

第二届火电厂锅炉、汽机新技术与节能改造研讨会



蒋寻寒 中国大唐集团电力科学研究院华东所首席专家，高级工程师，长期从事大型汽轮机热力性能试验、诊断，火电机组节能和优化运行等方面的技术和研究工作。主要成果：水蒸气简单高精度数学模型；大型火电机组能耗诊断和节能潜力分析；超高压到超超临界汽轮机滑压优化运行—机理、试验研究和实现；汽轮机通流部分热力参数敏感型故障诊断；大型火电机组汽轮机冷端设备优化配置和运行；大型火电机组煤耗查定试验；火电机组节能调度技术框架。

演讲题目：汽轮机改造若干新技术及和周边设备的关系





中国大唐集团科学技术研究院

China Datang Corporation Science and Technology Research Institute

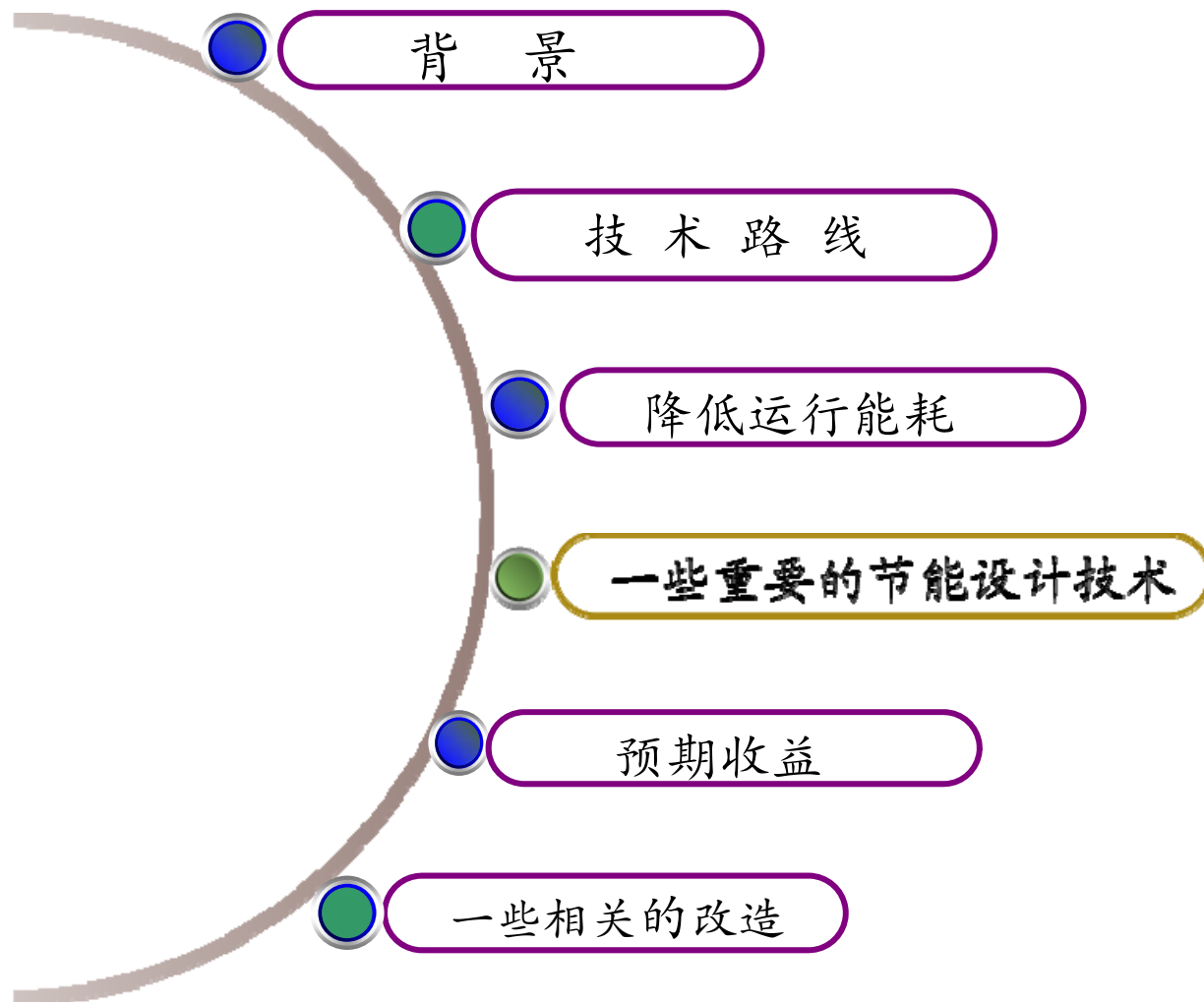
汽轮机改造的一些节能新技术以及整体优化

2015.3 宁波



EPTCHINA.CN
中国电力科技网

内 容



背 景

- 国家能源战略
- 发改委文件
- 国内整个发电领域面临的压力
- 基建设计阶段遗留的问题
- 传统的检修维护、优化运行工作，远不能解决问题
- 大量亚临界、超临界汽轮机迫切需要现代化改造

- 国内2009年左右开始，新一轮的300MW级别及600MW级别汽轮机通流改造大量出现，仅亚临界300MW就大致有近10~20台/年的市场。
- 投产不足10年的超临界600MW机型，也大量出现改造项目。
- 相关厂家有三大动力厂和Alstom、全四维、北重，各厂家的技术路线、特色、甚至对相关问题的理解都有差异。
- 改造投入很大，因此，为了使改造能够获得最好的效果，同时避免不必要的浪费，需要对各厂的技术思想、水平、特点，改造和周边设备的优化搭配，作出系统的梳理，为改造提供可靠的技术支撑。

技术路线

- 搜集、研究各汽轮机厂家近期实施的改造项目的业绩，原有设备情况、采用技术、验收试验结果和改造技术水平及效果的评价，了解各厂家的费用、加工工期等方面的信息。
- 通过各种渠道，了解相关厂家的技术进步情况，并分析研究对汽轮机安全、经济性的影响，修正改造预期收益的评估。研究各厂家在技术、工作中的不足，以及对策。
- 对改造机组设备现状和运行环境的研究，寻找适合的改造范围、关键技术和参数。

- 系统分析各汽轮机厂家的改造技术，包括范围、水平、思考深度，以及技术进步的情况。可能的改造范围如下表。

高压缸	中压缸	低压缸	其它
外缸	外缸	外缸	主汽阀、调阀
内缸	内缸	内缸	连通管
转子	转子	转子	轴承

- 如果高、中、低压缸改变级数，则必须更换相应转子；
如果需要调节级从反流改为顺流，则必须更换高压转子；
如果需要改变汽轮机排汽面积，则必须更换低压转子。

- 目前需要改造的都是传统结构的机型，高、中压缸合缸是普遍的配置，出力份额为高压缸小于30%，中压缸30%左右，低压缸一般超过40%，效率降低1%，则汽轮机热耗升高40kJ/kWh以上。
- 基于出力的份额配置，低压缸进汽温度较高，但结构大而薄弱，运行中不均匀的变形往往比较严重，造成低压缸内部的泄漏，低压缸效率较低，运行中突出的表现，就是5、6级抽汽温度过高。这种问题，通过常规的检修很难处理。
- 高、中压缸的通流效率容易测量，改造的节能效果也容易判断。从热力试验的结果，不难判断，一般说来，低压缸效率偏低，是传统结构汽轮机热耗偏高的主要原因。因此，通过改造，提高低压缸效率，有重要的意义。
- 一些电厂在改造中，没有选择改造低压缸，节能效果非常有限。

- 研究现有的各种改造机型，其合理的改造范围、适用技术、和周边设备的优化搭配问题；确定改造的预期收益。
- 需要研究机组的运行环境，尽可能提供准确可靠的边界条件：预期负荷率、背压（核算），周边设备相关改造的影响等，**进行必要的耦合（整体）优化设计。**
- 这些问题改造中必须考虑。**从电站设计的角度看，节能设计一定是精细化的，一定需要跨专业的视角的。**

- 为了和周边设备实现优化搭配，需要考虑：根据汽轮机的实际背压条件，合理设置余速损失，这是目前国内新机组建设和汽轮机改造中普遍存在不足、又非常重要的问题。
- 锅炉配置低温省煤器，和汽轮机低压回热系统的整体优化设计，以及对凝汽器工作的影响；等等。
- 研究、探索、总结改造中通流部分安装、调整的技术要点，特别是低压缸的安装、调整。

梳理、总结改造经验，指导今后的改造项目，同时大量用于新机组节能设计，为电厂赢得更大的节能效益。

降低实际运行能耗

- 如何降低实际运行煤耗，是电厂非常关心的问题，对于汽轮机，就是使平均工况下的热耗最低。
- 目前通行的汽轮机性能考核办法，是测试THA工况热耗，确定是否达到设计保证值。很多电厂已经察觉，据此进行优化，并不能保证平均工况下能耗最低。
- 一些电厂已经改变了性能考核要求，用**100%**负荷和部分负荷（比如**75%**）**2**个工况的热耗的加权平均值，作为考核依据。但是，权重的确定，可能影响汽轮机优化设计结果。那么，怎么确定合理的权重？
- 根据我们的理解，平均工况可以按**70~80%**负荷、额定背压考虑。让该工况热耗最低，就达到了优化设计的目的。

- 我们要考虑，中压缸效率和负荷基本没有关系；高压缸内，调节级以后的部分，效率和负荷也基本没有关系；低压缸除了最后2级，其它部分的效率也基本与负荷无关。
- 因此，要使平均工况下热耗最低的问题就转化为：解决汽轮机头、尾部分的优化设计和运行问题。
- 头的部分，一是调门管理方式和运行优化；二是高压缸通流面积应优化，关键是调节级面积，既满足最大出力要求，又不过大，以免低负荷时调门节流损失增加或主汽压力偏低。
- 最重要的是汽轮机排汽面积配置。为此，依据平均工况热耗最低的要求，进行优化设计。一旦确定优化方案，则性能考核试验时如何选择工况，如何加权平均，就已经不重要了。

一些重要的节能技术

高、中压缸

- 对于高、中压缸，小根径、多级数是当今趋势，可以有效提高通流效率。Alstom将增加级数做到了极致。西门子的变反动度设计技术，进一步挖掘了潜力。
- 对于中压缸进汽区的冷却，一般思路是用少量低温蒸汽将高温蒸汽和金属部件隔开。西门子用中压缸进汽的一小部分作为冷却蒸汽，节流加速后温度降低约15℃。Alstom则采用焊接转子技术，高温区采用高级别的金属材料，不需要冷却。都是巧妙的节能设计。

调门管理

- 超超临界汽轮机的调节级设计难度很大，必须在材料安全和效率之间寻求妥协。**1000MW**机组容量太大，调节级必须是双流设计，效率受损。
- 不设调节级，则高压缸设计大大简化。取消效率很低的调节级，对高压缸效率有好处。
- 理论上，只要调门全开时，高压缸效率提高**3%**（绝对），则部分负荷运行时，相对顺序阀方式，总体上仍有节能优势。
- 按设计，节流配汽汽轮机，部分负荷下，调门阀位应位于**45%**以上，上方留**3~5%**的通流能力即可，以减少节流损失。实际情况普遍不理想，需要大量复杂的优化工作，节能潜力较大。

- 因此，在超超临界汽轮机上，节流配汽有重要的应用价值，重新受到重视。国内原来不采用节流配汽的东方和哈尔滨也在积极研究，在新建超超临界机组上采用。欧洲厂家还在亚临界、超临界机型上大量应用，可以借鉴。
- 在亚临界和超临界机型的改造中，用节流配汽代替原有的顺序阀或复合配汽，是可选的方案，但需要比较复杂的技术经济对比，目前没有成熟的经验。
- 低负荷下，复合配汽损失较大，可以在顺序阀模式下进行滑压优化，节能效果更好。

有调节级，则采用节流配汽损失很大

高、中压分缸

- 高、中压合缸设计，可以有效缩短汽轮机长度，但热耗代价很大，设计为50 kJ/kWh左右，实际损失更大，因为过桥漏汽量一般明显大于设计要求。改造中对此无能为力。

改进低压缸设计，提高实际效率

- 降低分缸点 - 结构级减少，有效率优势。中压缸进出口温差大，设计难度可能有所增加。降低低压缸进汽温度，降低低压缸膨胀变形的动力，有重要意义。低压缸尺寸减小，刚性增加。
- 螺旋进汽室，压力分布均匀，压损降低 - 哈汽引进的Alstom技术。
- 轴承座落地，轴瓦中心固定。但改造中难以实施。
- 改变内缸结构，增强刚性。这是低压缸改造的主要手段。
- 总体效果：低压缸效率提高且稳定；实际轴系长度略微减少

先进的结构，使欧洲技术机型热耗更低，且随时间变化小

降低管道压损 - 主汽，冷、热再，连通管

- 从外三项目建设开始，属于设计院范围的工作。目前一般认为，可降低热耗约 20 kJ/kWh。
- 中、低压缸连通管，是汽轮机厂家进行优化，目的同样是降低压损，从2%降低到1~1.5%。

低压缸相关杂项

- 凝汽器抽空气管系并联设计，充分发挥双背压优势。
- 夏季循环水温高，则为真空泵设置低温水源。
- 低背压低压缸接近中压缸，让低背压低压缸多做功。



低温省煤器与低压缸耦合优化设计

- 对于烟煤锅炉，低温省煤器可将烟温从~125℃降低到~90℃，由凝结水吸收这些热量。
- 换热器存在端差，因此凝结水受热后，温度一般不超过100℃
- 理想情况是，倒数2号低加出口凝结水温约80℃，吸热后升高到~95℃，再进入下一级低加。这就是“串联方案”。
- 如果凝结水温超过85℃，则无法消纳烟气余热，如果为上一级低加设置旁路，由经过旁路的温度较低的凝结水吸热，则节能效果显著降低。应尽量避免这种“并联方案”。
- 根据汽轮机末2级的焓降，优化设计空预器进出口烟温，最大限度地增加节能效果。

预期收益

- 改造后，热力性能达到当前国内同类机型改造的先进水平。如下表。

改造后参数	单位	亚临界300MW	超临界600MW	超超临界660MW
参考背压	kPa	4.9		
改造后机组铭牌	MW	320~330	630~640	~ 700
THA工况热耗	kJ/kWh	< 7880	< 7580	< 7360
预期改造收益	kJ/kWh	THA工况 150~300 kJ/kWh		
实际改造收益	kJ/kWh	平均工况。在THA工况收益的基础上，增加0~30 kJ/kWh		
设计余速损失	kJ/kg	~ 33		

- 注：1. 改造后热耗是折算到参考背压后的数值。节能效果不包含低温省煤器的改造收益。需要特别关注所用技术的‘保效’能力。
- 2. 改造后机组的铭牌出力，根据背压条件和锅炉、辅机的容量余量确定。比如600MW机组，如果主汽流量不变，则根据不同的背压条件，改造后汽轮机铭牌可增加到630~640MW；如果锅炉和辅机有足够余量，主汽流量能够增加约80t/h，则可增容到660MW。
- 3. 改造收益，根据汽轮机原有性能差异而有所不同。实际改造收益指平均工况的收益，是真正重要的结果。平均工况可按70~80%负荷、额定背压工况设置。
- 4. 设计余速损失，是THA工况和实际额定背压下的数值。

跨代升级

- 根据国家发改委的文件要求，亚临界机组都将需要重大的改造。
- 南方机组缺少供热需求，因此，跨代升级就成为唯一的选择。
- 跨代升级，是在原有汽轮机的基础上，增设超高压缸，将原机组改造成二次再热机组，实现能耗大幅度降低，同时，机组容量增加近1/3。最早的项目在浙江，即将实施。选择600MW机组，容量合理。
- 极其复杂，在获得实际运行经验前，不宜大量实施。
- 改造范围广，投入很大。原有的锅炉和辅机全部需要重建或更换。高压加热器、给水泵也需要更换。原汽轮机同时进行通流改造。
- 为进一步节能，可将一次再热蒸汽温度，即原有的主汽温度提高到566℃。预计改造后实际运行煤耗可达290 g/kWh左右。

跨代升级 - 续

- 主汽压力很高，达到31MPa，即便如此，根据动力循环优化计算结果，一次再热蒸汽压力也需要降低。原主汽压力为16.7MPa，需要降低到12MPa以内。除原有抽汽，超高压缸排汽处设置1级抽汽。
- 设置与超高压缸同轴的BEST小机，排汽到除氧器。原高加的抽汽改从BEST引出，高压缸不再设置抽汽。可进一步降低运行能耗。
- BEST小机功能设置比较灵活，可以用来驱动给水泵等，但为了节能，最好的设置是正常运行时进汽调门可以保持全开，不需节流。
- 1级抽汽压力很高，给水温度可能需要限制，即进汽设置调节阀。为此，机组的负荷变化速度可能需要有所限制。
- 锅炉设计中，汽温调节，特别是二次汽温调节，是较困难的问题。

跨代升级 - 续二

- 给水温度很高，锅炉水冷壁的安全、各受热面的面积设置等，都面临较大的问题，各锅炉厂家给出了不同的方案：
- 限制给水温度。系统简单，水冷壁可采用传统的材料。高负荷时限制给水温度，会增加能耗。泰州二期给水温度限制在315℃以内。
- 烟气再循环。日本和欧洲有少量应用。再循环风机工作条件差，温度高、粉尘含量高，可能增加故障率。从锅炉的角度，这是一种耗能的调节方式。
- 三烟道设置。设计和运行非常复杂，尚无实际应用。
- 这几种方式都将有实际项目实施，但需经过几年的实际运行比较，才可能确认合理的技术路线。

0号高加、蒸汽冷却器

- 对于一次再热机组，0号高加结合低温省煤器，是重要的节能减排手段。增设0号高加需要注意：投、切的切换负荷点需要设计得较高，比如90%以上，以避免0号高加频繁投、切而造成泄漏。
- 增设蒸汽冷却器，需要注意相应的高加：按设计规范，高加的过热蒸汽冷却段内流速较高，汽流离开时，应有一定的过热度。增设外置的蒸汽冷却器后，高加进汽温度降低，这一要求无法满足，在过热蒸汽冷却段内存在流速较大的两相流，对高加安全形成威胁。方案有2个：重新设计、更换该高加，投入较大；现场切割、改造高加，投入小，但有一定风险。
- 若改造时汽轮机中低压缸分缸点降低，则抽汽口多了一个，如果现场有空间布置，可以考虑增设1台低加。

结 语

- 汽轮机通流改造，是节能减排的重要举措，意义重大。
- 现代汽轮机设计制造技术、火电机组节能技术发展很快。
- 改造和周边设备的配置及相关改造有着复杂的关系。
- 技术复杂，覆盖面广，投入很大。电厂难得一遇的重大改造项目，存在技术风险。
- 需要根据每台机组的实际情况，全面、深入、细致、严谨地研究改造范围和方案，力争改造能够做到：技术先进、安全高效、整体优化、节约投资，经得住时间的检验。



謝 謝



中国大唐集团科学技术研究院
China Datang Corporation Science and Technology Research Institute



EPTCHINA.CN
中国电力科技网