DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.10.014

电能航空动力技术发展研究

邵凌云[1,2*]，张卓然[1,2]，高华敏[1,2]，黄维康[1,2]，薛涵[1,2]，徐岳[1,2]

（1. 南京航空航天大学自动化学院，南京 211106；2. 低碳航空动力教育部工程研究中心，南京 210016）

摘要：电能航空动力技术开启了航空领域新一轮创新与变革热潮，是推进航空业绿色发展、应对全球环境挑战的重要举措。本文系统论述了国内外电动航空器的研究进展，分析了我国电能航空动力技术与国外的差距，明晰了我国电动航空器研制所面临的技术挑战；进一步梳理了电能航空动力四大关键技术：长寿命高能量密度电池技术、高效高功重比电机推进技术、能量综合管理技术和高升阻比气动布局设计技术，分析了各关键技术的产业特征和研究现状，阐明了各关键技术的发展方向和亟待解决的基础技术问题；构建了电能航空动力飞机性能评估模型，分析了电池能量密度、电机功率密度、电机效率和飞机升阻比等关键技术参数对电动航空器性能的影响，评估了电能航空动力技术在轻小型城市空运飞机、区域通勤飞机和小型支线飞机上的工程实用性。研究建议，电能航空动力技术发展应充分利用我国拥有的新能源产业的技术积累和先进工业基础，考虑高能量密度储能电池、高效能推进系统等关键部件的现有性能与未来提升需求，以城市空运、区域通勤、支线飞机为路径制定发展战略规划，逐步拓展电能航空动力技术在民航运输中的应用，助力我国实现碳达峰、碳中和目标。

关键词：电能航空动力；电动航空器；电推进；绿色航空；储能电池

中图分类号：TD67；TD82　　**文献标识码：**A

Development of Electric Propulsion Technology in Aviation

Shao Lingyun[1,2*], Zhang Zhuoran[1,2], Gao Huamin[1,2], Huang Weikang[1,2], Xue Han[1,2], Xu Yue[1,2]

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. Engineering Research Centre of Low-Carbon Aerospace Power, Ministry of Education, Nanjing 210016, China)

Abstract: The electric propulsion of aircraft has triggered a new wave of innovation and reform in the aviation sector. It is considered as an important move to implementing green development in aviation and addressing global environmental challenges. This study examines the research progress of the electric propulsion technology in aviation and reveals the technology gap between China and other countries, clarifying the technology challenges for developing electric aircraft in China. Four key technologies regarding electric propulsion in aviation are identified: long-life and high-energy-density batteries, electric propulsion with high efficiency and a high power-to-weight ratio, integrated management of energy, and aerodynamic configuration with a high lift-to-drag ratio. The industry characteristics and research status of the above technologies are investigated, and their future directions as well as the fundamental technical problems are clarified. Based on a performance evaluation model for electric aircraft, the influence of key technical parameters on the performance of electric aircraft are analyzed; these parameters include energy density of batteries, power-to-weight ratio and efficiency of motors, and lift-to-drag ratio of aircraft. Besides, the practicability of applying full electric propulsion on

收稿日期：2024-10-10；**修回日期：**2024-12-10

通讯作者：*邵凌云，南京航空航天大学自动化学院副研究员，研究方向为飞机电推进技术；E-mail: shaolingyun1990@outlook.com

资助项目：中国工程院咨询项目“新能源航空发动机发展战略研究”(2023-XBZD-15)；国家自然科学基金项目(52207060)；江苏省自然科学基金项目(BK20220905)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

aircraft for urban air transport, commuter transport, and regional use are evaluated. By cconsidering the current status and future development of key components such as high-energy-density storage batteries and high-performance propulsion systems, China should leverage its technological accumulation in the renewable energy industry and its advanced industrial foundation to establish a strategic plan for the development of electric aircraft oriented at urban air transport, commuter transport, and regional use, gradually extending the application of electric propulsion in civil aviation.
Keywords: electric propulsion in aviation; electric aircraft; electric propulsion; green aviation; energy storage battery

一、前言

为了应对日益严峻的环境问题，美国、英国和欧盟对未来飞机在燃油消耗、噪声控制、污染排放等方面提出了新的要求，并制定了具体的发展路径[1~3]。与此同时，中国民用航空局制定了《“十四五”民航绿色发展专项规划》，旨在推动我国民航业向绿色、低碳、可持续的方向发展；2025 年，“低空经济”首次被写入政府工作报告，在低空空域下的相关产业迅猛发展。在全球航空业“减碳减排”的大背景下，电能作为“绿色航空”最具工程可达性的技术路径之一，逐渐被应用于机载二次能源及一次能源系统，促使航空器向电气化方向发展。

电能航空技术发展的初级阶段是机载二次能源系统的电气化，即通过电作动、电驱动、电加热装置等取代传统液压系统和引气系统。波音 787，空客 A380、A350 等商用飞机现已实现大多数机载设备和操纵系统的电气化。然而，二次能源仅占飞机总耗能的一小部分，围绕二次能源的优化对飞机整体效率的提升较为有限[4]。飞机上超过 90% 的能量用于飞机推进过程[5]，因此实现飞机推进能源和动力系统的电气化对改善飞机燃油消耗、噪声控制和污染排放起到关键性作用。据美国国家航空航天局（NASA）测算，若飞机采用电力推进可实现节能超过 60%、减排超过 90%、降噪超过 65% 的潜在收益[6]。电能航空动力技术重塑了飞机能源体系架构，能够全面优化能量利用效率，是电能航空技术发展的新趋势。

电能航空发动机指用电动机代替传统燃油发动机，驱动螺旋桨、涵道风扇或其他装置产生飞行动力的一种航空部件。电动机的电能全部或部分来自于储能电池（如磷酸铁锂电池、三元锂电池等）、燃料电池（如氢燃料电池、固体氧化物燃料电池等）、太阳能电池、超级电容等供电装置。因此，按照电力供给方式的不同，电动航空器分为储能电池飞机、燃料电池飞机和太阳能飞机。为弥补单一电源供电的技术缺陷，将氢燃料电池和锂电池进行混合或太阳能电池和蓄电池进行混合，构成的电 – 电混合电推进系统成为当下的研究热点[7]。通过两种电源之间的协调补偿，提高系统的整体效率。

与传统航空燃油发动机相比，电能航空发动机从电能到推进功率的转化率能够超过 70%[8]，有望突破传统飞机发动机的能量转换效率极限，具备相当的现实意义。此外，电机具有的功率相对尺度无关性将使飞机推进系统及飞机总体设计突破传统架构的限制（如采用分布式电推进[9]），从而具有广阔的发展空间，继而从飞机整体层面提高飞行性能。

本文主要论述电能航空动力技术的国内外应用进展，分析国内外技术差距和亟待解决的关键技术问题，基于电能航空动力性能预测模型分析全电推进技术在城市空运飞机、区域通勤飞机和支线飞机上的工程可达性，提出我国电能航空动力技术的发展目标、重点任务以及推动我国电能航空动力技术的发展建议。

二、电动航空器研究进展

（一）国外研究进展

NASA 于 2015 年率先提出了电动飞机发展路线图，启动包括小型垂直起降飞行器、通用飞机和大型干支线飞机在内的 3 条技术路线研究[10]。英国航空技术研究所（ATI）于 2021 年初启动 FlyZero 项目，制定了英国航空工业的中长期技术发展战略，将电推进飞机作为实现零碳排放飞机技术的 3 条技术路径之一，对电能航空发动机研发提供了全面的资助[11]。欧盟主要国家航空研究机构也积极开展合作，在电推进技术领域取得了重要进展。

1. “创新精神号”电动飞机

罗尔斯 – 罗伊斯公司在“加速飞行电气化”（ACCEL）项目中研制的“创新精神号”电推进飞机于 2021 年 9 月首飞，最高飞行速度为 480 km/h，

打破了电动飞机飞行速度的世界纪录。该飞机采用400 kW电推进系统和能量密度最大的飞机用锂电池组；螺旋桨由3台YASA 750R轴向磁通永磁电机并联驱动，每台电机均有独立的逆变器和冷却装置，使电机在飞机起飞阶段能够提供强大的动力，同时提高系统冗余度，保证飞机可靠运行。

2. Eviation Alice电动通勤飞机

Eviation Alice电动通勤飞机是由以色列电动固定翼载人飞机制造公司（Eviation）研制的一款9+2座全复合材料电动飞机，于2022年9月27日在美国完成试验性首飞。其设计航程为800 km，载重为1100 kg，设计巡航速度为444 km/h。该机采用21700型锂电池，电芯的能量密度为260 Wh/kg，电池重量为3800 kg，约占飞机最大起飞重量（6.67 t）的一半，可提供900 kW·h的能量。电驱采用MagniX公司提供的两套650 kW的Magni650电驱系统（正在进行美国联邦航空管理局（FAA）电驱系统适航审定）。Eviation计划在2025年获得FAA的23部适航证，2026年量产交付。Alice所采用的电能航空动力技术实现了兆瓦级电推进系统的装机应用，为开发面向通勤市场的全电动客机提供技术积累。

3. NASA X-57分布式电推进飞机

NASA于2016年开展了X-57麦克斯韦验证机计划，该机的分布式电推进系统由2套置于左右机翼翼尖的大功率巡航动力装置（单台功率为60 kW）和12套位于机翼前缘的小功率增升动力装置（单台功率为10 kW）组成，二者均由机上的锂离子电池供电。其中，2台巡航电动机作为飞机的主动力装置，通过驱动两个大型螺旋桨为处于巡航阶段的飞机提供推进动力；12台增升电动机驱动位于机翼前缘的高升力螺旋桨以提高流经机翼的气流速度，从而在起降阶段增加飞机的升力。这种采用高升力螺旋桨的分布式电推进技术使得飞机维持升力所需的机翼面积减小至原来的1/3，降低了飞行过程中的阻力，能够有效提高气动效率[9]。

4. Joby S4电动垂直起降飞行器（eVTOL）

Joby公司一直致力于开发eVTOL飞机，代表性产品为Joby S4，于2017年首飞，2023年量产，正在进行FAA适航审定。全机重量为2400 kg，空重为1950 kg，巡航速度为320 km/h，航程为160 km。单个电机的峰值功率达到了236 kW，单个电机峰值扭矩为1800 N·m，电机电控重量为28 kg，最大功率质量比达到8.4 kW/kg。锂电池的电芯能量密度为288 Wh/kg，封装后的电池组能量密度为235 Wh/kg，电池在实验室中经过了1万次设定的飞行轨迹循环。

（二）国内研究进展

我国高度重视电动航空器的研发，积极推动关键技术探索。中国航空研究院于2019年发布《电动飞机发展白皮书》，制定了电动飞机发展战略规划，以推动我国电动飞机发展；工业和信息化部等四部门于2023年10月印发《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035年）》，指出针对市场应用场景需求，结合纯电推进技术及涡轮混合电推进技术发展，由小到大开展新能源商用飞机预先研究。我国在电能航空动力核心关键技术研究与产品研发等方面均已取得一些成果，主要进展如下。

1. 锐翔RX1E电动飞机

辽宁通用航空研究院于2012年开展锐翔（RX1E）双座电动飞机的研制工作。2013年6月RX1E成功首飞，2015年2月获得型号设计许可，2015年12月获得生产许可证，是我国第一架具有自主知识产权的新能源轻型通用飞机。目前，该双座级电动飞机已具备每年20~30架的自主生产能力；飞机采用纯锂电电池作为动力源，通过稀土永磁电机驱动螺旋桨作为动力，最大功率为40 kW，续航时间为1 h，续航里程为110 km。

2. 锐翔RX4E电动飞机

RX4E飞机是我国乃至世界首个申请23部正常类飞机适航审定的四座电动飞机机型，于2019年10月成功首飞，目前正在进行型号合格证的申请工作。该机起飞重量达1200 kg，巡航速度为220 km/h，续航时间为1.5 h，航程为300 km。电推进系统采用外转子三相永磁同步电机和余度电驱动技术，最大功率为140 kW，效率为92%~98%。系统动力电池装机总容量近70 kW·h，能量密度超过300 Wh/kg。该机型拥有高效率电推进系统集成、高升阻比整机气动布局设计、轻质高效低成本复合材料结构设计制造等电能航空动力核心技术，在城市空运及电动通航领域具有广泛应用前景。

3. “翌翔一号”电–电混合固定翼无人机

2020年，哈尔滨工业大学设计并制造了全国起

飞重量最轻的电–电混合固定翼无人机“翌翔一号”，巡航时间达到8 h以上。该无人机动力系统采用氢燃料聚化物电解质膜燃料电池作为主动力源，锂电池组为辅助驱动，与传统活塞发动机驱动相比，工作效率可增加大约20%，而与蓄电池相比，电池组能量密度提升了一倍以上。

4. EH216-S电动垂直起降飞行器

近年来，eVTOL在我国也得到了积极发展。2016年，亿航智能技术有限公司发布全球首款载人级无人驾驶飞行器eVTOL EH184。2019年，亿航智能技术有限公司成为全球首家上市的城市空中交通公司。2023年，亿航216取得全球首张适航证，汇天航空航天科技有限公司发布“陆地航母”分体式飞行汽车，峰飞V400、沃飞AE200 eVTOL型号合格审定申请获中国民用航空局正式受理。

EH216-S是亿航智能技术有限公司自主研发的、世界上首台获得航空器合格认证的eVTOL，该机型比以往机型新增了无人驾驶、航线预设功能，设计载客人数为2人，最大起飞质量为620 kg，最大航程为35 km，最大设计速度为130 km/h。目前已在全球14个国家成功完成超过2万次试飞，并于2023年获得中国民用航空局颁发的型号合格证。

（三）国内外对比

已试飞的国内外典型电动航空器主要性能如表1和图1所示。目前国外已试飞轻型运动电动飞机最大飞行速度为480 km/h，最大航程为750 km（HY4液氢燃料电池飞机）；已试飞区域通勤电动飞机最大载人数为9人，最大设计航程为800 km；已试飞eVTOL最大航程为300 km，载人数为6人。目前，国内已试飞的轻型运动电动飞机最大飞行速度为290 km/h，最大航程为300 km；已成功试飞eVTOL最大设计航程为250 km，载人数为5人；暂无区域通勤飞机成功试飞案例。由此可见，我国电动飞机的航程、载荷和飞行速度与国外同类型电动飞机相比仍存在一定的差距。

在取得的技术突破方面，国外面向民航运输领域已完成650千瓦级航空电机驱动系统的上机验证（Eviation Alice）、分布式电推进系统地面测试（X-57麦克斯韦）和氢燃料电池技术验证（ZeroAvia）。同时，欧美民航也致力于推动电推进系统部件的适航审定，以更好地支撑电推进技术在中短途航空器上的应用。近年来，我国在电动通航领域发展迅速，在高能量密度锂电池、余度电驱动技术、整机气动结构优化等方面取得重要进展。中国商用飞机有限责任公司近日推出19座全电动支线飞机CE-25A设计，采用集成在机翼上的管道风扇分布式电力推进，设计航程为400~500 km，最大巡航速度为400 km/h，可满足中短途大众客运和高端商务需求。目前CE-25A已完成缩比验证飞行，可为大功率分布式电推进系统上机应用提供技术参考。

总体而言，我国电能航空动力技术研究与国外相比存在以下差距：①在电动航空器关键技术和关键零部件方面尚未形成较强的自主研发及生产能

表1　国内外典型电动航空器产品的主要性能

	名称	推进功率/kW	质量/kg	动力架构	续航时间或航程	最大飞行速度/（km·h^{-1}）	首飞时间/年
国外	Alice	650×2	5500	螺旋桨	800 km	444	2022
	Accel	400	—	螺旋桨	45 km	480	2021
	e flyer2	90	662	螺旋桨	3 h/400 km	250	2018
	E-Fan	30×2	600	涵道风扇	1 h	220	2014
	Archer Midnight	—	2900	倾转旋翼	160 km	240	2023
	Vahana	45×8	726	多旋翼	100 km	220	2018
	Joby S4	70×12	1815	倾转旋翼	240 km	315	2017
国内	eDA40	130	800	螺旋桨	1.5 h	200	2023
	RX4E	140	952	螺旋桨	1.5 h/300 km	290	2019
	RX1E	40	340	螺旋桨	1 h/110 km	160	2013
	时的E20	100×6	2400	倾转旋翼	200 km	260	2023
	亿航216	—	360	对转螺旋桨	35 km	130	2021
	小鹏汇天X2	50×8	360	对转螺旋桨	35 min	130	2021

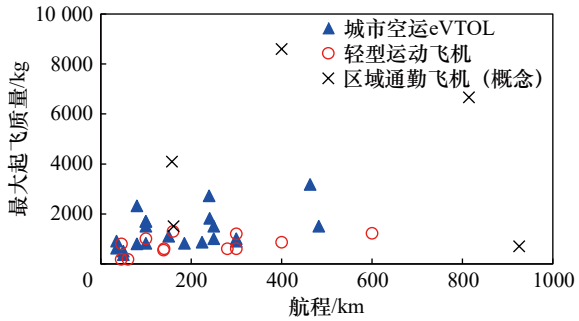


图1 全球电动飞机项目最大起飞质量与航程分布

力。电机、电控等核心零部件依赖进口，航空器制造业结构失衡，供应链松散，技术储备较少。② 基础研究薄弱，在高能量密度高安全动力电池、大功率高效电推进系统、先进气动布局与飞推一体化设计、能量综合管理技术等方面研发进展缓慢。③ 电动航空器产业链体系不完整，市场规模较小，在标准与法律制定及基础设施建设布局等方面还不完善。④ 电能航空动力技术研究主要集中在轻小型电动飞机和 eVTOL 等通航领域，对较大型电动航空器及数兆瓦级电推进系统验证平台缺乏前瞻布局和规划。

亟需开展电动航空器关键技术攻关，构建完善的电动航空器及关键部件产业链体系，增强自主研发、生产及运营能力，加快拓展各应用场景下的全谱系电动航空器研制，建立健全电动航空器适航审定与安全运行标准，推动我国电能航空动力技术的商业化进程。

三、电能航空动力关键技术

（一）长寿命高能量密度电池技术

电动航空器仅由电池为飞机动力提供能量。电池性能是制约电动航空器发展的关键因素，直接影响电动航空器航程、载荷和飞行安全[12]。航空电推进对电池能量密度、循环寿命、稳定性和安全性提出了更高的要求。

我国在电池模组优化设计、新型电池材料、凝聚态及固态电池等方面均取得了技术突破[13,14]。表 2 列出了国内各型锂电池产品的最高能量密度，表 3 对比了国内外动力电池的主要性能。我国工业级锂电池能量密度达到了 300 Wh/kg，与国外水平相当。但要实现电动航空器的商业应用，电池的能量密度和安全性仍有待提升。我国需要在高动力电解质材料、高比能正负极材料、高循环寿命隔膜技术、电池模组优化管控技术等方面取得进一步突破。

固态锂电池能量密度比传统锂离子电池更高，可突破 500 Wh/kg。此外，固态电解质化学活性较稳定，受环境温度影响较小，表现出良好的稳定性和可靠性。宁德时代新能源科技股份有限公司（简称宁德时代）提出了凝聚态航空电池的概念，能量密度预计能达到 500 Wh/kg，但目前仍处于推进落地阶段，尚未投入使用；比亚迪股份有限公司全固态电池选用硅基材料作为固态电池负极，牺牲了一部分能量密度的性能，能量密度预计能达到 400 Wh/kg。全固态电池要达到量产，在技术层面需要解决电极与电解质界面的稳定性问题，提高全固态电池的充放电水平和循环寿命。

锂硫电池理论能量密度可以达到 2600 Wh/kg，现阶段研究能达到 300~500 Wh/kg，充放电次数普遍在 100~200 次[15]。但锂硫电池中硫的导电性较差，且放电时沉淀在硫上堆积，导致电池循环寿命低。此外，锂硫电池中的电解液同样具有化学稳定性差和热稳定性差的特点，因此锂硫电池安全性能有待提高。锂空气电池利用锂金属与氧气的可逆反应，理论能量密度上限达到 11 000 Wh/kg，被认为是未来电池领域的颠覆性技术[16]。然而现有锂空气电池存在能量转化效率低、倍率性能差和循环寿命不佳等问题，短期技术实现难度较大，长期来看具有很大的研究意义与前景。

表 2 国内各型锂电池主要发展现状

企业	电池类别	最高能量密度 /（Wh·kg^{-1}）
宁德时代	三元锂电	304
	磷酸铁锂	160
	钛酸锂	255
比亚迪股份有限公司	三元锂电	200
	磷酸铁锂	180

表 3 国内外电池性能对比

	能量密度	充放电倍率	循环寿命
国外	300 Wh/kg（特斯拉）	15C（三星 SDI）	>20 000 次（东芝）
国内	300 Wh/kg（荣盛盟固利）	20C（宁德时代）	>15 000 次（荣盛盟固利在研）

氢燃料电池的能量密度高，理论上可超过2000 Wh/kg，现阶段研究能达到1500 Wh/kg。氢燃料电池的使用寿命较长，现阶段可达10 000 h[17]。近年来，氢燃料电池的功率密度已获得了大幅提升，但仍面临单体输出功率低的问题。氢燃料安全和高效存储也是氢燃料电池技术大规模商业化应用的难点所在。

以上电池技术具有各自的技术优势，但也存在技术挑战。实际应用时不仅要考虑电池自身特点和技术成熟度，而且需要根据飞行平台的特点和任务需求进行选择。对于旋翼电动飞机，由于其无法利用空气动力学改善飞行性能，对电池的依赖性较强，要想提高其航程，需要进一步提高锂电池的能量密度或采用锂电池与燃料电池混合供电方式。固定翼电动飞机采用当前锂电池技术已经能实现商载2~4人、续航300 km的飞行任务，满足通航需要。然而，要实现电能航空动力技术向远距离、长航时的民航运输领域拓展，则需要突破高性能锂电池–燃料电池混合供电技术和氢燃料电池技术等。

（二）高效高功率质量比电机推进技术

电动机作为电动航空器的核心动力单元，直接决定了电推进系统的能源利用率和推进效能。目前，推进电机的质量问题极大地限制了电动航空器的航程和有效载荷，电机系统在轻量化设计、损耗抑制和安全运行等方面面临挑战。

永磁同步电机由于永磁材料的高磁能积，能够同时获得较高的效率和功率密度，是中小型电推进飞机较合理的动力源方案。国外针对高功率密度、高效能永磁电机的研发起步较早，且高校、科研院所和制造商及零部件供应商之间合作紧密，形成了比较成熟的产业链，如图2所示。美国莱特电气公司和柯林斯航空航天公司研制的1 MW航空电机均已实现全功率测试；伊利诺伊大学研制的1 MW分布绕组外转子无槽永磁电机是兆瓦级推进电机的典型代表，电机重量仅为65.4 kg，转速为15 000 r/min，通过减速器驱动电动涵道风扇，功率密度达到了15.3 kW/kg，计算效率达到了96.4%[18]。目前，实验中的航空电机最大功率已达4 MW，功率密度为17.3 kW/kg，实验中的1 MW逆变器效率达98.5%[19]。国内在航空推进电机系统方面的研究起步较晚，大功率电机电驱产品主要应用于轨道交通领域，如中车时代电气股份有限公司研制的220 kW永磁电机电驱集成系统单元。此外，南京航空航天大学研发的360 kW双通道永磁推进电机样机采用定子浸油冷却方法，实测功率密度达到8 kW/kg，实测效率达98%，正在进一步开展全工况测试。

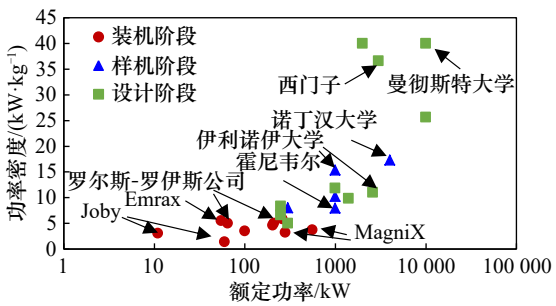


图2　应用及在研的航空推进电机

注：西门子表示西门子股份公司；霍尼韦尔表示霍尼韦尔国际公司。

在永磁推进电机应用方面，国外已实现装机试飞的电推进系统单元功率达到650 kW（即MagniX公司研制的Magni650电驱系统），推进电机功率密度达到5.8 kW/kg（SP260D-A）。我国实现装机的电推进系统功率等级最高达140 kW（用于锐翔RX4E），工业级驱动电机峰值功率密度达4.88 kW/kg（精进电动）。

超导技术以高载流、低热负载特性可以大幅提高机载功率密度和效率，为实现大型电动航空器的成功运行提供了可能。美国伊利诺伊大学、威斯康辛大学、NASA格伦研究中心、英国曼彻斯特大学等针对航空应用开展了兆瓦级超导或半超导电机研究[20~22]。2021年，俄罗斯推出的500 kW高温超导航空电动机已在雅克-40电动飞机上完成试飞。然而，超导电机在航空电推进系统中的成熟应用仍面临诸多技术问题，包括超导绕组的冷却与隔热、交流绕组在强磁场下的失超问题等。此外，安全可靠的低温冷却系统是超导推进电机的应用基础。超导电机仍需突破高电流密度低交流损耗超导材料、大功率超导电机轻量化设计、低温冷却等关键技术。

为满足电推进系统高效、高功率密度和高可靠性要求，我国亟需围绕推进电机、电机驱动控制器和电机热管理系统开展高性能电工材料、新型电机拓扑、超导电机、宽禁带半导体器件、电机电控深度集成、高效冷却、增材制造等技术攻关，提高推进电机及其控制器的自主创新研发及生产能力。

（三）能量综合管理技术

电能航空动力飞机供电系统日益复杂，电源端和负载端形式多样、存在多能耦合，如图3所示。同时机载设备的功率越来越大，这将导致系统的散热量不断增加，面临的热管理问题越来越严峻。采用传统的各系统独立能量管理方式无法实现飞机能量的高效利用。能量综合管理从飞机整体层面对能量进行优化配置和控制管理，协调不同系统之间的能量供需关系，以实现能量的高效利用和节约[23]。

美国早在2008年启动了“飞行器能量综合技术”（INVENT）计划，提出了“能量优化飞机”的概念[23]，旨在构建先进的整机能量管理系统，其核心是整机高效的热/质传输方法与先进的综合能热管理，目前地面综合演示验证即将完成。国内一些科研机构也从不同角度针对电动飞机能热管理技术开展了研究。西北工业大学从负荷端和电源端（发电+储能）的多样化角度，研究功率智能分配与能量优化管理、多能系统优化管理策略和飞推一体化控制技术等。

能量综合管理技术主要包含电网架构优化和集成化综合热管理。在电网架构方面，直流输电型和交流输电型电力系统架构是最具潜力的航空电力系统架构形式[24]。二者均能够实现发电机与电动机的解耦，使得各推进系统之间相互独立，提高系统运行稳定性和效率。与交流输电相比，直流输电不存在交流损耗，因此更适用于采用超导电力传输的大型涡轮发电分布式电推进系统。当前电力系统仍面临功率变换器重量大、系统损耗大、电磁干扰严重等问题，我国亟需针对高压直流供电系统开展机电系统故障诊断与健康管理技术研究，突破高冗余电力系统架构及相应的配电技术、高功率密度功率变换技术及高效散热技术等。

高性能热管理技术是飞机电推进系统性能提升与可靠运行的基础，不仅需要实现更高效的冷却效果，而且需要综合考虑冷却系统重量和体积对电推进系统乃至整机平台的影响[4]。因此，将油雾冷却[25]、相变冷却[26]等新型冷却散热技术与面向动力系统平台的综合热管理模式相结合，将进一步简化冷却系统架构，提高系统功率密度。随着飞/推一体化发展，集成化的综合热管理技术是未来飞机电推进热管理系统的重要发展趋势。

（四）高升阻比气动布局设计技术

电动航空器的升阻比越大，飞行时消耗的能量越小，在能量储备一定的情况下航时越长，因此需要进行高升阻比的整机气动外形与布局设计。一方

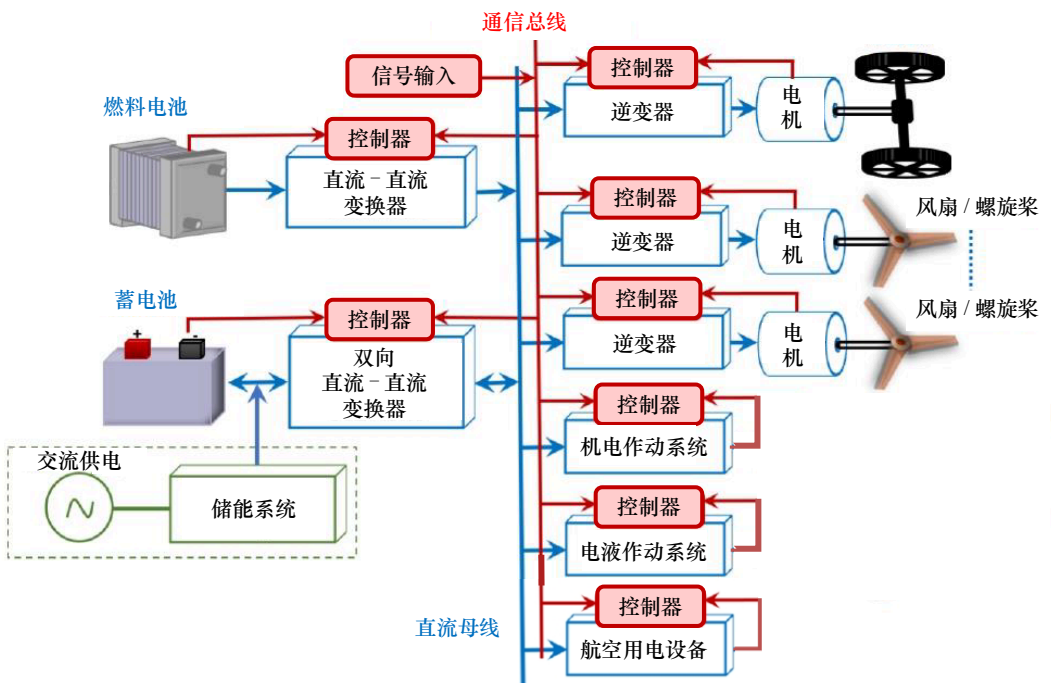


图3 电动飞机供配电系统框图

面，通过采用新结构、新材料、新工艺，减轻空机重量，提升飞机气动效率和有效载荷[27]。锐翔RX4E采用整机气动结构优化、碳纤维复合材料机身、机翼扭转控制等方式提高升阻比、降低结构重量，最大升阻比为17。另一方面，还需重点开展翼身融合布局、桁架支撑翼布局、分布式推进等新型气动布局技术研究，优化飞机气动特性，改善飞机飞行性能。分布式电推进系统采用多台分布式小功率电机推进装置，能够更为灵活地融入飞机气动布局，实现增升减阻，且在容错控制和冗余设计方面具有优势[9]。此外，电推进系统的功率相对尺度无关性使电动飞机总体设计可突破传统架构的限制，使气动设计更灵活。

为满足电动航空器的气动设计需求，我国需要深入分析动力装置构型、分布式布局与飞行平台性能之间的耦合关系，探索气动–结构–推进一体化设计方法，重点开展分布式布局、翼身融合布局、桁架支撑翼布局等先进气动布局设计研究，突破新型复合材料、高性能自适应机翼、层流翼身组合体设计等高升阻比空气动力设计和结构减重设计方法，有效提高飞机的空气动力效率，改善电动飞机的飞行性能。

四、电能航空动力技术的实用性分析

以全电推进的电动航空器为例，通过构建电能航空动力系统仿真模型，分析电动航空器性能随关键技术参数变化的规律，评估电能航空动力技术在轻小型城市空运飞机、区域通勤飞机和小型支线飞机上的应用可行性。

（一）模型构建与验证

首先，在厘清电推进系统的质量匹配、能量匹配和功率匹配关系[28-30]的基础上，基于Matlab/Simulink仿真平台构建了固定翼电动飞机性能评估模型，如图4所示。该模型由飞机气动模块、主电气系统模块、航电系统模块、动力电池模块和飞行任务模块构成。其中，飞机气动模块将飞机建模为对推进电机的负载，根据飞机结构及推进装置结构参数得到用于匹配计算的气动参数，包括升力系数、阻力系数、奥斯瓦尔德（Oswald）效率系数等。

以锐翔RX1E轻型飞机设计值（见表4）为参考，基于该模型估算现有电推进技术下飞机的性能，验证该模型的准确性。经计算，在现有技术水

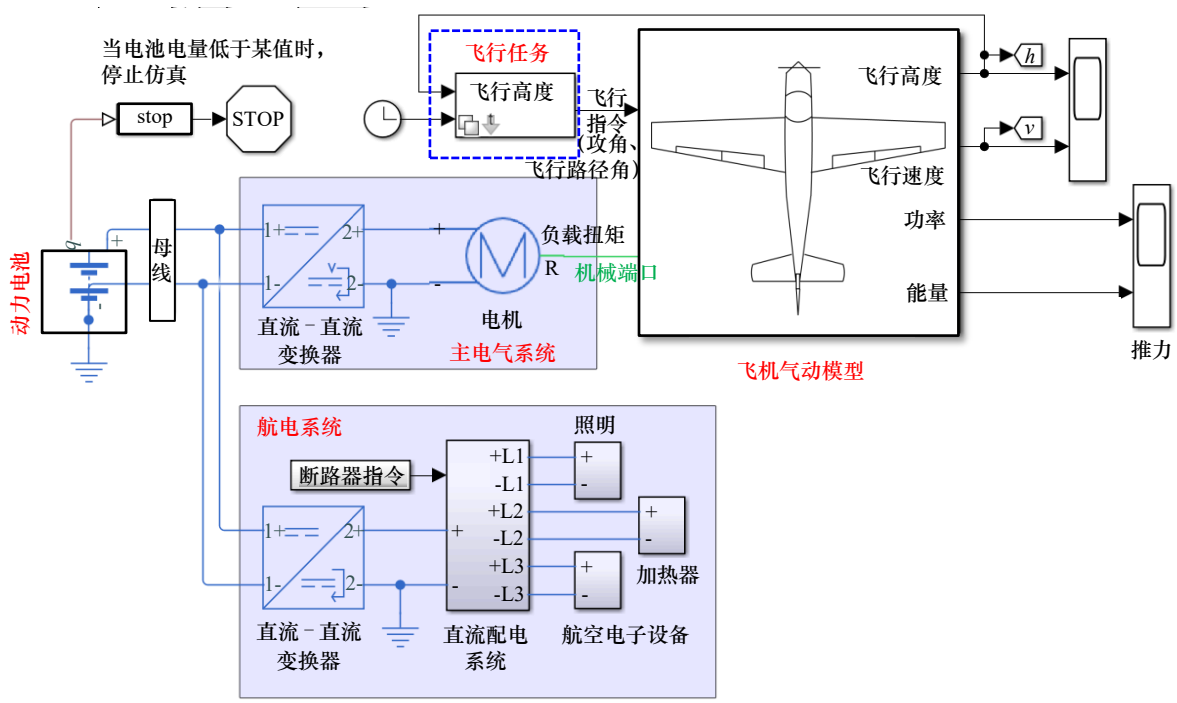


图4　固定翼电能航空动力飞机性能评估模型

注：R表示机械端口，连接电机或螺旋桨转轴；*b*表示电池剩余电荷量；*h*、*v*分别表示飞行高度、飞行速度；L1、L2、L3分别表示用电设备1、用电设备2、用电设备3。

表4 RX1E电动飞机关键参数

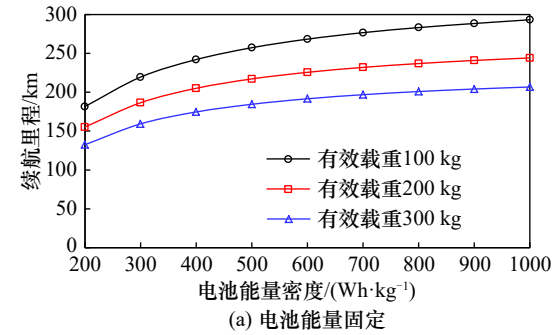
参数	单位	数值
机长	m	6.6
翼展	m	14.5
飞机空重	kg	340
最大起飞质量	kg	500
巡航速度	km/h	110
最大速度	km/h	160
升阻比	–	10
最大功率	kW	40
电池容量	Ah	32
续航时间	h	1
续航里程	km	110

平下（即电池能量密度为260 Wh/kg，电机功率密度约为3.75 kW/kg，电机效率为95%，升阻比为10），该轻型电动飞机能够实现200 km的航程。计算结果与RX1E轻型运动飞机的性能数据一致，基本验证了模型的准确性。

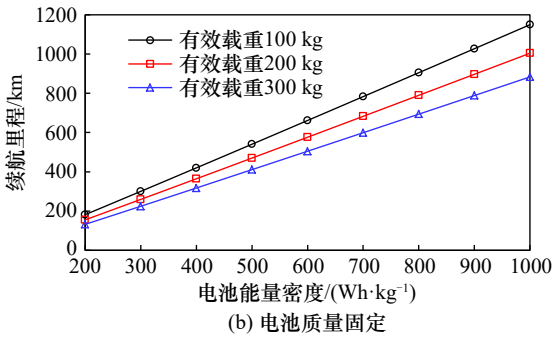
在上述基础上，以锐翔RX4E四座飞机设计值为参考，对电机功率密度和电池能量密度进行反向推演。设计载客量为4座，航程为350 km，巡航速度为200 km/h，其中电机的空重、电池重量及电机重量均为飞机设计载客量及设计航程的函数。根据重量、能量、功率匹配关系迭代计算，得到电机巡航功率约为60 kW、电池总能量约为104 kW·h，同时得到电机功率密度为3.9 kW/kg、电池能量密度为347 Wh/kg。

（二）关键技术参数分析

基于上述电动飞机模型进一步分析了电池能量密度、电机功率密度、电机效率、飞机升阻比等对电动飞机航程的影响规律。图5(a)和(b)分别为电池能量和电池重量不变时，飞机航程在不同有效载荷下随电池能量密度变化的趋势。图6为电池能量密度不变的情况下，航程随推进电机功率密度和推进系统效率的变化情况。图7为电机系统性能不变时，航程在不同电池能量密度下随飞机升阻比的变化情况。通过比较可知，电动飞机的航程受电池能量密度和飞机升阻比的影响显著；相较于电池能量密度的影响，推进电机系统质量占比较小，因此推进电机的功率密度和效率对航程的影响较弱。

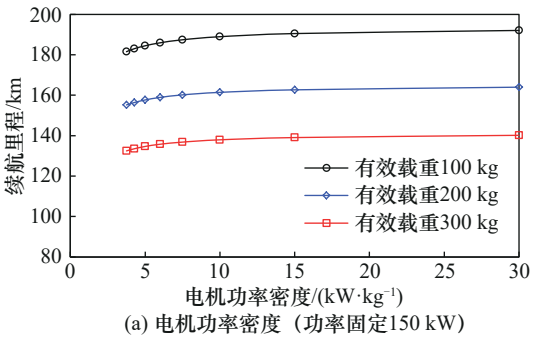


(a) 电池能量固定

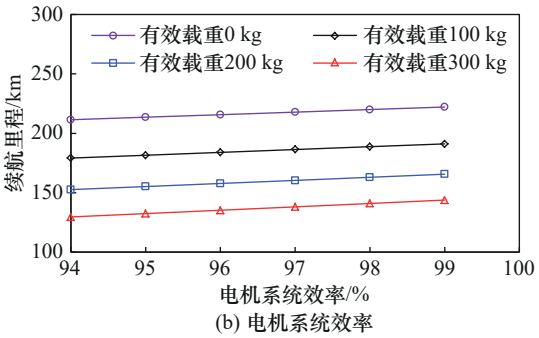


(b) 电池质量固定

图5 航程随电池能量密度变化情况



(a) 电机功率密度（功率固定150 kW）



(b) 电机系统效率

图6 航程随推进电机系统性能变化情况

图8(a)和(b)分别为电池质量占飞机总质量的30%和50%时，飞机所能达到的航程与电池能量密度、有效载荷之间的关系。可见，随着电池能量密度的增加，电池容量增大、航程增大；随着载荷的增加，飞机总质量增大、航程减小。当两座级轻小

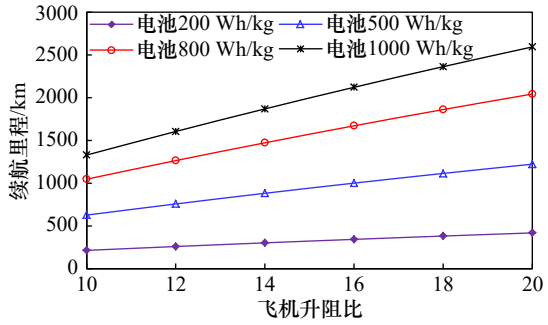
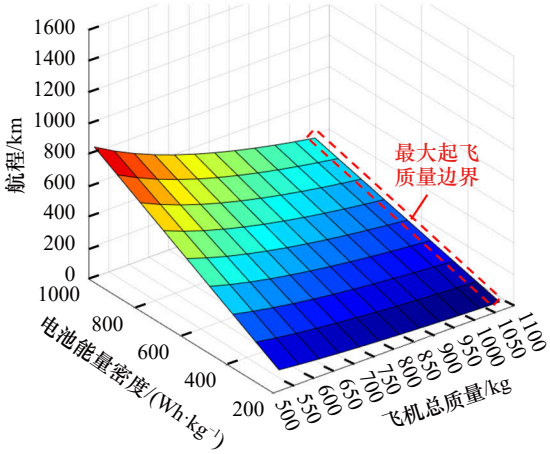
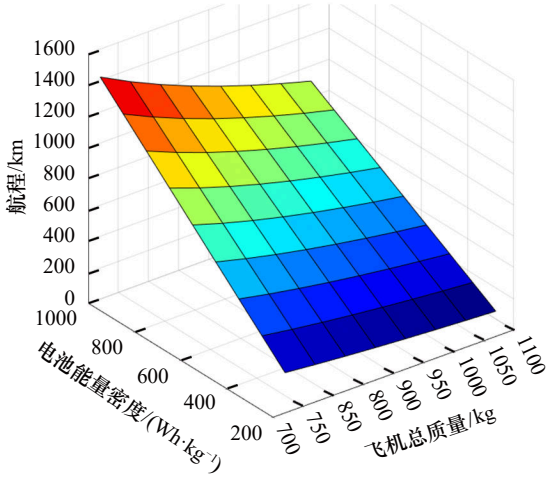


图7　航程随飞机升阻比变化情况



(a) 电池质量占比30%



(b) 电池质量占比50%

图8　航程和最大起飞质量随电池性能的变化情况

型电动飞机总质量超过1050 kg时，无论电池能量密度为多少，飞机都将无法起飞。对比可知，随着电池质量的增大，在相同的能量密度下，电池容量增加，因此航程提升，但最大起飞质量基本不受影响。

（三）电能航空动力在区域通勤和小型支线飞机上的应用评估

为评估电推进技术在区域通勤和支线飞机上的工程实用性，并预测关键部件所需达到的性能水平，选取Eviation Alice和运7-200A为参考机型，对模型中的飞机参数和气动参数进行设置，两种机型在模型中的关键参数如表5所示，对电机功率密度和电池能量密度进行反向推演。

分别以任务①14座级470 km航程、任务②30座级750 km航程的飞行任务为目标，按照功率、能量、质量匹配原则，对两个飞机模型中的电动力参数（包括电池质量、电机质量、电机转矩、电机效率等）进行修正，从而获得电池和电机所需达到的性能水平（见表6）。

到2030年，预计电机功率密度能够达到8 kW/kg，电池能量密度达到500 Wh/kg。采用2030年的技术水平，参考Eviation Alice飞机的气动参数及质量比例，计算可得电机巡航功率为776 kW，总能量为912 kW·h，根据模型迭代计算可得到电机的升力系数、阻力系数、Oswald效率系数等，预计到2030年，电机及电池技术水平可满足载客量14座、航程470 km的区域通勤飞机。

到2040年，预计电机功率密度能够达到15 kW/kg，电池能量密度达到1000 Wh/kg，同时预计兆瓦级电推进技术达到工程应用水平。采用2040年的技术水平，参考运7-200A等飞机的气动参数及质量比例，计算可得电机巡航功率为1.4 MW，总能量

表5　飞机及其部件关键参数

参数	区域通勤	小型支线
机翼面积/m²	35	75
飞机空重/kg	1400	12 500
升力系数	0.25	0.55
阻力系数	0.022	0.03
飞行高度/m	1000	7000
巡航速度/（km·h⁻¹）	420	500
电机转速/rpm	2000	2000

表6　关键部件所需达到的性能水平

飞行任务	巡航功率/kW	总能量/（kW·h）	电机功率密度/（kW·kg⁻¹）	电池能量密度/（Wh·kg⁻¹）
①	776	912	8	500
②	1400	2415	15	1000

为2415 kW·h，根据模型迭代计算可得到电机的升力系数、阻力系数、Oswald效率系数等，预计到2040年，电机及电池技术水平可满足载客量30座、航程750 km的小型支线飞机。以上分析为区域通勤和支线电动飞机发展路径提供数据支撑。

要实现更大型飞机的全电推进，需要突破颠覆性技术，如高功率密度燃料电池技术、高温超导推进技术、先进气动布局等。氢燃料安全和高效存储技术及高功率密度氢燃料电池工程实用化直接决定了氢燃料电池是否可用于未来支线电动飞机。

五、电能航空动力技术发展目标与重点任务

全面调研分析我国电能航空动力产业现状后发现，我国电动航空器研发、制造和运营基本处于“单打独斗”的局面[31]，没有明确制定与电能航空动力发展相关的政策和标准体系，产业链和基础设施建设布局仍不完善，在气动布局创新设计、高能量密度动力电池、高效率电推进系统、能量综合管理等方面尚未形成较强的自主研发能力。因此，需要抓住机遇、充分发挥我国在新能源领域的技术积累和产业优势，制定明确的电动航空动力技术发展目标和发展路线，推动我国电动航空器向实用化方向发展。

（一）发展目标

结合飞机动力系统性能预测模型和关键技术发展趋势，从电能航空动力总体层面和关键部件技术层面分别制定我国电能航空动力的发展目标，如表7和表8所示。

到2030年，城市空运飞机和中小型eVTOL投入商业应用。满足电动航空器使用需求和适航要求的500 Wh/kg级航空锂电池、500 kW级航空电机及驱动系统产品应用验证，功率质量比达到8 kW/kg；400 Wh/kg级航空锂电池、250 kW级航空电机及驱动系统投入量产；飞/推一体化设计技术成熟，飞机升阻比超过17；分布式电推进系统完成装机验证，并开始试飞区域通勤飞机。

到2040年，电池、电机及其控制器性能进一步提升，区域通勤电动飞机实现试运营。全固态电池产品成熟，燃料电池开始工程化应用，采用锂电池–燃料电池混合的电池系统能量密度突破1000 Wh/kg；超导电机低温冷却与制冷及绝缘技术突破，大功率推进系统开始试验半/全超导电机，电机的功率质量比突破15 kW/kg；能源管理进一步优化，数兆瓦级分布式电推进技术实现应用，飞机升阻比超过20，小型电动支线飞机开始试验飞行。

到2050年，超导电机技术实现上机应用，功率密度达到20 kW/kg，分布式电推进、翼身融合等新

表7 电能航空动力的总体目标

总体目标	2030年	2040年	2050年
电动航空器	实现小型电动飞机、eVTOL的商业应用 区域通勤电动飞机试飞	实现小型支线电动飞机试飞 区域通勤飞机试运营	实现小型支线电动飞机民航试运营 区域通勤交通成网
航程/km	100~500	500~1000	1000~2000
载客量/座	6~20	20~60	>60
体系标准	加快构建相对独立、适应市场的电动航空器运营支持体系，系统开展电能航空动力相关标准、规范制定		

表8 电能航空动力关键技术目标

技术目标	2030年	2040年	2050年
电池	高性能锂电池 500 Wh/kg	锂电池–燃料电池混合 1000 Wh/kg	氢燃料电池2000 Wh/kg
电机	高性能永磁电机 8 kW/kg，96%	半/全超导电机 15 kW/kg，98%	高温超导电机 20 kW/kg，>99%
电机控制器	高温碳化硅 8 kW/kg，98%	宽禁带器件 15 kW/kg，99%	矩阵变换器 20 kW/kg，>99%
气动设计	飞/推一体化 升阻比>17	分布式电推进 升阻比>20	翼身融合 升阻比>25
能量管理	高压直流供配电技术、集成化综合热管理技术和智能化的能量管理技术逐步成熟		

型气动布局成功应用，飞机升阻比超过25。区域通勤交通网络建立，小型电动支线飞机开始民航试运营，并实现完全自主、覆盖全部市场和产品线的电动航空器产业链。2050年后，突破发展支／干线电动飞机所需的颠覆性技术，如先进结构与材料、高温超导电机技术、锂空气电池技术、氢燃料安全和高效存储技术等。

（二）重点任务

电能航空动力技术发展应结合我国国情和工业技术积累，在未来不同时期推动落实相应的重点任务，具体规划如图9所示。

未来5~15年内，电能航空动力技术研究以面向城市空运和区域通勤为主，重点突破电池、电机的关键技术，加快形成安全高效的电机、电池、飞控、材料等现代化产业链，不断提升产业链韧性和安全水平，建成城市空运交通网络，加快电动通用航空器系列化、谱系化，推动实现20座级区域通勤电动飞机商业运营。

未来10~20年内，电能航空动力技术研究以面向民航运输为主，建成区域通勤网络，重点发展小型支线电动客机，逐步开始民航运输。现阶段应以预研和技术攻关为主，重点开展兆瓦级分布式推进技术、综合热管理技术、锂电池–燃料电池混合能源系统、超导电机低温与制冷及绝缘等技术研究，并以新舟60、新舟700、运-7等型号为原型进行小型支线电动飞机的设计和改进。采用锂电池–燃料电池混合的电池系统作为由纯蓄电池供电向纯燃料电池供电的过渡方案，为逐步实现电能航空动力技术由小到大、由短途向长途的商业化应用提供了可能。

在2050年前后，发展60~100座的氢燃料电池支线电动飞机，重点突破氢燃料电池、高效安全储氢系统、数十兆瓦级分布式电推进、超导电机与翼身融合等关键技术实用化，为后续发展中大型民用航空电动飞机提供技术积累和发展基础。

六、推动我国电能航空动力技术发展的建议

电能航空动力技术的发展应充分发挥我国储能电池、高效能电机电控、高压电网产业链完整、“产学研”体系成熟的优势，构建协同创新体系，培育航空产业链和供应链，支持龙头骨干企业整合创新链上下游单位，联合高校院所科研力量，以城市空运、区域通勤、支／干线飞机为战略路径，推进领域内创新平台建设。先重点支持中小型城市空运电动航空器发展，逐步建立城市空运交通体系，加强高能量密度高安全动力电池、高功率质量比电驱系统、分布式电推进等关键核心技术协同攻关，逐步推进兆瓦级电推进系统的工业应用；后续应加快氢燃料电池、超导电机与翼身融合等关键技术实用化，助力实现区域通勤和电动支线飞机的民航飞行。

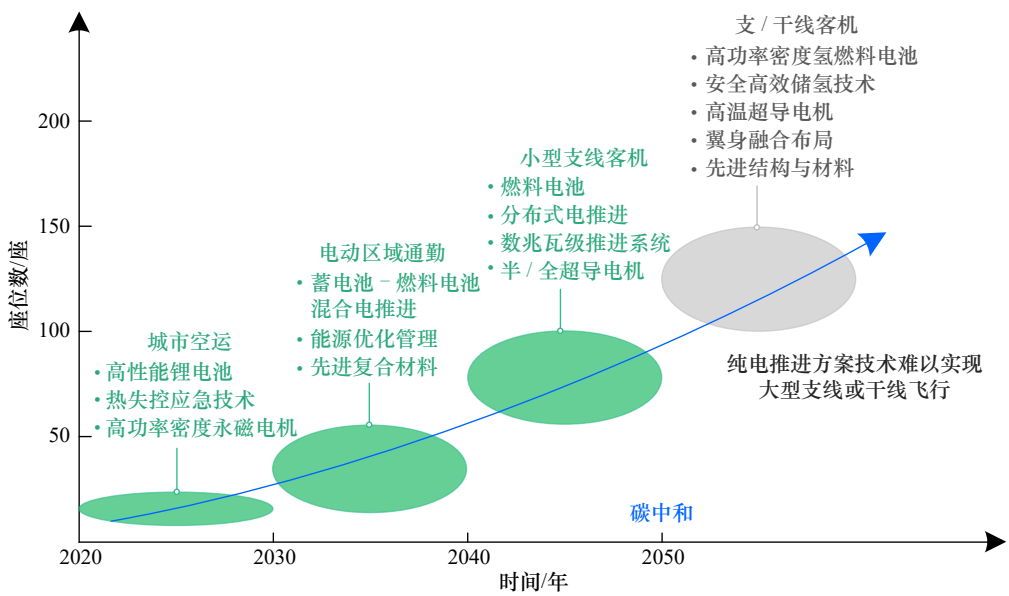


图9　电能航空动力技术发展规划

（一）加快推动电动通用航空器系列化、谱系化

紧密结合国家航空产业的发展需求，开展电动航空动力核心技术攻关，加快发展高能量密度、高安全性的航空动力电池，以及高功率密度、高效率、高可靠性的航空电推进技术，提升核心部件自主研发与制造能力，开发具有自主知识产权的电动通用航空器系列产品。

（二）加快拓展各应用场景下的全谱系电动飞行器研制

优先布局城市空运的产业链和市场，做好绿色民航运输的先期研究和技术储备。面向民航运输领域提前布局开展关键技术攻关，优先发展混合动力支线飞机，深入探索电电混合、油电混合、电氢混合动力等不同技术路线。

（三）积极参与电能航空动力标准构建和运营支持体系研究

面向城市空运和民航运输领域，加快构建相对独立、适应市场的电动航空器运营支持体系。针对不同推进架构、不同航程、不同型号的电动飞机审定专用条件，结合相关适航规定开展研究，编制形成电动航空器适航审定规章，推动中国电动航空器融入世界的发展规划，引领国际标准和发展方向。

（四）探索和建立有利于促进电动航空器发展的低空空域管理模式，促进低空经济发展

亟需开展低空空域的调度技术、航路规划和追踪监控技术的相关研究，推动电动飞机自动驾驶、自主飞行等智能化技术的研发，以实现eVTOL、轻型运动飞机及区域通勤飞机的综合管理和智能运行。同时完善起降、停放、充电、换电等基础设施，完善服务体系与信息支持建设。建立有利于促进低空通用航空发展的法规标准体系，明确空防安全与通用航空飞行安全责任主体，建立动态管理、灵活使用的低空空域使用机制。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: October 10, 2024; **Revised date:** December 10, 2024

Corresponding author: Shao Lingyun is an associate research fellow from the College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. Her major research field is aircraft electric propulsion. E-mail: shaolingyun1990@outlook.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on Development Strategy of New Energy Aero-engine” (2023-XBZD-15); National Natural Science Fund Project (52207060); Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20220905)

参考文献

[1] Federal Aviation Administration. United States 2021 aviation climate action plan [EB/OL]. (2021-11-09)[2024-12-15]. https://www. faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation_Climate_Action_Plan.pdf.

[2] 韩玉琪, 王则皓, 付玉. 欧盟清洁航空计划分析 [J]. 航空动力, 2023 (2): 28–30.
Han Y Q, Wang Z H, Fu Y. Analysis of European Union’s clean aviation program [J]. Aerospace Power, 2023 (2): 28–30.

[3] 王翔宇, 张平平. IATA航空净零排放发展路线图分析 [J]. 航空动力, 2024 (1): 50–55.
Wang X Y, Zhang P P. Roadmap of IATA net zero carbon emissions for aviation [J]. Aerospace Power, 2024 (1): 50–55.

[4] 张卓然, 陆嘉伟, 张伟秋, 等. 飞机电推进系统高效能电机及其驱动控制技术 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(16): 6610–6632.
Zhang Z R, Lu J W, Zhang W Q, et al. High-performance electric machine and drive technologies for aircraft electric propulsion systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(16): 6610–6632.

[5] O’Connell T. Fundamentals of more electric aircraft design [R]. Chicago: IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC), 2017.

[6] NASA Glenn Research Center. Electric propulsion system studies [EB/OL]. (2015-11-30)[2024-12-15]. https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160009274/downloads/20160009274.pdf.

[7] 秦江, 姬志行, 郭发福, 等. 航空用燃料电池及混合电推进系统发展综述 [J]. 推进技术, 2022, 43(7): 6–23.
Qin J, Ji Z X, Guo F F, et al. Review of aviation fuel cell and hybrid electric propulsion systems [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(7): 6–23.

[8] 黄俊, 杨凤田. 新能源电动飞机发展与挑战 [J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57–68.
Huang J, Yang F T. Development and challenges of electric aircraft with new energies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 57–68.

[9] 孔祥浩, 张卓然, 陆嘉伟, 等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述 [J]. 航空学报, 2018, 39(1): 021651.
Kong X H, Zhang Z R, Lu J W, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 021651.

[10] Jansen R, Bowman C, Jankovsky A, et al. Overview of NASA electrified aircraft propulsion (EAP) research for large subsonic transports [R]. Atlanta: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2017.

[11] David D, Simon B, Malcolm F, et al. Zero-carbon emission aircraft concepts [R]. Cranfield: Aerospace Technology Institute, 2022.

[12] 李开省. 电动飞机核心技术研究综述 [J]. 航空科学技术, 2019, 30(11): 8–17.
Li K S. Summary of research on core technology of electric air-

craft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 8–17.

[13] Chen W D, Liang J, Yang Z H, et al. A review of lithium-ion battery for electric vehicle applications and beyond [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 4363–4368.

[14] Yang Z F, Wang J, Cui C J, et al. High power density & energy density Li-ion battery with aluminum foam enhanced electrode: Fabrication and simulation [J]. Journal of Power Sources, 2022, 524: 230977.

[15] Gao Y, Guo Q Y, Zhang Q, et al. Fibrous materials for flexible Li–S battery [J]. Advanced Energy Materials, 2021, 11(15): 2002580.

[16] Wang L, Pan J, Zhang Y, et al. A Li–air battery with ultralong cycle life in ambient air [J]. Advanced Materials, 2018, 30(3): 1704378.

[17] Felseghi R A, Carcadea E, Raboaca M S, et al. Hydrogen fuel cell technology for the sustainable future of stationary applications [J]. Energies, 2019, 12(23): 4593.

[18] Sanchez R, Yoon A, Yi X, et al. Mechanical validation of a high power density external cantilevered rotor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3208–3216.

[19] Golovanov D, Gerada D, Sala G, et al. 4-MW class high-power-density generator for future hybrid-electric aircraft [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2952–2964.

[20] Scheidler J J, Tallerico T F, Miller W A, et al. Progress toward the critical design of the superconducting rotor for NASA's 1.4 MW high-efficiency electric machine [R]. Indianapolis: 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2019.

[21] Sugouchi R, Komiya M, Miura S, et al. Conceptual design and electromagnetic analysis of 2 MW fully superconducting synchronous motors with superconducting magnetic shields for turbo-electric propulsion system [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2020, 30(4): 1–5.

[22] Komiya M, Aikawa T, Sasa H, et al. Design study of 10 MW REBCO fully superconducting synchronous generator for electric aircraft [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(5): 5204306.

[23] Chapman J W, Schnulo S L, Nitzsche M P. Development of a thermal management system for electrified aircraft [R]. Orlando: AIAA Scitech 2020 Forum, 2020.

[24] Jones C E, Norman P J, Galloway S J, et al. Comparison of candidate architectures for future distributed propulsion aircraft [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(6): 1–9.

[25] Deisenroth D C, Ohadi M. Thermal management of high-power density electric motors for electrification of aviation and beyond [J]. Energies, 2019, 12(19): 3594.

[26] Wu F, EL-Refaie A M. Additively manufactured hollow conductors integrated with heat pipes: Design tradeoffs and hardware demonstration [R]. Gothenburg: 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM), 2020.

[27] 段辰龙, 李岩, 徐悦, 等. 电动飞机发展关键技术与总体性能关联性分析 [J]. 飞行力学, 2021, 39(2): 39–44.
Duan C L, Li Y, Xu Y, et al. Analysis on the relationship of key technology for electric aircraft development and overall performance [J]. Flight Dynamics, 2021, 39(2): 39–44.

[28] 刘福佳, 杨凤田, 刘远强, 等. 电动轻型飞机电推进系统选型与参数匹配 [J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(3): 350–356.
Liu F J, Yang F T, Liu Y Q, et al. Type selection and parameter matching of electric light aircraft propulsion system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 350–356.

[29] 刘福佳, 杨凤田, 刘孟诏, 等. 电动轻型飞机起飞总质量估算方法 [J]. 科学技术与工程, 2018, 18(5): 118–123.
Liu F J, Yang F T, Liu M Z, et al. Estimated method of the take-off mass of the electric light aircraft [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(5): 118–123.

[30] 康桂文, 胡雨, 李亚东, 等. 超轻型电动飞机电动力系统的参数匹配 [J]. 航空动力学报, 2013, 28(12): 2641–2647.
Kang G W, Hu Y, Li Y D, et al. Parameters matching of ultralight electric aircraft propulsion system [J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(12): 2641–2647.

[31] 孙侠生, 程文渊, 穆作栋, 等. 电动飞机发展白皮书 [J]. 航空科学技术, 2019, 30(11): 1–7.
Sun X S, Cheng W Y, Mu Z D, et al. White paper on the development of electric aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 1–7.