

# 全电动推进验证机 X-57概述

## A Review of NASA's First All-Electric X-plane , the X-57 Maxwell

■ 王翔宇 / 中国航发研究院

受全电动与分布式推进融合的设计驱动，X-57验证机将展示分布式全电动推进系统的优越性与应用可能，并在适航、安全、能效以及噪声等方面为确立未来电动飞行器研发认证标准做准备。

美国国家航空航天局（NASA）在2020年3月发布了分布式全电动推进验证机X-57麦克斯韦（Maxwell）的构型概念图，这是X-57验证机首次以完整的状态出现在人们的视野。在当前电动飞行概念层出不穷、飞行新势力纷纷入场的大背景下，作为NASA近20年来研发的首款全电动载人飞行平台，有着“空中特斯拉”之称的X-57验证机受到了持续的关注。



X-57验证机概念图（来源：NASA）

### X-57验证机研发目标

为使X-57验证机达到巡航能量效率提升500%这一首要目标，全电动架构、翼尖巡航电动机、大展弦比机翼以及分布式升力推进系统是其研发的关键。X-57验证机总工程师麦特·雷迪福表示，用电动机替换内燃机，相应的能效将从28%上升到92%（约3.3倍），同时借助构型优化设计还可以产生1.5倍的能效提升。分布式推进可有效地增升减阻，使得机翼结构更小更轻，同时翼尖螺旋桨能够抑制翼尖涡的不利影响。推进效率的提升以及低廉的电费带来了运营成本的下降，而预期能量密度200 (W·h)/kg的电池则超过了特斯拉Model S电动汽车10%以上，可支撑X-57不间断飞行320km，这些也使得X-57验证机具备向通用航空商业

机型演化的潜力。

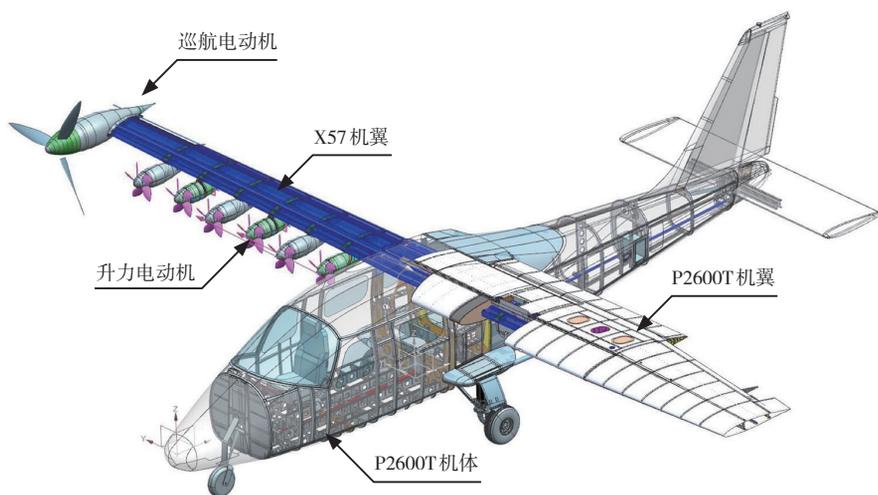
除了电动机自身固有的低噪声属性，分布式结构也带来了升力螺旋桨的小型化，起飞着陆时的低叶尖速度意味着X-57验证机比活塞式发动机飞机要安静得多。通过进一步对每组升力电动机以及螺旋桨异步化处理、使其具有不同的转速，NASA希望最终X-57验证机在地面上空的飞行噪声能够下降15dB以上。此外，X-57验证机的优势还体现在基于推力增强的鲁棒性飞行控制，电动机可在1min内实现超过50%的加力运转从而应对失速等突发情况，接近3倍的机翼载荷提升也将改善飞行品质和阵风响应。

### X-57验证机研发目标

首要目标	巡航能量效率提升500%
衍生目标	总运营成本降低30%
	飞行碳排放为0
次要目标	城市噪声降低15dB
	提升飞行控制裕度与鲁棒性
	弱化不利气象条件的影响

### X-57验证机研发阶段

根据NASA在2014年提出的“缩比集成电推进应用技术研究”（SCEPTOR）项目计划，为降低研发中可能出现的技术风险，X-57验证机的改装试



P2600T原型机/X-57验证机改装示意图(来源: NASA)

验工作分为4个阶段顺次进行。

### X-57验证机研发第一阶段

在第一阶段 (Mod I) 选用意大利泰克南 (Tecnam) 公司的 P2600T 轻型活塞式双发飞机作为原型机, 进行飞行测试并收集升力、阻力、能耗、巡航效率以及飞行品质等方面的数据, 以便与后续改造完成的分布式全电动推进验证机进行对比分析。与此同时, 针对独立的分布式全电动推进系统开展地面验证工作, 测试其在低速飞行条件下的增升效果。

早在2015年5月, 也就是X验证机被正式命名之前, NASA即开展了机翼前缘异步螺旋桨推进技术 (LEAPTech) 地面验证研究。通过与ESAero公司和Joby公司的合作, 在机翼前缘安装了18个升力电动机及螺旋桨系统, 由一辆福特皮卡以接近120km/h的速度带动, 从而模拟在风洞中的低速测试环境。结果显示, 分布式螺旋桨可显著加大机翼表面的来流速度与动压, 当升力电动机输出功率为225kW时机翼能够产生传统推进装置下2倍的升力, 这也意

味着这种电动吹气机翼真正成为了X验证机的构型方案。随着P2600T原型机运抵爱德华空军基地、相关收集试飞数据工作的完成, 2016年年中NASA正式公开了编号为X-57的验证机计划。

### X-57验证机研发第二阶段

第二阶段 (Mod II) 的主要任务是对原型机进行初始电气化集成。用两台巡航电动机代替原装的活塞式发动机, 驱动其作用的高压电池组则被安放在货舱处, 此时飞机外形包括发动机位置均不发生改变。利用专门为X-57开发的飞行模拟器构建虚拟环境, 帮助试飞员尽快熟悉适应电气化的飞行操作, 对改装后的电动飞行器进行地面和飞行测试, 验证电动机、电池以及电子电力系统的可靠性, 消除可能潜在的用电风险。

2016年7月, ESAero公司和缩放比复合材料 (Scaled Composites) 公司合作的P2600T改装工作启动, 而这一阶段最大的挑战无疑是高能高可靠性电池系统的开发。在2016年12月的热失效增长试验中出现了热击穿的问题, 一旦有一个模块发生短路, 整个电池组都将无法工作。解决的办法是在模块之间安装铝质蜂窝结构, 隔离局部电池故障释放的热能, 但这也使得研发周期推迟了整整一年。升级后的双余度电池系统架构由8个模块、每个模块640个单元变为了16个模块、每个模块320个单元, 单个模块质量的降低使得电池更换的操作更为容易。虽然电池组加入新的结构但整体上能量密度基本不变, 具备完成30min全功率试验能力。

Joby公司研制的60kW巡航电动机单个质量仅为26kg, 比原型机



分布式电推进系统地面验证试验(来源: NASA)



X-57 验证机概念示意图 (来源: NASA)

的罗塔克斯 (Rotax) 912S 活塞式发动机下降了一半以上, 但输出功率却达到了后者的 80%。在 2018 年完成电动机控制器和电池系统试验后, 缩比复合材料公司对集成到原型机上的电气系统进行了初始旋转试验, 电动机由地面电源供电后正常运转, 随后单独开展的电池重复性试验表明 X-57 验证机电气化设计方案基本达到了预期。2019 年 10 月, X-57 验证机 Mod II 构型交付 NASA 阿姆斯特朗飞行研究中心, 由电池供电的滑行试验与飞行试验将相继展开, NASA 希望相关工作能够在 2020 年上半年完成。

### X-57 验证机研发第三阶段

在第二阶段的基础上, 第三阶

段 (Mod III) 将开展两方面的工作。一是保留机体和尾翼结构不变, 标准宽幅机翼则被改装为大展弦比机翼, 机翼面积的下降意味着更小的飞行阻力、更不易受到阵风 and 湍流的干扰, 这样可有助于巡航效率和飞行品质的提升。二是将两台巡航电动机吊挂位置移动到了翼尖, 这样做可有效抑制由于翼尖涡诱导下洗作用的负面影响, 使得原型机高速巡航时的能量消耗下降 2/3 以上。

大展弦比机翼研发由 Xperimental 公司负责, 该机翼的平均弦长仅为原型机的 40%, 但承载的载荷却从 813Pa 提升到了 2154Pa 左右。相关测试工作已于 2019 年 10 月完成, 在机翼加载至设计极限载荷的 120% 时,

利用与翼尖相连的液压作动器模拟巡航电动机产生的惯性力和推力, 此时控制舵面在其偏转范围内可自由旋转, 整体结构能够承担 X-57 验证机 1360kg 的设计飞行质量。此外, 阿姆斯特朗飞行载荷实验室还进行了质量和平衡测量以及地面振动试验, 有助于进一步验证结构特性是否与试飞预期相匹配。待进行超声波健康检测后, 机翼被运回 ESAero 公司进行下一步改装。

### X-57 验证机研发第四阶段

第四阶段 (Mod IV) 将呈现出 X-57 验证机的最终形态。此时机翼下方吊挂的短舱内将会安装若干小型高升力电动机以产生分布式电推力。即使是在改装后大展弦比机翼的条件下, X-57 验证机也能以 P2600T 原型机标定的速度进行起飞操作, 而后进入巡航飞行时高升力电动机的柔性桨叶会停止工作、自动收拢到短舱内, 这样不会产生额外的阻力, 待到准备着陆时升力电动机运转, 受离心力作用螺旋桨再次激活以保证低速飞行时产生足够的升力。换句话说, 这种只在起飞着陆时运转的升力系统起到了类似襟翼的作用。

根据 2018 年确定的构型方案, X-57 验证机的升力系统将由 12 个升

### X-57 验证机研发分工安排

NASA 兰利中心	机体、机翼以及控制系统的集成
NASA 阿姆斯特朗中心	动力系统总集成, 飞行验证
NASA 格伦中心	电池系统测试与热分析、升力电动机控制器开发
ESAero	总外包承包商
Scaled Composites	第二阶段集成 (电池、电动机、控制器以及座舱)
Joby Aviation	第二阶段巡航电动机和控制器的开发
Xperimental	大展弦比机翼的设计和制造
Electric Power Sys	电池组开发
TMC Technologies	机载软件验证与确认 (V&V)
Tecnam	原型机 (不含发动机) 供应商

X-57 验证机主要参数

质量 / kg	1360	
最大飞行高度 / m	4267	
巡航速度 / (km / h)	277	
巡航高度 / m	2438	
失速速度 / (km / h)	108	
电池系统	属性	锂电池
	质量 / kg	358
	储能 / (kW · h)	69
	额定电压 / V	461
	持续输出功率 / kW	140
	最大输出功率 / kW	300
巡航电动机及其螺旋桨系统	数量 / 个	2
	质量 / kg	26
	直径 / m	1.52
	功率 / kW	60
升力电动机及其螺旋桨系统	数量 / 个	12
	质量 / kg	10
	直径 / m	0.58
	功率 / kW	10

力电动机及其螺旋桨组成，其输出功率以及质量之和恰好与巡航系统相当。考虑到前期 LEAPTech 计划已经对分布式推进系统进行了较为深入的技术验证，第四阶段的工作重点是整机层次的电力和控制系统集成，可能涉及到升力系统自动响应、推力自主控制以及单一仪表指示等问题。

## X-57 验证机的意义

回到 X-57 验证机，横向上看这种轻型电动飞机完全拥有向城市空中运输市场 (UAM) 提供商业服务的潜力，这也是 NASA 长期以来重点关注的领域。NASA 一直与 Cape Air 等小型客机运营商保持密切合

作，X-57 验证机在设计时充分考虑了电池容量与寿命、飞行速度、运营经济性以及城市噪声等城市空中运输市场的实际需求，而这些也可能成为未来行业公认的规范标准。与此同时，NASA 还委托博思艾伦咨询公司、皇冠咨询公司、麦肯锡咨询公司和 Ascension 咨询公司开展了迄今为止最全面的城市空中运输市场需求研究，涉及到机型分类、使用场景、经营模式、公众接受程度、运营障碍、成本构成以及市场预测等众多内容，这些将为未来 X-57 验证机的商业化起到很好的铺垫。

纵向上看，X-57 验证机可能只是近期 NASA 发力电动飞行领域的第

一步。随着空客公司和波音公司不约而同地将混合电推进作为 2030 年前后客机的动力选项，GE 公司、罗罗公司和普惠公司纷纷启动各自的电推进系统研发计划，处于“发现模式”的 NASA 已经明显感受到了业界对于亚声速固定翼运输机实现电气化飞行的急切需求，尽管这其中必将存在比小型通用航空电动飞机大得多的技术挑战。根据公开的信息，NASA 正在全力推进兆瓦级的电动机和相关电力电子设备的研发工作，借助 X-57 分布式全电验证机和 X-59 超声速低声爆飞行验证机的技术积累，大尺寸、高效率、采用翼身融合布局的全新亚声速验证机将在不久的将来成为现实。

## 结束语

在过去的 5 年时间里，NASA 在分布式全电动推进技术研究上迈出了坚实且极具开拓性的一大步，展示了其引领未来电动飞行的宏伟蓝图与技术实力。但是也要注意，即使 X-57 验证机采用了非常温和稳健的“分步走”技术路径，在电池系统与集成控制等研发过程中也出现了很多计划之外的问题。截至目前，其研究进度已经超期了一倍以上，这意味着电气化的航空旅行虽然是公认的发展趋势，但距其具备商业运营条件、真正改变人们出行方式仍会是道阻且长。很多初创公司提出的那些超前的全电动飞机概念布局、遥遥领先的设计参数以及三五年内实现市场投放的时间表，想要真正成为现实，难度可想而知。 **航空动力**

(王翔宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究)