



EPTCHINA.CN
中国电力科技网

SXEC 苏夏

大机组供热改造与优化运行技术2019年会



戈志华

华北电力大学教授、博士生导师，主持和完成国家科技支撑计划课题“火电机组汽轮机低位能梯级供热技术研究”、北京市科技计划课题“大中型火电空冷机组高效利用低品位余热系统技术研究”，围绕电厂余热回收、低位能梯级加热及高背压供热汽轮机安全性等方面发表多篇学术论文，授权发明专利6项。

燃气蒸汽联合循环热电联产机组多维运行特性

主办单位：中国电力科技网 协办单位：江苏苏夏能源集团 2019年9月25-27日 中国·石家庄

2009 Qingdao / 2010 Nanjing / 2011 Yangzhou / 2012 Wuxi / 2013 Suzhou / 2014 Xian / 2015 Guangzhou / 2016 Shenyang / 2017 Xuzhou / 2018 Changshu / 2019 Shijiazhuang



燃气-蒸汽联合循环热电联产 多维运行方式负荷特性研究

指导老师：戈志华教授



目录

- PART 01 研究背景
- PART 02 联合循环热电联产运行方式
- PART 03 多维运行方式负荷特性
- PART 04 多维运行方式热经济性
- PART 05 供热季机组调峰性能



01 研究背景



燃气-蒸汽联合循环热电联产

污染物排放少、综合效率高、耗水量低、占地面积小、运行调节方便、灵活性高



01 研究背景

北京市人民政府文件

京政发[2017]18号

北京市人民政府关于印发《北京市“十三五”时期能源发展规划》的通知

各区人民政府，市政府各委、办、局，各市属机构：

现将《北京市“十三五”时期能源发展规划》印发给你们，请认真贯彻执行。

北京市人民政府

2017年6月23日



余热和可再生能源供热面积
达到7000万平方米

清洁供热比重 达到95%以上

2020年北京市城乡供热布局示意图

北部和西北部七个区及大兴区以燃气为主，新能源和可再生能源为辅供热体系。

中心城以燃气、热电联产、余热为主，新能源和可再生能源为补充供热体系。



通州和房山区以外埠热源、燃气为主，新能源和可再生能源为辅供热体系。



01 研究背景

燃气热电机组
替代传统燃煤
供热并入电网

大规模风、光、
水等可再生能
源电并入电网

安全? 节能?

天然气耗率

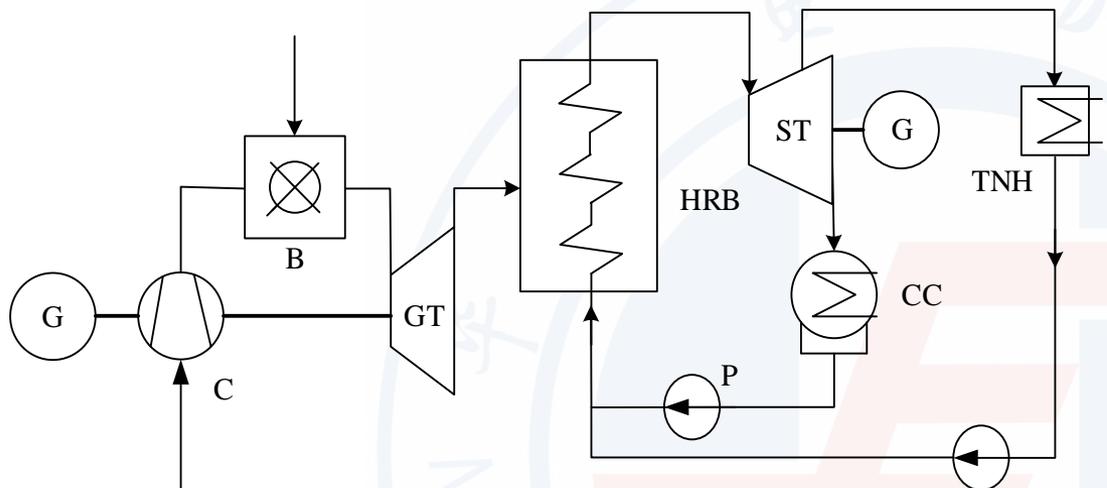
天然气的需求量猛增->“气荒”->天然气价格大涨->我国天然气储气库刚起步,只能加大进口->寻求天然气耗率低的最佳运行方式

热电比

供热机组多以热定电->热负荷高时发电多->占据可再生能源上网空间,弃风、弃水、弃光->不利于并网运行的安全稳定->寻求热电比小的最佳运行方式

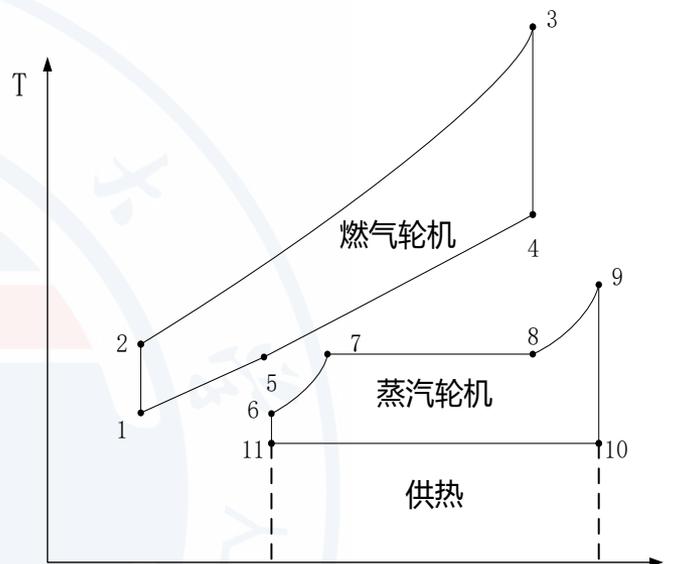


02 联合循环热电联产运行方式



C-压气机; B-燃烧室; GT-燃气轮机; HRSG-余热锅炉;
ST-蒸汽轮机; CC-凝汽器; P-给水泵; G-发电机; TNH-热网加热器

燃气-蒸汽联合循环热电联产系统图

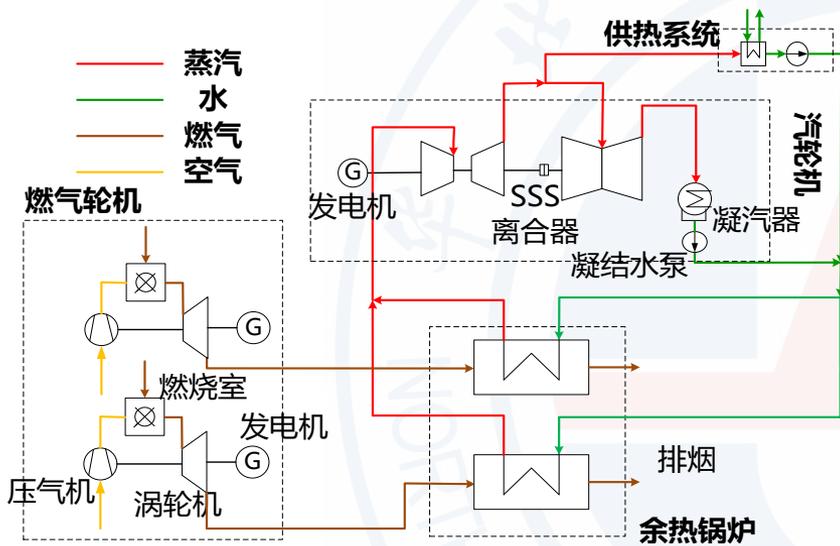


联合循环热电联产理想T-S曲线

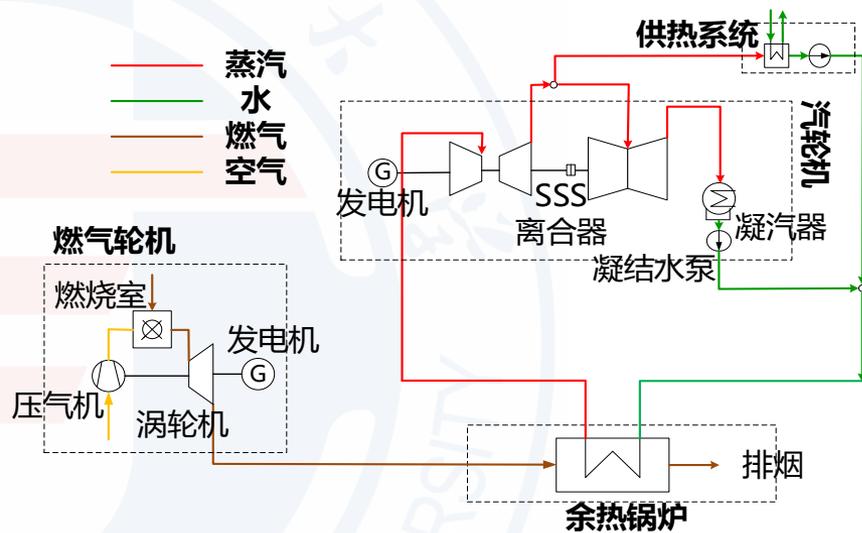
联合循环热电联产系统中，燃烧所释放的能量首先经过燃气轮机循环发电，排气的余热能用作蒸汽循环的热源，经蒸汽轮机循环利用发电后，再用于供热。整体上能量经过三个阶段梯级利用，总效率得到了提升。

02 联合循环热电联产运行方式

联合循环-底循环驱动方式



“二拖一”方式热力系统图

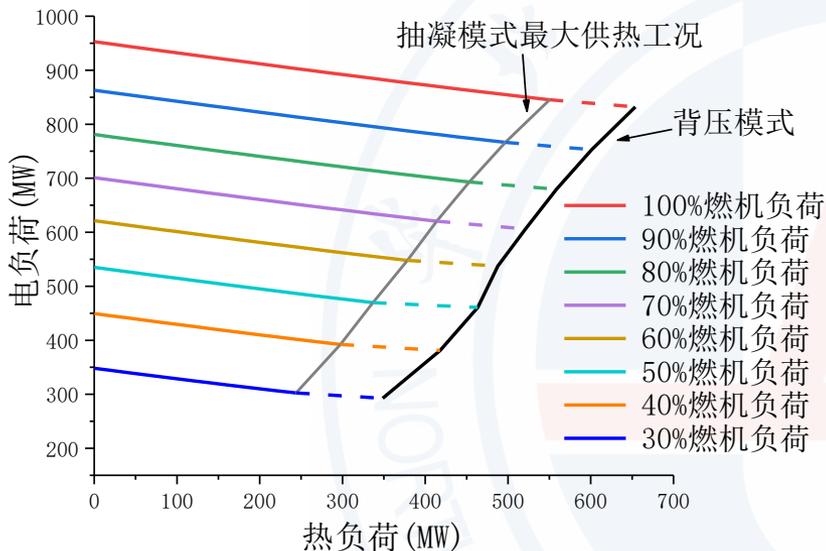


“一拖一”方式热力系统图

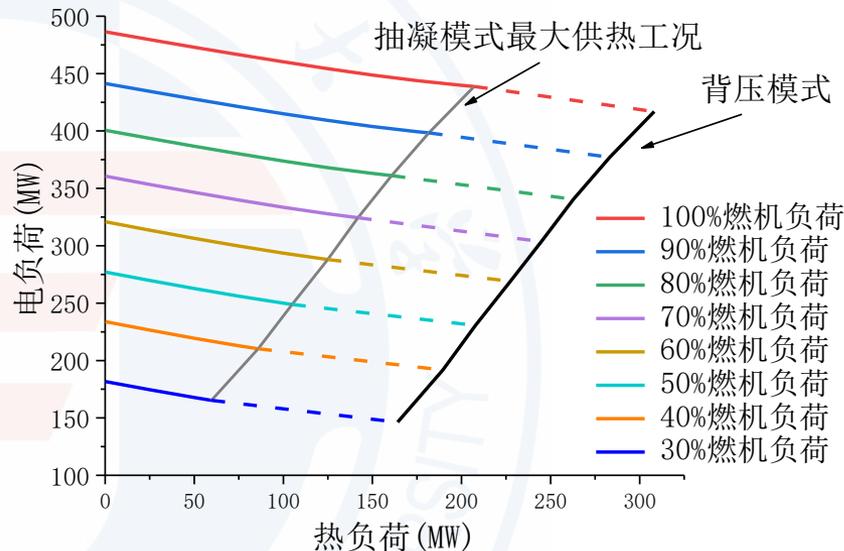
F级燃气-蒸汽联合循环机组设计为两台燃机、余热锅炉与一台蒸汽轮机，即两套燃机余热锅炉系统驱动一台蒸汽轮机的“二拖一”运行方式。低负荷时可采取一台燃气轮机、一台余热锅炉驱动蒸汽轮机运行，即“一拖一”运行方式。

03 多维运行方式负荷特性

联合循环多维运行负荷特性



“二拖一” 发电功率与供热量的关系

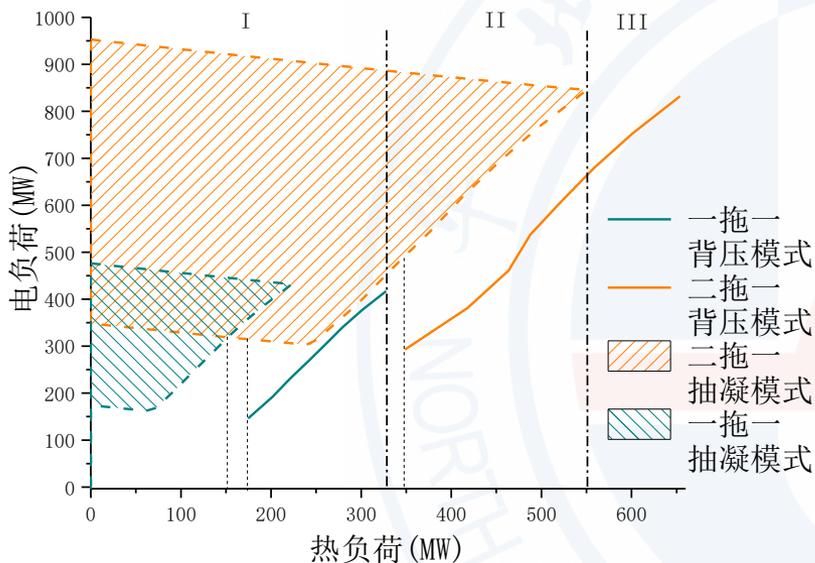


“一拖一” 发电功率与供热量的关系

- 1) 抽凝模式下电、热负荷在一定范围内均可灵活调整；而背压模式下供热负荷与发电负荷一一对应，不具备单独调节电、热负荷能力。
- 2) 燃机负荷相同，背压模式机组供热负荷较抽凝模式有所提高，因而机组承担一定供热负荷时，由抽凝模式切换至背压模式，可进一步降低机组发电负荷。
- 3) 与一拖一运行比较，二拖一运行供热能力和电负荷调整范围较大且电负荷整体偏高，因此二拖一运行适合供热运行，而一拖一运行方式更适合深度调峰。

03 多维运行方式负荷特性

联合循环负荷调节范围



多维运行负荷调节范围

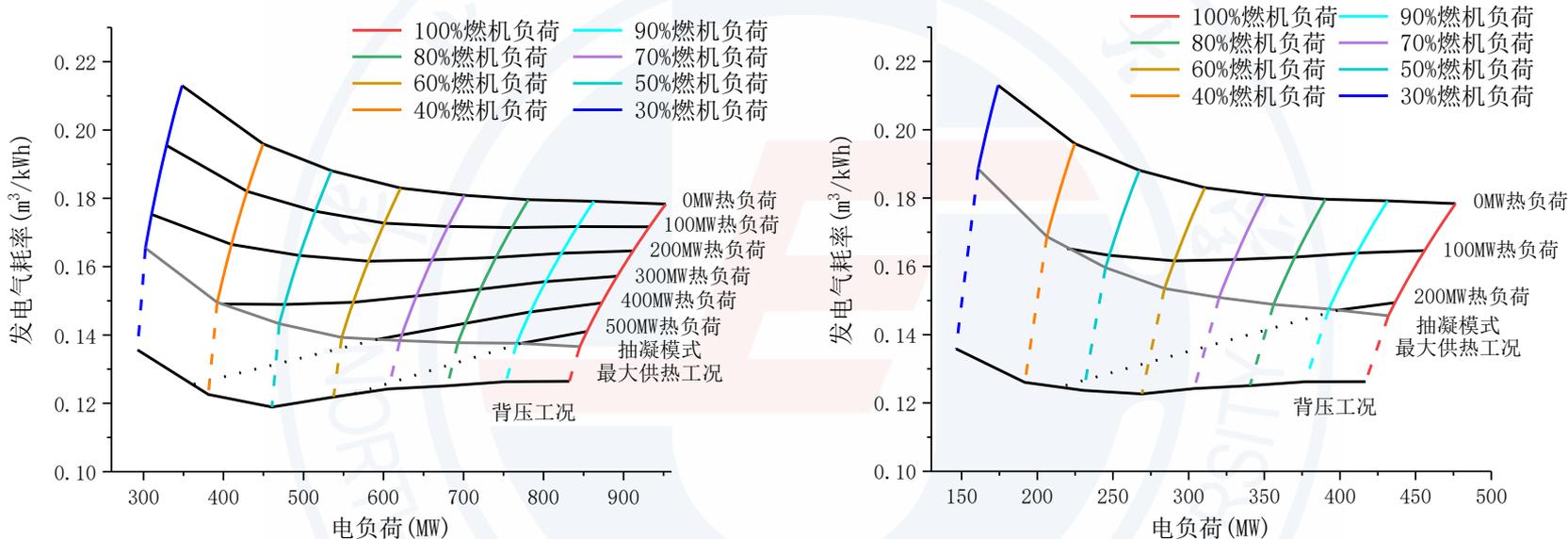
| 热负荷范围 (MW) | 最高发电负荷及运行模式(MW) | 最低发电负荷及运行模式(MW) | 调峰能力 % |
|---------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| $0 \leq Q \leq 152$ | 二拖一抽凝模式 922~951 | 一拖一抽凝模式 161~319 | 63.3~81.9 |
| $152 < Q \leq 175$ | 二拖一抽凝模式 917~922 | 二拖一抽凝模式 315~319 | 63.3~63.4 |
| $175 < Q \leq 328$ | 二拖一抽凝模式 887~917 | 一拖一背压模式 147~416 | 49.5~81.0 |
| $328 < Q \leq 349$ | 二拖一抽凝模式 883~887 | 二拖一抽凝模式 453~491 | 44.4~48.9 |
| $349 < Q \leq 550$ | 二拖一抽凝模式 845~883 | 二拖一背压模式 293~663 | 19.1~62.0 |
| $550 < Q \leq 650$ | 二拖一背压模式 663~827 | 二拖一背压模式 663~827 | 0 |

结合供热期热负荷，机组热电联产调峰运行主要分为三种情况：

- 1) 供热初末期机组承担热负荷较低时，机组一拖一运行配合二拖一运行，电负荷调节能力较单一运行方式大幅提高，如图中第I区域；
- 2) 供热寒冷期机组承担较高供热负荷时，通过二拖一抽凝运行与二拖一背压运行配合，机组具有一定电负荷调节能力，对应图中第II区域；
- 3) 当天气极端寒冷，机组承担热负荷非常大时，机组二拖一背压运行，不具备电负荷调节能力，对应图中第III区域。

04 多维运行方式的热经济性

发电气耗率

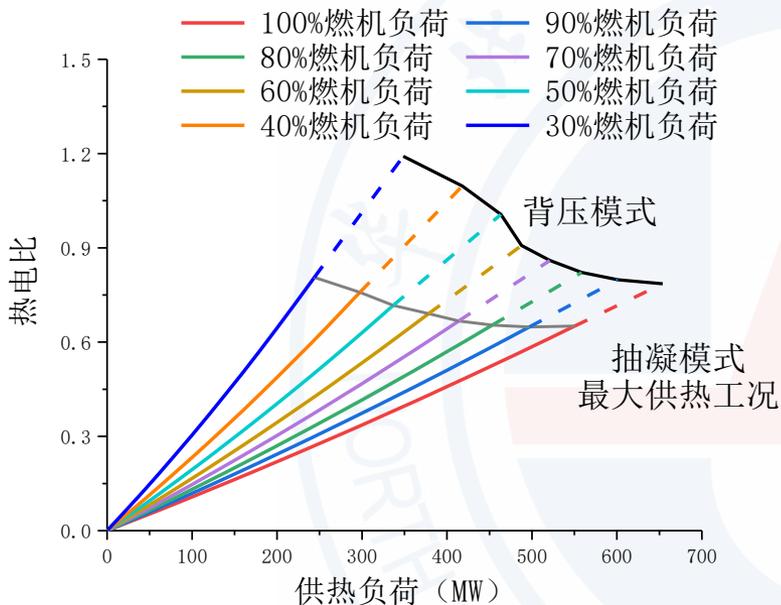


燃机负荷率不变的情况下，随着热负荷增加机组发电气耗率逐渐降低。

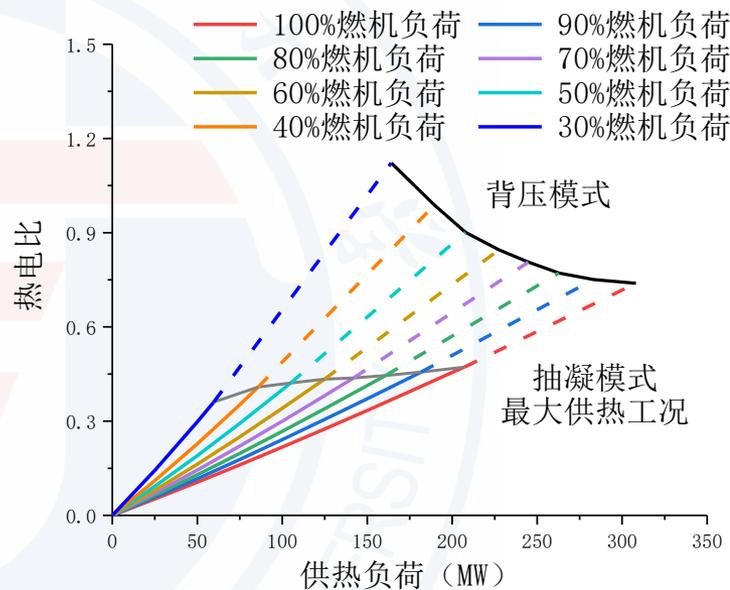
机组供热负荷一定并且承担热负荷较高时，随着发电负荷降低，冷源损失减少，能源利用效率提高，发电气耗率降低；而机组供热负荷较低时，随着发电负荷的降低，发电气耗率先略降低然后升高，原因是机组负荷率降低，导致燃机效率降低。

04 多维运行方式的热经济性

热电比



“二拖一”运行热电比变化



“一拖一”运行方式热电比变化

与抽凝模式比较，背压模式显著提升了机组的热电比，最大热电比可至1.2，因此针对调峰压力大和存在大量风、光电并网的情况，希望机组热电比大，可缓解调度压力、消纳可再生能源，此时背压模式可一定程度上满足以上需求。



05 供热季机组调峰性能

供热边界条件

将供热季划分为八个时间段进行分析，根据该时段平均气温估算供热负荷，以获得机组在不同供热时段内调峰灵活性情况。

供热季不同时间段供热负荷

| 时间段 | 室外平均温度 (°C) | 相对热量比 | 供热负荷 (MW) |
|------|-------------|-------|-----------|
| 11月下 | 1.89 | 0.60 | 387.8 |
| 12月上 | -0.57 | 0.69 | 447.1 |
| 12月下 | -0.16 | 0.67 | 437.2 |
| 1月上 | -2.27 | 0.75 | 488.0 |
| 1月下 | -3.34 | 0.79 | 514.0 |
| 2月上 | -2.64 | 0.76 | 496.9 |
| 2月下 | 1.19 | 0.62 | 404.7 |
| 3月上 | 5.33 | 0.47 | 305.0 |

供热初末期热负荷较低，考虑“一拖一”、“二拖一”配合运行，调峰能力较大。

次寒期供热负荷增大，只能“二拖一”运行，考虑通过抽凝、背压运行方式配合调峰。

严寒期，热需求很大，调峰能力有所下降。



05 供热季机组调峰性能

从发电气耗率来看，供热季机组参与电网调峰，随着发电负荷降低，气耗率普遍下降，机组热经济性有所提高。

供热季不同时间段机组调峰性能

| 时间段 | 供热负荷 MW | 最高发电负荷 | | 最低发电负荷 | | 多维运行方式 机组调峰能力 % |
|------|------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|-----------------------|
| | | 气耗率 m ³ /(kW·h) | 热电比 — | 气耗率 m ³ /(kW·h) | 热电比 — | |
| 11月下 | 387.8 | 0.150 | 0.44 | 0.126 | 1.11 | 55.4 |
| 12月上 | 447.1 | 0.146 | 0.52 | 0.126 | 1.01 | 44.5 |
| 12月下 | 437.2 | 0.146 | 0.50 | 0.125 | 1.03 | 46.5 |
| 1月上 | 488.0 | 0.141 | 0.57 | 0.124 | 0.91 | 33.4 |
| 1月下 | 514.0 | 0.140 | 0.60 | 0.122 | 0.87 | 27.4 |
| 2月上 | 496.9 | 0.141 | 0.58 | 0.119 | 0.89 | 31.4 |
| 2月下 | 404.7 | 0.149 | 0.46 | 0.123 | 1.09 | 52.7 |
| 3月上 | 305.0 | 0.157 | 0.34 | 0.127 | 0.80 | 53.5 |



05 供热季机组调峰性能

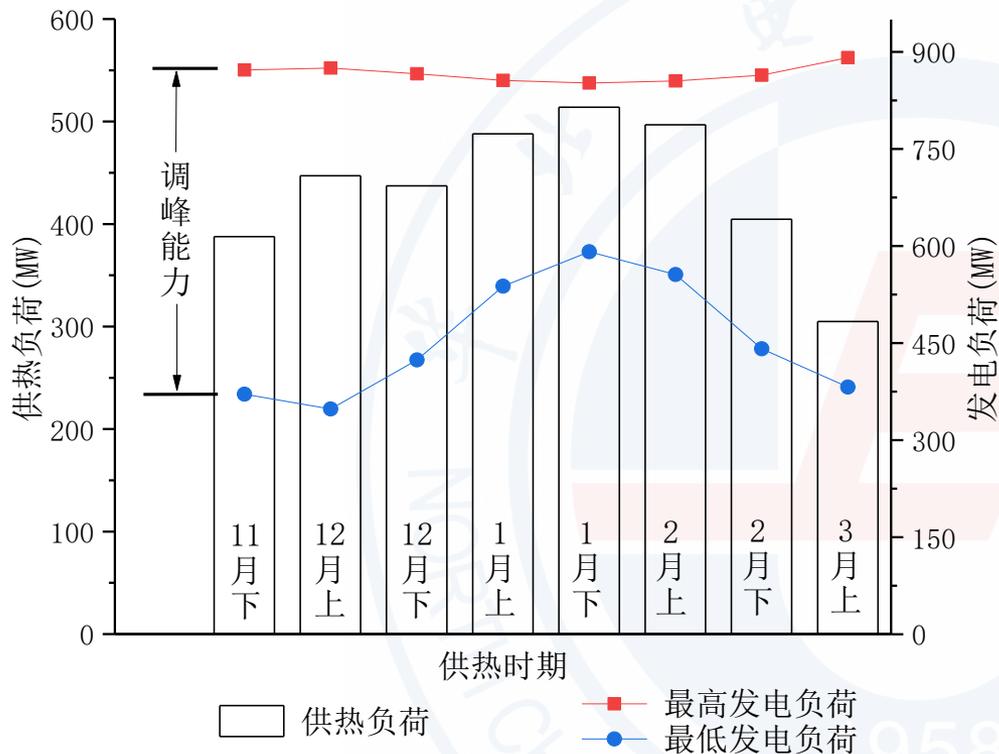
以热电比角度来看，相同热负荷下降低发电负荷，为可再生能源腾出了上网空间，可缓解电网调峰压力

供热季不同时间段机组调峰性能

| 时间段 | 供热负荷 MW | 最高发电负荷 | | 最低发电负荷 | | 多种运行方式 机组调峰能力 % |
|------|------------|-------------------------------|----------|-------------------------------|----------|-----------------------|
| | | 气耗率 m ³ /(kW·h) | 热电比 — | 气耗率 m ³ /(kW·h) | 热电比 — | |
| 11月下 | 387.8 | 0.150 | 0.44 | 0.126 | 1.11 | 55.4 |
| 12月上 | 447.1 | 0.146 | 0.52 | 0.126 | 1.01 | 44.5 |
| 12月下 | 437.2 | 0.146 | 0.50 | 0.125 | 1.03 | 46.5 |
| 1月上 | 488.0 | 0.141 | 0.57 | 0.124 | 0.91 | 33.4 |
| 1月下 | 514.0 | 0.140 | 0.60 | 0.122 | 0.87 | 27.4 |
| 2月上 | 496.9 | 0.141 | 0.58 | 0.119 | 0.89 | 31.4 |
| 2月下 | 404.7 | 0.149 | 0.46 | 0.123 | 1.09 | 52.7 |
| 3月上 | 305.0 | 0.157 | 0.34 | 0.127 | 0.80 | 53.5 |



05 供热季机组调峰性能



供热季联合循环机组调峰能力

多维运行方式配合调节，可提高机组调峰能力，以12月下期间为例，机组采用多维运行方式，调峰能力达46.5%，较传统抽凝运行增加25.2%。

对于整个供热季，机组的调峰能力大大提高，能为可再生能源提供**11.76亿kW·h**的上网空间，折合替代天然气耗量**2.2亿m³**。

减轻了电网调峰调度的负担，大大节约了一次能源的消耗，对环境保护大有裨益。



感谢各位专家

燃气-蒸汽联合循环机组
热电联产多维运行方式研究

1958