
选择 AIP 方案

—现代常规潜艇动力推进系统配置趋势

郭国才

(中船重工集团第 712 研究所 武汉市 64311 信箱)

摘要：常规柴电潜艇因受其传统推进技术的限制，已难于满足现代海军对其提出的更远续航力和更安静运行状态的基本要求。因此，研究开发新型潜艇推进系统，已成为提高和完善常规潜艇战术使命的必然趋势。经过近百年的探索，以及半个世纪的实践证明，常规潜艇“不依赖空气推进系统”(AIP)被认为是一个行之有效的解决方案，或者说是目前唯一的方法。

现代的 AIP 系统的初期投资虽然将整个潜艇的总费用增加了 15-30%，但其续航能力却提高了 5-10 倍。从 AIP 系统的工程化情况来看，斯特林发动机 AIP 系统、质子交换膜燃料电池-永磁推进电动机 AIP 系统和自主式水下能源舱-永磁推进电动机 AIP 系统等三种类型的 AIP 系统值得潜艇制造业关注。碳氢化合物燃料重整技术将进一步提升燃料电池系统的应用水平。

关键词：AIP 燃料电池 斯特林发动机 Mesma

1 前言

众所周知，潜艇因其隐蔽突击、出奇制胜的作战特点一直成为海军武器装备的宠幸。尤其是上个世纪 50 年代以后，核能源成功地应用于水下武器装备，核潜艇也真正成为了全天候、水下无限续航能力和高速进攻及逃逸的作战武器。

但不是所有的国家都需要一个具有核威慑的海军，在许多以海岸防卫为主要作战目标的国家，常规柴电潜艇仍然是他们的首选。重要的是常规柴-电潜艇所具备的低造价，低维护费用，低辐射噪声水平等特性是核动力潜艇所无法比拟的。因此，在上个世纪 80 年代以后，以延长常规潜艇水下潜航时间、提升其战术水平为目标的潜艇改造和现代化工程在工业技术发达国家之中迅速开展起来。传统的“不依赖空气推进系统”(AIP)概念被科学家和潜艇工程设计人员赋予了全新的意义。

2 进步与安全

目前所研究开发的不依赖空气推进系统始于第二次世界大战时期。此时，前苏联和德国都开发了各自的潜艇 AIP 系统。前苏联的 AIP 系统为一台闭循环柴油机 (CCD)，使用液氧和柴油燃料。该柴油机在 1940 年到 45 年间安装在 M-401 潜艇上进行试验。

在同期的德国，Hellmuth Walter 教授也研发了一台 AIP 系统。Walter 的 AIP 系统使用高浓缩氢 (H_2O_2) 燃烧驱动透平机，产生蒸汽动力驱动潜艇。二战后期，这个系统安装在新建的 XXVI 型 U 艇上进行试验。从技术上看，Walter 的 AIP 还不成熟，存在着极大的安全问题，在潜艇的封闭环境中，过氧化氢的存储极为困难。因此，XXVI 艇也未能参与任何海战。

二战之后，美、英和前苏联都获得了 Walter 的技术，并不同程度地延续了 Walter 的研究工作。美国的海军工程实验室加大了对 Walter 的 AIP 系统的试验，并把一台缩小了尺寸的系统安装在小型试

验艇 X-1 上。到了 50 年代中后期，随着原子能技术在潜艇上成功应用后，美国从此放弃了常规潜艇 AIP 技术的研究和开发。虽然英国皇家海军研发 Walter 的 AIP 系统的情形和美国相似，但是，它在战后对其他形式的 AIP 系统的研究工作却没有停止，如闭循环柴油机系统，以及高能电池等在潜艇上应用的可能性等。

1952 年，前苏联的一艘被命名为“617”(Design Project 617)的潜艇安装了 Walter 循环系统，1958 年后进入服役。然而，该艇极为短命，在服役后不到一年的时间里，就发生了艇上爆炸事故。从此，Walter 的 AIP 循环的研究再也没有被人们提起。

与此同时，前苏联却从其自主研发的闭循环柴油机 AIP 系统中获得了有用的运行经验。自 1953 年到 1957 年间，前苏联建造了 30 艘“魁北克”级舰艇(650 吨)，这些潜艇加装了闭循环系统，系统仍然使用液氧和柴油。但是，这些潜艇的使用状况令人恐怖，艇上经常发生爆炸或火灾事故。虽然前苏联的 AIP 系统技术不得不在 1970 年代中期终止，但它仍然进行了较长的运行试验，为现代 AIP 技术积累大量的宝贵经验，并促进了相关技术的发展。

由此看来，无论是早期的 Walter 蒸汽透平发动机，还是闭循环柴油机，虽能不同程度地改善潜艇的潜航时间或续航力，且反映出的声学特性也接近于人们对 AIP 系统的初始期望。但是，它们所暴露的巨大安全隐患，是注定不能成为海军的选择，更不能成为核动力的竞争对手。

3 AIP 发展的新时空

1980 年代后期，随着科学技术的日益进步和工业化水平的不断完善，人们开始考虑利用 AIP 技术改造现有海军常规潜艇，即在在役潜艇上加装“AIP 舱段”，提高潜艇的整体战术使命水平。这种由陈旧的 AIP 作为潜艇的主动力设计思路，转变为由 AIP 系统给潜艇提供必要的辅助动力的设计理念，是现代 AIP 技术走向蓬勃发展的重要因素。一般认为，常规潜艇的作战使命大致由隐蔽和攻击两部分组成，因此，支持其使命的潜艇速度则主要为分为低速巡航速度和高速攻击以及实施攻击之后的逃逸速度。

潜艇专家认为，常规潜艇在作战区域，其中 70-80%的时间处于低速巡游状态，而实施进攻和逃逸的时间仅为 20%左右。通过分析，人们发现，如果将在研中的任一种 AIP 系统作为常规潜艇的辅助动力系统，都完全可以满足潜艇在低速巡航时的动力要求，而且有些系统还可以有富裕的动力做其他用途使用。



图 1 斯特林发动机工作原理流程

3.1 斯特林发动机 AIP 系统

斯特林发动机系统是第一次将闭循环热机作为 AIP 系统应用于水下的成功例子。斯特林发动机闭循环系统由瑞典考库姆斯(Kockums)公司从 1960 年代开始研发，历经 20 余年。1980 年代末，瑞典海军的 Nachen 级潜艇在干船坞中被一分为二，中间加入了一个 8 米长的 AIP 系统舱段。1996 年，世界上第一艘装有斯特林发动机 AIP 系统的“哥特兰”(Gotland) 级 A19 型潜艇由瑞典考库姆斯公司

交付瑞典皇家海军使用，它标志着潜艇用 AIP 技术进入了开发与应用的新时代。

哥特兰 A19 潜艇安装了两台 AIP 系统，总功率为 150KW，作为潜艇巡航时的动力源。若潜艇在 5 节巡航速度运行时，它能为潜艇提供两周的无通气管航行时间。

在斯特林 AIP 系统中，惰性气体氦为液氧和柴油燃料的燃烧介质，燃烧室的压力比艇外海水的压力高，因此，废气可直接排放并溶解到海水中。斯特林发动机直接和一台直流发电机连接，为推进电动机和/或艇上电池组充电，或给其他用户提供电力。整个推进系统可提供 11 节水面航速和 20 节潜航速度，后者由潜艇主蓄电池供电（图 1）。

斯特林 V4-275R 发动机是单机功率为 75KW 的模块化系统（图 2），增值极为方便，易于提高功率等级配置；另外，斯特林发动机属热机范畴，技术成熟，易于开发；系统工作噪声小，声学特性好；且系统的支持费用也较低。但是，斯特林发动机作为热机，其卡诺效应和红外信号水平也不容过于乐观。

今天，瑞典海军已有 3 艘装有斯特林发动机 AIP 系统的潜艇在役，除 GMS 哥特兰以外，其他两艘分别是 HMS Uppland 和 Halland，后者于 1997 年服役。同时，考库姆斯公司也有类似的 T-96 出口型潜艇，其制造费用约为 1 亿美圆。

表 1 “哥特兰”(GOTLAND) 级 A19 型潜艇参数：

艇员	军官 5 人，士兵 28 人
尺寸	200x20 英尺
排水量	水面 1 240 吨，水下 1 490 吨
推进系统	2 台 MTU 柴油机，2 台 V4-275R 斯特林发动机 AIP 系统
速度	水面 11 节，水下 20 节
无通气管续航力	2 周/5 节

日本防卫厅利用斯特林发动机 AIP 也是比较成功的。1986 年日本就开始了新型斯特林发动机的基础研究，其原因基于两点：1-斯特林发动机在瑞典作为潜艇用发动机的研究工作已进行了近 20 年的时间，积累了大量的运行经验，2-和燃料电池 AIP 系统相比，斯特林发动机是传统的热机，更易于实现。

日本在 1991 年从瑞典引进斯特林发动机机体，进行应用型工程研究。1997-1999 年进行了陆上运转实验。2000 年底在三菱重工的神户船厂开始在“早潮”号教练潜艇上安装，2001 年底交付海上自卫队。“早潮”号教练艇是 1997 年 3 月作为“春潮”级的第 9 艘艇进入服役的。

“早潮”号上的斯特林发动机为 V4-275R MkII 新型连续外燃发动机，缸径为 60cm，高度为 140cm，额定转速为 2000r/min，持续额定功率为 65kW。从 2002 年 4 月开始，“早潮”号进行了长期航行的耐久性和整备性鉴定等试验，如果一切顺利，那么，日本防卫厅的装备斯特林发动机的 AIP 新型潜艇研制计划将纳入 2004 年度的军备预算。

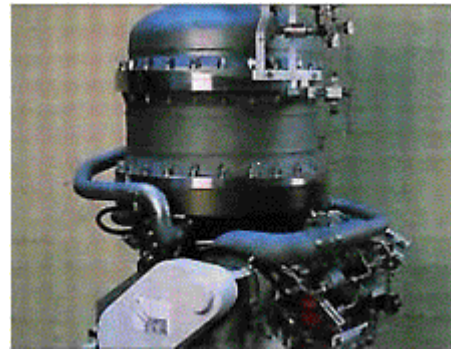


图 2 V4—275R 型 75kW 斯特林发动机

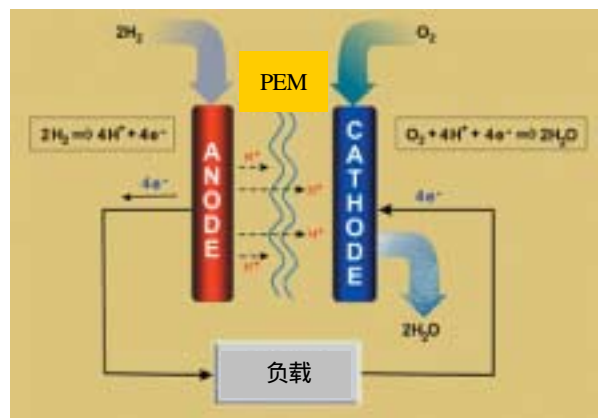


图 3 PEM 燃料电池原理示意图

3.2 燃料电池发电装置 AIP 系统

2002 年 3 月 20 日，世界第一艘装载了燃料电池发电装置和永磁主推进电动机的潜艇“U212A”在德国 HDW 的 Kiel 造船厂下水，并被命名为“U31”。

“U31”潜艇是一艘混合动力潜艇，其推进动力系统配置由两部分构成，即常规柴电部分：一套 MTU 柴油机驱动一台 Piller 交流发电机，一组常规铅酸蓄电池；AIP 部分：一组质子交换膜燃料电池（PEM）。推进电动机为一台永磁同步电动机（Permasyn），直接与 7 叶回转螺旋桨连接。

众所周知，燃料电池工作时不燃烧（冷燃过程，反应温度约 80C°），反应本身无噪音，是一种把化学能直接转化成电能的发电装置，因而效率非常高，其燃料效率几乎可达 100%，系统效率也有 80% 以上，而且没有有害副产品排放。质子交换膜燃料电池工作时，氢离子通过聚合物电解质导通到阴极，在此，氢离子和氧气发生电化学反应，并直接产生直流电力（图 3）。尽管燃料电池是一种理想的能量转换装置，但它必须有相应的支撑系统，作为其能量来源和电能最终使用燃料电池的工作环境提供接口。因此，燃料电池发电装置必须由以下 3 个重要部分组成：

- 燃料存储
- 燃料电池本体
- 能量调节

“U31”艇和将在 2004-2008 年进入服役的 214 型潜艇所使用的燃料电池 AIP 系统是德国西门子公司和 HDW 公司 15 年的研究成果。“U31” AIP 系统由 9 块西门子质子交换膜燃料电池发电模块、金属氢化物储氢罐、液氧槽以及其他组件构成，单机功率为 30-40kW；214 型 AIP 系统则由更加先进、功率更大的模块构成，每个模块的功率为 120KW。燃料氢和氧化剂在质子交换膜电池堆内发生化学反应，并直接生成电能，所生成的直流电力通过逆变器驱动 Permasyn 交流同步永磁电动机。燃料电池总功率为 300kW，可使潜艇以 4.5 节的速度潜航 1250 海里，或 15-17 天，是普通柴电潜艇潜航时间的 5 倍。同时，AIP 系统还能提供 11kW 的日用电量或给常规蓄电池充电。涉及到安全问题的氢、氧反应物存储装置被置于艇后部的压力舱壳和通海舱壳之间。其中氢以气体形式存储，即在 50 C° 和高压条件下，氢原子被“强力”压入金属氢化物棒（铁、钛和锰合金）内存储。



图 4 “U31” Permasyn 推进电动机

Permasyn 推进电动机是西门子最新开发的专门用于潜艇推进系统的永磁同步电动机（图 4）。与相同功率等级的其他电动机相比，具有尺寸小、重量轻、噪音低和效率高等特点，是与燃料电池 AIP 系统匹配的最佳组件。

“U31”潜艇长、高和最大直径分别为 56.0 米、11.5 米和 7.0 米，水上/水下排水量为 1 450/1 830 吨，最大时速 20 节，艇员 27 人，采用全综合控制系统。

燃料电池-永磁电动机 AIP 系统在“U31”潜艇上的成功应用，使人们长期以来追寻的更安静、更隐蔽以及更远续航力的常规潜艇的愿望可以说基本实现了。但人们仍然略感遗憾的是，燃料电池 AIP 系统属高技术产品，在当前形势下广泛开发还有相当的困难，因此，装置显得非常昂贵；从理论上讲，燃料电池的功率与其自身的体积和重量相比还有待提高。即：同样体积的电池堆发电装置应该提供更多的能量，使潜艇的潜航时间更长。另外，潜艇上燃料电池的氢燃料添加极大地限制了潜艇的活动范围。

在经历了十多年的论证之后，“212A型”潜艇计划在1994年正式进入实施阶段。当时，德国国防部和德国潜艇联合体(含HDW和TNSW等)签定了购买4艘“212A”艇，总合同款高达18亿美元，平均每艘造价为4.5亿美元。1996年，意大利海军以许可证形式加入了“212”艇的建造工程，1997年预定了两艘212型艇，易地在意大利的Fincantieri船厂建造。

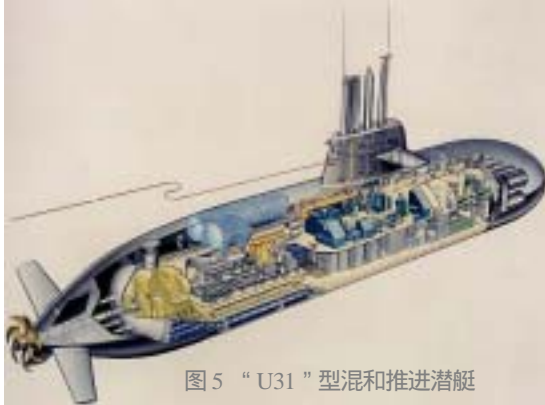


图5 “U31”型混和推进潜艇

德国在给德-意两国的“U212A型”潜艇定型之后，很快就结合德国的早期出口型潜艇“209型”特点，设计出了更具竞争力的“214型”潜艇，并且提出了对在役的“209型”现代化-加装AIP舱段的设想。德国潜艇建造联合体的“209型”潜艇的

出口量极大，尤其是南美洲国家、南亚国家和南非等国家都拥有做为主力潜艇的“209型”潜艇在役。

目前，希腊和韩国海军分别订购了3艘“214型”混合动力装置潜艇，另外，葡萄牙海军业已将“214型”潜艇作为其未来的装备的首选艇。

3.3 自主水下能源舱AIP系统

法国海军DCN早在1982年就已经开始实施了自主式水下能源舱(Mesma)AIP系统的开发研究工作。Mesma系统是在DCN的领导下，由多家设备公司联合开发，于1988年建成了第一台200KW的原形机。DCN希望它能在一艘1500吨级以上的常规柴电潜艇的潜航时间提高到300小时(4节时)

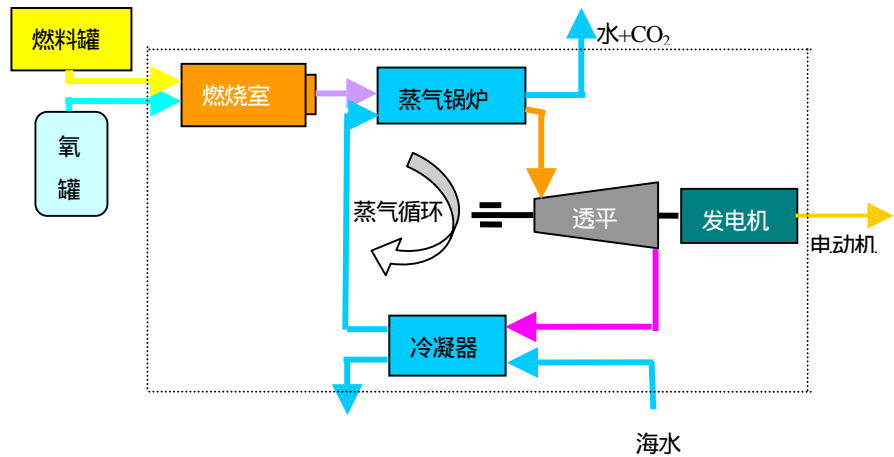


图6 Mesma原理示意图

Mesma系统是一台闭循环的蒸汽透平，主要由液氧槽和蒸汽发生器等两大部分构成，包含两个主要的循环回路：初级蒸汽回路和有机兰金回路等。即它利用初级回路的闭循环系统，通过液氧和碳氢燃料在燃烧室燃烧而产生的蒸汽，给兰金回路的镍合金蒸汽发生器提供热能，蒸汽驱动转速超过10000转/分的透平发电机，回路压力约60巴，系统净效率约为25%左右。DCN称，Mesma系统不会增加潜艇的任何特征信号，没有额外的噪声、热信号特征或其他显而易见的信号。蒸汽则通过冷凝回收以便再利用，根据设计要求，潜艇无论潜深如何，Mesma内部压力都比艇外压力高，因此，CO₂废气可通过压力壳直接排放到艇外海水中。

DCN的第一台Mesma AIP系统装在出口给巴基斯坦海军的“阿哥斯塔90B”潜艇第三艘艇上(2000年)而真正将Mesma系统和热蒙工业公司的永磁交流同步电动机共同配置作为高效AIP系统的使用的

是 DCN 和西班牙 Bazan (Izar) 船厂共同为智利海军设计建造的两艘 Scorpène 级潜艇。

Scorpène 级潜艇的设计原形来自于法国海军的“紫水晶”(Améthyste)级潜艇,但为充分利用永磁同步推进电机和 Mesma AIP 动力源这样一些代表海军军工最新技术,潜艇进行了艇型的重新设计和内部结构优化,采用了先进的模块化建造技术。因此,该艇属于 DCN 当局最新型的中型潜艇。Scorpène 级潜艇艇身优化后有利于能源利用,减少噪音,且操纵性和隐蔽性较好。在任何水域,潜艇可利用 Mesma AIP 系统动力巡航,以获得较长时间的水下续航力。根据 DCN 的报告,安装了 Mesma AIP 系统之后,潜艇的关键性能得到了极大的提升。首先, Mesma AIP 系统可获得 18 天以上的水下续航时间;潜艇采用全综合控制系统(IPMS),即通过任意一台多功能控制台就能够对潜艇不同部位进行全部控制和协调,包括动力系统,作战系统,观测测系统以及操控系统等,大大减少了艇员编制,减少了生命循环费用。



图7 Scorpène 上的 Mesma 系统

Scorpène 级潜艇共有 3 种版本,分别是“基本型”、“基本-AIP 型”和“紧凑型”,其中“紧凑型”潜艇的主推进动力为 AIP 系统,辅助动力采用柴油机。“基本-AIP”型的水下续航时间比基本型要长 3 倍。

表 2 三种 Scorpène 潜艇参数比较

	基本型 (CM-2000)	基本-AIP 型 (AM-2000)	紧凑型 (Compact)
全长	66.4 m	76.2 m	59.4 m
水下排水量	1,700 吨	2,000 吨	1,450 吨
潜航速度	> 20 节	> 20 节	> 14 节
下潜深度	> 300 m	> 300 m	> 200 m
艇员人数	30	30	22
续航时间	50 天	50 天	40 天

4 闭循环柴油机系统未能进入应用

由于柴油机的开发应用历史相对长,技术比较成熟,因此闭循环柴油机 AIP 系统的研发工作也开展地比较早。如前苏联、英国,意大利以及美国等都对闭循环柴油机 AIP 系统的可行性进行过不同程度的研究,尤其是德国、英国的开发令人瞩目。

上个世纪 80 年代,德国 GSC 潜艇建造联合体同时独立地开始开发两个不同的 AIP 系统。即 HDW 与西门子公司燃料电池系统和 TNSW 的闭循环柴油机系统。两个公司的研究成果都在 1988-1990 年间在德国海军的 U-1 艇(前 205 型)上海试。TNSW 的闭循环柴油机系统使用液氧和柴油,以惰性气体氩为介质。在闭循环系统中,氧与氩混和,形成“人造空气”。当潜艇上浮或利用通气管时,同一柴油机即成为常规推进模式(即“单机”概念)。在“U-1”潜艇的 TNSW 的系统上安装了英国 Coswoth 公司开发的三重柴油机水处理系统(MK3)。

通过试验人们发现不管从系统效率、可靠性或者从各种声学特征等方面考核,闭循环柴油机系统都要落后于燃料电池系统。并提出了提高闭循环柴油机系统必须解决的几大问题:1 解决大功率柴油机氧的存储;2 提高闭循环系统的效率;3 进一步提高水处理系统特性,解决系统和其循环泵的噪声源。

5 加拿大 AIP 开发状况

加拿大充分利用他国技术进行 AIP 系统的开发研究。在由国防部组织的 3 个预研究项目中有两个属燃料电池系统，即 Alupower 的铝/氧半燃料电池和 Ballard Power Systems 的 PEM 燃料电池。从目前情况看，前者燃料电池系统已应用于 UUV 推进，而后者主要进行 PEM 燃料电池系统和液态碳氢化合物（甲醇）的重整制氢技术研究，并取得了极大的成功。

早在几年前，Ballard 就与军方签定了开发 40kW PEM 燃料电池合同，陆上原形机运行非常顺利。Ballard 是全球著名的燃料电池技术领先公司，其陆基 250kW PEM 燃料电池发电装置已投入商业运行。

据有关报道称，加拿大国防部将极有可能利用 Ballard 的阿尔法燃料电池装置替代 Upholder 级潜艇的常规主推进装置，建造世界上第一艘全燃料电池潜艇-Monoboat，设计思想为：潜艇在水下使用燃料电池/液氧 AIP 系统，额定功率为 250kW；通气管航行时，使用燃料电池/大气系统，额定功率为 500kW。预计该方案将于 2、3 年后进入实施阶段。

6 俄罗斯 AIP 开发状况

俄罗斯早在前苏联时期就开始了燃料电池的研发工作。1991 年完成了潜艇用燃料电池（Kristall-27 和 Kristall-27E）的研究后，就着手给新一代出口型潜艇“AMUR”设计燃料电池 AIP 系统。同时也为 Project636 和 877EKM Kelo 级潜艇制定了燃料电池方案。目前，自用“Amur”首艇已在圣-比得堡船厂建造，但进度比较缓慢，同型号的出口型也未找到用户。俄罗斯 AIP 技术的滞后可能原因是冷战后其诸多军事计划取消，经费缩减所致。

7 比较与展望

7.1 比较

AIP 系统是一个系统性的工程，设计中要考虑的因素非常复杂。它既要考虑系统本身的特性，诸如：设计数据，性能特征，可靠性，经济和成熟性，后勤评估，探测性以及系统构成等；又要考虑国家政治，经济和地域情况等。而对于潜艇设计来说，还应考虑 AIP 系统装艇后，消耗品的存储，如燃料耗量、燃料能量密度、存储效率、氧气耗量、补给等；动力装置密度、容量、结构要求、安装及降低特征信号要求；潜艇对动力的需求等。

潜艇上考虑的每种 AIP 系统装艇后各因素对潜艇体积和重量的影响如表 3 和表 4。

表 3 装艇后对体积的影响

设计参数	金属氧化物 FC	甲醇重整 FC	CCD	斯特林发动机
消耗品				
燃料耗量/L/kW.h	0.634	0.159	0.329	0.37
燃料存储/L/kW.h	0.250	0.2224	0.017	0.0195
氧气耗量/L/kW.h	0.390	0.539	0.735	0.895
氧气存量/L/kW.h	0.058	0.081	0.1304	0.1579
氦/氮/氢耗量 /L/kW.h	0.0	0.005	0.0212	0.0067

氫/氮/氫存量 /L/kW. h	0.0	0.0011	0.0037	0.0011
补偿重量/L/kW. h	0.434	0.640	0.773	0.940
总比容积/L/kW. h	1.766	2.0075	2.0093	2.3902
动力装置大小				
动力装置比容积 /L/kW	64	115	89	83

表4 装艇后对重量的影响

设计参数	金属氧化物 FC	甲醇重整 FC	CCD	斯特林发动机
消耗品				
燃料耗量/kg/kW. h	3.49	0.41	0.277	0.293
燃料存储/kg/kW. h	0.874	0.074	0.034	0.039
氧气耗量/kg/kW. h	0.44	0.648	0.84	1.022
氧气存量/kg/kW. h	0.165	0.225	0.317	0.338
氫/氮/氫耗量 /kg/kW. h	0.0	0.01	0.03	0.01
氫/氮/氫存量 /kg/kW. h	0.0	0.001	0.002	0.001
总比重量/kg/kW. h	4.969	1.368	1.5	1.703
动力装置大小				
动力装置比容积 kg/kW	19	29	34	30

根据潜艇的设计方案,采用单独的 AC 或 DC 供电比 AC/DC 变换更常用,因为 AC 转换为 DC 的转换效率不同于 DC 转换 AC 的转换效率;产生 AC 的 AIP 装置 (CCD 等) 的功率也与产生 DC 的装置 (如 FC) 不同。这种能量需求差异可能回影响重量和体积,它因 AC 和 DC 的转换系数而异。

表4对2000-3000吨级常规潜艇满足5节航速,水下续航力20天的推进和生活用电所需的AIP体积和重量进行了比较。

设计参数	金属氧化物 FC	甲醇重整 FC	CCD	斯特林发动机
潜艇 AIP 体积/m ³	285	330	279	328
潜艇 AIP 重量/t	752	209	203	225
密度/t/m³	2.64	0.63	0.73	0.68

表5 消耗品和动力装置

设计参数	金属氧化物 FC	甲醇重整 FC	CCD	斯特林发动机
消耗品密度/kg/L	2.814	0.681	0.747	0.713
动力装置密度/kg/L	0.297	0.252	0.382	0.361

表6 几种类型的 AIP 系统一般参数比较

类型	PEM	CCD	斯特林	Mesma
----	-----	-----	-----	-------

功率 (KW) /系统	120 (35) /模块	150/台	75/单机	200/系统
系统效率*	45-55%	29-32%	30%	25%
能量转换	直接	间接/燃烧	间接/燃烧	间接/燃烧
反应物	氢/氧	矿物油/氧	矿物油/氧	矿物油 (乙醇) /氧
燃料消耗 (KG/KWH)	0.05	0.3	0.25	0.55
氧消耗 (KG/KWH)	0.4	0.75	1.0	1.1
最高温度	85C° 金属氢化物 300 C° /甲醇	>400 C°	>700 C°	>700 C°
复杂性	高技术	简	复杂	简
使用寿命	长	有限	较长	较长
开发费用	高	低	较高	一般
支持费用	中等	低	低	低
噪声	低	中等	中等	中等
红外信号	低	中	较高	较高
技术状况	批量		装艇	装艇
风险性	较高	较小	较小	较小
可靠性		较高	一般	高

*以上效率是根据甲醇、柴油机和原油的最低燃烧值计算出来的。

从性能的角度来看，最有效的 AIP 装置应该是满足潜航距离生命负载而对潜艇总体影响最小的系统。潜艇的总体性能必须受制于重量和需要足够空间以携带必要的装置、消耗品和结构等因素。

7.2 展望

AIP 系统技术通过近几年的开发研究，已基本呈现出良好的应用前景。以上几种 AIP 技术均已是成熟或较成熟的产品，各自的研发机构认为它们在其应用的范围内发挥着各自的作用。据专家估计，未来十年之中，全球将有 100-150 艘柴电潜艇进入服役。这些潜艇的一大部分将根据各自的情况，选择适当的 AIP 系统配置动力系统。从目前的情况看，西方国家的一艘现代化的柴电潜艇的建造费用约为 1-4 亿美元之间，而花费这笔费用的 15%或略多些加装一个 AIP 舱段，以期提升潜艇的战术使命性能的做法是一个极具诱惑力的方案。

闭循环柴油机 AIP 系统没有象几年前人们所想象的那样进入应用阶段，尽管荷兰 RDM 船厂建造的 1800 吨 Moray 1800H 潜艇计划仍然在继续。瑞典海军的斯特林发动机 AIP 系统虽然已成功应用，但该系统所固有的缺陷还不能使他们满意，因此，瑞典海军目前正在对燃料电池系统进行评估，也许燃料电池系统会成为瑞典海军下一个 AIP 系统。

可以肯定的是，燃料电池技术、斯特林发动机和 Mesma 系统将为常规潜艇的 AIP 技术积累更多的运行经验，也将成为今后数十年间常规潜艇 AIP 技术的应用主力。可以设想，随着科学技术的发展，碳纳米纤维储氢技术和碳氢化合物燃料重整技术一旦通过运行论证，将更进一步推动燃料电池 AIP 技术的广泛应用。

参考文献

- 1 郭国才，石 艳，郭自强 常规潜艇 AIP 系统的开发与应用 《舰船情报研究报告》北京 中国舰船研究院 12/1995

-
- 2 Edward C. Whitman AIR-INDEPENDENT PROPULSION -AIP Technology Creates a New Undersea Threat
 - 3 German Navy Launches Fuel Cell Submarine 27/2002
 - 4 DCN、考库母斯、HDW 等官方网站
 - 5 傅文昌等译“早潮”号教练潜艇的 AIP 系统 《世界の舰船》 武汉 国外舰船工程 总第 285 期
 - 6 汪新宇等译 AIP 系统装艇的重要性及有关问题 《WARSHIP ' 99》 国外舰船工程 总第 280 期