

# 在役机组供热改造 及 供热机组灵活性提升技术

报告人：宁哲

2018年4月·武汉



TPRI 微信二维码



# 第一部分 在役机组供热改造技术



一、前言



二、改造背景



三、采暖供热改造



四、工业供热改造



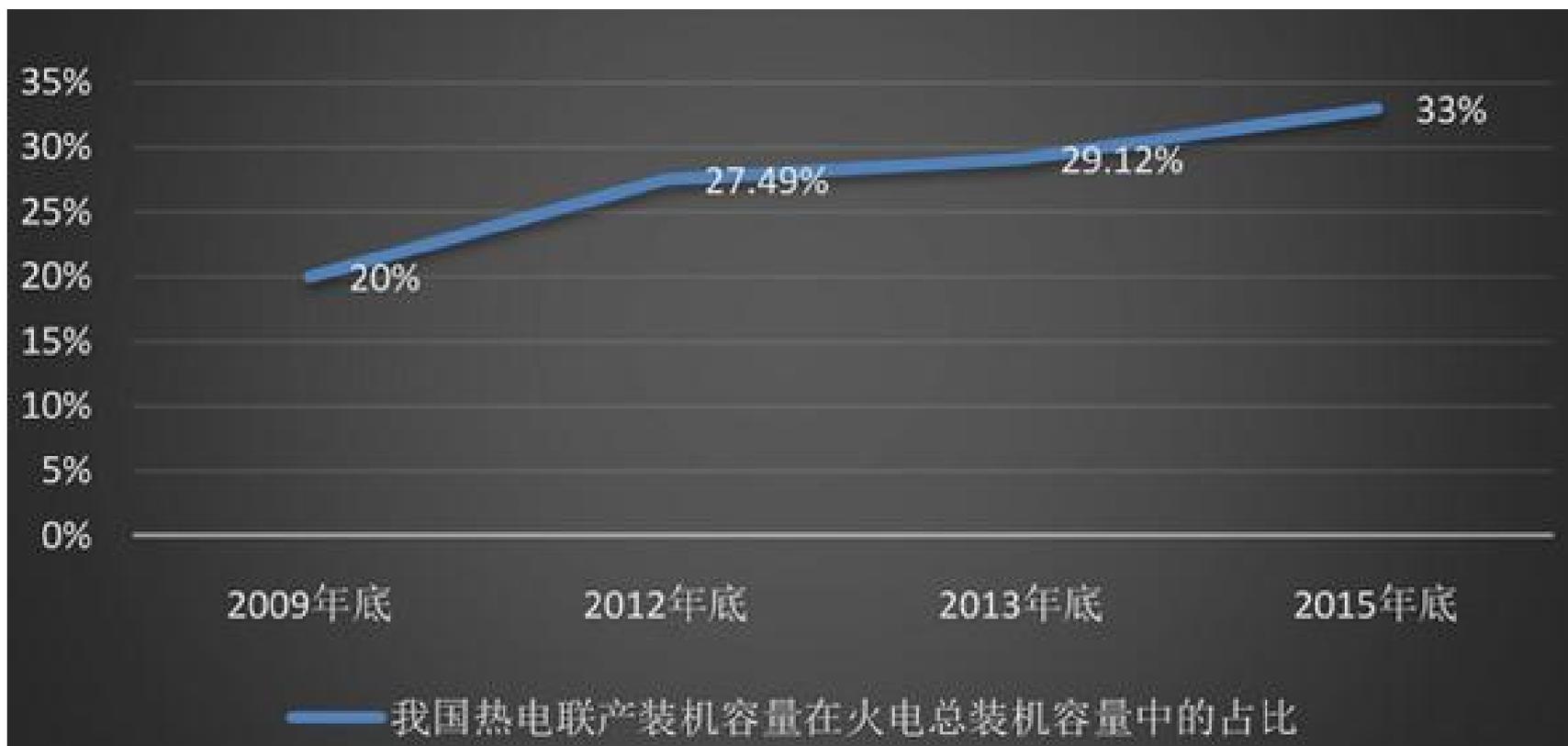
五、供热改造应关注的技术问题



六、结束语

## 一、前言

► 热电联产是**节能减排**的一项重要手段，近年来我国热电联产事业得到**蓬勃发展**



# 一、前言

## 建设了一大批热电联产机组

- **超超临界1000MW**抽凝供热机组已在**天津北疆**电厂投运
- **超临界600MW**抽凝供热机组已在福建**鸿山热电**有限公司投运
- **超临界350MW**抽凝供热机组已在**华能长春热电**厂投运
- 华能北京热电厂二期扩建工程建设两台F级燃机“二拖一”**燃气-蒸汽联合循环供热机组**，新增供热面积1300万平方米，新增发电能力92.3万千瓦
- 配**旋转隔板**的200MW汽轮机中电投平顶山电厂投运
- **高参数热用户**供热解决方案，应城、平果铝的例子

# 一、前言

一大批在役100MW~600MW纯凝机组正在或已经进行了供热改造

- 在役纯凝机组供热改造是实现热电联产最为快捷和有效的方法
- 在役纯凝机组供热改造、热电联产为节能减排做出重大贡献
- 电厂降低全年煤耗的需要, [青岛的例子](#)
- 地方政府节能减排的需要, [德州的例子](#)
- 城市热化的需要, [赤峰的例子](#)
- 市场发展的需要, [天生港的例子](#)

## 二、改造背景

### 1. 国家政策要求

◆ 国家一系列支持、鼓励政策及要求：

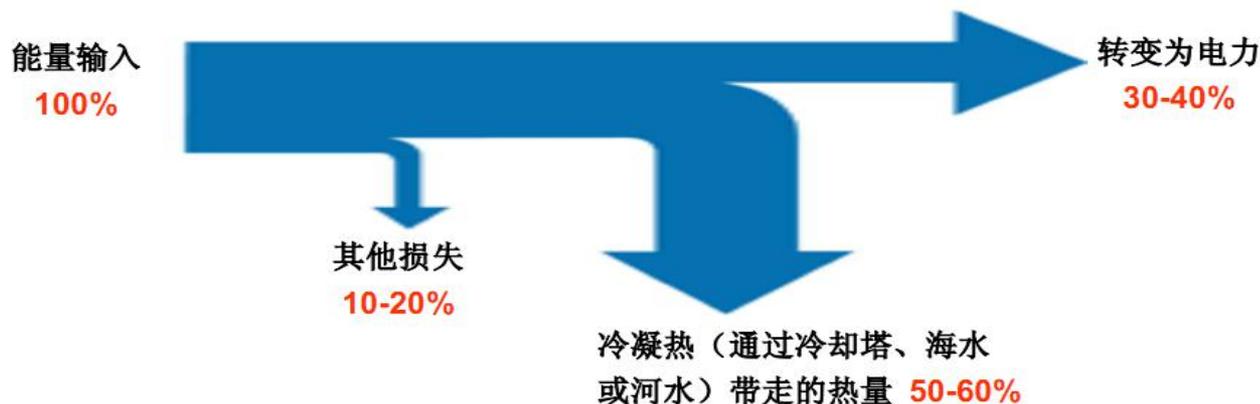
- 《国家能源节约与资源综合利用规划》；
- 《煤电节能减排升级与改造行动计划（2014—2020年）》；
- 《热电联产管理办法》（发改能源[2016]617）；
- 《“十三五”节能减排综合工作方案》。

## 二、改造背景

### 2. 节能减排的需要

◆ 火电厂的节能一直是工业节能的重点：

- 重点发展热电联产、集中供热及热能梯级利用技术；
- 火电机组冷源损失是其最大能量损失；
- 火电机组供热可显著减小冷源损失。



## 二、改造背景

### 3. 改善环境质量的需要

#### ◆ 集中供热、供汽，改善城市环境质量的需要

- 环境质量问题；
- 分散燃煤小锅炉供热的效率低、污染大；
- 城市发展带来的采暖供热缺口；
- 新兴工业园区对高温蒸汽的需求；
- 供热长输能力大幅提升带来的新用户；
- “2+26” 城市清洁取暖要求。

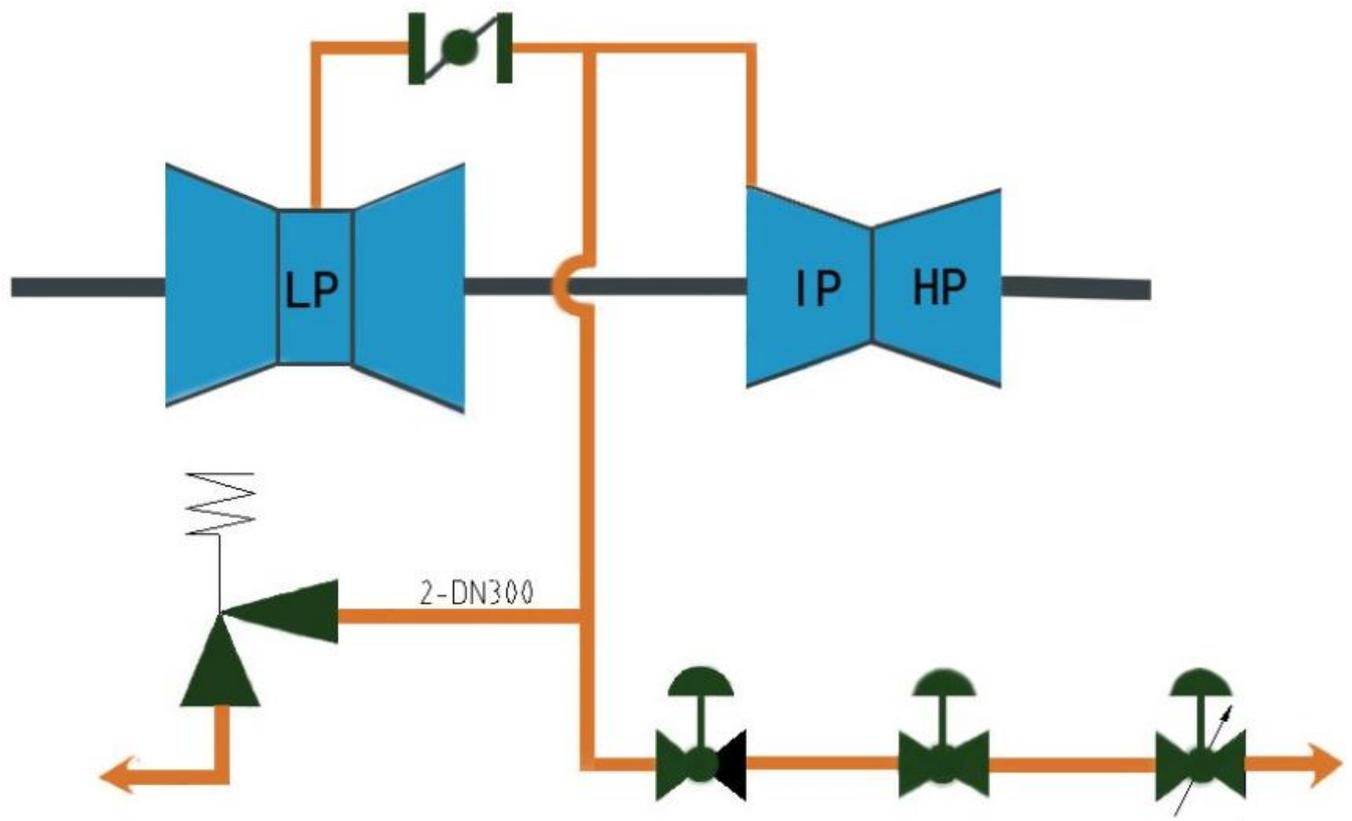
## 二、改造背景

### 4. 提升企业盈利能力的需要

- ◆ 采暖供热及工业供汽，成为火电企业增加收入的重要手段
- 设备年发电利用小时数持续下降；
- 火电机组处于低收入、高成本的经营模式；
- 供热有利于提升火电企业经济效益。

# 三、采暖供热改造

## 1. 中低压连通管采暖抽汽



## 三、采暖供热改造

- 在役纯凝式汽轮机供热改造中，采用最多的供热方式；
- 具有简单易行、机组运行灵活性强、全年经济性好等特点；
- 由于对机组没作大的改动，可能出现抽汽参数与供热需求匹配不尽合理现象。
- ◆ 抽汽经小焓降大流量背压机，如：华能铜川电厂
- ◆ 背压式小汽机拖动热网循环水泵
- 仍存在较大冷源损失

## 三、采暖供热改造

### 2. 低真空供热（小型机组）

#### ◆ 供热改造方案：

- 适当提高机组排汽背压（不改造或一次性改造，若改造需考虑对纯凝期的影响，如：根河电厂实施一次性改造）；
- 管网适配性问题（热网循环水进凝汽器，原循环冷却水隔离）；
- 热网水回收乏汽余热。

#### ◆ 技术特点：

- 背压选择；
- 冷源损失降低至零；
- 对安全可靠性的影响（汽轮机、凝汽器、轴系振动）；
- 对热网循环水量的要求。

## 三、采暖供热改造

### 3. 高背压供热

#### ◆ 供热改造方案：

- 叶片拆除与重装（聊热、曲阜）/双转子互换（黄台、德州、金桥）；
- 检修工期、技术风险、检修成本有所区别；
- 其他设备及系统适配性改造（配套投资相对较大）；
- 轴系稳定性保障措施；
- 管网改造，引入热网水回收排汽余热。
- 原有循环冷却水系统退出运行。

2012对青岛电厂的论证

# 三、采暖供热改造



## 三、采暖供热改造

- ◆ 其他系统及设备适配性改造
  - 凝汽器（强度、结垢、热膨胀）
  - 给水泵汽轮机
  - 凝结水精处理系统
  - 开式冷却水系统
  - 轴封冷却器
  - 抽真空系统
  - 管网
  - 首站设备（热网泵：汽泵、电泵）

## 三、采暖供热改造

高背压供热的演变体：

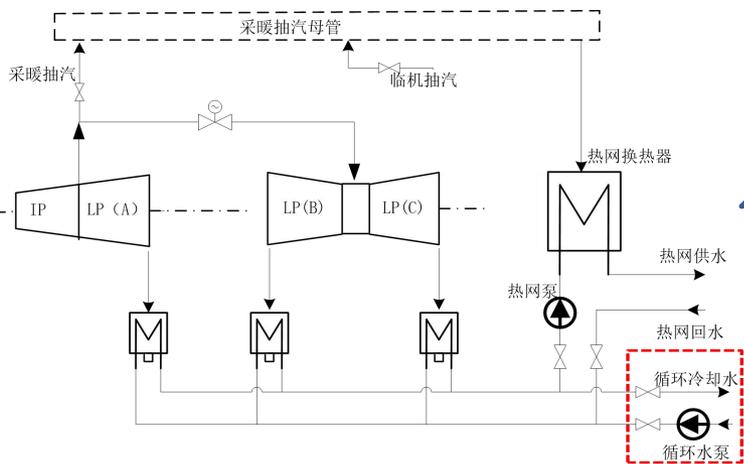
600MW超临界直接空冷机组双背压供热（朝阳）

基于双工质冷却的部分高背压供热（曲阜）

◆ 技术特点（因地制宜，因机制宜）：

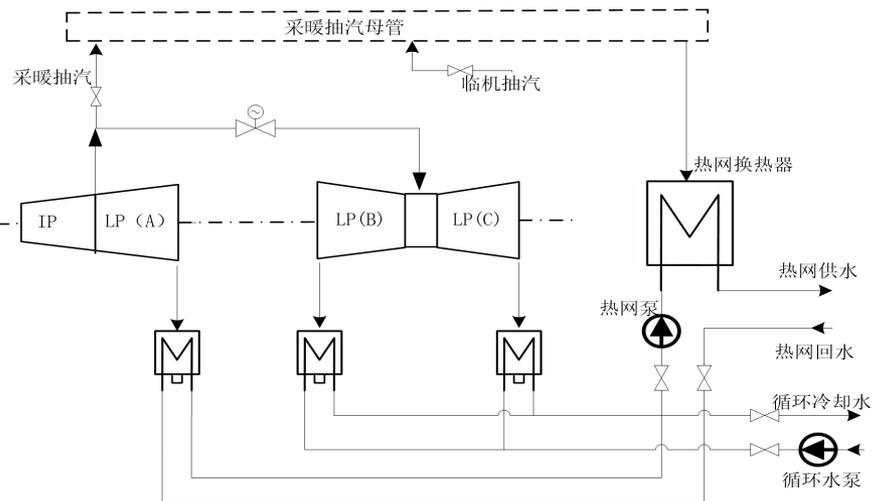
- 对热网循环水量要求降低30%~60%（显著降低准入门槛）；
- 两种冷却工质并列运行（一侧进循环冷却水，另一侧进热网循环水）；
- 可回收部分排汽余热（可根据水量条件分步改造），实现部分高背压供热；
- 源于三排汽机组，同样适用于四排汽机组，也可在二排汽机组中引申使用。

# 三、采暖供热改造



常规高背压

基于双工质冷却  
的部分高背压



## 三、采暖供热改造

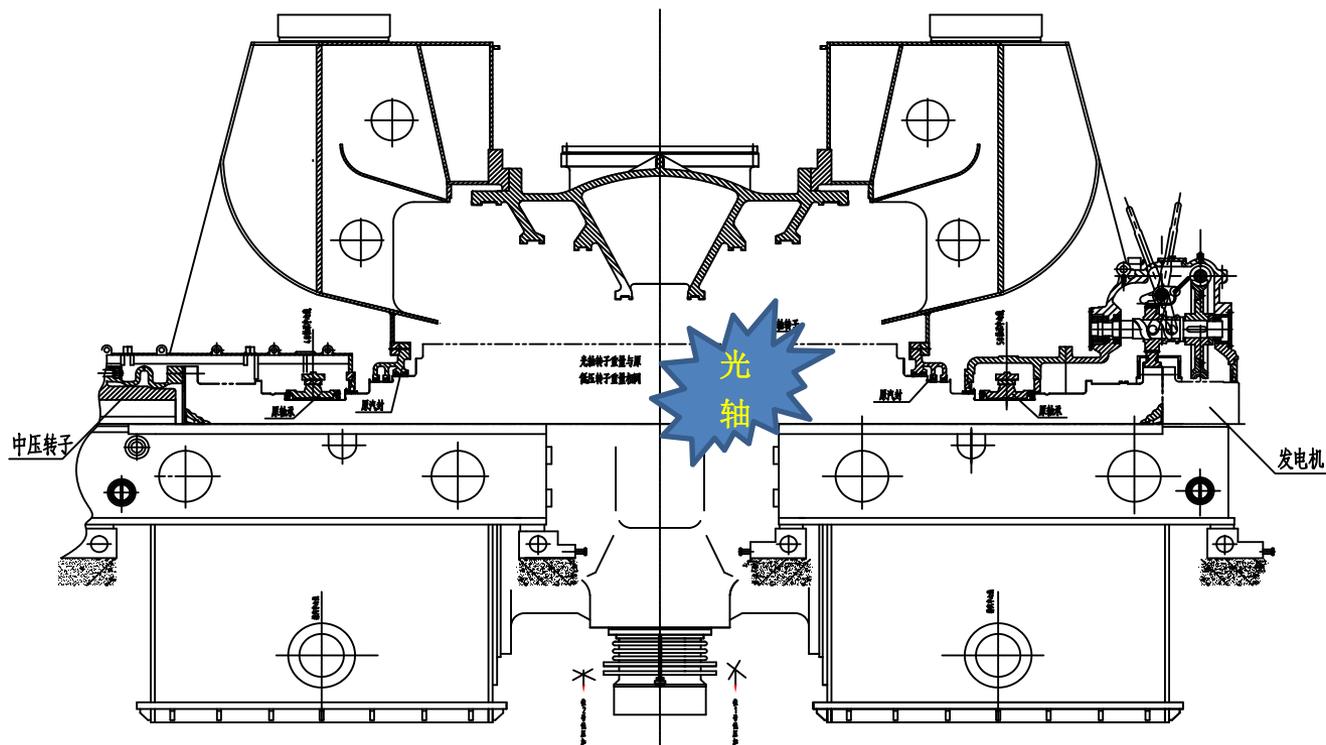
### 4. 低压光轴供热

#### ◆ 供热改造方案：

- 供热期低压转子换成光轴（仅起到一个传递扭矩的作用）；
- 对轮标准化处理（便于转子轴更换）；
- 中低压连通管改造（原连通管闷断，增设小旁路）；
- 中压排汽用于供热，供热管道上加设逆止阀、快关调节阀、安全阀等。

最早的在国电濮阳，华能系统有海热、烟台、包一等

# 三、采暖供热改造

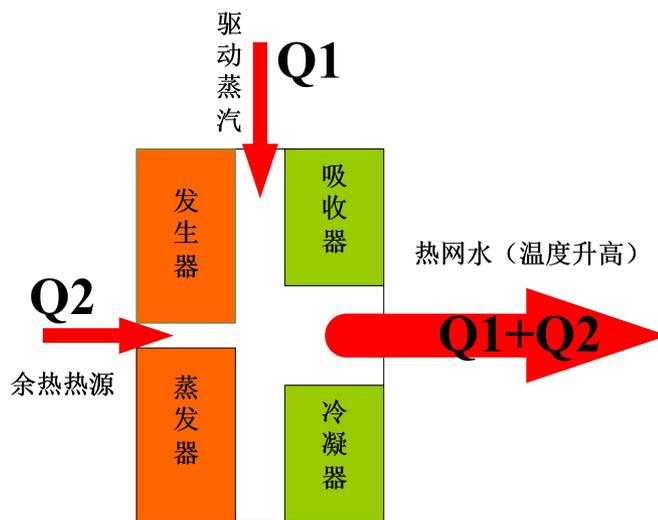
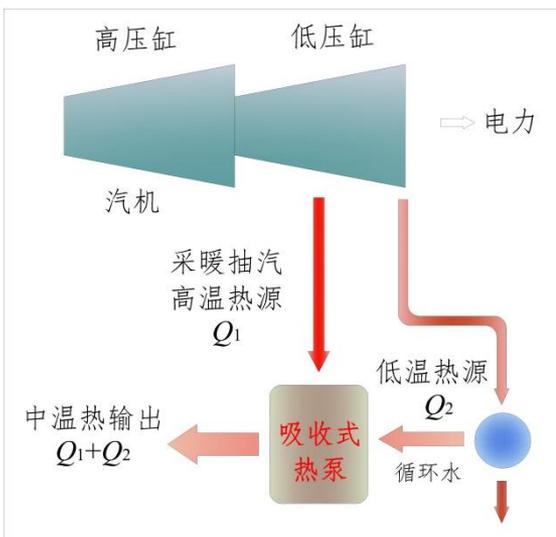


## 三、采暖供热改造

### 6. 吸收式热泵供热

◆ 供热改造方案：

- 增加吸收式热泵泵组（泵组费用、泵房及其他）；
- 驱动热源；
- 低位热源提取方式（空冷机组/湿冷机组）。



## 三、采暖供热改造

### ◆ 技术特点

- COP值（变工况性能）
- 驱动热源（抽汽量，抽汽参数）
- 可靠性及寿命
- 出口温度
- 单机容量
- 厂用电

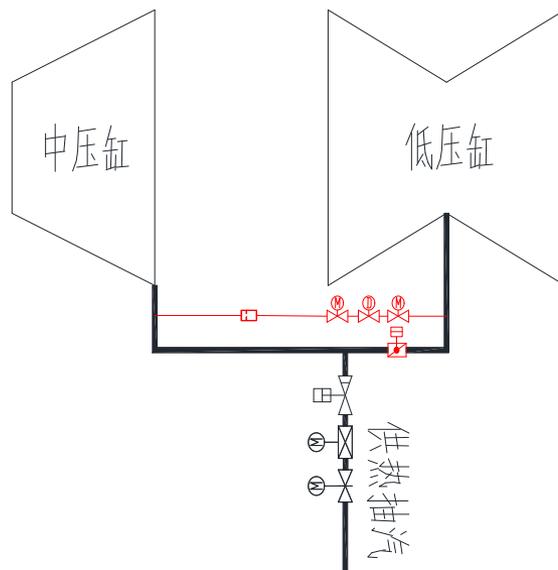
如：赤峰、九台、包二

## 三、采暖供热改造

### 6. 切除低压缸进汽供热技术（临河、延吉、东方、杨柳青、黄台）

#### ◆ 技术特点

- 中低压连通管改造；
- 加装低压缸温度测点；
- 机组喷水减温系统校核；
- 低压末级叶片安全可靠核算；
- 在线切缸试验。



ZL2017103869563

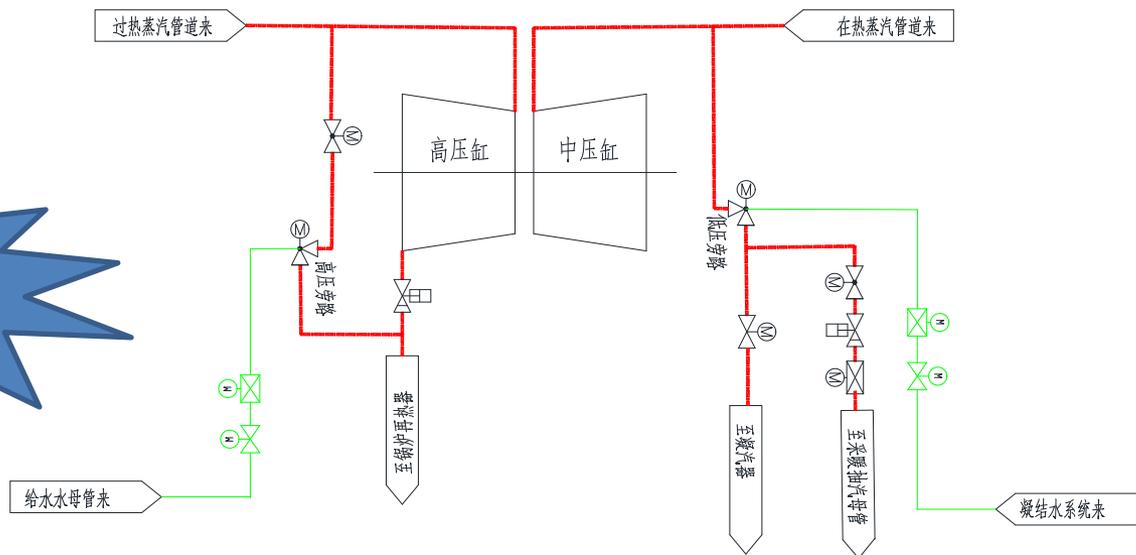
一种切除低压缸进汽的供热系统及方法

## 三、采暖供热改造

### 7. 汽轮机旁路供热技术

#### ◆ 技术特点

- 提升机组供热能力；
- 供热机组深度调峰下的供热可靠性；
- 实现停机不停炉供热。

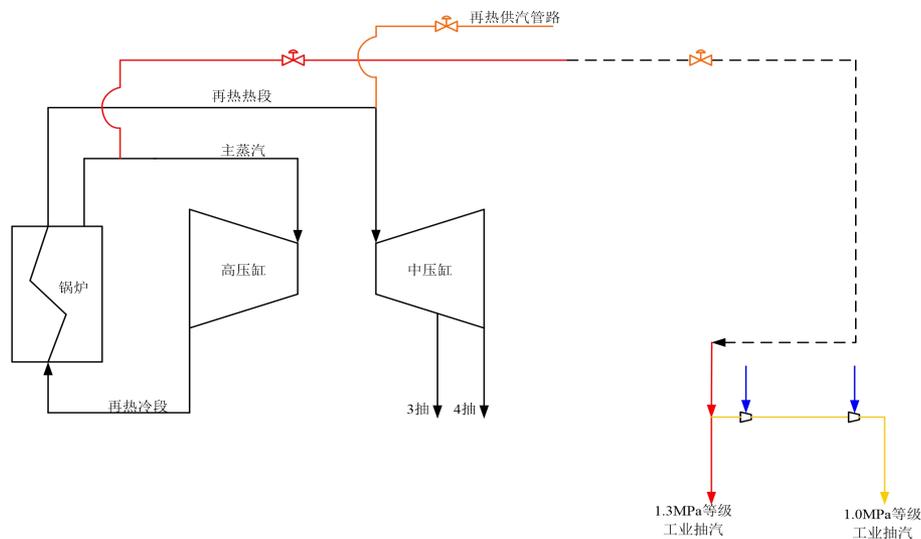


## 四、工业供热改造

### 1. 冷再/热再等抽汽供热（最常见）

#### ◆ 抽汽能力

- 冷再抽汽需考虑再热器超温限制；
- 热再抽汽能力相对更大；
- 冷再抽汽经济性一般更好；
- 常配套减温减压装置。

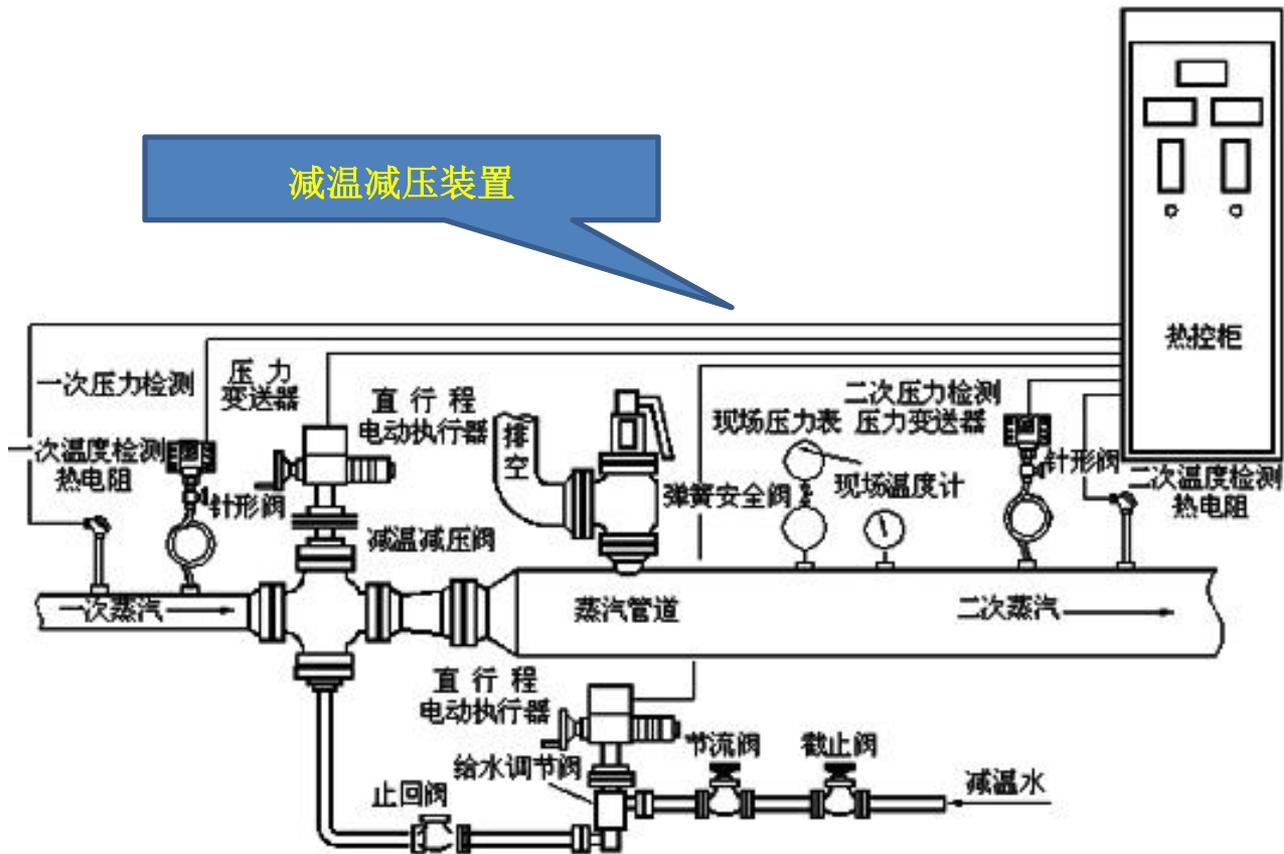


#### ◆ 安全可靠

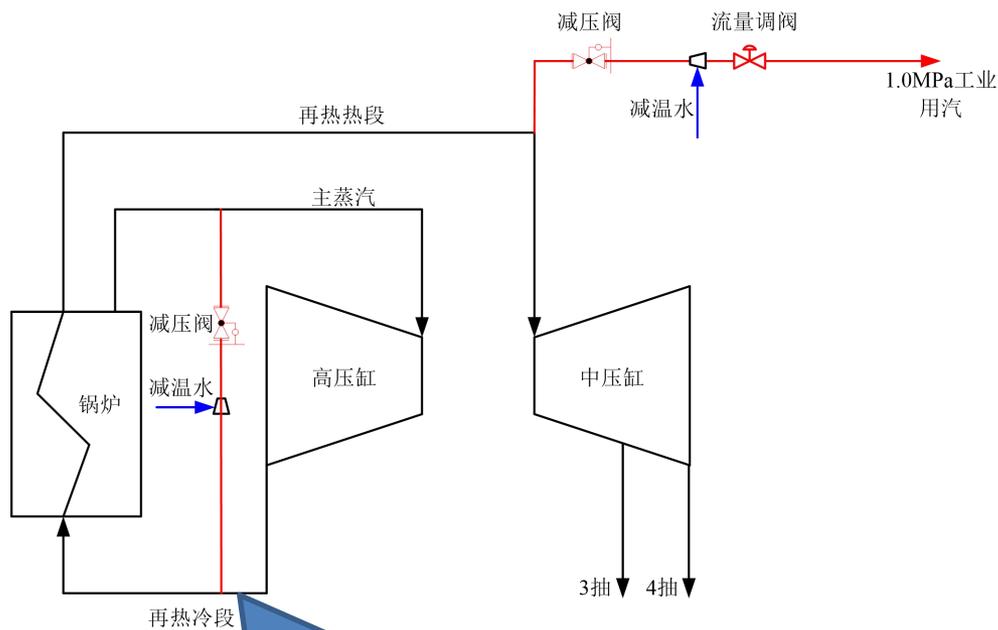
- 高压末两级叶片安全性（抽汽压力限制）；
- 机组轴向推力。

冷再、热再抽汽

## 四、工业供热改造



## 四、工业供热改造



旁路参与调节——缓解大量抽汽下的轴向推力问题

## 四、工业供热改造

### ◆ 中联门参调改造方案（德州、青山）

- 中联门改造（优化调节特性）；
- 控制逻辑改造；
- 高排压力控制；
- 轴向推力核算；
- 优点：显著提升单机冷再、热再供热能力，提高中低负荷供汽参数稳定性，利于供热机组深度调峰的要求。

## 四、工业供热改造

### 2. 旋转隔板抽汽供热（南京、西固）

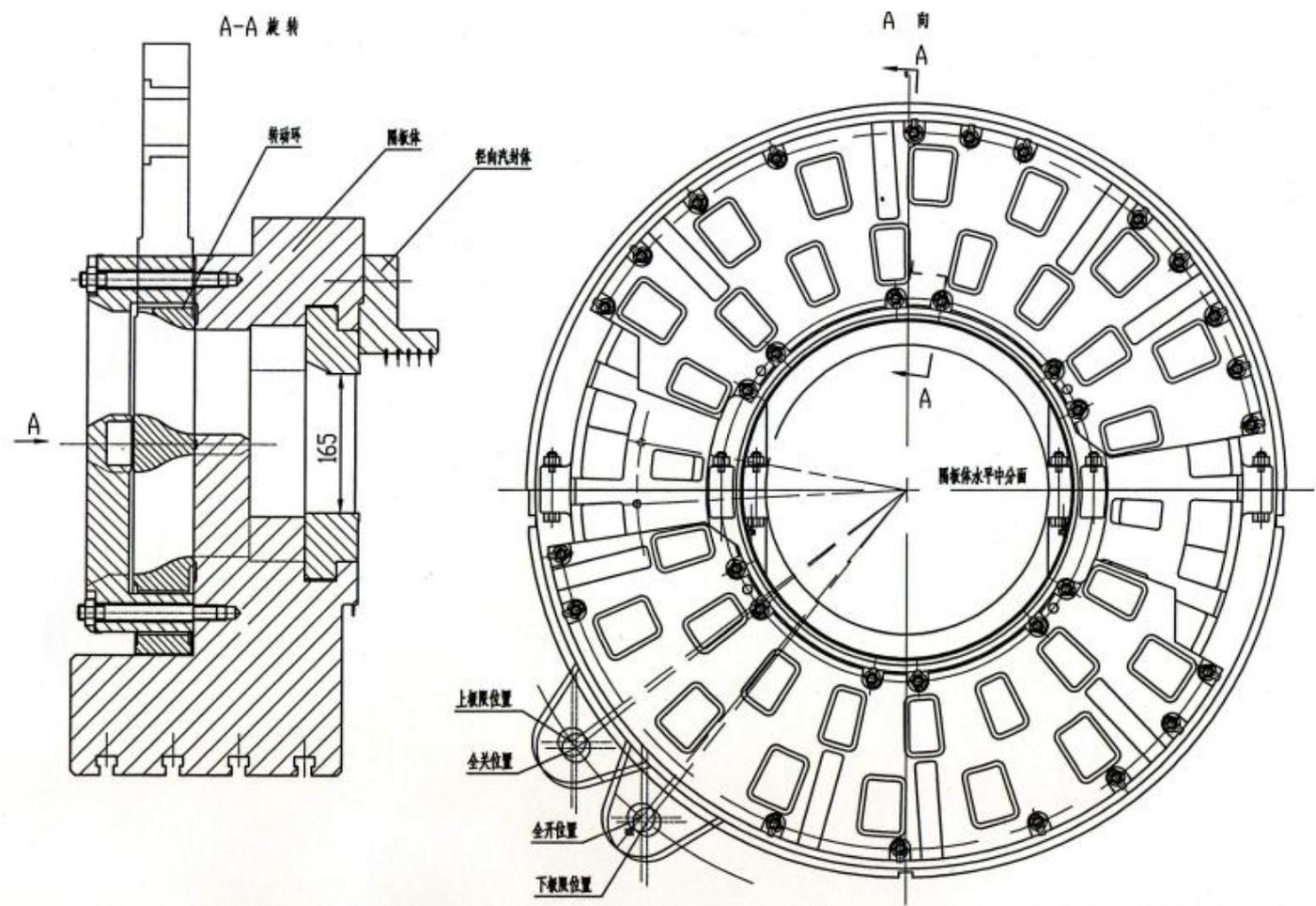
#### ◆ 技术特点

- 抽汽经济性好；
- 抽汽调节能力强；
- 新机较适合；
- 在役机组改造需结合通流改造进行。

#### ◆ 安全可靠

- 对上、下游流场的扰动（叶片安全可靠）；
- 旋转隔板本身可靠性（卡涩）；
- 改良——平衡腔室设计。

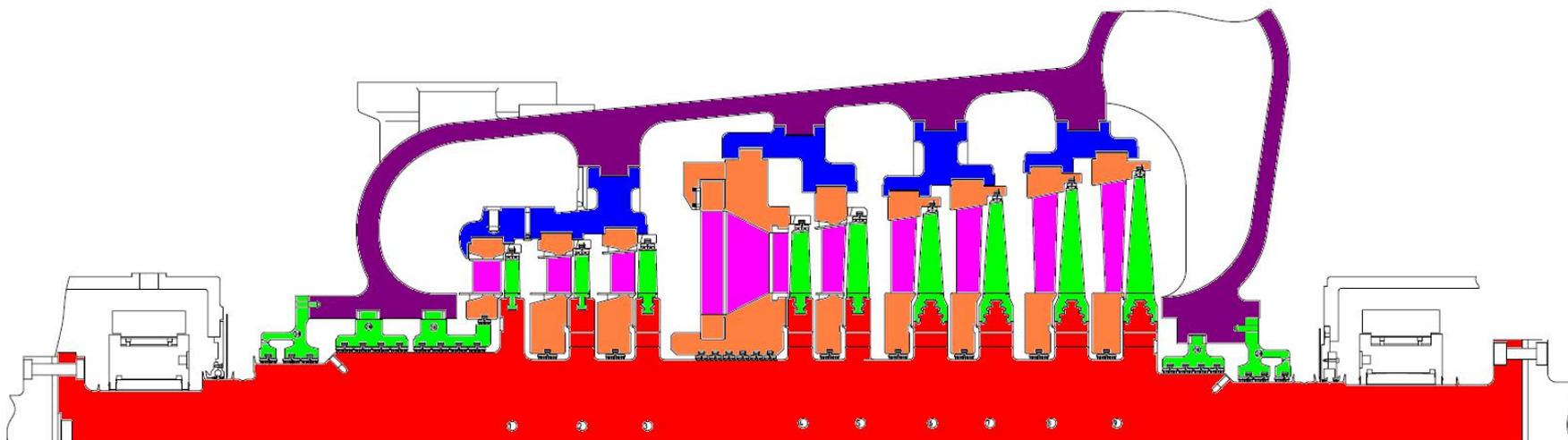
# 四、工业供热改造



## 四、工业供热改造

### ◆ 在役机组旋转隔板改造方案举例

- 增设旋转隔板，更换转子，调整通流级数；
- 更换外缸，增设油动机；
- 轴向推力核算。



## 四、工业供热改造

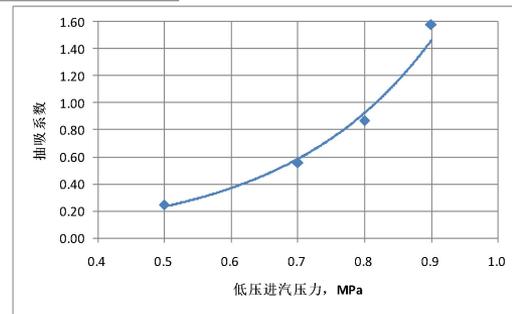
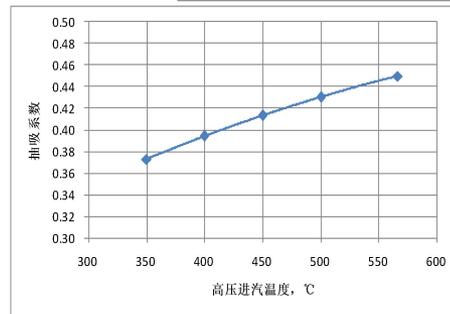
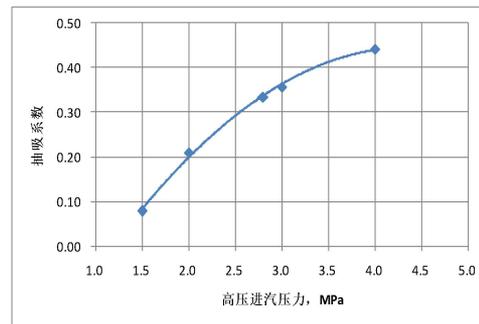
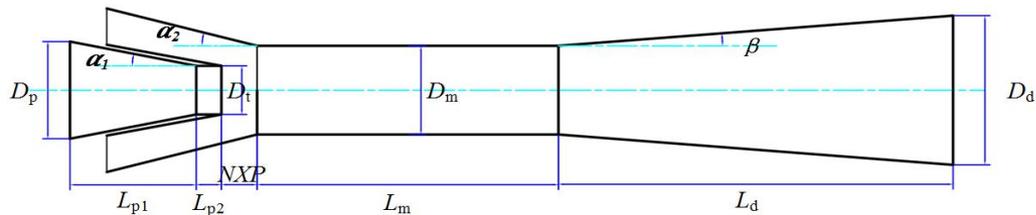
### 3. 压力匹配器 (望亭、费县)

#### ◆ 技术特点

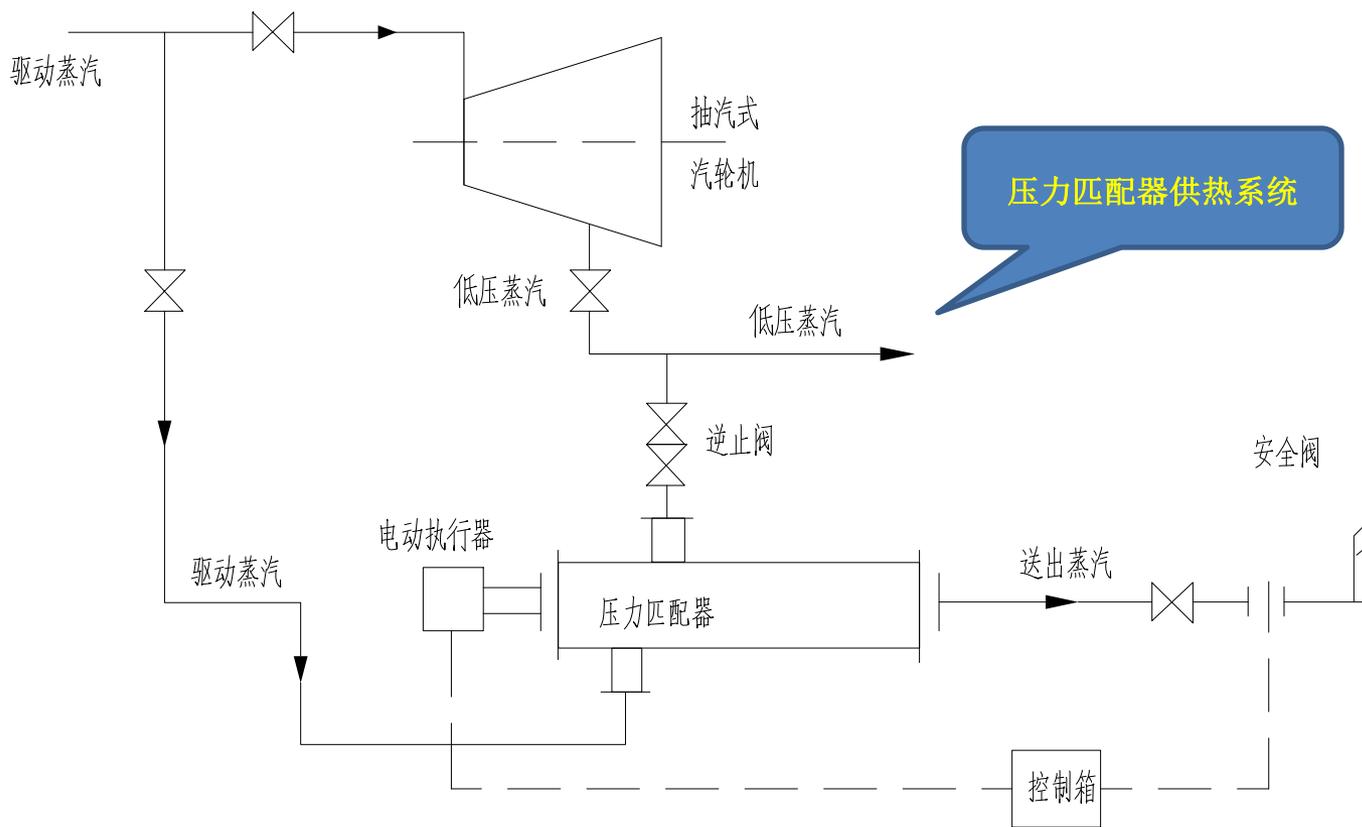
- 经济性优于减温减压;
- 高压汽源、低压汽源;
- 引射比 (变工况性能);
- 噪声。

#### ◆ 安全可靠

- 对通流部分安全性影响相对较小;
- 系统简单、可靠。

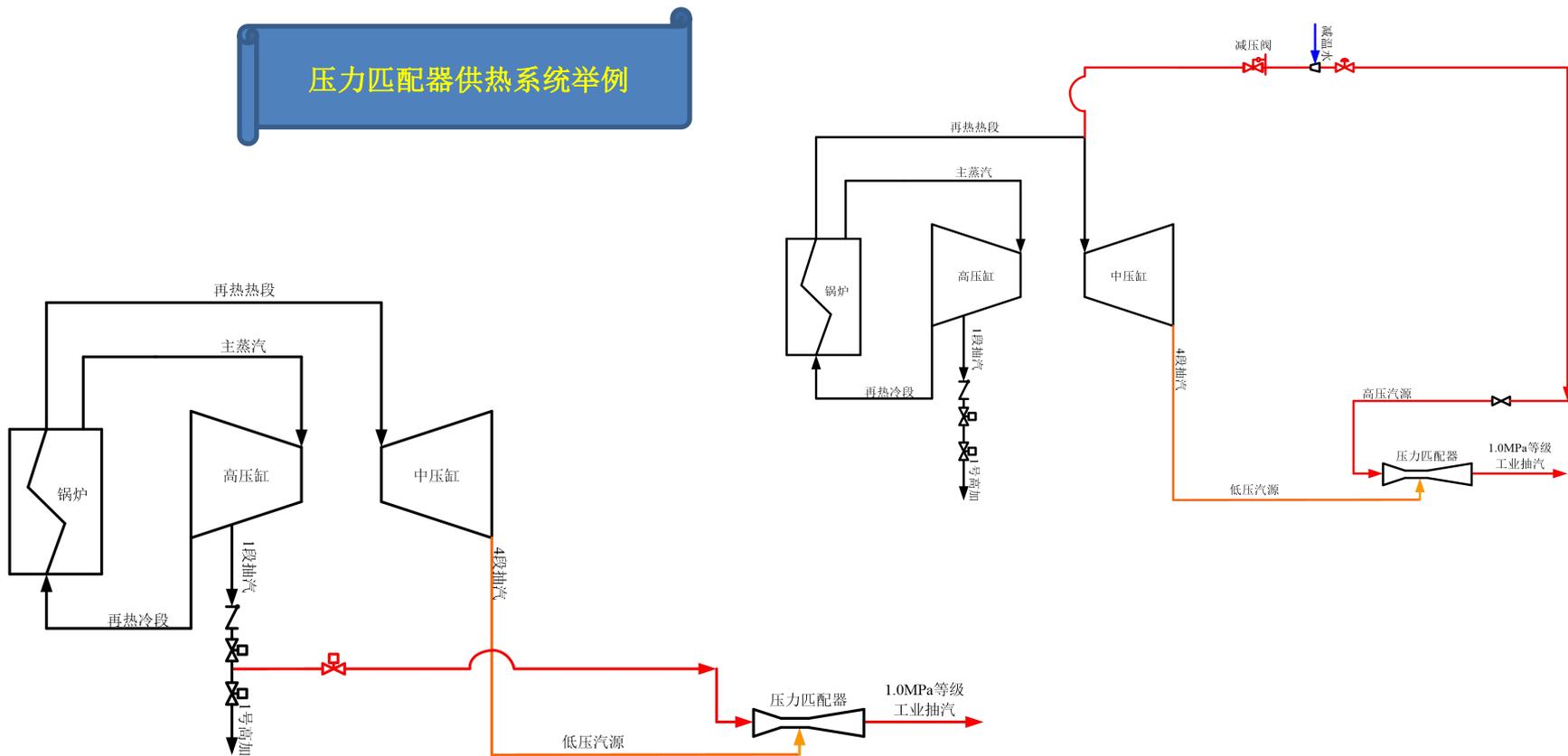


## 四、工业供热改造



# 四、工业供热改造

压力匹配器供热系统举例



## 四、工业供热改造

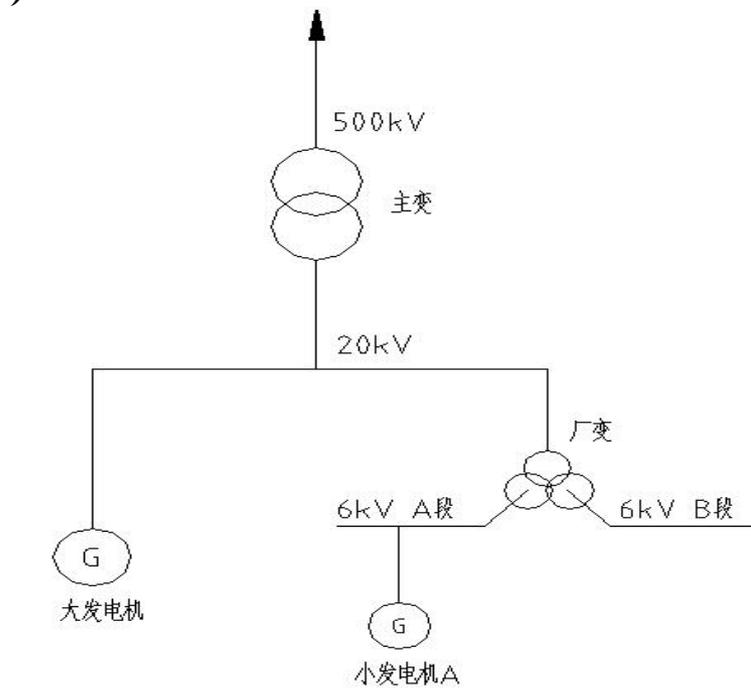
### 4. 背压机供热方案-能量梯级利用（铜川、大坝、衡水、秦热等）

#### ◆ 技术特点（广泛适用于工业抽汽及采暖）

- 供汽量较稳定的情形；
- 高压汽源；
- 排汽压力；
- 接发电机（对于采暖可驱动热网泵）。

#### ◆ 方案实施

- 增设背压发电机组
- 接入厂用电系统
- 安全可靠

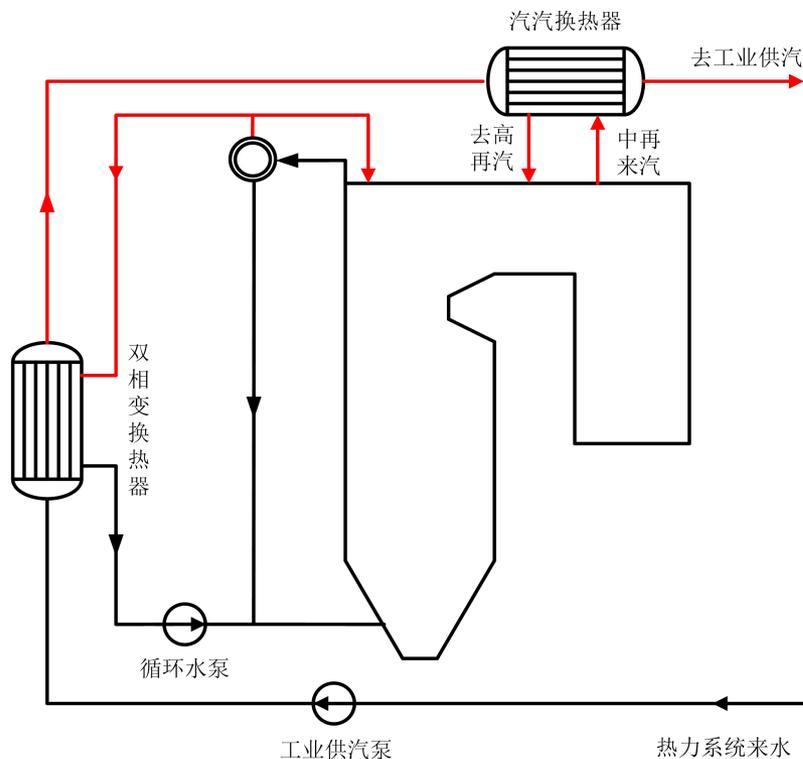


## 四、工业供热改造

### 5. 一种适用于高参数工业供汽的技术方案

◆ 技术特点（已申请不同配置方案的多项专利）

- 供汽压力范围为3.0MPa~10.0MPa；
- 供汽温度可达380℃~400℃。



## 四、工业供热改造

### [案例] G集团T电厂在役1000MW机组供工业用热

- 该厂2×1000MW机组的汽轮机系哈尔滨汽轮机厂和日本东芝联合制造的CCLN1000-25.0/600/600型。
- 已将现有的1A、1B电动引风机改为背压式小汽轮机驱动，小汽机汽源取自锅炉一级再热器出口及汽机高排出口，排汽接入对外供热管道（供热模式），也可引入高加、除氧器（回热模式）。
- 供热模式下小汽轮机设计的背压为1.2 MPa(a)，满足原设计供热要求

## 四、工业供热改造

地方政府要求，急需该厂向附近几家企业供汽以替代他们原有的自备锅炉，降低二氧化硫等大气污染物的排放。热用户处蒸汽参数要求：压力1.2MPa，温度200℃。

### 问题来了：

- 小汽轮机原设计的背压1.2 MPa(a)已不能满足新的供热需求。
- 小汽轮机几乎用尽了冷再能提供的额外用汽，从冷再处抽汽经减温减压来供汽已无可能。
- 中压缸上不可能开孔供工业用汽。

**思路：** 如何把背压式小汽轮机的排汽用起来

## 四、工业供热改造

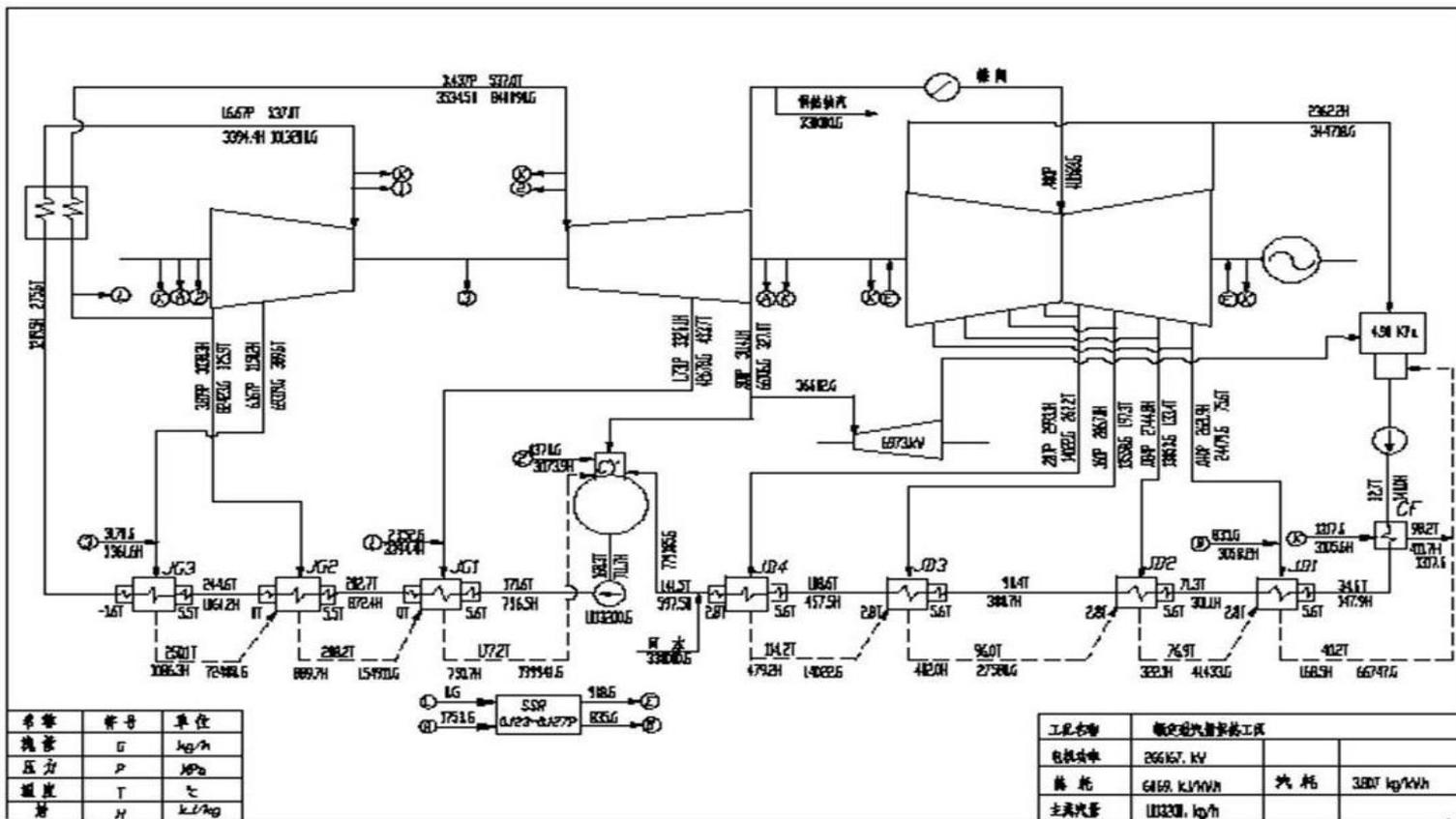
- 研究发现，适当的提高背压式小汽轮机的排汽压力是可行的
- 仅提高背压式小汽轮机的排汽压力会造成小汽轮机出力不足；
- 在提高背压式小汽轮机的排汽压力的同时，相应地提高其进汽压力是该问题的解决之道。
- 通过调整主机中压汽门，可适当提高冷再压力，也就提高了小汽轮机的进汽压力
- 以上结论在专题会上得到小汽轮机 and 主汽轮机厂家的认同，并给出了安全性和经济性方面的分析，提出了初步实施方案。

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

### (1) 对汽轮机进行详细的热力计算

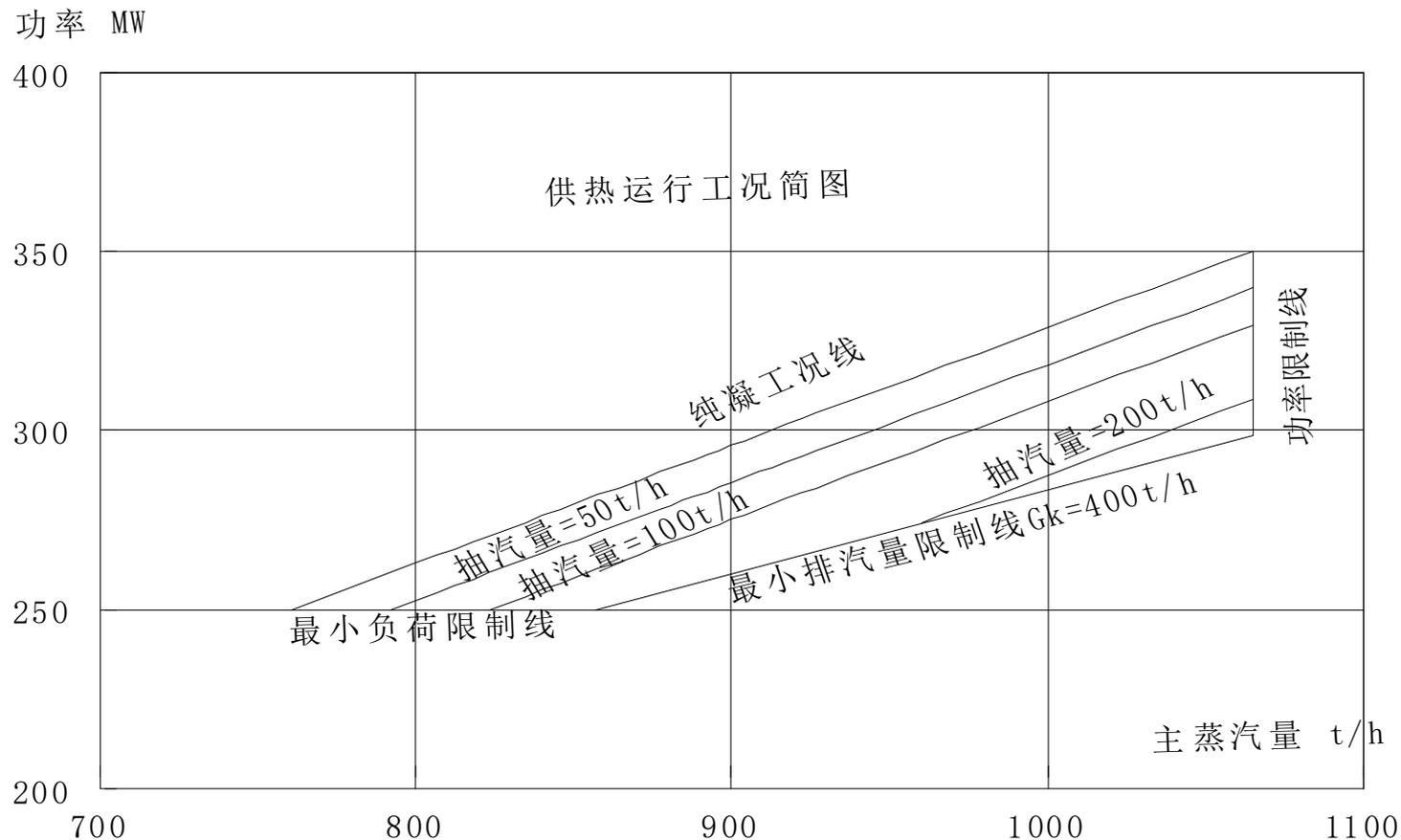
- 由原制造厂家来完成
- 对某些进口机组，由于缺乏相关资料，可能还需要测绘通流尺寸数据、收集机组资料来进行计算分析
- 绘制出新的热平衡图
- 制定供热工况图

# 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题



某电厂进口210MW汽轮机供热改造后热平衡图

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题



某350MW纯凝式汽轮机供热改造后供热运行工况图

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

### (2) 对通流部分重要零部件进行强度校核

- 供热改造后，在某些工况下中压通流级段各级焓降、压差、轮周功均有所增加，有可能造成部分通流级强度超限。
- 对通流部分重要零部件应进行强度校核计算
- 以某电厂国产300MW汽轮机供热为例

制造厂强度校核计算结果表明：

- 第15、16级隔板应力和板体挠度值偏大，强度超限，必须进行重新设计后更换为新的部件。
- 第15、16级动叶片工作应力值已超过许用应力值，应对该级次动叶片应重新设计、更换；
- 其余级次尚在安全范围内，原则上不需更换。

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

### (3) 对供热改造后的推力进行核算

- 供热改造后，通流级反动度及部分轮毂上承受的压力可能发生变化
- 需要对推力进行校核计算
- 以某电厂进口210MW汽轮机供热改造为例

计算表明：汽轮机轴向推力在合理范围内，供热对轴向推力没有产生不良影响。

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

### (4) 保证低压缸最小流量

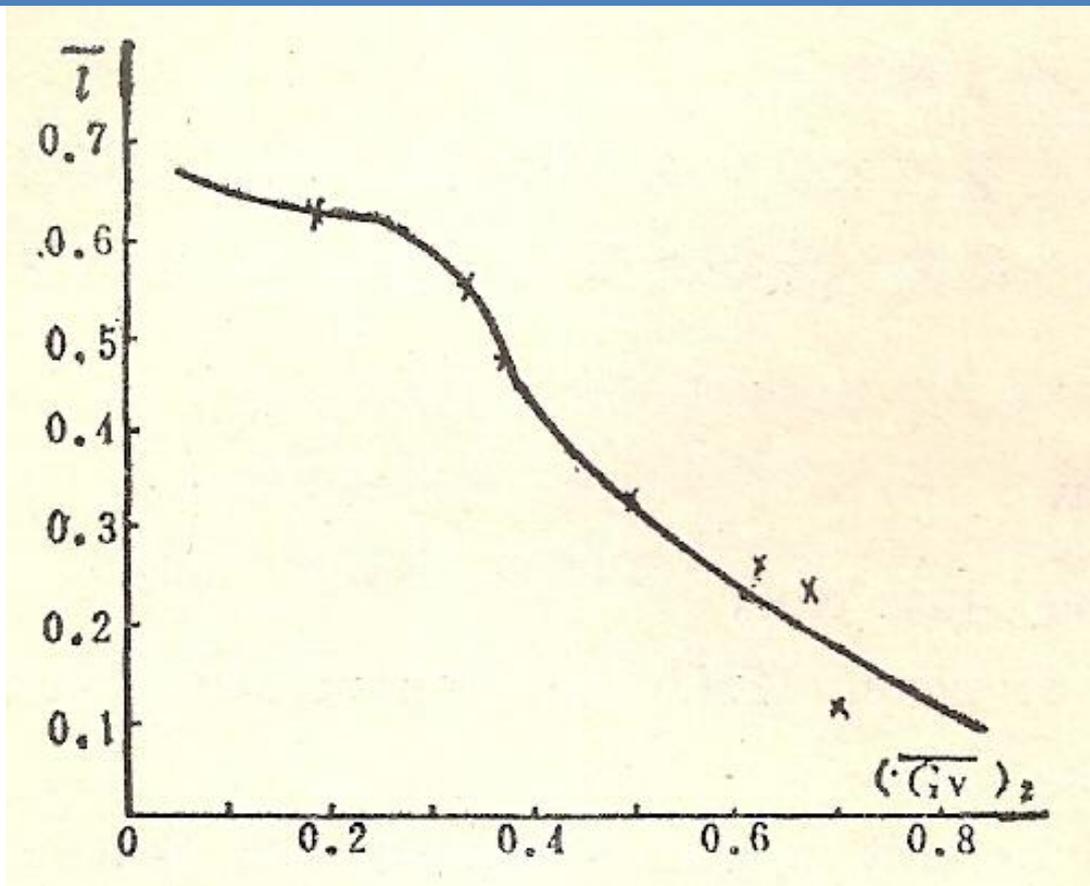
- 供热抽汽后，进入低压缸的蒸汽流量将减少
- 小容积流量工况下，低压末级动叶片根部会出现倒流现象，使动应力升高，还可能造成低压末级动叶片出汽边根部水蚀，危及叶片安全运行
- 末级叶片可能处于鼓风工况，使温度升高，威胁末级叶片的安全性
- 为保证低压级叶片的安全性，维持机组正常运行，供热改造时应研究确定出最大抽汽量的限制值，相应的确定出进入低于缸的最小流量值。

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题



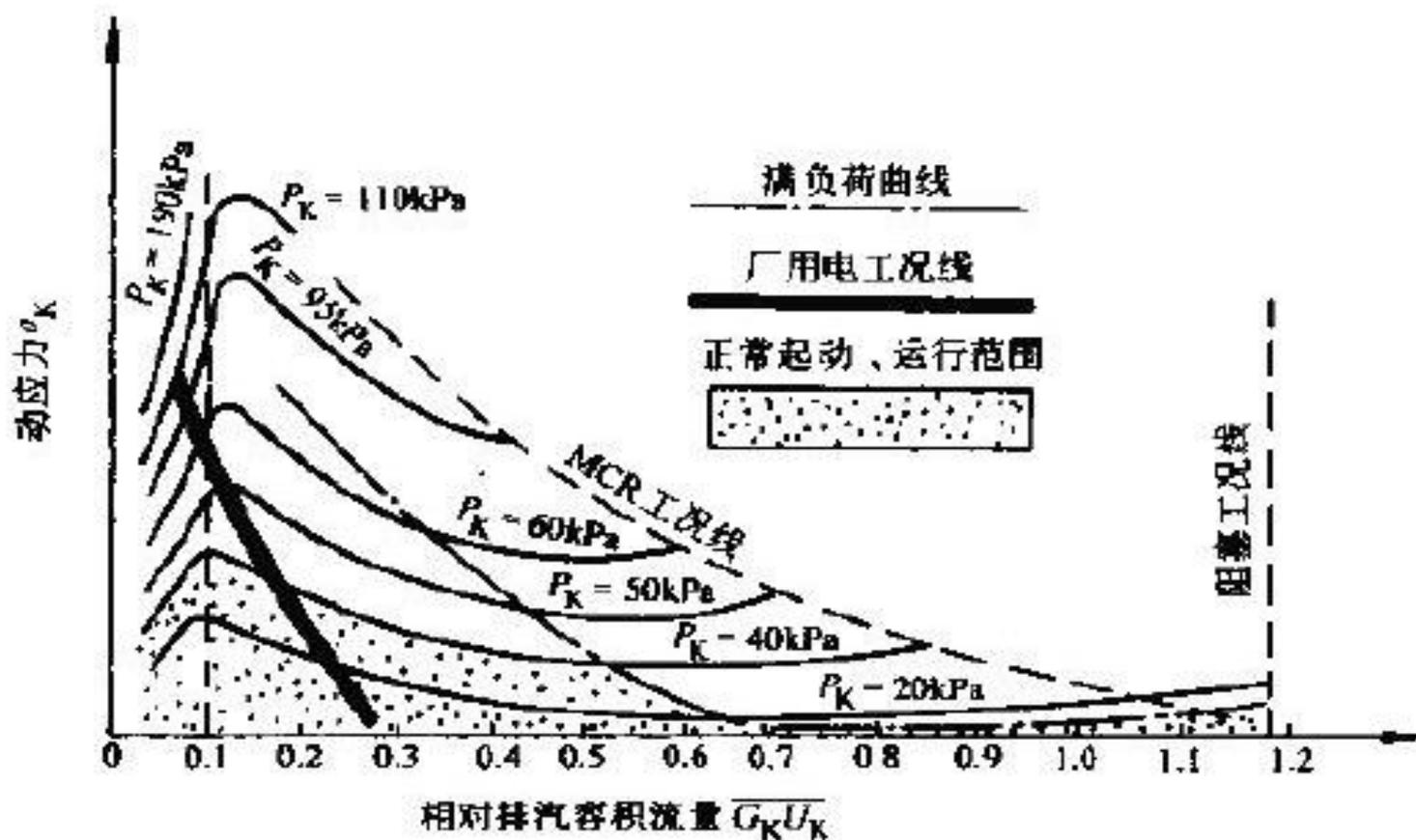
在电厂机组上实测汽轮机末级流场

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题



脱流区高度与容积流量的变化关系

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题



相对排汽容积流量与动应力关系

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

### (5) 在抽汽管道上设置完善的保护措施和疏水点

- 在抽汽管道上设置快关门、逆止门等，以防止甩负荷时供热管道返汽造成超速。
- 抽汽管道上的阀门应尽量靠近汽轮机，以减少抽汽口至快关门间的存汽容量。
- 确保疏水良好，防止造成汽轮机进水或冷蒸汽。

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

### (6) 做好新联通管及抽汽管道相关工作

- 解决好新联通管及附件对汽缸产生的附加力问题
- 充分考虑抽汽管道可能产生的支撑、膨胀、振动等方面的问题
- 由制造厂提出联通管所能承受的允许受力参数

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

- 设计院在初设阶段提出抽汽管对联通管的施力参数，整体核算后进行施工设计，以减少抽汽管道对机组正常运行的影响。

### 举例：300MW汽轮机供热改造

- 抽汽管口的允许推力：10000N
- 抽汽管口的允许力矩：30000N ● m
- 抽汽管口热膨胀：

轴向2.5mm 、 垂直9.63mm 、 侧向3.14mm

以低压转子进汽中心线与汽轮机转子中心线交点为原点

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

### (7) 最小电负荷应有一定的限制

- 机组供热运行期间，对最小电负荷应有一定的限制，从而保证供热参数及机组运行的安全性。

### (8) 采用汽动热网循环水泵

- 当抽汽压力远高于供热要求的汽压时，可考虑采用汽动热网循环水泵方式。
- 使高能级的抽汽做到合理利用
- 可以方便地实现循环水泵变转速运行

## 五. 汽轮机供热改造应关注的技术问题

### (9) 研究补水及水处理系统相关问题

### (10) 对凝结水泵进行变频改造

- 机组供热运行期间，主凝结水泵将在较低的变负荷区运行。
- 有必要对凝结水泵进行变频改造，从而节电。

### (11) 对汽轮机的控制系统进行改造

- 纯凝机组供热改造时，对汽轮机的控制系统也需相应地进行改造，做好热电负荷协调控制。

## 六. 结束语

- 除上述问题外，汽轮机供热改造还会涉及电厂厂区热网布置、热网首站建设、化学水处理及补给水系统改造、电气系统改造等项工作。
- 做好汽轮机供热改造还应做好以下工作：

## 六. 结束语

- 委托制造厂做好联接管改造及机组安全保障工作
- 选择有经验的设计单位做好热网首站设计、设备选型及相关的其它工作
- 聘请有经验的热电厂、设计院、研究院技术人员参加各阶段审查会，广泛吸取各方面的经验和教训，扎实做好各阶段工作

## 第二部分 供热机组灵活性提升技术



### 一、背景



### 二、提升供热机组灵活性的技术路线



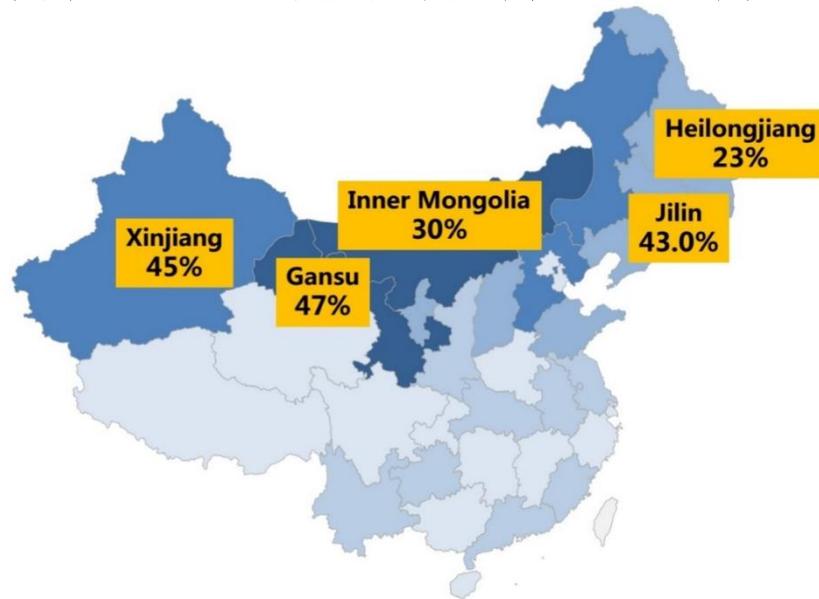
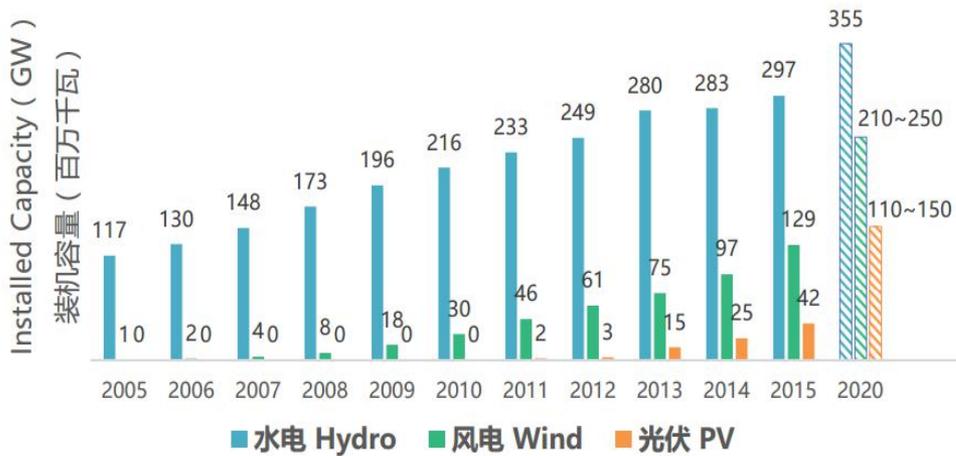
### 三、低压缸零出力技术案例介绍



### 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

# 一、背景

近年来，我国风电、光伏、水电等新能源电力装机容量持续快速增长，新能源在为我们提供大量清洁电力同时，也给电网的安全运行和电力供应保障带来了巨大挑战。部分地区出现了较为严重的弃风、弃光和弃水问题。

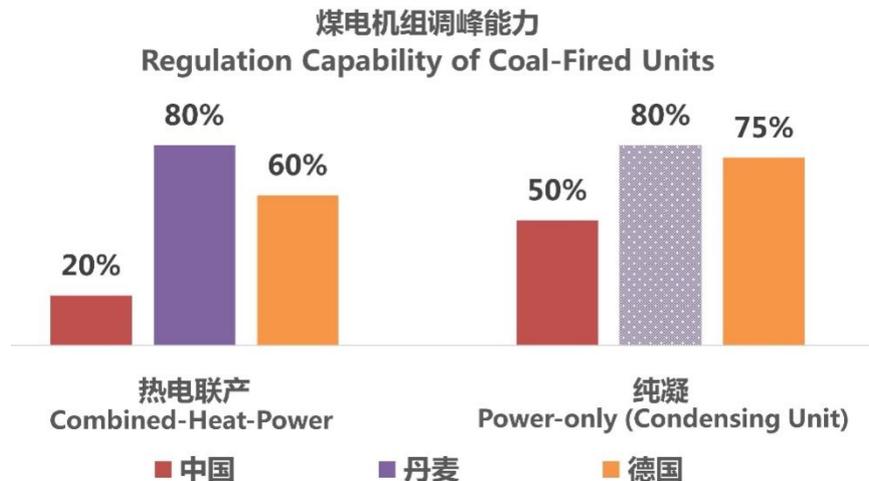


2016年上半年中国风电弃风率统计

2016年上半年，全国弃风电量323亿千瓦。

# 一、背景

受供热机组热-电耦合特性、“以热定电”运行方式及低压缸冷却蒸汽流量限值等因素影响，国内火电机组深度调峰能力不足，与国外机组存在较大差距！



国内外煤电机组调峰能力对比

2016年7月4日，国家能源局综合司下达了《火电灵活性改造试点项目的通知》。通知要求，挖掘火电机组调峰潜力，提升我国火电运行灵活性，提高新能源消纳能力。

# 一、背景

## 火电灵活性工作进展

Progress so far



# 一、背景

## 火电灵活性工作进展

Progress so far

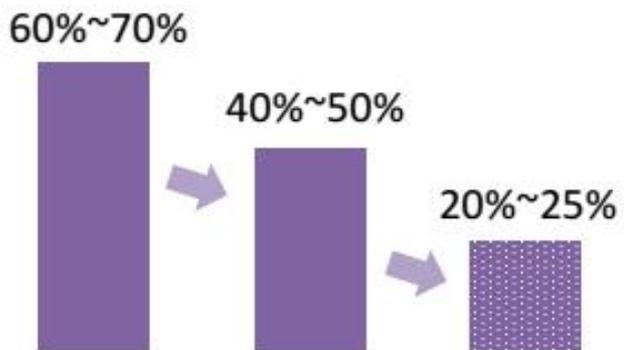


# 一、背景

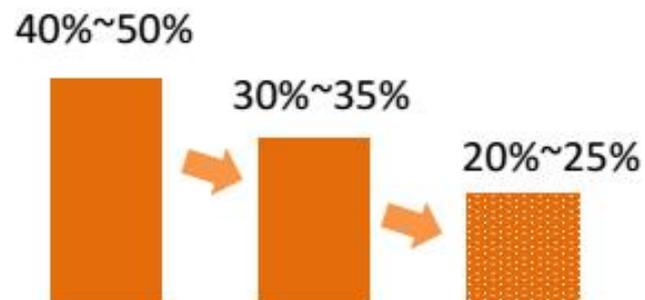
## 火电灵活性工作进展

Progress so far

提升灵活性改造预期将使热电机组增最小技术出力达到40%-50%额定容量；纯凝机组最小技术出力达到30%-35%额定容量。部分机组不投油稳燃时纯凝工况最小技术出力达到20%-25%。



Minimum load , CHP units  
热点联产机组



Minimum load , Condensing units  
纯凝机组

# 一、背景

## 火电灵活性工作进展

Progress so far

火电灵活性提升的实施共分示范工程、中等规模推广和大规模推广三个阶段。“十三五”期间，预计改造的煤电机组规模将超过2亿千瓦



# 一、背景

## 电力辅助服务政策——以东北电网为例

2016年11月国家能源局东北能源监管局下发《东北电力辅助服务市场运营规则（试行）》，规则中对调峰辅助服务包括的基本义务调峰辅助服务和有偿调峰辅助服务进行了明确规定。并对有偿调峰基准、结算方式、和实时深度调峰交易结算方式、  
2017年以来，福建、甘肃、山东等省份已经发布电力辅助调峰运营规则或征求意见稿。其他如山西、河北、内蒙古相关政策也正在筹备中。

## 国家能源局东北监管局文件

东北监能市场〔2016〕252号

### 关于印发《东北电力辅助服务市场运营规则（试行）》的通知

国网东北分部，辽宁、吉林、黑龙江省电力公司、蒙东电力公司，有关发电企业，有关市场主体：

为贯彻落实《中共中央 国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（中发〔2015〕9号）精神，发挥市场在资源配置中的决定性作用，保障东北地区电力系统安全、稳定、经济运行，缓解热、电之间矛盾，促进风电、核电等清洁能源消纳，按照《国家能源局关于同意开展东北区域电力辅助服务市场专项改革试点的复函》（国能监管〔2016〕292号）要求，我局制定了《东北电力辅助服务市场运营规则（试行）》，经充分征求市场主

# 一、背景

## 电力辅助服务政策——以东北电网为例

实时深度调峰交易采用“阶梯式”报价方式和价格机制，发电企业在不同时期分两档浮动报价电力调度机构按照电网运行实际需要根  
据日前竞价结果由低到高依次调用。

时期	报价档位	火电厂类型	火电厂负荷率	报价下限 (元/kWh)	报价上限 (元/kWh)
非供热期	第一档	纯凝火电机组	$40% < \text{负荷率} \leq 50\%$	0	0.4
		热电机组	$40% < \text{负荷率} \leq 48\%$		
	第二档	全部火电机组	负荷率 $\leq 40\%$	0.4	1
供热期	第一档	纯凝火电机组	$40% < \text{负荷率} \leq 48\%$	0	0.4
		热电机组	$40% < \text{负荷率} \leq 50\%$		
	第二档	全部火电机组	负荷率 $\leq 40\%$	0.4	1

## 二、提升供热机组灵活性的技术路线

### 火电机组灵活性改造主要内容与目标

根据国内新能源消纳对火电机组灵活性运行的需求，火电机组灵活性改造主要围绕以下三个方面进行：

- 深度调峰运行
- 快速负荷响应
- 快速启停机

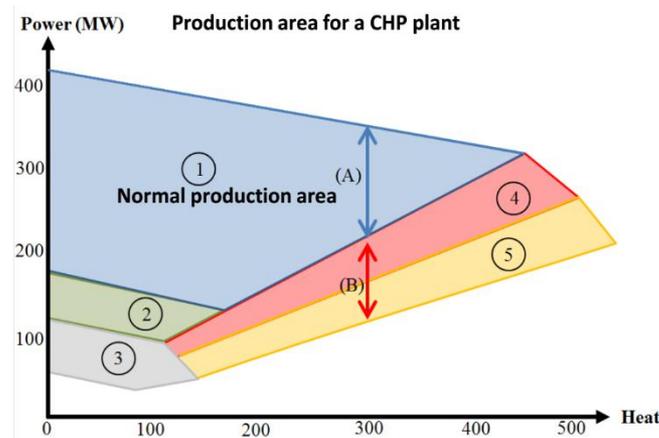


根据目前的情况，灵活性目标中首要目标的是深度调峰运行；其次是爬坡速率；再次是快速启停-个别电网实施机组轮停。

## 二、提升供热机组灵活性的技术路线

受“以热定电”运行方式影响，供热机组深度调峰能力有限。为提适应热机组深度调峰需求，需采取技术措施解除或弱化供热机组“热-电”耦合关系。国内外火电灵活性改造技术主要有：

- 储热解耦调峰技术
- 电锅炉热电解耦调峰技术
- 汽轮机旁路供热技术
- 汽轮机高、低旁路供热技术
- 低压缸零出力供热技术
- 其他技术



②、③降低锅炉最小技术出力改造

④、⑤热电解耦技术改造

## 二、提升供热机组灵活性的技术路线

### 2.1 储热解耦调峰技术

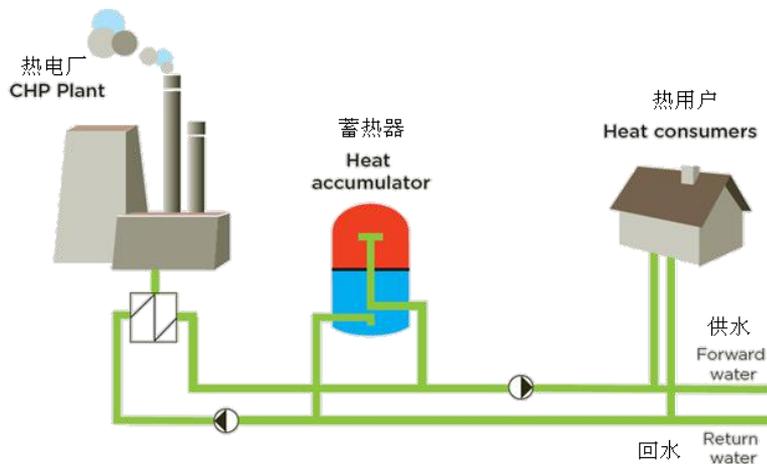
➤ **技术原理：**在热网一次管网设置热网循环水储罐系统，低热负荷需求时蓄热，高热负荷需求时放热，削弱热-电负荷的时间耦合程度。一般常压罐储热温度不超过95℃，带压储热罐储热温度不超过120℃。早期系统多是冷热双罐，目前选择常压斜温层单罐储热系统较多。

➤ **技术关键点：**①核定储热容量②罐体设计和施工 ③蓄放热模式及其精准调控。

➤ **技术特点：**

**优势：**对机组原热力系统的改造小。供热经济性较好。

**不足：**改造投资较大；占地面积大；对电网长期低负荷调峰的适应性差。<sup>66</sup>



## 二、提升供热机组灵活性的技术路线

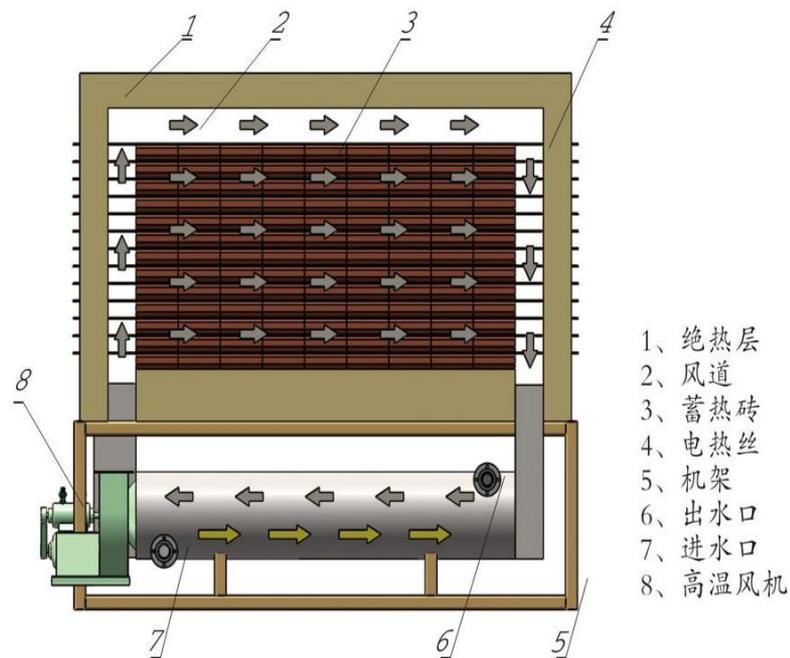
### 2.2 电锅炉热电解耦调峰技术

➤ **技术原理：**电热锅炉即在热源侧设置电热锅炉，以弥补低负荷供热抽汽不足的缺口，以实现热电解耦。目前相关技术主要有直接电热锅炉和蓄热式电加热锅炉（蓄热材料一般采用高铝混凝土砖和氧化镁砖）。

➤ **技术特点：**

**优势：**能够实现供热机组热电解耦，原原机组改造较少。

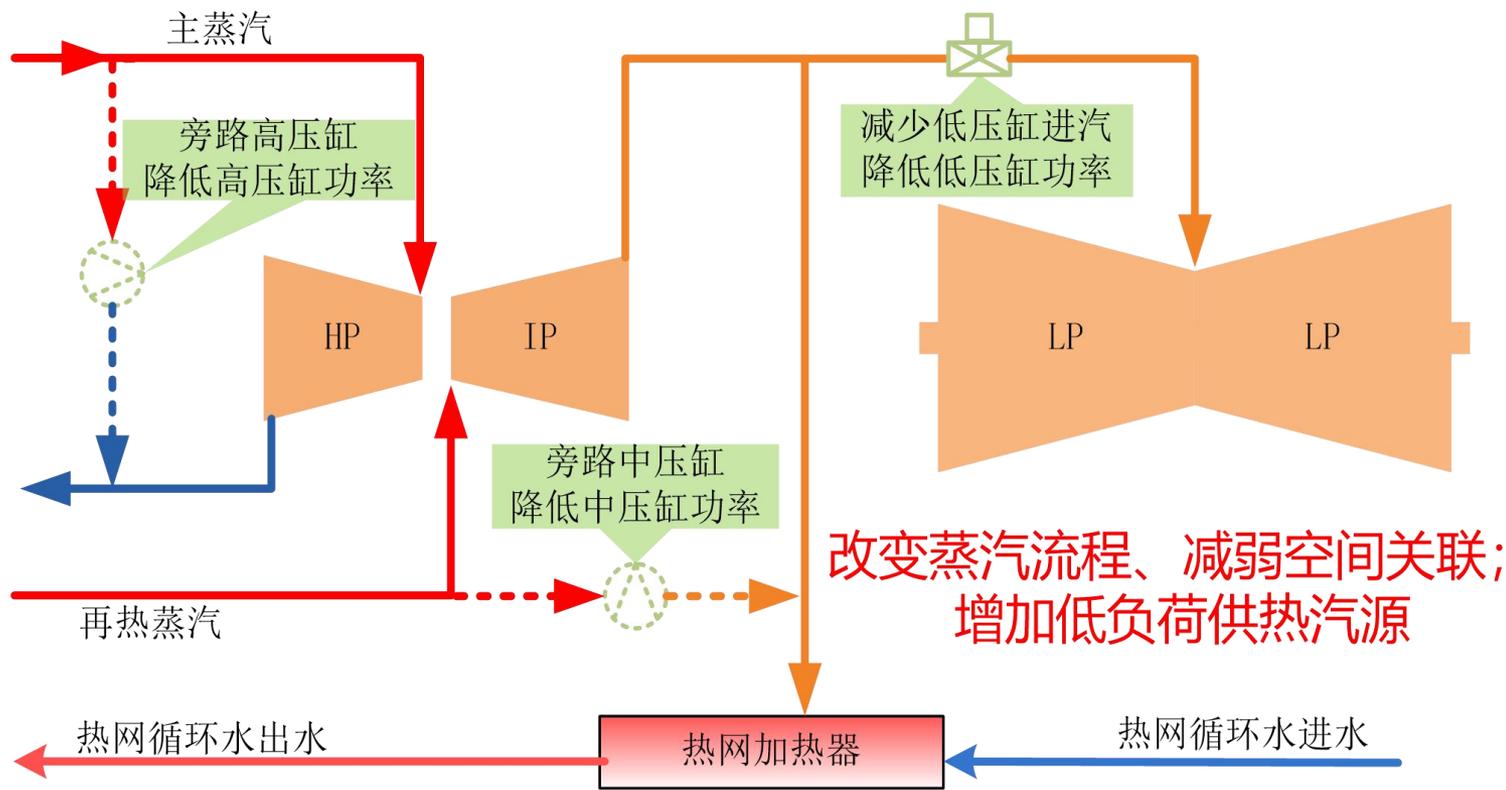
**不足：**改造投资较大，热经济性较差。



固体蓄热电锅炉原理图

## 二、提升供热机组灵活性的技术路线

### 2.3 基于蒸汽流程改造的灵活性改造技术

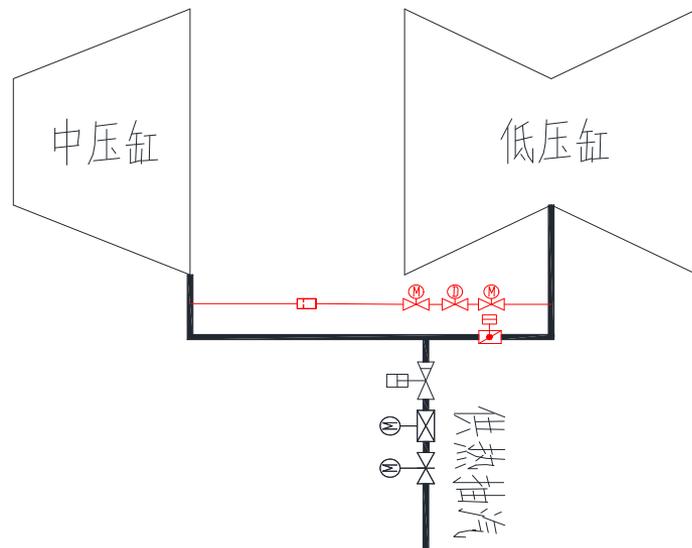


## 二、提升供热机组灵活性的技术路线

### 2.3.1 低压缸零出力供热技术

- **技术原理：**在供热期间切除全部低压缸进汽，仅保持少量的冷却蒸汽，使低压缸在高真空条件下3000转定速运行，从而提高了汽轮机的供热能力。
- **技术关键点：**① 高真空、极低流量条件下，低压缸的运行安全性；② 机组抽汽凝汽与背压运行方式的切换问题等。
- **技术特点：**

**优势：**改造投资小，供热经济性好。能够提高供热期的运行范围，将抽凝机组的运行边界拓展至背压机运行方式

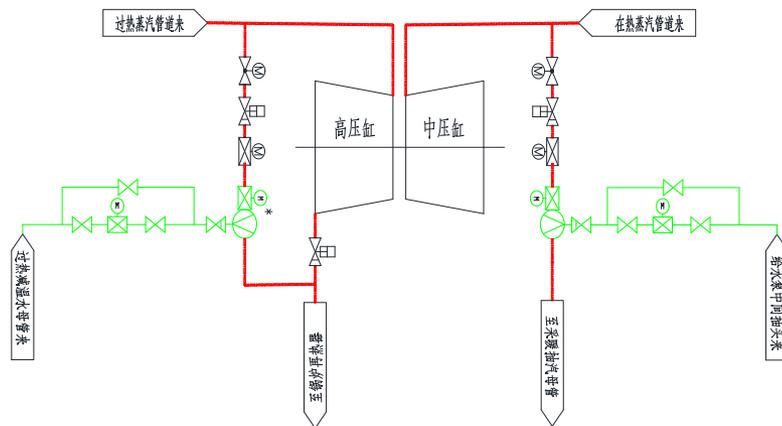


汽轮机切除低压缸供热改造示意图

## 二、提升供热机组灵活性的技术路线

### 2.3.2 汽轮机高、低旁路供热技术

- **技术简介：**汽轮机高、低旁路供热技术利用高压旁路将部分主蒸汽旁路至高压缸排汽，之后从低压旁路后抽汽对外供热，方案示意图见右图。
- **技术关键点：**①运行过程中高、低旁路的流量控制与匹配；②高压缸末级叶片运行安全性；③中联门与高排压力协调控制；④运行优化等
- **技术特点：**



—◇—	逆止阀	⊙	电动执行机构
—□—	截止阀	⊠	液动执行机构
—⊠—	调节阀	⊞	气动执行机构
符 号	名 称	符 号	名 称
图 形 符 号 表		图 形 符 号 表	

汽轮机高、低旁路供热原则性系统图

优势：热电解耦能力强，改造方案简洁、改造投资小。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

提高供热机组灵活性的低压缸零出力技术，又称“切除低压缸进汽供热技术”、“切缸供热技术”等，是西安热工研究院专利技术。



在华能临河电厂1号  
300MW机组上成功进行国内首  
台切低压缸供热，2016年8月  
对方案进行了实施，在2017年  
供热末期进行了试运，各项运  
行参数安全稳定。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

➤ 2017年国电延吉（200MW）、国电投东方（350MW亚临界）、杨柳青（300MW亚临界）、黄台（350MW超临界）项目陆续安全投运，标志着西安热工院低压缸零出力供热技术日趋成熟。

国电延吉-国内首台200MW低压缸零出力供热

国电投东方-国内首台亚临界350MW低压缸零出力供热

杨柳青-国内首台上汽亚临界300MW低压缸零出力供热

黄台-国内首台超临界350MW低压缸零出力供热

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

- 低压缸零出力技术的核心是仅保留少量冷却蒸汽进入低压缸，实现低压转子“零”出力3000转运行，更多的蒸汽进入供热系统，提高供热能力！降低电负荷，同时降低发电煤耗！
- 该技术运行方式能够实现供热机组在抽汽凝汽与高背压的不停机灵活切换，不仅改造费用小，运行维护费用也大幅降低。
- 西安热工院目前围绕该技术申请专利已达20余项。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 案例一

国电吉林龙华延吉热电厂锅炉是由哈尔滨锅炉厂有限责任公司设计制造的670t/h超高压汽包锅炉。国电吉林龙华延吉热电厂1、2号汽轮机是哈尔滨汽轮机厂有限责任公司生产的C160/N200-12.75/535/535/0.245型汽轮机。**末级叶片高度855mm。**

2017年供热期前进行了低压缸零出力改造。改造前设计额定采暖抽汽流量230t/h，最大采暖抽汽流量350t/h；改造后额定抽汽量达到457t/h，最大抽汽量达到489.5t/h。

单台机组改造总投资（含热网系统改造）约2000万元，税后静态投资回收期约2.5年。



## 三、低压缸零出力技术案例介绍

国电延吉电厂#2机切缸现场施工图



## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 案例二

辽宁东方电厂锅炉是由哈尔滨锅炉厂有限责任公司设计制造的1165t/h亚临界汽包锅炉。汽轮机是哈尔滨汽轮机厂有限责任公司生产的N350-16.7/538/538型亚临界凝汽式汽轮机。全四维通流改造后末级叶片高度**1018mm**。

2017年供热期前进行了低压缸零出力改造。改造前机组最大抽汽量为462t/h；改造后机组最大抽汽流量为648t/h，改造后机组供热抽汽流量增加约186t/h。

东方1号机组低压缸零出力改造项目（一期工程）静态总投资998万元，投资回收期在2年左右。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

辽宁东方电厂#1机切缸现场施工图



## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 低压缸零出力供热技术改造方案概述

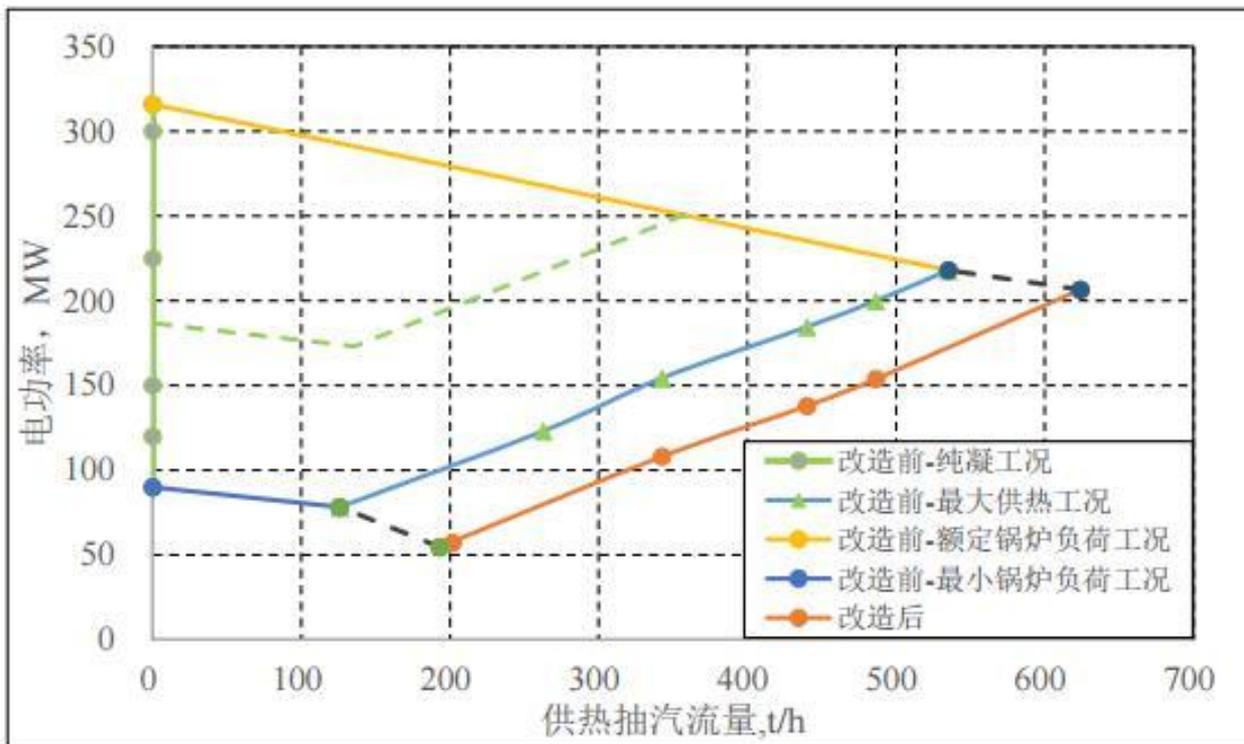
根据低压缸零出力供热技术实现原理和需求，改造总体工作范围如下：

- ▶ 进口技术供热蝶阀改造；
- ▶ 增设低压缸冷却蒸汽系统；
- ▶ 配套汽轮机本体运行监视测点改造；
- ▶ 低压缸末级叶片抗水蚀金属耐磨层喷涂处理；
- ▶ 低压次末级、末级叶片运行安全性校核；
- ▶ 配套供热系统改造；
- ▶ 配套抽空气系统改造；
- ▶ 配套自动控制系统改造；
- ▶ 低压缸零出力运行调试。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 低压缸零出力供热改造后机组供热能力分析

相同主蒸汽量条件下，采暖抽汽流量每增加100t/h，供热负荷增大约71MW，电调峰能力增大约50MW，发电煤耗降低约36g/kWh。



## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 低压缸零出力供热辅助系统适配性分析

根据低压缸零出力改造后运行需求，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

- 凝汽器（包括空冷岛和机力塔）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

- 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

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 热控部分改造

实施供热节能改造后，控制系统配套主要改造内容如下：

- 1) 梳理原控制系统中与供热抽汽相关的控制逻辑，取消或修改与低压缸零出力供热有冲突的相关控制逻辑。
- 2) 梳理原控制系统中与低压缸运行相关的保护定值设置，确认各控制逻辑与低压缸零出力运行要求一致。
- 3) 增加低压缸零出力供热投入/切除控制逻辑。
- 4) 改造方案新增加监视测点等接入DCS控制系统。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

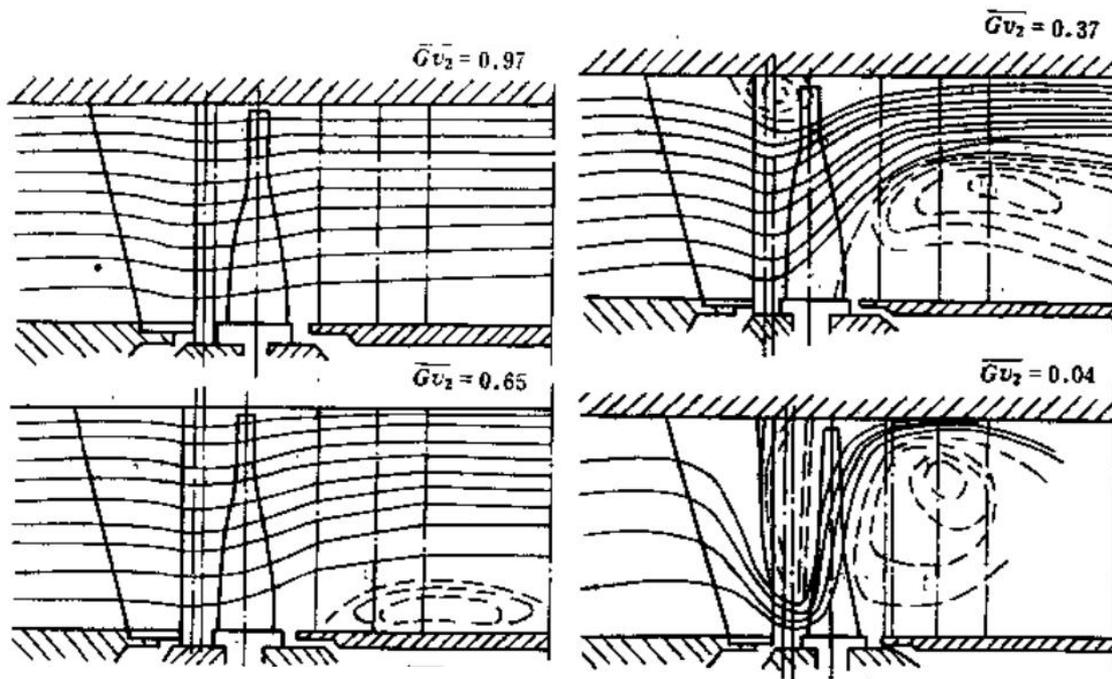
### 安全性校核

#### ● 小容积流量工况特性

汽轮机运行过程中，随着级内容积流量的减小，低压缸末两级流道内会产生进汽负攻角，在叶片压力面上形成流动分离，在叶根处的脱流、鼓风等现象，可能引起汽缸变形、叶片颤振、水蚀加剧等问题，危及机组安全运行。

王仲博.小容积流量下汽轮机末级长叶片可靠性的试验研究[J].中国电机工程学报.1987(04)

宁哲.200MW干式冷却汽轮机末级流动特性试验研究.中国电力.1997.41-43



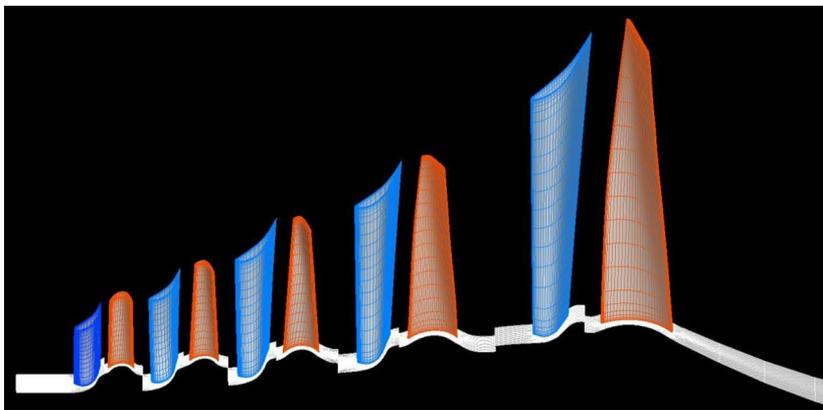
低压缸末两级叶片内流动状态随容积流量变化示意图

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

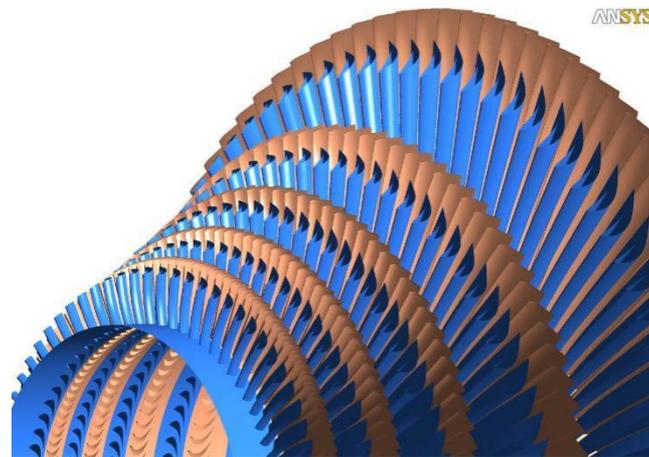
### 小容积流量工况运行对机组运行安全性的影响

为保证低压缸零出力工况下，低压缸长叶片的运行安全性，需采用数值分析方法对小容积流量条件下，末两级叶片安全性进行校核。

数值分析首先建立低压缸通流区域5级联合计算的CFD计算模型。之后，计算获得小容积流量条件下通流部分稳定流场分析，随后将流动计算获得结果作为边界条件叠加至低压缸长叶片动力力分析模型，从而获得不同容积流量条件下，低压缸长叶片的动应力变化特性。



低压缸 5 级叶片计算模型



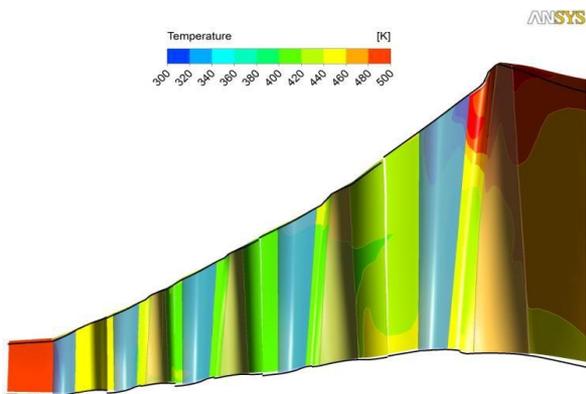
三维整圈 5 级叶片显示

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

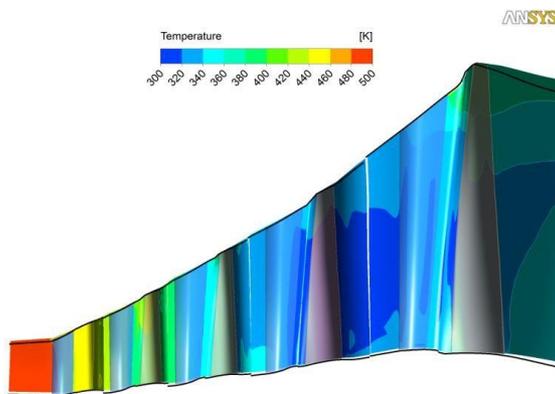
某机组低压缸长叶片安全性校核结果：

1) 随着低压缸进汽流量的减小，在低压缸末两级会逐渐出现鼓风现象，导致低压缸末两级级后温度升高，因此在切缸过程中应密切关注监视、高温区的温度，必要时增加后缸喷水流量。以此避免由于高温引起的汽缸变形，进而引发转静部件中心线不一致而产生的振动问题。

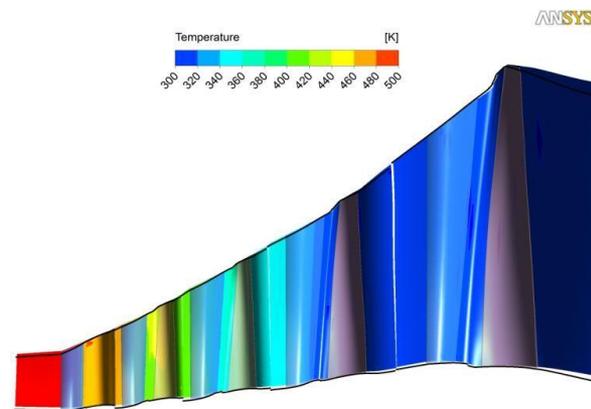
2) 在小容积流量工况下末级叶片的最大动应力小于设计工况下的最大动应力，因此，



低压缸单边进汽流量9.3t/h



低压缸单边进汽流量29.8t/h



低压缸单边进汽流量238.6t/h

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 低压缸零出力运行试验

机组切除低压缸运行时，低压缸长叶片鼓风情况、汽缸差胀、转子轴向位移变化、汽缸上下缸温差均可能发生较大变化，且不同机组上述特性各不相同。因此，需通过切除低压缸试验，研究机组在切除低压缸运行时的相关特性，为后续制订切除/投入低压缸控制方案及运行指导提供依据。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 投资收益估算

#### ◆ 改造项目投资

改造投资约1000万元，汽轮机辅机及供热系统根据适配性分析结果确定改造方案后确定投资额。

#### ◆ 改造项目收益

- 增加供热收益
- 降低发电煤耗收益
- 调峰政策奖励收益

#### ◆ 改造项目工期

可研：1个月； 订货：3个月； 施工、调试：1个月。

# 三、低压缸零出力技术案例介绍

## 知识产权



## 三、低压缸零出力技术案例介绍

### 安全性校核需要汽轮机制造厂提供的资料

1. 低压缸整缸叶型几何型线；
2. 排汽缸扩压段几何型线；
3. 低压缸各级热力设计数据；
4. 凝汽器扩压段出口设计背压；
5. 低压缸各级叶片装配图及工艺要求；
6. 低压末两级叶片几何造型数据；
7. 低压转子结构造型数据；
8. 低压末两级叶片材料牌号及其物理性能参数、力学性能参数。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

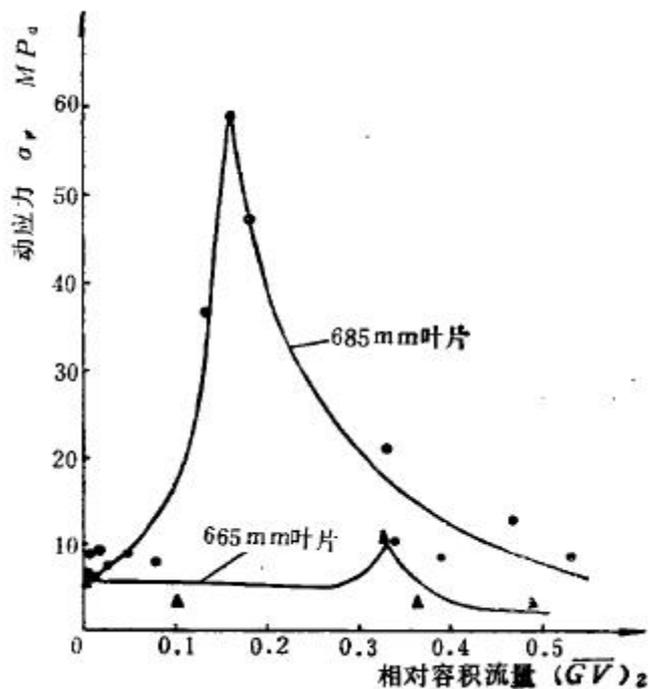
在缺少安全性校核资料数据时，建议进行汽轮机**动叶片动应力试验**。

试验采用无线电遥测技术，在叶片上粘贴电阻丝应变片作为传感元件，通过引线与微型发射机相连接。叶片在旋转状态下受到激振时产生振动变形引起应变片阻值的变化，其信号经发射机调制发射，由接收天线环接收，并经高频电缆送至接收机后，由记录仪对试验数据进行记录并分析。

试验前在西安热工研究院有限公司实验室采用标准音叉对测试系统进行了校验和标定，减少系统测量误差。

## 三、低压缸零出力技术案例介绍

不均匀的流场中, 叶片如有微弱的初始振动时, 就会不断地从汽流中吸取能量, 当能量足够大时, 便导致叶片振动增大, 即颤振发作。每台机组的风险点是不同的, 切不可只知其一, 不知其二, 盲目套用!!!



另一種情況是 12 800 瓩 前置式 反動汽輪機, 當它在無蒸汽方式運行大約兩小時後, 即發生了嚴重的事故。使汽輪機組長期不能工作, 通汽部分全部損壞。

但是很多試驗結果證明, 容量在 5000 瓩以下的(單缸衝動式機組)無蒸汽方式運行是完全可以允許的。

因而根據汽輪機在無蒸汽方式下運行時溫度條件的分析和試驗資料的研究, 得出以下結論: 僅是容量不大( 6000 瓩以下)而且是單缸的 汽輪機組在無蒸汽方式下 運行才會安全可靠。

大容量的汽輪機以及比 6000 瓩小的 雙缸式三缸式的 機組, 在無蒸汽方式下運行是不安全的。按照 1946 年 9 月反事故通報第 33 號的規定, 禁止這類機組 在無蒸汽方式下 運行。

## 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

### 【案例1】

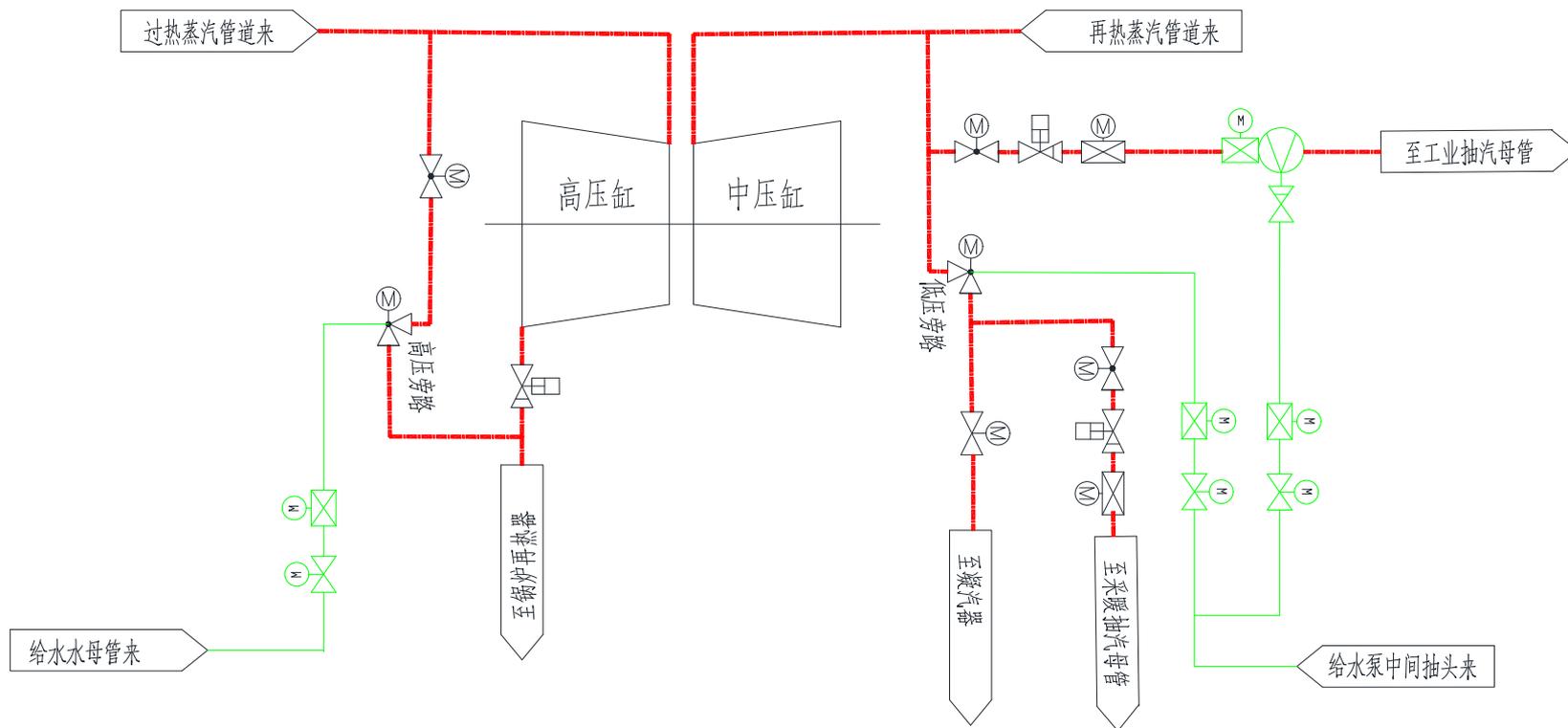
某电厂1、2号机组均为NC350 - 24.2/0.4/566/556型超临界抽汽凝汽式汽轮机组，设计供热抽汽流量为500 t/h，抽汽压力为0.4 MPa，抽汽温度为253.9° C，低压缸最小冷却通流量为150t/h，汽轮机设置40%容量高、低压旁路。

机组供热面积为1300万m<sup>2</sup>，为满足供热需求，1号机组已实施高背压供热改造。根据电网调峰和供热需求需求，考虑采暖期1号机组带基本供热负荷，调峰至200MW，2号机组需承担约254.7MW的供热负荷，调峰至70MW(20%THA)。

为此电厂对2号机组实施了高低旁路联合供热改造。

# 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

## 供热改造方案原则性热力系统



供热改造方案系统原则性热力系统图

## 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

### 高低旁路联合供热预期效果

- 根据校核结果：基于原40%容量高低旁路实施汽轮机高低旁路联合供热改造，汽轮机在20%THA工况时，汽轮机最大供热抽汽流量为228t/h，折合供热负荷154.96MW。不能满足供热需求。
- 若对原高低旁路实施扩容改造，则20%THA工况时，汽轮机供热抽汽流量可达500t/h时，折合供热负荷336.53MW。能够满足供热需求（扩容后高旁前、后蒸汽管道内径分别为235mm和600mm；低旁前、后蒸汽管道内径分别为600mm和1000mm）。

## 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

工况	单位	原高低旁路		扩容高低旁路	
		20%THA工况	100%THA	20%THA	100%THA
发电功率	MW	70	187.25	70	175.29
锅炉侧主蒸汽流量	t/h	422.15	1067	642.36	1067
汽轮机侧主蒸汽流量	t/h	276.91	813.01	323.57	774.96
汽轮机侧主蒸汽压力	MPa	9.86	24.2	14.78	24.2
汽轮机侧主蒸汽温度	°C	566	566	566	566
<b>供热负荷</b>	<b>MW</b>	<b>154.96</b>	<b>485.08</b>	<b>336.53</b>	<b>496.98</b>
<b>总供热抽汽流量</b>	<b>t/h</b>	<b>228</b>	<b>684</b>	<b>500</b>	<b>710</b>
<b>高旁蒸汽流量</b>	<b>t/h</b>	<b>145.24</b>	<b>253.99</b>	<b>318.79</b>	<b>292.04</b>
高旁减温水流量	t/h	17.73	46.23	41.43	51.39
<b>低旁蒸汽流量</b>	<b>t/h</b>	<b>162.97</b>	<b>300.23</b>	<b>360.22</b>	<b>343.44</b>
低旁减温水流量	t/h	53.02	96.6	139.78	137.1
<b>中排抽汽流量</b>	<b>t/h</b>	<b>12.01</b>	<b>287.17</b>	<b>0</b>	<b>229.46</b>
再热蒸汽流量	t/h	358.45	847.61	550.9	842.81
再热蒸汽压力	MPa	2.25	3.25	2.3	3.25

## 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

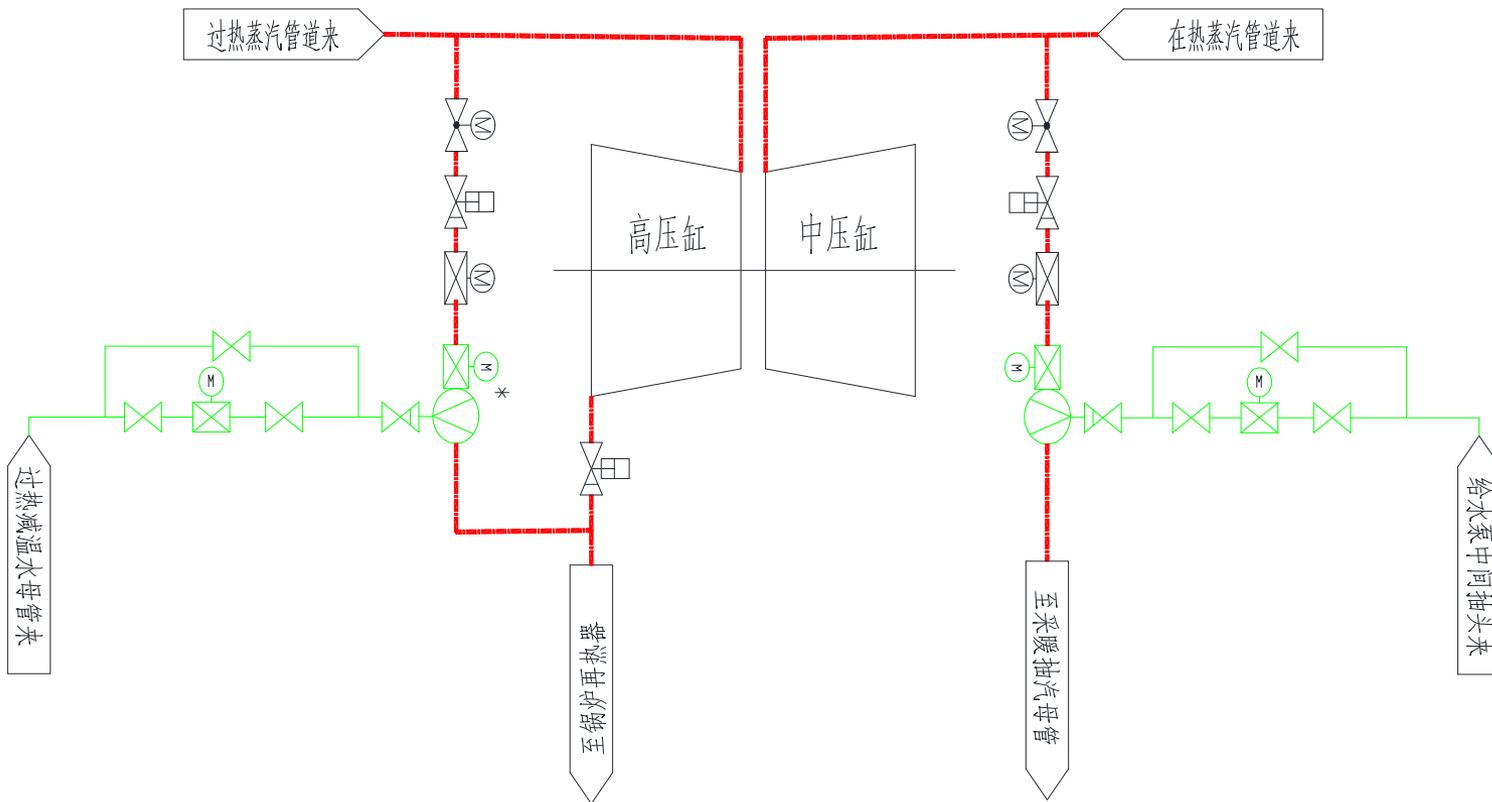
### 【案例2】

某电厂1、2号机组均为C260/N330-16.7/538/538型亚临界抽汽凝汽式汽轮机组，设计采暖抽汽量420t/h，工业抽汽量85t/h。

机组供热面积为1500万m<sup>2</sup>，设计供热负荷693MW。根据电网调峰和供热需求需求，电厂2号机组已立项实施低压缸零出力供热改造改造，计划对2号机组实施了高低旁路联合供热改造。

改造方案在原高低旁路基础上，各增设2套减温减压装置。即主蒸汽管道来（可取自高旁阀前）的抽汽经减温减压器后接入至高压缸排汽管道。供热抽汽取自热再蒸汽管道适当位置（低旁前），经减温减压器后汇入采暖抽汽母管。

# 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍



供热改造方案系统原则性热力系统图

## 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

### 高低旁路联合供热预期效果

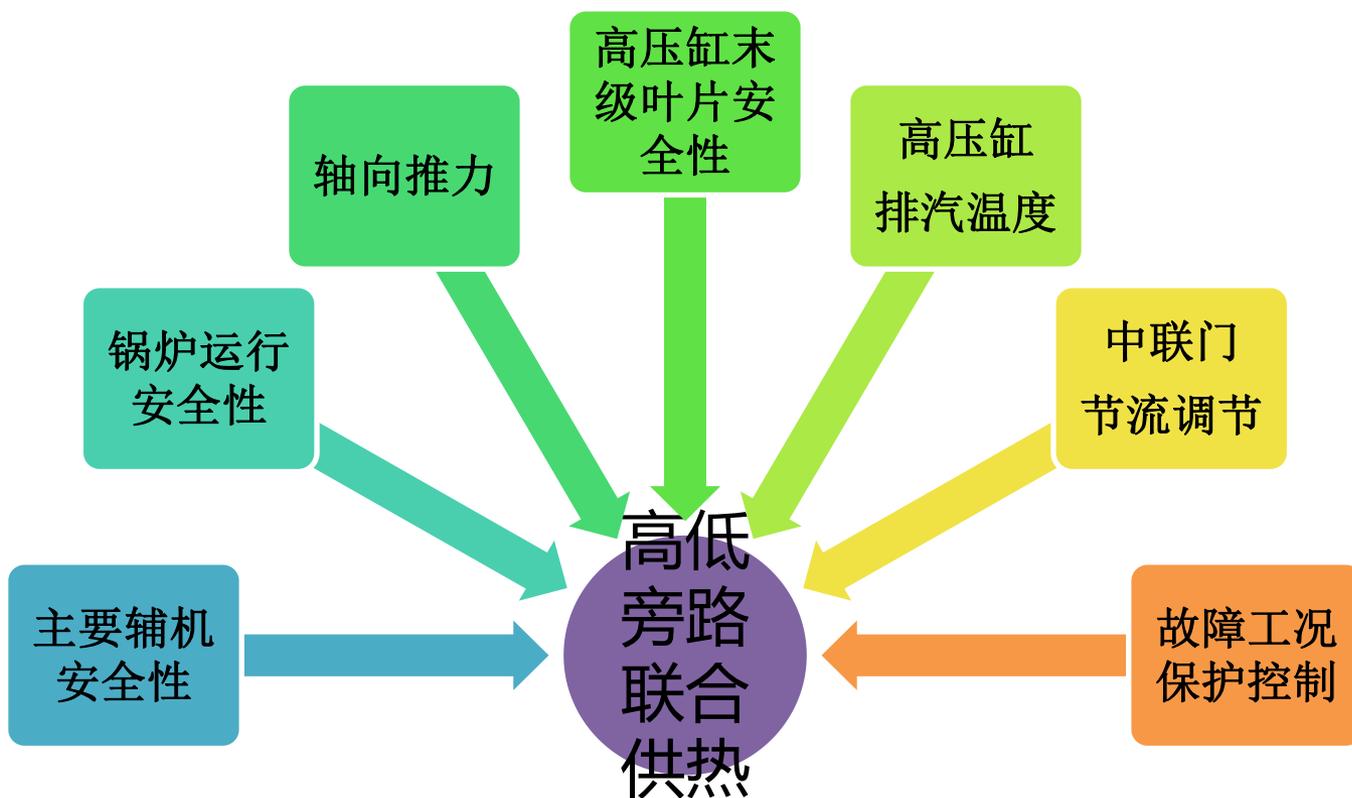
- 根据校核结果，实施改造后，机组高低旁路联合供热运行时：
  - ✓ 30%THA工况时，发电功率为99MW，供热抽汽流量420t/h，对应高旁蒸汽流量235.1t/h、低旁流量271.7t/h，中排抽汽流量103.4t/h，热耗率7165.9kJ/kWh，发电煤耗率268.3g/kWh。
  - ✓ 100%THA工况时，发电功率为180MW，供热抽汽流量620t/h，对应高旁蒸汽流量206.2t/h、低旁流量236.8t/h，中排抽汽流量345.1t/h，热耗率6122.5kJ/kWh，发电煤耗率229.5g/kWh。

## 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

项目	单位	汽轮机高低旁路旁路联合供热		
		30%THA	75%MS	100%MS
发电功率	MW	99	144.84	180.02
锅炉侧主蒸汽流量	t/h	658	784.5	1046
汽轮机侧主蒸汽流量	t/h	422.87	634.6	839.4
总采暖抽汽供热量	MW	309.62	327.74	450.1
总供热抽汽流量	t/h	420	450	620
高旁流量	t/h	235.1	149.9	206.6
高旁减温水流量	t/h	36.6	22.8	30.2
低旁流量	t/h	271.7	172.7	236.8
低旁减温水流量	t/h	44.9	28.1	38.1
中排抽汽流量	t/h	103.4	249.2	345.1
热耗率	kJ/kWh	7165.9	7068.7	6126.5
发电煤耗率	g/kWh	268.3	264.8	229.5

# 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

汽轮机高低旁路联合供热方案在安全性方面应分析因素



## 四、汽轮机高低旁路联合供热案例介绍

### 汽轮机高低旁路联合供热方案安全性分析

- 高、低旁路对汽轮机轴向推力的影响及控制措施。
- 高、低旁路对高压缸排汽温度的影响及控制措施。
- 高、低旁路对高压缸末级叶片运行安全性的影响及控制策略
- 高旁误动、卡涩等故障工况下，机组的联动保护措施。
- 改造方案对锅炉运行安全性的影响
- 改造方案对主要辅机设备运行安全性的影响

宁哲 13509183966

供热小组

联系人：余小兵  
13649274653

灵活性小组

联系人：黄嘉驷  
13991203639



*Thank you very much for your attention!*

追  
求  
卓  
越  
  
求  
实  
创  
新  
  
规  
范  
诚  
信  
  
以  
人  
为  
本

**谢谢!**