

航空混合电推进试验设备发展

The Development of Aviation Hybrid Electric Propulsion System Test Equipments

■ 姚轩宇 蒋承志 满运堃 / 中国航发研究院

混合电推进概念在汽车等交通运输领域已经得到应用，但由于体积质量、环境工况等方面的特殊性，使得航空混合电推进技术的应用远不如预期的那么顺利。为此，美欧相关研究机构纷纷着手打造适用于航空混合电推进技术研究与验证的试验平台，为后续深入开展技术研发与工程应用打基础。

飞行器正向着智能化、全电化方向发展，使得航空电推进技术受到越来越多的关注。从当前技术发展趋势来看，混合电推进技术将会是未来发展的一个重点。在航空混合电推进技术由概念研究向工程应用推进的过程中，试验设备将发挥出越来越重要的作用。

NASA主导下的混合电推进试验设施建设

在面向未来的航空推进技术发展路线图中，美国国家航空航天局（NASA）将混合电推进技术列为重点方向，先后支持了亚声速超绿色飞行研究

（SUGAR）计划、航天推进系统研究与技术（RTAPS）项目、可扩展集合电推进技术使用研究（SCEPTOR）项目等来支持相关企业和机构开展混合电推进技术探索，逐步形成了大功率混合电推进系统概念研究牵引和小功率混合电推进技术应用研究并进的发展思路。与此同时，NASA也规划了相应的试验设施建设发展路线，为混合电推进技术成熟度（TRL）提升提供保障。NASA混合电推进试验平台发展概况如图1所示。

在SCEPTOR项目牵引下，阿姆斯特朗飞行研究中心（AFRC）联合ESAero公司、NASA兰利研究中心、NASA格林研究中心等承担了混合电

推进集成测试平台（HEIST）项目，在AFRC建立了一系列的试验平台。

其中，AIRVOLT单推进器试验台采用模块化设计，如图2所示，主要用于探索子系统间相互影响以及测试不同的电池、电动机、控制器和螺旋桨效率，可支持100kW以下各型推进器的性能测试。该试验台配有齐备的传感器组，可用于采集扭矩、推力、电动机转速、振动/加速度、电压电流、温度等数据，使得研究人员可以测试各种电推进系统并掌握方案效率和改进方向。AIRVOLT初期以Jboy JM-1电动机为研发基础，通过试验收集到的数据完成推进器建模，并将模型进行硬

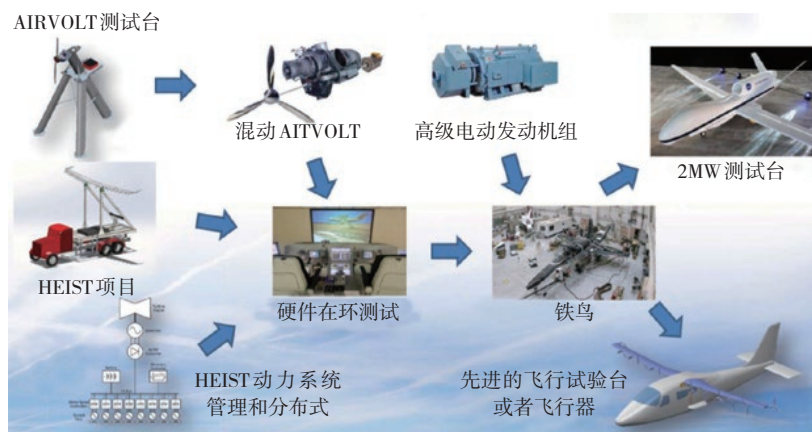


图1 NASA混合电推进试验平台发展概况



图2 AIRVOLT推进器试验台

件在环测试。后续还将对其进行改造以支持多通道的电动机与螺旋桨测试，用于开展混合动力分布式推进技术研究。

HEIST能力管理与分配(PMAD)测试系统的最大功率为3kW，可用于小型电动机控制性能研究、分布式电推进能量管理系统研制、能量分配管理策略验证、分布式推力控制方法、推进/飞行控制匹配等技术研究工作。

HEIST前缘异步螺旋桨技术(LEAPTech)测试系统的重点是关注分布式电推进系统与飞行器气动设计影响。2014年11月在加利福尼亚爱德华空军基地进行了首次试验。试验台由涡轮式发电机、交/直转换器、电池组系统、控制器、直流配电系统以及安装在长约9.45m机翼前缘的18个电动机驱动螺旋桨推进器组成。整套系统被安装在一台改装过的卡车上，可以通过车辆高速行驶模拟低速飞行工况。利用HEIST试验平台，NASA开展了发电机工作控制、电池容量管理以及功率需求管理等试验，对分布式推进控制算法、低速下分布式推进系统性能以及对机翼气动性能影响等进行了深入研究。为混合动力分布式推进系统设计及研发提供了大量试验数据与技术储备。

在HEIST LEAPTech试验完成后，研究团队将机翼部分与飞行仿真系统集成成为HEIST铁鸟(Ironbird)测试系统。重点研究涡轮发电系统与电池系统两套电源的能量管理技术，并建立适用于混合动力推进的能量管理、飞行控制算法研究以及动力转换等问题的仿真试验方法。通过这一试验平台，研究团队测试了不同类型

的混合动力推进技术，基于小型涡轮发电系统开展分布式电推进控制方法与规律研究以及故障复现，后续还将测试不同的总线配置方案、质量尺寸、电磁干扰以及热管理等方面研究，为推进系统集成设计与性能评估提供基础，并为更高级别混合动力推进试验平台设计积累经验。

HEIST平台已经被应用于SCEPTOR计划中X-57麦克斯韦技术验证机的研发当中，并将分阶段开展混合动力推进技术的飞行验证。

格伦(Glenn)研究中心还在梅溪溪试验站改建了NASA电动飞机试验平台(NEAT)，如图3所示，可进行600~4500V的高压电力总线架构、兆瓦级电动机/发电机、控制通信、电磁干扰、故障保护和热管理方面的研究，是世界首个具备开展150座单通道客机全尺寸能源系统试验的混合动力推进试验平台。NEAT还具备高空环境模拟能力，可以测试超过12000m飞行环境下低温、低气压等对于电推进系统的影响。目前，NASA已经在NEAT上进行了单通道涡轮电动飞机(STARC-ABL)推进

系统的兆瓦级试验研究工作。未来，NASA还将开展单通道飞机全尺寸、实际飞行质量的动力装置的地面试验，将TRL提升至6级，为实际飞行做好准备。

赛峰集团完成混合动力分布式推进试验台测试

赛峰集团制定了自己的混合动力推进解决方案的发展蓝图，通过与多方合作致力于在2025年前将混合动力推进技术投放到市场。为实现这一目标，赛峰直升机发动机公司、赛峰电气与电源公司及赛峰动力装置公司与赛峰集团研发和技术中心共同推动开展了混合动力分布式推进试验台的建设。

2018年，在法国波城机场附近的赛峰直升机发动机公司的测试场地进行了混合动力分布式系统的首次地面测试。在平台的测试期间，研究团队测试并验证了电池组独立供电、涡轮发电与电池组联合供电等不同的工作模式，试验了其电源管理系统性能，系统供电总功率为100kW。



图3 NEAT

GE 航空集团建立电力综合系统研究发展中心

GE 航空集团几年来与多家公司就混合动力电推进飞机概念开展合作。2013年，GE 航空集团与美国代顿大学合作，在俄亥俄州建立了电力综合系统研究发展中心（EpisCenter），可开展规模从500kW ~ 2.5MW不等的航空电推进电力系统测试，重点研究先进的能源管理技术，包括发电、配电、电力控制以及新型电能存储等技术的开发，减小电推进系统的体积与质量，提高飞机总体运行效率。

依托该中心，GE 航空集团开发并测试了1MW的高功率密度电动机/发电机。之后在俄亥俄州皮布尔斯进行了现场测试，用来驱动一个来自萨伯340涡桨支线飞机的螺旋桨。GE 航空集团还与NASA共同出资开发“先进飞行器项目”（AAVP），研发尺寸、功率、效率和飞行高度等方面满足飞行要求的下一代电推进系统所需的变频器，该项目前期取得的成果以及后续技术研制同样可在该中心进行测试与验证。

柯林斯宇航将打造行业领先的电源系统实验室

联合技术公司（UTC）旗下的柯林斯宇航于4月8日宣布将建立行业领先的电源系统实验室——电网（The Grid），如图4所示，柯林斯宇航将利用这个高功率、高电压的实验室，设计和测试大功率发电机等系统，用于商用、军用、公务航空、无人机和城市空中交通平台等电气化水平更高的下一代飞行器。相关建设工作现已启动，预计将于2021年完工并全面投入运行。

电网实验室支持的首批平台项



图4 柯林斯宇航电网实验室

目中，就包括联合技术公司最近公布的混合动力验证机“804计划”，它是由联合技术领先项目（UTAP）发起的混合动力验证机计划，预计能在每小时标准航行中节省30%的燃油，大大降低碳排放水平。

为实现这一目标，柯林斯宇航将与普惠等合作，计划在较短时间内重新设计涡桨支线飞机的推进系统，改由2MW的混合动力推进系统提供动力。利用电网实验室，完成1MW的电动机、电动机控制器和电池系统的设计与测试。该1MW电动机将成为迄今为止航空领域功率最大且效率最高的电动机之一。新的电动机和电动机控制器将作为验证机混合动力推进系统的一部分，辅助燃油发动机提供动力。电网实验室也将成为世界上为数不多的几个能够测试同等级电推进系统的设施之一。

结束语

随着对混合动力推进技术研究的深入，试验研究与验证工作的重要性愈加凸显。为了尽快实现这一技术的工程化，各研究机构与企业纷纷加大投入，设计搭建了各种试验设备并

已取得初步成效。特别是NASA主导下的一系列混合动力推进试验平台的建设，一方面在明确的目标蓝图牵引下形成了不同功率等级、不同功能实现、不同测试手段相互配合补充的试验能力布局，打造从部件测试到飞行器/推进系统以及飞行验证样机等不同级别试验测试平台；另一方面相关试验设备与NASA主导的各混合动力推进技术研究项目紧密结合，形成项目技术牵引与试验验证支撑结合的良好互动，推动其混合动力推进技术成熟度不断提升。此外，各机构间“强强联合”趋势明显，不仅有项目合作下的联合建设，也有并购重组等深度整合。

目前，我国在航空混合动力推进领域的研究尚处于起步阶段，为支撑混合动力推进技术从概念转向应用，相关试验设备空白有待填补。同时，在试验设备发展过程中，需要加强行业联合，建立起我国自己的混合动力推进试验能力，为未来混合动力推进技术的长远发展与应用打好基础。

航空动力

（姚轩宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空新型动力技术研究）