

# 源-网-荷侧先进绝热压缩空气储能 灵活性建模及运行研究

---

报告人：李 瑞

导师：梅生伟 教授

# 汇报提纲

---



—from Google Image

1

研究背景

2

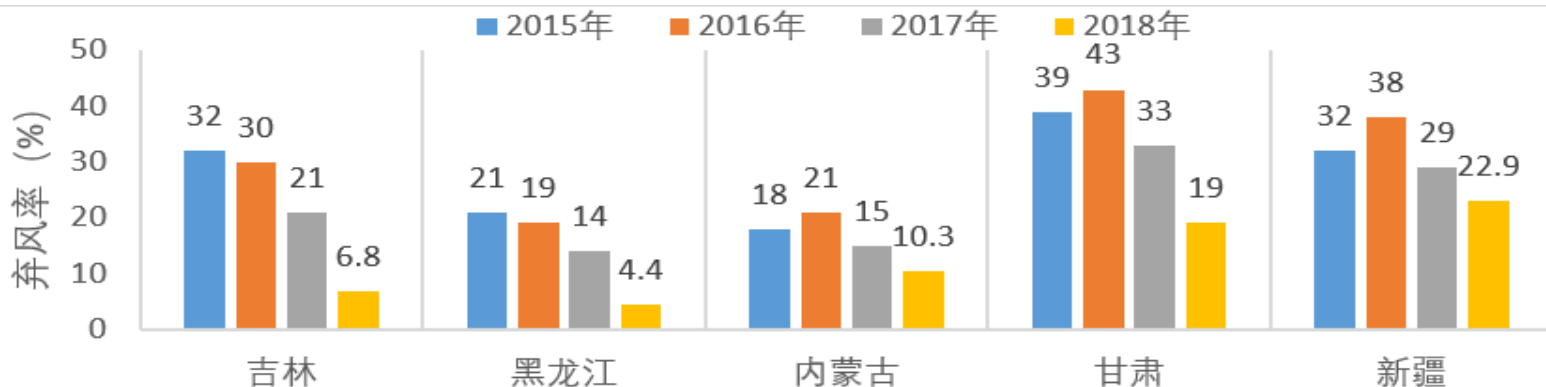
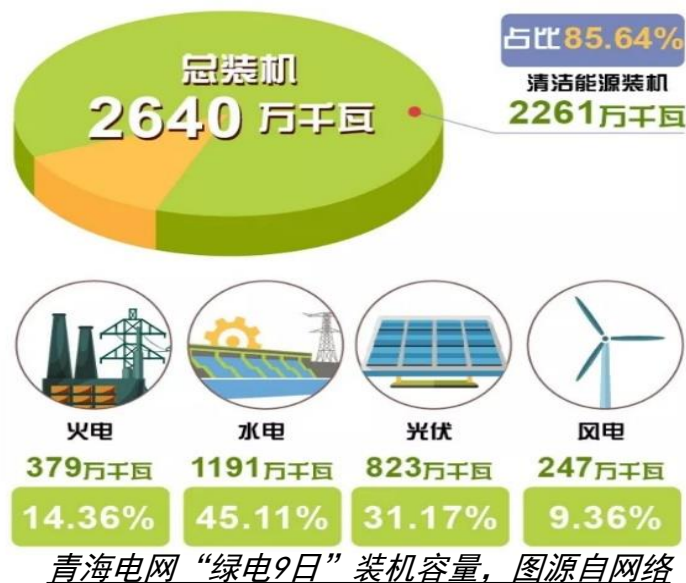
研究内容

3

总结

# 1. 研究背景

## □ 新能源电力系统现状 (I) 新能源容量与电量高比例渗透渐成共识



受限于电力系统灵活性资源, 新能源机组电量/容量继续渗透受阻

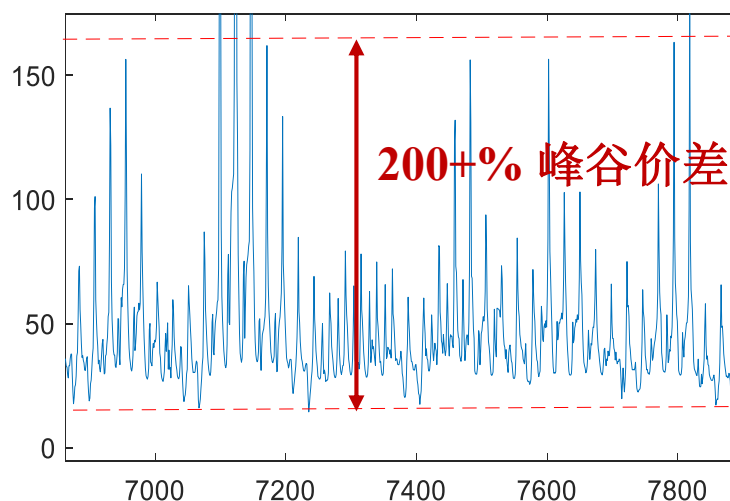
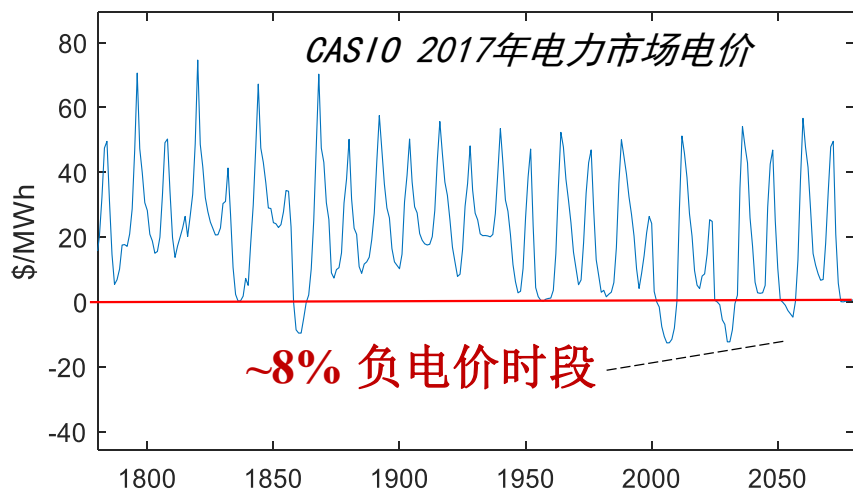
# 1. 研究背景

## □ 新能源电力系统现状 (II)

电力市场负电价与峰谷价差愈演愈烈

—美国电力市场典型节点负电价小时数占比

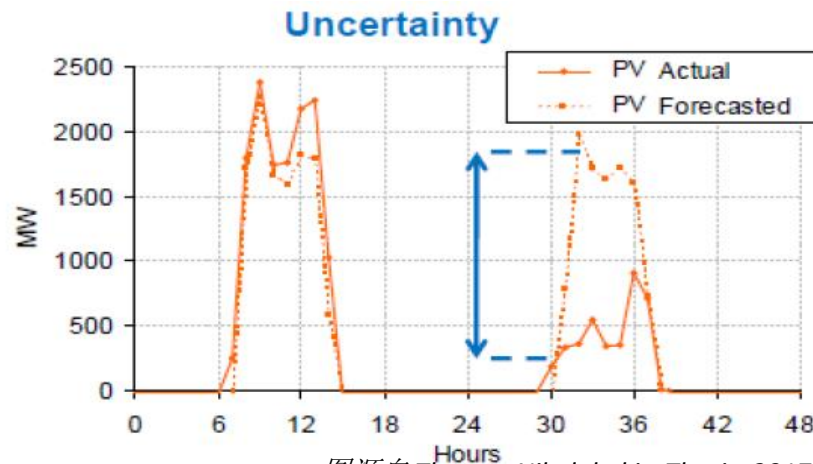
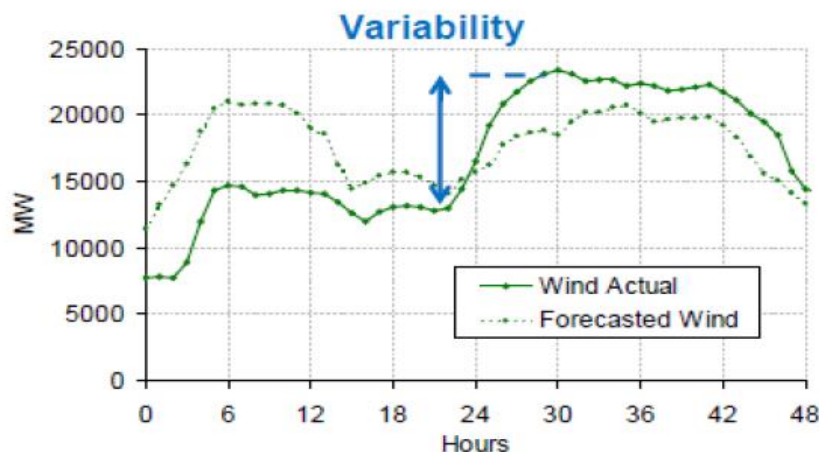
年份	CAISO	ERCOT	NYISO	PJM	ISO-NE
2013	2.26%	0.29%	1.37%	2.41%	0.00%
2014	5.03%	0.67%	2.13%	5.24%	0.76%
2015	5.40%	3.79%	8.56%	11.00%	1.64%
2016	8.33%	3.94%	6.54%	4.01%	2.77%
电价节点	SP-15	West	ZoneD-North	Byron	Maine



不可调度性使新能源机组难以主动响应电力市场电价信息

# 1. 研究背景

□ **根源与源-网-荷灵活性需求** 以灵活性资源应对波动性与不确定性



图源自 Thomas Nikolakakis, Thesis, 2017

多样的灵活性资源需求

💡 **灵活电源**

💡 **输送通道**

💡 **灵活负荷**



容量不足

调峰/备用缺乏

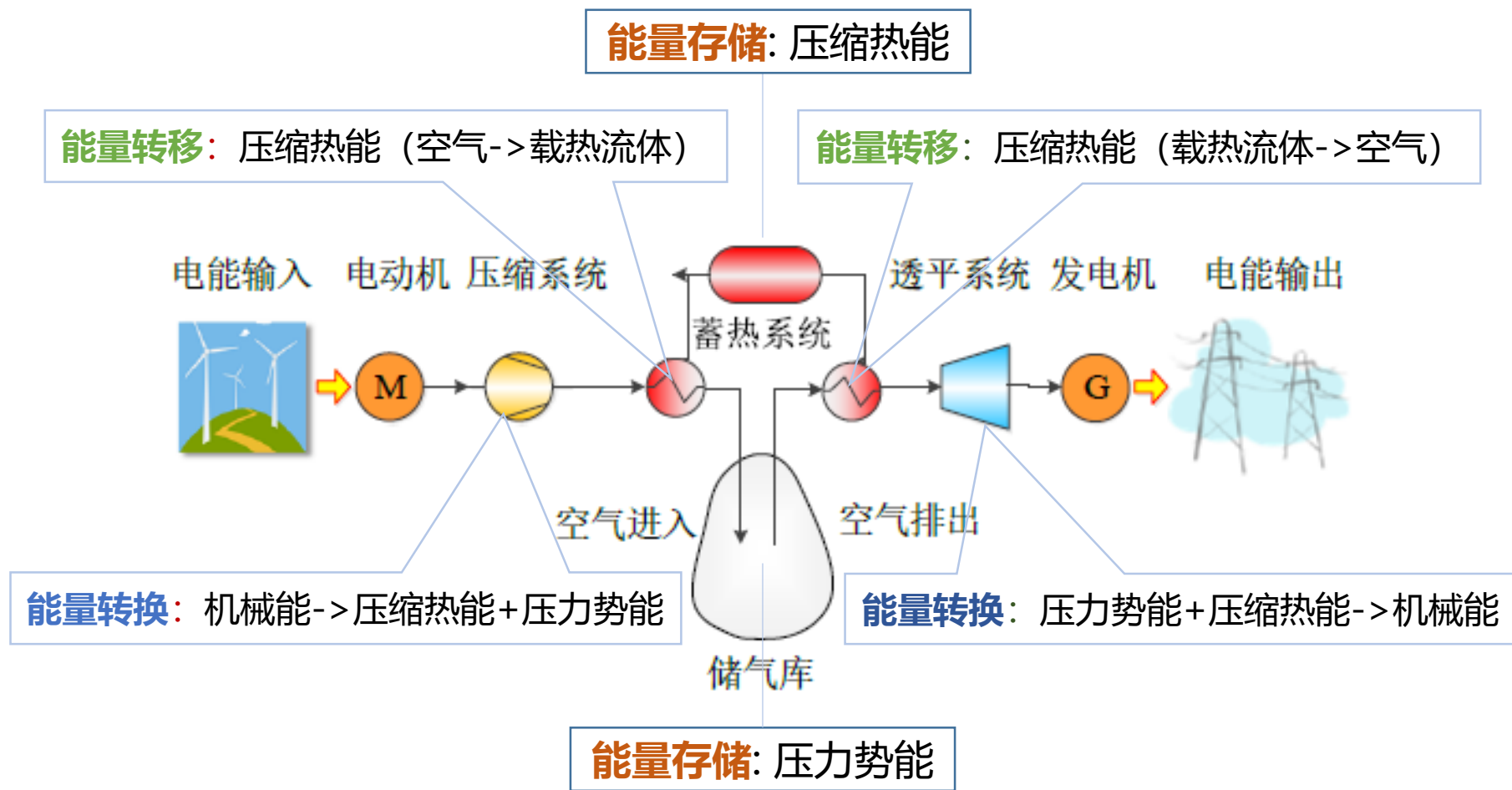
图源自 Dave Mooney, Report, 2015

聚焦于电能

具备灵活调节及多能联供能力的**储能技术**可有效注入**多类灵活性**

# 1. 研究背景

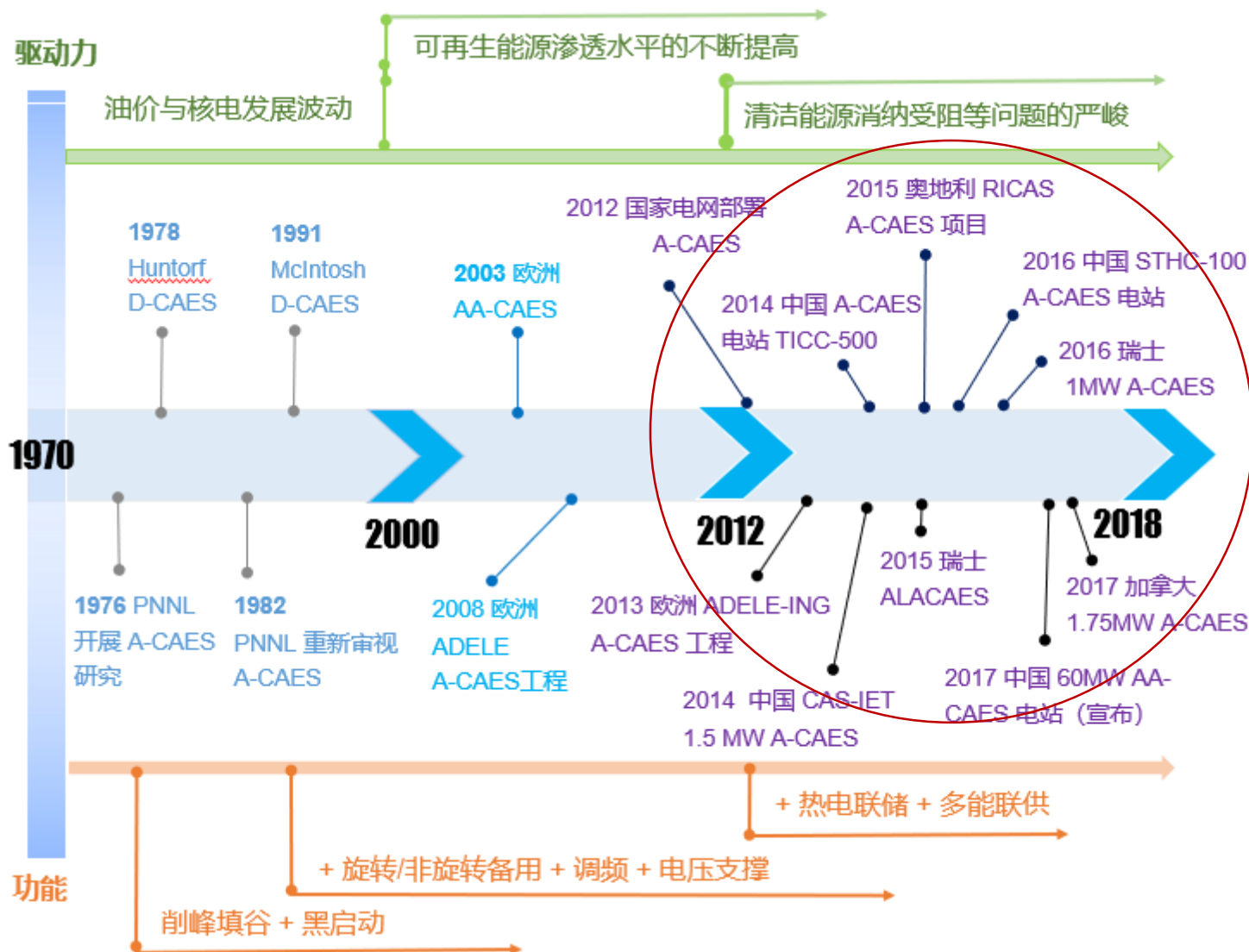
## □ 先进绝热压缩空气储能(AA-CAES)



能量转换、转移及存储组件实现压力势能与压缩热能的解耦存储与耦合释能

# 1. 研究背景

## □ 先进绝热压缩空气储能历史沿革



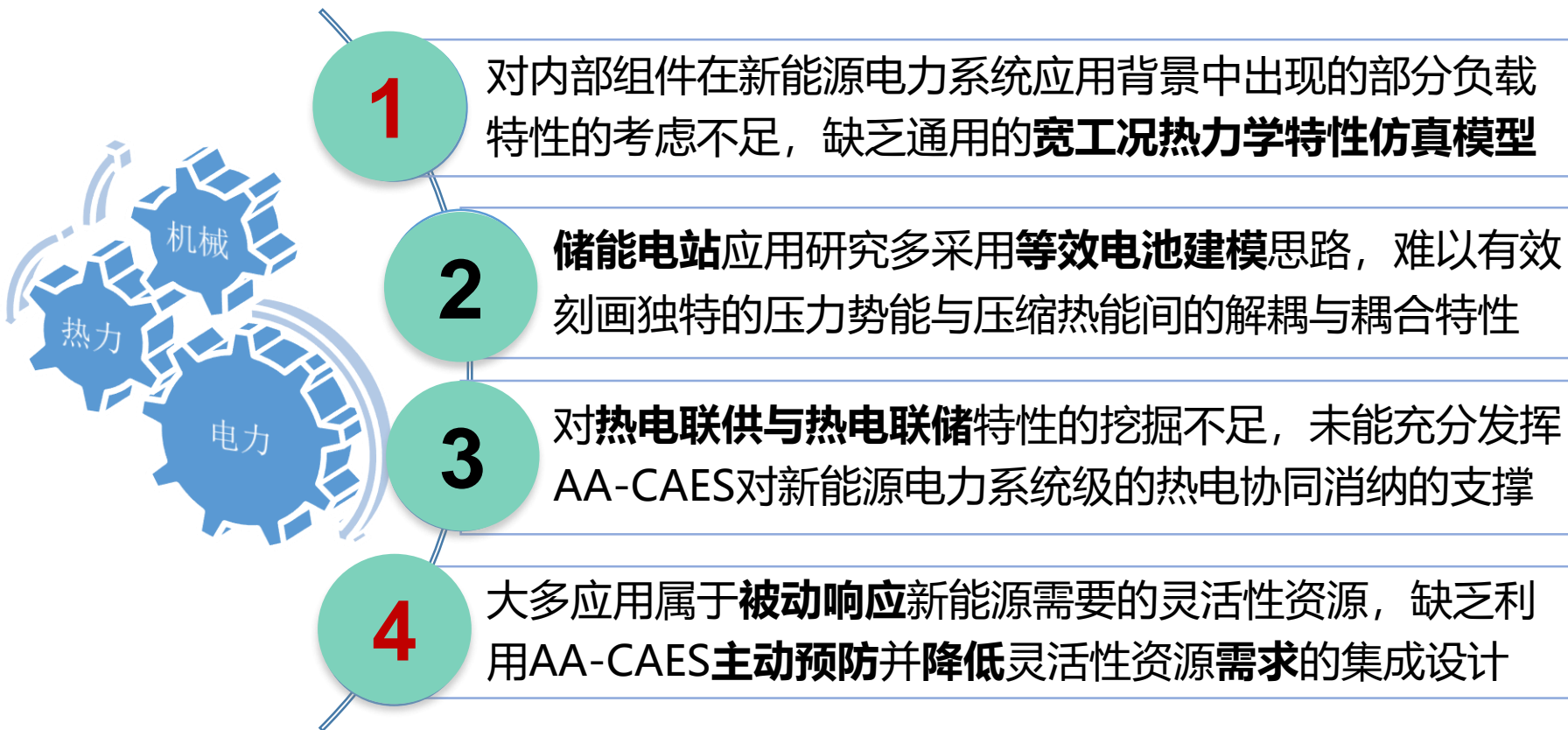
源网荷三侧的先进绝热压缩空气储能

不同的驱动力激发了AA-CAES在电力系统中日趋丰富的功能



# 1. 研究背景

## □ 面向新能源电力系统的AA-CAES灵活性研究现状



本文深入挖掘AA-CAES的**三类灵活性**，从**源-网-荷**三侧出发，建立集**仿真、建模、调度及运营**于一体的分析方法，实现“**被动响应**”与“**主动预防**”相结合的灵活性支撑框架



# 汇报提纲

---



—from Google Image

1

研究背景

2

研究内容

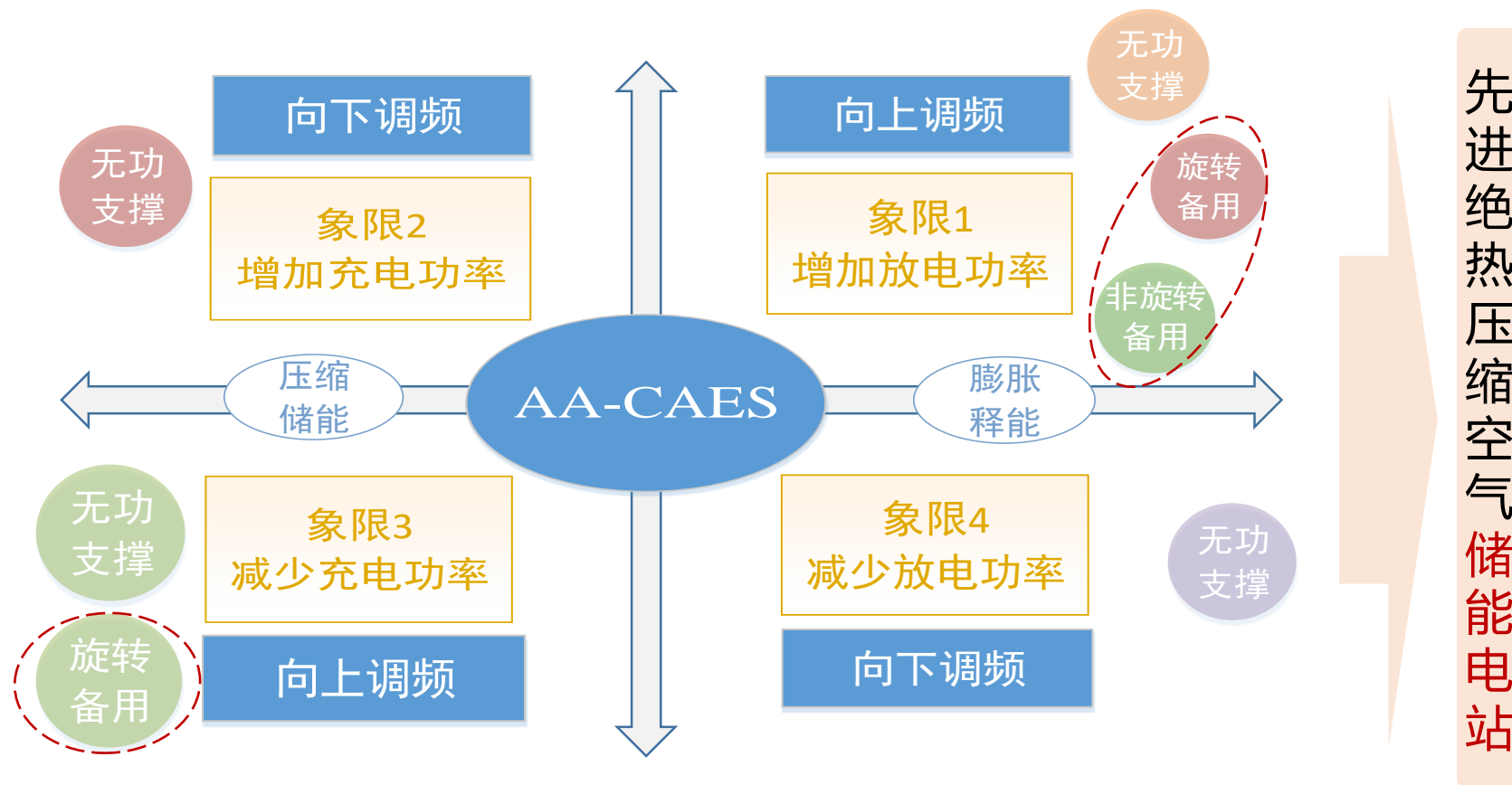
3

总结

## □ 先进绝热压缩空气储能的常规灵活性

论文第1章

✓ 继承了CAES的优良动态响应特性，具备CAES的常规灵活性



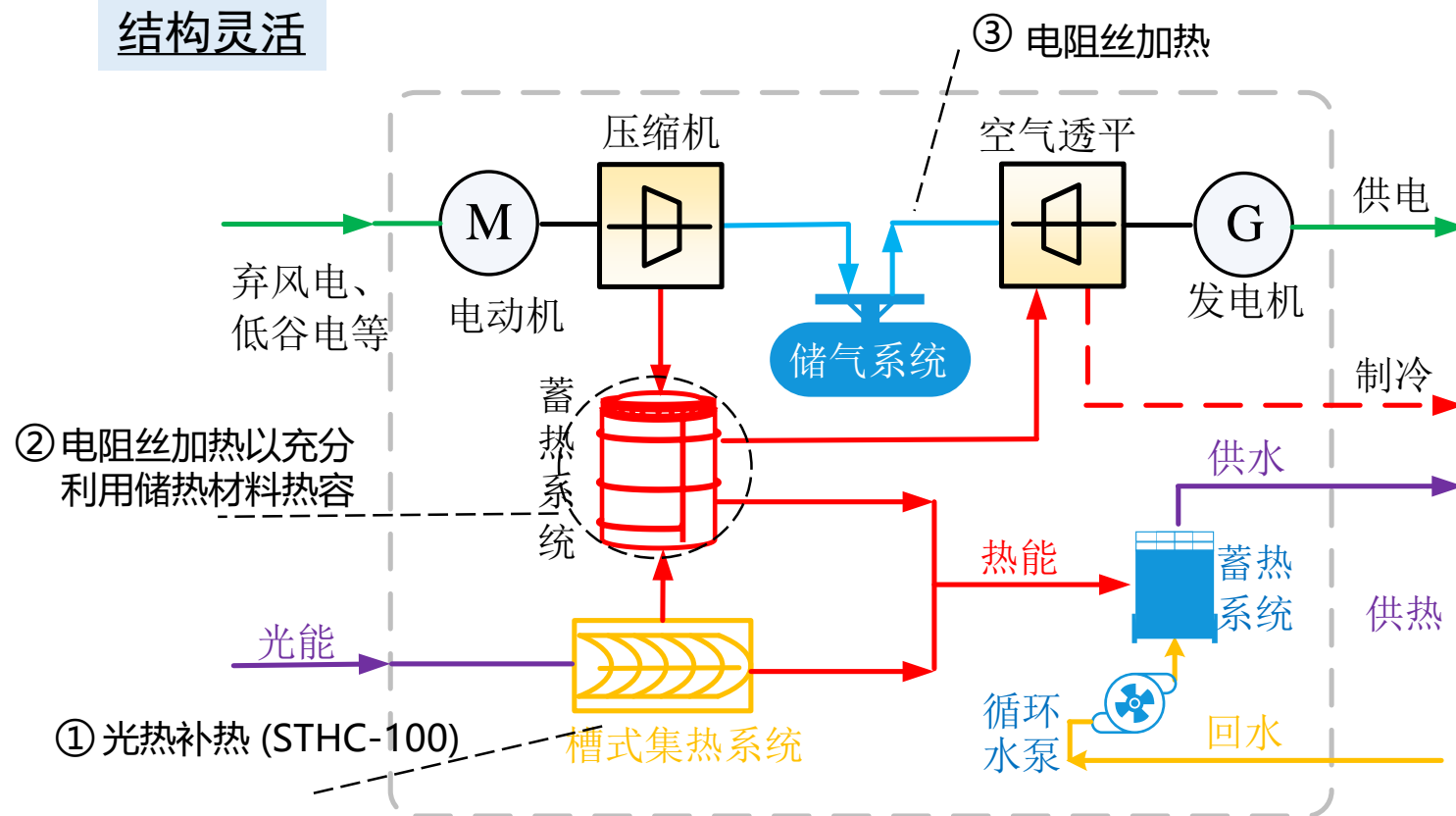
AA-CAES具有以能量搬移与容量备用为特征的常规灵活性

## □ 先进绝热压缩空气储能的供能灵活性

论文第1章

✓ 蓄热系统实现了压缩热能的收集与回馈，内置储热与储电单元

结构灵活



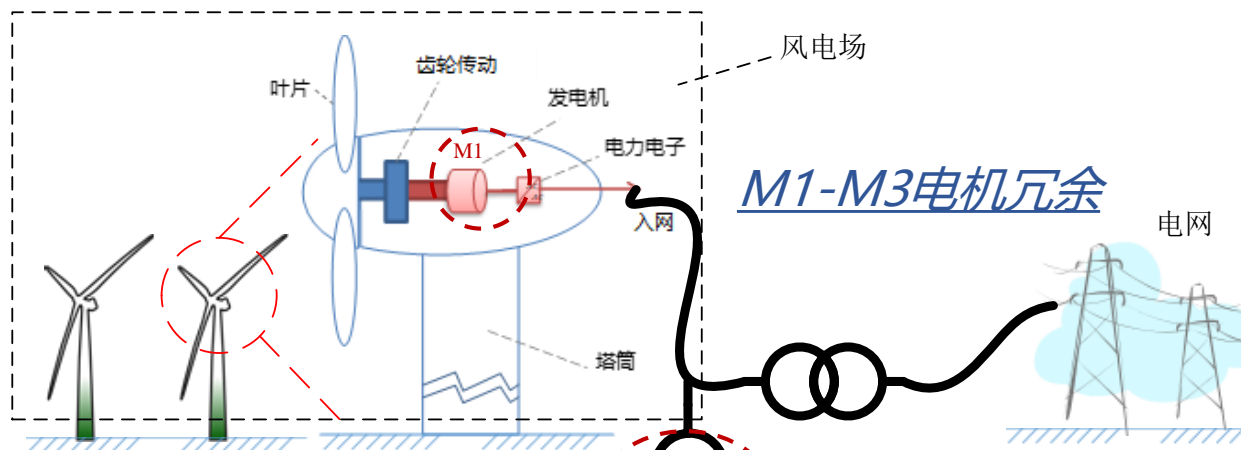
先进绝热压缩空气能量枢纽

AA-CAES具有以**热电联储与热电联供**为特征的**供能灵活性**

## □ 先进绝热压缩空气储能的接口灵活性

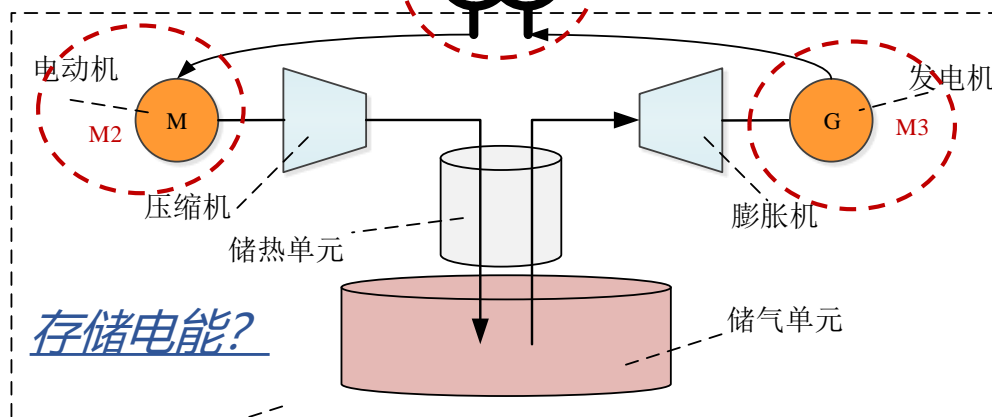
论文第1章

风-储集成设计?



空气动力汽车AirPod

图源自MDI公司官网

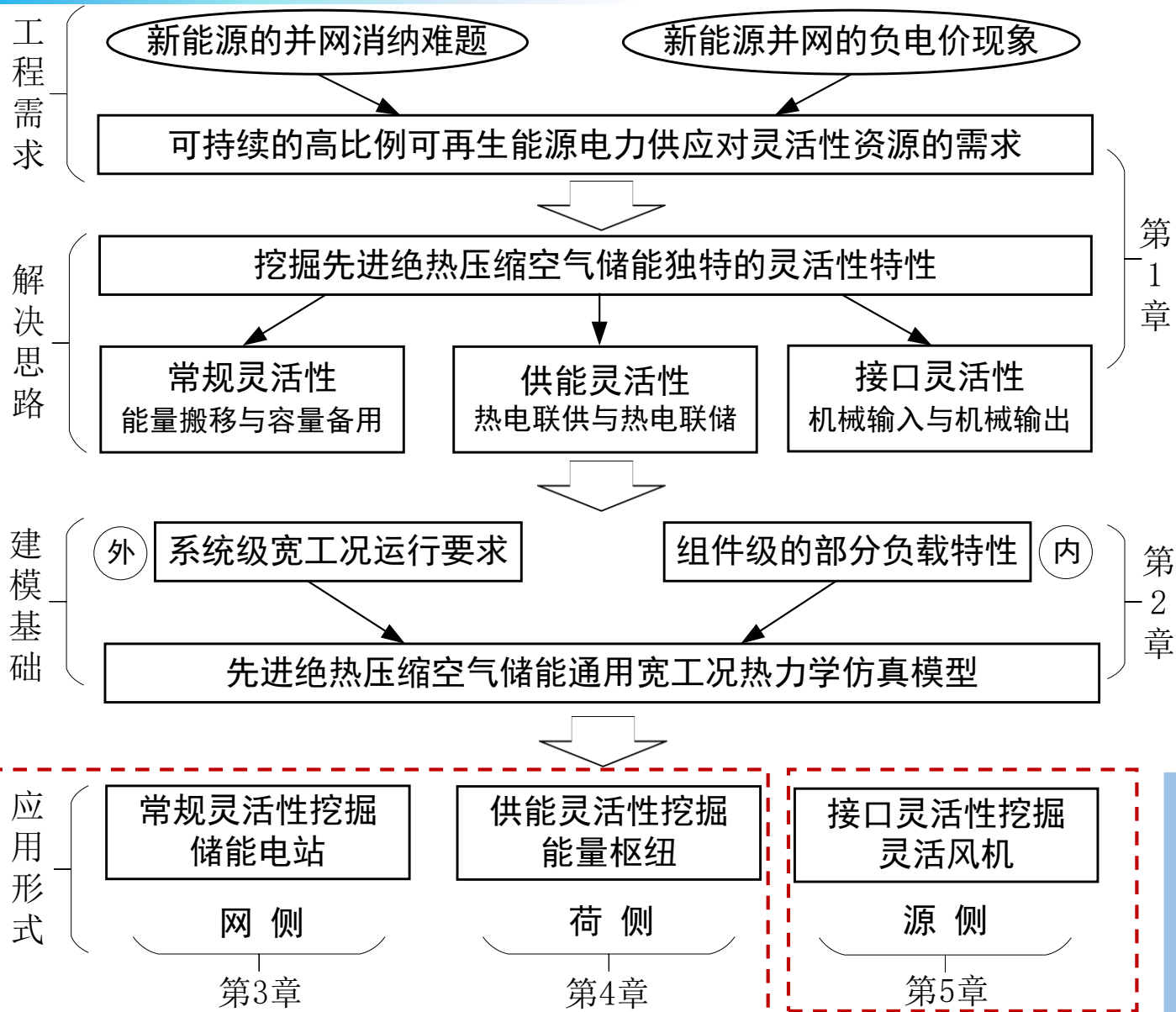


绝热压缩空气储能电站

内嵌绝热压缩空气型灵活风机

AA-CAES具有以机械输入与机械输出为内涵的接口灵活性

# 论文结构



# 2.1 先进绝热压缩空气储能通用宽工况仿真模型

## □ 本部分研究框架

论文第2章

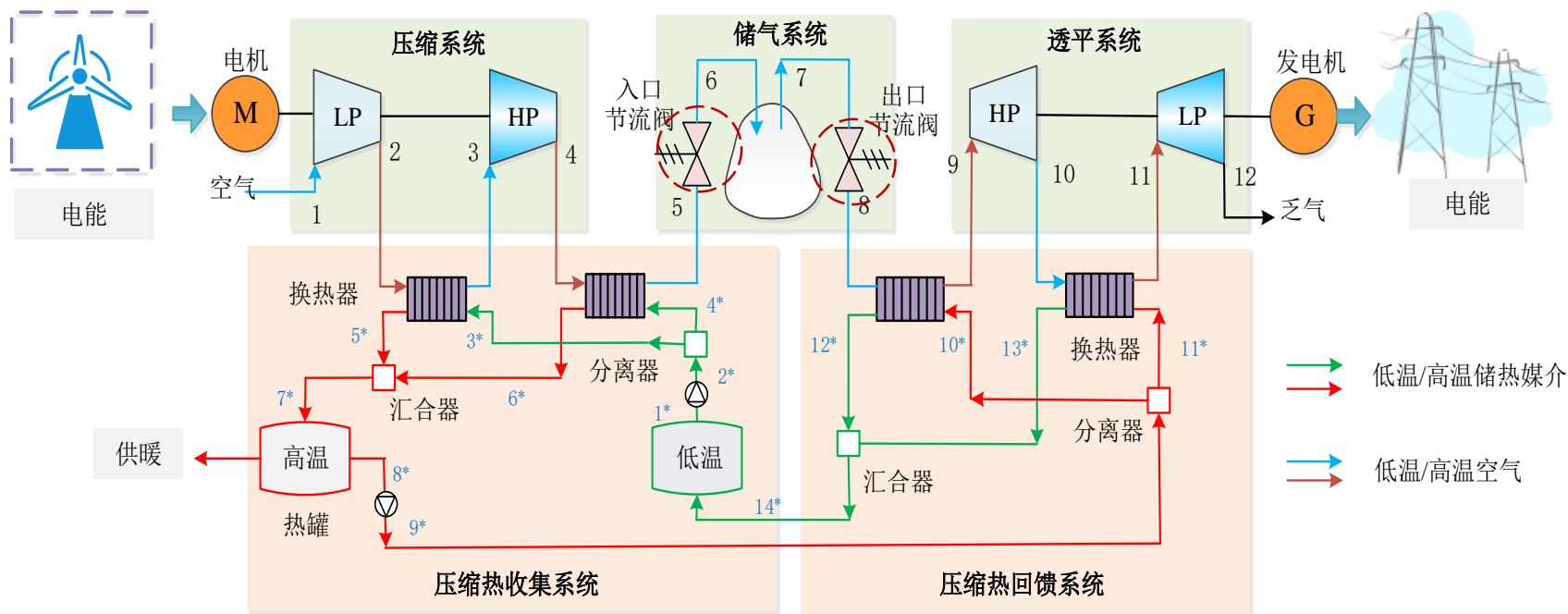
宽工况仿真必要性



通用宽工况仿真模型



系统实现与效果示例



抽象出源-网-荷侧各AA-CAES应用形式具备的通用组件，刻画在新能源电力系统应用中需关注的部分负载特性，提供模型兼容性接口支持

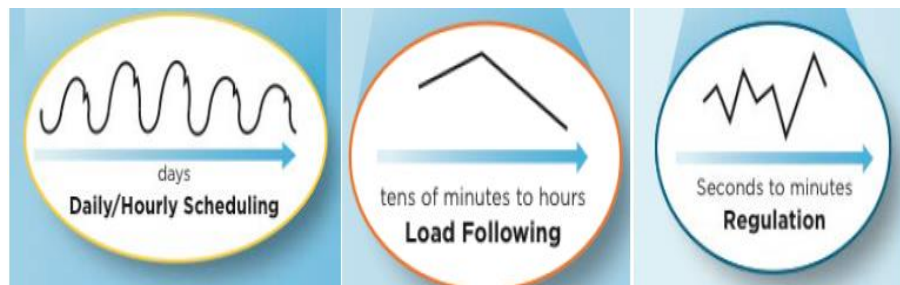
# 2.1 先进绝热压缩空气储能通用宽工况仿真模型

## 通用宽工况仿真必要性

外部宽工况应用激发内部部分负载特性

外因

风能直驱  
多能联储  
多能联供  
储能  
调频  
黑启动  
调相



对AA-CAES系统的宽工况运行要求

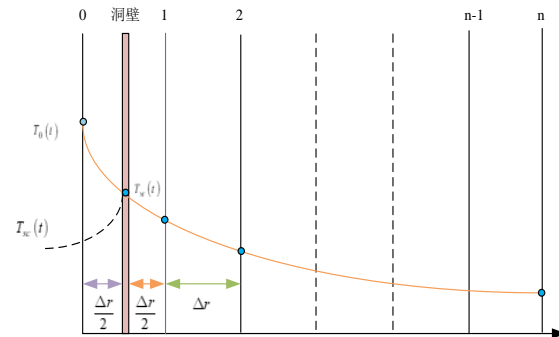
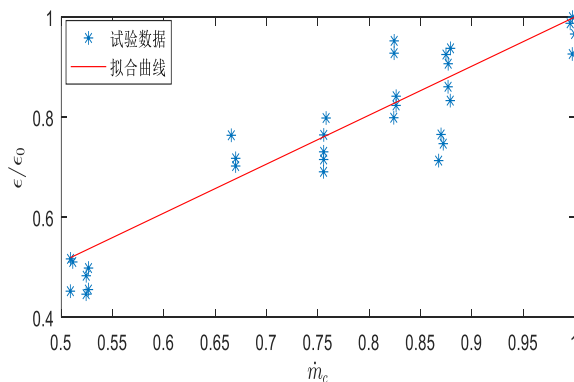
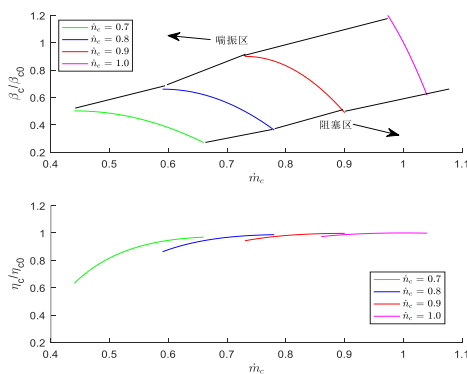
右图源自 Dave Mooney, Report, 2015

内部三大类组件表现出的部分负载特性或动态特性

能量转换类

能量转移类

能量存储类



内因

构建计及组件级部分负载特性的通用仿真模型方能准确刻画电力系统中的特性



# 2.1 先进绝热压缩空气储能通用宽工况仿真模型

宽工况仿真模型(能量+焓) 基于各类组件通用的解析(实验)表达式

额定工况

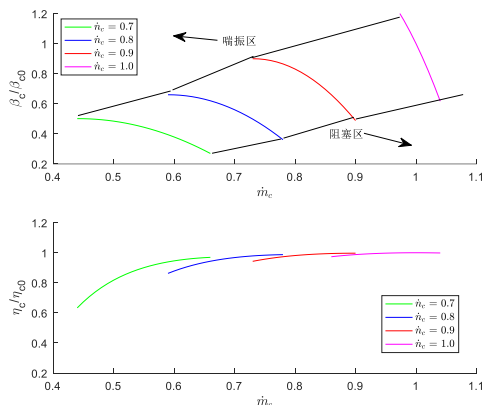
部分负载

解析模型

压缩机

$$T_{c,i}^{out} = \frac{1}{\eta_{c,i}} T_{c,i}^{in} \left( \left( \beta_{c,i} \right)^{\frac{k-1}{k}} + \eta_{c,i} - 1 \right)$$

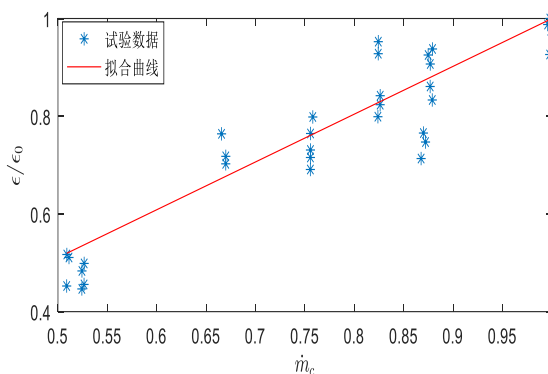
$$W_{c,i} = \dot{m}_c c_p^a (T_{c,i}^{out} - T_{c,i}^{in})$$



换热器

$$T_{c,HX,i}^{a,out} = T_{c,HX,i}^{a,in} - \Phi_{c,i}^{HX} / (c_p^a \dot{m}_{c,i}^a)$$

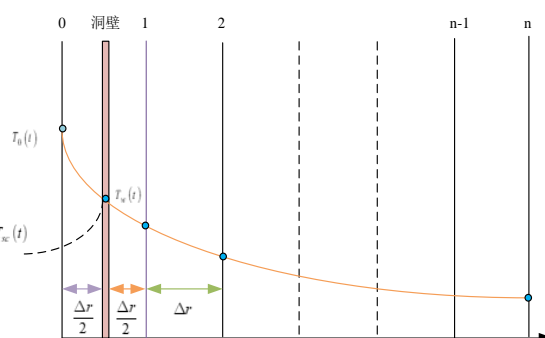
$$\Phi_{c,i}^{HX} = \varepsilon_{c,i} C_{c,i}^{\min}(t) (T_{c,HX,i}^{a,in} - T_{c,HX,i}^{HTF,in})$$



储气库

$$\frac{dm_{as}}{dt} = \dot{m}_{as}^{in} - \dot{m}_{as}^{out}$$

$$\frac{dp_{as}}{dt} = \frac{kR_g}{V_{as}} (\dot{m}_{as}^{in} T_{as}^{in} - \dot{m}_{as}^{out} T_{as}^{out}) + \frac{R_g}{c_v^a V_{as}} (\alpha_w A_w (T_w - T_{as}))$$



$$\frac{\beta_{c,i}}{(\beta_{c,i})_0} = a_{1,i} (\dot{G}_{c,i})^2 + a_{2,i} \dot{G}_{c,i} + a_{3,i}$$

降阶流量

$$\varepsilon_{c,i} = \frac{1 - \exp[-NTU_{c,i} (1 + C_{c,i}^{HX})]}{1 + C_{c,i}^{HX}}$$

换热器效能

$$\frac{\partial T_{rs}}{\partial t} = r_{rs} \left( \frac{\partial^2 T_{rs}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{rs}}{\partial r} \right)$$

热传导方程

$$\frac{\eta_{c,i}}{(\eta_{c,i})_0} = [1 - c(1 - \eta_{c,i})^2] (\dot{\eta}_{c,i} / \dot{G}_{c,i}) (2 - (\dot{\eta}_{c,i} / \dot{G}_{c,i}))$$

降阶转速

$$C_{c,i}^{\min} = (\dot{m}_c c_p^a, \dot{m}_{c,i}^{HTF} c_p^{HTF})_{\min}$$

最小热容

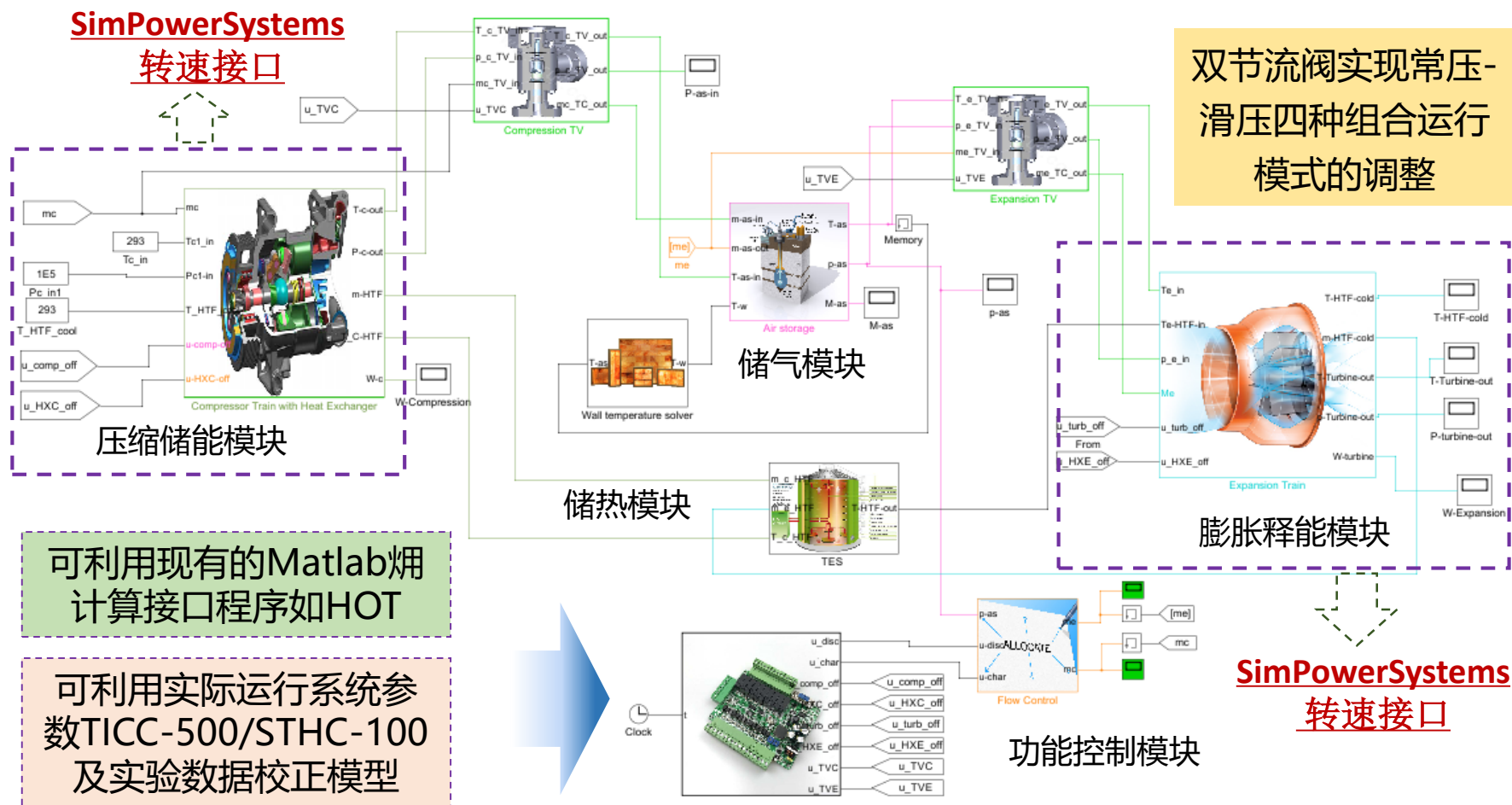
$$T_w(t) = \frac{T_{sc,a}}{2 \left( \frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2} \right)} + T_{rs,1} \left( 1 - \frac{1}{\left( \frac{1}{Bi^+} + \frac{1}{2} \right)} \right)$$

壁面实时温度

基于组件解析表达式实现模型通用性及接口兼容性, 面向多种AA-CAES实现形式

# 2.1 先进绝热压缩空气储能通用宽工况仿真模型

## 宽工况仿真系统 MATLAB/Simulink实现与电力系统仿真软件的接口

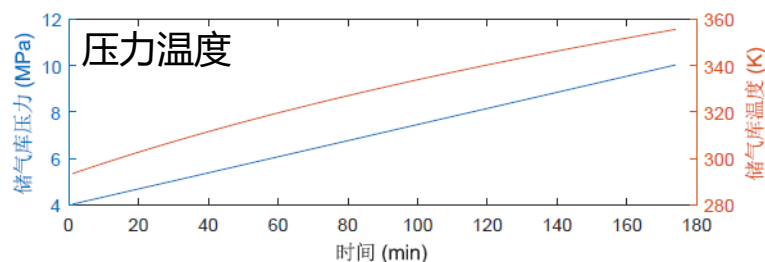
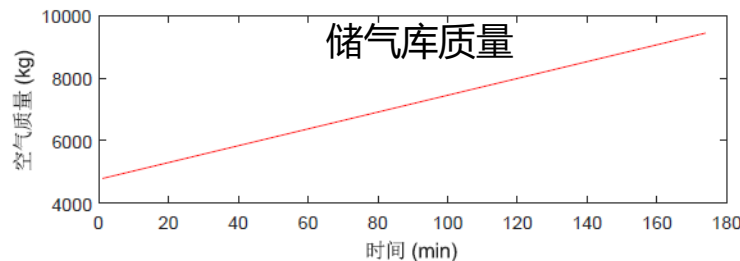
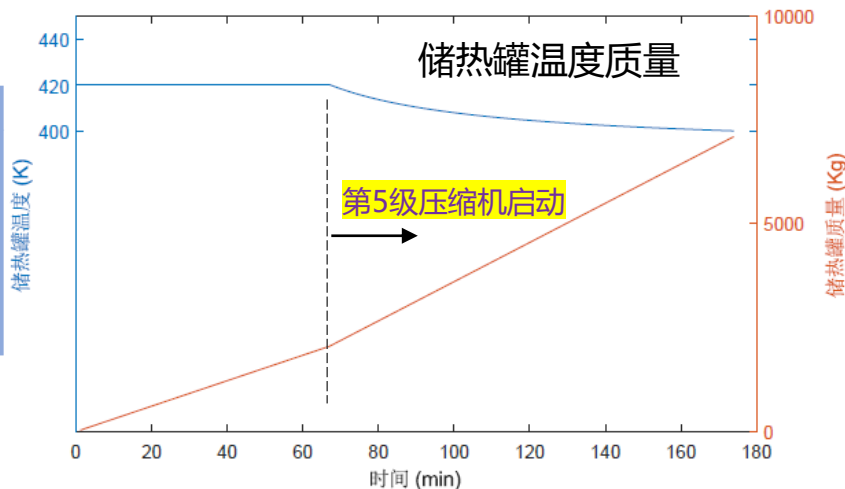


# 2.1 先进绝热压缩空气储能通用宽工况仿真模型

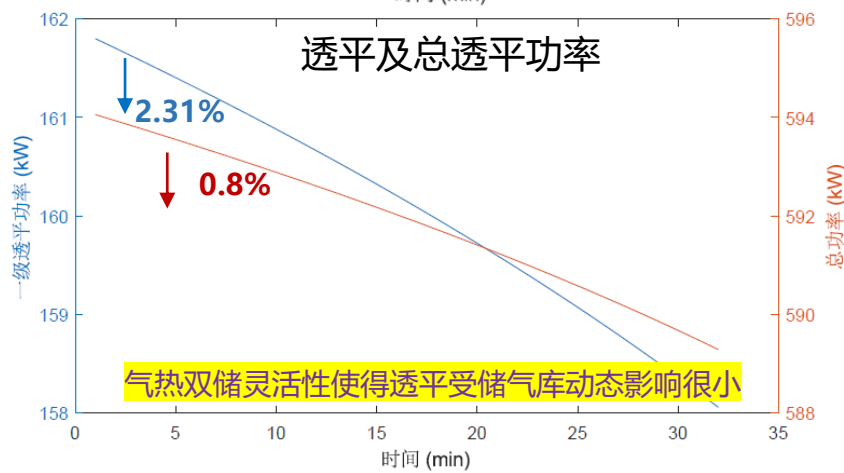
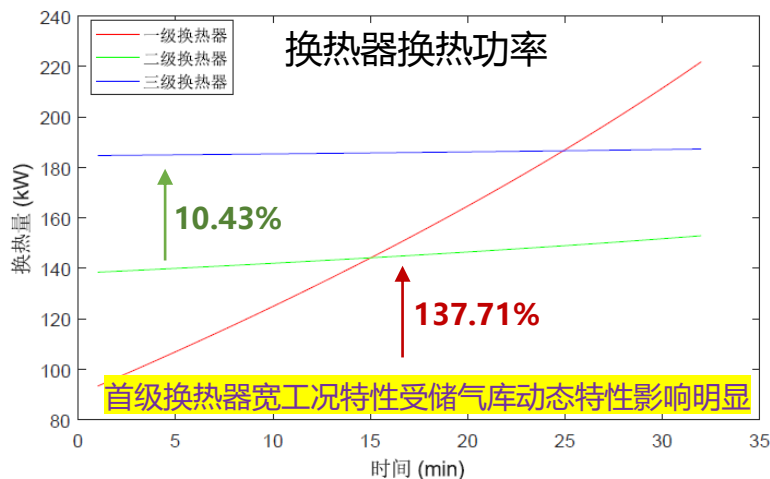
## 热力特性仿真示例

### 0.5 MW AA-CAES系统滑压-常压运行特性

压缩过程



膨胀过程



宽工况下电-电循环效率相对降低**6.9%**@40%，热电联供效率相对下降**5.1%**@84.7%

## 2.1 先进绝热压缩空气储能通用宽工况仿真模型

### □ 小结

#### ➤ 研究成果

- ✓ AA-CAES 通用宽工况热力学仿真模型（运行模式+供能模式）
- ✓ 模型兼容性可实现对多类典型AA-CAES形式的热力学特性仿真
- ✓ 典型AA-CAES系统宽工况热力学特性分析

#### ➤ 支撑材料

- ✓ **李瑞**, 陈来军, 梅生伟\*, 薛小代. 先进绝热压缩空气储能宽工况运行特性建模及风电协同运行分析. 电力系统自动化, 2019,43(11):25-33.
- ✓ 梅生伟, **李瑞**\*, 陈来军, 薛小代. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2893-2907.
- ✓ 梅生伟\*, **李瑞**, 黄少伟, 魏韡, 张雪敏, 卢强. 多能互补网络建模及动态演化机理初探. 全球能源互联网, 2018, 1(01):10-22.

## 2.2 网侧先进绝热压缩空气储能电站建模及运行

### □ 本部分研究框架

论文第3章

电池荷电状态(SOC)建模经典方法

储能SOC

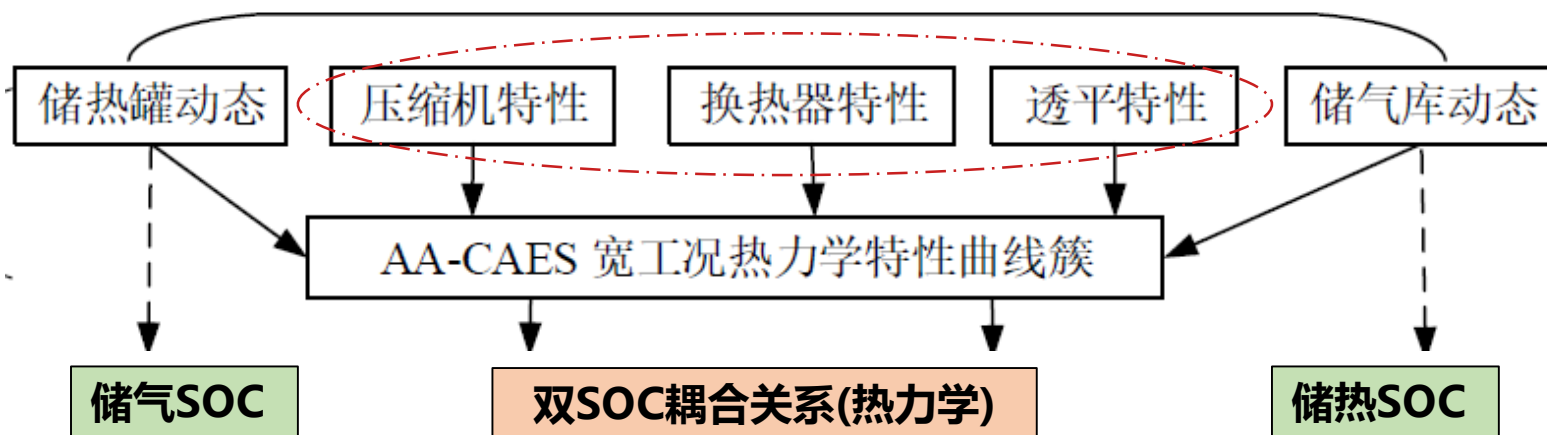
充电效率

放电效率

功率接口

$$E_{t+1}^B = (1 - \gamma) E_t^B + p_t^{char} \eta^{char} - \frac{P_t^{dis}}{\eta^{dis}}$$

第2章组件级稳态热力学仿真模型



针对**储能电站**这一经典应用形式，基于**仿真模型**抽象出面向电力系统应用的**宽工况双SOC建模**理念与方法，并应用于经济调度及市场运营

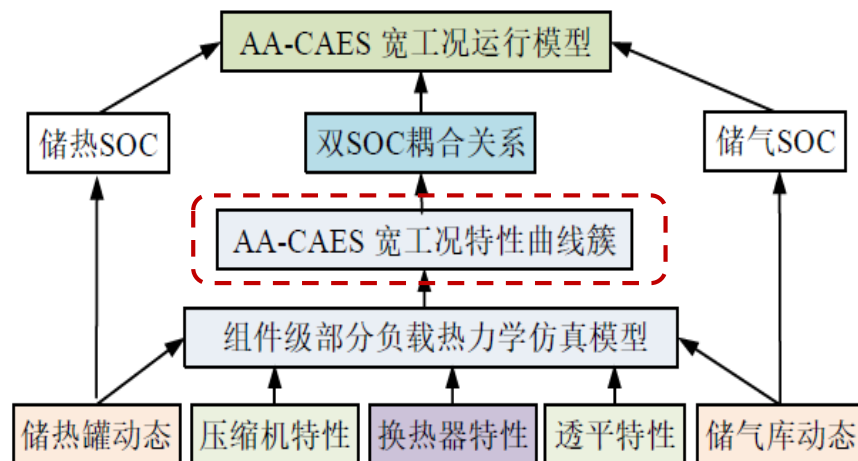
# 2.2 网侧先进绝热压缩空气储能电站建模及运行

## 宽工况热力学特性曲线簇

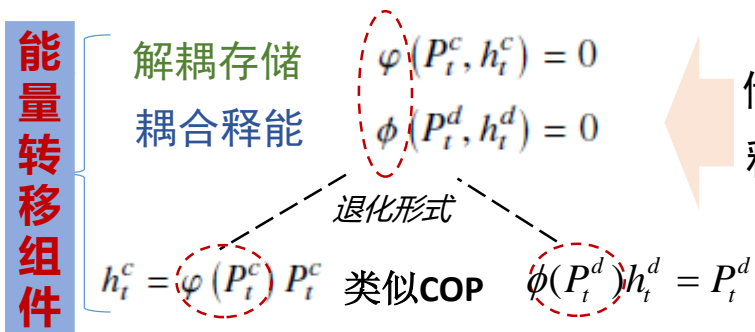


左图截自 青大光伏中心宣传视频, 2018

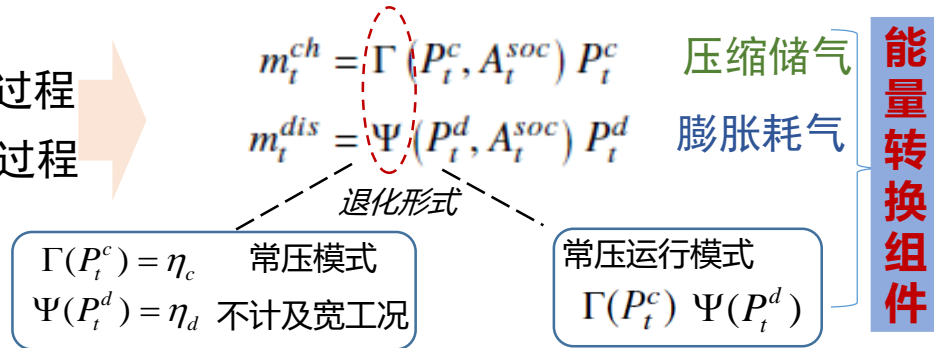
内部组件热力学特性的集中化表示



内部压缩热能与压力势能的耦合关系



外部电功率与储/耗气量的耦合关系



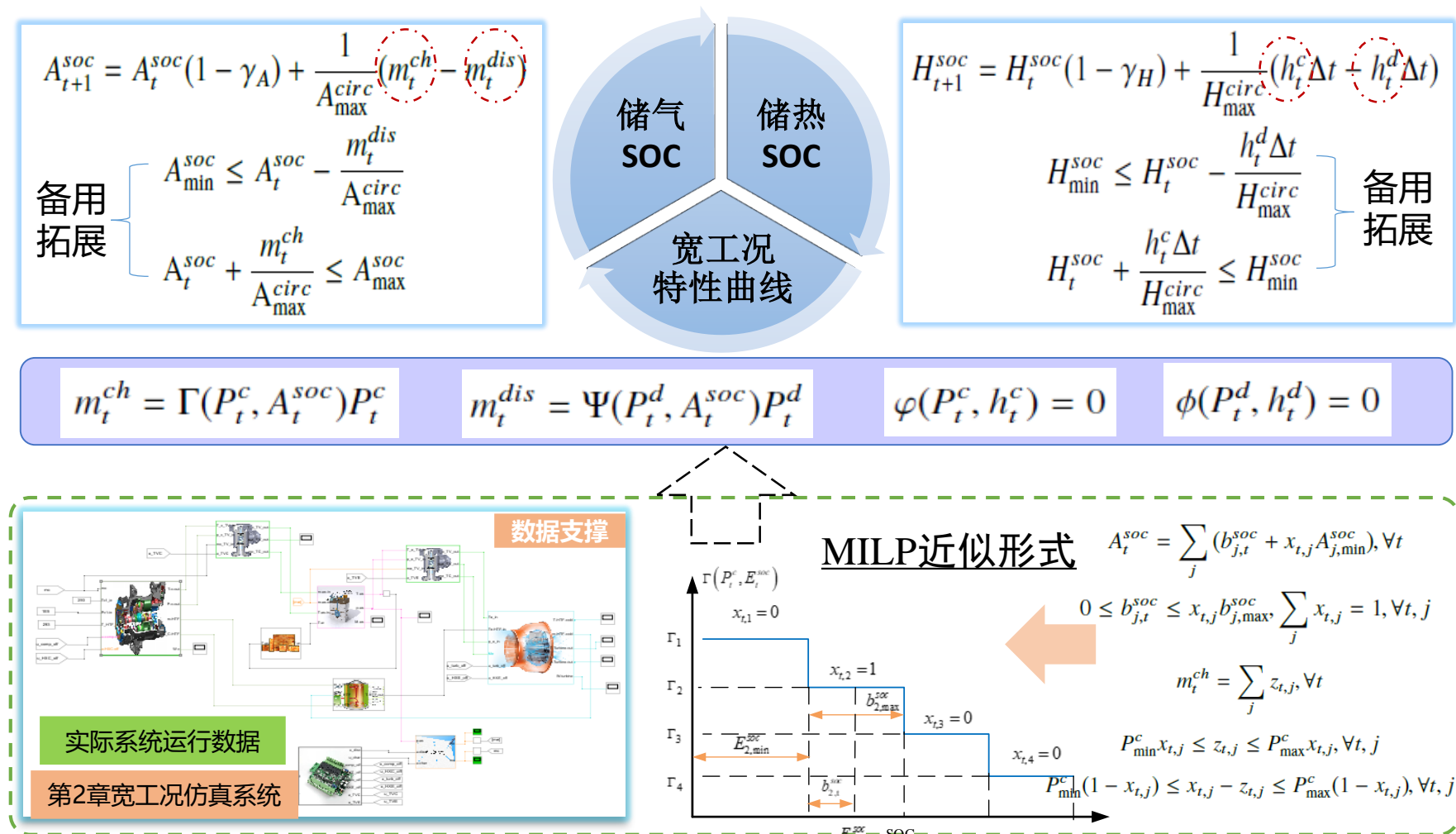
宽工况特性曲线簇实现了能量转换与转移组件部分负载特性的封装与集中统一



# 2.2 网侧先进绝热压缩空气储能电站建模及运行

## 宽工况双SOC建模框架

物理意义明确、形式优美、实现权衡



双SOC运行系列模型可应用于含AA-CAES的电力系统调度、市场运营等问题



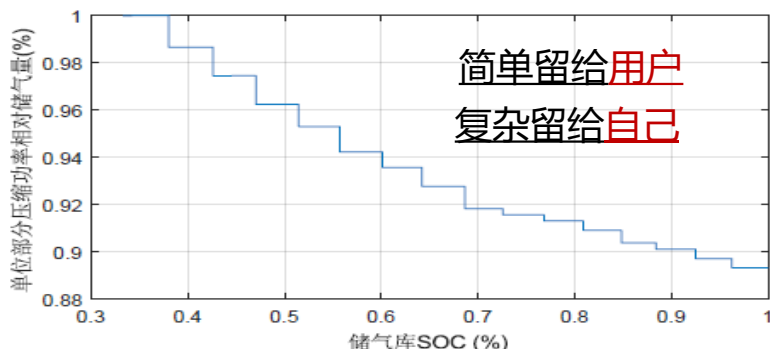
# 2.2 网侧先进绝热压缩空气储能电站建模及运行

## 宽工况双SOC模型的扩展示例

双SOC能量与备用模型

电力系统应用程序/模型（调度、规划、市场）AA-CAES储能电站接口

功率  $(P_t^c, P_t^d)$  备用容量  $(P_t^{c,sr}, P_t^{d,sr}, P_t^{d,nr})$  储能水平  $(A_t^{soc}, H_t^{soc})$



附加  $m_t^{dis,eq} = \Psi(P_t^{d,eq}, A_t^{soc}) P_t^{d,eq}$

约束  $\phi(P_t^{d,eq}, h_t^{d,eq}) = 0$

$$A_{t+1}^{soc} = A_t^{soc}(1 - \gamma_A) + \frac{1}{A_{max}^{circ}}(m_t^{ch} - m_t^{dis})$$

$$A_{min}^{soc} \leq A_t^{soc} - \frac{m_t^{dis,eq}}{A_{max}^{circ}} \quad \text{修正项}$$

$$A_t^{soc} + \frac{m_t^{ch}}{A_{max}^{circ}} \leq A_{max}^{soc}$$

$$H_{t+1}^{soc} = H_t^{soc}(1 - \gamma_H) + \frac{1}{H_{max}^{circ}}(h_t^c \Delta t - h_t^d \Delta t)$$

$$H_{min}^{soc} \leq H_t^{soc} - \frac{h_t^{d,eq} \Delta t}{H_{max}^{circ}} \quad \text{修正项}$$

$$H_t^{soc} + \frac{h_t^c \Delta t}{H_{max}^{circ}} \leq H_{max}^{soc}$$

等效功率  $P_t^{c,eq} = P_t^c - P_t^{c,sr}$  旋转与非旋转备用容量

$P_t^{d,eq} = P_t^d + P_t^{d,sr} + P_t^{d,nr}$

# 2.2 网侧先进绝热压缩空气储能电站建模及运行

## □ 典型应用示例

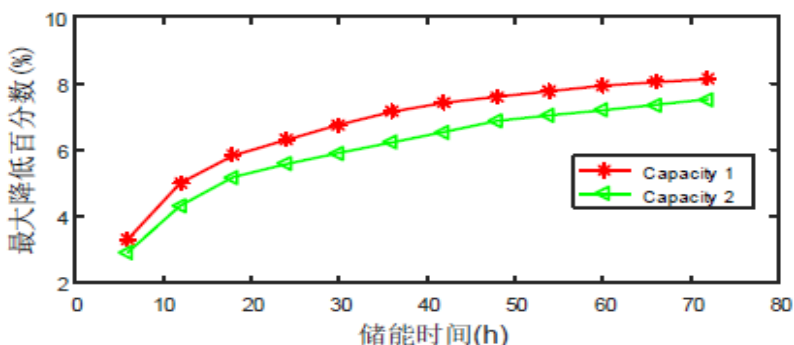
风储  
协同  
发电  
调度

$$\max \sum_{t=1}^{8760} (W_t + P_t^d - P_t^c)$$

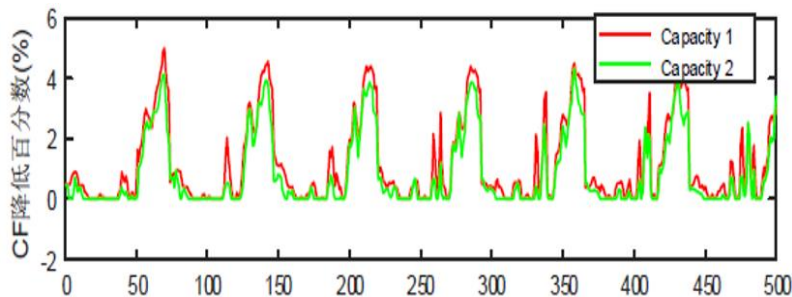
s.t. AA-CAES 双 SOC 能量模型

AA-CAES 运行限制约束

风-储系统运行约束



宽工况影响受储能容量较大，定容时需考虑宽工况



计及宽工况特性后等效容量因子降低~4%

可指导风-储协同系统运行与规划

$$\max_{\Xi, U, P} \sum_{j=1}^{N_A} \sum_{t=1}^{N_T} (\lambda_{j,t}^{dis} A_{j,t}^{dis} - \lambda_{j,t}^{ch} A_{j,t}^{ch}) - \sum_{j=1}^{N_A} \sum_{t=1}^{N_T} (C_j^{dis} A_{j,t}^{dis} + C_j^{ch} A_{j,t}^{ch})$$

日前  
电力  
市场  
竞标

s.t. AA-CAES 双 SOC 能量模型

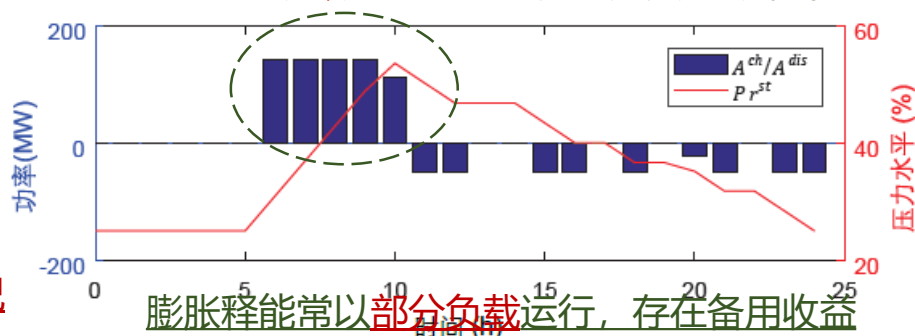
AA-CAES 运行限制约束

竞标标的限制约束

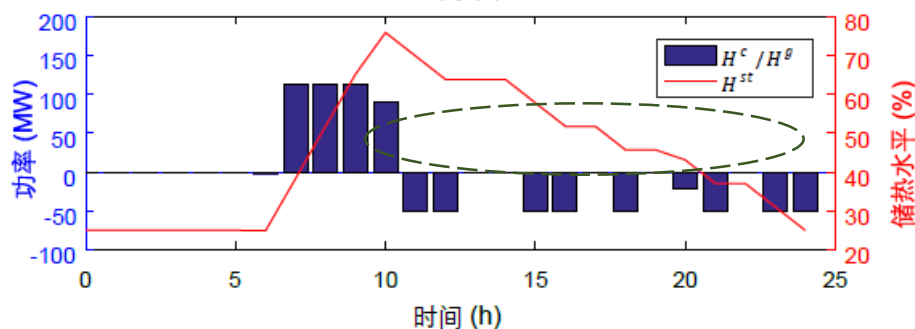
电力市场出清问题

价格影响者机制

压缩储能常以额定工况运行，部分负载影响不显著



膨胀释能常以部分负载运行，存在备用收益



可指导储能电站经济性评估与运营

## 2.2 网侧先进绝热压缩空气储能电站建模及运行

### □ 小结

#### ➤ 研究成果

- ✓ AA-CAES储能电站宽工况热力学特性曲线簇
- ✓ AA-CAES储能电站双SOC运行模型框架及三种典型模型
- ✓ 宽工况对风电与AA-CAES储能电站协同系统发电能力的影响
- ✓ AA-CAES储能电站日前电力市场竞标策略

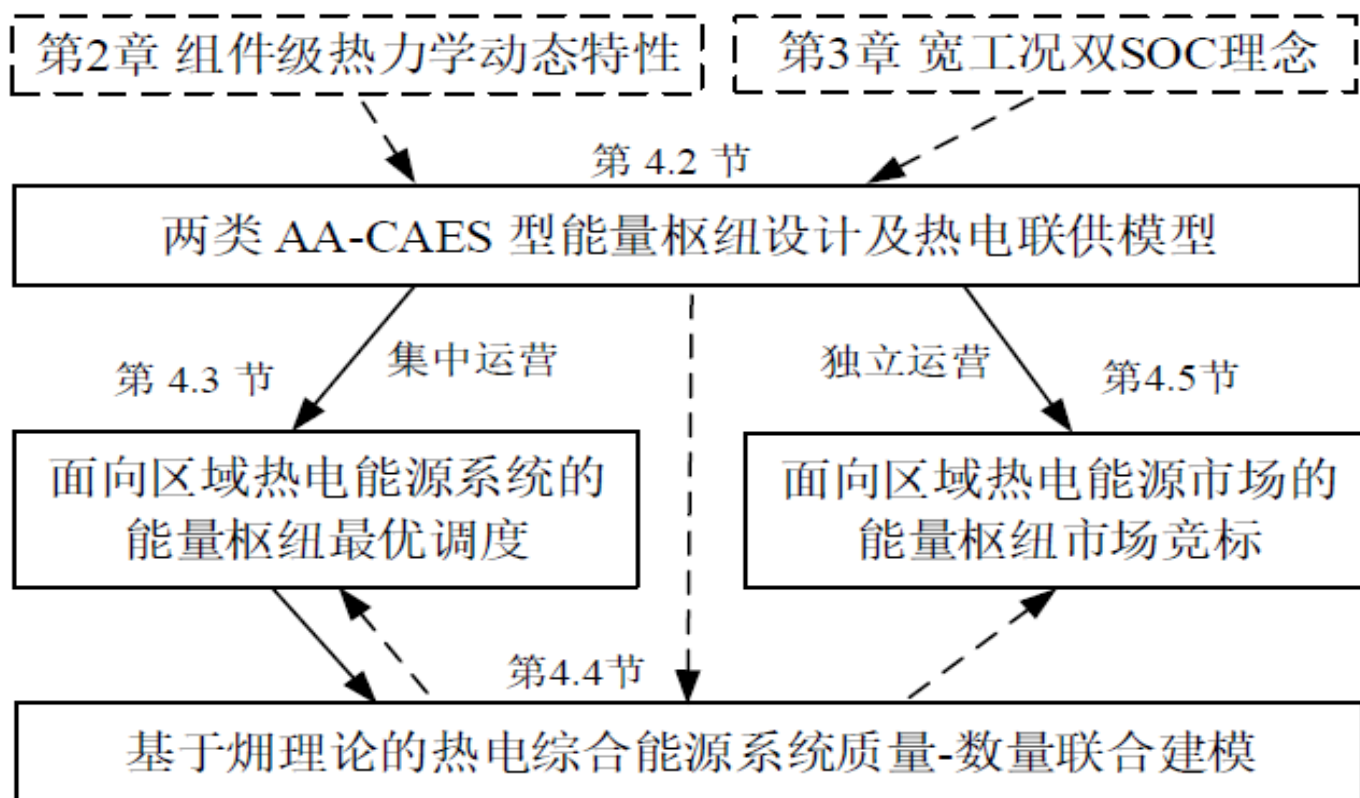
#### ➤ 支撑材料

- ✓ **李瑞**, 陈来军, 梅生伟\*, 薛小代. 先进绝热压缩空气储能宽工况运行特性建模及风电协同运行分析. 电力系统自动化, 2019,43(11):25-33.
- ✓ **李瑞**, 陈来军, 梅生伟\*, 薛小代. 先进绝热压缩空气储能电站主从博弈竞标策略. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 662-667.
- ✓ 梅生伟\*, 公茂琼, 秦国良, 田芳, 薛小代, **李瑞**. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景. 电网技术, 2017,41(10):3392-3399.

## 2.3 荷侧先进绝热压缩空气能量枢纽建模及运行

### □ 荷侧能量枢纽研究框架

论文第4章

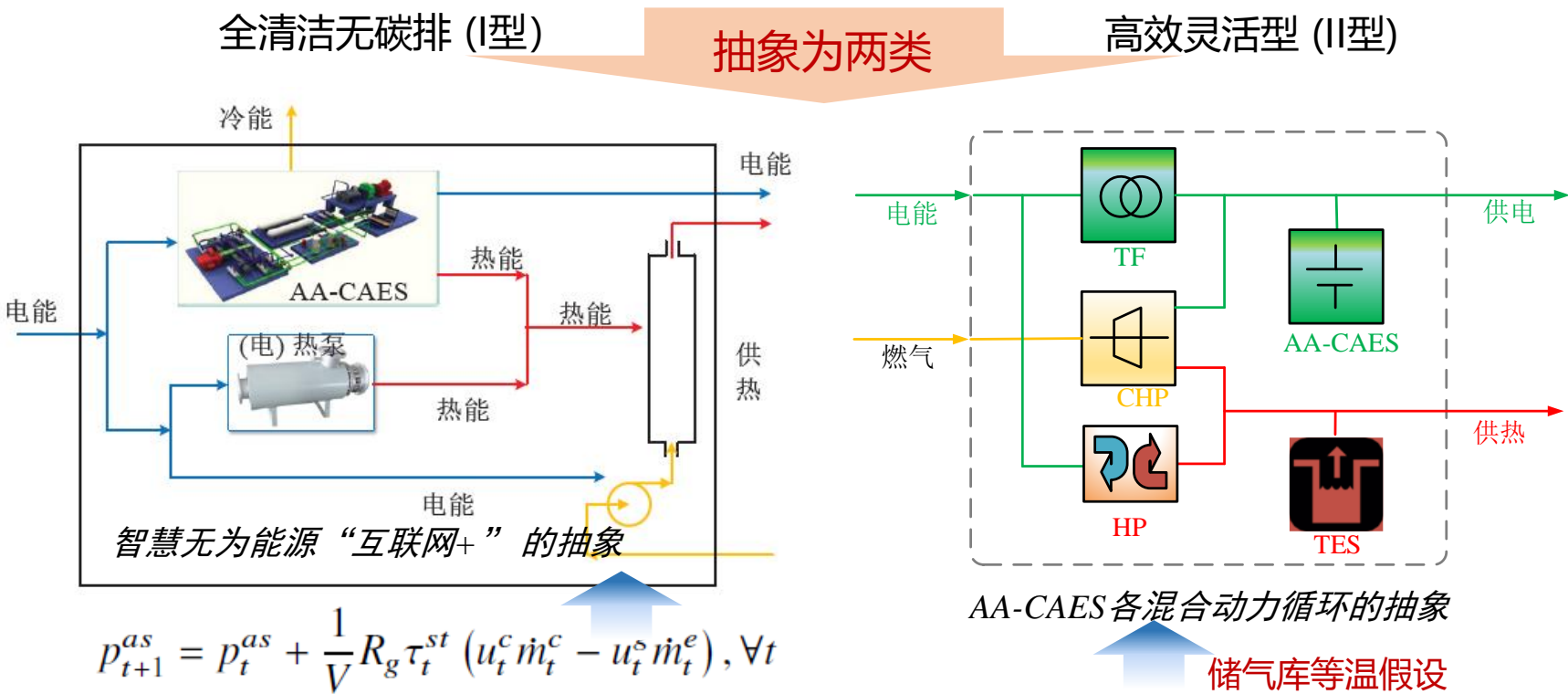


以**能量枢纽**形式挖掘**供能灵活性 (CHP+TES+EES)**，结合典型AA-CAES型能量枢纽的集中运营经济调度及独立运营市场竞标展开分析

# 2.3 荷侧先进绝热压缩空气能量枢纽建模及运行

## □ 荷侧能量枢纽设计及建模

多种具有灵活工作模式的AA-CAES或CAES理念，如CAES与燃气轮机混合循环、CAES与内燃机循环、风-光-CAES互补系统、槽式集热与AA-CAES混合系统等



$$p_{t+1}^{as} = p_t^{as} + \frac{1}{V} R_g \tau_t^{st} (u_t^c \dot{m}_t^c - u_t^s \dot{m}_t^s), \forall t$$

$$H_t^{st} = H_{t-1}^{st} + u_t^c H_t^g - u_t^s H_t^c - h_t^d, \forall t$$

$$E_{t+1} = E_t + p_t^{ch} \eta_+^{esu} - p_t^{dis} / \eta_-^{esu}, \forall t$$

多能联供，简化版仿真模型，双SOC

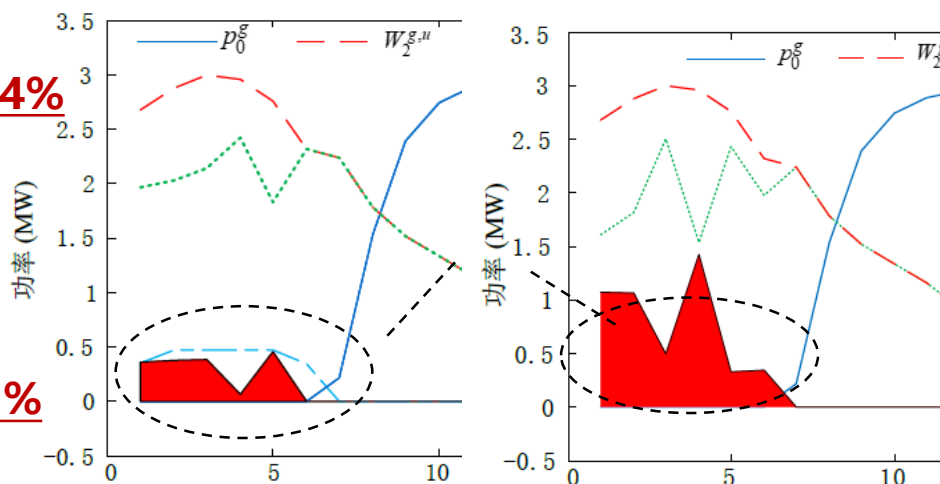
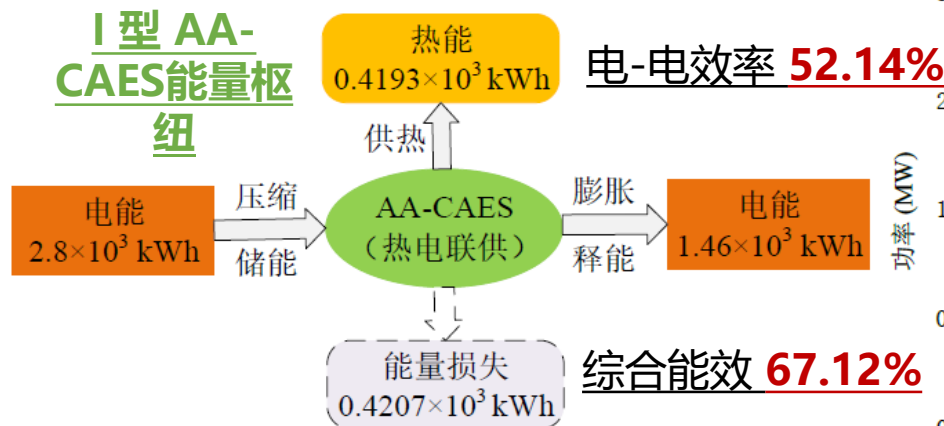
仅供电，等效电池SOC模型

## 2.3 荷侧先进绝热压缩空气能量枢纽建模及运行

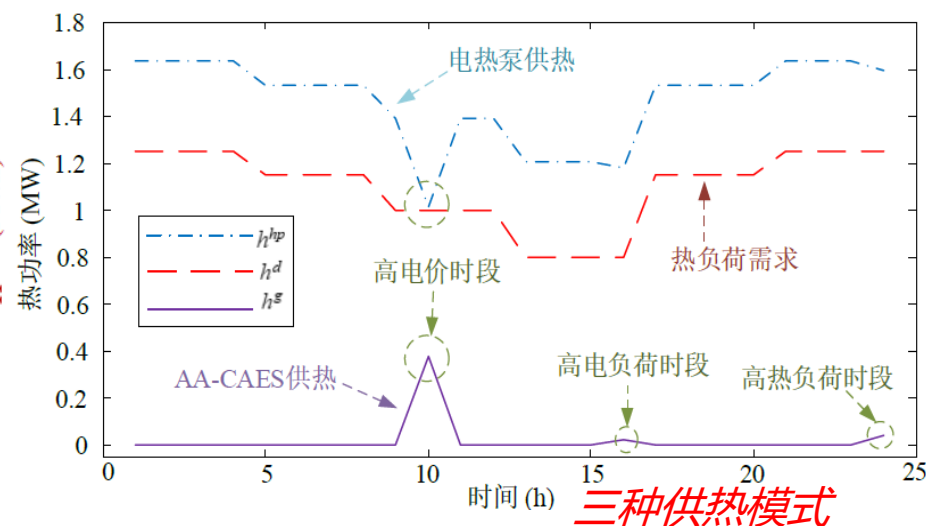
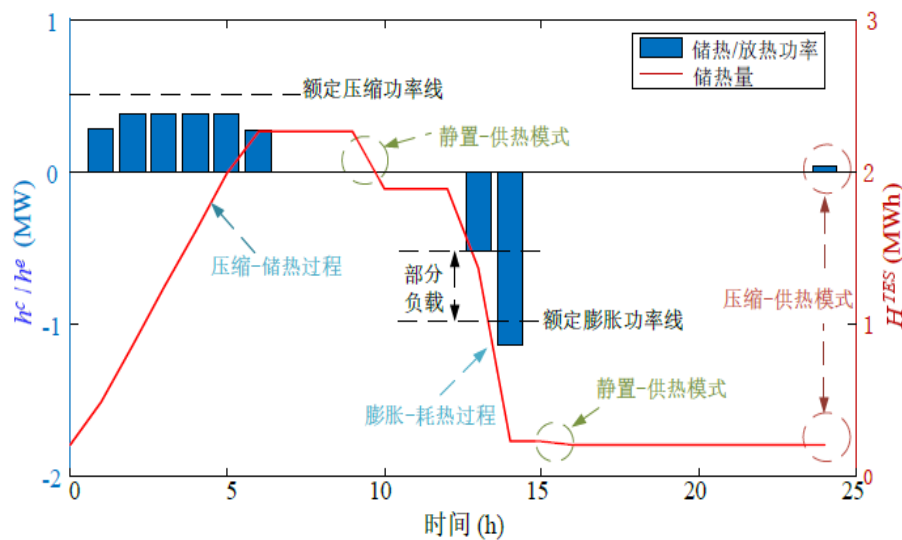
### 含能量枢纽的无碳排区域热电联合系统经济调度

集中运营

#### I型AA-CAES能量枢纽



发挥储能特性，降低夜间的弃风



三种供热模式

储能+储电+热电联供特性赋予了AA-CAES能量枢纽较强的供能灵活性



# 2.3 荷侧先进绝热压缩空气能量枢纽建模及运行

## □ 热电联合系统质量-数量联合建模

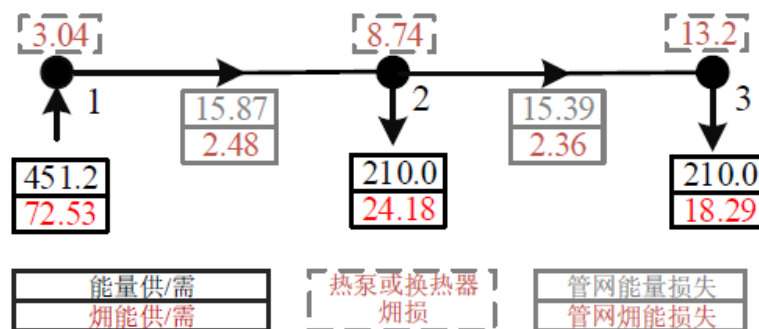
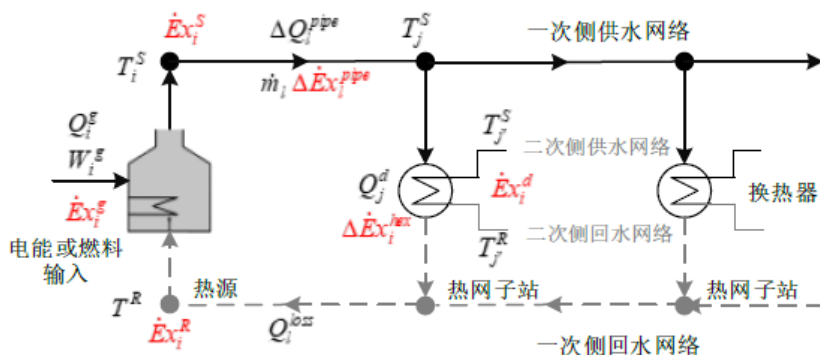
AA-CAES及综合能源系统涉及不同品位的多能流统筹，需要集能量与品位于一体的质量-数量联合分析模型。

<b>热一律</b>	<b>数量</b>	$\Delta \dot{E}x_i^{pipe} = (1 - \frac{2T_0}{T_{l(i)}^S + T_{l(i)}^R}) \Delta Q_l^{pipe}$	<b>品位</b>	<b>热二律</b>
	$Q_i^g = c_p \dot{m}_i (T_i^S - T_i^R)$	<b>源</b>	$\dot{E}x_i^S = \dot{m}_i ((h_i^S - h_0) - T_0 (s_i^S - s_0))$	
	$\Delta Q_l^{pipe} = c_p \dot{m}_l (T_{l(i)}^S + T_{j(l)}^R - 2T_0) (1 - e^{-\frac{\lambda L_l}{c_p \dot{m}_l}})$	<b>网</b>	$\dot{E}x_i^R = \dot{m}_i ((h_i^R - h_0) - T_0 (s_i^R - s_0))$	
	$Q_j^d = c_p \dot{m}_j (T_j^S - T_j^R)$ $\sum_i Q_i^g = \sum_j Q_j^d + \sum_l \Delta Q_l^{pipe}$	<b>荷</b>	$\Delta \dot{E}x_l^{pipe} = Ex_{l(i)}^S - Ex_{l(j)}^S + Ex_{l(j)}^R - Ex_{l(i)}^R$	
		$\Delta \dot{E}x_j^{hex} = T_0 Q_j^d (\frac{2}{T_j^S + T_j^R} - \frac{2}{T_{j'}^S + T_{j'}^R})$		
		$\dot{E}x_j^d = Q_j^d (1 - \frac{2T_0}{T_{j'}^S + T_{j'}^R})$		

电能焓为1、模型无需改变

**兼容性**

AA-CAES型能量枢纽焓接口



可用于热电综合能源系统的运行、规划及AA-CAES多能流产品定价



# 2.3 荷侧先进绝热压缩空气能量枢纽建模及运行

## 面向热电综合能源市场的能量枢纽竞标策略

独立运营模式

Obj-Lin =  $\sum_t \left[ \xi_t p_t^{gb} + \Delta \xi \sum_{k=1}^K 2^{k-1} z_{tk}^{gb} \right] - \sum_t \gamma_t p_t^{gas}$

+  $\sum_t \left[ \chi_t h_t^b + \Delta \chi \sum_{k=1}^K 2^{k-1} z_{tk}^{hb} \right]$

-  $\sum_t \left[ \zeta_t p_t^{db} + \Delta \zeta \sum_{k=1}^K 2^{k-1} z_{tk}^{db} \right]$

s.t. 能量枢纽运行约束

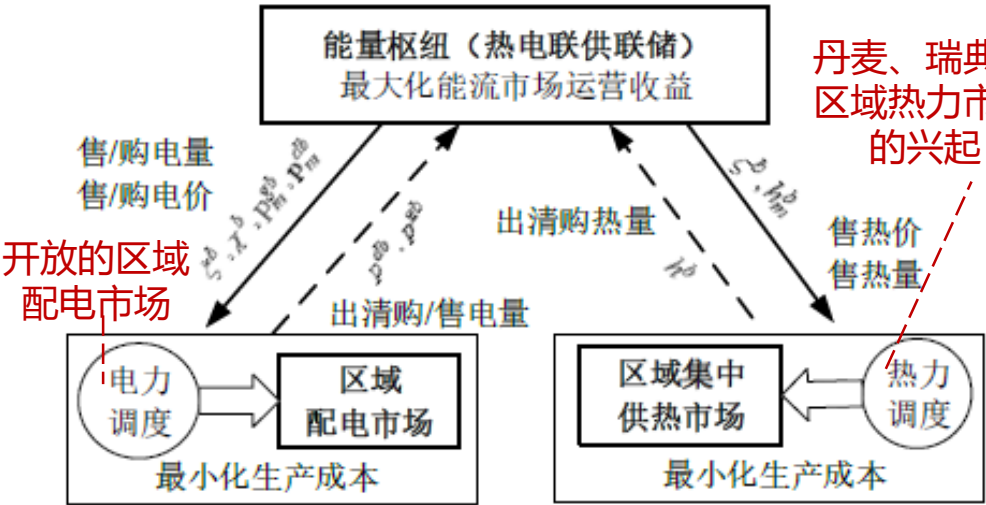
布尔展开附加约束

热网出清线性化 KKT 系统

电网出清线性化 KKT 系统

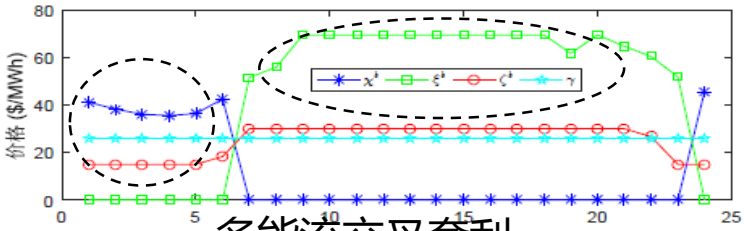
竞标标的约束集

$\eta_+^{esu} / \eta_-^{esu}$	成本		收入		利润
	PDN	Gas	PDN	DHN	
75%	318.78	493.53	749.08	398.38	335.15
70%	63.41	<b>493.53</b>	<b>474.94</b>	<b>398.39</b>	316.39
65%	67.18	<b>493.53</b>	<b>474.94</b>	<b>398.39</b>	312.62
60%	72.98	<b>493.53</b>	<b>474.94</b>	<b>398.39</b>	306.82

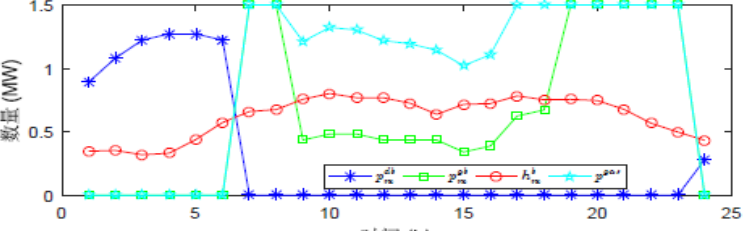


丹麦、瑞典等区域热力市场的兴起

主从博弈



多能流交叉套利



充分利用燃气、电价及热价间的**交叉套利**，确保最小经济性及辅助定容

## 2.3 荷侧先进绝热压缩空气能量枢纽建模及运行

### □ 小结

#### ➤ 研究成果

- ✓ 两类AA-CAES型热电联供能量枢纽设计及建模
- ✓ 含AA-CAES型能量枢纽的热电联合系统最优调度（集中运营假设）
- ✓ 基于焓理论的热电联合系统质量-数量联合建模（热电品位）
- ✓ 面向多能流市场的AA-CAES型能量枢纽竞标策略（独立运营假设）

#### ➤ 支撑材料

- ✓ **Li Rui**, Wei Wei, Mei Shengwei\*, et al. Participation of an Energy Hub in Electricity and Heat Distribution Markets: An MPEC Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018. (Early access)
- ✓ **Li Rui**, Chen Laijun\*, Yuan Tiejia, et al. Optimal Dispatch of Zero-Carbon Emission Micro Energy Internet Integrated with Non-Supplementary Fired Compressed Air Energy Storage System. *Journal of Modern Power System and Clean Energy*, 2016, 4(4):566–580. (2017年 MPCE Most Cited Paper Award)
- ✓ **Li Rui**, Chen Laijun, Wei Wei\*, et al. Economic Dispatch of Integrated Heat-power Energy Distribution System with Concentrating Solar Power Energy Hub. *Journal of Energy Engineering*, 2017, 143 (5):1-11.
- ✓ Mei Shengwei, **Li Rui**, Xue Xiaodai, Chen Laijun\*, et al. Paving the Way to Smart Micro Energy Grid: Concepts, Design Principles, and Engineering Practices. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2017, 3(4):440-449.

## 2.4 源侧内嵌绝热压缩空气灵活风机建模及运行

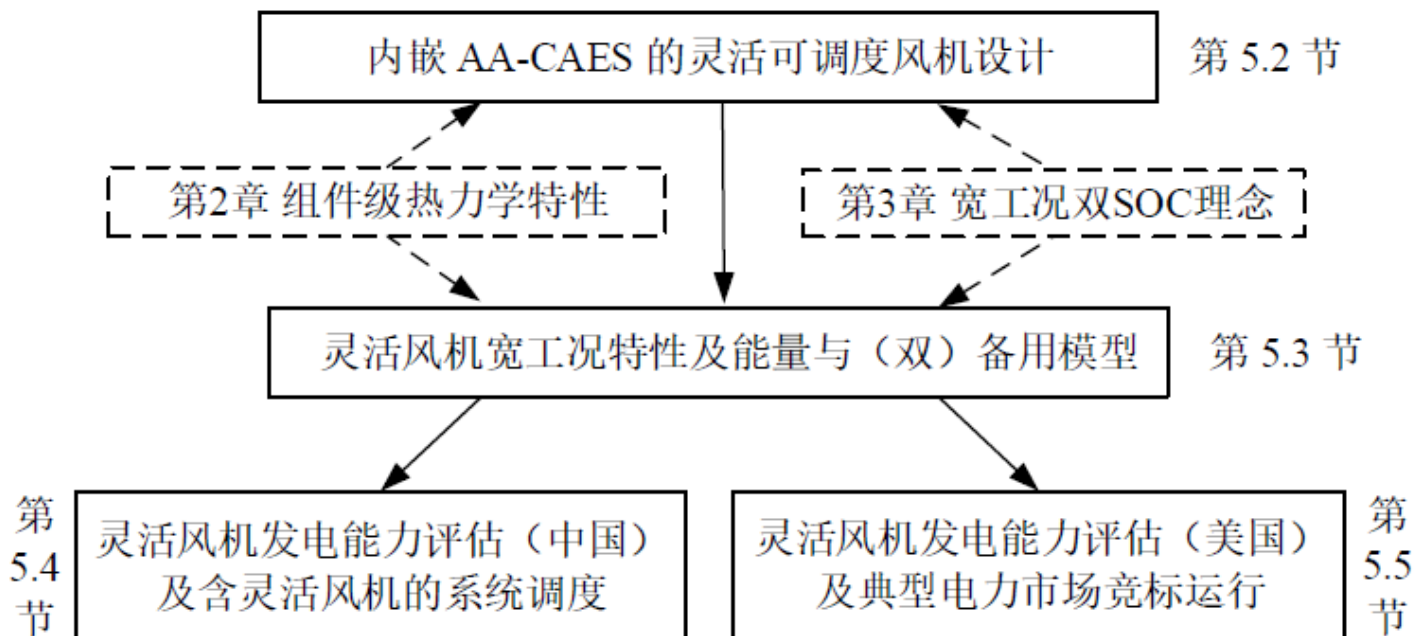
### □ 本部分研究框架

论文第5章

事后补救 (被动)



提前预防 (主动)

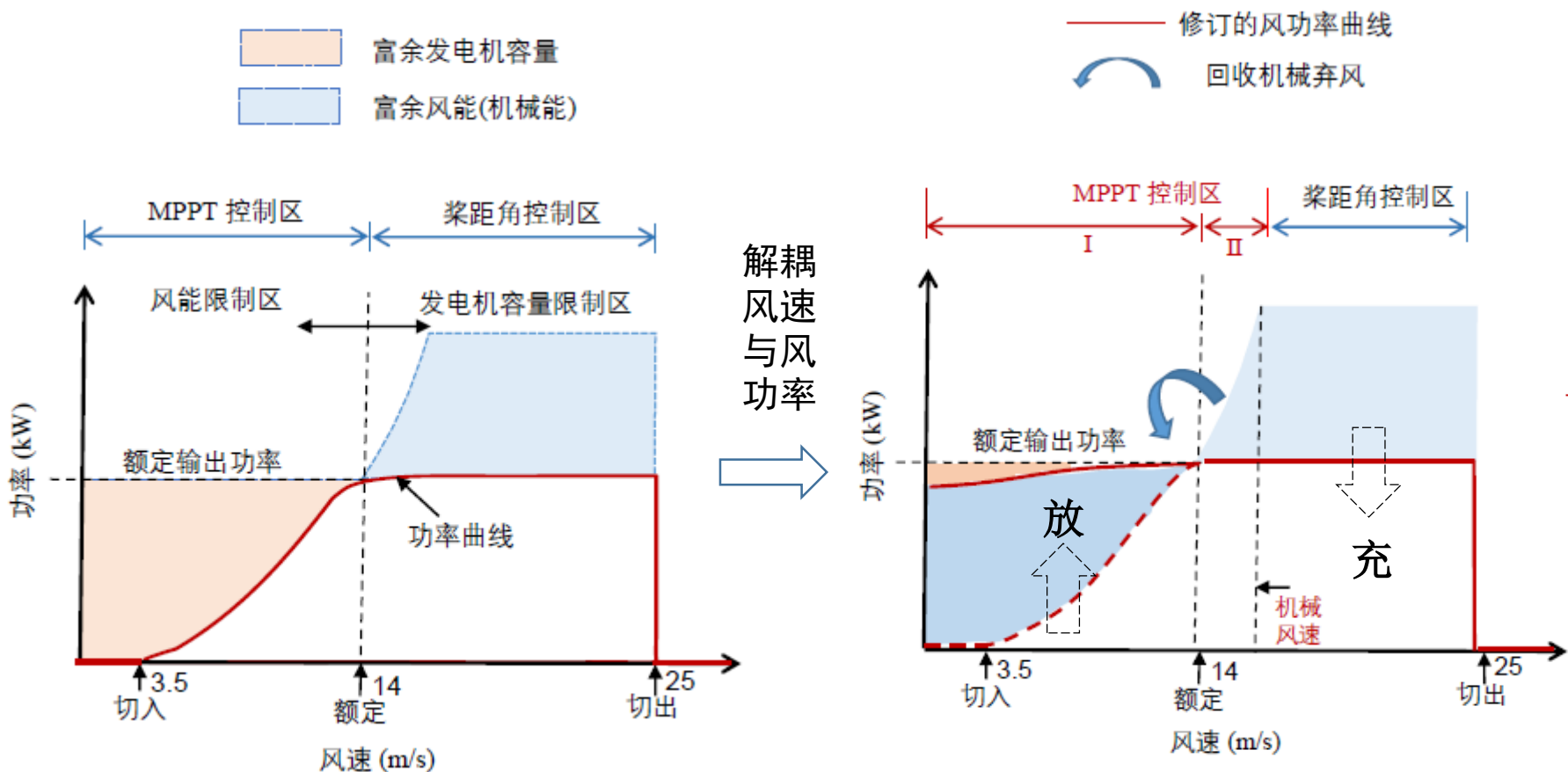


以灵活风机形式挖掘接口灵活性，设计源侧紧凑型风-储系统，建立能量及双备用模型，应用于发电能力评估、市场竞标及系统级调度

## 2.4 源侧内嵌绝热压缩空气灵活风机建模及运行

### □ 传统风机局限性及灵活风机改进理念

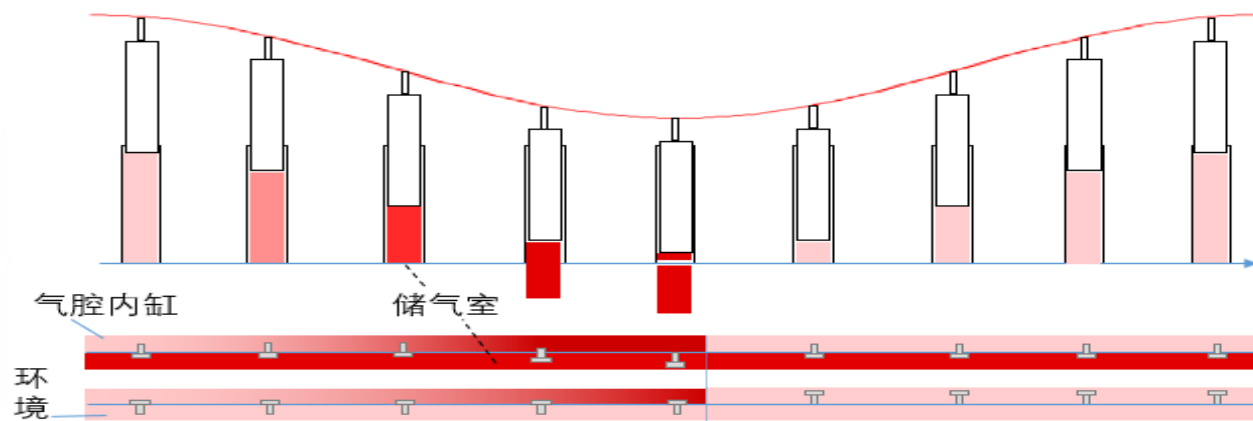
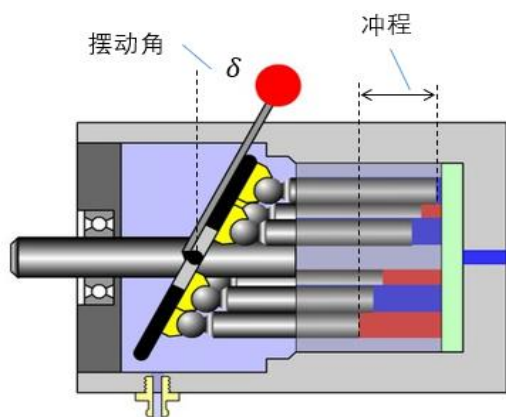
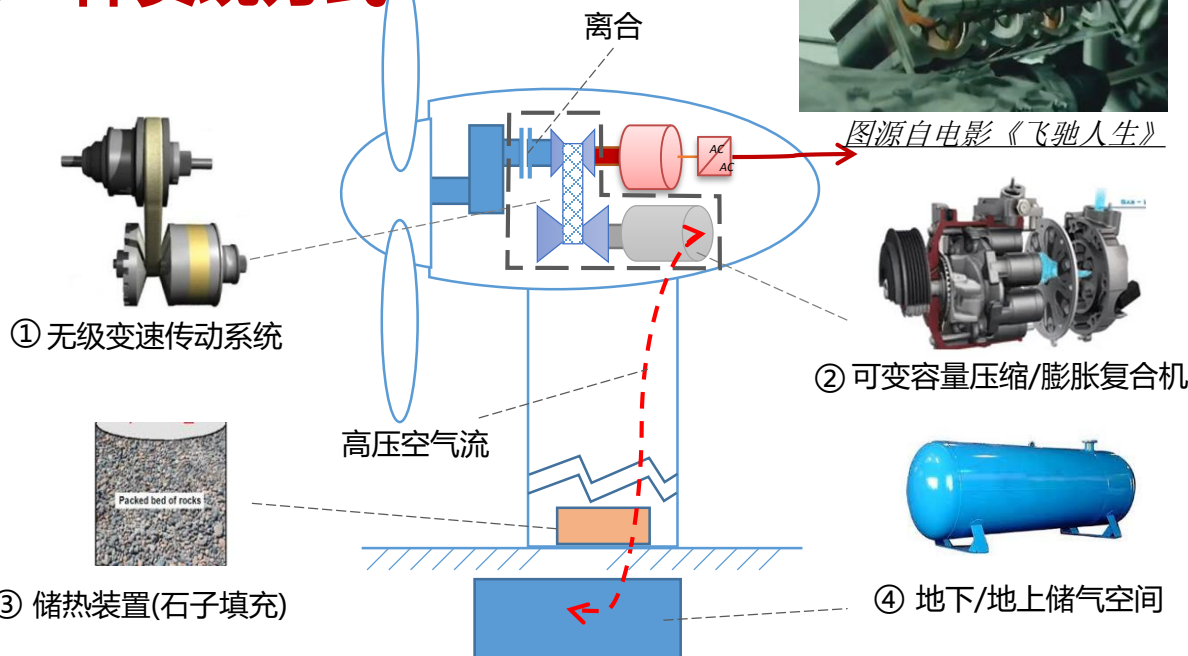
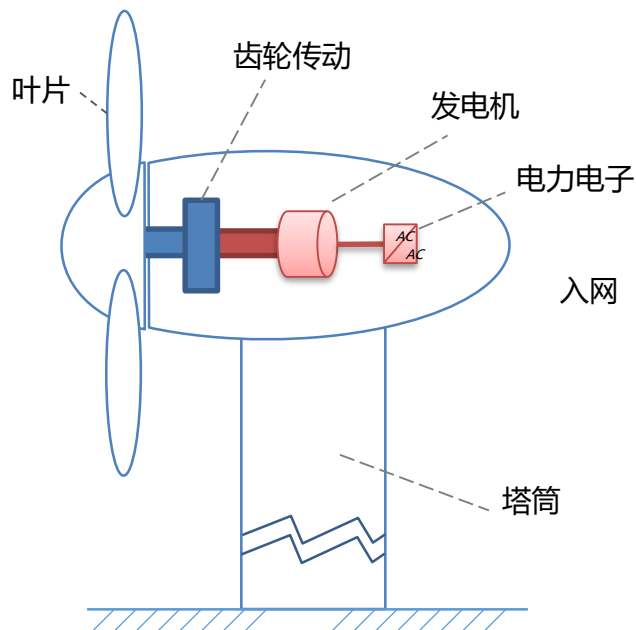
✓ 风电不可调度性的根源：波动性风速与风功率间的瞬时强耦合关系



传统风机在风能限制区与发电机容量限制区之间的矛盾及改进理念

# 2.4 源侧内嵌绝热压缩空气灵活风机建模及运行

## 灵活风机机械结构的一种实现方式

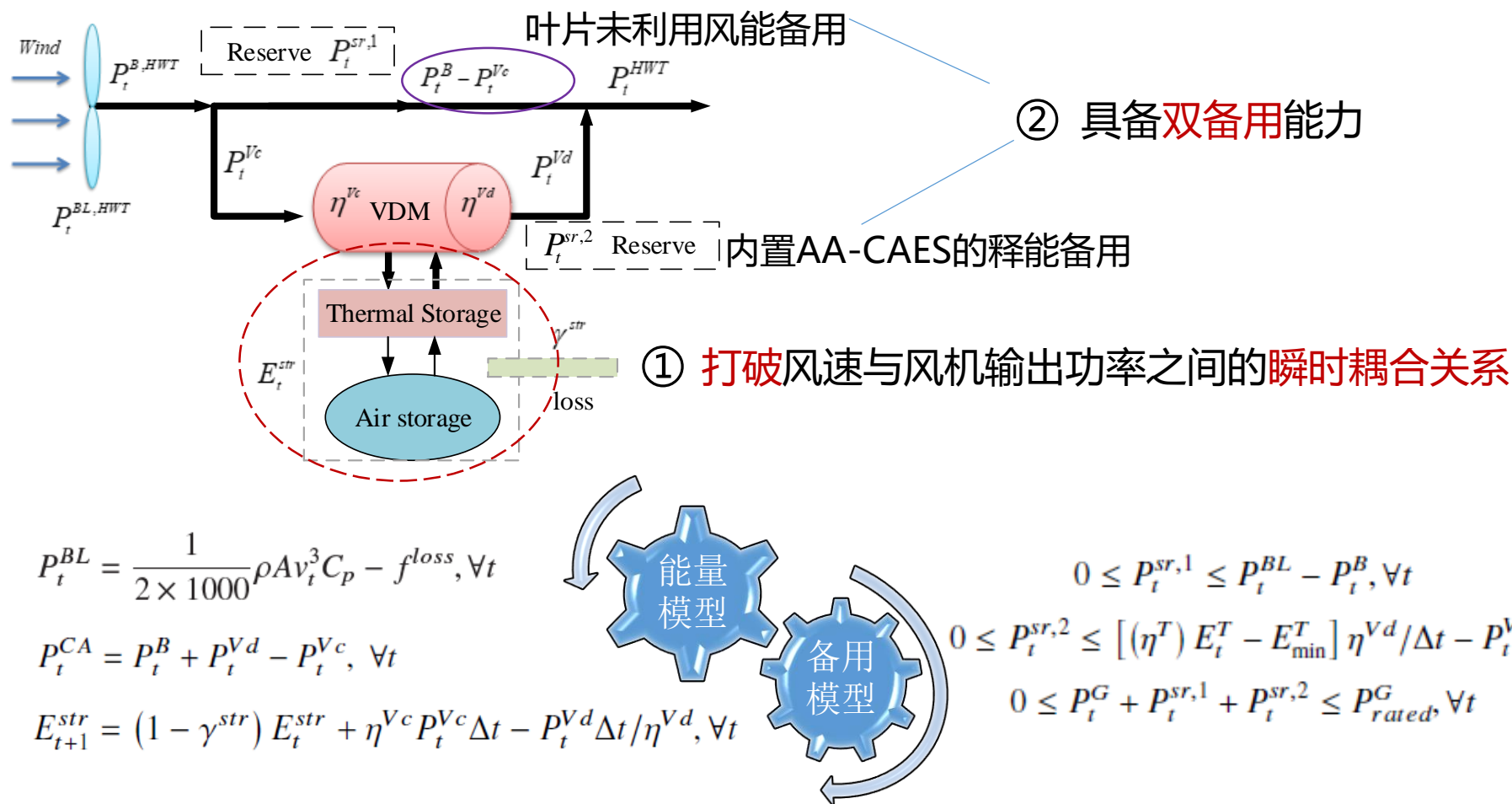


提供了针对直驱风机机械接口的灵活风机实现方案及控制策略以简化建模

# 2.4 源侧内嵌绝热压缩空气灵活风机建模及运行

## □ 灵活风机运行建模

能量模型与(双)备用模型



为电力系统调度运行及市场运营程序提供标准能量与备用模型接口



# 2.4 源侧内嵌绝热压缩空气灵活风机建模及运行

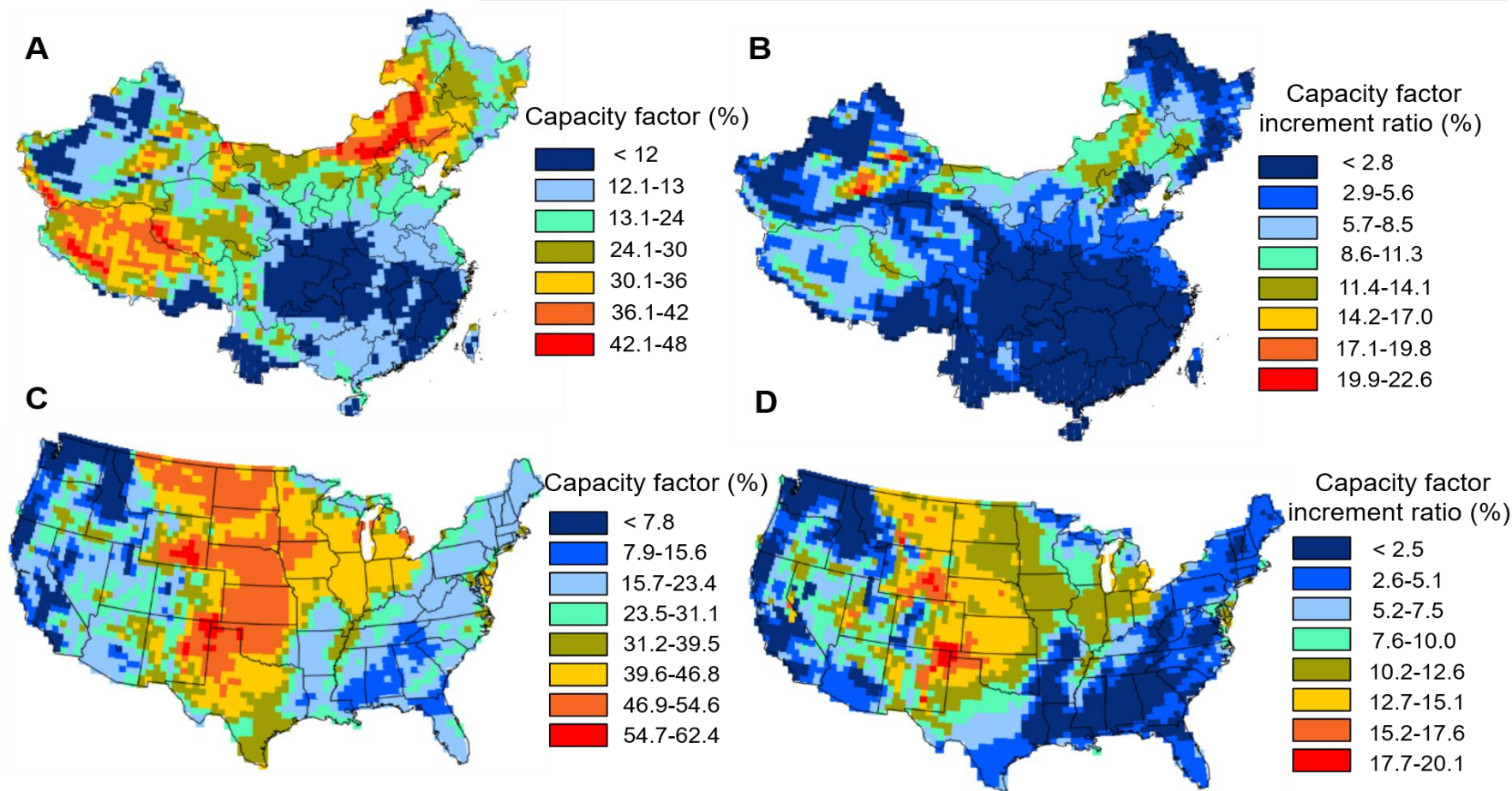
## 灵活风机发电能力评估

5000+风速全年样本, 1.5 MW 金风, 2.5MW GE

$$\max \frac{1}{8760 \times P_{\text{rated}}^{\text{WT}}} \sum_{t=1}^{8760} P_t^{\text{CA}} \Delta t$$

哈佛奥德赛服务器集群

42个计算节点 X 10个CPU X 6 GB RAM, 平均计算时间18h/CPU



具有大幅提升发电量的潜力, 为风机初步定址规划提供了参考依据



# 2.4 源侧内嵌绝热压缩空气灵活风机建模及运行

## □ 灵活风机日前电力市场竞标运行

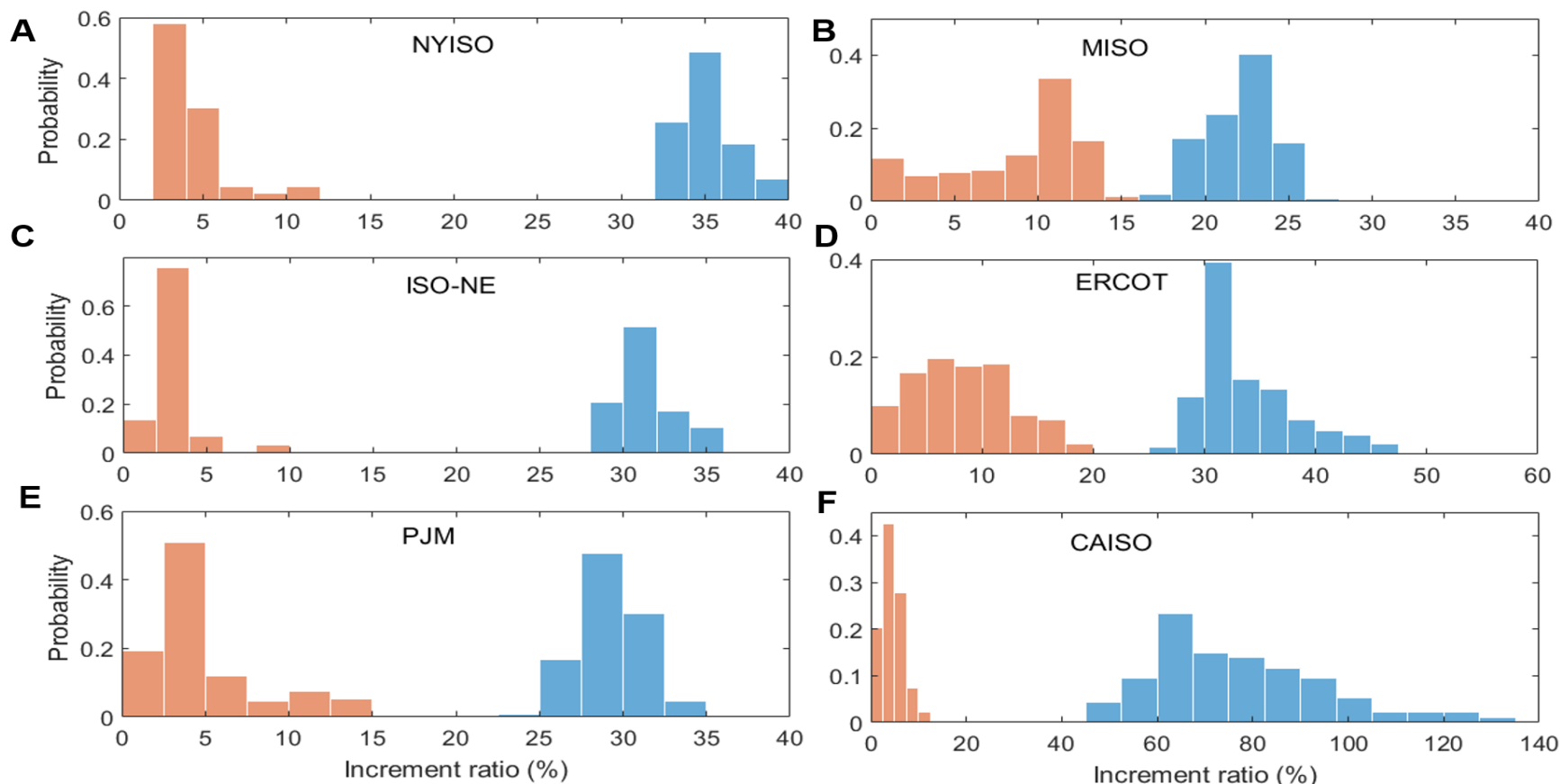
小容量价格接受者机制

$$\max \sum_{t=1}^{8760} \lambda_t^E P_t^{CA} \Delta t$$

仅电量市场

灵活风机成本增长率 9%-12%

Market revenue Capacity factor

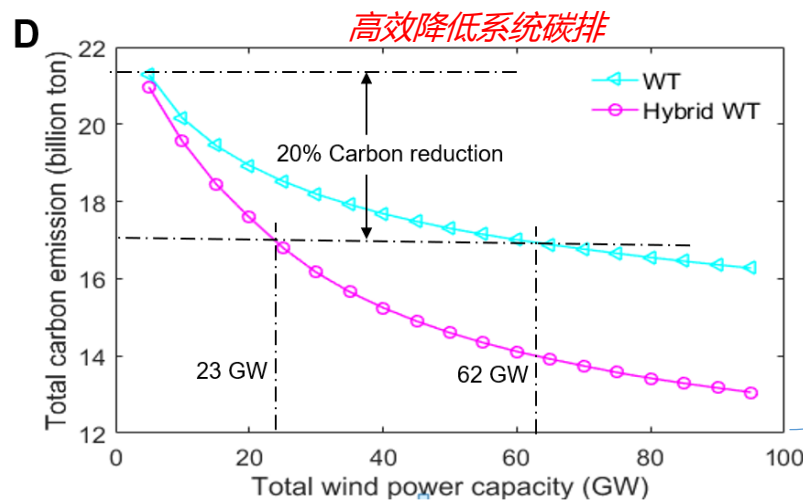
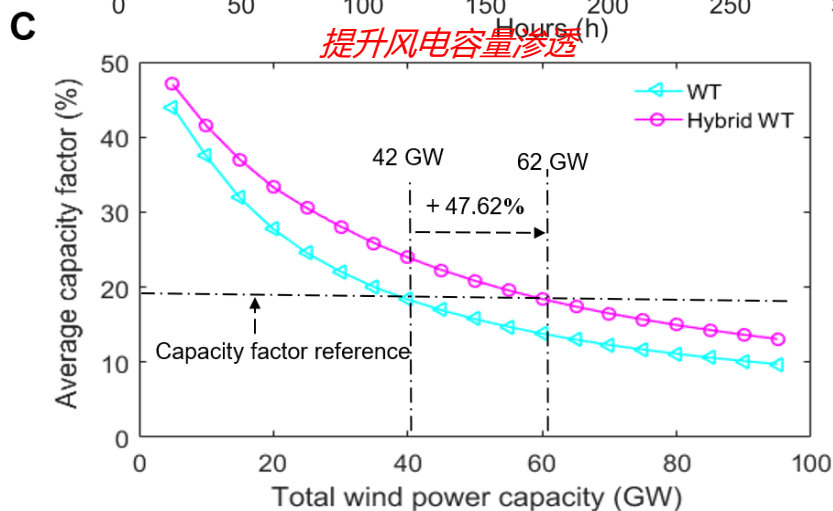
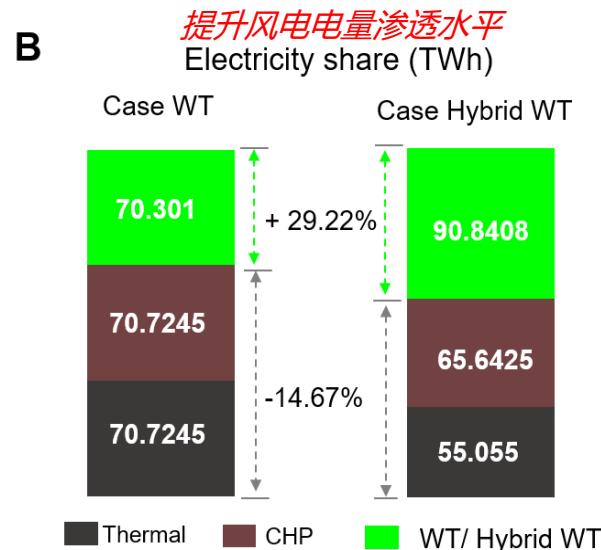
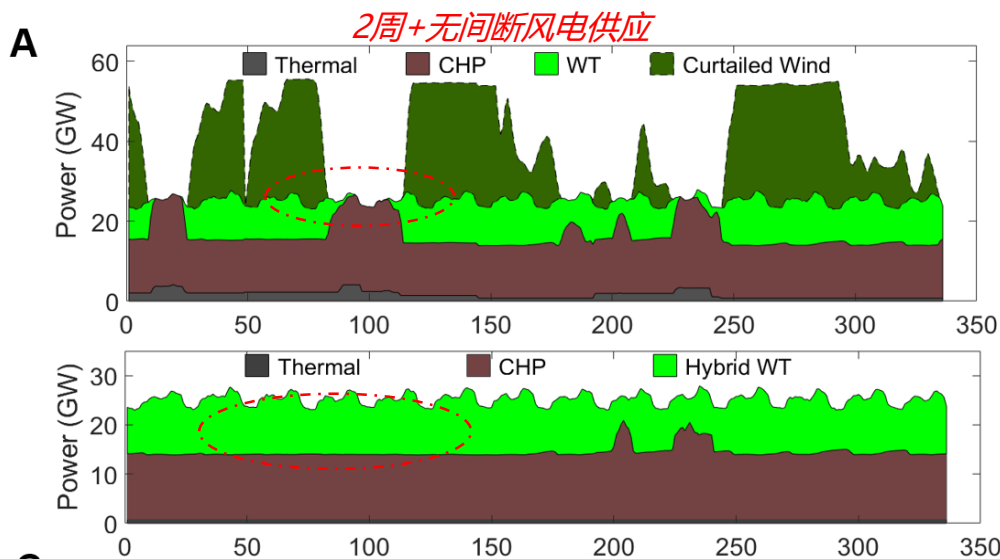


灵活风机由于内嵌AA-CAES的缓存功能，具备对市场电价的响应能力

# 2.4 源侧内嵌绝热压缩空气灵活风机建模及运行

## 含灵活风机的风电电力系统调度

蒙西电网电力系统级热电最优调度



其它灵活性资源均相同

灵活可调度风机可有效增加风电容量/电量渗透，有效降低系统总碳排

## 2.4 源侧内嵌绝热压缩空气灵活风机建模及运行

### □ 小结

研究成果:

- 内嵌AA-CAES的可调度风机设计及运行模型 (能量+双备用)
- 可用于灵活风机初步选址规划的发电能力分析 (中国+美国)
- 面向日前电量市场的灵活风机竞标策略 (美国六大电力市场)
- 含灵活风机的风电电力系统调度运行 (蒙西电网算例)

支撑材料:

1) **Li Rui**, Mei Shengwei\*, Michael B. McElroy\*, et al. Design of Hybrid Wind Turbine with Embedded Mechanical Storage Providing Dispatch Capability. **XX**, 2019. (一审)

# 汇报提纲

---



—from Google Image

1

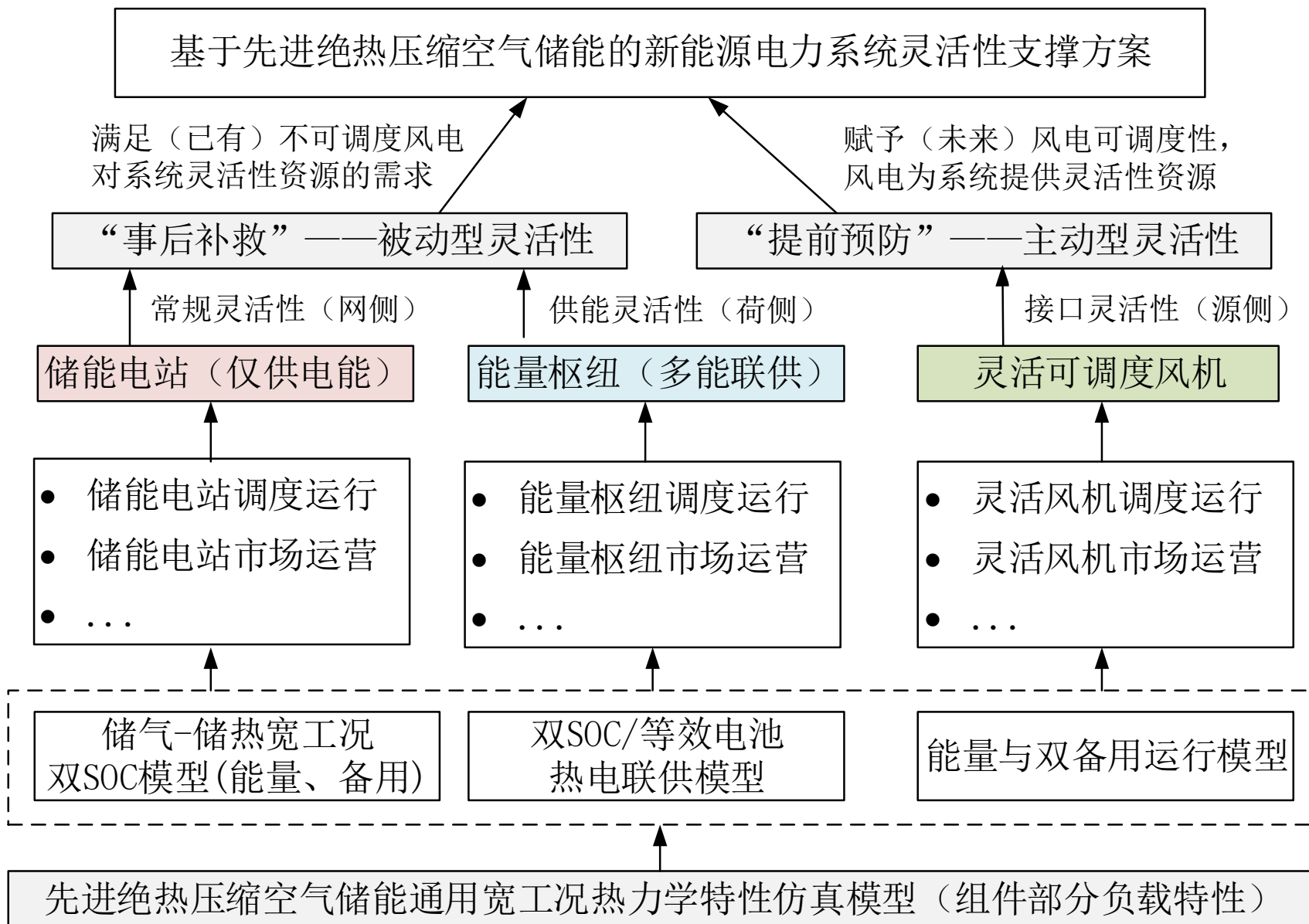
研究背景

2

研究内容

3

总结



# 研究成果

1. **Li Rui**, Mei Shengwei\*, Michael B. McElroy\*, et al. Design of Hybrid Wind Turbine with Embedded Mechanical Storage Providing Dispatch Capability. **XX**, 2019. (一审)
2. **Li Rui**, Wei Wei, Mei Shengwei\*, et al. Participation of an Energy Hub in Electricity and Heat Distribution Markets: An MPEC Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018. (Early access)
3. Mei Shengwei, **Li Rui**, Xue Xiaodai, Chen Laijun\*, et al. Paving the Way to Smart Micro Energy Grid: Concepts, Design Principles, and Engineering Practices. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2017, 3(4):440-449.
4. **Li Rui**, Chen Laijun, Wei Wei\*, et al. Economic Dispatch of Integrated Heat-power Energy Distribution System with Concentrating Solar Power Energy Hub. *Journal of Energy Engineering*, 2017, 143 (5):1-11.
5. **Li Rui**, Chen Laijun\*, Yuan Tiejiang, et al. Optimal Dispatch of Zero-Carbon Emission Micro Energy Internet Integrated with Non-Supplementary Fired Compressed Air Energy Storage System. *Journal of Modern Power System and Clean Energy*, 2016, 4(4):566–580. (**MPCE Most Cited Paper Award**)
6. 李瑞, 陈来军, 梅生伟\*, 薛小代. 先进绝热压缩空气储能宽工况运行特性建模及风电协同运行分析. *电力系统自动化*, 2019,43(11):25-33.
7. 梅生伟, 李瑞\*, 陈来军, 薛小代. 先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望. *中国电机工程学报*, 2018, 38(10): 2893-2907.
8. 李瑞, 陈来军, 梅生伟\*, 薛小代. 先进绝热压缩空气储能电站主从博弈竞标策略. *控制理论与应用*, 2018, 35(5): 662-667.
9. 梅生伟\*, 李瑞, 黄少伟, 魏韡, 张雪敏, 卢强. 多能互补网络建模及动态演化机理初探. *全球能源互联网*, 2018, 1(01):10-22.
10. 梅生伟\*, 公茂琼, 秦国良, 田芳, 薛小代, 李瑞. 基于盐穴储气的先进绝热压缩空气储能技术及应用前景. *电网技术*, 2017,41(10):3392-3399.
11. Cheng Jie, **Li Rui\***, F. Fred Choobineh, Mei Shengwei, et al. Dispatchable Generation of a Novel Compressed-Air Assisted Wind Turbine and Its Operation Mechanism. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018. (Early access)

---

# 谢 谢

请批评指正！