

直升机绿色航空动力技术发展研究



刘道建, 黄水林, 冯维超

中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001

摘要:开展绿色航空动力技术研究对于推动直升机行业可持续发展与实现碳中和目标至关重要。本文分析了直升机绿色航空动力技术的发展方向,重点从特性和飞行器性能方面对不同绿色航空动力进行了对比。通过分析发现,中短期内可持续航空燃料(SAF)适用于传统构型或混合动力直升机;未来城市内短距离空中交通,电池是最适合的航空动力,城市间空中交通或具有高速、长航时需求的直升机,氢燃料电池-电池混合动力是最适合的动力;构型创新是直升机绿色能源动力性能倍增器,氢能应用须依托跨专业、跨领域的企业和科研机构协同来完成。本文研究对直升机绿色航空动力技术的发展具有一定的指导意义。

关键词:直升机; 绿色航空动力; 可持续航空燃料; 氢燃料电池; 电池

中图分类号: V272

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2024.01.011

直升机由于其特有的垂直起降、悬停、前后、侧向和低速/超低空机动飞行,以及对机场等基础设施要求低等特性,已广泛应用于人类社会活动的多个环节,在执法、紧急医疗服务、基础设施维护、灭火救灾和搜索救援等方面将发挥越来越大的作用。近年来,无人直升机也得到快速发展。无人直升机由于去除了有人机飞行员生理和飞行环境限制,在农业植保、管线巡查、地质测绘、航空拍摄、物流和安防等任务繁重、环境恶劣的领域得到了广泛应用。随着我国经济社会的发展,一方面要替换老旧直升机,另一方面各行业特别是商务飞行以及城市空中交通等领域对直升机的需求规模将进一步扩大,未来我国的直升机市场规模潜力巨大^[1-2]。

在直升机需求规模扩大的同时,用户对直升机经济性、安全性、可靠性、舒适性和环保性等的要求也逐渐提高。虽然当前直升机温室气体排放只占人类活动温室气体排放的极小一部分,但在直升机使用率较高的地区,它是机场和城区当地噪声和大气污染的重要来源之一^[3],这使得人们对“传统且吵闹”的直升机的接受程度逐渐降低。此外,在全球气候变暖的大背景下,为减少航空运输业的碳排放,国际民用航空组织(IACO)于2016年制定了到2050年航空碳排放较2005年减少一半的控制目标^[4]。同时,根据IACO的预测,如图1所示,基于传统航空技术的进步,无法实现航空

业可持续发展和碳中和目标^[4-5]。为积极响应IACO的碳排放要求,同时出于对未来直升机飞行活动对环境可持续性影响的担忧,世界各直升机强国正寻求碳排放更低和环境更友好的直升机技术。由于直升机可执行多种类型任务,运行一般无规划,且支持其运行的基础设施要比固定翼飞机简单,因此要推动直升机行业的可持续发展,更快速、更显著地实现碳中和目标,探寻与发展直升机绿色航空动力技术是最主要的技术途径^[6-7]。我国民用直升机产业起步较晚,基础比较薄弱,航空动力的绿色创新发展将是我国直升机技术实现“换道超车”的重要机遇。

本文分析了直升机绿色航空动力技术的发展方向,重

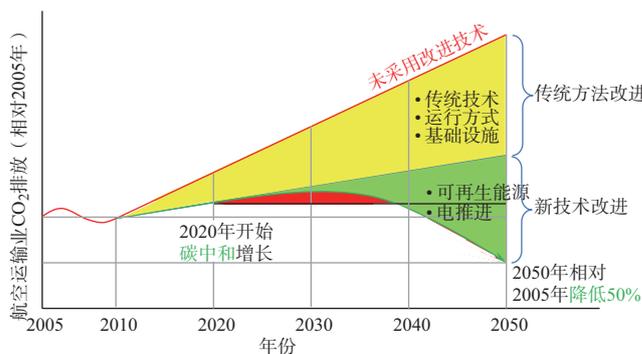


图1 航空运输业CO₂减排目标路线图^[4]

Fig.1 Roadmap of net CO₂ emissions from aviation sector^[4]

收稿日期: 2023-07-26; 退修日期: 2023-10-25; 录用日期: 2023-12-07

引用格式: Liu Daojian, Huang Shuilin, Feng Weichao. Research on the development of green power technologies for helicopter [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(01):97-104. 刘道建, 黄水林, 冯维超. 直升机绿色航空动力技术发展研究[J]. 航空科学技术, 2024, 35(01):97-104.

点从特性和飞行器性能方面对不同绿色动力进行了对比,并阐述了氢能垂直起降飞行器面临的技术挑战,为今后直升机绿色航空动力技术的发展提供一定的指导。

1 直升机绿色航空动力发展现状

1.1 直升机动力朝可再生能源/电动化的方向发展

汽车行业为降低二氧化碳(CO₂)和污染排放,已经开始转向了混合动力和电动汽车时代,这为直升机动力的转型发展指明了方向^[8-9]。传统直升机通常由涡轴或活塞发动机提供动力,发动机燃烧室内化石燃料的燃烧是CO₂和有害排放的主要来源。当前,普遍认为要在2050年前实现航空业净零碳排放,主要有三个绿色能源动力发展方向:可持续航空燃料(SAF)、氢能和电池^[3,6,10]。本质上,如图2所示,能源生产朝着可再生化方向发展,即生物质、风、光等可再生能源,动力系统朝着电动化方向发展。相比于传统能源形式,电动化消除了机械传动、引气和液压系统,在降低设备重量的同时提高了二次能源和电能利用率。

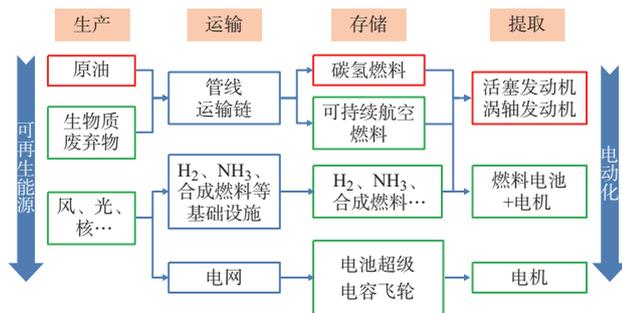


图2 直升机实现绿色航空动力的技术途径

Fig.2 New green power technologies for helicopter applications

SAF仍属于航空燃料,其能量密度与航空煤油相当,且可与煤油混合使用,因此适用于绝大部分现役航空发动机。目前,SAF已获得认证并获准用于航空业。2021年9月,赛峰集团成功完成了使用100%生物燃料运行的Makila2发动机的地面测试项目,当前在役机队中的所有赛峰发动机均已通过使用高达50%SAF运行的认证。如图3所示,2022年6月,一架空客H225直升机在其搭载的两台赛峰Makila2发动机上使用了100%SAF并进行了首飞。相关测试也在其他型号直升机上进行,以期在2030年之前完成100%SAF应用的认证。相对于化石燃料,SAF总体上可以降低80%的CO₂排放^[6],但其他常规和非常规有害排放仍不可避免。

电池的电力可由可再生光伏/风力发电产生,通过电网输送,并以充电的方式存储到机载电池中,纯电池驱动直升



图3 双发使用100% SAF的空客H225直升机

Fig.3 Airbus H225 helicopter with 100% SAF

机在飞行中不产生任何排放。当前,纯电池动力电驱动主要应用于小型直升机,且已有多种型号进入演示验证阶段。如图4所示,法国Aquinca公司对传统直升机进行改型,研制出Volta电动直升机,最大起飞重量为520kg,携带160kg锂电池,续航时间达30min;美国Tier1 Engineering公司推出罗宾逊R44电动直升机,飞行时间可达30min,飞行距离最远可达55km。当前电池过低的能量密度是制约其在直升机上大范围应用的最大“瓶颈”。



(a) Aquinea公司Volta



(b) 罗宾逊R44

图4 电动直升机

Fig.4 Electric helicopter

由可再生光伏/风力发电进行电解水制氢被视为最佳的可再生能源储能方式。氢气的能量密度约为120MJ/kg(33kWh/kg),是标准航空煤油的3倍,是锂电池的100倍。氢来源丰富,作为航空能源,可以实现CO₂和有害物零排放,且相对于常规电池,其在质量上具有更高的能量密度。燃料电池是一种将燃料化学能直接转化为电能的化学装置,没有机械传动环节,能源转化效率高,使用寿命长,被誉为是继水电、火电和核电之后的第4代发电技术^[11]。目前,氢燃料电池航空应用还处于起步阶段,特别是氢能载人飞行器还处于概念演示阶段。氢燃料电池创新者HyPoint和Piasecki飞机公司于2021年8月宣布开发了世界上第一架

氢动力载人直升机,外观如图5所示。据称,该直升机利用HyPoint 现有的技术,开发了5个650kW的氢燃料电池系统,计划在2025年进行首飞。



图5 HyPoint和Piasecki合作开发的氢动力直升机外观
Fig.5 Appearance of hydrogen powered helicopter developed by HyPoint and Piasecki

1.2 混合动力电驱动是直升机的主要动力形式

直升机一般以机载的方式存储能源,当前最先进的锂电池的质量能量密度与航空煤油和氢气分别相差40倍和100倍,这是限制纯电池动力系统应用于大型直升机的最主要因素。赛峰集团认为,续航时间超过30min或航程超过100km的纯电池动力垂直起降平台至少还需要20年才能实现^[12]。氢能无疑可以通过极高的能量密度大幅提高飞行器的续航能力,但当前氢燃料电池反应堆功率密度依然较低,且输出电压对功率变化较锂电池更为敏感,其应用于直升机这种具有短时大功率需求的飞行器还面临诸多挑战。当前,应用于直升机的涡轴发动机热效率只有30%左右,活塞式发动机的热效率为30%~40%,部分负荷工况下效率会迅速降低,且发动机尺寸越小,效率越低^[13]。电驱动的方式可将发动机与旋翼进行解耦,发动机驱动发电机发电,并与燃料电池和电池等装置组成多种混合动力电驱动系统。动力系统根据飞行剖面对系统的工作方式做出优化管理,以适应直升机起飞/着陆与巡航飞行所需动力的巨大差异,同时使主动力装置能够运行在高效、低排放区,从而使油耗和有害排放降到更低的水平。在电池能量密度和燃料电池功率密度尚未满足飞行器性能要求前,混合动力电驱动是从传统发动机驱动到纯电驱动的一种过渡方案。

当前,发展最快的是基于燃油发动机-电池组合的油/电混合动力系统。研究显示,油/电混合动力系统可比传统动力系统方式提高3%~12%的能源经济性^[14-15]。贝尔公司在贝尔429直升机的基础上改装了电驱动分布式反扭矩系统(EDAT),如图6所示。该系统取消了复杂的机械传动尾桨,改用分布式电驱动涵道尾桨平衡反扭矩。相比传统尾桨,EDAT的复杂性低、效率高,并且具有安全裕度。2018年7月,赛峰集团进行了首次混合动力电驱动系统地面测试,该动力系统由燃气涡轮发动机驱动发电机,并与一组电池相结合,可产生100kW的电能。同年,美国新能源科技

公司Workhorse的SureFly混合动力直升机完成首次试飞,可携带约180kg载荷,续航时间达1h,续航里程达112km。贝尔公司在2019年Uber Elevate大会上首次展示了其Nexus空中出租车,最大起飞重量约为2700kg,最大飞行速度约为240km/h,首架飞行验证机采用的是与赛峰集团合作开发的“涡轴发动机—发电机—分布式电动机”混合动力系统。受氢能产业链发展滞后和燃料电池技术成熟度不足的限制,基于氢燃料电池-电池组合的混合动力电驱动系统目前还处于理论研究阶段,但已有大量基础研究表明,将氢燃料电池和电池相结合能满足直升机悬停所需的高功率密度和巡航的高能量密度需求,且性能优于二者单独作为动力源的性能^[16-18]。



图6 贝尔带有电动尾翼的改装试验版429直升机
Fig.6 Bell EDAT 429 helicopter

1.3 构型创新是直升机绿色动力性能倍增器

采用电驱动是为了降低直升机发动机的排放和噪声,传动系统大幅度简化,在能源效率和任务灵活性上也有很大提升。但电驱动并不能提升所有性能,当前实现难度最大的是将直升机的主旋翼改为电驱动方式,这是因为直升机飞行时功耗远大于固定翼飞机,就目前电机的技术水平而言,即使当前最先进的发电机-电机动力系统,重量仍比传统的发动机-齿轮动力系统重10%左右^[19],这对于需要使用主旋翼作为主升力面的直升机是极为不利的。电动技术的许多独特特征催生了新的推进概念,其中最主要的是电机的“尺度无关”性^[20]。由此带来的好处是将集中的主旋翼形式根据需要转变成分布式旋翼,充分利用动力系统与气动布局的有利气/动耦合,将推力放在需要平衡的位置,大幅提高气动性能,进而大幅降低油耗和噪声水平,同时操纵性、可靠性和安全性也得到全面提升^[21]。

电驱动不仅给直升机带来动力形式的变革,也带来直升机总体和系统设计的重大转变,欧美等国家的飞机及发动机制造商、初创企业、科研机构等均加大了对新构型垂直起降飞行器的相关研发力度。当前,典型的新型垂直起降飞行器构型可以分为升力分布式多旋翼、升力分布式多旋翼+推力螺旋桨、分布式倾转多旋翼、倾转机翼分布式多旋翼等几类^[22-23]。其中,升力分布式多旋翼构型在城市空中

交通飞行器中采用较多,如我国亿航(Ehang)公司的“亿航184”和空中客车直升机公司的CityAirbus等。后三种构型结合了直升机和固定翼飞机的特点,飞行速度和续航能力均得到了极大提升。美国加州Kitty Hawk公司的Cora和波音公司的PAV采用升力分布式多旋翼+推力螺旋桨构型。美国Joby公司的S4和贝尔公司的Nexus空中出租车采用了分布式倾转多旋翼构型。欧洲空客的Vahana和美国国家航空航天局(NASA)的GL10等采用了倾转机翼分布式多旋翼构型。此外,美国极光公司的XV-24“雷击”将分布式涵道风扇安装在可倾转机翼上,德国Lilium公司的Lilium全电动喷气式飞机将分布式涵道风扇安装在机翼后缘的可倾转襟翼上,两者均用于产生推力和飞行控制。

2 直升机绿色航空动力对比分析

2.1 SAF、氢气和电池特性对比

SAF、氢气和电池都是能源的载体,其优缺点对比见表1。SAF能量密度高,但在品质和易使用方面远不如电能,这是因为燃料高度不可逆的“非约束”燃烧过程会产生有效能损失,且完成做功后会将大量的剩余热量和污染物排放到大气中。氢燃料电池非燃烧过程从原理上控制了燃烧过程产生的有效能损失。近年来,锂电池等高性能电池取得非常大的进步,但由于钴、锂和镍等电池原材料的循环回收工艺还有待进一步成熟和商业化,在强大且完整的回收供应链建成之前,过度依赖电池系统可能会导致新的环境污染问题。相对于电池,氢燃料电池的主要优势在于其具有更高的能量密度。目前进入市场的锂离子单体电池的能量密度约为200~350W·h/kg,组合成电池堆的能量密度只有150~200W·h/kg。近年来,由于在材料和制造领域不断取得进展,氢燃料电池的能量密度相比于21世纪初已获得了大幅提升(达到1700W·h/kg),考虑到储氢罐的重量及燃料电池堆的重量和效率,燃料电池的能量密度仍可达到500W·h/kg以上,明显高于电池的能量密度^[24-25]。

中短期内以SAF为代表的全生命周期低碳/净零碳方案对航空业的可持续发展具有重要的现实意义,但制约SAF大规模应用的主要挑战是其产能和成本问题。SAF的主要生产原料“生物质或废品”有限,无法通过大规模投资改观,这与建设可再生发电厂和制氢厂迅速提升产能不同。目前,SAF成本约为航空煤油的2.5~8倍,产量仅占全球商用航空煤油的0.1%^[26]。预计到2040年只能提供全球航空所需SAF的20%,剩余缺口只能从大气或工业烟气中收集碳与氢气合成,不仅效率低,而且与直接制氢相比,要多花

表1 三种绿色能源动力的优缺点比较

Table 1 Comparison between SAF, hydrogen and battery

	SAF (发动机)	氢 (燃料电池)	电池
CO ₂ 减排潜力	80%	100%	100%
有害污染排放	有(NO _x 、碳烟等)	无(轨迹云)	无
系统能量密度*	最高 (1.5kW·h/kg)	中等 (0.5kW·h/kg)	最低 (0.2kW·h/kg)
能源利用效率*	最低(30%)	中等(40%~50%)	最高(70%)
后勤基础设施	无须改变	储氢、输氢和加氢等设备	快充或换电系统

注:*数据来自参考文献[22]。

费约45%的电能和20%的氢气。而随着“绿氢”的规模化生产和储运,预计到2050年使用成本将基本上与传统化石燃料持平^[27]。氢被标榜为21世纪最理想的能源,被多个国家提升至国家战略高度,发布或正在制定相关国家氢能战略,并在不同的战略指导下形成了差异化的氢能发展路线^[28]。我国进入“十三五”之后对氢能的应用研究也进入了“快车道”,加速了氢能源布局。基于我国的资源禀赋、技术优势、现有能源结构和社会舆论的特点,预计到2050年,氢能在我国能源体系中的占比约为10%,氢能产业链中制氢、储运、加氢站、氢燃料电池应用等各个环节将会获得大幅发展,并能够满足商业化需求。

2.2 氢燃料电池和电池动力飞行器性能对比

飞行器续航性能取决于飞行器上可用能量、飞行器总重量以及空气动力学性能。经典燃油发动机动力飞行器重量在飞行过程中逐渐降低,而对于氢燃料电池动力飞行器,由于氢气能量密度高,且在现有储氢技术条件下,与同等级别纯电池动力飞行器相比,飞行所需氢气的质量相对于飞行器总质量可忽略不计,能源系统的质量主要由储氢罐及相应的阀和管路构成^[29]。因此,类似于电池动力飞行器,可以认为氢燃料电池动力飞行器重量在飞行过程中近似保持不变,其续航时间取决于所储存的氢气的量,即

$$t = \frac{\eta_{FC} \cdot m_{H_2} \cdot LHV_{H_2}}{P_{FC}} \quad (1)$$

巡航速度为 v_c ,则续航里程为

$$R = v_c \cdot t \quad (2)$$

式中, η_{FC} 为燃料电池能量转化效率; m_{H_2} 为飞行器储存氢气的质量; LHV_{H_2} 为氢气低热值; P_{FC} 为燃料电池动力系统输出功率。

氢气的质量与储氢系统质量 m_{tank} 和氢质量系数 w_{H_2} 有关。为方便比较,将能源系统的能量密度统一用 E^* 表示,动力传递效率统一用 η 表示,其中

$$E^* = \frac{w_{H_2}}{1 - w_{H_2}} \cdot \eta_{FC} \cdot LHV_{H_2} \quad (3)$$

基于飞行器悬停和巡航所需功率计算公式^[30],氢能飞行器悬停时间和续航里程分别为

$$t_h = \eta \cdot E^* \cdot \frac{1}{g} \cdot \sqrt{\frac{2\rho}{\sigma}} \cdot \frac{m_{\text{tank}}}{m} \quad (4)$$

$$R_c = \eta \cdot E^* \cdot \frac{1}{g} \cdot L/D \cdot \frac{m_{\text{tank}}}{m} \quad (5)$$

式中, m 为飞行器总质量; σ 为桨盘载荷; L/D 为升阻比。对应电池动力悬停时间和续航里程分别为^[22]

$$t_h = \eta \cdot E^* \cdot \frac{1}{g} \cdot \sqrt{\frac{2\rho}{\sigma}} \cdot \frac{m_{\text{battery}}}{m} \quad (6)$$

$$R_c = \eta \cdot E^* \cdot \frac{1}{g} \cdot L/D \cdot \frac{m_{\text{battery}}}{m} \quad (7)$$

从式(4)~式(7)中可以看出,在能源系统重量占比相同条件下,氢燃料电池动力系统对续航能力的提升主要来自能源系统能量密度的提高。不同氢气质量分数下储氢系统能量密度如图7所示,储氢系统 w_{H_2} 达到2%就可以获得优于电池的能量密度。在当前储氢罐的技术条件下,能源系统的能量密度约为电池的4倍。此时若考虑燃料电池堆在内,氢燃料电池堆的质量取决于其自身的功率密度,但能源系统的能量密度远远高于电池,包括燃料电池堆在内的能源动力系统的能量密度仍具有优于电池动力系统的潜力。

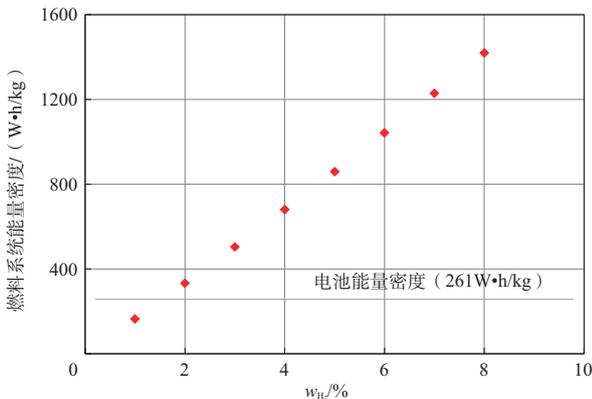


图7 不同氢气质量分数下储氢系统能量密度

Fig.7 Energy density of hydrogen storage system with different hydrogen mass fraction

基于现有储氢系统和电池技术水平,取电池能量密度为 $261\text{W}\cdot\text{h}/\text{kg}$, 储氢系统的 w_{H_2} 为6%, 并假设桨盘载荷 $\sigma = 40\text{N}/\text{m}^2$, 巡航升阻比 $L/D = 4$, 在不同氢气质量分数和能源系统重量占比条件下电池和氢燃料电池动力系统飞行器悬停时间和续航里程分别如图8(a)和图8(b)所示。可以看出,

在当前电池能量密度水平下,储氢系统氢质量分数 w_{H_2} 达到2%就可以获得优于电池动力的悬停时间和续航里程,且 w_{H_2} 越大,随能源系统重量占比增大,续航性能提升效果越好。在当前III型和IV型高压储氢罐均已获得近6%的氢质量占比,可获得电池动力飞行器近4倍的续航能力。因此,未来氢能飞行器更适合于对航时要求高、对载重要求低的飞行任务,而在高载重任务中,氢能航时优势并不明显。另外,在未来的氢能飞行器总体设计中,为执行更长航时的飞行任务,应当尽可能增加氢能系统在起飞重量中的占比。

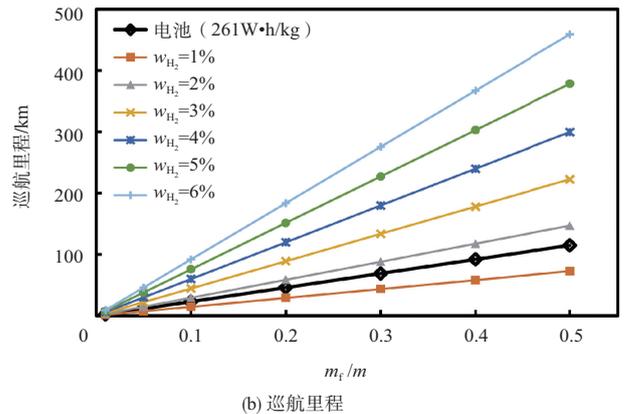
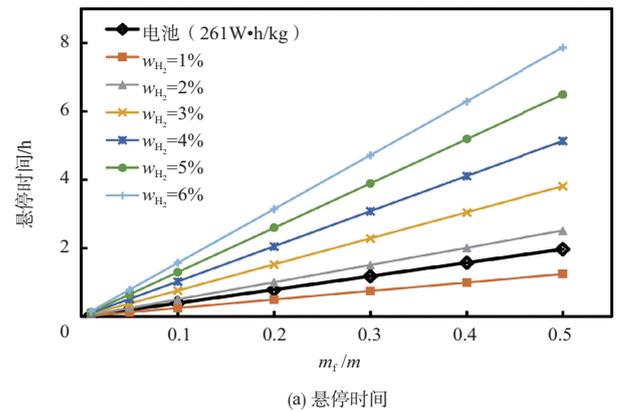


图8 电池和氢燃料电池飞行器悬停时间和续航里程对比
Fig.8 Hovering endurance and cruise range of rotorcraft powered by battery and hydrogen fuel cell

当前多个公开报道的氢燃料电池无人机飞行试验也充分说明了氢燃料电池相比电池具有更好的续航能力。2015年,美国EnergyOr公司开发了第一架氢燃料电池多旋翼垂直起降(VTOL)飞行器,起飞总重为9.5kg,有效载荷为1kg,飞行持续了2h,比使用电池作为动力的飞行时间延长了2~3倍。2022年3月,航空工业直升机所研制的20kg级变距多旋翼无人机AR-20锂电池换装为氢燃料电池后,续航能力由原来的1h提升至3h。

2.3 氢能垂直起降飞行器面临的技术挑战

氢是未来最重要的可再生能源载体,氢燃料电池是氢能最直接、最高效的使用方式,在可预见的未来,其相对于SAF和电池均具有明显的优势。然而,氢燃料电池应用于垂直起降飞行器相对较晚,当前技术的发展程度尚不能支撑氢能直升机投入现役,未来要开辟出有规模的市场还需克服以下难题。

(1)氢燃料电池功率密度问题。从图9可以看出,氢燃料电池更适合重量功率比高的飞行器,重量功率比越高的氢燃料电池动力飞行器,飞行所需功率越低,氢反应堆的重量占起飞重量的比例就越低,可携带的氢气容量就越大。当前,氢燃料电池功率密度依然较低,过高的峰值功率必然会导致反应堆重量大幅提高,从而会严重限制氢气存储重量。相比锂电池,氢燃料电池内阻高,单个反应单元在无电流静态电压为1V时,随着电流增大,电压会逐步降低,在设计最大功率时电压会降到0.6V,如果电流继续提高,电压将迅速下降^[31]。因此,对于功率需求较高的飞行器,提高氢燃料电池功率密度是实现氢燃料电池应用的关键。

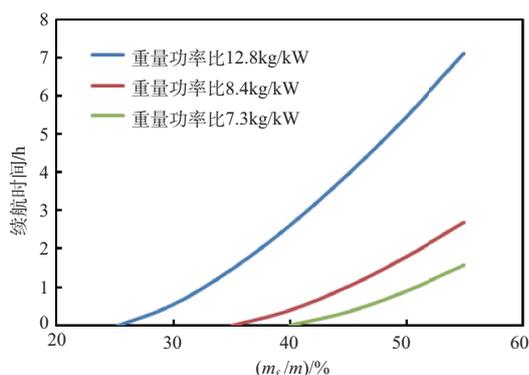


图9 重量功率比对飞行器续航时间的影响

Fig.9 Effects of weight-to-power ratio on endurance

(2)氢燃料电池环境适应性问题。空气中硫化物含量较高的环境、盐雾环境和沙尘暴严重的沙尘环境可能会导致反应堆内化学成分或微观结构损坏。相比之下,锂电池由于与外界不存在气体交换,在相应环境下均可以正常工作。同时,由于反应堆必须在40~60°C环境下工作,当前设计应用海拔高于3500m时发电能力会降至85%,高度继续上升,发电能力会迅速下降。因此,未来氢燃料电池航空应用需要在保持其较高能量转化效率的前提下开发相应环境下的保护措施。

(3)机载储氢问题。氢燃料电池可以解决续航的老问题,却带来了能源存储的新问题。储氢系统通常采用大尺

寸的高压气瓶。据统计可知,相对于氢气瓶重量增加,气瓶容积增加更快。若使用现成的飞行器直接改装氢动力,则可能不仅要消耗较大的结构重量来固定氢气瓶,过于紧凑的空间也无法安装较大的氢气瓶。因此,在设计阶段就应该重点考虑储氢系统设计,在未来的飞行器设计中应考虑液态和固态储氢技术,甚至可以将氢气瓶作为机体承力结构的一部分^[32]。

3 结论与展望

为实现航空业可持续发展和碳中和目标,直升机绿色航空动力正朝着能源可再生化和动力系统电动化的方向发展。中短期内可持续航空燃料适用于传统构型或混合动力直升机。由于受能量密度限制,电池适用于城市内短距离空中交通。依据氢燃料高能量密度和电池高功率密度的特点,氢燃料电池—电池混合动力适用于城市间空中交通或具有高速、长航时需求的直升机。氢是未来最重要的可再生能源载体,但未来氢能应用于直升机,还需解决燃料电池功率密度、环境适应以及机载储氢问题,须依托跨专业、跨领域的企业和科研机构协同来完成。

结合目前直升机绿色航空动力的发展现状和不同动力的对比结果,总结直升机绿色航空动力的未来发展趋势及相关关键技术如下:

(1)SAF可直接替换传统航空燃料,中短期内适用于传统构型或混合动力直升机。当前仍需要解决SAF燃料组成及其理化特性与发动机的匹配问题,同时提升炼制工艺水平,降低生产成本。

(2)未来城市内的短途空中交通,电池是最适合的航空动力,而城市间空中交通或具有高速、长航时需求的直升机,氢燃料电池—电池混合动力是最适合的动力。提高电池能量密度、电机及控制器功率密度以及能量管理水平是直机电动化的关键。

(3)氢能在未来能源体系中的占比有望超过10%,成本也越来越具竞争力,实现其应用的关键是提高氢燃料电池功率密度和环境适应性及解决氢机载存储的问题。

(4)分布式电驱动是未来直升机绿色动力装置的主要应用形式,但增加了气动设计和飞行控制的复杂性,需要结合气动、推进、结构及控制等多学科进行一体化设计。 **AST**

参考文献

- [1] 吴希明,张广林,牟晓伟. 中国直升机产业的现状及发展建议[J]. 航空科学技术,2021,32(1): 3-9.

- Wu Ximing, Zhang Guanglin, Mu Xiaowei. China helicopter industry status and development proposal[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(1): 3-9. (in Chinese)
- [2] 张扬军, 钱煜平, 诸葛伟林, 等. 飞行汽车的研究发展与关键技术[J]. *汽车安全与节能学报*, 2020, 11(1): 1-16.
- Zhang Yangjun, Qian Yuping, Zhuge Weilin, et al. Progress and key technologies of flying cars[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2020, 11(1): 1-16. (in Chinese)
- [3] Russell C R, Young L A, Yamauchi G K, et al. *Encyclopedia of aerospace engineering*[R]. AIAA Library of Flight, 2015.
- [4] International Air Transport Association. *Aircraft technology roadmap to 2050*[R]. IATA, 2019.
- [5] Jonas K N. Hydrogen electric airplanes-A disruptive technological path to clean up the aviation sector[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2021, 9(1):92-102.
- [6] Tjandra A, Basset P M, Vincent R, et al. Green house gas (GHG) reduction study for the rotorcraft industry[C]. 76th Annual Forum & Technology Display Vertical Flight Society, 2020.
- [7] 纪宇晗, 孙侠生, 俞笑, 等. 双碳战略下的新能源航空发展展望[J]. *航空科学技术*, 2022, 33 (12): 1-11.
- Ji Yuhan, Sun Xiasheng, Yu Xiao, et al. Development prospect of new energy aviation under carbon peaking and carbon neutrality goals[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33 (12): 1-11. (in Chinese)
- [8] International Energy Agency. *Electric and plug-in hybrid electric vehicles roadmap*[R]. Directorate of Sustainable Energy Policy and Technology (SPT), 2011.
- [9] Datta A, Johnson W. Requirements for a hydrogen powered all-electric manned helicopter[C]. 12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, 2012: 5405.
- [10] Schneider D. Helicopters go electric[J]. *IEEE Spectrum*, 2012, 49(1): 11-12.
- [11] 毛保华, 卢霞, 黄俊生, 等. 碳中和目标下氢能源在我国运输业中的发展路径[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2021, 21 (6): 234-243.
- Mao Baohua, Lu Xia, Huang Junsheng, et al. On development path of hydrogen energy technology in China's transportation system under carbon neutrality goal[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2021, 21 (6): 234-243. (in Chinese)
- [12] 廖忠权. 赛峰集团电推进技术发展[J]. *航空动力*, 2020(3): 31-36.
- Liao Zhongquan. The development of Safran electric propulsion technology[J]. *Aerospace Power*, 2020(3): 31-36. (in Chinese)
- [13] 朱炳杰, 杨希祥, 宗建安, 等. 分布式混合电推进飞行器技术综述[J]. *航空学报*, 2022, 43(7): 48-64.
- Zhu Bingjie, Yang Xixiang, Zong Jian'an, et al. Distributed hybrid electric propulsion aircraft technology: Review[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(7): 48-64. (in Chinese)
- [14] Donato T, Spedicato L. Fuel economy of hybrid electric flight [J]. *Applied Energy*, 2017, 206: 723-738.
- [15] Koruyucu E. Energy and exergy analysis at different hybridization factors for hybrid electric propulsion light utility helicopter engine[J]. *Energy*, 2019, 189: 116105.
- [16] Datta A, Johnson W. Power-plant design and performance analysis of a manned all-electric helicopter[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(2): 490-505.
- [17] Ng W, Datta A. Hydrogen fuel cells and batteries for electric-vertical take-off and landing aircraft[J]. *Journal of Aircraft*, 2019, 56(5): 1765-1782.
- [18] Ustolin F, Taccani R. Fuel cells for air-borne usage: Energy storage comparison[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43:11853-11861.
- [19] Rosario R D. A future with hybrid electric propulsion systems: A NASA perspective[C]. *Turbine Engine Technology Symposium*, 2014.
- [20] 黄俊. 分布式电推进飞机设计技术综述[J]. *航空学报*, 2021, 42(3): 7-23.
- Huang Jun. Survey on design technology of distributed electric propulsion aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(3): 7-23. (in Chinese)
- [21] 宋敏华, 张文琦, 相倩, 等. 电动飞机分布式螺旋桨对气动性能影响的建模研究[J]. *航空科学技术*, 2023, 34 (6): 20-25.
- Song Minhua, Zhang Wenqi, Xiang Qian, et al. Modeling research on the influence of distributed propellers on aerodynamic performance of electric aircraft[J]. *Aeronautical*

- Science & Technology, 2023, 34 (6): 20-25. (in Chinese)
- [22] Felix F D, Carsten B, Cees B. A review of configuration design for distributed propulsion transitioning VTOL aircraft[C]. 2017 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 2017.
- [23] Yan Xufei, Lou Bin, Xie Anhuan, et al. A review of advanced high-speed rotorcraft[J]. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2021, 1102: 012006.
- [24] Hepperle M. Electric flight-potential and limitations [C]. NATO Science and Technology Organization, 2012.
- [25] Ng W, Patil M, Datta A. Hydrogen fuel cell and battery hybrid architecture for range extension of electric VTOL (eVTOL) aircraft[J]. Journal of the American Helicopter Society, 2021, 66(1): 1-13.
- [26] 王翔宇. 可持续航空燃料发展展望[J]. 航空动力, 2022(2): 24-28.
Wang Xiangyu. Sustainable aviation fuel outlook[J]. Aerospace Power, 2022(2): 24-28. (in Chinese)
- [27] 张扬军, 彭杰, 钱煜平, 等. 氢能航空的关键技术与挑战[J]. 航空动力, 2021(1):20-23.
Zhang Yangjun, Peng Jie, Qian Yuping, et al. Key technologies and challenges of hydrogen powered aviation[J]. Aerospace Power, 2021 (1):20-23. (in Chinese)
- [28] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 1-12.
Xu Shuo, Yu Biying. Current development and prospect of hydrogen energy technology in China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Science Edition), 2021, 23(6): 1-12. (in Chinese)
- [29] 李建, 张立新, 李瑞懿, 等. 高压储氢容器研究进展[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1835-1844.
Li Jian, Zhang Lixin, Li Ruiyi, et al. High-pressure gaseous hydrogen storage vessels: Current status and prospects[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1835-1844. (in Chinese)
- [30] Raymer D P. Aircraft design: A conceptual approach[M]. 5th edition. Virginia: AIAA Education Series, 2012.
- [31] Ng W, Datta A. Development of models for electrochemical power and sizing of electric-VTOL aircraft[C]. AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2018.
- [32] Winnefeld C, Kadyk T, Bensmann B, et al. Modelling and designing cryogenic hydrogen tanks for future aircraft applications[J]. Energies, 2018, 11: 105.

Research on the Development of Green Power Technologies for Helicopter

Liu Daojian, Huang Shuilin, Feng Weichao

China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China

Abstract: To achieve the sustainable development of helicopter and carbon neutral target, developing green aviation power is the most important technological approach. The development directions of green aviation power were analyzed, and then compared in the view of properties and vehicle performance. It can be found that, Sustainable Aviation Fuel (SAF) is the most suitable fuel for traditional and hybrid helicopter in short-to-middle term. Battery is the ideal power for inner-city urban air mobility, while hydrogen fuel cell-battery hybrid power is more suitable for inter-city urban air mobility or high speed and long endurance helicopter. The performances of green power helicopters can be enhanced with new configuration, while the application of hydrogen to helicopter relies on the wide cooperation of interdisciplinary enterprises and institutes. This research will show certain guiding significance for the development of helicopter green aviation power technology.

Key Words: helicopter; green aviation power; SAF; hydrogen fuel cell; battery