

核科学与技术



国防科工委
十五
规划
教材

核动力设备

● 主编 孙中宁



哈尔滨工程大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

第 1 章 绪 论

1.1 船用核动力装置的发展与现状

1954 年 4 月,美国核潜艇“鳐鱼”(Nautilus)号的建成下水标志着核动力舰船时代的开始,此后,美、苏、英、法等四国先后建造了大量的核潜艇和一定数量的核航空母舰、核驱逐舰和核巡洋舰,目前在役的约 300 余艘。中国也建造了少量的核潜艇。经过近半个世纪的发展,核动力舰艇已成为各国海军的重要力量,无论在战略地位上还是在技术发展水平上,都取得了其他舰种所不能比拟的地位。如“鳐鱼”号核潜艇曾于 1958 年 8 月进行了人类首次冰层下面横跨北极的航行;美国的“三叉戟”核潜艇可装载 24 枚导弹,每枚携带 8 个核弹头,水下航速 24 节,一次装料可连续航行 180 万公里,下水之后可 10 年在水下航行而不露出水面;美国的“企业”(Enterprise)号核动力航空母舰和“长滩”(Long Beach)号核动力巡洋舰,在无中途靠岸和无补给的情况下周游世界;俄罗斯(前苏联)的“共青团员”号核潜艇曾于 1984 年 8 月下潜到 1 020 米的深度,在 1 000 米的深度上成功地进行了大深度鱼雷发射实验。总之,由于核动力舰艇一般都具有数万乃至上百万海里的续航力,可以长时间在水面、水下高速航行或潜伏,因此具有强大的生命力以及良好的隐蔽性和机动性。迄今,美国潜艇反应堆的 SW 序列已发展到 S6W,SG 序列发展到 S9G,反应堆功率达到 215 ~ 250 MW,自然循环能力达到 25% ~ 30%。俄罗斯的舰用压水堆也发展了四代,其中第一代采用分散布置;第二代采用紧凑布置;第三代采用高效直流蒸汽发生器的紧凑布置压水堆;第四代为一体化的压水堆,将高效列管式直流发生器布置在反应堆压力容器内,其自然循环能力达到 100% 的满功率,蒸汽发生器的体积换热能力为盘管式的 2.6 倍,因此使反应堆的质量、尺寸大大减少,安全可靠性能显著提高。法国由于没有得到美国和英国的技术支援,花费了较长时间独立发展自己的船用核动力技术,20 世纪 70 年代初开发了世界上独特的 CAP 型一体化压水堆。据报导,该型反应堆的自然循环能力达到 60%,而且结构紧凑,安全可靠,噪音低,其反应堆堆芯寿命长达 25 年,基本上与艇同寿命。英国船用核动力技术的发展主要跟随美国,在 S5W 标准型压水堆的基础上,结合本国条件进行了改进,开发了 A、B、Z、G 四型堆芯,也曾探索过气冷堆和一体化压水堆方案,但最终还是转向分散布置压水堆,水平与美国相当。

回顾舰船核动力的发展历史不难看出,各国一直都在根据自己国家的实际情况,采取不同的路线、方针、政策,进行着积极的探索和不懈的努力,以提高反应堆的可靠性、耐航性和安全性,概括起来主要包括以下几个方面。



1. 提高固有安全性

据不完全统计,自核潜艇问世以来,已发生的严重事故中核动力装置事故约占 1/3。因此,提高核动力装置的安全可靠性,特别是确保核安全,已成为核动力运行中的头等大事。解决这一问题的有效措施是采用非能动安全系统,即依靠重力、对流、蒸发等自然过程自动处理各种事件,即使在发生严重失水事故时,也能保证向堆芯补水,绝对保证堆芯不裸露,而且无需运行人员操作,从而可避免人为误操作的发生。

2. 提高单堆功率

美国海军第一代高速核潜艇反应堆 S5W - II 是第一艘攻击型核潜艇反应堆 S2W 功率的 2 倍,“洛杉矶”级攻击型核潜艇反应堆 S6G 是 S5W 功率的 2 倍,现在正在建造的 SSN - 21“海狼”级攻击型核潜艇的反应堆 S6W 功率又几乎是 S6G 功率的 2 倍。不过由于潜艇的速度与功率之间是三次方函数关系,若速度增加到原来的 2 倍,则功率必须增加到原来的 8 倍。所以近年来,国外核潜艇在发展大型化、快速化的过程中遇到很大的困难。由此看来,未来的核潜艇反应堆功率不会再继续增加,因为目前在役的单堆热功率已达到 250 MW,可提供 6 万马力功率的规模,已经十分可观了。

3. 增强自然循环能力

美国从 1961 年起开始研究自然循环压水堆。其特点是利用反应堆和一回路中冷却剂在系统中的温差而造成的密度差与布置上的位差作为动力进行自然循环。美国海军的 S5G、S6G、S8G 均为自然循环压水堆,法国也采用了自然循环压水堆,英国和俄罗斯的压水堆也都在不断提高自然循环能力。自然循环压水堆的优点是:① 工作安全可靠,反应堆装置自然循环能力高时,可保证在中、低速工况下不使用主泵,从而可免去由主泵引起的一系列问题,如主泵断电事故和衰变热导出等问题,保证堆芯不产生过热而烧毁;② 提高整艇的隐蔽性,因为潜艇的噪声主要来自螺旋桨、主减速齿轮和主循环泵,故主循环泵停转可使噪声降低很多,从而提高了潜艇的隐蔽性。

4. 冷却剂单流程通过堆芯

早期的反应堆堆芯冷却采用双流程。其优点是反应堆体积小,质量轻,堆芯功率密度大。但堆芯结构复杂,冷却剂流动状况不佳。现代潜艇压水堆堆芯都采用单流程冷却。其优点除冷却剂流量大、温差小、燃料元件因冷却条件好而不易发生烧毁和破损事故外,还有堆芯结构简单、冷却剂流动阻力小,因而增大了自然循环能力。但由于流量增大,必须增大主泵及一回路管道尺寸,这又给动力装置的总体布置带来一定困难。

5. 提高自动化水平

核动力装置的体积和质量约占核潜艇的体积和质量的 40% 左右,因此,核动力装置的自动化对全艇的自动化具有重要的意义。核动力装置自动化水平的主要标志是大量采用微型与小型计算机;对反应堆控制的信息进行综合处理、综合显示;指导操作人员在正常和异常工况下的正确操作;防止事故的发生和缩小事故的范围。



6. 延长堆芯寿命

目前,美国海军的 S6G 和 S8G 反应堆的寿命都已达到 10 ~ 13 年。法国的 CAP 型反应堆可达 25 年,即与艇同寿命。长寿命堆芯的主要优点是可提高在航率,减少艇壳的大切口次数,增加艇壳的可靠性,减少放射性废物对操作人员和环境的影响,提高燃料利用率,降低换料费用。

7. 发展新材料

为了提高核动力装置的性能,研制新材料是十分重要的。国外海军一直很重视材料的发展工作,包括核燃料、包壳材料(不锈钢与锆合金)、一回路管道材料、蒸汽发生器传热管材料、海水冷凝器管子材料、管板材料、控制棒材料等。尤其是蒸汽发生器传热管材料的腐蚀问题,世界各国都在根据本国的设计、制造、运行实践来改进材料,并结合采取其他有效措施来减少对材料的腐蚀。

8. 发展完善一体化压水堆技术

采用一体化压水堆可使系统大大简化,管路、阀门减少,从而简化安装和建造难度,使工期缩短,系统的质量、体积大幅度下降,一般质量可比分散布置轻一半,体积减小 1/3,自然循环能力达到 30% 以上,因此使反应堆的固有安全性和可靠性得到明显提高,堆芯熔化概率可降至 5×10^{-8} 堆年。一体化压水堆不仅适合于军用舰船,也非常适合中、小型核电厂或热电厂,具有良好的发展前景。

1.2 电厂核动力的发展与现状

1.2.1 世界能源概况

能源是人类生存的重要支柱,是现代社会经济发展的必要保证。然而,随着世界人口的急剧增长和经济的快速发展,人类社会正面临着越来越严峻的能源短缺和环境恶化的压力。据资料统计显示,至 1995 年底,全世界探明的煤炭可采储量为 10 391.8 亿吨,预计可开采 200 年;石油剩余储量 1 380 亿吨,预计还可开采 40 余年,天然气储量 139.6 万亿立方米,预计可开采 60 年;水力可开发装机容量 2 260 GW。最近又有研究探明,在海底储存着比石油储存量至少大十多倍的碳氢水生化合物,它们在低压下是很好的燃料。这些能源资源无疑可以支持人类几十年甚至近百年的能源需求,但很难满足长期生存发展的需要。直接燃烧这些宝贵的资源以取得动力所需的热能,在经济上应该说也是极不合理的,而且化石燃料在燃烧的过程中要释放出大量的二氧化碳,二氧化硫,烟尘,三、四苯芘,放射性飘尘,氮氧化物等。在这些排放物中,一氧化碳、烟尘直接危害人畜;三、四苯芘是强致癌物质;放射性飘尘使生物受到辐射损伤;二氧化硫和氮氧化物会产生酸雨,使植物死亡、饮水变质;二氧化碳在大气中聚积会引起温室效应,使全球气温上升,给生态环境和世界气候带来不利影响。这一切都对人类生存构成严重威胁,是当今世界性的严重问题,特别是由于二氧化碳的大量排放而产生的“温室效应”问题,已引起国



际社会的广泛关注,曾多次召开国际会议,提出限制二氧化碳排放的种种要求与措施。1989年5月,82国签署了赫尔辛基宣言;1997年12月,在有177国参加的日本京都会议上,最后签署了削减温室气体排放标准的《京都议定书》,规定到2006~2010年与1990年相比,减少量达到:美国7%,日本6%,欧盟各国8%。

要解决经济发展与环境保护这对矛盾,目前最切实可行的途径就是大力发展核电技术。

1. 核电资源的蕴藏量非常丰富

据初步统计,虽然全世界已探明可开采铀储量(1997年)只够使用几十年至近百年,但如果采用快中子增殖堆,通过燃料的转化、再生,则可再用2000多年,如果进一步实现受控聚变反应,并在海水中提取氘加以利用,则所获取的聚变能可供全世界享用百亿年以上,那时人类将不再为能源问题而困扰。

2. 核电是高能量、低耗料的电厂

1 kg ^{235}U 全部裂变释放的能量相当于2700吨标准煤燃烧产生的能量,这比任何一种化学反应释放的能量都要大几百万倍;一吨海水中的氘聚变反应时释放的能量相当于250吨标准煤。一座1000 MW的火电厂每天烧8000吨左右的优质煤,每年需 3×10^6 吨煤,而同样规模的核电厂,每天只需2.86 kg纯 ^{235}U ;若用平均富集度为2.86%的铀燃料,则每年只需40吨左右就够了,由此可以大大缓解交通运输的矛盾。

3. 核电是一种非常清洁的能源

它不仅能长期稳定地供应能源,而且对保护环境、改善人类生存条件发挥重要作用。一座1000 MW的燃煤火电厂,每年向大气中排放几十万吨二氧化硫、烟尘和700多万吨的二氧化碳,以及几十吨的重金属(如砷、铅、水银)和放射性同位素(铀、钍、镭),给人类生存环境造成严重污染,而每千瓦小时的核发电量,从采矿直至完成,整个处理过程所排放的二氧化碳总和只有12克。据估算,如果把世界上的核电都用煤电替代的话,则仅1990年一年就得多排放17亿吨二氧化碳,2500万吨二氧化硫和120万吨氮氧化物。因此,只有逐步以核电代替火电,才有可能从根本上解决环境问题,特别是“温室效应”问题。

4. 核电是一种安全的能源

由于核电是一种有很大潜在危险的能源,因此从它发展的初始阶段,就一直把安全性放在首要位置。为了防止放射性物质泄漏污染环境,核电厂一般都在放射性物质与环境之间设置三道屏障:第一道是燃料元件包壳,它能承受200个大气压力,使放射性裂变产物被限制在包壳内;第二道屏障是反应堆压力壳及一回路耐压管道;第三道屏障是反应堆安全壳,它将一回路系统及设备都密封在里面,即使一回路系统及设备发生了严重的破裂事故,放射性物质也不会扩散到厂房以外。与此同时,核电厂中还专门设置了各种工程安全设施,以保证这些屏障在最严重的假想事故下不被突破。截止1999年底,所有核电机组总计运行了9414堆年,只发生了两起核电厂严重事故,即1979年3月28日三里岛核电站(美国)事故和1986年4月26日凌晨的切尔诺贝利核电站(前苏联,今乌克兰)事故,属于事故概率最低的行业之一。另外还应该看



到,这两起事故的发生都不是不可避免的,也不是技术上不可克服的,事故发生的主要原因是人为失误造成的。

1.2.2 世界核电发展历程

1954年6月27日,世界上第一座核电厂在前苏联建成并网发电,从此核电作为一种新型清洁能源而在许多国家崛起,并得到迅速发展。经过多年的努力,核电厂的研制和发展走过了试验、示范和商业推广的过程。从20世纪60年代至70年代中期,是核电在全世界蓬勃发展的黄金时代,美国、法国、原联邦德国、日本、加拿大、比利时、瑞典等国都相继发展和建造了本国的核电厂,1976年全世界核电装机容量突破100 GW。据国际原子能机构报告,1999年在全世界32个国家和地区共运行着435台核电机组,总装机容量351.718 GW,另外还有39台共32.898 GW的核电机组正在建设之中。1999年的核电总量为2 394.63 TW·h,比1998年增长了约4.5%,占世界总发电量的17%。发电量占有比例超过10%的国家有22个,超过40%的国家是:法国(75%)、立陶宛(73.11%)、比利时(57.7%)、保加利亚(47.1%)、斯洛伐克(47%)、瑞典(46.8%)、乌克兰(43.77%)、韩国(42.8%)。美国的核电比例是19.54%,运行的核电机组数为104个,总装机容量97.145 GW,占全世界核电总装机容量的27.6%。中国大陆的核电份额只有2%,但却是当今世界上发展速度最快的国家。

当然,核电的发展也不是一帆风顺的,特别是进入20世纪80年代以后,世界核电发展的步伐明显变缓,这里原因是多方面的。首先,1973年和1979年两次石油危机的打击,使世界经济发展速度减慢,许多工业国能源过剩,迫使原来制定的大规模发展核电的计划大大削减。其次,三里岛核电站事故和切尔诺贝利核电站事故使核电发展受到了沉重打击,特别是切尔诺贝利核电站事故,不仅造成重大人员伤亡,还有大量放射性物质外泄,产生严重核污染,这使得欧美多国反核力量大增,在有的国家,核能面临生死存亡之争,更不用说发展了。

目前核电发展面临的另一个重要问题是改善其经济性。本来核电的经济性在经历数十年的发展后,已得到相当的肯定,但是,随着对核能安全的要求愈来愈高,审批过程更严格,建造周期更长,使得核能的成本不断攀升,从而使核电在和火电的竞争中处于不利的地位。同时,也应该清醒地看到,所有这一切困难都不是不能克服的。从1985年开始,在美国能源部的支持下,由美国电力研究所牵头起草编制了先进轻水堆的用户要求文件(URD),对未来先进轻水堆的设计提出了一个明确和完整的技术要求,这些要求吸收了世界商用轻水堆已有30年运行经验的成熟技术,并强调简单、牢靠和更加容易的设计特点,实现轻水堆总体性能上有较大改进。这类堆不要求建原型堆,也不要求做大量的试验论证,ABWR、System80+、EPR等都是第三代先进轻水堆核电站的代表。这类核电站是今后一段时期内商用核电主力堆型。先进轻水堆的基本特点包括:

- (1) 增加安全裕量,提高事故遏制能力;
- (2) 简化并增强专设安全系统,降低堆芯损坏频率;



- (3) 大而坚固的安全壳设计;
- (4) 先进的人机接口;
- (5) 大的机组容量。

第三代核系统的初始市场定位是 20 世纪 90 年代的美国和欧洲市场;在提出 URD 时,并未考虑电力市场的非管制化的改革,因此,尽管这种系统在东亚市场上仍有相当的竞争力,但在电力市场非管制化改革后的欧美市场仍缺乏竞争力,显得初期投资过高、建设周期长和发电成本高。

为此在 2000 年 1 月,美国能源部发起组织了由阿根廷、巴西、加拿大、法国、日本、韩国、南非、英国和美国 9 个国家的高级政府代表参加的会议,就开发第四代核电的国际合作问题进行讨论。2000 年 5 月,美国能源部又发起组织了近百名国内外专家,就第四代核电的一般目标问题进行研讨,目的是经研究,选出一个或几个第四代核电的概念性设计,以便进一步开展工作。第四代先进核能系统的主要发展目标包括:

- (1) 经济上有竞争力,基础价(电功率)比投资小于每千瓦 1 000 美元,发电成本低于 3 美分/(kW·h);
- (2) 能长期持续提供清洁能源,确保燃料得到充分利用;
- (3) 更高的安全性和可靠性,堆芯熔化概率很小,发生严重事故时,无需厂外应急计划,可通过核电厂整体实验向公众证明其安全性;
- (4) 建造周期少于 3 年,以使其投资风险降至与其他能源投资项目可比的程度;
- (5) 尽量减少核废物产生,提高公共健康和环境保护水平;
- (6) 具有防止核武器材料扩散的安全保障。

核电作为一种新的能源,只有短暂的 50 年的发展历史。由于种种原因,它的发展有过高潮,也有过挫折,但可以预计在新的世纪里,核电及核能利用将会进一步向前发展。这种新的能源将被越来越多的人所认识,将会在生产发展和人类生活改善方面发挥越来越大的作用。

1.3 中国核电发展

尽管中国是世界五个核大国之一,但民用核电事业的发展却很晚,直到 1991 年 12 月,首座自行建设的 300 MW 秦山核电站才并网发电;1994 年 2 月和 5 月从法国引进的两套 900 MW 核发电机组在广东大亚湾建成投入商业运行,从此揭开了我国(台湾省除外)大规模和平利用核能的新篇章。目前,中国面临着国家安全和经济可持续发展的双重压力,因此进一步大力发展核电已是势在必行。

1. 发展核电有助于减轻我国在环境保护方面的压力

通过 20 多年的改革开放,我国取得了举世瞩目的成绩,但也付出了沉重的代价。在我们的能源消费结构中,煤和石油的消费占到 96.4%(1997 年 6 月)。这些化石燃料的燃烧,造成了严



重的环境污染,一些城市的大气污染程度已达到发达国家 20 世纪五六十年代污染最严重时的程度;我国已经成为继北美和欧洲之后的第三大酸雨污染区。据 1995 年世界银行推算,我国由于大气污染和酸雨每年造成的经济损失达 373 亿美元,占 GPT 的比例超过 5%。1997 年 4 月,“国际能源展望”估计,1990 ~ 1995 年,中国共排放了 8.21 亿吨二氧化碳,仅次于美国而居世界第二。另据估计,按我国目前的人口增长和经济发展速度,到 2050 年,我国的煤炭年消耗量将达到 50 亿吨,超过了 1988 年全世界 48.4 亿吨的煤炭总产量,如果真是那样的话,我们国家将不可避免地成为“黑盒子”,这是环境无论如何都无法承受的。与此同时,根据环保方面的《京都议定书》,已有 77 个国家做出了限量排放二氧化碳的明确承诺,中国作为一个负责任的大国,也必须在这方面承担相称的责任。

2. 发展核电有助于提高我国的能源安全

我国的煤炭和石油消费占能源消费总量的比例一直居高不下,世界银行的一份报告曾指出:“经济发展如此依赖于煤炭,这在世界上是少有的”。由此不仅带来了严重的环境问题,而且由于煤、油的生产地大部分远离能源主要消费区和工业集中的东部沿海地区,造成交通紧张和能源供应困难。与此同时,我国石油供应也已于 1993 年开始由净出口国变为净进口国,我国石油消费对外部的依赖成为现实。随着国内石油供需缺口的进一步扩大,这种依赖性在今后将进一步扩大。如果形成过分依赖进口石油的局面,要保证能源的安全将更加困难,因为我国无法像美国等国家那样以强大的军事力量为海外石油供应提供安全保障。在再生能源方面,我国虽然拥有世界上最丰富的水力资源,理论蕴藏量达到 676 GW,但可经济开发的水力资源不到 200 GW,远远满足不了国民经济发展的需要。至于太阳能、潮汐能、风力及地热能等,虽然也已开始获得应用,但是还不具备进行大规模工业应用的条件。在此情况下,只有发展核能,才能满足我国不断增长的能源需求,并从根本上改善环境,减轻交通运输负担,促进我国经济持续稳定地发展。

3. 发展核电有利于保持和提高国家核能力

由于核武器和核电在关键的技术与基础制造产业能力方面有着许多共同的要求,而且一般情况下,实现受控核反应要比进行核爆困难得多,也就是说,能进行核试验的国家不一定具有独立建立核电厂的能力,而有了核电产业的国家则大都具备进行核试验和制造核武器的能力,更何况在和平时期,各国都不能通过大量生产核武器来锻炼和改进核技术。因此,我国通过进一步发展核电,可以将核工业系统的研究设计力量充分调动起来,使一些已经停产的核燃料生产系统重新运转起来,更好地解决核工业的地区转移和人员安置问题,并帮助解决高等教育核专业的学科延续和人才出路问题。总之,只有进一步发展核电产业,才能够为平稳地推进核工业系统本身的体制改革和结构调整创造条件,使我国的核技术力量得到保存和延续,并在新的基础上得到提高。

当前,我国的核电产业正处在世纪之交的十字路口,面临着千载难逢的历史的机遇。因为经过老一辈科技工作者的艰苦努力和 20 多年的改革开放,我国已具备了自主发展核电的经济



基础和技术力量,拥有巨大的国内电力需求市场,一套完整的市场机制也正在不断完善当中。我国目前已建成和正在建设的核电站有秦山一期、二期、三期,广东大亚湾,广东岭澳和江苏田湾共 11 套机组,总装机容量为 8 700 MW,同时国家还计划在“十五”期间再建造 4 ~ 6 套核电机组。据报导,到 2010 年我国的核电装机容量目标是 20GW,到 2020 年达到 40 GW,核电份额将从现在的 1.15% 提高到 5%,被认为是今后 20 年内世界上最大的核电市场。当然,我国核电产业的发展也面临着巨大的挑战,毕竟我们发展核电的时间还很短,尚属幼稚产业。加入 WTO 之后,国际经济形势的风云变幻将直接对国内形势产生影响,国外的大核电公司也正虎视眈眈地注视着中国的核电市场,而我们又急需国际合作以获取先进的技术和先进的管理经验以及必要的资金支持。但作为世界大国,为了确保国家能源安全,我们更需要自主发展自己的核电产业,并积极参与国际竞争,以获取一定的国际核电市场份额,为此,我国有关方面正在大力进行先进反应堆的开发研究工作。以中国核动力院为主,正在研究开发先进压水堆,所推出的 CNP - 1000 压水堆设计方案,被认为是我国今后核电发展的潜在堆型;以中国原子能科学研究院为主,正在研制一座试验快中子增殖反应堆;清华大学核能技术设计研究院也正在研究开发高温氦冷反应堆和供热式反应堆,其中一座 5 MW 的供热试验堆已于 1989 年建成,一座 10 MW 的高温氦冷堆也已于 2000 年底达到临界;还有许许多多的核能技术工作者也在不断地努力。可以相信,在政府和各界人士的共同努力下,我国的核电产业一定会迎来一个辉煌的明天。

1.4 核动力装置的基本组成与工作过程

核动力装置是以核裂变能来产生动力的装置。对于不同类型的反应堆,相应的装置系统和设备组成也会有较大差别,目前世界上正在运行的主要反应堆类型有压水反应堆、沸水反应堆、重水反应堆、水 - 石墨反应堆、快中子反应堆、气冷堆及一些其他堆型。在核电厂中,压水反应堆的装机容量约占核电总装机容量的 64%。而在船用核动力装置中,几乎全部采用压水反应堆,所以这里只以压水堆核动力装置为例,简要介绍系统基本组成及主要设备。

压水堆核动力装置主要由一、二两个回路系统组成,原理流程如图 1 - 1 所示。

一回路系统由主循环泵、蒸汽发生器、稳压器及管道、阀门组成。核燃料在反应堆内发生链式核裂变反应,释放出的大量热能传给主冷却剂,由主循环泵将冷却剂唧送到蒸汽发生器,通过蒸汽发生器再将热能传递给管外的二回路水,使它变成蒸汽,冷却剂则再由主循环泵唧送回反应堆内,如此循环往复地构成一个闭式的循环回路。系统运行时,回路中产生的压力波动由稳压器控制。现代的核动力装置一般都有 1 ~ 4 个一回路系统对称地并联在反应堆压力容器上,每一个回路由一台主循环泵、一台蒸汽发生器和管道、阀门组成。

二回路系统是将蒸汽的热能转换为机械能或电能的装置。它由汽轮机、汽水分离再热器、冷凝器、凝结水泵、给水泵、给水加热器、除氧器等设备及相应的管道、阀门组成。二回路给水在蒸汽发生器内吸收了一回路冷却剂传给的热量后蒸发为蒸汽,品质合格的蒸汽首先进入汽轮



机高压缸做功,从高压缸中出来的蒸汽进入汽水分离再热器,提高干度后的蒸汽再进入汽轮机低压缸做功,最终的乏汽全部排入冷凝器中凝结成水,然后由凝水泵将凝结水送入低压加热器加热,再到除氧器进行热力除氧,最后由给水泵将其唧送到高压加热器,再加热后返回蒸汽发生器,构成二回路的密闭循环。

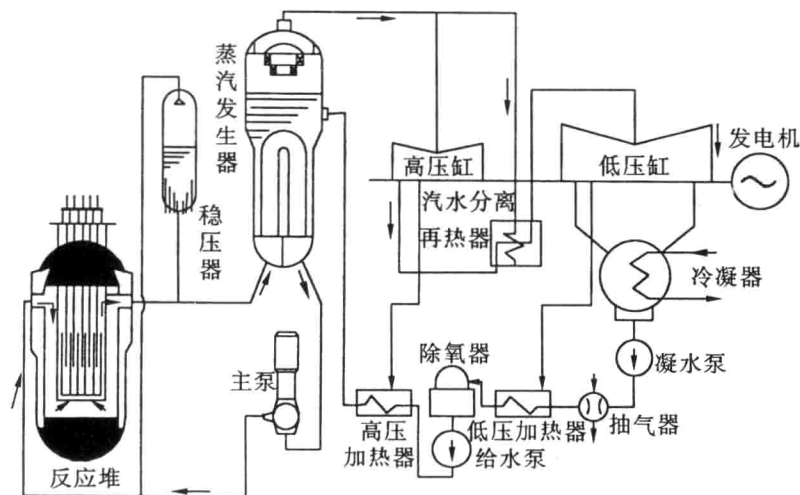


图 1-1 压水堆核动力装置流程简图

除上述两个主要回路,核动力装置一般还有许多辅助系统以确保系统的安全、稳定运行。如余热排出系统、化学与容积控制系统、净化系统、设备冷却水系统、安全注射系统等。

电厂核动力装置和船用核动力装置的基本组成是一致的,但由于电厂更加注重经济性,而舰船主要关心的是安全可靠,并受有限空间的约束,因此前者一般要比后者的结构复杂得多。它们之间的另一个最大区别是电厂核动力装置的汽轮机直接驱动发电机发电,而船用核动力装置的汽轮机则是通过减速齿轮来驱动螺旋桨产生船舶前进的动力。

在核动力装置中,反应堆、蒸汽发生器、主循环泵、稳压器、汽轮机、冷凝器、发电机等都是非常重要的大型设备。这些设备的研究、设计和制造的水平对核动力装置的安全性、可靠性和经济性具有举足轻重的影响。如虽然蒸汽发生器只是一回路系统中的一个设备,但它的传热管面积却占一回路系统承压边界总面积的近 80%,传热管的破裂是造成核动力装置事故停闭的主要原因之一。因此,各国科学家一直都在对这些设备进行深入细致的研究,以改进其性能。目前,对于反应堆、水泵、汽轮机等都有专门的课程进行详细的介绍和分析,而对于蒸汽发生器、稳压器和冷凝器,一般是作为系统的一部分,简单地介绍其功能和工作原理,内容显得过于浅显,不能满足人才培养的需要;至于专业书籍,内容又显得过多、过深,也不适合本专业培养方向在本科生阶段的教学要求。为此,本教材力求综合、浓缩已有专业书籍的精华,吸收最新的研



究成果,把握当前的发展方向,将原理性和工程性有机地结合在一起,使得学生能在不太多的学时里,对蒸汽发生器、稳压器和冷凝器的结构、工作原理、设计原则、热工水力过程、稳态及动态特性等有一个比较全面的了解,进而在掌握专业基础知识和基本技能的基础上,学会运用基本理论知识解决工程实际问题的方法。

思 考 题

1. 简述目前船用核动力装置的发展趋势。
2. 为什么说人类生存与社会发展面临能源的严峻挑战,如何解决这一问题?
3. 为什么说核电是一种清洁、安全的新能源?
4. 我国煤炭资源丰富,为什么还要发展核电?
5. 先进轻水反应堆有何基本特点?
6. 第四代先进核能系统的主要发展目标有哪些?

第 2 章 压水堆蒸汽发生器的工作原理与结构设计

2.1 蒸汽发生器概述

2.1.1 蒸汽发生器的作用与地位

蒸汽发生器是产生汽轮机所需蒸汽的换热设备。在核反应堆中,核裂变产生的能量由冷却剂带出,通过蒸汽发生器将热量传递给二回路的给水,使其产生具有一定压力、一定温度和一定干度的蒸汽。此蒸汽再进入汽轮机中做功,转换为电能或机械能。由图 1-1 可以看出,在这个能量转换过程中,蒸汽发生器既是一回路设备,又是二回路设备,所以被称为一、二回路的枢纽。实际运行经验表明,蒸汽发生器能否安全、可靠地运行,对整个核动力装置的经济性和安全可靠性的影响十分重要。据压水堆核电厂事故统计显示,蒸汽发生器在核电厂事故中居重要地位。例如仅 1977 年一年,在 79 座运行的压水堆核电厂中,就有 34 座发生了蒸汽发生器传热管破损。美国核管会(NRC)在 1982 年发表的调查报告中指出,美国正在运行的 48 座核电厂中,有 40 座发生了蒸汽发生器事故,其中 8 座情况严重。据报道,国外 PWR 核电厂的非计划停堆次数中约有四分之一是因有关蒸汽发生器问题而造成的。1991 年 2 月 9 日,日本美滨-2 堆的 A 号蒸汽发生器发生一根传热管横向断裂事故;1992 年,在 205 座反应堆中,报告蒸汽发生器有问题的达 172 座;同年美国 PWR 的负荷因子,由于蒸汽发生器问题(包括传热管破损和更换蒸汽发生器)而降低了 3.31%,占年负荷因子总降低值的 12.7%。1979 ~ 1994 年,已有 55 台蒸汽发生器因传热管严重破损而被迫更换,其实际使用寿命平均仅约为 14 年(最短者仅 8 年),远未达到 30 ~ 40 年的设计寿命。美国 1992 年更换磨石-2 堆的两台蒸汽发生器,停堆 192 天,耗费 1.9 亿美元。可见,一些蒸汽发生器的可靠性是比较低的,它对核电厂的安全、可靠性和经济效益有重大影响。因此,各国都把研究与改进蒸汽发生器当做完善压水堆核电厂技术的重要环节,并制定了庞大的研究计划,主要包括蒸汽发生器热工水力分析;腐蚀理论与传热管材料的研制;无损探伤技术;振动、磨损、疲劳研究;改进结构设计,减少腐蚀化学物的浓缩;改进水质控制等。

2.1.2 蒸汽发生器的基本技术要求

在核动力装置中,由于一回路为带有放射性的回路,而二回路为非放射性回路,因此在研制蒸汽发生器时对结构、强度、材料抗腐蚀性、密封性等都提出了很高的要求,其中最基本的技



术要求包括以下几方面。

(1) 蒸汽发生器及其部件的设计,必须保证供给核电站在任何运行工况下所需要的蒸汽量及规定的蒸汽参数。只有满足这个要求才能保证电站在不同负荷下经济运行。

(2) 蒸汽发生器的容量应该最大限度地满足功率负荷的需要,而且要求随着单机容量的增加,其技术经济指标得到相应的改善。

(3) 蒸汽发生器的所有部件应该绝对地安全可靠。蒸汽发生器的受热面是由大量的小直径管子组成的,因此在一回路(带有放射性)中就有大量的管子,使核电站运行的可靠性在很大程度上取决于蒸汽发生器的可靠性。这样,蒸汽发生器的屏蔽问题必须解决,所有部件必须保证工作可靠。

(4) 蒸汽发生器各零、部件的装配,必须保证在密封面上排除一回路工质漏入二回路中去的可能性。一回路工质不允许漏入二回路工质中去的原因是汽轮机回路没有生物防护,任何一种漏入都将会导致放射性泄漏事故。

(5) 必须排除加剧腐蚀的任何可能性,特别是一回路中的腐蚀。这主要是为了防止腐蚀产物对一回路工质的污染。腐蚀产物过多地进入到一回路中去,一方面引起一回路工质放射性的增加,另一方面导致放射性腐蚀产物在一回路的沉积。腐蚀产物在燃料元件上的沉积是极其危险的,它会使传热性能骤然下降。

(6) 蒸汽发生器必须产生必要纯度的蒸汽,以保证蒸汽过热器在高温下可靠地运行,并保证汽轮机也可靠而经济地运行。

(7) 蒸汽发生器应该设计得简单紧凑,便于安装使用,同时易于发现故障而及时排除,并有可能彻底疏干。

(8) 保证蒸汽发生器具有较高的技术经济指标。

在设计蒸汽发生器时,要考虑一、二回路两种工质的种类和参数,正确地选择结构方案、材料、传热管尺寸、传热系数以及冷却剂等,对取得蒸汽发生器最佳技术 - 经济指标是非常重要的。另外,必须采取减小向外散热损失的措施。

2.1.3 蒸汽发生器的分类

蒸汽发生器是核动力装置中一个非常重要的热量交换设备,在核动力装置的发展过程中出现过各种形式的蒸汽发生器,根据各自的结构特征和运行方式,可以把他们分成不同的类别。如按照工质流动方式可分为自然循环蒸汽发生器和直流蒸汽发生器;按蒸汽发生器的外形可分为卧式蒸汽发生器和立式蒸汽发生器;按传热管形状可分为U形管、直管、螺旋管,以及由其他形状传热管构成的蒸汽发生器。表2-1列出了蒸汽发生器一些常见的结构方案,它们可以作为蒸汽发生器分类的基础。目前在压水堆核动力装置中使用的蒸汽发生器主要有立式U形管自然循环发生器、卧式自然循环蒸汽发生器及列管式直流蒸汽发生器。表2-2列出了几种典型蒸汽发生器的基本参数。



表 2-1 蒸汽发生器一些常见的结构方案

二回路工质流动方式	蒸汽发生器筒体外形	蒸汽发生器安放位置	传热管形状	管板结构
自然循环、管内直流、管外直流	立式、单筒卧式、双筒卧式	分散式、紧凑式、一体化式	直管、U形管、螺旋管、微波浪管、套管	圆柱形联箱、平面管板

表 2-2 压水堆核动力装置中几种典型蒸汽发生器的基本参数

电厂名称	单位	Yankee Rowe	秦山核电厂	美滨二号	Stade	大亚湾核电厂	WNP-5	WNP-4	WWER-1000
类型		立式U形管	立式U形管	立式U形管	立式U形管	立式U形管	立式U形管	立式直管	卧式U形管
国家及制造厂		美国西屋	中国上海锅炉厂	日本三菱重工	德国西门子	法国法马通	美国燃烧工程公司	美国巴布柯克·威尔柯克斯公司	俄罗斯
热功率	MW	150	517.5	728	474	965	1 900	1 880	749
一回路压力	MPa	13.8	15.2	15.4	15.5	15.5	15.5	15.5	13.9
冷却剂进口温度	℃	293	316.1	320	311.1	327.6	327.3	331	323
冷却剂出口温度	℃	268	287.9	289	284.6	292.4	295.8	298	289
冷却剂流量	t/h	4 756	12 000	12 240	11 000	16 754	37 273	36 000	14 400
二回路蒸汽压力	MPa	3.43	5.54	5.34	4.97	6.89	7.32	7.14	6.28
二回路蒸汽温度	℃	243	282	269	265	284	289	306	278.5
蒸汽产量	t/h	258	1 010	1 429	898	1 938	3 905	3 795	1 469
给水温度	℃	160	220	221	207.5	226	232	240.5	220
传热面积	m ²	1 250	3 072.9	4 120	4 510	5 429	9 700	12 691	5040
传热管外径	mm	19.1	22	22.225	22	19.05	19.05	15.9	12
传热管壁厚	mm	1.8	1.2	1.27	1.2	1.09	1.07	0.86	1.2
传热管数目	根	1 620	2 977	3 260	2 605	4 474		16 000	15 648
传热管材料		SS304	1-800	1-600	1-800	1-690	1-600	1-600	0Cr18Ni10Ti
上筒体外径	m	2.59	3.63	4.22	3.60	4.484	6.22	3.720	
下筒体外径	m	2.16	2.8	3.23	2.74	3.446	4.82	3.720	4(内径)
总高	m	12.3	17.3	19.3	15.7	20.8	20.88	23.0	13.84
净重	t	85	211.5	277		330	750	490	264



2.2 立式 U 形管自然循环蒸汽发生器

2.2.1 工作原理

在蒸汽发生器中,如果水和汽水混合物的循环不需要外加能量,而是依靠水和汽水混合物的密度差进行水循环,则称其为自然循环蒸汽发生器。自然循环蒸汽发生器又可分为立式自然循环蒸汽发生器和卧式自然循环蒸汽发生器,目前核动力装置中使用最多的就是如图 2-1 所示的立式自然循环蒸汽发生器。

蒸汽发生器由上、下封头、管板、U 形管束、汽水分离装置及筒体组件构成。在一次侧,来自反应堆的冷却剂由下封头进口管进入进口水室,然后通过 U 形管束将热量传递给二次侧工质。冷却剂流出 U 形管束后,经过出口水室,再从下封头出口管流出,由主冷却剂泵送回反应堆。在二次侧,二回路给水由给水泵输送到蒸汽发生器的给水管,通过给水分配环管进入管束衬筒与壳体之间所形成的环形下降通道向下流动,通过衬筒与管板二次侧表面之间的缺口处进入,并横向冲刷管束,然后折流向上,进入管束空间。水在 U 形管束空间吸收来自一回路的侧的热量,被逐渐加热到饱和温度并不断产生蒸汽。当汽水混合物向上流动并离开弯头区时,大约有 25% 的饱和水蒸发为蒸汽。汽水混合物继续上行,首先进入一次粗分离器分离出大部分水分,带有细小水滴的湿蒸汽继续向上流动,经过重力分离后进入二级汽水分离(干燥)器,进一步将蒸汽湿度降至 0.25% 以下后,由蒸汽导管引出,送往汽轮机做功。分离出的饱和水全部进入环形下降通道,与二回路给水混合后成为循环水,二回路侧工质的流动情况如图 2-2 所示。

自然循环发生器的主要特点是产生湿饱和蒸汽;存在内部水循环,而且这种水循环不需要外部动力。

自然循环蒸汽发生器的优点是水容积大;蓄热量大;缓冲性好;对自动控制的要求不高。由于可进行炉内水处理和排污,适当降低了对传热管材和二回路水质的要求,从而简化了系统,并提高了设备的安全可靠性。

自然循环蒸汽发生器的缺点是:

- (1) 为保证蒸汽品质,需要装设汽水分离设备,使蒸汽发生器的结构复杂,尺寸增大;
- (2) 由于自然循环蒸汽发生器产生饱和蒸汽,因此需要在汽轮机高低压缸之间装设汽水分离再热器或在汽轮机内加装分离级,使系统复杂化,投资提高;
- (3) 静态特性较差,特别是在采用一回路冷却剂平均温度不变的运行方案时,当蒸汽负荷从满负荷降到零负荷时,蒸汽发生器压力将增加几十个大气压,使筒体的设计压力和给水泵的轴承载荷都大大增加。

与卧式自然循环蒸汽发生器相比,立式 U 形管自然循环蒸汽发生器的优点是:

- (1) 避免了气泡的停滞,改善了传热,使水循环更加安全可靠;

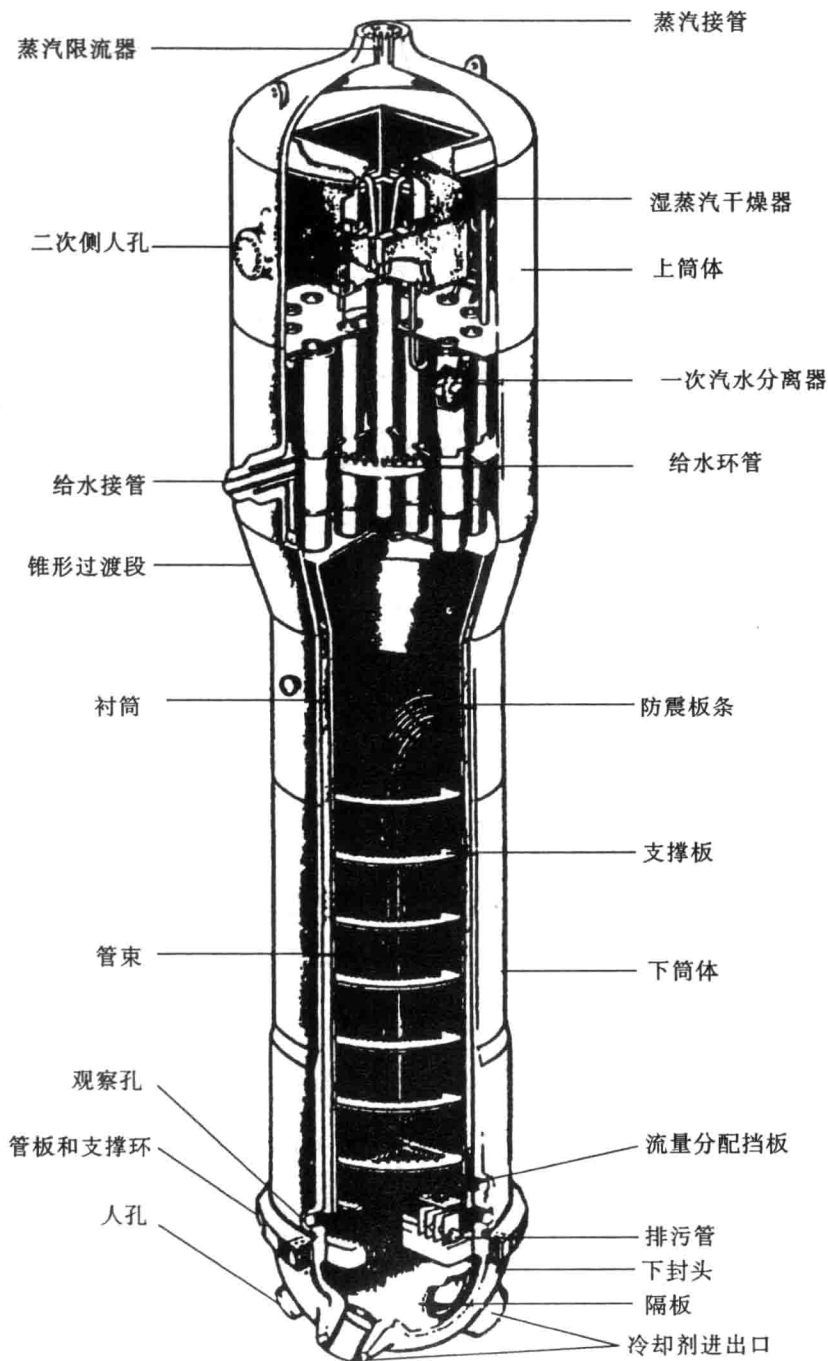


图 2-1 立式 U 形管自然循环蒸汽发生器

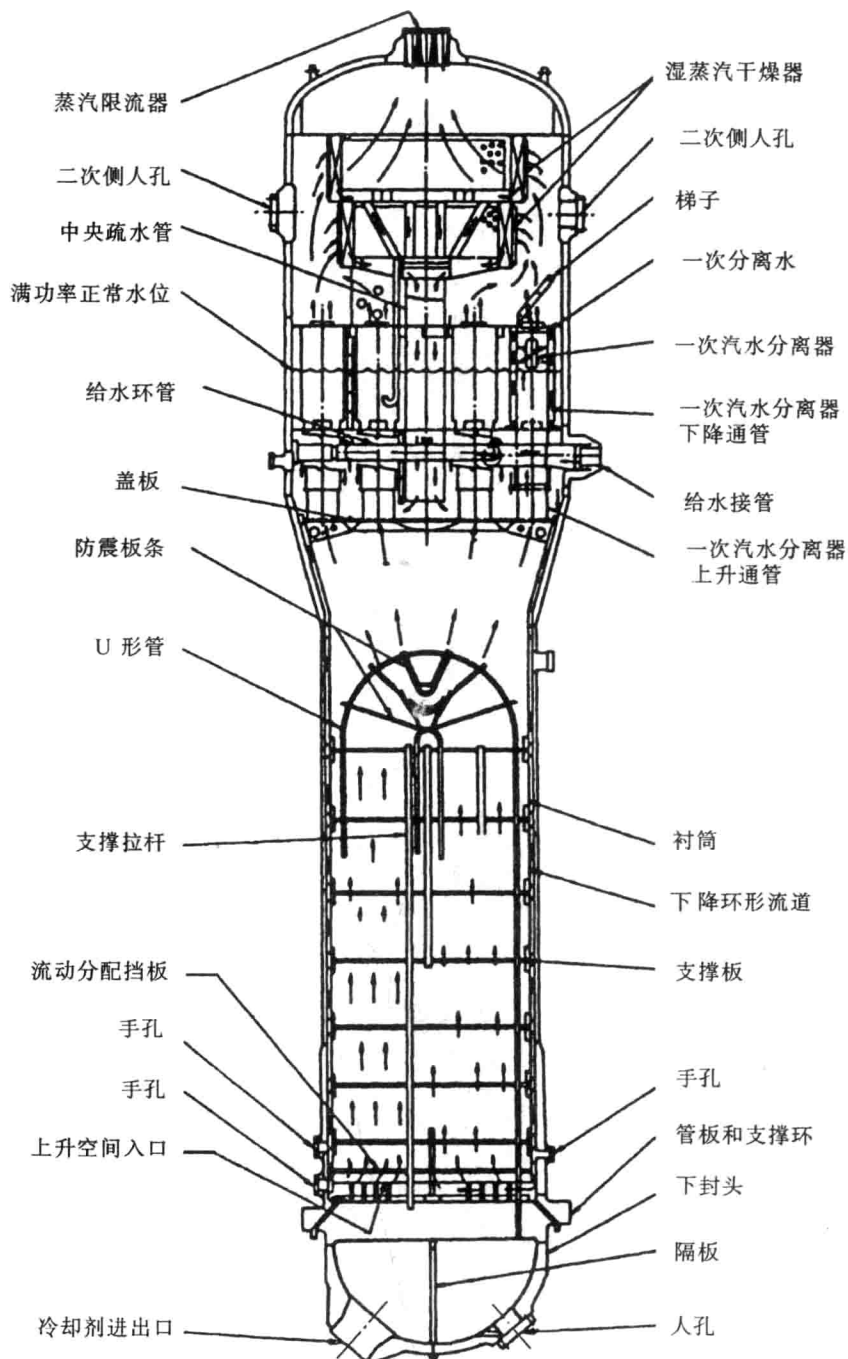


图 2-2 二回路工质流程简图