

无人机用混合动力系统综合分析^{*}

吴 雄, 沈 勋, 宋汉强

(海军研究院, 上海 200436)

摘 要: 混合动力系统是介于传统发动机和全电推进系统之间的一种新型推进形式。本文首先针对无人机对混合动力系统的需求, 梳理了系统的架构形式、特点和发展现状等; 其次对系统四大关键技术进行了提炼分析和评价; 最后分析了技术研究的发展趋势并提出了发展建议。研究表明: 针对无人机动力需求, 在现有技术水平下, 混合动力系统是一种兼顾高效与性能的优良方案, 可真正实现无人机的个性化设计。同时, 混合动力系统也存在着系统总体设计、高效高功重比电机、能量综合管理、高能量密度储能等关键技术瓶颈, 是需要重点研究和攻克的方向。

关键词: 无人机; 混合动力系统; 关键技术; 高功率密度; 高能量密度; 综述

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2022) 11-210719-13

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 210719

Comprehensive Analysis of Hybrid System for Unmanned Aerial Vehicle

WU Xiong, SHEN Xun, SONG Han-qiang

(Naval Research Institute, Shanghai 200436, China)

Abstract: Hybrid system is a new form of promotion between traditional aeroengine and full electric propulsion. Firstly, the architectural form, the structure features, the operating principle and development status of the hybrid system are sort out for unmanned aerial vehicle (UAV) requirements. Secondly, four key technologies of hybrid system are extracted and analyzed. Finally, some development trends and suggestions for the technology developments are proposed. The research shows that for the power demand of UAV, within actual technology condition, the hybrid system is an excellent solution given consideration to high efficiency and performance for aviation propulsion, which can truly realize the personalized design of UAV. At the same time, the key technology bottlenecks including overall system design, high efficiency and high work weight ratio electric machinery, integrated energy management and high energy density charge-storage, do exist within the hybrid system yet to be researched and resolved.

Key words: Unmanned aerial vehicle; Hybrid system; Key technologies; High power density; High energy density; Review

1 引 言

电动航空技术被西方视为继活塞发动机、燃气

涡轮发动机后的航空推进第三次技术革命, 成为当前航空动力发展的重要趋势^[1-7]。混合动力系统可涵盖千瓦至兆瓦级功率范围, 以满足从中小型无人机、

^{*} 收稿日期: 2021-10-16; 修订日期: 2022-05-30。

作者简介: 吴 雄, 博士, 高工, 研究领域为航空动力装置。

通讯作者: 沈 勋, 博士, 工程师, 研究领域为航空动力装置。

引用格式: 吴 雄, 沈 勋, 宋汉强. 无人机用混合动力系统综合分析[J]. 推进技术, 2022, 43(11):210719. (WU Xiong, SHEN Xun, SONG Han-qiang. Comprehensive Analysis of Hybrid System for Unmanned Aerial Vehicle[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11):210719.)

中小型垂直起降飞机、通航飞机、公务与区域运输飞机以及商用支线客机等多种飞机类型动力发展需求,适用速度范围涵盖几十至数百公里/小时。中小功率等级混合动力推进技术取得一定进展,针对百千瓦级的混合动力系统已开展部分试验研究与工程验证,并逐步拓展至兆瓦级混合动力分布式推进系统研发。

近年来,包括 NASA、DARPA、波音、空客、GE、罗罗、赛峰、西门子在内的欧美各大研究机构、飞机制造商和众多初创型高新技术公司投入大量精力开展混合动力系统技术研究和系统集成工作,以抢占未来电动航空发展的先机^[8-15]。军方也开始投入力量支持开展混合动力技术研究,目的是通过混合动力系统,提高旋翼机速度、悬停效率、巡航效率和有效负载能力。据不完全统计,目前开展航空混电推进技术研究和系统集成的厂商超过 200 家。国内部分高科技企业和高校投身全电航空推进系统研究,在小型通航电动飞机研发方面基本与国外同步,但在在混合动力系统技术方面研究主要偏向多为概念研究和基础技术研究方面,针对实用化的混合动力推进技术探索与试验验证研究亟待开展。

本文针对无人机用混合动力系统,基于其架构形式、特点和发展现状分析,对系统四大关键技术进行了提炼分析和评价,总结了技术研究的发展趋势并提出了针对性建议。

2 混合动力系统架构形式和特点

混合动力系统是指通过传统发动机(活塞发动机、燃气涡轮发动机)驱动发电机发电,与储能装置(锂电池等)一起为电动机提供电力,并由电动机驱动螺旋桨、风扇或旋翼,以提供绝大部分或全部推进力的新型推进形式。

2.1 架构形式

按照发动机是否直接提供推进功率以及是否带储能装置来划分,混合动力系统一般可分为三种架构:串联式、并联式和混联式^[16-17]。串联式架构如图 1 所示,发动机不直接提供推进力,输出功率给发电机发电,再与储能装置(电池)一起为电动机提供电力,驱动螺旋桨、风扇或旋翼等产生推进力。并联式架构如图 2 所示,由电池供电的电动/发电机和发动机经传动装置连接驱动风扇,飞行中由其中一个或两者同时提供推力。在大状态时,电池可驱动电动机来提供发动机不足的功率;在小状态时,电动/发电机作为发电装置运行,富裕电能将为电池充电。混联

式架构为串联、并联两种架构的结合,由于结构复杂、重量大、设计成本高,难以实现无人机轻量化与推进系统的协调,因此尚未成功应用于无人机中。需要特别指出的是,在串联式架构中有一种特殊类型——涡轮-电架构,即发动机和发电机组成涡轮-电系统,为推进电动机提供电力以驱动螺旋桨、风扇或旋翼等产生推进力,自身不带储能系统,可节省占比较大的电池系统重量。上述电推进类型技术上各有优势:串联式系统为机载电推进系统提供了电能,使飞机可采用分布式布局,但增加了系统重量;并联式系统最大可用功率高、系统重量轻,但发动机与电动/发电机采用机械连接,飞机布局受限。

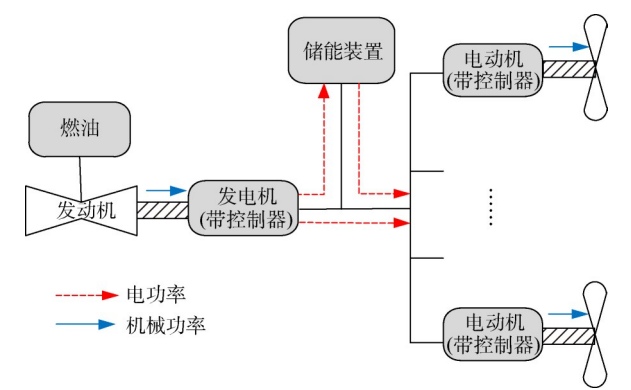


Fig. 1 Serial hybrid power system architecture

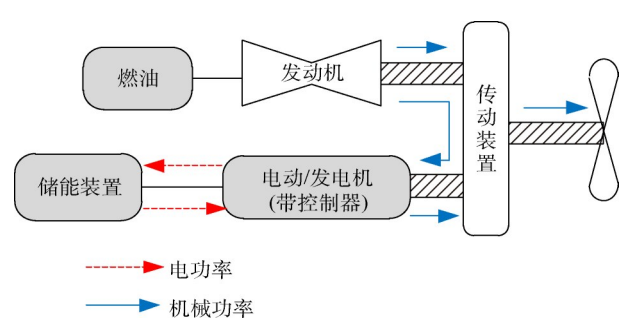


Fig. 2 Parallel hybrid power system architecture

2.2 系统特点

串联式混合动力系统使得飞机布局灵活。发动机工作状态不受环境变化的影响,始终在最佳的工作区域内稳定运行,因此发动机具有良好的经济性和排放指标;同时发动机与电动机之间无机械连接,整个系统的结构布置自由度较大,适用于分布式推进布局。由于增加了发电机、电动机和能源管理控制装置,系统重量相对于传统发动机有所增加,运行过程中存在能量转换,导致发动机输出的能量存在一定损失。

并联式混合动力系统通过发动机与储能装置的

结合,可适应飞机对发动机的多状态点设计要求,满足飞机起飞大功率和巡航低油耗需求。发动机-电机可根据飞机的飞行任务需求进行组合优化,始终保持运行在高效率、低油耗、低排放的理想运行区间,提高了飞机的燃油经济性。在飞机起飞的大功率需求时,储能系统释放电能转化为轴功率,叠加发动机输出功率,满足飞机起飞功率需求。在飞机巡航低油耗需求时,通过回收发动机理想运行状态的剩余功率进行发电,维持了发动机的高效率,也增加了飞机的续航里程和机载供电能力。发动机和电动机组成的双动力系统使飞机具备了多种动力使用模式,可提高飞行安全性。并联式混合动力系统具有最大可用功率高、系统重量轻等优点,但是发动机与电动/发电机采用机械连接(减速器及离合装置等),结构和控制设计复杂,难以实现电机分布式布局,相对于串联式系统而言飞机布局受限。

综上所述,一方面,采用混合动力系统极大拓展了飞行器设计的自由度,带来了飞行器综合性能大幅提高的可能性。电推进“尺度无关性”特点可将目前集中的动力形式(单发、双发、四发)根据需要变成分布式推进,通过气动、结构、动力的最佳融合,实现气动、噪声、推进效率的全面提升。另一方面,混合动力系统实现了动力与飞行器整体集成设计,实现了协同增值效益。故而单独将混合动力系统与传统动力系统进行比较指标是不全面的,尽管混合动力系统相比传统动力系统可能重量、复杂度增加,效率有所降低,但与飞行器整体考虑带来的性能提升则非常显著。

同时,由于系统复杂程度和重量有所增加,能量利用效率有所降低。因此,在技术发展的基础上,不断提高混合动力系统的功率密度和系统效率,成为持续开展研究和验证的主线^[18-22]。

3 混合动力系统发展现状

3.1 国外发展现状

欧美国家对混合动力分布式推进系统的研发非常重视,通过各种项目和计划给予了大量支持,牵引整合各飞机、发动机企业以及相关研究机构开展多种形式的协同研发工作。经过近几年的发展,国外已经在中小功率等级混合动力分布式推进系统研发方面积累了大量理论技术和工程经验,并对其应用前景给予了很高期望,同时也正逐步开展面向兆瓦级的混合动力分布式推进技术攻关^[23-25]。

中小功率等级混合动力系统的主要进展包括:

3.1.1 美国

(1)“HEIST”试验台及“X-57”验证机

2014年,NASA与ESAero公司合作开展了电推进技术研究(SCEPTOR)计划,建立了200kW级混合动力电推进集成测试平台HEIST,如图3所示,并在加利福尼亚爱德华兹空军基地进行了首次试验^[26]。HEIST试验平台由涡轮发电机、交/直流转换器、电池组、电子控制器、直流配电系统以及安装在翼展9.45m机翼前缘的18个电动机和螺旋桨组成。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试验平台开展了发电机、电池容量管理以及功率需求管理等试验。

2017年,NASA开始X-57分布式电推进验证机的改装工作,如图4所示。验证机重1360kg,原有2台活塞发动机由14台电动机替代,其中两个翼尖布置2台60kW大电动机,机翼前缘布置12台10.5kW高速小电动机。构型优化设计完成改进后,X-57机翼有效升力系数明显提升且巡航诱导阻力降低,从而产生1.5倍的能效提升,能耗相比P2006T原型机大幅降低,可实现进阶最大升阻比下的巡航优化^[27-29]。

(2)“GL-10”倾转旋翼验证机

2015年,NASA启动“高效垂直起降飞机计划”,开展了GL-10等分布式混合推进垂直起降概念机研制^[30-31],如图5所示。验证机重28kg,翼展3m,共装有10个旋翼,其中8个位于机翼上,2个位于水平尾翼上,主要用于分布式推进效率验证,即在向前飞行中,仅使用翼尖推进器以实现高巡航效率。试验中的分布式推进系统在最初的飞行中是由电池提供动力,但后续升级为串联式混合动力,目前正在开展百kg级(200~300kg起飞重量)样机研制与试验。同时,计划支持了Lunchpoint公司开展了高功率密度机载混合系统研究,启动了6kW,20kW和45kW三个等级的机载发电系统研制。

GL-10飞机的混合动力系统为串联式,多个电动螺旋桨使得飞行器推进效率和气动效率高,发动机始终工作在高效工作点,不足在于增加了发电机、电动机和电池组部分的重量。

(3)“雷击”垂直起降试验飞机

2016年,在DARPA的支持下极光公司开展了“雷击”垂直起降试验飞机项目,这是迄今最大的混电动力垂直起降飞行器项目。无人机采用一台罗·罗公司AE1107C涡轴发动机驱动,通过其驱动3台霍尼韦尔公司的发电机来产生电力,并将电力分配

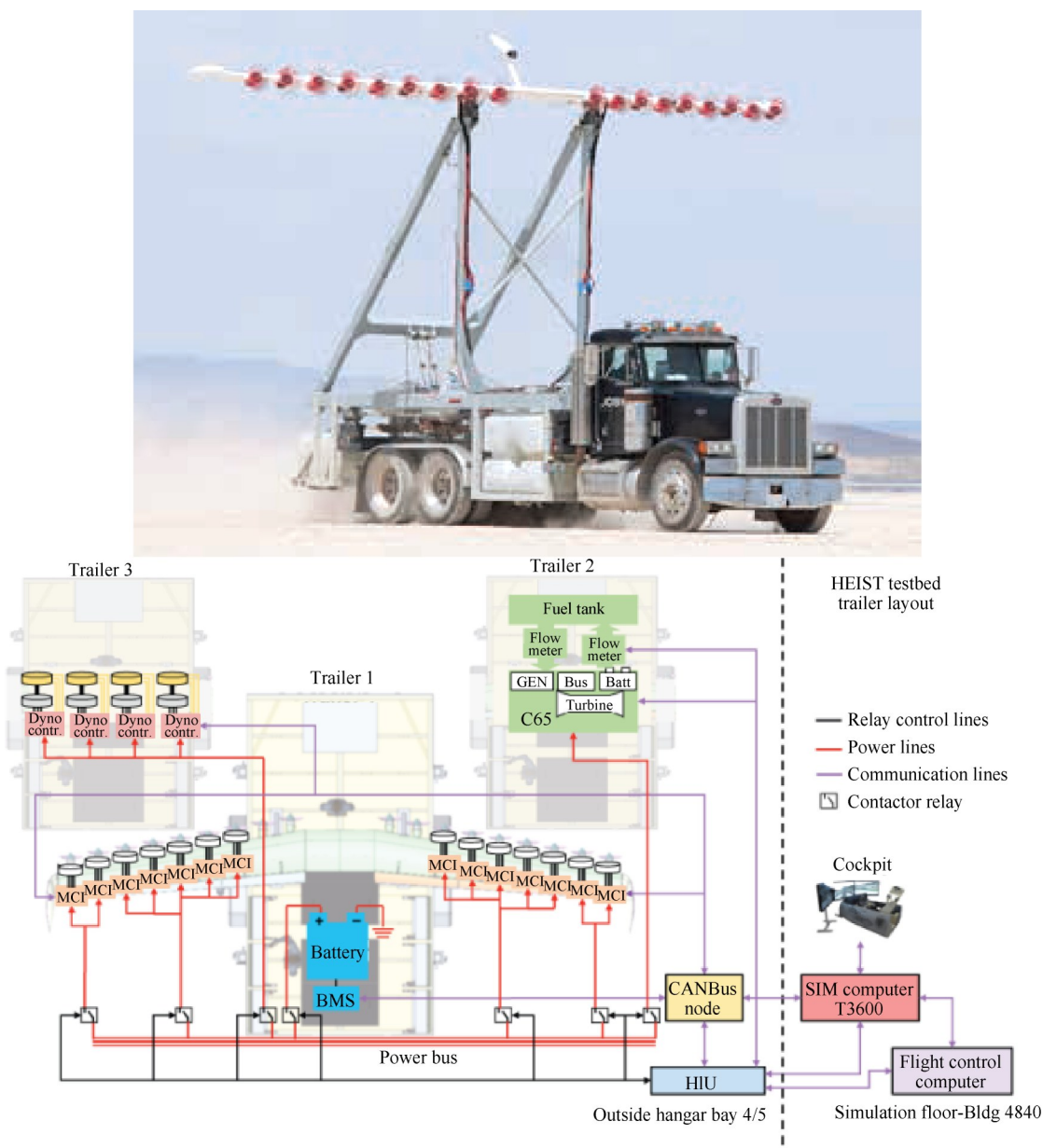


Fig. 3 Integrated test platform of HEIST^[26]

至全机 24 个涵道式风扇上,形成分布式混合电推进系统^[32-33]。该飞机同样使用了串联式混合动力架构,分布式电动涵道风扇使得飞机飞行效率高,且具有相对螺旋桨飞机更好的包容性与飞行速度,但是该飞机起飞功率较大,对电动机、发电机功重比有非常高的要求,存在较大的技术挑战。项目由于兆瓦级电机热管理等技术问题暂停,但其垂直起降无人机上应用混合电推进系统的技术路线还在持续推进。

在军用飞机领域,美国空军研究实验室(AFRL)布局率先谋划军用混电分布式推进系统的发展,希望通过加强混电分布式推进系统来增加无人机航程和巡航时间,增加雷达等任务系统设备的功率,降低对抗环境下的噪声,实现作战时更安静,并提升系统

的可靠性。从 2016 年开始,持续开展高效可重构混合动力管理/小型无人系统和大型无人机混电分布式推进系统研究工作,2020 年开展了模块化的、安静的混合动力设计研究,2021 年开展了模块化的、安静的小型无人系统混合动力与智能控制研究。同时,美国空军正在积极推动“敏捷”eVTOL 飞行器项目^[34],目标场景是人员运输、点对点后勤运输、对非军事应用的支持,目前已对 eVTOL 飞行器启动了招标程序。

3.1.2 欧 盟

(1)“E-Fan”系列多项技术研究验证

欧盟提出“航迹 2050”(Flight Path 2050)计划,目标是以 2000 年的水平为基点,在 2050 年前实现将二氧化碳排放降低 75%,氮氧化物排放降低 90%,噪声

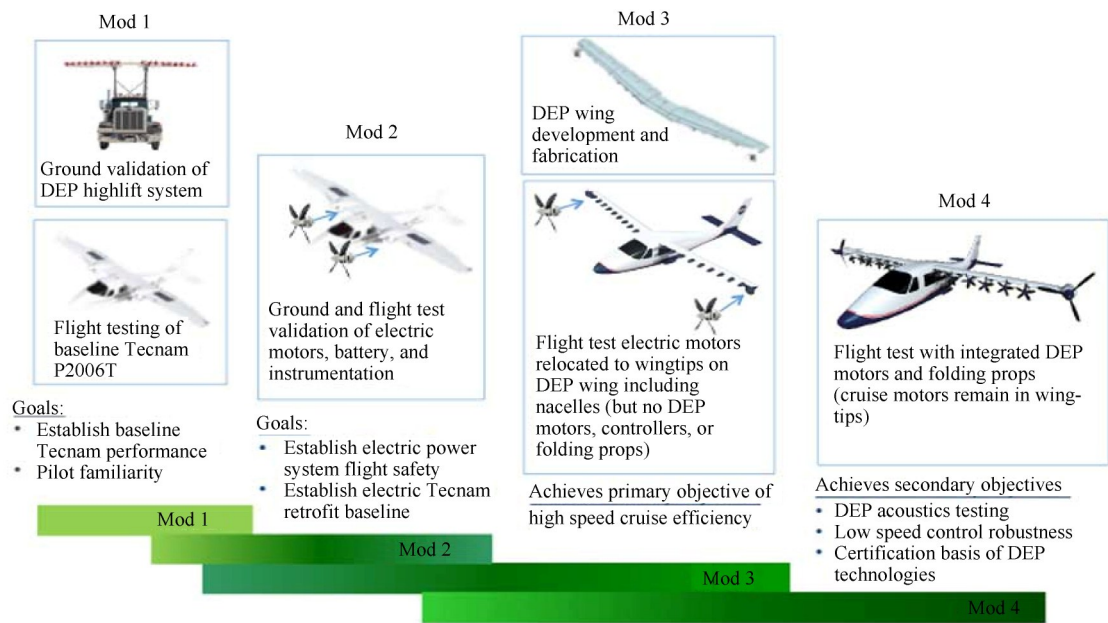


Fig. 4 Four development stages of X-57 verification vehicle(Source:www.nasa.gov)

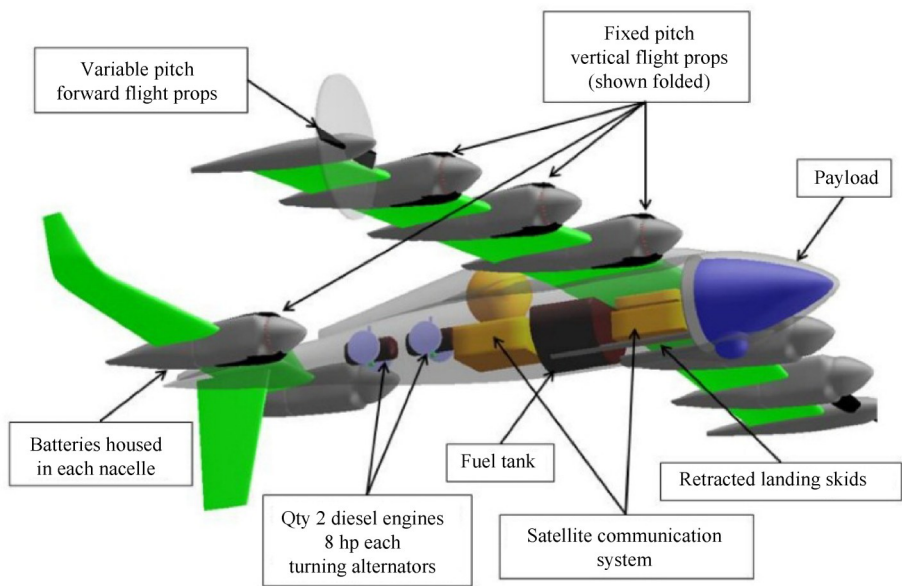


Fig. 5 Tilting wing verifier GL-10 and its hybrid power system^[30]

降低 65%。围绕这一目标,空客大力支持混合推进系统,寻求开发 2030 年服役的基于混合动力分布式推进系统的翼身融合飞机方案。

空客首先通过开展电动飞机项目研究电推进的优势,设计研发了纯电飞机 Cri-Cri 和 E-Fan(图 6(a))并分别于 2010 年和 2013 年完成首飞,验证了轻质、高效的发电机和电动机技术^[35]。其中,E-Fan 验证机总重量 600kg,巡航速度 160km/h,续航时间 0.5h。该机搭载总容量 29kW·h 的锂电池组,电池组重量 167kg,能量密度达 0.174(kW·h)/kg。

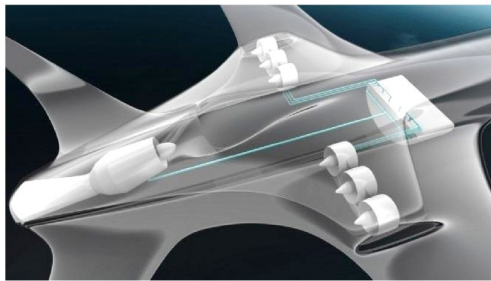
在此基础上,2013 年 11 月,空客公布了与西门子

公司和罗·罗公司联合开发的基于“E-Thrust”混合动力分布式推进系统的 100 座级支线客机概念,推进系统(图 6(b))采用 6 台电动风扇,每个机翼上沿展向分布 3 台,通过一个燃气动力单元(涡扇发动机带动发电机产生电力)为 6 台风扇提供电力和为电能存储装置充电,推进系统的等效涵道比预计将超过 20。

2017 年底,空客、罗·罗和西门子计划合作开发一款飞行验证机 E-Fan X^[36],如图 7 所示。该机采用串联式混动架构,以罗·罗的 AE2100 涡桨发动机为核心机改装涡轮发电装置,使用西门子研制的 2.5MW 发电机和 2MW 电动机,系统电压高达 3kV,飞



(a) E-Fan fully electric plane



(b) E-Thrust hybrid distributed propulsion system

Fig. 6 “E-Fan” series technology research verification systems of Airbus^[35]

行测试平台为 BAe146 支线客机。2020 年初,由于资金等问题项目宣布终止,虽然验证机不会进行试飞,但罗·罗将继续完成该混动系统的地面测试。

(2)多个混动项目持续推进

2018 年,罗·罗公司在范堡罗航展公布了基于 M250 涡轴发动机(功率 190kW)改装的混合动力垂直起降飞行器概念,并于 2019 年完成地面试验。罗罗

计划集成 M250 发动机、高能量密度的电池系统、发电机、电能转换器和先进电力管理和控制系统,应用于包括电动垂直起降飞机、通用飞机和混合动力直升机等飞行平台,并开展了飞行试验^[37]。

2018 年,赛峰公司开始测试 100kW 级的混合动力分布式推进系统(图 8),并公布了 500kW 级的电动机并提出了基于改进型“阿蒂丹 3”涡轴发动机的混合动力系统概念方案。2019 年,赛峰集团被 Zunum Aero 公司选中为混合动力小型支线客机 ZA10 提供动力系统解决方案,其混合动力推进系统首次应用在贝尔“空中出租车”Nexus 上,该机动力推进系统能够输出 600kW 的功率。赛峰正在开发功率输出从 45 到 500kW 的一系列电动机^[38]。

2019 年,由钻石飞机工业公司和电动系统开发商西门子公司在 HEMEP 项目下进行改进的,由德国 LuFo 航空研究计划及奥地利相应机构资助的双发混合动力飞行器完成首飞。飞行器由安装在机头内的 110kW 的 AE300 柴油发电机提供动力,推进系统由两台 75kW 的电动机驱动,安装在鸭式前置翼面上,后机舱配备两个 12kW·h 电池储存电能,这是世界上第一架配备电驱动螺旋桨和发动机串联架构布局的混合动力飞机。

英国剑桥大学设计了 20kW 级并联式混合系统,并改装了一架单座通航飞机 SONG,于 2014 年 8 月完成试飞。该系统为图 2 所示的典型并联式混合动力

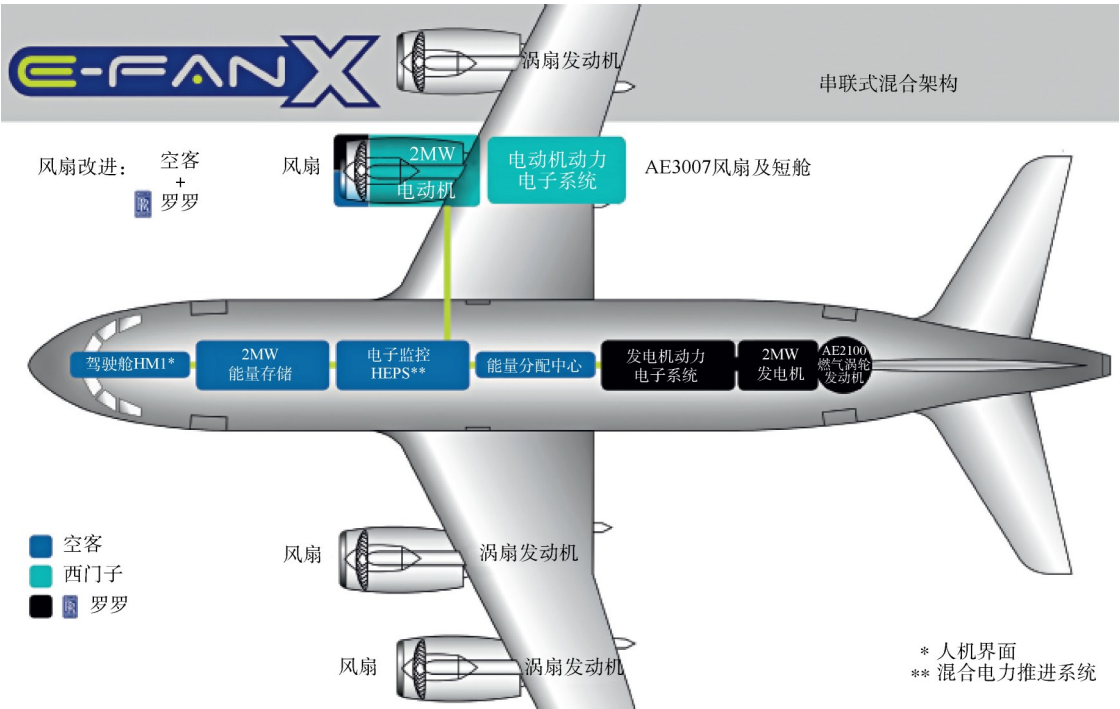


Fig. 7 E-Fan X verification vehicle and power system framework^[36]



Fig. 8 100kW hybrid system of Safran^[38]

系统架构,采用了7.5kW发动机和12kW的电动/发电机,并与内燃机和螺旋桨同轴,依据实际飞行工况灵活切换电机与内燃机的输出比例,使得内燃机始终工作在高效区,从而显著提升燃油经济性。相比采用传统推进系统,并联混动系统将功重比提升19.8%,燃油消耗减少了47.7%。

3.1.3 俄罗斯

电推进作为俄罗斯未来航空重点改革创新的方向,技术发展也十分迅猛,多个机构开展了方案设计和地面试验^[39]。

俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)从2004年开始混合动力系统的技术探索,积累了基础技术研究经验。目前正在开展500kW级混合动力系统的研制工作,TsAGI、超级奥克斯公司、乌法国立航空技术大学等多家科研机构参与研发。为此专门开发了转速50000r/min、功率大于300kW、效率达96%的高速发电机。为提高发电机功率,采用了液氮和高温超导体,预计到2030年和2035年,研发的超导体发电机功率将分别达到2MW和5MW。CIAM原型机于2021年开展试验测试,最终搭载批生产混合动力飞机开展试飞。

俄罗斯中央空气流体动力学研究院(TsAGI)提出了一种分布式混合动力系统方案,用于支撑轻型短距起降支线飞机。该方案由1台涡轴发动机、1台发电机、20~30台分布式小型螺旋桨和一套电源系统组成,最大特点是低速时利用翼尖螺旋桨吹风来降低翼尖涡阻提高升力,巡航时收起部分螺旋桨减阻提速,同时采用分布式结构设计降低迎面阻力。经计算,该方案可使飞行速度提升100%,航程提升1~1.5倍,起降距离缩短50%,目前正在开展模型试验。

2019年莫斯科航空大学首次将俄罗斯自研的超导材料用于大功率电动机。方案采用-196℃的液氮冷却超导体,极大地降低了电动机电阻,电功率比磁阻电动机更高,验证了超导电机在混合动力系统成功应用的可行性。

从国外研究来看,混合动力系统应用前景广阔,

功率等级涵盖从20kW至兆瓦级,混合动力形式包含串联式和并联式,发动机平台包括活塞式和涡轴发动机。垂直起降飞行器和分布式推进飞机是欧美军事强国发展的重点方向,串联式混合动力系统为其提供了动力,使得飞机布局灵活、效率高,但也存在系统重量较大的问题。并联式混合动力系统推重比更高,可用于替换固定翼无人机的传统发动机以提高效率,NASA等研究机构论证了并联式混合动力系统应用于倾转旋翼等垂直起降固定翼飞机,研究结果显示并联式混动系统可提高系统效率,可以降低传动系统的复杂度。在功率等级方面,20~200kW级的混合动力系统主要基于活塞发动机,已经有部分接近应用;200kW以上的混合动力系统主要应用于起飞重量吨级及以上的大中型飞机,以涡轴发动机为基础,对发电系统、电动机的功重比要求更高,目前仍然存在多个技术挑战,正处于关键技术研究阶段。

3.2 国内发展现状

近年来,国内部分高科技企业和高校投身全电航空推进系统研究,在小型通航电动飞机研发方面基本与国外同步,但在高功率密度高效电机、电力集成控制以及储能设备等关键技术领域技术水平与国外仍有较大差距,且多以局部性、基础性、零星化探索为主,实用化、商用化发展程度相对较低^[40-44]。

2016年,深圳亿航公司研发的亿航184/216单/双座多旋翼载人/无人驾驶飞机开始进行演示飞行。辽宁通用航空研究院研发的双座锐翔电动飞机是全球第一款同时获得生产许可证的电动飞机,现已开始交付航校进行飞行培训,但其推进系统依旧采用进口电动机,采用的锂电池能源系统也仅能以150km/h的速度支持1.5h的续航。

中国航发研究院联合南京航空航天大学和中国空气动力研究与发展中心,开展了500kW级尾座式混合动力分布式推进系统方案设计及适配无人机平台方案设计(如图9所示),完成了缩比模型设计和分布式推进风洞试验,并设计搭建了小型地面原理验证试验平台^[45]。中国航发涡轮研究院采用500kW级单转子涡轴发动机作为发电系统原动机,通过分布式电动机驱动涵道风扇,预计动力涡轮输出到电动风扇输出功率过程能量转化效率(发动机、电力变换、输电、电机总效率)可达0.8左右。同时,也提出了基于小型涡喷发动机改装涡轴发动机的小功率方案。山河科技公司和中科院工程热物理所分别开发了70kW级、100kW级串联式混合电推进系统,并计划开展地面相关系统试验和试飞验证。



Fig. 9 Tailstock hybrid distributed propulsion scheme and wind tunnel test^[45]

清华大学针对转子发动机和涡轴发动机的混合推进系统均进行了研究,从发动机、电池和电机技术进行了分析,开展了分布式推进垂直起降无人机设计与仿真研究^[46-47]。沈阳航空航天大学将加拿大钻石 DA20-C1 双座固定翼飞机动力改进为并联式混合结构后,仿真分析后显示相对于原状态,混合动力系统使得飞机起飞滑跑距离缩短 20%~30%,爬升率增大 20%~26%^[48]。北京航空航天大学基于 350 座级分布式推进系统与翼身融合布局(BWB)耦合的飞机概念方案,采用计算流体力学的方法研究了推进系统关键设计参数对飞机气动特性的影响^[49]。西北工业大学提出了工质驱动分布式概念,完成了工质驱动分布式推进系统的总体性能建模及其性能初步分析,并根据太阳能无人机推进系统的特点,研究了分布式推进系统分布位置、控制方式等与无人机飞行品质之间的关系^[50]。

总体而言,我国在混合动力电推进技术方面还处于探索研究阶段,落后于世界航空发达国家。近年来,我国多所院校和研究院在民用电动飞机领域相继开展了相关研究,但是动力系统主要以采购国外电机为主。随着西方发达国家对我国实行的技术封锁,加大了我国对相关核心技术攻关的难度,国内相关科研院所与高校也加大了高效率电机设计与研发,并已取得一定的成果,在太阳能飞机和混合动力汽车等领域得到应用^[18]。其中,混合动力汽车用电动机、发电机功重比小于 1.5kW/kg(转速 6000r/min 左右),太阳能飞机推进电机小于 0.5kW/kg(转速 400r/min 左右)。但应看到,我国在高效电机设计、制造和集成等方面的技术水平与国外先进技术仍然存在明显的差距,需要针对高性能飞机的油电混合动力系统开展关键技术攻关与验证。

4 混合动力系统关键技术分析

无人机用混合动力系统的关键技术包括总体设计、高效高功重比电机、能量综合管理、高能量密度

储能等^[51-69]。

4.1 混合动力系统总体设计技术

混合动力系统需要结合无人机典型任务需求,提出总体构架以及能源配比优化设计方案,实现在满足任务需求前提下的动力系统最优设计,形成面向任务需求、满足使用环境的无人机混合动力系统设计方法。建立混合动力系统模型,针对动力系统及平台总体性能、成本、技术风险等进行多维度综合评价,探索以无人机平台综合效能最优为目标的混合动力分布式推进系统综合评估与方案选型方法。

同时,串联系统发电机与发动机的匹配也会对整个系统的能量转化效率(推进端电机输出功率与发动机输出功率之比)产生较大影响。并联系统电动/发电机与发动机的匹配将会对整个系统的输出功率上限产生较大影响。因此,发动机与电机的匹配在总体设计技术中应着重考虑。

4.2 高效高功重比电机技术

电动机、发电机功重比(功率密度)直接决定电动飞机的性能。航空电机主要包括:异步电机、开关磁阻电机和永磁同步电机。异步电机和开关磁阻电机效率高、结构简单、适合高转速运行,但功重比低。永磁同步电机效率高、功率密度高,控制性能优异,十分适用于混合动力系统。电动飞机中,要想继续增加电机的功重比,就需要在推进电机的热设计、磁性能设计、结构冷却设计等方面有技术创新。

电动机、发电机的体积、重量通常由转矩来决定,转速越高其功重比、效率越高。在类型和转速一定的条件下,随着功率等级的提升,电机、发电机的功重比和效率会有一定提升,但是提升的幅度有限。国外典型电动/发电机主要技术参数见表1。其中,无人机、通航飞机用推进电动机、发电机功率在 30~50kW,转速低于 6000r/min,功重比低于 2.5kW/kg。用于大型无人机、支线客机、未来电推进民机的电动机、发电机功率等级更高,要求的功重比也更高,NASA 预计未来兆瓦级功率密度将达到 16.5kW/kg,将采用超导电机等新技术,兆瓦级混合动力系统应用场景与关键技术与小功率等级混合动力系统具有一定差异。

4.3 能量综合管理技术

能量综合管理技术是推动飞机由传统架构向电动飞机发展的关键因素。飞机的能源-动力系统电网容量迅速提升、负载特性日趋复杂,对配电系统的性能和可靠性提出了更高的要求,电力集成与控制技术将在电动飞机发展中发挥重要作用。同时,短

时高倍率供电、电动力系统内部低效运行等因素都会导致大量的热负荷,使得电动飞机的电源、电力电子设备、电机等对热管理提出了极高的需求。为了满足电动飞机对配电和热管理的需求,应当开展飞机能源-动力系统电网架构、电力电子技术、热管理技术等的研究。

4.4 高能量密度储能技术

储能系统的能量密度是决定电动飞机性能的重要参数。当前,电动飞机多采用三元锂离子电池,它的能量密度在 200~350(W·h)/kg,预计 2030 年可以达到 500(W·h)/kg;但更高的能量密度预计需要新的化学介质,锂硫磺、锂金属、锂空气是不错的选择,其中锂空气电池的理论重量能量密度可以超过 10(kW·h)/kg,与航空煤油的当量能量密度基本相当。此外,美国

NASA 和阿贡国家实验室联合研制的纳米电燃料液流电池(NEF)也具有相比当前锂离子电池更高的能量密度(1.5~2 倍)和安全性,预计 2023 年能量密度可达 750(W·h)/kg,具体见表 2。

4.5 关键技术评估

按照新兴技术、前沿技术、瓶颈技术、关键技术等对混合动力系统关键技术进行分类,如图 10 所示。根据对系统发展的贡献程度,可对各项技术重要性进行初步综合评价,具体如表 3 所示。

5 结束语

5.1 未来发展趋势

- (1)无人机真正实现个性化设计
- 由于混合动力系统尤其是串联式混合动力系统

Table 1 Main technical features of foreign motors

Continuous operating power	Research unit	Application	Technical indicator	Technical feature
12kW	Polytechnic University of Lausanne, Switzerland	Solar powered aircraft propulsion	Efficiency: 92% Work weight ratio: 0.324kW/kg Rotary speed: 5000r/min	Permanent magnet synchronous
30kW	Sineton Com., Slovenia	Electric navigable aircraft propulsion	Efficiency: 94% Work weight ratio: 1.76kW/kg Rotary speed: 2400r/min	Permanent magnet synchronous
45kW	Safran	Electric navigable aircraft propulsion	Efficiency: 94% Work weight ratio: 2.5kW/kg Rotary speed: 2500r/min	—
50kW	University of Adelaide, Australia & University of Wisconsin, USA	UAV propulsion	Efficiency: 94%; Work weight ratio: — Rotary speed: 8000r/min	Permanent magnet synchronous
250kW	GE Com., USA	Aviation starter/generator	Efficiency: — Work weight ratio: 3.9kW/kg Rotary speed: 52000r/min	High speed switched reluctance

Table 2 Energy density of several typical batteries

Type	Energy density/(W·h)/kg)
Power lithium battery	Ternary lithium battery
	180 ~ 240
	Lithium iron phosphate battery
	120 ~ 150
	Lead carbon battery
Development objectives of 2030	25 ~ 50
	All vanadium flow battery
	7 ~ 15
Hydrogen fuel cell	500
	Proton exchange membrane cell
	600 ~ 1000
	Theoretical upper limit
	1×10 ⁴ ~ 2×10 ⁴

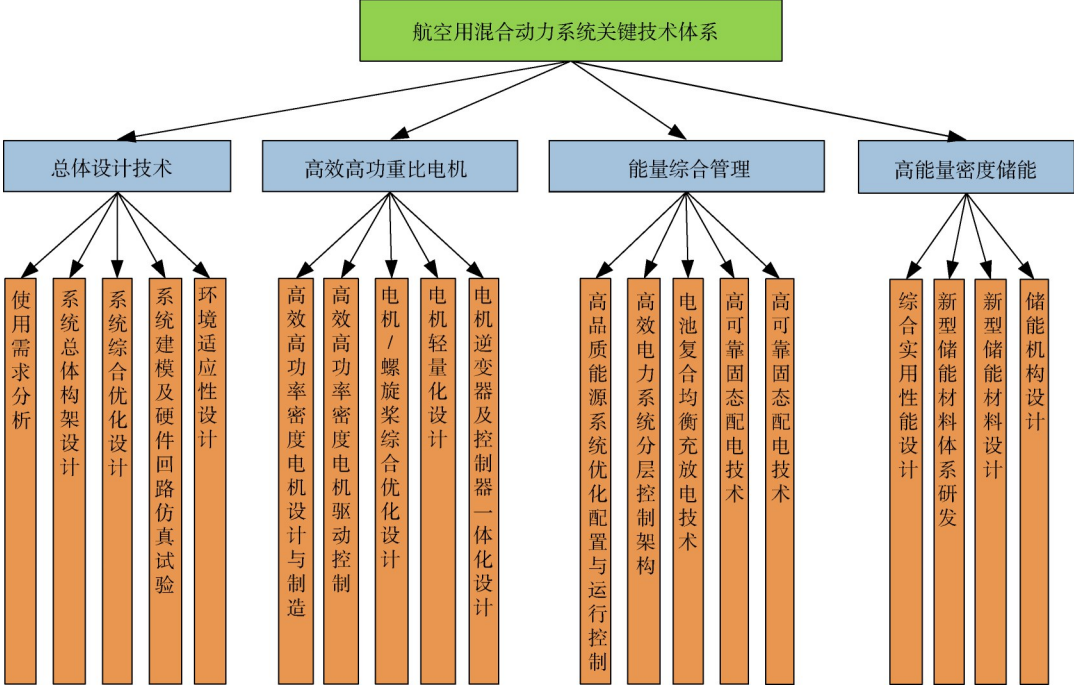


Fig. 10 Key technology system of hybrid propulsion system

Table 3 Analysis on the importance of key technologies of hybrid propulsion system

	Technology category	Key	Frontier	Emerging	Bottleneck	Contribution
Key technology system of hybrid propulsion system	Overall design	●		●		Important
	High efficiency and high power weight ratio motor	●			●	Extremely important
	Integrated energy management	●			●	Extremely important
	Energy storage of high energy density	●	●		●	Extremely important

极大拓展了飞行器设计的自由度,例如分布式推进设计、飞推一体化设计、翼身融合设计、消除翼尖涡/尾涡设计以及高效螺旋桨/风扇系统设计等,飞行器推进效率可大幅提高,甚至比安装先进传统发动机时高出 20%,因此未来采用混合动力系统的无人机可真正实现高效推进,以及需求化、个性化设计。

(2)高功率密度高效电机是发展重点

从混合动力系统的架构形式可看出,系统重量相较于单一的传统发动机而言有所增加,能量转化过程也更为复杂。因此,根据关键技术分析,为弥补系统重量的增加和能量转化效率的降低代价,必须加强高密度高效电机的设计,包括电机与发动机之前的匹配设计以及电机控制、电力转换装置的设计,甚至采用超导技术,提升整个系统的功率密度、效率、供能品质等。

(3)能量综合管理技术是重要保障

由于任务系统扩容带来的无人机电网容量日益

增大,负载特性日趋复杂,给由储能系统、能源转换系统、驱动系统和冷却系统等共同构成复杂的能源管理系统带来了巨大的技术挑战。由于中小型无人机采用的大部分都是活塞发动机(小部分采用小型涡轴发动机),周期性运转中并非一直对外输出功率,因此,为保证能源系统的稳定高效供给,必须对发动机和电池系统进行优化配置和运行控制。同时,负荷变化带来的电力系统内部低效运行、锂电池短时倍率放电等都会导致系统设备发电状况较为严重,严重影响系统正常工作和飞行安全,必须依靠具有高效冷却能力的系统能量综合管理技术。

(4)要实现全电动有赖于高能量密度储能系统发展

目前液体燃料电池的能量密度大都比锂电池高,但功率密度普遍在 100W/kg 以下,相对于中小型无人机来说功率密度过低,在提供起起飞所需功率的情况下无法提供有效载荷。相比之下锂电池功率

密度可达 2 kW/kg 以上,但能量密度相对较低,目前处于 $200(\text{W}\cdot\text{h})/\text{kg}$ 的水平,使得全电动飞机极限飞行时间都在 45 min 以内,航程普遍在 200 km 以下,有时难以满足航空用户的需求^[70-71]。因此,要真正实现全电动飞机的实用化和市场化,必须依靠满足高功率密度的高能量密度储能技术发展。根据表2,预计到2030锂电池能量密度能达到 $500(\text{W}\cdot\text{h})/\text{kg}$ 的技术水平。未来相当长一段时间内,混合动力系统仍是对航程航时有一定要求的电推进无人机的最佳选择。

5.2 发展建议

针对无人机动力需求,由于锂电池能量密度低(低于 $0.3(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{kg}$),全电推进飞机航速、航程易于受限。考虑到燃油的热值为 $12(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{kg}$,基于传统发动机结合电池系统高放电倍率的特征,混合动力系统可实现高能量密度(大于 $2(\text{kW}\cdot\text{h})/\text{kg}$)、宽功率范围的供电要求。而传统发动机多采用油动(汽油居多),具有航时长、载重大、抗风能力强等优点,但汽油机本身的转换效率较低(平均在 40% 以下)、电功率提取能力受限。综合而言,基于传统发动机的混合动力推进系统是一种兼顾高效与性能的优良方案。

针对航空用混合动力系统,国外制订了详细的关于混合动力系统的研究和发展计划、发展目标,并已开展了关键技术研究 and 系统集成试验验证工作,以及飞行试验验证。而国内目前还缺乏顶层设计和统筹规划,关键技术系统性研究、系统集成设计能力、关键产品设备与国际领先水平存在代差,试验验证能力缺乏,研究领域零星分散,研究的系统性和深度不够、以我为主的创新性研究、集成验证案例较少。针对中小型无人机的确切需求,建议在现有单项技术的基础上,开展无人机混合动力系统关键技术研究,并通过地面及飞行验证,提高系统的技术成熟度,促进关键技术储备,并为未来更大功率等级混合动力系统的发展积累经验、奠定基础。

致谢:感谢中国航发动力机械研究所金海良研究员、涡轮系统研究院刘昭威高工,中国科学院工程热物理研究所阳诚武高工,海军研究院吕日益高工、卜振鹏工程师参与论文内容并给予指导!

参考文献

- [1] Rosero J, Ortefa J, Aldabas E, et al. Moving Towards a More Electric Aircraft[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2007, 22(3): 3-9.
- [2] Hiserote R, Harmon F. Analysis of hybrid-Electric Propulsion System Designs for Small Unmanned Aircraft System[C]. *Nashville: AIAA 8th International Energy Conversion Conference*, 2010.
- [3] Zuoming Lin. Making Aviation Green[J]. *Advances in Manufacturing*, 2013, 1(1): 43-49.
- [4] Nateri M, James H, Chery B, et al. A NASA Perspective on Electric Propulsion Technologies for Commercial Aviation[R]. *ARC-E-DAA-TN 37026*, 2016.
- [5] Alrashed M, Nikolaidis T, Philips P, et al. Utilisation of Turboelectric Distribution Propulsion in Commercial Aviation: A Review on NASA's TeDP Concept[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(11): 48-65.
- [6] Dieter Scholz. Evaluating Aircraft with Electric and Hybrid Propulsion[C]. *Cologne: Electric & Hybrid Aerospace Technology Symposium*, 2018.
- [7] Farokhi S. Future Propulsion Systems and Energy Sources in Sustainable Aviation[M]. *New Jersey: John Wiley & Son Inc.*, 2020.
- [8] Boric M. Airbus on the Way to the Electric Future[J]. *Aircraft Maintenance Technology*, 2018, 29(3): 38-46.
- [9] 徐德康. 空客开始研制电动支线飞机[J]. *国际航空*, 2017(12): 21-23.
- [10] Norris G. Rolls-Royce Unveils Comprehensive Electric Power Plan[J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2019, 181(7): 61-63.
- [11] Anonymous. Airbus, Rolls-Royce, and Siemens Join Forces for a Hybrid-Electric Future[J]. *Welding Journal*, 2018, 97(1).
- [12] 李开胜. 电动飞机技术的发展研究[J]. *航空科学技术*, 2019, 30(1): 1-7.
- [13] 李开胜. 电动飞机核心技术研究综述[J]. *航空科学技术*, 2019, 30(11): 8-17.
- [14] Friedrich C, Robertson P. Hybrid-electric Propulsion for Automotive and Aviation Applications[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2015, 6(2): 279-290.
- [15] 王翔宇. 电动飞行与推进系统变革[J]. *航空动力*, 2019(3): 43-47.
- [16] Brelje B, Martins J. Electric, Hybrid, and Turboelectric Fixed-Wing Aircraft: A Review of Concepts, Models, and Design Approaches[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, 104: 1-19.
- [17] 闫晓军. 无人机动力[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [18] Gong A, Verstraete D. Fuel Cell Propulsion in Small Fixed-wing Unmanned Vehicles: Current Status and Research Needs[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(33): 21311-21333.
- [19] 王书礼, 孙金博, 康桂文, 等. 一种电动飞机电推进系统的能效优化方法[J]. *航空学报*, 2021, 42(3): 47-55.
- [20] 孙晓军, 姚崇, 宋恩哲, 等. 船舶并联气电混合动力系统

- 力系统动态特性研究与能量效率分析[J]. 推进技术, 2022, 43(5): 374-385. (SUN Xiao-jun, YAO Chong, SONG En-zhe, et al. Dynamic Characteristics Research and Energy Efficiency Analysis of Marine Parallel Gas-Electric Hybrid Power System[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(5): 374-385.)
- [21] 孙晓军, 宋恩哲, 姚崇, 等. 基于模糊逻辑推理的船舶并联气电混合动力系统能量最优分配研究[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 392-404. (SUN Xiao-jun, SONG En-zhe, YAO Chong, et al. Optimal Energy Allocation of Ship Parallel Gas Electric Hybrid Power System Based on Fuzzy Logic Reasoning[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6): 392-404.)
- [22] 杨凤田, 范振伟, 项松, 等. 中国电动飞机技术创新与实践[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 1-5.
- [23] 齐汀. X-57: NASA的下一个里程碑[J]. 大飞机, 2016(5): 63-65.
- [24] 吴蔚. “从概念到现实”: NASA X-57取得发展里程碑[J]. 中国航空报, 2019(8): 1-2.
- [25] 匡宇, 张邦楚, 姜鹏, 等. 国外全电动飞机的研究现状与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2021(3): 93-98.
- [26] Stoll A. Comparison of CFD and Experimental Results of the LEAPTech Distributed Electric Propulsion Blown Wing[C]. *Dallas: 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2015.
- [27] Deere K, Viken J, Viken S, et al. Computational Analysis of a Wing Designed for the X-57 Distributed Electric Propulsion Aircraft[C]. *Denver: AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2017.
- [28] Deere K, Viken J, Carter M, et al. Computational Analysis of Power Lift Augmentation for the LEAPTech Distributed Electric Propulsion Wing[C]. *Denver: AIAA Applied Aerodynamics Conference*, 2017.
- [29] Deere K, Viken J, Carter M, et al. Computational Component Build-Up for the X-57 Distributed Electric Propulsion Aircraft[C]. *Kissimmee: AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2018.
- [30] Meswain R, Glaab L, Theodore C, et al. Greased Lightning(GL-10) Performance Flight Research: Flight Data Report[R]. *NASA/TM-2017-219794*, 2015.
- [31] Williams H. Go Greased Lightning: NASA Furthers Hybrid Power Aircraft[J]. *Janes International Defense Review*, 2015, 48: 30-31.
- [32] John K. Aurora Flight Sciences to Develop High-Speed DARPA VTOL X-Plane[J]. *Military & Aerospace Electronics*, 2016, 27(6).
- [33] Graham W. DARPA's VTOL X-Plane Designs in Detail[J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2016, 6(27).
- [34] Richard W. Agile Change in Air Force “Agility Prime” Launch Pays Off[J]. *Vertiflite*, 2020, 66(4): 50-53.
- [35] Airbus. E fan X Project[EB/OL]. <https://www.airbus.com/innovation/future-technology/electric-flight/e-fan-x.html>, 2018-04-25.
- [36] Anonymous. Partners Power Ahead with Hybrid E-Fan X Program[J]. *Flight International*, 2019, 195(5692).
- [37] Michael G. Rolls-Royce Tests Hybrid Power System[J]. *Flight International*, 2019, 195(5679).
- [38] 廖忠权. 赛峰集团电推进技术发展[J]. 航空动力, 2020(3): 31-36.
- [39] 王乐, 王鹏, 高海红. 俄罗斯混合电推进技术发展浅析[J]. 航空动力, 2019(6): 41-43.
- [40] 周国庆, 李正浩. 浅谈混合动力系统在通用飞机上的应用[J]. 中国科技纵横, 2015(10): 53-55.
- [41] 黄俊, 杨凤阳. 新能源电动飞机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57-68.
- [42] 范振伟, 杨凤天, 项松, 等. 我国电动飞机发展现状及建议[J]. 航空科学技术 2019, 30(11): 18-21.
- [43] 邹海宁, 程靖, 雷虎. 航空混合电推进技术状况及商用研究[J]. 飞机设计, 2020, 40(5): 28-31.
- [44] 王鹏, 鞠新, 郑天慧, 等. 航空混合电推进系统的发展现状及应用前景[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2021, 34(2): 52-57.
- [45] 姚轩宇, 满运堃, 王爱峰. 涡轮发电混合动力分布式推进系统设计分析[J]. 航空动力, 2019(5): 71-74.
- [46] 范勇, 朱纪洪, 孟宪宇, 等. V/STOL飞机建模与仿真分析[J]. 中国工程科学, 2011, 13(3): 107-112.
- [47] 程志强, 朱纪洪, 袁夏明, 等. 推力矢量垂直短距飞机轨迹优化与控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(1): 38-46.
- [48] 康桂文. 通用飞机油电混合动力系统设计与性能仿真[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2015.
- [49] 闫万方. 分布式动力设计参数对BWB耦合布局客机的气动影响研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.
- [50] 肖伟, 周洲, 王睿, 等. 分布式推进系统对太阳能无人机横航向飞行品质的影响研究[J]. 西北工业大学学报, 2012, 30(6): 868-873.
- [51] 赵长辉, 陈立玮. 电动飞机技术分析[J]. 国际航空, 2011(10): 28-30.
- [52] Koster J, Humbargar C, Serani E, et al. Hybrid Electric Integrated Optimized System: Design of a Hybrid Propulsion System for Aircraft[C]. *Florida: The 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2011.
- [53] 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): 47-54.
- [54] Yoon A, Srastu F, Lohan F. Direct-Drive Electric Motor for STARC-ABL Tail-cone Propulsor[R]. *AIAA-2019-4516*.

- [55] 李慧颖. 一种混合动力飞机动力系统试验台架的设计研究[J]. 机械工程师, 2020(8): 99-100.
- [56] 康桂文, 孙振祥. 通用飞机油电混合动力系统设计与性能仿真[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(2): 23-27.
- [57] 王珂, 陈维荣, 李奇, 等. 基于燃料电池的无人飞机混合动力系统设计[J]. 电源技术, 2013, 37(2): 241-245.
- [58] 袁雷, 胡冰新, 魏克银, 等. 现代永磁同步电机控制原理及Matlab仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
- [59] 腾飞. 电动飞机主驱动永磁同步电动机损耗抑制技术研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [60] 张卓然, 于立, 李进才, 等. 飞机电气化背景下的先进航空电机系统[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 622-634.
- [61] 钱煜平, 张扬军. 航空混合电推进系统中的热管理问题分析[J]. 航空动力, 2019(6): 36-40.
- [62] 王书礼, 马少华, 张硕. 电动飞机电机控制器风冷散热结构的计算和改进[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(6): 1-7.
- [63] 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(33): 350-356.
- [64] Kim J, Kwon K, Roy S. Megawatt-Class Turbo-Electric Distributed Propulsion, Power, and Thermal Systems for Aircraft[R]. AIAA 2018-2024.
- [65] 向乾, 张晓辉, 王正平, 等. 适用无人机的小型燃料电池控制方法[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 86-97.
- [66] 李勇, 韩非非, 张昕喆. 基于自适应神经模糊推理算法的无人机电推进燃料电池供气系统性能优化[J]. 推进技术, 2021, 42(6): 1395-1409. (LI Yong, HAN Fei-fei, ZHANG Xin-zhe. Performance Optimization of Fuel Cell Gas Supply System for UAV Electric Propulsion Based on Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Algorithm[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2021, 42(6): 1395-1409.)
- [67] 黄俊. 分布式电推进飞机设计技术综述[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 7-23.
- [68] Gesell H, Wolters F, Plohr M. System Analysis of Turbo-Electric and Hybrid-Electric Propulsion Systems on a Regional Aircraft[J]. *Aeronautical Journal*, 2019, 123(1268): 1602-1617.
- [69] Boggero L. Development of a New Conceptual Design Methodology for Parallel Hybrid Aircraft[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, 233(3): 1047-1058.
- [70] 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.
- [71] 张茂权, 陈海昕. 小型电动无人机航程航时估算模型[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 98-106.

(编辑:梅瑛)