

航空超导电驱动系统发展研究

Development Research of Aviation Superconducting Electric Driving Propulsion System

■ 杨文将 王少鹏 白明亮 宋东彬 / 北京航空航天大学 姚轩宇 蒋承志 / 中国航发研究院

基于超导电驱的航空电推进系统具有高功率密度、高转换效率和低损耗等优势，是大功率航空动力系统的重要发展方向。俄罗斯、美国和欧洲的相关研究团队对于超导电驱动系统纷纷开展技术探索和方案预研，为超导技术在下一代飞行器的应用提供理论基础。

面向航空业节能减排、绿色低碳的发展目标，美国和欧盟对于下一代飞行器在噪声、燃油消耗和污染物排放等方面分别提出了量化指标，而飞机动力系统技术的进步与革新是进一步提升燃油利用率、降低排放的必要保证。电推进技术是航空技术发展的重要方向，已成为下一代飞行器的一种可行的选择。将电推进系统应用于大型飞行器的主要挑战为功重比，当前涡轮发动机的功率密度在3 ~ 8kW/kg之间，而传统工业电动机的功率密度通常低于2.5kW/kg，难以满足大功率电动飞机的动力需求。超导材料在一定低温环境下可以体现超导特性，能够以几乎为零的电阻传导非常大的电流，能量损耗非常低。超导电机使用超导材料替换传统电机的绕组材料，可以大幅提高导体电流密度并且减小损耗，从而提高电磁负荷、提升电机效率及功重比，成为传统发电机和电动机的有利替代者。因此，超导航空电驱动系统应运而生，成为解决大功率航空电推进系统已有问题的很有前景的方案。

超导电机发展与特点分析

自1976年美国应用超导大会上首次

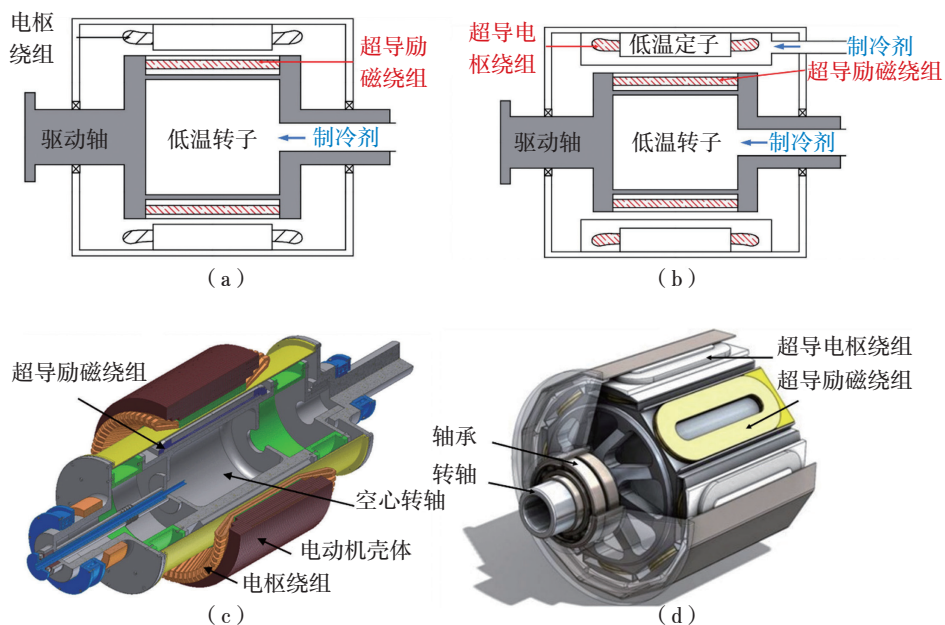


图1 半超导电机与全超导电机结构及典型样机

提出机载超导电机以来，超导电机已经发展出低温超导电机与高温超导电机等不同超导材料的类型，以及半超导电机和全超导电机等不同结构的类型。目前高温超导电机的功率密度已超过10kW/kg，大幅超过传统机载电机，甚至优于涡轮发动机的功率密度，而且高温超导体的临界温度高于液氮沸点，制冷成本较低，逐渐成为超导电机的主流研

究方向。

半超导电机是指使用超导材料替代励磁绕组或电枢绕组的电机，通常可分为定子型和转子型，但定子半超导型电机因交流损耗较大导致电机转速受限、效率较低，因此转子超导型是半超导电机的主要研究对象。转子半超导电机仅使用超导材料替代常规的转子线圈，利用超导励磁绕组中的直流电场产生高强度气

隙磁场，没有交流损耗，电机效率很高。通常需要将转子超导电机的转轴设计为中空无铁芯结构，如图1(a)所示，以通入冷却介质、避免铁芯磁饱和同时减轻质量，而且需要对定转子进行热隔离，该型超导电机的主要技术难点在于旋转密封及冷却系统。典型样机如韩国电工技术研究所设计的1MW半超导电机，如图1(c)所示，用BSCCO超导线材制造的跑道型线圈绕制成两极转子，空心转轴内的液氮热虹吸冷却系统维持低温环境，定子电枢采用常规铜绕组并用非磁性材料固定^[1]。

全超导电机是励磁绕组与电枢绕组同时采用超导材料的电机，理想状况下全超导电机可以在利用超导励磁绕组提高磁负荷的同时利用超导电枢绕组提高线负荷，进而达到最高的功率密度，结构如图1(b)所示。但超导电枢绕组的交流损耗问题难以解决，尤其是在超导强励磁场作用下尤为明显，因此现有的全超导样机多处于较低转速的验证阶段，尚

不能完全开发出全超导电机的潜力。莫斯科航空学院于2017年在多电飞机会议中展示的一台1MW全超导电机，功率密度约为12kW/kg，如图1(d)所示，利用跑道型超导线圈分别作为定转子的电枢绕组和励磁绕组，改进为无铁芯结构后，又能够有效避免铁芯磁饱和并有效减轻质量，达到20kW/kg的功率密度^[2]。

全超导电机是最具有发展前景的超导电机，理论上其功率密度可达20kW/kg以上，但是由于目前超导线材的交流损耗问题难以解决，转子半超导电机可能将率先应用于实际的机载项目中。

航空超导电驱动力总成系统发展态势

在航空动力总成系统中应用超导技术，理论上可以减轻系统质量、减小损耗并提高系统的效率。目前，航空超导电驱动力系统视为未来飞机电推进的重要突破点，是实现航空脱碳目标至关重要的解决方案。

相关科研单位和研究机构已开展超导推进技术预研和验证，探索其应用于大功率支线飞机动力系统的可能性。

俄罗斯

俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)于2017年莫斯科航展上宣布其首个混合电推进系统研究计划，并展出了500kW混合电推进概念模型。该动力系统由燃气涡轮发动机驱动发电机发电，同电池一起供电给超导电动机驱动六叶螺旋桨。由于超导材料的使用将其项目命名为高温超导平台(HTSP)混合动力总成，参研单位包括负责试验平台研制和飞行试验的西伯利亚航空研究所(SibNIA)、负责飞行器空气动力学、结构强度和和相关流体力学研究的中央空气流体动力学研究院(TsAGI)、负责混合电推进动力验证装置研究的茹科夫斯基国家研究中心、负责航空发电机研制的乌法国立航空技术大学(UGATU)以及负责超导电动机设计和研制的莫斯科

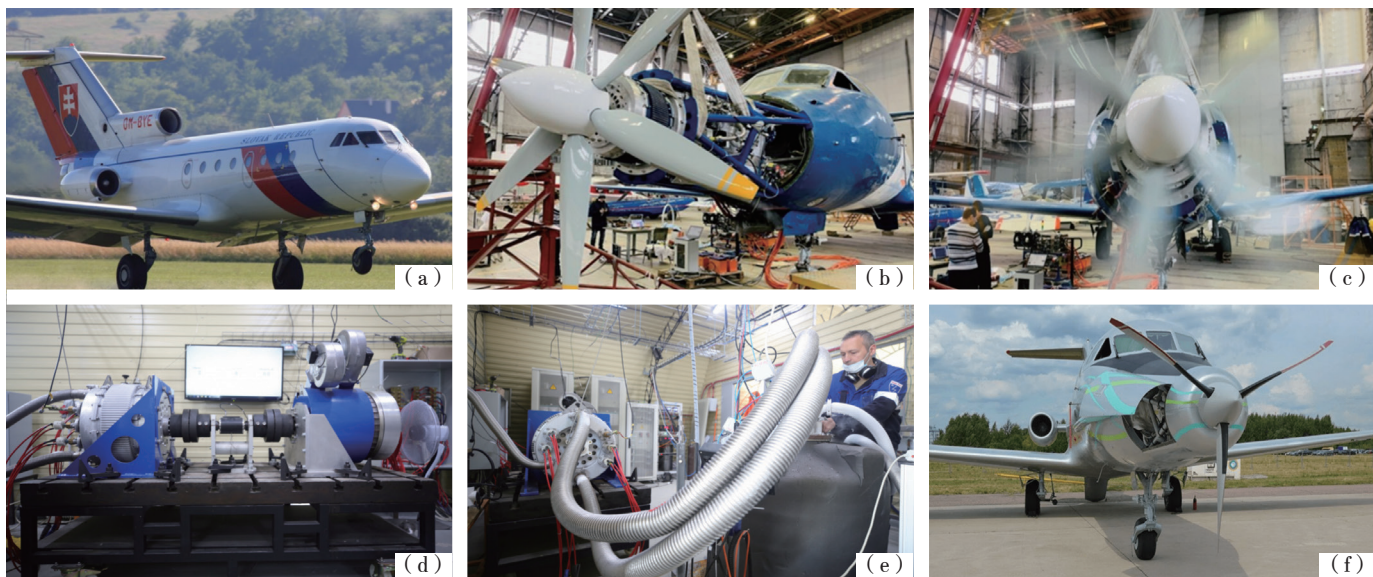


图2 俄罗斯超导电动系统

航空学院和超级奥克斯 (SuperOx) 公司。

该项目原型机是采用苏联/俄罗斯雅科夫列夫设计局 (Yakovlev) 研制的三发喷气支线飞机雅克-40, 其主要动力为尾部3台 AI-25 涡扇发动机, 如图2 (a) 所示。为将雅克-40 飞机改装为超导混合电推进验证平台, 将原有发动机替换为2台由霍尼韦尔公司研制的TFE731-5BR 发动机和1台克里莫夫TV2-117 涡轴发动机驱动发电机。动力总成系统中发电机由UGATU 和 CIAM 共同研制^[3], 功率约为400kW, 转速约为12000r/min, 效率约为96%; 锂电池作为辅助动力装置, 主要是为雅克-40 起飞和爬升时提供辅助动力, 并在巡航飞行期间存储多余的能量。

SuperOx 公司目前已经研制了数百个电机绕组原型, 以及大约10个不同功率的电机原型。该系统中超导电动机质量约为100kg, 转速为2500r/min, 可以产生400 ~ 500kW 的功率, 但超导材料只有在低温环境下才能保持超导特性, 因此需要配备对应的机载低温冷却系统。图2 (d) ~ 图2 (e) 为500kW 超导电动机测试试验现场, 采用温度为77K 的液氮冷却, 液氮流量为6L/h 以保持超导材料零电阻特性。SuperOx 公司于2020年12月将其研制的500kW 超导电动机安装在作为试飞平台的雅克-40 飞机上, 超导电动机、冷却系统和螺旋桨安装在机体头部, 如图2 (b) 和图2 (c) 所示, 并进行了螺旋桨试运行, 于2021年2月开始进行地面台架测试, 随后进行了地面滑行测试。

混合动力验证机雅克-40LL 配备了基于燃气涡轮发动机和超导电

动机的混合动力系统, 已于2021年7月24日在莫斯科航展上完成了首次试飞, 如图2 (f) 所示。SuperOx 公司将继续生产功率1MW 的超导电动机, 将在伊尔-114 飞机上安装2台来取代其型号为TV7-117 的涡桨发动机。另外在2030年左右 SuperOx 公司将与 CIAM 等单位合作研制出不低于2MW 的超导发电机, 为俄罗斯超导混合电动系统的发展助力。

欧洲

为探索超导材料在航空应用的可能性, 空客公司已成立先进超导和低温动力总成系统演示器 (ASCEND) 项目^[4], 计划在3年内研制一套500kW 通用的超导电驱动动力总成验证系统, 结合液氢冷却和超导技术演示纯电/混合电推进, 探索超导材料和低温系统对飞机电力推进系统性能的影响。该项目的地面演示器将由空客子公司 UpNext 来建造, 与传统技术相比, 其目标是将动力总成质量和电气损耗至少降低50%, 同时将效率提高5% ~ 6%。

ASCEND 项目的动力总成系统如图3所示, 包括低温冷却系统、超导电动机、低温冷却电动机控制单元、超导配电系统、电缆和保护装置等。超导直流电缆和连接器将功率传递到电动机控制单元, 转换为交流电输入给超导电动机驱动涵道风扇/螺旋桨正常运转。低温冷却系统为超导组件提供冷却, 根据当前信息可以确定其冷却工质为液氢。尽管整个超导系统需要保持冷态, 但是动力总成的不同组件需要不同的冷却温度, 例如, 电缆可能需要80K, 常规半导体需要100 ~ 150K, 因此该项目也将着眼于调节冷却温度或为一些组件开发特定的冷却系统。

ASCEND 项目中动力总成系统预计在2023年年底测试和评估适用于纯电/混合电推进的解决方案, 为空客公司决策未来飞机所需要的推进系统架构类型提供支持。目前项目研究对象为500kW 以内的超导电驱通用总成系统, 并不是针对某个特定机型, 旨在证明超导电驱技

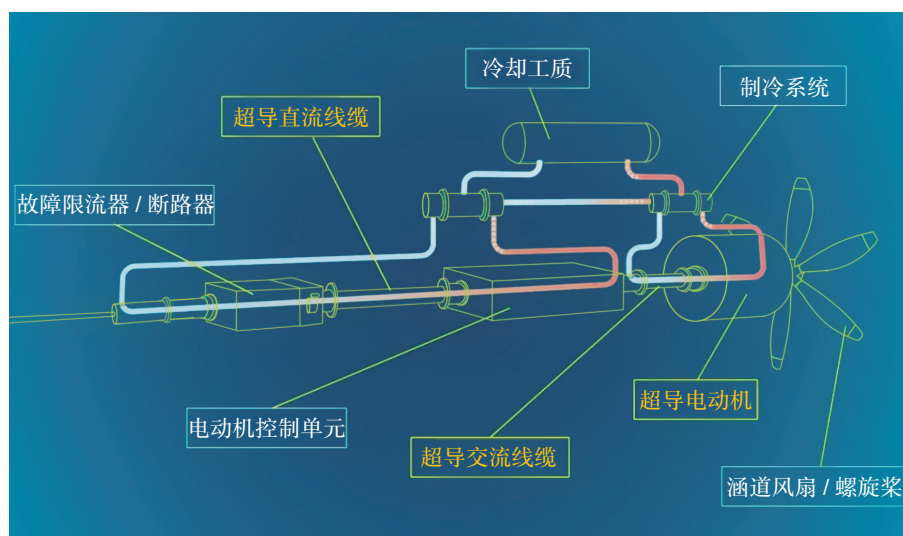


图3 空客超导电动总成系统架构



图4 NASA大功率超导航空电驱动力系统概念设计

术应用的可行性和潜力。当前现有的飞行器类型中，电动垂直起降（eVTOL）飞行器、轻型和支线飞机可能需要几百千瓦的功率，而大型飞机则需要数兆瓦的功率，因此超导电驱动力系统目前研究和短期应用集中于前者。赛峰集团等公司及研究实验室已加入到超导电驱的研究中，成为ASCEND项目的合作伙伴，空客公司预计于2023年验证系统方案，2025年完成飞行演示，2026年确定飞机开发方案，并在2035年投入使用。

美国

美国国家航空航天局（NASA）、波音公司等研究团队一直在探索未来大功率航空超导电驱动力系统架构方案，SUGAR Freeze是波音公司在亚声速超绿色飞机研究（SUGAR）项目支持下的一种混合电推进飞机，如图4所示，其尾端推进风扇由固体氧化物燃料电池循环供电，并由带有超导电源管理系统的超导电动机驱动^[5]。NASA N3-X通过安装在机头的2台燃气涡轮发动机驱动4台

超导发电机发电，总发电功率约为50MW，每台发电机为3~4台功率为2.5MW的超导电动机供电，总推进功率约为35MW。

NASA格伦研究中心正建造电动飞机试验平台（NEAT），如图5所示，以实现未来单通道飞机全尺寸、实际飞行质量条件下的电推进系统地面试验，提高推进系统的技术成熟度，为飞行试验做准备。NEAT可以测试全套电推进系统，其功率

可达到24MW，汇流条电压可达到4500V。试验台周围还有热核火箭试验设施和高超声速风洞，可提供NEAT所需要的功率、冷却和低温基础设施，确保大功率常规或超导电驱系统试验的开展。

超导航空电驱动力推进技术面临挑战

机载低温冷却技术尚未成熟

超导航空电驱动力推进系统

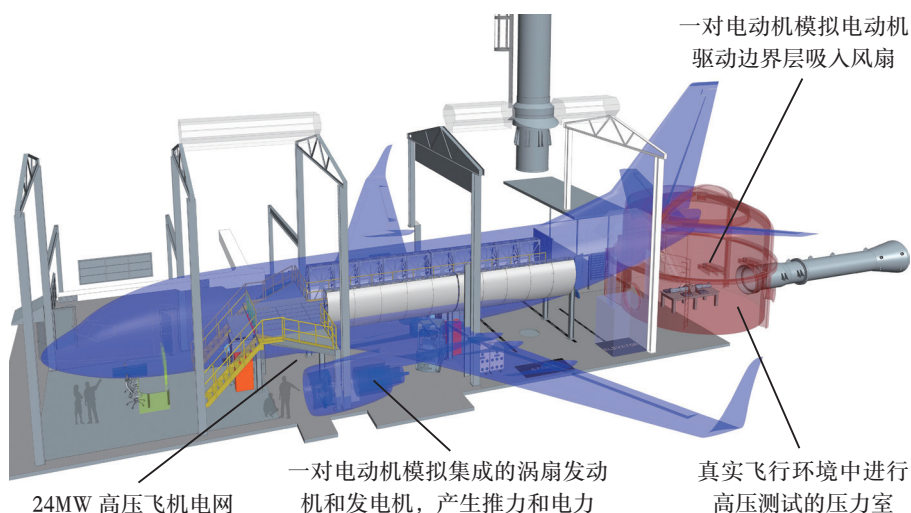


图5 美国NEAT

的亮点在于创造性地使用了超导磁体，但对动力系统来说，超导磁体并不是其电机系统不可或缺的元素，只是一个可能的性能加分项，因为超导技术要求严苛的低温工作条件。要持续维持超导电机处于超导状态必须依赖一套非常精密复杂的冷却系统，而现有的超导电机常使用液氮、液氢、液氦或者液氖作为冷却介质，对应的低温制冷设备大多是针对特定的地面基础试验，且质量和体积较大。机载超导电机冷却设备须根据飞机尺寸及型号进行特殊的设计，保证在飞机质量和体积裕度内发挥制冷作用，保证超导材料的超导特性和电机的冷却。因此，超导电机的体积、质量优势，需要在电机功率和尺寸的需求足够大的背景下，才能展现出一定的实用价值。

超导材料高度依赖冷却系统，而低温冷却系统可能削弱超导电机固有的高可靠性优势，而飞机的动力系统对可靠性要求是最高的。美国、欧洲目前所研发的超导电驱动系统，其主要规划和验证性使用都集中在工业级用途，尤其是船舶动力方面，尚未应用于机载动力系统，因此启用超导动力系统将对飞机安全提出极大的挑战。另外，从经济学的角度来讲，超导材料、超导电机冷却系统等产品价格奇高，客观上也阻碍了超导电驱动系统的大规模市场化应用。

大容量、高效率的功率变换器技术亟待解决

超导电推进系统的动力源于超导电机，要实现超导电机的精准控制需要大容量、高效率的功率变换器，实现交流电和直流电之

间的转换。电推进系统中的功率变换器主要有发电机侧的整流器、电动机侧的逆变器和为机上其他设备供电的功率变换器。兆瓦级功率变换器所依托的大容量电力电子技术需要在以下方面获得突破：开关器件、半导体材料、功率电路拓扑、滤波器、封装和热管理等^[6]。目前亚兆瓦或兆瓦级大容量电力电子装置局限于传统硅基晶闸管或绝缘栅双极型晶体管（IGBT）换流技术，开关频率偏低、体积大且功耗高，难以实现电力系统性能的大幅提升。

功率器件的开关损耗也可以通过优化电路拓扑来降低，如软开关技术。输入/输出滤波器有助于降低干扰，提高电能质量，降低对机载电子设备和电机的影响。但滤波电容体积和质量大、不耐高温、可靠性差，因此对于滤波器的设计需要尽可能做到体积小、质量轻。第三代功率半导体SiC器件具有效率高、导通电阻低、热导率好、工作温度高、可靠性好、耐电磁辐射等优势，是实现功率变换器性能大幅提升的重要基础。

结束语

超导航空电驱动系统相比于传统动力系统可以有效地降低动力系统总成的质量、减少电气损耗并降低系统电压、提高动力总成系统的效率，是解决当前推进系统功重比过小问题的颇有前景的方案。俄罗斯、美国和欧洲等针对超导电驱动系统推进技术进行项目预研、部件制造与测试、验证平台搭建等研究，探索其在航空动力推进的可行性。超导技术应用的同时也带来一系列挑战，应用于航空电推进仍需要时间和经

验的积累。

航空动力

（杨文将，北京航空航天大学，副教授，主要从事超导电机系统和空天电动推进技术研究）

参考文献

- [1] Baik S, Kwon Y, Park S, et al. Performance analysis of a superconducting motor for higher efficiency design[J]. IEEE transactions on applied superconductivity, 2013, 23(3):5202004–5202004.
- [2] Dezhin D S, Ivanov N S, Kobzeva I N, et al. Completely superconducting electric machine with high specific power[J]. Russian electrical engineering, 2018, 89(2): 75–79.
- [3] Ismagilov F, Varyukhin A, Vavilov V, et al. Electric machines development process for aviation hybrid propulsion systems[C]. IECON 2020 the 46th annual conference of the IEEE industrial electronics society. IEEE, 2020: 955–960.
- [4] Airbus. Advanced superconducting & cryogenic experimental powertrain demonstrator [EB/OL]. (2021-03-29)[2021-05-22]. <https://www.airbus.com/newsroom/stories/ascend-cryogenics-superconductivity-for-aircraft-explained.html>.
- [5] Jansen R, Bowman C, Jankovsky A, et al. Overview of NASA electrified aircraft propulsion (EAP) research for large subsonic transports[C]. 53rd AIAA/SAE/ASEE joint propulsion conference. 2017: 4701.
- [6] Dever T P, Duffy K P, Provenza A J, et al. Assessment of technologies for noncryogenic hybrid electric propulsion[M]. NASA Glenn research center, 2015.