

The background of the cover is decorated with several stylized atomic symbols, each consisting of a central nucleus with a plus sign and three elliptical orbits. These symbols are scattered across the green background.

高等教育试用教材

船用核反应堆运行与管理

张大发
郑福裕

主编
主审

A red octagonal stamp with a white border and a central design is located in the bottom left corner.

原子能出版社

A large, faint watermark is visible in the bottom left corner, featuring the characters '新华书店' (Xinhua Bookstore) and 'PDF'.

U664.1
Z12

412666

高等教育试用教材

船用核反应堆运行与管理

张大发	主编	郑福裕	主审
张大发 毛景荣	编	朱隆新	审



原子能出版社
北京

图书在版编目(CIP)数据

船用核反应堆运行与管理/张大发,毛景荣编. —北京:原子能出版社,1997.6

高等教育试用教材

ISBN 7-5022-1650-2

I. 船… II. ①张…②毛… III. ①船舶推进堆-运行-高等学校-教材②船舶推进堆-技术管理-高等学校-教材 IV. U664.151

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 24506 号

内 容 简 介

本书着重叙述船用核反应堆运行与管理的技术问题。全书共十一章。第一章绪论,叙述船用核反应堆运行与管理的特点、任务及核安全有关问题。第二、三、四章论述船用反应堆的启动、功率运行与停堆以及其中相关的安全问题。第五、六章分别论述船用核反应堆的异常和事故工况及其注意的问题。第七至十一章主要叙述船用反应堆装置设备的管理、维修管理、辐射防护管理、计算机控制和管理与人员的管理,并介绍了核反应堆事故诊断专家系统,人因工程学等新技术的概念。本书的特色在于突出船用核反应堆运行与管理的特点。

本书是高等学校核反应堆工程专业、船用核反应堆运行管理专业的通用教材,同时可以作为从事核反应堆运行管理、维修等科技人员的参考书。

☆
本书经核工业教材委员会反应堆工程教材委员会于1993年9月由周法清教授主持召开的审稿会审定作为高等教育试用教材。



©原子能出版社,1996

原子能出版社出版 发行

责任编辑:孔月

社址:北京市海淀区阜成路43号 邮政编码:100037

原子能出版社印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张14.625 字数363千字

1997年6月北京第1版 1997年6月北京第1次印刷

印数:1—1000

定价:11.80元

前 言

本书是高等学校核反应堆工程专业、船用核反应堆运行管理专业的通用教材。本书是根据1991年11月在武汉召开的核反应堆工程专业教材会审定的《船用核反应堆运行与管理》教材大纲编写的。

本书着重从船用特点出发,以典型的船用压水堆为背景,论述了反应堆的运行与管理,并试图对船用核反应堆运行与管理中发生的或可能遇到的一些基本技术问题加以分析和总结,使之系统化,并用于指导实践。全书共分十一章。第一章叙述了船用核动力装置的发展、特点以及船用核反应堆运行管理的任务及其核安全问题。第二章论述了船用核反应堆的启动、从次临界到超临界的过渡特性及在启动中的有关安全问题。第三章论述船用核反应堆的功率运行的特征,稳定工况的参数监督,变工况的过渡特性及其安全分析。第四章论述反应堆的停堆及其停堆后的安全问题。第五章、第六章简述了船用反应堆异常工况运行及主要典型事故的现象、过程及处理。第七章叙述了船用反应堆装置系统的主要设备(压力容器、蒸汽发生器、主泵、稳压器以及主要阀门等)的运行管理问题。第八章叙述了船用反应堆装置设备维修管理中的技术问题。第九章叙述了船用反应堆的辐射防护及三废处理。第十章简述反应堆运行的计算机控制和管理,并对典型的计算机应用及事故诊断专家系统作了介绍。第十一章从人因工程学的概念出发,对人员可靠性进行了分析,叙述了人员培训和考核的基本问题。

本教材由海军工程学院张大发主编并编写第一、三、五、七、九、十、十一章。海军工程学院毛景荣编写第二、四、六、八章。本教材由清华大学郑福裕主审。海军工程学院朱隆新审校。上海交通大学周法清主持教材的审稿工作。西安交通大学朱继洲与海军37031部队焦增庚参加了教材审稿工作。他们对教材的初稿进行了认真的审阅,提出了许多宝贵意见和建议。

赵仁恺对本教材也进行了审阅,对教材的编写和修改给予了热情帮助和指导,同时给予了充分的肯定。认为“这是一本从运行和管理的角度,根据我国船用反应堆多年的运行和管理经验,结合当前的反应堆装置的发展,对船用反应堆运行管理进行了全面系统的论述的好书。……该书不仅是一本好的教科书,也是一本适用广大从事船用反应堆运行与管理人员好的实用书籍,是一本具有相当学术与实用水平的好书。”对此,编者一并致以衷心的感谢。

《船用核反应堆运行与管理》教材涉及学科多,加之编者学识水平有限,经验不足,书中难免有不妥之处,恳切希望使用本教材的高等院校师生及各研究、设计和生产单位的广大读者、专家学者给予批评指正。

编 者

1993年11月

目 录

前言

第一章 绪论	(1)
1.1 船用核动力装置的组成	(1)
1.1.1 船用动力装置类别	(1)
1.1.2 船用核动力装置的发展	(4)
1.1.3 船用核动力装置的基本组成	(8)
1.2 船用核动力装置的特点	(10)
1.2.1 质量指标	(11)
1.2.2 尺寸指标	(11)
1.2.3 船舶有效功率	(12)
1.2.4 机动性指标	(12)
1.2.5 隐蔽性	(13)
1.2.6 船用核动力装置的生命力	(13)
1.3 船用核反应堆运行工况与特点	(14)
1.3.1 运行工况种类	(14)
1.3.2 各类运行工况的特点	(14)
1.4 船用核反应堆运行规程概述	(15)
1.4.1 运行规程的类别	(15)
1.4.2 运行规程在运行管理中的地位	(15)
1.5 船用核反应堆运行管理的组织和任务	(15)
1.5.1 船用核反应堆运行管理的组织	(15)
1.5.2 船用核反应堆运行管理的任务	(16)
1.5.3 船用核反应堆运行管理与核安全	(18)
习题与思考	(21)
第二章 船用核反应堆的启动	(22)
2.1 初次启动	(22)
2.1.1 系统检查	(22)
2.1.2 系统清洗	(23)
2.1.3 水压试验	(23)
2.1.4 系统综合调试	(24)
2.1.5 装料与临界监督	(28)
2.1.6 反应堆初次临界	(29)
2.1.7 测试与试验	(30)
2.2 正常启动	(31)
2.2.1 核反应堆动力装置的冷启动	(31)
2.2.2 核反应堆动力装置的热启动	(36)
2.3 核反应堆的最佳提棒程序	(38)
2.3.1 控制棒效率	(38)

2.3.2	最佳提棒程序	(38)
2.4	启动盲区与中子源	(38)
2.4.1	长期停堆后堆内中子源强的估算	(38)
2.4.2	核反应堆启动盲区的估计	(41)
2.4.3	源区特性	(42)
2.4.4	中间区特性	(43)
2.5	核反应堆启动运行安全分析	(45)
2.5.1	临界判别	(45)
2.5.2	从次临界到临界的过渡特性	(47)
2.5.3	由临界到超临界的过渡特性	(50)
2.5.4	启动运行中的反应性变化及估算	(52)
	习题与思考	(54)
第三章	船用核反应堆的功率运行	(56)
3.1	船用核反应堆功率运行的特点	(56)
3.2	功率运行时的功率校准	(57)
3.3	功率运行时的运行限值和条件	(58)
3.4	稳定工况运行	(58)
3.4.1	稳定工况运行状态的监督	(59)
3.4.2	稳定工况运行时控制棒棒栅位置的调整	(60)
3.4.3	功率运行时稳压器压力控制	(61)
3.4.4	功率运行时稳压器的水位控制	(62)
3.5	变工况运行	(63)
3.5.1	提升功率时的操纵	(63)
3.5.2	降功率时的操纵	(64)
3.5.3	改变工况时堆内主要参数的变化规律	(64)
3.6	功率运行时堆内反应性的变化及估算	(67)
3.6.1	功率运行时堆内反应性变化的主要因素	(67)
3.6.2	功率运行中反应性量值的估算	(67)
3.7	船用核反应堆功率运行安全分析	(70)
3.7.1	船用核反应堆功率运行的安全特征	(70)
3.7.2	无外控时反应堆动力装置的过渡特性	(73)
3.7.3	有外控时反应堆动力装置的过渡特性	(78)
	习题与思考	(81)
第四章	船用核反应堆的停闭	(82)
4.1	反应堆的冷停闭	(82)
4.1.1	冷停闭及其操作过程	(82)
4.1.2	冷停闭注意的问题	(84)
4.2	反应堆的热停闭	(84)
4.2.1	热停闭的运行过程	(84)
4.2.2	热停闭的特点与安全	(85)
4.3	反应堆的事故停闭	(85)

4.3.1 事故停闭的安全原则	(85)
4.3.2 事故停闭后的处理	(86)
4.4 反应堆停闭后的剩余功率与安全分析	(86)
4.4.1 停堆后剩余功率的来源	(86)
4.4.2 剩余功率的估算	(87)
4.4.3 停堆后的剩余功率及安全分析	(88)
习题与思考	(91)
第五章 船用核反应堆的异常工况运行	(92)
5.1 异常工况运行与船舶生命力	(92)
5.2 环路流量不对称时的运行	(92)
5.2.1 双环路流量不对称时的判别与安全限制	(92)
5.2.2 三环路流量不对称时的判别与安全限制	(93)
5.3 环路温差不等的异常工况运行	(93)
5.3.1 双环路温差不等时的运行监督与安全限制	(93)
5.3.2 三环路温差不等时的运行监督与安全限制	(94)
5.4 单环路的运行	(94)
5.4.1 单环路运行的基本过程	(95)
5.4.2 单环路运行安全限制	(96)
5.5 控制棒异常状态下的运行	(96)
5.5.1 局部掉棒状态下的运行及限制	(96)
5.5.2 连续提棒状态下的运行	(98)
5.5.3 局部卡棒情况下的运行	(100)
5.6 其他异常工况下的运行	(101)
5.6.1 堆内部分燃料元件包壳破损	(101)
5.6.2 蒸汽发生器发生局部泄漏时的运行	(101)
5.6.3 设备冷却水系统局部泄漏	(102)
5.6.4 主泵定子泄漏情况下的运行处理	(102)
5.6.5 主机速关情况下的运行	(102)
习题与思考	(103)
第六章 船用核反应堆的事故工况运行	(104)
6.1 概述	(104)
6.2 失水事故	(105)
6.2.1 失水事故产生的原因	(105)
6.2.2 失水事故分析	(105)
6.2.3 失水事故的判断和处理	(107)
6.2.4 失水事故的预防	(108)
6.3 主泵断电事故	(109)
6.3.1 主泵断电过程分析	(109)
6.3.2 主泵断电的后果	(110)
6.3.3 主泵断电后的处理	(110)
6.4 反应性事故	(110)

6.4.1 反应堆启动事故	(110)
6.4.2 冷水事故	(113)
6.5 蒸汽发生器 U 形管破裂事故	(113)
6.6 主蒸汽管道破裂事故	(114)
6.6.1 事故过程	(114)
6.6.2 事故危害	(115)
6.6.3 事故分析与处理	(115)
6.7 没有紧急停堆时的预期瞬态 ATWS	(117)
6.7.1 事故描述	(117)
6.7.2 事故处理	(118)
6.8 国外船用核动力装置发生事故简介	(118)
习题与思考	(120)
第七章 船用核反应堆装置设备的运行管理	(121)
7.1 船用核反应堆装置的日常保养、定期检查和在役检查管理	(121)
7.1.1 日常检查保养	(121)
7.1.2 定期检查	(121)
7.1.3 在役检查管理	(121)
7.2 船用核反应堆装置主要设备的管理	(125)
7.2.1 压力容器与堆芯的运行管理	(125)
7.2.2 蒸汽发生器的运行管理	(131)
7.2.3 稳压器的运行管理	(135)
7.2.4 主冷却剂泵的运行管理	(136)
7.2.5 控制棒驱动机构及控制棒运行管理	(140)
7.2.6 电气设备与控制仪表的管理	(142)
7.3 核动力装置主回路管道、阀门的运行管理	(144)
7.3.1 核动力装置主回路管道运行管理	(144)
7.3.2 核动力装置用阀门的运行管理	(145)
7.4 核动力装置水质管理	(150)
7.4.1 水质在核动力装置安全运行中的地位与要求	(150)
7.4.2 水质控制的一般方法	(152)
7.4.3 水质管理的分析方法	(154)
7.5 核动力反应堆换料运行管理	(155)
7.5.1 核燃料更换的主要任务和要求	(155)
7.5.2 核反应堆换料的基本程序	(155)
7.5.3 反应堆换料中的安全与防护	(157)
7.5.4 破损燃料组件的管理	(158)
7.6 船用核动力装置设备质量管理	(158)
7.6.1 质量管理的概念	(158)
7.6.2 船用核动力装置的质量管理	(159)
7.7 船用核动力装置的文件、信息管理	(161)
7.7.1 文件管理的基本任务	(161)
7.7.2 信息管理的基本任务	(162)

习题与思考	(162)
第八章 船用核反应堆装置维修管理	(163)
8.1 概述	(163)
8.1.1 维修的一般概念	(163)
8.1.2 维修指标	(163)
8.1.3 大型核电厂的维修特点	(164)
8.1.4 船用核动力装置维修的特点	(164)
8.2 船用核反应堆装置维修原则	(165)
8.2.1 维修的基本原则	(165)
8.2.2 装置的全寿命管理	(166)
8.3 船用核反应堆装置维修管理的基本任务	(168)
8.3.1 船用核反应堆装置维修管理的基本任务	(168)
8.3.2 维修管理的安全监督	(169)
8.3.3 维修管理的质量保证	(169)
8.4 船用核反应堆装置维修管理中的信息反馈	(172)
8.4.1 维修信息的分类	(172)
8.4.2 信息在维修管理中的作用	(174)
8.4.3 信息管理与信息反馈	(174)
习题与思考	(175)
第九章 船用核反应堆装置的辐射防护管理	(176)
9.1 船用核反应堆装置的辐射防护与标准	(176)
9.2 船用核反应堆运行期间的辐射防护与管理	(177)
9.2.1 辐射工作区划分及管理	(177)
9.2.2 运行期间放射性防护与管理措施	(180)
9.2.3 放射工作人员的分级及健康管理	(181)
9.3 船用核反应堆的放射性废物处理	(182)
9.3.1 “三废”处理及管理目标	(182)
9.3.2 “三废”管理的基本要求	(182)
9.3.3 放射性“三废”的来源	(182)
9.3.4 放射性“三废”的分类与收集	(183)
9.3.5 放射性“三废”的处理	(183)
9.4 船用核动力装置辐射事故的处理原则	(184)
习题与思考	(185)
第十章 船用核反应堆的计算机运行控制和管理	(186)
10.1 核动力装置的计算机运行控制与管理的发展	(186)
10.2 计算机对核动力装置运行控制和管理的形式	(186)
10.2.1 控制形式	(186)
10.2.2 计算机对核动力装置运行控制和管理职能	(188)
10.2.3 运行数据的采集和管理	(188)
10.2.4 核反应堆的在线监督管理	(188)
10.2.5 反应堆的实时运行控制	(189)

10.3 计算机在核动力装置运行控制中的应用现状	(190)
10.3.1 反应堆计算机控制系统的任务和特点	(190)
10.3.2 核动力领域中计算机控制系统的典型应用的形式	(190)
10.3.3 典型的核动力装置微机监控系统的应用	(194)
10.3.4 美国萨瓦娜反应堆基本管理和运行程序功能	(196)
10.3.5 反应堆事故诊断专家系统	(197)
习题与思考	(202)
第十一章 船用核反应堆运行人员的管理	(203)
11.1 人因工程学的基本概念	(203)
11.1.1 人因工程学研究范围、方法、体系	(203)
11.1.2 人因工程学在核动力领域中的应用	(204)
11.2 人因在船用核反应堆运行管理中的作用与地位	(205)
11.2.1 运行人员在船用核反应堆运行管理中的作用与地位	(205)
11.2.2 船用核反应堆运行管理人员的基本要求	(207)
11.3 核反应堆运行管理人员的培训与考核	(208)
11.3.1 理论培训	(208)
11.3.2 反复训练	(208)
11.3.3 考核评价	(209)
11.4 核动力训练模拟器对运行人员的培训管理	(209)
11.4.1 核动力训练模拟器在核动力运行管理中的作用	(209)
11.4.2 核动力装置模拟的基本原理	(209)
11.4.3 核动力训练模拟器的基本功能	(212)
11.4.4 核动力模拟器的训练	(213)
习题与思考	(214)
附录1 国外部分核舰艇反应堆事故与事件	(215)
附录2 日本船用FDR压水堆主要技术数据	(216)
附录3 美国潜艇核动力装置模式堆概况	(217)
附录4 美国核潜艇的主要参数	(217)
附录5 美国潜艇核动力装置主要性能	(218)
附表1 力	(219)
2 压力	(219)
3 功、能和热量	(219)
4 功率	(220)
5 热流密度	(220)
6 比热	(220)
7 单位换算	(220)
8a 按温度排列的饱和蒸汽表	(220)
8b 按压力排列的饱和蒸汽表	(221)

第一章 绪 论

核反应堆的研究、设计、建造、运行与管理、退役是发展反应堆科学技术中的不可缺少的几个环节,而反应堆的运行与管理则是其中的一个极为重要的过程。对于已建成的反应堆,运行与管理的好坏直接关系到核反应堆装置性能的发挥。同时核反应堆动力装置的经济性、安全性、可靠性,都与在役期间的运行与管理密切相关。因此,研究和加强核反应堆的运行与管理已是发展核动力技术过程中的一个重要的环节。

船用核反应堆的运行与管理与陆用反应堆运行与管理相比,又具有其特殊的要求。首先是船用核反应堆的工作场所一般远离陆地,独立地航行在海上,因而会出现装备器材、技术后援不足等情况,这对运行与管理提出了更高的要求。另外,由于船舶经常需要离靠码头、改变航速等,这都要求船用核反应堆能频繁地改变功率以适应其机动性能要求。因而更要求船用核反应堆运行与管理具有熟练的专业技能。由于船用核反应堆比常规船用动力装置更具有高温高压、强放射性的特点,给运行管理又增加了难度。因此研究和学习船用核反应堆的运行与管理经验,是提高核动力舰船的航行能力,加强船用核反应堆运行安全的基本保证。本章就船用动力装置的发展,船用核动力装置的基本组成、特点和船用核反应堆运行管理任务及其核安全问题作了叙述。

1.1 船用核动力装置的组成

1.1.1 船用动力装置类别

按其使用的能源来分,船用动力装置一般分为两大类:一类为应用常规能源(如:煤、油等)的,称常规动力装置,另一类为应用核能的称为核动力装置。但是,对船用动力装置也往往以推进装置的类型进行分类,而推进装置的特点一般体现在动力装置的类型、动力传递方式、推进器种类三个方面。由不同类型的动力装置、不同形式的传动方式和不同类型的推进器进行合理组合,可组成多种型式的推进装置。在这些推进装置中,动力是核心。因此,根据动力装置型式的不同来划分更具有普遍意义。

1. 蒸汽动力装置

在蒸汽动力装置中,根据主机运动方式的不同,有往复式蒸汽机和汽轮机两种^[1]。往复式蒸汽机最早应用于海船。由于它具有结构简单、运行可靠、管理方便等优点,在过去很长的一段时期内占据着统治地位。但由于其经济性差、尺寸、质量大、不能适应机组功率增长的需要,现在已经被其他船用发动机所代替。回转式汽轮机自从十九世纪末问世并装船使用以来,由于受到柴油机的挑战,一直发展比较缓慢。这种发动机运行平稳,摩擦和磨损较少,振动和噪声较轻。但热效率低,还要配置质量、尺寸较大的锅炉、冷凝器、减速齿轮装置以及其它辅助机械,因此装置的总质量和尺寸均较大。这就限制了它在中小船舶中的应用。然而最近十几年来,由于系列化、通用化和简单化装置的制造,降低了造价;蒸汽初始参数的提高(有的可达到 15MPa,

540℃),中间过热和废热充分回收利用系统的采用,大幅度降低了燃油消耗率;繁重的锅炉水垢清洗问题的解决;低螺旋桨转速等一系列措施的采用,再加上这种装置对燃料适应性好的优点,故扩大了应用范围。不少资料表明,在功率超过 22000kW 和船速超过 20kn 时,汽轮机动力装置比柴油机动力装置更为优越。蒸汽动力装置的组成原理见图 1.1。

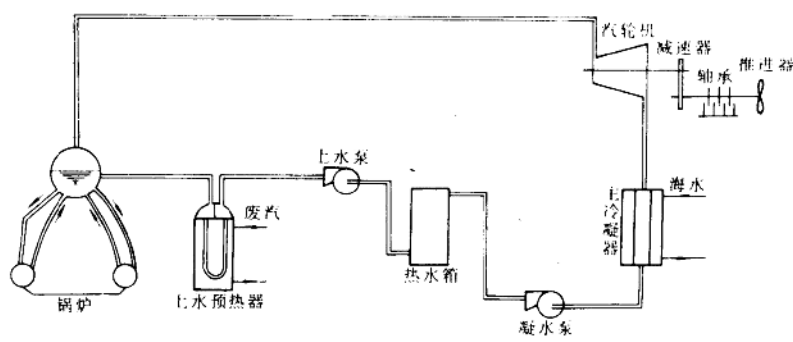


图 1.1 蒸汽动力装置组成原理图

2. 船用柴油机动力装置

柴油机不仅是热效率最高的一种热机,而且还具有启动迅速、安全可靠、装置较轻、功率范围大(从几 kW 至数万 kW)等一系列优点,因此船舶主机及发电机副机现在多用这种发动机。船舶以柴油机动力装置占绝对优势的状况,在今后一个相当长的时间内还将继续下去。在中、大型民用船舶上所使用的柴油机有大型低速和大功率中速两大类。这两种柴油机在激烈竞争的同时又互相促进,都在迅速的发展着。

大型低速柴油机动力装置自 60 年代起发展的特别迅速。一方面是由于当时船舶向大型化、高速化发展,需要大功率的发动机;另一方面由于废气涡轮增压技术的进步,可燃用更低质燃料,降低了比油耗,为大型低速机发展提供了可能。70 年代两次能源危机的冲击和相继出现的航运事业不景气,从节能需要出发,船舶已不再向大型化和高速化方向发展,除专业化船舶

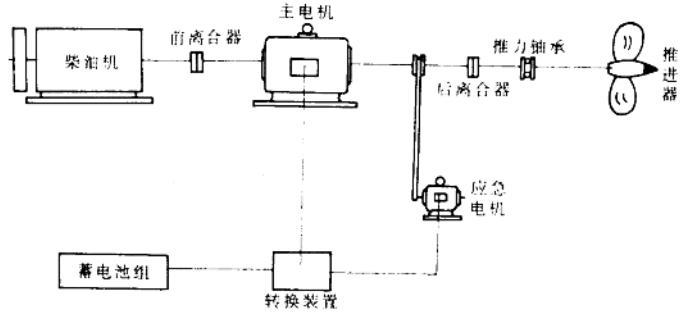


图 1.2 船用柴油机动力装置组成原理

外,一般货船的航速降至 14kn 左右。为了适应这种形势,大型低速柴油机的尺度不但不再增加,而且缸径也都回到 1000mm 以内,并出现了缸径只有 260mm 的低速机(如 S26MC/MCE)。从 70 年代末至今围绕着节能这一中心,大型低速柴油机的结构差不多年年都在改进,大体每隔两年就推出一种新机型。可以认为,降低耗油率而提高经济性,仍然是今后发展的方向之一。柴油机动力装置的组成原理见图 1.2。

3. 船用燃气轮机动力装置

燃气轮机动力装置是上世纪 30 年代燃气轮机开始兴盛以后而发展起来的。第一批作为商船主机出现的是在 50 年代。它的优点是单位质量和尺寸小,机动性高,操纵管理简便,便于实现自动化。但它的经济性差,进排气管道大,机舱布置困难,装置较复杂,叶片及燃气发生器在高温高压状态下工作,寿命较短。由于以上原因,这种动力装置的应用仍处于发展之中。其基本组成原理见图 1.3。

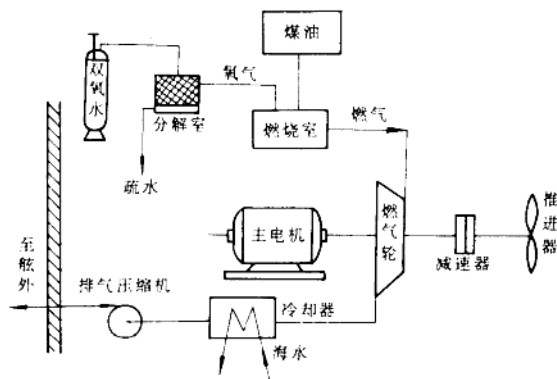


图 1.3 船用燃气轮机动力装置组成

4. 核动力装置

船用核动力装置根据其用途一般可分为两类。一类为民用的,如原子能破冰船、核动力客商船和海洋考察船的等。另一类为军用的,如核动力航空母舰、巡洋舰、潜水艇的等。无论民用还是军用的船舶核动力装置,它们的组成原理是一样的,即通过核燃料的核裂变产生能量,经蒸汽发生器产生蒸汽推动汽轮机做功,进而驱动推进器工作,船用核动力装置(压水型)一般由反应堆、一回路系统、二回路系统、电力系统、推进轴系几大部分组成。基本原理如图 1.4 所示。

船用核动力装置,将使船舶和舰艇的性能大大改善,速度加快,一次装料,航行能力达百万公里以上。对于水下的舰艇来说,它不需要大量空气,可以长期在海底航行,仅受人员和供给限制。所以说,核反应堆的利用使远洋船舶和舰艇动力技术进入一个新的时代。它的突出优越性为:不需要大量的燃料贮备便可长期航行,且核燃料的量占整个载量的比例极少,提高了船舶的有效载量,对民用船舶可加大装货量,对于军用舰艇来说,可以加强舰艇的装备,提高作战能力。

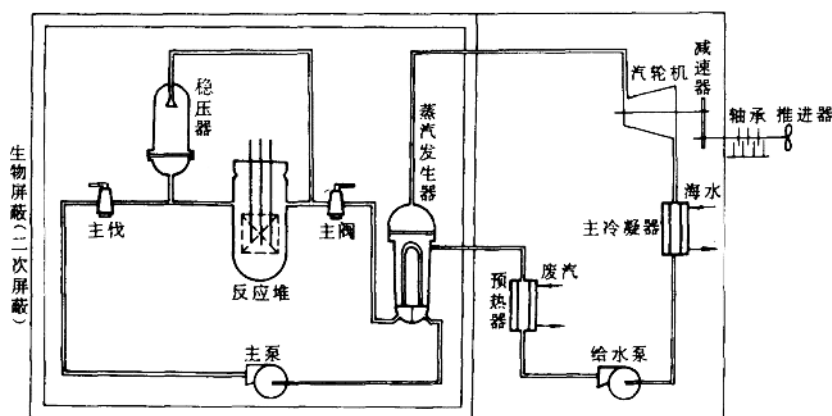


图 1.4 船用核动力装置组成

1.1.2 船用核动力装置的发展

1946 年美国海军首先开始了核动力用于舰艇的研究。重点研究和开发了核潜艇用的动力堆。1954 年第一艘核动力潜艇“鳐鱼”号建成,1958 年以后,以“飞鱼”号为模式建造了一批鱼雷攻击型的核潜艇。接着,自 1958 年开始,以“乔治·华盛顿”号为模式建造了“北极星”弹道导弹型核潜艇,以后又发展了“海神”型和“三叉戟”型核潜艇,至今美国海军中约有一百几十艘核潜艇在服役^[2]。

60 年代以来,英国、法国和原苏联也相继发展核潜艇。英国海军中拥有十余艘核潜艇,法国已建造 7 艘。原苏联建造核潜艇虽比美国迟,但也拥有 170 余艘核潜艇,总数超过了美国,并且研制成钠冷核动力装置用于核潜艇。世界部分国家核潜艇基本情况列于表 1.1。

表 1.1 世界部分国家核潜艇基本情况

国 别	艇 种	排水量 (水下)t	核反应堆 (型式)	动力装置	轴 功 率 MW	航 速 kn
美 国	鱼雷攻击	3500—6900	S5W—S6W 压水堆	二台蒸汽透平	11.40—22.06	25/30
	弹道导弹	6700—18700	S ₅ W2 压水堆	二台蒸汽透平	11.40—22.06	25/30
	鱼雷攻击	4000—4200	压水堆	蒸汽透平	16.55	25/30
原苏联	飞航导弹	5000	压 水 堆	蒸汽透平	16.55	20/25
	弹道导弹	9000—14500	压 水 堆	蒸汽透平	17.65—29.42	25
英 国	鱼雷攻击	4000	S ₅ W 压水堆	蒸汽透平	11.40	
法 国	导弹型	9000	压 水 堆	蒸汽透平	11.40	25
意大利	鱼雷攻击	2800	压 力 堆	蒸汽透平	11.4	

表 1.2 原苏联核动力破冰船

船 名	服役 (a)	满载排水量 (t)	全长×宽×吃水 (m)	堆 型	堆功率 (MW _e)	推进装置	轴功率 (马力/kW)	航速 (kn)	破冰能力(m)
列宁号 (Lenin)	1959	17810	134×27.6×10.5	半一体化 PWR	90×2	直流电动机	39200/2882	19.6	1.5
北极号 (Arktika)	1974	20905	147.9×29.9×11.0	半一体化 PWR	150×2	直流电动机	72000/5292	20.8	2.3
西伯利亚号 (Sibir)	1977	21120	147.9×29.9×11.0	半一体化 PWR	150×2	直流电动机	72000/5292	20.8	2.2+
俄罗斯号 (Rossiya)	1985	22920	150×30.0×—	半 体 化 PWR	150×2	直流电动机	72000/5292	20.8	2.5
СЕРМОПНУТb (Sevmorput)	1988	61000	260.3×32.2×10.7	半一体化 PWR	135×1	蒸汽透平	40000/2940	20.0	1.0
太梅尔号 (Tajmyr)	1989	20000	151.8×29.2×8.1	半一体化 PWR	171×1	交流电动机	48000/3528	18.5	1.8
苏联号 (Sovetskiy)	1989	22920	150×30×—	半一体化 PWR	150×2	直流电动机	72000/5292	20.8	2.5
瓦依加奇号 (Vaygach)	1990	20000	151.8×29.2×8.1	半一体化 PWR	171×1	交流电动机	48000/3528	18.5	1.8
亚马尔号 (Yamal)	1992	23400	150×30×—	半一体化 PWR	150×2	直流电动机	72000/5292	20.8	2.5
乌拉尔号 (Ural)	1994	25800	159.6×30×—	半一体化 PWR	150×2	直流电动机	72000/5292	—	2.7

各国在建造核动力潜艇的同时,还研究了各种核动力水面舰船。首先是原苏联于 1959 年建成“列宁”号原子破冰船,以后又建造了“北极”号、“西伯利亚”号等多艘原子破冰船。其基本情况见表 1.2^[3]。

美国建造了第一艘核动力客货船“萨凡娜”号。联邦德国建造了“奥托·哈恩”号商船。日本于 1973 年建造了“陆奥”号核动力考察船。世界部分国家核动力船的基本情况,见表 1.3^[4]。

表 1.3 世界部分国家核动力船的基本情况

类别 \ 船名	陆奥号	萨凡娜号	列宁号	奥托·哈恩号
国 籍	日 本	美 国	原苏联	德 国
建造日期	68 年 11 月 27 日	58 年 5 月	56 年 8 月	63 年 9 月
下 水	69 年 6 月 12 日	59 年 7 月	57 年 12 月	64 年 6 月
临 界		61 年 12 月		68 年 8 月
船属种类	货船	客货船	破冰船	矿石运输船
船长(m)	130	181.5	134	171.8
船宽(m)	19	23.77	27.6	23.4
船高(m)	13.2	15.24	16.10	14.5
满载吃水(m)	6.9	8.99	9.0	9.2
满载排水量(t)	10400	22170	16000	25950
速 度(kn)	16.5	20	18	15.75
反应堆功率(MW)	36×1	80×1	90×3	38×1

在军用水面核动力中,美国 1957 年先后建造了核动力驱逐舰、巡洋舰和航空母舰。首艘 10 万吨的核动力航空母舰“企业”号 1962 年建成。以后又建造了“尼米兹”号、“艾森豪威尔”号、“文森”号、“林肯”号和“华盛顿”号等 6 艘核动力航空母舰。由于核动力航空母舰不需要别的舰只供给燃料,所以大大提高了整个舰队的续航能力。

原苏联 1981 年建造了基洛夫级核动力巡洋舰,后来又建造排水量为 5×10^4 t 级的基辅级核动力航空母舰。随着核动力发展,核动力在舰船上的发展应用将更为广泛。美国和原苏联核动力水面舰船情况列表 1.4。

表 1.4 美国和原苏联核动力水面舰船基本情况

国别	舰船类型	排水量 (t)	航速 (kn)	核反应堆 型式	轴功率 (MW)	续航力 (nm le)
美国	驱逐舰	8200—10000	30	$2 \times D_2G$	44.13	15000
	巡洋舰	17100	30	$2 \times C_1W$	58.84	75000
	航空母舰	82000—95000	30	$8 \times A_2W$	184—220	430000
原	破冰船	16000	30	$3 \times 90MW$	32.36	
苏联	巡洋舰	27000				
	航空母舰	50000				

根据舰船对核动力装置的要求,多年来各国曾对五种核反应堆进行了试验研究。实践证明,由于压水堆结构简单、紧凑;体积小、操作灵活,所以更适合舰船动力的要求。目前舰船用压水堆主要有三种形式。图 1.5 示出了舰船用压水堆系列。

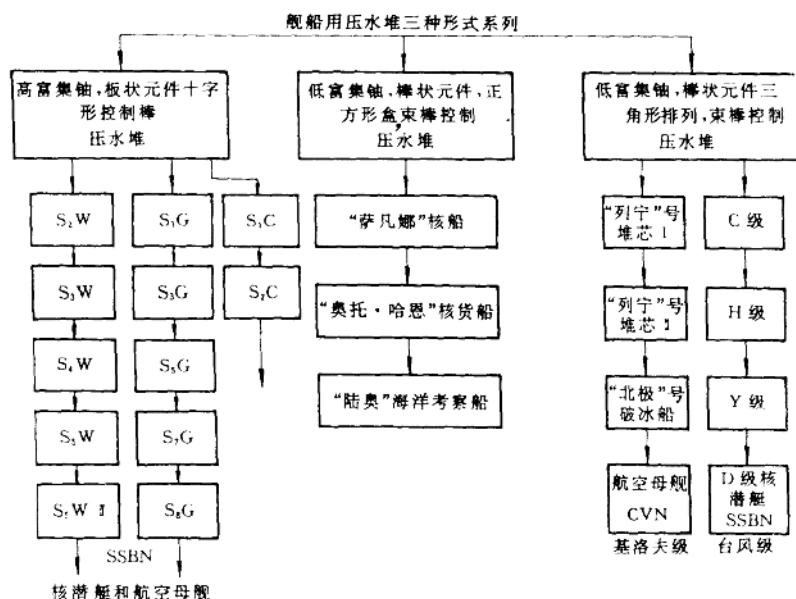


图 1.5 舰船用压水堆三种形式系列

- 代号中第一字母表示类别: S 表示潜艇 D 表示驱逐舰 C 表示巡洋舰 A 表示航空母舰
- 第二字母表示开发制造序号
- 第三字母表示开发制造公司: W 表示西屋公司 G 表示通用电气公司 C 表示燃料工程公司

①高富集度铀板状燃料元件反应堆

这种反应堆采用富集度为 20% 以上的 ^{235}U 的板状元件。板状元件放热面积大,堆芯布置非常紧凑,体积小,单位体积输出功率大。这样,反应堆外壳尺寸缩小,动力回路设备紧凑,适于潜艇的有限空间。但是核燃料富集度高,建造和运行费用贵。后来设计了冷却水自然循环压水堆,取消了一回路的主泵,使动力回路系统更加紧凑。70 年代末又经过改进,建成 S_6G 压水堆,用于“三叉戟”号导弹核潜艇。

②低富集度铀分散型压水堆

分散型船用压水堆的结构同陆上核电厂的大致相同。采用低富集度的二氧化铀棒状元件,立式筒形反应堆压力容器。例如:“列宁”号破冰船,“萨瓦娜”号客货船和日本的“陆奥”丸海洋考察船的反应堆,均采用陆上核电厂压水堆的技术。以美国的“萨凡娜”号反应堆为例,其堆芯采用富集度为 4.4% ^{235}U 棒状元件。由 32 个元件盒组成当量直径为 1.56m、高度为 1.68m 的圆柱状堆芯中,设有 21 根十字形控制棒,反应堆堆顶上设置有 21 组控制棒传动机构,整个反应堆高 8.2m,直径为 3.3m,总质量为 600t,一次装料 7.1t(其中 ^{235}U 重 312kg)。

分散型船用压水堆的动力系统与陆上压水堆电厂一样,由蒸汽发生器、反应堆、一回路冷