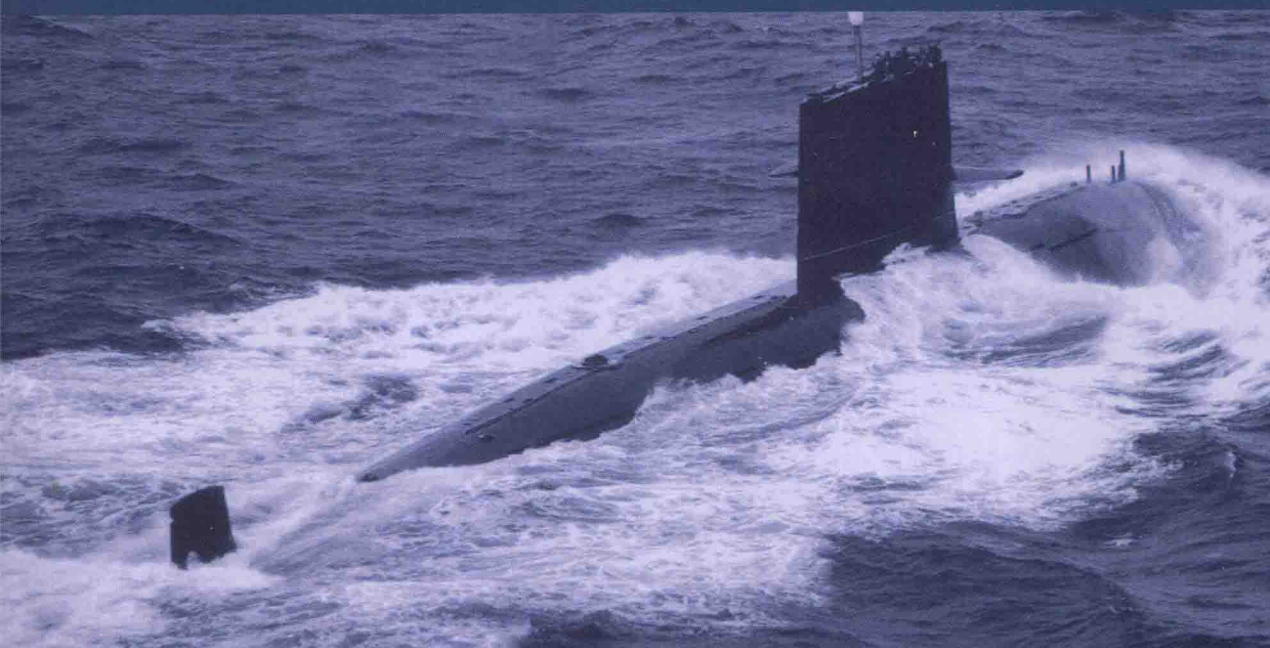


潜艇AIP装置

Submarine Air Independent
Power Plant

李大鹏 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

潜艇 AIP 装置

李大鹏 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书全面、系统、深入地研究和介绍了潜艇 AIP 装置,包括闭式循环柴油机装置、斯特林发动机装置、闭式循环汽轮机装置、基于燃料电池的电化学发电机装置和小型反应堆装置,以及潜艇使用条件下燃料和氧化剂的制备、装载和加注,并展示了 AIP 潜艇在潜艇和动力装置设计、隐蔽性等领域的最新研究成果。书中收集和整理了大量国外公开发表的潜艇动力装置数据、图表和曲线,对于潜艇 AIP 装置的研究、设计与使用具有较高的参考价值。

本书取材广泛,内容丰富、详实、新颖,使用性强,可供从事研究、设计、制造潜艇 AIP 装置的科技人员使用和参考,也适用于高等院校相关专业,如动力工程及工程热物理、轮机工程、能源科学与技术、船舶与海洋工程、核能科学与工程等专业的研究生和高年级本科生阅读,并作为教材使用。

图书在版编目(CIP)数据

潜艇 AIP 装置/李大鹏编著. —北京:国防工业出版社,2015.2

ISBN 978-7-118-09787-0

I. ①潜… II. ①李… III. ①潜艇—动力装置
IV. ①U674.76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 016695 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)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 25 字数 610 千字

2015 年 2 月第 1 次印刷 定价 180.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776
发行业务:(010)88540717

前 言

隐蔽性是潜艇最重要的战斗性能。军用潜艇应具备很弱的物理场特征,能以极低噪声在水下长时间航行。动力装置是潜艇主要的物理场特征源之一,潜艇战斗性能的高低在很大程度上取决于潜艇动力装置综合性能的优劣。一般来说,现有的潜艇动力装置可分为以下几种:核动力装置、柴-电动力装置、化学发电装置、蓄电池和各种闭式循环热力发动机装置。

为扩大军用潜艇活动半径、延长潜航时间及提高隐蔽性,世界主要的潜艇建造国家纷纷研究开发了潜艇水下航行时不依赖外界空气供给的动力装置,缩写简称“AIP(Air Independent Power Plant)装置”。采用 AIP 装置的非核动力潜艇简称“AIP 潜艇”。从不间断水下续航力来讲,AIP 潜艇一般介于常规柴-电动力潜艇与核动力潜艇之间。

AIP 装置的应用是非核动力潜艇发展史上的一次“动力革命”。经过长期发展,AIP 装置已具备了实艇使用条件,积累了大量的运行经验,非核动力潜艇在潜艇发展史上具备了远超出常规柴-电动力潜艇的不间断水下续航能力,使得诞生了百余年的常规柴-电动力潜艇又一次焕发了生机。

在不间断水下续航力性能上,没有一种非核动力潜艇能与核动力潜艇相比。核动力潜艇是真正意义上的 AIP 潜艇。核动力潜艇在水下低噪声航速、水下经济航速、水下最大航速、最大下潜深度、不间断水下续航力以及自持力等指标上都远远超过非核动力潜艇。近 30 年来,核动力潜艇在减噪降噪方面取得了较大进步,水下低噪声航速得到大幅提高,在与非核动力潜艇对抗中全面处于上风。美国新一代“弗吉尼亚”级多用途核动力潜艇最大水下低噪声航速达到 15kn,这已经大大超过了现在非核动力潜艇的最大水下低噪声航速,且与非核动力潜艇的水下最大航速已经相差不大。

核动力潜艇隐蔽性能的提高大大压缩了非核动力潜艇的使用空间。但现代化核动力潜艇存在着技术要求高、造价惊人、战斗使用和维修保养费用高、退役后销毁难度大等缺点,建造还涉及到国际上复杂的地缘政治关系,拥有核动力潜艇对于许多国家并非易事。另外,在一些特定海区,如峡湾和浅水海域,执行诸如布雷、人员输送等任务,非核动力潜艇具有较高的战斗效率和军事经济性。

现代非核动力潜艇具有较高隐蔽性、相对低的建造和使用费用,可以方便地加入不同国家海军舰队的各种编制。但当其水下航行时,由于蓄电池组电能储备有限,需要间断性上浮。在通气管航行状态下,利用柴油发电机组对蓄电池组充电。这是常规柴-电动力潜艇最容易暴露的时刻,也是其最致命的弱点之一。因此,增大常规柴-电动力潜艇的不间断水下续航力、减小潜艇在通气管航行状态的暴露概率及提高隐蔽性,一直是常规柴-电动力潜艇设计和使用的努力方向。

一些国家由于各种原因不能或不愿建造核动力潜艇,如德国、日本和瑞典等国,只建造柴-电动力潜艇,这就要求所建造的常规柴-电动力潜艇即使不能在所有战术-技术性能参数上达到核动力潜艇的水平,也要相当接近才有竞争力。因此,世界上潜艇设计师们的关注焦点都转向了 AIP 装置。第 4 代非核动力潜艇上基本都采用了 AIP 装置作为辅助动力装置。目前,一些

先进潜艇国家已经开始研发第5代非核动力潜艇,而第5代非核动力潜艇最大的特点是潜艇水面和水下航行状态都采用单一全工况发动机,这表明AIP装置已经充当了潜艇主动力装置,并且是潜艇唯一的动力装置。

近年来,越来越多的国家采购了安装有AIP装置的非核动力潜艇,或者对现役非核动力潜艇嵌入AIP装置舱段进行现代化改装,使潜艇作战性能得到了明显提高。同时,AIP技术对于世界各国非核动力潜艇的发展战略也产生了不可低估的影响。AIP技术已经成为发展各国水下力量的关键技术。如何定位潜艇AIP技术及如何确定本国潜艇AIP技术发展模式,日益引起了许多国家的重视和思考。

目前使用的AIP装置主要包括闭式循环柴油机(Closed Cycle Diesel Engine,CCDE)、斯特林发动机(Stirling Engine,SE)、闭式循环蒸汽轮机(Module d' Energie Sous - Marine Autonome, MESMA)与基于燃料电池(Fuel Cell,FC)的电化学发电机。德国、瑞典、法国、俄罗斯等国在AIP装置制造和使用方面取得了大量的经验,使用微型核反应堆的核电推进系统也自成体系。

潜艇AIP装置主要分为两大类:热机AIP装置和电化学AIP装置。热机AIP装置包括闭式循环柴油机(CCD)、斯特林发动机(SE)、闭式循环蒸汽轮机(MESMA)、核电混合推进系统(SSN)等;电化学AIP装置使用聚合物电解质膜燃料电池、碱性燃料电池、质子交换膜燃料电池等。

目前,技术较为成熟并已在实艇上装备的AIP装置主要是斯特林发动机、闭式循环蒸汽轮机装置、电化学发电机装置和闭式循环柴油机装置。采用闭式循环柴油机装置的国家有俄罗斯、德国、荷兰、英国和意大利;采用斯特林发动机的有瑞典、日本、韩国;采用闭式循环蒸汽轮机装置的有法国;采用电化学发电机装置的有德国、俄罗斯。这些国家在AIP装置设计、制造和使用上都积累了极为丰富的经验,取得了毋庸置疑的成功。

为应对迅猛发展的探潜、攻潜技术给潜艇带来的日益增大的威胁,世界上主要潜艇国家都在加快先进核动力潜艇和AIP潜艇的发展。AIP潜艇通常比核动力潜艇造价低很多,但不间断水下航行时间长、武器搭载种类丰富。一般认为,对于排水量在1000~3000t之间的潜艇,AIP装置是首选;更大排水量的潜艇,应优选核动力装置。AIP潜艇的造价是绝大多数潜艇国家都可以承受的。

目前,从非核动力潜艇的发展上可以勾画出两个方向。首先是对传统的柴-电动力潜艇进行现代化改造。技术方案包括采用低噪声固定节距的轴系、单桨主推进直流电动机、大功率整流器等,柴油发电机装置采用转速在1200~1800r/min、功率在700~1500kW的高速柴油机,直流或交流电机功率和效率的提高、具有高比功率的新型蓄电池的应用(如银锌电池、钠硫电池、镍镉电池、镍锌电池、金属空气电池等)以及高温超导技术的实用化都将对非核动力潜艇的发展起到推动作用。

第二个方向是AIP装置的现代化改进。闭式循环柴油机装置与其他类型AIP装置相比,具有最少的研制和生产费用及较小的重量-尺寸指标。闭式循环蒸汽轮机或燃气轮机装置可以使用固体、液体燃料以及其他热源;斯特林发动机为低噪声发动机,可使用外部热源,既能充当主推进发动机,又能作为蓄电池充电;电化学发电机装置相当于静态电流源,与蓄电池组类似,但容量大得多。只有提高AIP装置功率、可靠性和使用寿命,降低其造价,才能满足未来非核动力潜艇动力装置的要求。

在世界上现役非核动力潜艇中,公认采用氢氧燃料电池电化学发电机作为辅助动力装置的德国U-212级及其出口型U-214级潜艇在技战指标上最为先进。AIP装置采用燃料电池的

主要技术问题在于制造简单、可靠和安全的储存、制备和输送氢系统。氢燃点高,但燃烧热值不大。以氢作为热力发动机燃料不经济。氢氧燃料电池可借助电化学反应将氢的化学能转化为电能,反应产物水可直接使用。氢作为燃料应用的限制,主要体现在氢的储存和制备上。目前储氢方法有加压气瓶储存、反应容器中低温储存、与液态金属结合的固态储存、低温下的吸附储存、液体介质中以化学结合状态储存、微气囊储存、使用泡沫金属和沸石的气态储存以及复合系统储存等。比较储氢方案有效性时不能脱离使用要求,要考虑储氢系统的工作状态、尺寸、氢纯度、使用安全性和其他许多因素。最后指出,尽管氢是太阳系中分布最为广泛的元素,但地球上氢原子是以与其他化学元素结合的形式存在的,提取氢需要消耗大量能量。因此,与其说氢是能量来源,不如说它是良好的能量载体。氢作为广泛使用的能源前景还很遥远,但在特殊用途水下设备和航天飞行器中,氢目前还是不二的选择。

AIP 潜艇的造价比普通柴—电动力潜艇要高出许多,而且这种潜艇将主要用于近海而不是大洋水域。在近海海区,先进的常规柴—电动力潜艇也能保证战斗效率,但 AIP 潜艇的战斗效率至少要高出一倍。20 世纪 90 年代中期,由俄罗斯克雷洛夫中央研究院进行的计算表明,采用电化学发电机装置的 AIP 潜艇不间断水下续航能力是普通柴—电动力潜艇的 5.5 倍。在近海海区,从经费比指标上看,AIP 潜艇具有较大优势。2003 年,北约于大西洋水域举行的两次演习中,安装有斯特林发动机 AIP 装置的瑞典海军“哈兰特”号潜艇在与一艘西班牙海军传统柴—电动力潜艇对抗中轻松获胜,然后又战胜了一艘法国核动力潜艇。此后,在地中海举行的一次演习中,该艇在与美国“休斯顿”号核动力潜艇对抗中也占据了上风。

对非核动力潜艇来说,在向巡逻区域航渡过程中,为了减少利用通气管航行的时间,通常选择使用中等航速来完成航渡。之所以不使用高速航渡的另外一个原因,是为了把随航速提高而增加的噪声等级降低。当潜艇到达巡逻区域后,为了增加巡逻时间,保证艇上声纳探测的灵敏度,并防止潜艇被敌人各种反潜探测手段发现,潜艇通常以低速航行。从世界各国常规柴—电动力潜艇运行的统计数据来看,一艘常规柴—电动力潜艇在它全部航行过程中,大约有 80% 的时间处于低速和中速航行状态。对于 AIP 潜艇来说,中速和低速航行所需要的功率恰好处于潜艇 AIP 装置额定功率的中间范围。因此,AIP 装置的运行工况可以与常规柴—电动力潜艇水下航行的各种工况良好匹配。

核动力潜艇运行经验表明,为在危急时刻完成快速部署,并作为最有效的反潜武器,潜艇具有较高的最大水下航速至关重要。美国现役核动力潜艇最大水下航速都超过 30kn。1982 年马岛战争期间,英国皇家海军快速部署其 3 艘核动力潜艇时的平均航速为 23kn,远超目前任何 AIP 潜艇航渡航速。不过人们有理由相信,随着 AIP 技术的发展,AIP 装置的输出功率将会得到大幅度提升,AIP 潜艇的水下航速和续航力也会提高。从当前 AIP 技术的现状来看,AIP 潜艇达到 10kn 的“平衡航速”已经被普遍认为可以在近期内实现,并且在不远的将来,AIP 潜艇将具有 15kn 的“平衡航速”。

目前,距离全 AIP 动力潜艇还有一段距离,各种类型 AIP 装置的输出功率普遍不高,主要是用作辅助动力装置,不具备足够的能量密度以满足潜艇水下长时间高速航行的需要。随着研究进度的加快,不久的将来,将会出现采用单一全工况(水面和水下航行状态)发动机的第 5 代非核动力潜艇。从目前趋势看,斯特林发动机将战胜单位功率造价高、机组总功率增大受限的电化学发电机装置,成为第 5 代非核动力潜艇最有希望采用的动力。

近年来出现了一种设计思想,是在核动力潜艇上采用 AIP 装置作为辅助或应急动力装置。根据美国海军专家的观点,对于现代多用途核动力潜艇和弹道导弹核动力潜艇,传统的备用推

进装置,如几百马力功率的备用推进电机,带动艏部两舷侧浸入式涵道内的螺旋桨作为应急推进,或者采用汽轮发电机、柴油发电机发电经交直流转换供电,或者使用蓄电池电能带动主推进直流电机作为应急推进装置,这些方案已经不能够满足备用推进的要求,尤其是当核动力潜艇处于冰下航行状态时,这对于美俄两国海军同等重要。如果使用 AIP 装置,可以简单地解决在反应堆故障和其他极端情况下的问题,保证反应堆的安全性。

国外经验表明,对常规柴-电动力潜艇进行 AIP 改装,升级为 AIP 潜艇是简单、快速且经济的技术方案。一种现实可行的改装方案是在潜艇中部嵌入 AIP 辅助动力装置舱段,这样在不显著增大潜艇排水量、最大水下航速略有降低的条件下,可以不消耗蓄电池电能,成倍地提高潜艇在低噪声状态下的不间断水下续航力。法国、瑞典、德国、俄罗斯都有这样的商品化 AIP 舱段推向市场。

尽管以航母战斗群为代表的美国海上力量拥有世界上最先进的探潜和攻潜手段,但依然对其海上优势存在忧患意识。2003 年 5 月,美国海军出台的《增强反潜作战能力》报告认为,潜在对手的非核动力潜艇数量不断增多,俄中等国建造的低噪声非核动力潜艇已对美国海军构成了一定的威胁。美国海军与日本海上自卫队频繁进行反潜联合演习,利用日本先进的非核动力潜艇提升美国海军反潜能力。美国海军尽管只拥有核动力潜艇,但最近几年高度重视与外国先进非核动力潜艇的合练,拿外国先进非核动力潜艇当“陪练”,已成为美国海军对付亚太地区国家非核动力潜艇的“战术”。2004 年 6—7 月,以美国为首的 8 个国家在夏威夷周边海域举行了第 19 次“环太平洋”联合军演,与以往历次联合军演不同的是,此次十分突出反潜作战演练。美国国防部官员称,这是在亚太地区非核动力潜艇数量增多的背景下做出的选择。联合军演中,美国海军要求参演国增加 P-3C 反潜机的出动架次,并且出动了“斯坦尼斯”号航空母舰与 7 艘核动力潜艇参加反潜演练,反潜兵力大大强于历次军演。对于增强此次军演反潜作战力度的目的,美国海军太平洋舰队表示:“冷战时期的深海反潜经验已经无法应付今天的事态了,而且太平洋地区国家的潜艇数量正在增多。”“此次反潜演练,我们将改变以往只重视深海反潜作战的做法,同时加强 300m 水深浅海海域反潜作战演练。”

为了加强反潜作战,2004 年 4 月,美国海军太平洋舰队在西海岸的圣迭戈海军基地成立了负责反潜作战协调与组织的反潜作战司令部。这一新的作战司令部使命包括集成先进的反潜作战网络、建立反潜作战条令、探索作战概念、负责反潜战训练,并辅助海军领导人制定反潜战策略,确保美军与其盟军安全进出战区。同时,为了加强反潜作战,美国海军研制和开始部署 P-8 新一代反潜机。据法新社报道,美国海军同波音公司签署了一份金额为 39 亿美元的合同,研制用于海上监视的新型 P-8 反潜机,并最终取代 P-3 反潜机 P-8。新型反潜机采用图像匹配技术跟踪移动目标,具有“发现即摧毁”的能力,将为美国海军利用电子传感器发展“水下共同网络”起到关键性作用。

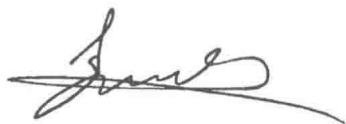
近年来,AIP 潜艇数量不断增大,针对 AIP 潜艇的对抗演练也在增多。2009 年 8 月,意大利海军 U-212A 级 AIP 潜艇“Scire”号(舷号 S527)前往美国梅波特海军潜艇基地,以假想敌身份同美国海军的“杜鲁门”航母打击群一起参加联合特遣部队演习(JTFX)。演习目的是提升航母打击群的海上危机应急反应能力,同时也为航母打击群在海外部署做准备。2008 年 8 月,该艇的姊妹艇“萨尔瓦多·托达罗”号参加了“罗斯福”号航母打击群在诺福克海军基地举行的同类演习。此前,为加强针对性,美国甚至从瑞典租借了“哥特兰”级 AIP 潜艇用于训练,租借时间长达一年。

在美国海军术语中,常见的“浅水海域”是指水深在 200m 以内的沿岸海域。目前人类在海

洋中的各种主要经济活动和对海洋的各项开发利用主要集中在这一海域,也是已有和未来海上冲突发生最为频繁的海域。中国是一个海域辽阔、岛屿众多、海岸线漫长的国家。按照《联合国海洋法》公约而成为中国海洋国土,其中包括专属经济区和大陆架的海域约为 300 万 km^2 。中国沿海一线有近万个大小岛屿,中国有 1.8 万 km 的大陆海岸线,沿海岸线的陆上区域是中国东南部沿海地区,这些地区是中国的政治、经济、文化和军事核心地区,也是中国国家实力的精华所在,但同时也是中国存在严重国家安全隐患的地区,是未来潜在军事冲突可能爆发的地区之一。

未来军事冲突可能以中国周边的浅水海域为首要和主要战场。渤海平均水深 18m,海域面积 7.7 万 km^2 ;黄海平均水深 44m,海域面积 38 万 km^2 ;南海平均水深 1200m,海域面积 350 万 km^2 ;西沙和南沙群岛均为珊瑚礁岛屿,是南海的水下浅滩地区;台湾海峡平均水深 100m,台湾东岸有一个坡度相对平缓的浅水海域。当危机爆发时,中国海军主要作战海域将是中国周边的浅水海域。在这些浅水海域,AIP 潜艇作战效率高于传统常规柴-电动力潜艇,接近于核动力潜艇。

在未来相当长的时间内,中国海军的主要作战方向将是有效控制第一、二岛链内外。目前,所有与中国有关的、涉及战争与和平的问题和争端都集中在中国近海。可以说,与空军一样,海军是目前中国武装力量中最接近战场前沿的军种,对国家安全具有决定性的作用 and 意义。中国海军潜艇部队的兵力构成应为“高低搭配”,大力发展先进的多用途核动力潜艇、弹道导弹核动力潜艇和 AIP 潜艇。充分利用各种资源,走技术创新之路,加快推进新军事变革,拥有在局部占据绝对优势的“海上杀手锏”,是致力于现代化建设和处于新军事变革中的中国海军的当务之急。



初稿 完成于 库兹涅佐夫海军学院

俄罗斯 圣彼得堡 小黑河

终稿 完成于 海军工程大学

湖北 武汉 二〇一四年十一月

目 录

第 1 章 AIP 潜艇	1
1.1 非核动力潜艇的现代发展	1
1.2 潜艇 AIP 装置发展历史	8
1.3 世界各国 AIP 潜艇发展战略	17
1.4 现代 AIP 潜艇	21
1.5 潜艇 AIP 装置的选择	33
1.6 潜艇 AIP 装置性能评价与 AIP 潜艇军事 - 经济分析	41
第 2 章 闭式循环柴油机 AIP 装置	45
2.1 闭式循环柴油机装置及其在潜艇上的应用	45
2.2 人造气体混合物	63
2.3 低温储存氧和二氧化碳冷冻	66
2.4 气体回路数学建模	69
2.5 人造气体混合物的组成	71
2.6 人造气体混合物中氧气浓度	72
2.7 人造气体混合物湿度	74
2.8 柴油机和主要单元的工作过程参数与性能指标	76
2.9 使用人造气体混合物的柴油机实验研究	80
2.10 使用人造气体混合物的柴油机计算研究	83
2.11 废气净化和二氧化碳冷冻	84
2.12 燃料和氧化剂低温储存	87
第 3 章 斯特林发动机 AIP 装置	89
3.1 斯特林发动机及其在潜艇动力装置上应用	89
3.2 斯特林发动机工作原理与结构	96
3.3 工质的选择	101
3.4 工质热物理性质	106
3.5 工质安全性	107
3.6 燃料和氧化剂	109
3.7 气缸材料	109
3.8 斯特林发动机水下动力装置	109
3.9 飞利浦公司斯特林发动机	114

3.10	通用动力公司斯特林发动机	125
3.11	MAN/MWM 公司斯特林发动机	133
3.12	尤纳德·斯特林公司斯特林发动机	139
3.13	考库姆公司 V4-275 型	146
3.14	斯特林发动机换热器	150
3.15	回热器	153
3.16	温度分布和热平衡	158
3.17	工质流动不稳定	159
3.18	主要参数	161
3.19	气缸热计算	164
3.20	燃料和氧化剂装量	165
3.21	斯特林发动机调节	167
3.22	斯特林潜艇	177
第 4 章	汽轮机 AIP 装置	181
4.1	汽轮机 AIP 装置在潜艇动力装置上应用	181
4.2	MESMA 装置	189
4.3	阿戈斯塔-90B 和鲉鱼级潜艇	190
4.4	闭式循环汽轮机 AIP 装置	193
第 5 章	电化学发电机 AIP 装置	197
5.1	电化学发电机 AIP 装置在潜艇上应用	197
5.2	燃料电池	205
5.3	基于燃料电池的电化学发电机	217
5.4	燃料电池的化学动力学基础	222
5.5	电化学发电机 AIP 装置	224
5.6	电化学发电机重量尺寸计算	243
5.7	潜艇电化学发电机 AIP 装置设计	245
5.8	潜艇用燃料电池的选择	250
第 6 章	电化学发电机-热机联合 AIP 装置	255
6.1	电化学发电机-热机联合 AIP 装置的构成	255
6.2	联合 AIP 装置中燃气轮机重量尺寸指标评估	256
6.3	联合 AIP 装置的性能比较	259
第 7 章	潜艇电化学发电机 AIP 装置反应物的储存与制备	261
7.1	潜艇电化学发电机 AIP 装置反应物的选择	261
7.2	氢的气瓶储存	261
7.3	氢的低温储存	264
7.4	微气囊储氢	267

7.5	甲醇重整制氢	274
7.6	氨离解制氢	277
7.7	金属互化物热离解制氢	277
7.8	金属氢化物水解制氢	287
7.9	水反应金属制氢	288
7.10	天然气的蒸汽转换制氢	289
7.11	煤炭的蒸汽重整制氢	290
7.12	水的热化学分解制氢	291
7.13	电解水制氢	292
7.14	储氢量	294
7.15	氧的储存与制备	295
7.16	反应物储存与制备系统的技术 - 经济分析	298
第 8 章 AIP 潜艇隐蔽性		302
8.1	潜艇隐蔽性	302
8.2	潜艇噪声	304
8.3	制氢器中蒸汽 - 氢气气泡生长过程噪声	308
8.4	蒸汽 - 氢气气泡融合的声能辐射特性	311
8.5	蒸汽 - 氢气气泡脱离的声能辐射特性	313
8.6	蒸汽 - 气体乳状液中声波传播速度	314
8.7	电化学发电机装置潜艇化学场	315
8.8	电化学发电机装置防爆系统	319
8.9	AIP 潜艇废气处理	322
第 9 章 使用氢燃料 AIP 潜艇的岸上充注设施		329
9.1	水电解槽	329
9.2	固体聚合物电解质水电解	331
9.3	固体聚合物电解质水电解槽实验研究	338
9.4	反应物岸上制备	343
9.5	核反应堆 + 水电解槽岸上充注设施	347
第 10 章 小型反应堆潜艇动力装置		349
10.1	小型反应堆在潜艇动力装置上的应用	349
10.2	AMPS 小型反应堆潜艇辅助动力装置	352
第 11 章 AIP 潜艇设计		359
11.1	动力装置质量和功率估算	359
11.2	轴系推进系统	360
11.3	潜艇排水量	362
11.4	参数变化对潜艇负载影响	364

11.5	潜艇体积方程	365
11.6	军事 - 经济分析	367
11.7	战斗效率分析	370
11.8	技术 - 经济评估	372
11.9	潜艇 AIP 改装	375
11.10	潜艇 AIP 动力装置的选择	376
参考文献		379

第 1 章 AIP 潜艇

1.1 非核动力潜艇的现代发展

截至 2008 年 10 月,世界上有 47 个国家和地区拥有潜艇,在役潜艇 419 艘,其中,核动力潜艇 141 艘。20 世纪百年内,世界主要潜艇国家建造的潜艇数量如表 1-1 所列。

表 1-1 主要潜艇国家在 20 世纪建造的潜艇数量

国别	潜艇(核动力潜艇)总数/艘	占建造总数/%
德国	1705	33.1
俄罗斯(苏联)	1096(241)	21.4
美国	640(182)	12.5
英国	578(24)	11.2
日本	263	5.1
意大利	256	5.0
法国	232(12)	4.5
其他国家	372	7.2
合计	5142(456)	100

20 世纪 80 年代,以美苏两个超级大国为首,各国开始发展第 4 代核动力潜艇。第 4 代核动力潜艇充分体现了人类在核能科学与技术、流体力学、武器、材料、舰船物理场、水声、自动化控制与操纵、通信等领域取得的成就,其中包括:美国的“海狼”级(1997 年)和“弗吉尼亚”级(2004 年),俄罗斯的“亚森”级(2010 年)和“北风之神”级(2008),法国的“梭鱼”级(2007 年),英国的“机敏”级(2009 年)。

非核动力潜艇扮演的不仅是战术角色,也能执行战略任务。当今,不仅海洋大国,甚至一些海洋小国,也拥有非核动力潜艇。非核动力潜艇具有能够给强大敌人造成不可承受损失的能力。

20 世纪 90 年代,德国、法国、瑞典和俄罗斯开始发展第 4 代非核动力潜艇(自 20 世纪 90 年代初,“常规柴-电潜艇”或“常规柴-电动力潜艇”这一专属名词更多地被“非核动力潜艇”所取代)。这些国家建造的非核动力潜艇,也是目前世界武器市场上的激烈竞争对手。

在世界武器市场上,非核动力潜艇是利润非常高、市场容量相当大的武器系统。据预测,随着各国非核动力潜艇服役年限逐渐期满,世界非核动力潜艇市场容量将在 2010—2020 年达到增长高峰,因为届时许多国家老化过时的第 3 代非核动力潜艇将会大规模退役。

20 世纪 60—80 年代,非核动力潜艇一直处于核动力潜艇技术优势阴影的笼罩之下。美国拒绝发展常规柴-电动力潜艇(特殊用途的常规柴-电动力潜艇和深海航行器除外),自 20 世纪 50 年代起,只由自己的北约盟友发展常规柴-电动力潜艇。

苏联与美国不同,苏联不仅大力发展大洋级核动力潜艇,还致力于开发在濒海海域执行任务的非核动力潜艇。苏联的潜艇发展战略是由其海洋国土特点决定的。苏联海军出入大洋的波罗的海和黑海周边国家众多,且都是非核国家,这些国家大都具有常规柴-电动力潜艇的研发、建造能力和军事基础设施。因此,苏联海军水下力量的发展战略,首先是大力发展核动力潜艇,其次是发展常规柴-电动力潜艇。苏联解体前,苏联海军拥有世界上最强大、数量和型号最多的核动力和非核动力潜艇。

潜艇建造是高科技知识密集型产业,需要雄厚配套的工业技术基础和造船基地,其开发和保障都需巨大的人力、物力投入。潜艇的生产称为“建造”,而不是像其他工业产品一样称为“制造”。

随着潜艇建造技术的发展,非核动力潜艇愈发呈现出知识密集化、技术专业化、设备和基础设施投入大、造价高的发展态势,同时能够自主建造非核动力潜艇国家的名单也在不断缩减。

20 世纪 50—60 年代,世界上几乎所有发达国家都能建造柴-电动力潜艇。以欧洲为例,能够建造柴-电动力潜艇的国家包括俄罗斯、英国、荷兰、西班牙、东德、意大利、法国、瑞典。到了 20 世纪 90 年代,欧洲的“非核动力潜艇建造国家俱乐部”中就只剩下俄罗斯、德国、法国和瑞典了,其他国家或者选择从国外直接购买,或者购买许可证在本国组装建造。

随着潜艇技术的迅猛发展,潜艇成为了最有效的海军武器之一。如果在 20 世纪 50—60 年代,潜艇建造主要体现在对美制和苏制潜艇的仿造和改进上,那么到了 70 年代,英国、法国、德国、日本的潜艇建造厂家先后加入了先进潜艇建造国家的行列。

例如,德国 U-205 级、U-209 级潜艇及其大量改进型号在世界潜艇市场上取得了巨大成功,其中,U-209 级潜艇的销售表现最为抢眼。1970—2000 年,在 14 个国家有 63 艘不同改进型号的 U-209 级潜艇服役。购买德国许可证组装生产的国家包括阿根廷、巴西、印度、土耳其、韩国等。

法国在 1974—2006 年建造了 13 艘“阿戈斯塔”级潜艇,其中 4 艘属于本国海军,4 艘属于西班牙海军,5 艘属于巴基斯坦海军。在亚洲国家中,虽然日本存在着武器出口禁令,但仍积极地为其海上自卫队建造了第 2 代和第 3 代大洋级柴-电动力潜艇。日本建造的柴-电动力潜艇普遍吨位较大,排水量在 $2500 \sim 2800 \text{m}^3$ 。

第 2、第 3、第 4 代柴-电动力潜艇的发展与核动力潜艇并肩而行,体现在隐蔽性提高、下潜深度增大、自持力提高、自动化操纵与控制完善、导航通信及武备系统现代化。20 世纪 70 年代,柴-电动力潜艇的需求恢复增长,潜艇 AIP 装置重新引发了各国的兴趣。这时的潜艇 AIP 装置,主要用作辅助动力装置,可将潜艇低航速水下不间断续航力提高 2~3 倍。

要指出的是,1940—1950 年期间,苏联、美国和英国在潜艇 AIP 装置方面进行了积极的尝试,但当核动力潜艇出现后,他们对 AIP 装置的兴趣大减。之所以柴-电动力潜艇在核能广泛应用的时代仍能体现出价值,主要因为其造价比核动力潜艇低许多。同时,核动力潜艇技术水平不尽如人意,如可靠性、隐蔽性和战备水平不高。

1996—1997 年,瑞典海军服役了 3 艘“霍兰”级潜艇。“霍兰”级潜艇属于第“3+”代非核动力潜艇,排水量 1300(水面)/1600(水下) m^3 ,长 60.4m,为第 3 代“西哥特兰”级柴-电动力潜艇的改进型。

“霍兰”级潜艇的水下噪声水平有所降低,具有先进的无线电电子设备和武器,其突出特点在于装备了斯特林发动机 AIP 装置。之后,每艘瑞典海军的“哥特兰”级潜艇都安装了 75kW 功率斯特林发动机。瑞典是世界上首先在自己的柴-电动力潜艇上全部安装斯特林发动机 AIP

装置的国家。

虽然斯特林发动机 AIP 装置可以保证潜艇在 2.5kn 水下航速下的自持力达到 20 昼夜,使用蓄电池组时的水下最大航速达到 20kn,但也存在缺点,表现为柴油机效率较低、潜艇噪声水平较高、尾迹增强、下潜深度减小(后者影响并不十分重要,因为瑞典海军潜艇主要的活动海域——波罗的海,其水文条件决定了潜艇的工作深度为 150m)。

澳大利亚和日本都购买了瑞典斯特林发动机,对自己的柴-电力潜艇进行现代化改装。2005 年,美国海军租赁了一艘“哥特兰”级潜艇。据报道,美国海军意图用其研究对抗中国 AIP 潜艇的战术。不能排除,美国希望利用欧洲的技术重返非常有前景的世界非核动力潜艇市场。这一时期,日本购买了瑞典的斯特林发动机,瑞典开始研制建造使用斯特林发动机的新型潜艇。

1994 年,德国签订了采购 4 艘 U-212 级第 4 代非核动力潜艇合同。该级潜艇的建造利用了德国自 20 世纪 70 年代开始在潜艇 AIP 装置领域的研究成果和使用经验。

20 世纪 90 年代初期,经过在德国海军 U-1 型潜艇(U-205 级)上的大量实验和长期使用,德国海军选择了电化学发电机装置作为潜艇 AIP 装置方案。相比其他类型的 AIP 装置,电化学发电机 AIP 装置具有系列优点,如相对较高的效率、对氧需求量较小、放热量低、唯一的反应产物为水等,但最大技术难点在于艇上氢的储存和制备。德国专家使用金属氢化物储氢。该储氢方法需要复杂昂贵的岸上充注设施,这极大限制了这种 AIP 装置的应用。

1996 年,德国 U-212 级潜艇建造计划和意大利海军潜艇建造计划联合,建造 U-212A 级潜艇。U-212 级首艇 U-31 和次艇 U-32 分别于 2002 年和 2005 年下水,这样德国海军就自 1969 年以来首次接收了新型潜艇,并于 2006 年又接收了两艘同型号潜艇。

意大利海军两艘 U-212A 级潜艇分别于 2009 年和 2010 年服役。和德国同型号潜艇相比,艇体结构和设备上的区别不大。由于在意大利建造,考虑到了意大利制造商的生产能力和利润状况。希腊船厂为希腊海军建造了两艘作为 U-212 出口型的 U-214 级潜艇,潜艇长度增加到 65m,水面排水量为 1600m³,安装有电化学发电机 AIP 装置,首艇 2004 年下水。韩国于 2000 年签署了在本国建造 3 艘 U-214 级潜艇合同。土耳其订购了 6 艘 U-214 潜艇,巴西和南非也有采购意愿。

与其前几代相比,德国第 4 代非核动力潜艇艇体形状有所不同。主要表现为具有高度流线形,这种艇型是以往德国潜艇未曾采用过的;容纳可伸出设备的舰桥轮廓平滑,类似飞机形状;与舰桥相连的水平舵让人想起了苏联具有“轿车”形状舰桥的第 2 代和第 3 代核动力潜艇,类似舰桥也可以在将于 21 世纪 20 年代取代“弗吉尼亚”级多用途核动力潜艇的美国下一代核动力潜艇上看到。

U-212 级潜艇水面排水量为 1450m³,水下排水量为 1830m³,采用“一个半”耐压壳体结构,这是电化学发电机装置布置所要求的。另外,采用了潜艇上很少见到的 X 形尾舵,这种尾舵在以前希腊建造的第 3 代非核动力潜艇上也曾见到过。潜艇耐压壳体采用低磁钢制造,非耐压壳体和舰桥围罩采用玻璃钢制造。

U-212 潜艇上装备有传统柴-电力装置和电化学发电机辅助动力装置。轴系推进电机功率为 3875hp,带动 7 叶低噪声镰刀形螺旋桨。电化学发电机装置功率为 306kW,包括 10 台单台功率为 34kW 的电化学发电机,可保证潜艇水下最大航速为 8kn,巡航航速为 3kn。根据厂家介绍,可不间断水下航行 14 昼夜,航行距离为 1700 海里。使用柴油机时的巡航速度为 8kn,航行距离为 8000 海里。使用蓄电池组能以 4kn 速度航行 420 海里。

U-212 和 U-212A 潜艇的长度均为 55.9m,最大水下航速为 17kn,有些资料称 20kn。最

大下潜深度为 300m, 自持力 30 昼夜。潜艇武器为 533mm 鱼雷发射管, 备雷 12 条。希腊海军潜艇使用的是最新型的 DM2A4 型电动鱼雷, 最大水下速度为 50kn, 航程在 20km 左右。艇员 27 人, 自动化水平很高。单艘 U-214 潜艇造价在 3~3.5 亿欧元。

U-212/U-214 潜艇的竞争对手是法国 DCNS 公司和意大利 ISAR 公司共同研制的“鲉鱼”级潜艇。“鲉鱼”级潜艇是第 3 代非核动力潜艇“阿戈斯塔”级的改进型。“鲉鱼”级潜艇上广泛吸取了法国核动力潜艇(主要是“卢比斯”级小型核动力潜艇)的设计和使用经验。“鲉鱼”级潜艇共有 3 个型号, 可根据用户需求和经济实力进行选择, 包括基本型(传统的柴-电动力潜艇)、AIP 型和 AIP 紧凑型(AIP 装置功率略小)。“鲉鱼”级潜艇完全是为出口而设计的。

“鲉鱼”级基本型的标准排水量为 1550t, 长为 66.4m。最大水下航速为 20kn, 下潜深度为 300m。使用蓄电池组, 潜艇可以巡航速度水下航行 500 海里。AIP 型“鲉鱼”级潜艇长度增大到 76.2m, 排水量增加到 1770t, 使用 AIP 装置, 可以 4kn 水下航速航行 1300 海里。与 U-212 级潜艇一样, “鲉鱼”级潜艇噪声水平很低, 这归功于潜艇优化了的水动力学外形、伸出设备和凸出部分减少、低噪声螺旋桨与轴系、隔声甲板、橡胶减震器、双层弹性衬垫等技术措施的应用。

与德国使用燃料电池 AIP 装置的 U-212 级潜艇不同, 法国 AIP 潜艇使用闭式蒸汽轮机装置(称为“MESMA”)。在特殊设计的燃烧室中, 柴油与氧气混合燃烧产生的热能为蒸汽发生器所使用。氧气在艇上以液氧形式储存。蒸汽供给 200kW 功率蒸汽轮机, 做功后的乏汽被冷凝, 冷凝水在闭式循环系统中被重复使用。燃烧生成的二氧化碳气体排出舷外。废气排放压力足够大, 可以保证在超过潜艇极限深度下仍能排放废气。

1999—2006 年, 交付巴基斯坦的 3 艘“阿戈斯塔”级潜艇首次采用了 MESMA 装置。潜艇中部嵌入了 10m 长的 MESMA 舱段, 潜艇标准排水量由 1550t 增大到 1770t, 水下最大航速由 20kn, 略有下降到 19kn。

1997 年签署的建造首批“鲉鱼”级潜艇合同, 是为智利海军建造两艘“鲉鱼”级基本型, 分别于 2007 年和 2008 年交付。2002 年, 又与马来西亚签订建造两艘“鲉鱼”级潜艇合同。2003 年, 西班牙决定购买 4 艘“鲉鱼”级潜艇, 潜艇尺寸略有增大。

法国潜艇建造商在印度获得了最大成功。2005 年, 经国际招标, 签署了根据许可证在印度本土使用法国设备为印度海军建造 6 艘“鲉鱼”级潜艇的合同。在 6 艘潜艇中, 包括有基本型和 AIP 型。第一艘于 2012 年服役, 其余 5 艘将于 2017 年前服役。与为智利和马来西亚海军建造的单纯装备鱼雷武器的“鲉鱼”级潜艇不同, 印度海军“鲉鱼”级潜艇将装备 SM40 型潜射战术反舰导弹。

作为传统的潜艇出口大国, 俄罗斯非核动力潜艇在世界市场上的推广更多地体现为国家行为。由于运作机制更为高效, 德国和法国取代俄罗斯, 占领了世界潜艇市场的大部分。

在潜艇降噪技术上, 俄罗斯与其竞争对手一直处于“你追我赶”的态势。20 世纪 70 年代末期, 位于列宁格勒(现在圣彼得堡)的“红宝石”设计局研制了 877 型“基洛”级第 3 代柴-电动力潜艇, 其噪声水平成为了 1980—1990 年期间新的潜艇隐蔽性标准, 西方媒体称其为“大洋黑洞”, “只有在没有噪声的海洋环境中才能搜寻到它”。1980 年, 苏联海军开始接收该型潜艇; 稍晚一些, “基洛”级系列型号潜艇开始畅销世界, 阿尔及利亚、印度、伊朗、中国、罗马尼亚、波兰等国购买了约 60 艘 877 型及其改进型潜艇, 如 877、877B、877Э、877ЭKM、636、636M 等型号。“基洛”级潜艇的每一型号都有改进, 636 型潜艇已经属于第“3+”代潜艇。这些武备强大、性能可靠和外形漂亮的潜艇已经成为人类潜艇建造史上的标杆, 直到今天仍在建造和销售。

俄罗斯第 4 代非核动力潜艇 677 型“拉达”级也由“红宝石”设计局设计, 位于圣彼得堡的

海军部船厂建造,其出口型为“阿穆尔”级。首艇“圣彼得堡”号于1999年开工,2004年下水,2007年开始海试,至今仍未交付。

“圣彼得堡”号的试航和调试严重延期,招致了俄罗斯国内的强烈批评,国外竞争对手也乐于看到这种情况。但要指出的是,“圣彼得堡”号是世界上第一艘全新设计的第4代非核动力潜艇,采用了大量新技术。批评者可能会说,本可以不采用一系列具有很高风险的技术,而采用较为成熟、较少革命性的技术方案,建造出技术上不那么复杂和更容易建造的潜艇。但如果这样,将不可避免地使得俄罗斯落后于欧洲的竞争对手,并且失掉未来的非核动力潜艇市场。

俄罗斯造船工业是在国内经济状况较为复杂的后危机时代开始了“拉达”级潜艇的建造,国家刚经过了灾难性的十年经济崩溃期。对于国内造船业来说,与其说是在痛苦中生存,不如说是已经死亡,“达拉”级潜艇的建造情况可想而知。

目前,俄罗斯的造船工业已经开始向健康方向快速恢复和提高,在“阿穆尔”级潜艇的研制和建造上已经体现出了这一趋势。现实并未如许多人所预言的那样:随着国家经济的极度衰弱,基础工业遭受了重大损失,俄罗斯丧失了研制和建造新型潜艇的能力。俄罗斯已经表现出重建海上力量的信心,并采取了一系列的实际举措。

2005年“拉达”级潜艇次艘“喀兰斯塔特”号敷设了龙骨,2006年开工了第三艘“塞瓦斯托波尔”号,然后是“彼得巴普洛夫斯克”号。波罗的海舰队和黑海舰队计划于2010年各接受6艘“拉达”级潜艇,但由于试航迟迟未完成,目前来看,交付日期不能确定。

2008年8月,海军部船厂拟定了出口12艘“阿穆尔-1650”型潜艇(排水量为1650t的“阿穆尔”级)的计划,单艘潜艇市场售价在1.5~2亿美元,比德国同类潜艇便宜许多。“阿穆尔-1650”型潜艇采用高强度钢制成的单壳体结构,安装有CЭД-1型全工况永磁轴系推进电机,功率为4100kW,额定转速为200r/min。两组共252个蓄电池组成蓄电池组,长期放电状态下的蓄电池组容量为10580kW·h,蓄电池组寿命不低于5年。额定排水量为1765m³,长为66.8m,水下最大速度为21kn,工作深度为300m,最大航程为6500海里,使用蓄电池在巡航速度3.5kn下的水下续航力为650海里,自持力为45昼夜,乘员为35人。

由于大量采用减振降噪技术,“阿穆尔”级潜艇的噪声水平比第3代非核动力潜艇低很多,甚至比“基洛”级潜艇还要低。需指出的是,“阿穆尔”级潜艇采用了独一无二的革命性的主动降噪技术,其技术原理是制造反相声波抵消潜艇发射的噪声。

“阿穆尔”级潜艇采用第4代作战信息管理系统和集成自动化系统,保证潜艇操纵、信息和作战设备工作以及全船数据交换。“阿穆尔”级潜艇具有模块化的程序库,可保证在位于潜艇指挥舱操纵员岗位上完全自动化操作。德国、法国和俄罗斯的第4代非核动力潜艇上使用的智能化作战信息管理系统,在设计思想和使用上很相似,都采用了模块化数据库。

另外一个重要改进,是“阿穆尔”级潜艇上采用了不穿过潜艇耐压壳体,带有电视成像、红外热像仪和激光设备的潜望镜及可升起桅杆。这种不穿过潜艇耐压壳体的可升起设备尽管于1966年在意大利就出现了,但首次应用还是在美国“弗吉尼亚”级第4代核动力潜艇上。

“拉达”级首艇没有采用AIP装置,此为其批评者最为诟病之处。客观地说,与法国潜艇一样,俄罗斯非核动力潜艇的AIP装置只是作为辅助动力装置。根据客户要求,选择安装嵌入式AIP装置舱段的方案,而不是像德国潜艇那样,动力装置中本身就包含了电化学发电机AIP装置。

尽管AIP装置在潜艇上使用非常有前景,但对于俄罗斯和法国海军的战术和战略使用并不是非常关键,因为两国海军都有为数众多的核动力潜艇。如果使用技术原理完全不同的新型AIP装置,并在与国外同行进行军事技术合作时,就要面临不可避免的系统接口问题,主要体现