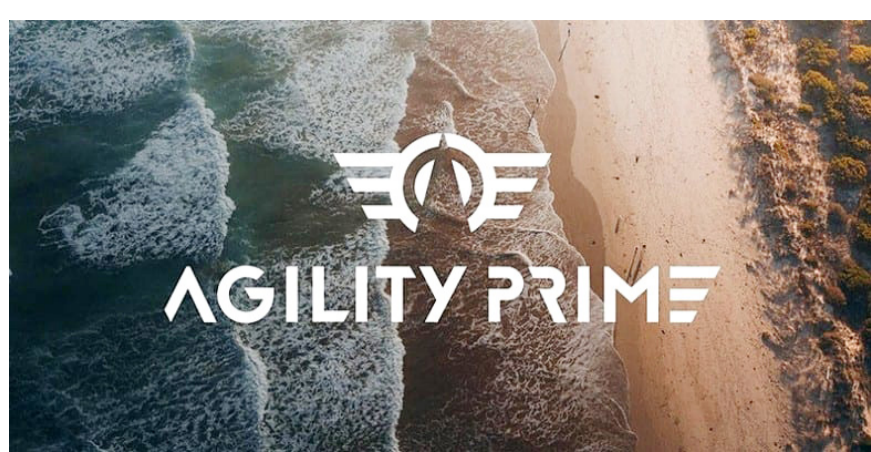




雷戈-A 货运飞行器



美空军启动“敏捷至上”(Agility Prime)项目时发布的海报式徽标



艾罗伊公司与巴航X公司“礼拜堂”飞行器

# 美空军敏捷至上项目飞行器方案分析

| 穆作栋

2020年2月，美空军启动了名为“敏捷至上”(Agility Prime)的演示验证项目，探索航空业新兴的电动垂直起降(eVTOL)技术在特种作战、救援搜索、短距运输等军事任务应用的可行性，推动商用技术向军事领域转化。

电动垂直起降飞行器是当前商用航空领域的前沿领地，具有能量效率高、运营及维护成本低、噪声小等显著优势，在城市空运(UAM)等短距离运输应用场景下具有巨大的发展潜力，已经吸引了全球商用市场的广泛关注，获得了巨额资金投入。同时，这一新型飞行器的特征完美契合特种作战、救援搜索、短距运输等军事任务提出的隐蔽、机动、灵活、低成本、高可靠性、简易环境起降能力等需求。在商用技术发展及军事任务需求的双重推动下，美空军迅速做出反应，启动了“敏捷至上”项目。

在“敏捷至上”项目中，美空军将飞行器研发流程及其相关融资行为均释放至工业界，转而主导测试工作，将政府资源和商业资本、技术高效融合。此前美空军研究实验室公开了混合电推进固定翼飞行器概念，此次“敏捷至上”项目延续了对电动飞机技术的关注，将美空军相关研究范围从大型固定翼飞机扩展至中小型垂直起降飞行器，结合多年以来美空军持续发展的多电飞机技术，体现了其多方位推进航空武器装备电气化的发展思路。今年2月“敏捷至上”项目启动后，美空军积极推动项目发展，开展了为期5天的专题线上活动，在项目初始方案基础上进一步拓宽了空军eVTOL飞行器的应用场景范围，并快速推动企业参与进程、授出合同。

## 项目概况

“敏捷至上”项目旨在开展军方与企业(包括传统航空航天防务企业与小企业)合作，在美国联邦航空局(FAA)适航审定程序之前，通过军方先行测试，推动相关技术发展与应用。该项目得到了美国交通部、军方等的高度关注和支持，4月27日进行的线上活动中，包括美国交通部长古兰、空军部长等在内的相关领导均出席活动并发言。

“敏捷至上”项目核心是竞争性的演示验证活动，美空军通过演示合同为参与方提供资金和政府资源，支持其开展多种环境条件、任务场景下的飞行器演示验证，进而基于参与方飞行测试表现，评估后续是否授予采办合同。

在资金支持方面，美国政府和军方积极制定和推动相关产业政策，通过包括美空军中小企业创新研发基金(SBIR)在内的多个渠道对其进行支持；在政府资源方面，参与者能够获得包括电磁干扰实验室、风洞、试飞空域、声学实验室等在内的基础设施使用资源。今年2月项目发布招标公告，投标截止日期为12月17日，目标为验证相关技术的可行性及任务能力，并于投标截止日期前完成原型机试飞，从而评估军方前期采购试验的可行性，筛选出符合适航审定要求的参与者；4月底至5月初开展了“敏捷至上”线上活动，针对项目内容、技术需求、参与方等开展进一步介绍和讨论；随后预计于2023年完成飞行器适航审定，2025年初具备规模化应用的水平，实现大规模采购。军方为参与者提供试飞空域和配套资源，加快技术成熟；同时军方作为启动用户，先行试用飞行器(暂不要求取证)，但企业必须说明其适航审定计划。

目前，“敏捷至上”项目已开始与参与方签署合同，美国初创公司军刀飞机公司(Sabrewing)获得了金额325万美元的中小企业创新研究合同。需要指出的是，国防部建议美国相关企业在考虑接受国外投资时主动申请外国投资委员会针对投资人和资金的审查；同时，“敏捷至上”项目虽然允许国外企业参与，但设置了相关信息保密要求。

## 飞行器应用场景及技术需求

“敏捷至上”项目将军用电动垂直起降飞行器命名为“适应性保障飞行器”(ORB)，应满足的技术要求主要包括以下5个方面：1)机械结构较传统垂直起降飞行器简化，从而降低维护成本和周期；2)应用自主飞行技术，提高安全性、降低人员操作需求；3)经济性，可批量生产应用；4)采用分布式电推进技术实现低噪声；5)灵活、敏捷，减少对基础设施的依赖。

相应的，飞行器应具备的技术要素包含：1)采用分布式推进系统；2)采用电推进系统；3)有人驾驶、遥控驾驶，或自主飞行；4)垂直起降；5)具备悬停能力；6)可具备升力表面；7)模块化设计。

在项目启动阶段，美空军提出了其关注的典型应用场景，随后在线上活动阶段，美空军进一步扩大了其兴趣范围(Area of Interest)，将应用场景拓展为3类，场景与相应技术指标需求分别为：

- 1) 第一类应用场景(大型载人)  
该类场景是项目启动阶段提出的最初应用场景。有效载荷3~8人；采用全电推进或混合电推进；航程大于161千米；飞行速度大于161千米/时；航时超过60分钟。
- 2) 第二类应用场景(小型载人)  
有效载荷1~2人，或同等重量的货物；采用全电推进或混合电推进；航程大于16千米；飞行速度大于72千米/时；航时超过15分钟。
- 3) 第三类应用场景(载货)  
有效载荷大于230kg；最大起飞重量大于600kg；采用全电推进或混合电推进；航程大于322千米；飞行速度大于161千米/时；航时超过100分钟。

相较于商用领域的电动垂直起降飞行器，“敏捷至上”提出的技术要求有一定差异性。对于上述第一类应用场景，“敏捷至上”提出的技术指标要高于现有的典型商用技术指标，例如贝尔公司于今年1月提出的Nexus 4EX商用飞行器方案航程为95千米，同期现代公司S-A1方案航程同样约100千米，这一航程能够满足典型的商用城市空运需求，但不能满足军事任务需求；第二类和第三类飞行器在商用领域的应用场景尚未凸显，因而未得到广泛关注。此外，军事任务的环境条件与城市存在显著差异，需要考虑结冰防护等多种环境控制问题。美空军表示，采购的飞行器型号不会是军用定制，而是与商用市场版本相同的型号。

## 第一类应用场景方案

该类飞行器与现有商用技术发展方向较为契合，因而参与方的飞行器方案研发进展与项目进程较快。在这一应用场景，目前乔比飞机公司(Joby Aviation)、贝塔技术公司(BETA Technology)与提升飞机公司(LIFT)均已完成原型机试飞，皮亚塞基飞机公司(Piasecki)也在“敏捷至上”线上活动中展示了其概念方案。

2020年5月29日，美空军宣布乔比飞机公司与贝塔技术公司顺利进入“敏捷至上”项目第三阶段。在第一阶段中，企业向美空军提交解决方案概要；第二阶段美空军对解决方案概要进行评估，主要关注包括商业可行性、运营实用性、技术成熟度、适航认证方法、时间表等在内的因素；第三阶段企业将可获得相关资源的权限，并可能进一步获得原型机其他交易合同(Other Transaction for Prototype)。本文对乔比飞机公司S4飞行器进行介绍。

在“敏捷至上”项目最初启动时，S4就被业界认为是最契合项目要求的飞行器。S4采用全电推进系统和倾转旋翼构型，共6个旋翼，在两侧翼尖、中段和尾翼各设置1台电机，巡航速度320千米/时，航程240千米。

倾转旋翼构型能够在确保良好垂直起降性能的前提下提高平飞效率，从而兼顾垂直起降能力与巡航经济性，相较于旋翼构型能够大幅提升航程。



Flyt“红色蜂鸟”轻型垂直起降飞行器



乔比S4电动垂直起降飞行器

倾转旋翼技术的研发与应用已有数十年历史，V-22等型号已经在特种作战等场景下获得了广泛应用，但采用传统动力系统的倾转旋翼机，其发动机功率输出机构与旋翼之间需要极为复杂的机械传动组件，显著增加了平台复杂性和重量，对可靠性带来了一定影响。电推进系统的应用有效规避了上述风险，电机可直接安置于倾转翼组件处，通过线缆传输驱动电机，无需动力传动组件，大幅降低了机械结构的复杂度，其维护特性能够得到保证。

电推进系统为倾转旋翼构型带来了广阔的发展空间，目前多家eVTOL飞行器制造商选择了这一构型，除了本文提到的乔比公司，还有多家城市空运企业的方案，如空客公司A3创新中心Vahana验证机、贝尔公司Nexus 4E全电推进飞行器和Nexus 6H混合电推进飞行器、现代汽车公司S-A1飞行器、百合公司Lilium飞行器等。



贝塔技术公司阿丽亚飞行器

S4为代表的倾转旋翼飞行器也面临显著的技术困难，其核心在于控制率复杂。由于飞行器需要在垂直起降和平飞两种模式间转换，且采用一套动力系统，为了保证转换过程的安全和稳定，需要设计相应的控制率。此外，飞行器气动外形需要兼顾垂直起降、平飞与转换过程的要求。经过无人机等领域多年的探索，目前行业内有一定的技术沉淀，有力支撑了当前的飞行器研发。

作为与乔比飞机公司S4飞行器共同进入“敏捷至上”第三阶段的方案，阿丽亚飞行器姗姗来迟，直至2020年6月12日正式公开。据媒体提供的资料，该飞行器质量高达2.7吨，其弧形机翼长15米，是当前全球最大的eVTOL飞行器。目前，阿丽亚的航程等技术参数尚未公开，其设计航程为400千米。

阿丽亚飞行器采用了另一种eVTOL飞行器常见的构型，即固定翼与旋翼的混合构型，在两侧机翼中部的后方各设置一个定距螺旋桨，提供垂直起降所需升力，机身尾部设置一个推进螺旋桨，提供平飞巡航阶段的推力。在平飞巡航阶段，机翼位置的4个螺旋桨将停转并固定在最小阻力和稳定，需要设计相应的控制率。此外，飞行器气动外形需要兼顾垂直起降、平飞与转换过程的要求。经过无人机等领域多年的探索，目前行业内有一定的技术沉淀，有力支撑了当前的飞行器研发。

混合构型在兼顾了多旋翼飞行器的垂直起降性能与固定翼飞行器的平飞高效特性，相较于倾转旋翼构型，混合构型结构简单、无倾转部件。其缺点也很显著，固定翼与旋翼结构并存实际是一种妥协，两者会互相影响，一方面结构质量大，另一方面效率受限，在垂直起降阶段，大面积的机翼会增大起降阻力，在平飞阶段，旋翼会增大阻力。阿丽亚在平飞阶段停转螺旋桨并固定位置就是平衡这种影响的一种措施。

贝塔技术公司来自美国，该公司于2019年1月公开了其eVTOL验证机AVA XC，质量高达1.8吨，是当时全球最大的eVTOL飞行器，随后空客公司的城市空客(CityAirbus)飞行器以2.5吨质量跃居榜首，本次阿丽亚的公开使得贝塔技术公司反超空客。值得注意的是AVAXC在验证机阶段采用了倾转旋翼构型，机翼前后四个位置各设置一对电机，共8个电机，而阿丽亚飞行器则选取了混合构型、设置4个升力电机。

## 第二类应用场景方案

该类飞行器关注轻载荷、短距离的简易运输任务，参与方的典型飞行器是飞特公司(Flyt)研发的“红色蜂鸟”(Red Hummingbird)轻型电动垂直起降飞行器。“红色蜂鸟”采用4个涵道风扇提供升力和动力，商载113kg，续航时间20~30分钟。目前“红色蜂鸟”已完成全尺寸验证机无人试飞，计划于疫情结束后开展载人试飞测试。

“红色蜂鸟”应用了简单的多旋翼构型，采用涵道风扇，一方面降低翼尖导致的噪声和阻力、提高效率，另一方面也能降低旋翼故障对乘员的风险。此类飞行器的技术难度较低，但其核心问题在于安全性，乘员与旋翼

间缺乏可靠的保护结构，在发生故障或事故时，旋翼极易对乘员造成严重伤害。

## 第三类应用场景方案

该类飞行器关注大载荷、远距离货物运输需求。军刀公司在“敏捷至上”线上活动中展示了雷戈-A(Rhaegal-A)货运电动垂直起降无人飞行器概念，获得“敏捷至上”项目首批合同。艾罗伊公司(Elroy Air)与巴航X公司(Embraer X)合作研制的“礼拜堂”(Chaparral)混合电推进飞行器也加入了“敏捷至上”第三类应用场景。

区别于上述两类应用场景的全电推进飞行器，雷戈-A采用混合电推进系统，能够提供更大航程。在动力装置方面，该机兼具传统升力表面与倾转涵道风扇，可实现垂直起降与常规起降；其载荷为1225千克(垂直起降)/2268千克(常规起降)，速度可达到370千米/时。雷戈-A采用模块化设计，因而具备良好的维护性。应用了基于人工智能的场景识别系统，并且设计了基于多种传感器的探测避障系统。

雷戈-A采用的是采用混合电推进系统，这一技术一般面向大航程任务，是未来支线/干线电动飞机的发展方向，在城市空运领域鲜有出现。混合电推进技术依然需要基于燃料的内燃机，这也是保证其能量密度的核心。区别于传统动力系统，混合电推进系统通过电池组作为储能装置实现能量输出的“削峰填谷”，保证发动机始终处于良好、高效的工作状态，这一思路也是航空装备能量系统领域近年来极为重视的能量优化方法。但由于混合电推进系统的复杂性，初创企业鲜有涉足，相关企业多为传统航空、动力制造商。面向未来干线飞机的大型混合电推进飞行器尚处于概念研究阶段，支线混合电推进飞机处于演示验证阶段，典型代表是UTC公司的801计划，而此前该领域的明星——空客和罗罗合作的E-FAN X演示验证计划已于2020年4月宣告终止。在eVTOL领域，混合电推进技术也是几家欢乐几家愁，2018年率先进入联邦航空局型号适航审定阶段的SureFly公司面临严重经济困境，贝尔公司的Nexus 6H曾是优步Elevate计划中唯一的混合电推进方案，但该公司在重新评估城市空运需求后也于2020年初转而提出了Nexus 4E全电推进方案，XTI公司TriFan 600混合电推进飞机于2019年中完成了65%缩比验证机的试飞。

混合电推进技术在未来发展极具前景，但其复杂性将多数缺乏积淀的初创公司挡在门外，甚至在美国国防预先研究计划局(DARPA)的“垂直起降实验飞机”(VTOL X)项目中，极富动力系统研制经验的霍尼韦尔公司因面临严重的系统热管理问题导致项目终止。目前罗罗、UTC等巨头持续推进相关技术发展。

“礼拜堂”飞行器由美国初创企业艾罗伊公司研发，2020年初，巴航X公司开始参与其研发过程。“礼拜堂”飞行器同样采用混合电推进系统，其有效载荷为100~225千克，航程500千米，其特征为采用吊架式可拆卸货运吊舱，能够实现高效的货物运输。“礼拜堂”飞行器的构型设计与贝塔技术公司阿丽亚飞行器类似，采用固定翼与旋翼的混合构型。

## 总结

面对快速发展城市空运行业，美国从政府到工业界各层面高度关注行业的有序、健康发展。“敏捷至上”项目整合了政府资源和业界力量，旨在推动相关技术与军事应用，形成竞争优势。

从军方角度来看，由于相关技术具有军民融合的特征，民用电动飞机相关技术可迅速应用于军用航空领域。美军希望通过“敏捷至上”打通国防采办与产业界的通道，军方提供政府资源，借助业界的创新能力提升美军能力。与业界的密切合作也可以拓宽军方的采办渠道。