat{x}_s^{v+1} = \sum_{s=1}^{100} p_s x_s \quad \rho_s^{v+1} \leftarrow \rho_s^v + r(x_s - \hat{x}^{v+1})$$

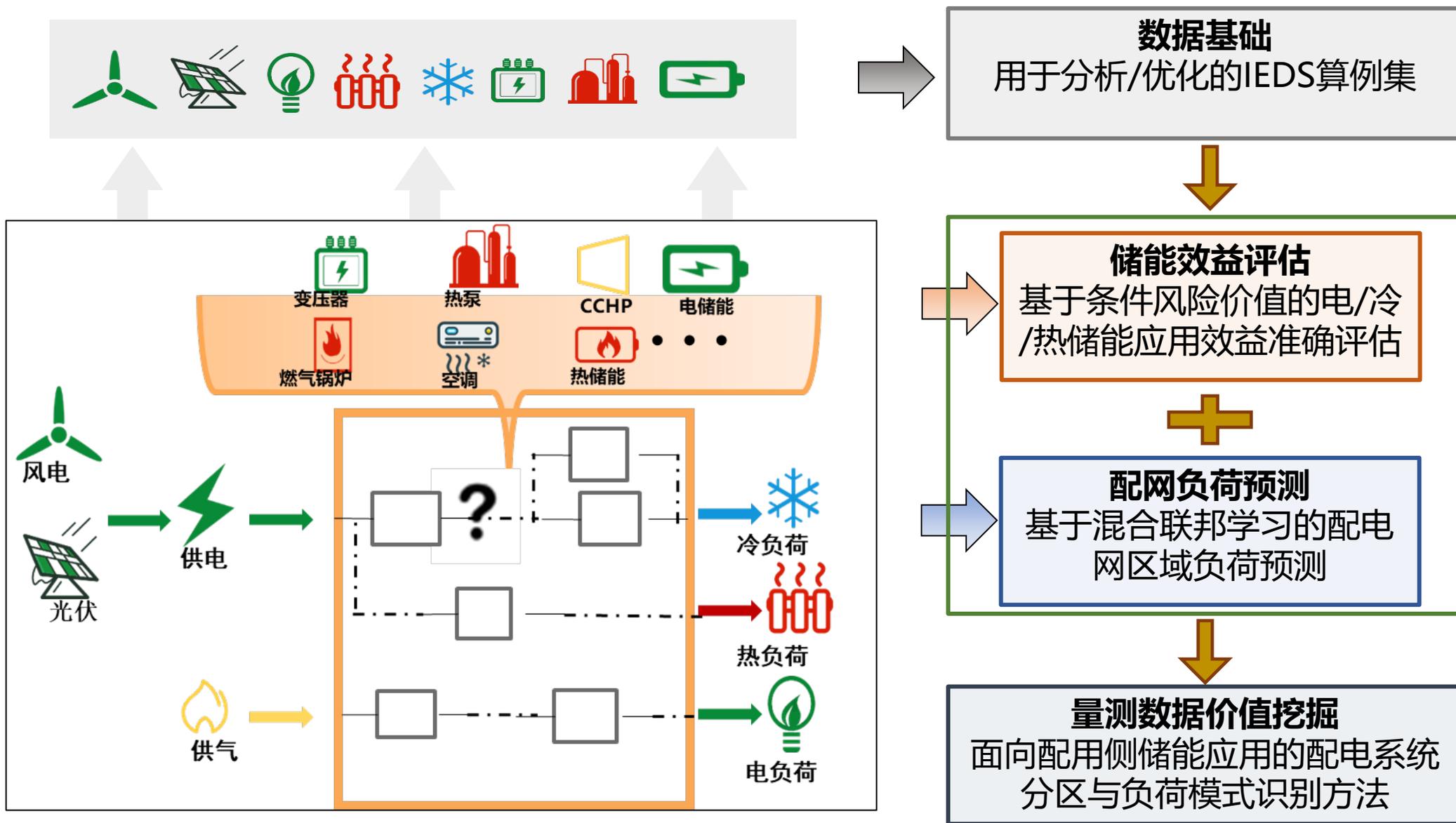
3.2 改进PH加速随机UC求解5-10倍

加速求解算法

目录

- 01 研究内容及进展概述
- 02 面向配用侧储能应用的配电系统分区负荷模式识别
- 03 基于统计学习/考虑新型设备的IEDS不确定性规划建模
- 04 基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法
- 05 结论与展望

▶ 研究内容1 面向配用侧储能应用的配电系统分区负荷模式识别

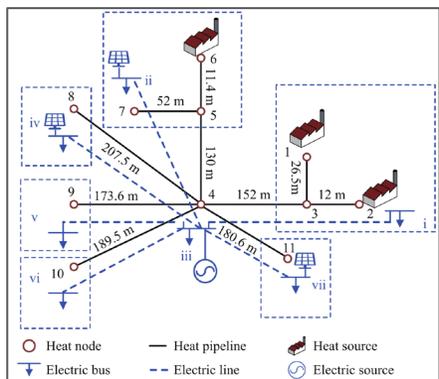


研究内容1：数据基础——面向不同规模IEDS的算例集构建

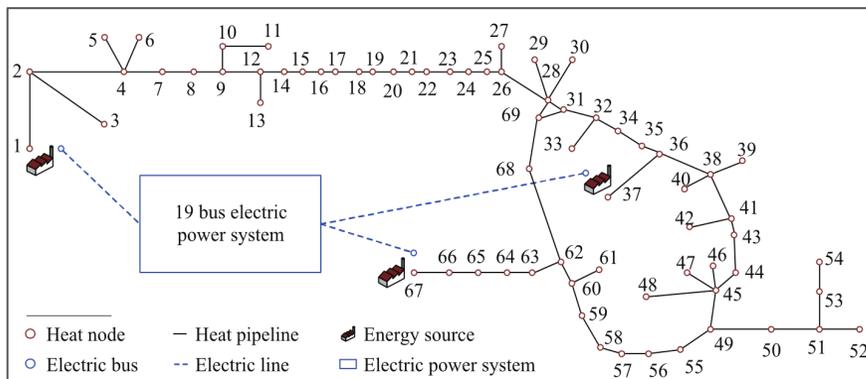


- ◆ **问题**：如何为电-热耦合IEDS规划构建合理可靠的算例集？
- ◆ 现有测试算例**并不开源**，而少量开源算例也由于系统规模、拓扑和数据等原因而**难以被重复使用**

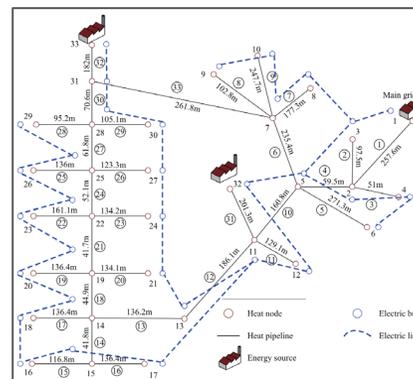
贡献：基于实际电热耦合IEDS构建的不同规模开源测试算例及修改方法



园区级(华北某工业园区)



城市级(东北地区某城市)

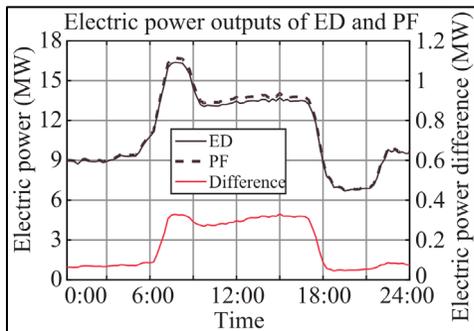


岛屿级(巴厘岛)

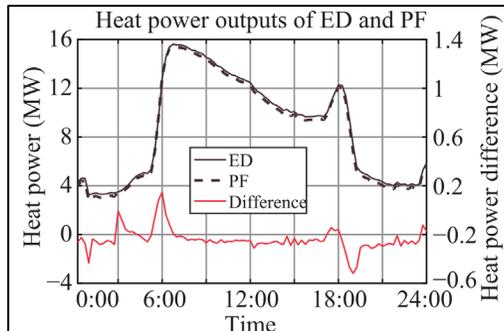


算例修改方法

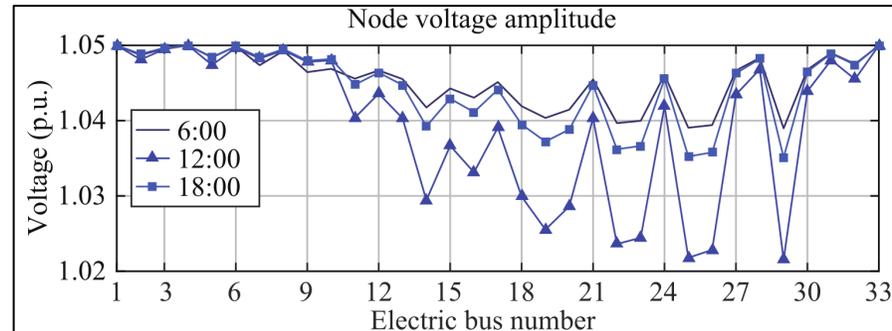
算例集用于经济调度 (ED) 与潮流 (PF) 的稳定性分析



岛屿级算例ED与PF的电功率输出



岛屿级算例ED与PF的热功率输出



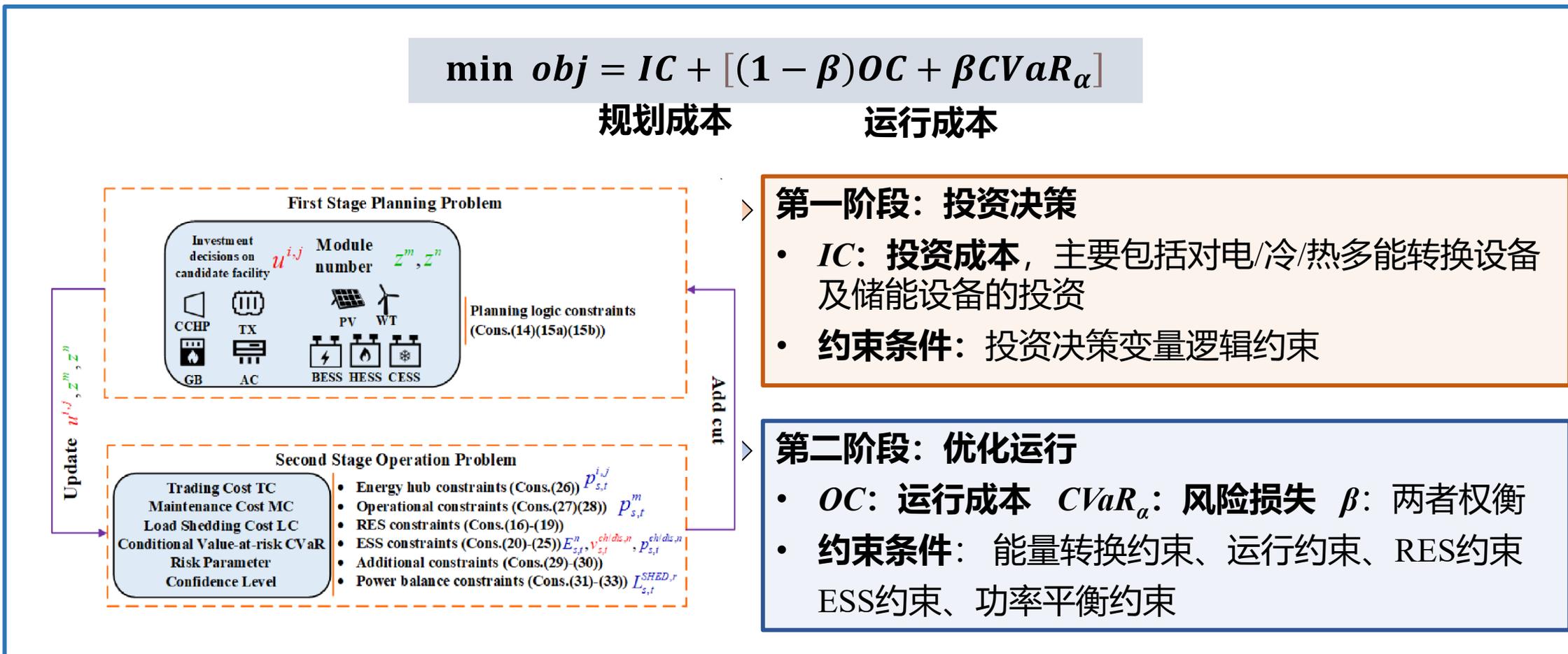
岛屿级算例PF分析中不同时间段的母线电压幅值

研究内容1.1：基于CVaR的电/冷/热储能应用效益评估



- ◆ **关键挑战：** IEDS规划与运行优化中如何有效评估纳入电/冷/热储能后降低的潜在风险？
- ◆ **研究思路：** 可再生能源和各类储能集成的单节点IEDS优化规划模型，风险由条件风险值(CVaR) 度量

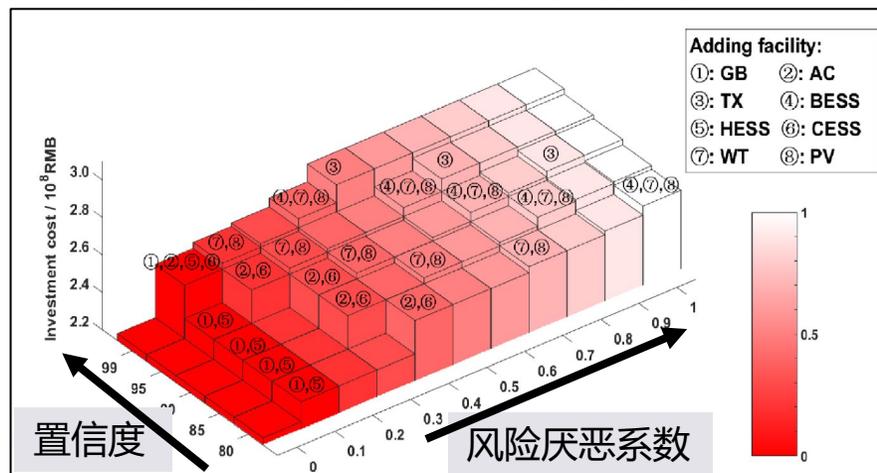
$$\min \text{obj} = \underbrace{IC}_{\text{规划成本}} + [(1 - \beta)OC + \beta CVaR_{\alpha}]_{\text{运行成本}}$$



研究内容1.1：基于CVaR的电/冷/热储能应用效益评估



基于条件风险价值的投资策略分析

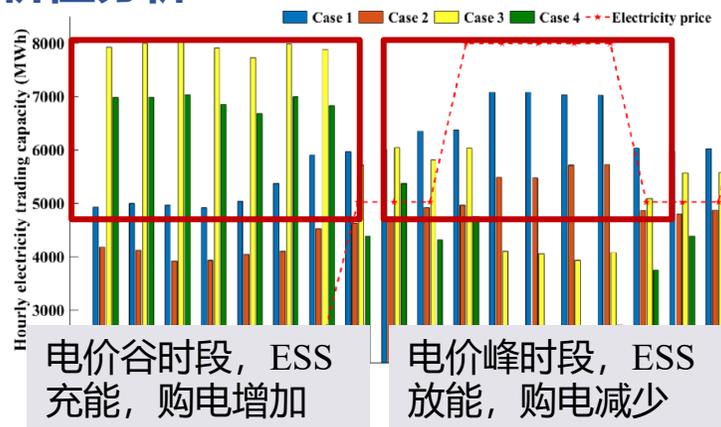


- 随置信度(α)和风险厌恶系数(β)提高, 总投资增加
- 多能装置和ESS经常同时出现在附加投资中, 如①⑤
- 相同置信水平下, 随风险厌恶系数增加, 风险偏好型投资者更倾向于优先投资供冷供热设备
- 所提策略可作为辅助工具为不同的投资者提供定制化投资建议

IEDS中配备电/冷/热多种储能应用价值分析

| $\alpha=0.95, \beta=0.5$ | 案例 1 | 案例 2 | 案例 3 | 案例 4 |
|--------------------------|----------|----------|----------|----------|
| CCHP | 5MW | 5MW | 5MW | 5MW |
| GB | 25MW | 25MW | 25MW | 20MW |
| AC | 38.5MW | 38.5MW | 36MW | 36MW |
| TX | 20MW | 20MW | 20MW | 20MW |
| BESS | — | — | 1MWh | 14MWh |
| HESS | — | — | 42MWh | 16MWh |
| CESS | — | — | 17MWh | 8MWh |
| WT | — | — | — | — |
| PV | — | — | — | — |
| 投资成本(10^4 RMB) | 26739.25 | 27366.34 | 26458.72 | 27870.57 |
| 交易成本(10^4 RMB) | 17948.96 | 15451.78 | 17810.78 | 14578.45 |
| 维护成本(10^4 RMB) | 191.07 | 161.74 | 192.20 | 165.56 |
| 减载成本(10^4 RMB) | 151.46 | 151.46 | 107.48 | 91.18 |
| VaR(10^4 RMB) | 20956.41 | 18896.09 | 20927.49 | 18134.64 |
| CVaR(10^4 RMB) | 24113.34 | 21788.36 | 23394.08 | 20013.27 |
| 总成本(10^4 RMB) | 47941.66 | 46143.01 | 47210.98 | 45294.80 |

有/无ESS下的成本及风险价值



电价谷时段, ESS 充电, 购电增加

电价峰时段, ESS 放电, 购电减少

不同案例在价格信号引导下的购售电行为

- IEDS配置电/冷/热储能后, 交易成本、维护成本、减载成本、条件风险价值CVaR均有所降低
- 相比多能耦合装置, 电/冷/热储能在运维成本、优化调度、能源套利等方面存在优势

研究内容1.2: 基于混合联邦学习的配电网区域负荷预测



- ◆ **关键挑战: 如何利用现有量测数据, 实现城市配电网区域负荷预测?**
- ◆ **负荷预测的数据集分散在IEDS各处, 如果将所有数据集中分析, 那么通信量和计算负担将是巨大的**

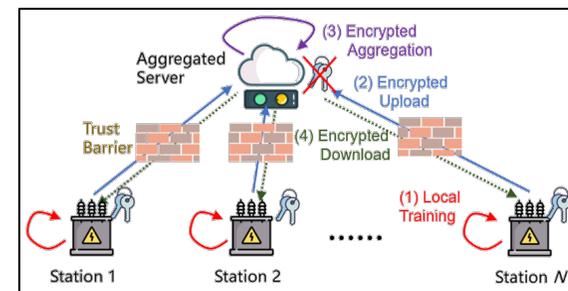
贡献: 构建联邦学习框架, 创造性引入实时人口特征数据, 提升负荷预测精度

联邦学习(Federated Learning, FL):

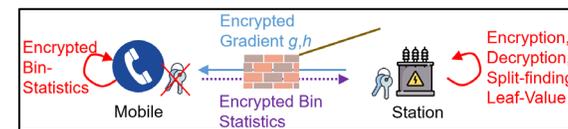
- **分布式机器学习技术**
- **多个本地数据源间进行分布式模型训练**
- **仅交换模型参数或中间结果**
- **构建基于虚拟融合数据下的全局模型**
- **实现数据隐私保护和数据共享计算平衡**

实时人口特征数据:

- **年龄范围(Age Range)**
- **人数(Headcount)**
- **性别(Gender)**
- **收入(Income)**
- **.....**

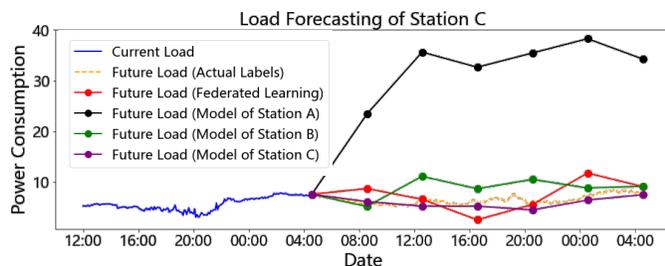


变电站间的
横向FL

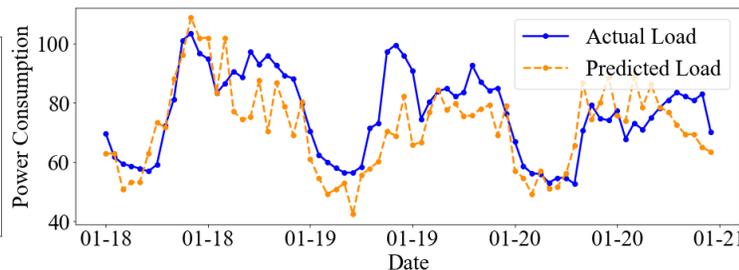


负荷与人
口统计间的
纵向FL

负荷预测结果



横向FL预测结果



纵向FL预测结果

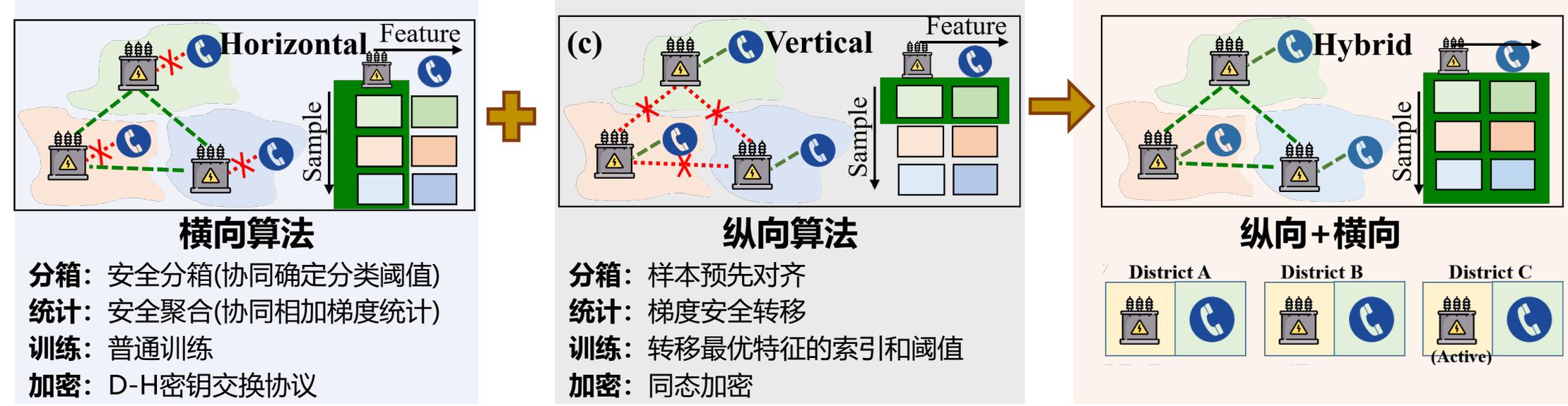
- **所提的横向与纵向FL模型可以相当准确地预测未来电力负荷**
- **横向FL(红色曲线)模型比单站数据训练得出的模型具有较高的泛化能力(对新样本的适应)**

研究内容1.2: 基于混合联邦学习的配电网区域负荷预测

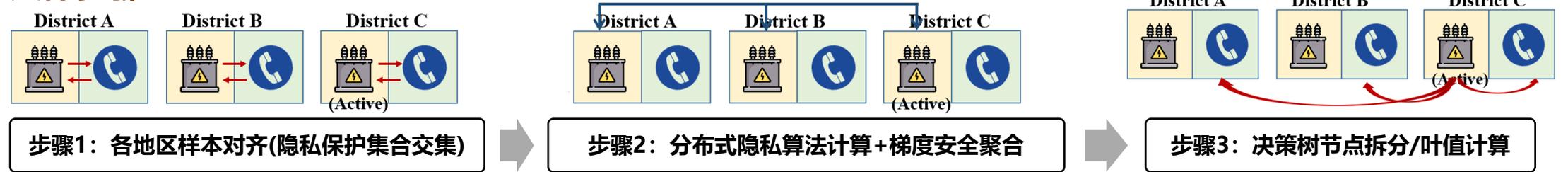


- ◆ 上述联邦学习框架处理数据选择横向或纵向分离, 忽略了两者都存在的情况
- ◆ 公平和效率问题: 主动训练方推断其他方数据时存在不公平的优势, 任务处理过程中其他方被动等待

贡献: 进一步构建纵向联邦学习和横向联邦学习合并的**混合联邦学习**



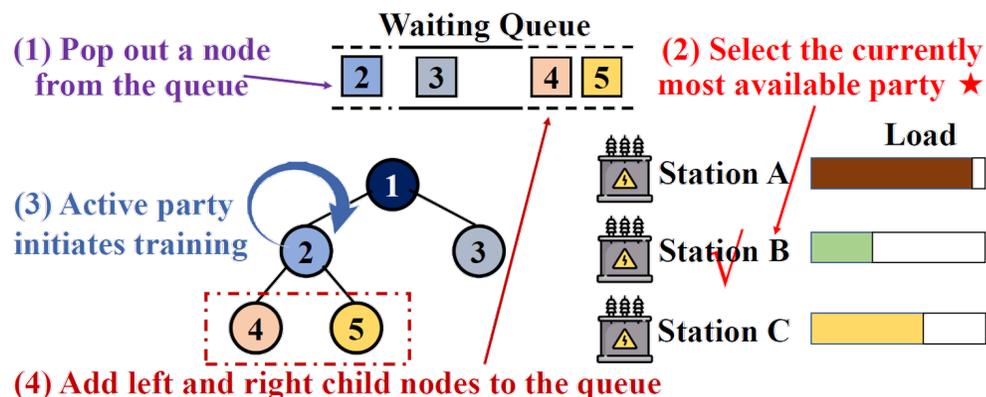
具体步骤



研究内容1.2: 基于混合联邦学习的配电网区域负荷预测



基于混合联邦学习框架的动态任务分配方案



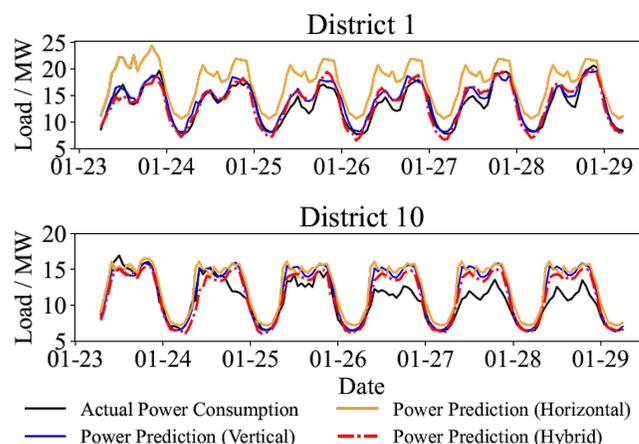
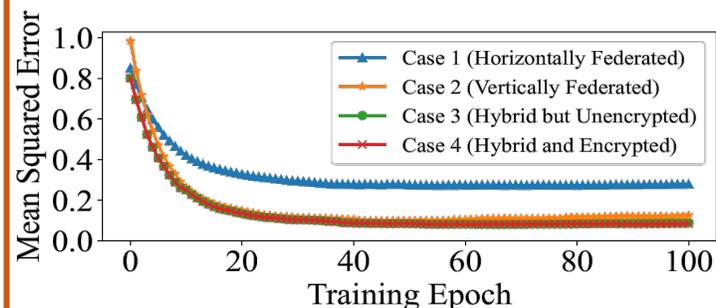
从队列中取出一个索引最小的节点进行训练

指定最方便的一方作为主动训练方在后台执行

发起梯度聚合和节点拆分

将当前节点的左、右子节点加入队列

负荷预测结果



4种联邦学习方案预测平均绝对误差MAE 区域1(上)和区域10(下)6天内的负荷预测曲线

- 平均绝对误差MAE对比(预测精度): 混合FL(绿色与红色) < 横向/纵向FL(蓝色与橙色), 说明混合FL精度更高
- 预测准确度: 混合FL > 横向/纵向FL, 即使负荷波动剧烈, 混合FL也能准确预测这些变化
- 无损加密: 未加密(绿色)与加密(红色)的混合FL的MAE相同

目录

- 01 研究内容及进展概述
- 02 面向配用侧储能应用的配电系统分区负荷模式识别
- 03 基于统计学习/考虑新型设备的IEDS不确定性规划建模
- 04 基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法
- 05 结论与展望

研究内容2：基于统计学习/考虑新型设备的IES不确定性规划建模



◆**关键挑战**：“双碳目标”下IES如何考虑**碳捕集、利用和封存(CCUS)**、电转气(PtG)等新型设备进行“规划建模”，同时探讨其中“不确定性”带来的影响。

贡献：提出一种电-气耦合IES规划模型，将传统火力电厂改造为**碳捕集发电厂(CCPP)**，在捕集CO₂的同时将富余电力通过PtG设备生产天然气。

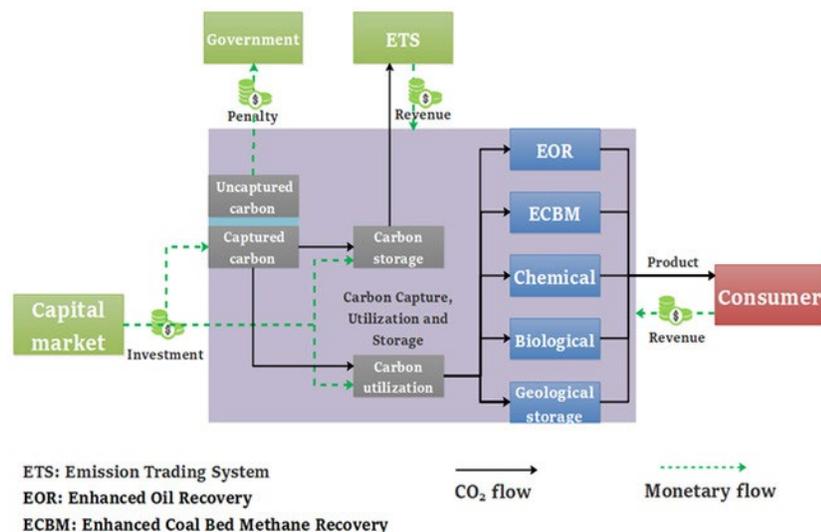


图1. CCUS商业模式流程图

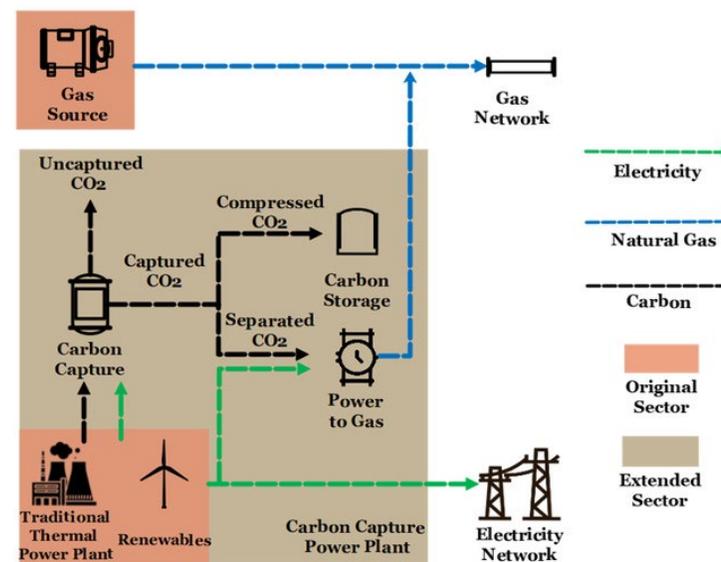


图2. 碳捕集电厂改造框架图

研究内容2：基于统计学习/考虑新型设备的IEDS不确定性规划 建模方法



- 考虑因素：PtG定容选址、CCUS设备/火力发电厂/CCPP/天然气源/PtG运行成本、碳排放税和碳交易收入
- 随着气候与碳排放监管政策的变化，碳价、碳税和负荷不确定性的影响在规划模型中进行了分析和讨论
- 引入随机规划和鲁棒规划，通过各项经济指标和碳排放相关指标验证了规划改造模型的可行性和经济性。

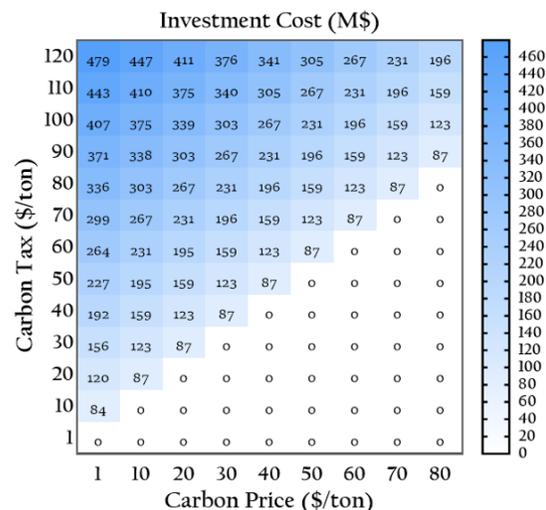


图1.不同碳价、碳税下的投资成本

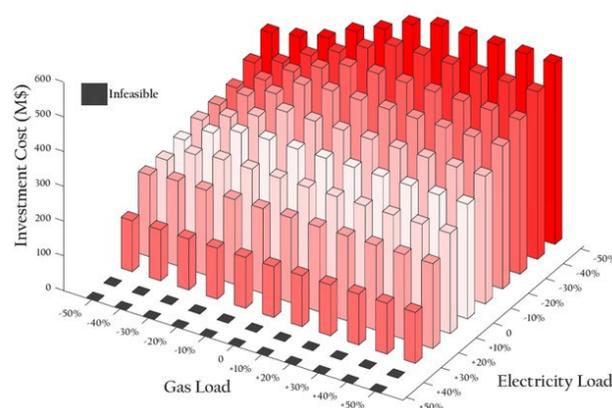


图2.不同电/气负荷下的投资成本

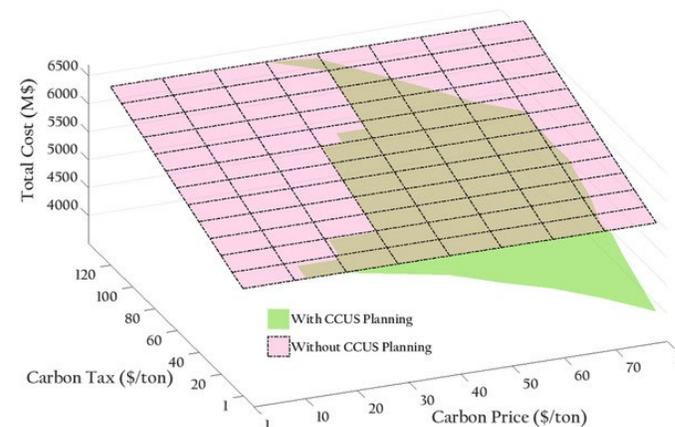


图3.不同碳价、碳税下改造与不改造的总成本对比

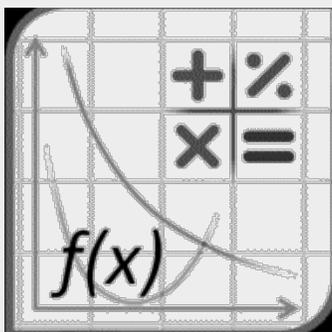
在碳价高于40 \$/ton时，引入CCUS和PtG改造传统火电厂后，电气耦合IES年度规划运行总成本至少下降9.48%

研究内容2：基于统计学习/考虑新型设备的IEDS不确定性规划 建模方法



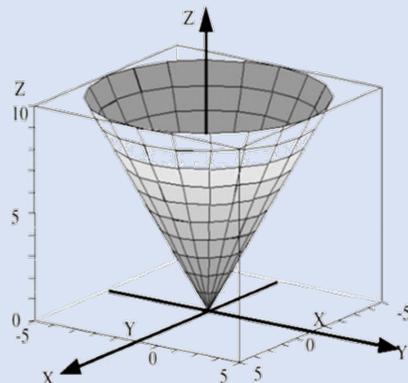
- ◆ **关键挑战**：在IEDS建模中，电-气耦合的优化通常会因气体流动方程等非凸关系而变得难以求解
- ◆ **研究思路**：分段线性化可保证准确性和最优性，但计算时间过长，能否统计学习形成数据驱动模型？

非线性求解器



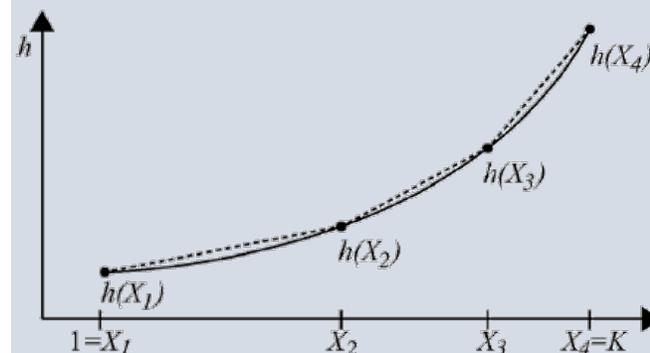
优势: 方便快捷
缺陷: 全局最优性?
无法包含整数变量

二阶锥松弛



优势: 快速精准
缺陷: 非二次项约束?
全局最优性?

分段线性化



优势: 理论上可行且最优
缺陷: 计算效率低

目录

- 01 研究内容及进展概述
- 02 面向配用侧储能应用的配电系统分区负荷模式识别
- 03 基于统计学习/考虑新型设备的IEDS不确定性规划建模
- 04 基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法
- 05 结论与展望

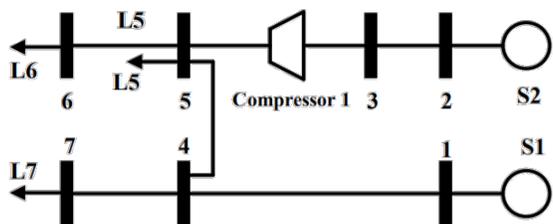
研究内容3：基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法



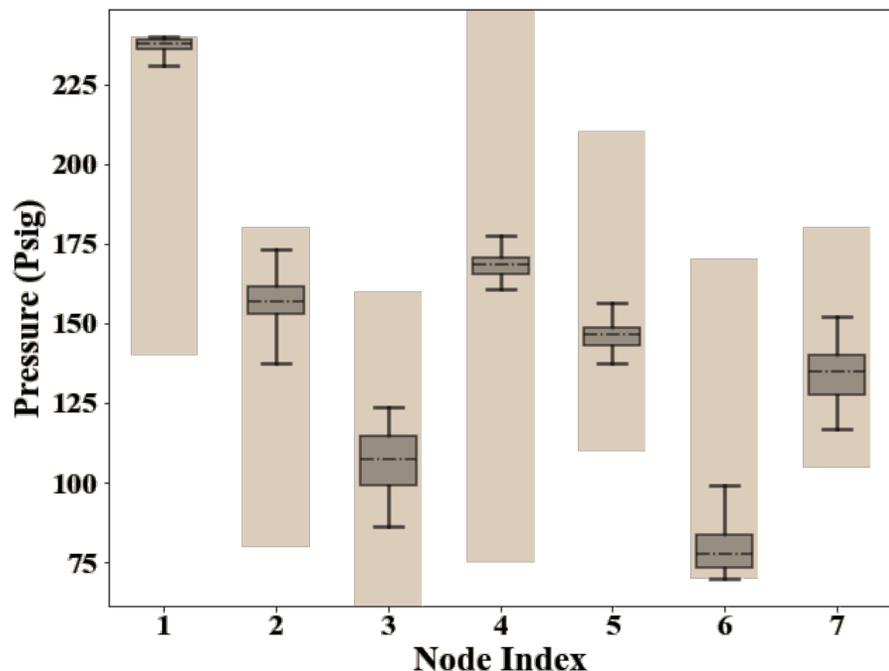
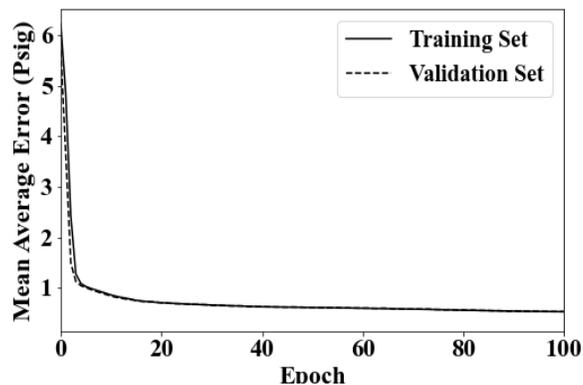
- ◆ **关键问题**：如何利用初始可行解的构造与搜索(warm start热启动)提升非凸优化问题计算效率？
- ◆ 已在**电力系统机组组合问题**得到有效应用，同时被包含在商业求解软件(CPLEX、Gurobi)求解过程中

◆ **贡献**：提出了一种数据驱动的热启动方法以提升气网最优潮流中凸松弛的效率，可应用于电-气耦合IEDS。

7节点天然气网络



ANN平均训练误差



物理约束下的节点压力范围

随机场景下的压力数据 (ANN)

直观上：
ANN大大缩小了初始节点的压力范围！提高了计算效率。

图1.所有场景中ANN生成的初始点数据

研究内容3：基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法



- 算例研究表明，这种方法显著减少了凸凹过程(convex-concave procedure, CCP)算法的迭代次数，气网最优潮流**求解加速10倍**，同时仍然可以保证解的最优性和可行性。

表1 50个随机场景下7节点稳态模型的平均精度与计算效率

| | 最优成本* (\$) | 计算时长 (s) | 最大违背气网潮流参数 ξ |
|-----------------|---|---------------|-----------------------|
| 方法1 基准点 | 16750.84 | 0.2164 | 0 |
| 方法2 数据驱动 CCP | 16750.85 $2.0 \times 10^{-5}\%$ | 0.0550 | 7.61×10^{-6} |
| 方法3 冷启动 CCP | 16935.74 1.1% | 0.7911 | 8.56×10^{-8} |
| 方法4 分段线性化 | 16750.84 $-9 \times 10^{-8}\%$ | 0.5865 | 1.68×10^{-5} |

表2 50个随机场景下20节点拟动态模型的平均精度与计算效率

| | 平均迭代次数 | 计算时长 (s) | 平均最优解差距 | 最大违背气网潮流参数 ξ |
|-----------------|--------|---------------|-------------------------|-----------------------|
| 方法1 基准点 | — | 1.4935 | — | 0 |
| 方法2 数据驱动 CCP | 1.47 | 0.3326 | $4.89 \times 10^{-4}\%$ | 3.28×10^{-4} |
| 方法3 冷启动 CCP | 7.92 | 3.29 | $1.02 \times 10^{-2}\%$ | 4.93×10^{-4} |
| 方法4 分段线性化 | — | 29.88 | $4.93 \times 10^{-3}\%$ | 1.30×10^{-2} |

* 单个随机场景的最优成本

研究内容3：基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法



算例表明，（部分场景下）使用MPH的计算效率可达CPLEX的**188倍**，优于Benders分解。

将以下方法应用于模型求解：

- 方法1：CPLEX求解随机UC (benchmark)
- 方法2：确定性UC求解
- 方法3：Benders 分解求解随机UC
- 方法4：TPH求解随机UC，MATLAB并行计算
- **方法5：MPH求解随机UC，MATLAB并行计算**

表2 IEEE 118-bus/比利时20节点燃气系统不同方法的比较

| 方法 | 计算时长 (s) | 预期成本 (M\$) |
|-------------|-------------------|------------|
| CPLEX求解随机UC | 1227.0 | 1.5425 |
| Benders分解 | 1962.5 | 1.5429 |
| TPH 1/2/4 | 802.8/544.7/514.8 | 1.5426 |
| MPH 1/2/4 | 406.3/285.5/270.0 | 1.5426 |

表1 IEEE 24-bus/比利时 20-node gas 算例与方法

| 算例 | 方法 | 计算时长(s) | 预期成本 (M\$) | 耗煤成本 (M\$) | 天然气成本(M\$) | 未供给能量(GW) |
|-----|-----------------------------|-------------------|------------|------------|------------|-----------|
| 算例1 | 方法1 CPLEX求解随机UC | 10933 | 13.9762 | 5.2474 | 5.6602 | 0 |
| | 方法2 确定性UC求解 | 21.63 | 165.91 | 5.1201 | 5.6977 | 0.307 |
| | 方法3 Benders分解 | 407 | 13.9736 | 5.2003 | 5.7358 | 0 |
| | 传统PH算法 TPH 1/2/4 | 185.6/138.6/118.9 | 13.9754 | 5.0411 | 5.8752 | 0 |
| | 改进PH算法 MPH 1/2/4 | 114.3/70.72/58.03 | 13.9754 | 5.0411 | 5.8752 | 0 |

表1中：

- 提出的MPH求解随机UC优于TPH算法
- 通过MATLAB并行计算(1/2/4代表线程数)可进一步加速求解

表2中：

- **Benders 分解在处理问题时效率低下，甚至慢于基准方法，这表明其效率可能在很大程度上取决于网络的规模和参数**

目录

- 01 研究内容及进展概述
- 02 面向配用侧储能应用的配电系统分区负荷模式识别方法
- 03 基于统计学习/考虑新型设备的IEDS不确定性规划建模方法
- 04 基于线性化潮流与场景“分解-协调”的IEDS规划加速求解算法
- 05 结论与展望

▶ 结论与展望



- IEDS中的量测**数据价值挖掘**可提高设备效益评估/负荷预测准确性；
- IEDS规划问题中需重视**新型设备的建模与各类不确定性的影响**；
- IEDS物理模型复杂度高，**数据驱动建模**不失为一种解决方案；
- IEDS优化呈现强非凸性，**数据驱动方法**可应用于加速其求解。
- **存在的不足之处**：专利申请需加强（目前仅实审1项）；中文期刊发表需加强。

▶ 已取得的研究成果



本项目已发表/接收7篇SCI期刊/6篇EI检索会议文章，代表性成果节选如下：

- [1][Liu H, Shen X*, Guo Q, et al. Application of modified progressive hedging for stochastic unit commitment in electricity-gas coupled systems\[J\]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 7\(4\): 840-849.](#)
- [2][Liu H, Yang L, Shen X*, et al. A Data-Driven Warm Start Approach for Convex Relaxation in Optimal Gas Flow\[J\]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36\(6\): 5948-5951.](#)
- [3][Liu H, Shen X*, Guo Q, et al. A data-driven approach towards fast economic dispatch in electricity-gas coupled systems based on artificial neural network\[J\]. *Applied Energy*, 2021, 286: 116480.](#)
- [4][Liu H, Zhang X*, Shen X*, Sun H and Shahidehpour M. A Hybrid Federated Learning Framework with Dynamic Task Allocation for Multi-Party Distributed Load Prediction\[J\]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Accepted.](#)
- [5][Qin X, Shen X, Guo Y, et al. Combined electric and heat system testbeds for power flow analysis and economic dispatch\[J\]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 7\(1\): 34-44. \(非一作/通讯\)](#)
- [6][Xuan A, Shen X*, Guo Q, et al. A conditional value-at-risk based planning model for integrated energy system with energy storage and renewables\[J\]. *Applied Energy*, 2021, 294: 116971.](#)
- [7][Xuan A, Shen X*, Guo Q, et al. Two-stage Planning for Electricity-Gas Coupled Integrated Energy System with Carbon Capture, Utilization, and Storage Considering Carbon Tax and Price Uncertainties\[J\]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022.](#)

▶ 已取得的研究成果



本项目已发表/接收7篇SCI期刊/6篇EI检索会议文章，代表性成果节选如下：

- [8] [Wang Z, Shen X*, Sun H. An Integrated Energy Distribution System Planning Method with Multiple Energy Storage Systems\[C\]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration \(EI2\). IEEE, 2021: 1338-1343.](#)
- [9] [Shen X*, Li S, Li H. Large-scale Offshore Wind Farm Electrical Collector System Planning: A Mixed-Integer Linear Programming Approach\[C\]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration \(EI2\). IEEE, 2021: 1248-1253.](#)
- [10] [Lin H, Shen X*, Guo Q, et al. Accuracy and application scope analysis for linearized branch flow model in radial distribution systems\[C\]//2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting \(PESGM\). IEEE, 2021: 1-5.](#)
- [11] Liu H, Zhang X, Shen X* and Sun H. Privacy-Preserving Power Consumption Prediction Based on Federated Learning with Cross-Entity Data[C]. *2022 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Accepted
- [12] Chai Z, Shen X* and Sun H. Impacts of DGs in Active Distribution Network Considering Bi-directional Power Flow and Carbon Emission Flow Theory[C]. *2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2)*, Accepted.
- [13] Shi Y, Shen X* and Sun H. Robust Day-ahead Economic Dispatch of Integrated Energy System Considering Load Uncertainties and Power Reserve Revenue[C]. *2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (IEEE EI² 2022)*, Accepted



▶ 个人荣誉和人才培养

● 个人荣誉和学术兼职：

- 入选CSEE “青年人才托举工程” (2020)
- IEEE Senior Member (2021)
- CSEE Journal of Power and Energy Systems (JCR一区, **IF 6.01**)编辑 (2022)
- Applied Energy (JCR一区, **IF 11.45**) Young Editor Board (YEB)青年编委 (2022)

● 人才培养：

□ 硕士生毕业5人、在读8人

- ▶ 轩昂 (清华SIGS 23博)、刘海舟 (清华SIGS 校内转博)、秦鑫 (剑桥 博士在读)、政雪翎、赵心怡 (UW 博士在读)
- ▶ 王镇 (计划出国读博)、石宇杰 (计划校内转博)、熊祖逊 (计划出国读博)、柴兆元、王稚萌、王永恒、陈福民、夏添
- ▶ 林汉阳 (英国帝国理工硕/清华SIGS22级博、co-advise)



清华大学深圳国际研究生院
Tsinghua Shenzhen International Graduate School

数据驱动的含多种储能综合能源配电系统规划方法研究 (52007123)

感谢NSFC!
谢谢大家!



微信



官网

欢迎扫码加微信及关注: <http://xinweishen.com/>

欢迎提问交流
xwshen@tsinghua.edu.cn

sigs.tsinghua.edu.cn

