

混合动力推进系统与飞机数字化设计现状与展望^{*}

康 乐^{1,2}, 冉千禧¹, 毛军逵^{1,2,3}, 余之圳¹, 韩 枫^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016;

2. 南京航空航天大学 综合能源研究院, 江苏 南京 210016;

3. 南京航空航天大学 江苏省航空动力系统重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘 要: 本文总结了国内外针对混合动力推进系统及飞机发展专门开发的数字化设计工具, 归纳了其相应设计方法及特点。综合来看, 为了满足混合动力飞机的设计需求, 集成高精度电系统和热能管理系统模型, 建立针对性的性能评估体系、飞机与发动机设计的数据耦合交互、研究设计与安全性分析相统一的建模方法、基于人工智能方法提高优化设计管理能力是目前面向其特点的关键发展方向, 并为其后续的实验验证、适航条例制定等工程应用提供重要的技术支撑和设计依据。

关键词: 混合动力推进系统设计; 混合动力飞机设计; 多学科优化设计; 混合动力评价体系; 综述

中图分类号: V211 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 03-2212002-17

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2212002

1 引 言

混合动力推进系统及飞机具有节能、减排、降噪、低运营成本等潜力, 国内外对这一领域的研究正逐渐从概念设计过渡到应用研究。与传统推进系统的设计不同, 混合动力推进系统为动力系统机械解耦提供条件的同时, 也增加了系统复杂性和设计自由度, 使其在多学科设计、评价体系建立、飞机发动机一体化设计等方面有着更为复杂、苛刻的需求。在过去的 15 年中, 在飞机推进系统的设计中加入电推进的考量逐渐进入大众视野, 激发了各大科研单位和航空公司对于新概念航空技术的想象力。混合动力推进受到了其在海洋推进、汽车工业等相邻领域的启发, 被认为在航空航天领域也有着广阔的应用前景。在发展初期的 5 年内, 关于混合动力的专业论文每年仅以个位数量级在发表, 从 2015 年开始, 相关的论文数量增长显著, 每年增量约 30 篇, 学术界和工业界对这一热点的关注可见一斑。

混合动力引发公众兴趣的重要原因是: 首先, 由

于环境改善的需求, 航空业的普及, 乘坐飞机在 21 世纪成为了大众在面对长途旅行时的首选, 客机可以提供高效、快速和安全的运输, 这是任何其他长途旅行方式都无法比拟的。低污染、低噪声、高性价比、高燃油效率和更大设计灵活度是航空业持续关注的需求。此外, 航空旅行由于其灵活的容量和路线, 低廉的基础设施成本和不受地理障碍的限制, 已使航空业发展进一步迅速扩张, 同时进一步刺激了航空业节能、减排和降低成本的需求。但是以涡轮风扇发动机为代表的传统动力系统由于燃烧温度已接近化学极限, 涡轮材料限制和冷却的高代价使得传统航空发动机的热效率提升空间有限, 其性能提升已逐步逼近了渐近线。由于传统航空发动机涵道比变化范围小, 非设计点工况下部件性能下降严重, 使得其设计无法兼顾宽速域、大空域的需求, 因此必须考虑更具革命性的进步, 才能达到社会和市场对航空发动机进步的需求。因此美国在 2008 年提出针对 2035 年技术条件的‘N+3’目标^[1]; 欧洲制定了针对航空业节能减排的发展策略^[2]; 中国政府也自 2009 年起宣布了一系

^{*} 收稿日期: 2022-11-30; 修订日期: 2023-10-06。

基金项目: 国防基础科研重点项目 (CKY2018605B006)。

作者简介: 康 乐, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究领域为混合动力系统及飞行器设计、氢涡轮发动机设计。

通讯作者: 毛军逵, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为航空发动机热管理和高效热防护、空气系统热分析和叶尖间隙主动控制、陶瓷基复合材料多尺度热分析、燃料电池及混合动力、气热固耦合数值仿真等方向。

E-mail: mjkpe@nuaa.edu.cn

引用格式: 康 乐, 冉千禧, 毛军逵, 等. 混合动力推进系统与飞机数字化设计现状与展望[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 2212002. (KANG L, MAO J K, YU Z Z, et al. Hybrid propulsion systems and aircraft digital design status and prospects[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 2212002.)

列有关遏制温室气体排放的措施,2020年做出了“双碳”战略的重大部署^[3-7]。针对减碳,甚至零碳的航空设计目标,多种具有低排放特性的新概念飞行器的研究均在其各自的领域展开研究,其中包括多电/全电飞机^[8-9]、纯电动飞行器^[10-11],从替代性能源入手,有潜力实现净零排放的、更具有清洁效应的氢动力飞行器^[12-13]在减碳航空器领域打开了广阔的前景^[14]。

尽管目前电池的性能得到了大幅提高,但是电池的比能(约400 Wh/kg)^[7]显著低于航空煤油的比能(11 889 Wh/kg),将会给电气化飞行器带来过重的额外负载,导致其商载大幅度降低或飞机轮档能耗升高。同时,由于飞机的航线设计中有必然存在的大功率工作阶段(起飞、爬升、降落等),而电推进系统在大功率需求下的效率衰退很快^[15-17],大功率航段需要燃气涡轮发动机提供部分辅助功率,缓解电推进系统的性能衰退。混合动力推进可将燃气涡轮发动机和电推进的优势进行互补,一方面可以部分地规避低比能电池带来的质量惩罚,另一方面还可以通过在航程中给电池充电来重复利用电池质量,由此回收飞机下降航段燃气涡轮发动机产生的过剩功率,并在后续降落和滑行航段利用。这样的动力系统结构不仅允许燃气涡轮发动机始终工作在最佳运行工况下从而提升整体工作效率;同时通过电池的在途充电,将一部分化学能转化为电能,可以增大电池的在途电能输出能力,用能量转化的方法提高电池的使用比能(定义如式(1)所示),缓解由于物理比能(定义如式(2)所示)不足引发的问题。与此同时,混合动力推进系统可以选取航空煤油、液氢、甲烷、乙醇等可替代的清洁燃料。因此混合动力推进系统的研究在实现减碳的前提下,现阶段最具有工程实际价值,可以较为容易地实现多种能源、多种动力架构集成后达到总体优势最大化。

$$\text{电池使用比能} = \frac{\text{电池在途输出总电能}}{\text{机载电池总质量}} = \frac{\text{机载电池预存电能} + \text{在途转化化学能}}{\text{机载电池总质量}} \quad (1)$$

$$\text{电池的比能} = \frac{\text{机载电池最大预存电能}}{\text{机载电池总质量}} \quad (2)$$

早期的飞机设计和发动机设计依赖于昂贵的实验验证,随着计算机技术的发展和普及,计算机仿真模拟和优化设计技术在当今新概念飞机的开发中发挥着巨大的作用。计算机仿真模拟可以提供具有通用性的设计环境,其可扩展性和模块化特性能

为特定概念的飞机设计提供定制化服务。通过设计模块的重复使用节省了设计人员不必要付出的重复劳动,从而使他们更加专注于特定的研究领域^[18-19]。同时,利用合适的计算机设计环境可以在新概念飞机设计及探索的初期,部分代替高成本的实验,通过建立高水平的计算机模拟设计平台快速设计并评估大量的候选方案,识别并分析相关的关键技术,进而探索其优化设计空间^[20],尤其是考虑气动性能模拟的计算机仿真设计,例如使用先进的空气动力学模块来评估新概念几何布局等。

混合动力概念使得动力系统及飞机和配置变得更加多样化且复杂^[21],这也推动各设计平台的开发随着研究人员的研究目标向更多模块和功能延伸发展,例如许多动力系统及飞机设计软件针对混合动力概念,开发或升级了相对应的功能包^[22]。同时,针对混合动力的设计特点,还可以通过可预见的技术水平来预测未来可行的设计空间^[23-24]。

本文将对国内外涉及混合动力推进系统和飞机的建模和分析工作进行总结,对比这些仿真环境的精确度、学科广度和应用领域等,并分析归纳相关的设计平台在发展和应用中面临的挑战。

2 数字化设计平台

先进的建模和仿真能力可能以商业秘密的形式存在于工业部门或设计研究单位内部,因此发表的文献可能会呈现不完整。在此基础上,作者对国内高校及主要研究机构近些年在混合动力推进系统及飞行器设计平台方面的发展做了尽可能深入的归纳和总结,其中包含如GT-HEAT, GENUS, SUAVE等经过多年的积累并基于传统推进系统及飞机设计所拓展开发的设计平台,也包括像MYSTIC, Iniciator等针对混合动力小规模建模工作。

2.1 大规模混合动力系统设计平台

2.1.1 佐治亚理工学院开发的GT-HEAT设计平台

为了满足高度集成的混合动力飞机设计的要求,佐治亚理工学院的研究人员以NPSS(Numerical Propulsion System Simulation)^[25-26]为核心创建了GT-HEAT(Georgia Tech Hybrid Electric Analysis Tool)工具^[27-28]。随着NPSS向混合动力系统的设计进行分析开发^[29-31],GT-HEAT也随之拓展了研究领域。如图1所示,GT-HEAT是一个模块化的平台,由任务需求、飞机设计、动力系统设计三个主要模块再向下细分,涵盖飞机气动分析、质量估算、操纵稳定性分析、热状态分析等子模块。2012年以来,该开发团队构建

了可以满足电推进系统需求的模块化功能包,对混合动力飞机设计相关学科进行逐渐复杂化和多元化的拓展分析^[32-35]。

值得关注的是,GT-HEAT集成了热分析管理模块,针对每个热源部件的热交换器进行了独立建模,满足热负荷与气流进行热交换研究。从混合动力系统的架构分类来看,其中包括应用了局部电气化的分布式推进系统的飞机设计^[32]和应用电动可变发动机的推进系统的飞机设计^[33-34],通过对比分析确定并联混合动力和电驱动分布式架构的可行设计空间。佐治亚理工学院利用GT-HEAT展开混合动力飞机概念设计,通过对混合动力飞机的参数化设计和优化分析探索其可行设计空间,发现了混合动力飞机在低空飞行状态下的能耗下降^[36]。

2.1.2 克兰菲尔德大学开发的 GENUS 设计平台

图 2 中的 GENUS 飞机设计环境是自 2012 年起由

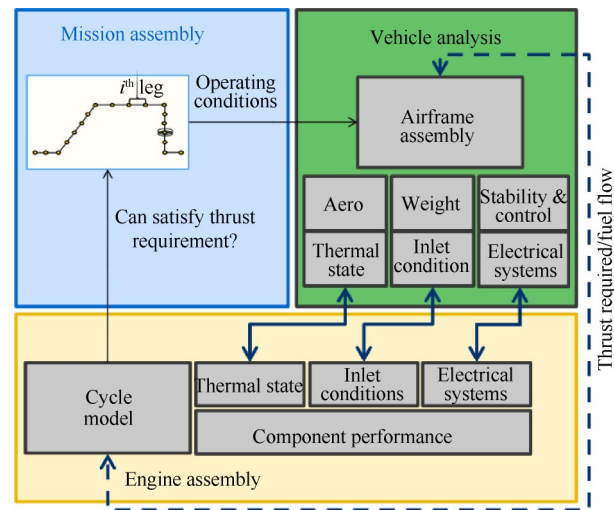


Fig. 1 GT-HEAT modular framework^[28]

Smith带领的克兰菲尔德大学飞机设计组的研究人员开发的飞机设计环境^[37-39]。由于 GENUS 是用 JAVA 编写的,它在使用环境、拓展等方面具有较大的灵活性。在 multidisciplinary design 方面,GENUS 针对混合动力飞机的设计集成了 9+1 个设计学科^[40]。在设计过程中引入了混合动力推进的设计和功率与能源管理的模糊策略设计。图 2 显示了 GENUS 中模块和学科之间的交互逻辑。对于混合动力飞机来说更加重要的排放监测和成本估算在 GENUS 中也予以考虑。相比其他设计平台来说,GENUS 通过集成全面的飞机设计相关的学科,每个学科内嵌多个设计估算方法供研究者对比应用,在研究混合动力飞机设计方法中有显著的优势。然而,在电系统建模和热能管理的设计方面,目前只有电池电量的在线模型并假设其放电深度为 80%,在电机、控制系统、热能管理系统等新增电系统部件只有初步的满足质量和功率估算的参数化设计,需要进一步建立性能模拟方法以提供更具有工程意义的数据和建议。研究者基于 GENUS 设计平台,基于 Boosted Turbofan 的动力架构,在混合动力飞机的优化设计方面做了探索研究,针对如何平衡混合动力推进能量利用率和质量惩罚的设计问题展开分析,通过分析设计案例,将混合动力飞机的设计空间分为正负两个区间,探索如何在最大化混合程度(最大化动力系统能量使用效率)的前提下,仍可以限制由耗电带来的质量惩罚,由此通过已被广泛应用的设计参数“混合程度”来探索混合动力飞机通用的设计空间和准则^[41]。

2.1.3 美国航空航天局开发的 LEAPS 设计平台

LEAPS (Layered and Extensible Aircraft Perfor-

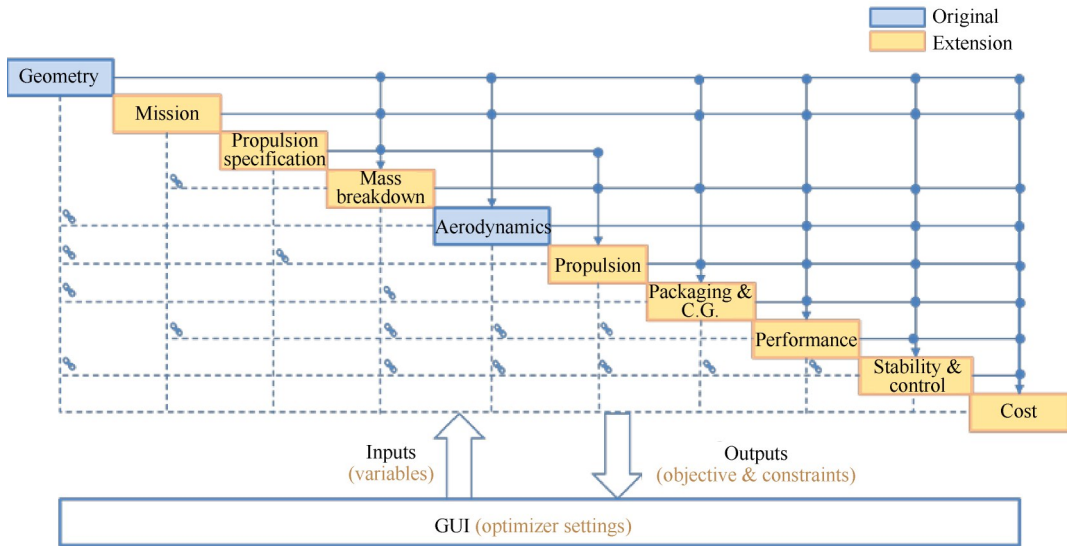


Fig. 2 Modules and data flow in GENUS^[40]

mance System)是一个模块化、多学科集成的混合动力飞机集成设计工具^[34,42-43]。LEAPS 是美国航空航天局兰利研究中心的 ASAB (Aeronautics Systems Analysis Branch) 基于 FLOPS (Flight Optimization System) 开发的。它除了具有 FLOPS 本身的特点 (i.e. 快速分析传统飞机的航线性能以便进行大量优化设计) 外, LEAPS 在其基础上拓展了应用新型推进系统的新概念飞机^[44]。LEAPS 可以集成处理包括电推进系统在内的多种推进器类型, 从而通过设计分析来研究新型概念带来的潜在效益和可能拓展的设计空间。

LEAPS 优化工作流程分为命令输入、性能更新、分析计算、报告四个阶段, 为混合动力飞机设计提供了可行的开发环境。通过并联混合动力架构验证了 LEAPS 的设计方法, 虽然新型动力系统给建模带来了挑战, 但经过分析研究不仅为混合动力架构所对应的飞机建模提供了方案, 同时证明了并联混合动力架构与其他混合动力支线飞机相比之下的优势: 并联混合动力架构不仅可以减少动力系统油耗, 还减小了整个飞机满足任务需求时的质量, 更在设计分析中发现巡航段的爬升率对于整个混合动力飞机的设计影响较大, 而能量管理和功率管理对混合动力飞机能量消耗和成本优化的作用至关重要, 需作为后续建模和设计研究的重点探索方向。

2.1.4 斯坦福大学开发的 SUAVE 设计平台

SUAVE 是斯坦福大学开发的开源、多学科和多计算精度集成的飞机概念设计环境, 在文献[45-50]中进行了详尽的介绍。它提出了一种区别于常规设计、依赖于经验和参考设计手册的设计方法, 通过增强物理相关性, 从不同部件入手来参数化混合动力飞机, 其功率和质量工作流程如图3所示。从2017年起, SUAVE 的发展开始面向电驱动飞机, 从电动小无人机开始^[48,51], 目前已可以进行基于经验、半经验的

电动短距离垂直起降飞机^[52]和分布式电推进飞机的设计^[53-54]。针对电推进飞机的设计特性, 开发者在气动设计、航线设计、优化目标和优化约束的选择方面均做了区别于其他类型飞机的改进和适应性开发。为了构建混合动力的设计环境, SUAVE 中加入了基于经验的电池放电损耗模型。通过对锂电池半经验建模, 研究者进行了关于电驱动运行寿命在内的性能评估并进行优化, 使得电池功耗降低了5%~10%, 挖掘出混合动力飞机在续航方面的潜力^[53]。

在混合动力领域, SUAVE 在设计能力和优化算法方面不断发展, 具备了初步的设计空间探索能力, 并有一定的工程应用能力; 然而, 在进行数值仿真方面仍存在挑战和发展空间; 同时在热管理、热失效、声学模拟等方面 SUAVE 鲜有涉及。考虑这些学科对混合动力推进系统及飞机的影响至关重要, 开发者将解决这些问题列入未来的发展计划^[55-59]。

2.1.5 ESAero 开发的混合动力设计平台

在过去的十几年中, ESAero (Empirical System Aerospace) 的软件不断发展并且公开发表, 混合动力飞机的设计以三个软件的交叉集成来实现: HAPSS (混动飞机与动力系统集成), TOGW (最大起飞质量估算), 和 PANTHER (混合动力的动力系统与飞机集成)。

TOGW 在经验公式计算的基础上, 通过电系统和热能管理系统的尺寸预估来估算整个混合动力飞机的总起飞质量^[60-61], 成为后续飞机设计模型的基础和尺寸与质量的估算。HAPSS 目前只可以模拟串联式混合动力系统。由于 HAPSS 无法模拟推进系统与机身的集成效应^[62], 所以在其基础上开发了飞机设计平台 PANTHER (见图4)。PANTHER 允许用户通过飞机设计、推进系统、热能管理三方面来评估混合动力飞机设计^[63-66]。从2009年起, ESAero 开始设计 ECO-150 和 ECO-250 飞机, 但是工业界普遍认为“单通道

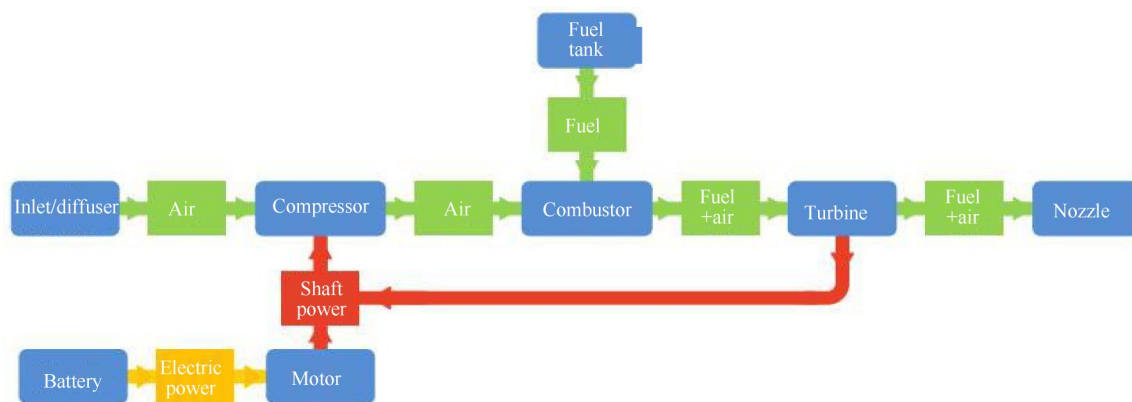


Fig. 3 Hybrid turbojet power and mass flows^[45]

窄体(Tube-and-Wing)”对于涡轮电动力架构来说无法体现其优势,但 Schiltgen 等^[63]通过 PANTHER 模型做了相反的设计证明。然而在对混合动力推进性能评估起重要作用的经济性、排放估算、噪声估算等性能评估方面,ESAero 暂未发表论文。

2.1.6 赛峰集团开发的 PACIFYC 设计平台

PACIFYC (Propulsive ArChItecture for hYbrid Commuters)设计平台是 Isikveren 带领赛峰集团的混合动力研究组针对混合动力推进系统和其在航空领域的应用搭建的设计平台,为此从 2014 年起进行了长期的研究并带领研究人员为该领域的研究奠定了较为全面的基础^[21,67-79],其中文献[74-75]为混合动力推进系统的设计与建模打下了基础,通过集成四个动力架构(Electric Booster, 涡轮-电架构, 电池辅助供能和电池辅助供能的 Electric Booster)的建模(见图 5),实现对不同架构的定性评估。Pornet 等^[70-72]则针对混合动力飞机的概念设计进行了研究和探索,考虑动力系统架构、质量集成、飞机运营等方面,面向 19 座、70 座和 180 座商用飞机的设计案例来完善该平台,如今此平台已开始面向氢动力飞机进行开发,

同时拓展如 BLI 模拟等与混合动力飞机的通用模块。基于 PACIFYC 的研究从几种常见的混合动力架构出发进行设计分析,但在建模中由于考虑的电系统建模和热能管理建模较少,因此其工程应用仍有局限性。

2.2 国外内部开发的混合动力系统设计平台

除了成熟的、经过长期积累的飞机设计工具已面向混合动力系统设计的要求进行改进和更新外,还有一些如 Initiator^[80]这样,由各研究组织内部开发的混合动力系统设计工具:TASOPTe(Transport Aircraft System OPTimization-electric)^[81]是由 TASOPT(Transport Aircraft System OPTimization)^[82-83]发展而来的全电飞机设计与优化程序。TASOPTe 有两个关键的特点:电池分析建模,且能够分析边界层吸入。虽然目前尚未应用于混合动力飞机的设计,但可以作为混合动力飞机研究的储备和参考。罗马特雷大学开发的 FRIDA(Framework for Innovative Design in Aeronautics)在混合动力支线飞机的研制中被用作飞机的整体设计和性能评估^[84]。德国布伦瑞克工业大学开发的 EWL(EnergieWende in der Luftfahrt)在飞

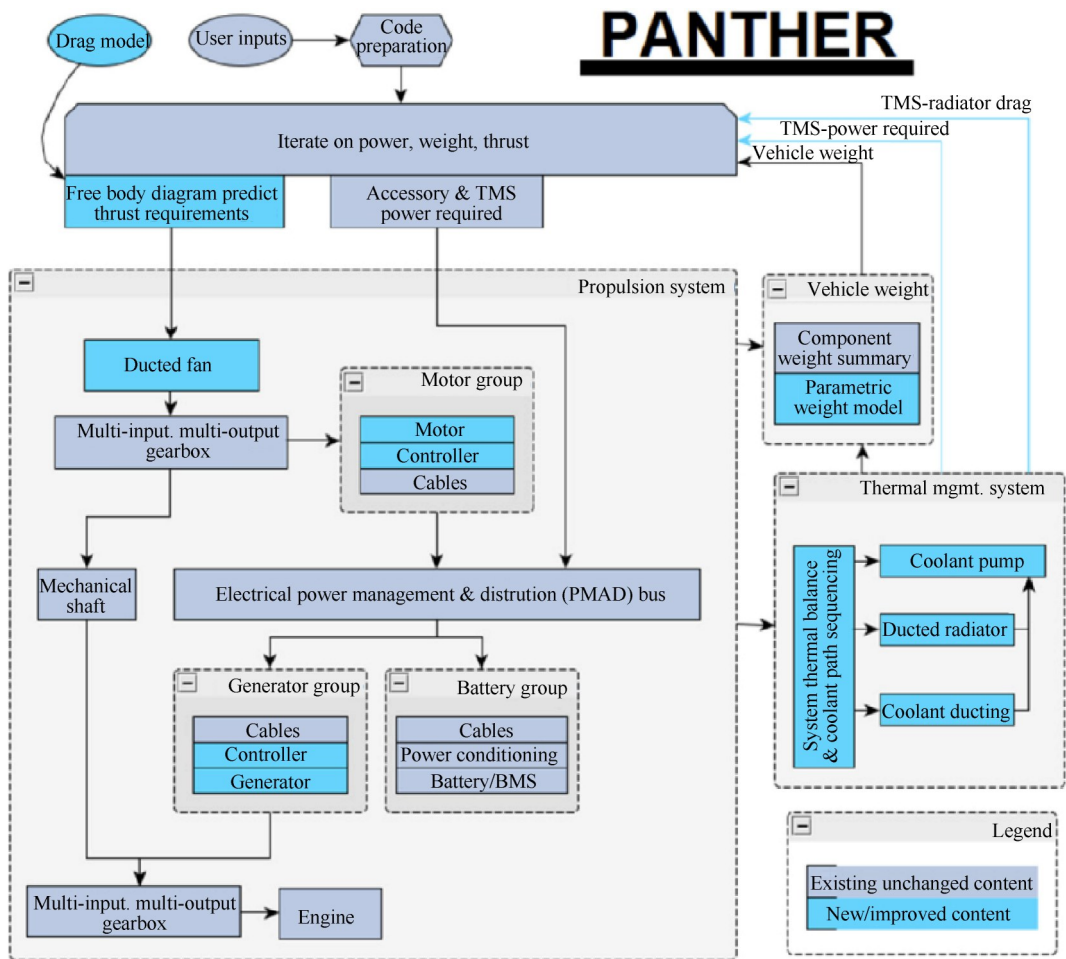


Fig. 4 PANTHER on-design mode logic flow diagram^[63]

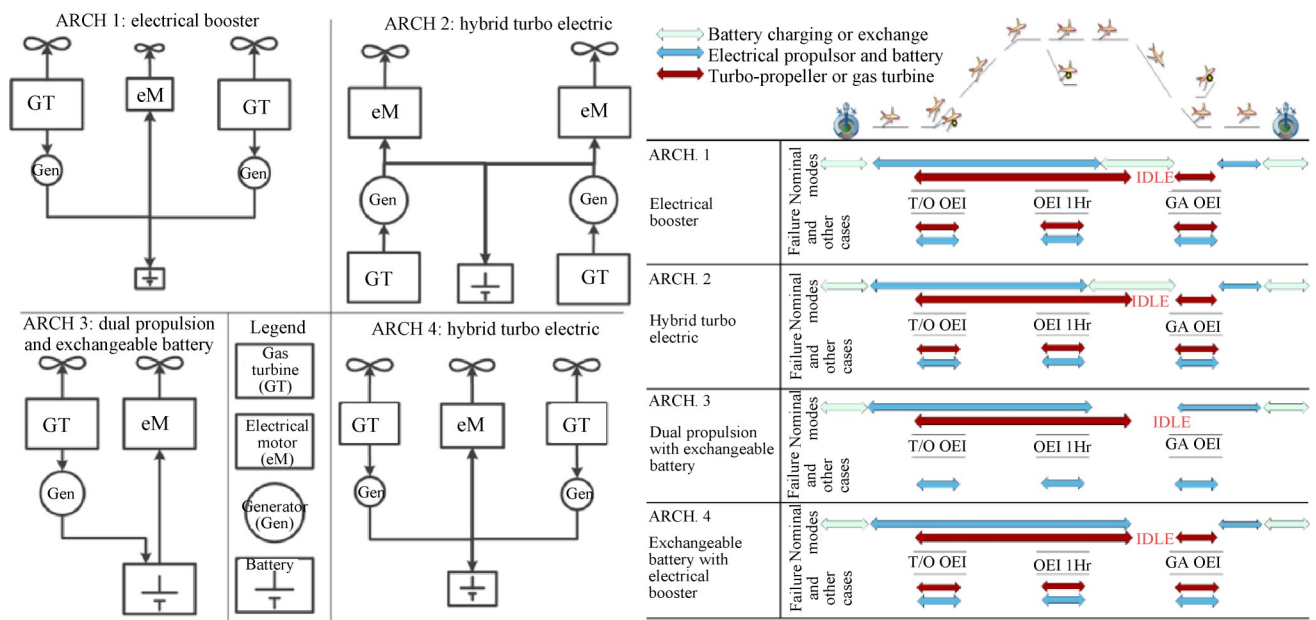


Fig. 5 Architecture candidates and corresponding operational modes considered in the PACIFYC down-selection^[74]
(GT(Gas turbine), eM(Electric motor), Gen(Generator), T/O(Take-off), OEI(One engine inoperative), GA(Go around))

机设计阶段针对混合动力飞机的设计提出了初步的研究方法^[85]。法国航空航天实验室的 Schmollgruber 等集成了 FAST 和 OpenMDAO^[86-89], 以适应混合动力飞机的概念设计^[90], 其优势在于计算包含成本估算, 但计算都建立在经验计算的基础上, 计算精度较低^[91]。MYSTIC (Multidisciplinary Sizing Tool for Integrated Concepts) 设计平台在 Clean Sky 2 中的 DRAGON (Distributed fans Research Aircraft with electric Generators by ONERA) 项目中起到了重要的作用^[92], 为其总体性能评估提供了半经验的计算环境。同时, 米兰理工大学的 Carlo 将动力系统模型与飞机性能模型集成并用于小型混合动力飞机初步设计的优化设计工具^[93]。巴黎理工大学的 Luca 仅探索并联混合架构的混合动力系统与传统飞机设计方法结合后的设计^[94]。亚琛工业大学 Kreimeier 等^[94]的模型涉及能耗估算、质量估计和运行成本预测。各位学者对该领域建模工作的探索提供了充足的参考信息, 同时表明亟需更加全面的工具对混合动力飞机设计进行完整的模拟研究。

表 1 列出了以上主要的设计混合动力系统及飞机设计平台, 总结了各设计平台的开发特点及相关研究。目前, 国外各研究机构经过长时间的积累和开发, 为混合动力系统及飞机的设计奠定了基础, 作为开辟绿色飞机设计途径的重要工具, 数字化设计平台仍在快速发展和壮大中。

2.3 国内的混合动力系统设计研究

国内在混合动力设计领域起步较西方晚, 且已发表的科研论文较少涉及混合动力系统或飞机的数字化设计平台, 以下调研和分析尽可能详尽。

2015 年起, 沈阳航空航天大学的康桂文指导研究了关于通用飞机油电混合动力系统设计与性能仿真^[95], 研究人员使用 Matlab 根据飞机动力学计算对一款双座飞机进行油电混合动力的改进设计, 验证了混合动力飞机的优势。后对飞机滑跑距离和爬升率性能做了进一步计算模拟, 验证了混合动力飞机在高海拔地区优势更为明显^[96], 在此基础上, 提出了电推进系统的能效优化方法, 对延长电驱动飞机的续航时间具有重要的意义^[97]。

2017 年, 西北工业大学在张晓斌教授的带领下成立了飞机电推进技术工业和信息化部重点实验室, 2020 年搭建了分布式电推进飞机动力系统仿真模型, 其中对飞机电网进行了分析, 集成了推进系统的功率和电气系统能量传输并建立了输电线和电机的参数化模型^[98], 其工作集中攻克在飞机推进系统中逐渐复杂的电系统建模问题。此外, 西北工业大学郭迎清教授指导开展了质子膜燃料电池和锂电池混合动力系统建模工作, 验证了两者混合进行能量管理的可行性^[99]。

北京理工大学的刘莉教授对太阳能/氢能混合动力在小型低空长航时无人机的应用方面进行了较为充分的研究^[100]。针对小型低空长航时无人机特殊的

Table 1 Summary comparison of hybrid powertrain design platforms

序号	开发者	设计平台名称 (简写)	特点 (精确度、学科广度和应用领域)	相关研究
1	佐治亚理工学院	GT-HEAT	可用于混合动力部件级分析:气动分析、热管理模型和任务需求分析	[27-36]
2	克兰菲尔德大学	GENUS	多学科、多阶算法集成的飞机设计平台;可进行混合动力飞机的几何外形设计、气动性能估算、任务需求研究、质量估算、发动机设计、动力系统设计、性能估算、操稳计算、成本估算、排放估算等	[37-41]
3	美国航空航天局	LEAPS	低阶、多学科飞机优化设计模型;计算几何气动、推进质量、性能评估;集成 Model-Centre, Flops, wate++, 与 NPSS 等子设计模块	[42-44]
4	斯坦福大学	SUAVE	基于多保真度算法;多学科飞机优化设计工具;可估算机翼尺寸、任务需求、推进系统设计;利用 pyOptSparse 进行优化研究;能够分析 BLI 和 DEP 的气动影响	[45-59]
5	ESAero	TOGW	基于经验公式的多学科飞机设计工具;可估算推进系统的尺寸、质量	[60-61]
6		HAPSS	只可模拟串联式混合动力系统	[62-63,66]
7		PANTHER	在 HAPSS 的基础上集成了飞机设计、推进系统、热能管理三方面来评估混合动力飞机设计	[63-66]
8	赛峰	PACIFYC	PACE 成套工具:APDTM 用于飞机概念设计和性能分析;SysArcTM 用于多层子系统集成;OpenVSP 用于飞机的几何设计	[74-76]
9	代尔夫特理工大学	Initiator	初步尺寸设计;基于经验公式的质量估算;基于涡格法的机翼气动估算	[80]
10	麻省理工学院	TASOPTe	多学科优化工具;可进行机身、推进系统和任务需求的设计;可进行 BLI、桁架设计、双泡机身等气动分析;可分析电池性能	[81-83]
11	罗马特雷大学	FRIDA	针对 BWB 机身进行混合动力配置;可以进行尺寸设计;基于半经验方法进行涡扇发动机设计;可以进行气弹性能和噪声预测研究	[84]
12	德国布伦瑞克工业大学	EWL	灵活度大、基于物理的飞机设计工具;可估算气动性能、进行结构和动力系统设计	[85]
13	法国航空航天实验室	FAST	基于经验公式和低阶算法、集成于 OpenMDAOzhong 的多学科设计分析工具:机身设计、结构/质量设计、推进系统设计	[86]
14		OpenMDAO	低阶,多学科飞机优化设计模型;梯度优化算法	[87-89]
15		MYSTIC	多学科概念设计工具;可模拟涡轴发动机性能;可进行 3D 气动评估;基于有限元方法的机翼结构分析;可分析涵道风扇性能	[92]

需求飞行剖面,建立了能源系统模型,提出了考虑质量能量耦合关系的总体设计方法,开发了能源管理仿真平台^[101-103]。在此平台的基础上,验证了混合动力推进对无人机航时有很大的提升。

南京航空航天大学的毛军逵教授团队从多能源动力系统设计的角度出发,在氢燃料电池、氨燃料电池等多种新能源驱动的动力系统入手积累了成熟的研究基础^[104-107]。同时,从整体架构的角度,针对混合动力发动机的设计建立了仿真模型,该平台可以进行针对涡轮-电并联混合动力架构、电辅助驱动涡扇(Boosted Turbofan)架构、电池辅助驱动的涡轮-电串并联混合动力架构等混合动力系统的性能计算分析。结合大型客机和长航时无人机的典型飞行包线,建立了针对混合动力系统及飞机的性能评估体系(考虑多种功率管理方案的应用、电池放电情况的在线监控、飞行包线内的动力系统动态响应、适航要

求,建立在线监测推力、耗油率、耗电率、混合系数等性能参数的全新评估体系)。除此之外,在全局热能管理、综合能源管理、电系统建模的研究等方面也在快速发展建设中^[40,108]。

南京航空航天大学的毛建国于2017年为了研究混合动力系统的控制策略,设计了适用于小型航空活塞发动机的混合动力系统,通过仿真证明在加入模糊控制器的逻辑门限制控制策略下混合动力系统的耗油量降低了24%^[109]。王继强副教授于2022年通过 Matlab 建模探索了并联混合动力齿轮传动涡扇发动机的性能,验证了其节能、减排和降噪的潜力^[110]。

中国航发沈阳发动机研究所的刘一雄等^[111]于2022年开发了基于多目标遗传算法、综合考虑传统发动机和电力发动机性能的混合动力航空发动机及其优化设计方法。此外,北京航空航天大学的成都

创新科技园近六年以无人机混合动力系统研究为重点研究方向之一,开展研发创新和成果转化^[112]。中国航发四川燃气涡轮研究院与辽宁通用航空研究院共同研制的首架纯电驱双发涵道风扇无人机成功试飞^[113]。中国航发湖南动力机械研究所与中国航发南方工业有限公司等机构,突破串联架构混合电推进系统关键技术,成功研制国内首套航空混合电推进系统^[114]。

综上所述,国内对于混合动力的模拟工作从各个角度和方向分别在做努力,并已取得阶段性进展。各单位在混合动力系统研制方面做了突破性的研究并取得了进展,为混合动力系统的后续研究奠定了基础,但是目前很少有公开的文献介绍他们使用的设计工具。

通过国内外建模工作的调研对比,国外的建模工作,将动力系统和飞机的建模做了较好的统一,而国内这两部分工作相对较为割裂,动力系统与飞机的统一建模对于混合动力概念的发展尤为重要。此外,国内在混合动力系统的设计平台开发中,无论是在学科丰富度、可靠性分析、经验积累等方面与国外相比仍有较大差距,在后续的总结中做了统一的梳理和规划。

3 混合动力系统与飞机设计平台发展关键技术

通过以上总结可以发现,虽然随着混合动力概念的发展,涌现出大量为探索其设计空间而针对性开发的设计平台,然而面对最终的工程应用或精细化设计的要求仍面临着很大的挑战。

对于混合动力来说,所谓“改变游戏规则”的新型推进系统在原有的设计中大量增加额外部件,这样的改变为优化能量利用、优化燃气涡轮发动机的运行、高效管理热量等方面提供了更多的自由度和便利。但与机遇并存的是随之而来的在高效设计、安全运行等方面的挑战和难题。在数字化设计愈渐重要的时代,通过基于模型的分析设计可以为混合动力概念的工程化应用提供数据支持。本节对混合动力系统与飞机设计平台发展的关键技术做以下总结。

3.1 混合动力多学科集成的设计与评估技术

与传统的飞机相比,混合动力飞机的设计不仅要考虑常规的几何外形设计、质量估算、动力系统设计、布局设计、航线设计、操纵稳定性计算等学科的集成设计,更应突出体现混合动力飞机设计复杂性

和设计优势的学科,如排放计算、声学估算、考虑新能源全生命周期和考虑运营规则变革后的成本估算、电系统性能模拟、整机范围的能源与热量综合管理等。因此,只有在整机充分参数化建模的前提下,才能完全打开混合动力概念为动力系统设计 and 飞机设计带来的完整设计空间,从而探索出混合动力飞机的全局优化设计方法。在混合动力概念设计初期,研究者所攻克的问题集中在粗略估计该概念为动力系统设计或飞机设计分别带来的变化,如表1所示,目前仍缺乏可以集成混合动力概念发展所有相关学科的设计与评估技术,而此技术需要长期且完备的建模积累,是混合动力概念发展所面临的亟待解决的问题。

首先,对于混合动力飞机来说,由于混合动力系统为气动优化带来了新的空间,所以在研究时应尽可能优化气动进步,从而充分利用动力系统设计 with 飞机设计的耦合优势^[115]。由外形和布局改进带来的气动优势,只有通过有效的、高精度的气动仿真得出的分析数据在工程上更具有参考意义。所以对混合动力飞机的设计分析,有必要在气动和布局方面对其物理设计特性的变化进行数值仿真建模和优化设计。

此外,对于混合动力系统来说,新增的电推进系统与热能管理系统有很强的耦合作用^[63,116-121],结构布局、配置、动力总成设计和热能管理设计会产生密切的互相影响^[60]。由于电推进系统的温度对其工作的高效性、可靠性和安全性至关重要,尤其是航空应用对功率的需求较高,此时电子设备会散发出大量热量,传统的散热方式对飞机的质量和阻力产生较大的不利影响。相反,如果对这些热量进行优化管理,可以大幅度提升飞机子系统尤其是推进系统效率。所以电推进系统内部件的效率和热衰退状态需要参考其性能特性变化而建模,同时在其失效边界内充分考虑功率、热量和能源的流动与循环利用,以便提升动力系统整体性能并在节能方面进一步打开优化空间^[122]。目前针对混合动力系统的热能管理模块建模分析仍旨在回答初步的设计问题,如:在混合动力飞机设计的任务需求中,什么设计因素对其热能管理影响大^[123],什么样的冷却方式较适合混合动力飞机设计的需求^[124],热能管理方式对混合动力系统的收益是否产生决定性的影响等^[125]。以上工作通常建立在独立的热能管理模型和对动力系统设计 with 飞机设计初步调研的基础上,缺乏基于整机模型集成的设计研究和进一步的数据支撑。另一方面,针对

热能管理和锂电池在混合动力系统中的应用在混合动力汽车的研究中较多^[122,126-129],其中与飞机设计有相关性的可以参考,但仍非常缺乏具有针对性的建模分析,例如应分析飞机设计不同于汽车设计的多学科设计耦合和应用场景的适应性。因此,考虑电、功、热集成的混合动力设计平台不仅可以让混合动力系统和飞机的数字化设计更接近工程水准,更在电推进系统设计安全性研究、设计边界确立和优化提升性能方面有长足的进步^[130]。

同时,混合动力飞机除了节能外,还有其他重要的收益,如噪声和排放的减少,以及运营成本降低等。因此针对混合动力飞机建立多学科的性能评估体系很有必要,这也是混合动力飞机进行全面优化的基础。例如,在常规的飞机性能(推力、油耗)评估外,有针对性地开展声学评估也是非常必要的。降噪收益除了电池代替部分涡轮发动机降低了来自燃气涡轮发动机的噪声外,还包括飞发一体化设计所产生的降噪效果。目前的工具开发鲜有将评估体系各方面结合,来综合量化混合动力飞机在各方面的贡献,甚至缺乏通用的集成量化标准和等量评价标准。目前,米兰理工大学的Carlo开发了一种噪声预测模型,该模型被验证并适用于传统动力飞机、混合动力飞机和全电飞机^[131],值得借鉴。

对于混合动力飞机这样各系统高度耦合的新概念飞机类型来说,在估计它全局层面的设计效益时,需要囊括和考虑的学科比传统飞机更加复杂和多样化。因此,对于混合动力飞机的数字化设计来说,在排放、噪声、成本、热能管理、能源使用等方面估算的多学科集成设计,将成为一个具有挑战性的方面,亟需去探索、研究和实现。

3.2 混合动力飞机的智能化在线动态优化技术

如前所述,目前所有的飞机设计方法倾向于使用计算机集成的设计环境,优化设计是新概念动力系统与飞机设计中探索各设计参数对飞机整体设计影响的有效方法,在混合动力飞机进行工程应用之前,可缩短理想设计与工程实际的距离。对于混合动力飞机的设计空间探索、质量和尺寸估算来说,低精度的建模和仿真工具是有必要的,而对于评估不同学科之间的耦合作用,高精度的建模和仿真工具则是必需的,尤其是混合动力系统的设计需要更强的学科之间的耦合。例如需要高精度的热、电、工质流仿真方法对混合动力系统中的性能学科、电气系统设计学科、热管理学科的耦合关系进行仿真分析,仿真的精确度越高,则优化设计的可靠性越高。

一方面,目前对于混合动力的设计考虑多是单目标的优化设计^[132],随着设计流程中耦合变量增多,需要优化考虑的因素也随之增多,不仅计算速度变慢,而且需要根据设计的实际考虑,增加不止一个的设计协同目标。有研究从无人机的能量管理出发,提出了改进的ECMS方法进行能量管理优化研究,但仍鲜有考虑电池的实时状态^[132-133]。后续的优化方法需要在混合动力推进系统和飞机的设计中应用多目标优化设计方法,这对在优化设计中使用到的数学方法有了进一步的要求,在提高设计精度的同时,节约计算成本。这也成为将来针对混合动力飞机设计建模仿真的挑战和发展方向。

另一方面,混合动力推进系统的动态性能评估与反馈对飞机整体性能的优化设计提出了更高的要求^[134-136]。由于混合动力系统解耦了传统航空涡轮燃气发动机的传动部件^[132],使得能源供给以氢能、电能等清洁能源,动力架构^[137]以串联、并联等多动力组合方式,动力布局以涡轮发电分布式涵道风扇、电助推涡扇双发等形式,能量管理^[138-139]以模糊管理、优化管理等控制方法,从四个方面共同提升了混合动力系统的设计自由度和运行机动性^[74]。如此复杂的动力构造、运行模式、与飞机结构的强耦合关系同时也带来了诸多设计挑战,忽略优化和权衡设计的混合动力系统不仅无法实现节能减排的愿景,甚至将带来得不偿失的设计结果^[41]。例如不合理的混合动力系统输出会导致电池寿命缩短、性能损失等一系列严重的后果^[140]。动力系统变革带来的自由度不仅体现在设计中的自由度,同时反映在飞机航行时遇到故障的处理方式自由度高,在对其动态性能进行有效即时评估后分析其故障可隔离性,并进行能量、功率和热量的全局统筹再分配的自由度高。航空动力系统的多变量、强非线性、强耦合、工作环境恶劣且多变等特点,使动力系统对运行期间的稳定性、适航安全性、高效性有非常高的要求。出现故障时,系统需要实时排除故障带来的危险并能以高可靠性工作状态继续工作^[141-145]。而混合动力推进系统复杂度大幅增长,使局部失效带来的整体失效更快且严重,使动力系统的失效预测难度激增且准确度骤降,极易导致由动力系统故障引发的飞行灾难性事故^[135]。所以它对数学模型模拟精细度要求更高,并且要求具有在精准数学模型的基础上进行在线优化的能力。因此,混合动力飞机实现工程应用的另一个亟待满足的需求是混合动力推进系统在设计阶段与运行阶段的智能优化设计:首先,设计阶段如何进行多能源、

多动力架构、多动力布局的配合部署对多学科集成优化设计分析提出了要求;更重要的是,运行阶段如何根据实际航线状态在线调整功率-能量管理策略,以提高混合动力推进系统的动态性能,对智能化且持续的动态优化提出要求。混合动力推进系统与飞机设计平台需要通过基于深度自编码神经网络的强化学习,训练并提高模型给出合理最优解的能力^[146-148]。这样在保证模拟精度的前提下,加快故障检测后的系统优化管理及再分配的响应速度。在故障预测和制定应对策略方面,也可以尽可能地探索研究,确立最低性能要求和操作准则,为适航条例的制定提供参考建议。

3.3 混合动力的飞发一体化设计技术

飞机和发动机设计隔离主要以第一代战斗机为代表,此阶段飞机只能实现高亚声速飞行($Ma=0.9$);飞机和发动机设计开始进行边界联合主要以第二、三代战斗机为代表,此阶段的飞机飞行最大速度达到 $Ma=2.0\sim 2.5$,最大高度为 $18\sim 20\text{ km}$ ^[149];第四代战斗机(美俄第五代机)实现了飞机和发动机的局部融合设计,在高机动飞行和超声速巡航飞机的基础上,进而实现了隐身。而下一步发展亦将实现飞机和发动机的深度融合作为设计目标。可见,飞发一体化设计对提高飞机整体性能起着重要的作用。

混合动力飞机的主要变革产生于动力系统的变革,为飞发一体综合设计提供了有利条件:通过大功率电推进系统辅助为传统动力传输部件的机械解耦提供了条件,使其具备灵活的多模态工作能力;此外,动力系统在飞机的布局设计方面也有更大的自由度,支持飞机探索例如短距离垂直起降、分布式动力布局等灵活的设计空间。同时,混合动力飞机也对飞发一体综合设计提出了要求:如低比能电能载体使储能系统增重,需要通过飞发联合设计来实现结构综合减重;电推进系统对热能管理提出的高要求,需要通过飞发一体设计进行综合规划来统筹分配全机能源,既可以提高整体能源利用率,又可以为推进系统的安全性提供有效保障。

本文第2部分总结的大部分设计工具均起始于或聚焦于混合动力系统的研究,但其中既能细化动力系统设计,又能涉及飞机气动、布局设计的飞发一体设计评估技术体现较少,将飞机与发动机的数字化设计平台统一化,进行质量-功率-能量的精细化集成将成为下一代绿色航空动力达到更高的循环热效率和更大的涵道比调节范围、绿色飞行器达到更高的综合能量利用率和更灵活的布局必不可少的前

提条件,因此它也是混合动力推进数字化设计平台的重点发展方向之一。

3.4 混合动力推进系统的设计与安全性分析一体化建模技术

由于缺乏根据适航条例所量化得到的适航性与安全性分析评估,混合动力的概念距离工程应用仍有距离。而在第2节所总结的设计平台中,没有设计平台将适航性与安全性分析评估纳入开发环境中。

然而,适航安全性分析是军用飞机作战效能充分发挥的重要条件,更直接影响民航飞机系统、人员生命及财产的安全。世界航空强国无不把适航规章建设置于极为重要的战略高度,尤其是针对新研军/民用飞机的工程应用及技术分析,应最大限度地扩展适航规章建设的影响力^[150]。但我国针对军用航空器仍未形成完善的适航管理体系^[151],且中国民用航空规章第25部《运输类飞机适航标准》仍与美国FAR25部保持一致,混合动力飞机的适航条例制定目前更是空白。因此,进行混合动力系统研制和适航规章制定,尤其是根据相关关键技术在我国的发展状况来建立中国特色的混合动力飞机适航条例对增强中国在国际绿色航空领域的主导权和话语权具有重要作用。

关于安全性分析、故障预测与健康管理技术的研究方法可以划分为基于数学模型的方法、基于信号处理的方法和基于人工智能的方法三类^[152-155]。其中,基于模型的系统级、数据化的安全性分析、故障预测与健康管理的动力系统研制和适航规章制定的必要手段和重要环节^[156]。通过对混合动力系统建立设计与安全性分析一体化的扩展模型,可以在满足安全性设计和性能设计之间平衡交互的基础上,针对混合动力推进系统设计和飞机设计建立与安全性分析相统一的模型,从动力系统和能源储存系统出发为混合动力飞机的适航规章提供与设计一致的数据化支持^[157],是混合动力飞机刻不容缓的需求。

4 结论与展望

由于动力推进系统和飞机的设计需要整合大量学科和变量,设计者们总是需要对设计有足够的知识并足够熟悉,才能进行分析与设计。在混合动力推进系统与飞机设计环境的构建上即便目前存在着大量的重复工作,但仍然同时存在着巨大的空缺和局限性问题需要解决。此外,混合动力推进系统和飞机设计缺乏充足的实验数据和设计经验以供参考

借鉴,加强建立计算机仿真模拟设计平台,能够为加快混合动力推进概念在绿色航空中工程应用的进程提供有力的数据支撑:

(1)为了满足混合动力推进系统与飞机的设计需求,首先应建立基于物理结构的多学科仿真设计模型,以便展开后续的精细化仿真设计。目前已开发的设计平台基本可以满足混合动力的概念设计,对动力系统与飞机设计均处于精细度较低的概念设计阶段。而混合动力推进为飞机设计带来了更复杂的电系统设计以及电、功、热集成管理的需求,如何打破飞机与动力系统设计的壁垒,使以动力系统设计为主的混合动力飞机得以从飞机的角度进行全局的优化设计是未来发展的重要方向之一。

(2)针对混合动力的节能、减排、降噪、低成本等特点,应当建立可以体现并量化其优劣的全新评价体系。目前的数字化设计平台对这几方面的仿真方法缺乏较为全面成体系的模型,无法做到多方面的权衡对比优化设计,因此,建立有害气体/温室气体排放评估模块、电能与化学能的综合能源模型、集成发动机运行噪声和飞机气动噪声的集成评估模型、评估混合动力系统及飞机全生命周期的成本估算模型等亟需后续的混合动力推进数字化建模充实以满足需求。

(3)针对混合动力推进系统特性需要考虑其既包括传统的燃气涡轮发动机,又包括电功率驱动的推进器,其工作极限与在线管理策略需要重新根据其特点展开研究。控制系统需要探测到实时动态性能并进行评估以及进行最优应对策略的反馈,混合动力飞机适航条例的制定也需要明确设计失效边界和优化运行的准则。为了解决这个问题,需要大量的数字化设计经验和设计数据支持,建立基于深度自编码神经网络和强化学习的人工智能方法,训练并提高混合动力飞机设计模型给出航线内动态状态评估下即时能量、功率、电、热能管理的合理最优解的速度和能力,这将成为重要的需求和航空领域数字化设计平台的发展任务之一。

致谢:感谢国防基础科研重点项目的资助。

参考文献

- [1] VERSTRAETE D, LEHMKUEHLER K, GONG A, et al. Characterisation of a hybrid, fuel-cell-based propulsion system for small unmanned aircraft[J]. *Journal of Power Sources*, 2014, 250: 204-211.
- [2] European Commision. Flightpath 2050: Europe's vision for aviation, report of the high level group on aviation research[R]. Luxembourg: Directorate General for Mobility and Transport, 2011.
- [3] 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.
- [4] 史作廷,时希杰. 努力推动实现碳达峰碳中和目标[J]. *红旗文稿*, 2021, 20: 25-28.
- [5] 中共中央,国务院. 关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见[J]. *煤化工*, 2021, 49(5).
- [6] 胡文娟,何建坤. 中国能够,而且必须实现2060年碳中和目标[J]. *可持续发展经济导刊*, 2020(12): 18-21.
- [7] 中国航空工业民机系统工程研究中心. 新能源飞行器发展展望[N]. *中国航空报*, 2022-11-08(10).
- [8] 于黎明. 全电飞机的技术改进及其发展状况[J]. *飞机设计*, 1999, 3: 1-3.
- [9] 李凤娥,罗玉梅,张玉. 电力飞机的技术进展[J]. *中国民航飞行学院学报*, 2012(4): 17-20.
- [10] 范振伟,杨凤田,李亚东,等. 某型双座电动飞机设计与试验[J]. *航空学报*, 2021, 42(3): 623972.
- [11] 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): 624619.
- [12] 赖耀胜,李龙. 氢能飞机发展现状分析[J]. *航空动力*, 2021(6): 37-40.
- [13] 罗或. 氢能飞机蓄势待发[J]. *航空动力*, 2022(2): 34-38.
- [14] 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): 214-217.
- [15] MOURA S J, STEIN J L, FATHY H K. Battery-health conscious power management in plug-in hybrid electric vehicles via electrochemical modeling and stochastic control[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 21(3): 679-694.
- [16] 陶袁雪. 考虑电池衰退特性的复合电源电动汽车能量管理策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021.
- [17] 唐佳慧. 考虑电池老化的并联式混合动力汽车能量管理策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [18] SZIROCZÁK D. Conceptual design methodologies appropriate to hypersonic space and global transportation systems[D]. Cranfield: Cranfield University, 2015.
- [19] SUN Y C. Conceptual design methodologies appropriate to supersonic business jets[D]. Cranfield: Cranfield University, 2018.
- [20] GERO J S, HANNA S. Design computing and cognition 14[M]. Cham: Springer, 2015.
- [21] PORNET C. Electric drives for propulsion system of transport aircraft[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.

- [22] BRELJE B J, MARTINS J R. Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: a review of concepts, models, and design approaches[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, 104: 1–19.
- [23] JAMESON A. Computational aerodynamics for aircraft design[J]. *Science*, 1989, 245: 361–371.
- [24] RAYMER D. Aircraft design a conceptual approach compress[M]. 6th edition. Kissimmee: AIAA Education Series, 2018.
- [25] EVANS A, FOLLEN G, LOPEZ C N. Numerical propulsion system simulation's national cycle program[C]. Cleveland: 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 1998.
- [26] KESTNER B, NAM T, FLETT A, et al. Integrated engine and aircraft mission performance analysis using NPSS[C]. Nashville: 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, 2012.
- [27] GLADIN J C, PERULLO C, TAI J C, et al. A parametric study of hybrid electric gas turbine propulsion as a function of aircraft size class and technology level[C]. Grapevine: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [28] PERULLO C A, TAI J, MAVRIS D. A new sizing and synthesis environment for the design and assessment of advanced hybrid and electric aircraft propulsion systems[C]. Phoenix: International Symposium of Airbreathing Engines(ISABE), 2015.
- [29] PERULLO C, MAVRIS D N. Assessment of vehicle performance using integrated NPSS hybrid electric propulsion models[C]. Cleveland: 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2014.
- [30] PERULLO C A, TRAWICK D, CLIFTON W, et al. Development of a suite of hybrid electric propulsion modeling elements using NPSS[C]. Düsseldorf: Turbine Technical Conference and Exposition, 2014.
- [31] PERULLO C A, TRAWICK D R, MAVRIS D N. Assessment of engine and vehicle performance using integrated hybrid-electric propulsion models[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2016, 32(6): 1305–1314.
- [32] GLADIN J C, TRAWICK D, PERULLO C, et al. Modeling and design of a partially electric distributed aircraft propulsion system with GT-HEAT[C]. Grapevine: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [33] GLADIN J C, TRAWICK D, MAVRIS D N, et al. Fundamentals of parallel hybrid turbofan mission analysis with application to the electrically variable engine[C]. Cincinnati: AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, 2018.
- [34] TRAWICK D, PERULLO C, ARMSTRONG M, et al. Development and application of GT-HEAT to design of the electrically variable engine(EVE)[C]. Grapevine: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [35] TRAWICK D R. A methodology for the determination of optimal operational schedules of hybrid electric architectures[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2018.
- [36] PERULLO C, TRAWICK D, ARMSTRONG M, et al. Cycle selection and sizing of a single-aisle transport with the electrically variable engine(TM)(EVE) for fleet level fuel optimization[C]. Grapevine: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [37] SMITH H, SZIROCZÁK D, ABBE GE, et al. The GENUS aircraft conceptual design environment[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2018, 233(8): 2932–2947.
- [38] SUN Y, SMITH H. Low-boom low-drag optimization in a multidisciplinary design analysis optimization environment[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 94: 105387.
- [39] SEPULVEDA E, SMITH H, SZIROCZAK D. Multidisciplinary analysis of subsonic stealth unmanned combat aerial vehicles[J]. *CEAS Aeronautical Journal*, 2019, 10(2): 431–442.
- [40] KANG L, SUN Y, SMITH H. MDAO method and optimum designs of hybrid-electric civil airliners[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 35(4): 04022032.
- [41] KANG L, SUN Y, SMITH H, et al. The effects of the degree of hybridisation on the design of hybrid-electric aircraft considering the balance between energy efficiency and mass penalty[J]. *Aerospace*, 2023, 10(2).
- [42] CAPRISTAN F M, WELSTEAD J. LEAPS: an initial assessment towards a multi-order approach to air vehicle mission analysis[C]. Denver: 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2017.
- [43] WELSTEAD J R, CALDWELL D, CONDOTTA R, et al. An overview of the layered and extensible aircraft performance system (LEAPS) development[C]. Kissimmee: 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.
- [44] CAPRISTAN F M, WELSTEAD J R. An energy-based low-order approach for mission analysis of air vehicles in leaps[C]. Kissimmee: 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.
- [45] LUKACZYK T, WENDORFF A D, BOTERO E, et al. SUAVE: an open-source environment for multi-fidelity conceptual vehicle design[C]. Dallas: 16th AIAA/ISS-

- MO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2015.
- [46] BOTERO E M, WENDORFF A, MACDONALD T, et al. SUAVE: an open-source environment for conceptual vehicle design and optimization [C]. San Diego: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2016.
- [47] MACDONALD T, BOTERO E, VEGH J M, et al. SUAVE: an open-source environment enabling unconventional vehicle designs through higher fidelity [C]. Grapevine: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [48] WENDORFF A, BOTERO E, ALONSO J. Comparing different off-the-shelf optimizers' performance in conceptual aircraft design[R]. AIAA 2016-3362.
- [49] BOTERO E, CLARKE M, ERHARD R, et al. Aerodynamic verification and validation of SUAVE[C]. San Diego: AIAA SciTech Forum, 2022.
- [50] BOTERO E, ALONSO J J. Conceptual design and optimization of small transitioning UAVs using SUAVE[C]. Denver: 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2017.
- [51] CLARKE M A, SMART J, BOTERO E, et al. Strategies for posing a well-defined problem for urban air mobility vehicles [C]. San Diego: AIAA SciTech 2019 Forum, 2019.
- [52] VEGH J M, BOTERO E, CLARKE M, et al. Current capabilities and challenges of NDARC and SUAVE for eVTOL aircraft design and analysis [C]. Indianapolis: AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum, 2019.
- [53] CLARKE M A, ERHARD R M, ALONSO J J. Aerodynamic optimization of wing-mounted propeller configurations for distributed electric propulsion architectures[C]. Virtual Event: AIAA Aviation 2021 Forum, 2021.
- [54] ERHARD R M, CLARKE M A, ALONSO J J. A low-cost aero-propulsive analysis of distributed electric propulsion aircraft[C]. Virtual Event: AIAA SciTech Forum, 2021.
- [55] MACDONALD T, CLARKE M, BOTERO E M, et al. SUAVE: an open-source environment enabling multi-fidelity vehicle optimization[C]. Denver: 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2017.
- [56] WENDORFF A D, BOTERO E, ALONSO J J. Comparing different off-the-shelf optimizers' performance in conceptual aircraft design[C]. Washington: 17th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2016.
- [57] CLARKE M A, ALONSO J J. Forecasting the operational lifetime of electric aircraft through battery degradation modeling[C]. San Diego: AIAA SciTech Forum, 2022.
- [58] CLARKE M A, ALONSO J J. Evaluating the performance and acoustic footprint of aircraft for regional and urban air mobility[C]. Virtual Event: AIAA Aviation Forum, 2021.
- [59] CLARKE M A, ALONSO J J. Lithium-ion battery modeling for aerospace applications [J]. Journal of Aircraft, 2021, 58(6): 1323-1335.
- [60] FREEMAN J, SINGH R, OSTERKAMP P, et al. Challenges and opportunities for electric aircraft thermal management [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(6): 519-524.
- [61] TORREZ C, GUSTETIC J L, FELDER J L, et al. Hybrid-electric aircraft TOGW development tool with empirically-based airframe and physics-based hybrid propulsion system component analysis[R]. AIAA 2005-3541.
- [62] GREEN M W. HAPSS, hybrid aircraft propulsion system synthesis [D]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2012.
- [63] SCHILTGEN B T, FREEMAN J. Aeropropulsive interaction and thermal system integration within the ECO-150: a turboelectric distributed propulsion airliner with conventional electric machines [C]. Washington: 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2016.
- [64] GREEN M W, DANIS R A, FREEMAN J L. Examining the conceptual design process for future hybrid-electric rotorcraft[R]. NASA/CR-2018-219897.
- [65] DANIS R, FREEMAN J L, SCHILTGEN B. Applications for hybrid electric power and energy supplementation on a single-aisle airliner [C]. Cincinnati: 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium, 2018.
- [66] GREEN M W, SCHILTGEN B, GIBSON A. Analysis of a distributed hybrid propulsion system with conventional electric machines[C]. Atlanta: 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2012.
- [67] PORNET C, SINGH R, KAISER S, et al. Integrated fuel-battery hybrid for a narrow-body sized transport aircraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(6): 568-574.
- [68] PORNET C, SINGH R, KAISER S, et al. Cost-based flight technique optimization for hybrid energy aircraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(6): 591-598.
- [69] ISIKVEREN A T, SINGH R, KAISER S, et al. Pre-design strategies and sizing techniques for dual-energy aircraft [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology

- gy, 2014, 86(6): 525–542.
- [70] PORNET C. Conceptual design methods for sizing and performance of hybrid-electric transport aircraft [D]. Freistaat Bayern: Technische Universität München, 2017.
- [71] PORNET C, GOLOGAN C, VRATNY P C, et al. Methodology for sizing and performance assessment of hybrid energy aircraft[C]. Atlanta: 2013 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2013.
- [72] PORNET C, ISIKVEREN A T. Conceptual design of hybrid-electric transport aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 79: 114–135.
- [73] ISIKVEREN A T, PORNET C, VRATNY P C, et al. Optimization of commercial aircraft using battery-based Voltaic-Joule/Brayton propulsion [J]. Journal of Aircraft, 2017, 54(1): 246–261.
- [74] ISIKVEREN A T, FEFERMANN Y, MAURY C, et al. Pre-design of a commuter transport utilising Voltaic-Joule/Brayton motive power systems[J]. The Aeronautical Journal, 2018, 122(1248): 205–237.
- [75] CINAR G, MAVRIS D N, EMENETH M, et al. Sizing, integration and performance evaluation of hybrid electric propulsion subsystem architectures[C]. Grapevine: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2017.
- [76] ISIKVEREN A T. Method of quadrant-based algorithmic nomographs for hybrid/electric aircraft pre-design [J]. Journal of Aircraft, 2018, 55(1): 396–405.
- [77] ISIKVEREN A T. Fundamentals, pre-design methods and various studies of hybrid /electric aeronautical vehicles [D]. Habilitation à Diriger les Recherches thesis, Institut Supérieur de l’Aéronautique et de l’Espace(SU-PAERO-ISAÉ), 2019.
- [78] SIBILLI T, SENNE C, JOUAN H, et al. Synergistic hybrid-electric liquid natural gas drone: S. H. I. E. L. D [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2020, 92(5): 757–768.
- [79] HEIDEBRECHT K B A, HOOGREEF M, VOS R, et al. Development of a hydrogen-powered fuselage-mounted BLI propulsor add-on for passenger aircraft [C]. Stockholm: 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2022.
- [80] HOOGREEF M, VOS R, DE VRIES R. Conceptual assessment of hybrid electric aircraft with distributed propulsion and boosted turbofans [C]. San Diego: AIAA SciTech 2019 Forum, 2019.
- [81] GNADT A R, SPETH R L, SABNIS J S, et al. Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2019, 105: 1–30.
- [82] DRELA M. TASOPT 2.00 transport aircraft system optimization technical description [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [83] PANTALONE G, BLANCO E R, WILLCOX K. TASOPT engine model development a partner project 48 report[R]. PARTNER-COE-2016-004.
- [84] ROSSETTI M, CENTRACCHIO F, IEMMA U. Approach to the weight estimation in the conceptual design of hybrid-electric-powered unconventional regional aircraft [J]. Journal of Advanced Transportation, 2018, 2018(6).
- [85] LIU Y, ELHAM A, HORST P, et al. Exploring vehicle level benefits of revolutionary technology progress via aircraft design and optimization [J]. Energies, 2018, 11(1): 166.
- [86] SCHMOLLGRUBER P, BARTOLI N, BEDOUE T J, et al. Use of a certification constraints module for aircraft design activities[C]. Denver: 17th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2017.
- [87] HWANG J T, MARTINS J R R A. A computational architecture for coupling heterogeneous numerical models and computing coupled derivatives [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2018, 44(4): 1–39.
- [88] GRAY J, MOORE K, NAYLOR B. OpenMDAO: an open source framework for multidisciplinary analysis and optimization [C]. Fort Worth: 13th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis Optimization Conference, 2010.
- [89] GRAY J S, HWANG J T, MARTINS J R R A, et al. OpenMDAO: an open-source framework for multidisciplinary design, analysis, and optimization[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2019, 59: 1075–1104.
- [90] SGUEGLIA A, SCHMOLLGRUBER P, BARTOLI N, et al. Exploration and sizing of a large passenger aircraft with distributed ducted electric fans [C]. Kissimmee: 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.
- [91] SGUEGLIA A, SCHMOLLGRUBER P, BARTOLI N. Multidisciplinary design optimization framework with coupled derivative computation for hybrid aircraft [J]. Journal of Aircraft, 2020, 57(4): 715–729.
- [92] SCHMOLLGRUBER P, ATINAULT O, CAFARELLI I, et al. Multidisciplinary exploration of DRAGON: an ONERA hybrid electric distributed propulsion concept [C]. San Diego: AIAA SciTech 2019 Forum, 2019.
- [93] RIBOLDI C E D. An optimal approach to the preliminary design of small hybrid-electric aircraft [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 81: 14–31.
- [94] BOGGERO L, FIORITI M, CORPINO S. Development of a new conceptual design methodology for parallel hybrid aircraft [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineer-

- ing, 2019, 233(3): 1047-1058.
- [95] KREIMEIER M, STUMPF E. Benefit evaluation of hybrid electric propulsion concepts for CS-23 aircraft[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2017, 8: 691-704.
- [96] 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.
- [97] 康桂文, 孙振祥. 油电混合动力飞机起飞爬升性能模拟[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(3): 67-70.
- [98] 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): 53-61.
- [99] 雷 涛, 孔德林, 王润龙, 等. 分布式电推进飞机动力系统评估优化方法[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 44-63.
- [100] 王 哲, 郭迎清. 混合动力系统建模及能量管理策略应用[J]. 航空发动机, 2019, 45(5): 7-11.
- [101] 刘 莉, 曹 潇, 张晓辉, 等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 623474.
- [102] 刘 莉, 杜孟尧, 张晓辉, 等. 太阳能/氢能无人机总体设计与能源管理策略研究[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 144-162.
- [103] 张晓辉, 刘 莉, 戴月领. 燃料电池无人机能源管理与飞行状态耦合[J]. 航空学报, 2019, 40(7): 92-108.
- [104] 张晓辉, 刘 莉, 戴月领, 等. 燃料电池无人机动力系统方案设计与试验[J]. 航空学报, 2018, 39(8): 162-171.
- [105] WANG Z X, MAO J K, HE Z Z, et al. Fuzzy control based on IQPSO in proton-exchange membrane fuel-cell temperature system[J]. Journal of Energy Engineering, 2020, 146(5): 04020044.
- [106] SHU L, SUNARSO J, HASHIM S S, et al. Advanced perovskite anodes for solid oxide fuel cells: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(59): 31275-31304.
- [107] 徐乐根, 毛军逵, 梁凤丽, 等. 直接氨 SOFC-GT 混合动力系统性能及航空应用[J]. 航空动力学报, 2023, 38: 1-15.
- [108] 胡焦英, 毛军逵, 贺振宗. 基于航空煤油重整的 SOFC-GT 混合动力系统性能[J]. 航空动力学报, 2020, 35(2): 325-336.
- [109] KANG L, SUN Y, SMITH H, et al. The effects of the degree of hybridisation on the design of hybrid-electric aircraft considering the balance between energy efficiency and mass penalty[J]. Aerospace, 2023, 10(2): 111.
- [110] 毛建国, 马 粮, 陈明浩. 小型航空活塞发动机混合动力系统仿真与控制策略研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(3): 68-78.
- [111] 陈佳杰, 刘云霄, 王继强, 等. 并联混合动力齿轮传动涡扇发动机建模与性能分析[J]. 推进技术, 2022, 43(10): 496-507. (CHEN J J, LIU Y X, WANG J Q, et al. Modeling and performance analysis of parallel hybrid geared turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(10): 496-507.)
- [112] 刘一雄, 莫 姐. 一种混合动力航空发动机及其优化设计方法[P]. 中国专利: CN202210406872. 2.
- [113] 刘 杰. 从北航起飞![N]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_17418620, 2022-04-01.
- [114] 屠泽灿. 陶瓷基复合材料导热机理及其在气冷涡轮叶片热分析中的应用研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [115] 梁婷侯, 朴 诚. 打造“三个高地”走在前列 | 我国首款油电混合动力通用飞机成功首飞[N]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1727258152889236117&wfr=spider&for=pc>, 2022-03-14.
- [116] GRAY J S, MADER C A, KENWAY G K W, et al. Modeling boundary layer ingestion using a coupled aeropropulsive analysis[J]. Journal of Aircraft, 2018, 55(3): 1191-1199.
- [117] FALCK R D, CHIN J, SCHNULO S L, et al. Trajectory optimization of electric aircraft subject to subsystem thermal constraints[C]. Denver: 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2017.
- [118] KIM J, OH J, LEE H. Review on battery thermal management system for electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 149: 192-212.
- [119] WU W X, WANG S F, WU W, et al. A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 182: 262-281.
- [120] YANG S, LING G, FAN Y, et al. A review of lithium-ion battery thermal management system strategies and the evaluate criteria[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2019, 14(7): 6077-6107.
- [121] WANG Z C, DU C Q. A comprehensive review on thermal management systems for power lithium-ion batteries[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139: 110685.
- [122] JR W A, TAVARES R T, BARBOSA F R, et al. System architectures for thermal management of hybrid-electric aircraft-FutPrInt50[C]. Salerno: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2022.
- [123] CHAI X, YU X Q, WANG Y. Tradeoff study between cost and environmental impact of aircraft using simultaneous optimization of airframe and engine cycle[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2017(1): 1-10.

- [124] GKOUTZAMANIS V G, TSENTIS S E, MYLONAS O S, et al. Thermal management system considerations for a hybrid-electric commuter aircraft[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2022, 36(3): 650-666.
- [125] MCCLUSKEY P, SAADON Y, YAO Z, et al. Thermal management challenges in turbo-electric and hybrid electric propulsion[C]. Cincinnati: 2018 International Energy Conversion Engineering Conference, 2018.
- [126] ADLER E J, BRELJE B J, MARTINS J R R A. Thermal management system optimization for a parallel hybrid aircraft considering mission fuel burn [J]. *Aerospace*, 2022, 9(5): 243.
- [127] ZHANG W C, LIANG Z C, WU W X, et al. Design and optimization of a hybrid battery thermal management system for electric vehicle based on surrogate model[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 174: 121318.
- [128] PATEL J R, RATHOD M K. Recent developments in the passive and hybrid thermal management techniques of lithium-ion batteries [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 480: 228820.
- [129] YUE Q L, HE C X, JIANG H R, et al. A hybrid battery thermal management system for electric vehicles under dynamic working conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 164: 120528.
- [130] LYU Y, SIDDIQUE A R M, MAJID S H, et al. Electric vehicle battery thermal management system with thermoelectric cooling [J]. *Energy Reports*, 2019 (5): 822-827.
- [131] FERNÁNDEZ-YÁÑEZ P, ROMERO V, ARMAS O, et al. Thermal management of thermoelectric generators for waste energy recovery [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 196: 117291.
- [132] RIBOLDI C E D, TRAINELLI L, MARIANI L, et al. Predicting the effect of electric and hybrid-electric aviation on acoustic pollution[J]. *Noise Mapping*, 2020, 7 (1): 35-56.
- [133] XIE Y, SAVVARISAL A, TSOURDOS A, et al. Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020, 34(4): 432-450.
- [134] XIE Y, SAVVARIS A, TSOURDOS A. Fuzzy logic based equivalent consumption optimization of a hybrid electric propulsion system for unmanned aerial vehicles [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 85: 13-23.
- [135] CHENG Y, D'ARPINO M, RIZZONI G. Fault diagnosis in lithium-ion battery of hybrid electric aircraft based on structural analysis[C]. Anaheim: 2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC), 2022.
- [136] 曹明, 黄金泉, 周健, 等. 民用航空发动机故障诊断与健康管理现状、挑战与机遇 I: 气路、机械和 FADEC 系统故障诊断与预测[J]. *航空学报*, 2022, 43 (9): 9-41.
- [137] BENDARKAR M V, SAROJINI D, MAVRIS D N. Off-nominal performance and reliability of novel aircraft concepts during early design[J]. *Journal of Aircraft*, 2022, 59(2): 400-414.
- [138] SAHOO S, ZHAO X, KYPRIANIDIS K. A review of concepts, benefits, and challenges for future electrical propulsion-based aircraft[J]. *Aerospace*, 2020, 7(4): 44.
- [139] 张钰凡, 马睿, 张羽翔, 等. 航空燃料电池推进系统能量管理策略研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(13): 5012-5025.
- [140] PERULLO C, Mavris D. A review of hybrid-electric energy management and its inclusion in vehicle sizing[J]. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2014, 86(6): 550-557.
- [141] LYU X Q, WU Y B, LIAN J, et al. Energy management of hybrid electric vehicles: a review of energy optimization of fuel cell hybrid power system based on genetic algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 205: 112474.
- [142] 崔建国, 李国庆, 蒋丽英, 等. 基于深度自编码网络的航空发动机故障诊断[J]. *振动、测试与诊断*, 2021, 41(1): 85-89.
- [143] 孙瑞谦, 蔡林峰, 韩小宝, 等. 考虑性能退化的航空发动机故障诊断量化评估[J]. *推进技术*, 2022, 43 (8): 210247. (SUN R Q, GOU L F, HAN X B, et al. Quantitative evaluation of fault diagnosability for degraded aero-engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(8): 210247.)
- [144] 郭亚中, 左洪福, 王华伟. 基于粗糙集的民航飞机故障诊断规则获取方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 11: 139-144.
- [145] 王仲生, 何红. 基于小波分形的飞行器结构系统早期故障识别[J]. *机械强度*, 2008(6): 893-896.
- [146] 韩淞宇, 邵海东, 姜洪开, 等. 基于提升卷积神经网络的航空发动机高速轴承智能故障诊断[J]. *航空学报*, 2022, 43(9): 158-171.
- [147] HASHEMI S R, ESMAEELI R, NAZARI A, et al. A fast diagnosis methodology for typical faults of a lithium-ion battery in electric and hybrid electric aircraft [J]. *Journal of Electrochemical Energy Conversion and Storage*, 2019, 17(1): 1-20.
- [148] HASHEMI S R, NAZARI A, ESMAEELI R, et al. Fast fault diagnosis of a lithium-ion battery for hybrid electric aircraft[C]. Bunavista: ASME Power Conference, 2018.

- [149] HASHEMI S R, BAGHBADORANI A B, ESMAEELI R, et al. Machine learning-based model for lithium-ion batteries in BMS of electric/hybrid electric aircraft [J]. *International Journal of Energy Research*, 2021, 45(4): 5747–5765.
- [150] 林 鹏, 左林玄, 王 霄, 等. 未来作战飞机飞发一体化技术的思考[J]. *航空动力*, 2018(2): 52–57.
- [151] 尹泽勇, 丁水汀, 李 果, 等. 航空发动机下一代适航规章制定策略和技术路径[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(4): 230–239.
- [152] 郑秀艳, 史校川, 鄢辉萍, 等. 浅析军用航空器适航管理[J]. *航空标准化与质量*, 2020(5): 44–47.
- [153] 李俊松. 基于神经网络的混合动力汽车故障诊断研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [154] 柴春红, 刘家学, 何率天. 模糊数学在飞机故障诊断中的应用[J]. *模糊系统与数学*, 2003(3): 107–110.
- [155] 王仲生, 刘贞报, 隆 莹. D-S多Agent飞行器结构系统早期故障智能诊断[J]. *西北工业大学学报*, 2006, 24(5): 600–603.
- [156] 鲍梦瑶, 李 果, 丁水汀. 基于模型的航空发动机系统安全性研究[J]. *航空动力学报*, 2016, 31(8): 2029–2039.
- [157] 陈农田, 宁威峰, 陈俊熹, 等. 新能源飞机适航安全性问题研究综述[J]. *中国民航飞行学院学报*, 2022, 33(5): 5–9.

(编辑:白 鹭)

Hybrid propulsion systems and aircraft digital design status and prospects

KANG Le^{1,2}, RAN Qianxi¹, MAO Junkui^{1,2,3}, YU Zhizhen¹, HAN Feng^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Integrated Energy Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

3. Jiangsu Province Key Laboratory of Aeronautical Power System, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper summarizes the digital design tools developed specifically for hybrid propulsion systems and aircraft development at home and abroad, and analysis their method and features that experienced a long-time accumulation. In summary, to meet the design requirements of hybrid-electric aircraft, integrating high-fidelity electric system and thermal management system modules, establishing an overall performance evaluation system, coupling and exchanging design between aircraft and propulsion system, constructing the modeling method which unifies the design and safety assessment, and improving optimisation design capabilities based on artificial intelligence methods are key development needs. Additionally, it provides reliable data to support subsequent experiments, airworthiness regulations and engineering applications.

Key words: Hybrid-electric propulsion design; Hybrid-electric aircraft design; Multidisciplinary design analysis and optimization method; Hybrid-electric evaluation system; Review

Received: 2022-11-30; Revised: 2023-10-06.

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2212002

Foundation item: Defense Industrial Technology Development Program (CKY2018605B006).

Corresponding author: MAO Junkui, E-mail: mjke@nuaa.edu.cn