

# 第九届大机组供热改造与优化运行技术2017年会



**任 伟**

**大容量汽轮机  
新技术提升和供热改造技术**

哈尔滨汽轮机厂研究院设计所副所长。长期从事汽轮机新产品开发、系统设计、项目咨询、节能改造等工作。在复杂机型和供热机型选型、机组系统改造设计等方面有较丰富的经验，参加过多个大型项目的设计和研究工作，在国内技术刊物发表论文10余篇，获省部级科技成果奖多项。



EPTCHINA.CN  
中国电力科技网

SXEC 苏夏

2017年12月12-13日 中国·徐州

# 大容量汽轮机 新技术提升和供热改造技术

哈尔滨汽轮机厂有限责任公司

2017.12 徐州



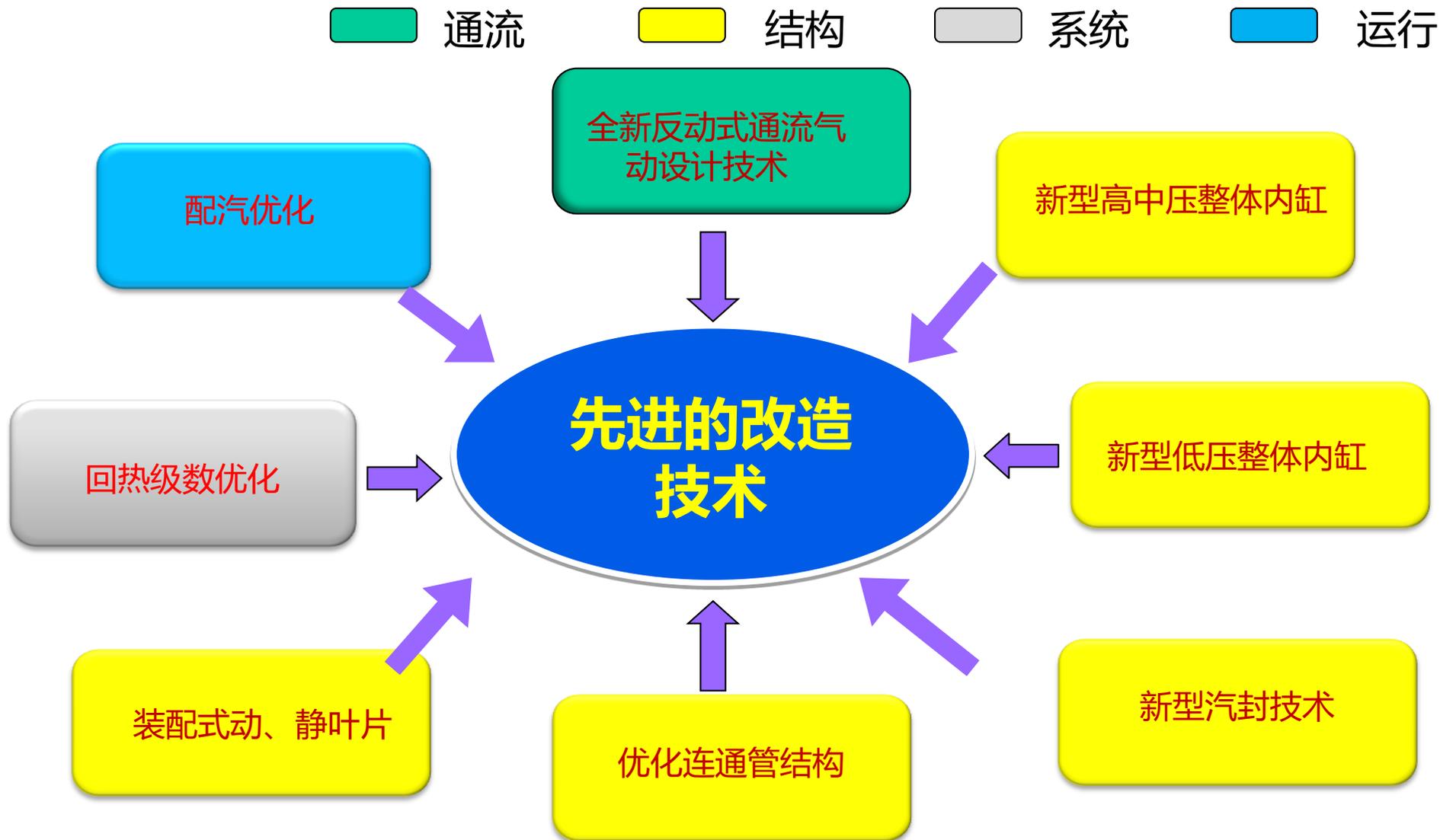
# 主要内容

- 1、现代汽轮机先进技术和工艺
- 2、大容量机组现代化改造方案
- 3、大机组高背压供热改造
- 4、大容量抽凝机组改背压机（光轴）供热改造
- 5、大容量机组低压缸解列供热改造
- 6、结束语

## 1. 技术发展背景

- 节能降耗是国家能源政策的主要核心内容；
- 正在服役的机组有的循环效率偏低，不符合国家节能减排的要求；
- 提高机组效率，降低机组热耗已成为发电企业主要工作目标；
- 上一个十年，我国装机容量增长过快，导致运行小时数下降，负荷率过低，高参数机组没有发挥出有效作用；
- 当前节能降耗形势的需要，机组精细化设计势在必行，升级改造势在必行；
- 供热改造应认真总结经验教训，方案论证应更精细。

## 2、只有多种措施并用，才能共同提升机组热电效率

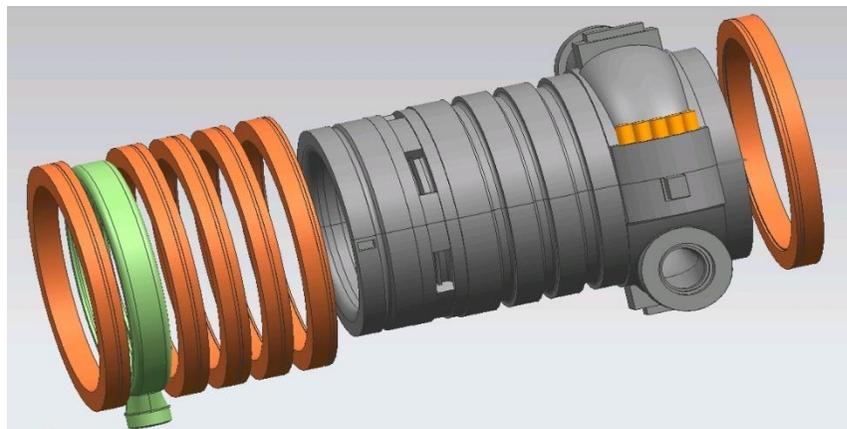
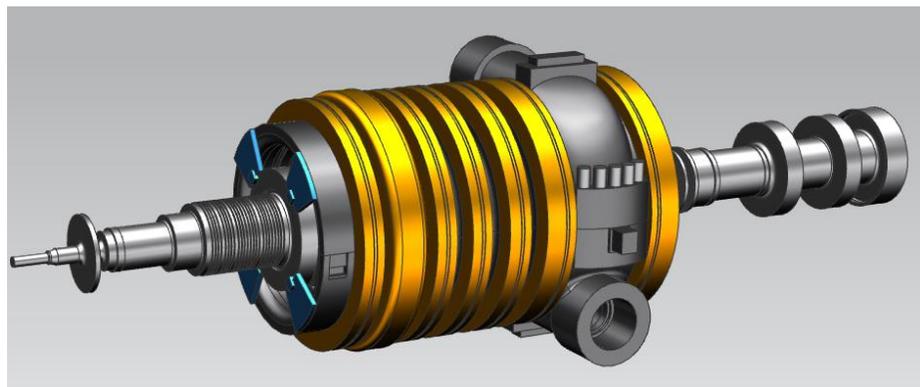
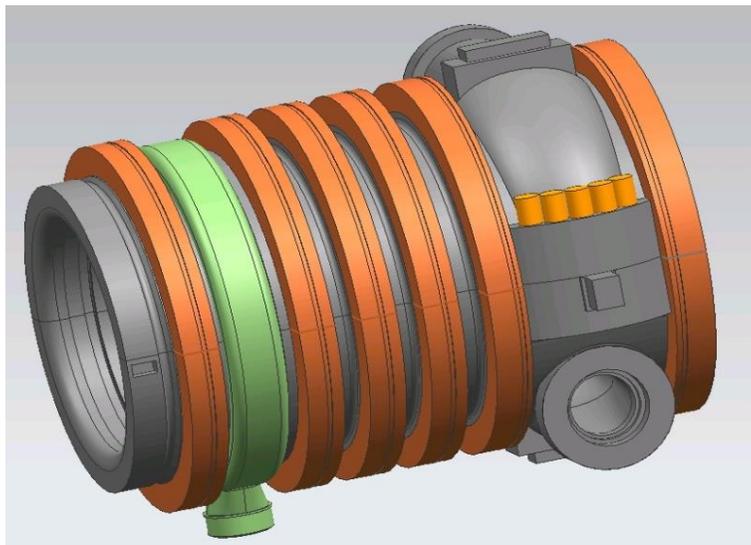


## 3. 近年来哈汽公司新技术提升的主要方面

- 高参数高压内缸先进红套环技术；
- 切向进汽及横置静叶技术；
- 多级小焓降反动式叶型；
- 预扭装配式隔板工艺
- 低压整体铸造大内缸；
- 小间隙可磨汽封+汽轮机摩擦启动技术；
- 大机组0#高加、10级回热及外置式蒸冷器系统。

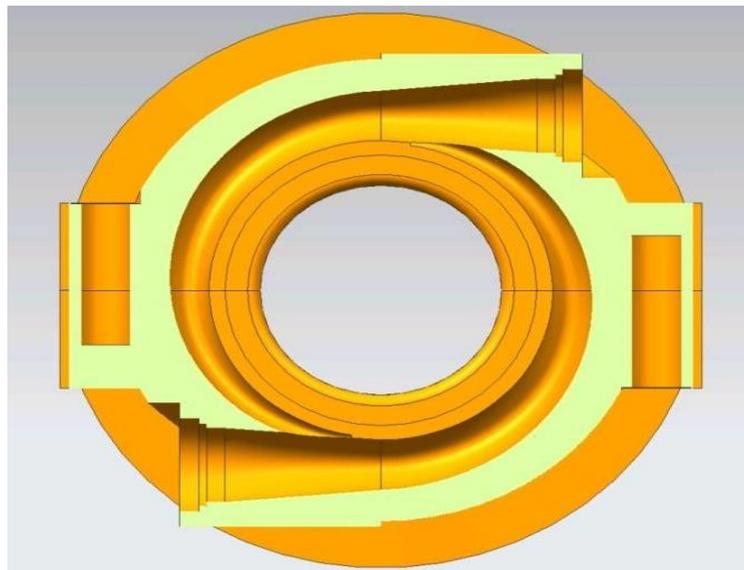
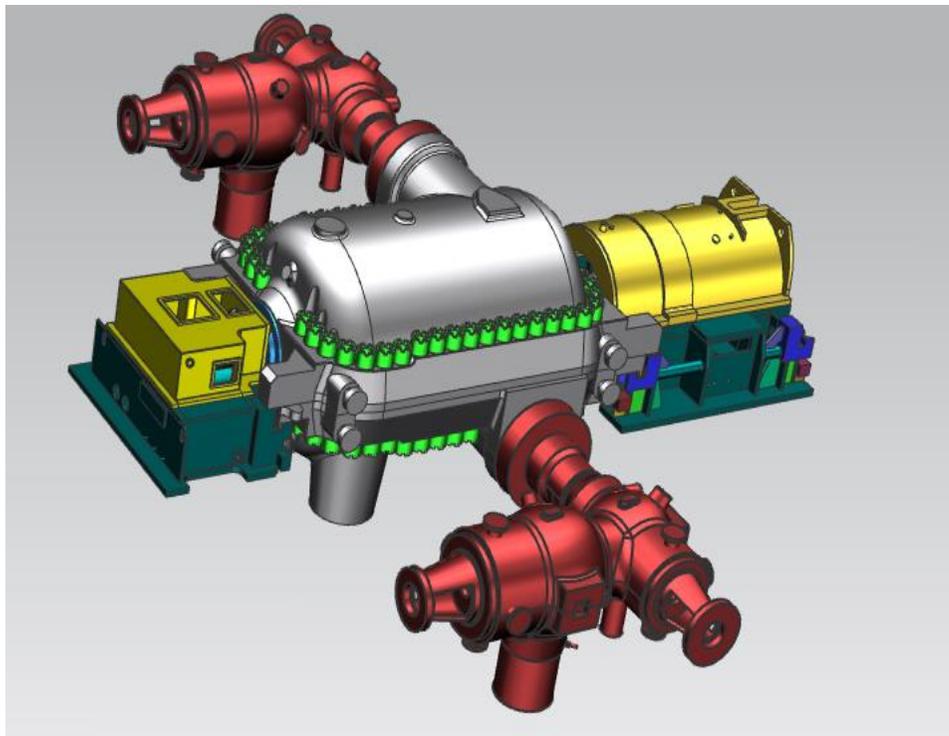
## □ 大容量机组高压内缸红套环密封结构

- 哈汽公司自2012年以后开始立足自我，开发设计新百万和二次再热机组，取得了多项关键技术的突破，也开始了汽轮机精细化设计的阶段。

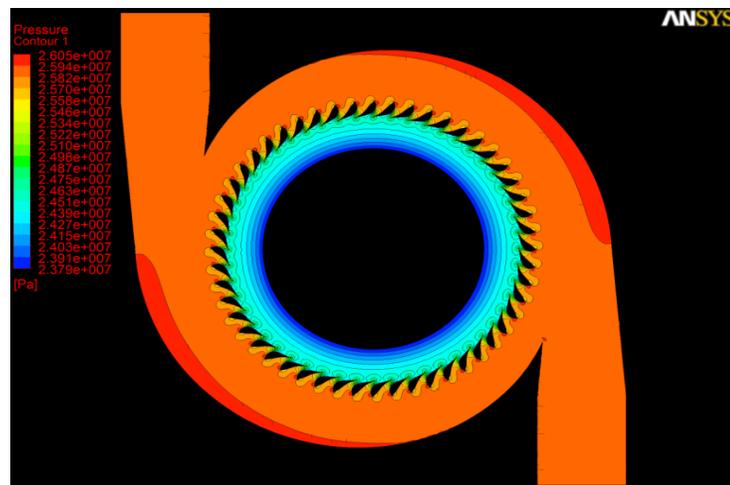


## □ 大容量机组高压蜗壳进汽技术

- 减小第一级导叶进口参数的切向不均匀性，减小进口部分的流动损失。



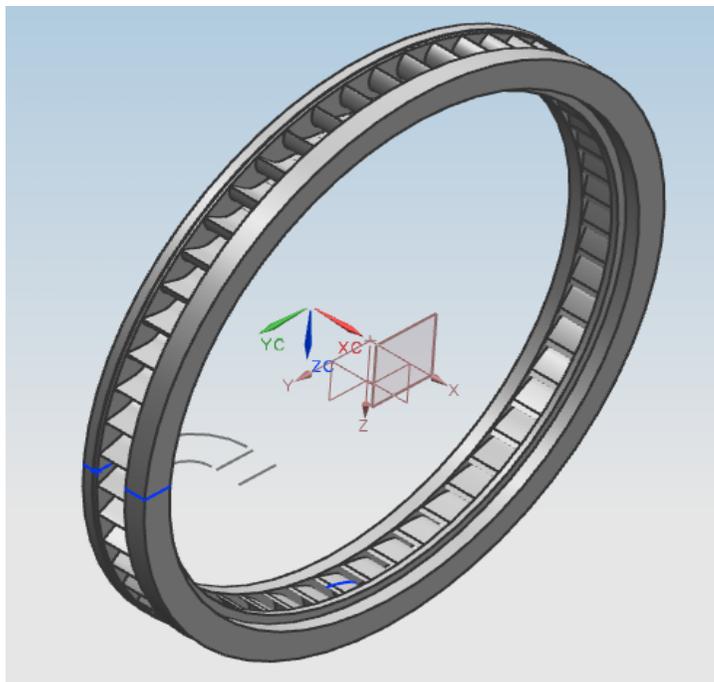
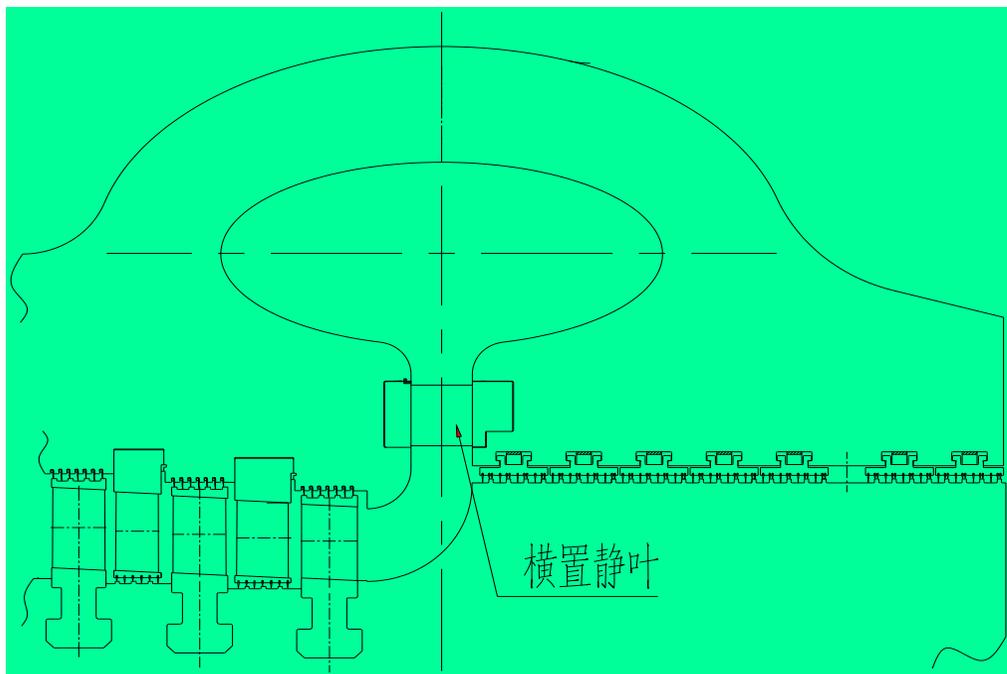
汽轮机进汽蜗壳实体图



高压进气蜗壳压力云图

## □ 高压第一级横置静叶

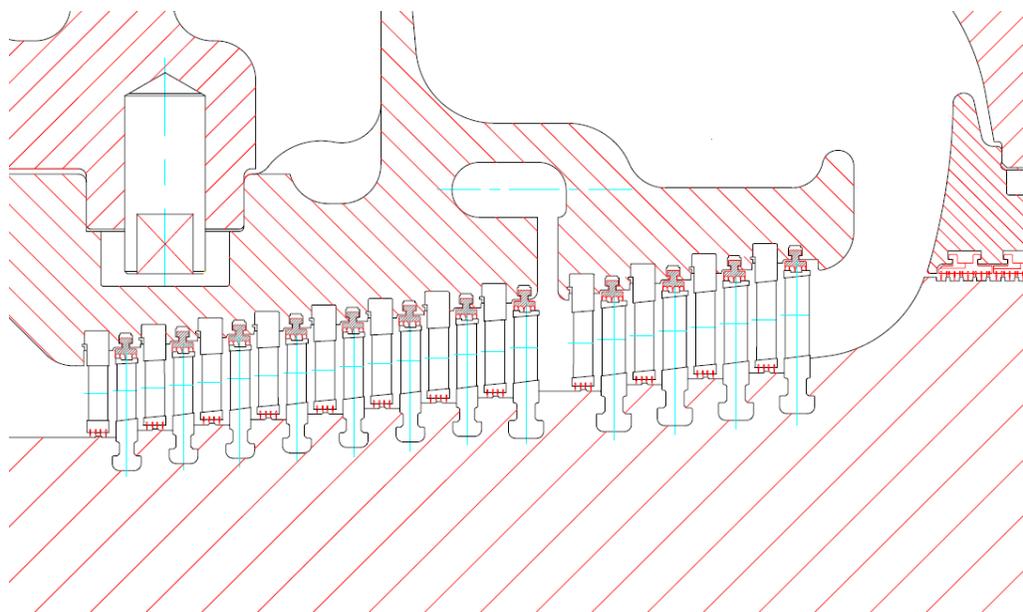
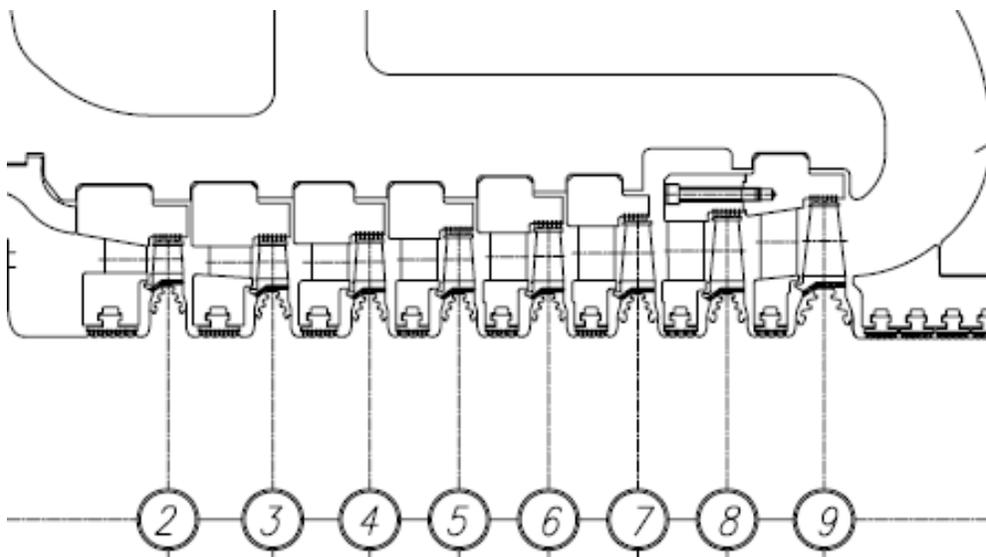
- 高压缸第一级静叶片采用轴向布置形式，以配合切向蜗壳全周进汽形式



第一级轴向布置静叶实体图

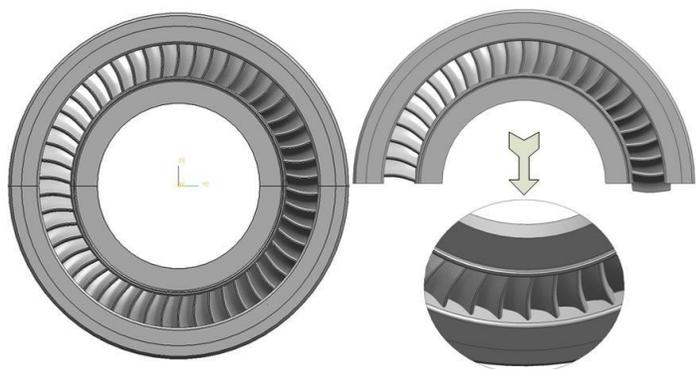
## □ 采用反动式通流的优点

- 叶片宽度小，在转子跨距一定的情况下，能够布置更多的级数，提高缸效率。
- 结合装配式隔板结构，能够简化通流结构，在设计、加工制造等方面，相对冲动式更简单。
- 反动级负荷变化时高效区宽泛，机组部分负荷时效率下降得较慢，对当前机组较低的负荷形势更有意义。

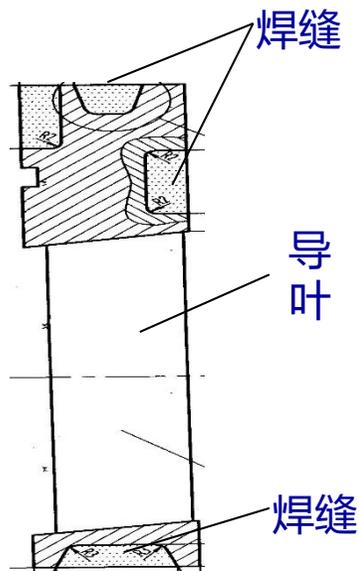


# 一、现代汽轮机先进技术和工艺

## □ 预扭装配式隔板（静叶栅）

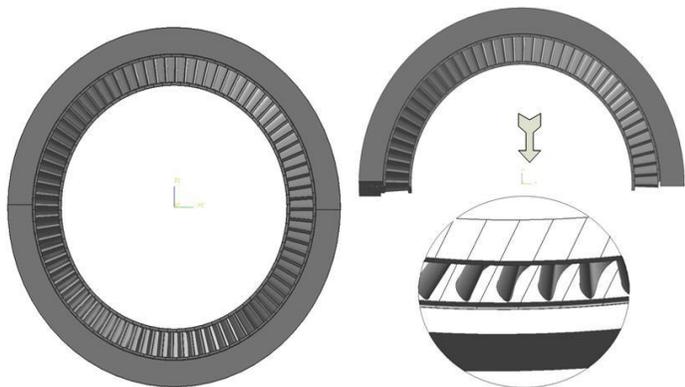


焊接隔板实体图

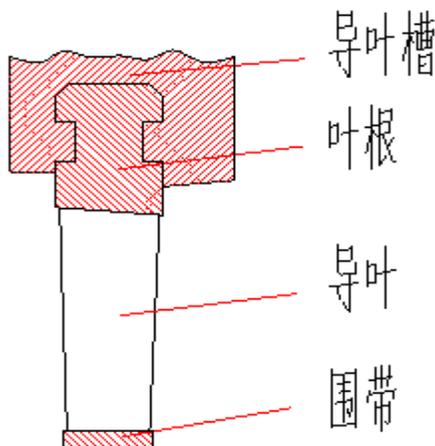


焊接隔板纵剖图

- 隔板装配摒弃过去的焊接工艺，采用预扭装配工艺。
- 拆装更便利，导叶片有损坏时可以更换指定的叶片，安装拆卸方便



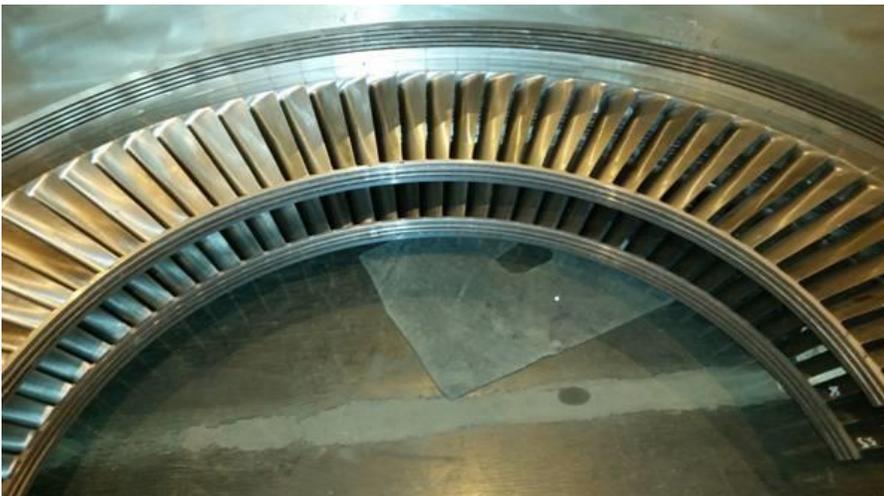
装配式隔板实体图



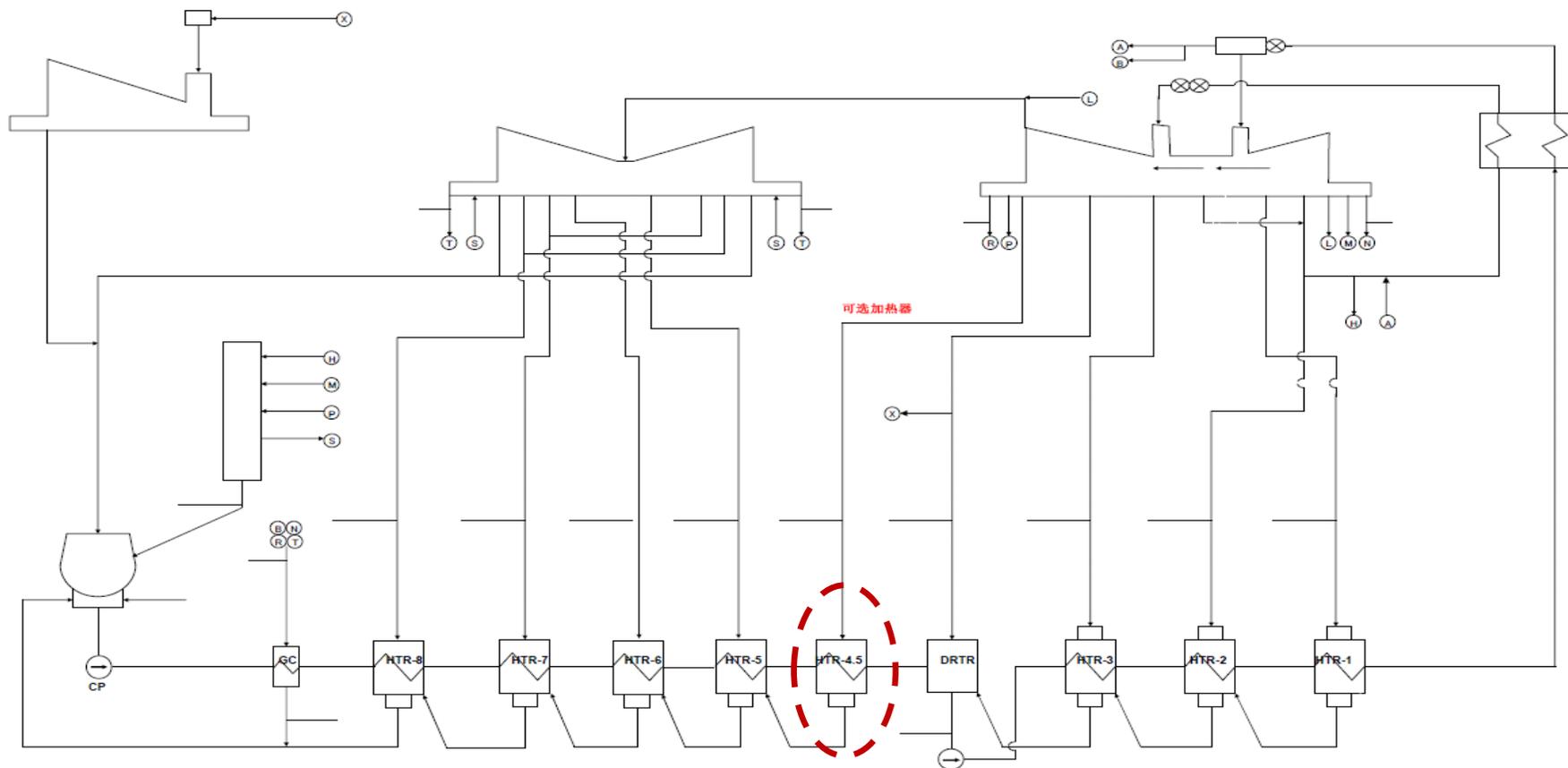
装配式隔板纵剖图

- 装配式隔板不进行焊接，不存在叶片变形，从而更好保证叶片通流的尺寸精度

## □ 绥中电厂800MW改造机组的高压装配式隔板照片



## □ 大机组0#高加、10级回热



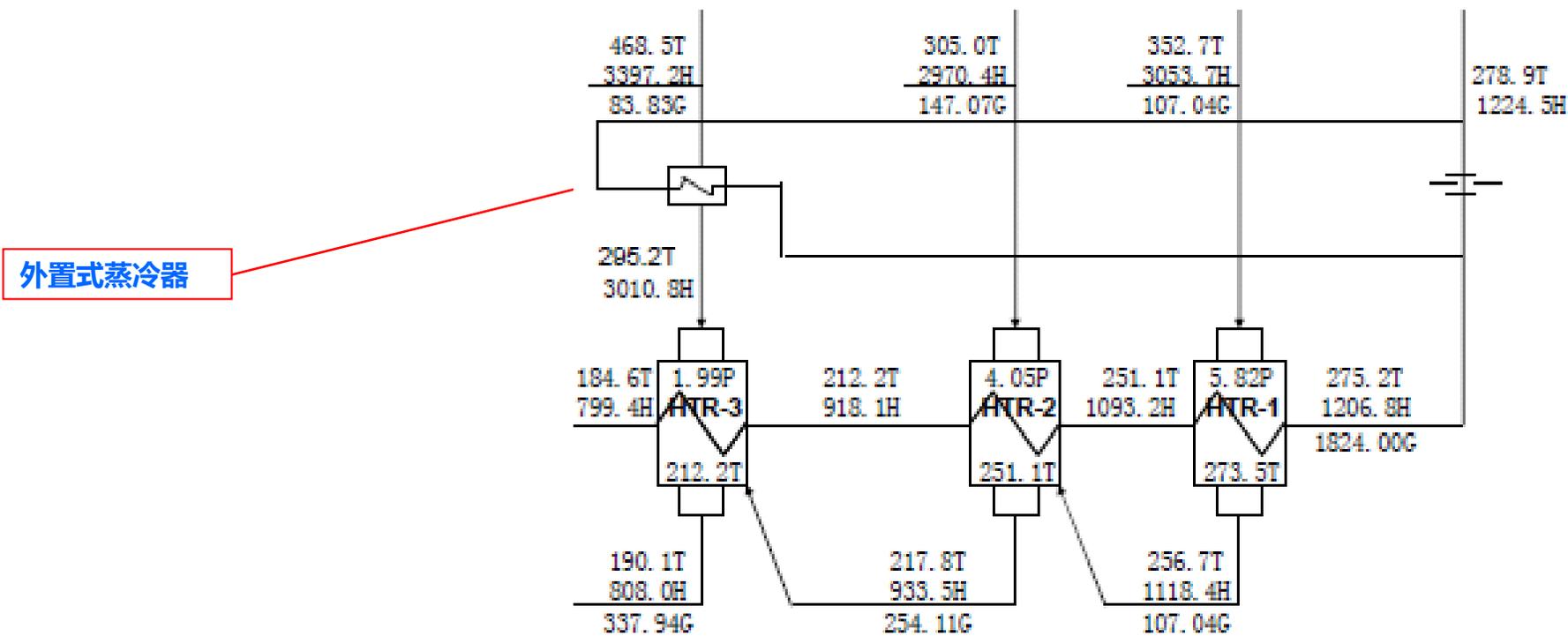
有条件时，增加回热级数，降低热耗率

增加0#高加、部分负荷时投入，提高部分负荷时的给水温度，降低部分负荷时的热耗率

增加4.5级回热，适当降低热耗率

# 一、现代汽轮机先进技术和工艺

## 增加外置式蒸汽冷却器

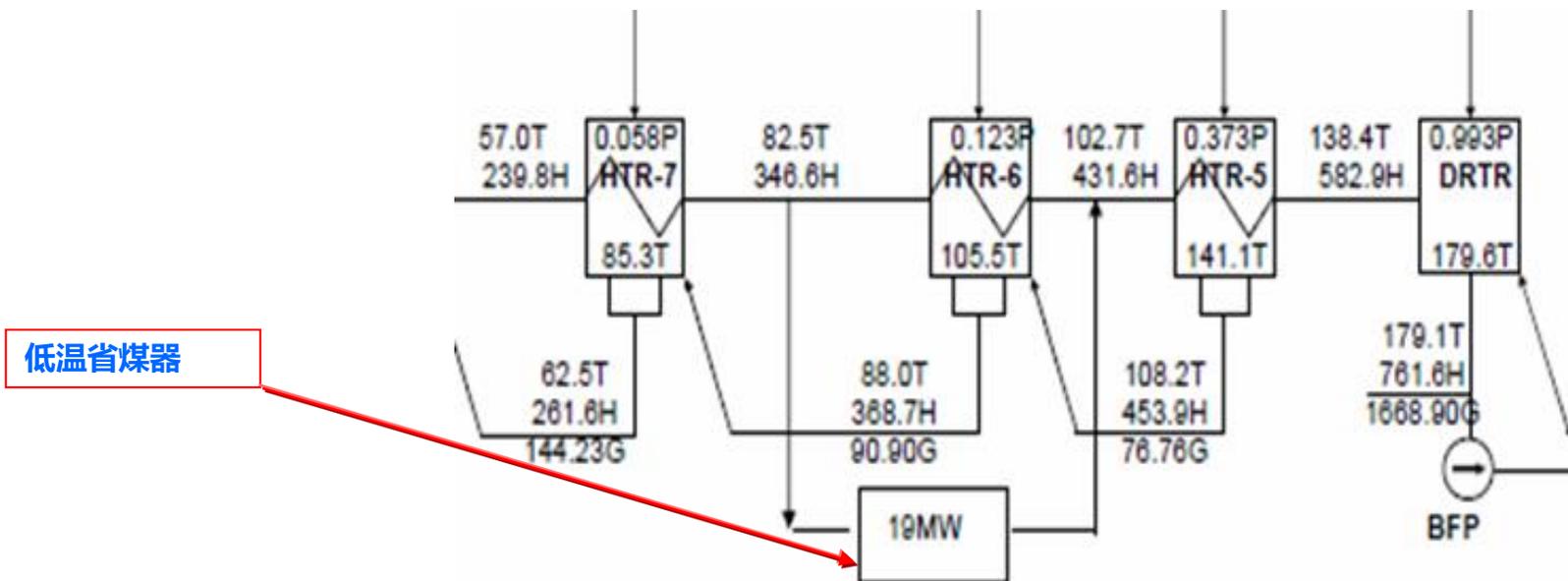


外置式蒸冷器

### 蒸汽冷却器

由于3抽过热度较大，直接加热给水会降低机组朗肯循环效率，采用外置蒸汽冷却器先加热高温给水可提高给水温度4-5℃，提高汽轮机循环效率，降低机组热耗，同时改善三号高加的工作环境。

## 增加低温省煤器



### 低温省煤器

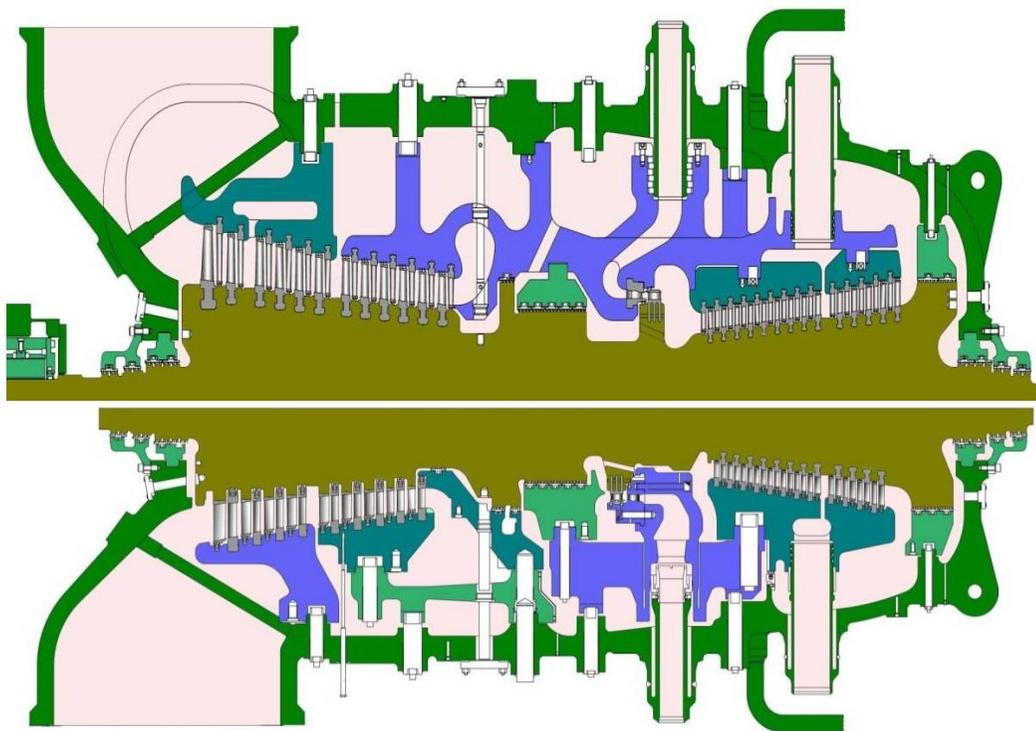
根据锅炉低温省煤器提供的热量和进出口水温的要求，选择适合的位置，尽量提高热量的利用率，减少对其他加热器的影响。

不同类型锅炉排烟温度存在差异，一般要求给水入口水温80℃，给水出口水温115℃。

### 1. 高中压通流技术升级方案

#### 增加级数，更换叶型

升级后



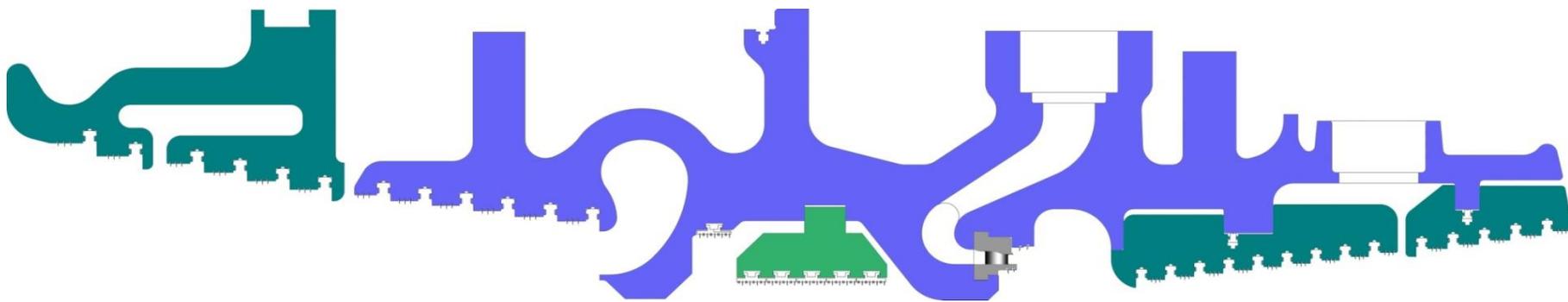
升级前

高中压纵剖面图对比

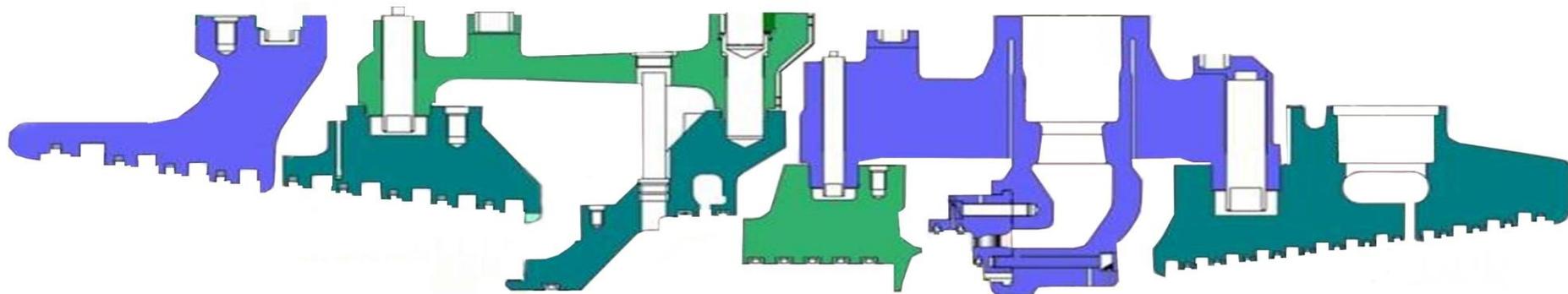
- 1、高中压缸增加级数；
- 2、装配式隔板，小间隙汽封技术；
- 3、优化高压喷嘴面积；
- 4、新型高中压内缸，优化中压隔板套；
- 5、小压损型中压进汽腔室；
- 6、增加#4.5回热抽汽。

### 2. 高中压内缸升级方案

优化进排汽结构，简化内缸结构，减少漏汽隐患



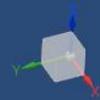
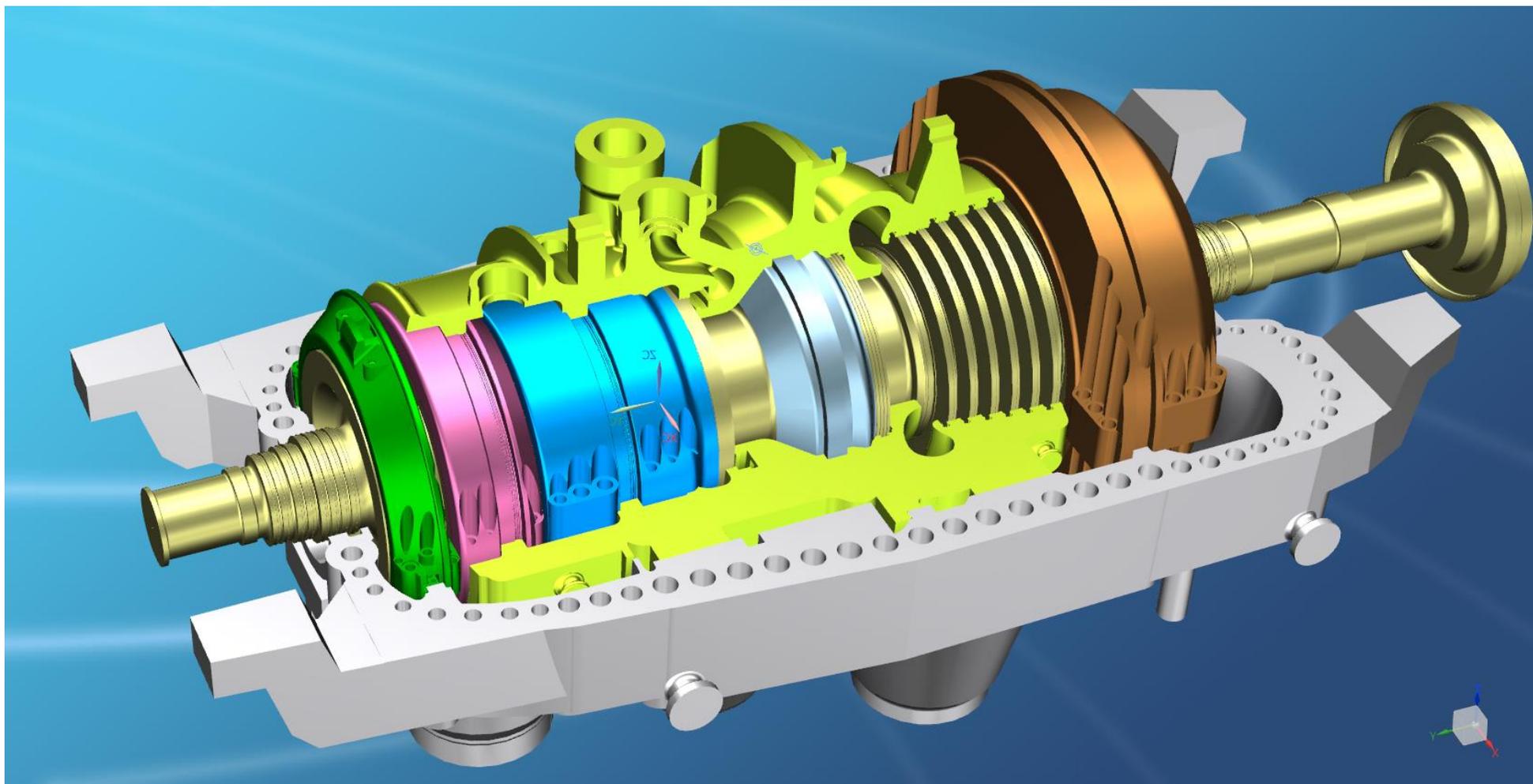
升级后高中压整体内缸剖面图



原高中压内部结构剖面图

### 2. 高中压内缸升级方案

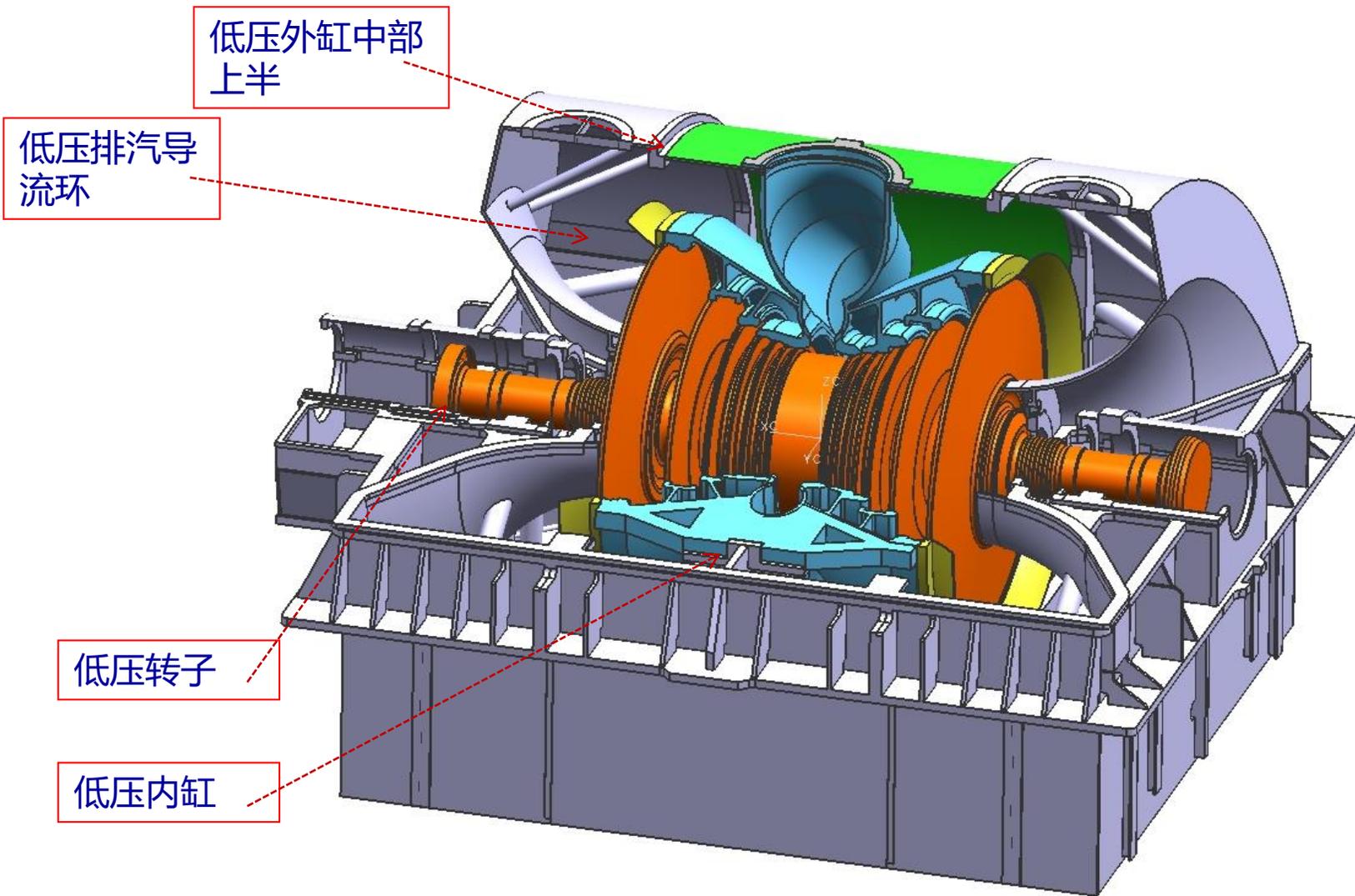
优化进排汽结构，简化内缸结构，减少漏汽隐患



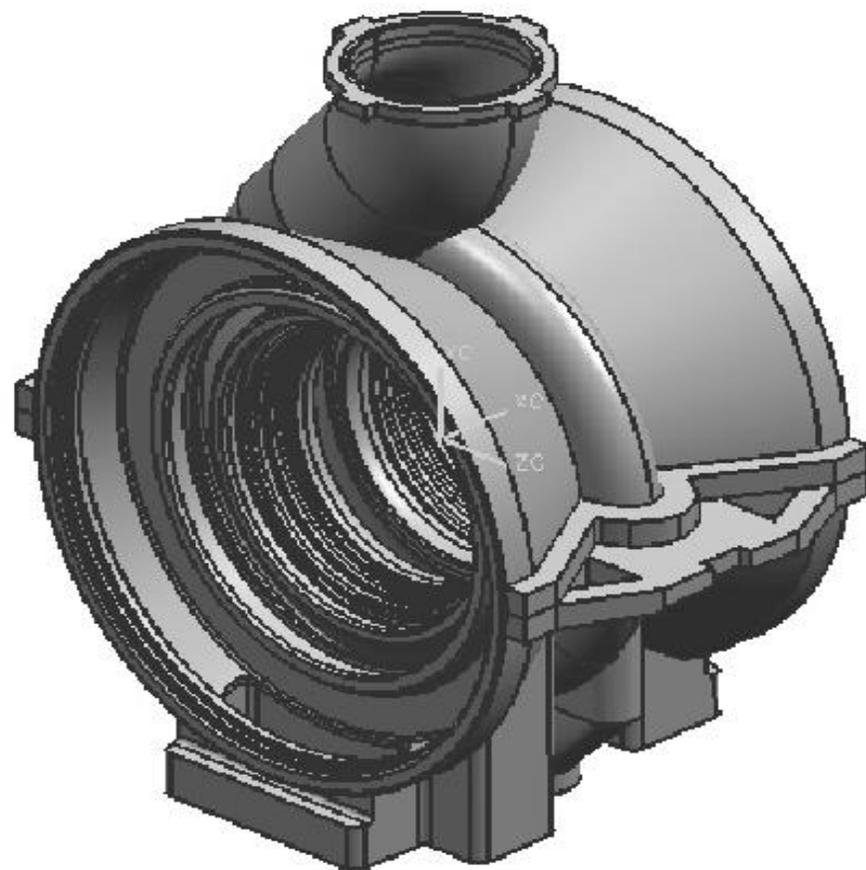
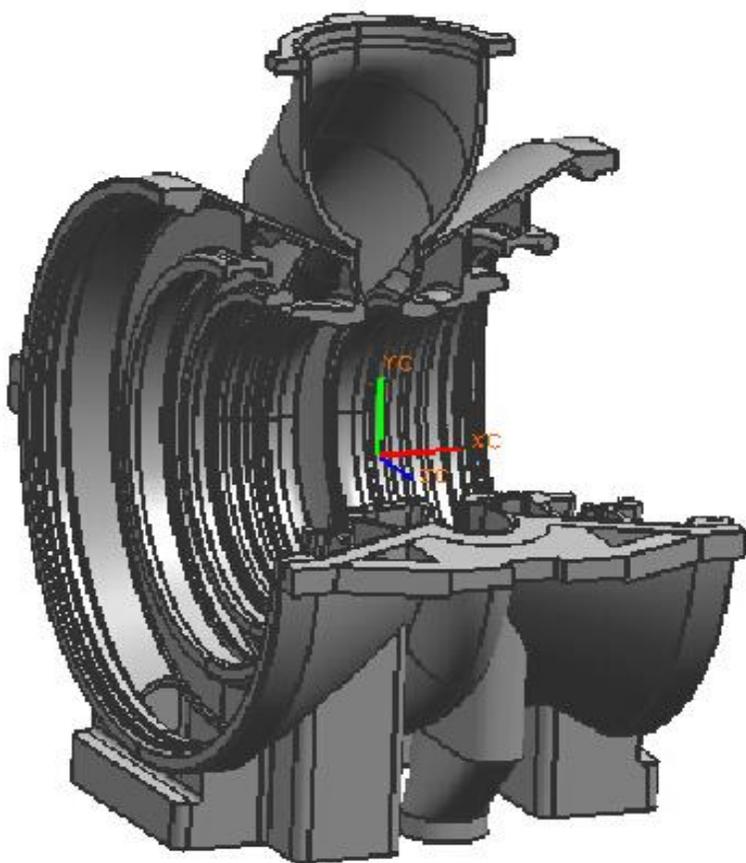
## 二、大容量机组现代化改造方案

### 3. 低压旋转进汽蜗壳及铸造内缸

升级后的实体装配图

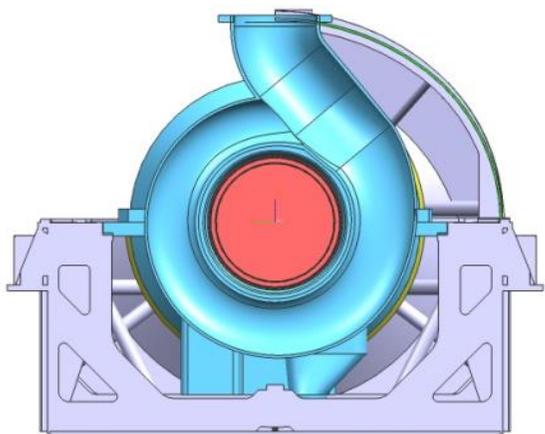
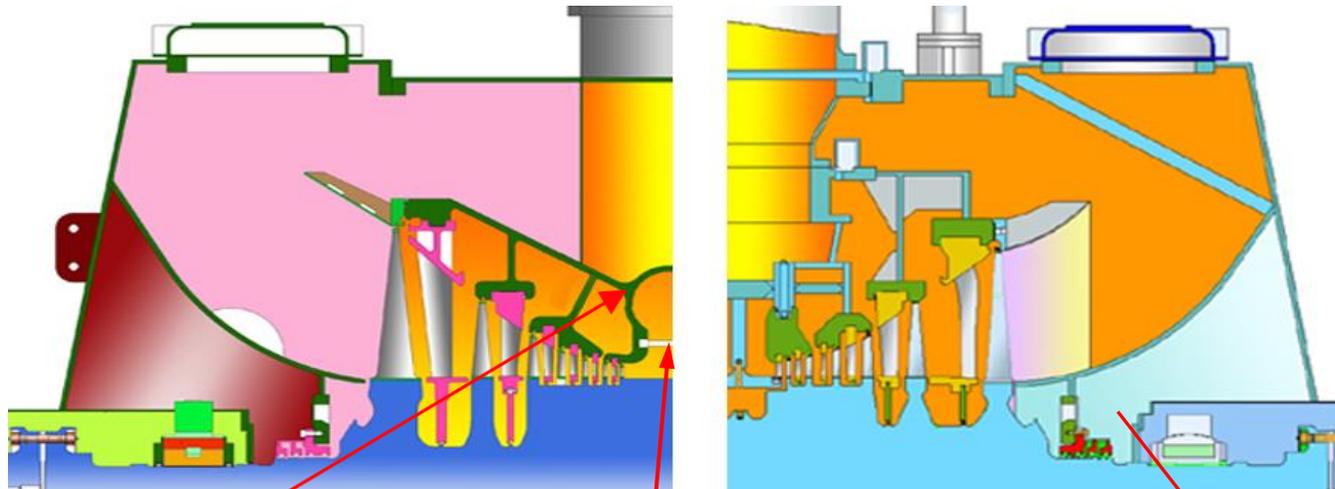


### 低压整体铸造内缸（球墨铸铁）

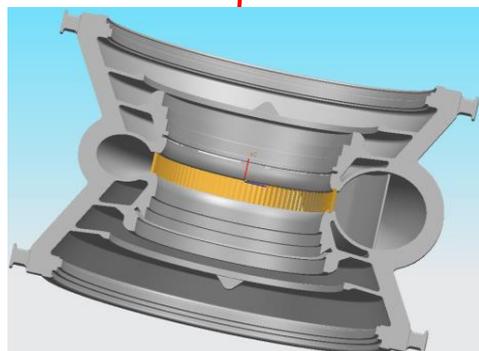


升级后的低压内缸实体图

### 4. 旋转进汽蜗壳——第一级横置静叶



360°蜗壳进汽

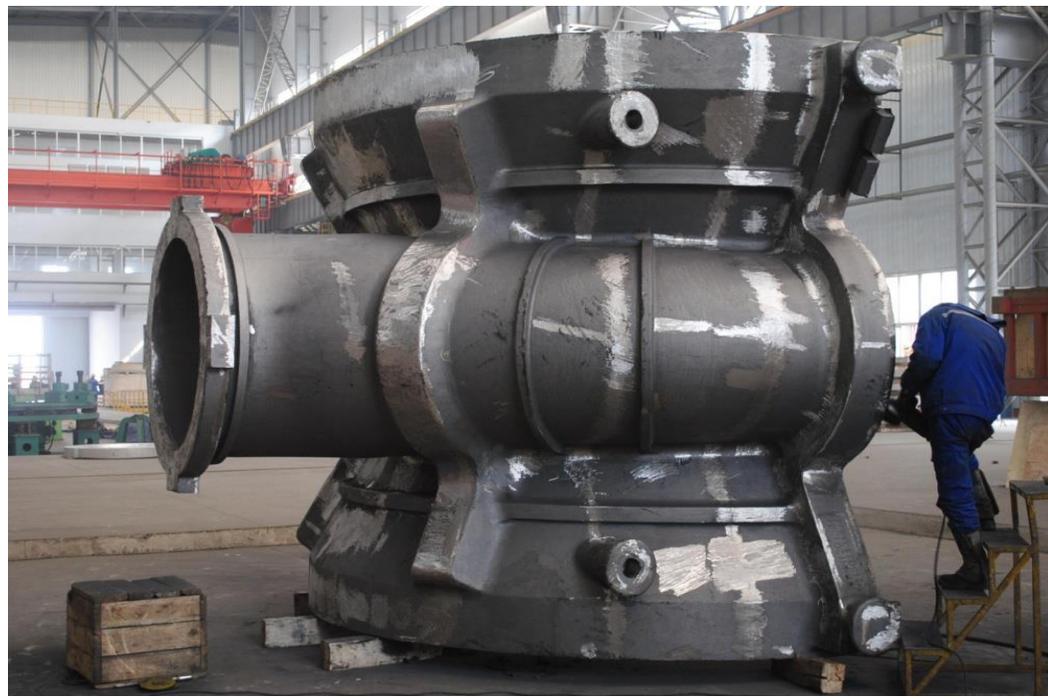


横置静叶

传统多级扰流低压内缸设计

## 二、大容量机组现代化改造方案

### □ 铸造好的低压铸铁内缸毛坯



### □ 铸造好的 低压内缸



## 二、大容量机组现代化改造方案

正在吊装的内缸上半，能看见第一级横置静叶

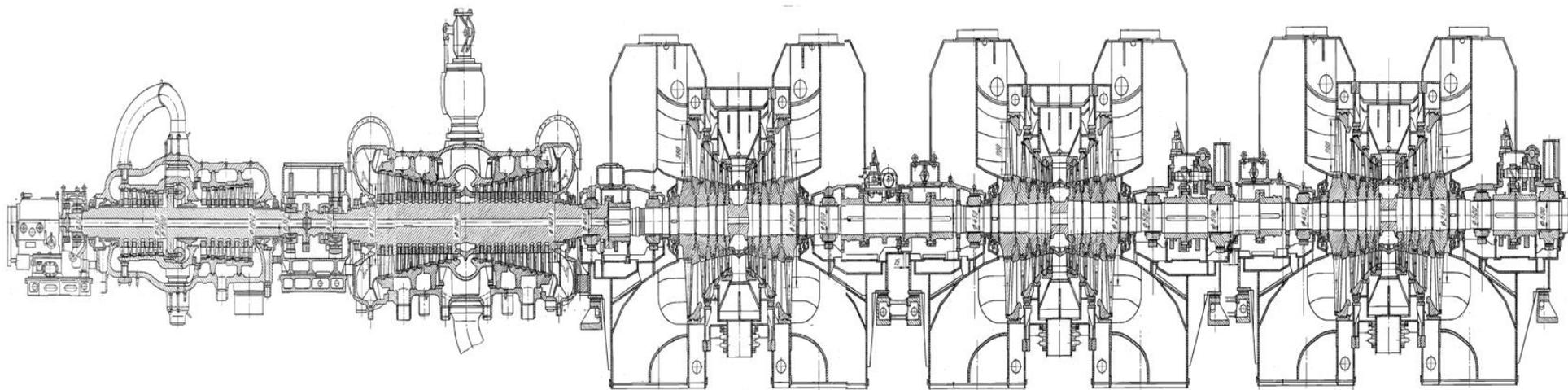


### 部分技术已经得到验证

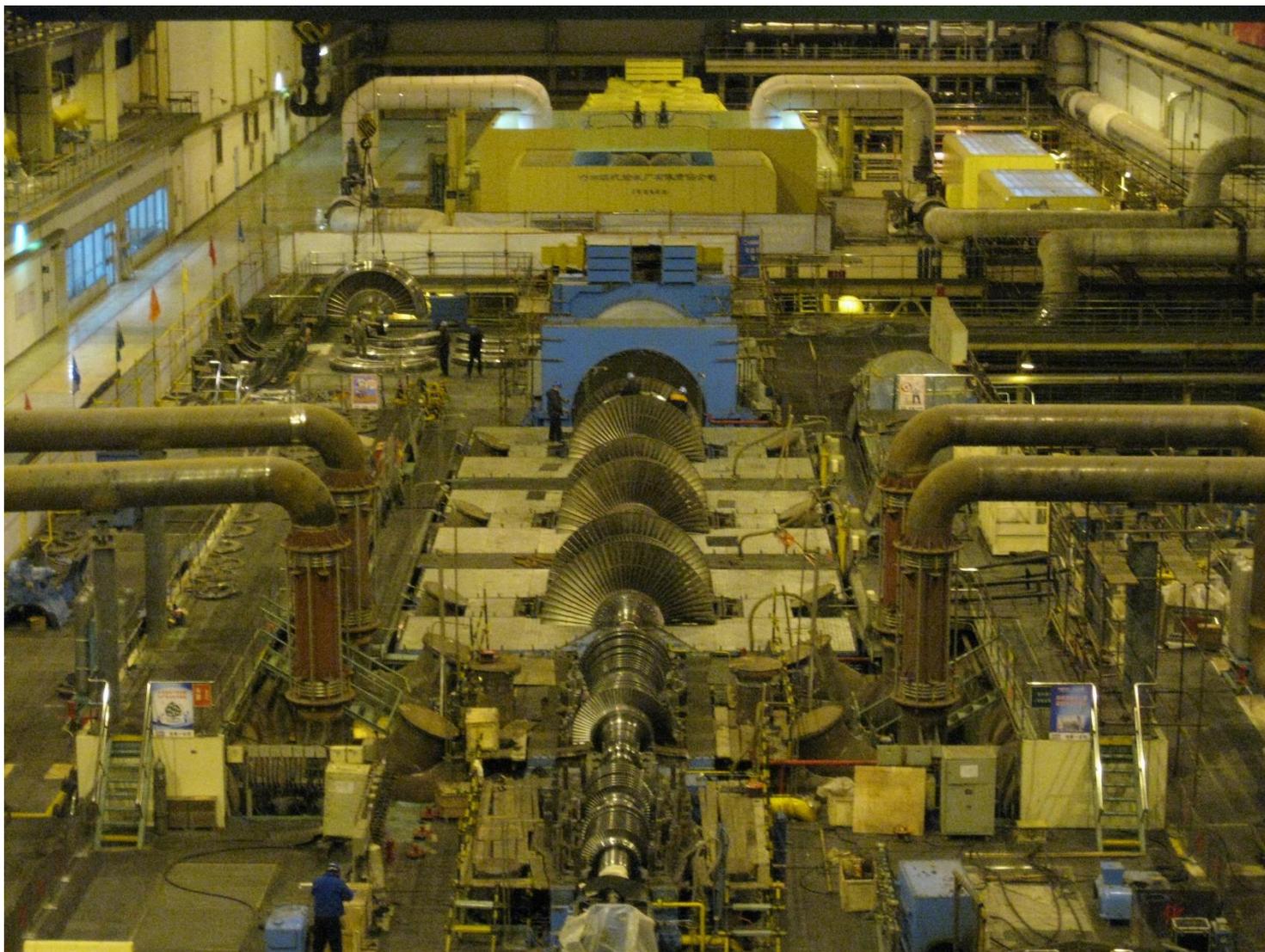
- 绥中俄制800M机组改造
- 多台新型350MW汽轮机顺利投产
- 大唐七台河亚临界600MW机组成功改造

### 国华绥中俄制800MW机组现代化改造

- 型号：K—800—240—5型(N800-240/540/540)
- 制造商：列宁格勒金属工厂
- 型式：超临界，单轴，五缸六排汽、一次中间再热，冲动凝汽式汽轮机
- 汽轮机级数共60级。



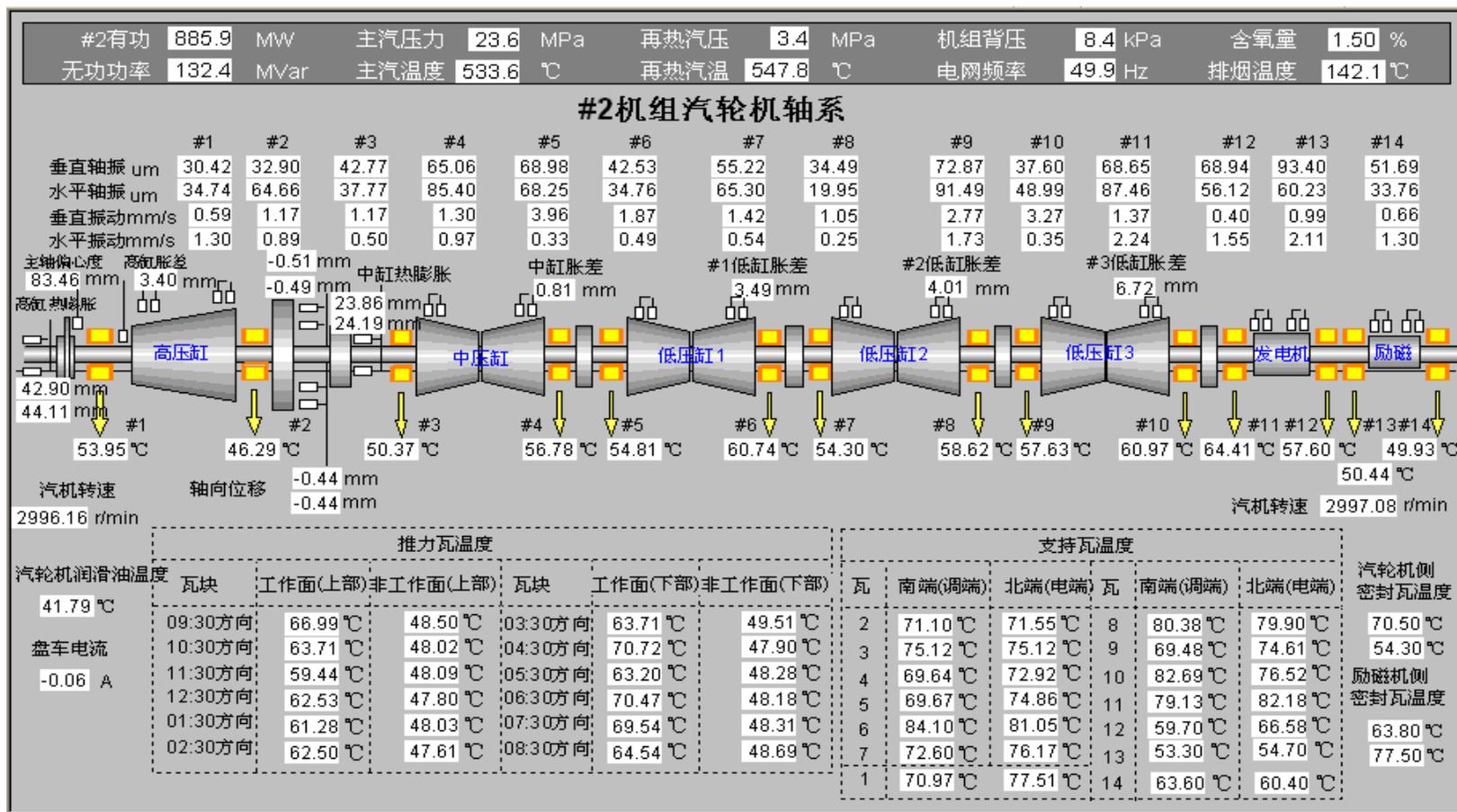
### 改造安装中的880MW汽轮机



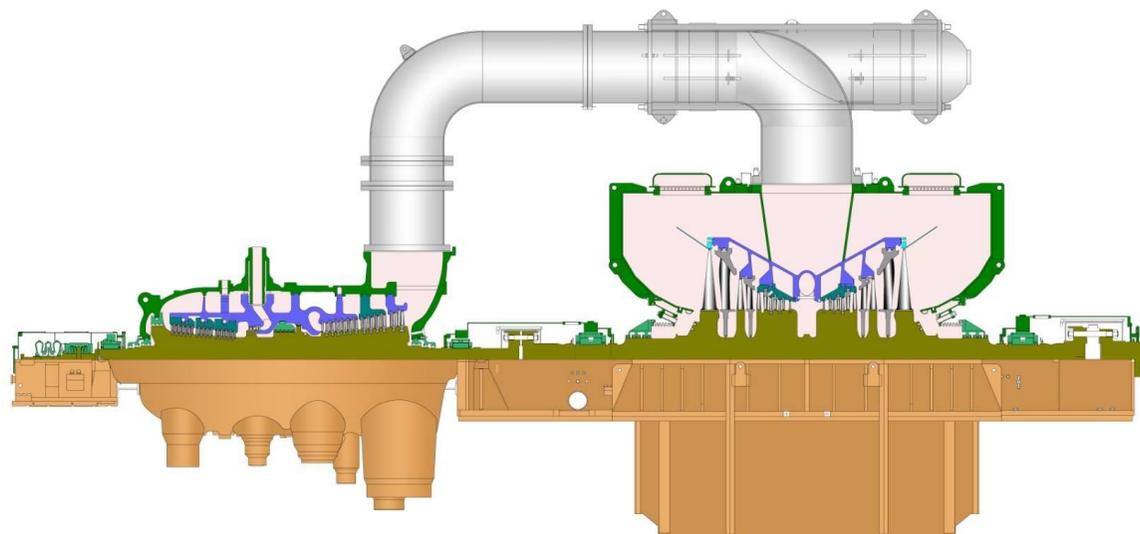
## 二、大容量机组现代化改造方案

- 2014年9月13--20日通过168小时试运行
- 各轴承振动值均在A级，多小于70 μm
- 支持轴承温度最高64℃，推力瓦温70℃

- 缸效率达到设计值
- 机组实际煤耗下降~30g/kW.h



### 基于新技术提升后的 新型超临界350MW抽凝汽轮机系列



**哈汽公司新近设计制造的多个供热机型，比较具有代表性的350MW机组，是目前国内供热机组的主力机型**

大唐大庆机组：已商业运行，热耗率低于7700kJ/kWh

华能伊春机组：刚投产，供电煤耗295.6g/kWh

大唐绥化机组：已经投产，性能优于伊春机组

深能保定机组：采用了高中压分缸设计，性能将再次提升

### 大唐七台河600MW亚临界机组改造

- 2015年2月份开始项目实施
- 2015年底完成调试并过168,
- 由西安热工院2016年1月份完成性能试验
- 机组三缸效率分别达到86.5%、93%、90%
- 机组出力和热耗达到设计值
- 低压整体铸造大内缸工作状态良好、5抽6抽温度未见升高现象

### 哈汽公司机组改造统计

目前，哈汽公司共完成300MW以上汽轮机通流改造60多台，其中国外制造机组20台；300MW等级50多台；600MW等级16台；800MW等级2台，另有多台机组修复工作。

改造的国外机组包括有俄罗斯机组、美国GE机组、波兰机组、意大利安萨尔多机组、捷克斯柯达机组等。

进期成功修复北京高碑店、洛阳热电的俄制165MW机组  
改造后机组均运行良好

## 汽轮机高背压供热——汽轮机组能量梯级利用形式的典范

1. 汽轮机冷端损失占总损失的50%以上，冷端损失如果能以利用，是最佳的节能，节能量大、成本低廉
2. 将进入汽轮机的蒸汽的能量中高品质的部分用尽后，再吐给下游供热，避免了冷端损失
3. 抽凝机组采用高背压供热之后，能够在原来最大采暖供热负荷基础上，再增加约20%的供热量，能够将全厂的热电效率从70%提高到95%以上
4. 比热泵技术更简单、投资少，运行费用低廉、收效更大。

低真空循环水供热的特点：供热量大、供热品质低、要求负荷稳定

### 高背压供热改造中几个需要注意的问题

1. 高背压供热的特点：供热量大、品质较低、负荷要求稳定
2. 机组改造能否成行，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

(以亚临界300MW机组为例说明)
3. 机组改造方案需要单独订制、一事一议
4. 双转子方案还是单转子方案，均有可取之处，需要认真协商
5. 在评价电厂的改造效果时，一定要有全厂的概念，综合考虑全厂的收益，不能仅评价单台机组的改造效果

### 低真空循环水供热改造适用范围

- 东北、华北、黄河流域
- 中型和大型城市、供暖人口密集区
- 电厂里最好有两台以上的机组，其中一台至少是抽汽供热的机组
- 有大而稳定的热负荷，且热网循环水温度要合适

## 大容量机组低真空供热改造方案选取

- 改造方案的选择——互换转子方案、改造转子方案
- 互换转子方案：两根低压转子
  - 冬季低真空转子——末叶短、级数少
  - 夏季正常转子——正常末叶和级数
- 改造转子方案：将原有正常转子改造成低真空转子，改造后不再改回来
  - 无论冬夏，只用一根低压转子

- 改造方案的选择
  - 1) 互换转子方案
- 向电厂提供一根备用转子供冬季低真空供热时使用，该转子比正常转子少1—2级，前面各级与旧转子相同，末级是新设计的末级，叶高适当减短，满足冬季高背压运行，相应的新末级隔板和导叶也一并备用一套新的。
- 冬季低真空时，将原机组低压转子吊出，同时拆除原机组末两级隔板，换上新隔板，再安装上新转子就可以了。夏季不供热时旧转子再换回来，同时换回来原来的末二级旧隔板

### 三、大机组高背压供热改造

#### 互换转子方案适用条件：

- 冬季供热、夏季纯凝时满负荷或接近满负荷运行
- 华北、西北、黄河流域地区（有迎峰度夏任务）
- 优缺点
  - 优点：冬夏两季均能满负荷
  - 缺点：每年两次停机、开缸、倒换转子、转子对轮铰孔精度要求高

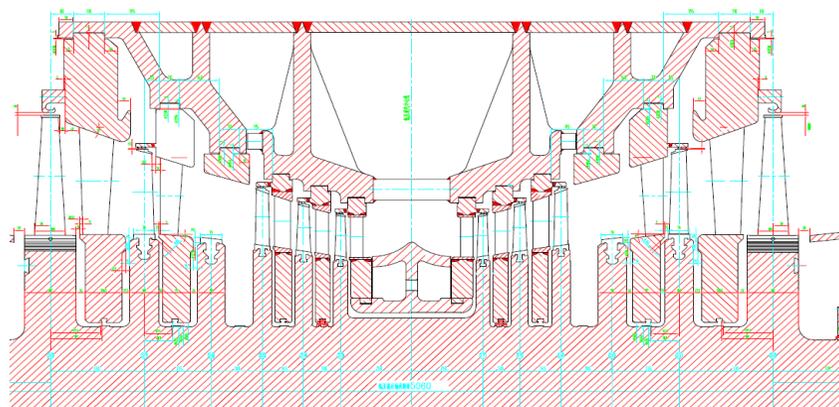
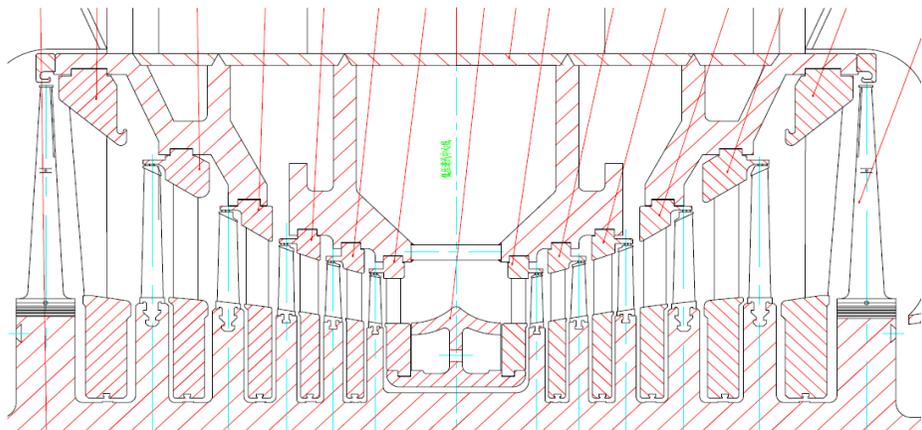


- 2) 改造转子方案
- 将电厂原有低压转子拆除末2-3级，并新设计一级末叶片和相应导叶，新末叶的叶根照配，叶高适当减短，该转子比正常转子少一级，前面各级与旧转子相同，满足冬季高背压运行，相应的新末级隔板和导叶也新设计。原来末级隔板更换成导流环。
- 转子改造后就不再变动。冬季低真空时，新转子很好满足高背压要求，夏季纯凝时，较短的末叶将会影响机组的最大出力，但是如果机组夏季负荷较小（最大负荷不超过原来的80%），对电厂的经济性将不会产生影响。

### 三、大机组高背压供热改造

改造转子方案适用条件：

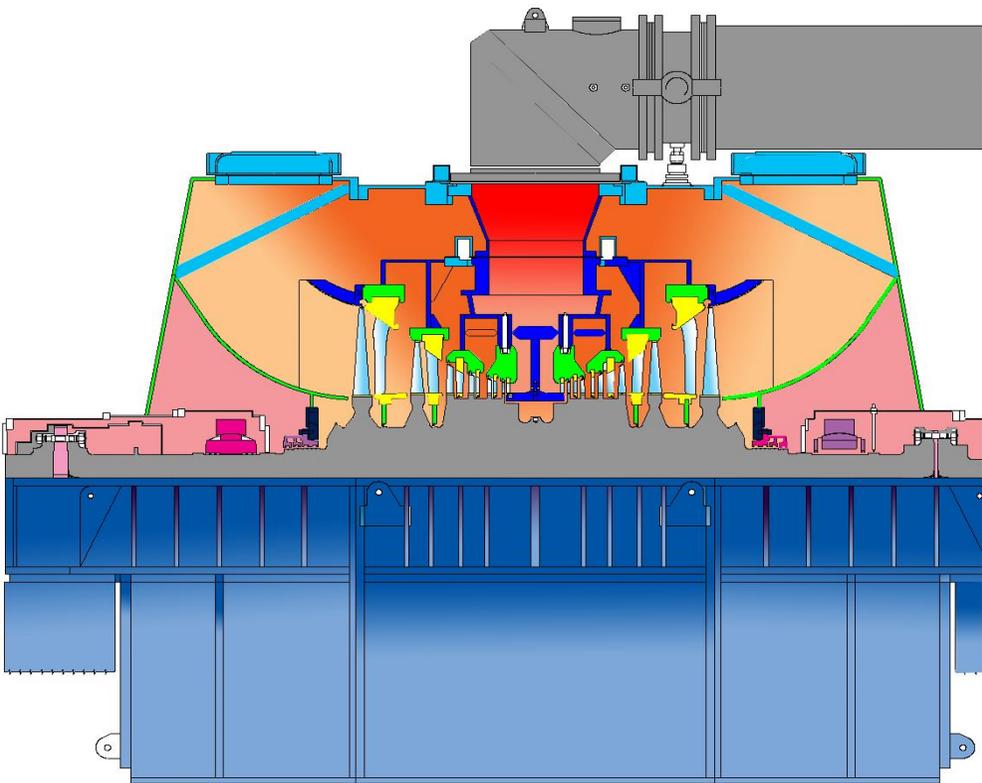
- 冬季供热、夏季纯凝负荷较小（最大负荷不大于原机80%额定）
- 东北地区（无空调负荷、夏季无需满发）
- 优缺点
  - 优点：改造简单，花费少，不需要每年两次倒换转子
  - 缺点：夏季不能大负荷纯凝运行，电网调大负荷困难



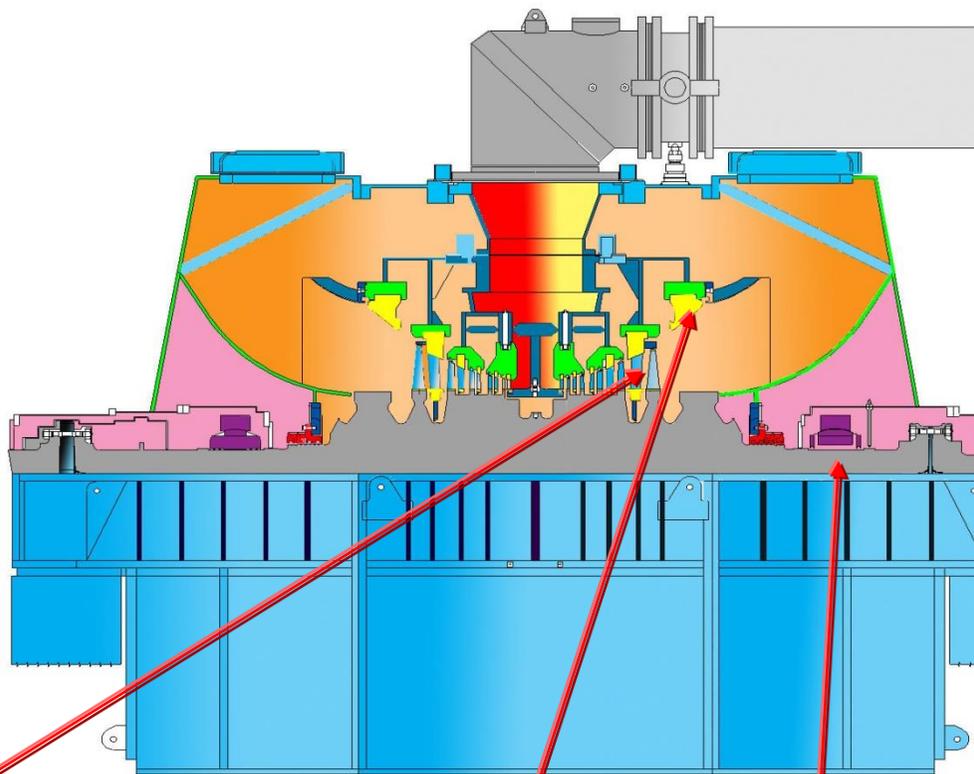
某机组改造前后的低压缸剖面图

### 三、大机组高背压供热改造

#### 300MW机组改造前后的低压缸剖面图



重新设计原次末级，作为新转子的末级



拆除原末级隔板，新设计导流环

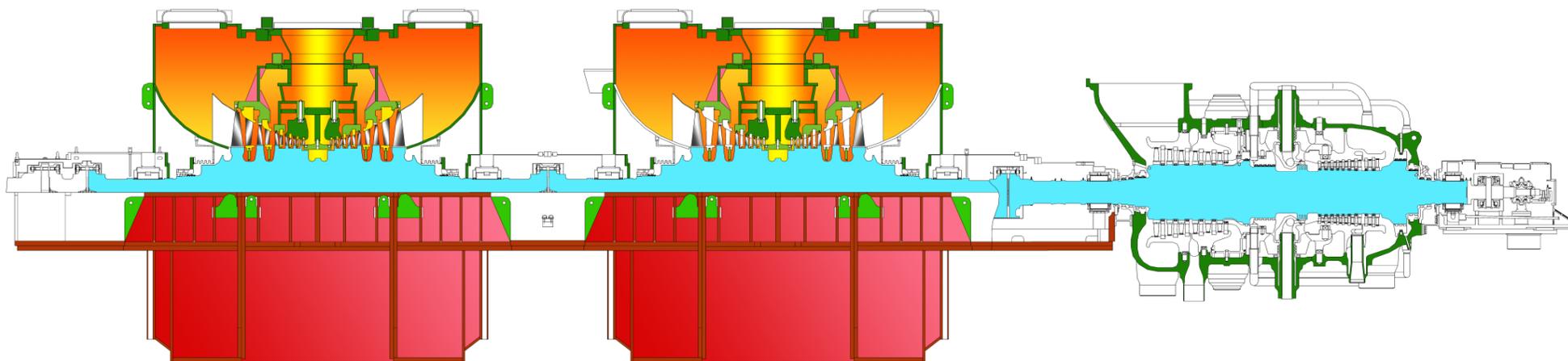
安装时适当预降低轴承标高

## 300MW/600MW空冷机组改造

在300MW空冷机组的排气装置旁边安置一个冷凝器（换热器）

在600MW空冷机组的一个低压缸的排气装置旁边安置一个冷凝器（换热器），  
只改其中一个低压缸

中电投的燕山湖电厂600MW空冷机组改造，实现了双背压运行



## 改造后对机组出力的影响

- 改造后，低压缸末级叶片短了，排气面积减少了，机组的最大出力降低，大约降低到原来的70%—80%
- 末级叶片长度决定汽轮机的最大容量
- 当电网调机组的最大负荷时，会有影响
- 同时，为了机组低压缸安全运行，避免低压缸出现鼓风过热现象，机组也不允许电负荷过小

- 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高限值。
- 综合以上因素，排汽压力上限值以不超过55kPa为宜，相应的供水温度不超过80℃。
- 超临界机组再热温度较高，当背压升高时，排汽更容易鼓风，因此排汽压力设计值更应该加以限制。

#### 注意：运行时采暖抽汽量不宜过大

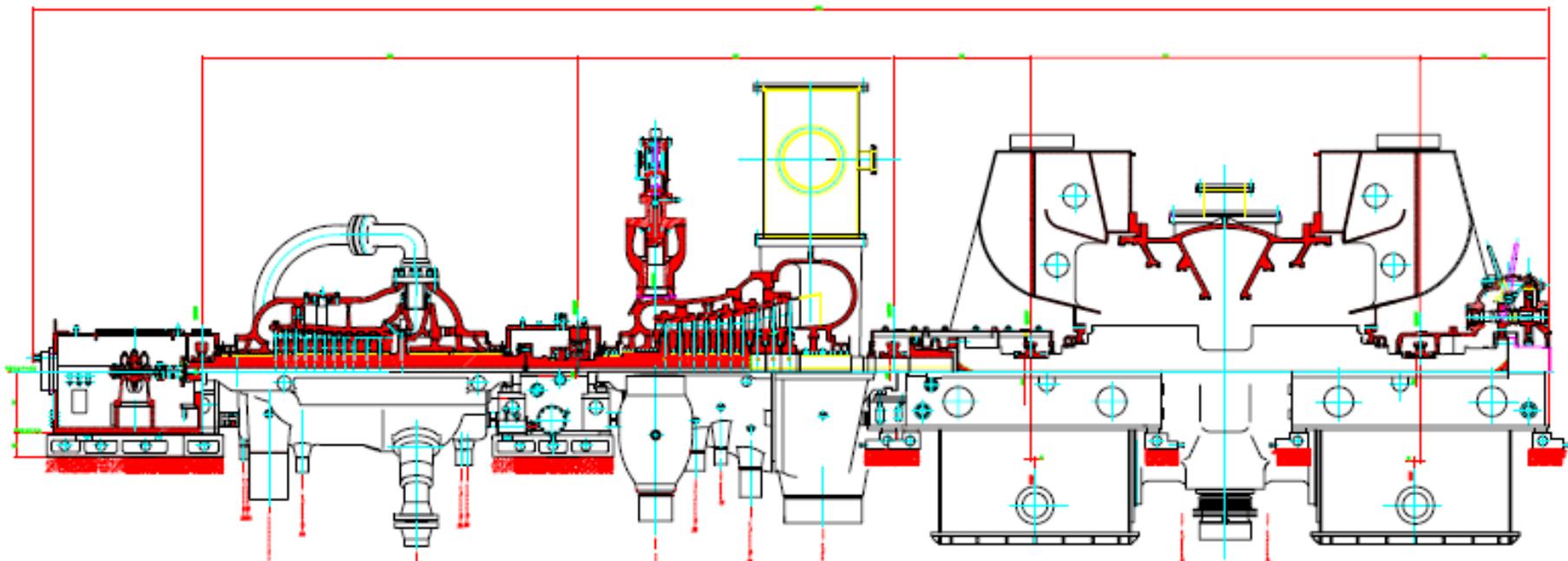
- 高背压运行时，低压缸容易鼓风过热，特别是当机组再有采暖抽汽时，低压缸的缸效率下降，鼓风更容易发生；
- 根据计算经验，高背压运行时，低压缸的安全的排汽量不宜小于额定纯凝时的60%；
- 因此当机组改造成低真空运行时，相应的采暖抽汽量应适当减小，以300MW机组改造为例，采暖抽汽量不宜大于300t/h。

### 背压机（光轴）改造基本思路

- 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，中压缸排汽全部去热网供热，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；
- 整机出力大约降低到原来的70%；
- 与高背压供热改造相比，可再增加一些供热量，同时运行更加灵活，不受供热负荷限制，供热量可随着供热负荷的变化而任意改变。
- 低压转子适当冷却

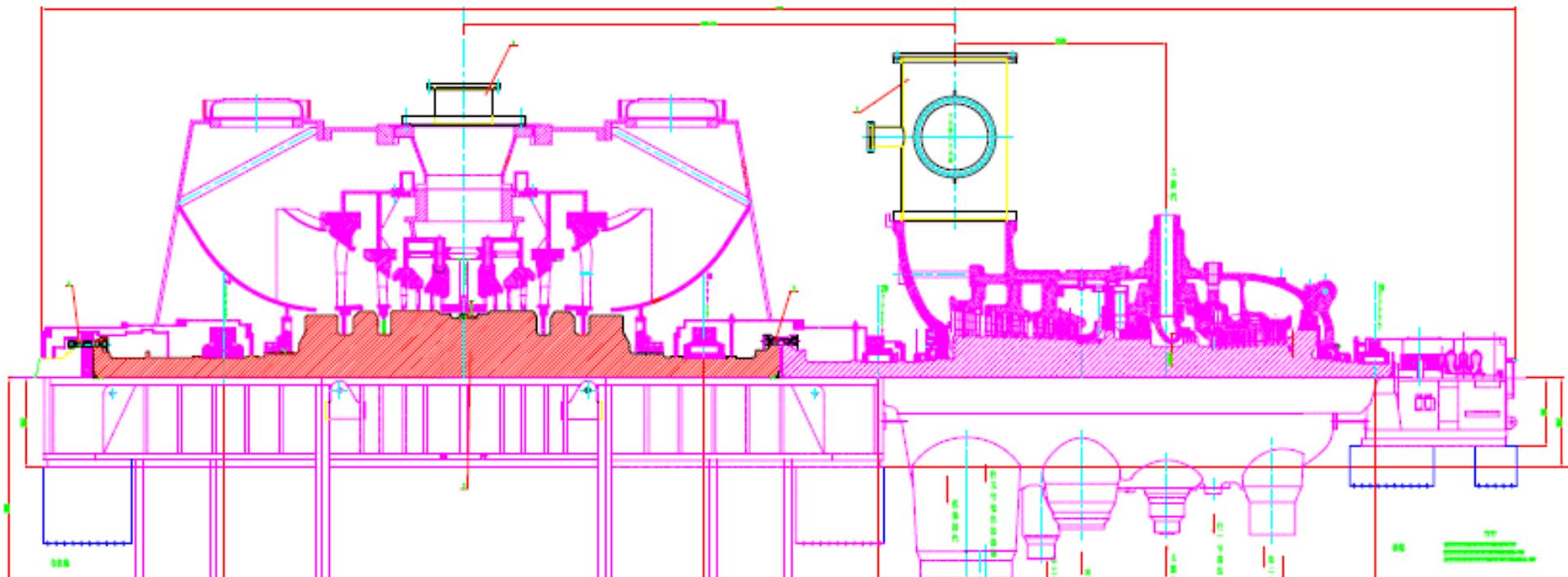
### 三缸200MW机组改背压机（光轴）改造

改造后机组出力155MW，背压供汽量最大490t/h



### 双缸300MW机组改背压机（光轴）改造

改造后机组出力210MW，背压供汽量最大660t/h

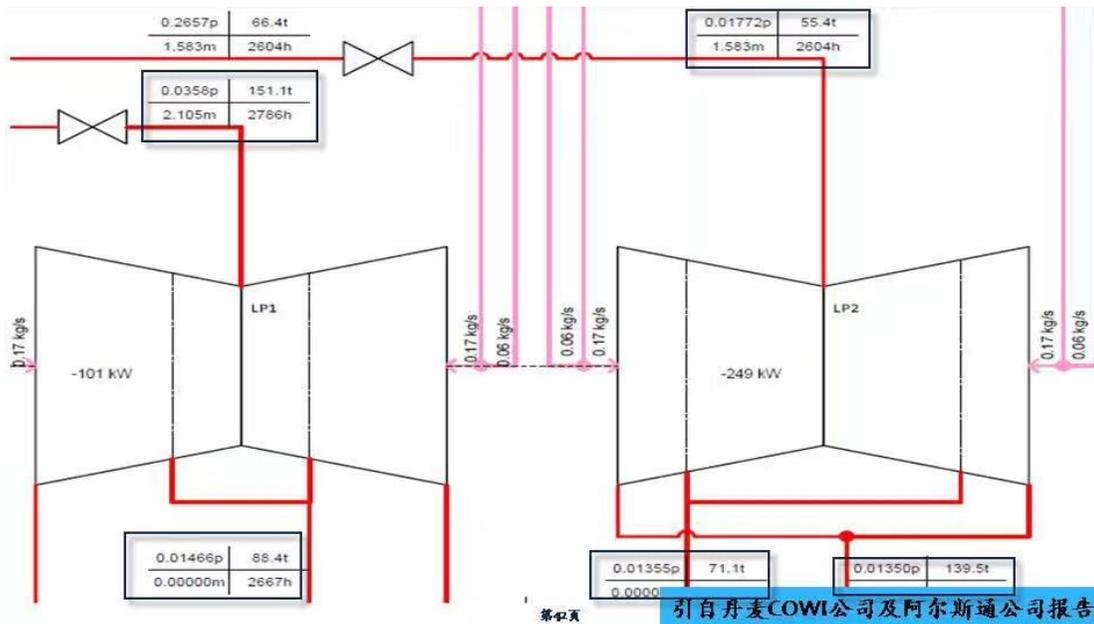


### 背压机（光轴）改造运行情况

- 华能海拉尔原200MW抽凝机改造
- 大唐丰润原300MW抽凝机改造
- 新疆北屯135MW抽凝机改造

### 国外情况

丹麦Vattenfall公司纯凝407MW的热电机组(Nordjylland Coal CHP Power Station Denmark)在兴建时就考虑了高度的机组灵活性，可实现切除 $2 \times$ LP低压缸进汽的背压供热运行方式。此时，每个低压缸仅引入 $1.583 \sim 2.105 \text{ kg/s}$ 左右的冷却蒸汽。低压缸温度大概在 $71.1$ 、 $139.5^\circ\text{C}$ 。



### 低压缸灵活性运行改造中需要考虑的问题

主机几个主要的影响安全的问题，以及建议

- 鼓风危害（低压缸，不限于末级叶片）
- 末二级叶片汽蚀和水蚀
- 末叶片动应力大，颤振危害，曲线，末叶片的安全余量
- 低压缸长期喷水的安全性，喷水方式的设计
- 热力计算的局限性，无法计算边缘工况，不要迷信数值模拟
- 安全性评价的原则，不能仅仅短时运行，过于片面
- 需要试验验证，且试验时要考虑全面，测点要充分考虑流动的特性
- 一事一议，不宜快速、广泛、大面积推广

### 低压缸灵活性运行改造可行性

#### 主要安全问题——鼓风和动应力问题

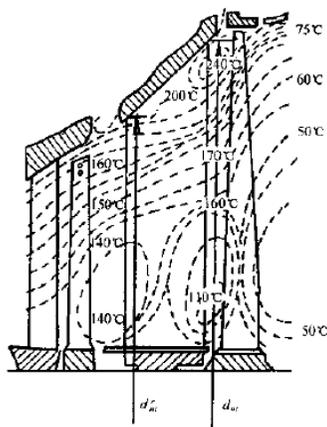
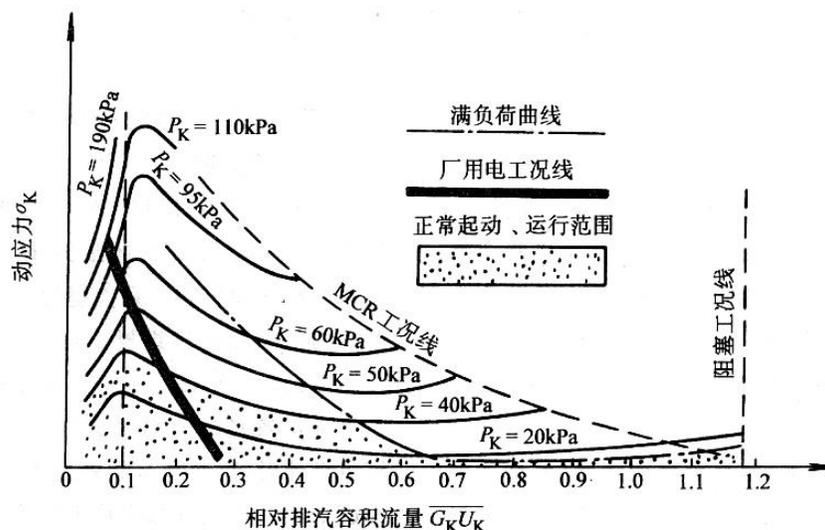
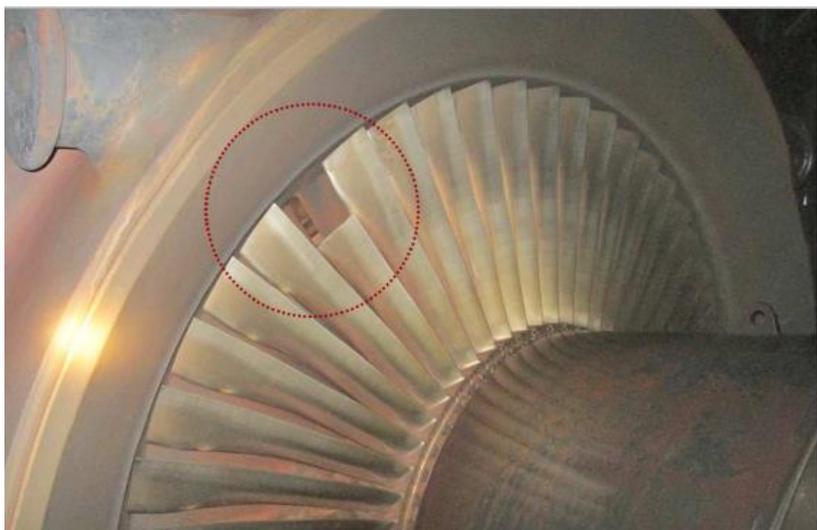


图 5-45 K-300-240 型汽轮机末级和  
倒数第二级出口处实际流线图谱及温度分布



- ① 发生鼓风现象，蒸汽温度升高，300MW等级机组，末级叶片温度达到200 °C以上，末级叶片采用17-4PH材料，这种材料西屋公司规定使用温度不宜超过200 °C；
- ② 叶片根部出现负反动度，喷水时，水滴吸入工作面，对背弧产生侵蚀，需要采用过渡区叶片考核标准，计算末级叶片；
- ③ 喷水只是降低排汽部分温度，汽缸温度梯度易引起低压缸变形，动静碰磨；
- ④ 叶片处于小容积流量、大负冲角状态，叶片发生颤振现象，目前这种工况下颤振响应无法准确进行计算评估，只能通过试验确认。前苏联、西屋、西德、日本都发生过叶片颤振事故；

### 国外机组末叶片因颤振断裂的照片



阿尔斯通机组断裂的末叶片

LMZ机组断裂的末叶片

### 低压缸灵活性运行改造可行性

#### 哈汽意见

- ① 汽轮机末叶在容积流量小于额定值的15%时会发生动应力增加；叶片会出现颤振的可能，带来安全隐患；
- ② 临河项目试验期间机组负荷120MW，出力为40%工况，如进一步降低负荷，联通管旁路蒸汽温度升高，低压缸运行条件会更加恶劣；
- ③ 叶片颤振引起断裂需要一定时间的能量积累，短时间无事故不代表长期安全；临河的试验仅持续了不到24小时，不足以验证该运行模式在长期运行条件下的安全性；
- ④ 低压缸喷水系统长期运行不是安全的运行模式；
- ⑤ 低压缸切除运行存在较大风险，长期运行安全性不易保证。

**鉴于以上原因，哈汽认为，低压缸切除运行存在较大风险，长期运行条件下的安全性不能保证  
该项目不宜马上大面积推广，需要观察，更需要试验验证。**

## 结束语

1. 精细化设计，是今后产品性能提高的必由之路；
2. 钱买不来最先进技术，要想提高技术水平，必须走立足自我的基础上努力创新
3. 我们现在正面临一个技术创新的最佳时期，也是一个紧迫时期，用主席的话说：**雄关漫道真如铁，而今迈步从头跃**
4. 目前哈汽的大容量机组现代化改造已经有多个项目正在执行，期待为国家的节能减排工作作出更大贡献。

请各位领导和专家批评指正！  
谢谢！

