

浅谈压水堆核电站 AP1000 屏蔽式电动主泵

张明乾 刘 昱 李承亮

(中广核工程设计有限公司上海分公司, 上海; 200030)

摘要: 综合介绍美国西屋公司第三代先进压水堆 AP1000 屏蔽式电动主泵的主要技术特点, 通过对屏蔽式电动主泵功能及机械结构方面的介绍, 探讨其设计上的独特优点, 分析评估此泵在我国技术转让过程中存在的潜在风险。

关键词: 核电站用泵 第三代压水堆 屏蔽式电动主泵 功能 机械结构分析

前 言

核电与水电、火电并称为世界电力的三大支柱。为了实现我国核电中长期发展规划, 顺应世界核电技术进步的潮流, 国家做出了以全面技术转让方式引进 AP1000 建设浙江三门、山东海阳核电示范工程的重大决策^[1]。美国西屋公司开发的 AP1000 (Advanced Passive PWR - 1000 MWe) 先进非能动型压水堆属于第三代先进压水反应堆, 其电厂净输出功率约 1117MWe^[2]。AP1000 设计强调采用技术成熟的部件, 确保在低维护要求的前提下获取高度可靠性^[3], 其中, 反应堆冷却剂主循环泵(以下简称主泵)采用的是美国电气机械公司 (EMD) 设计的屏蔽式电动泵^[4], 它是一回路系统中唯一的旋转设备, 是核岛的“心脏”, 属于核安全一级设备, 是压水堆核电站的关键设备之一。

1 反应堆冷却剂系统简述

表 1 一回路系统主要参数

参 数	数 值
冷端数量(个)	4
热端数量(个)	2
堆芯出口压力(MPa)	15.50
堆芯出口温度(℃)	321.1
堆芯入口压力(MPa)	15.93
堆芯入口温度(℃)	280.7
每环路最佳估算流量(m ³ /h)	35772.1

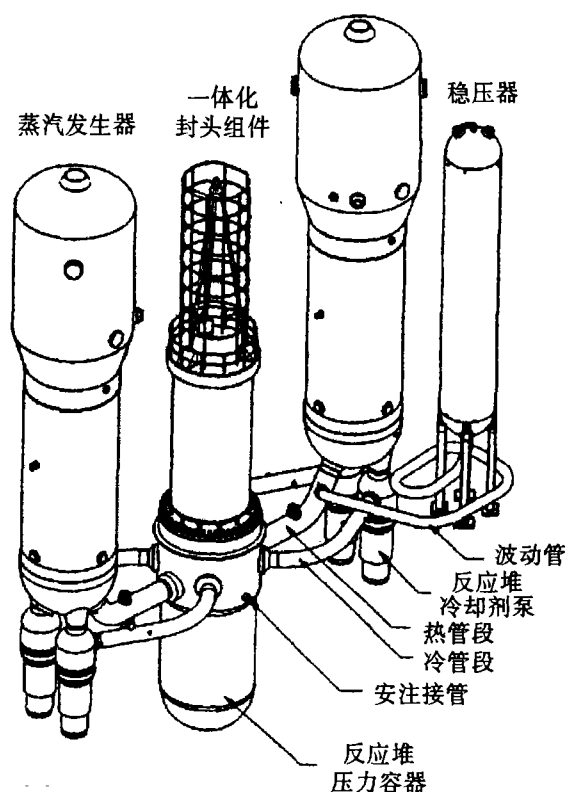


图 1 AP1000 一回路系统布置图

AP1000 反应堆冷却剂系统借鉴了美国 APP-CE 公司开发的两环路压水堆的设计, 主回路由 2 个并联环路组成, 每一个环路由一台蒸汽发生器、一条热段主管道、2 条冷段主管道和 2 台并联的主泵组成, 另有一台稳压器联接到其中的一个环路的热管段。AP1000 蒸汽发生器为立式、倒 U 形管型蒸汽发生器^[5]。主泵采用无轴封的屏蔽式电动主泵, 其一回路系统主要参数见表 1 所示^[6], 一回路布置见图 1。

2 AP1000 屏蔽式电动主泵功能及主要设计参数

AP1000 主泵是单级的离心式无密封屏蔽电动泵。它可以输送较高压力和温度状态下的反应堆冷却剂。其功能是将反应堆冷却剂升压,克服系统阻力,完成在堆芯、冷却剂环路和蒸汽发生器之间的循环。主泵承压壳是反应堆冷却剂压力边界的一部分,其设计、制造和检验应满足相关设计要求。泵壳和电机的定子外壳提供了防止反应堆冷却剂以及其它放射性材料泄漏到安全壳大气中的一道屏障。

由图 1 可以看出,一个回路上的 2 台泵的入口直接焊接在蒸汽发生器底部,出口联接到冷段主管道上。泵体布置在上,电动机在下,这样布置使泵吸入口与蒸汽发生器出口直接联接,省去了自蒸汽发生器到泵的这段管路,减小了环路压降。AP1000 标准堆型的设计要求在失去一台主泵运行时就要保护停堆,这样设计不仅考虑到再失去一台主泵时其情转流量无法满足所要求的安全裕量,还因为那台停运的主泵无法在其它 3 台主泵处于额定转速运转下再启动起来。为了做到不超电流运行,必须将其它 3 台主泵的转速降至 300 r/min,以减少倒灌流量的反向冲击力矩^[7-8]。为了防止运行过程中发生汽蚀,在设计中也充分考虑必需汽蚀余量,其值应小于系统运行时的有效汽蚀余量。主泵出口不设逆止阀,也没有防逆转装置^[7]。主泵主要技术参数见表 2。

3 AP1000 屏蔽式电动主泵的结构特点

AP1000 屏蔽式电动主泵的一种设计方案如图 2 所示,主泵由泵体和电机两部分组成。主泵的水力部件(包括泵壳、叶轮、导叶以及进口导管等部件)直接安装在电机单元上,中间

表 2 AP1000 主泵主要技术参数

参 数	数 值
设计压力(MPa)	17.1
设计温度(℃)	343
额定流量(m ³ /h)	17886
额定压头(m)	111.3
额定功率(MW)	5.15
泵转速/正常状态(r/min)	1750
总高(m)	6.69
设备冷却水流量(m ³ /h)	136.3
设备冷却水最大入口温度(℃)	35.0
泵出口管嘴内径(cm)	55.9
泵入口管嘴内径(cm)	66.0
电机类型	鼠笼式感应电动机
相数	3
电压(V)	6900
频率(Hz)	60
启动电流(A)	可变
总重量(电机和泵壳)(kg)	83687.3

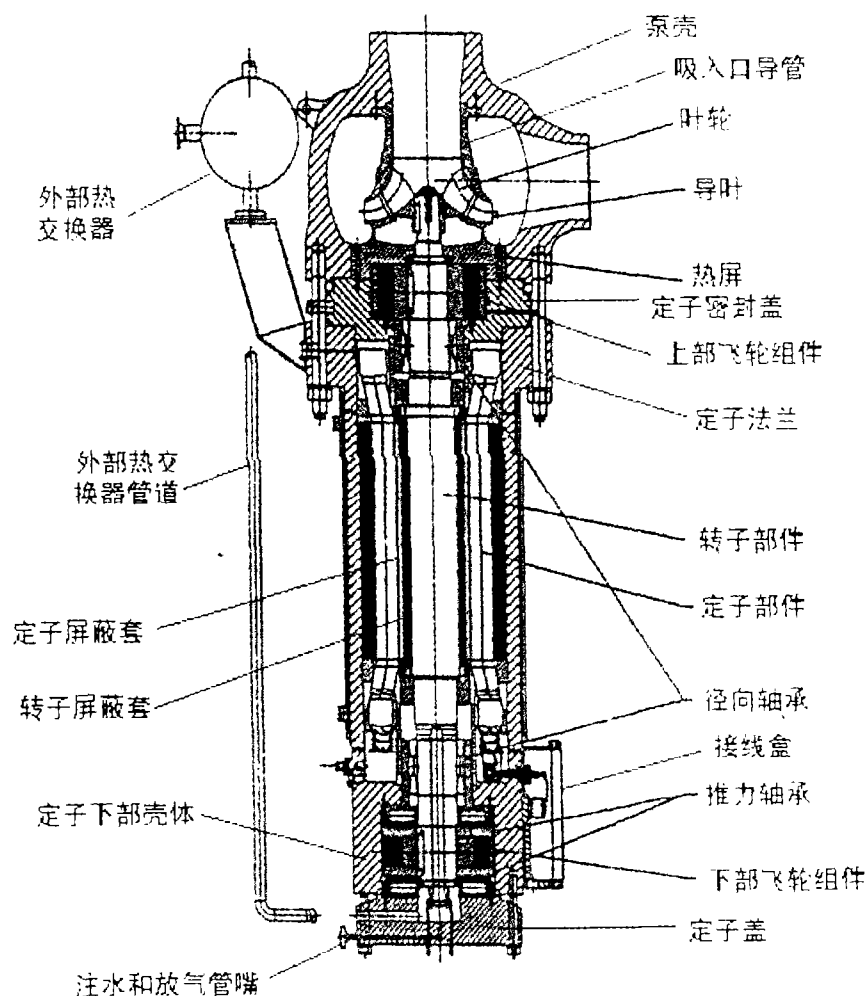


图 2 AP1000 屏蔽式电动主泵

没有联轴器,在检修主泵时可以随同电机模块一起拆卸。泵的承压壳由泵壳、热屏、定子外壳和定子盖等组成。在电机内部,定子绕组和转子都由屏蔽套保护,使其与一回路冷却剂介质完全隔绝开来。由于电动机的转子和泵的叶轮固定在同一根轴上,并包容在与主回路连通的承压边界内,因此可以实现一回路冷却剂的零泄漏。

叶轮旋转时,流体从叶轮中心甩向叶轮外缘,经过导叶后沿联接在泵壳上的上充管道排出。一旦电机内部腔室充满反应堆冷却剂,在叶轮和热屏之间的迷宫密封会减弱在运行过程中流到电机腔室的冷却剂流量^[9]。

3.1 屏蔽套

屏蔽套用于防止输送液体介质与电机定子铁芯、转子铁芯、定子绕组接触,防止这些部件受到浸蚀。屏蔽套分为定子屏蔽套和转子屏蔽套,屏蔽套材料为耐腐蚀非磁性金属哈氏合金 Hastelloy C276 合金,为了保证电机具有高性能,并尽量减少屏蔽套内的涡流损耗,屏蔽套越薄越好,同时考虑电机效率和转子刚度要求,应选择合适的细长比。定子屏蔽套厚度 0.381 mm,直径为 565 mm,长度 3147 mm,定子屏蔽套与转子屏蔽套之间间隙较普通电机大,AP1000 主泵中此间隙为 4.83 mm。屏蔽套只承担密封功能,屏蔽套的背部支撑用来承担机械强度,背部支撑由中段铁芯及两端支撑筒组成。

自 1952 年以来 EMD 公司对屏蔽套进行精心研究,形成一整套专有技术,包括材料采购、精密剪裁、精密滚压成型、自动埋弧焊接工艺、射线及液体渗透探伤、1.5 倍设计压力的水压试验以及氮气检漏(8~9 小时)等。

3.2 驱动电机

AP1000 主泵电机是立式、水冷的鼠笼式感应电动机。由于屏蔽电机的损耗高,发热严重,定子屏蔽套使定子成为一个封闭区域,造成定子铁芯和绕组的冷却只能靠温度梯度产生的热传导散热。绕组端部由于散热困难,成为温度场中的热点。由此可见,AP1000 主泵电机的冷却措施及温升控制是保证正常运行的关键。作为解决措施,一方面,电机绕组采用较高的绝缘等级(N 级,200℃),另一方面,通过有效的冷却来降低电机各部分的温度。除了电机顶部由流经主泵热屏的设备冷却水冷却,迷

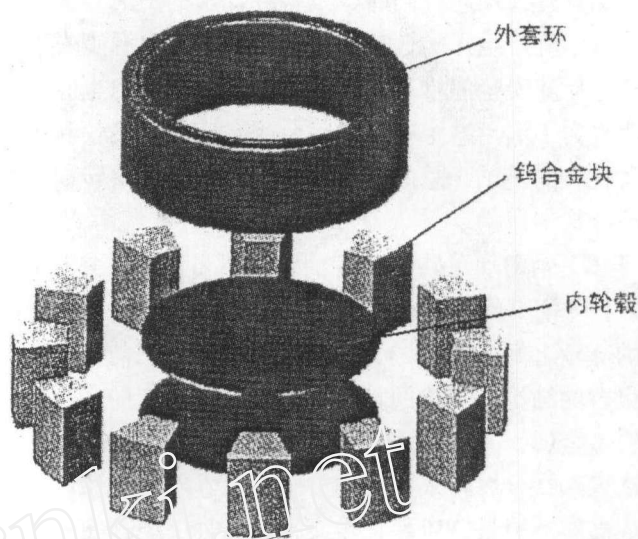


图 3 12 块钨合金拼装而成的飞轮

官式密封(在转子与热屏之间位置)阻隔泵壳腔室内的高温冷却剂和电机腔室内的低温冷却剂进行热交换之外,电机冷却功能还通过两个冷却回路来实现:

1) 外置热交换器冷却回路。外置热交换器的壳侧为电机腔内的反应堆冷却剂,管侧为设备冷却水,由外置热交换器冷却后的一回路冷却剂由电机转子下部进入,并有一辅助叶轮驱动冷却剂循环,冷却剂轴向流经电机腔室,带出转子和定子的热量,通过外置热交换器后得到冷却。

2) 流经电机定子冷却外套的设备冷却水回路。来自设备冷却水系统的较低温度的水从冷却外套内流过,带出电机定子绕组发出的热量。通过冷却回路的有效工作使电机腔室内的冷却剂温度保持在 80℃ 以下,定子绕组中的最高温度不大于 180℃,以此保证绕组绝缘的性能和寿命。

主泵电机电源与可变频的驱动装置相连,该装置由变频器、功率转换器、冷却系统和控制系统组成,变频器采用的是意大利 ASI Robicon 公司生产的 Silsovert H 型高压大容量变频器^[7]。主泵启动时采用变频调速控制装置,用来降低冷态工况时的电机功率,从而最大限度地缩小电机尺寸。在 232℃ 以下,主泵转速是可调的;在 232℃ 以上,主泵达到正常的运行工况后,对于 60Hz 电网,变频调速装置就被旁路掉^[10]。

3.3 飞轮

在电源丧失后反应堆应维持一段时间的流量,

以充分冷却堆芯。同时,设备冷却水的丧失对惰转能力不应产生影响,在发生厂外和厂内电源丧失事故并伴随安全停堆地震时,主泵的惰转能力也应保持。为了满足这个要求,每台主泵应装有飞轮和惯量较大的转子,总的转动惯量用于维持在惰转期间的冷却剂流量。

飞轮增加了转动部件的转动惯量,飞轮由上下 2 个飞轮组件组成,上部飞轮组件位于电机和泵壳的叶轮之间(见图 2),下部飞轮组件采用与推力盘组合的结构。飞轮的材料是一种可机加工的高密度钨基金属,这种材料的主要成份是钨(占 97%),外加镍和铁金属粉末粘合剂^[8],它可在有限体积内实现高转动惯量,以保证主泵惰走特性。上部飞轮组件采用热套装的预应力方法,用不锈钢外套环将 12 块扇形钨合金块固定在不锈钢内轮毂上,其外部包有屏蔽套以防止应力腐蚀,最后将飞轮固定在屏蔽泵的主轴上,如图 3 所示。但由于外套环受到预紧力和离心力作用,可能会使外套环产生时效作用,导致不锈钢套环应力松弛。飞轮外围的承压壳采用加强措施,以限制其发生飞射。

飞轮的设计转速为电机同步转速的 125%,包括了所有可能的超速工况。如果在运转期间定子屏蔽套或绝缘层发生泄漏,反应堆冷却剂可能会造成定子绕组的短路,这种情况会使泵发生与丧失电源一样的工况,进入惰转状态。在定子或转子屏蔽套失效的情况下都没有一回路冷却剂泄漏到安全壳内。另外,在一般的周期性在役检查过程中对飞轮组件不做要求^[10]。

3.4 轴承

主泵装有 3 个轴承,2 个径向轴承和一个双向推力轴承,都在电机一侧,轴承采用水润滑方式。在泵启停过程和正常运行时,通过电机冷却回路使流过轴承的冷却剂温度保持在 80℃ 以下,以保证轴承的寿命。主泵中轴向力主要由转子重量与叶轮水推力产生。对于泵在上、电机在下的布置,两种轴向力方向相反,静止时推力轴承受到转子全部重量,当运转时叶轮水推力抵消一部分转子重量。水润滑双向推力轴承在国外已经广泛应用,用于轴封泵重负荷的水润滑推力轴承(最大 66 t)在田湾核电站主泵中已采用,关键是选用合适的摩擦副材料、合适的推力轴承端面比压、合适的平均线速度(PV 值)及合适的轴承结构,以便使轴承磨损率降低。

轴承应具有足够的刚度来限制轴的移动,以减少叶轮和轴密封的磨损,并避免电机定子和转子之间的接触。即使在地震事故最恶劣的工况下,动压径向轴承载荷也应在承载能力之内。每台泵应装有温度传感器进行监测。在轴承温度升高时,温度监测系统会在控制室给出轴承高温报警信号,要求泵停运。

3.5 监测及诊断

泵组监测极为重要,既然保证 60 年免维修,机组运行状况全部靠监测来判断。泵组设有转向、转速及加速度、振动、温度等监测、报警、保护系统。主泵装有振动监测系统来连续监测结构的振动情况,有 5 个振动传感器提供泵的振动信息,振动程度达到限制值时会给出报警信号。4 个电阻温度探测器监测电机冷却循环回路中冷却剂的温度,给出轴承和电机运行的温度信息,在长期丧失设备冷却水事故工况下,它们还可以提供要求泵停运的保护信息。速度传感器监测泵的转速。另外电压和电流传感器给出电机载荷和输入电源的状态信息。

4 AP1000 屏蔽式电动主泵的成熟性与风险分析

屏蔽泵具有零泄漏、安全性高、结构紧凑等优点^[11]。尽管屏蔽泵的初始成本比较高,但由于其运行可靠,使用寿命长,维护工作量少^[12],在核电站及核潜艇上已得到广泛应用。美国已拥有 1500 台屏蔽泵应用于核领域的经验,其中 100 台屏蔽泵的尺寸和重量是 AP1000 主泵的 80~90%,电机功率达到了 2.2MW(AP1000 要求达到 5.15MW),但这些屏蔽泵都没有采用飞轮结构^[13]。EMD 公司设计的 AP1000 屏蔽式电动主泵保留了屏蔽泵的独特优点,克服和改进了屏蔽泵的某些缺点,提出了新颖的设计理念,有其独到之处:

1. 屏蔽式主泵由于没有旋转轴的外伸部分,不存在输送液体外泄,消除了因轴密封失效或全厂断电事故工况下冷却剂泄漏的潜在风险,大大提高了核电站的安全性。

2. 去掉了轴密封及相关辅助系统,简化了机组运行,减少了泵的维修工作量,例如没有联轴器,因此机组对中问题也不存在。

3. 消除了飞轮破裂引起的飞射物损坏安全壳

内其它设备的可能性。

4. 采用水润滑轴承(不采用油润滑),消除了油润滑带来的火灾隐患,提高了核电厂的安全性。

5. 主泵直接与蒸发器下封头联接,取消了主泵与蒸发器之间的冷却剂主管道,降低了环路压降,简化了泵的支承。

6. 轴向推力远小于轴封式泵,顶轴系统被简化或取消。

另外, AP1000 所选用的主泵是专门为 AP1000 堆型量身设计的,世界上至今还没有如此大容量的屏蔽式主泵运行的先例,设计的完善性还有待时间的考验。其功率大,有惰转要求,对零部件的加工、焊接、装配和轴承润滑的要求极高,而且必须在 1:1 的试验回路上进行试验,在各种性能都满足 AP1000 核电站要求后,才能正式投入产品的生产^[4]。屏蔽式电动泵的制造技术较难掌握,加工精度高,配件属非商品级的,国产化难度大^[14],目前 AP1000 主泵的国产化任务由沈阳鼓风机厂和哈尔滨电机厂承担。在技术转让中我们需要关注以下内容:

1. 屏蔽泵造价昂贵,综合运行效率(60%)低于轴封式主泵,应全面跟踪产品的设计、制造、验证全过程。

2. 已有运行经验的同类参考屏蔽电机没有飞轮,而 AP1000 主泵屏蔽电机有上下 2 个飞轮。应关注飞轮的结构设计、制造工艺及其试验、设计验证和性能验证试验。

3. 每台主泵电机需要配置变频器(VFD)和 2 台 1E 级 6900V 开关装置,要增加一定的建造和运行费用。屏蔽泵是按照 60Hz 设计的,而中国的电网是 50Hz,致使原设计意图为短时运行的 VFD 必须持续运行,其可靠性应得到保证。

4. 屏蔽电机的损耗较高,冷却措施及温升控制是关键。

5. 屏蔽泵与蒸汽发生器作为整体结构可能带来的问题,如泵壳与接管的焊接,抗震相关问题。

6. 维修空间狭窄及需要专用的维修工具。

AP1000 屏蔽式电动主泵是核电站的关键设备之一,它的设计和制造技术难度都很高,并涉及多方面的知识和经验,在我国引进 AP1000 核电站技术的过程中应关注其关键技术细节,逐步消化吸收其核心技术,在引、消、吸的过程中真正提升我国相关行业的核心竞争力。

参考文献

- 1 张华祝. 第三代核电技术与中国核能行业的发展[J]. 国防科技工业, 2007, (06)
- 2 杨孟嘉, 任俊生, 周志伟. 未来 10 年核电先进堆型[J]. 国际电力, 2004, 8(03)
- 3 西屋电气公司. 西屋公司的 AP1000 先进非能动型核电厂[J]. 现代电力, 2006, 23, (5)
- 4 许连义. AP1000 核岛主要设备的国产化[J]. 中国核工业, 2007, (06)
- 5 Westinghouse Electric Company. Design Control Document, Revision 15, Chapter 5, 2007
- 6 W. E. Cummins, M. M. Corletti, T. L. Schulz. The technical characteristics and development progress of AP1000[J]. Nuclear Power, 2007: 54
- 7 马习朋. 第三代核电 AP1000 主冷却剂泵的变频设计方案探讨[J]. 电力设备, 2007, 8, (12)
- 8 黄成铭. AP1000 反应堆冷却剂泵[J]. 国外核动力, 2007, (6)
- 9 Westinghouse Electric Company, UK Compliance Document for AP1000 Design, Revision 1, Section F Chapter 5, May 2007
- 10 Westinghouse Electric Company. UK AP1000 Safety and Environmental Report, Revision 1, Chapter 5, February 2007
- 11 全国化工设备技术中心站机泵技术委员会. 工业泵选用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998
- 12 季建刚, 孔繁余, 孔祥花. 屏蔽泵发展综述[J]. 水泵技术, 2006, (1)
- 13 唐锡文. AP1000 的先进性、建造风险与未来的改进方向分析[A]. 见: 李晓文. 中国核学会 2007 年学术年会论文集. 2007
- 14 许连义. AP1000 主要核岛设备的国产化[J]. 发电设备, 2007, (4): 249 ~ 251

(本文编辑 王振华)

5 结 论