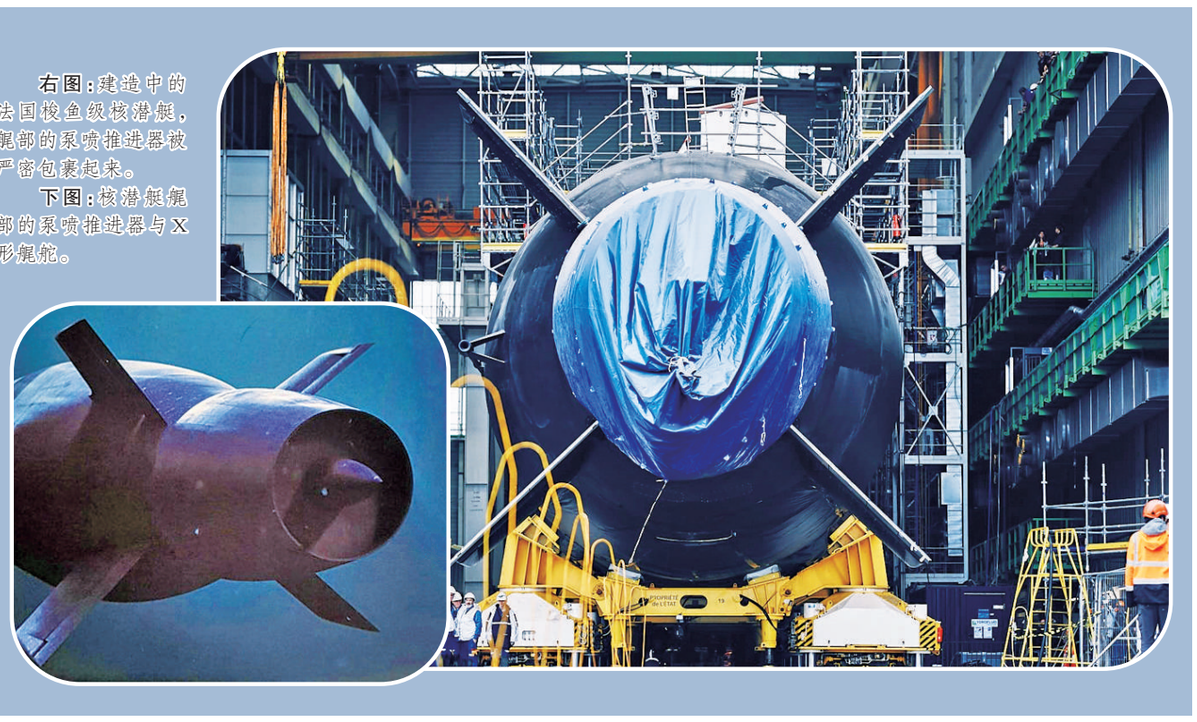
泵喷推进：潜艇的“静音革命”

■于 斌

近日，法国海军集团在瑟堡船厂将最新一艘梭鱼级攻击型核潜艇从建造车间转移至下水平台。这艘水下排水量5300吨的核潜艇，最引人注目的技术特征之一，是艇艉的泵喷推进器。法国海军集团将其列为该级潜艇“显著降低声学信号”的关键装置之一，与减振浮筏、消声瓦等技术并列。从首艇到最新一艘，法国人在所有梭鱼级攻击型核潜艇上都使用了泵喷推进器。法国人为何对这套装置如此看重？泵喷推进器为何成为新一代核潜艇的“标配”？回答这些问题，要从螺旋桨推进器的困境讲起。



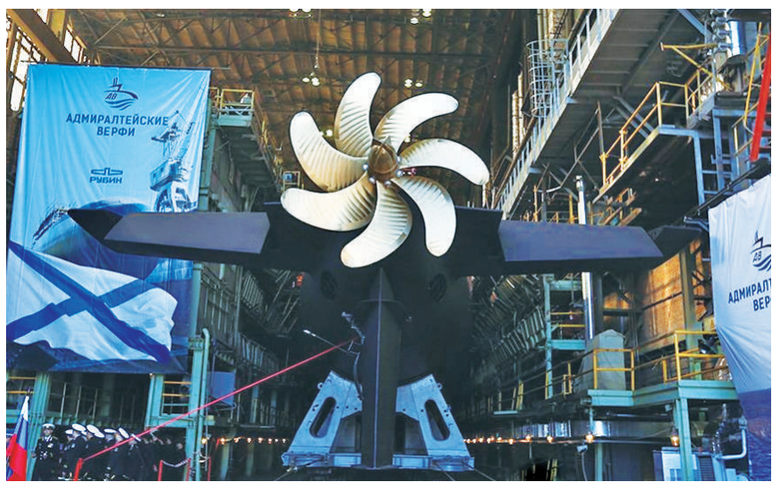
右图：建造中的法国梭鱼级核潜艇，艉部的泵喷推进器被严密包裹起来。

下图：核潜艇艉部的泵喷推进器与X形艉舵。

将螺旋桨包裹起来

在泵喷推进器出现前，潜艇普遍采用七叶大侧斜螺旋桨。这是一种专为降噪设计的推进器，但它有个明显缺点：螺旋桨在高速旋转时，桨叶梢部水流压力骤降，海水瞬间汽化成气泡，气泡破裂会产生剧烈噪声，并伴随叶片空蚀损伤。这种空泡现象，是潜艇主要的辐射噪声源之一。螺旋桨转速越高，空泡越剧烈，噪声越刺耳，潜艇就越容易暴露。设计师曾尝试通过增加桨叶数量、优化剖面设计等降低噪声水平，但只要桨叶在水下高速转动，噪声就难以根除。

泵喷推进器的思路是把螺旋桨包裹起来，通过改善其工作环境，降低噪声水平。泵喷推进器由三部分构成：最外层是一个环形导管，用于把旋转的叶片包裹起来；导管内是一圈转子叶片，负责把水流加速向后推出产生推力；转子前后布置定子，前置定子负责梳理进入导管的乱流，后置定子回收尾流，把“打转”的水流重新“捋直”。这“一梳一捋”，让泵喷推进器在同样工况下既能压住噪声，又节省了能量。



常规潜艇上的七叶大侧斜螺旋桨。

泵喷推进器并非新事物，最早可追溯到20世纪中叶，起初主要装备鱼雷，用于提高航速，后逐渐转移到潜艇上。经过数十年发展，它已成为新一代核潜艇的主流选择。英国机敏级、法国梭鱼级、美国海狼级和弗吉尼亚级均采用这一推进装置。与七叶大侧斜螺旋桨相比，泵喷推进器的效率更高，辐射噪声更低，高航速下降噪优势更明显。通俗地说，泵喷推进器让潜艇在大洋里“跑得更快、噪声更小”。

静与快的双重跃升

泵喷推进器之所以受到多国海军青睐，主要在于它对潜艇隐蔽性能的显著提升。水声学中有一条基本规律：噪声每降低10分贝，被动声呐的探测距离缩短一半。泵喷推进器通过加装导管、增加叶片数量、降低叶梢载荷等综合手段，将噪声压到了较低水平，相当于给潜艇推进装置装上“隔音罩”。

公开资料显示，泵喷推进器相比七叶大侧斜螺旋桨的总体噪声水平下降约10分贝，低频噪声的降幅更可观。在战场上，这意味着潜艇被发现的风险大幅降低。以美国海狼级攻击型核潜艇为例，该艇采用泵喷推进，水下30米深度时的低噪声航速大于20节，辐射噪声接近海洋环境背景噪声，被认为是当今世界上最安静、最快的核潜艇之一。法国梭鱼级同样通过泵喷推进器实现低噪声航行，向其“融入大洋”的隐身目标迈进一步。

除隐蔽性能好以外，泵喷推进器还带来机动性能的跃升。传统螺旋桨在高速段空泡噪声急剧恶化，成为限制潜艇高速航行的“紧箍咒”。泵喷推进器改善了水流条件，使潜艇能以更高航速安静航行。这意味着潜艇既能悄悄接近目标，又能在实施攻击任务后快速撤离，攻防转换更灵活。对需要兼顾“抵近侦察”与“高速撤离”的攻击型核潜艇而言，这一能力尤为重要。需要说明的是，泵喷推进器的技术核心在于让核潜艇兼具高航速与低噪声优势，而非单纯提高航速，核潜艇的最大航速仍取决于反应堆功率与艇型设计。

此外，泵喷推进器的结构特点还带来诸多好处。例如，环形导管如同防护套，减少了推进器被渔网、缆绳等水中异物缠绕的风险；定子的整流作用让能量损耗更低，有助于提升续航力。对需要长时间水下活动的潜艇而言，这意味着能够在阵位上停留更久。

从图纸到装艇“三道坎”

泵喷推进器的好处显而易见，但把它从图纸变成潜艇部件，至少需要跨过“三道坎”。

第一道是设计坎。泵喷推进器由导管、转子、定子协同工作，各部件的尺寸、叶片数量、间距和剖面设计稍有不当，降噪效果就会大打折扣，同时还可能增大水流阻力，引发新的振动与噪声。另外，转子和定子间的互扰、叶片与导管内壁的间隙，都是极难把握的设计细节。定子采用前置还是后置设计，也要经过精密考量：前置定子先梳理来流，侧重降噪；后置定子回收尾流，侧重效率，选择哪种构型是在降噪与效率之间权衡的结果。

第二道是制造坎。泵喷推进器的尺寸大、结构复杂，长期浸泡在海水中，对耐腐蚀性、抗空蚀性和结构强度要求较高。另外，导管外壳要用高强度合金或复合材料整体设计成型，叶片是复杂的三维曲面，对加工精度要求极高。制造这样一台庞大的精密设备，需要大型加工仪器、高性能材料和严格的质量控制作支撑，这也是许多国家“看得懂原理、造不出实物”的原因所在。

第三道是装配坎。泵喷推进器不是独立部件，而是与艇体、动力系统、传动轴系深度耦合在一起。其轴系振动会沿艇体向外辐射，若隔离措施不到位，泵喷推进再安静也会受拖累。多国普遍采用减振浮筏、弹性支撑等手段，将振动控制在艇体内部。此外，泵喷推进器自身也会产生振动。因此，减振需要“源头设计+传递路径隔离”多管齐下，一步不到位，前功尽弃。正因如此，掌握泵喷推进技术的国家屈指可数。

向无轴推进方向演进

泵喷推进器已经走过从无到有的阶段，下一步将从有轴泵喷走向无轴泵喷。

传统泵喷通过一根传动轴与艇内动力装置相连，轴系与齿轮箱是不容忽视的噪声源。无轴泵喷的设想，是把环形电机直接嵌入导管内壁，让电机定子、转子和泵喷结构融为一体，彻底取消传动轴，从源头上消除轴系振动噪声，同时还能为艇内腾出宝贵空间，便于布置更多载荷。这一技术若成功应用，潜艇的安静性能有望再上一个台阶。

目前，无轴泵喷面临大功率电机小型化、水下密封、热管理等诸多难题，短期内难以实现快速发展。可以预见的是，随着综合电力系统、高性能永磁电机和先进材料技术的持续突破，泵喷推进将不断向集成化、智能化演进，并与潜艇总体设计、新型降噪技术深度融合。

从螺旋桨到有轴泵喷，再到无轴泵喷，潜艇的水下推进技术正在经历一场“静音革命”。对潜艇而言，谁能在“静”字上多下功夫，谁就能在水下战场掌握更多主动权。

英国拟用“机械爪”捕获失效卫星

■曲 卫

据外媒报道，英国计划研制一款配备机械抓捕装置的航天器，主动捕获并清除地球轨道上的失效卫星。英国航天局公布的信息显示，该项目合同金额为8100万美元，由英国“太空清洁”公司负责实施。航天器计划于2029年发射，完成两颗英国注册失效卫星的清除任务。这项计划不仅着眼于减少太空垃圾，也将验证航天器自主交会、机械捕获和重复利用等关键技术。

此次实施的英国“主动碎片清除”任务，核心是一款具备自主导航和机械抓捕能力的专用航天器。按照设计方案，航天器首先接近目标卫星，通过自主导航和姿态控制调整相对位置，再利用机械抓捕装置将其固定。随后，航天器携带目标卫星降低轨道高度并释放，使失效卫星在大气阻力下逐渐下降，最终重返大气层并烧毁。

这项任务的难点在于精准捕获。近地轨道航天器通常以每小时2.7万千米的速度运行，部分失效卫星还可能发生不规则翻滚。如何在高速运行环境下实现安全接近、可靠抓捕和轨道调整，对导航控制及机器人技术提出较高要求。



航天器（左）用机械爪抓捕失效卫星（示意图）。

近年来，全球卫星发射数量不断增长，地球轨道环境日趋复杂。欧洲航天局最新统计数据显示，目前全球受到持续跟踪的在轨空间物体约有47250个，其中既包括正常运行的卫星，也包括失效航天器、火箭残骸及大型碎片。相比能够追踪的大型目标，数量庞大的微小碎片更加难以监测。欧洲航天局估计，地球轨道上尺寸介于1厘米至10厘米的空间碎片约有150万块，尺寸介于1毫米至1厘米的碎片约有2.3亿块。这些碎片虽然体积较小，但高速碰撞仍可能损坏卫星设备，甚至威胁载人航天活动。更严重的是，大型空间物体发生碰撞后可能产生大量新碎片，进一步增加后续碰撞概率，形成连锁反应。因此，单纯依靠轨道监测和碰撞预警已难以从根本上消除碎片风险，主动移除失效航天器成为太空环境治理的技术方向。

该项目的意义，并不局限于清除失效卫星。英国航天局表示，相关技术还可用于未来航天器的在轨检查、维修、燃料补给和寿命延长，并服务于在轨组装与制造产业发展等。目前该项目仍处于设计和研制阶段。机械抓捕的可靠性、复杂轨道环境下的作业安全、目标再入风险以及长期运营成本，均有待后续验证。

「森林骑士」

■张诗宏

下面这张照片中，一名骑在马背上的士兵，头戴战术头盔，面涂迷彩油，身着绿色吉利服，胯下的黑马披挂同色系的迷彩伪装网，看上去与周围环境几乎融为一体。这是英国军队进行军马伪装测试的一幕，其背后隐藏着一个军事课题：现代战场上的骑马侦察与伪装。

作为现代狙击手和侦察兵的标准装备，吉利服最初是苏格兰高地猎人的伪装服，是为了在狩猎中隐蔽接近猎物而设计的。这种服装的最大特点是用布条、麻绳或植被状材料覆盖全身，打破人体轮廓，使穿着者融入自然环境。照片中的士兵身穿吉利服，配备战术背心，表明这是一次接近实战状态的侦察测试。

在现代化战场上，骑马参战似乎早已过时，但在一些特殊的地形条件下，马仍具有不可替代的战术价值。森林、沼泽、山地等复杂地形是装甲车辆通行的“噩梦”，而马却可以灵活通过。训练有素的马几乎不会发出噪声，在需要隐蔽侦察的任务中，具有无人机和车辆无法比拟的优势。

英国陆军进行的测试，正是为了验证这些课目。测试内容包括马在现代战场上的耐力、负重能力及与骑手的协同性等。马的优势在于树林、沼泽、山地等车辆通行困难的地形，以及需要低噪声等特征的隐蔽行动。

照片中的马同样披挂迷彩伪装网，这并非多余之举。迷彩伪装网不仅能打破马的轮廓，使其与周围环境形成视觉融合，同时还兼具可见光与红外伪装功能，实现相当程度的红外隐身。

侦察与伪装的结合，是现代战场上的一个难题。作为伪装方时，需要不断提升伪装水平；而作为侦察方，需要不断发展先进探测手段。照片中的场景将这两者巧妙结合，展示了传统伪装手段在现代侦察中的价值。

再看这张照片，它似乎也是一个提醒：在无人机和卫星主导战场侦察的今天，骑马侦察与伪装并未消失，在特定环境中可以发挥重要作用。说到底，骑马伪装是为了更好地实施侦察。这一点，从苏格兰高地的狩猎活动到今天的战场从未改变。

图文兵戈



无创脑控技术赋能单兵操作无人机

据外媒近日报道，英国一家公司于9月下旬在曼彻斯特举行的防务会议期间演示了无创脑机接口控制技术。这项技术通过神经连接控制无人机，可赋能单兵隐蔽操控。

在智能化无人作战快速发展的背景下，完全自主武器存在伦理争议与失控风险。传统摇杆、屏幕操控方式操作链路长，难以适应复杂战场的快速决策需求，现代战场需要一种“人在回路”、低负担的指令交互手段。

无创脑机接口控制技术采用无创头带方案，操作员既不需要屏幕也没有操纵杆，唯一的控制器是一条戴在头上的白色头带。头带内侧密布微型针状传感器，贴附于操作员头部，实时采集视觉皮层的电活动信号。设备内置的信号处理器将脑电模式转化为控制指令，再通过蓝牙发送至无人机。

目前，这项技术最多能控制10架无人机进行集体飞行，但不具备多机独立任务能力。对于超视距飞行，操作员可通过屏幕查看。

此次演示属于早期原理展示，仅验证基础编队控制，尚未披露在复杂电磁环境下的稳定性、抗干扰能力，以及多机独立任务分配实测数据。

（宁国强）

前沿技术



无创脑控无人机技术演示。

社址：北京市西城区阜外大街34号 邮政编码：100832 发行电话：（010）68525572 每周一、二、三、四、五出版 全年定价150元 零售每份0.57元 承印单位：解放军报社印刷厂（地址同社址）