



核科学与技术系列

# 核动力装置热力分析

彭敏俊 田兆斐 编著

NUCLEAR  
SCIENCE  
AND  
TECHNOLOGY

HEUP 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press



核科学与技术系列

哈尔滨工程大学“十一五”研究生教材建设专项资金资助出版

# 核动力装置热力分析

彭敏俊 田兆斐 编著  
王金忠 主审

NUCLEAR  
SCIENCE  
AND  
TECHNOLOGY

HEUP 哈尔滨工程大学出版社  
Harbin Engineering University Press

## 内 容 简 介

本书介绍了不同堆型核电厂采用的朗肯循环、布雷顿循环以及影响循环热效率的主要因素,介绍了定功率法、等效焓降法、循环函数法、凝汽法、矩阵法等热平衡分析方法,着重介绍了焓的概念、计算方法以及焓分析方法在压水堆核动力装置热力分析中的应用,并通过对压水堆核电厂热力系统的热平衡分析和焓分析,指出核电厂能量传输与转换过程中能量利用的合理性与有效性,提出改善核电厂热力系统能量利用水平的方法和途径。本书还简单介绍了焓经济学分析方法的基本理论以及核电机组热经济性在线分析的方法。

本书适合作为高等院校核能科学与工程学科研究生、核工程与核技术专业 and 热能工程专业高年级本科生的专业课教材,也可供从事核动力装置工作的技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

核动力装置热力分析/彭敏俊,田兆斐编著. —哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2012. 8  
ISBN 978 - 7 - 5661 - 0401 - 4

I. ①核… II. ①彭… ②田… III. ①核动力装置 - 热力学 - 分析 IV. ①TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 186994 号

---

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 哈尔滨工业大学印刷厂  
开 本 787mm × 1 092mm 1/16  
印 张 15.25  
字 数 368 千字  
版 次 2012 年 8 月第 1 版  
印 次 2012 年 8 月第 1 次印刷  
定 价 32.00 元

<http://press.hrbeu.edu.cn>

E-mail: [heupress@hrbeu.edu.cn](mailto:heupress@hrbeu.edu.cn)

---

# 前 言

自 20 世纪 50 年代世界上第一座核电厂在前苏联的奥勃宁斯克建成以来,核电的发展极为迅速,核电作为一种安全、清洁、经济、可持续发展的能源,已经被国际社会所接受,目前世界核能发电占总发电能力的比例已经超过了 16%。尽管在核电发展史上先后出现了美国三哩岛核电厂事故(1979 年)、前苏联切尔诺贝利核电厂事故(1986 年)和日本福岛核电厂事故(2011 年),使得核电发展进程在不同时期出现了波折,但是基于世界上已有核电厂运行的丰富经验和良好安全记录,以及人类社会可持续发展的客观要求,未来核电仍然将作为一种主要的能源形式得到发展。

随着国民经济的迅速发展,我国对能源的需求日益增长,由于以煤、石油为主的常规化石能源日益枯竭和使用过程中对环境产生的严重污染,大力发展核电是实现可持续发展、解决能源短缺、确保国家能源安全的重要途径之一。我国从 20 世纪 80 年代中期开始建设核电厂,至 2010 年投入商业运行的核电机组已达 13 个。国家发改委 2007 年 10 月通过的《核电发展中长期规划(2005—2020)》中明确要求“积极发展核电”,计划到 2020 年核电总装机容量达到 4 000 万千瓦,标志着中国核电进入了快速、稳定发展的新阶段。

从本质上说,核电厂是将核能转换为电能的能量系统。在获得一定电能的情况下,尽量减少核燃料的消耗量,降低发电成本,一直是人类努力追求的目标。通过对核电厂热力系统的分析,可以指出能量传输与能量转换过程中能量利用的合理性与有效性,提出改善核电厂热力系统能量利用水平的方法和途径。

本教材是 2003 年哈尔滨工程大学出版社出版的研究生教材《核动力装置热力分析》的修订版,主要以压水堆核电厂为对象,介绍其基本热力循环、能量分析的方法,着重介绍焓方法在压水堆核动力装置热力分析中的应用。全书内容共分九章:第 1 章介绍核电厂的基本类型、热力分析的目的和任务;第 2 章简要介绍热力分析的理论基础;第 3 章介绍热力过程的焓分析方法;第 4 章介绍核电厂采用的热力循环形式及影响热循环效率的主要因素;第 5 章介绍核电厂热力系统的热平衡分析方法;第 6 章介绍了核电厂热力系统的焓分析方法;第 7 章介绍了改善核电厂热经济性的途径和合理用能的基本原则;第 8 章简要介绍了焓经济学分析方法的基本理论;第 9 章简要介绍了核电机组热经济性在线分析的方法。

哈尔滨工程大学彭敏俊教授修订了本书第 1,2,3,4,6,7,8 章,田兆斐教授修订了第 5 章并编写了第 9 章,全书由彭敏俊教授统稿。哈尔滨工程大学王金忠教授、阎昌琪教授审阅了书稿并提出了许多宝贵意见和建议。在编写过程中参考或引用了国内外一些学者的论著,在此一并表示衷心感谢。

学习本书应具有工程热力学、传热学的基础,并对核动力装置及设备有一定程度的了解。本书可作为高等院校核工程专业、热能工程专业本科生、硕士研究生的教材,也可以供从事核动力装置工作的技术人员参考。

由于编著者水平有限,书中难免有不少缺点和错误,深切希望广大读者提出宝贵意见。

编著者

2011 年 12 月于哈尔滨

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 核电的特点及其发展前景 .....	1
1.2 核电厂的类型及其热力系统 .....	7
1.3 核电厂的热经济性指标.....	12
1.4 热力分析的目的及任务.....	14
思考题与习题 .....	15
<b>第 2 章 热力分析的理论基础</b> .....	16
2.1 热力学基本概念.....	16
2.2 热力学第一定律 .....	21
2.3 热力学第二定律 .....	25
2.4 能量系统的热力分析方法.....	32
思考题与习题 .....	38
<b>第 3 章 热力过程的焓分析方法</b> .....	39
3.1 焓的基本概念.....	39
3.2 焓的分类及其计算.....	42
3.3 焓损失与焓平衡方程.....	55
3.4 焓分析方法.....	65
3.5 能级分析原理.....	70
思考题与习题 .....	75
<b>第 4 章 核电厂的热力循环</b> .....	76
4.1 朗肯(Rankine)循环 .....	76
4.2 蒸汽参数对循环效率的影响.....	83
4.3 给水回热循环.....	87
4.4 蒸汽再热循环.....	97
4.5 具有再热的回热循环 .....	100
4.6 布雷顿(Brayton)循环 .....	101
思考题与习题.....	105
<b>第 5 章 核电厂热力系统的热平衡分析</b> .....	106
5.1 传统的热平衡分析方法 .....	106
5.2 核电厂热力系统的定功率算法 .....	107
5.3 主要设备的热平衡分析模型 .....	111
5.4 热平衡分析示例 .....	129
5.5 核电厂热力系统热平衡计算结果分析 .....	134
5.6 等效焓降法 .....	136



5.7	循环函数法	141
5.8	凝汽法	145
5.9	矩阵分析法	150
	思考题与习题	152
<b>第 6 章</b>	<b>核电厂热力系统的焓分析</b>	<b>153</b>
6.1	主要设备的焓分析模型	153
6.2	核电厂热力系统焓分析实例	166
6.3	核电厂热力系统的焓优化	168
	思考题与习题	171
<b>第 7 章</b>	<b>核电厂热力系统节能分析</b>	<b>172</b>
7.1	改善核电厂热经济性的途径	172
7.2	合理用能的基本原则	179
	思考题与习题	185
<b>第 8 章</b>	<b>焓经济学分析方法及其发展</b>	<b>186</b>
8.1	核电厂焓经济学分析的意义	186
8.2	焓成本方程	187
8.3	核电厂主要热力设备焓成本分析	189
8.4	运行成本与焓效率的关系	191
8.5	热力系统焓经济学优化方法	192
8.6	核电厂热力系统焓经济学优化探讨	198
	思考题与习题	199
<b>第 9 章</b>	<b>核电机组热经济性在线分析</b>	<b>200</b>
9.1	机组性能在线分析技术的发展及应用	200
9.2	核电机组热经济性在线分析系统设计	203
9.3	热力系统性能在线计算方法	207
9.4	核电机组热力系统经济性分析模型	210
	思考题与习题	213
<b>附录 A</b>		<b>214</b>
附表 A-1	主要变量符号表	214
附表 A-2	常用单位换算表	216
附表 A-3	水的热物性参数	217
附表 A-4	具有焓参数的饱和水与饱和蒸汽表(按温度排列)	218
附表 A-5	具有焓参数的饱和水与饱和蒸汽表(按压力排列)	219
附表 A-6	龟山-吉田环境模型的元素化学焓与温度修正系数	220
附表 A-7	常见无机化合物的化学焓及其温度修正系数	221
附表 A-8	常见有机化合物的化学焓及其温度修正系数	221
附表 A-9	燃料化学焓的近似计算式	222
附表 A-10	常见固体燃料的化学焓	222
附表 A-11	几种煤气的化学焓	222

附表 A - 12 压水堆核电站主要参数 .....	223
附录 B .....	226
附录 B - 1 大亚湾核电站热力系统计算程序 .....	226
附表 B - 1 热力系统结构参数变量说明 .....	234
参考文献 .....	235

# 第 1 章 绪 论

能源是人类赖以生存和发展的重要物质基础,人类文明每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替。人类开发、利用能源经历了依赖传统可再生能源的薪柴时期、煤炭时期和石油时期三个不同阶段,随着社会的发展和技术的进步,今后必将进入新能源与可再生能源利用的新时期。

目前,煤炭、石油和天然气三大化石能源仍是世界最主要的一次能源。据统计,2006 年世界一次能源消费总量为  $1.556 \times 10^{10}$  tce<sup>①</sup>,其中煤炭、石油、天然气、核能和水能的比例分别为 28.4%、35.8%、23.7%、5.8% 和 6.3%<sup>[1]</sup>。

电能现代化生产和人类的日常生活中有着极为重要的作用,电能的应用及电力工业的发展情况标志着一个国家的现代化生产水平和人民的生活水平。自然界中不同形式的一次能源(如煤、石油、天然气、水能、核能、风能、太阳能、地热、潮汐等)可以通过不同类型的发电厂转换为电能,其中核电由于资源消耗少、环境影响小和供应能力强等优点,日益被公众了解和接受,与火电、水电并称为世界三大电力供应支柱。

## 1.1 核电的特点及其发展前景

核能发电是利用核裂变或者核聚变所释放的能量进行发电,核裂变能发电现已达到工业应用规模,而通过有控制地释放核聚变能达到大规模和平利用的受控热核反应迄今尚未实现工业化应用。

### 1.1.1 世界核电的发展历程

1942 年 12 月 2 日,在美国物理学家恩利克·费米(Enrica Fermi)指导下设计制造的第一座核反应堆在芝加哥运转成功,首次实现了铀核的可控自持裂变链式反应,标志着人类从此进入了原子能时代。

1954 年 7 月,前苏联利用其生产核武器钚的石墨水冷堆技术,在奥勃宁斯克(Obninsk)建成了世界上首座电功率为 5 MW 的压力管式石墨水冷堆试验性核电厂,揭开了核能发电的序幕。1957 年 12 月,美国在其核潜艇用压水堆的技术基础上,建成了世界上第一座电功率为 90 MW 的原型压水堆核电厂——希平港(Shippingport)核电厂。1956 年,英国利用其生产军用钚的石墨气冷堆技术,建成两座单机电功率为 46 MW 的核电机组。这些实验性和原型核电机组验证了核能发电技术的可行性,国际上将其称为第一代核电机组。

20 世纪 70 年代,因石油涨价引发的能源危机促进了核电的发展。世界各国在实验性和原型核电机组基础上,相继开发、建设电功率在 300 MW 以上的商用核电机组,堆型主要有美国、欧洲和日本的压水堆(PWR)、沸水堆(BWR),俄罗斯的轻水堆(VVER/WWER)和

① 吨标准煤当量(ton of standard coal equivalent,tce),1 tce = 29.3 GJ。



加拿大的重水堆(CANDU),目前世界上正在商业运行的400多座核电机组绝大部分属于这一时期的产品,称为第二代核电机组。

1979年3月,美国发生了三哩岛(Three Mile Island, TMI)核电厂事故,虽未造成人员伤亡,却对世界核电发展产生了深远影响。三哩岛事故后,美国核管会(USNRC)加强了对核电厂的安全管理,不但严格控制新许可证的发放,而且对原有核电厂的设备和规程提出许多修改要求。1986年4月,前苏联又发生了切尔诺贝利(Chernobyl-4)核电厂事故,造成严重的人员伤亡、大面积环境污染和人员迁移,格外加重了人们对核电安全的担心。

20世纪90年代,为了解决三哩岛和切尔诺贝利核电厂严重事故的负面影响,世界核电界集中力量进行了研究和攻关,美国和欧洲先后出台《先进轻水堆用户要求》和《欧洲用户对轻水堆核电站的要求》,国际上通常把满足这两份文件之一的核电机组称为第三代核电机组。第三代核电机组是在1996~2010年设计的,将安全作为首要参考因素,主要目标是进一步提高第二代核电机组的安全性,比较有代表性的主要有先进沸水堆(ABWR)、非能动先进压水堆(AP1000)、欧洲先进压水堆(EPR)。

表1-1列出了1960~2010年世界核电装机容量的增长情况。

表1-1 1960~2010年世界核电装机容量

(单位:GW)

年份	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2006	2010
装机容量	6.83	16	135	328	340	351.7	369.6	374.682

根据世界核新闻(WNN)网站和国际经济合作组织核能机构(NEA)2008年年报提供的数据,截止到2009年6月1日,全世界有30个国家和地区运行<sup>①</sup>着436座核电机组,总净装机容量为372.5GW;在建<sup>②</sup>的核电机组共有45座,总净装机容量为39.948GW;计划<sup>③</sup>建设的核电机组共有131座,总装机容量为142.855GW;拟建<sup>④</sup>的核电机组共282座,总净装机容量为316.205GW。

2008年全世界的核发电总量为2601TWh,约占全世界总发电量的15%,是近五年来核发电量最低的一年。截至2009年6月1日,经合组织(OECD)成员国共拥有341座现役机组,占全世界总核电净装机容量的83.2%。表1-2列出了核电比例最高的前10个国家。

表1-2 2008年全世界核电比例最高的10个国家

国家	法国	立陶宛	斯洛伐克	比利时	乌克兰
核电比例	76.2%	72.9%	56.4%	53.8%	47.4%
国家	瑞典	斯洛文尼亚	亚美尼亚	瑞士	匈牙利
核电比例	42.0%	41.7%	39.4%	39.2%	37.2%

① 运行:并网发电。

② 在建:反应堆已浇筑第一罐混凝土,或者正在进行重大整修。

③ 计划:已批准且建设资金已经到位,或建设进度良好但被无限期暂停。

④ 拟建:有明确计划但仍然未获得资金和/或批准。

目前,第四代核电系统的研究工作已逐步展开,其反应堆和燃料循环都将有重大革新和发展。2002年,国际上对最有希望的未来反应堆概念进行了选择,确定了从能源可持续发展、经济竞争力、安全可靠性和防扩散和外部侵犯能力方面最具前景的6种堆型,包括带有先进燃料循环的钠冷快堆(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)、铅冷快堆(Lead-cooled Fast Reactor, LFR)和气冷快堆(Gas-cooled Fast Reactor, GFR)三种快中子堆,以及超临界水冷堆(Super Critical Water-cooled Reactor, SCWR)、超高温气冷堆(Very High Temperature gas-cooled Reactor, VHTR)和熔盐堆(Molten Salt Reactor, MSR)三种热中子堆。这些设计的主要特点是改进了经济性,增强了安全性,使废物量最小化和防止核扩散燃料循环。

当今世界能源工业正面临着可持续发展战略和生态环境保护的双重压力,核电由于安全、经济、清洁的特点以及在燃料供给方面具有的明显优势,在21世纪将会出现新的发展高潮,在相当长的一段时期内,核电将成为电力工业的支柱。

核能利用是解决能源问题的必由之路,核能在人类可使用能源中的比例将逐步加大,从而改善能源结构,并有希望在将来彻底解决人类对能源的需求。然而,核能的开发利用是一个循序渐进的长期进程,按其科技难度和实现产业化的前景展望,大致可分为三个阶段:第一阶段是热中子反应堆;第二阶段是快中子增殖堆;第三阶段是可控聚变堆。这三个阶段需要互相衔接,逐步进入实用,实现产业化<sup>[2]</sup>。

### 1.1.2 核能发电的特点

在世界能源供应中,核电已占有重要地位。核电与常规能源相比,在以下几个方面具有显著的优越性。

#### 1. 核燃料能量密度较高

原子能可通过核裂变或核聚变的方式释放出来,一些放射性核素在衰变过程中也会释放出一定的能量。表1-3列出了几种核反应与燃烧化学反应释放的能量数值。

表1-3 核反应与燃烧化学反应释放的能量比较<sup>[3]</sup>

反应类型	反应式	释放的能量
铀核裂变	${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \longrightarrow {}_{42}^{95}\text{Mo} + {}_{57}^{139}\text{La} + 2{}_0^1\text{n} + 7{}_{-1}^0\text{e}$	约200 MeV
太阳中的氢核聚变反应	$4{}_1^1\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + 2{}_1^0\text{e}$	24.7 MeV
氢弹中的氘氚聚变反应	${}_1^2\text{H} + {}_1^3\text{H} \longrightarrow {}_2^4\text{He} + {}_0^1\text{n}$	17.6 MeV
镭核的衰变	${}_{88}^{226}\text{Ra} \longrightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$	4.8 MeV
钴-60的衰变	${}_{27}^{60}\text{Co} \longrightarrow {}_{28}^{60}\text{Ni} + {}_{-1}^0\text{e}$	2.8 MeV
碳原子的燃烧化学反应	$\text{C} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{CO}_2$	4.1 eV

1 kg 铀-235 完全裂变所释放的能量相当于 2 400 t 标准煤或者 1 570 t 石油完全燃烧所放出的能量,在同等质量下,氘氚核聚变反应所释放的能量大约是铀核裂变反应的 4 倍。

一座容量为 1 000 MW 的压水堆核电站,满功率运行 300 天只消耗低浓铀 25 ~ 30 t(相当于天然铀 150 ~ 180 t);而一座相同容量的燃煤火电厂,满功率运行 300 天则需要消耗 3 100 000 t 左右的煤,平均每天需要运输上万吨燃料和上千吨灰渣。

由于核电厂具有能量密度高、燃料消耗少的特点,其占地面积较相同容量的火力发电厂要小得多,并且可以显著减轻对运输系统的压力,节约大量的燃料运输费用。

## 2. 核电是清洁能源

核电厂以可裂变重核(如 $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ )为燃料,而火力发电厂以煤炭、石油或者天然气为燃料,它们向环境排放的废物各不相同。表1-4为1000 MW核电厂与不同类型火电厂年度废物排放量的比较。

表1-4 1000 MW电厂的年度废物排放量<sup>[4]</sup>

燃料类型	燃料耗量 /t	CO <sub>2</sub> /t	SO <sub>2</sub> /t	NO <sub>x</sub> /t	烟尘 /t	灰渣 /t	放射性 /Bq	微量元素 /t
煤	$2.4 \times 10^6$	$5.88 \times 10^6$	$4.4 \times 10^4$	$2.2 \times 10^4$	$9.0 \times 10^3$	$4.5 \times 10^5$	$6.6 \times 10^9$	20.8
天然气	$7.7 \times 10^5$	$2.48 \times 10^6$	0	$2.0 \times 10^3$	0	0	0	0
油	$1.04 \times 10^6$	$2.9 \times 10^6$	$2.0 \times 10^3$	0	0	0	0	—
核燃料	24	0	0	0	0	0	有	0

注:①对于燃煤机组,煤中全硫分按1.15%计算,煤耗为310 g/(kW·h);对于燃气机组(联合循环)发电气耗为140 g/(kW·h);对于燃油机组(联合循环)发电燃耗为190 g/(kW·h)。

②各类电厂的年运行时间均按5500 h计算。

③微量元素包括砷、镉、铅、锰、汞、镍、钒。

由表中所列数据可以看出,火力发电厂在运行过程中会产生大量的烟尘、CO<sub>2</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>以及一些微量元素,对环境的污染比较严重。

核电厂日常运行排出的放射性废气与废液量很小,且处于严密的监督和控制之下,周围的居民由此受到的辐射剂量小于来自天然本底的1%。同时,核电厂不向环境排放SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和烟尘等有害物质,也不排放形成温室效应的CO<sub>2</sub>等气体。因此,核能发电是各种能源中温室气体排放量最小的发电方式,核电是一种极为清洁的能源。

从保护环境的角度来看,利用核能代替化石能源,可以有效地减少排入大气中的CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>等化学燃烧产物,从而遏制温室效应的发展和酸雨的形成。据估算,美国自1973年以来,由于核电厂的运行,CO<sub>2</sub>的排放量减少了约 $20 \times 10^8$  t,对保护环境起到了重要作用。

## 3. 核燃料资源丰富

煤炭、石油和天然气等化石燃料是不可再生资源,也是现代化工、轻纺工业的宝贵原料。根据英国BP(British Petroleum)公司2006年发布的世界能源统计报告,截止到2005年末,世界探明石油储量 $1.636 \times 10^8$  t,天然气剩余可采储量 $1.7983 \times 10^{14}$  m<sup>3</sup>,煤炭剩余可采储量 $9.0906 \times 10^{11}$  t。按照2005年的生产水平,世界石油、天然气和煤炭储采比分别为40.6、65.1和155。再继续使用化石燃料作为主要能源,不仅会造成自然资源的浪费和严重的环境污染,而且将加剧全球性的能源危机。

为了解决能源利用过程中的环境污染问题以及人类面临的能源危机,实现社会的可持续发展,必须努力提高能源利用效率,更多地开发和利用其他替代能源。目前,太阳能、风能、水力、地热和生物能等自然资源虽然在一定程度上已开发利用,但是受到自然条件和其他客观条件的影响和制约,不可能从根本上解决人类社会的能源问题。

核裂变能的利用经过多年的研究和实践,在技术上比较成熟并已在工业中大规模应用,利用核能发电为补充和代替常规能源提供了新的手段。核能不仅具有较高的能量密度,而且资源丰富。根据国际经合组织核能机构(NEA)和国际原子能机构(IAEA)2008年6月联合发布的红皮书《铀2007:资源、生产和需求》,世界铀资源总量为 $1.5969 \times 10^7$  t,包括已探明资源 $5.469 \times 10^6$  t和未探明资源 $1.05 \times 10^7$  t。按2006年世界天然铀消费量 $6.65 \times 10^4$  t计算,已探明资源量几乎可以满足全世界80年的需求。

目前的商用核电机组主要采用热中子反应堆,对铀资源的利用率只有1%左右,将要实现商用化的快中子增殖反应堆可以将铀资源的利用率提高到60%~70%,大大延长已探明铀资源的使用时间。

目前正在研究的可控核聚变技术一旦实现商用化,将揭开人类能源利用的新篇章。核聚变所使用的氘可从海水中提取,1 L海水中能够提取30 mg氘,在核聚变反应中能产生约等于300 L汽油燃烧产生的能量。据测算,地球上的海水中共有 $4.5 \times 10^{13}$  t氘,如全部提取出来用于核聚变,可为人类提供无穷无尽的洁净能量。目前,由欧、日、俄、美、中、韩、印七方参与的国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)合作计划已经启动,如果进展顺利,有可能在2050年前后,开展商业性受控热核聚变发电的示范。

#### 4. 核电经济性良好

核电厂的重要经济指标是产生1 kW·h电能所需要的成本,主要由电厂建造投资费、燃料循环费和运行维修费三部分组成,表1-5给出了核电、煤电和气电几种发电成本的比较<sup>[5]</sup>。

表1-5 标准化发电成本的组成<sup>①</sup>

项目	建造投资费/%	燃料循环费/%	运行维修费/%	合计/%
核电厂	43~70	13~30	17~31	100
煤电厂	23~45	35~65	6~28	100
气电厂	13~33	53~84	3~19	100

注:①考虑5%的贴现率。

核电厂对安全性的要求严格,而且系统复杂,设备众多,因而核电的建造投资费用要高于火电(煤电和气电),但燃料费要远低于火电。由于燃料费补偿了投资费,使得核电成本有可能低于火电成本。美国能源咨询委员会在研究了几十年来的平均发电成本后指出,核电、煤电、燃气发电和燃油发电的平均发电成本每kW·h分别为4美分、5美分、6美分和8美分左右。近几年来,国际上对核电与煤电的成本作过比较,法国煤电成本是核电成本的1.75倍,德国是1.64倍,意大利是1.57倍,日本是1.51倍,韩国是1.7倍。

随着世界性能源危机的日益加剧,以及核电技术的逐步成熟和核电设备的标准化,世界各核电国家的核电成本将普遍低于火电成本,从长期经济效益来看,核电具有一定优势。

#### 5. 核电安全性很高

为了防止放射性物质外泄,威胁人类的生命安全,破坏生态环境,核电厂在设计、建造和运行过程中始终贯彻纵深防御的安全原则,包含了在放射性物质与人员所处的环境之间设置多道屏障,以及对放射性物质的多级防御措施。由于核安全的极端重要性,几十年来世界

各有核国家投入了大量人力、物力和财力进行核安全研究,核安全技术取得了很大的进步,有效地提高了核电厂的安全性,发生放射性物质大量释放的严重事故的概率大大降低。

在半个多世纪的核电发展史上,先后发生了美国三哩岛核电厂事故(1979年3月28日)、前苏联切尔诺贝利核电厂事故(1986年4月26日)和日本福岛核电厂事故(2011年3月11日),其中切尔诺贝利核电厂事故导致大量放射性物质向环境释放,造成了生命财产的巨大损失,但该电厂使用的石墨沸水堆仅在前苏联境内建设过,并不代表主流的核反应堆技术。这些事故对核电发展进程产生了重要影响,个别国家甚至宣布完全放弃核能发电,但是从世界上已有核电厂积累的丰富运行经验和良好的安全记录来看,核能发电无论是生产过程中的人员伤亡,还是对环境的不良影响都远远优于其他工业部门,核电的安全是有保障的,核电是安全、清洁的能源,已是世界能源界公认的结论。

### 1.1.3 我国核电发展的前景

我国是世界上最大的发展中国家,其能源结构主要以化石燃料为主。2006年,中国的一次能源消费结构为:煤炭占69.4%,石油占20.4%,天然气占3.0%,水电、核电和风电合计占7.2%;而同一年全世界的一次能源消费结构为:石油占35.8%,煤炭占28.4%,天然气占23.7%,水能占6.3%,核能占5.8%<sup>[1]</sup>。中国煤炭的生产和消费远高于石油,天然气和核电的消费远低于世界平均水平。这种以煤炭为主的能源结构是造成能源消费强度高、能源利用效率低和环境污染的重要原因。

我国的水力和煤炭资源较为丰富,蕴藏量分别居世界第1位和第3位;而优质化石能源相对不足,石油和天然气资源的探明剩余可采储量目前仅列世界第13位和第17位。由于人口众多,各种能源资源的人均占有量都低于世界平均水平,其中石油、天然气人均剩余可采储量仅为世界平均水平的7.7%和7.1%,储量比较丰富的煤炭也只有世界平均水平的58.6%。随着我国经济的持续快速发展,能源消费需求急剧增长,供需矛盾日益突出,已经成为我国经济社会可持续发展的最大制约,直接威胁国家经济安全。从这个角度来说,我国是能源资源严重短缺的国家。

我国的能源资源分布极不均匀,煤炭储量的93%分布在华北、西北和东北地区,水力资源大多集中在西部地区,与全国工业布局、人口分布不相适应,形成了“北煤南运、西煤东调”、“西部油气东输、东北油气南送、海上油气登陆”、“西电东送”的能源输送大格局,以及大规模、长距离的能源运输体系,占用了大量的运输资源。为了满足国民经济快速发展对电力需求的增长,避免大量的“北煤南运”及远距离的“西电东送”,从长远来看,核能作为一种清洁能源,将在既少煤炭又无水力资源的沿海经济发达地区得到较快发展。

随着世界能源消费量的迅速增加,CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、灰尘颗粒物等环境污染物的排放量逐年增加,化石能源对环境的污染和全球气候的影响也日趋严重。国际社会为应对全球气候变化,通过签订各类公约,推动各国采取对策努力限制或减少温室气体的排放,许多国家在调整能源战略和制定能源政策时,增加了应对气候变化的内容,重点是限制化石能源消费,鼓励能源节约和清洁能源的使用。各国把核能、水能、风能、太阳能、生物质能等低碳和无碳能源作为今后发展的重点,这也是我国未来能源发展的主要方向。

1985年,中国首座核电厂——秦山一期300 MW示范核电厂开工建设,揭开了中国核电发展的序幕。至2008年,中国共有11个核电机组在运行,总装机容量为9.1 GW,核电装

机容量占电力总装机容量的 1.1%，形成了浙江秦山、广东大亚湾、江苏田湾三大核电基地，表 1-6 所示为目前正在运行的 11 个核电机组的概况<sup>[6]</sup>。

表 1-6 中国大陆正在运行的核电机组

序号	机组名称	堆型	所在地	额定电功率/MW	首次并网时间
1	秦山核电厂	压水堆	浙江海盐	310	1991-12-15
2	大亚湾核电厂 1 号机组	压水堆	广东深圳	984	1993-08-31
3	大亚湾核电厂 2 号机组	压水堆	广东深圳	900	1994-02-07
4	秦山二期 1 号机组	压水堆	浙江海盐	650	2002-02-06
5	岭澳核电厂 1 号机组	压水堆	广东深圳	990	2002-02-26
6	岭澳核电厂 2 号机组	压水堆	广东深圳	990	2002-09-14
7	秦山三期 1 号机组	重水堆	浙江海盐	728	2002-11-19
8	秦山三期 2 号机组	重水堆	浙江海盐	728	2003-06-12
9	秦山二期 2 号机组	压水堆	浙江海盐	650	2004-03-11
10	田湾核电厂 1 号机组	压水堆	江苏连云港	1 060	2006-05-12
11	田湾核电站 2 号机组	压水堆	江苏连云港	1 060	2007-05-14

截止到 2009 年初，中国有广东岭澳二期、秦山二期扩建、辽宁红沿河、福建宁德、福建福清、广东阳江、秦山核电方家山等 7 个核电项目 22 个机组在建，总装机容量为 22.9 GW。拟建的核电项目包括浙江三门、山东海阳、广东台山等共有 9 个。

2007 年 10 月，中国政府颁布《国家核电发展中长期规划(2005—2020)》，提出了中国核电发展目标。到 2020 年，中国核电运行装机容量将建成 40 GW，在建装机容量 18 GW。

## 1.2 核电厂的类型及其热力系统

核裂变反应堆有多种形式，如压水堆、沸水堆、重水堆、石墨水冷堆、高温气冷堆、快中子增殖堆等。核电厂使用的反应堆按照核燃料循环体系可以分为铀-钚循环体系和钍-铀循环体系，图 1-1 列出了两个燃料循环体系的动力反应堆类型。

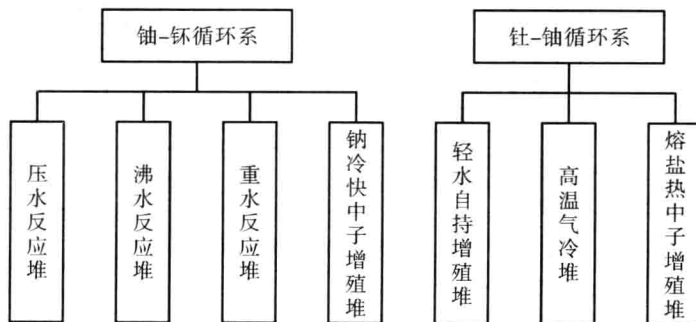


图 1-1 核电厂动力反应堆类型



目前世界上运行和建造的核电机组中各种堆型的应用情况如表 1-7 所示。

表 1-7 世界核电厂各种反应堆类型及所占比例<sup>[7]</sup> (截至 2007 年 8 月 22 日)

反应堆类型	正在运行机组			正在建造机组		
	数量	装机容量/MW	机组比例/%	数量	装机容量/MW	机组比例/%
压水堆(PWR)	265	243 218	60.36	21	17 371	70.00
沸水堆(BWR)	94	84 958	21.41	2	2 600	6.67
加压重水堆(PHWR)	44	22 367	10.02	4	1 298	13.33
石墨慢化轻水堆(LWGR)	16	11 404	3.64	1	925	3.33
气冷堆(GCR)	18	9 034	4.10	0	0	0
快中子增殖堆(FBR)	2	690	0.46	2	1 220	6.67
总计	439	371 671	100	30	23 414	100

### 1.2.1 压水堆核电厂

压水堆具有结构紧凑、体积小、功率密度高、平均燃耗较深等优点,与其他堆型相比,建造周期短、造价便宜。另外,压水堆在结构设计上采用多道屏障防止放射性物质外泄,而且冷却剂具有负温度系数,使反应堆具有自稳自调特性,因此安全性较好。经过多年的研究和发展,压水堆已是比较成熟的堆型,目前世界上运行中的核电厂有半数以上属于压水堆型。

压水堆核电厂由反应堆厂房(即安全壳)、一回路辅助系统厂房、核燃料厂房、汽轮机厂房、输配电厂房、主控室、循环水泵房及三废处理厂房等组成。压水堆核电厂热力系统主要包括一回路核岛和二回路常规岛两大部分,其热力系统原理流程如图 1-2 所示。

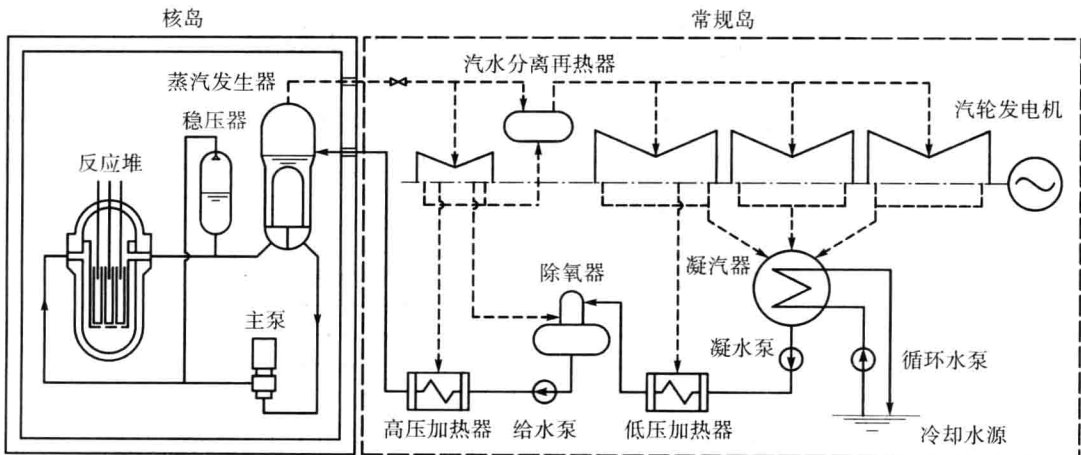


图 1-2 压水堆核电厂热力系统原理流程图

核岛主要包括反应堆、一回路冷却剂系统及一回路辅助系统。

压水堆一般使用棒状燃料元件,燃料元件以锆合金作包壳,内装<sup>235</sup>U 富集度较低的 UO<sub>2</sub>

陶瓷燃料,使用经过处理的高纯水作为冷却剂和慢化剂。为了使冷却剂流经堆芯时不发生容积沸腾,反应堆的运行压力通常保持在 12 ~ 17 MPa 的水平。

现代商业性压水堆核电厂的一回路系统一般有二至四条对称并联在反应堆压力容器接管上的密闭环路,每一条环路由一台反应堆冷却剂泵、一台蒸汽发生器和相应的管道所组成,通常将反应堆、一回路冷却剂系统及其相应的辅助系统合称为核蒸汽供应系统(Nuclear Steam Supply System, NSSS)。过冷状态的冷却剂在主冷却剂泵的驱动下循环于一回路系统中,将堆芯核燃料裂变反应产生的热量带出,并在流经蒸汽发生器时对二次侧给水进行加热。一回路辅助系统用以保证反应堆和一回路冷却剂系统的正常安全运行,在事故工况下提供必要的安全保护措施,以防止放射性物质的扩散和污染。

常规岛部分与常规火电厂的热力系统相似,采用具有蒸汽再热和给水回热的朗肯循环,主要设备包括汽轮机、发电机、凝汽器、循环水泵、凝水泵、给水泵、给水加热器、除氧器和汽水分离再热器等。蒸汽发生器二次侧给水吸收一次侧冷却剂放出的热量而产生饱和蒸汽,蒸汽管路将蒸汽送至汽轮机,在高压缸中膨胀做功后排出的低参数湿蒸汽进入汽水分离再热器进行汽水分离和再热,被加热至微过热状态后送入低压缸做功。汽轮机驱动发电机产生电能,汽轮机排出的乏汽在凝汽器中冷凝成水,经给水加热器加热到一定温度,送入蒸汽发生器中,开始下一次汽水循环。

与常规火电厂相比,压水堆核电厂汽轮机组具有以下一些特点:

(1) 新蒸汽参数与核电厂运行负荷相关,会在一定范围内变化。

(2) 新蒸汽多为饱和蒸汽,参数较低。

(3) 汽轮机理想焓降小,容积流量大。核电厂饱和蒸汽汽轮机的理想焓降比火电厂过热蒸汽汽轮机的理想焓降约小一半,因此在同等功率下核汽轮机的蒸汽容积流量比火电厂汽轮机高出 60%~90%。

(4) 汽轮机叶片大部分工作在湿蒸汽区,叶片表面容易受到侵蚀。由于蒸汽中液滴的侵蚀,叶片表面呈现起伏不平的海绵状,既会降低级效率,又会改变叶片的振动和强度特性,严重时导致叶片断裂。

### 1.2.2 沸水堆核电厂

沸水堆与压水堆同属于轻水堆,用低富集铀作燃料,以加压轻水作为中子慢化剂和反应堆冷却剂。沸水堆的主要特征是允许冷却剂在堆芯沸腾,堆内产生的汽水混合物通过反应堆压力容器上部的汽水分离器和蒸汽干燥器进行除湿,干燥后的饱和蒸汽可直接送入汽轮机组膨胀做功。沸水堆直接产生蒸汽供应汽轮机组使用,省去了蒸汽发生器和稳压器,使核电厂的工作可靠性大大提高;由于采用单一循环回路,动力循环的工质流量大幅度减少,降低了循环消耗功率,有利于提高核电厂的经济性。图 1-3 所示为沸水堆核电厂热力系统原理流程图。

沸水堆的工作压力约为 5 ~ 7 MPa,只相当于压水堆工作压力的一半,因此沸水堆核电厂设备、管路的设计压力相对较低,可以降低电厂设备投资费用。但是,沸水堆的功率密度低于压水堆,在同等功率水平下沸水堆压力容器的尺寸比压水堆大很多。

沸水堆产生的蒸汽会带有一定的放射性,在汽水循环过程中会使汽轮机、凝汽器以及相应的管道、阀门都沾染上放射性,因而需要对蒸汽系统、给水系统的设备进行屏蔽,并将汽轮

机厂房划入放射性控制区,增加了检查和维修的困难。

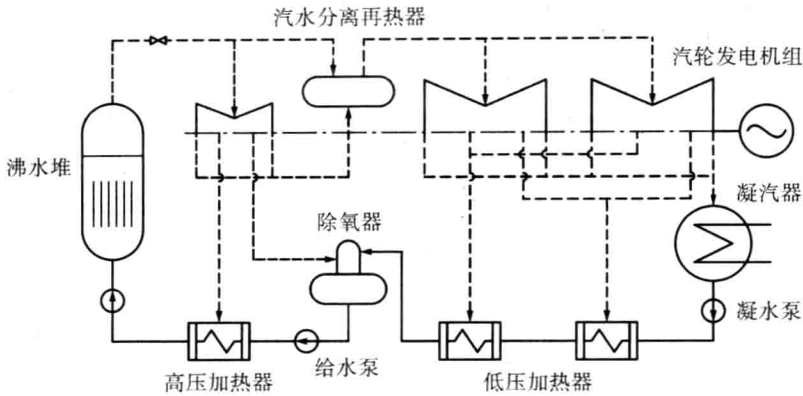


图 1-3 沸水堆核电站热力系统原理流程图

### 1.2.3 重水堆核电厂

重水堆以重水作为慢化剂,广泛用作动力堆、核燃料生产堆和研究试验堆。由于重水的热中子吸收截面很小,重水堆可以使用从天然铀到各种富集度的铀作为核燃料,并有通过 Th-U 循环实现核燃料增殖的可能。

发电用重水堆按堆体结构分为压力容器式和压力管式两种类型。压力容器式重水堆的结构与压水堆相似,只限于使用重水作为冷却剂。压力管式重水堆可用重水或沸腾轻水、CO<sub>2</sub> 气体等作冷却剂。目前发展成熟的商用重水堆型是加拿大 CANDU 型压力管式重水堆,使用天然铀作燃料,加压重水作冷却剂。图 1-4 所示为 CANDU 堆核电厂系统流程图。

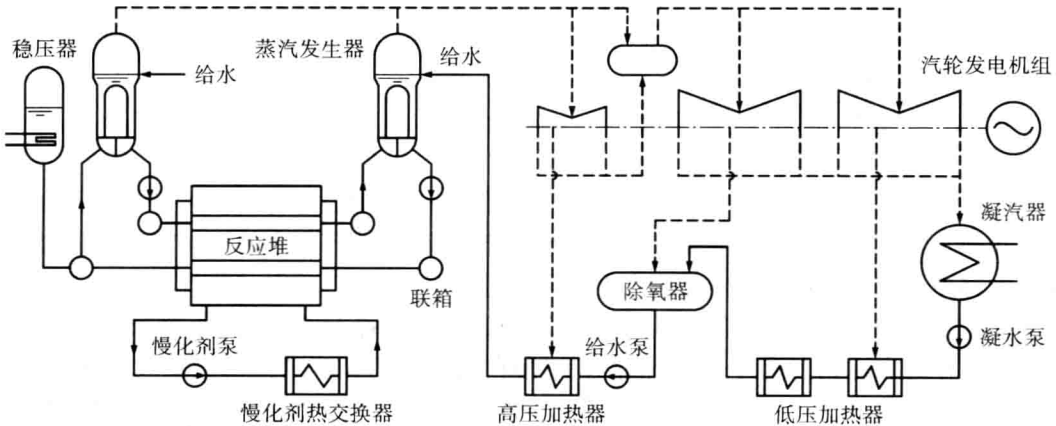


图 1-4 CANDU 堆核电厂系统流程图

这种反应堆对天然铀的消耗量小,可实现不停堆换料,从而提高核电厂的可用率和负荷因子,有利于降低发电成本。而且乏燃料中<sup>235</sup>U 的丰度已低于扩散厂尾料,可不必进行后处理,使燃料循环大大简化而仍能得到较高的铀资源利用率。但是,CANDU 堆的重水装载量大,增加了投资费用,而且重水密封防漏的问题较多,增加了运行维修的困难和费用。