

低空飞行器动力系统技术发展综述

白晓鑫¹, 李长豫¹, 赵自庆², 但敏², 任烁今¹, 王凤滨¹, 刘双喜¹, 王雨¹

(1. 中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津 300300)

(2. 中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 低空经济作为国家新兴支柱产业,其规模化发展高度依赖低空飞行器的技术突破,而动力系统是决定飞行器综合性能的关键。本文系统回顾了低空飞行器动力系统的主要技术路线与发展现状。首先,介绍了低空飞行器的典型类型及其对动力系统的差异化需求;然后,重点梳理并对比分析了燃油动力、纯电力、氢能动力及混合动力4类技术路线的技术特点、研究进展与主要发展瓶颈,并围绕机载储能、电驱动系统、能量管理及适航审定等关键技术探讨了其突破方向;最后,对动力系统未来多元化、智能化、绿色化的发展趋势进行了展望,以期对低空飞行器动力技术的选型、研发及产业政策制定提供系统性参考。

关键词: 低空经济;动力系统;航空发动机;纯电力;氢燃料电池;混合动力

中图分类号: V239

文献标识码: A

A review of propulsion system technology development for low-altitude aircraft

BAI Xiaoxin¹, LI Changyu¹, ZHAO Ziqing², DAN Min², REN Shuojin¹,
WANG Fengbin¹, LIU Shuangxi¹, WANG Yu¹

(1. CATARC Automotive Test Center (Tianjin)Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

(2. College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: As a strategically important emerging industry, the development of the low-altitude economy relies heavily on technological breakthroughs in low-altitude aircraft. The propulsion system is the key determinant of an aircraft's overall performance. This paper provides a systematic review of the main technical approaches and the current development status of propulsion systems for low-altitude aircraft. First, it introduces the main types of low-altitude aircraft and their specific requirements for propulsion systems. It then focuses on organising and comparing the technical characteristics, research progress and primary bottlenecks of four technology routes: fuel-powered, pure electric, hydrogen-powered and hybrid-powered systems. Breakthrough directions for key technologies such as onboard energy storage, electric drive systems, energy management and airworthiness certification are then explored. Finally, it outlines future trends in power system development towards diversification, intelligence and sustainability, aiming to provide a systematic reference for selecting, researching and developing, and formulating industrial policy for low-altitude aircraft power technologies.

Key words: low-altitude economy; propulsion system; aircraft engine; pure electric propulsion; hydrogen fuel cell; hybrid electric propulsion

收稿日期: 2026-01-29; 修回日期: 2026-04-09

基金项目: 航空科学基金(2024L074067001)

通信作者: 赵自庆(1989-), 男, 博士, 讲师。E-mail: zqzhao@cauc.edu.cn

引用格式: 白晓鑫, 李长豫, 赵自庆, 等. 低空飞行器动力系统技术发展综述[J]. 航空工程进展.

BAI Xiaoxin, LI Changyu, ZHAO Ziqing, et al. A review of propulsion system technology development for low-altitude aircraft [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

低空经济是以各类有人和无人驾驶航空器在低空空域开展活动为核心的新兴经济形态,其空域范围通常为距地平面垂直高度1 000 m以下,部分特殊区域可延伸至3 000 m^[1]。低空经济自2024年首次写入我国政府工作报告以来,其定位经历了从“新增长引擎”到“新兴产业”,再到“新兴支柱产业”的三级跃升,战略产业地位逐渐凸显。作为全球经济增长的新引擎与科技创新的重要前沿,低空经济正快速发展。其应用场景涵盖城市空中交通(Urban Air Mobility, UAM)、物流配送、应急救援与农林植保等诸多领域,正深刻改变着传统产业模式和人们的生活方式^[2]。我国已将低空经济发展纳入国家战略规划与综合交通体系建设部署^[3]。以电动垂直起降飞行器(Electric Vertical Take-off and Landing, eVTOL)、飞行汽车和先进无人机为代表的新型低空飞行器,是推动该领域从概念验证走向规模化商业应用的核心装备。而这些低空飞行器的航程、载荷、噪声及经济性等关键性能,高度依赖于其动力系统的技术水平^[4]。因此,深入分析低空飞行器动力系统的技术发展趋势与共性关键技术,已成为该领域的研究热点^[5-7]。

当前,低空飞行器动力系统已形成燃油动力、纯电力、氢能动力及混合动力等多技术路线并存的发展格局^[8-10]。各类技术在成熟度、性能边界与适用场景上差异显著,其选型与发展路径直接关系到低空经济在不同应用场景的可行性与效

益。尽管现有研究已取得不少进展,但仍存在一些不足:多数综述集中于单一技术路线,缺乏对不同技术路线的横向比较与适用场景分析^[11-13];部分研究仅针对特定飞行器平台,未能形成面向低空经济全场景的系统性技术图谱^[14-18];此外,对机载储能、电驱动、能量管理等关键共性技术的发展趋势,尚缺乏系统梳理,难以有效支撑产品选型与研发决策^[19-21]。

为厘清不同动力系统的技术特点、适用场景与发展方向,本文系统梳理低空飞行器主流动力系统的发展现状。首先,概述低空飞行器的典型类别及其对动力系统的差异需求;其次,重点剖析燃油动力、纯电力、氢能动力及混合动力这4类技术路线的工作原理、优势、瓶颈与应用现状;然后,聚焦机载储能、高效电驱动及能量管理、适航审定等关键共性技术,探讨其发展趋势与突破方向;最后,总结多技术路线并存的未来格局,并对产业配套与可持续发展进行展望,以期对相关技术研发与产业决策提供参考。

1 低空飞行器及其动力系统概述

1.1 低空飞行器典型类型

低空飞行器作为构建未来立体交通网络与低空经济生态的基础,其构型设计正呈现多元化发展趋势。根据用途与结构特点,可主要分为eVTOL、无人机和通用航空飞机三大类,各类飞行器的典型技术特征与动力系统需求如表1所示。

表1 低空飞行器典型类型与动力需求对比
Table 1 Comparison of typical low-altitude aircraft types and their power requirements

| 飞行器类型 | 典型构型 | 主要应用场景 | 典型航程需求/km | 典型载荷需求 | 动力系统核心要求 |
|--------|--------------|--------------|-----------|-----------------|-----------------|
| eVTOL | 多旋翼/倾转旋翼/复合翼 | 城市空中交通、短途通勤 | 50~300 | 1~6人/100~600 kg | 高功率密度、低噪声、高安全冗余 |
| 中小型无人机 | 多旋翼/固定翼 | 巡检、植保、消费娱乐 | 10~100 | <150 kg | 轻量化、高可靠性、经济性 |
| 大型无人机 | 复合翼/固定翼 | 物流运输、应急救援 | 200~1 000 | 150~1 000 kg | 高能量密度、长航时、大载荷 |
| 通用航空飞机 | 固定翼/直升机 | 公务飞行、培训、特种作业 | 500~2 000 | 4~10人 | 高可靠性、全天候、成熟供应链 |

eVTOL依托分布式电推进(Distributed Electric Propulsion, DEP)架构,兼具垂直起降、低噪声及零碳排放等显著优势,是UAM场景下的关键运载平台^[22-23]。根据气动布局与推进方式的不同,eVTOL主要细分为多旋翼、倾转旋翼、复合翼以及倾转涵道等构型。其中,多旋翼构型结构简单

且控制成熟,但巡航效率较低,典型代表如亿航EH216-S。倾转旋翼构型则兼顾了垂直起降与高效巡航性能,是目前长程机型的主流技术路线,代表机型如Joby S4。

无人机涵盖了从微型多旋翼到大型固定翼等多种构型,已在物流配送、电网巡检及应急救援等

领域形成规模化应用。受限于起飞重量与任务包线的差异,其动力选型呈现明显的层级特征:消费级与小型工业级无人机普遍采用高倍率锂电池直驱方案;而针对长航时、大载重的中大型物流或侦察无人机,单纯的电动力难以突破续航瓶颈,因此油电混合动力或氢燃料电池动力系统正成为提升性能核心技术方向^[24]。代表机型包括广泛应用的大疆工业系列以及采用油电混动构型的御风未来E40H等。

通用航空飞机主要指服务于中长距通勤及特种作业的轻型直升机与传统固定翼飞机。相较于前两者,此类飞行器对航程、载荷和全天候运行能力要求较高。目前,其动力系统仍以传统燃油动力为主导,但在全球航空脱碳背景下,可持续航空燃料(Sustainable Aviation Fuel, SAF)及混合动力技术也正在开展应用。这一类别的典型平台包括赛斯纳172及Piper PA-28等成熟机型。

1.2 动力系统的基本分类

较之传统通航飞行器,低空飞行器的一个显著特征是动力能源形式的拓展和革新,其动力系统可根据能源利用方式与工作原理进行系统性划分。

根据能源利用方式,动力系统主要分为传统燃油动力、纯电动、氢能动力及混合动力四种形

式。其中,燃油动力目前仍占主导地位,而纯电动、氢能动力及混合动力正加速向实用化演进。从工作原理来看,则可分为内燃机、电动机、燃料电池以及由上述技术组合而成的混合动力系统。不同动力形式在功率密度、续航能力、环境适应性及运维成本等方面各具特点,共同构成当前低空动力系统的多元化技术路线。低空飞行器动力系统的分类如图1所示。

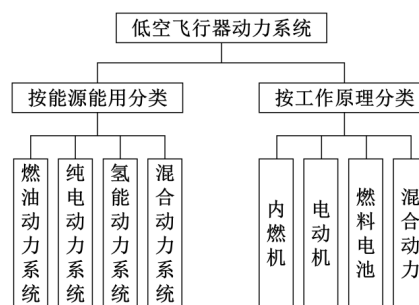


图1 低空飞行器动力系统分类

Fig. 1 Classification of power systems for low-altitude aircraft

2 动力系统技术特点与现状

低空飞行器动力系统的选择是对航程、载荷、安全性与运营成本的综合权衡。当前主流技术路线涵盖燃油动力系统、纯电动动力系统、氢能动力系统及混合动力系统。不同技术路线的核心优势、主要局限性及典型应用平台对比如表2所示。

表2 各类动力系统技术路线综合对比

Table 2 Comprehensive comparison of technical pathways for various power systems

| 技术路线 | 核心优势 | 主要局限性 | 应用机型 |
|---------|--|--|--------------------------------------|
| 燃油动力系统 | —能量密度高、航程长、载重能力强 —技术成熟、功率覆盖范围广、使用维护成本低 | —排放与噪声污染严重 —机械响应较慢 | 赛斯纳172、壹通TP500无人运输机 |
| 纯电动动力系统 | —零排放、低噪声、结构简单 —控制精度高、响应快、维护成本低 —适合分布式电推进 | —航程短、电池重量大、载重受限 —低温续航衰减 —快充基础设施不足 | 小鹏汇天旅航者X2、亿航EH216-S、Joby-S4 |
| 混合动力系统 | —航程长 —安全冗余高 —技术过渡容易 | —系统复杂、重量高体积大 —热管理复杂 —适航取证复杂 | Elroy Air Chaparral C1、追梦空天DF600“惊鸿” |
| 氢能动力系统 | 氢燃料电池 | —电堆功率密度与寿命瓶颈 —储氢技术成本高 —加氢基础设施匮乏 | 同济大学“飞跃一号”氢燃料电池动力无人机 |
| | 氢燃料内燃机 | —与传统航空煤油发动机动力构型基本一致,改装成本相对较低 —效率低于燃料电池 —仍有氮氧化物排放 | 沈航通航RX4HE氢内燃机四座飞机 |

需要说明的是,表2主要从能源利用方式的角度对4类动力系统技术路线进行综合对比。在实际工程应用中,同一能源利用方式下可能对应不

同的工作原理实现路径。例如,氢能动力既可采用氢内燃机方式,也可采用氢燃料电池方式实现;混合动力系统则涵盖了内燃机—电动机、燃料电

池—电池等多种原理组合形式。两种分类维度的交叉关系在后文各节中进行了详细阐述。

2.1 燃油动力系统

1) 现状与发展趋势

燃油动力系统主要分为活塞式发动机和燃气涡轮发动机两大类,凭借其成熟的供应链与高能量密度燃料优势,目前仍主导通用航空市场。

活塞式发动机包括往复式与旋转式(转子)两类。其结构简单、成本低廉,但存在功重比低、高空性能衰减明显等局限,通常需配合增压技术使用。往复式活塞发动机长期以来一直是小型通用航空飞机的首选动力。根据统计^[25],截至2023年,我国通用航空飞机中活塞动力占比约50%。转子发动机凭借其高功率密度、体积小、运行平顺等性能,正面临新的发展机遇。相比活塞发动机,涡轮发动机(如涡喷、涡轴)具有更高的功重比和速度性能,适合高空高速或重载任务,但低速工况下油耗较高且效率较低,广泛应用于中大型无人机、公务机、支线客机以及绝大多数军用和民用直升机。我国通航飞机动力系统构成如图2所示。

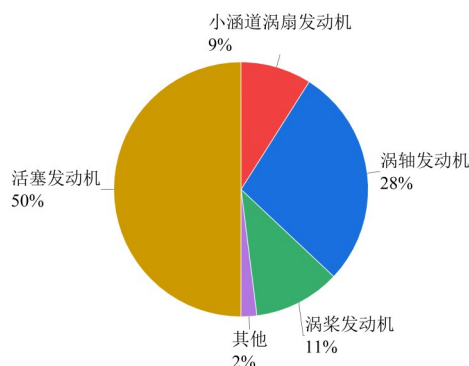


图2 我国通航飞机动力系统构成^[26]
Fig. 2 Composition of power systems for general aviation aircraft in China^[26]

2) 核心优势与挑战

传统燃油动力的核心优势主要体现在3个方面:一是航空煤油/汽油能量密度远超现有电池,可确保飞行器具备优异的续航能力和有效载荷能力;二是形成了完整的设计理论、成熟制造工艺和完善供应链体系;三是功率覆盖范围广(数千瓦至数十兆瓦),能够满足从小型无人机到大型运输机的多样化需求。

燃油动力系统性能的持续提升,在很大程度上

上有赖于对燃烧过程的深入理解与精确调控。近年来,围绕旋流燃烧流场结构、射流火焰卷吸与稳定机制以及气量分配对燃烧室排放的影响规律等方面的研究不断深入^[27-29],为低空飞行器燃油动力系统的高效低排放燃烧室设计提供了重要的理论基础与技术参考。

然而,面对日益严格的环保法规和城市低空应用对低噪声、低排放的要求,燃油动力的污染重、噪声大、效率提升空间有限等短板日益凸显,在纯直驱模式下的应用范围预计将逐渐被压缩。然而,作为混合动力系统的重要组成部分,传统燃油动力在中短期内仍将保持关键作用,尤其在远距离飞行与高载重运输等任务场景中,依然具有难以替代的优势^[8,30-31]。

2.2 纯电动动力系统

1) 技术特点

随着eVTOL、电动通航飞机和各类无人机逐渐成为低空经济的核心装备,其对高效动力系统的的需求日益迫切。特别是在UAM场景中,短航程、低载荷以及对环境噪声的严苛要求,纯电动技术凭借零排放、低噪声和较低运营成本等优势,被普遍视为现阶段的主流路线^[32]。全球范围内,Joby Aviation S4、Wisk Aero Cora和亿航EH216等标杆性eVTOL机型均采用了纯电构型。其中,Joby S4采用六倾转旋翼纯电构型,设计航程约241 km、巡航速度322 km/h,已于2024年完成超过1 600次试飞,并获得美国联邦航空管理局颁发的允许商业运营证书。在消费级和行业级无人机市场,纯电动更是占据绝对主导地位。

从系统原理上看,纯电动动力系统采用高比能动力电池作为单一能源载体,通过“储能—变流—电机—推力发生器”的能量转换链路,将电能转化为驱动螺旋桨的机械能,从而构建起高度集成的全电动力架构(如图3所示)。

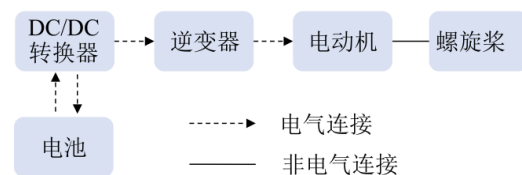


图3 纯电动动力系统架构

Fig. 3 Architecture of a pure electric propulsion system

锂离子电池是当前纯电动动力系统电池包的主流技术方案。国内外知名 eVTOL 产品均采用锂电池,例如美国 Joby S4、英国 Vertical VX4 以及国内时的科技 E20 等。其核心性能指标包括能量密度、功率密度、循环寿命及安全性^[33]。

电机系统作为关键的驱动部件,通常由电机及电机驱动器组成,其性能直接决定动力系统的能量转换效率与推进性能。当前主流电机类型为永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)与无刷直流电机(Brushless Direct Current Motor, BLDC):PMSM 具有高功率密度、高效率的优势,但需应对散热难题与退磁风险;BLDC 则具备控制逻辑简单、可靠性高的特点。此外,超导电机凭借极高的电流密度与低损耗特性,被认为是未来突破功率密度瓶颈的颠覆性技术,目前仍处于理论探索与初步应用阶段^[16]。

2) 主要瓶颈与挑战

电池能量密度不足是制约纯电动飞行器航程与载荷的核心瓶颈。当前主流商用锂电池能量密度约为 250~300 Wh/kg,仅为航空煤油的 1/40 左右^[34]。若采用现有电动汽车动力电池搭载 1~2 座 eVTOL,其典型续航仅 20~30 min,这促使多数厂商转向混合动力方案。

此外,纯电动动力系统还存在以下关键制约因素:高频起降与快充对电池循环寿命的严苛要求、航空级电池高昂成本、长时间充电对运营周转的影响、大功率充放电带来的热管理难度、电池热失控风险及严格适航取证要求、低温环境下性能显著衰减等。

综合上述分析可知,纯电动系统在城市短途客运(航程<100 km)和小型物流配送场景中具有显著优势,但在中长航程、大载荷应用场景下仍面临能量密度瓶颈。这一技术边界决定了纯电动难以独立承担低空经济全场景覆盖的任务,需与其他技术路线形成协同互补以形成技术合力。

2.3 氢能动力系统

1) 技术特点

氢能作为一种能量密度高且清洁可再生的能源,在低空动力领域同样具备广阔的发展前景。根据氢能转化路径的差异,氢能动力系统主要分为氢内燃动力和氢燃料电池动力两类。不同技术

路线的关键技术对比如表 3 所示。

氢内燃动力可进一步细分为氢燃料活塞式内燃机和氢燃料涡轮发动机,其核心原理为直接燃烧,即通过改造现有活塞式内燃机或燃气涡轮发动机,使氢气在缸内燃烧产生推力。该技术路线的核心优势在于可依托现有发动机技术进行适配性改造,显著降低开发成本与周期,同时能够输出较高推力,适用于长航程飞行和大载荷应用场景。需要注意的是,尽管氢气燃烧过程不产生二氧化碳,但仍会生成氮氧化物^[35]。

氢燃料电池动力通过电化学反应方式,将氢能直接转化为电能,进而驱动电机带动螺旋桨。其唯一排放物为水蒸气,可实现完全零污染排放。氢燃料电池动力系统主要由燃料电池电堆、储氢系统、空气供应系统、热管理系统及辅助电源构成。其中,质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)因具备工作温度低、启动速度快、功率密度较高等优势,已成为低空飞行器氢燃料电池动力系统的首选技术路线^[36]。相较于氢内燃动力,氢燃料电池动力的核心优势体现在能量转换效率高、运行噪声低、零污染排放。在同等氢燃料携带量下,采用燃料电池动力飞行器的航程约为内燃动力机型的 150%^[35]。

表 3 氢内燃机与燃料电池动力系统关键技术对比
Table 3 Key technology comparison between hydrogen internal combustion engines and fuel cell propulsion systems

| 技术指标 | 氢内燃机 | 氢燃料电池 |
|--------------------|------------------|---------|
| 能量转换效率 | 30%~45% | 40%~85% |
| CO ₂ 排放 | 0 | 0 |
| NO _x 排放 | 相较喷气燃料减少 50%~70% | 0 |
| 噪声水平 | 高 | 非常低 |
| 系统复杂度 | 低 | 高 |
| 系统重量 | 轻 | 重 |
| 相对航程(相同氢) 基准值 | | 约增加 50% |

当前,储氢方式以 IV 型碳纤维缠绕气瓶为主,其质量储氢密度可达 5wt%~6wt%;液氢储罐虽理论质量储氢密度更高,但需维持-253℃超低温绝热环境,导致系统复杂性显著提升且存在明显蒸发损失^[37],目前仍难以实现规模化应用。2024 年,Joby Aviation 公司一架搭载液氢燃料电池的技

术验证型 eVTOL 完成长航程试飞,成为液氢技术在垂直起降飞行场景下应用的里程碑事件^[38]。

综合上述分析可知,氢燃料电池动力凭借高能量转换效率与零污染排放的特性,已被国内外主流制造商认为是氢能航空领域的首选方案。氢内燃动力虽开发难度较低、技术更为成熟,但在能量转化效率与环保性能上均劣于氢燃料电池动力,当前主要作为补充技术方案或过渡选项存在。

2) 应用探索与潜力分析

氢燃料电池在无人机领域已初步商业化应用。例如,新加坡 HES Energy Systems 推出的多款长航时氢能动力无人机已进入市场。在 eVTOL 与支线客机方向,国际上也涌现出一批氢电推进技术研发项目。2024 年 Joby Aviation 搭载液氢燃料电池的技术验证机完成了约 841 km 的长航程试飞,创造了电动垂直起降飞行器的航程纪录,该验证机集成了液态氢燃料箱和燃料电池系统,搭载了 40 kg 液氢,验证了液氢储能在 eVTOL 平台上的可行性^[12]。Alaka'i Technologies 研发的 Skai eVTOL 亦采用氢燃料电池作为主动力源,目前相关项目多处于试验与适航取证阶段。Zero-Avia 则专注于氢电推进支线客机改装,其核心产品 ZA600 氢动力系统(600 kW 级)已在 Dornier 228 双发涡桨飞机上完成首飞验证,成为全球首架搭载氢燃料电池动力系统完成飞行的商用级固定翼飞机^[39]。我国于 2017 年 1 月成功实现首架载人燃料电池飞行器的试飞,该机搭载了中国科学院大连化学物理研究所研制的 20 kW 燃料电池系统。2024 年 1 月,全球首款四座氢内燃飞机原型机 RX4HE 完成首飞。该机搭载了一台 2 L 排量的氢燃料内燃机,配备 4.5 kg 高压气态储氢系统,巡航速度为 180 km/h^[12]。

3) 主要技术瓶颈与挑战

氢燃料电池在低空飞行器动力系统中具有突出优势,但其规模化应用同样面临一系列技术与工程挑战。首先,电堆性能尚存局限。低空飞行器对重量高度敏感,要求电堆兼具高功率密度与长循环寿命(通常需达数千小时),而目前 PEMFC 在这两方面仍有较大提升空间^[36]。其次,关键材料的成本居高不下,尤其是铂基催化剂与质子交换膜,导致系统整体经济性偏低。储氢技术是另一瓶颈。高压气态储氢的体积能量密度较低,且

储氢罐形状往往难以与机身结构理想集成;液氢储罐虽能量密度较高,却面临绝热设计复杂、蒸发损失显著等问题,增加了系统复杂度和运行成本。此外,实际飞行环境中的热管理与安全性问题亦不容忽视。高空低温易导致电堆生成的水结冰堵塞流道,而其散热过程也需动态精准调控。与此同时,氢气易燃易爆的特性对泄漏检测、阻燃设计及应急处置提出了较传统航空燃油更为严苛的安全要求。

尽管面临上述挑战,氢-电混合动力系统技术路线仍展现出明确的商业化潜力。该技术综合了燃料电池的高能量密度与动力电池的高功率密度优势,通过能量与功率的协同管理,实现系统整体性能的优化,因此被视为实现长航程、零排放低空飞行的关键技术方向之一^[12]。

2.4 混合动力系统

1) 主要构型

混合动力系统融合了传统燃油动力与纯电力系统的优势,兼具长航程、快速功率响应以及低功耗、低排放等特性,是当前低空飞行器动力转型中最具工程可行性的技术方向之一。根据能量与功率流的耦合方式,该系统主要可分为串联式、并联式和串并联式(或称混联式)3种构型^[40-42],其典型架构如图 4 所示。

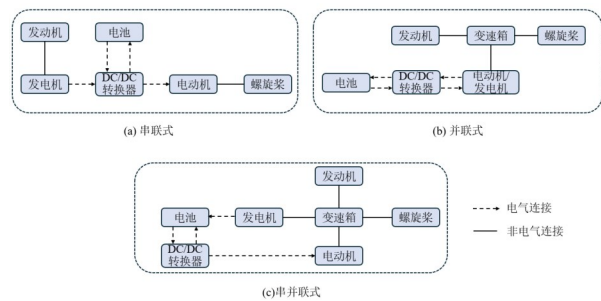


图 4 典型混合动力系统架构
Fig. 4 Architecture of a typical hybrid-electric propulsion system

在串联式构型中,发动机与推进器无机械连接,仅用于驱动发电机发电,发动机始终稳定运行于最高效率区间。所产生的电能储存于电池,或直接驱动电动机以产生推力。例如,本田的 eVTOL 即采用此方案,其能源管理策略在垂直起降阶段合并发电机与电池功率,在巡航阶段可单独使用电池,从而实现更长的航程^[43]。并联式构型

则允许发动机与电机通过机械传动装置(如变速箱)共同或独立驱动推进器。串并联式构型综合了前两者特点,虽结构最为复杂,但也提供了最高

的能量管理灵活性。不同类型混合动力系统特点如表4所示。

表4 不同混合动力系统特点对比
Table 4 Comparison of characteristics of different hybrid-electric propulsion systems

| 类型 | 优点 | 缺点 | 应用平台 |
|------|---|--|---------------|
| 串联式 | —发动机始终运转在高效区 —变速箱简化/无需传动装置 —支持分布式电力推进 | —高转速工况下效率较低 —电机、发电机需按最大功率设计,成本、重量和体积增加 —需配备发电机 | 无人机、eVTOL |
| 并联式 | —巡航速度下综合效率更高 —电机仅需部分功率额定 —无需独立发电机 | —机械传动系统复杂 —发动机无法始终保持高效区运转 —不支持分布式电推进 | 复合翼无人机、短途通航飞机 |
| 串并联式 | —能量管理具有最大灵活性 —可采用小型高效发动机 —电机仅需部分功率额定 | —齿轮箱复杂度高 —需配备发电机 —系统重量较大 | 大型通用飞机 |

3种构型各有其技术特点与适用场景。串联式构型因实现完全的机电解耦,便于布置分布式电推进系统,从而优化气动布局,已成为多数eVTOL的首选方案。并联式构型在巡航阶段具有更高的机械传动效率,且电驱动系统仅需提供部分功率,因此更适用于以巡航为主、对垂直起降时长要求不高的复合翼无人机或短途通航飞机。串并联式构型虽在能量管理灵活性上优势显著,但因结构复杂、重量较大,目前主要在部分大型通用飞机平台进行探索性应用。

2) 技术特点与应用前景

混合动力系统的综合性能优势显著。首先,通过将发动机维持在高效工况运行、启用短时纯电模式以及高效能量回收,可将整体燃油效率提升20%~50%,并大幅降低碳排放与污染物。其次,相比纯电动,混合动力系统大幅延长了航程与载荷能力;相比燃油动力,其排放与噪声水平更低,尤其适用于城市等噪声敏感区域。此外,多动力源并存带来了更高的系统冗余度与安全性,当单一动力源发生故障时可提供备份能力。

基于上述优势,混合动力系统在长航程、大载荷的低空飞行任务中具备广阔的应用前景。御风未来公司研制的E40H,作为首款满足民航局适航要求的混合动力无人机,其最大飞行时间达10h,航程超过800km,可满足就公共安全、应急救援、消防灭火、电力巡检、物流运输等场景任务需求。

3) 主要瓶颈与挑战

然而,该系统的产业化应用仍面临诸多问题。首先,系统复杂性与重量约束矛盾。多动力单元、

功率电子器件以及复杂能量路径的集成导致结构重量与故障点增多,部分抵消了其能效收益。其次,能量管理策略的设计技术难度较高,需根据飞行阶段、功率需求及电池状态进行实时、精准的功率分配,这直接决定了系统的整体效率与动态响应性能^[31]。同时,系统热管理较为复杂,发动机、电机、电控及电池等多热源并存且热负荷特性各异,对冷却系统设计提出了更高要求。此外,其采购与维护成本显著高于传统燃油动力,也在短期内制约了其市场竞争力。最后,面向适航审定,混合动力系统多动力源耦合、复杂控制逻辑及潜在电磁干扰等新问题,尚无成熟的审定标准与验证方法,取证过程面临很大挑战。

3 关键技术突破方向

低空飞行器动力系统的演进与性能提升有赖于一系列关键技术的突破。结合当前学术界与工程实践的前沿进展,未来的研究与工程化将重点集中在机载储能技术、高比功率能量转换技术以及系统安全可靠等方面。限于文章篇幅,下文对这些关键技术方向作简要综述。

3.1 机载储能技术

机载储能技术的性能直接决定低空飞行器动力系统的续航、有效载荷与安全裕度,是纯电动与氢燃料电池推进系统发展的关键制约环节。

1) 高能量密度电池技术

锂离子电池是目前电动汽车领域商业化最成

熟的技术。近年来,通过持续的材料优化和制造工艺改进,其单体能量密度已从早期的约100 Wh/kg显著提升至250~300 Wh/kg的水平^[44-45]。根据《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035年)》的规划,面向电动航空的适航与性能要求,推动400 Wh/kg级航空锂电池产品的量产,并逐渐开展500 Wh/kg级产品的小规模验证^[46]。围绕能量密度提升与低空场景安全,当前锂离子电池的技术攻关主要围绕以下4个方向展开:

①高镍正极材料体系。以镍钴锰、镍钴铝及更高镍含量材料为代表的正极体系,是提升电池能量密度的主流路径,可将单体比能量提升至300 Wh/kg以上。然而,其热稳定性差和循环衰减仍是瓶颈^[47],亟待通过阴/阳离子掺杂、表面包覆修饰以及微观结构设计等策略予以改善^[48]。

②硅基负极材料。硅的理论比容量显著高于石墨,被认为是实现高能量密度负极的重要方向,但其在锂化/脱锂过程中剧烈的体积膨胀会导致电极粉化与容量快速衰减。目前的研究通过构建

纳米硅结构、发展硅碳复合材料以及采用预锂化技术,在缓解体积效应、提升循环稳定性方面取得了阶段性进展^[49]。

③电解液体系与功能添加剂。面向高电压正极的匹配需求,需开发耐受高电压的稳定电解液,同时需通过引入阻燃添加剂、设计宽温域电解液配方等手段,全面提升电池的安全冗余与高低温环境适应性,以满足航空应用的苛刻要求。

④电池结构与制造工艺优化。通过减薄集流体与隔膜厚度、提高极片压实密度、优化焊接与成组工艺等措施,可在电池包层面提升能量密度、一致性与可靠性,从而更好满足适航要求与批量制造需求^[50]。

2) 下一代电池技术

为突破传统液态电解质锂离子电池的体系局限,满足航空应用对极端性能的追求,新一代电池技术的研发已成为前沿焦点。各类技术路线在理论能量密度、安全性及工程化可行性方面差异显著,其核心特性对比如表5所示。

表5 下一代电池技术路线特性对比

Table 5 Characteristics comparison of next-generation battery technology pathways

| 技术路线 | 核心原理与优势 | 关键技术挑战 | 发展现状与展望 |
|------------|---|--|--|
| 固态/半固态电池 | 采用固态电解质替代易燃液态电解液,安全性更高;理论能量密度有望超过500 Wh/kg | 固-固界面阻抗高;离子电导率相对较低;大尺寸极片制备工艺复杂,成本高昂 | 半固态已在eVTOL领域率先示范应用;全固态仍处于工程化攻关阶段 ^[51] |
| 锂硫(Li-S)电池 | 基于硫与锂的多电子转化反应,理论能量密度极高(约2 600 Wh/kg);正极活性物质硫资源丰富,环境友好 | 多硫化物穿梭效应导致容量快速衰减;硫正极导电性差;金属锂负极枝晶风险突出 | 具备航空应用潜力,当前主要通过导电骨架设计与隔膜/界面调控提升循环寿命 |
| 金属空气电池 | 以空气中氧气作为正极活性物质,理论能量密度在电化学体系中最高 | 开放体系对空气中水汽、二氧化碳的净化与管理要求极高;空气电极催化效率与耐久性不足;实际循环寿命短 | 目前整体成熟度较低,距离满足航空器严苛的可靠性、寿命与环境适应性要求尚有显著差距 |

3) 氢储能技术

在氢能动力系统中,储氢方式的选择直接决定了系统的质量、体积、续航与安全性,是实现工程化应用的关键环节。目前,主流技术路线主要包括高压气态储氢、低温液态储氢以及固态材料储氢。

高压气态储氢是目前最为成熟的方案。当前应用主流为IV型储氢瓶,其采用聚合物内衬与碳纤维增强复合材料缠绕结构,质量储氢密度已接近材料体系的物理极限。为追求更优的系统质量比并进一步降低成本,业界正聚焦于研发V型无内胆全复合材料储氢瓶。该技术的发展重点在于实现更精密的纤维缠绕工艺,并应用更高强度的

碳纤维材料^[52]。液态储氢具有极高质量能量密度(约为常规航空燃油的3倍)优势,但较低的体积密度是其固有短板。实现机载应用的关键在于研制质量储氢密度在15wt%~20wt%甚至更高的高性能液氢储罐,并依靠先进的真空多层绝热技术来最大限度地抑制蒸发损失^[53]。固态储氢技术,如金属氢化物、化学氢化物及多孔吸附材料等,通常具备较高的体积储氢密度和安全优势,但普遍存在吸放氢动力学较慢、循环稳定性不足以及系统集成复杂等问题,目前大多尚处于实验室研发与原理验证阶段^[54]。

3.2 高效电驱动系统

电驱动系统是低空飞行器实现电动化与分布式推进的核心,其效率、功率密度与可靠性直接决定了飞行器的航程、有效载荷与运行安全边界。典型电驱动系统由动力电源、功率变换器(如DC/DC变换器与逆变器)、驱动电机及推进器(螺旋桨或涵道风扇)构成,其架构如图5所示。面向低空飞行器应用需求,电驱动技术正沿着高功率密度电机、基于宽禁带器件的电力电子技术以及分布式电推进的系统级协同3条主线加速发展。

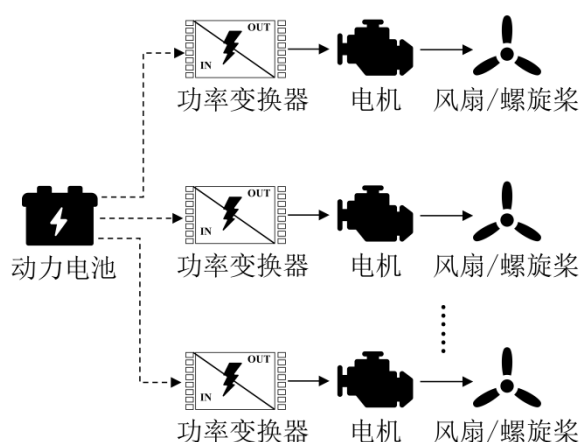


图5 典型电驱动系统架构

Fig. 5 Architecture of a typical electric drive system

1) 高性能电机技术

电机技术发展的核心在于提升功率密度,并确保在航空环境下的高可靠性。在材料层面,具备优异高温稳定性的高性能永磁体仍是当前实现高功率密度的主流选择。软磁材料则朝着低损耗、高频化的方向演进,如高牌号硅钢片、铁钴合金以及非晶/纳米晶材料,旨在降低电机铁心损耗并支撑电机向更高转速发展。绕组与导体技术更关注高槽满率与良好的散热可制造性,新型高导电复合导体虽展现出潜力,但其短期应用仍受制于工程成熟度与成本^[55]。

在结构拓扑方面,轴向磁通电机因其高转矩密度、高功率密度及扁平的轴向结构,已成为分布式电推进系统中极具竞争力的电机类型^[56-57];横向磁通电机与超导电机理论上具备更高性能潜力,但受限于复杂的制造工艺或必需的低温系统,更偏向中长期技术储备。此外,各类无永磁电机(如感应电机、开关磁阻电机)因成本优势与潜在的容

错运行能力而受到关注,但其固有的转矩脉动、振动噪声及控制复杂度等问题,仍需在航空应用场景下进行充分的验证与优化。

2) 功率转换器技术

功率转换器承担着电能变换与电机驱动控制的核心功能,其转换效率、功率密度与电磁兼容性能,直接决定了电推进系统的综合效能。宽禁带半导体器件是实现电推进系统高效率和高紧凑性的关键。其中,碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)功率器件被业界视为下一代技术突破的核心方向^[58-59]。相较于传统硅基器件,SiC和GaN器件能显著降低功率转换过程中的开关损耗与导通损耗,支撑变换器向高频化、小型化发展。研究表明,采用先进宽禁带器件与集成封装技术的航空级功率转换器,其功率密度有望达到35.36 kW/kg以上量级。

3) DEP技术

DEP技术通过将传统集中式推进动力分解为多个独立控制的小功率电机-螺旋桨/风扇单元,实现了推进系统在空间布局与功能控制上的解耦,从而为飞行器总体设计带来了更高的气动、控制自由度与冗余安全^[6]。在气动层面,通过翼面吹气或翼尖推进等特定布局可有效改善升力分布并降低诱导阻力,从而大幅提升飞行器在起降、爬升等低速阶段的性能。在安全性方面,多推进单元构成天然的物理冗余,当个别单元发生故障时,其余单元可通过推力再分配提供必要的推力裕度,从系统架构层面增强了飞行器的容错能力与可靠性。在噪声控制上,通过对螺旋桨/风扇的气动外形优化,可在满足推力要求的同时有效降低整体噪声辐射水平。此外,通过对两侧推进单元施加差动推力,还能实现高效的滚转与偏航控制,在部分飞行状态下可替代或简化传统气动舵面的功能^[60]。

然而,DEP系统的工程化应用仍面临若干关键挑战。例如,随着推进单元数量增至十几个甚至数十个,其协同控制逻辑与故障诊断策略的复杂性呈指数级增长。高度集成的电机、变换器及线缆布局,也带来了严峻的电磁兼容与辐射干扰问题。此外,多个电驱动单元及其配套的热管理系统所带来的额外重量与成本,也对其商业化推广带来很大挑战^[61]。

3.3 能量管理与热管理技术

1) 智能能量管理策略(Energy Management Strategy, EMS)

对于混合动力系统,EMS的设计水平直接决定了系统的整体效率、续航能力以及关键部件寿命。现有策略主要分为规则型、优化型与学习型三类^[62-63]。规则型策略基于预设逻辑(如门限值)进行功率分配,虽实现简单、工程鲁棒性好,但难以在全任务剖面内实现全局最优。优化型策略以动态规划为代表,能在已知完整工况信息下寻得理论最优解,但计算复杂度高,难以直接用于飞行器实时控制^[64];模型预测控制通过滚动时域优化,在性能与实时性之间取得了较好平衡^[65]。学习型策略通过在线学习与自适应调整,提升了系统对复杂未知工况、任务不确定性的适应能力,为系统的长期高效运行提供了新思路^[66]。以He^[67]等人的研究为例,其提出的基于深度强化学习的智能EMS,在分层框架中融合了两个基于双延迟深度确定性策略梯度算法的智能体。通过多智能体协同进行能量管理,实现了燃油消耗降低2.2%,同时将电池健康状态维持在99.9%的效果。

总体而言,EMS正从“规则驱动”向“优化与学习协同驱动”智能架构演进。

2) 先进热管理技术

低空飞行器动力系统在功率密度下运行时,电池、电机及功率电子器件将产生大量热量。电机的持续运转受限于绝缘材料的耐温等级,而电池的性能与寿命也对温度极为敏感。因此,有效的热管理是维持系统高功率输出、保障安全性与延长使用寿命的基础^[68]。针对电池的热管理,空冷、液冷、相变材料以及热管等技术均有应用^[69]。其中,液冷技术因换热能力强、温控精度高而成为高功率密度电池包的主流选择,其技术关键在于保障电芯间的温度均匀性。对于电机与功率电子器件,通常采用液冷或强制风冷方案,并通过集成散热结构(如冷板、机壳水套)与高导热界面材料来强化传热。在系统层级,热管理需考虑不同部件间的热耦合与热量梯级利用。例如,可将功率电子器件或电机的废热回收,用于座舱采暖或燃料电池系统的预热;亦可通过统一规划与集成各子系统的冷却回路,在提升热管理效率的同时实现轻量化设计。

3.4 系统安全与适航审定研究

动力系统的安全可靠性是低空飞行器适航审定的关键判断依据。不同于燃油动力系统,目前快速发展中的纯电、混合动力和氢能系统,在能源形式、推进机制和系统构成上均存在显著差异,导致其在失效路径、系统耦合风险以及适航验证流程方面面临全新挑战。在此背景下,系统安全设计与适航审定技术本身,已成为引导动力系统技术创新方向的重要因素。然而,现行适航规章主要基于传统航空器制定,针对新型动力系统的审定框架仍处于探索阶段^[70-71]。

1) 国际适航审定动态

从全球主要适航机构的工作进展来看,各国正围绕新型动力系统加快适航标准的制修订,但在技术路径选择与推进节奏上存在差异。美国联邦航空管理局于2022年发布了针对电动及混合电推进飞行器的特殊条件,采用“一事一议”方式以“powered-lift”这一新类别为Joby等企业开展型号合格审定。欧洲航空安全局则采取了更为系统化的策略,于2023年发布了全球首部针对eVTOL的专用适航标准SC-VTOL,对电动推进系统的失效概率、电池热失控防控及多动力源故障容限等提出了量化要求,Lilium等企业已进入审定程序^[71]。中国民航局的相关工作同样进展明显,2024年亿航EH216-S获得全球首张eVTOL型号合格证,2025年底发布的《动力提升航空器适航标准(征求意见稿)》则进一步对电动推进、混合动力及能量管理系统提出了系统性审定要求。相比之下,日本与韩国虽已启动相关研究,但尚未发布独立标准文件,主要依托双边协议开展审定合作。基于上述适航标准体系,对电动与氢动力系统的适航审定要求展开分析。

2) 电动系统适航审定要求

在电动系统方面,适航审定需重点关注其高压、快响应及多通道冗余等特性。《动力提升航空器适航标准(征求意见稿)》对电动系统的审定要求提供了系统指导,主要体现在以下3方面:一是系统级安全冗余设计。电动推进系统需在严苛的尺寸与重量限制下构建多通道供电与多模块容错的架构。例如在DEP系统中,通过配置多个独立动力通道并设置故障隔离机制,确保即使在发生“最严重故障”时,仍可维持足够推力实现安全返

航。二是动力电池安全控制。针对高能量密度电池的热失控风险,适航规章对热失控防控、状态精确监控及撞击防护等方面提出了明确而细致的要求。三是电动发动机的可靠性与完整性。规章要求涵盖阻燃材料选用、关键部件寿命管理及高速转子包容性等多方面,其标准远超传统工业电机,相关验证方法与模型仍是当前研发中的难点。

3) 氢动力系统适航要求前瞻分析

氢动力系统的适航审定则面临更为复杂的挑战。目前虽尚未形成正式标准文件,但基于现行审定逻辑可推演其主要评估要求:储氢系统安全方面,需验证储氢罐在高空温差与循环载荷下的密封性、爆破强度和疲劳寿命,并设置冗余泄氢阀门系统;泄漏监测系统须具备ppm级灵敏度,通常配置两个独立通道的氢浓度传感器,并结合内部通风系统实现危险区域识别。燃料电池系统的电学与热安全方面,涉及气体输配管路密封监控,以及热管理系统快速除水与防冰功能,以防止短路或流道阻塞。系统集成与物理隔离方面,氢系统需通过舱段隔离与耐爆防火材料,实现与飞控舱、电气控制系统等关键区域的有效分隔,防止风险连锁传递。

4 未来发展趋势与产业展望

未来,低空飞行器动力系统将朝着多元化、智能化、绿色化的方向演进,其发展进程将与低空经济的拓展紧密交织、相互促进。

4.1 多能源协同与场景化动力选择

鉴于低空飞行任务谱系广泛且运行环境复杂,单一动力形式难以普适于所有场景。因此,未来低空飞行器动力系统更可能呈现“多能源长期并存、按场景最优配置”的总体格局。燃油动力、纯电力、混合动力及氢能动力等技术路线将依据各自的能量密度、功率响应、使用成本与成熟度等特性,在不同航程、载荷、起降条件以及环保和噪声约束等细分需求下形成相对清晰的应用边界^[6,14,26]。

4.2 人工智能技术应用

近年来,人工智能技术(Artificial Intelligence, AI)正深刻重塑低空飞行器动力系统的设计与运

行模式,“AI+动力”已成为推动该领域智能化发展的关键方向之一。

在动力系统设计层面,AI技术的应用正不断深化。例如基于神经网络的航空发动机燃烧室火焰状态识别、排放预测模型构建以及雾化过程建模等研究及应用^[72-75]。通过数据驱动模型与高保真数值模拟结合,可显著缩短设计迭代周期,并提升复杂燃烧系统的多目标优化能力。在动力系统运行管理层面,AI技术在智能能量管理、故障诊断与预测性维护等方面的应用也日益成熟。以深度强化学习为基础的能量管理策略,已在混合动力系统的功率分配优化中展现出接近全局最优的控制效果。

随着“AI+动力”交叉研究的不断深入,数据驱动与物理模型融合有望贯穿动力系统从概念设计、详细仿真、试验验证到在役运维的全生命周期,成为提升低空飞行器动力系统性能与可靠性的关键技术手段。

4.3 低空补能基础设施与运维体系

低空经济的规模化运营离不开完善的地面基础设施支持与运维保障体系。为满足未来发展需求,需要构建起覆盖广泛、空间布局合理的充/换电和加氢网络,其空间分布应与空域规划、起降场站及主要航路需求紧密结合^[76]。研发自动对接充电机器人,实现快速、可靠的无人化充电连接。发展兆瓦级大功率无线充电技术,提升充电便利性与效率。与此同时,结合物联网、大数据和人工智能技术,构建动力系统智能化运维体系^[77]。通过对海量运行数据的实时监测与分析,实现关键部件的预测性健康管理、远程智能诊断与故障预警,从而优化维护周期,显著提升机队出勤率与运营安全水平,并降低全生命周期运维成本^[1]。

4.4 全生命周期可持续性评估

随着环保意识的持续增强,动力系统的综合评估已不再局限于运行阶段的能耗与排放表现,而是逐步延伸至涵盖原材料开采、部件制造、运输物流、使用运营直至报废回收的全生命周期维度^[78]。开展全面的生命周期评价,是科学比较不同技术路线真实环境效益与经济性的基础,能为产业和政策制定提供关键决策依据^[79]。此外,大

力发展动力电池梯次利用与回收技术,推进绿色氢能的规模化制备与应用,是实现低空经济可持续发展的关键。

5 结束语

本文系统梳理了低空飞行器动力系统的多元技术路线、发展现状及其关键挑战。分析表明,各类动力技术因其性能特点不同,已呈现出较为明确的应用场景与发展趋势。纯电动系统凭借零排放、低噪声和高速响应的优势,在城市空中交通及小型无人机领域显示出强劲的应用潜力,但其航程受限于当前电池能量密度,短期内难以独立支撑长距离任务。氢能动力系统具备高能量密度的特点,为长航时、大载荷场景提供了一种具备前景的零排放解决方案,然而,燃料电池电堆的功率密度与耐久性、储氢系统的成本与安全性,以及加氢基础设施的不足,仍是其规模化应用的主要制约。混合动力系统通过融合燃油动力与电推进的优点,在中短期内较好地平衡了航程、载荷与环保要求,成为许多中大型无人机和区域性eVTOL的现实选择,但其系统复杂性、重量增加及适航取证难度等问题同样需要关注。传统燃油动力在SAF等技术的应用下,预计仍将在长航程、高载重等特定任务中保持其不可替代的作用。

未来,低空飞行器动力系统的发展将呈现多元化、协同化与智能化的趋势。单一能源形式难以适应所有应用场景,多种能源长期并存、按任务需求最优配置将成为常态。技术突破主要围绕下一代机载储能、高功率密度电驱动、智能能量管理以及适航审定等核心领域展开。与此同时,动力系统的发展与低空经济的规模化相辅相成,地面补能网络、智能化运维体系以及全生命周期可持续性评估,将是支撑低空产业健康发展的重要基础。展望未来,进一步推动动力系统与飞行器总体设计的深度耦合,并借助数字孪生、人工智能等技术提升研发与运维水平,将成为未来提升低空飞行器性能和实现商业化成功的关键。

参考文献

- [1] 蔡铭, 马川淇, 朱华飒, 等. 低空运行安全保障技术研究综述[J]. 交通运输工程与信息学报, 2025, 23(3): 1-26.
Cai Ming, Ma Chuanqi, Zhu Huasa, et al. Low-altitude airspace operations safety assurance technologies: a technological review[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2025, 23(3): 1-26. (in Chinese)
- [2] 王文超, 陈思好, 张兴东, 等. 低空飞行安全风险分析与系统管理[J/OL]. 航空工程进展, 1-12 [2026-02-03]. https://link.cnki.net/urlid/61.1479. V. 20250709. 1639.006.
Wang Wenchao, Chen Siyu, Zhang Xingdong, et al. Low-altitude flight safety risk analysis and system management[J/OL]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 1-12 [2026-02-03]. https://link.cnki.net/urlid/61.1479. V. 20250709. 1639.006. (in Chinese)
- [3] 万福军, 周幸窈, 陶赞, 等. 中国低空经济现状及标准化发展探析[J]. 标准科学, 2025(12): 16-22.
Wan Fujun, Zhou Xingyao, Tao Zan, et al. Analysis of the current status and standardization development of China's low-altitude economy[J]. Standard Science, 2025(12): 16-22. (in Chinese)
- [4] Li Y M, Guo T, Chen J, et al. Urban air mobility: a review and challenges [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2025, 17(3): 67-87.
- [5] Yu F F, Chen J J, Gao P N, et al. A review of hybrid-electric propulsion in aviation: modeling methods, energy management strategies, and future prospects [J]. Aerospace, 2025, 12(10): 895.
- [6] 刘文琦. 低空经济下的eVTOL发展现状与未来研究[J]. 直升机技术, 2025(4): 7-13.
Liu Wenqi. Current status and future research of eVTOL in the low-altitude economy[J]. Helicopter Technique, 2025 (4): 7-13. (in Chinese)
- [7] Saif E, Çelik M S, Keskin B, et al. Hybrid power units (HPUs) for eVTOL urban air mobility (UAM) vehicles: a conceptual analysis and future research directions[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11 (6): 13150-13165.
- [8] 帅石金, 马骁, 张晓卿, 等. 低空飞行器混合动力系统关键技术研究进展与展望[J]. 推进技术, 2025, 46(11): 31-52.
Shuai Shijin, Ma Xiao, Zhang Xiaoqing, et al. Advances and challenges in hybrid-electric propulsion technologies for low-altitude aerial vehicles[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(11): 31-52. (in Chinese)
- [9] Sahoo S, Zhao X, Kyprianidis K. A review of concepts, benefits, and challenges for future electrical propulsion-based aircraft[J]. Aerospace, 2020, 7(4): 44.
- [10] 王国庆, 李小兵, 张锐, 等. 氢动力低空飞行器发展现状与可靠性挑战[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2025, 43 (3): 1-6.
Wang Guoqing, Li Xiaobing, Zhang Rui, et al. Development status and reliability challenges of hydrogen low-altitude aircraft[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2025, 43(3): 1-6. (in Chinese)

- [11] 刘翔, 竺宏杰, 张爱玲, 等. 新能源航空发动机研究进展与展望[J]. 航空工程进展, 2025, 16(3): 17-28.
Liu Xiang, Zhu Hongjie, Zhang Ailing, et al. Overview of the current research status of new energy aviation engines [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(3): 17-28. (in Chinese)
- [12] 康桂文, 杨凤田, 许青藤, 等. 通用航空氢能动力发展及氢内燃飞机研制进展[J]. 推进技术, 2025, 46(11): 23-30.
Kang Guiwen, Yang Fengtian, Xu Qingteng, et al. Advancements in development of hydrogen-powered general aviation and hydrogen internal combustion aircraft[J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(11): 23-30. (in Chinese)
- [13] Cohen A P, Shaheen S A, Farrar E M. Urban air mobility: history, ecosystem, market potential, and challenges [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(9): 6074-6087.
- [14] Swaminathan N, Reddy S R P, RajaShekara K, et al. Flying cars and eVTOLs: Technology advancements, powertrain architectures, and design [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(4): 4105-4117.
- [15] Meng Z J, Ji J C, Liu L L, et al. eVTOL aircraft for the low-altitude economy: A review of development history, core technologies, and future trends [J]. Case Studies on Transport Policy, 2025, 22: 101629.
- [16] Zhang B W, Song Z X, Zhao F, et al. Overview of propulsion systems for unmanned aerial vehicles [J]. Energies, 2022, 15(2): 455.
- [17] Guan X M, Shi H X, Xu D S, et al. The exploration and practice of low-altitude airspace flight service and traffic management in China [J]. Green Energy and Intelligent Transportation, 2024, 3(2): 100149.
- [18] Zhao X P, Yang W P, Sun Z J, et al. Overview of electric propulsion motor research for EVTOL[C]// 2nd International Conference on Green Aviation (ICGA 2024). MDPI, 2025: 46.
- [19] Saunders G, Sumagaysay G, Patel S, et al. Design, analysis, and testing of a modular tiltrotor eVTOL vehicle with distributed electric propulsion[C]// AIAA SCITECH 2026 Forum. Orlando, FL. AIAA, 2026: AIAA2026-1878.
- [20] Li W, Cheng R G, Huang H H, et al. Energy consumption modeling and optimization of an eVTOL aircraft: Integrating weight, motor, and battery dynamics [J]. Energy, 2025, 325: 136229.
- [21] 闫炬壮, 杨文将, 白明亮, 等. 高功率密度航空推进超导电机关键技术分析[J]. 航空动力, 2024(2): 70-74.
Yan Juzhuang, Yang Wenjiang, Bai Mingliang, et al. Technical analysis of high power density aero-propulsion superconducting machines [J]. Aerospace Power, 2024(2): 70-74. (in Chinese)
- [22] 范振伟, 杨凤田, 项松, 等. 我国电动飞机发展现状及建议[J]. 航空科学技术, 2019, 30(11): 18-21.
Fan Zhenwei, Yang Fengtian, Xiang Song, et al. Present situation and advice of electric aircraft development in China [J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(11): 18-21. (in Chinese)
- [23] Benzaquen J, He J B, Mirafzal B. Toward more electric powertrains in aircraft: technical challenges and advancements [J]. China Electrotechnical Society Transactions on Electrical Machines and Systems, 2021, 5(3): 177-193.
- [24] 李兢尧, 王宝军, 李轩, 等. 低空无人机系统关键技术与应用前景[J/OL]. 航空工程进展, 1-10 [2026-02-03]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250702.1659.002>.
Li Jingyao, Wang Baojun, Li Xuan, et al. Key technology and application prospects of low altitude UAV system [J/OL]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 1-10 [2026-02-03]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250702.1659.002>. (in Chinese)
- [25] 中国民用航空局. 2023年民航行业发展统计公报[R]. 北京: 中国民用航空局, 2024.
Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin on the development of the civil aviation industry in 2023 [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2024. (in Chinese)
- [26] 尹泽勇, 李维, 肖为, 等. 我国新能源低空飞行器动力发展与展望[J]. 推进技术, 2025, 46(11): 12-22.
Yin Zeyong, Li Wei, Xiao Wei, et al. Prospect of developing new energy aero-engine for low-altitude aircraft in China [J]. Journal of Propulsion Technology, 2025, 46(11): 12-22. (in Chinese)
- [27] 吕将. 水平扩散射流火卷吸动力学机制及火焰行为研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2024.
Lyu Jiang. Study on air entrainment dynamics mechanism and flame behavior of horizontal diffusion jet fires [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2024. (in Chinese)
- [28] 王志凯, 江立军, 陈盛, 等. 受限空间内三级旋流流场和燃烧性能研究[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 237-246.
Wang Zhikai, Jiang Lijun, Chen Sheng, et al. Study on flow fields and combustion characteristics of triple swirler in confined zone [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 237-246. (in Chinese)
- [29] 王志凯, 龚卡, 罗莲军, 等. 旋流器气量分配对全环燃烧室排放的影响[J]. 航空动力学报, 2024, 39(1): 20230156.
Wang Zhikai, Gong Ka, Luo Lianjun, et al. Effects of swirler airflow split on emissions of full annular combustor [J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(1): 20230156. (in Chinese)
- [30] 伏宇, 刘昭威, 郑天慧, 等. 航空燃气涡轮-电混合动力系统关键技术分析[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 73-83.
Fu Yu, Liu Zhaowei, Zheng Tianhui, et al. Turbo-electric

- hybrid aero propulsion system key technologies analysis[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2024, 45(3): 73-83. (in Chinese)
- [31] 吴雄, 沈勋, 宋汉强. 无人机用混合动力系统综合分析[J]. *推进技术*, 2022, 43(11): 6-18.
Wu Xiong, Shen Xun, Song Hanqiang. Comprehensive analysis of hybrid system for unmanned aerial vehicle[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(11): 6-18. (in Chinese)
- [32] 邵凌云, 张卓然, 高华敏, 等. 电能航空动力技术发展研究[J]. *中国工程科学*, 2025, 27(2): 25-38.
Shao Lingyun, Zhang Zhuoran, Gao Huamin, et al. Development of electric propulsion technology in aviation[J]. *Strategic Study of CAE*, 2025, 27(2): 25-38. (in Chinese)
- [33] 邓景辉. 电动垂直起降飞行器的技术现状与发展[J]. *航空学报*, 2024, 45(5): 47-69.
Deng Jinghui. Technical status and development of electric vertical take-off and landing aircraft[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(5): 47-69. (in Chinese)
- [34] 蒙迪, 韩冰, 宁方立, 等. 全电/混动直升机发展及动力/传动系统综述[J/OL]. *航空工程进展*, 2025 (2025-05-09). <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.v.20250507.1413.004>.
Meng Di, Han Bing, Ning Fangli, et al. Overview of all-electric/hybrid helicopter powertrain and transmission system[J/OL]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2025 (2025-05-09). <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.v.20250507.1413.004>. (in Chinese)
- [35] Sethi V, Sun X X, Nalianda D, et al. Enabling Cryogenic Hydrogen-Based CO₂-Free Air Transport: Meeting the demands of zero carbon aviation[J]. *IEEE Electrification Magazine*, 2022, 10(2): 69-81.
- [36] 高彦峰, 宋琦, 谢高峰, 等. 临近空间无人机液氢供能系统技术分析[J]. *航空工程进展*, 2024, 15(2): 11-24.
Gao Yanfeng, Song Qi, Xie Gaofeng, et al. Analysis of liquid hydrogen power systems for near space unmanned aerial vehicles[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2024, 15(2): 11-24. (in Chinese)
- [37] 高扬, 张志强, 王赵蕊佳, 等. 氢能动力试飞关键技术分析与发展展望[J]. *航空工程进展*, 2024, 15(6): 77-85.
Gao Yang, Zhang Zhiqiang, Wang Zhaoruijia, et al. Analysis and development prospect of key technologies for hydrogen power flight test[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2024, 15(6): 77-85. (in Chinese)
- [38] Anon. Joby achieves the first piloted eVTOL air taxi flight between two public airports [EB/OL]. (2025-08-15) [2026-01-29]. <https://www.jobyaviation.com/news/first-piloted-evtol-air-taxi-flight-between-two-public-airports/>.
- [39] EMEC. HyFlyer projects[EB/OL]. (2025-04-21)[2026-01-29]. <https://www.emec.org.uk/projects/hydrogen-projects/hyflyer/>.
- [40] Cardone L M, Petrone G, De Rosa S, et al. Review of the recent developments about the hybrid propelled aircraft[J]. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 2024, 103(1): 17-37.
- [41] Rendón M A, Sánchez R C D, Gallo M J, et al. Aircraft hybrid-electric propulsion: Development trends, challenges and opportunities[J]. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 2021, 32(5): 1244-1268.
- [42] Xie Y, Savvarisal A, Tsourdos A, et al. Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(4): 432-450.
- [43] HONDA. Fly farther with Honda original technology: research and development of eVTOL power unit [EB/OL]. [n. d.] [2026-01-29]. https://global.honda/en/tech/eVTOL_gas_turbine_hybrid_system/.
- [44] Fotouhi A, Auger D J, Propp K, et al. A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium-Sulphur[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56: 1008-1021.
- [45] Sougrati M T, Darwiche A, Liu X, et al. Transition-metal carbodiimides as molecular negative electrode materials for lithium-and sodium-ion batteries with excellent cycling properties[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2016, 55(16): 5090-5095.
- [46] 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 中国民用航空局. 工业和信息化部等四部门关于印发绿色航空制造业发展纲要(2023—2035年)的通知[EB/OL]. (2023-10-10)[2026-01-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6908243.htm.
Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Science and Technology, Ministry of Finance, & Civil Aviation Administration of China. Notice on issuing the development outline for green aviation manufacturing industry (2023—2035) [EB/OL]. (2023-10-10) [2026-01-29]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202310/content_6908243.htm. (in Chinese)
- [47] Konuma I, Ikeda N, Campéon B D L, et al. Unified understanding and mitigation of detrimental phase transition in cobalt-free LiNiO₂[J]. *Energy Storage Materials*, 2024, 66: 103200.
- [48] Zhang M Y, Chen K, Li W F, et al. Advanced modification strategies for improving the thermal stability of Ni-rich layered cathodes towards next-generation lithium-ion batteries[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 661: 238606.
- [49] Zubi G, Dufo-López R, Carvalho M, et al. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 89: 292-308.
- [50] Kulova T L, Fateev V N, Seregina E A, et al. A brief review of post-lithium-ion batteries[J]. *International Journal*

- of Electrochemical Science, 2020, 15(8): 7242-7259.
- [51] Niu H Z, Zhang N, Lu Y, et al. Strategies toward the development of high-energy-density lithium batteries[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 88: 111666.
- [52] 戴景富, 李健卓, 孟祥宇, 等. 碳纤维复合材料储氢罐的研究进展及应用现状[J]. 合成纤维, 2025, 54(12): 56-61.
Dai Jingfu, Li Jianzhuo, Meng Xiangyu, et al. Research progress and application status of carbon fiber composites hydrogen storage tanks[J]. Synthetic Fiber in China, 2025, 54(12): 56-61. (in Chinese)
- [53] 高怡宁, 颀文庆, 方淳, 等. 燃料电池无人机关键技术与混合能量架构研究[J/OL]. 航空学报, 2025 (2025-11-20). <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251120.1332.002>.
Gao Yining, Xie Wenqing, Fang Chun, et al. Research on key technologies of fuel cell unmanned aerial vehicles and hybrid energy architecture[J/OL]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025 (2025-11-20). <https://link.cnki.net/urlid/11.1929.V.20251120.1332.002>. (in Chinese)
- [54] Xu Y H, Zhou Y, Li Y T, et al. Research progress and application prospects of solid-state hydrogen storage technology [J]. Molecules, 2024, 29(8): 1767.
- [55] 张典, 梁培鑫. 电动飞机推进电机发展及关键技术综述[J]. 航空科学技术, 2024, 35(3): 1-10.
Zhang Dian, Liang Peixin. Overview of the development and key technologies of electric aircraft propulsion motors [J]. Aeronautical Science and Technology, 2024, 35(3): 1-10. (in Chinese)
- [56] Sitapati K, Krishnan R. Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(5): 1219-1226.
- [57] Giulii Capponi F, De Donato G, Caricchi F. Recent advances in axial-flux permanent-magnet machine technology [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2190-2205.
- [58] Lidow A, Strydom J, Strittmatter R, et al. GaN: A Reliable Future in Power Conversion: Dramatic performance improvements at a lower cost [J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2015, 2(1): 20-26.
- [59] Millán J, Godignon P, Perpiñá X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(5): 2155-2163.
- [60] 王科雷, 周洲, 马悦文, 等. 垂直起降固定翼无人机技术发展及趋势分析[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 1-13.
Wang Kelei, Zhou Zhou, Ma Yuewen, et al. Development and trend analysis of vertical takeoff and landing fixed wing UAV [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 1-13. (in Chinese)
- [61] Kim H D, Perry A T, Ansell P J. A review of distributed electric propulsion concepts for air vehicle technology [C]// 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium. Cincinnati, Ohio. AIAA, 2018: AIAA2018-4998.
- [62] Yang C, Liang B Y, Wang W D, et al. An efficient energy management strategy based on heuristic dynamic programming specialized for hybrid electric unmanned delivery aerial vehicles [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 453: 142222.
- [63] 宋晓辉, 王博, 曹欣, 等. 飞机电力系统架构优化与能量管理策略研究[J]. 航空工程进展, 2025, 16(6): 169-183.
Song Xiaohui, Wang Bo, Cao Xin, et al. Optimization of aircraft power system architecture and energy management strategy [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2025, 16(6): 169-183. (in Chinese)
- [64] Misley A, Sergeant A, D'Arpino M, et al. Design space exploration of lithium-ion battery packs for hybrid-electric regional aircraft applications [J]. Journal of Propulsion and Power, 2023, 39(3): 390-403.
- [65] Wei Z C, Ma Y, Xiang C L, et al. Power prediction-based model predictive control for energy management in land and air vehicle with turboshaft engine [J]. Complexity, 2021, 2021: 2953241.
- [66] Yang C, Lu Z X, Wang W D, et al. An efficient intelligent energy management strategy based on deep reinforcement learning for hybrid electric flying car [J]. Energy, 2023, 280: 128118.
- [67] He L L, Chen F, Tian P D, et al. An improved energy management strategy for hybrid electric powered aircraft based on deep reinforcement learning [J]. Aerospace Science and Technology, 2024, 149: 109137.
- [68] Dong C F, Qian Y P, Zhang Y J, et al. A review of thermal designs for improving power density in electrical machines [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(4): 1386-1400.
- [69] Wu Z W, Lian W L, Chen B Y, et al. Research on battery heat generation characteristics and thermal management system applied to a typical eVTOL [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 257: 124187.
- [70] 丁水汀, 綦蕾, 李果, 等. 基于系统安全的低空装备适航技术及标准研究[J]. 中国民航大学学报, 2025, 43(5): 1-15.
Ding Shuiting, Qi Lei, Li Guo, et al. Research on airworthiness technology and standards for low-altitude equipment based on system safety [J]. Journal of Civil Aviation University of China, 2025, 43(5): 1-15. (in Chinese)
- [71] 张妙婵, 李磊, 孙中雷, 等. 载人 eVTOL 航空器 TC 取证适航要求现状及风险挑战 [J/OL]. 航空工程进展, 1-16 [2026-02-03]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250224.1607.004>.
Zhang Miaochan, Li Lei, Sun Zhonglei, et al. Status of airworthiness requirements, risks and challenges for obtaining TC of person-carrying eVTOL aircraft [J]. Advances in

- Aeronautical Science and Engineering, 1-16 [2026-02-03].
<https://link.cnki.net/urlid/61.1479.V.20250224.1607.004>. (in Chinese)
- [72] 宋宛芝, 王志凯, 陶一涵, 等. 航空发动机智能流体力学研究进展与展望[J/OL]. 推进技术, 2026 (2026-02-11).
<https://link.cnki.net/urlid/11.1813.V.20260210.1905.004>.
 Song Wanzhi, Wang Zhikai, Tao Yihan, et al. Research progress and outlook on intelligent fluid mechanics for aero-engines [J/OL]. Journal of Propulsion Technology, 2026 (2026-02-11). <https://link.cnki.net/urlid/11.1813.V.20260210.1905.004>. (in Chinese)
- [73] 王志凯, 高君宇, 吴浩然, 等. 基于深度视觉特征挖掘的燃烧室火焰状态识别[J/OL]. 推进技术, 2026 (2026-01-30). <https://link.cnki.net/urlid/11.1813.v.20260129.1518.005>.
 Wang Zhikai, Gao Junyu, Wu Haoran, et al. Combustor flame state identification based on deep visual feature mining [J/OL]. Journal of Propulsion Technology, 2026 (2026-01-30). <https://link.cnki.net/urlid/11.1813.v.20260129.1518.005>. (in Chinese)
- [74] 王志凯, 陈盛, 范玮. 神经网络宽度对燃烧室排放预测的影响[J]. 航空学报, 2023, 44(5): 82-92.
 Wang Zhikai, Chen Sheng, Fan Wei. Effect of neural network width on combustor emission prediction [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(5): 82-92. (in Chinese)
- [75] 王志凯, 赵鸿华, 刘逸博. 基于神经网络的预膜雾化模型[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 217-223.
 Wang Zhikai, Zhao Honghua, Liu Yibo. Prefilming atomization model based on neural network [J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(7): 217-223. (in Chinese)
- [76] Yang S H, Hui H X, Wang H, et al. Low-altitude economy is coming: How to develop new-type power system [J]. The Innovation Energy, 2025, 2(3): 100088.
- [77] 郭禹铭, 王雅婷. 我国低空经济高质量发展的挑战、瓶颈与路径选择[J]. 公共财政研究, 2025(5): 82-96.
 Guo Yuming, Wang Yating. Reflections on promoting high-quality development of the low-altitude economy [J]. Public Finance Research Journal, 2025(5): 82-96. (in Chinese)
- [78] Pinheiro Melo S, Barke A, Cerdas F, et al. Sustainability assessment and engineering of emerging aircraft technologies: Challenges, methods and tools [J]. Sustainability, 2020, 12(14): 5663.
- [79] Nakamura H. Sustainability of Urban Low-Altitude Transportation Infrastructure: Environmental Impacts, Carbon Reduction Pathways, and Policy Optimization [J]. International Journal of Urban Airspace Economics & Technologies, 2025, 1(1): 27-38.

(编辑: 马文静)