

高空长航时太阳能飞机研究进展与技术挑战*

杨希祥¹, 侯中喜², 郭正¹

(1. 国防科技大学空天科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 国防科技大学试验训练基地, 陕西西安 710100)

摘要:高空长航时太阳能飞机是当前的前沿热点方向,可实现月量级的长期驻空,并形成“时间持久+区域保持”的新型应用能力。系统总结了高空长航时太阳能飞机三阶段发展历程,包括初期探索阶段、快速发展阶段、实用能力验证与应用示范阶段,重点阐述国外典型发展计划,深入分析气动布局设计、储能电池、高空推进、大尺度结构、飞行控制等面临的主要技术挑战,并提出重点攻关方向建议,为高空长航时太阳能飞机创新发展提供参考。

关键词:高空长航时太阳能飞机;研究进展;气动布局设计;储能电池;高空推进

中图分类号:V272 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2023)06-001-09



听语音
与作者互动
聊科研

Development status and technology challenges of high-altitude long-endurance solar-powered aircraft

YANG Xixiang¹, HOU Zhongxi², GUO Zheng¹

(1. College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Test Center, National University of Defense Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: HALE (high-altitude long-endurance) solar-powered aircrafts are the research frontiers, they can staying airborne for several months, and can form new application ability named "long-endurance + station-keeping". The three-stage development process of HALE solar-powered aircrafts was systematically summarized, including early exploration stage, rapid development stage and operational capability demonstration stage, and typical development plans aboard were introduced. Key technology challenges were analyzed, including aerodynamic configuration design, energy storage battery, high altitude propulsion, large scale structure and flight control, and the suggestions for research directions were proposed. All those can provide reference for innovation development of HALE solar-powered aircrafts.

Keywords: high-altitude long-endurance solar-powered aircraft; development status; aerodynamic configuration design; energy storage battery; high altitude propulsion

临近空间(一般指距地面 20~100 km 高度)是高于传统航空器飞行高度、低于传统航天器轨道高度的空天结合区域,具有独特的环境特征和巨大潜在应用效能^[1]。临近空间飞行器是指运行在临近空间并执行特定任务的飞行器,根据飞行高度和速度特征,可分为低速和高速两类。

高空长航时太阳能飞机是典型的低速临近空间飞行器,采用大尺度大展弦比轻质机翼,依靠太阳能和储能电池实现能量闭环,采用电机和螺旋桨构成动力推进系统,可实现区域长期驻留和抗风机动飞行^[2],并形成不同于传统飞机和卫星的新型信息保障能力,在网络化互联互通、区域化持久情报监视侦察、长期化高空环境探测等领域具有巨大应用潜力^[3-6]。

近年来,在军民需求和飞行变革双重驱动下,伴随轻质材料、太阳电池、储能电池等技术指标的提升和人类对临近空间环境认知的深化,高空长航时太阳能飞机在创新探索和多飞多试中持续发展,以空客 Zephyr 为代表的小载重型太阳能飞机已形成实用化能力^[7]。

本文梳理总结高空长航时太阳能飞机发展的历史经纬,分析面临的主要技术挑战,为发展规划布局、技术创新突破、应用能力构建等提供参考借鉴。

1 高空长航时太阳能飞机研究进展

纵观高空长航时太阳能飞机 40 余年发展过程,整体上可分为三个阶段:初期探索阶段、快速

* 收稿日期:2022-06-23

基金项目:国家部委基金资助项目(20191A010233)

作者简介:杨希祥(1982—),男,河北阜城人,教授,博士,博士生导师,E-mail:yangxixiang@nudt.edu.cn

发展阶段、实用能力验证与应用示范阶段。

1.1 初期探索阶段

人类利用太阳辐射的历史可以追溯到公元前 7 世纪,当时用具有放大镜功能的玻璃取火,但直到 1767 年,Saussure 发明了太阳能集热器并用于做饭,太阳能技术的优点才开始显现。1839 年,Becquerel 通过电解液实验发现了光生伏打效应,这是后来一切太阳电池技术的基础。19 世纪末至 20 世纪上半叶,太阳电池技术取得一定提升,但关键进展出现在 1954 年,贝尔实验室的 Chapin 等三位科学家研制成功光电转换效率达到 6% 的单晶硅太阳电池^[8]。随后,Raspert 提出利用太阳能驱动飞机的概念^[9]。1958 年起,单晶硅太阳电池逐步在航天领域应用,1960 年,商业化单晶硅太阳电池效率达到 14%,至 1985 年效率达到 20%。

1974 年 9 月,在 AIAA/MIT/SST 联合举办的低速飞行会议上,英国帝国理工的 Irving 等^[9]发表论文,阐述了利用太阳能驱动飞机飞行的可行性。同年,美国 Astro Flight 公司建造了第一架太阳能飞机 Sunrise I,由 Robert Boucher 设计,并于 11 月进行了飞行试验,标志着太阳能飞机时代的来临,飞机质量 12.25 kg,翼展 9.75 m,太阳电池阵功率 450 W^[10-11]。1975 年夏,Astro Flight 公司建造了改进型太阳能飞机 Sunrise II,并在秋季开展了飞行试验,飞机构型与 Sunrise I 相同,质量 10.3 kg,翼展 9.75 m,太阳电池功率 600 W,飞行试验预定高度 15.2 km,由于指控系统故障,实际飞行高度 5.2 km。1977 年,NASA 的 Kuhner 等^[12]提出了高空长航时太阳能飞机概念,重点是遥感和通信两大应用领域。

Sunrise II 的太阳电池后来用于 AeroVironment 公司(超轻型飞机先驱 Paul MacCready 于 1971 年创立)研制的、航空史上首架有人驾驶太阳能飞机 Gossamer Penguin,飞机质量 30.8 kg,翼展 21.6 m,由于结构脆弱、可控性差,飞行测试只能在清晨风小的时候开展。1980 年 4 月至 8 月开展了多次飞行试验,实现了仅依靠太阳能持续飞行 14 min 21 s 的里程碑式进展,为后续更高性能的太阳能飞机设计提供了实际经验。

1981 年 7 月 7 日,有人驾驶的 Solar Challenger 飞越了英吉利海峡^[8],飞行距离 262.3 km,空中飞行 5 h 23 min,创造了太阳能飞机历史的新里程碑。飞机质量 152.4 kg(含驾驶员),长度 9.24 m,翼展 14.2 m,弦长 1.77 m,铺装了 16 128 块太阳电池,在工作高度功率可达 4 000 W,在海

平面时功率 2 500 W,安装 1 个电机,由 Astro Flight 公司提供,Dupont 公司资助并生产先进材料。飞机具有大的水平安定面,可抗正常湍流。Robert Boucher 在 Gossamer Penguin 和 Solar Challenger 项目中担任关键顾问角色^[13]。

1982 年,NASA 的 Yongblood 等^[14]研究了高空长航时太阳能飞机总体设计方法。同期,NASA 资助 AeroVironment 公司开展了高空长航时太阳能飞机项目 HALSOL^[15],探索 20 km 高空飞行的可行性,建造了 3 架缩比机和 1 架原型机,验证了气动和结构设计技术,但能源存储技术难以满足高空长航时飞行需求,后项目被搁置,10 年后重启演变为 Pathfinder 项目。

1.2 快速发展阶段

快速发展阶段的典型代表计划是 NASA 联合 AeroVironment 公司的环境研究飞机和传感器技术(environmental research aircraft and sensor technology, ERAST)计划、DARPA 联合波音公司的 Vulture 计划、Airbus 防务与空间公司的 Zephyr 计划。

1.2.1 ERAST 计划

1993 年下半年,NASA 联合 AeroVironment 公司启动 ERAST 计划,目标是发展在 20 km 附近高空的长航时飞机,用于环境采样和传感,先后研制了 Pathfinder、Pathfinder Plus、Centurion、Helios 四型高空太阳能飞机^[13,16-17],创造了多项飞行高度和航时记录。

Pathfinder 是高空太阳能飞机技术验证平台,旨在验证大型轻质复合材料结构、低翼载飞翼机翼、低雷诺数空气动力学、容错控制、高效太阳电池等技术。飞机长度 3.66 m,翼展 30 m,弦长 2.44 m,质量 254 kg,太阳电池最大输出功率 7 500 W,转换效率约 14%,安装 6 台电机,单台功率 1.25 kW。1993 年,在弹道导弹防御办公室主导下,Pathfinder 在 NASA Dryden 研究中心开展了第一次飞行试验,研究其在反弹道导弹中的潜在应用。1995 年 9 月 11 日,Pathfinder 超越 Solar Challenger,实现了 15.5 km 的飞行高度,被美国国家航空协会列入“1995 年最难忘的 10 个飞行纪录”。1997 年 7 月 7 日,通过改进太阳电池接收的光入射角度,在位于夏威夷的海军太平洋导弹靶场创造了 21.8 km 的太阳能动力飞行高度纪录,也是螺旋桨推进的飞行高度纪录。海军太平洋导弹靶场具有好的日照条件、良好的空域和无线电条件、有利于验证载荷成像的多样化陆地和海岸生态系统等,被认为是开展太阳能飞行器试

验的理想地点,Pathfinder 在这里共开展了 7 次飞行试验。

1998 年,通过增加翼展、改进电机、采用更高效的太阳电池,研制了 Pathfinder Plus,其实际上是 Pathfinder 和之后的 Centurion 之间的一个过渡型号,目的是验证新的太阳电池、气动、推进等技术,飞机质量 317.5 kg。Pathfinder Plus 翼展 36.88 m,采用了新的长度 13.4 m 的中翼,新的硅基太阳电池转换效率达 19%,最大输出功率约 12 500 W,由 SunPower 公司提供,安装 8 台电机,单台最大功率 1.5 kW,巡航速度 27.4~32.2 km/h。1998 年 8 月 6 日,在海军太平洋导弹靶场创造了 24.5 km 的飞行高度新纪录,其中 21.3 km 以上高度飞行航时为 3.5 h,任务载荷质量为 30.8 kg。

Centurion 属于轻质飞翼太阳能飞机,目标是作为未来航时数周甚至数月的太阳能飞机的原型技术验证机,质量 816.8 kg(24.4 km 高度)。飞机机翼分 5 段,材料主要采用碳纤维、石墨环氧树脂复合材料和凯夫拉,5 段机翼厚度相同,均为 29.2 cm,没有梯形度或后掠,翼展 62.8 m,弦长和 Pathfinder 相同,展弦比 26。太阳电池夏季日中天最大输出功率 31 kW,搭载了可支持不超过 5 h 飞行的备用锂电池,安装 14 台电机,单台功率 2.2 kW。机翼下方安装 4 个设备舱,并安装储能电池、飞控设备、压舱物和起落装置。1998 年开展了采用储能电池动力的低空飞行试验,验证了飞行控制和结构性能。

Helios 是 AeroVironment 公司拟发展的终极版太阳能飞机,以前述三型太阳能飞机技术为基础,增加储能电池用于夜间飞行,设计飞行航时 4~6 个月,载荷质量约 100 kg,载荷功耗 1 000 W。Helios 分为高空型(HP01)和长航时型(HP03)两个版本。HP01 翼展 75.3 m,质量 929 kg,太阳电池输出功率 42 kW,仍然采用 14 台电机,4 台在新的中间两段机翼上进行了重新布置。

2001 年 8 月,HP01 在海军太平洋导弹靶场起飞,创造了 29.5 km 的飞行高度新纪录。HP03 主要目标是采用氢-空气燃料电池完成 15.2 km 高度跨夜间持续飞行,飞机翼展与 HP01 相同,质量达到 1 051 kg,展弦比 31。2003 年 6 月 7 日,HP03 完成首飞,结果表明其具有在 15.2 km 高度飞行 30 h 的能力,2003 年 6 月 26 日,HP03 在飞行试验中遭遇低空强湍流解体^[3,18],同年,ERAST 计划正式终止。2017 年,日本 SoftBank 公司和 AeroVironment 公司联合成立 HapsMobile 子公司,以 Helios 为基础研发用于高空移动通信的太阳能

飞机 SunGlider,2020 年 9 月在新墨西哥州开展了飞行测试,在约 19 km 高度成功实现了稳定的 4G 网络连接^[19]。

1.2.2 Vulture 计划

2007 年,DARPA 启动 Vulture 计划,美国空军研究实验室(air force research laboratory, AFRL)和 NASA 也给予了支持,目的是发展高空超长航时侦察用大型重载太阳能飞机,预期持续飞行航时 5 年,载荷质量 450 kg,载荷功耗 5 kW。

2008 年 4 月,DARPA 分别和极光、波音、洛克希德·马丁三家公司签订合同,开展总体方案设计(第一阶段)。极光公司提出了 Odysseus 方案,波音公司联合英国 QinetiQ 公司提出了 SolarEagle 方案,洛克希德·马丁联合 AeroVironment 公司在 Helios 基础上提出了增强结构安全性的方案。DARPA 最终选择了 SolarEagle 方案,2010 年 9 月,授予波音公司 9 000 万美元的合同,开展全尺寸验证机研制和飞行试验(第二阶段),周期为 4 年^[20]。SolarEagle 验证机翼展 122 m,采用四机身四尾翼组合模式,验证试验计划飞行 30 d。2012 年,DARPA 取消了验证机研制和飞行试验。2017 年,极光公司被波音公司收购,2018 年 11 月,波音公司宣布正在研制 Odysseus 高空长航时太阳能飞机^[21],相对 2008 年的概念方案做了较大调整,设计飞行时间中纬度地区可达 1 年、极地 6 个月,最大载荷质量超 50 kg,翼展 74 m,机身采用薄壁轻质高强碳纤维结构,采用薄膜砷化镓太阳电池和最大功率点跟踪技术,电池组件转换效率超 25%,稳定输出功率 250 W,采用三尾翼布局,安装六套双叶可变距螺旋桨推进系统。2019 年 7 月,宣布无限期推迟原定当年开展的首次飞行试验。

1.2.3 Zephyr 计划

在 NASA 和 AeroVironment 公司发展尺寸越来越大的太阳能飞机的同时,中小型轻质太阳能飞机技术也取得重要突破,典型代表是 Zephyr 计划^[22-24]。

Zephyr 计划开始于 2001 年,最初是用于拍摄打破世界高度纪录的气球飞行,英国 QinetiQ 公司研制了概念验证机 Zephyr2,质量不到 7 kg,有自由飞行和系留飞行两种模式,在 Clifton 吊桥成功试飞。2002 年,研制了 Zephyr3,长度 12 m,质量 15 kg,原计划由载人气球系留带至高空,因气球出现技术问题未能试飞。此后,QinetiQ 公司转向发展 Zephyr 无人机,用于侦察监视、对地观测、远

程感知、通信中继、灾害监测、互联网接入服务等。2005 年 2 月, Zephyr4 由高空气球在 9.14 km 高度放飞, 飞行 1 h, 主要目的是探索降低技术风险, 验证高空长航时无人机基本特性、能源需求、夜间飞行高度等, 飞机翼展 12 m, 质量约 17 kg。

Zephyr5 继续用于探索降低技术风险, 包括两个型号。研究发现, Zephyr 可低速在稠密大气层中飞行, 因此 QinetiQ 公司决定改用地面手掷起飞方式, 回收采用机腹着陆方式。鉴于 Zephyr 对低层大气阵风比较敏感, 放飞天气窗口选择非常重要。Zephyr5-1 同时配备储能电池和太阳电池, 质量 31 kg, Zephyr5-2 仅使用不可充电的储能电池, 质量 25 kg, 不能跨昼夜。2005 年 12 月, 两型飞机在美国新墨西哥州白沙导弹靶场试飞, 分别飞行 4 h 和 6 h, 验证了地面起飞、上升、巡航和下降等技术。2006 年 7 月, 两型飞机再次开展了飞行试验, Zephyr5-1 飞行 18 h (夜间飞行 7 h), 飞行高度达到 10.97 km, 试验中搭载了光学和红外载荷, Zephyr5-2 飞行 17 h。通过 Zephyr5, 飞行控制和储能电池技术得到很大提升。

Zephyr6 在 Zephyr5 基础上迈进了一大步, 是一款全功能验证平台, 太阳电池可在飞行中为储能电池充电。Zephyr6 翼展 18 m, 采用超轻碳纤维材料, 质量不超过 30 kg。2007 年 7 月, Zephyr6 在新墨西哥州连续飞行 54 h, 最大飞行高度 17.8 km; 2008 年 8 月, 在亚利桑那州的陆军尤马靶场, 飞行高度达到 18.3 km, 飞行时间 82 h 37 min^[25-26], 刷新了无人机领域由全球鹰保持的 30 h 的纪录。在这个阶段, Zephyr 获得了美国国防部的资助, 得以进入一个新的五年发展阶段。

Zephyr7 继承了大量 Zephyr6 的技术, 目标是采用太阳电池和储能电池构成循环能源系统, 最终实现月量级飞行航时。设计飞行高度为白天 19.8 km, 夜间 13.7 km。采用晶体硅太阳电池和锂硫储能电池, 在最优能量质量比设计目标下, 采用转换效率 10% 的太阳电池, 锂硫电池比能量约 350 Wh/kg。鉴于 Zephyr6 试验中减驱电机出现的问题, 采用了直驱电机, 提高了推进系统效率和可靠性。飞机质量 53 kg, 翼展 22.5 m, 机翼面积较 Zephyr6 增加约 50%, 改用 T 型尾翼, 为增加稳定性, 增加一对翼梢小翼。飞机在起飞阶段采用遥控模式, 到达巡航高度后切换为自主飞行模式。2010 年 7 月 9 日至 23 日, Zephyr7 在亚利桑那州的陆军尤马靶场, 创造了连续飞行 336 h 22 min 的航时新纪录^[27], 飞行高度达到 21.6 km, 搭载了

侦察和通信中继载荷, 证明了高空长航时太阳能飞机概念和技术路线的可行性, 基本完成了全部技术验证工作, 向构建实用能力迈进了一大步, 在世界范围内引发了高空长航时太阳能飞机发展热潮, 是具有重大意义的里程碑事件。

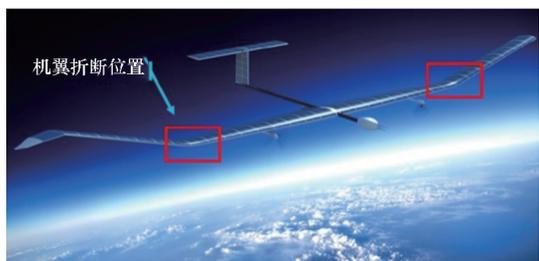
2013 年, 空客防务与空间公司从 QinetiQ 公司收购了 Zephyr 项目, 作为对卫星功能的补充, 致力于实现民用和商业化, 包括高分辨率成像、红外成像、应急通信网构建等。2014 年冬季, Zephyr7 在南半球完成了超过 11 天的高难度长航时飞行试验^[28]。同年, 空客启动可用于生产的定型版飞机 ZephyrS (也称 Zephyr8) 的研制, 飞行高度约 21 km, 巡航速度 55 km/h, 载荷质量 5 ~ 10 kg。

1.3 实用能力验证与应用示范阶段

2016 年, 英国国防部宣布购买 3 架 ZephyrS 太阳能飞机, 用于作战概念与作战能力验证^[29]。2018 年 7 月 11 日, 在英国国防部支持下, 第 1 架 ZephyrS 自亚利桑那州靶场起飞, 创造了 25 d 23 h 57 min 的超长航时飞行新纪录^[30], 最高飞行高度 21.7 km, 持续飞行高度 18.3 km, 证明了系统能力, 实现了所有预定试验目标。飞机翼展 25 m, 质量约 65 kg, 储能电池质量约占 1/3, 设计飞行时间达 100 d, 爬升速度约 0.42 m/s, 采用高效砷化镓太阳电池和硅纳米线负极材料高比能量锂电池, 太阳电池效率达 28%, 功率密度达 1 kW/kg, 锂电池单体比能量 435 Wh/kg, 循环寿命 200 次, 配置 2 台 450 W 的电机。2018 年 7 月 16 日, 空客宣布第一条组装生产线开始运营^[31]。

2019 年 3 月和 9 月, ZephyrS 经历了 2 次失败的试验, 主要是上升过程不稳定气流造成滚转失控, 最终导致飞机机翼结构破坏和折断^[32] (见图 1^[32]), 但并未影响整体的顺利进展。2020 年 11 月前三周, ZephyrS 在亚利桑那州成功完成了年度飞行试验, 飞机采用了新的软件控制系统, 全面验证了起飞、爬升、巡航、下降、着陆全包络飞行性能, 重点验证了飞机敏捷性、灵活稳健的控制与运行管理能力^[33]。

2021 年夏, ZephyrS 进一步在亚利桑那州开展了面向应用的系列飞行试验^[34]。先期采用 1/3 缩比机开展了 4 次低空飞行试验, 进一步验证了新的设计改进、多飞机操作、敏捷操作和人员训练。采用全尺寸飞机开展了 2 次平流层飞行试验: 2021 年 7 月 16 日开展了第一次飞行试验, 飞行时间 17 d 23 h 39 min, 搭载了用于分析和改进飞行包线、结构完整性的设备; 8 月 25 日开展了

图1 ZephyrS 飞行试验中机翼折断位置^[32]Fig.1 Wing fracture locations of ZephyrS in flight test^[32]

第二次飞行试验,飞行试验 18 d 22 h 30 min, 这为英国国防部开展的作战应用验证飞行创造了 23.2 km 的飞行高度新纪录,验证了区域驻留、机动飞行等性能,证明了具有快速响应、持久的作战应用能力,为形成可部署的装备产品创造了条件。试验中搭载了侦察、通信等多类型载荷,测试了新一代对地观测载荷,能够同时提供图像和分辨率 18 cm 的视频,试验中获取了 20 000 幅图像;搭载了无线电发射机,与地面天线开展通信试验,设置了多类型天气条件、接收距离、飞行模式等。结果表明,在平流层可提供 2 GHz 频谱服务的能力,可使用 450 MHz 窄带在 140 km 范围内提供连接服务,验证了 ZephyrS 具备提供无线宽带连接的能力,在高原、海岛、海上等通信中具有巨大应用潜力。2022 年 6 月 15 日,ZephyrS 在亚利桑那州靶场起飞,至 8 月 16 日飞行航时已超 60 d,远远打破了其在 2018 年创造的飞行航时纪录。

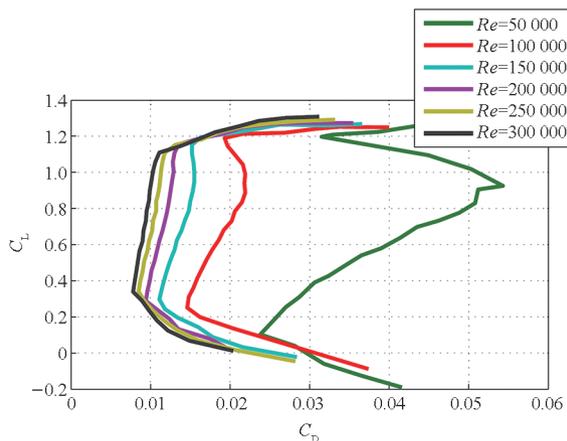
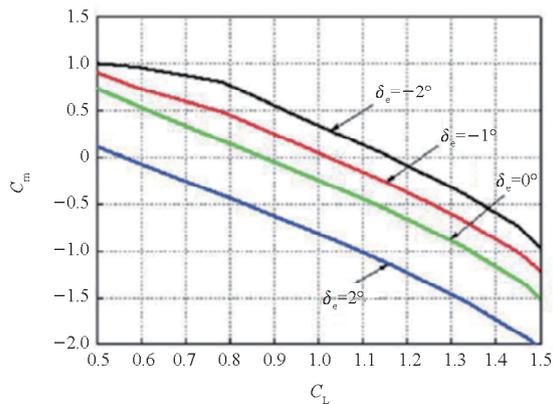
当前,ZephyrS 总飞行航时已超过 3 600 h,未来将发展载荷能力更大、全年可用的 ZephyrT(也称 Zephyr9)型号^[35],采用双尾撑布局,翼展 32 m,质量超 140 kg,具有更大的载荷能力,可搭载雷达、激光雷达、电子战或电子侦察等多类型载荷。更长飞行航时、更大载荷能力也是整个高空长航时太阳能飞机的发展方向 and 趋势。

2 高空长航时太阳能飞机技术挑战

2.1 低雷诺数条件下高效气动布局设计

太阳能飞机平飞功率与速度的 3 次方成正比,为降低能耗,通常以较低速度(10 ~ 70 m/s)飞行,而 20 km 附近高空大气密度稀薄,约为地面的 7%^[1]。为实现升重平衡,需要高升力系数(一般大于 1.0),高升力系数会造成诱导阻力增加,进而导致阻力增加(见图 2^[36]),图中 C_D 为阻力系数, C_L 为升力系数, Re 为雷诺数),且平飞功率与升阻比并不总保持线性关系,而与功率因子成反比,综合来说,太阳能飞机高效气动布局需以高升

力系数为基础(见图 3^[37],图中 C_L 为升力系数, C_m 为俯仰力矩系数, δ_e 为舵偏角),兼顾低阻力系数、高升阻比、高功率因子。同时,太阳能飞机高空低速飞行特性,造成其工作在低雷诺数下(不超过 10^6),往往存在流动分离和转捩等特殊气动现象^[38]。流动分离产生的分离气泡等,会造成气动性能大幅下降;流动转捩造成层流和湍流同时存在,且转捩位置受机翼翼型形状、攻角、来流速度等影响。

图2 高升力翼型 E387 在低雷诺数下的升阻特性^[36]Fig.2 Lift and drag characteristics of E387 airfoil in low Reynolds number^[36]图3 类 ZephyrS 无人机升力系数与俯仰力矩系数^[37]Fig.3 Lift coefficient and pitching moment coefficient for a ZephyrS-like UAV^[37]

为解决这一问题,重点研究方向包括:低雷诺数下气动特性数值模拟方法、边界层转捩和流动分离特性、流动分离控制、部件耦合干扰特性、适应低雷诺数条件的高升低阻高功率因子的气动布局设计等。

2.2 高比能量储能电池技术

循环能源系统是保证高空长航时太阳能飞机实现 $N \times 24$ h 长期驻空的关键,储能电池是夜间飞行的能量源,太阳能飞机能量短缺主要源于储能电池能量密度和功率密度相对较低^[39](见

图 4^[40])。储能电池质量可达整个太阳能飞机系统的 30% ~ 50%^[41], 在升重平衡约束下, 大质量的储能电池造成太阳能飞机尺寸规模增加, 尺寸规模增加又造成能源需求增加, 形成“恶性循环”, 造成太阳能飞机设计域极其狭窄。锂离子电池和锂聚合物电池是中低空太阳能飞行器上使用最多的储能电池, 氢氧再生燃料电池则在理论上适用于长航时大功率飞行, 与之伴随的挑战是, 锂离子电池在现有材料体系下比能量提升空间已很有限(200 ~ 240 Wh/kg), 难以实现高空跨昼夜飞行, 锂硫电池仅仅几十次的循环性能难以满足月量级飞行实际要求, 再生燃料电池效率有待提升。

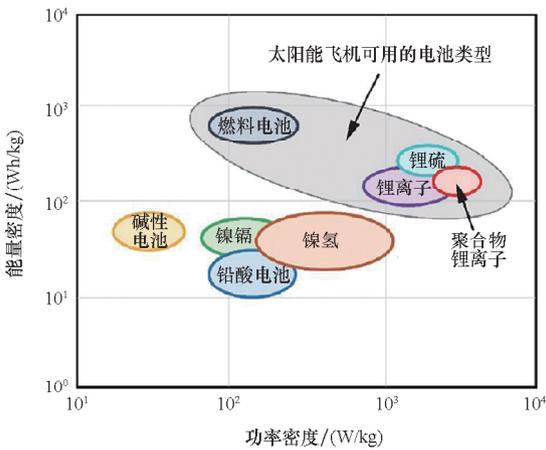


图 4 典型储能电池能量密度和功率密度^[40]

Fig. 4 Energy density and power density for typical energy storage battery^[40]

为解决这一问题, 重点攻关方向包括: 锂离子电池大容量正负极材料技术、新型锂离子电池电解液或电极界面稳定技术、锂硫电池循环稳定技术、大容量锂硫电池堆设计与临近空间环境适应性技术、高效率氢氧燃料电池与高功率水电解器、再生氢氧燃料电池系统集成与优化技术等。

2.3 高效宽工况电机螺旋桨推进技术

电机螺旋桨构成的动力推进系统是高空长航时太阳能飞机巡航飞行和区域保持控制的关键保障, 是全机最大的能量消耗源, 其整体工作效率对能源系统乃至总体设计影响巨大, 目前, 电机效率已达 90% 以上, 提升空间有限, 螺旋桨效率低于 60%, 是推进系统整体效率提升的主要关注点。太阳能飞机飞行高度和飞行速度变化较大, 差异化工况下推进系统性能变化很大, 10 m 量级大桨径螺旋桨推进系统在偏离设计点高度和风速时推力损失最大可达 60%, 若采用高空、低空两套推

进系统, 则会给系统造成质量代价。因此, 高空太阳能飞机推进系统既要满足高空稀薄大气条件下的高效率和高可靠性要求, 又要适应飞行高度和速度大跨度变化条件^[42-43]。同时, 电机数量、转速等与不同尺度螺旋桨匹配, 对推进系统整体性能存在重要影响(见图 5^[44])。

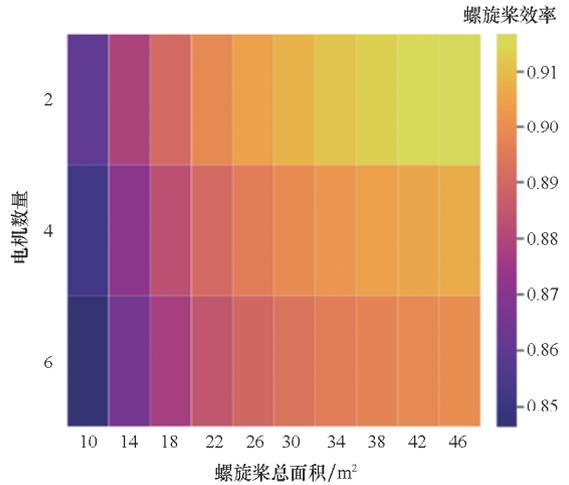


图 5 适应不同推进系统构型的螺旋桨优化设计^[44]

Fig. 5 Optimal design of propeller for different propulsion system configuration^[44]

为解决这一问题, 重点攻关方向包括: 高空低雷诺数下高效螺旋桨翼型设计、高空稀薄大气下电机长期工作可靠性提升技术、推进系统宽工况适应性技术、电机/螺旋桨匹配设计技术、推进系统效率测试技术^[45]等。

2.4 大展弦比轻质结构与振动控制技术

高空长航时太阳能飞机飞行速度低, 太阳能获取能力不高, 为维持升重平衡和能源平衡, 需设计为大尺度大展弦比结构(翼展数十米至百米, 展弦比几十), 并严格限制结构质量(2 ~ 3 kg/m²), 以适应太阳能飞机小翼载荷特性(仅为传统有人驾驶飞机的百分之几)。太阳能飞机结构包括主机翼、机身、尾翼等(见图 6^[46]), 其中, 主机翼质量占结构质量的大部分, 需特别设计^[47]。同时, 大尺度大展弦比机翼往往会产生较大上反(可高达半翼展的 1/4), 传统线性理论无法分析结构气动耦合特性, 难以控制结构失效^[48], Helios、ZephyrS 飞行试验都曾遭遇过相关问题。

为解决这一问题, 重点攻关方向包括: 轻质高强复合材料技术、大尺度结构几何拓扑优化技术、轻质高柔性高效太阳电池技术、大展弦比机翼气动弹性和颤振仿真技术、结构振动控制技术^[53]等。

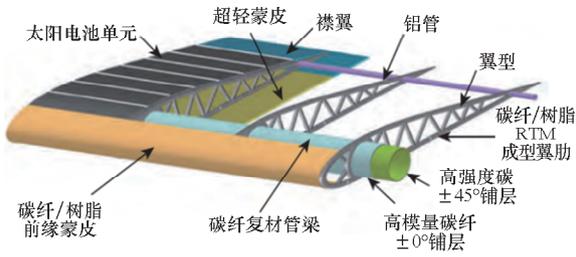


图6 典型太阳能飞机机翼结构^[46]

Fig. 6 Typical wing structure for solar-powered UAV^[46]

2.5 面向任务的航迹规划与控制技术

高空长航时太阳能飞机能量需求与飞行航迹密切相关,两者呈强耦合关系,航迹规划策略对飞行航时具有关键影响。太阳能飞机飞行速度低,与环境风场速度在一个量级,飞行控制受风场扰动影响明显^[49]。太阳能飞机数周甚至数月长期巡航驻空,面对的任务场景复杂多变,加上任务驻留区域约束(见图7^[50])、能源动力约束多、控制能力受限、高空风场环境小尺度未知变化等^[51-52],给航迹规划和制导控制造成很大挑战,且与传统航空器存在很大差异。此外,太阳能飞机未来在海上等大区域范围使用,多机编队组网是常态应用模式。

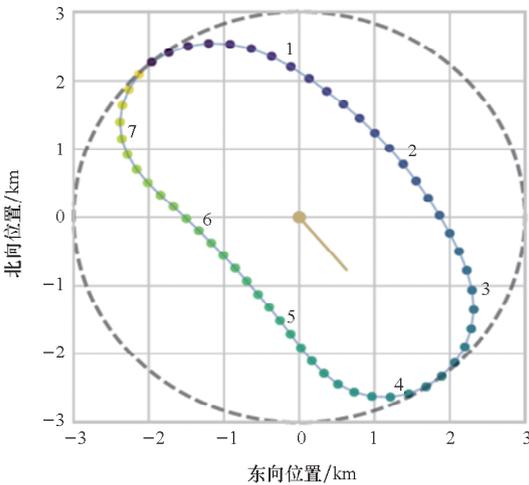


图7 任务区域约束下太阳能飞机航迹规划^[50]

Fig. 7 Path planning for solar powered UAV under station-keeping constraints^[50]

为解决这一问题,重点攻关方向包括:应用任务、能源、动力、控制综合约束的航迹规划技术,高精度强鲁棒制导控制系统一体化设计技术,航迹在线智能规划与智能控制技术,面向区域覆盖的多太阳能飞机编队控制技术^[53]等。

2.6 临近空间环境能量综合利用技术

能量紧缺是高空长航时太阳能飞机最核心的问题之一,基本贯穿所有技术挑战。在现有能源

系统指标水平,特别是储能电池比能量指标相对较低的条件下,需探索从“对抗”到“和谐”的环境相处之道,从临近空间辐照、风场等环境中综合获取、存储能量^[40],打破太阳电池和储能电池构成的“小范围能量闭环”局限,拓展飞行航时和载荷能力边界。与之并存的挑战是,环境能量获取与飞行器运动参数之间的关联机理与耦合模型如何揭示建立、动态环境如何准确感知、静态设计方案如何在动态变化的环境中保证能量昼夜闭环等。

为解决这一问题,重点攻关方向包括:临近空间风场环境特征与演化规律、风场在线感知与估计方法、梯度风场中滑翔模式与能量获取机制(见图8^[41])、重力势储能飞行轨迹设计与能量管理策略(见图9^[41])等。

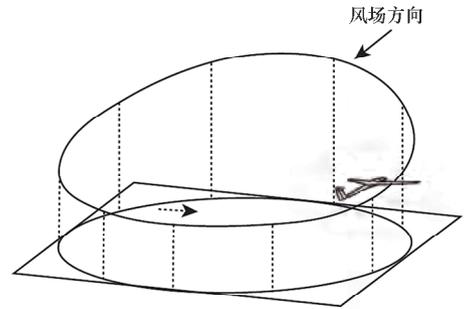


图8 梯度风场中椭圆形滑翔模式^[41]

Fig. 8 Elliptical mode dynamic soaring in gradient wind^[41]

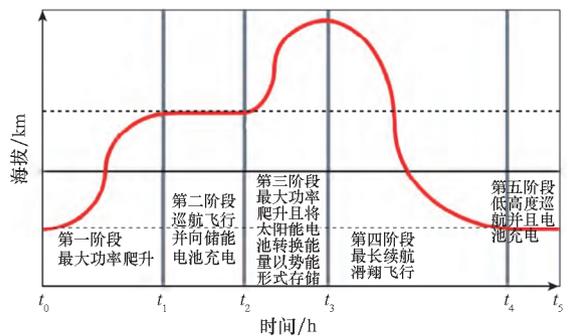


图9 重力势储能模式中典型飞行轨迹^[41]

Fig. 9 Typical trajectory in gravitational potential energy storage mode^[41]

3 总结

高空长航时太阳能飞机是当前空天领域的前沿热点方向,可形成“时间持久+区域保持”的新的应用能力,是传统飞机和卫星系统的有力补充,对构建空天一体的应用体系,培育产业经济发展新动能,意义重大。本文系统总结了高空长航时太阳能飞机发展历程,分析了主要技术挑战,下一步,将针对重点攻关方向,持续开展应用基础与技

术创新研究。

参考文献 (References)

- [1] 《平流层飞艇技术》编写组. 平流层飞艇技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
Compilation Group of "Stratospheric Airship Technology". Stratospheric airship technology[M]. Beijing: Science Press, 2019. (in Chinese)
- [2] 石文, 贾永清, 李广佳, 等. 高空超长航时太阳能无人机主要技术问题分析[J]. 飞航导弹, 2021(6): 63 - 66, 104.
SHI W, JIA Y Q, LI G J, et al. Analysis of main technical problems of high altitude and long endurance solar unmanned aerial vehicle[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(6): 63 - 66, 104. (in Chinese)
- [3] SHARPE P, DEWALD A J, HANSMAN J. An optimization approach to mapping the feasible mission space of a high-altitude long-endurance solar aircraft [C]//Proceedings of AIAA Aviation 2021 Forum, 2021.
- [4] 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(1): 83 - 90.
SHI W, LI G J, YI Z S, et al. Current status and prospect of solar-powered unmanned aerial vehicle application in near space[J]. Aerospace Technology, 2022(1): 83 - 90. (in Chinese)
- [5] AIRBUS. Zephyr high altitude platform station (HAPS) achieves connectivity in trial conducted by Airbus and NTT DOCOMO [EB/OL]. [2022 - 05 - 25]. <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-11/ENG-Airbus-Zephyr-NTT-Docomo-Joint-Press-Release.pdf>.
- [6] LYON H M, INALHAN G, BOURNE D, et al. High-altitude UAS pseudo-satellites: architecture for end-to-end military communications [C]//Proceedings of AIAA Scitech 2021 Forum, 2021.
- [7] TAITSCH F. Airbus Zephyr solar high altitude platform system (HAPS) reaches new heights in its successful 2021 summer test flights [EB/OL]. (2021 - 10 - 11) [2022 - 06 - 06]. https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/71ad19a41f446e4c62a3642fda39d050_EN-Airbus-Press-Release-Zephyr-2021-summer-test-flights.pdf.
- [8] VEETIL M, HARSHITH T N, DARSHAN G J, et al. Design and analysis of high altitude pseudo satellite (HAPS) [J]. International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 2020, 9(1): 31 - 46.
- [9] IRVING F, MORGAN D. The feasibility of an aircraft propelled by solar energy [C]//Proceedings of 2nd International Symposium on the Technology and Science of Low Speed and Motorless Flight, 1974.
- [10] BOUCHER R J. Project sunrise [C]//Proceedings of AIAA/SAE/ASME 15th Joint Propulsion Conference, 1979.
- [11] BOUCHER R J. Sunrise, the world's first solar-powered airplane [J]. Journal of Aircraft, 1985, 22(10): 840 - 846.
- [12] KUHNER M B, EARHART R W, MADIGAN J A, et al. Applications of a high-altitude powered platform (HAPP) [R/OL]. [2022 - 05 - 25]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19790012817/downloads/19790012817.pdf>.
- [13] GIBBS Y. NASA Armstrong fact sheet: solar-power research [EB/OL]. [2022 - 06 - 06]. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/news/FactSheets/FS-054-DFRC.html>.
- [14] YOUNGBLOOD J, TALAY T. Solar-powered airplane design for long-endurance, high-altitude flight [C]//Proceedings of 2nd International Very Large Vehicles Conference, 1982.
- [15] FLITTIE K, CURTIN B. Pathfinder solar-powered aircraft flight performance [C]//Proceedings of 23rd Atmospheric Flight Mechanics Conference, 1998.
- [16] 张健, 王江三, 耿延升, 等. 高空长航时太阳能无人机的技术挑战[J]. 航空科学技术, 2020, 31(4): 14 - 20.
ZHANG J, WANG J S, GENG Y S, et al. Technology challenges for high altitude long endurance solar powered UAV [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(4): 14 - 20. (in Chinese)
- [17] 郭正, 朱雄峰, 侯中喜, 等. 太阳能飞机: 基于广义能源的总体参数设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
GUO Z, ZHU X F, HOU Z X, et al. Solar-powered aircraft: conceptual parametric design based on generalized energy [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [18] GIBBS Y. Past projects: Helios prototype solar-powered aircraft [EB/OL]. [2022 - 06 - 23]. <https://www.nasa.gov/centers/dryden/history/pastprojects/Helios/index.html>.
- [19] NEWTON L. Sun glider builds on legacy of solar aircraft [EB/OL]. [2022 - 06 - 06]. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/sunglider-builds-on-legacy-of-solar-aircraft.html>.
- [20] ESHEL T. Vulture solar-powered UAV set for months long mission by 2014 [EB/OL]. [2022 - 06 - 23]. https://defense-update.com/20100918_darpa_selects_boeing_for_vulture.html.
- [21] NANCY O. Persistence a key feature of solar-powered Odysseus autonomous aircraft [EB/OL]. [2022 - 06 - 06]. <https://techxplore.com/news/2018-11-persistence-key-feature-solar-powered-odysseus.html>.
- [22] RAPINETT A. Zephyr: a high altitude long endurance unmanned air vehicle [D]. Guildford: University of Surrey, 2009.
- [23] DAVEY P. Zephyr HALE UAS [C]//Proceedings of AIAA Aerospace Conference and Exhibit, 2007.
- [24] ZHU X F, GUO Z, HOU Z X. Solar-powered airplanes: a historical perspective and future challenges [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 71: 36 - 53.
- [25] DE MATTOS B S, SECCO N R, SALLES E F. Optimal design of a high-altitude solar-powered unmanned airplane [J]. Journal of Aerospace Technology and Management, 2013, 5(3): 349 - 361.
- [26] QinetiQ. Breakthrough unmanned aerial surveillance technology: Zephyr [R]. QinetiQ, 2009.
- [27] 李晨飞, 姜鲁华. 临近空间长航时太阳能无人机研究现状及关键技术 [J]. 中国基础科学, 2018, 20(2): 22 - 31.
LI C F, JIANG L H. Research status and key technology of near space long endurance high altitude solar-powered unmanned air vehicle [J]. China Basic Science, 2018, 20(2): 22 - 31. (in Chinese)
- [28] 张京男. 欧洲微风太阳能无人机应用与方案研究 [J]. 飞航导弹, 2016(2): 47 - 52.
ZHANG J N. Application and scheme research of European breeze solar UAV [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(2): 47 - 52. (in Chinese)
- [29] CORFIELD G. UK military buys third £4m Zephyr drone for 'persistent surveillance' trials [EB/OL]. [2022 - 06 - 06]. https://www.theregister.com/2016/08/18/ministry_of_defence_buys_third_zephyr_solar_drone/.
- [30] TAITSCH F, DUPIECH A. Airbus Zephyr solar high altitude pseudo-satellite flies for longer than any other aircraft during its successful maiden flight [EB/OL]. [2022 - 06 - 06]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2018->

- 08-airbus-zephyr-solar-high-altitude-pseudo-satellite-flies-for-longer.
- [31] DUPIECH A. Airbus opens first serial production facility for Zephyr high altitude pseudo-satellites [EB/OL]. [2022-06-06]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2018-07-airbus-opens-first-serial-production-facility-for-zephyr-high>.
- [32] Australian Transport Safety Bureau. In-flight break-up involving airbus Zephyr unmanned aerial vehicle [R/OL]. [2022-06-06]. https://www.atsb.gov.au/publications/investigation_reports/2019/air/ao-2019-056.
- [33] DUPIECH A. The airbus Zephyr, solar high altitude platform station (HAPS) concludes a successful new test flight campaign in Arizona [EB/OL]. (2020-12-03) [2022-06-06]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-12-the-airbus-zephyr-solar-high-altitude-platform-station-haps>.
- [34] TAITSCH F. Airbus Zephyr solar high altitude platform system (HAPS) reaches new heights in its successful 2021 summer test flights [EB/OL]. [2022-06-06]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-10-airbus-zephyr-solar-high-altitude-platform-system-haps-reaches-new>.
- [35] Airbus Defense and Space. Zephyr: persistence and flexibility [R]. Airbus Defense and Space, 2018.
- [36] HWANG S J, KIM S G, KIM C W, et al. Aerodynamic design of the solar-powered high altitude long endurance (HALE) unmanned aerial vehicle (UAV) [J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2016, 17(1): 132-138.
- [37] 段卓毅, 王伟, 耿建中, 等. 高空长航时太阳能无人机高效气动设计新挑战 [J]. *空气动力学学报*, 2017, 35(2): 156-171.
DUAN Z Y, WANG W, GENG J Z, et al. Challenges of high efficiency aerodynamics design for HALE solar powered UAV [J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2017, 35(2): 156-171. (in Chinese)
- [38] DRELA M. XFOIL: an analysis and design system for low Reynolds number airfoils [C]//*Proceedings of Low Reynolds Number Aerodynamics*, 1989.
- [39] 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): 80-91.
ZHU L H, SUN G R, HU W T, et al. Key technology and development trend of energy system in solar powered unmanned aerial vehicles [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 80-91. (in Chinese)
- [40] 徐建国. 小型固定翼太阳能无人机能源系统的关键技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
XU J G. Study on key technology of energy system of small fixed wing solar powered unmanned aerial vehicle [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019. (in Chinese)
- [41] 侯中喜, 高显忠, 郭正, 等. 太阳能飞机: 高空长航时飞行关键问题 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.
HOU Z X, GAO X Z, GUO Z, et al. Solar-powered aircraft: the crucial problem about the high-altitude long-endurance flight [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [42] DANTSKER O, CACCAMO M, IMTIAZ S. Propulsion system design, optimization, simulation, and testing for a long-endurance solar-powered unmanned aircraft [C]//*Proceedings of AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum*, 2020.
- [43] 李星辉, 李权, 张健. 太阳能无人机高效螺旋桨气动设计 [J]. *航空工程进展*, 2020, 11(2): 220-225, 238.
LI X H, LI Q, ZHANG J. Aerodynamic design of a high efficient solar powered UAV propeller [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2020, 11(2): 220-225, 238. (in Chinese)
- [44] MASCARENHAS C A, ANDERSON J G, LANGFORD J S. Solar-powered aircraft-configuration design optimization based on propulsion system mass and efficiency characterization [C]//*Proceedings of AIAA Aviation 2021 Forum*, 2021.
- [45] DANTSKER O D, DETERS R, CACCAMO M. Propulsion system testing for a long-endurance solar-powered unmanned aircraft [C]//*Proceedings of AIAA Aviation 2019 Forum*, 2019.
- [46] MONTAGNIER O, BOVET L. Optimisation of a solar-powered high altitude long endurance UAV [C]//*Proceedings of 27th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 2010.
- [47] 刘峰, 闫清云, 王卓煜. 全复合材料太阳能无人机结构设计与分析 [J]. *复合材料科学与工程*, 2022(4): 32-39.
LIU F, YAN Q Y, WANG Z Y. Structural design and analysis of composite solar powered unmanned aerial vehicle [J]. *Composites Science and Engineering*, 2022(4): 32-39. (in Chinese)
- [48] 毛一青, 杨飞, 谷迎松. 15米翼展太阳能飞机机翼颤振分析和刚度设计 [J]. *航空工程进展*, 2019, 10(4): 536-541.
MAO Y Q, YANG F, GU Y S. Research on flutter characteristics and stiffness design for 15 meters span wing of a solar-powered aircraft [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2019, 10(4): 536-541. (in Chinese)
- [49] 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): 29-58.
MA D L, ZHANG L, YANG M Q, et al. Review of key technologies of ultra-long-endurance solar powered unmanned aerial vehicle [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 29-58. (in Chinese)
- [50] MARTIN R A, GATES N S, NING A, et al. Dynamic optimization of high-altitude solar aircraft trajectories under station-keeping constraints [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2019, 42(3): 538-552.
- [51] OETTERS HAGEN P, FÖRSTER J, WIRTH L, et al. Meteorology-aware multi-goal path planning for large-scale inspection missions with solar-powered aircraft [J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2019, 16(10): 390-408.
- [52] 吴健发, 王宏伦, 黄宇. 大跨时空任务背景下的太阳能无人机任务规划技术研究进展 [J]. *航空学报*, 2020, 41(3): 59-79.
WU J F, WANG H L, HUANG Y. Research development of solar powered UAV mission planning technology in large-scale time and space spans [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(3): 59-79. (in Chinese)
- [53] VASISHT S, MESBAHI M. Trajectory design and coverage control for solar-powered UAVs [C]//*Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2015.