

# 考虑多能互补和负荷不确定性的区域综合能源系统的优化 定容与资产利用效率分析

Optimal Sizing and Asset Utilization Efficiency Analysis of the Distributed Multi-Energy System  
Considering the Energy Substitution and Load Uncertainty

王盛, 丁一\*

浙江大学电气工程学院

wangsheng\_zju@zju.edu.cn



1

引言

2

区域综合能源系统多能互补优化运行建模

3

双层鲁棒设备优化定容模型

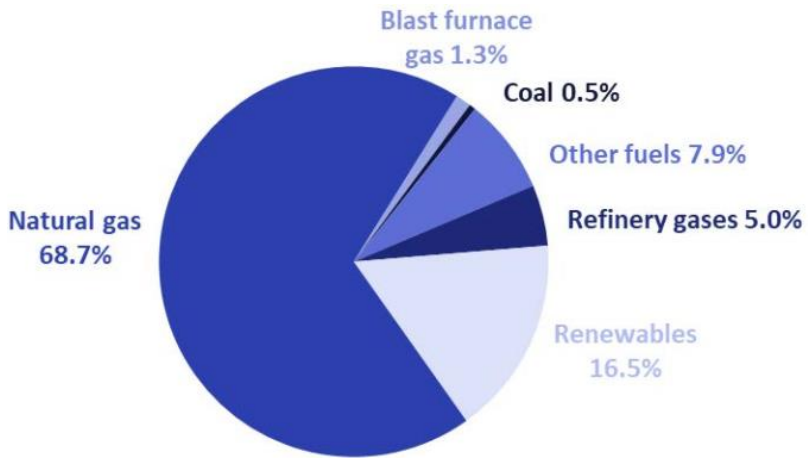
4

双层鲁棒优化问题求解及资产利用效率分析

5

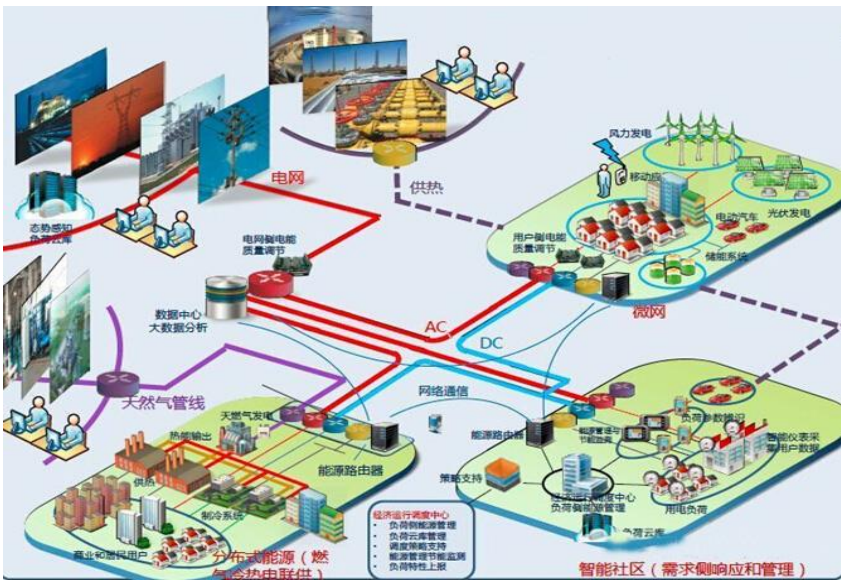
案例分析

# 1.1 区域综合能源系统



- 2017年在英国，CHP消耗的**68.7%** 的燃料为天然气[1]。

✓ 随着世界范围内对低碳和可持续发展的关注，多种能源的协调优化运行，例如电力、天然气、冷、热等，成为一种新的提高运行效率的可能方式。



## 主要特点

- 多种能源耦合，满足多元需求
- 用能效率提高，达到节能减排的效果
- 多能源互补，供能可靠性较高
- 促进可再生能源的消纳

## 内涵概述

- 多能互补、协调优化是综合能源系统的基本内涵
- 综合能源系统以**电能**为核心，实现电、气、热等多种能源相互转化及消纳，提供多样化的能源服务。

## 问题

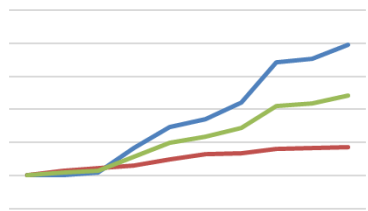
- 系统元件更多、规模更大、**不确定性因素更多**；
- 耦合元件组成系统时的**经济性难以确定**；
- 综合能源系统的**协调优化运行和规划难度较大**。

[1] GOV.UK:Department for Business EIS. Digest of UK Energy Statistics (DUKES): combined heat and power 2018 July. <<https://www.gov.uk/government/statistics/combined-heat-and-power-chapter-7-digest-of-united-kingdom-energy-statistics-dukes>>.

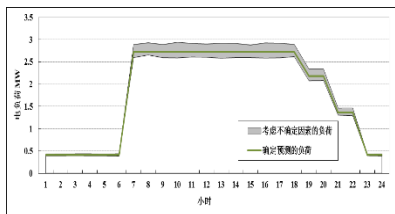
# 1.2 区域综合能源系统规划



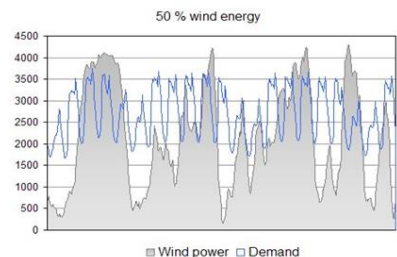
## 规划层面



多能负荷增长



负荷不确定性



可再生能源出力波动

经济性

可靠性

鲁棒性

提高能效

降低碳排

反馈

## 运行层面



多能互补运行策略

选址定容

配网



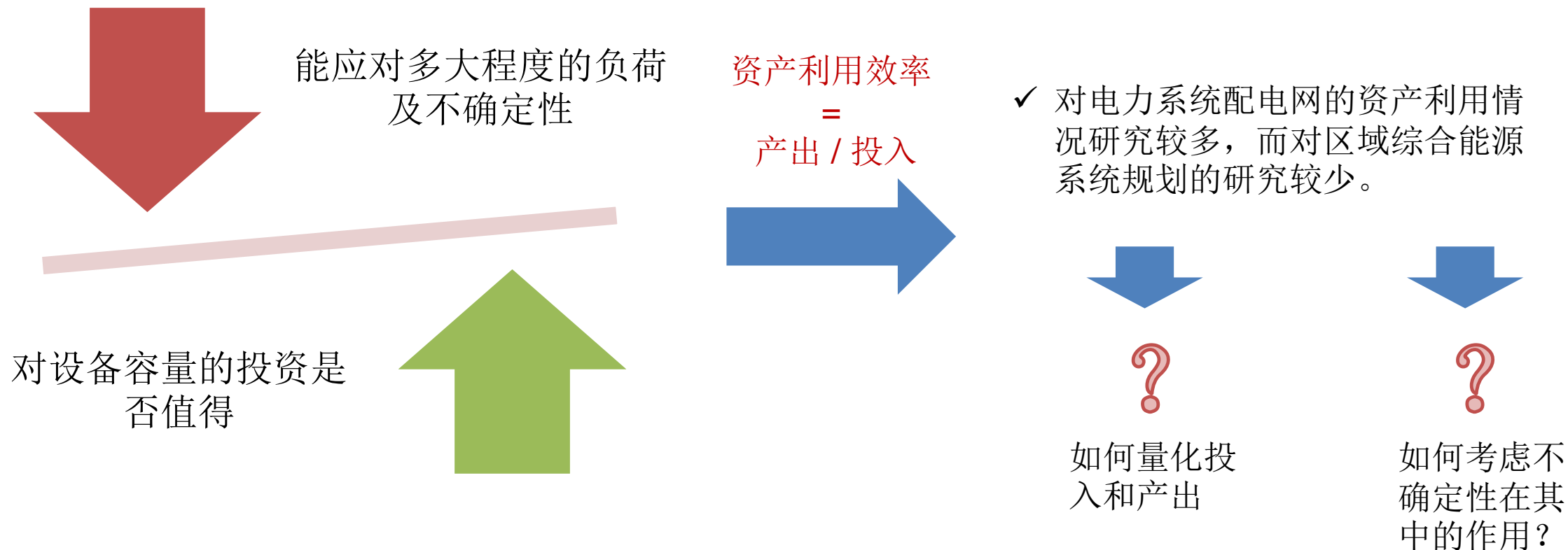
区域综合能源设备

设备/网络容量约束

用户



# 1.3 问题与挑战



1

引言

2

区域综合能源系统多能互补优化运行建模

3

双层鲁棒设备优化定容模型

4

双层鲁棒优化问题求解及资产利用效率分析

5

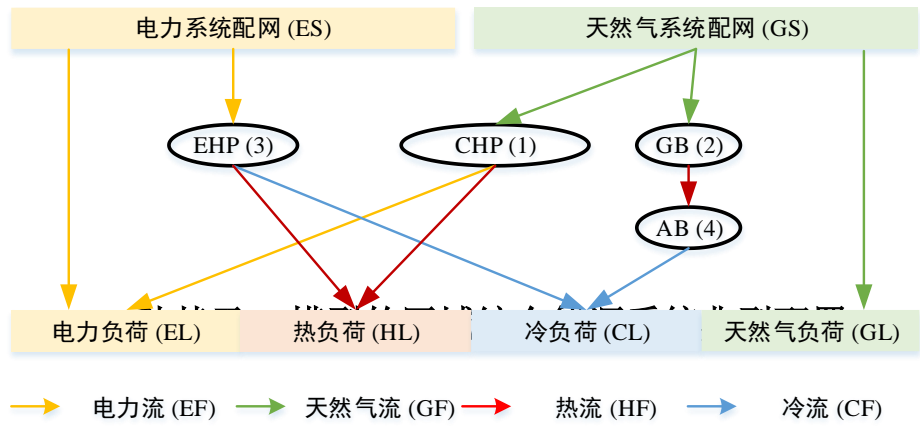
案例分析





典型配置

CHP、燃气锅炉（gas boiler, GB）、电锅炉（electric boiler, EB）、热泵（electric heat pump, EHP）、吸收制冷机（absorption chiller, AB）。



- 能量分配约束
  - $P_{ee} + EC_3 = ES$  电力配网侧约束
  - $GC_1 + GC_2 + P_{gg} = GS$  天然气配网侧约束
  - $HC_4 = HP_2$  GB、AB之间约束
  - $EL = P_{ee} + EP_1$  电力负荷侧约束
  - $HL = \gamma HP_3 + HP_1$  热力负荷侧约束
  - $CL = (1 - \gamma) CP_3 + CP_4$  冷负荷侧约束
  - $GL = P_{gg}$  天然气负荷侧约束

优化运行

区域综合能源系统在运行时段的目标为，在满足设备运行约束的前提下，通过多能互补的运行策略灵活协调各设备的运行状态，从而以最低的成本满足综合能源负荷的需求。

单位时间内的运行成本：
$$\min_{P_h} OC_h = \underset{\text{电价}}{ep_h} \times \underset{\text{耗电量}}{ES_h} + \underset{\text{气价}}{gp} \times \underset{\text{耗气量}}{GS_h}$$

s.t.

• 能量转换约束

• 运行容量约束

$$\begin{bmatrix} GC_1 \\ GC_2 \\ EC_3 \\ HC_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\eta_1^e} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\eta_1^h} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\eta_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\gamma COP_3^h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{(1-\gamma)COP_3^c} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{COP_4} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} EP_1 \\ HP_1 \\ HP_2 \\ HP_3 \\ CP_3 \\ CP_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{EP_1}{HP_1} \\ \frac{HP_2}{HP_2} \\ \gamma \frac{HP_3}{(1-\gamma)CP_3} \\ \frac{CP_4}{CP_4} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} EP_{1,h} \\ HP_{1,h} \\ HP_{2,h} \\ HP_{3,h} \\ CP_{3,h} \\ CP_{4,h} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} \overline{EP_1} \\ \overline{HP_1} \\ \overline{HP_2} \\ \overline{\gamma HP_3} \\ \overline{(1-\gamma)CP_3} \\ \overline{CP_4} \end{bmatrix}$$

1

引言

2

区域综合能源系统多能互补优化运行建模

3

双层鲁棒设备优化定容模型

4

双层鲁棒优化问题求解及资产利用效率分析

5

案例分析



### 3 考虑负荷不确定性的鲁棒优化定容方法



#### □ 负荷不确定性建模

在区域综合能源系统的运行过程中，需求侧的负荷会受到天气、能源价格、用户生产计划和行为模式等一系列的不确定性因素的影响。我们采用箱型不确定集（Box uncertainty set）来描述负荷的不确定性

$$\text{负荷不确定集: } U^L = \left\{ L_{t,s,h} \mid L_{t,s,h} = L_{t,s,h} + \Delta L_{t,s,h} z_t^+ - \Delta L_{t,s,h} z_t^-, \right\}$$

$$\begin{aligned} \text{负荷共模值: } L_{t,s,h} &= (\bar{L}_{t,s,h} + \underline{L}_{t,s,h}) / 2 \\ &= ([\bar{EL}_{t,s,h} \quad \bar{HL}_{t,s,h} \quad \bar{CL}_{t,s,h} \quad \bar{GL}_{t,s,h}]^T \text{ 负荷上限} \\ &\quad + [\underline{EL}_{t,s,h} \quad \underline{HL}_{t,s,h} \quad \underline{CL}_{t,s,h} \quad \underline{GL}_{t,s,h}]^T) / 2 \text{ 负荷下限} \end{aligned}$$

不确定参数范围:

$$U^z = \left\{ \begin{aligned} z_t^+ &= [z_t^{EL+} \quad z_t^{HL+} \quad z_t^{CL+} \quad z_t^{GL+}] \in [0,1] \\ z_t^- &= [z_t^{EL-} \quad z_t^{HL-} \quad z_t^{CL-} \quad z_t^{GL-}] \in [0,1] \\ \sum_{t=1}^{NT} \left( z_t^{EL+} + z_t^{EL-} + z_t^{HL+} + z_t^{HL-} + z_t^{CL+} + z_t^{CL-} + z_t^{GL+} + z_t^{GL-} \right) &\leq \Gamma^L, \forall t \end{aligned} \right\}$$

$$\text{负荷差模值: } \Delta L_{t,s,h} = (\bar{L}_{t,s,h} - \underline{L}_{t,s,h}) / 2$$

$$\text{年负荷增长: } L_{s,t,h} = L_{s,1,h} (1 + \lambda)^{t-1}$$

年增长率

#### □ 鲁棒优化定容方法

在考虑负荷不确定性的基础上，区域综合能源系统的鲁棒优化定容的目标为，确定各设备的投资容量，使得总成本最小。

$$\begin{aligned} \text{总成本: } \min_P TC &= \underbrace{IC}_{\text{投资成本}} + \underbrace{TOC}_{\text{运行成本}} = \underbrace{\left[ \overline{EP}_1 \quad \overline{HP}_2 \quad \overline{HP}_3 \quad \overline{CP}_4 \right]}_{\text{设备容量}} \times \underbrace{\left[ UC_1 \quad UC_2 \quad UC_3 \quad UC_4 \right]}_{\text{设备单位容量投资成本}} + \max_{z_t} \min_{P_{t,s,h}} \sum_{t=1}^{NT} \underbrace{\frac{1}{(1+\delta)^{t-1}}}_{\text{折现率}} \sum_{s=1}^{NS} d_s \sum_{h=1}^{24} \underbrace{OC_s(h)}_{\text{每小时运行成本}} \end{aligned}$$

1

引言

2

区域综合能源系统多能互补优化运行建模

3

双层鲁棒设备优化定容模型

4

双层鲁棒优化问题求解及资产利用效率分析

5

案例分析

# 3 双层鲁棒优化问题求解 / 资产利用效率分析



## □ 双层鲁棒优化问题求解

一般化形式

$$\min_P TC=UC^T \bar{P} + \max_{z,z \in U^z} \min_{P,A^T P+B^T \bar{P}+C^T z \leq D} E^T P$$

能量平衡约束更新

$$\begin{aligned} P_{ee,t,s,h} + EP_{1,t,s,h} &\geq EL_{t,s,h} + \Delta EL_{t,s,h} z_t^{EL+} - \Delta EL_{t,s,h} z_t^{EL-} \\ HP_{1,t,s,h} + \gamma HP_{3,t,s,h} &\geq HL_{t,s,h} + \Delta HL_{t,s,h} z_t^{HL+} - \Delta HL_{t,s,h} z_t^{HL-} \\ (1-\gamma)CP_{3,t,s,h} + CP_{4,t,s,h} &\geq CL_{t,s,h} + \Delta CL_{t,s,h} z_t^{CL+} - \Delta CL_{t,s,h} z_t^{CL-} \\ P_{gg,t,s,h} &\geq GL_{t,s,h} + \Delta GL_{t,s,h} z_t^{GL+} - \Delta GL_{t,s,h} z_t^{GL-} \end{aligned}$$

不确定集条件更新

$$z_t^+, z_t^- \in \{0,1\}$$

该双层鲁棒优化模型具有线性的目标函数和约束条件，因此可以通过C&CG法求解[2]。

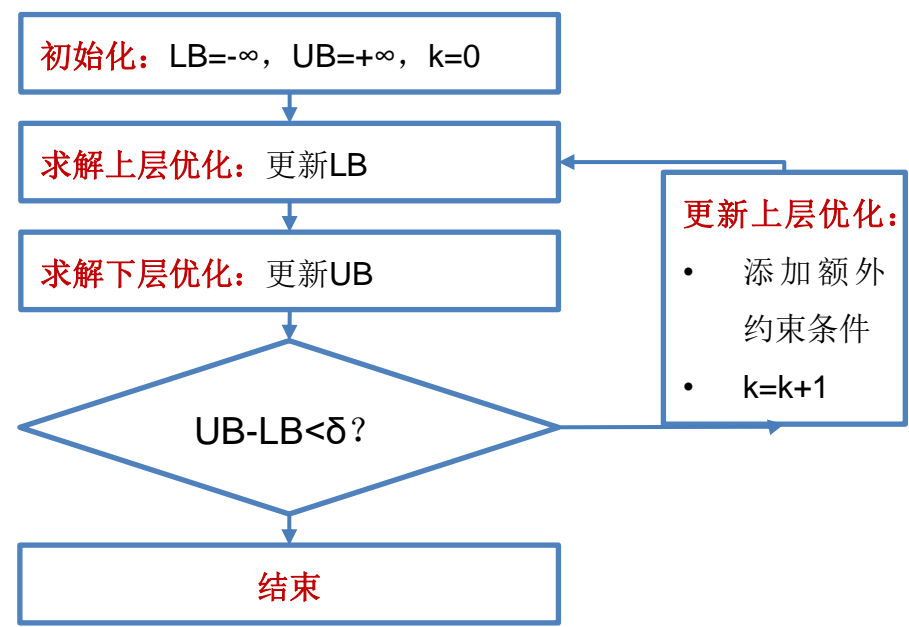
## □ 资产利用效率分析

在本文中，我们将对区域综合能源系统对设备投资带来的收益定义为在给定年限内所节约的运行成本。则资产利用效率定义为该收益与设备投资成本的比值，即：

$$AUE = \left( \sum_{t=1}^{NT} \frac{1}{(1+\delta)^{t-1}} \sum_{s=1}^{NS} d_s \sum_{h=1}^{24} OC_{t,s,h}^* - OC_{0,t,s,h} \right) / UC^T \bar{P}^*$$

不考虑负荷不确定时的原运行成本可以计算为

$$OC_{0,t,s,h} = ep_h \times \left( EL_{t,s,h} + \frac{HL_{t,s,h}}{COP_{AC}^h} + \frac{CL_{t,s,h}}{COP_{AC}^c} \right) + gp \times GL_{t,s,h}$$



[2] ZENG B, ZHAO L. Solving two-stage robust optimization problems using a column-and-constraint generation method [J]. Operations Research Letters, 2013, 41(5): 457-61.

1

引言

2

区域综合能源系统多能互补优化运行建模

3

双层鲁棒设备优化定容模型

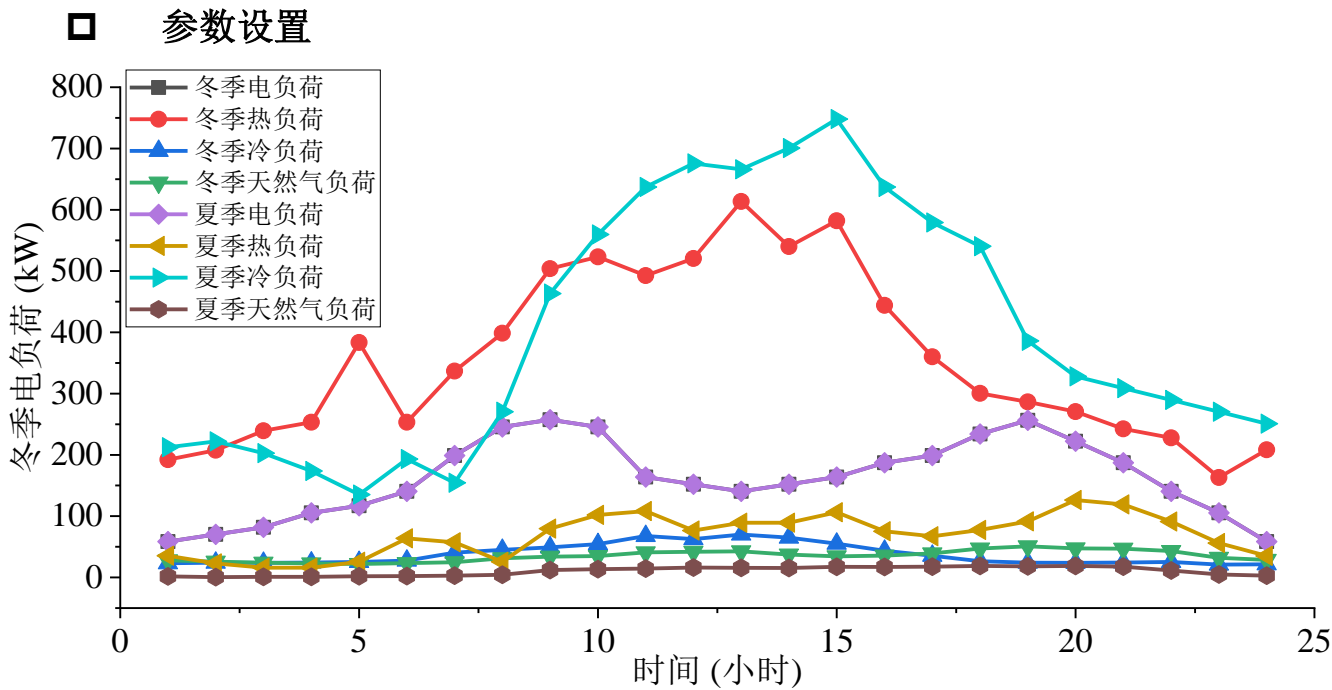
4

双层鲁棒优化问题求解及资产利用效率分析

5

案例分析

# 5.1 参数设定 / 优化定容结果



该区域综合能源系统的典型日负荷

设备单位容量投资成本

单位容量投资成本 (\$/kW)	
CHP	600
GB	40
EHP	240
AB	220

场景数量:  $NS = 2$

负荷差模值:  $\Delta L_{s,t} = 0.1L_{s,t}$

规划年限:  $NT = 5$

资金折现率:  $\delta = 5\%$

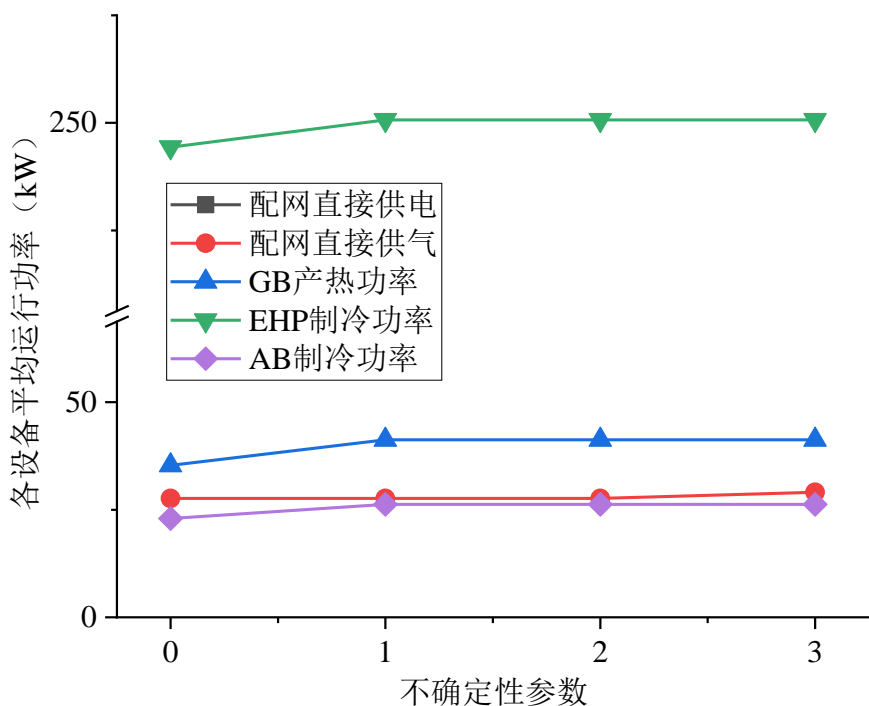
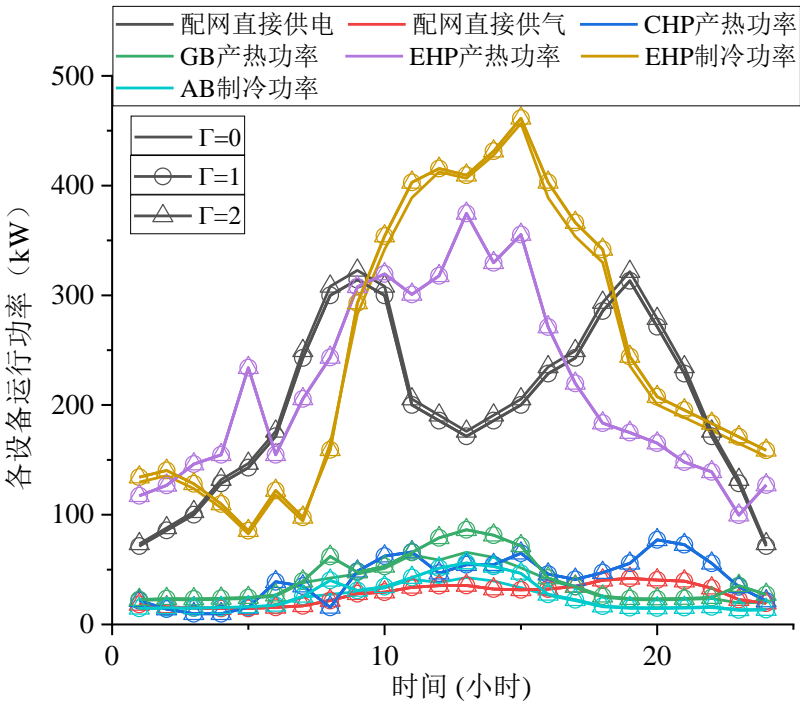
## 定容结果分析

不同不确定性参数下的优化定容结果

不确定性参数	CHP发电/产热容量 (kW)	GB产热容量 (kW)	EHP产热/制冷容量 (kW)	AB制冷容量 (kW)
0	184.91	157.67	1095.29	102.48
1	212.65	181.32	1141.72	117.86
2	212.65	181.32	1141.72	117.86
3	212.65	181.32	1141.72	117.86

- ✓ 负荷不确定性的存在的确对设备定容方案会产生影响，设备的容量需要增加以应对负荷可能的增长。
- ✓ 随着不确定性参数进一步增加，设备定容方案不再变化

## 运行状况分析



不同不确定性水平下: (a)各设备的日运行状况; (b)典型设备的平均运行状况

- ✓ 可以看出，各设备的日运行状况与日负荷趋势一致。当不确定性参数 从0增加到1时，EHP和AB的制冷功率增加；当不确定性参数 从1增加到2时，配网的直接供电功率增加。
- ✓ 随着不确定性水平的增加，典型设备的平均运行功率增加。这也进一步验证了在规划时，我们需要更大的设备容量支撑该运行功率。

典型场景下设备运行情况

场景	夏季		冬季	
	运行情况	设备平均利用率	运行情况	设备平均利用率
CHP发电	不运行	0%	不运行	0%
CHP产热	运行	35.42%	不运行	0%
GB	不运行	0%	运行	31.91%
EHP产热	不运行	0%	运行	31.18%
EHP制冷	运行	35.05%	不运行	0%
AB	不运行	0%	运行	31.91%

- EHP由于其较高的能效，多用于满足占据主导的冷/热负荷
- 非占据主导的冷/热负荷则由AB或CHP提供。
- 设备平均使用率皆较高。



# 5.2 成本分析 / 资产利用效率分析



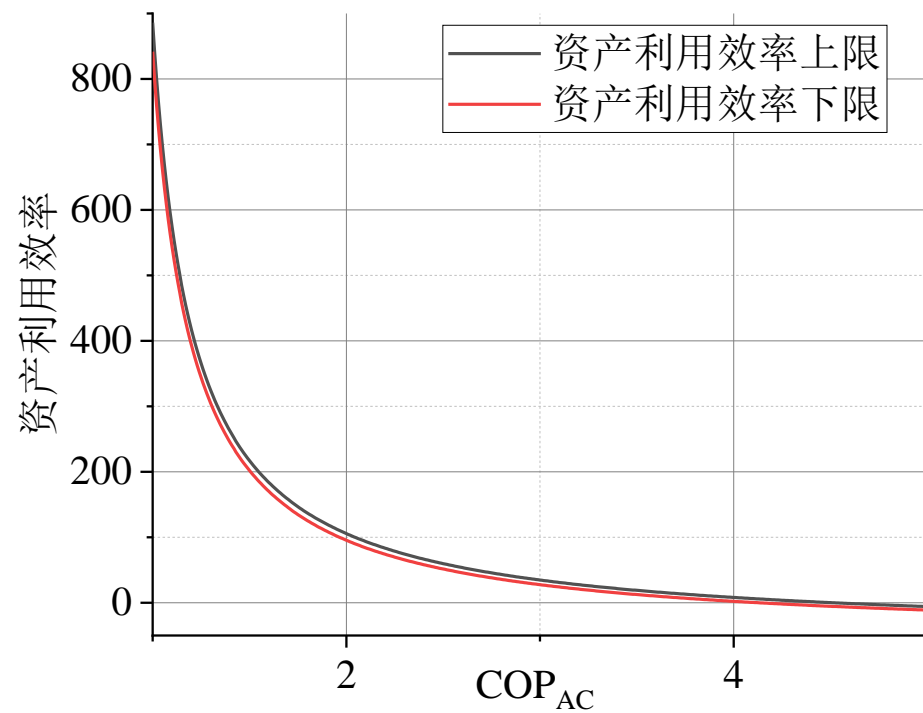
## 成本分析

不同不确定性参数下的成本

不确定性参数	总成本 (\$)	运行成本 (\$)
0	$5.6277 \times 10^7$	$5.5874 \times 10^7$
1	$5.7158 \times 10^7$	$5.6724 \times 10^7$
2	$5.7930 \times 10^7$	$5.7495 \times 10^7$
3	$5.8632 \times 10^7$	$5.8197 \times 10^7$
4	$5.9270 \times 10^7$	$5.8835 \times 10^7$
5	$5.9822 \times 10^7$	$5.9387 \times 10^7$
6	$6.0438 \times 10^7$	$6.0003 \times 10^7$

✓ 尽管不确定性参数在1以后投资成本就不再增加，但是其运行成本仍在稳步上升。相较于运行成本，设备投资成本较小。因此，可以预计，该定容方案时根据负荷需求上限所确定的。

## 资产利用效率分析



Γ= 3时的资产利用效率敏感性分析

✓ 假定用户侧制冷/产热设备的能效比 $COP_{AC}=3$ ，经计算资产利用效率区间为[20.46, 25.21]。

✓ 即使考虑负荷的不确定性，该资产利用效率始终维持在较高的水平。

- ✓ 当假定的 $COP_{AC}$ 越高，则资产利用效率越低，对区域综合能源系统设备容量的投资的意义越低。
- ✓ 根据负荷不确定性进行最恶劣情况估计，当 $COP_{AC}>4.12$ 时，资产利用效率开始小于0，即，不建议进行区域综合能源系统的设备投资；

# Thanks!

