



EPTCHINA.CN
中国电力科技网

SXEC 苏夏

第十届“大机组供热改造与优化运行技术2018年会”



叶东平

哈尔滨电气集团汽轮机厂副总设计师。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、联合循环系统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，获省部级科学技术成果奖多项。

大容量汽轮机供热改造技术综述和典型问题

2018年10月10-12日

中国·常熟

大容量汽轮机 供热改造和典型问题交流

哈尔滨汽轮机厂有限责任公司

2018. 10 常熟



主 要 内 容

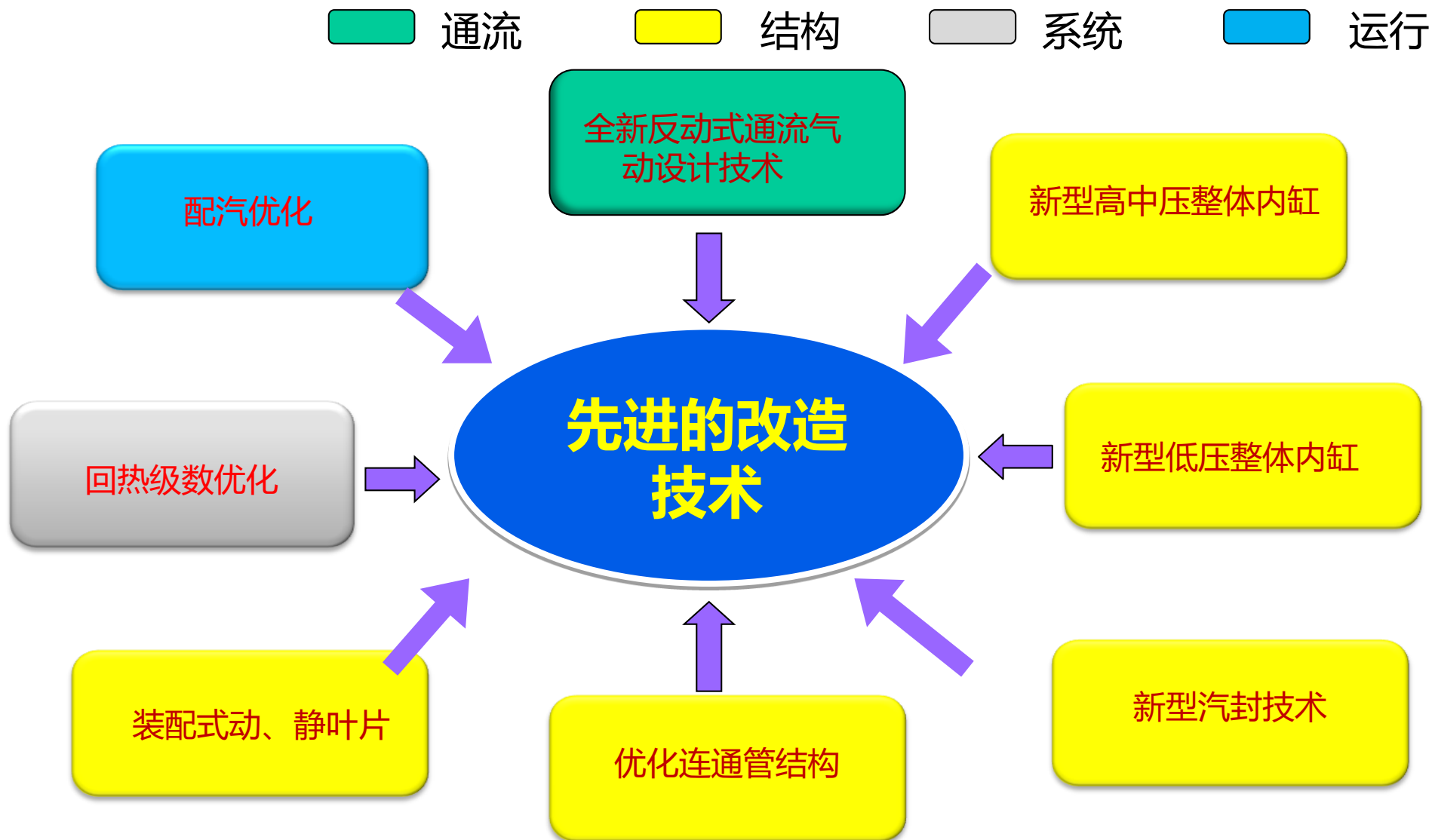
- 1、现代汽轮机先进技术和工艺
- 2、大容量机组现代化改造方案
- 3、大机组高背压供热改造
- 4、大容量抽凝机组改背压机（光轴）供热改造
- 5、大容量机组低压缸解列供热改造
- 6、结束语

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；
- 提高机组效率，努力降低机组热耗率；
- 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；
提高机组灵活性，是近期的另一个新需求；
- 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；
- 供热改造时，应认真总结经验教训，方案论证应更精细。

一、现代汽轮机先进技术和工艺

2、只有多种措施并用，才能共同提升机组热电效率



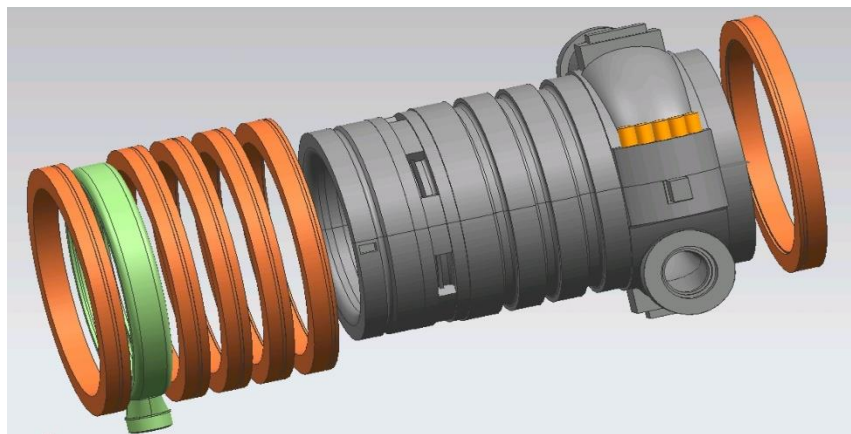
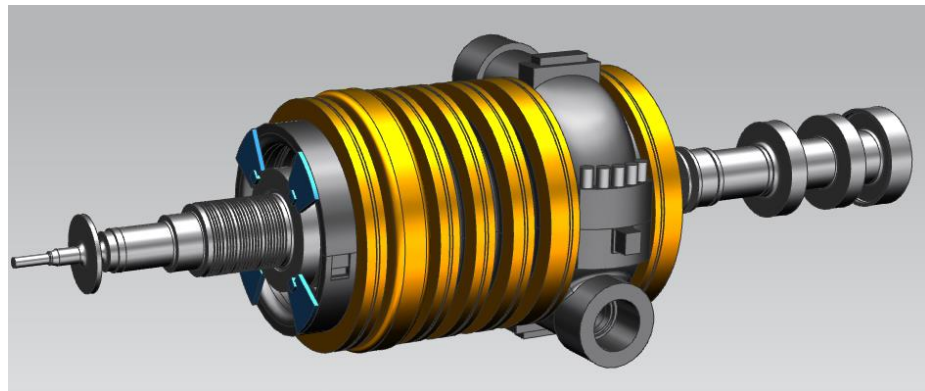
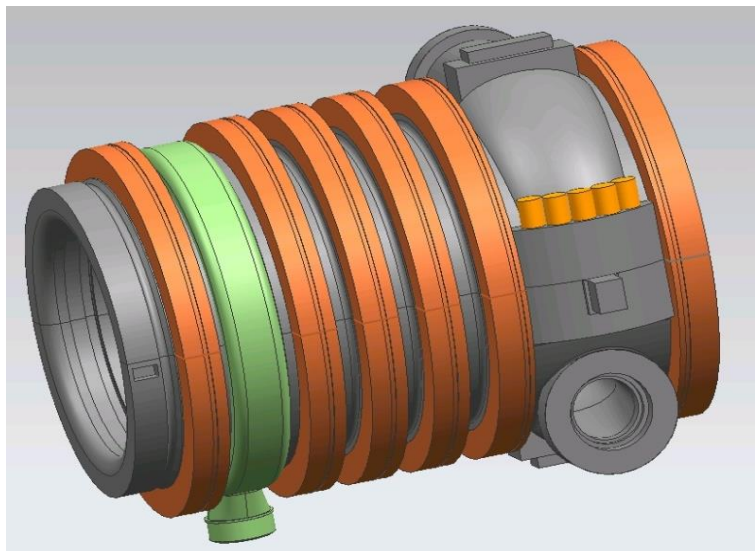
3. 近年来哈汽公司新技术提升的主要方面

- 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;
- 小间隙可磨汽封技术;
- 大机组0#高加、10级回热及外置式蒸冷器系统。

一、现代汽轮机先进技术和工艺

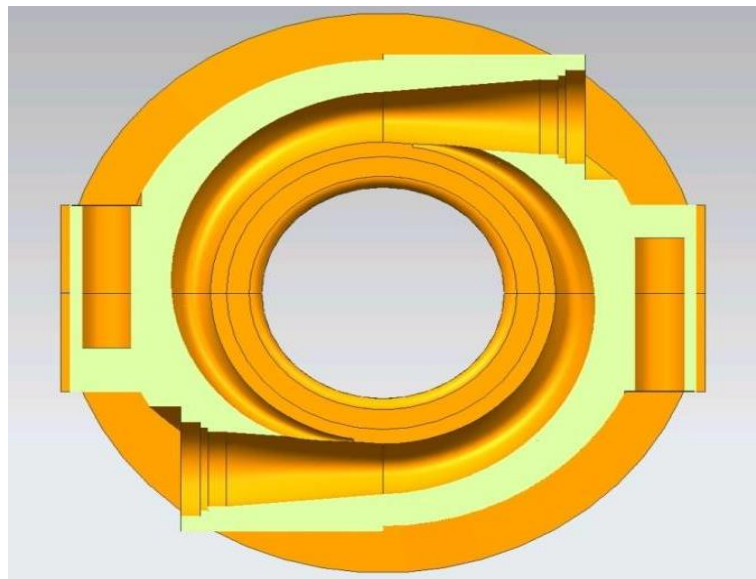
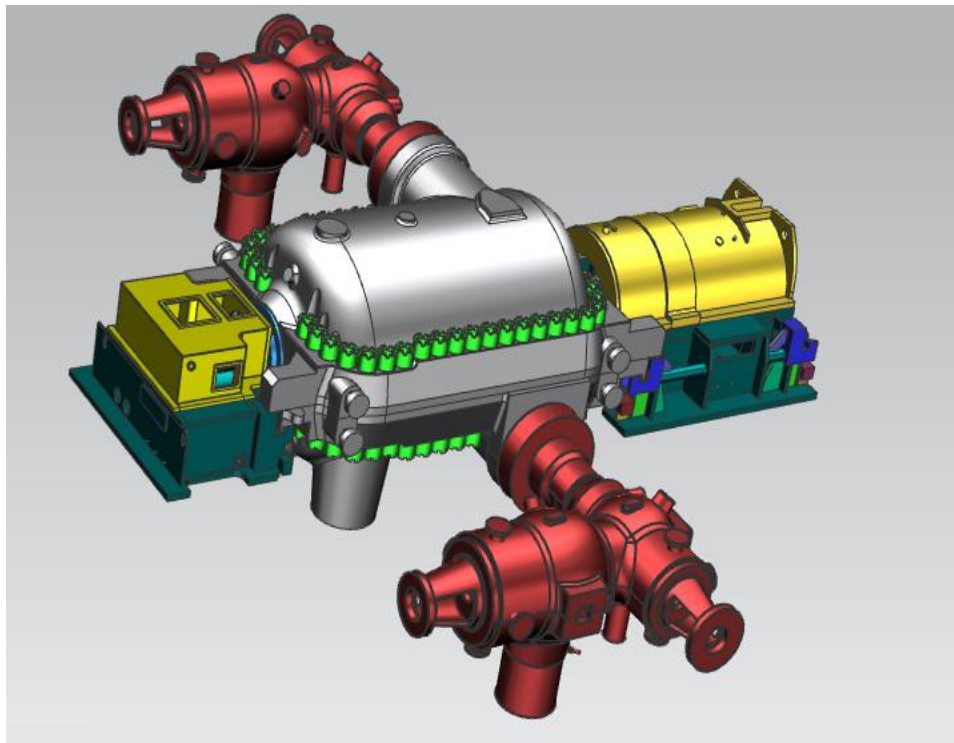
□ 大容量机组高压内缸红套环密封结构

- 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。

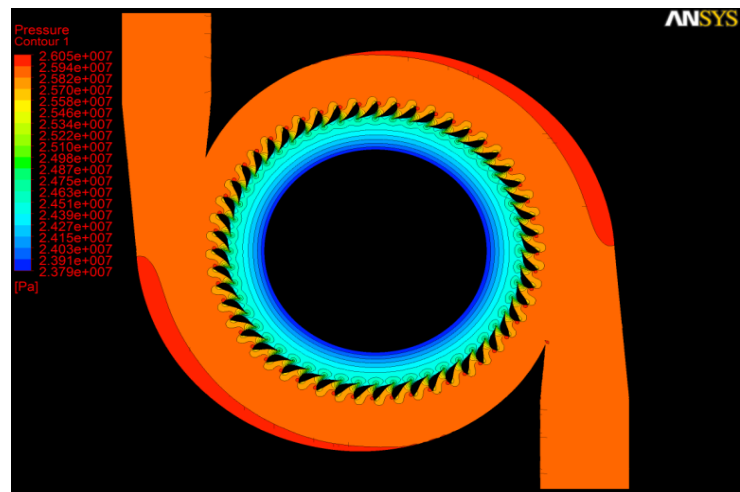


□ 大容量机组高压蜗壳进汽技术

- 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。



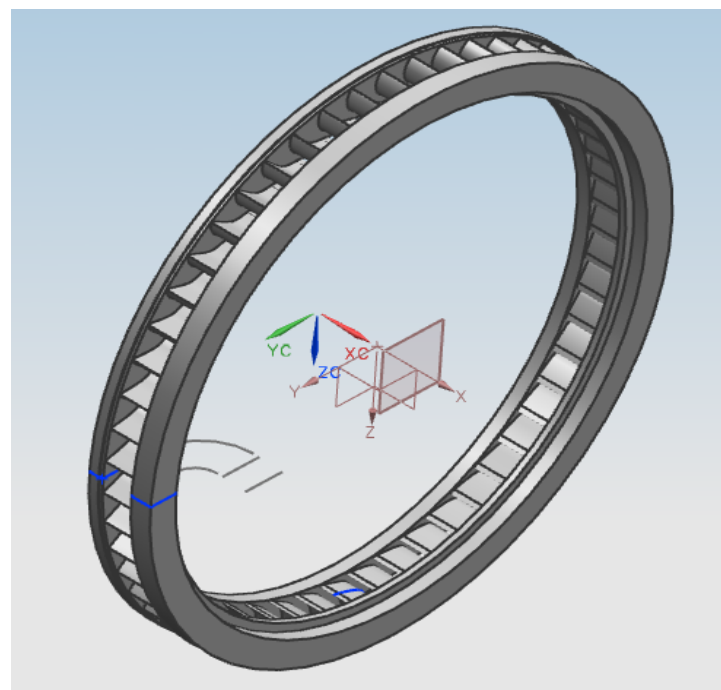
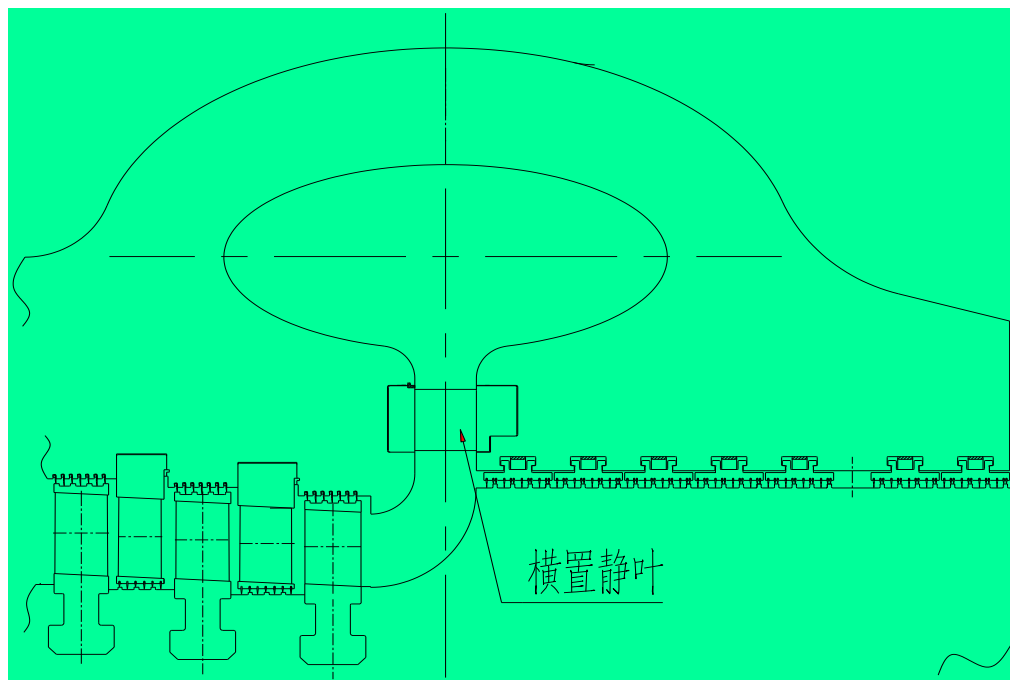
汽轮机进汽蜗壳实体图



高压进气蜗壳压力云图

□ 高压第一级横置静叶

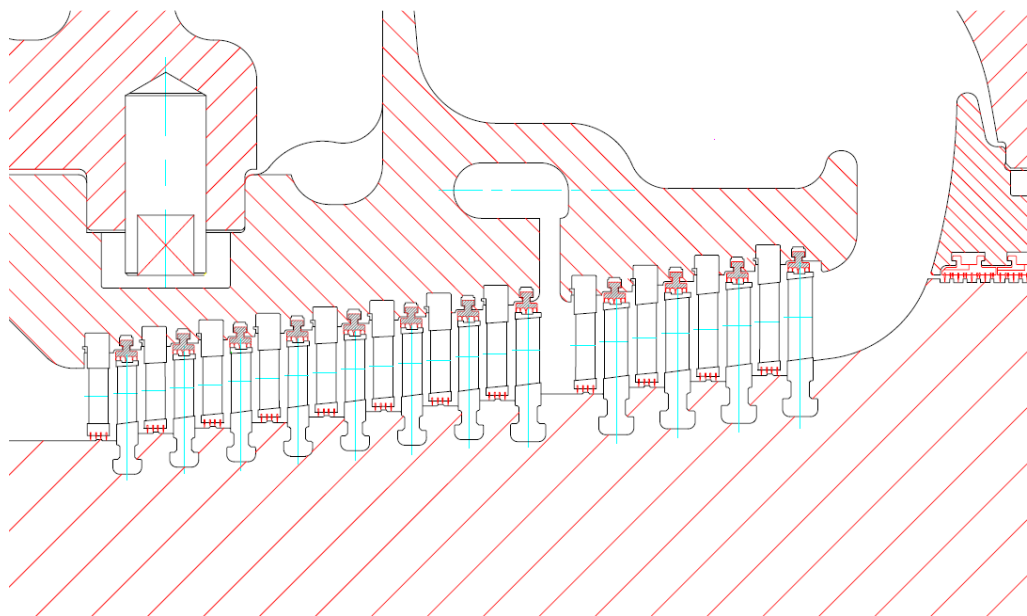
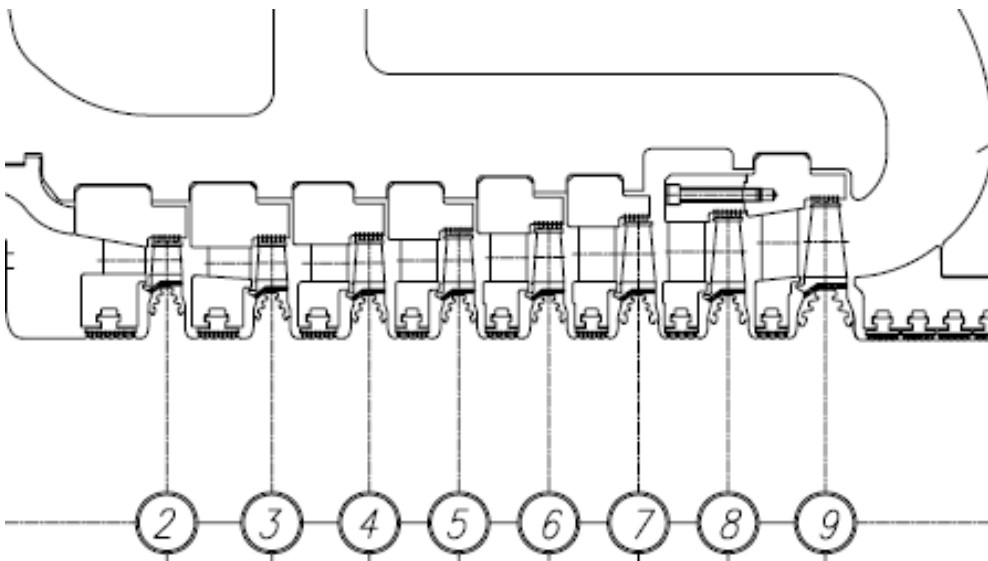
- 高压缸第一级静叶片采用轴向布置形式，以配合切向蜗壳全周进汽形式



第一级轴向布置静叶实体图

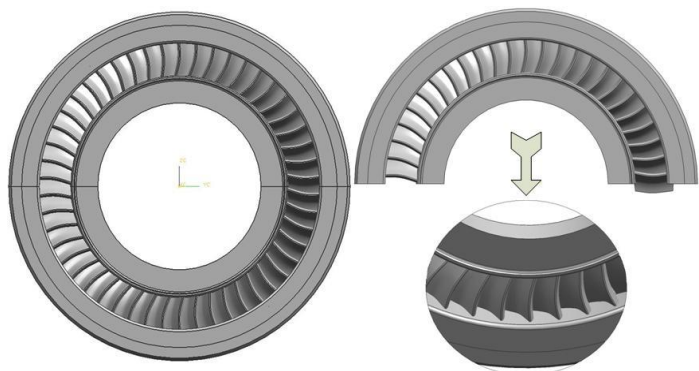
□ 优先采用反动式通流的优点

- 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。

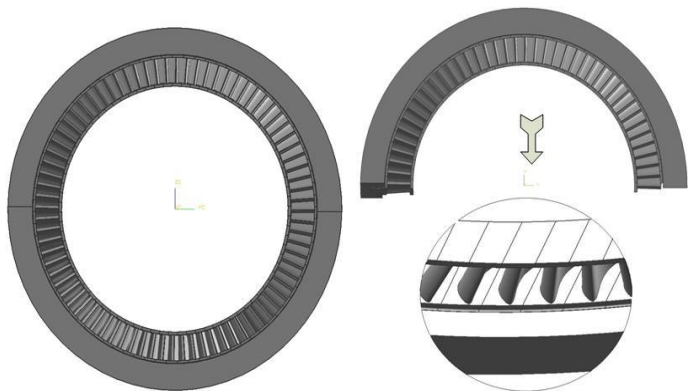


一、现代汽轮机先进技术和工艺

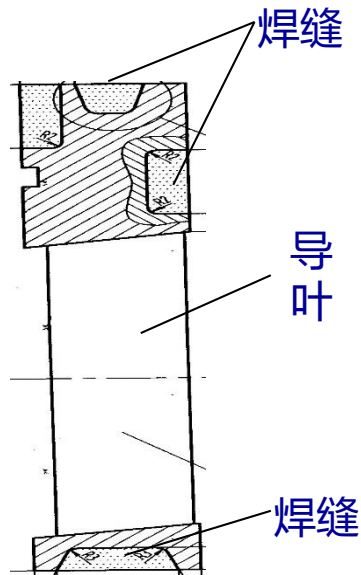
□ 预扭装配式隔板（静叶栅）



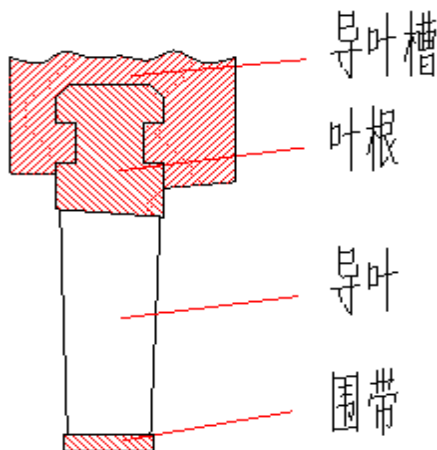
焊接隔板实体图



装配式隔板实体图



焊接隔板纵剖图

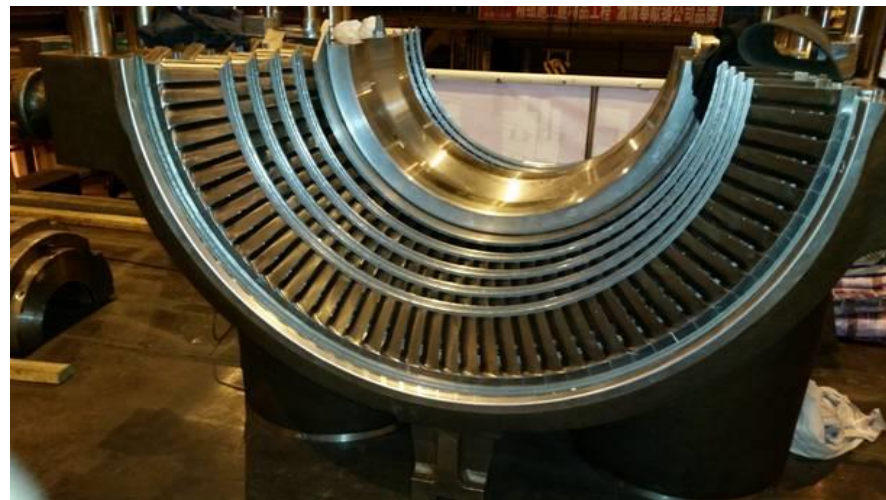


装配式隔板纵剖图

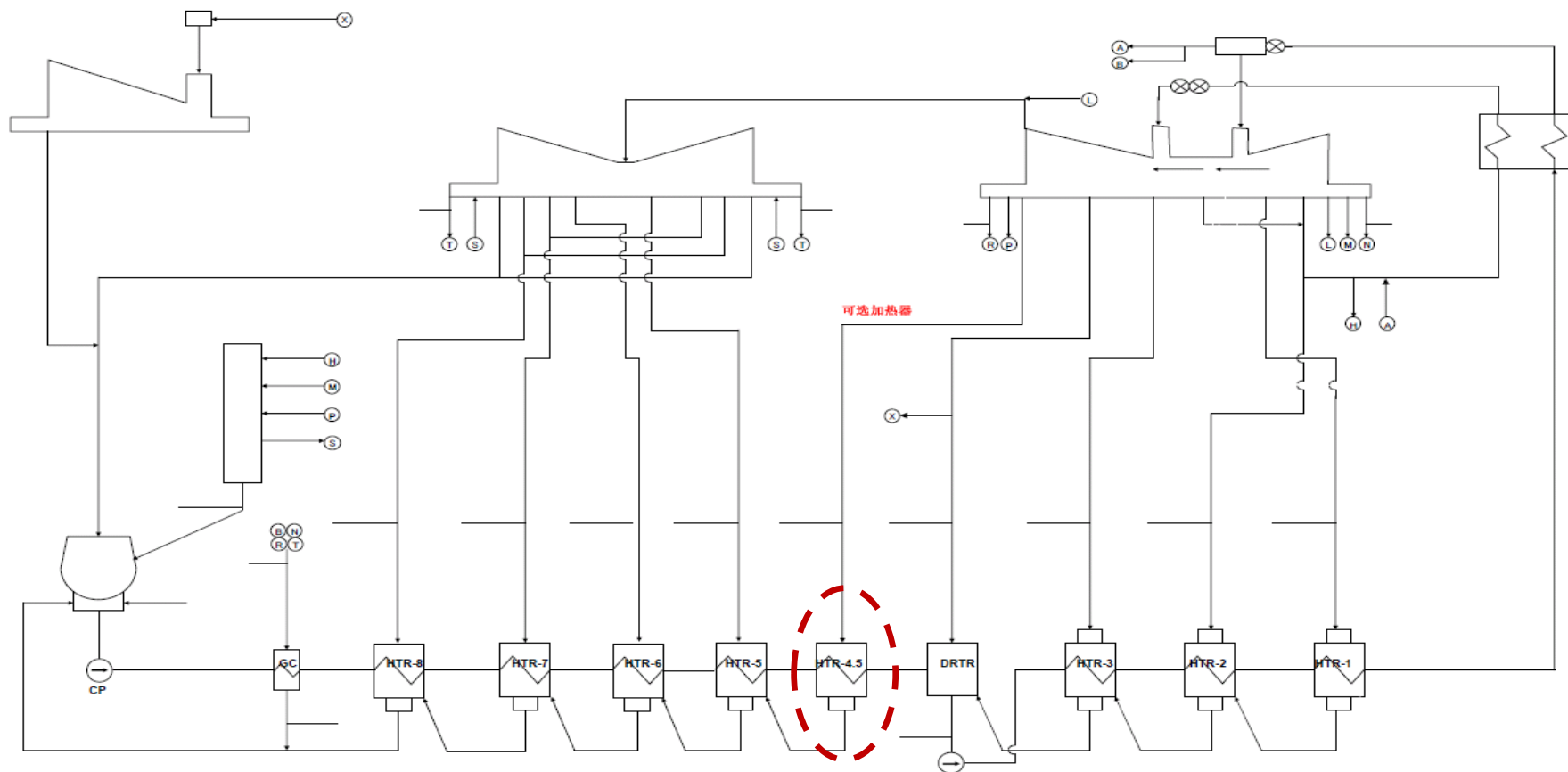
- 隔板装配摒弃过去的焊接工艺，采用预扭装配工艺。
- 拆装更便利，导叶片有损坏时可以更换指定的叶片，安装拆卸方便
- 装配式隔板不进行焊接，不存在叶片变形，从而更好保证叶片通流的尺寸精度

一、现代汽轮机先进技术和工艺

□ 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



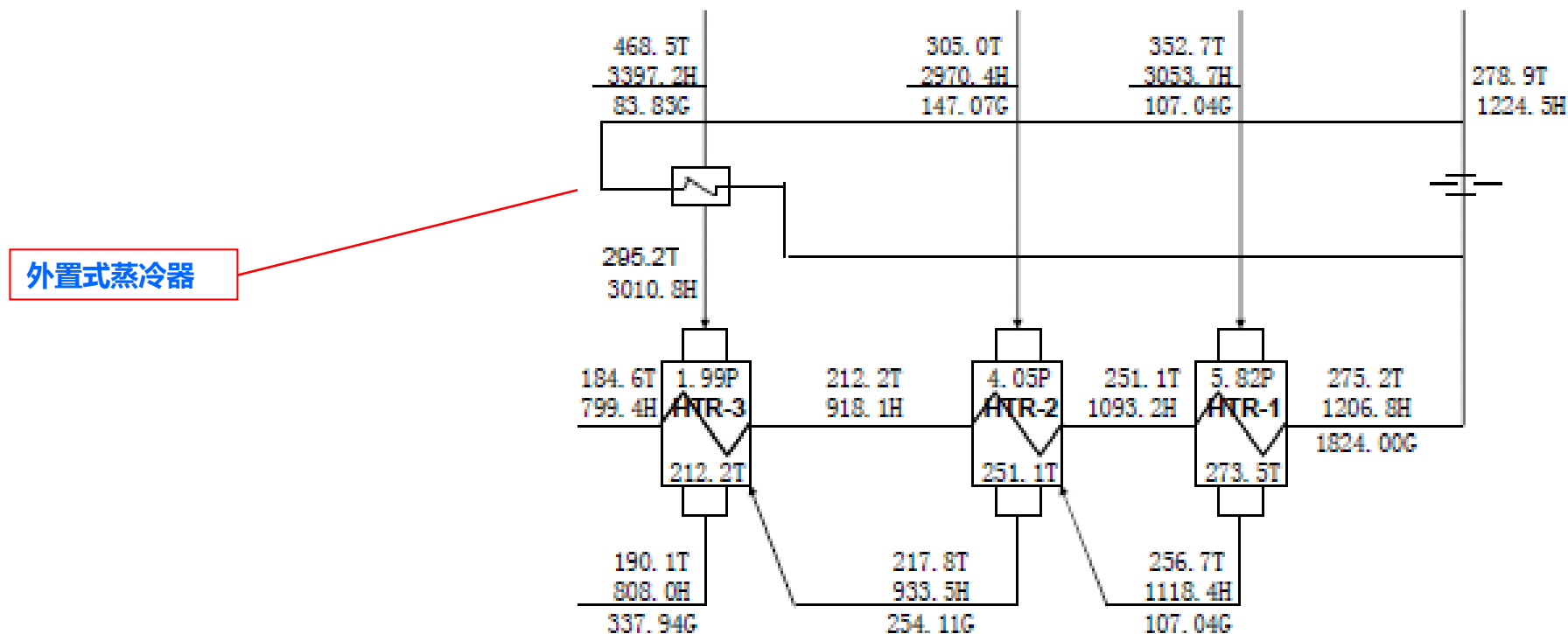
有条件时，增加回热级数，降低热耗率

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



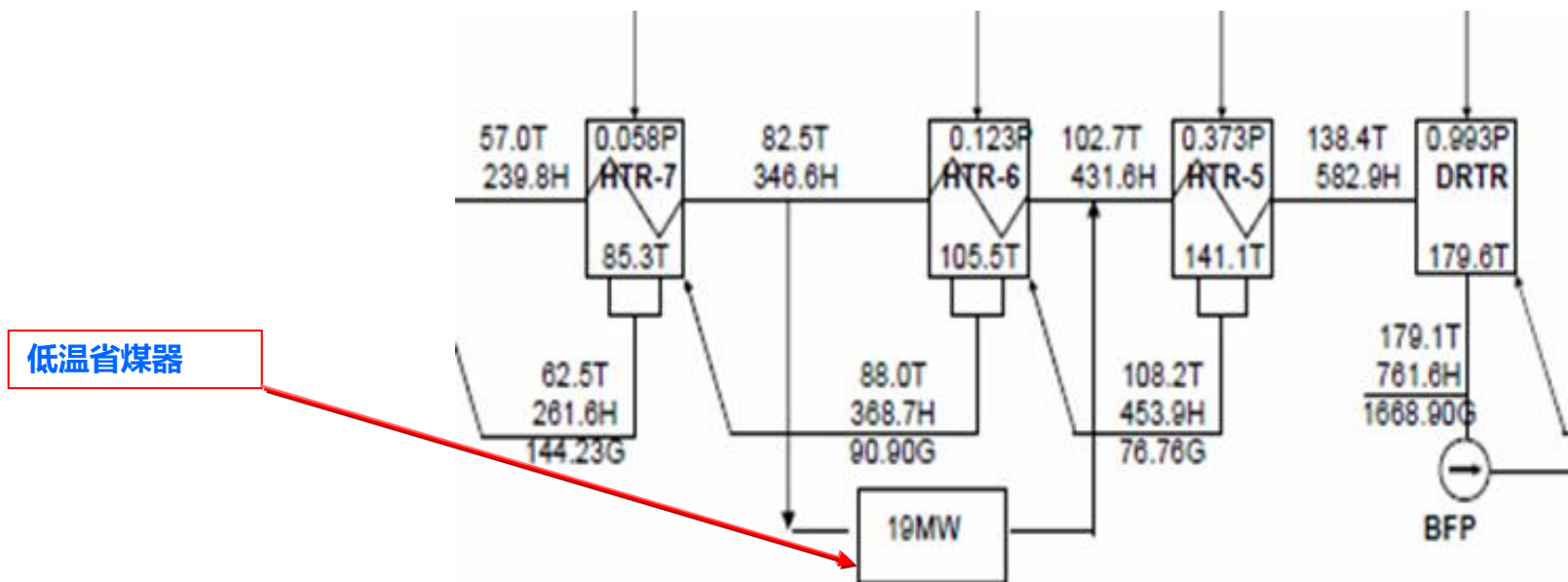
外置式蒸冷器

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。

一、现代汽轮机先进技术和工艺

□ 增加低温省煤器



低温省煤器

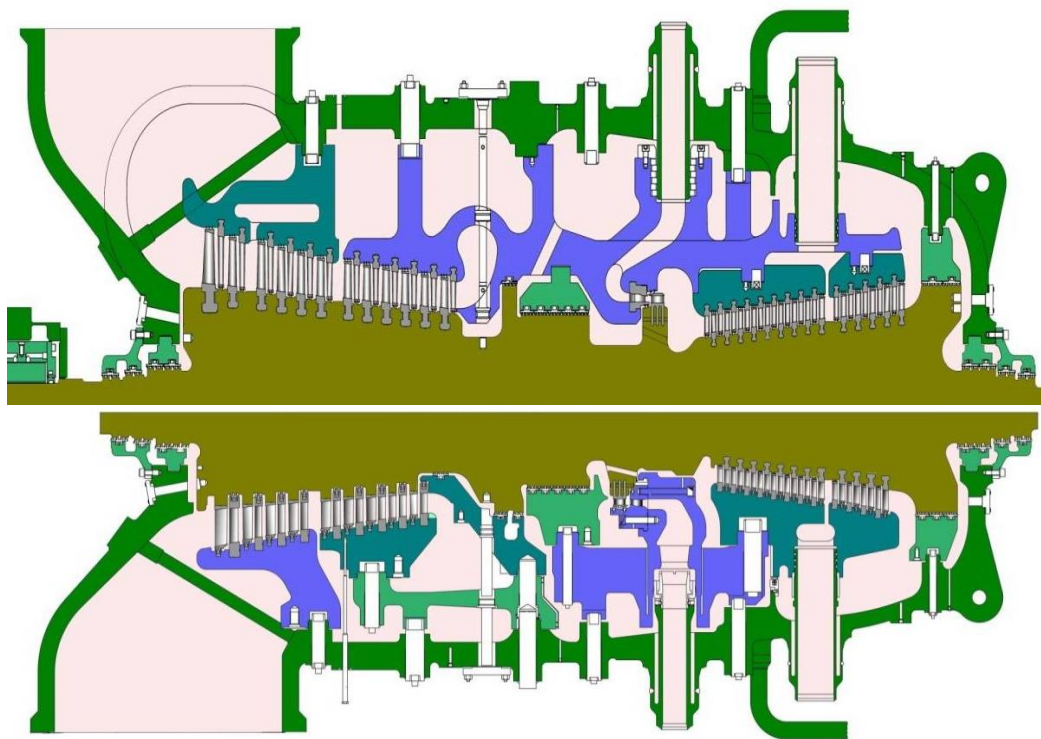
根据锅炉低温省煤器提供的热量和进出口水温的要求，选择适合的位置，尽量提高热量的利用率，减少对其他加热器的影响。

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



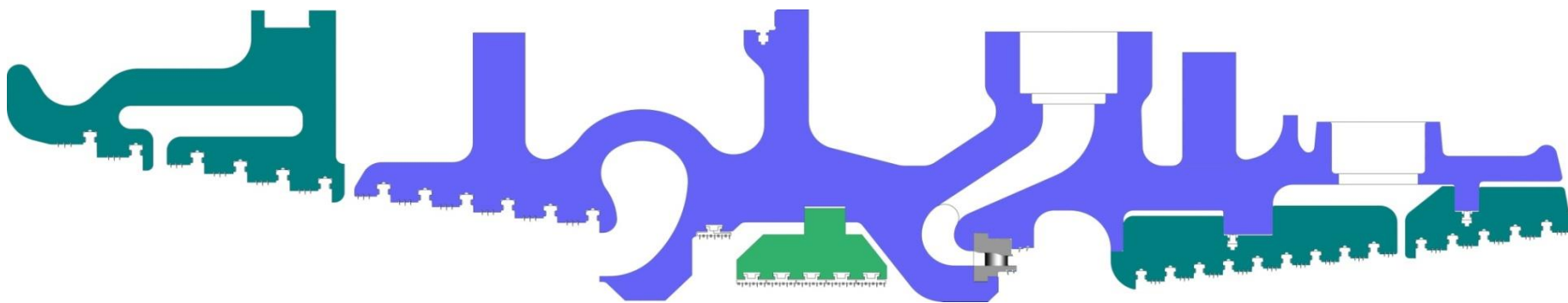
升级前

高中压纵剖面图对比

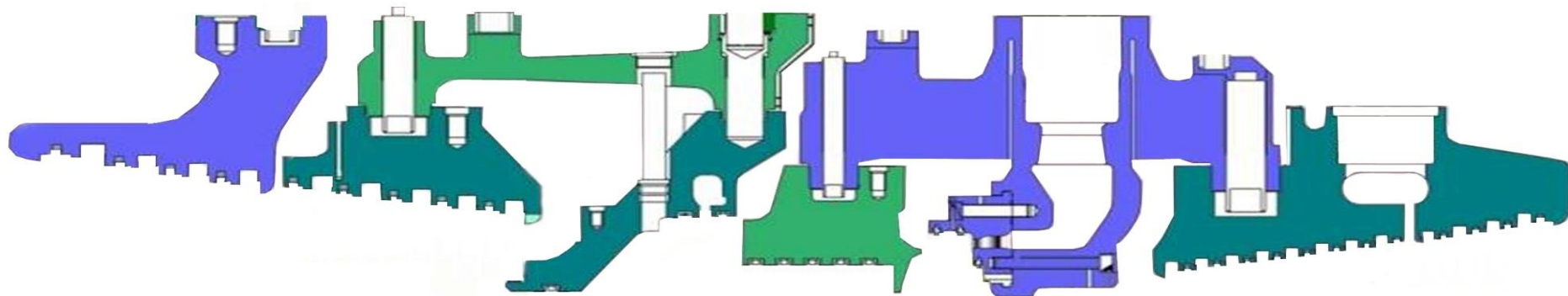
- 1、高中压缸增加级数；
- 2、装配式隔板，小间隙汽封技术；
- 3、优化高压喷嘴面积；
- 4、新型高中压内缸，优化中压隔板套；
- 5、小压损型中压进汽腔室；
- 6、增加#4.5回热抽汽。

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



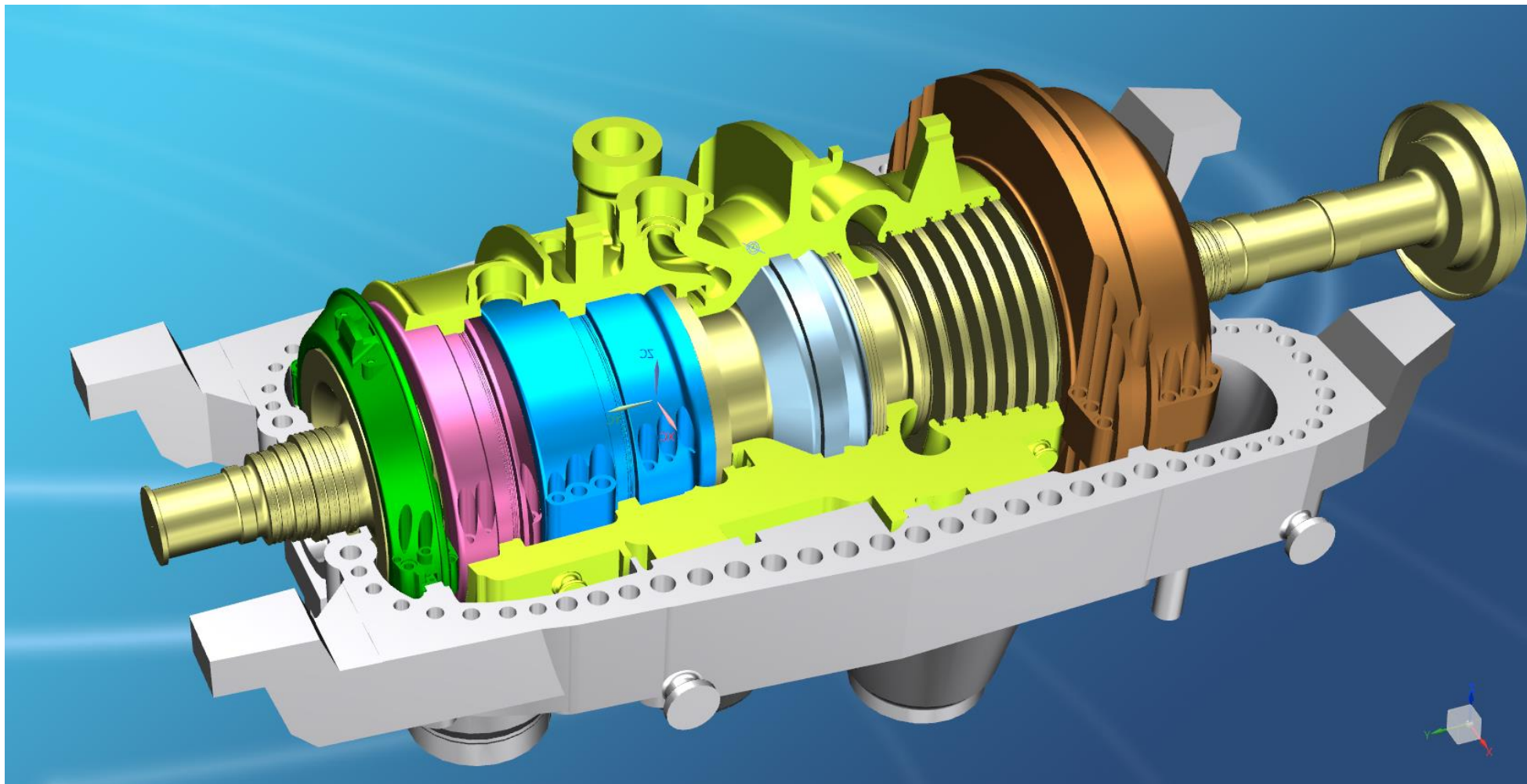
升级后高中压整体内缸剖面图



原高中压内部结构剖面图

2. 高中压内缸升级方案

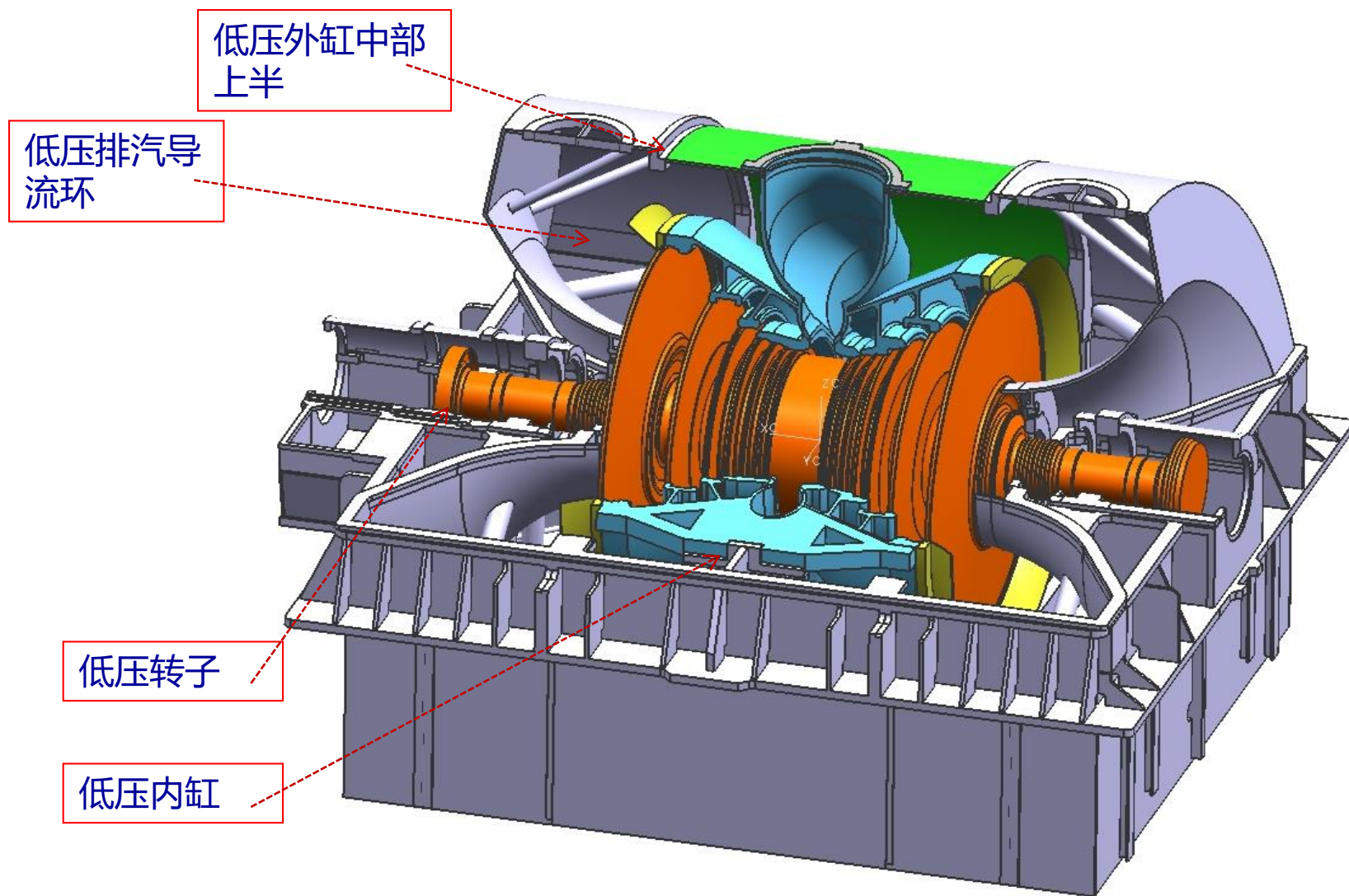
优化进排汽结构，简化内缸结构，减少漏汽隐患



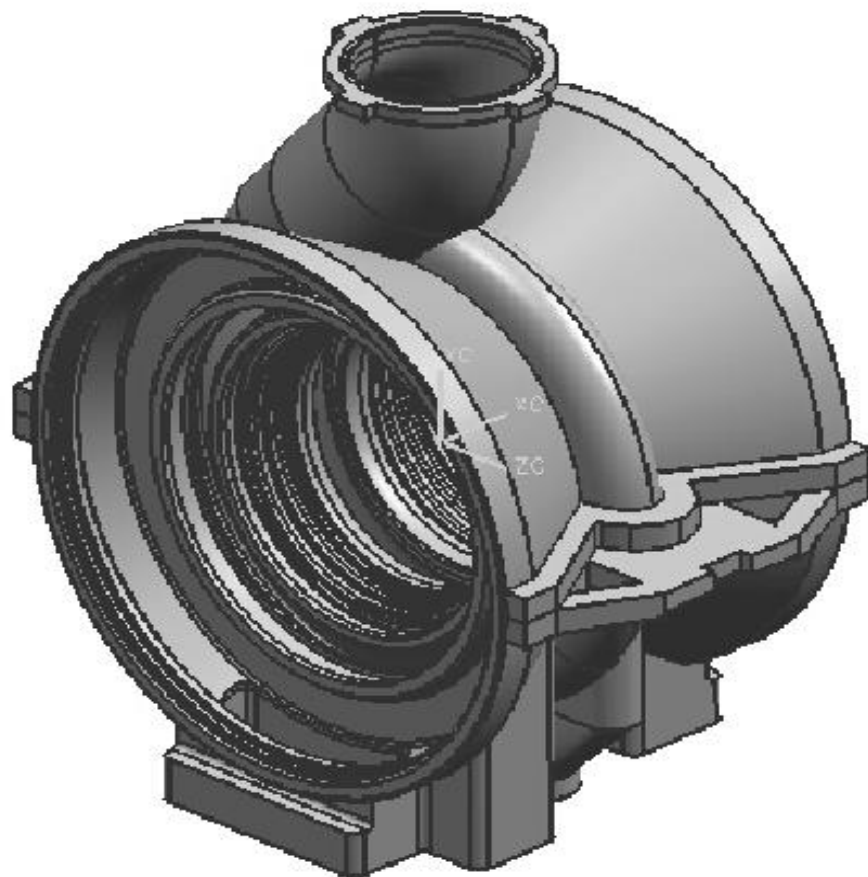
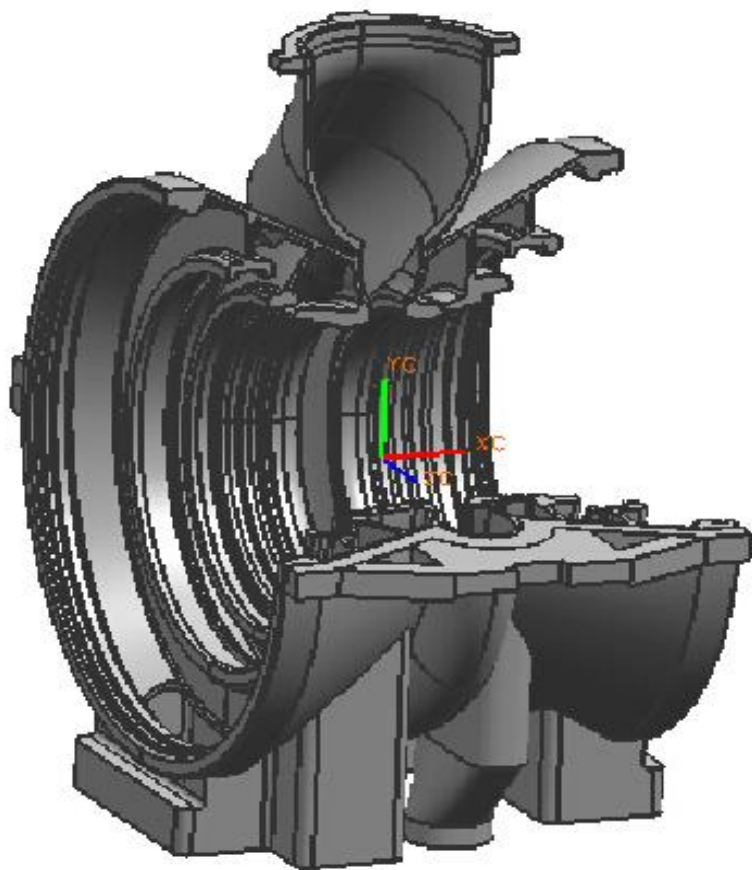
二、大容量机组现代化改造方案

3. 低压旋转进汽蜗壳及铸造内缸

升级后的实体装配图



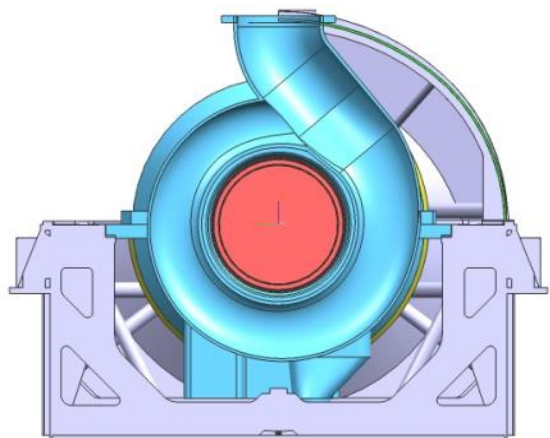
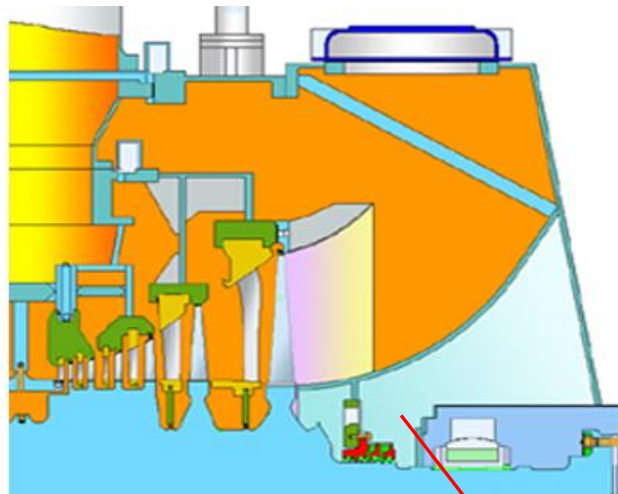
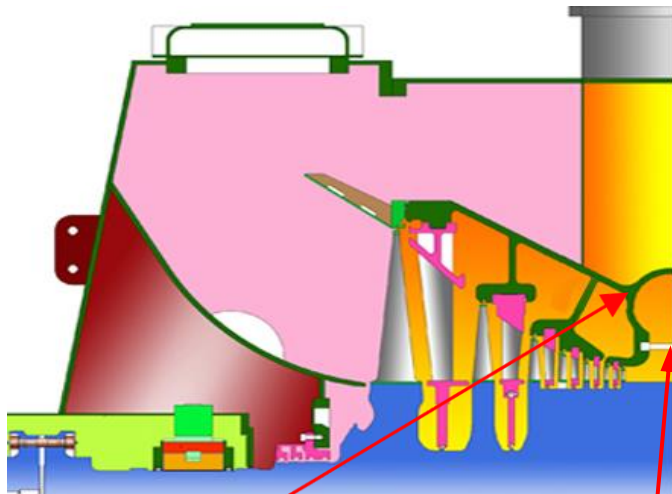
低压整体铸造内缸（球墨铸铁）



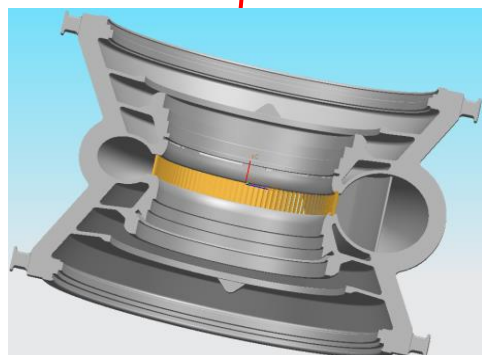
升级后的低压内缸实体图

二、大容量机组现代化改造方案

4. 旋转进汽蜗壳——第一级横置静叶



360°蜗壳进汽



横置静叶

传统多级抗流低压内缸设计

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

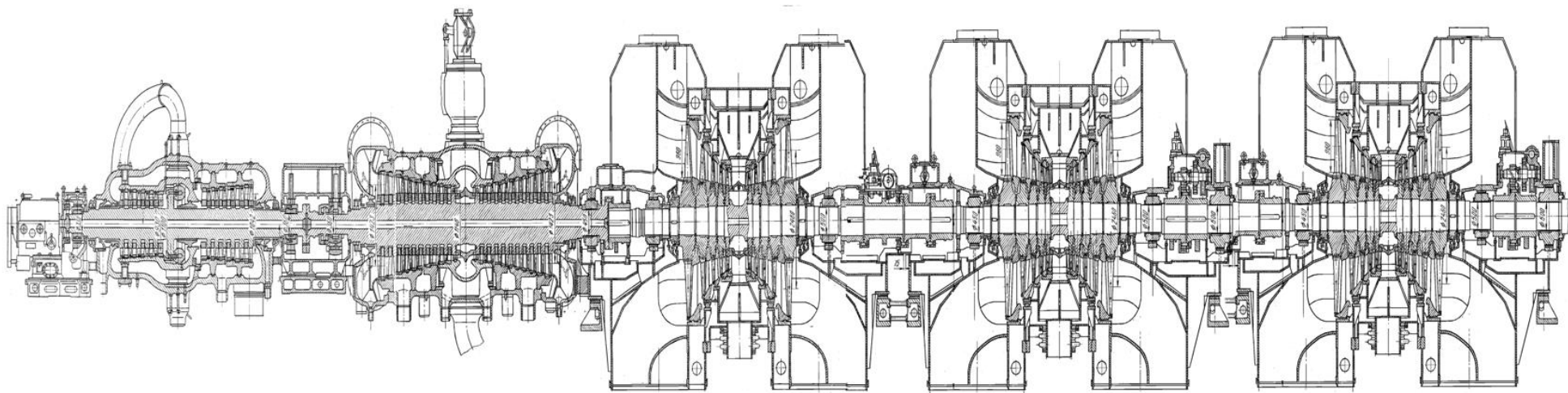


部分技术已经得到验证

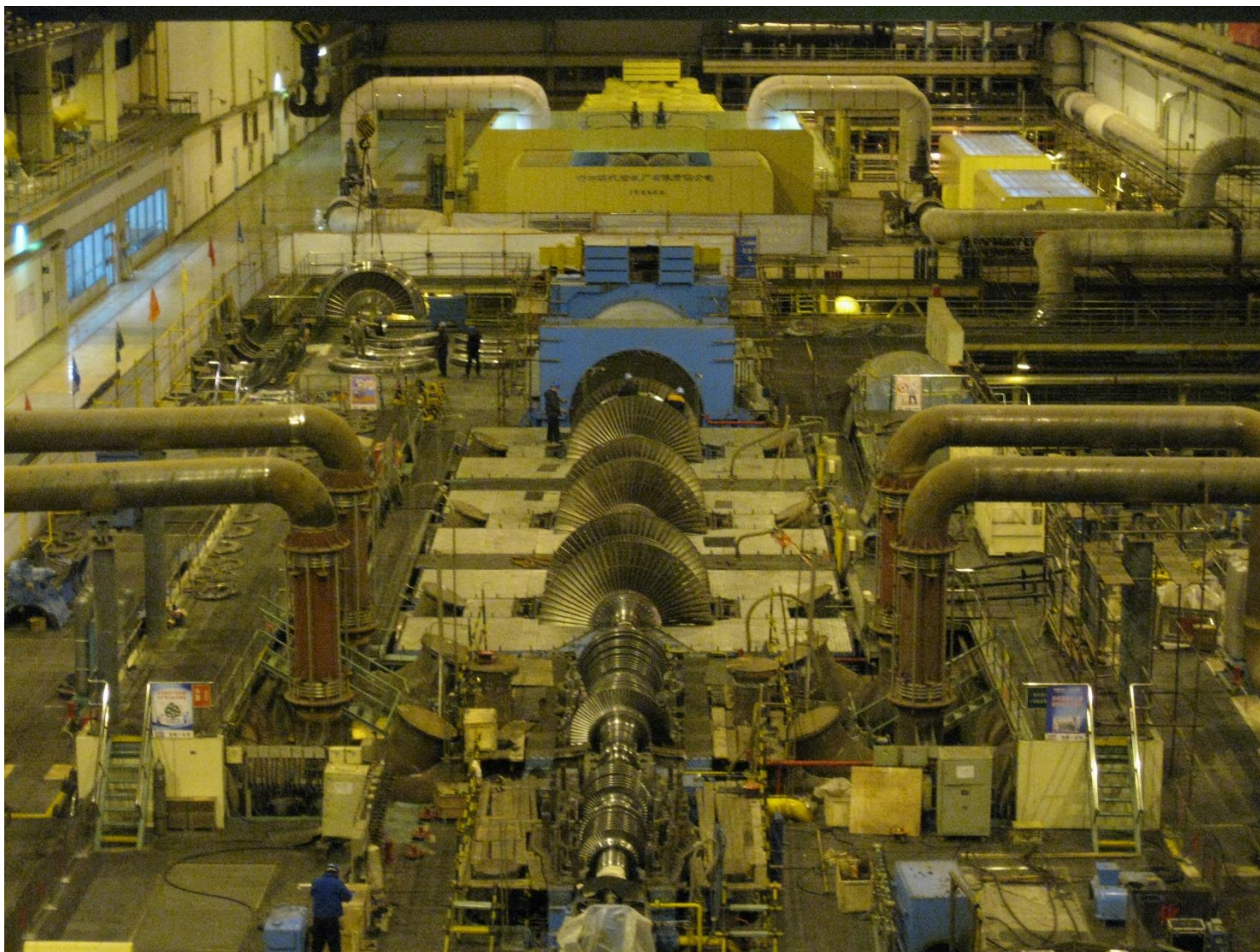
- 绥中俄制800M机组改造
- 多台新型350MW汽轮机顺利投产
- 大唐七台河亚临界600MW机组成功改造
- 国华九江新1000MW汽轮机顺利投产

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。



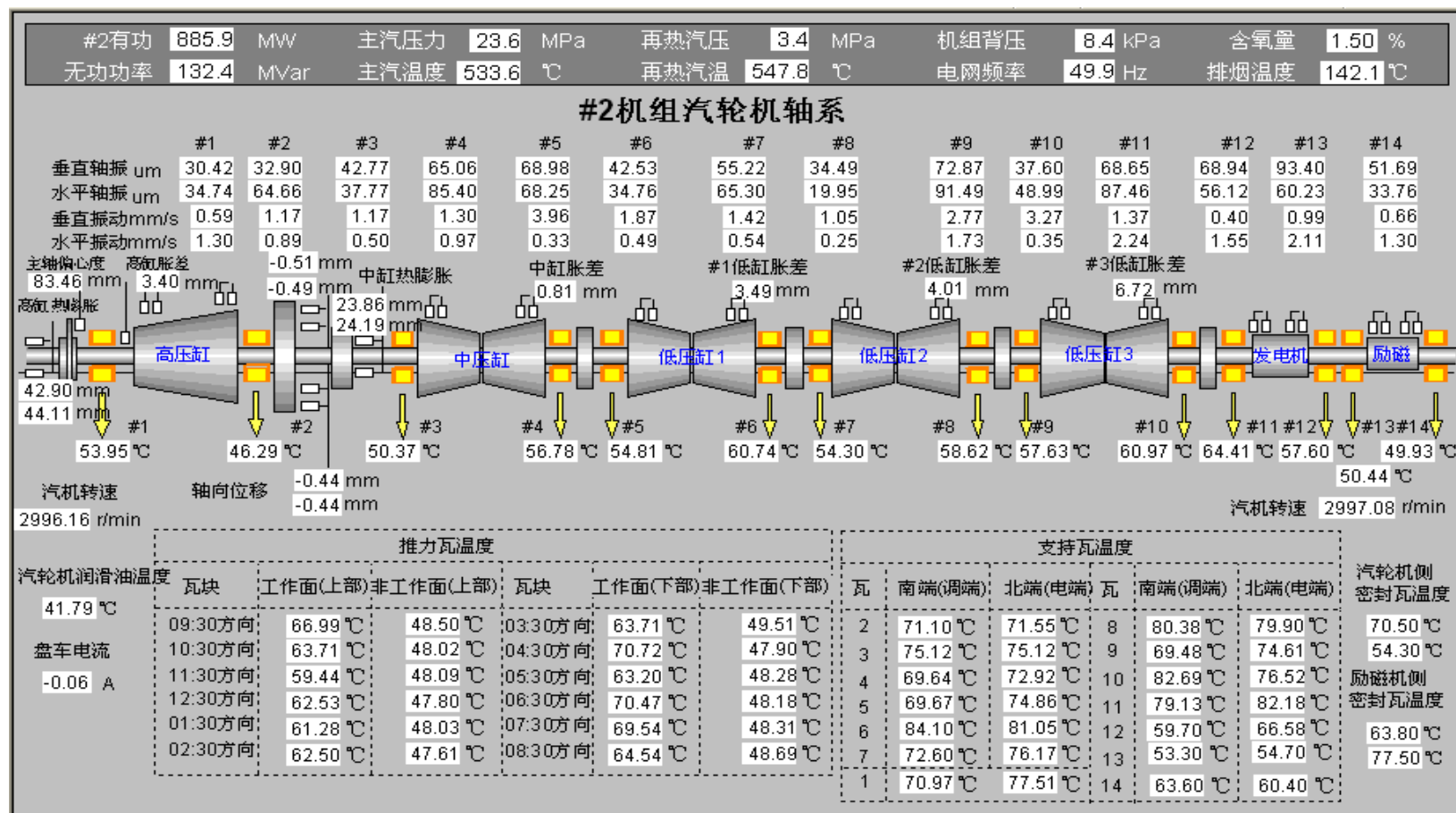
改造安装中的880MW汽轮机



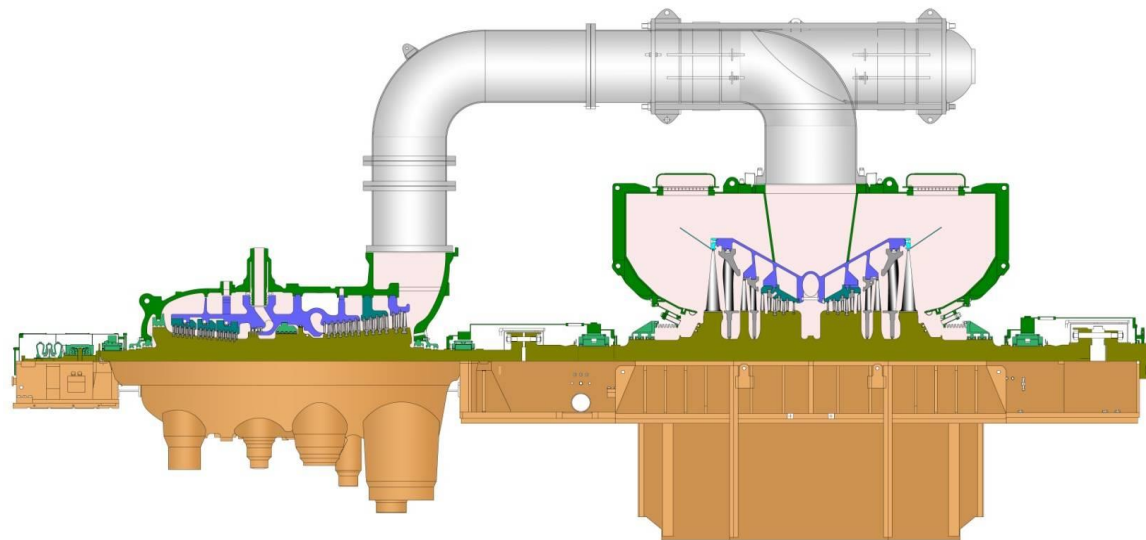
二、大容量机组现代化改造方案

- 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 $70 \mu\text{m}$
- 支持轴承温度最高 64°C ，推力瓦温 70°C

- 缸效率达到设计值
- 机组实际煤耗下降 $\sim 30\text{g/kW}\cdot\text{h}$



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，比较具有代表性的超临界350MW机组，是目前国内供热机组的主力机型

华能大庆机组：热耗率低于7700kJ/kWh

华能伊春机组：热耗率7680kJ/kWh

大唐绥化机组：热耗率7630kJ/kWh

深能保定机组：热耗率7640kJ/kWh

亚临界600MW机组改造

电厂名称		七台河亚临界600MW改造		马鞍山当涂超临界600MW改造	
项目	单位	保证值	实测值	保证值	实测值
THA工况热耗	kJ/kW.h	7790	7777.56	7600	7592
75%THA 工 况 热耗	kJ/kW.h	7908	7842.87	7728	7718
50%THA 工 况 热耗	kJ/kW.h	8190	8181.78	8038	7998

国华九江超超临界1000MW新机组投产后性能试验结果

电厂名称		国华九江超超临界新1000MW机组	
项目	单位	保证值	实测值
1#机100%负荷热耗值	kJ/kW.h	7197	7191
1#机75%负荷热耗值	kJ/kW.h	7282	7279
2#机100%负荷热耗值	kJ/kW.h	7197	7188
2#机75%负荷热耗值	kJ/kW.h	7282	7276

目前，哈汽公司共完成300MW以上汽轮机通流改造100多台，其中国外制造机组20台；300MW等级80多台；600MW等级20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和西屋的机组、波兰机组、意大利安萨尔多机组、捷克斯柯达机组等。

成功修复北京高碑店俄制165MW、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、一厂一策
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

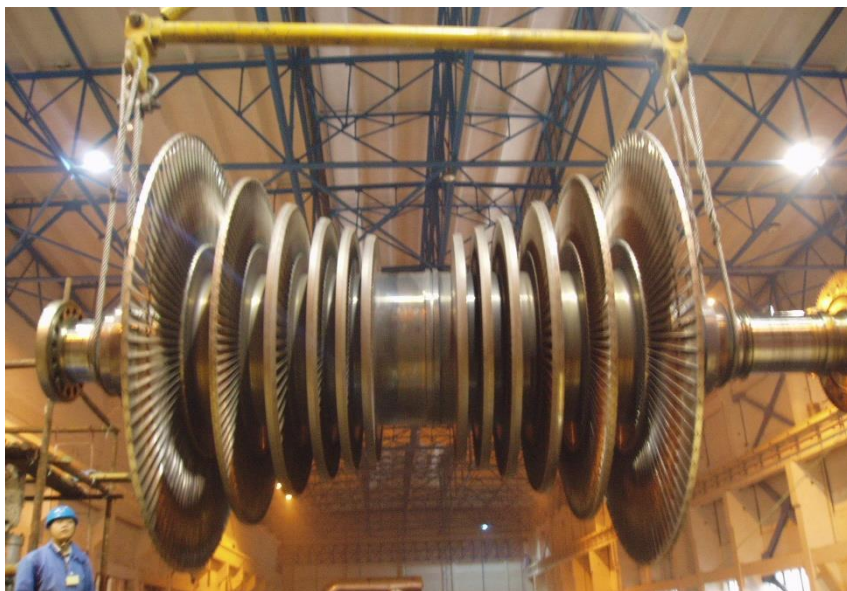
- 改造方案的选择——互换转子方案、改造转子方案
- 互换转子方案：两根低压转子
 - 冬季低真空转子——末叶短、级数少
 - 夏季正常转子——正常末叶和级数
- 改造转子方案：将原有正常转子改造成低真空转子，改造后不再改回来
 - 无论冬夏，只用一根低压转子

- 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
- 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

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

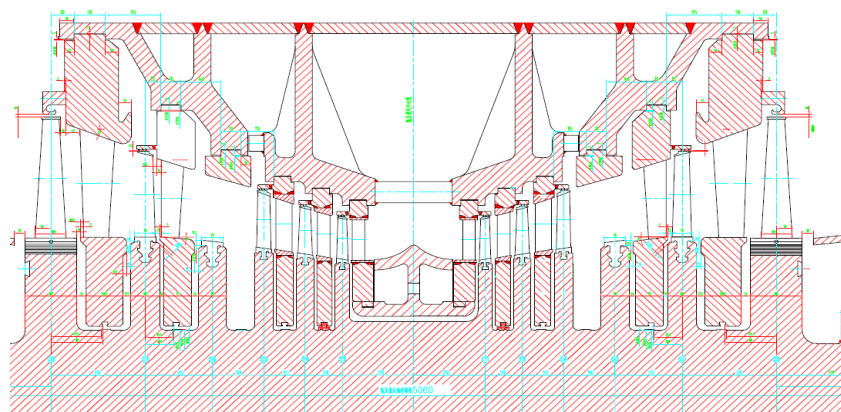
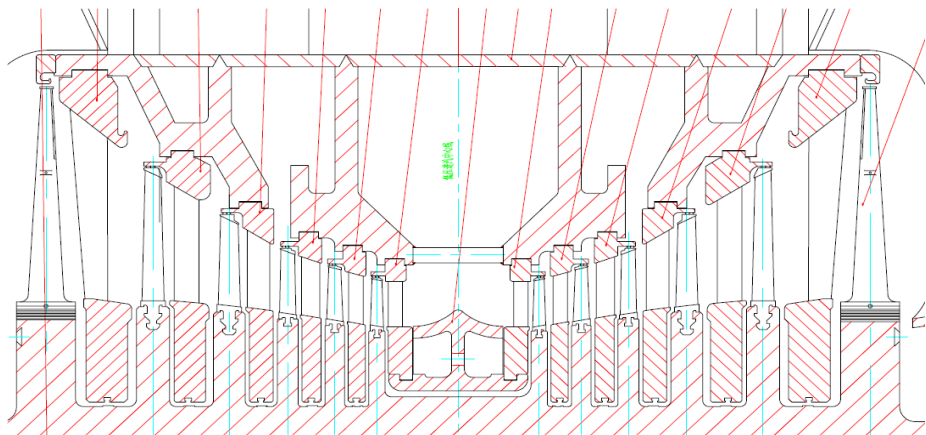


- 2) 改造转子方案

- 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。
- 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。

改造转子方案适用条件：

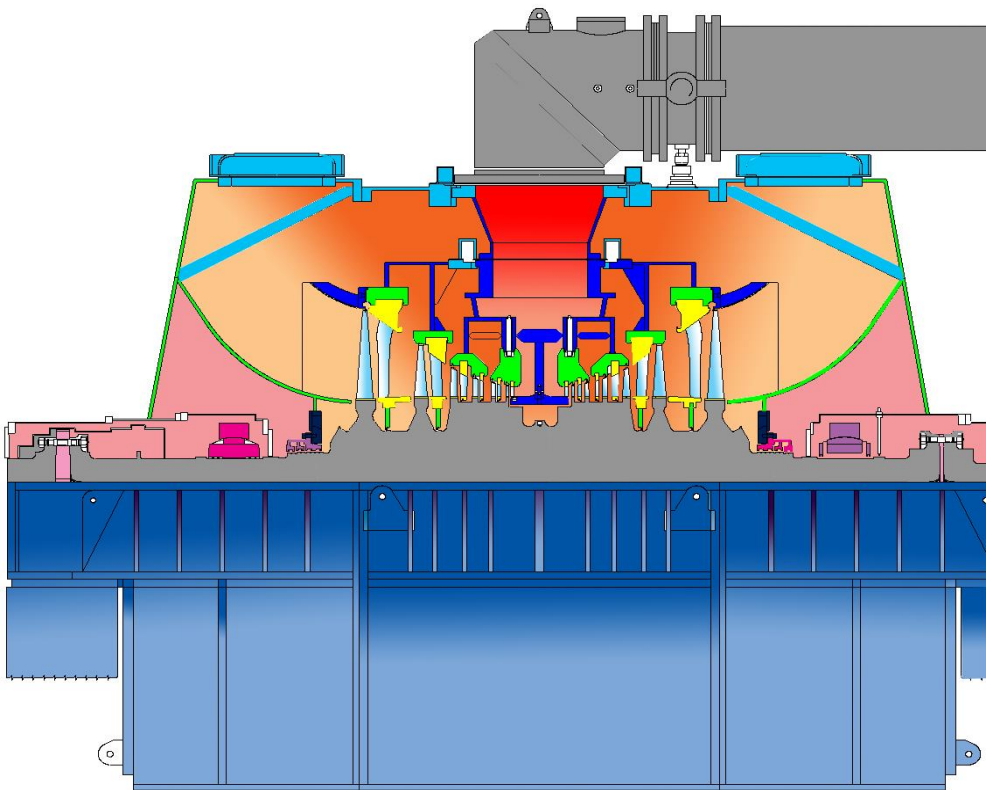
- 冬季供热、夏季纯凝负荷较小（最大负荷不大于原机80%额定）
- 东北地区（无空调负荷、夏季无需满发）
- 优缺点
 - 优点：改造简单，花费少，不需要每年两次倒换转子
 - 缺点：夏季不能大负荷纯凝运行，电网调大负荷困难



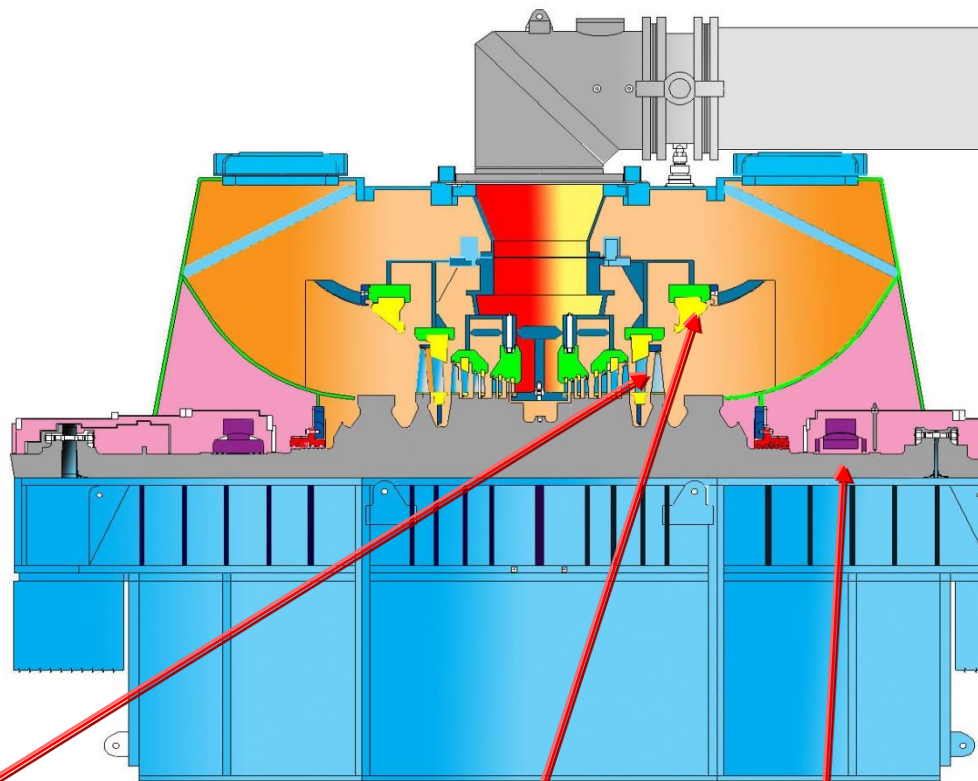
某机组改造前后的低压缸剖面图

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

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

注意：设计时循环水量不宜过小

运行时采暖抽汽量不宜过大

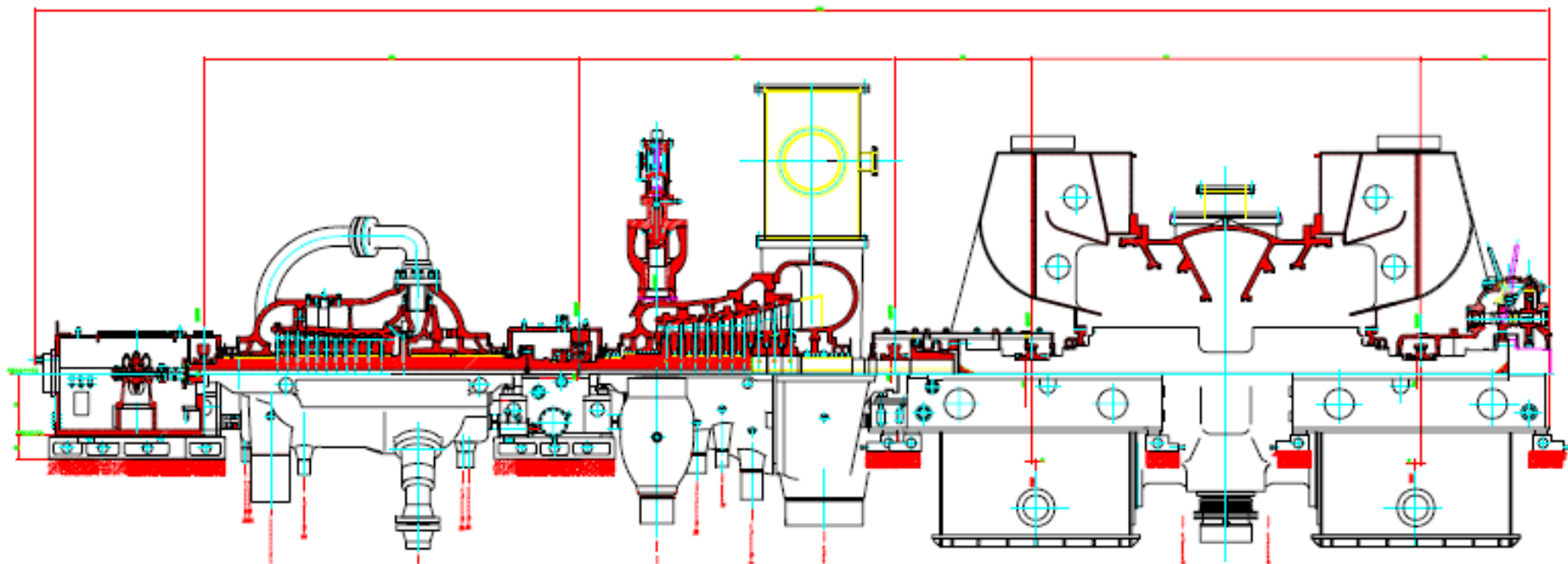
- 循环水量过小，低压缸鼓风现象加剧，改造方案可能不成立
- 高背压运行时，低压缸容易鼓风过热，特别是当机组再有采暖抽汽时，低压缸的缸效率下降，鼓风更容易发生；
- 根据计算经验，高背压运行时，低压缸的安全的排汽量不宜小于额定纯凝时的60%；
- 因此当机组改造成低真空运行时，相应的采暖抽汽量应适当减小，以300MW机组改造为例，采暖抽汽量不宜大于300t/h。

抽凝改背压供热（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60%--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

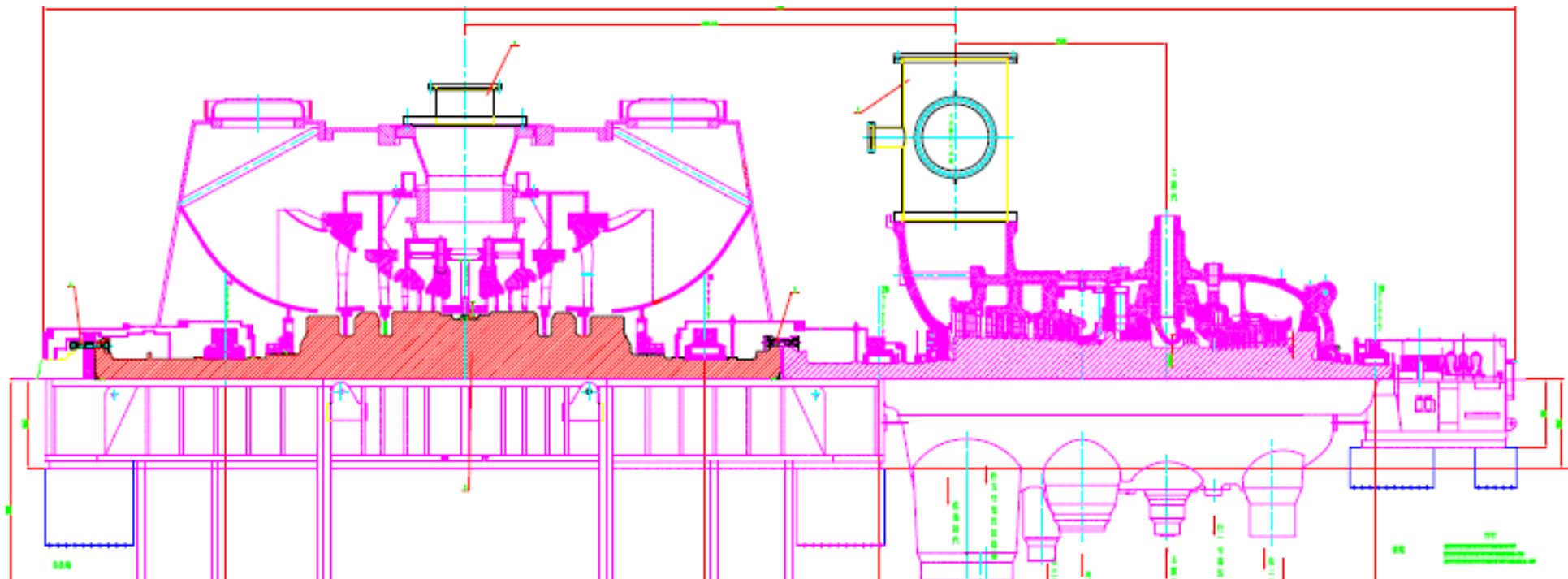
200MW机组改背压机（光轴）改造

改造后机组出力155MW，背压供汽量最大490t/h



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



低压缸解列（切缸）供热原理图

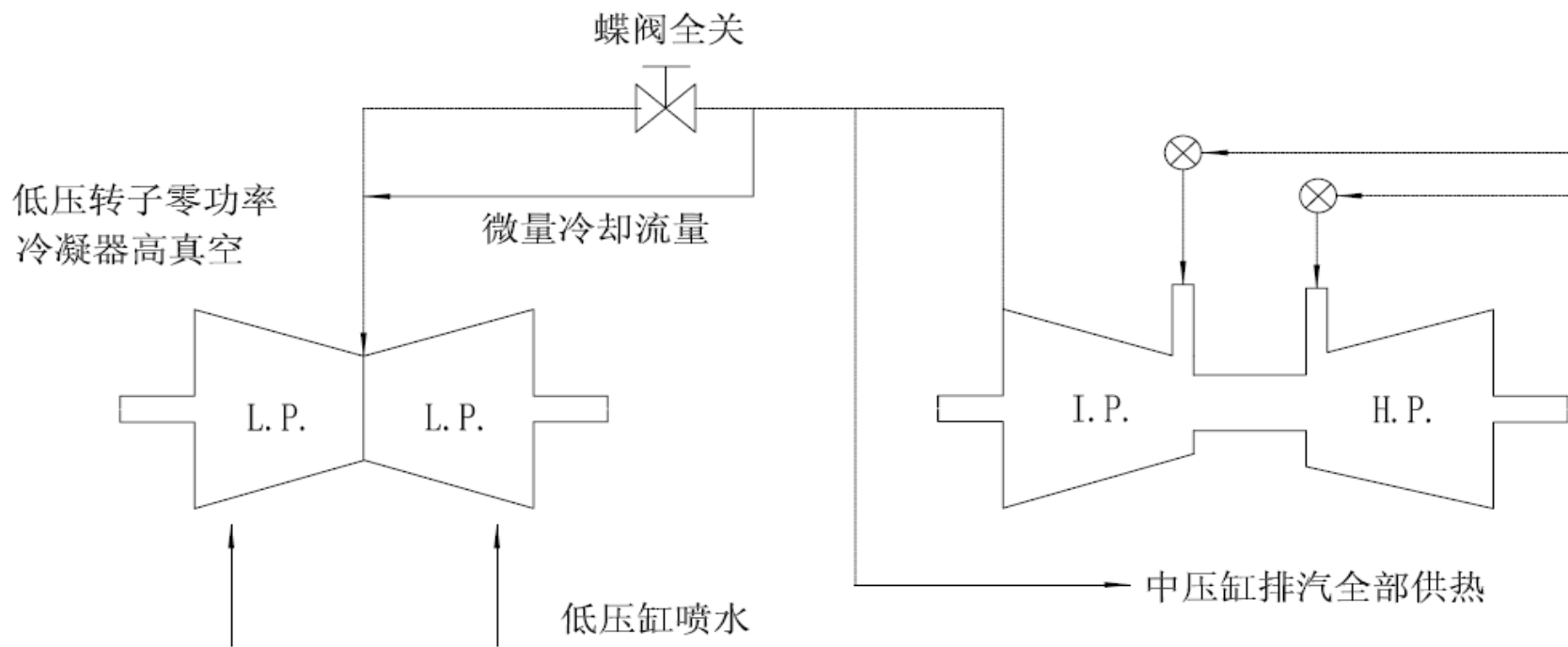
全关型蝶阀

低压转子微量冷却流量、零功率运行

中排蒸汽全部供热

冷凝器高真空运行

低压缸喷水连续投入



切除低压缸供热技术应用情况

国外应用情况

丹麦Vattenfall公司纯凝407MW的热电机组；
兴建时就考虑了较大的机组供热灵活性。

国内2016年开展情况（2017年推广更多）

临河热电1号机组；
延吉热电2号机组；
辽宁东方电厂1号机组；
杨柳青电厂7号机组。
等等。。。。。

低压缸灵活性运行需要考虑的问题

主机几个大安全问题，以及建议

- 鼓风过热危害（低压缸，不限于末级叶片）
- 末二级叶片汽蚀和水蚀
- 末叶片动应力大的危害，曲线，末叶片的安全余量，短期安全不代表安全
- 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，商业软件无法计算边缘工况，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，不宜快速大面积推广

小流量时末叶片蒸汽扰流现象

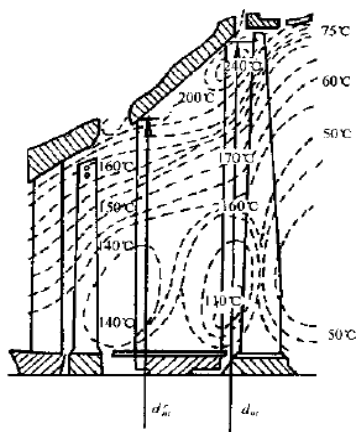
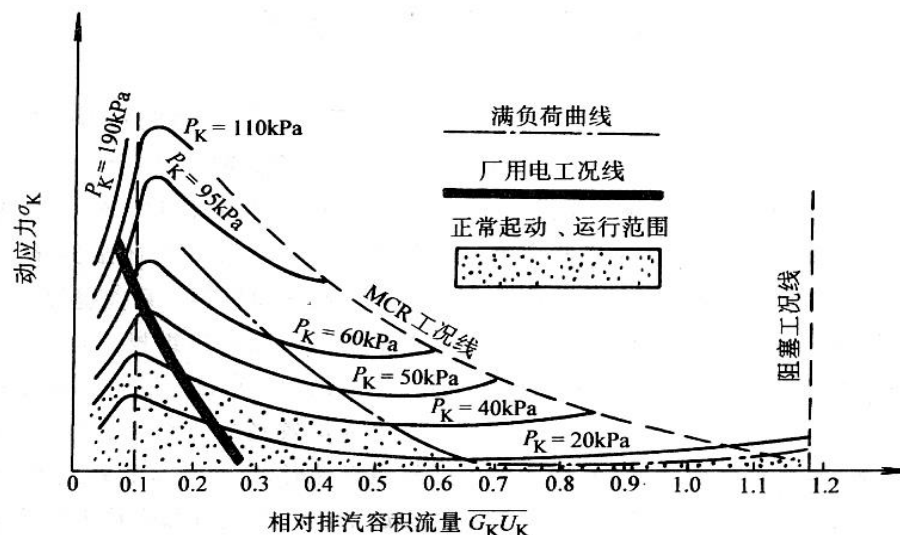


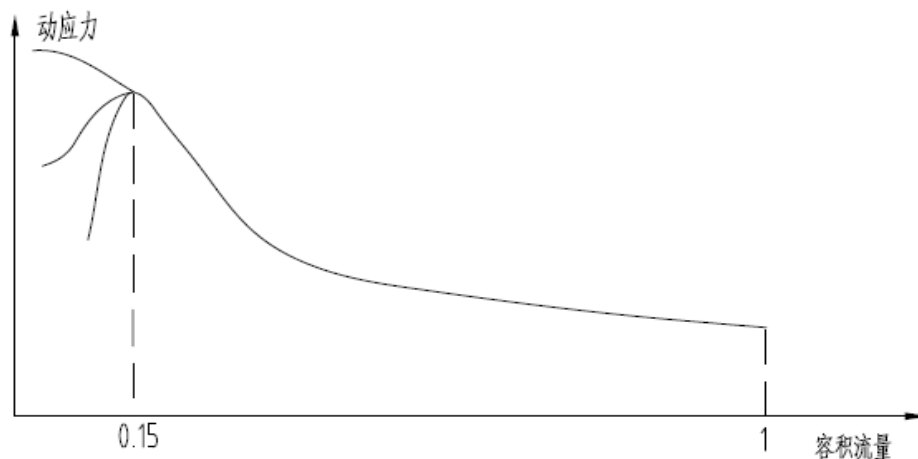
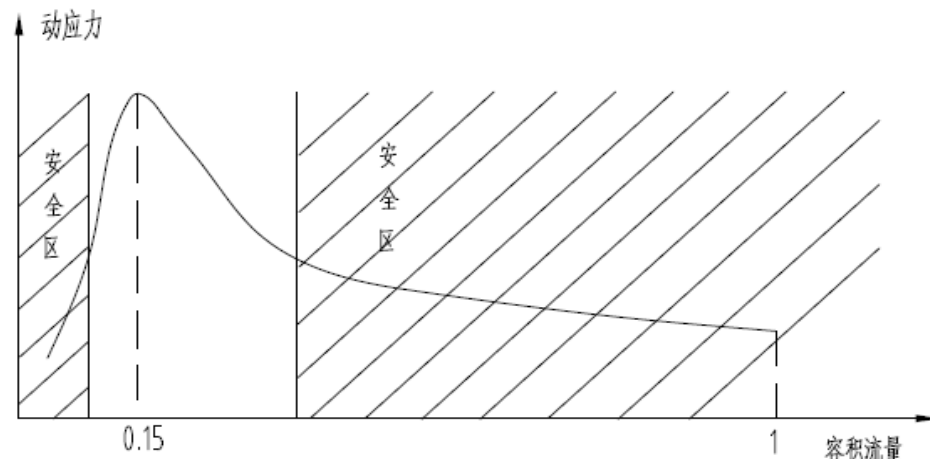
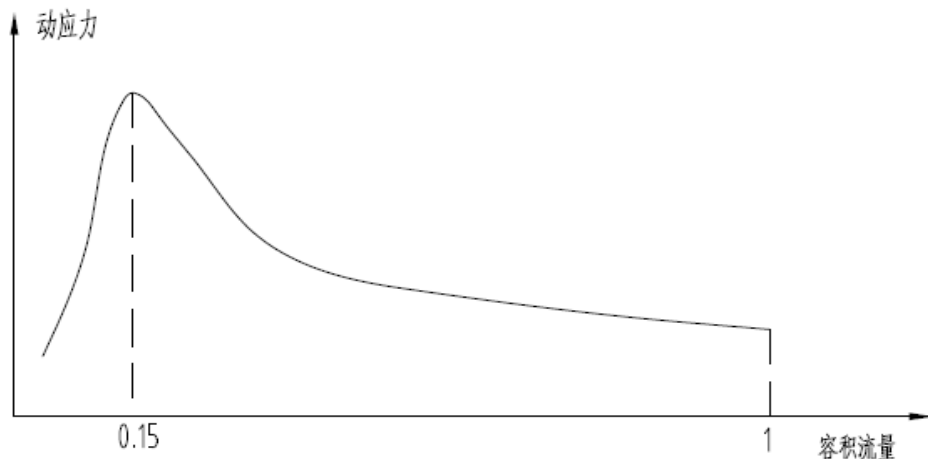
图 5-45 K-300-240 型汽轮机末级和
倒数第二级出口处实测流线图谱及温度分布

末叶片动应力曲线



- 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℃以上，末级叶片采用17-4PH材料，这种材料使用温度不宜超过200℃；
- 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；

末叶片动应力曲线——曲线形式是多种多样的



- ① 末叶片动应力曲线形状不是唯一的
- ② 不同的末叶片有不同的动应力曲线
- ③ 过小流量的运行区存在安全隐患

五、大容量机组低压缸解列供热改造

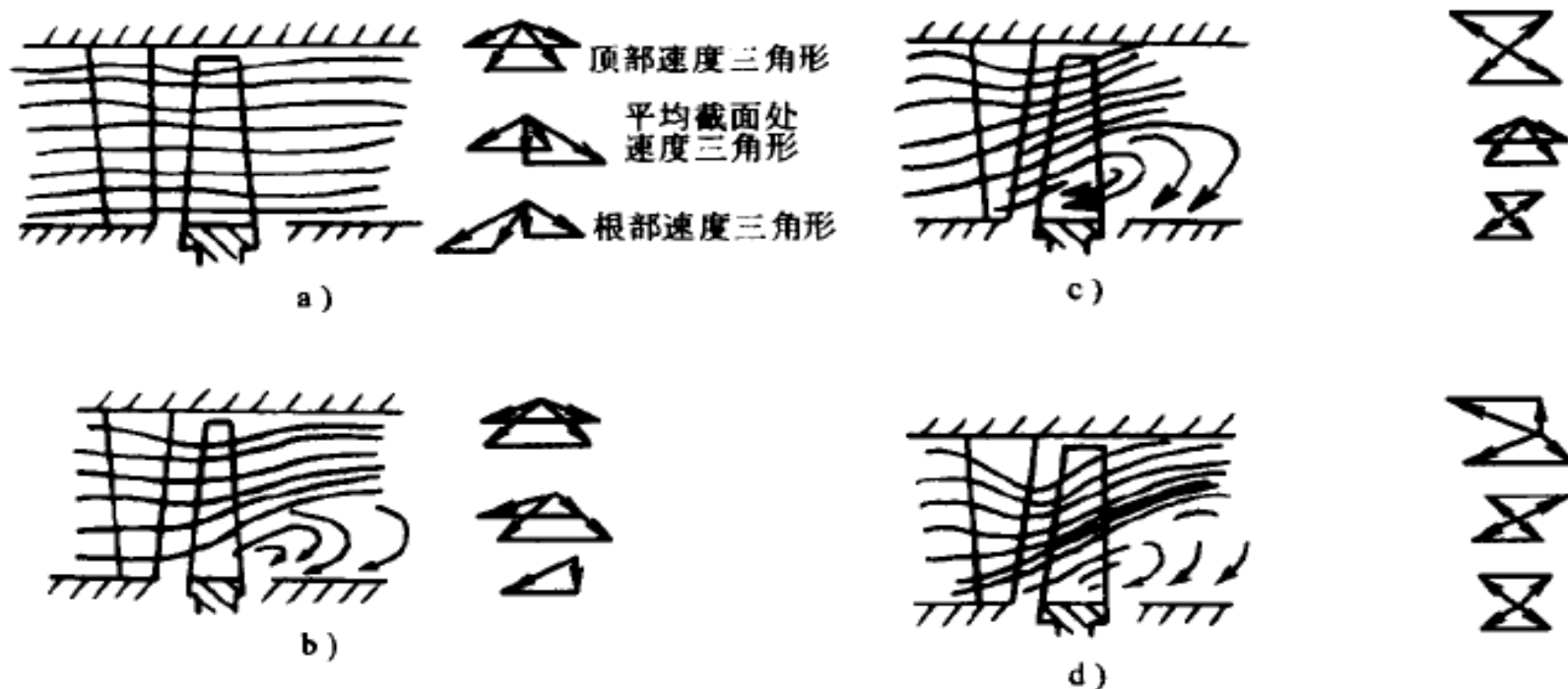


图 2-5-54 不同容积流量工况下的流线图

a) GV_n 额定负荷 b) $0.54GV_n$ c) $0.46GV_n$ d) $0.28GV_n$

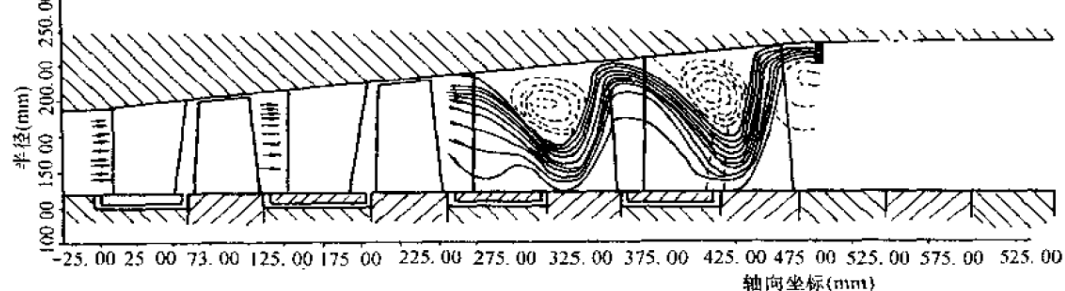
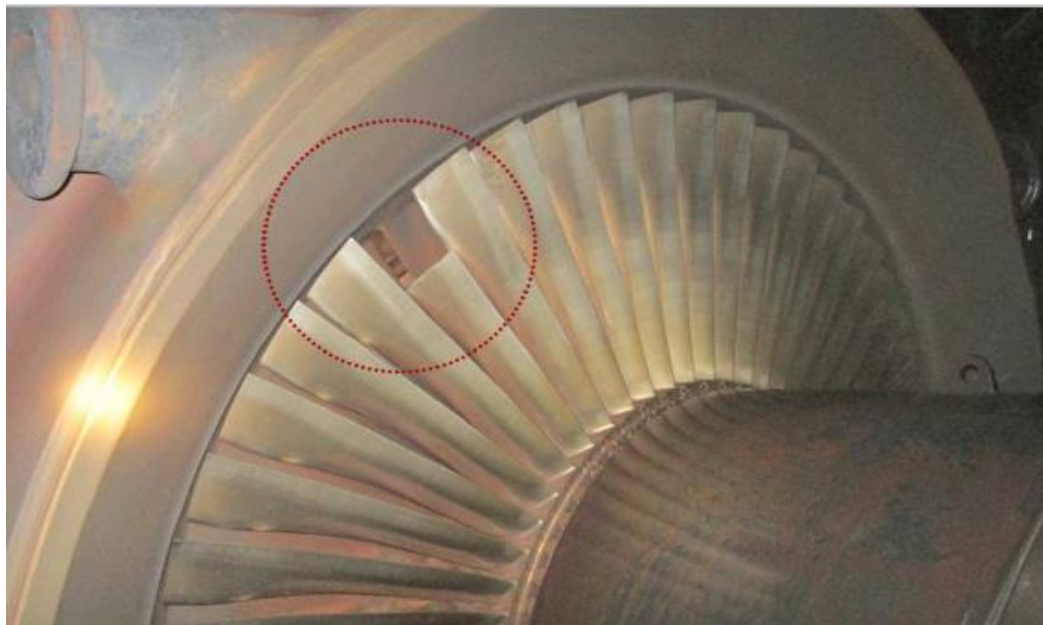


图 5-43 某一试验汽轮机当质量流量为 4% 额定流量时流线图

小流量时，末级叶片
蒸汽回流，出现水刷

- ① 小流量时叶片根部水刷加剧；
- ② 容量流量越小，水刷越大；
- ③ 摘自《核动力汽轮机》和《火力发电设备技术手册》

因动应力大而曾经损坏过的末叶



ALSTOM机组断裂的末叶片



LMZ机组断裂的末叶片

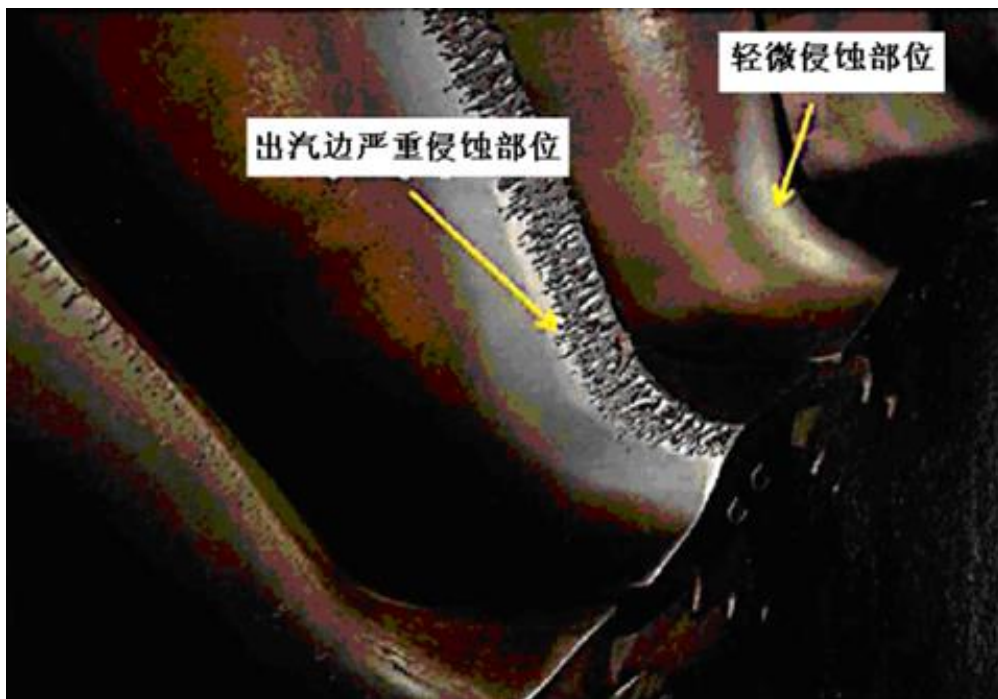
末几级叶片鼓风危害

鼓风引起排汽温度会升高到100—200℃，将带来问题如下：

- ① 汽缸变形，易引起轴承标高发生变化，动静碰磨；
- ② 末三级叶片许用值发生变化，存在静应力超标的风险；
- ③ 末三级叶片整圈动频率下降，存在共振点落入避开区的风险。
- ④ 低压缸喷水能够降低排汽温度，但是大多数低压缸喷水系统都不能够长期投入

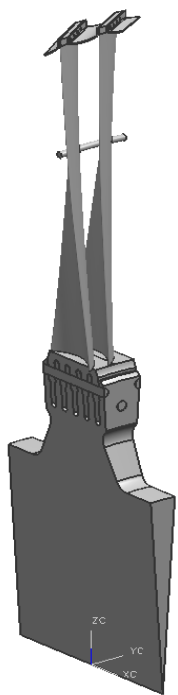
末级叶片的水蚀危害

► 叶片长时在低负荷工况下运行，叶片根部的脱流和叶片顶部的涡流汽流中夹带的水滴随蒸汽倒流冲刷叶片，使叶片根、顶部水蚀严重，长期运行会给叶片带来严重的安全隐患。

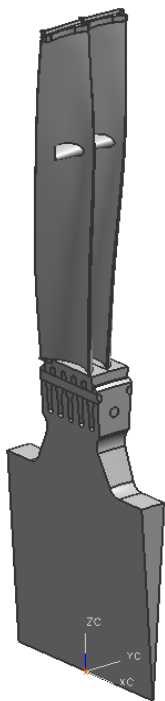


切除低压缸供热技术——哈汽的解决方案

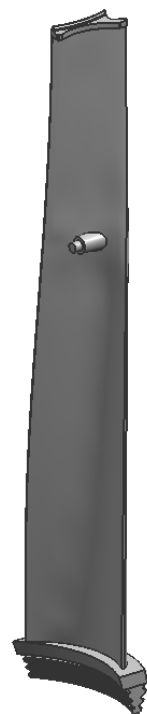
1) 更换已经做过实验的、动应力小的末叶片



710mm叶片



730mm叶片



900A3叶片



900B叶片

更换经过验证的安全叶片

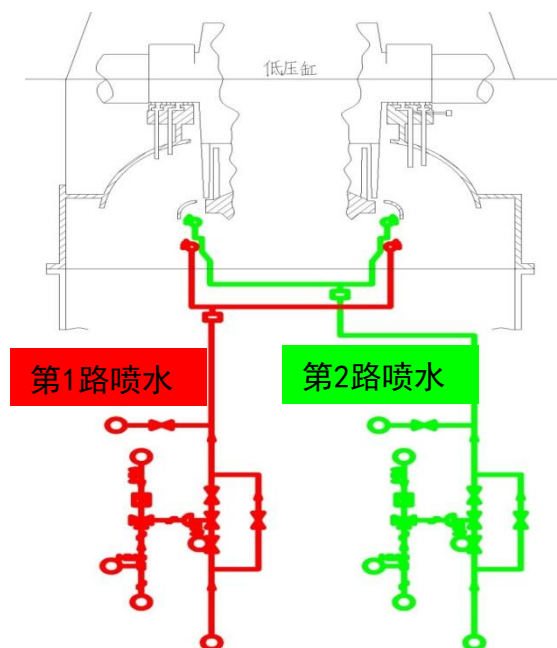
切除低压缸供热技术——哈汽的解决方案

2) 低压缸 鼓风过热风险解决措施

- ① 优化低压缸喷水系统，降低排汽温度，末两级叶片设置温度测点；
- ② 详细计算叶片强度与振动，给定叶片运行温度上限，并设置报警保护；
- ③ 汽缸变形及轴系稳定性分析。

优化后的低压缸喷水系统（详见右图）：

- 采用优秀的雾化喷头，保证喷水减温效果。
- 双路喷水系统，分阶段投入
- 优化喷水角度，减少减温水回流导致叶片水蚀。



切除低压缸供热技术——哈汽的解决方案

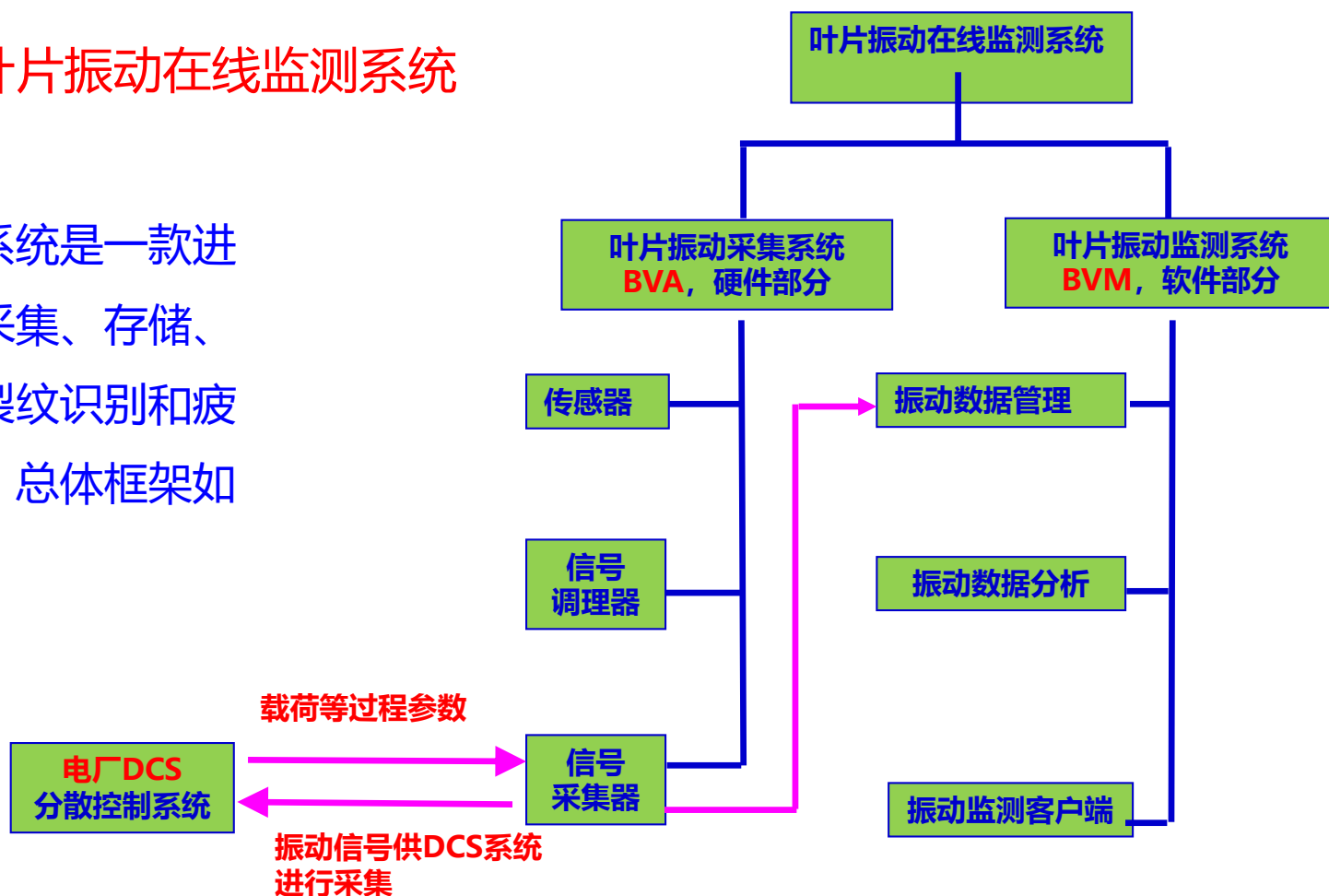
3) 叶片水蚀的辅助解决措施

- 叶片表面做特殊喷涂处理，提高叶片抗水蚀冲刷性能；

切除低压缸供热技术——哈汽的解决方案

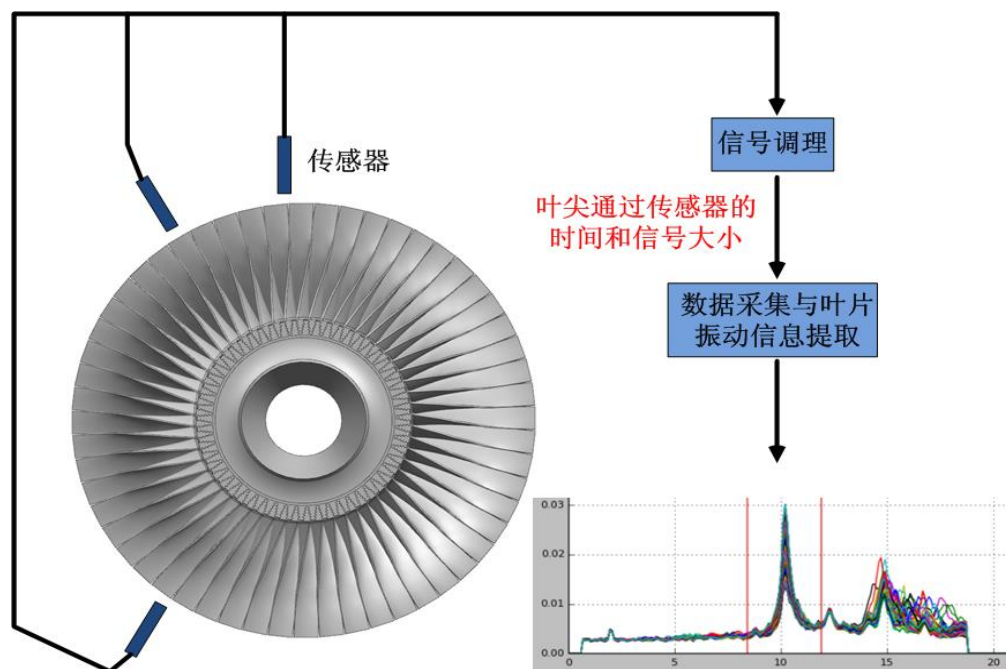
4) 电厂安装叶片振动在线监测系统

叶片振动在线监测系统是一款进行叶片振动数据的采集、存储、分析，可用于叶片裂纹识别和疲劳风险的评估软件，总体框架如下所示。



切除低压缸供热技术——哈汽的解决方案

4) 电厂安装叶片振动在线监测系统



叶片振动数据采集及信号分析系统

振动监测客户端输出，包括：

- 异步共振分析。
- 同步共振分析。
- 传感器状态显示。
- 趋势分析功能。
- 叶片之间特征对比分析。
- 频谱查看。
- 将指定的分析图表和图片的描述文件
- 叶片振动特征参数和DCS中的过程参数的变化同时进行显示。

结束语

1. 精细化设计，是今后产品性能提高的必由之路；
2. 要想提高技术水平，必须走立足自我的基础上进行努力创新
3. 不要期望通过技术的进步来解决一切问题
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。

谢谢

