



EPTCHINA.CN

中国电力科技网

热电联产远距离低能耗集中供热技术研讨会



黄坤

东方汽轮机有限公司电站服务事业部技术服务高级工程师。长期从事汽轮机主机设备的设计、研发工作；近些年参与300MW~600MW汽轮机节能通流改造以及供热改造有关的技术工作。取得实用新型专利授权2项，获省部级科研成果奖1项。

东方供热改造及灵活性改造技术

CEEC 中国能建

华源泰盟
HYTM

2018年3月20-22日 中国·太原



东方电气集团东方汽轮机有限公司

东方供热改造及灵活性改造技术

东方汽轮机有限公司
电站服务事业部

2018/3/21



目 录

1 常规供热改造技术

2 高背压供热改造技术

3 机组灵活性改造技术



东方电气集团东方汽轮机有限公司

1

常规供热改造技术

常规供热改造技术

1

强大的供热
机型研发能力

2

丰富的抽汽
机型及投运经验

3

抽汽供热
调节措施多样

4

高背压
改造技术先进

东汽关于老机组供热改造的几种方案简述

方 案	1	2	3	4	5		
调节手段	蝶阀	旋转隔板	座缸阀	压力 匹配器	高背压供热改造		
					光转子	双转子	单转子
适用压力范围 (MPa)	0.25~ 1.0	1.0 ~ 1.5	2.0 ~ 4.0	1.0 ~ 4.0	采暖供热用		
实施位置	连通管	中压缸	中压缸	无限制	低压缸		
典型案例	菏泽 改造	西固 改造	惠州 改造	恒运 改造	包一 改造	金桥 改造	古交 改造

供热改造分类

一般常规供热参数大致分为以下几档：

- 1) 4.0MPa等级，400℃以上；
- 2) 1.5-2.5MPa，300-400℃；
- 3) 1.0MPa，350℃以下；
- 4) 0.3-0.6MPa，350℃以下。

热电联产机组供热通常分为：

- 1) 可调整抽汽（汽轮机内部调节供热参数）
- 2) 非调整抽汽（汽轮机外部调节供热参数）
- 3) 高背压循环水直接供热

非调整抽汽

非调整抽汽指在汽轮机本体或主汽、再热冷段、热段管道、连通管相应的位置打孔抽汽，其供热蒸汽参数随机组电负荷变化，汽轮机本身没有调节能力，需在外部减温减压后满足热用户的要求。

供热参数	抽汽位置
4.0MPa等级	过热器出口
1.5-2.5MPa	再热热段或冷段
1.0MPa	再热冷段或连通管
0.3-0.6MPa	中低压连通管



东方电气集团东方汽轮机有限公司

- 结构简单，可根据热用户的要求确定打孔的位置，设计灵活。抽汽口根据供热参数要求进行设计，在抽汽管道上增设逆止阀、快关阀、安全阀、关断阀等阀门以便满足供热工况运行的要求。

- 改造范围

需对汽缸进行补充加工抽汽口，焊接抽汽口接管。另外由于供热抽汽后，通流级段各级焓降、压差、轮周功均有变化，可能会造成部分通流级强度超限。必须对该级隔板和动叶片进行计算，决定是否更换为新的部件。

- 改造注意要点

推力及推力矩对汽缸稳定性的影响

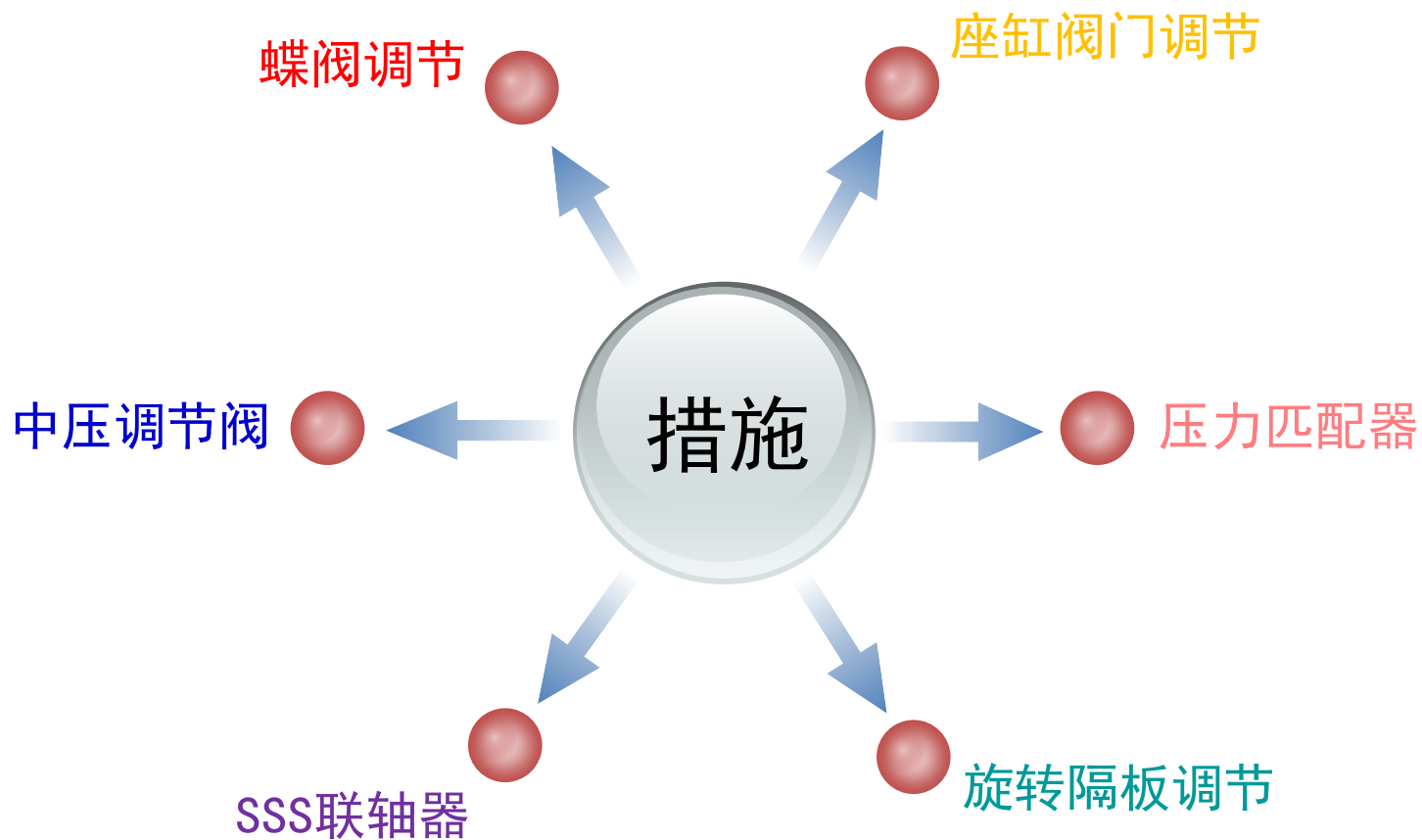
供热管道的布置

回热系统的影响

汽轮机轴向推力的影响

汽轮机通流部件强度

可调节供热抽汽

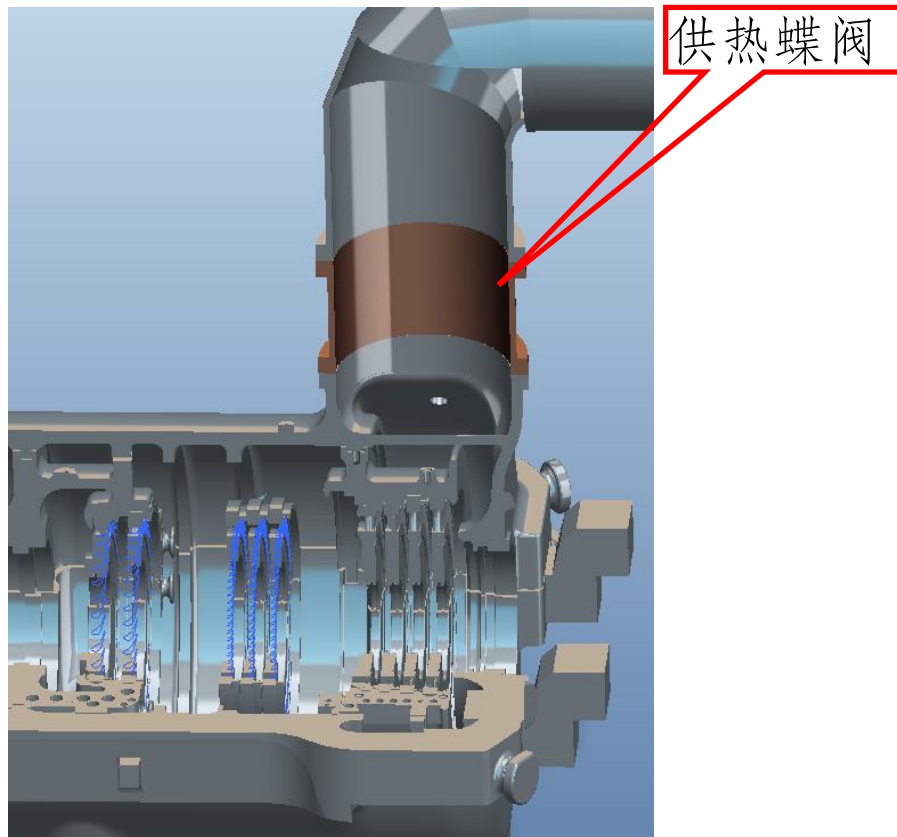


① 连通管蝶阀调节

➤ 用于供热抽汽点设在中排的方案，可满足0.5MPa采暖、1.0MPa工业左右的抽汽，业绩最为广泛

➤ 蝶阀供热特点：

布置在中压排汽口连通管上；
供热蝶阀控制油采用高压抗燃油，
双油动机系统，开启或关闭都具有较大的驱动力矩；油动机布置在蝶阀阀壳上，对汽缸不产生附加的翻倒力矩。



● 从连通管抽汽供热

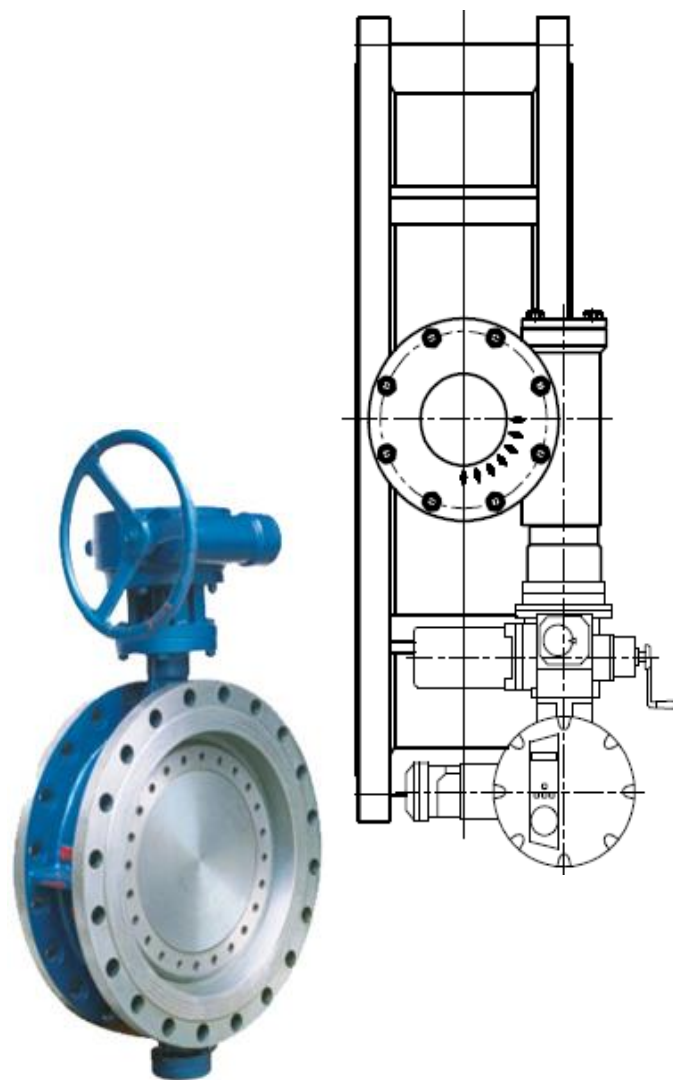
抽汽口设置在中低压联通管，在中低压联通管上增设供热蝶阀（液动/电动）；

抽汽管道上增设逆止阀、快关阀、安全阀、关断阀等阀门

● 改造范围

连通管上增设抽汽三通/四通，加装供热蝶阀。

在供热抽汽时，中压末两级级间焓降、压差增加较大，轮周功增加较多，因此，需对中压末两级强度进行校核，**故可能对中压末两级隔板和动叶进行重新设计更换为新的部件。**



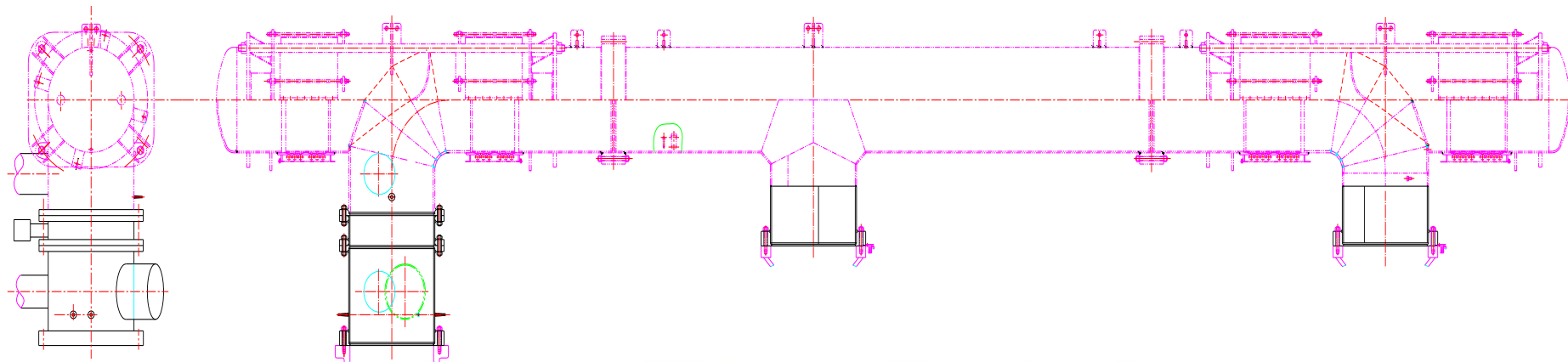
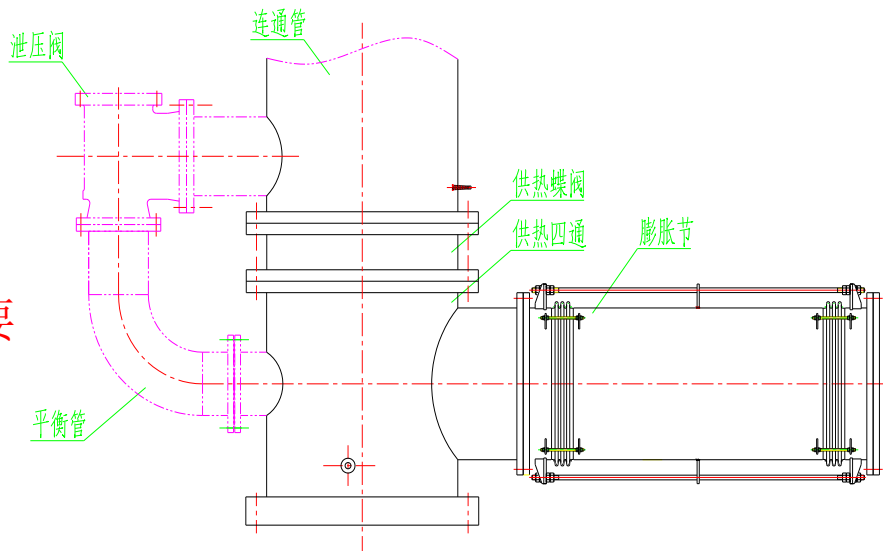
从连通管抽汽的优缺点

优点：

I 结构简单，对本体通流不需要做大的改造；

II 供热抽汽量大，可满足大供热量用户要求；

缺点： 抽汽参数受到中压排汽参数的限制；

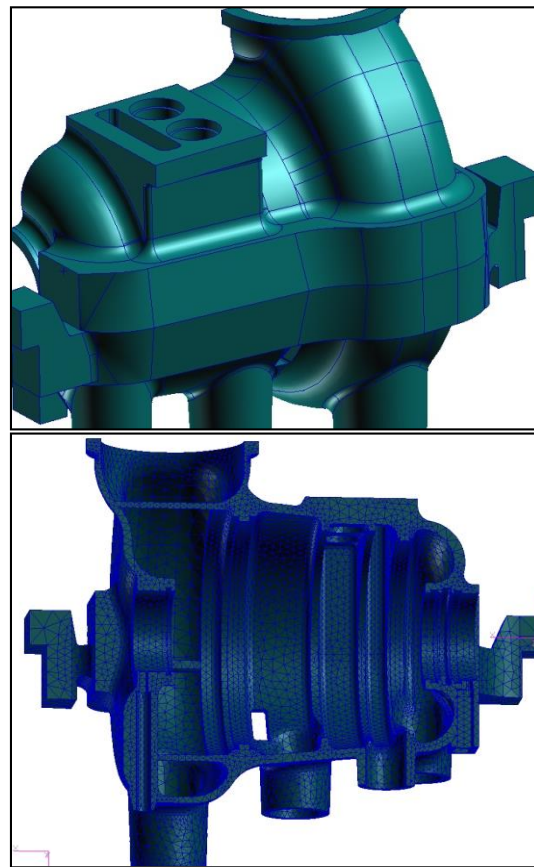
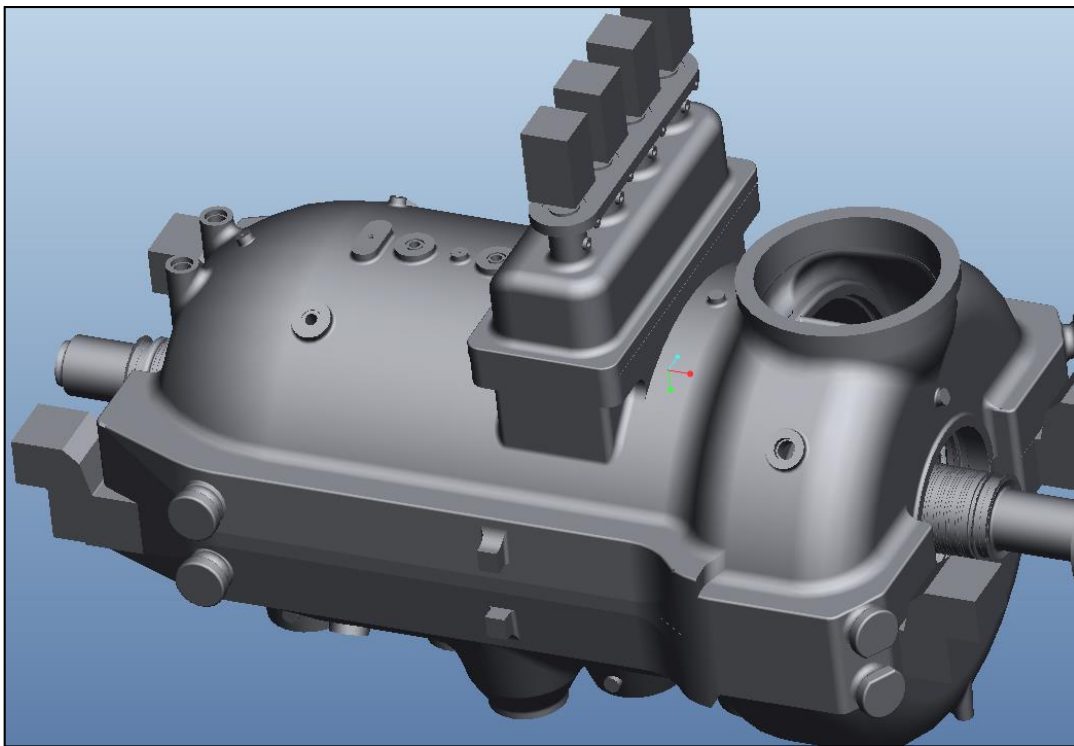




东方电气集团东方汽轮机有限公司



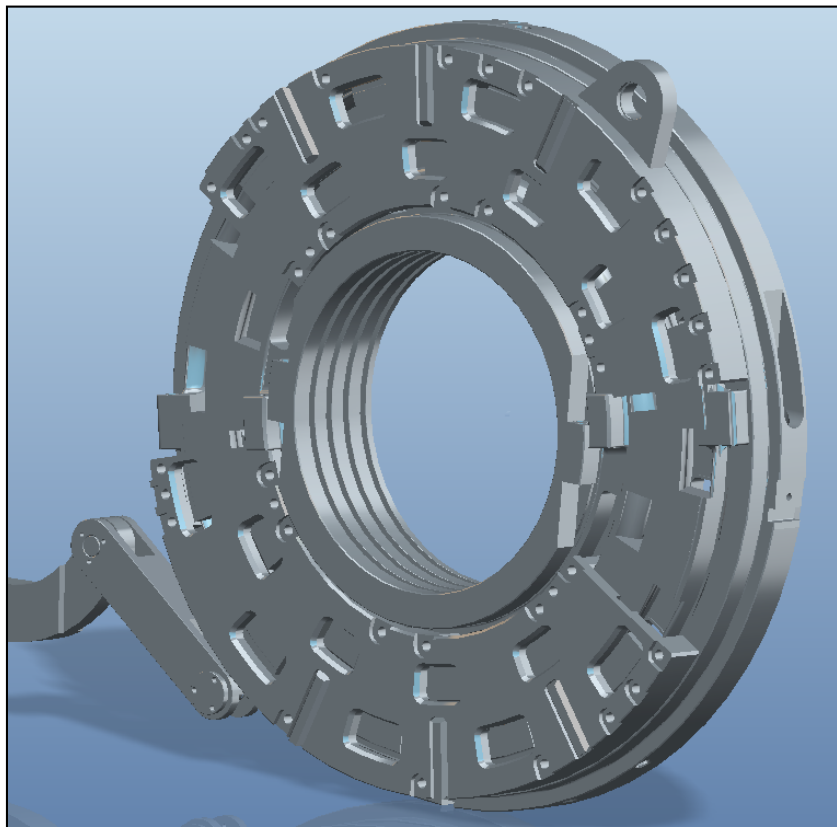
② 座缸阀门调节



➤座缸阀供热特点：中压座缸供热调节阀门设计无预启阀结构；调节性能好，节流损失小。

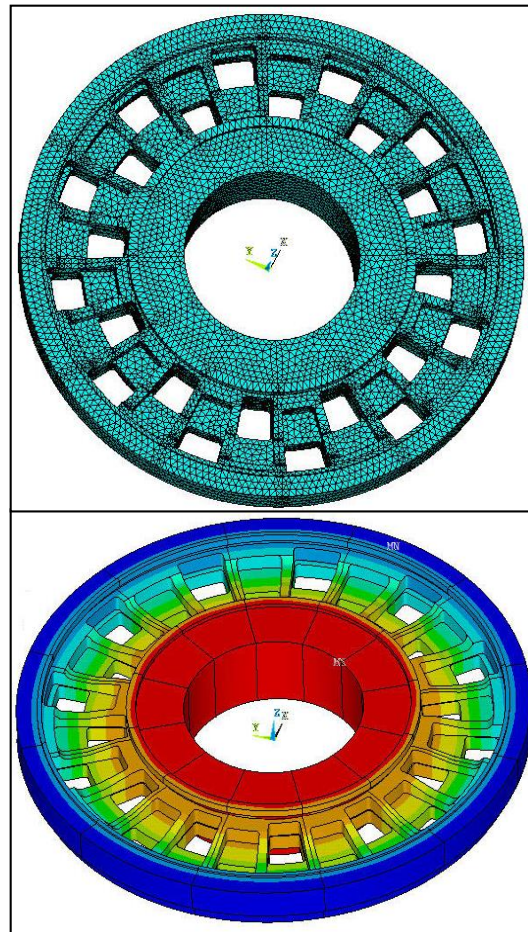
➤用于供热压力2.0~4.0MPa可调抽汽方案。

③ 旋转隔板调节



➤ 旋转隔板供热特点：

回转直径大，工作温度高(最高设计温度为 500°C)

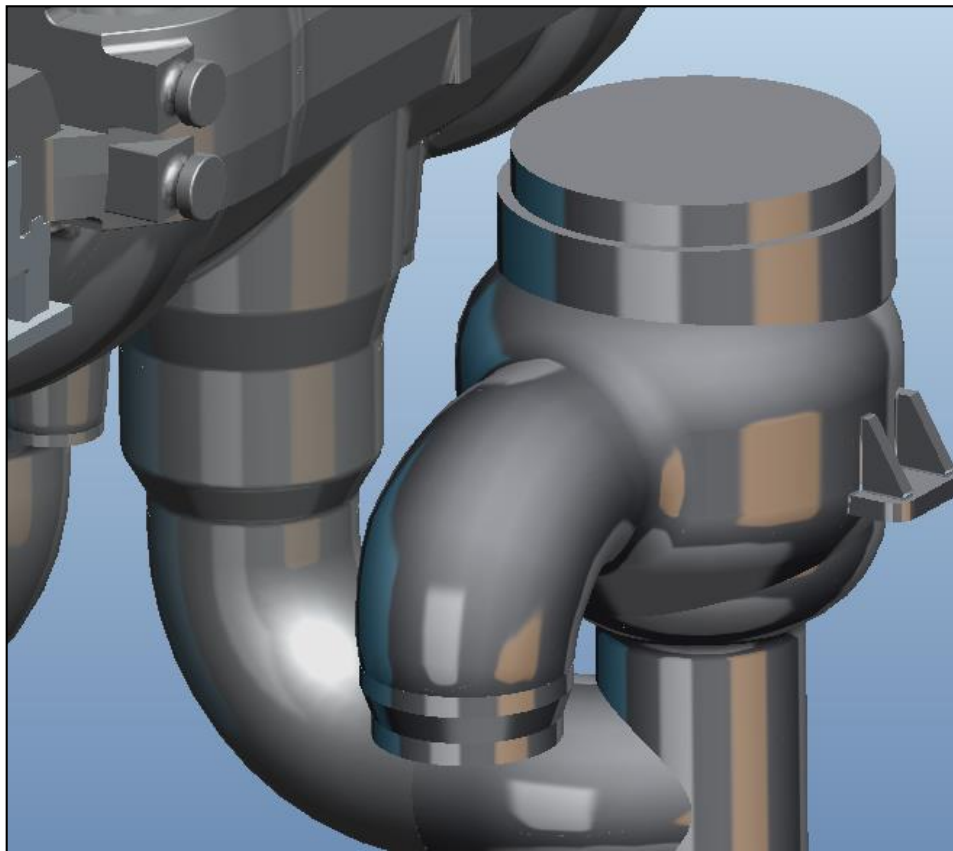


➤ 用于供热压力 $1.0\sim 2.0\text{MPa}$ 可调抽汽方案

④ 中压调节阀

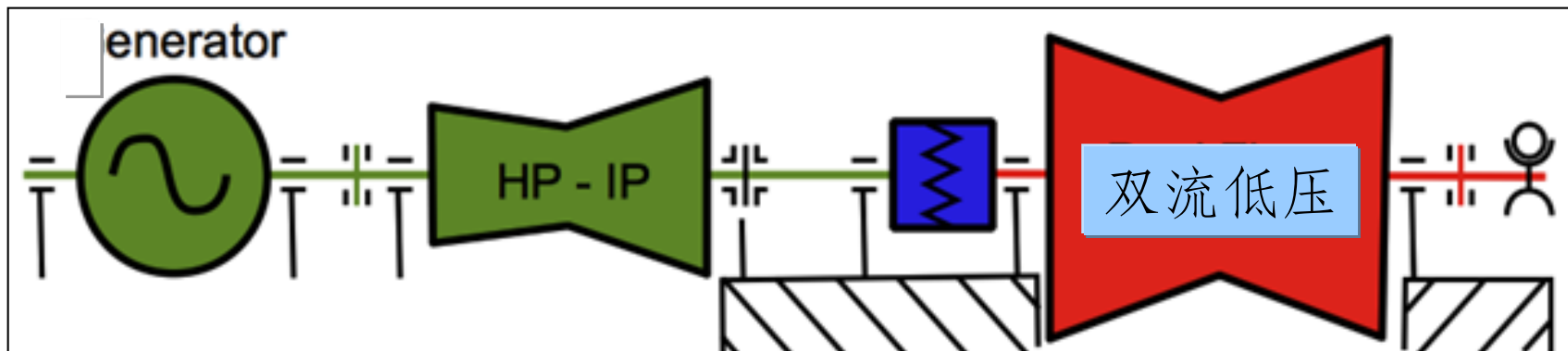
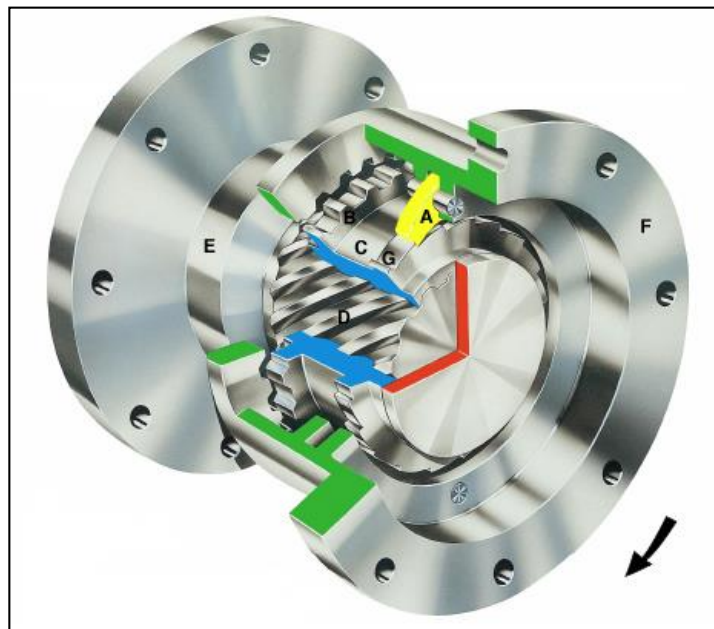
➤ 用于供热压力3.5~4.5MPa再热热段、冷段可调抽汽方案

➤ 采用中调门调节抽汽参数,已成为我公司解决大型热电联产机组实现高温高压工业抽汽参数的成熟方案。



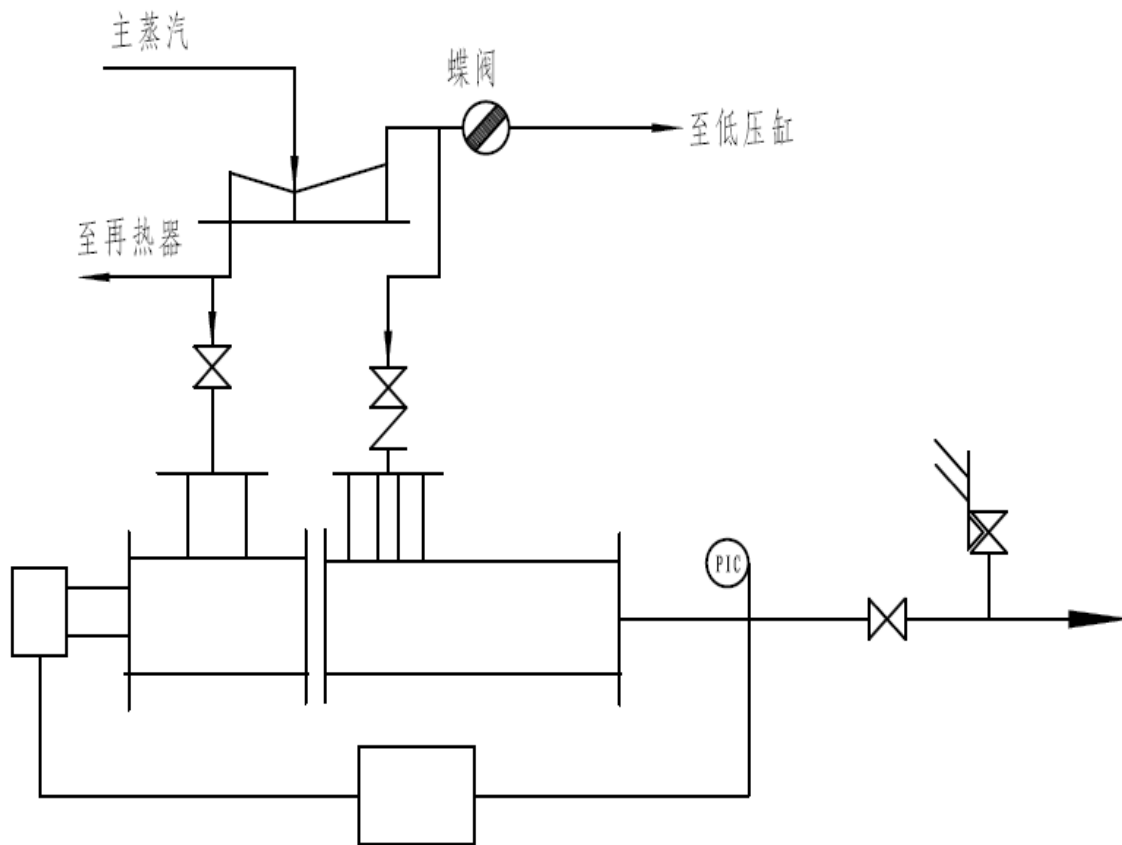
⑤ SSS联轴器

➤可以实现中压缸转子与低压缸转子自动脱开，转为背压机运行，使机组供热流量达到最大。已应用于高碑店联合循环机组。



⑥ 压力匹配器

➤ 将高于供汽压力（一般从再热冷段或热段非可调抽汽）和低于供汽压力（一般从中低压连通管加调整碟阀可调抽汽）的两种蒸汽混合，满足供汽压力要求。供热参数可满足1.0-2.0MPa



供热改造方案推荐

在以上方案中，可调抽汽中旋转隔板和座缸阀调节改造范围大、成本高，施工难度较大，供热改造方案的高中压模块（转子、隔板、动叶片、内外缸等）全部需要改造，因此不推荐采用该供热方案。连通管蝶阀、中联阀调节及压力匹配器方式运用较多。

	~4.0MPa	1.5-2.5MPa	~1.0MPa	0.3-0.6MPa
连通管供热改造	×	×	√	√
压力匹配器供热改造	×	√	√	×
中联阀	√	×	×	×



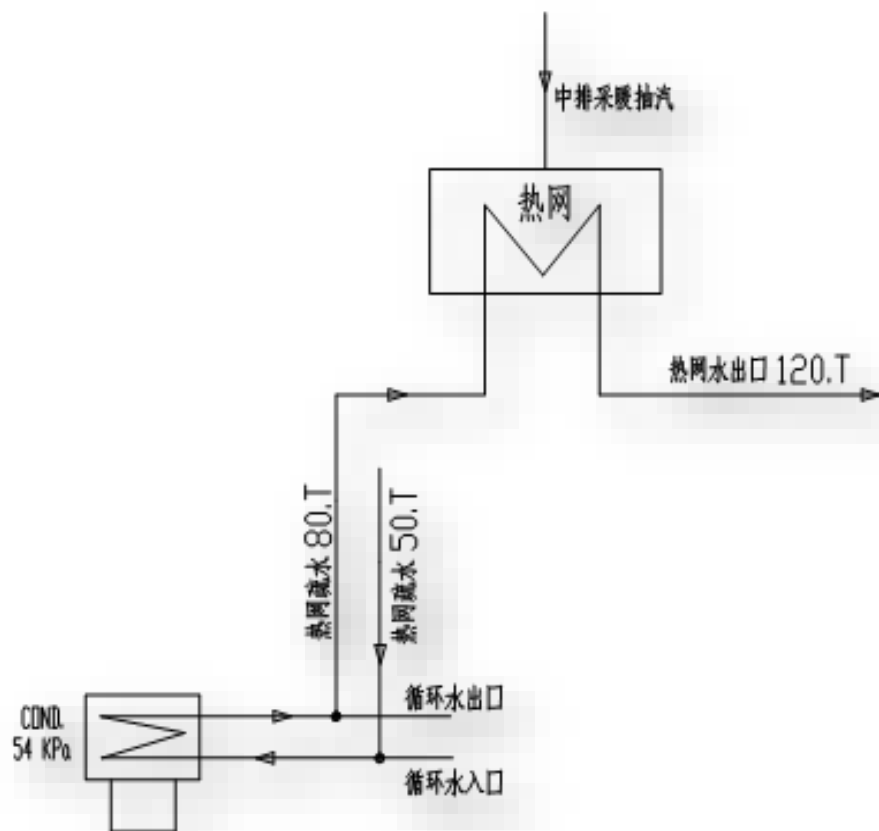
东方电气集团东方汽轮机有限公司

2

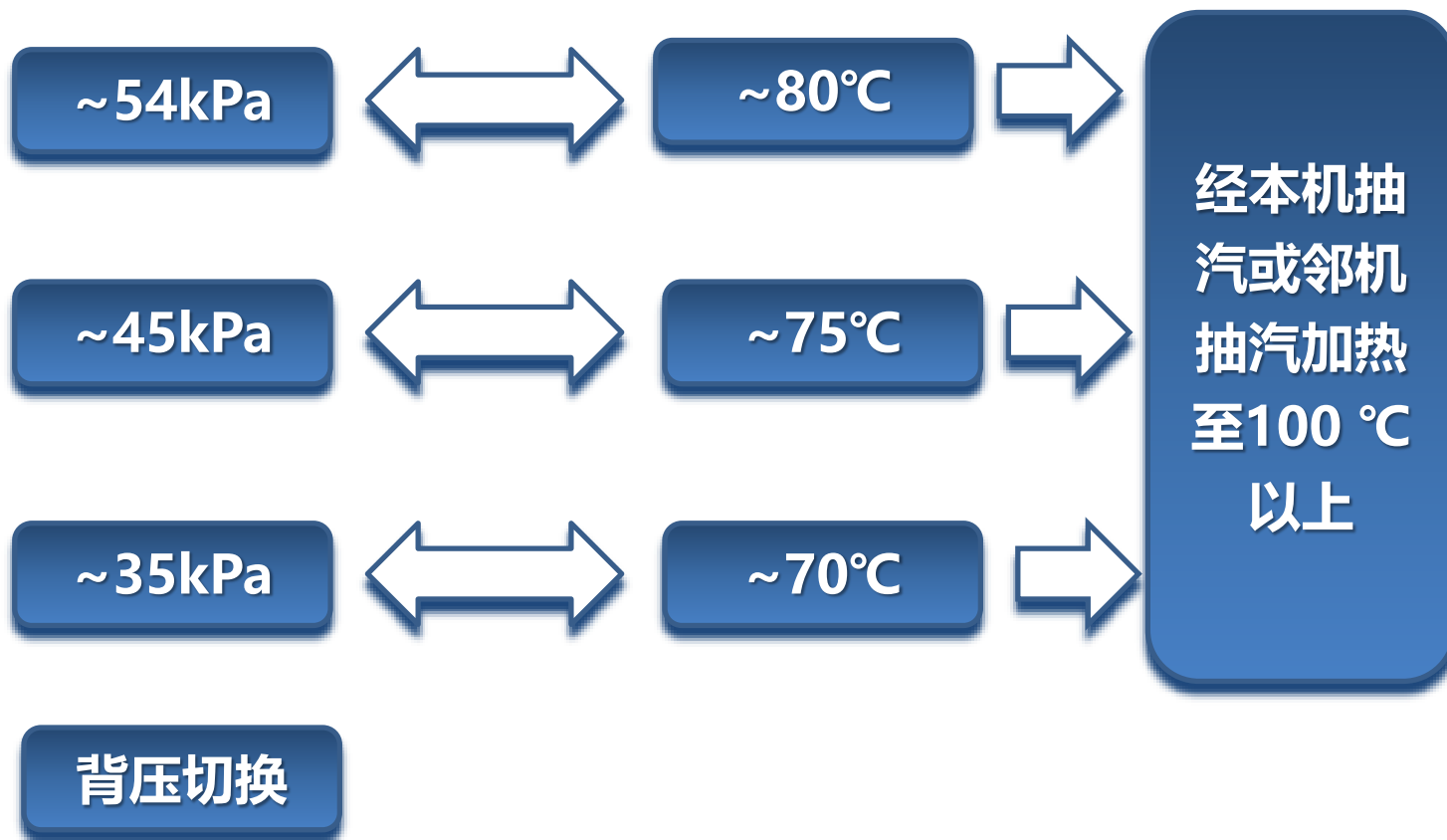
高背压供热改造技术

☆ 高背压机组概念

- ❑ 汽轮机排汽压力为 $\sim 54\text{kPa}$;
- ❑ 凝汽器入口的循环水切换为热网回水, 利用汽轮机排汽加热热网回水至一定温度对外供热 ;
- ❑ 初末寒期, 通过调节机组负荷来满足外网热负荷要求 ;
- ❑ 极寒期, 在高背压机组不能满足外网热负荷要求的情况下, 利用本机或邻机采暖抽汽满足外网热负荷要求。

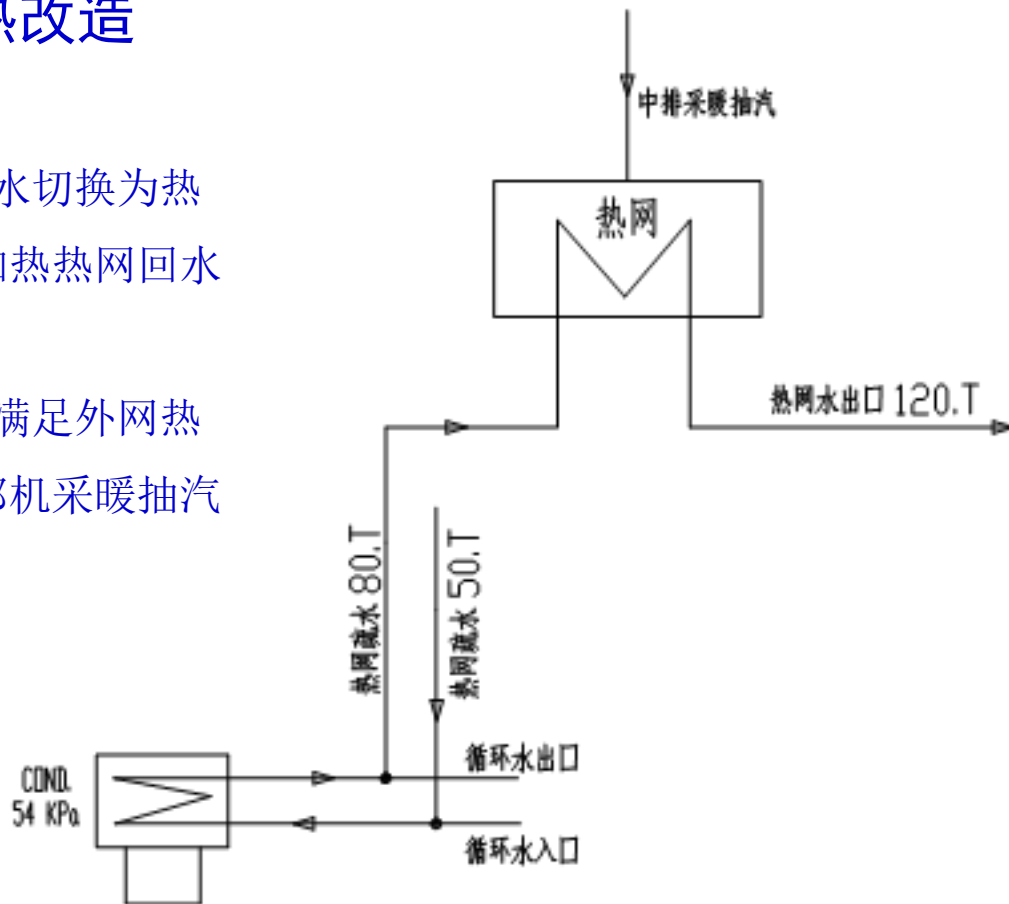


☆ 高背压改造的参数选择

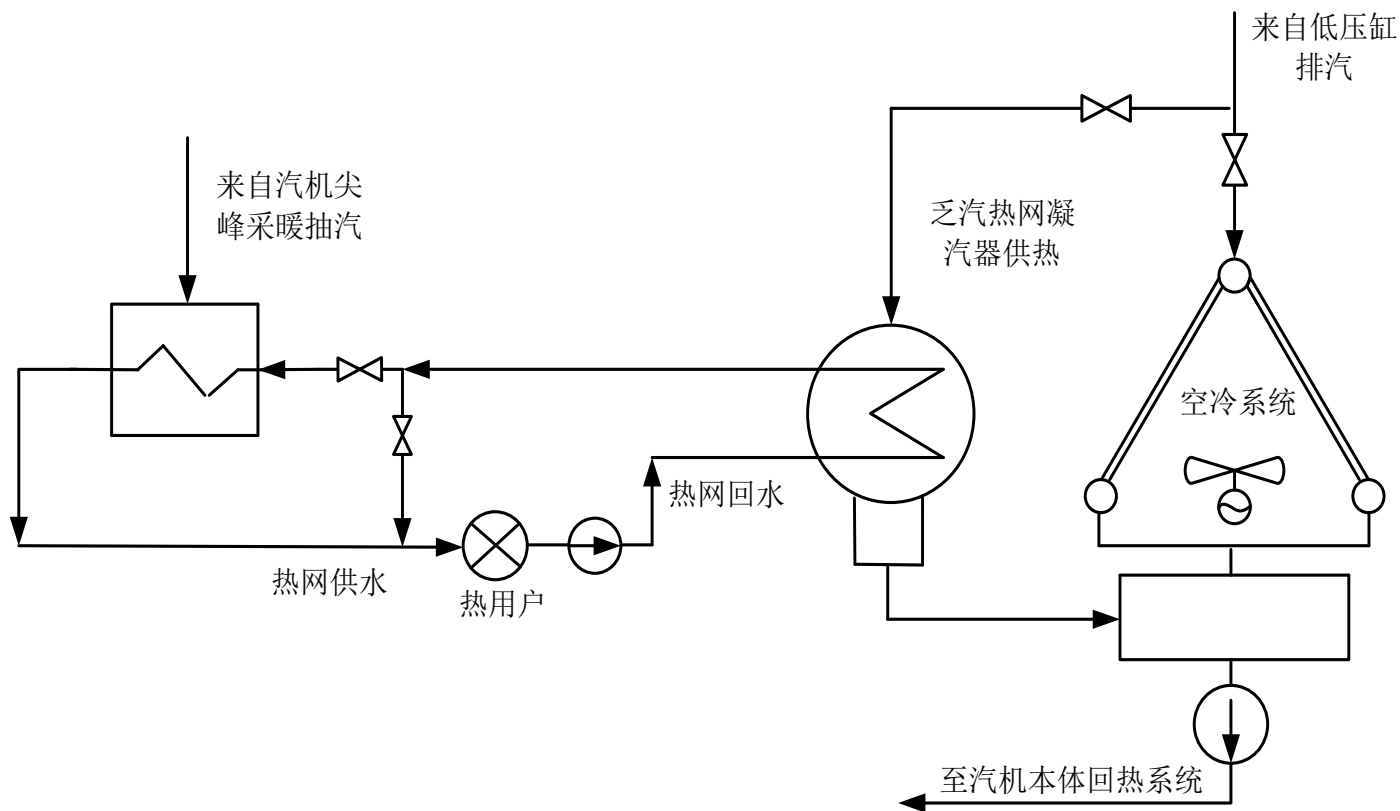


高背压循环水供热改造

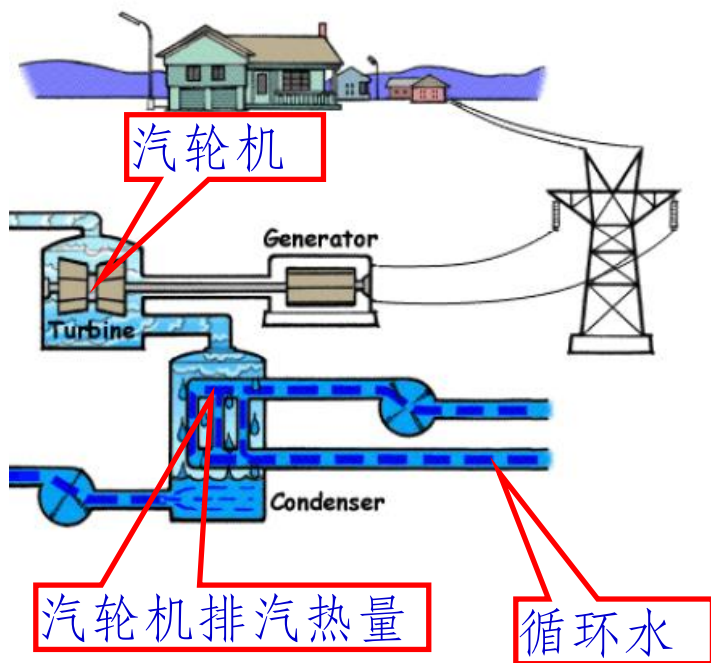
- 凝汽器入口的循环水切换为热网回水，利用汽轮机排汽加热热网回水至80℃ 对外供热；
- 在高背压机组不能满足外网热负荷要求的情况下，利用邻机采暖抽汽满足外网热负荷要求。



空冷机组高背压循环水供热改造示意图



高背压机组的优势



0冷源损失



- 和常规供热机组相比，供热流量最大；
- 和低压光轴方案相比，发电机功率最大；
- 高背压改造可实现0冷源损失。

高背压循环水供热优点:

- 与常规供热机组相比，供热面积大
- 以热定电，热电负荷双赢
- 0冷源损失，节能效果显著

高背压机组技术



1 低压双转子技术

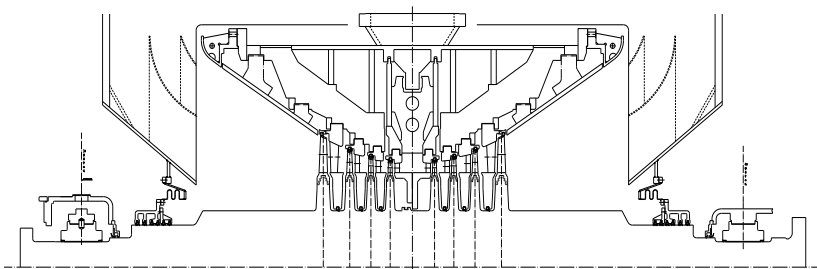


2 低压光转子技术

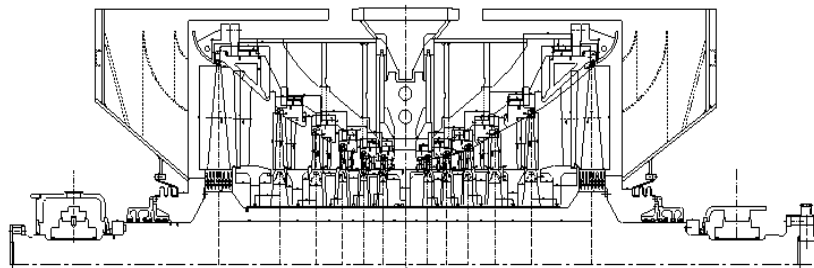


3 低压单转子技术

★ 双转子方案

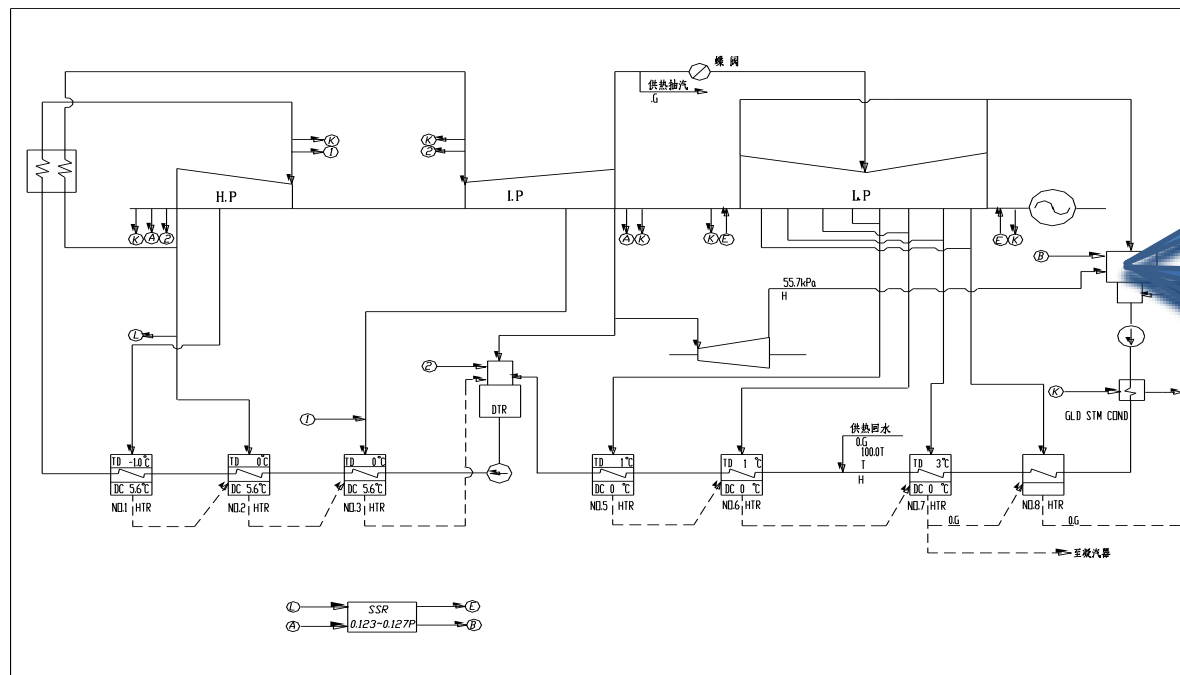


采暖期



非采暖期

- 旧低压转子返厂，更换叶片，补充加工为高背压转子（采暖期），纯凝期采用新供的转子。
- 新供高背压转子，纯凝恢复原样。
- 更换低压内缸、导流环、喷水系统、端汽封、联轴器螺栓（采暖期与非采暖期共用）。



~54kPa

~45kPa

~35kPa

背压切换

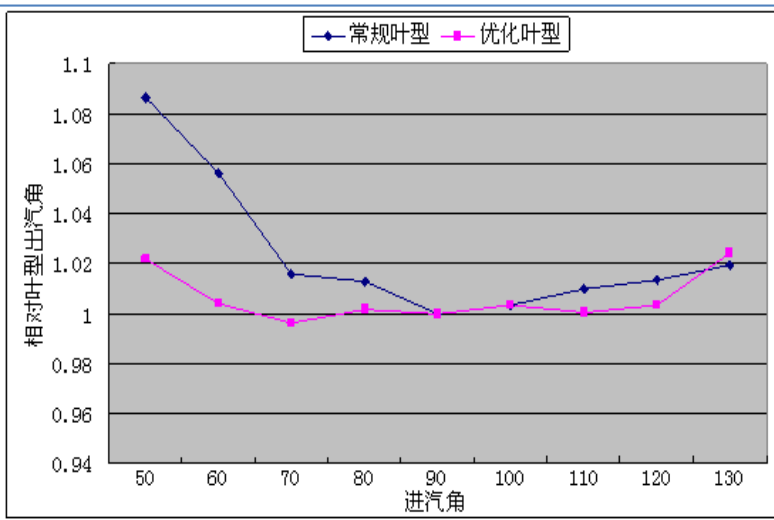
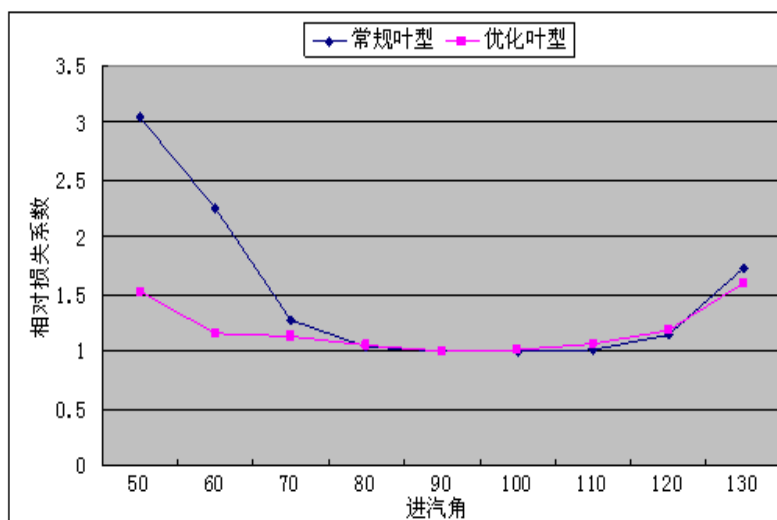
双
转
子
技
术

- ❑ 非采暖期采用高效纯凝转子，可提高机组低压缸效率2%以上；
- ❑ 采暖期采用高背压转子；
- ❑ 采暖期机组电负荷范围 50% THA~85% THA。

☆ 单转子方案

东汽针对空冷机组特点，自主开发出即可以适用于高背压采暖期又可以适用于非采暖期纯凝工况的低压末级叶片；

高效宽负荷叶型研发时，不只关注额定工况下的经济性，同时兼顾部分负荷下的机组性能。通过CFD数值分析及试验研究，研发对宽适应性更好的新叶型。



常规叶型与新叶型能量损失随进汽角变化的试验曲线

☆ 低压缸单转子优势

- ◆ 彻底消除了低压缸双转子方案中旧低压转子如检查存在缺陷而不能满足项目需求的隐患；
- ◆ 低压末级动叶片采用先进的叶型及叶根技术，可同时满足高背压工况和纯凝工况的安全性要求，并具有较高的经济性；
- ◆ 减少了停机次数；
- ◆ 不需要例行揭缸更换低压转子，减少了电厂每年两次不必要的揭低压缸施工；
- ◆ 不需要更换低压转子后，正常情况下，机组每年可多50天(低压转子每更换1次工期按25天计算)的运行时间；
- ◆ 减少了因低压缸揭缸而产生的易损件损耗；
- ◆ 机组在供热工况的供热能力及经济性达到最优水平；
- ◆ 新的低压通流提高了机组在部分负荷(主要是75%以下负荷)工况的经济性。

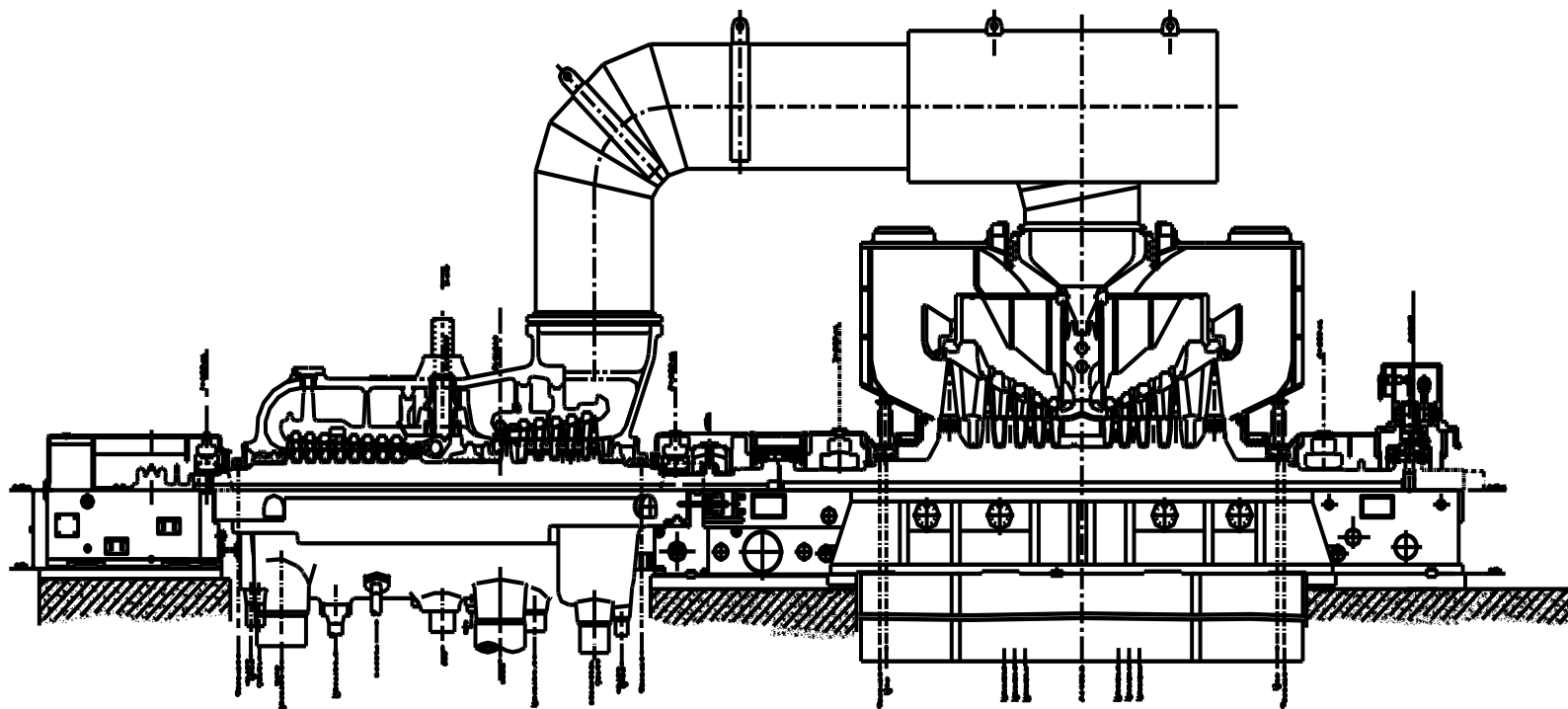


东方电气
DONGFANG ELECTRIC

东方电气集团东方汽轮机有限公司



古交电厂D300Q机组概况



高压缸：1调节级+8
压力级
中压缸：6压力级
低压缸：2×5压力级

给水泵拖动方式：3×50%B-MCR电
泵
末级动叶片高度：661mm
末级动叶片环形排汽面积：
 $2 \times 4.70\text{m}^2$



东方电气集团东方汽轮机有限公司



古交电厂D300Q机组改造原则

蒸汽参数不变，回热系统影响很小

机组外形尺寸不变，旋转方向不变

主汽门、调门现有位置不变，轴承座安装位置不变

转子间的联接方式和位置不变

机组的基础不动，对基础负荷影响很小

方便检修，快速切换



东方电气集团东方汽轮机有限公司

☆ 古交电厂D300Q机组改造方案

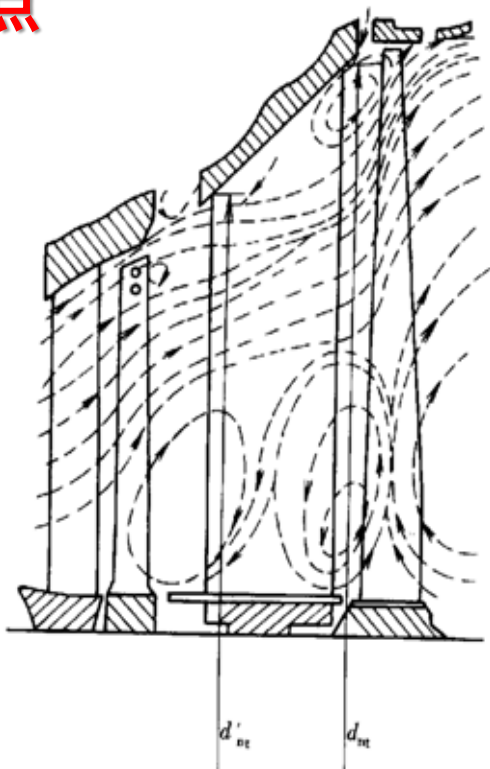
单转子方案也即一次改造成功后，该通流适用于采暖期及非采暖期。非大修期不揭缸运行。该方案新设计末级叶片，整个低压通流全新设计。

主机改造范围主要包括：低压转子、动叶片、隔板、内缸、进汽室、进汽短管、排汽导流环以及减温水管和喷嘴、对轮螺栓等。

辅机改造范围主要包括：高背压凝汽器、轴封加热器增大面积、凝结水管道、低加疏水改造。

☆ 技术特点、难点

●小容积流量时叶片的技术难点



工况定义

- 在容积流量下降过程中，末级流动出现负攻角，在叶片压力面上产生附面层的分离，在叶根处产生扩压流动且形成脱流。把动叶根部开始出现脱流及其后容积流量更小的工况称为级的小容积流量工况。
- 随着容积流量的减小，级的效率变坏。在某一小的容积流量下，级的轮周功率等于零，汽轮机的级不对外做功，而且还要消耗轴上机械功的工况称为鼓风工况，也称耗能工况或压气机工况。

脱流的负面影响

❑ 鼓风工况下对通流部分的加热

➤ 单缸凝汽式汽轮机在空载工况下，将只有调节级的喷嘴有蒸汽膨胀做功，其余各级都在接近于排汽压力的压力下空转。凡处在空转下的级都将受到加热。

❑ 末级动叶根部出口边的水蚀

➤ 小容积流量工况下，末级叶根汽流倒流带入的水滴将对动叶出口边背弧产生侵蚀。这种侵蚀使应力水平已经很高的末级叶片强度被削弱，增加了不安全因素。

❑ 诱发颤振

➤ 小容积流量工况下，末级动叶进口大负攻角引起大尺度分离诱导产生自激振动，导致动应力水平突增。

防范措施

- 通流设计时，采用较高的根部反动度，增加动叶的压力梯度，延缓脱流的发生。
- 为了降低末级和排汽缸的温度，可在末级后装设喷水冷却装置。
- 采用叶片颤振设计法，使总阻尼 $\delta_{\text{总}} = \delta_{\text{机械}} + \delta_{\text{气动}} > 0$ 。

防颤振措施

□ 增加机械阻尼

- 用衰减性大、耐水蚀的材料；
- 围带成圈保证大的结构阻尼。

□ 增加气动阻尼

- 增加叶片弦长 B ；
- 增大刚性，采用外形粗壮的叶型，增高叶片自由振动频率；
- 减小大负攻角和汽流大尺度分离，用攻角适应性好的大头叶型。



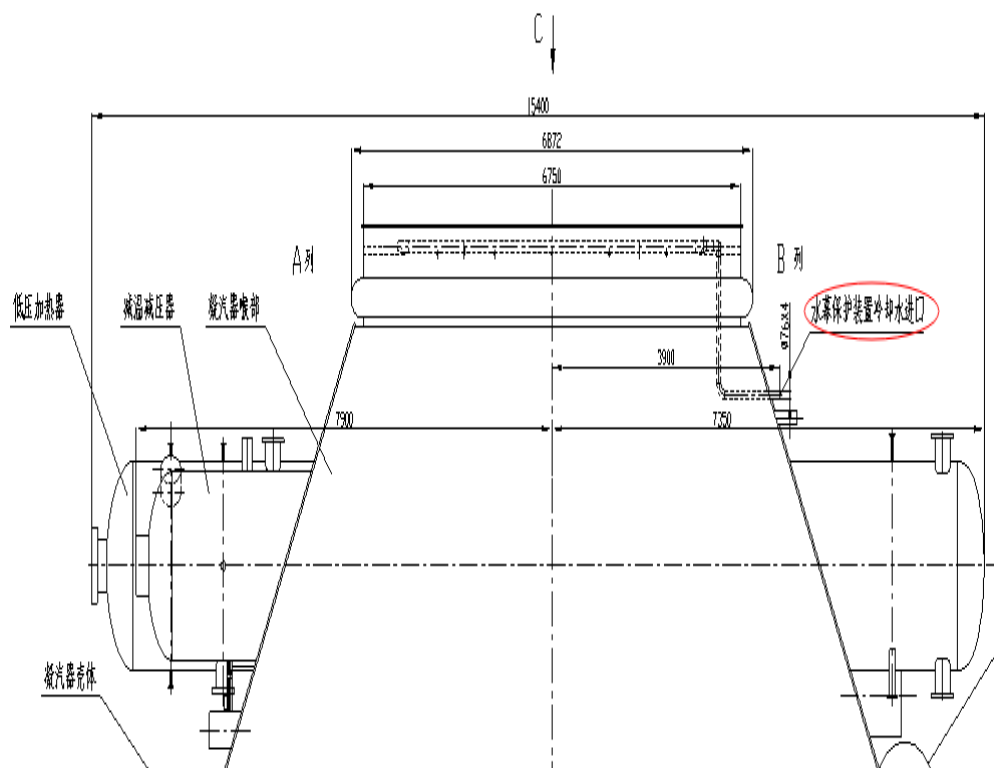
先进的辅机改造技术

●凝汽器改造技术

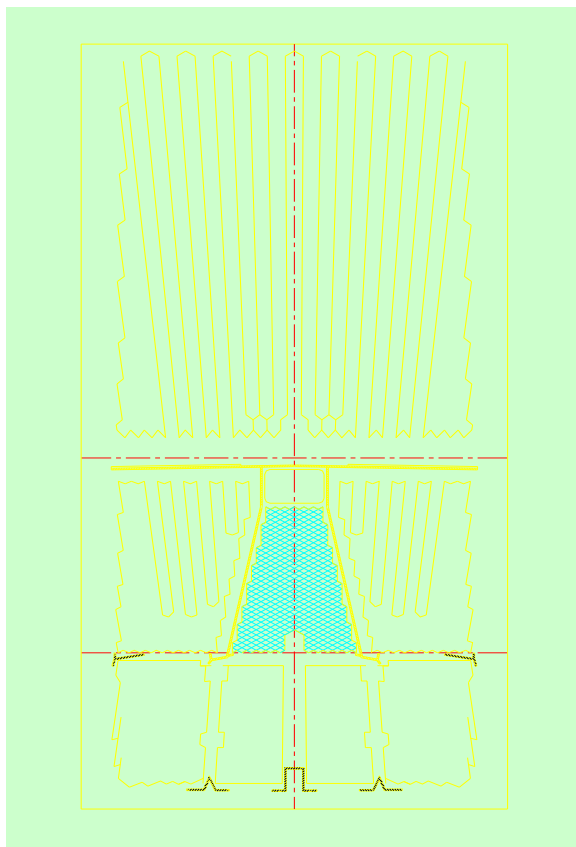
- 与德国BLACK-BURR技术合作；
- 排管的优化设计-开发流场分析程序；
- 不锈钢管技术-抗腐蚀冲蚀性能高；
- 采用自行研制的膜式喷嘴来给补水除氧
优点：系统简单，可靠性和经济性好；
- 采取把喷嘴布置在喉部内，利用汽轮机的排汽来加热给水达到热力除氧的目的。
优点：系统简单，可靠性和经济性好。

凝汽器喉部水幕保护

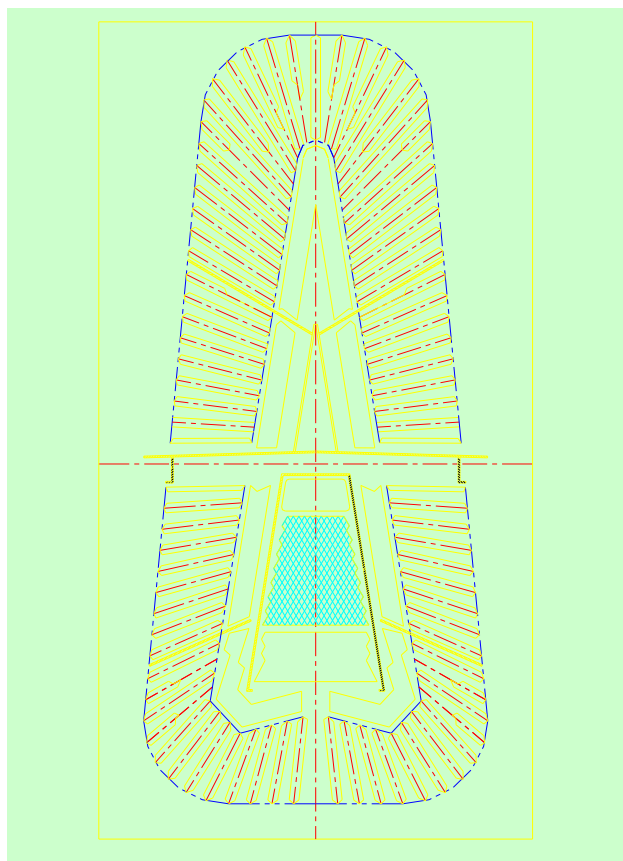
当低排温度超过实时排汽压力对应的饱和温度（不含）时投喷水，低压缸排汽温度低于实时排汽压力对应的饱和温度（不含）时停喷水。



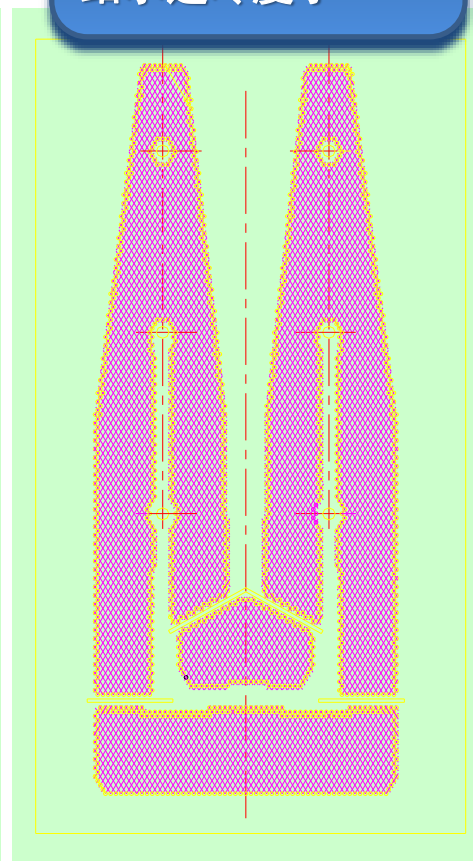
流场均匀、汽阻小
、传热系数高、凝
结水过冷度小



70年代
外围带状式排管

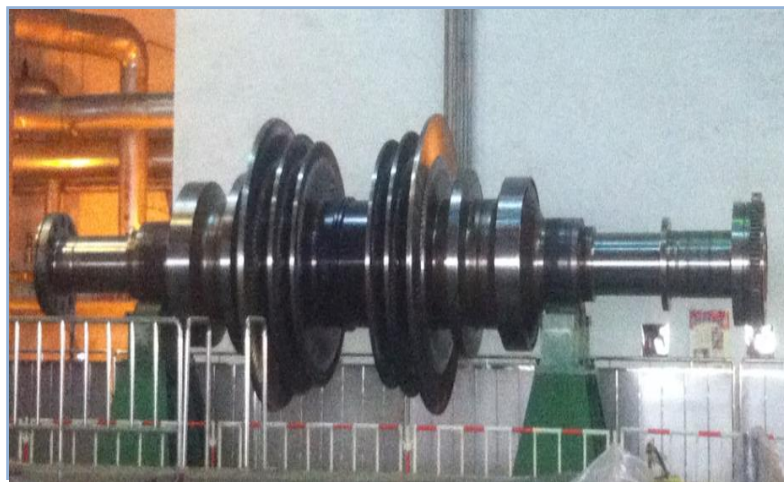


80年代
卵形排管

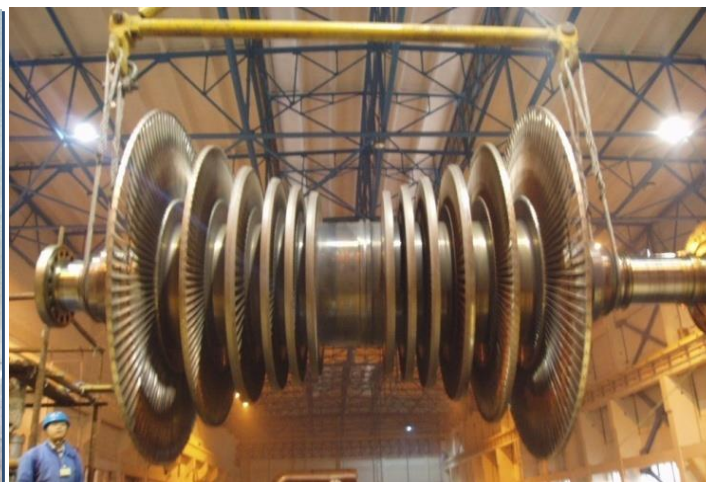


现有
BD模块式排管

● 轴系静动特性分析技术



采暖期



非采暖期

- 比压合理
- 临界转速避开工作转速 $\pm 15\%$
- 扭振避开10%工频和 $[-7\%, 8\%]$ 二倍频两个区间。
- 优化安装曲线，切换时高中压不再揭缸



东方电气集团东方汽轮机有限公司



低压外缸及凝汽器的保温



● 热网凝汽器技术

热网凝汽器冷却水采用供热水，设计压力1.0~2.0MPa，水压试验压力1.3~2.5MPa，远超常规凝汽器；凝汽器背压高：15~65kPa，进水温度高：35~73.1℃，出水温度高：53~84.5℃，汽侧水侧温差大。对凝汽器的管板、水室等受压部件提出了新的要求。

凝汽器与乏汽排汽管道支路连接，有上进汽和侧进汽等多种型式，承受排汽管道的推力及推力矩，对于侧进汽凝汽器还承受侧向上的真空力与真空力矩，凝汽器结构设计应充分考虑，以保证凝汽器运行安全。

总体来说，供热用热网凝汽器循环倍率小，温升大，温差大，温度高，背压高，同时有来自排汽管道的推力和推力矩。东汽利用先进的排管技术和丰富的凝汽器设计经验开展设计，实践证明，凝汽器抗压能力强，稳定性好，热力性能好，安全性符合要求。





热网凝汽器业绩表(不完全统计)

序号	电厂机组	汽机功率(MW)	换热面积(m ²)	数量	管材	出厂时间	投运时间	备注
1	山西古交电厂#1~#4	300	866~15100	23	不锈钢TP316L	2015~2017	2015~2017	
2	包铝热电#1	330	4000 、 2000	1+1	不锈钢TP316L	2017	2017	侧向进汽
3	锡林热电厂#2	300	8240	2	不锈钢TP316L	2016	2016	
4	山西嘉节电厂#1	300	12000	1	不锈钢TP316L	2015	2015	
5	包头第一热电厂#1	300	8030	2	不锈钢TP316L	2015	2015	
6	包头第二热电厂#1	300	8030	2	不锈钢TP316L	2014	2014	
7	金桥热电厂#1	300	20000	1	不锈钢TP316L	2014	2014	
8	龙华热电厂#11	200	12460	1	不锈钢TP316L	2013	2013	
9	太钢热电厂#1	300	8030	2	不锈钢TP316L	2013	2013	
10	鹿华热电厂#1	300	10000	1	不锈钢TP316L	2013	2013	
11	榆次热电厂#1	300	8300	2	不锈钢TP316L	2012	2012	

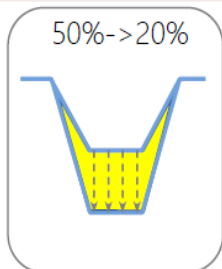


3

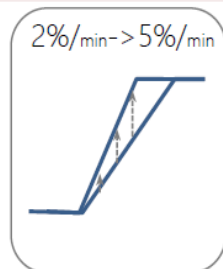
机组灵活性改造技术

1 灵活性改造的目标

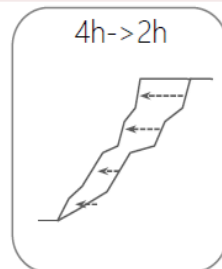
指标	现状	改造目标
温态启停时间	4小时	2小时
变负荷速率	1%~1.5%/min	5%/min
变负荷深度	50%~100%	20%~100%
供热机组	以热定电	热电解耦



深度调峰能力



快速爬坡能力

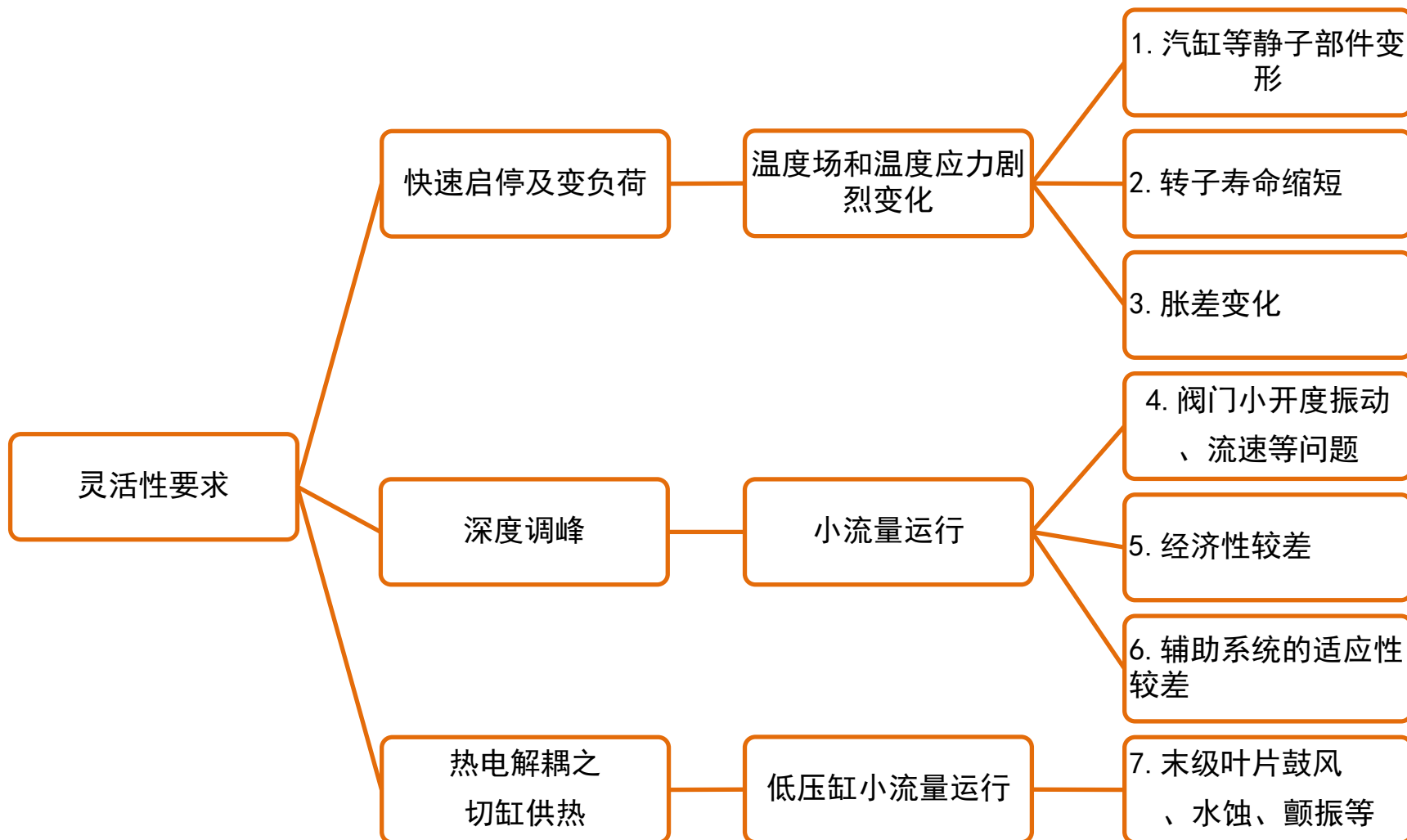


快速启停

灵活性改造对于汽轮机来说主要是指满足灵活运行要求：

通过技术创新，挖掘燃煤机组（含纯凝和热电）**调峰潜力**、**爬坡能力**以及**启停速度**，为消纳更多波动性可再生能源，灵活地参与电力市场创造条件。

2 灵活性要求对汽轮机的影响



3 东汽灵活性改造技术

3.1 满足灵活性要求的汽轮机可靠性保证技术

★主机本体



通流间隙 改造技术

针对灵活性运行的机组，计算各变负荷工况下不同转子和汽缸温度场下的机组热膨胀变化，根据冷热态动静胀差变化在改造设计时对通流轴向间隙和径向间隙进行合理的调整，避免灵活性运行时的轴向及径向碰磨，确保机组安全运行。



通流部件 安全性设计

在灵活性要求的调峰范围及负荷变化率的工况下，金属温度变化率大而快，汽轮机阀门、汽缸、转子、叶片等通流部件将承受很大的热应力，将对通流部件寿命产生严重损耗。因此须对这些部件的强度进行优化设计和寿命评估，优化机组原启动曲线，注意合理分配各负荷段升温范围，控制温升率。



轴系稳定性 保证技术

对灵活运行时的机组轴系稳定性、推力变化进行评估。在不改造现有推力瓦面积前提下，通过灵活性改造方案调整通流部件结构尺寸，保证各工况推力满足设计规范要求，保证机组安全运行。

3.1 满足灵活性要求的汽轮机可靠性保证技术

★辅助系统



疏水系统

■ 机组灵活性改造后可能长期处于低负荷工况下运行，根据原设计逻辑，高、中、低压疏水阀分别将于机组30%、20%、10%负荷工况打开，在此工况下长期处于疏水阀打开工况，将影响机组的经济性。

✓ 需对疏水阀的开启逻辑进行优化。



汽封系统

■ 机组灵活性改造后汽封系统将长期处于非自密封状态运行，需保证参数合适且稳定的辅助蒸汽长期供汽以满足机组轴封要求。

✓ 原汽封加热器设计冷却水需满足最低300t/h的冷却水量方能保证轴封需求，在低负荷给水量不足300t/h时，需开启凝结水再循环，以保证轴封系统正常投入，建立真空，或者重新设计一套汽封加热器以满足小流量工况运行。



凝汽器

■ 灵活性改造后机组可能长期处于低负荷状态，凝汽器可以采用以下两种运行方式：

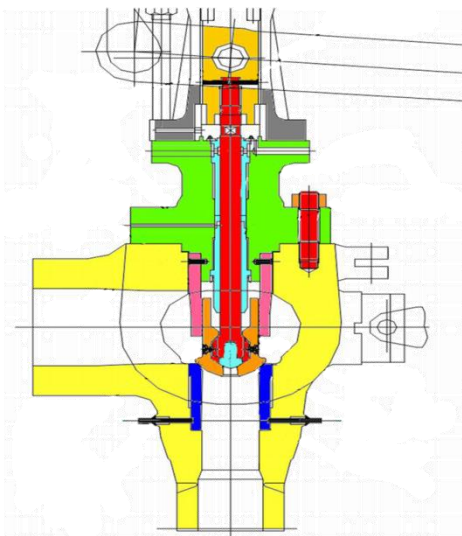
✓ 半侧运行
✓ 小水量运行：需对低流速下管侧结垢的解决方案进行研究，采用何种运行方式需联合水工专业共同进行评估选择最优的方案。

3.2 兼顾灵活性要求的汽轮机经济性提升技术

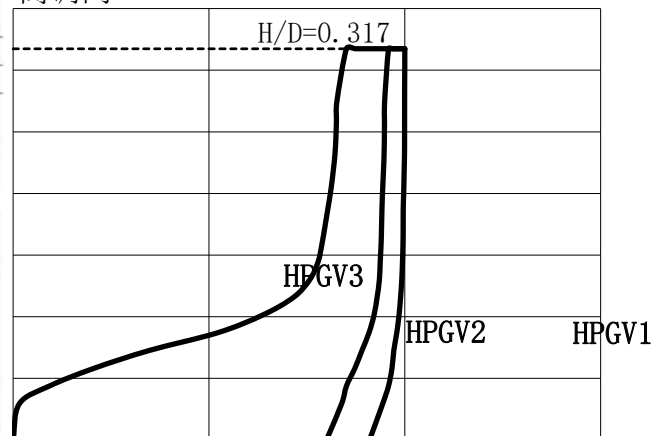
★根据初参数，优选最佳通流级数，应用东汽先进DAPL高效宽负荷叶型，改善攻角适应性和变工况性能，提升低负荷工况下机组效率。

★根据调峰深度和年负荷分布，优选最佳末叶，提升变负荷工况下机组效率。

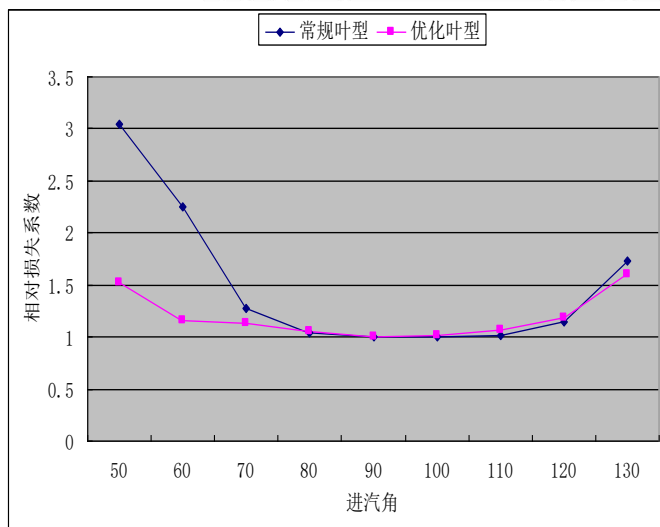
★优化配汽方式，合理设置各组喷嘴只数及阀序，提高低负荷工况下的经济性。



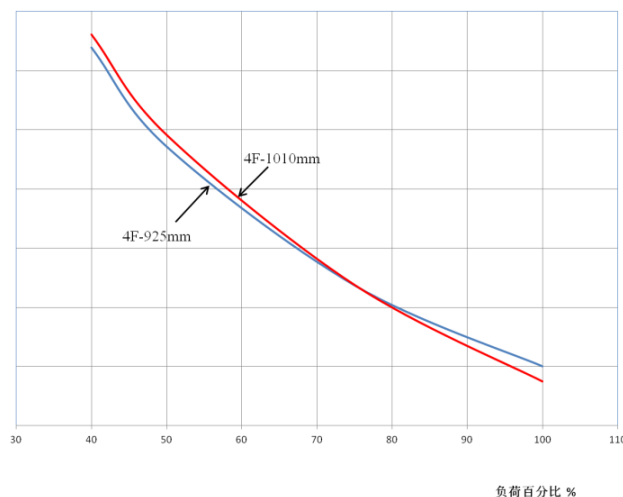
高调阀



流量百分比



机组热耗变化



3.3 实现热电解耦的低压缸切除技术

★针对供热机组，在汽机方面目前较为流行的方案是切除低压缸供热。由于低压缸进汽量很少，小于末两级叶片的最小冷却流量，故末两级叶片运行时处于鼓风状态，其工作温度上升剧烈，同时，低压喷水一直开启，由于蒸汽卷吸作用会造成末级叶片出汽边水蚀。另外，在小流量下叶片还可能出现颤振等问题。

★应对措施：

- 设置冷却蒸汽旁路及低压末两级保护温度限值。
- 采用优化的末级、次末级叶片，使其在高温下也能满足强度要求，同时具备良好的抗水蚀性能。
- 精确分析小流量下叶片可能出现的颤振点，在运行时注意避开。同时对安全连续运行的低压排汽质量流量进行限制，
- 对中压末几级隔板和叶片加强，保证中排抽汽供热工况中压末几级强度。
- 设置叶片健康专家系统，实时监测并评估叶片寿命状态



叶片健康专家系统

实时振动监测与分析

实时冲击监测与分析

叶片工作温度监测

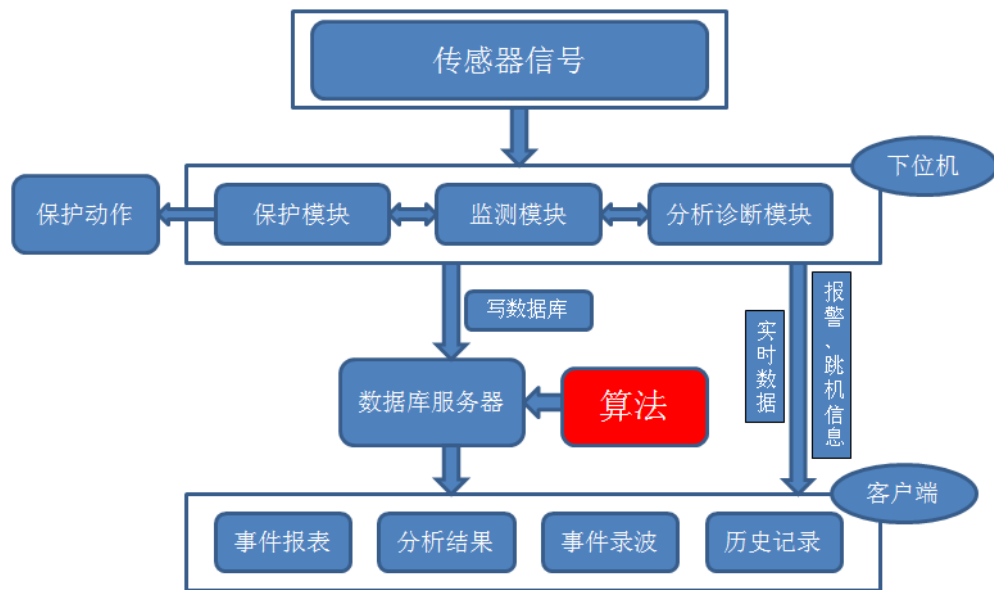
蒸汽参数监测

叶片寿命评估

叶片故障诊断

叶片保护动作装置

该系统的总体设计目标是通过对于末级叶片周向振动位移、机组运行背压、转速、末级次末级叶片工作湿度工作温度等相关数据进行连续、在线监测，对叶片的健康寿命状态进行实时评估。





东方电气集团东方汽轮机有限公司

努力实现一流管理
创新研究一流技术
重建拥有一流设备
奉献用户一流质量
谢谢！

