

“双碳”战略下绿色能源无人机的发展机遇和挑战

席涵宇, 王正平, 张晓辉*, 杨 盾

(北京理工大学宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 对绿色能源无人机这一新兴航空技术领域进行了综合评述, 并讨论了未来发展机遇和挑战。首先, 阐述了绿色能源无人机的发展现状, 介绍了典型太阳能无人机、氢燃料电池无人机, 分析了高效柔性薄膜太阳能电池、轻质高效氢燃料电池等绿色能源动力关键技术; 然后, 对“双碳”战略带来的机遇进行了分析; 最后, 探讨了绿色能源无人机技术发展面临的挑战, 以及未来发展方向, 为绿色能源飞行器技术领域的研究工作和关键技术攻关提供一定参考。综述表明, “双碳”战略已经提升到了国家战略层面, 绿色装备需求迫切, 绿色航空发展进程正在加速。兼顾长航时和大载荷的实用化技术、低成本快捷改装技术以及多种能源混合互补技术等将是推动绿色能源无人机未来发展的关键。

关键词: “双碳”战略; 绿色航空; 新能源; 混合动力; 太阳能无人机; 氢燃料电池无人机

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 2096-5915(2023)01-02-12

DOI: 10.19942/j.issn.2096-5915.2023.01.02

Opportunities and Challenges for the Development of UAV Technology Under the "Double Carbon" Strategy

XI Hanyu, WANG Zhengping, ZHANG Xiaohui*, YANG Dun

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A comprehensive review of green energy UAVs which is an emerging field of aviation technology is presented, and the future development opportunities and challenges are discussed. First, the development status of green energy UAVs is expounded, typical solar-powered UAVs and fuel cell UAVs are introduced, and key technologies of green energy power such as high-efficiency flexible thin-film solar cell and lightweight and high-efficiency fuel cell are analyzed. Then the opportunities brought by the "Double carbon" strategy are analyzed. At last, the challenges and development directions of green energy UAV technology development are discussed. This paper can provide a certain reference for research work and key technology research in related fields. The comprehensive commentary indicates that "Double carbon" strategy has been elevated to the national strategic level, the demand for green equipment is urgent, and the development process of green aviation and green aerospace is accelerating. Green energy UAVs have played an increasingly important role in the civilian and military fields. Practical technologies that take into account both

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-10-27

基金项目: 航空科学基金 (2020Z005072001)

long endurance and large loads, low-cost and quick modification technologies, and hybrid and complementary technologies for multiple energy sources will be the key to promoting the future development of green energy UAVs.

Key words: "Double carbon" Strategy; Green Aviation; New Energy; Hybrid Electric Power; Solar-powered UAVs; Fuel Cell Powered UAVs

1 引言

当前全球非预混燃烧每年向大气排放约为510亿吨的温室气体,为了避免温室气体带来的气候灾难,根据《巴黎协定》所规定的碳排放尽早达到峰值,并在本世纪中叶实现碳排放净增量归零的目标。多数发达国家已经明确提出了碳中和的时间表,到21世纪中叶,世界主要碳排放国家都将实现二氧化碳净零排。2020年,中国宣布了“碳达峰”和“碳中和”的目标愿景,简称“双碳”战略目标^[1],并将“双碳”提升到了国家战略层面。为了实现这一目标,必须以科技创新为先导。因此,“双碳”战略为科技创新提供了广阔的发展空间。

与有人飞机相比,无人机场景适应性更强,用途更广,从而得到各个领域的青睐。无人机已经广泛应用到战场侦察与评估、环境监察与检测、空中物流与快递、娱乐生活与活动等各个领域,成为社会发展和人们生活中密不可分的重要组成部分^[2-5]。

世界各国已经将绿色能源装备放到了重中之重的位置,绿色航空^[6-7]、绿色航天^[8-9]的进程正在加速,绿色能源飞行器已经成为发展热点。绿色能源无人机是无人机技术和绿色能源技术深度交叉融合的产物。“双碳”战略将推动绿色能源装备的发展,绿色能源无人机的发展必将成为“双碳”科技创新中的重点之一。

与无人机相关的技术很多,本文主要讨论“双碳”战略为无人机发展带来的机遇和挑战。因此,本文重点介绍绿色能源无人机和绿色能源技术的发展情况,分析“双碳”战略给绿色能源无人机发展带来的机遇和挑战。在此基础上,对绿色能源无人机的发展前景和产业化方向进行初步探讨。

2 绿色能源无人机发展概况

太阳能、氢能等绿色能源具有无污染、无排放等显著优势,以太阳能、氢能为能源的绿色能源无人机具有无污染、低振动、长航时等优点^[10-11]。太阳能、氢能是绿色能源无人机的主要能源形式。

2.1 太阳能无人机

1974年,世界上的第一架太阳能无人机Sunrise I(图1(a))完成了首航^[12],开启了各国探索太阳能无人机的大门。通过无人机总体方案设计、能源动力系统研究、飞行试验验证等手段,重点突破无人机长航时关键技术,取得了丰富的研究成果。

2.1.1 太阳神(Helios)无人机

太阳神无人机是美国国家航空航天局和航空环境公司联合研发的太阳能无人机,采用飞翼式布局(图1(a))。翼展75.3 m,机翼上安装14个推进器,翼面上安装62000块SunPower双面硅太阳能电池板,光电转化效率达19%,最大可以供电40 kW。2001年8月13日,太阳神创造了29.43 km的太阳能无人机飞行高度记录^[13]。后期,为了进一步增加航时,在无人机上加装了18 kW的氢燃料电池系统(图1(b)),以满足夜间飞行的能源需求(图1(c))^[14]。

2.1.2 西风(Zephyr)无人机

西风无人机是英国国防部下属的奎奈蒂克公司研发的太阳能无人机,如图2所示。2013年被空客集团防务与空间公司收购。之后,奎奈蒂克公司为高空伪卫星应用打造了Zephyr S(Zephyr 8)平台,如图3(a)所示;并进一步研发Zephyr T平台,如图3(b)所示,其目标是在追求更长航时的同时,兼顾更大的有效载荷能力。Zephyr S为了达到提高航时的目的,光伏采用了柔性高效

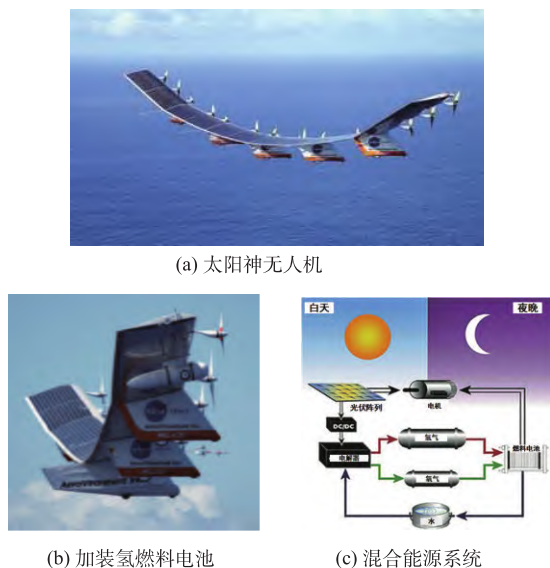


图1 太阳神无人机

Fig. 1 Helios UAV

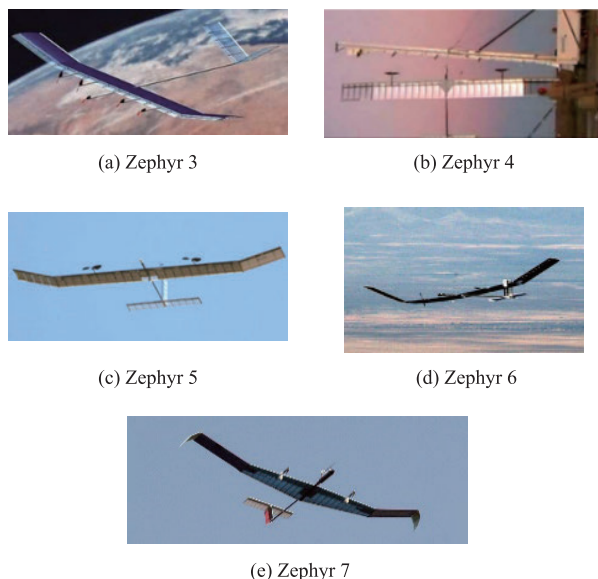


图2 西风系列无人机

Fig. 2 Zephyr series UAVs

三节砷化镓太阳能电池，光电转化效率达28%，比功率超过1500 W/kg，储能采用了硅纳米线阳极锂离子电池，比能量达435 Wh/kg^[15]。2021年11月，Zephyr S携带光学高级地球观测系统为客户演示了未来运营模式，在23 km高度连续飞行了两个架次，每次超过18天，证明了其在提供即时、持久态势感知方面的运营价值。截至当时，该型无人机在平流层已累计飞行了2435 h^[16]。为了进一步提升载荷能力，空客公司基于Zephyr S进一步设计了更大尺寸的Zephyr T型号，采用了双T形尾翼，计划携带20 kg任务载荷^[17]。2022年7月，Zephyr S无人机打破了26天不间断飞行记录。2022年8月19日，其持续飞行时间已经延长至64天^[18]。

2.1.3 PHASA-35无人机

PHASA-35无人机是英国BAE Systems公司研发的一款新型、超轻、太阳能高空长航时无人机，如图4所示。翼展35 m，可携带15 kg设备，为卫星和常规动力飞机提供持久稳定的图像和通信平台。PHASA-35无人机采用先进的复合材料、能源管理技术、太阳能电池。光伏阵列在白天提供能源并储存在可充电电池中，以维持夜晚飞行。PHASA-35无人机自身可在一个区域内持续工作一个月。在不到两年的时间里，该无人机完成了

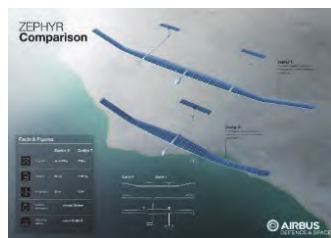
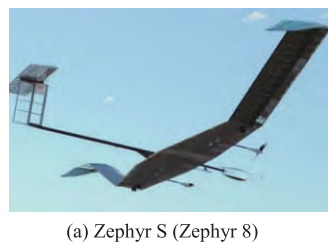


图3 空客的西风无人机平台

Fig. 3 Airbus's Zephyr UAV platform



Fig. 4 PHASA-35 UAV

设计和制造,并于2020年在澳大利亚进行了首飞实验^[19]。

2.1.4 彩虹太阳能无人机

彩虹太阳能无人机是中国航天科技集团公司第十一研究院研发的高空长航时太阳能无人机,采用正常式布局如图5所示。翼展45 m,设计留空时间大于24 h,升限超过20 km,载荷能力为20 kg。2017年,该无人机完成了20 km高空15 h飞行试验,使我国成为继美、英之后,第三个掌握高空长航时太阳能无人机技术的国家^[20]。



图5 彩虹太阳能无人机

Fig. 5 Caihong solar powered UAV

2.1.5 魅影太阳能无人机

魅影太阳能无人机如图6所示,集太阳能、无人机和无线路由器三者于一体,太阳能为其供给能源。太阳能无人机为持久留空平台,可与WI-FI技术相结合,构建“空中WI-FI基站”,通过空中单机或多机基站,实现区域覆盖,解决偏远地区、广域海上和灾区等应急场所快速搭建信息桥梁的难题,填补了国内在“空基”通信基础设施中的空白。该型太阳能无人机是国内第一架全翼式布局太阳能无人机,也是国内第一架薄膜电池太阳能无人机。魅影太阳能无人机机身长7 m,贴满晶硅板,续航时间6~24 h,最大任务高度可达6000 m,内部搭载1 kg重特制路由器,总重不超过15 kg。2018年,魅影太阳能无人机在陕北毛乌素沙漠边缘的戈壁上,完成了19 h 34 min的全自主飞行,并顺利回收,刷新了国内最长续航时间16 h 09 min的记录^[21]。

2.1.6 其他太阳能无人机应用工程

国外商业公司一直在探索太阳能无人机的商业价值。比较著名的机型有极光的“Odysseus”太阳能无人机,如图7(a)所示;Google的Solaris50无人机,如图7(b)所示;Skydweller的太阳能无



图6 魅影无人机

Fig. 6 Meiying UAV

人机,如图7(c)所示。其中,Skydweller型号除了太阳能之外,还在引入氢燃料电池。目前该项目正在推进中,近期未见后续报道。国内一些研究院也在尝试开展太阳能无人机项目工程,例如中航工业第一飞机设计研究院的启明星50,如图7(d)所示;中国航天科工集团第三研究院的飞云工程,如图7(e)所示。都进一步表明了绿色能源无人机未来发展势头的强劲^[22]。



(a) Odysseus



(b) Solaris50



(c) Skydweller



(d) 启明星50



(e) 飞云工程无人机

图7 太阳能无人机项目

Fig. 7 Solar powered UAV projects

2.2 氢燃料电池无人机

氢燃料电池无人机是目前中低空电动长航时无人机中最具发展潜力的绿色能源无人机。其利用氢燃料电池高比能的特点,不断刷新氢能动力无人机的航时记录,成为当前国内外中低空电动

长航时无人机发展热点。

2.2.1 长航时氢燃料电池无人机

离子虎无人机是美国海军研究实验室研发的长航时氢燃料电池无人机,采用常规式布局,如图8(a)所示。其起飞重量15.9 kg,配置了Protonex公司550 W轻型燃料电池,如图8(b)所示。2009年,该无人机携带气态氢燃料,持续飞行了26h,创造了当时燃料电池无人机最长航时记录^[23-24]。2013年,这架无人机配装美国海军研究实验室研制的轻质低温贮存容器及传输系统,使用液氢燃料,持续飞行了48h,创造了保持至今的燃料电池无人机航时记录^[25]。



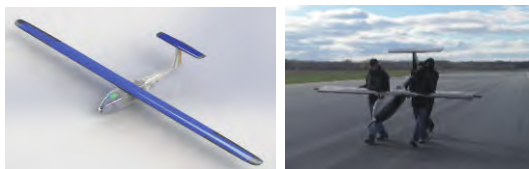
(a) 离子虎无人机

(b) 燃料电池系统

图8 “离子虎”无人机及燃料电池系统

Fig. 8 “Ion Tiger” UAV and fuel cell system

离子虎的成功进一步推动了混合虎的发展^[26],如图9所示。混合虎采用氢燃料电池与太阳能电池混合能源形式,于2020年11月成功试飞^[27]。



(a) 设计方案

(b) 试飞场景

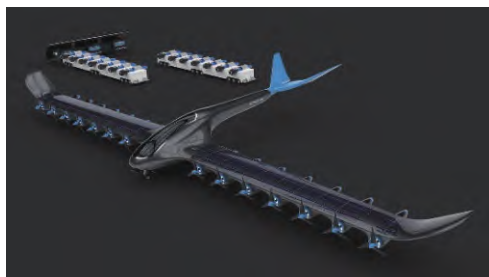
图9 混合虎无人机

Fig. 9 Hybrid Tiger UAV

2.2.2 H3 Dynamics分布式氢动力概念无人机

H3 Dynamics致力于研制分布式氢燃料电池动力方案,以促进氢动力航空应用推广^[28]。2018年该公司申请了分布式航空氢动力的方案专利,如图10(a)所示;2022年1月,测试了模块化的氢推进短舱方案,如图10(b)所示;同时宣布将研制Hywings H-25货运无人机机型,新机型将采用两个动力舱,最大起飞重量为25 kg,可携带5 kg

有效载荷。2022年7月,在巴黎附近机场成功试飞了该机型,如图10(c)所示,并计划下一步在2023年底实现可搭载2~4名乘客的载人飞机设计^[29]。



(a) 分布式氢动力概念



(b) 分布式氢电舱



(c) Hywings H-25试飞

图10 H3 Dynamics的分布式氢动力方案

Fig. 10 Distributed hydrogen-electric UAVs of H3 Dynamics

2.2.3 国内商用垂直起降氢燃料电池无人机

2019年5月,成都纵横股份与斗山创新开始合作研发工业级氢动力垂直起降无人机平台,并于当年实现首飞。2021年5月成功交付了实用型号CW-25H,如图11所示。该机型翼展6 m,机长2.1 m,最大起飞重量31 kg,载荷4 kg,巡航速度80 km/h,续航时间可达330 min,实现了国内氢动力无人机的商业化应用。



(a) CW-25H交付

(b) CW-25H试飞

图11 商用氢燃料电池无人机

Fig. 11 Commercial Hydrogen Fuel Cell UAV

2.3 绿色能源动力关键技术

目前,绿色能源无人机主要采用太阳能和氢能动力技术,由太阳能电池、氢燃料电池、辅以

储能电池与动力系统（电机、电调、螺旋桨等）构成无人机的能源动力系统。绿色能源无人机的性能主要受到绿色能源动力关键技术的限制，下面对绿色能源动力关键技术进行总结分析。

2.3.1 高效柔性薄膜太阳能电池技术

以砷化镓（GaAs）、镓铟砷（GaInAs）等为代表的薄膜太阳能电池技术因其柔性高效以及曲面贴合性好的特点，能够完全满足无人机空气动力学要求和美学外观要求，被广泛应用于国内外著

名的太阳能无人机，如空客的Zephyr、波音极光的Odysseus以及国内彩虹太阳能无人机等。在三结薄膜太阳电池方面，2022年，美国能源部国家可再生能源实验室（NREL）采用厚量子阱超晶格实现了三结太阳能电池39.5%的地面效率和34.2%的空间效率，如图12所示^[30]，打破了日本Sharp公司于2013年创造的37.9%的光电转换效率记录，该公司采用了倒装型（Inverted Metamorphic Multijunction, IMM）电池技术^[31]。

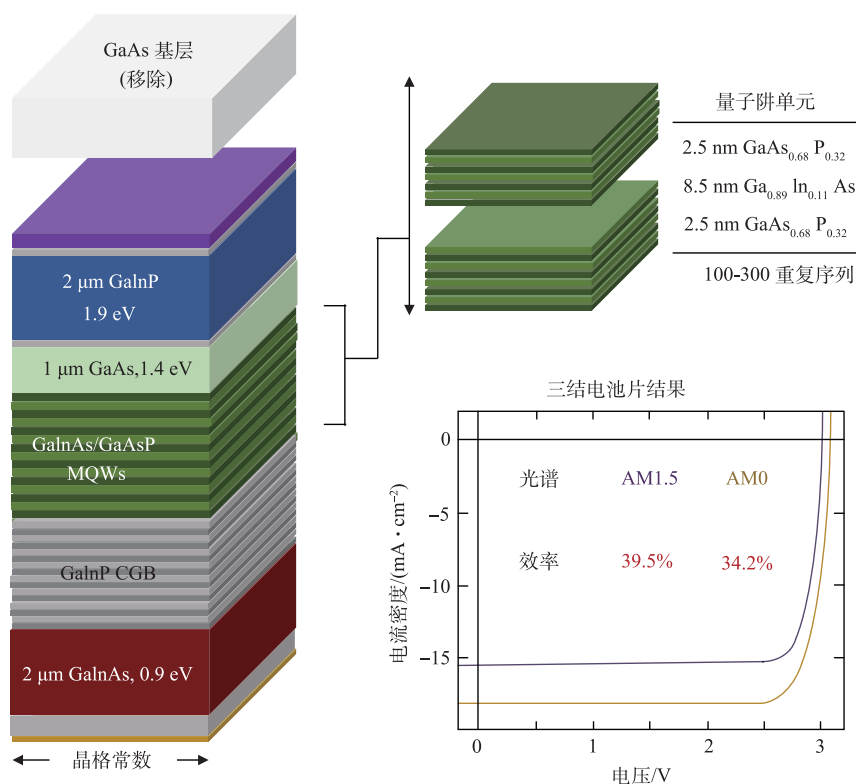


图12 NREL三结高效太阳能电池技术

Fig. 12 Triple-junction high-efficiency solar cell technology of NREL

国内三结GaAs太阳能电池技术暂时相对落后，但光电转换效率已超过了30%，接近国际先进水平^[31]，而国内GaAs薄膜太阳能电池技术尚未超过35%，国内应用于无人机的薄膜太阳能电池效率为31%，但依然取得了不俗的应用效果^[32]。

目前，国内外可生产高效半柔性/柔性太阳能电池的厂家中具有代表性的有：美国SunPower公司和Micro Link公司\汉能旗下的Alta Devices美国子公司，以及中国电子科技集团第十八研究所。这些厂家主要生产的柔性太阳能电池如图13所

示。其中，Micro Link公司的砷化镓太阳能电池在Zephyr S上得到了应用。

2.3.2 轻质高效氢燃料电池技术

氢燃料电池是以氢气和氧气作为电化学反应原料，将氢氧的化学能直接转换为电能的装置，没有机械传动部件，具有无噪声、无污染，且高比能的特点，是中低空电动长航时无人机最佳动力源之一。

国内外生产无人机用燃料电池的厂家及产品相对较多，比较典型的有：Protonex公司的

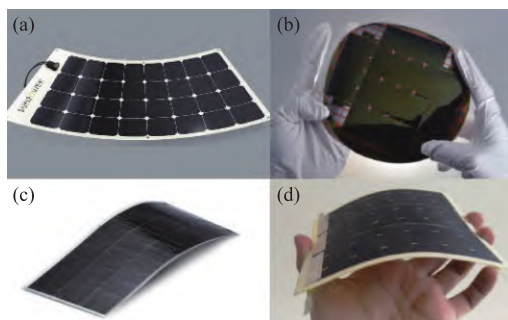


图13 部分厂家的柔性太阳能电池

Fig. 13 Flexible solar cells from some manufacturers

Protonex 燃料电池、加拿大 EnergyOr 燃料电池公司的 EPOD 燃料电池、新加坡 H3Dynamics 的 A 系列燃料电池、英国 Intelligent Energy 公司的 IE-SOAR 系列燃料电池、上海攀业氢能源公司的 EOS 燃料电池、武汉众宇动力系统公司的 HyLite 燃料电池等,如图 14 所示。其中, H3Dynamics 公司的燃料电池在“EAV-1”(韩国)、“Wander B”(以色列)等无人机上得到应用, Protonex 公司的燃料电池在“离子虎”(美国)、“扫描鹰”(美国)等无人机上得到应用; EnergyOr 公司的燃料电池在“H2Quad”(加拿大)等无人机上得到应用, HES 公司的燃料电池在“Skyblade”(新加坡)等无人机上得到应用, 上海攀业的燃料电池在“飞跃一号”(中国)等无人机上得到应用, 武汉众宇的燃料电池在“天行者”(中国)等无人机上得到应用。

目前, 燃料电池的比能量和比功率是评价无人机用燃料电池性能的两个重要指标。比能量直接决定燃料电池无人机的航时, 其主要受限于储氢能力。通常, 携带的氢气量越大比能量越高, 而目前用于无人机的燃料电池系统的比能量可超过 800 Wh/kg [33], 明显高于现在航模锂电池的比能量 (约 200 Wh/kg)。比功率作为另一个重要指标, 决定了燃料电池的动力特性, 以及无人机的机动性能, 其主要受限于燃料电池堆自身的发电能力。统计并对比目前主流燃料电池制造商公开的性能数据如图 15 所示。

英国 Intelligent Energy 公司的燃料电池比功率最高, 可达到 552 W/kg ; H3 Dynamics 公司的燃料电池也可以达到 500 W/kg ; 国内武汉众宇的燃料电池可达到 300 W/kg , 与国际先进水平尚有一定差距。



图14 部分厂家的氢燃料电池

Fig. 14 Hydrogen fuel cells from some manufacturers

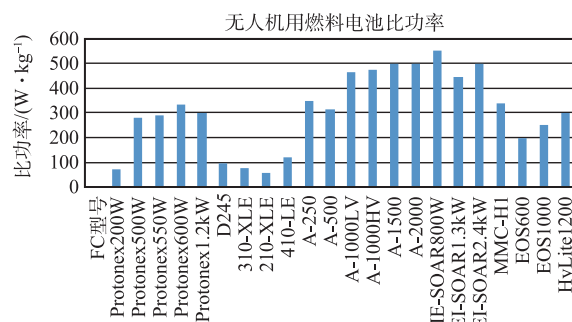


图15 无人机用燃料电池比功率

Fig. 15 Specific power of fuel cell for UAVs

2.3.3 高储氢质量比储氢技术

无人机的可用空间有限, 如何在有限的空间下储存、携带更多的氢是有效提高氢燃料电池无人机航时的关键之一。根据氢燃料的不同物理形态, 可灵活地采取不同形式的储氢技术, 如气态储氢、液态储氢和固态储氢。目前, 气态储氢技术成本较低, 技术成熟较高, 在无人机应用较为广泛。

根据安全制造材质和工艺, 气瓶一般分为四型: I 型瓶为金属气瓶, II 型瓶为金属内胆纤维环向缠绕气瓶, III 型瓶是金属内胆纤维全缠绕气

瓶, IV型瓶是非金属类的纤维全缠绕气瓶。III和IV型均有35 MPa压力和70 MPa压力^[34-35]。IV型气瓶是当前国际上最先进的储氢气瓶, 采用碳纤维、玻璃纤维全缠绕工艺, 内胆也采用复合材料, 因此质量更轻, 特别适合应用于无人机, 目前在国际市场上应用较多。国内IV型瓶正处于研发阶段, 尚无成熟商用产品。因此, 国内无人机应用的主要是35 MPa的III型瓶, 如图16所示。



图16 无人机用III型储氢瓶

Fig. 16 Type III of hydrogen tank for UAVs

储氢质量比(简称“储氢比”)是评价储氢能力的重要指标, 即储氢质量与整个储氢装置质量之比。目前无人机用高压储氢瓶储氢比可以达到8%, 特制储氢瓶可以超过10%, 如离子虎所用的高压碳纤维储氢瓶可达到13%^[25]。图17给出了国外H3Dynamics公司和国内中材科技公司两个专业做无人机用储氢瓶的公司的产品数据。可以看出, 当前国内外储氢质量比差距不大, 国外最高可以达到8%, 国内可达到7.5%。

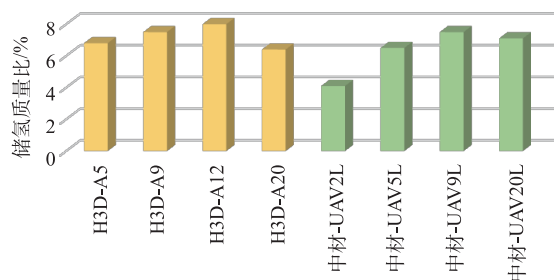


图17 无人机用储氢瓶的储氢质量比

Fig. 17 Hydrogen storage mass ratio of tank for UAVs

3 “双碳”战略带来的机遇

“双碳”战略对科技创新和发展带来的影响是全方位的, 为无人机技术发展带来的机遇主要反

映在以下两个方面: (1) 绿色能源无人机发展需求愈发强烈, 需求牵引为绿色能源无人机的发展带来了强劲的源动力; (2) 绿色能源产业化进程加速成形, 为绿色能源无人机的发展带来了巨大的驱动力。

3.1 绿色能源无人机发展需求强烈

目前, 世界范围内的无人机应用已经涉及各个领域, 我国民用无人机产业发展迅速。根据中研普华无人机行业分析专家撰写的《2022—2026年中国无人机行业深度调研与投资战略研究咨询报告》^[36], 我国的民用无人机市场将在未来3~5年内实现年均超过50%的高速增长。无人机不仅“飞入寻常百姓家”, 而且应用场景不断拓展, 在航拍、植保、电力、安防、测绘等领域日渐成熟, 并有望逐步打开无人机数据服务、驾驶员培训等增值服务市场。有关部门预测, 到2025年, 我国民用无人机产值将达到1800亿元。

为了实现“双碳”战略目标, 随着无人机数量的激增, 其绿色环保的要求就更加迫切, 研发绿色能源无人机的需求非常强烈。目前, 采用蓄电池供电的电动无人机已经取得了很大的进展, 但是, 由于蓄电池的能量密度有限, 蓄电池电动无人机普遍存在航时短、有效载荷低的问题。在实现更长航时、更低噪声、更加环保等目标方面, 太阳能、氢能驱动的绿色能源无人机具有更加明显的优势。根据能源的特性, 可以研发不同能源的无人机, 以满足应用需求。例如, 在平流层内部署高空长航时太阳能无人机, 可以形成长期的、高空的、活动的、绿色的对地观察平台, 填补卫星与飞机之间的空档。在低、中空发展氢能无人机, 可以大大提升无人机的飞行航时。在不同空域发展太阳能/氢能混合能源无人机, 可以充分利用两种能源的优势。可见, “双碳”战略正在为绿色能源无人机的发展带来强劲的源动力。

3.2 绿色能源产业化进程加速

能源是人类赖以生存的重要资源, 开发和利用绿色能源是实现“双碳”目标的重中之重。世界各国都出台了相关的政策, 以促进绿色能源的产业化发展。与绿色能源无人机相关的光伏^[37]和氢能^[38]产业的发展都得到了极大的促进。其中,

氢能的产业化进程更是显著。

氢能是一种来源丰富、绿色低碳、应用广泛的二次能源,对构建清洁低碳安全高效的能源体系、实现“双碳”目标,具有十分重要的意义。多年来,受限于氢能产业链复杂,制氢、储氢、运氢、加氢等环节存在经济性、安全性等问题,氢能的利用受到很大的限制。为了满足低碳要求,近年来,各国纷纷提出了氢能产业相关的报告和文件,如2020年5月欧盟发表了《氢能动力航空》研究报告^[39],2020年11月美国能源部提出了《氢能计划发展规划》^[40],2021年8月英国商务、能源与产业战略部发布了《UK氢能战略》^[41]。

2022年3月23日,中国国家发展改革委和国家能源局发布了《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》^[42],明确了氢能的能源属性,氢能是未来国家能源体系的组成部分,充分发挥氢能清洁低碳特点,推动交通、工业等用能终端和高耗能、高排放行业绿色低碳转型。在“双碳”战略目标下,为建设绿色经济高效便捷的氢能供应体系,中国逐渐突破氢的制、储、运、加等各环节的技术难关。可见,光伏和氢能产业的大力发展,为绿色能源无人机产业化进程的加速提供了巨大的驱动力。

4 绿色能源无人机发展趋势

绿色能源无人机虽然已经历了近半个世纪的发展,但是,研究工作主要还是集中在概念探索和技术验证层面,工程实用的绿色能源无人机种类和数量还不多。“双碳”战略在为绿色能源无人机的发展提供机遇的同时,也给该技术领域的发展提出了严峻挑战。其核心问题是,在“双碳”目标时间紧、任务重的形势下,如何能够快速制造大量实用化、产业化的绿色能源无人机。面对该挑战,本文提出以下几点推动绿色能源无人机快速发展的思考与展望。

4.1 绿色能源无人机的实用化发展

从1974年世界上的第一架太阳能无人机出现至今,已经有了大量的绿色能源无人机产品。发展的前期,主要是进行概念探索、技术研究和试

验验证。而为了绿色能源无人机真正能够大批量的使用,并发挥重要的作用,其核心需要解决的问题是飞行航时和有效载荷能力的同时提升,以满足实用化需求。21世纪之后,无人机的厂商们已经开始在这个方面加大力度,如空客集团防务与空间公司,基于多代西风太阳能无人机的基础和成果,提出了面向应用需求、兼顾追求更长的航时和更强的有效载荷能力的Zephyr S和Zephyr T发展方案。

因此,为了加速绿色能源无人机产业化进程,应该在现有成果的基础上,重点解决绿色能源无人机实用化相关的关键技术。其中,最重要的是兼顾解决绿色能源无人机的长航时和大有有效载荷的关键问题,组建航空应用的氢能产业联盟,快速形成满足应用需求的绿色能源无人机产业链条。

4.2 无人机的能源绿色化改装发展

无人机行业经过多年的发展,已经形成大量的成熟产品。与研发一款新型的绿色能源无人机相比,在成熟机型上进行绿色能源改装是一条快速发展绿色能源无人机的有效途径。目前为止,已经有多家公司对此进行了探索和实践,较为成功地对油动、电动无人机进行了氢燃料电池改装,例如,Insitu公司将扫描鹰改装成了燃料电池无人机,有效改善了原始油动无人机的污染、噪声和振动严重等问题^[43];以色列两家公司Israel Aerospace Industries和BlueBird Aero Systems,分别对BirdEye 650和Boomerang无人机进行了燃料电池改装,显著提升了无人机航时^[44-46]。文献[47]对无人机的氢燃料电池改装开展了较为深入的研究,表明通过对成熟无人机进行燃料电池改装,可以有效提高无人机航时,缩短绿色能源无人机的研发周期。

因此,为了缩短研发周期和降低成本,快速形成满足应用需求的绿色能源无人机产业,可以采取对现有成熟无人机进行绿色能源动力改装的技术途径,重点解决无人机总体匹配设计、能源动力系统改装等关键问题。

4.3 多种绿色能源混合式互补发展

太阳能、氢能作为绿色能源无人机的主要能源,各有优缺点。为了满足无人机的长航时和大

有效载荷的应用需求,克服太阳能无人机夜间飞行、氢燃料电池的储氢量有限的难题,发展太阳能/氢能混合能源无人机也是一种重要技术方案。可以通过研制混合能源无人机、对太阳能无人机进行燃料电池加装、对燃料电池无人机进行太阳能电池加装等方式,形成互补性绿色能源系统。早期,太阳神太阳能无人机就曾进行加装氢燃料电池的尝试,此外,文献[48]和[49]在太阳能/氢能混合动力无人机总体设计与能源管理等方面开展了较为深入的研究。2018年,通过对离子虎燃料电池无人机加装太阳能电池,设计了太阳能/氢能混合动力混合虎无人机,皆在使其具备2天以上航时的能力^[50]。2022年,美国海军与Skydweller Aero公司签订了一份价值1400万美元(8906万人民币)的合同^[49],计划在其太阳能无人机上增设氢燃料电池。该合同将持续到2023年底,最终将在阳光动力2号太阳能无人机上进行飞行测试,其中白天收集的太阳能为主要推进动力,氢燃料电池系统将作为备用电源。此外,氢能系统还将提供额外的能量以便在更高的高度或速度上飞行,不仅使无人机飞得更远,也能为有效载荷提供更多的电力。

因此,为了进一步升级绿色能源无人机产业,也可通过新研或对原有绿色能源无人机进行能源系统拓展等方式,开发优势互补的混合能源无人机,重点突破无人机总体设计方法、能源动力系统升级、混合能源管理等关键技术。

5 结束语

“碳达峰”“碳中和”已经成为世界范围内的头等大事之一。不同的国家正在根据自身情况纷纷提出了自己的目标,有望到21世纪中叶,世界主要碳排放国家都将实现二氧化碳净零排。无人机作为一种广泛应用的产业,同样面临着巨大的挑战。同时,它也迎来了前所未有的机遇。为了实现绿色能源无人机的产业化,无人机行业应进一步加大科技创新的力度,并加速推动其发展进程。

本文分析了“双碳”战略为无人机产业带来

的机遇和挑战,适逢绿色能源产业化发展契机,提出了绿色能源无人机实用化发展、能源绿色化改装发展、多种能源混合式发展等产业化快速发展思路,并指出了需要重点攻关柔性太阳能电池、高效氢燃料电池以及储氢能力的关键技术,为绿色航空技术发展提供参考。

参 考 文 献

- [1] 白永秀, 鲁能, 李双媛. 双碳目标提出的背景、挑战、机遇及实现路径[J]. 中国经济评论, 2021, 11(5): 10-13.
- [2] 赵伟, 王正平, 张晓辉, 等. 面向疫情防控的无人机关键技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(3): 8-18.
- [3] 王秋生, 贺云涛, 张晓辉, 等. 基于无人机航拍图像的车道线检测方法综述[J]. 无人系统技术, 2019, 2(5): 9-16.
- [4] 贾宜霖, 岳训. 引领式空中汉字展示无人机集群的仿真研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 32-39.
- [5] Ella A. 无人机系统[M]. 刘莉, 李道春, 等, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
- [6] 孙侠生. 绿色航空技术与进展[M]. 北京: 航空工业出版社, 2020.
- [7] Ramesh A. 绿色航空[M]. 刘莉, 朱春玲, 季路成, 等, 译. 北京: 北京理工大学出版社, 2019.
- [8] 魏冰洁, 孙小菁, 王小永. 全电推进卫星平台现状与进展[J]. 真空与低温, 2016, 22(5): 301-305, 310.
- [9] 兰顺正. 航天器电推进系统技术获进展[N]. 中国国防报, 2020-2-4(04).
- [10] 马东立, 张良, 杨穆清, 等. 超长航时太阳能无人机关键技术综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 34-63.
- [11] 刘莉, 曹潇, 张晓辉, 等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 6-33.
- [12] Zhu X, Guo Z, Hou Z. Solar-powered airplanes: A historical perspective and future challenges [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 71(11): 36-53.
- [13] Noll T E, Brown J M, Perez-Davis M E, et al. Investigation of the helios prototype aircraft mishap [R]. Hampton, USA: NASA, J2004.
- [14] 祝彬, 陈笑南, 范桃英. 国外超高空长航时无人机发展分析[J]. 中国航天, 2013, 427(11): 28-32.
- [15] Airbus Defence. Airbus Zephyr Solar High Altitude Pseudo-Satellite flies for longer than any other aircraft

- during its successful maiden flight [EB/OL]. 2018 [2022]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2018-08-airbus-zephyr-solar-high-altitude-pseudo-satellite-flies-for-longer>.
- [16] Airbus Defence. Airbus Zephyr Solar High Altitude Platform System (HAPS) reaches new heights in its successful 2021 summer test flights [EB/OL]. 2021 [2022]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-airbus-zephyr-solar-high-altitude-platform-system-haps-reaches-new>.
- [17] UASweekly. Airbus Releases Zephyr T UAS Details [EB/OL]. 2016 [2022]. <https://uasweekly.com/2016/07/16/airbus-releases-zephyr-t-uas-details/>.
- [18] Wikipedia. Airbus Zephyr [EB/OL]. 2022 [2022]. https://en.wikipedia.org/wiki/Airbus_Zephyr.
- [19] Baesystems. Solar-electric unmanned air vehicle with the potential to transform the air and space market [EB/OL]. 2022 [2022]. <https://www.baesystems.com/en-us/product/phase-35->.
- [20] 范轩. 我国首款大型太阳能无人机完成两万米高空飞行[J]. 中国航天, 2017, 471(7):33.
- [21] 闫清云, 刘峰, 王卓煜. 太阳能无人机发展综述[J]. 飞机设计, 2021, 41(2):1-5, 12.
- [22] 石文, 李广佳, 仪志胜, 等. 临近空间太阳能无人机应用现状与展望[J]. 空天技术, 2022, 445(1):83-90.
- [23] None. Record flight for UAV using Protonex fuel cell system[J]. Fuel Cells Bulletin, 2009, 2009(12): 4.
- [24] None. NRL Ion Tiger fuel cell UAV extends flight endurance record [J]. Fuel Cells Bulletin, 2022, 2010(1):4.
- [25] Swider-Lyons K E, MacKrell J A, Rodgers J A, et al. Hydrogen Fuel Cell Propulsion for Long Endurance Small UAVs [C]. AIAA Centennial of Naval Aviation Forum "100 Years of Achievement and Progress". Virginia Beach, USA, September 21-22, 2011.
- [26] Stroman R O, Edwards D J, Jenkins P, et al. The hybrid tiger: a long endurance solar/fuel cell/soaring unmanned aerial vehicle [C]. The 48th Power Sources Conference, Washington DC, USA, June 14, 2018.
- [27] U. S. Naval Research Laboratory. NRL's Hybrid Tiger UAV Soars at Demonstration [EB/OL]. 2021 [2022]. <https://www.nrl.navy.mil/Media/News/Article/2498102/nrls-hybrid-tiger-uav-soars-at-demonstration/>.
- [28] H3Dynamics. CREWED H2 FLIGHT [EB/OL]. 2022 [2022]. <https://www.h3dynamics.com/hydrogen-powered-aircraft-solutions>.
- [29] H3Dynamics. Another World First: H3 Dynamics' Hydrogen Nacelle Technology Takes Flight. [EB/OL]. 2022 [2022]. <https://www.h3dynamics.com/h3-dynamics-company-news>.
- [30] France R M, Geisz J F, Song T, et al. Triple-junction solar cells with 39.5% terrestrial and 34.2% space efficiency enabled by thick quantum well superlattices [J]. Joule, 2022, 6(5): 1121-1135.
- [31] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2019年中国光伏技术发展报告—新型太阳能电池的研究进展(4) [J]. 太阳能, 2020, 316(8):5-9.
- [32] 朱立宏, 孙国瑞, 呼文韬, 等. 太阳能无人机能源系统的关键技术与发展趋势[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 85-96.
- [33] Toghyani S, Atyabi S A, Gao X. Enhancing the specific power of a PEM fuel cell powered UAV with a novel bean-shaped flow field[J]. Energies, 2021, 14(9): 2494.
- [34] 鄢家乐, 陈学东, 范志超, 等. 70MPa车载IV型储氢气瓶铺层设计与实验验证[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(10):71-80.
- [35] 王莹. 70MPa车载储氢气瓶供氢系统及快充过程研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [36] 中研普华无人机行业分析专家. 2022-2026年中国无人机行业深度调研与投资战略研究咨询报告[R]. 深圳: 中研普华管理咨询有限公司, 2021.
- [37] 中企顾问网. 2022-2028年中国柔性薄膜太阳能电池行业发展态势与行业竞争对手分析报告[EB/OL]. 2022 [2022]. <http://www.cction.com/report/202201/260678.html>.
- [38] 中研普华行业分析专家. 2022-2027年中国氢能行业投资分析及深度前景预测报告[R]. 深圳: 中研普华管理咨询有限公司, 2022.
- [39] 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, 18(1):20-23.
- [40] U.S. Department of Energy. Hydrogen Program Plan [EB/OL]. 2020 [2022]. <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>.
- [41] U. K. Secretary of State for Business, Energy and Industrial Strategy. UK Hydrogen Strategy [EB/OL]. 2021 [2022]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf.

- [42] 中国国家发展改革委. 氢能产业发展中长期规划(2021–2035年)[EB/OL]. 2022[2022]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/P020220323314396580505.pdf>.
- [43] None. Insitu flies hydrogen fuel cell powered ScanEagle UAV[J]. Fuel Cells Bulletin, 2021, 2012(5): 5.
- [44] None. BlueBird, Horizon unveil first commercial fuel cell UAV[J]. Fuel Cells Bulletin, 2009, 2009(10): 6.
- [45] 张晓辉. 燃料电池混合动力无人机能源管理研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2019.
- [46] Krawczyk J, Mazur A, Sasin T, et al. Fuel cells as alternative power for unmanned aircraft systems – current situation and development trends [J]. Transactions of the Institute of Aviation, 2014, 4(237): 49–62.
- [47] 刘义龙. 无人机氢燃料电池动力改装关键技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2022.
- [48] 李延平. 太阳能/氢能混合动力小型无人机总体设计[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- [49] 刘莉, 杜孟尧, 张晓辉, 等. 太阳能/氢能无人机总体设计与能源管理策略研究[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 144–162.
- [50] Dobrokhodov V, Jones K D, Walton C, et al. Achievable endurance of hybrid UAV operating in time-varying energy fields [C]. AIAA Scitech 2020 Forum, Orlando, USA, January 6–10, 2020.

作者简介



席涵宇(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源飞行器总体设计与能源管理。



王正平(1971—), 男, 博士, 高级实验师, 主要研究方向为飞行器实验平台建设、飞行器总体设计与飞行器结构设计。



张晓辉(1988—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为新能源飞行器总体设计与能源管理。本文通信作者。



杨 盾(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源飞行器总体设计与能源管理。