文章编号:1674-8190(2025)06-169-15

飞机电力系统架构优化与能量管理策略研究

宋晓辉,王博,曹欣,刘锋
(庆安集团有限公司 航空设备研究所,西安 710077)

摘　要: 随着飞机电气化的发展,全电飞机二级能源优化问题得以有效解决。本文分析了飞机电力系统的架构、能源不稳定性以及动态管理控制方法;概述了基于多目标优化的飞机电力系统架构方法,综合考虑了重量、可靠性、安全性、效率及可再生能源等因素;基于能效和电能质量函数,研究了飞机不同功率的流动关系,比较了飞机在不同微电网架构下的控制策略。结合相关文献,对飞机电力系统的电源稳定性进行了分析,总结了飞机电力系统架构优化方法的发展趋势。结合当前EMS技术发展和架构优化现状,对未来飞机微电网与飞机电力系统能量优化问题进行了展望。

关键词: 多电/全电飞机;能量优化与评估方法;电力系统能量管理;稳定性分析;健康管理系统
中图分类号: V242　　**文献标识码:** A
DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2025.06.19

Optimization of aircraft power system architecture and energy management strategy

SONG Xiaohui, WANG Bo, CAO Xin, LIU Feng
(Aviation Equipment Research Institute, Qing'an Group Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: With the development of fully electric aircraft, especially the technological advances in hybrid-electric and electric propulsion aircraft, the optimization of aircraft power system design and operation has been effectively addressed. The basic concepts and research progress of aircraft power system optimization, evaluation technologies, and dynamic management control methods are analyzed in this paper. The aircraft power system architecture method is summarized based on multi-objective optimization, and the factors such as weight, reliability, safety, efficiency, and renewable energy characteristics are considered. Based on cost functions related to energy efficiency and power quality, the relationships of power flow in the aircraft are studied, and the control strategies for different aircraft microgrid architectures are compared. With reference to relevant literature, the power quality and stability issues in aircraft power systems are discussed. The development trends of optimization methods for aircraft power system architecture are summarized. Considering the current status of EMS (Energy Management System) technology development and architecture optimization, the energy optimization issues of future aircraft microgrids and aircraft power systems are discussed.

Key words: more/all electric aircraft; energy optimization and evaluation method; energy management of power system; stability analysis; healthy management system

收稿日期: 2025-04-02;　**修回日期:** 2025-08-25
通信作者: 宋晓辉(1996—),男,硕士,助理工程师。E-mail: 742866256@qq.com
引用格式: 宋晓辉,王博,曹欣,等. 飞机电力系统架构优化与能量管理策略研究[J]. 航空工程进展, 2025, 16(6): 169-183.
SONG Xiaohui, WANG Bo, CAO Xin, et al. Optimization of aircraft power system architecture and energy management strategy [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(6): 169-183. (in Chinese)
*第二十七届中国科协年会学术论文

0 引 言

飞机的电力系统可以分为一级能源和二级能源。一级能源主要由燃油发动机提供推力,二级能源则包括液压、气动和电力系统。目前,飞机二级能源正朝着电气化方向发展,这一趋势在各种飞机领域中愈发明显。电气化的主要目的包括提高效率、减少二氧化碳排放以及降低运营成本[1]。随着多电飞机(MEA)和全电飞机(AEA)的出现,电力系统正逐步取代气动、液压和机械电力系统[2],电力终将成为飞机唯一的能量输入形式。近年来,随着低空经济和绿色航空的发展,全电飞机成为实现零排放航空的重要途径[3]。全电飞机和电推进飞机(EPA)的电力系统,其架构、电力能量优化管理以及功率控制密切相关[4-6]。在"全电"概念中,通过电作动代替液压作动来改善环境,需要对电功率的动态特性进行控制,以避免因发电机导致的过载。特别是对于电推进飞机,推力可以由电力系统提供[7-9]。随着电力电子技术的发展,高压直流(HVDC)系统正成为MEA/AEA和EPA的应用趋势[10],通常会将能量存储系统(如锂离子电池)集成到电力系统中,以提高系统的性能。

飞机的电力系统是一个"飞行微电网",用于实现不同的飞行功能。可再生能源(如燃料电池和光伏电池)已被集成到飞机电力系统中[11],作为辅助动力装置、应急电源或主推进混合能源,可再生能源的输出功率会影响飞机电力系统的电能质量。因此,对能量和功率管理是必要的[12-13]。近年来,电推进飞机已成为一个重要研究课题,这一趋势对飞机电力系统提出了更高要求。由于其性能随功率需求而变化,必须要优化能量管理,同时考虑飞机电力系统的稳定性、电能质量,以及由于典型能量组件的功率损耗而产生的热能[14-16]。飞机上能量的优化可以分为两个主要领域:1) 电力系统的静态架构和配置优化评估;2) 动态能量和功率规划或管理方法,以满足电力系统的效率、稳定性、可靠性、安全性的要求[17-18]。飞机的电力系统必须具有高可靠性和安全性,相关研究集中在飞机电力系统的容错、安全性和可靠性上[19],对飞机安全性的要求更为严格[20]。

因此,飞机的能量优化涵盖健康管理与故障分析,且需综合考虑不同的电压等级、负载特性和架构[21-22]。传统的能量转换设备,像发电机、电机和功率转换器,其设计参数要求较高,不同设备之间的耦合关系也极为复杂。鉴于此,多电飞机(MEA)、全电飞机(AEA)或电推进飞机(EPA)中电力系统的评估和优化方法,必须以数学多参数化和功率流分析为基础[23-24]。

在特定条件下,设计参数和优化参数为整数形式。例如,部分布尔变量只能取0或1,如开关操作状态,还有电力系统中电池数量或发电机的数量等[25-27]。因而,这些优化问题能够转化为多参数混合整数线性规划(MILP)。

要解决电力系统的能量问题,需依据飞机不同的能源架构,综合考量诸多因素,包括电力系统的参数边界、优化标准、变量以及目标函数等[28]。目前,已开发出评估整个MEA电力系统的工具[29-30]。

对于机载动态能量和电力管理系统,传统MEA的电力需求变化较小,这是因为发动机提供的总功率中,电力所占比重较低,所以其能量管理框架和控制方法相对简单。然而,全电飞机和电推进飞机的能源需求在飞行阶段变化显著[31]。为此,相关研究已从电源、电力分配网络和电力负载等方面提出众多能量和电力管理系统架构,用于协调各组件[32]。同时,还阐述了能量和电力管理控制方法,以达成诸如最小化燃料消耗、飞行成本,最大化系统可靠性[33-36],实现快速功率响应,增强稳定性以及提高电能质量等优化目标[37]。能量和电力优化已应用于飞行控制子系统、环境控制系统、电力发电和分配系统以及负载管理系统[38-41]等。

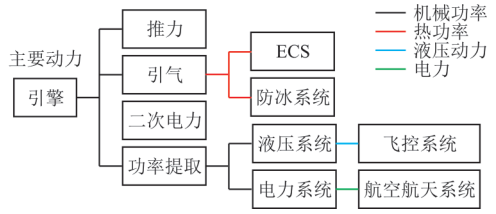
本文对飞机电力系统展开较为全面的分析,着重探讨架构优化和能源管理控制方面的关键技术进展以及发展趋势。

1 飞机电力系统结构研究综述

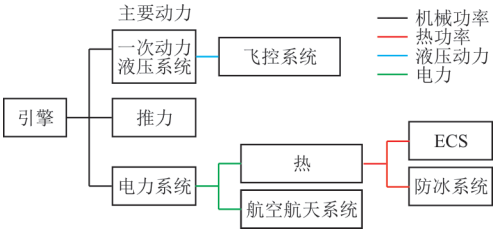
电力系统是多个部件作为一个系统协同工作,为飞机提供电力和推力。飞机电力系统可分为两种类别,负责提供电推力的电推进系统和为航空电子设备或电作动器提供电力的电力系统。

1.1　飞机电力系统结构的选择

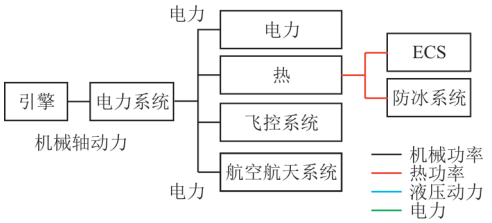
飞机电力系统架构如图1所示。在系统层面,不同部件输出功率的差异使得各部件之间的模型变得更为复杂。在电力系统中,各部件的设计通常独立完成,因此系统外形尺寸设计预留了一定余量。



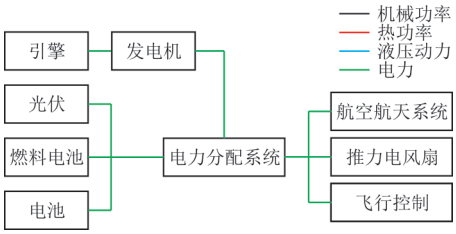
(a) 飞机电力系统的传统结构



(b) 飞机电力系统电气结构



(c) 全电飞机和电推进飞机结构



(d) 可再生能源集成的飞机结构

图1　飞机电力系统结构

Fig. 1　Aircraft power system structure

发动机作为飞机的关键部件,除了为飞机提供推力外,还能输出机械能、液压能和气动能。然而,各部件间的热传递会导致系统发热。电力系统负责将机械能转换为电能,但在此过程中会产生功耗并使整体温度升高。为应对温升问题,热管理系统借助电力和空气流动来降低飞机的温度。

随着技术的不断进步,一些可再生能源,如光伏(PV)、燃料电池或氢能,已应用于飞机电力系统[42]。相较于驱动电机,这些可再生能源具有节能减排、经济高效的优势。由于其能量有限,常与燃油发动机驱动的发电机搭配使用。对于未来飞机电力系统而言,可将可再生能源(如光伏系统和燃料电池)集成其中,同时降低发动机功率,以提升整个飞机电力系统的效率[43]。

多电飞机电力系统结构如图1(b)所示,在该架构中,电力系统为环境控制系统(ECS)和防冰系统提供动力。全电和电推进飞机的结构如图1(c)所示,适用于中型和大型飞机;小型或轻型飞机(如无人机)的结构如图1(d)所示。在特定条件下,可再生能源电源会依据飞机功率大小和负载情况进行配置。

随着电力系统集成度的不断提高,传统设计理念被逐渐打破,设计方向日益趋向热、电和机械的联合设计[44]。飞机电力系统结构的优化设计本质上是一个复杂的优化问题,需要在庞大的参数空间中寻找最优解。选择电力系统架构时,必须综合考虑体积、质量、可靠性和效率等因素[45-46]。基于这些约束条件,可运用评估和优化方法进行迭代,以确定飞机电力系统的最优结构[47]。

1.2　飞机电力系统架构优化与评估

在飞机电力系统结构设计里,各部件之间的建模至关重要。飞机电力系统中的电力设备/子系统存在多物理场的相互作用,包括热力学、空气动力学、液压、电气等领域。这就需要寻找初始平衡条件,并合理定义求解器设置,例如选择合适的数值方法和时间步长,同时还要考虑集成描述各种物理现象的复杂功率模型,这些模型的频率范围差异较大[48]。

不同架构飞机电力系统(AEPS)分析工具的基础是一个包含主要电力子系统的组件模型库。这些部件模型能够集成为小型电力系统架构,可依据飞机电力系统在不同运行模式或飞行周期下对性能指标进行定量评估。传统的小信号建模方法常用于电力系统的稳定性分析和控制回路设

计，但不适用于多源微电网应用。Blaabjerg 等[49]提出了克服该障碍的方法，以满足全电飞机和电动飞机的需求。

尽管电力系统的动态模型由各部件提供，但系统的热分析难以进行整体考量。对于多物理场，如地面能源系统、飞机和船舶电力系统，互联系统被建模为具有不同时间域的动态交互功率模块，这种方法适用于优化大规模复杂电力系统的结构拓展。多层次动力学建模方法为在能量和能量空间中建模和控制多物理子系统之间的相互依赖性提供了基本方法，以确保系统实现可行且接近最优的操作。

从另一种角度看，电力系统的架构优化是一个最大化或最小化线性或非线性分析目标函数的过程，涉及各种等式和不等式约束以及多个设计变量或参数，每个变量或参数都有其取值范围。简单来说，优化设计问题就是在考虑合理约束条件的情况下，为给定问题找到最佳的配置和变量解。最优条件通常很大程度上取决于所选的目标函数，而目标函数可能涉及飞机电力系统的性能指标(FOM)。在飞机的热管理和能量系统设计中，效率、功耗、可靠性、电能质量和热传递率通常需要最大化，而成本、质量、燃料消耗、环境影响和功率损耗则需要最小化。这些指标都可以选为目标函数，但通常综合考虑多个目标函数更具意义和实用性。

常见情况下，多个优化目标可能相互矛盾，即在相同运行点下，一个目标函数达到最优时，另一个可能并非最优。单变量函数的最值可通过简单的线性优化确定，利用一阶或二阶导数技术就能找到给定函数的最优值。更高级的是，还能求解多变量非线性函数的最优值以及具有非线性约束的多变量优化问题。由于大多数实际问题都存在约束条件，因此受约束的优化问题是科学实践中的重要研究课题[50]。

多目标化在航空电力系统中已得到广泛研究和应用，存在众多涉及多目标优化的飞机电力系统算法和应用案例研究。处理多个目标函数的常见方法之一是将它们与某些权重因子结合成一个单一的目标函数，再进行最小化或最大化。例如，在飞机电力系统中电子设备的热交换器和冷却系统的最优设计中[51]，期望最小化能量破坏率并最大化热传递率，但会导致流体流量增加以及冷却系统摩擦压力损失增大。多目标化问题包含多个需要最小化或最大化的目标函数，和单目标优化一样，也涉及多个线性和非线性约束，任何可行解(包括最优解)都必须满足这些约束。此外，电力、液压和气动能量已集成到飞机电力系统中[52]。这种异构能量优化问题通常使目标函数变得非常复杂，参数归一化并不容易处理。电力系统的电气化趋势可以缓解这种复杂性，电力管理优化问题表述如式(1)～式(4)所示。

最小化/最大化：

$$O=f_n(\boldsymbol{x}) \quad (n=1,2,\cdots,N) \tag{1}$$

受约束于：

$$g_j(\boldsymbol{x})>0 \quad (j=1,2,\cdots,J) \tag{2}$$

$$h_k(\boldsymbol{x})=0 \quad (k=1,2,\cdots,K) \tag{3}$$

$$x_i^{(L)}<x_i<x_i^{(u)} \quad (i=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

式中：f 为目标函数；g 为不等式约束；h 为等式约束。

问题的解是 $\boldsymbol{x}$，它是 n 个决策变量或设计参数的向量。公式(4)为变量界限，限制了搜索空间的边界，任何决策变量的解都应在下限 $x_i^{(L)}$ 和上限 $x_i^{(u)}$ 之间。为了说明这一问题，考虑以下情况：多目标优化模型有两个目标函数，f_1 和 f_2。假设这两个函数需要最小化(尽管最大化也可以类似处理，因为它是函数负值最小化的等价形式)，5 个不同设计点的 2 个目标函数的趋势如图 2 所示，可以看出：设计点 2 的目标函数优于设计点 4，因为设计点 2 的两个目标函数 f_1 和 f_2 都小于设计点 4；设计点 3 的目标函数优于设计点 5；设计点 1、计点 2 和计点 3 没有被其他参数设计变化所主导。

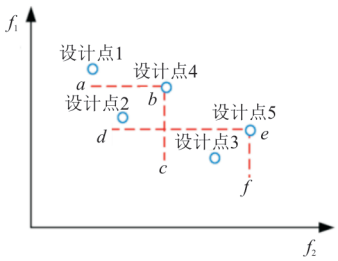


图 2 5 个设计点的 2 个目标函数趋势

Fig. 2 Trend for the two objective functions at five design points

非主导设计的聚合形成为帕累托边界曲线，代表了飞机电力系统的设计参数点的最佳集合。引入遗传算法（GA）优化设计集表示飞机电力系统的最佳设计参数点集合，如图 3 所示，可以从帕累托边界上的任何一点上选择一个最优的设计条件，是根据最优决策者的经验和判断得出的。飞机电力系统可能从能量或功率领域有许多优化目标，如质量、可靠性、效率、体积和油耗成本，可以用公式（1）表示，平衡关系如公式（3）所示。发电机或电池功率输出的变化率可以在不等式约束公式（2）中进行格式化。优化模型中的决策变量或设计变量有时是随机的，如负载功率需求或一些电源，如 PV，因此必须提供随机优化和鲁棒优化方法。

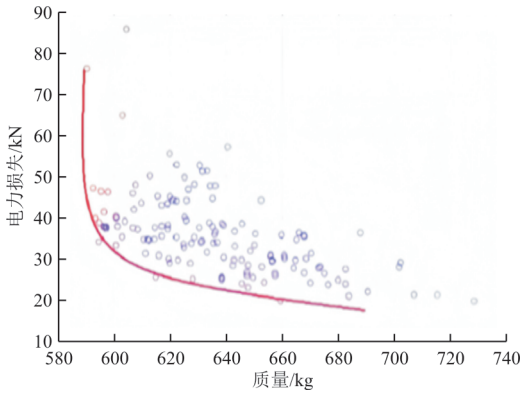


图 3　引入了遗传算法（GA）优化设计集表示为飞机电力系统的最佳设计参数点集合

Fig. 3　The set of GA optimization designs is introduced as the Pareto frontier curve and represents the best collection of design parameter points for aircraft power systems

对于飞机电力系统，能量效率函数[53]为

$$E_{Gi}(t)=\alpha_{Gi}P_{Gi}^{2}(t)+\beta_{Gi}P_{Gi}(t)+g_{Gi} \tag{5}$$

式中：α_{Gi}、β_{Gi}、g_{Gi} 为根据实验和模拟数据的多项式拟合得到的发电机的效率系数。

通过这种方法，可以构建自耦变压器整流器单元（ATRU）、双主动桥（DAB）转换器、一些 DC-DC 转换器和电压源逆变器（VSI）的模型，以实现电力系统级的效率优化。

从公式（5）可以看出，功率转换器的效率几乎是一个凸函数，能够降低优化问题的难度。飞机电力系统的架构优化问题可以重新表述，以考虑系统的功率效率。

问题：能量管理系统（PMS）与多目标优化的飞机电力系统最小化。

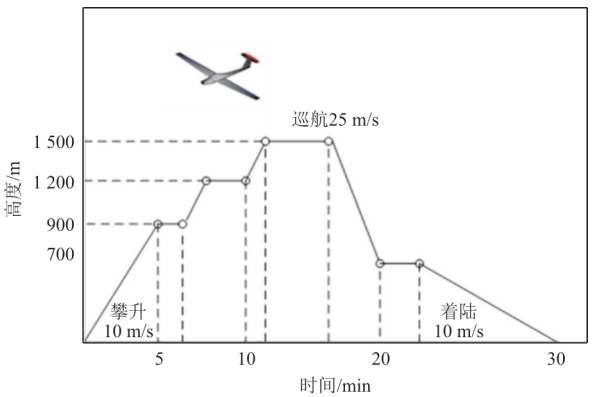
$$\varepsilon=\{E_{Gi}|G_i\in g\}\cup\{E_{Gi}|C_i\in C\} \tag{6}$$

式中：E_{Gi} 为发电机的效率函数；g 为电力系统中的发电机集合；C 为电力系统中的功率转换器集合；E_{Gi} 为飞机电力系统中功率转换器的效率函数。

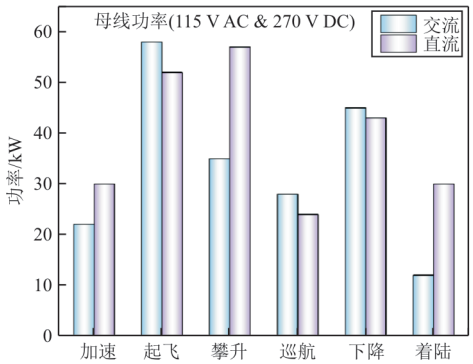
在飞机电力系统中，能量静态优化问题的形成必须考虑许多约束条件，如体积、质量、散热和可靠性。基于不同电源的最优参数和最优分配，可以推导出飞机电力系统的最优架构和配置。实现多个目标之间良好平衡的功率最优调度问题包括：确保发电机的最佳运行范围，通过利用电力储能系统根据功率需求的变化获得发电机和功率转换器的高效率区域，以及在发电机、电力母线和电力负载之间的连接中保持电力优先级，以达到最佳性能指标[54]。

2　飞机电源不稳定性分析

不同类型的动力源可以根据飞行任务和飞机类型配置成一个集成的电力系统[55]。负载功率曲线随着不同的飞行阶段而变化，如图 4（a）所示。对于电推进飞机，其功率曲线如图 4（b）所示，适用于不同的动力架构，例如恒频交流（CFAC）或高压直流（HVDC）。从图 4 可以看出：在爬升和下降阶段，功率需求非常大，而在巡航期间功率非常稳定，因此合理的电源配置和组合对飞机非常重要。



（a）负载曲线



(b) 功率曲线

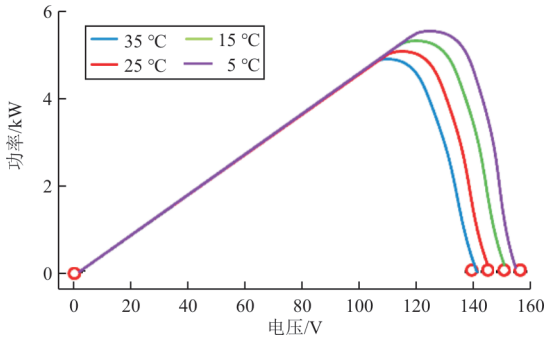
图 4 飞行阶段及功率需求

Fig. 4 Flight phase and power requirements

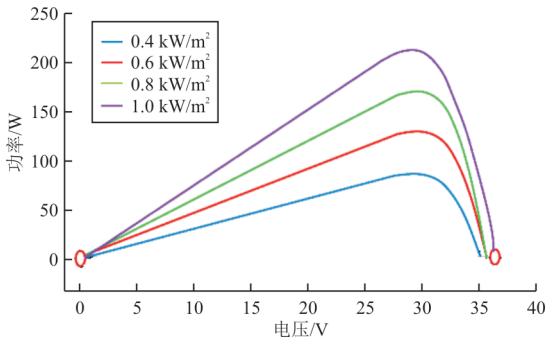
2.1 小型飞机和无人机

小型飞机和无人机的功率需求相对较低，因此可以应用新的可再生能源，如光伏和燃料电池，因为它们的功率密度和功率响应速度有限。当飞机处于高海拔时，许多环境因素会影响光伏电池的运行特性及其发电能力。两个主要的环境参数是太阳辐照度 G 和环境温度 T，这两个因素与光伏的运行电学特性之间的关系可以用数学模型来描述[56]。基于光伏电池或面板的 I-V 曲线可以计算出功率—电压曲线。不同环境温度下的 P-V 曲线如图 5(a)所示，不同太阳辐照度下的曲线如图 5(b)所示。

对于太阳能飞机或无人机，太阳辐照度、角度和温度会随着飞机海拔高度的变化而变化，有时是逐渐变化(几分钟到几小时)，有时则是快速变化(几秒钟)，例如，穿过云层和温度变化会影响飞机的滚转角度。考虑到 I-V 曲线仅描述了某一瞬间的特性，光伏系统必须与其他储能系统集成，以满足飞机电力系统的要求。为了提高太阳能飞机的性能，需要考虑两种不同的设计方法：1) 在给定翼面积上收集更多的太阳能，并利用重力势能；2) 更好地利用收集到的太阳能。通过将太阳能电池板倾斜朝向太阳，可以增加太阳能的收集量，通过光控和姿态调整来实现，然而，这会增加空气阻力，从而导致更高的飞行功率需求。如果将光伏阵列的最佳倾斜角度视为动态的，并确定最佳飞行路线或轨迹，这种惩罚可以最小化或权衡[57]，这仍然是一个开放的研究课题。由于传统储能设备的能量密度和功率密度有限，太阳能不适合中型和大型飞机。



(a) 不同环境温度下的 P-V 曲线



(b) 不同太阳辐照度下的曲线

图 5 光伏组件在不同环境温度和太阳辐照下的功率特性

Fig. 5 The power characteristics of PV modules under different ambient temperatures and solar irradiance

对于燃料电池无人机，当无人机在高海拔任务中飞行时，环境温度和气压的变化会影响质子交换膜燃料电池(PEMFC)的输出功率特性。海拔每上升 1 000 m，温度大约降低 6 ℃；海拔每上升 900 m，气压大约降低 10 kPa(0.1 bar)。

因此，在研究无人机混合电力系统时，EMS 不能忽视由于海拔变化导致的环境因素对 PEMFC 输出功率特性的影响。燃料电池的特性曲线如图 6 所示。

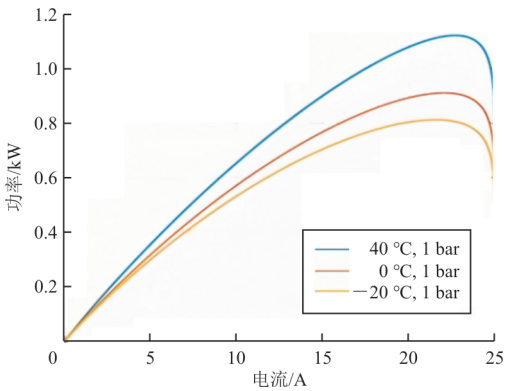


图 6 燃料电池功率曲线

Fig. 6 The output power characteristics of fuel cell

为了维持燃料电池的最佳运行或高效率区域,设计适当的能量管理策略和功率控制方法对飞行中的环境变化至关重要[58]。

2.2　区域性飞机

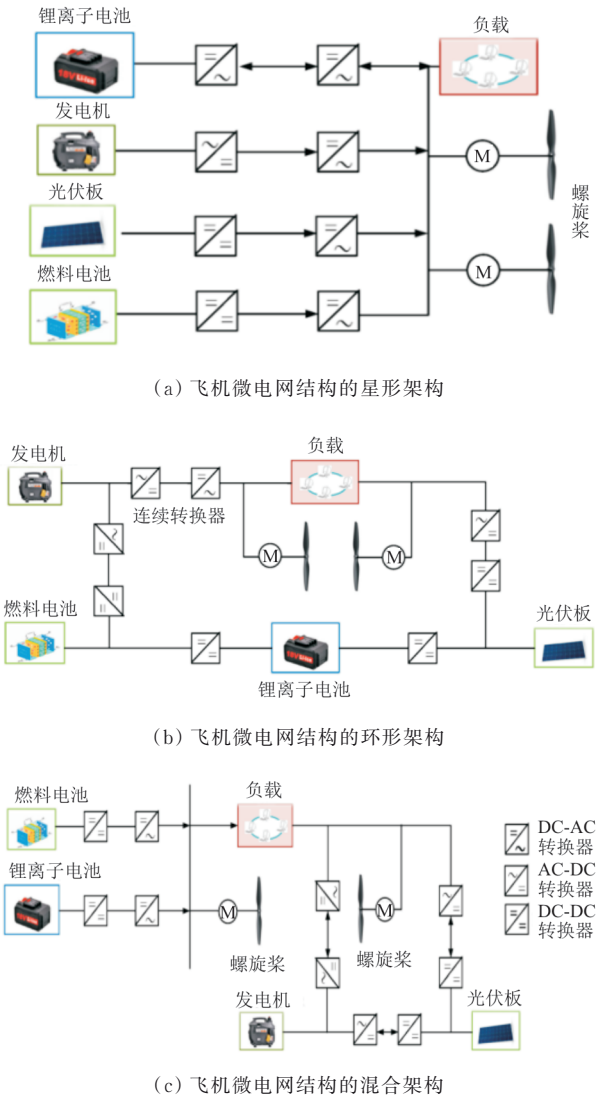
在传统MEA和未来中型或大型电推进飞机中,主要的电能来源是发动机驱动的发电机。电源主要是为电力负载提供大量比例的电能,电池组通常用作能量存储系统,以调节发动机的运行点。燃料电池为辅助动力装置(APU)提供电能,并将在未来作为应急电源,满足对绿色航空的需求[59]。由于燃料电池的内部电化学和机械动态较慢,对快速电负载瞬态的响应较慢。飞行中电负载的瞬态变化或功率扰动会在燃料电池内产生有害的低反应物条件,缩短其使用寿命。燃料电池和电负载之间的时间常数差异需要一个电能存储单元补充燃料电池在瞬态状态(如起飞、爬升和偏航控制)中的峰值功率需求。辅助电能存储单元,如电池或超级电容器,具有以下功能:补偿像燃料电池这样的主要电源的缓慢功率动态;减少对快速变化电负载的响应时间;在燃料电池的输出功率调整以匹配新的稳态平均功率需求之前,为负载供电。尽管燃料电池的能量密度高于电池,但它们对低频纹波电流非常敏感[60]。当从基于燃料电池的电源向交流电负载提供低频交流电时,燃料电池堆中可能出现交流电流的二次谐波分量。到达燃料电池的低频纹波电流可能会使运行点从欧姆极化区域移动到浓差极化区域,从而导致燃料电池系统的不稳定运行。这可能导致燃料电池电源单元的故障,系统可能会关闭并损坏。因此,这种低频电流应通过电力电子转换器吸收和消除。高功率密度的DC-DC交错式升压转换器可用于实现与直流母线的接口。在某些情况下,多单元或多个并联功率转换器可能是更好的选择用于解决这一问题[61]。

2.3　窄体和宽体或双通道飞机

从兆瓦级MEA向兆瓦级AEA EPS的电力消耗提升是一项非凡的工作,这种转化需要解决的技术挑战包括:高电压传输与分配[62]、超导性[63]、热管理和冷却[64]以及大功率发电。大功率、高温、超导发电系统是减少兆瓦级架构中的高损耗并提高整个飞机EPS功率密度的唯一可行途径[65]。然而,超导架构仍存在一些缺点和挑战,例如,为了实现超导效应,需要低温冷却系统,这会影响尺寸或体积、质量、效率以及材料或电气元件的比功率。由于电源的不确定性,对于飞机电力系统而言,尚不清楚这些设备在高海拔下的运行情况。为了减少二氧化碳排放,作为直接燃烧氢气的替代方案,可以利用涡轮电推进系统(TEPS)[66]。涡轮电分布式推进可以应用于飞机,有可能成为飞机领域的下一个颠覆性技术突破。涡轮电推进解决方案可以通过整个飞行阶段让氢涡轮在最佳效率点运行来最小化整体燃料或气体消耗(改进的燃气轮机循环)。结合燃料电池,基于液氢的TEPS可以更好地利用液氢作为燃料和超导功率转换的低温冷却介质的高协同效应。TEPS还可以与燃料电池集成作为应急电源或APU,必须考虑与飞机电力系统集成的可再生能源的不确定性,电源的安全性和可靠性是最重要的性能指标。机载电力电源系统发生了显著变化,以提供大幅增加的功率需求,同时满足极其严格的质量和体积、安全性和可靠性、电能质量、可用性等要求[67]。在未来,飞机电力系统必须满足绿色航空和环境保护的要求。无论EPS架构如何,它都应该根据既定的航空航天标准为电力负载提供更好的电能质量。需要注意的是,对于新的电力平台,需要更新标准化文件,因为MIL-STD-704F的许多要求是遗留性质的(失真谐波谱、电磁发射、电压调制包络等)[68],并且未来的某些电力架构方面,如更高的电压水平或电网频率范围,并未涵盖。

3　能源与电力管理系统

飞机的能量与电力管理问题通常由电力系统实现,因为飞机的发展趋势是“更多电”和“全电”。特别是对于电推进飞机,电力系统的架构可以成为类似地面微电网的“机载微电网”。为了描述飞机上微电网的架构,飞机微电网的不同架构类型如图7所示。



(a) 飞机微电网结构的星形架构

(b) 飞机微电网结构的环形架构

(c) 飞机微电网结构的混合架构

图 7 飞机微电网不同架构类型

Fig. 7 Aircraft microgrid have different structure types

机载微电网有多种架构，包括星形架构、多星形架构、环形架构和混合架构。为了获得可靠的电力供应的最佳架构，需要对飞机机载微电网进行评估，即根据某些标准评估不同架构的性能。这些标准包括能量系统的效率、可靠性和燃油消耗经济性。对最合适的飞机电力系统架构的评估和选择是一个交互过程，由多个权衡、详细分析需求和约束作为输入变量，以及详细分析以形成决策矩阵，用于比较不同架构与功能目标[69]。在考虑电推进需求时，必须考虑电螺旋桨的负载特性。电力系统的能量管理被称为长期的能量优化问题，可以包括上述标准。电力系统的电力管理与短期和瞬态电力响应优化问题有关，包括系统的稳定性、瞬态电力响应、电力质量和故障保护。此外，飞机微电网有多种电力供应类型、运行和保护模式、控制拓扑结构和电力分配网络结构，这些因素能够影响它们的动态特性，因此开发准确、完整的能量和电力管理模型与策略是非常具有挑战性的。分层微电网能量和电力管理系统包含 3 个层次，以实现不同的控制目标：第 1 层，基于内部控制、响应速度和基于主控制的系统稳定性，用于发电过程；第 2 层，基于次级控制的高电力质量和电力共享；第 3 层，基于三级控制的电力经济调度管理、基于政策控制的系统可靠性和经济规划[70]。

基于最优能量管理和电力系统架构，动态电力管理策略对飞机电力系统的运行非常重要。对飞机的电力系统采用分布式控制策略，通过建立通信网络拓扑结构实现本地控制器之间的信息交换。事实上，分布式控制策略可以被视为集中控制和分散控制之间的折衷方案[71]。在飞机中，假设本地子系统由相互竞争的实体和公司独立开发，任何协调都必须考虑控制器的隐私，并考虑它们更新速率的差异[72]。假设子系统由可能在各种开发项目中相互竞争的分包商开发和制造，子系统及其控制器的设计细节可能被视为知识产权(IP)，其设计者不愿使用可能暴露它的基于模型的协调。因此，分布式控制比集中控制方法更适合于仅交换一些信息或变量。在飞机电力系统的能量管理中，控制架构的选择至关重要。分散控制架构存在明显不足，由于子系统间缺乏信息交换，其能量管理的最优性能不及分布式控制。因此，依据能量系统的动态状态轨迹和控制输入决策变化挑选合适的控制器架构十分必要。

飞机电力系统典型的管理和控制器架构如图 8 所示。在图 8(a)中，三级控制主要负责机载微电网能量在不同电源间的最优分配，以实现电力消耗最小化和燃料经济调度最优化，同时兼顾电力稳定性、安全性和容错能力等附加目标。然而，当飞机电力系统的线路电阻与线路电抗比值较高时，实部和虚部功率共享的准确性会降低。为解决这一问题，提出了次级控制，其主要目标是将飞机交流电力系统的频率和电压恢复到额定值。此外，还采用了适当的控制方法来提升电压质量，包括补偿电压不平衡和次级控制中的谐波失真。

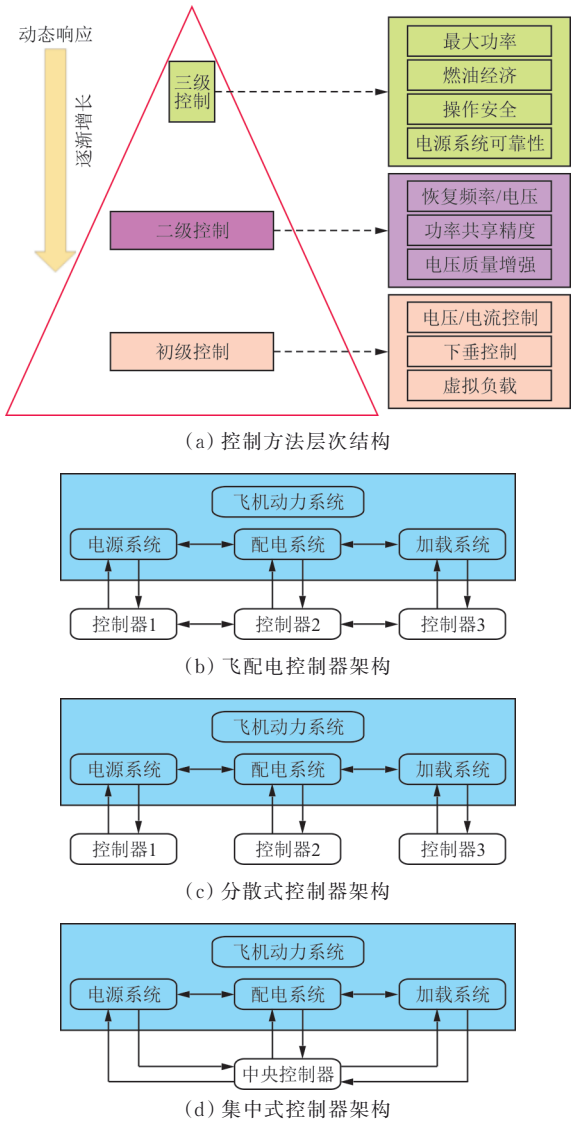


图 8　飞机电力系统不同控制器架构

Fig. 8　Different controller architecture for the aircraft power system

飞机电力系统包含多种不同的电源子系统，如电力发电机、燃料电池、储能电力系统（如锂电池）和超级电容器，它们具有不同的时间和空间动态特性。集中式控制器架构存在明显短板，容易受到不同子系统控制器单点故障的影响，而微电网的实时控制特性对飞机而言至关重要。

随着电力系统在飞机电力系统中的渗透率不断增加，不同电力电子子系统之间的联系更为紧密，相互关联性更强。因此，每个子系统的控制器架构需综合考虑动态特性、通信能力、时间尺度和交换信息等因素进行选择。分布式能量和电力管理架构作为一种多智能体系统，因其在电力系统可靠性和安全性方面的优势，成为未来控制器架构更具潜力的选择。

此外，飞机电力负载系统在一些典型操作场景下会面临挑战。例如，起飞时激活飞行表面、使用定向能武器（DEW）进行高推力机动的军用飞机，以及通过喷气发动机和电动机同时加速的混合推进飞行器，这些操作模式都可能引发大的功率瞬态和电压母线稳定性问题。为减轻快速变化的功率需求所导致的功率干扰，可以采用合适的控制器架构、控制方法或能量管理策略。

可再生能源与传统飞机 EPS 的集成可以提高能量效率并减少发电机的过大尺寸，但是，可再生能源的间歇特性和电化学响应使得功率优化分配更加复杂。负载电力需求与飞行控制系统耦合非常紧密，飞机电力推进系统负载的随机变化使得最优功率分配控制非常困难。

随着电推进和多电飞机的发展，飞机电力系统可以看作是一个“多能源的微电网”，区别于陆地微电网，具有多种能量转换方式，受到复杂的飞行条件约束，而其飞行耐久性完全取决于能量利用效率。虽然现有的研究工作大多集中在多电飞机（MEA）的实时功率平衡控制，鲜有其能量优化问题，飞机电力系统的能量管理策略必须从多方面考虑多学科优化内容。

用于发电系统、配电系统和车载负载侧控制的能量和功率管理策略，对负荷侧控制类似于陆地微网中的需求侧管理（DSM），基于规则、模糊逻辑和基于 MPC 的能量管理策略常用于无人机、MEA。基于混合系统理论，Dunham 等[68]提出了一种多电飞机能量管理的动态优化策略以及表达 MPC 的框架，以解决飞机系统中能量管理的相关问题。创建优化指标，采用必要的计算工具，并通过仿真进行初步验证。Jiang Z H 等[73]提出了一种分层模型预测控制（MPC）框架，用于混合动力或电力推进系统，该框架可以覆盖很宽的模型保真度带宽，并使用两种 MPC 在模型中执行所有必要的物理定律。通过使用等式约束，状态变量约束显式地包含在控制器中（离散时间模型或系统状态转移方程）将状态约束转换为控制约束，分层 MPC 框架允许将操作约束分配给不同级别的 MPC，仿真结果表明，该递阶控制系统在飞机电源系统的动态条件下，对能量流和动态电流/电压调节都有较好的优化效果。在飞机电力系统能量管理优化中，为了克服动态规划的“多维数困难”问

题，必须对复杂系统的状态进行整合。

此外，包括MPC在内的传统EMS容易受到电力系统中不确定性或变化的影响，这会进一步降低EMS的性能。基于人工智能的EMS可以有效解决这个问题，因此，强化学习或近似动态规划(ADP)可以应用于飞机电力系统的优化问题。优化值函数可以用不同的方法来近似，例如时间差分(TD)，最近邻检索(NN)方法来获取。一些概率函数可用于描述EPA的电源和负载变化的随机特性。Li Y C等[74]提出深度强化学习(DRL)，用于为一系列混合动力汽车(HEV)开发EMS。

由于DRL在推导过程中不需要未来驾驶信息的优势，因此在解决能量管理问题时具有良好的泛化性，可以将其表示为马尔可夫决策过程(MDP)。基于DRL的无人机模型EMS总体方案如图9所示，所提出的能量管理方法的总体原理图也可以在电推进无人机上实现。

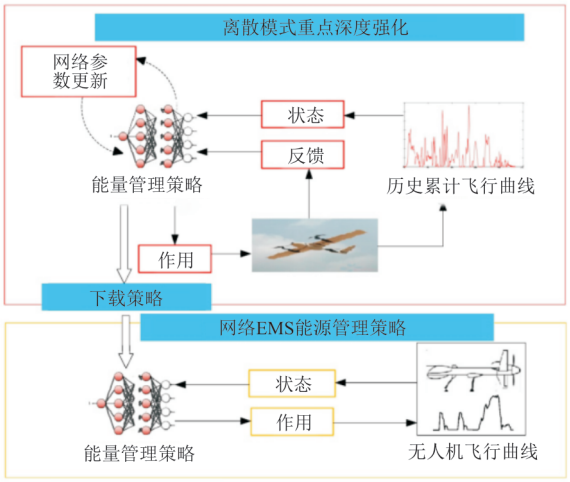


图9 基于DRL的无人机模型EMS总体方案
Fig. 9 The overall schematic of DRL-based EMS for the UAV model

通常，能量管理方法的实施分为3个阶段。对于EPA，采用神经网络表示EMS，并在仿真环境中采用DDPG算法更新EMS的参数，这种更新是基于数据的，当训练结果达到收敛时，将神经网络的参数和结构保存为训练好的EMS，下载的EMS可以直接进行在线应用，只需简单地将状态映射到可再生能源和电力负荷的不确定性和随机性，在设计能量管理策略时，必须考虑飞机中的能量。基于随机ADP方法的能量管理策略在系留微电网和车辆动力系统中被提出，这些方法也可以扩展到飞机微电网[75]。

4 未来电推进飞机能量管理系统的发展趋势

在绿色航空运输发展以及能源消耗和环境保护的双重压力之下，电推进飞机凭借其在能量生成和分配方面所具备的灵活性与高效性，获得了良好的发展契机。每一架电推进飞机的机载电力系统都可被视作一个“飞行微电网”。如同地面微电网和智能电网需要进行功率分配与能量优化一样，电推进飞机的系统与自身之间开展功率分配和能量优化也是必不可少的。

电推进飞机的电力系统涵盖了发电机、电力分配子系统、能量存储装置以及多个分布式推进电机。飞机的电气化已成为不可逆转的发展趋势，这一趋势不仅会极大地改变航空运输系统的运行模式，其影响还将扩展至电力和能源领域，这就使得未来的航空运输管理演变成一个复杂的交通电力多微电网协调问题[76]。

绿色、安静的电动地面和空中交通工具的市场渗透将显著改善噪声和污染问题。垂直起降(eVTOL)飞行器将实现区域内的快速、可靠运输。支持城市空中交通(UAM)的基础设施开发可能会比充电站具有显著的成本优势，这些充电站可以从机场的微电网中获取电能。eVTOL飞行器利用电推进，因此在运行中实现零排放，并且足够安静，可以在城市中运行。多电/全电飞机的能量管理和路径优化规划必须在某些情况下进行协调，机场和飞机的能量管理验证可以在硬件在环(HIL)平台上进行，微电网虚拟模型如图10所示。由于整个系统的规模和复杂性，能量管理算法必须在不同的操作场景中进行测试，其中数字仿真的效率非常低[35]，因此，可以应用实时平台来实现系统的仿真。在图10中，机场微电网虚拟模型可以在台风-604 HIL终端中构建和调度，多电/全电飞机也可以集成到台风-HIL中，机场微电网的EMS可以在RT-LAB 5700平台上制定和解决[77]。基于这种系统配置，可以将启发式方法和优化方法应用于整个能量系统，以提高仿真速度和效率。数字和模拟信号可以在台风-HIL和RT-LAB平台之间传输。

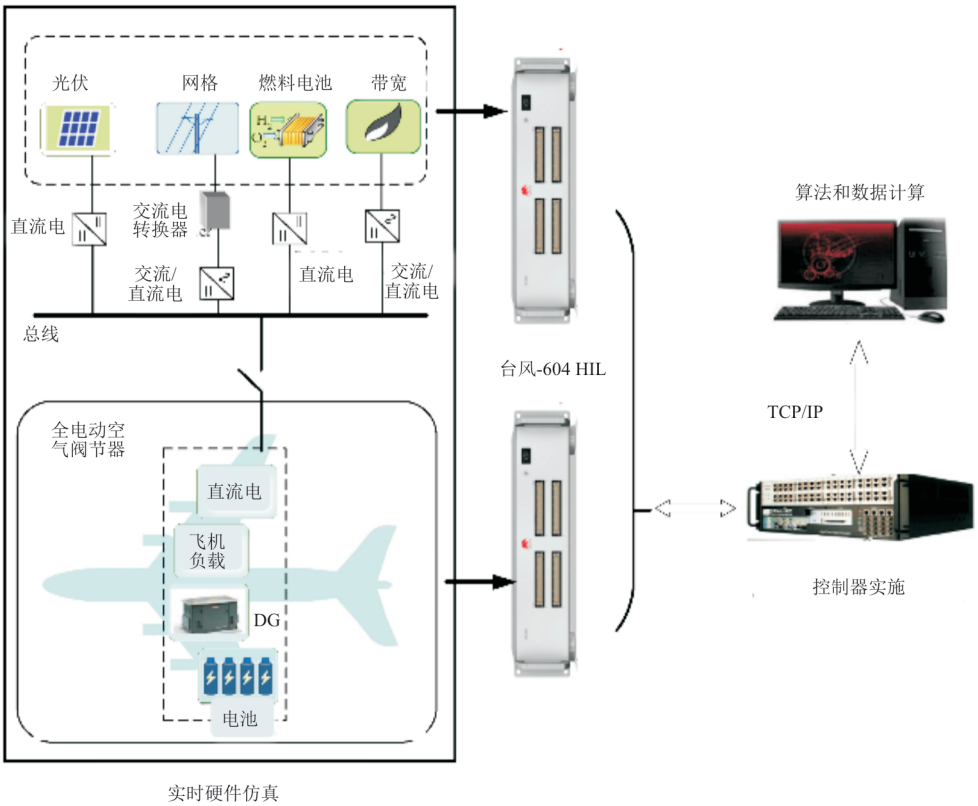


图 10　微电网虚拟模型

Fig. 10　Virtual model of microgrid

未来全电动机场和EPA的常规运行模式下,机场的分级控制或能量管理框架实际上是一个交直流混合微电网电力系统,这将是未来全电飞机能量管理的发展趋势。

先进的计算优化[78]、分析和分布式控制方法、自适应能量管理策略以及电能存储系统的多功能优化是在飞机电力系统领域中比较有发展前景的研究课题。

5　结束语

本文分析了多电/全电飞机(MEA/AEA)电力系统的架构优化和能量管理问题,提出了考虑多电/全电飞机电力系统架构的技术发展趋势,分析了电力系统的架构优化与评估方法,同时结合电气化飞机的最新技术,飞机电力系统的架构和控制策略也随之改变。为了应对飞机电力系统中可再生能源的不确定性,必须采用有效的能量管理方法。电能的协调控制在飞机中至关重要,以确保高利用率和高稳定性,能量管理系统架构必须和飞机电力系统架构紧密结合。随着电推进飞机安全性和能效要求的提高,EMA需要与电力、液压和机械等多个物理领域相结合,来解决电力系统复杂的建模问题。随着先进飞机电气化的发展,大规模、多学科、多领域的飞机电力系统能量管理策略的研究也愈演愈烈,这一趋势将推动多电/全电飞机在能量管理和架构优化方面的持续发展。此外,也需要考虑飞行微电网与飞机之间的能量管理的关系,不同微电网的能量管理策略是未来发展的趋势。

参考文献

[1]　SAID W. Powering commercial aircraft: the next logical step in vehicle electrification viewpoint[J]. IEEE Electrification Magazine, 2017, 5(4): 4-8.

[2]　EMADI A, EHSANI M, MILLER J M. Vehicular electric power systems land, sea, air and space vehicles[M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.

[3]　ANSELL P J, HARAN K S. Electrified airplanes: a path to zero-emission air travel[J]. IEEE Electrification Magazine, 2020, 8(2): 18-26.

[4]　O'CONNELL T, RUSSELL G, MCCARTHY K, et al. Energy management of an aircraft electrical system[C]//

46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville: AIAA, 2010: 7092.

[5] GANEV E, KOERNER M. Power and thermal management for future aircraft[C]// SAE Technical Conference. US: SAE International, 2013: 1-8.

[6] GANEV E D. Electric drives for electric green taxiing systems: examining and evaluating the electric drive system [J]. IEEE Electrification Magazine, 2017, 5(4): 10-24.

[7] 赖思齐, 陈桂鹏, 颜佳佳, 等. 飞机电源系统故障诊断方法综述及发展趋势[J]. 航空工程进展, 2024, 15(3): 27-44.
LAI Siqi, CHEN Guipeng, YAN Jiajia, et al. Summary and development trend of fault diagnosis methods for aircraft power supply system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(3): 27-44. (in Chinese)

[8] 齐扬, 李伟林, 吴宇, 等. 航空推进电源系统研究综述[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 51-59.
QI Yang, LI Weilin, WU Yu, et al. Summary of research on aviation propulsion power supply system[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20(5): 51-59. (in Chinese)

[9] 程国华. 大型民用飞机电源系统的现状与发展[J]. 民用飞机设计与研究, 2008(4): 1-5.
CHENG Guohua. Present situation and development of power supply system for large civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2008(4): 1-5. (in Chinese)

[10] 赵长辉, 卢黎波, 陈立玮, 等. 飞机的电动力系统技术概述[J]. 航空工程进展, 2011, 2(4): 449-458.
ZHAO Changhui, LU Libo, CHEN Liwei, et al. Overview of aircraft electric power system technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2011, 2(4): 449-458. (in Chinese)

[11] 金贤球, 雷涛, 闵志豪, 等. 分布式电推进飞机能量优化动态管理技术研究[J]. 电气工程学报, 2023, 18(3): 51-67.
JIN Xianqiu, LEI Tao, MIN Zhihao, et al. Research on energy optimization dynamic management technology of distributed electric propulsion aircraft[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18(3): 51-67. (in Chinese)

[12] 李开省. 多电飞机电力系统发展综述[J]. 国际航空, 2015(12): 26-30.
LI Kaixing. Review of power system development of multi-electric aircraft [J]. International Aviation, 2015(12): 26-30. (in Chinese)

[13] 吴光辉. 民用飞机先进技术展望[J]. 网信军民融合, 2021(7): 5-7.
WU Guanghui. Prospect of advanced technology of civil aircraft [J]. Civil-Military Integration on Cyberspace, 2021(7): 5-7. (in Chinese)

[14] BENZAQUEN J, FATEH F, SHADMAND M B, et al. Performance comparison of active rectifier control schemes in more electric aircraft applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 1470-1479.

[15] FERNANDES M D, DE P ANDRADE S T, BISTRITZKI V N, et al. SOFC-APU systems for aircraft: a review [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(33): 16311-16333.

[16] GOLDBERG C, NALIANDA D, SETHI V, et al. Assessment of an energy-efficient aircraft concept from a techno-economic perspective[J]. Applied Energy, 2018, 221: 229-238.

[17] 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. (in Chinese)

[18] 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 Jun, YANG Fengtian. Development and challenge of new energy electric aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2016, 37(1): 57-68. (in Chinese)

[19] 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 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): 522405. (in Chinese)

[20] ALEXANDER R, MEYER D, WANG J K. A comparison of electric vehicle power systems to predict architectures, voltage levels, power requirements, and load characteristics of the future all-electric aircraft[C]// 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). Long Beach: IEEE, 2018: 194-200.

[21] MISRA A. Energy storage for electrified aircraft: the need for better batteries, fuel cells, and supercapacitors [J]. IEEE Electrification Magazine, 2018, 6(3): 54-61.

[22] SHIBATA K, MAEDOMARI T, RINOIE K, et al. Aircraft secondary power system integration into conceptual design and its application to more electric system [R]. US: SAE International, 2014.

[23] 中国航空新闻网. 国外民用航空机电与飞控技术 2021 年发展综述[EB/OL]. (2022-04-12)[2025-04-02]. http://www.cannews.com.cn/2022/0412/341569.shtml.
China Aviation News Network. Overview of foreign civil aviation mechatronics and flight control technology development in 2021[EB/OL]. (2022-04-12)[2025-04-02]. http://www.cannews.com.cn/2022/0412/341569.shtml. (in Chinese)

[24] 张彦, 王恒涛, 杨瑞, 等. 无人航行器动力及其推进系统的研究现状与展望[J]. 中国航海, 2020, 43(4): 71-77.
ZHANG Yan, WANG Hengtao, YANG Rui, et al. Research status and prospect of power and propulsion system of unmanned vehicle[J]. Navigation of China, 2020, 43(4): 71-77. (in Chinese)

[25] BORNHOLDT R, THIELECKE F. Optimization of the power allocation for flight control systems[R]. US: SAE, 2014.

[26] SHAHSAVARI B, MAASOUMY M, SANGIOVANNI-VINCENTELLI A, et al. Stochastic model predictive control design for load management system of aircraft electrical power distribution[C]// 2015 American Control Conference (ACC). Chicago: IEEE, 2015: 3649-3655.

[27] LIU Y Z, YANG S S, WANG L, et al. Dynamic programming algorithm for management of aircraft power supply system[C]// 2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Nottingham: IEEE, 2018: 1-6.

[28] 刘俊峰，陈剑龙，王晓生，等. 基于深度强化学习的微能源网能量管理与优化策略研究[J]. 电网技术，2020，44(10)：3794-3803.
LIU Junfeng, CHEN Jianlong, WANG Xiaosheng, et al. Research on energy management and optimization strategy of micro-energy network based on deep reinforcement learning [J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3794-3803. (in Chinese)

[29] TELFORD R, JONES C, NORMAN P, et al. Analysis tool for initial high level assessment of candidate MEA architectures[R]. US: SAE, 2016.

[30] KWATNY H G, MENSAH E, NIEBUR D, et al. Optimal power system management via mixed integer dynamic programming[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2006, 39(7): 353-358.

[31] 李开省. 碳中和目标下航空能源转型研究[J]. 航空科学技术，2021，32(9)：1-11.
LI Kaixing. Research on the transformation of aviation energy under the goal of carbon neutrality [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(9): 1-11. (in Chinese)

[32] 李开省. 锂离子电池在电动无人机中的应用研究[J]. 航空科学技术，2020，31(5)：1-9.
LI Kaixing. Research on the application of lithium-ion batteries in electric unmanned aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(5): 1-9. (in Chinese)

[33] SEBASTIAN R K, PERINPINAYAGAM S, CHOUDHARY R. Health management design considerations for an all electric aircraft[C]// The 5th International Conference on Through-Life Engineering Services. Cranfield: IEEE, 2016: 102-110.

[34] FLYNN M C, SZTYKIEL M, JONES C E, et al. Protection and fault management strategy maps for future electrical propulsion aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 1458-1469.

[35] XIONG Q, FENG X Y, GATTOZZI A L, et al. Series arc fault detection and localization in DC distribution system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(1): 122-134.

[36] WANG Y S, LEI H, HACKETT R, et al. Safety assessment process optimization for integrated modular avionics [J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2019, 34(11): 58-67.

[37] RUBINO L, IANNUZZI D, RUBINO G, et al. Concept of energy management for advanced smart-grid power distribution system in aeronautical application[C]// 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Toulouse: IEEE, 2016: 1-6.

[38] TERORDE M, WATTAR H, SCHULZ D. Phase balancing for aircraft electrical distribution systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(3): 1781-1792.

[39] TERORDE M, SCHULZ D. New real-time heuristics for electrical load rebalancing in aircraft[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(3): 1120-1131.

[40] ZHANG H, MOLLET F, BREBAN S, et al. Power flow management strategies for a local DC Distribution System of More Electric Aircraft[C]// 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Lille: IEEE, 2010: 1-6.

[41] CAO Y, WILLIAMS M A, KEARBEY B J, et al. 20x-Real time modeling and simulation of more electric aircraft thermally integrated electrical power systems[C]// 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC). Toulouse: IEEE, 2016: 11-16.

[42] 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)：46-62.
KONG Xianghao, ZHANG Zhuoran, LU Jiawei, et al. Review of electric power system of distributed electric propulsion aircraft[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(1): 46-62. (in Chinese)

[43] DINCER I, ROSEN M A, AHMADI P. Optimization of energy systems[M]. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2017.

[44] WILLIAMS M A. A framework for the control of electrothermal aircraft power systems [D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2017.

[45] WILLIAMS M, SRIDHARAN S, BANERJEE S, et al. PowerFlow: a toolbox for modeling and simulation of aircraft systems[R]. US: SAE, 2015.

[46] ZHANG Y C, PENG G O H, BANDA J K, et al. An energy efficient power management solution for a fault-tolerant more electric engine/aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(7): 5663-5675.

[47] 高锋阳，张浩然，王文祥，等. 氢燃料电池有轨电车混合储

能系统的节能运行优化[J]. 电工技术学报，2022，37(3)：686-696.
GAO Fengyang，ZHANG Haoran，WANG Wenxiang，et al. Energy-saving operation optimization of hybrid energy storage system of hydrogen fuel cell tram[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2022，37(3)：686-696.(in Chinese)

[48] 张峻滔，王亚震，李晖，等. 碳纤维复合材料结构锂离子电池研究综述[J]. 复合材料学报，2023，40(3)：1263-1273.
ZHANG Juntao，WANG Yazhen，LI Hui，et al. Study review on structure lithium-ion batteries of carbon fiber reinforced composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2023，40(3)：1263-1273.(in Chinese)

[49] BLAABJERG F，IONEL D M. Renewable energy devices and systems with simulations in Matlab and ANSYS[M]. Boca Raton：CRC Press，2017.

[50] MAGNE P，NAHID-MOBARAKEH B，PIERFEDERICI S. Active stabilization of DC microgrids without remote sensors for more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industry Applications，2013，49(5)：2352-2360.

[51] 丁颖慧，祁国成，张博明. 结构储电碳纤维复合材料研究进展[J]. 复合材料学报，2021，38(1)：16-24.
DING Yinghui，QI Guocheng，ZHANG Boming. Recent progress in carbon fiber reinforced composites for electricity storage[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2021，38(1)：16-24.(in Chinese)

[52] NJOYA MOTAPON S，DESSAINT L A，AL-HADDAD K. A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2014，61(3)：1320-1334.

[53] CHEN J W，SONG Q C. A decentralized energy management strategy for a fuel cell/supercapacitor-based auxiliary power unit of a more electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics，2019，66(7)：5736-5747.

[54] 刘畅，卓建坤，赵东明，等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(1)：1-18,369.
LIU Chang，ZHUO Jiankun，ZHAO Dongming，et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids[J]. Proceedings of the CSEE，2020，40(1)：1-18,369.(in Chinese)

[55] US Department of Defense. Aircraft electric power characteristics；department of defense interface standard：MIL-STD-704F[S]. Lakehurst：US Department of Defense，2004.

[56] CANO T C，CASTRO I，RODRIGUEZ A，et al. Future of electrical aircraft energy power systems：an architecture review[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2021，7(3)：1915-1929.

[57] 张志祥，肖铎，王佳斌. 多旋翼燃料电池无人机能量管理策略研究[J]. 信息技术与网络安全，2018，37(1)：122-126.
ZHANG Zhixiang，XIAO Duo，WANG Jiabin. Research on energy management strategy of multi-rotor fuel cell UAV[J]. Information Technology and Network Security，2018，37(1)：122-126.(in Chinese)

[58] ALRASHED M，NIKOLAIDIS T，PILIDIS P，et al. Utilisation of turboelectric distribution propulsion in commercial aviation：a review on NASA's TeDP concept[J]. Chinese Journal of Aeronautics，2021，34(11)：48-65.

[59] GUI H D，CHEN R R，NIU J H，et al. Review of power electronics components at cryogenic temperatures[J]. IEEE Transactions on Power Electronics，2020，35(5)：5144-5156.

[60] 张苗欢. 现代飞机配电技术简介[J]. 科技视界，2015(27)：105-106.
ZHANG Miaohuan. Brief introduction of modern aircraft power distribution technology[J]. Science & Technology Vision，2015(27)：105-106.(in Chinese)

[61] GOLOVANOV D，GERADA D，SALA G，et al. 4-MW class high-power-density generator for future hybrid-electric aircraft[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification，2021，7(4)：2952-2964.

[62] 许世景，吴志新. 基于PMP的HEV全局最优能量管理策略研究[J]. 中国机械工程，2014，25(1)：138-141.
XU Shijing，WU Zhixin. Investigation of global optimization energy management strategy of HEV based on PMP[J]. China Mechanical Engineering，2014，25(1)：138-141.(in Chinese)

[63] GUO F，WEN C，SONG Y. Distributed control and optimization technologies in smart grid systems[M]. Boca Raton：CRC Press，2017.

[64] 雷涛，闵志豪，付红杰，等. 燃料电池无人机混合电源动态平衡能量管理策略[J]. 航空学报，2020，41(12)：324048.
LEI Tao，MIN Zhihao，FU Hongjie，et al. Dynamic balanced energy management strategies for fuel-cell hybrid power system of unmanned air vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2020，41(12)：324048.(in Chinese)

[65] 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)：5012-5024.
ZHANG Yufan，MA Rui，ZHANG Yuxiang，et al. Review on energy management strategy of aviation fuel cell propulsion system[J]. Proceedings of the CSEE，2023，43(13)：5012-5024.(in Chinese)

[66] 王莹，王凤，花业婷. 中国航空机载系统改革创新发展[N]. 中国航空报，2022-11-02.
WANG Ying，WANG Feng，HUA Yeting. Reform and innovative development of Chine's aviation airborne systems[N]. Chine Aviation News，2022-11-02.(in Chinese)

[67] 张泽辉，陈辉，高海波，等. 基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略[J]. 中国舰船研究，2020，15(2)：127-136.
ZHANG Zehui，CHEN Hui，GAO Haibo，et al. Energy

management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(2): 127-136. (in Chinese)

[68] DUNHAM W, HENCEY B, GIRARD A R, et al. Distributed model predictive control for more electric aircraft subsystems operating at multiple time scales [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(6): 2177-2190.

[69] 马睿，宋剑，王宇昂，等. 计及飞行任务与能耗分析的航空燃料电池推进系统能量管理策略[J]. 中国电机工程学报，2023, 43(1): 221-236.
MA Rui, SONG Jian, WANG Yuang, et al. Fuel cell electric propulsion system energy management strategy based on flight mode and energy consumption analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 221-236. (in Chinese)

[70] 王海峰. 战斗机故障预测与健康管理技术应用的思考[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. (in Chinese)

[71] 王少萍. 大型飞机机载系统预测与健康管理关键技术[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. (in Chinese)

[72] 范振伟，杨凤田，项松，等. 我国电动飞机发展现状及建议[J]. 航空科学技术，2019, 30(11): 18-21.
FAN Zhenwei, YANG Fengtian, XIANG Song, et al. Present situation and advice of electric aircraft development in China [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 18-21. (in Chinese)

[73] JIANG Z H, RAZIEI S A. Hierarchical model predictive control for real-time energy-optimized operation of aerospace systems [C] // 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). Piscataway: IEEE, 2019: 1-16.

[74] LI Y C, HE H W, PENG J K, et al. Deep reinforcement learning-based energy management for a series hybrid electric vehicle enabled by history cumulative trip information [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7416-7430.

[75] GAO Q X, LEI T, DENG F, et al. A deep reinforcement learning based energy management strategy for fuel-cell electric UAV [C] // 2022 International Conference on Power Energy Systems and Applications (ICoPESA). Piscataway: IEEE Press, 2022: 524-530.

[76] TRINKLEIN E H, COOK M D, PARKER G G, et al. Exergy optimal multi-physics aircraft microgrid control architecture [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 114: 105403.

[77] LI Z M, XU Y, FANG S D, et al. Multiobjective coordinated energy dispatch and voyage scheduling for a multienergy ship microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 989-999.

[78] MOLZAHN D K, HISKENS I A. A survey of relaxations and approximations of the power flow equations [J]. Foundations and Trends in Electric Energy Systems, 2019, 4(1/2): 201-221.

（编辑：丛艳娟）

（上接第168页）

[24] VIDANOVIC N, RASUO B, DAMLJANOVIC D, et al. Validation of the CFD code used for determination of aerodynamic characteristics of nonstandard AGARD-B calibration model [J]. Thermal Science, 2014, 18(4): 1223-1233.

[25] 许和勇，叶正寅，张伟伟. 基于非结构自适应网格技术的高超声速流动数值模拟[J]. 工程力学，2012, 29(3): 226-229,236.
XU Heyong, YE Zhengyin, ZHANG Weiwei. Numerical simulation of hypersonic flow based on unstructured adaptive grid method [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 226-229,236. (in Chinese)

[26] SLATER W J. 2021 NASA ONERA M6 wing [EB/OL]. [2025-04-02]. https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/m6wing/m6wing.html.

[27] HAMMITT A G, BOGDONOFF S M. Hypersonic studies of the leading edge effect on the flow over a flat plate [J]. Journal of Jet Propulsion, 1956, 26(4): 241-246.

[28] 郭帅旗，刘文，张陈安，等. 高超声速钝前缘乘波构型优化设计研究[J]. 力学学报，2022, 54(5): 1414-1428.
GUO Shuaiqi, LIU Wen, ZHANG Chen'an, et al. Design and optimization for hypersonic cone-derived waverider with blunted leading-edge [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(5): 1414-1428. (in Chinese)

（编辑：马文静）