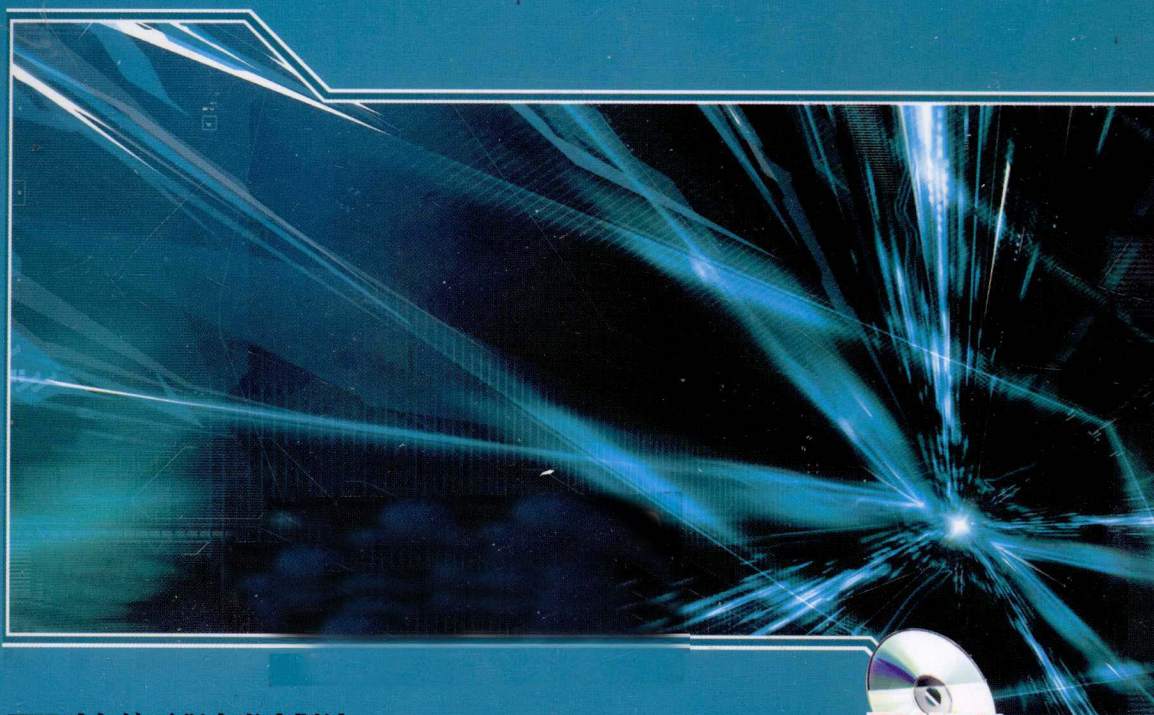




国防特色教材·核科学与技术

核能动力装置设计与优化原理

贾宝山 俞冀阳 彭敏俊 编著



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

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社





国防特色教材·核科学与技术

核能动力装置设计与优化原理

贾宝山 俞冀阳 彭敏俊 编著

哈尔滨工程大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

本书介绍了核能动力装置的设计原理和优化原理,分析对象涉及到反应堆堆芯、稳压器、蒸汽发生器、汽轮机、冷凝器等装置中的所有关键设备。全书共分8章,在概括描述核能动力装置性能特点、应用领域、发展趋势、类型特点、系统和设备的基础上,介绍了设计和优化的一般步骤和系统优化参数的确定方法;介绍了核反应堆堆芯、装置中的热力和动力设备的设计和分析模型;介绍了多种优化算法及其特点;然后以压水堆型核能动力装置为分析对象,分别给出了蒸汽发生器和反应堆压力容器两个单个设备优化和核能动力装置全系统总体优化的案例。

本书内容涵盖专业面宽、综合性强、特色突出,适合作为高等院校核能科学与工程、核能与能源工程、核反应堆工程与安全等核科学与核技术类专业研究生和高年级本科生专业课教材。同时,本书也可作为从事核电站、舰船或航天核动力装置设计、优化、运行、管理和评价工作的专业技术人员的培训教材和专业参考书。

图书在版编目(CIP)数据

核能动力装置设计与优化原理/贾宝山,俞冀阳,彭敏俊编著.
—哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2010.9
ISBN 978-7-81133-843-0

I. ①核… II. ①贾… ②俞… ③彭… III. ①核动力
装置—最优设计 IV. ①TL99

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 135193 号

核能动力装置设计与优化原理

贾宝山 俞冀阳 彭敏俊 编著
责任编辑 石 岭

*

哈尔滨工程大学出版社

哈尔滨市南岗区东大直街 124 号(150001) 发行部电话:0451-82519328 传真:0451-82519699

<http://press.hrbeu.edu.cn> E-mail:heupress@hrbeu.edu.cn

黑龙江省地质测绘印制中心印刷厂印刷 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:19 字数:400 千字

2010 年 10 月第 1 版 2010 年 10 月第 1 次印刷 印数:1000 册

ISBN 978-7-81133-843-0 定价:42.00 元

前 言

自 1942 年世界第一座核反应堆问世以来,由于核能动力所独具的特色,核能利用经军用转向民用,历经 60 多年的发展,无论在陆上、在海洋,还是在太空,无论是核动力潜艇、核动力舰船、核动力航天器,还是核能电站,各式各样的核动力装置被开发出来并得到了广泛应用,核能已经成长为能源和动力领域的强大支柱。

早前,核能动力装置最终设计方案的选定常常依靠以往经验的积累和专家的判断,近年来人们不仅可以用各种计算机程序相当准确地预计和模拟核能动力装置的各种运行工况,而且还尝试把最优化设计理论和方法应用到核能动力装置的设计中来,使核能动力装置最终设计方案的确定更加科学化和理想化。

本教材是作者参考和吸收国内外已有技术资料,在开展核能动力装置设计和优化科研和教学实践的基础上编著而成的,本书的分析对象涉及到反应堆堆芯、稳压器、蒸汽发生器、汽轮机、冷凝器等装置中所有关键设备。全书内容共分八章:第 1 章概括描述了核能动力装置的性能特点、应用领域和发展趋势;第 2 章描述了不同类型核能动力装置及其系统组成和关键设备;第 3 章介绍了核能动力装置设计和优化的一般步骤和系统优化参数的确定方法;第 4 章和第 5 章分别介绍了核反应堆堆芯、装置中的热力和动力设备的设计和分析模型;第 6 章介绍了多种优化算法,并评价了它们的特点;第 7 章和第 8 章以压水堆型核能动力装置为分析对象,分别给出了蒸汽发生器和反应堆压力容器两个单个设备优化和核能动力装置全系统总体优化的案例。

本教材由清华大学和哈尔滨工程大学长期从事核能科学与工程领域科研和教学工作的教师共同编著。其中第 1,4 章由贾宝山教授编著;第 2,5 章由彭敏俊教授编著;第 3,6,7,8 章由俞冀阳副教授编著;全书由贾宝山教授统稿。在大纲制定、内容编写和书稿审查过程中,哈尔滨工程大学阎昌琪教授,清华大学周志伟、曹栋兴、赵兆颐、王国力教授等,为本书提出了许多宝贵意见和建议,并给予了大力支持,同时,在编写过程中参考或引用了国内外一些专家学者的论著,在此一并表示衷心感谢。

本教材内容涵盖专业面宽、综合性强、特色突出,适合作为高等院校核能科学

与工程、核能与能源工程、核反应堆工程与安全等核科学与核技术类专业研究生和高年级本科生的专业课教材。同时,本书也可作为从事核电站、舰船或航天核动力装置设计、优化、运行、管理和评价工作的专业技术人员的培训教材和专业参考书。

核能动力是十分活跃的学科领域,新的研究成果和技术资料不断涌现,应用范围也在不断扩展。鉴于此,欲在本书中将有关成果十分完整、准确地反映出来,实非编著者能力所及,书中片面、不妥之处在所难免,甚至可能存在谬误之处,恳请广大读者批评指正。

编著者

2010年3月

目 录

第 1 章 核能动力装置概述	1
1.1 核能动力装置的性能特点	1
1.2 可移动核动力的应用领域	4
1.3 可移动核动力技术的最新发展趋势	13
1.4 固定式核能动力的最新发展趋势	15
思考题与习题	20
第 2 章 核动力装置的系统与设备	21
2.1 核动力装置功能及原理	21
2.2 典型的核动力堆型	25
2.3 压水堆核动力装置的系统组成	40
2.4 核能系统的关键设备	52
思考题与习题	62
第 3 章 核能动力装置优化综述	64
3.1 优化对象的仿真模拟	64
3.2 工程优化理论概述	65
3.3 核能动力装置的优化设计	71
3.4 核能动力装置参数优化概述	78
3.5 设备外部参数和总体优化系统参数的确定	80
思考题与习题	90
第 4 章 核反应堆堆芯设计与建模分析	91
4.1 核反应堆堆芯设计综述	91
4.2 堆芯方案耦合设计的计算流程	95
4.3 堆芯主要设计参数的确定	98
4.4 堆芯中子物理学设计与建模分析	113
4.5 堆芯热工水力学设计与建模分析	132
思考题与习题	150

第5章 热力和动力设备设计与建模分析	151
5.1 蒸汽发生器的设计与动态模型	151
5.2 稳压器的设计与瞬态分析模型	179
5.3 主冷却剂泵的动态数学模型	190
5.4 蒸汽轮机的动态数学模型	196
5.5 冷凝器的热工设计与瞬态分析模型	205
5.6 系统和其他部件的动态数学模型	216
思考题与习题	221
第6章 优化算法介绍及特点比较	222
6.1 优化算法概述	222
6.2 遗传算法	226
6.3 其他优化算法简介	236
6.4 联合算法的应用	249
思考题与习题	260
第7章 单个设备优化	261
7.1 蒸汽发生器部件优化	261
7.2 反应堆压力容器部件优化	275
思考题与习题	280
第8章 核动力装置的系统总体优化	281
8.1 概述	281
8.2 系统优化参数的分析和选取	281
8.3 系统优化的数学模型	282
8.4 系统效率计算的简化处理	283
8.5 全系统优化——优化程序和结果	283
8.6 程序使用说明	288
思考题与习题	292
参考文献	293

第 1 章 核能动力装置概述

1942 年 12 月在美国芝加哥大学建成了世界上第一座反应堆,证明了实现可控链式裂变反应的科学可行性,标志着核能利用新时代的开始。

在第二次世界大战期间及以后的一段时间内,世界各国先后建成了一批生产核武器用铀的生产堆和核潜艇用动力堆;自 20 世纪 50 年代初以来,人们利用已有的军用核技术建造了以发电为目的的核电厂,核能利用从军用转向了民用。经过 60 多年的发展,核能已经成长为能源和动力领域的强大支柱。

以原子核裂变能作为推进动力的能源系统(或装置),包括发生核裂变反应的核反应堆、为产生推进动力所必需的系统和有关设备。用于舰船、潜艇、航天等领域的核能动力装置,称作可移动核动力装置。此外,宇航中的核火箭或核动力推进器等也都属于可移动核动力装置。

核电厂用核能作为能量来源,它包括发生核裂变反应的反应堆和为了实现从核能转变为传送到电网上的电能所必需的系统和相关设备。核电厂大多建在靠近丰富冷却水源的固定厂址,因此也称作固定式核动力装置。此外,核供热站、核热电厂等也属于固定式核动力装置。

本书中介绍的核能动力装置是一个广义的概念。目前有两大类核能动力装置:可移动核动力装置和固定式核动力装置。核能动力装置可应用于三大领域:①陆上核动力装置,即通常所说的核电厂、核供热站、核热电厂等;②海洋核动力装置,即核动力舰船、核潜艇、核动力航空母舰、原子破冰船、小型核潜器等;③空间核动力装置,即宇航中的核火箭或核动力推进器等。陆上核动力装置可归类于固定式核动力装置;海洋核动力装置和空间核动力装置可归类于可移动核动力装置。

1.1 核能动力装置的性能特点

核能动力装置之所以在广泛领域获得应用并得到快速发展,是因为核能具有其他形式的能源所不能比拟的性能特点。

1.1.1 核能动力的优点

1. 核燃料具有很高的能量密度

首先,核燃料具有很高的能量密度。1 千克易裂变物质铀-235 完全裂变所产生的能量,大约相当于 2 800 吨优质煤(这大约是一整列火车的载重量)或 2 100 吨燃油充分燃烧后所放出的热能。又例如,一艘推进功率为 7.4 万千瓦的大型快速船,如果采用常规动力装置,全速航行一小时大约要消耗 35 吨燃油,而采用压水堆核能动力装置,则仅消耗 17 克的铀-235 核

燃料。

正是因为核燃料有非常高的能量密度,所以舰船航行时可以只装载少量的核燃料,而且不像常规舰船那样需要不时地补充燃料(比如一个核动力航空母舰可以航行 10 年而不需要增添燃料),却能够提供巨大的续航力。这对于增加舰船吨位和提高舰船航速来说,其经济上的优越性是十分巨大的。

在民用电力生产领域,如果将核电厂的燃料消费与燃煤电厂的燃料消耗作一个对比,我们可以发现,对于一座百万千瓦的燃煤发电厂每年要烧掉大约 300 万吨优质煤,但是相同电功率的核电厂每年仅需要大约 30 吨核燃料,真正烧掉的铀-235 大约只有 1 吨。

2. 核裂变过程不需要氧气

核裂变反应与常规燃料燃烧反应不同,核裂变过程不依赖氧气,核动力装置不需要像常规动力装置那样不断地向动力装置输送氧气。因而它用作潜艇核动力是非常合适的,并且有着无可比拟的突出优势。装有核动力装置的潜艇,只要保证艇员在与外界空气完全隔绝的舱室内能够正常生活,在艇员身体健康的情况下,就可以在水下持续潜航很长的时间。长时间的潜航增加了潜艇的隐蔽性,极大地扩展了潜艇的攻击能力和防御能力,使潜艇真正成为一个能在水下自由移动的、难以被敌人发现的弹道导弹发射平台,同时核潜艇本身也是最有效的反潜武器,能够更好地完成其战略、战术任务。

3. 核动力用作舰船推进具有功率大的优点

在要求舰艇具有较高的平均航速和较大的续航能力的情况下,由于核动力装置不需要携带大量的燃料,总的质量、尺寸与相同功率水平的常规动力装置相比并不笨重。常规动力装置在最大功率下的运行时间,因为燃油消耗过多而总是受到限制,但是对于核动力舰艇来说,由于反应堆堆芯核燃料具有极高的能量密度,对于满功率航行的限制已经失去了意义。核动力舰艇航行实践说明,以尽量多的时间按满功率或者接近满功率进行工作是可行的。此外,由于功率大,核动力装置在核燃料的供应、运输和装载量等方面具有优越性。除舰艇以外,核动力装置对其他具有专门特殊使命要求的各种船舶来说,也十分吸引人。例如,要求具有大功率的原子破冰船和具有大吨位的矿砂船、运油船、集装箱运输船等,都极为适宜选取核反应堆作为它们的推进动力源。

4. 核动力装置较为稳定易于控制

与锅炉蒸汽轮机动力装置相比较,核动力装置运动特性较为稳定,且易于控制,其负荷跟随特性也比较好。尤其压水堆核动力装置所固有的负温度效应自调节特性,能够使反应堆装置较迅速地随着汽轮机进气阀开度变化而自动跟随调节。这一特点提高了核动力装置的可操作性,对于核动力装置的控制是十分有利的。

5. 核能的优点是清洁,有利于保护环境

众所周知,燃烧石油、煤炭等化石燃料必须消耗氧气,生成二氧化碳。由于人类大量燃烧化石燃料等,已经使得大气中 CO_2 的含量显著增加,导致“温室效应”,其后果是地球表面温度

升高,干旱、沙漠化,两极冰层融化和海平面升高等,这一切都会使人类的生存条件恶化。除 CO_2 外,燃煤电厂还要排放大量的二氧化硫等,它们造成的酸雨使土壤酸化、水源酸度上升,对农作物、森林造成危害。煤电厂排出的大量粉尘、灰渣也对环境造成污染。相比之下,核电厂向环境排放的废物要少得多,大约是火电厂的几万分之一。而且生产核能不需消耗氧气、不会产生 CO_2 ,它不排放二氧化硫,也不产生粉尘、灰渣。核电厂正常运行时当然也会向环境中排放少量的放射性物质,核电厂对周围居民的放射性剂量不到天然本底的 1%,不是什么严重的问题。值得指出的是,由于煤渣和粉尘中含有铀、钍、镭、氡等天然放射性同位素,所以煤电厂排放到环境中的放射性比相同功率的核电厂要多几倍,甚至几十倍。

核能动力装置的这些特性使之成为公众能够接受大规模发展核能的重要原因。

1.1.2 核能动力的缺点

任何事物都是一分为二的,不用讳言,核能动力装置也有它的缺点,归纳如下:

1. 产生放射性核素

裂变反应堆释放巨大能量的同时,伴随着生成的裂变产物大都是放射性核素。在产生的裂变产物中,有容易从二氧化铀芯块中逸出的气体氪(Kr)、氙(Xe)及易溶于水的卤族元素,并有燃料元件内积累的放射性裂变产物,因此核能的释放过程也是放射性核素的产生过程,从而给人们核能动力装置的运行、维修管理带来较大的困难。除了裂变产物的放射性外,反应堆内的大量中子会使堆内的各种材料“活化”而转变成放射性物质。现代核工程设计技术可以把所有这些放射性物质禁锢起来,使其不会危害工作人员和对环境造成污染。但这毕竟存有潜在的危险,一旦发生重大核事故,就可能使放射性物质释放到环境中去。为了做到万无一失,核能动力装置的设计、建造和运行必须采用很高的安全标准。

2. 核反应堆的“剩余发热”问题

与放射性相联系的另一个问题是核反应堆的“剩余发热”问题。由于核燃料元件中积累了大量强放射性的裂变产物,这些裂变产物在进行衰变时会放出 β 和 γ 射线,这些射线与周围的材料相互作用很快转化为热能,因此即使反应堆停止运行以后堆芯也还会不断地发热,这就是所谓“剩余发热”。所以反应堆停堆后还要对它继续进行冷却,否则就会把堆芯烧坏,导致放射性物质外泄。

3. 放射性废物的处置问题

与放射性相关的还有核废物的处置问题。虽然核电厂每年产生的核废料很少,但其中有些放射性核素的半衰期极长,需要几千年、几万年甚至更长时间才能完全衰变。如何妥善地存放这些核废料,使它们在漫长的岁月中不至于释放到环境中去,是科学家和公众非常关心的问题。对这一问题现在已有了不少可行的技术方案。解决这一问题的另一思路是设法通过核反应将长寿命的放射性元素转变为短寿命的,目前也提出了若干技术方案。如能实施,核废物的处置就不再是一个在某种程度上影响核能发展的问题。

1.2 可移动核动力的应用领域

自从 1955 年 4 月世界上第一艘压水堆核动力潜艇——“鹦鹉螺”号问世以来,不同类型的可移动核动力得到了快速的发展。可移动核动力为核潜艇、核动力航空母舰、原子破冰船、核动力深海潜器、核动力航天器、航天核火箭、航天核电源等提供所需的推进动力,在很多领域或发挥着巨大作用,或展现了诱人的应用前景。

1.2.1 舰船核动力

根据它们的功能,舰船核动力一般分为两类:一类为民用的,如原子破冰船、核动力客商船和海洋科学考察船等;另一类为军用的,如核动力航空母舰、核动力潜艇和核动力巡洋舰等。

尽管民用与军用舰船核动力装置的应用领域有明显的不同,但它们的组成和原理是相似的。核反应堆中原子核裂变所产生的热能通过一回路中的冷却剂带走,在蒸汽发生器中将该热能传递给二回路中的水,所产生的高温、高压蒸汽用来驱动蒸汽轮机,经减速后带动螺旋桨航行。

舰船核动力装置的核心部件是核反应堆。用于舰船核动力的堆型可以有多种,但采用最多的是压水堆。压水堆舰船核动力装置系统一般由反应堆、一回路系统、二回路系统、电力系统、推进轴系几大部分组成。与核电厂主要的差别在于系统组成中存在的推进轴系。比较有发展前景的蒸汽推动的汽轮机主要是回转式蒸汽轮机。

舰船核动力装置与核动力电厂相比较,虽然它们的工作原理是基本相同或相似的,但它们所经历的工作环境和运行条件,以及运行管理和监督措施的要求却有很大区别。舰船核动力装置的工作环境和运行条件如下:

- ①船舶受海洋条件的影响,易产生摇摆和倾斜;
- ②易产生海洋事故,包括碰撞、触礁和火灾;
- ③船舶速度(负荷)变化急剧,且幅度大,有时必须倒航;
- ④航行远离基地、码头,给维修、补给造成困难;
- ⑤船内空间有限,所有设备必须质量轻、体积小;
- ⑥船上及港口人员密集,所以放射性防护极为重要;
- ⑦海洋气候潮湿,且含有盐分。

舰船核动力装置由于受舰船工作环境和运行条件的影响和限制,其技术经济指标与核电厂也不尽相同。相同的经济技术指标涉及装置的功率、装置的安全性、装置的经济性、装置工作的可靠性等;不同的指标有装置的质量、尺寸等机动特性、装置工作的适航性等。

1. 民用核动力船

表 1.1 给出了 20 世纪六七十年代开发建造的四艘有代表性的民用核动力装置的主要参数。

(1)“列宁”号破冰船

前苏联第一艘核动力“列宁”号破冰船于1959年完工。它的核动力装置由三套独立的核动力回路系统组成。反应堆、蒸汽发生器和冷却剂泵等一回路主系统设备安装在密封舱内。核动力装置的总质量约5 767 t。

表 1.1 民用船舶核动力装置的主要参数表

项 目 \ 船 名	萨瓦娜	列宁	奥托·哈恩	陆奥
国别	美国	前苏联	原西德	日本
船种	客货船	破冰船	矿砂船	货船
满载排水量/万吨	2.217	1.6	2.59	1.04
最大输出轴功率/MW	16.170	32.34(三轴)	8.085	7.35
航速/kn*	20.0	18.0	16.0	16.5
一回路环路数/个	2	2	3	2
蒸汽发生器数目/台	2	3(一台备用)	3	2
堆芯冷却剂流量/(t/h)	3 635	3×780	3×800	1 800
反应堆额定热功率/MW	69	3×65	38	36
核动力装置的效率/%	23.6	18	21.3	20.4
一回路压力/MPa	12.0	12.75	6.1	10.8
堆芯入口/出口温度/℃	257/273	286/310	267/278	271/285
冷却剂欠饱和度/℃	51.5	39.1	空泡份额≤6%	30.6
二回路额定压力/MPa	3.1	2.8	2.9	3.9
蒸汽温度/℃	238(饱和)	307(过热 66℃)	273(过热 36℃)	251(饱和)
堆芯寿期/满功率年	650	365	500	375

注:kn(节)为国家选定的非国际单位制单位,只用于表述航行速度,1 kn=1 n mile/h=1.852 km/h。

(2)“萨瓦娜”号核动力客货船

第一艘核动力客货船“萨瓦娜”号1962年2月完工。“萨瓦娜”号的动力装置的主动动力是核能动力,核动力装置的一回路采用两个并联环路,每条环路上设有一台蒸汽发生器、两台冷却剂泵,两条环路共用一个稳压器。一回路系统和设备紧凑布置在安全容器内。核动力装置的总质量约3 650 t。

(3)“奥托·哈恩”号核动力研究船

西德建造的“奥托·哈恩”号核动力研究船是前苏联“列宁”号、美国“萨瓦娜”号以后世界上第三艘核动力商船。该船于1968年完工,是一艘运载矿砂的散装货船。载货量14 000 t,总载重量16 870 t。“奥托·哈恩”号船采用改进型压水堆,即一体化压水堆系统作为推进动力

装置。该船先后完成了 80 次货运与研究性航行,共航行了 250 000 n mile(1 n mile 为 1 海里,等于国际单位制的 1 852 m)。该船将近四年的运行实践,证实了一体化反应堆结构紧凑,安全可靠,有良好的自加压性能,能适应大风浪等恶劣气候条件。同时也发现这种一体化压水堆还存在着一些新的问题,有待于今后研究改进。

(4)“陆奥”号核动力试验船

日本第一艘核动力船“陆奥”号是世界上第四艘非军用核动力船舶,全船于 1972 年全部竣工,安装有三菱重工研制的压水堆及有关设备。该船核动力续航距离达 14.5 万海里;核能动力装置的总质量约 3 810 t。

2. 核动力潜艇

核动力潜艇具有良好的隐蔽性、较大的自给力、续航力和较强的突击威力,可用于袭击海岸设施和陆上重要目标,攻击大中型水面舰艇和潜艇,以及布雷、侦察和输送人员等。按战斗使命一般可分为核动力弹道导弹潜艇、攻击型潜艇和巡航导弹潜艇。

(1) 弹道导弹核潜艇

① 最先进的弹道导弹核潜艇

第二次世界大战后,美国海军共发展了 4 代核动力弹道导弹潜艇。目前在役数量最多、最为先进的便是第四代“俄亥俄”级核潜艇,它构成了美国海基战略核威慑的主力。该级核潜艇吨位大,采用了高性能核反应堆、先进电子设备和多种降噪措施,特别是装备了昂贵的“三叉戟”导弹,堪称世界潜艇之王。“俄亥俄”级核潜艇长 170.7 m,宽 12.8 m,吃水 10.8 m,长宽比是 13.3:1,为拉长的水滴型艇型,非常有利于水中航行,加上采用了一座功率大、寿命长的 S8G 自然循环压水反应堆,总功率 6 万马力(4.412 99 万千瓦),使水下排水量虽重达 18 750 t,水下航速仍可达到 25 kn,由于采用了高强度钢艇壳,其下潜深度可达 400 m。

② 吨位最大的弹道导弹核潜艇

俄罗斯是目前世界上拥有核动力弹道导弹潜艇最多的国家,现服役总量为几十艘。其中“台风”级吸收了前苏联 20 多年来发展弹道导弹核潜艇的经验,代表了当代弹道导弹核潜艇的先进水平,是目前世界上吨位最大的核潜艇。

“台风”级艇型极大,长 170 m,宽 25 m,吃水 13 m;水下排水量 26 500 t;动力装置采用两座 330 MW ~ 360 MW 压水堆和两台蒸汽轮机,8 万轴马力(5.883 99 万千瓦);水上航速 19 kn,水下航速 26 kn;潜深 300 m。与美国“俄亥俄”级潜艇相比,其水下排水量增大 40%,但艇长大致相等,艇宽几乎大一倍,长宽比约为 7:1,这种粗短的流线型使之下水航行阻力较小。

(2) 攻击型核潜艇

① 世界上最小的核动力攻击型潜艇

“红宝石”是当今世界上最小的核动力攻击潜艇。该级艇融会了诸多先进的核动力推进技术,装备了不少世界一流的武器装备,所以具有非常独特的性能和相当的攻击威力。

“红宝石”核动力攻击潜艇长 72 m,宽 7.6 m,吃水 6.4 m;水面排水量 2 385 t,水下排水量

2 670 t;最大下潜深度 300 m,最大航速 25 kn。如此轻吨位、小尺寸的攻击型核潜艇,具有小艇的优势,它可在活动空间小、情况复杂、声波传播条件差等海域灵活自如地活动,大显身手。这种艇的压水堆具有结构紧凑、系统简单、体积小、质量轻、便于安装调试、可提高轴功率等一系列优点,并且有助于在反应堆一回路采用自然循环冷却方式,以降低潜艇的辐射噪声。

“红宝石”与大中型核动力攻击型潜艇相比性能上尚有一定差距,但其在机动性、隐蔽性和经济性等方面却又令其他艇自叹不如。

②航速最快、潜深最大的核动力攻击型潜艇

在前苏联的攻击型核潜艇的发展史上,“阿尔法”级是一型具有创新意义的潜艇,虽然目前只有 1 艘在役,其余或封存或报废,但它的设计经验已在其后的“西尔雷”级艇的设计上得到应用。“阿尔法”级潜艇建造于 1970 年至 1983 年间,它创新地采用了钛合金作艇壳,长宽比也与以前的核潜艇大不相同,以达到水动力性能最佳状态。核反应堆采用新型的液态铅-铋合金冷却的中能中子反应堆,功率密度为普通反应堆的 4 倍。

这些创新使“阿尔法”级潜艇在下潜深度和艇速上创下了世界纪录,其最大潜深为 914 m,最大水下航速为 45 kn,这一航速与鱼雷的航速相差无几,大大提高了潜艇规避鱼雷攻击的能力。“阿尔法”级潜艇的排水量在俄罗斯现有核动力攻击型潜艇中属最小的,水上为 2 700 t,水下为 3 600 t;艇长 81.5 m,宽 9.5 m,吃水 7.5 m。

③参加海湾战争的核动力攻击型潜艇

“洛杉矶”级潜艇自 1976 年首艇服役至今已有三十余年的历史,是美国海军技术上最成功的一级攻击型核潜艇,也是目前在役数量最多的。“洛杉矶”级是一级多用途攻击型核潜艇,可执行反潜、反舰、护航、布雷、侦察、救援等多种任务,装备“战斧”巡航导弹后还可执行对地纵深打击的任务。该级艇长 110.3 m,宽 10.1 m,吃水 9.9 m;水下排水量 6 927 t,水下航速 32 kn;最大潜深 530 m。动力装置为 1 座自然循环压水堆,主机为两台蒸汽轮机,轴功率 4.5 万马力(3.308 万千瓦)。

有多艘“洛杉矶”级潜艇参加了 1991 年的海湾战争,其中两艘首次发射了“战斧”导弹。

(3)巡航导弹核潜艇

“库尔斯克”号属俄罗斯最大的一型“奥斯卡”级飞航导弹核潜艇,是其飞航导弹核潜艇的最后一级,俄海军将其定为水下一级核巡洋舰。该级共有两型,“奥斯卡 I”型均已退役,“奥斯卡 II”型现有多艘在役。

“奥斯卡 II”型的水上排水量为 13 900 t,水下排水量为 18 300 t;长 154 m,宽 18.2 m,计及稳定翼在内的宽度为 20.1 m,吃水 9.2 m;极限下潜深度为 500 m,工作深度 420 m。水上航速为 15 kn,水下为 28 kn。动力装置中,共有两座反应堆(各为 190 MW)和两台汽轮机,双桨。

3. 核动力航空母舰

目前世界上吨位最大、在役数量最多的一级航空母舰,就是“尼米兹”级核动力航空母舰。该级航空母舰满载排水量为 9.1 万吨以上,这相当于 1 100 多节装满货物的火车厢总质量。

“尼米兹”级第五艘“林肯”号由于在建造时格外加装了重 6 000 t 的装甲板,因而它的满载排水量骤增到 10.2 万吨,成为世界上有史以来最大的一艘航空母舰。“尼米兹”级航空母舰的尺寸也相当惊人,舰长 330 米,宽 76 米,甲板面积比三个足球场面积还要大;舰体吃水 11.3 米,舰体从舰底龙骨到舰桥顶部共高七十多米,相当于二十余层大厦的高度。舰上动力装置采用两台压水反应堆,总功率 28 万马力(20.593 965 万千瓦),等于 3 000 辆载重卡车的功率,最大航速 33 kn;加一次核燃料可使用 13 年,续航力达 80 万海里~100 万海里,相当于绕地球 25~30 圈。

“尼米兹”级各航空母舰自问世以来,以打击力强、反应迅速、机动性好、兵力投送能力大,始终为美国海军和历届政府所青睐,经常作为“急先锋”被派往世界有关海区,以应付地区冲突或局部战争。海湾战争中,美国海军就曾出动了包括“尼米兹”级航空母舰在内的多艘航空母舰。目前,美国海军已有多艘“尼米兹”级航空母舰在役。

4. 核动力巡洋舰

美国有 8 级各种巡洋舰服役,其中 5 级为核动力。第一级核动力巡洋舰是 1956 年着手设计的“长滩”级,它是世界上最早的核动力水面舰艇。美国第一、第二、第三级核动力巡洋舰各只有一艘。到第五级为“弗吉尼亚”级,该级舰满载排水量 11 000 t,标准排水量 8 623 t,全长 178.4 m,宽 19.2 m,吃水 9 m;装有两座性能改进提高了的 D2G 型压水堆,两台汽轮机,双轴,功率达 10 万轴马力(7.354 987 5 万千瓦),航速 30 kn。

前苏联有一级核动力巡洋舰“基洛夫”级,首舰“基洛夫(Kirov)”号;第二艘“伏龙芝(Frunze)”号。该级舰长 248 m,宽 28 m,吃水 8.8 m,满载排水量 28 000 t,是两个压水堆与石化燃料联合的核蒸汽联合动力装置,采用蒸汽轮机,双轴,功率 15 万轴马力(11.032 48 万千瓦),航速 33 kn。该级舰是前苏联第一代核动力水面舰艇,是目前世界上最大的巡洋舰,在全世界现有核动力巡洋舰中是速度最快的,它的单堆功率也最大。

1.2.2 水下小型核动力潜器

21 世纪是海洋的世纪,很多国家都认识到海底蕴藏着丰富的矿物和生物资源。为此,目前世界很多国家都面临着两方面重要课题:一是海洋防御;二是海洋资源的研究、探测和开发。

在海洋防御方面,核动力已经发挥了很大作用。目前核潜艇已成为各核大国海军的一支重要作战力量。但是由于大型潜艇的功率大、建造周期长、建造费用高等特点,其建造数量是有限的。另外,大型潜艇也不适合执行所有的战斗使命,如水下探测和侦察等,这样就需要一些尺寸较小、排水量较小的潜器来完成这些任务。

在海洋资源的研究、探测和开发方面,由于海底资源极其丰富,研究和开发海底资源是世界各国目前面临的重要课题,近年来很多国家已经开始着手对海洋资源进行研究 with 探测。

近年来关于深海的探测已经研究出了一些常规的水下动力源,例如斯特林发动机、闭式循环柴油机、燃料电池、闭式循环汽轮机等。这些常规动力源携带的燃料有限,因此使用的时间

都较短,一般在几小时或几十小时,这就限制了这些潜器的工作范围。如果能为这些潜器提供像反应堆这样的动力源,潜器的下潜深度和下潜时间将不受动力源的限制,深海的研究工作将会得到很大的进展。由于核燃料的裂变本身不需要空气,是一种天然的不依赖于空气“燃烧”的燃料,因此它是水下动力最理想的选择。

装有小型核动力装置的深海潜器有以下优点:①能满足潜器的机动性和水下续航力等要求,可以为全航程提供足够的能源,不受下潜深度和潜伏时间的限制;②固有安全性好,事故概率低、维修保养量小;③燃料的消耗量少,因此核燃料一次装料可使其在满功率下运行一年以上,中间不需要添加燃料。

可以预见到,在21世纪的海洋开发和利用上,水下小型核动力将会扮演很重要的角色。国际上海洋资源开发竞争越来越激烈,用于海洋开发的投入也越来越大,水下潜器和水下工作站的开发和利用将会有广泛的应用前景。

日本核能研究所设计研究的电功率为150 kW的深海DRX型反应堆,是一个用来提供水下动力源的小型核动力装置。它采用了一体化的设计,一个大的承压壳内包容了蒸汽轮机、蒸汽发生器以及反应堆容器,由此形成一个很紧凑的发电装置。这一装置容易操纵、固有安全性高、启动时间短、有较好的反应堆功率响应特性,在事故情况下有固有的堆芯淹没和衰变热导出特性。

DRX反应堆于1989年开始进行研究,开发这种反应堆的目的是将其装在如图1.1所示的小型潜器上。该潜器全长24.5 m、宽4.5 m、高6 m。设计条件是纵倾 30° 、横倾 15° ,最大下潜深度6 500 m。潜器上布置6个推进器,具有前进3.5 kn、升降1.5 kn、侧移1.5 kn等机动能力,可连续工作30天。该潜器的人员活动空间由5个相通的内径均为2.8 m的钛合金球型容器构成,可乘坐8人,其中包括一定数量的从事深海研究的科学家。核动力的输出电功率为150 kW。

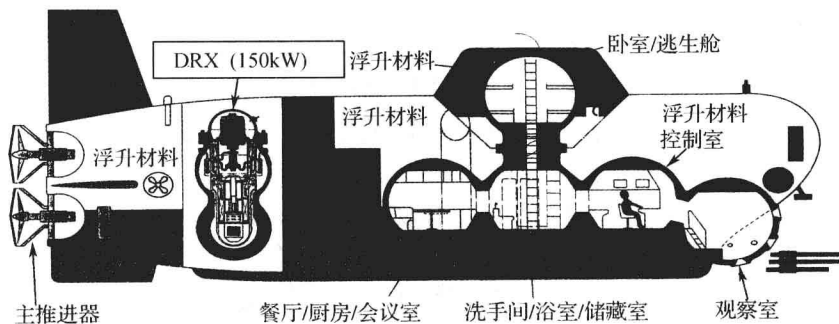


图 1.1 小型核动力潜器

这种小型潜器具有海底勘探、水下标本采集、水下电缆铺设等多种功能,如果用在军事上,可进行水下侦查、监控、布雷等多项作战任务。因此这种水下潜器在军事上和民用上都有很大

的开发和应用价值。

1.2.3 空间核动力反应堆

随着科学技术的发展,人类对太空深处探测的欲望越来越强烈。要完成远程太空探索必备的条件是:①要有长期有效的推进能量,即空间火箭推进技术;②长期的电能供应,即空间能源供应技术。这些要求对能源的可选择种类有很大限制,一般的常规能源很难满足以上的要求,从目前的能源技术发展水平看,无论是空间火箭推进技术,还是空间能源供应技术,比较现实可行的就是利用核能。

(1) 关于空间能源供应技术

人造卫星、宇宙飞船空间站等航天器的仪器设备的运行需要能源维持。目前在这些航天器上使用的常规能源有热能、化学能、光能和太阳能4种。随着人类对太空的不断开发和利用,需要的空间能源的功率越来越大,寿命越来越长,因此这些常规能源的功率和寿命受到限制,很难满足空间站长期工作的需要,而核能完全可以突破这些限制而担负起空间能源供应的使命。

(2) 关于空间火箭推进技术

核动力火箭的最大优点是体积小,使用时间长。从理论上说,一艘核动力飞船可以在外太阳系中航行10~15年。这样一颗探测器可以在木星、土星、天王星和海王星的大气中飞行数月,以获取大气组分等数据。核动力火箭的反应堆可以在远离地面后再启动,核动力探测器实际上可以做得比使用化学推进的探测器更安全,核反应堆既可以为这些探测器提供动力,还可以为各种仪器提供电源。这种反应堆产生的废料很少,一次深空探测总共只会产生1g左右的裂变产物,而且这些产物不会落到地面。核能空间推进技术目前仍处于研究和开发阶段,可望在10年内投入使用,核火箭发动机可能比这需要更长的时间。

1. 空间核反应堆能源技术

与热能、化学能、光能和太阳能等几种空间能源相比,空间核反应堆能源有以下优点:

- ①能满足和超过所有空间飞行的要求,既可以低功率长期供应能源,又可以短时间高功率供能;
- ②体积小、质量轻,特别是每千瓦功率的单位质量比大大小于其他种类的能源;
- ③与太阳能和光能源电池相比具有抗外界攻击的性能。

由于空间核动力装置的使用环境与陆上核动力装置的使用环境有很大差别,因此对空间核动力装置各方面的指标要求也有很大不同,其使用环境有以下特点:

①卫星在发射时,空间核动力装置要承受10g左右的加速度,同时还要产生很大的振动,此外由于进入轨道便进入失重状态,因此要注意反应堆内液体的状态变化及其他变化;

②在宇宙中,局部空间的温度是绝对零度,因此要使空间核动力装置运行,必须保持适当的温度;

③宇宙空间是高真空状态,在无填充气体的条件下,有机的电绝缘体可能发生汽化,使反