

NEW ENERGY AIRCRAFT DEVELOPMENT WHITE PAPER



新能源飞行器发展白皮书 (2024)



中国航空工业发展研究中心

2024年11月

序

新能源飞行器是使用电、氢等新型能源以减少航空运输业对化石能源依赖的一种飞行器，是贯彻绿色航空、应对全球环境挑战的重要举措，是帮助我国航空产业实现双碳战略目标的必然选择，同时也是“第三航空”时代的重要标志。自 2016 年以来，城市空运和电动垂直起降（eVTOL）飞行器开启了新能源航空领域第一轮创新与变革热潮，氢能、可持续航空燃料（SAF）等能源形式也紧随其后，全方位推动通航、干支线领域的新能源化。2023 年 12 月，中央经济工作会议提出打造低空经济等战略性新兴产业，作为低空经济的重要载体，新能源飞行器再次被推上发展高峰。为把握航空产业变革关键机遇，指引我国新能源航空未来发展方向，中国航空研究院和中国航空工业发展研究中心先后发布了《电动飞机发展白皮书（2019）》和《新能源飞行器发展展望（2022）》，聚焦重点领域关键技术，制定新能源飞行器发展战略规划，在我国绿色航空产业转型升级的关键时期起到了重要引领作用。

全球新能源航空的发展日新月异，仅在 2023 年就有超过 150 个新型号立项，多款 eVTOL 飞行器投入试点运营，亿航获得全球首张局方颁布的载人 eVTOL 型号合格证，氢动力支线飞机实现从零到一的首飞，可持续航空燃料的投产规模不断扩大。

全球新能源航空产业在过去四年中规模翻了一番，吸引了大量企业、资本团体、科研机构跨界参与，美国、英国、法国等国家相继发布新能源航空发展规划，从单一的电动飞机转向电能、氢能、可持续航空燃料多种能源形式同步发展，从 eVTOL 和新能源通航飞机逐步向更大尺寸的干支线飞机发展。

为更好把握全球新能源飞行器发展态势，引领国内新能源飞行器的技术发展和产业布局，培育低空经济新经济增长极，中国航空工业发展研究中心在《电动飞机发展白皮书（2019）》和《新能源飞行器发展展望（2022）》的研究基础上，正式发布《新能源飞行器发展白皮书（2024）》，分析新能源飞行器的发展必要性，明确新能源飞行器的定义和分类，制定我国新能源飞行器发展规划，提出产业发展建议。白皮书提出我国应当坚持多技术路线并举，小型飞行器以电动为主攻方向，干支线等中大型飞行器加快探索氢能、可持续航空燃料等新能源方案，大力推进低空经济产业化进程，积极开拓全球航空市场，通过传统民机赛道和新能源赛道的共同发力，实现航空产业发展的“换道超车”。

目 录

1 前言	1
2 发展必要性	3
2.1 新能源飞行器是航空产业实现绿色发展的必然选择	3
2.2 新能源飞行器是我国追赶世界航空强国的重要领域	5
2.3 新能源飞行器面临良好的国内产业基础和发展机遇	6
3 定义与分类	8
3.1 新能源飞行器的定义	8
3.2 新能源飞行器的分类	8
4 发展规划	11
4.1 不同新能源技术的优势区间	11
4.2 新能源飞行器技术发展目标	13
4.3 关键技术发展预测	14
4.4 氢能飞机概念设计	16
5 关键技术	19
5.1 总体设计技术	19
5.2 高效电推进技术	20
5.3 能量综合管理技术	22
5.4 能源系统技术	23
5.5 氢涡轮推进技术	25
5.6 氢燃料存储技术	25
5.7 氢能生产与使用技术	27
5.8 可持续航空燃料技术	29
6 发展措施	32
附录 缩略语和专有名词表	34

1 前言

航空研究的战略推动力包括全球机动、环境挑战、技术聚焦 3 个方面，通过电能、氢能和可持续航空燃料等新能源技术实现向低碳航空动力的过渡，是应对环境挑战的主要举措。NASA 研究认为，电推进飞机可以实现节能超过 60%、减排超过 90%、降噪超过 65% 的潜在收益¹，欧盟认为氢动力飞机是实现欧洲 2050 碳排放要求的唯一途径²。

近年来，全球范围内兴起新能源飞行器技术发展热潮。据不完全统计³，截至 2024 年 10 月，全球范围内新能源航空企业已超 300 家，在研项目超过 700 个，其中大部分企业和项目集中在美国、中国和欧洲地区。亿航 EH216-S 获得全球首证，多款 eVTOL 飞行器开展试点运营，氢燃料电池涡桨支线飞机完成首飞，长航程、大载客量的新能源商用飞机项目不断涌现。空客 ZEROe、英国政府 FlyZero、欧盟“氢能航空 2050”等计划提出要在 2035 年前将氢动力支线飞机投入市场，2050 年前实现氢动力干线飞机的大规模应用，全球新能源飞行器的发展已迈入快车道。

2016 年，国际民航组织（ICAO）提出了 CORSIA 计划，目标是到 2050 年航空运输业碳排放量降低至 2005 年同期的一半水平。ICAO 要求从 2027 年开始强制实施 CORSIA 机制，按照航空运输增量分摊减排责任。2020 年我国正式提出 2030 年前碳达峰、2060 年前碳中和的双碳战略目标，明确要求制定交通行业碳达峰行动方案，编制碳中和技术发展路线图，加快发展新能源、航空航天等战略性新兴产业。2021 年中国民航局和国家发改委等单位联合印发《“十四五”民用航空发展规划》，明确要求 2025 年航空运输吨

¹ NASA 格林研究中心《电力推进系统研究》，Electric Propulsion System Studies.

² 欧盟《2050 年目标：欧洲航空零排放之路》，Destination 2050: A Route to Net Zero European Aviation.

³ 罗兰贝格咨询公司《绿色航空旅行开拓新视野》，Green Air Travel Reaches for New Horizons.

美国垂直飞行协会《世界 eVTOL 飞行器目录》，World eVTOL Aircraft Directory.

SMG 咨询公司《先进空中交通报告》，Advanced Air Mobility Report.

公里二氧化碳排放量相比 2020 年下降 4.5%，单位旅客能耗下降 10%。虽然吨公里二氧化碳排放量和单位旅客能耗在持续下降，我国航空运输业二氧化碳排放总量仍在逐年增加。根据我国民航局在新冠疫情前的统计数据⁴，2020 年以前中国航空运输业二氧化碳排放量年均增幅为 14.8%。根据国际航空运输协会（IATA）和中国航空运输协会的统计⁵，2023 到 2024 年全球和我国的民航业复苏情况远超预期。随着航空运输业的不断复苏，我国的航空减碳任务面临巨大压力。

表 1 全球典型新能源飞行器项目

项目/型号	国家	企业/机构	技术方案	所处阶段	技术特点
亿航 EH216	中国	亿航	电推进	获得型号认证	2 座，多旋翼 eVTOL
VoloCity	德国	Volocopter	电推进	适航取证中	2 座，多旋翼 eVTOL
Joby S4	美国	Joby	电推进	适航取证中	5 座，倾转旋翼 eVTOL
V2000CG	中国	峰飞	电推进	货运型完成取证	5 座，复合翼 eVTOL
RX4E	中国	锐翔	电推进	适航取证中	4 座，固定翼轻型飞机
Alice	以色列	Eviation	电推进	完成首飞	9 座，涡桨支线飞机
HY4	德国	H2FLY	氢动力	完成首飞	4 座，固定翼双体飞机
Gullhyver	法国	ONERA	氢动力	概念设计	200 座，双泡升力体机身
ZEROe	法国	空客	氢动力	地面试验	三种型号同步推进
ZA600/2000	美国	ZeroAvia	氢动力	完成首飞	19 座，氢燃料电池

在新能源飞行器领域，目前国内外仍处于发展早期阶段。以新能源航空引发的技术革新为契机，我国航空业应当大力发展新能源飞行器，攻克绿色低碳航空关键技术，迅速追赶世界先进水平，增强在全球范围内的市场竞争力，同时带动我国多个相关产业的整体发展，为实现航空强国提供重要支撑，抢占未来航空产业的市场和技术制高点，实现绿色低碳航空转型。

⁴ 中国民航局 2015-2022 年《民航行业发展统计公报》
⁵ 数据来源：国际航空运输协会“航空客运定期数据”-2023 年 1 月到 2024 年 9 月
中国航空运输协会“中国民航主要生产指标统计”-2023 年 1 月到 2024 年 9 月

2 发展必要性

2.1 新能源飞行器是航空产业实现绿色发展的必然选择

从第一架飞机发明到现在有超过 100 年的历史，飞机对扩大人类的活动空间、加快社会经济的发展和节约人类交流的时间起到了极大的推动作用，但带来许多便利的同时也对人类赖以生存的环境造成了危害。全球航空业快速发展对环境造成的危害主要体现在以下三点：首先飞机飞行带来的化石燃料废气排放必然导致空气污染；其次由于发动机排放的温室气体必然加速全球变暖，导致更严重的环境问题；最后在飞机起飞和降落时，巨大的噪声会对机场附近的生产生活带来影响。研究表明⁶，目前航空运输业碳排放量约占全球碳排放总量的 2.5%~4%，随着航空旅客量的快速增长，民航正在成为碳排放上升势头最快的行业。从 20 世纪 70 年代开始，世界航空运输旅客周转量大约 15 年翻一番，预计今后 20 年将以每年 4.6% 左右的速度持续增长⁷。按照旅客周转量的增长速度，2050 年航空业的二氧化碳排放量将达到 18 亿吨，较 2022 年水平增长超三倍⁸，航空运输对环境的压力持续增大，如何缓解飞机对环境的影响已经成为亟待解决的问题。

根据相关分析数据，飞机航空燃料的燃烧是航空运输业碳排放的首要来源，达到了航空运输业碳排放总量的 79%。航空燃料燃烧的碳排放大多由窄体和宽体干线飞机产生，分别占了 43% 和 37%；货运飞机次之，占比为 15%；支线飞机的碳排放占比为 5%；而通航飞机的占比最少，仅为 0.02%。从减少航空碳排放的角度来说，降低飞机燃料燃烧的碳排放是航空绿色低碳发展的关键，尤其是要减少以干支线航班为主的民航运输碳排放。

⁶ 国际能源署（IEA）《2024 年全球能源展望报告》，World Energy Outlook 2024.

⁷ 国际航空运输协会（IATA）《2023 年全球客运市场分析报告》，Air Freight Market Analysis 2023.

⁸ 气候行动追踪组织（Climate Action Tracker）《航空业统计数据》

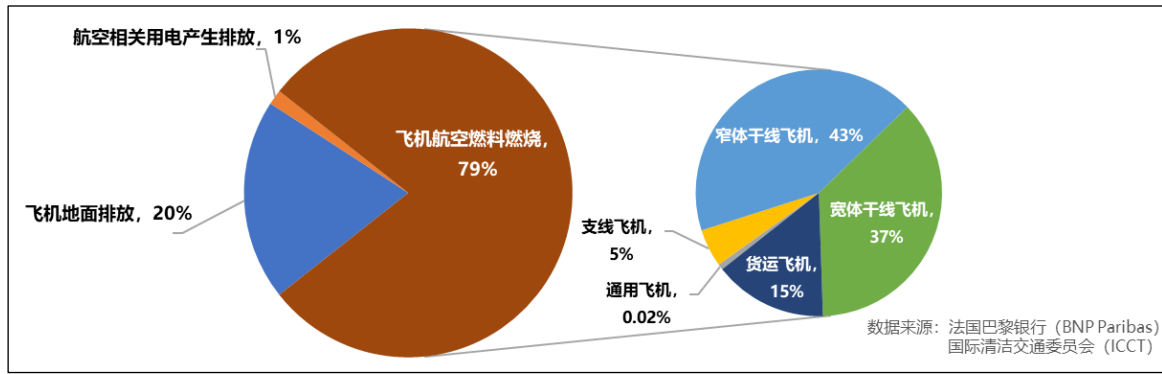


图 1 全球航空运输业的碳排放占比⁹

如果不采取任何措施，我国航空运输业碳排放可能会以 14.8% 的年均增幅持续增长。根据预测¹⁰，通过改善气动布局 and 发动机结构、使用绿色材料、提高航空燃料生产工艺、优化机队结构、提升空管运行效率等多种手段，可以实现 29% 的中等幅度降碳减排，但距离 2060 年碳中和目标仍有较大的差距。使用新能源技术是实现航空产业绿色发展目标的必然选择，新能源飞行器的大规模应用以及电、氢等能源的绿色生产可以贡献 71% 的减碳指标。

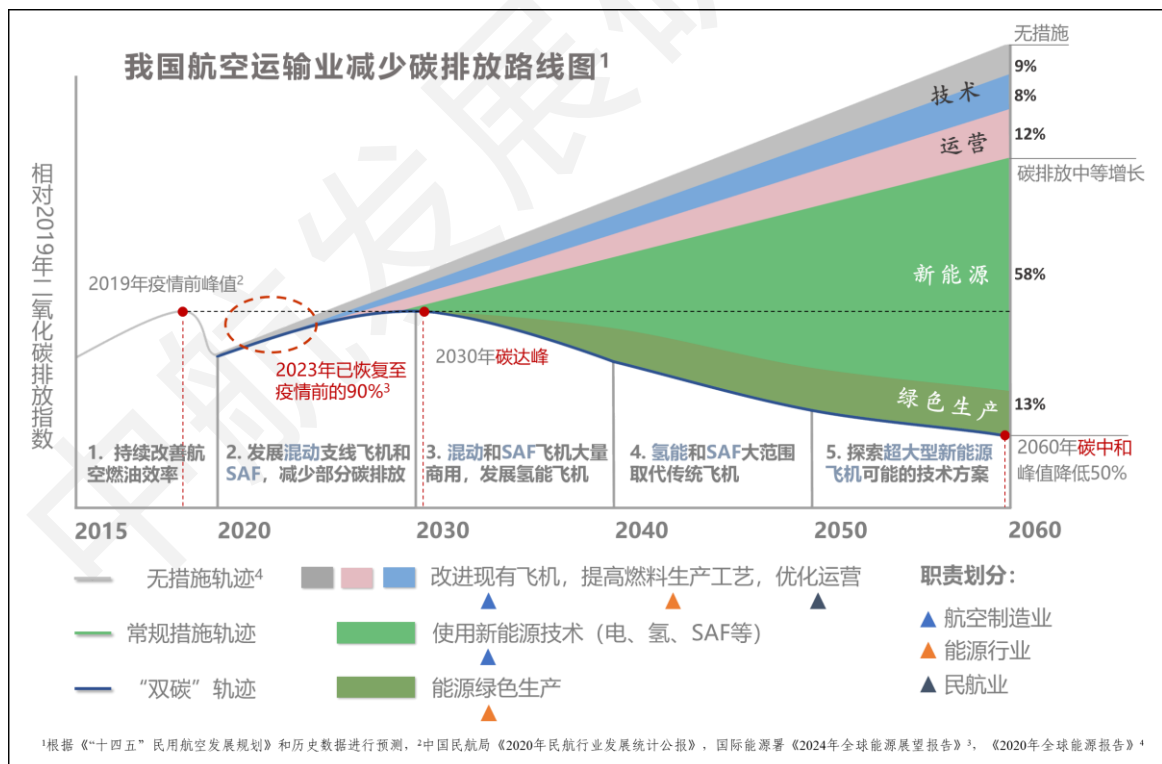


图 2 2024-2060 年我国航空运输业碳排放预测和减排路线图

⁹ 根据法国巴黎银行 (BNP Paribas) 和国际清洁交通委员会 (ICCT) 的数据分析得到。

¹⁰ 基于国内历史数据和中国民航局《2022 中国民航绿色发展政策与行动》进行预测，同时参考了美国联邦航空管理局 (FAA)《美国 2021 航空气候行动计划》等国外战略文件。

2.2 新能源飞行器是我国追赶世界航空强国的重要领域

近年来，作为世界航空业先进水平的代表，美国和欧洲多家飞行器制造商与科研机构高度关注新能源飞行器研究。NASA 于 2015 年提出了电动飞机发展路线图，在多条技术路线同步开展研究。空客公布了三款 ZEROe 氢动力概念机，目标在 2035 年前推出全球首款零排放商用飞机，目前已完成兆瓦级氢燃料电池动力系统的地面试验，同时联合赛峰、达索等公司启动 VOLCAN 计划，以 A319 Neo 飞机为载体促进可持续航空燃料的大规模应用。霍尼韦尔持续开发电动航空市场，AAM（先进空中交通）部门已获得超 100 亿美元订单。Archer 和 Joby 公司在美军“敏捷至上”项目的资助下开始交付 eVTOL 飞行器。ZeroAvia 完成多尼尔 228 氢燃料电池改装飞机试飞。新能源飞行器已经在多个国家掀起了发展热潮。



图 3 国外新能源飞行器典型产品

我国在新能源飞行器领域也开展了多项技术与产品研究工作。在能源动力领域，依托电动汽车行业，商用锂电池能量密度已超过 250Wh/kg，宁德时代发布的凝聚态航空电池能量密度号称可达 500Wh/kg，跻身世界前列，并与商飞成立合资公司商飞时代，共同开展电动飞机研发；在小型载人新能源飞行器领域，辽宁通用航空研究院研制的锐翔系列电动飞机 RX4E，深圳亿航公司研制的 EH216-S，上海峰飞公司研制的 V2000CG 均已取得突破性进

展，其中亿航 EH216-S 在 2023 年 10 月获得了中国民航局颁发的全球首张载人 eVTOL 飞行器型号合格证，峰飞 V2000CG 货运型在 2024 年 3 月获得全球首张吨级以上 eVTOL 飞行器型号合格证；在新能源商用飞机领域，中国航空研究院、航发 608 所、北航、西工大等研究机构 and 高校开展了新概念布局 and 关键技术研究，聚焦总体布局方案、电推进系统、超导动力传输等重点研究方向。



图 4 我国新能源飞行器典型产品

全球航空产业由于高门槛、高依存度、高投入/高附加值的特点，行业壁垒极高，先发优势明显，领头企业具有较强的垄断地位。我国的航空产业起步较晚，在技术储备、产业链发展、市场份额、品牌价值、标准与法律制定等方面明显落后于欧美航空强国，很难在短期内缩短传统化石能源航空产业的差距。以新能源飞行器为代表的全球航空产业“绿色低碳”转型是我国航空产业的重大机遇，有望打破欧美航空强国的垄断地位，解决国产航空发动机“卡脖子”问题，实现航空产业发展的“换道超车”。

2.3 新能源飞行器面临良好的国内产业基础和发展机遇

截至目前，已有超过 30 家国内整机研制企业进入新能源飞行器领域，亿航、峰飞等企业研发的 eVTOL 飞行器达到世界先进水平，中国航空研究院、中国航发研究院、商飞北研、北航、南航、西工大等单位陆续开展新能源飞行器关键技术探索。我国新能源汽车、轨道交通等行业快速发展，培育

了一批有国际竞争力的电池、电机及控制器企业，相关技术优势可以有效提升我国新能源飞行器产业链的整体竞争力，电池产业龙头企业宁德时代已经与商飞成立合资公司商飞时代，共同进军新能源飞行器领域。整体来看，我国新能源飞行器发展具备良好基础。

我国庞大的市场需求提供了足够的内需动力，低空经济产业的后发优势明显，尤其是在航空物流配送、城市空中交通等新兴领域具有全球独一无二的市场需求。另外，随着我国环境保护和能源危机意识的增强，以及低空空域的逐步开放，新能源飞行器具有广阔的市场前景。

国家机关和地方政府颁布了多项政策文件支持新能源飞行器的发展。2023年10月，工信部等四部门联合发布《绿色航空制造业发展纲要（2023-2035年）》，部署我国绿色航空产业“换道超车”的新任务和新路径。12月，中央经济工作会议明确将低空经济作为我国战略性新兴产业之一，提出打造和大力发展低空经济，开辟产业新赛道。深圳、合肥、长沙等城市相继出台低空经济发展政策，亿航、峰飞等企业在政策支持下逐步开展城市空运试点运行。在国家的鼓励和支持下，我国新能源飞行器产业正在进入快速发展阶段。

3 定义与分类

3.1 新能源飞行器的定义

新能源飞行器是以实现未来零碳排放飞行为目标，使用电、氢能等新型能源来减少航空运输业对污染大的化石能源依赖的绿色航空技术新型飞行器。新能源飞行器是满足国防装备建设、碳中和、航空电气化等国家重大战略需求的关键核心，应符合以下条件：（1）全生命周期内降低温室气体（以二氧化碳为主）排放；（2）对环境友好，保护生态系统，保障生物多样性；（3）具有技术可实现性；（4）具有经济价值及市场竞争力。

3.2 新能源飞行器的分类

《中国大百科全书》将航空器（飞行器）分为气球、飞艇、滑翔机、飞机、直升机、自转旋翼机、倾转旋翼机和扑翼机共八类。无论是传统的燃油动力还是电驱动、氢能等新能源动力，均遵循以上分类方式。传统的民用航空范畴包括通用航空和公共航空运输两种，近些年又催生出城市空运、无人机作业等新应用领域。从应用场景的角度，新能源飞行器可粗略分为电动垂直起降（eVTOL）飞行器、新能源通航飞机以及干支线飞机等，其中 eVTOL 飞行器又分为多旋翼、复合翼、倾转旋翼等构型。

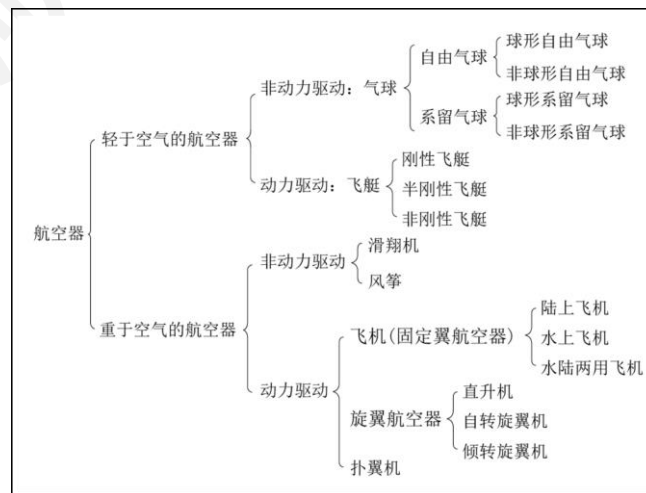


图 5 《中国大百科全书》对航空器的分类

eVTOL 作为一种新式的飞行器，其在定义和分类上与传统的直升机、无人机之间有着密不可分的联系，同时也极易被混淆。从航空行业的视角来看，电动垂直起降（eVTOL）飞行器可以拆分为“电动”和“垂直起降”两个属性，前者表示动力来源，后者表示飞行能力。垂直起降飞行器和直升机可以看作是同一类产品的不同表述形式，直升机不只有常见的“单旋翼+尾桨”构型，也有多旋翼、倾转旋翼和复合翼等构型，一般认为 eVTOL 和直升机的区别主要在于动力方式的不同。FAA 将具有飞机和直升机特性的飞行器定义为“动力升降”类飞机，其中就包括 eVTOL 飞行器。

		垂直起降构型			
		单旋翼	多旋翼	倾转旋翼	复合翼
动力来源	电推进	 Volta	 亿航EH216S	 时的E20	 峰飞“盛世龙”
	燃油推进	 直10	 CH-47 “支奴干”	 V-22 “鱼鹰”	 X-49A “速度鹰”

图 6 不同动力来源和构型的垂直起降飞行器

eVTOL 和无人机的核心区别在于是否有“人”，而与构型、尺寸等因素无关。一般认为有人驾驶或者载人的飞行器属于 eVTOL，无人驾驶且同时载物的飞行器属于无人机。另一个极易被混淆的概念是 eVTOL 和飞行汽车。飞行汽车作为一种特殊的 eVTOL 飞行器，其核心特征是可以同时满足地面行驶和空中飞行两种功能，具备汽车和飞行器的双重属性。飞行汽车也分为常规起降构型和垂直起降构型两种，前者早在上世纪就推出过多个产品，和 eVTOL 无直接关系，后者伴随着近些年电动航空技术的发展逐渐兴起，属于 eVTOL 的一个分支。

eVTOL对比无人机		eVTOL对比飞行汽车	
无人驾驶	有人驾驶		
载人	eVTOL 亿航EH216S 沃飞AE200	eVTOL 亿航EH216S	飞行汽车（垂直起降） （常规起降）
载物	无人机（垂直起降） 大疆FlyCart30		

图 7 eVTOL 和无人机、飞行汽车的主要区别

除了从应用场景和构型的角度进行分类，还可以针对新能源飞行器的能源和动力方式进行分类。新能源飞行器从能量来源的角度可分为电能飞行器、氢/氨能飞行器和可持续航空燃料飞行器，其中电能飞行器的能量来源包括作为储能装置的动力电池和作为能量转化装置的太阳能电池，氢/氨能飞行器的能量来源是氢和氨燃料。新能源飞行器从动力来源的角度可分为电动飞行器、氢/氨动力飞行器和可持续航空燃料飞行器，电动飞行器是所有以电动机为动力来源的飞行器的总称，电动机的电力来源可以是动力电池和太阳能电池，也可以是氢和氨燃料电池。氢/氨动力飞行器只包含将氢和氨作为发动机燃料的飞行器，其范围要小于刚才提到的氢/氨能飞行器。另外，使用可持续航空燃料的飞行器单独归为一类，以上分类方式暂不包括核动力、飞轮储能等应用前景尚不明朗的航空动力方案。

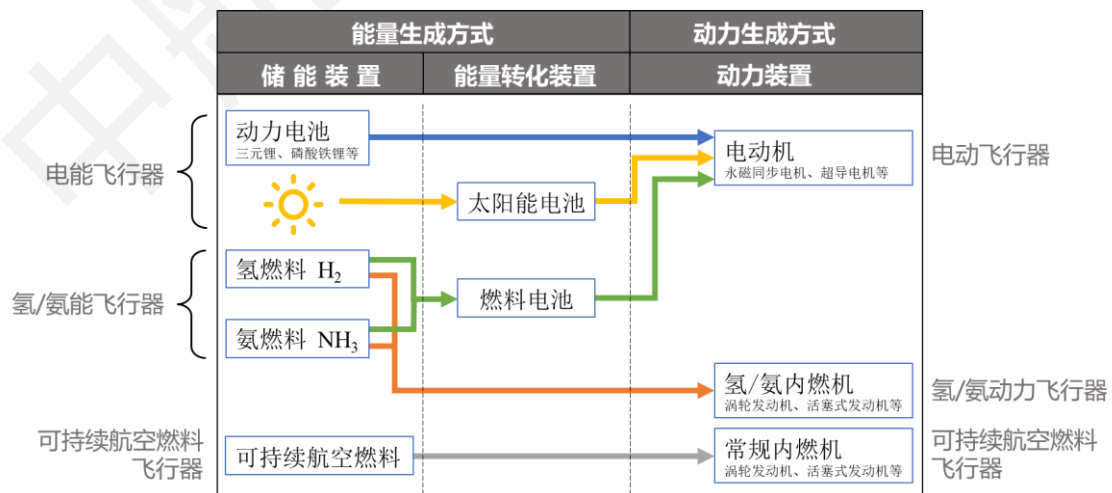


图 8 按照能量和动力来源的新能源飞行器分类

4 发展规划

本章分为四个小节，4.1 分析了储能电池、氢燃料电池、氢涡轮和可持续航空燃料四种新能源技术方案的优劣势和最佳适用区间；4.2 评估了低空经济和民航应用场景对新能源飞行器的技术能力需求，提出了技术发展目标；4.3 预测了新能源飞行器的技术发展趋势，梳理了关键技术路径；4.4 提出了一种氢燃料电池支线飞机概念设计，并对其性能和应用前景进行了分析。新能源飞行器发展规划基本框架如下所示。

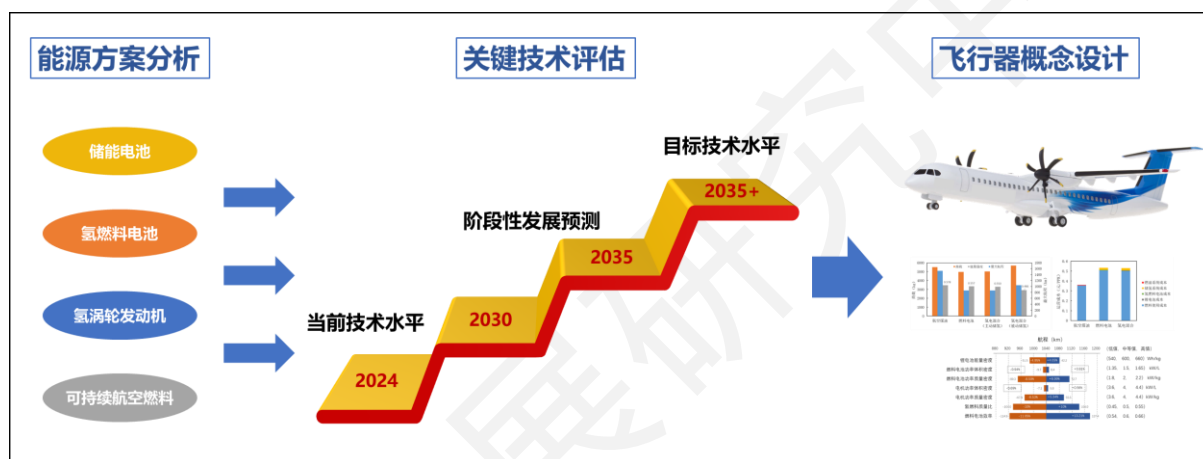


图 9 新能源飞行器发展规划基本框架

4.1 不同新能源技术的优势区间

在我国双碳战略牵引的背景下，以航空燃油为动力来源的传统飞行器难以完成减排降噪目标。新能源技术作为我国八大战略性新兴产业之一，尤其是新能源交通领域在政策支持、技术储备、产业规模等方面已经有了长足的发展，工业级的锂电池能量密度超过 250Wh/kg，氢燃料电池系统功率密度接近 1kW/kg，实验室环境下电机功率密度超过 4kW/kg，高温超导电机、复合材料氢燃料存储罐、高效液氮冷却装置等技术取得关键性突破，总体设计、能源架构、电气元件等领域不断发展，已经具备新能源飞行器研制和落地的产业基础。

新能源飞行器除了按照能源供给方式和动力产生方式的分类以外，按照用途、航程和载客（货）量可以粗略地分为通航飞机、eVTOL 飞行器、支线飞机、窄体干线飞机、宽体干线飞机和超大宽体干线飞机。综合考虑飞机性能指标、技术成熟度、市场需求、产业链发展、法律法规等因素，对未来新能源飞行器的技术发展进行预测，得到不同乘客数和航程的新能源飞行器能源动力方案优势区间如下。其中，不同乘客数和航程对应的新能源飞行器性能包线基于对未来市场和技术发展的预测。

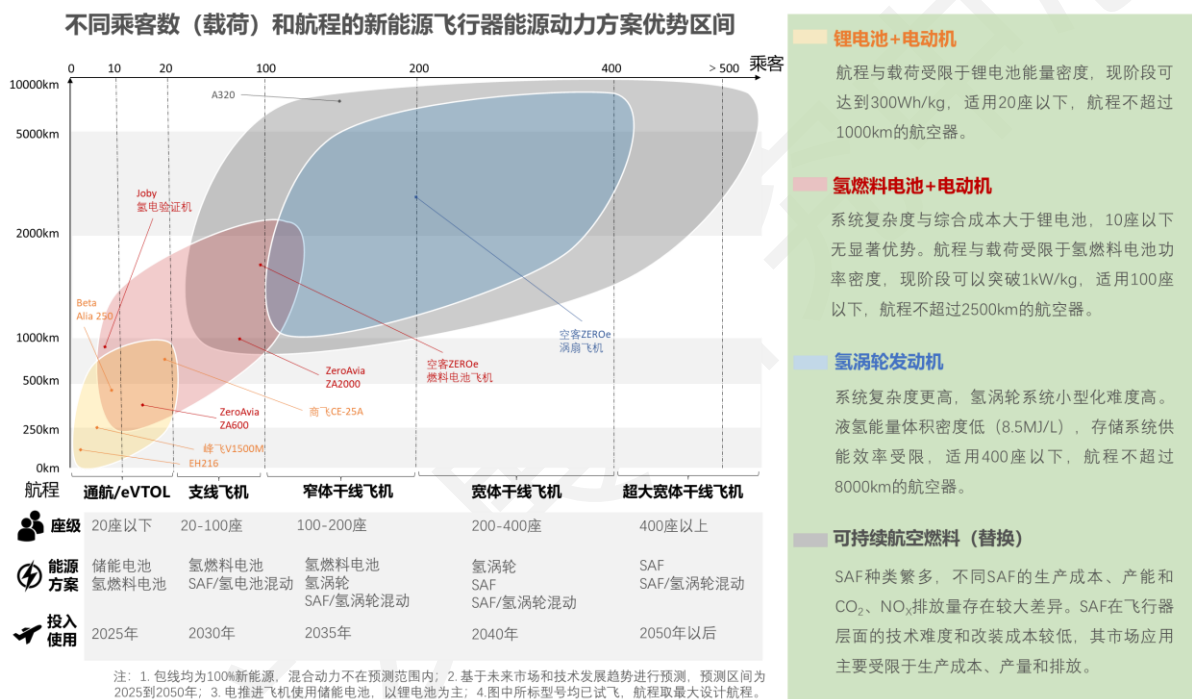


图 10 不同乘客数（载荷）和航程的新能源飞行器能源动力方案优势区间

面向低空经济应用场景的 eVTOL、新能源通航飞机等机型（20 座以下）预计在 2025 年左右可投入商业应用，能源方案以储能电池和氢燃料电池为主。面向传统航空运输市场的新能源干支线飞机发展周期较长，预计在 2030 年到 2050 年之间投入使用，机型从 20 到 100 座支线飞机（对标新舟 60、ATR-72，可能采用氢燃料电池）逐步向 100 到 200 座窄体干线飞机（对标商飞 C919、空客 A320，可能采用氢燃料电池或氢涡轮）、200 到 400 座宽体干线飞机（对标空客 A350、波音 747，可能采用氢涡轮或 SAF）发展。上述

飞机也可以采用混合动力的能源方案。对于 400 座以上的超大宽体干线飞机，目前仅有可持续航空燃料可以满足其性能要求，其他新能源方案需要根据未来突破性技术的发展情况做进一步的论证。

4.2 新能源飞行器技术发展目标

白皮书以满足低空经济和民航运输应用场景需求为标准，预测新能源飞行器能源动力系统的目标技术能力。由于燃料电池、氢涡轮等技术尚处于研究阶段，分析样本和可靠依据较少，因此白皮书仅对技术成熟度相对更高的储能电池和电推进系统进行预测，在今后的研究中会增加更多的技术能力指标。相关结论如下表所示。

表 2 新能源飞行器的技术发展目标预测

技术领域	技术指标	目标技术能力
储能电池	系统能量密度	≥500Wh/kg （低空应用场景） ≥1000Wh/kg （民航应用场景）
	放电倍率	连续放电≥3C，瞬时放电 5-7C
	循环寿命	≥2000 次
电推进系统	额定功率密度	≥4 kW/kg
	推进效率	≥96%

1、储能电池

对于电池能量密度，NASA 认为 eVTOL 飞行器的电池系统能量密度需要达到 500Wh/kg，美国能源部（DOE）认为航空电池的能量密度应当超过 1000Wh/kg 才能满足中型以上商用飞机的飞行需求。综合考虑各项研究结论，面向 eVTOL、中小型无人机等低空飞行器的储能电池系统能量密度目标设定为 500Wh/kg，面向新能源商用飞机的系统能量密度目标设定为 1000Wh/kg。

对于电池放电倍率，NASA 认为电池的最大放电倍率必须达到 3 到 5C 才能满足 eVTOL 在起降或者悬停时的动力系统功率需求。也有研究者认为 eVTOL 在降落过程中如果遇到侧风、障碍物等突发情况，快速拉起和姿态调

整所需的电池瞬时放电倍率将达到 7C。电池放电倍率目标设定为连续放电 3C，瞬时放电 5 到 7C，其中 5C 应至少持续 10 分钟，7C 应至少持续 2 分钟。

考虑到经济性等因素，新能源飞行器所需的电池循环寿命应尽量在 1000 次以上，也有学者认为需要达到 2000 次才有较好的经济性。电池循环寿命目标设定为 15℃测试环境下 2000 次循环充放电后电池容量衰减到 80%。

2、电推进系统

低空经济应用场景下的绝大多数低空装备所需的电动机单机功率不超过 200kW。美欧国家现有的航空电动机产品额定功率密度一般在 2.5 到 3.5kW/kg 之间，峰值功率密度可以达到 5 到 8kW/kg，基本能够满足轻负载应用场景下的使用需求。如果是电动机功率更高的干支线飞机，相应的功率密度要求也会增加。白皮书认为，对于 100 到 200kW 级电推进系统，额定功率密度目标设定为 4 kW/kg。

在航空领域广泛应用的永磁同步电机效率可以达到 94%~95%，越往上提升的难度越大。近些年受到较多关注的超导电机理论效率在 98%以上，但在超导材料、电机强度、可靠性等方面仍存在技术问题，短期内较难实现落地应用。综合考虑新能源飞行器的功能性能需求，100 到 200kW 级电推进系统的推进效率目标设定为 96%。

4.3 关键技术发展预测

白皮书采用德尔菲法、趋势外延法等方法对未来我国新能源飞行器的阶段性技术发展指标和技术路径进行预测分析。技术预测的范围包括：①飞行器本体技术（eVTOL、无人机等低空飞行器，以及干支线商用飞机）；②能源系统技术（储能电池和燃料电池）；③动力系统技术（电动机和氢涡轮发动机）。考虑到技术的长期发展存在较多不确定性因素，预测时间跨度从 2025 年到 2035 年。技术指标的预测基准为投产装备型号可以达到的技术能力水平。相关预测结果如下表所示。

表 3 2025-2035 年我国新能源飞行器技术发展趋势

技术领域		时间节点	技术指标	关键技术路径
飞行器本体	低空飞行器	2025 年	完成多款 eVTOL 飞行器适航取证；电动飞机产业化；新能源通航飞机各项技术成熟度达到 6 级。	分布式电推进系统、高功率电机电控与能量/热管理系统、总体气动改型设计、新型氢动力飞机结构设计等。
		2030 年	eVTOL 开始成熟运营；电动飞机规模化生产；新能源通航飞机各项技术成熟度达到 8 级。	
		2035 年	电动飞机年产量持续增加；不同用途的新能源通航飞机适航取证，2035 年之后持续发展。	
	商用飞机	2025 年	完成氢动力飞机和混合动力飞机创新构型设计和总体技术研究。	
		2030 年	实现氢燃料电池涡桨支线飞机商业应用，完成氢涡轮窄体干线飞机概念方案设计与技术攻关。	
		2035 年	完成氢涡轮窄体干线飞机商业应用，探索宽体干线飞机可能技术方向。	
能源系统	储能电池	2025 年	储能电池单体能量密度达到 500Wh/kg，连续放电倍率突破 2.5C，循环次数超过 1000 次，安全性做到不起火，不爆炸。	固态电池、铝空气电池、硅阳极材料、锂金属电池等。
		2030 年	储能电池单体能量密度达到 700Wh/kg，连续放电倍率突破 3C，循环次数超过 1500 次，安全性做到不起火，不冒烟，动力不丢失。	
		2035 年	储能电池单体能量密度超过 1000Wh/kg，连续放电倍率突破 4C，循环次数超过 2000 次，具备无感安全和自修复能力。	
	氢燃料电池	2025 年	燃料电池系统功率密度提升至 1.5kW/kg，额定功率下氢电转化效率提升至 55%以上。	新型电极材料、高效水热智能管理和控制系统、质子交换膜技术等。
		2030 年	燃料电池系统功率密度提升至 2kW/kg，额定功率下氢电转化效率提升至 60%以上。	
		2035 年	燃料电池系统功率密度提升至 2.5kW/kg，额定功率下氢电转化效率提升至 65%以上。	
	储氢系统	2025 年	质量储氢密度达到 25%，系统总储氢量 1.5 吨。	存储轻量化设计、复合材料氢瓶、低温冷却系统、机载液氢分配系统等。
		2030 年	质量储氢密度达到 30%，系统总储氢量 3 吨。	
		2035 年	质量储氢密度达到 35%，系统总储氢量 6 吨。	

动力系统	电动机	2025 年	航空电机及驱动系统功率突破 500kW，额定功率密度达到 3kW/kg。	高功率密度永磁同步电机、高温超导电机、新型磁性、绝缘、导电材料等。
		2030 年	航空电机及驱动系统功率突破 1MW，额定功率密度达到 4kW/kg。	
		2035 年	航空电机及驱动系统功率突破 2MW，额定功率密度达到 5kW/kg。	
	氢涡轮	2025 年	发动机总效率（热效率×推进效率）达到 40%，额定功率密度达到 6kW/kg。	发动机燃烧室结构、燃料喷射与混合装置、热循环系统、发动机冷却系统等。
		2030 年	发动机总效率（热效率×推进效率）达到 42%，额定功率密度达到 6.5kW/kg。	
		2035 年	发动机总效率（热效率×推进效率）达到 43%，额定功率密度达到 7kW/kg。	

4.4 氢能飞机概念设计

20 到 100 座的氢动力支线飞机在未来的五到十年内具有较高的发展价值，既可以验证电推进、储氢、能量管理等新能源航空技术，又能加快机场氢能基础设施建设，对我国新能源航空的全面发展具有重要推动作用。2022 年发布的《新能源飞行器发展展望 2022》分析了两种氢能混合动力涡桨支线飞机设计方案，白皮书在此基础上提出一种氢燃料电池支线飞机概念设计，命名为“氢能 1 号”。限于篇幅，白皮书仅对“氢能 1 号”的设计方案和分析结果进行简单介绍，更多信息详见相关论文¹¹。

“氢能 1 号”使用液氢存储罐+氢燃料电池+锂电池+电动机的动力方案，氢燃料电池提供飞行过程中的大部分电力，锂电池在飞机的起飞和爬升阶段进行辅助供电。储氢罐放置在机身后部（占用大约四排座椅空间），锂电池放置在机身底部，氢燃料电池和电动机放置在发动机短舱内。依托我国快速发展的新能源装备、氢能等相关产业，使用国产涡桨支线飞机改装氢动力的成本和风险相对较低，有望在 2 到 3 年内实现首飞。“氢能 1 号”的概念图和设计参数如下所示。

¹¹氢燃料电池支线飞机概念设计与性能分析[J/OL].航空学报, 1-15[2024-08-30].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20240621.0955.002.html>.

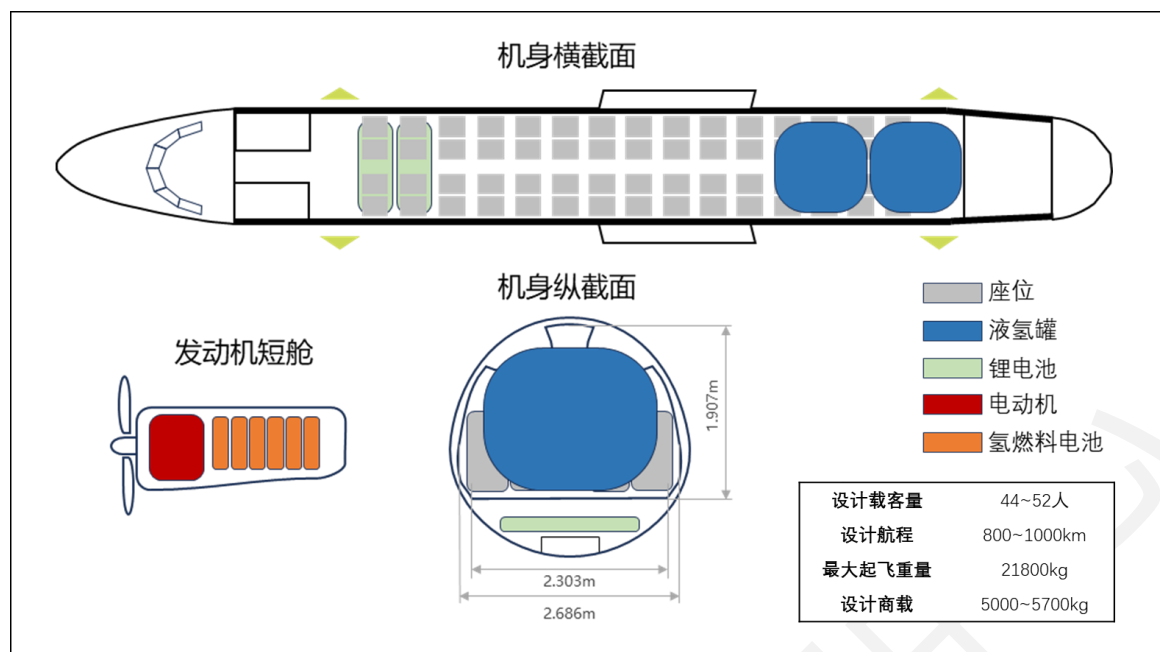


图 11 “氢能 1 号”支线飞机概念设计图

根据仿真计算结果，与常规的航空煤油动力飞机相比，采用氢-锂混合供电的“氢能 1 号”支线飞机理论航程降幅为 31.9%到 43.3%，载客量降幅为 13.3%到 26.7%，商载减少 8.7%，能效提升 5.1%，运营成本增加 46.9%，碳排放减少 87.5%。尽管“氢能 1 号”支线飞机在商载和航程方面无法与常规动力飞机相媲美，其仍可以满足大部分国内支线航线的使用需求，而且在能量利用效率、碳排放等方面具有较大的优势。同时，随着氢燃料生产使用成本的降低和新技术新构型的应用，氢动力飞机的性能劣势将逐渐缩小。

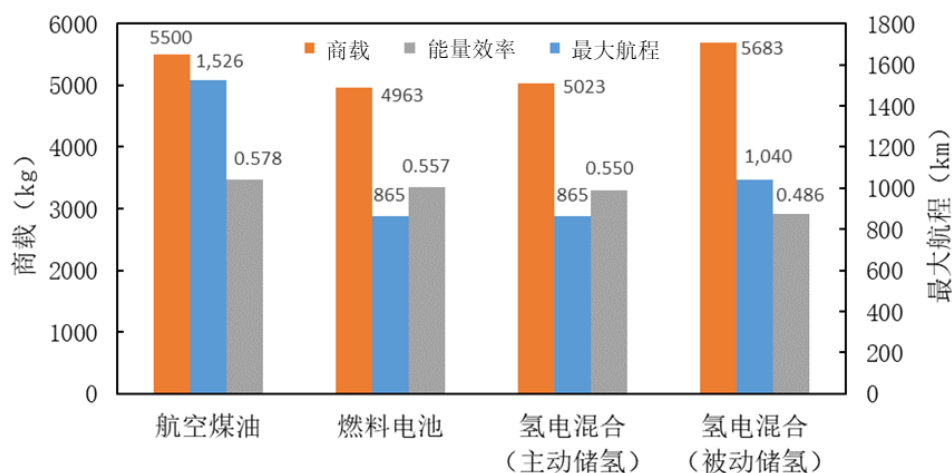


图 12 “氢能 1 号”的商载、能量利用效率和最大航程仿真结果

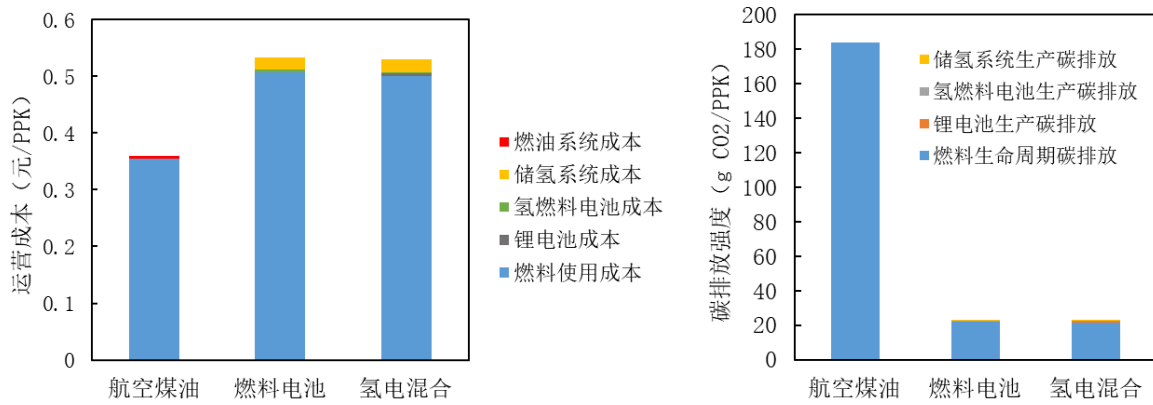


图 13 “氢能 1 号” 的运营成本和碳排放强度仿真结果¹²

对氢燃料电池飞机的设计模型进行敏感性分析可以深入了解各项参数对飞机性能的影响程度，例如燃料电池效率、氢燃料质量比、电机功率密度等。经过计算可知，氢燃料电池效率对飞机性能的影响最大，而燃料电池和电动机的功率体积密度对航程的影响较小。敏感性分析还可以作为优先改进哪些技术的参考。燃料电池效率和储氢质量比的提高将对飞机航程产生巨大的影响，与之相比，燃料电池和电动机的功率体积密度则对飞机航程的提升几乎没有影响。

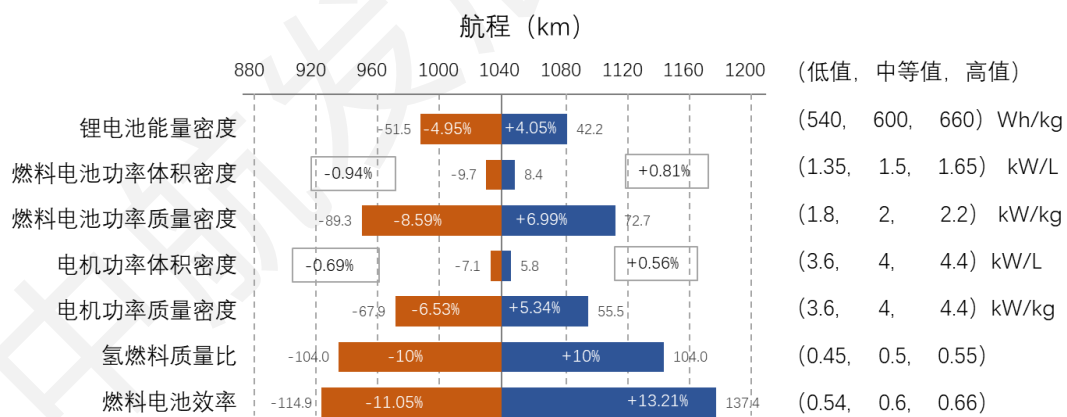


图 14 “氢能 1 号” 支线飞机参数敏感性分析

¹² 表中给出了完全使用氢燃料电池和氢燃料电池-锂电池混合供电系统两种方案的性能参数，其中运营成本定义为飞机每运输 100kg 载荷一公里所需要的各项成本之和，单位是元/PPK，PPK 表示每百千克公里，碳排放强度同理。

5 关键技术

本章分析了新能源飞行器的八项关键技术领域——总体设计技术、高效电推进技术、能量综合管理技术、能源系统技术、氢涡轮推进技术、氢燃料存储技术、氢能生产与使用技术以及可持续航空燃料技术，并在最后给出了关键技术图谱。

5.1 总体设计技术

与传统动力形式相比，电推进系统具有一定程度的功率相对尺度无关性，电动飞机总体设计可突破传统架构的限制，具有广阔的设计空间。另一方面，受限于电池等部件功率密度和能量密度水平，与采用传统动力形式的常规布局飞机相比，电推进系统会影响航程和有效载荷等性能指标，对气动-结构-推进一体化设计和气动布局创新设计提出了需求。

1、气动-结构-推进一体化设计技术

与传统燃油飞机相比，新能源飞行器的气动布局、推进系统设计等具有较高的自由度，且高度耦合，采用传统的独立设计方式限制了飞机综合优化设计水平，开展气动、结构、动力系统一体化设计能够有效提高飞机性能。

2、气动布局创新设计技术

为满足新能源飞行器气动布局设计需求，优化飞机气动特性，改善飞机飞行性能，可开展以下非常规气动布局的设计与研究，例如：

翼身融合布局——将传统的机身与机翼结构融合，通过一体化设计制造，提高升力、降低结构重量与阻力，从而提高燃油效率，大幅改善飞机的飞行性能，同时可以满足机上储氢的空间需求。

桁架支撑翼布局——与传统机翼相比，由于桁架承担了部分载荷，减轻了翼根弯矩，有利于减轻重量，在同等重量下可增加机翼面积，有利于降低阻力，提高升阻比。

分布式电推进布局——在机翼或机身上分布安装多个螺旋桨/涵道风扇，可提高气动效率、降低阻力。其中，附面层抽吸技术在飞机尾部安装嵌入式风扇，通过加速抽吸机身附面层降低阻力，改善气动性能。

国内外企业、高校和科研机构正持续不断探索新型气动布局及各种气动技术的潜力，典型布局和产品型号如下图所示。



图 15 广泛应用于新能源飞行器的气动布局设计和技术

注：从左上方起依次是——1、双机身布局（德国 DLR HY4 氢燃料电池飞机）；2、翼身融合布局（西工大翼身融合缩比验证机）；3、翼身融合布局（空客 ZEROe 概念机）；4、桁架支撑翼布局（NASA 跨声速桁架支撑翼（TTBW）飞机模型）；5、自适应变形机翼（空客公司 C295 飞行试验平台）；6、层流流动控制技术（NASA 开槽自然层流翼型）；7、主动控制技术（空客“超性能机翼”（eXtra Performance Wing）项目）。

5.2 高效电推进技术

电推进技术通过高功率密度电动机带动涵道风扇或螺旋桨，为飞机提供部分或全部飞行推力，不再完全依赖燃油，可以解决传统飞机推进系统带来的噪声和污染排放问题（即氮氧化合物、烟煤以及未燃碳氢化合物）。电推进技术是电动飞机的核心技术，它的功重比直接决定了电动飞机的动力、效率等关键性能指标。为满足高效率、高功重比和高可靠性要求，需要针对电推进系统开展如下关键技术研究。

1、高功率密度电动机技术

目前的高功率密度电动机有常规电机（主要是永磁同步电机）和超导电机两种。与其它电机相比，永磁同步电机（无刷直流电机）具有高效率、高功重比、高可靠性等优点，成为电推进飞机电机的首选。随着新型电推进飞机向大型化、长航程以及高可靠性等方向发展，轻质高效和高可靠性的永磁同步电机成为未来电推进飞机电机的重要发展方向。

超导电机是采用超导体代替常规导电材料来实现电磁能与机械能之间能量转换的装置。具有体积小、效率高、重量轻、同步电抗小等特点，在相同重量和相同能量输入下，可产生远高于普通电机的扭矩，在电动飞机的应用方面具有极高潜力，将会成为代替煤油喷气发动机的新型飞行动力装置的关键部件。目前研究的超导电机绝大部分为半超导电机，全超导电机是未来超导电机的重要发展趋势。

2、分布式电驱动技术

得益于电机的相对尺度近似无关性，总功率相同时单个大功率电机和多个小功率电机系统的功率密度和效率基本一致，采用多个小功率电机驱动较小直径风扇的分布式电驱动系统可以在保证总功率不变的前提下有效提高涵道比、动力装置的控制和容错性能，同时小体积的电驱动系统能够更方便地融入机身，提高飞机气动效率。分布式电推进技术可以充分挖掘飞机一动力装置一体化设计的潜力，获得推进、气动、重量等方面的综合收益。

3、电机驱动控制器

电机驱动控制器是保证永磁同步电机和超导电机高效可靠运行的必要设备，主要由控制模块和驱动模块两部分组成。电动飞机电推进系统对电机驱动控制器提出了大功率、高效率、高可靠性和高功重比的要求。采用新一代碳化硅和氮化镓功率器件的电机驱动控制器是未来的发展方向之一。

4、新材料技术

为了提高电推进系统的效率，功率变换器、发电机、电动机和各种控制器中大量应用了先进新材料技术，材料的磁性、绝缘性和导电性直接影响了电推进系统性能水平。

5、飞机-动力系统集成设计技术

针对新能源动力对飞行器设计带来的气动、推进、结构、重量等方面的新问题，需要深入分析动力装置构型、布局与飞行平台性能之间的耦合关系，探索适用于新能源飞行器的动力装置集成设计方法、流程和设计准则。

5.3 能量综合管理技术

由于将电能作为飞机的一次能源，新能源飞行器电网容量迅速提升，负载特性日趋复杂，对配电系统的性能提出了更高要求；新能源飞行器的热管理问题更加突出，在能量综合管理方面需要开展以下研究。

1、电网架构

飞电网架构包含供电体制、配电系统及拓扑结构、配电容错及保护，是影响飞机安全性、可靠性、系统质量、效率的关键因素。电动飞机电力系统面临的多种约束条件（如重量、体积、飞机推进系统工况变化等）是配电系统设计重要影响因素，需采用多目标优化思路，满足电动飞机系统要求。

2、电力电子技术

电力电子技术是飞机电能传递、变换、控制的基础，电动飞机的电力系统包含大量整流器、逆变器及控制器件等。电力电子器件的功率密度、效率等指标决定了电力系统的性能，对飞机的安全性、可靠性具有重要影响。

3、热管理技术

热管理技术用于飞机各部件及系统散热、冷却，是保障电动飞机各部件

及系统（特别是电动机、电力电子设备）正常、高效工作的必要条件。此外，超导电机需要低温环境以维持超导状态，采用热管理技术能够保障超导系统的隔热能力，避免外部热量影响超导低温环境。

4、能量智能管理

飞机系统日益复杂且高度耦合，采用传统的各系统独立能量管理方式无法实现飞机能量的高效利用。能量智能管理从飞机整体层面研究能量综合优化设计和控制管理，可有效提高能量利用效率。

5.4 能源系统技术

能源系统指的是为新能源飞行器提供电能的组件系统，其性能从根本上决定了飞机的续航时间、航程以及运营成本。根据电能来源的不同，航空能源系统可分为储能系统（三元锂电池、磷酸铁锂电池、钠离子电池等，在电池中直接储存电能）和电能转化系统（各种燃料电池，将氢、氨等燃料转化为电能）。长寿命高可靠性的能源系统具有更稳定的供电能力、更低的维修和更换频率，能有效提高新能源飞行器的综合性能。

1、储能电池

现阶段应用于航空领域的储能电池（也称动力电池）主要为锂离子电池，按照电解液状态的不同又分为液态电池、凝聚态电池、固态电池等。2023年4月，宁德时代发布了凝聚态航空锂电池，单体能量密度最高可达500Wh/kg，具有安全性高、可靠性强、循环寿命长等优点，极大推动了我国航空动力电池的发展。国内外的相关企业和研究机构也在研发更多的电池技术方案满足航空领域应用需求，例如铝-空气电池、硅阳极电池、锂金属电池等。此外，我国也在探索钠离子电池，其优势是制造成本低、原材料储量大，对保证行业安全、维护供应链稳定具有重要意义。

2、燃料电池

氢/氨燃料电池是重要的航空能源系统解决方案，通过氢/氨在燃料电池中的电化学反应产生电能。由于氨燃料电池的效率和功率密度普遍低于氢燃料电池，氨的热值也比氢更低，因此航空上大多采用氢燃料电池方案。氢燃料电池具有“零碳零污染”的特点，唯一的中间产物是水。制约氢燃料电池发展的主要技术短板是功率密度，近年来随着材料和制造技术的进步，氢燃料电池的功率密度已经大幅度提升，预计在 5 到 10 年内就可以满足中大型飞行器的性能需求。飞机上的氢燃料电池面临的另一个问题是热管理，常见的质子交换膜燃料电池理想工作温度是 60 到 80℃，过高的温度会导致能量转换效率下降甚至是系统故障。使用燃料电池的地面车辆一般选择强制对流换热器，这种被动换热器的外置散热片面积较大，安装在飞机上会对空气动力性能造成负面影响。氢燃料电池飞机一般会使用主动换热器技术，也可以选择与储氢系统共用一套热管理系统。此外，氨燃料电池也是航空领域的一种潜在能源解决方案。

3、储能电池-燃料电池混合供电系统

储能电池-燃料电池混合供电系统是一种兼顾储能电池和燃料电池优点的航空能源系统解决方案。氢存储罐的能量密度远高于储能电池，而氢燃料电池的功率密度又低于储能电池，因此两者的混合供电系统具有互补特性，既能保证飞机的峰值功率需求，又能保证飞机的续航能力。氢燃料电池在储能电池的辅助下可以更多运行在高效区，从而提高氢燃料经济性。由于氢燃料电池在负载变化时的动态响应较慢，响应速度更快的储能电池可以改善系统动态特性，在飞机起降时提供更大的电流。此外，得益于储能电池的协同作用，氢燃料电池输出功率的变化可以保持在较低且稳定的水平，极

大缓解了与功率波动相关的氢燃料电池老化，进一步降低飞机的运营成本。

5.5 氢涡轮推进技术

氢涡轮推进技术指的是用氢作为发动机的燃烧原料替代传统的航空燃油，直接带动风扇产生推力或者带动发电机发电，再驱动电动机带动风扇产生推力。相比于传统的化石燃料，氢燃料具有完全不同的物理和化学特性，为了充分发挥氢涡轮推进方案的性能优势，发动机必须进行针对性改进和优化。主要研究内容包括：（1）发动机燃烧室结构，传统航空煤油发动机燃烧室的几何结构不利于氢燃料和氧化剂的有效混合，降低了氢燃料的燃烧效率，因此需要重新设计航空发动机的燃烧室结构，针对超低温液体燃料特性进行优化；（2）燃料喷射与混合装置；（3）热循环和管理系统；（4）高速发动机冷却系统，通过使用低温冷却流进一步提高效率。（5）低氮氧化物排放技术，为了降低氢动力飞机的污染排放，需要针对氢燃料发动机开发低氮氧化物排放技术，例如微混合燃烧室、稀薄喷射技术和贫油直喷等等。

5.6 氢燃料存储技术

尽管氢的高热值¹³（143MJ/kg）是常见航空煤油（43MJ/kg）的三倍，但由于氢的密度极低，氢气的能量体积密度远小于航空煤油，即使是液氢的能量体积密度也仅仅是航空煤油的三分之一。氢动力飞机需要额外的氢燃料存储空间，导致机身尺寸的增加，产生更多的飞行阻力。

目前看来液氢存储是比较合适的机上氢燃料存储方案，相比于气态存储具有更高的能量体积密度，缺点是需要维持低温高压环境（ $\leq -253^{\circ}\text{C}$ ，1.429 个标准大气压）。液氢存储系统的低温冷却和绝缘装置会消耗额外的

¹³ 氢的高热值为 143MJ/kg，低热值为 120MJ/kg，Jet A-1 航空煤油的高热值为 43MJ/kg，低热值为 42MJ/kg（ASTM D4809-13 标准测量法）。现有研究大多取高热值，但也有研究认为燃料电池反应生成的是水蒸气，氢涡轮发动机的燃烧产物也是水蒸气，因此选择低热值。

能量，增加了飞机的重量、体积和复杂度，从而降低了燃料的有效能量体积密度和安全性。为了提高液氢存储系统的综合性能，需要研究以下关键技术：

①存储系统轻量化设计，包括先进材料研发、新型存储结构和循环蒸发处理系统；②低温冷却系统，包括低温泵、管道和状态监测传感器等等；③高压高功率电力系统；④机载液氢分配系统，包括燃料管、液氢循环系统、通风管理系统、气化装置等等。

根据液氢的物理特性，液氢存储罐宜采用球形或柱形设计，不宜储存在传统的机翼油箱中。放置液氢存储罐会导致机体尺寸增大和舱室空间减小，进而增加空气阻力和飞行成本。对于中、大型支线或干线飞机而言，现有的飞机结构设计无法满足氢动力飞机的实际需求，需要开展⑤翼身融合设计、⑥箱式机翼结构等关键技术攻关，提高飞机内部空间的利用率并减小飞机体积。未来可能的几种氢燃料布置方案如下图所示，分为机体集成式和外挂式两种。（a）、（b）、（c）三种集成式设计方案可以直接在现有机型的基础上进行改装，但缺点是占用了机内空间并导致有效载荷降低。（d）方案在翼身融合布局的基础上设计，最大化利用了机内空间。（e）和（f）属于外挂式方案，优点是不占用机内空间，但可能对飞机的气动布局造成影响。

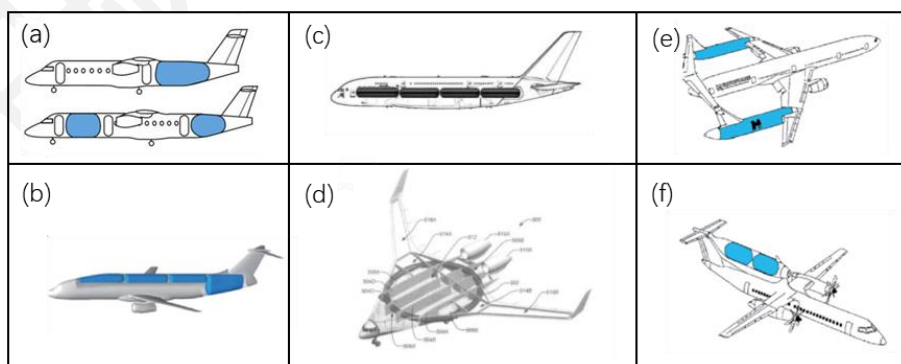


图 16 飞机氢燃料存储罐布局方案（a, b, c, d 是机体集成式，e, f 是外挂式¹⁴）

¹⁴ 文献来源：Khandelwal B, et al. Hydrogen powered aircraft: The future of air transport[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013.

主动式储氢系统配备了完整的温度控制装置，优点是存储时间长、氢燃料蒸发量低，缺点是储氢密度低，系统能耗高。与之对应的被动式储氢系统则舍弃了温控装置，采用真空夹层等手段被动地隔绝氢燃料和环境之间的热传导以维持内部温度，优点是成本低、重量轻、额外消耗的能量几乎为零，但氢燃料的蒸发速度更快，一次加注后的存储时间更短。

5.7 氢能生产与使用技术

氢动力飞机还要攻克氢燃料供应链中生产、运输与存储的技术难点。日本的氢动力汽车产业在政府和企业长达十余年的大力推动下仍然收效甚微，一个很重要的原因就是始终没有解决氢动力汽车全面铺开时的氢气供应链安全性和经济性问题。基础设施配套的两大关键技术分别是氢气经济可持续生产技术和氢气运输与加注技术。

1、氢气经济可持续生产技术

氢气的生产环节按照碳排放量的不同可分为“绿氢”和“灰氢”，前者的主要生产途径是水的电解，电力来源是太阳能或者风能，不产生额外的污染；后者的主要生产途径是蒸汽甲烷重整和煤的汽化，生产过程中释放大量的二氧化碳。2023 年，中国全年氢产量约为 3500 万吨¹⁵，其中“绿氢”占比不到 1%，产量约 30 万吨。按照提供 1kWh 能量所需的成本计算，“绿氢”比航空煤油更昂贵。“绿氢”平均生产成本为 0.9 元/kWh，“灰氢”的平均生产成本¹⁶为 0.3 元/kWh。与之相比，2024 年 9 月中石油航煤出厂价约 7500 元/吨，折合 0.6 元/kWh，必须降低“绿氢”的生产成本以提高竞争力。

2、氢气运输与加注技术

与传统的化石燃料相比，氢燃料的物理和化学特性极其不稳定，如何实

¹⁵ 国家能源局《中国氢能发展报告（2023）》

¹⁶ 欧盟《氢动力航空：到 2050 年氢技术、经济 and 气候影响》

现低成本的氢燃料运输与存储是氢动力飞机能否投入大规模商业运营的关键。氢气的运输和场地存储环节需要对基础设施进行改造，其中的两个关键领域是向机场输送氢气和机场的存储与加气设施。输送氢气的一个选择是通过现有的天然气输送网络，对天然气管道的改造需要投入大量的资金并进行全面的安全性评估，而且需要考虑氢气的生产地（产能过剩的可再生能源工厂和氢气生产基地）与使用地（机场）之间长距离运输带来的成本和安全性问题。因此应当尽可能在机场直接制氢，通过使用机场附近的可再生能源进行水电解制氢。

端到端氢燃料运输网络是另一种解决方案，在氢生产基地将氢燃料加注并封装在氢燃料胶囊存储罐中，通过公路或铁路交通运输到机场，然后直接把胶囊罐安装到飞机上。这种飞机“换氢”方案的优点是极大简化了氢燃料储运加注过程，降低了运输管道、机场储氢和加注设施的建设成本，加快了飞机补氢速度，但缺点是胶囊储氢罐额外占用了机上空间并增大了重量，边际成本较高，在氢燃料需求量达到一定规模后的效率和经济性落后于机场制氢方案，运输网络承载力上限也低于后者。因此，飞机“换氢”方案主要适用于氢燃料需求量较少并且基础设施建设不完善的前期发展阶段。

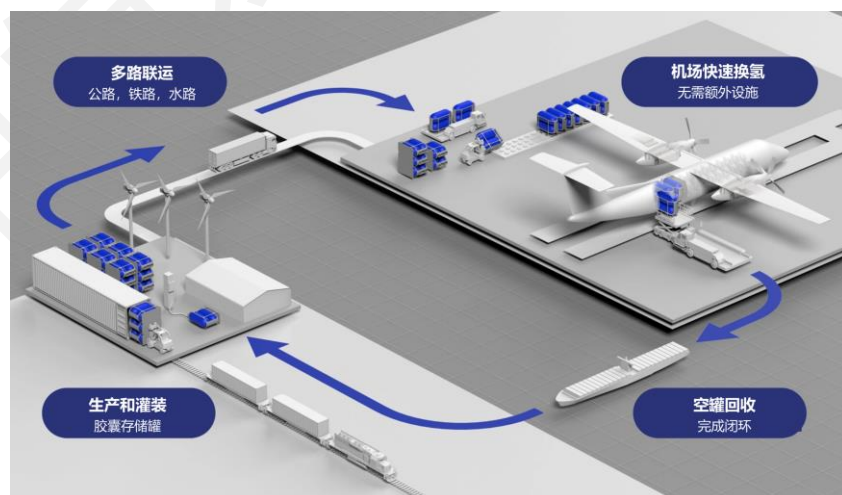


图 17 一种典型的模块化氢燃料运输网络

5.8 可持续航空燃料技术

可持续航空燃料飞机的关键技术主要是不同种类燃料的生产、储存与运输，以及因燃料不同的化学和物理特性带来的航空发动机、热管理、燃油系统、防火系统等方面的关键技术。可持续航空燃料生产环节除了受到生产工艺和技术的影响以外，原材料的供应量对其大规模应用也起着决定性作用。此外，政府和企业推广可持续航空燃料时也会关注安全性、经济性、环保性等多方面因素。可持续航空燃料的发展涉及航空制造、能源生产、交通运输等多个产业，其主要技术难点和发展瓶颈存在于原材料供应、生产制造和基础设施配套等方面。

根据技术水平、相关企业现有研发计划、产业规模、原材料供给量、国家政策导向等要素评估不同可持续航空燃料技术路线的可行性。可持续航空燃料的技术路线评价有以下几个指标：

- 政策支持的程度；
- 关键技术成功率；
- 关键技术成功后的技术成熟度等级；
- 相关研究与生产的研究机构/企业的发展状况和潜力。

目前航空业认可的可持续航空燃料生产技术路线有 10 到 15 种，根据上述技术路线评价指标，具备长期发展潜力的有 5 种——酯类和脂肪酸类加氢(HEFA)、醇喷合成(AtJ)、费托合成(FT)、解聚工艺、电转液工艺(PtL)，前三种已通过国际认证，后两种尚处于实验室发展阶段。

从原料来源的角度来说，我国具有较大发展潜力的可持续航空燃料原料来源有酯类、纤维素类和气体类三种。酯类原料包括废弃油脂、油料作物

等，我国每年废弃油脂产量在 1000 万吨以上¹⁷，理论上可以转化成可持续航空燃料产量超过 300 万吨。纤维素类原料包括能源植物、农林废弃物和城市垃圾等，我国目前有 10 亿亩盐碱地¹⁸，种植芦竹等能源植物理论上可以炼制的可持续航空燃料超过 3000 万吨。气体类原料包括绿氢和二氧化碳等，攻克碳捕捉、绿氢制备等关键技术后，气体类原料的产量上限几乎无穷。

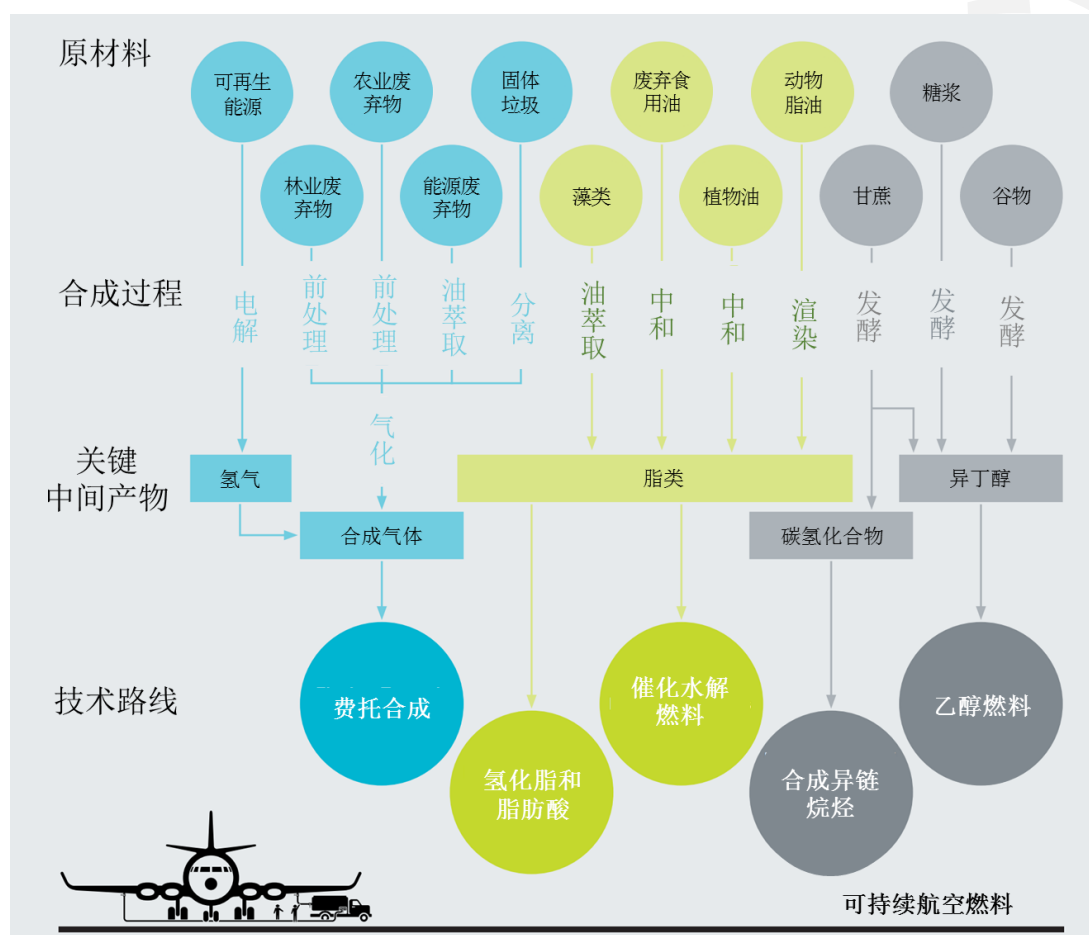


图 18 可持续航空燃料的主要原料来源和技术路线

¹⁷ 中金企信国际咨询公司《2024 版全球及中国废弃油脂资源综合利用行业研究预测报告》

¹⁸ 中科院南京土壤所《中国土壤科学数据库》

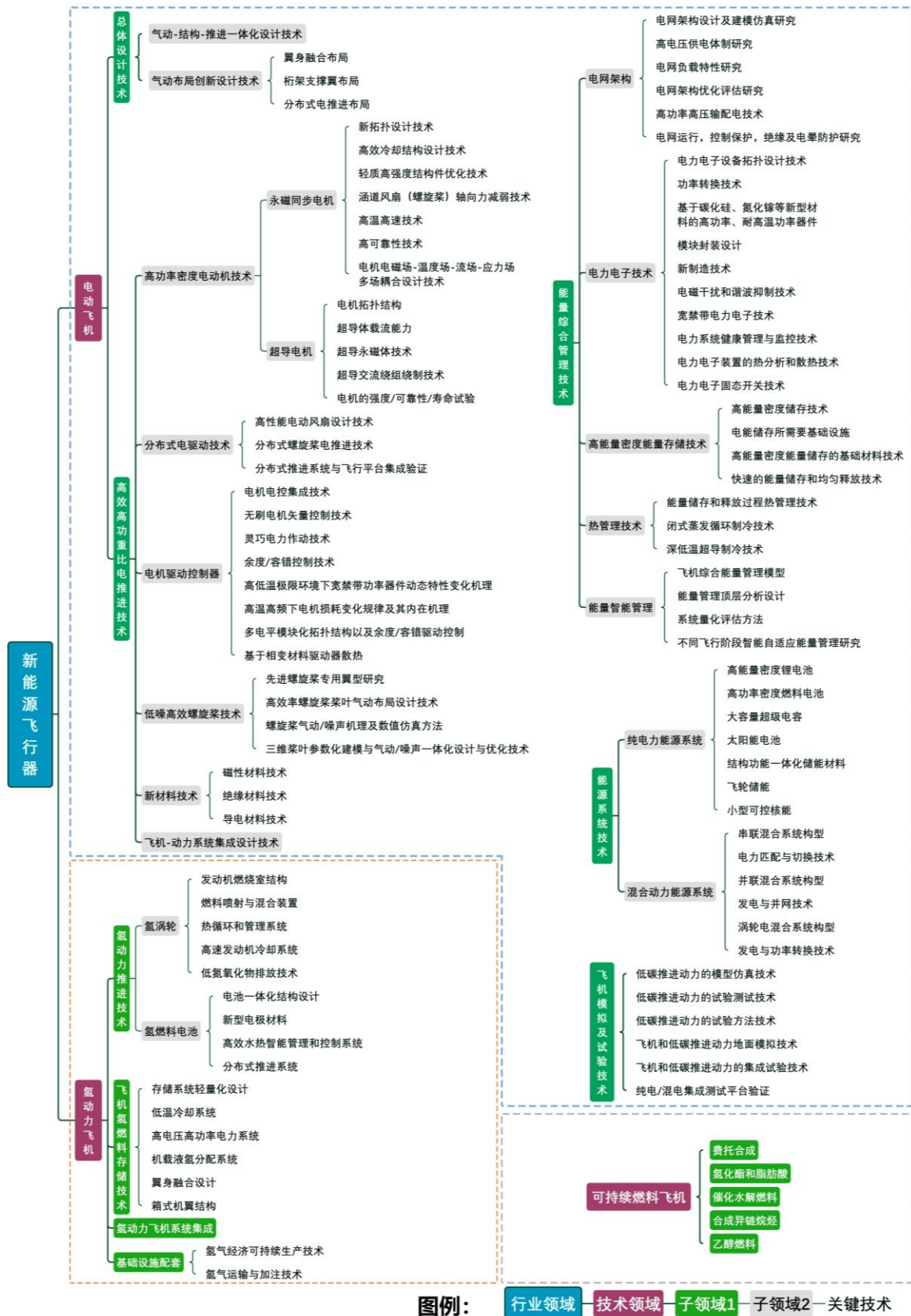


图 19 新能源飞行器关键技术图谱

6 发展措施

一是强化顶层战略规划和方向指引。我国新能源航空产业应强化顶层战略规划研究，引导行业形成发展共识。遵循从小到大，从易到难的发展原则，按照通航飞机、支线飞机、干线飞机的顺序制定发展路线图和战略规划，首先进行关键技术攻关，再通过验证机验证，最后进行工程化和市场化推广。此举一方面可以引导广大企业和科研机构在充分进行市场调研、审慎考虑自身条件和特点的基础上，确定不同阶段的发展方向和重点；另一方面也可以引导金融投资机构利用自己掌握的金融手段，支持从事研发、生产和使用技术发展路线图中所列产品和技术的企业和项目，引导市场和社会资源向国家的战略重点有效聚集。

二是加强自主创新研发和多路并举。新能源航空的发展离不开产业链上每一个环节的进步，更需要从研发到生产全过程的独立自主，避免核心技术被“卡脖子”。我国应高度重视新能源飞行器发展，加大研发投入，形成自主创新成果，做好技术储备。坚持多技术路线并举，积极探索绿色航空新领域新赛道。按照技术成熟度，稳步推进技术攻关，中小型飞行器以电动为主攻方向，干支线等中大型飞机积极探索氢能源、可持续航空燃料、混合动力等技术路线，前瞻布局未来产业。

三是推动低空经济产业化发展。以无人机、eVTOL 飞行器和电动通航飞机为主要载体的低空经济产业已经迎来黄金发展期，正逐步实现从城市周边到城市核心，从生产作业到交通运输的突破性变化，下一步需要开展特定场景下的试点示范运行，加强基础设施和标准法规建设，完善运营管理体系，推动低空经济产业化发展。我国应当始终坚持三个协同发展原则——坚持制造业与运营业协同发展，探索安全、高效、经济的商业运营模式和运行支持保障方式；坚持整机集成企业与产业链配套企业协同发展，由整机带动产

业链配套企业，建立利益共同体；坚持骨干央企与众多民营企业协同发展，充分发挥各自优势，积极抢占技术制高点和市场先机。

四是紧抓航空绿色能源变革新机遇。以可持续航空燃料、氢能为主的航空绿色能源变革极有可能引发全球性的民航产业变革，但由于其发展周期较长，总体投入较高的特点，国内相关产业发展较为缓慢。我国应建立以政府为引导、国央企为骨干、全产业链企业共同参与的绿色民航发展模式，将氢燃料电池支线飞机作为发展切入点，在明确技术和产品路线后尽快转入工程验证并启动产业化进程，紧追全球绿色民航发展步伐，避免在可能到来的新一轮航空产业变革中被拉开差距。

五是积极参与新能源航空全球市场。新能源航空对于整个航空产业来说是一个新兴领域，相关技术、市场、标准、法规仍处于发展初级阶段，传统航空强国与后发国家之间起步差距较小。新能源航空是我国参与全球市场竞争，推动民机产业高质量发展的重要机遇。建议我国航空企业积极开拓国际市场，提高中国技术和中国产品在全球的知名度和认可度，与国外新能源航空企业同台竞争。

六是争取新能源航空国际话语权。当前，NASA、空客、DLR、ATI 等国外企业、科研机构争相发布新能源航空发展计划和路线图，提出产品方案和运营概念，意图在全球新能源航空快速发展阶段占据行业主导地位。建议我国航空企业和科研机构研究制定符合我国国情的新能源航空发展规划和路线图，持续迭代更新，引导产业发展方向。同时，加快推动新能源航空工业法规标准体系和适航审定体系建设，积极参与 FAA、EASA、SAE 等国际、地区和国家组织的相关新能源航空标准法规编制工作，提高我国在新能源航空标准领域的国际话语权和影响力。

附录 缩略语和专有名词表

缩略语	缩略语或专有名词全称	中文
AAM	Advanced Air Mobility	先进空中交通
UAM	Urban Air Mobility	城市空中交通
eVTOL	Electric Vertical Take-Off and Landing	电动垂直起降
SAF	Sustainable Aviation Fuel	可持续航空燃料
BWB	Blended Wing Body	翼身融合
TBW	Truss-Braced Wing	桁架支撑翼
PEMFC	Proton-Exchange Membrane Fuel Cell	质子交换膜燃料电池
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	固体氧化物燃料电池
HEFA	Hydroprocessed Esters and Fatty Acids	酯和脂肪酸加氢
AtJ	Alcohol to Jet	醇喷合成
FT	Fischer Tropsch	费托合成
PtL	Power to Liquid	电转液
TC	Type Certificate	型号合格证
NASA	National Aeronautics and Space Administration	美国航空航天局
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	德国航空航天中心
ATI	Aerospace Technology Institute	英国航空技术研究所
FAA	Federal Aviation Administration	美国联邦航空管理局
EASA	European Union Aviation Safety Agency	欧盟航空安全管理局
ICAO	International Civil Aviation Organization	国际民用航空组织
IATA	International Air Transport Association	国际航空运输协会
SAE	Society of Automotive Engineers	美国机动工程师协会
IEA	International Energy Agency	国际能源署
CAT	Climate Action Tracker	气候行动追踪组织
DOE	Department of Energy	美国能源部
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation	国际航空碳抵消和减排计划