航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jan. 25 2024 Vol. 35 No.01 2-14

固定翼民机的新能源关键技术研发现状与展望

雷国东，徐悦，陈少军，朱海涛，段辰龙，吴耕宇
中国航空研究院，北京 100012

摘　要：新型能源的存储、运输及转化是制约新能源固定翼民机发展的主要“瓶颈”和关键技术，如动力电池的质量能量密度过低导致储能重量过大是制约全电新能源民机发展的“瓶颈”，氢气的体积能量密度过低导致的储能容积过大以及运输困难问题是制约氢能新能源飞机发展的“瓶颈”；可持续航空燃料（SAF）民机的应用则主要受到SAF的转化成本制约。能源到推进的转化（如纯电能推进、氢燃料电池电机推进及油电混动推进）存在的主要问题是高功率密度与大功率电机的研制，使用分布式电推进技术可以部分地解决这类电机问题，但氢燃料电池的质量与体积功率密度仍然是阻碍其在大型飞机上推广应用的主要制约因素，使用氢气作为航空发动机的燃料则不仅存在高压或低温燃料运输及在飞机上存储的技术问题，氢燃料的特殊理化性质也会带来有别于液体碳氢燃料的特殊安全性问题。本文对比和归纳了几种替代能源在民用航空器上应用的可能性，推论得到绿色SAF或液化天然气（LNG）类碳氢燃料，相对直接使用液氢燃料更具可行性，即绿氢与直接大气捕获二氧化碳的化工或生物合成燃料更具可行性，可作为新能源航空器发展的参考和指导。

关键词：质量能量密度；体积能量密度；SAF；功率密度；分布式电推进

中图分类号：V27　　**文献标识码：**A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2024.01.001

航空新能源是指相对于传统化石能源（如航空煤油等）而言的新型能源，主要包括太阳能、纯电能、油电混动、氢能源、可持续航空燃料等非传统航空能源[1-3]。新能源飞机是指利用这些非传统航空能源能够实现携带指定商载飞行指定距离的新型能源飞行器。目前，新能源固定翼航空器发展方向呈现出多样化，因此必须优选出具有工程可行性、安全性、经济性的技术发展方向，以为新能源固定翼航空器发展提供一定的参考和指导。

尽管新能源飞机出于各种原因目前很难替代常规化石能源飞机，但是随着世界新能源技术的研发以及“双碳”政策的推进，新能源飞机将会逐渐具有市场竞争力，并成为世界主要航空强权争相研发的重点方向之一。在未来大型民用飞机的发展规划上，欧洲空客公司的研发思路较为乐观，重点布局发展液氢能源的新型客机，空客公司最近公布了多种布局和级别的液氢能源飞机概念设计，德国航空航天研究院（DLR）更是大力开展基于氢燃料推进的航空发动机技术研发；美国波音公司认为氢燃料存在低密度、低温、易爆、氢脆等安全问题，氢气的制造到储存与运输技术仍然任重道远，尤其是需要对现有飞机框架进行比较深层次的改造设计，因此重点布局了基于可持续航空燃料（SAF）的客机，包括生物合成航空燃料与电能合成航空燃料，而将液氢新型飞机作为一种长远未来的储备航空技术。生物合成SAF甚至包括生物甲烷（CH_4）这种极易生成的生物燃料，电能合成航空燃料则需辅助碳捕获技术利用从大气或工厂得到的二氧化碳结合电能制造的氢气，通过催化剂合成航空燃料，最易合成的还是甲烷燃料。而基于SAF的民用飞机，无论是掺混部分SAF还是完全SAF的民用飞机目前均已试飞成功，但是常温液态SAF产量不足且价格过高是限制其大规模应用的主要问题，液氢的市场终端价格过高也是推广氢能源飞机的主要障碍之一。

收稿日期：2023-07-21；退修日期：2023-10-23；录用日期：2023-12-07
基金项目：航空科学基金（2019ZA004003）；中国航空研究院五性自立科学基金（ZC272006201）；电功率兆瓦级新能源航空器关键技术（2022YFB4300200）
引用格式：Lei Guodong, Xu Yue, Chen Shaojun, et al. Research and development status and prospect of the alternative energy key technologies for the fix-wing civil aircrafts[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(01): 2-14. 雷国东，徐悦，陈少军，等. 固定翼民机的新能源关键技术研发现状与展望[J]. 航空科学技术，2024，35(01)：2-14.

本文主要论述了固定翼民机可能用到的各种替代能源的国内外发展现状、关键技术和主要的技术优劣势，以及可能的应用场合分析，对比与归纳了各种形式应用的可行性、经济性与安全性等，初步推论得到相对直接使用绿色液氢，绿色SAF或液化天然气（LNG）类碳氢化工合成或生物合成燃料更具可行性、经济性和安全性。

1 太阳能飞机

太阳能飞机主要利用太阳能电池板的光电转换提供能量供给电动机，驱动飞机飞行，太阳能的分布密度极低且具有随时间、空间变化的特点，太阳能飞机一般设计为具有极大机翼面积但起飞总重量（质量）极低的形式。尽管其载重能力较差，但是作为长航时侦察观测类飞机却十分有效，如实现长时间地监测森林火灾等。

1.1 关键技术

太阳能飞机的核心技术是轻质、高强度且高效率太阳能电池板，同时也需要高功率密度电动机，以提高太阳能飞机的发电和推进装置功率密度、减少飞机的起飞总重。由于太阳能飞机的起飞总重一般比较低，推进功率有限，推进装置功率密度过低导致的矛盾一定程度上不是特别突出，采取分布式电推进技术可以部分地缓解对高功率电机的需求。

1.2 应用场合

太阳能飞机适宜作为轻型大展弦比长航时无人机应用，用于观测、探测、侦察或通信中继等作业目的，如可作为“伪卫星”长时间实时监测局部地区等。

1.3 优劣分析

太阳能成本低廉且来源无限，采用轻质材料制作的飞行器易于实现极长航时的高空飞行，但是太阳能过于分散，随时间与空间、纬度变化，能量密度过低，难以应用于起飞重量和商载较大的重型飞行器，适宜应用于机翼面积极大、起飞总重较小的长航时侦察与观测型的低速无人机。

1.4 国内外研究现状

太阳能飞机在国内外目前已经广泛涌现，如美国国家航空航天局（NASA）的“太阳神号”、瑞士探险家皮卡德制造的“阳光动力2号”、国产的“启明星”与“墨子II型”太阳能飞机等，如图1~图3所示。随着太阳能电池技术的进步，更多性能更优良的太阳能飞机将会出现。这类飞机一般采用大展弦比平直翼设计，以适应低速飞行下的极高气动效率。为弥补此类飞机电推进能力不足，机翼表面铺设高效率太阳能电池板以充分吸收太阳的辐射能量，这类技术方案几乎是太阳能飞机的唯一形式。

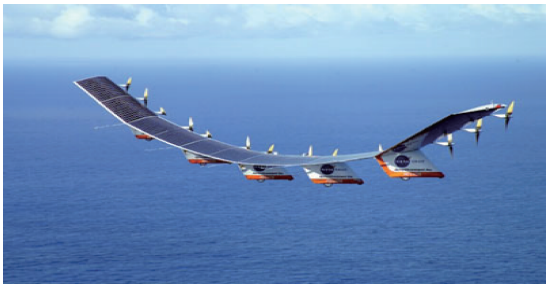


图1 NASA“太阳神号”飞机

Fig.1 The solar energy plane “Apollo” of NASA

图2 “阳光动力2号”太阳能飞机

Fig.2 The solar energy plane of “Sun Power II”

(a) “启明星”太阳能飞机

(b) “墨子Ⅱ型”太阳能飞机

图3 “启明星”飞机和“墨子II型”飞机(国产)

Fig.3 The domestic solar energy plane of “Venus” and “Mozi II”

2 全电动飞机

全电动飞机是指采用动力电池作为主要推进飞行能源，

采用电动机驱动推进装置飞行的新能源飞机。全电动飞机的优点是飞机本身不排放含碳化合物和氮氧化合物，非常清洁与环保，而且由于电能来源广且十分廉价，燃料使用成本极低。但是，目前的动力电池质量能量密度过低，实用能量密度处于250W•h/kg的量级，全电动飞机只能设计为轻型短途通用飞机，大型运输类飞机的全电化需要在动力电池的能量密度和电机的功重比等关键技术上取得突破性进展。

2.1 关键技术

目前，限制全电动飞机应用发展的主要技术“瓶颈”是缺乏高质量与高体积能量密度的动力电池，与油动飞机竞争也需要有高功率密度及大功率的电动机。因此，可以采用分布式电推进技术部分解决缺乏单个大功率电动机的问题，分布式电推进技术虽然增加了推进系统的复杂性，但是可以显著提升推进系统的推进效率，具有优良的节能效果，这是一种以总体气动设计技术弥补飞行器所需的动力电机功率不足的设计思路。

2.2 应用场合

受限于动力电池的能量密度，目前全电动飞机仅适用于低成本短途飞行的小型通用飞机，一个典型应用场景是在美国的五大湖地区进行低成本的短途飞行，因为受地理条件限制，陆路的汽车需要绕行很长距离，而水面的船舶则速度太慢，能够直接飞越五大湖区实行点对点交通的全电动飞机很适合此地交通。其实，国内也有类似的地理区域，如北京所处的环渤海区域，由山东半岛、辽东半岛、北京、天津及河北省沿海区域构成，此地属于人口密集区域，陆路由大连到烟台需要绕行很长距离，海上直线距离虽只有约190km，却需要6h，因此全电动飞机是有市场竞争优势的。中国类似的地理单元还有珠三角、长三角、杭州湾、台湾海峡两岸、鄱阳湖与洞庭湖周边区域，同样是人口密集，但这些地区跨越水面的陆地交通系统也很发达，珠三角与长三角、台湾海峡两岸人口过于密集，全电动飞机或可很好地发挥能源成本低的优势，用于缓解这些地区的地面交通拥堵、水面交通过慢的情况。

2.3 优劣分析

假设所用电能来自清洁能源，全电动飞机的优势是本身绝对清洁无污染，能源系统完全没有二氧化碳和氮氧化合物排放（不考虑滑油蒸发燃烧之类），能源成本低廉；其劣势是动力电池质量能量密度不足，导致航程较短，空机重量系数过大而商载系数较低，较难应用于起飞总重较大的运输类飞机。

2.4 国内外研究现状

据NASA官网报道，X–57采用了独特的分布式电推进系统，在轻型通用飞机、支线客机等类型上具有较好的应用前景，对全电动飞机技术实用化并投入商业运营是一次非常有价值的探索，X–57 Maxwell飞机由4座轻型燃油动力飞机“TecnamP2006T”改型而来，其两台Rotax912S3四缸活塞式发动机被12台电动机取代，如图4所示。但是，最近X–57飞机项目出于各种原因已被NASA取消。

图4　NASA的X–57全电飞机

Fig.4　The X–57 plane of NASA

空客的E–Fan全电动飞机采用全碳纤维复合材料结构，翼展约为9.5m，机身长约6.7m，重约600kg，内设前后两个座位，如图5所示。该飞机配备两台发动机，由锂离子电池驱动，在电池充满电的情况下可飞行45~60min，最高飞行高度为1000m，最快飞行速度可达220km/h。E–Fan全电动飞机在2013年巴黎航展上首次展出，并在2015年展示了飞跃英吉利海峡的能力。

图5　空客的E–Fan飞机

Fig.5　The E–Fan plane of Airbus

国内锐翔全电动飞机自2017年开始研发，采用了双门四座的布局，全身采用了77%的复合材料，相比传统金属材料，锐翔全电动飞机具有重量轻、耐腐蚀等特点。由于搭载锂电池最大功率为140kW，最大续航里程为300km，而且即便是在坑洼不平的路面上也能顺利起飞。锐翔全电动飞机速度可达160km/h，在空中电量不足时可打开整体降落伞缓慢降落，如图6所示。

图6 锐翔国产全电动飞机

Fig.6 The domestic all-electric plane Ruixiang

3 油电混动飞机

油电混合动力飞机的最终设计目的是形成“烧油—发电—电机推进”的能量利用方式；利用电机自身的特性（如效率远高于热机、对尺寸不敏感等）以及特殊的总体气动设计机理、能量回收等技术弥补油电转化的额外能量损失，实现飞机总体性能在设计效率上的突破革新。弥补油电转化能量损失的飞机总体气动设计机理如边界层吸入（BLI）式推进技术、分布式电推进，或在航空发动机低效的机场滑行和低空飞行时由纯电驱动等策略，这些措施造成的能量节省超过了油电转化相对于直接油动推进的能量损失，这些是油电混动类飞机节油的基本逻辑和机理。

3.1 关键技术

油电混合动力飞机需要有高功重比发电机与高功重比电动机技术，以避免飞机空重比过大，因为现有的常规发电机与电动机的功重比要差于现有航空发动机；边界层吸入、分布式电推进、能量回收、航发低效阶段纯电推进等总体气动技术必须能弥补油电转化过程相对于纯油动力的能量转化损耗。

3.2 应用场合

油电混动技术一般适用于中小型飞机，受限于发电机、电动机等电力系统的功率与功率密度，仍然无法与燃油航空发动机比拟，而小型飞机对功率与功率密度的要求较低，现有的较低功重比的电力驱动系统也可以满足。

3.3 优劣分析

相对纯油动飞机，油电混动飞机的比油耗可以显著降低，因其特殊的总体气动设计及能量回收等技术使高效率的电能推进充分得到利用，因而具有十分显著的节油能力；相对于全电动飞机，油电混动飞机的航程可以轻松达到纯油动飞机的标准而没有“续航焦虑”。但油电混动飞机的不足是动力电池与发电及电动系统的重量压低了舱内商载比例，动力电池与电动机的功率及功率密度不足导致只能采用分布式电推进给予弥补，导致空机重量系数进一步增加。

3.4 国内外研究现状

目前，国内外有大量油电混动小型通航飞机出现，如图7~图12所示。对于大中型民机，主要的商用飞机公司（如波音与空客公司）均提出了多项概念方案，包括分布式推进、边界层吸入式推进、支撑翼及翼身融合布局等，但边界层吸入式推进因边界层内的低能气流严重畸变可能会损伤压气机而进展缓慢，分布式电推进技术则受限于动力电池功率密度不够、发电机与电动机等电力系统的功率与功率密度不足；航发低效阶段采用电力推进而巡航采用航发推进的小型通用飞机技术比较成功，这类飞机对电力系统的功率与功率密度以及动力电池的总能量要求不高，大中型油电混动民机市场化需要动力电池及发电机与电动机等系统在功率、功率密度等关键参数上取得较大的技术突破。

图7 国内首款油电混动飞机（山河科技SA60L）

Fig.7 The first domestic hybrid fuel–electric plane (SA60L form Shanhe technology company)

图8 奥地利钻石飞机公司的油电混动DA40飞机

Fig.8 The hybrid fuel-electric plane DA40 of the Diamond plane company, Austrian

4 SAF飞机

SAF是指通过生物合成或化学合成制造的碳氢化合物

图9 “日本飞机开发协会”5MW级混动客机

Fig.9 The 5MW hybrid fuel–electric plane of Japan Aircrafts Development Company

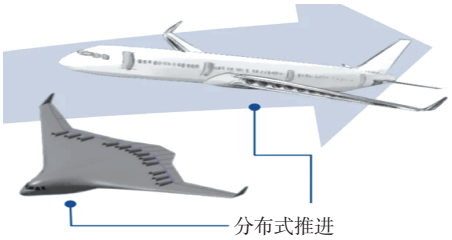


图10 借助边界层吸入式推进或分布式电推进弥补油电转化的能量损失

Fig.10 The BLI and distributed propulsion technologies to cover the energies conversion loss

图11 波音油电混动支撑翼民机概念

Fig.11 The braced wing civil plane of hybrid fuel-electric propulsion of Boeing

燃料，这类燃料中的碳来自大气圈或生物圈，而不是类似化石燃料来自地壳，使用SAF全生命周期分析并不会增加大气和生物圈中的温室气体总量，如利用玉米、麻风树种子及微藻等制造航空煤油，利用从大气或工厂中捕获的二氧化碳，结合清洁电能电解的氢气通过催化剂合成甲烷、甲醇、航空煤油等，并没有将地壳中的化石能源中的碳释放于大气圈或生物圈，而是利用了“循环碳”，因此制造某些SAF存储起来反而有“碳汇”的效果，如图13所示。用玉米等粮食作物制作燃料具有与人类争食的典型害处，尽管某些国家

图12 空客油电混动边界层吸入推进民机概念

Fig.12 The BLI technologies used in the hybrid fuel–electric propulsion civil plane of Airbus

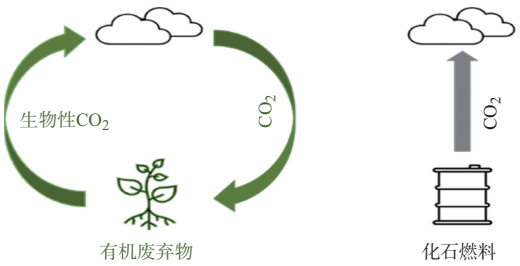


图13 “碳循环”与“碳排放”

Fig.13 The carbon cycling and emission

粮食充足，但仍然有大量人类处于挨饿状况，所以这种生物燃料是不人道的科技；用麻风树种子合成燃料虽没有与人类争食，但却抢夺了某些动植物生存的空间和食物，破坏了生物多样性；用微藻制作SAF可同时避免上述问题，但微藻大规模培植需要消耗大量资金建造工厂[4–13]。

通过生物合成技术得到某些生物燃料反而有非常典型的“负碳”效应，如通过生物废弃物（如秸秆、厨余垃圾、人类与牲畜的粪污、工业有机废水）制造甲烷燃料，因为一旦堆积或掩埋这些废弃物，它们会自发释放大量甲烷进入大气，而甲烷的温室效应是二氧化碳的26倍，将甲烷收集后作为燃料燃烧为二氧化碳排放不仅没有增加大气圈的碳含量，还显著降低了温室效应；而地球上的沼泽与湿地、三角洲、海洋、湖泊与河流、反刍动物、化解冻土每时每刻都因厌氧环境而在释放甲烷，甲烷已成为仅次于二氧化碳的“温室效应”气体。为了减缓甲烷释放，全球150个国家已签署了“全球甲烷承诺”，国际能源署（IEA）2022年报告指出化石燃料行业的甲烷排放问题仍没有得到有效控制，同时随着温室效应的增强，自然界自身排放甲烷的问题也在加剧。因此，收集自然界的生物废弃物或反刍动物释放的甲烷具有十分显著的“负碳”效应，但目前因产业收益率过低而并未获得大规模推广，国外已有收集奶牛反刍排放甲烷的技

术出现，而中国针对生物甲烷燃料制造已提出国家规划，“十四五”规划中提出到2030年中国的生物天然气总量要求达到$2\times10^{10}m^3$（欧盟生物天然气产量），中国的生物天然气潜力在$8.8\times10^{10}m^3$[14]，中国化石天然气年生产量在$2.2\times10^{11}m^3$，近年来从俄罗斯进口天然气的规划是要达到$3.8\times10^{10}m^3$，可见生物天然气的发展潜力，而生物天然气可进一步进行电化学合成更长碳链的常温航空燃料，如航空煤油。

电制燃料（PtX）或E-Fuel燃料（包括电制气体燃料（PtG）与电制液体燃料（PtL）），采用清洁来源的电能制造气体或液体，如氢气、甲烷、氨气及甲醇、汽油与柴油、航空煤油等；此类燃料一般采用电制氢气，结合通过碳捕获技术直接从大气或工业排放得到的二氧化碳，通过电化学技术合成甲烷、氨气等气体，或者通过费托合成（FTP）长链碳氢化合物（如甲醇、汽油、柴油、航空煤油等），现有的化学合成已经可以通过来自大气的二氧化碳合成淀粉等，因此电制燃料在理论和技术上已经成熟，但是目前的制造成本过高，在市场价格上难以与化石来源或生物来源的燃料竞争。电制燃料技术示意路线图如图14所示。

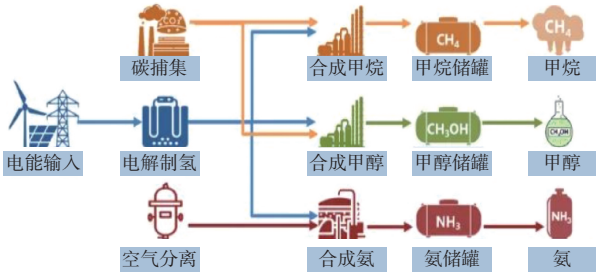


图14　电制燃料技术示意路线图

Fig.14　The PtX technical approaches

电制燃料最易合成的是氨气和甲烷，而电能和氢能在移动交通工具的存储和运输上存在质量能量密度过低（电能）或体积能量密度过低（氢能）的严重理化问题，尤其是氢能的存储和运输，需要高压或者低温技术，如图15所示，但体积能量密度仍然非常低，存储和短途运输成本甚至超过常规燃料的终端价格，这是氢能目前推广速度受限的主要原因。为解决氢能的储运问题，发现将氢气转化为易于液化和储运的甲烷和氨气反而可能终端价格更低，尤其是氨气，因此更直接的做法是直接将液化甲烷和氨气作为终端燃料。甲烷可作为极佳的航空航天燃料，目前已经成为包括SAPCEX公司、蓝色起源公司、蓝箭航天在内的等商业航天企业火箭发动机的主要燃料，低廉的成本和优异的理化性质获得包括中国在内的主要航天强国政府的重点研发投资；而氨气因易于液化和运输，分解制造氢气技术成熟且成本可接受，如图16所示，未来可成为氢能远程运输的科学方式。

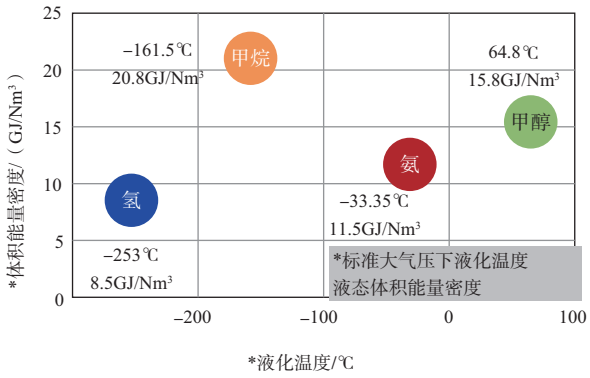


图15　终端燃料产品理化性质

Fig.15　The physical and chemical properties of fuels

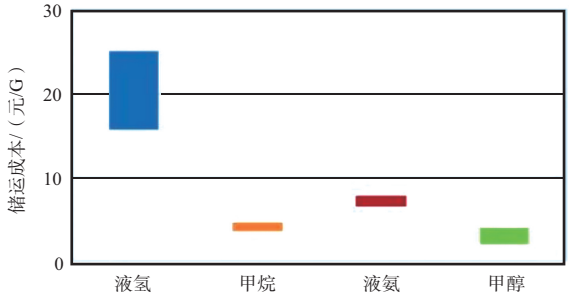


图16　产品储运与合成成本（参考价格）

Fig.16　The fuel cost of storage and transport (reference price)

4.1 关键技术

SAF的制造技术包括生物合成技术、基于清洁电能的电化学合成技术，基于非废弃物的生物合成燃料与清洁能源电制合成液体燃料当前存在的主要问题是制造成本过高，产量低且终端价格没有市场竞争力，如图17所示。基于废弃物的生物合成燃料因为合成成本极低，原料来源丰富而潜力巨大，但需要规模化生产以提高收益率。

4.2 应用场合

SAF适用于现役及未来的燃油飞机、低温的液化甲烷燃料飞机等。生物或合成液化天然气燃料因储存温度比液氢高约90℃，密度约为液氢的7倍，且质量能量密度比常规航空煤油高约18%，不易爆炸且没有对铝铁钛等金属承力结构材料“氢脆”的隐患等，生物或合成LNG燃料在民机上的应用潜力巨大。

4.3 优劣分析

SAF的优势是现有的飞机总体和机载技术框架可以完

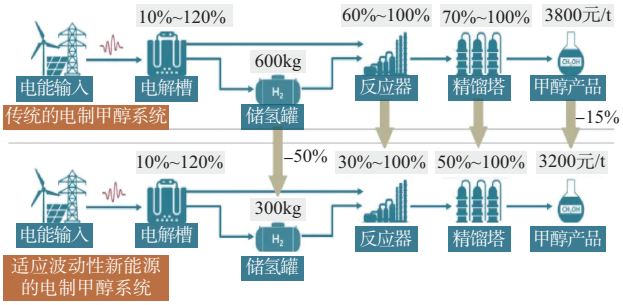


图 17　电制燃料成本示意图

Fig.17　The costs of the PtX fuels

全保留不做任何改变；同时，采用完全生物合成或者费托合成的航空碳氢燃料可以使燃料中的碳元素始终处于循环利用之中，从而二氧化碳排放量不增加，因而属于清洁能源，而且燃料的能量密度略有增加，目前生物合成的航空燃料已处于实测使用阶段；使用某些生物原料的SAF燃料甚至具有一定的“负碳”效应，使用现代基因工程技术改造后的某些“能源作物”的干物质产量极高，其吸收大气中二氧化碳的速率甚至可以达到一般森林的数十倍，是非常具有发展潜力的人工“碳汇”。

其劣势是第一代生物合成航空煤油需要较高级的原料，如玉米、麻风树种子等，易于与人类或牲畜、其他动植物争食的来源原料或者投资较大的微藻工厂。基因改造的“能源作物”可能抢夺人类粮食耕地与水资源而造成与人类间接争食的效果，同时“能源作物”过于强盛的生命力又会造成生物多样性的灾难问题，因为它们会驱逐或杀死很多动植物，需要政府统筹规划。

用厨余垃圾制作航空燃料也存在产量不足问题；采用麻风树等植物则会挤占某些动植物的生存空间与食物资源，形成生态危害问题，微藻类生物合成航空燃料比较有前景，可以实现工厂化生产且生产效率可以数倍于常规粮食作物原料，但是设施投资极大，目前产量不足且价格过高。

生物合成甲烷则在技术与原料上不存在上述问题，主要由甲烷组成的混合气（又称天然气、沼气、瓦斯等），在自然界中广泛存在，地球上的湿地、三角洲、海洋、堆积的秸秆、粪污、动物身体、地下密闭空间等每时每刻均可自发地产生大量的甲烷气体，尤其是养牛业的甲烷排放量居全球人为甲烷排放首位，因为无论是被水漫盖还是空气不易流通的环境，有机物质被喜氧菌群分解产生的二氧化碳覆盖，如不能被风吹走，正好为厌氧菌群分解释放甲烷提供了极佳的工作环境，牛内脏也是极佳的厌氧环境。

费托合成航空燃料目前处于前沿技术研究阶段，由于可以采用工业化生产方式大规模生产，因而比较有前景，主要原料是二氧化碳和水，来源无限，但是目前技术不成熟，设施投资和制造成本居高不下，但是这一技术相对氢能源飞机具有十分强劲的竞争力，有人认为以大气中的二氧化碳为原料人工合成航空燃料、以二氧化碳为原料人工合成淀粉的技术是彻底解决“碳达峰碳中和”行动的核心关键技术，而这两项技术目前已经通过了实验室试验验证，并在进行扩大产量试验。

PtX是基于清洁能源的燃料，PtX意味着利用电力将大气中的二氧化碳和水合成燃料。为了使PtX成为绿色燃料，生产燃料的电力当然必须来自可再生能源，如太阳能、风能、水力发电或者仍有争议的核能。即可再生能源电解水制绿氢，绿氢结合二氧化碳转化为氨、甲醇、甲烷、合成气（进一步合成液体燃料）。甲烷、甲醇和氨气这三个目前是常见的X路线，甲醇化和甲烷化耦合碳捕集促进碳捕集技术发展，氨与碳捕集无关，也不受制于碳源，因为氮气是大气中比例最高的气体，占比超78%，来源无限。

SAF或PtX等航空燃料尽管直接排放一定量的二氧化碳，但在全生命周期内可以实现“碳中和”或者“负碳”排放。液氢燃料等尽管不直接排放二氧化碳，但考虑全生命周期却可能在制造过程中排放更多的二氧化碳，如“煤制氢”与“甲烷制氢”。

4.4 国内外研究现状

当前基于生物来源的SAF的掺混与100%成分的试验飞行在国内外已获得成功，如图18所示，而基于清洁电能和大气碳捕获技术的合成SAF的新型技术试验在国内外也均已获得成功；基于LNG的试飞技术则于近50年前在苏联图-155客机上获得成功验证，欧盟和NASA近年来均已提出基于生物天然气的概念飞机，LNG燃料市场价格远低于液氢，不足航空煤油价格的一半，但低热值却显著高于航空煤油，应用配套技术成熟，是一种潜力极大的可持续航空燃料。

考虑到制造技术难易程度与成本，在石油危机年代，液化天然气燃料飞机概念也被推出，作为液氢燃料飞机的一个备用方案，如图19所示；而现代国际社会提出碳中和要求后，绿色LNG概念飞机重新被推出，因为LNG可视为一种极易合成SAF，或介于液氢和SAF之间的权衡，如图20、图21所示，可持续甲烷在降低气候危害性和航程上潜力最大。

SAF在国内也有研究进展，如民航大学利用基因编辑技术改造某些种类的能源作物，使其产量显著提升并更加适应恶劣环境（如盐碱地环境），国内有大片的盐碱地可供

图18　掺混或100%SAF航空试飞已获成功

Fig.18　The blended or 100% SAFs used in aviation

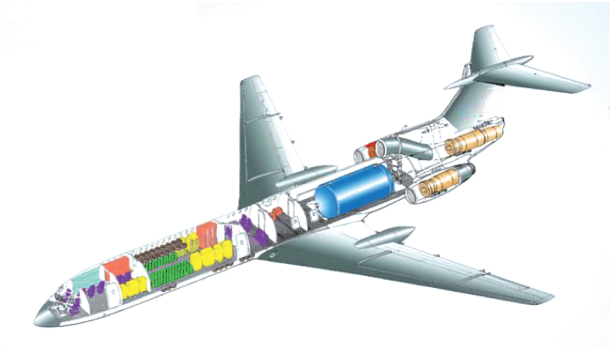


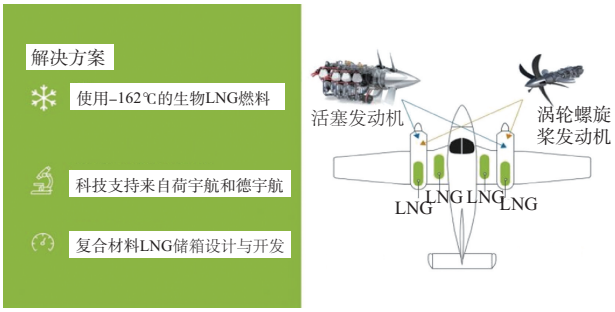
图19　Tu–155 LNG和液氢低温燃料试验飞机

Fig.19　The LH2 and LNG Tu–155 plane

使用;镇海炼化SAF工厂等则是利用“地沟油”等废弃生物原材料合成SAF。“地沟油”的收集比较困难且总量相对航运业需求不足,适应恶劣土地的基因改造的能源植物是一个极佳的SAF制造途径,甚至有“负碳”效果。但是能源作物的推广面临水资源调配、生物多样性、对粮食作物种植造成经济冲击等问题,需要国家统筹安排解决,如能源作物对水资源的使用侵占了粮食作物的水资源使用,种植能源带来的经济效益打击了种植粮食的积极性等。

5 氢能源飞机

氢能源飞机是指使用压缩氢或液氢等作为能源介质,使用氢燃料电池或氢燃料航空发动机推进的新能源飞机。这里将混合部分动力电池的氢电混合动力也归入氢能源飞机,如图22所示。氢能源的最大优势是质量能量密度极高,相当于常规燃料航空煤油的2.8倍,且能源本身完全没有碳排放;其劣势是压缩氢及液氢密度过低导致体积能量密度过低,而且需要极低温度存储(–253℃),导致低温储箱



(a) DLR的LNG燃料概念飞机

(b) NASA的LNG概念飞机

图20　欧盟BIO LNG涡桨与NASA LNG概念飞机

Fig. 20　The BIO–LNG propeller planes of EU and NASA (SUGAR freeze conception)

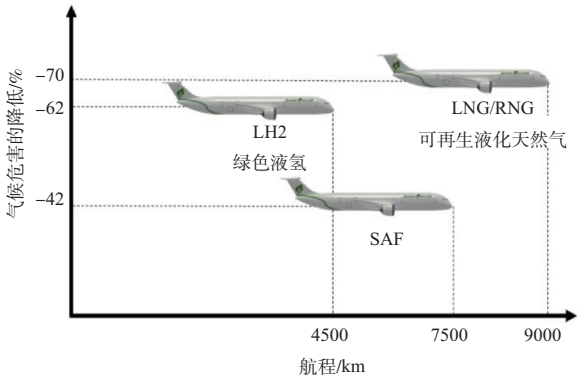


图21　三类燃料宽体远程客机航程与气候收益

Fig.21　The range and impacts on climate of the three kinds of wide-body long range civil planes

体积庞大挤压飞机有效可利用容积,同时氢气的易爆炸、易“氢脆”等安全风险问题也必须得到可靠解决。氢气包括电解水或者甲烷制氢,大部分还是来自化石能源,我们称之为“灰氢”,碳排放不仅没减少反而显著增加;氢气来源于清洁能源如风、水与光伏,生物质能源或核能,我们称之为“绿氢”与“紫氢”,自身完全没有碳排放[15–26]。

除了采用清洁能源电解水制氢,氢气的压缩与液化能耗也比较大,同时因为密度过低导致其储存与运输成本极高,其单位质量短途运输成本甚至超过了航空煤油的终端

图22　空客公司的液氢能源民机概念设计

Fig.22　The conceptual hydrogen plane of Airbus

价格，这都是氢能源飞机研发与应用中必须解决的主要问题，即制氢成本、储存成本、短途运输成本，长途直接运输成本甚至超过将氢转化为液氨再由液氨制氢的成本，液氨可能是未来长途运输氢气的较好中介。

5.1 关键技术

关键技术包括低成本的“绿氢”或“紫氢”制造技术，高压或液氢存储与短途、长途输送及加注技术，由机翼与机身内部显著布置改变导致的氢能源飞机总体气动设计技术，燃氢航空发动机或氢燃料电池技术等；此外，还有氢燃料的安全防护保障技术，包括预防对人员和设备的低温危害及物理或化学爆炸，处理结构金属材料“氢脆”破坏等隐患的技术。

5.2 应用场合

液氢燃料适用于大中型运输类飞机、长航程或长航时运输类飞机，虽然小型短途飞机也可采用氢能源，包括氢燃料电池或氢燃料航空发动机，或氢电混合动力推进，但因为其机身空间有限，而液氢的存储与运输困难且危险性高，需要较为严格的操作标准，容纳极低密度的液氢付出空间代价过大，同时导致制造与维护成本过高，小型飞机大多本身比较便宜，没有必要采用高配设置，小型或短途飞机更适宜采用全电能源。大中型运输类飞机因动力电池能量密度不足，无法采用全电能源而必须采用液氢新型能源设计，机舱空间大，易于容纳液氢。

5.3 优劣分析

氢能源飞机的优势是飞机排放完全无碳（不考虑滑油燃烧），劣势是因机翼与机身内部布置的显著改变导致飞机总体气动设计与现有的飞机框架有比较大的改变，同时飞机的配套设施（如机场维护、燃料运输加注及安全防护等）需要比较大的改变。

安全性问题主要有：（1）爆炸极限极宽，为4%~75.6%；（2）“氢脆”问题，对铝铁等多种金属存在腐蚀性，存储和传输需预防“氢脆”隐患；（3）膨胀爆炸问题，液氢极易气化，一旦发生热泄漏，储氢或传输装置内部压力增大易于膨胀爆炸；（4）低温伤害性，–253℃极低温度下对设备材料和人体都存在严重安全隐患，低温泄漏极易发生冻伤危害。

液氢燃料的市场价格过高，同等能量下难以与常规燃料的经济性竞争。液氢的另一个主要问题是体积能量密度过低，因为燃料体积占据空间过大，且需要极低温度存储，故在飞机上较难应用；同时，因为密度过低以及“氢脆”隐患，液氢的运输成本也较一般的燃料运输成本更高。这些都是阻碍液氢作为能源载体应用的非常不利因素。

氢燃料不论是压缩氢还是液态氢，均在存储、传输、应用方面十分不便捷，有人提出将氢气通过吸附、溶解等物理方式可获得比压缩氢更大的储氢密度，但是这些技术很难应用于航空航天工业，且技术不成熟。

另一类思路则是将氢气通过PtX形成易于存储、传输、应用的含氢化合物作为燃料使用，典型的形式是氨气和甲烷，其中甲烷液化后的单位体积含氢量甚至比液氢还高约50%，体积能量密度约为液氢的2.5倍，质量能量密度接近液氢的50%，爆炸极限是5%~15%，沸点大大高于液氢，甚至“可再生”性能优良，生物天然气已成为成熟的替代能源，且产量潜力巨大，而使用二氧化碳和水合成甲烷的技术也日趋成熟，尤其是没有“氢脆”的问题，对现有燃油发动机的改造极小，因此可以认为是一种极佳的“化学”储氢方式，同时天然气工业技术非常成熟，价格相对十分便宜。化学制氨技术同样十分成熟，氨气液化容易，但是氨气由于质量能量密度过低而难以作为航空燃料使用；在长途运输之后，液氨加热并使用催化剂后极易分解为氢气和氮气，而气态氢气则可作为燃料直接使用[27–48]。液氢与液氨、LNG等的理化性质见表1。

表1　液氢与液氨、LNG等的理化性质对比

Table 1　The physical and chemical properties: Liquid hydrogen, liquid natural gas and liquid ammonia

	液氢	液氨	LNG
密度/(kg/m^3)	70.85	617	420
温度/℃	–253	–34	–162
低热值/(MJ/kg)	119.64	18.6	42.5
体积低热值/(MJ/m^3)	8.48	11.48	17.85

5.4 国内外研究现状

欧盟和空客公司提出了比较激进的氢能源飞机发展规划，如图23~图25所示，力推“零排放”的概念飞机。英国虽退出欧盟，但也受到了欧洲大陆航空科技规划的影响，紧随其后也独自提出了一系列氢能源飞机概念；DLR甚至试飞成功小型氢能源试验机Hy4验证机。美国的波音公司和

NASA联合试飞成功了“幻影之眼”无人机(见图26),该无人机采用液氢燃料,由氢燃料内燃机驱动,美国的Universal Hydrogen公司试飞了40座的氢能改型飞机,但波音公司和NASA放弃了继续深入研发氢能源飞机,转向重点布局了基于SAF的民用飞机研发,而认为氢能源飞机是一项“长期”的航空科技。所以,欧盟和美国在氢能源飞机上形成了一方“激进”与一方“保守”的不同发展思路,目前难以判断双方战略的高下。基于SAF的新型民机在设计制造上并不需要过多的改造,而氢能源飞机在设计、制造、维护、运营等方面与常规能源飞机存在较大的差异,需要有较大的科技突破,如安全性问题,如图27所示。

考虑到“尾迹云”的温室效应,氢能源飞机虽完全没有排放二氧化碳,但排放的水蒸气量却远大于常规的航空煤油飞机,因而会形成更多的“尾迹云”,而“尾迹云”对环境的影响问题目前已逐渐得到了全球航空界和环保界的重视,这是氢能源飞机研发和推广应用中一个十分不确定的因素。

图23 空客的液氢民机概念

Fig.23 The hydrogen civil plane of Airbus

图24 DLR的双体氢能源飞机

Fig.24 The twin-body hydrogen plane of the DLR

图25 Universal Hydrogen公司氢能改型飞机

Fig.25 The modified hydrogen fueled plane of Universal Hydrogen Company

6 未来展望

太阳能的能量密度过低且过于分散,同时电驱动装置功率密度低,难以应用于起飞重量较大的重型飞机;纯电动飞机的动力电池质量能量密度与电机的功率密度在没有革命性提升之前,难以应用于大型和长航程飞机;而油电混动飞机则还是存在比较显著的碳排放问题,发电与电动系统的功重比难以显著提升,限制了这种技术的推广应用;SAF与现有的飞机技术兼容性非常好,并且不需要对现有飞机关键技术和维护配套技术框架做出大的改变,全生命周期分析可以逼近零碳或者“负碳”;而氢能源飞机则对现有飞

图26 波音“幻影之眼”液氢内燃机驱动无人机

Fig.26 The “phantom eye” hydrogen plane of Boeing

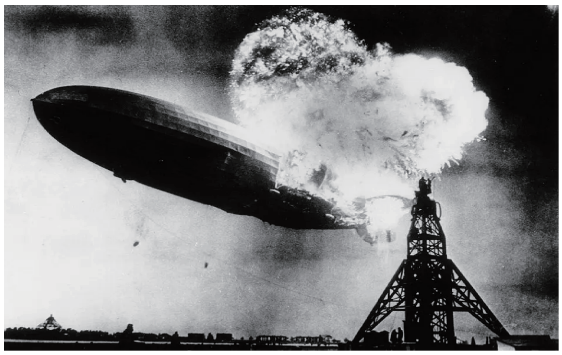


图27 使用氢气的航空器(齐伯林飞艇)

Fig.27 The Zeppelin airships filled with hydrogen

机总体气动、储能与推进等技术，飞机的外围配套，燃料制造、运输与加注等系统需要有比较彻底的革命性改造[49]。

氢能源在民用飞机上的直接应用，在储存和运输、安全性、外围配套等技术上需要解决的问题较多，但氢能源结合碳捕获技术将氢气转化为PtX则可轻松避开氢气的压缩、液化与存储、运输、易爆炸与易“氢脆”等安全性、高成本和技术问题，其终端市场价格将大概率低于液氢的终端价格；现役的民用飞机与其他航空器的设计制造将不需要进行大范围的改造设计，而直接使用氢能源的各种飞机将不得不为适应氢能源的低温、低密度、易爆炸与易“氢脆”等性质做大幅度的改造设计，使用PtX是一种间接与快速且使航空器不需要进行大幅度改造设计的使用氢能源的较好技术途径。AST

参考文献

[1] Nelson E S, Reddy D R. Green aviation:Reduction of environmental impact through aircraft technology and alternative fuels [M]. London: Taylor and Francis Group CRC Press, 2017.

[2] Gabrie Z, Paolo T. Solar hydrogen energy systems: Science and technology for the hydrogen economy [M]. Milan Italy: Springer, 2012.

[3] 国家发改委，国家能源局.“十四五”现代能源体系规划[R].国家能源局网站，发改能源（2022）210号，2022.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. 14th five-year plan for modern energy system[R]. National Energy Administration website, National Development and Reform Commission and National Energy Administration (2022) 210th, 2022.（in Chinese）

[4] Agora V, Agora E. The future cost of electricity-based sythetic fuels[Z]. Berlin: Frontier Economics Ltd., 2018.

[5] Marta Y, Alba S. A look into the role of e-Fuels in the transport system in Europe (2030-2050) [J]. Concawe Review, 2019, 28 (1): 4-22.

[6] 石化行业走出去联盟.全球电制燃料技术发展分析[C].2022亚洲炼油和石化科技大会，2022：1-25.
The Go-Global Alliance of the Petrochemical Industry. The development technical analysis of the global PtX fuels [C].2022 Asia Refining and Petrochemical Technology Conference, 2022: 1-25.（in Chinese）

[7] 柳下再会. 以碳之名：低碳骗局幕后的全球博弈[M]. 北京：中国发展出版社，2010.
Liuxia Zaihui. In the name of carbon dioxide: The golbal game behind the low carbon fraud [M]. Beijing: China Development Press,2010.（in Chinese）

[8] Bradley M K, Christopher K D. Subsonic ultra green aircraft research phase II: N+4 advanced concept development[R]. NASA/CR-2012- 217556, 2012.

[9] Muhammad-Azfar A, Boon-Cheong C. Benchmarking key success factors for the future green airline industry[J]. Procedia-social Behavioral Science, 2016, 224: 246-253.

[10] Paolina F. Green airport design evaluation (GrADE) methods and tools improving infrastructure planning[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 3781-3790.

[11] Hughes C E, Vanzante D E. Aircraft engine technology for green aviation to reduce fuel burn [R]. AIAA-2011-3531, 2011.

[12] Kevin R A, Francisco M C. Conceptual design of the parallel electric-gas architecture with synergistic utilization scheme (PEGASUS) concept[R]. AIAA-2017-4001,2017.

[13] Fabio C B. Biojet fuel: A tool for a sustainable aviation industry-A technical assessment [C]. 26th SAE Brasil International Congress and Display, 2017: 36-142.

[14] Liu Chang, Wang Jun, Ji Xiaoyan, et al. The biomethane producing potential in China: A theoretical and practical estimation[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, 24(7): 920-928.

[15] 曹冠杰，王业辉，孙小金. 氢能航空发展现状分析[J]. 航空动力，2022(2)：29-33.
Cao Guanjie, Wang Yehui, Sun Xiaojin. The hydrogen aviation development status analysis [J]. Aerospace Power, 2022(2): 29-33.（in Chinese）

[16] Rory R, Sean R N, Mitch W. Liquefied natural gas as the next aviation fuel[R]. AIAA- 2015-4247, 2015.

[17] Jeroen A K, Manuel F A. Environmental, economical and technical aspects of a cryoplane in the preliminary design phase [C]. ICAS 2002 Congress, 2025.

[18] Airbus D G. Liquid hydrogen fuelled aircraft system analysis [Z]. Airbus, 2001.

[19] Dries V. On the energy eifficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(23): 7388-7394.

[20] Nojoumi H, Dincer I G F, Naterer G F. Greenhouse gas

emission assessment of hydrogen and kerosene-fuelled aircraft propulsion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(3): 1363-1369.

[21] Contreras A, Yigit S, Ozay K, et al. Hydrogen as aviation fuel: A comparison with hydrocarbon fuels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1997,22(10-11): 1053-1060.

[22] Heinz G K, Reinhard F. Cryoplane: Hydrogen fuelled aircraft status and challenges[J]. Air & Space Europe, 2001, 3(3-4): 252-254.

[23] Rainey S M, Veziroglu T N. Computer modeling and comparison of hydrogen-fuelled and methane-fuelled hypersonic vehicles[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1992,17(1): 53-61.

[24] Brewer G D. The prospects for liquid hydrogen fuelled aircraft [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 1982, 7(1): 21-41.

[25] Bhupendra K, Adam K, Paulas R S, et al. Hydrogen powered aircraft: The future of the air transport[J]. Progress in Aerospace Science, 2013, 60: 45-59.

[26] Witcofski R D. Hydrogen-fuelled subsonic aircraft: A perspective [C].NASA, Advance in Engineering Science, 1976: 1265-1278.

[27] Weber R J. A review of the potential of the liquid methane fuel for supersonic transport[C]. Advances in Cryogenic Engineering, 1969: 13-19.

[28] Klepikov I A, Katorgin B I, Chvanov V K. The new gneration of rocket engines, operating by ecological safe propellant liquid oxigen and liquid natural gas (methane) [J]. Acta Astronautica, 1997, 41(4-10):209-217.

[29] Mary A P S, Timothy J H, Christopher J K. Design and scaling laws of a 40-MW-class electric power distribution system for liquid-H2 fuel cell propulsion [C]. AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2021: 1-12.

[30] Marc A P. A plan for biomass power generation with negative carbon emission [C]// Procedings of the ASME 2021 Power Conference, 2021: 1-14.

[31] Keiichi O, Takuya M, Hitoshi F, et al. Emission and engine operation with SAF (Sustainable Aviation Fuel) produced through integrated process of woody biomass gasification and fischer-tropsch synthesis [C]. AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum, 2021: 1-20.

[32] John F, David C B, Shane K, et al. The co-optimization of sustainable aviation fuel: Cost, emission and performance [C]. AIAA Scitech 2021 Forum, 2021: 1-20.

[33] Christopher A S, Lee W K. Using liquid natural gas fuel to cryogenically cool and enhance a hybrid electric aircraft power system[C]. The AHS International 74th Annual Forum and Technology Display, 2018: 1-7.

[34] Lee W K, Michael D P, Brooke E R. Urban air mobility network and vehicle type-modeling and assessment [R]. NASA/TM-2019-220072, 2019.

[35] Jason H, Brian N, Lee K. Feasibility study of a liquid natural gas fuel cooled small scale hybrid electric flight vehicle [C]. AIAA Scitech 2020 Forum, 2020: 1-13.

[36] Joseph D E, Rene E C. Tankage systems for a methane fueled supersonic transport[R]. NASA-TM-X-52378, 1967.

[37] Weber R J. Liquefied natural gas as a fuel for supersonic jet aircraft[R]. NASA-TM-52282, 1967.

[38] Aiken W S. Alternate-fuelled transport aircraft possibilities [R]. NASA-TM-78330, 1978.

[39] Mitch R W, Robert M, Christopher K G, et al. Economic and environmental assessment of liquefied natural gas as a supplemental aircraft fuel [J]. Progress in Aerospace Science, 2014, 66: 17-36.

[40] David C. Sustainable aviation fuels: The challenge of decarbonization[J]. Energy Procedia, 2019, 158: 1202-1207.

[41] Nadir Y, Alpaslan A. Sustainable alternative fuels in aviation [J]. Energy, 2017, 140(2): 1378-1386.

[42] Thushara K H, Zahira Y, Narayanan N B. Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges [J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2015, 42: 1234-1244.

[43] Solange I M, Ingrid L M, Rubens M F, et al. Sustainable aviation fuels: Production, use and impact on decarbonization [C]. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences, 2022: 348-371.

[44] Hudson L, Jefferson A, Bauen A, et al. Sustainable aviation: A UK roadmap for sustainable aviation fuels [C]. Biofuel for Aviation Feedstocks, Technology and Implementation, 2016: 315-337.

[45] Richard L A. Sustainable aviation alternative fuels: From afterthought to cutting edge[C]. Energy, Transport, the Environ-

ment, 2012: 401-434.

[46] Sandra R, Marina B, Clemens N, et al. Paths to alternative fuels for aviation[J]. CEAS Aeronautical Journal, 2018, 9: 389-403.

[47] Patrick S, Valentin B. Power-to-liquids as renewable fuel option for aviation: A review [J]. Chemie Ingenieur Technik, 2018, 90(1-2): 127-140.

[48] Ramesh K A. Sustainable (green) aviation: Challenge and opportunities[C]. SAE International Journal of Aerospace, 2010, 2(1): 1-20.

[49] 雷国东,徐悦. 未来大型客机发展方向及关键设计技术研究[J]. 航空制造技术,2023,66(14): 26-37.
Lei Guodong, Xu Yue. Development directions and key design technologies research of future large airliners[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 26-37.（in Chinese）

Research and Development Status and Prospect of the Alternative Energy Key Technologies for the Fixed-wing Civil Aircraft

Lei Guodong, Xu Yue, Chen Shaojun, Zhu Haitao, Duan Chenlong, Wu Gengyu

Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China

Abstract: The storage, transportation and transformation of the alternative energy are the bottlenecks and key technologies that restrict the development of the alternative energy fixed-wing civil aircraft. For example, the low mass energy density of the power batteries leads to the excessive weight of energy storage, which is the bottleneck of the development of the all-electric civil aircraft, and the low volume energy density of the hydrogen leads to the excessive volume of the energy storage and transportation difficulties, which are the bottlenecks of the development of the hydrogen civil aircraft. The application of the SAF fuel in civil aircraft is mainly restricted by the production cost of the SAF fuel. The main problem for the transformation from energy to propulsion, such as the all-electric propulsion, the hydrogen fuel cell propulsion and fuel-electric hybrid propulsion, is the development of high power density and high power motors, which can be partially solved by using distributed electric propulsion technology, but the mass and volume power density of the hydrogen fuel cells are still the main restrictions for its promotion and application in large aircraft. Using hydrogen as fuel for air-breath engines not only has technical problems of high-pressure or low-temperature fuel transportation and storage on aircraft, but also the special physical and chemical properties of the hydrogen fuel will bring special safety problems being different from the liquid hydrocarbon fuels. The comparison and induction for the application of the alternative energies in civil aircraft are presented, and the conclusion is that the SAF or green LNG fuels may be the most attractive choice for the civil aircraft compared with the direct using of the liquid hydrogen as aeronautical fuel. Or the green hydrogen must be used to synthesize SAF or LNG with the carbon dioxide from the atmosphere. And these can be the references or guidance for the alternative fueled civil aircraft.

Key Words: mass energy density; volume energy density; SAF fuel; power density; distributed electric propulsion

Received: 2023-07-21； **Revised:** 2023-10-23； **Accepted:** 2023-12-07

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2019ZA004003); CAE Independence Research Fund for the Five Characters (ZC272006201);Key Technologies for the Megawatt Level Alternative Energy Aircraft with Electric Power(2022YFB4300200)