

# C919 徽章拼图

「让大飞机的历史瞬间  
触手可及」



## 航空动力

- 民用航空发动机技术发展现状与趋势
- 欧美下一代窄体机动力系统发展态势展望
- 高速、绿色、智能——未来航空动力革新



# 大飞机

JETLINER

08 August

2026.08 | 总第146期

ISSN 2095-3399



9 772095 339266





P10

P28

P46

P61

P64

P70

## 05 卷首语

05 多路线竞速与体系化变革的未来 | 林喆

## 06 资讯

## 10 封面文章

10 民用航空发动机技术发展现状与趋势 | 李拥军 朱雯

16 欧美下一代窄体机动力系统发展态势展望 | 孟繁叮

20 高速、绿色、智能——未来航空动力革新 | 邵锡

24 绿色动力革命——兆瓦级电机来临，准备好了吗 | 宋璐

## 28 航空制造

28 德国民用航空产业的承压复苏与前瞻布局 | 王泽溪

33 eAction: 空客下一代窄体机计划出炉 | 杜婷

38 航空结构业的并购与重组 | 陈济桁

42 支线为基 双域破局  
——巴航工业亮眼业绩背后的增长逻辑 | 曲小

## 46 航空运输

46 我国民航业反内卷的政策路径研究 | 卢梦圆

51 暑运客流普涨之后：千万级机场的分化时刻 | 丁一璠

56 从体系准入到能力信任  
——EASA 适航条例演进与 DOA 制度的中欧比较 | 慕琦 施文琦

## 61 专栏

61 “三电系统”能否成为低空经济的“新三样”？ | 于达维

## 64 科普

64 全维度飞电防护体系：规避万米高空中的隐形风险 | 晴天

67 飞行是如何一步一步变得如此安全的？（一） | 陈伟宁

## 70 回眸

70 刘敬宜与中国民航的百年航迹 | 成功



# 大飞机

2026 年第 08 期 | 总第 146 期 | 08 月 31 日出版

中国标准连续出版物号

ISSN 2095-3399 CN 31-2060/U

主管主办 中国商用飞机有限责任公司

出版发行 上海《大飞机》杂志社有限公司

## 编委会

主任 贺东风  
常务副主任 沈 波  
副主任 罗 晓  
委员 戚学锋 于世海 李 玲  
张小光 吴文生  
学术顾问 吴光辉 陈 勇

## 上海《大飞机》杂志社有限公司

总经理 程福江  
副总经理 徐显辉 郭宗磊

编辑部主任 庄 敏  
主编 林 喆  
副主编 陈伟宁 欧阳亮  
责任编辑 张凯敏 哲 良 郑小芳  
新媒体编辑 张竞霄  
图片编辑 王脊梁  
美术编辑 刘晓雨 邵奕辰

采访主任 柏 蓓  
文字记者 李 琰 廖天航 赵婷婷  
摄影记者 管 超 华思清 颜康植

发行总监 刘 影  
广告主管 瞿席燕

国内发行 上海市报刊发行局  
国内订阅 全国各地邮局  
邮发代号 4-883  
地 址 上海市浦东新区世博大道 1919 号  
邮 编 200126  
电 话 021-20887106  
网 址 www.comac.cc  
电子邮箱 dfj@comac.cc  
定 价 人民币 20 元  
印 刷 上海申江印刷有限公司  
法律顾问 上海大邦律师事务所

## 卷首语

# 多路线竞速与体系化变革的未来

文 | 林喆

航空动力正站在喷气时代以来最剧烈的变革关口。传统燃气轮机热效率逼近物理天花板，而 2050 净零排放的倒计时却一秒不停。这场航空业的竞赛不再是单一指标的迭代升级，而是技术路径、产业生态与自主能力的全面较量。

传统赛道上，存量博弈与代际竞速并行。主流航空发动机制造商一方面高度聚焦以热端部件改进为主的耐久性提升工程，大幅提高发动机在翼时间，增强运营经济性。下一代窄体动力则分裂为两条旗帜鲜明的路线：CFM 的开放式风扇构型剑指 20% 以上节油，可谓做法激进；普惠与罗罗则坚持齿轮传动涡扇，虽稳妥可控，但效率提升的天花板隐约可见。空客已向开放风扇伸出橄榄枝，波音仍在审慎观望。传统动力仍是 2035 年前后新窄体机的必然选择，但终局远未落定。

新兴赛道上，混电与氢电正加速起飞。兆瓦级电推进系统已从图纸轰鸣到地面台架，GE、普惠、罗罗密集验证，2027 年首飞在即；ZeroAvia 拿下全球首个氢电设计机构批准，赛峰电动机率先适航取证。混电凭借对现有支线平台的直接改装，成为近期最务实的低碳方案；氢电则瞄准全生命周期零碳，空客 ZEROe 与 2MW 级项目加速攻关。行业巨头与初创企业联手，正一寸寸推开 2030 年后的想象空间。

颠覆性赛道上，超燃冲压、分布式推进与 AI 正重塑动力形态。超燃冲压与涡轮基组合循环让高超声速客机不再是科幻，“3 小时内抵达地球任意角落”已点燃速度革命的引信；分布式推进系统将推力化整为零，大幅提升整机能源利用效率；而 AI 则赋予发动机“智慧大脑”。这三者虽然成熟度不一，却共同指向同一个未来：更快、更智能、更环保。

与此同时，产业格局也在剧烈重组。欧美巨头仍把持传统高地，但俄罗斯等国正加速国产化，全球供应链趋向自主多极。新兴动力则开辟出“换道超车”的窗口，适航标准、能源基建与飞发协同成为新壁垒。

未来十年，航空动力不会是单一技术的独舞，而是传统升级、电动替代、颠覆突破三条主线交织演进的复杂变革。保持多元路线并行，务实推进验证，才是通往 2050 净零目标最可靠的道路。这场革命，已在每一台试验件、每一行代码和每一次点火中悄然加速。



未来十年，航空动力不会是单一技术的独舞，而是传统升级、电动替代、颠覆突破三条主线交织演进的复杂变革。

▼ 封面图片 | 万全摄



- 关注我们 -  
FOLLOW US

### 本刊声明：

- 稿件从发表之日起，其专有出版权和网络传播权即授予本刊，同时许可本刊转授第三方使用。
- 本刊作者保证，来稿中没有侵犯他人著作权或其他权利的内容，并将对此承担责任。
- 本刊支付的稿费已包括上述使用方式的稿费。



01

▲ 陶冉摄

## 1 C919 开通首条国际航线

8月12日下午,由C919执飞的CA723航班从北京首都国际机场起飞,前往蒙古国首都乌兰巴托,标志着C919首条国际航线正式开通。截至目前,国航已运营12架C919客机,开通北京至上海、广州、香港、哈尔滨、重庆等航线,执飞超1.2万班次,安全运送旅客超162万人次。



02

## 2 翎亚航空 C909 新开两条航线

8月24日,印尼翎亚航空一日内新开两条航线,包括首次使用C909执飞雅加达—班达楠榜国内航线,同时成功完成C909班达楠榜—吉隆坡首航,这也是印尼楠榜省历史上第一条国际直飞航线。

## 3 《民用航空发展“十五五”规划》印发

为认真贯彻党中央和国务院决策部署,根据“十五五”规划纲要及交通强国建设部署,中国民航局、国家发展改革委、交通运输部近日联合印发《民用航空发展“十五五”规划》。

规划明确,到2030年,民航行业安全水平、服务能力、基础设施率先迈向国际一流,技术创新、绿色低碳、治理能力实现重大突破性进展,服务国家重大战略、促进区域经济社会发展和满足人民美好航空出行需要更加有力。

## 4 波音 737MAX7 获颁美国联邦航空管理局型号合格证

8月3日,美国联邦航空管理局向波音颁发737MAX7型号合格证。作为737MAX家族中尺寸最小和航程最远的产品,737MAX7在两舱布局下可搭载135~160名乘客,最大航程可达3800海里(7040千米),首用户为美国西南航空公司。



05

▲ 来源:空客官网

## 5 空客 A350F 完成地面振动试验

8月8日,空客在图卢兹完成A350F货机地面振动试验(GVT),试验结果与理论模型的预测结果高度吻合。目前,空客正在推进数据处理与模型调校工作,为后续A350F首飞奠定基础。

## 6 空客扩建贝尔法斯特工厂

近日,空客正式公布位于北爱尔兰贝尔法斯特生产基地的扩建投资计划,以强化A220机型机翼生产能力,为2028年实现月产13架的目标提供硬件支撑,扩建工程预计2028年上半年竣工。

7 巴航工业第二季度营收创纪录达 22 亿美元

近日，巴西航空工业公司发布 2026 年第二季度财务业绩：公司实现营收 22 亿美元，创下第二季度营收历史新高，较 2025 年同期增长 23%。公司二季度共交付 65 架飞机，交付量环比增长 48%，同比增长 7%，创下过去 16 年来第二季度交付表现的最高纪录。得益于强劲表现，巴航工业上调 2026 年全年盈利预期，预计全年调整后息税前利润率介于 10% 至 10.6% 之间。



▲ 来源：vpk.name

8 首架量产型 MC-21-310 飞机完成首飞

8 月 3 日，俄罗斯首架量产型全国产化 MC-21-310 在伊尔库茨克完成首飞。此次飞行持续 1 小时 23 分钟，飞行高度达到 6000 米，最大飞行速度 600 公里/小时。试飞过程中，机组对飞机在不同飞行状态下的稳定性、操纵性以及俄制机载系统的运行情况进行了检查。

9 韩国三家廉航达成合并协议

近日，韩进集团旗下真航空（Jin Air）、釜山航空（Air Busan）和首尔航空（Air Seoul）三家廉航正式敲定合并方案，标志着韩国廉航市场新一轮重大整合正式落地。根据三方达成的协议，真航空将接收釜山航空、首尔航空的所有机队、航线、资产负债、人员及全部运营权责，后两家航司品牌将彻底退出市场。



▲ 来源：<https://pps.main.jp/airline/lj.html>

10 全球最大纯电动飞机完成载人首飞

8 月 12 日，瑞典 Heart Aerospace 公司 30 座级支线客机 ES-30 的技术验证原型机——X1 在纽约州普拉茨堡国际机场完成首次载人飞行。X1 验证机翼展约 32.31 米，搭载 4 台电动马达，完全依靠机载电池驱动，起飞重量超 11340 千克，是迄今实现首飞的最大电动飞机。本次试飞持续约 27 分钟，最高爬升至约 335 米，涵盖滑行、起飞、爬升、机动及着陆等试飞科目。ES-30 计划 2031 年投入商用运营，目前已获美联航、加拿大航空等采购意向订单。

▼ 来源：[cnbeta.com](http://cnbeta.com)、[twcnbeta.com](http://twcnbeta.com)、[tw](http://tw)



# 民用航空发动机 技术发展现状与趋势

文 | 李拥军 朱雯 编辑 | 林喆

▲ 来源：GE 官网

2025 年以来，全球民用飞机发动机产业在经历了供应链危机与可靠性挑战后进入稳步复苏通道，主流发动机制造商一方面通过热端部件升级、耐久性套件改装等手段大幅提升现役机队在役时间，缓解航空公司运营压力；另一方面持续加大对混合电推进、氢能推进等前沿技术的投入，为下一代客机动力储备技术方案。同时，

俄罗斯等国的国产化进程显著提速，全球民用航发产业格局正在发生深刻变化。

## 窄体飞机发动机：存量升级与下一代技术竞速

窄体飞机发动机是全球民用飞机发动机市场规模最大、竞争最激烈的领域。

2025 年至今，CFM 国际（GE 航空与赛峰的合资公司）与普惠的双寡头格局仍在延续，但双方的竞争焦点已从单纯的燃油效率比拼转向“效率 + 耐久性”的综合较量。与此同时，罗罗依托 UltraFan 发动机项目，加速回归窄体动力市场，俄罗斯的国产航发步入产业化关键期。

现役产品方面，CFM 的 LEAP 系列发动机产能稳步提升，2025 年共交付 1802 台，持续推进成熟化升级，LEAP-1A 发动机已实现高压力涡轮（HPT）耐久套件量产与反向引气系统（RBS）规模化安装，目前 40% 的 LEAP-1A 机队正在使用耐久性套件，70% 的 LEAP-1A 机队已经使用反向引气系统；LEAP-1B 耐久性增强套件已获 FAA、EASA 认证，反向引气系统取得初始认证。在支线飞机动力领域，GE 航空的 CF34 系列长期主导全球喷气支线发动机市场，累计交付超 7500 台、飞行超 2.09 亿小时，技术层面持续推出延寿升级包，依托涂层优化等方案延长部件寿命，全系列支持使用合规掺混比例的可持续航空燃料。

下一代产品方面，GE 通过 CFM 全力推进 RISE（可持续发动机革命性创新技术）项目，该项目正在推进开放风扇发动机架构测试，目标是在单通道飞机上实现较传统涡扇发动机约 20% 的燃油效率提升。目前工程团队已完成超过 350 项测试和 3000 次发动机核心部件耐久循环，但尚未进入整机地面测试或飞行测试阶段。

普惠的 GTF 发动机已获得全球 90 余家客户超 14000 台的确定订单及意向承诺，2025 年以来持续推进粉末冶金质量问题修复。迭代型号 GTF Advantage 于 2025 年获 FAA、EASA 认证，2026 年 5 月首批交付空客，普惠计划 2028 年初实现 100% 交付。针对现役机队升级，普惠

开发了 PW1100G 热端部件升级（HS+）方案，HS+ 套件正在波音 747SP 飞行台上开展飞行试验，尚未获得 FAA 认证。此外，PW1500G、PW1900G 热端升级也处于技术测试阶段。

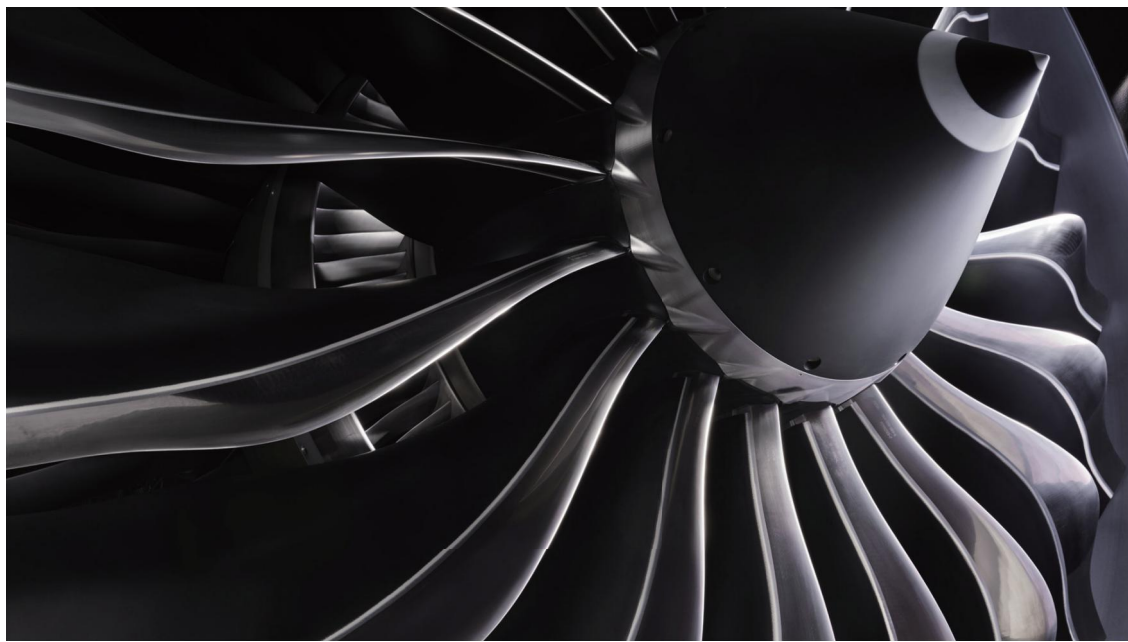
而普惠的下一代产品，GTF Gen2（第二代齿轮传动涡扇发动机）仍处于预研阶段，尚未正式立项。2025 年至 2026 年，普惠重点开展了 CMC 陶瓷基复合材料、复材风扇叶片等关键技术攻关，吸取了现役 GTF 暴露的耐久性问题教训。

罗罗自 2012 年退出窄体客机发动机市场后，正依托 UltraFan 技术平台谋划重返。公司构建了可扩展的超扇技术架构，覆盖从窄体到宽体的全推力范围，其中 UltraFan 80 面向宽体市场，UltraFan 30 则是重返窄体市场的核心项目。2025 年，罗罗正式启动 UltraFan 30 验证机的设计工作。2026 年 6 月，该型号顺利完成概念设计评审，详细设计工作全面展开，计划于 2028 年开始地面试验。目前，该项目已获得欧盟“清洁航空”计划 UNIFIED 项目 6400 万欧元资助，但商业化落地仍需数十亿英镑投入。

俄罗斯以自主保障为核心目标，持续推进窄体发动机国产化。2025 年，联合发动机公司正式向雅科夫列夫公司交付首批批产型 PD-14 发动机，配套 MC-21-310 飞机开展适航取证。2026 年 8 月，PD-14 全国产版随量产 MC-21-310 飞机完成首飞，开展补充适航审定，俄罗斯工贸部计划 2026 年底完成 PD-14 全国产版补充适航取证。

## 宽体飞机发动机：存量提质与新型号临近服役

宽体机发动机市场同样呈现“生产提速 + 耐久性升级”的双主线特征。随



▲ 来源：GE 官网

着波音 787、空客 A350 等机型交付量回升，主流发动机制造商加快产能建设，同时通过套件升级持续提升现役机队可靠性；俄罗斯则持续开展国产发动机试验工作。

现役产品方面，GENx-1B 作为波音 787 系列的主力动力，市场需求持续旺盛，技术层面开展了耐久性升级，优化高压涡轮叶片冷却与型面设计，恶劣环境下首修前在翼周期提升至约 5 年；AI 叶片检测、360 泡沫清洗等运维技术持续推广，相关成果于 2025 年集中对外披露。受多重因素影响，配套 GE9X 的波音 777-9 商业运营时间已推迟至 2027 年。目前，GE9X 持续开展服役前耐久性验证，已完成第二轮粉尘吸入测试，依托模拟中东沙尘工况开展高温多尘环境专项优化。2026 年 1 月，GE9X 因中部密封件裂纹临时暂停交付，完成根因分析后，改进方案已导入生产线，正开展 FAA 适航认证。

罗罗 2024 年宣布投资 10 亿英镑以提高遄达发动机系列的耐久性，包括将发动机的在翼时间提高 40% 的目标。目前

遄达 7000、遄达 1000、遄达 XWB 三大主力型号均取得阶段性进展：遄达 1000 发动机（配套波音 787）第一阶段升级套件已获 EASA、FAA 认证，将在役时间延长一倍，并已启动交付与改装；第二阶段高压涡轮叶片部件 2025 年底完成取证，自 2026 年起全套升级包陆续投放。遄达 7000（配套空客 A330neo）自 2022 年起在新出厂的发动机上安装耐久性增强套件。2025 年数据表明，遄达 7000 耐久性增强套件已使发动机在翼时间提升至原来的三倍。遄达 XWB 系列（配套空客 A350）于 2025 年完成了改进型高压涡轮叶片的初步评估，2026 年将进一步测试叶片冷却能力。此外，XWB-84 增强性能版于 2025 年 5 月投入运营；XWB-84 系列关键限寿件延寿改进预计 2026 年完成；面向沙漠工况优化的 XWB-97 第三阶段升级于 2025 年启动部件试验，预计 2028 年投用。

下一代产品方面，罗罗计划在 2026 年底前于英国德比测试台启动 UltraFan 80 下一轮测试，新一轮测试将用于验证

经过改进的发动机方案，包括新的高压压气机以及旨在提高寿命和可靠性的多项技术调整。

俄罗斯在宽体发动机领域采取“核心机衍生”的技术路线，依托 PD-14 的技术基础研发 PD-35 发动机。PD-35 技术验证机于 2023 年完成总装，2024 年在彼尔姆 OS-5 露天试验台启动第一阶段地面测试；2025 年 9 月，该机在同一试验台进入第二阶段耐久性测试。此外，俄罗斯在 2025 年还披露了 PD-26 发动机项目，这是一型 26 吨级中等推力发动机，目前完成了草图设计，整机工程研制尚未正式启动。

## 新兴动力技术：多路线并行与可持续动力加速落地

混合电推进是航空领域具备中短期落地潜力的低碳推进技术，主流制造商正开展技术攻关与飞行验证，适配涡桨、涡扇等动力类型，系统架构包含并联、串联、串并联三类。

普惠在欧盟 PHARES 项目中牵头开展混合动力验证，基于 PW127XT 开发并联混电验证机，项目于 2026 年初正式启动。同时，在 RTX 混合动力飞行演示项目下，普惠正改装一架冲 8-100 验证机，目前该系统已完成全功率地面测试，正向集成试飞阶段推进，预计 2027 年实现首飞。在欧盟 SWITCH 项目下，普惠联合柯林斯、ATR、空客等进行研制，在第二代 GTF 集成双兆瓦级双轴嵌入式混动系统，2026 年 7 月完成了兆瓦级混电推进系统的地面测试，并预计于 2027 年首飞。

GE 航空在军民多条路线并行推进混合动力技术。2025 年，该公司在 NASA 涡轮风扇发动机功率提取演示项目支持下，完成“护照”发动机双轴嵌入式混动

地面测试，验证了窄体混合动力发动机架构的系统集成与控制逻辑。在 NASA 的“电气化动力总成飞行验证”项目下，GE 航空于 2026 年 6 月完成了兆瓦级并联混电地面集成测试，同年 7 月，完成了 3 万英尺高空飞行测试。

罗罗主攻支线涡桨混动技术方向，当前牵头欧盟 HE-ART 项目，开展支线混动涡桨全尺寸地面验证系统研发（并联混电），项目计划于 2026 年底前完成地面验证演示。

赛峰已构建从核心技术验证到多场景商用落地的完整技术体系。核心元器件率先突破适航，ENGINEUS 100 电动机获 EASA 认证，成为全球首款获得认证的用于混电及全电飞机的电机。干线验证平台加速测试，PHILEAS 双轴嵌入式混动验证机于 2026 年 7 月启动地面测试，适配下一代短程、中程民用飞机。支线领域双线推进：产品端，基于 Arrano 发动机的 TG600 涡轮混动系统（串联混电），已配套 Aura Aero ERA、Electra EL9 机型，进入原型开发与量产合作阶段；预研端，赛峰牵头欧盟 OSYRYS 项目，研发机载发

▼ 来源：罗罗官网



电配电、热管理与能量管理系统。

2025 年以来，氢能航空动力技术路线出现明显分化，大多数企业主攻氢燃料电池技术，氢涡轮研发节奏有所放缓，但关键验证工作持续开展。

氢燃料电池技术方面，空客在 2025 年正式修订 ZEROe 项目路线图，将技术路线收敛到氢燃料电池驱动的支线飞机方案。2025 年 6 月巴黎航展期间，空客与 MTU 航空发动机公司签署氢能合作谅解备忘录；2026 年 7 月宣布成立合资企业，推进全电动氢燃

阶段，可适配更大座级的支线飞机。

氢涡轮技术方面，赛峰 2025 年初联合 Turbotech、液化空气等公司完成了基于超高效再生循环的氢涡轮发动机地面测试。罗罗改装后的 Pearl 15 涡扇发动机于 2026 年 4 月完成 100% 气态氢燃料全功率地面测试，首次实现该型发动机全起飞推力稳态运行。此外，中国在氢能航空领域也实现了新突破。2026 年 4 月，中国航发湖南动力机械研究所自主研制的兆瓦级氢燃料航空涡桨发动机 AEP100，配套 7.5 吨级无人运输机在湖南株洲成功首飞，



▲ 来源：中国航发

料电池发动机商业化落地，预计 2027 年正式运营。初创企业 ZeroAvia 持续深耕氢燃料电池领域，其核心商业化产品 ZA600 型 600 千瓦氢电动力总成正在推进适航认证，该系统采用 200 千瓦级燃料电池发电模块，整套发电系统比功率达 1.4 千瓦 / 千克，目标 2027 年完成燃料电池系统认证；功率更高的 2 ~ 5 兆瓦级 ZA2000 动力系统处于研发测试

这是全球首次兆瓦级氢燃料航空涡桨发动机试飞，为中国氢能航空动力技术发展奠定了重要基础。

随着超声速民用飞机研发升温，配套动力技术也取得重要进展。

主流低超声速（1.4 ~ 1.8 马赫）动力技术方面，美国博姆公司为“序曲”超声速客机开发的 Symphony 发动机，2025 年完成核心机最终设计评审，并

选定科罗拉多航空航天港作为测试基地，首台 Symphony 冲刺核心（sprint core）已于 2026 年启动装配，计划年中完成装配，三季度开展首轮核心测试，年末完成预量产整机装配，2027 年实现试运行并向首发客户 Crusoe 交付首批机组。

高超声速（3 ~ 5 马赫）动力技术方面，美国 Hermeus 公司的 CHIMERA 涡轮基组合循环（TBCC）发动机随 Quarterhorse Mk1 验证机于 2025 年完成首飞。日本宇宙航空研究开发机构 2026 年 5 月完成马赫 5 级冲压发动机地面燃烧试验，验证高空极端热环境下的燃烧与气动性能。此外，Astro Mechanica 与英国 Helix 联合开发的 Duality 混合电推进系统已完成第三代热试车，第四代正在测试中，计划三年内首飞验证。

## 技术发展趋势展望

一是传统构型发动机竞争重心向全生命周期价值偏移。传统燃气轮机热力效率逼近物理极限，行业竞争逻辑已从单一性能指标突破，转向全生命周期可靠性、运维经济性与低碳适配能力的综合比拼。现役型号升级以耐久性为核心，通过热端部件改进大幅延长在翼时间，降低航空公司全生命周期成本；下一代型号则在开式风扇、齿轮传动等架构创新基础上，同步提升效率与可靠性。未来 5 ~ 10 年，传统构型仍占市场主导，量产交付与全周期服务体系成为竞争核心。

二是新兴动力技术竞速进入生态体系比拼阶段。混合电推进、氢能动力等多路线并行，标志下一代航空动力已脱离原理验证阶段，进入系统集成与商业化落地关键窗口期。这一阶段的竞争核



▲ 来源：FlightGlobal

心从单一部件性能，转向适航标准、能源基建、机发协同设计的产业生态构建。多路线并存反映行业对终极形态尚未形成共识，制造商通过跨界合作分散风险。随着碳中和约束强化，技术路线将逐步收敛，率先完成适航与产业链闭环的路线将获得先发优势。

三是全球产业格局向多极化与体系化分立演进。欧美制造商长期垄断的格局正在逐步松动，俄罗斯的国产化进程加速，是地缘政治格局变化下航空动力供应链自主化、区域化的必然结果。这种替代是涵盖材料研发、制造体系、适航标准的完整产业能力并行构建，将形成与欧美体系互补竞争的多元市场结构。与此同时，新兴动力赛道为后发国家提供换道窗口，传统技术壁垒部分消解。未来产业将呈现“传统赛道固化、新兴赛道多元竞速”的特征，技术自主权与供应链安全成为布局核心。



▲ 来源：Aerospace Global News

# 欧美下一代窄体机动力系统发展态势展望

文 | 孟繁叮 编辑 | 林喆

在全球航空业 2050 净零碳排放目标驱动下，下一代窄体机动力系统的技术迭代已成为民航产业低碳转型的核心抓手。当前，欧美航空发动机产业形成开放式风扇架构与齿轮传动涡扇构型两条并行技术路线，CFM 国际 RISE、普惠 GTF Gen2 与罗罗 UltraFan 30 三款核心验证项目，叠加空客、波音两大主机厂的差异化选型策略，下一代窄体机动力领域呈现技术多元探索、路径分化博弈的发展态势。本文针对三款动

力技术验证计划，系统梳理其技术路径与研发进展，从技术潜力、商业前景与主机厂立场维度开展对比分析，以期对相关产业研究与决策提供客观参考。

## 传统动力作为下一代窄体机的现实选择

在全球民用航空业深度脱碳的目标导向与下一代窄体客机代际更迭时间约束的双重作用下，动力系统的技术路径选择呈现出远期愿景与近期落地的显著分野。空客明确表示其下一代窄体客机将在 2035~2040 年投入市场，替代现役 A320neo 系列，需在 2027 年前后完成发动机选型定案，为整机研发、适航取证预留充足周期。

纯电驱动、氢燃料推进等新能源动力方案虽具备长期减排潜力，但受限于储能密度、系统集成复杂度、适航认证体系缺失及地面配套基础设施不完备等工程化落地壁垒，其技术成熟度尚无法支撑窄体客机在 2040 年前实现规模化商业服役。因此，在下一代窄体客机迭代窗口期内，传统动力迭代路径成为下一代窄体客机动力选型中兼具技术可行性与时间适配性的现实选择。

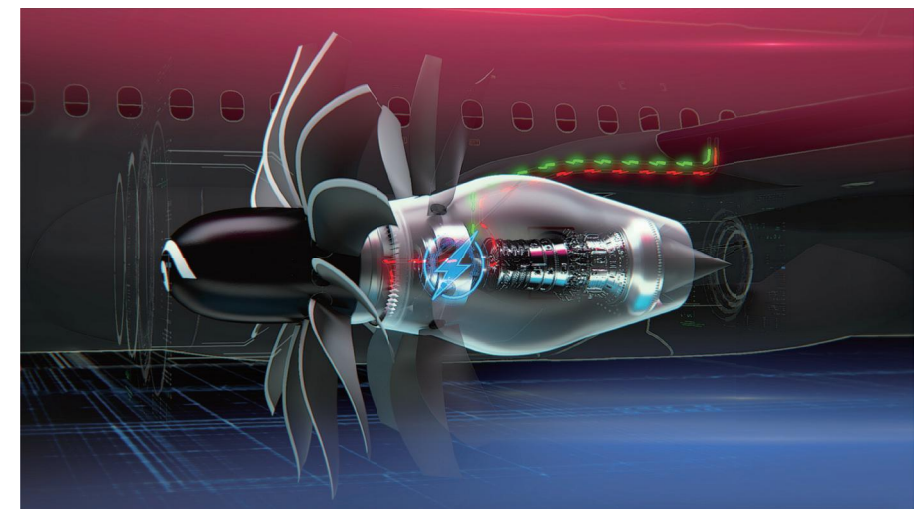
## 发动机制造商的技术探索

波音、空客均在筹划各自下一代窄体机项目，对应动力装置的市场竞争正日趋激烈。下一代窄体机发动机的研发正围绕两条并行且相互竞争的技术路线展开：以 CFM 国际主导的开放式风扇构型方案，以及以普惠和罗罗主推的齿轮传动涡扇构型方案。

CFM 国际公司于 2021 年启动“可持续发动机革命性创新技术”（RISE）技术验

证计划。通过研发开放式风扇架构、紧凑核心机和混合动力电动系统等先进技术，旨在较现役同级发动机减少 20% 以上的油耗和二氧化碳排放，并实现与可持续航空燃料（SAF）100% 兼容。

RISE 项目历经五年技术攻关，已取



▲ 图 1 | RISE 开放式风扇、紧凑核心机和混合电力技术效果图

得多项实质性研究进展：已于 2026 年 7 月完成开放式风扇与紧凑型核心模块初步设计评审（PDR），设计方案获得确认；正在开展开放式风扇叶片与后端出风导叶（OGV）的机械与材料测试，气动声学性能优于预期；配套首台高速低压涡轮机已进行超 1000 小时试验，气动热性能验证合格；提前开展耐久性测试，完成新一代高压涡轮翼型（HPT）超 2000 次粉尘吸入循环试验，并在 LEAP-1B 发动机上开展二次试验；稳步推进混动系统地面测试，赛峰开展 PHILEAS 混动验证机试验，适配中短程客机，GE Aerospace 完成两轮混动发动机测试，验证电动航空落地可行性。

RISE 项目目前处于早期技术验证阶段，已完成初步设计评审，转入全尺寸验证机零部件研制，但尚未进入整机地面测

试或飞行测试阶段。

普惠面向下一代窄体客机发动机，采用“渐进式创新”战略，坚定押注齿轮传动涡扇发动机 GTF Gen2。

GTF Gen2 沿用现役 GTF 发动机齿轮传动涡扇架构，其热端部件将采用陶瓷基复合材料（CMC）涡轮罩与涡轮叶型，以更少冷却空气实现更高工作温度；风扇模块采用复合材料叶片，实现结构减重并适配更大风扇直径，降低齿轮箱载荷，以实现更高的燃油效率与可靠性。

图 2GTF Gen2 目前处于早期概念预研阶段，尚未开展初步设计评审，暂无明确的方案定型、整机验证及首飞时间节点。现阶段重点推进复合材料风扇叶片、CMC 热端部件等关键技术论证。

罗罗于 2026 年 2 月公布了 UltraFan 30 发动机模型，标志其重返窄体客机动力市场。UltraFan 30 为推力 3 万磅级的涵道式齿轮传动涡扇发动机。该验证机采用先进制造技术，配备 90 英寸风扇、20 MW 功率齿轮箱、碳钛风扇系统（由碳钛风扇叶片及复合材料机匣构成），旨在较现役发动机最高降低约 20% 油耗，100% 兼容可持续航空燃料。

▼ 图 2 | 普惠现役 GTF 发动机整机



罗罗牵头“超新型创新全集成发动机验证项目”（UNIFIED），支持 UltraFan 30 技术验证机的研发与地面测试工作。该项目获“欧盟清洁航空联合执行体”（CAJU）6400 万欧元资助，支持 UltraFan 30 技术验证机按计划于 2028 年开展地面测试，并为后续的飞行测试奠定可靠基础。

UltraFan 30 目前处于早期研发阶段，已完成概念方案评审，其整机定型、首飞及服役时间取决于下一代窄体客机项目推进节奏，尚无公开确切时间表。

### 三款动力系统对比

在技术发展潜力层面，三款动力方案均以燃油效率提升为核心目标。CFM RISE 开放式风扇方案作为颠覆性构型，通过“无涵道”架构以及等效高涵道比设计目标，较现役发动机再减少 20% 以上油耗，理论上效率提升空间最大，但其面临气动声学控制、叶片飞脱防护增重、飞发集成重构等工程挑战；罗罗 UltraFan 30 齿轮传动涡扇方案虽设定 20% 节油目标，但受涵道架构物理边际制约，后续效率提升空间收窄；同时需克服宽体技术向窄体推力级缩比的工程适配难题，并面临供应链与运维体系的重建成本；普惠 GTF Gen2 依托现役 GTF 架构的迭代升级，受制于前代产品可靠性遗留引发的市场信任压力，以及陶瓷基复合材料等新技术长期服役性能的验证不足。

在商业应用前景方面，三款动力技术的商业应用前景与研发路径及技术成熟度相匹配。RISE 开放式风扇方案已完成核心部件的初步设计评审（PDR），凭借领先的验证进度在颠覆性技术赛道中占据先发位置，商业前景与其能否率先完成适航标准建立高度相关，服役时间约为 21 世纪 30 年代中后期；GTF Gen2 尚处于方案论

证与早期概念研发阶段，依托现役成熟架构迭代升级，以渐进保守策略换取相对确定的商业化节奏，研制启动时间不早于 21 世纪 30 年代初，投放窗口延后至 21 世纪 30 年代末；UltraFan 30 刚完成概念设计评审，处于初步设计初期，验证起步较晚、技术跨度较大，其服役时间表与市场竞争地位面临更高的不确定性。

针对主制造商选型立场，波音、空客两大主制造商的选型立场与其下一代机型的研发策略深度绑定，整体呈现“空客偏先行探索波音重稳健落地”的分化特征。

空客对 CFM RISE 开放式风扇方案持积极推进的合作态度，将其作为核心动力验证方案。双方将依托 A380 试验平台开展试飞验证；同时空客联合 CFM 国际、新加坡民航局签署谅解备忘录（MOU），率先在机场层面为开放式风扇方案运营做准备。但空客尚未作出最终选型承诺，仍保留回归传统涵道构型的备选路径。

波音对下一代窄体机动力方案的技术选型整体持审慎稳健策略。波音优先考量技术成熟度与运营可靠性，更倾向低风险传统涵道动力。业界普遍认为波音对 CFM RISE 开放式风扇方案持审慎怀疑态度，但波音执行副总裁 Stephanie Pope 在 2026 年范堡罗航展前的访谈中，明确表示未将该构型完全排除于备选动力清单之外。受适航取证、产能与财务压力约束，波音尚未正式立项窄体客机迭代项目。

通过上述对比分析，本文提出三点思考：

一是平衡技术先进性与商业可行性。下一代窄体机动力技术研发需兼顾技术突破强度与市场接受度，在追求燃油效率提升的同时，充分考量运营可靠性、维护成本、适航周期等商业约束，以航空公司实际运营需求为导向优化技术路线，避免技术指标超前与产业落地需求脱节。



▲ 图 3 | 罗罗 UltraFan 30 验证机

二是建立机型与动力系统的耦合机制。下一代窄体机研发需打破“先定飞机、再选动力”的传统模式，主制造商与发动机厂商应在机型概念阶段启动协同研发，依据动力技术成熟度合理规划飞机研发与服役节点，并预留动力架构升级空间，打造可迭代的平台体系，实现飞机与动力系统的协同演进。

三是坚持多元技术路线并行布局。下一代窄体机动力技术迭代面临技术攻关、适航认证与工程适配等多重不确定性，单一技术路径一旦受阻易引发产业发展停滞；维持开放式风扇、齿轮传动涡扇等多条路线并行探索，可形成技术互补与风险对冲格局，提升产业抗风险能力，保障动力技术迭代与民航减排进程的连续性。



▲ 图 1 | EcoPulse

# 高速、绿色、智能 ——未来航空动力革新

文 | 邵锡 编辑 | 林喆

在高超声速巡航、零排放飞行、智能自主控制的需求牵引下，超燃冲压、分布式推进与 AI 驱动智能推进三大赛道加速突破，擘画高速、绿色、智能融合的未来航空动力图景。

## 超燃冲压发动机：点燃高超声速之梦

传统喷气发动机依赖旋转的压气机

和涡轮来压缩空气并提取功率，但当飞行速度超过约 3 倍声速时，进气道对气流的自然冲压效应就足以完成压缩。而在高于 5 马赫的速度下，气流若在燃烧前被减速至亚声速，将带来剧烈的总压损失和热负荷，于是超燃冲压发动机应运而生。该动力装置全程保持流道内气流超声速状态，直接完成燃油喷射、掺混与燃烧，是高超声速飞行器的核心动力，具备结构简洁、维护便捷、安全性突出等优势，在马赫数

5 ~ 7 区间巡航性能优异，是全球航空重点攻坚的前沿技术。

超燃冲压发动机技术的发展已有 80 多年历史。20 世纪 90 年代，最早的专利就记录在案。美国通用电气公司、联合技术公司、马夸特公司、约翰·霍普金斯大学 APL 实验室以及 NASA 兰利研究中心等研制出了典型的氢燃料超燃冲压发动机。20 世纪 80 年代，俄罗斯中央航空发动机研究院与中央空气流体动力研究所等合作实施了“冷”高超声速技术发展计划，旨在加强超燃冲压发动机关键技术研究。经过世界各国对超燃冲压发动机技术的持续攻关，高超声速飞行器的速度不断突破，目前公开发表的 X-43 飞行器的飞行速度达到了 9.6 马赫。

但超燃冲压发动机有一个天生的“软肋”：无法在零速度下工作。一辆不能从静止起步的汽车毫无用处，一架只能在 5 马赫以上点火的发动机同样如此。于是，涡轮基组合循环（TBCC）成为破解这一悖论的关键路线。TBCC 整合涡扇与冲压两套动力系统，适配 20 千米至 100 千米临近空间飞行，拥有飞行包线宽广、可重复使用、推力大、安全性高等优势，是当前组合动力领域核心研发方向。其工作逻辑清晰：地面起降、低速飞行依靠涡扇发动机，2 ~ 4 马赫切换冲压模态，5 马赫以上转入超燃冲压巡航。现阶段 TBCC 尚未实现工程规模化应用，飞发一体化设计、多模态平稳转换、整机级高温试验是产业化亟待攻克的关键瓶颈。

美国和日本是 TBCC 技术研究的先行者。2010 年，NASA 公布了 2035 年前美国吸气式推进技术的发展路线，其中 TBCC 相关技术位于高优先级行列，包括流道控制、进气道技术、涡轮 / 超燃模态转换技术、高马赫数涡轮技术等。美国的代表性项目包括 RTA、FaCET 和 Trijet 等；

日本在 HYPR90 计划完成后，深入开展了 ATREX 预冷发动机的研究。

一旦 TBCC 的技术壁垒被攻克，加上主动冷却结构与高密度吸热碳氢燃料的成熟，高超声速客机就将从概念走向现实。届时，它的运营模式可能类似今天的公务航空——昂贵但可接受，为旅客提供“3 小时内抵达地球任意角落”的新选项。

## 分布式推进：重构飞机动力布局

分布式推进将传统的少数大推力发动机替换为沿机翼、机身分散布置的众多小型风扇。这些风扇由小功率的电机驱动，从而将“动力产生”与“推力分布”解耦。依托该布局，飞行器可运用边界层吸入、吹气增升、差动推力控制等气动优化手段，同步降低飞行阻力、运行噪声，大幅提升整机能源利用效率，相较传统集中式动力拥有四大核心优势：

第一，燃油与能耗效率显著提升。分布式构型可将等效涵道比提升至 20 以上，减少燃料消耗与污染物排放；边界层吸入技术吸收机身表层低速气流，整机能耗可降低约 20%。

第二，噪声水平大幅下降。多组小直径风扇分散布置，搭配电动螺旋桨同步相位降噪控制，整机噪声远低于传统民航客机。

第三，飞行安全冗余度更高。多推进单元并行工作，单个或少数风扇失效不会影响整机稳定飞行，大幅降低空中动力故障风险。

第四，飞行操控自由度更强。独立精准调控每一台推进器推力，可实现推力矢量与差动控制，部分工况下能够替代传统气动舵面，拓展飞行器机动控制边界。

目前主流的分布式推进主要有两种技术路线。一是分布式电推进（DEP）。

利用电能驱动分布在机翼或机身上的多个螺旋桨或涵道风扇。电能可以来自电池，也可以来自氢燃料电池。二是分布式混合电推进。由传统燃气涡轮发动机带动发电机发电，为多个电动机提供电力，由电动机驱动风扇提供全部或大部分推力。这种方案被视为从传统燃油动力到未来纯电驱动的“关键桥梁”。

任何新技术从概念到成熟，都需要经过验证机的考验。全球多国已落地多款验证机型，完成技术可行性验证。

美国 NASA 的 X-57 “麦克斯韦” (Maxwell) 是 DEP 的早期标志性验证机，在大展弦比机翼布置 14 台电动推进器。项目 2023 年正式收官，虽受电池采购、适航认证零部件、末端试验故障制约未能完成首飞，但在电池热失控防护、碳化硅逆变器、电磁干扰抑制领域取得突破性成果，为电动航空行业标准制定积累核心试验数据。

空客、达赫集团和赛峰集团联合开发的 EcoPulse，是分布式混合电推进标志性机型。它在机翼前缘安装了 6 个由 45 千瓦电动机驱动的螺旋桨，动力来自高压电池组（800 伏直流电，350 千瓦功

率）或 100 千瓦的辅助动力装置。2023 年 11 月完成首飞后，EcoPulse 累计进行了近 100 小时的飞行试验，其中约 50 次采用分布式混电推进系统。试验证实了分布式电推进在真实飞行条件下的可行性，为混电飞机的设计、认证和生产积累了宝贵经验。

放眼长远发展，能量密度仍是制约分布式推进突破的关键瓶颈。当锂离子电池系统级能量密度突破 400~500 瓦时 / 千克，并且高温超导电机和氢燃料电池技术成熟时，混合电推进和全电推进将足以支撑 50 ~ 80 座级支线客机，执行 1500 公里以内的航线。

## AI 驱动的推进系统：赋予发动机“智慧大脑”

“AI 驱动的推进系统”并不取代发动机的热力学循环，而是利用机器学习、深度神经网络和数字孪生技术，对发动机的工作过程进行实时感知、决策和优化，让推进系统从“被动响应油门”变为“自适应的智能体”。它可以动态调整燃油喷射、变几何构型、主动间隙控制和推力分

配，实现全剖面效率最优；还能基于传感器数据进行故障预测和寿命管理，大幅降低维护成本和空中停车风险。

国际航空企业已率先落地 AI 智能推进技术。通用电气公司在 GE9X 等最新型号发动机中广泛部署了数字孪生模型，通过机载边缘计算和地面云分析，持续学习每台发动机的个性退化特征。罗罗公司则提出了“智能发动机” (Intelligent Engine) 愿景，利用 AI 将发动机、飞机与地面支持系统连成一个能互动的生态系统。

当飞机采用混合电推、氢能等多能源动力系统时，如何在不同能源间进行最优分配就成了核心难题。为此，航空动力多能源智能管控大模型系统应运而生。这个系统就像飞机的“能源大脑”，能实时分析飞行工况，自主制定能量管理策略，动态优化燃油、电力、热能的分配。它能实现“秒级”的复杂耦合关系解析，确保飞机在任何时刻都能以最高效、最安全的方式飞行。

展望未来，发动机全权限数字电子控制 (FADEC) 将融入持续进化的 AI 核心，使推进系统能根据任务变化自重构控制律，并与飞行控制系统、气象传感网络协同，实现四维航迹管理与能量最优推力的无缝配合。一台 AI 驱动的发动机，故障预测可以精确到具体航段甚至具体机动动作之前，将计划外停场变为历史。

## 未来展望：航空动力的融合与新生

未来的航空动力不会是单一路线的独舞，而是超燃冲压组合动力装置、分布式推进和 AI 智能控制深度交融的共生体。在这幅图景中，洲际高超声速客机与零排放混合电推客机将由一条智能主线贯穿。前者搭载 TBCC 动力，从跑道零速自主起



▲ 图 3 | NASA 官网

飞，AI 在毫秒间管理涡扇与冲压模态的无缝转换，平稳加速至 6 马赫，将上海与纽约之间的航程压缩至两小时以内。高密度储热燃料与主动热防护结构协同工作，机身每一寸热应力和结构健康状态都处于 AI 的实时监控之下，确保极端热环境中的安全与寿命。后者则覆盖中短程航线，以氢燃料电池或氢涡轮为能量源，驱动分布式风扇阵列，配合超导电动机和智能功率管理系统，逼近电机推进的效率极限。起飞滑跑时近乎静默，巡航中零碳排放，机场周边的噪声与尾气一并消失。AI 不仅管理机上推进系统，还与地面电网和氢能补给设施实时对话，根据载荷、电价和氢储状态统筹分配每一度电，把“绿色”从概念落地为每公里的运营账单。

未来的航空动力将彻底告别“仅靠加大涵道比和改进压气机”的渐进式发展，进入一个由多物理域耦合、数据驱动和可持续能源革命共同书写的新篇章。届时，人类将同时拥有更快的速度、更洁净的天空和更聪明的飞行器。所有这些前瞻技术的每一步前行都是在为那个激动人心的时代铺设跑道。

▼ 图 2 | X-43 飞行器



# 绿色动力革命

## 兆瓦级电机来临，准备好了吗么



文 | 宋璐 编辑 | 林喆

▲ 来源：ZeroAvia 官网

在全球航空业低碳转型与零碳排放目标的强力驱动下，航空发动机的动力形式正经历自喷气时代以来最深刻的变革。传统燃气轮机依赖化石燃料的热效率已逼近理论极限，难以满足国际民航组织（ICAO）及各国提出的中期减排目标，而兆瓦级电推进系统的出现，为航空动力落地“去碳化”提供了切实可行的路径——混电推进成为近期技术落地的现实选择，氢电推进则为航空业 2050 年净零目标提供终极解决方案。GE、普惠、罗罗、空客等传统航空巨头，以及 ZeroAvia、H2FLY 等初创企业，以前所未有的速度将兆瓦级电机从概念推向工程验证与适航取证。

### 混电推进：即将步入兆瓦级动力时代

混电推进通过电池、电机与燃气轮机等热力发动机协同工作，在起飞、爬升和巡航等不同阶段优化能量分配，从而降低油耗和排放，技术成熟度达到 5 至 6 级水平。混电推进即将达到兆瓦级动力能级，从概念设计进入工程

验证与适航阶段。

GE 凭借其在航空与电力领域双重优势，领衔兆瓦级混合电推进技术落地研究。GE 与 NASA 合作的“混合热效率核心机”项目，旨在研究电机与燃气发动机高效融合。2025 年 11 月，使用经改装的 Passport 涡扇发动机，成功启动了混合电推进系统原型机的首次完整地面测试。在美国宇航局的“电气化动力总成飞行验证”项目下，GE 基于萨博 340B 飞行平台，使用 GE 电机、BAE 电池和 CT7 涡桨发动机，于 2026 年 6 月完成了兆瓦级混合动力集成地面测试。2026 年 7 月，完成 3 万英尺高空飞行测试，验证了兆瓦级混合电推进技术在商用客机上的可行性。

雷神公司致力于兆瓦级电机测试。雷神旗下普惠联合柯林斯、ATR、空客等研制的兆瓦级混合电推进验证系统项目，由柯林斯研发 1 兆瓦电机，以普惠涡桨发动机为基础，进行电动化升级。2026 年 7 月完成了兆瓦级混电推进系统的地面测试，并预计于 2027 年首飞。此外，空客与 ATR 正在研发基于 ATR42/72 涡桨飞机的符合 CS-23 及 CS-25 认证标准的下一代模块化电池系统。

罗罗德国与赛峰共同研发 2.5 兆瓦级混合动力电动发动机，使用赛峰 ENGINE-US 电机，目前推进器、动力齿轮箱、能源管理与分配系统等子系统部件技术成熟

度达到 4 至 5 级水平。赛峰 EngineUs 100 电动机获 EASA 认证，成为全球首款获此认证的电动机。此外，赛峰正在推进“与支线飞机混合动力化相关的机载系统”项目，负责开发机载发电与配电系统、先进热管理系统及能量管理航电解决方案，旨在为下一代支线机减碳 30%。

### 氢电推进：初创联手巨头共研兆瓦级动力

氢电推进通过电化学反应，将氢气的化学能直接转化为电能，驱动电机为飞机提供动力，全飞行阶段零碳排放，技术成熟度达到 4 至 5 级水平。目前，空客、GE 等传统巨头携手初创企业推动氢电推进从数百千瓦级到兆瓦级动力的演示验证。

美英合资初创氢电飞机开发公司 ZeroAvia 开发 600kW 级电机，专为最多 20 个座位的商用飞机设计，于 2025 年 9 月完成 2 小时 38 分全飞行剖面地面模拟测试，2025 年 11 月获英国民航局 DOA（全球首个氢电推进设计机构批准），2026 年 3 月，FAA 针对 600kW 电机发布特殊条件正式规则。目前 ZeroAvia 全套动力系统和零部件已获近 3000 份订单。此外，ZeroAvia 与赛峰合作聚焦高温质子交换膜燃料电池技术，为其下一代产品 ZA2000 开展技术攻关。

美国电动飞机公司 Joby Aviation 旗下氢燃料电池航空动力系统开发公司 H2FLY 计划于 2026 年底完成 2kW/kg 功率密度的 350kW 级电机系统开发，并与德意志飞机公司合作改装 1.5MW 氢电支线客机，目标为 2027 年获得 CS-23 认证。H2FLY 公司是全球首款完成液氢驱动载人飞行的氢电飞机 HY4 验证机的开发者，该机型于 2023 年 9 月实现 1500 公里航程试飞，电机系统功率密度从 2023 年的

▼ 图 1 | 柯林斯研发的 1 兆瓦电机



0.2kW/kg 提升至 2024 年的 0.6kW/kg。此外，H2FLY 通过欧盟 HEAVEN 项目与液化空气集团等合作，重点突破液氢储运及燃料电池高空性能等关键技术。

GE 航空子公司 Avio Aero 牵头的“用于混合动力—电动支线应用的创新演示器”项目，参与方包括 H2FLY 等初创公司。该项目以 Avio Aero 的 Catalyst 发动机为基础，开发并验证 2 兆瓦混合电推进。H2FLY 负责提供兆瓦级燃料电池系统。2026 年 6 月，在 DRL 完成了专有燃料电池系统地面测试，证明了其在兆瓦级功率下应对真实飞行功率瞬变的可行性。并计划于 2026 年内，实现完整混电推进系统的地面台架验证，技术成熟度达到 4 至 5 级水平。

欧洲空客 ZEROe 项目正式进入工程阶段。ZEROe 的最新构型采用 4 个 2.4 兆瓦电动机，由苏格兰斯克莱德大学研制，已完成 100kW 全超导航空电动电机的演示验证，有效解决了现有电推进系统功率密度偏低、整机重量过大等短板，校方正联合空客研制兆瓦级全超导电机原型。此外，配套 ZEROe 开展了储氢研究及测试，目前技术成熟度达到 3 至 4 级水平。

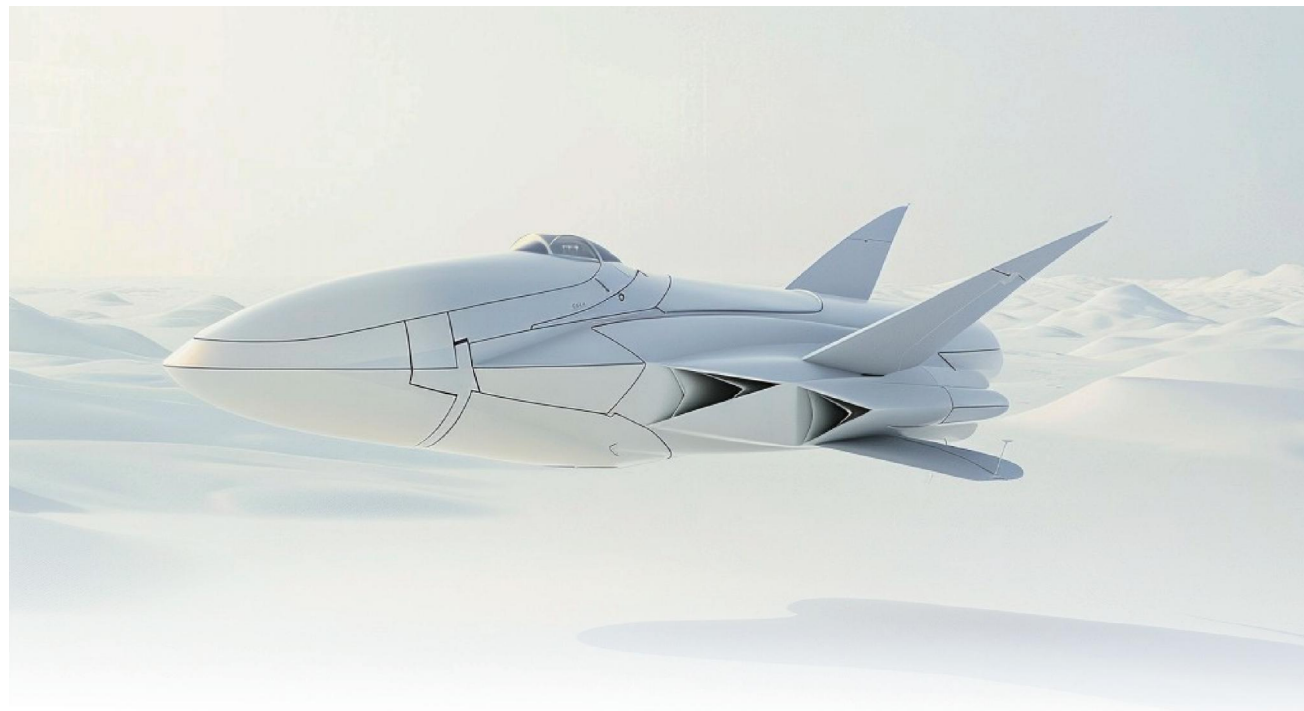
## 适航认证：欧美破冰铺路

FAA 在 600 千瓦级别电机适航审定上取得关键进展。对于 ZeroAvia 公司的 ZA601 电动发动机系统，FAA 已于 2026 年 4 月正式发布了该电机的专用条件，为其型号认证铺平了道路。ZA601 电动发动机于 2025 年 2 月获批 G-1 问题文件，FAA 与申请人就审定标准达成书面共识，明确了针对具体技术特点，应适用哪些适航规章和安全评估标准。2025 年 8 月，签署 P-1 特殊条件问题文件，记录了对该新型电推进技术的特殊条件草案。2026 年 4 月，正式发布专用条件，作为最终规则在《联邦公报》上公布，为电动发动机这一新颖设计确立了与现有适航标准等效的安全要求。

EASA 在电机取证方面已先迈出一大步。2025 年，赛峰 ENGINEus 100 电动机依据 EASA 于 2021 年发布的 SC E-19《电动 / 混合动力推进系统特殊条款》进行审定后，取得 EASA 型号合格证，是全球首款获得此认证的民用航空电动机。此次取证是 SC E-19 条款首次被应用于具体型号认证，目前，该条款已成为业界标杆，为小型及更广泛类型飞机的航空电气化铺平了道路。

此外，欧洲还在推进“颠覆性技术新型适航审定方案与符合性验证方法构建项目”，建立面向支线混动飞机高压配电系统技术与氢能机载燃料配套技术的新型适航验证体系，包括协同研发渠道、监管标准、通用模型、法规缺口、提升适航取证成熟度并制定 CRL 分级国际标准、起草适航法规等，旨在实现新技术取证周期与成本均降低 30%。

在氢电测试方面，荷兰航空航天中心持续推进测试设施建设，支持对氢燃料电池系统、电推进系统、液氢储存等进



▲ 来源：StockCake

行系统级或单个组件的测试，以满足航空安全与适航认证要求。

总的来看，兆瓦级电推进动力离我们越来越近，未来三年将是混电推进从验证到定型的关键窗口，氢电推进则处于技术爬坡期。GE、普惠、罗罗等传统航发巨头的密集验证，ZeroAvia、H2FLY 等初创企业的快速突围，EASA、FAA、CAA 等监管机构相继为电推进适航“破冰”，产业变革加速推进，主要呈现以下四方面趋势：

一是混电先行与氢电行远。混电推进凭借对支线涡桨平台（如萨博 340B、ATR）的直接改装能力和较低技术风险，将于 2027 年前后率先实现首飞与验证，成为近期可落地的现实选择。氢电则瞄准更远的全飞行阶段零碳目标，GE/Avio Aero 的 2MW 混电验证、空客 ZEROe 的 4×2.4MW 全超导电机等项目正加速攻关，将在 2030 年后释放更大潜力。

二是巨头与初创携手模式。传统航空巨头提供系统集成、适航经验与平台资源，初创企业提供高功率密度电机或燃料电

池核心技术，将成为兆瓦级赛道的主流研发范式。未来三年，竞争焦点将不再聚集于能否造出兆瓦级电机，而在于能否以适航级的可靠性将其配备飞机并实现商业运营。

三是适航认证破冰。赛峰 EngineUs 100 电动机获 EASA 全球首张航空电动机认证，ZeroAvia 获英国 CAA 全球首个氢电推进设计机构批准（DOA），FAA 也为 600kW 电机发布专用条件。监管机构已正式为电推进适航铺路，为产业化扫清关键制度障碍。

四是欧美推进新能源产业链布局。欧美以 NASA 项目、“清洁航空”计划等国家战略、产业政策与跨国项目为顶层设计，牵引 GE、雷神、空客等巨头主导攻关，在“子系统—新能源发动机—测试—适航”等主要环节形成系统化布局与产业闭环优势，试图在全球航空电推进新兴赛道上建立起先发壁垒。

▼ 图 2 | EngineUs 100 电动机



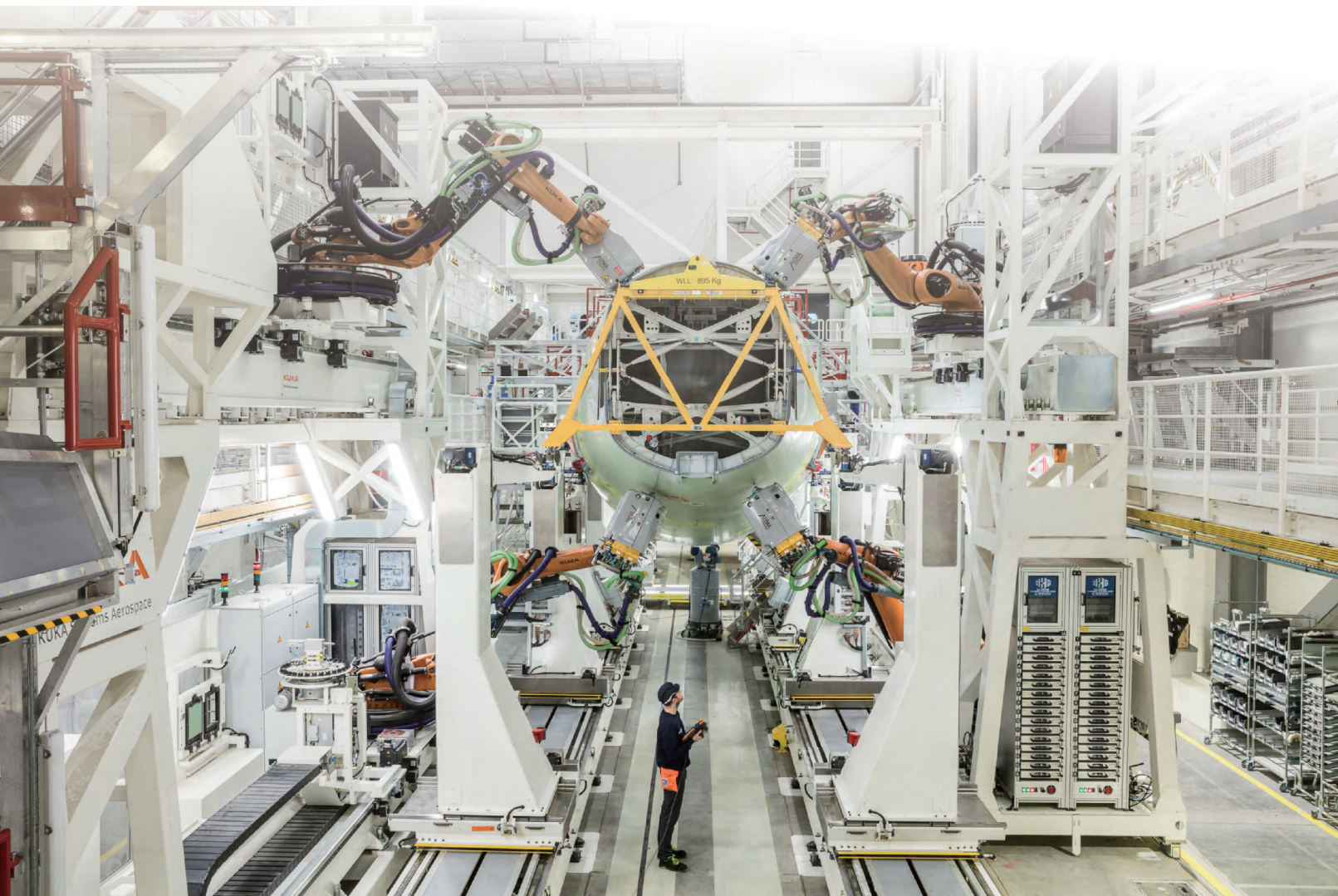
# 德国民用航空产业的承压复苏与前瞻布局

文 | 王泽溪 编辑 | 庄敏

当前全球航空航天产业持续受到供应链瓶颈与地缘政治冲突双重冲击，德国作为欧洲航空制造核心区域，产业链整体承压明显。空客窄体客机产能爬坡进度不及预期，发动机短缺、零部件质量问题、地缘冲突引发的油价与通胀波动，持续制约产业复苏。但利勃海尔、迪尔航空、

MTU、瑞卡罗等核心一级供应商并未放缓发展节奏，全力化解短期产能瓶颈、修复供应链韧性的同时，围绕空客下一代单通道飞机（NGSA）、波音新机替代方案开展长周期技术布局，通过技术迭代、架构升级、材料革新储备未来产能，行业整体增长信心稳固，将持续重塑全球民用航

▼ 来源：空客官网



空制造业竞争格局。

## 产业承压

现阶段德国民用航空航天产业核心任务是全力配合空客推进供应链产能扩容，同时业内正为空客 2030 年前后推出的下一代单通道飞机（NGSA）开展实质性前置筹备工作，兼顾短期产能攻坚与长期产业布局。

空客持续推进产能提升计划，目标是 2027 年底前将 A320neo 系列飞机月产量提升至 70 ~ 75 架。但产能落地进度不及预期，2026 年前 4 个月空客仅交付 136 架 A320neo 系列飞机，月均交付量仅 34 架，发动机供给不足的核心短板充分凸显。此外，2025 年底暴露的供应商质量问题，导致前机身壁板需返工返修，进一步拖累了交付进度。反观 2025 年，空客 A320neo 系列飞机月均交付量超 50 架。除主力窄体机系列外，空客还计划大幅提升其他机型产能，其中 A220 飞机月产量目标提升至 13 架，A350 飞机产能也将扩容，预计 2028 年率先实现月产 12 架，后续或将进一步上调产能。

作为空客起落架、飞控系统、作动器及电子元器件核心供应商，利勃海尔全力配合空客产能目标，但公司自身供应链运营依旧举步维艰。地缘冲突持续为行业产能提升增添不确定性，业内企业风险应对策略分化，部分企业稳步推进产能建设，部分企业选择保守观望。目前全行业尚未针对严峻市场环境充分研讨产业储备方案与供应链韧性提升策略，行业风险防控体系仍待完善。企业压力主要集中于二三级小型配套供应商，这类企业掌握航空产业不可或缺的特种工艺，但普遍财务抗风险能力薄弱，部分关键小微企业需依靠一级供应商全额资金扶持才能维持运营、保障

配套稳定。对此，利勃海尔认为行业需务实研判现有产能规划的合理性，若无调整方案，全产业链将全力保障空客交付需求。

迪尔航空面临与利勃海尔相似的供应链困境。依托成熟的机舱内饰业务布局，迪尔航空已提前完成产能储备，现有工业产能尚未完全释放，可承接空客未来增量订单。但行业供应链韧性尚未完全修复，下游供应商交付履约能力普遍不达标，且供应商规模越小，抗风险、保交付能力越弱。尽管部分供应链环节有所好转，但企业仍需频繁主动介入生产、追赶进度，最大限度降低对空客整机交付的影响。为优化供应链管控，迪尔航空对采购体系进行重大调整，整合业务部门与战略部门，搭建统一职能单元，提升供应链信息透明度，实现供应瓶颈的提前排查与预判。

## 细分赛道态势

航空发动机制造商 MTU 同样面临供应链发展不均衡的问题，项目运行状态随时间动态变化，年度间稳定性差异显著。作为普惠在国际航空发动机公司（IAE）联盟的合作方，MTU 当前深陷 GTF 发动机交付分歧。当前，普惠与空客就 2026 年度 PW1100G 齿轮传动涡扇发动机交付数量存在较大争议，空客认为当前发动机交付量远未达到合同约定标准。2025 年底，IAE 联盟全力冲刺发动机交付，助力空客完成年度目标。2026 年普惠工作重心则转向在役机队运维服务，重点缓解航班非计划停飞问题。目前行业整体发动机存量紧缺，产能扩张速度无法匹配市场需求，供需缺口持续存在。

飞机座椅赛道整体态势相对稳健。总部位于施瓦本哈尔的航空座椅厂商瑞卡罗（Recaro）2025 年营收同比增长 24%，营收规模首次恢复至疫情前水平，



▲ 来源：Aerospace Manufacturing and Design

2026 年依旧延续稳健增长态势。尽管中东部分航司考虑暂缓投资，但北美、欧洲、亚洲客户的新机装机、出厂装配、客舱改装项目均稳步推进，同时阿联酋航空等中东航司利用机队停飞窗口期，加速开展客舱翻新升级。受航空座椅长生产周期特性影响，当前新增投资决策对产能的拉动效果最早将于 2027 年显现，老旧飞机退役提速仅会小幅影响翻新业务，不会对行业造成即时冲击，当前市场整体产能仍处于紧缺状态。

据瑞卡罗市场测算，2025 年全球航空座椅市场规模约 31 亿美元，预计 2030 年将增至 50 亿美元，增长动力主要来源于高端座椅产品需求扩容。依托现有订单与潜在储备订单，企业商务舱座椅营收占比将由当前 20% 提升至 40%。现阶段，霍尔木兹海峡通航波动引发的油价、化工原料价格上涨，尚未对座椅、内饰配套企业的供应链、主营业务及客户需求造成直接冲击，但高度依赖石油基原材料的迪尔航空，未来或将面临供应链承压风险。若中东局势持续恶化、航司复苏不及预期，2027 年行业增长态势或将受到一定影响。

整体来看，行业多重挑战之下市场需求依旧旺盛。MTU 整机制造与 MRO 业务订单饱满，核心源于 PW1100G 在役机队的大规模修复需求。长期来看，即便 GTF 发动机专项修复工作量回落，全球在役机队规模持续扩张仍将稳固 MRO 订单基本盘。同时，高门槛的技术与资金要求，让竞争对手新增 MRO 产能落地难度极大。即便未来老旧飞机退役提速，MTU 仍可通过二手发动机零部件转售持续创造收益。

### 转型突破

迪尔航空的业务增长高度绑定空客新机交付节奏，2008 年收购的空客劳普海姆内饰工厂，奠定了双方长期深度依存的合作基础。相较于空客，波音客舱内饰业务垂直整合程度极高，自主产能充足，迪尔航空拓展波音配套业务的空间有限。对此，企业聚焦波音非自研客舱配套业务，同时布局海外产能、拓展全新合作版图。迪尔航空在墨西哥克雷塔罗新建工厂，既可以有效控制生产成本，也能挖掘远期增长潜力，该区位已

被波音认定为零部件配套优选产地。除此之外，企业持续推进与巴航工业的合作扩容，丰富客户结构。

迪尔航空墨西哥工厂初期承担 A220 客机客舱行李架生产任务，受产品性能优化、结构重新设计影响，项目进度有所延后。企业表示，需优先完成产品技术打磨与工业化量产验证，待技术完全成熟后再推进产线迁移，目前 A220 行李架仍由劳普海姆工厂生产交付。空客 A220 系列及未来 A220-500 加长版机型，将成为企业重要的增长极，现阶段迪尔航空尚未涉足 A320neo 系列行李架制造业务。

利勃海尔则依托新项目研发持续挖掘增长动能。2024 年，空客选定利勃海尔为 A320 系列研发全新集成式飞控计算机（IFCC），该设备计划 2028 年配套全新量产 A320neo 飞机，依托 NGSA 机型迭代规划，该产品将拥有约 10 年稳定量产周期。企业将以该项目为技术基底，推动飞控计算机技术多机型适配，同时积极备战下一代单通道飞机项目，抢占新机配套份额。在新机增量领域，利勃海尔全力推进波音 777X 折叠机翼作动器量产，项目初始年产量 25 套，后续将逐步提升至 50 套，支撑机型 2027 年初交付目标落地。

与此同时，各家企业持续加码新技术、新场景研发。瑞卡罗在国际飞机内饰展推出可识别 90 种语言的语音控制座椅概念产品，同时研发座椅集成扬声器技术，优化乘客出行体验，目前仍在攻关主动降噪、音质调校等技术细节。行业研发复杂度提升，也带来了新的交付难题，适航认证周期冗长、配套产品交付滞后，已成为整机交付延误的重要诱因。为破解认证瓶颈，瑞卡罗疫情期间自建碰撞测试实验室，年均完成 500 次测试，为企业产能释放与高速增长提供核心支撑。

### 未来布局

空客下一代单通道飞机、波音 737 MAX 替换机型，已成为德国航空配套企业的核心布局方向。不同细分领域研发周期差异显著，利勃海尔飞控、起落架等系统产品研发周期漫长，迪尔航空客舱部件研发节奏相对宽松，而 MTU 发动机研发则高度依赖空客最终技术路线选型，核心争议聚焦开式转子与传统涵道式技术路线。

整机厂商普遍希望尽快推出全新窄体客机，但新机落地节奏完全取决于航空发动机技术成熟度，行业决策需兼顾技术可行性与整体工业战略。未来全球窄体客机产能将迎来跨越式提升，空客、波音月产能均有望冲击 100 架，高量产需求下，双源供应体系将成为保障供应链稳定的核心关键。

针对下一代动力技术路线，MTU 持稳健审慎态度，更看好迭代成熟的涵道式发动机方案，认为开式转子发动机的性能增益无法覆盖技术风险，且会大幅改动整机设计，适配成本过高。目前 MTU 联合普惠启动新一代 GTF 发动机研发，在现有成熟架构基础上迭代升级，最大程度规避技术风险。行业普遍认为，窄体机动力作为企业核心支柱业务，可靠性与成熟度优先于技术激进迭代。

利勃海尔积极挖掘新机设计趋势带来的增量机遇，依托罗罗 UltraFan 80 验证机齿轮箱研发经验，迭代开发适配新一代窄体机的 UltraFan 30 小型化齿轮箱，积极切入航空发动机供应链领域。同时，针对未来窄体机更长、更薄、更轻量化的机翼设计趋势，结合机场机位通用适配要求，大力推广 777X 折叠机翼作动器、新一代电动作动系统，抢占新机配套市场。

迪尔航空则从组织架构与技术研发两个维度，同步推进 NGSA 项目配套筹备工



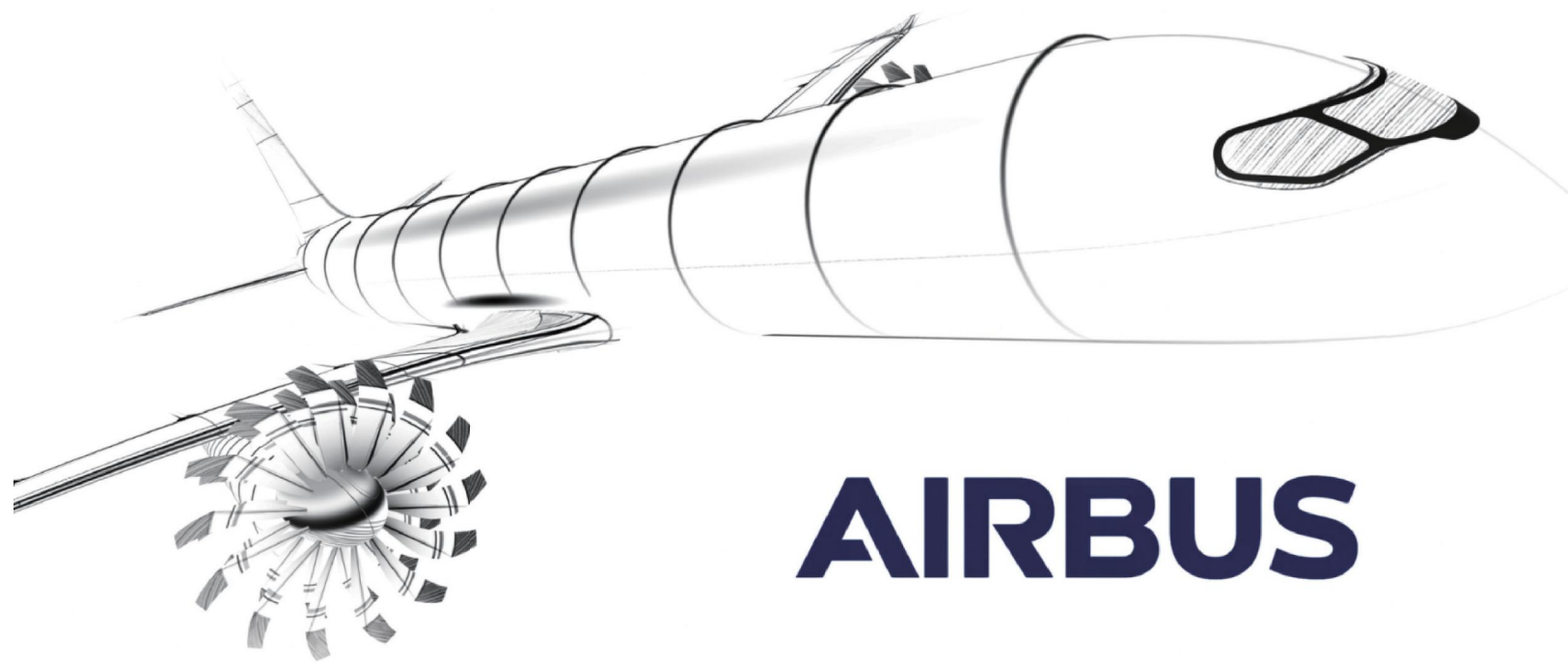
▲ 来源：Liebherr 官网

作。公司正全力推进内部流程数字化转型，引入人工智能技术赋能生产研发，搭建可适配多家主制造商（OEM）的数字化核心体系，实现自有工艺、研发方法、生产工具与一级供应商体系的无缝对接。技术层面，公司全面梳理核心战略业务，从成熟量产产品中提炼、迭代新型配套技术。目前，迪尔航空正面临关键技术路线抉择：是延续成熟的蜂窝夹层结构工艺，还是全面切换热塑性复合材料制造方案。

综上所述，当前德国民用航空航天产业正处于产能爬坡与供应链脆弱性博弈的矛盾发展周期。一方面，市场对新机型的需求依旧强劲，空客等整机厂正极力推动窄体客机产能向历史新高爬坡（如 A320neo 计划在 2027 年底前达到月产 70~75 架）。另一方面，发动机供应短缺、零部件质量复检以及中东局势升级带来的高通胀与油价波动，彻底暴露了二级、三级中小供应商财务稳定性弱、抗风险能力不足的底层短板。现阶段产业增长瓶颈并

非订单匮乏，而是下游供应链保障能力不足，倒逼一级供应商通过资金扶持、架构重组、体系优化等方式提升全链条韧性，缓解“有单难产”的行业痛点。

在化解短期产能危机的同时，德国航空企业开启长周期双轨布局，兼顾现有机型产能释放与 2030 年后下一代窄体客机技术迭代。各核心企业形成差异化战略路径：MTU 坚守成熟涵道式发动机迭代路线，规避激进技术风险；利勃海尔依托作动、飞控、齿轮箱技术积累，适配未来机翼设计革新趋势；迪尔航空聚焦数字化转型与新材料替代，打造客舱配套核心竞争力。本轮技术选型与前置研发布局，不仅将决定各家企业的新机配套份额，更将深刻重塑未来数十年全球民用航空制造产业格局。



▲ 来源：空客官网

## eAction: 空客下一代窄体机计划出炉

文 | 杜婷 编辑 | 庄敏

对于何时启动和推出新一代窄体客机，近年来空客始终没有停止过探索和实践。研发新一代继任 A320 系列飞机的新机型对于空客来说远非一次简单的产品更新，更多的是对新技术的战略选择，这种选择牵一发而动全身。为此，过去几年间，空客与合作伙伴开展了大量合作，从氢能、混电推进、开式转子发动机到“明日之翼”，通过不断的技术迭代和战略调整，一些技术路径被搁置，一些正在加速推进。在此基础上，空客下一代窄体客机的雏形正逐步形成。

在 2026 年 7 月的范堡罗国际航展上，空客首席执行官傅里正式对外宣布，一个内部代号为 eAction 的下一代单通道客机项目将在 2030 年左右正式启动，并将成为 A320 系列飞机的继任者，服务于单通道客机市场。

## 被叫停的新能源项目

2020 年 9 月，空客发布了名为 ZEROe 的氢能飞机项目，并表示最快将于 2035 年开始向客户交付使用氢能源的零排放商用飞机。ZEROe 氢能飞机项目包括三个子型号，一个外观类似于传统的涡轮喷气发动机机型，但机身更长，载客量为 120 人到 200 人，航程超过 3500 公里；第二个是使用涡轮螺旋桨发动机的支线飞机，载客量为 100 人左右，航程为 1800 公里；第三款概念机采用翼身融合的方案，航程可达到 3700 公里。翼身融合的构型可以灵活设计客舱布局与氢燃料存储，载客量可达到 200 人左右。

此后，空客通过各种形式的合作，利用美国和欧洲发动机制造商的专业能力推动氢燃料技术向前发展。同时，空客还与多方围绕基础设施和产业链建设等开展合作探索。在氢气基础设施建设方面，空客与多方围绕氢气的生产、存储、运输和加注技术等开展了一些技术研究，并先后与亚洲、欧洲和北美洲的多个机场签署协议，计划在这些机场建设加氢站。但显然，从传统的航油到氢能，企业更多的时候只能解决技术难题。正如国际航空运输协会指出的那样，若政府不主导投资，氢能飞机最终只能沦为“纸上蓝图”。

最终，2025 年 2 月，空客正式对外宣布，由于受到氢能技术成熟度不够、相关产业链和基础设施尚未成熟等一系列因素的综合影响，公司决定将氢能飞机问世

的时间从 2035 年推迟。与此同时，空客还暂停了于 2024 年启动的“City Airbus NextGen”项目，即空客“空中出租车”项目中的最新型号。从空客接连暂缓和叫停新能源飞机项目不难看出，一方面新能源的使用绝非一家企业所能主导，它需要整个产业链乃至国家、地区的大力支持与配合。另一方面，站在航空业产业格局重塑的关键时刻，空客选择了将更多资源投向传统领域。

## “是改进而非颠覆”

在接受《航空周刊》采访时，傅里表示，经过前期和供应商、合作伙伴开展了大量工作，包括多技术路线对比、项目论证、仿真测试等后，当前空客对于下一代窄体客机制定的技术方案是“改进而非颠覆”，将会主要围绕气动设计、动力系统、新材料等方面对下一代窄体客机进行改进升级。设定的核心目标是，相比在役 A320neo 系列飞机，燃油消耗降低 20%～25%，并且可以全面兼容 100% 可持续航空燃料（SAF）。

对于战略的调整，傅里也作出了回应。他表示，空客并没有放弃使用氢能技术，前期在 ZEROe 氢能飞机项目上的很多技术探索仍将被应用在下一代窄体客机上。换言之，空客只是调整了对氢能技术的商业化应用节奏和使用场景，未来将继续把氢能技术应用在 100 座级以下的产品市场，但主要是出于长期技术储备的考虑。

在项目推出时间上，空客计划能够在 21 世纪 30 年代后期将新一代机型投入商业运营。公司认为这是一个“可实现的”时间节点。根据空客早前的市场预测，21 世纪 30 年代左右，全球市场将有一批窄体客机面临退役，这个时间点与空客下

一代窄体客机预计推出的时间刚好吻合。作为新飞机最重要的动力系统，空客计划在 2027 年明确最终的发动机选型。

此外，由于供应链的稳定性已经影响到了当前在役飞机的产能提升工作，因此要研发新机型，一个十分重要的工作就是提高供应链企业的同步性，并赢得供应商的支持。对此，傅里在接受《航空周刊》采访时也表明，如果空客率先启动下一代飞机的研发，意味着全球优质的供应商资源将有望向空客倾斜，这将更有利于空客提前锁定核心供应商的产能和研发资源。

同时，空客还指出，伴随着新一代

## 明确多项关键技术研发

在 2026 年 7 月的范堡罗航展上，空客与多家合作伙伴不约而同地围绕下一代窄体客机项目公布了多项关键技术的研发计划，其中包括 RISE 项目、“明日之翼”计划、Switch 项目、未来供应商协作项目等。

动力系统的选择是空客下一代窄体客机项目中最受业界关注的一个项目。目前 CFM 国际公司的开式转子发动机项目和普惠的 GTF 齿轮传动混动方案都在空客的备选方案内。

2021 年，CFM 国际公司正式开始



▲ 来源：汉莎航空

机型的还有更加先进的数字化生产体系，产线将大规模应用创新技术，大幅提升窄体客机的生产效率。由于空客目前手握的现役 A320neo 系列飞机的订单众多，即便推出新一代窄体客机，在相当长的一段时间里，这两款机型将在生产线上同时进行生产，因此新技术的应用将有望同时提升这两款机型的交付速度，以满足全球航空公司机队更新的需求。

启动 RISE 项目，并旨在开发一系列颠覆创新技术以推进新一代开式转子发动机的研发。2024 年，RISE 项目开始了首轮风洞测试，试验采用五分之一缩比演示发动机，并将其安装在同比例缩小的机翼上，以评估发动机的空气动力学和声学特性，收集巡航状态的高速空气动力学数据，由此校准数值工具并评估安装方式对风扇性能的影响。

单级开放风扇发动机是 RISE 项目中的关键核心技术，其涵道比是未来普通发动机的 5 倍以上，风扇叶片由碳纤维复合材料制成。但是仅靠开放风扇技术难以大幅降低油耗，因此 RISE 项目还研发了轻量级、紧凑型的发动机核心，搭载了更先进的冷却系统和耐高温材料，同时还能够兼容可持续航空燃料、氢燃料，以及 GE 正在和美国国家航空航天局共同合作研发的混合电力系统。同时，RISE 项目还采用了变循环发动机设计技术，这项技术可以根据需要调节涵道比，比如在飞机起飞阶段提供更大的推力，在巡航状态下可以转换为更大的涵道比。

自 2021 年项目启动以来，围绕开放式风扇、紧凑型核心机、混合电力推进系统等先进发动机架构，项目已经完成了近 500 项测试和超过 3000 个耐久循环，并在三大核心技术攻关方向上取得了新的突破。一是完成了关键设计评审工作，即开放式风扇和紧凑型核心机关键模块评审工

作都已完成，相关设计概念得到进一步确认。二是耐久性测试前置工作已经开展。在新技术研发早期启动耐久性测试将有助于更早优化硬件设计。三是混合电力地面测试稳步推进。目前 GE 正在和赛峰飞机发动机公司持续开展相关地面验证工作，项目进展符合中期承诺。同时，两家企业还分别与美国国家航空航天局、美国能源部、法国民航研究委员会、德国航空航天中心等建立合作关系，加速推进各项测试工作。

随着系统的逐步到位，未来 10 年内，多项地面及飞行试验将陆续启动。飞行测试对于深入了解真实飞行场景下的发动机性能、安全性、噪声及空气动力学表现至关重要，这也是发动机研发的关键一步。根据已经公开的信息，未来早期的项目产品将在 A380 飞机平台上进行测试工作。

eAction 项目的另一个动力选项则是采用混合动力的普惠 GTF 发动机，其

中关键技术是由空客、MTU 航空发动机、GKN 航空航天、普惠、罗克韦尔·科林斯公司等合作的 SWITCH 项目。该项目是在 GTF 发动机基础上验证混合电技术，并结合燃烧侧水蒸气注入技术。这项技术被业界称为微混合化技术，将在一台 20 兆瓦级的普惠 GTF 发动机中，使用 1 兆瓦的混合电力系统，用于滑行、起飞增功以及辅助涡轮发动机处理瞬间工况等。研发团队希望采用了新技术的 GTF 发动机可以实现 20% 的燃油效率提高，降低 50% 的二氧化碳和氮氧化物排放。根据项目设想，电气设备将安装在全尺寸 GTF 发动机外部，电动发电机将通过齿轮连接至两根涡扇传动轴。系统既可以从传动轴获得能量并为电池储能，也可以在起飞阶段向涡轮提供动力。

在范堡罗国际航展上，科林斯公司宣布已经完成了用于混电 GTF 发动机的电子系统初始集成测试，近期将硬件运往空客在德国的工厂用于飞机级集成测试。根据计划，SWITCH 项目将在 2027 年年初完成，同时欧洲净洁天空项目第四轮计划资金还在 2026 年年初划拨了该项目的后续项目，用于把电力传动子系统集成到 GTF 发动机进行地面测试，目标是在 2029 年年底达到技术成熟度 5 级。后续，混电版的 GTF 发动机也将在 A380 飞机上进行飞行测试。

除了动力系统之外，空客认为创新的机翼设计将继续助力飞机燃油效率的提升，于是早在多年前，空客就启动了一个名为“明日之翼”（Wing of Tomorrow）的项目。

“明日之翼”项目的研发重点是开发可高速生产的大展弦比复合材料机翼技术，以降低飞行阻力。根据空客多年前公布的下一代飞机技术路线图，新飞机的机翼将采用轻量化复合材料，其中

碳纤维的使用占比将达到 60% 以上，同时还将采用智能折叠技术，飞机翼展可达到传统机型的 1.5 倍，气动效率提升 15% 以上，同时适配现有机场设施。

在 2026 年范堡罗国际航展上，“明日之翼”项目时间表已更加明确。空客正式宣布将启动为期 3 年的“明日之翼”翼梢延长段设计、制造与飞行验证计划。全尺寸翼梢延长段将在英国菲尔顿的机翼技术开发中心总装后，转移至图卢兹，集成于 A321neo 飞行测试平台上。该测试将获取不同长翼几何在真实飞行环境下的气动性能、载荷响应、气动弹性特性及其对飞机操纵品质的影响，为下一代大展弦比机翼方案选择提供依据，首个构型计划于 2027 年下半年开始试飞。空客将在 A321neo 上试飞多种 4 ~ 5 米级固定翼梢延长段，重点评估气动性能、载荷、操纵品质以及大展弦比方案的可实现性。

尤为值得一提的是，在 eAction 项目中，空客还想通过名为“未来供应商协作”（FUSE）的计划，创新与核心供应商的合作模式，进一步加强双方的深度捆绑。对于这项计划，目前空客并没有透露过多细节，但表示想通过创新的合作模式，让更多核心供应商、潜在供应商等参与更深层次的技术协作。所有这些探索目标都是直指产能提升。根据空客的规划，到 21 世纪 30 年代，其窄体客机的月产规划是 75 架至 100 架，要实现这个目标，供应商的配合和支撑极为重要，因此在新一代机型尚未推出之时，空客已未雨绸缪规划创新供应链合作模式，此举值得业界持续关注。

▼ 来源：CompositesWorld



# 航空结构业的并购与重组

文 | 陈济衍 编辑 | 庄敏

▲ 来源: aerodinecomposites.com

二十年来,航空结构行业的利润率一直落后于航空航天产业链中的其他领域。内部采购的增加、“超级一级供应商”的消失以及疫情后的交付压力正在重塑供应链,这些都对行业产生了深远影响。

自 2004 年英国 Counterpoint 市场情报公司开始追踪航空结构行业以来,一个现实情况始终没有改变——航空结构行业的盈利能力往往难以达到业内其他细节领域的平均水平。为了打造更具韧性的企业,不同企业先后经历了收购、出售、合并、分拆等一系列操作,但可持续的回报却难以实现。

航空结构包括机翼、机身、尾翼和

发动机短舱等,是复合材料价值最高的应用终端市场之一。然而,结构生产企业面临着一系列严峻现实问题,尽管材料、自动化和工艺方面取得了进步,但航空结构供应链的很多环节仍然面临持续性压力。

## 极具挑战的商业模式

航空结构行业面临诸多挑战的根源在于结构件领域的商业模式。与发动机或飞机系统不同,航空结构业的售后市场通常较为有限。结构件交付后,高利润的重复性销售机会远少于发动机或其

他飞机系统,航空公司通常会尽可能选择维修而非更换。因此,航空结构件的需求高度依赖飞机的生产交付速度。

行业资产基础往往也更加专业化。一条大型飞机结构的生产线通常是围绕特定飞机项目进行设计、认证和设备配置的。将工作从一个地点转移到另一个地点是可行的,但实际上成本高昂、耗时漫长,并且受到诸多审核认证要求的严格限制。这些限制使得合理化产能或实现不同生产设施之间的协同变得困难。

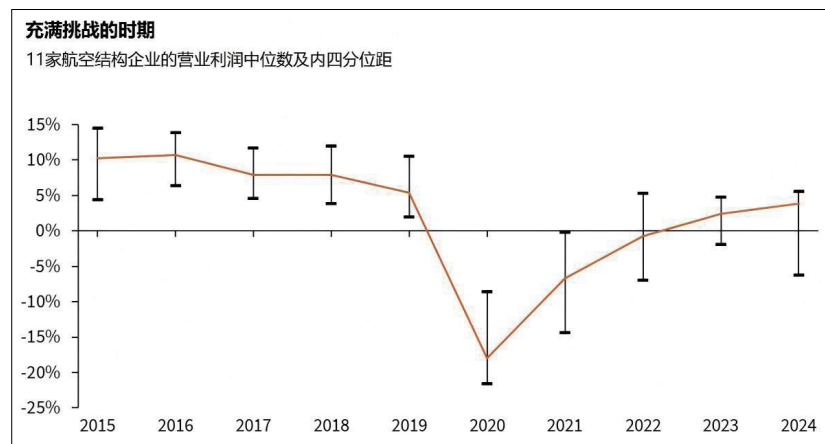
与航空航天其他细分领域相比,航空结构件的知识产权密集度往往较低。相当一部分知识产权掌握在飞机原始设

备制造商或原材料供应商手中。但这并不意味着航空结构供应商缺少专业知识和技术门槛。事实上,制造大型、高质量且能够通过认证的结构件是一项巨大的挑战,企业通常需要投入大量资金和设备来满足原始设备制造商的要求并提升自身技术水平。然而,由于缺乏知识产权,与拥有更多专有技术、更雄厚售后市场或更高转换成本的企业相比,许多结构供应商难以获得同等价值回报。

更广泛的行业趋势加剧了商业模式的结构性压力。在 2020 年之前,主要原始设备制造商持续不断的成本削减措施已经压低了整个供应链的利润率,并增加了营运资金需求。疫情导致飞机产量急剧下降,由于航空结构供应商严重依赖新飞机生产,因此对其打击尤为沉重。许多公司裁员,导致关键技能人才流失。当新飞机交付开始回升时,供应商不得不在劳动力短缺、通货膨胀、原材料供应受限和资产负债表脆弱的背景下重建产能。

样本包括财务报表公开透明的主要航空结构企业,以及单独报告航空结构业务板块的企业。图 1 所示指标通常为营业利润,但各公司在具体报告定义上存在一些差异。由于数据可获取性的限

▼ 图 1 | 部分航空结构制造商的营业利润率中位数。  
来源: Counterpoint 市场情报公司



制，样本企业略微偏向欧洲，但也包括北美和亚洲的企业。

疫情前，样本中企业的营业利润率中位数通常在个位数高位到两位数低位之间徘徊。航空航天行业的利润率因服务市场不同而存在较大差异，但总体而言低于行业平均水平的 15% ~ 20%。疫情后，利润率急剧下降，大多数情况下甚至跌至负值。随着生产率的提高，利润率有所回升，但仍有部分企业面临较大压力。

### 消失的超一级供应商

盈利能力疲软导致了行业格局重塑。21 世纪初，市场上存在着一批大型独立企业被称为“超一级供应商”（Super Tier 1s）——这些供应商拥有足够的规模、工程技术和投资能力来承接大型飞机结构制造。2004 年，市面上六大超一级供应商包括：阿莱尼亚、古德里奇、胡雷尔·伊斯帕诺、川崎、三菱和沃特。2005 年势必锐航空系统公司正式成立，并由此成为了第七家超一级供应商。这

一时期恰逢波音 787 和空客 A350 的投产，两个项目都大量依赖超级一级供应商的外包业务，而原始设备制造商则扮演着集成商的角色。

过去 20 年间，超级一级供应商的格局发生了巨大变化。一些公司退出了市场，另一些则被更大的集团收购。一些公司试图精简业务组合，却发现项目转移的成本和复杂性远超预期，重组难度也更大。如今，超级一级供应商所剩无几，预计很快将从市场中消失。

同时，结构内化趋势也愈发强烈。原始设备制造商的战略也发生了变化，从二十年前强烈推崇的外包局面，逐渐转向将关键结构制造能力重新纳入自己的业务版图进行直接控制。

对于空客而言，推行这一战略的部分措施是将 Stelia 与蒙图瓦德布列塔尼和南特工厂合并，成立空客大西洋公司，以及将 Premium Aerotec 并入空客航空结构有限公司。这两家公司都生产用于机身和机翼的大型部件，以及跨多个平台的其他关键机身结构能力。正如公司在 2023 年业务更新电话会议上所说：“简而言之，公司四年前就决定飞机结构是核心业务，因此空客决定采用‘自主研发’模式，而非纯粹的‘采购’模式，此举旨在为下一代飞机研制做好准备，因为飞机结构将集成更多功能。”

对波音而言，最大的转变是收购势必锐公司。波音于 2025 年 12 月完成了此次收购，将重要的生产能力重新纳入公司内部。与此同时，空客也接管了势必锐旗下的多个生产基地以及支持空客项目的工作包，包括位于金斯顿、圣纳泽尔、卡萨布兰卡、贝尔法斯特和普雷斯蒂克的业务。对波音而言，这种内部化趋势早已窥见端倪。例如，777X 飞机机翼由波音在华盛顿州埃弗雷特工厂制

造，这与最初 777 项目中外包给日本航空结构供应商联盟的做法截然不同。

如果对比二十多年前外包水平和如今的情况，就会发现外包的航空结构件价值稳步增长。随着波音与空客对势必锐收购交易的完成，并考虑到空客自身的业务，外包的天平正在向内部生产倾斜。而且，短期内内部生产的水平很可能会继续上升。

### 未来发展策略和适应措施

航空结构行业未来发展方向是什么？Counterpoint 认为有三个观点需要重点考虑。

首先，随着产量的提升，预计行业财务状况将持续改善。单通道飞机在疫情后已实现良好复苏，而此前增长滞后的双通道飞机目前也已反弹，预计未来几年产量将进一步增长。对于一个高度依赖产量的行业而言，这将带来一定的缓解。

其次，预计航空结构供应商将采取一系列策略来提升自身地位。Counterpoint 的分析表明，并不存在一种占主导地位的、一刀切的策略，而是高度依赖于公司的历史项目、地域分布和自身能力。一些企业，例如蒙大拿航宇公司，通过垂直整合取得了成功，掌控了从挤压件到成品装配的整个供应链。其他企业则专注于不同的生产技术或飞机部件。例如，ST 工程公司在复合材料和短舱领域取得了成功。还有一些企业尝试将劳动密集型工作转移到人工成本更低的地区，或随着时间的推移在合适的环节代替人工生产，以提高自动化程度。

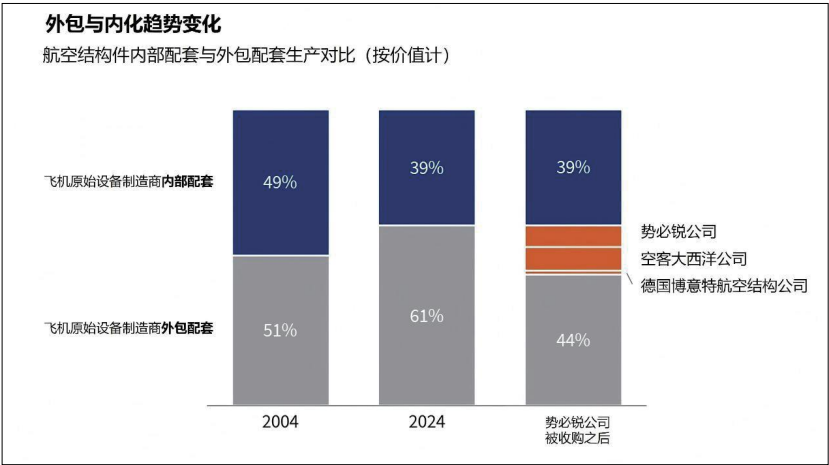
尽管预计未来会有更多工作转移到企业内部完成，原始设备制造商仍然有意愿继续外包大型项目。航空结构供应

复合材料行业应密切关注这些变化，因为它们既带来风险也带来机遇。未来的飞机很可能需要更多更先进的复合材料结构，而不是更少。

商仍然是专业知识、能力和投资的重要来源。对于像下一代单通道飞机这样的新项目而言，投资范围广泛且数额巨大，这一点至关重要。例如，萨博公司正在积极探索复合材料技术，以期在下一代飞机领域抓住机遇。

最后，预计并购将继续在行业中发挥作用，因为供应商需要调整和重塑其产品组合以保持竞争力，尤其是在业界翘首以盼空客和波音推出全新单通道飞机项目之际。

复合材料行业应密切关注这些变化，因为它们既带来风险也带来机遇。未来的飞机很可能需要更多更先进的复合材料结构件。虽然业内人士大多关注复合材料的应用方式和应用领域，但了解谁将负责复合材料的产业化、谁将投资建设所需的产能以及谁将从中获得可接受的回报同样至关重要。对于价值链上游的企业而言，这些变化会影响产品和工艺开发，以及行业内的采购决策。此外，它们还会影响企业选择技术合作伙伴的方式，以及这些合作伙伴在未来项目中可能扮演的角色。



▲ 图 2 | 按价值计算的航空结构内部采购与外部采购对比  
来源：Counterpoint 市场情报公司

# 支线为基 双域破局

## ——巴航工业亮眼业绩背后的增长逻辑

文 | 曲小 编辑 | 庄敏



▲ 来源：Business Jet Traveler

2026 年 8 月，巴航工业发布第二季度财务业绩报告，交出一份极为亮眼的成绩单。报告显示，公司二季度实现营收 22 亿美元，较 2025 年同期增长 23%，调整后净利润同比增长超 38%，储备订单价值攀升至 345 亿美元，刷新历史最高纪录。从交付量来看，得益于均衡生产计划的有

序推进，公司二季度共交付 65 架飞机，是近 16 年来第二季度最佳交付表现。在供应链问题日益突出的当下，巴航工业上半年已累计交付 109 架飞机，同比增长 20%。这一系列亮眼的数据背后是巴航工业近两年来不断根据市场需求，在深耕支线飞机市场的基础上，持续迭代创新、精

准布局的必然结果。

### 均衡生产计划见效

根据巴航工业最新发布的这份财务数据，公司已经连续七个季度不停刷新营收纪录，储备订单数量也处于历史高位。这主要得益于公司商用飞机、公务航空、售后服务和防务航空等多个部门的共同努力。

在商用航空业务板块方面，第二季度巴航工业 E2 系列飞机屡屡斩获新订单，订单数已突破 500 架。在公务航空板块，得益于市场对飞鸿 300EV、领航 500E 和领航 600E 等新机型的强劲需求，公司二季度公务机交付量同比增长 18%，达到 45 架，储备订单增速达到 5%，储备订单价值超 78 亿美元，创下新纪录。尤为值得一提的是，尽管公务机交付量有所增加，但公务机业务板块的订单与交付比仍然保持 1:1 以上，市场需求可见一斑。同时，在交付量上升、定价改善、美国关税降低等多重因素作用下，公司公务机业务板块的毛利率从去年同期的 20.9% 增至 23.8%。

各业务条线订单的稳定交付是巴航工业业绩持续攀升的重要保证。对此，巴航工业在业绩报告中也指出，公司自 2023 年正式启动的“均衡生产计划”正在不断发挥积极作用。

一直以来，年底集中交付飞机、年初产能闲置的问题是行业通病。过去在产业链相对稳定的时候这个问题并不凸显，但近两年来产业链供应不足的问题让这一行业通病逐渐成为不可忽视的痛点。为此，巴航工业提出了“均衡生产计划”，旨在解决“前松后紧”的生产习惯，在确保生产质量的前提下稳步释放产能。

巴航工业的这一计划主要围绕三方面开展工作。一是通过精益制造压缩生产周期，推行“完美工位”现场改善体系，对

总装工序进行全流程优化。截至 2026 年，Praetor 系列公务机总装周期已从 2021 年的 18 个月缩短至 8 个半月，E-Jet 系列商用飞机总装周期压缩 27%。依托柔性混合总装线，可在同一条产线动态切换商用飞机与公务机生产，实现不同产品线产能错峰调配，最大化利用既有厂房与人力资源。二是推动供应链协同平抑，向一级供应商输出全年均衡的月度需求预测，替代以往年末突击加码的订货模式，配套搭建数字化供应链管理平台，对可能出现的核心零部件短缺情况进行提前预警，协调产业链配套企业同步平稳排产。三是对试飞、喷漆、内饰安装等后置工序进行前置排布，扩建喷漆中心与试飞准备设施，将大量准备工作平摊至上半年，避免年末生产资源挤兑。

从公司 2026 年上半年的交付情况来看，这一从 2023 年开始启动的生产计划已经开始收获成效。公司 2026 年上半年交付飞机数量较去年同比增长 20%，季度间交付量差距显著收窄，扭转了过去一季度生产低迷的情况。在此基础上，二季度报表中，巴航工业已提高了年度交付目标：商用飞机的交付目标为 80 ~ 85 架、公务机 160 ~ 170 架。2027 年至 2028 年，巴航工业计划将商用飞机的产能提升至 100 架。

### 客货机均实现销售突破

随着庞巴迪由于 C 系列飞机项目的战略失误，黯然退出商用飞机市场，曾经的竞争对手巴航工业已经毫无悬念地坐上了世界商用飞机市场的第三把交椅。与庞巴迪不同，巴航工业一直以来主攻支线飞机市场，未曾踏入干线飞机领域，稳健的发展风格也为公司赢得了更大的生存空间。

在 7 月的范堡罗航展上，巴航工业 E2 系列共收到了来自 3 家客户的 28 架订单，分别是 Abra 集团签署 20 架 E195-E2

飞机订单，西班牙加那利航空公司签署 5 架 E195-E2 飞机订单，卢森堡航空签署 3 架 E190-E2 飞机订单，同时这 3 项购机协议中还包含 30 架飞机的优先选购权，若客户权益全部行使的话，则意味着订单数将增至 58 架。在收获了这笔订单后，巴航工业 E2 系列飞机的确认订单数正式突破 500 架，全球 24 家运营商在役 E2 飞机超 200 架；同期巴航工业商用飞机储备订单总价值达 151 亿美元，产能储备覆盖近五年产量。

分机型来看，E195-E2 是 E2 系列的主力机型，累计确认订单 424 架，累计交付 169 架，未交付储备订单 255 架，附带选购权与购买权 253 架，订单占比与市场接受度均居首位；E190-E2 累计确认订单 65 架，累计交付 34 架；E175-E2 早期受美国支线航空“范围条款”限制，市场开拓一度受阻。但 2024 年 11 月，公司一举拿下美国航空旗下 Envoy 航空 90 架订单，为该机型史上最大单笔协议，预计今年第三季度启动交付。

巴航工业 E 系列货机的市场表现同样不错。在范堡罗航展上，巴航工业与 Azorra 签署 E 系列货机采购协议，该协议中包括 20 架 E 系列客改货飞机确认订单及 10 架优先选购权，总订单量最多可达 30 架。该协议也标志着 Azorra 正式进军货机租赁市场，成为首批承诺引进巴航工业 E 系列货机的租赁商之一。

2022 年巴航工业宣布正式启动 E 系列货机项目，最初有 E190F 和 E195F 两款产品，但在综合考虑市场、成本等因素后，E195F 项目被暂时搁置，公司将主要精力用于市场需求更大的 E190F 项目。2024 年 4 月 7 日，巴航工业首架客改货 E190F 飞机在巴西圣若泽杜斯坎普斯完成首飞。2024 年 7 月，巴航工业 E 系列货机 E190F 获得巴西国家民航局（ANAC）颁发的型

号合格证。两个月后，该机型获得美国联邦航空管理局（FAA）的适航批准。2025 年 2 月，E190F 获得欧洲航空安全局（EASA）的适航批准。2025 年 8 月，Bridges 航空货运公司接收首架 E190F，2026 年 3 月搭载货物，完成首次商业飞行。

巴航工业 E 系列货机的航程是大型涡桨货机的 3 倍，且载货体积可增加 40% 以上，与窄体喷气货机相比，E 系列货机的运营成本可减少 30%。E190F 业载为 13.5 吨。根据巴航工业预测，未来 20 年全球市场对于这一类型货机的需求约在 700 架左右，同时公司也乐观预测 E190F 和 E195F 将占据其中 100 ~ 200 架改装货机。在产能规划方面，巴航工业计划第一年客改货产能约在 5 架左右，之后将逐步提升至年产 12 架。后续如果有足够的市场需求，公司还将进一步提升客改货项目的产能。

### 公务航空与创新领域

在持续巩固支线飞机市场份额的同时，近两年巴航工业也加快了公务飞机产品的更新迭代以占据更多的市场。目前公司公务机与商用飞机交付比约 2:1。公务航空以高利润率、快增长和大交付量，成为支撑巴航工业整体业绩上行的稳固板块。

2025 年，公司全年公务航空营收 22.1 亿美元，同比增长 25%，占公司总营收约 30%；调整后 EBIT 利润率 12.0%，剔除美国关税影响后达 14.3%。全年交付 155 架公务机，创历史纪录，同比增长 19%，第四季度单季交付 53 架，刷新单季纪录。其中，14 架飞鸿 100、72 架飞鸿 300、39 架领航 500、30 架领航 600。

进入 2026 年，增势延续。二季度公务航空营收 7.25 亿美元，同比大增 32%，增速居各板块之首。二季度共交

付 45 架公务机，分别是 24 架飞鸿系列和 21 架领航者系列，占公司当季总交付数的 69%，调整后 EBIT 利润率剔除一次性因素达 16.1%。至此，上半年巴航工业已交付 74 架公务机，占全年 160 至 170 架指引中点的 45%。公司已将全年调整后 EBIT 利润率指引上调至 10% 至 10.6%，公司也提出希望在 2030 年前实现年产 200 架公务机的目标。

为了进一步巩固市场地位，巴航工业今年同时对其明星产品——飞鸿系列和领航系列进行了全新升级，推出了领航 600E 超轻型公务机、领航 500E 中型公务机和飞鸿 300EV 轻型公务机。领航系列公务机 2018 年推出市场，此次技术更新是这一系列产品问世以来首次重大升级。

全新领航 600E 和领航 500E 均搭载全新客舱管理系统，并全面升级机上娱乐与照明系统。新系统通过多种交互界面为乘客提供更直观的客舱环境控制，乘客可通过专属应用程序轻松调节温度、气流、灯光、视频及音频。在蓝牙音频和无线充电的加持下，乘客可尽享无缝互联体验。全新智能控制面板让座椅调节触手可及。语音控制与 RGB 氛围灯可供选装。客舱顶板经过重新设计，集成新一代顶部面板与空气循环系统。此外，两款升级机型还配备了更全面的航电套件，包括同级别机型中独有的全电传操纵系统和主动防颠簸技术，以及巴航工业增强视觉系统（E2VS）。为进一步提升飞行安全，两款机型还配备了冲出跑道情境感知与报警系统（ROAAS）。这些先进的技术可有效降低飞行员工作负荷，不仅让飞行更加平稳顺畅，也进一步拓展了可通达更多目的地的运营灵活性。目前，这两款机型都已经获得美国联邦航空管理局、欧洲航空安全局和巴西民航局的适航认证，预计 2029 年一季度开始实现商业交付。

飞鸿 300EV 是巴航工业 2026 年 7 月推出的升级机型，新增 Garmin 自动着陆系统、自动刹车、电传飞控方向舵系统，同时配套多项优化升级。目前，飞鸿 300EV 已完成全部试飞工作，预计 2026 年年底前完成适航取证工作，首批交付预计在 2028 年年末。

此外，巴航工业还在持续稳步推进电动垂直起降飞机的研制。2020 年 10 月，巴航工业宣布在美国成立名为“Eve 城市空中交通解决方案”的子公司，以加快开发电动垂直起降飞机计划的进程。2025 年 12 月，首架全尺寸无人驾驶电动垂直起降飞机（eVTOL）原型机在巴航工业位于圣保罗州的测试基地完成首飞。

截至 2026 年 3 月，这架原型机已完成 35 次飞行，累计飞行时长近 1.5 小时。飞机爬升至距地高度 140 英尺（约 43 米），并在各项测试条件下展现出稳定的飞行表现。初步结果显示，推进系统与电池性能均超初始预期，效率有所提升，噪音水平则保持在预测范围内且显著低于传统直升机。目前开展的飞行测试主要集中于低速运行（最高 15 节，约 28 公里 / 小时），以验证控制律、旋翼气动效率、热特性及推力模型。Eve 将继续推进测试计划，逐步扩展飞行包线，开展更高速度的飞行验证。根据计划，Eve 公司将制造 6 架原型机用于适航取证工作，并计划在 2027 年获得巴西民航局颁发的型号合格证，2028 年前投入商业运营。与此同时，巴航工业还在持续推动先进空中交通解决方案产品组合的发展，包括城市空中交通管理软件 Eve Vector，以及售后服务和运营支持平台 Eve TechCare，积极与监管机构及公私合作项目保持沟通，为未来飞机投入运营及市场规模化发展构建所需要的生态系统。



▲ 王脊梁 摄

# 我国民航业反内卷的政策路径研究

文 | 卢梦圆

编辑 | 林喆

近年来，随着中国民航业进入结构性调整期，“内卷式竞争”现象日益突出，表现为运力重复投放、价格战频发及资源配置效率低下。本文基于 2025 年行

业运营数据，剖析了“内卷式竞争”的具体表现、深层成因，借鉴欧美成熟市场经验，提出构建由约束型、引导型、市场型三类政策工具组成的框架，引导民航业从规模扩张转向价值创造，实现高质量发展。

## 民航业“内卷式竞争”的表现

2024 年 7 月，中央政治局会议明确提出“要强化行业自律，防止内卷式恶性竞争”；2025 年 7 月，民航局年中工作会议再次强调要“综合整治行业内卷式竞争”。“内卷式竞争”是指市场主体在固定资源约束下，陷入重复投入、价格战和低效扩张的低水平竞争，其典型特征是投入产出比持续恶化、过度依赖价格战、行业整体盈利能力下降。

当前，我国民航业的“内卷”主要体现在三个方面。

一是运力投放的低水平重复。在热门干线及国际航线上，“运力集中投放”现象明显。地方政府补贴加剧了这一趋势——以青海省为例，2025 年其民航发展专项资金增至 2.3 亿元，用于“吸引和增加重点航线的运力”。这种“以补贴换运力”的做法，虽推动了航班量短期增长，却削弱了航线网络的整体效率。

二是价格竞争加剧。2024 年国内经济舱平均票价同比下降 7.4% 至 758 元，2025 年进一步跌至 740 元。但“旺丁不旺财”现象突出——吉祥航空座公里收入同比下降 3.1%，春秋航空国内航线客公里收益同比下降 4.8%。国际航线同样承压，2024 年枢纽机场出境航班平均票价同比均下降约 35%。

三是资源配置效率下降。航班时刻和机场容量等核心资源受行政决策和地方政府干预影响，难以遵循市场效率原则。货运领域尤为明显：北上广深四大机场

货邮吞吐量全国占比从 2019 年的 51.4% 降至 2025 年的 46.3%，国际货邮占比从

| 机场类别 | 机场城市 | 2024 年<br>票价降幅 | 机场类别 | 机场城市 | 2024 年<br>票价降幅 |
|------|------|----------------|------|------|----------------|
| 国际枢纽 | 北京   | -36.80%        | 区域枢纽 | 武汉   | -31.60%        |
| 国际枢纽 | 广州   | -35.90%        | 区域枢纽 | 长沙   | -18.40%        |
| 国际枢纽 | 深圳   | -26.60%        | 区域枢纽 | 南京   | -27.00%        |
| 国际枢纽 | 成都   | -39.20%        | 区域枢纽 | 郑州   | -32.30%        |
| 国际枢纽 | 重庆   | -33.10%        | 区域枢纽 | 厦门   | -31.30%        |
| 国际枢纽 | 西安   | -27.00%        | 区域枢纽 | 青岛   | -25.20%        |
| 国际枢纽 | 昆明   | -18.60%        | 区域枢纽 | 海口   | -27.10%        |
| 国际枢纽 | 哈尔滨  | -22.60%        | 区域枢纽 | 沈阳   | -37.60%        |
| 国际枢纽 | 乌鲁木齐 | -21.70%        | 区域枢纽 | 贵阳   | -20.20%        |

▲ 表 1 | 2024 年枢纽机场国际出港票价变动情况 数据来源：OAG

| 排序 | 省市  | 国内航线 | 亚洲及地区 | 洲际航线 |
|----|-----|------|-------|------|
| 1  | 云南省 | 7.2  | 19.2  | 80   |
| 2  | 安徽省 | 8    | 20    | 30   |
| 3  | 广州市 | 5.5  | 30    | 80   |
| 4  | 深圳市 | 5    | 12.9  | 93   |
| 5  | 江西省 | 6.2  | 16    | 20   |
| 6  | 海南省 | 10.6 | 43    | 18   |

▲ 表 2 | 我国部分省市货运航线补贴标准（万元 / 班）数据来源：根据公开信息编制（2026）

81.4% 收窄至 71.0%。地方政府高额货运补贴（洲际航线最高达 93 万元 / 班）稀释了枢纽的规模效应，降低了全行业国际竞争力。

## 多重机制错配导致越竞争越低效

“内卷式竞争”的形成并非单一因素所致，而是政策、市场与评价体系多重

美国与欧洲在行业发展早期，同样经历过运力盲目扩张、价格战、航司大面积亏损的阶段，其后通过系统性制度重构走出了困境。

机制共同作用的结果。

首先是地方竞争放大低效供给。地方政府出于拉动区域经济、提升本地航空枢纽地位的考量，普遍倾向于以财政补贴吸引航司开辟航线。其副作用不容忽视：一是补贴标准缺乏统一规范，易引发地区间竞相加码——洲际航线补贴从 23 万元 / 班到 93 万元 / 班不等，相差逾 4 倍；二是航空公司决策逐渐脱离市场需求，转而依赖补贴维持生存，导致运力配置与真实需求脱节；三是缺乏补贴退坡机制，原本应为“临时措施”的补贴演变为长期制度性安排。

其次是航班时刻、机场容量和航权等核心资源仍主要依赖行政分配，并存在分配不合理等问题。现行时刻分配模式下，高效率航空公司未必能获得高价值时段，而低效率航空公司却可凭借历史持有量继续绑定优质资源。同时，将时刻与客座率指标挂钩，迫使航空公司在需求不足的市场提供折扣，引发价格战。此外，干支网络协调不足，支线机场过度依赖补贴，干线机场因时刻紧张难以有效承接支线客流等都会造成相关问题。分配中的地方干预，更使部分国际航线服务于地方面子工程而非真实需求。

最后是规模导向强化数量竞赛。长期以来，行业评价以旅客吞吐量、航班量、

机队规模等规模指标为导向。在这一导向下，航空公司更关注市场份额而非收益质量，地方政府更看重通航城市数量而非大量发放补贴带来的实际效果。2025 年三大航营收均超 2019 年同期，但国航、东航仍分别亏损 17.7 亿和 16.33 亿元，“增收不增利”困境突出。

## 国际经验借鉴

美国与欧洲在行业发展早期，同样经历过运力盲目扩张、价格战此起彼伏、航司大面积亏损的阶段，其后通过系统性制度重构走出了困境。

1978 年《航空放松管制法》实施后，美国航空业进入自由竞争状态，航空公司价格战层出不穷，行业累计亏损超 600 亿美元，160 余家航司申请破产，泛美航空等标杆企业退出历史舞台。转折点在于当时的政府出台了破产保护制度（第 11 章），为困境企业提供有序退出路径，避免了“僵而不死”企业长期占用有限的航空资源；此外，当时的美国航空业开启了大规模并购，不断重塑行业格局，最终形成四大航掌控约 80% 国内份额的格局，运力投放趋于理性，盈利能力显著改善。政府角色从干预供给转向维护规则，反垄断审查、消费者保护、空域管理各司其职，从根本上避免了行政干预对市场信号的扭曲。

欧盟走的是市场机制与政策约束并行的道路。公共服务义务（PSO）体系允许对偏远地区航线提供补贴，但须经严格程序。国家援助（State Aid）制度遏制补贴竞赛——所有补贴须获得欧盟委员会批准，非法补贴须偿还。单一航空市场政策被消除，航司可在成员国间自由开辟航线，资源自然流向回报率更高的市场。机场时刻资源配置方面，拥堵机场的起降费远高

于平均水平，促使航司主动优化航班时刻。

尽管美国和欧洲模式路径不同，但两者都启示我们应利用制度机制来重塑竞争环境，而非直接行政干预竞争结果。美国的“退出机制”表明，不应允许低效企业长期处于“僵而不死”的状态，相反必须建立制度化的退出渠道。欧洲的“基于规则的约束”表明，补贴并非被严格禁止，但必须在统一规则下使用。

要厘清政府与市场的界限。政府的作用在于制定规则、维护市场秩序并保障公共服务，而非干预航线运力的分配。在市场能够有效运作的领域，应允许市场发挥主导作用。

要遏制低效补贴和重复投入。补贴应针对公共服务需求，并须经过必要性审查、对竞争影响的评估以及对有效性的评估。制定统一的补贴标准以及透明公开的程序，是防止地区间恶性竞争的基本条件。

要建立以效率和质量为导向的制度框架。资源配置应更多地考虑效率因素，评价体系需从“规模导向”转向“价值导向”。只有当制度激励的方向真正与高质量发展目标保持一致时，市场主体的行为才会随之调整。

## 政策建议

针对当前困扰民航业的“内卷式竞争”这一紧迫问题，并借鉴国际经验，本文依据中国民航局 2025 年政策部署中“全面应对行业内‘内卷式’竞争”的指导方针，提出应运用三类政策工具，建立一套政策框架以应对“内卷式”竞争。

一是约束型工具。约束型工具的核心在于通过对补贴和竞争行为设定底线约束，防止市场机制遭到过度扭曲。

建立航线补贴的负面清单及透明的



这套机制的目标，是从根本上打破以规模论成败的评价惯性，让市场主体意识到，把规模做大不等于把事情做好。

评估机制。建议民航主管部门与财政部门协作，明确禁止对高密度、高度市场化的干线航线以及竞争已十分激烈的航线提供补贴，并将财政资金分配给真正需要支持的欠发达地区。同时，所有使用公共资金的航线补贴安排均应公开披露补贴标准、期限及预期成效。建立统一的国家补贴信息平台，并引入第三方定期评估机制。不符合标准的补贴应尽可能逐步取消，以防止临时措施演变为常态化做法。

加强公平竞争审查和中央监管。将地方航空补贴纳入公平竞争审查范围。市场监管部门应与民航主管部门联合审查地方补贴政策，重点防范对地方航空公司的不当优惠待遇、歧视性条件及市场分割。

二是引导型工具。引导型工具是通过调整评价体系和政策引导，推动市场主体从拼规模转向创价值。

构建航线质量评价体系，改变规模导向。在行业评价中引入收益率、客座率与收益平衡度、航线可持续性（无补贴盈亏能力）、网络协同效应等质量指标，并在航司评级、时刻分配、航线审批等环节中切实体现，质量好、效率高的，资源向其倾斜。这套机制的目标，是从根本上打破以规模论成败的评价惯性，让市场主体

意识到，把规模做大不等于把事情做好。

推动枢纽分工协同与干支网络优化。制定全国性的机场功能分工指南，明确各层级机场的定位：国际枢纽聚焦国际长航线和高端市场，区域枢纽侧重干支衔接，中小机场立足本地需求，减少同质化竞争。同时，鼓励干线航司与支线航司建立代码共享和运力衔接合作，对干支衔接效果突出的航线给予时刻或收费方面的优惠。支线机场不应永远靠补贴输血，而是真正融入网络、通过提升流量实现可持续运营。

三是市场型工具。市场型工具的核心是通过市场化改革，让核心资源流向真正能用好的地方。

推进航班时刻资源市场化配置。改革不必一步到位，可以在现行行政配置基础上稳步推进。近期，可在时刻资源紧张的机场先行探索时刻交换、交易等市场化机制，允许航司之间通过市场化方式调整时刻结构；后期再研究时刻拍卖、二级市场时刻优化等更深层次的改革路径。同时，建立时刻使用效率评估机制，对长期低效占用时刻的行为形成约束，推动其向真正能发挥价值的方向改进。

完善价格机制与优化航权配置。票价应当更真实地反映市场供求关系，减少不必要的行政干预，支持航司借助大数据分析和动态定价工具提升收益管理能力。国际航线配置方面，对于商业前景较明朗的航线，应更多尊重航司的商业判断，逐步压缩行政干预的空间，引导运力真正跟着需求走，而不是跟着补贴和指令走。

# 暑运客流普涨之后：千万级机场的分化时刻

文 | 丁一璠

编辑 | 林喆

暑运首月的机场客流，交出了一份增长广泛、分化更深的成绩单。2026年7月，国内41家千万级机场当月合计完成旅客吞吐量约1.23亿人次。以各机场旅客规模加权计算，单月同比增幅为5.5%，其中36家机场实现同比增长，5家下降。暑运把更多机场重新带回增长区间，但并没有消除枢纽之间、区域之间和双机场城市内部的结构性落差。

徐炳南 摄

### 1.23 亿人次背后

从 7 月单月规模看，上海浦东以 807.1 万人次居首，广州白云以 779.5 万人次紧随其后，北京首都 684.8 万人次、深圳宝安 587.2 万人次、成都天府 545.2 万人次分列第三至第五。前五座机场当月合计完成 3403.8 万人次旅客吞吐，占 41 家样本总量的 27.6%；前十座机场占比进一步升至 47.3%。这意味着，在机场网络的最高层级，航线资源、国际中转能力与区域位置仍然决定着旺季客流的主要去向。

不过，规模排名不能等同于增长程度。头部机场中，北京首都同比增长 12.2%、北京大兴增长 13.0%、广州白云增长 9.4%、上海浦东增长 7.9%、深圳宝安增长 8.0%，均明显高于样本加权平均水平；而成都天府、杭州萧山、昆明长水、西安咸阳的增幅分别为 2.5%、1.1%、1.5% 和 1.4%，显示同属枢纽并不意味着拥有同样的需求弹性。

这也是 7 月数据最值得注意之处：一端是超大枢纽在暑运中获得更强的需求增长，另一端则是区域机场、双机场城市和部分传统干线机场仍在低增速乃至负增长中寻找平衡。

全国层面，7 月民航旅客运输量约 7447.6 万人次、同比增长 3.7%，暑运总量仍处在扩张区间；但 7 月经济舱平均票价同比小幅下降，市场呈现“量升价弱”的特征。机场客流的正增长因此更应理解为运力、票价与出行需求共同作用的结果，而非单纯由消费热度驱动。

### 北京“双枢纽”同时加速

7 月首都机场完成 684.8 万人次旅客吞吐，同比增长 12.2%；大兴机场完成

530.0 万人次，同比增长 13.0%。两场合计超过 1214 万人次。首都机场的增长尤其亮眼。公开信息显示，首都机场 7 月旅客量同比增长 12%，其中国际及地区旅客量 176.2 万人次，同比增长 13%；暑运期间新开或加密的国际航线，为其国际门户属性提供了直接支撑。当国际及地区客流恢复与国内旺季出行叠加，传统国际枢纽的航班波次、联程连接和高价值旅客基础便会重新体现为吞吐量优势。

大兴机场 13.0% 的增幅，则反映出另一个逻辑：在北京航空市场的双场结构下，增量航班与航司基地化运营仍有空间。相较于以成熟国际网络见长的首都机场，大兴的增长更多依赖国内干线与区域航线的运力组织，以及其承接新增供给的能力。两场同步增长并不意味着功能重叠，反而说明北京市场正在以差异化分工承接暑运需求。

对机场经营者而言，这种“双引擎”格局的价值在于，增长不再完全依赖单一机场的时刻扩容。对航空公司而言，则意味着国际中转、商务干线、低成本与区域网络可以在不同机场寻找更匹配的成本结构。北京双机场提示，机场竞争的下一阶段并非简单的客流排序，而是网络功能的再分配。

### 成都“双机场”出现“强弱倒挂”

在所有 41 家机场中，成都双流 7 月旅客同比增长 18.4%，增速最高；同期成都天府完成 545.2 万人次旅客运送，同比增长 2.5%。双流单月客流仍低于天府，但 7 月增速显著领先，显示出鲜明的“双机场强弱倒挂”。

天府机场以 545.2 万人次位列全国第五，其体量已意味着较高基数；而双

流的高增速，更多说明成都航空市场正在经历资源再平衡。公开报道显示，双流机场 T1 国际厅在 7 月底恢复运营，港澳台航线逐步由天府回转；同时，成都两场在暑运中多次刷新单日起降纪录。国际及地区航线、商务客流和既有航司基地资源的回流，均可能放大双流的同比弹性。

从城市航空市场的角度看，成都的意义不只在两座机场的简单相加。天府承担国际枢纽与增量运力的平台功能，双流则依托成熟区位、既有客源和部分航线调整获得阶段性修复。两者不是彼此替代，而是在暑运高峰中重新分配不同类型的需求。

### 西北与避暑目的地增长更快

乌鲁木齐天山机场 7 月完成 363.7 万人次旅客运送，同比增长 13.1%，在 41 家机场中增速位居第二；同期累计同比增长 6.0%。这一表现与暑期“追凉”出行、长线旅游和新疆航空供给增加形成呼应。行业统计显示，7 月乌鲁木齐机场航班量同比增长 18.8%，入疆运力同比增长 10.3%，均居全国前列。

从需求侧看，暑期家庭出游推动了客源从一线城市向新疆、东北、云南、贵州等目的地扩散。去哪儿网数据显示，多条飞往避暑地的航线预订量增长显著；在此背景下，乌鲁木齐既是目的地机场，也是进入新疆腹地的中转地。对于航程较长、替代交通方式较弱的市场而言，航空仍具有较高的不可替代性。

哈尔滨太平 7 月同比增长 5.6%，青岛胶东增长 5.0%，三亚凤凰增长 4.1%，海口美兰增长 4.0%，亦从不同方向说明旅游机场的暑运支撑仍在。其中，哈尔滨的避暑标签与东北文旅热度



▲ 来源：乌鲁木齐天山国际机场

相互强化；海南两场则受益于跨区域度假和国际航线恢复。海口美兰今年国际及地区旅客吞吐量已经突破 100 万人次，时间较上年提前 45 天，国际客流的增量正成为其区别于纯国内旅游机场的重要变量。

但旅游机场也并非整体高歌猛进。昆明长水机场 7 月旅客仅同比增长 1.5%，累计同比为 -0.6%；贵阳龙洞堡当月增长 7.2%，累计同比仍为 -0.2%。这说明旅游需求的旺盛不能直接转化为所有目的地枢纽的全面增长。航线供给、航司运力投放、客源地竞争和票价策略，仍在决定旅客的最终降落点。

### 国际航线恢复正在重塑增量

与此前以国内市场修复为主的阶段不同，2026 年暑运的一个核心变量是国际及地区航线的结构性恢复。据统计，上海两场的航线网络已覆盖 53 个国家、302 个航点，暑运日均保障航班约 2430 架次；新开、复航和加密航线涉及东北亚、欧洲、澳洲等多个方向。这为浦东 7

月 807.1 万人次、同比增长 7.9% 的表现提供了重要支持。

广州白云 7 月同比增长 9.4%，累计同比增长 8.4%；首都机场累计同比增长 5.8%；深圳宝安累计同比增长 3.9%。这些高能级门户机场的共同优势在于：国际航线恢复不仅带来直接的进出境旅客，也会通过中转、国内联程和航司网络协同，拉动更长链条的客流。

入境游是其中不可忽略的增量。中国政府网援引平台数据称，暑期入境游预订订单量同比增长超过两成；上半年入境外国人同比增长 20.4%，免签便利是重要推动因素。对北京、上海、广州、成都、昆明等具备国际航线与入境服务能力的城市而言，入境客流的恢复不只是吞吐量的增加，也关系到机场商业、航线收益和区域旅游消费的联动。

不过，国际航线恢复仍具有不均衡性。中东航线受地缘局势影响，部分运力需绕飞、取消或转投其他市场。这使国际网络的增长并非“全面回到过去”，而是向东南亚、东北亚、欧洲和澳新等方向重新配置。因此，机场的国际增量更取决于航点结构与航司网络适配，而不只是“国际航班数量增加”本身。

### 全年分化仍未扭转

若只看 7 月，增长面达到 36 家机场，市场表现积极；但累计增长数据不如单月表现。41 家机场中，累计增长 20 家、下降 20 家、哈尔滨太平持平。其中西安咸阳累计同比 -2.1%、南京禄口 -1.3%、武汉天河 -3.6%、长沙黄花 -6.3%、天津滨海 -7.4%，均说明年初至今的客流修复尚未完成。

尤其值得关注的是部分当月转正、累计仍负的机场。如武汉天河 7 月仅增长

0.2%，累计 -3.6%；南京禄口当月增长 4.7%，累计 -1.3%；厦门高崎当月增长 0.4%，累计 -1.9%；合肥新桥当月增长 2.7%，累计 -2.1%。这类机场面临的并不是“有没有暑运”，而是暑运增量是否足以覆盖淡季和此前月份留下的缺口。

另外，南宁吴圩、石家庄正定、揭阳潮汕、无锡硕放的累计表现较为突出：南宁累计增长 11.3%，石家庄增长 9.9%，揭阳潮汕增长 14.2%，无锡增长 7.6%。它们的共同点并不完全相同，却共同说明中小规模机场仍可能借助区域客源、低成本航司网络、跨境与旅游需求获得高于全国平均水平的增速。

因此，判断机场业景气度应同时看三个维度：单月同比反映旺季边际变化，累计同比反映全年修复质量，绝对客流规模则决定运营杠杆的基础。

### “旺丁不旺财” 的约束仍在

机场吞吐量增长通常被视为航空业回暖的先行信号。但 2026 年暑运提醒市场，客流与收益并不总是同步。公开数据称，7 月国内经济舱平均票价约 834.7 元、同比下降 0.7%；同期航空煤油价格仍处于较高水平。如 7 月国内航煤油价格为 8030 元 / 吨（环比 -17.54%，同比 +45.81%）。对航空公司而言，运力增加带来客流，却可能在票价竞争中稀释单位收益；对机场而言，旅客量增加能改善非航商业和收费基础，但航班时刻、航线结构与国际旅客占比仍会影响收入质量。

业内人士表示，对机场运营者而言，下一阶段的竞争焦点不只是“把吞吐量做大”，而是提高航线网络的抗波动能力：一是巩固国际及地区航线和中转网络，提升高价值客群占比；二是与文旅、

| 排序 | 机场     | 代码  | 当月完成旅客吞吐量（万人次） | 同比     | 累计完成旅客吞吐量（万人次） | 累计同比  |
|----|--------|-----|----------------|--------|----------------|-------|
| 1  | 广州白云   | CAN | 779.5          | 9.4%   | 5112.8         | 8.4%  |
| 2  | 上海浦东   | PVG | 807.1          | 7.9%   | 5076.2         | 4.4%  |
| 3  | 北京首都   | PEK | 684.8          | 12.2%  | 4260.6         | 5.8%  |
| 4  | 深圳宝安   | SZX | 587.2          | 8.0%   | 3948.7         | 3.9%  |
| 5  | 成都天府   | TFU | 545.2          | 2.5%   | 3270.9         | -0.1% |
| 6  | 北京大兴   | PKX | 530            | 13.0%  | 3197.1         | 3.9%  |
| 7  | 重庆江北   | CKG | 484.2          | 9.0%   | 2967.3         | 1.3%  |
| 8  | 上海虹桥   | SHA | 446.1          | 5.4%   | 2956.3         | 2.5%  |
| 9  | 杭州萧山   | HGH | 461.9          | 1.1%   | 2939.3         | 1.6%  |
| 10 | 昆明长水   | KMG | 479.1          | 1.5%   | 2885.1         | -0.6% |
| 11 | 西安咸阳   | XIY | 458.9          | 1.4%   | 2752.6         | -2.1% |
| 12 | 成都双流   | CTU | 334.5          | 18.4%  | 2023.6         | 7.0%  |
| 13 | 南京禄口   | NKG | 316.8          | 4.7%   | 1800.9         | -1.3% |
| 14 | 武汉天河   | WUH | 288.9          | 0.2%   | 1770.6         | -3.6% |
| 15 | 乌鲁木齐天山 | URC | 363.7          | 13.1%  | 1745.2         | 6.0%  |
| 16 | 郑州新郑   | CGO | 273.1          | 0.6%   | 1668.5         | -0.9% |
| 17 | 厦门高崎   | XMN | 263.6          | 0.4%   | 1662.1         | -1.9% |
| 18 | 长沙黄花   | CSX | 292.0          | 1.1%   | 1660.9         | -6.3% |
| 19 | 海口美兰   | HAK | 223.9          | 4.0%   | 1632.1         | 1.6%  |
| 20 | 青岛胶东   | TAO | 287.6          | 5.0%   | 1587.2         | 3.5%  |
| 21 | 哈尔滨太平  | HRB | 237.9          | 5.6%   | 1433.3         | 0.0%  |
| 22 | 三亚凤凰   | SYX | 188.5          | 4.1%   | 1420.2         | 4.2%  |
| 23 | 沈阳桃仙   | SHE | 224.9          | -3.4%  | 1409.6         | -2.5% |
| 24 | 贵阳龙洞堡  | KWE | 253.1          | 7.2%   | 1310.3         | -0.2% |
| 25 | 济南遥墙   | TNA | 197.6          | 3.1%   | 1164.4         | -0.1% |
| 26 | 大连周水子  | DLC | 219.0          | 2.7%   | 1128.8         | -1.2% |
| 27 | 天津滨海   | TSN | 185.0          | -2.5%  | 1084.8         | -7.4% |
| 28 | 长春龙嘉   | CGQ | 167.2          | 3.0%   | 1038.6         | 2.0%  |
| 29 | 兰州中川   | LHW | 191.4          | 5.0%   | 978.3          | -5.7% |
| 30 | 宁波栎社   | NGB | 152.3          | 0.9%   | 948.3          | 2.1%  |
| 31 | 福州长乐   | FOC | 151            | 0.3%   | 930.3          | -0.1% |
| 32 | 南宁吴圩   | NNG | 134.7          | 9.7%   | 841.1          | 11.3% |
| 33 | 太原武宿   | TYN | 141.9          | -4.3%  | 803.3          | -5.9% |
| 34 | 珠海金湾   | ZUH | 121.8          | 4.1%   | 771.5          | 0.4%  |
| 35 | 石家庄正定  | SJW | 126.0          | 10.4%  | 743.1          | 9.9%  |
| 36 | 合肥新桥   | HFE | 129.6          | 2.7%   | 731.7          | -2.1% |
| 37 | 温州龙湾   | WNZ | 114.1          | -11.7% | 715.0          | -6.0% |
| 38 | 呼和浩特白塔 | HET | 148.9          | 0.5%   | 705.8          | -2.5% |
| 39 | 南昌昌北   | KHN | 121.9          | -0.4%  | 674.0          | -3.2% |
| 40 | 揭阳潮汕   | SWA | 94.1           | 4.6%   | 673.2          | 14.2% |
| 41 | 无锡硕放   | WUX | 101.7          | 5.5%   | 669.7          | 7.6%  |

▲ 表 | 2026 年 7 月全国 41 家千万级机场运营数据统计表  
备注：数据基于测算，有误差，仅供参考

城市交通系统协同，把短期旅游热度转为稳定客源；三是在双机场、同城多机场和高铁竞争场景中明确功能定位，避免同质化供给挤压收益。

### 机场从“谁更忙”逐渐走向“谁更稳”

41 家千万级机场的数据表明：需求正在恢复，且恢复更偏向具有国际门户能力、避暑旅游资源、网络枢纽地位或新增运力承接空间的机场；与此同时，传统区域枢纽和受高铁、天气、供给调

整影响较大的机场，仍处在修复与分化交织的阶段。

上海浦东和广州白云保持超大体量，北京双枢纽同步加速，成都双机场出现阶段性再平衡，乌鲁木齐等长线旅游节点显著跑赢，温州、兰州、太原等机场则仍需应对累计口径的压力。它们共同组成了暑运首月的真实面貌：不是一条向上的直线，而是一张由航线、客源、城市经济、天气和竞争关系共同绘出的网络图。

# 从体系准入到能力信任

## ——EASA 适航条例演进与 DOA 制度的中欧比较

文 | 綦琦 施文琦 编辑 | 林喆



▲ 来源：Shutterstock.com

2026 年 7 月 1 日，新修订的《中华人民共和国民用航空法》正式实施，其中新增的设计机构许可证书制度标志着中国适航管理体系的历史性转型。这一转变的核心逻辑在于：设计机构不再仅仅是“提交合规文件的主体”，而是被要求成为“能够自我证明合规的体系”。中国民用航空局（以下简称 CAAC）这种全新的“放权”与“赋能”并重的监管思路，是在借鉴和参考欧洲航空安全局（以下简称 EASA）自 2003 年建立设计机构批准（以下简称

DOA）制度基础上的探索实践。

对于从事航空器设计制造、零部件研发和相关咨询服务的机构而言，充分准确理解 EASA 条例的演进逻辑与 CAAC 的全新适航制度设计，不仅是把握行业趋势的需要，更是本机构申请 DOA 的工作量评估、实施申请准备的重要基础。笔者将从梳理 EASA DOA 制度的法律基础与演进脉络、分析近年 EASA 适航审定的改革动向、DOA 申请的能力匹配度以及工作量评估三个方面展开研究。

### DOA 建立发展： 法律基础与演进逻辑

EASA DOA 制度的法理基础是欧盟委员会 Regulation (EC) No 1702/2003 法案。该法规确立了 Part 21《航空产品和零部件适航和环境认证程序》，其中 Subpart J（附件 J）专门规定了设计机构批准的框架要求。这一制度的设计初衷是明确的：将监管资源从“逐项审查”转向“体系监督”，让有能力的设计机构承担更多的合规责任。

DOA 的核心机制可以概括为“一体系、三职能、一监控”。“一体系”是指设计机构必须建立、实施和维护一个设计管理系统（英文全称 Design Management System，以下简称 DMS）；“三职能”是指：适航职能（即管理认证过程和持续适航）、独立核查职能（即由未参与合规文件编制的人员进行验证）和设计职能本身；“一监控”是指：独立监控职能，通过内部审核确保体系持续合规。

在 DOA 制度运行 20 多年的实践过程中，EASA 逐渐发现，并非所有设计机构都需要或能够建立完整的 DOA 体系。对于仅从事欧洲技术标准指令（英文简称 ETSO）项目批准的设计活动范围较为有限的设备制造商，建立完整的 DOA 体系程序过于繁琐，维持成本过高。为此，EASA 发展出了“替代程序”（Alternative Procedures to DOA，以下简称 ADOA）的制度安排。ADOA 的本质是一套由申请人建立、经 EASA 评审通过的程序手册，用以展示设计能力。与完整的 DOA 相比，ADOA 不要求设立独立监控职能和安全管理体系（英文简称 SMS），也不需要任命适航办公室主任、独立监控负责人等关键管理岗位。这种“轻量化”设计为中小型设计机构提供了可行的准入路径。

两条路径并存的格局说明，EASA 在制度设计上试图在“监管效率”与“准入负担”之间寻求平衡。

### DOA 制度改革： RMT.0727 与声明式设计组织

2023 年，EASA 启动了 RMT.0727 规则制定任务，其中第 4 子任务是专门针对 ETSO 授权系统的审查。改革的核心驱动力来自两个方面：一是欧洲航空业界对“比例性原则”的诉求，即不同规模、不同业务范围的组织应当适用不同层级的监管要求；二是对安全合规设计效率提升的追求，即在确保不降低安全水平的前提下，简化审批流程，减轻企业负担。

从更宏观的视角看，DOA 改革也与素有 EASA “基本法”之称的 Regulation (EU) 2018/1139 修订有关。新修订的基本法要求将安全管理体系的理念更深入地融入设计机构管理，同时要求规则制定更加注重风险导向和比例原则。

EASA 开展的 DOA 改革最具突破性的设计就是声明式设计组织（英文全称 Declared Design Organisation）概念的引入。根据 EASA 的规划，新的 Part 21 将增设 Subpart N，规定设计能力声明（英文全称 Declaration of Design Capability，以下简称 DDC）的程序要求。此

新修订的基本法要求将安全管理体系的理念更深入地融入设计机构管理，同时要求规则制定更加注重风险导向和比例原则。

项制度创新的核心逻辑可以概括为：从“EASA 事前评审”转向“申请人自我声明 +EASA 事后监督”。具体操作办法是：

在 ADOA 模式下，申请人先建立程序手册，再经过 EASA 的多轮迭代（英文全称 desk review），最后由 EASA 作出符合性判定。

在 DDC 模式下，申请人先建立程序手册并进行自我声明合规，再到 EASA 进行登记声明，最后 EASA 通过 ETSO 项目进行监督，必要时开展专项监督活动。

从 ADOA 到 DDC 制度创新的优势在于：有效降低了新申请人的前期门槛（即无需等待 EASA 评审即可启动相关设计工作），同时为申请人提供了更大灵活性来管理自身的程序体系。当然，这也并非意味着 EASA 监管放松，因为 EASA 保留了在项目层面和专项监督中的全面检查行政权力。

DOA 制度改革还释放了一个重要信号，即 EASA 正在推动航空器设备制造商从传统的 ETSO 持有人向拥有更全面责任的 DOA 体系加快过渡。根据拟议修订通告（NPA 2025-11），EASA 取消了“高级 ETSO”与“标准 ETSO”的分类，改

为统一的 ETSO 授权框架，但获得 DOA 的申请人可享有更大的特权，即自主批准所有小改、简化的大改的审批流程。这一制度设计的意图在于用“特权激励”而非“强制命令”的方式引导制造商提升安全合规设计体系能力。

### 中国 DOA 制度的建立与特征

中国适航管理体系中对设计机构的管理要求，最早体现在《民用航空产品和零部件合格审定规定》（版本号 CCAR-21-R4）的相关条款中。该规章要求型号合格证申请人建立设计保证系统（以下简称 DAS），并通过民航局审查后方可进入型号审定程序。DAS 被定义为包含设计职能、适航职能、独立监督职能的体系，具体包括组织机构、职责、程序和资源。然而，规章层面的要求在 2026 年 6 月 30 日前始终面临着尴尬的法律地位问题，即设计机构许可并未被规章的上位法《民用航空法》（旧版）所确认。

新修订的《民用航空法》首次在法律层面明确了设计机构许可证书制度，要求设计机构建立 DAS。其意义在于设计机构批准从“局方政策要求”上升为“法律强制义务”，其法律位阶和约束力都发生了质变。

通过具体法律条款的比较性分析研究，笔者认为中国的 DAS 和欧盟的 DOA 虽然在制度框架上高度相似，但在具体细节方面存在若干差异，如下。

一是法律地位不同。欧盟的 DOA 是一种独立的组织批准证书，不绑定于具体型号。而中国的 DAS 虽然在法律层面被确认，但在实际操作中仍与型号合格审定项目深度绑定，即 DAS 在型号审定过程中接受评估，目前尚无独立于型号的 DAS 证书颁发案例。

二是权利授予模式不同。欧盟的 DOA 持有人享有“默认授权”，即在批准范围内自主开展设计活动，EASA 不逐项审查合规文件。中国的 DAS 权利则更多表现为“项目绑定”模式，设计机构的权利来源于具体型号审定过程中的认可。

三是安全管理要素的成熟度不同。欧盟的 DOA 明确将安全管理体系纳入设计保证系统的必备要素，要求建立安全政策、安全风险管理、安全保证和安全促进四大支柱。中国的 DAS 虽然在《民用航空产品和零部件合格审定规定》中已有安全管理要素的要求，但相关配套指导材料和操作细则仍在完善过程中。

在审查理念上，中国和欧盟均强调对体系运行有效性的验证，但中国在操作层面更加强调“文文相符、文实相符”的原则。“文文相符”是指设计保证手册、程序文件、符合性文件之间的逻辑一致性。“文实相符”是指文件描述与实际产品、实际操作的一致性。这一理念实质上是“体系管理”的原则落实为可检查、可验证的具体要求，与欧盟的 DOA 在审查中采用“手册评审 + 现场审计”方法有异曲同工之妙。

### DOA 申请能力要求与路径建议

航空器设计机构申请并获得 DOA 已经不是“要不要”，而是“怎么取证”“高效取证”的问题。基于对欧盟的 DOA 制度和中国的 DAS 制度对比分析，结合与全程参与欧盟 DOA 评审的航空领域专家的咨询访谈，笔者总结出中国 DOA 申请的既有能力和技术要求。具体如表 1 所示。

以航空器设计机构向行业主管部门申请 DOA 认证为例，基于欧盟的 DOA 申请实践通常需要 12 ~ 18 个月，考虑到中国的 DAS 评审需要嵌入型号审定流程，

| 能力维度     | EASA DOA 要求        | CAAC DAS 要求           |
|----------|--------------------|-----------------------|
| 设计保证手册编制 | DOH（设计组织手册）        | DAM（设计保证手册）           |
| 关键岗位设置   | HDO/HoA/ISM/CVE/SM | 责任经理 / 适航经理 / 独立监督负责人 |
| 独立监控体系   | 内部审核周期 24 个月       | 内部审核要求明确              |
| 安全管理体系   | 强制要求（四大支柱）         | 正在完善中                 |
| 供应商管控    | 设计分包控制程序           | 供应商管控要求               |
| 持续监督应对   | DPI 年度监督计划         | 局方持续监督                |

▲ 表 1 | 中国 DOA 申请的既有能力和技术要求

DOA 申请工作量可以分为三个阶段。差距分析与体系规划，耗时约 2 ~ 3 个月。对照 EASA Part 21 Subpart J 或 CAAC CCAR-21 DAS 要求，自主或聘请专业咨询服务机构对申请主体机构开展申请 DOA 能力现状评估，定制化编制体系搭建计划。本阶段建议投入熟悉适航法规且有实践经验的高级工程技术人员 4 ~ 5 人或者来自外部 DOA 申请专业资深顾问 2 ~ 3 人。

手册编制与岗位配置，耗时约 4 ~ 6 个月。组织有手册编制经验的高级工程技术人员或来自外部的资深顾问编制设计组织手册或设计保证手册。建议在专家指导下任命申请文件中所必需的关键岗位人员并协助其获得必需的相关资质证明文件。本阶段的工作难点是关键岗位人员的资质论证和安全经理的安全管理体系知识培训，建议投入熟悉适航法规和手册编制经历的高级工程技术人员 5 ~ 6 人或者来自外部 DOA 领域专业资深顾问 3 ~ 4 人。

体系试运行与迎审支持，耗时约 4 ~ 6 个月。为提升 DOA 申请效率和成功过审的能力，建议聘请外部 DOA 领域专业资深顾问开展内部审核、独立监控演练，模拟行业主管部门审查场景进行预审。

▼ 来源：www.airfrance.com.cn





本图由 AI 生成。

此阶段需要具备有丰富沟通经验和熟悉申请流程的外部专家全程参与。

在 DOA 申请工作量评估方面，笔者认为：国内一个完整的 DOA 取证项目，工时预估在 800 ~ 1500 人时之间。当然，具体工时还要视航空器设计机构既有能力情况才可以评估和确认 DOA 申请流程耗时情况。

此外，对于以中国市场为主的设计机构，笔者建议：优先聚焦中国的 DAS 体系搭建，但预留欧盟 DOA 的扩展空间。具体而言：在编制设计保证手册时，需要参照欧盟 DOH 的结构，如增加安全管理要素章节、独立监控程序等，为未来申请欧盟的 DOA 或向欧洲出口产品打下基础。对于有国际化战略的设计机构，可同步启动 EASA Form 4 岗位资质档案的建设工作，或者启动申请欧盟的 DOA 程序。

综上所述，现行的《中华人民共和国民用航空法》引入的设计机构许可制度，在法律层面上实现了与欧盟模式的对标，但在制度的精细度、安全管理体系的成熟度以及权利授予的独立性方面，仍处于从“跟跑”到“并跑”的过渡阶段。具体到中国的 DOA 申请实践，笔者认为：科学有效识别拟申请设计机构既有能力与目标要求之间的差距，是设计服务产品、评估工作量和制定报价方案的前提。在可预见的未来，随着中国低空经济产业的快速发展，中国的 DAS 制度向欧盟的 DOA 进一步靠拢的趋势不会改变，但“产品绑定”的阶段性特征也将持续存在。

## “三电系统” 能否成为低空经济的“新三样”？

文 | 于达维 编辑 | 林喆

过去几年，电动汽车、锂电池与光伏电池组成的“新三样”构成了中国制造业出海的闪亮名片。随着电动垂直起降飞行器（eVTOL）浪潮席卷全球，依托国内庞大新能源汽车产业链孕育出的“电池、电机、电控”（三电系统），正在被寄予厚望——它能否顺理成章地接棒，成为低空经济的“新三样”？

然而，汽车级供应链想跨界民航，须直面航空对安全极为严苛的要求，谈何容易。

### 作者简介

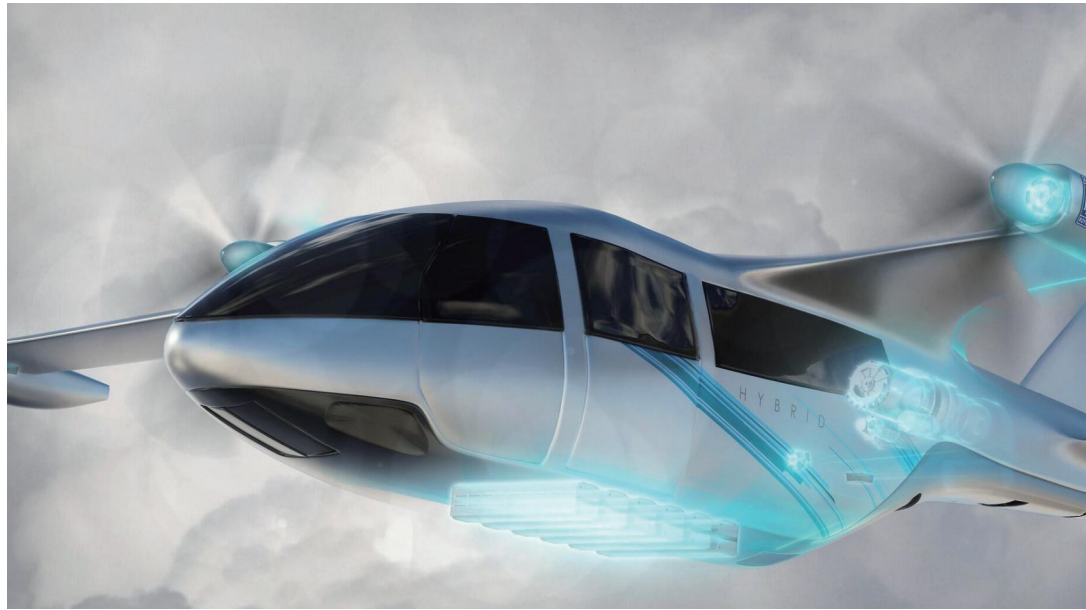


于达维，18 年传媒行业知名媒体机构从业经验，多次对高科技领域技术特点、潜在问题、发展趋势等进行深入报道。

聚焦航空航天、通信导航、人工智能、生物医药研发等众多高科技领域，并对博世、霍尼韦尔、阿里巴巴、甲骨文等知名企业进行采访，各类报道累计 1000 余篇。



本图由 AI 生成。



▲ 来源：www.ccaonline.cn

2026 年，全球电动垂直起降飞行器（eVTOL）产业正式迎来从概念试飞迈向商业适航验证的决定性节点。产业竞争的焦点已从极具观赏性的原型机试飞，转向冷酷且不容差错的适航法规审核。

2023 年 10 月，中国民航局向亿航智能颁发了全球首张无人驾驶载人航空器型号合格证（TC），紧接着在 2024 年 4 月又颁发了全球首张生产许可证（PC）。这标志着中国率先在政策与监管层面打响了下空经济商业试运行的第一枪。

然而，欧美竞争对手并未落后。进入 2025 年下半年至 2026 年上半年，美国 Joby Aviation 与 Archer Aviation 相继宣布进入美国联邦航空管理局（FAA）第 4 阶段（TIA，型式检验核准）的最终飞行测试，冲刺首批有人驾驶客运商业试点；欧洲 Lilium 与 Volocopter 则在欧洲航空安全局（EASA）于 2024 年更新的 SC-VTOL 严苛标准下，推进严苛的结构与动力验证。

这一系列有明确时间戳的事件表明，全球低空经济的竞赛已经彻底告别 PPT 时代。正是在这一背景下，“三电系统”能否借势复制中国新能源汽车的奇迹，成

为中国航空制造业撬动全球市场的“新三样”，成为产业界最为瞩目的核心焦点。

将“三电系统”视为低空经济未来的“新三样”，绝非毫无根据的空中楼阁。其底层逻辑，在于中国过去十年在新能源汽车赛道上积累的巨大产业溢出效应。eVTOL 的技术内核是用分布式电力推进（DEP）系统取代传统复杂的中枢机械传动，这种结构变革将航空器的制造重心，从传统的涡轮发动机和复杂齿轮箱，转移到了电池、电机与电子控制系统上——而这恰恰是中国工业制造能力最强、产业链最为完整的领地。

中国“三电系统”向航空领域延伸时，展现出了极强的竞争优势，尤其在电池技术上，随着航空级电池向 400 Wh/kg 乃至全固态技术演进，中国电池巨头凭借成熟的研发体系与庞大的量产能力，实现了极致的研发响应速度与成本压制。而欧美创业公司因缺乏成熟本土电池供应链，往往陷入高昂的手工定制与缓慢的迭代循环中。

在高功率密度电机与毫秒级响应的电控算法上，在中国拥有深厚的供应链配套。无论从原型机组装、工装模具开发还

是供应链协同速度来看，中国企业都具备将技术快速转化为成熟产品的执行力。

然而，“三电系统”要真正蜕变为低空经济的“新三样”，必须越过汽车与航空这两个行业之间天差地别的技术与安全鸿沟，而不能简单地将车规级供应链“搬”上天空。

对比汽车工业与民航工业的标准差异，这种天壤之别体现在以下四个核心维度。

一是灾难性故障率标准的量级差距：汽车工业（含车规级最高标准）对系统灾难性故障率的要求通常在每小时十万分之一至百万分之一（即  $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ）级别，并允许通过降级运行或靠边停车来保障人身安全；而民航客运对于灾难性事故的铁律是“零容忍”，严苛要求达到每飞行小时十亿分之一（即  $10^{-9}$ ），相当于十亿飞行小时才允许出现一次致命故障。

二是冗余设计架构的复杂度差异。车规级“三电”多采用双回路安全保护与软件降级策略；而航空级“三电”则要求极其复杂的硬件三重乃至四重异构冗余，即使其中任意两套系统同时发生物理损坏，剩余系统仍必须独立保障飞行器安全着陆。

三是核心飞控软件认证的严苛程度。汽车行业主要遵循 ISO 26262 功能安全与 ASPICE 流程；而民航领域则必须通过极其昂贵且耗时巨大的 DO-178C A 级认证，每一行飞控与电控代码都必须经过穷尽式的数学验证与物理测试。

四是测试验证与供应链生命周期。汽车“三电”系统的开发与验证周期通常为 1 至 2 年，注重快速迭代与成本控制；而航空级组件则需要经历 5 至 10 年的全寿命周期测试包括极端环境、剧烈震动、高空低压与疲劳等极限测试。

正因如此，“三电”要走向天空，绝非简单的“产能转移”，而是一场极其

艰难的“质量升维”。如果不解决航空级异构冗余与 DO-178C 等核心软件验证问题，过度依赖汽车级供应链反而会在面对严苛适航审查时埋下巨大隐患。

除了技术本身，“三电系统”能否真正成为“新三样”，还取决于中国能否啃下规则与商业化这两块硬骨头。

适航证是航空产品出海的“通行证”。目前 FAA 与 EASA 牢牢把持着全球民航规则的定义权。尽管 CAAC 给本土无人驾驶构型颁发了证照，但欧美监管机构对无人驾驶路线维持高度审慎态度。中美、中欧在新型航空器上的适航互认进展缓慢。

若无法获得欧美市场的适航认可，“三电系统”将很难像新能源汽车那样顺畅地打入全球高端市场。

低空经济规模化的前提，是支撑“高密度、高频次”飞行的数字化空管系统。目前国内在低空通感一体化调度、复杂气候预测等方面仍处于点状试点阶段。在没有打通高频次运营、航空保险与自我造血的商业闭环前，“三电”组件的庞大产能将面临阶段性消化不良。

“三电系统”能否成为低空经济的“新三样”——这个问题的答案，不在于我们的工厂能以多低的成本造出多少组电池和电机，而在于我们能否以对航空安全的敬畏之心，将这些车规级优势升维为符合十亿分之一故障率的航空级可靠性。

中国已经凭借敏捷的政策与庞大的工程力打响了低空经济的头炮。但在接下来的适航长征中，中国企业必须啃下异构冗余设计、飞控软件验证与国际规则博弈这三块硬骨头。唯有超越单纯的“性价比”思维，建立起真正让全球民航界信服的安全体系，“三电系统”才能真正接棒，成为重塑天空的“新三样”。



▲ 来源：Colossal

# 全维度飞电防护体系： 规避万米高空中的隐形风险

文 | 晴天 编辑 | 张克农

飞电防护系统的建立可追溯到 1963 年，当年 12 月 8 日，泛美航空的 PA214 航班在美国马里兰州上空盘旋时遭雷电直击，机身静电累积叠加雷电强电流击穿机翼备用油箱，引燃油箱内燃油混合气，左翼当场爆炸

断裂，整机空中解体坠毁，机上 81 人全数遇难。

1964 年，空难调查报告落地后，美国联邦航空管理局首次以适航立法形式，把飞机全生命周期静电防护从“可选配置”改成“硬性强制要求”，从飞机设计源头构建全周期、全维度的航空静电防护体系。之后分阶段将四项关键防护要求写入民航强制适航条款：一是做好整机导电搭接，把机身外壳、机载设备、输油管线互相连通，让整架飞机电位一致，避免零件缝隙打出电火花；二是在机翼尖端、尾翼等位置安装静电放电刷，及时把飞行积攒的静电慢慢放到空气中；三是优化机身抗雷击构造，给雷电电流规划好顺畅的导出路线，防止电流窜进机身内部；四是严控油箱防护设计，做好油箱密封与通气，避免电火花引燃油箱里挥发的燃油气体。

第二轮修订发生在 2001 年，起因是五年前的一次空难。1996 年 7 月 17 日，由纽约飞往巴黎的一架波音 747 飞机，起飞爬升至约 4200 米高空时机翼中央油箱突然发生爆炸，机头直接断裂、整机空中解体坠海，全机 230 人无人生还。美国联邦航空管理局由此修订油箱防静电规章，将燃油管线与机载线路全面纳入等电位搭接管控，通俗来说，就是把燃油管线和飞机内部的电线全都连在同一个导电体系上，让飞机各处的电压始终保持一致，就不会出现电势差，也就没法出现电火花去引燃燃油。

2008 年的第三轮修订又规定 30 座以上新造客机强制加装机载氮气惰化系统，用惰性氮气置换油箱氧气，就算出现电火花也不会出现燃烧，从源头杜绝油气爆燃的危险。

今天，我们就来谈谈这些防护系统建立背后的科学知识。

## 消除电火花的隐患

每架飞机都有一层机身蒙皮，材质就是导电性能优良的铝合金或者是轻质的复合材料，蒙皮就好比是飞机的“铁皮外衣”，包裹住机身、机翼外表面。飞机在高空飞行时，机身积累了很多电荷，当飞机蒙皮的衔接处零部件断裂，相邻两块金属电位不一致，容易出现电火花。为了预防这样的情况发生，复合材料机身蒙皮上必须预埋铜质或者铝质金属网，目标就是让电荷能够快速均匀地在机身表面分布，整架飞机变成一个统一导电整体、各处电压相同。不会出现一处电压高、一处电压低，避免电荷在局部聚集，防止其在流动时跨缝隙放电产生火花。

雷雨发生时，附近的云层本身携带大量电荷，飞机机头、翼尖、尾翼这些尖角位置容易形成局部电场，人们最早就想过解决的办法。用蘸过导电药水的棉线绑在机翼、尾翼边缘，靠细线尖端慢慢放走静电，其造价十分便宜，但是缺点也很明显，一遇雨雪受潮就失灵，放电效果忽好忽坏。1920 年，美国航空电气工程师霍华德·布兰查德提交了飞机静电放电器专利方案，这是全球放电刷最早理论构想。受工业条件制约，他的构想未能落地量产。直至二战时期，美国海军研究实验室罗斯·冈恩博士团队研发出首款实用金属针式放电刷，才把放电刷从理论变为机载实用部件，当时这些放电刷被批量安装在军用战机上，这也是人类第一款标准化金属针式静电放电刷。

今天民航飞机上广泛使用的是高阻碳纤维放电刷，其主体由数百根超细导电碳纤维捆束成型，内置高阻碳芯，末端镶嵌微型钨合金放电针尖，可以缓慢

放走飞行时摩擦产生的数万伏沉积静电，就像给飞机安装了“静电释放阀门”。如今每架民航飞机上通常会安装数十个放电刷，覆盖机身关键部位。

### 构建分级防护体系

针对静电、雷电带来的间接电磁干扰，飞机机舱内部建立了由内到外的三层防护体系。

首先是机载电器的电路板上加装专用防雷、防静电零部件，遇上瞬间高压静电冲击时，能把突发高压快速泄掉。可以把其归纳成五种“防雷保安零件”，它们层层阻挡住高压静电冲击波和雷击冲击波。第一道“保安”是气体放电管，碰到上万伏雷击高压就击穿导通，把超大电流直接导入到飞机外壳，让其流出。第二道“保安”是压敏电阻，只要发现电压超标立刻变导电膜，稳住电源电压。第三道“保安”是 TVS 二极管，其反应极快，也被称为“纳秒级闪电守门员”，可以瞬间掐灭细小高压，确保导航系统和飞控系统里的精密芯片不受损伤。第四道“保安”是 ESD 静电元件，专门处理飞行摩擦产生的细碎静电，守护住导航系统、通讯系统、显示屏装置内部的精密信号线。第五道防护是自恢复保险丝，电流超标时自动断开电路，故障消除后自动恢复通电，避免短路烧毁机载电器。

其次在系统层面，关键设备的线缆会增设屏蔽层，减少静电电磁波的干扰。屏蔽层一般是金属网和铝箔套，电磁杂波碰到金属外皮就被导入机身放走。同时，飞控、导航等关键系统配备多套备用设备，一套受轻微干扰失灵，备用系统立刻顶上，飞机可以照常工作。

最后是整机层面搭建第三重防护，

主要方法是科学布线、分区进行电磁隔离。具体是将电子设备的强弱电线路分开铺设，易受干扰设备要远离大功率耗电部件，以此来全面改善机舱内部静电环境，从布局上减少电火花产生，以及对线路产生信号干扰的安全隐患。

### 全流程管控筑牢防线

为了最大限度地确保飞机安全，民航还建立了全链条静电管控机制，多维度补齐防护短板。

飞机在停机坪停靠期间，受干燥扬尘、加油作业、空气摩擦、带电尘埃附着等因素影响，机身壳体极易积攒大量静电荷。每次航班起飞之前，地勤维护人员都会连接专用接地电缆，一端牢牢固定在飞机机身接地点位，另一端接入大地，借助地线形成放电通道，将机身囤积的静电平稳导入地面，彻底释放。

飞行途中，飞行员会依靠机载气象雷达、空管实时气象通报，持续监控航路天气变化。一旦预判前方出现雷暴云团、强对流积雨云、富含冰晶的带电云层，立刻调整飞行高度、改航绕行。这类云层内密布雨滴、冰晶，当飞机高速穿行时，机体和颗粒物很容易产生剧烈摩擦，快速聚集大量静电，还极易遭遇雷电感应干扰。

飞机正式投入民航运营、申领适航许可证之前，还需要完成一系列雷电与静电防护专项试验。试验环境模拟高空雷雨、云层摩擦、雷电直击与感应放电等极端工况，只有所有项目全部达标，飞机才能拿到适航证、投入航线运行。

# 飞行是如何一步一步变得如此安全的？（一）

文 | 陈伟宁

编辑 | 张克农

▼ 来源：Admiral Cloudberg/Medium



“航空是最安全的出行方式。”

根据国际民航运输协会（IATA）发布的 2025 年度安全报告，全球商业航班的总事故率为 1.32 起 /1000000 架次，相当于每 759646 次飞行才会发生 1 起事故。

与其他交通方式相比，航空具有无可比拟的安全优势。以个人驾车为例，过去 10 年间，全球每 16 亿公里的乘客死亡人数为 9.1 人，而商业航空为 0.038 人，前者约为后者的 300 倍。

那么，飞行是如何一步一步变得如此安全的呢？

### 科罗拉多大峡谷空难

1956 年 6 月 30 日，一个天气晴朗的星期六上午，美国著名的科罗拉多大峡谷如往常一般，赭红色的岩壁在晨光中沉默伫立，气象万千。那时，喷气时代的序幕已经拉开，而天空，似乎辽阔得永远不会有拥挤之虞。

上午 10 时 30 分，美国联合航

空的 718 号航班（机型：道格拉斯 DC-7）从洛杉矶起飞，载着 58 名乘客向东飞行。同在这片空域的，是环球航空的 2 号航班，一架载着 70 人的“超级星座”客机，正从纽约飞往旧金山，两架飞机的高度指针都稳稳地停在 6400 米。那个年代，飞行员只能遵循“看见并避让”的目视规则，飞行时没有地面雷达的持续追踪也没有自动防撞系统的警示。

大峡谷的壮丽是致命的诱惑。为了让乘客饱览这一地质奇迹，飞行员常常偏离航线，盘旋出更完美的观景角度。那天上午，两架飞机如同两条即将交汇的丝线，以每小时 480 公里的速度彼此靠近。

10 时 31 分，环球航空的机长或许正在低头检查仪表，他的副驾驶也可能正侧身向窗外的峡谷望去。联合航空的驾驶舱里，或许正回荡着乘客对岩层色彩的惊叹声，双方都忽略了本该被听见的引擎轰鸣声。

没有人看见对方。

10 时 32 分，天空裂开了。DC-7 的左侧机翼切入了“超级星座”的驾驶舱与机身连接处，金属撕裂的巨响在大峡谷上空炸开。两架重达数十吨的钢铁之鸟瞬间解体，碎片混合着行李、座椅和尚未熄灭的燃油，如同悲怆的焰火，向峡谷底部坠落。岩壁上至今仍可见撞击留下的暗色痕迹，这场爆炸的能量，甚至在峡谷的砂岩上刻下了永久的伤疤。

峡谷底部，残骸散落在一片名为“神庙岩”的台地附近。救援队徒步跋涉数小时才抵达现场，面对的是一片没有任何生还者的废墟。128 条生命，在上午的阳光中永远静止。

这场空中撞机灾难震惊了整个世

界。美国人第一次意识到，天空不是无限的，目视规则在高速飞行的喷气时代，不过是一层脆弱的薄冰。

经过调查和反思，大峡谷空难引发了安全监管领域的重大变革，这些变革主要包括以下几点。

催生了独立的航空安全监管机构。空难最直接的成果是推动了美国联邦航空管理局（FAA）于 1958 年成立。此前，航空安全监管分散且松散。FAA 的成立，标志着一个专业、权威的机构开始统一制定和执行航空安全规则，从根本上改变了管理格局。

彻底改变了飞行规则。当时，飞行员主要依靠“看见并被看见”的目视飞行规则，在广阔的天空中自由选择航线。此后，这一规则被彻底改写，民航客机被要求必须在规定的航路内飞行，使得空中交通变得有序、可预测。

全面升级了空中交通管制（ATC）系统。旧有的空管系统信息滞后，无法掌握飞机实时位置。事故发生后，美国投入约 2.5 亿美元对空管系统进行了全面升级，建立了我们今天所熟知的、更加严密和高效的空管体系。

建设全国性雷达网络。事故发生前，雷达覆盖率很低，空管员和飞行员都无法精确掌握空中交通状况。事后，全美各大机场和关键空域紧急加装了雷达，使得地面管制员第一次能够“看见”空中的飞机，实现了主动指挥和调配，这是防止碰撞的关键技术突破。

确立了飞行数据记录器（黑匣子）的价值。在此次事故调查中，调查人员因缺乏飞行数据而面临巨大困难，只能依靠残骸碎片拼凑真相。这起事件极大地凸显了为飞机安装飞行数据记录器（即“黑匣子”）的紧迫性，



为后来“黑匣子”成为民航客机的标配埋下了伏笔。 ▲ 来源：霍尼韦尔

通过上述措施，如今大型客机在空中相撞的事故已极为罕见。



# 刘敬宜与中国民航的百年航迹

文 | 成功 编辑 | 陈伟宁

本图由 AI 生成。

1949 年 11 月 9 日清晨 6 时，香港启德机场薄雾未散。

十二架飞机静静地停在跑道上，引擎低吼如蛰伏的巨兽。机舱内，飞行员紧握操纵杆，手心汗湿；机舱外，地勤人员默默地进行绕机检查，眼神坚定。没有人高声言语，但空气中弥漫着一种近乎神圣的紧张——他们即将飞向北方，飞向充满希望的未来。

在这场被后世称为“两航起义”的壮举背后，有一位老人彻夜未眠。他没有登机，却比任何人都更早抵达命运的彼岸。他就是中央航空公司总经理刘敬宜，一位用一生心血为中国天空铺路的先行者。当第一缕阳光刺破云层，照亮北飞的机翼时，他站在办公室窗前，轻声自语：“我们终于要回家了。”

## 一枚铜钱与一片天空

1897 年，广东南海，一个名叫刘敬宜的男婴呱呱坠地。

彼时的大清帝国，山河破碎，列强环伺。甲午战败的阴霾尚未散去，八国联军的铁蹄又将踏碎紫禁城的宁静。刘家虽为商贾，却素有家国情怀，刘父常对幼子说：“吾辈生于乱世，当思以实业救国。”

1913 年，16 岁的刘敬宜考取官费留学日本资格。临行前夜，父亲将一枚磨得发亮的乾隆通宝放入他掌心：“此去东洋，勿忘吾土。学成归来，当为国铸翼。”少年郑重点头，将铜钱贴身藏好——这枚小小的金属，从此成为他一生的精神信物。

在东京早稻田大学，他主修政治经济学，却对航空产生了近乎痴迷的热情。每逢周末，他便徒步数里，到羽田机场外驻足观看。看着银鹰起落，他心中涌动着难以言喻的激动与不甘：为何中国的天空如此寂静？为何偌大的中国，连一条像样



▲ 来源：《国家记忆》

的航线都没有？

1917 年，俄国十月革命的消息传来，他在日记中写到：“工业乃国之筋骨，航空即国之双翼。无翼之国，终为鱼肉。”四年后归国，他先入北洋政府外交部，后转入交通部。有一次，他随团考察欧美铁路，在德国汉莎航空公司总部，他看到一张世界航线图——密密麻麻的红线如血管般覆盖全球，唯独中国内陆是一片刺眼的

▼ 来源：<https://www.douyin.com/note/7570540190855969471>





▲ 来源：北京日报

空白。那一刻，他暗暗发誓：“此生必填此空白。”

## 茫茫荒原中的罗盘

1930 年冬，南京国民政府交通部会议室。窗外寒风凛冽，室内气氛凝重。交通部长王伯群指着墙上的巨幅中国地图，从上海一路划至迪化（今乌鲁木齐），那条虚线如同一道未愈的伤疤。“谁愿为此线执笔？”满座官员面面相觑，无人应声。

唯有刘敬宜起身，声音沉稳：“我愿往！”

次年 2 月，欧亚航空公司正式成立，由国民政府与德国汉莎航空合资。刘敬宜

出任中方理事，实际负责日常运营。公司成立后，一系列挑战扑面而来——没有机场、没有导航设备、没有气象站，甚至连一张精确的航空地图也没有。

1932 年春，为勘测西安至兰州段航线，刘敬宜率队深入六盘山。一行人乘马车、骑骆驼，在黄土高原的沟壑间穿行。有一天，他们在考察中突遇“黑风”——西北地区特有的一种沙尘暴。只见顷刻之间天地混沌，能见度不足十米，向导惊慌失措，队伍几近迷失。危急关头，刘敬宜从怀中掏出一枚罗盘和自制的简易气压计，凭借记忆中的山形水势，硬是带队摸出险境。当晚，考察队宿于一座废弃的烽火台，他在油灯下绘出第一份西北航线草图，题名《天路初稿》，并在页脚写下：“天路虽险，人心可通。”

万事开头难。除了工作环境异常艰苦之外，更令刘敬宜棘手的是与德方的合作博弈。1933 年，汉莎航空高层提议将公司注册地迁至柏林，以规避中国方面的税收和监管。消息传来，刘敬宜彻夜未眠。次日，他携万言书直赴交通部参加会议。在会上，他慷慨激昂地说：“航空主权乃国家主权之延伸。若连天空都任人主宰，何谈独立自主？”他援引国际法，据理力争，最终迫使德方让步。公司的注册地保留在上海，中方保留董事会多数席位。德方总经理克尼平后来在回忆录中写到：“刘先生外表儒雅如学者，内里却如精钢铸就，与他共事，既敬且畏。”

1935 年，兰州至肃州（酒泉）航线开通前夕，当地军阀马步芳疑其为“空中侦察”，派兵封锁机场。刘敬宜单骑赴其府邸，不带卫兵，仅携一壶普洱茶。二人对坐，他推心置腹地对马步芳说：“将军可知，一封家书从兰州到肃州，马帮需半月，而飞机只需两小时。通邮即通心，通

心则安边。”马步芳沉吟良久，终被其诚恳打动，不仅放行，还派骑兵沿途护航。此后，这条航线成为抗战时期苏联援华物资的生命线。

## 乘客安全高于一切

1941 年 12 月 8 日，珍珠港事件爆发当日，日军空袭香港启德机场。当时，刘敬宜正在办公室审阅季度财报，一声巨响震碎玻璃，弹片划过他的左颊，鲜血直流。了解情况之后，他顾不上包扎，立刻抓起电话：“所有能飞的飞机，立刻转场重庆，一架也不能留给日本人！”

自此，央航（1943 年由欧亚航空改组而成）进入最艰难的岁月。1942 年，“驼峰航线”开通，盟军飞机穿越喜马拉雅山向中国运送物资。虽然这一航线的主力由美军承担，但央航承担了昆明—重庆—成都三角航线的全部客运与部分军用货运。当时，央航的飞机多为老旧的 DC-3，常

因高空结冰或引擎故障迫降深山。

为此，刘敬宜立下铁律：“乘客安全高于一切，宁可停飞，不可冒险！”

有一次，一架央航客机在飞越秦岭时遭遇强气流，机长紧急请求返航，地面调度犹豫不决，担心影响一批前线急需的青霉素转运。消息传至刘敬宜耳中，他立即冲进调度室，一把抓起话筒：“我是刘敬宜，命令机组立即返航，人命比任务重要，我担责！”

事后，他自掏腰包慰问机组，并推动建立中国首个航空气象预警系统。他常对身边的人说：“我们不是在开飞机，是在托付生命。”

抗战胜利后，他前往上海接收日伪“大日本航空”资产。在虹桥机场仓库，他意外地发现了一架完好无损的道格拉斯 DC-4 客机。他轻轻抚摸冰凉的机身，对身边的员工说：“这不只是飞机，这是未来，我们要用它把四万万同胞的心连成一体。”

到 1948 年，央航拥有 42 架飞机，航

▼ 来源：北京日报





▲ 来源：Mentour Pilot 历史图文页

线覆盖全国主要城市及曼谷、仰光等地，年载客量超过 10 万人次。然而，刘敬宜却始终住在重庆的一处简陋公寓里，家中

唯一的“奢侈品”是一台收音机——只为每晚收听天气预报，确保次日航班安全。

### 维港夜话与银鹰北飞

1948 年底，国民党政权风雨飘摇，国民政府下令“两航”（央航与中航）紧急南迁香港。刘敬宜抵港后，深居简出，表面配合，暗中却与中共地下党员吕云荪秘密接触。

一次深夜会面，吕云荪问他：“刘总，您已功成名就，为何还要冒此奇险？”

刘敬宜沉默良久，望向窗外维多利亚港的灯火，缓缓道：“我这一生，只为一件事——让中国人的飞机，在中国的天空自由飞翔。如今，机会来了。我不敢辜负这片天空，更不敢辜负三十年前那个在戈壁滩上画航线的自己。”

说服同僚共同起义并非易事。管理层中有些人坚决反对。为此，刘敬宜邀请他们夜游海港。海风拂面，他指着对岸漆黑的大陆：“你看，那边有我们建设的第一条跑道，有我们教出的第一批

飞行员，有我们三十年的梦想，难道要让它永远沉睡？”

1949 年 11 月 8 日夜，起义方案最终敲定。刘敬宜召集核心骨干，在九龙塘寓所举行“最后晚餐”。席间无酒，只有清茶。他举杯：“明日之后，或为英雄，或为罪人。但无论结局如何，我们问心无愧。”

众人泪目，齐声应诺。

11 月 9 日凌晨，行动开始。刘敬宜坐镇指挥中心，手心全是冷汗。当第一架 C-47 腾空而起，机尾灯光划破黑暗直指北方时，他喃喃道：“回家了，回家了。”

十二架飞机，历时七小时，安全抵达北京与天津。周恩来总理亲自设宴欢迎。席间，周总理举杯：“刘先生，你们带回来的不只是飞机和器材，更是新中国民航的翅膀！”

1950 年，刘敬宜出任民航局副局长。他做的第一件事，便是废除旧民航的“头等舱特权制”，推行统一票价。有人质疑：“这样会亏本。”他回答说：“民航不是富人玩具，是人民的交通工具。我们的飞机，要载得起工人、农民、学生。”

他力主创办中国民航大学（今中国民航大学前身）。1951 年开学典礼上，他拄着拐杖（因早年勘测落下腿疾）走上讲台，对首批学员说：“你们手中握的不是操纵杆，是国家的命脉。安全二字，重于泰山。记住，每一次起飞，都是对生命的承诺。”

他尤其重视技术自主。1956 年，苏联专家建议全盘采用苏式标准运营飞机。刘敬宜坚决反对：“我们可以学习，但不能照搬。中国的气候、地形、空域，必须有自己的标准。”他亲自主持编写的《中国民用航空飞行规则》，沿用二十余年。书中扉页题词：“安全源于

敬畏，规范始于细节。”

晚年，他常去首都机场看飞机起降。工作人员劝他注意休息，他笑答：“听听引擎声，就像听老朋友说话。”1973 年病重住院时，他仍口述建议：“将来要造我们自己的大飞机……不能总租别人的翅膀。”弥留之际，家人在他枕下发现了那枚铜钱，已被摩挲得温润如玉。

刘敬宜一生清廉。1949 年起义时，他将个人积蓄全部捐出作为员工安置费。去世后，家中仅存几箱书籍、一套旧西装和那枚父亲给的铜钱。

今天，中国民航年运输旅客已超过 6 亿人次，机队规模世界第二。C919 翱翔蓝天，国产大飞机梦正圆。这一切，都始于那个在戈壁滩上画下第一道航线的青年，始于那个在维港夜色中毅然选择归航的老人。

### 永享自由之天空

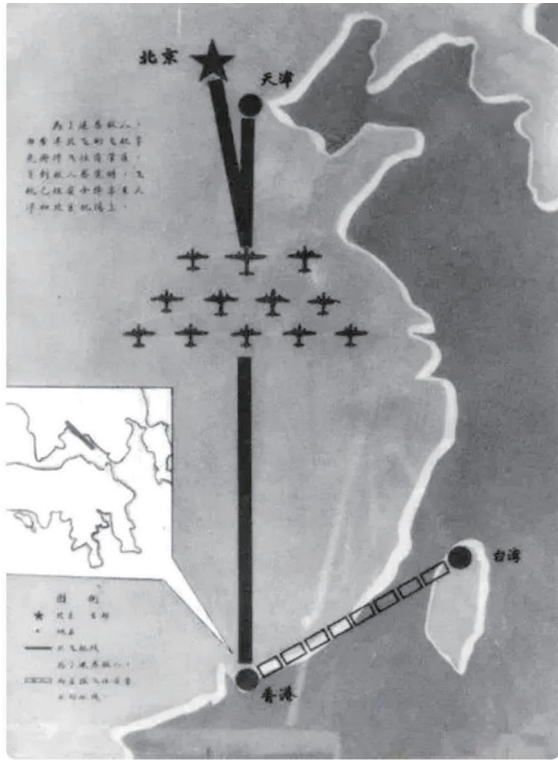
2023 年，华东师范大学档案馆展出了一件特殊的藏品——一本泛黄的笔记本，扉页题字：“天路漫漫，吾将上下而求索。刘敬宜，1932 年于酒泉。”

翻开内页，是密密麻麻的航线数据、气象记录，以及一行小字：“愿后世子孙，乘长风，破万里浪，永享自由之天空。”

这，便是刘敬宜留给这片土地最深情的遗嘱。

他的名字，或许并不为人所知，但每一张机票、每一次平安落地，都是对他最好的铭记——

因为，他让中国人第一次真正拥有了自己的天空。



▲ 图 | “两航”北飞示意图  
来源：[https://mbd.baidu.com/newspage/data/dtlandingsuper?nid=dt\\_5478707622859330859&sourceFrom=search\\_a](https://mbd.baidu.com/newspage/data/dtlandingsuper?nid=dt_5478707622859330859&sourceFrom=search_a)

