

第九届大机组供热改造与优化运行技术2017年会



郑莆燕

分布式供能系统设计与运行优化研究

上海电力学院能源与机械工程学院副教授，从事电厂热力系统和分布式供能系统的性能分析、评价与优化方面的教学和科研工作。主持上海市科委“临港重装备产业园区智能能源生产管理与供应调度研究”、上海市教委“基于用户端的分布式供能系统设计优化研究”等项目的研究。发表论文30余篇，获得发明专利5项、实用新型5项。



EPTCHINA.CN
中国电力科技网

SXEC 苏夏

2017年12月12-13日 中国·徐州



上海电力学院能源与机械工程学院

分布式能源系统设计与运行优化

郑莆燕



研究背景



两级蓄能冷热电联供系统



燃机与用户的匹配



一、研究背景

➤ 分布式供能系统的发展

联产系统	主要技术	能源类型	主要设备		相对节能率	例子
			原动机	热驱动设备		
第一代	常规动力技术与余热利用技术简单集成	一次能源（煤、石油、或少量天然气）	蒸汽轮机	热交换器	5%-10%	热电联产系统
第二代	动力与中温利用构成较好的综合利用	主要是天然气、液化天然气、石油	燃气轮机、内燃机	吸收式制冷机、补燃型制冷机	10%-20%	燃气轮机+双效溴化锂制冷机
第三代	用户需求与系统供应紧密耦合、系统的集成程度更高	天然气、可再生能源（太阳能、风能、地热等）	微型燃气轮机、燃料电池、斯特林机、太阳能电池板	吸收式制冷机、补燃型制冷机、太阳能集热器、热泵	20%-40%	内燃机冷热电联产系统+冷水蓄冷系统

一、研究背景

➤ 四个多样化的特点：

- ▲ 提供给用户的能源多样化：冷、热（不同温度等级）、电
- ▲ 采用的一次能源多样化：天然气、沼气、太阳能、风能
- ▲ 设备选择多样化：原动机、吸收式制冷剂（烟气型、蒸汽型、热水型）、蓄能装置
- ▲ 系统结构存在多种可能

一、研究背景

不同原动机的比较

	适用范围	优点	缺点
蒸汽轮机	大型集中式电站，工业用热电联产	理论上可采用任何燃料；技术成熟，使用寿命长，可靠性强	发电效率低，启动速度慢，部分负荷性能差
燃气轮机	大型热电联产系统（1MW以上）	可靠性高，功率范围大，可与蒸汽透平组成联合循环发电	需要优质燃料，机组价格昂贵，在高海拔或环境温度较高时，性能会大幅下降
内燃机	1MW以下的发电场合	启动速度快，部分负荷性能好，技术成熟具有多种型号，初投资低	振动严重，噪声大，运动部件多，维护周期短，维修费用高，NO _x 排放量大
斯特林机	小型热电联产，尤其适用于家用	几乎可采用任何燃料，排放低，效率高，噪声低	技术不成熟，成本高，回收余热的品位低
燃料电池	家用或小型联产系统	发电效率高，污染物排放少，部分负荷性能好	技术不成熟，成本高，商业化程度低，工程风险高

一、研究背景

不同蓄能方式的比较

技术名称	优点	缺点	适用情况
微型抽水蓄电	储电周期不受限制	效率较低	有高低落差的用户，水资源充足
微型压缩空气蓄电	功率范围广、寿命长、储能时间不受限制、环境保护性强、储能效率高	保温、保压要求高，设计成本较高	多与储热设备综合应用、用于居民楼和商业办公楼
蓄电池蓄电	污染小、稳定性高、对负荷反应快、建造周期短、增扩容改造方便	价格昂贵、寿命短、能量密度低、废弃物化学污染难于消除	可用于各种系统中
自然分层水蓄能技术	技术简单、有效、经济、蓄能效率高	需要很大的空间、增加保温层、增加水处理费用、建设难度大	适用于冬季蓄热、夏季蓄冷的纬度适中地区
冰蓄冷技术	易于布置、除湿能力强	耗电量大、技术要求高	多与空调系统综合使用
飞轮蓄电	灵活性高、能量密度大、技术易实现	蓄能效率低	可用于各种系统

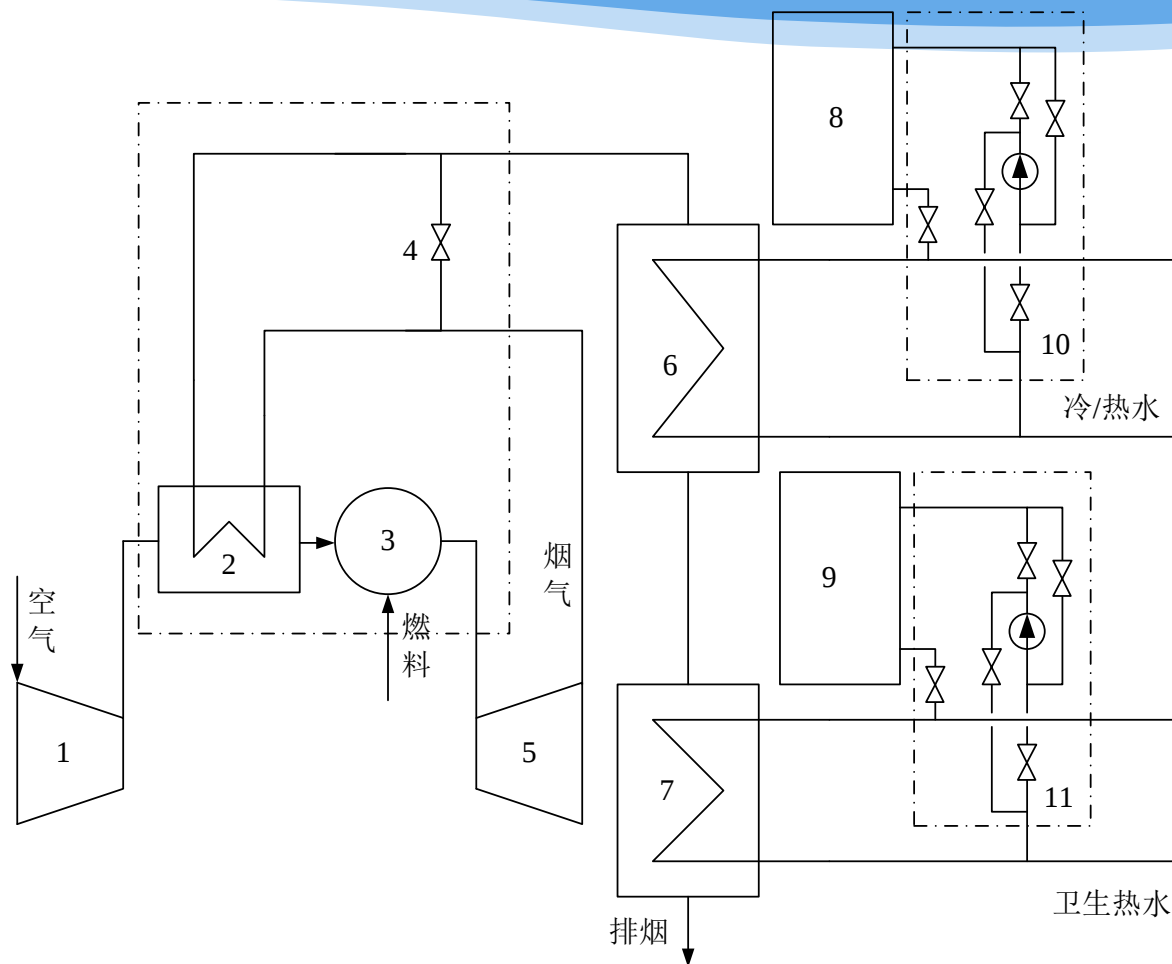
一、研究背景

➤ 存在的问题：

- ⤴ 用户负荷数据的准确性差，与实际运行情况存在较大的差异，缺乏合理的预测模型。
- ⤴ 用户负荷往往呈现出间歇性变化的特点，使设备利用率下降，而且增加低负荷运行时间。
- ⤴ 新能源引入后的，增加了系统运行的不确定性。
- ⤴ 引入储能装置后的分布式供能系统，储热和储电均有所考虑，但只能实现日负荷的调峰。
- ⤴ 设计优化时，须综合考虑系统运行的影响，所以必基于全年运行情况展开设计。

两级蓄能冷热电联供系统

蓄水 + 蓄燃料



- 1-压气机 2-回热器 3-燃烧室 4-旁路调节阀 5-燃气透平 6-烟气型双效溴冷机
7-烟水换热器 8-蓄冷热水箱 9-蓄冷/热水箱 10-控制阀组一 11-控制阀组二

二、两级蓄能冷热电联供系统

➤ 两级蓄能冷热电联供系统

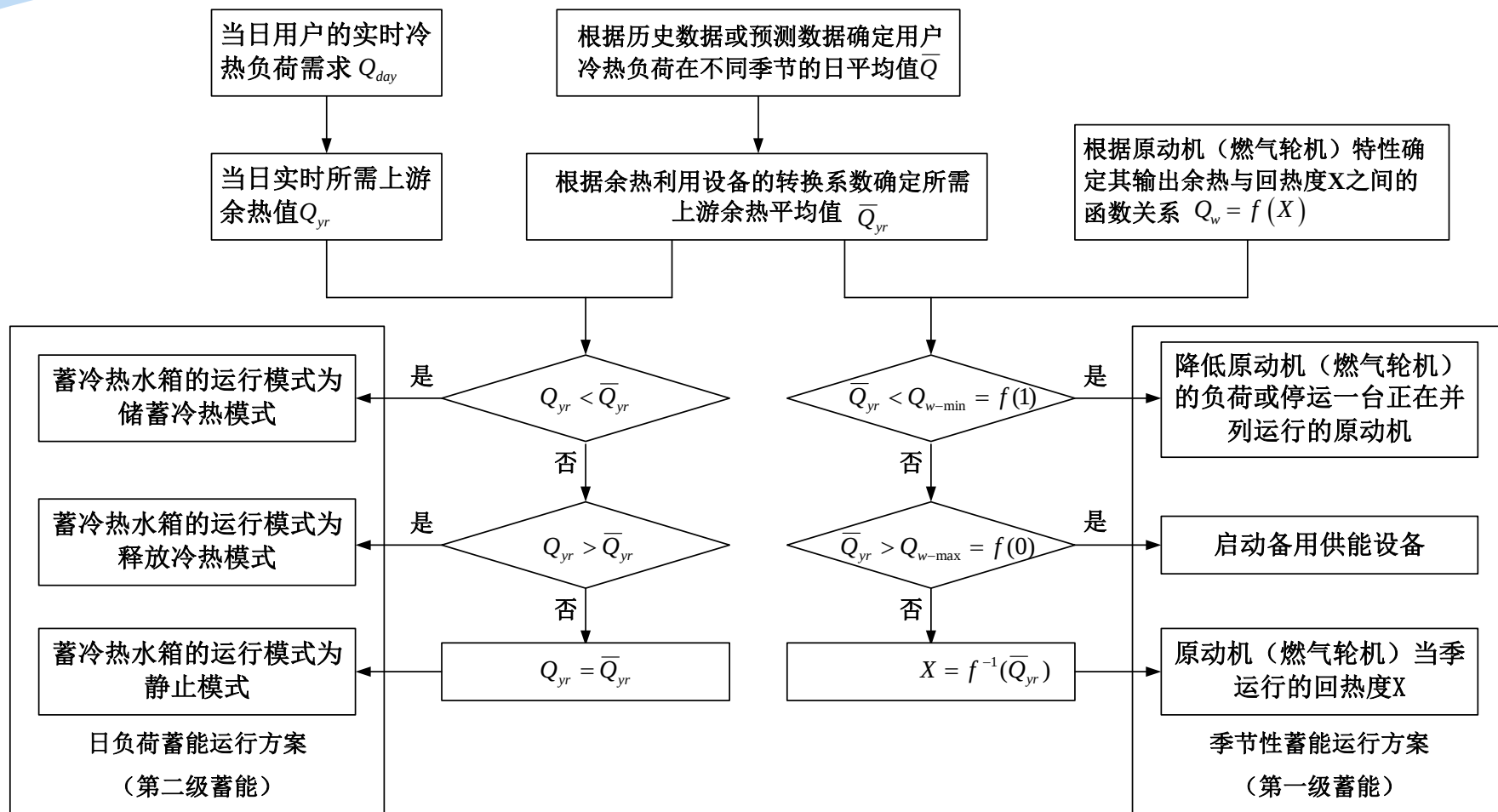
什么是“蓄燃料”？

Bowman-TG80燃气轮机供热参数随回热度的变化情况

回热度	排烟温度/℃	发电效率/%	单台燃气轮机提供的余热/ KW	燃料消耗/g标煤/s
1	278	24.28	255.57	0.113
0.8	352	21.59	327.80	0.127
0.6	426	19.64	400.12	0.139
0.4	484	17.60	457.09	0.155
0.2	547	15.80	519.13	0.173
0	615	14.10	586.32	0.194

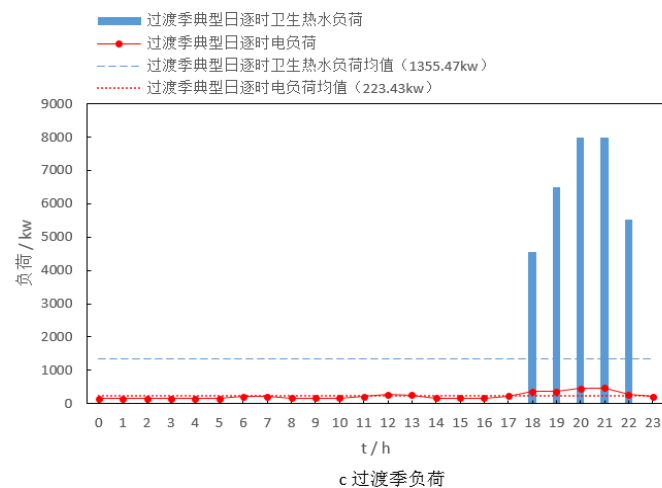
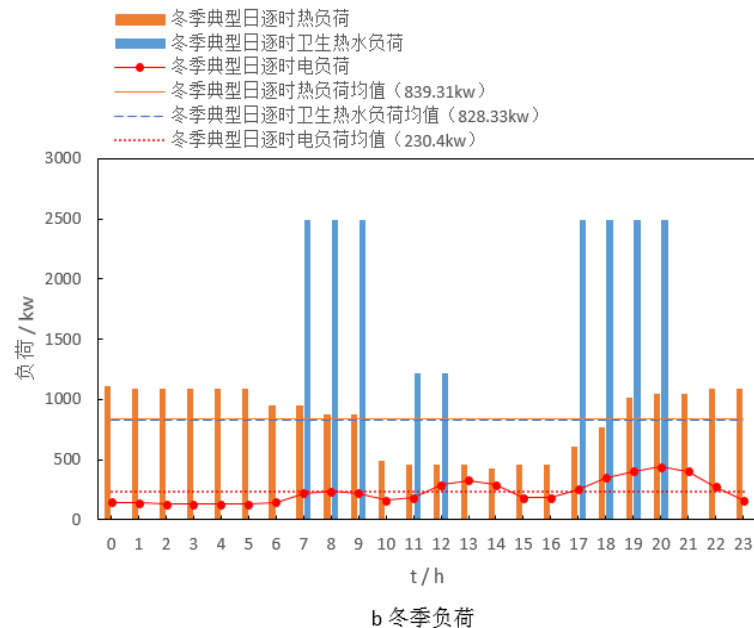
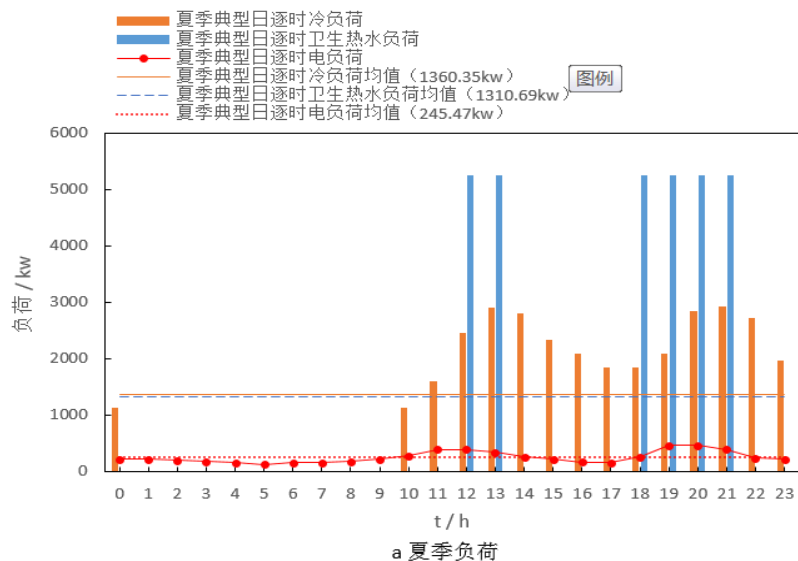
项目	环境温度	环境压力	压比	燃气轮机输出功	燃料流量	燃气轮机效率	尾气温度	空气流量
单位	℃	Mpa		KW	kg/s	%	℃	kg/s
数值	15	0.1	4.3	80	0.845	24.28	278	0.8384

二、两级蓄能冷热电联供系统



二、两级蓄能冷热电联供系统

➤ 以某用户为案例



用户在不同季节的日均冷热负荷 (kW)

季节	冷负荷	热负荷	生活热水
夏	1 360. 35	—	1 310. 69
冬	—	839. 31	828. 33
过渡	—	—	1 355. 47

二、两级蓄能冷热电联供系统

➤ 以某用户为案例

燃气轮机为**BowmanTG80** 型有回热微型燃气轮机，烟气型双效溴冷机制冷系数和制热系数分别为**1.312**和**0.93**，烟水换热器的换热效率为**0.95**（排烟温度为**90℃**，此效率仅考虑散热损失），并假设这三个参数不随负荷变化而变化。

各季节性负荷蓄能运行模式

季节	用户所需 上游余热 /kW	回热器可调联供系统（两级）			回热器关闭联供系统（单级）		
		台数/台	回热度	单台发电 功率/kW	台数/台	回热度	单台发电 功率/kW
夏	2416.53	5	0.0951	80	5	0	78.96
冬	1774.41	5	0.4882	80	4	0	75.71
过渡	1426.81	5	0.7018	80	3	0	78.44

*全年365天，夏季96天，冬季110天，过渡季159天。

二、两级蓄能冷热电联供系统

➤ 以某用户为案例

蓄能水箱运行模式

季节	冷/热负荷水箱		生活热水水箱	
	充能	释能	充能	释能
夏季	0:00-11:00,	22:00-24:00	0:00-12:00,	12:00-14:00,
	23:00-24:00		14:00-18:00,	18:00-22:00
冬季	10:00-19:00	0:00-10:00, 19:00-24:00	0:00-7:00,	7:00-10:00,
			10:00-11:00,	11:00-13:00,
			13:00-17:00,	17:00-20:00
			20:00-24:00	
过度季	—	—	0:00-18:00,	18:00-22:00
			22:00-24:00	

二、两级蓄能冷热电联供系统

➤ 以某用户为案例

两种方案的系统能效比较

方案类型	联产系统全年发电量 /万kw. h	天然气耗量/kg			发电效率/%			全年相对 节能率/%
		夏	冬	过渡	夏	冬	过渡	
两级蓄能系统	350.4	441569	418536	536334	14.97	18.1	20.41	56.2
单级蓄能系统	260.71	464528	408482	457915	14.05	14.04	14.07	53.2

结论：两级蓄能与单级蓄能相比，系统发电量增加，相对节能率更高。

三、燃机与用户的匹配

➤ 有回热的微燃机

微燃机输出余热 Q_w 与回热度 X

- 当 $X = 0$ 时，输出最大余热 $Q_{w\max} = f(0)$
- 当 $X = 1$ 时，输出最小余热 $Q_{w\min} = f(1)$

定义描述微燃机供热能力变化程度的自定义无量纲参数

$$\theta = \frac{Q_{w\min}}{Q_{w\max}} = \frac{f(1)}{f(0)}$$

回热度 X		1	0.8	0.6	0.4	0.2	0	θ
排烟温度 /°C	BowmanTG80 型	278	352	426	484	547	615	0.5143
	CapstoneC30型	275	336	391	453	508	569	0.4273

三、燃机与用户的匹配

➤ 用户需要的上游余热

$$\left\{ \begin{array}{ll} \bar{Q}_{yr,s} = \frac{\bar{Q}_{cs}}{COP} + \frac{\bar{Q}_{hw,s}}{\eta_{hw}} & \text{夏季所需上游余热} \\ \bar{Q}_{yr,w} = \frac{\bar{Q}_{hw}}{\eta_h} + \frac{\bar{Q}_{hw,w}}{\eta_{hw}} & \text{冬季所需上游余热} \\ \bar{Q}_{yr,ts} = \frac{\bar{Q}_{hw,ts}}{\eta_{hw}} & \text{过渡季所需上游余热} \end{array} \right.$$

定义描述用户用热
波动范围的自定义
无量纲特征参数

$$\omega = \frac{\bar{Q}_{yr_{\min}}}{\bar{Q}_{yr_{\max}}}$$

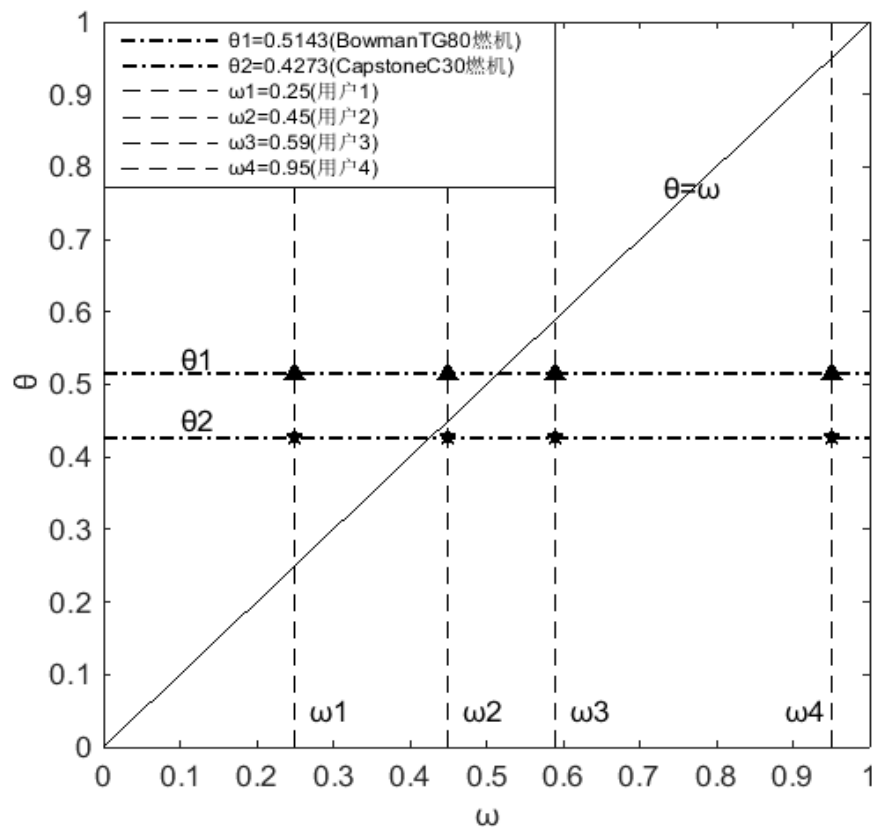
用户	夏季		冬季		过渡季	ω
	冷负荷	生活热水	热负荷	生活热水	生活热水	
1	926.96	223.53	420.3	169.58	223.53	0.25
2	926.96	223.53	420.3	333.76	402.63	0.45
3	1360.35	1310.69	839.31	828.33	1355.47	0.59
4	1696.05	1526.74	1379.94	1241.98	2619.33	0.95

三、燃机与用户的匹配

➤ $\theta - \omega$ 模型

——用以确定燃机型号

- $\theta \leq \omega$ 区域内的用户是微燃机能够全年采用回热调节的用户;
- $\theta > \omega$ 区域内的用户是该微燃机不能全年采用回热调节的用户



$\theta - \omega$ 模型

三、燃机与用户的匹配

➤ Q-n 模型

——用以确定燃机台套数n

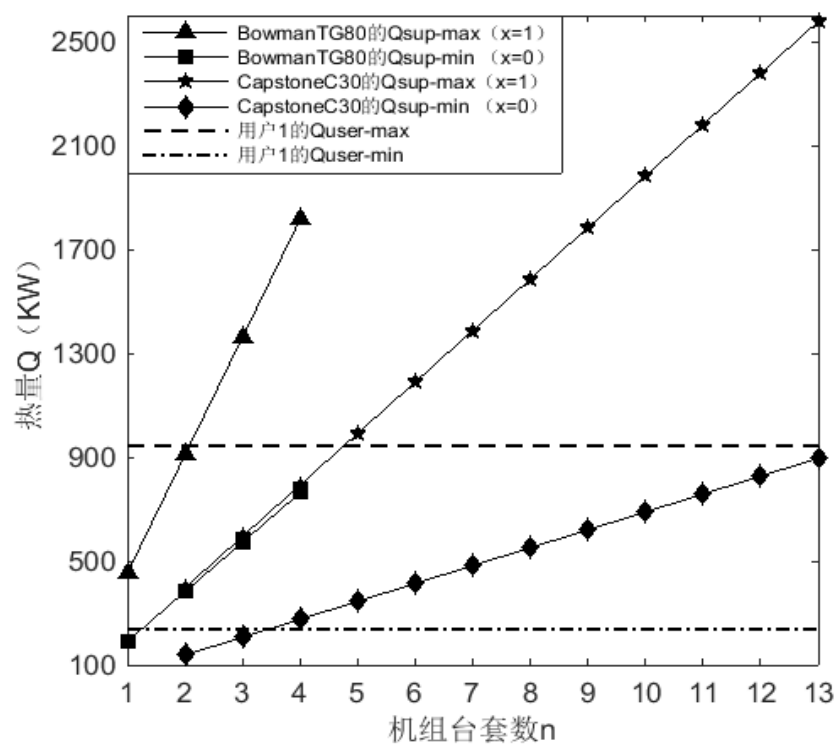
$$\bar{Q}_{yr_{\max}} < n \cdot \left\{ C_{pg} \cdot [q_{mgs(X=0)} + \frac{C_{pg}}{C_{pa}} \cdot \frac{q_{mgs(X=0)} \cdot (T_{w(X=0)} - T_{xj})}{T_{xj} - T_a}] \cdot (T_{xj} - T_w^*) \right\}$$

$$\bar{Q}_{yr_{\min}} > n \cdot [C_{pg} \cdot q_{mgs(X=1)} \cdot (T_{w(X=1)} - T_w^*)]$$

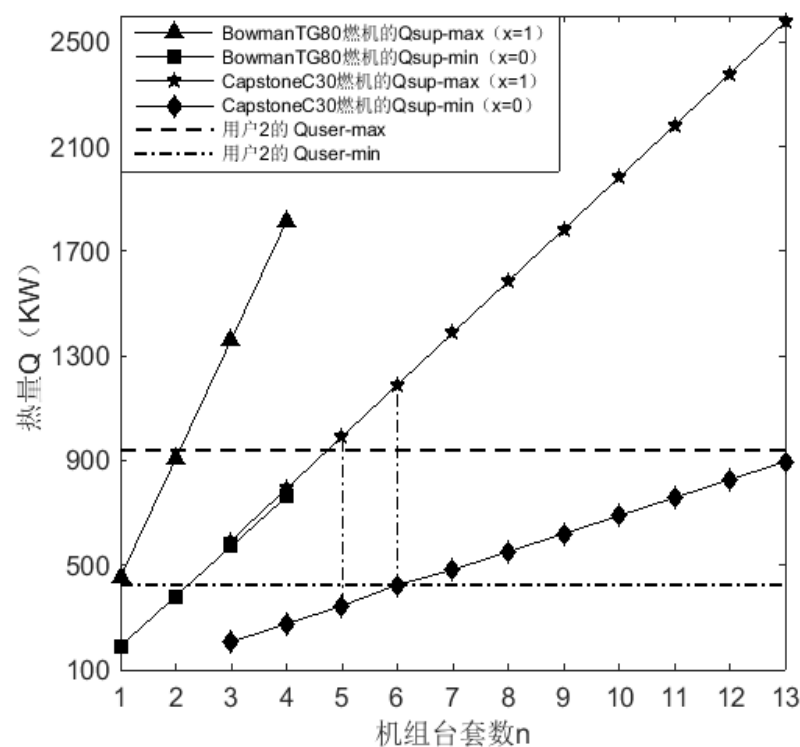
满足上述两个条件的燃机台套数n，在余热供给上均能达到要求。

三、燃机与用户的匹配

➤ Q-n 模型



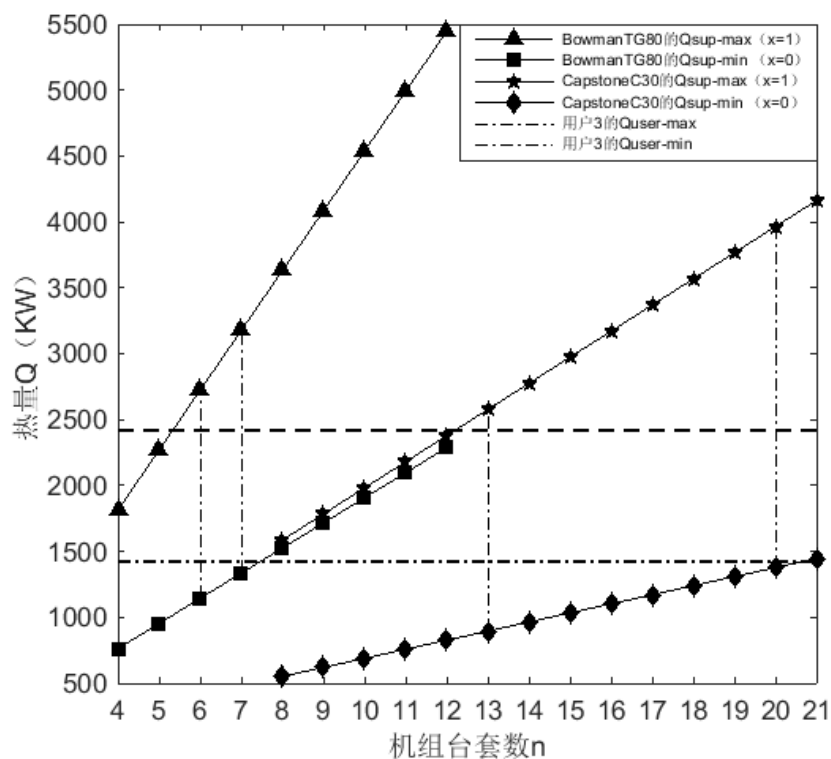
用户1的 Q-n 模型



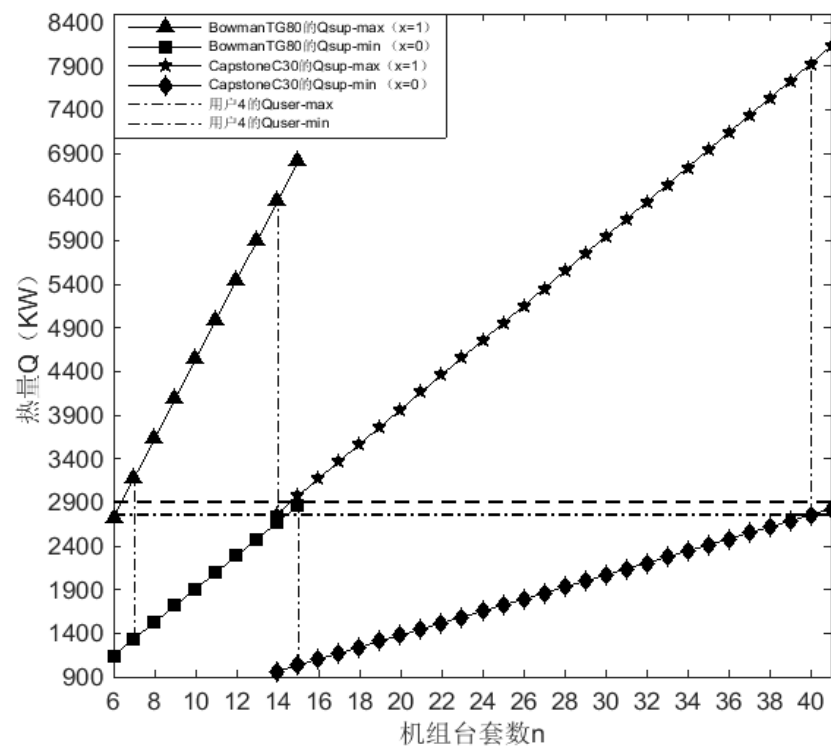
用户2的 Q-n 模型

三、燃机与用户的匹配

➤ Q-n 模型



用户3的 Q-n 模型



用户4的 Q-n 模型

三、燃机与用户的匹配

➤ 以四个不同用户为案例

回热蓄能与回热关闭联供系统选型结果

用户		2	3	4		3	2	3	4		3
微燃机型号		CapstoneC30			BowmanTG80		CapstoneC30			BowmanTG80	
		回热蓄能联供系统（两级）					回热关闭联供系统（单级）				
台数/台	夏	5	13	15	7	6	5	13	15	7	6
	冬	5	13	15	7	6	5	9	15	7	4
	过渡	5	13	15	7	6	3	8	14	7	4
回热度X	夏	0.0745	0.0940	0.0355	0.1273	0.1718	0	0	0	0	0
	冬	0.2927	0.4828	0.0925	0.1874	0.5857	0	0	0	0	0
	过渡	0.8900	0.6933	0.1103	0.2061	0.8097	0	0	0	0	0
单台发电功率 /kw	夏	30	30	30	80	80	27.06	26.42	28.33	67.39	64.02
	冬	30	30	30	80	80	19.93	29.32	26.47	62.84	75.99
	过渡	30	30	30	80	80	14.94	24.48	29.26	61.42	50.53
全年发电量*/ kw. h		131.4	341.64	394.2	490.56	420.48	74.58	223.53	359.05	388.88	245.88

三、燃机与用户的匹配

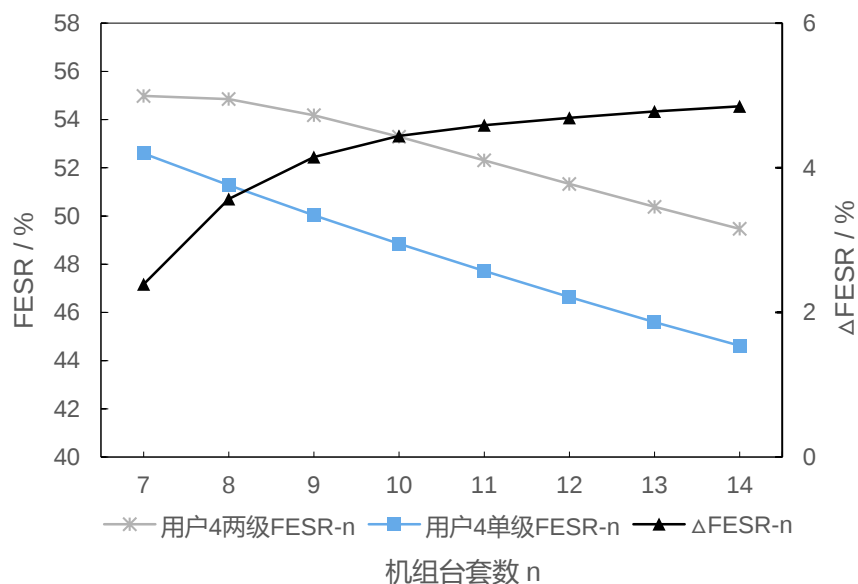
➤ 以四个不同用户为案例

n最小的分布式供能系统能效比较

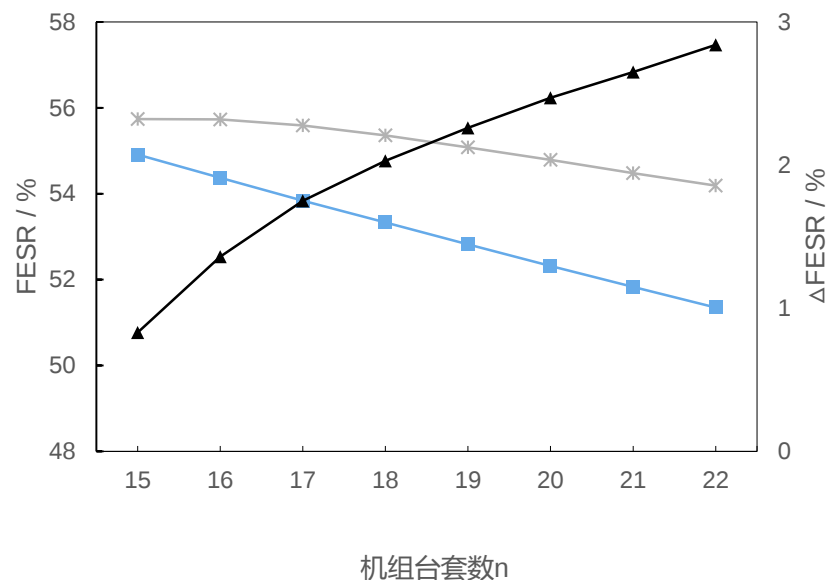
用户		2	3	4		3	2	3	4		3
微燃机型号		CapstoneC30			BowmanTG80		CapstoneC30			BowmanTG80	
		回热蓄能联供系统（两级）					回热关闭联供系统（单级）				
天然气耗 量/kg	夏	196773	505678	604367	609122	509086	194601	499082	599691	594379	494784
	冬	198275	459986	669163	674616	468160	189059	420739	660543	654574	417786
	过渡	187213	576678	957042	965005	602141	143392	487347	944962	934190	481423
发电效率 /%	夏	13.17	13.32	12.87	15.19	15.58	12.01	11.89	12.24	13.12	12.83
	冬	14.98	16.79	13.32	15.72	19.42	10.43	12.42	11.9	12.73	13.78
	过渡	22.93	19.36	13.46	15.88	21.82	8.95	11.5	12.41	12.6	11.49
各季节相 对节能率	夏	0.19	0.433	0.422	0.418	0.428	0.172	0.417	0.416	0.396	0.399
	冬	0.587	0.579	0.59	0.582	0.569	0.554	0.556	0.579	0.559	0.538
	过渡	0.556	0.568	0.594	0.586	0.551	0.479	0.529	0.587	0.561	0.497
全年相对节能率		0.491	0.535	0.557	0.55	0.524	0.445	0.508	0.549	0.526	0.484

三、燃机与用户的匹配

➤ 以四个不同用户为案例



BowmanTG80燃机回热蓄能 (用户4)



CapstoneC30燃机回热蓄能 (用户4)

台套数n对分布式供能系统能效的影响

结论：在有蓄能的条件下，发电量增加，发电节能效果明显，两级蓄能的节能效果更好；两级蓄能相对于单级蓄能节能效果的增加幅度与燃机类型有关。

三、燃机与用户的匹配

➤ 以四个不同用户为案例

系统年净运行总成本 $C_{nrd} = C_{total} - C_{sp}$

$$C_{total} = C_i + C_m + C_{CCHP}$$

$$C_{CCHP} = C_e + C_f$$

C_{total} : 两级调峰联产系统年运行总成本, 万元;

C_{sp} : 两级调峰联产系统年上网电收益, 万元;

C_i : 两级调峰联产系统初投资年折算值, 万元;

C_m : 两级调峰联产系统年维护成本, 万元;

C_{CCHP} : 两级调峰联产系统年运行能耗成本, 万元;

C_e : 两级调峰联产系统年购电成本, 万元;

C_f : 两级调峰联产系统年消耗燃料成本, 万元;

三、燃机与用户的匹配

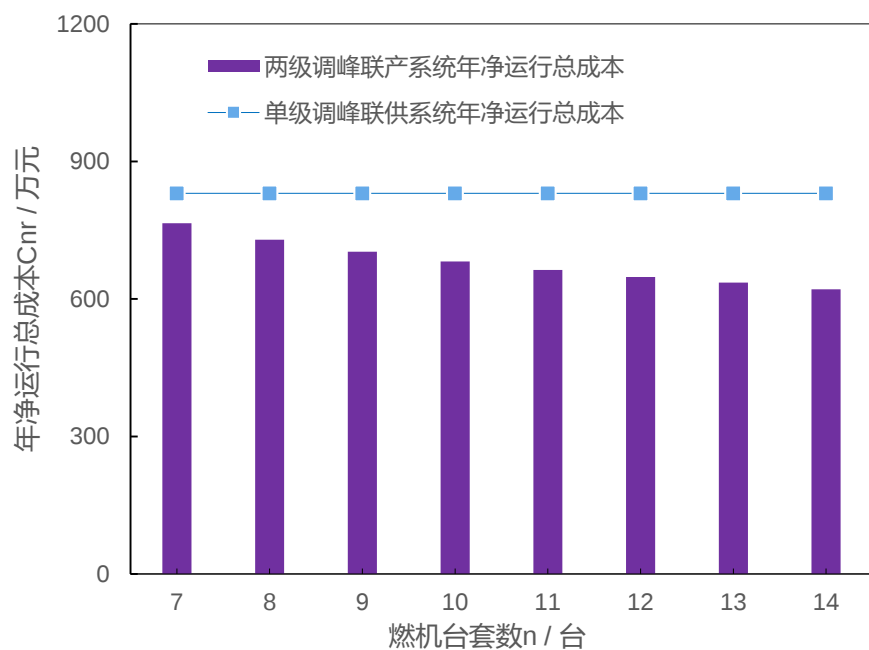
➤ 以四个不同用户为案例

n最小的分布式供能系统经济性比较

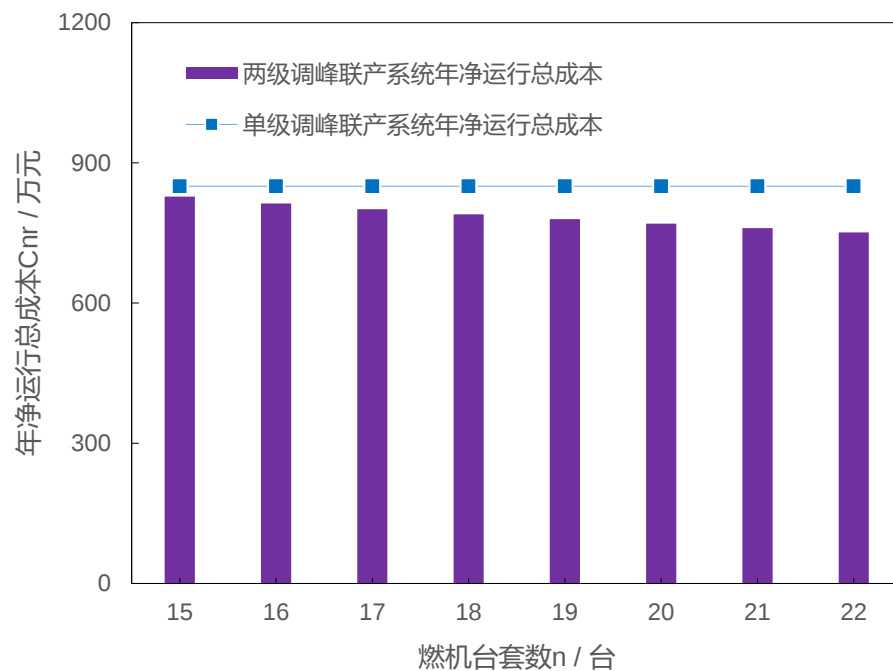
燃机型号		CapstoneC30			BowmanTG80	
用户		2	3	4	3	4
年净运行总成本/ 万元	单级蓄能	408.63	430.20	850.01	418.16	830.34
	两级蓄能	384.48	377.27	827.77	339.81	765.08
年净运行总成本降低值/万元		24.15	52.93	22.24	78.34	65.26

三、燃机与用户的匹配

➤ 以四个不同用户为案例



BowmanTG80燃机回热蓄能（用户4）



CapstoneC30燃机回热蓄能（用户4）

台套数n对分布式供能系统经济性的影响

结论：在有蓄能的条件下，发电量增加，售电获得的经济效果明显，两级蓄能的经济性更好。



上海电力学院能源与机械工程学院

谢谢！

郑莆燕