

# 美国海军中小型无人机电推进动力系统发展分析

## Analysis to the Electric Propulsion Systems for Small and Medium UAVs of U.S. Navy

宋汉强 张光智 沈勋 / 海军研究院

纯电/混合电推进动力系统在本质上属于多技术集成，随着发动机、电池等单项技术的模块化并行发展，可以快速转化成装备，满足海军无人机对中小推力/功率动力系统的需求。

长期以来，“需求牵引、技术推动”是武器装备发展的总体思路。在航空动力系统的活塞时代（第一时代）和涡轮时代（第二时代），航空动力发展以飞机的“需求牵引”为主。而在碳达峰、碳中和的战略背景下，可持续性则成为摆在航空业面前的首要问题，航空动力发展进入以纯电/混合电推进为代表的电气化时代（第三时代）<sup>[1-2]</sup>。纯电/混合电推进本质上属于多技术集成，具有典型的“技术推动”特征，可以满足未来海军用中小型无人装备发展的动力需求。

### 美国海军中小型无人机电动力系统发展现状

从海军无人装备应用需求看，可以分为潜射无人机、舰载无人机，以及可通过空投、舰载和近海车载发射的无人机集群等。不同的应用场景，对配套动力的需求存在差异。总体而言，对于军事需求集中在探测、预警、侦察、指挥、通信中继、干扰、攻击、运输等特种任务的航空装备，纯电/混合电推进可很好地



美国海军管式发射的“郊狼”无人机集群

匹配其动力需求。

潜射无人机需要跨水空介质使用，尤其对于须具备水下机动能力的装备，在水下可采用固体燃料或者电力驱动，在空中可采用传统发动机，纯电/混合电推进是理想的动力形式。从20世纪90年代开始，美国海军形成了包括“海上搜索者”“海上哨兵”“鸬鹚”“弹簧折刀”“潜射扫描鹰”“黑翼”等一系列试验性潜射无人机。除“鸬鹚”属于大型潜射无人机外，其余均属于小型无人机平台且均为干式发射。其中，“弹簧折刀”“黑

翼”等选用电池作为动力。

无人机集群主要以小型飞机平台为主，飞机平台质量小到以克为单位计，最多在数百千克量级，对配套动力的需求集中在电动、活塞、微型涡喷/涡扇发动机。2014年美国战略能力办公室（SCO）主持了“灰山鹑”项目，2015年美国海军研究办公室（ONR）主导了低成本“郊狼”无人机集群项目，美国国防预先研究计划局（DARPA）启动了“小精灵”项目，配套动力系统集中在电动和微型涡喷/涡扇发动机<sup>[3]</sup>。

美国空军“敏捷至上”项目中纯电/混合电推进飞机平台

类型	载荷	发布性能指标要求			方案
		航程/km	航时/min	速度/(km/h)	
大型载人平台	3 ~ 8人	161	60	161	 <p>乔比飞机公司的S4航空器，全电推进的倾转旋翼构型</p>
					 <p>贝塔技术公司的“阿丽亚”航空器，全电推进系统和固定翼/旋翼混合构型</p>
小型载人平台	1 ~ 2人	161	15	72	 <p>飞特公司的“红色蜂鸟”轻型电动垂直起降单人飞行器，采用4个涵道风扇提供升力和动力</p>
运输平台	20kg	322	100	161	 <p>军刀飞机公司的“雷戈”航空器，采用混合电推进系统，兼具传统升力和倾转涵道风扇</p>

短期内大型舰载无人机平台依然以传统构型动力为主；而适配多样化任务的中小型无人机平台主要承担侦察、监视、预警、通信中继和运输等任务，对动力需求集中在中小推力/功率，与当前的纯电/混合电推进发展态势极其匹配。在美国空军的“敏捷至上”项目中<sup>[4]</sup>，已探索了电动垂直起降飞行器的应用，其作战使用场景包括但不限于特种作战、救援搜索、短距离运输等任务，整体上分为3个不同等级的飞机平台，包括大型载人类、小型载人类和运输类。由于各平台采取的都是旋翼构型，具备垂直起降能力，在针对腐蚀防护采取适应性改进后也可满足海军舰载使用需求。

## 需求分析

对于混合电推进动力系统，飞机平

台关心的是对整体的贡献。相比于传统动力系统的推力、耗油率、推力/功率质量比等顶层指标，混合电推进具备独特的特征，实质上可等效为发电机组的航空应用，在不同功率量级下，可用等效燃油消耗率和等效功率/质量比加以评价<sup>[5]</sup>。从海军使用场景上看，为满足多样化任务需求，主要集中在跨介质无人机（包括潜射无人机、潜水无人机等）、舰载无人机，以及无人机集群等方面。其共性需求主要集中在以下方面。

一是飞机平台等级，从中小型无人机可选的纯电/混合电推进动力看，功率等级涵盖从几十千瓦至兆瓦级。混合电推进有串联式和并联式，发动机为活塞式和转子式，其中，20 ~ 200kW的混合电推进动力系统主要基于活塞式或转子式发动

机，200kW以上的混合电推进动力系统以涡轴发动机为基础发展，主要应用于起飞质量在吨级及以上的大中型无人机。

二是飞机平台任务载荷需求，区别于民用无人机的单一使用场景需求，军用无人机平台通常需要兼顾多任务能力。可分为基本飞行性能和任务需求，由于作战使用场景差异，和民用飞机平台相比，基本飞行性能通常还须兼顾高强度对抗、高强度使用、复杂环境等多种因素，使其在基本飞行平台上的赋能远远高于民用平台，造成可用任务载荷远小于民用领域的单一任务载荷。因此，在固定功率等级下，对高等等效功率/质量比、低油耗的需求水平更高。

三是海洋环境适应性要求，对于配装海军飞机平台使用的动力系

统，在高温、高湿和高盐的海洋环境下，需要满足腐蚀防护和霉菌等要求；在舰载环境中，还需满足酸性大气、复杂电磁环境等使用要求。因此，在材料选取、腐蚀防护涂层、“舰—机—发”适配、舰载条件下的综合保障，以及舰载约束下安全性设计等方面，对电推进动力系统提出了特有的海洋环境下适应要求。

除共性需求外，为适配不同任务场景，配装不同类型飞机平台的动力要具备其特有的任务特征。在跨介质无人机领域，目前在发展和验证的计划中均存在水下机动能力不足的缺点，在一定程度上无法全面满足潜艇隐身的需求，因此，动力系统需求重点集中在水下续航、水下机动、发射深度等能力，可推断出高储能、高能量密度电池是对电动推进的核心需求；在空投无人机、舰载无人机和无人机集群方面，在承担侦察、预警、中继类等任务时，通常对航时、航程要求较高。因此，对纯电/混合电推进动力系统的需求主要集中在能量利用效率上，纯电推进重点在高能量密度电池综合能总量，混合电推进重点集中于始终使传统构型发动机工作在最佳巡航状态点，以满足飞机平台多样化任务能力需求。对于承担一定攻击任务的无人机，则对飞行速度、低噪声、强隐身等提出明显需求。

## 关键技术

纯电/混合电推进动力系统改变了传统的直接将化学能转换为机械能的能量转换形式，而是先将全部或部分能量转换为电能，利用电能转换成机械能产生飞机所需的动力。其关键不在于推进系统的能量转换效

益，而在于飞机平台总体收益。由于对机械能开展能量管理所需机电系统结构复杂，而电能可在存储、分配控制等方面极具优势，借助其尺寸无关特性，在电能管理过程中，能量损耗极低，使得飞机平台气动设计超出原有固定的范畴，可根据其能量管理需求灵活配置，给飞机平台灵活布局带来了收益。有研究表明，电推进动力系统可将能量利用效率从目前涡扇发动机的40%左右<sup>[6]</sup>提升至70%左右<sup>[7]</sup>。纯电/混合电推进需要突破以下关键技术。

一是混合动力系统综合设计技术，重点是瞄准飞机平台，形成面向任务需求、满足使用环境的无人机混合电推进动力系统设计方案。

二是高效高功率质量比电动机/发电机技术，将直接决定飞机的性能，是保证飞机平台载荷的重要前提。

三是能量综合管理技术，突破根据任务需求的能量管理技术，是推动飞机由传统架构向电动飞机发展的关键因素。

四是高能量密度储能技术，作为纯电推进飞机的能量来源，直接决定了飞机的质量等级，混合电推进的储能装置，决定了最大起飞质量和载荷等，是突破传统发动机多状态点设计的关键因素，且发展潜力大，未来可通过新型高能电池实现，包括氢燃料电池、高能量密度锂电池等。

## 结束语

纯电/混合电推进是由技术集成创新带来的新构型产品，区别于传统以需求牵引为主的发展模式，其“技术推动”特征更为明显，包括发电

系统技术、电池技术、综合热管理技术，以及飞发高度一体化设计、人工智能技术集成等。从美国“敏捷至上”项目中纯电/混合电推进飞机平台发展路线看，更趋向于在大量的民用技术成熟后向军用转化的发展路径。目前中小型无人机发展火热，城市空中交通、物流、特种应用等市场需求巨大，因此，新形势下要充分吸收民用领域的发展经验，迅速借鉴、转化和吸收其技术成果，发挥市场引导技术创新的主导作用，走出一条纯电/混合电推进动力系统在海军无人机领域的发展道路。

**航空动力**

（宋汉强，海军研究院，工程师，主要从事海军航空动力装备发展规划论证、型号论证和评估等工作）

## 参考文献

- [1] 中国科协航空发动机产学研联合体. 世界航空发动机年度进展报告[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社 (2019). 2019: 15-18.
- [2] 廖忠权. 未来航空可持续发展之路[J]. 航空动力, 2021(01): 10-15.
- [3] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展[J]. 航空学报, 2020, 41(4).
- [4] 穆作栋, 袁成. 美国空军敏捷至上电动垂直起降飞行器项目分析[J]. 飞航导弹, 2021(2): 59-63.
- [5] 孔祥浩, 张卓然, 陆嘉伟, 等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 021651.
- [6] 中国航空学会. 2015年第二届中国航空科学技术大会论文集[C]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 330-334.
- [7] 黄俊, 杨风田. 新能源电动飞机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57-68.