



澳門大學
UNIVERSIDADE DE MACAU
UNIVERSITY OF MACAU



智慧城市物聯網國家重點實驗室(澳門大學)
State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (University of Macau)

综合能源系统在低碳化过程中的可靠性问题 ——以掺氢电-气耦合系统为例

第四届国际青年学者论坛电气分论坛

王盛

澳门大学

智慧城市物联网国家重点实验室



2012.9

浙江大学

本科，电气工程及其自动化



2016.9

浙江大学

博士，电气工程
导师：丁一



2021.8

国网苏州城市能源研究院

城市能源战略规划中心，研究员



国家电网
STATE GRID

国网(苏州)城市能源研究院
STATE GRID (SUZHOU) CITY & ENERGY RESEARCH INSTITUTE

2022.6

澳门大学

博士后
PI: 宋永华

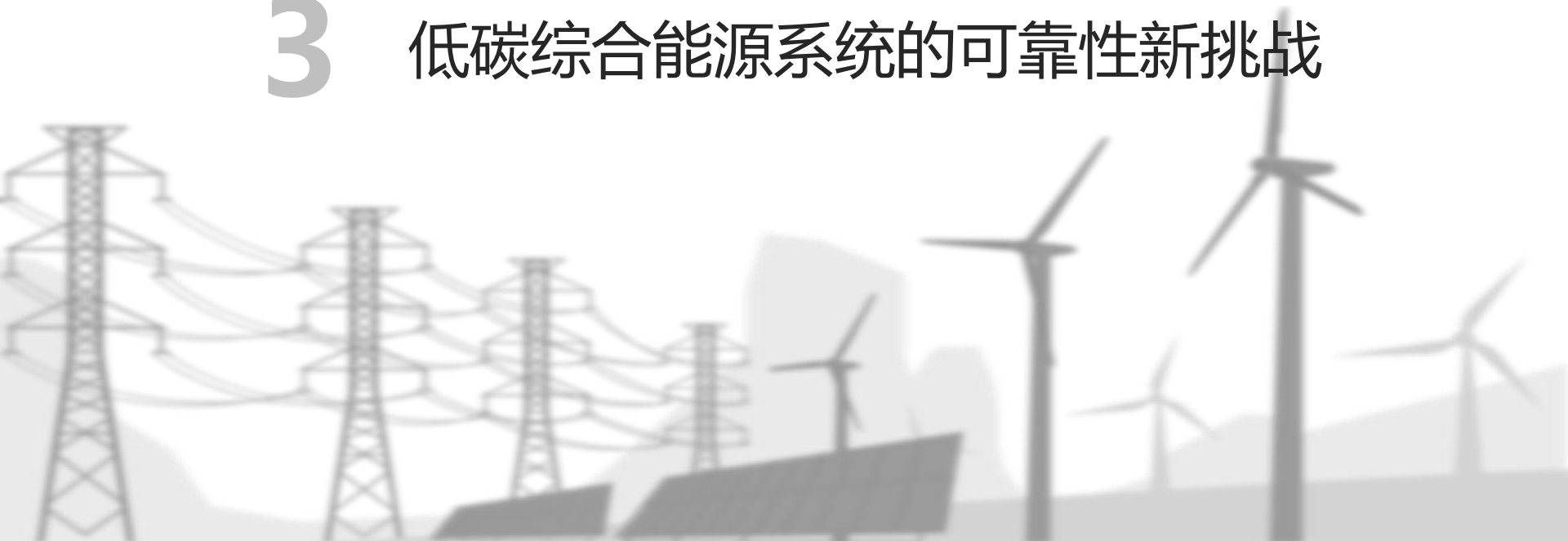


澳門大學
UNIVERSIDADE DE MACAU
UNIVERSITY OF MACAU

1 研究背景

2 综合能源系统的灵活性与可靠性

3 低碳综合能源系统的可靠性新挑战



不同能源之间耦合加剧

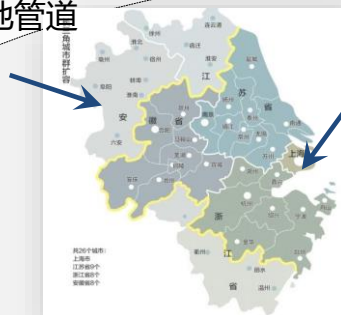
世界范围



- 西班牙电力批发市场的价格上涨115%
- 法国上涨了400%

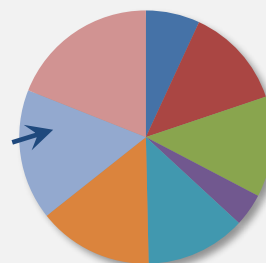
国家/省级

陆地管道



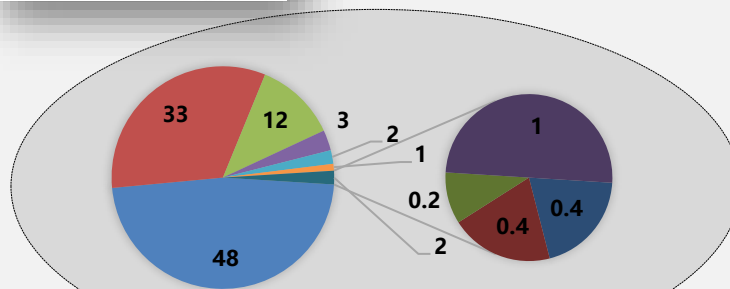
海运LNG

长三角, 16.7%



- 第二大天然气消费地区

城市级



- 9 000 平方公里 集中供热区域, 其中热电联产机组供应占比51% (消耗煤炭或天然气)

在不同地域尺度下, 多种能源形式 (电力、天然气、冷、热等) 互相紧密耦合

综合能源系统的可靠性问题

2016.09

澳大利亚



风电压缩**燃气机组**空间、天然气市场波动、**天然气输送管道**地缘格局不利

供电中断约50小时

2017.08

台湾, 中国



大潭燃气电厂人为操作失误, 天然气供应中断

4 GW电力供应缺额

2019.08

英国



Little Barford**燃气电厂**停机, 风机脱网

约100万人停电1.5小时

2021.02

得州, 美国



低温冻结天然气井口

最大20GW切负荷, 影响用户超480万

2020.12

山西, 中国



热电厂输煤带结冰

影响城区近1100万平方米的供热面积达三天

2021.05

台湾, 中国



兴达电厂**燃气机组**停机

分区限电, 影响全台各县市约400万户

综合能源系统的可靠性亟待研究

1 研究背景

2 综合能源系统的灵活性与可靠性

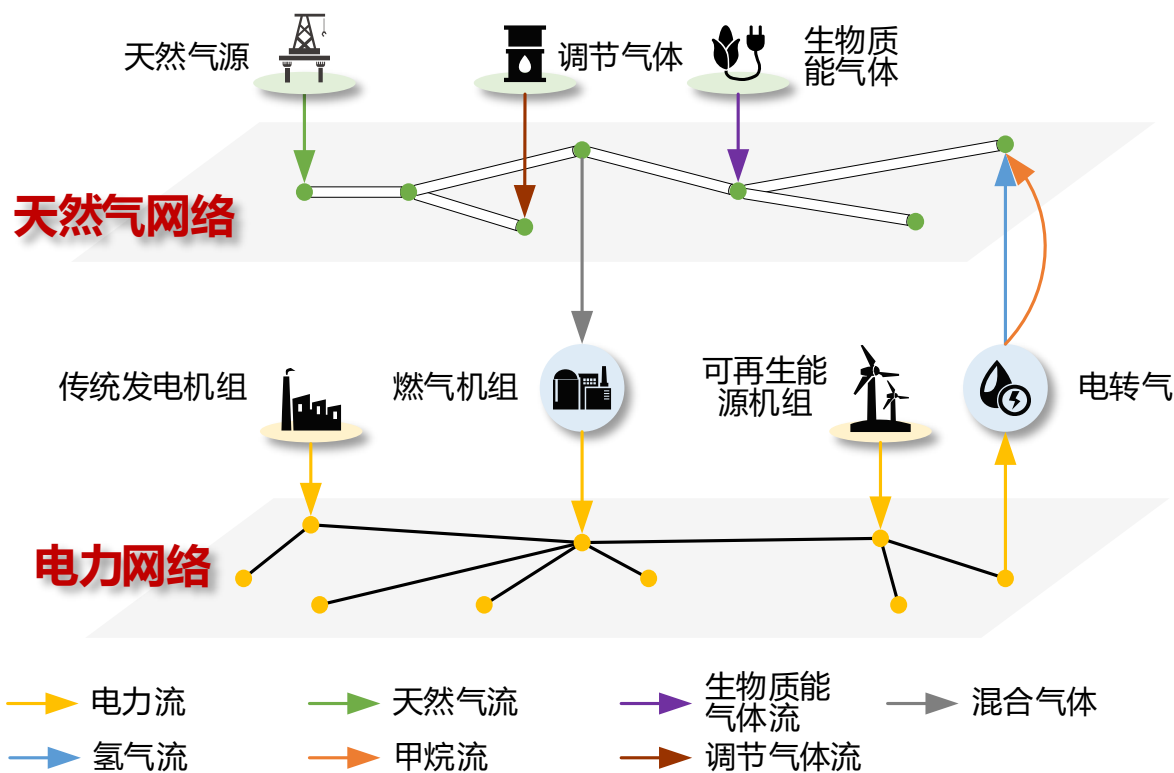
3 低碳综合能源系统的可靠性新挑战



综合能源系统的灵活性与可靠性

灵活性来源之一：电力和天然气系统的相互支撑

电力系统和天然气系统通过燃气机组和电转气设备紧密耦合。我们建立适用于多能源耦合网络的联合优化潮流技术和紧急状态管理方法，建立**考虑电-气双向互动的可靠性评估方法**。



从“**单一**”
到“**耦合**”

[1] Wang S, Ding Y, Ye C, et al. Reliability evaluation of integrated electricity-gas system utilizing network equivalent and integrated optimal power flow techniques[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1523-1535.

灵活性来源之一：电力和天然气系统的相互支撑

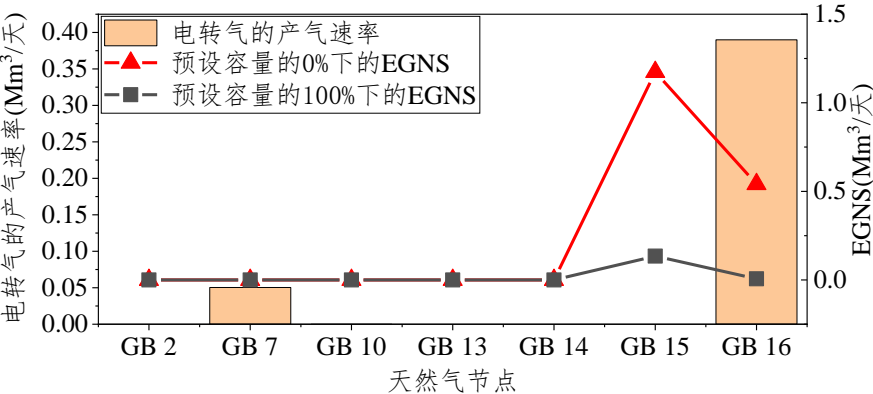


图1 不同容量的燃气机组和电转气设施对EDNS的影响

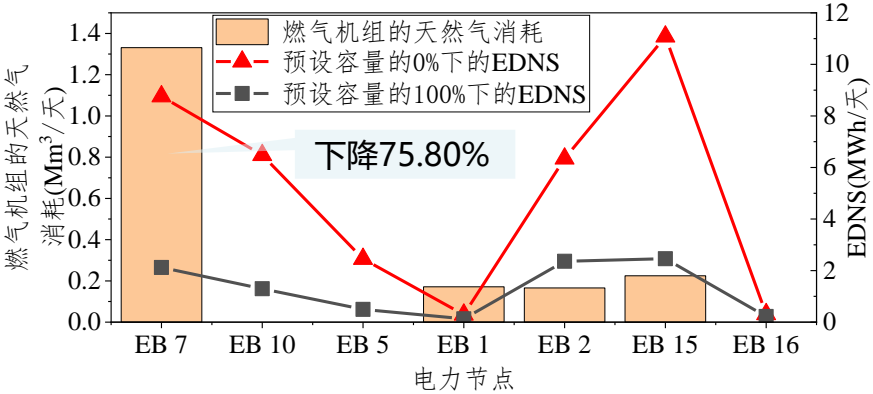


图2 不同容量的燃气机组和电转气设施对EGNS的影响

表1 不同容量的燃气机组和电转气设施下的电力天然气联合系统的可靠性和运行成本

场景	A	B	C	D
相对容量 (%)	0	25	50	100
非燃气机组发电成本 (\$/h)	5.92×10^4	5.62×10^4	5.28×10^4	4.75×10^4
天然气购买成本 (\$/h)	2.03×10^5	2.05×10^5	2.07×10^5	2.09×10^5
电力负荷中断成本 (\$/h)	2.08×10^5	1.28×10^5	7.17×10^4	4.33×10^4
天然气负荷中断成本 (\$/h)	5.58×10^5	5.03×10^5	4.00×10^5	2.88×10^5
总成本 (\$/h)	1.03×10^6	8.92×10^5	7.31×10^5	5.88×10^5
EB 7上的EDNS (MWh/天)	8.76	7.09	5.63	2.12
EB 15 上的EDNS (MWh/天)	11.08	6.72	3.65	2.46
GB 15 上的EGNS (Mm³/天)	1.17	0.732	0.348	0.135

对比不同能源耦合设备容量：

✓ 即使能量源（天然气源和非燃气机组）相同，当电力和天然气系统之间有更多能量交互能力时，能够提高关键节点可靠性，降低成本。

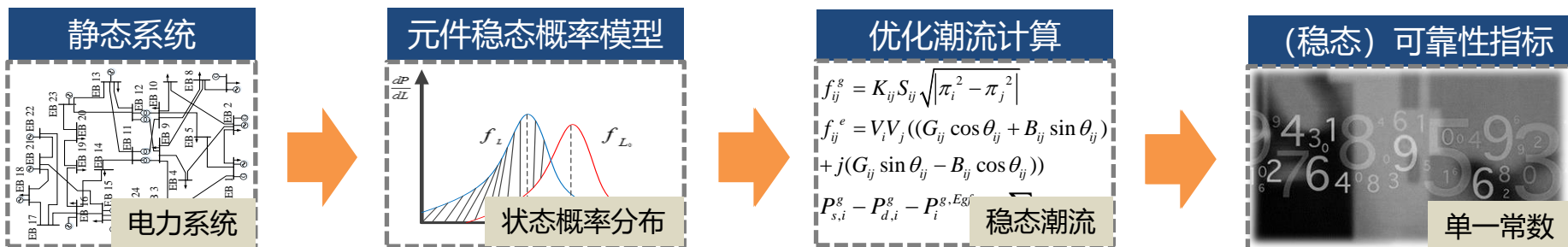
综合能源系统的灵活性与可靠性

灵活性来源之二：天然气的动态特性

天然气、热等多种能源形式使得综合能源系统呈现**动态特性**。将传统的可靠性分析方法推广至**由偏微分方程描述的动态系统**，建立考虑能流动态特性的综合能源系统的可靠性分析理论体系。

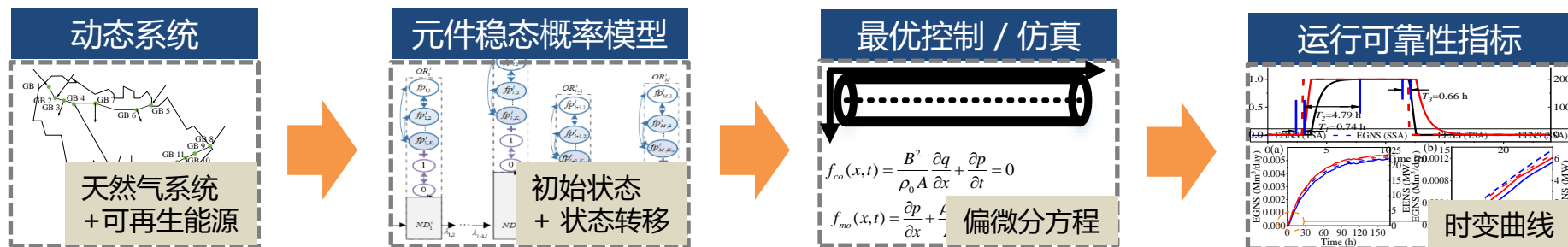
长期可靠性分析方法（稳态）

适用于长期规划，元件可用率、系统可靠性等指标为常数，不考虑时序



运行可靠性分析方法（动态）

适用于日前机组组合、实时运行，元件可用率、系统可靠性等指标为时变量，考虑时序



[2] Wang S, Ding Y, Han X, et al. Short-term reliability evaluation of integrated electricity and gas systems considering dynamics of gas flow[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(20): 2857-2871.

从“静止”到“动态”

灵活性来源之二：天然气的动态特性

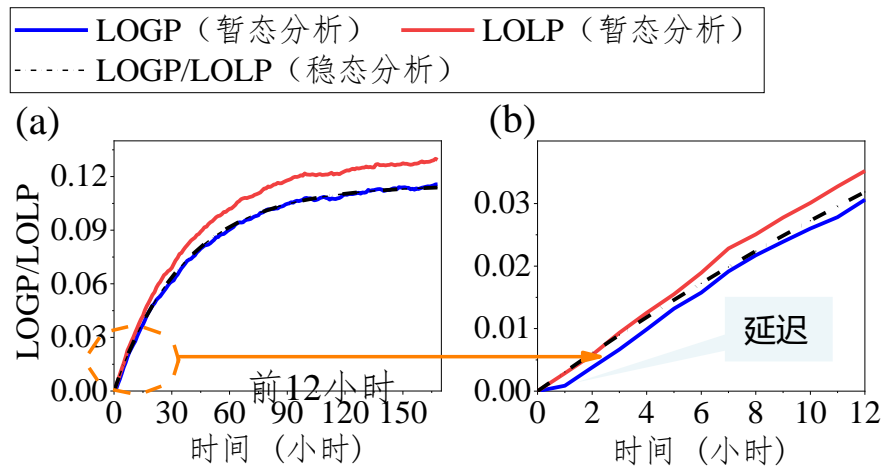


图3-3 单个管道中暂态和稳态分析下的LOGP和LOLP

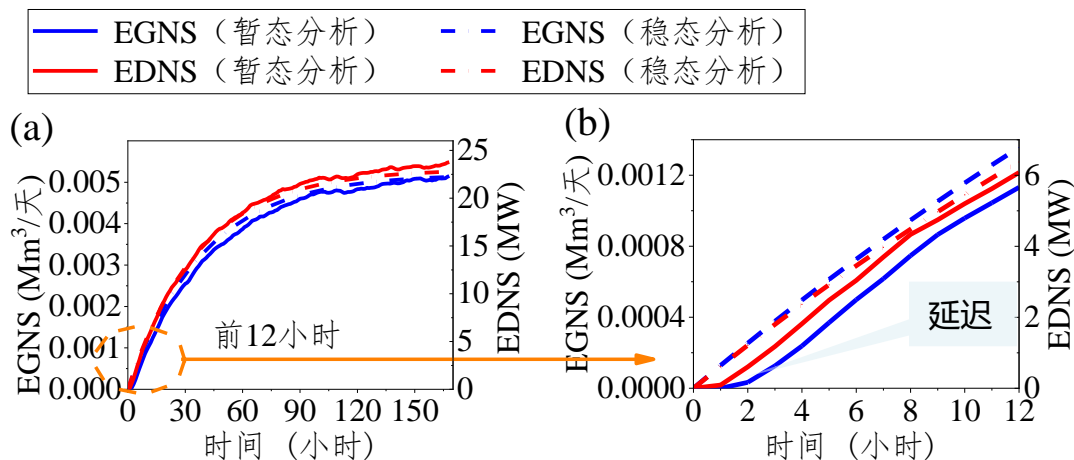


图3-4 单个管道中暂态和稳态分析下的EGNS和EDNS

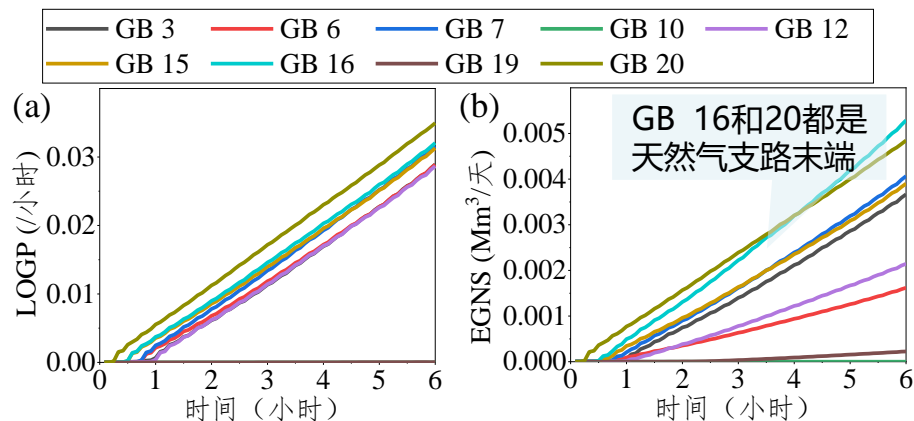


图3-8 节点可靠性指标

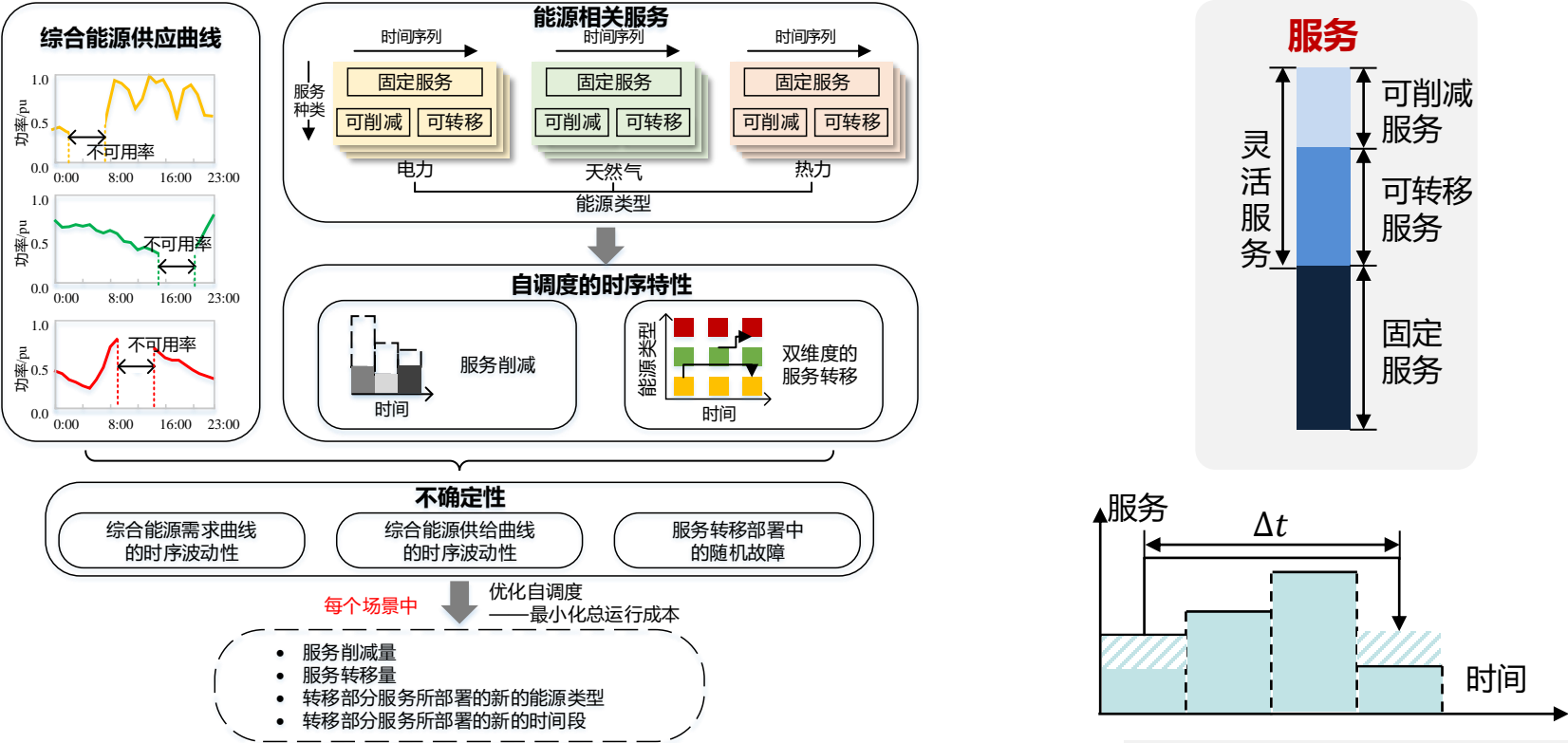
运行可靠性评估：

- ✓ 通常需要数分钟乃至数小时的时间来达到稳态
- ✓ LOGP、EGNS和EDNS等可靠性指标的出现与上升被不同程度的推迟与减缓

综合能源系统的灵活性与可靠性

灵活性来源之三：综合需求响应

综合能源用户能够灵活选择各种能源来满足其所需要的服务。我们建立**基于服务的综合能源用户多层次自调度策略**，从而更准确地评估用户侧灵活性对于提高运行可靠性的作用。



[3] Wang S, Shao C, Ding Y, et al. Operational reliability of multi-energy customers considering service-based self-scheduling[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113531.

从“固定”到“灵活”

灵活性来源之三：综合需求响应

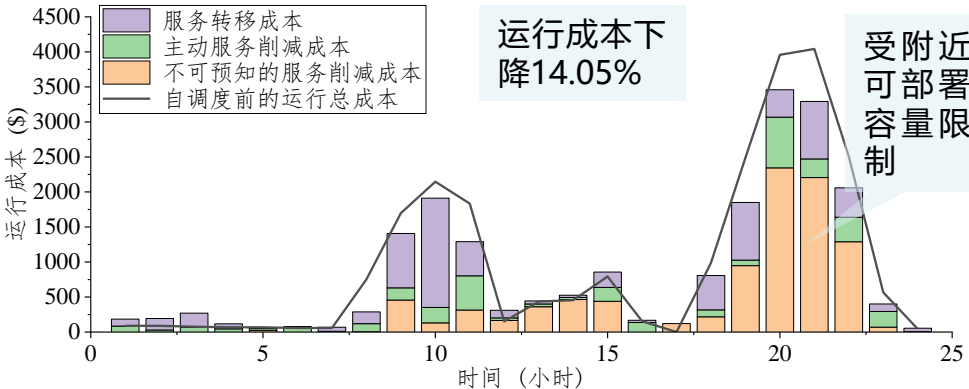


图4-6 自调度前后的运行成本对比

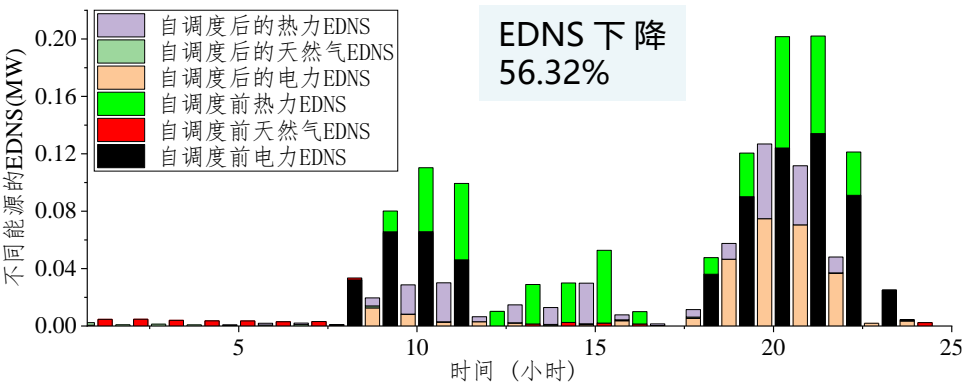


图4-7 自调度前后的运行可靠性对比

- ✓ 综合需求响应可以改善综合能源用户的运行可靠性，降低运行成本，尤其是尖峰时段
- ✓ 提升服务的灵活性能提升可靠性

表4-3 不同可削减服务和可调度服务容量下综合能源用户的可靠性对比

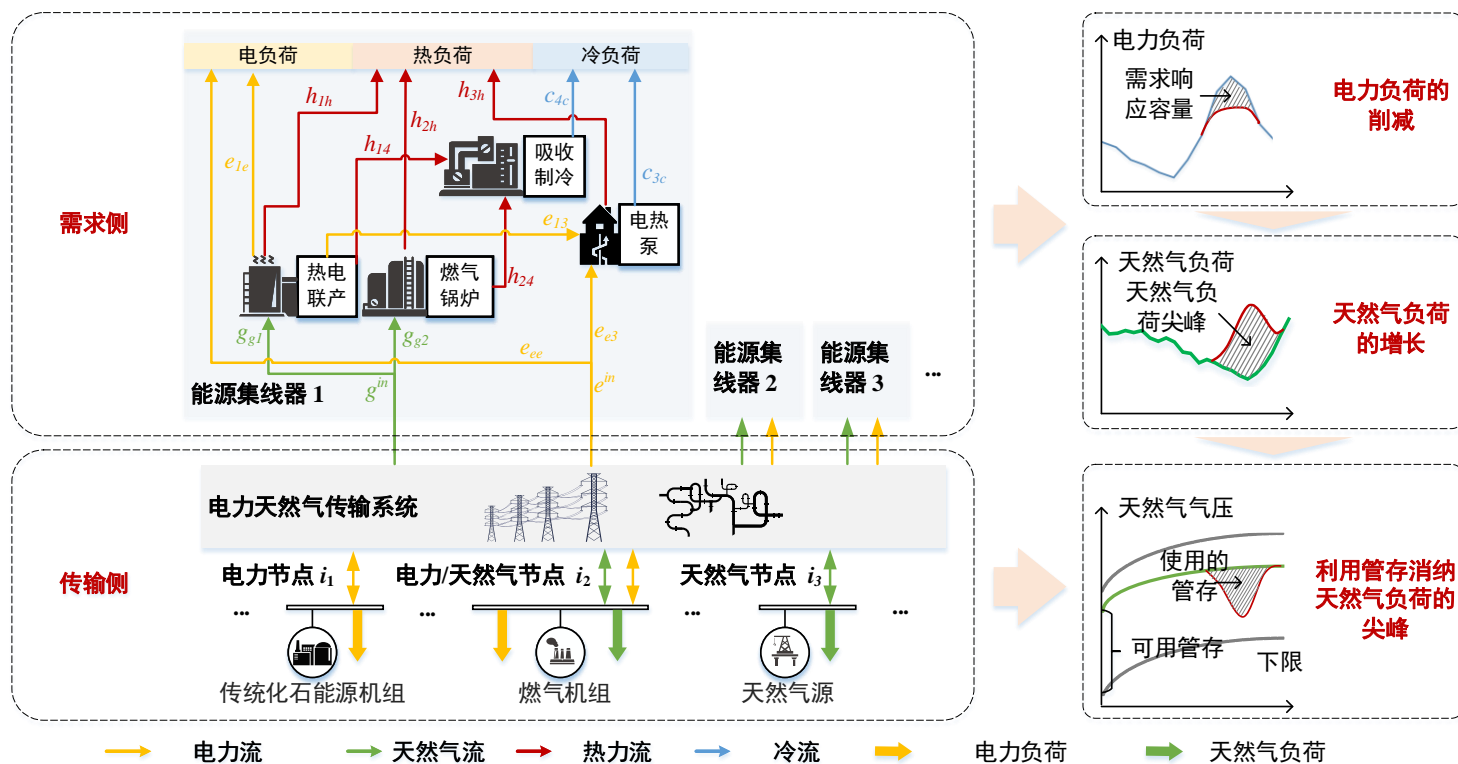
场景	A	B	C	D
可削减服务的比例	0	0.1	0.1	0.3
可转移服务的比例	0	0.25	0.5	0.5
电力EDNS (MW)	0.0295	0.0127	0.0065	0.0058
天然气EDNS (MW)	0.0016	0.0006	0.0015	0.0007
热力EDNS (MW)	0.0189	0.0121	0.0124	0.007
电力LOLP (/小时)	0.0083	0.0089	0.0078	0.0071
天然气LOLP (/小时)	0.0125	0.0044	0.0054	0.0049
热力LOLP (/小时)	0.011	0.0107	0.0109	0.0093
综合能源用户的EDNS (MW)	0.05	0.0254	0.0204	0.0136
综合能源用户的LOLP (/小时)	0.0125	0.0107	0.0105	0.0093

下降

综合能源系统的灵活性与可靠性

1+1>2: 各个灵活性之间的协调

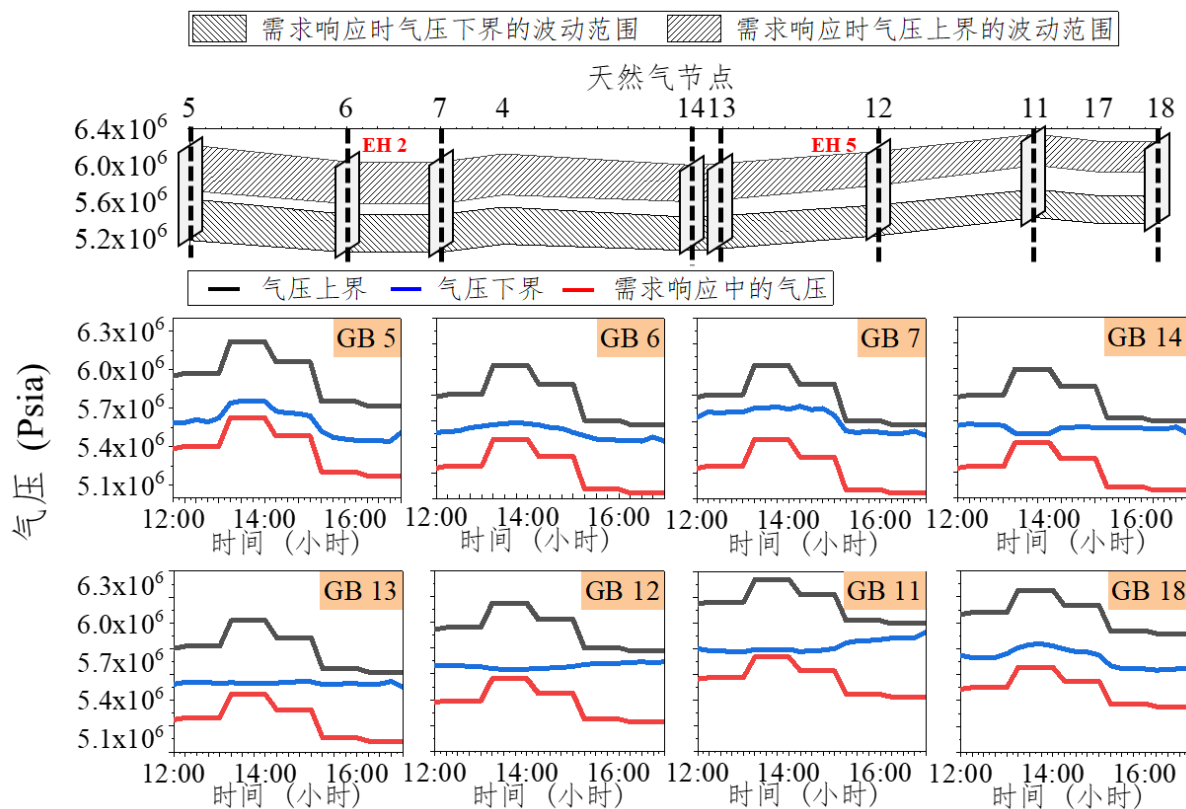
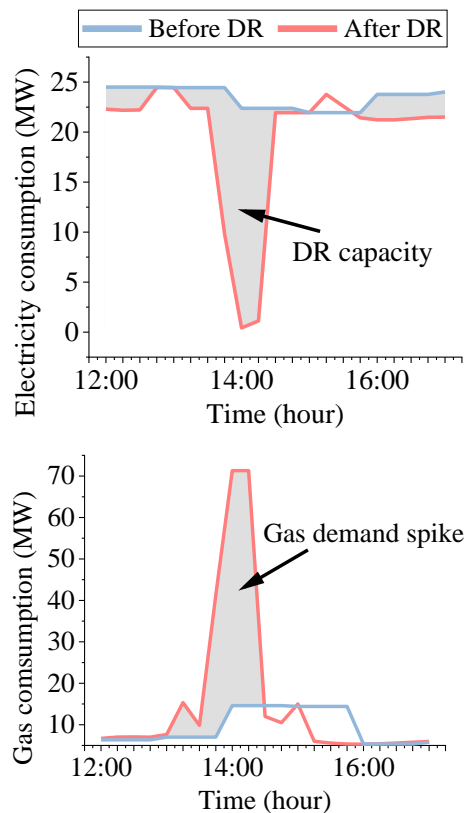
通过综合能源用户的灵活自调度能将电力负荷尖峰转嫁至天然气系统。我们**利用天然气管存消纳转嫁而来的电力负荷尖峰**，从而更好的维持全系统的供需平衡。



[4] Wang S, Hong X, Ding Y, et al. Demand Response for Energy Hubs in Integrated Electricity and Gas Systems Considering Linepack Flexibility (Under review by IEEE TSTE).

综合能源系统的灵活性与可靠性

1+1>2: 各个灵活性之间的协调



主网对天然气尖峰的消纳:

- ✓ 提供了大量电力需求响应容量, 产生了较大天然气负荷尖峰, 但未对气压造成较大冲击
- ✓ 通过提升上游气源出力、提升上游气压, 增加管存, 降低下游气压, 来应对天然气需求尖峰

综合能源系统的灵活性与可靠性

协调的灵活性对可靠性的影响：可靠性权衡

总结综合能源系统的多类灵活性，提出系统性的**可靠性权衡理论**，剖析综合能源系统相对于传统电力系统在可靠性上的特殊特性，有助于更好开展可靠性管理。



[5] Wang S, Hui H, Ding Y, et al. Operational Reliability Evaluation of Urban Multi-Energy Systems With Equivalent Energy Storage[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022.

[6] Wang S, Zhai J, Hui H, et al. Operational Reliability Evaluation of Integrated Energy Systems Considering Gas Flow Dynamics and Demand-Side Flexibilities. (Under review by IEEE TII).

协调后对可靠性的影响：可靠性权衡

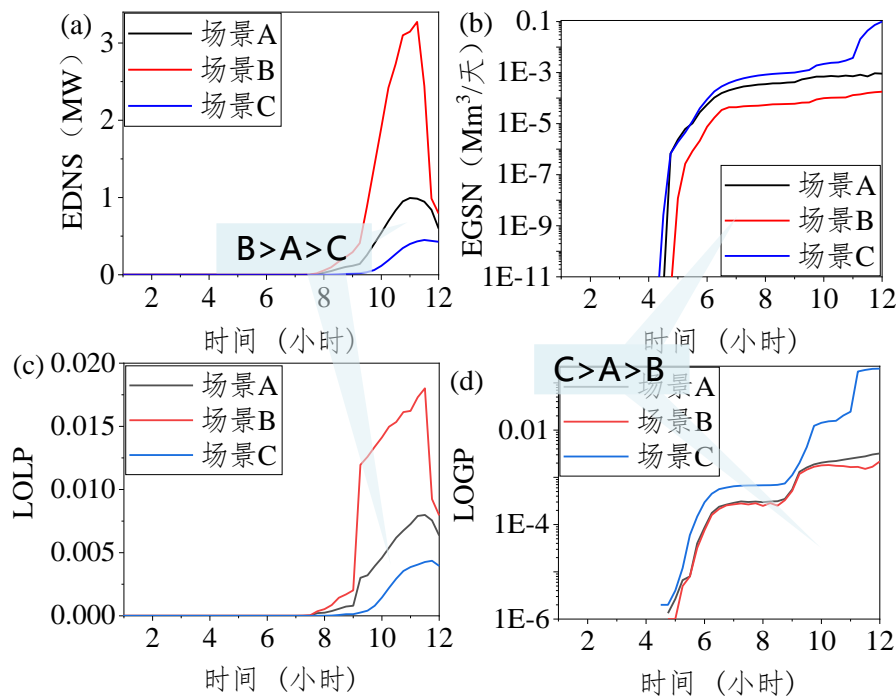


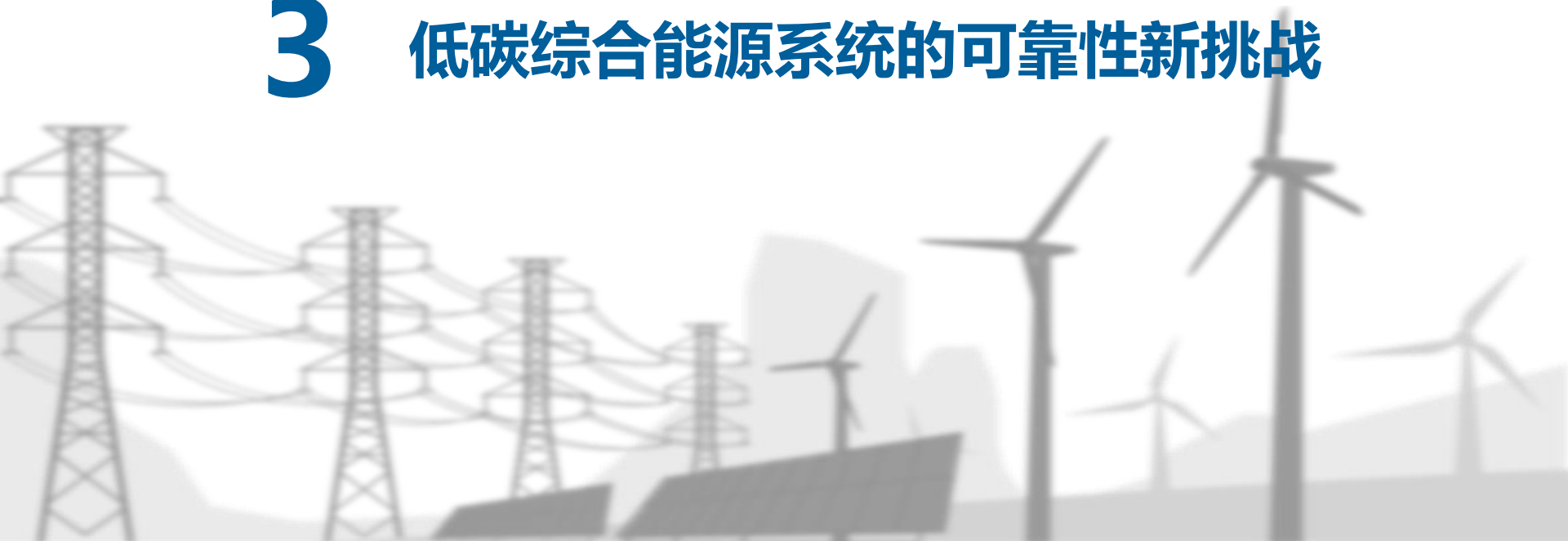
图6-5 不同用户损失函数下电力天然气联合系统的 (a) EDNS对比; (b) EGSN对比; (c) LOLP对比; (d) LOGP对比

表6-4 不同气压的终端条件下系统的期望运行状态

场景		D	E	F	
前6小时	12:00时刻的终端条件气压下限相对值	1	0.98	0.9	下降
	EENS (MWh)	0	0	0	
后6小时	EVNS (Mm³)	0	0	0	下降
	期望总运行成本 (\$)	8.17×10^5	7.52×10^5	5.06×10^5	
后6小时	EENS (MWh)	0.95	1.06	462	
	EVNS (Mm³)	2.07×10^{-7}	1.32×10^{-5}	0.1462	上升
后6小时	期望总运行成本 (\$)	9.53×10^5	1.02×10^6	3.18×10^6	

- ✓ 电力和天然气负荷的权重会影响天然气系统对燃气机组的管存备用开放量，从而形成不同系统之间的可靠性权衡
- ✓ 前一时间域的气压终端条件的限制影响后一时间域上的管存可用量，从而形成可靠性在不同时段的权衡

- 1 研究背景
- 2 综合能源系统的灵活性与可靠性
- 3 低碳综合能源系统的可靠性新挑战**



“双碳”和能源不可能三角



✓ 2020年9月22日，习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话，宣布“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”。



构建低碳能源系统，会对经济性和可靠性带来挑战

政策和低碳举措



基础设施	CCUS	替代气体（氢气等）	长周期可调节储能	...
	产销者资源	离岸可再生能源	屋顶光伏& BIPV	
市场机制	P2P交易	差价合约		...
	碳追踪、碳交易	容量市场		
数字转型	区块链	数字孪生		...
	机器学习			
...				



前沿的低碳
解决方案

控制: 通过灵活性措施来提高低碳解决方案的可靠性

评估: 在采用低碳解决方案的同时保障可靠性

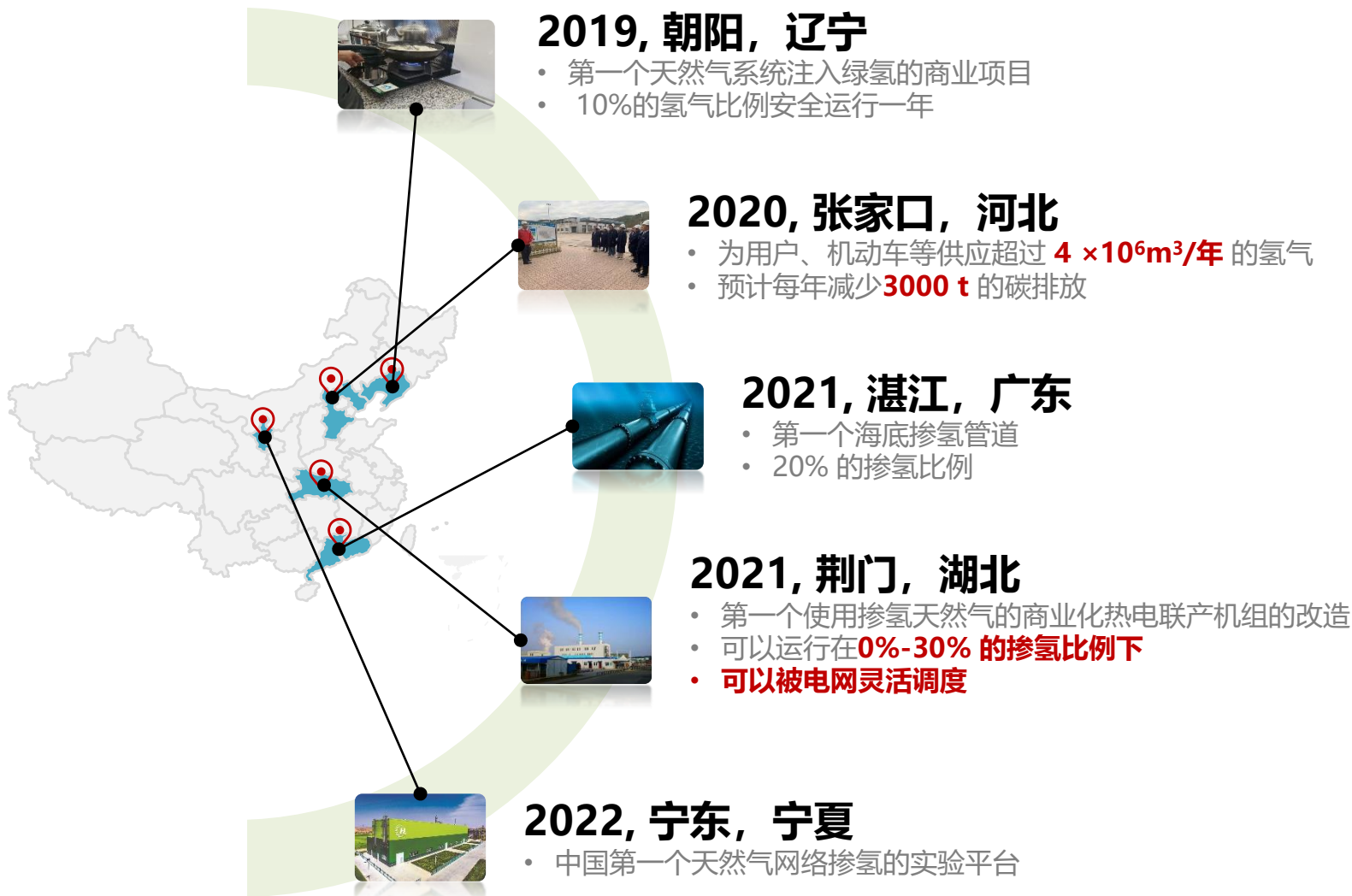
可靠性

在鼓励低碳解决方案的同时，做好可靠性保障工作

掺氢的电力-天然气耦合系统



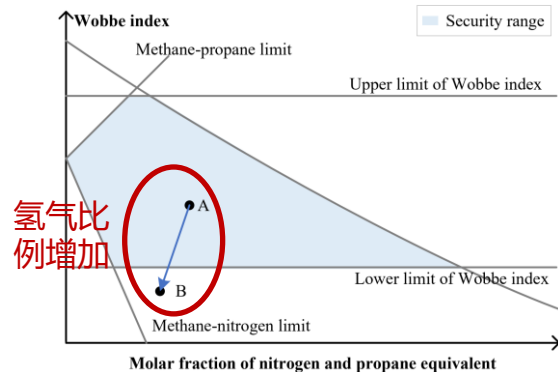
掺氢的电力-天然气耦合系统



掺氢的潜在可靠性问题

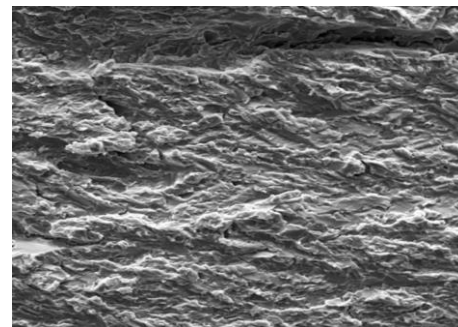
气体质量

- 更低的热值
- 不理想的燃烧



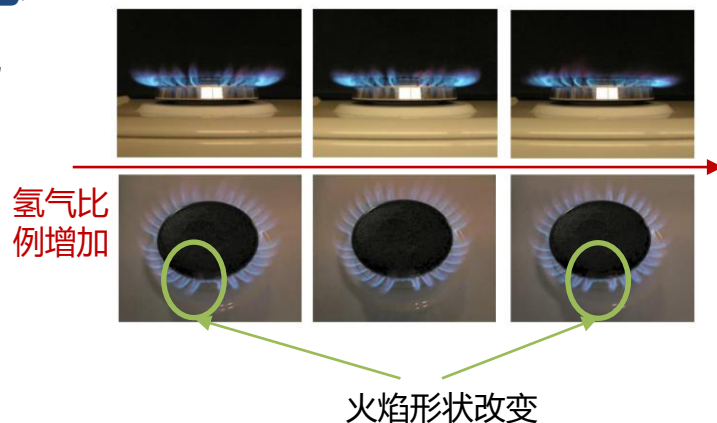
氢脆

- 管道的腐蚀



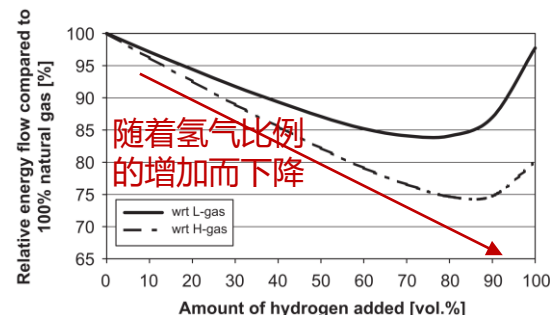
燃烧动态

- 回火
- 局部过热



天然气潮流模式

- 管存振荡



掺氢在为能源系统脱碳的同时，带来潜在安全可靠问题

评估和解决思路

总体目标

在不同时间尺度上，评估和缓解注氢带来的可靠性问题

新因素

- 注氢未来增长预期
- 氢脆效应远期影响

- 强耦合电转气的新能源不确定性
- 短期内天然气成分的波动允许“预算”

- 设备故障与负荷波动
- 新能源预测偏差

新手段

中长期优化规划

- 合理对电转气和新能源选址定容
- 合理规划调节气体
- 合理规划管道材质

日前优化计划

- 做好新能源短期预测与安全管理
- 做好管存使用与补充计划

实时优化运行

- 做好动态气体成分与潮流追踪
- 做好紧急状态与偏差管理

时间尺度

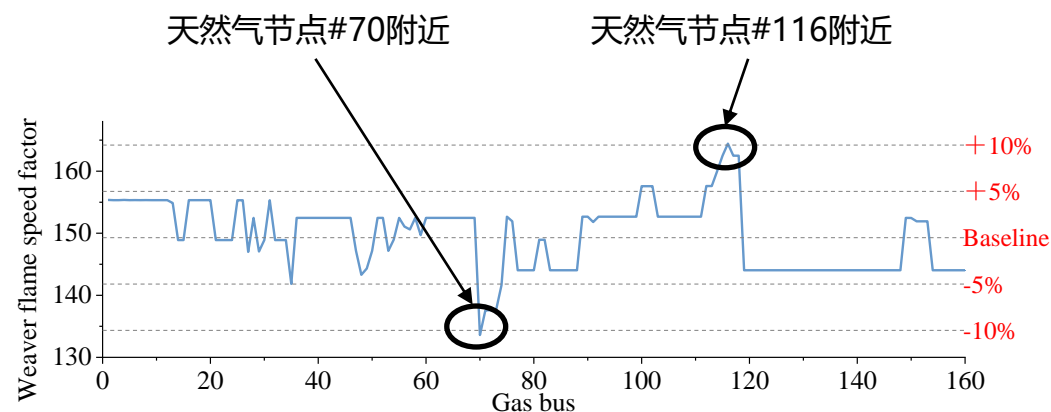
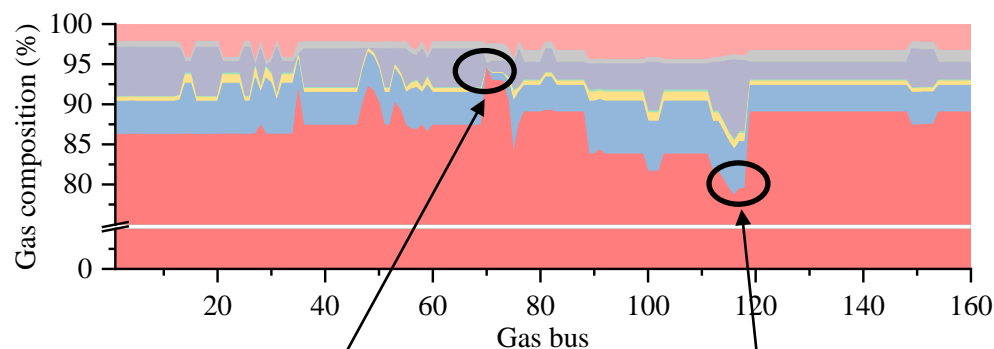
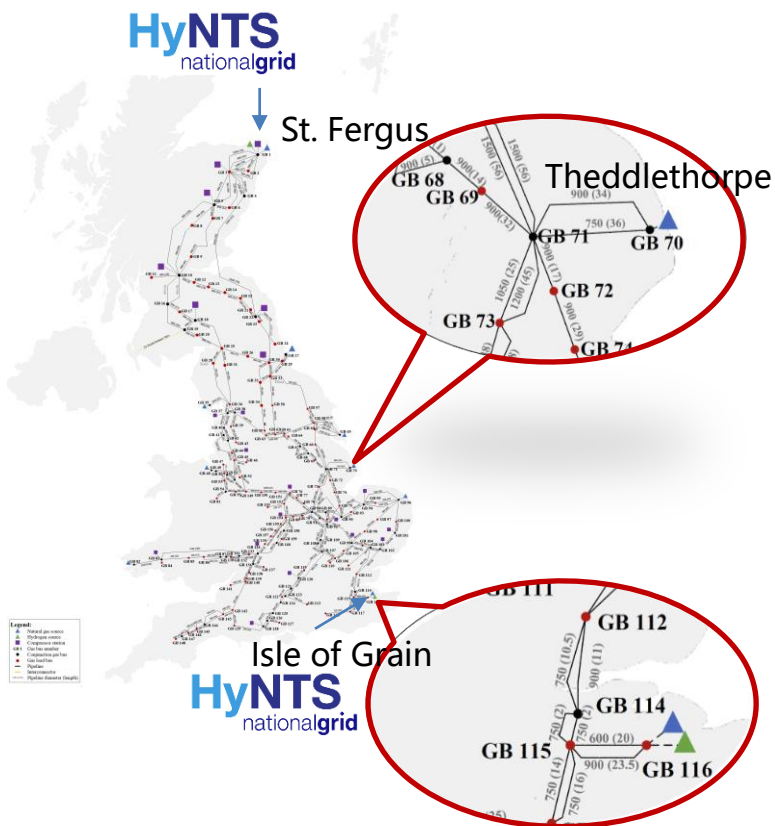
中长期

日前

运行

核心——基于气体成分追踪的优化能流技术

在来源于可再生能源发电的绿氢的注入下，天然气系统内的的气体成分随时间和地点不断变化。为了保证安全性，提出**能够进行气体成分追踪的电力-天然气优化能流技术**。



[7] Wang S, Zhai J, Hui H. Optimal Energy Flow in Integrated Electricity and Gas Systems With Injection of Alternative Gas[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023.



澳門大學
UNIVERSIDADE DE MACAU
UNIVERSITY OF MACAU



智慧城市物聯網國家重點實驗室(澳門大學)
State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (University of Macau)

谢谢!

王盛 (E-mail: shengwang@um.edu.mo)

澳门大学

智慧城市物联网国家重点实验室

