

600MW 等级超超临界汽轮发电机组型式探究

张乐川 李临临
山东电力工程咨询院

内容提要：本文介绍了国内超超临界 600MW 等级汽轮发电机组的技术引进及国产化情况，对超超临界机组型式两缸两排汽与三缸四排汽进行比较分析，对超超临界机组设计与主厂房布置有一定的参考价值。

关键词：超超临界 两缸两排汽 三缸四排汽

1 概述

国家政策能源政策的调整，高参数、大容量发电机组的研发，推动国内超超临界技术蓬勃发展，同时科研单位与制造行业与时俱进，经过近些年的技术研讨、吸收、消化、发展、实用，超临界机组的陆续安全经济投产，超超临界百万机组的正处紧张建设阶段，皆为新技术提供了有效的实践检验平台。

1) 国内超超临界机组的蒸汽压力多采用比常规超临界机组稍高的压力，即超超临界在初压的选择上采用的是在目前国内超临界的基础上逐步发展的方法，现阶段主汽门前压力选择经过各方面论证后集中二种较合适和妥当参数：

25MPa：华能玉环电厂、国电泰州电厂一期和邹县四期工程采用的参数。

27MPa：外高桥三期采用的参数。

对于主汽温度，采用 600 是适合中国国情的。对锅炉而言，过热蒸汽从 585 提高到 605 ，锅炉型式基本一样，仅后屏过热器和末级过热器的工质温度提高，使得后屏过热器部分受热面管子、集箱、管道的材料档次提高。总的来说，过热蒸汽温度从 585 提高到 605 将增加锅炉总价的 1%。对汽机而言，目前高温 600 参数机组的使用业绩已相当成熟，在日本及德国针对不同的部套阀门、汽缸、转子等已有系列的标准材料。

2) 对于再热次数，有一次再热和二次再热二种方式，与一次再热比较，二次再热虽然可以提高效率，但也将提高投资。从电厂投资以及热经济性角度考虑，现阶段超超临界机组采用一次再热是比较合适的。

3) 随着世界各国汽轮机制造业的不断发展，目前大容量机组的布置型式已逐步统一向单轴方向发展。对于 1000MW 等级的单轴汽轮机已有四缸四排汽也有五缸六排汽。

综上所述，考虑到经济性、耐高温材料的开发应用情况及有利于国产化等方面因素，我国超超临界机组的技术参数：27MPa/600 /600 或 25MPa/600 /600 单轴，一次中间再热二种，具体参数可随中标的制造厂家情况选取。

2 机组容量

机组容量宜根据机组所处电网容量合理选择，并非机组越大越好。从目前华东、华北地区来看，燃煤价格相对较高，华东、华北电网容量较大，因此已经普遍采用大容量、高参数机组，以达到降低发电煤耗、减小排放、节省资源之目的，发展大容量百万机组是适当的。据统计，20 世纪 80 年代以来仅共有 18 台百万千瓦等级机组投产。而且 1000MW 机组因其技术水平高，自动化程度高，减少了停机故障的发生率；再有设计水平和制造质量，科学运行管理水平等方面的提高，使之可用率要比 800MW 机组高，强迫停机率比 800MW 机组低很多。根据 ABB 和 SIE-MENS 公司提供的资料，他们的 900MW 级超临界机组的可用率可大于 90%。

同时百万机组存在一次投资大，回收期长，设备设计、制造要求高，依赖进口设备等多制约因素。

对于 600MW 等级超超临界机组完全可以依托国外超超临界机组良好的运行实绩,国内制造厂在 600MW 等级超超临界机组的生产、设计、研发已积累的不少经验及国产化程度高,加以 600MW 等级超超临界机组与同等级超超临界机组具有良好的继承性等特点,采用先进的 600MW 等级超超临界参数国产汽轮发电机组即符合多数地方电网容量的实际特点,也符合国家的产业政策,600MW 等级超超临界机组应大力推广。

3 600MW 汽机汽缸组合型式

目前大容量机组的布置型式基本为单轴布置,例如 600MW 等级三缸四排汽、四缸四排汽、两缸两排汽等,1000MW 等级的单轴汽轮机即有四缸四排汽也有五缸六排汽,其影响机组结构的主要因素是低压缸的选择,低压缸设计又受到排汽面积与平均背压的影响:

1) 汽轮机的排汽面积

汽轮机的功率与进汽量和蒸汽焓降有关系。在一定的蒸汽初终参数下,汽轮机的蒸汽焓降是一定的,所以汽轮机所能发出的最大功率主要决定于通过汽轮机的最大流量。而汽轮机的最大流量又决定于末级叶片的通流能力(排汽面积)。

汽轮机功率不变,只有通过增大汽机末级叶片的通流面积来实现,而增大通流面积的方法可以是:

a、增加低压缸的数量,使排汽口的数量增多

但是,低压缸的数量不能无限的增加。因为低压缸的数量越多,使得轴系越长、轴系的稳定性就差,设计难度也大。此外,主厂房的投资也会因此增大。而增大通流面积的另一方法是:

b、增大末级叶片的长度,使单个排汽口的面积增加。

为此,世界上各大汽机制造厂都相继开发了大于 1000mm 的末级长叶片,使得单个排汽口的面积增大了。末级叶片长度和排汽面积 SIEMENS 公司为 1150mm、 11.5m^2 ,日立公司为 1092.2mm、 10.2m^2 ,东芝公司为 1019.2mm、 11.89m^2 、俄罗斯为 1200mm、 11.7m^2 等等。

这就是之所以出现长末级叶片的两缸两排汽型式与常规三缸四排汽型式相竞争的原因。

2) 汽轮机的背压

上述假定了初终参数不变的情况下所作的分析。其实,汽机的终参数,也就是汽机背压,对汽机的功率也有很大的影响。当汽机背压降低后,由于焓值变化很小,因此汽机的理想焓降增加不多。但蒸汽的比容却变化极大。

由此可见,根据目前国际上末级叶片的发展现状,对于两缸两排汽、常规背压(4.9kPa)来说,600MW 的容量已经基本达到了极限状态。如果背压降低,需有合适排汽面积的配合,但受限于末级叶片长度,则需增加低压缸,虽然经济性有所提高,但同时也带来了一些缺点。两缸两排汽机组与三缸四排汽机组相比主要的优势在于,其一;轴系短,对机组轴系振动情况极为有利。其二;可减少因不均匀沉降基础变形对于轴承荷载和轴系对中的影响。其三;因减少了一个低压缸可使机组本身造价降低,也因机组总长缩小而使主厂房造价降低。

3) 国内 600MW 等级超超临界机组制造与国产化

超超临界机组在国际上已经是一项逐渐成熟的技术,世界上有不少大型电站设备制造公司都有能力制造超超临界机组。

我国在此领域亦迎头赶上,哈尔滨锅炉有限公司和上海汽轮机厂在华能玉环发电厂的 1000MW 等级超超临界机组工程上中标,东方锅炉厂和东方汽轮机厂在山东邹县发电厂的 1000MW 等级超超临界机组工程中标,上海锅炉有限公司和上海汽轮机厂在上海外高桥发电厂三期工程的 1000MW 等级超超临界机组工程中标,以及哈尔滨锅炉有限公司和哈尔滨汽轮机厂在江苏泰州一期工程的 1000MW 等级超超临界机组工程中标,为百万等级超超临界机组的国产化奠定了坚实的基础。

我国的火电设备制造以上海、哈尔滨、四川东方作为三大基地,通过多年的自身建设,

采用自主设计、技术支撑，部分引进的模式，目前都已具备独立设计并制造亚临界、超临界参数 600MW 的汽轮发电机组的能力。国内制造对于汽轮机本体、锅炉本体在设计手段上都作了一定的技术储备，因此在进行常规超临界机组国产化的同时发展超超临界机组，既能提高我国的电力工业水平，实现向超超临界机组的跨越，又能充分利用已有的设计制造能力，保持行业发展的可持续性。但由于温度和压力将超过常规超临界参数，国内制造企业虽然在设计手段上也已具备这一条件，但在某些核心技术上还缺乏一定的经验，完全自主设计具有一定的风险性。采取走先引进核心部分的技术，再选择自主设计、外商支撑，最后实现完全国产化的道路。

国内 600MW 等级超超临界机组生产厂商有哈尔滨汽轮机厂、上海汽轮机厂、东方汽轮机厂、北重阿尔斯通（北京）电气装备有限公司；其生产型式包含：高中压分缸四缸四排汽、高中合缸三缸四排汽、高中分缸三缸两排汽、高中合缸两缸两排汽，均为单轴系结构四种型式。以下分厂商介绍机组型式特点。

a) 哈尔滨汽轮机厂

技术特点

技术支持：哈汽公司超超临界机组系全套引进日本三菱公司的原机型。由三菱公司设计，三菱公司和哈汽公司联全制造。

主要技术特点：A、机型为单轴两缸、两排汽、一次中间再热，凝汽式机组。高中压合缸，低压缸采用一个 48 英寸自带围带末级叶片。这种设计降低了汽轮机总长度。B、除高压缸喷嘴、主汽门与再热主汽门、末三级叶片需进口，均国产设计生产，其中末三级叶片由营口#2 机组后可以国产。C、转子直接支撑在基础上。E、高压和中压排汽涡壳最优设计，损失最小。

业绩

哈汽公司与三菱公司联合生产

机组名称	功率 MW	压力 MPa	转速 rpm	温度	投运年	末叶英寸	备注
营口#1#2	600	25.0	3000	600/600	2007	48	华能
灤山#1#2	600	25.0	3000	600/600	2007	48	中电投
河源#1#2	600	25.0	3000	600/600	2008	48	深能源
铁岭#1#2	600	25.0	3000	600/600	2007	48	华电

三菱公司制造广野 #5 超超临界机组 2004 年 3 月初始启动，2004 年 7 月投入商业运行至今，汽轮机进口主蒸汽参数为 24.6MPa/600 /600 。

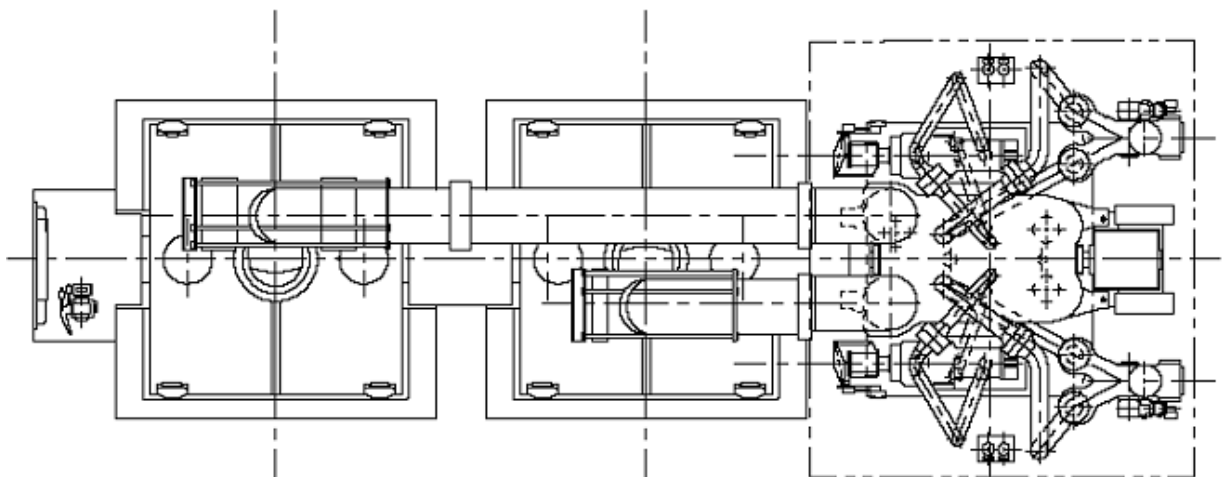


已定货的超超临界 600MW 机组的结构与已投运广野 #5 机组完全相同。

b) 上海汽轮机厂

技术特点（技术支持：美国西门子公司）

技术特点：A 该厂生产 600MW 超超临界机组型式包括高中合缸三缸四排汽、高中分缸三缸两排汽、两缸两排汽三种型式。主蒸汽参数：25MPa/600 /600 。B 采用高中压缸联合启动。C 高中压合缸三缸四排汽汽轮机外形尺寸：27.7 × 11.5 × 8m。



D 两缸两排汽机组高中压均为单流，采用合缸回流结构，低压缸为双流，采用双层缸结构。高中压合缸结构采用目前成熟的超临界与百万机组的设计模块高压缸积木块 BB0244S 在材料、结构方面改进，以适应 25MPa，600 /600 的超超临界进汽参数，转子叶片内缸

材料使用西门子超超临界 1000MW 材料。配特大型长叶片的低压缸，采用 1000MW 机组的末 2 级成熟可靠叶片，末级叶片高度 1146mm。

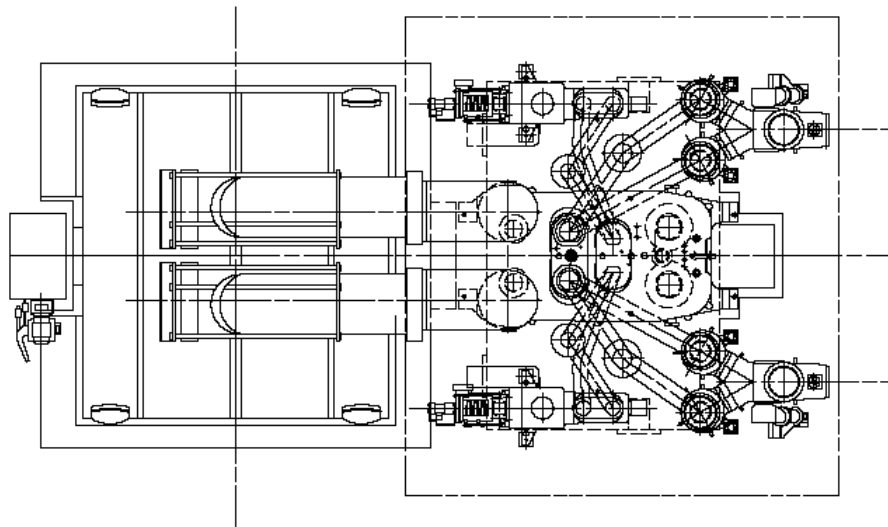
业绩

2006 年汽轮机产能为 3500 万千瓦。超超临界 1000MW 已有 6 台，外高桥三期、宁海、北疆，超超临界 600MW 等级目前尚无订单。

c) 东方汽轮机发电机

技术特点（技术支持：日立公司）

技术特点：A 其超超临界 600MW 机组现开发有三缸四排汽 600MW 机组，三缸四排汽 660MW 机组，两缸两排汽 600MW 机组三种型式。三缸四排汽 600MW 机组，三缸四排汽 660MW 机组采用 40" 末级叶片，两缸两排汽 600MW 机组采用 48" 末级叶片。B 冷态启动采用高中压缸联合启动，热态启动采用中亚缸启动。C 三缸四排汽尺寸：27.7×10.6m；轴向排汽面积为：35.006m²；两缸两排汽尺寸：19.70×10.60m；轴向排汽面积为：24.28m²。



业绩

东汽产能为年 1500 ~ 1800 万千瓦。无论何型式皆是同等级亚临界、超临界机组的技术继承，国产化程度高，技术可靠，引进费用、万本低。

已定货的两台芜湖超超临界机组为三缸四排汽 660MW 超超临界机组。

d) 北重阿尔斯通（北京）电气装备有限公司

技术特点（技术支持阿尔斯通 ALSTOM 公司）

该公司系北京重型电机厂和阿尔斯通北京投资有限公司按 40% 和 60% 比例出资形成的合资公司，2005 年 3 月开始营运，主营 600MW 及以上汽轮机与汽轮发电机。

主要技术特点：A 机型为一次中间再热、单轴、三缸两排汽与四缸四排汽反动式超超临界 600MW 汽轮机组。四缸四排超超临界 600MW 汽轮机尺寸：27m（包含发电机组总长 43m）；高中分缸三缸两排汽超超临界 600MW 汽轮机尺寸：21m（包含发电机组总长 37m）。B600MW 等级超超临界机组系阿尔斯通公司模块设计产品，其固有特点：

主汽门调门、再热主汽门调门均直接与本体连接，残余气体超速危险小；高压内缸为圆筒形外部红套环结构，受热均匀，应力小缩短启动时间；

轴系采用焊接转子；

高、中、低压缸进汽全部为切向全周进汽，采用节流配汽；

机组 DEH，TSI，ETS 系统采用透平油；高、中压模块厂内整装后出厂；

45 英寸末级叶片等特点。

业绩

2005 年至 2006 年厂房处于建设期，没能承接到超超临界机组合同。

4) 发电机型式

相对锅炉与汽轮机而言，发电机的技术比较成熟，各大制造厂都认为按现有技术条件，对于 600MW 全速汽轮发电机的设计、制造等方面不会存在很大的困难。除了少数关键技术，一般均能实现国产化。各制造厂均有一套完整的运输方案。

上电和哈电制造的 600MW 汽轮发电机电压为 20kV，东电 600MW 汽轮发电机电压为 22kV；哈尔滨汽轮发电机厂同汽轮机一起引进三菱发电机，由于三菱公司的发电机轴系原因（连接靠背轮尺寸小等），造成哈电机厂的配套发电机转子与常规 600MW 机组的发电机转子差别较大，发电机转子价格高，订货困难；定子结构与常规超临界发电机相同。

北重、上电、东方发电机与常规超临界发电机相同。发电机冷却方式采用目前国际上较为普遍的“水氢氢”方式，即定子绕组水冷、定子铁芯、转子绕组氢内冷。

励磁系统为无刷励磁式静态励磁系统。

4 两缸两排汽与三缸四排汽比较

超超临界 600MW 等级机组已设计生产的型式主要有两缸两排汽与三缸四排汽两种。采用两缸两排汽型式，机组高中压为合缸结构，低压一个 48 英寸末级叶片的低压缸；采用三缸四排汽型式，机组的高中压缸与两缸结构相同，低压部分采用两个长叶片的低压缸模块。低压部分由各制造厂设计。国内已定货的超超临界机组除东汽厂生产的三缸四排汽 660MW 的芜湖工程外，其他四工程均为哈汽厂生产的两缸两排汽 600MW。其机组设计与三菱公司已运行的广野 5# 机组相同。对这两种已投入生产的机型从以下几个方面进行对比分析。

1) 设计概况

	两缸（哈汽）	三缸（哈汽）	两缸（东汽）	三缸（东汽）
机组型式	两缸两排汽	三缸四排汽	两缸两排汽	三缸四排汽
高压阀门	高压主汽调节联合阀	相同	相同	相同
中压阀门	再热主汽调节联合阀	相同	相同	相同
高中压缸	高中压合缸	相同	相同	相同
高压通流	1+10	相同	1+7	1+7
中压通流	7	相同	6	6
低压缸	1	2	1	2
低压通流	2×5	2×2×7	2×6	2×2×7
末级叶片	48"	1000mm	48"	40"

2) 基础及本体结构

	两缸	三缸	两缸-三缸
基础总长 m	21.5	28.5	-7

基础总高 m	13.7	13.7	相同
基础总宽 m	12.5	12.5	相同
起吊高度 m	11 ~ 13.5	10.5	0.5 ~ 3
机组本体总重 t	~ 770	~ 1020	~ 250

从表中可以看出，两缸机组基础的长度要求、基础的负荷均小于三缸机组，但如果汽机房运转层采用同样标高为前提，两缸机组要求的起吊高度大，主厂房容积不减反升，土建造价增加；但两缸可减少一低压缸及相应凝汽器的一次性投资（尽管两缸结构的低压缸末级叶片造价会上升）。

3) 热经济性

随着背压和负荷率的不同，三缸四排汽和两缸两排汽机组的热耗各有优劣。

以哈尔滨汽轮机厂的三缸和两缸热经济性比较如下。

负 荷		100%THA	75%THA	50%THA	40%THA	加权平均
负荷模式	小时	4200	2120	1180	300	7800
两缸热耗	kJ/kW.h	7400	7437.6	7626.3	7795.4	7437.0
三缸热耗	kJ/kW.h	7376.5	7448.4	7684.4	7882	7431.4
比较（两缸-三缸）	kJ/kW.h	23.5	-10.8	-58.1	-86.6	5.7

两缸机组额定工况热耗 7400kJ/kcal.h，三缸机组额定工况热耗 7376kJ/kcal.h，三缸机组额定工况热耗稍好于两缸机组。按照负荷模式对全年热耗加权平均，三缸比两缸高 5.7kJ/kcal.h。东方汽轮机厂四排汽方案机组热耗优于两排汽方案 30kJ/kW.h，热效率高于两排汽方案 0.41%；但背压大于 5.3kPa，两排汽方案优于四排汽方案机组。

4) 叶片

三缸四排汽与两缸两排汽设计方案之争在于超长末级叶片与超大低压缸的研发。鉴于 48" 长叶片仅有西门子、三菱公司研制，且刚刚问世，尽管广野有投产机组，但仍需时间检验其可靠性、安全性及经济性。

5) 单位出力主机造价

东方汽轮机厂可以生产 TC4F40 型号 660MW 三缸四排汽和 TCDF48 型号 600MW 两缸两排汽两种型号的汽轮机。参考制造厂提供的汽轮机、发电机价格和锅炉厂两种负荷锅炉的报价，比较两种负荷机组的单位负荷造价，结果如下：

机 型	TCDF-48（两缸）	TC4F-40（三缸）	两缸-三缸
负荷（MW）	2 × 600	2 × 660	-120

汽轮机估计价格(万)	37872	38932	-1060
锅炉报价(万)	75000	77000	-2000
发电机估计价格(万)	14900	14900	0
总造价(万)	127772	130832	-3060
单位负荷造价(元/kW)	1064.8	991.2	73.6
年发电量(万 kWh)	660000	726000	-66000

由两种负荷机组的单位负荷造价可以看出,660MW 负荷机组单位造价低于 600MW 负荷机组单位造价 73.6 元/kW。按照机组每年运行 5500 小时计算,2×660MW 机组每年多发 66000 万度电。

5 结论建议

1) 鉴于三大厂商均可设计、生产三缸四排汽的超超临界机组,并且三缸四排汽机组的良好继承性,无技术风险,与常规超临界机组设计与生产无重大差异,不存在两缸两排汽机组的末级长叶片的技术风险与低压转子的采购问题;推荐 600MW 机组采用三缸四排汽型式。

2) 按各工程水文资料确定的背压值,比较三缸与两缸热经济性高低;

3) 最终的机组尺寸变化造成的主厂房造价变化与两缸主机价格的减少影响应综合详细比较确定。

注:本文发表在《热机技术》2006 年第 4 期