电动飞机离战场有多远

■史 斌 牛泽锋



全球最大吨位载人全电飞机X1全尺寸验证机。

8月12日，由瑞典航空企业研发的全球最大载人全电飞机X1在美国普拉茨堡机场完成首飞。这标志着兆瓦级全电航空动力正式从轻型民用领域迈向大型重载实用阶段，同时也为未来低空作战、前沿后勤、特种勤务体系革新开辟了全新技术路径。

首飞实现技术突破

X1全尺寸验证机翼展32.3米、机长23.2米，最大起飞重量约11.3吨，是当前全球吨位最大、动力级别最高的全电池动力飞机。整机采用轻量化航空复合材料打造，完全由电池提供动力，首飞期间耗电费用约为5美元，凸显出电力推进带来更低的飞机运营成本。值得注意的是，X1并非等比例缩比模型，而是与30座级ES-30量产支线客机相对应的全尺寸验证机。其验证范围不只是“电动机能不能带动飞机上天”，还覆盖大型机体结构、气动布局、电池布置与配平、系统集成等多项与真实机型同量级的关键技术内容，核心目标是为30座级ES-30量产支线电动飞机积累实测数据。

本次试飞严格遵循美国FAA实验类特殊适航认证标准，是历经1年地面测试、系统校验后的定型验证飞行，具备较高的工程参考价值。试飞全程27分钟，X1全尺寸验证机独立完成滑行、全速起飞、稳定爬升、空中机动、平稳着陆全课目。全程状态可控、系统零故障，最大飞行高度335米，全电推进系统持续输出功率稳定突破1兆瓦。

相比之下，此前的纯电动力实飞验证，基本都停留在几十千瓦至数百千瓦级别的轻型机和通航机量级。兆瓦级稳定输出功率意味着动力级别跨过大型运输类航空器门槛，在10吨级以上大型航空器上实现纯电动力长时间稳定做功。这一技术难点在于兆瓦级电流下的热管理、放电稳定性、电磁兼容，以及能量分配与瞬时功率调度等，需要各子系统同步协调、互不掣肘。此次试飞将这些情况首次放在真实工况下进行测试，验证其技术可行性。

军事应用潜力受关注

X1全尺寸验证机的首飞成功，并非民用技术的“自娱自乐”，其低噪声、低成本、低红外特征、易部署、运维简便等特性，精准击中传统军用航空体系的运营痛点，也使X1全尺寸验证机的军事应用前景受到关注。

一是将推进前沿后勤保障革新。大型电动飞机无需燃油补给，依托野战移动储能车即可快速补能，跳过了油料储运、场站油库等复杂环节，适配偏远哨所、远海岛礁、山岳丛林等缺乏飞行场站保障的特殊地域，能够高效完成弹药给养、医疗器材的短途投送，将前线后勤保障链条压缩一半以上，大幅降低油料运输车队、场站运维的暴露风险。

二是低空隐蔽侦察，实现真正的“静默抵近”。电动飞机的噪声远低于传统飞机，红外辐射信号特征较同体量涡桨飞机更弱，可轻松规避声学、红外警戒系统探测。改装后的电动飞机搭载光电侦察、电子对抗设备，可实现低空抵近侦察等，有助于提升战术行动突然性与隐蔽性。

三是特种作战投送，具备复杂地形的野战起降能力。电动飞机运维简便、运行成本低，在基地人员通勤、短途物资转运、训练保障等场景中具备一定的经济优势。这类应用对航程和载荷要求相对宽松，技术门槛低于一线作战场景，或将成为电动飞机军事化应用的早期切入点。

短期内难以大量列装

受限于当前储能、材料、动力控制技术不足等，大型电动飞机的全面军事化应用仍存在诸多短板，短期内难以替代传统军用航空器。

航空动力电池的质量能量密度仅有传统航空燃料的1/50，体积能量密度是传统航空燃料的1/14，这一差距严重制约电池技术在航空业的广泛应用。数吨重的电池还会挤占机内空间，导致飞机载荷不足，无法用于远程投送、长时滞空作战等高强度军事任务。同时，电池对环境敏感度较高，低温环境下续航衰减明显，高温环境下易出现热失控，复杂电磁环境下抗干扰能力不足，这些都无法满足全域全天候使用要求。

此外，目前民用技术验证机型的电力推进、电控系统、飞控系统均参照民用标准设计，在战场电磁干扰、火力冲击等恶劣环境下的系统稳定性、故障容错能力和应急处置能力不足，无法满足军事装备高可靠性、高安全性的核心要求。

随着新型储能、航空材料、智能电控、混动集成技术的持续迭代，大型电动航空技术将逐步突破现有瓶颈，实现规模化落地，并成为现代空战与后勤体系的重要补充力量。例如，未来10年油电混动将成为主流航空动力，兼顾燃油长续航与纯电低隐身的优势，将优先用于执行低烈度空中保障等任务；2035年前后，随着电池技术进一步走向成熟，能量密度进一步提升，纯电大型航空器续航有望提升至500千米以上，逐步向无人作战、分布式低空投送场景拓展。

X1全尺寸验证机首飞，验证了兆瓦级全电动力在大型航空器上的应用可行性。未来从技术验证到量产使用，再到军事化应用，该机还需跨越电池能量密度、航程载荷、野战保障等多道门槛，后续发展值得关注。

美军加速发展廉价高超声速武器

■徐秉君

近期，美国海军首次公开F/A-18E/F“超级大黄蜂”舰载战斗机挂载“黑胡子”高超声速导弹飞行测试的画面，表明该项目已进入机载集成阶段。此前，五角大楼已与该型导弹的生产商——卡斯泰利恩公司签署初始生产订单，用于制造首批400多枚“黑胡子”导弹。



F/A-18E/F“超级大黄蜂”舰载战斗机挂载“黑胡子”高超声速导弹测试。

压缩性能缩减成本

“黑胡子”导弹采用两级结构，固体火箭助推器将滑翔体飞行器助推至一定速度和高度后释放，射程接近800千米，速度超过5马赫。滑翔体飞行器可在大气层内机动飞行，轨迹难以预测。战斗部重约43千克，仅有精确制导火箭弹战斗部的一半，远低于“鱼叉”导弹、AGM-158C远程反舰导弹等的战斗部重量。这意味着该型导弹对大中型水面舰艇的毁伤效能不足，偏向于打击雷达、导弹发射架、辅助舰艇等防护较弱的目标。导弹鼻锥一侧有一个向下倾斜的开口，疑似为红外成像导引头窗口。由于红外成像制导属于被动探测，不会触发雷达告警系统，也不受射频电子干扰，因此该型导弹适用于复杂电磁环境下的突防作战。在末段制导精度足够的情况下，其对特定目标可形成有效打击，但对加固目标或大型军舰内部舱室的摧毁能力不足。

“黑胡子”导弹的最大特点是成本低。五角大楼的采购文件显示该弹的目标单价在30万至50万美元之间，卡斯泰利恩公司希望进一步将量产单价压至30万美元以内。而美陆军“暗鹰”高超声速导弹的单枚成本在4100万至1.06亿美元之间，两者价格相差超过百倍。这一差距由不同的设计理念决定：“暗鹰”导弹代表“性能优先”发展理念，追求极致的射程与突防能力，但代价是导弹单价高、产量低，本质上是一种准战略威慑武器。“黑胡子”导弹采取“制造优先”思路，采用成熟的固体火箭助推+滑翔体构型，放弃了超燃冲压发动机等高难技术，在设计之初便明确了“快速、批量生产”目标。

提速发展面临压力

“黑胡子”导弹从概念设计到实弹飞行测试仅用时18个月，这一速度在现有国防采办体系下不可想象。其背后是美军多个高超声速武器项目正面临进度延期与成本超支压力。

美海军此前推进的“高超声速空射进攻性反舰武器”（HALO）项目，原计划2029财年形成早期作战能力，但在2024年秋因预算限制被取消工程招标，美海军在官方声明中坦承“无法在计划交付时间表内完成任务”。此后美海军又启动“多任务经济能力效应器”（MACE）项目，并于今年2月确定“黑胡子”导弹为首个候选武器。

“黑胡子”导弹的战术定位非常清晰：它并非用于战略威慑，而是一款可由舰载机携带、在防区外大量发射的反舰武器。未来面对敌方的先进防空系统，一架F/A-18E/F“超级大黄蜂”舰载战斗机可携带4枚“黑胡子”导弹，以规模化高速打击形成饱和攻击态势。美海军作战部长称，美海军需要这样一种“可负担的规模化导弹”。

至于如何面对成本超支压力，卡斯泰利恩公司的应对策略是自主研发、生产发动机、舵机、导引头等重要部件，以压缩成本开支。然而，过往的研发经验表明，从原型研发到批量生产过程中，导弹成本往往不降反升，“黑胡子”导弹的目标单价能否在量产阶段维持不变还需观察。此外，本次测试仅为挂载飞行，主要验证导弹挂载接口与载机兼容性。至于导弹在发射时能否顺利与载机分离、滑翔体在高速飞行中能否保持稳定性、末段制导精度能否满足打击需求等等，有待实弹测试检验。

“黑胡子”导弹是美军在高超声速武器发展缓慢的情况下，给出的有限解决方案：在战术层面快速发展一种可负担的规模化打击武器。其能否顺利走向量产，有待进一步观察。

水雷上的『小手柄』

■王子渊

下面这张照片中，漂浮在水面的水雷雷体表面伸出一根根像“小手柄”一样的东西。它可不是用来搬运水雷的把手，而是水雷的触发引信——赫兹触角。它的正式名称是赫兹式电冲击触角，是19世纪末到第二次世界大战期间触发式锚雷上的典型设计。

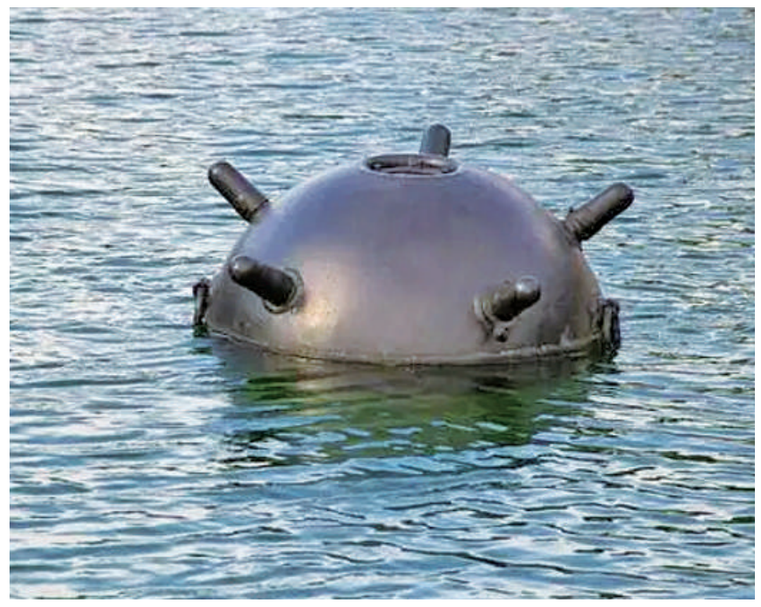
赫兹触角通常是一根铅制薄壁金属管，外观像短粗的触角或手柄，安装在雷体表面，内部封装着一支装有硫酸的玻璃管。平时，铅壳和玻璃管互不干扰。一旦舰船撞上水雷，触角被压弯或挤压，内部玻璃管破裂，硫酸流出来与铅壳发生电化学反应，产生电流，进而触发雷管引爆水雷。因此，它看起来只是一根管子，实际上却是一个电解引信。其优点是结构简单、长期浸泡在海水里也能维持性能稳定，即使表面附着藻类等，只要触角被撞后发生足够形变，仍能可靠引爆。

赫兹触角多用于锚雷，这类水雷的雷体漂浮在水中，通过锚链固定在海底，当过往舰船碰到雷体上的触角时，水雷就会被触发。它不需要雷达、声呐或复杂电子设备，是一种“最朴素”的触发方式。当然，它的局限也很明显：必须发生物理碰撞才能触发，对扫雷具、小型船只或非接触目标不够“灵敏”。现代水雷已经转向磁、声、水压等非触发式引信，甚至用人工智能和多模传感器识别目标。赫兹触角并没有完全消失，而是从“技术前沿”退居为一种“技术留存”。

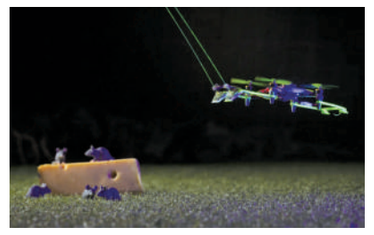
第一次世界大战期间，德国“狼”号袭击舰伪装成货船，搭载约450枚水雷，远赴大洋深处执行秘密破袭任务。1917年7月，它在澳大利亚加博岛附近布下一片雷区。后来，英国商船“坎伯兰”号误入这片雷区，被炸伤并最终沉没。更具戏剧性的是，这片雷区中的一枚水雷直到1929年才被渔船捞起，此时距其被布设水中已经过去12年，这段往事也成为赫兹触角水雷可靠性与危险性的生动注脚。

如今再看水雷上这些“小手柄”，有人感慨，它们不只是机械零件，还是海战对抗的缩影：简单可靠，也足够危险。

图文兵戈



微型无人机加装触须导航



微型无人机使用触须发现前方障碍物。

据外媒报道，荷兰代尔夫特理工大学研究团队从老鼠身上获得灵感，提出一套仿生触觉导航方案，通过为微型无人机加装人工触须，解决微型无人机的导航难题。

老鼠拥有高度灵敏的触须，能够在近距离接触障碍物之前感知到物体的存在。依靠这一感知器官，老鼠可以在建筑物、下水道、洞穴以及众多狭窄环境中快速穿梭，不受能见度条件限制。受此启发，研究人员研制出一种轻量化压力感应人造触须，单根仅重3.2克，长度200毫米，将其安装在微型无人机前端。每根触须的根部装有微型气压传感器，传感器与微型控制器相连。当无人机靠近物体，触须擦碰或抵在物体表面发生弯曲时，根部产生的压力变化可在2毫秒内传导给微控制器，微控制器以毫米级精度计算接触位置与形变深度，从而确定物体位置。

实验中，加装触须的无人机不仅能够在黑暗的环境中依靠贴墙行进方式探索密闭空间，还能在不依赖视觉传感器的前提下，构建陌生环境的触觉地图并找到出口。这种能力在搜救场景中极具实用价值——浓烟、粉尘等会大幅限制视觉导航效果。

不过，这项技术存在明显局限：触须必须接触物体，才能感知物体的存在。由于触须仅有200毫米长，这意味着无人机无法在未知地形中快速行进。

超薄复合薄膜可用于电磁屏蔽



超薄复合薄膜有望用于通信电子设备防护。

据外媒报道，韩国科研人员开发出一种超薄复合薄膜，厚度仅17.5微米，约为头发丝直径的1/5，有望用于军用通信电子设备的电磁防护。

这种薄膜借鉴“砖—石砂浆”结构，碳纳米管纤维充当承力骨架，提供强度和导电能力；MXene纳米片填充纤维间隙，形成连续导电网络并抑制红外热辐射。制备过程时，碳纳米管纤维连续浸入MXene溶液并排缠绕，从而实现大面积均匀制膜。

这种超薄复合薄膜的屏蔽效能超过90dB（指定频段与测试条件下），可大幅衰减入射电磁波，抗拉强度与高强度结构钢相当，且耐高温高湿、反复弯折不易开裂。

需要说明的是，该薄膜实现的是电磁屏蔽与红外隐身，主要防止电磁波进入或内部信号泄露。公开信息并未提及其降低雷达反射信号能力，因而不能直接将其等同于让战机从雷达屏幕上“消失”的隐身涂层。该薄膜优势在于超薄、轻质、高强度，未来有望用于军用通信电子设备的防护。

（宁国强）

前沿技术

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）