



国防特色教材·核科学与技术
黑龙江省精品图书出版工程项目

核动力设备

Nuclear Power Equipment

(第2版)

主编◎孙中宁

HEUP 哈尔滨工程大学出版社



国防特色教材·核科学与技术

黑龙江省精品



核动力设备

(第2版)

主编 孙中宁

主审 阎昌琪

HEUP 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

蒸汽发生器、稳压器、冷凝器等都是核动力装置非常重要的大型设备。这些设备的研究和设计、制造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。

本书共分12章。第1章绪论,介绍核动力装置的发展历程、现状和未来发展趋势。第2章至第6章介绍蒸汽发生器的工作原理、结构设计、热工水力特性计算、自然循环蒸汽发生器的运行特性及传热管的腐蚀与防护。第7章至第9章介绍压力安全系统的功能、组成和电加热式稳压器的结构、控制、容积和电加热功率计算及动态特性模型分析。第10章至第12章介绍表面式冷凝器的工作原理、热工水力计算、变工况特性和主要零部件的结构、选材、布置及其性能分析。

本书是为核工程专业编写的专业教材,内容既全面翔实,又简明扼要,兼顾理论分析与工程设计需要,将原理性和工程性有机地结合在一起,对相关工程技术人员也具有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

核动力设备/孙中宁主编. —2版. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2017. 8
ISBN 978-7-5661-1578-2

I. ①核… II. ①孙… III. ①核动力装置
IV. ①TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 181597 号

选题策划 石 岭
责任编辑 石 岭 宗盼盼
封面设计 张 骏

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451-82519328
传 真 0451-82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江龙江传媒有限责任公司
开 本 787 mm × 960 mm 1/16
印 张 12.25
字 数 322 千字
版 次 2017 年 8 月第 2 版
印 次 2017 年 8 月第 1 次印刷
定 价 32.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn



作者简介

孙中宁，男，1963年3月生，“龙江学者”特聘教授，现为哈尔滨工程大学核科学与技术学院教授，博士生导师。1983年进入哈尔滨船舶工程学院学习，2000年在哈尔滨工程大学获博士学位，2000—2002年在哈尔滨工业大学能源科学与工程学院动力工程及工程热物理博士后科研流动站工作，2003—2004年在日本原子力研究所工作。获得国家科技进步二等奖1项，部级科技进步一等奖1项，部级科技进步三等奖7项，在国内外刊物及学术会议上发表论文160余篇，获得国家发明专利27项。从事教学工作27年，教授的主要课程有反应堆热工水力、核动力设备、反应堆结构与材料、先进核动力反应堆、强化换热等。现任船舶核动力专业委员会委员，《应用科技》编委，国家自然科学基金通讯评审专家。主要研究方向：反应堆热工水力，反应堆严重事故缓解技术，强化换热技术。

新书推荐

《核工程检测技术（第2版）》

《气液两相流（第3版）》

第2版前言

本书作为核工程专业的本科生专业课教材于2004年出版。原版书中内容力求综合,浓缩已有专业书籍的精华,吸收最新研究成果,将原理性和工程性有机地结合在一起,努力使学生能在较短的时间里学会运用基本理论知识解决工程实际问题的方法。不过,随着时间的推移,书中的一些内容渐显过时、陈旧,个别概念和表述已不再准确、恰当。在该书的使用过程中,一些老师和学生,以及作者本人,还陆续发现书中存在的一些错误和不足。

本次再版,作者综合各方面的意见和建议,针对原书中存在的问题和不足进行了认真修改与完善,更新了陈旧过时的内容,同时仍保留了原书特有的风格,使书中内容更适合当前的教学使用。

鉴于作者水平有限,加之修改时间仓促,书中错误或疏漏之处在所难免,恳请读者不吝批评、指正。

编者

2017年7月

第 1 版前言

核动力工程是综合性、专业性和技术性都非常强的学科领域,包括当今世界的许多高新技术,对相关从业人员的专业水平具有较高的要求。随着我国船用核动力和核电事业的迅速发展,国内急需加强培养从事核动力技术研究、开发、设计和运行、管理的人才,并配备合适的相关教材。

本书以当前国内外的主要核动力装置类型——压水堆核动力装置为应用背景,重点介绍立式 U 形管自然循环蒸汽发生器、电热式稳压器和水冷表面式冷凝器的有关知识,同时也兼顾未来的发展趋势,介绍一些新材料、新方法和新结构等内容。本书力求综合、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。

本书是在参考了孙福泰教授的授课讲义和其他作者的大量文献,并结合自己多年积累的教学经验的基础上编写而成的。在本书的编写过程中,杜泽教授为收集资料给予了许多帮助;核动力运行研究所的吴洪涛先生提供了螺旋管蒸汽发生器的技术资料;阎昌琪教授对教材的编写给予了热情的支持、指导和帮助,提出了许多有益的意见和建议。在此,作者一并向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,实践经验不足,加之时间仓促,参考的资料也不够丰富,书中难免存在疏漏或错误之处,诚恳希望广大读者批评指正。

编 者

2003 年 12 月

目 录

| | |
|------------------------|----|
| 第1章 绪论 | 1 |
| 1.1 船用核动力装置的发展与现状 | 1 |
| 1.2 电厂核动力的发展与现状 | 3 |
| 1.3 中国核电发展 | 6 |
| 1.4 核动力装置的基本组成与工作过程 | 7 |
| 思考题 | 9 |
| 第2章 压水堆蒸汽发生器的工作原理与结构设计 | 10 |
| 2.1 蒸汽发生器概述 | 10 |
| 2.2 立式U形管自然循环蒸汽发生器 | 12 |
| 2.3 卧式自然循环蒸汽发生器 | 19 |
| 2.4 直流式蒸汽发生器 | 20 |
| 2.5 其他几种有特色的蒸汽发生器 | 23 |
| 思考题 | 28 |
| 第3章 蒸汽发生器传热管的腐蚀与防护 | 29 |
| 3.1 传热管破损的种类及其发生机理 | 29 |
| 3.2 防止传热管破损的主要措施 | 33 |
| 思考题 | 39 |
| 第4章 蒸汽发生器的热计算 | 40 |
| 4.1 蒸汽发生器热计算概述 | 40 |
| 4.2 蒸汽发生器的传热过程 | 41 |
| 4.3 蒸汽发生器的设计热计算步骤 | 48 |
| 思考题 | 49 |
| 第5章 自然循环蒸汽发生器的水力计算 | 50 |
| 5.1 单相流动阻力计算 | 50 |
| 5.2 气液两相流动阻力计算 | 54 |
| 5.3 二回路侧水力计算 | 62 |
| 思考题 | 69 |
| 第6章 自然循环蒸汽发生器的运行特性 | 70 |
| 6.1 核动力装置的静态运行方案选择 | 70 |
| 6.2 蒸汽发生器的静态特性计算 | 73 |
| 6.3 蒸汽发生器的水循环特性 | 74 |
| 6.4 蒸汽发生器的水位测量与控制 | 75 |
| 6.5 蒸汽发生器的蒸汽品质控制 | 83 |
| 思考题 | 90 |

| | |
|---------------------------------|-----|
| 第7章 压力安全系统 | 91 |
| 7.1 压力安全系统的功能 | 91 |
| 7.2 稳压器的主要类型与工作原理 | 92 |
| 7.3 压力安全系统的组成及主要设备部件结构 | 97 |
| 7.4 稳压器的压力调节与水位控制 | 104 |
| 7.5 稳压器的事故分析 | 106 |
| 思考题 | 107 |
| 第8章 稳压器的容积和电加热功率计算 | 108 |
| 8.1 压水堆一回路系统冷却剂体积波动的原因 | 108 |
| 8.2 稳压器容积计算的要求和依据 | 111 |
| 8.3 稳压器容积的划分与计算 | 113 |
| 8.4 稳压器的电加热功率计算 | 118 |
| 思考题 | 122 |
| 第9章 稳压器的动态特性 | 123 |
| 9.1 单区平衡模型分析 | 123 |
| 9.2 二区非平衡模型分析 | 128 |
| 思考题 | 136 |
| 第10章 冷凝器及其典型结构 | 137 |
| 10.1 冷凝器的功用 | 137 |
| 10.2 冷凝器的分类及其工作过程 | 140 |
| 10.3 冷凝器的典型结构 | 142 |
| 思考题 | 147 |
| 第11章 冷凝器的主要部件结构 | 149 |
| 11.1 壳体与水室 | 149 |
| 11.2 管板与隔板 | 150 |
| 11.3 冷却管及其固定 | 151 |
| 11.4 冷凝器的总体布置 | 159 |
| 思考题 | 165 |
| 第12章 冷凝器的热力特性 | 166 |
| 12.1 冷凝器的传热与水力计算 | 166 |
| 12.2 空气对冷凝器工作的影响 | 176 |
| 12.3 冷凝器的变工况热力特性 | 178 |
| 12.4 影响凝结水过冷的因素 | 181 |
| 思考题 | 184 |
| 参考文献 | 185 |

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“鳐鱼”(Nautilus)号核潜艇的建成下水标志着核动力舰船时代的开始,此后,美国、俄罗斯、英国、法国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 300 余艘。中国也建造了一定数量的核潜艇。经过半个多世纪的发展,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 kn,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;俄罗斯的“共青团员”号核潜艇曾于 1984 年 8 月下潜到 1 020 m 的深度,在 1 000 m 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;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、尺寸大大减小,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。据报道,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,而且无须

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,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、冷却剂流动阻力小等特点,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(不锈钢与铝合金)、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,也非常适合于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 1.396×10^6 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》。

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,则可再用两千多年,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,那时人类将不再受能源问题的困扰。

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 2 700 t 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 t 标准煤。一座 1 000 MW 的火电厂每天烧 8 000 t 左右的优质煤,每年需 3×10^6 t 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 t 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 1 000 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 g。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,2 500 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。截至 1999 年底,所有核电机组总计运行了 9 414 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(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。2011 年 3 月的日本福岛核电站事故,尽管其主因是 11 日发生的 9 级强烈地震和地震引发的海啸,但导致电站爆炸和放射性物质向环境扩散的更深层的原因既有设计技术的不足,更有电站管理上的缺陷和决策上的失误。

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、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,截至 2016 年 2 月底,全世界共有 448 台核电机组在运行,总装机容量约 3.19 TW。主要分布在北美、欧洲及东亚的一些工业化国家,其中美国有 99 台、法国有 58 台、日本有 42 台、俄罗斯有 35 台、韩国有 25 台。核电发电量约占全球总发电量的 10%,有 16 个国家和地区核发电量占发电总量的比例超过 19%,其中法国为 72%,韩国为 30.3%,美国为 19.7%。目前全球在建核电机组 61 台,装机容量为 61.3 GW。中国大陆的核电份额虽然不足 4%,但却是当前世界上发展速度最快的国家,目前已投入运行的机组达到 36 台,在建机组 21 台。

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,迫使原来制订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。2011年3月的福岛核电站事故更是再次敲响了安全的警钟,它告诉人们:人类对自然界的认识还非常有限,自然界可能发生的事件和事件叠加常常超出想象,我们必须给予核电安全以高度重视。同时,也应该清醒地认识到,随着有机能源的日益枯竭和环境的不断恶化,发展核电是当前和未来相当一段时期内为满足社会发展而不得不做出的抉择,我们只能积极面对,努力发展安全性更高的核能系统。

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,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,所有这一切困难都是可以克服的。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如下:

- (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年代的欧美市场。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如下:

- (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,无须厂外应急计划,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 60 多年的发展历史。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,尽管发生了福岛核电事故,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。

1.3.1 发展核电有助于减轻我国在环境保护方面的压力

通过 30 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 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。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。

1.3.2 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,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。

1.3.3 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机遇。因为经过老一辈科技工作者的艰苦努力和 30 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。我国大陆目前已建成的核电机组有秦山一期、秦山二期、秦山三期、广东大亚湾、广东岭澳一期、广东岭澳二期和江苏田湾共计 13 台,总装机容量为 10 800 MW,另有 28 台、总装机容量为 30 970 MW 的核电机组正在建设中。按照国家规划,到 2020 年我国的核电装机容量将达到 70~80 GW,核电份额将从现在的 1.15% 提高到 3.5%。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。加入世界贸易组织后,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,国家在积极引进 AP1000 和 EPR 第三代核电技术的同时,也在《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020)》中将大型先进压水堆及高温气冷堆核电站列入国家科技重大专项,大力推进先进反应堆的开发研究工作。目前,自主设计的 CPR1000 核电机组已在岭澳二期建成并网发电,CAP1400 的技术研发取得重大进展,ACP1000 的研制已转入工程设计阶段;以中国原子能科学研究院为主研制的快中子增殖反应堆已于 2011 年 7 月 21 日成功并网发电;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;一座电功率为 200 MW 级的高温气冷堆示范电站在山东荣成石岛湾开工建设。还有许许多多的核能技术工作者也都在进行共同的努力,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。

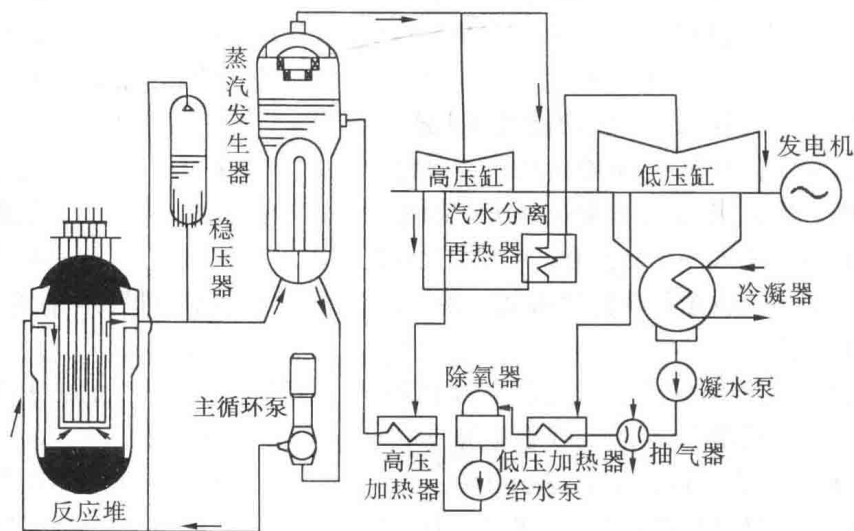


图 1-1 压水堆核动力装置流程简图

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。

除上述两个主要回路外,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