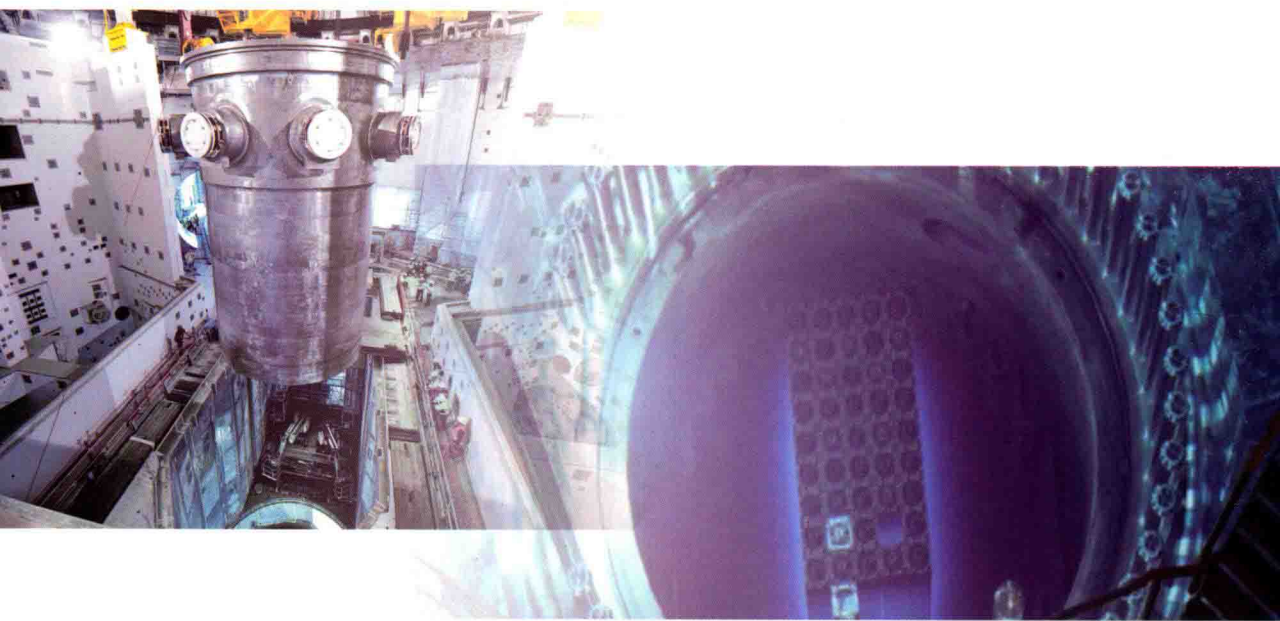


军队“2110工程”三期建设教材

# 舰船核反应堆 运行物理

陈玉清 蔡琦 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

军队“2110工程”三期建设教材

# 舰船核反应堆运行物理

陈玉清 蔡琦 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书主要介绍核动力舰船的发展概况、核动力装置的基本组成及工作原理;原子核物理的基本知识、堆芯内核反应的类型及特点、裂变能的来源及释放能量特点;中子在堆芯内从产生到消失过程的能量变化规律和空间移动规律;反应堆达到临界的基本条件,即堆芯几何特性和材料特性的匹配关系,临界时堆芯热源的分布特征;核反应堆功率运行期间,堆芯特性参数变化对反应堆临界特性的影响,船用反应堆常用的反应性控制方法及特点;反应堆偏离临界时,描述堆芯功率变化的动力学方程及求解方法,堆芯功率随时间的变化规律;反应堆物理试验所开展的试验项目、试验方法及安全注意事项等。

本书主要针对舰船核动力堆的结构组成特点,阐述堆芯内中子与物质的相互作用的基本规律、核能稳定释放的基本条件,并特别强调舰船核反应堆运行过程中的物理现象、运行控制方法,是核动力运行人员、维修保养人员、安全管理人员掌握舰船核反应堆物理特性的重要参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

舰船核反应堆运行物理/陈玉清,蔡琦编著. —北京:  
国防工业出版社,2017. 1  
ISBN 978-7-118-10389-2

I. ①舰… II. ①陈… ②蔡… III. ①军用船—核动力装置—反应堆物理学 IV. ①U674. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 271715 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$  字数 302 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1800 册 定价 65.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

热中子反应堆是以可控的方式利用中子诱发铀核裂变释放核能的装置,核反应堆物理作为研究反应堆内中子产生、运动、消失过程的一门学科,是研究核能开发应用的基础,相关课程也是核工程专业的的基础必修课程。

本书共分9章,第1章主要介绍核动力舰船的发展概况、核动力装置的基本组成及原理;第2章主要介绍原子核物理的基本知识、堆芯内核反应的类型及特点、裂变能的来源及释放能量特点;第3章介绍中子在堆芯内从产生到消失过程的能量变化规律和空间移动规律;第4章主要介绍反应堆达到临界的基本条件,即堆芯几何特性和材料特性的匹配关系、临界时堆芯热源的分布特征;第5、6章主要介绍核反应堆功率运行期间,堆芯特性参数变化对反应堆临界特性的影响、船用反应堆常用的反应性控制方法及特点;第7章主要介绍反应堆偏离临界时,描述堆芯功率变化的动力学方程及求解方法,以及堆芯功率随时间的变化规律;第8章主要介绍舰船核反应堆核设计的基本原则、内容及分析方法;第9章主要介绍反应堆物理试验所开展的试验项目、试验方法及安全注意事项。

本书由陈玉清统稿,第1~3章由蔡琦编写,第4~9章主要由陈玉清编写。全书由于雷教授审校,此外赵新文、郝建立、王晓龙对本书也提出了许多有益的意见,在此对他们表示衷心的感谢。

由于水平有限,经验不足,书中难免存在缺点和错误,恳切地希望读者指正。

作者

2016年7月

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 核动力潜艇的崛起 .....	1
1.2 核动力水面舰艇的发展 .....	3
1.3 舰船核动力装置的基本组成 .....	3
1.4 压水堆的基本结构 .....	5
1.5 核反应堆运行物理的主要研究内容 .....	6
第 2 章 原子核物理基础 .....	7
2.1 原子核的基本性质 .....	7
2.1.1 原子核的组成 .....	7
2.1.2 原子核的质量 .....	8
2.1.3 核的大小与液滴模型 .....	8
2.1.4 核密度及其计算 .....	9
2.2 原子核的结合能与比结合能 .....	10
2.2.1 质量亏损与结合能 .....	10
2.2.2 比结合能 .....	11
2.2.3 裂变能和聚变能 .....	13
2.3 核衰变与核反应 .....	13
2.3.1 放射性衰变 .....	13
2.3.2 核衰变的基本规律 .....	15
2.3.3 核反应及其遵循的守恒定律 .....	16
2.3.4 反应能和阈能 .....	17
2.3.5 核反应的机制 .....	17
2.4 中子核反应 .....	19
2.4.1 产生中子的核反应 .....	19
2.4.2 中子引起的核反应 .....	20
2.5 核反应截面与核反应率 .....	24
2.5.1 中子密度与中子束强度 .....	24
2.5.2 微观截面 .....	24
2.5.3 宏观截面 .....	25
2.5.4 平均自由程 .....	27
2.5.5 核反应率 .....	27

2.5.6	中子通量密度 .....	28
2.5.7	截面随中子能量的变化 .....	28
2.5.8	共振吸收和多谱勒效应 .....	31
2.5.9	平均截面 .....	32
2.6	核裂变反应 .....	33
2.6.1	核裂变机理及裂变材料 .....	33
2.6.2	裂变产物与裂变中子 .....	34
2.6.3	裂变能量与反应堆功率 .....	38
2.6.4	核反应堆的剩余释热 .....	40
	习题 .....	41
<b>第3章</b>	<b>中子的慢化与扩散</b> .....	<b>43</b>
3.1	链式裂变反应与反应堆临界 .....	43
3.1.1	实现自持链式反应的条件 .....	43
3.1.2	压水堆内的中子循环过程 .....	45
3.2	中子慢化与慢化能谱 .....	47
3.2.1	中子慢化机理 .....	47
3.2.2	中子的弹性散射过程 .....	48
3.2.3	慢化剂的性质 .....	53
3.2.4	慢化时间与中子年龄 .....	54
3.2.5	反应堆能谱 .....	55
3.3	单群中子的扩散 .....	57
3.3.1	斐克扩散定律 .....	57
3.3.2	连续性方程 .....	60
3.3.3	扩散方程 .....	61
3.3.4	稳态扩散问题的解 .....	64
3.3.5	扩散长度与徙动长度 .....	66
3.3.6	扩散时间与中子寿命 .....	69
	习题 .....	70
<b>第4章</b>	<b>均匀反应堆的临界理论</b> .....	<b>71</b>
4.1	均匀裸堆的单群扩散理论 .....	71
4.1.1	均匀平板裸堆单群扩散方程的解 .....	71
4.1.2	均匀裸堆的单群临界方程 .....	74
4.1.3	圆柱形均匀裸堆临界方程的解 .....	75
4.1.4	临界方程的应用 .....	79
4.2	有反射层反应堆的单群扩散理论 .....	80
4.2.1	有反射层平板堆的单群临界方程 .....	80
4.2.2	反射层节省 .....	83
4.2.3	反射层对中子通量密度分布的影响 .....	84

4.3	栅格的非均匀效应及处理方法	85
4.3.1	栅格的非均匀效应	86
4.3.2	栅格的均匀化处理方法	86
4.4	中子通量密度分布的不均匀性及展平方法	87
	习题	89
<b>第5章</b>	<b>核反应堆内反应性的变化</b>	<b>91</b>
5.1	反应性及其变化影响因素	91
5.2	燃耗效应	93
5.2.1	运行过程中核燃料的燃耗及转换	93
5.2.2	运行过程中核燃料核密度的变化规律	94
5.2.3	反应堆寿期与燃耗深度	97
5.3	中毒效应	98
5.3.1	毒性与中毒反应性	98
5.3.2	氙中毒( $^{135}\text{Xe}$ )	99
5.3.3	钐中毒( $^{149}\text{Sm}$ )	109
5.3.4	非饱和毒物的中毒效应	112
5.4	温度效应	112
5.4.1	温度效应产生的原因	112
5.4.2	温度效应的定量描述	113
5.4.3	温度系数对核反应堆运行特性的影响	116
	习题	117
<b>第6章</b>	<b>反应性控制</b>	<b>120</b>
6.1	反应性控制的任务、原理及方法	120
6.1.1	反应性控制中所用的几个物理量	120
6.1.2	反应性控制的任務	120
6.1.3	反应性控制的原理及方法	121
6.2	控制棒控制	123
6.2.1	控制棒的价值	123
6.2.2	控制棒的干涉效应	126
6.2.3	控制棒插入深度对堆芯功率分布的影响	126
6.2.4	船用压水堆控制棒的运行要求	127
6.3	可燃毒物控制	127
6.3.1	可燃毒物材料	127
6.3.2	可燃毒物的布置及对 $k_{\text{eff}}$ 的影响	128
	习题	130
<b>第7章</b>	<b>核反应堆中子动力学</b>	<b>131</b>
7.1	中子动态学基础	131
7.1.1	简单的中子动态学	131

7.1.2	缓发中子的作用	132
7.1.3	缓发中子对控制起作用的物理条件	133
7.1.4	反应堆周期	134
7.2	点堆中子动力学方程	135
7.2.1	点堆动力学方程的导出	135
7.2.2	点堆中子动力学方程的特点及应用范围	138
7.3	阶跃引入反应性时点堆动力学方程的解	139
7.3.1	倒时方程的导出	139
7.3.2	倒时方程根的分析	140
7.3.3	例题分析	141
7.4	点堆动力学方程的近似解	142
7.4.1	单组缓发中子近似模型	142
7.4.2	常数缓发中子源近似模型	142
7.4.3	瞬跳近似	142
7.5	有外中子源时稳态与临界问题	143
7.5.1	次临界公式	144
7.5.2	向临界逼近的中子动态学特性	144
7.5.3	无限缓慢提棒与下界周期	145
7.6	点堆中子动力学方程的数值解	147
7.6.1	点堆中子动力学方程的矩阵形式	147
7.6.2	微分方程的刚性问题	148
7.6.3	点堆方程数值求解中的刚性问题	148
7.6.4	隐式差分法求解点堆方程	150
7.7	多群时空中子动力学方程	151
7.7.1	反应堆时空中子动力学方程的基本形式	151
7.7.2	时—空中子动力学方程的求解	152
	习题	153
<b>第8章</b>	<b>舰船核反应堆核设计</b>	<b>155</b>
8.1	舰船核反应堆的核设计准则	155
8.1.1	堆芯燃耗要求	155
8.1.2	功率分布控制要求	155
8.1.3	堆芯反应性控制	155
8.1.4	反应性系数	156
8.1.5	核设计可信度要求	156
8.2	舰船核反应堆设计分析概述	156
8.2.1	核数据库	156
8.2.2	燃料组件均匀化计算	157
8.2.3	堆芯临界燃耗分析	157



8.2.4 分析结果的验证 .....	158
习题 .....	158
<b>第9章 核反应堆物理试验</b> .....	<b>159</b>
9.1 概述 .....	159
9.2 外推法测量反应堆临界参数 .....	160
9.2.1 外加中子源源强的估算方法 .....	160
9.2.2 外推法测量临界参数的基本原理 .....	161
9.2.3 外推临界安全的具体措施 .....	164
9.3 堆芯中子通量密度的测量 .....	164
9.3.1 活化探测器 .....	165
9.3.2 自给能探测器 .....	168
9.4 堆芯反应性的测量 .....	170
9.4.1 周期法测量反应性 .....	170
9.4.2 动态跟踪法测量反应性 .....	171
9.4.3 落棒法测量反应性 .....	172
习题 .....	175
附录1 核常数表及转换因子表 .....	176
附录2 核素基本参数及微观截面 .....	177
附录3 贝塞尔函数 .....	191
附录4 反应性-周期( $\rho \sim T_0$ )关系表 .....	193
参考文献 .....	194

# 第 1 章 绪 论

铀原子核的裂变现象被发现后不久,科学家就预言,核能将是最理想的潜艇动力源。1954年,美国第一艘核潜艇“鹦鹉螺”号问世,揭开了舰艇核动力推进的序幕,同时为潜艇水下持续隐蔽航行开拓了广阔的前景。这是20世纪中叶造船史上的一次革命,核动力舰船得到了快速的发展。本章将简要介绍核动力舰船的发展情况、舰船核动力装置的基本组成和舰船用压水堆的基本结构。

## 1.1 核动力潜艇的崛起

核动力潜艇经过半个世纪的发展,无论在战略地位上,还是在技术发展水平上,都已成为强国海军最重要的兵力之一,在政治、军事、外交等方面发挥了其他武器平台难以取代的作用。现代核潜艇集高新技术于一身,采用了大量的先进技术,隐蔽性好,续航力大,潜航时间长,水下航速高、攻击力强,是海军武器装备库中的尖端装备;特别是反应堆与战略核武器“两核联手”的弹道导弹核潜艇,更是以强大的威慑力巩固着一个国家的战略地位。为了把国家战略核力量建立在切实可靠的基础上,无论是美国、俄罗斯这样的核大国,还是英国、法国这样的中等核国家,都无一例外地把弹道导弹核潜艇作为国家战略兵力的发展重点,弹道导弹核潜艇已成为陆上、空中和水下“三位一体”战略核打击力量的中坚。由于世界战略核武器加快向海洋转移,使得海军的打击范围突破了海洋和海岸,而延伸到陆上纵深腹地。核潜艇成为无所不至的武器隐形发射平台。

半个多世纪来,美国、苏联/俄罗斯、英国和法国相继研制了500余艘核潜艇,目前国外在役约140余艘。其中,弹道导弹核潜艇约38艘,巡航导弹核潜艇约11艘,攻击型核潜艇90余艘。

### (一) 弹道导弹核潜艇

弹道导弹核潜艇是核大国海军兵力的重要组成部分,与陆基洲际导弹和战略轰炸机组成“三位一体”的战略核威慑力量。与陆基洲际导弹和战略轰炸机相比,弹道导弹核潜艇还具有以下优点:

#### 1. 隐身性能好

弹道导弹核潜艇可以长期在水下航行、机动或发动攻击,隐蔽性好。近年来又广泛采用了降噪措施,使辐射噪声低于海洋本身噪声;同时又采取了各种隐身措施,增大下潜深度至500m,并拥有迷惑或欺骗敌方探测的各种手段,生存概率在90%以上,比陆基导弹固定发射井高10倍以上,比陆基机动战略武器高1倍以上。

## 2. 机动能力强

弹道导弹核潜艇可以长期在水下连续高速潜航。可以在本国海域游弋,又可滞留在北极庇护所,也可在各大洋巡逻,活动范围很大,且能有效地规避或自卫,使反潜兵力很难进行侦察和搜索,需要发动战略进攻时,则能迅速到达指定海域,攻防能力兼备。

## 3. 突袭威力大

弹道导弹核潜艇装备的导弹射程最大可达上万千米,一个分弹头的威力就达几十万吨 TNT 当量,攻击命中率很高(圆概率偏差小于百米)。一旦发生核大战,即使本土陆基战略核力量被全部摧毁,只要有一艘弹道导弹核潜艇,也能对敌方构成严重威胁,从而影响或改变战争的战略格局。

弹道导弹核潜艇在现代战争中负有重要的战略使命,不仅可以打击敌方大片纵深国土上的城市、工业区、机场、港口、运输枢纽和兵力集结地等软目标,而且还能够打击陆上导弹发射井等硬目标。

自 20 世纪 50 年代末期以来,美国、苏联/俄罗斯、英国和法国等大国都拥有弹道导弹核潜艇,共建造了近 180 艘。相比于美国和俄罗斯建立了生存能力强、攻防兼备、核常兼容、足够有效的“三位一体”战略核力量,英国和法国出于战略威慑的不同需要,尤其是从本国综合实力和地理条件因素考虑,英国把 100% 的战略核力量放到了水下,也就是所有的弹道导弹都被安置到战略核潜艇上,而法国海基核力量也承担 90% 以上的核威慑和核反击任务。

### (二) 攻击型核潜艇

攻击型核潜艇是以鱼雷和战术导弹为进攻性武器的核潜艇,是现代造船、核技术、导弹和电子技术相结合的海军装备。其具有下列突出特点:

#### 1. 隐蔽性好

由于采用了核动力,不必像常规潜艇那样浮出水面充电,因此不易暴露,可以长期连续地在水下航行。由于采用各种降噪措施,辐射噪声低,目前已低于海洋背景噪声,下潜深度可达 500m,再加上非声隐身措施,具有良好的隐身性,潜航时的生存概率达 90% 以上。

#### 2. 高速机动,活动范围大,续航力长,攻防能力兼备

先进的攻击型核潜艇装备了大功率长寿命高性能反应堆,一次装料可运行 30 年,续航力达 100 万海里以上,最高航速可达 30 多节,活动范围可遍布各大洋,可远隔重洋快速奔赴战区,可在水下大深度远距离潜航,反潜兵力很难侦察和搜索,其反而会成为攻击型核潜艇跟踪和攻击的目标。

#### 3. 探测能力强

现代攻击型核潜艇装备多种先进探测设备,具有先敌发现目标的能力。艇上装备了先进的声纳设备,数量众多,远程警戒距离可达 100 海里以外。

#### 4. 攻击力强

攻击型核潜艇装备了 6~8 具鱼雷发射管,有的还装备了导弹垂直发射筒,可装载鱼雷、反舰导弹、反潜导弹、远程对陆攻击巡航导弹、防空导弹、水雷等多种先进武器。

50 多年来,美国、苏联/俄罗斯、英国和法国等西方国家建造了 270 多艘攻击型核潜艇。冷战结束后,在役的攻击型核潜艇数量有所减少,维持在当前的规模。

### (三) 巡航导弹核潜艇

巡航导弹核潜艇曾是苏联特有的一种核潜艇。主要作战使命是用反舰导弹攻击航母编队,保卫本国领土不受严重威胁。

苏联/俄罗斯自 20 世纪 60 年代以来,在导弹、核武器、潜艇推进和电子技术方面都取得了重大进展,建造了大量巡航导弹核潜艇作为反航母作战的核心力量之一。先后发展了 5 型 65 艘巡航导弹核潜艇,目前只有约 8 艘“奥斯卡”-II 型巡航导弹核潜艇在役(2000 年 8 月 27 日,沉没在巴伦支海的库尔斯克号就是该型核潜艇)。“奥斯卡”级核潜艇采用了俄罗斯当时最新的核潜艇技术,可作为先进型核潜艇的代表,其主要任务是在靠近俄罗斯的海域用导弹攻击敌方航母编队,也可与远程海上轰炸机和水面舰艇协同作战对其实施饱和攻击;此外,也可承担巡逻、侦查、搜集情报、布雷等多种作战任务。

该级潜艇装备 24 枚 SS-N-19 型反舰导弹(射程 550km)和大量鱼雷,可连续两次对水面舰艇发动攻击,攻击力强;结构独特,生命力强,居住性好;辐射噪声低,隐身性好;采用双反应堆推进,功率大,航速高,机动能力好。缺点是作战使命单一,救生能力不足。鉴于现代核潜艇普遍装备反舰导弹执行反舰使命,因此,俄罗斯研制了攻击型与巡航导弹型相结合的“亚森”级核潜艇,该型首艇于 2014 年正式服役。

由于对陆攻击巡航导弹在近年来现代化战争中的突出表现,2002 年 10 月,美国海军将“俄亥俄”级弹道导弹核潜艇的前 4 艘改装成巡航导弹核潜艇,原 24 个弹道导弹发射管中的 22 管用来装巡航导弹,每管 7 枚共 154 枚,同时稍做改进,还具有发射无人机和无人潜航器的能力,另 2 管在特种作战时用以连接海豹人员输送艇和一个干式甲板舱,海豹输送艇每次可搭载 9 人,潜艇可运送 66 名特种作战人员以执行侦察、渗透、偷袭、解救人质等行动。

## 1.2 核动力水面舰艇的发展

核动力的优越性能鼓励各国在发展核动力潜艇的同时,也积极开展核动力水面舰艇的研制。目前,世界上已有近 10 万吨级的核动力航空母舰、核动力导弹巡洋舰和核动力导弹驱逐舰在大洋游弋。与常规动力水面舰艇相比,核动力水面舰艇具有更广的战术机动性能和独立的活动能力,能长时间高速航行。例如,1964 年,美国的核动力航空母舰“企业”号、核动力导弹巡洋舰“长滩”号和核动力导弹驱逐舰“班布里奇”号在没有后勤支援的情况下,环球航行了 3 万海里。又如 1971 年,核动力导弹巡洋舰“特鲁克斯顿”号以平均 28 节的航速两次横越印度洋,航行 8600 海里,当时成为水面舰艇历史上航程最远的一次高速航行。

## 1.3 舰船核动力装置的基本组成

目前,世界上核动力舰船普遍采用的是压水堆核动力装置,其通常由反应堆及一回路系统、二回路系统及轴系、综合控制系统、电力系统及辐射防护系统等组成。

(1) 反应堆及一回路系统主要包括主冷却剂系统、保障主冷却剂系统运行的辅助系统(压力安全系统、净化系统、补水系统),确保堆芯安全的专设安全系统(余热排出系统、安全注射系统)等十几个子系统。

(2) 二回路系统又称为蒸汽供应系统,主要包括蒸汽系统、蒸汽安全排放系统、凝给水系统等二十余个子系统。

(3) 综合控制系统主要包括反应堆控制、测量、运行支持、管理分系统,反应堆及一回路仪表控制分系统,二回路过程监控分系统,轴系测量控制分系统等。

(4) 电力系统主要包括正常供电系统、应急供电系统、电气综合监控系统、辅机电气传动控制系统。

(5) 辐射防护系统包括辐射防护设施和辐射监测系统两部分,辐射防护设施主要包括屏蔽、通风及净化、堆舱负压及应急排风系统;辐射监测系统以固定式连续监测为主,在舱室有代表性或存在潜在辐射危险的部位设置中子、 $\gamma$  和气载放射性物质的监测点,异常情况可发出报警信号,以控制舱室环境的辐射水平。

反应堆堆芯核燃料裂变产生的热量,由一回路系统主冷却剂(水)的循环流动过程带出堆芯,并通过蒸汽发生器传给二回路水,主冷却剂由主泵驱动返回堆芯,不断循环冷却反应堆,如图 1.1 所示。舰船核动力装置一回路系统一般是由几条完全相同的、对称并联在反应堆压力容器接管上的密闭环路组成。其中每一条环路都包含蒸汽发生器,反应堆进口、出口接管处的各一只冷却剂隔离阀和连接这些设备的主回路冷却剂管道。为了维持反应堆安全可靠地工作,一回路系统还包括一些必须设置的辅助系统。

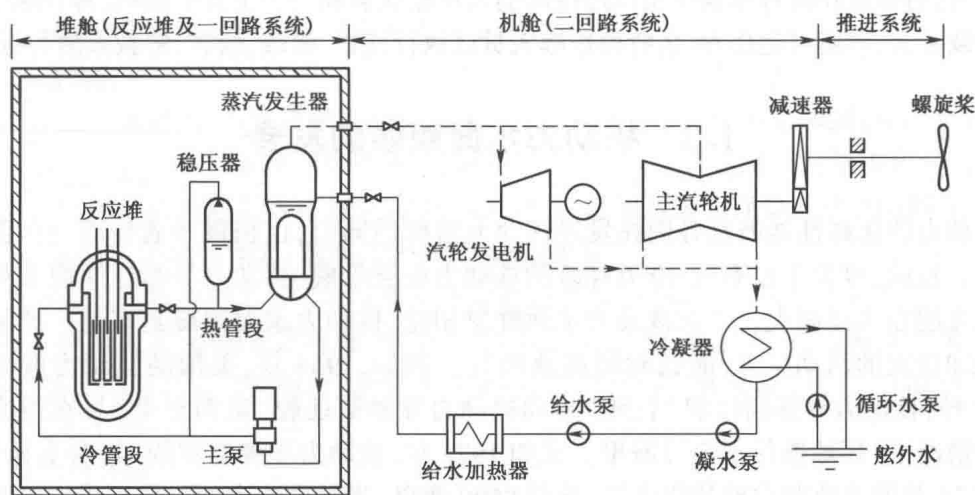


图 1.1 舰船核动力装置原理示意图

二回路水在蒸汽发生器(二次侧)中被一回路高温高压水加热成蒸汽,一部分蒸汽驱动主汽轮机旋转,通过齿轮减速箱和轴系带动螺旋桨,推动舰船前进;另一部分蒸汽推动主汽轮机发电,提供全船所需的电力。二回路给水泵将各部分蒸汽冷凝水重新打回到蒸汽发生器,形成汽—水循环,同时也完成热能到机械能和电能的转换。

## 1.4 压水堆的基本结构

各种类型的动力反应堆中,压水堆由于具有结构紧凑、体积小、功率密度高、平均燃耗较深,放射性裂变产物不易外逸,良好的功率自稳自调特性、比较安全可靠等优点,获得了广泛的应用。舰船压水堆与核电厂压水堆本体结构基本类似,图 1.2 给出了典型核电厂压水堆堆芯的基本结构,其主要组成包括:

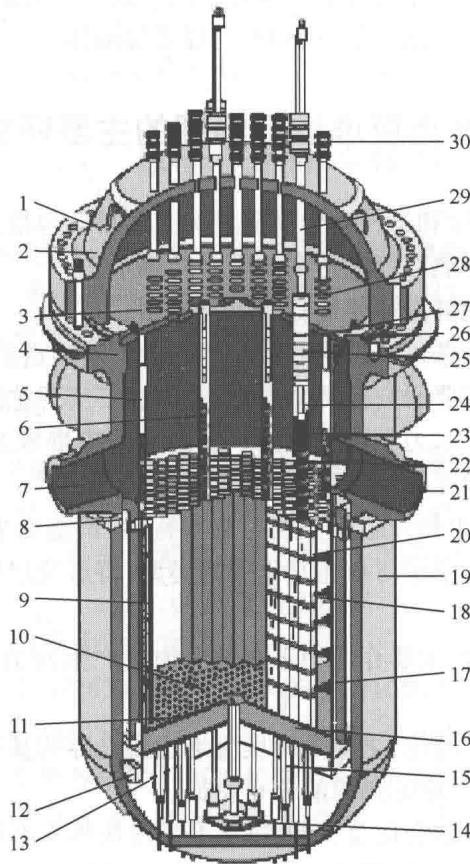


图 1.2 压水堆的结构图

- 1—吊装耳环;2—封头;3—上支撑板;4—内部支撑凸缘;5—堆芯吊篮;  
6—上支撑柱;7—进口接管;8—堆芯上栅格板;9—围板;10—进出孔;11—堆芯下栅格板;  
12—径向支撑件;13—底部支撑板;14—仪表管;15—堆芯支撑柱;16—流量混合板;17—热屏蔽;  
18—燃料组件;19—压力容器;20—围板径向支撑;21—出口接管;22—控制棒束;23—控制棒驱动杆;  
24—控制棒导向管;25—定位销;26—夹紧弹簧;27—控制棒套管;28—隔热套筒;  
29—仪表引线管;30—控制棒驱动机构。

(1) 燃料组件。燃料组件是反应堆活性区的核心部件,提供全寿期足够的核裂变反应材料,由燃料芯块、燃料包壳(锆合金)、结构件等组成。

(2) 控制棒及其驱动机构。控制棒由强中子吸收材料(如铪、碳化硼、银—铟—镉)制

成,通过驱动机构在堆内上下移动,控制反应堆内用于核裂变反应的中子数量,从而控制反应堆功率。

(3) 主冷却剂。压水堆用水作为冷却剂,将堆芯核反应产生的热量带出;同时水又是慢化剂,用来降低裂变生成的中子动能,使之更容易与铀-235 发生裂变反应。

(4) 吊篮。用于安放燃料组件、控制棒、中子源等部件。

(5) 反应堆压力容器。压力容器内部安装堆芯组件,顶盖上安装控制棒驱动机构;与一回路系统共同形成密封空间。

(6) 反应堆屏蔽。为了防止反应堆产生  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  及中子对运行人员、设备的辐射损伤,堆芯压力容器外周围设置了屏蔽水箱、铅和聚乙烯等屏蔽体。

## 1.5 核反应堆运行物理的主要研究内容

根据前面所述,人们设计和运行动力反应堆的主要目标包括:

(1) 反应堆必须能够释热并能维持在所需要功率水平。

(2) 反应堆功率必须能够按需要进行调节与控制。

(3) 必须在确保安全的条件下把堆芯产生的热量不断输送出去。

反应堆运行物理课程主要研究前两个目标,并阐述了实现这两个目标的方法与措施;后一个目标主要由反应堆热工水力学课程研究。为研究反应堆堆芯的热源特征,需要详细分析堆芯内中子与物质核的相互作用,因此,本书主要内容有:

(1) 原子核物理基础,主要介绍原子核的基本特性,核能的来源及开发途径,核与核的转换途径,产生中子的方法,中子与核相互作用的类型、特点及定量描述方法,中子诱发重核的裂变反应等。

(2) 中子的慢化与扩散,主要介绍中子在堆芯内从产生到消失过程的能量变化规律和空间移动规律。

(3) 均匀反应堆的临界理论,主要介绍反应堆达到临界的基本条件,即堆芯几何特性和材料特性的匹配关系,临界时堆芯热源的分布特征。

(4) 核反应堆内反应性的变化及控制,主要介绍反应堆功率运行期间,堆芯特性参数变化对反应堆临界特性的影响、控制反应性的方法及控制特性。

(5) 反应堆中子动力学,主要介绍反应堆偏离临界时,堆芯功率随时间的变化规律。

(6) 反应堆物理试验,主要介绍反应堆新堆投入运行前、运行一定时间或经过长时间维修后重新启堆时,为实测堆芯物理特性所开展的试验项目、试验方法及安全注意事项。

## 第 2 章 原子核物理基础

设计核反应堆的目的,是利用堆内大量中子与核燃料、慢化剂、结构材料、控制材料及裂变产物等物质核发生各种类型的相互作用,确保稳定、可靠地释放核能。因此,在讨论核反应堆内发生的各种物理过程之前,有必要对有关原子核的基础物理知识作一介绍。

### 2.1 原子核的基本性质

原子核的基本性质通常是指原子核作为整体所具有的静态性质,这些性质和原子核结构及其变化有密切的关系。本节只对与本课程有关的内容加以讨论,其他性质从略;最后介绍核密度的计算,供以后各章节采用。

#### 2.1.1 原子核的组成

原子核由质子和中子组成。质子和中子统称为核子。质子(用  $p$  表示)带正电,中子(用  $n$  表示)不带电。因此,核子有两种状态:带电态,就是质子;不带电态,就是中子。

质子就是氢核,它所带的电荷等于基本电荷,即电子电荷的绝对值:

$$e = 1.602176 \times 10^{-19} \text{C}$$

实验表明,质子和中子的质量分别为

$$m_p = 1.67262 \times 10^{-27} \text{kg} = 938.2716 \text{MeV} \cdot \text{C}^{-2} \quad (2.1)$$

$$m_n = 1.674927 \times 10^{-27} \text{kg} = 939.5654 \text{MeV} \cdot \text{C}^{-2} \quad (2.2)$$

自由的质子是稳定的,自然界中质子可以长期存在,在星际空间存在着很多自由质子。

中子是不稳定的,除非将它束缚在原子核内。自由中子将衰变为质子和负电子  $\beta^-$ ,并放出一个反中微子  $\bar{\nu}$ :

$$n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu} \quad (2.3)$$

发生这一过程的平均时间约为  $(896 \pm 10) \text{s}$ ,所以自然界中见不到自由中子。在反应堆内燃料核裂变所放出的中子,从产生到被吸收或泄漏出堆外的平均寿命,对热中子反应堆大约为  $10^{-3} \text{s} \sim 10^{-4} \text{s}$  量级,对快中子反应堆则只有  $10^{-6} \text{s} \sim 10^{-7} \text{s}$  量级。可见,中子的不稳定性在反应堆物理分析中并不重要。在讨论中子扩散、慢化、吸收或增殖等所有过程中,可以不考虑中子的衰变问题。微观粒子都具有二重性,有时表现为单个粒子,有时又表现为波,在堆芯物理特性研究中主要考虑是中子的粒子性。

具有相同质子数  $Z$  和中子数  $N$  的一类原子核,称为一种核素。核素用符号  ${}_Z^A X$  或  ${}^A X$  表示。其中  $X$  是元素符号; $Z$  称为电荷数,也就是该元素的原子序数; $A = Z + N$  称为质量数,也就是核素的核子总数。



质子数相同、中子数不同的核素称为同位素。例如 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 和 ${}_{92}^{238}\text{U}$ 就是铀的两种同位素,它们在天然铀中所占原子百分比(称为丰度)分别为0.72%和99.27%。同位素间核反应特性差异很大,研究核反应时需要详细区分不同的同位素。

### 2.1.2 原子核的质量

当忽略核外电子的结合能时,原子核的质量等于该元素的原子质量减去该原子的外层电子的质量,即

$$m = m_A - Zm_e \quad (2.4)$$

式中: $m_A$ 为原子的质量, $m_e$ 为电子的质量, $Z$ 为电荷数。 $m_A =$ 原子的原子量 $\times$ 原子质量单位。

电子的质量是很微小的,实验表明

$$m_e = 9.109382 \times 10^{-31}\text{kg} = 0.51100\text{MeV} \cdot \text{C}^{-2}$$

在1960年以前,原子质量单位采用的是氧单位,记作amu(atomic mass unit的缩写)。1amu定义为 ${}^{16}\text{O}$ 原子质量的1/16。从1960年1月1日起,国际物理学会议规定,原子质量单位采用碳单位,记作u(unit的缩写)。1u定义为 ${}^{12}\text{C}$ 原子质量的1/12。碳单位和氧单位的换算关系如下:

$$1\text{u} = 1.000318\text{amu} = 1.66053873 \times 10^{-27}\text{kg} = 931.4940\text{MeV} \cdot \text{C}^{-2}$$

当用u作单位时,质子、中子和电子的质量分别为

$$m_p = 1.007276\text{u}$$

$$m_n = 1.008665\text{u}$$

$$m_e = 5.4858 \times 10^{-4}\text{u}$$

由于核外电子的质量较原子核的质量小得多,同时对于原子核的变化过程,变化前后核的电子数目不变,电子质量可以自动相消。在实际计算核转换过程的质量变化时,不必推算原子核的质量,近似利用原子的质量变化即可。而任何元素的原子质量,以u为单位时都接近于某一整数,这个整数就是质量数A,即

$$m \approx m_A \approx Au$$

### 2.1.3 核的大小与液滴模型

根据核内电荷分布的实验,可以推知稳定的原子核的形状一般为近似椭球形,椭球长短轴之比一般不大于5/4,所以也可以把它近似地看作球形。若把原子核近似看作一个半径为R的球,R为原子核的等效半径,A为质量数,二者满足如下关系:

$$R = r_0 A^{1/3} \quad (2.5)$$

式中: $r_0$ 为一常数,实验研究表明 $r_0 \approx (1.4 \sim 1.5) \times 10^{-15}\text{m}$ 。

按照式(2.5)算出的原子核的半径虽然不十分严格,但对许多计算来说,精度已足够了。由于原子的半径约为 $10^{-10}\text{m}$ 量级,这表明原子核的线度要比原子小5个量级左右。

根据式(2.5)可以计算球形核的体积,即