

# 大机组供热改造与优化运行技术2019年会



刘网扣

上海发电设备成套设计研究院发电设备技术研发与服务事业部高级工程师，长期从事大型电站汽轮机通流与节能一体化技术研究、电厂冷端优化、电厂热力系统优化及节能改造、电厂供热改造研究等。先后负责或参与多个电厂300MW~1000MW通流改造、节能优化、供热改造的项目，取得了多项科技成果，积累了丰富的工程经验。

600MW机组低压缸零出力（切缸）改造技术及工程实践介

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



上海发电设备成套设计研究院有限责任公司  
SHANGHAI POWER EQUIPMENT RESEARCH INSTITUTE CO.,LTD

# 600MW机组低压缸零出力（切缸） 改造技术及工程实践介

刘网扣

2019年9月25日

## 知识产权声明

本文件的知识产权属国家电力投资集团公司及其相关产权人所有，并含有其保密信息。对本文件的使用及处置应严格遵循获取本文件的合同及约定的条件和要求。未经国家电力投资集团公司事先书面同意，不得对外披露、复制。

### *Intellectual Property Rights Statement*

*This document is the property of and contains proprietary information owned by SPIC and/or its related proprietor. You agree to treat this document in strict accordance with the terms and conditions of the agreement under which it was provided to you. No disclosure or copy of this document is permitted without the prior written permission of SPIC.*



上海发电设备成套设计研究院有限责任公司  
SHANGHAI POWER EQUIPMENT RESEARCH INSTITUTE CO.,LTD

**一、背景介绍**

**二、技术方案介绍**

**三、工程实践介绍**

**四、结论及展望**

# 一 项目背景

## 可再生能源发展规划

欧洲、美国和中国分别提出到2050年将实现100%、80%和60%可再生能源电力系统的蓝图。

中国的十二五和十三五两个五年计划中也明确表示将加大可再生能源的利用。这些可再生能源包括：水力发电、风电、太阳能发电和核电。



可再生能源装机和发电的比例在不断加大

# 一 项目背景

## 可再生能源发展障碍

近年来，由于“三北”地区冬季供暖期的需要，多数“以热定电”的火电机组出力大幅上升，进而留给风电的上网空间非常有限，导致了中国严重的弃风、弃光等现象。在2016年上半年，甘肃弃风率高达47%，新疆弃风率为45%；

对于风电、光伏发展的问题在于发电源和消耗端的不匹配，三北地区新能源多，而用电端主要在东南地区；

除了大中型水电具有较好的调节性能外，风电、太阳能发电的可控性较差，可再生能源发电的波动性和随机性给电力系统带来了较多的不确定性。



燃煤  
电厂  
灵活  
调峰  
的必  
然选  
择

# 一 项目背景

- 能源局《火电灵活性改造试点项目的通知》要求：挖掘火电机组**调峰潜力**，**提升我国火电运行灵活性**，消纳能力；
- “十三五”期间实施2.2 亿千瓦燃煤机组的灵活性改造，热电机组增加**20% 额定容量的调峰能力**，最小技术出力达到40~50%额定容量；
- 机组灵活性改造大范围开展，尤其北方热电联产机组，改造型式多样，效果不一。

# 一 项目背景



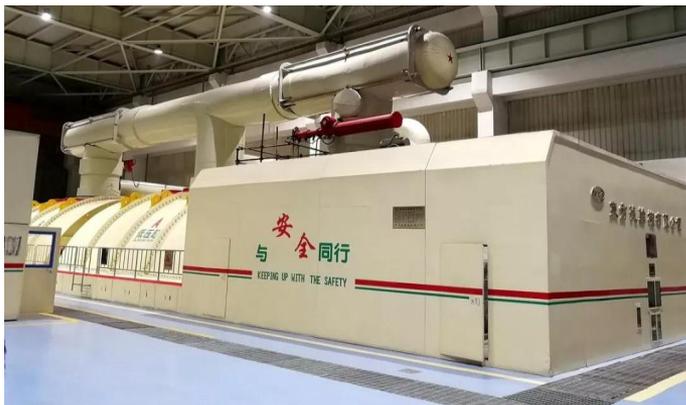
电锅炉



熔盐储热调峰



热水罐储热调峰



低压缸零出力

- 改动少，投资小；
- 运行方式灵活；
- 供热量大，调峰能力强。

# 一 项目背景

## ■ 目前情况:

机组配置: 2×600MW 超临界机组, N600-24.2/566/566;

抽汽供热: 汽轮机中低压连通管打孔抽汽, 额定压力1.0MPa, 温度375°C;

供热能力: 工业抽汽118.5t/h, 采暖抽汽 320t/h; (采暖供汽最大能力420t/h );

■ **供暖能力存在缺口:** 市近、远期规划, 供热负荷增加至618MW (对应中排抽汽量666t/h);

■ **调峰需求:** 两台600MW机组的利用小时呈下降趋势, 机组参与深调的幅度范围不断增长, 但随着城市供热需求的增长, 机组的采暖抽汽也呈逐年增长的趋势, 供热与深调成为一对矛盾, 机组无法实现热电解耦;

■ **补贴政策:** 《火电机组辅助调峰政策》已经出台, 明确火电机组参与深度调峰给予相应补贴, 补贴标准采用一厂一策的原则。

## 二 技术方案介绍

2.1 技术背景

2.2 总体技术方案

2.3 切缸安全性校核

2.4 汽轮机本体改造

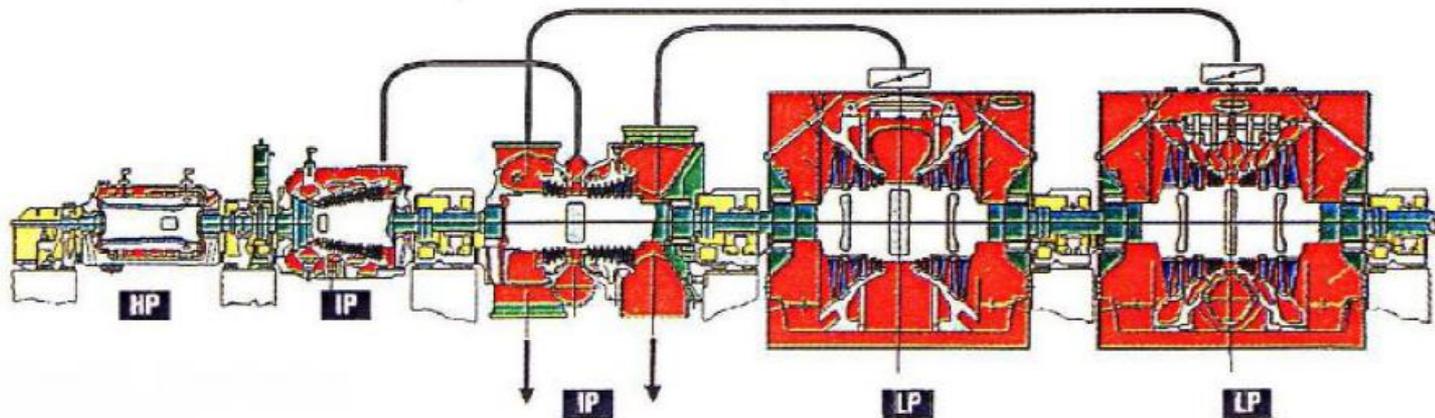
2.5 冷却蒸汽旁路系统

2.6 控制系统

2.7 改造涉及的其他系统

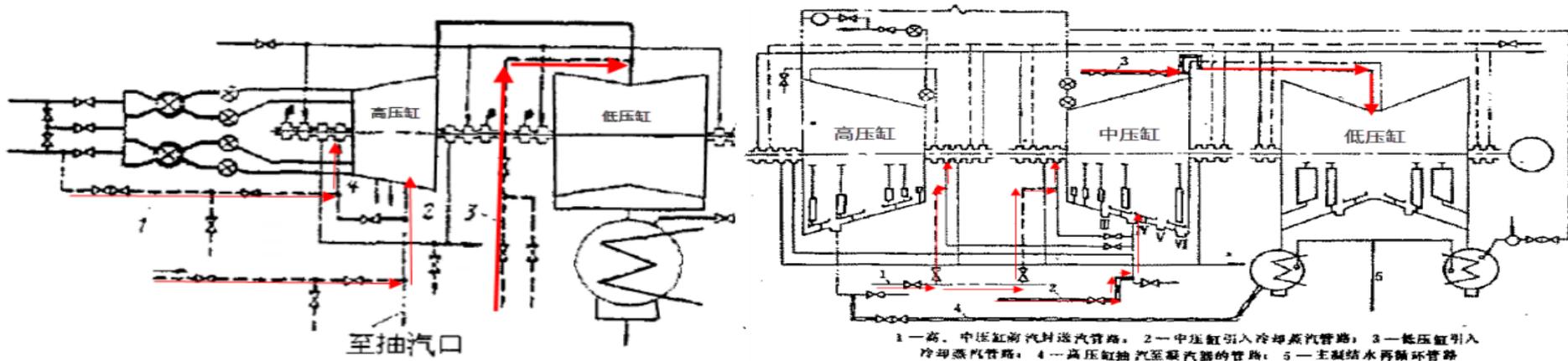
## 2.1 技术背景

- 丹麦Avedore2号机组，543MW，全年供采暖、生活热水；
- 设计考虑了低压缸控制-调节和切除工况，连通管蝶阀全行程调节，从全开到全关，能调节能切除；
- 低压缸切除工况控制冷却蒸汽流量2~5kg/s，低压缸末级长期不喷水，控制末级温度在42℃以下。



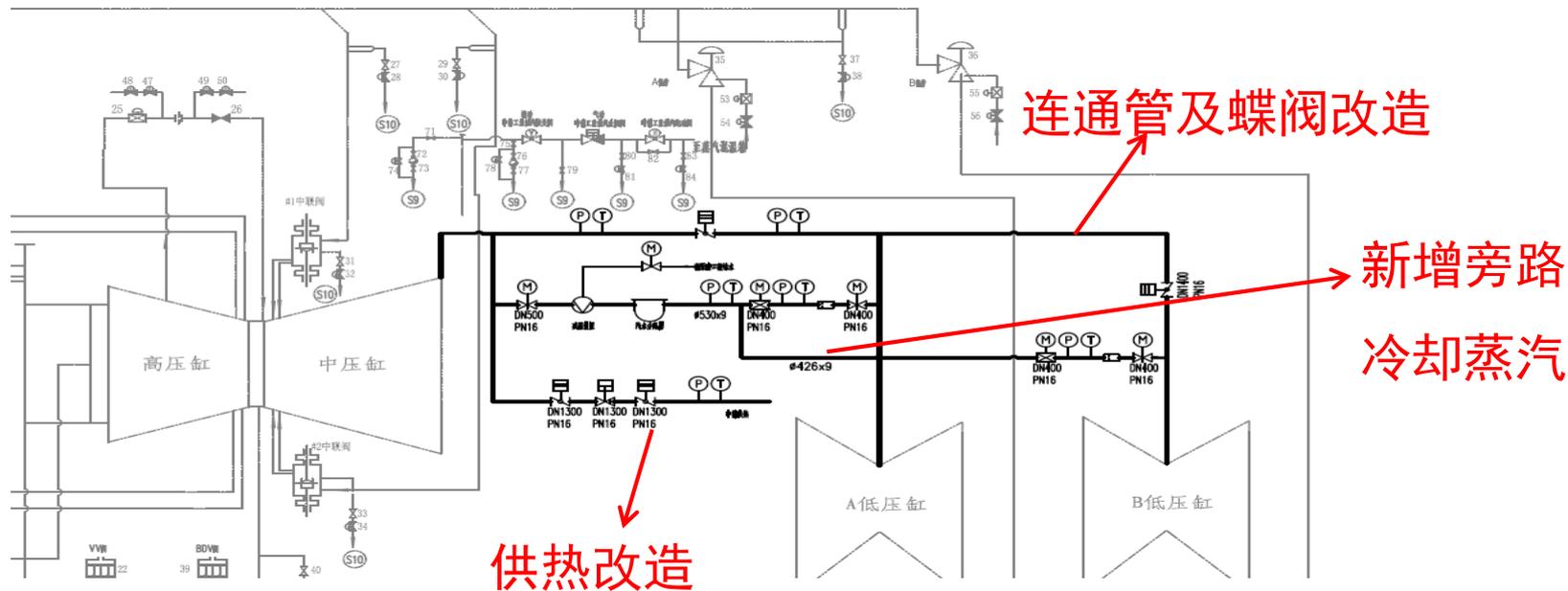
## 2.1 技术背景

- 前苏联大量机组以及上世纪80年我国多台100MW、200MW机组，采用少蒸汽运行，整台汽轮机不做功，仅维持在3000rpm作为调相机参与调峰；
- 从轴封、汽轮机抽汽口、中排通入少量冷却蒸汽，在叶片、内缸、进汽室等位置加装大量温度测点，保证在少蒸汽运行工况机组的安全运行。



## 2.2 总体改造技术方案

## 总体改造系统图



采用可完全密封的液压蝶阀切除低压缸原连通管进汽，通过新增旁路管道通入少量的冷却蒸汽，用于带走切除低压缸进汽后的鼓风发热量。

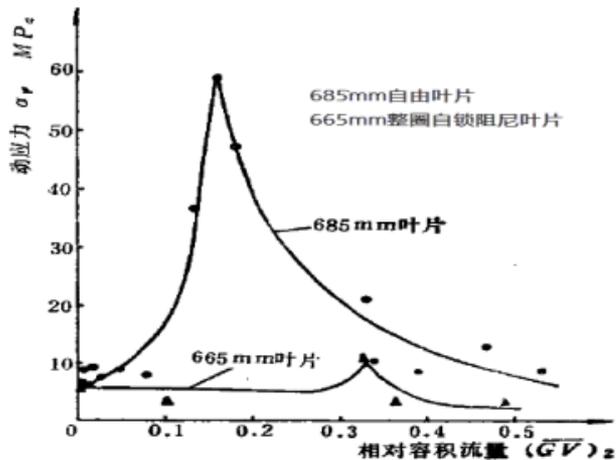
## 2.2 总体技术方案介绍

- (1) 切缸风险分析及低压缸安全性校核
- (2) 汽轮机本体改造
- (3) 增设低压缸旁路冷却蒸汽系统
- (4) 供热系统改造
- (5) 热控系统改造
- (6) 改造涉及的其他系统：热力系统、热网首站、电气

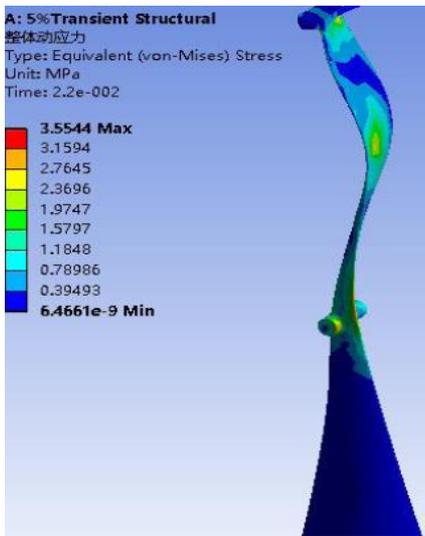
## 2.3 安全性校核

## 切缸的风险分析

- 小流量叶片失速颤振  
(自由叶片更危险)



- 鼓风、摩擦发热带来的强度、振动、应力问题



- 低压缸喷水引起的叶片水蚀

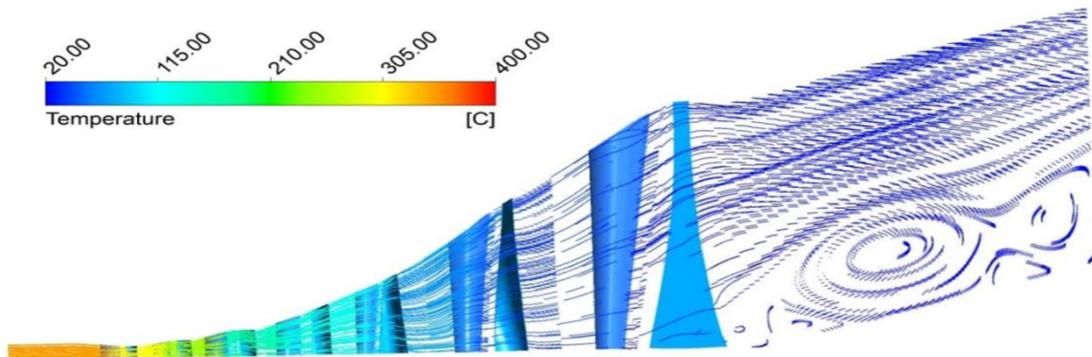


## 2.3 安全性校核

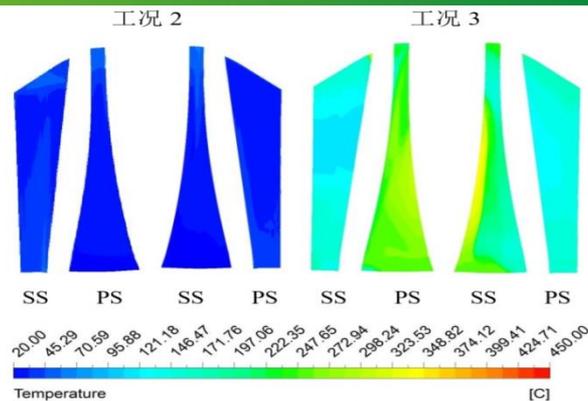


## 2.3 安全性校核

## 600MW机组流场校核



(140t·h<sup>-1</sup>) 子午面流场

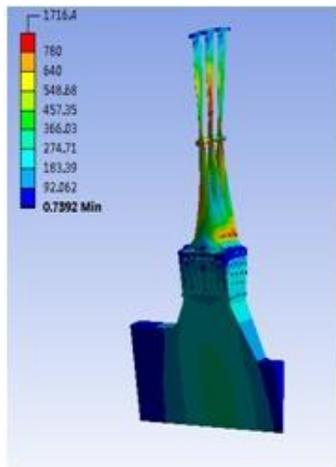


末级叶片表面温度

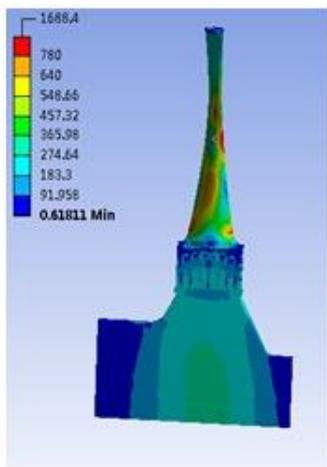
- ① 低压缸流量低于140t/h时，末级叶片及排汽区域开始出现汽流分离和涡流的现象，随着流量减小，分离区域逐渐向上游发展，且分离越来越严重；
- ② 低压缸在小流量工况下，末级叶片会进入鼓风状态，随着流量的减小，末级叶片的温度逐渐升高，最大值出现在末级静叶片叶顶出汽边附近；
- ③ 更低的冷却蒸汽温度可以减缓鼓风状态引起的叶片高温情况，蒸汽参数控制在流量单缸30t/h、温度200°C，末级动叶表面温度可以控制在100°C以内（不喷水）。

某600MW机组低压缸末级1016mm动叶

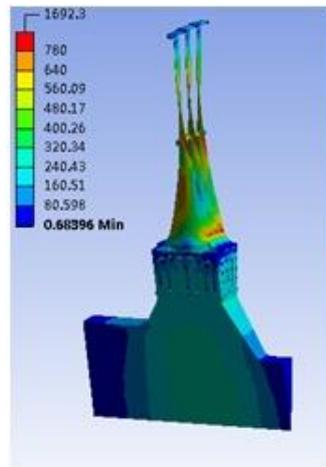
- 最大应力出现在叶根槽部位最下端销钉孔中；
- 温度越高应力越大，降低末级叶片的温度是降低应力的关键。



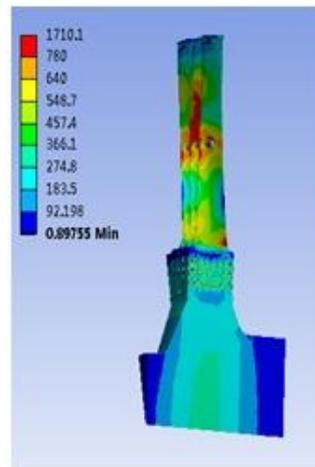
(a) 80°C 工况



(b) 100°C 工况

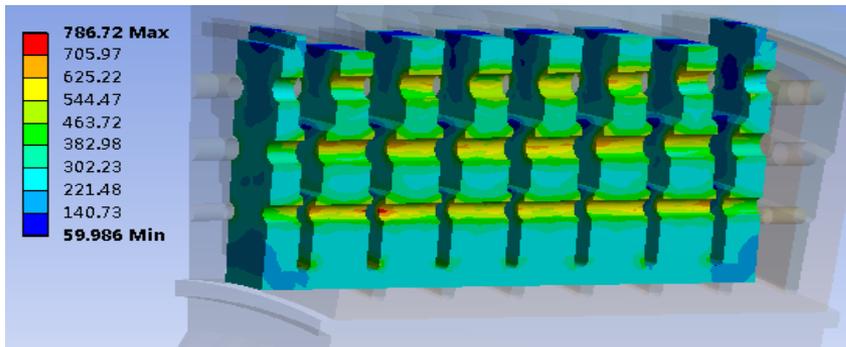


(c) 120°C 工况

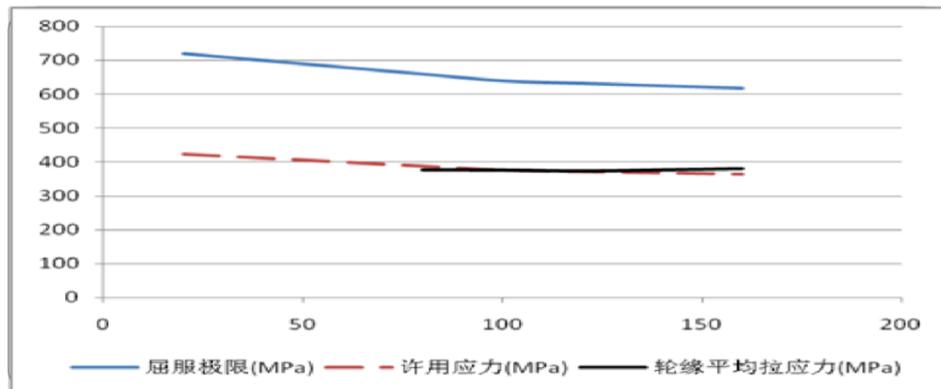


(d) 160°C 工况

### ■叶根槽强度校核（末级动叶）



100°C叶根槽拉应力场云图



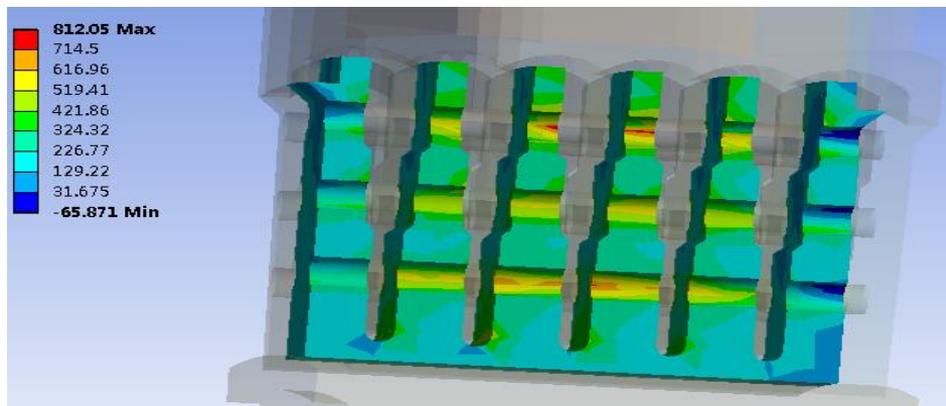
不同温度下屈服极限、许用应力与平均拉应力曲线

低压缸末级强度计算结果表明当叶轮温度低于100°C时，平均拉应力小于许用应力，强度设计合格，当温度大于100°C时，平均拉应力大于许用应力，强度设计不合格。

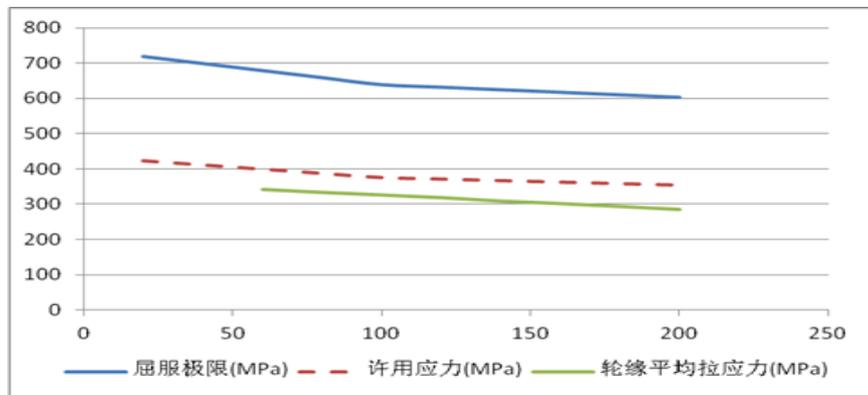
## 2.3 安全性校核

## 600MW机组强度校核

### ■叶根槽强度初步校核（次末级动叶）



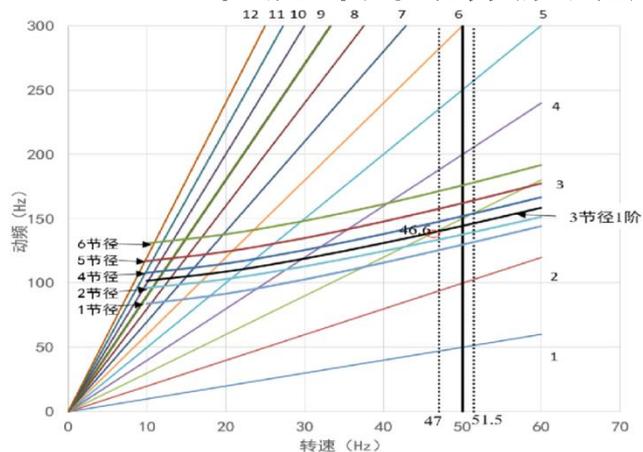
200°C叶根槽拉应力场云图



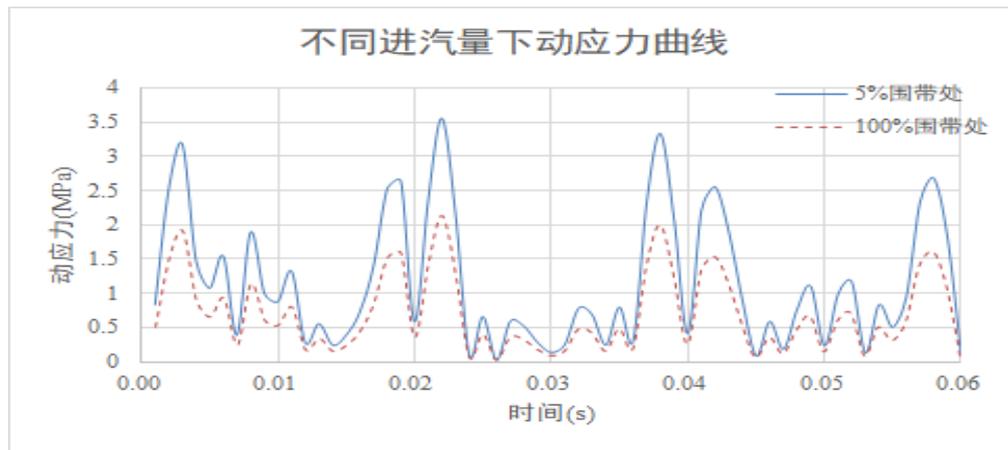
不同温度下屈服极限、许用应力与平均拉应力曲线

低压缸次末级叶轮温度低于200°C，平均拉应力要小于许用应力，强度设计合格。

### ■1016mm末级叶片动频及动应力校核



整圈连接叶片的坎贝尔图



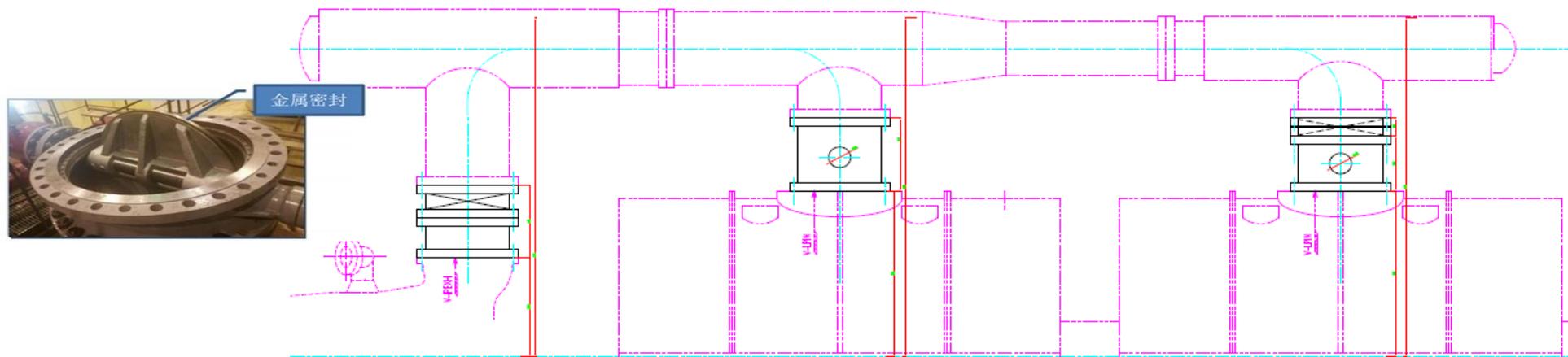
5%、100%进汽流量下在0.06s内的动应力曲线

- ① 小流量运行时，温度升高，弹性模量降低，靠近50Hz的三节径1阶振动频率（46.6Hz）降低，对47Hz~51.5Hz的避开率更大，满足调频要求；
- ② 整圈自锁叶片振动应力随着进汽流量的降低略有增高，增大幅度不高。

## 2.3 安全性校核

### ■安全性校核结论：

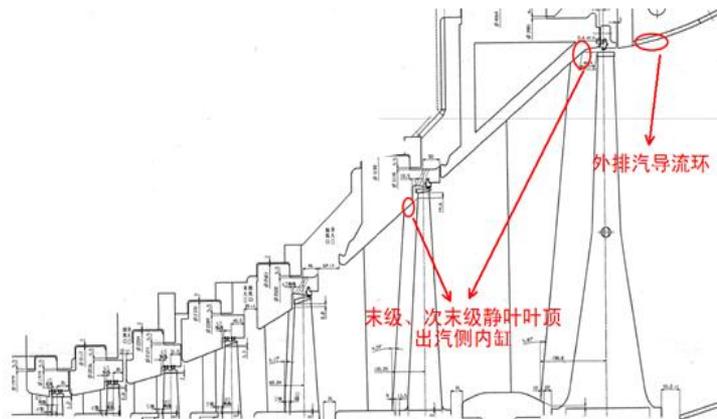
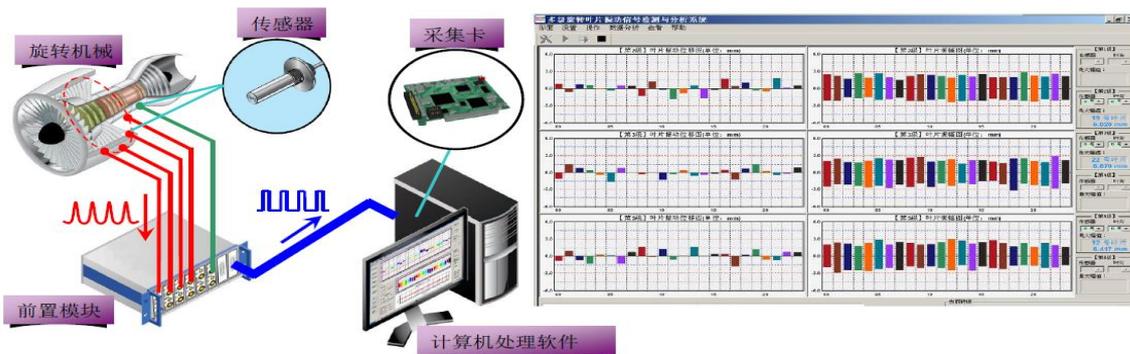
对低压缸末级叶片的流场、强度、动应力等进行了核算，结果表明在低压缸切除工况通入一定量的冷却蒸汽（30t/h），控制好排汽温度等重要参数，低压缸长叶片的强度、动应力等满足设计规范要求，低压缸在切缸工况能够长期安全运行。



1. 原连通管保留整体抬高，增加短接，抽凝、切缸功能均可实现；
2. 液动蝶阀，金属密封关闭不泄漏，具备调节功能。

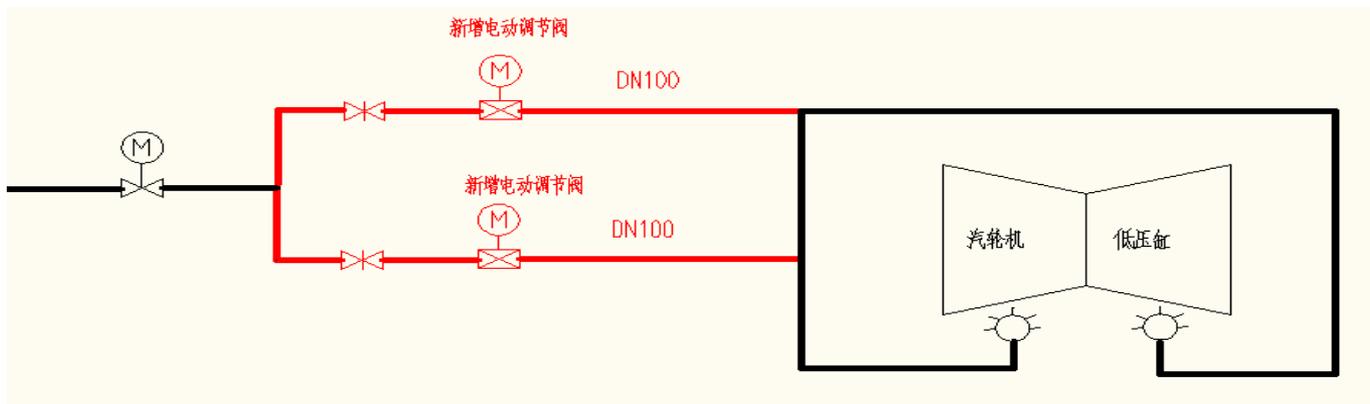
## 2.4 汽轮机本体改造

## 叶片监测系统



叶片监测、预警的三个方面：

- 叶片温度 (核心)
- 通流间隙
- 叶片振动



为便于调节和监视切除低压缸运行时低压缸喷水减温流量，对原低压缸喷水减温系统增加流量测点和调节阀，调节阀安装在原低压缸A、B两侧喷水电动门的位置，同时将A、B两侧喷水管增大。

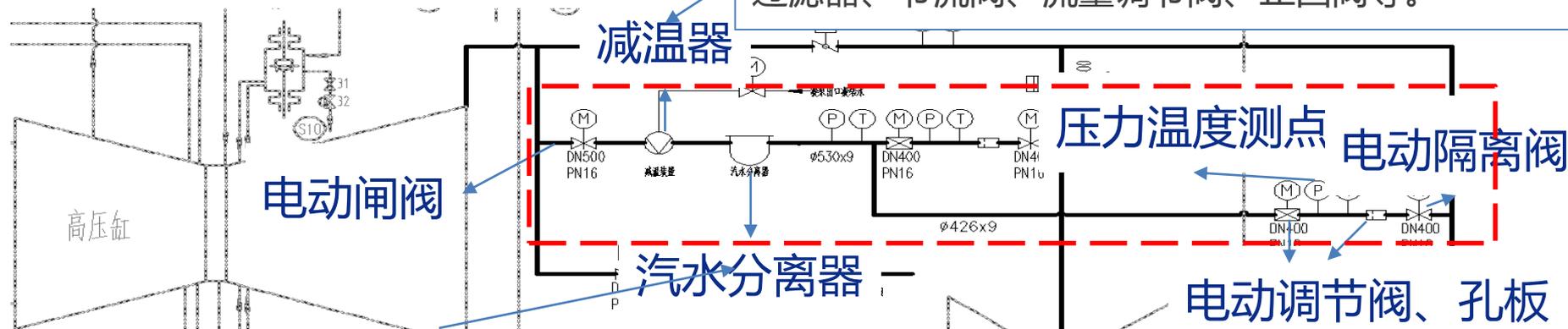


- 末两级动叶的回流区域热喷涂一层耐冲蚀的涂层。
- 喷涂采用金属喷涂工艺，涂层厚度0.1mm~0.2mm。涂层的抗水蚀能力优于一般的表面淬火处理。
- 喷涂区域：叶片出气侧背弧以及进汽侧叶顶。

## 2.5 冷却蒸汽旁路

### 冷却蒸汽旁路方案

旁路采用减温方案，设计出口蒸汽温度150~250℃，减温水来自凝泵出口，减温水管道上依次布置截止阀、过滤器、节流阀、流量调节阀、止回阀等。



汽水分离器采用吸附型，最大压降0.015MPa，分离效率99.9%。

流量调节阀采用电动阀，全行程比例控制。流量计采用孔板流量计，测量精度1%。管路长度满足流量计前10D后5D的安装要求。



## 2.6 热控系统改造

### ■新增测点接入控制系统

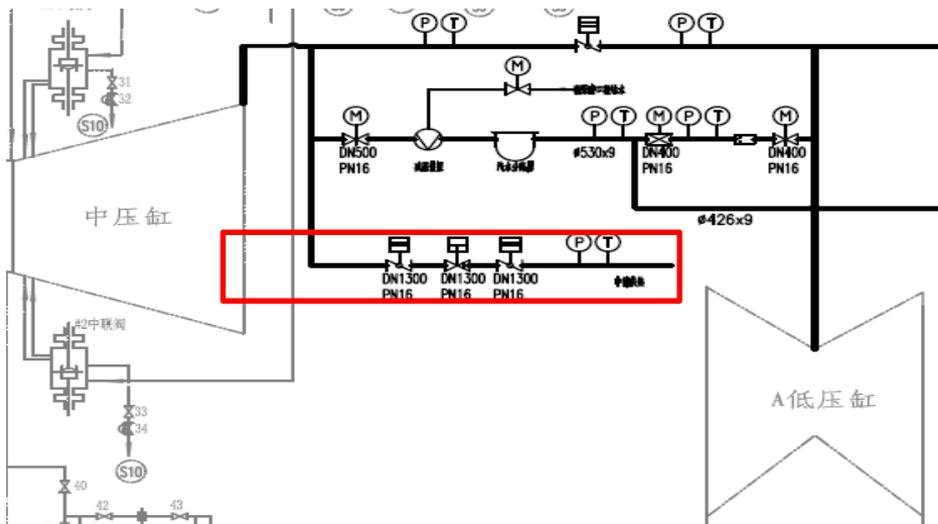
- ① 低压缸本体温度、压力测点；
- ② 低压缸冷却蒸汽旁路控制阀门及测点；
- ③ 低压缸喷水系统测点；
- ④ 连通管供热蝶阀前后测点；
- ⑤ 中排蝶阀、B低压缸入口蝶阀。

- ① **取消的保护**：低流量保护停机联锁；中排蝶阀保护与切缸冲突部分；供热投入最低负荷；
- ② **优化的保护**：排汽温度的报警值和跳机值；供热蝶阀前压力温度的报警值和跳机值；低压缸末级喷水逻辑优化；机组切缸TSI保护定值优化；
- ③ **增加的保护**：切缸投入、运行、退出过程中的汽轮机本体保护逻辑；低压缸次末级超温保护逻辑；
- ④ **600MW切缸逻辑**：切单缸与切双缸的逻辑优化；切单缸与切双缸的热力系统、低压缸喷水逻辑优化。

## 2.7 改造涉及的其它系统

## 供热管道系统改造

### ■ 600MW机组供热管道改造



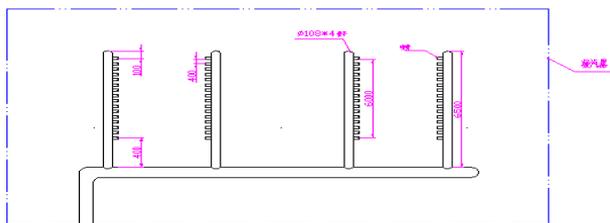
■ 现有的抽汽管道规格**DN800**，最大抽汽流量仅能至480t/h（流速76m/s）

↓ 口径增大

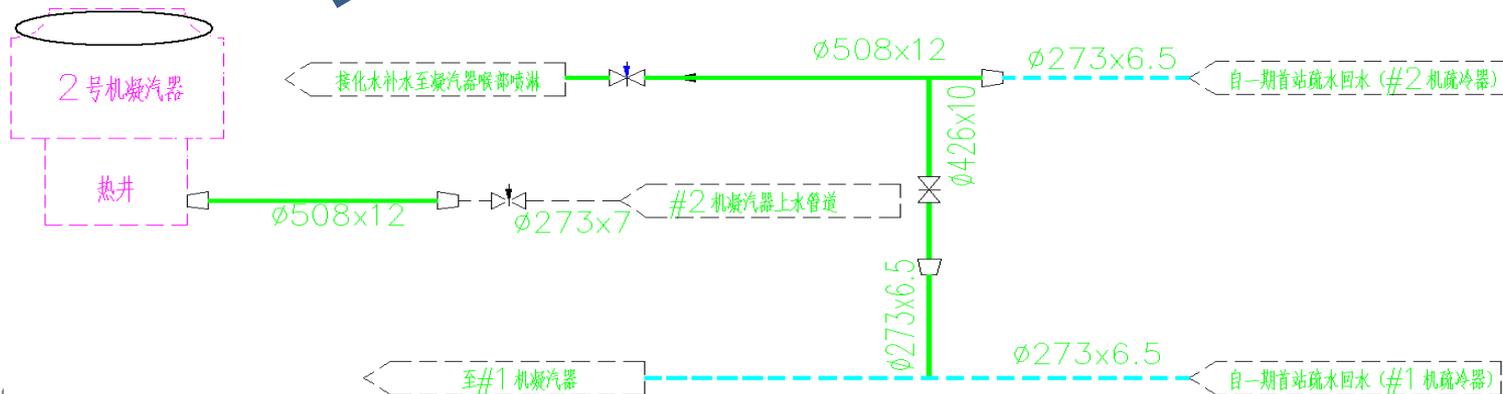
■ 抽汽管道更换为**DN1300**，供热管道上依次布置液动快关阀、气动逆止阀、供热关断阀。垂直段开口将旁路冷却蒸汽引出。

## 2.7 改造涉及的其它系统

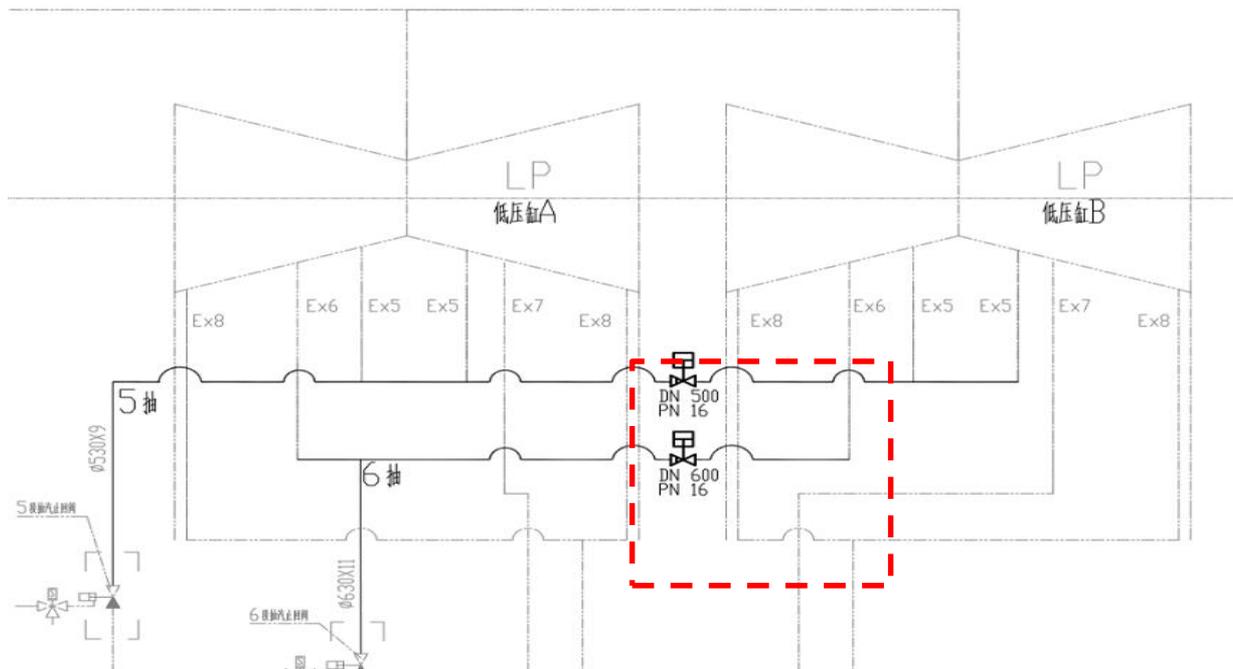
## 热网首站疏水系统改造



- ① 热网首站疏水经疏水换热器，温度降低至 $50^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ ；
- ② 疏水分两路进入凝汽器，一路经凝汽器喉部雾化喷入，起到一定的降温效果；一路进入热井，补水管路上设置调节阀，对两路补水进行分配。



低加抽汽系统需增设逆止阀，将A、B低压缸抽汽隔离。



- ① **电气**：低压缸切除改造新增电动阀一般不超过10个，增加的电动执行机构总功率不超过30kW，电动执行机构供电取自机组现有MCC柜，基本无新增厂用电，现有电气系统无需改造。
- ② **土建**：改造工程没有新建构、建筑物，土建工作主要是新增设备、管道及管件的安装固定，主要的土建施工在汽机房的运转层以及厂区供热管道范围内进行。
- ③ **消防**：改造无新增火灾危险性设施，不涉及消防系统改造。

# 三 工程实践介绍

## 河南公司开封电厂600MW机组低压缸零出力EP项目



	<b>C630/349-24.2/09/566/566</b>	<b>型汽轮机</b>			
东方电气 DONGFANG ELECTRIC		<b>STEAM TURBINE</b>			
额定功率 RATED OUTPUT	630 MW	供热参数: EXTRACTION CONDITION:			
新汽压力 FRESH PRESSURE	24.2 MPa	功率 OUTPUT	349.8 MW	温度 TEMPERATURE	346.5 °C
新汽温度 FRESH TEMPERATURE	566 °C	压力 PRESSURE	0.9 MPa	流量 FLOW	945 t/h
再热温度 REHEAT TEMPERATURE	566 °C	转 RATED	速 SPEED	3000	r/min
排汽压力 EXHAUST PRESSURE	4.9 KPa	出厂编号/日期 NUMBER/DATE FOR DELIVERY	No. /	年月日	
<b>东方汽轮机有限公司</b> DONGFANG TURBINE Co., Ltd.					

### 三 工程实践介绍

### 项目工期及关键节点

■总工期：127天

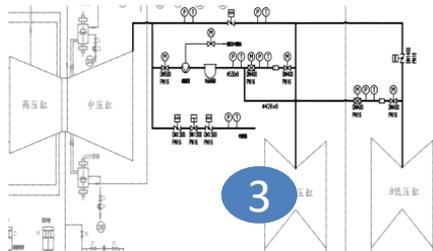
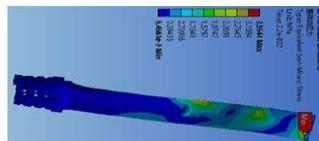
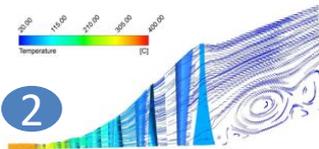
■施工工期：52天

■关键节点：

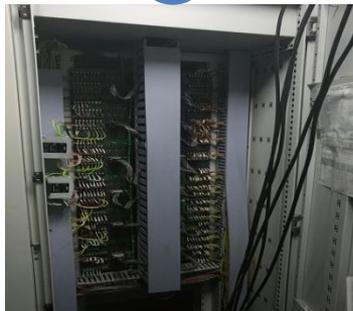


- ✓ (1) 技术总成
- ✓ (2) 安全性校核
- ✓ (3) 系统方案设计
- ✓ (4) 汽轮机本体改造
- ✓ (5) 设备选型供货
- ✓ (6) 热控设计改造
- ✓ (7) 项目总体管理
- ✓ (8) 调试试验
- ✓ (9) 性能试验

承担的  
工作:



6



5



8



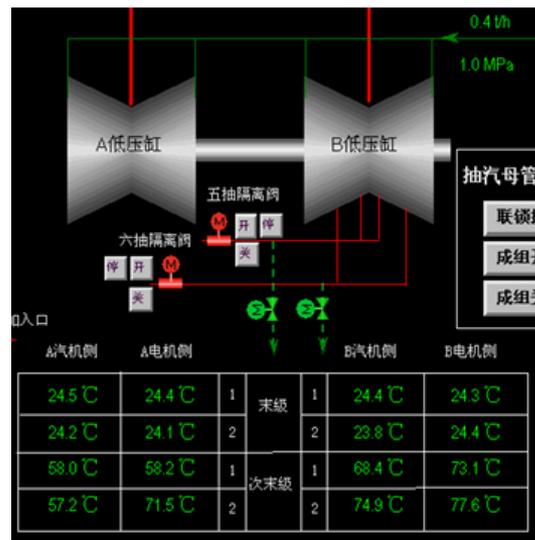
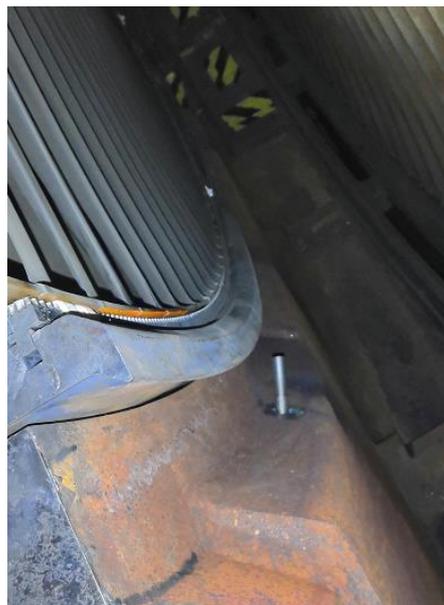
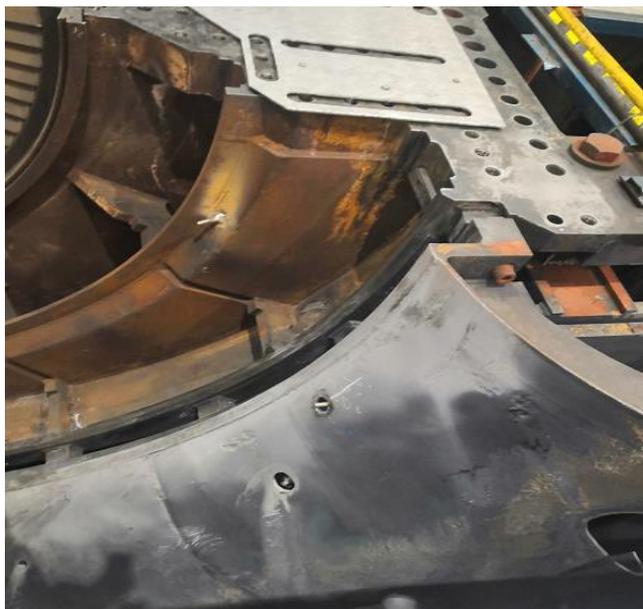


- (1) 改造后连通管整体抬高1.4米，增加三段三通短接，均为法兰连接。
- (2) 中排蝶阀DN1400具备调节和快关功能，关到位密封；B缸入口蝶阀DN1400具备调节性能，关到位密封。

### 三 工程实践介绍

### 汽轮机本体改造 (低压缸叶片监测)

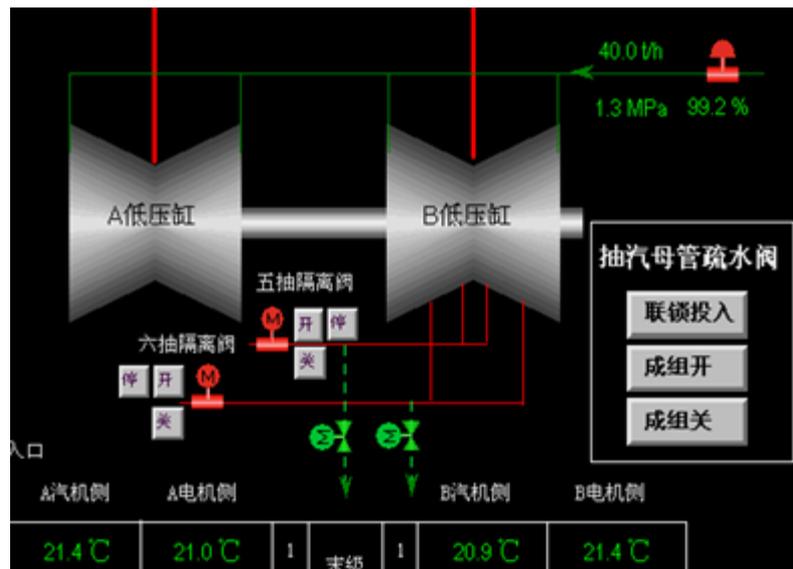
- (1) 对切缸工况的末两级温度、鼓风状况进行监视控制;
- (2) 根据长叶片的鼓风发热情况对切缸运行参数进行调整。



### 三 工程实践介绍

### 汽轮机本体改造 (低压缸喷水优化)

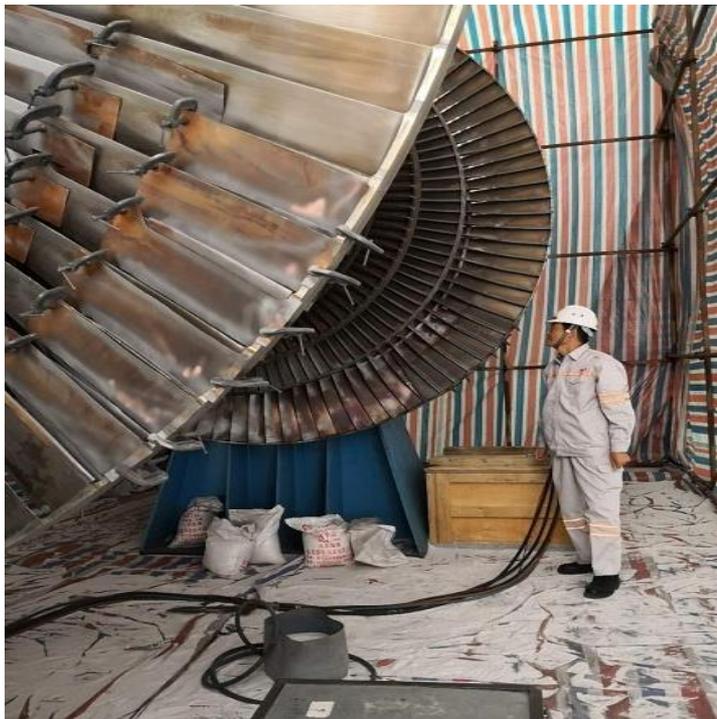
- 更换雾化效果更好的喷嘴，调整喷嘴布置和角度，减少水蚀，提高喷水降温效果；
- 喷水母管上增加调节阀和流量测点，喷水控制逻辑优化。



### 三 工程实践介绍

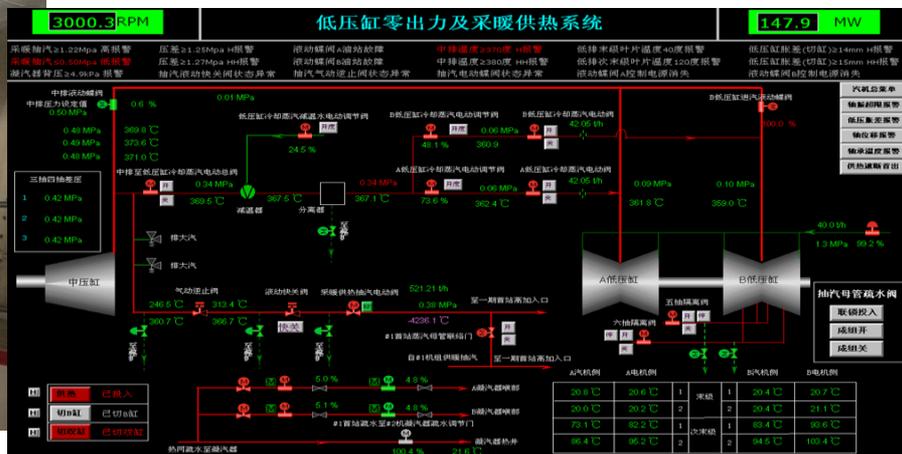
### 汽轮机本体改造（长叶片喷涂）

- 超音速火焰喷涂，采用先喷砂后喷涂工艺；
- 喷涂后至少三年内涂层不会脱落。



# 三 工程实践介绍

## 低压缸冷却蒸汽旁路系统



- 冷却蒸汽旁路所有系统均布置汽机平台；引出位置在供热管路上，送入低压缸位置在连通管进入低压缸的垂直管路上；
- 600MW机组比300MW布置要复杂。

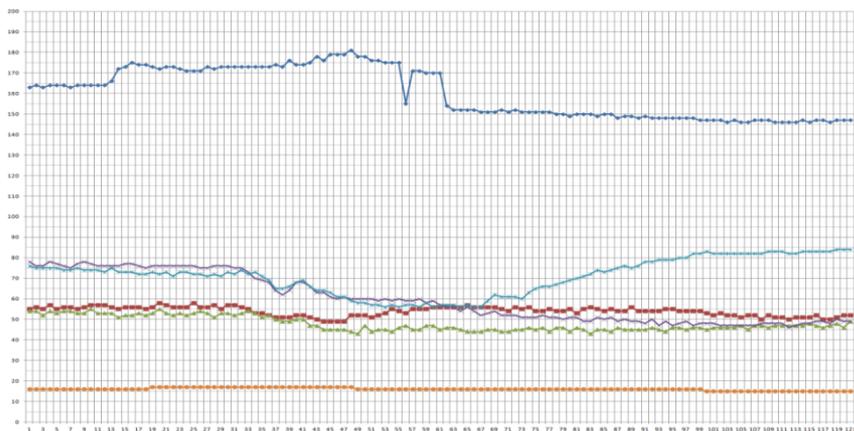
试验测定低压缸切除运行对机组主要设备及系统运行状态的影响，为后续制订低压缸零出力运行控制方案与运行规程提供依据。

- ① 试验测定高真空、小容积流量鼓风工况下，低压缸长叶片区域温度变化；
- ② 低压缸切除过程中以及运行时，汽轮机轴瓦振动、差胀、轴向位移、汽缸上下缸温差、排汽温度等的变化趋势与规律；
- ③ 试验测定低压缸切除运行时，主要辅助系统的适应性；
- ④ 低压缸切除运行时，进汽参数、排汽参数、冷却蒸汽流量对低压缸运行状态的影响；
- ⑤ 低压缸切除运行中CCS、AGC、一次调频的试验及变负荷能力。

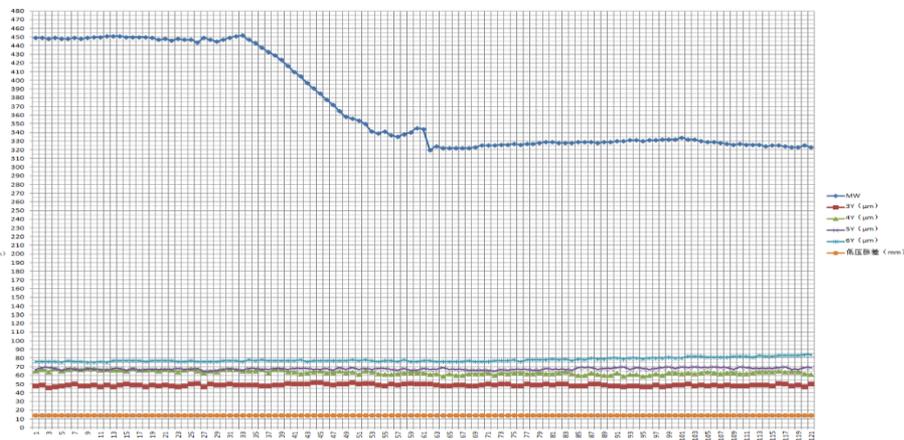
A/B低压缸全切试验历时6小时22分钟，试验期间最低点负荷142MW、供热蒸汽量495t/h；B低压缸单切试验历时8小时50分，试验期间最低点负荷330MW、主蒸汽流量1245t/h、供热蒸汽量530t/h。

试验项目	单位	切A/B低压缸		单切B缸	
		切缸前	切缸后	切缸前	切缸后
主蒸汽流量	t/h	712	694	1246	1246
机组负荷	MW	182	148	345	331
供热蒸汽流量	t/h	380	520	470	505
中排压力	MPa	0.44	0.48	0.62	0.70
次末级温度	°C	70	85	68/70	68/85
末级温度	°C	28	23	26/28	26/23

切双缸、切单缸前后低压缸监视参数的变化，低压缸在切缸状态的振动、差胀变化很小，仅在切双缸状态6号轴振略增加，其它轴振、差胀等几乎没有变化。

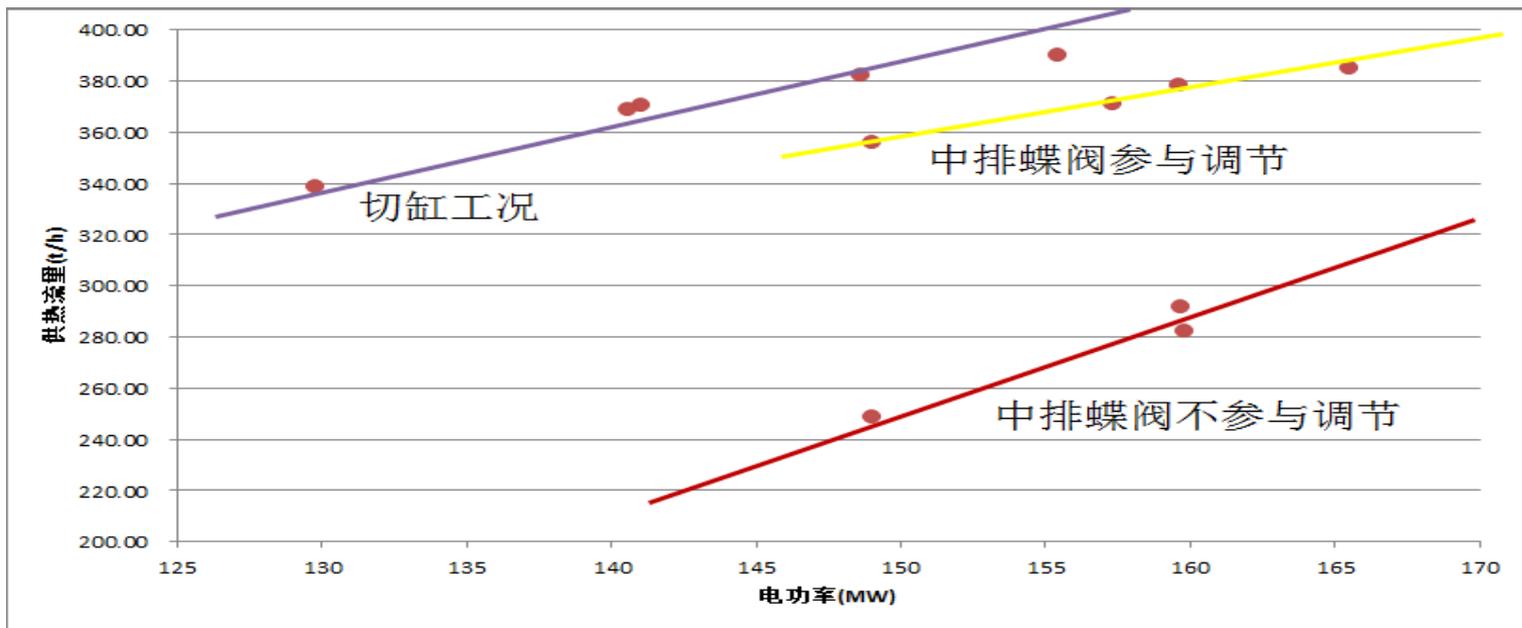


切双缸运行参数变化



切单缸运行参数变化

- 根据低压缸切缸实际运行数据，对比各工况的电负荷供热流量关系；
- 同样电负荷下，切缸工况的供热流量增加；同样供热流量下，切缸工况的电负荷降低；
- 低压缸切缸改造大幅提升机组的供热能力和调峰能力，实现热电解耦。



## 四 结论及展望

- 通过汽轮机本体改造、热控改造等技术改造以及调试试验，低压缸可在零出力（切缸）状态长期安全稳定运行；
- 改造后的汽轮机在供热季可在抽凝和低压缸切除两种状态自由切换运行。在同样电功率的情况下，机组（600MW机组）采暖抽汽流量可增加 $2 \times 140\text{t/h}$ 。在满足同样采暖抽汽供热的情况下，电功率可下降70MW。低压缸切除工况供电煤耗下降40g/kWh以上，节能减排效益显著；
- 机组的供热能力和深度调峰能力均大幅提升，实现热电解耦。

- ✓ 低压缸切除运行工况安全性校核技术。对低压缸少蒸汽工况的流场、叶片强度、叶片动频、叶片动应力、转子轮槽应力、低压缸刚度等的计算分析技术；
- ✓ 低压缸切除运行的本体及系统改造技术。包括连通管改造技术、冷却蒸汽旁路改造技术、低压缸末两级动叶片监测系统、低压缸排汽喷水减温系统优化、热力系统优化改造技术等；
- ✓ 低压缸切除运行的控制优化改造技术。包括投切缸/退切缸的逻辑增设、切单缸 / 双缸的逻辑优化、中排蝶阀的控制及保护优化、汽轮机保护定值的优化、低压缸排汽喷水减温系统逻辑优化、低压缸切除运行后的协调控制优化等；
- ✓ 低压缸切除运行的工程应用技术。包括工程概念设计、关键设备选型、设备布置、设备安装等技术；
- ✓ 低压缸切除运行的调试及试验技术。包括低压缸投切缸前准备技术、投切缸运行技术、切缸运行的参数调整及试验技术、退切缸运行技术、切单缸/切双缸的转化技术。

- 低压缸零出力过程中的电热负荷协调问题，确定低压缸零出力的最佳工作方式；
- 低压缸零出力过程中的AGC、一次调频及CCS问题；
- 切缸过程中辅机最佳运行方式的确定。

- 低压缸零出力在机组深度调峰、智慧供热上的应用；
- 低压缸零出力在工业供汽上的应用，中低压缸零出力应用；
- 汽轮机零出力的应用；
- 低压缸零出力在燃气联合循环机组上的应用。



上海发电设备成套设计研究院有限责任公司  
SHANGHAI POWER EQUIPMENT RESEARCH INSTITUTE CO.,LTD

谢谢!  
THANK YOU !