

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.05.021

多电飞机电力系统及其关键技术

张卓然, 许彦武, 姚一鸣, 于立, 严仰光

(南京航空航天大学多电飞机电气系统工业和信息化部重点实验室, 南京 211106)

摘要: 多电飞机将机载二次能源逐步统一为电能, 有效提高了飞机的燃油经济性、可靠性和维护性, 已成为航空科技发展的重要方向。作为机载二次能源系统的核心, 电力系统在多电飞机发展过程中起到了关键支撑作用。电力系统及其关键技术的创新发展是实现飞机综合性能提升和全局优化的必要基础。本文从多电飞机的基本概念与特点出发, 分析对比了典型多电飞机的电力系统架构, 在此基础上系统地总结了支撑多电飞机电力系统发展的关键技术, 讨论了未来多电飞机电力系统高压、直流和智能化的发展趋势。

关键词: 多电飞机; 电力系统; 绿色航空; 高压直流电源; 智能化

中图分类号: V11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)05-0969-16

Electric Power System and Key Technologies of More Electric Aircraft

ZHANG Zhuoran, XU Yanwu, YAO Yiming, YU Li, YAN Yangguang

(Center for More-Electric-Aircraft Power System, Ministry of Industry and Information Technology,
Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The secondary energy on board has been gradually replaced by electrical power in more electric aircraft, effectively improving the fuel economy, reliability and maintainability of the aircraft, and has become an important direction of the aviation technology. As the core of the secondary energy system on board, the power system plays a key supporting role in the development of more electric aircraft. The innovative development of the power system and related technologies are the necessary basis to realize the improvement and global optimization of the aircraft comprehensive performance. Based on the concepts and characteristics of more electric aircraft, this paper analyzes and compares the electric power system architecture of three typical more electric aircraft, summarizes the key technologies supporting the development of more electric aircraft electric power system, and discusses the development trend of high voltage, direct current and intelligent more electric aircraft electric power system in the future.

Key words: more electric aircraft; electric power system; green aviation; high voltage DC power system; intelligent power system

多电飞机使用电能逐步代替传统飞机上的液 能源系统的结构, 大幅度提高了飞机机载系统的可
压能、气压能和机械能等二次能源^[1], 简化了飞机 靠性和维护性^[2], 同时也优化了飞机的能量利用效

基金项目: 国家自然科学基金“叶企孙”联合基金重点项目(U2141223)。

收稿日期: 2022-08-15; **修订日期:** 2022-10-09

作者简介: 张卓然, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为航空电气化与多电/全电飞机电力系统。主持国家自然科学基金“叶企孙”联合基金重点项目、国家优秀青年科学基金、江苏省杰出青年基金等多项重点基金项目, 发表国内外期刊论文 130 余篇, 授权国家发明专利 50 余件, 获江苏省科学技术一等奖、国家技术发明二等奖和中国航空学会青年科技奖等奖项。

通信作者: 张卓然, E-mail: apsc-zzr@nuaa.edu.cn。

引用格式: 张卓然, 许彦武, 姚一鸣, 等. 多电飞机电力系统及其关键技术[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 969-984. ZHANG Zhuoran, XU Yanwu, YAO Yiming, et al. Electric power system and key technologies of more electric aircraft[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 969-984.

率,降低了燃油消耗和污染物的排放,多电化已成为提升飞机技术性能和战术性能、支撑绿色航空发展的重要途径^[3-5]。

与传统飞机相比,多电飞机大量使用电力驱动/作动系统,电机和电力电子变换器得到广泛应用,各飞行阶段任务的完成都离不开电力的支撑。因此,多电飞机对机载电力系统的容量、功率密度、可靠性以及容错性都提出了更高的要求。自20世纪70年代多电飞机的概念提出之后,欧美国家陆续制定众多计划持续支持多电飞机相关技术的研究。20世纪80年代,美国率先开展了“多电飞机”(More electric aircraft, MEA)计划^[6],随后为开发适用于多电飞机的先进电力系统又实施了“多电飞机电源管理和配电系统”(Power management and distribution system for a more electric aircraft, MADMEL)计划^[7]以及“联合攻击机综合子系统演示验证计划(Joint strike fighter integrated subsystems technology, J/IST)”。欧洲实施的“更开放的电气技术”(More open electrical technologies, MOET)计划以及“洁净天空”(Clean Sky)项目也在一定程度上促进了多电飞机电力系统的发展^[8-9]。电工科技的迅速发展使得固态配电、电力作动和起动发电等关键技术得到了突破,再加上变频交流和高压直流两种先进电源体制的发展使得多电飞机成为了可能。21世纪初,空客A380、波音B787以及F-35三种多电飞机陆续升空,开启了多电飞机的新时代。国内对于多电飞机的研究与实践处于起步阶段,在大型客机以及新一代军机上进行了多电技术的初步应用。

多电飞机概念的提出已近半个世纪,3种主要型号的多电飞机在不同的技术路线上进行了探索和实践,但仍处于多电化发展的初级阶段。未来多电飞机逐渐将电力系统与推进系统、液压系统以及环控系统飞行关键系统进行融合,多电飞机电力系统必然更加集成化;同时,数字化和信息技术的发展将促使多电飞机电力系统更加智能化和自主化;此外,高压化、直流化以及综合热管理和能量优化也将是未来多电飞机电力系统的重要特征。

本文以飞机多电化为背景,阐述了多电飞机的基本概念和特点,分析对比了目前多电飞机电力系统的典型架构,梳理了支撑多电飞机电力系统发展的关键技术与研究现状,讨论了未来多电飞机电力系统的发展趋势。

1 多电飞机基本概念与特点

理论上,液压和气压驱动/作动都可以由电力实现。多电飞机采用电能逐步取代现有飞机上

的液压能、气压能和机械能。起动发电一体化、电力作动、电环控等以及支撑多电飞机电力系统运行的先进供电系统架构、固态功率配电、动力和热管理技术等都是多电技术的重要组成部分。图1和图2分别给出了传统飞机和多电飞机的二次能源架构。

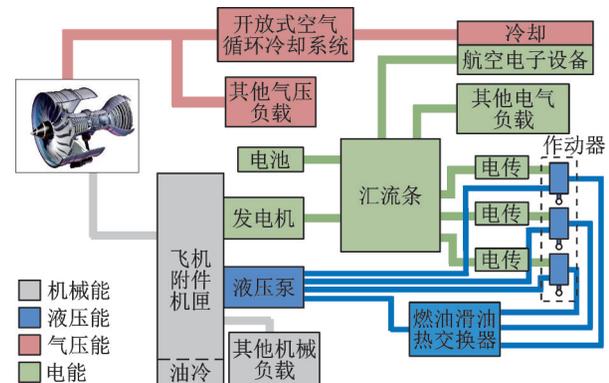


图1 传统飞机二次能源架构^[10]

Fig.1 Typical aircraft power system^[10]

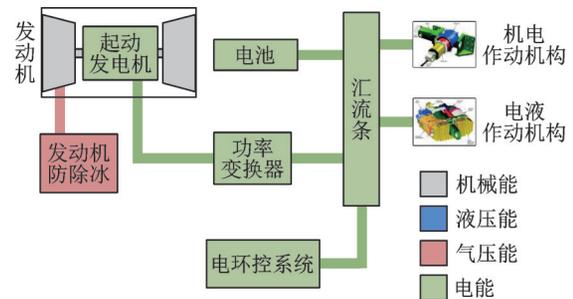


图2 多电飞机二次能源架构^[10]

Fig.2 More electric aircraft power system^[10]

航空电力系统由电源系统、配电系统和用电设备组成,是机上电能从产生、输送、分配到使用的总体。电力系统对于多电飞机总体及全局优化设计至关重要,主要表现在:

(1)简化了飞机发动机结构、改善了发动机性能。多电飞机可以通过采用内装式起动发电机以及电动液压泵、燃油泵和滑油泵,极大简化甚至取消发动机附件机匣。通过使用电环控以及电热防除冰技术使得发动机不再提取压气机压缩后的高压空气。多电技术简化了动力系统的结构,有效提升了发动机的效率和性能。

(2)简化了飞机内部结构。多电飞机可以通过取消发动机引气并且采用电力作动技术代替传统飞机的液压作动机构,简化了飞机二次能源系统的管网架构,降低了系统重量,同时避免了气压管路和液压管路的泄漏,提升了系统可靠性和可维护性。

(3)提升了飞机能源利用效率。一方面,电能传输和变换过程中的损耗较小;另一方面,可以

根据负载用电需求灵活控制发电量,减少了二次能源系统所需的燃油消耗。

(4)提高效费比、简化后勤支援。多电飞机的保养维护简单、可靠性高、使用维护费用低、地面支援设备少,供气、供液和空调车等可以取消,只保留加油设备和电源车,因此显著降低了地面保障和保养维护的难度,增加了飞机出勤率。

多电飞机表面上看是改变了飞机二次能源的布局,实质上多电飞机实现了飞机和发动机的全局优化,改善了飞机的总体技术/战术性能以及经济性,对于飞机的发展有着深远的影响。同时,从二次能

源角度,多电技术的发展方向是全电化,也就是将飞机上除发动机动力以外的各种能源统一为电能。

A380、B787 和 F-35 三款多电飞机在不同程度上实现了部分二次能源向电能的统一,因此可以称为第一代多电飞机。A380 的多电技术主要表现在使用电液作动器(Electric-hydraulic actuator, EHA)和电备份液压作动器(Electrical backup hydraulic actuator, EBHA)取代部分液压作动器,优化了飞机飞控作动系统的体积重量,初步实现了功率电传操纵飞行(Power-by-wire, PBW)^[11-13],其舵面作动器的分布如图 3 所示^[1]。

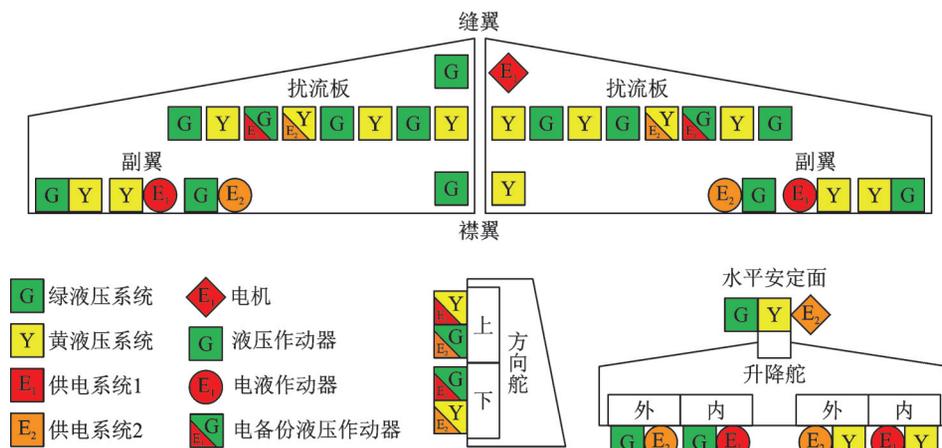


图 3 A380 舵面作动器分布^[1]

Fig.3 Actuator distribution of A380 rudder surface^[1]

B787 则采用了电能代替气压能的多电化路线,通过利用起动发电一体化、电热防除冰、电环控等多电技术,取消了发动机的引气并且简化了发动机的附件机匣,减少了发动机大约 35% 的引出功率,巡航状态下的燃料消耗可以节省 1%~2%^[14]。B787 飞机中电力作动技术的应用较少,仅在部分扰流板的控制中采用了电力作动技术。

相较于 A380 和 B787, F-35 在二次能源结构上更接近于全电飞机。首先, F-35 采用了起动发电一体化技术,早期设计甚至曾尝试将起动发电机内装于发动机。同时, F-35 的作动装置几乎全部采用了电作动或电液作动,如图 4 所示。

此外, F-35 还采用了全新的动力和热管理系

统(Power and thermal management system, PT-MS),采用同一套涡轮机组实现了辅助电源、应急电源、环控系统冷却和热管理功能的集成^[15-16]。

多电技术的应用使多电飞机对电力系统的依赖性大幅度提高,也对机载电力系统提出了更高的要求,与地面电力系统相比亦有显著区别,主要体现在以下 4 个方面:

(1)运行环境不同。飞机电力系统的运行需要适应飞机高速或超机动飞行时的高温、高压以及强振动等恶劣环境。同时,机载用电设备的增多使得飞机有限空间内的电磁环境越来越复杂,因此需要充分重视各种电力电子设备之间的电磁干扰问题。

(2)与地面电力系统相比,机载电力系统对可靠性和安全性的要求更高。飞机中的飞控系统等相关用电设备的失电会导致飞机发生灾难性事故,因此飞机电力系统中一般由多台主电源构成余度供电,同时还配有辅助电源以及应急电源作为备份。除此之外,电力系统中的配电部分也具有较高的冗余容错能力,从而保证关键汇流条和用电负载的不中断供电。

(3)机载系统的体积重量直接决定了飞机的燃油消耗,因此对飞机电力系统部件的功率密度和效

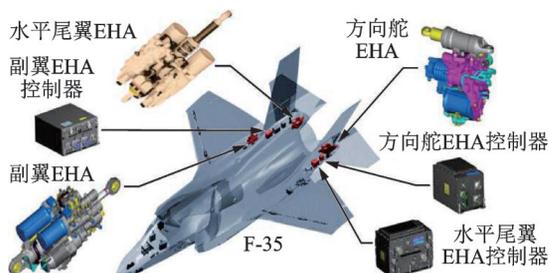


图 4 F-35 战斗机的电作动器布局^[15]

Fig.4 Electric actuator layout of the F-35 fighter^[15]

率有很高的要求,而高可靠性和高安全性的要求与降低机载系统体积重量两者之间存在矛盾和相互制约关系。

(4)飞机电力系统的容量与地面电力系统相比较小,可以看作是孤岛运行的微网结构。但与地面微网相比,多电飞机的电力系统大量使用电力电子设备以及电力作动器等非线性负载,其起动冲击电流、恒功率特性和能量回馈等问题对电力系统的供电质量和系统稳定性带来了诸多挑战。

2 多电飞机电力系统典型架构与分析

多电飞机对供电容量的需求大幅度提升,电力系统的性能对多电飞机整体性能的影响日益凸显。多电飞机电力系统的典型架构主要包括了变

频交流、高压直流以及混合供电架构。

飞机变频交流电力系统中的发电机取消了传统恒频交流系统中的恒速传动装置以及功率变换器,具有重量更轻、可靠性更高、损耗更低的优势。同时,恒速传动装置的取消也使得发电机的起动发电一体化更易实现。但是,变频交流系统仍然难以实现多台发电机的并联运行。A380采用的就是115 V、370~800 Hz的变频交流供电系统,系统架构如图5所示^[1],其主发电机采用了4台150 kVA的变频交流发电机,辅助电源采用了辅助动力装置(Auxiliary power unit, APU)驱动的2台120 kVA、400 Hz的恒频交流发电机,应急电源采用的是1台冲压空气涡轮(Ram air turbine, RAT)驱动的70 kVA的变频交流发电机,机载发电总容量高达910 kVA^[13]。

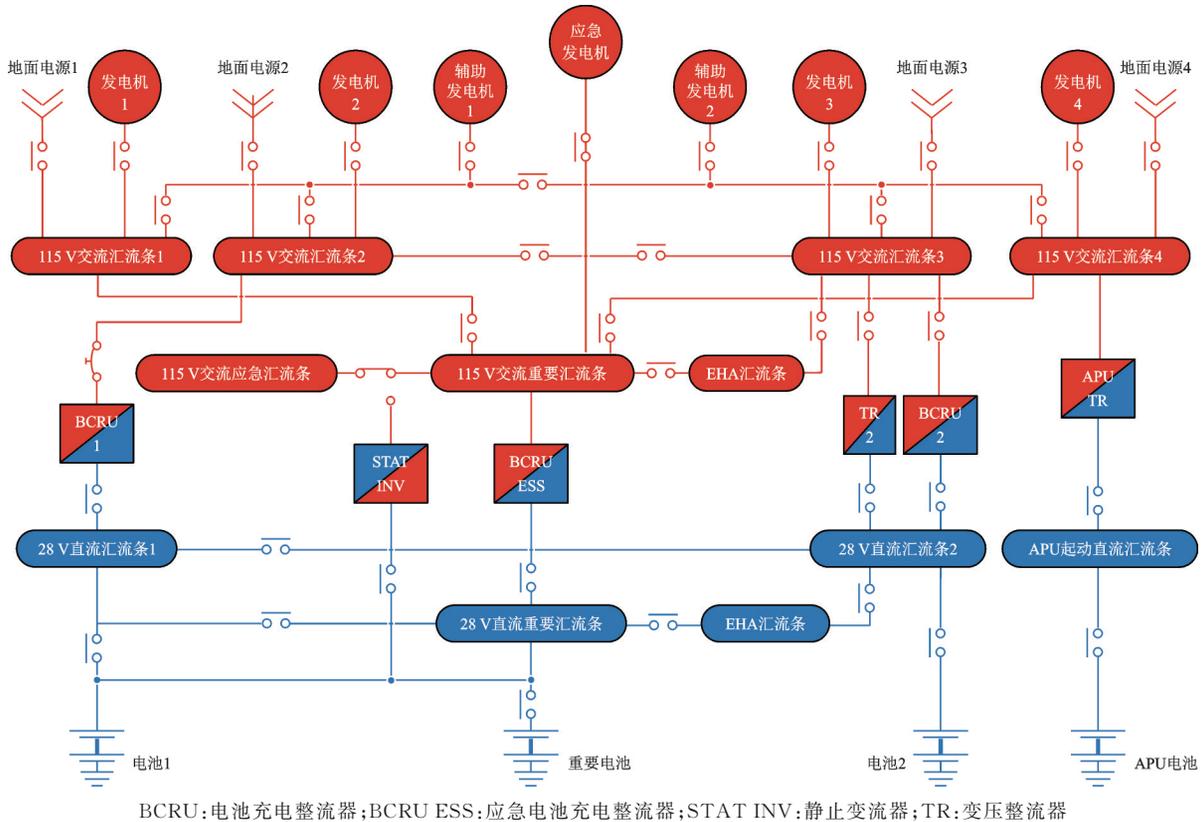


图5 A380采用的供电架构^[1]

Fig.5 Power supply architecture used by A380^[1]

多电飞机 B787 采用了 230 V、360~800 Hz 变频交流供电体制,机载总发电容量达到了 1 450 kVA。图 6 给出了 B787 的供电系统架构^[1],其主电源是两台发动机驱动的 4 台 250 kVA 变频交流起动发电机,辅助电源是 APU 驱动的 2 台 225 kVA 的变频交流发电机,应急电源采用的是 1 台 RAT 驱动的发电机。与 A380 不同的是, B787 主发电输出功率中有接近一半(445 kW)经过自耦变压整流器(Auto transformer rectifier unit,

ATRU)转换,通过 270 V 高压直流母线分配至机载高压直流负载。其中,40 kW 用于液压系统,40 kW 用于冷却系统,32 kW 用于环控系统的风扇,320 kW 用于环控系统的客舱增压^[17]。此外,系统中仍保留了 115 V、400 Hz 交流以及 28 V 直流汇流条,两者通过二次配电装置和远程配电装置为中小功率的恒频负载和直流负载供电。B787 这种交直流混合形式的供电系统架构优化了大功率电机负载的供电,提高了系统的功率密度,并且很好地

DC变换器和1台5.4 kVA的DC/AC逆变器^[15-16]。

此外,另两款机型的架构也值得关注。美国F-22战斗机采用了270 V高压直流供电系统,其主电源为2台65 kW高压直流发电机,发电机不并联工作,互为备份。二次电源采用了2台6 kVA的DC/AC逆变器和4台2.1 kW的270~28 V DC/DC变换器,辅助电源则为1台由APU驱动的22 kW高压直流发电机^[18]。C919飞机是中国首款按国际先进适航标准研制的单通道大型客机,采用了115 V、360~800 Hz变频交流架构。F-22和C919尚不属于多电飞机,但二者均采用了较为先进的电力系统架构,具备多电技术特征。

3 关键技术研究现状

多电飞机概念的提出打破了机载电力系统与其他系统独立发展的边界^[10],越来越多机载设备成为电力系统的用电负载,电力系统逐渐成为保障飞机可靠安全飞行的关键系统。

多电飞机电力系统的发展离不开多项关键技术的支撑,包括:电力系统架构及其建模和分析方法、大功率无刷发电与起动机发电一体化、高效高功率密度功率变换和固态配电技术等。

3.1 电力系统架构、建模和分析方法

系统架构是飞机电力系统安全可靠运行的基础,很大程度上决定了系统的运行效率和可靠性,同时也是实现系统控制、保护以及健康管理的前提。

如前所述,变频交流以及高压直流体制的发展使得多电飞机电力系统架构发生了很大变化,可靠性和电能利用率有效提升,其中,多电飞机B787的电力系统架构中还采用了更为先进的分布式配电和负载自动管理技术,系统架构更加轻量化和智能化。

近年来,随着电工技术的不断发展^[19],新型电力电子变换拓扑在机载电力系统的应用成为研究热点。诺丁汉大学的学者就提出了基于矩阵接触器以及集成模块化变换器等新型电力电子拓扑的机载电力系统架构^[5],如图8和9所示。在此基础上,结合优化配置方法以及智能管理策略可以使系统在不同飞行阶段重新规划负载供电路径来满足不同用电设备的需求,能够有效提高电力系统的鲁棒性以及电力电子设备的利用率。

高压直流供电系统相比于交流供电系统具有更高的功率密度和可靠性,同时还可以采用闭式电网结构从而形成不中断供电,图10给出了基于多发电机并联供电的单汇流条高压直流电力系统架构^[5],每台发电机都采用下垂控制来实现均流供

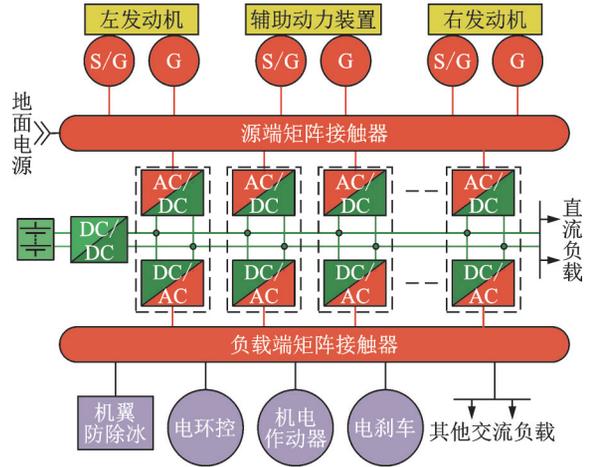


图8 基于矩阵接触器的电力系统架构^[5]

Fig.8 Power system architecture with matrix contactors

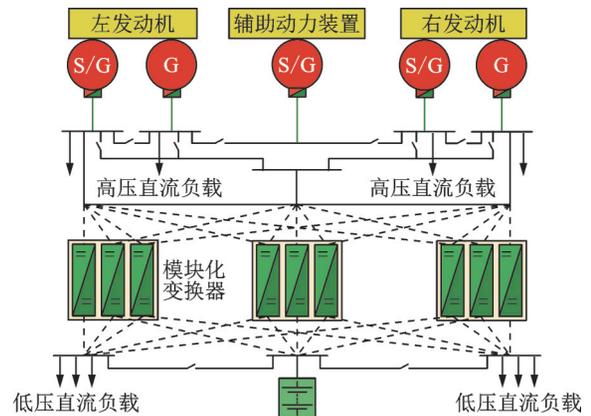


图9 基于模块化电力电子变换器的电力系统架构^[5]

Fig.9 Power system architecture with modular power electronic converters

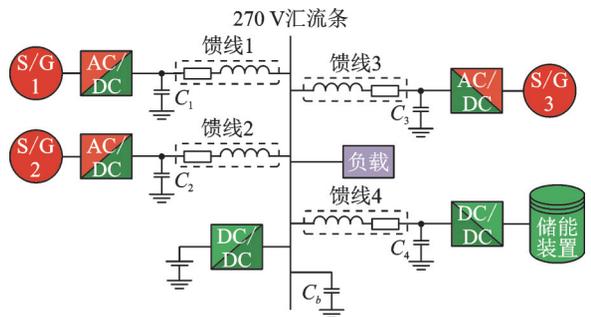


图10 单汇流条高压直流电力系统架构^[5]

Fig.10 Single-bus HVDC power system architecture

电。此外,直流系统还易于与燃料电池、动力电池和超级电容等储能装置连接,实现能量的双向流动,进而实现系统能量和功率的最优分配,从而进一步提升系统运行效率和电能质量。

随着多电飞机对电能的依赖性越来越强,对机载电力系统的正常、故障和失效等模态进行分析,以及对系统的电能质量、保护和可靠性等技术指标进行评估也更为重要。传统基于物理实验的分析方法滞后于飞机的设计过程,同时设计与验

证的迭代周期长、成本高,影响现代飞机设计进度^[20]。

对飞机电力系统进行建模,采用基于模型的系统工程(Model based systems engineering, MBSE)分析方法能够避免传统飞机电力系统工程设计的弊端,提高系统的设计效率^[21-22]。开展电力系统建模的主要挑战是需要平衡系统的仿真速度与系统中各个部件的模型准确性和保真度^[23]。为此,欧盟在其 MOET 项目中提出了建模层级的概念,并将机载电力系统中的部件按模型复杂度分为架构级、功能级、行为级以及电路级 4 个层级。根据不同研究目的对系统中的部件进行不同层级的建模,可以有效提高仿真效率^[9]。

多电机的发展使其电力系统综合了电气、机械、电子和控制等多个学科领域^[24],其运行特性还与电磁、损耗、热以及流体等物理场直接相关。传统电气模型已不能完全表征系统的运行特性,因此对电力系统进行多学科多物理场的建模是进行系统级分析和验证的关键技术和发展趋势^[25-27]。欧盟早在其 2002 年开始的功率优化飞机(Power optimized aircraft, POA)计划中,提出了铜鸟(Copper bird)试验台的概念^[28-29]。铜鸟试验台是用于在地面测试飞机电力系统的多学科综合试验平台,按照真实飞机一比一的比例还原机上电力系统的状态,图 11 为赛峰集团开发的铜鸟试验台,可用于测试和分析机载电力系统的电能质量、系统可靠性和稳定性。我国 C919 飞机的研制阶段也通过铜鸟试验台完成了电力系统的地面验证。



图 11 赛峰集团开发的铜鸟试验台^[30]

Fig.11 Copper bird test bench developed by Safran^[30]

现阶段,智能制造和工业 4.0 时代的到来使得数字孪生技术成为覆盖产品设计、生产、试验、维修和使用等全生命周期管理的新概念^[31-33],如图 12 所示,数字孪生技术可以将多电机电力系统的工作状态和数据实时映射至数字空间,实现系统的在线分析、验证和优化。

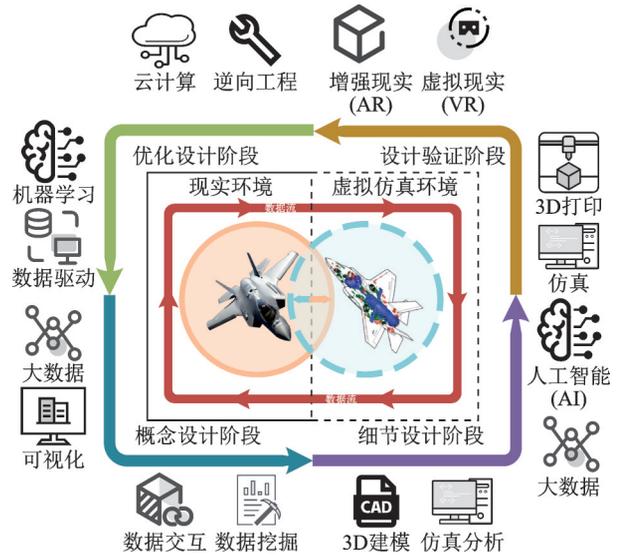


图 12 数字孪生概念图^[31]

Fig.12 Digital twin concept map^[31]

3.2 大功率无刷发电与起动发电一体化

多电机将机载非推进能源逐步统一为电能,要求飞机电力系统中的发电机能够提供大容量高品质电能^[10]。起动发电一体化技术将发动机电起动功能与发电功能融合在一台电机上实现,简化了发动机的附件机匣,提高了系统的功率密度,优化了飞机发动机轴功率的提取,从而减少了燃料消耗^[34-37],已在 B787、A350 和 F-35 三种多电机上实现了装机应用。在此基础上将起动发电机集成在发动机高压轴上构成的内装式高速起动发电机为消除发动机的附件机匣创造了条件,可以进一步提升功率密度和传动效率,是下一代多电机的重要特征和关键技术^[36-37]。

目前变频交流电源体制下的多电机基本都采用三级式无刷同步电机作为主发电机和辅助发电机,三级式无刷同步电机由永磁副励磁机、交流主励磁机、旋转整流器和主发电机等部件组成,通过调节主励磁机即可完成主发电机输出电压的调节,具有发电控制简单、过载能力强、易于灭磁保护等优势。在主发电机输出侧增加不控整流电路即可将三级式同步电机拓展至高压直流电源系统中使用,美国 F-22 和 F-35 战斗机都以三级式高压直流发电机作为其供电系统的主电源,并且后者实现了起动发电一体化功能。

三级式无刷同步电机发电技术相对成熟,起动发电一体化技术也已实现,但需要增加额外的励磁控制电路才能完成,且起动控制策略较为复杂。同时,由于三级式电机转子结构复杂以及旋转整流器的可靠性问题,难以实现高速运行,限制了其在高压直流电源系统中的进一步发展,并且不能与发动

机集成实现内装起动发电。混合励磁电机结合了电励磁电机调压简单以及永磁电机起动控制灵活和高效的优势。转子磁分路混合励磁电机通过固定导磁桥来实现转子无刷励磁,因此不需要低可靠性的旋转整流器部件;同时,转子磁分路混合励磁电机主磁场正弦度较高,能够满足航空交流起动发电系统多种工况下的高电源品质要求,在多电飞机变频交流起动发电系统中具有良好的应用前景^[38-39]。

稀土永磁电机的转子永磁体实现无刷励磁,相比于电励磁同步电机具有功率密度高、效率高以及可以高速运行的优势,但同时也面临高温退磁和故障灭磁的风险^[40],多电战机F-35上PTMS中的内装式永磁起动发电机就采用了高阻抗设计,额定功率为80 kW/270 V,峰值功率可以达到120 kW,转速达59 000 r/min。相比于永磁电机,开关磁阻电机定转子不含永磁体,结构更为简单可靠且容错性强^[41],F-35早期在地面验证时其高压直流系统的主电源就使用了160 kW/270 V的双通道开关磁阻起动发电机^[42]。以上两种电机一般应用在高压直流系统中,本体虽然可靠但其起动和发电运行都必须使用可控全功率变换器,并且发电工况下需要获取转子位置信息,控制策略较为复杂,削弱了电机本体结构简单可靠带来的优势。

电励磁双凸极电机是由开关磁阻电机衍化而来,继承了磁阻电机结构简单可靠、容错性强的优势,其定子上有独立的励磁绕组,因此通过调节励磁电流即可调节输出电压^[10,36]。在此基础上,可以将电励磁双凸极电机与永磁电机构成并列式混合励磁电机,从而充分发挥两者优势,同时永磁部分与电励磁部分相互独立无磁路耦合,具有较高的设计灵活性。这两种电机由于其电机结构的特殊性存在发电正弦度差的问题,一般只用于高压直流供电系统中,与永磁电机和开关磁阻电机相比不需要检测转子位置信息并且无需可控功率变换器,因此起动发电控制策略更为简单可靠,为航空内装式高速起动发电系统提供了新方案^[38-39]。

3.3 高效高功率密度功率变换

多电飞机电力系统的容量大幅度增加并且广泛使用大功率电力作动,对功率变换装置的需求远高于传统的飞机。电力系统中实现不同种类电能之间变换的二次电源,起动发电机、电作动和电环控系统电机控制器,电池充电器以及航电设备的供电电源都属于功率变换设备。以多电飞机B787为例,其电力系统中二次电源总容量就高达800 kW。

目前机载功率变换设备均采用硅基半导体器件,硅器件技术经过60年的发展,从架构、可靠性和性能提升方面已经接近其物理极限,难以大幅减小的导通损耗和开关损耗限制了变换器效率的提升,较大的结电容限制了高功率等级变换器的开关频率,因此需要较大体积重量的滤波装置,功率密度难以有效提高。此外,硅器件的最高结温一般为150℃,大功率变换器则需要更复杂的散热冷却系统。B787飞机150 kW的ATRU和110 kW的通用电动机起动控制器(Common motor start controller, CMSC)就难以通过风冷实现散热,须使用液冷来保障其运行可靠性。

21世纪初,以碳化硅和氮化镓为代表的宽禁带半导体器件迎来加速发展。与硅器件相比,宽禁带器件具有开关频率高、击穿电压高、结温高、抗辐射能力强和导通电阻小等优势,为航空高效高功率密度功率变换的实现提供了基础条件^[43-44]。

使用宽禁带半导体器件可以大幅提高功率变换器的开关频率,但同时开关损耗也随之增加;另一方面,当开关频率增加到一定程度时也会带来严重的电磁辐射和噪声等电磁干扰问题,干扰其他电子设备的正常工作^[44]。结合零电压开通和零电流关断的软开关技术可以有效降低开关损耗并且抑制高频开关带来的电磁干扰,从而提高变换器的效率和可靠性^[45]。

多电飞机电力系统电源体制逐渐向高压大功率的方向发展,目前飞机上的二次电源大多采用两电平变换器,对内部开关器件的电压和功率等级要求较高,因此ATRU等二次电源内部一般都配有变压器,体积重量相当大。虽然宽禁带器件的发展提高了半导体开关器件的开关频率,但在高压大功率场合开关频率与容量之间的矛盾仍然存在^[46]。多电平技术的发展突破了传统功率变换器的局限^[47],通过对功率开关器件进行级联组合能够提升变换器的耐压/耐流能力从而实现高压大功率输出,大幅度提高了功率变换器的等效开关频率和输出波形质量,直接降低了高压大功率变换系统对变压器和滤波器的容量需求,在此基础上采用模块化设计能够提高变换器的拓展性、维护性和容错性^[48-50]。目前,模块化多电平技术已经涵盖DC/DC、DC/AC以及AC/AC等多种形式的电能变换,在多电飞机电力系统中具有较高的应用潜力。

3.4 固态配电

配电系统是飞机电力系统中联系发电和用电的关键环节,实现电能的输送、分配和保护作用。随着航空技术的发展,配电系统的控制方式逐渐从传统的常规配电、遥控配电发展为目前的固态配

电。固态功率控制器(Solid state power controller, SSPC)作为先进固态配电系统的关键部件,以功率半导体器件作为开关,集成了继电器的开关控制功能和断路器的保护功能,具有响应快、开关无电弧、不存在机械磨损的高可靠性优势^[1]。

SSPC首次应用于军机洛克希德C-130J上^[51]。1997年,先进战机F-22成功首飞,其配电系统中就采用了可编程的SSPC,并通过1553B通讯总线和微处理机实现了负载的自动管理。多电机飞机A380、A350、B787和F-35中都已广泛使用交流115V和直流28V的SSPC作为配电系统的基础元件,其中B787的配电系统采用了先进的分布式固态配电技术,使用了多达900个SSPC^[1]。大飞机C919的配电系统中也采用SSPC来提高系统的可靠性。

目前,SSPC主要应用在远程配电中心或者二次配电中心,向中小功率的负载配电,受固态开关器件导通压降大以及容量的限制,机载一次配电仍使用有触点的断路器或混合式断路器。随着宽禁带器件的发展,国内外多家研究机构开始研制基于碳化硅的SSPC以及高压大功率固态断路器(Solid state circuit breaker, SSCB),有望将其应用至一次配电中从而实现更为全面的固态配电^[52-53]。

集成化、通用化和模块化是下一代SSPC的发展方向,美国DDC公司、Leach公司已经相继推出了第三代基于微处理器的多通道SSPC模块和配电单元,进一步提高了SSPC的功率密度和集成度。其中,DDC公司的产品RP-28001000N0能够实现270V直流电压下提供12通道150A的电流输出,如图13所示^[54]。此外,通过将电弧故障检测和寿命预测等技术集成至SSPC中^[55-56],能够使电力系统更加智能化,具有更高的可靠性以及更完善的故障诊断与保护功能。

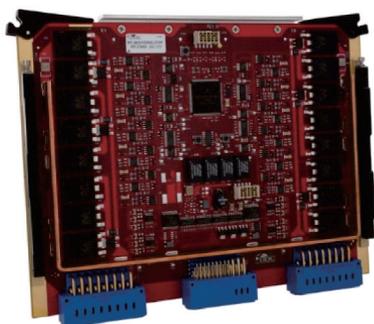


图13 多通道270V高压直流SSPC模块^[54]

Fig.13 Multi-channel 270 V HVDC SSPC module^[54]

3.5 用电设备

传统飞机中的用电设备主要包括航电设备、照

明设备以及供油设备等,多电机的诞生使机载用电设备的数量和种类大幅增加^[57],如图14所示。首先,多电机通过大功率高速电机传动压气机作为高压气源来实现传统飞机上客舱增压、空调制冷以及机载设备冷却等环控系统的功能。多电机B787率先采用了电环控系统的理念,其电环控系统中配有四台电动压缩机以及两台风扇电动机,总功率约为500kW。同时,B787还使用了电热防除冰代替传统飞机上的气热防除冰系统。

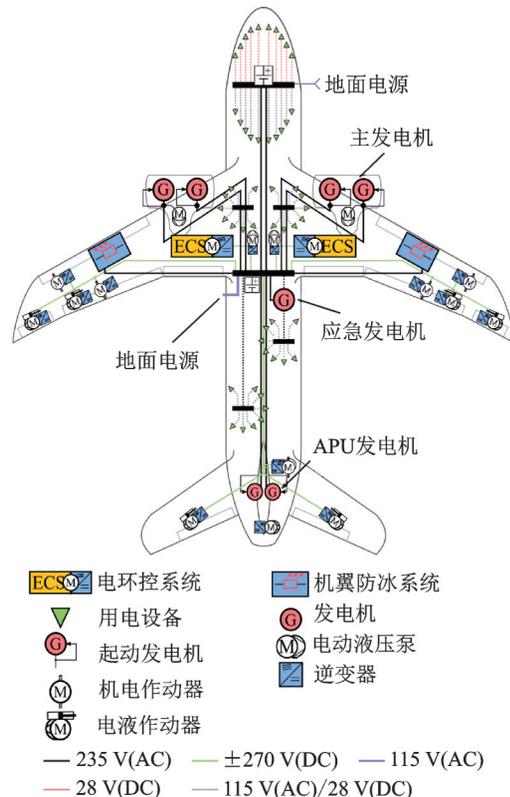


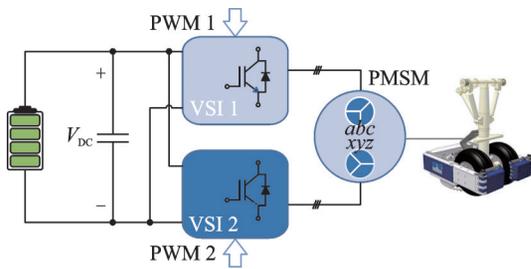
图14 多电机的发电机与用电设备^[57]

Fig.14 Generator and electrical equipment of more electric aircraft^[57]

多电机广泛使用电力作动器代替传统飞机中的液压作动器完成飞行舵面的操纵^[58]。空客A380和A350都采用了基于2H/2E的飞控作动系统架构,通过在主飞行舵面上配置EHA和EBHA代替传统3H架构中的一个液压回路,减小了体积重量。多电战斗机F-35的主飞行舵面则全部采用EHA作动,大大提高了飞机的战术性能。相比于EHA和EBHA,机电作动器(Electromechanical actuator, EMA)通过电机传动机械装置实现舵面的作动,能够进一步取消液压源及其管路,但由于可靠性和安全性方面的原因目前仅应用于飞机的辅助操纵舵面。例如,B787的14个扰流板中有4个就采用EMA作动,A350的水平安定面(Trimtable horizontal stabilizer, THS)中采用了基于EMA

的全电作动^[59],此外,B787还将EMA用于机轮制动系统中代替传统的液压刹车,可靠性大大提高,是首架应用全电刹车的多电飞机。

为了减小飞机在地面滑行过程中发动机的燃油消耗和噪声污染,优化机场运行效率,绿色滑行的概念逐渐被提出。绿色滑行通过在前起落架或主起落架中安装机轮电驱动装置以实现电力驱动^[60],如图15所示,是未来多电飞机的重要发展趋势。目前,霍尼韦尔与赛峰公司、德国WheelTug公司以及DLR研究中心均对电滑行展开了大量的研究和实验,并在A320、B737、B767等飞机上完成了测试^[61-62]。文献[63-64]指出,电滑行中电机的功率范围一般在150~300 kW,同时制动导致的能量回馈功率最高达95 kW,因此电滑行驱动系统的供电以及能量回馈管理成为其发展和装机应用的关键技术。



VSI:电压源型逆变器;PMSM:永磁同步电机

图15 电滑行驱动装置示意图^[60]

Fig.15 Diagram of the electric taxiing drive^[60]

多电飞机广泛使用电力作动,其机载用电设备相比于传统飞机种类更加繁杂,同时具有更强的非线性。其中,机载设备中的开关电源和调速电机其输入电压与电流之间呈负阻抗特性,都属于恒功率负载;EHA、EBHA和EMA等电力作动器、电动刹车以及电动滑行等装置处于制动工况时,会使电机工作在发电状态,将电能返回至电网,属于具有能量回馈特性的一类负载;机载高能激光武器、动能武器和雷达设备工作时呈现出短时周期或非周期脉冲特性,属于脉冲负载。大量的非线性负载容易导致系统偏移正常工作点,严重时会使系统产生振荡,极大影响系统的稳定运行。各类新型电气负载对于多电飞机电力系统稳定性和动态性能的影响需要深入研究。

目前常用的电力系统稳定性分析方法主要分为小信号分析和大信号分析^[65-66]。其中,小信号分析一般基于系统的阻抗模型,依据Middlebrook等准则对系统在小扰动的情况下判稳。大信号分析则以Lyapunov判据为基础,常用于分析系统在大

扰动情况下的稳定性。针对系统稳定性的补偿方法有无源阻尼法和有源阻尼法,无源阻尼法一般通过增大母线电容实现,有源阻尼则是在系统的控制策略中注入线性或非线性补偿信号,通过调整源或负载侧的等效阻抗来提高系统的稳定性。

3.6 电力系统故障诊断和健康管理

作为多电飞机的关键子系统,电力系统的性能和状态直接决定了飞机的安全可靠飞行以及战术任务的完成,因此,多电飞机对电力系统可靠性和维护性提出了更高的要求,同时也对电力系统的测试、维修和保障带来更大的挑战。

最初飞机上一般采用机内测试(Built-in test, BIT)完成对机载电力系统的故障诊断,但由于虚警率较高并未进行推广应用。到了20世纪80年代,微处理器技术和总线技术的发展推动了BIT更加数字化和智能化,有效降低了虚警率和检测时间,BIT技术在B747、A320、F-16和F-18等飞机上得到了广泛的应用。随后,欧美国家又陆续提出更为先进智能的机载故障预测与健康管理(Prognostics and health management, PHM)技术,通过使用传感器实时监测系统的运行状态,结合微处理器技术以及智能算法实现故障的快速诊断定位。同时还能对系统、部件或模块的故障和剩余寿命进行预测^[67],从而提高系统的可靠性和维护性,将传统的“事后维修和定期维修”转变为“视情维修以及基于状态的维修”。PHM技术逐渐成为支撑电力系统可靠运行的关键技术。

目前,美国波音和欧洲空客公司针对旗下民航飞机开发的PHM系统,都采用了基于机载PHM系统、地空数据链系统和地面健康管理软件平台的体系架构,已经应用在多电飞机B787、A380和A350中^[68]。多电战机F-35的PHM系统如图16所示,由机载智能实时监控系統、地面综合管理系统以及两者之间的接口组成,覆盖了机体结构、推进系统、飞控系统以及包含电力系统在内的机电系统等多个子系统^[67-71]。

多电飞机的发展使得机载各子系统逐渐趋于电气化,通过复用传感器即可实现对机载各个系统状态的监测并且不需要设立独立的供电装置,因此,多电技术使得PHM更易实现。另一方面,随着发电机控制器、汇流条功率控制器和SSPC等部件的数字化和智能化发展,通过将故障诊断和寿命预测功能集成在部件中,能够实现电力系统的自主PHM,进一步提升故障诊断和保护的速度,从而提高电力系统的安全性和可靠性。

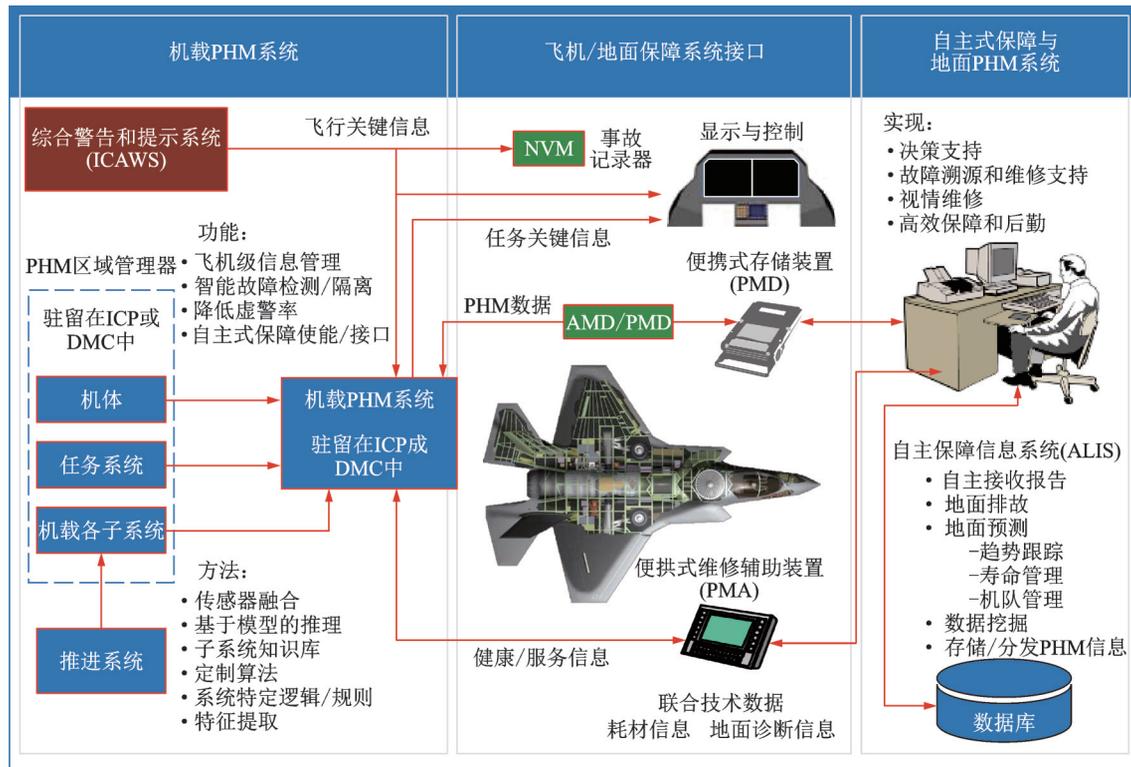


图 16 F-35 PHM 系统结构及所用技术^[69]

Fig.16 F-35 PHM system structure and technology used^[69]

4 电力系统发展方向

4.1 高压、直流化

随着飞机电力系统用电需求的增加,通过提高电压等级来优化系统的体积重量成为多电飞机的必然趋势,在多电飞机 A350 和 B787 中采用的 230 V 变频交流体制以及 F-35 中采用的 270 V 高压直流体制上已得到了体现。

相比于变频交流体制,高压直流体制更具优势和潜力,是未来多电/全电飞机的重要发展方向,具体表现在以下 4 个方面:

(1)从供电电源的角度,高压直流系统能够突破交流系统对发电频率的约束,因此可以使用更高转速的发电机从而减小发电机的体积重量,提升功率密度。

(2)从电力系统配电的角度,相比于交流电力系统的三相四线制,高压直流系统采用单线制或双线制,电缆的重量大幅度降低。此外,直流输电的线路阻抗较小并且无集肤效应,因此使用直流系统可以减小传输损耗,提高配电系统的效率。

(3)从电力系统用电设备的角度,高压直流系统中的变换器不需要进行无功补偿和功率因数校正,简化了负载驱动电源的设计,为大功率电驱动和电力作动等多电化负载的应用提供了便利条件。

(4)从电力系统控制和管理的角度,高压直流

系统更易于实现多通道并联控制,能够在增大系统容量的同时进一步提高系统的稳定性和可靠性,实现不中断供电。

未来,多电飞机高压直流系统的电压等级将突破目前的 270 V 或 ±270 V,朝着 540 V 甚至更高等级发展。高压、直流和大容量带来的电力系统和设备绝缘、安全等问题将更加突出。

4.2 智能化

随着多电飞机分布式电力系统概念的提出和应用,飞机电力系统逐渐呈现微电网的特征,可以将飞机电力系统看作空中移动微网。

人工智能以及数字化技术的发展使得目前多电飞机电力系统呈现出局部智能化的特征。以智能部件 SSPC 为核心,集总线控制、负载自动管理以及故障预测与健康管理等功能的智能配电系统就是最明显的一个例子。

未来,通过将人工智能、大数据以及先进智能传感技术等应用至多电飞机电力系统中,能够实现电力系统中各模块的高效协同运行。智能发电机(含控制器)和智能配电等概念将不断丰富和完善。同时,电力系统能够通过对发电、配电和用电设备状态信息的监测做出最优的决策和控制,提高系统的电能质量和运行效率,确保在各种工况和环境下安全可靠运行,成为高度自主、智能的空中移动微网。

4.3 集成化

多电飞机电力系统集成化程度将越来越高,有助于进一步减小系统的体积重量、提高系统的可靠性和运行效率,同时集成化也为系统的监测、维护和保障提供了便利。电力系统的集成特征包含部件集成和系统集成。

(1) 部件集成

传统系统中的电机与功率变换器、控制器相互分离,连接线缆以及各自独立的冷却设备导致航空电机系统体积重量较大。通过将变换器以及电机控制器集成至电机系统的内部,采用一体化的设计方法,可以优化冷却设计以及线缆长度,提升航空电机系统的功率密度和运行效率。

飞机电力系统中的二次电源往往需要考虑一定的余度和容错设计,因此导致二次电源的功率密度提升困难。宽禁带器件以及电力电子模块化封装技术的发展为机载变换器的集成设计提供了可能,使用功率密度更高以及容错能力更强的集成化多端口、多功能变换器代替传统的功率变换器,能够在优化二次电源的体积重量的同时实现负载的余度和容错供电。

(2) 系统集成

多电飞机的多电发动机将起动发电机内装在航空发动机内部,实现了电力系统与飞机推进系统的集成。未来,高可靠的机电作动器有望替代目前的液压作动器和电液作动器,实现电力系统与飞控系统的进一步集成。此外,电环控和电热防除冰技术能够取消发动机的引气,电动滑行技术赋予机轮新的使命从而实现无排放绿色滑行,这些都将促使电力系统朝着更加集成化的方向发展。

4.4 综合热管理和能量优化

多电飞机机载用电设备大量增加,除了对电力系统的容量提出了要求,同时还带来大功率电气设备的冷却问题,随着未来大功率脉冲雷达设备以及高能武器的装机应用,其工作时产生的热载荷急剧增加,对机载设备的热管理带来更加严峻的挑战。

飞机子系统内部大多设置冷却散热设备,各子系统之间的冷却相互独立,造成了功能的冗余和浪费,导致机载系统体积重量较大。电气设备的损耗发热可加以有效利用,单个设备的效率最优不一定使整个系统效率最优,因此,有必要对多电飞机进行综合热管理。通过对机载有限的热量和热沉进行综合管理,可以优化整机的热量分配,为电力系统中大功率高能负载的运行提供良好的机上环境支撑。

此外,脉冲功率负载和电动机负载等非线性负载的增加导致多电飞机电力系统的峰值功率越来

越高,但在整个飞行任务剖面中的占比却很小,传统按照峰值功率的设计方法虽然保证了电力系统的可靠性但系统的运行效率和燃油利用率都很低。未来多电飞机的电力系统将按动态需求设计,以整个飞行任务剖面的平均功率作为发电机的功率设计点,采用储能技术满足负载的峰值功率需求,并对再生能量进行管理,从而优化系统的体积重量,提高电力系统的运行效率进而提升发动机的燃油利用率。

5 结 论

航空电力系统技术的创新与实践对于多电飞机的发展至关重要。只有新型航空电力系统基础理论和关键技术的突破,才能实现飞机整体设计优化、燃油效率提升、运营成本和后勤保障难度降低。多电飞机电力系统理论及其关键技术是航空科技研究和发展的一个重要方向。

电工科技的发展使得大功率无刷起动发电一体化、高效高功率密度功率变换、固态配电、系统故障诊断和健康管理等电力系统相关技术得到突破,大大促进了多电飞机的发展,电力系统已成为影响多电飞机安全、经济运行和战术性能的关键子系统。

未来,航空电力系统将逐渐向飞控、燃油、环控等系统扩展融合。以多电发动机、电力推进为代表的新一代动力装置对电力系统的要求和影响将进一步延伸到机载电源和用电设备,电力系统与动力系统也将实现深度耦合。飞机动力系统和任务系统的变革,将深刻影响机载电力系统的用电负载特性,对电力系统的架构、关键部件以及系统的综合控制和管理提出新的更高要求。

参考文献:

- [1] 秦海鸿, 严仰光. 多电飞机的电气系统[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.
QIN Haihong, YAN Yangguang. Power system for more electric aircraft[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2016.
- [2] 严仰光, 秦海鸿, 龚春英, 等. 多电飞机与电力电子[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 11-18.
YAN Yangguang, QIN Haihong, GONG Chunying, et al. More electric aircraft and power electronics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(1): 11-18.
- [3] WHEELER P, BOZHKO S. The more electric aircraft: Technology and challenges[J]. IEEE Electrification Magazine, 2014, 2(4): 6-12.
- [4] SARLIOGLU B, MORRIS C T. More electric air-

- craft: Review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 54-64.
- [5] BUTICCHI G, WHEELER P, BOROYEVICH D. The more-electric aircraft and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2022. DOI: 10.1109/JPROC.2022.3152995.
- [6] RICHTER E, ANSTEAD D H, BARTOS J W, et al. Preliminary design of an internal starter/generator for application in the F110-129 engine [C]//Proceedings of Aerospace Atlantic Conference & Exposition. [S.l.]: SAE, 1995.
- [7] MALDONADO M, KORBA G J. Power management and distribution system for a more-electric aircraft (MADMEL) [J]. Aerospace & Electronic Systems Magazine IEEE, 1999, 14(12): 3-8.
- [8] BRUNET M, AUBRY S, LAFAGE R. The clean sky programme: Environmental benefits at aircraft level [C]//Proceedings of the 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Dallas, TX: AIAA, 2015: 1-7.
- [9] WHEELER P, BOZHKO S. The more electric aircraft: Technology and challenges[J]. IEEE Electrification Magazine, 2014, 2(4): 6-12.
- [10] 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.
ZHANG Zhuoran, YU Li, LI Jincan, et al. Key technologies of advanced aircraft electrical machine systems for aviation electrification[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(5): 622-634.
- [11] CROKE S, HERRENSCHMIDT J. More electric initiative-power-by-wire actuation alternatives [C]//Proceedings of Aerospace & Electronics Conference. [S.l.]: IEEE, 1994.
- [12] MARE J C, JIAN F U. Review on signal-by-wire and power-by-wire actuation for more electric aircraft [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017, 30(3): 857-870.
- [13] 王光秋. 民机先进技术汇编[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
WANG Guangqiu. Compilation of advanced technology of civil aircraft [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
- [14] SINNETT M. 787 No-bleed systems: Saving fuel and enhancing operational efficiencies[J]. AERO, 2007, 7(28): 6-11.
- [15] ROBBINS D, BOBALIK J, DE STENA D, et al. F-35 subsystems design, development & verification [C]//Proceedings of AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference. Atlanta, Georgia, US: AIAA, 2018. DOI: 10.2514/6.2018-3518.
- [16] 张卓然, 许彦武, 于立, 等. 多电飞机高压直流并联供电系统发展现状与关键技术[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 12-25.
ZHANG Zhuoran, XU Yanwu, YU Li, et al. Parallel HVDC electric power system for more-electric-aircraft: State of the art and key technologies [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 12-25.
- [17] WHYATT G A, CHICK L A. Electrical generation for more-electric aircraft using solid oxide fuel cells: DE-AC05-76RL01830 [R]. [S.l.]: Pacific Northwest National Laboratory, 2012.
- [18] 于敦. 国外飞机供电系统手册[M]. 北京: 中国航空信息中心, 1997.
YU Dun. Foreign aircraft power supply system manual [M]. Beijing: China Aviation Information Center, 1997.
- [19] 马伟明. 关于电工学科前沿技术发展的若干思考[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4627-4636.
MA Weiming. Thoughts on the development of frontier technology in electrical engineering [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4627-4636.
- [20] 陆清, 吴双. 民用飞机虚拟集成试验技术研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2017, 135(2): 1-7.
LU Qing, WU Shuang. The technique research on virtual integration test for civil aircraft [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2017, 135(2): 1-7.
- [21] 朱素华, 闫杰. 飞机电气系统的MBSE设计及仿真[J]. 科技创新导报, 2019, 16(20): 8-11.
ZHU Suhua, YAN Jie. MBSE design and simulation of aircraft electrical system [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2019, 16(20): 8-11.
- [22] LI L W, SOSKIN N L, JBARA A, et al. Model-based systems engineering for aircraft design with dynamic landing constraints using object-process methodology [J]. IEEE Access, 2019, 7: 61494-61511.
- [23] BOZHKO S V, WU T, YANG T, et al. More-electric aircraft electrical power system accelerated functional modeling [C]//Proceedings of the Power Electronics & Motion Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2010.
- [24] 李伟林, 王雨峰, 赵宏卫, 等. 基于FMI的多电飞机用电设备多物理域建模 [C]//第十七届中国CAE工程分析技术年会. 海口: [s.n.], 2021.
LI Weilin, WANG Yufeng, ZHAO Hongwei, et al. Multi-physical modeling of electric equipment of multi-electric aircraft based on FMI [C]//Proceedings of the 17th China CAE Annual Conference. Haikou: [s.n.],

- 2021.
- [25] ROBOAM X, SARENI B, ANDRADE A. More electricity in the air: Toward optimized electrical networks embedded in more-electrical aircraft [J]. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 2012, 6(4): 6-17.
- [26] CAO Y, WILLIAMS M A, KEARBAY B J, et al. 20x-real time modeling and simulation of more electric aircraft thermally integrated electrical power systems [C]//*Proceedings of the International Conference on Electrical Systems for Aircraft*. [S.l.]: IEEE, 2017.
- [27] 王莉, 戴泽华, 杨善水, 等. 电气化飞机电力系统智能化设计研究综述[J]. *航空学报*, 2019, 40(2): 5-19.
- WANG Li, DAI Zehua, YANG Shanshui, et al. Review of intelligent design of electrified aircraft power system [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(2): 5-19.
- [28] FÉLIX M, ROUTEX J Y. A copper bird for aircraft equipment systems integration and electrical network characterization [C]//*Proceedings of the 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. [S.l.]: AIAA, 2013.
- [29] BALS J, HOFER G, PFEIFFER A, et al. Virtual iron bird—A multidisciplinary modelling and simulation platform for new aircraft system architectures [C]//*Proceedings of DGLR Jahrestagung*. [S.l.]: DGLR, 2005.
- [30] BOURGET L. Press kit [M]. [S.l.]: Paris Air Show, 2015.
- [31] LO C K, CHEN C H, ZHONG R Y. A review of digital twin in product design and development [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 48(9): 101297.
- [32] GLAESSGEN E H, STARGEL D S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air Force vehicles [C]//*Proceedings of the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference*. Honolulu, Hawaii: [s.n.], 2012.
- [33] HAZBON O, GUTIERREZ L, BIL C, et al. Digital twin concept for aircraft system failure detection and correction [C]//*Proceedings of AIAA Aviation 2019 Forum*. [S.l.]: AIAA, 2019.
- [34] BOZHKO S, YANG T, PEUVEDIC J L, et al. Development of aircraft electric starter-generator system based on active rectification technology [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2018, 4(4): 985-996.
- [35] ZHANG Z R, LI J C, LIU Y, et al. Overview and development of variable frequency AC generators for more electric aircraft generation system [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2017, 3(2): 32-40.
- [36] 于立, 张卓然, 张健, 等. 多电发动机内装式高速起动机发电研究与实践 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(14): 4615-4628, 4740.
- YU Li, ZHANG Zhuoran, ZHANG Jian, et al. Study and implementation on high-speed starter/generator for more electric engine application [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(14): 4615-4628, 4740.
- [37] 张卓然, 李进才, 韩建斌, 等. 多电飞机大功率高压直流起动机发电系统研究与实现 [J]. *航空学报*, 2020, 41(2): 324-335.
- ZHANG Zhuoran, LI Jincai, HAN Jianbin, et al. Research and implementation of high-power high-voltage DC brushless starter generator system for more-electric-aircraft [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(2): 324-335.
- [38] 张卓然, 耿伟伟, 戴冀, 等. 新型混合励磁电机技术研究及进展 [J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(1): 27-36.
- ZHANG Zhuoran, GENG Weiwei, DAI Ji, et al. Recent progress of novel hybrid excited machines [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(1): 27-36.
- [39] 张卓然, 王东, 花为. 混合励磁电机结构原理、设计与运行控制技术综述及展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(24): 7834-7850, 8221.
- ZHANG Zhuoran, WANG Dong, HUA Wei. Overview of configuration, design and control technology of hybrid excitation machines [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(24): 7834-7850, 8221.
- [40] NØLAND J K, LEANDRO M, SUUL J A, et al. High-power machines and starter-generator topologies for more electric aircraft: A technology outlook [J]. *IEEE Access*, 2020. DOI: 10.1099/ACCESS.2020.3007791.
- [41] MADONNA V, GIANGRANDE P, GALEA M. Electrical power generation in aircraft: Review, challenges, and opportunities [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2018, 4(3): 646-659.
- [42] HAMSTRA J W. The F-35 flighting II: From concept to cockpit [M]. [S.l.]: Lockheed Martin Corporation, 2019.
- [43] BUTICCHI G, BOZHKO S, LISERRE M, et al. On-board microgrids for the more electric aircraft—Technology review [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(7): 5588-5599.
- [44] ZHU R M, HUANG Z, DINAVAH V. A universal wideband device-level parallel simulation method and conducted EMI analysis for more electric aircraft microgrid [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2020, 1(2): 162-

- 171.
- [45] MOHAMMED S A Q, JUNG J W. A state-of-the-art review on soft-switching techniques for DC-DC, DC-AC, AC-DC, and AC-AC power converters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2021, 17(10): 6569-6582.
- [46] 郭鹏. 模块化多电平变换器优化控制方法及应用研究[D]. 长沙:湖南大学, 2020.
- GUO Peng. Research on the optimization control and application of modular multilevel converter[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [47] 李永东, 徐杰彦, 杨涵棣, 等. 多电平变换器拓扑结构综述及展望[J]. *电机与控制学报*, 2020, 24(9): 1-12.
- LI Yongdong, XU Jieyan, YANG Handi, et al. Overview and prospect of multilevel converter topology[J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(9): 1-12.
- [48] DEBNATH S, QIN J C, BAHRANI B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(1): 37-53.
- [49] 徐殿国, 李彬彬, 周少泽. 模块化多电平高压变频技术研究综述[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(20): 104-116.
- XU Dianguo, LI Binbin, ZHOU Shaoze. Overview of the modular multilevel converter based high voltage motor drive[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(20): 104-116.
- [50] 杨晓峰, 郑琼林, 薛尧, 等. 模块化多电平换流器的拓扑和工业应用综述[J]. *电网技术*, 2016, 40(1): 1-10.
- YANG Xiaofeng, ZHENG Qionglin, XUE Yao, et al. Review on topology and industry applications of modular multilevel converter[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(1): 1-10.
- [51] CHANDRASEKARAN S, LINDNER D K, LOUGANSKI K, et al. Subsystem interaction analysis in power distribution systems of next generation airlifters [C]//Proceedings of European Power Electronics Conference.[S.l.]:[s.n.], 1999.
- [52] DONG Z, REN R, WANG F. Development of high power bidirectional DC solid-state power controller for aircraft applications [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 10(5): 5498-5508.
- [53] HUANG Z, YANG T, ADHIKARI J, et al. Development of high-current solid-state power controllers for aircraft high-voltage DC network applications[J]. *IEEE Access*, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3099257.
- [54] DDC. 207 V DC, 150 A, 12-channel solid-state power controller [EB/OL]. (2022-05-05). <http://www.ddc-web.com/en/power/solid-state-power-controllers/bvardsandp-duc/rp-2800/000no?partNumber:RP-28001000N0>.
- [55] MOLLIGODA D A, CHATTERJEE P, GAJANAYAKE C J, et al. Review of design and challenges of DC SSPC in more electric aircraft[C]//Proceedings of the 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC).[S.l.]: IEEE, 2016.
- [56] LIU W J, ZHANG X B, DONG Y J, et al. Arc fault detection for AC SSPC based on Hilbert-Huang transform[C]//Proceedings of IECON 2017—The 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.[S.l.]: IEEE, 2017.
- [57] SCHEFER H, FAUTH L, KOPP T H, et al. Discussion on electric power supply systems for all electric aircraft[J]. *IEEE Access*, 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991804.
- [58] CAO W P, MECROW B C, ATKINSON G J, et al. Overview of electric motor technologies used for more electric aircraft (MEA)[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(9): 3523-3531.
- [59] QIAO G, LIU G, SHI Z H, et al. A review of electromechanical actuators for more/all electric aircraft systems[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, 232(22): 4128-4151.
- [60] LUKIC M, GIANGRANDE P, KLUMPNER C, et al. Analysis of energy storage system requirements for aircraft electric taxiing operations[C]//Proceedings of IECON 2019—The 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. [S.l.]: IEEE, 2019.
- [61] LUKIC M, GIANGRANDE P, HEBALA A, et al. Review, challenges, and future developments of electric taxiing systems[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, 5(4): 1441-1457.
- [62] LUKIC M, HEBALA A, GIANGRANDE P, et al. State of the art of electric taxiing systems[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC).[S.l.]:[s.n.], 2018.
- [63] RECALDE A A, LUKIC M, HEBALA A, et al. Energy storage system selection for optimal fuel consumption of airloscraft hybrid electric taxiing systems [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2021, 7(3): 1870-1887.
- [64] HEINRICH M T E, KELCH F, MAGNE P et al. Regenerative braking capability analysis of an electric taxiing system for a single aisle midsize aircraft[J].

- IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(3): 298-307.
- [65] LANG X Y, YANG T, HUANG Z, et al. Stability improvement of onboard HVdc grid and engine using an advanced power generation center for the more-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 660-674.
- [66] 李永东, 章玄, 许烈. 多电飞机高压直流供电系统稳定性研究综述[J]. 电源学报, 2017, 15(2): 2-11.
LI Yongdong, ZHANG Xuan, XU Lie. A survey on stability analysis for HVDC power system in MEA[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 2-11.
- [67] 王海峰. 战斗机故障预测与健康管理工作应用的思考[J]. 航空科学技术, 2020, 31(7): 3-11.
WANG Haifeng. Research on application of prognostics and health management technology for fighter aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(7): 3-11.
- [68] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理工作关键技术[J]. 航空学报, 2014, 35(6): 1459-1472.
WANG Shaoping. Prognostics and health management key technology of aircraft airborne system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(6): 1459-1472.
- [69] MCCOLLOM N N, BROWN E R. PHM on the F-35 fighter[C]//Proceedings of 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management (PHM). [S.l.]: IEEE, 2011.
- [70] LOSIK L. Using the prognostic health management program on the air force next generation reusable launch vehicle[C]//Proceedings of AIAA SPACE 2012 Conference & Exposition. [S.l.]: AIAA, 2012.
- [71] 年夫顺. 关于故障预测与健康管理工作认识的几点认识[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 1-14.
NIAN Fushun. Viewpoints about the prognostic and health management[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 1-14.

(编辑:孙静)