

# 航空用燃料电池及混合电推进系统发展综述\*

秦江, 姬志行, 郭发福, 刘禾, 李成杰, 沈轶岭, 程昆林, 章思龙

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 工信部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 随着世界范围内碳减排需求的日益增长及长航时飞机的发展需要, 高效率的燃料电池航空电推进系统逐渐受到重视, 氢能航空的理念被人们所熟知, 可使用碳氢燃料的高温燃料电池还可与燃气涡轮组成混合动力系统, 发电效率进一步提高至70%。本文回顾了燃料电池及燃料电池涡轮混合系统在航空能源、动力系统方向应用概况; 概述了几种突破现有涡轮发动机技术瓶颈的新概念混合电推进系统, 如发电与推进一体化燃料电池涡轮混合动力系统和无涡轮燃料电池混合推进系统; 基于此, 分析了限制燃料电池混合系统实际应用的关键技术难题, 主要体现在混合动力系统功重比较低、大分子碳氢燃料重整技术未突破两方面。

**关键词:** 航空动力系统; 电推进; 混合动力; 燃料电池; 燃料重整

**中图分类号:** TM911 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 07-210164-18

**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.210164

## Review of Aviation Fuel Cell and Hybrid Electric Propulsion Systems

QIN Jiang, JI Zhi-xing, GUO Fa-fu, LIU He, LI Cheng-jie, SHEN Yi-ling, CHENG Kun-lin, ZHANG Si-long

(Key Laboratory of the Ministry of Industry and Information Technology, School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** With the increasing demand of carbon emission reduction and the development of long endurance aircraft in the world, the high efficiency fuel cell aviation electric propulsion system has been paid more and more attention, and the concept of hydrogen aviation is well known. The high temperature fuel cell which can use hydrocarbon fuel can also form a hybrid power system with gas turbine, and the power generation efficiency can be further improved to 70%. Firstly, this paper reviews the application of fuel cell and fuel cell turbine hybrid system in aviation energy and power system. Then, several new concepts of hybrid electric propulsion systems are summarized, such as power generation and propulsion integrated fuel cell turbine hybrid power system and non turbine fuel cell hybrid propulsion system. Based on this, this paper analyzes the key technical problems that limit the practical application of the fuel cell hybrid system, mainly reflected in the low power to weight ratio of the hybrid system and not achieved a breakthrough of the macromolecular hydrocarbon fuel reforming technology.

**Key words:** Aircraft power system; Electric propulsion; Hybrid power; Fuel cell; Fuel reforming

### 1 引言

为构建节约型、可持续发展型社会, 各国的环境

保护标准日益提高。2019年12月欧盟提出了到2050年实现温室气体碳中和的目标, 之后日本、韩国也提出了在2050年实现碳中和的目标<sup>[1]</sup>。2020年9

\* 收稿日期: 2021-03-18; 修订日期: 2021-09-24。

通讯作者: 秦江, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为燃料电池混合动力、热管理、能量综合利用。

引用格式: 秦江, 姬志行, 郭发福, 等. 航空用燃料电池及混合电推进系统发展综述[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 210164. (QIN Jiang, JI Zhi-xing, GUO Fa-fu, et al. Review of Aviation Fuel Cell and Hybrid Electric Propulsion Systems[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(7):210164.)

月的第七十五届联合国大会一般性辩论上,中国提出了二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和的目标和承诺<sup>[2]</sup>。其中,交通工具不仅在化石燃料消耗及排放中所占的比例较大<sup>[3]</sup>,而且影响人们的生活。以运输量持续增长的航空领域为例,其二氧化碳排放量占全球二氧化碳总排放量的2%以上<sup>[4]</sup>,且逐年上升。因此,如何提高航空工业动力系统的能量利用效率并降低污染物排放是每一个能源、动力装置研究人员所关心的问题。传统交通工具的动力系统主要为燃烧式引擎,燃气轮机等。燃烧式引擎从第二次工业革命起开始实用化,已被广泛研究。截止目前,其性能提升较为缓慢,且提升幅度较小<sup>[5]</sup>。为降低碳排放、发展噪音较小的新型飞机,人们提出了多电、全电飞机,以电池作为飞机部分或全部能源供给。由于电池能量密度较小,将其作为飞机能源限制了其航程和载重。燃料电池相对于电池等设备具有功率密度大、受天气制约小等特点,相对于传统燃烧式引擎具有热效率高、污染物排放小等特点,可作为新型、高效、低排放动力系统,是未来飞机的潜在最优动力解决方案之一<sup>[6]</sup>。

质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)和固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)是目前最具有应用潜力的燃料电池动力系统。PEMFC已经开始应用于汽车、轮船等交通工具。然而其只能使用高纯度氢作为燃料,具有一定局限。相比之下,SOFC是一种高效、清洁能源设备<sup>[7]</sup>,可使用碳氢燃料,相较于质子交换膜燃料电池在燃料后勤保障体系方面有较大优势。欧洲和北美已有多个供给碳氢燃料的SOFC示范项目<sup>[8]</sup>。日本尼桑公司在2016年试运行了一款以乙醇为燃料的SOFC汽车<sup>[9]</sup>。此外,SOFC工作温度较高(600~1000℃),相较于PEMFC可允许电极温升大,其水、热管理也相对简单。

SOFC由于工作温度高,基于“温度对口”的能量梯级利用原理,可与燃气轮机(Gas Turbine, GT)相结合,组成热效率更高的SOFC/GT混合动力系统,被用于地面分布式发电系统<sup>[10-12]</sup>。由于碳氢燃料如丙烷、汽柴油、煤油等具有较大的能量密度。以这些燃料为能源的SOFC/GT混合动力系统可用作飞机动力系统方案,应用前景广阔,可发挥更大用途。如果用SOFC/GT混合动力系统替换现有飞机的燃烧式引擎,发动机热效率可提高近一倍,飞机耗油率将显著下降,且在污染物减排等方面也有较大优势。美国国

家航空和宇宙航行局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)对SOFC在航空器上的应用非常关注,均认为高效率、低污染的SOFC/GT混合动力系统在飞机的应用具有重要意义。NASA在培育超高效率低排放航空动力项目中(Fostering Ultra-Efficient Low-Emitting Aviation Power Project, FUELEAP)计划用SOFC/GT混合动力系统作为NASA第一个全电飞机X-57“Maxwell”的动力装置<sup>[13]</sup>。

本文系统总结了近些年有关燃料电池及燃料电池混合动力系统在飞机推进系统方面的研究进展及相应成果,分析了适用于航空推进系统的燃料电池类型及特点,重点介绍了PEMFC有人机、无人机和SOFC无人机动力系统的研究、发展现状,介绍了非燃料电池混合动力系统在航空推进系统方面的研究进展。此外,燃料电池涡轮混合系统不仅可作为大型飞机机载能源系统,还可为高空长航时无人机、分布式推进飞机和低排放民用客机等长续航、低排放飞机提供动力。文中介绍了燃料电池涡轮混合动力系统作为飞机动力系统的相关研究,包括燃料电池燃气涡轮分布式混合推进系统<sup>[14]</sup>、燃料电池混合推进与能源一体化系统<sup>[15]</sup>、无涡轮喷气发动机<sup>[16]</sup>等多种新型燃料电池及混合电推进系统方案,重点分析了限制燃料电池混合动力系统性能提升及实际应用的主要技术难题:混合系统功重比较低;大分子碳氢燃料重整技术未突破。

## 2 燃料电池航空动力装置研究进展

与传统动力装置中的燃烧反应不同,燃料电池是通过电化学反应方式将燃料中的化学能直接转化为电能的发电装置。由于不经过高温燃烧,不受卡诺循环效率的制约,所以燃料电池的能量转化效率非常高,可达60%以上。燃料的节约同时意味着二氧化碳排放量的降低。同时因为不经历高温燃烧而避免了氮氧化物的生成,所以燃料电池污染物排放少。此外,由于没有涉及高速旋转部件,所以燃料电池噪声污染也小。因此,燃料电池是十分有利于环境保护的技术,被称为21世纪的绿色能源转化技术<sup>[17]</sup>。燃料电池动力装置被逐步应用于航空、航海、汽车、火车、地面发电等多个领域。

### 2.1 燃料电池简介

按电解质类型分类,燃料电池主要有五种:碱性燃料电池、磷酸盐燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池、

PEMFC和SOFC<sup>[18]</sup>,如表1所示<sup>[19]</sup>。其中,碱性燃料电池(工作温度60~220℃)以35%~50%的氢氧化钾溶液为电解质,不能直接采用空气作为氧化剂,也不能使用重整气体作为燃料,目前仅用于航天器等特殊场合,不适合民用。磷酸燃料电池(工作温度150~220℃)以铂为电催化剂,已经实现商品化,但是由于电解质为液体,限制了其被广泛应用。熔融碳酸盐燃料电池(工作温度600~650℃)以碳酸盐为电解质,正在由示范运行阶段向商品化阶段过渡,但是由于其电解质也为液体,在运输、密封等方面天然处于劣势,因此其应用也受到一定限制。PEMFC(工作温度80~200℃)以固体聚合物膜为电解质,燃料为氢气或重整气,效率较高,适用于电动汽车和可移动电源。SOFC(工作温度600~1000℃)以复合氧化物为电解质,不需要其他的催化剂,并且燃料种类多样。PEMFC和SOFC是目前最有可能被广泛应用的两种燃料电池。虽然目前PEMFC已被广泛应用,但是由于SOFC的工作温度高、不需要使用贵金属催化剂、燃料适应广泛等特性,被公认是非常有发展前景的发电装置,可广泛应用于传统电力市场,包括住宅用、工业用/现场型发电机,便携移动电源、偏远地区供电以及机车动力装置等<sup>[20]</sup>。

图1为SOFC工作原理示意图。阳极通道内,碳氢燃料与电化学反应产生的水蒸汽进行重整反应,重整反应产生氢气。阴极通道内,氢气与空气进行电化学反应,输出电能。SOFC由Patel等<sup>[21]</sup>于19世纪末提出。然而较高的工作温度(600~1000℃)使得SOFC的相关研究一度停滞。随着20世纪70年代末期陶瓷技术的突破,SOFC逐渐重新受到人们的重视,并一直持续到现在。SOFC相比于其他类型燃料电池的优势在于:(1)热效率高,约为40%~80%<sup>[22]</sup>,几乎为

热效率最高的燃料电池。(2)燃料来源广泛:可使用液体碳氢燃料、醇类燃料、一氧化碳、煤炭、生物质等。(3)因为工作温度高,不需要使用贵金属催化剂。(4)电池为全固态结构,不会产生电解液泄露与电解液腐蚀的情况。(5)相比于其它燃料电池,SOFC对硫的容忍度最高。(6)因其尾气余热温度高,可与其他系统组成联合循环。(7)因其工作温度较燃气轮机等热机低,氮氧化物污染物排放较少。(8)SOFC可利用一氧化碳作为燃料,因此不存在一氧化碳中毒现象。(9)除去泵/风机外,SOFC发电系统没有其他较大的转动部件,噪音较低。

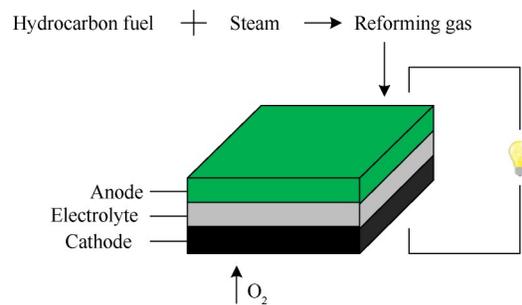


Fig. 1 Schematic diagram of SOFC

SOFC相比于其他类型燃料电池的劣势在于:(1)工作温度高,对材料热稳定性要求很高,SOFC广泛使用昂贵的陶瓷材料。(2)SOFC材料主要为陶瓷,陶瓷升温速率慢,因而系统启动缓慢。(3)相对于传统能量利用技术,如涡轮与内燃机(功率密度为几千瓦每千克),SOFC功率密度(主流为几百瓦每千克)相对较低。

国内生产固体氧化物燃料电池的公司主要有:宁波索福人有限公司、苏州华清京昆新能源科技有限公司、潮州三环有限公司和佛山索弗克氢能源有

Table 1 Introduction of various fuel cells<sup>[19]</sup>

Fuel cell type	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolyte type and conductive ion type	KOH solution (OH <sup>-</sup> )	Proton conductor polymer(H <sup>+</sup> )	Phosphoric acid (H <sup>+</sup> )	Molten phosphate (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	Solid oxide(O <sup>2-</sup> or H <sup>+</sup> )
Working temperature	80~250℃	40~80℃	150~220℃	650℃	600~1000℃
Fuel	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH	H <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH, et al	H <sub>2</sub> , hydrocarbon	H <sub>2</sub> , hydrocarbon
Efficiency /%	60~90	43~58	37~42	50	50~65
Toxic substance of fuel cell	CO, sulfide	CO, sulfide	CO, sulfide	CO, sulfide	CO is the fuel with high sulfur tolerance
Catalyst type	Noble metal	Noble metal	Pt	Ni	Electrode
Starting speed	A few minutes	A few minutes	Dozens of minutes	Dozens of minutes ~ Few hours	Dozens of minutes ~ Few hours

限公司等。索福人能源技术有限公司<sup>[23]</sup>可以提供2200W,700W电堆、测试及发电系统。2021年1月6号,宁波索福人有限公司成功试运行25kW SOFC系统。燃料电池系统发电功率达到30.3kW,电效率60.8%,燃料利用率79.8%<sup>[24]</sup>。苏州华清京昆新能源有限公司<sup>[25]</sup>可提供1000W电堆、测试及发电系统产品,工作温度750℃,功率密度为300mW/cm<sup>2</sup>,燃料利用率达到55%。潮州三环已突破了SOFC关键核心技术,开发出1.5kW的SOFC电堆,预计寿命可达到5年。佛山索弗克氢能源有限公司<sup>[26]</sup>的产品主要以微管式SOFC为主,电堆功率一般为几百瓦量级。此外一些研究所也在开发高质量SOFC产品或系统,如上海硅酸盐研究所、大连化物所等。

## 2.2 PEMFC动力系统发展现状

由于PEMFC较SOFC工作温度低,生产制造较为容易,因而率先应用于航空飞行器。

### 2.2.1 国外PEMFC无人机及动力发展现状

公开文献发表的第一架燃料电池无人机是2003年AeroVironment公司在NASA资助下研制的“Hornet(大黄蜂)”无人机,该无人机采用飞翼式布局,翼展仅有38cm,总重170g,其中燃料电池为质子交换膜燃料电池,可以续航0.25h<sup>[27]</sup>。同年NASA研制的“Helios”无人机翼展可以达到75m,携带可以发出18.5kW功率的燃料电池也实现了成功飞行<sup>[28]</sup>。这些无人机表明燃料电池发电可以驱动不同尺寸的无人机,证实燃料电池作为无人机动力是可行的。

在接下来的十年中,燃料电池无人机的续航能力不断增加,从最初15min增长至48h,成为电动小型无人机最有希望提高续航能力的途径。美国海军研究实验室(NRL)在2005年研制的小型研究型燃料电池无人机Spider Lion使用燃料电池推进系统,无人机翼展2m,总重2.5kg,采用Protonex公司生产的95W的质子交换膜燃料电池,携带34MPa高压气态氢气罐,飞行实验测定飞行时间为3h19min<sup>[29]</sup>。在同一时

期,该实验室也在执行Ion Tiger无人机项目,其目的是验证燃料电池无人机的极限航时应用。无人机翼展5.2m,总重15.9kg,使用550W的质子交换膜燃料电池(与XFC的550W燃料电池一致),在携带2.3kg载荷的情况下,持续飞行26h。2013年通过对无人机的储氢技术进行改进,携带液氢罐,飞行时间达到了48h,创造了燃料电池无人机的航时记录<sup>[30]</sup>。除此之外,国外多个研究单位、高校、企业等都开始对该领域进行研发,比如AeroVironment公司、洛马公司、韩国航空航天研究院(KARI)、加利福尼亚大学、佐治亚理工大学等均研制了功率不等的燃料电池无人机,如表2所示。综上所述,国外在燃料电池无人机方面率先开展相关研究,无人机类型以固定翼无人机为主,尝试了高压氢气罐储氢以及液态储氢等高效储氢技术,燃料电池无人机的续航时间纪录长达48h,相比于以锂电池为动力的电动飞机不超过10h的续航时间翻了数倍,是未来在长续航电动无人机方面的重点实现途径。

### 2.2.2 国外PEMFC载人飞机及动力发展现状

在载人燃料电池飞机方面,以波音、空客、DLR为首的研究单位首先展开相关研究。2008年,波音公司成功完成了载人燃料电池飞机的飞行测试<sup>[36-37]</sup>,将质子交换膜燃料电池和锂电池组成混合动力系统配置进飞机,通过驱动电动机,继而带动螺旋桨实现飞机飞行。燃料电池系统输出的最大功率为24kW,锂离子电池可以输出50~75kW的电功,飞机飞行过程中仅产生水蒸汽,且比传统飞机安静得多。除此之外,德国宇航中心(DLR)牵头研制的燃料电池飞机DLR-H<sub>2</sub>于2009年试飞成功<sup>[38]</sup>,其中质子交换膜燃料电池可以发出25kW的电功,燃料电池的工作效率可以达到52%。这架燃料电池飞机可连续飞行5h,航程可达750km。在载人飞机方面,其他的单位也有试飞成功的报道,如表3所示<sup>[39-40]</sup>。国外也有部分企业参与了燃料电池载人飞机的研制。2019年,位于美

Table 2 Fuel cell UAV

Development organization	Name	Fuel cell type	Power/W	Fuel cell mass/kg	Total mass/kg	Time/h
NRL <sup>[29]</sup>	Spider Lion	PEMFC	115	—	3.1	3~4
NRL <sup>[30]</sup>	Ion Tiger	PEMFC	550	1.9	15.9	48
University of California <sup>[31]</sup>	Pterosoar	PEMFC	150	2.273	5.0	12
Georgia Institute of Technology <sup>[32]</sup>	GT FCU AV	PEMFC	500	4.96	16.4	0.75
KARI <sup>[33]</sup>	EAV-1 UAV	PEMFC	—	—	6.5	4.5
Loma company <sup>[34]</sup>	Stalker XE	SOFC	300	—	11.0	8
University of Michigan <sup>[35]</sup>	Endurance	SOFC	—	—	5.3	10

Table 3 Fuel cell manned aircraft

Name	HY4 <sup>[39]</sup>	Rapid 200 FC <sup>[40]</sup>
Time	2016	2010
Development organization	DLR	Jihlavan, Polytechnic University of Turin
Aircraft appearance	Double fuselage, wingspan 21.36m, four seat passenger plane	Wingspan 10m
Flight speed	Cruise: 145km/h Max: 200km/h	Cruise: 135km/h Max: 150km/h
Flight range/flight time	1500km	45min
Power	Fuel cell 80kW+c cell 45kW	Fuel cell 20kW+c cell 20kW

国加州的 Alaka'i Technologies 公司公布了研制的 Skai 六旋翼五座氢燃料电池电动垂直起降飞机, 这架原型机为 5 座, 续航 4h, 航程 640km, 商载 450kg<sup>[41]</sup>。2020 年美国 ZeroAvia 公司的电动改型 M500 六座飞机在英国克兰菲尔德机场成功试飞<sup>[42]</sup>, 该机采用氢燃料电池供电, 最大起飞重量 2.3t, 最大航程 1800km, 满足大部分短途通勤民航的需求。

2.2.3 国内 PEMFC 无人机及动力发展现状

国内首先在燃料电池无人机方面开展研究的高校是同济大学, 2012 年 12 月, 同济大学研制完成了我国第一架纯燃料电池无人机“飞跃一号”, 无人机使用了一个 1kW 的质子交换膜燃料电池作为动力, 有效载荷 1kg, 续航时间 2h<sup>[43-44]</sup>。2012 年 7 月 30 日, 由辽宁通用航空研究院和大连化物所合作研制, 由氢燃料电池作为主要动力, 锂电池作为辅助动力的无人试验机“雷鸟”首飞成功。无人机在起飞阶段使用燃料电池与锂电池共同驱动, 巡航和降落阶段由燃料电池驱动。“雷鸟”使用的燃料电池为大连化物所研发的 10kW 级航空用质子交换膜燃料电池系统<sup>[45]</sup>。

2020 年, 哈尔滨工业大学秦江教授课题组设计制造了基于燃料电池和锂电池混合动力的“翌翔一

号”长航时固定翼无人机, 是国内起飞重量最小的燃料电池固定翼无人机, 无人机实物图如图 2 所示。该无人机使用了质子交换膜氢燃料电池作为无人机推进动力来源, 同时采用了锂电池作为无人机动力的辅助能量来源, 无人机性能参数如表 4 所示, 从表中可以看出, 该无人机的续航时间达到了 8h 以上。



Fig. 2 Physical picture of UAV

图 3 是该无人机的动力系统原理图, 混合动力系统包括锂电池、氢气罐、燃料电池、DC/DC 转换器、电源管理模块和电动螺旋桨, 无人机在起飞和高速飞行时需要动力系统有大功率输出, 因此采用锂电池供电, 在巡航阶段改由燃料电池供电。

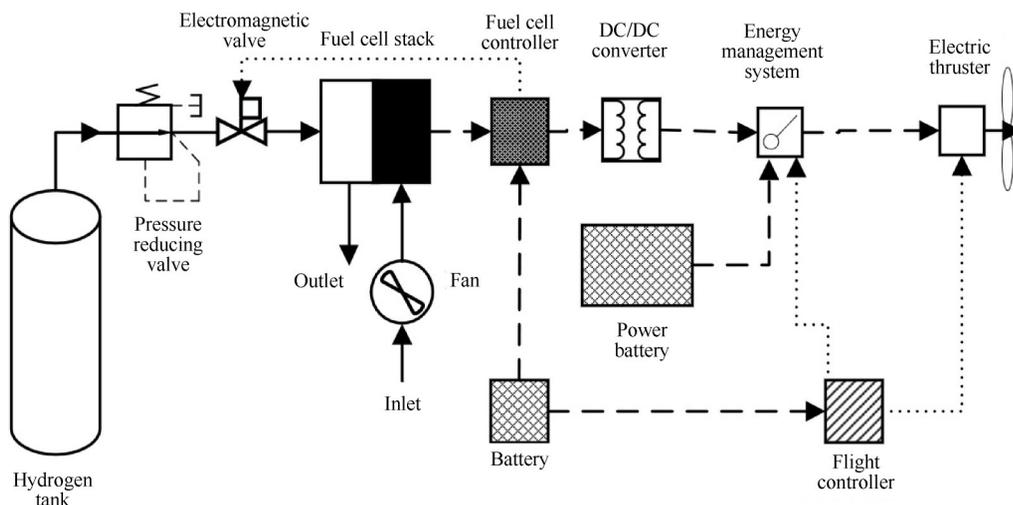


Fig. 3 Schematic diagram of UAV power system

**Table 4 UAV performance parameters**

Index	Data
Cruise speed/(m/s)	20
Practical ceiling/km	5
Maximum take-off weight/kg	10
Empty weight/kg	6
Carrying capacity/kg	4
Maximum flight speed/(m/s)	30
Maximum flight time/h	8.9
Maximum flight radius/km	240

该无人机所具有的优势总结如下:

(1)动力系统为燃料电池,该系统效率高,可以达到50%以上。相对活塞发动机而言,效率提升20%左右,相对蓄电池而言,具有更高的能量密度(蓄电池能量密度250Wh/kg,燃料电池系统能量密度达500Wh/kg)。

(2)动力系统不含旋转部件,工作安静,低噪音。

(3)属于电动飞机,节能环保,不排放污染气体。

(4)动力系统具有较高的效率和能量密度,其航程和航时相比同功率传统动力形式的无人机大幅提高。

2021年1月,哈工大“翌翔一号”燃料电池无人机还完成了国内首次氢燃料电池固定翼无人机弹射起飞试验,该技术可大幅降低需要携带的锂电池重量,使得无人机对于起飞场地的要求大幅下降,其应用场景可进一步扩展。

2021年2月,哈工大“翌翔二号”无人机首飞成功,该飞机翼展为3.2m,最大起飞重量为20kg,最大载重可以达到3.5kg,理论续航时间可达16h,最大航程可以达到1000km,项目团队开发应用于“翌翔二号”的燃料电池/锂电池混合动力系统具有高功率密度和高能量密度的特点,是锂电池无人机的续航时间的3倍。“翌翔二号”无人机采用了动力系统/结构一体化设计方式,是国内首架可以采用多种起降方式,具有大载重、长航时特点的无人机实验平台。

除了高校、研究所等研究机构外,国内的一些企

业也对燃料电池无人机开展了研究并研制出了多款技术验证机,主要有科比特航空科技有限公司、浙江氢航科技有限公司、武汉众宇动力系统科技有限公司、斗山创新(深圳)有限公司、黑鲨科技有限公司和新研氢能科技有限公司等企业,代表性验证机如表5所示。

目前国内的燃料电池无人机主要以旋翼机为主。其他公司的燃料电池无人机产品也在其各自的应用场景中有竞争优势,例如“独角鲸2”号旋翼机用于数据通信,“高山雨燕”固定翼无人机用于大范围侦察等。总体来说,目前国内的燃料电池无人机行业发展的如火如荼,燃料电池无人机的发展前景一片光明。

#### 2.2.4 国内PEMFC载人飞机发展现状

国内的燃料电池载人飞机由中科院大连化物所与辽宁通用航空研究院联合研制,基于辽宁通用航空研究院研制的RX1E电动飞机改装而来。燃料电池飞机采用大连化物所研制的20kW氢燃料电池为动力电源,配合小容量辅助锂电池组,储氢方式为机载35MPa氢储罐,于2017年试飞成功<sup>[51]</sup>。

相比于燃料电池无人机,燃料电池载人飞机的技术难度更高,进行相关研究的机构较少,但燃料电池载人飞机在未来低碳环保、清洁静音的短途通勤任务上相比燃油飞机拥有无可比拟的优势,近年来越来越受到相关学者的重视。

随着世界范围内对低排放、低耗油率动力系统的需求,燃料电池逐渐得到了广泛研究和应用。相比于燃烧式引擎,燃料电池动力的主要优势是效率高,污染物排放低。燃料电池效率为40%~80%,相比之下柴油发动机效率约35%,蒸汽轮机效率29%~42%。因此,以燃料电池为动力和能源系统,可节约大量化石燃料,降低污染物及碳排放。

#### 2.3 SOFC动力系统发展现状

洛克希德·马丁公司(Lockheed Martin Space Systems Company, LMT)研制了以丙烷为燃料的8kg“Stalker-XE”小型无人机<sup>[52]</sup>,如图4所示。该无人机

**Table 5 Domestic fuel cell UAV enterprises**

Serial number	Name	Representative UAV
1	CorBit Aviation Technology Co., Ltd	HYDrone-1800 <sup>[46]</sup>
2	Zhejiang Qinghang Technology Co., Ltd	Apus melba <sup>[47]</sup>
3	Wuhan Zhongyu Power System Technology Co., Ltd	Light cavalry <sup>[46]</sup>
4	Doosan Innovation (Shenzhen) Co., Ltd	DT30 <sup>[48]</sup>
5	Black Shark Technology Co., Ltd	Narwhal 2 <sup>[49]</sup>
6	Xinyan Hydrogen Energy Technology Co., Ltd	Six rotor industrial UAV <sup>[50]</sup>

原型采用电池作为能源,续航时间为 2h。改装后的无人机以 SOFC 为动力,续航时间增加到 8h。此外,意大利先进能源技术研究所在欧洲燃料电池和氢能利用项目的资助下对小型 SOFC 无人机进行了流动换热仿真与实验研究<sup>[53]</sup>。

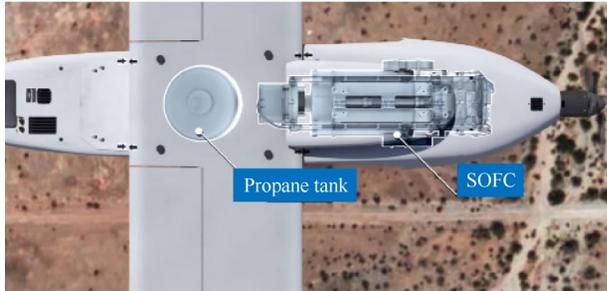


Fig. 4 “Stalker XE” unmanned aerial vehicle powered by SOFC<sup>[52]</sup>

### 3 航空混合动力系统研究现状分析

以固体氧化物燃料电池为主体,与涡轮发动机相结合所组成的新型混合系统可结合两种动力系统的优势,大幅降低单一动力在某方面劣势所带来的不良影响,燃料电池混合动力系统逐渐受到关注,主要类型有燃料电池涡轮混合动力系统、“旁路式”燃料电池涡轮推进发电一体化系统、与燃料电池相结合的无涡轮喷气发动机。

#### 3.1 传统航空混合动力系统

目前在研的大多数混合动力系统可以分为电-电混合系统和油-电混合系统两类<sup>[54]</sup>。前者在传统意义上是将氢燃料电池和锂电池结合提供混合动力,之后也考虑使用太阳能电池和蓄电池结合,该系统因在整个能量转化过程中输出有用功率都为电功,因此又称为纯电动推进系统。后者是由传统的航空燃油发动机和电动机结合而成的混合动力系统,根据发动机是否直接提供推进动力,进一步又可分为并联式油电混合系统和串联式油电混合系统,如图 5 和图 6 所示<sup>[55]</sup>。在并联式油电混合系统中,发动机和电池驱动的电动机共同驱动螺旋桨,二者在能量上相互补充协调,降低了系统的耗油率,但发动机和螺旋桨存在紧密的耦合关系,效率的提升受到一定限制。串联式油电混合系统则解决了并联式油电混合系统存在的耦合弊端,该系统通过发动机驱动发电机,再通过电动机带动螺旋桨,因此旋转部件均可在各自最优工况下运行。

飞机在飞行过程中,需要经历起飞、爬升、巡航、

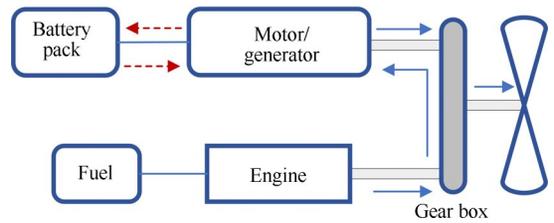


Fig. 5 Parallel hybrid system

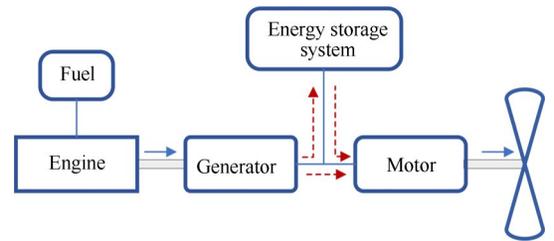


Fig. 6 Series hybrid system

下降等过程,而这些过程对能量的需求差异较大。以 MQ-9“死神”无人机为例,起飞和爬升阶段的功率需求是巡航阶段功率需求的 3 倍左右,但前两个阶段工作时间却很短。对于传统的燃油发动机而言,设计点往往为最大功率输出点,这实际在一定程度上造成了一种浪费和低效<sup>[56]</sup>。而混合动力系统通过能量之间的协调补偿,可以将工作时间长但功率需求低的续航下的工况作为设计点,这极大地提高了系统的整体效率。

采用电-电混合动力系统的飞机在 21 世纪初已经开始被研制。2008 年,波音公司成功完成了第一架载人燃料电池飞机的飞行测试<sup>[31]</sup>,该飞机的动力系统为质子交换膜燃料电池和锂电池的混合系统,在起飞阶段燃料电池和锂电池共同工作为电动机提供电能,之后在巡航状态下仅燃料电池输出电功通过驱动电动机,带动螺旋桨实现飞机飞行,证实了该混合动力系统的可行性及先进性。

并联式油电混合系统被认为是传统动力系统的巨大颠覆,因其优异的性能也开始被研究。2011 年, NASA, Boeing 和 GE 推进的 Subsonic Ultra Green Aircraft Research 的第一阶段报告中提出了并联式混合构型的“hFan”发动机,将作为波音“SUGAR Volt”混合动力飞机的动力方案,如图 7 所示。该动力系统由燃气涡轮发动机和电动机组成,起飞阶段电动机和发动机共同工作;巡航阶段仅电动机提供全部推进功率。该方案可比传统发动机 CFM56 的耗油率降低 28%<sup>[4]</sup>。之后,在 2012 年,在 NASA 的资助下,英国剑桥大学研制出全球首架并联式混合动力飞机,相较柴油机节省 30% 的燃料。飞机在起飞时同时使用柴

油机及电动机,巡航时电动机切换至发电模式,为蓄电池充电,或切换至引擎辅助模式以节省燃料<sup>[57]</sup>。

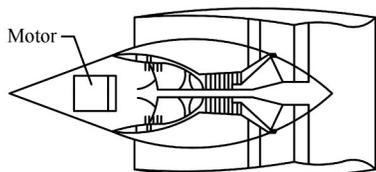


Fig. 7 Hybrid configuration of "hFan" engine<sup>[4]</sup>

串联式油电混合系统因最终输出能量全部转化为电能,通过电动机带动推进器,因此一般需要较大容量的电动机。而又考虑到电机尺寸无关的这一特性,基于该动力系统的分布式推进方案被广泛研究。当发动机的类型为燃气涡轮时,该系统被称为涡轮发电分布式电推进系统(Turboelectric Distributed Propulsion, TeDP)。在2013年6月巴黎航展上,空客宣布与西门子/罗罗公司联合开发100座级支线客机"E-Airbus"概念,并计划于2030年服役,该飞机采用了一种名为E-Thrust的混合电推进系统,该系统由1台安装在机身后部的嵌入式涡扇发动机带动发电机产生电力,驱动安装在机翼上的6台风扇,并为机载电池充电,每个机翼沿展向分布3台风扇,该推进系统的等效涵道比预计将超过20<sup>[58]</sup>。2017年12月,这三家公司又宣布合作研发一款混合电推进验证机E-Fan X,其动力采用串联混合电推进结构,4台涡扇发动机中的1台将被2MW的电动机取代。一旦系统成熟性得到验证后,飞机的另外1台涡扇发动机也将被电动机取代<sup>[59]</sup>。NASA为了进一步提升飞机的动力性能,提出了翼身融合机身的混合动力飞机N3-X,其概念图如图8所示,飞机的动力方案为分布式燃气涡轮电力推进系统<sup>[60-61]</sup>,安装在每个机翼顶端的是一个燃气涡轮发动机,每个发动机驱动两个超导发电机,共带动14个风扇运转以产生推力。该飞机相比传统的波音777-200LR,在飞行任务相同的条件下,可降低燃油消耗70%~72%,且NO<sub>x</sub>和噪音排放都明显降低。

上述的混合系统被认为是传统的混合系统构



Fig. 8 NASA concept picture of N3-X<sup>[62]</sup>

型,其中燃气涡轮的做功效率依旧没有得到本质上的提升,且存在配备的蓄电池能量密度低、高功率密度的电机研制困难等问题。随着燃料电池技术的不断发展,尤其是高温的固体氧化物燃料电池所展现出的优良性能不断提升,一种基于固体氧化物燃料电池的混合动力系统也逐渐被研究者所关注。

### 3.2 燃料电池涡轮混合动力APU

SOFC尾气温度较高,达600~1000℃,可以被涡轮利用。因此,SOFC可与燃气轮机GT组成混合动力系统<sup>[63-64]</sup>,如图9所示。空气经加压预热后供给燃料电池阴极;碳氢燃料重整后供给燃料电池阳极。SOFC内部发生内重整反应和电化学反应。SOFC未反应的燃料在燃烧室内燃烧后,尾气进入涡轮膨胀做功。因此,混合系统的发电功率来自SOFC和涡轮两部分,较单一的燃料电池或燃气涡轮效率有较大提升。SOFC/GT混合系统于20世纪70年代被提出,其系统热效率可高达70%,如图10所示,几乎是目前发电效率最高的大功率发电系统。国内主要研究单位有清华大学、上海交通大学、西安交通大学、重庆大学等高校。清华大学的史翔翔副教授课题组在针对地面分布式发电的燃料电池涡轮混合动力系统领域进行了较早的研究<sup>[65-66]</sup>,且对固体氧化物直接碳燃料电池<sup>[67]</sup>、固体氧化物火焰燃料电池<sup>[68]</sup>、可逆固体氧化物燃料电池<sup>[69]</sup>等多种新型的燃料电池做了大量工作,为混合系统的进一步发展提供了多种选择。上海交通大学翁一武教授等<sup>[70]</sup>搭建了国内第一个高温燃料电池燃气轮机混合动力实验平台,在我国研究混合动力系统前进道路上迈出了重要的一步。

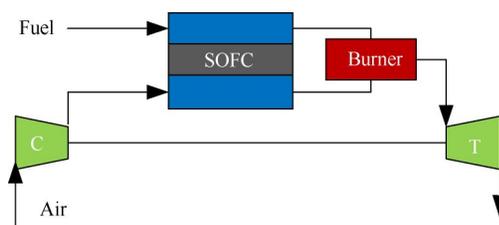


Fig. 9 Schematic diagram of SOFC/GT hybrid systems

SOFC/GT混合系统可作为地面分布式电站。该发电系统具有效率高、污染排放少、噪音较低等特点,已被国内外单位广泛研究<sup>[71-76]</sup>。本文主要关注混合动力系统在交通运输工具动力系统方面的应用研究,故在地面发电领域的相关情况不再赘述。

飞机机载APU一般为微型燃气轮机。在非设计工况运行时,其发电效率较低,CO<sub>2</sub>和污染物排放均较大,给地面机场带来很大环境污染<sup>[77]</sup>。SOFC/GT

混合系统的热效率相较微型燃气轮机高出近一倍,有望作为飞机的能源系统。Daggett等<sup>[78]</sup>在2003年指出SOFC/GT混合系统作为机载APU的主要优点是消除了飞机主发动机的供电负荷,提高了发电效率。劳斯莱斯公司、波音公司和NASA等单位<sup>[79-84]</sup>于2004~2006年用数值推进系统仿真仿真软件(Numerical Propulsion System Simulation, NPSS)对SOFC/GT混合系统进行了热力循环、质量等系统级性能分析,构建的SOFC/GT机载APU三维模型,如图11所示。研究表明:(1)为提高系统效率并降低重量,SOFC应工作在850~880℃。SOFC最优工作压力为3个大气压。(2)阳极循环给系统带来了很大益处,如提升了系统工作温度和可对水进行回收。(3)在深度改进SOFC堆型和提升重整器性能后,将整个系统封装在给定的体积中是可能的,并且重量也是可以接受的。

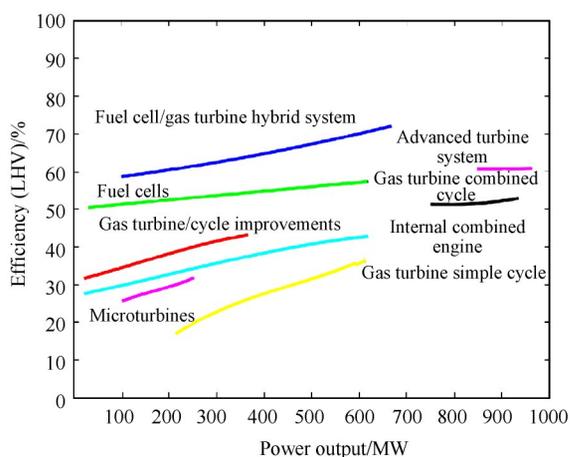


Fig. 10 Cycle efficiency comparison

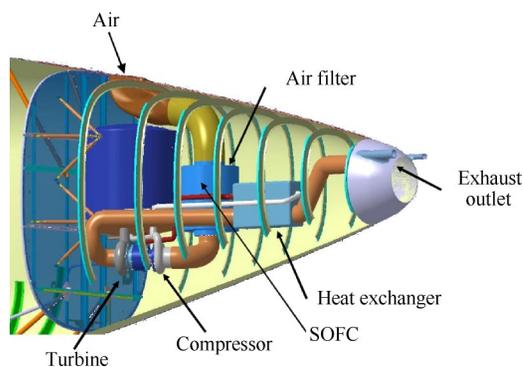


Fig. 11 Schematic diagram of the SOFC/GT APU<sup>[79]</sup>

Freeh等<sup>[81-82]</sup>利用集总参数模型模拟了200kW等级的SOFC/GT机载APU混合系统。结果表明,该系统在巡航阶段的发电效率为73%。Tornabene等<sup>[83]</sup>建立了SOFC/GT混合系统详细的质量模型,受到了

SOFC/GT混合系统在飞机方向研究的相关人员的广泛关注。Steffen等<sup>[84]</sup>的研究结果显示SOFC形式对混合系统的重要影响,采用金属支撑时,混合系统质量为1396kg,采用瓦楞式结构时,质量为720kg。Rajashkara等<sup>[80]</sup>预测SOFC/GT混合系统在100kW~10MW功率等级的应用范围具有竞争力。美国联合技术研究中心的Braun等<sup>[85]</sup>以航煤为燃料模拟了300kW的SOFC/GT机载APU混合系统,热效率可达70%。以上研究结果充分表明SOFC/GT混合系统作为机载APU展现出较高的热效率。此外,波音公司曾计划将SOFC系统作为B-787客机的APU。研究结果表明,在操作电压为0.7V,压力为0.8MPa时,燃料电池系统效率高于50%,质量小于4000kg。

### 3.3 燃料电池涡轮混合推进系统

与机载燃料电池构型相似的混合动力系统还可作为高空长航时无人机、分布式推进飞机、高效低排放飞机和通勤飞机等对耗油率、排放、静音等要求严格的飞机的推进系统。

#### 3.3.1 高空长航时无人机用混合推进系统

高空长航时(High-Altitude Long Endurance, HALE)无人机是一种新型无人机,在监视、通信等方面有极高的战略价值,能极大提高整个作战体系的效能,受到国内外研究单位广泛关注<sup>[86]</sup>。

Himansu等<sup>[87]</sup>于2006年首次开展了SOFC/GT混合系统用于HALE无人机推进系统的研究。任务指标为15~22km高度巡航10天以上。该推进系统使用氢燃料。模型充分考虑了推进系统的效率、重量以及任务时间。研究表明,当巡航时间大于10天时,SOFC/GT混合系统在热效率方面的优势将抵消该系统带来的质量惩罚。

帝国理工大学Aguiar等<sup>[88]</sup>于2008年对SOFC/GT混合系统应用于HALE无人机进行了热力循环构型研究。HALE无人机任务时间为1周以上,马赫数为0.25~0.35,飞行高度为15~20km,燃料为液氢。Aguiar分析了单堆、双电堆、三电堆结构的SOFC/GT混合系统。三堆的SOFC/GT混合系统如图12所示。结果表明三电堆SOFC/GT混合系统效率可达66.3%,相比于单堆SOFC/GT混合系统效率为54.4%。通过增加SOFC电堆数量来提高SOFC/GT混合系统热效率的原因在于:空气进入下一个SOFC堆前进行了中冷,因而间接降低了压气机耗功,提高了系统效率。

美国国家燃料电池中心(National Fuel Cell Research Center, NFCRC)Tarroja等<sup>[89]</sup>于2009年利用低压下的SOFC实验数据对50kW等级HALE无人机氢

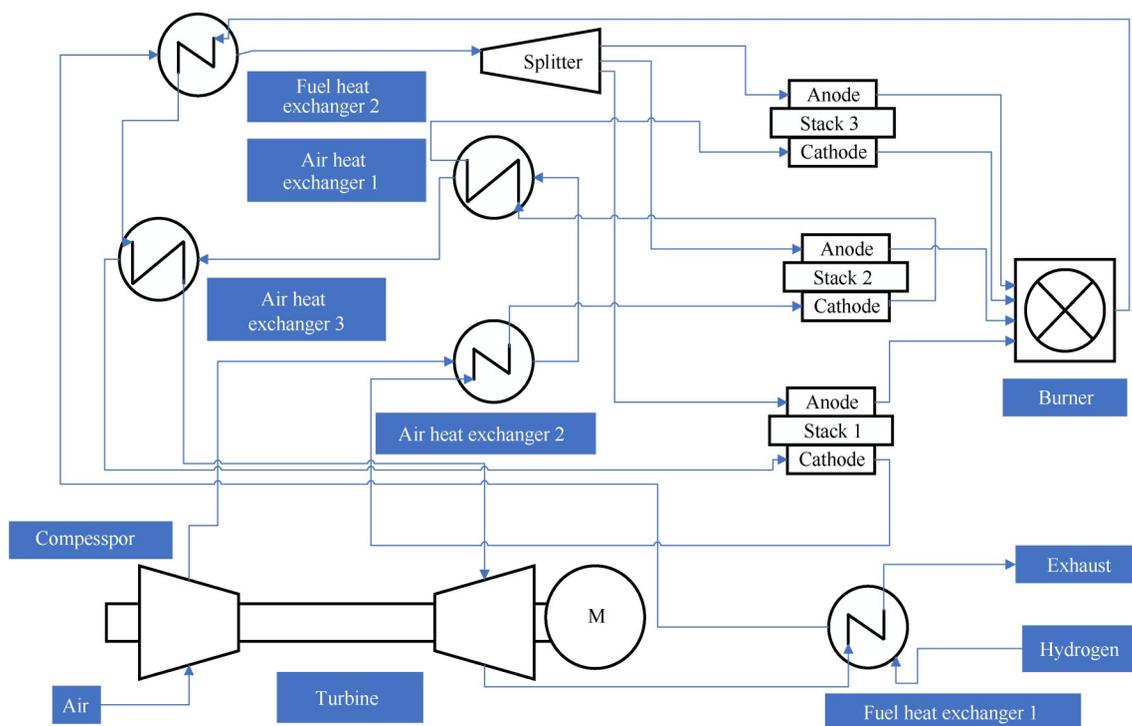


Fig. 12 Three-stack SOFC/GT system arrangement diagram<sup>[88]</sup>

燃料 SOFC/GT 混合系统进行了精确的热力学参数分析和性能评估。研究表明,热力学循环效率最高可达 65%。系统压比存在最优值,SOFC 不一定必须工作在一个大气压下。荷兰代尔夫特理工大学 Fernandes 等<sup>[90]</sup>于 2014 年进行了以生物质为初始燃料的 HALE 无人机的 SOFC/GT 混合系统热力学研究。飞行器巡航高度为 21km,功率为 100kW, Fernandes 没有考量飞行器系统质量和燃油质量。研究表明,生物质转化成的液氢在 SOFC/GT 推进系统中的焓损失所占比例约为 11%,因此液氢不一定是最佳燃料选择,其它燃料也应该被讨论。

哈尔滨工业大学姬志行研究了以航空煤油为燃料的 SOFC/GT 混合系统<sup>[91]</sup>,并应用于 HALE 无人机。结果表明,在采取阴极循环和阳极循环后,发动机热效率可达 64%,阳极循环比对发动机性能影响很大。随着阳极循环比增加,SOFC/GT 混合系统热效率先增加后减少。而阴极循环比对发动机性能影响较小。

### 3.3.2 分布式推进飞机用混合推进系统

分布式推进飞机改变了原有飞机的推进方式。该飞机布置多达十余个电动涵道风扇,如图 13 所示。其效果相当于变相增加涡扇发动机涵道比。可突破现有涡扇发动机涵道比增加受制于飞机机身高度这一局限,因此也对动力系统耗油率敏感性较高。JAXA 于 2012 年提出将 SOFC/GT 混合系统作为分布式推进系统的核心机<sup>[92-94]</sup>。Okai 等<sup>[93]</sup>研究了氢燃料

供应给 SOFC 和燃烧室比例对发动机热力循环的影响。为了平衡燃料和燃料箱的体积和重量,Okai 等<sup>[94]</sup>提出了两种燃料、两组燃气涡轮的混合系统。Okai 指出:增加 SOFC 功率时,会带来得不偿失的质量惩罚,需要综合权衡。重量和可操作性是 SOFC/GT 混合系统作为分布式推进系统核心动力装置的关键技术。

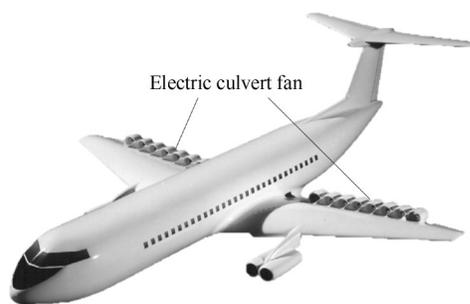


Fig. 13 Schematic diagram of distributed electricity airplanes

厄瓜多尔基多公立大学 Valencia 等<sup>[95]</sup>于 2015 年将 SOFC/GT 混合系统用于满足 NASA 提出的“N3-X”飞行器,其为结合边界层摄食概念的分布式电力推进飞行器。该系统燃料为氢。Esteban 对每个部件的重量都进行了评估。研究表明混合布雷顿循环和燃料电池,和涡轮带动电动机的分布式推进系统的协同优势可以为整个推进系统的性能改进提供更

多的可能性。莱特州立大学 Chakravarthula<sup>[96]</sup>于2016年进行了有关 SOFC/GT 混合系统用于分布式电力推进飞机的瞬态分析。

### 3.3.3 亚声速民用客机用混合动力系统

波音公司、通用公司和佐治亚理工大学<sup>[97-99]</sup>在2008年10月~2010年3月进行了亚声速超绿色飞机研究(Subsonic Ultra Green Aircraft Research, SUGAR)。该飞机不仅要求动力系统低排放、低耗油率,还要求动力系统噪音较低。燃料电池系统在这几方面具有优势。然而,相比于燃气涡轮系统,基于燃料电池的推进系统将面临更多挑战。而且,与燃气涡轮知识库相比,用于辅助设计燃料电池燃气涡轮混合系统的经验基础和工具处于相对原始的状态。NASA<sup>[100]</sup>在“N+4”先进概念研究中表明如果飞行器采用 SOFC/GT 混合系统并和开式转子螺旋桨相结合,相对于原型波音 765 飞机可降低 64.1% 的燃油消耗。因此,以 LNG 为燃料的 SOFC/GT 混合系统是非常有前景的技术。Yanovskiy 等<sup>[5]</sup>研究结果表明,如果将以 LNG 或液氢为燃料的 SOFC/GT 混合系统作为民用客机或运输机动力系统,可拓展原有飞机航程 20%~100%。

波音公司提出用 SOFC/GT 混合系统与电池共同作为小型通勤飞机的动力源<sup>[13, 101-102]</sup>,如图 14 所示。SOFC/GT 混合系统功率满足飞机巡航时的功率需求,并在功率富余时给电池充电,电池提供飞机起飞和爬升需要的额外功率。目前小型内燃机通勤飞机巡航效率低于 30%,而 SOFC/GT 混合系统可以达到 60% 的热效率,将其作为轻型通勤飞机的动力源可减少 50% 的燃油消耗。



Fig. 14 Schematic diagram of all-electricity commuter airplanes<sup>[13]</sup>

Stoia 等<sup>[103]</sup>指出 SOFC/GT 混合系统通过配置温度较高热循环鼓风机可以实现超过 60% 的效率,并且通过配置温度较低的热循环鼓风机可以实现超过 50% 的效率。Woodham 等<sup>[104]</sup>完成了 SOFC/GT 混合系统的安全分析,为推进该混合系统实用化做出了贡献。

### 3.4 发电与推进一体化燃料电池涡轮混合动力系统

正在发展的新型飞机不仅对动力系统有耗油率、推力等各项指标要求,随着机载设备用电功率的增加,对发电系统功率和效率提出了更高要求。马里兰大学帕克分校 Waters 等<sup>[105-108]</sup>于 2014~2016 年将 SOFC 系统与涡喷发动机、高涵道比涡扇发动机、低涵道比涡扇发动机进行了结合。SOFC 发电系统作为涡轮发动机的旁路,如图 15 所示。SOFC 系统使原有涡轮发动机功率密度下降 10% 以内,但可以为飞机提供更多的电能并提升发动机整体热效率。在旁路比为 8,压力比为 40 时,涡扇发动机与 SOFC 旁路结合后,可以产生高达 100~200kW 的电力,而且几乎没有阻力损失。研究表明,将推进与供电相结合 SOFC/GT 混合系统整体性能比独立组件的性能更好。

哈尔滨工业大学姬志行提出了一种“旁路式”SOFC/GT 混合动力循环的新构型<sup>[109]</sup>,如图 15 所示,在高、低压透平间引入了级间燃烧室(Inter-Stage Turbine Burner, ITB),不仅可满足未来机载设备高功率电能需求,还可显著提高低压透平入口温度,进而提高发动机比功,增大推力。该“旁路式”SOFC/GT 混合系统中,碳氢燃料通过部分氧化重整后供给燃料电池。当电功分数(飞机电功率与总功率之比,总功率定义为电功率与推进功率之和)为 0.2 时,相较于同等情况下工作的涡喷发动机,发动机单位推力可提高 24.07%。

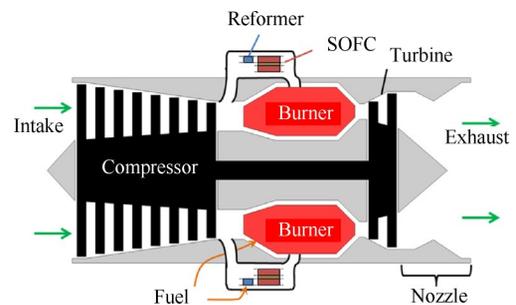


Fig. 15 Schematic diagram of SOFC/GT hybrid system with bypass

### 3.5 无涡轮燃料电池混合推进系统

燃气涡轮发动机受限于涡轮材料和工艺,燃烧温度提升较为困难。因而涡轮入口温度成为限制燃气涡轮发动机性能进一步提升的制约因素。哈尔滨工业大学秦江教授课题组在国内率先提出了一种新型无涡轮喷气式发动机<sup>[110-113]</sup>,如图 16 所示。该发动机中压气机由电动机驱动。电动机由 SOFC 提供电能。SOFC 后部直接燃烧室和喷管。由于没有透平,

因此没有“涡轮前最高工作温度”这一限制,可通过提高燃烧温度,大幅提升发动机推力。此外,由于燃料电池效率较高,该发动机在燃烧室温度较低时比冲较高。

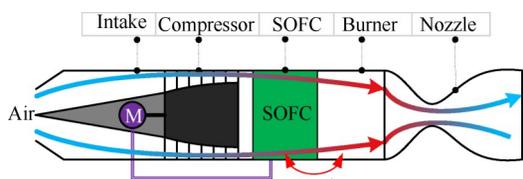


Fig. 16 Schematic diagram of turbine-less jet engine

在飞行高度为 10km,压比为 20,飞行马赫数为 0.9,燃烧室出口温度为 1700K 条件下,无涡轮发动机相比传统涡喷发动机性能对比如表 6 所示<sup>[112]</sup>。该新型发动机在比推力和比冲两个指标方面均有较大提高。

Table 6 Performance comparison between turbojet engines and turbine-less jet engines

Performance parameter	Turbojet engine	New engine	Performance improvement/%
Specific thrust/(N/(kg·s <sup>-1</sup> ))	786	1189	52
Specific impulse/s	2583	3187	23

SOFC 具有高温余热和未利用完的燃料,如果将其与燃气涡轮想结合,混合系统发电效率将进一步提升。相比于原有燃气涡轮系统,基于 SOFC 混合系统热效率更高、耗油率更低,二氧化碳和氮氧化物排放也更低。如图 17 所示,本文重点介绍了航空用燃料电池及混合电推进系统研究现状。由于推进系统输出推进功而不是轴功的复杂性,基于 SOFC 混合系统有多种构型,包括基本的 SOFC 燃气涡轮混合系统、“旁路式”SOFC 混合推进能源系统和与无涡轮喷气发动机。各种动力装置中的 SOFC/GT 混合系统特点总结如表 7 所示。从表中可以看出,除推进能源一体化飞机与无涡轮喷气发动机配置的 SOFC/GT 混合

系统外,其余飞机等配置的 SOFC/GT 混合系统构型均相同,均为 SOFC/GT 混合系统基本构型。这是因为航空动力机械有推进功的需求,不完全需要轴功。为节省重量,部分用于航空发动机的 SOFC/GT 混合系统选择了大分子碳氢燃料,如煤油、汽油等。用于动力装置的 SOFC/GT 混合系统与地面 SOFC/GT 混合系统效率相近,均高达 50%~70%。

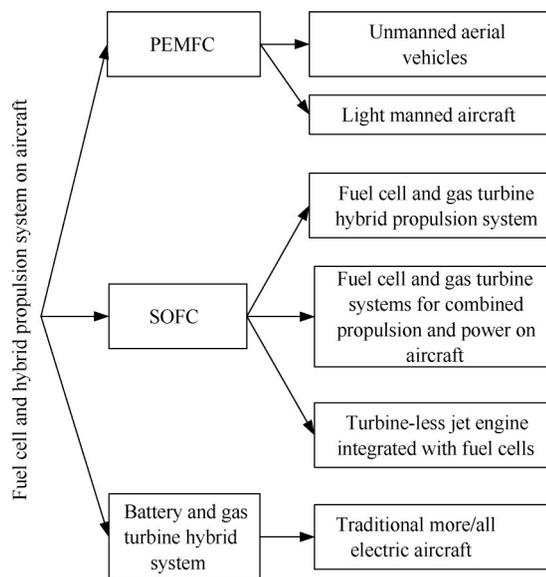


Fig. 17 Classifications and applications of fuel cell hybrid power system for aircraft

## 4 航空混合动力装置面临的技术挑战

### 4.1 燃料电池混合动力系统功重比

地面发电设施由于有较大空间可供安装和运行,一般对设备体积和重量不是很敏感。交通工具尤其是汽车、航空器等对动力系统体积和重量非常敏感。自从燃料电池混合系统被提出用于无人机动系统,系统质量优化研究一直在进行。

燃料电池在飞机上应用具有油耗率低的优势,但也会带来质量惩罚<sup>[115]</sup>。Tornabene 等<sup>[83]</sup>首次建立了燃料电池混合系统的质量和体积模型。Jansen

Table 7 Performance comparison among SOFC/GT hybrid engines

Application object	Configuration	Characteristic	Fuel	Efficiency/%
Airborne auxiliary energy system <sup>[86-87]</sup>	Basic configuration	Clean and efficient	Hydrocarbon	73.0
High altitude long endurance UAV <sup>[92]</sup>	Basic configuration	Amount of fuel is particularly large	H <sub>2</sub> /hydrocarbon	66.3
Promoting energy integration aircraft <sup>[110]</sup>	SOFC bypass	High power required	Hydrocarbon	—
Distributed propulsion aircraft <sup>[99]</sup>	Basic configuration	Power demand MW	H <sub>2</sub> /hydrocarbon	60.0
Subsonic ultra green aircraft <sup>[105]</sup>	Basic configuration	Clean and efficient	H <sub>2</sub> /hydrocarbon	—
Commuter plane <sup>[106]</sup>	Basic configuration	Electric energy needs 75kW	Hydrocarbon	60.0
Turboless jet engine <sup>[114]</sup>	Cancel turbine	Thrust specific impulse average lift	Hydrocarbon	57.6

等<sup>[114]</sup>通过建立电动飞机的质量和性能模型,分析了飞机性能和发动机性能之间的联系。Valencia等<sup>[95]</sup>通过对燃料电池混合系统热力性能和质量进行分析,发现通过使用液氢燃料,飞机耗油率降低了70%,然而发动机重量将增加40%。因此,如何提高燃料电池混合系统功重比是目前该系统实现示范应用的主要问题。燃料电池混合系统中燃料电池占据了绝大部分质量<sup>[87]</sup>。如何提高燃料电池功率密度是提高燃料电池混合系统功率密度的关键。Hashimoto等<sup>[116]</sup>通过设计新材料,研究了一种高功率密度燃料电池。工作在加压情况时,该新型SOFC功率密度可达1.20kW/kg,远高于目前0.23kW/kg的SOFC水平。当使用该高功率密度燃料电池时,混合系统功率密度可达0.3kW/kg以上。该动力系统在功率密度方面,将满足NASA正在研发的X-57“Maxwell”飞机对动力系统的要求<sup>[13]</sup>。

## 4.2 大分子碳氢燃料重整技术

氢气体积能量密度较低,目前的储氢方法常用的为高压储氢罐储氢,最先进的70MPa高压储氢罐的质量储氢密度为10%左右<sup>[117]</sup>。相比于高压储氢罐储氢,有些研究者开始考虑发展常规大分子碳氢燃料重整制氢技术,如煤油、汽油和柴油等,碳氢燃料重整制氢可以达到较高的储氢密度同时氢气可以随时制取和使用,目前的基础设施也较完善,是获取氢气的另一种重要途径。

碳氢燃料重整方法主要有催化部分氧化重整(Catalytic Partial Oxidation, CPOX)、自热重整(Autothermal Reformation, ATR)和水蒸汽重整(Steam Reformation, SR)<sup>[101]</sup>。其中,水蒸汽重整吸热,效率最高;部分氧化重整放热,紧凑度最大;自热重整绝热,效率与紧凑度均适中。自热重整反应中,可通过调节水蒸汽流量和空气流量,轻微控制反应器吸放热。交通工具对紧凑度要求较高,因此部分氧化重整和自热重整是目前用于交通工具的两种重要制氢技术。Dorazio等<sup>[118]</sup>通过对正十四烷自热重整反应的计算动力学研究,得到了该反应的反应机理,并与实验结果符合得很好。反应机理总结如下:正十四烷的氧化反应与裂解反应最先开始,然后催化剂作用于表面反应和气化反应,氢气主要来源于部分氧化重整反应和水汽置换反应。水汽置换反应消耗了供给系统的大部分水蒸汽。该机理对数值仿真研究含有大分子碳氢燃料重整的热力系统起到了很大帮助<sup>[119]</sup>。亚利桑那州大学李培文课题组进行了大量自热重整实验的相关工作<sup>[120]</sup>。实验中燃料为Jet-A型

煤油。在重整器温度为696℃,水碳比为2.5,氧碳比为0.5条件下,自热重整反应效果最佳。燃料转换率、制氢率、能量效率分别为0.89,1.44,和0.65,该研究具有较大的实用意义。国内在汽、柴、煤油等液体碳氢燃料重整方面研究较少,未见成熟产品公开。

碳氢燃料容易在重整器或SOFC内积碳,这将引起设备故障。目前主要通过加大氧碳比<sup>[107]</sup>或水碳比<sup>[121]</sup>的方法抑制积碳。该方法主要适用于外重整的SOFC/GT混合系统。由于SOFC工作在600~1000℃,因此燃料可先其内部进行重整,然后发生电化学反应。Liese等<sup>[122]</sup>的研究结果表明,由于要对SOFC进行冷却,外重整SOFC的阴极空气流量几乎是内重整SOFC的阴极空气流量的两倍。如果此时为了抑制结焦,大幅度增加重整器氧碳比或水碳比,将增加SOFC/GT混合系统体积和重量,影响交通设备里程。因此,探究低空气/水蒸汽流量条件下,抑制燃料在重整器及SOFC积碳方法是一项影响到SOFC/GT安全运行的关键技术。

燃料电池中的催化剂对硫非常敏感。硫极易引起催化剂中毒,进而导致燃料电池失效。即使SOFC是对硫容忍度最高的燃料电池之一,也需要对燃料中的硫进行严格检测与去除。城市中的煤油、汽油、柴油含硫量均较高,进入燃料电池前必须进行脱硫处理。目前主要有两种方式进行脱硫,一种是贮存地脱硫<sup>[123]</sup>,即燃料从炼油地出厂前后进行脱硫除硫。汽、柴油在注入交通工具的油箱后,其硫浓度就已经降到SOFC许可标准以下。该方式需要在地面安装大规模除硫设备,工程量较大。但除硫效果好,易于燃料电池车的大规模推广。第二种除硫方式为“在岸”除硫<sup>[124-125]</sup>,即在需要使用燃料电池的交通工具上安装一套除硫设备。此方式不用对现有燃料体系做较大改动,但会使本来功重比较低的SOFC发动机功重比进一步降低,且无法保证除硫设备的长期、高效工作。因此,衡量各方面成本、研制高效、低能耗脱硫设备是推广SOFC等燃料电池动力装置实用化需要解决的重要问题。

## 5 总结与展望

本文系统介绍了航空燃料电池及混合电推进概念、原理、技术优点和相关技术的发展现状,梳理了世界各国燃料电池飞机的技术现状、理论研究、仿真分析、实验研究。飞行试验表明,燃料电池动力及混合推进系统具有高效率、低耗油率、低排放等技术优势,可显著提升航空飞行器的航时及工作范围,在发

展超长航时航空飞行器方面具有很大的技术优势,特别在军事无人机方面发展前景广阔。

航空燃料电池及混合电推进系统可实现超低排放和零排放,为发展绿色航空提供了重要的技术路径,将极大地助力多电/全电飞机的发展,在零碳时代的大背景下将进一步得到快速的发展,为航空碳减排做出巨大的贡献。

## 参考文献

- [1] 姜克隽,冯升波. 走向《巴黎协定》温升目标:已经在路上[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 1-6.
- [2] 新华每日电讯. 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话[EB/OL]. [http://www.xinhuanet.com/mrdx/2020-09/23/c\\_139389875.htm](http://www.xinhuanet.com/mrdx/2020-09/23/c_139389875.htm), 2020-09-23.
- [3] Schafer A, Barrett S R, Doyme K, et al. Technological, Economic and Environmental Prospects of All-Electric Aircraft[J]. *Nature Energy*, 2018, 4: 160-166.
- [4] Bradley M K, Droney C K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research, Phase I: Final Report [R]. NASA 2011-216847.
- [5] Yanovskiy L S, Baykov A, Raznoschikov V, et al. Alternative Fuels and Perspectives Solid Oxide Fuel Cells Usage in Air Transport [J]. *ECS Transactions*, 2013, 57(1): 149-160.
- [6] Liu F, Zhao F, Liu Z, et al. The Impact of Fuel Cell Vehicle Deployment on Road Transport Greenhouse Gas Emissions: The China Case [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(50).
- [7] 严林博,何伯述,裴晓辉,等. 煤基近零排放系统中固体氧化物燃料电池本体的模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(29): 94-103.
- [8] Rechberger J, Kaupert A, Hagerskans J, et al. Demonstration of the First European SOFC APU on a Heavy Duty Truck [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14(36): 76-85.
- [9] Tucker M C. Development of High Power Density Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cells [J]. *Energy Technology*, 2017, 5(12).
- [10] 李杨,翁一武. 固体氧化物燃料电池-燃气轮机混合动力系统的性能及控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(35): 94-100.
- [11] 吕小静,陆超豪,耿孝儒,等. 水蒸气对IT-SOFC/GT混合动力系统性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(4): 705-710.
- [12] 岳秀艳,韩吉田,于泽庭,等. 设置富氨蒸气回热器的固体氧化物燃料电池/燃气轮机/卡琳娜联合循环系统的热力性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(26): 4483-4492.
- [13] Papathakis K V, Schnarr O C, Lavelle T M, et al. Integration Concept for a Hybrid-Electric Solid-Oxide Fuel Cell Power System into the X-57 "Maxwell" [C]. *Atlanta: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2018.
- [14] 秦江,姬志行,党朝磊,等. 一种用于飞行器的固体氧化物燃料电池燃气涡轮分布式混合推进系统[P]. 中国专利: 110056429, 2019-07-26.
- [15] 秦江,姬志行,郭发福,等. 一种用于飞行器的新型涡轮-高温燃料电池混合推进及能源一体化系统[P]. 中国专利: 110071309, 2019-07-30.
- [16] 秦江,姬志行,程昆林,等. 与固体氧化物燃料电池集成的无涡轮喷气发动机[P]. 中国专利: 110608108, 2019-12-24.
- [17] 王绍荣. 固体氧化物燃料电池简介[J]. 上海节能, 2007(3): 32-34.
- [18] 蒙青山. 基于SOFC/GT和跨临界CO<sub>2</sub>循环的联合发电系统特性研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [19] 各种燃料电池的技术性能[EB/OL]. <https://wenku.baidu.com/view/054fbc776394dd88d0d233d4b14e852459fb3969.html>, 2019-10-29.
- [20] 张健. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机联合循环特性分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2007.
- [21] Patel N K, Utter R G, Das D, et al. Surface Degradation of Strontium-Based Perovskite Electrodes of Solid Oxide Fuel Cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 438(227).
- [22] O'hayre R, Cha S W, Prinz F B, et al. Fuel Cell Fundamentals [M]. USA: John Wiley & Sons, 2016: 9-11.
- [23] kW-Class SOFC Power Generation and Testing System [EB/OL]. <http://www.sofcman.com>, 2018-09-20.
- [24] Breaking!!! Successful Operation of 25kW SOFC Power Generation System [EB/OL]. <http://www.sofcman.com/2021011401>, 2021-01-14.
- [25] 苏州华清京昆新能源科技有限公司 [EB/OL]. <http://www.huatsing-power.com>, 2018-07-20.
- [26] 佛山索弗克氢能源有限公司 [EB/OL]. <http://www.isofcdynamic.com>, 2018-08-01.
- [27] Dornheim M. Fuel Cells Debut [J]. *Aviation Week & Space Technology*, 2003, 158(22).
- [28] 丁金亮. 民用飞机燃料电池技术应用现状及未来展望[J]. 军民两用技术与产品, 2019(7): 59-62.
- [29] 李文杰,张纯学. 美海军研究燃料电池推进的无人机[J]. 飞航导弹, 2006(5): 30-30.
- [30] Baldic J, Osenar P, Lauder N, et al. Fuel Cell Systems for Long Duration Electric UAVs and UGVs [C]. *Orlando: SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2010.
- [31] Lapeña-Rey N, Mosquera J, Bataller E, et al. First Fu-

- el-Cell Manned Aircraft[J]. *Journal of Aircraft*, 2010, 47(6): 1825-1835.
- [32] Chiang C, Herwerth C, Mitmirani M, et al. Systems Integration of a Hybrid PEM Fuel Cell/Battery Powered Endurance UAV[C]. *Reno: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2008.
- [33] Bradley T, Moffitt B, Mavris D, et al. Development and Experimental Characterization of a Fuel Cell Powered Aircraft[J]. *Journal of Power Sources*, 2007, 171(2): 793-801.
- [34] Lee B, Park P, Kim C, et al. Power Managements of a Hybrid Electric Propulsion System for UVAs[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(8): 2291-2299.
- [35] None. Lockheed Martin Ruggedized UAS Uses AMI Fuel Cell Power[J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2011(9): 4-4.
- [36] Roessler C, Schoemann J, Baier H. Aerospace Application of Hydrogen and Fuel Cells[C]. *Essen: 18th World Hydrogen Conference*, 2010.
- [37] None. Boeing Fuel Cell Plane in Manned Aviation First[J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2008(4): 1-1.
- [38] Barrett S. Fuel Cells Power First Take off for DLR's Antares Aircraft[J]. *Fuel Cells Bulletin*, 2009(9): 3-3.
- [39] HY4 Aircraft[EB/OL]. <http://www.aerospace-technology.com/projects/hy4-aircraft/>, 2020-10-09.
- [40] Cestino E, Romeo G, Borello F. Rapid200-FC, Flight Test of First All Electric Propulsion Aeroplane Powered by Fuel Cells[C]. *Venice: 3rd Council of European Aerospace Societies Air&Space Conference*, 2011.
- [41] 世界首架氢燃料电池eVTOL载人飞机亮相[EB/OL]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201906/01/57186.html>, 2019-06-01.
- [42] ZeroAvia 电动飞机公司为何选择氢能[EB/OL]. <https://www.gg-fc.com/art-40157.html>, 2020-06-16.
- [43] Surer M G, Sarikaya İ, Arat H T. Usage Potential of Fuel Cells for Manned/Unmanned Air Vehicles: Developments, Current Status [C]. *Cyprus: 16th International Conference on Clean Energy*, 2018.
- [44] 王春. 我国第一架纯燃料电池无人机在上海首飞成功[J]. *农业工程*, 2013(1): 30-30.
- [45] 小城. 中国首架碳纤维材料结构燃料电池动力无人机试飞[J]. *航空制造技术*, 2012(16): 18-24.
- [46] 张晓辉. 燃料电池混合动力无人机能量管理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [47] 佚名. 高山雨燕, 载誉而归![EB/OL]. <https://www.81uav.cn/uav-news/201907/23/60142.html>, 2019-07-23.
- [48] 佚名. 从标准、项目以及产品盘点, 中国氢燃料电池无人机发展现状[EB/OL]. [https://www.thepaper.cn/news-Detail\\_forward\\_8487066](https://www.thepaper.cn/news-Detail_forward_8487066), 2020-07-29.
- [49] 戴月领. 基于模型预测的燃料电池无人机能量管理策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
- [50] 佚名. 新源创能研发了一款六旋翼氢燃料电池无人机[EB/OL]. <https://energy.cngold.org/c/2020-01-27/c6828611.html>, 2020-01-27.
- [51] 佚名. 国产飞机动力大突破: 首款燃料电池飞机腾空[EB/OL]. <https://news.mydrivers.com/1/515/515028.htm>, 2017-01-09.
- [52] Marchant W, Tosunoglu S. Rethinking Wildfire Suppression with Swarm Robotics [C]. *Florida: 29th Florida Conference on Recent Advances in Robotics*, 2016.
- [53] Giacoppo G, Barbera O, Briguglio N, et al. Thermal Study of a SOFC System Integration in a Fuselage of a Hybrid Electric Mini UAV[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(46).
- [54] 佚名. 混合动力飞机将航空运输带入“环保时代”[J]. *技术与市场*, 2019, 26(5): 2-3.
- [55] 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): 51-67.
- [56] 钱煜平, 张扬军. 航空混合电推进系统中的热管理问题分析[J]. *航空动力*, 2019(6): 36-40.
- [57] 全球首架混合动力飞机问世[J]. *中国工会财会*, 2015(5): 52-52.
- [58] 廖忠权. 航空混合电推进系统发展研究[J]. *航空动力*, 2018(2): 45-50.
- [59] 廖忠权. 支线客机的混合电推进之路[J]. *航空动力*, 2019(5): 61-64.
- [60] Davies K, Norman P, Jones C, et al. A Review of Turboelectric Distributed Propulsion Technologies for N+3 Aircraft Electrical Systems [C]. *Dublin: 48th International Universities' Power Engineering Conference*, 2013.
- [61] Kim H D, Felder J L, Tong M T, et al. Revolutionary Aeropropulsion Concept for Sustainable Aviation: Turboelectric Distributed Propulsion [C]. *Busan: 21st ISABE Conference*, 2013.
- [62] Singh R, Kim H D, Felder J L, 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.
- [63] 张会生, 苏明, 翁史烈. 燃气轮机与混合装置的性能比较[J]. *动力工程*, 2005(4): 599-602.
- [64] 陈启梅, 翁一武, 翁史烈, 等. 高温燃料电池与燃气轮机相结合的混合发电系统[J]. *热能动力工程*, 2005(2): 111-115.
- [65] 史翊翔, 包成, 蔡宁生, 等. 基于分布参数燃料电池模型的SOFC-GT混合发电系统模拟[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2011, 51(2): 282-288.
- [66] Shi Y, Cai N, Li Z. Performance Analysis of SOFC/Micro-GT Hybrid System [J]. *Journal of Tsinghua University*

- ty (*Science and Technology*), 2005, 45(8): 1142-1145.
- [67] Wu Y, Shi Y, Luo Y, et al. Elementary Reaction Modeling and Experimental Characterization of Solid Oxide Direct Carbon-Assisted Steam Electrolysis Cells[J]. *Solid State Ionics*, 2016, 295: 78-89.
- [68] Wang Y, Shi Y, Cao T, et al. A Flame Fuel Cell Stack Powered by a Porous Media Combustor[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(50): 22595-22603.
- [69] Chen Y, Luo Y, Shi Y, et al. Theoretical Modeling of a Pressurized Tubular Reversible Solid Oxide Cell for Methane Production by Coelectrolysis [J]. *Applied Energy*, 2020, 268(11).
- [70] 李 杨. 高温燃料电池—燃气轮机混合动力系统变工况性能分析与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- [71] 吕小静. SOFC/GT混合动力系统运行关键问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [72] 周娜娜. SOFC/GT耦合发电系统中燃料电池阴极气流管理的半实物仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [73] 张兄文. 固体氧化物燃料电池及其混合系统的多级建模与仿真研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2008.
- [74] Rossi I, Traverso A, Tucker D. SOFC/Gas Turbine Hybrid System: A Simplified Framework for Dynamic Simulation[J]. *Applied Energy*, 2019, 238(15): 43-50.
- [75] Steilen M, Saletti C, Heddrich M P, et al. Analysis of the Influence of Heat Transfer on the Stationary Operation and Performance of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Power Plant[J]. *Applied Energy*, 2018, 211(4): 79-91.
- [76] Oryshehyn D, Harun N F, Tucker D, et al. Fuel Utilization Effects on System Efficiency in Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Hybrid Systems[J]. *Applied Energy*, 2018, 228(19): 53-65.
- [77] Wu S, Li Y. Fuel Cell Applications on More Electrical Aircraft [C]. *Hangzhou: 17th International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2014.
- [78] Daggett D L, Eelman S, Kristiansson G. Fuel Cell APU for Commercial Aircraft [C]. *Dayton: Aiaaicas Int Air & Space Symp & Expos the Next Years*, 2003.
- [79] Rajashekara K, Grieve J, Daggett D. Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid APU System for Aerospace Applications [C]. *Tampa: 2006 IEEE Industry Applications Conference—Forty-First IAS Annual Meeting*, 2006.
- [80] Rajashekara K, Grieve J, Daggett D. Hybrid Fuel Cell Power in Aircraft [J]. *IEEE Industry Applications Magazine*, 2008, 14(4): 54-60.
- [81] Freeh J E, Steffen C J, Larosiliere L M. Off-Design Performance Analysis of a Solid-Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid for Auxiliary Aerospace Power [M]. *USA: National Aeronautics and Space Administration*, 2005.
- [82] Freeh J E, Pratt J W, Brouwer J. Development of a Solid-Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System Model for Aerospace Applications [C]. *Vienna: 2004 ASME Turbo Expo*, 2004.
- [83] Tornabene R, Wang X Y, Steffen, et al. Development of Parametric Mass and Volume Models for an Aerospace SOFC/Gas Turbine Hybrid System [C]. *Reno-Tahoe: ASME Turbo Expo 2005—Gas Turbine Technology: Focus for the Future*, 2005.
- [84] Steffen C J, Freeh J E, Larosiliere L M, et al. Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid Cycle Technology Auxiliary Aerospace Power [C]. *Reno-Tahoe: ASME Turbo Expo 2005—Gas Turbine Technology: Focus for the Future*, 2005.
- [85] Braun R J, Gummalla M, Yamanis J. System Architectures for Solid Oxide Fuel Cell-Based Auxiliary Power Units in Future Commercial Aircraft Applications [J]. *Journal of Fuel Cell Science & Technology*, 2009, 6(3).
- [86] 曹秋生, 张会军. 高空长航时无人机的特点及技术难点探讨[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2008, 3(1): 8-13.
- [87] Himansu A, Freeh J E, Syeffenjr C J, et al. Hybrid Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine System Design for High Altitude Long Endurance Aerospace Missions [C]. *Irvine: 4th International ASME Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology*, 2006.
- [88] Aguiar P, Brett D, Brandon N. Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System Analysis for High-Altitude Long-Endurance Unmanned Aerial Vehicles [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2008, 33(23): 7214-7223.
- [89] Tarroja B, Mueller F, Pratt J, et al. Thermodynamic Design Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell Gas Turbine Hybrid System for High-Altitude Applications [C]. *Denver: 7th International Energy Conversion Engineering Conference*, 2009.
- [90] Fernandes A, Woudstra T, Aravind P V. System Simulation and Exergy Analysis on the Use of Biomass-Derived Liquid-Hydrogen for SOFC/GT Powered Aircraft [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, 40(13): 4683-4697.
- [91] Ji Z, Qin J, Guo F, et al. Effect of Operating Parameters on a Hybrid Propulsion System with High Efficiency Fueled by Kerosene for High Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicles [C]. *Cincinnati: 54th AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2018.
- [92] Okai K, Himeno T, Watanabe T, et al. Investigation of FC/GT Hybrid Core in Electrical Propulsion for Fan Aircraft [C]. *Orlando: 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propul-*

- sion Conference, 2015.
- [93] Okai K, Fujiwara H, Nomura H, et al. Performance Analysis of a Fuel Cell Hybrid Aviation Propulsion System[C]. *Atlanta: 10th Annual International Energy Conversion Engineering Conference*, 2012.
- [94] Okai K, Nomura H, Tagashira T, et al. Effects of Fuel Type on Aircraft Electric Propulsion with SOFC/GT Hybrid Core[C]. *Atlanta: 53rd AIAA/SAE/ASAE Joint Propulsion Conference*, 2017.
- [95] Valencia E, Hidalgo V, Laskaridis P, et al. Design Point Analysis of a Hybrid Fuel Cell Gas Turbine Cycle for Advanced Distributed Propulsion Systems[C]. *Orlando: 51st AIAA/SAE/ASAE Joint Propulsion Conference*, 2015.
- [96] Chakravarthula V A. Transient Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System for Distributed Electric Propulsion[D]. *Dayton: Wright State University*, 2016.
- [97] Bradley M K, Droney C K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase 2. Volume 2; Hybrid Electric Design Exploration[R]. *NASA/CR-2015-218704/VOL2*, 2015.
- [98] Bradley M K, Droney C K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research: Phase I Final Report[R]. *NASA 2011-216847*.
- [99] Jansen R, Bowman C, Jankovsky A, et al. Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion (EAP) Research for Large Subsonic Transports[C]. *Atlanta: 53rd AIAA/SAE/ASAE Joint Propulsion Conference*, 2017.
- [100] Bradley M K, Droney C K. Subsonic Ultra Green Aircraft Research Phase II: N+4 Advanced Concept Development [R]. *NASA/CR-2012-217556*.
- [101] Stoia T, Atreya S, O'neil P. A Highly Efficient Solid Oxide Fuel Cell Power System for an All-Electric Commuter Airplane Flight Demonstrator[C]. *San Diego: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2016.
- [102] Borer N K, Geuther S C, Litherland B L, et al. Design and Performance of a Hybrid-Electric Fuel Cell Flight Demonstration Concept[C]. *Atlanta: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2018.
- [103] Stoia T, Balan C, Atreya S, et al. Solid Oxide Fuel Cell-Steam Reforming Power System Configuration Options for an All-Electric Commuter Airplane Flight Demonstrator[C]. *Atlanta: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2018.
- [104] Woodham K P, Graydon P, Borer N K, et al. Fuel Model-Based System Safety Analysis[C]. *Atlanta: 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, 2018.
- [105] Waters D F, Cadou C P. Engine-Integrated Solid Oxide Fuel Cells for Efficient Electrical Power Generation on Aircraft[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 284: 588-605.
- [106] Waters D F, Vannoy S, Cadou C P. Influence of Flow Path Configuration on the Performance of Hybrid Turbine-Solid Oxide Fuel Cell Systems for Aircraft Propulsion and Power[C]. *Orlando: 51st AIAA/SAE/ASAE Joint Propulsion Conference*, 2015.
- [107] Waters D F. Modeling of Gas Turbine-Solid Oxide Fuel Cell Systems for Combined Propulsion and Power on Aircraft[D]. *Maryland: University of Maryland*, 2015.
- [108] Waters D F, Cadou C P. Optimization of Gas Turbine-Solid Oxide Fuel Cell Systems for Aircraft Power Generation[C]. *Kissimmee: 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2015.
- [109] Ji Z, Qin J, Cheng K, et al. Performance Evaluation of a Turbojet Engine Integrated with Interstage Turbine Burner and Solid Oxide Fuel Cell[J]. *Energy*, 2019, 168: 702-711.
- [110] Ji Z, Qin J, Cheng K, et al. Thermodynamic Analysis of a Solid Oxide Fuel Cell Jet Hybrid Engine for Long-Endurance Unmanned Air Vehicles[J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 183: 50-64.
- [111] Ji Z, Qin J, Cheng K, et al. Comparative Performance Analysis of Solid Oxide Fuel Cell Turbine-Less Jet Engines for Electric Propulsion Airplanes: Application of Alternative Fuel[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 93(10).
- [112] Ji Z, Qin J, Cheng K, et al. Thermodynamic Performance Evaluation of a Turbine-Less Jet Engine Integrated with Solid Oxide Fuel Cells for Unmanned Aerial Vehicles[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 160(11).
- [113] Ji Z, Qin J, Cheng K, et al. Thermodynamics Analysis of a Turbojet Engine Integrated with a Fuel Cell and Steam Injection for High-Speed Flight [J]. *Energy*, 2019, 185: 190-201.
- [114] Jansen R, Brown G V, Felder J L, et al. Turboelectric Aircraft Drive Key Performance Parameters and Functional Requirements [C]. *Orlando: The 51st AIAA/SAE/ASAE Joint Propulsion Conference*, 2015.
- [115] Dollmayer J, Bundschuh N, Carl U B. Fuel Mass Penalty Due to Generators and Fuel Cells as Energy Source of the All-Electric Aircraft[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2006, 10(8).
- [116] Hashimoto S, Hirota T, Suzuki K, et al. Material Development Strategy of Lightweight Solid Oxide Fuel Cells for Airplane System Electrification [J]. *ECS Transactions*, 2019, 91(1): 311-318.
- [117] 高惠民. 解析丰田燃料电池轿车 Mirai 高压储氢系统(上)[J]. *汽车维修与保养*, 2021(3): 59-62.
- [118] Dorazio L, Castaldi M J. Autothermal Reforming of Tetra-

- decane (C<sub>14</sub>H<sub>30</sub>): A Mechanistic Approach[J]. *Catalysis Today*, 2008, 136(3): 273–280.
- [119] Martinez A S, Brouwer J, Samuelsen G S. Comparative Analysis of SOFC-GT Freight Locomotive Fueled by Natural Gas and Diesel with Onboard Reforming[J]. *Applied Energy*, 2015, 148: 421–438.
- [120] Zhang S, Wang X, Li P. Hydrogen Production via Catalytic Autothermal Reforming of Desulfurized Jet-A Fuel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016, 42(4): 1932–1941.
- [121] Ding X, Lv X, Weng Y. Coupling Effect of Operating Parameters on Performance of a Biogas-Fueled Solid Oxide Fuel Cell/Gas Turbine Hybrid System[J]. *Applied Energy*, 2019, 254(11).
- [122] Liese E A, Gemmen R S. Performance Comparison of Internal Reforming Against External Reforming in a SOFC, Gas Turbine Hybrid System [C]. *Atlanta: The ASME Turbo Expo*, 2005, 127(1): 86–90.
- [123] 孔令艳, 李 钢, 王祥生. 液体燃料催化氧化脱硫[J]. *化学通报*, 2004, 67(3): 178–184.
- [124] Xu X, Liu X, Xu B. A Survey of Nickel-Based Catalysts and Monolithic Reformers of the Onboard Fuel Reforming System for Fuel Cell Apu Applications[J]. *International Journal of Energy Research*, 2016, 40(9): 1157–1177.
- [125] 唐晓东, 胡 涛, 李晶晶, 等. 车用燃料电池化学脱硫研究进展[J]. *化工进展*, 2015, 34(5): 1277–1282.

(编辑:朱立影)