

浙能集团汽轮机组节能升级改造的技术经济性研究和实践

浙江省浙能技术研究院 倪定 周仁米 顾伟飞

2015 年 12 月

目 录

1 引言.....	3
1.1 我国能源安全发展对燃煤发电发展的要求.....	3
1.2 燃煤发电的出路.....	3
1.3 先行一步的浙江省能源集团公司节能减排工作.....	4
2.浙能集团及汽轮机组节能增容改造总体概况.....	5
2.1 浙江省能源集团有限公司及装机容量基本概况.....	5
2.2 浙能集团汽轮机组节能增容改造总体概况.....	5
3.浙能集团汽轮机组节能增容改造技术经济性研究的主要内容.....	8
3.1 战略研究课题的背景.....	8
3.2 战略研究课题的方法和基本策略.....	8
3.3.对发电企业传统技术改造管理模式进行优化创新.....	9
3.4.对传统的节能评价体系和方法进行优化拓展创新.....	10
3.5. 现役发电机组升级改造的规范化管理.....	13
4.浙能集团汽轮机组节能升级增容改造实施概况.....	14
4.1. 215MW 亚临界机组供热改造.....	14
4.2. 上汽国产引进型西屋 300MW 机组升级改造.....	15
4.3.600MW 亚临界机组升级改造概况.....	18
4.4.600MW 超临界机组升级改造概况.....	20
5.浙能集团汽轮机组节能升级改造技术经济性研究的主要成果.....	22
5.1.取得明显的经济效益和社会效益。.....	22
5.2.综合效益和推广应用前景.....	23
5.3.浙能集团公司燃煤发电机组.....	23
5.4. 创建首个清洁能源示范省.....	24

浙能集团汽轮机组节能升级改造的技术经济性研究和实践

1 引言

1.1 我国能源安全发展对燃煤发电发展的要求

2014年习近平总书记亲自主持召开中央财经领导小组第6次会议，确立了我国能源安全发展的行动纲领。李克强总理主持召开新一届国家能源委员会首次会议，确立了我国能源发展战略。明确提出“节约、清洁、安全”能源战略方针和“节约优先、绿色低碳、立足国内、创新驱动”能源发展战略。

2014年9月12日国务院三部委发布了《煤电节能减排升级改造行动计划（2014-2020年）》（以下简称《行动计划》）。全国能源工作会议要求认真落实国务院《大气污染防治行动计划》，能源领域大气污染治理力度不断加大。制订出台一系列能源领域大气污染防治配套政策措施。加快发展清洁能源，能源结构进一步优化：提高非化石能源占一次能源消费比重。

发展新能源，提高非化石能源占一次能源消费比重。降低燃煤发电比重，不是封杀燃煤发电，而是要走高效、清洁发电的道路。发展新能源和高效清洁燃煤发电两个轮子一起转，将是我国长期的能源安全战略新常态。

今年12月2日召开的国务院常务会议指出，按照绿色发展要求，落实国务院大气污染防治行动计划，通过加快燃煤电厂升级改造，在全国全面推广超低排放和世界一流水平的能耗标准，是推进化石能源清洁化、改善大气质量、缓解资源约束的重要举措。会议决定，燃煤机组2020年前全面实施超低排放和节能改造，届时所有现役电厂度电平均煤耗须低于310克、新建电厂平均煤耗低于300克。同日，国务院三部委联合发布通知【2015】2835号文“对燃煤电厂超低排放实行电价支持政策”，推进煤炭清洁高效利用，促进节能减排和大气污染治理，决定对燃煤电厂超低排放实行电价支持政策。

1.2 燃煤发电的出路

《行动计划》明确了降低供电煤耗、降低污染物排放、降低煤炭占能源消费比重，提高安全运行质量、提高技术装备水平、提高能源利用效率的目标。明确提出要坚持典型引路，积极推动国家煤电节能减排示范基地和示范电站建设。

《行动计划》发布之后各发电集团以及燃煤发电企业都在积极行动起来，有

的集团组织研究相应的升级改造计划路线，有的则组织进行升级改造的可行性研究方案。有的发电企业则仍在苦苦寻求如何完成《行动计划》所制定的目标和方向……，一场燃煤发电机组升级改造的大决战已经拉开，少部分企业已经组织实施……。

今年相关组织和部门召开了“超超临界机组技术交流会年会”、“第二届火电厂汽机锅炉新技术和节能改造技术交流会”等一系列技术交流会，各大发电集团领导、各集团电力技术研究院领导各抒己见，发表了很好的见解……。

关键的问题在于尽快落实《行动计划》确定的目标指标，不是纸上谈兵，而是要有行动。

1.3 先行一步的浙江省能源集团公司节能减排工作

1.3.1 节能升级改造研究和实施

浙能集团有限公司早在6年前就在全中国先行一步，开始了燃煤发电机组升级改造的可行性研究并组织实施。在此基础上完成了(2012年立项的)“浙能集团在役燃煤发电机组升级改造技术经济性分析研究”的集团公司战略研究课题，取得以下成果：

- 1) 突破了传统的发电企业技术改造模式；
- 2) 创新的提出了发电机组升级改造评价方法—优化的发电设备节能评价方法；
- 3) 形成了浙能集团燃煤发电机组升级改造技术路线和管理模式
- 4) 在30多台(次)机组上组织实施，取得了巨大的节能效果。

1.3.2. 超低排放改造

2012年前后开始了燃煤机组超低排放研究和实施

- 1) 2013年在嘉华两台百万千瓦机组超低排放改造。
- 2) 2014年六横电厂两台百万千瓦机组超低排放与新建工程同步投产。

1.3.3. 同步实施节能升级改造和超低排放改造

嘉华4号机组亚临界600MW机组和乐清600MW超临界机组分别同时组织实施节能升级改造和超低排放改造，两台机组均于2014年12月15日重新投产发电。

浙能集团公司拟通过燃煤发电机组节能升级和超低排放两个轮子一起转，浙能集团公司将在2017年之前将完成燃煤发电机组的节能升级改造和超低排放改造。

1.3.4. 全国首个清洁能源示范省的建设

浙江省已经在全国首先启动了清洁能源示范省的建设，浙能集团公司为之作出巨大贡献。

2.浙能集团及汽轮机组节能增容改造总体概况

2.1 浙江省能源集团有限公司及装机容量基本概况

2.1.1. 浙江省能源集团有限公司基本概况

浙江省能源集团有限公司（以下简称浙能集团）成立于 2001 年，2003 年电力体制改革厂网分开时，接管了原浙江省电力公司管理的部分发电企业。浙能集团实施“大能源战略”，与时俱进，开拓创新，实现了企业快速健康发展，企业规模快速扩大、效益稳步提升、实力明显增强，形成了以电为主、多业发展的产业格局。截止 2013 年底，集团总资产 1538.4 亿元。2013 年集团实现销售收入 783.6 亿元，列中国企业 500 强第 171 位，列中国企业效益 200 佳第 81 位。

2.1.2. 浙能集团装机容量基本概况

截止 2014 年底，集团控股管理发电装机容量 26905 万千瓦，其中燃煤机组装机容量 23660 万千瓦，60 万千瓦及以上装机占煤机总容量的 73.5%，位居全国同行前茅。

表 1 2014 年浙能集团燃煤机组装机容量一览表

机 组	台数	容量	比例
130MW 亚临界供热机组	2 台	260MW	1.10%
215MW 亚临界供热机组	4 台	860MW	3.63%
300MW 等级亚临界机组	16 台	5160MW	21.81%
600MW 等级亚临界机组（含已增容）	7 台	4380MW	18.51%
600MW 等级超临界机组（含已增容）	8 台	6360MW	26.89%
660MW 超超临界机组	4 台	2640MW	11.16%
1000MW 超超临界机组	4 台	4000MW	16.91%
合 计	45 台	23660MW	

2.2 浙能集团汽轮机组节能增容改造总体概况

浙能集团自 2008 年开始启动现役汽轮发电机组节能升级改造工作，实施“浙能集团汽轮机组节能增容改造技术经济性研究的战略研究课题”

1) 确定了顶层设计与摸着石头过河相结合，分期分批分等级稳步推进；节能改造

和设备挖潜相结合统筹考虑机组升级改造的总体策略；

2) 在设备管理方面，对发电企业传统技术改造管理模式进行优化创新，形成了一套相对比较系统和独具特色的管理模式和管理流程；

3) 在技术管理方面，对传统的节能评价体系和方法进行优化拓展创新，形成一套相对比较科学的与时俱进的管理方法。

截止 2015 年底已经在集团公司大部分机组上实施。浙能集团已经或计划实施机组升级改造工作的基本情况见表 2：

表 2-1 浙能集团 2015 年底已经实施机组升级改造工作的基本情况表(共 32 台次)

单位	机组	容量	参数	改造范围	改造实施或计划实施时间
嘉兴	1	300MW	亚临界	高中压缸	2011 年 9 月 1 日-10 月 30 日
嘉兴	1	300MW	亚临界	低压缸	2013 年 9 月 14 日-11 月 26 日
嘉兴	2	300MW	亚临界	高中低压缸	2012 年 10 月 1 日-12 月 5 日
温州	3	300MW	亚临界	高中压缸	2011 年 10 月 29 日-12 月 31 日
温州	3	300MW	亚临界	低压缸	2014 年 3 月 30 日-6 月 12 日
温州	4	300MW	亚临界	高中压缸	2012 年 10 月 11 日-12 月 3 日
温州	5	300MW	亚临界	高中压缸	2012 年 4 月 28 日-6 月 30 日
温州	6	300MW	亚临界	高中低压缸	2013 年 10 月 1 日-12 月 11 日
长兴	1	300MW	亚临界	高中压缸	2014 年 2 月 4 日-3 月 29 日
长兴	2	300MW	亚临界	高中低压缸	2013 年 2 月 25 日-5 月 2 日
长兴	3	300MW	亚临界	高中压缸	2012 年 10 月 1 日-12 月 25 日
长兴	4	300MW	亚临界	高中压缸	2013 年 10 月 15 日-12 月 9 日
台州	8	330MW	亚临界	高压缸	2014 年 4 月 2 日-6 月 3 日
台州	9	300MW	亚临界	高压缸	2013 年 9 月 25 日-11 月 30 日
台州	10	300MW	亚临界	高压缸	2014 年 1 月 16 日-3 月 20 日
北仑	3	600MW	亚临界	高中压缸	2012 年 9 月 9 日-12 月 12 日
北仑	4	600MW	亚临界	高中低压缸	2013 年 11 月 30 日-2014 年 2 月 10 日
北仑	3	600MW	亚临界	低压缸	2013 年 9 月 1 日-10 月 30 日
北仑	5	600MW	亚临界	高中低压缸	2014 年 1 月 10 日-3 月 28 日
兰溪	3	600MW	超临界	高中低压缸	2014 年 3 月 22 日-6 月 6 日

嘉华	4	600MW	亚临界	高中低压缸	2014年10月15日-12月15日
乐清	1	600MW	超临界	高中低压缸	2014年10月19日-12月15日
兰溪	4	600MW	超临界	高中低压缸	2015年4月10日-7月2日
嘉兴	3	600MW	亚临界	高中低压缸	2015年5月16日-7月25日
乐清	2	600MW	超临界	高中低压缸	2015年4月14日-6月30日
嘉兴	5	600MW	亚临界	高中低压缸	2015年4月21日-6月26日
温州	4	300MW	亚临界	低压缸	2015年4月26-7月10日
长兴	3	300MW	亚临界	低压缸	2015年8月14-12月15日
温州	5	300MW	亚临界	低压缸	2015年9月15日-12月6日
兰溪	1	600MW	超临界	高中低压缸	2015年9月5日-11月18日
嘉华	6	600MW	亚临界	高中低压缸	2015年10月6日-12月15日
凤台	2	660MW	超临界	高中低压缸	2015年10月7日-12月6日

表 2-2 浙能集团计划实施机组升级改造工作的基本情况表

单位	机组	容量	参数	改造范围	计划改造时间	备注
长兴	4	300MW	亚临界	低压缸	2016年6月	合同已签
兰溪	2	600MW	超临界	高中低压缸	2016年10月月-12月	合同已签
凤台	1	660MW	超临界	高中低压缸	2016年3月-5月	合同已签
长兴	1	300MW	亚临界	高中压缸	2017年3月	合同已签

在全国实现多个首次

浙能集团启动现役汽轮发电机组节能升级改造工作之后，在完成 300MW 亚临界机组升级改造的之后，实现多个首次：

- ◆ 首先在全国对原装进口 600MW 亚临界东芝机组（北仑 3 号机组）采用阿尔斯通技术实施通流改造；
- ◆ 首先在全国对东汽（日立技术）600MW 亚临界机组（嘉华 4 号机组）同时实施通流改造和超低排放改造；
- ◆ 首先在全国对上汽（西屋技术）600MW 亚临界机组（嘉华 5 号机组）实施通流改造；
- ◆ 首先在全国对东汽（日立技术）600MW 超临界机组（兰溪 3 号机组）实施通流改造；

- ◆ 首先在全国对上汽（西屋技术）600MW 超临界机组（乐清 1 号机组）同时实施通流改造和超低排放改造。
- ◆ 首先完成百万千瓦机组超低排放改造。
- ◆ 首先在百万千瓦机组上完成超低排放项目与新建工程项目同步投产。
- ◆ 全国首个清洁能源示范省的建设。

3.浙能集团汽轮机组节能增容改造技术经济性研究的主要内容

3.1 战略研究课题的背景

战略研究课题分别从企业发展情况、企业内部和外部环境、国家能源和环境保护政策发展等方面开展比较全面的分析研究，本文简略。

3.2 战略研究课题的方法和基本策略

根据浙能集团公司“大能源”发展战略，立足发电主营业务要根据国家政策和国情省情，进行在役发电机组节能增容改造的基本策略研究，制定在役发电机组节能增容改造总体规划。

3.2.1. 采取顶层设计与摸着石头过河相结合的方法

对在役发电机组实际能耗水平进行全面梳理，顶层设计与摸着石头过河相结合，分期分批稳步推进、先易后难、先试点再推广，在浙能集团在役燃煤发电机组中，亚临界机组占集团公司总装机容量约为 45%，而亚临界 300MW 等级亚临界机组数量最多，能耗水平相对比较高，投产时间比较早，对集团公司平均能耗水平影响比较大。当时国内已经实施通流改造的 300MW 机组比较多，改造技术相对比较成熟，比较容易取得突破。因此，首先安排在 300MW 汽轮机组试点和推广，然后再在 600MW 亚临界机组和超临界机组上实施。

3.2.1.1. 300MW 亚临界汽轮发电机组节能增容改造

就浙能集团公司 16 台 300MW 等级汽轮机组来说，10 台 156 系列上汽产西屋系列机组，因投产时间长、能耗水平高、对浙能集团公司平均供电煤耗、污染物排放指标、生产成本，以及社会责任和社会形象影响比较大。这类机组改造技术相对比较成熟，改造经验和实例比较多，应该安排首批实施。

2 台北重-阿尔斯通机组虽然投产时间比较长，但各项经济技术指标基本处于全国同类型机组的前列；

2 台东汽-日立机组投产时间不长，总体性能指标与上汽早期 156 机组相比，与设计保证值偏差还不算太大；

2 台哈汽-西屋抽凝机组 2011 年刚投产，在不供热情况下能耗水平比较高，但供热后能耗指标会相当先进。

3.2.1.2. 600MW 亚临界汽轮发电机组节能增容改造

北仑 3-5 号机组已经于 2012 年分别采用阿尔斯通通流改造技术和东汽高压阀组技术完成汽轮机和高压阀组的升级改造，改造后高压缸效率、中压缸效率和高压阀组压损均达到预期技术指标，机组铭牌出力增加到 660MW。

嘉华 4 号机组通过竞争性谈判与阿尔斯通公司签订了升级改造合同，已经于 2014 年实施。3 号机组将根据改造情况决定。

嘉华 5 号机组升级改造通过竞争性谈判决定承包制造厂，计划于 2015 年实施。6 号机组将根据改造情况决定。

3.2.1.3. 600MW 超临界汽轮发电机组节能增容改造

兰溪 3 号机组通过竞争性谈判与阿尔斯通公司签订升级改造合同，已于 2014 年上半年实施，改造后性能试验表明基本达到改造的设计保证值。其它机组已与阿尔斯通公司续签改造合同。

乐清电厂二台 600MW 超临界上汽西屋型机组的通过竞争性谈判与上海电气签订升级改造合同，二台机组节能升级改造工作已经完成。

具体实施的时机由各电厂选择各机组在计划检修的 A 级检修或 B 级检修中实施，报集团公司生产安全部全盘统一考虑。

3.2.2. 节能改造和设备挖潜相结合统筹考虑机组升级改造

节能改造和设备挖潜相结合统筹考虑机组升级改造，要考虑全省电力供应需求实践增长的情况，对在役机组的产能以及发电机组主辅设备配套的适配性存在的问题进行全面分析，充分挖掘原有设备潜能，适当增加挖潜改造的投资，通过增容满足浙江省电力增长需求。

3.3.对发电企业传统技术改造管理模式进行优化创新

要改变发电企业在技术创新和技术改进方面基本上没有话语权的局面，在汽轮机升级改造过程中，与制造厂共同研究各项优化完善措施，提出自己的创新技术，经过与制造厂交流和评审后，应用到汽轮机升级改造之中。这样发电企业技术改造就能够摆脱被动运用制造厂提供的成熟技术的旧模式，创立把现有技术和

创新技术有机结合的汽轮机升级改造新模式，走出发电企业技术改造新途径。采用优化的汽轮机节能评价方法对设备制造行业提供的改造技术进行全面评价论证，以及对机组现有主辅设备升级改造的适配性论证基础上，确定升级改造目标。并针对现有技术的薄弱环节进行研究，提出自主创新的技术措施，经充分科学论证，把应用现有先进技术和自主创新技术有机结合起来，在机组升级改造的实践中研究和应用，力争取得锦上添花的节能效果。例如：我们在制定乐清电厂1号机组升级改造方案时，向制造厂提出将超超临界西门子机组的低压缸斜撑缸方案应用到西屋机型的升级改造中，经过制造厂进一步优化设计，形成我们主导的新型技术方案

3.4.对传统的节能评价体系和方法进行优化拓展创新

3.4.1. 传统的汽轮发电机组节能评价体系和方法

(1) 汽轮发电机组装备行业的节能评价指标：汽轮机制造厂为用户提供的只有比较粗的综合指标（汽机热耗率）和分项指标（高、中、低压缸效率）。

没有将上述综合指标进一步分解细化到汽轮机设计制造的每一个部件和环节，制定相应科学的经济性评价方法。

制造厂在二十多年的历次优化完善过程中，关注的重点放在通流部分的叶型优化方面，而忽略了在结构设计和汽封配置方面进行科学合理的评价和优化完善；

这两方面设计的短板对提高汽轮机组的综合技术指标的影响也是同样需要特别关注的。

(2) 汽轮发电机组工程配套设计的相关指标：

在汽轮发电机组设计配套方面，缺少相关适配性的技术指标，基本是沿用前苏联的发展模式，主要设备之间，以及辅助设备与主设备的适配性存在一些不合理性，部分设备的富裕裕量相对比较大，运行中大马拉小车情况比较普遍；部分设备则设计容量偏小，运行中不堪重负、缺陷频繁，在额定负荷范围内甚至出现卡脖子的情况。

最近十多年来，新建火力发电厂工程在可行性研究和设计阶段得到进一步优化，单位容量的工程造价、土地占用率，以及工程投产后的单位容量能耗、水耗等经济指标和各项小指标明显优于现役机组，主设备之间，以及辅助设备与主设备的适配性更加合理。

(3) 汽轮发电机组发电行业的节能评价指标：

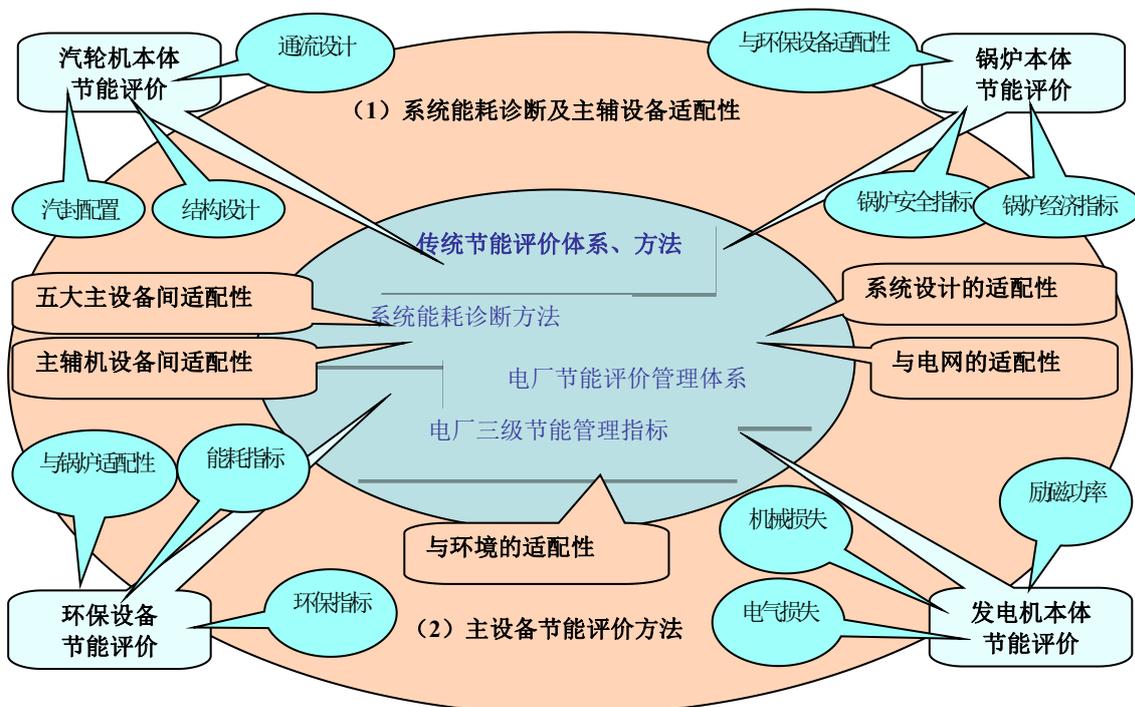
在火力发电厂企业，虽然建立了节能管理体系，建立了汽轮机组运行管理以供电煤耗、机组热耗、厂用电率为主的三级经济指标体系。但缺少针对汽轮机本体的比较细化的科学合理节能评价方法

(4) 进一步优化汽轮机组节能评价体系和方法的必要性

汽轮机技术发展需要以科学的态度全面分析研究，把科学发展与汽轮机技术发展紧密结合起来，进一步优化和细化现有粗放的汽轮机节能评价方法，对现有节能评价体系和三级节能指标进行全方位的纵向到底、横向到边的优化、补缺、细化和拓展，并应用到汽轮机的通流设计、结构设计和汽封配置等方面的节能评价和优化设计之中，制定相应的完善措施，提高汽轮机组的经济性。

3.4.2. 对传统的节能评价体系和方法全面优化的主要内容

3.4.2.1. 优化的汽轮机组节能评价方法基本构架



3.4.2.2 优化的汽轮机组节能评方法基本构架和主要指标

要充分挖掘现役机组的节能潜力，首先要对现有设备进行能耗评价和诊断，制定节能降耗的技术方案，实现降耗增容。

参考新建火力发电工程设计优化的经验，对在役机组机组优化，解决主设备之间、辅助设备与主设备、机组与电网、机组与环境、机组各系统的适配性问题，对原设计容量较大的主辅助设备校核评审和论证，核定增容部分设计容量比较小的主辅助设备，投入少量资金进行技术改造使之与其它设备的适配性更加合理，实现挖潜增容。

针对现有汽轮机组节能评价方法的薄弱环节进行进行全面细化、补缺和拓展，提出的汽轮机组系统能耗诊断及主辅设备适配性的评价要素，为汽轮机组升级改造立项过程，根据现有设备具体情况进行主辅设备适配性研究，实现降耗增容和挖潜增容。

确定现役机组升级改造目标时的主要指标是增容的单位容量投资，增容目标不宜定得太高。它控制在新建火电工程单位容量投资的三分之一至二分之一为宜。

3.4.2.3. 汽轮发电机组的系统能耗诊断及主辅设备适配性

目的：在现有电厂节能管理体系基础上进行系统能耗诊断，进而针对现役发电机组在设计方面存在的问题开展成套设备和系统的适配性分析研究，消除现役设备的短板和大马拉小车现象，充分挖掘现有设备潜能，提高火力发电机组综合效益。

新建工程根据《火力发电厂可行性研究报告内容深度规定》进行优化设计，某些指标将因工程和用地情况进行优化设计的技术方案，管道的压损会明显降低。对于实施升级改造的机组，THA 工况应该为合作方提供机组实际运行参数进行设计计算，由此获得的热耗率、缸效等设计保证值才更可信。需研究的主要有：

- ①主设备之间的适配性
- ②辅助设备与主设备的适配性
- ③汽轮发电机组与电网的适配性
- ④汽轮机组对环境因素的适应性
- ⑤汽轮发电机组各系统之间及系统内部的适配性

3.4.3. 汽轮机本体的节能评价方法

我们提出了进行汽轮机本体节能评价的汽轮机通流设计、结构设计和汽轴封配置三大要素。以及采用汽缸综合效率与汽缸通流效率差值进行判别的重要指标。

3.4.3.1 汽轮机通流设计的主要因素和节能评价方法

进行汽轮机本体通流设计的节能评价，应要分析高、中、低压缸之间的分缸负荷与焓降分配是否合理。改造设计适当增加中压缸分配的负荷，可提高整机的内效率。

在通流设计方面，我们针对通流设计过程中是否考虑了动叶的离心力对蒸汽影响问题，提出从计算结果或产品结构判别通流设计是否考虑离心力的四种评价方法，可协助制造厂在汽轮机叶型设计做好优化通流设计工作，提高汽轮机相对内效率。

3.4.3.2. 汽轮机结构设计的节能评价方法的研究和解决方案

关于汽缸结构性内漏问题

3.4.3.3. 汽轮机汽封的优化配置

对各种汽封的工作原理和使用情况进行了认真分析总结，提出了各种汽封的分类方法，提供了一个比较科学合理的汽轮机组各部位汽封选型最佳组合方案的参考标准和基本原则。

3.4.4. 汽轮机组设计补充创新技术的研究与应用

通过调查研究，我们发现目前国内主要汽轮机装备制造厂提供的改造方案总体上比十多年前已经有了很大的进步，相对比较成熟可靠，但仍存在一些问题需要得到解决，提供的业绩部分指标与设计保证值有差距。因此需要在制造厂提供的成熟技术基础上，针对其尚未解决的薄弱环节进行科技攻关创新，制定科学合理的补充技术措施，与制造厂提供的通流改造成熟技术同步实施，确保改造效果在制造厂设计保证值基础上，更上一层楼，取得了锦上添花的更佳节能减排效果。

自主创新的汽轮机设计补充技术是根据优化的汽轮机节能评价方法，对制造厂现有汽轮机技术进行评价之后，针对现有汽轮机技术的薄弱环节而研究开发的补充技术措施：

3.4.4.1. 高压缸夹层蒸汽控制技术简介及其应用情况

3.4.4.2. 防止汽缸结构性内漏的技术措施

3.4.4.3. 汽轮机组各部位汽封配置的推荐方案

3.4.4.4. 汽轮机组补充创新技术所获得的专利技术(共 15 项实用新型专利)

3.5. 现役发电机组升级改造的规范化管理

3.5.1. 现役发电机组升级改造管理导则

3.5.1.1、编写《现役发电机组升级改造管理导则》的目的

1) 根据集团公司相关管理标准的要求和国家现行管理法律、法规、规章、标准，结合集团公司“大能源”发展战略和现役火力发电机组节能减排工作现状，特制订本办法。本办法的实施有助于进一步规范发电机组升级改造管理工作，提高公司节能减排工作水平。

2) 发电机组升级改造项目是以对汽轮机设备实施通流改造技术为核心项目，以对锅炉、电气专业及其它主辅设备实施优化完善技术为配套项目，以实现机组节能降耗和增容目标并举的集成重大技术改造项目。

3) 项目采用优化的火力发电机组节能评价方法, 做好发电机组升级改造前期的可行性研究工作, 在跟踪和消化吸收各项火力发电先进技术创新和发展的基础上, 针对机组存在的设计问题和短板, 以降耗增容和挖潜增容相结合, 制定升级改造方案, 确定机组升级改造的降耗目标、增容目标和改造范围。

4) 通过管理导则的实施, 保证立项机组各项安全性、可靠性、经济性的各项指标处于同类型机组先进指标, 取得最佳经济效益和节能减排综合社会效益和最佳投入产出的性价比。

3.5.1.2、《现役发电机组升级改造管理导则》的主要管理流程

1) 检修滚动规划

2) 项目的可行性研究项目规划可行性研究可研审查项目立项项目招投标项目实施改后性能试验项目验收项目后评估图 3-2 管理流程

3) 项目立项和备案

4) 项目的供应商选择

5) 项目实施过程管理

6) 项目考核试验

7) 项目的验收评审

8) 项目的后评估

3.5.2. 汽轮机汽封配置管理导则

2012 年浙能技术研究院在完成“汽轮机新型汽封技术研究及其应用”科技项目之后, 我们根据集团公司领导的要求编制了《汽轮机汽封配置管理导则》

4. 浙能集团汽轮机组节能升级增容改造实施概况

4.1. 215MW 亚临界机组供热改造

4.1.1 供热改造技术方案

镇海电厂于 2010 年实施 4×21.5 万千瓦机组供热改造工程, 供热半径 7~11 公里, 供热能力每小时 400 吨, 同步对机组的设备进行脱硫、脱硝、电除尘器提效改造, 对厂内和厂外热网设计、建设进行改进。实施了末端有大用户支撑、“三管两箱”的热网低损耗优化设计方案及智能调度控制模式, 提高了热网安全性与经济性;

4.1.2 取得的经济效益和社会效益

本项目实施后, 机组供电煤耗率下降了约 20.28 g/kWh, 2011-2013 年镇海电

厂累计节煤 22.51 万吨，节约资金 1.8 亿元，再加供热收入累计 2.33 亿元，三年直接经济效益总额为 4.13 亿元；2011-2013 年累计减少 SO₂ 排放量 3333.3 吨、烟尘排放量 6429.2 吨、CO₂ 排放量 100.2 万吨，经济效益与社会效益十分显著。

4.1.3 获得的科技成果

本项目获得 2014 年浙江省科技进步二等奖和浙江电力科学技术一等奖。

4.2. 上汽国产引进型西屋 300MW 机组升级改造

截止 2014 年 12 月浙江省能源集团有限公司的在装的上汽国产引进型西屋机型的 300MW 汽轮发电机组已经完成嘉兴 1 号和 2 号机组、温州 3 号-6 号机组、长兴 1 号-4 号机组共 10 台机组的升级改造工作，机组升级改造后机组铭牌出力均提高到 330MW；其中嘉兴 2 号机组、长兴 2 号机组、温州 3 号和 4 号，及 6 号机组机组已经完成高中低压缸全改。温州 5 号机组、长兴 1 号机组、及 3 号和 4 号机组机组的低压缸改造的合同已经签订，将于 2015 年-2016 年实施。

为浙能 10 台上汽西屋机组节能升级改造项目提供技术和设备的供应商主要有北京全四维公司和上海电气。其中，四台由全四维承担高中低压缸的改造，五台由上海电气承担高中低压缸的改造，温州 5 号机组则由上海电气和全四维分别承担高中压缸和低压缸的改造。上海电气承担的五台机组的低压缸改造，两台采用上汽对原西屋技术进行优化改进的技术，三台采用的是上汽对西门子技术消化吸收的 AIBT 技术进行改造的。具体改造方案见下表。

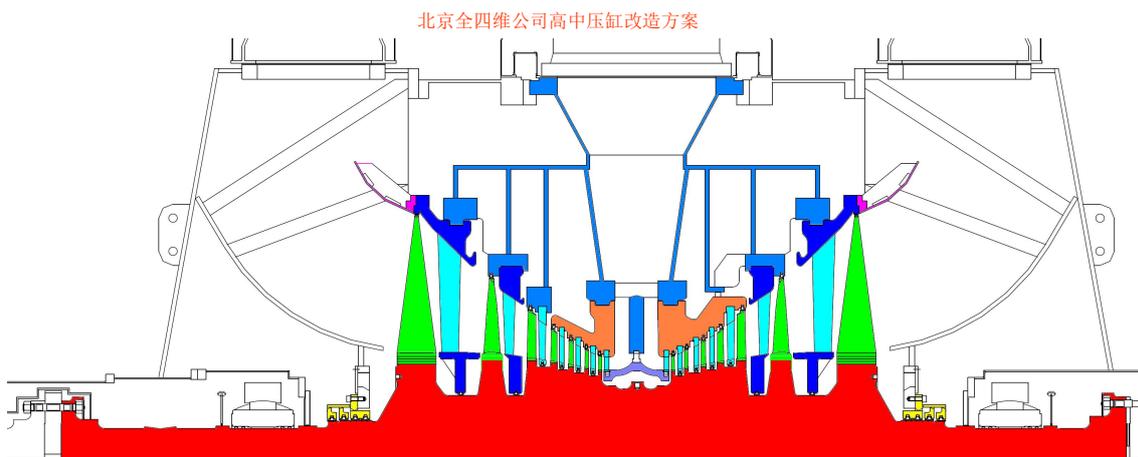
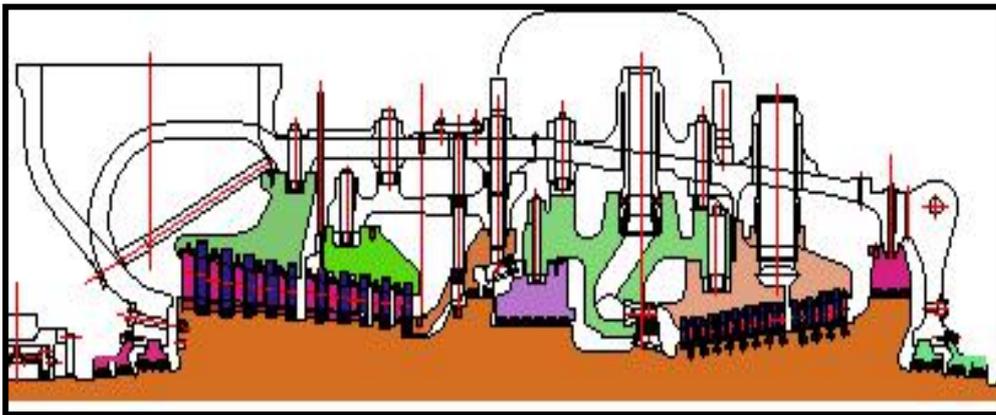
上汽国产引进型西屋机型升级改造方案一览表

单位	机组	汽轮机		其它方面 配套改造情况
		高中压缸	低压缸	
嘉兴	1	采用北京全四维技术，增加 1 级，调节级改顺流布置。更换转子及动叶、内缸、持环及静叶、高压进汽室、高压喷嘴组、等部件。汽轴封采用组合式汽封。	采用北京全四维技术，更换转子及动叶、持环及静叶、汽封等部件。	锅炉、发电机以及主变根据具体情况同步进行了适当的增容改造
嘉兴	2			
温州	3			
温州	4			
温州	5	采用上汽西屋优化技术，增加 1 级，调节级改顺流布置。更换转子及动叶、内缸、持环及静叶、高压进汽室、高压喷嘴组、等部件。汽	采用上汽西屋优化技术，更换整体内缸、前四级动叶、持环及静叶、汽封等部件。	锅炉、发电机以及主变根据具体情况同步进行了适当的增容改造
温州	6			
长兴	2	采用上汽 AIBT 技术，更换斜撑式内缸，增加 1	采用上汽 AIBT 技术，更	锅炉、发电机以及主变根据具体情况
长兴	1			
长兴	3			

长兴	4	轴封采用组合式汽封。级，更换转子及动叶、持环及静叶、汽封	同步进行了适当的增容改造
----	---	------------------------------	--------------

4.2.1 北京全四维改造方案

- 1) 调节级改顺流布置
- 2) 优化焓降分配: 高中压部分各增加 1 级。
- 3) 调节级子午面收缩静叶栅
- 4) 高中压缸通流部分的优化设计
- 5) 高中压内缸和持环优化设计
- 6) 改进高压进汽插管和一抽插管的密封结构
- 7) 优化汽轴封改进和配置: 高压平衡活塞汽封增加 1 圈。
- 8) 高压缸夹层蒸汽系统完善
- 9) 更换低压缸动静叶片, 末级采用 958mm、次末级采用 480mm 叶片, 采用整体内缸。



4.2.2 上汽改造方案

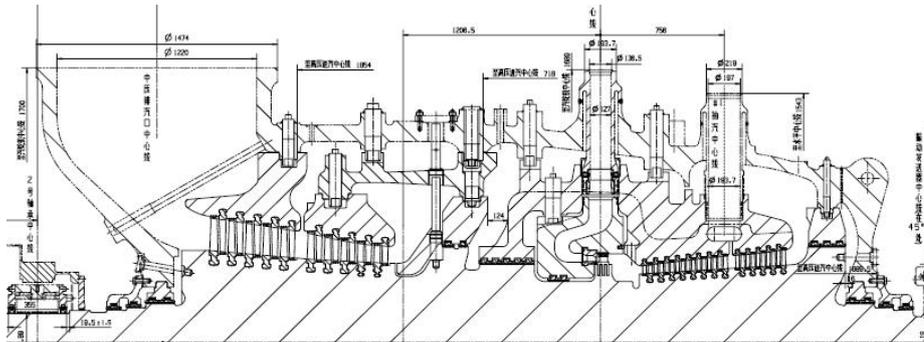
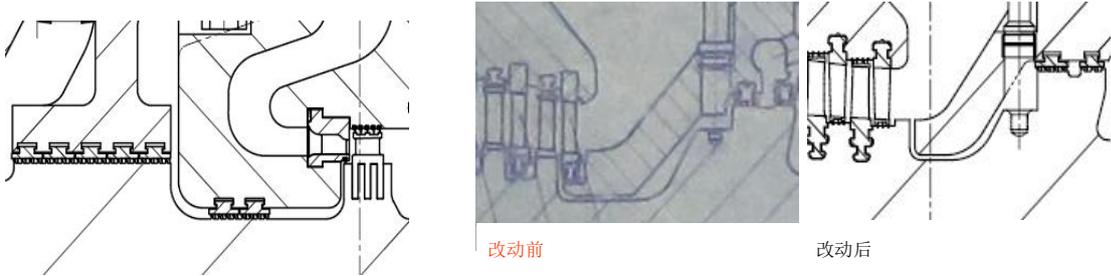
- 1) 调节级改顺流布置
- 2) 优化焓降分配: 高压缸增加 2 级, 中压缸增加 1 级。
- 3) 完善通流动静结构, 消除原型机高压上下缸温差过大问题。
- 4) 改进高压进汽和一抽插管的密封结构

5) 优化汽轴封配置:

在高压喷嘴出口经过叶根汽封之后到高压平衡活塞之前，高压喷嘴室增加 2 圈汽封。见下左图。

6) 改进高压缸夹层蒸汽

7) 过桥汽封进入中压缸第一级的结构改动，见下右图



4.2.3. 上汽 300MW 西屋机型升级改造前后主要技术指标

在浙能集团 10 台上汽国产引进型西屋机组中，嘉兴两台机组于 1994 年投产，改造前实际运行热耗分别为 8282KJ/kWh 和 8326KJ/kWh；高压缸效率为 80.4%左右，中压缸效率为 90%左右；其它 8 台机组于 2001-2003 年投产，改造前实际运行热耗为 8240-8300KJ/kWh 之间，高压缸效率为 80.5-80.8%之间，中压缸效率为 90.0-90.5%之间；实施升级改造之后，三缸全改 THA 工况热耗 7960-7990KJ/kWh 范围，只改高中压缸 THA 工况热耗 8060-8110KJ/kWh 范围。高压缸效率为

86.9-87.4%，中压缸效率为 92.1-92.8%

4.2.4 获得科学技术成果情况

“基于汽轮机节能评价方法的 300MW 汽轮机组升级改造的研究与实践”已经先后获得 2013 年浙江省科学技术二等奖、2013 年全国电力职工技术成果三等奖、2013 年浙江省电力科学技术一等奖。

4.3.600MW 亚临界机组升级改造概况

4.3.1. 北仑东芝机型升级改造

浙能北仑二期 3-5 号机组增效扩容改造项目主要由汽轮机高中压通流部分和高压阀组改造组成，同时进行了锅炉低氮燃烧器改造、机组控制系统一体化改造。

4.3.1.1 改造前基本概况

北电 3-5 号机组于 2000 年 9 月-2001 年投产发电。汽轮机为日本东芝公司生产的单轴四缸四排汽亚临界一次中间再热、冲动、双背压凝汽式汽轮机。北仑二期机组投产初期性能考核试验，热耗率平均值为 8040kJ/kW·h，与设计值 7773kJ/kW·h 相比，偏高幅度达 3.4%，高压缸效率试验平均值为 81.3%，偏低设计值约 6.3%；中压缸效率试验平均值为 87.9%，偏低设计值约 7.2%。

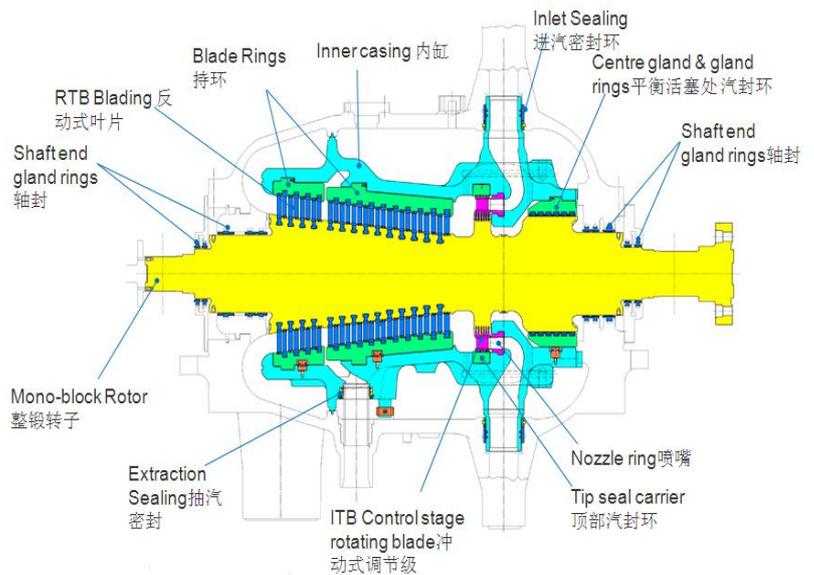
4.3.1.2. 设备改造概况

北仑 3 号-5 号机组采用阿尔斯通通流改造技术和东汽高压阀组技术完成汽轮机和高压阀组的升级改造，改造后高压缸效率、中压缸效率和高压阀组压损均达到预期技术指标，机组铭牌出力增加到 660MW。

1) 高压缸通流改造技术

更换转子和内缸，高压通流级数由原来的 1+7 级调整为 1+14 级，调节级采用冲动式，其余压力级采用反动式。

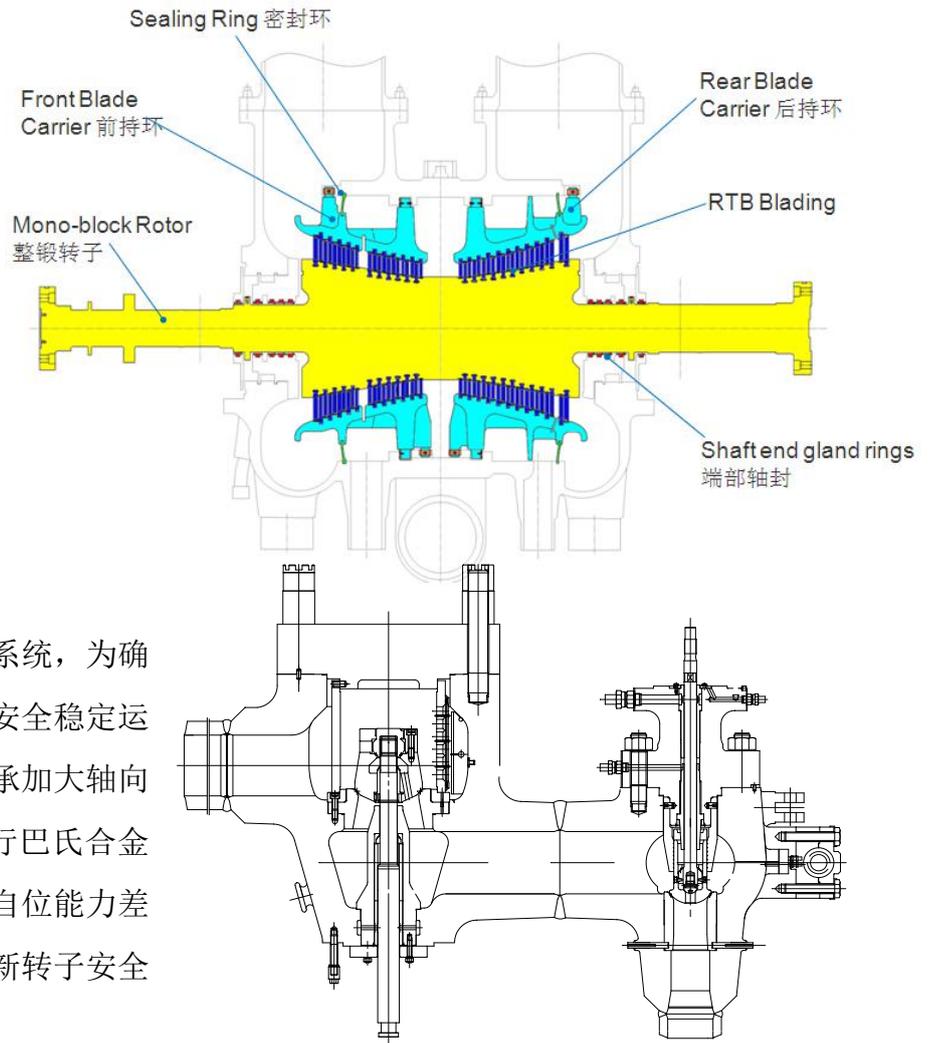
2) 中压缸通流改造技术



更换中压内缸和转子，采用反动式双流设计，中压部分由原来的 2×6 级调整为 2×11 级。中压缸改造剖面图如下图所示。

3) 轴承技术改造

由于采用了反动式的技术，高中压转子重量大幅上升，导致轴承比压相应上升，且北仑#4、5 机组#2/3/4 号轴承存在瓦块及轴套支点磨损，自位能力差问题。原机组没有顶轴油系统，为确保通流改造后汽轮机安全稳定运行。新设计制造的#3 轴承加大轴向尺寸，对#2、4 轴承进行巴氏合金升级改造，消除了轴承自位能力差的隐患，确保了改造后新转子安全稳定运行。



4) 高压阀组改造技术

采用扩大通流口径与优化流场为主要手段对高压阀组进行整体优化设计改造，降低高压阀组压损。

4.3.1.2. 改造前后主要技术指标

机 组	改造前实际指标				改造后保证指标				改造后实际指标			
	热耗 kJ/kWh	缸效率%			热耗 kJ/kWh	缸效率%			热耗 kJ/kWh	缸效率%		
		高压	中压	低压		高压	中压	低压		高压	中压	低压
3	8029.1	82.43	88.11	88.21	/	91.1	91.13	/	/	91.47	92.01	/
4	8055.5	81.4	88.01	86.38					/	91.03	92.31	/
5	8036.6	80.97	87.54	87.70					/	91.25	92.16	/

4.3.1.3. 获得科学技术成果情况

本项目获得 2014 年浙江电力科学技术一等奖。

4.3.2. 东汽日立 600MW 亚临界机型的升级改造

嘉华 4 号机组通过竞争性谈判, 选择阿尔斯通公司承担机组的升级改造工作。改造方案与兰溪 3 号机组基本相同, 机组于 2014 年 10-12 月同时安排了节能升级改造和超低排放技术改造两大改造项目, 机组于 2014 年 12 月 15 日并网发电。

4.3.3. 上汽西屋 600MW 亚临界机组的升级改造

嘉华 5 号机组采用上海电气提供的高中低压缸全改的改造方案, 该方案是上海电气与西门子公司合作之后, 将原西屋技术经过多年优化之后, 与西门子技术进行融合和优化, 形成独具特点的 AIBT 技术, 提供了比较科学合理的改造方案。方案增加高中压缸级数, 降低调节级焓降, 更换喷嘴组、高压内缸、转子和动叶、隔板和静叶、汽封、进汽导流环、排汽导流环等部件。机组将于 2015 年实施升级改造。

4.4.600MW 超临界机组升级改造概况

4.4.1. 东汽日立 600MW 超临界机型的升级改造

浙能集团目前拥有 6 台东汽日立 600MW 超临界机组, 汽轮机为东方汽轮机的单轴三缸四排汽超临界一次中间再热、冲动、双背压凝汽式汽轮机。分别为兰溪 1-4 号机组和凤台 1、2 号机组。

兰溪四台机组投产于 2006 年-2007 年。投产后 THA 工况修正后的热耗率平均为 7805kJ/kWh, 与设计值 7537kJ/kWh 相比, 偏高 3.6%; 四台机高压缸效率平均为 84.5%, 比设计值 86.3% 偏低 1.8%; 中压缸效率平均为 91.4%, 比设计值 92.5% 偏低 1.1%; 低压缸效率为 86.3%, 比设计值 93.2% 偏低 6.9%; 以上三项影响整机效率 3.5%。

凤台两台机组分别于 2008 年 8 月和 9 月投产, 因原设计余量较大, 2000 年两台机组的铭牌出力改为 630MW。投产后汽轮机热耗在 3VWO 工况下的数值为 7851kJ/kWh, 比设计值 7535kJ/kWh 高出热耗率 316kJ/kWh, 比同期国内同类机组先进值 7500kJ/kWh 偏高 351kJ/kWh。

4.4.1.1. 兰溪 3 号机组升级改造概况

兰溪 3 号机组增效扩容改造项目以汽轮机通流改造为主, 配套锅炉、发电机、主变扩容改造。在降低汽轮机热耗水平同时提高机组出力, 机组增容至 660MW。

1) 设备改造概况

汽轮机部分:

通过竞争性谈判采用阿尔斯通技术进行改造。更换高中压转子、高中压内缸、低压转子、低压内缸、高中低压部分所有静叶和通流部件。

(1) 汽轮机高中压通流部分保留冲动式设计，高压缸级数增为 10 级；中压缸的级数不变。改造后增大了顶部/底部半径的比值，叶片更长，效率更高。动叶具有先进的叶型，整体围带，叶顶采用迷宫式汽封。增大高中压喷嘴以降低固体微粒冲刷。高中压隔板采用了具有先进的三维型线的静叶，围带被焊进隔板内外环。

(2) 改造低压缸采用阿尔斯通高性能反动式通流设计，末级叶片为 37”带鳍叶片，由 7 级改为 8 级，转子采用焊接式空心转子。

锅炉部分：

(1) 增容改造后锅炉 BMCR 蒸发量最大可至 2020.5t/h，再热器流量由 1551.3t/h 增大到 1652.33t/h。

(2) 适当减少低温再热器右侧受热面，以减少低温再热器左右侧的温度偏差。

(3) 减少再热器管组后，进入空预器的烟温将增加 8~11℃，适当增加省煤器受热面积。

(4) 过热器出口安全阀进行更换并整定，以满足锅炉排放量的增加需要。再热器安全阀定值整定。

(5) 增加热一次风道母管截面，以满足磨煤机出口温度提高及增容改造后燃煤量增加的需要。

发电机部分：更换发电机定子槽楔，更换高换热性能氢冷器，提高氢冷器压力；

主变部分：更换高效冷却器。

2) 改造后主要指标

2014 年 6 月底 7 月初，按照 ASME 规程，通过严格的热耗考核试验，结果显示 100%THA 工况下，汽轮机高中低压缸效率分别为 88.63%、90.98%、90.70%，热耗为 7628.41kJ/kWh（合同为 7630kJ/kWh）；75%THA 工况下，汽轮机高中低压缸效率分别为 85.67%、91.11%、89.45%，热耗为 7804.24 kJ/kWh（合同为 7814kJ/kWh）；加权为 7716.32 kJ/kWh（合同为 7722 kJ/kWh），热耗指标均达到了合同要求值。

3) 项目验收评审和推广示范

该项目于 2014 年 9 月通过了浙江省经信委组织的验收评审。

国家能源局综合司国能综电力[2014]787 号文，将兰溪 3 号机组汽轮机通流改造项目确定为国家煤电机组节能与改造示范项目。

4.4.1.2 兰溪其它 3 台机组升级改造安排

兰溪 3 号机组改造成功后，其它 3 台机组已经与阿尔斯通公司续签了节能升级改造合同，2015 年改 2 台，2016 年改 1 台。

4.4.1.3 凤台 1、2 号机组节能升级改造的安排

凤台两台机组的节能升级改造，通过竞争性谈判与阿尔斯通公司签定了节能升级改造合同。分别安排在 2015 年和 2016 年实施。

4.4.2. 上汽西屋 600MW 超临界机型的升级改造

4.4.2.1. 乐清 1 号机组升级改造

在确定乐清 1 号机组升级改造方案之前，上海电气采纳了浙能集团的建议，将该公司采用西门子技术生产的超超临界机组的低压缸（斜撑式内缸）应用于上汽亚临界西屋 600MW 机组的低压缸改造，并对相关接口和部件进行优化，提供了比较科学合理的改造方案。

因此在项目的竞争性谈判中战胜阿尔斯通公司的有力竞争，承接了该机组的升级改造。这也是全国首台超临界 600MW 机组采用斜撑式低压内缸结构实施的改造项目。

机组于 2014 年 10-12 月同时安排了节能升级改造和超低排放技术改造两大改造项目，机组于 2014 年 12 月 15 日并网发电。

改造后性能试验初步计算结果：额定负荷机组热耗 7650kJ/kWh 左右，比合同保证值 7600kJ/kWh 高 0.6%。

5.浙能集团汽轮机组节能升级改造技术经济性研究的主要成果

5.1.取得明显的经济效益和社会效益。

已经实施的发电机组升级改造工作取得直接经济效益超过 5 亿元/年，减少排放的环境效益和创造社会产值的社会效益也十分巨大。

见浙能集团已经完成升级改造的燃煤机组降耗和增容的直接效益汇总表

浙能集团部分已经完成升级改造的燃煤机组降耗和增容的直接效益汇总表

机组	供电煤耗降幅	降耗直接年收益	增容直接年收益	合计直接收益
嘉兴 1 号机组	6.24g/kWh	875.5 万	1650 万	2525.5 万
嘉兴 2 号机组	11.3 g/kWh	1584 万	1650 万	3234 万
温州 3 号机组	6.28 g/kWh	880.5 万	1650 万	2530.5 万
温州 4 号机组	7.53 g/kWh	947.8 万	1650 万	2597.8 万

温州 5 号机组	6.51 g/kWh	1074 万	1650 万	2724 万
温州 6 号机组	11.1 g/kWh	1578 万	1650 万	3228 万
长兴 1 号机组	6.54 g/kWh	918 万	1650 万	2568 万
长兴 2 号机组	9.44 g/kWh	1217.8	1650 万	2867.8 万
长兴 3 号机组	6.54 g/kWh	918 万	1650 万	2568 万
长兴 4 号机组	6.54 g/kWh	918 万	1650 万	2568 万
北仑 3 号机组	8 g/kWh	2057 万	4290 万	6347 万
北仑 4 号机组	6.5 g/kWh	1467 万	4290 万	5757 万
北仑 5 号机组	6.5 g/kWh	1467 万	4290 万	5757 万
兰溪 3 号机组	6.7 g/kWh	1680 万	3894 万	5574 万
合计		17582.6 万	33264 万	50846.6 万

注：嘉兴 1 号、温州 3 号-5 号、长兴 1 号及 3-4 号机组、北仑 3-5 号机组仅为高中压缸改造后的计算数据

5.2.综合效益和推广应用前景

通过分期分批实施在役汽轮发电机组升级改造，优化了浙能集团公司主营发电业务的产能结构，提高了浙能集团公司的综合竞争力。

在实施在役汽轮发电机组升级改造的同时，浙能集团完成了全国首家燃煤机组（嘉华 7 号 1000MW 超超临界机组）超低排放技术改造和首台燃煤机组（六横 1、2 号 1000MW 超超临界机组）超低排放项目与新建工程同步投产，并计划于 2017 年之前完成 300MW 以上机组的超低排放改造。

12 月 15 日嘉华 4 号机组和乐清 1 号机组，在同时完成机组节能升级改造和超低排放改造工作之后，同时并网发电，这是继浙能三台 1000MW 机组超低排放项目完成之后，全国首批 600MW 机组实施的超低排放改造和节能升级改造项目。

5.3.浙能集团公司燃煤发电机组

浙能集团公司先期进行的燃煤机组节能减排和升级改造工作具有很强的示范效应，在当前部分发电集团为执行三部委《行动计划》而苦苦寻觅对策、研究升级改造计划路线之际，浙能集团公司已经以优异的业绩为全国同行业树立了良好的典型样板，其成果包括：

5.3.1. 浙能集团公司的节能减排升级改造突破了传统的发电企业技术改造由设

备制造企业主导的管理模式，形成了由发电企业主导，自主创新技术与设备制造
企业先进技术相融合的新型技术改造模式。

5.3.2. 优化的燃煤发电机组节能评价方法，为发电企业设备诊断和制定升级改造
方案提供了科学的依据。

5.3.3. 形成了规范的燃煤发电机组升级改造管理模式。

5.3.4. 以节能升级改造和超低排放改造两大举措同步实施，大幅度提升燃煤机
组综合竞争力，符合国家“节约、清洁、安全”的能源战略。

5.4. 创建首个清洁能源示范省

由于浙能集团在燃煤机组节能减排方面的示范作用，浙江省内其它发电
集团的电厂也在积极组织节能升级改造和超低排放改造工作。

因此，浙江省政府已经与国家能源局协商，将在全国率先创建国家清洁能源
示范省。

根据创建方案，浙江省将通过创建国家清洁能源示范省，成为国家重要的清
洁能源综合示范基地、清洁能源科技创新基地、能源体制机制改革实践基地。

据了解，由于浙能集团在燃煤机组节能减排方面的典型示范作用，国华、
国电、华能等发电集团正在积极安排新的节能减排工作。据了解，目前阿尔斯通、
上汽、东汽、全四维等汽轮机厂的节能升级改造订单已经排到 2018 年。

第一作者简介：倪 定

浙江省能源技术研究院生技部 科技主管
教授级高级工程师

浙江省能源集团有限公司 汽机高级专家
华电集团公司 火力发电厂安全性评价特聘专家
华电电力科学研究院 高级顾问
神华国华电力公司 技术专家库特聘技术专家

本人长期在生产一线进行电力科学研究，解决生产实际问题，近五年在浙能、华电集团
公司参与近百台汽轮机组节能升级增容改造，先后获得省部级科技成果 7 项；其它科技成果
26 项；完成各类科技、技改、节能项目 30 多项；发表论文约 50 余篇；获得 15 项专利。