

引用格式: 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): 522405. WANG L, DAI Z H, YANG S S, et al. Review of intelligent design of electrified aircraft power system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(2): 522405 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2018.22405

# 电气化飞机电力系统智能化设计研究综述

王莉<sup>\*</sup>, 戴泽华, 杨善水, 毛玲, 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 210016

**摘要:** 能源危机和环境问题推动了绿色航空的发展, 飞机电气化是绿色航空的主要实现手段, 已经成为航空技术发展的重要方向。本文介绍了飞机电气化的发展历程, 阐述了电气化飞机电力系统的关键技术及其研究现状, 分析了先进飞机电力系统设计的关键技术, 指出了飞机电力系统综合化、智能化的发展特点。在分析飞机电力系统设计存在的问题的基础上, 文章初步提出了电气化飞机电力系统智能化设计平台的理论框架、功能和特点, 分析了支撑电力系统智能化设计平台的关键技术, 指出了航空智能化设计的研究方向。

**关键词:** 电气化; 多电/全电; 电推进; 电力系统; 系统级研究; 智能化设计; 多学科设计优化

中图分类号: V11; V22; V271.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2019)02-522405-15

随着能源危机的加剧和环保意识的觉醒, 航空业的持续增长对环境的影响越来越受到重视, 电气化飞机在这样的环境下应运而生。飞机电气化的发展可以分为 2 个阶段: 第 1 阶段以多电/全电技术的发展为标志, 第 2 阶段以电推进技术的发展为标志。

为实现飞机的多电/全电化, 欧盟和美国开展了一系列研究。法国 G2E 实验室、德国联合武装部队大学、英国克兰菲尔德大学等欧盟机构研究主要涉及飞机能源优化、发配电、电环控和电作动等技术领域, 侧重电力系统的系统级研究<sup>[1-2]</sup>, 在应用上相对保守, A380 仅采用了固态配电网和电备份液压作动技术。加州大学伯克利分校、NASA 等美国机构的研究主要涉及发配电、电能管理、电防冰、电力作动和发动机等多个领域, 侧重于多电发动机、电力系统和综合热管理<sup>[3]</sup>等领域, 在应用方面超前于欧洲, B787 采用了大容量启动/发电、电环控、电除冰、电作动和固态配电网

技术。国内的科研院所和高校也对启动/发电<sup>[4]</sup>、静止变流器<sup>[5]</sup>、固态配电网<sup>[6]</sup>、电作动<sup>[7-8]</sup>、系统实时仿真试验<sup>[9]</sup>、综合热管理<sup>[10]</sup>等技术开展了大量研究<sup>[11]</sup>, 取得了研究成果。

继多电/全电飞机的发展后, 为进一步提升飞机能量转换效率, NASA<sup>[12-20]</sup>、克兰菲尔德大学<sup>[21-23]</sup>等科研机构以及空客集团<sup>[24]</sup>等企业对于电推进技术进行了大量研究<sup>[25-27]</sup>。目前, 纯电动推进已在 RX-1E、E-fan 等<sup>[27]</sup>轻小型飞机中实现。但是受各项技术的制约, 大型客机还难以使用纯电动推进技术, 因此油电混合动力推进是纯电动推进的过渡阶段。NASA 采用并联混合电推进的设计概念和分布式布局结构, 开发了一种 48 座的概念支线客机“飞马”<sup>[28]</sup>。

电气化技术的发展使得飞机的机电系统与动力系统在电力系统中逐步融合。飞机电力系统集成了飞机所有机载设备的能量需求, 逐渐向综合化的方向发展, 这对飞机电力系统设备和系统的

收稿日期: 2018-06-01; 退修日期: 2018-07-16; 录用日期: 2018-08-16; 网络出版时间: 2018-08-27 17:34

网络出版地址: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20190201.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51777092)

\* 通信作者. E-mail: liwang@nuaa.edu.cn

设计提出了新要求。

与此同时,随着科技与信息化水平的不断进步,人工智能(AI)在工业界获得了广泛关注,基于知识工程(KBE)技术<sup>[29]</sup>以及虚拟现实技术<sup>[30]</sup>在智能制造领域得到了研究,各国开始将智能化的概念应用到飞机中。B787 在客舱中率先使用了电致变色技术的智能舷窗<sup>[31]</sup>。NASA 和波音公司开展的 SUGAR 项目对智能化部件、智能化能源管理以及控制技术进行了研究。智能材料<sup>[32]</sup>和结构研究的时间更早,但主要集中在军机领域。总而言之,智能技术在飞机部件级已获得一定程度的研究和应用,但在系统级的研究仍处于起步阶段。

本文讨论电气化飞机电力系统组成和相关研究进展,分析电气化飞机电力系统设计的关键技术,在此基础上将 AI 技术引入电力系统设计中,提出了先进飞机电力系统智能化设计平台的构想和规划,为飞机电力系统的研究和发展奠定基础。

## 1 电气化飞机电力系统的组成及研究现状

电气化技术推动了多电化设备的发展以及机电系统和动力系统的融合,从而产生了全新的飞机电力系统,本部分从电气化的机载设备以及由此而产生的先进电源系统和配电系统 3 个方面阐述电气化飞机电力系统组成。

### 1.1 电气化机载设备的发展现状

飞机机载设备的电气化体现在多电/全电负载和电推进系统。

多电/全电负载使用电能逐步取代飞机液压、气压等其他形式的二次能源,从而简化飞机能源结构,提升能源利用率和可靠性,降低燃油消耗,主要包括电传飞控系统、电环控系统、电除冰系统、电燃油泵系统、电刹车系统、电推进系统。

电传飞控系统<sup>[33]</sup>使用电备份液压作动器、电动静液作动器或机电作动器操纵和控制飞行器,消除了液压管路,解决了散热、燃油效率低的问题,提高了系统的可靠性、维修性、效率、生存力、容错力,已在 F-18、B787 等机型获得应用。

电环控系统<sup>[34]</sup>使用电能和冲压空气代替发动机引气,实现机舱增压、通风和温度控制以及设

备冷却。系统工作不会直接影响发动机热动力循环,减少了飞机性能代偿损失,节省了飞机燃油消耗。该技术已在 B787 中得到首次应用。

电除冰系统代替机械、液体或气体除冰,使用电能加热部件的待防护表面,使其不结冰<sup>[35]</sup>。考虑到电除冰对结构、控制和能源载荷带来的影响,国外已采用在易结冰部位涂覆低表面能疏水涂层的途径实现被动防冰<sup>[32]</sup>。

电燃油泵系统使用电动燃油泵代替固定排量的齿轮泵,可根据发动机的需要提供发动机所需的燃油,无需考虑燃油流回及其冷却问题,既减轻了系统的重量,又降低了系统的复杂性。美国已在发动机上验证了这项技术<sup>[36]</sup>。

电刹车系统通过电机、杠杆构成的机电结构取代原有的液压刹车系统,消除了液压刹车存在的燃烧危险和泄漏污染,在安全、性能、保障性、维修性、重量和费用方面都占优势。美国于 20 世纪 90 年代研制了第三代电刹车系统<sup>[8]</sup>。

电推进系统通过电动机直接将电能转化为机械能,使得原本的发动机工作不再受飞行状态影响,提高发动机的工作效率,降低燃油消耗和污染排放,从而缓解飞机对环境的影响以及对石油资源的依赖。

机载设备的电气化为飞机电力系统带来了巨大的改变,主要体现在:

1) 设备的电气化对电力系统的供电可靠性提出了更高的要求。系统需要保证关键的飞行设备在任意工作状态下的不间断供电。

2) 设备的电气化提高了飞机电力系统的供电功率。在所有的非推进系统中,电环控系统和防除冰系统的能耗最大,因此设备的多电/全电化要求大大提高了飞机供电系统的容量。而为保证与原先发动机相当的推进功率,电推进系统需要数十千瓦至数十兆瓦不等推进功率的电动机作为动力源,进一步提升了飞机电力系统的供电需求。

3) 电气化设备大部分都是电机类负载,其大量应用对飞机电力系统的供电质量和稳定性均会产生影响:① 大多数大功率电机负载在低频范围内具有负阻抗特性,会影响供电质量和系统稳定性;② 多数大功率电机都带有一个低输入阻抗的“容性”电磁干扰滤波器,因而在起动过程中会出现大的冲击电流;③ 气流等外部的不确定性因素

导致飞控设备和推进设备工作状态发生改变,对电网造成冲击;④ 电机负载在制动过程中会产生再生能量,将其回收利用有利于提高系统能量利用率,但直接回馈电网会对电网产生很大的冲击,影响系统供电质量。

4) 电气化技术通过电能实现所有机载设备的统一,有利于系统资源的综合利用和统一协调分配,实现飞机机电系统功能、性能和成本的最优化,显示出机电综合的特征。

电气化机载设备可靠性高、功率高、电能质量高、稳定性高和机电综合的特征,对电源系统和配电系统提出了更高的要求。

## 1.2 电源系统的发展现状

为满足电气化的发展要求,飞机电源系统必须具备以下特征:① 系统结构简单,可靠性高;② 能源能量密度高,能支持长航程的飞行;③ 电源系统容量大,可以满足大功率负载的供电需求;④ 能源转化利用率高,系统损耗小,可以提供足够的供电时长;⑤ 电源系统具有很好的稳态和动态性能,并且控制简单,从而保证系统的供电质量和稳定性;⑥ 电源系统具有多个余度,能在故障情况下保证系统的供电能力,具有高的供电可靠性;⑦ 为实现能源互补,提高电能质量,基于储能的电源系统得到广泛关注和应用。

目前,飞机电源系统按功能可分为主电源、辅助电源、应急电源和地面电源;按种类可分为旋转发电机、化学电池和太阳能电池等。其中,发电机为目前大型客机电源的主要形式。而这种旋转发电系统由发动机带动,机械结构复杂、噪声大、污染严重,不符合绿色航空的发展需求。此外,在电推进技术的发展下,发动机在动力系统中的作用逐渐弱化。因此,研究人员一方面改进发动机系统,将开放式循环系统转变为封闭式循环系统,以求提高发动机效率;另一方面,非旋转部件发电技术开始受到关注,燃料电池因其高能量密度、高效率、清洁、模块化、控制简单而成为研究热点,基于混合储能的燃料电池系统已获得广泛研究<sup>[36-40]</sup>;但现有技术下的燃料电池还存在寿命短、成本高等问题,目前未能在大型飞机中获得实际应用。

## 1.3 配电系统的发展现状

为满足电气化的发展要求,飞机配电系统必

须具备以下特征:① 可靠性高,保证系统的冗余容错供电;② 重量轻,提高飞机航程;③ 损耗小,提高配电系统供电效率。

目前,飞机配电系统通过一次配电系统的网络重构技术和二次配电系统的固态配电技术满足负载可靠供电的需求。但随着用电功率的提高,配电系统的研究重点就不再局限于可靠性,而是实现可靠性、重量和损耗三者的权衡。目前的研究主要从以下3方面着手:① 采用新的技术手段提高配电设备可靠性或降低设备重量和损耗,例如分布式智能固态配电技术<sup>[41]</sup>、新型供电体制、超导技术<sup>[20]</sup>和新型材料工艺<sup>[42]</sup>;② 在保证部件可靠性的基础上,对电网结构进行改进,定量分析电网结构对可靠性、重量和损耗的影响,在三者之间进行权衡,从而优选最佳的配电系统方案;③ 采用先进的能量管理策略和控制手段,实时调整系统工作状态,从而提高系统效率。

## 2 电气化飞机电力系统设计的关键技术研究现状

电气化技术的发展凸显了电力系统在整个飞机运行过程中的重要作用,并对其性能提出了更高的要求,因此国内外对电气化飞机电力系统设计技术开展了大量研究,主要包括:① 供电体制设计技术;② 电网结构设计技术;③ 机电综合技术;④ 能量管理与控制技术;⑤ 鲁棒设计与控制技术;⑥ 系统验证技术。

### 2.1 供电体制设计技术

随着飞机电力系统功率逐渐提高,原有供电体制将会导致系统重量和损耗大大增加,因此研究人员对电气化飞机的供电体制开展了一系列的研究。文献<sup>[43-45]</sup>基于帕邢定律研究线缆间的气隙与安全电压等级的关系。文献<sup>[46-48]</sup>综合对比了交、直流不同供电体制对配电系统重量的影响。NASA对超导电推进飞机的供电体制进行了较全面的研究<sup>[14-17,20]</sup>,文献通过建模方法分析系统关键部件的重量、效率和电压的关系,在此基础上开展系统供电体制的研究,最终提出了适应22.4 MVA的超导电推进飞机的 $\pm 2 \sim \pm 10$  kV DC的供电体制。

研究表明,电气化飞机的供电体制应在对现

有供电体制的基础上开展研究和设计,以方便利用现有系统配套实现系统重量、损耗的降低和可靠性的提高,同时也能降低成本;此外,不同的电网结构方案设计得到不同等级的最优电压<sup>[20]</sup>,两者的作用关系还有待于进一步研究,从而实现综合性能优化。

## 2.2 电网结构设计技术

为保证系统安全、可靠供电,飞机通常配备冗余容错的电网结构。但相较于传统飞机电网,电气化飞机电网容量的大幅提升,这不仅要求系统可靠性高,而且给其重量、损耗带来了挑战。

供电可靠性要求飞机电网含有多个电源,实现多余度供电。电源数量增加带来的重量提升无可避免,设法降低每个电源的重量成为研究的一个思路。美国 INVENT 计划提出动态需求设计的方法,即根据整个飞行包线的平均功率进行系统设计,并使用大功率密度的储能设备提供峰值功率<sup>[49]</sup>。文献<sup>[50]</sup>提出了一种互联构架的电网构架,通过并联供电降低单个电源重量,但其损耗高于正常系统,也降低了系统的供电余度。

系统的可靠供电还可以通过构建环形网络结构,利用故障重构技术实现。这就导致电网结构的复杂化。飞机电网结构的传统构建方法——枚举法往往无法全面考虑所有情况,从而导致设计结果无法达到最优<sup>[18-20]</sup>。因此,基于模型的寻优设计方法<sup>[51]</sup>开始用于飞机电网结构设计。

INVENT 计划的设计思想和建模寻优的电网规划方法具有明显优势。但按动态需求设计的方法必然会提高能量管理和控制的难度,也会降低系统的鲁棒性,在设计过程中需要对此进行权衡考虑;而对于建模寻优的电网规划方法而言,目前的方法建立在已知系统所有网络节点的信息,并不能对节点的个数(如供电冗余度)和类型(如供电体制)进行设计,因此还需要进行更深入的研究,开发更具有开放性的设计方法。

## 2.3 机电综合技术

传统飞机机载设备相对分散、独立的控制和管理模式使得硬件利用率低、连线错综复杂,无法满足电气化发展对可靠性、重量和损耗的需求。因此,各机电子系统除要满足自身的功能外,还要

从飞机整体出发,综合考虑机、电、液、热等多方面,基于优化的思想,权衡系统性能参数,实现机电系统功能、能量、控制和物理 4 个方面的综合设计,形成一个综合化系统,根据飞机不同状态自动调整系统,实现飞机系统功能、性能和成本最优化<sup>[52]</sup>。

目前,国外的先进机型已经开始采用机电综合控制系统,使每个机电子系统完成资源的协调分配、故障后系统重构、飞机综合健康管理等任务<sup>[53]</sup>。与国外的先进水平相比,中国还存在较大差距,需要开展更深入的研究工作<sup>[54]</sup>。

## 2.4 能量管理和控制技术

目前,飞机电力系统的能量管理和控制基本都采用基于负载重要度和优先级管理的负载端管理方法,而电源系统和电网只在电源或者供电通道故障时进行切换备份,正常情况下几乎不作任何管理。而随着电气化技术的发展,机载设备和系统的起动、关闭等暂态行为更加剧烈,仅仅针对系统稳态的控制已无法满足能量管理的需求。因此,研究人员逐渐将更多目光转移到对系统动态过程的优化控制的研究中。

美国匹兹堡大学<sup>[55]</sup>、加州理工大学<sup>[56]</sup>、加州大学伯克利分校<sup>[57-58]</sup>以及英国克兰菲尔德大学<sup>[59-60]</sup>等多个研究机构均对多电飞机电力系统的能量综合管理和控制技术开展了研究。其中,文献<sup>[57-58]</sup>借鉴工业领域用于过程控制的模型预测控制技术提出的能量优化分配和综合管理方法,符合机电综合的发展需求,并且故障预测与健康管理的思想相契合,是飞机电力系统能量管理和控制未来发展的趋势。

近年来跟踪国外先进研究,中国也开展了一些飞机电机动态管理方法的研究,例如南京航空航天大学分别采用动态优化和“削峰填谷”的思想对电网<sup>[61-62]</sup>和负载<sup>[63]</sup>进行能量管理,西北工业大学从飞机总体出发考虑各子系统在不同飞行阶段内能量的优化分配<sup>[64]</sup>。

## 2.5 鲁棒设计与控制技术

传统方法按照峰值功率设计飞机电力系统,因此所有不确定性干扰都是在系统容忍范围内。但在电气化飞机中,一方面大量大功率电力电子和电机类设备的使用增大了飞机电力系统的不确

定性;另一方面,设计人员按照飞行包线的平均功率和热载荷设计系统,有限的容量使得很多不确定性因素对电网带来的扰动难以自愈。而鲁棒性是指闭环系统在摄动下能保持稳定和一定的性能,兼顾了系统的稳定性和性能。因此,电力系统的鲁棒设计和控制技术是飞机电力系统电气化的一个重要研究方向。

目前国内外已有大量文献针对飞机电力系统稳定性问题开展了研究<sup>[65-72]</sup>,而鲁棒性的研究刚刚起步。文献<sup>[1-2]</sup>基于  $H_\infty$  控制理论,以重量、损耗和动态性能为优化目标,对飞机电力系统构架的集成和控制开展了研究。文献<sup>[73-74]</sup>基于结构奇异值理论,开展多电飞机电力系统的鲁棒性研究,结合敏感度分析方法,获得影响系统鲁棒的关键因素,从而指导构架和控制参数的设计。但这几篇文献没有结合飞机的不同运行场景进行研究,研究对象也比较简单。

与此同时,鲁棒理论在智能电网中已得到大规模研究和应用,如鲁棒状态估计<sup>[75-76]</sup>、鲁棒稳定器<sup>[77-78]</sup>、鲁棒控制<sup>[79-80]</sup>、鲁棒设计<sup>[81]</sup>等。随着对鲁棒思想的进一步深入理解,相关理论很快会在航空电力系统中得到更深入的应用。

## 2.6 系统验证技术

基于仿真试验的验证技术投入小、快速灵活、资源可重复利用的优点,因此被广泛用于飞机电力系统的验证工作中。

国内外已针对飞机不同子系统的验证开展了大量研究。为实现仿真速度和精度的权衡,国外将部件模型分为结构级、功能级、行为级和器件级4个层次<sup>[82]</sup>,用以实现系统不同性能的验证。南京航空航天大学、北京航空航天大学、西北工业大学等单位都研制了飞机机电系统<sup>[53-54,83]</sup>和供电系统<sup>[84-87]</sup>的仿真验证软件。

随着飞机电力系统的综合化发展,虚拟集成试验技术开始受到关注。虚拟集成试验技术利用计算机仿真技术将实际的多系统、多学科领域进行统一建模和协同集成仿真试验,是系统验证技术的发展趋势。目前,国内外已提出了多种分布式协同仿真接口方法,如 FMI(Functional Mock-up Interface)<sup>[88]</sup>、VPNET(Virtual test bed and PNET)<sup>[89]</sup>和 TISC<sup>[90]</sup>等。其中的部分技术在国

际航空界获得了一定的应用<sup>[91]</sup>。而国内相关技术的发展并不成熟,还有待于进一步研究。

## 3 电气化飞机电力系统智能化设计

随着电气化技术和智能技术的发展,飞机各个子系统间相互关联性更强,促使电力系统向综合化、智能化的方向发展。而为实现行业的智能转型,中国多个规划文件均指出,建立产品数字化和智能化设计制造平台,开发面向产品全生命周期的网络环境下的智能化创新设计方法及技术、计算机辅助工程分析与工艺设计技术。毫无疑问,智能化的发展趋势必将对航空领域产生巨大和深远的影响,智能设计作为航空智能化的主要手段<sup>[92]</sup>,对提高航空系统的经济效益和降低对环境的影响具有重大作用。

因此,将传统的设计、试验流程与新技术条件下的设计分析、优化、仿真试验验证技术有机结合,从系统总体角度出发,将综合化、智能化的思想融入到电力系统的设计和试验中,进行统筹规划,形成基于全生命周期的、数字化的先进飞机电力系统智能设计/评估体系,必然成为未来的发展主流方向。

### 3.1 设计平台/方法研究现状

目前,以 CATIA 软件为核心的 LCA(Life-Cycle Applications)三维在线设计平台和以 Windchill 为核心的协同设计平台已经在国内外航空工业设计、制造部门获得推广<sup>[93]</sup>,设计人员在飞机电气系统设计时广泛采用二维电气系统设计软件与 CATIA 相结合的数字化设计平台进行系统图纸、图样的设计<sup>[94]</sup>,数字化设计已经实现。飞机电力系统的设计遵从系统工程的 V 型开发流程和自顶向下的设计思想,利用数字化软件工具开展设计。但整个设计过程相互独立,不能进行系统间的综合设计、验证;整个设计过程是一个单向串行结构,存在了大量迭代设计,导致研制效率低、周期长、成本高<sup>[95]</sup>。

为解决该问题,国外开始尝试将智能优化的思想融入到飞机电力系统的设计中。

欧盟建立飞机电力系统部件多层次模型库<sup>[96]</sup>,开发电力系统构架设计优化工具,以部件间的控制为内环,以部件的集成构架为外环,进行

新型电力系统架构开发过程中的可靠性、重量和电气性能综合评估和优化<sup>[1-2]</sup>,还可以进行敏感度分析<sup>[97]</sup>、稳定性评估<sup>[98]</sup>、基于模型的故障检测和验证<sup>[99-102]</sup>研究。美国加州 UTC 联合科技研究中心和伯克利分校提出,借助基于平台的组合方法<sup>[103]</sup>分别对系统拓扑<sup>[51]</sup>和控制<sup>[57-58]</sup>进行优化设计,自动优化生成优化的飞机电力系统方案。波音和弗吉尼亚理工大学共同合作开发了飞机电气系统稳定性分析软件<sup>[104]</sup>。

KBE 技术<sup>[95]</sup>也在国外航空领域得到了一定的应用。通用电气公司将 AI 技术和计算流体力学相结合设计飞机气动机构,使用人类专家先验思路消除客户在迭代开发工作中干预,系统表现出优异的计划前检查能力<sup>[105]</sup>。NASA、美国弗吉尼亚大学和喷气推进实验室联合开发的智能综合设计环境将高性能计算、大容量通信网络、虚拟产品开发、KBE、计算智能、人机交互和产品信息管理等前沿技术融合在一起,使分布在不同地区的科学家和工程师共同利用知识对系统进行开发设计<sup>[106]</sup>。

在后续研究中,还需要进一步整合各子系统的设计、验证功能,引入智能优化的思想,形成综合化、智能化的数字设计和验证平台,以设计后决策代替设计前决策,从而避免迭代设计,提高设计效率,降低设计周期、成本和技术风险。

### 3.2 设计问题的特点

结合第 2 节分析,飞机电力系统优化设计问题具有高维多目标、高维设计空间、多约束、多学科以及多层次嵌套等特点。

#### 1) 高维多目标

飞机电力系统的设计是一个复杂的工程问题,包含可靠性、维修性、重量、成本和电能质量等多个设计目标,因此属于高维多目标设计问题,必然导致计算复杂度增加。

#### 2) 高维设计空间

飞机电力系统的设计参数包含网络拓扑、各部件容量和能量分配的相关参数等,构成了高维的设计空间,往往会导致维数灾难<sup>[107]</sup>。

#### 3) 多约束

飞机电力系统必须遵循一定规则,如:电源节点不能直接与负载节点连接,负载的供电可靠性,

系统整体的可靠度等。因此其设计必然受到设计参数、状态参数和目标参数等多个约束的影响,加剧了解决过程的复杂性。

#### 4) 多学科<sup>[108]</sup>

电气化飞机电力系统设计优化问题涉及动力、电、机械、液、气、热等多个学科和子系统,各学科、子系统和设计问题之间相互作用和影响,导致系统参数互相耦合,需要权衡设计。

#### 5) 多层次嵌套

飞机电力系统设计问题是一个两层嵌套决策问题:上层通过系统的改造影响能量分配路径的选择,属于静态设计问题;而下层则依据设计者的投资决策去选择效用最大的路径,属于动态设计问题。此外,系统的静态设计又是一个多层次嵌套决策问题:顶层通过对改变子系统间的拓扑结构改善系统性能;底层通过部件/器件工艺技术的选择提升系统性能。

设计人员需要借助数字化、智能化的设计手段才能解决上述问题,降低系统的设计难度。

### 3.3 智能化设计理论、功能和特点

#### 3.3.1 智能化设计理论框架体系

先进飞机电力系统智能化设计的理论框架体系如图 1 所示。飞机电力系统智能化设计包括所有与飞机电力系统有关的决策问题,是决策者按照先进的科学程序,运用现代智能化技术,对未来

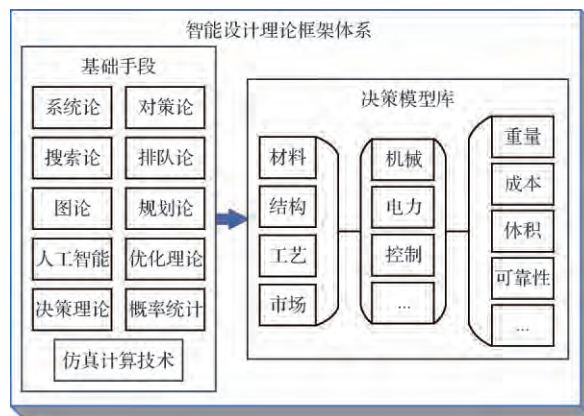


图 1 先进飞机电力系统智能设计理论框架体系  
Fig. 1 Theory framework of intelligent design for advanced aircraft power system

飞机技术发展的方向、目标以及解决设计问题的原则、方法所做的选择和决定。不同于传统的经验型设计方法,智能化设计属于科学型设计:智能化设计运用现代科学方法(如物理学、运筹学等),通过建立数学模型,对所决策的设计问题进行精确的定量描述;同时,智能化设计运用现代科学技术,特别是人工智能、优化方法和电子计算机,求解假设问题的模型,以获得最优(或近似最优)的决策结果。

### 3.3.2 智能化设计平台功能

根据上述理论框架,本文构建的飞机电力系统智能化设计平台功能如图2所示。

1) 数学模型库。数学模型以多种形式描述研究对象,反映了系统的主要组成和各部分的相互作用,是智能化设计的核心。用于电力系统智能化设计的决策模型是以材料、结构、工艺和市场等方面的技术参数为知识和约束条件,以机械、电力、控制等物理连接关系为纽带,构建的多个设计目标的标准化的数学模型。

2) 模型近似。飞机电力系统结构庞大,为降低计算成本,平台通过数学模型的方法将目标函数和约束近似拟合,从而降低模型复杂度。目前,常用的方法有多项式响应面法、径向基神经网络方法、Kringing方法<sup>[109]</sup>和增强的径向基函数法等。

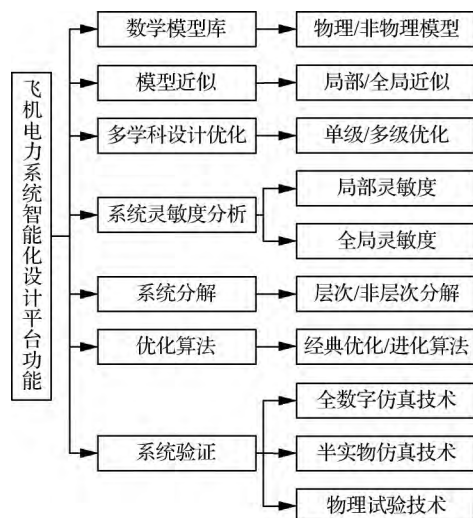


图2 飞机电力系统智能化设计平台功能

Fig. 2 Function of intelligent design platform for aircraft power system

3) 多学科设计优化(Multi-disciplinary Design Optimization, MDO)。针对系统参数耦合的特征,MDO<sup>[110]</sup>通过建立合理的优化体系、选择适当的策略来减少优化时的计算负担,从结构上解决设计优化问题所面临的多学科难题。目前方法主要有多学科可行方法、单学科可行方法、同时分析优化方法、并行子空间优化方法、协同优化方法等。

4) 系统灵敏度分析。为识别系统参数间复杂的耦合关系,设计人员通过灵敏度分析等手段观察参数的变化而表现出来的敏感程度,了解系统输出参数随输入参数的变化情况,从而为设计问题的分解和决策提供依据。比较常用的是全局和局部灵敏度方法。

5) 系统分解。系统分解根据对飞机电力系统参数耦合关系的识别结果,将系统分为多个子系统,从而实现多个子系统的并行或串行处理和优化,以此来提高优化效率,减少计算时间。

6) 优化算法。优化算法是飞机电力系统优化设计的核心部分,也是智能化设计的基础手段。可归纳为有严格数学定义的经典优化算法(梯度法、内点法等)和进化算法(模拟退火、神经网络、遗传算法和演化算法等)。

7) 系统验证。智能化设计离不开对其设计方案的验证,基于虚拟现实的仿真验证技术可以提高设计和验证效率,节省设计过程的成本和周期。

### 3.3.3 智能化设计特点

电力系统智能化设计具体特点如下:

1) 智能化设计融合CAE技术和AI技术,将工程设计以及分析等活动有机整合,形成知识的系统构架,通过知识驱动和最佳实践的积累,提出设计问题的最优解决方案。

2) 智能化设计具有模块化的特点,能充分利用现有的设计模块,对各子系统进行既独立又交叉的优化设计,有效地组织和管理整个设计过程,具有很强的灵活性。

3) 智能化设计具有并行性的特点,在设计初始阶段就考虑系统从概念设计到报废处理的全生命期的各个方面,并能通过网络将分散在不同地区的设计部门组织起来进行分布式设计。

4) 智能化设计需要集成通信、数据库以及优



化设计过程和定性解计算的可视化环境,应当具备易于使用、鲁棒等特点。

总之,飞机电力系统智能化设计具有基于知识和智能、模块化、并行性和设计环境友好 4 个特征,可以避免盲目性和设计返工造成的人力、物力的浪费,提高设计质量,降低设计风险,缩短产品的设计周期。

### 3.4 智能化设计流程

结合 3.3.2 节所述设计平台功能,本文提出覆盖飞机全生命周期的飞机电力系统数字化、智能化的设计和验证流程如图 3 所示。

在生命周期的每个阶段,设计平台在明确当

前阶段任务目标的基础上,调用相应的设计及决策模型进行系统集成;根据设计需求,权衡计算精度和成本,通过合适的试验设计方法,获得足量数据,使用近似技术构建满足设计需求的元模型;而后结合相关技术条件参数,借助敏感度分析等方法,探索输入参数、输出目标之间的变化关系和趋势,确定设计目标关于设计参数的敏感因素;根据分析结果,分割系统,对各子系统进行综合协调,确定最佳参数组合,得到设计对象关于任务目标的 Pareto 最优解;结合具体应用和专家意见等多方面因素,对形成的多个集成方案进行综合决策,确定最终方案;最后,根据不同生命周期阶段的需求,选用合适的手段对系统集成方案进行验证。

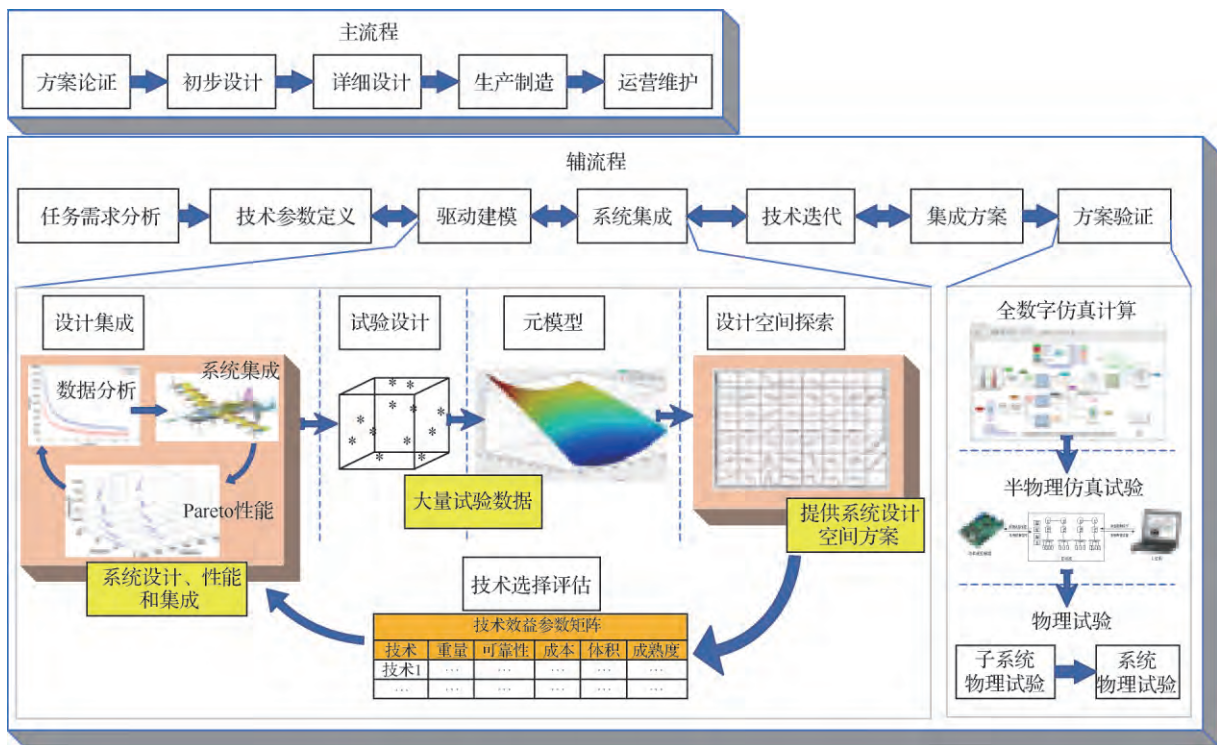


图 3 先进航空电力系统智能设计流程

Fig. 3 Intelligent design process of advanced aircraft power system

### 3.5 关键技术

电力系统智能化设计平台的关键技术包括:

- ① 多学科建模技术;
- ② 智能化多学科设计优化技术;
- ③ 基于虚拟现实的分布式仿真验证技术。

#### 1) 多学科建模技术

开发多学科模型是进行电力系统设计、分析、

优化的首要任务,具体应包括系统的体积、重量、功率和冷却以及可靠性、可用性、维护性和成本等方面的决策模型。

目前在商业软件中二次开发的模型通常是系统或部件的物理或时频域模型,通用性差、计算量大、耗时长,难以满足计算成本的要求,不能直接用于系统的智能化设计。因此,需要在此基础上,



借助供应商以及其他学科知识的支持,建立具有通用接口的决策模型,形成标准化的多学科模型库。

## 2) 智能化多学科设计优化技术

多学科设计优化技术是进行飞机电力系统智能化设计的基本工具,也是解决飞机电力系统优化设计问题的主要手段<sup>[110-112]</sup>,具体包括近似技术、灵敏度分析、系统分解技术、MDO 和优化/决策算法。

智能化设计要求设计平台还应具备一定的自主能力:① 能够自主权衡模型的计算精度和成本,从而形成最佳的优化模型;② 能够根据敏感度分析,自动分割重组设计问题,减少人工干预;③ 能够根据具体问题的特点,自动选择算法,如开展鲁棒优化、组合优化等,提高设计精度和效率;④ 能够自动将多学科优化设计等算法与优化算法相结合,获取最佳的组合效果。

## 3) 基于虚拟现实的分布式仿真验证技术

为实现对设计的验证,具有分布式计算能力并且能够直观显示试验结果的系统验证技术是飞机电力系统智能化设计必不可少的环节。

近年,相关飞机设计所都进行了一定的仿真试验研究,但这些验证工作缺乏统一的流程和标准规范,通用性差,难以实现不同系统的移植和集成,虚拟集成试验技术还有待于进一步研究。

## 4 结 论

电气化技术推动了飞机电力系统综合化和智能化的发展,对飞机电力系统及其管理控制系统性能提出了更高的要求,也给飞机电力系统的设计带来了新的挑战,数字化、综合化、智能化的设计技术是未来的研究重点。

电气化飞机电力系统的智能化设计显著特征是将人工智能技术融入到飞机电力系统设计/验证过程中,从飞机总体全生命周期的多项性能出发,综合协调飞机各子系统资源,并进行仿真试验验证,从而实现电力系统的综合性能的优化设计。

为建立飞机电力系统智能化设计/评估体系,涵盖飞机全生命周期的多学科建模技术,模块化、自动化的设计平台软件技术,以及标准化的分布式可视化验证技术是亟待突破的核心问题。

## 参 考 文 献

- [1] HERNANDEZ D, SAUTREUIL M, RETIERE N, et al. A new methodology for aircraft HVDC power systems design[C] // IEEE International Conference on Industrial Technology. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [2] RIU D, SAUTREUIL M, RETIÈRE N, et al. Control and design of DC grids for robust integration of electrical devices. Application to aircraft power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 58(2): 181-189.
- [3] 郭生荣. 航空机电系统综合技术发展[J]. 航空精密制造技术, 2016, 52(1): 1-6.  
GUO S R. Development of aviation electromechanical system integration technology[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2016, 52(1): 1-6 (in Chinese).
- [4] 张兰红, 胡育文, 黄文新. 异步电机启动/发电系统启动向发电的转换研究[J]. 航空学报, 2005, 26(3): 356-361.  
ZHANG L H, HU Y W, HUANG W X. Research on the conversion from starting mode to generating mode of induction machine starter /generator system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2005, 26(3): 356-361 (in Chinese).
- [5] 张方华, 龚春英, 邓翔. 航空静止逆变器的研究综述[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(1): 19-26.  
ZHANG F H, GONG C Y, DENG X. Review of aeronautic static inverter[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2014, 46(1): 19-26 (in Chinese).
- [6] 阮立刚, 王莉. 一种新型直流固态功率控制器行为模型[J]. 航空学报, 2012, 33(1): 129-137.  
RUAN L G, WANG L. A novel behavioral model of solid state power controller[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 129-137 (in Chinese).
- [7] 白龙, 孙楚, 周元钧. 航空机电作动器的混合整流全状态反馈控制[J]. 航空学报, 2016, 37(6): 1940-1952.  
BAI L, SUN C, ZHOU Y J. Full-state feedback control of a novel hybrid rectifier applied to aircraft electric actuator load[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(6): 1940-1952 (in Chinese).
- [8] 相里康, 马瑞卿. 飞机全电刹车机电作动系统上电自检测[J]. 航空学报, 2016, 37(12): 3832-3842.  
XIANG L K, MA R Q. Power-on self-test of electro-mechanical actuation system for aircraft electric braking[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(12): 3832-3842 (in Chinese).
- [9] 王丹阳. 宽体客机电网实时仿真技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 52-66.

- WANG D Y. Research on real time simulation of wide-body aircraft electric power system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017; 52-66 (in Chinese).
- [10] 雷屹坤. 飞机综合一体化热/能量管理系统方案研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014; 18-30.
- LEI Y K. Research on scheme of integrated thermal and energy management system of aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014; 18-30 (in Chinese).
- [11] 郑先成, 张晓斌, 黄铁山. 国外飞机电气技术的现状及对我国多电飞机技术发展的考虑[J]. 航空计算技术, 2007, 37(5): 120-122.
- ZHENG X C, ZHANG X B, HUANG T S. States of foreign aircraft electric technologies and consideration on our aircraft electric technologic developments[J]. Aeronautical Computing Technique, 2007, 37(5): 120-122 (in Chinese).
- [12] FELDER J L, BROWN G V, KIM H D, et al. Turboelectric distributed propulsion in a hybrid wing body aircraft: ISABE-2011-1340[R]. Washington, D. C.: NASA Glenn Research Center, 2011.
- [13] BERTON J J, KIM H D, SINGH R, et al. Turboelectric distributed propulsion benefits on the N3-X vehicle[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2014, 86(6): 558-561.
- [14] BROWN G. Weights and efficiencies of electric components of a turboelectric aircraft propulsion system[C]// AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Reston, VA: AIAA, 2013; 1-18.
- [15] ARMSTRONG M J, ROSS C A H, BLACKWELDER M J, et al. Propulsion system component considerations for NASA N3-X turboelectric distributed propulsion system [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2015, 5(2): 344-353.
- [16] VRATNY P C, KUHN H, HORNING M. Influences of voltage variations on electric power architectures for hybrid electric aircraft [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2017, 8(1): 31-43.
- [17] JONES C E, NORMAN P J, GALLOWAY S J, et al. Comparison of candidate architectures for future distributed propulsion aircraft[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(6): 1-9.
- [18] ARMSTRONG M, ROSS C, PHILLIPS D, et al. Stability, transient response, control, and safety of a high-power electric grid for turboelectric propulsion of aircraft; NASA/CR-2013-217865[R]. Washington, D. C.: NASA, 2013.
- [19] ARMSTRONG M J, ROSS C A H, BLACKWELDER M J, et al. Trade studies for NASA N3-X turboelectric distributed propulsion system electrical power system architecture [J]. SAE International Journal of Aerospace, 2012, 5(2): 325-336.
- [20] ARMSTRONG M J, BLACKWELDER M, BOLLMAN A, et al. Architecture, voltage, and components for a turboelectric distributed propulsion electric grid; NASA/CR-2015-218440[R]. Washington, D. C.: NASA, 2015.
- [21] NALIANDA D, SINGH R. Turbo-electric distributed propulsion opportunities, benefits and challenges[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal, 2014, 86(6): 543-549.
- [22] GOHARDANI A S, DOULGERIS G, SINGH R. Challenges of future aircraft propulsion technology and its potential application for the all electric commercial aircraft [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2011, 47(5): 369-391.
- [23] MALKIN P, PAGONIS M. Superconducting electric power systems for hybrid electric aircraft[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(6): 515-518.
- [24] BERG F, PALMER J, MILLER P, et al. HTS electrical system for a distributed propulsion aircraft [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1-5.
- [25] 孔祥浩, 张卓然, 陆嘉伟, 等. 分布式电推进飞机电力系统研究综述[J]. 航空学报, 2018, 39(1): 021651.
- KONG X H, ZHANG Z R, LU J W, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 021651 (in Chinese).
- [26] 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 Z R, YU L, LI J C, 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 (in Chinese).
- [27] 黄俊, 杨凤田. 新能源电动飞机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57-68.
- HUANG J, YANG F T. Development and challenges of electric aircraft with new energies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 57-68 (in Chinese).
- [28] ANTCLIFF K R, CAPRISTAN F M. Conceptual design of the Parallel Electric-Gas Architecture with Synergistic Utilization Scheme (PEGASUS) concept [C]// AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference. Reston, VA: AIAA, 2017; 1-6.
- [29] 宋利康, 郑堂介, 朱永国, 等. 飞机脉动总装智能生产线

- 构建技术[J]. 航空制造技术, 2018(Z1): 28-32.
- SONG L K, ZHENG T J, ZHU Y G, et al. Construction technologies of intelligent pulse production line for aircraft final assembly[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(Z1): 28-32 (in Chinese).
- [30] 帅朝林, 陈雪梅, 邱世广. 虚拟现实技术在航空智能制造中的应用思考与展望[J]. 航空制造技术, 2016, 59(16): 26-33.
- SHUAI C L, CHEN X M, QIU S G. Thinking and prospect of virtual reality application in aerospace intelligent manufacturing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2016, 59(16): 26-33 (in Chinese).
- [31] 曾艺. 民用飞机客舱智能舷窗系统设计[J]. 航空科学技术, 2015, 26(8): 53-56.
- ZENG Y. Design of cabin smart window system for civil aircrafts[J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(8): 53-56 (in Chinese).
- [32] BUSCHHORN S T, KESSLER S S, LACHMANN N, et al. Electrothermal icing protection of aerosurfaces using conductive polymer nanocomposites [C] // 54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston, VA: AIAA, 2013: AIAA-2013-1729.
- [33] 李永锋. 宽体客机飞控电作动系统设计[J]. 航空学报, 2017, 38(S1): 147-155.
- LI Y F. Electrically powered actuation system design for long range wide body commercial aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(S1): 147-155 (in Chinese).
- [34] 孟繁鑫, 王瑞琪, 高赞军, 等. 多电飞机电动环境控制系统关键技术研究[J]. 航空科学技术, 2018, 29(2): 1-8.
- MENG F X, WANG R Q, GAO Z J, et al. Research of key technology for the more electrical aircraft electric environmental control system[J]. Aeronautical Science and Technology, 2018, 29(2): 1-8 (in Chinese).
- [35] 袁起航, 林贵平, 李广超, 等. 电脉冲除冰系统电磁脉冲力仿真分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(3): 632-638.
- YUAN Q H, LIN G P, LI G C, et al. Simulation and analysis on electromagnetic impulse force of electro-impulse de-icing system[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(3): 632-638 (in Chinese).
- [36] 高泽海, 马存宝, 宋东. 飞机燃油供油系统性能退化与故障预测[J]. 西北工业大学学报, 2015(2): 209-215.
- GAO Z H, MA C B, SONG D. Aircraft fuel feeding system performance degradation and failure prediction [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2015 (2): 209-215 (in Chinese).
- [37] LÜCKEN A, BROMBACH J, SCHULZ D. Design and protection of a high voltage DC onboard grid with integrated fuel cell system on more electric aircraft[C]//Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 1-6.
- [38] SANTARELLI M, CABRERA M, CALÍ M. Solid oxide fuel based auxiliary power unit for regional jets: Design and mission simulation with different cell geometries[J]. Journal of Fuel Cell Science & Technology, 2010, 7(2): 58-66.
- [39] ROMEO G, CESTINO E, BORELLO F, et al. An engineering method for air-cooling design of 2-seat propeller driven aircraft powered by fuel cells[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2011, 24(1): 79-88.
- [40] DAI Z H, WANG L, YANG S S. Fuel cell based auxiliary power unit in more electric aircraft[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [41] 阮立刚, 王莉, 叶家瑜, 等. 基于混合信号状态机的交流固态功率控制器功能模型[J]. 航空学报, 2017, 38(11): 321133.
- RUAN L G, WANG L, YE J Y, et al. Functional modeling of AC solid state power controller based on mixed signal state machine[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(11): 321133 (in Chinese).
- [42] SCHROTER T, SCHULZ D. The electrical aircraft network-benefits and drawbacks of modifications[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2013, 49(1): 189-200.
- [43] COTTON I, NELMS A, HUSBAND M. Defining safe operating voltages for aerospace electrical systems[C]//Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 67-71.
- [44] COTTON I, NELMS A. High voltage aircraft power systems[J]. IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine, 2008, 23(2): 25-32.
- [45] CHRISTOU I, NELMS A, COTTON I, et al. Choice of optimal voltage for more electric aircraft wiring systems [J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2011, 1(1): 24-30.
- [46] NYA B H, BROMBACH J, SCHULZ D. Benefits of higher voltage levels in aircraft electrical power systems [C]//Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-5.
- [47] NYA B, BROMBACH J, SCHRÖTER T, et al. Weight evaluation of cabin power architecture on smaller civil aircraft [C] // International Workshop on Aircraft System Technologies. Hamburg, Germany: Deutsche Nationalbibliothek, 2011: 1-10.
- [48] BROMBACH J, LUCKEN A, NYA B, et al. Comparison of different electrical HVDC-architectures for aircraft ap-

- plication[C]// *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-6.
- [49] SCHROETER T, NYA B H, SCHULZ D. Potential analysis for the optimization of the electrical network of large modern civil and future single aisle aircraft and examples of the network capacity utilisation[C]// *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 1-7.
- [50] KOSTAKIS T, NORMAN P J, GALLOWAY S J. Assessing network architectures for the more electric engine and aircraft[C]// *Power Engineering Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 1-6.
- [51] NUZZO P, XU H, OZAY N, et al. A contract-based methodology for aircraft electric power system design[J]. *IEEE Access*, 2014, 2(2): 1-25.
- [52] 陈娟, 王占林. 飞机多机电系统综合仿真的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2003, 24(4): 638-640.  
CHEN J, WANG Z L. Investigation of integrating management of multiple electro-mechanical system[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(4): 638-640 (in Chinese).
- [53] 郑伟, 解向军. 先进战斗机综合机电系统试验技术研究[J]. *飞机设计*, 2010, 30(5): 31-35.  
ZHENG W, XIE X J. Research on integrated electromechanical systems test technology for advanced fighter[J]. *Aircraft Design*, 2010, 30(5): 31-35 (in Chinese).
- [54] 郭鹏, 李亚晖, 孙允明. 机载机电综合管理系统架构建模与仿真方法[J]. *电光与控制*, 2017, 24(12): 100-105.  
GUO P, LI Y H, SUN Y M. Architecture modeling and simulation methods of integrated electromechanical management system[J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(12): 100-105 (in Chinese).
- [55] SINAN Y. Optimal controller design for more-electric aircraft power systems[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2011: 22-27.
- [56] XU H. Design, specification, and synthesis of aircraft electric power systems control logic[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2013: 42-73.
- [57] MAASOUMY M, NUZZO P, IANDOLA F, et al. Optimal load management system for aircraft electric power distribution[C]// *IEEE Conference on Decision and Control*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 2939-2945.
- [58] SHAHSAVARI B, MAASOUMY M, SANGIOVANNI-VINCENTELLI A, et al. Stochastic model predictive control design for load management system of aircraft electrical power distribution[C]// *American Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 3649-3655.
- [59] XIA X, LAWSON C P. The development of a design methodology for dynamic power distribution management on a civil transport all electric aircraft[J]. *Aerospace Science & Technology*, 2013, 25(1): 125-131.
- [60] XIA X. Dynamic power distribution management for all electric aircraft[D]. Bedfordshire: Cranfield University, 2011: 67-79.
- [61] 彭城. 多电飞机电能管理关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014: 31-34.  
PENG C. Key technologies of electric power management for more electrical aircraft[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014: 31-34 (in Chinese).
- [62] 吴雅婷. 宽体客机电网管理技术研究和实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 11-16.  
WU Y T. Research and realization on grid-management technology of wide-body airplane[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 11-16 (in Chinese).
- [63] 唐彬鑫. 飞机多电化负载特性分析和管理工作研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017: 31-36.  
TANG B X. Research on characteristics analysis and management of MEA electrical loads[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017: 31-36 (in Chinese).
- [64] 葛玉雪, 宋笔锋, 裴扬. 基于可用能的多电飞机能量利用率分析方法[J]. *航空学报*, 2014, 35(5): 1276-1283.  
GE Y X, SONG B F, PEI Y. Analysis method of more-electric aircraft energy efficiency based on exergy[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(5): 1276-1283 (in Chinese).
- [65] BARRUEL F, CAISLEY A, RETIERE N, et al. Stability approach for vehicles DC power network: Application to aircraft on-board system[C]// *Power Electronics Specialists Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2005: 1163-1169.
- [66] AREERAK K N, WU T, BOZHKO S V, et al. Aircraft power system stability study including effect of voltage control and actuators dynamic[J]. *IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems*, 2011, 47(4): 2574-2589.
- [67] AREERAK K N, BOZHKO S V, ASHER G M. DQ-transformation approach for modelling and stability analysis of AC-DC power system with controlled PWM rectifier and constant power loads[C]// *2008 13th International Power Electronics and Motion Control Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 2049-2054.
- [68] BROMBACH J, JORDAN M, GRUMM F, et al. Influence of small constant-power-loads on the power supply system of an aircraft[C]// *International Conference on Compatibility and Power Electronics*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 97-102.

- [69] ZHENG X, LIU W, ZHANG X. Voltage stability analysis for aircraft variable frequency generation system loaded with PWM rectifier[C]// 2013 IEEE 14th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL) Piscataway, NJ: IEEE Press, 2013: 1-5.
- [70] EL-KISHKY H, EBRAHIMI H. On modeling and control of advanced aircraft electric power systems: System stability and bifurcation analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63: 246-259.
- [71] 朱成花, 严仰光. 一种改进的阻抗比判据[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(3): 315-320.  
ZHU C H, YAN Y G. Improved impedance criterion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 38(3): 315-320 (in Chinese).
- [72] 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 Y D, ZHANG X, XU L. A survey on stability analysis for HVDC power system in MEA[J]. Journal of Power Supply, 2017, 15(2): 2-11 (in Chinese).
- [73] KUHN M R, JI Y, SCHRDER D. Stability studies of critical DC power system component for more electric aircraft using  $\mu$  sensitivity[C]// Mediterranean Conference on Control & Automation. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2007: 1-6.
- [74] SUMSUROOAH S, ODAVIC M, BOZHKO S. A modeling methodology for robust stability analysis of nonlinear electrical power systems under parameter uncertainties [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(5): 4416-4425.
- [75] WENG K H, CHEN T, LING K V, et al. Variance analysis of robust state estimation in power system using influence function[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 92: 53-62.
- [76] CHEN T. Robust state estimation for power systems via moving horizon strategy[J]. Sustainable Energy Grids & Networks, 2017, 10: 46-54.
- [77] HORCH A, NACERI A, AYAD A. Power system stabilizer design using  $H_{\infty}$  robust technique to enhance robustness of power system[C]// Renewable and Sustainable Energy Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 884-889.
- [78] PERES W, JÚNIOR I C S, FILHO J A P. Gradient based hybrid metaheuristics for robust tuning of power system stabilizers[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 95: 47-72.
- [79] FURTAT I B, FRADKOV A L. Robust control of multi-machine power systems with compensation of disturbances [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 584-590.
- [80] CAMPOS V A F D, CRUZ J J D. Robust hierarchized controllers using wide area measurements in power systems[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83: 392-401.
- [81] BRIVIO C, MONCECCHI M, MANDELLI S, et al. A novel software package for the robust design of off-grid power systems[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 166: 668-679.
- [82] WU T, BOZHKO S V, ASHER G M, et al. Accelerated functional modeling of aircraft electrical power systems including fault scenarios[C]// 2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 2537-2544.
- [83] 代京, 张平, 李行善, 等. 航空机电系统测试性建模与分析新方法[J]. 航空学报, 2010, 31(2): 277-284.  
DAI J, ZHANG P, LI X S, et al. Novel approach for aviation electromechanical system testability modeling and analysis [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(2): 277-284 (in Chinese).
- [84] MENG L, YANG S, WANG L, et al. Integrated simulation of electric power systems based on LabVIEW and Simulink[C]// International Conference on Future Computer Sciences and Application. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2011: 78-81.
- [85] WANG C, HUANG J. Simulation and evaluation models of aircraft power supply system based on Simulink/LabVIEW[C]// Fourth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 81-86.
- [86] LI B, LI W, ZHANG X, et al. Modeling and simulation of aircraft power supply system based on Dymola and Modelica[C]// International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [87] DAI Z H, WANG L, YANG S S. Multi-signal model in application of spacecraft power system testability[C]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Reston, VA: AIAA, 2016: 1-7.
- [88] MODELISAR. Functional mock-up interface for model exchange[J]. Information Technology for European Advancement, 2010(1): 17-23.
- [89] 李伟林, 张晓斌, 董延军. 电力系统综合仿真方法研究(一): VPNET(英文)[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 95-102.  
LI W L, ZHANG X B, DONG Y J. Study of co-simulation methods applied in power systems (Part I): VPNET [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 95-102 (in Chinese).
- [90] 李浩敏. 基于模型的飞机系统架构设计综述[J]. 民用飞

- 机设计与研究, 2017(3): 17-20.
- LI H M. Review on the model-based A/C system architecture design[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2017(3): 17-20 (in Chinese).
- [91] 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(2): 1-7.
- LU Q, WU S. The technique research on virtual integration test for civil aircraft[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2017(2): 1-7 (in Chinese).
- [92] 宋文滨. 未来飞机的智能化技术综述与发展展望[J]. *民用飞机设计与研究*, 2017(3): 122-129.
- SONG W B. Smart technologies for future aircraft[J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2017(3): 122-129 (in Chinese).
- [93] 吴光辉, 刘虎. 大型客机数字化设计支持体系框架[J]. *航空学报*, 2008, 29(5): 1386-1394.
- WU G H, LIU H. Framework of digital design support system-of-systems for large airliners[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2008, 29(5): 1386-1394 (in Chinese).
- [94] 邵忠天, 田玉斌, 张卓. 飞机电气系统数字化设计流程优化研究[J]. *航空科学技术*, 2016, 27(6): 30-33.
- TAI Z T, TIAN Y B, ZHANG Z. Research on aircraft EPS digital design flow optimization[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2016, 27(6): 30-33 (in Chinese).
- [95] ALSINA J. Development of an aircraft design expert system[D]. England: Cranfield University, 1988: 36-47.
- [96] BALS J, HOFER G, PFEIFFER A, et al. Virtual iron bird—A multidisciplinary modelling and simulation platform for new aircraft system architectures[C]//*Deutscher Luft-und Raumfahrtkongress 2005*, Bonn: German Society for Aeronautics and Astronautics, 2005: 1-9.
- [97] JI Y, BALS J. A novel Modelica signal analysis tool towards design of more electric aircraft[C]//*IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 152-156.
- [98] KUHN M R, JI Y, JOOS H D, et al. An approach for stability analysis of nonlinear electrical network using anti optimization[C]//*2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2008: 3873-3879.
- [99] ROGERSTEN R, XU H, OZAY N, et al. An aircraft electric power testbed for validating automatically synthesized reactive control protocols[C]//*International Conference on Hybrid Systems: Computation and Control*. New York: ACM, 2013: 89-94.
- [100] KUHN M R, JI Y. Modelica for large scale aircraft electrical network V&V[C]//*Proceedings of the 10th International Modelica Conference*. Lund: Modelica Association, 2014: 747-756.
- [101] ROGERSTEN R, XU H, OZAY N, et al. Control software synthesis and validation for a vehicular electric power distribution testbed[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2014, 11(10): 665-678.
- [102] BESTER J E, MABWE A M, HAJJAJI A E. A virtual electrical test bench for more electrical aircraft architecture verification and energy management development[C]//*European Conference on Power Electronics and Applications*. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2015: 1-10.
- [103] PINTO A, BECZ S, REEVE H. Correct-by-construction design of aircraft electric power systems[C]//*AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations*. Reston, VA: AIAA, 2013: 1-11.
- [104] FU S W J, KARIMI K J, JAKSIC M D, et al. Electrical power system stability optimization system: US 201401220-50A1 [P]. 2014-05-01.
- [105] LAU M Y. Expert system for aerial vehicle deployment system selection[D]. Toronto: Ryerson University, 2005: 26-45.
- [106] NOOR A K, VENNERI S L. ISE: Intelligent synthesis environment for future aerospace systems[J]. *IEEE Aerospace & Electronic Systems Magazine*, 2008, 23(4): 31-44.
- [107] FRANS V D B, ENGELBRECHT A P. A cooperative approach to particle swarm optimization[J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 225-239.
- [108] 余雄庆, 丁运亮. 多学科设计优化算法及其在飞行器设计中应用[J]. *航空学报*, 2000, 21(1): 2-7.
- YU X Q, DING Y L. Multidisciplinary design optimization a survey of its algorithms and applications to aircraft design[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2000, 21(1): 2-7 (in Chinese).
- [109] 韩忠华. Kriging 模型及代理优化算法研究进展[J]. *航空学报*, 2016, 37(11): 3197-3225.
- HAN Z H. Kriging surrogate model and its application to design optimization: A review of recent progress[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(11): 3197-3225 (in Chinese).
- [110] 桂业伟, 刘磊, 代光月, 等. 高超声速飞行器流-热-固耦合研究现状与软件开发[J]. *航空学报*, 2017, 38(7): 87-105.
- GUI Y W, LIU L, DAI Y G, et al. Research status of hypersonic vehicle fluid-thermal-solid coupling and software development[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(7): 87-105 (in Chinese).
- [111] ZHANG Q, LI H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2007, 11(6): 712-731.



[112] DEB K, JAIN H. Handling many-objective problems using an improved NSGA-II procedure[C]//2012 IEEE

Congress on Evolutionary Computation (CEC). Piscataway, NJ: IEEE Press, 2012: 1-8.

(责任编辑: 李丹)

## Review of intelligent design of electrified aircraft power system

WANG Li<sup>\*</sup>, DAI Zehua, YANG Shanshui, MAO Ling, YAN Yangguang

*Centre for More-Electric-Aircraft Power System of Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*

**Abstract:** Energy crisis and environmental problem propel the development of green aviation. Electrification of aircraft is the approach to green aviation, and has become the future direction of aviation technology. This paper introduces the history of the aircraft electrification, describes the key technologies and hot topics of the electrified aircraft power system, and then analyzes the key technologies of the design of advanced aircraft power system. The paper also points out the characteristics of the integration and intelligence of the aircraft power system. After that, problems of the design of aircraft power system are analyzed to help build theoretical framework of intelligent design platform of advanced aircraft power system. Functions and characteristics of the platform are proposed, and the key technologies support the intelligent power system design are analyzed, pointing out the future directions of intelligent design of aviation.

**Keywords:** electrification; more/all electric; electric propulsion; power system; system-level research; intelligent design; multi-discipline design optimization

Received: 2018-06-01; Revised: 2018-07-16; Accepted: 2018-08-16; Published online: 2018-08-27 17:34

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20190201.html>

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (51777092)

\* Corresponding author. E-mail: liwang@nuaa.edu.cn