

潜艇外形进化史

■王钟正 强裕功

潜艇的流线型艇体,是实现水下高效航行与隐蔽机动的重要设计,也是潜艇工业发展历程最直观的技术缩影。潜艇外形设计的核心逻辑,是通过优化艇体轮廓,降低水下航行的摩擦阻力与形状阻力,同时兼顾水面航行的兴波阻力,实现航速提升、噪声抑制、隐蔽性与续航能力增强的综合目标。

早期潜艇的外形均为“锥形款”。这类外形的设计仅以实现密封下潜为目标,完全无任何水下动力学考量,艇体多为简单的球形或圆柱形。1620年,荷兰工程师德雷贝尔打造的以木质为框架、蒙覆皮革的简易潜艇便是这一外形的典型代表。受外形所限,这类潜艇水下阻力巨大、航行稳定性极差,仅能在浅海实现低速、短距离的航行,尚不具备实际作战价值。

一战至二战时期,潜艇的外形普遍采用“雪茄形”。这一艇型的诞生,贴合当时潜艇以水面航行为主、水下仅作短距离隐蔽航行的作战需求,其外形酷似雪茄,首部尖瘦、中部为规则的圆柱形、尾部呈锥状,能有效切割水面波浪,降低水面航行的兴波阻力,让潜艇在水面拥有较快的航速。德国经典的U型潜艇便是该艇型的典型代表。但该外形的短板也十分突出,水下航行时艇体轮廓会产生巨大的形状阻力,不仅航速大幅下降,还会产生较高噪声,隐蔽性差。

对水下高速性能的持续探索,催生出了“水滴形”外形。1953年,美国“大青花鱼”号试验潜艇开创性地采用了这一艇型,其外形轮廓与飞艇流线形态相似,首部圆钝、中部粗圆饱满、尾部尖细,是水下高航速状态下阻力最小的艇体外形。“水滴形”外形让潜艇的水下航速大幅提升,航行噪声也显著降低,与核动力结合后,完美适配核潜艇长期水下航行的作战需求。但“水滴形”也存在明显缺陷:水面航行时艇首易被波浪淹没,航行稳定性差;且艇体全为曲面结构,加工精度要求极高,同时内部空间受外形限制

较为局促,不利于搭载各类设备。现代主流潜艇,则普遍采用“拉长水滴形”外形。为解决水滴形的设计痛点,工程师在其粗圆饱满的中部,加入了一段平行的圆柱体,打造出拉长水滴形艇型。该外形保留了水滴形首部与尾部的流线型轮廓,对中部做了延伸优化,仅让潜艇的水下高速性能有小幅下降,却大幅增加了艇体内部的可用空间,同时让潜艇水面航行的稳定性得到显著提升。如今,“拉长水滴形”已成为各国核潜艇的标准外形设计,是目前最适配水下作战需求的潜艇外形。

潜艇外形的发展历程,本质上是人类对水下流体力学认知与军事作战需求不断结合、相互适配的过程。如今,依托计算流体力学仿真、高精度建模等技术,潜艇外形正朝着更贴合水下低阻、静音、高效等需求的方向持续优化。

下图:采用“水滴形”外形的美国“大青花鱼”号潜艇。 资料图片



战机开火后弹壳去哪了

■胡勇华

兵器漫谈

在战争电影中,我们常常能看见老式战斗机开火时,弹壳像雨点般往下掉的场景。从朝鲜战场的F-86“佩刀”,到冷战时期的米格-21,这些战机的机炮一开火,弹壳就哗啦啦四散飞逃,在空中划出一道闪亮的轨迹。

而如今,许多先进战机在实战中却见不到这样的“弹壳雨”,甚至听不到弹壳掉落的声音。这些空弹壳到底去哪了?答案其实很简单:它们被战机自己“吞”回了体内。

在战机超音速飞行、发动机功率倍增的今天,随意抛壳早已成为危及飞行安全的“隐患”。过去战机速度慢,发动机吸力有限,抛出去的弹壳即会撞到机身,也很难造成严重损伤。但现代战机高速飞行,发动机进气口的巨大吸力能将附近的物体瞬间吸入,一旦弹壳被吸入发动机,轻则导致叶片损坏,重则引发发动机空中停车,严重威胁战机安全。

除了安全风险,抛壳还会破坏战机的重心平衡。以俄罗斯苏-27系列战机使用的GSh-301机炮为例,单枚弹壳就重达390克,如若一次连续射击打出几十发,随机抛落的弹壳会让战机重量分布忽左忽右,很容易影响战机空中姿态。

现代战机的弹壳回收系统,就是为解决这些问题而生。它的工作原理并不复杂:子弹被击发后,空弹壳刚一脱离炮膛,就会被专门的导向装置接住,通过机

身内部的回收通道,直接送入预设的储存容器里。

欧洲“台风”战斗机搭载的毛瑟BK27机炮,采用了无弹链封闭式进弹系统,自带弹壳回收器,不仅彻底避免了弹壳撞击机身的风险,还让系统占用空间减少了60%。这款机炮还被瑞典“鹰狮”等多款欧洲战机采用,成为欧洲空军战机的标准配置。

有些机型还使用上了“双向传输带”技术,传送带一边把新子弹源源不断送向炮膛,一边把空弹壳同步收回来。美国A-10“疣猪”攻击机就是如此,它搭载的30毫米转管机炮射速惊人,每次射击都会产生大量弹壳,但这些弹壳全被回收系统储存起来,既避免了被发动机吸入的风险,还能作为临时压舱物维持战机重心平衡,尤其适合低空近距支援作战时的复杂飞行姿态。

俄罗斯的苏-57隐形战机,在设计时也充分考虑了弹壳回收的重要性。作为隐身战机,它不仅要具备超机动能力,还要避免任何可能破坏隐身性能的设计。如果随意抛壳,弹壳掉落时产生的雷达反射信号,或是撞击机身留下的痕迹,都可能暴露战机位置。因此,苏-57的弹壳回收系统被整合进机身内部,与隐身设计完美兼容,成为其整体作战能力的重要组成部分。

从“抛壳”到“吞壳”,战机开火不再掉落“弹壳雨”,看似不起眼的小设计,往往能在关键时刻影响战场胜负。未来,随着战机技术的不断进步,弹壳回收系统将会更加高效、紧凑,或许还会融入智能化管理,让战机在激烈的空战中,始终保持最佳状态。



AIP 潜艇：游弋深海的“隐形猎手”

■鲍 萍 张佳豪

动力革命

从“氧气依赖”到“深海长潜”

在AIP技术普及前,常规潜艇长期依靠柴油机与铅酸蓄电池构成水下航行的两套运行模式:在水面航行或通气管潜航状态下,潜艇可获取外界空气,启动柴油发动机工作,不但直接驱动潜艇航行,还能够带动发电机为艇载铅酸蓄电池储存电能,完成能源补给;当潜艇完全进入水下潜航状态时,密闭艇体与外界空气隔绝,柴油发动机因缺氧无法运行,潜艇随即切换为纯电动工作模式,由蓄电池供电驱动推进电机,保障水下机动和设备运转。该动力构型技术成熟、造价较低、维护便捷,至今仍是中小型近海防御潜艇的主流配置。但受铅酸电池储能上限的约束,传统柴电潜艇水下低速续航仅可维持3至5天,电量耗尽后必须上浮至通气管深度甚至水面重新充电,隐蔽性与持续水下作战能力存在根本性短板。

AIP技术研发起步于二战时期。为破解盟军高密度航空反潜封锁,德国率先研究以过氧化氢为氧化剂、以煤油为燃料的闭式循环动力系统。这套系统使潜艇在水下航行速度达到25节,远快于传统柴电潜艇,被认为是AIP系统的雏形。然而,受过氧化氢易燃易爆、运行可靠性差的制约,该装备未能批量列装。战后英国、苏联接续相关技术的攻关,但同样困于安全缺陷而终止研究,再加上战后大国一度将资源重点投向核潜艇的研发,致使AIP潜艇的研发进程放缓。

上世纪60年代至80年代,核潜艇造价高昂,小型化落地困难的短板日益凸显,促使许多国家开始寻求非核路线。上世纪60年代末,瑞典启动斯特林发动机的潜艇化研制,并于1988年将斯特林发动机应用于服役多年的“水怪”号常规潜艇上,标志着现代实用型AIP技术的正式诞生。同期,德国开始研究以质子交换膜燃料电池为核心的AIP系统,并在陆上试验中成功运行。1986年,苏联在“比目鱼”级试验艇上完成了闭式循环液氧柴油机试验,该系统能够依靠废气回收实现密闭循环运行,但因噪声偏高、尾气处理结构繁琐,仅作为技术储备保存。

上世纪90年代,低温液氧存储、精密加工、舰艇降噪等配套技术日趋成熟,AIP技术逐渐由试验样机转向实际装备。瑞典率先取得颠覆性突破,研发的加装有完善斯特林发动机的“哥特兰”级潜艇,成为全球首款量产列装、具备实战能力的斯特林AIP潜艇,该艇可连续数十天水下静默巡航,彻底根除了传统柴电潜艇频繁上浮充电的先天弊病,拉开AIP潜艇规模化服役序幕。法国研发了一套液氧—乙醇闭式循环蒸汽轮机并实现外贸出口,2003年,巴基斯坦海军装备了该套系统的“哈姆扎”号潜艇服役,成为全球首艘装备该技术的AIP出口型潜艇,但该系统受制于能量效率偏低、附属设备繁杂等问题而被逐步淘汰。

迈入21世纪,AIP技术在全球加速扩散,各国依托自主攻关、技术引进、国产化改装三种路径批量列装新型潜艇。德国迭代优化燃料电池AIP技术,2004年212A型潜艇入列服役,凭借低噪声、高能量转化率成为世界常规潜艇的标杆。衍生型号214型因环境适应能力更加突出,被韩国、土耳其引进仿制,是当前全球装备数量最多的AIP潜艇。日本也在AIP潜艇的研发上迅速跟进,在瑞典斯特林技术的基础上自行研制“苍龙”级AIP潜艇。



图①:瑞典“哥特兰”级AIP潜艇。图②:俄罗斯677型AIP潜艇。图③:德国212A型AIP潜艇。

资料图片

静默杀手

常规潜艇战力得到质变式提升

那么,AIP技术的核心优势在哪?为何引得世界各国争相研究和发展呢?

传统柴电潜艇必须定期浮出水面或升起通气管,依赖氧气启动柴油机为蓄电池充电。这一刻,潜艇的雷达特征明显、噪声巨大,是整个巡逻周期中最脆弱的窗口。而AIP系统依靠潜艇自带的低温储罐存放液态氧,水下作业全程消耗自备氧化剂完成燃烧或电化学反应,从根源上实现了常规潜艇的代际跨越,具体有以下三点优势。

水下潜航时间大幅延长。传统潜艇纯靠蓄电池供电,在水下低速静默巡航最多只能支撑3至5天;而装备AIP系统后,潜艇可连续低速潜航长达2至3周,是前者的4到6倍。

暴露风险大幅降低。传统柴电潜艇每隔1至3天就必须暴露通气管,为柴油机动力提供氧气,这无异于在高危海域定时向反潜机“报到”。而AIP潜艇在整场巡逻中几乎无需上浮,通气管暴露时间锐减90%以上,告别了定期上浮的尴尬。

战场生存率发生质变。凭借超长的隐蔽性和几乎为零的暴露率,AIP潜艇能够在水下静默潜伏数周,从容穿透对手严密的立体反潜网。无论是封锁海峡、隐蔽渗透还是特种作战,其任务成功率和自身生存率都得到了质变式的提升。

这些革命性能力提升的背后,本质是让潜艇依靠自身携带的氧化剂推动发动机或电池系统工作,完全不依赖外界空气完成燃烧或电化学反应,从根源摆脱上浮供氧需求。经过数十年工程打磨,斯特林发动机与质子交换膜燃料电池已然成为当前国际上两条最为成

熟的技术路线。

斯特林发动机属于外燃动力装置,工作过程中发动机外部柴油和液氧持续稳定地燃烧,产生的近千度高温会不断向发动机内部密封的惰性气体提供热量,使气体在受热膨胀、遇冷收缩的过程中循环推动活塞运转发电。其动力输出平稳、机械振动与声学信号微弱,是瑞典、日本等国选用的成熟方案。

质子交换膜燃料电池利用纯氢和纯氧发生电化学反应产生的电能推动潜艇运行,其能量转换效率高达50%至60%,远超任何热机,且由于几乎没有运动部件,实现了近乎静音,是目前最隐蔽的AIP方案。短板在于氢气的储存难度较大,而金属氢化物、低温液氢罐储氢又对系统和成本提出了较高要求。

除上述两种主流技术路线外,部分国家还研发了闭式循环柴油机和闭式循环汽轮机。前者在原有柴电潜艇的基础上用液氧和惰性气体构成闭合燃烧回路,技术继承性好,但系统复杂,噪声仍然偏大;闭式循环汽轮机通过乙醇和液氧燃烧产生的蒸汽驱动发电,功率强劲、水下冲刺能力强,但耗氧量大、红外特征明显的问题致使研发空间持续萎缩。

综合来看,斯特林路线讲求可靠与平衡,燃料电池路线追求极致的安静与高效。这两条核心路径,共同构筑了AIP潜艇的技术基石,将常规潜艇从近海防御的配角,推向了现代水下威慑舞台的中央。

颠覆规则

持续深刻影响水下攻防格局

现有的AIP技术中,斯特林发动机热效率已逼近瓶颈,老式的闭式循环动力系统则受到噪声、能耗制约而被逐步边缘化。着眼未来技术演进,质子交换

膜燃料电池技术或将随着新型制氢、低成本储氢技术的落地,在AIP技术发展领域展现出更大优势。

近些年,让常规潜艇跑出超20节高航速的“AIP+锂电池”技术正被越来越多的国家所关注。在该项技术中,AIP负责长时间隐蔽潜伏,大功率锂电池负责瞬时释放极大电流,实现潜艇的全速航行。这种兼顾隐蔽性与机动性的技术将进一步优化常规潜艇的作战能力。

模块化的AIP动力将同样助力于无人水下装备的更新迭代,搭载AIP系统的大型无人潜航器可承担前沿侦察、水雷布设、远程火力打击等任务,与有人潜艇、水面作战舰艇组网协同作战。

而随着人工智能技术的发展,智能能量管理系统将让AIP潜艇在水下根据战术任务,自动优化能源分配,成为一个高度自动化的水下智能平台。

AIP技术的不断发展对常规潜艇的实战运用产生了深远影响。其重塑了常规潜艇战术打法,从只能预判敌方航线定点设伏转变为可提前数天进入任务海区,在较大范围内机动巡航、主动搜寻跟踪目标,使单点伏击升级为大范围动态水下封锁,迫使对手反潜兵力搜寻范围成倍扩张、反潜成本急剧攀升。

在战略层面,AIP已经成为平衡海上军力的关键装备。对于不具备核潜艇研制与列装能力的国家,高性能AIP潜艇是以低成本构建近海区域拒止能力的最优选择,依托该型装备即可扼守关键海峡与近海航道,有效威慑域外海上力量的贸然介入。对于拥有核潜艇的海军强国,AIP潜艇可与核潜艇高低搭配,在重点水道构筑多层隐蔽水下阻击线,完善近海、远海梯次配置的水下防御体系。

AIP技术已经改写常规潜艇在世界海军战场上的原有角色,使其从近海设伏的防御配角,蜕变为能够实施大范围动态封锁、穿透立体反潜网的砬码,在可预见的未来,将持续深刻影响水下攻防的格局。

(作者单位:海军工程大学)