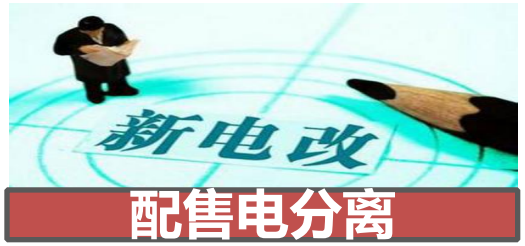
用户侧综合能源系统规划与运行控制关键技术

报告人：唐 巍
中国农业大学 信息与电气工程学院
2017年11月 中国•南宁

研究背景与意义



提高能源利用效率
合理**能源利用结构**

提高清洁能源
开发利用率

集中在用户侧

能源市场化

必然趋势

促进适应

用户侧综合能源系统

用户侧综合能源系统研究对于缓解能源危机、解决清洁能源利用、促进用户侧能源互联、适应配售电市场环境具有理论和现实意义。

关键技术

用户侧综合能源系统的
典型模式与运行特性分析

规划

基于热-电混合潮流的用户侧综合能源系统优化规划

基于机会约束规划的用户侧综合能源系统互联规划

运行

配售电分离环境下用户侧综合能源系统日前优化调度

评估

用户侧综合能源系统
评估指标体系及方案决策

目录 CONTENTE

1 用户侧综合能源系统典型模式与运行特性分析

2 基于热—电混合潮流的用户侧综合能源系统优化规划

3 基于机会约束规划的用户侧综合能源系统互联规划

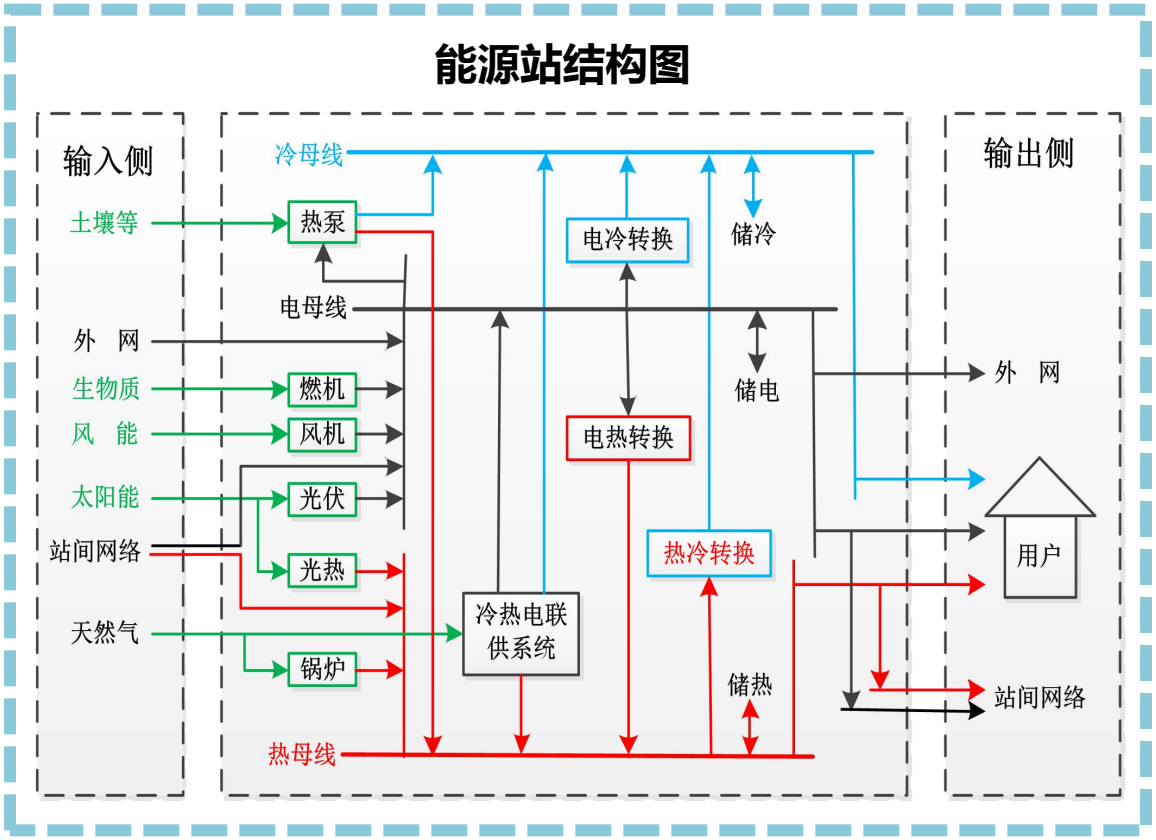
4 配售电分离环境下用户侧综合能源系统日前优化调度

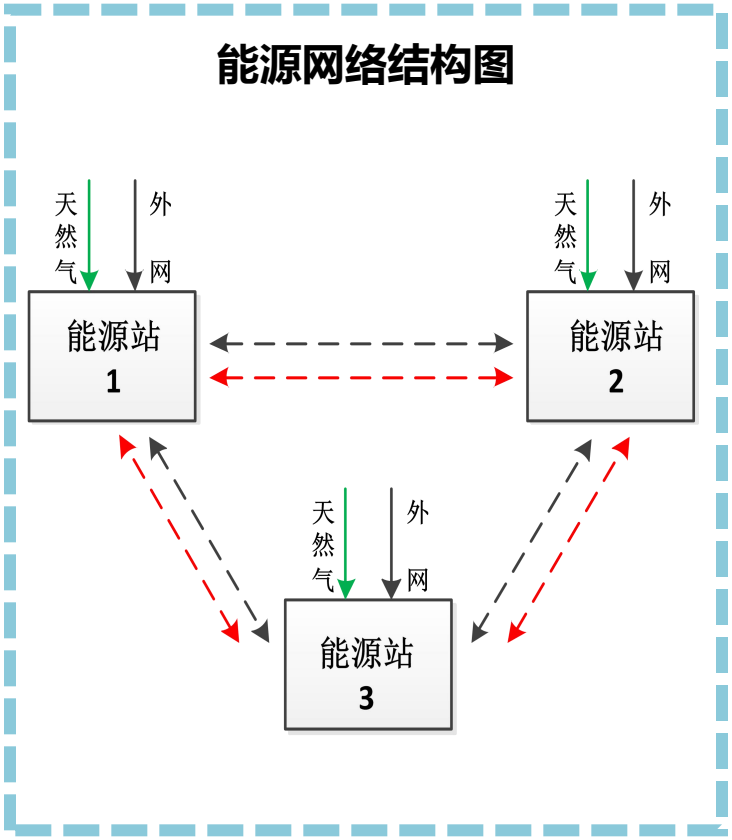
5 结论与展望

1

用户侧综合能源系统的典型模式与运行特性分析

系统结构





供电：光电、风电、生物质发电、冷热电联产、储电、站间电网、外（配）网
供热：光热、热泵、锅炉、冷热电联产、电-热转换、储热、站间热网
供冷：热泵、冷热电联产、电-冷转换、热-冷转换、储冷

典型模式

农业园区

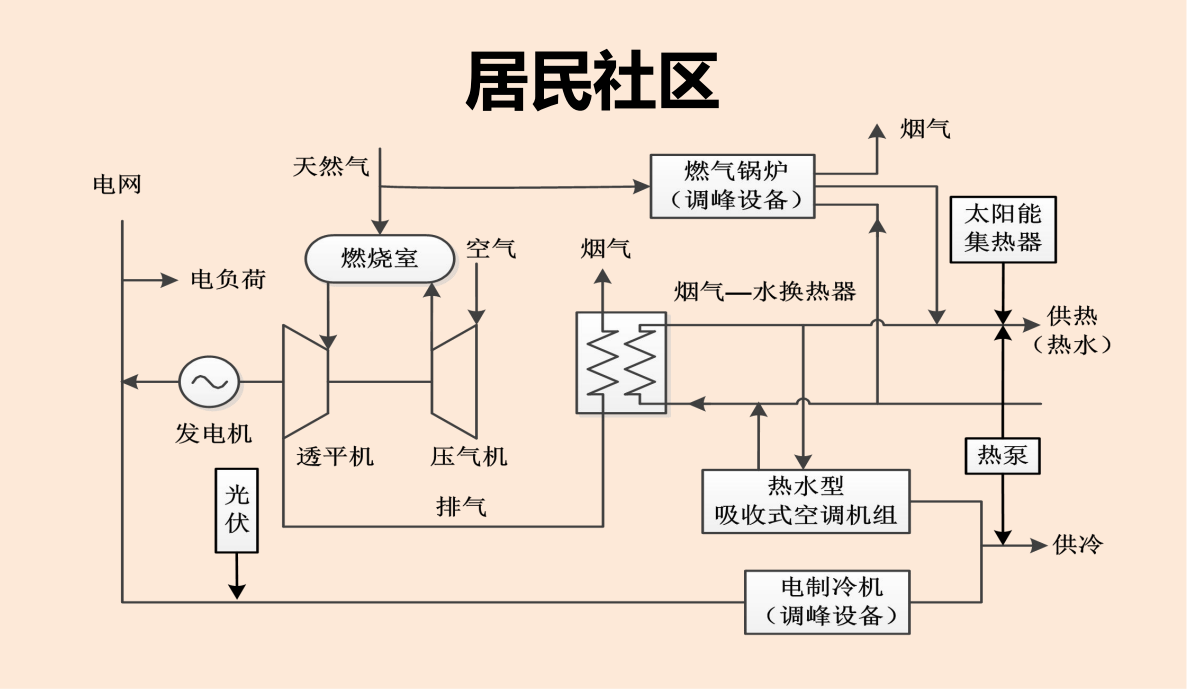
居民社区

用能需求
供能条件
负荷种类

工业园区

商业园区

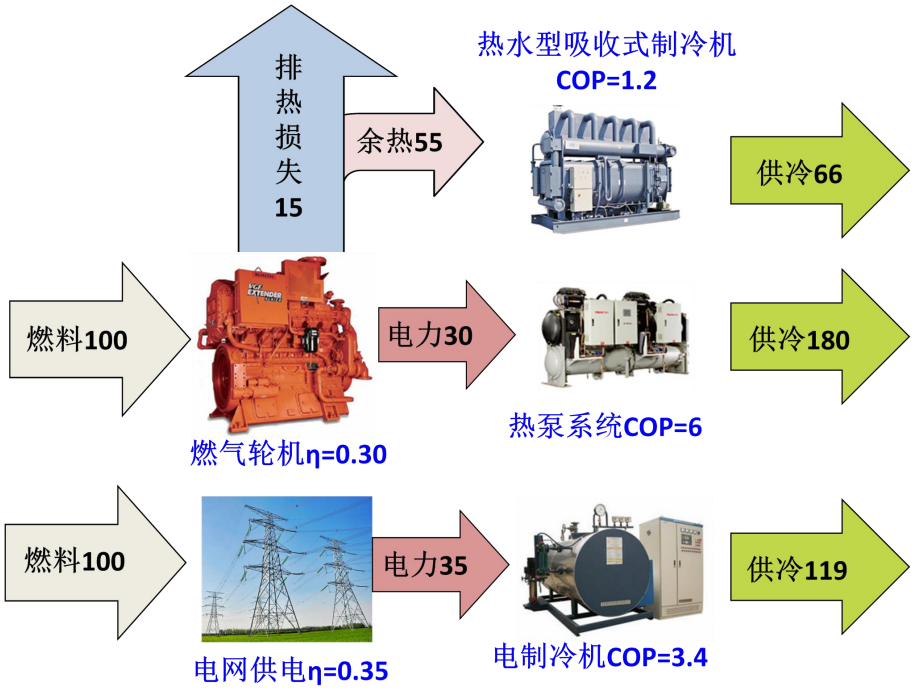
典型模式1—居民社区

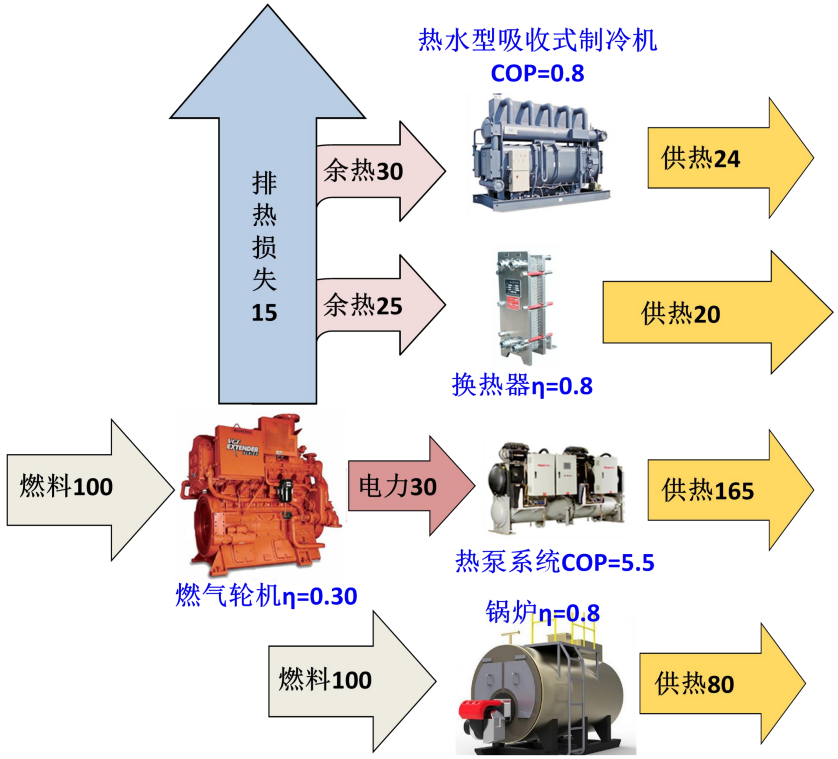


能源需求：冷、热、电三种能量
用能特点：对冷热电的需求比较均衡
建筑特点：楼群较密集，有大量的屋顶面积
能源供应：电网供电、冷热电联产、热泵、太阳能集热器、光伏发电、风力发电等

典型模式1—居民社区

能效特性分析



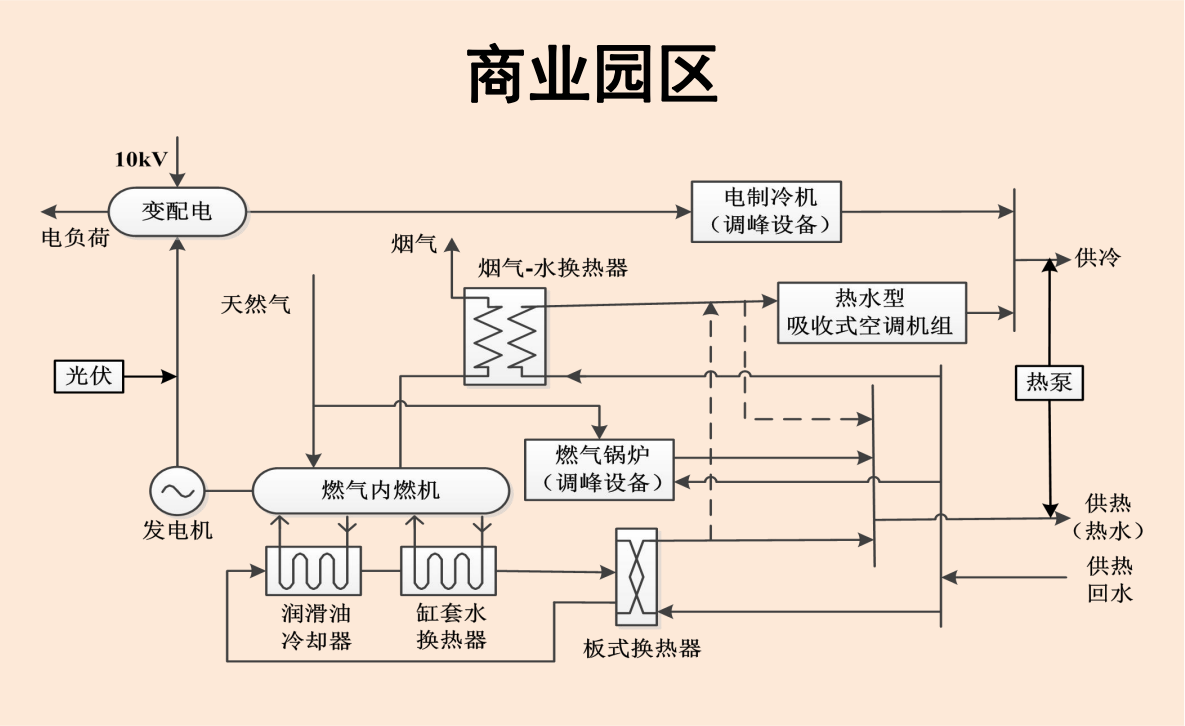


供冷模式能效比为1.83（传统1.19）

供热模式能效比为1.45（传统0.8）

能效比：实际制冷量（制热量）与输入功率的比值

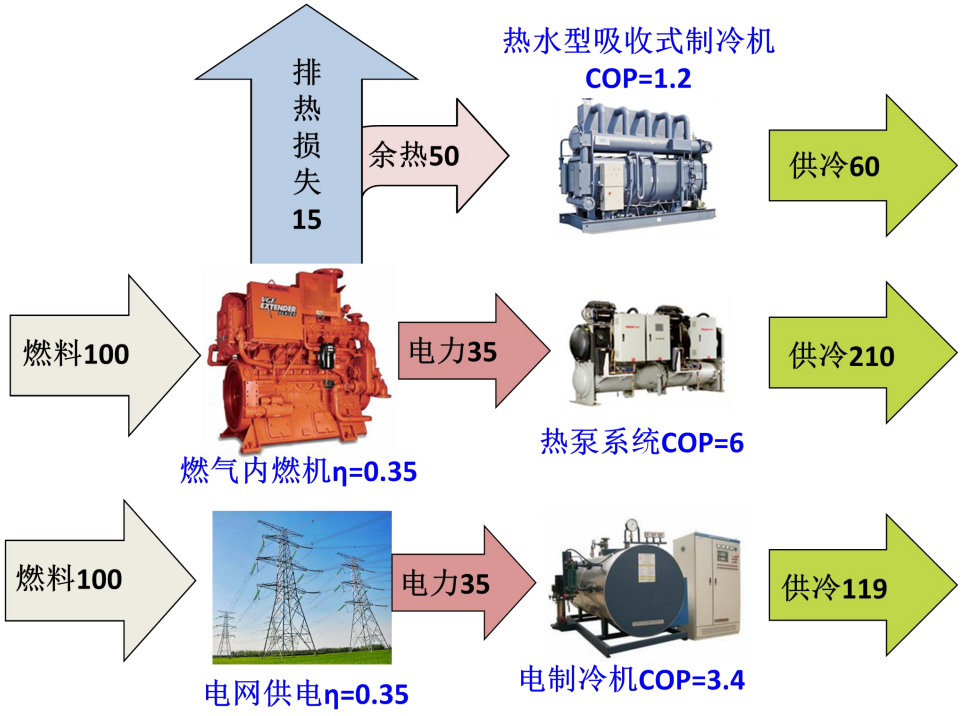
典型模式2—商业园区



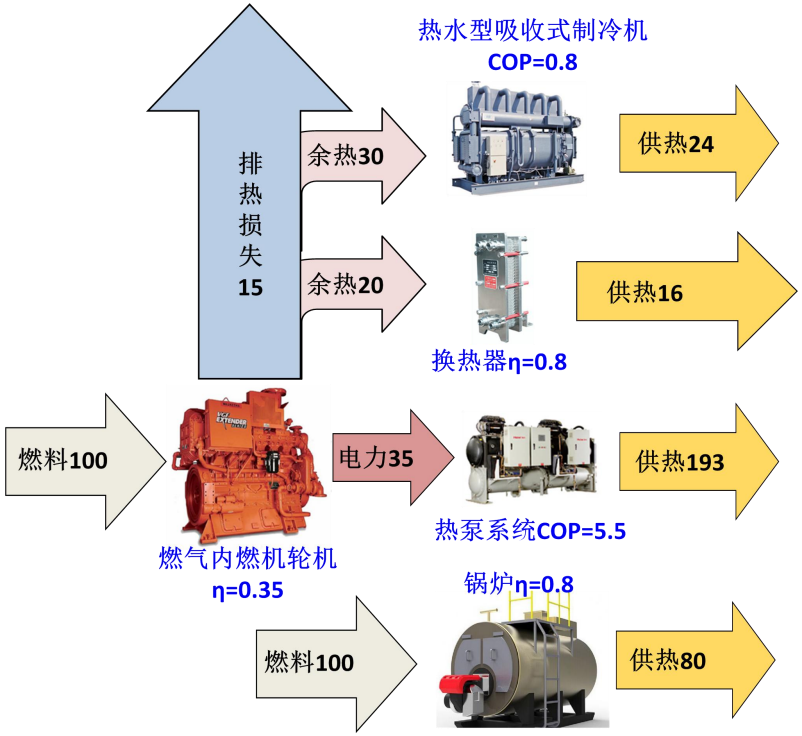
能源需求：冷、热、电三种能量
用能特点：对热和冷负荷的需求一般，主要依赖电能
建筑特点：繁华地段，建筑物密集且地价较高
能源供应：电网供电、冷热电联产、热泵、光伏发电等

典型模式2—商业园区

能效特性分析

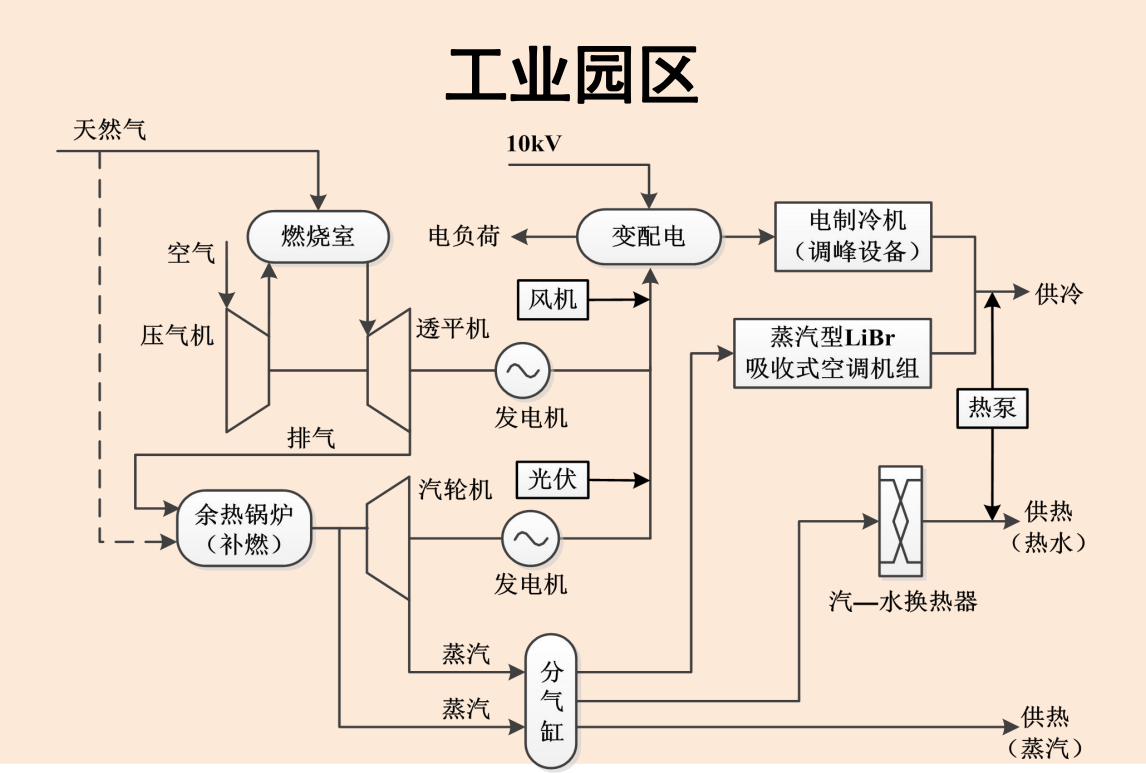


供冷模式能效比为1.95



供热模式能效比为1.57

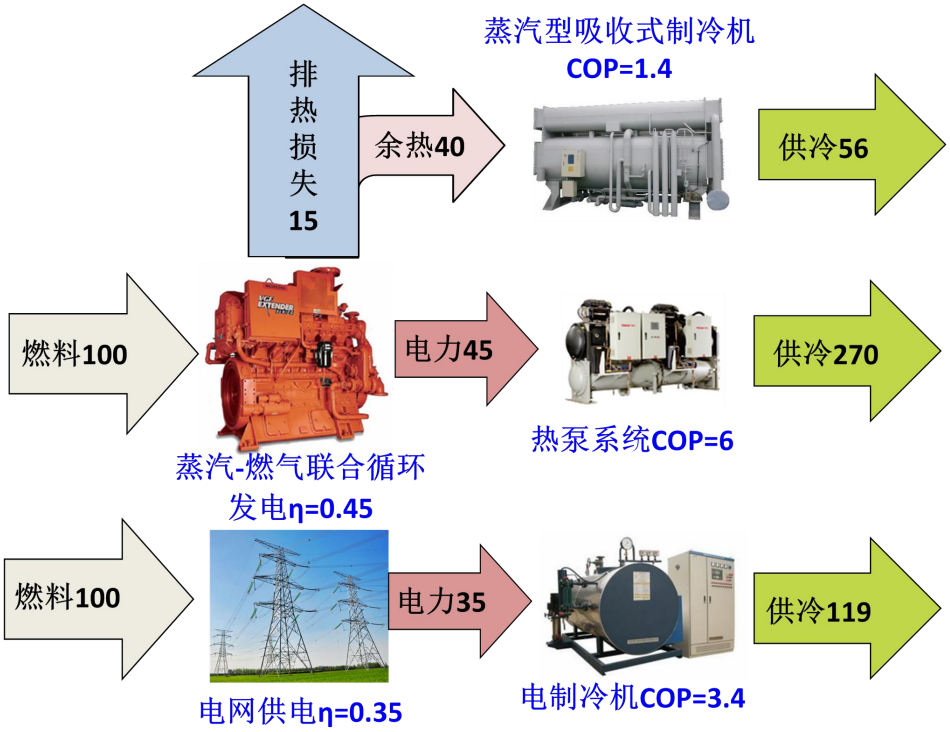
典型模式3—工业园区



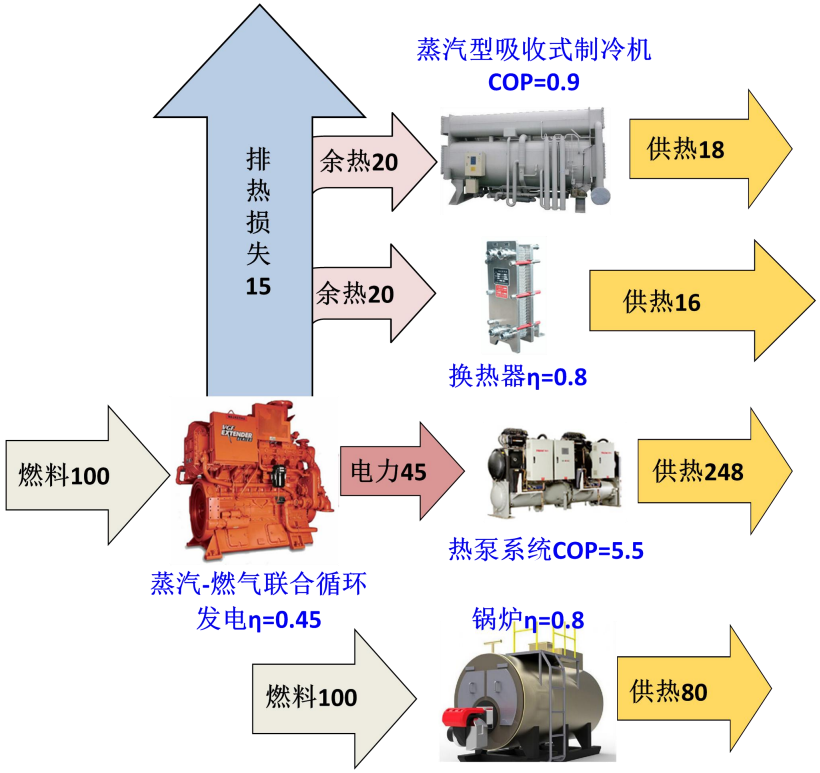
能源需求：冷、热、电三种能量
用能特点：对电能和蒸汽的需求全年都比较高
建筑特点：城市边缘，占地面积较大
能源供应：电网供电、市政供热、冷热电联产、热泵、光伏发电、风电等

典型模式3—工业园区

能效特性分析

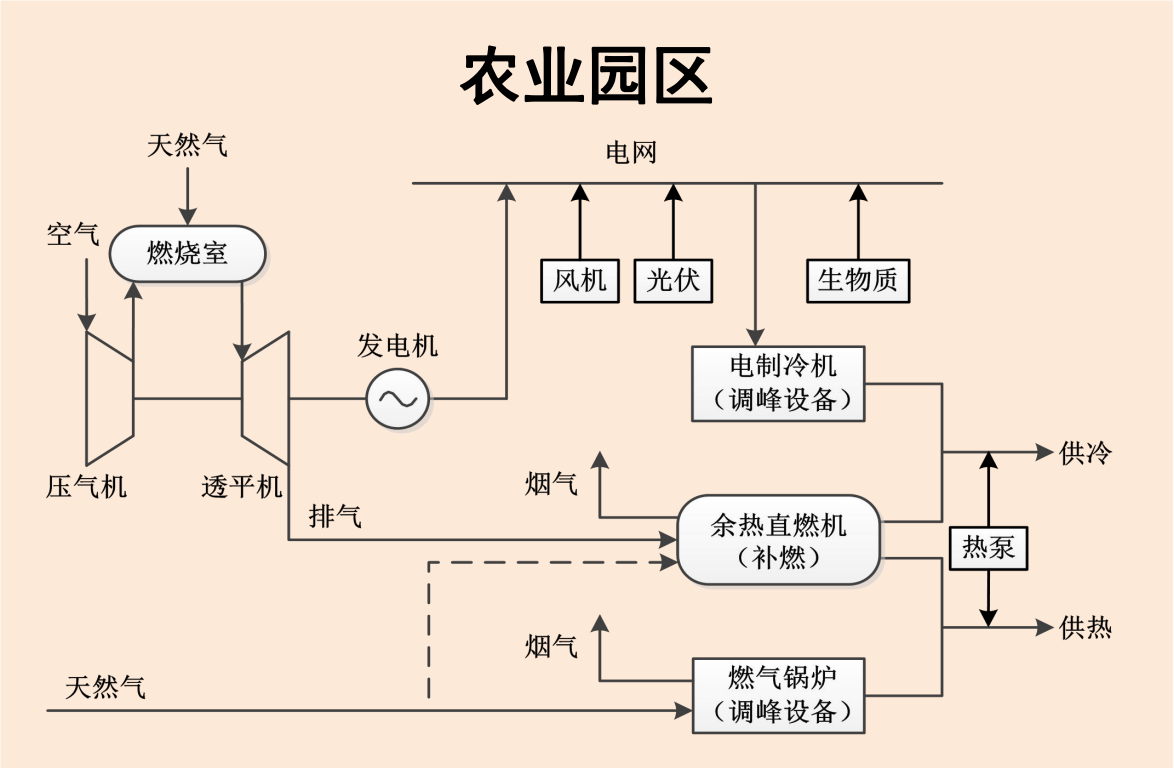


供冷模式能效比为2.23



供热模式能效比为1.81

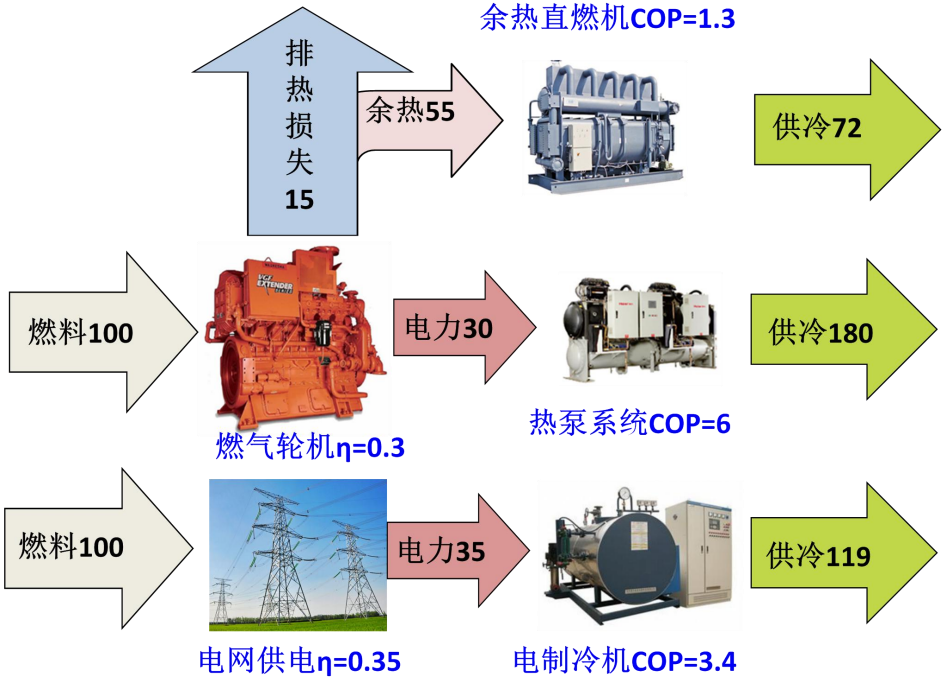
典型模式4—农业园区

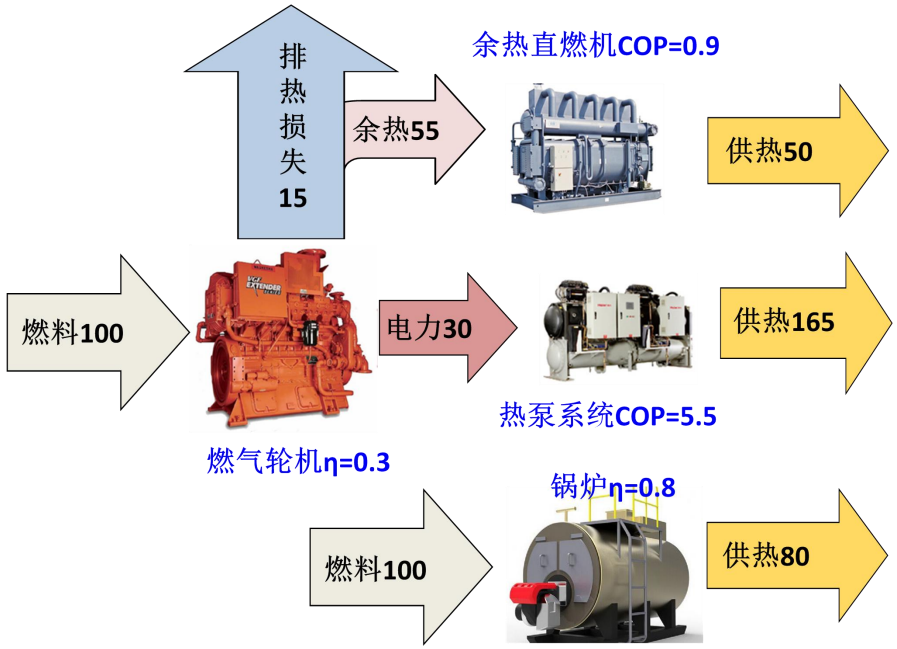


能源需求：冷、热、电三种能量
用能特点：主要为电能和热能
建筑特点：占地面积较大，周围比较空旷并且地价较低
能源供应：电网供电、冷热电联产、热泵、光伏、风电、生物质发电等

典型模式4—农业园区

能效特性分析





供冷模式能效比为1.86

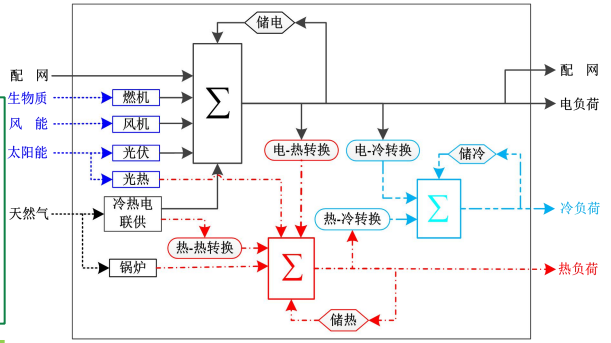
供热模式能效比为1.48

2 基于热-电混合潮流的用户侧综合能源系统优化规划

用户侧综合能源系统优化规划

思路与特点

对单个综合能源系统内部的分布式能源进行选址定容及接入规划
1. 在规划中考虑运行，采用二层规划方法建模
2. 采用时序性描述光伏与负荷特性
3. 考虑热电耦合，采用热-电混合潮流获得运行数据



层规

规划层 上层规划

$$\min F = F(x, w)$$
$$G(x) \le 0$$

规划目标：设备投资运行维护费、电网购电费、环境费用

决策变量：分布式能源安装位置和容量、新增管网的位置和长度

控制层 下层规划

$$\min w = f(x, y)$$
$$g(x, y) \le 0$$

规划目标：一次能源节约率（利用率、分布式能源运行费、网络损耗费用

决策变量：分布式能源24h出力

初始条件

投资决策

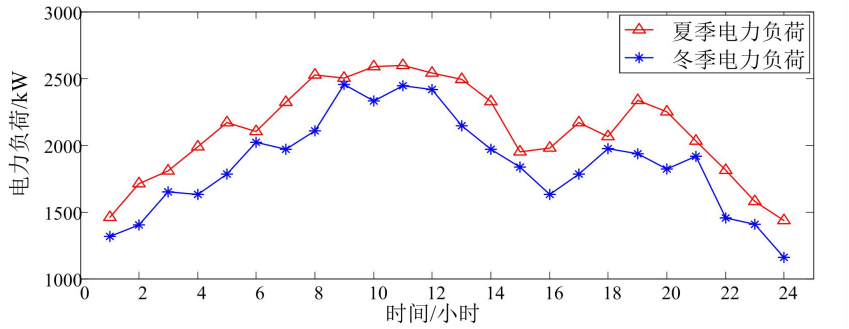
运行优化

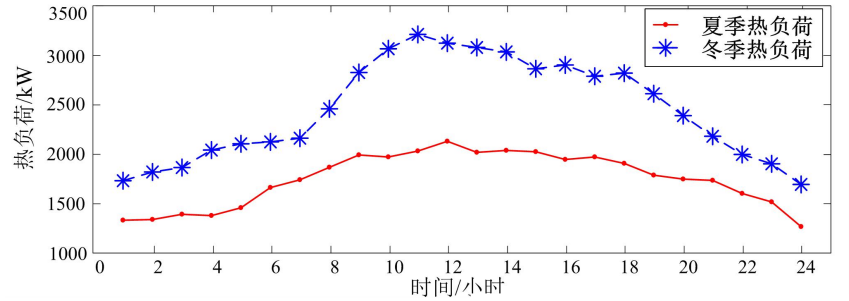
反馈

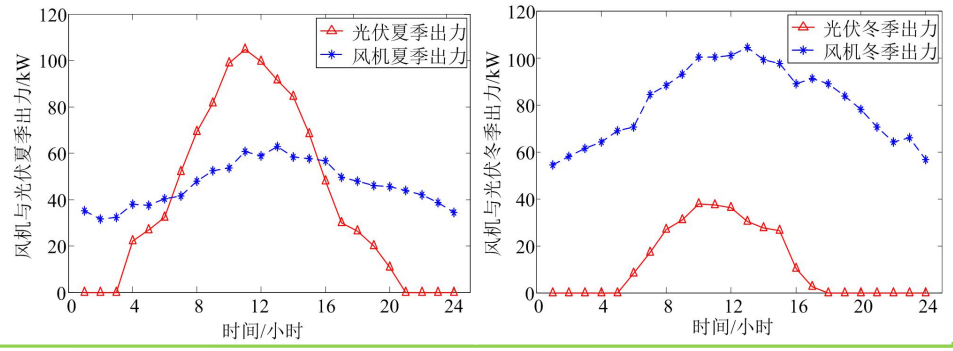
用户侧综合能源系统优化规划

上层规划

$$F_{up} = \min(C + C_G + C_E)$$







（1）设备投资年费用C（**考虑折旧因素**）

$$C = C_C + C_{OM} + C_P$$

分布式能源　　运维　　新增网架

运行费由下层目标优化决定

（2）从主网购电年费用C_G

$$C_G = \sum_{k=1}^{4} T_k \sum_{t=1}^{24} (C_P C_{GP,k}(t) - C_S C_{SP,k}(t))$$

（3）环境成本费用C_E

$$C_E = \sum_{k=1}^{4} T_k \sum_{t=1}^{24} \sum_{i=1}^{2} R_i (K_i^{MT} P_{e,k}^{MT}(t) + K_i^B Q_k^B(t)) \Delta t$$

用户侧综合能源系统优化规划

下层规划 $F_{low}=\min(\omega_1(1/\eta_{PESR})+\omega_2 C_O+\omega_3 C_{loss})$

（1）一次能源节约率

分产系统年一次能源消耗量

综合能源系统年一次能源消耗量

$$\eta_{PESR}=\frac{\eta_{PEC}^{FC}-\eta_{PEC}^{LC}}{\eta_{PEC}^{FC}}$$

（2）一次能源利用率

电、热、冷

可再生能源发电量

$$\eta_{NCR}=\frac{E_e+Q_h+Q_c-\sum_{j=1}^{N}E_j}{\frac{E_{grid}^{LC}}{\eta_{grid}\eta_e}+\sum_{i=1}^{n}F_i^{LC}}$$

购电

燃料

（3）设备运行费Co（返回到上层）

$$C_O=\sum_{k=1}^{4}T_k\sum_{t=1}^{24}(\sum_{h=1}^{N_{MT}}C_{MT,k,h}^{f}(t)+\sum_{q=1}^{N_B}C_{B,k,q}^{f}(t))$$

（4）网络损耗费用$Closs$

$$C_{loss}=Q_{loss}+P_{loss}$$

$$=\sum_{k=1}^{4}T_k\sum_{t=1}^{24}(\sum_{i=1}^{N_{pipe}}c_h C_m \dot{m}_{k,t,i}\Delta T_{k,t,i}+c_p\Delta t P_{loss,k,t})$$

用户侧综合能源系统优化规划

约束条件

电网约束

$$\begin{cases} P_{Gi}^t = P_{Li}^t - U_i^t \sum_{j=1}^{N_{node}} U_j^t (G_{ij}\cos\delta_{ij} + B_{ij}\sin\delta_{ij}) \\ Q_{Gi}^t = Q_{Li}^t - U_i^t \sum_{j=1}^{N_{node}} U_j^t (G_{ij}\cos\delta_{ij} - B_{ij}\sin\delta_{ij}) \end{cases}$$

$$P\left\{U_i^{\min} \le U_i(x,\xi) \le U_i^{\max}\right\} \ge \beta_U, i \in \Omega_{node}$$

$$P_{Li}^{\min} \le \left|P_L^t\right| \le P_{Li}^{\max}$$

热网约束

$$\begin{cases} A\dot{m} = \dot{m}_q \\ Bh_f = 0 \end{cases}$$

$$\phi = C_p \dot{m}_q (T_s - T_o)$$

$$C_p(\sum \dot{m}_{out})T_{out} = C_p \sum (\dot{m}_{in} T_{in})$$

设备出力约束

$$SOC_{\min} \le SOC(t) \le SOC_{\max}$$

$$P_{Ch_\min} \le P_{Ch}(t) \le P_{Ch_\max}$$

$$P_{DCh_\min} \le P_{DCh}(t) \le P_{DCh_\max}$$

$$P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1) \le R_{up,MT}$$

$$P_{MT}(t-1) - P_{MT}(t) \le R_{down,MT}$$

$$Q_{\min}^B \le Q^B \le Q_{\max}^B$$

用户侧综合能源系统优化规划

上层精英保留策略遗传算法

上层规划编码方式

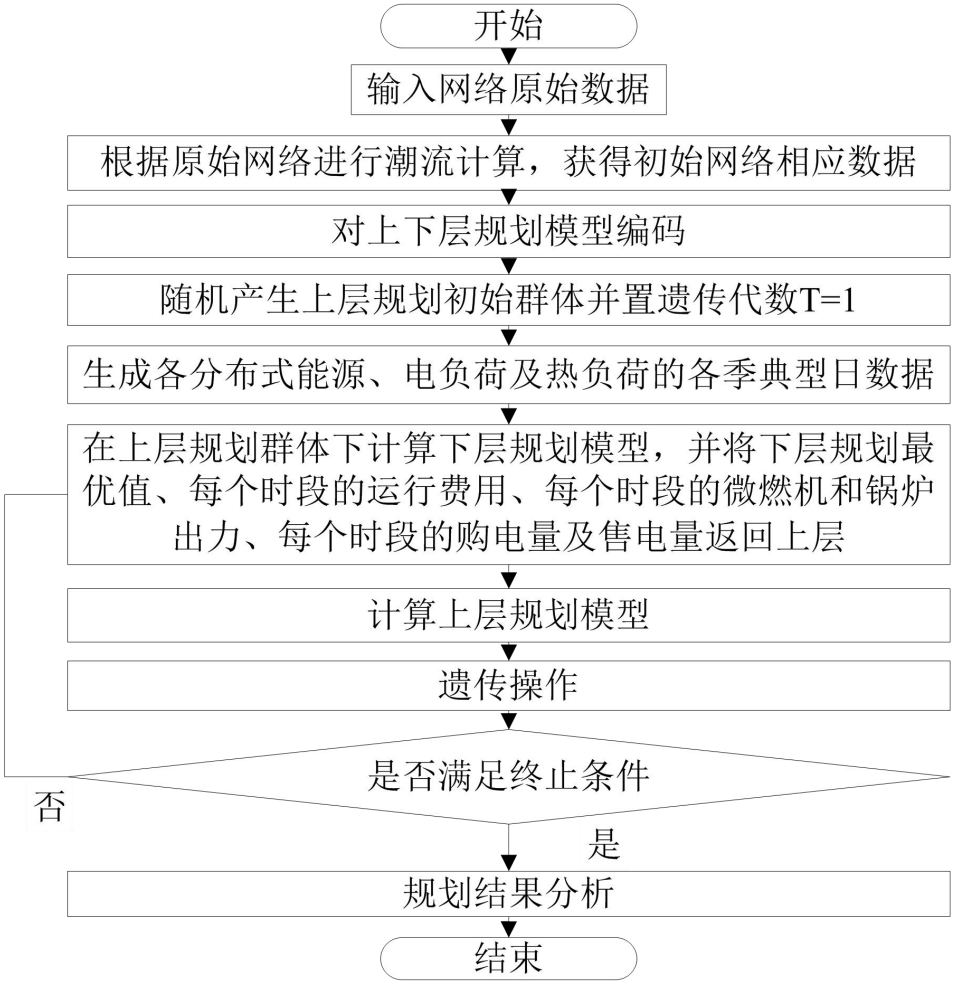
分布式能源信息		新建线路	
分布式能源容量	分布式能源类型	电线路	热管道

下层自适应粒子群算法

下层规划编码方式

$$P_i = \overbrace{[P_{i1}, P_{i2}, \ldots\ldots, P_{i24}]}^{\text{储能24小时调度值}} \overbrace{[M_{i1}, M_{i2}, \ldots\ldots, M_{i24}]}^{\text{微燃机24小时调度值}}$$

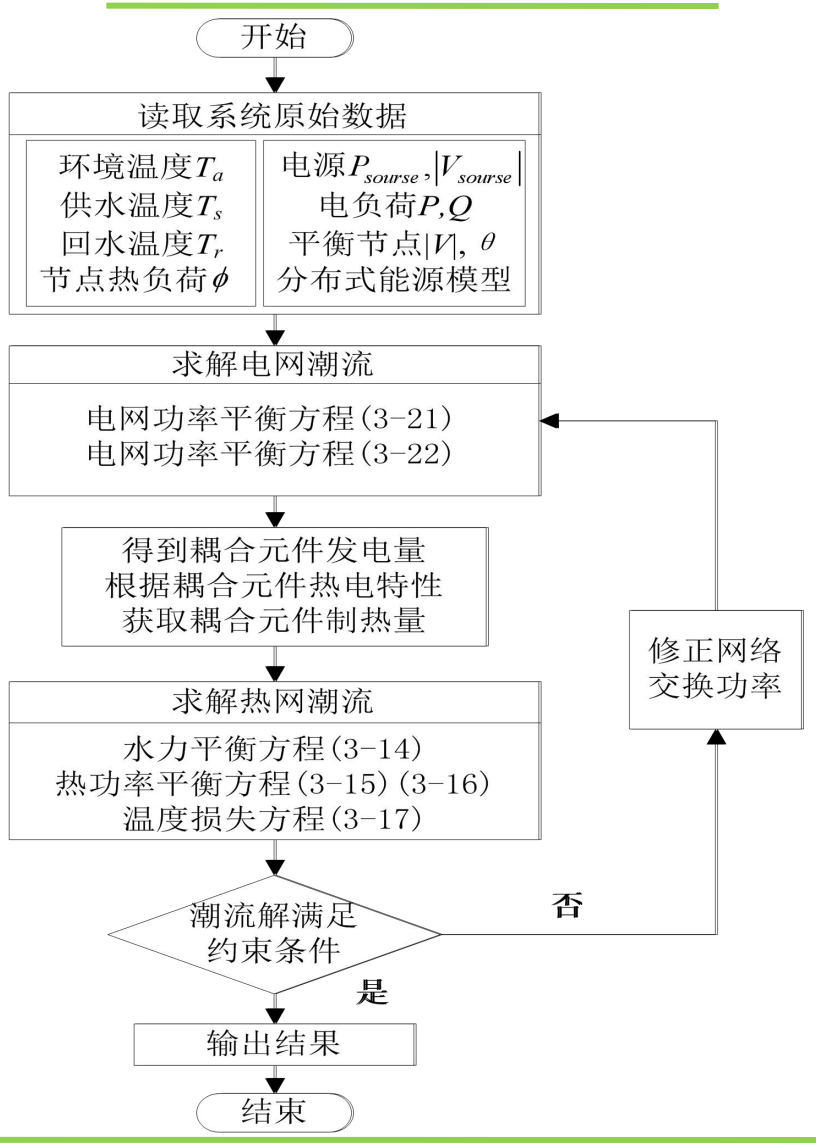
求解算法



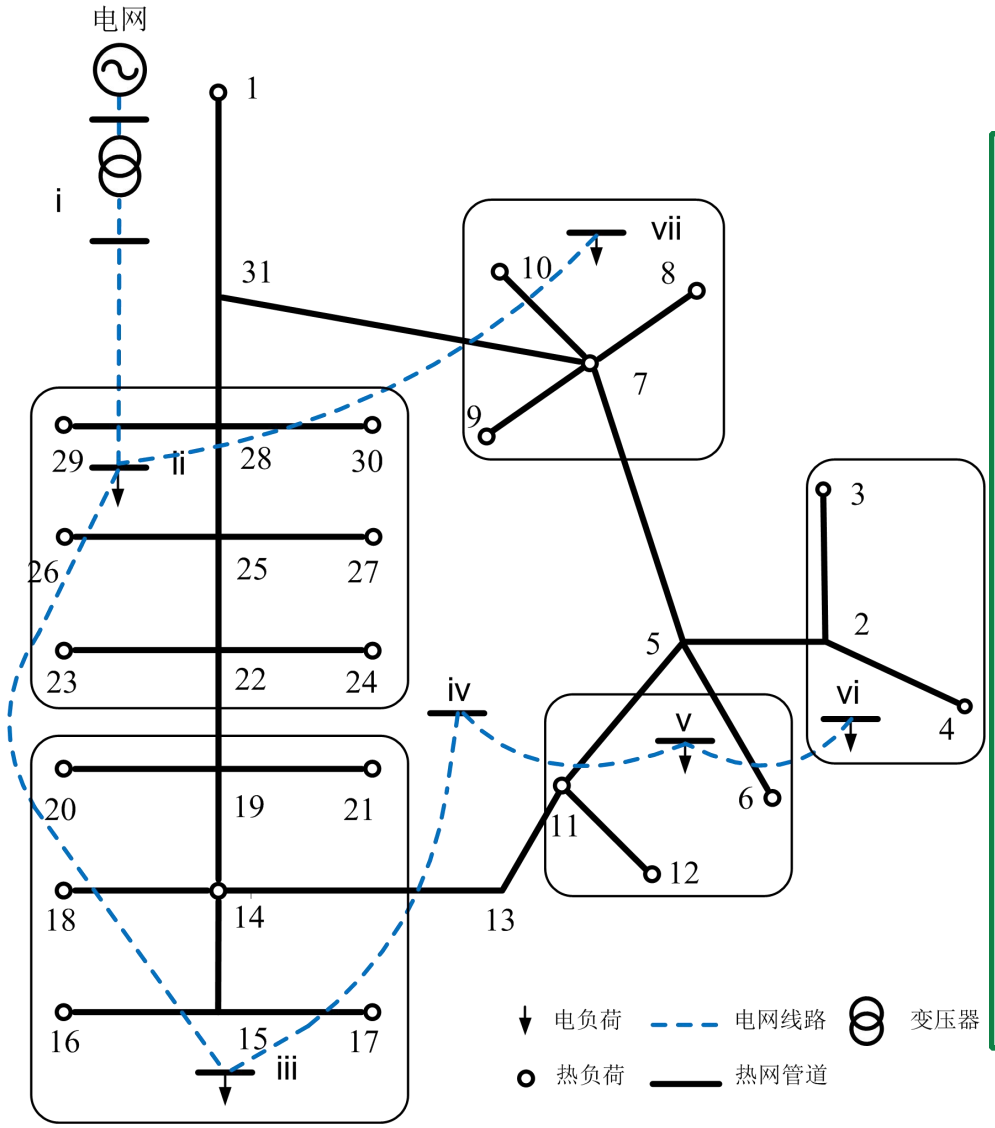
用户侧综合能源系统优化规划

热网-电网综合潮流

用户侧综合能源系统内耦合元件是热网与电网连接的桥梁，基于耦合元件热、电功率特性形成热网-电网综合潮流。热网潮流采用牛顿-拉夫逊算法求解，电网潮流采用前推回代法求解。



用户侧综合能源系统优化规划

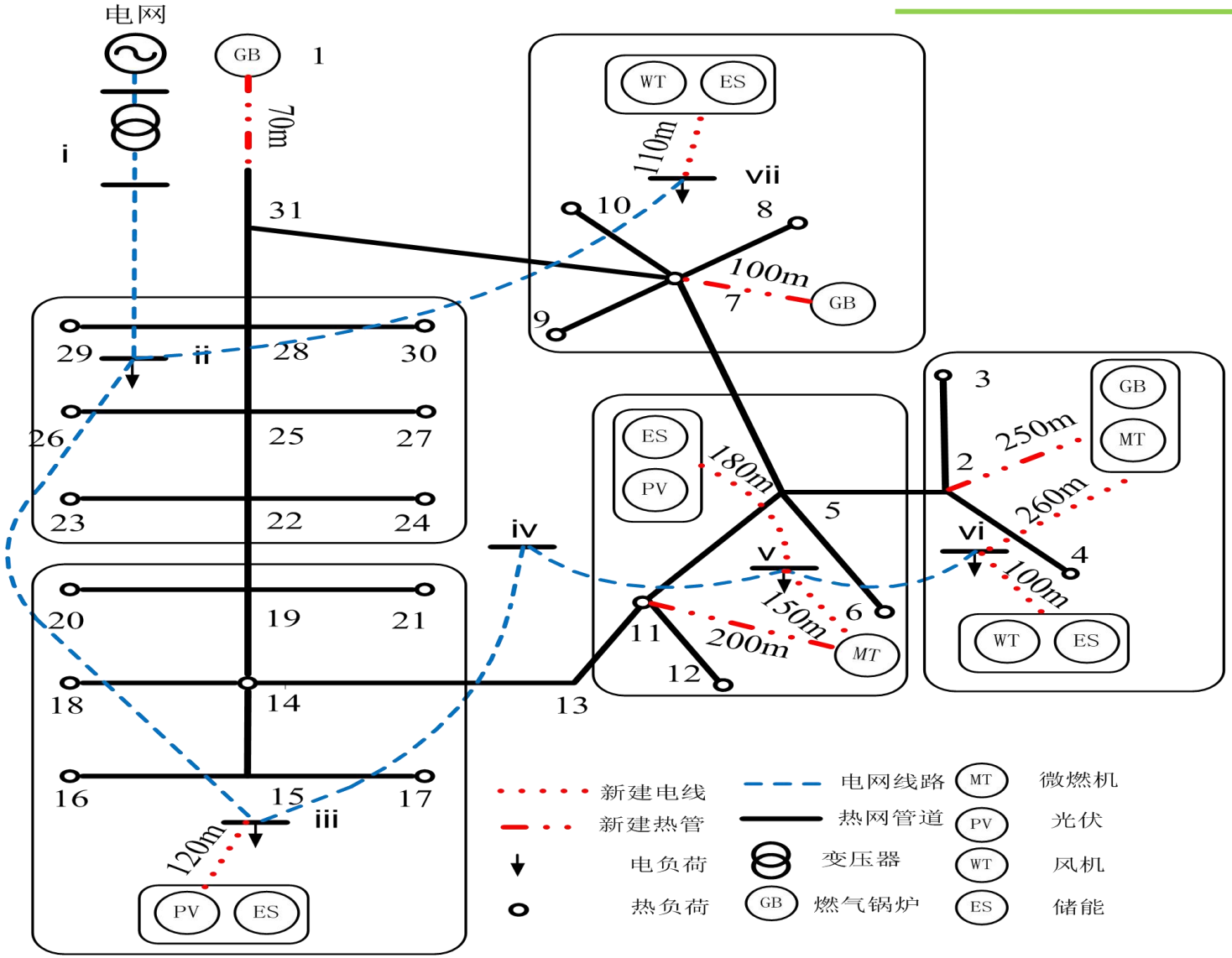


方案1：分产系统，只由燃气锅炉供热，热网孤岛运行，只由公用电网供电；

方案2：热电联产系统，微燃机与锅炉共同供热，热网孤岛运行，微燃机与公用电网共同供电；

方案3（本文方法）：用户侧综合能源系统，微燃机与锅炉共同供热，热网孤岛运行，微燃机、风机、光伏、储能及公用电网共同供电。

用户侧综合能源系统优化规划



用户侧综合能源系统优化规划

算例分析

	投资运行维护费用	购电费用	环境成本	总成本	年一次能源节约率
情形 1	698.29	737.18	16.26	1451.73	---
情形 2	897.46	276.95	20.09	1194.50	34.33%
情形 3	964.98	193.52	19.81	1178.31	41.10%

分布式能源		情形 1	情形 2	情形 3
燃气锅炉	容量(kW)	1500, 1500, 1100	800, 700, 800	800, 900, 700
	位置	1, 2, 11	1, 2, 22	1, 2, 7
微燃机	容量(kW)	---	600, 400	400, 400
	位置	---	2, 7	2, 11
风机	容量(kW)	---	---	100, 300
	位置	---	---	vi, vii
光伏	容量(kW)	---	---	88, 176
	位置	---	---	iii, v
储能	容量(kW)	---	---	99, 165 66, 198
	位置	---	---	iii, v, vi, vii
电线路	长度（m）	---	270, 130	（180, 150） （260, 100） 120, 110
	接入位置	---	vi, vii	v, vi, iii, vii
热管道	长度（m）	80，250，200	70, 230 120, 210	70, 250 150, 200
	接入位置	1, 2, 11	1, 2, 7, 22	1, 2, 7, 11

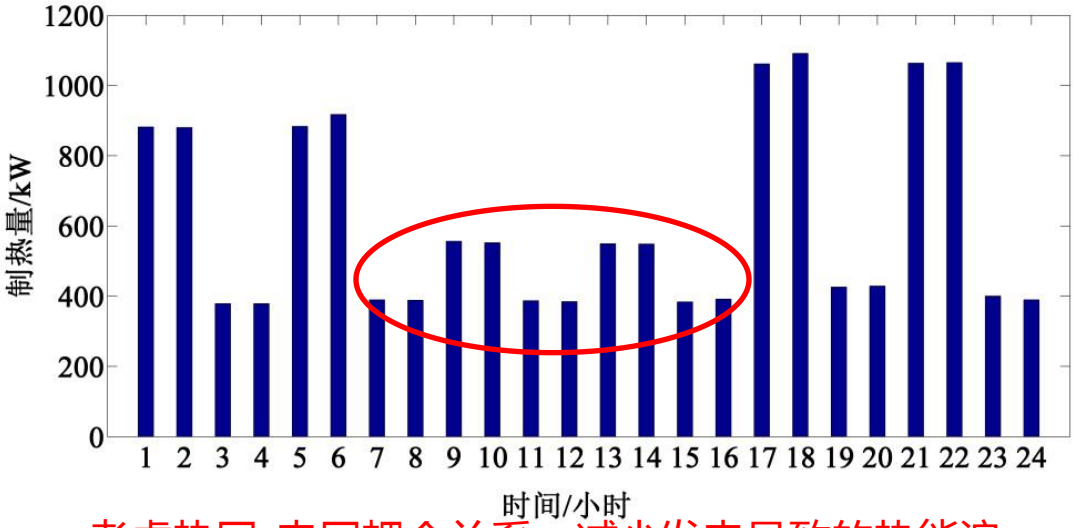
提高环保效益

提高经济效益

提高能源利用率

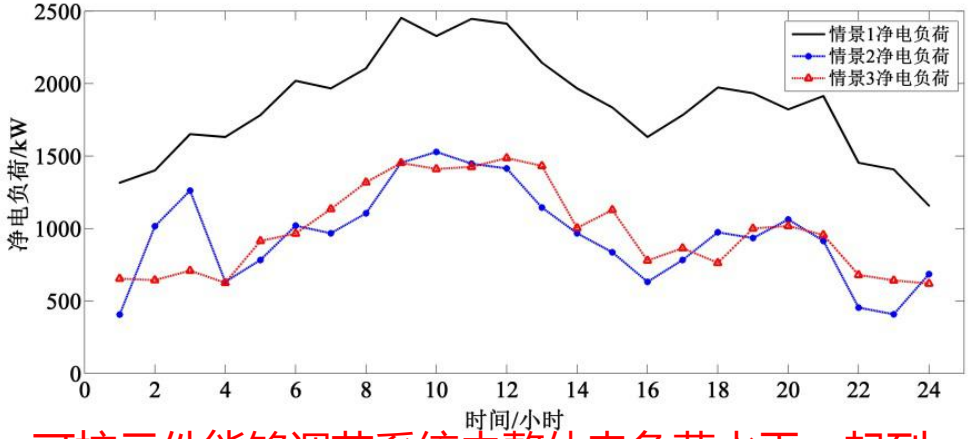
用户侧综合能源系统优化规划

方案3春季典型日微燃机优化结果



考虑热网-电网耦合关系，减少发电导致的热能浪费，使系统能源高效利用。

冬季典型日各方案净负荷曲线



可控元件能够调节系统内整体电负荷水平，起到削峰填谷、节能降损的作用。

➢小结

（1）采用本文用户侧微型能源站及接入网络二层规划方法得到的规划方案，联合优化规划能够获得更高的经济效益、能源利用效率和环保效益。

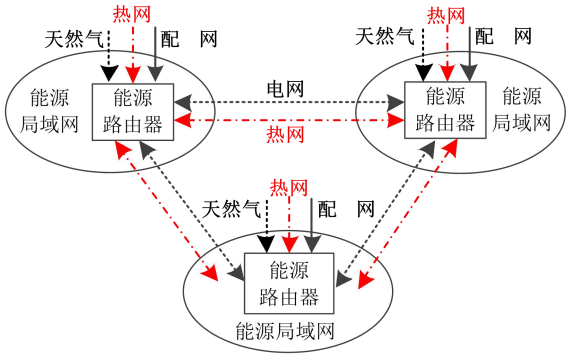
（2）用户侧微型能源站及接入网络规划需考虑热网-电网运行特性，利用热网-电网综合潮流计算可获得更加准确的网络运行数据，从而为规划研究提供更符合实际的数据。

3 基于机会约束规划的用户侧综合能源系统互联规划

用户侧综合能源系统互联规划

思路与特点

多个综合能源系统系统容量优化配置及系统间联络线规划
1. 多个综合能源系统互联
2. 考虑光伏与负荷的不确定性，采用机会约束规划方法



层规

规划层 上层规划

$$\min F = F(x, w)$$
$$G(x) \le 0$$

规划目标：投资费用、年运行费用

决策变量：各能源路由器内设备的安装容量、路由器间网络的传输路径和容量

控制层 下层规划

$$\min w = f(x, y)$$
$$g(x, y) \le 0$$

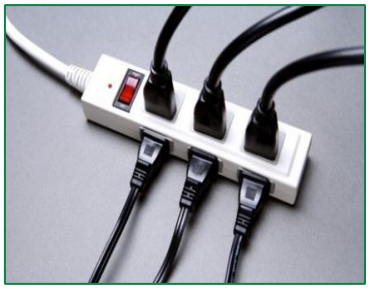
规划目标：燃料、运行维护、购电费、碳税

决策变量：分布式能源24h出力

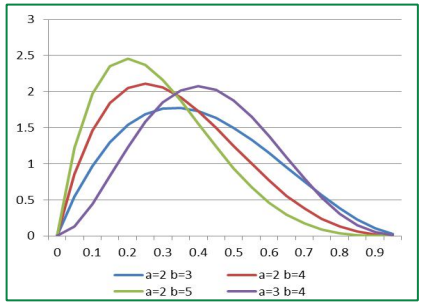
投资决策

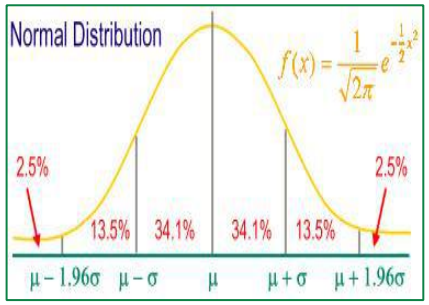
运行优化

用户侧综合能源系统互联规划



不确定性





二者存在关联性

光伏-负荷综合模型

各典型日每小时光伏负荷所有状态及对应概率

削减状

采用机会约束规划方法解决不确定性问题

用户侧综合能源系统互联规划

上层目标 一定置信度下**的年费用最低**

$$\sum_{i=1}^{\xi_{\max}} P\left\{f(X,\xi_i) \le \overline{F}_{上}\right\} \ge \alpha \qquad \text{其中} \quad f(X,\xi) = C_{\text{Cap}} + C_{\text{Ope}}$$

◆**投资** $C_{Cap} = C_C + C_O + C_P$ $C_C = r_x \sum_{x=1}^{N_D}\sum_{i=1}^{N_x} w^x R_i^x$ **设备** $C_O = 8760 \sum_{x=1}^{N_D} c_x Cap^x F_x$ **维护** $C_P = \sum_{g=1}^{N_L}\sum_{k=1}^{N_g^{new}} x_{g,k}(CRF_i \gamma_{g,k} C_{g,k}^{new} L_{g,k} + W_{g,k}^{new})$ **网架**

下层目标 一定置信度下**的年运行费最低**

$$\sum_{i=1}^{\xi_{\max}} P\left\{f(X,\xi_i) \le \overline{F}_{下}\right\} \ge \alpha \qquad \text{其中} \quad f(X,\xi) = C_{\text{Ope}} = C_{\text{F}} + C_G + C_{\text{E}}$$

◆**燃料** $C_F = \sum_{k=1}^{2} T_k \sum_{t=1}^{24}\sum_{x=1}^{N_D} C_{x,i}^f(t)$ ◆**购电** $C_G = \sum_{k=1}^{2} T_k \sum_{t=1}^{24} (C_P C_{GP,t} - C_S C_{SP,t})$ ◆**环境** $C_E = \sum_{k=1}^{2} T_k \sum_{t=1}^{24}\sum_{j=1}^{m}\sum_{x=1}^{N_D} R_j K_j^x P_e^x(t)\Delta$

约束条件

1）支路功率概率约束： $P\left\{P_k(x,\xi) \le P_k^{\max}\right\} \ge \beta_P \qquad k \in \Omega_{\text{line}}$

2）节点电压概率约束： $P\{U_i^{\min} \le U_i(x,\xi) \le U_i^{\max}\} \ge \beta_U, i \in \Omega_{node}$

用户侧综合能源系统互联规划

约束条件

安装容量约束

$$\begin{cases} C_{j,s}^{\min} \le C_{j,s} \le C_{j,s}^{\max} \\ \bar{\varphi}_{r,j,k}^{\min} \le \bar{\varphi}_{r,j,k} \le \bar{\varphi}_{r,j,k}^{\max} \end{cases}$$

能量单元的出力/传输容量约束

$$\begin{cases} x_{t,j,s}(C_{j,s}\chi_{j,s}^{\min}) \le Q_{t,j,s}^{\text{out}} \le x_{t,j,s}(C_{j,s}\chi_{j,s}^{\max}) \\ x_{t,r,j,k}(\bar{\varphi}_{r,j,k}\chi_{r,j,k}^{\min}) \le q_{t,r,j,k}^{\text{start}} \le x_{t,r,j,k}(\bar{\varphi}_{r,j,k}\chi_{r,j,k}^{\max}) \end{cases}$$

系统能量（电、热、冷）平衡约束

$$p_{t,j}^{\text{L}} = \sum_m p_{t,j,m}^{\text{OUT}} - \sum_n p_{t,j,n}^{\text{in}} + (p_{t,j}^{\text{buy}} - p_{t,j}^{\text{sel}}) + (p_{t,j}^{\text{dis}} - p_{t,j}^{\text{ch}}) + (\sum_k p_{t,k,j}^{\text{end}} - \sum_k p_{t,j,k}^{\text{start}})$$

$$h_{t,j}^{\text{L}} = \sum_m h_{t,j,m}^{\text{OUT}} - \sum_n h_{t,j,n}^{\text{in}} + (h_{t,j}^{\text{dis}} - h_{t,j}^{\text{ch}}) + (\sum_k h_{t,k,j}^{\text{end}} - \sum_k h_{t,j,k}^{\text{start}})$$

$$c_{t,j}^{\text{L}} = \sum_m c_{t,j,m}^{\text{OUT}} + (c_{t,j}^{\text{dis}} - c_{t,j}^{\text{ch}})$$

储能单元约束

$$\begin{cases} E_{\text{t}_0,j} = E_{\text{t}_\text{N},j},\ \gamma_1^{\min} C_j^{\text{ES}} \le E_{t,j} \le \gamma_1^{\max} C_j^{\text{ES}} \\ H_{\text{t}_0,j} = H_{\text{t}_\text{N},j},\ \gamma_2^{\min} C_j^{\text{HS}} \le E_{t,j} \le \gamma_2^{\max} C_j^{\text{HS}} \end{cases}$$

0-1变量约束

$$\begin{cases} x_{r,j,k} \le y_{r,j,k} \\ x_{r,k,j} \le y_{r,j,k} \end{cases}$$

$$x_{t,r,j,k} + x_{t,r,k,j} \le 1$$

用户侧综合能源系统互联规划

上层精英保留策略遗传算法

上层规划编码方式

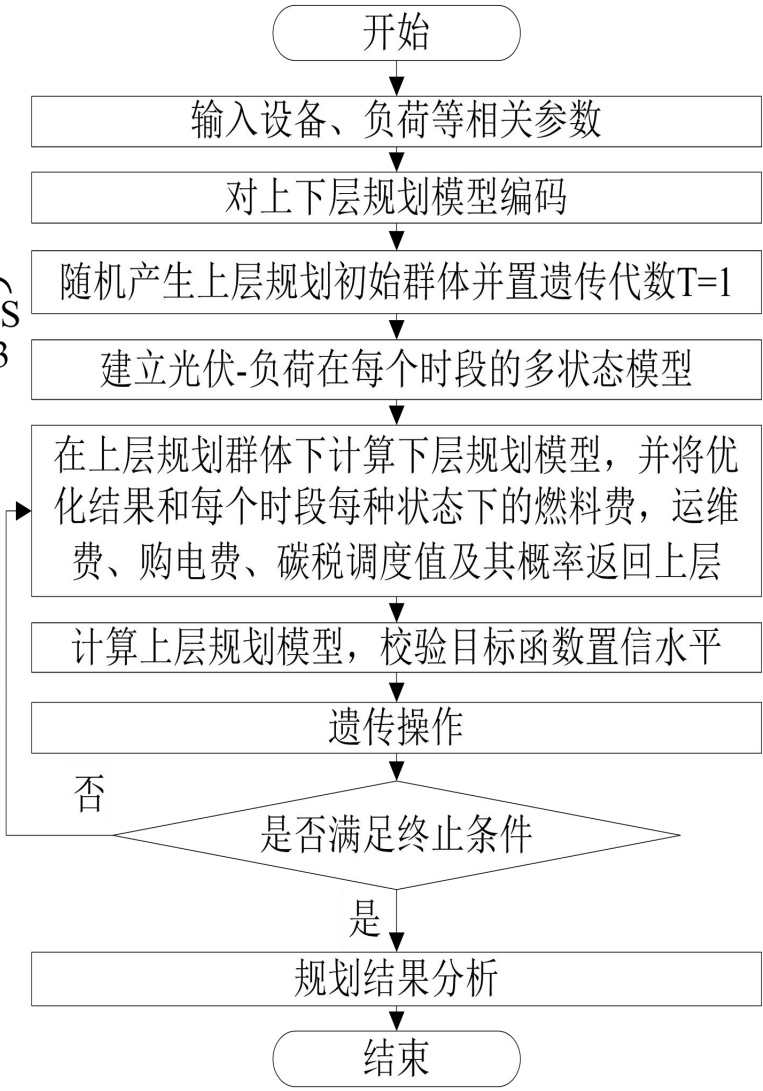
	路由器 1									路由器 j								
GT	GS	PV	AC	HP	EC	ES	HS	···	GT	GS	PV	AC	HP	EC	ES	HS
2	3	3	3	3	3	3	3		2	3	3	3	3	3	3	3

下层规划采用分支定界法

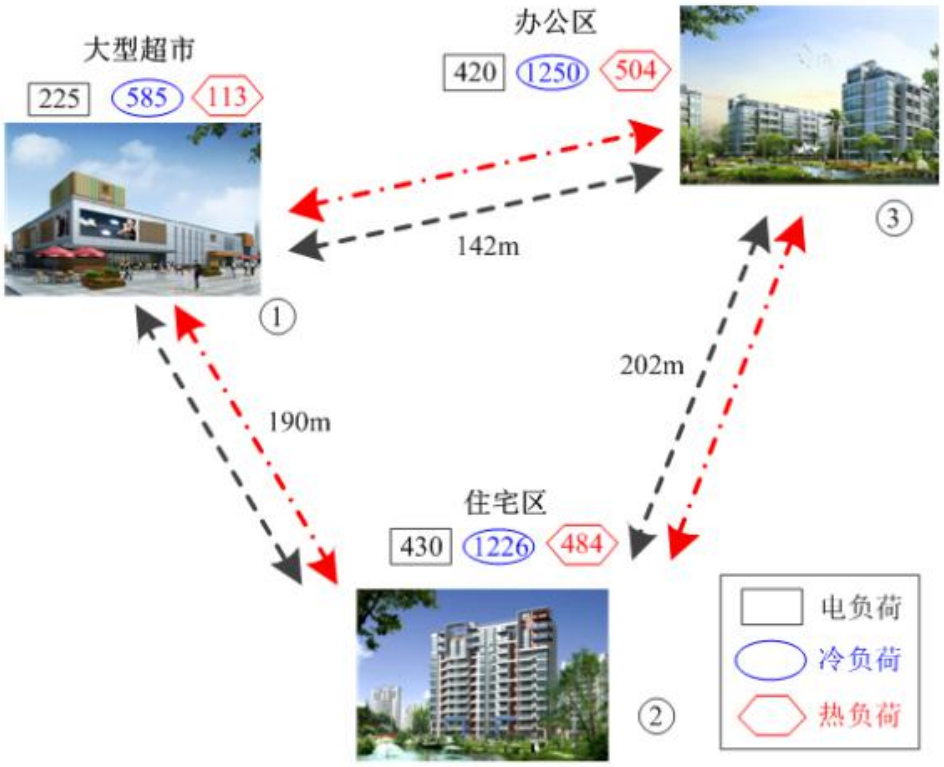
下层动态经济调度为0-1混合整数线性规划模型，本文采用分支定界法对其求解。

$$\begin{cases} \min \quad \mathbf{c}^T\mathbf{x} \\ s.t. \quad \mathbf{Ax}=\mathbf{b} \\ \qquad x_{\min} \le x_i \le x_{\max}, i \in \mathbf{I} \\ \qquad x_j \in \{0,1\}, j \in \mathbf{J} \end{cases}$$

求解算法



用户侧综合能源系统互联规划



方案1：传统供能方式，即配网供电，区域锅炉房供热，电空调供冷；

方案2：常规冷热电联供系统，燃气轮机产电和热，吸收式制冷机可将余热化为冷，电制冷机供冷；

方案3：各路由器间无网络连接，只负责所在局域网供能；

方案4 （本文方法） ：各路由器可通过电网和热网连接。

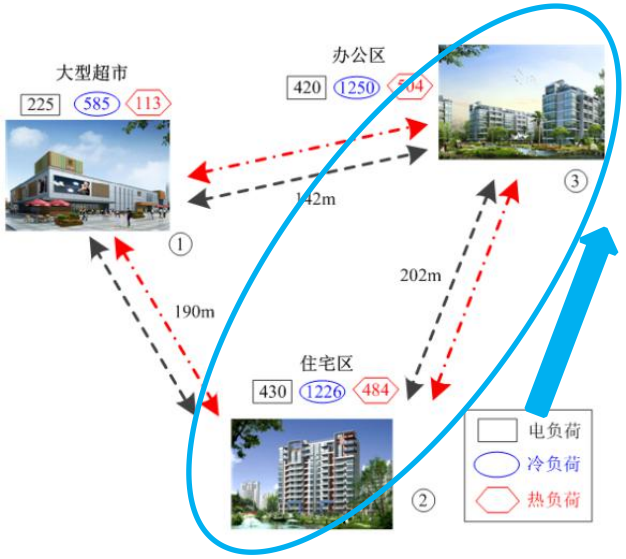
用户侧综合能源系统互联规划

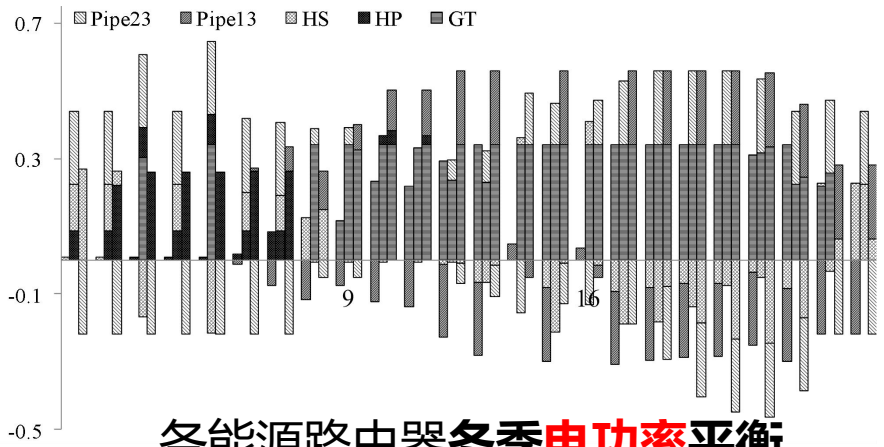
费用/万元	情形 1	情形 2	情形 3	情形 4
投资	50.57	139.64	204.33	180.05
运维	9.06	13.81	12.07	12.37
燃料	83.60	316.66	233.02	269.02
配网	616.65	210.54	136.43	77.91
碳税	172.35	111.42	83.76	72.97
合计	932.23	792.07	669.61	612.32

设备/（kW）	情形 1			情形 2			情形 3			情形 4		
	超市	住宅	办公	超市	住宅	办公	超市	住宅	办公	超市	住宅	办公
燃机	0	0	0	200	200	400	200	200	200	200	200	200
锅炉	200	500	600	200	400	200	0	0	0	0	0	0
光伏	0	0	0	0	0	0	140	420	210	140	490	210
吸收式制冷机	0	0	0	500	1000	1100	400	500	500	400	700	300
热泵	0	0	0	0	0	0	0	400	300	100	100	300
电制冷机	600	1300	1300	100	300	200	100	100	100	0	200	400
电储能/（kWh)	0	0	0	0	0	0	200	500	0	0	0	0
热储能/（kWh）	0	0	0	0	0	0	2000	5000	9000	2000	4000	6000
电网	1-2										0	
	1-3										131（50mm^2）	
	2-3										261（150mm^2）	
热网	1-2										0	
	1-3										216（50mm）	
	2-3										216（50mm）	

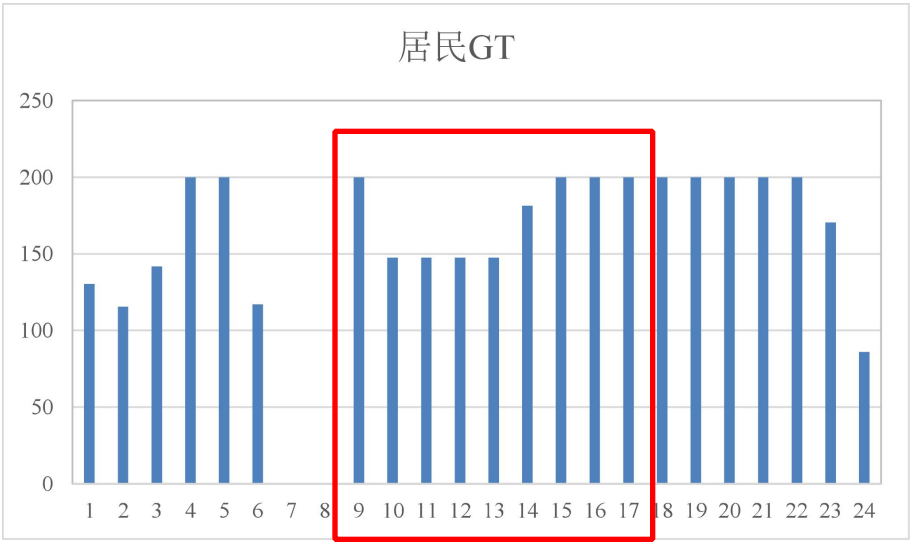
用户侧综合能源系统互联规划

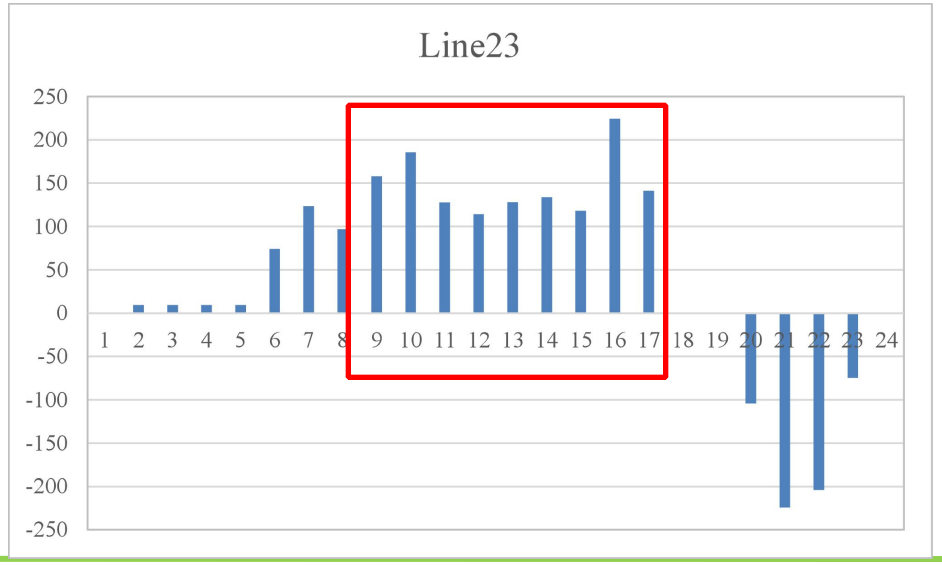
算例分析





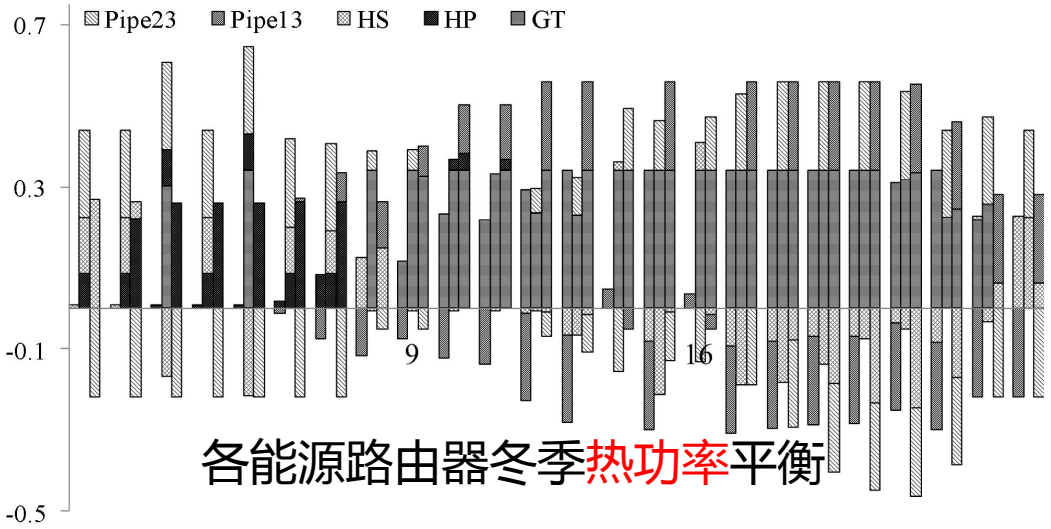
各能源路由器**冬季电功率平衡**





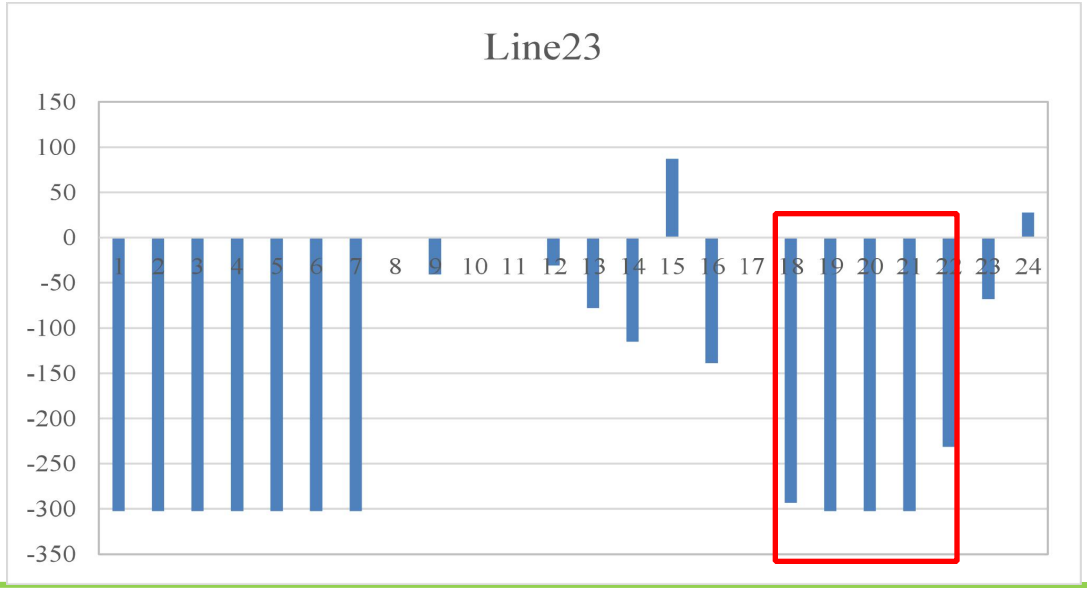
用户侧综合能源系统互联规划

算例分析



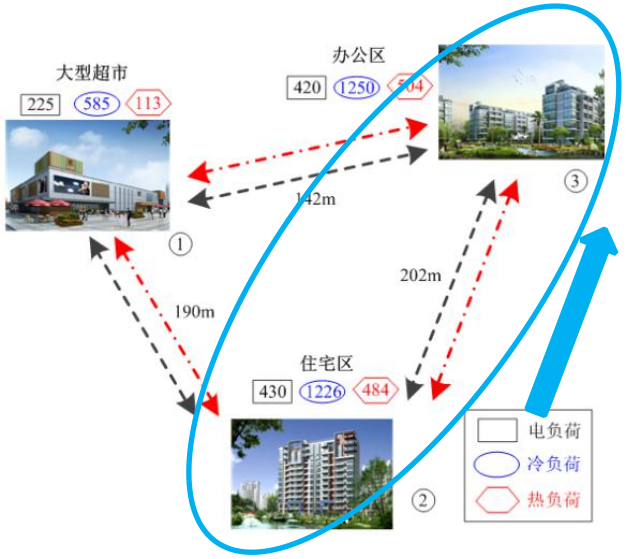
各能源路由器冬季热功率平衡

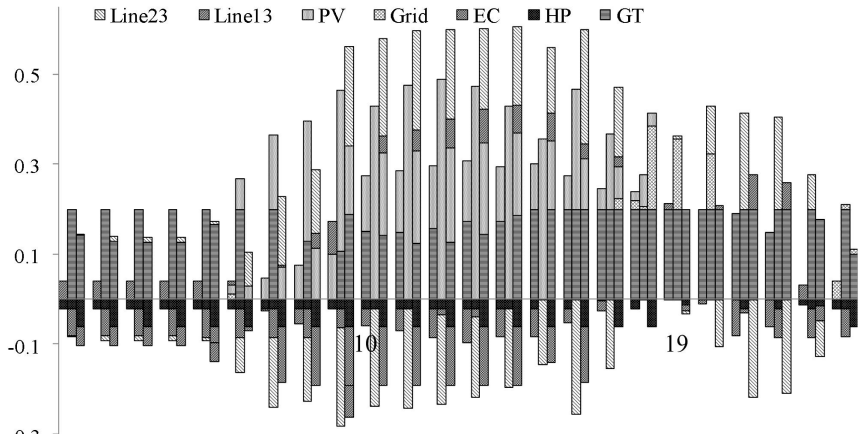
协调互济实现不同区域负荷特性的互补，使电/热负荷峰谷时段不匹配问题得以缓解。



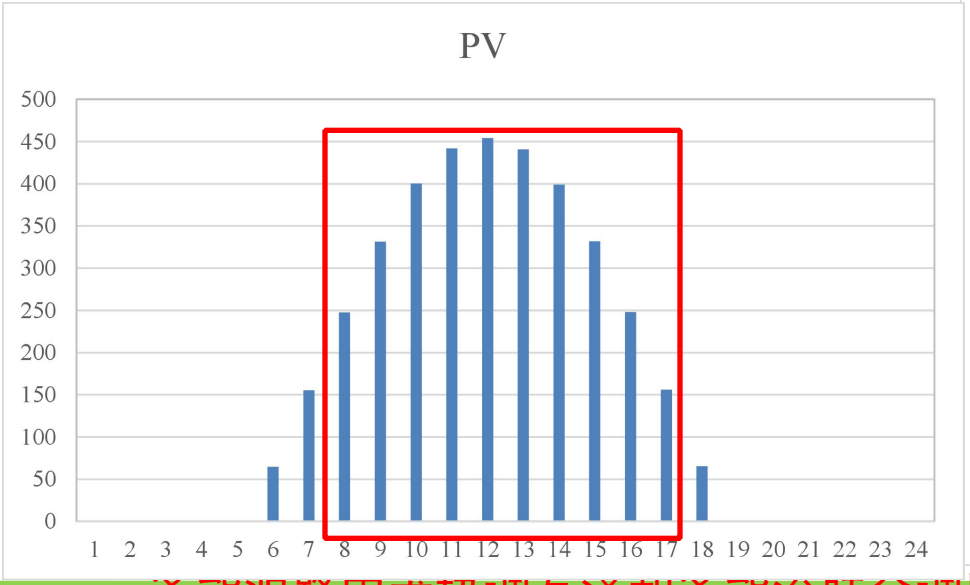
用户侧综合能源系统互联规划

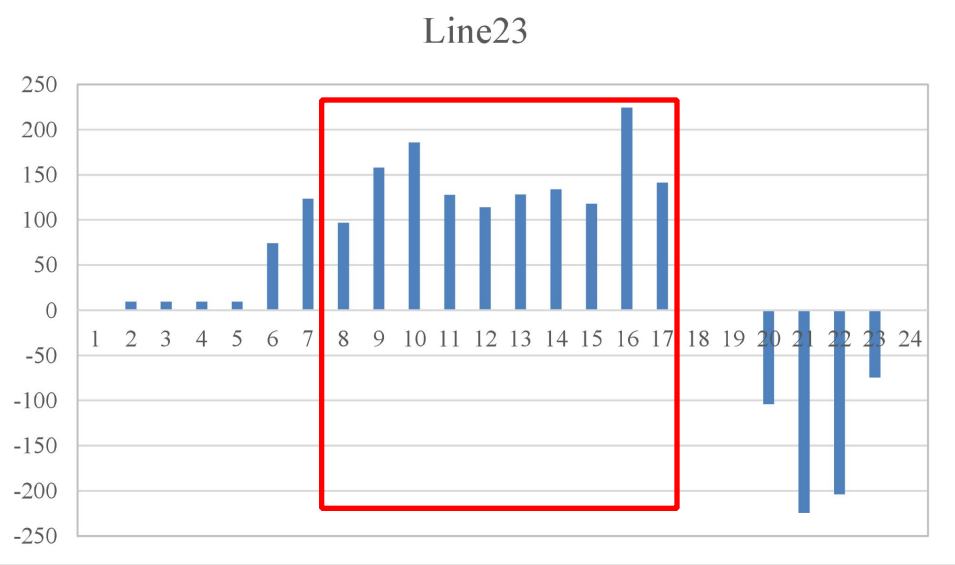
算例分析





各能源路由器夏季电功率平衡



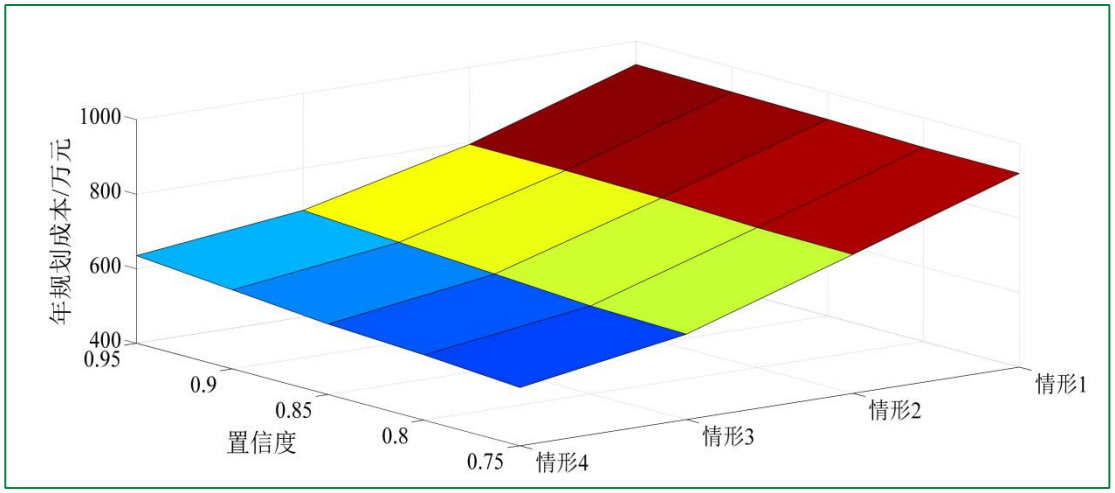


多能源路由器协调互济和多能流联合调度促进了可再生能源的消纳。

用户侧综合能源系统互联规划

算例分析

置信度	情形 1	情形 2	情形 3	情形 4
0.75	920.06	772.76	629.37	556.4
0.80	921.07	776.3	636.29	575.17
0.85	927.607	786.84	653.28	589.4
0.90	932.23	792.07	669.61	612.32
0.95	937.68	793.52	686.78	635.42



$$\sum_{i=1}^{\xi_{\max}} P\left\{f(X,\xi_i) \le \overline{F}_{上}\right\} \ge \alpha$$

$$\sum_{i=1}^{\xi_{\max}} P\left\{f(X,\xi_i) \le \overline{F}_{下}\right\} \ge \alpha$$

➢**小结**

（1）规划中考虑电/热/冷能流联合调度的供能模式，与传统供能模式、常规冷热电联产系统相比，具有更高的经济效益；

（2）多个能源局域网协调互济可有效缓解负荷与燃机热电比不匹配、电热（冷）负荷峰谷时段不匹配等问题，还可实现不同区域负荷特性的互补；

（3）各能源局域网通过网络实现互联比无网络连接更经济，通过电/热多种网络互联比通过单一电网或热网连接更具经济性。

（4）确定置信度为0.9作为本章用户侧综合能源系统规划模型参数的参考取值，对于综合能源系统规划规划等其他类似问题具有一定的参考价值。

4 配售电分离环境下用户侧综合能源系统日前优化调度

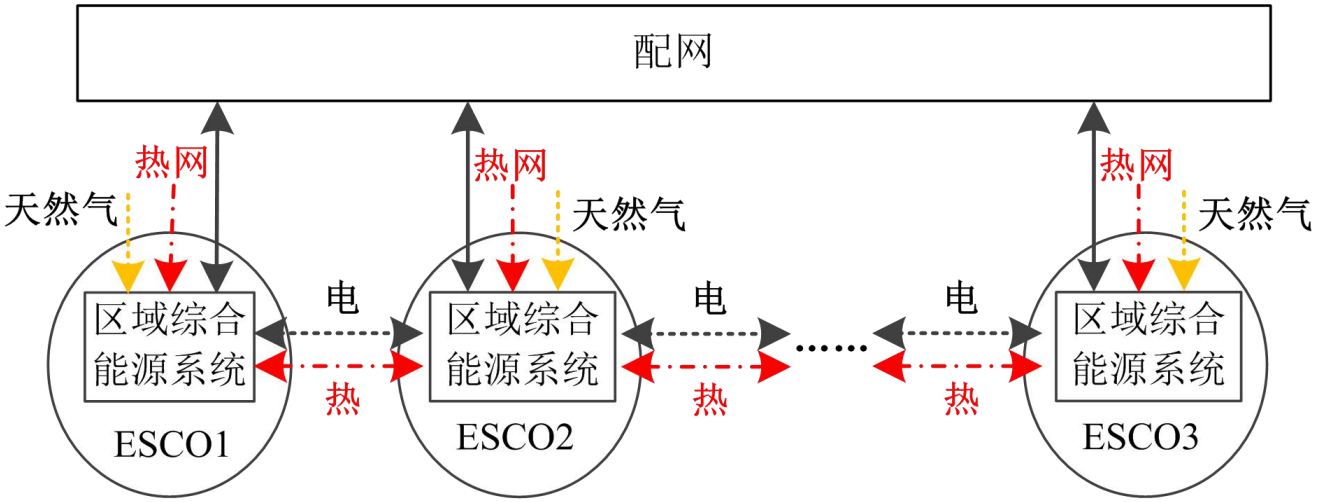
*配售电分离*日前优化调度

思路与特点

基于多个系统及配网互联，以能源服务公司利益最大化为出发点进行了优化调度

1. 配售电分离背景下，能源服务公司进行能源管理
2. 以能源服务公司收益最大化为出发点进行日前调度
3. 考虑预测误差带来的不确定性，采用强化线性区间规划方法进行求解

用户侧综合能源互联网系统结构图



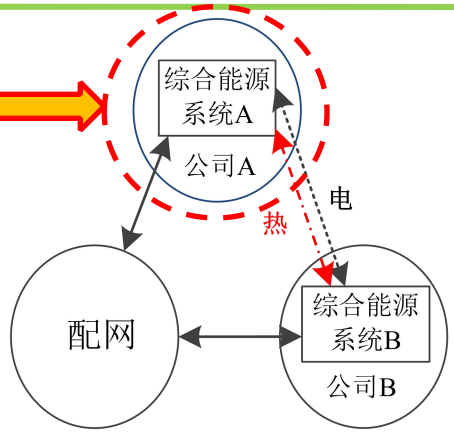
配售电分离日前优化调度

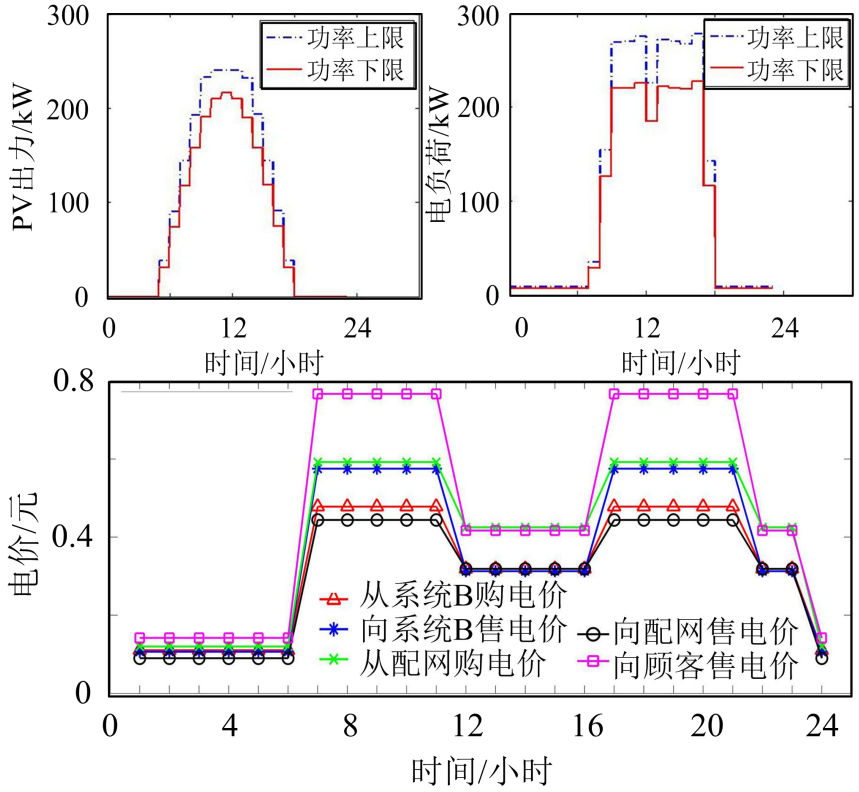
目标函数

目标函数

$$[F]=\max([C_{EN}]-[C_{OM}]-[C_F]-[C_E])$$

售能收益　维护费用　燃料费用　碳税费用





（1）售能收益

$$[C_{EN}]=\sum_{t=1}^{24}([S_t]-[C_t^G]-[C_{t,E}^{ESC}]-[C_{t,H}^{ESC}])$$

（2）维护年费用

$$[C_{OM}]=\sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{N_D}([Q_{t,i}^{\text{out}}]c_i^{\text{OM}})$$

（3）燃料费用

$$[C_F]=\sum_{t=1}^{24}\sum_{i=1}^{N_D}c_t^{gas}\frac{[F_{t,i}]\Delta t}{L}$$

（4）碳税费用

$$[C_E]=\sum_{t=1}^{24}c_{Ctax}(E_f\sum_{i=1}^{N_D}[F_{t,i}]+\frac{E_{grid}}{\eta_{grid}}[P_t^{GP}])$$

配售电分离日前优化调度

约束条件

电/热/冷能量平衡　　储能设备约束

各设备出力约束　　0-1变量约束

（1）能量平衡

$$\sum_{m_e}[P_{t,m_e}^{\mathrm{OUT}}]-\sum_{n_e}[P_{t,n_e}^{cv}]-[P_t^{\mathrm{L}}]+[P_t^{GP}]-[P_t^{SP}]+[P_t^{\mathrm{dis}}]-[P_t^{\mathrm{ch}}]=0 \quad \text{(电)}$$

$$\sum_{m_h}H_{t,m_h}^{\mathrm{OUT}}-\sum_{n_h}H_{t,n_h}^{\mathrm{in}}-H_t^{\mathrm{L}}+(H_t^{\mathrm{dis}}-H_t^{\mathrm{ch}})=0 \quad \text{(热)}$$

$$\sum_{m_c}C_{t,m_c}^{\mathrm{OUT}}-C_t^{\mathrm{L}}+(C_t^{\mathrm{dis}}-C_t^{\mathrm{ch}})=0 \quad \text{(冷)}$$

（2）储能设备约束

$$\begin{cases} E_{\mathrm{t_0}}=E_{\mathrm{t_N}},\ SOC_{\min}^{\mathrm{ES}}\le SOC_t^{\mathrm{ES}}\le SOC_{\max}^{\mathrm{ES}} \\ H_{\mathrm{t_0}}=H_{\mathrm{t_N}},\ SOC_{\min}^{\mathrm{HS}}\le SOC_t^{\mathrm{HS}}\le SOC_{\max}^{\mathrm{HS}} \end{cases}$$

（3）各设备约束

$$x_{t,i}(C_i\beta_i^{\min})\le Q_{t,i}^{\mathrm{out}}\le x_{t,i}(C_i\beta_i^{\max})$$

（4）0-1变量约束

$$\begin{cases} x\le y \\ x_1+x_2\le 1 \end{cases}$$

配售电分离日前优化调度

强化区间线性规划计算流程

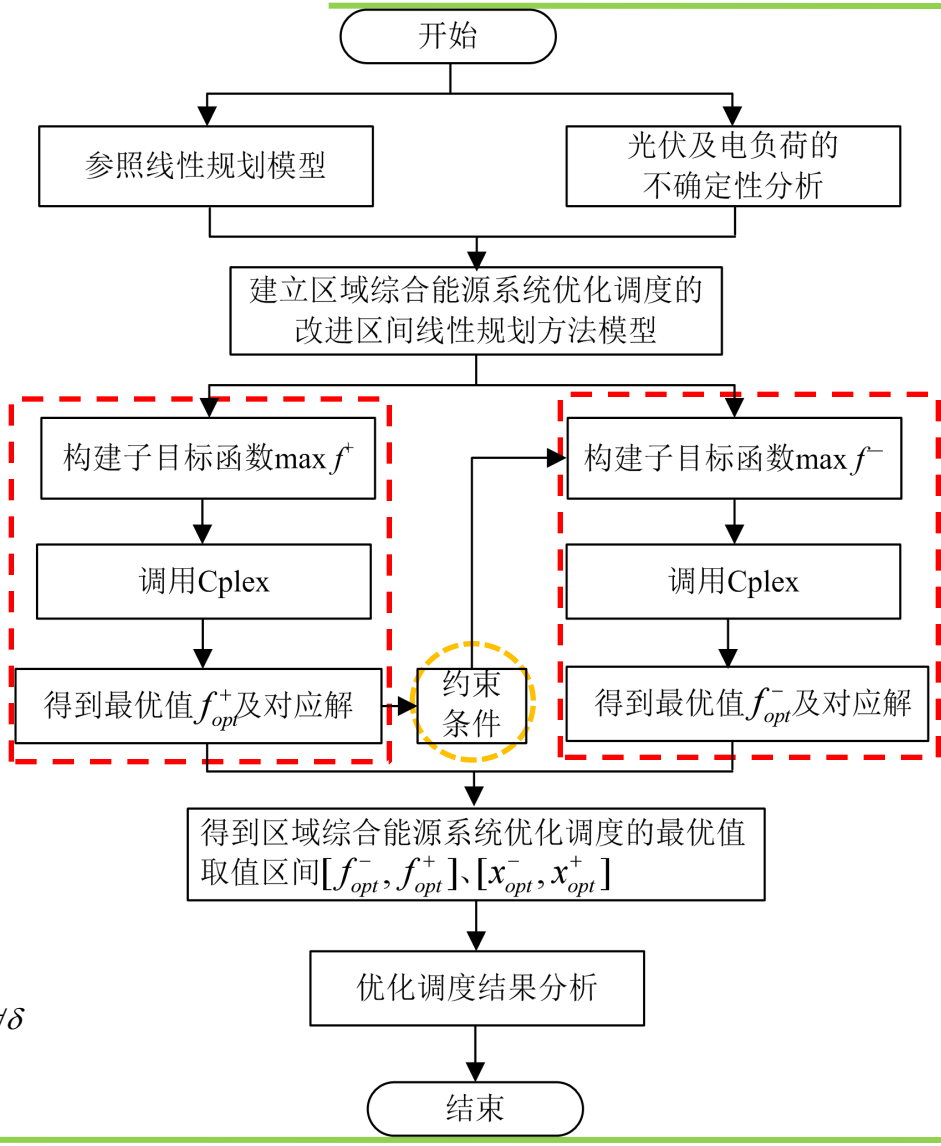
1)求解上限子模型解f^+

$$\begin{cases} \max f^+ = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^+ x_j^+ + \sum_{j=k_1+1}^{n} c_j^+ x_j^- \\ s.t. \sum_{j=1}^{k_1} \left|a_{ij}^{\pm}\right|^- \operatorname{sgn}(a_{ij}^-) x_j^+ + \sum_{j=k_1+1}^{n} \left|a_{ij}^{\pm}\right|^+ \operatorname{sgn}(a_{ij}^+) x_j^- \le b_{ij}^+ \\ x_j^{\pm} \ge 0 \qquad \forall j \end{cases}$$

2）求解下限子模型解f^-

$$\begin{cases} \max f^- = \sum_{j=1}^{k_1} c_j^- x_j^- + \sum_{j=k_1+1}^{n} c_j^- x_j^+ \\ s.t. \sum_{j=1}^{k_1} \left|a_{ij}^{\pm}\right|^+ \operatorname{sgn}(a_{ij}^+) x_j^- + \sum_{j=k_1+1}^{n} \left|a_{ij}^{\pm}\right|^- \operatorname{sgn}(a_{ij}^-) x_j^+ \le b_{ij}^- \\ x_j^{\pm} \ge 0; \forall i, j \\ x_j^- \le x_{j,opt}^+, \quad j = 1,2,...,k_1 \\ x_j^+ \ge x_{j,opt}^-, \quad j = k_1+1, k_1+2, ..., n \\ \sum_{j=k_1-p+1}^{k_1} -(\left|a_{\delta j}^{\pm}\right|^+ x_j^- - \left|a_{\delta j}^{\pm}\right|^- x_j^+) + \sum_{j=n-p+1}^{n} (\left|a_{\delta j}^{\pm}\right|^- x_j^+ - \left|a_{\delta j}^{\pm}\right|^+ x_j^-) \le 0, \forall \delta \end{cases}$$

求解算法

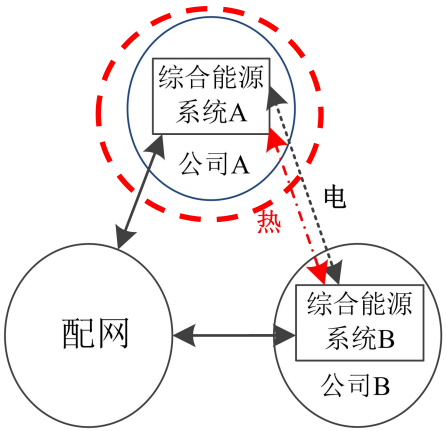


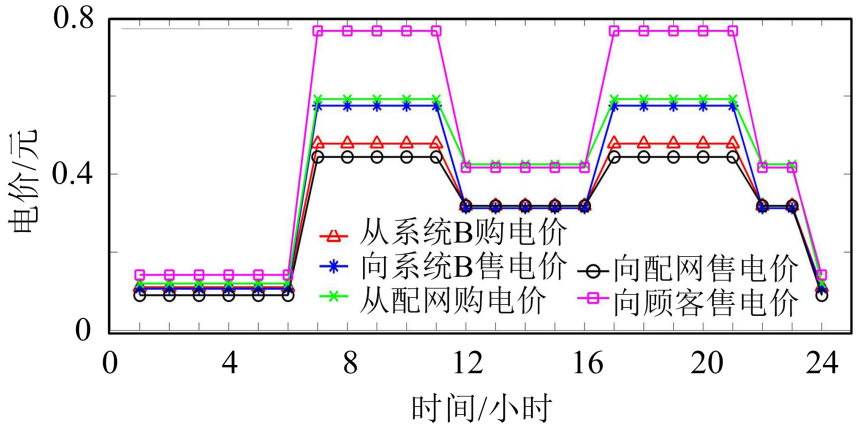
配售电分离日前优化调度

区域综合能源系统互联对能源服务公司经济效益的影响分析

选取北方某办公区为研究对象，能源服务公司A负责该区域能源管理，其与配电公司及能源服务公司B互联，可进行能源交易，并假设光伏出力与负荷的预测波动均为±10%。

情形1：系统A只与配网互联，可与配电网交互电能，区域内部供热、供冷；
情形2：系统A、B及配网互联，系统A与B交互电、热，系统A与配电网交互电。

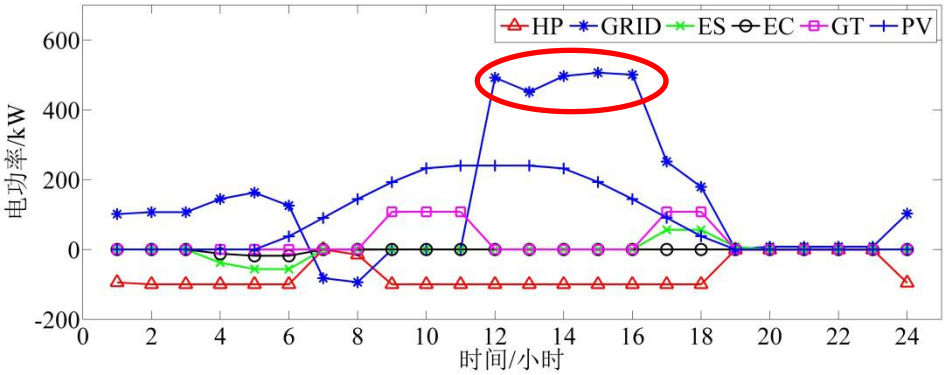




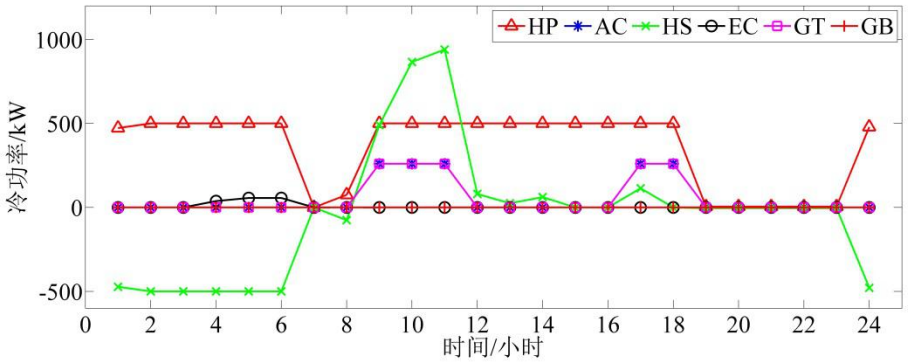
用户侧综合系统不同情形下的日前经济运行结果

费用 元	系统 A 情形 1	系统 A 情形 2
售能效益	[5215.67, 5250.11]	[5747.10, 5865.66]
维护费用	[193.37, 196.32]	[207.12, 207.79]
燃料费用	[564.18, 677.02]	[991.39,1001.27]
碳税费用	[1069.55, 1238.99]	[934.79, 1132.28]
总盈利	[3103.33, 3423.00]	[3405.76, 3732.36]

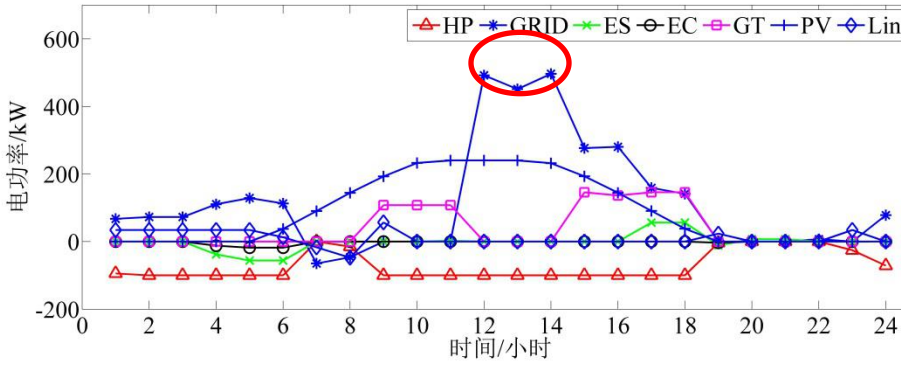
配售电分离日前优化调度



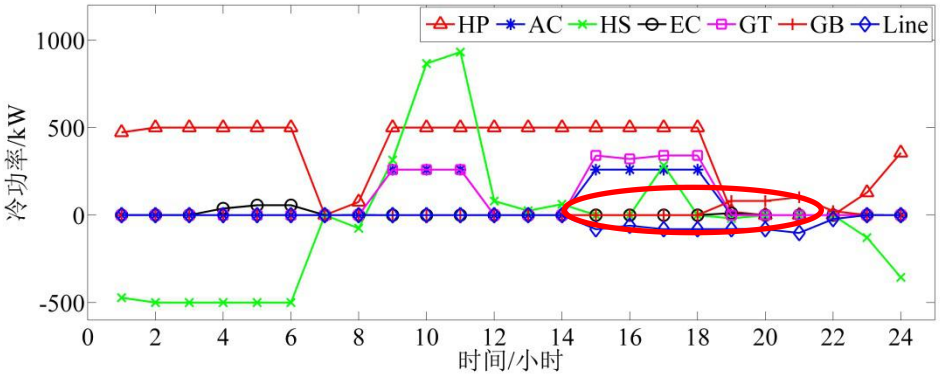
情形1电功率



情形1冷功率



情形2电功率



情形2冷功率

- **综合能源系统之间的互联以及与配网互联可提高区域综合能源系统运行的经济性；**
- **能源交易中的竞争及分时电价对服务公司的经济调度具有引导作用，可提高盈利。**

配售电分离日前优化调度

负荷不确定性程度对综合能源系统运行的影响分析

系统A分别与电网及系统B交易情况

负荷波动%	总盈利区间下限/元	总盈利区间上限/元	总盈利区间宽度/元	总盈利波动%
±10%	3405.76	3732.40	326.64	±4.6%
±15%	3396.00	3752.02	356.02	±5.0%
±20%	3376.05	3771.69	395.63	±5.5%
±25%	3356.10	3791.35	435.25	±6.1%
±30%	3336.06	3812.84	474.78	±6.6%

不同电负荷波动时的日前经济运行结果

费用 元	±10%	±30%
售能效益	[5747.10, 5865.66]	[5829.80, 5870.98]
维护费用	[207.12, 207.79]	[207.34, 209.97]
燃料费用	[991.39,1001.27]	[989.48, 1104.23]
碳税费用	[934.79, 1132.28]	[820.15, 1220.72]

➢结论

（1）强化区间规划模型能够在保证解空间绝对可行的情况下，给出目标函数的适宜区间，区间形式的最优解可以更真实地反映系统中不确定因素对综合能源系统总盈利的影响。

（2）综合能源系统之间的互联以及与配网互联可提高用户侧综合能源系统运行的经济性，提高设备利用率，而且使系统的运行更加灵活、可靠；能源交易过程中存在的竞争关系及分时电价的时段特征对服务公司的经济调度具有引导作用，可提高能源服务公司盈利。

（3）负荷波动的大小会对系统总盈利的不确定性造成直接的影响。当负荷波动绝对值小于15%时，总盈利波动绝对值小于5%；当负荷波动绝对值小于30%时，总盈利波动绝对值小于7%。

5 研究展望

结论与展望

创新点1

考虑了热电耦合关系，采用时序性描述光伏与负荷特性，在规划中结合运行控制，建立了基于热-电混合潮流的二层规划模型，提出了基于改进遗传算法与自适应粒子群算法的二层规划求解方法，研究了用户侧综合能源系统内部分布式能源选址定容及接入规划方法。

创新点2

建立了基于机会约束规划的用户侧综合能源系统互联规划模型，考虑光伏与负荷的不确定性，建立光伏-负荷综合模型，充分考虑多种能源互联、多个供能区域互济及多类能流联合调度，建立二层规划模型，研究了户侧综合能源系统互联下的容量配置及系统间联络线规划的方法。

创新点3

在配售电分离背景下，多个区域综合能源系统及配网互联条件下，以能源服务公司利益最大化为出发点，建立基于区间线性规划的用户侧综合能源系统日前经济优化调度模型。充分考虑 系统中光伏及负荷的预测误差等不确定性因素，利用强化区间线性规划方法进行模型求解。

结论与展望

展望1

源-网-荷协同的综合能源系统规划与运行控制

（需求侧相应、EV新型负荷、温控负荷）

展望2

用户侧综合能源系统的评估指标体系及评价方法

（可靠性、运行风险 。。。。。。）

展望3

计及可靠性的用户侧综合能源系统规划方法研究

展望4

计及风险的用户侧综合能源系统运行控制策略研究

感谢大家聆听！

欢迎交流指正！