

文章编号: 1674-8190(XXXX)XX-001-11

新能源航空发动机研究进展与展望

刘翔^{1,2,3}, 竺宏杰^{1,2,3}, 张爱聆^{1,2,3}, 卫洪森^{1,2,3}, 刘文淇^{1,2,3}, 万恒成^{1,2,3}

(1. 中国民用航空飞行学院 民航安全工程学院, 广汉 618300)

(2. 民机火灾科学与安全工程四川省重点实验室, 广汉 618300)

(3. 四川省全电通航飞行器关键技术工程研究中心, 广汉 618307)

摘要: 近年来, 我国经济持续增长, 对清洁能源的需求日益迫切。航空业也一直在积极探索清洁、低排放的能源技术。使用新燃料和新能源的新型航空发动机被认为是减少碳排放的重要解决方案。本文介绍了新能源航空发动机的研究进展, 首先按照时间顺序介绍了航空发动机的发展历程, 然后介绍了新燃料航空发动机、电动飞机、燃料电池航空发动机等的研究现状, 最后对新能源航空发动机未来的研究进行了展望。

关键词: 航空发动机; 新能源; 新燃料; 氢能源; 电动飞机

中图分类号: V232.4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.XXXX.XX.01

Overview of the current research status of new energy aviation engines

LIU Xiang^{1,2,3}, ZHU Hongjie^{1,2,3}, ZHANG Ailing^{1,2,3}, WEI Hongsen^{1,2,3},

LIU Wenqi^{1,2,3}, WAN Hengcheng^{1,2,3}

(1. School of Civil Aviation Safety Engineering, Civil Aviation Flight Academy of China, Guanghan 618300, China)

(2. Sichuan Provincial Key Laboratory of Civil Aircraft Fire Science and Safety Engineering, Guanghan 618300, China)

(3. Sichuan Province Key Technology Engineering Research Center for All Electric Navigation Aircraft, Guanghan 618300, China)

Abstract: In recent years, China's economy has continued to grow, and the demand for clean energy has become increasingly urgent. The aviation industry has also been actively exploring clean and low emission energy technologies. The use of new fuels and new energy for new aviation engines is considered an important solution to reduce carbon emissions. This article provides an overview of the research status of new energy aviation engines. Firstly, the development history of aviation engines is introduced in chronological order. Then, the research status of new fuel aviation engines, electric aircraft, fuel cell aviation engines, etc. is introduced. Finally, the future research of new energy aviation engines is discussed.

Key words: aircraft engines; new energy; new fuel; hydrogen energy; electric aircraft

收稿日期: 2024-01-12; 修回日期: 2024-04-16

基金项目: 四川省科技厅项目(2021YFSY0023); 四川省重点实验室项目(MZ2023KF04); 中国民航飞行学院面上项目(PHD2023-066)

通信作者: 万恒成(1992-), 男, 博士, 讲师。E-mail: wanhc@cafuc.edu.cn

引用格式: 刘翔, 竺宏杰, 张爱聆, 等. 新能源航空发动机研究进展与展望[J]. 航空工程进展, XXXX, XX(XX): 1-11.

LIU Xiang, ZHU Hongjie, ZHANG Ailing, et al. Overview of the current research status of new energy aviation engines[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, XXXX, XX(XX): 1-11. (in Chinese)

0 引言

航空发动机是一种用于提供推力、驱动飞机飞行的发动机,是飞机最关键的组件之一。航空发动机通常基于内燃机机制运行,通过燃烧燃料以产生高温高压的气体,并将这些气体转换成推力以驱动飞机向前飞行。根据不同的工作原理,航空发动机可以分为多种类型,包括涡轮喷气发动机、涡桨发动机和活塞发动机等。现在,传统的航空发动机正在向核能动力、太阳能动力、燃料电池动力以及新能源燃料航空发动机发展。

现如今,社会发展最核心的主题之一是日益增长的能源需求。在污染和温室效应等环境问题下,新能源逐渐成为应对能源危机和环境污染这一全球挑战的重要战略^[1]。随着对环境的日益关注和日益严格的环境法规,减少与航空公司运营相关的环境危害仍然是航空业的首要问题^[2-3]。

实现无碳排放经济是现如今我国所追求的一个目标。科学和技术进步需要遵循这一发展趋势,在提高热机效率的同时,减少碳和其他有害气体化合物排放,降低对大气污染和温室效应的影响。将该航空业与化石燃料分离是迈向环保未来的有效措施之一。因此,需要找到合适的替代传统化石燃料的能量方法^[4]。在这种情况下,新能源燃料似乎是一种可能的解决方案。

本文对新能源航空发动机进行综述,介绍近年来燃料电池航空发动机、新燃料航空发动机及其他新能源航空发动机的研究现状,并对未来新能源航空发动机的研究和发展进行展望。

1 航空发动机的发展历程

航空发动机起步于1903年活塞式发动机,具有油耗低、成本低、工作可靠等特点。活塞式发动机主要由气缸、活塞、连杆、曲轴、气门机构、螺旋桨减速器、机匣等组成^[5]。气缸是空气与燃料混合物发生燃烧的场所。在气缸盖上安装了用于点火燃料混合物的电动火花塞和进排气阀门。在使用过程中,由于气缸内的高温,在气缸的外壁上安装了大量的鳍片,从而增大了散热的面积。汽缸在引擎壳体上的布置有星型、V型和对置型等多种形式。气体在活塞的往复运动作用下,在气缸中完成进气、压缩、燃烧、膨胀和排气循环,并通过连杆

和曲轴将活塞往复运动转换成旋转运动^[6]。当曲柄旋转时,由减速装置驱动的螺旋桨旋转,并通过螺旋桨产生推力。与曲轴相连的凸轮装置用于控制进气阀,排气门的定时开闭。活塞发动机结构如图1所示。

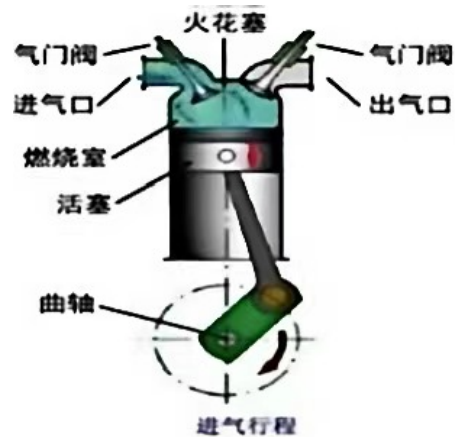


图1 活塞发动机结构^[6]
Fig. 1 Structure of piston engine^[6]

从20世纪40年代喷气式发动机出现后,由于其具有种种优势而逐渐取代了活塞式发动机。但是活塞式发动机仍有成本、油耗等优势,因此在中小型飞行器以及部分直升机上还有使用^[7]。

现代涡轮喷气发动机由进气道、压气机、燃烧室、涡轮及尾喷管等部件构成(如图2所示),对于军用涡喷发动机,在涡轮与尾喷管之间设置了一个加力燃烧室^[8]。涡轮喷气式发动机与内燃机类似,需要经过进气、增压、燃烧和排气四个步骤,只是分别在不同部件中连续完成,内燃机则是在气缸往复循环中依次完成^[9]。

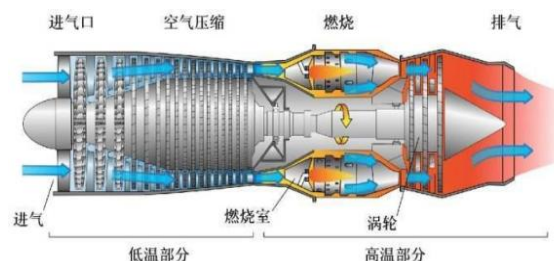


图2 涡轮喷气发动机结构^[8]
Fig. 2 Structure of turbojet engine^[8]

涡扇发动机是在涡喷发动机基础上改进的航空涡轮发动机,改进的地方是在传统的涡轮喷气发动机上增加了一级或若干级风扇,同时增加涡轮负荷或级数,为风扇提供驱动力^[10],如图3所示。

风扇出口将进气分成两个部分,一部分不通过燃烧而排放至大气(即外涵道)。目前用于飞机的涡轮风扇发动机可分为不加力式涡轮风扇发动机和加力式涡轮风扇发动机两种类型^[11]。

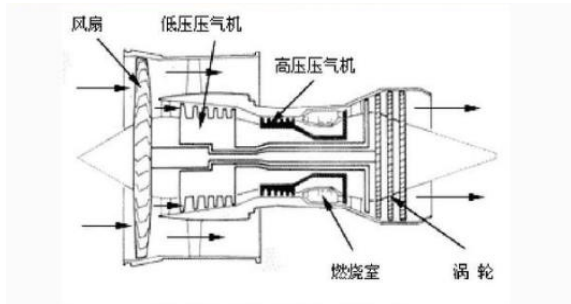


图3 涡轮风扇发动机结构^[10]
Fig. 3 Structure of turbofan engine^[10]

涡轮螺旋桨发动机,简称涡桨发动机,由螺旋桨和燃气发生器组成,螺旋桨由涡轮带动^[12]。由于螺旋桨的直径较大,转速要远比涡轮低,为使涡轮和螺旋桨都工作在正常的转速范围内,需要在它们之间安装一个减速器,将涡轮转速降至十分之一左右后,才可驱动螺旋桨^[13],如图4所示。由于涵道比大,涡轮螺旋桨发动机在低速下效率要高于涡轮风扇发动机,但受到螺旋桨效率的影响,它的适用速度不能太高,一般要小于800 km/h。在中低速飞机或对低速性能有严格要求的巡逻、反潜或灭火等类型飞机中的到广泛应用^[14]。

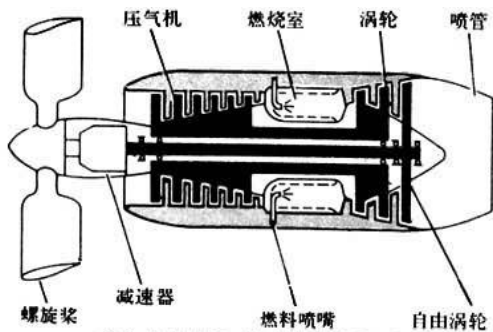


图4 涡桨发动机结构^[12]
Fig. 4 Structure of turboprop engine^[12]

涡轮轴发动机的工作和构造也是由涡轮风扇发动机的原理演变而来,涡轴发动机主要用于直升机(非固定翼飞机),涡扇发动机主要用于固定翼飞机^[15]。理论上,更大的旋翼直径可以带来更多的益处。对于一个给定的核心引擎产生相同的轴功率,若搭配更大直径的旋翼,那么该旋翼能产生更多的升力。然而,在实际中,旋翼的直径是受

限制的。一般而言,旋翼流过的空气量大约是涡轮轴发动机流过的空气量的500到1000倍^[16],涡轮轴发动机结构如图5所示。

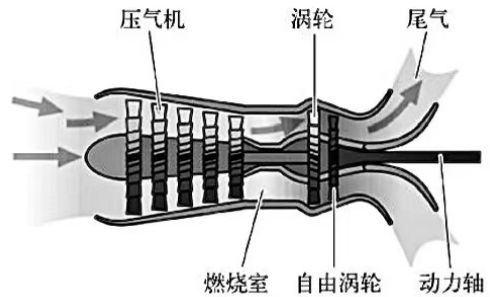


图5 涡轮轴发动机结构^[16]
Fig. 5 Structure of turboshaft engine^[16]

传统的化石燃料仍是当今人类社会使用的主要能源。但是化石燃料在提供动力和热能的同时,也在大量排放温室气体,如图6所示,在2019年地球的平均温度相比于20世纪中叶升高了约1℃,极地地区可达5℃以上^[17]。

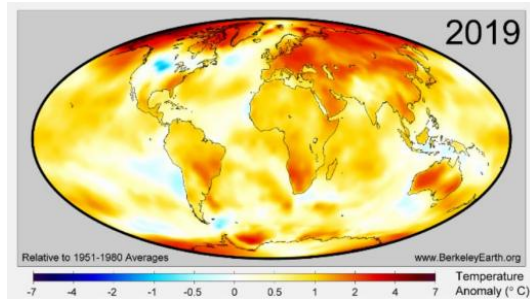


图6 2019年当地气温相对于20世纪中叶的气温^[17]
Fig. 6 Local temperatures in 2019 relative to those in the middle of the 20th century^[17]

由于传统的石油、煤炭等能源均属于不可再生资源,并且在开采和使用过程中会产生大量的污染和排放物,且出于绿色环保和经济发展的需要,除航空煤油之外,发展新的能源,成为未来的一个研究重点,同时也导致了对新航空动力或新能源探索^[18]。新燃料航空发动机,如氢燃料发动机、生物燃料发动机,天然气发动机等和新能源发动机:如太阳能,核能,燃料电池等发动机。

2 新能源航空发动机的研究现状

2.1 太阳能航空发动机

早在1974年,美国就已经研发出了太阳能无人机,1980年美国就将其列入了全国性的研究项

目,并在各个部门中进行了大量的研究。美国太空环境公司的无人驾驶太阳能无人驾驶飞机于1980年完成第一次飞行^[19]。全球首个完全由太阳能供电的太阳能驱动的“太阳挑战者”无人机,于2009年11月19号在瑞士瑞本多夫空军基地展出^[20]。第一个试验飞行了2公里,以9.26公里/小时的速度飞行。第一次试验只在跑道上进行,其目标是使其可以在20到25天内绕地球一周。随后,该机型于2010年4月7号被运送到位于瑞士西部的巴亚尼机场,用于其第一个飞行时间为2小时的飞行测试,该项目在瑞士州的巴亚尼机场完成。

2.2 核能航空发动机

根据其原子核反应的研究成果,美国空军在2003年开始研究长航时无人飞行器,并采用了核能/普通涡扇发动机联合驱动的技术。美国空军对“全球鹰”无人驾驶飞机进行了论证,并对其从传统的涡轮增压换成了核/化能源的混合涡轮增压引擎进行了研究^[21]。只有在“全球鹰”起飞,爬升,降落过程中,通常的涡轮风扇才会为其供电,而在冰层飞行至14 000米左右(45 000英尺)时,它就会转变成为一个核能扇发动机动。有了核/化能风扇引擎之后,“全球鹰”可以在空气中保持一个星期至数个月的航程。在进行侦查的同时,新的核能无人驾驶飞机也可以配备地面防空导弹。

另外,美国洛克希德·马丁公司也在秘密研制一种叫做“用于等离子约束的封装磁场”的小型聚变堆,它将会带来革命性的变化,并于2014年申请了专利^[22]。有一个潜在的可能性,这个反应器将被安置在战机上。在2018年,这家公司还申请到了更多用于小型融合反应器的专利。根据新闻报导,新的科技可以在近期内量产。

核能航空发动机已成为国际航空大国着重发展的方向,经历了从核裂变反应堆到量子核反应堆的演化过程。该技术在战略轰炸机、大型运输机、超音速巡航导弹、碟形空天飞机、无人机等多个应用领域进行了研发和实验研究。21世纪以来,伴随着新的核反应模式,新的作战模式如长航时无人驾驶飞机、远距离巡航飞行器的需求,重新点燃了全球对核动力航空发动机的研究热情,并

为其发展开辟了新的机遇^[23]。但是,目前我国在核动力航空领域的研究刚刚起步,仅仅在核反应堆小型化和核辐射屏蔽核心技术方面取得了重要突破,同时实现对核污染的有效治理,才能使我国核电航空发动机实现实际应用^[24]。

2.3 电动飞机发动机

随着电动汽车的普及和其他交通方式产生的温室气体排放量的减少,航空旅行对环境污染的影响变得更加显著。为了减少污染和维护,确保更便宜、更方便的飞行,工业界和学术界将努力转向飞机电气化。考虑到各种类型的飞机,已经提出了几种框架:多电动飞机(MEA)、混合动力飞机(HEA)和全电动飞机(AEA)^[25]。在20世纪40年代,Kilgore等人首次将电推进技术用于航空航天领域,并获得美国发明专利。

如图7所示,X-57麦克斯韦号是一款完全电力的电力驱动测试平台,美国NASA在2016年公布,它是在意大利P2006T型客机上进行改造的^[26]。与原版的X-57最大的区别在于,P2006T上的两个活塞式引擎被替换为十四个马达,十二个起落马达和两个驱动马达,都被安置在机身的前部和尾部,电力供应装置则被安置在机身内部。X-57具有大约161公里的最大飞行距离和大约1小时的持续时间^[27]。



图7 X-57麦克斯韦全电动飞机^[27]
Fig. 7 X-57 Maxwell all electric aircraft^[27]

如图8所示,ACCEL是一款全电动飞机,它是英国罗尔斯-罗伊斯公司于2019年推出的,它的目标是生产一种最快速的电动飞机,并将于2020年春天完成ACCEL的第一次飞行测试^[28-29]。

如图9所示,这款由法国空客公司于2013年首次在巴黎航空展上展示的纯电力型客机,同时也是全球首款完全依靠电力驱动的客机,在英吉

利海峡上空平稳飞行。2015年,空客公司建成了位于法国的二代E-Fan型纯电动客机总装生产线,并于2017、2019年陆续投产了两个座位型和四个座位型,此外,空客还将在2050年前实现100个座位的E-Fan型纯电动客机^[30]。



图8 ACCEL电动飞机^[29]

Fig. 8 ACCESS Electric Aircraft^[29]



图9 E-Fan全电动飞机^[30]

Fig. 9 E-Fan All Electric Aircraft^[30]

由辽宁通用航空研究所所属的沈阳航空航天大学开发的RX1E锐翔增程型飞行器是一种两座位的电动轻型运动航空器,它不仅是轻型运动飞行器的一个代表作,同时也标志着中国首次拥有了一款完全拥有自主知识产权的双座电动轻型运动飞行器^[31]。机身采用复合材料,推进器采用了碳纤维和单翼结构。这种飞机既环保又安静,还能大大提高飞行时间,飞行距离。此外,本机还装备有整套备份伞装置,极大地改善了飞行安全性^[32]。

2015年2月6号,辽宁通用航空研究所成功研发出一种新型动力轻型运动飞机RX-1E。空客集团于2015年7月12日宣称,它的E-fan技术验证机已穿越英吉利海峡。在此基础上,对其进行可行性分析、建模与设计等方面的研究也越来越引起人们的重视^[33-35]。

1974年11月4号,全球第一台由太阳能驱动的电力飞机获得了第一次飞行^[36],1980年5月18日,一名13岁的男孩用“Gossamer Penguin”进行了第一次载人飞行^[37]。2015年,瑞上的“阳光动力2

号”在绕地球一周中途径中国。

据不完全统计,全世界大约有100个以上的电动飞机计划在开发之中。通过系统的研究,并结合国际上的专家们的研究结果表明,电动飞机具有很大的发展空间,具有很好的环保、可靠性、安全性和经济性,并具有很好的发展前景^[38]。

2.4 燃料电池航空发动机

由于环境保护的原因,在航空领域中广泛使用的是氢燃料电池。氢燃料电池虽然具有很高的能量密度,但是其功率密度却很低,通常只能与高功率的锂离子电池相结合。德国航空航天中心在A320客机上加装了90千瓦氢燃料电池,用于带动机身前轮旋转,使其无需启动就能在地上滑动,节约燃油约15%^[39]。

世界上第一个由燃料电池控制的有人驾驶飞机于2009年七月在德国北方的汉堡进行了一次成功的飞行^[40]。这种燃料电池的飞行器可以持续5小时,航程750公里。它的燃料电池则是设置在尾部的隔板上。这款飞行器使用的是一种轻便的空气冷却电池,它可以把几百个燃料电池串联在一起,通过特殊的管路来引导电流。这种燃料电池型飞行器在环境保护方面有很多优点,它的飞行速度很慢,可以说是一种清洁的飞行器。

2012年12月,中国第一架纯燃料电池无人机“飞跃”,由同济大学 and 上海奥科赛飞机公司联合研发,在上海奉贤海域首次试飞成功。这种无人机可以在距离海平面2千米的高度上,以30公里/小时的速度,持续2小时^[41]。

2017年1月,由中国科学院大连化学物理研究所制造的20千瓦燃料电池系统提供动力的国内首架载人燃料电池飞行器已经完成了它的首次成功试飞,这一成就代表着中国在航空领域燃料电池技术上实现了重大突破,并成为继美国和德国之后,全球第三个掌握该领域技术的国家^[42]。

2010年,台湾大学成功试飞了岛内第一架燃料电池无人机“灰秃鹰”(图10a),总飞行时长为15 min^[45]。同济大学也同时开始进行燃料电池无人机的结构设计等理论研究^[43],2012年与上海奥科赛飞机公司共同研制了“飞跃一号”燃料电池无人机(图10b)^[46]。2014年,武汉众宇动力系统科技有限公司开发了“天行者”燃料电池无人机(图

10c)^[47]。2017年,优雷特(银川)航空技术有限公司和珠海天晴航空航天科技有限公司共同研制了首架氢燃料电池倾转旋翼无人机(图10d)^[48]。“蒲公英1-A”氢燃料电池无人机动力是“蒲公英”的燃料电池版(图10e),其目的是验证无人机氢燃料电池相关系统的可行性^[49]。2018年11月完成了80min飞行测试^[44]。



(a) 灰秃鹰^[45]



(b) 飞跃一号^[46]



(c) 天行者^[47]



(d) 倾转旋翼无人机^[48]



(e) 蒲公英1-A^[49]

图10 国内轻小型氢燃料电池无人机

Fig. 10 Domestic light and small hydrogen fuel cell drones

2.5 氢燃料航空发动机

由于航空业的增长速度预计将快于其他产生温室气体的行业,航空业的份额预计将在未来几十年大幅增长。因此,必须找到煤油的替代品。从替代燃料的前景来看,有许多候选燃料:液氢、液态甲烷、醇类如乙醇和甲醇,以及合成煤油^[50]。

氢燃料具有环保节能的优点,使用氢燃料产生的唯一排放物是水蒸气,不会污染环境且氢燃料的能量密度高^[51]。氢燃料具有可再生性,可以有效的解决化石燃料的短缺问题。氢燃料替代传统化石燃料作为航空发动机动力具有高功率密度和零碳排放的优点,是未来低碳时代下航空业的理想动力来源方式。

近几年,空客公司透露了其Zeroe氢能飞行项目的蓝图,该计划涉及使用燃氢技术,包含燃氢涡轮桨发动机、氢燃料电池以及燃氢涡扇发动机和氢动力的全涡轮电力系统。该项目旨在针对短途区域航线飞机和主流宽体喷气机都制定了详细规划,并且预计到2035年将把这些氢动力飞机推向商业运行。

2000年,空中客车公司领导着由34家航空企业和研究机构参与的“低温航线”项目,旨在系统分析以液氢为燃料的飞机方案。2005年,美国航空环境公司成功制造并测试了全球首架液氢动力无人机。日本在2017年和2019年分别发布了《氢基本战略》和《氢能利用进度表》,鼓励相关企业积极开发氢能飞机。2020年,欧盟委员会启动了“洁净天空计划”,旨在在2028年实现氢动力通勤飞机的认证和支线飞机的试飞,2035年完成中程氢动力飞机的开发,并在2050年完成中远程氢动力飞机的开发^[52]。

2010年,沈阳航空航天大学组建了通用航空重点实验室,并开始尝试制作氢燃料电池无人机。2012年,"雷鸟"氢燃料电池无人机完成首飞,成为我国首款氢燃料电池无人机。2017年,沈阳航空航天大学、中国科学院大连化学物理研究所联合研制了我国首架2座气燃料电池试验机并进行了试飞。2023年,沈阳航空航天大学研制的4座氢燃料内燃机飞机搭载了2L氢燃料内燃机完成首飞,成为我国首架以氢内燃机为动力的通航飞机。2023年,浙江氢航科技有限公司成功研发的氢动力多旋翼无人机通过了中国电力科学研究院有限公司的检测认证,其主要性能指标完全符合电力巡检所需的使用标准。

我国正与国际氢能飞机发展趋势同步,积极开展氢能飞机研发工作。辽宁通用航空研究院正专注于氢燃料电池与电池混合动力飞机技术攻关,北京航空航天大学则专注于燃冲涡轮发动机

PT6的氢燃料改型论证。同时,中国航天科技集团有限公司第六研究院第一〇一研究所负责氢制取液氢生产和轻质高效液氢燃料存储装置的研发,而哈尔滨工业大学与佛吉亚斯林达安全科技(沈阳)有限公司联合致力于高压气态储氢技术的研究。这些研究机构的综合技术水平已接近国际先进水平。能指标均符合电力巡检的使用要求^[53]。

针对通勤/远程氢能飞机,宋等人建立了TCO模型分析框架(如图11所示)^[54]。应用建立的TCO模型,测算了我国当前通勤/短程飞机的成本情况(如图12所示),目前,由于氢能飞机的研发尚处于初级阶段,其发展条件尚未完全成熟。在这种情况下,氢气价格仍然相对较高,导致燃料成本在氢能飞机的运营成本中所占比重较大,且电池系统的更换也带来了额外的成本。

		氢能飞机	纯电动飞机	燃油飞机
购买成本	毛利	在制造成本基础上的增量成本	在制造成本基础上的增量成本	在制造成本基础上的增量成本
	零部件成本加成	由于缺乏规模效益,氢动力系统部件和燃油车相比多出的额外成本加成	由于缺乏规模效益,非动力系统部件和燃油车相比多出的额外成本加成	无,已实现完全规模效益
	动力机	锂电池、电动机、氢内燃、氢涡轮、氢涡轮及相关组件	电动机及相关组件	内燃机
	储能组	氢罐、锂电池系统	电池、电池管理系统	油箱
	其他零部件	如螺旋桨、起落架、仪表系统		
运营成本	燃料费用	氢气价格×百公里耗气量	电价×百公里耗电量	油价×百公里耗电量
	基础设施	加氢站	充电站及相关设施	假设加油站成本已经体现在油价中
	维修费用	日常维护成本	日常维护成本	日常维护成本
	零部件替换	氢罐系统、锂电池替换成本	电池替换成本	内燃机替换成本
	其他	保险及其他费用		

图 11 通勤/短程氢能飞机TCO模型分析框架^[54]

Fig. 11 TCO Model analysis framework for commuter/short range hydrogen aircraft^[54]

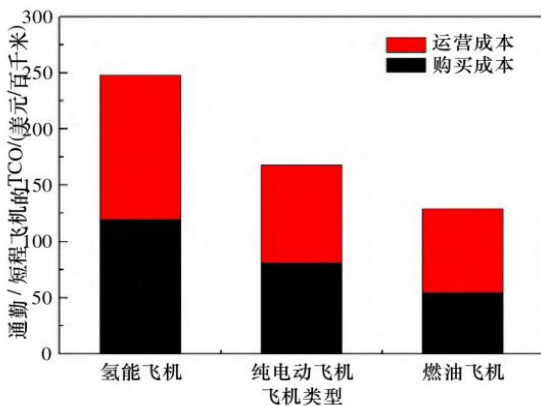


图 12 我国当前的通勤/短程飞机的成本情况^[54]

Fig. 12 Current Cost Situation of Commuter/Short Range Aircraft in China^[54]

2.6 生物燃料航空发动机

生物燃料属于可持续航空燃料(SAF)。近年来,对SAF的研究是一个热门话题,如图13所示,2001—2022年文献发表数量总体呈增长趋势,从2001年的8篇增加到2022年的388篇^[55]。累计发文章量曲线斜率呈上涨趋势。生物航空燃料的优点在于不仅可以满足传统航空燃料的基本特性而且生物航空燃料的原料在世界各地都有,生产过程不受地点限制。

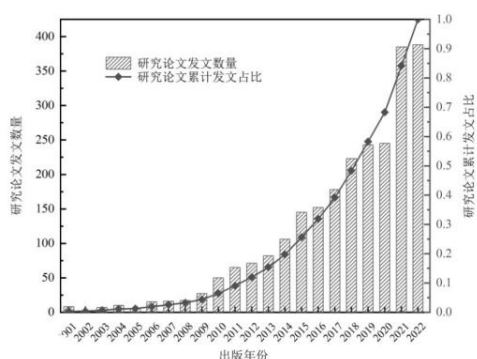


图 13 SAF 技术的年度研究论文发文数量及发文累积占比^[55]

Fig. 13 Annual number and cumulative proportion of research papers published on SAF technology^[55]

加氢处理的可再生喷气燃料(HRJ)或加氢处理酯和脂肪酸(HEFA)通常是化学式为 C_nH_{2n+2} 的链烷烃液体。加氢处理的可再生喷气燃料是高能生物燃料,即使不混合也可以作为燃料使用^[56]。其主要优势之一是减少温室气体的排放。HRJ不含芳烃和硫,具有高十六烷值、高热稳定性和低尾气排放。这些燃料储存稳定,耐微生物生长。利用可再生生物资源生产替代航空燃料是一项极具前景的技术,有望取代石油基燃料。液氢和液态甲烷燃料的使用是受欢迎的,但它们的高生产成本和对传统飞机发动机的不太适用性使它们不太受欢迎。出现了许多挑战,包括原料的可用性、替代燃料与传统燃料的兼容性、环境问题以及生产和分销问题。

天然气主要是甲烷,已被建议作为航空的替代燃料,液化天然气可以最大限度地减少油箱的重量和体积。之前已经进行了几项研究来评估液化天然气在亚音速飞机上的使用。最近,初创公司 Savion Aerospace 提出了一种商务涡轮螺旋桨飞机设计,巡航速度为 0.55 马赫,使用液化天然气。具体来说,创始人乔纳森·吉布斯(Jonathan Gibbs)声称,通过使用现有发动机并改造燃烧室以燃烧天然气,可以降低 75% 的开发成本,并且由于硫含量较低,维护成本降低了 15%^[57]。

2.7 天然气燃料航空发动机

液化天然气在航空业的实施有一些潜在的复杂性,需要首先解决^[58]。例如,除了管道外,机场还需要容纳大型液化天然气储罐或液化设施,以确保安全有效的添加燃料。此外,由于这种燃料

的特性,需要采取额外的安全措施。例如,在水中发生碰撞时,由于液化天然气与水的剧烈反应,不得让水进入储罐。如果这些障碍得到解决,世界可以从航空中使用液化天然气在经济和环境方面获得显著好处。

2.8 混合动力飞机

一般情况下,混合动力系统将燃油与电池结合起来,共同为飞机的动力推进及其各项系统供应所需的能量。空客、罗罗和西门子在 2017 年启动了 E-Fan X 混动飞机项目。该飞机选择了 BAE-146 飞机作为验证平台,并将其中一台发动机替换为功率为 2MW 的电动机^[59]。

3 总结与展望

为消减、根治日益恶化的全球温室效应问题,联合国制定了碳减排的全球经济社会发展战略。民航活动碳排放现占全球碳排总量约 2%,预计 2050 将占全球碳排总量 25%。为此,全电飞行器成为世界各国民航发展碳减排的基本路径。

全电飞行器技术是一项跨时代的高新技术,大力发展全电飞行器是解决能源与环境问题的有效途径^[60]。全电航空从净零排放、高效节能、智能互联的理念出发,优化飞行器的推进系统、控制系统、整体结构等性能,采用电能、氢能等全电取代传统化石能源,改变传统飞行器设计思想,是未来航空产业的发展方向。

因此,全面建设新能源航空发动机,必将大幅提高我国全电飞行器的质量和其对环境保护做出的贡献,提高我国全电航空产业的自给能力和核心竞争力,实现对国外企业的“弯道超车”,快速占领产业价值链的高端。

1) 太阳能无人机、核能航空发动机发展时间较短且相关技术不够成熟;各类电动飞机目前也仅能满足电动飞机的最低使用要求,未来发展也面临很多技术挑战;燃料电池具有诸多环境优势且效率远高于传统航空发动机,未来燃料电池有望取代飞机上的多个发电系统^[61];以氢燃料、液化天然气燃料为代表的新燃料航空发动机是极具前景的航空发动机技术,但也具有成本高等问题;生物航空燃料代表的是可持续航空燃料的一种,在未来一段时间内,可持续航空燃料的大规模应用

将成为航空业减少二氧化碳排放的主要驱动力。可持续航空燃料将成为替代传统航空燃油的首选。

2) 国家相关政策及发展纲要均表明,在未来一段时间内,大型飞机将综合运用新型气动布局、可持续航空燃料和混合动力等多种技术路径。同时,还将积极探索氢能源、液化天然气等技术路线,以进行前瞻性布局,促进未来产业的发展^[62]。目标是到2025年使用可持续航空燃料发动机的国产民用飞机要实现示范应用,到2035年新能源航空器成为发展主流^[63]。

3) 目前,全球的能源消费正朝着低碳化和无碳化的方向发展。研发对环境友好和经济性比较好的航空燃料是新能源航空发动机技术的目标^[64]。发展新能源航空发动机,对我国能源、交通、国防等方面的原创性科学技术具有重要意义,并且能够促进我国“双碳”战略的实施。随着科技的不断进步,新能源发动机技术也在不断创新,例如:燃料电池的效率改进、氢燃料技术等都在持续改进,以提高新能源发动机的效率、续航里程和可靠性。环保意识的提高和对气候变化的关注推动了新能源发动机市场的增长。新能源发动机的发展趋势是朝着更高效、更清洁、更可持续的方向发展,随着技术创新、市场需求和政策支持的不间断推动,预计新能源发动机在未来将逐渐取代传统燃油发动机,成为主流的动力来源之一^[65]。

参考文献

- [1] WANG Youwei, QIU Wujie, SONG Erhong, et al. Adsorption-energy-based activity descriptors for electrocatalysts in energy storage applications[J]. National Science Review, 2018, 5(3): 327-341.
- [2] ABDULLAH M A, CHEW B C, HAMID S R. Benchmarking key success factors for the future green airline industry [J]. Procedia Soc., 2016, 224: 246-253.
- [3] HWANG J, CHOI J K. An investigation of passengers' psychological benefits from green brands in an environmentally friendly airline context: The moderating role of gender [J]. Sustainability, 2018, 10(1): 80.
- [4] MOLINA S, NOVELLA R, GOMEZ S J, et al. New combustion modelling approach for methane-hydrogen fueled engines using machine learning and engine virtualization [J]. Energies, 2021, 14(20): 6732.
- [5] 敖灿, 张文俊. 关于飞机磁电机绝缘电阻值低问题的分析与研究 [J]. 科技创新与应用, 2015(24): 1.
AO Can, ZHANG Wenjun. Analysis and research on the low insulation resistance of aircraft magneto [J]. Science and Technology Innovation and Application, 2015(24): 1. (in Chinese)
- [6] 付晓明. 活塞发动机 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 30-60.
FU Xiaoming. Piston engine [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016: 30-60. (in Chinese)
- [7] RUFFLES P C. Innovation in aero engines [J]. The Aeronautical Journal, 1996, 100(1000): 472-484.
- [8] RITCHIE H, ROSER M. CO₂ and Greenhouse Gas Emissions [EB/OL]. (2016) [2020]. <https://ourworldindata.org/co2-and-othergreenhouse-gas-emissions/>.
- [9] 许硕, 袁海泉. 现代涡轮喷气发动机的物理原理 [J]. 物理通报, 2022(4): 4.
XU Shuo, YUAN Haiquan. Physical Principles of Modern Turbojet Engines [J]. Physics Bulletin, 2022, (4): 4. (in Chinese)
- [10] 司古. 美利坚大国地位的动力基石 [J]. 航空知识, 2010. 5(3): 122-123.
SI Gu. The Power Cornerstone of America's Great Power Status [J]. Aviation Knowledge, 2010. 5(3): 122-123. (in Chinese)
- [11] 彭友梅. 苏联/俄罗斯/乌克兰航空发动机的发展 [M]. 北京: 航空工业出版社. 2015: 687.
PENG Youmei. Development of Aircraft Engines in the Soviet Union/Russia/Ukraine [M]. Beijing: Aviation Industry Press. 2015: 687. (in Chinese)
- [12] 许春生. 燃气涡轮发动机 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2006: 56.
XU Chunsheng. Gas Turbine Engine [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 2006: 56. (in Chinese)
- [13] 涡轮风扇发动机. 中国科普博览 [EB/OL] 2019-06-25 [2024-03-21]. <https://www.kepu.net.cn/gb/beyond/aviation/knowledge/kno236.html>
engineTurbofan. China Science Popularization Expo [EB/OL] 2019-06-25 [2024-03-21]. <https://www.kepu.net.cn/gb/beyond/aviation/knowledge/kno236.html>. (in Chinese)
- [14] 朱伟锋. 赛斯纳208多用途飞机(上) [J]. 航空知识, 2006, 5(2): 66-68.
ZHU Weifeng. Cessna 208 Multipurpose Aircraft (Part 1) [J]. Aviation Knowledge, 2006, 5(2): 66-68. (in Chinese)
- [15] 涡轮螺旋桨发动机. 中国科普博览 [EB/OL]. 2019-06-25 [2024-03-21]. <https://www.kepu.net.cn/gb/beyond/aviation/knowledge/kno237.html>
enginesTurboprop. China Science Popularization Expo [EB/OL]. 2019-06-25 [2024-03-21]. <https://www.kepu.net.cn/gb/beyond/aviation/knowledge/kno237.html>. (in Chinese)
- [16] 查理. 涡轮轴发动机技术 [J]. 国防科技, 2004, 4(2): 5.
LiCHA. Turboshift Engine Technology [J]. Defense Technology, 2004, 4(2): 5. (in Chinese)
- [17] 涡轮轴发动机. 中国科普博览 [EB/OL]. 2019-06-25

- [2024-03-21] <https://www.kepu.net.cn/gb/beyond/aviation/knowledge/kno236.html>
engineTurboshaft. China Science Popularization Expo [EB/OL]. 2019-06-25 [2019-06-25] <https://www.kepu.net.cn/gb/beyond/aviation/knowledge/kno236.html>. (in Chinese)
- [18] ANTOSHKIV O, POOJITGANONT T, JEHRING L, BERKHOLZ C. Main aspects of kerosene and gaseous fuel ignition in aero-engine[J]. The Aeronautical Journal. 2017, 121(1246):1779-1794.
- [19] 李有浩, 京秋. 新型太阳能无人机“百人队长”号[J]. 航空知识, 1999, 2(2):2.
LI Youhao, JING Qiu. New type of solar powered unmanned aerial vehicle "Captain 100" [J]. Aviation Knowledge, 1999, 2(2): 2. (in Chinese)
- [20] SchefferJim, 臧友松. 太阳能挑战者[J]. 世界科学, 1983. SchefferJim, ZANG Yousong. Solar Challenger [J]. World Science, 1983. (in Chinese)
- [21] 周义, 王自焰, 庞海东, 等. 大气层侦察卫星——全球鹰无人机的应用与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2003, (11):26-29. ZHOU Yi, WANG Ziyang, PANG Haidong, et al. Atmospheric Reconnaissance Satellites - Application and Development Trends of Global Eagle Drones [J]. Aviation Missile, 2003, (11): 26-29. (in Chinese)
- [22] 大卫·塔波特. 洛克希德马丁真的取得了核聚变反应堆突破?[J]. 科技创业, 2014, (11):2.
Did David Tapote. Lockheed Martin really achieve a breakthrough in nuclear fusion reactors? [J] Technology Entrepreneurship, 2014, (11): 2. (in Chinese)
- [23] 江和甫, 蔡毅, 斯永华. 对航空发动机研究和发展规律的认识[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2001, 14(3):4.
JIANG Hefu, CAI Yi, SI Yonghua. Understanding of Research and Development Laws of Aircraft Engines [J]. Gas Turbine Testing and Research, 2001, 14(3): 4. (in Chinese)
- [24] 叶蕾, 赵学成. 核能航空发动机的发展[J]. 飞航导弹, 2009, 5(4):6.
YE Lei, ZHAO Xuecheng. Development of Nuclear Aviation Engines [J]. Aviation Missile, 2009, 5(4): 6. (in Chinese)
- [25] BUTICCHI G, WHEELER P and BOROYEVICH D. The More-Electric Aircraft and Beyond [J]. Proceeding of the IEEE. 2023, 111(4):356-370
- [26] 匡宇, 张邦楚, 姜鹏, 等. 国外全电动飞机的研究现状与发展趋势[J]. 飞航导弹, 2021, 6(3):93-98.
KUANG Yu, ZHANG Bangchu, JIANG Peng, etc Research Status and Development Trends of All Electric Aircraft Abroad [J]. Aviation Missile, 2021, 6(3): 93-98. (in Chinese)
- [27] 王秒香, 王元元. 电动飞机的误解分析与研究综述[J]. 航空科学技术, 2018, 30(5):3-8.
WANG Mianxiang, Wang Yuanyuan. Misunderstanding Analysis and Research Review of Electric Aircraft [J] Aviation Science and Technology, 2018, 30(5): 3-8. (in Chinese)
- [28] None. 罗尔斯-罗伊斯领导打造世界最快的全电动飞机[J]. 中国民用航空, 2019, (2):1.
None. Rolls Royce leads the world's fastest all electric aircraft [J]. Civil Aviation of China, 2019, (2): 1. (in Chinese)
- [29] LIN Z M, CHINA A I C O. Making aviation green [J]. Advances in Manufacturing, 2013.
- [30] 王腾飞, 寇淑然, 任柏春, 刘佩佩. 电动航空器发展状况分析[J]. 科技视界, 2022, (23):25-27.
WANG Tengfei, KOU Shuran, REN Baichun, LIU Peipei. Analysis of the Development Status of Electric Aircraft [J]. Science and Technology Vision, 2022, (23): 25-27. (in Chinese)
- [31] 航咖. 航咖飞机评测: 沈阳造锐翔纯国产电动飞机, 飞行2小时成本仅需40元 [EB/OL]. (2018.12.26) [2024.03.21]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1620882201-653168072&wfr=spider&for=pc>
HANG ka. Hangka Aircraft Evaluation: Shenyang made Ruixiang pure domestic electric aircraft, with a 2-hour flight cost of only 40 yuan [EB/OL] (December 26, 2018) [2024.03.21] <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1620882201653168072&wfr=spider&for=pc>. (in Chinese)
- [32] AKTAS, DENSU. General Aviation Electric-Powered Aircraft Feasibility [C] // Aiaa Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum & Aerospace Exposition. Nashville: 2012
- [33] TAKAHASHI K, FUJIMOTO H, HORI Y. Modeling of propeller electric airplane and thrust control using advance of electric motor [C] // IEEE International Workshop on Advanced Motion Control. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2014: 482-487.
- [34] STEINER H, VRATNY P C, GOLOGAN C, et al. Optimum number of engines for transport aircraft employing electrically powered distributed propulsion [J]. CEAS Aeronautical Journal, 2015, 5(2):157-170.
- [35] BOUCHER R. Sunrise the world's first solar-powered airplane [J]. Journal of Aircraft, 1985, 22(10):840-846
- [36] MACCREADY P B, LISSAMAN P B S, MORGAN W R, et al. Sun-powered aircraft design [J]. Journal of Aircraft, 1983, 20(6):487-493.
- [37] 齐汀. X-57: NASA的下一个里程碑[J]. 大飞机, 2016, (05):63-65.
QI Ting X-57: NASA's Next Milestones [J]. Big Aircraft, 2016, (05): 63-65. (in Chinese)
- [38] 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 Challenges of New Energy Electric Aircraft [J]. Journal of Aviation, 2016, 37(1): 57-68. (in Chinese)
- [39] 高育红. 燃料电池飞机[J]. 能源研究与利用, 2009(5):37-37.

- GAO Yuhong. Fuel Cell Aircraft [J]. Energy Research and Utilization, 2009, (5): 37. (in Chinese)
- [40] 佚名. 世界首架“零排放”飞机起飞[J]. 环境监测管理与技术, 2009,(4):1.
Anonymous. The world's first "zero emission" aircraft takes off [J]. Environmental Monitoring Management and Technology, 2009, (4): 1. (in Chinese)
- [41] 伍赛特. 燃料电池应用于航空推进领域的前景展望[J]. 能源研究与管理, 2018,(4):89-91.
WU Saite. Prospects for the application of fuel cells in the field of aviation propulsion [J]. Energy Research and Management, 2018, (4): 89-91. (in Chinese)
- [42] 冯诗愚, 周利彪, 朱珍昱, 等. 双齿气体循环泵基本几何理论和容积计算[J]. 航空动力学报, 2020, 35(9):7.
FENG Shiyu, ZHOU Libiao, ZHU Zhenyu, et al. Basic geometric theory and volume calculation of double tooth gas circulation pumps [J]. Journal of Aerodynamics, 2020, 35 (9): 7. (in Chinese)
- [43] NONE. Fuel cell/battery hybrid UAV takes off in taiwan [J]. Fuel Cells Bulletin, 2010, (6):4-5.
- [44] 许震宇, 卢强. 燃料电池轻型飞机起飞质量估算方法[J]. 飞机设计, 2011, 31(3):6-8.
XU Zhenyu, Lu Qiang. Estimation Method for Takeoff Mass of Fuel Cell Light Aircraft [J]. Aircraft Design, 2011, 31 (3): 6-8. (in Chinese)
- [45] 许震宇, 李斌. 某型燃料电池无人机结构设计[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010, 16(6):55-58
XU Zhenyu, LI Bin. Structural design of a certain type of silent battery unmanned aerial vehicle [J]. Fiberglass/Composite Materials, 2010, 16(6):55-58. (in Chinese)
- [46] 许震宇. 同济主持研制首架燃料电池无人机试飞成功[EB/OL]. (2012. 12. 19)[2024. 3. 21]
XU Zhenyu, led by Tongji, developed the first fuel cell unmanned aerial vehicle test flight (EB/OL). (2012. 12. 19) [2024. 3. 21]. (in Chinese)
- [47] 佚名. "天行者"燃料电池固定翼无人机[J]. 航空模型, 2016,(011):000
Anonymous "Skywalker" fuel cell fixed wing unmanned aerial vehicle [J]. Aviation Model, 2016, (011):000. (in Chinese)
- [48] 刘莉, 曹潇, 张晓辉, 贺云涛. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3):623474-623474.
LIU Li, Cao Xiao, Zhang Xiaohui, et al. Review of the Development of Light and Small Solar/Hydrogen Energy Drones [J]. Journal of Aeronautics, 2020, 41 (03): 6-33. (in Chinese)
- [49] 刘倩. 燃料电池无人机电堆控制系统研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019
LIU Qian. Research on Fuel Cell Drone Stack Control System [D] Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [50] 戴领. 基于模型预测的燃料电池无人机能源管理策略研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
DAI Ling, Research on Energy Management Strategies for Fuel Cell Drones Based on Model Prediction [D] Beijing: Beijing Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [51] 梁新成, 刘鹏, 张志冬, 等. 基于燃料电池汽车氢气制备研究[J]. 交通节能与环保, 2022,(2):18.
LIANG Xincheng, LIU Peng, ZHANG Zhidong, et al. Research on Hydrogen Preparation for Fuel Cell Vehicles [J]. Transportation Energy Conservation and Environmental Protection, 2022, (2): 18. (in Chinese)
- [52] HAGLIND F, HASSELROT A, SINGH R. Potential of reducing the environmental impact of aviation by using hydrogen Part I: Background, prospects and challenges. The Aeronautical Journal (1968). 2006, 110(1110):533-540.
- [53] 张晓东, 宋寒冰. 未来飞机的新动力[J]. 大飞机, 2023, (11):15-18.
ZHANG Xiaodong, SONG Hanbing. New Power for Future Aircraft [J]. Big Aircraft, 2023, (11): 15-18. (in Chinese)
- [54] 宋薇薇, 杨凤田, 项松等. 氢能飞机研制进展及产业化前景分析[J]. 中国工程科学, 2023, 25(5):192-201.
SONG Weiwei, YANG Fengtian, XIANG Song et al. Analysis of the Development Progress and Industrialization Prospects of Hydrogen powered Aircraft [J]. China Engineering Science, 2023, 25 (5): 192-201. (in Chinese)
- [55] Gibbs J, Nagel B. Design, Economic Competitiveness, and Profitability of a 2025 LNG Fueled Turboprop for the LNG Air Transportation System [C]//Aiaa Aerospace Sciences Meeting, San Diego, CA, USA. 2016:1-13
- [56] 蒋采玲. 水热转化高级脂肪酸为长链烷烃[D]. 上海: 上海交通大学, 2024
JIANG Cailing. Hydrothermal conversion of advanced fatty acids into long-chain alkanes [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2024. (in Chinese)
- [57] 王洪悦. 喷射策略和燃烧室形状对天然气发动机燃烧特性的影响研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2020.
- [58] 谢鹏. 空客呼吁绿色飞行[J]. 商务周刊, 2008,(9):1.
XIE Peng. Airbus calls for green flight [J]. Business Weekly, 2008, (9): 1. (in Chinese)
- [59] 欧盟. 氢动力航空: 基于事实的氢能技术、经济与2050年气候影响研究[M]. 卢森堡: 欧盟出版办公室, 2020.
EU. Hydrogen powered aviation: Fact based hydrogen technology, economy, and 2050 climate impact research [M]. Luxembourg: EU Publishing Office, 2020. (in Chinese)
- [60] 钱伯章译. 东丽为革命性的全电动飞行器提供碳纤维复合材料[J]. 合成纤维, 2020, 49,(9):1.

(编辑: 马文静)