

提高供热机组灵活性的 低压缸零出力技术

西安热工研究院有限公司

2018年7月

汇报人 黄嘉驷 13991203639

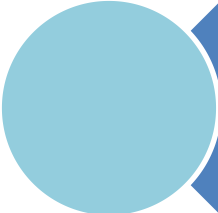


黄嘉驷

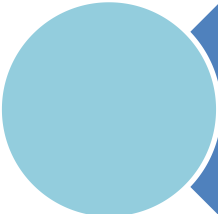
正高工，注册咨询工程师

西安热工研究院节能减排中心，节能技术研发与设计所所长，热工院汽机专业灵活性课题小组组长。长期从事热电解耦、节能诊断、节能技改可行性研究、热力试验，汽轮机深度大修等技术研究及应用推广工作。主持编写电力行业标准 DL/T 1755-2017《燃煤电厂节能量计算方法》、参编了专著《火燃煤发电机组能耗分析与节能诊断技术》，华能集团科技项目《节能降耗专项》课题负责人。

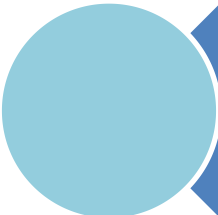
主要内容



一、灵活性改造必要性



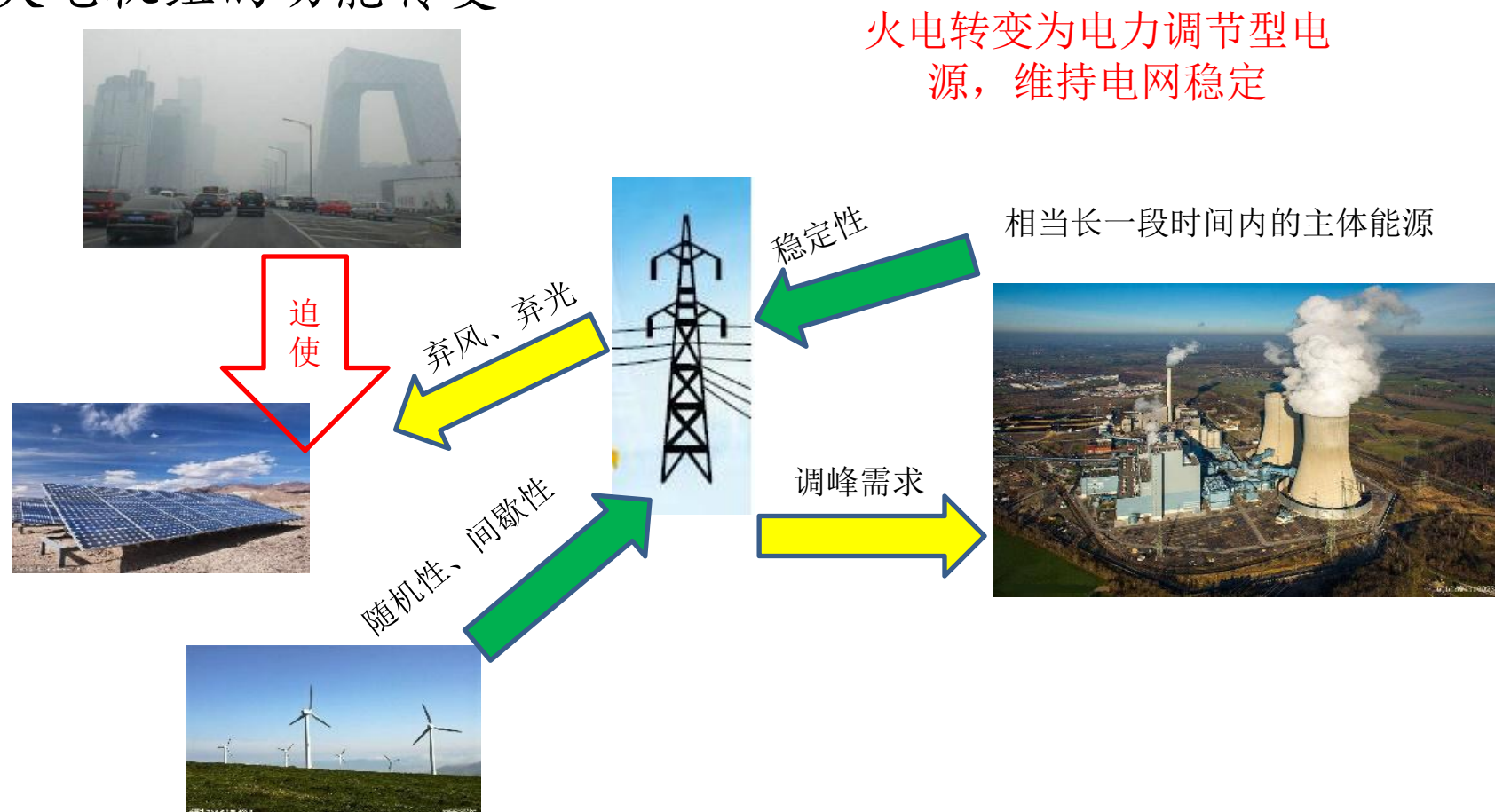
二、低压缸零出力技术



三、下一步工作方向

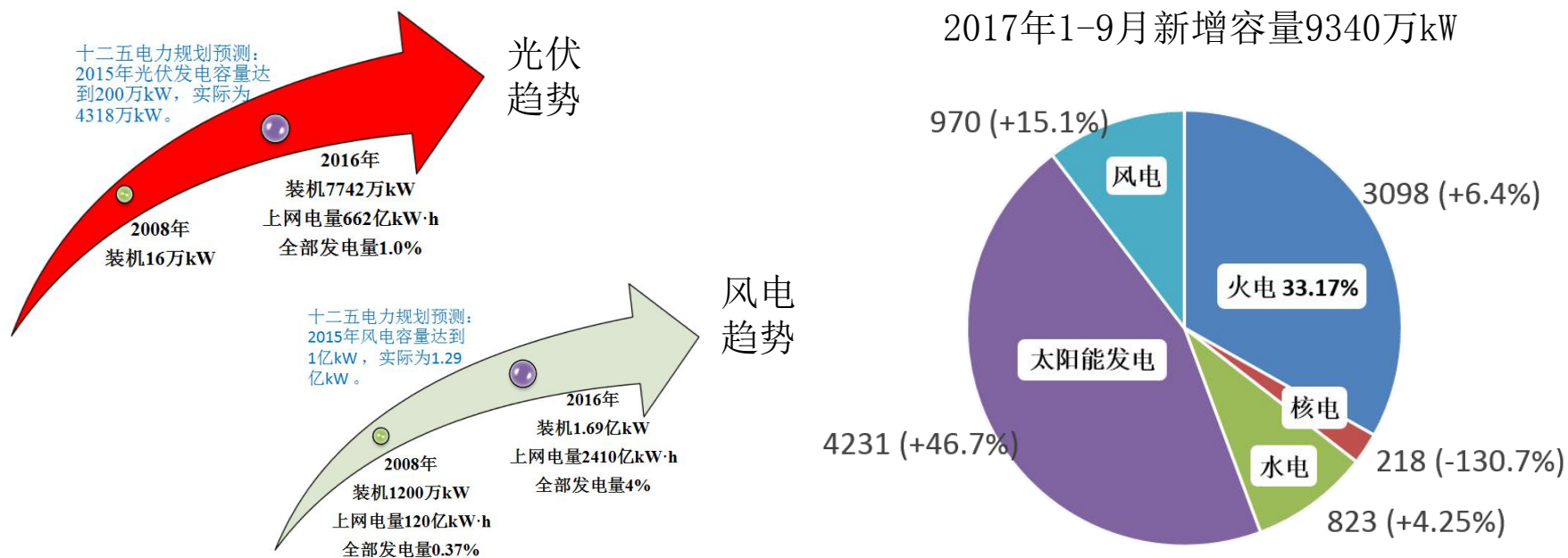
一、灵活性改造必要性

1.1 火电机组的功能转变



一、灵活性改造必要性

1.2 我国可再生能源发展迅猛



《2016年中国可再生能源发展报告》预计，到2020年光伏将突破1.6亿kW，风电装机将突破2.3亿kW，**火电机组的运行灵活性需要进一步增强。**

一、灵活性改造必要性

1.3 火电机组灵活性主要制约因素

1) 调峰能力不足

目前，我国纯凝机组的实际调峰能力一般为额定容量的50%，典型抽凝机组在供热期的调峰能力仅为额定容量的20%。东北地区2015年底火电装机容量为8572万千瓦，春节期间的调峰缺口已经突破600万千瓦。

2) 负荷响应速度迟缓

对火电机组而言，其能量产生和转换过程环节较为复杂，有较大的延迟，例如锅炉接收到负荷指令后，煤量变化到蒸汽流量变化需要的时间，在1.0—2.5min。

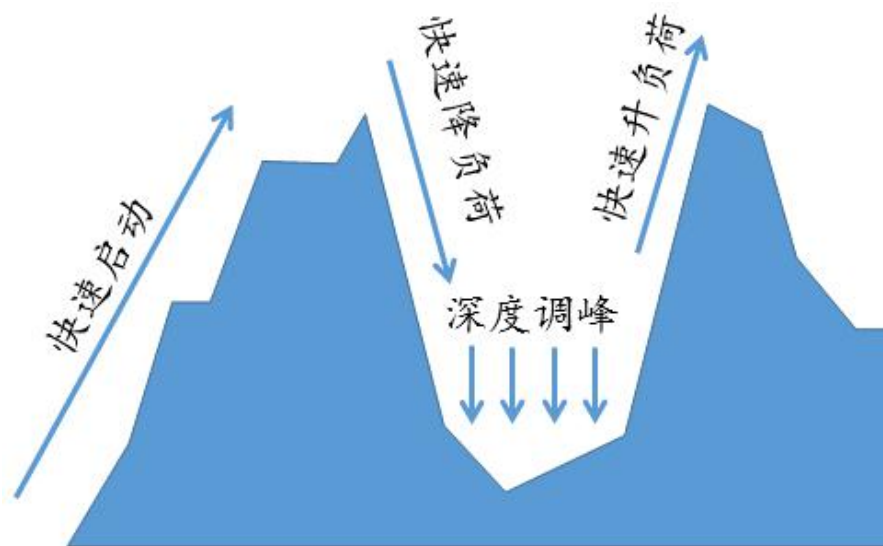
3) 对机组安全性、环保性以及经济性影响显著

一、灵活性改造必要性

1.4 火电机组灵活性发电主要内容

1)首要目标是降低机组最小技术出力；使热电机组增加20%额定容量的调峰能力，最小技术出力达到40%-50%额定容量；纯凝机组增加15%-20%额定容量的调峰能力，最小技术出力达到30%-35%额定容量。部分具备改造条件的电厂预期达到国际先进水平，机组不投油稳燃时纯凝工况最小技术出力达到20-25%。

2)其次是快速负荷响应，目前电网要求AGC机组的调节速度考核指标为1.0%-2.0% Pe/min，希望通过改造达到2.5%-3.0% Pe/min。



运行灵活性

一、灵活性改造必要性

1.5 汽机及其辅机低负荷存在的问题

在负荷低于**40%**时，汽轮机及其辅机设备因为运行工况严重偏离了设计，会存在一些问题，需要研究及解决，主要有：

- ◆ 汽轮机进汽量较小时，蒸汽的做功能力下降，效率下降严重。
- ◆ 低压缸后几级会发生鼓风发热。会引起低压缸和凝汽器的变形，进而导致轴承位置的变化引起轴系振动问题；此外因为转子和汽缸受热不均，会引起胀差问题。
- ◆ 如果低负荷运行时间较长，易造成调速汽门的卡涩。

一、灵活性改造必要性

1.5 汽机及其辅机低负荷存在的问题

- ◆ 机组滑压运行升负荷时，除氧器水箱的水温滞后于压力的升高，致使水的含氧量增大；而减负荷时又会使进入给水泵的水温不能及时降低，易导致给水泵入口发生汽蚀问题。
- ◆ 加热器抽汽压力降低，可能导致疏水不畅。
- ◆ 给水流量的降低会使再循环调门开启以满足给水泵最小流量要求，会造成对调门阀芯的严重冲刷，长期冲刷易造成阀门关闭不严，再循环内漏增大了给水泵耗功、降低了给水泵带负荷能力。
- ◆ 在高真空度和低负荷下，汽缸内外压力差增加，低压缸为双层结构，横向和纵向尺寸大，刚度差出现弹性变形，轴封动静部分可能产生碰磨现象，导致机组振动增加。

一、灵活性改造必要性

1.5 汽机及其辅机低负荷存在的问题

◆ 末级叶片水蚀问题，姚孟电厂国产第一台300MW汽轮机并网运行700h后，揭缸发现末级叶片出汽边背弧侧严重的水冲蚀痕迹，从叶根算起的10—250mm和沿出汽边算起的宽5~7mm的区域里呈粗砂布状。在以后的几次揭缸中，发现水冲蚀日趋严重。到1990年大修时(累计运行约80000h)，水冲蚀区域已扩展成从叶根开始至离叶根40mm宽10mm的宽广范围。水冲蚀区为深1.0-1.7mm的蜂窝状组织，出汽边已穿透，呈锯齿状。经鉴定不能继续使用，需报废换新。

一、灵活性改造必要性

1.5 汽机及其辅机低负荷存在的问题

- ◆ 长期低负荷运行，应进行给水泵适配性分析，调整再循环开启时机和给水泵组最低转速设置，优化给水泵运行方式，保证低负荷工况下给水泵经济安全运行。给水泵替代运行可以考虑：一是启动备用电动泵，二是汽泵汽源采用高压汽源，应进行经济性和可靠性研究。
- ◆ 凝结水泵流量极低时变频运行，可能会出现低频振动问题。应进行凝结水泵适配性分析，优化凝结水泵运行方式，进行针对性的低频振动问题处理。

一、灵活性改造必要性

1.5 汽机及其辅机低负荷存在的问题

◆ 当汽轮机在启动、加热、停机冷却过程中，或在运行中工况变化时，汽缸和转子会产生热膨胀或冷却收缩，由于转子的受热表面积比汽缸大，且转子的质量比对应的汽缸小，蒸汽对转子表面的放热系数较大，因此在相同的条件下，转子的温度变化与汽缸不同步，使得转子与汽缸之间存在膨胀差。

◆ 由于机组胀差较大，该汽轮机组的迷宫式汽封短齿都出现“掉台”（即短齿对不上轴上的凸肩）现象，造成漏汽大增，而这些漏汽又使加热轴胀差进一步增大。

二、低压缸零出力技术

2.1 热电解耦必要性

在冬季，特别是夜间，风力丰富而电网负荷处于低谷时段，供热机组“以热定电”运行方式限制其发电出力调节能力，

随着城市扩张带来供热热源的不足和供热需求的不断增大，城市周边的电厂供热能力提升到了上限，一些距离城市较远的电厂纯凝机组也陆续改造为供热机组，此类机组原先在电网中的定位为主力发电机组，承担电力调峰任务，若要改为以热定电运行将对电力调度运行增加了难度。

形成了电力平衡和热力平衡难以协调的矛盾局面。

二、低压缸零出力技术

2.2 技术简介

- 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。
- 2016年8月在华能临河电厂1号300MW机组上对方案进行了实施，在2017年供热末期进行了试运，各项运行参数安全稳定。
- 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。

二、低压缸零出力技术

2.2 技术简介

- 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。

二、低压缸零出力技术

2.3 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。

二、低压缸零出力技术

2.4 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。



尚海

TPRI 西安热工研究院延吉项目部

二、低压缸零出力技术

国电延吉电厂#2机切缸现场施工图



二、低压缸零出力技术

辽宁东方电厂#1机切缸现场施工图



二、低压缸零出力技术

2.5 改造范围

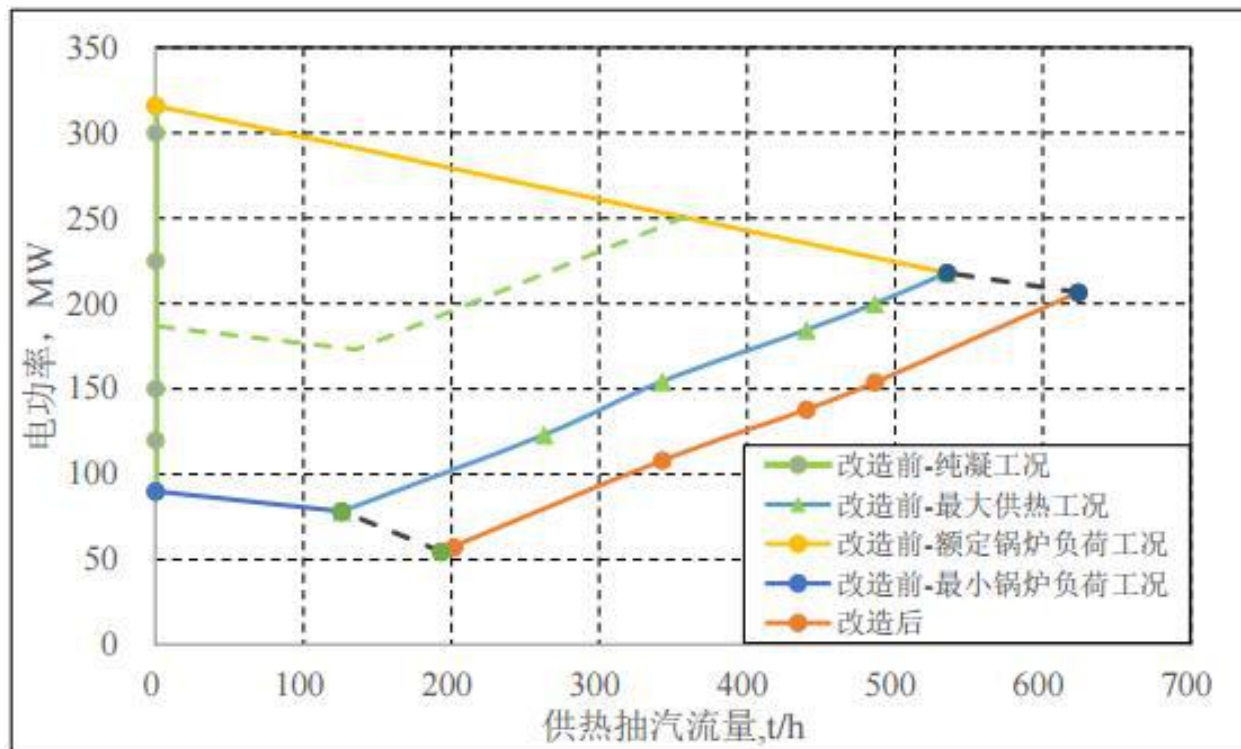
根据低压缸零出力供热技术实现原理和需求，改造总体工作范围如下：

- 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。

二、低压缸零出力技术

2.6 热电特性曲线

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。



二、低压缸零出力技术

2.7 系统适配性

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

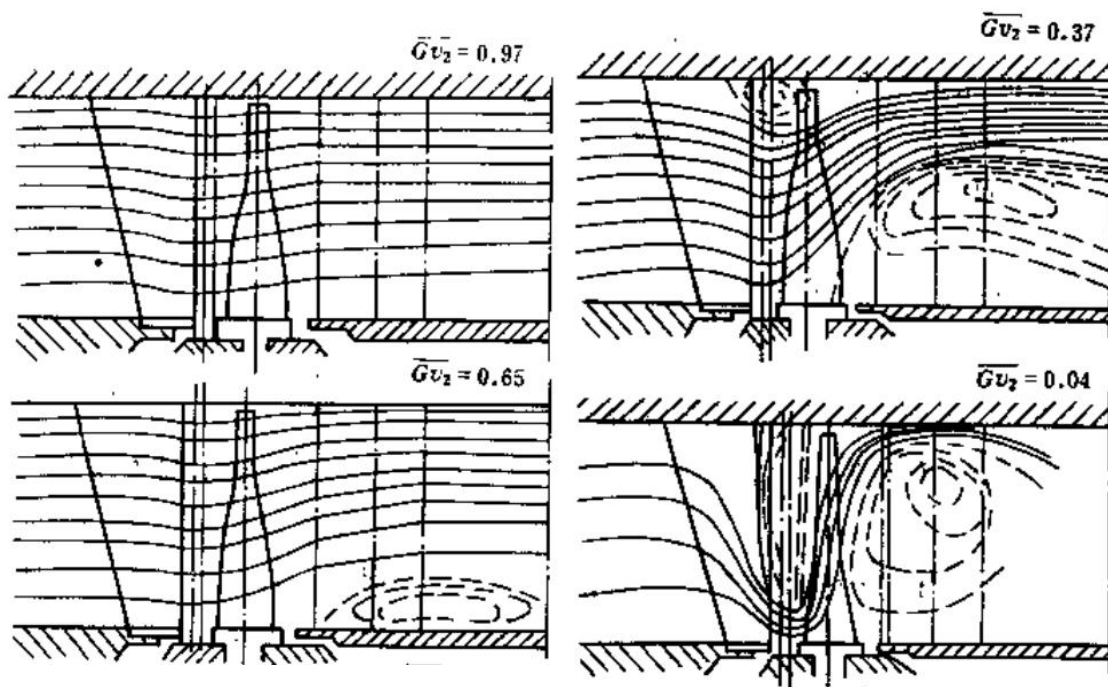
二、低压缸零出力技术

2.8 小容积流量工况概述

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



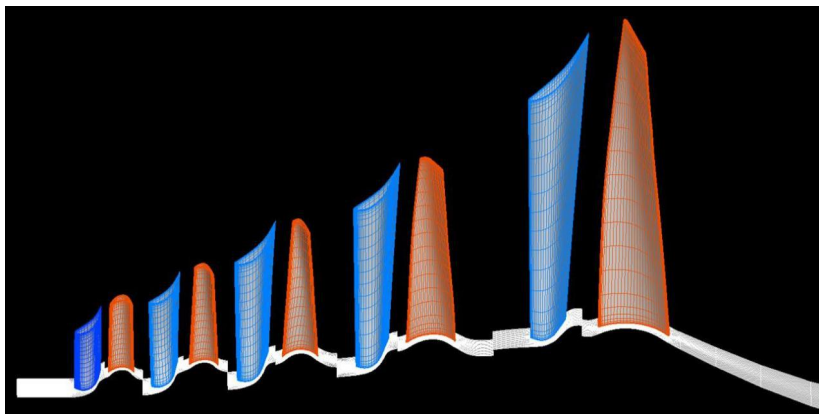
低压缸末两级叶片内流动状态随容积流量变化示意图

二、低压缸零出力技术

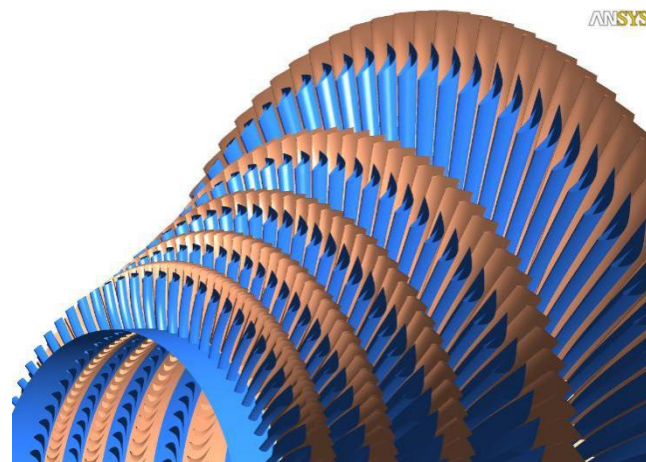
2.9 安全性校核

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



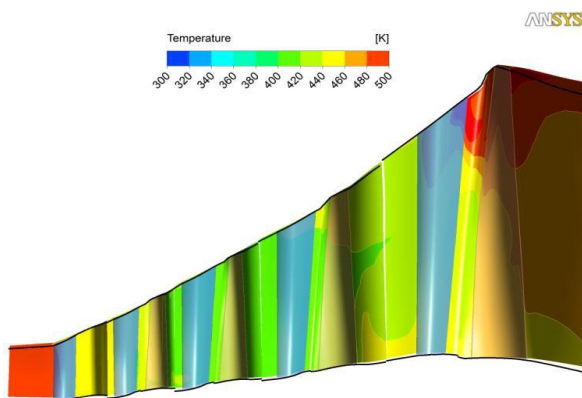
三维整圈 5 级叶片显示

二、低压缸零出力技术

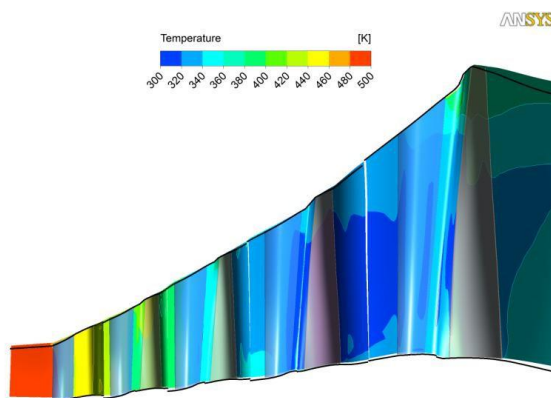
2.9 安全性校核

某机组低压缸长叶片安全性校核结果：

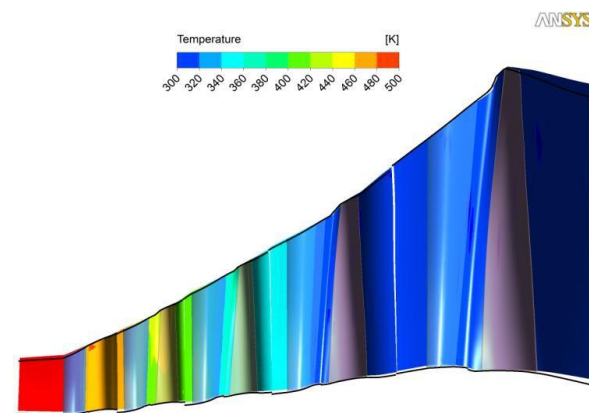
- 1) 随着低压缸进汽流量的减小，在低压缸末两级会逐渐出现鼓风现象，导致低压缸末两级级后温度升高，因此在切缸过程中应密切关注监视、高温区的温度，必要时增加后缸喷水流量。以此避免由于高温引起的汽缸变形，进而引发转静部件中心线不一致而产生的振动问题。
- 2) 在小容积流量工况下末级叶片的最大动应力小于设计工况下的最大动应力，因此，在小容积流量工况下末级叶片的动强度满足制造厂设计规范要求。



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

二、低压缸零出力技术

2.10 特性试验

机组低压缸零出力运行时，低压缸长叶片鼓风情况、机组真空、汽缸差胀、转子轴向位移变化、汽缸上下缸温差、加热器抽汽量、中压缸排汽参数，连通管受力等均可能发生较大变化，且不同机组上述特性各不相同。因此，需通过低压缸零出力特性试验，研究机组在低压缸零出力运行时的相关特性，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。

二、低压缸零出力技术

2.11 投资及工期

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

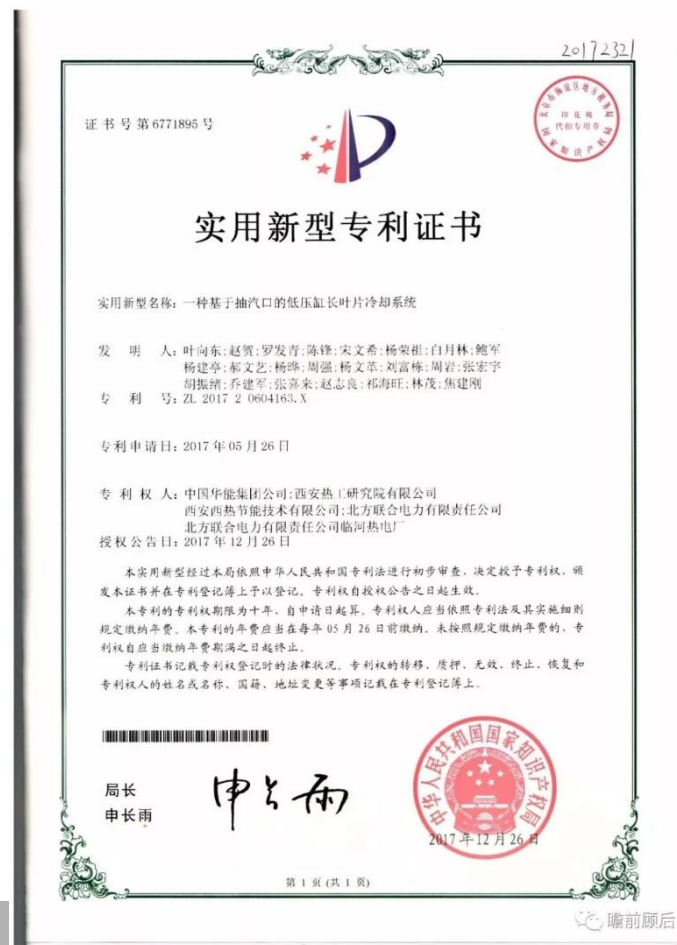
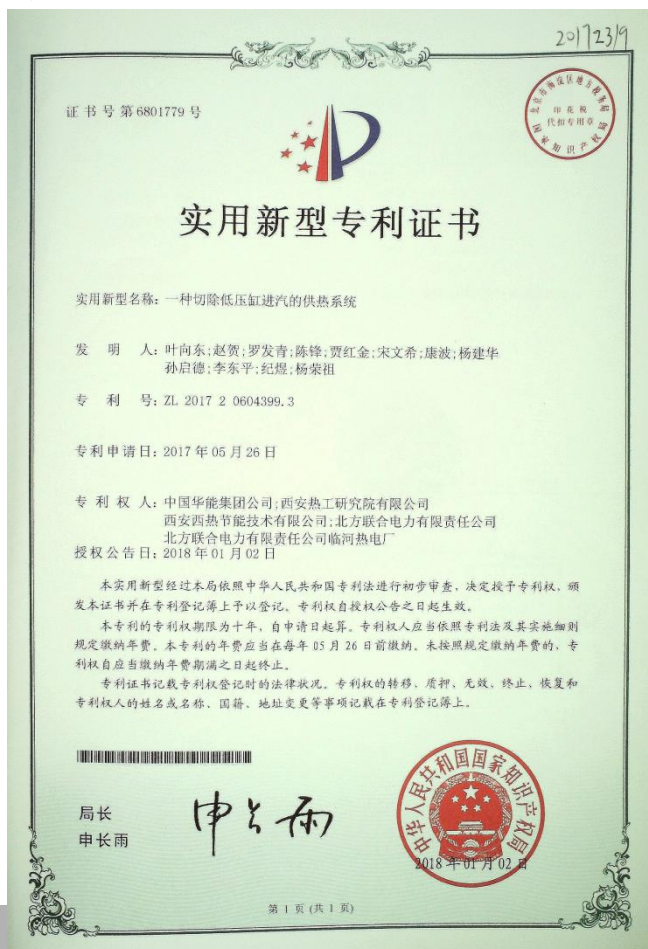
- 增加供热收益
- 降低发电煤耗收益
- 调峰政策奖励收益

改造项目工期

可研：1个月；
订货：3个月；
施工、调试：1个月。

二、低压缸零出力技术

2.12 知识产权



二、低压缸零出力技术

2.13 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。

二、低压缸零出力技术

2.14 叶片动应力试验

在缺少安全性校核资料数据时，应进行汽轮机**叶片动应力试验**。

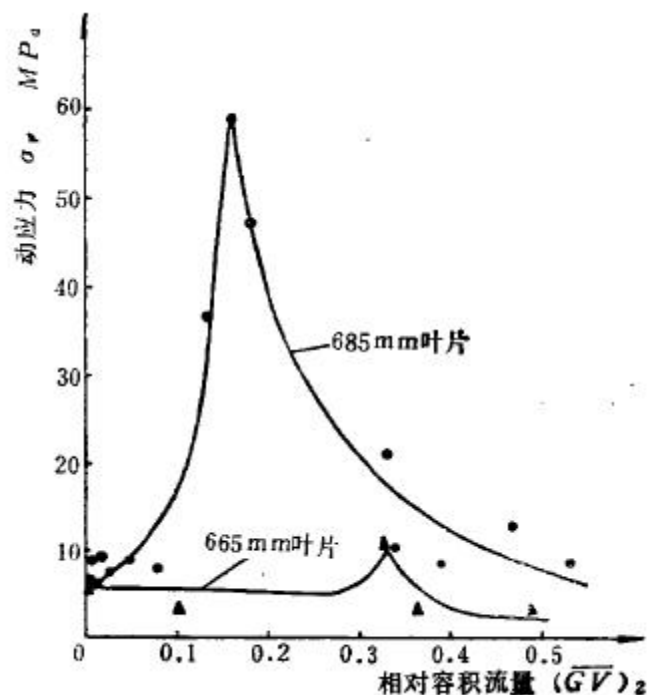
试验采用无线电遥测技术，在叶片上粘贴电阻丝应变片作为传感元件，通过引线与微型发射机相连接。叶片在旋转状态下受到激振时产生振动变形引起应变片阻值的变化，其信号经发射机调制发射，由接收天线环接收，并经高频电缆送至接收机后，由记录仪对试验数据进行记录并分析。

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。

二、低压缸零出力技术

2.15 颤振风险

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。

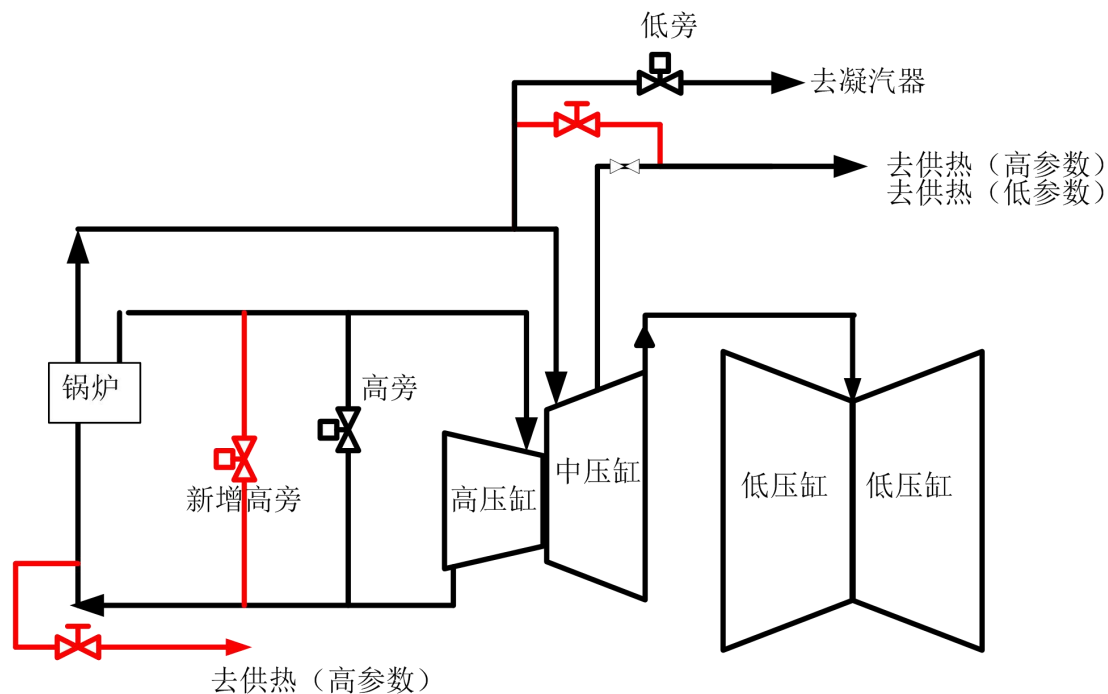
大容量的汽輪機以及比 6000 瓩小的雙缸式三缸式的機組，在無蒸汽方式下運行是不安全的。按照 1946 年 9 月反事故通報第 33 號的規定，禁止這類機組在無蒸汽方式下運行。

二、低压缸零出力技术

2.16 与旁路供热技术耦合

通过高旁系统分流部分主蒸汽，低旁路系统分流再热蒸汽对外供热。

这种方案避免了锅炉再热器超温、汽轮机轴向推力超限等问题。



二、低压缸零出力技术

2.16 与旁路供热技术耦合

某200MW机组低压缸零出力与旁路耦合对比

	项目	单位	原设计额定 供热工况	低压缸零 出力方案	低压缸零出力 耦合两级旁路方 案
电负荷调峰 能力对比	电功率	MW	130	96	72
	供热能力	MW	225	225	225
	调峰能力增加	MW		34	58
供热增容 能力对比	电功率		130	120	88
	供热能力		225	275	378
	供热能力增加			50	153

二、低压缸零出力技术

2.17 结论

低压缸零技术可大幅提高火电机组深度调峰能力、供热能力和供热经济性。低压缸零出力技术是对供热机组现有运行模式的重大突破，具有投资小，收益高、维护简单的特点，经济、社会、环保效益和市场推广价值显著。

低压缸零出力技术是对汽轮机原设计的创新型突破，对于不同类型的机组，受机组型式、设计和结构特点、运行条件等方面的限制，低压缸零出力的运行特性也不同。因此，低压缸零出力改造不宜简单复制。

三、下一步工作方向

- 做好低压缸零出力改造的方案优化、保护联锁完善等工作，为了确保低压缸零出力运行长期安全可控，做好末级叶片防磨喷涂养护工作，每年供热期结束应对末两级叶片进行检查探伤，并优化后缸喷水方式，防范后缸喷水对末级叶片潜在侵蚀。
- 低压缸零出力改造后，要充分考虑机组零出力运行方式下辅机系统(如抽真空系统、循环水系统、凝结水系统等)和供热系统的可靠运行及节能经济运行问题，并制订相应的优化运行措施及适配性改造。
- 在运行管理、检修管理等方面，认真总结共性问题，将低压缸零出力运行及安全检查规范化、常态化、制度化、标准化，纳入到机组运行及检修规程、技术监督等电力生产管理体系中。

*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!