

文章编号:1674-8190(2021)02-001-11

# 飞机电力系统技术研究

李开省

(航空工业中航机载系统有限公司,北京 100028)

**摘要:** 飞机电力系统技术是新一代飞机迫切需要研究的核心技术之一,随着新一代飞机朝着更多电、更高效、更清洁、更智能和少污染的目标发展,飞机电力系统的技术研究显得越来越重要,特别是对飞机提出了集成、多电、互联、智能和高效的新性能要求,飞机电力系统正是满足这些新要求的重要支撑。本文根据国外电力系统技术的发展,从新一代飞机电力系统高效的理念出发,介绍了新一代飞机电力系统如何逐步实现多电技术、混动技术到电动技术的具体方案,并对飞机电力系统四大关键技术和市场趋势进行分析,指出要突破的技术难点。飞机电力系统技术为新一代飞机研究设计和未来发展提供借鉴。

**关键词:** 电力系统架构;电机技术;能量储存技术;电力电子技术;独立电网技术

**中图分类号:** V242; V272

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.02.01

**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



## Research on Aircraft Power System Technology

LI Kaisheng

(AVIC Airborne System Co., Ltd., Beijing 100028, China)

**Abstract:** The aircraft power system technology is one of the core technologies urgently needed studying of new generation aircraft. With the development target trend of more electricity, high efficiency, more cleanliness and intelligence, and less pollution, the technology study of aircraft power system becomes more important, especially for the aircraft new performance requirements of integration, more electricity, interconnection, intelligence and efficiency, the aircraft power system is the significant support for the new requirements. According to the development of abroad power system technology, and proceeding from the high efficient idea of new generation aircraft power system, the concrete scheme of new generation aircraft power system realizing the multi-electric technology, mixture driving technology and power drive technology is introduced, four key technologies and market trend of aircraft power system are analyzed, and the technology difficulties are pointed out. This aircraft power system technology can provide the reference for the design and future development of new generation aircraft study.

**Key words:** power system architecture; motor technology; power storage technology; power electronic technology; independent grid technology

## 0 引言

随着电力电子技术、电机技术和电池技术的快速进步和技术突破,飞机电力系统在飞机上地

位越来越重要。飞机电力系统的技术研究已经成为新一代新能源飞机的核心和关键,是解决飞机污染排放和提高飞机能源效率的重要途径<sup>[1-3]</sup>。

本文通过对飞机电力系统的分析研究,结合

收稿日期:2021-01-13; 修回日期:2021-03-05

通信作者:李开省,yhdylks@163.com

引用格式:李开省.飞机电力系统技术研究[J].航空工程进展,2021,12(2):1-11.

LI Kaisheng. Research on aircraft power system technology[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(2): 1-11. (in Chinese)

国外航空电力系统的技术发展,提出航空业新一代飞机电力系统技术发展思路,创新性地开展飞机电力系统的新技术研究,拓展飞机新技术产生的新市场领域,指出电动化技术的发展思路,以期航空工业的发展进步提供参考。

## 1 飞机电力系统地位和作用

飞机电力系统是包含电能的生成、传输、分配、存储和使用的一个独立电网络。在这个独立电网中由电能产生的发电机、电能传输的输电电缆、电能分配的配电系统和电力电子变换设备、电能存储的电池系统和飞机上靠电能作动的各种执行部件以及对这些部件运行进行控制的控制器等构成<sup>[3]</sup>。飞机电力系统的用电设备主要有航空电子系统、飞行控制系统、环境控制系统、防除冰系统、起降系统、通信系统(内部和外部)、飞机照明以及飞机其他用电的关键功能元件等。所有这些系统和部件都具有可靠性高、体积小和重量轻的特点,可以实现飞机的高效率工作。随着飞机上更多系统逐步实现电气化替代,飞机的总体效率进一步提高,污染排放进一步减少,飞机电力系统的地位和作用越来越重要<sup>[4-5]</sup>。未来,飞机电能源系统也会成为飞机一次能源推进动力的核心,因此极大推动飞机的技术进步。

传统的飞机系统示意图如图 1 所示,可以看出:传统飞机平台电力系统的需求较少,目前国内飞机电力系统可以满足飞机用电需求。为了满足飞机发展的需求和新技术的应用,提升飞机电力系统竞争力,飞机电力系统技术需要不断的进步,以降低电力系统产品体积和成本,提高飞机电力系统产品的效率和功率密度,提升未来飞机电力系统功率需求。

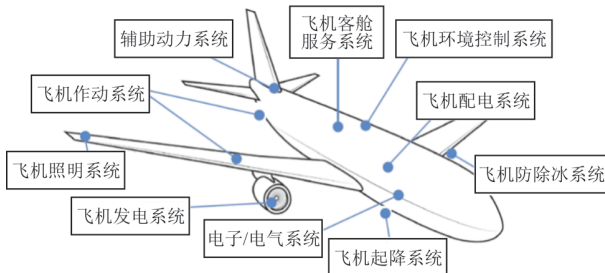


图 1 传统的飞机系统示意图

Fig. 1 Schematic of tradition aircraft system

未来飞机电力系统功率需求的趋势如图 2 所示。

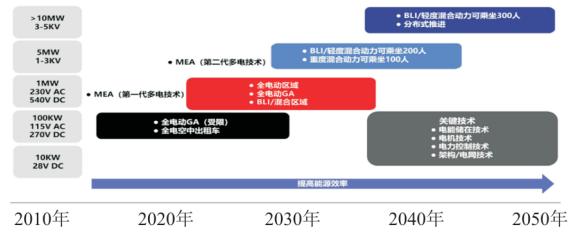


图 2 飞机电力系统功率需求图

Fig. 2 Schematic of power requirement of aircraft power system

## 2 飞机电力系统构成

飞机电力系统是由飞机发电系统设备、飞机电力分配和电力变换系统设备、飞机用电系统设备,以及把电能从发电机传输到电力分配系统和电力变换设备,再通过电力分配和电力变换设备传输到飞机航空用电设备的传输网络构成,飞机的电力系统是一个独立的电网络系统,具有一切独立电网络的特点。

飞机独立电网络的方框图如图 3 所示。



图 3 飞机独立电网络方框图

Fig. 3 Diagram of aircraft independent power network

飞机发电系统设备的作用是将航空发动机的机械能转换成飞机需求的电能;飞机电力分配和电力变换系统设备是将飞机发电机发出的电能进行电力分配、变换、冗余、容错和不间断等供电方式进行合理配置,通过传输电网提供给飞机的用电系统设备;飞机的用电系统设备具有飞机上的各种操纵控制功能、生命保障功能和飞机实现任务系统功能,例如飞机的各种马达、控制、照明、武器发射、加热、探测等设备。

### 2.1 飞机电力系统特点

飞机电力系统传输距离短,发电、电力分配和变换及用电设备都集中在航空器中,核心是电力系统的系统化和集成化。

(1) 飞机电力系统设备体积小,重量轻,可靠性高。

(2) 飞机电力系统设备比地面设备耐更严酷的自然条件。

(3) 飞机电力系统设备的结构设计、热设计、冷却介质等都比地面电力系统设备复杂,对所用设备和材料提出了更高的要求。

(4) 飞机电力系统设备是发电、电力分配和变换、储存、驱动、用电、控制和通信等为一体的现代高科技系统。

## 2.2 飞机电力系统技术构成和框架

飞机电力系统的技术分布如图4所示,由四部分组成。

(1) 发电系统技术:随着电动飞机技术发展,发电系统技术逐步扩展到电机技术,不仅仅是发电技术,而且未来随着电推进技术发展,电动机技术更为重要,将电推进和发电系统技术结合起来,其核心是电机技术<sup>[6-7]</sup>,既包含电动机又包含发电机。

(2) 电力分配和变换技术:包含电能的分配和变换,其技术主线核心就是电力电子技术<sup>[8-10]</sup>。

(3) 系统集成架构和热管理技术:包含电力系统架构设计、集成与热管理技术,其技术主线核心就是系统架构和电网络技术<sup>[11]</sup>。

(4) 能量储存技术:主要是电池技术,也就是电池里面存储的能量密度,其核心就是能量存储技术<sup>[12]</sup>。

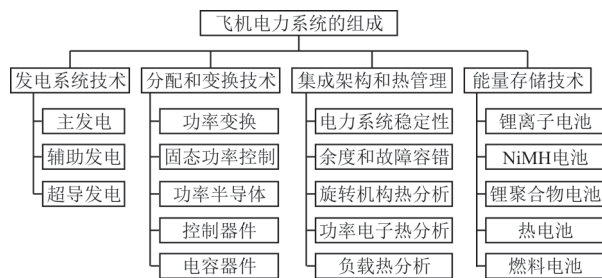


图4 飞机电力系统技术分布图

Fig. 4 Distribution of aircraft power system technology

将电力系统的四个部分用核心技术来表达就是电机技术、电力电子技术、架构和电网络技术、能量存储技术。

## 3 飞机的能源逐步实现电气化

在航空业过去的几十年发展中,民用航空业发展使国际社会发生改变,实现了民用航空经济

高效和安全舒适的全球运输产业链。由于航空新技术的不断进步和市场需求的根本推动,航空固定翼飞机和旋翼飞机经过几代航空人艰苦卓绝的努力,使民用航空运输业保持了持续的增长,近年来民用航空运输的客运量更是以4.5%的复合年增长率在增长,预计未来民用航空业会以同样的增长率快速前进<sup>[13]</sup>。

民用航空运输业的持续增长必然会带来越来越严重的环境污染问题,除非航空业采取新的技术措施,否则世界航空业制定的减排目标,将会使民用航空业的增长率受到限制。民用飞机的大量应用会影响世界的整个环境气候(通过CO<sub>2</sub>排放)、当地的空气质量(NO<sub>x</sub>,未燃烧的碳氢化合物和颗粒物排放),并且产生大量的噪声。民用航空业正在大力进行技术创新的投入,以突破航空业在上述方面所面临的问题,降低民用航空业对整个世界环境造成的影响。

减少航空业的污染排放,降低对世界环境造成的影响,在飞机中增加电能使用是非常具有吸引力的措施,由于电能为飞机优化提供了新的机会,可以大幅度减少飞机对环境的影响。这些措施包括提高电力系统效率、减少电力系统的重量和体积,同时增加系统功能。随着飞机系统的多电化和飞机级设计的优化,将使飞机的可靠性和可维护性大幅提高,飞机的总成本大幅降低,并且可以进一步提高飞机的安全性。

在颠覆性的飞机概念创新设计中,飞机的电能将被用于提供飞机推进的推力。这就是新能源电动飞机技术,该项技术将会极大地改变现有的飞机供应链,并促进许多新技术产品进入新市场的机会。不采用这项新的颠覆性的创新技术,将不可能实现世界航空业和欧洲委员会2050年的环境目标。用于新飞机的颠覆性创新技术包括混合动力和电力推进技术<sup>[14-15]</sup>。飞机电力系统中创新技术(例如高压、兆瓦级的独立电网系统)的问世,被广泛认为有可能在未来推出具有先进混合动力或电力推进技术的新型飞机平台上应用。此外,使用电力推进系统的推力产生技术可以为飞机能量存储、能量转换和推进系统推力的分配提供更高的灵活性,从而实现飞机整体性能的最优,使飞机具有更高的燃油效率和更低的运行噪声。

从飞机能量优化利用的角度出发,飞机的电

力系统的发展分为两种技术趋势:一是飞机的二次能源系统向着多电、全电化的趋势发展(即多电、全电飞机技术);二是飞机一次能源逐步从传统能源形式发展到混合动力能源再到电能源的趋势发展。飞机二次能源的多电化,对常规液压、气压、机械能源的需求量逐步减少,飞机二次能源朝着更多电能方向迈进。飞机一次能源从混合动力到电力推进的颠覆性技术的方向发展(即电动飞机技术),使得飞机电力系统从传统飞机的二次能源朝着飞机一次能源转变,电能源的发展方向发生了根本性的转变。这种转变使飞机电能源的功率量级发生数量级的变化,将迫切需要研究具有高功率密度和小体积重量的大功率电机、高效的高能量密度电能存储技术等<sup>[12,16]</sup>。这些技术是未来解决航空业环境问题的关键推动力。

飞机电力系统的这两种发展趋势,创造出飞机新的市场需求,显著提高了现有飞机整体效率。

这些新市场需求包括电动航空的城市航空运输和低排放或零排放的区域航空运输,为了适应新市场的这种变化,城市需要建设许多小型机场,开发更多的区域中型电动和混动飞机,以提高飞机的燃油效率、减少对环境造成的影响。

通过研究未来飞机平台(传统的和颠覆性的)对电力系统的技术发展需求,考虑国际航空业的市场发展,对应飞机电力系统两种发展趋势,开展了目前交付的飞机和未来架构飞机所需的电力系统技术评估,梳理出一些急需解决的关键技术挑战,为我国航空工业飞机电力系统的技术发展找出明确的方向。

## 4 多电飞机技术

飞机二次能源系统(液压、气压、机械)逐步实现用电能来替代,是飞机电力系统逐步向多电、全电飞机技术发展的第一步,具体方案如图 5 所示。

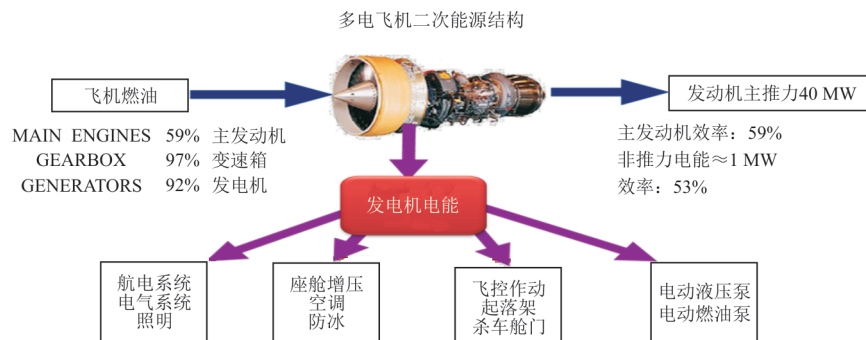


Fig. 5 Diagram of more-electric and all-electric aircraft

多电飞机技术利用飞机的电力系统和机电系统的技术发展优势,通过减小飞机系统的尺寸、重量和功耗来提高系统的运营效率。这项技术通过更高效、更轻便的电力系统代替传统的飞机气动和液压系统,从而实现飞机系统的高效,减少飞机的污染排放和更为简化的飞机整体架构<sup>[1,3]</sup>,提高了飞机的可靠性和健康管理性能,降低了飞机维护成本,简化了飞机维护流程。

多电飞机技术的优点如下:

- (1) 提高了飞机电力系统效率;
- (2) 减小了飞机系统的重量和体积;
- (3) 提高了飞机可靠性;

- (4) 改善了飞机可维护性;
- (5) 增加了新功能,对系统级进行优化;
- (6) 降低了飞机成本,经济效益显著。

由于多电飞机技术有上述优点,使得飞机有更低的燃油消耗、更少的排放和更低的总成本。为此,需要飞机电力系统技术从飞机的顶层系统设计和综合集成等方面来综合考虑。多电飞机技术系统框图如图 6 所示,这些系统被分配到四个特定的飞机电力系统的关键技术领域。按飞机电力系统技术发展中所强调的那样,这些技术需要在特定主题上进行大量投资,以开发出更多的多电、电动飞机。

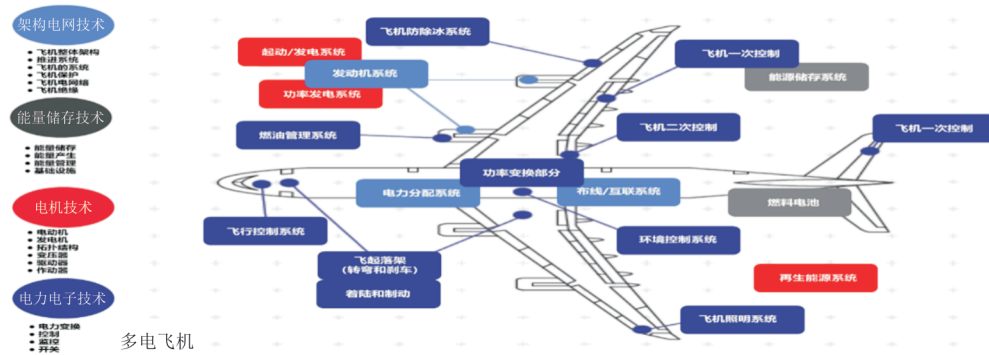


图 6 多电飞机技术方框图

Fig. 6 Diagram of more power aircraft technology

在最新的多电飞机技术上,除了飞机的推进系统外,飞机系统大多将采用电能来驱动,飞机还具有电能存储功能。这一概念可使飞机上的能源系统使用进行重新平衡,并在飞机不同的飞行阶段进行优化,从而可以充分利用多电飞机系统的技术优势。当前的多电飞机技术主要包含电力驾驶舱、电力环境、电力作动、电力刹车、电力防除冰系统以及各种电力的辅助设备控制。例如在波音 787 飞机上已经实现发动机起动/发电功能,极大减轻了飞机的重量,提高了飞机的效率<sup>[12]</sup>。因此多电飞机的电力系统集成是其关键成果之一。飞

机的液压系统用电力系统替代更具有挑战性,目前应用较多的是分布式电动液压系统,以取代笨重、不可靠的集中式液压系统(其中部分已经在空客 A380 和波音 B787 飞机上实现)<sup>[3]</sup>。多电飞机技术改进升级、现有飞机传统系统的技术挑战如图 7 所示,其中电机、功率电子变换器和电力分配系统功率密度的提高将是多电飞机技术在飞机上推广应用的关键推动力。多电飞机技术也将改进旋翼飞机,其中电力尾旋翼、更轻的电力作动器等附件的技术进步是旋翼飞机实现多电技术的关键。

电气化的应用				
类别	城市航空运输 (新市场)	区域小商用航空运输 (新)	中型商用航空运输 (现有)	大型航空运输 (现有市场)
电力需求	150-200KW	2MW推力	22MW推力	60MW推力
能源需求	150-200KWh*	12MWh	55MWh	390MWh
非推力能源需求	5-10KWh	0.1-0.3MWh	1-6MWh	8-30MWh
乘客人数	1-5	9-20	120-200	240-500
范围	30英里+有限转移	300英里+转移	800英里+转移	3000英里+转移
全部重量	1t	2-10t	~100t	~250t
充电/加油时间	2-10分钟	15-30分钟	20-60分钟	<2小时
多电架构	—	—	改进架构	改进架构
混合动力	—	并联混合动力	改进+瞬态辅助-吸引力	改进+瞬态辅助-可能
先进混合动力和电动	电动航空能量储存	串联式	串联式也许可行	串联式困难
工作高度	几十米	商用可能性低	商用	商用
最大工作速度	<150mph	300-400mph	600mph	600mph
自主价值	必要的	中等	中等	中等/高
监管难度	非常高	高	中等	可能高
垂直起降	是	不可能	否	否

图 7 飞机电气化的应用情况

Fig. 7 Application conditions of aircraft electricity

## 5 飞机混合动力和电力推进系统

飞机混合动力推进系统技术正在开展大规模的研究<sup>[2,6]</sup>,准备应用于未来的大型商用飞机上。飞机的混合动力将燃气涡轮发动机、发电系统和电能存储系统结合在一起,共同推进飞机的涡轮

风扇或螺旋桨。飞机的电力推进系统是飞机推进完全依赖于电力的推进系统,而该推进的电力是由燃料电池、锂离子电池和超级电容器系统中存储的电能产生<sup>[5,12,17]</sup>。

飞机的混合动力系统可分为并联混合动力系统和串联混合动力系统<sup>[14]</sup>,并联混合动力系统利

用电池或燃料电池存储的电能为电动机提供动力,电动机和发动机一起产生飞机的推进推力,电动机是辅助推力用来补充或替代使用常规燃料的涡轮发动机的不足。飞机额外的电能可以用于在飞机加速或者在飞机高功率需求时的推力补充,也可以在飞机的电机和电池之间实现双向功率传递。

电动辅助功能包括在燃气轮机壳体内容合并电动机/发电机,以形成飞机的轻度混合动力系统,从而最大程度地减少飞机对发动机及其他机械零件的改动<sup>[14]</sup>。这个方案使得发动机成为减少CO<sub>2</sub>排放的有前途且经济实用的短期解决方案,并且可能在小型支线飞机和大型客机的开发计划中投入使用。

并联混合动力系统允许在发动机和电力系统中进行独立运行和优化,可实现两个系统之间功率共享的独立设计。由于混合动力系统有两套推进系统,结构相对复杂,限制了飞机的整体设计,飞机发动机安装位置由推进器来确定,并且在某些飞行区域中发动机可能未在其最佳设计条件下运行。混合动力系统的关键技术挑战是提高电机、电力电子设备的效率,电能存储的能量密度以及电力系统的保护和容错能力。并联混合动力方框图如图8所示。

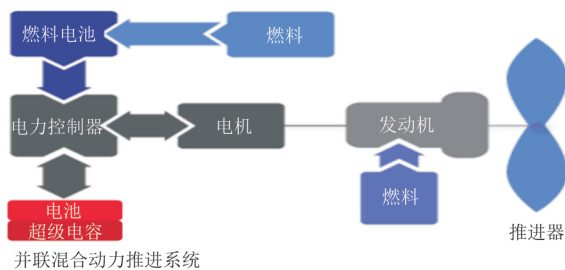
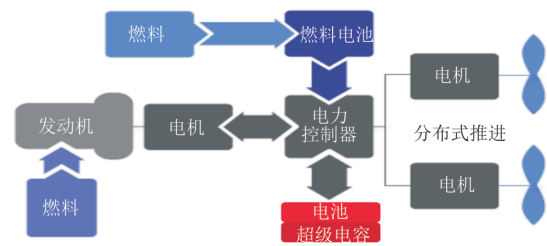


图8 并联混合动力系统原理框图

Fig. 8 Diagram of parallel hybrid power system

在串联混合动力推进配置中,涡轮轴或涡轮发动机的能量通过驱动推进系统的发电机转换为电能。电能驱动电动机带动风扇产生推力,这种推力可以由一个或多个分布式风扇提供,而每个风扇都由电动机驱动。涡轮发动机仅用于发电,其直接用于为传递推进力的电动机提供动力,或者为飞机的电能存储系统(如果基于电池)充电。当飞机需要峰值推进功率时,或者当不需要发动机工作的时候,电能将从能量存储系统中直接输送出来。串联混合动力允许在系统级别对飞机进行优化,并以较低的总重量实现飞机的高效运行,如图9所示。



串联混合动力推进系统

图9 串联混合动力系统原理框图

Fig. 9 Diagram of cascade hybrid power system

串联混合动力系统使发动机在其最佳状态和更高效率的情况下运行,能够优化飞机分布式推进系统。但是,从总体上来看,串联混合动力系统重量更重,整体效率相对于并联混合动力系统要低。

每种混合动力系统的解决方案都可以应用于所考虑的三种情况,在每种情况下上述方案都有不同的优势和局限性。实际应用哪种解决方案完全取决于飞机执行任务情况。

高效的电能存储技术是飞机电力推进系统的关键,而电力电子技术也非常重要,由于电力电子设备需要非常高的效率、低热损耗和良好的冷却。

当飞机的推动力用电力推进系统的推力取代了发动机推力,飞机就可以实现无排放飞行,这在人口密度高的地区(例如城市)具有很大吸引力。但是,目前由于受到电池能量存储密度的限制,电力推进的电动飞机仅在小型飞机或城市区域有限的空间内飞行,还不能在中距离和较远距离的飞行航段上使用。根据飞机需要提供峰值功率需求的能量,电池也可以与超级电容器结合起来使用。燃料电池可以为飞机提供更大的飞行推动力,但目前其重量仍然很重,并且在航空飞行应用中没有得到充分的验证。

电力推进技术的快速发展是由市场需求和国际民航运输业的国际法规及环境因素要求而推动,而不是由飞机降低成本的要求推动。目前电力推进技术的一些应用在技术上已经接近可行,例如城市航空运输。在航空运输业的其他领域,仍然需要进行重大的技术创新,如电池能量存储密度(关键),高效高功率密度的电机和电力电子设备等<sup>[6]</sup>,电力推进系统原理如图10所示。

飞机电力推进系统能源结构发展如图11所示,可以看出:飞机混合动力系统和电力推进系统是飞机一次能源的逐步电动化过程,飞机飞行的动力由传统飞机的燃油产生发展到由燃油的电能来共同产生,即混合动力飞机;飞机飞行的动力由

传统飞机的燃油产生发展到由电能来产生,即电力推进飞机。

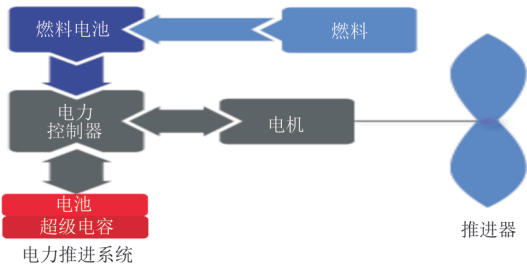


图 10 飞机电力推进系统原理框图  
Fig. 10 Diagram of aircraft power propulsion system

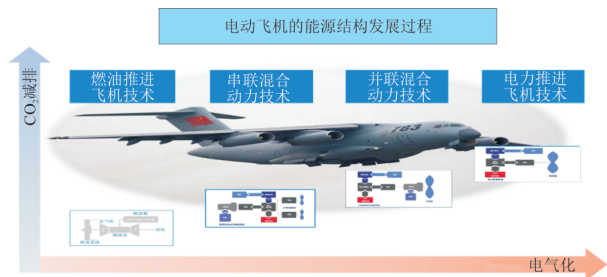


图 11 飞机电力推进系统能源结构发展图  
Fig. 11 Diagram of energy structure development of aircraft power propulsion system

电力推进飞机的具体方案图如图 12 所示,一

次能源是由电能来实现,飞机的推动力由电能产生(锂离子电池、燃料电池和超级电容等电能存储形式)。邹宁等<sup>[18]</sup>以天翼 1 无人机为研究对象实现了电动化改造,计算了电推进系统中电动机和锂电池组的主要参数。

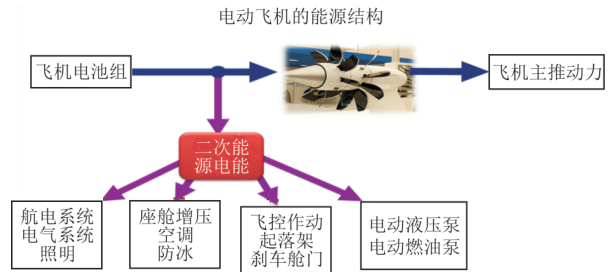


图 12 电动飞机的方案图  
Fig. 12 Diagram of power aircraft scheme

## 6 飞机电动化技术面临的挑战

飞机电动化是一个逐步发展的过程,在发展过程中各个阶段都面临着不同的技术挑战。本文列举了架构和电网技术、能量存储技术、电机技术、电力电子技术四个主要技术领域来说明电力推进系统关键领域的相关挑战的程度,如图 13 所示。

飞机电动化技术挑战				
升级飞机子系统	架构和电网技术	能量存储技术	电机技术	电力电子技术
<b>多电飞机子系统技术挑战</b>				
环境控制系统				
电力防冰系统				
启动/发电系统				
机电驱动系统				
多电发动机				
电力分配与保护				
非关键动力燃料电池				
整体系统动力需求				
<b>并联混合动力子系统技术挑战 (除了MEA)</b>				
大功率启动/发电				
电力共享控制				
蓄电池				
电力分配与保护				
整体电力系统				
<b>电力推进子系统技术挑战 (除了MEA)</b>				
蓄电池				
燃料电池				
分布式推进电机				
电力分配与保护				
整体系统电力需求				
<b>串联混合动力子系统技术挑战 (除了MEA)</b>				
大功率发电机				
电力共享控制				
蓄电池				
燃料电池				
分布式推进电机				
电力分配与保护				
整体系统电力需求				

关键: 红色—核心挑战; 蓝色—重大挑战; 灰色—需要工作, 风险可控; 白色—不适应

图 13 飞机电动化的技术挑战  
Fig. 13 Technology challenge of aircraft electromotion

## 7 电动化技术及其发展思路

### 7.1 电动化技术

飞机电动化和独立自主性的结合可以实现飞机新的机动性概念<sup>[3,19]</sup>,例如用于城市航空运输等领域的自主电动飞机“VTOL”,其已经针对具有有限能力的1~4乘客电动“VTOL”交通运输工具开展了多个项目的研发。这些新概念的运输工具将与传统的出租车行业展开竞争,因此其必须具备运输价格便宜和使用方便的特点。由于目前的运输工具噪声及污染排放大,是城市生活环境中面临的关键问题。而这些新的技术平台将依靠电力推进系统来运行,使城市污染排放、噪声大为降低,因而得到人们的认可和应用。

### 7.2 发展思路

从飞机电动化各个环节面临的技术挑战进行梳理,可以总结出四个主要关注的核心技术领域和具体的关键技术。

#### 7.2.1 飞机电力系统架构和电网络技术

主要是飞机系统的总体设计,以适应飞机电能大功率的需求,飞机电网采用高压输电,最大限度地减少电能损耗,同时飞机电网实现高水平健康管理和可靠保护功能<sup>[11]</sup>。

关键技术:

- (1) 飞机电力系统架构仿真飞机技术;
- (2) 飞机电力系统架构设计与优化技术;
- (3) 飞机推进技术;
- (4) 飞机电网稳定、可靠设计技术;
- (5) 飞机电力系统保护技术;
- (6) 飞机电力系统高压绝缘技术。

#### 7.2.2 飞机电能存储技术

飞机要在体积小、重量轻的储能设备中存储足够电能,就需要提高储能设备能量存储密度,这些储能设备要具有成本低、效率高、寿命长的特点,同时还要提高储能设备的充放电效率<sup>[12]</sup>。

关键技术:

- (1) 高能量密度存储技术;
- (2) 能量产生技术;
- (3) 能量管理技术;
- (4) 电能存储所需要技术设施。

#### 7.2.3 电机技术

高功率密度、高效的电机是飞机电动化的关键,可以产生飞机飞行所需大功率能量,是飞机前进提供推进推力的发动机<sup>[6-7]</sup>。同时许多小电机也是飞机飞行操纵动力的部件。

关键技术:

- (1) 高效、高功率密度、大扭矩的电动机推进技术;
- (2) 高效、高功率密度的发电机技术;
- (3) 各种电机的拓扑技术;
- (4) 高效的变压器设计技术;
- (6) 各种高效、灵巧的电力作动技术。

#### 7.2.4 电力电子技术

飞机上大量使用电力电子设备,要求其损耗小、重量轻、耐高温,用于实现飞机上的电力变换、电力控制和电力调节等功能,向飞机提供高质量大功率电力能源<sup>[8-10]</sup>。

关键技术:

- (1) 电力电子变换技术;
- (2) 电力系统控制技术;
- (3) 电力系统健康管理与监控技术;
- (4) 电力电子固态开关技术。

飞机电动化要从上述四个方面进行优化设计和攻关,它们是飞机电动化的核心与关键,把这四个方面核心技术分析清楚,飞机电动化将会取得成功。

## 8 航空电动化的市场分析

飞机电动化的技术开发适用于一系列市场领域,包括商用和军事应用的航空领域。目前在混合动力旋翼飞机、倾斜旋翼飞机、性能优化公务机、高效的货运飞机、主流商用客机和城市内的小型飞机上都广泛使用电动化技术。在大型商用航空运输领域,飞机的电动化有两种截然不同的应用方向:一是采用当前常规架构趋势多电飞机技术的电气化持续增长<sup>[20-21]</sup>;二是采用各种级别的电力推进技术来支持潜在的新市场应用<sup>[1,3]</sup>,包括混合动力飞机(乘客大于20个座位级)和有航程限制的适用于所有电动化技术(乘客小于20个座位)的单通道飞机,以及其他新概念飞机,例如用于城市



航空运输的电动垂直起降飞机(VTOL)等。

混合动力和电动化技术架构的飞机市场拓展和广泛应用取决于这两项技术的成熟和合格稳定产品的推出,这些技术可以满足航空领域对特定的尺寸、重量、功率和安全性要求。但支持这些技术的航空体系还会遇见更广泛的问题,例如航空的法律法规和航空地面的基础设施等。这些问题的解决,将决定着上述技术应用和市场发展的步伐。可以考虑几种构型的飞机同时存在,以确定上述技术何时进入市场比较合适。

新飞机交付市场有各种可能的方案,但不包括旋翼飞机或公务机。目前以最保守的情况估计,在窄体和宽体飞机的细分市场中将保留传统架构技术,混合动力和电动飞机应用都仅限于城

市内的区域和次区域平台。在这些平台的未来升级中,电动化程度有限的传统架构仍然将保留大部分市场价值。

飞机按平台类型划分的收入如图 14 所示,其中考虑了可能在 2030 年左右引入混合动力电动支线飞机的情况,该飞机的座位超过 20 个,电力推进的支线飞机座位低于 20 个;还考虑了 2035—2040 年引入混合电动飞机窄体平台的情况,以及 2040 年以后潜在混合动力电动宽体飞机的情况。这些平台市场拓展可以通过相关新技术的采用来实现。中国的航空工业要想在世界航空市场上立足就需要确保在这些新技术的发展上已经做好充分的准备。

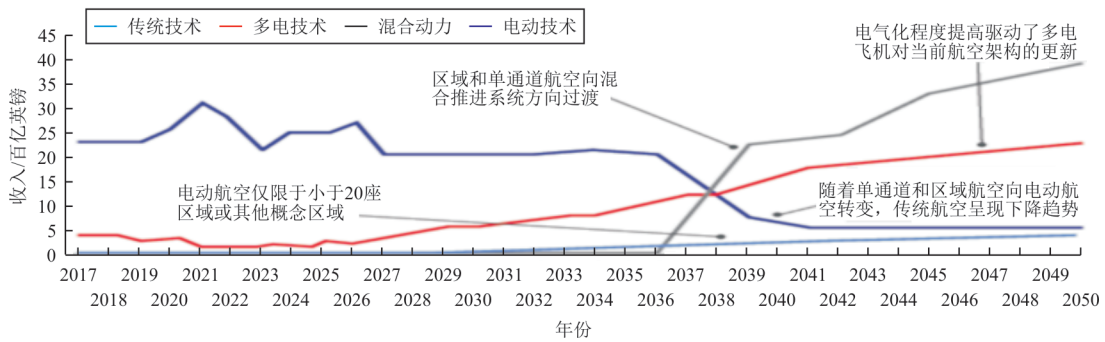


图 14 飞机按平台类型划分的收入图

Fig. 14 Income diagram of aircraft according to platform types

从图 14 可以看出:传统平台仍将保持最大的累积市场价值,超过约 5.6 万亿英镑,但是到 2050 年,其数量和价值将逐渐下降<sup>[22]</sup>;紧随其后的是价值约 3.5 万亿英镑的多电飞机技术呈上升趋势。值得注意的是,多电飞机技术的架构发展不受与混合动力或电力推进架构相同挑战规模的限制,从而提供了更多明确的市场机会。在这种情况下,最大的收益将是在此期间交付的混合动力电动飞机,价值约 4 万亿英镑。销量的大幅度增长将由传统地区和单一品种向混合动力方向转变。技术的可用性还可能会引入所有不到 20 个座位的电动子区域,这可能会开辟新的区域航空旅行航线,这些飞机的价值在此预测期内可能超过约 4 000 亿英镑<sup>[22]</sup>。传统和新技术的市场份额图如图 15 所示。

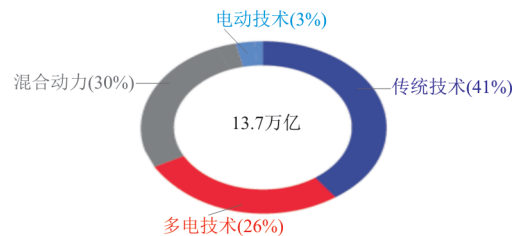


图 15 传统和新技术的市场份额图

Fig. 15 Market shares of traditional and new technology

要注意常规平台市场,即使在这种快速发展的情况下,常规平台仍将保留超过 5.6 万亿英镑的市场,但是到 2050 年,其数量和价值将逐渐下降<sup>[22]</sup>。随着电动技术的发展,电力系统的发展也具有重要价值,尤其是随着电力系统价值的增加,可以过渡到多电技术的架构,随后再到混合动力和电力推进的架构。

电力系统的价值比图如图 16 所示,可以看出:到 2050 年的预测期间内,飞机电力系统中传统飞

机的总价值预计将达到 1 620 亿英镑,多电飞机将达到 1 920 亿英镑,混合电动飞机将达到 5 780 亿英镑,电动飞机平台将达到约 1 270 亿英镑。

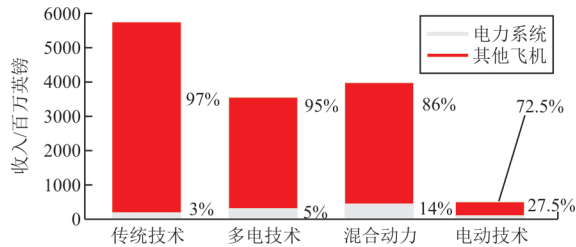


图 16 电力系统的价值比图

Fig. 16 Price-to-value ratio of power system

## 9 结束语

飞机的电动化可分为两大技术趋势:一个趋势是飞机的二次能源逐步向用电能来代替其他能源的方向发展,减少了飞机对传统液压和气动系统的需求;另一个趋势是飞机一次能源向混合动力或电力推进的方向发展。

飞机电动化将改变未来航空市场,为中国航空工业进入世界航空市场竞争带来了重大机遇,飞机电动化将为飞机电力系统供应商创造出新的广阔航空市场领域。

如果我国要在这个新的航空市场占有一席之地,则需要飞机电力系统研究和技术上进行大量人力和物力投资。我国应制定明确的国家飞机电动化技术投资计划,重点建设高水平飞机电动化技术的电力系统集成和测试设施平台,以支持我国飞机电动化技术的集成和测试,提高我国飞机电动化的技术水平。

飞机电动化技术是未来飞机的发展方向,是减少污染排放、降低噪声和满足国际社会未来发展的必由之路,也是我国承诺实现碳排放标准的关键推动力。相信未来随着我国电动飞机产业的不断发展壮大,带动整个人类社会朝着绿色、清洁和安全的方向迈进。

### 参考文献

[1] 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 Kaisheng. Development review of more-electric power system[J]. International Aviation, 2015(12): 26-30. (in Chinese)

[2] Aerospace Technology Institute. Electrical power systems

[J]. Insight, 2018(7): 1-6.

[3] 李开省. 电动飞机技术的发展研究[J]. 航空科学技术, 2019, 30(1): 1-7.  
LI Kaisheng. Research on the development of electric aircraft technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 2019, 30(1): 1-7. (in Chinese)

[4] KRUPPA Otmar. The more electric aircraft (MEA) [R]. US: RMC, 2014.

[5] 孙友师. 从多电飞机到能量优化飞机——美国空军航空机电领域发展计划浅析[C]// 2015第二届中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学会, 2015: 495-498.  
SUN Youshi. From MEA to EOA: analysis of USAF development programs related to aircraft systems[C]// 2015 The Second Chinese Aviation and Science Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2015: 495-498. (in Chinese)

[6] MAZZOLENI Mirko, DI RITO Gianpietro, PREVIDI Fabio. Electro-mechanical actuators for the more electric aircraft [M]. Berlin: Springer, 2021.

[7] 程海龙. 多电飞机机电系统关键技术探究[J]. 科技信息, 2013(19): 104.  
CHENG Hailong. Research of key technologies of more electric aircraft motor system[J]. Science & Technology Information, 2013(19): 104. (in Chinese)

[8] 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): 1-15.  
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): 1-15. (in Chinese)

[9] 梁嘉琳, 周元钧, 董世良. 多电飞机电力系统集成仿真技术的研究[J]. 电力电子, 2006(1): 1-4.  
LIANG Jialin, ZHOU Yuanjun, DONG Shiliang. EMA power system integrated simulation saber simulation [J]. Power Electronics, 2006(1): 1-4. (in Chinese)

[10] 孙哲, 梁青阳, 罗沛清. 飞机电力系统三相不平衡的抑制技术及发展[J]. 高科技与产业化, 2010(6): 87-89.  
SUN Zhe, LIANG Qingyang, LUO Peiqing. Suppression technology and development of aircraft electric system three-phase imbalance[J]. High-Technology & Industrialization, 2010(6): 87-89. (in Chinese)

[11] CAVALLO Alberto, CANCEIELLO Giacomo, RUSSO Antonio. Integrated supervised adaptive control for the more electric aircraft[J]. Automatica, 2020, 117: 108956.

[12] ZHANG Yicheng, CHEN Jian, YU Yang. Distributed power management with adaptive scheduling horizons for more electric aircraft[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 126: 106581.

[13] 郑成成, 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 Xiancheng, ZHANG Xiaobin, HUANG Tieshan. 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)
- [14] 李开省. 混合电推进支线客机的可行性分析[J]. *航空动力*, 2020(2): 32-35.
- LI Kaisheng. Feasibility analysis on regional aircraft with hybrid electric propulsion system [J]. *Aerospace Power*, 2020 (2): 32-35. (in Chinese)
- [15] 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, CHEN 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)
- [16] RODRÍGUEZ Fermin, GAIZKA Martínez, SERGIO Rodríguez, et al. Increasing the safety of more electric aircraft through a novel algorithm in the DC power system [J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 14(3): 690-705.
- [17] 赵长辉, 陈立玮, 张勤满, 等. 太阳能电动飞机技术发展综述[C]// 第五届中国航空学会青年科技论坛. 南昌: 中国航空学会, 2012: 124-126.
- ZHAO Changhui, CHEN Liwei, ZHANG Qinman, et al. Review of solar powered electric aircraft technology [C]// The Fifth Youth Science Conference of CSAA. Nanchang: CSAA, 2012: 124-126. (in Chinese)
- [18] 邹宁, 姚小轶, 梁爽, 等. 天翼 1 无人机电动化改造可行性分析[J]. *航空工程进展*, 2020, 11(2): 214-219.
- ZOU Ning, YAO Xiaoyi, LIANG Shuang, et al. Feasibility analysis on electric transformation of SW1 unmanned aerial vehicle [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(2): 214-219. (in Chinese)
- [19] 朱新宇. 多电飞机及其技术发展分析[J]. *民用飞机设计与研究*, 2008(2): 17-22.
- ZHU Xinyu. Development analysis of more-electric aircraft and its technology [J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2008(2): 17-22. (in Chinese)
- [20] 王复华. 多电飞机及其发展状况[J]. *航空制造技术*, 2008 (9): 63-64.
- WANG Fuhua. Multi-electric aircraft and its development [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008 (9): 63-64. (in Chinese)
- [21] 李开省, 王宏霞. 多电飞机技术及其标准体系探讨[J]. *航空标准化与质量*, 2007(6): 10-14.
- LI Kaisheng, WANG Hongxia. Discussion on the more-electric aircraft technology and standard system [J]. *Aeronautic Standardization & Quality*, 2007(6): 10-14. (in Chinese)
- [22] 李开省. 电动飞机核心技术研究综述[J]. *航空科学技术*, 2019, 30(11): 8-17.
- LI Kaisheng. Research overview of electric aircraft core technologies [J]. *Aeronautical Science and Technology*, 2019, 30(11): 8-17. (in Chinese)

#### 作者简介:

李开省(1961—),男,硕士,高级专务、研究员。主要研究方向:航空机载机电系统技术,多电、全电及电动飞机技术,能量优化系统技术等。

(编辑:丛艳娟)