航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Nov. 25 2019 Vol. 30 No.11 8-17

电动飞机核心技术研究综述

李开省*
航空工业中航机载系统有限公司， 北京 100028

摘　要：电动飞机技术是航空工业未来的发展方向，由于其大量减少了二氧化碳和其他污染物的排放，减少了飞机的噪声，提高了飞机效率，在未来有着广阔的市场前景，其核心技术是高效高功重比的电动机技术、高温电力电子变换技术和高能量密度电池技术。核心技术的突破对于混合动力和电动力航空未来发展起着至关重要的作用。

关键词：混合动力飞机；电动飞机；电动机；发电机；电力电子变换器；锂电池；燃料电池；太阳能电池

中图分类号：V272　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.11.002

近几年来，电动飞机技术得到了快速发展[1]，根据美国环保局统计，包括航空在内的所有的运输系统，占全球人类温室气体排放的1/4，根据国际运输协会的预计，到2025年乘坐客机旅行的需求量将呈现翻一番的增长。为了减少二氧化碳和其他污染物的排放，目前，国际社会亟须转型升级，大量使用污染少、高效率的新型能源。汽车工业已经开始转向混合动力和电动汽车时代，使其对环境污染排放大大降低。特别是近几年来，电力电子技术、高能量密度电池技术、新型材料技术的快速发展，推动了电动飞机技术的快速发展。图1为传统技术的改进和下一代技术引入CO_2减排比较图。

目前，电动飞机技术也正在向市场发展过渡，电力推进装置的推进功率范围在逐步拓展（从45kW到260kW），现阶段这种发展的推进功率只适应于小型私人飞机。预计到2025年，储能技术的快速进步将足以满足中程电动飞机发展的需求。根据德国西门子公司的预测，2050年电力推进将成为航空工业所有部门的标准，成为飞机的主要推进方式。

耐高温电力电子技术、电池储能技术的进步，使得电力发动机技术（即电动机技术）可能赢得与燃油发动机的竞争胜利，并且，可能发展成为汽车和飞机首选的推进动力系统。

几十年以来，两种推进技术在发展之间的竞争一直在进行，特别是最近几年，似乎竞争已经尘埃落定，形势已经开始发生变化。化石燃料的可燃性和价格越来越难以预测，特别是二氧化碳排放和发动机的污染物会促发温室气体效应，并严重影响空气质量。因此，引起国际社会的日益关注。随着世界各地越来越多国家人民生活水平的提高，便捷的交通也是人们日常生活日渐富裕的一种体现。全球汽车、飞机的保有量、运输量始终呈上升态势。人类社会发展似乎只有一条出路，每一代的运输工具都需要比上一代更清洁环保。新一轮动力的竞争集中在高效、无污染的竞争上。因此，混合动力和电动飞机注定成为未来航空工业发展的必由之路。

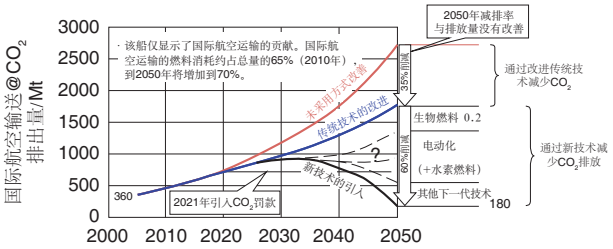


图1　传统技术的改进和下一代技术引入CO_2减排比较图

Fig.1　Improving of traditional technology and introducing next generation technology into CO_2 emission reduction comparison chart

1 电力推进技术

电力推进技术是交通运输业发展的一个重大技术创新，它和燃油运输工具相比，有着非常多的优势，它高效、无污染和无噪声。但是，由于电池技术发展水平的限制，纯电动电力推进目前仅仅限于小型飞机，虽然，电动机可以生产

收稿日期：2019-09-16；退修日期：2019-09-25；录用日期：2019-10-11
*通信作者. Tel.：010-58354928　　E-mail：yhdylks@163.com
引用格式：Li Kaisheng. Summary of research on core technology of electric aircraft[J].Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 8-17. 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.

得足够大，可以满足推进大型飞机发展的需要，但由于电池技术尚未达到提供长途飞行所需要的能量密度。这在目前阶段限制电动航空在大飞机推进技术上发展。根据飞机电动化的发展[2]，日本制定了发展路线（见图2）。

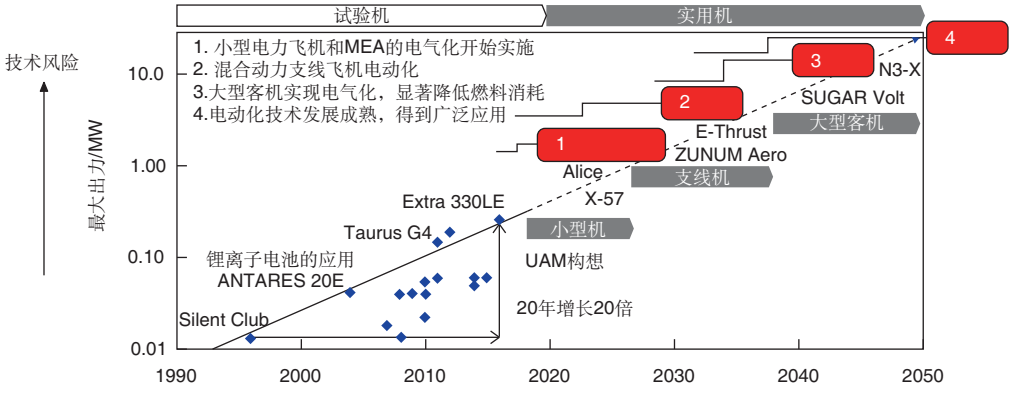


图2　日本航空电动化发展路线图

Fig.2　Roadmap for the development of aeronautical electronics in Japan

在航空工业的发展中，人们根据目前阶段动力现状，提出了一种发动机推进方式的新构型，开发了混合动力推进的发动机，使用燃油发电来产生推进电动机的电力。这种新技术有许多种混合动力的典型架构，图3～图6从原始的基本动力构型出发，介绍几种基本的混合动力和电动力的拓扑结构。

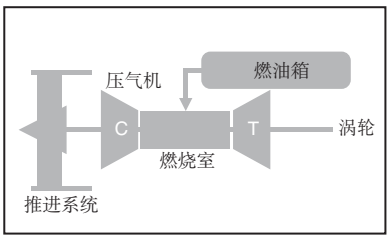


图3　常规发动机拓扑图

Fig.3　Topology of conventional engines

图3是常规发动机的拓扑简图，它说明了发动机常规推力系统，主要靠燃油燃烧来产生飞机的动力，推动螺旋桨或者涡轮风扇，使飞机产生前进的动力。目前这种方式的优点：(1)飞机发动机技术成熟；(2)相对混合动力推进构型简单。缺点：(1)飞机污染排放高，效率低；(2)飞机噪声非常大。

从图4可以看出，电池是飞机的主能量来源，电机仅由电池供电；风扇的推进功率仅由电动机提供。通过电动机将电能转换成机械能并带动风扇旋转。电力推进飞机的优点：(1)飞机的空间设计可以高度灵活，效率高；(2)飞机噪声、热辐射和其他发射大大降低。缺点是电池的续航能力仍然很低。

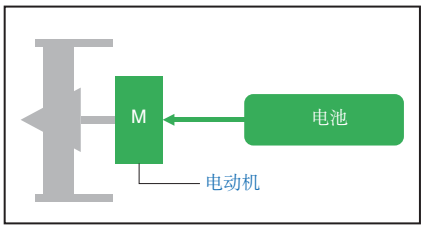


图4　电力推进发动机拓扑图

Fig.4　Topology of electric propulsion engine

从图5可以看出，燃油发动机驱动发电机产生电力，电力（和电池）给电动机供电并给电池充电；风扇的推进功率仅由电动机提供。通过电动机将电能转换成机械能带动风扇旋转。这种串联混合动力优点：(1)使飞机的电力和推力发电分离；(2)各种飞行模式提供可行性。缺点：(1)增加了发电机的重量；(2)复杂度比常规发动机高。

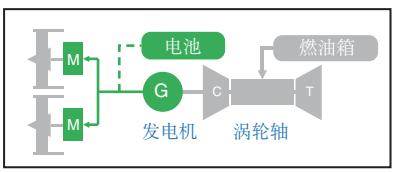


图5　串联混合动力拓扑图

Fig.5　Series hybrid power topology

从图6可以看出，电机仅由电池供电，风扇的推进功率仅由电动机和热力发动机提供。通过电动机将电能转换成机械能和燃油热力发动机共同带动风扇旋转。电动机提供

峰值功率。这种并联混合动力的优点：常规发动机能够在最优功率点运行，电机提供峰值功率。缺点是复杂度比常规发动机高。

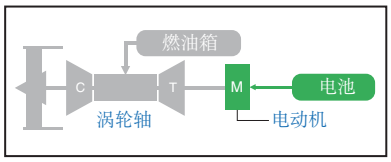


图6 并联混合动力拓扑图

Fig.6 Parallel hybrid power topology

根据目前电池的发展情况，电动和混合动力系统主要应用情况如下：在电力推进方面主要应用于小型螺旋桨固定翼飞机、小型垂直起降旋翼机。在混合动力推进方面主要应用于旋翼机、小型喷气式固定翼飞机、区域固定翼飞机、窄体客机和宽体客机。

飞机电力推进技术和汽车的电力推进技术一样，飞机的飞行速度和扭力操作也需要不断变化，最好是没有变速箱。在这方面电动机比燃油发动机更容易实现。

从上面的拓扑分析和应用情况可以看出，飞机的电动化发展也是一个过程，从飞机燃油推进系统、混合动力推进系统发展到电力推进系统，是一个逐步发展的过程。这个过程发展快慢取决于技术进步的快慢。图7为飞机推进系统逐步电气化示意图。

图7 飞机推进系统逐步电气化示意图

Fig.7 Schematic diagram of progressive electrification of aircraft propulsion system

有人和无人飞机的电动和混合动力推进装置用一张框图来说明，从推进装置的控制、系统集成和客户服务的角度来分析这个架构。

从图8可以看出，涡轮发动机燃烧燃料产生旋转动力

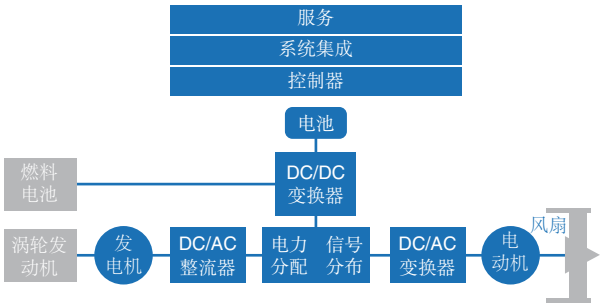


图8 混合推进系统方框图

Fig.8 Block diagram of hybrid propulsion system

推动发电机旋转，发电机产生三项交流电力。其他发电机冗余绕组实现热备份提高系统可靠性。发出的三项交流电经过整流器变成直流电力，作为主要能量来源。同时，允许部分直流电为飞机及其他控制系统供电并给电池充电。当然，主要电能输送给推进螺旋桨的电动机，直流交流变换器提供了一种变频输出，使螺旋桨能以任何速度和扭矩旋转，无须变速箱。

当飞机在巡航高度飞行时，发电机提供飞机飞行所需要的一切动力，当飞机在起飞和爬升阶段时，电池提供所需要的峰值动力，这样，飞机发动机可以保持在一个高效率的状态下。在飞机的下降阶段，飞机实现再生制动，在那里电动机成为螺旋桨旋转的发电机，给电池充电或给电网回馈能量。

使用重力及空气动力的自由能量给电池部分充电，可以大大提高飞机的效率，降低飞机的使用成本。

2 电动机技术

电动机是电力推进和混合动力推进的核心，其中电动机的功重比和效率是电动飞机和混合动力飞机能否成功的关键。它和电动汽车电动机发展一样，电动机技术在不断改进进步中。

从图9可以看出，美国特别重视电机技术发展[3~6]，制定了一个电机技术发展路线图，从而牵引美国电机技术的发展和进步，美国制定的电机技术发展路线图（见图10）是立足当今的技术水平。它们不仅仅有路线图，也有支撑路线图的具体项目，通过团队合作，使电机技术发展具有系统性、组织性、操作性和执行性。

美国国家航空航天局（NASA）和美国能源部主导了多个先进电机的研发项目，为了提高电机功率密度和功重比采用了扁线绕制工艺；为了提高电机的效率采用超导电机技术；为了降低电机成本采用了轻稀土、无稀土低成本电机技术；为了适

图9　美国电机技术发展路线图

Fig.9　Roadmap of electrical machinery technology development in the United States

应汽车和飞机体积小、可靠性高的要求采用了电机电控深度集成技术；为了提高电机性能、适应飞机和汽车要求，采用高性能非永磁电机设计技术。总之，通过以上技术来实现未来在航空和汽车上高性能、高效率、低成本、高密度和高可靠要求。

NASA在电动飞机混合气电推进的项目中，对电动机研制提出采用超导电机设计技术，明确了技术指标要求：(1)功率1MW；(2)功重比8hp/lb或13.2kW/kg；(3)效率大于96%；(4)要求第三阶段2018年完成；(5)承担单位为美国伊利诺伊大学和美国俄亥俄州大学。

NASA内部的电机研究重点关注超高效率99%的分析研究和原理测试上。采用全超导电机设计：(1)低风扇压力+边界层摄入；(2)超导(包括超导传输)；(3)在4500r/min时，风扇电机功率达到4MW；(4)在6500r/min时，发电机功率达到30MW；(5)直流母线电压在5~10kV之间；(6)动力总成端到端效率等于98%。

2.1 目前的现状

从目前的资料可以看出，伊利诺伊大学完成电机的现状：(1)在电机的功重比13kW/kg情况下，电机效率大于96%技术承诺可以实现；(2)已经通过了计算机建模和组件测试验证；(3)2017年关键风险有解决措施；(4)在系统集成方面仍然存在机会与挑战。实际的产品实物和实现指标如图11所示。

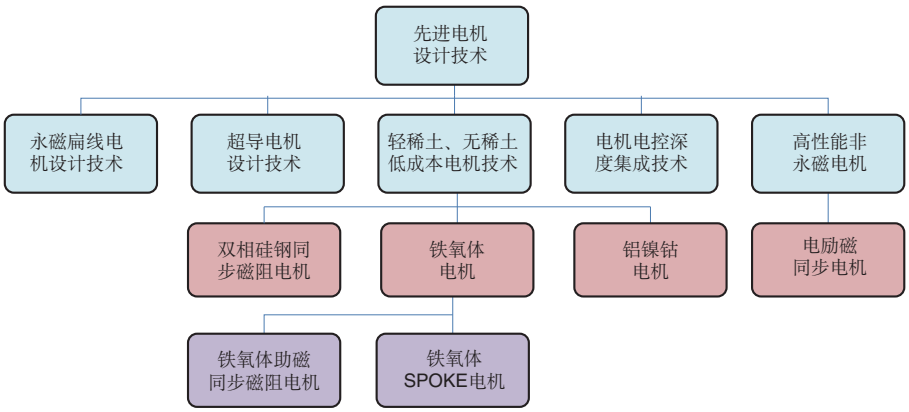
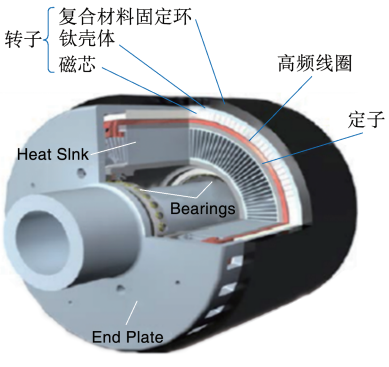


图10　美国先进电机设计技术图

Fig.10　Americal advanced motor design technical drawings



关键参数	实际值
额定功率	1MW (Spec=1MW)
额定效率	97.4% (Spec=96%)
功重比	15kW/kg (Spec=13kW/kg)
总重量	144.2 lb
转子重量	75.7 lb
同步电抗	0.06 p.u.
绝缘等级	H
转速	15000r/min
线电压	650 V_{RMS}
直流电压	±500 V
冷却方式	强迫风冷，20m/s

图11　伊利诺伊大学电机实际参数图

Fig.11　Actual parameter diagram of university of Illinois Motor

从图中可以看出，美国伊利诺伊大学基本达到的NASA的电机设计目标。

从目前的资料可以看出，俄亥俄州大学完成电机(见图12)的现状是：(1)完成了300kW扁线湿式线圈演示验证电

机；(2)完成了1MW电机的初步设计；(3)500kW演示机正在建设中(推力1MW)；(4)研究初级电机/涡轮机；(5)4000kVA变换器设计；(6)经过设计优化，电机功重比达到11.2hp/lb,但有些问题仍然需要解决。

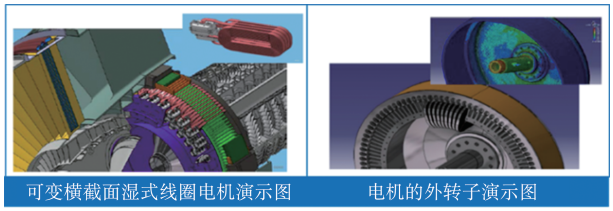


图12 俄亥俄大学电机图

Fig.12 University of Ohio motor map

从美国两所大学在混合电力推进方面的研制情况看，基本满足了NASA的项目要求。美国能源部主导了其他几个公司先进电机研制项目。

2.2 电机电控深度集成技术

为了实现更小的体积、更低的成本，需要大量减少非有效材料的使用。如果将电机电控在物理上融合在一起，就能节约大量材料。图13是电机电控深度集成的发展图。

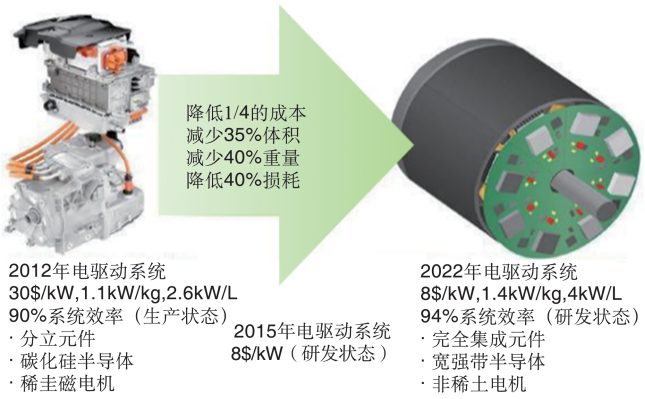


图13 电机电控深度集成图

Fig.13 Electronically controlled depth integration diagram of motor

目前，三合一驱动总成产品是国内电动汽车等关注重点，但这些集成是弱集成，仅仅把电机、电控和变速箱协调设计，装配在一起。而深度集成技术会更进一步。

橡树岭实现开发一款峰值功率55kW的六相容错电机，工作温度可达200℃(冷却液温度105℃)。这种容错电机，提供了电机的可靠性。定子由6个独立模块拼接而成，在一相或两相损坏的情况下，仍然能保证稳定工作。图14为容错电机的定转子结构图。

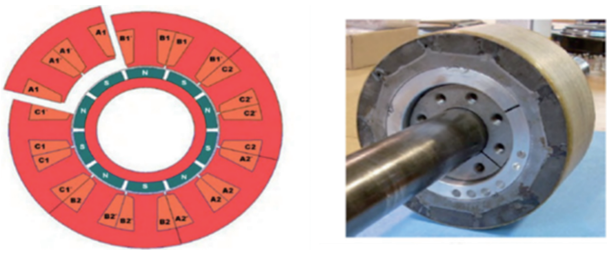


图14 容错电机的定转子结构图

Fig.14 Stator and rotor structural diagram of fault tolerant motor

该电机系统的最大创新是封装技术，采用裸片封装在冷却基板，底面直接液体冷却，省却了多余的绝缘材料，热阻小，热路短。更进一步使电机和功率器件在同一冷却系统，结构非常紧凑。由于技术超前，取得较好的研制效果。图15为电机电控深度集成实物图。

2.3 双相硅钢同步磁阻电机

双相硅钢同步磁阻电机其核心原理是采用硅钢的局部非导磁化，来提高同步电机的凸机比和功率密度。美国通用电气公司(GE)双相硅钢同步磁阻电机如16图所示。

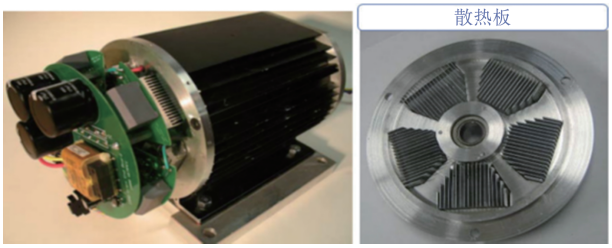


图15 电机电控深度集成实物图

Fig.15 Electric control depth integrated physical map of motor

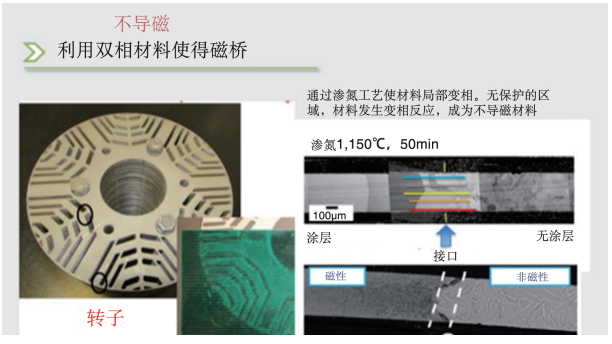


图16 双硅钢同步磁阻电机图

Fig.16 Diagram of double silicon steel synchronous reluctance motor

2.4 铁氧体助磁同步磁阻电机

该电机是美国橡树岭国家实验室(ORNL)的第二代同

步磁阻电机技术，利用铁氧体助磁达到低成本、高功率密度的效果，同时配合上串并联绕组切换技术，实现提高高效区间面积。ORNL公司电机如图17所示。

图17 永磁助磁同步磁阻电机图

Fig.17 Chart of permanent magnetically assisted synchronous reluctance motor

3 电力电子技术

电力电子技术是电力推进和混合动力推进的核心，其中电力电子变换器等部件的功重比和效率是电动飞机和混合动力飞机能否成功的关键。它和电动汽车电动机发展一样，电力电子技术也在不断改进进步中。

NASA在电动飞机混合气电推进的项目中，对电力电子技术部件研制提出采用耐高温碳化硅等设计技术，明确了以下技术指标要求：(1)功率1MW，三相交流输出；(2)电压1000V或更高直流输入；(3)常温变换器研制：三年(分三个阶段)；承担单位：美国GE公司，采用碳化硅半导体技术；美国伊利诺伊大学，采用氮化镓半导体技术；(4)低温变换器研制：4年(分三个阶段)；承担单位：波音公司，采用CoolMOS，SiGe硅半导体技术。图18为两个变换器关键指标示意图。

NASA内部的电机研究重点基于电机封装和冷却要求，设计了一个14kW的变换器。在冷却需求满足条件下，驱动效率达到99%。

常温变换器的需求

关键性能指标	功重比kW/kg	功重比hp/lb	效率/%
最小值	12	7.3	98.0
目标值	19	11.6	99.0
挑战值	25	15.2	99.5

低温变换器的需求

关键性能指标	功重比kW/kg	功重比hp/lb	效率/%
最小值目标值	17	10.4	99.1
	26	15.8	95.3
挑战值	35	21.3	99.4

图18 两个变换器关键指标要求图

Fig.18 Key indicators requirement diagram of two converters

3.1 目前现状

3.1.1 兆瓦级碳化硅轻量功率变换器

美国GE公司：兆瓦级碳化硅轻量功率变换器。目标：(1)研制和测试先进功率变换器；(2)设计功率转换形式；(3)演示可伸缩的变换器系统；(4)实现碳化硅电力电子技术；(5)演示技术成熟度TRL4的1MW、2.4kV变换器。

从GE研制出变换器(见图19)试验结果可以看出，变换器效率99.4%的目标能够实现：(1)GE公司1.7kV、500A碳化硅双模块作为兆瓦级轻量变换器的基本部分；(2)经典的三级ANPC被选为碳化硅轻量变换器拓扑结构；(3)变换器效率性能已经被双脉冲测试验证；(4)进行结构机械设计，满足具体的变换器功率密度目标；(5)第一阶段1MW的演示机组在2017年建成测试。

图19 GE实际变换器的机械布局图

Fig.19 Mechanical layout of GE actual converter

3.1.2 美国伊利诺伊大学变换器

美国伊利诺伊大学变换器(见图20)是飞行电容器和多级变换器，特点为：(1)模块化的变换器结构(冗余、交叉、可伸缩)；(2)13级飞行电容器演示验证；(3)高速、高频的电动机驱动。

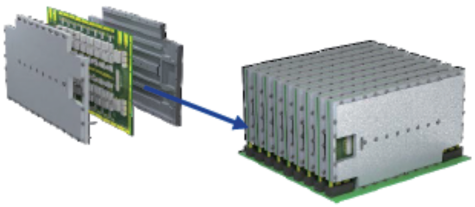


图20 伊利诺伊大学的多级变换器图

Fig.20 University of illinois multilevel converter diagram

3.1.3 波音公司超轻高效兆瓦级冷凝变换器

波音公司超轻高效兆瓦级冷凝变换器，具有以下特点：(1)功率半导体器件的研究；(2)拓扑结构研究；(3)控

制与脉宽调制技术研究;(4)功率驱动技术研究;(5)NPC新型拓扑的研究;(6)EMI滤波技术研究;(7)低温冷却系统研究(见图21)。

波音公司最终实现了它们高效超轻的目标。从图22我们可以看出最终的结果,它对各部分都进行了仔细分析。

图21 波音公司创新性的低温冷却系统设计图

Fig.21 Boeing innovative low temperature cooling system design chart

从上面数据可以看出,波音公司达到了NASA变换器的挑战目标。

从波音公司变换器的研制中可以看出,它们在电动航空领域做了大量技术工作,为美国电动和混动飞机的发展做出了突出的贡献。图23为波音公司变换器的系统构架图。

4 新材料技术

在电力推进系统中,为了提高电力推进系统的效率,在不同的部件上大量应用了先进的新材料技术,本文重点讨论一下应用最广、最为关键的三种材料,分别是磁性材料、绝缘材料和导电材料。

4.1 磁性材料技术

在功率变换器、发电机、电动机和各种控制器中大量使

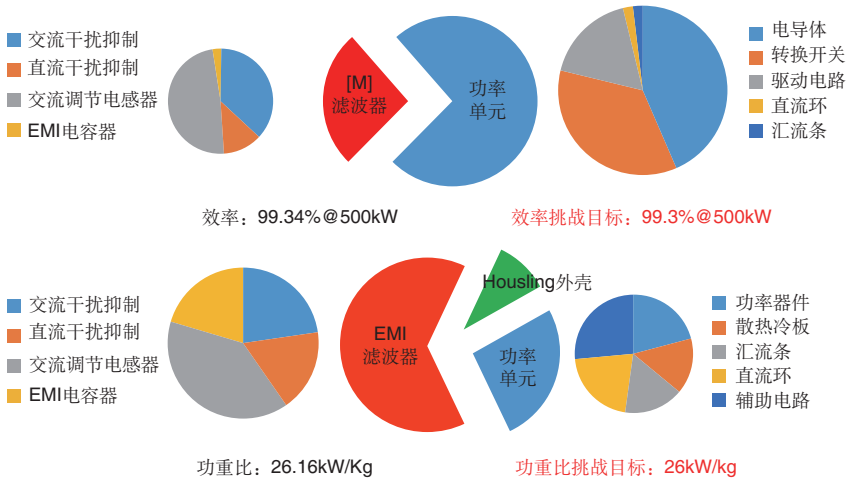


图22 波音公司变换器达到实际值

Fig.22 Actual value of Boeing converter

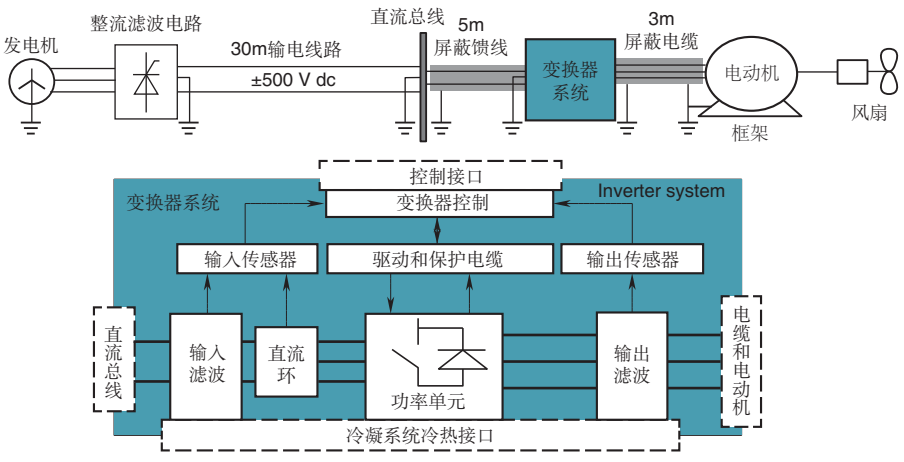


图23 波音公司变换器的系统架构图

Fig.23 Boeing inverter system architecture

用磁性材料，这些材料的性能直接决定了部件的性能和价格。如何来选定合适材料就非常重要，为了完成高效率的部件开发，美国在电力推进项目中做了一些基础技术研究。

上述材料用在电力推进系统电机控制变换器中，其中20kHz纹波抑制电感波器大量使用此材料。在美国能源部的光伏并网变压器中也大量使用此材料。

4.2 绝缘材料技术

在电力推进系统的电动机、发电机和各种变换器中大量使用绝缘材料，它的绝缘等级和性能直接影响了电力推进系统性能质量。美国在电力推进项目中做了这些基础技术研究。

在电力推进系统的研制中，开展了有机/无机复合材料研究，对材料热性能进行定量研究，对如何应用新材料的工程解决方案进行研究。

4.3 导电材料技术

在电力推进系统的电动机、发电机、各种变换器和导线中大量使用导电材料，它的导电性能直接影响了电力推进系统性能质量。美国在电力推进项目中做了这些基础技术研究[7,8]。图24就是美国研究的一种导电材料曲线图。

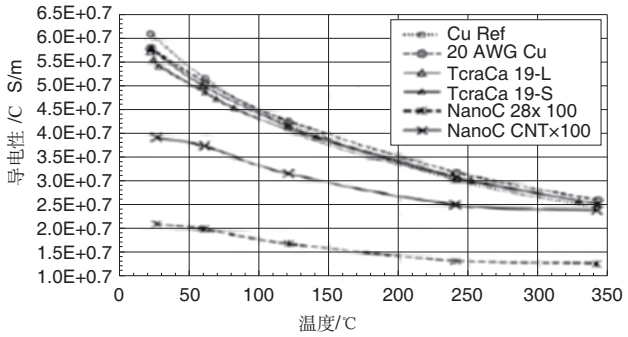


图24 导电材料温度和导电率的曲线图

Fig.24 Temperature and conductivity curves of conductive materials

在电力推进系统的研制中，理论上纳米材料和石墨烯具有高导电性能，但在实际应用中特定的导电性能改善有限，从曲线中可以观察分离金属高导电性能。

5 高能量密度电池技术

对于电动和混动飞机来说，电池技术非常关键，电池的能量密度大小决定电动和混动飞机的未来发展。电池实际上就是发电器，电池中有利于化学能的化学电池和利于太阳辐射能的太阳能电池。化学电池利于电池的自身所具有化学反应物质（活性物质）通过化学反应放电，使用后废弃的电池称为一次电池；可重复充放电的电池称为二次电池；电池本身不具备活性物质而由外部提供的电池称燃料电池。在电动和混动飞机中经常使用是二次电池、燃料电池和太阳能电池。其中化学电池和燃料电池的发电原理是相同的。

5.1 锂离子电池技术

电动飞机经常使用的锂离子电池就是化学电池的一种，下面用电动汽车电瓶的锂离子电池为例说一下化学电池的基本原理（见图25）和锂离子电池的电力产生基本构成方程式。

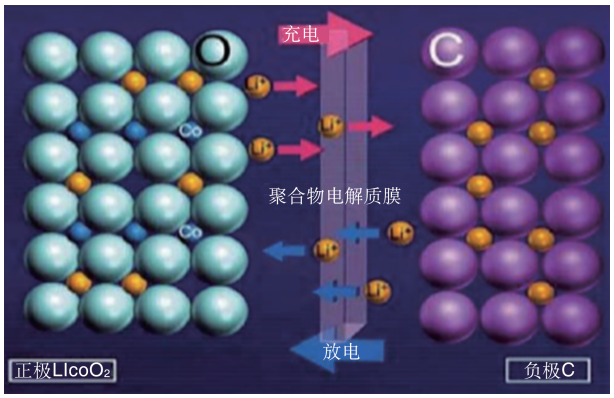


图25 锂离子电池的基本原理图

Fig.25 Basic principle chart of lithium ion battery

首先考虑两电极相互独立的情况。此时，各电极与电解液产生化学反应，进而产生电能。$LiFePO_4$的化学反应方程式如下：

（1）充电：$LiFePO_4-xLi^+-xe^-\rightarrow xFePO_4+(1-x)LiFePO_4$

（2）放电：$FePO_4+xLi^++xe^-\rightarrow xLiFePO_4+(1-x)LiFePO_4$

从锂离子电池原理可以看出，锂离子电池发电产生大量化学能，其能量密度在逐年不断地提高，最近，有报道称其能量密度已经接近500W•h/kg。已经可以在电动汽车和未来电动飞机大量使用。

5.2 燃料电池技术

燃料电池是利用物质的氧化还原反应所产生的电荷的移动而进行发电的。一次电池内储存的活性物质消耗完就不能用。二次电池靠充电时活性物质再生，然后放电即发电。而燃料电池则只要不断提供活性物质的燃料和氧化剂就能继续发电。燃料电池不需要提供热能，而是依靠电化学反应直接发电，所以效率高，又因不排出有害气体物质，以电力电源为主作为各种用途的电源正在研发中。

燃料电池以天然气、液化气、丙烷气、轻汽油等碳化氢燃料和甲醇等作为燃料。另外，采用的氧化剂可使用空气。图26为氢燃料电池发电原理，图27为燃料电池典型结构。

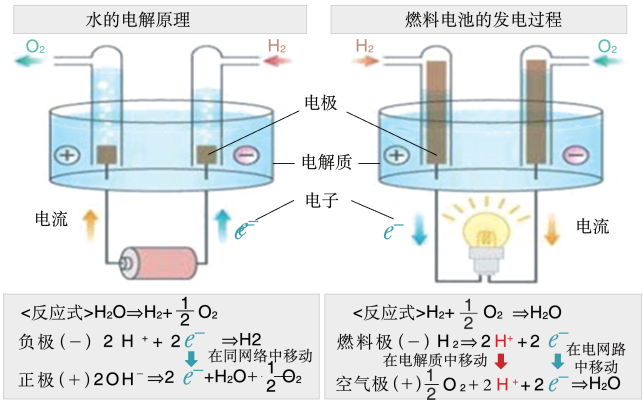


图26 燃料电池发电原理图

Fig.26 Principle of fuel cell power generation

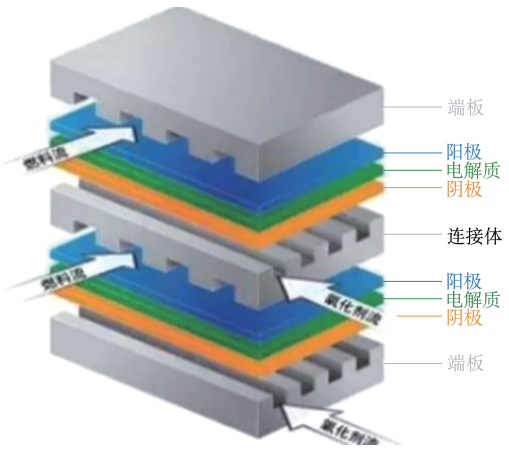


图27 燃料电池的典型结构图

Fig.27 Typical structural charts of fuel cells

从燃料电池的发电原理和其结构可以看出，燃料电池是一个新型的朝阳产业，在未来新能源汽车和新能源飞机上将大有作为。燃料电池由于其能量密度大，正广泛应用于电动汽车、电动和混动飞机的研发中。

5.3 太阳能电池技术

太阳能电池是根据半导体的工作原理，把光能变换成电能的电子元件。当光照射到太阳能电池上就能向外输出电能，因此称太阳能电池。

太阳能电池是光能转换为电能器件，太阳光照射在半导体的P-N结上，产生新的电子-空穴对，在P-N结电场的作用下，空穴由P区流向N区，电子由N区流向P区，接通电路就形成电流，这就是太阳能电池发电原理（见图28）。

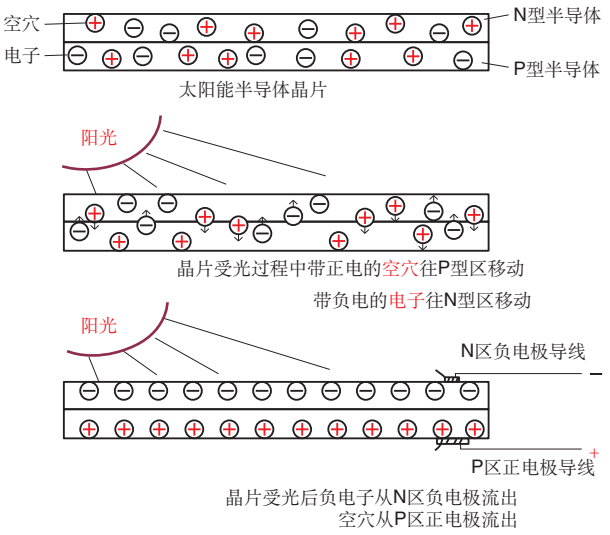


图28 太阳能电池发电原理图

Fig.28 Schematic diagram of solar cell power generation

从太阳能电池的发电原理可以看出，太阳能电池是一种物理性质的电源，而传统的电池（像锂离子电池、燃料电池等）是一种化学性质的电源。

太阳能电池可以在小型电动飞机上大量使用，利用太阳光给太阳能电池充电，飞机可以飞行很长的时间，在今年的莫斯科航展上，西北工业大学周洲教授研制的魅影太阳能电动无人机受到国内外的广泛关注。

从以上介绍的三种高性能电池可以看出，电动飞机的发展离不开电池技术的进步，电池的能量密度的提高，将会大大带动电动和混动飞机的发展。同时，对于不同的飞机需求，各种电池都有自己的优缺点，可以根据飞机发展不同的需求，选择不同电池作为电动和混动飞机的主要能源。

6 结束语

电动航空是未来飞机的发展方向之一，它会带动整个工业技术进步和发展，高效的电推进技术是电动航空核心，其核心聚焦在电机技术、电力电子技术和新材料技术上。电机技术发展会带动高功重比、高功率密度和高效率电机的发展进步，进而使人们走进超导技术新世界；高功率密度高温电力电子技术的发展进步，会使人们走进碳化硅高温器件的电力电子技术的新领域；基础材料技术的进步，促进了电推进系统发展，解决电推进技术聚焦的核心技术的难点问题。为电动和混动飞机发展奠定坚实的技术基础。因此，关注电池技术的发展问题，它决定电动飞机的未来，人类社会能否生活在少污染或无污染的时代，就取决于电池

技术进步，进而取决于电动和混动飞机未来发展。 AST

参考文献

[1] 李开省．电动飞机技术的发展研究[J]．航空科学与技术，2019(1):1-7.
Li kaisheng Research on the development of electric aircraft technology[J]. Aviation Science and Technology, 2019(1): 1-7.（in Chinese）

[2] AMPAIRE. 日本航空电气化联盟ÉCLAIR未来愿景报告[R]. 安飞航空，2019.
AMPAIRE. ÉCLAIR future vision report of japan aviation electrification alliance [R]. Airways,2019. (in Chinese)

[3] Tom L. Siemens electric aircraft propulsion unit: inside the digital twin design strateg[EB/OL]. (2018-10-16). http://www.engineering.com/Author/ID/149083/TomLombardo.

[4] 核动力蜗牛．美国“先进电机研究”技术综述[Z]．电机产品技术前哨, 2019.
Hedongliwoniu. Summary of advanced motor technology in USA[Z]. Technical Outpost of Motor Products, 2019. (in Chinese)

[5] Arlington V A. NASA hybird gas-electric propulsion(hgep) subproject[R]. Advanced Air Transport Technology,2017.

[6] Felder J L, Brown G V, Kim H D. Turboelectric distributed propulsion in a hybrid wing body aircradt[C]//20th International Society for Airbreathing Engines, 2011.

[7] 正田英介．电机电器[M]．北京：科学出版社，2001.
Zhengtianyingjie. Electric motor[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

[8] Bernhard K.Oliver maiwald[Z].SZ scala Gmb H, 2016.

（责任编辑 王为）

作者简介

李开省（1961— ）男，硕士，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。

Tel: 010-58354928 E-mail:yhdylks@163.com

Summary of Research on Core Technology of Electric Aircraft

Li Kaisheng*

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

Abstract: Electric aircraft technology is the future development direction of aviation industry. Because it reduces the emission of carbon dioxide and other pollutants, reduces the noise of aircraft and improves the efficiency of aircraft, it has broad market prospects in the future. Its core technology is high efficiency and high power-to-weight ratio motor technology, high temperature power electronic conversion technology, high energy density battery technology. Breakthroughs in core technology play a vital role in the future development of hybrid and electric aviation.

Key Words: hybrid aircraft; electric aircraft; motor; generator; power electronics converter; lithium ion battery; fuel cell; solar cell

Received: 2019-09-16； **Revised:** 2019-09-25； **Accepted:** 2019-10-11

***Corresponding author.Tel. :** 010-58354928 **E-mail:** yhdylks@163.com