

核电汽轮机的特点及选型

陈 娟¹, 徐大懋²

(1 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663 2 广东核电集团有限公司, 广东 深圳 518124)

摘 要:介绍了核电汽轮机的参数低、采用节流调节、蒸汽湿度大以及增设汽水分离再热器等特点,并分析了产生这些特点的主要原因;其次论述了汽轮机与反应堆的容量匹配以及各种出力的概念。核电本身的特点是造价高、运行费用低、无温室气体排放,为了充分发挥核电的特长,反应堆与汽轮机采用零裕量匹配。各种出力的概念也与常规火电有所不同。最后深入讨论了核电汽轮机的选型以及全速机与半速机在经济性和可靠性各方面的比较。

关 键 词:核电机组;汽轮机;选型;全速机;半速机

中图分类号:TK26 文献标识码:B

引 言

目前,世界上有核电站约 463 座,总装机容量约 3.7 亿 kW。全球平均核电容量占总发电容量 11%,电量占总发电量 17%;发达国家平均核电容量约占 20%,电量约占 30%。我国核电装机容量占国内装机总容量 1.2%,远远低于世界水平。核电是一种经济、安全、可靠和清洁的能源,相比煤电而言,一台 1 000 MW 级核电站每年可减少标准煤耗 250 万 t,从而减排 580 万 t 二氧化碳,0.4 万 t 二氧化硫(脱硫后)和 1.2 万 t 一氧化氮。因此,国家对核电的政策已由“适度发展”调整为“积极发展”。

汽轮机是核电的重要组成部分,有全速机和半速机两种机型。在国内已运行的核电机组中,除秦山三期采用半速机外,全都为全速机。目前,所有在建的百万等级以上核电项目全部采用半速机。

由于核电发展速度很快,常规岛应如何和核岛合理匹配是重要的问题,国内目前尚未做太多工作,本研究目的就是原理和总体方面论述核电汽轮机的主要特点,它与常规火电汽轮机有何不同,以及如何正确地选择机型,尤其是全速机与半速机。有关结构、材料、安装和运行方面的特点,文献[1]已有详细论述。

核电汽轮机的特点与核电本身的特点密切相关,核电的主要特点为:

(1) 核电单位千瓦造价高,国产化后约为火电的 2~3 倍。

(2) 核电的燃料便宜,每度电燃料成本为 0.5 美分左右,只有火电的 20%~30%。

(3) 核电成品燃料价格稳定,天然铀价格的波动对核电成品燃料的影响很小,只占 4% 左右。

(4) 大部分核电实行定期换料,换料周期为 12 个月或 18 个月,每次换 1/3 或 1/4。通常燃料量按满负荷设计,如未用完则造成能源浪费。

(5) 核电比火电安全性要求更高。

(6) 因特点(1)、(2)和(4),核电通常带基本负荷。

(7) 核电的 CO₂、SO₂ 和 NO_x 排放为零。

1 核电汽轮机的特点

1.1 参数低

目前的核电站多为压水堆核电站,由于受反应堆压力容器强度的限制,核电站中一回路参数低,故二回路的主蒸汽参数也较低。以国内惯用的 1 000 MW 级机组为例,一回路平均压力 15.5 MPa,平均温度 310 °C;故二回路参数也低:蒸汽发生器出口压力 6.7 MPa,温度为 283 °C,是含有一定湿度的蒸汽,湿度一般为 0.2%~0.4%。

与同功率的火电汽轮机相比,核电汽轮机蒸汽做功的焓降小,而所需的主蒸汽流量大。1 000 MW 核电和超超临界火电有关技术数据对比如表 1 所示。

从表 1 中数字可作如下分析:

(1) 核电对火电新汽流量的比值约为 2 倍,用于再热的蒸汽约 10%,故排汽量的比值约 1.8。由

于核电参数低,故对同容量、同背压的机组,核电汽轮机的低压排汽面积约为火电的 2 倍。

(2)如同为全速机,核电低压部分体积和重量也约为火电的 2 倍。火电多了高温高压部分,故全机相比核电汽轮机与火电汽轮机重量比约为 3.2。

(3)重量比并不同于价格比,汽轮机的成本加工费用所占比重较大,核电汽轮机与火电汽轮机价格比约为 1.25:1。

表 1 1 000 MW 核电和火电有关技术数据对比

参数	总焓降 /($^{\circ}\text{C}$ / $^{\circ}\text{C}$ /MPa)	新汽量 / $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	排汽量 / $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	排汽量 / 新汽量
核电	283/269/6.43	941.4	5 808.2	2 964.4 / 0.51
火电	600/600/25	1 765.6	2 851.0	1 608.6 / 0.56
比值	—	0.53	2.04	1.84 / 0.91

1.2 采用节流调节

汽轮机的调节方式有两种,即节流调节和喷嘴调节。二者的差别是:节流调节无调节级,设计工况效率高,变工况效率低;喷嘴调节正好相反。二者设计工况及变工况的效率相差约 1%。除了 1 000 MW 等级超超临界机组有采用节流调节方式外,其余火电均采用喷嘴调节。

核电汽轮机普遍采用节流调节,原因是:(1)核电主要带基本负荷;(2)核电实行定期换料,变工况效率毫无意义。

1.3 湿蒸气影响

高压区的特点是水滴粒度小,速度低,水和汽密度差小,流速差小,对叶片的损伤可不考虑。但其内压大于外压,水滴易渗入静止件中分面而造成腐蚀。通常的防锈措施是中分面堆焊不锈钢,或选用不锈钢作气缸材料。低压部分的湿蒸气特点与高压相反:水滴粒度大,水和汽密度差大,在离心力的作用下其运动方向以径向为主,相对动叶片的流速高,可对末级动叶片造成严重的腐蚀,是防水蚀之重点。低压部分内压小于外压,静止件中分面无需防锈。各种防锈的结构和材料文献[1]中已详细介绍。

普遍的观点认为,由于湿蒸气的原因,当核电机组用负荷时通流部分残存的水可快速挥发,增大了蒸汽的流量,易造成超速。从原理上分析存在这种现象,但实际实验结果超速率在 6% 左右,和火电机组相当,甚至更低,原因是核电汽轮机转子的惯量增加大于蒸汽量的增加。以半速机为例,转子重量约为 250 t,而火电全速机仅 70 t 左右,电机转子重量

也有差别;即使核电全速机与火电全速机相比,转子总重量的比值也在 1.5 以上。由于闪蒸而引起蒸汽量的增加,经计算最多不超过 30%。

1.4 汽水分离再热器 (MSR)

常规火电的再热在锅炉中进行,热量当然也来自锅炉,再热参数的选择与锅炉密切相关。核电的再热与常规火电不同,不是在反应堆内进行,而是在堆外利用新汽和高压抽汽再热,热量来自已进入常规岛的蒸汽,所以再热参数的选择与核岛无关,属于汽轮机自身的热力系统,其特点为:

(1)再热可以去湿、防止低压排汽湿度过大和提高循环效率。

(2)再热温度比新汽温度低 10 ~ 20 $^{\circ}\text{C}$,有温差存在。

(3)再热有两种方案,一是单级再热,即只用新汽再热,汽量约 10%;二是双级再热,第一级加热用高压缸某点抽汽,一、二级汽量各约 5%。双级加热为“梯级加热”,减小了传热温差,效率可提高约 0.5%,被广泛采用。大多数情况下,再热抽汽和高加回热抽汽可选在同一抽汽点,结构并不复杂。

(4)对压水堆而言,再热压力各厂家差别较大,范围可从 0.7 ~ 1.4 MPa,多数选在 0.9 ~ 1.1 MPa。再热压力愈高,低压排汽湿度愈大,但不太敏感;再热压力的变化对效率的影响也很微弱;再热压力对 MSR 的重量有明显影响。制造厂选取再热压力的原则主要是低压缸和 MSR 的合理组合。

1.5 容量匹配及各种出力定义^[3]

常规火电一般采用炉跟机的容量匹配模式,汽轮机先由额定功率确定蒸汽量,锅炉根据汽轮机的要求进行设计。蒸汽量应考虑各种裕量,如夏季保证出力裕量、机组老化裕量、制造误差裕量等。

核电的蒸汽发生器无流量裕量,也不能超压,汽轮机根据蒸汽发生器给出的参数进行设计,供汽量也无任何裕量。蒸汽发生器可留一定面积裕量,考虑的是堵管;汽轮机自身可留一定面积裕量,考虑的是设计、制造误差和老化。这种匹配模式,可充分发挥设备潜力,并要求对设备进行精心设计、制造和维护。

由于核电本身的特点以及堆与机的零裕量匹配模式,核电汽轮机各种工况出力的概念也与火电不同。

1.5.1 计算出力 CR

额定进汽参数,额定背压,供货商在热平衡图上提供的出力,也为其保证出力。汽轮机供货商不同,

其保证出力一般也不同。

1.5.2 旺季出力 HR

该地区电负荷最高季节时出力, 所用背压为该季节平均背压, 由业主根据季节和区域的不同和需要提出。

1.5.3 试验出力 TR

考核试验时实测出力。该数据必须在机组全部安装完毕, 整体启动时测试。

1.5.4 最大出力 MR

额定参数下冬季出力, 供货方要保证此工况下的机组可靠性。

1.5.5 额定出力 NR

额定出力为在额定参数和规定背压(由冷端优化确定)下的出力。核电的额定出力涉及到上网电量和运行业绩, 定值偏高或偏低均对业主利益有影响。有两种确定方法: (1) 额定进汽参数和额定背压下的试验出力, 即与 TR 相同, 取值精确到 1 MW。

(2) 如尚未试验, 则 $NR = (0.98 \sim 1.0) CR$ 系数因供货商而异, 取值精确到 1 MW。

在核电主机标书中, 一般会要求供货商提供计算出力 CR 旺季出力 HR 最大出力 MR 及阀门全开出力 WWOR。相比火电而言, WWOR 对核电无意义。火电机组中, 阀门全开, 增加通流面积, 锅炉应供蒸汽, 机组可发出更大的功率。对核电而言, 由于蒸汽发生器产生的蒸汽无裕量, 阀门全开并不能增加机组的出力, 但合同中仍要求供货商提供该出力, 主要是看供货商通流裕量是多少。考核出力一般考核计算出力 CR 和旺季出力 HR 即可。对于核电而言, 出力和热耗间有简单的关系式:

$$H \times N_e = 3600 N_t$$

式中: H —热耗, kJ/kW; N_e 、 N_t —电功率和热功率, kW。因此, 考核出力和考核热耗是一回事, 通常考核出力即可。

2 核电汽轮机的选型

核电汽轮机有全速机(3 000 或 3 600 r/min)和半速机(1 500 或 1 800 r/min)两种。为什么大容量核电汽轮机要采用半速机? 前已论述, 同容量的核电与火电相比, 其排汽面积约大一倍。增加排汽面积有 3 种方法。

(1) 增大单个排汽口面积, 即增大末级叶片长度。对于全速机而言, 受到叶片和转子材料许用应力的限制, 表 2 为在当今技术水平下全速机允许的

最大叶片高度及相应排汽面积。

表 2 当前全速机末级长叶片最大高度

转速 / $r \cdot \min^{-1}$	材料	叶片长度 /m	排汽面积 / m^2
3 000	钢	1.20	11.0
	钛	1.4	14.0
3 600	钢	1.0	7.6
	钛	1.15	9.7

(2) 增加低压缸数, 也就是增加轴数。受到轴系振动的限制, 轴数越多, 轴系振动愈复杂, 一般不超过 6 轴, 11 个轴承。对核电高、中压只有一个缸, 低压可用 3 缸 6 排汽。当然, 轴数的限制只涉及到轴系振动可能更复杂, 不是绝对不可行。江苏省田湾核电厂所用俄罗斯全速汽轮机即为 7 轴, 4 个低压缸, 由于采用了特殊的布置方式, 将高压缸置于 4 个低压缸中间, 其轴系振动未出现问题。

(3) 选用半速机, 增大末级叶片长度。材料许用应力和轴系振动的限制均获解决。目前半速机最短的末级叶片为 1.25 m 相应排汽面积约为 14 m^2 ; 最长末级叶片为 1.8 m 相应排汽面积约 26 m^2 , 用于北欧冷却水温很低地区; 大多数末级叶片长 1.35 ~ 1.45 m 排汽面积为 17 ~ 20 m^2 。

一般情况下功率愈大愈应采用半速机, 但也有些例外情况, 如田湾核电厂单机容量 1 060 MW 选用了世界上最大的 8 排汽全速机; 而秦山三期 730 MW 重水堆却反而选用 4 排汽半速机。这种情况有其特殊背景: 俄罗斯在原苏联时既有全速机, 也有半速机, 解体后半速机生产厂哈尔科夫汽轮机厂归属乌克兰, 俄罗斯只能供由 IMZ 厂生产的全速机。如改用我国已掌握的先进的半速机, 田湾机组出力可提高约 5%。秦山三期汽轮机由日立供货, 日立 1.25 m 长叶片半速机已有长期运行业绩, 如选全速机则需 3 个低压缸 6 排汽, 综合技术经济指标可能不如半速机。

全速机的最大排汽面积与半速机的最小排汽面积相当, 但此时应力水平相差很多, 材料等价也不一样, 全速机反而比半速机造价高。

大多数情况下, 半速机的末级长叶片是由全速机模化而来, 即将全速机长叶片所有的几何尺寸(包括转子直径)乘以 2 即可。相似理论可以证明, 对相互模化的叶片, 应力和振动的安全裕度完全相同。以目前国际上应用最普遍的半速机和全速机为例, 半速机取 1.45 m, 全速机取 1 m, 其圆周速度及应力比较如表 3 所示。

表 3 全速机与半速机的圆周速度和应力比较

	全速, 1 000 mm	半速, 1 450 mm	半速机下降值 /%
周速 $U/m \cdot s^{-1}$	430	330	23
$U^2 (\times 10^{-4})$	18.5	10.9	41
相对应力	1.0	0.59	41

应力和水蚀率均与周速平方成正比, 故半速机应力及水蚀率也比全速机下降约 40%。不仅末级长叶片, 其它动叶片和转子的应力也同样下降, 而半速机与全速机的材料一般相同, 故半速机的可靠性设计比全速机容易。

国内对百万等级核电应选用何种机型有不同看法, 解决的方法是对具体项目进行技术经济分析。下面先介绍一种通用性的粗略分析方法, 并以岭澳二期为例进行具体分析。

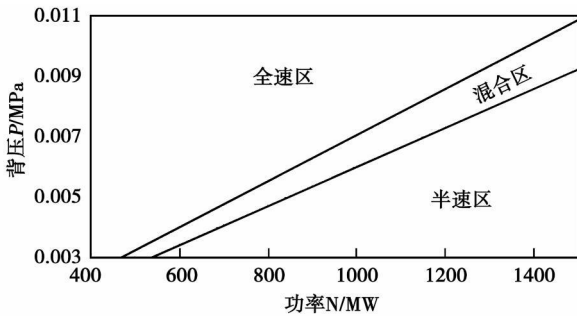


图 1 全速机与半速机的应用范围

图 1 是针对典型的全速机和半速机, 应用范围是由强度限制和综合技术经济分析得到的。根据图 1 所给定区域, 不必进行任何计算, 只须凭经验估计出合理背压即可。如 1 000 MW 广东地区直流供水冷却, 背压在 0.005 5 ~ 0.006 0 MPa 之间, 位于半速区, 接近边界。再如秦山二期, 650 MW, 背压约

0.004 8 ~ 0.005 2 MPa, 位于全速区。秦山三期为重水堆, 功率 730 MW 背压为 0.004 8 ~ 0.005 2 MPa, 查出在混合区靠近全速边界, 选用排汽面积较小的半速机也可以。图 1 也可用于 60 H 机组, 只要将其功率乘以 1.44 再查曲线即可。

图 1 只能用于粗略的参考, 对实际工程项目, 则应根据具体数据进行精确的分析。以岭澳二期为例: 如采用先进的全速机, 造价为 15 亿美元 /GW, 如采用先进的半速机, 由详细分析计算, 造价增加 1.3%, 而功率可增加 4%, 故单位造价为:

$$(15 \times 1.013) / (100 \times 1.04) = 14.6 \text{ 亿美元 /GW}$$

不难算出, 采用半速机后不仅单位造价降低, 出力增加, 所增加投资一年多即可回收。全速机与半速机的其它方面比较, 文献 [2] 已有详细论述。

3 结 论

核电汽轮机具有参数低、流量大、湿度大和节流调节等特点, 容量匹配采用机随堆模式, 通流裕量小, 各种出力的定义也与火电有所不同。与全速机相比, 半速机圆周速度较小, 故应力小, 低压部分耐水蚀性能好, 但制造成本较高。在选型方面, 全速机与半速机的选用应考虑综合技术经济指标, 根据机组的容量和背压值确定。对于中国的情况, 1 000 MW 等级及以上核电机组, 选用半速机有明显的优点。

参考文献:

- [1] 崔宏博. 核电汽轮机特点研究 [J]. 东方电气评论, 2005(4): 192-195
- [2] 崔宏博. 全、半转速核电汽轮机比较 [J]. 东方电气评论, 2006(2): 58-63
- [3] 徐大懋. 蒸汽循环电站主设备的容量匹配 [J]. 中国电机工程学报, 2009(20): 25-29

(编辑 辉)

新技术、新设计

不依赖空气的动力装置排出燃烧产物的技术

据《Суудостроение》2009 年 7~8 月号报道, 应用以液态碳氢化合物和氧作为燃料的热力发动机不依赖空气是增加非核动力驱动的水下物体动力储备和水下续航力的有效方法。

当动力装置在水下工作时, 排出碳氢化合物燃烧产物, 其主要成分是二氧化碳, 是一个至今尚未得到很好解决的问题。

研究证明, 用于建立使用碳氢化合物燃料的不依赖空气的动力装置排气中二氧化碳液化系统并把热量传递给被气化的氧的工艺流程。

准备使该系统投入实际应用, 借助于工艺上简单的方法就能在不向周围环境排出燃烧产物的情况下保证闭式循环热力发动机的工作, 并有助于建造远景更完善的用于水下应用的使用碳氢化合物燃料的不依赖空气的动力装置。

(吉桂明 摘译)

the initial concentration of methylene blue was within a range from 50 to 250 mg/L and the temperature was 30 °C. The adsorption isotherm and kinetic curves of the com core active carbon when adsorbing the methylene blue were obtained. The test results show that the Freundlich adsorption isotherm model can relatively accurately describe the adsorption phase equilibrium of methylene blue on the com core active carbon. A quasi second stage reaction model can more accurately describe the adsorption process of the com core active carbon. When a balance is established, the adsorption capacity of the active carbon ranges from 48.5 to 225 mg/g. It can be known from the foregoing that the com core active carbon can achieve a best effectiveness for removing the methylene blue pigment in the water solution and is a kind of adsorption agent with a development potential. Key words: biomass active carbon; methylene blue; adsorption; balance; kinetics

导流型垂直轴风力机内部流场计算方法的比较与研究 = Comparison and Study of the Methods for Calculating the Flow Fields inside a Flow-guided Type Vertical Shaft Wind Turbine [J]. 汉 / WANG Xin, TONG Zhengming, WANG Qikun (College of Power Engineering, Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 455 ~ 458

On the basis of CFD (computational fluid dynamics) simulation calculations, a multiple reference coordinate system method and a sliding mesh method were used respectively to conduct the numerical simulation of a flow-guided type vertical shaft wind turbine. The scope and occasions of each method suitable for engineering applications were also given. In terms of calculation of the overall external characteristics of this type wind turbine, both calculation methods can arrive at similar conclusions regarding such performances as total torque and others. The multiple reference coordinate system method with a relatively short period is regarded as more suitable. As regards the inner characteristics of local flows, the sliding mesh method, as a nonstationary flow calculation method, can relatively accurately express the change of inner characteristics parameters depending on time and space. For the calculations in this regard, the sliding mesh method, which is comparatively reasonable in physical meaning, is more applicable. Key words: wind wheel; guide wind wheel; numerical simulation; multiple reference coordinate system; sliding mesh

核电汽轮机的特点及选型 = Features and Type Selection of Steam Turbines in Nuclear Power Plants [J]. 汉 / CHEN Juan (Guangdong Provincial Electric Power Design and Research Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510663), XU Damao (Guangdong Nuclear Power Group Co., Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518124) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2010, 25(4). — 459 ~ 462

First described were such features of nuclear power plant turbines as low parameters, adoption of throttling regulation, high steam wetness and additional installation of MSRs (moisture separator and reheater) etc. and analyzed were the main generation causes of these features. Subsequently, the capacity matching and concepts of various capacities were expounded. The features of nuclear power plants themselves include a high manufacturing cost, a low operation cost and absence of greenhouse gas emissions. To allow full play to the merits of nuclear power plants, the reactor and steam turbines adopt a zero allowance matching. The concepts of various capacities are different from those of conventional coal-fired power plants. Finally, the type selection of steam turbines for use in nuclear power plants and comparison of full speed turbines and semi speed ones in terms of cost effectiveness and reliability were discussed in detail. Key words: nuclear power plant unit; steam turbine; type selection; full speed turbine; semi speed turbine