

# NASA电推进技术研究进展

## Research Progress of NASA Electric Propulsion Technology

■ 兰海青 孙明霞 张美杉 / 中国航发动力所

传统推进系统的燃油效率提升在未来将面临极限，需要探索新的航空推进系统解决方案，以应对气候变化的挑战。在众多的解决方案中，电推进技术能够提高效率、降低排放和噪声，具有明显的优势。

美国国家航空航天局(NASA)认为，电推进技术是非常有潜力的动力解决方案之一，并开展了多项研究，包括纯电/混合电推进技术的多个飞机项目、燃料电池概念探索、电推进技术验证的试验设施的建设等。

### 混合电推进飞机概念

在混合电推进技术领域，NASA先后开展了多个飞机项目，并对其进行了分析和研究。2008年，NASA提出采用涡轮电分布式推进(TeDP)系统的N3-X飞机概念，对TeDP系统进行了循环分析，对电力部件的质量和效率问题进行了研究，并对噪声和排放进行了评估。2016年，NASA开始研制带后部边界层推进的单通道涡轮电动飞机(STARC-ABL)，其缩比概念机已经在NASA电动飞机试验台(NEAT)上进行了首次地面试验，并且对该飞机的推进系统进行了动态分析。2017年，NASA提出一种称为采用协同利用方案的并联电-燃气结构(PEGASUS)的支线客机概念，推进系统采用并联混合电推进结构。2019年，NASA提出带前缘嵌入式分布单通道涡轮电飞机(STARC-LEED)概念，推进系统为TeDP系统，旨在研究分布



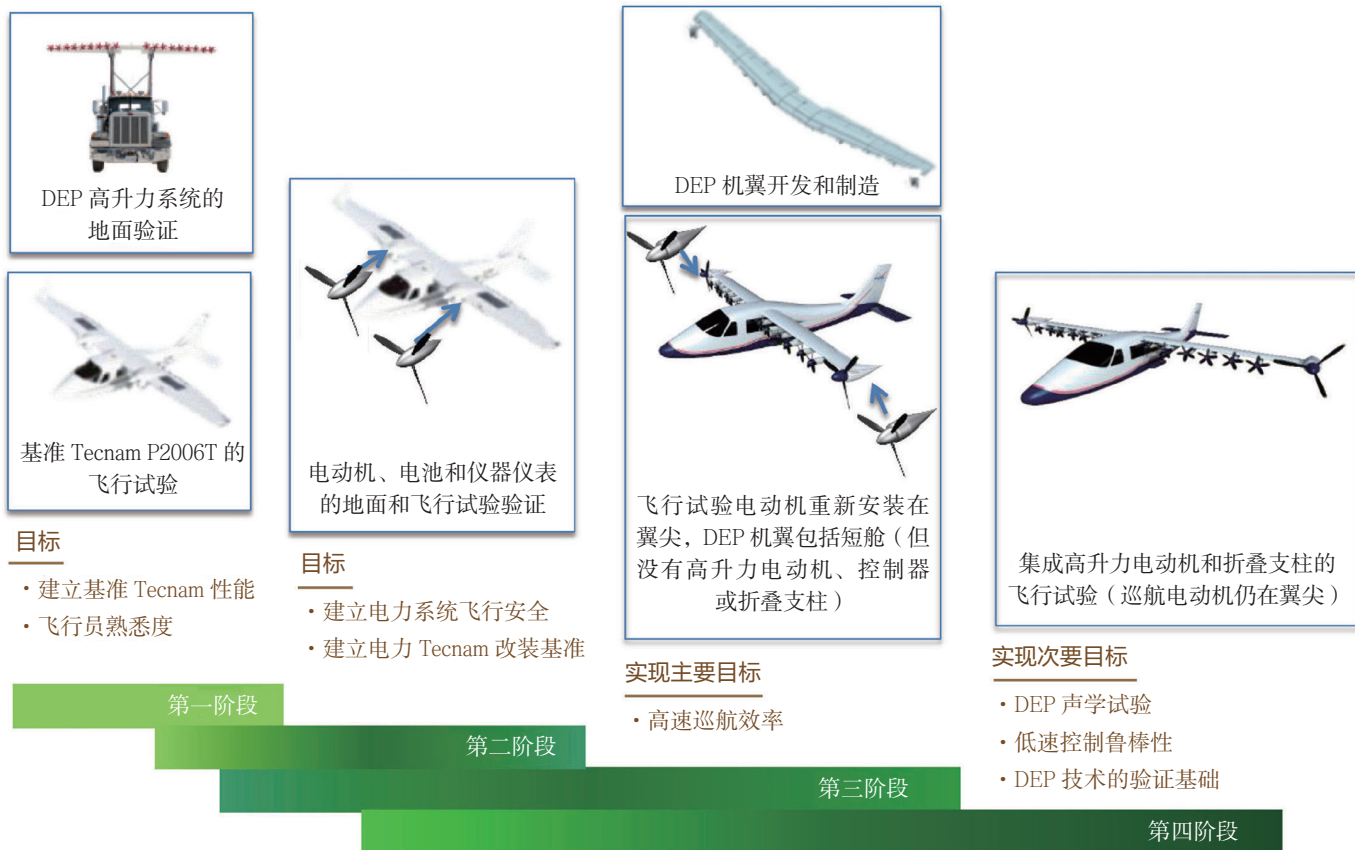
NASA的STARC-ABL混合电推进飞机方案

式混合电推进系统飞机的机翼结构设计，以弥补相比常规飞机机翼额外增加的系统质量，之后采用有限元分析模型，对STARC-LEED概念飞机的两种结构进行研究和分析，以确定与常规结构相比，嵌入式方法是否具有结构质量优势。

### 纯电推进飞机

2016年，NASA在可拓展收敛电力技术作战研究(SCEPTOR)飞行验证项目下，对泰克南(Tecnam)P2006T飞机进行改装，使其采用分布式电推进(EDP)技术，并将该飞机称为SCEPTOR验证机。SCEPTOR项目分为4个阶段：第一阶段，试

验P2006T飞机基本性能，并对分布式电推进系统的机翼(来自于LEAPTech飞机项目)进行地面试验；第二阶段，P2006T飞机结构(包括机翼)采用试验电力系统和定制巡航电动机进行改装，对电动机、电池及其他相关设备的性能进行试验；第三阶段，采用较薄的大展弦比复合材料机翼替换P2006T飞机的原始机翼，巡航电动机移动至翼尖位置，同时在左右机翼前缘各安装6个升力电动机短舱(无电动机和螺旋桨)，试验新型机翼及翼尖推进方案的减阻效果；第四阶段，在12个升力电动机短舱上安装电动机和螺旋桨，试验飞机的低速性能以及分布式电



### SCEPTOR 验证机阶段

推进系统的升力效果。

2017年，NASA将SCEPTOR验证机改名为X-57麦克斯韦飞行验证机。该飞机包括两台大功率巡航电动机（每台功率为60kW）和12台小功率升力电动机（每台功率为9kW），二者均由机上的锂离子电池供电。两台巡航电动机分别位于左右机翼翼尖，为飞机的主要动力装

置，通过驱动两个直径为1.52m的大型螺旋桨，为处于巡航阶段的飞机提供动力。12台升力电动机位于左右机翼前缘，在每侧机翼上沿翼展分别安装6台，通过驱动自带的12台螺旋桨，用于在起降阶段增加飞机的升力。NASA研究了两种类型分布式推进技术的气动推进效益：翼尖安装巡航螺旋桨用于回收或减

少机翼涡流能量，在巡航时降低阻力；前缘高升力螺旋桨用于低速时提高升力，巡航时更高效。该研究表明，X-57验证机的性能能够满足计划目标。

2018年，NASA在巡航和起飞/着陆条件下对X-57的机翼进行计算研究，预测X-57飞机的部件性能。2020年，NASA采用新的电池模型，



X-57飞机的地面状态、起飞状态、巡航状态



对X-57飞机的电池进行了评估，这也有助于电池技术的发展。研究结果表明，对于特定的优化任务，X-57飞机电池能量传递到轴的平均效率为77.3%。考虑到25%的电池容量，在任务期间，只有接近一半的原始55.3kW·h标称电池组能量可以转化为有用功。2020年3月，NASA展示了X-57飞机的最终布局包括大展弦比机翼和直径为1.5m的翼尖螺旋桨。NASA计划在2022年秋天进行X-57的飞行试验。

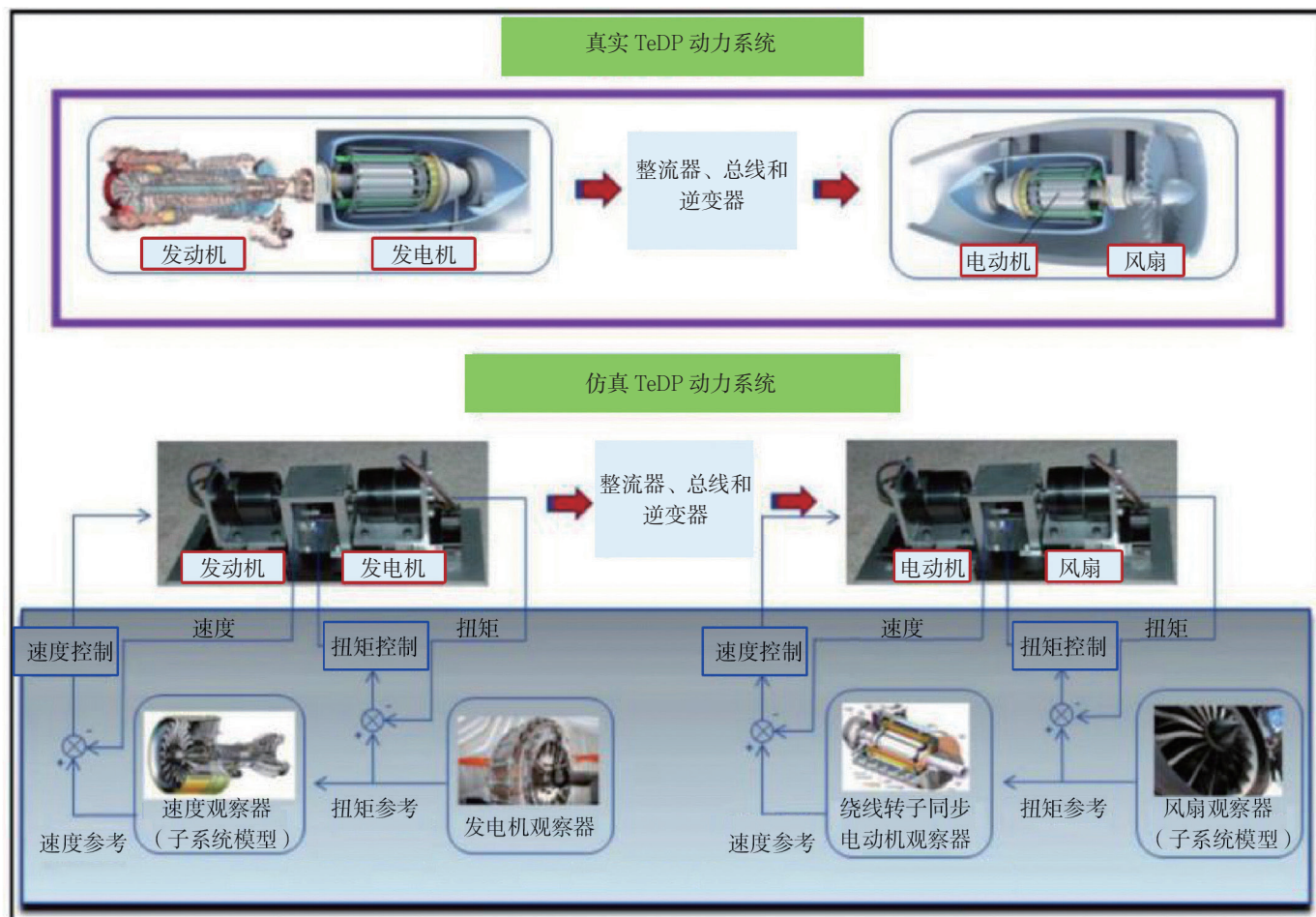
### 燃料电池技术

2003年，NASA探索了几种燃料电池，

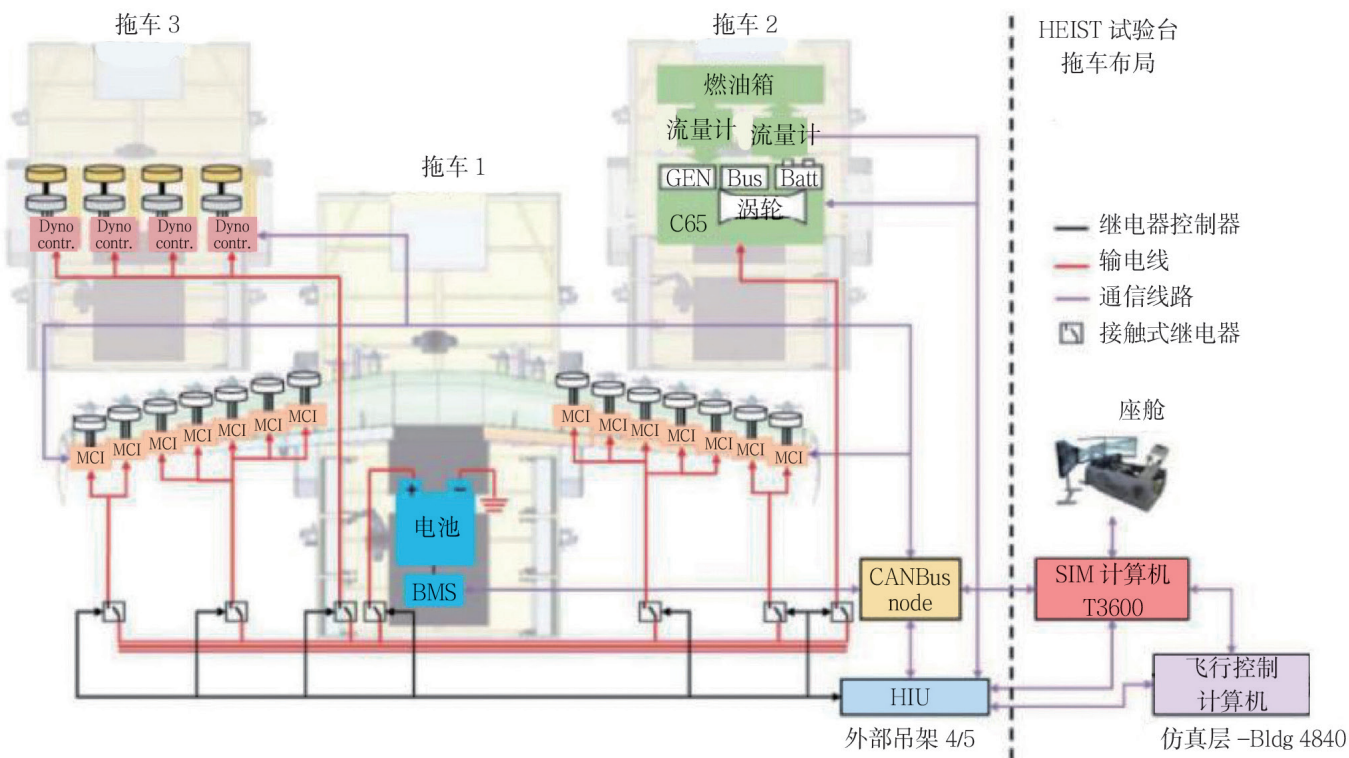
为纯电飞机提供动力，以显著降低排放或实现零排放。这几种燃料电池包括液态氢质子交换膜（PEM）燃料电池、甲醇PEM燃料电池和固体氧化物混合燃料电池。NASA评估了这几种燃料电池对小型飞机起飞质量和航程的影响，发现固体氧化物混合燃料电池显示出最大的潜力。

2012年，NASA探索了为超轻型通用纯电动直升机提供动力的燃料电池，以实现与内燃机相当的性能。该项研究选用的是两座的罗宾逊R22直升机，推进系统采用电动力代替原来的活塞发动机。推进系统包括高压质子交换膜燃料电池、

储存罐内的氢燃料、锂电池和交流同步永磁电动机。NASA设计了3种推进系统模型，包括只有锂电池的、只有燃料电池的和两种电池混合的。在3个基本任务下，NASA评估了纯电推进直升机，并对3种推进系统模型的性能进行了研究，得出以下几点结论：如果能将电动汽车技术应用到航空中，电推进系统的单位功率将接近目前配备R22直升机的活塞发动机的一半，但效率是后者的两倍；在温度控制较好的情况下，锂电池在直升机悬停最高限度下表现最优，在压力控制较好的情况下，燃料电池在直升机巡航时最佳，因



有速度控制和扭矩控制反馈结构的单线电力网格模拟器



HEIST 系统结构

此在目前的技术下，燃料电池用于巡航、锂电池用于悬停的组合方案为最优解；直升机纯电推进的唯一障碍是高扭矩低转速转子的运行，对电动机来说，高扭矩低转速从数量级上说是不可行的。

### 电推进技术试验设备

NASA 投资了多项电推进技术的试验设备，包括推进电力网格模拟器 (PEGS)、混合电集成系统试验台 (HEIST) 和电推进飞机试验台 (NEAT)，进行长期单通道混合燃气电推进飞机部件和系统研究。此外，NASA 还开发了 Airvolt 电推进试验台，进行 EDP 技术验证。这些设备补充了相关工业能力，包括较高技术成熟度 (TRL) 的飞行动态/气动性集成、动态电力网络管理和较低

TRL 的超导部件试验。

### 推进电力网格模拟器

2014，NASA 根据固定翼计划 (SFW) 中未来 TeDP 飞机的目标，开发电力网络模拟器以仿真 TeDP 动力网格，深度理解系统原理，从而快速分析和验证 TeDP 电力系统的方案论证。该模拟器由相对较小且低成本的部件组成，能够快速分析和验证 TeDP 电气系统的方案，并允许对部件进行仿真。PEGS 为缩比动力系统，包括 1 组 4 个相同的电动机和相关电动机驱动/控制系统，可以将普通电动机系统转换成独特的 TeDP 电网仿真器，利用半实物实现实时仿真性能。

### 混合电集成系统试验台

2016 年，NASA 开发了 HEIST 试验台，研究 TeDP 技术的功率管理、过渡复杂性、模块结构和飞行控制

率。该试验台可以确定混合电推进和分布式电推进飞机结构的成熟度。HEIST 设备包括 3 辆拖车，包含分布式电推进机翼、电池系统和涡轮发电机、测力计，并具有电力和通信基础设施，所有这些都与 NASA 阿姆斯特朗研究中心 (AFRC) 仿真实验室连接。该试验台包括 18 个由电池和涡轮发电机提供电力的高性能电动机，并由飞行仿真指挥。该试验台的结构包括分布式电推进机翼 (包括螺旋桨、电动机、控制器和电缆系统)、电池、涡轮发电机、测力机、仿真计算机、飞行控制计算机和座舱。该试验台上的螺旋桨为 LEAP Tech 项目的高速传统螺旋桨 (约 7000r/min)，涡轮发动机由于悬挂排放限制和高速螺旋桨固有的危险需要在户外开展试验。仿真计算



机、座舱和SCRAMNet基础设施位于AFRC吊架试验间的第2层。这些因素迫使机翼和涡轮发电机要保持灵活性，以便封装在悬挂环境中在外面试验，因此NASA将所有移动硬件放置在了拖车上。

### 电推进飞机试验台

2016年，NASA建立了NEAT试验台，用于飞行前的全尺寸电推进系统的部件开发和验证。该试验台的主要目的是开展大功率常温和低温飞行质量电推进系统试验，使高压总线结构、大功率兆瓦级逆变器整流器、大功率兆瓦级电动机和发电机、系统通信、系统电磁干扰缓解和标准、系统故障保护和系统热管理等技术部件达到TRL 6。先进飞行器计划、先进空运技术项目、混合燃气电推进项目都需要通过该试验台实现未来单通道商用电动飞机的技术开发目标。在功率为

125kW和250kW时，NEAT试验台已经通过安全审查和运行，验证和完善了电推进飞机的战略，可以模拟涡轮发动机集成发电机、电动机驱动推进风扇。这些是混合电推进和涡轮电推进系统的关键，能够试验未来更大功率、更大电压和结构越来越复杂的全尺寸系统。

NEAT试验台填补了大功率、大尺寸、飞行质量动力系统部件和系统开发试验台的空白。整个电推进飞机系统的TRL将稳定前进，从缩比部件开发，到全尺寸单通道混合燃气电推进飞机验证机。为了安全，试验台的控制室远离试验台约402m。这种安全级别，加上该试验台的远程位置，使得在实际飞行场景下进行独特的全尺寸动力系统试验的机会很多，包括低温燃料、大翼展、电磁干扰和大功率研究硬件等。

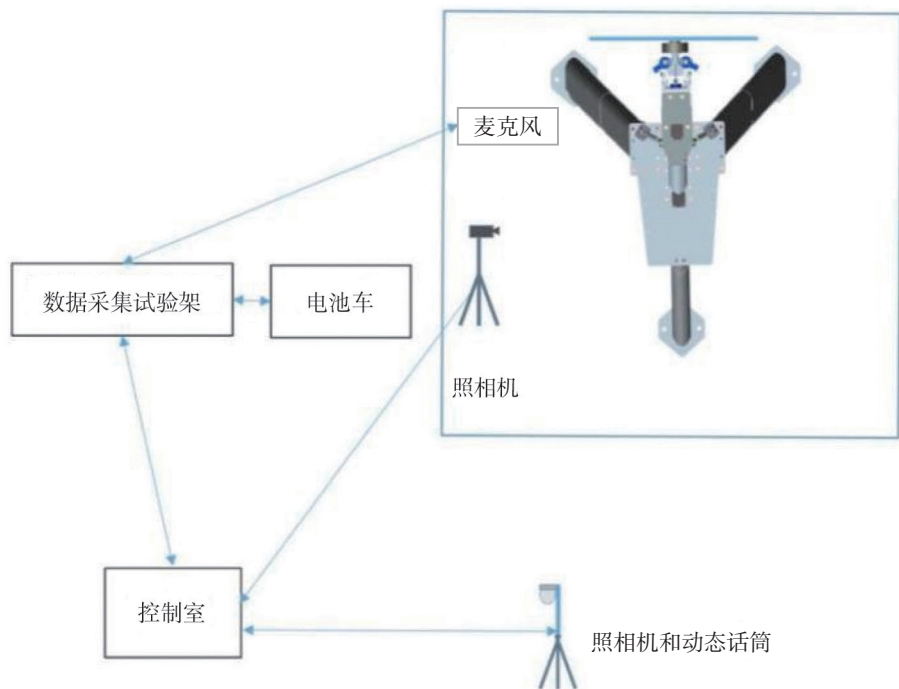
### Airvolt 电推进试验台

2016年，NASA开发Airvolt电推进试验台，以更好地理解和分析电池产生的电流如何通过总线结构、电动机控制器、电动机和其他设备为螺旋桨产生推力。该试验台主要是用于X-57飞机的JM-57巡航电动机的验证，收集电动机和逆变器的高保真数据，电池系统效率、热管理和独立于制造商报告值的声学值，提升对未来飞机电推进系统的理解。Airvolt试验台可以容纳功率为100kW的电动机和螺旋桨直径为1.8m的小型系统。数据采集系统监测推力和扭矩，以及动力源、逆变器和电动机之间的电流和电压，还有系统的振动、温度和声学值等。该试验台每秒能测200万个样本，有助于更好地理解被测系统。该试验台能够准确计算效率、揭示子系统之间的未知关系、找到电推进技术的确认和验证方法。

### 结束语

目前，NASA的全电推进技术验证机X-57取得了一些进展，已经展示了最终结构并在准备试飞。多项混合电推进飞机概念尚存在电力系统质量大、超导电机无法实现和热管理等技术挑战需要应对。在试验设备领域，NASA建立了应用于不同电推进技术验证的试验台和试验设施。作为美国航空领域的技术引领机构，NASA从飞机推进系统、燃料电池、试验设备等方面对纯电推进和混合电推进技术进行的开发、研究和试验，将为电推进技术在航空领域的应用提供契机。

(兰海青，中国航发动力所，工程师，从事航空发动机科技情报及文献研究)



Airvolt电推进试验台布局