



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



王学栋

华电电力科学研究院汽机专业首席研究员，教授级高级工程师，山东大学博士。长期从事电厂汽轮机本体和辅机的性能测试、经济指标分析、机组节能技改项目可行性研究、节能技改方案研究等工作。获得中国电力科技进步奖二等奖，山东省科技进步二等奖、三等奖，华电集团科技进步一等奖，华能集团科技进步三等奖，山东电力科技进步一等奖、二等奖、三等奖等十几项。发表EI、ISTP检索、中文核心期刊论文30余篇。

## 几种汽轮机余热利用改造方式对比分析

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

# 几种汽轮机余热利用改造方式的对比分析

— 华电电力科学研究院有限公司 —

求真 务实 专业 纯粹

报告人:王学栋

二〇一九年九月

# 目录

## CONTENTS

- 01 几种余热利用改造方式的简要比较
- 02 本体、热力系统及辅机改造技术方案
- 03 机组供热期运行的性能指标
- 04 运行中的参数控制和注意事项

01

## 几种余热利用改造方式的简要比较

## 几种余热利用改造方式的简要比较

### 余热利用的形式

热泵供热技术。

高背压循环水供热技术  
( 实则低真空、单转子、双  
转子互换 ) 。

高背压供热技术 ( 切缸、光  
轴 ) 。

#### 热泵供热技术

吸收式热泵以蒸汽、废热水为驱动热源，把低温热源的热量提高到中、高温，提高了能源的品质，供给热用户。

#### 高背压循环水供热技术

有单转子、双转子方案，提高凝汽器背压和循环水温度，高温循环水经过凝汽器、热网首站加热后，直接给用户供热。采暖期高背压运行，非采暖期低背压运行。

#### 切缸供热技术

改造中低压缸连通管，实现低压缸不进汽，中压缸排汽全部抽出到供热首站，低压缸通流部分不变，加装冷却蒸汽旁路。

#### 光轴供热技术

改造中低压缸连通管，低压缸通流部分静动叶去掉，低压转子光轴。把中压缸排汽全部抽出到供热首站，低压缸不进汽 ( 有的工程有少量进汽 ) 。

# 几种余热利用改造方式的简要比较

**优点：**不改变主机系统，运行灵活，相当于增加热源点，节能效果显著。

**缺点：**热泵数量多，投资巨大，占地面积大。新建厂房；新建蒸汽、热网水、循环水管路。维护工作量较大。

**优点：**低压缸通流部分不改造，只改中低压缸连通管和外供蒸汽管路，检修和改造工作量小，运行方式灵活，调峰能力强。

**缺点：**运行安全性，低压缸末两级叶片安全性需要长期运行验证。



通常采用双背压双转子互换方案。



**优点：**对机组发电功率影响小，经济性好。



**缺点：**投资偏大；每年需更换转子二次。本体、辅机、热力系统改造工作量大。



把低压转子更换成光轴，仅仅起到与发电机连接作用，把中压排汽全部进入首站加热循环水至用户。



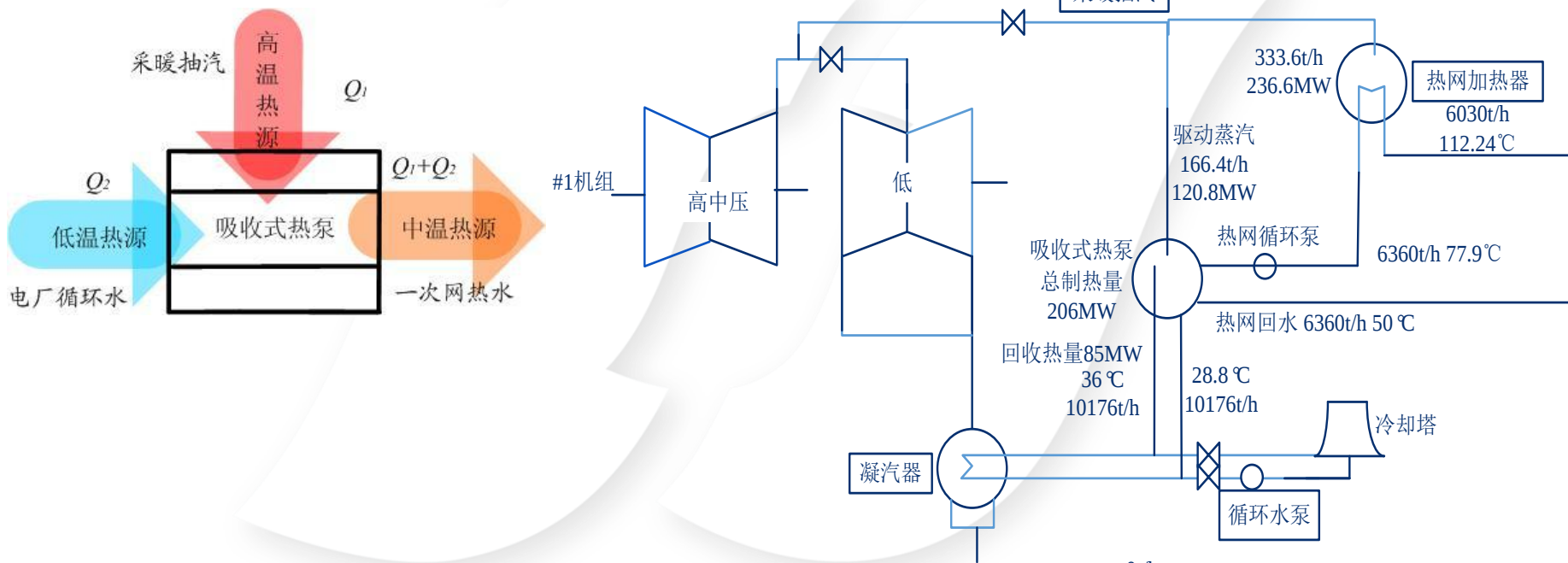
**优点：**安全性高，资金投入不大（对于中排压力高的机组，不太适合）。



**缺点：**经济性稍差，影响发电功率较大；每年需更换转子二次。

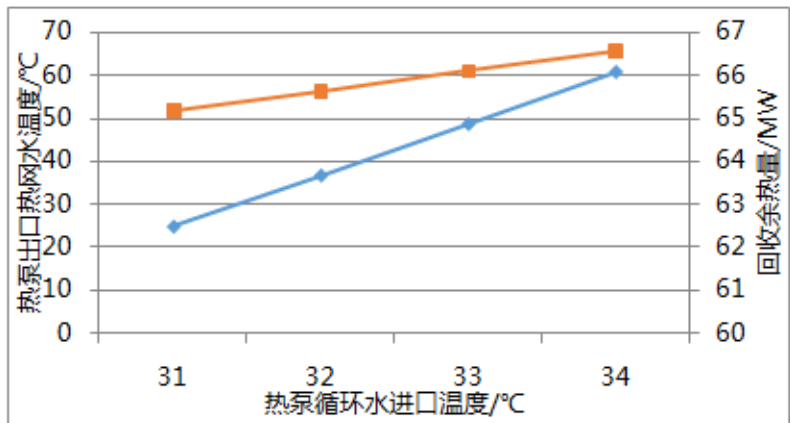
# 几种余热利用改造方式的简要比较

## 热泵供热技术-吸收热泵供热方式



## 几种余热利用改造方式的简要比较

### 热泵供热技术-吸收热泵供热方式



#### □ 热泵改造和选型需要考虑的边界因素：

✓ 吸收式热泵系统，存在驱动蒸汽系统、热网水系统、余热源（循环水、排汽）系统三大系统耦合

✓ 驱动蒸汽压力、热网水回水温度、热泵出口余热源温度（机组背压）是选型和优化运行的关键边界条件

✓ 选型边界参数必须根据实际运行情况核实，必要时需要进行试验测试

✓ 进入热泵余热源温度不能过低（ $>25^{\circ}\text{C}$ ），为保证通流安全也不能太高；热网水回水温度应尽量低（ $<55^{\circ}\text{C}$ ），以确保提高余热利用率；驱动蒸汽压力 $>0.2\text{MPa}$

#### □ 灵活性条件下的影响因素：

✓ 驱动蒸汽压力可通过压力匹配器等多汽源保证

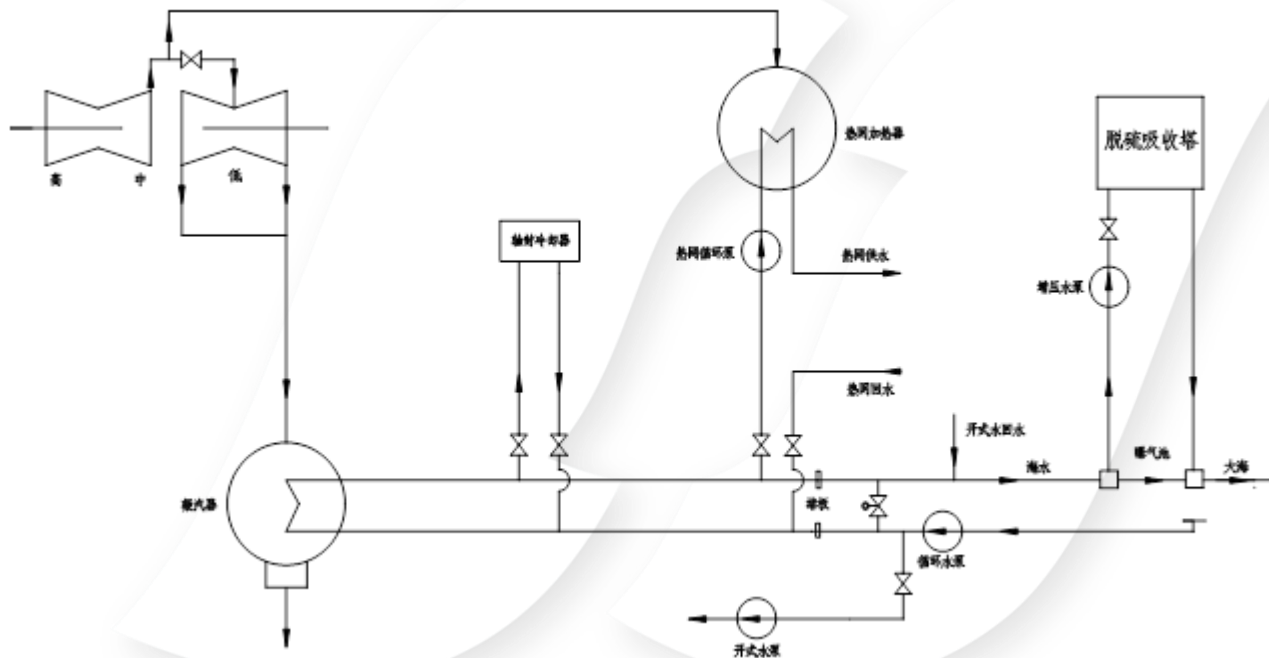
✓ 调整二次热网侧参数，确保回水温度合理和热网水流量优化

## 热泵供热技术-吸收热泵供热方式

吸收式热泵工作原理：以汽轮机抽汽为驱动能源  $Q_1$ ，回收循环水余热  $Q_2$ ，加热热网回水。得到的有用热量（热网供热量）为消耗的蒸汽热量与回收的循环水余热量之和  $Q_1+Q_2$ 。

**优点：**运行方式简单灵活，在供热初末期热负荷较小，无法完全回收循环水余热，节能性受限制；不需以热定电运行，对机组出力影响小；增加了一个热源点，对供热安全性有提升。

**缺点：**1) 由于受热网回水温度高的限制，为了达到回收余热的目的，需要的热泵容量大，导致电厂热泵设备占地面积大，在多数电厂会缺少场地布置；  
2) 由于热网回水温度相对较高，一般电厂回收余热要求更高汽轮机抽汽参数和余热参数才能达到一定效果；回收余热的比例较小，节能性受到限制。  
3) 施工范围大，周期长，投资较大，相比于凝抽背技术灵活性较差。



## 高背压供热技术-高温循环水供热：

“双背压双转子互换”的**技术特征**是：  
采暖期内使用动静叶片级数相对减少的  
低压转子，非采暖期使用原设计配备的  
纯凝低压转子；机组在采暖期高背压运  
行，非采暖期低背压运行。

**运行方案：**热网循环水采用两级串联加热的方式。第一级加热是热网循环水进入机组凝汽器，吸收低压缸排汽的热量，然后通过供热首站加热器完成第二次加热，加热到一定温度后，将其送到热水管网通过二级换热站与二级热网循环水进行换热，热网循环水降温回到凝汽器，形成一个完整的循环水回路。供热首站的二次加热蒸汽来自本机或临机中低压连接管抽汽。

## 几种余热利用改造方式的简要比较

### 高背压供热技术-高温循环水供热

#### 高背压循环水供热的特点：

供热量大、供热品质低、要求电负荷稳定。比较适合于大型机组的循环水余热回收技术。但采用这种方式，需要有很大的、较稳定的供热面积，否则就无法消化掉进入凝汽器乏汽的巨大余热量。需要晚开早停，能够全部吸收余热，对发电功率影响小。同时本体和系统改造工作量大，一年揭低压缸两次，检修工作量大。

#### □高背压双/单转子供热需要考虑的边界因素：

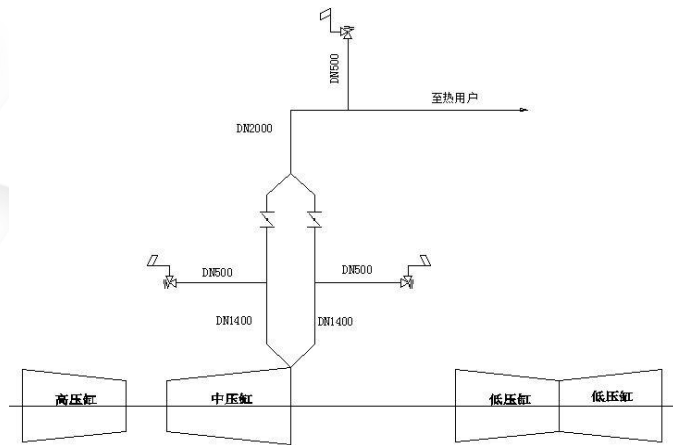
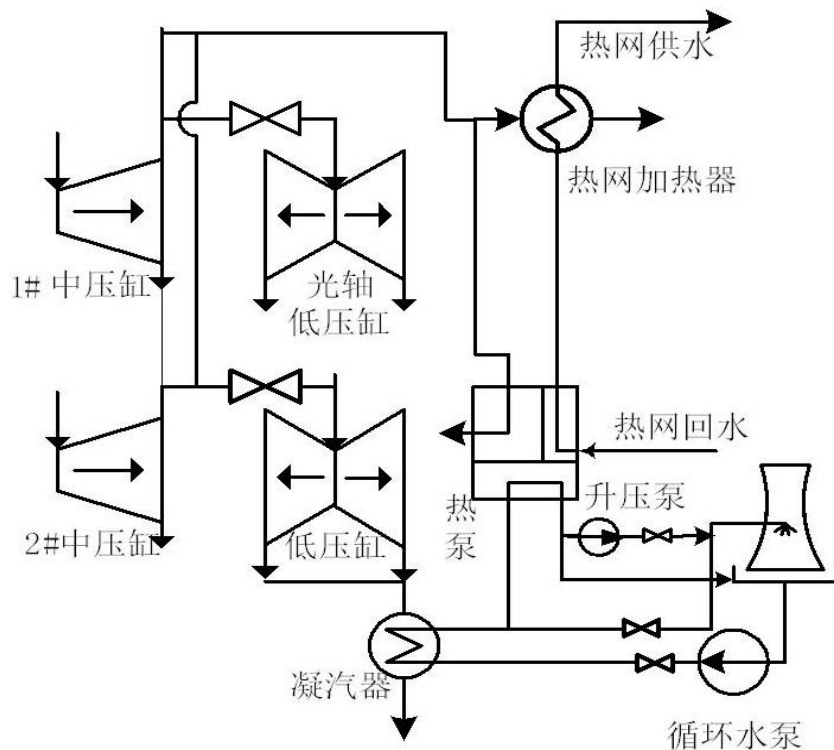
- ✓凝汽器背压抬高，可达54kPa，排汽直接加热热网水
- ✓为适应高背压供热，主机低压通流改造，小机改造
- ✓其他辅助系统适配性改造，改造范围较大（凝汽器、抽真空系统、凝结水精处理、循环水等）
- ✓背压升高后的膨胀、振动问题
- ✓冬季热负荷高而夏季电负荷低时，可考虑单转子
- ✓双背压直接供热（600MW单低缸高背压供热、300MW单边低缸背压供热等）

#### □灵活性条件下的影响因素：

- ✓背压运行以热定电，供热前换专用转子，灵活性差
- ✓针对单台高背压机组的灵活性优化
- ✓从全厂角度进行供热灵活性运行优化

## 几种余热利用改造方式的简要比较

### 光轴技术-背压排汽供热，少量抽汽减温减压后冷却低压光轴



## 几种余热利用改造方式的简要比较

### 光轴技术

光轴供热的**技术特点**是：采暖期内使用光轴的低压转子，背压排汽供热，非采暖期使用原设计配备的纯凝转子，恢复原运行方式

#### □低缸光轴供热需要考虑的边界因素：

- ✓相当于中排背压供热，需要有足够的热负荷
- ✓静子尽量不作改动，确保优减改造量及成本
- ✓低缸光轴依然要考虑冷却问题（视具体情况）
- ✓凝汽器凝汽量较少，相关辅机适配性改造问题
- ✓低缸不做功后，机组出力减少，调峰顶出力受限制

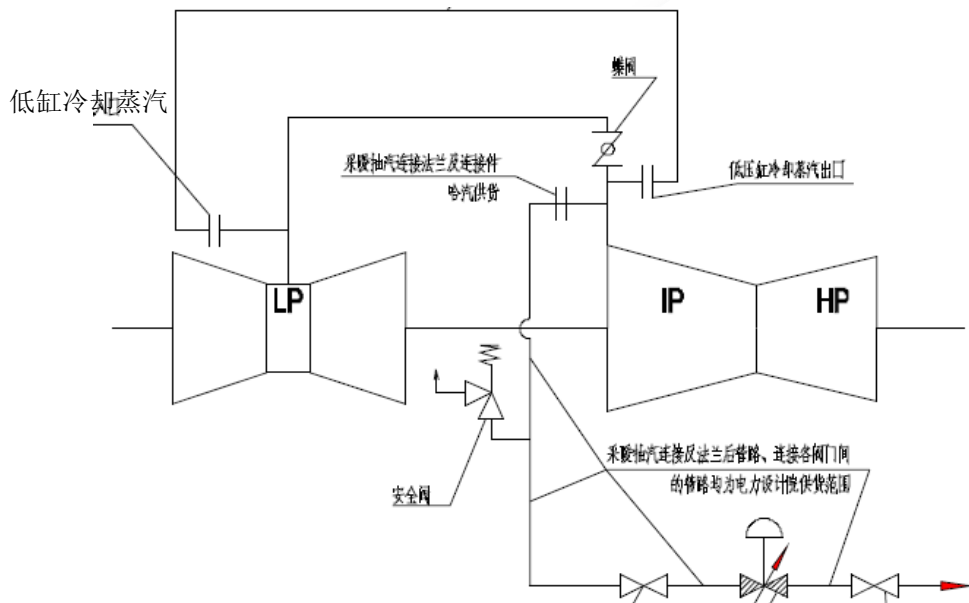
#### □灵活性条件下的影响因素：

- ✓以热定电，灵活性稍差
- ✓顶尖峰出力能力受限制

**运行方案**：本机只能实施单级加热，抽汽直接供热网首站加热热网循环水。

**技术特点**：采用这种方式，供热量大，也需要有很大的、较稳定的供热面积，否则就无法消化掉中压缸排汽所携带的巨大热量，或者机组在较低的锅炉蒸发量下运行。能够全部吸收余热，因为去掉了低压缸的做功量，对发电功率影响大。同时本体和系统改造工作量大，一年揭低压缸两次，检修工作量大。

## 切缸技术-同义词：低压缸零出力、凝抽背



✓相当于中排背压供热，需要有足够的热负荷

### ✓切缸负荷点的设计选型问题

✓鼓风问题（气动计算分析）、动应力问题（叶片强度颤振分析）、水蚀问题（温控措施、叶片选型及喷涂）

✓轮盘叶根强度问题（叶根槽有限元分析）

✓辅机适配性改造问题等

### □ 灵活性条件下的影响因素:

✓设计时需充分考虑调峰特性, 以及切换频次

✓末叶安全校核存在不确定性，需寿命评估，必要时更换末级叶片：通流监控系统：定期内部检查

✓需在设计时结合属地调峰政策论证其影响，经济性分析：  
单机、全厂机组运行经济性，以及调峰补贴



### 切缸技术-类似于抽汽供热、背压排汽供热：

切缸供热的**技术特点**是：一根转子，通过操作中低压缸连通管道上新加装的可关闭到0的阀门开度，调整外供蒸汽流量，实现机组的纯凝、抽汽、背压运行方式切换。另外加装一冷却蒸汽旁路，低压缸通入适量蒸汽，冷却低压转子。

**运行方案**：本机只能实施单级加热，抽汽直接供热网首站加热热网循环水。

**技术特点**：采用这种改造技术，背压工况下，供热方式和供热量与光轴供热接近，供热量大，需要有很大的、较稳定的供热面积，能够全部吸收余热，因为去掉了低压缸的做功量，对发电功率影响大。就一根转子运行，本体改造工作量小，检修工作量小。但低压缸在少汽的状态下运行，末级和次末级存在鼓风损失的风险，有待长期运行、末两级动叶安全性的验证。

## 几种余热利用改造方式的简要比较

**各种改造技术的适用范围：**以上改造技术，除了热泵供热方式以外，在供热期，都属于背压机组的范畴，“以热定电”、“热电耦合”是背压机组的运行特性。所以发电企业的热负荷条件决定了机组的运行方式和改造方式。

下表是高背压机组改造的热负荷条件和循环水条件。

### 机组供热改造的热负荷条件

| 容量等级        | 机组最小供热负荷 |
|-------------|----------|
| 100MW       | ≥140MW   |
| 135MW~150MW | ≥200MW   |
| 200MW       | ≥240MW   |
| 300MW       | ≥350MW   |

### 同容量等级机组热网循环水流量、回水温度限制值

| 容量等级        | 循环水流量     | 回水温度 |
|-------------|-----------|------|
| 100MW       | ≥4000t/h  | ≤55℃ |
| 135MW~150MW | ≥5500t/h  | ≤55℃ |
| 200MW       | ≥7000t/h  | ≤55℃ |
| 300MW       | ≥10000t/h | ≤55℃ |

## 各种改造技术的适用范围：

以上最小供热负荷除以各地的单位面积热负荷，可以得到最小供热面积。热泵适用的热负荷范围比较大，一台单机热泵的功率可以变化，根据热负荷的增长情况，不同期建设，陆续增加热泵台数；如果供热负荷小、供热面积小、循环水流量小、循环水回水温度高，光轴供热和高背压供热机组很难运行。

光轴供热和切缸供热机组，因为中压缸排汽参数高，储存的热量高，相同容量的机组，在相同的电负荷条件下，需要的热负荷更高。因此光轴供热机组的运行比高背压循环水供热机组运行需要更晚地投入，更早地退出。而切缸运行的机组，完全背压运行，需要的热负荷跟光轴供热机组一样，但由于运行方式灵活，可以正常地运行，根据热负荷变化情况，在凝汽、抽汽、背压运行三种状态下灵活切换。

02

## 本体、热力系统及辅机改造技术方案

- 2.1 高背压循环水供热改造技术；
- 2.2 光轴供热改造技术；
- 2.3 切缸供热改造技术（凝抽背、低压缸零出力）

## 2.1 高背压循环水供热改造技术

| 循环水供热的发展 | 第一阶段        | 第二阶段                | 第三阶段                                                                     |
|----------|-------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 机组参数特征   | 高温高压及以下蒸汽参数 | 超高压蒸汽参数             | 亚临界及以上蒸汽参数                                                               |
| 机组容量特征   | ≤50MW       | 135MW等级             | 300MW及以上等级                                                               |
| 机组结构特征   | 单缸机组        | 低压缸单层<br>落地式轴承      | (1) 低压缸双层<br>(2) 座缸式轴承<br>(3) 汽动给水泵<br>(4) 凝结水系统精处理                      |
| 改造技术典型特征 | 凝汽器加固       | 凝汽器加固               | 凝汽器加固                                                                    |
|          |             | 低压缸双转子双模式<br>完善膨胀系统 | 低压缸双转子双背压模式<br>完善膨胀系统                                                    |
|          |             |                     | (1) 通用双层低压内缸<br>(2) 座缸式轴承的可靠性<br>(3) 驱动给水泵汽轮机的工况适应性<br>(4) 凝结水精处理系统的高温树脂 |
|          |             |                     | 第三代技术                                                                    |

### 高背压供热改造技术适用的机型

#### 两排汽的135MW、200MW等级



目前三大动力厂生产的135MW等级机组都有改造的业绩、两排汽的200MW等级机组也有改造案例

#### 三排汽的200MW等级



西安热工研究院改造曲阜圣城三缸三排汽的200MW等级机组，凝汽器冷却水双工质

#### 300MW等级



上汽座缸轴承，东方落地轴承，三大动力厂空冷、湿冷的300MW等级机组都有改造的业绩。

### 低压转子的几种改造方式：单转子、双转子

135MW等级机组

单转子、拆装最后两级叶片



135MW等级机组

双转子，拆和截短叶片  
(哈汽烟台)



135MW等级机组

双转子，去掉最后两  
级叶片，转轴加粗



135MW等级机组

双转子，去掉第一和最后一级  
叶片，通流面积重新设计。



300MW等级机组

双转子，去掉最后两级叶片，  
转轴加粗



300MW等级机组

双转子，去掉最后两级，通流  
面积重新设计。



### 第三代300MW等级机组高背压改造的关键技术（以上汽300MW机组为例）：

#### 创新研究

双层低压缸通用性改造研究

座缸式轴承座的可靠性研究

凝结水精处理系统的高温树脂研究

给水泵汽轮机大范围变工况适应性研究

#### 继续研究

新、旧低压转子互换性及高背压低压转子的研究

热力系统运行方式研究与优化

凝汽器双运行模式下的安全性研究

大容量、高参数机组循环水直供技术的参数匹配研究

### 辅机、热力系统的校核与分析

#### 凝汽器适应性分析



机组改为高背压运行后，热网循环水的压力、温度比原机组循环水参数增加很多，因此需要对凝汽器的可靠性进行论证。

#### 小汽轮机适应性分析



机组改为低真空运行后，如果原给水泵汽轮机排汽还进入大机凝汽器，则小汽机背压也随之升高，一方面背压升高小汽轮机出力降低，不能满足机组运行要求，另一方面原小汽轮机的末级叶片也不允许背压升高到42kPa，因此需对小汽机进行改造及运行可靠性论证。

#### 凝结水系统适应性分析



改造前凝结水系统设计温度为50℃，改造后凝结水系统设计温度变为78℃。凝结水系统受到影响的主要是凝结水泵以及凝结水精处理装置

## 2.1 高背压循环水供热改造技术

# 技术改造内容（以上汽300MW机组为例）

### 低压缸通流部分全部更换，重新进行优化设计

#### 本体改造方案

**供热工况：**新设计的供热用隔板安装在新设计整体内缸上的低压持环中，在现场可装配，仅将低压持环更换，将低压末两级隔板拆下，换为带有隔板槽保护功能的导流板，同时换成新设计的高背压供热转子运行。

**非供热工况：**拆除导流板，安装低压末两级隔板及带有纯凝用隔板的低压持环，新设计的低压内缸配合电厂原有低压转子运行。

# 改造的技术方案（以上汽300MW机组为例）

## 配套系统改造方案

### 给水泵汽轮机改造

背压提升造成给水泵汽轮机出力降低。

对给水泵汽轮机进行通流改造，保证在大变工况范围内具有较高的效率。核算排汽膨胀节等，同时满足纯凝和高背压两种工况下安全运行的要求。

### 凝汽器改造

汽轮机高背压改造后，在供热期间，需解决凝汽器水室承压、温度升高造成管束与壳体膨胀不均匀以及与低压缸之间的应力过大三个问题。

可以选用整体改造或提高强度简约改造模式。现有各种改造方案。

### 轴加改造

原有的轴封加热器凝结水在供热期温度提高，不能满足轴封漏汽回收的要求。

将原轴封冷却器面积加大，轴封加热器建议选用一用一备形式，冷却介质采用冷油器用水或其他35℃左右水源。现有各种改造方案。

# 关键问题和解决措施（以上汽300MW机组为例）

（1）关于变工况运行时，低压缸温度过高，造成轴承抬高的问题。

上汽300MW机组低压转子采用的是座缸式轴承座，低压轴承的标高将随着排汽温度的变化而变化，背压提高后排汽温度达到 $83^{\circ}\text{C}$ ，在变工况时甚至达到 $100^{\circ}\text{C}$ 以上，造成低压缸的座缸轴承中心线提高。

通过优化设计、对各轴承标高、轴系调整、低压缸通流间隙调整及低压缸两级喷水减温装置，提高了机组的安全可靠性。

### (2) 关于高背压工况下排汽温度升高造成瓦温高的问题。

低压缸轴承为座缸式轴承，高背压工况下，瓦温升高。

通过设计安装 #3、4轴  
承护套及轴瓦喷油冷却装置，  
解决了轴承瓦温升高问题。

### (3) 关于给水泵汽轮机排汽温度高的问题。

给水泵汽轮机原设计背压为4.5-12kPa，而供热期间凝汽器背压高达54kPa，会造成给水泵汽轮机排汽温度升高、出力不足。

通过研发制造新转子、更换叶片材料、改造蒸汽室喷嘴环、加工新的导叶持环等方案，使小汽轮机同时满足纯凝和高背压两种工况下安全运行。

**小汽轮机末两级叶片工况变化最大，必须进行强度校核。**

### (4) 关于凝结水精处理高温运行的问题。

供热期凝结水温度达到  
80℃以上，原凝结水精处  
理系统无法运行。

研制开发适用于80℃以上的  
中压耐高温树脂；新增3台内  
衬丁基橡胶，耐温100-120℃  
的高温混床，两用一备。

## 2.1 高背压循环水供热改造技术

### (5) 关于凝汽器水室承压、温度升高造成管束与壳体膨胀不均以及与低压缸之间的应力过大问题。

机组改造后，凝汽器水室压力由原来设计压力0.4MPa提高到0.5-0.6MPa（甚至更高、章丘145MW机组循环水压力1.1MPa），低压缸排汽温度升高造成凝汽器管束与壳体膨胀不均匀，会造成管束的胀口泄漏。

对凝汽器进行了整体改造，更换凝汽器管束，水室采取弧形板结构，内部增加支撑，加厚管板厚度等措施，设计水室承压达到1.0MPa；凝汽器后水室增加伸缩节，当凝汽器温度升高后管板和水室自由膨胀。

### (6) 热力系统配套改造

为适应高背压工况运行，进行了轴封冷却器增容，及开式水、海水脱硫、低压缸喷水、给水泵密封水、热网循环水系统等配套改造。

由于改造方式不同，以上问题在切缸供热技术和光轴供热技术中基本不存在，因此以上技术难题是高背压循环水供热技术所特有的。

### 关键问题与解决措施\_制造厂设计中采取的措施

#### 如何增加发电量的问题：

双背压双转子互换技术，在供暖季采用全新的供热转子，应当设计相对减小的通流供热转子，一方面可以提高机组的安全性，另一方面可以增加发电量，提高经济效益。（一重新优化设计，试验证明：重新优化设计后的低压缸效率较高）

**解决措施：**对高背压运行的低压转子进行优化设计，同时合理的分配各级焓降，解决强度问题和新的末级叶片防汽蚀问题。

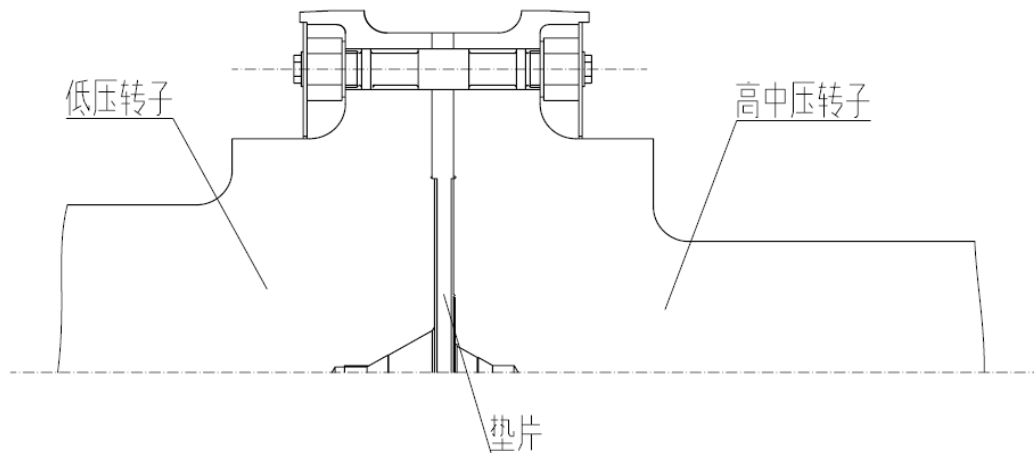
在这一技术应用细节上，华电系统和华能系统差别较大。

## 2.1 高背压循环水供热改造技术

### 关键问题与解决措施

**转子互换性问题：** 双背压双转子互换供热改造技术的关键。

转子互换性主要在于轴承轴径处尺寸及联轴器螺栓布置及螺栓孔尺寸。原低压转子为上汽厂产品，拥有原低压转子的精加工尺寸，且拥有精准钻模，不需要进行现场铰孔。根据以往数十台机组通流改造的经验，上汽厂改造项目转子拥有良好的互换性。



**技术改造方案：**机组低压缸采用双转子互换形式，非供热期仍采用原低压纯凝转子，以纯凝方式运行；供热期采用光轴转子，中压排汽通过排汽管路实现对外供热。

- 将机组原来的低压转子吊出，更换成一根光轴，连接高压转子和发电机，中压缸排汽全部去供热首站，光轴仅起到传递扭矩的作用；
- 原抽凝机组变成一背压机运行，没有了冷端损失；
- 机组更换连通管，拆除低压缸内的静子部分，基础和其他部件不动；
- 低压转子适当冷却。
- 热力系统：如凝水系统、循环水系统、抽真空系统进行相应改造。

# 技术改造内容（以苏制三缸两排汽200MW等级机组为例）

- ▶ 取消低压 $2 \times 4$ 级通流，去掉纯凝低压转子、全部隔板和隔板套。
- ▶ 新设计一根低压转子，为光轴无叶片转子，主轴尺寸与原机组低压转子主轴尺寸基本相同，轴径处尺寸与原低压转子轴径尺寸相同，无需更换原低压支持轴承。低压光轴转子，只起到将中压转子和发电机转子连接传递扭矩的作用。

# 技术改造内容

- ▶ 冬季供热运行时，更换原中低压缸连通管，在中压缸上部排汽口增加一个供热抽汽短管，原进入低压缸的中压缸排汽就全部进入供热管道。原机组联通管仍保留，在纯凝工况下使用。
- ▶ 从供热抽汽管道上抽取少量蒸汽，经过减温减压以后，通入低压缸，冷却低压光轴转子（此措施部分方案采用）。
- ▶ 为保证原低压转子与新设计低压光轴转子的互换性，中-低联轴器和低-发联轴器均采用液压螺栓结构。
- ▶ 机组在供热运行期间，在低压缸隔板或隔板套槽内安装新设计的保护部套，以防止低压隔板槽档在供热运行时变形、锈蚀。

- ▶ 新增加一套汽封冷却器及汽封加热器，满足机组低压光轴供热运行需要；改造后#1低压加热器无回热蒸汽进入，供热首站回水温度为100℃，回水到#2低加凝结水管道前。
- ▶ 改造后机组供热期和非供热期运行方式不一样，每年在季节交换时机组需停机，进行低压缸揭缸，更换低压转子、低压隔板、隔板套和联通管等设备部件。
- ▶ 光轴改造后，转子重量发生变化，轴承负载与压比相应变化。某200MW等级机组改造方案没有提及，某100MW机组：对3#、4#轴承支反力影响不大。仍在轴承压比允许范围内。

# 关键问题与解决措施

## (1) 解决低压光轴转子鼓风的技术措施

汽轮机供热期运行时，低压部分不再进汽，在低压缸内会产生鼓风现象，如低压缸温升过高，会引起整个低压部分膨胀及标高发生变化，给机组安全运行带来影响。

- 机组启动时严格控制机组差胀。
- 凝汽器循环水系统小流量运行，保持凝汽器、主冷油器等冷却用水，将低压光轴鼓风产生的热量带走。
- 监测低压缸缸温，如缸温升高，可开启低压缸喷水装置，保障机组运行安全。

(2) 转子互换性问题：等同于高背压双转子互换，利用联轴器液压螺栓连接，以及保证低压转子联轴器螺栓布置和螺栓孔尺寸加工的精确性。

(3) 解决汽轮机轴系标高抬升的措施。

- ▶ 对低压缸运行标高产生最大影响的就是低压排汽缸温升产生的热膨胀变形量。供热期运行，低压缸温度约为 $65^{\circ}\text{C}$ ，低压转子运行标高抬升约 $0.32\text{mm}$ ，原机组设计在低压缸排汽温度高于 $80^{\circ}\text{C}$ 时，低压缸喷水装置自动投入，排汽温度在 $80^{\circ}\text{C}$ 以下基本安全。
- ▶ 需检查机组排汽温度在 $65^{\circ}\text{C}$ 时的相关运行记录，如转子振动情况良好，在供热期可维持原机组轴系标高运行，不进行处理。
- ▶ 汽轮机轴系标高抬升影响汽轮机转子安装找中心，与高背压循环水供热改造技术类似，但光轴供热改造，不涉及动静间隙调整问题。

### (4) 解决汽轮机胀差影响的措施

- 在冬季供热工况运行时，高中压缸转子和汽缸膨胀量基本无变化。
- 低压缸运行状态与原纯凝工况比较，低压缸与转子温升较低（31℃左右），正常运行工况下，低压转子及低压缸的绝对膨胀量变化不大。原设计轴封间隙能满足运行要求。

### (5) 解决凝结水系统影响的措施

- 光轴供热抽汽改造后，机组凝结水量较小，机组原有凝结水泵不能够正常运行，需要加装一台小流量凝结水泵。

### (6) 解决回热系统影响的措施

- 光轴改造后低压级无回热抽汽，#1低压加热器只作为凝结水侧及疏水侧的通道投入运行，而蒸汽侧停运。
- 低压缸的汽封管路不变。新增加一台汽封冷却器，用小流量的循环冷却水冷却。原汽封加热器和汽封冷却器需从原凝结水管道旁路出来。

### (7) 解决凝汽器影响的措施

- 机组在冬季供热运行时，低压缸由光轴转子取代原低压纯凝转子，低压缸只有少部分蒸汽进入，凝汽器运行条件与非供热期不同，抽真空系统和凝结水系统正常运行，原凝汽器完全可以适应供热期低压光轴运行需要。

- (8) 循环水系统的影响：循环水流量大幅度减少，只为了冷却少量蒸汽，因此需加装半容量泵，或更换小流量转子，以减少供热期循环水泵耗电量。

# 技术改造方案

- 切缸供热技术是在原抽凝/纯凝机组运行基础上，新增（或更换）中低压连通管处为可关到零位并全密封的调节蝶阀，实现了低压缸可不进汽的要求，使低压转子在高真空条件下“空转”运行，将全部中压排汽引出供热的新型供热改造技术。同时为缩短微量漏气在低压缸内的滞留时间，防止鼓风超温的危险发生，将极小流量的冷却蒸汽引入低压缸，并开启低压缸喷水减温系统。改造后的机组具备凝汽、抽汽、背压式机型的优点，机组供热量大且调峰能力强。

# 技术改造内容（以某330MW机组为例）

- 更换连通管，更换原中低压缸联通管处的电动蝶阀，新更换的阀门要求是液压控制，可以关到零位、全密封、零泄漏。
- 增设低压缸冷却蒸汽管道系统，少量的冷却流量进入低压缸，保证缸内合理的流动性，将鼓风所产生的热量顺利带走。
- 低压缸喷水系统改造。机组背压供热期间，低压缸排汽量大幅减少，同时后缸喷水需要长期投运，因此需要对喷水装置进行改造，更换为具有高精度调节功能的阀组；同时加装孔板流量计，检测运行期间的喷水量。
- 供热抽汽母管扩容。机组进行切缸技术改造后，背压供热期间，采暖抽汽量增大，需要对抽汽管道进行流速核算。

# 技术改造内容（以某330MW机组为例）

- 汽轮机本体改造：低压缸末级、次末级动叶处装设温度测点。
- 机组在抽凝或者纯凝工况运行时，与常规抽凝机组没有任何区别。
- 机组背压供热工况运行时，除了低压通流部分以外，与光轴供热技术又相同，因此切缸供热技术如果在采暖季节运行时间长的话，为了机组供热期运行的经济性，凝结水系统、循环水系统、低加回热系统等也需进行相应的改造，但目前切缸技术，为了调峰和调度的灵活性，以及减少投资，以上系统一般不进行改造。

# 技术改造内容（以某330MW机组为例）

- 机组背压供热工况运行时，低压缸处于高真空、极小容积流量“空转”运行状态，在此运行状态下，低压缸叶片鼓风、汽缸胀差、转子轴向位移均可能发生较大变化，此种运行已经严重偏离机组的原始设计运行参数，而目前的数值模拟计算根本无法准确计算缸内叶片鼓风、汽缸膨胀和转子的轴向位移、动叶受力等数据，由温度分布变化而引起的上述参数特性，不同机组表现也各不相同。

# 关键问题与解决措施

(1) 当末级的容积流量减小到一定程度，会诱发末级叶片颤振，长期运行会导致叶片断裂。

➤ 构建低压缸极小流量计算模型，获得低压缸零出力状态下的流动特性，掌握叶片动应力的分布规律，确定极小流量的安全范围。

(2) 末两级叶片的鼓风损失：低压缸流量少到一定程度，气流将不再推动叶片做功，而会以惰性形态被动叶扇动排挤出叶片通道，会导致叶栅通道局部出现高温区域，使得通流部件许用应力下降、内缸受热变形。

➤ 进汽流量越低，通流部分尾部的鼓风现象越严重，为了防止鼓风升温对汽轮机尾部以及凝汽器造成影响，对低压缸后缸喷水减温系统进行优化改造。

# 关键问题与解决措施

- (3) 末级叶片水蚀的预防：在末级叶片出汽边进行防水蚀喷涂。现在华电集团、华能集团已改造多台，运行时间长短不一，需要揭缸检查。
- (4) 辅机和供热系统适配性研究。根据背压供热工况运行需求，进行汽轮机辅机和供热系统适配性分析，根据适配性分析结果制定优化、改造方案。
  - 汽轮机辅机适配性分析，包括：凝汽器及抽空气系统、循环水泵及循环水系统、凝结水泵及凝结水系统。
  - 供热系统适配性分析，包括：供热抽汽管道、热网首站（包括热网加热器、热网疏水泵、热网循环水泵）、热网循环水管道。

03

## 机组供热期运行的性能指标

- 3.1 高背压循环水供热改造技术；
- 3.2 光轴供热改造技术；
- 3.3 切缸供热改造技术（凝抽背、低压缸零出力）

## 高背压循环水供热改造后机组的性能指标

- 抽凝机组采用高背压供热之后，能够在原来最大采暖供热能力基础上，再增加约20%的供热量。机组供热期一次能源利用效率达到85%以上，热电效率达到96.3%-98.5%，热耗率3650-3750kJ/kW.h之间，抽汽工况的热耗率稍高。
- 改造后，低压缸级数少了或末级叶片短了，低压缸做功能力降低，机组的最大出力降低，大约降低到原来的70%—80%。
- 青岛300MW机组最大出力为230MW，最小出力165MW；十里泉140MW机组最大出力为110MW，最小出力75MW；滕州145MW机组最大出力为133MW，最小出力80MW。
- 最大出力受冷端参数，尤其是背压的影响；从锅炉稳燃性能来说，机组最小出力都能够达到改造前的数值，或者更低，但此时机组供热能力和供热量降低，达不到热网的需要，因此供热期机组最大负荷降低，最小负荷增加，机组调峰区间变窄。

### 光轴供热改造后机组的性能指标

- 少了低压缸做功，整机出力大约降低到原来的70%；
- 苏制210MW机组（三缸两排汽），光轴供热改造后设计额定出力158.5MW，抽汽流量491 t/h，额定供热能力为321MW；最大试验出力150.7MW，抽汽流量448t/h，最小试验出力90MW，机组150.7MW工况下的试验热耗率4223kJ/kW.h，供热量1099GJ/h。
- 哈汽220MW机组（三缸三排汽），光轴改造后额定出力155MW，最大试验出力151.8MW，**最大抽汽量301.4t/h，此工况下的试验热耗率5972.7kJ/kW.h。**
- 与高背压供热改造相比，供热量增加，同时运行稍加灵活，抽汽量、供热量随着供热负荷的变化而变化；在相同的主蒸汽流量和锅炉最低稳燃负荷流量下，机组发电功率降低，有利于电网的低负荷调峰，但顶出力能力降低，调峰区间大幅度变窄。
- 光轴供热改造，由于抽汽供热（背压供热），供热品质高，对发电出力影响大，在相同的主蒸汽流量下，发电功率下降幅度大、热耗率就高。

## 切缸供热改造后机组的性能指标

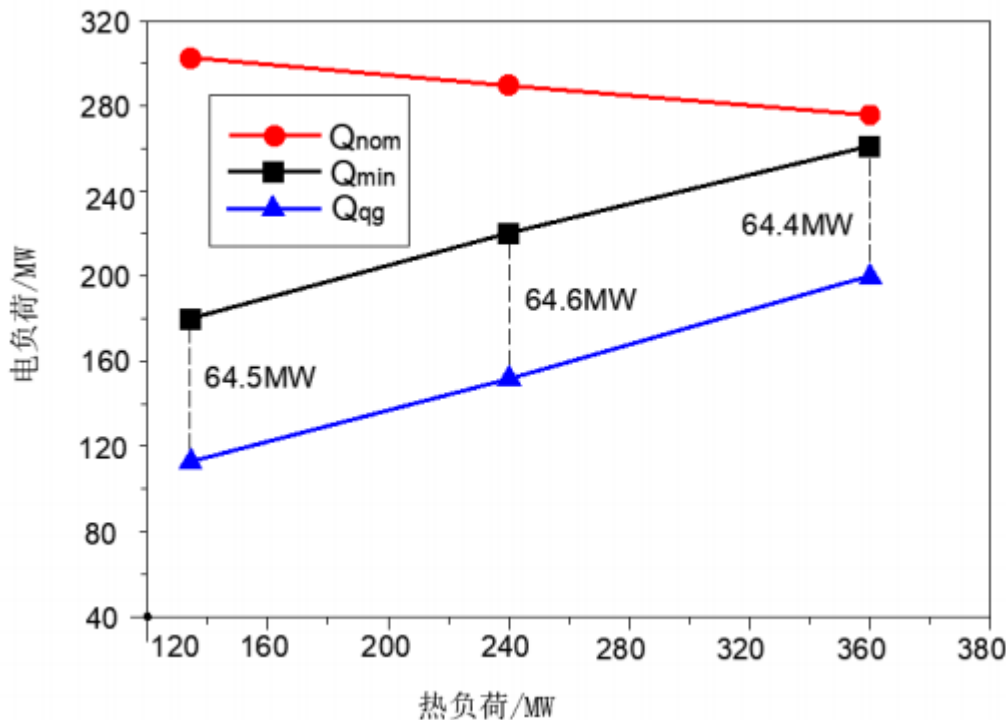
- ▶ 切缸供热技术，机组有三种运行方式：纯凝、抽凝、背压；机组在抽凝或者纯凝工况运行时，与常规抽凝机组没有区别；背压运行方式与光轴供热改造类同。
- ▶ 两种极端工况是纯凝工况和背压供热工况：纯凝工况，不考虑中低压缸连通管压力损失，机组热耗率不变；背压供热工况，机组热耗率与光轴改造相同，受抽汽参数与低压缸做功所占份额有关；抽汽工况的热耗率介于两种工况之间。
- ▶ 热电机组，尤其是背压供热机组，传统上实行“以热定点”、“热电耦合”的运行方式，导致机组供热期最高负荷带不上去，最低负荷压不下来。
- ▶ 切缸供热改造机组的最大优点在于运行方式灵活，由此带来的调峰能力大和调度灵活，实现了“热电解耦”。

## 切缸供热改造后机组的性能指标

- ▶ 两种工况决定切缸技术的调峰区间：纯凝条件下的最大连续出力TMCR工况决定了切缸供热机组改造后的最大出力；背压工况下，锅炉最低稳燃负荷，决定了机组最小出力，约为机组改造前最小出力的60%~70%，为纯凝THA工况的25%~30%。
- ▶ 某330MW抽凝机组实施切缸供热改造：改造前后采暖抽汽参数不变，改造前额定采暖抽汽量330t/h，额定供热负荷240MW，最大采暖抽汽量450t/h，最大供热负荷320MW，折算1152GJ/h；改造后约有656t/h 蒸汽用于采暖供热，可增大供热能力150MW，折算为540GJ/h，改造后最大供热负荷470MW，折算1692GJ/h，单机可接待最大供热面积1175万m<sup>2</sup>，单机可新增供热面积375万m<sup>2</sup>。

## 切缸供热改造后机组的性能指标

- 某330MW机组，相比于改造前锅炉最小出力工况，保证对外供热负荷不变的条件下，切缸改造后可使发电功率下降约64MW。在带供热负荷135MW条件下，最低电负荷为110MW，达到THA工况出力的33.3%。
- 已改机组数据：改造后在锅炉100%负荷时，发电负荷约为60%，300MW机组采暖抽汽达650t/h；在锅炉40%负荷时，发电负荷约为25%，300MW机组采暖抽汽量约250t/h。**供热能力和调峰能力提升效果显著。**



## 切缸改造技术与高背压循环水供热技术的性能指标比较（以某330MW抽凝机组为例）

| 项目             | 单位      | 额定进汽量、切缸改造(按照<br>低压缸进15t/h冷却汽计算) | 额定进汽量、高背压<br>改造(最大热负荷) |
|----------------|---------|----------------------------------|------------------------|
| 机组进汽量          | t/h     | 998                              | 998                    |
| 采暖抽汽量          | t/h     | 651.9                            | 380                    |
| 采暖热负荷          | MW      | 467.2                            | 272.3                  |
| 总供热负荷          | MW      | 467.2                            | 475.7                  |
| 机组电负荷          | MW      | 220.0                            | 244.8                  |
| 相对纯凝时机组电<br>负荷 | MW      | 330                              | 330                    |
| 给水泵汽轮机进汽       | t/h     | 39.3                             | 59.1                   |
| 凝汽器进汽量         | t/h     | 54.3                             | 320.5                  |
| 凝汽器背压          | kPa     | 5.39                             | 43.7                   |
| 所需循环水量         | t/h     | 2124                             | 8834                   |
| 循环水进水温度        | ℃       | 16                               | 55                     |
| 循环水出水温度        | ℃       | 31.2                             | 75                     |
| 供热温度           | ℃       | /                                | 101.4                  |
| 机组热耗率          | kJ/kW.h | 4243                             | 3690                   |

## 切缸改造技术与高背压循环水供热技术的性能指标比较

从以上330MW机组切缸供热改造和高背压供热改造性能指标的计算，可以看出两者运行性能的差别。光轴供热改造等同于此计算工况的切缸改造技术。

- ▶ 在额定进汽流量工况，切缸改造技术的热耗率比高背压供热改造大，原因是发电量少；同样，高背压供热机组，如果带中低压缸连通管抽汽，其热耗率也高于高背压纯凝工况。
- ▶ 在额定进汽流量工况，切缸改造技术的发电功率比高背压供热改造小，原因是供热蒸汽品质高。对以上330MW机组，切缸改造技术利用中压缸排汽供热，设计压力0.4MPa，设计温度245.7℃；高背压改造利用低压缸排汽供热，设计压力43.7kPa。
- ▶ 以上三种方式，都没有冷源损失，因此计算的机组试验热耗率应该都在3650-3750 kJ/kW.h之间，计算的机组热耗率有差别，跟计算方法和热力系统还有关系，供热量从系统吸热量中减掉，而热网首站回水的参数影响机组供热量的计算。
- ▶ 以上三种方式，要比较供热工况的经济性，应计算其一定条件下的发电功率、供热量、热化发电率（额定进汽量条件、一定的热负荷条件等）。

04

## 运行中的参数控制和注意事项

- 4.1 高背压循环水供热改造技术；
- 4.2 光轴供热改造技术；
- 4.3 切缸供热改造技术（凝抽背、低压缸零出力）

### 改造时关注的问题

**(1) 背压选取要合适，背压越高，热网循环水供水温度越高，越有利于采暖供热；背压越高，排汽温度也越高，但是排汽温度不能超过机组运行的排汽温度上限值（80℃）。**

➤综合以上因素，排汽压力以不超过50kPa为宜，相应的供水温度不超过80℃。

**(2) 机组改造能否成功，与诸多因素有关，其中主要的有：热网循环水量不能太小、循环水入口温度不能过高、机组正常运行的发电负荷不能过小。**

### 改造注意事项

#### ► 改造后对机组出力的影响因素

- ❶ 冷端设计参数和实际运行参数决定汽轮机背压，背压与末级叶片长度决定汽轮机改造后的最大出力；
- ❷ 为了机组低压缸安全运行，避免低压缸出现鼓风过热现象，同时为了保证机组的供热能力，机组不允许电负荷过小，机组调峰区间变窄。
- ❸ 不考虑最低供热负荷，锅炉最低稳燃负荷时，汽轮机的最低负荷降低。

# 改造注意事项

### ► 运行时采暖抽汽量不宜过大：

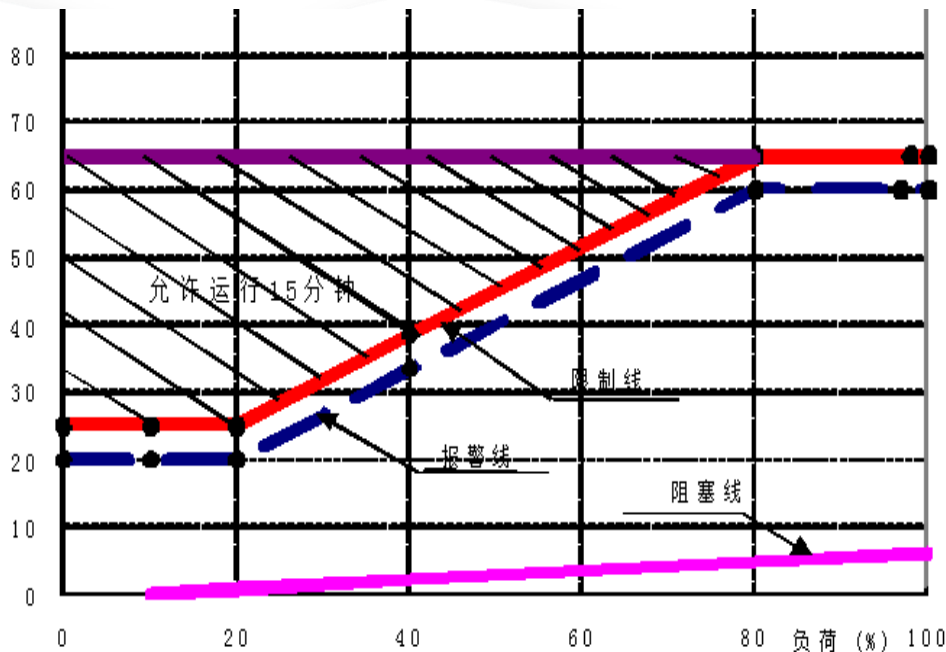
- ❶ 高背压运行时，低压缸容易鼓风过热，特别是当机组带有采暖抽汽时，低压缸的缸效率下降，鼓风更容易发生；
- ❷ 低压缸的安全排汽量不宜小于额定纯凝时的60%；
- ❸ 因此当机组改造成高背压供热运行时，相应的采暖抽汽量应适当减小，以300MW机组改造为例，采暖抽汽量不宜大于300t/h。

这几点与切缸供热改造技术矛盾。

### 运行中需要关注的问题

#### 背压限制

为安全起见，要确保在高背压供热时，末级叶片的运行条件在安全范围内。根据叶片本身的特性，动应力在相对容积流量小于20%时会急剧升高，相对容积流量至11%左右时达到峰值，因此，要控制高背压运行时排汽容积流量大于末级叶片设计容积流量的20%。根据这个原则，考虑一定的安全余量，给出末级叶片的背压限制线。在报警线以下的区域运行，机组是安全的。



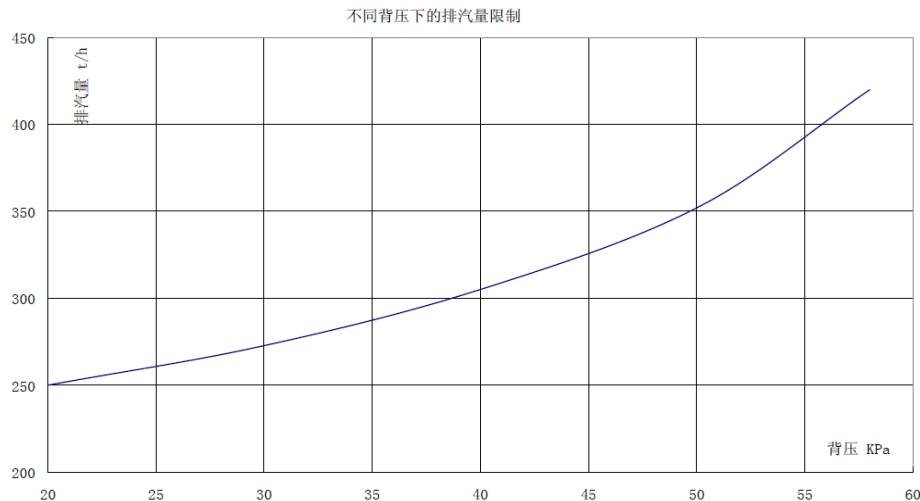
680mm末级叶片的背压限制曲线

### 运行中需要关注的问题

#### 汽轮机运行调节及优化运行

冬季高背压供热工况运行时，尽量让改造后机组多带负荷运行，从而减少冷端损失，提高整个电厂经济性。当机组投入高背压供热运行时，要采取以热定电的运行方式。热负荷变工况时有两种调整途径：1、在采暖初期，热负荷需求量小时，回水温度降低（低于 $60^{\circ}\text{C}$ ），可以采用降低背压运行的方式，减少排汽量，降低供热量；2、当回水温度达到 $60^{\circ}\text{C}$ ，供热量需求仍旧没有达到最大需求时，可以调整抽汽量，调整供水温度。两种调整方式可以同时进行。

不同背压下的最小排汽量限制见右图。



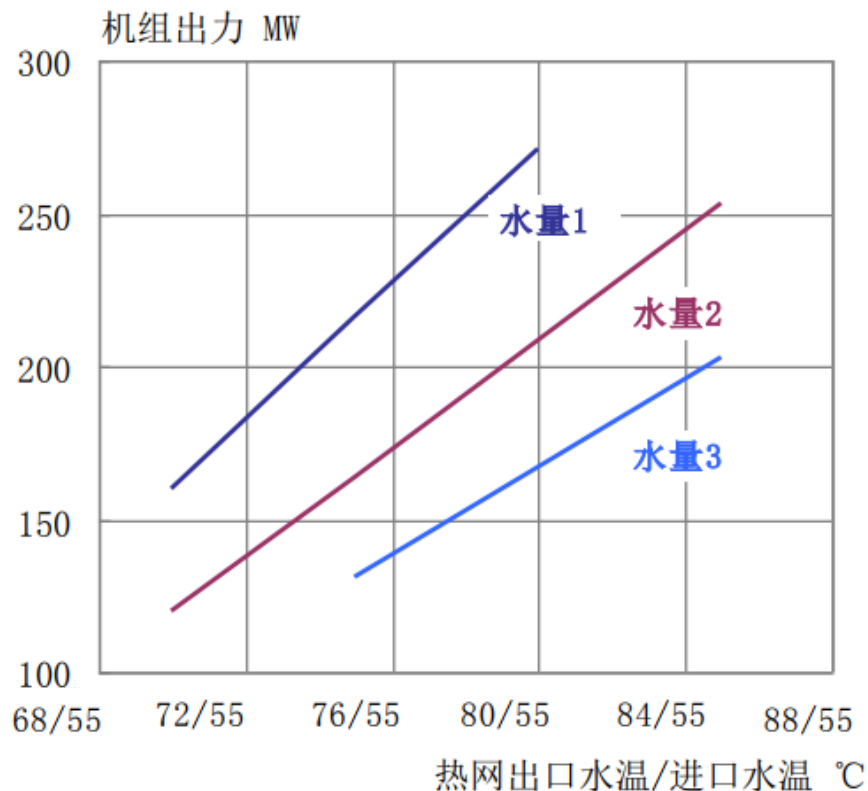
不同背压下排汽量限制

### 运行中需要关注的问题

#### 汽轮机运行调节及优化运行

- 1、采暖初、末寒期由于环境温度相对较高，供热负荷较小，机组根据热负荷及热网供回水温度来调节发电量。
- 2、极寒期由于供热负荷增加，仅靠改变机组负荷的方式来调节热网循环水已经不能满足要求，也即在极寒期需要通过本机或是临机中排抽汽来进一步加热热网水。
- 3、本机运行方式优化与不同供热方式机组间的运行优化问题。

—能量梯级利用最经济



### 改造注意事项

#### ◆ 光轴供热/切缸供热改造需注意的问题

- 低压缸进汽量问题；
- 供热期冷端系统、热力系统的运行方式；
- 中低压分缸压力对供热经济性的影响；
- 连通管的设计；
- 低压转子与光轴的互换（液压螺栓，标准化处理）——光轴；
- 轴瓦的通用性——光轴；
- 低压叶片安全性问题（应力、水蚀）——低压缸零出力。



# 谢谢！

求真 务实 专业 纯粹

报告人:王学栋

二〇一九年 九月