DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.10.024

# 太阳能飞机技术与应用发展研究

**刘向雷，杨馨萌，胡睿雄，宣益民** *

（南京航空航天大学能源与动力学院，南京 210016）

**摘要：**太阳能飞机是一种完全由太阳能驱动的绿色新能源航空器，具有高空长航时飞行、灵活作业和零碳排放等优势，是全球航空航天业重点发展的新兴领域。本文系统调研了国内外太阳能飞机的发展现状，梳理了关键技术图谱与面临的挑战，包括先进气动设计技术、高效低成本太阳能电池技术、高能量密度储能电池技术以及高效宽工况推进技术。在此基础上，基于能量平衡和质量平衡原理，建立了太阳能飞机总体性能仿真模型，预测了各组件重量、可持续飞行高度和载重能力的未来演化趋势。研究表明，太阳能飞机的发展方向以长航时、高空飞行的太阳能无人机为主，在军事侦察、环境监测和中继通信等领域具有重要应用前景。结合技术分析与性能预测结果，论证提出了太阳能飞机近、中、远期的发展目标与重点任务，并从总体思路、技术攻关和体系建设3个层面提出了促进其持续、稳步、快速发展的发展建议，以期为我国太阳能飞机的领域布局和相关研究提供参考。

**关键词：**太阳能飞机；绿色航空；碳中和；高效太阳能电池；先进气动设计；高能量密度储能电池

**中图分类号：**V272　　**文献标识码：**A

# Development and Application of Solar-Powered Aircraft Technology

**Liu Xianglei, Yang Xinmeng, Hu Ruixiong, Xuan Yimin** *

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Solar-powered aircraft has the advantages of prolonged high-altitude flight, operational flexibility, and zero carbon emissions, making it one of the emerging fields that the global aerospace industry prioritizes. This study investigates the current development status of solar-powered aircraft in China and abroad and summarizes the development trends of its key technologies, including advanced aerodynamic design, efficient and low-cost solar cells, high-energy-density batteries, and efficient and wide-operating-condition propulsion. Based on the energy balance and mass balance principles, this study establishes an overall performance simulation model for solar-powered aircraft, predicting the development trends of its mass, sustainable flight altitude, and load capacity. The primary development direction of solar-powered aircraft is long-endurance, high-altitude, solar-powered unmanned air vehicles, which has important application prospects in the fields of military reconnaissance, environmental monitoring, and communication relay. Based on the predictive results and key technology research, this study proposes the short-, medium-, and long-term development goals and key tasks of solar-powered aircraft. Furthermore, it proposes strategies and policy recommendations to promote the sustainable development of solar-powered aircraft from three different levels: overall idea, technological breakthroughs, and system construction.

**Keywords:** solar-powered aircraft; green aviation; carbon neutrality; efficient solar cell; advanced aerodynamic design; energy storage battery with high energy density

**收稿日期：**2024-10-12；**修回日期：**2025-02-17

**通讯作者：***宣益民，南京航空航天大学能源与动力学院教授，中国科学院院士，研究方向为低碳航空动力技术；E-mail: ymxuan@nuaa.edu.cn

**资助项目：**中国工程院咨询项目“新能源航空发动机发展战略研究”(2023-XBZD-15)

**本刊网址：**sscae.engineering.org.cn

## 一、前言

党的二十大报告提出，以国家战略需求为导向，集聚力量进行原创性、引领性科技攻关，坚决打赢关键核心技术攻坚战。太阳能飞机作为新一代航空技术的典型代表，具有高空长时巡航、灵活作业和低成本运营等独特优势，可在军事侦察、环境监测、中继通信等领域实现颠覆性应用。同时，其飞行过程中完全依赖太阳能，能够避免碳排放及其他污染物排放，对推动航空业绿色转型具有重要意义。太阳能飞机的研发与应用，不仅为国家科技创新和高端装备制造提供了新的增长点，还将为应对全球气候变化、实现可持续发展注入强劲动力。

太阳能飞机根据功能分为无人和载人两种类型。太阳能无人机表现出显著的技术优势，与传统无人机相比，具备更高的飞行高度（20~30 km）、更长的留空时间和更广的作业覆盖范围。由于这一特性，太阳能无人机在侦察监视、对地观测、中继通信中展现出广泛的应用前景。同时，临近空间太阳能无人机被誉为“平流层卫星”，与传统卫星相比，具备使用灵活、时间 / 空间分辨率高、成本低等独特优势；与高空气球和高空平流层飞艇相比，在机动性能、可控性和可回收性方面更具竞争力。此外，载人太阳能飞机在长时间飞行、绿色环保及低碳运营方面展现了显著的潜力，能够为未来短途运输提供可持续解决方案。基于上述优势，太阳能飞机未来可广泛应用于各领域，成为国内外研究的热点方向。

近年来，国内外在太阳能飞机技术与应用方面取得了显著进展。以英国、美国、瑞士等国家为代表研制的太阳能飞机，在飞行时长和飞行高度等关键技术指标上实现了重要突破，并初步达到可应用标准。2010—2022 年，美国海军、英国国防部等陆续启动了多项太阳能飞机项目，推动其在侦察、中继通信等领域的应用。同时，美国还制定了长航时高空航空器的运行规范，为太阳能飞机的大规模应用奠定了制度保障。我国虽起步较晚，但近年来在太阳能飞机技术研发和制造领域发展迅速，取得了一系列标志性成果。2017 年，“彩虹”太阳能无人机成功完成临近空间飞行试验，标志着我国在该领域取得了重大突破。当前，中国航天科工集团有限公司、中国航天科技集团有限公司和中国航空工业集团有限公司等单位正加大投入，重点围绕超长航时、临近空间飞行等关键技术展开攻关。太阳能飞机的发展不仅为我国在国际航空科技竞争中赢得战略优势提供了重要保障，也为实现绿色航空与碳减排目标提供了有效的技术路径。

国内外在太阳能飞机的技术开发和应用探索方面已取得重要进展，特别是在低雷诺数气动设计、高效光电转换材料、储能系统优化以及推进系统适应性等关键技术领域不断突破，并提出了多种典型设计方案，如飞翼布局、轻质柔性机翼结构设计以及高效能源管理系统等。然而，对于太阳能飞机总体性能的系统性预测与分析仍显不足，特别是在未来性能演化趋势的定量研究以及应用路径的系统规划方面，仍需进一步深入研究。

本文聚焦太阳能飞机的关键技术与总体性能，依托能量平衡和质量平衡原理，使用总体性能仿真模型预测太阳能飞机未来性能参数（如组件质量、飞行高度、载重能力）的演化趋势。并结合当前关键技术的发展现状与性能预测结果，提出了太阳能飞机的近期、中期和远期发展目标及应用路径，以为我国太阳能飞机的发展和相关研究工作提供参考。

## 二、太阳能飞机的发展现状

### （一）发展背景

太阳能飞机的研究可追溯至 20 世纪 70 年代，随着光伏技术和新型材料的发展，其飞行性能逐步提升。1974 年，美国阿斯特罗飞行公司研制了世界上第一架太阳能无人机 Sunrise I，其成功飞行标志着太阳能飞机的研究正式起步。1981 年，美国国家航空航天局（NASA）资助的 Solar Challenger 成功完成英吉利海峡跨越飞行，标志着太阳能飞机从实验验证阶段进入实际应用探索阶段。随后，Pathfinder、Centurion、Helios 等一系列高空长航时太阳能无人机相继试飞，其中 Helios 在 2001 年创造了 29.5 km 的飞行高度纪录，展现了太阳能飞机在临近空间领域的巨大潜力。进入 21 世纪，各国围绕太阳能飞机在军事侦察、环境监测和通信中继等领域的应用展开深入研究，并相继推出 Zephyr、Solar Impulse 等典型机型，推动太阳能飞机迈向实用化阶段。

近年来，全球航空航天领域加速向绿色低碳方向转型。2022 年 10 月，国际民用航空组织（ICAO）通过了国际航空长期全球愿景目标（LTAG），要求全球航空业在 2050 年实现净零碳排放。我国民航业也高度重视绿色低碳发展，于 2021 年 12 月发布《“十四五”民用航空发展规划》，将“绿色航空”列为航空运输业发展的重点目标之一，助力我国实现碳达峰、碳中和目标。为进一步推动航空制造业绿色转型，2023 年 10 月，工业和信息化部、科学技术部、财政部和中国民用航空局联合印发了《绿色航空制造业发展纲要（2023—2035 年）》，明确提出要加快推动电动通用航空器的系列化与谱系化发展，重点攻克太阳能无人机等关键核心技术。

全球航空业约 79% 的碳排放源自航空燃料的燃烧过程，每千克常规航空燃料燃烧会释放二氧化碳约 3.15 kg[1]。以空客 A320 为例，一次 1647 km 的航班飞行消耗燃料约 6332.1 kg，排放二氧化碳约 $2.0\times10^4$ kg[2]。因此，减少航空燃油产生的碳排放是实现航空业脱碳目标的关键。然而，仅靠提高燃油效率的渐进性改进已难以满足深度减碳需求，全球航空业正加速向绿色能源和低碳动力技术的革命性变革迈进。在这一过程中，发展绿色能源航空器已成为航空强国和主流制造商的战略优先方向。

太阳能飞机因其完全依赖太阳能驱动，展现出独特的技术优势和广阔的应用前景。太阳能电池板覆盖在太阳能飞机机翼和尾翼表面，当受到光照时，太阳能电池将太阳能转化为电能，转化的能量取决于飞机飞行的地理位置、时间、光线相对于太阳能电池的入射角度和云层覆盖水平等因素（见图 1）。白天获得的能量主要用于为推进系统提供动力，剩余的电能用来给储能电池充电；当光照不足或在夜晚时，则由储能电池放电为飞行提供能量，直到次日太阳升起，开始新的供能循环，从而实现持续不间断飞行。相比传统飞机，太阳能飞机不仅具有显著的环境友好性，还能满足高空长航时任务的特殊需求，在军事侦察、中继通信、气象观测和灾害监测等领域具备广泛的应用潜力，为太阳能飞机技术发展提供了重要牵引。

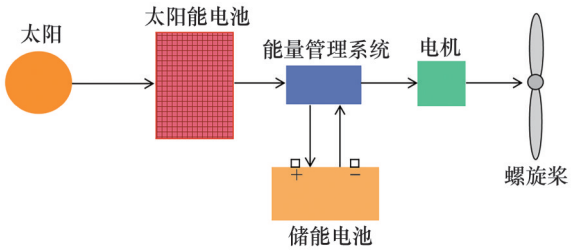

图 1　太阳能飞机的基本原理

### （二）国内外发展现状

近年来，太阳能飞机的研发在国外取得了显著进展，多个型号的太阳能无人机成功完成了长航时飞行试验，并在飞行高度和飞行时长等方面取得了突破性成果（见表 1）。美国的环境研究航空器与传感技术（ERAST）项目旨在研制可在高海拔地区执行长期地球科学和环境任务的无人飞行器，该项目的第四代航空器 Helios 曾创下 29.5 km 飞行高度的世界纪录[3]。与之相比，英国的 Zephyr 在持续飞行时间上展现了更为卓越的性能，可广泛应用于监视、侦察和中继通信等领域。2001 年启动以来，Zephyr 系列太阳能无人机多次创造飞行纪录，最长持续飞行时间为 42 d，为太阳能飞机的发展设立了新的标杆。PHASA-35 号也展现了太阳能无人机在持续作战能力上的潜力，其在 2023 年和 2024 年两次成功飞至 20 km 的平流层并顺利着陆，可以在极端环境下长期工作[4,5]。此外，瑞士的 Solar Impulse 计划则侧重于载人太阳能飞机的研发，2012 年实现了历史上首次完全依靠太阳能的跨洲飞行，2016 年完成了为期 17 个月的环球飞行[6~8]。

与国外相比，我国太阳能飞机发展起步较晚，但近年来也取得了一定成果。“墨子”和“彩虹”系列太阳能无人机的成功试飞，标志着我国在该领域取得重要突破。“墨子II号”于 2019 年首飞，可以在 6000~8000 m 高空飞行，留空作业达 12 h[9]。“彩虹 T 号”于 2017 年完成临近空间飞行试验，标志着我国成为继美国、英国之后第三个掌握此技术的国家。飞云工程和“启明星 50 号”的研发显示了我国在应急通信和高空持续飞行能力上的进步，飞云工程通过太阳能无人机构建空中局域网，为应急通信提供了新的解决方案[10]；“启明星 50 号”设计最高飞行高度超过 20 km，能实现连续跨昼夜飞行[11]。

综合分析国内外太阳能飞机的发展现状可以看出，虽然我国在太阳能无人机领域取得了一定成果，但整体技术水平仍处于追赶阶段。在续航时间、载重能力等关键性能指标上，与国际先进

水平相比仍存在差距，同时尚未实现载人飞行的突破。

## 三、太阳能飞机关键技术分析

太阳能飞机的性能和发展潜力在很大程度上取决于多项关键技术的协同发展。本章从技术层面对影响太阳能飞机核心性能的关键技术进行系统梳理，构建太阳能飞机关键技术图谱（见图2）。重点分析先进气动设计、高效低成本太阳能电池、高能量密度储能电池、高效宽工况推进技术的发展现状、技术难点及攻关方向。

表1　国内外太阳能飞机设计参数和飞行数据

| 名称 | 国家 | 翼展/m | 展弦比 | 质量/kg | 试验时间/年 | 最大飞行高度/km | 持续飞行时间 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Helios | 美国 | 75.3 | 30.4 | 719 | 2001 | 29.5 | 24 h |
| Zephyr S | 英国 | 25 | 19 | 75 | 2022 | 23 | 42 d |
| Solar Impulse I | 瑞士 | 63.4 | 约21 | 1600 | 2018 | 8.5 | 26.17 h |
| Solar Impulse II | 瑞士 | 72 | 约19 | 2300 | 2018 | 8.5 | 62 h |
| 彩虹T号 | 中国 | 45 | — | — | 2017 | ＞20 | ＞24 h |
| 魅影号 | 中国 | 7 | — | 15 | 2018 | — | 19.57 h |
| 墨子II号 | 中国 | 15 | 19 | 45 | 2019 | 8 | 12 h |
| 启明星50号 | 中国 | 50 | — | — | 2022 | ＞20 | 26 min |

图2　太阳能飞机关键技术图谱

### （一）先进气动设计技术

太阳能飞机通常具有较低的飞行速度和较高的飞行高度，而大气密度随高度的升高呈指数下降，因此太阳能飞机具有典型的低雷诺数气动特性。临近空间太阳能无人机巡航飞行雷诺数约为$2.0\times10^5$，比普通飞行器低了约1~2个数量级[12]。当雷诺数低于$10^6$时，机翼上的流场会发生层流分离、转捩和湍流再附等流动现象，导致飞机的气动性能下降。因此，发展适合低雷诺数条件的翼型优化设计技术成为关键。与传统翼型相比，低雷诺数翼型通常具有更平坦的气动外形和较小的厚度，既能铺设太阳能电池，又能减少因辐照差异引起的效率损失。例如，已有研究通过计算和风洞试验，设计了四种适用于太阳能飞机的低雷诺数翼型，类似BC 3X92的平板翼型展现出高升力与低阻力的潜力[13]。未来，应结合优化算法与实验验证，进一步提升翼型的气动性能，以满足长航时飞行的需求。

太阳能飞机主要采用常规布局和飞翼布局。常规布局技术相对成熟，如英国的Zephyr系列和我国的“彩虹”系列太阳能无人机，但该布局的纵向配平依赖于平尾产生的负升力，气动效率受到限制。相比之下，飞翼布局通过取消传统尾翼，实现机身与机翼一体化的流线型设计，具备更高的气动效率和更轻的结构重量。美国的Helios太阳能无人机采用飞翼布局，展现了在高空长航时飞行中的应用潜力。然而，飞翼布局仍面临纵向稳定性不足和操控性较差的问题，需要进一步优化控制技术和飞行器结构设计。此外，新型气动布局技术正在快速发展，包括T构型设计、菱形翼布局、串置翼布局、鸭式布局等[14]。这些布局理论上具备提升气动效率和优化结构重量分布的潜力，但气动性能尚需通过大规模试验验证。未来攻关方向可着重于新型布局的综合气动性能评估、控制算法优化以及结构适配性研究，以实现性能突破。

为满足太阳能电池的铺设需求，太阳能飞机需具备较大的机翼面积；为减轻结构质量，通常采用超轻质复合材料和柔性设计理念。柔性机翼允许显著弹性变形，但这种设计将改变气动载荷分布并显著影响飞行器的横航向稳定性。发展大尺度柔性机翼的气动–结构耦合技术成为关键攻关方向，通过多物理场仿真与实验验证，可进一步提升其气动性能和结构可靠性。此外，气动–结构–推进一体化设计技术的应用，可实现多系统协同优化，显著提高太阳能飞机的高空长航时飞行能力。

基于现有技术分析和发展趋势，太阳能飞机升阻比的未来发展潜力值得关注。图3展示了不同类型航空器的升阻比和速度范围[15]，其中大型临近空间长航时太阳能无人机的升阻比已超过30。结合低雷诺数翼型优化设计、气动布局改进以及柔性机翼气动–结构耦合等技术的潜在发展，预计到2030年，太阳能飞机升阻比可达到35；到2040年，随着气动设计和轻质复合材料技术进一步成熟，升阻比有望提升至40；到2050年，在气动效率优化技术实现全面突破的推动下，升阻比可达到45。

### （二）高效低成本太阳能电池技术

太阳能飞机所需的太阳能电池技术，应同时满足以下五方面的要求：高光电转换效率、高功率密度、良好柔韧性（确保与机翼表面的紧密贴合）、优良稳定性（耐受高低温及辐射环境）以及较好的经济性。从现阶段来看，太阳能电池的效率已能够基本满足太阳能飞机的能量需求。但从实际应用情况看，当前电池布置的铺片率并未达到极限水平[16]。在此背景下，进一步提高太阳能电池系统（含封装）的功率密度比单纯提升光电转换效率更有意义。未来发展方向是研发更轻薄的太阳能电池，这也将成为太阳能飞机的主流技术选择。

现阶段，应用最广泛的太阳能电池主要包括硅太阳能电池和薄膜GaAs太阳能电池。根据美国国家可再生能源实验室（NREL）发布的太阳能电池最佳研究效率图[17]，这两类电池的技术路径及效率演进有了较为成熟的发展。其中，晶硅太阳能电池技术成熟且成本较低，在Solar Impulse以及Helios

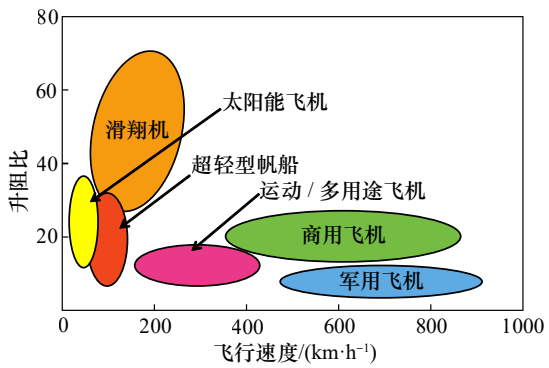


图3 不同类型航空器的升阻比和速度范围

中获得广泛应用。然而，其功率密度低、刚性大，与曲面机翼的贴合性差，对航空器的气动性能造成不利影响。薄膜GaAs太阳能电池具有更高的光电转换效率、功率密度和稳定性，且可制成柔性电池[18]，能够满足柔性机翼的铺设需求。然而，GaAs电池因原材料稀缺且昂贵，生产成本高，规模化应用受限。

近年来，钙钛矿电池作为新型太阳能电池技术，取得了快速发展。为了突破单结太阳能电池的Shockley-Queisser极限[19]，钙钛矿基叠层电池（包括钙钛矿/钙钛矿和钙钛矿/硅结构）成为研究的重点。常规单结钙钛矿太阳能电池的理论光电转换效率为33%，而多结钙钛矿电池的理论光电转换效率高达47%[20]，展示了这一技术的巨大潜力。随着钙钛矿基叠层太阳能电池技术的不断发展，“产学研”协同创新加速推进，材料改进、制造工艺和电池结构优化领域不断突破，钙钛矿叠层太阳电池效率飞速提升。目前最先进的硅电池、GaAs及钙钛矿太阳能电池性能如表2所示[21~23]，综合来看钙钛矿电池能够克服晶硅太阳能电池功率密度低和GaAs太阳能电池经济性差的问题，同时具有较高的光电转换效率和适应曲面贴合的能力，极具潜力成为下一代太阳能飞机的核心技术方案。

针对钙钛矿电池在光电性能和环境适应性上的不足，应集中开展以下技术研究，以提升其综合性能并扩大应用潜力。首先，优化光子管理与电子管理协同机制，深入研究材料微观结构与器件能带匹配对太阳光捕获、载流子分离及传输效率的影响，开发全光谱高效捕获技术和高性能缺陷钝化材料，通过添加剂调控和提升薄膜结晶质量，实现宽光谱捕获与高载流子分离效率的综合提升。其次，提高材料环境友好性与稳定性，开发低铅或无铅柔性衬底的高质量结晶方法，通过组分调控、还原剂添加及阻隔层插入策略，增强钙钛矿的耐热性、耐氧化性及耐辐射性能，减少对环境和生物的潜在危害。通过以上研究，可显著提升柔性钙钛矿太阳能电池的光电转换效率、功率密度及环境适应能力，为太阳能飞机领域提供高效、轻质且环保的新型太阳能电池方案。

表2　目前最先进太阳能电池性能指标对比

| 性能指标 | 单晶硅 | 叠层GaAs | 叠层钙钛矿 |
|---|---|---|---|
| 最高光电转化效率/% | 27.3 | 39.5 | 34.6 |
| 功率密度/（$W\cdot g^{-1}$） | 0.4 | 2 | 23 |
| 制造成本/（$\$\cdot m^{-2}$） | 50~80 | 30 000 | 20~40 |
| 柔性 | 差 | 优 | 优 |
| 稳定性 | 良好 | 优 | 差 |
| 经济性 | 良好 | 很差 | 优 |

结合各类太阳能电池发展和应用现状，本研究认为在2030年之前，叠层GaAs电池因其高效率、轻质量和成熟的航空应用技术，仍是航空器光伏能源的主流选择。然而，随着钙钛矿叠层电池技术的不断突破，其在效率提升、柔性化设计和低成本制造等方面的优势逐步显现，到2040年，基于钙钛矿的叠层电池将有望成为未来太阳能飞机商业化的主要能源解决方案。基于目前的技术发展情况，结合钙钛矿电池和其他高效叠层电池（见图4）的演进趋势[24]，预计到2030年，应用于太阳能飞机的电池效率可达到38%，功率密度（含封装）可达到2 kW/kg；到2040年，效率预计可达到40%，功率密度（含封装）提升至6 kW/kg；到2050年，随着材料和制造技术的进一步突破，电池效率有望达到42%，功率密度（含封装）将达到10 kW/kg。

### （三）高能量密度储能电池技术

储能电池是太阳能飞机在复杂多变天气环境下实现稳定飞行的核心技术，同时也是整机重量的主要来源之一，占比约为30%~50%。在飞机升重平衡约束下，大质量的储能电池造成太阳能飞机尺寸增加，尺寸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[25]。因此，设计具有高能量密度和长循环寿命的储能电池对于提升太阳能飞机的飞行性能具有重要意义。目前，锂离子电池、锂硫电池和燃料电池因其较高的能量密度成为太阳能飞机的主要储能选择[26]。

锂离子电池因技术成熟、循环寿命较长的特点被广泛采用，如大型载人太阳能飞机Solar Impulse II。然而，其能量密度难以突破400 Wh/kg[27]，这一限制成为进一步提升太阳能飞机性能的关键瓶颈。相比之下，锂硫电池因理论能量密度高达2600 Wh/kg而备受关注[27]，Zephyr S太阳能无人机所采用的锂硫电池，其储能密度达到了350 Wh/kg，为其创造42 d连续飞行记录提供了技术支撑。然而，锂硫电池在多次循环后由于硫的多硫化物迁移效应导致循

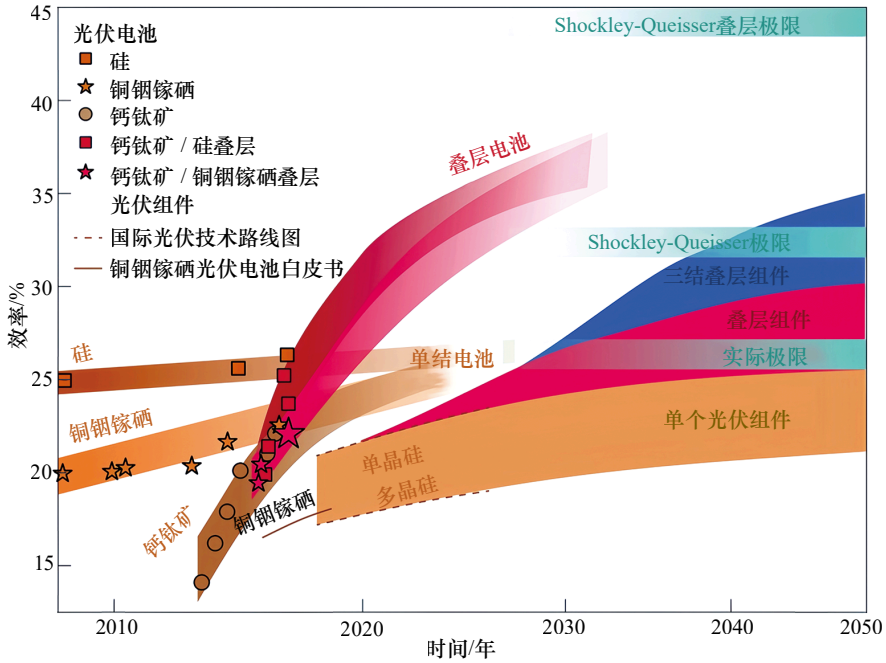


图4　单结和多结太阳能电池的效率预测

环稳定性下降，并存在一定的安全隐患[28]。此外，氢燃料电池凭借高能量密度的潜力被视为未来重要的发展方向，但其燃料储存系统复杂，安全性较低，储氢系统的体积和重量增加会显著降低系统总体功率密度，同时对太阳能飞机的气动性能带来不利影响。

提高储能电池的能量密度是决定太阳能飞机性能能否实现跨越式发展的关键。只有进一步提升储能电池在白天储存太阳能并转化为能量的能力，太阳能飞机才能实现稳定可靠的跨夜飞行。未来，针对太阳能无人机的实用化需求，储能电池需达到单体能量密度不低于 450 Wh/kg，同时实现充放电深度（DOD）循环寿命超过 100 次的目标[29]。当前，储能电池的循环寿命和能量密度尚未达到这一要求，亟需在材料与结构设计上实现新的突破。未来的发展趋势应聚焦于高容量正负极材料、高环境适应性电解质以及高循环寿命隔膜技术的创新与优化，同时通过系统性改进提高电池的循环稳定性和在临近空间环境中的适应能力，从而兼顾高储能密度与高安全性的需求。通过材料与工艺的持续攻关，储能电池的能量存储效率与环境适应能力将显著提升，推动新型轻质高效储能技术在太阳能飞机领域的广泛应用。

根据相关技术规划，储能电池的能量密度目标设定为：2025 年达到 400 Wh/kg，2030 年进一步提升至 500 Wh/kg[30]。这一规划为未来储能电池的发展提供了明确的目标和方向。如图 5 所示，对 1683 种电池中的 51 种高能量密度电池进行统计分析，可预测未来电池技术的发展路线[31]。研究结果显示，到 2030 年，储能电池的能量密度有望达到 500 Wh/kg。根据 2013—2030 年的能量密度增长趋势进一步推算，到 2040 年，储能电池能量密度可能提升至 700 Wh/kg；到 2050 年，随着锂硫电池、锂空气电池及氢燃料电池等新型高能量密度电池的持续发展，储能电池能量密度有望突破 1000 Wh/kg。

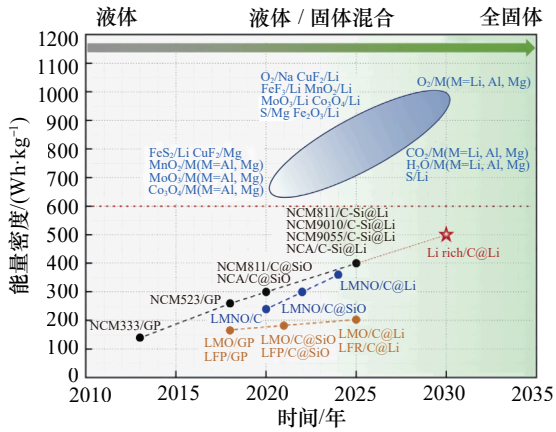


图5　未来 10 年高能量密度电池发展路线图

### （四）高效宽工况推进技术

太阳能飞机的推进系统主要由电机和螺旋桨组成，推进系统的轻质化与高效化是实现大载荷、长航时飞行的核心基础。该系统需要在复杂工况下保持高效运行，并满足临近空间环境的特殊需求。

在电机方面，目前太阳能飞机广泛采用永磁无刷直流电机，其高效率和分布式布局能够有效提升系统的整体性能。例如，Zephyr 6的永磁无刷直流电机系统效率达到88.3%[32]，而Solar Impulse II的4台分布式电机（每台功率为12.8 kW）通过减速齿轮组驱动螺旋桨，其整体系统效率高达94%[32]。此外，HELIPLAT无人机采用的轴向磁通盘式永磁同步电机效率可达96.1%[16]，展现了更高的性能。然而，该类电机制造难度较大，设备加工精度要求高，同时面临热管理与散热设计等技术瓶颈[33]。未来推进电机的研发需聚焦于高性能电机材料、创新电机拓扑结构、深度电机电控集成及高效散热技术，结合增材制造工艺，逐步提升国产推进电机的自主研发与生产能力，技术发展趋势如表3所示。

目前，推进电机效率已达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[25]。高空稀薄的大气环境显著降低了空气密度，使螺旋桨翼型的雷诺数较低，导致层流分离、转捩、分离再附等复杂流动现象。这些特性严重制约了螺旋桨性能的优化，同时太阳能飞机需要在昼夜变化的海拔跨度范围内高效飞行，进一步加剧了螺旋桨设计的难度。随着飞行高度逐步向30 km以上迈进，螺旋桨效率将面临显著下降的挑战。为满足太阳能飞机昼夜跨高度飞行和低能耗续航的需求，需要在多种复杂工况下提升螺旋桨效率。在设计过程中，应确保翼型在设计点处于高升力使用迎角范围，并通过优化叶宽和桨距分布，实现高气动效率和稳定的气动性能。为应对这些挑战，亟需研发轻质、高效且适用范围广的低雷诺数太阳能飞机螺旋桨技术。

未来，太阳能飞机推进系统的发展应从以下方向着力攻关：一是提升临近空间电机的运行可靠性，通过高导热系数材料与多通道冷却结构优化电机的散热性能；二是研发适用于高空低雷诺数条件的螺旋桨翼型，结合数值仿真与风洞实验实现翼型性能的精确预测与提升；三是推进宽工况适应性技术的发展，包括多档速比减速齿轮组与智能控制系统，以适应海拔、风速与负载变化。通过多学科协同优化与集成设计，高效宽工况推进技术将进一步满足太阳能飞机的多任务需求，为提升其综合性能奠定坚实基础。

表3　推进电机性能发展趋势

| 电机性能 | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|---|---|---|---|
| 电机效率/% | 96 | 98 | 99 |
| 电机功率密度/（kW·kg$^{-1}$） | 8 | 15 | 20 |

## 四、太阳能飞机性能发展趋势预测

为了更精确地把握未来太阳能飞机的发展趋势，进一步建立了太阳能飞机的总体性能仿真模型。通过仿真计算来系统分析未来太阳能飞机各组件的重量分布、可持续飞行高度、载重能力等关键参数的演变规律，从而为太阳能飞机及其关键技术的发展提供客观依据。

### （一）性能预测流程及关键技术参数

白天，太阳能飞机通过太阳能电池将太阳能转化为电能，驱动推进系统，从而保持飞机的持续飞行。基于这一实际过程，首先建立了标准晴天大气层内的太阳辐照模型，可以计算不同地区、日期及海拔高度下的太阳辐照情况，进而计算得到太阳能电池可转换的能量。同时，结合太阳能飞机高空飞行的特点，随着海拔的增加，大气密度降低，因此需要考虑螺旋桨效率随飞行高度上升而衰减的情况。根据能量平衡和质量平衡的原则，建立了太阳能飞机的总体性能仿真模型，其中能量平衡要求在整个飞行过程中，太阳能电池收集的能量应满足飞机全天飞行的需求；质量平衡指的是飞机各部件的总质量需等于起飞质量，并与巡航状态下的全机升力相匹配。太阳能飞机的重力主要来自太阳能电池、储能电池、推进系统、机体结构及载荷等。通过仿真计算，能够明确飞行高度、载重能力等性能指标与太阳能电池效率、功率密度、储能电池能量密度和推进系统功率密度之间的关系，进而预测太阳能飞机总体性能的发展趋势。太阳能飞机的性能预测流程如图6所示。

各关键技术的性能预测参数见表4。需要特别指出的是，性能参数的预测基于对技术发展的合理

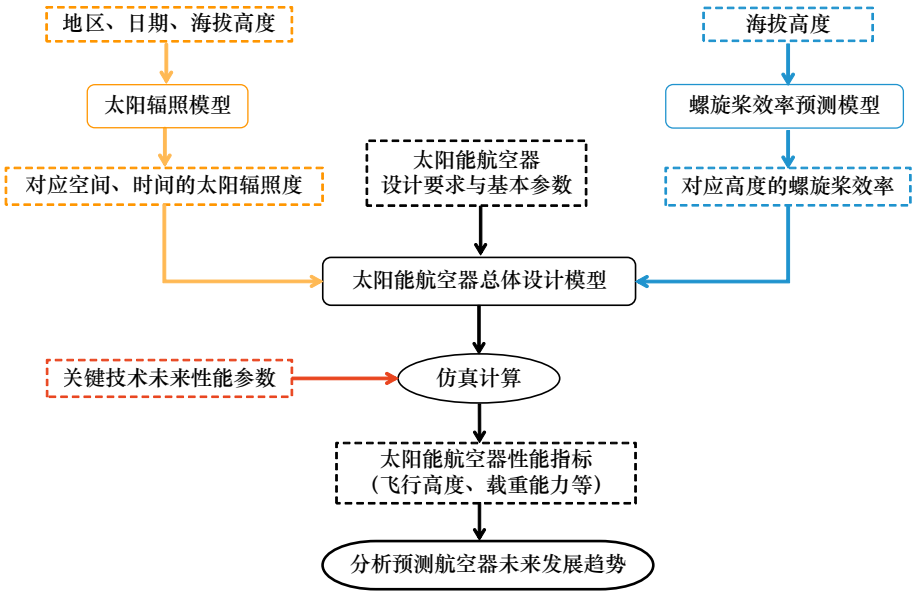


图6　太阳能飞机总体性能预测流程图

表4　关键技术的性能预测参数

| 预测参数 | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|---|---|---|---|
| 升阻比 | 35 | 40 | 45 |
| 太阳能电池效率/% | 38 | 40 | 42 |
| 太阳能电池功率密度/（kW·kg$^{-1}$） | 2 | 6 | 10 |
| 储能电池能量密度/（Wh·kg$^{-1}$） | 500 | 700 | 1000 |
| 电机效率/% | 96 | 98 | 99 |
| 电机功率密度/（kW·kg$^{-1}$） | 8 | 15 | 20 |

推测，具体数值可能因技术进步的速度及工程实际限制而有所调整。然而，总体趋势表明关键技术将持续优化，例如升阻比、太阳能电池功率密度和储能电池能量密度等性能将不断提升，以满足高空长航时飞行任务对高效气动性能、能源利用效率和系统可靠性的综合要求。需要强调的是，最终预测的太阳能飞机性能参数应视为理论计算结果，旨在展示太阳能飞机随着关键技术进步可能达到的潜力。实际的技术进展可能导致这些参数的调整。因此，本研究的结果更多地反映了未来发展的趋势和前景，而非绝对的定量预测。

### （二）太阳能无人机性能预测

太阳能无人机具备可高空长航时飞行、高机动灵活性以及便于使用与维护等多重优势，在军用和民用领域展现出重要的应用潜力。可持续飞行高度是其最为关键的性能参数，直接决定了应用价值，随着飞行高度的提升，无人机覆盖的地面范围增大，可提供更强的信息支持和监测能力。此外，飞行速度和载荷比同样是重要性能指标，飞行速度的提升有助于增强无人机的机动性，而更高的载荷比则能够支持携带更多设备，从而拓宽应用领域。

结合国内外太阳能无人机的飞行高度纪录来看，在 Helios 曾达到 30 km 以外，PHASA-35、Zephyr S 等机型的飞行高度均在 20 km 左右，因而可假设 2020 年飞行高度为 20 km。在载荷比保持为 7% 的条件下（总质量 70 kg、有效载荷 5 kg），提高太阳能电池效率、功率密度、储能电池能量密度等任一参数，均可提升无人机的飞行高度。随着飞行高度的增加，大气密度降低会导致推进效率下降，从而增加飞行能耗。在相同的环境条件下，提升太阳能电池效率和储能电池能量密度能够增强无人机的能量获取能力，支持更长时间的高空飞行，同时提升飞行速度。采用更高功率密度的太阳能电池、推进系统可以有效降低机体质量，减少支撑整机飞行所需的能量消耗。此外，较高的升阻比意味着更优的气动性能，有助于显著降低飞行能耗，从而实现更高的飞行高度。根据预测，到 2050 年，太阳能无人机的飞行高度可达到 43 km，飞行速度提升至 368 km/h（见图 7）。

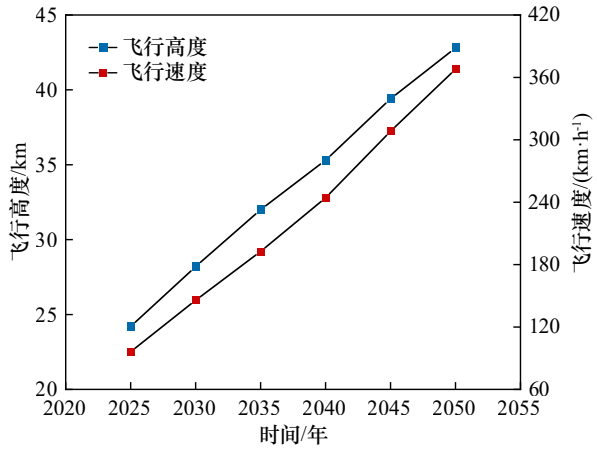


图7　太阳能无人机飞行高度和速度的变化趋势

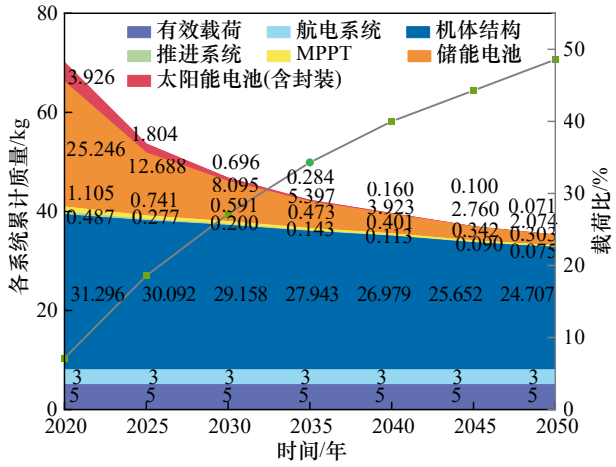


图8　太阳能无人机各部件质量及载荷比的变化趋势

对于飞行高度超过20 km的太阳能飞机，可作为“伪卫星”在临近空间长时间作业，应用于区域侦察、中继通信等领域，同时还能承担大气环境探测和森林火险预警等任务。由于多样化的应用需求，太阳能飞机需要携带更大质量的仪器设备，从而必须提高其载荷比。如图8所示，在保持20 km飞行高度的情况下，2020—2050年，随着关键技术的不断进步，太阳能电池和储能电池的质量将显著下降，从而极大减少飞机的“死重”。具体而言，与2020年相比，到2050年太阳能电池、储能电池、推进系统、太阳能控制（MPPT）系统和机体结构的质量将分别减少98%、91.8%、84.4%、72.6%和21%。总体上，太阳能无人机的总质量预计在未来将减少49.7%。由于太阳能电池和储能电池等技术的进步使质量得到减轻，从而释放出更多的载荷空间，提升了太阳能飞机的任务能力。当总质量保持70 kg时，其有效载荷质量可从5 kg提升至34 kg，载荷比将从7%提升至48%。随着载荷比的提高，太阳能无人机的应用场景将进一步拓展。

如图9所示，到2030年，太阳能无人机的飞行高度将提升至28 km，载荷比提升至27%，能够搭载监测平台并快速部署，应用于灾害监测等任务；到2040年，飞行高度提升至35 km，载荷比提升至40%，可以携带更大规模的监测设备进行高空长期驻留，承担通信中继和环境监测任务，并在侦察等领域发挥重要作用；到2050年，飞行高度进一步提升至43 km，载荷比提高至48%。理论计算表明，飞行高度为20 km的机载平台可为直径约500 km的地面区域提供信息支持服务，若飞行高度增加至30 km，覆盖范围可扩展至约600 km[34]。根据文献公式计算，太阳能无人机在43 km高空飞行时，其

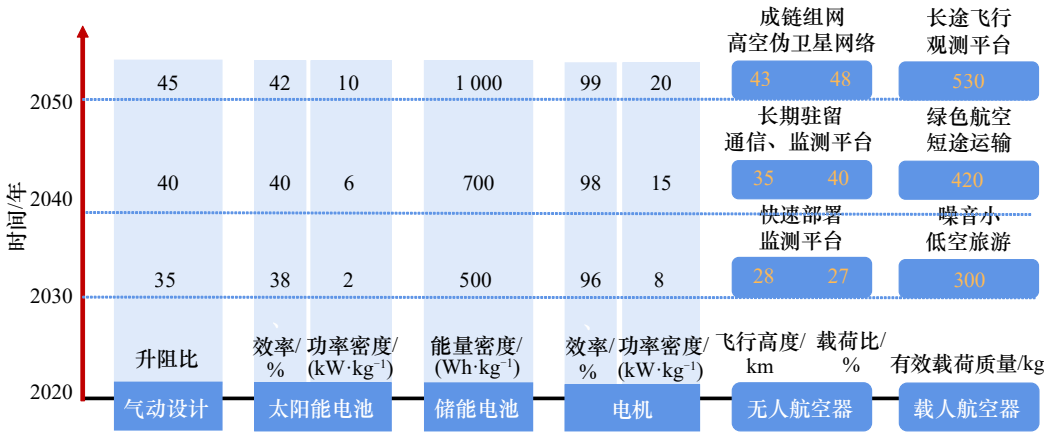


图9　太阳能无人机的性能变化趋势及应用领域

信息支持范围可达到约740 km，同时可通过“成链组网”技术构建高空伪卫星网络，以增强信息覆盖能力。

### （三）载人太阳能飞机性能预测

载人太阳能飞机在旅游观光、极限运动等领域具有一定的商业潜力，有效载荷质量是未来发展的关键性能参数。结合目前载人太阳能飞机的载重极限（可搭载一人，并需考虑座椅等附加质量），假设2020年有效载荷质量为100 kg。在1400 kg总质量和500 m飞行高度保持不变的前提下，随着太阳能电池效率、功率密度和储能电池能量密度提高，相应部件质量得到降低；在同样的功率需求下，更高功率密度的推进系统所占质量更小。到2050年，载人太阳能飞机的有效载荷质量预计可达530 kg，实现5~8人的载人飞行（见表5）。

尽管如此，载人太阳能飞机相较于常规飞机仍存在明显不足：飞行受天气影响较大，对日照等条件要求苛刻；驾驶舱空间有限，舒适性较差，隔热保温设计不足；体积庞大，城市起降困难；建造成本高昂，例如Solar Impulse II的建造耗时13年，耗资1.6亿美元。因此，载人太阳能飞机的应用范围相对有限，市场前景不明朗，发展潜力较低，不宜作为主要发展方向。

表5 载人太阳能飞机有效载荷质量发展趋势

| 参数 | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|---|---|---|---|
| 有效载荷质量 | 300 kg | 420 kg | 530 kg |
| 载客量 | 3~4人 | 4~6人 | 5~8人 |

## 五、太阳能飞机的发展目标、重点任务与发展建议

### （一）发展目标

基于我国太阳能飞机及其关键技术发展现状的调研和分析，结合未来总体性能的预测，提出相应的发展战略与目标。建议采用“四步走”方式推动太阳能飞机的发展。

“飞得高”：第一阶段为技术探索阶段，重点提高飞行升限并积累高空飞行经验。

“飞得远”（2030年前）：第二阶段着重延长航时，解决持续飞行问题，使太阳能飞机的技术优势得以充分发挥，初步达到可应用标准。

“有得用”（2040年前）：第三阶段注重提升实用性，降低太阳能电池成本并引入高能量密度储能电池，显著提高有效载荷，拓展任务和应用能力。当前太阳能无人机有效载荷仅约为7%，远远无法满足商业需求。

“用得好”（2050年前）：大力发展关键技术及其相关产业，构建技术经济性分析和全生命周期评价规范，完善相关体系和标准，实现规模化应用（见图10）。

此外，从总体和技术层面出发，制定我国太阳能飞机及其关键技术的发展目标（见表6）。

### （二）重点任务

近期（2030年前）：重点任务为提高太阳能无人机高空巡航时间，使其初步达到可应用标准。在这一阶段，太阳能电池功率密度达2 kW/kg、

表6 太阳能飞机及其关键技术发展目标

| 阶段目标 | | | 2030年 | 2040年 | 2050年 |
|---|---|---|---|---|---|
| 总体 | 无人 | 航时/月 | 1 | 4 | 12 |
| | | 飞行高度/km | 28 | 35 | 43 |
| | | 载荷比/% | 27 | 40 | 48 |
| | 载人 | 巡航速度/（$km\cdot h^{-1}$） | 100~150 | 200 | 300 |
| | | 载荷比/% | 21 | 30 | 38 |
| 关键技术 | 气动设计 | 升阻比 | 35 | 40 | 45 |
| | 太阳能电池 | 效率/% | 38 | 40 | 42 |
| | | 功率密度/（$kW\cdot kg^{-1}$） | 2 | 6 | 10 |
| | 储能电池 | 能量密度/（$Wh\cdot kg^{-1}$） | 500 | 700 | >1000 |
| | 电机 | 效率/% | 96 | 98 | 99 |
| | | 功率密度/（$kW\cdot kg^{-1}$） | 8 | 15 | 20 |

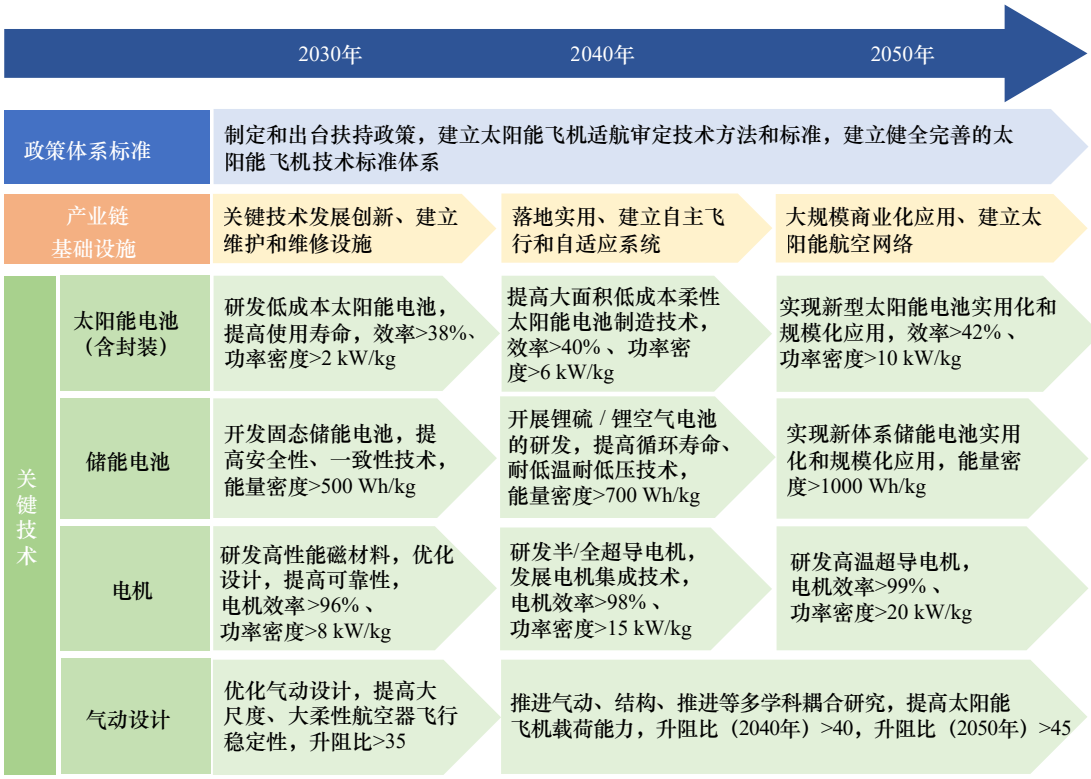


图10　太阳能飞机及其关键技术发展路线图

效率达38%，高性能固态锂电池能量密度预计达500 Wh/kg，永磁推进电机技术功率密度达8 kW/kg、效率达96%。需要突破的关键技术包括：柔性高效薄膜太阳能电池制造技术、高能量密度固态锂电池技术、高功率密度永磁电机技术等。

中期（2040年前）：重点任务为提高太阳能飞机载荷能力，降低飞机总体成本，实现太阳能飞机落地应用。在这一阶段，太阳能电池功率密度达6 kW/kg、效率达40%，锂硫/锂空气电池能量密度预计可达到700 Wh/kg，半超导和全超导推进电机技术功率密度达15 kW/kg、效率达98%。需要突破的关键技术包括：大面积低成本柔性钙钛矿光伏电池制造技术、高性能锂硫/锂空气电池技术、超导电机低温冷却与散热技术等。

远期（2050年前）：重点任务为推动载人太阳能飞机向商业化运营迈进，实现太阳能无人机全年不间断飞行，推进其大规模应用。在这一阶段，太阳能电池功率密度达10 kW/kg、效率达42%，储能电池能量密度超过1000 Wh/kg，高温超导推进电机功率密度达20 kW/kg、效率达99%。需要突破的关键技术包括：低成本高稳定性的储能电池技术、高温超导电机技术、翼身融合技术等。

### （三）发展建议

为进一步加快我国太阳能飞机发展，从总体思路、技术攻关、体系建设三个不同层面提出以下发展建议。① 重点发展太阳能无人机技术。充分发挥太阳能无人机在高空长时间飞行、快速部署以及成本低廉等方面的优势，推动该技术在特定领域取代卫星，通过多架太阳能飞机形成高空平台网络，提供广域覆盖服务，执行包括但不限于遥感、通信等多样化任务。发挥政府主导力量，推动相关部门、地方政府积极采购和使用太阳能无人机，扩大市场规模，推动技术和产业革新。② 加快攻关太阳能飞机关键技术。加快发展高效率低成本柔性太阳能电池、高功率密度高安全储能电池、高可靠性高功率密度电推进技术、高效能量管理与飞行控制技术等，持续推动太阳能飞机关键部件制造技术、总体设计与综合优化管理技术等升级换代，不断提升太阳能飞机高空长航时飞行水平。③ 加快建设太阳能飞机关键技术标准体系和适航审定体系。加快完善太阳能飞机的行业法规、技术标准体系、检测认证

体系，抢占国际话语权，推进行业高质量发展。开展太阳能航空适航审定技术预先研究，加快建立太阳能飞机适航审定体系，加速满足市场需求的太阳能飞机适航取证。

**利益冲突声明**

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** October 12, 2024; **Revised date:** February 17, 2025

**Corresponding author:** Xuan Yimin is a professor from the College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, and a member of Chinese Academy of Sciences. His major research field is low-carbon aviation power technology. E-mail: ymxuan@nuaa.edu.cn

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on the Development Strategy of New Energy Aero-engine” (2023-XBZD-15)

**参考文献**

[1] 施喆闻. 从产业投资视角看航空公司碳中和路径 [J]. 民航管理, 2022 (1): 25–31.
Shi Z W. Airlines’ carbon neutrality path: From the perspective of industrial investment [J]. Civil Aviation Management, 2022 (1): 25–31.

[2] 韩博, 刘雅婷, 谭宏志, 等. 一次航班飞行全过程大气污染物排放特征 [J]. 环境科学学报, 2017, 37(12): 4492–4502.
Han B, Liu Y T, Tan H Z, et al. Emission characterization of civil aviation aircraft during a whole flight [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(12): 4492–4502.

[3] Noll T E, Brown J M, Perez-Davis M E, et al. Investigation of the Helios prototype aircraft mishap volume I mishap report [R]. Washington DC: National Aeronautics and Space Administratio, 2004.

[4] Doyle S. The measure of persistent high altitude solar aircraft (PHASA 35) [J]. Engineering & Technology, 2020, 15(3): 92–93.

[5] FlightGlobal. BAE details latest test success with high-flying PHASA-35 [EB/OL]. (2024-12-19)[2024-12-20]. https://www.flightglobal.com/defence/bae-details-latest-test-success-with-high-flying-phasa-35/161180.article.

[6] Böswald M, Vollan A, Govers Y, et al. Solar Impulse - Ground vibration testing and finite element model validation of a lightweight aircraft [R]. Paris: IFASD, 2011.

[7] Matyas T, Galin A, Suruntovich N. Solar Impulse-2 [R]. Minsk: BNTU, 2016.

[8] Dawson D. Solar Impulse 2: Pulse on the future [J]. Composites World, 2016, 71: 36–53.

[9] 耿肃竹. “墨子II型” 无人机首飞成功 [J]. 创新世界周刊, 2019 (7): 58–59.
Geng S Z. The first flight of Mozi II UAV was successful [J]. Innovation World Weekly, 2019 (7): 58–59.

[10] 国家航天局. 航天科工飞云工程取得阶段性成果 [EB/OL]. (2019-03-15)[2024-12-20]. https://www. cnsa. gov. cn/n6758823/n6758838/c6805666/content.html.
China National Space Administration. Feiyun Engineering of China Aerospace Science and Industry Corporation Limited has achieved phased results [EB/OL]. (2019-03-15)[2024-12-20]. https://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n67 58838/c6805666/content.html.

[11] 国产大型太阳能无人机首飞成功 [J]. 中国环境监察, 2022 (9): 6.
The domestic large-scale solar drone made its first flight successfully [J]. China Environment Supervision, 2022 (9): 6.

[12] 陶于金. 临近空间超长航时太阳能无人机发展及关键技术 [J]. 航空制造技术, 2016, 59(18): 26–30.
Tao Y J. Development and key technology on near space long voyage solar unmanned aerial vehicle [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(18): 26–30.

[13] Chen W S, Bernal L. Design and performance of low Reynolds number airfoils for solar-powered flight [R]. Reno: 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2008.

[14] 李广佳, 王红波, 张凯, 等. 临近空间太阳能无人机增升减阻技术综述 [J]. 航空学报, 2024, 45(5): 193–209.
Li G J, Wang H B, Zhang K, et al. Lift enhancement and drag reduction technologies of solar powered unmanned aerial vehicles in near space: Review [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 193–209.

[15] Vashishtha V, Kumar S, Ashok, et al. Solar power the future of aviation industry [J]. International Journal of Engineering Science and Technology, 2011, 3(3): 2051–2058.

[16] 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.
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): 34–63.

[17] NREL. The best-research cell efficiencies chart [EB/OL]. (2024-10-11)[2024-12-20]. https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf.

[18] 薛超, 姜明序, 高鹏, 等. 柔性砷化镓太阳电池 [J]. 电源技术, 2015, 39(7): 1554–1557.
Xue C, Jiang M X, Gao P, et al. Thin film Ga as solar cells [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2015, 39(7): 1554–1557.

[19] Rühle S. Tabulated values of the Shockley-Queisser limit for single junction solar cells [J]. Solar Energy, 2016, 130: 139–147.

[20] 王爱丽, 汪舒蓉, 林红, 等. 钙钛矿太阳电池的研究进展与关键挑战 [J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(7): 1306–1322.
Wang A L, Wang S R, Lin H, et al. Recent advances and critical challenges of perovskite solar cells [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(7): 1306–1322.

[21] Hu Y Z, Niu T T, Liu Y H, et al. Flexible perovskite solar cells with high power-per-weight: Progress, application, and perspectives [J]. ACS Energy Letters, 2021, 6(8): 2917–2943.

[22] Horowitz K, Remo T, Smith B, et al. A techno-economic analysis and cost reduction roadmap for III - V solar cells [R]. Golden: NREL, 2018.

[23] De Bastiani M, Larini V, Montecucco R, et al. The levelized cost of electricity from perovskite photovoltaics [J]. Energy & Environmental Science, 2023, 16(2): 421–429.

[24] Albrecht S, Rech B. Perovskite solar cells: On top of commercial

photovoltaics [J]. Nature Energy, 2017, 2(1): 1–2.

[25] 杨希祥, 侯中喜, 郭正. 高空长航时太阳能飞机研究进展与技术挑战 [J]. 国防科技大学学报, 2023, 45(6): 1–9.
Yang X X, Hou Z X, Guo Z. Development status and technology challenges of high-altitude long-endurance solar-powered aircraft [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2023, 45(6): 1–9.

[26] Gao X Z, Hou Z X, Guo Z, et al. Reviews of methods to extract and store energy for solar-powered aircraft [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 96–108.

[27] Cheng Q, Chen Z X, Li X Y, et al. Constructing a 700 Wh kg-1-level rechargeable lithium-sulfur pouch cell [J]. Journal of Energy Chemistry, 2023, 76: 181–186.

[28] 刘帅, 姚路, 章琴, 等. 高性能锂硫电池研究进展 [J]. 物理化学学报, 2017, 33(12): 2339–2358.
Liu S, Yao L, Zhang Q, et al. Advances in high-performance lithium-sulfur batteries [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2017, 33 (12): 2339–2358.

[29] 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.
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): 85–96.

[30] 陈吉清, 翁楚滨, 兰凤崇, 等. 政策影响下的动力电池产业发展现状与趋势 [J]. 科技管理研究, 2019, 39(9): 148–157.
Chen J Q, Weng C B, Lan F C, et al. Development status and trend of power battery industry under the influence of policy [J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(9): 148–157.

[31] Cao W Z, Zhang J N, Li H. Batteries with high theoretical energy densities [J]. Energy Storage Materials, 2020, 26: 46–55.

[32] 张新彤. 太阳能无人机用高效率高转矩密度永磁同步电机的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(硕士学位论文), 2018.
Zhang X T. Research on high efficiency and high torque density permanent magnet synchronous motor of solar unmanned aerial vehicle [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(Master's thesis), 2018.

[33] 暴杰, 许重斌, 赵慧超. 汽车电驱动新型轴向磁通电机技术综述 [J]. 汽车文摘, 2022 (5): 44–48.
Bao J, Xu C B, Zhao H C. Overview of new axial flux motor technologies for automobile electric drive [J]. Automotive Digest, 2022 (5): 44–48.

[34] Collozza A, Dolce J L. High-altitude, long-endurance airships for coastal surveillance [R]. Washington DC: NASA, 2005.