军工T型台

近年来，电动垂直起降飞行器（eVTOL）在世界范围内受到密切关注，其相关技术研究、应用发展如火如荼。

根据美国垂直飞行学会的数据显示，截至2024年底，全球电动垂直起降飞行器概念产品数量已超过1000个，覆盖430多家设计机构。

与此同时，电动垂直起降飞行器在军用领域的发展也不容忽视。5年前，美国空军作战试验和创新中心（AFWERX）对外宣称，他们将发起“敏捷至上”项目，致力于探索电动垂直起降飞行器在军事领域的应用。前不久，该项目组又披露，他们将转向探索混合电推进电动垂直起降飞行器的形式，加速研发电动垂直起降飞行器的混合电推进系统。

那么，电动垂直起降飞行器经历了怎样的发展历程？它将为战场带来哪些改变？未来的发展前景如何？请看本期关注。

电动垂直起降飞行器——

旋翼嗡鸣，飞向何方

■王应洋 卓俊朴 张 鹏

美国乔比航空公司的一架实验性电动垂直起降飞行器正在进行起降测试。 供图：阳 明

从“重型油动”到“轻型电动”

驾驶舱在机首，驾驶舱后方是机身——一个可以旋转的“圆筒”，“圆筒”上固定了3片呈45° 倾斜布置的机翼，每个机翼的末端都安装了一个喷口。起飞时，“圆筒”开始旋转，机翼尾端的喷口开始喷气，助推飞行器升上天空……

这个外形有点类似“火箭”的飞行器，是世界上最早的垂直起降飞行器。

二战末期，盟军掌握了战场主动权，德国空军机场经常被盟军压制。德国空军机场的目标很大，在战争中很容易被摧毁。为解决这一问题，德国福克·伍尔夫公司的工程师准备研究一种可以短距起降的战斗机。

起初，他们打算在发动机和机翼上下功夫，但后来发现，如果采用传统的平衡翼设计方式，起飞滑跑距离至少需要800米左右。

后来经过反复设计研究，福克·伍尔夫公司的工程师拿出了“垂直起降飞行”的设计方案。与其他飞行器相比，垂直起降飞行器具有一个明显的优势：起飞空间只需要一个篮球场大小的平地即可。但由于技术过于复杂，该飞行器设计方案最终夭折。

为了保证战争中机场一旦被摧毁后，空军仍能起飞作战，研发或引进能够垂直或短距离起降的战斗机，始终是世界上许多国家关注的重点。

1957年，英国霍克公司和布里斯托尔公司开始研究垂直起降战斗机。12年后，英国列装了“鹞式”战斗机。利用矢量喷管技术，同时融合固定翼飞机的高速巡航性能与直升机的垂直起降特性，这款战斗机实现了短距离起降，服役后带来了战斗力的提升。在马尔维纳斯群岛战争中，“鹞式”战斗机击落了21架阿根廷战斗机，被阿根廷空军飞行员称为“空中黑色魔鬼”。

作为燃油动力垂直起降飞行器的典型代表，美军F-35B战斗机已部署于两栖攻击舰，启动垂直起飞模式时，作战半径可达400公里左右。不过，该型战斗机存在噪音大、成本高、效费比低等缺陷。据悉，F-35B战斗机自2015年服役以来，已发生至少5起全损事故，可靠性值得商榷。

对于垂直起降飞行器来说，其“垂直起降”的飞行方式，决定了飞行器自身重量对飞行的重要影响。

为了减轻负重，早在2009年，美国航空航天局就提出了概念电动垂直起降飞行器“海雀”。但当时受限于动力与能源等技术瓶颈，“海雀”未能落地。

近些年，随着电动机、电池与气动技术的成熟，美国乔比航空公司于2023年推出全球首架军用电动垂直起降飞行器原型机，并将其交付美国空军。

从“重型油动”到“轻型电动”，带来的多种优势显而易见：电动垂直起降飞行器的重量大大减轻；电驱动系统将其每小时运营成本降至约600美元；电驱动模块化设计，使电动垂直起降飞行器理论故障率较传统直升机减少约70%；电动垂直起降飞行器噪音低，且彻底规避了燃油泄漏引发的环境风险……

回首垂直起降飞行器的发展历程，其早已发展成为一个“大家族”。从广义上来说，无需依靠跑道起飞的直升机、多旋翼飞行器、倾转旋翼机、推力矢量喷气机等均可算作垂直起降飞行器。同时，垂直起降飞行器也可按照有人驾驶或无人驾驶，以及燃油驱动或电驱动等方法进行分类。

电动垂直起降飞行器作为“后起之秀”，其最突出的优点是动力来源从航油变成了电力，噪音更低更加环保，在设计上也更加灵活，更容易获取轻装简行、敏捷机动的能力，进而适应更为多样复杂的飞行任务。

拓宽低空战场新疆界

当前，电动垂直起降飞行器普遍采用分布式电推进系统，驱动能源以高能锂电池为主，容错能力强、可靠性高。

未来随着动力、能源与控制等关键技术的突破，凭借机动敏捷和可探测性低的优异性能，电动垂直起降飞行器有助于构建低空作战与后勤保障的新形态。

2020年，美国空军启动了代号“敏捷至上”的验证项目，探索电动垂直起降飞行器在战术投送与特战救援等场景中的应用，发挥其“战场尖兵”的作用。

在人员部署方面，借助电动垂直起降飞行器可获得“动如脱兔”的战术响应速度。

未来战场上，人员快速进出战区的机动能力已成为战术决胜的关键要素之一。电动垂直起降飞行器可与直升机或装甲车辆构建“联合杀伤链”，通过敏捷投送或近距离支援，提升战术响应速度。

在物资运输方面，借助电动垂直起降飞行器可实现“最后一公里”保障。

传统空运平台体型巨大，容易成为空中靶标，如北约C-17“环球霸王”运输机翼展约51米、CH-47“支奴干”直升机旋翼直径约18米。在大规模运输场景中，物资卸载需伴随装甲部队的实时防护。电动垂直起降飞行器可弥补战术级末端补给缺口，通过空中航路快速精确投送物资。电动垂直起降飞行器甚至可支持吊舱式空投，直接规避近地机动阶段的危险与能量消耗。

在医疗救援方面，电动垂直起降飞行器可扮演战场“空中救护车”的角色。

通过搭载雷达与光电侦测系统，电动垂直起降飞行器可执行战场人员搜索、定位与抵近救援等任务。比如，如果遇到山体滑坡、洪涝等灾害，电动垂直起降飞行器可以实时稳定地将影像信息回传至地面指挥中心，为灾情评估和救援提供决策依据，完成快速精准搜救。

在当前信息化战争的背景下，军事行动要求作战单元具备更强的隐蔽性和生存能力，快速反应和高机动性成为必要条件。从这个角度来看，能够在不同复杂地形和环境中快速反应的电动垂直起降飞行器，是传统飞行器无法比拟的。

走向自主化、智能化、体系化

公开资料显示，近年来，在电动垂直起降飞行器领域，很多国家正逐渐构建起涵盖技术攻关、空域管理、量产体系及基建标准的完整生态。

随着动力、能源与气动等技术的进一步突破，以及与人工智能技术的融合发展，未来必将出现更加自主化、智能化、体系化的电动垂直起降飞行器，其应用前景将更加广阔。

——自主化让电动垂直起降飞行器“操控员”转变为“任务指挥官”。

目前，“手动操控”模式的电动垂直起降飞行器存在操控员技能门槛高、培训周期长以及人机交互效率低等问题。未来赋予电动垂直起降飞行器自主感知、规划能力与控制权限，可进一步优化战场时空窗口利用率。比如，通过装载避障系统，电动垂直起降飞行器可以感知电线、建筑、树木与山体等，自主避开障碍物，保证飞行安全。

其具体过程为：操控员授权或监督任务，电动垂直起降飞行器按照授权执行规划，实现动态人机协同作战。

——智能化为电动垂直起降飞行器装上“眼睛、耳朵与大脑”。

集成惯性导航、光电吊舱与机载雷达等传感器，以及多模态数据融合算法，为电动垂直起降飞行器装上“眼睛、耳朵与大脑”。借助“眼睛、耳朵与大脑”，电动垂直起降飞行器可独立完成定位建图、目标搜索与识别跟踪等任务。

如果搭载嵌入式神经网络处理器，电动垂直起降飞行器还能完成复杂环境下的意图解析、行为决策与路径规划任务。例如，通过充分利用低空气流数据，电动垂直起降飞行器可以优化飞行轨迹，像海鸥一样省力地“御风而行”。如果传感器信号直驱执行机构，电动垂直起降飞行器将具备毫秒级响应能力，环境适应性大幅提升。

——体系化将赋予电动垂直起降飞行器不可或缺的战场新角色。

电动垂直起降飞行器可通过多机集群实现协同作战，形成覆盖陆、海、空的全域作战体系。一方面，多机编组通过分布式信息共享，协同执行“侦察—决策—打击—评估”任务链，提高作战效能。另一方面，电动垂直起降飞行器集群与无人战车或无人舰艇构建“跨域杀伤网”，推动战场模式向体系化演进。目前，美国空军已经实现了通过电动垂直起降飞行器，与其他军用飞机直接进行无线电通信，验证了战术级信息融合的潜力。此外，电动垂直起降飞行器还可作为空中通信节点，整合卫星、5G和地面基站数据链，实现战场信息融合。

从“重型油动”到“轻型电动”，再到战场“跨域杀伤网”，电动垂直起降飞行器正以飞快的速度拉近技术与作战之间的距离。它的军事化进程将如何重构战场？答案或许就藏在下一代电动垂直起降飞行器的旋翼嗡鸣之中。

保障达人

陆军某旅火炮维修技师陈江山讲述研发创新之路——

「走得不容易，但我觉得值」

■赵东方 刘华山

初春清晨，陆军某旅训练场上，二级上士陈江山正带着几名战士调试一台设备。

借助眼前这台设备的智能测试评估系统，官兵们能在不吊拆炮塔的情况下，快速发现隐形故障，为火炮检测提供定量的决策依据。

入伍十余年，陈江山从一名普通士兵成长为装备保障领域的“兵工匠”。他研发的多项创新成果已获推广应用，大幅提升了装备保障效率。谈起这些年的研发之路，陈江山感慨：“这条路走得不容易，但我觉得值。”

陈江山的研发之路始于一次保障任务。当时，一门火炮突发故障。他发现，依靠现有检测设备维修火炮，过程繁琐，制约了维修效率。“研发一套便携式、智能化、可视化检测设备，用来提升维修效率。”他萌生了一个想法。

说干就干。陈江山开始查阅资料、请教专家，甚至自费购买零部件进行试验。然而，研发之路充满挑战，遭遇技术瓶颈、设备调试失败等等，难题接踵而至。

然而，陈江山心里始终憋着一股劲。“不把这东西搞出来，我决不罢休。”那段时间，他吃住都在修理间，经过无数个日夜的奋战，终于成功研发出某型火炮的智能测试评估系统。依靠这个系统，检测故障的耗时大幅缩短，系统得到了官兵好评。

事实上，陈江山的研发创新成果远不止这一项。“高射机枪手一体化装弹机”“突击车轻量化便携动力舱吊具”“融合型便携式自适应充电站”……一个个创新成果落地生根，被多个单位推广应用，解决了装备保障中的多个难题。

陈江山没有停下脚步。在他看来，一个人的力量有限，只有带动更多人参与创新，才能为部队装备保障注入更多活力。为此，他主动将自己的研发经验和维修技巧传授给年轻官兵，并成立研发创新小组，带领战友共同攻关。

“既然选择了在军营成长，就要干一行、爱一行、专一行。”陈江山常把这句话挂在嘴边。

在他看来，装备保障是战场打赢链条的重要一环，只有把每个装备保障细节做到极致，才能让每台装备都以最佳状态投入战斗。

如今，陈江山每天依然忙碌在装备保障一线。“只要部队有需要，我就会一直干下去。”他说。

上图：陈江山正在检修装备。 杨振鸣摄

军用护目镜——

士兵的“视觉盾牌”

■冀 德 冯佳琦

军工科普

无论是在影视作品还是在各类军事新闻报道中，观众经常可以看到佩戴各式军用护目镜的士兵。

士兵们佩戴眼镜不是为了增加神秘感，在战场上，军用护目镜是他们的“视觉盾牌”。

护目镜与军事用途联系在一起，要追溯到一战时期，空战场上的飞行员首先配备了护目镜。德国飞行员曼弗雷德·冯·里奇特霍芬就佩戴着由皮革和玻璃制成的护目镜，驾驶“福克DR-1”三翼机进行作战。

当时，战斗机座舱大多采用开放式设计。战斗机高速飞行时气流大，护目镜的出现使飞行员的眼睛免受冲击。此外，在当时的技术条件下，战斗机的油料有时会发生外溅，护目镜可以有效防止油料飞溅到飞行员眼睛里。

这一时期的护目镜设计简单，功能单一，其缺点也显而易见：透明的玻璃镜片易碎，且不能抵挡紫外线对眼睛的伤害。

到了二战时期，军用护目镜开始大量配备各军兵种作战人员。这一时期，军用护目镜的典型代表有美军的M1943护目镜、M1944护目镜和德军的M30护目镜等。此时的护目镜与之前相比有了很大进步，护目镜框架材质升级为硬质铝合金，同时镜片经过了防雾和硬化处理。不过，护目镜的功能还是仅限于防风防沙、防碎石、防紫外线等。

随着战争形态、作战样式不断演进，士兵的眼睛在战场环境下受到的威胁变大。加拿大陆军曾做过一项关于视觉伤害的调查，调查显示，大约67%的视力受损者，在眼睛受伤时未使用任何护眼装置。

经过多年发展，军用护目镜的样式和制造材料不断完善和丰富。目前，军用护目镜大多采用聚碳酸酯材料制造。这种材料制成的镜片不仅轻便，抗冲击性能也比传统玻璃材料高出数倍，可以有效抵御高速飞溅物的冲击。例如，由这种材料制造的美国ESS Crossbow护目镜，其镜片能防枪弹片、子弹及碎片的冲击。

另外，除了镜片的制作材料，镜片的颜色选择也大有讲究。在实战或者训练中，环境光线对视觉的影响不容忽视，为此，军用护目镜通常配备深灰色、黄色和透明3种颜色的镜片。

深灰色镜片能有效防止紫外线，适合在晴朗天气或者有强光的作战环境下使用；黄色镜片具有一定的增亮效果，能在暗光条件下让景物看起来更加清晰，适合在阴雾天气或者清晨傍晚等低光环境中佩戴；透明镜片透光率高，可以最大限度地保持视觉还原度，适用于夜间、阴天或室内靶场等弱光的环境……

如今，军用护目镜正呈信息化、智能化的发展趋势，或将成为未来战场士兵作战的战斗子系统之一，在兼顾防护的同时与头盔、通信系统等其他装备相兼容，辅助全方位感知态势，适应不同战场需求并发挥重要的作用。

美国ESS Crossbow护目镜。 资料图片