

C919 徽章拼图

「让大飞机的历史瞬间

触手可及」



139

大飞机 JETLINER

2026.01

飞控系统

- 飞控电子系统：钢铁鲲鹏的“神经中枢”
- 守护飞机安全的“终极防线”
- 主飞控作动系统：一场隐秘的修行



大飞机

JETLINER

01 January

2026.01 | 总第139期

ISSN 2095-3399







05 卷首语

05 磨砺，让成长更有分量 | 欧阳亮

06 资讯

10 封面文章

- 10 飞控电子系统：钢铁鲲鹏的“神经中枢”
| 徐凡 许友平 叶继海
- 14 守护飞机安全的“终极防线” | 司马骏 唐志帅
- 18 从操控者到决策者——人机协同飞控系统设计重塑
飞行员角色 | 游思齐 李剑 郭海新 刘兴华 吕延平
- 21 主飞控作动系统：一场隐秘的修行 | 黄健 卢靖 龚孝懿
- 26 飞机的“升力魔法”——民机高升力系统的发展与未来
| 韩昕悦 曹俊章 沙力塔那提·包拉提 孙运强
- 29 从机械操纵到电传飞控：飞控系统的技术演进
| 杨海鹏 顾晨波 于维倩 王晓梅

34 航空制造

- 34 人工智能赋能大飞机发展现状和展望 | 冯鲁文 王元元 杨敏
- 39 新一代发动机维修网络不断扩大 | 赵平
- 45 NASA 与波音合作研发新一代机翼 | 王泽溪

50 航空运输

- 50 全球航空业的经营分化及其发展路径 | 赵巍
- 56 2025 年六大航司成绩单 | 丁一璠
- 60 我国跨境电商空运贸易形势研判及发展建议
| 葛金梅 姚津津 汪航

66 产业观察

- 66 封关后，海南如何用好第七航权 | 蒋星
- 70 氢能航空：从十亿级研发市场迈向百亿级
商用市场 | 隋丕宁

74 专栏

- 74 200 座级，为何最受航司青睐 | 于达维
- 76 时光奔流又一年 质效双升启新程 | 詹东新

78 科普

- 78 民用飞机驾驶舱的百年演变 | 吉亮宇

82 回眸

- 82 胡戈·容克斯 开创金属飞机飞行时代
| 王思磊



▼ 本期导读

飞控系统是飞机的“神经中枢”，由传感器、计算机、作动器与舵面组成。传感器实时采集空速、姿态、角速率等信号；飞行控制计算机按飞行员指令、传感器实时状态信号与飞行包线算法解算舵面偏转量；作动器通过电液伺服系统驱动副翼、升降舵、方向舵等核心操纵面，并配合扰流板辅助控制，实现飞机三轴稳定与机动。

现代电传飞控用数字总线取代机械钢索，减重千余公斤，并通过冗余通道、故障自检测与表决逻辑把失效概率降到 10 以下。它能自动配平、抑制失速、限制过载，让飞行员像开轿车一样操纵复杂飞机，同时把飞行品质、油耗、维修成本一并优化。

可以说，飞控系统是直接关系到生死的关键系统，保证时刻具备飞行控制能力，是飞机安全的底线、红线、生命线。

▼ 封面图片 | 王脊梁 摄



- 关注我们 -
FOLLOW US

本刊声明：
1. 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。
2. 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。
3. 本刊支付的稿费已包括上述使用方式的稿费。

大飞机

2026 年第 01 期 | 总第 139 期 | 01 月 28 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

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

主编 陈伟宁

执行主编 欧阳亮

副主编 庄 敏 林 喆

文字编辑 哲 良 张凯敏

美术编辑 邵奕辰 刘晓雨

采访主任 柏 蓓

记者 王脊梁 李 琰 管 超

商务总监 刘 影 021-20887168

发行主管 颜康植 021-20887121

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 021-20887197

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



通过战略调整、组织学习与资源重构，部分企业不仅能克服困难，在竞争中实现跃迁式成长，且最终能塑造出不可复制的竞争优势。

卷首语

磨砺，让成长更有分量

文 | 欧阳亮

今天，华为手机已经是高端手机的代名词，其三折叠手机等产品引领了行业发展风向。但在 2012 年推出 Ascend P1 之前，华为手机卡顿严重，因容易发热被用户戏称为“暖手宝”，且消费者普遍认为“华为是做基站的，手机只是副业”，不愿为其支付溢价，被迫走低价路线的华为手机又被嘲讽为“除了便宜，再没有别的优点”。

回顾华为手机的发展历程，我们可以发现，在一个完全竞争的市场中，由于已经有成熟的企业、成熟的产品占据主导地位，新进入的企业和产品面对的竞争是极其残酷的。美国学者约翰·迈耶提出的“新进入者劣势理论”认为，在企业生命周期的初始阶段，大都面临资源匮乏、品牌认知度低、供应链不稳、客户信任不足、融资困难等挑战。美国劳工局的数据显示，新创立企业中只有 51.6% 能活过 5 年，只有 33% 能撑到第 10 年。市场竞争的压力可想而知。

然而，正是这些过程中的“磨砺”，构成了企业进化的催化剂。通过战略调整、组织学习与资源重构，部分企业不仅能克服困难，在竞争中实现跃迁式成长，且最终能塑造出不可复制的竞争优势。

起步于 1970 年的空客正是这一方面的典范。空客推出 A300 时，全球商用飞机市场已被波音、麦道、洛克希德等公司瓜分，空客在交付了法国航空和汉莎航空的早期订单后，整整 18 个月没有一家航空公司下单购买 A300 飞机。已经下线的飞机只能停留在图卢兹布拉尼亚克机场上经受日晒雨淋，被称为“晒太阳的铁鸟”。

站在悬崖边的空客与美国东方航空签订了一个“屈辱”的协议：免费借 4 架 A300 给东方航空运营，若机队日利用率不足 7 小时，或每可用座英里成本高于公司现役 L-1011 飞机的 105%，可无条件退货。此外，空客在美国东海岸设立了 3 个 24 小时快速响应中心，确保航材在 2 小时内送达，所有驻场工程师费用、航材备件库存皆由空客承担。最终，空客凭借创新技术和周到服务，打开了美国市场，逐渐站稳了脚跟。

磨砺并非成长的障碍，而是成长的必要条件。在充满不确定性的时代，真正的成长，永远诞生于风暴的中心。只要主动构建应对磨砺的能力体系，不断积累知识、优化流程、重构资源，最终必然能凭借优质产品占有市场份额。

01



▲ 贺明 摄

1 南航 C919 实现双基地运行

日前，注册号为 B-658N 的 C919 客机正式入列中国南方航空湖南分公司。长沙成为继北京、上海、广州之后全国第四个执管 C919 的城市。至此，南航 C919 实现广州、长沙双基地运行。

随着湖南航空产业配套与保障能力持续完善，南航湖南分公司及南航工程技术分公司湖南基地将 C919 作为机队建设与运行保障的重点，系统推进机组改装培训、航线优化与维修体系建设。

自 2025 年 1 月 C919 首次飞抵湖南以来，南航已先后在湘执飞长沙至广州、北京、西安、上海、海口、成都、三亚共 7 条航线，截至 12 月 31 日，已累计执飞航班超 1400 班，承运旅客超 17 万人次。

2 2025 年：空客交付领跑，波音逐渐复苏

1 月 12 日，空客公布了 2025 年飞机交付报告——全年共交付 793 架飞机，比 2024 年增长了 4%。订单方面，空客全年共收获 1000 架订单，净订单为 889 架。

具体机型交付方面，A320neo 共交付 607 架，比 2024 年增长 1%；宽体机交付也增长 1%，主要靠 A330 带动；旗舰机型 A350 交付了 57 架，和 2024 年保持一致；A220 表现最好，交付 93 架，同比大增 24%。

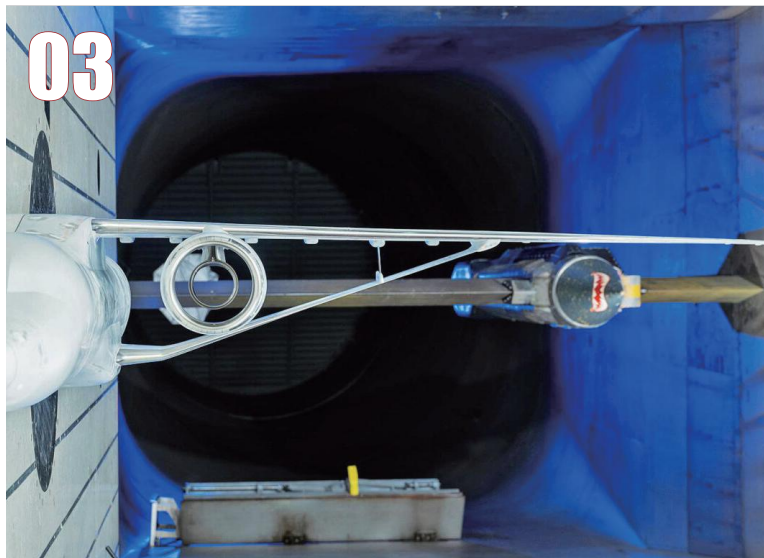
2025 年，波音共交付 600 架飞机，比 2024 年增长 72%，创下 2018 年以来的新高，其中包括 440 架 737MAX 和 88 架 787。虽然交付量还是比空客少很多，但波音在订单方面实现了突破，全年净订单 1075 架，自 2018 年以来第一次超过空客。分析师指出，市场将密切关注 737MAX 10 的认证进展，如果波音能持续提升生产质量，2026 年有望继续在订单端超越空客。

3 NASA 与波音完成薄机翼风洞试验

近日，NASA 与波音完成了高展弦比机翼主动控制技术风洞试验，该技术在降低油耗的同时，还能控制轻薄、柔性机翼在机动载荷和阵风情况下的响应。

此次试验在 NASA 兰利研究中心的跨声速动力学风洞（TDT）进行，属于自适应机翼技术集成研究项目。该项目旨在探索如何利用主动控制技术，实现细长、柔性且降低油耗的机翼设计。

03



4 中国将成全球最大航空售后服务市场

1 月 15 日，空客发布的《全球航空服务市场预测》显示，全球航空售后服务市场重心正明显东移，中国将成为价值最大的市场。

数据显示，中国航空服务市场规模预计将从 2025 年的 248 亿美元增长到 2044 年的 638 亿美元，未来 20 年的增长潜力不容小觑。目前，中国已成为空客民用飞机最大的单一国别市场，未来 20 年预计将接收 9570 架新飞机。

5 巴航工业向波特航空交付第 50 架 E195-E2

巴航工业近期表示，已向加拿大波特航空交付第 50 架 E195-E2。此前，波特航空已确认订购 75 架 E195-E2，并拥有另外 25 架的购买权。E195-E2 飞机助力波特航空在加拿大、美国以及加勒比地区、墨西哥和中美洲实现航线网络扩张。

04



05



6 庞巴迪 Global 8000 获 EASA 认证

近日，庞巴迪宣布，其旗舰公务机 Global 8000 获得 EASA 认证，此前该机于 2025 年 11 月和 12 月分获加拿大交通部与 FAA 认证，并在同年 12 月投入使用。

Global 8000 最高巡航速度 0.95 马赫，是协和飞机之后速度最快的民机，最大航程 8000 海里（14816 千米）。该机在 4.1 万英尺（约 12497 米）巡航时客舱高度显示仅 2691 英尺（820 米），可显著提升舒适性与健康水平，进一步巩固了其在超远程公务航空领域的领先地位。



7 UAC 拟缩短图-214 机身生产周期

1 月 26 日，俄罗斯工贸部长阿里汗诺夫在视察喀山飞机制造厂时表示，通过对生产设施大规模升级、建造新厂房、实施自动化和精益生产，图-214 机身的生产周期可压缩至 12 天，而工厂年产量可达 20 架。

除安装高性能设备外，该厂还将通过数字建模分析生产流程并识别瓶颈。UAC 表示，喀山厂的升级改造是试点项目，其战略效益将推广至 UAC 旗下所有其他企业。

9 欧洲电动飞机领域进入高速发展阶段

欧洲“清洁航空”计划下的多款混合电推进系统将开展地面测试。在第一阶段，Avio Aero 主导的 Amber 项目和罗罗主导的 He-art 验证机项目正在为 2026 年的地面测试做准备。两者都计划在 2026 年底前完成并联式混合动力涡轮发动机（e-TP，适用支线飞机）技术可行性验证。

10 AIR 发布首架量产型 eVTOL 货机

近日，以色列空中交通企业 AIR 发布其首架量产型 eVTOL 货机，项目由原型研发阶段迈入工程化与产业化阶段。该机型基于此前验证机优化而来，重点提升结构强度、系统集成度及生产一致性，面向货运应用进行定型设计。

该 eVTOL 货机采用全电推进系统，具备中等载重能力和模块化货舱配置，可用于区域物流、应急运输及无人化货运场景。首架量产机将用于后续飞行验证及适航认证相关工作，并计划在北美市场开展演示运营。



11 2025 年全球航空安全统计数据公布

12 月 22 日，Cirium 航空安全总监保罗·海耶斯发布了 2025 年全球航空安全统计数据。2025 年，全球共发生 8 起涉及喷气 / 涡桨客机及通勤飞机的致命航空事故，造成 34 名机组、362 名乘客及 30 名地面人员死亡。其中，5 起事故发生在载客航班上，导致 359 名乘客遇难。数据统计范围包括载客量超过 14 人（或同等载货量）的商用喷气或涡桨固定翼飞机，且事故造成飞机严重损坏。从事故数量看，2025 年致命航空事故较 2024 年减少 1 起，基本接近近 5 年（7.8 起）和近 10 年（8.6 起）的平均水平，显示长期安全趋势持续改善。

▼ 安京 摄



8 2025 年 GE 交付 2386 台发动机

1 月 22 日，GE 在披露 2025 年业绩时表示，其 2025 年共交付 2386 台商用飞机发动机，同比增长 25%。与赛峰合作的 CFM 共交付 1802 台 LEAP 发动机，比 2024 年增长 28%。财务业绩直接反映了当前商用发动机交付量的激增和售后服务需求的增加。



▲ 王脊梁 摄

飞控电子系统： 钢铁鲲鹏的“神经中枢”

文 | 徐凡 许友平 叶继海 编辑 | 欧阳亮

“鲲鹏展翅，九万里，翻动扶摇羊角。背负青天朝下看，都是人间城郭。”鲲鹏齐天，泰然悠游；而当置身于现代客机，枕云御风、饱览风物，亦不由感叹，此般“巨兽”何尝不是逍遥天地的“钢铁鲲鹏”。

或许你会疑惑，这“钢铁鲲鹏”究竟是如何平稳飞行的呢？又究竟是什么魔力指挥其以多重姿态翱翔天际？它好似有着精密的“大脑和神经”，执行复杂的逻辑思考，又能以精确的指令让舵面随“心”而动。没错，这便要归功于飞控电子。

飞控电子指的就是围绕飞行控制系统的一整套电子硬件与软件：飞控计算机、传感器、执行机构控制单元、操作系统、中间通信网络乃至安全监控与故障诊断逻辑。

它们是现代客机的神经中枢，用指令计算、信息传递让这“钢铁鲲鹏”拥有了数字生命体的灵动与鲜活。

演化：从机械到电传

在机械飞控时代，直接的力学传动控制在客机的操纵中占据一席之地。早期飞机型号中，飞行员通过操纵杆、方向盘、脚蹬等装置，借助钢索、拉杆、滑轮等机械机构直接驱动控制面。然而，随着飞机体积增大、飞行速度提升，控制面负载显著增加，完全依靠飞行员的人力操作逐渐难以实现。液压系统的引入让飞行员能够通过简单操作，借助液压伺服动作系统放大力量并输出指令，但彼时客机的操纵仍然较为费力且不够灵活。

20 世纪 30 年代，自动驾驶仪的出现

可认为是飞控电子技术的早期实践，其功能虽以基本的姿态与航向稳定为主，但将自动控制理念引入飞行，为飞控电子发展奠定了基础。20 世纪 60 至 70 年代，由于飞机性能的提升，传统的机械操纵系统已难以满足需求，而电子技术的发展为使用模拟电路增强或替代机械操纵提供了可能，模拟电传系统也因此应运而生。

20 世纪 80 年代，微处理器和数字计算机技术趋于成熟，数字式电传飞控凭借其优势逐渐取代了模拟电传飞控，时代的变革渐渐拉开帷幕，属于电传飞控（FBW: Fly-By-Wire）的时代真正到来。在飞控电子中，专用飞控计算机（FCC）由于具备执行更复杂控制律、处理更多传感器数据的能力，开始成为这一时期不可或缺的飞控主角。飞行员的操纵指令通过转化为数字信号，经由计算机处理后，再驱动液压或电控制舵面，飞控计算机也可根据实际飞行条件调整控制策略，极大提高了飞行安全性。时至今日，电传飞控仍是一项重要的飞行控制设计理念。

竞逐：欧美的设计哲学

自进入电传飞控时代以来，飞控电子的发展要从欧洲和美国主制造商的双雄竞逐中一探究竟。

欧洲大型客机主制造商是电传飞控积极的开拓者，该公司某中短程窄体机型是全世界第一款数字电传飞控商用客机，使用侧杆和脚蹬作为驾驶员输入，以七台三种类型的计算机计算控制指令：两台升降舵 / 副翼计算机（ELAC）提供升降舵和副翼控制，并控制水平安定面的两个电动马达；三台扰流板 / 升降舵计算机（SEC）负责所有多功能扰流板的控制，并控制第三个水平安定面的马达，同时承担 ELAC 计算机备份的责任；两台飞行增稳计算机

(FAC) 通过偏航阻尼器提供方向舵控制，并提供方向舵配平电动控制，如图 1 所示。集中式控制和机械控制通道的混合架构使得电源短暂丧失或计算机短时失效后，机械控制通道可继续控制。

该公司的现代远程宽体机型同样采用侧杆和脚蹬作为驾驶员操作输入，但计算机架构则有所区别：以三台主计算机（PRIM）和三台次计算机（SEC）进行控制指令计算，任意一台 PRIM 或 SEC 都可实现对飞机的控制，保证安全飞行和着陆，如图 2 所示。主舵面配置两至三台液压作动器或液压作动器与电作动器的组合，PRIM 和 SEC 均与 FCRM/EM 进行连接，控制作动器输出。此外，一个备份控制模块（BCM）和一个备份能源供给（BPS）组成了备份控制。在所有飞控计算机丧失的情况下，备份控制系统则可以提供基本的控制和稳定性，以达到保证飞机姿态安全和稳定、等待丧失的系统恢复的目的。

在电传飞控技术使用方面，美国主制造商也有其独到的设计理念。20 世纪 90 年代，该公司第一款采用电传操纵系统的远程宽体机型问世。其使用传统的杆盘和脚蹬进行操作输入，以三余度相似数

字式主飞控计算机（PFC）和四余度相似模拟式作动器控制电子（ACE）作为控制核心计算控制律指令，对包括升降舵、方向舵、副翼、水平安定面和扰流板在内的舵面进行控制，如图 3 所示。每台 PFC 内部通常设有多条计算通道和异构处理器，采用多数表决来抵抗软硬件故障与共因错误。而 ACE 直接与操纵杆、舵面伺服打交道，完成从模拟信号到数字信号的转换与底层驱动。在发生极不可能的全部电源丧失时，该机型可提供机械备份控制，通过驾驶盘提供 4# 和 11# 扰流板控制及通过备用平尾配平手柄对平尾进行控制，以使驾驶员可以水平直线飞行，直到电源系统重新启动。

美国主制造商的第二款电传操纵宽体客机也延续了其传统的杆盘和脚蹬操作输入；计算机架构方面则采用三余度相似数字式 PFC 和四余度相似数字式 ACE 作为控制核心计算控制律指令，以电液伺服作动器为执行部件对舵面进行控制。该机型还采用了部分电作动器控制，在出现全部液压丧失的情况下，提供两对电作动扰流板和电俯仰配平进行飞机控制。若出现全部 ACE 信号丧失的情况，则可通过备用俯

仰配平开关对平尾进行直接控制，通过驾驶盘对一对扰流板进行直接控制。其架构如图 4 所示。

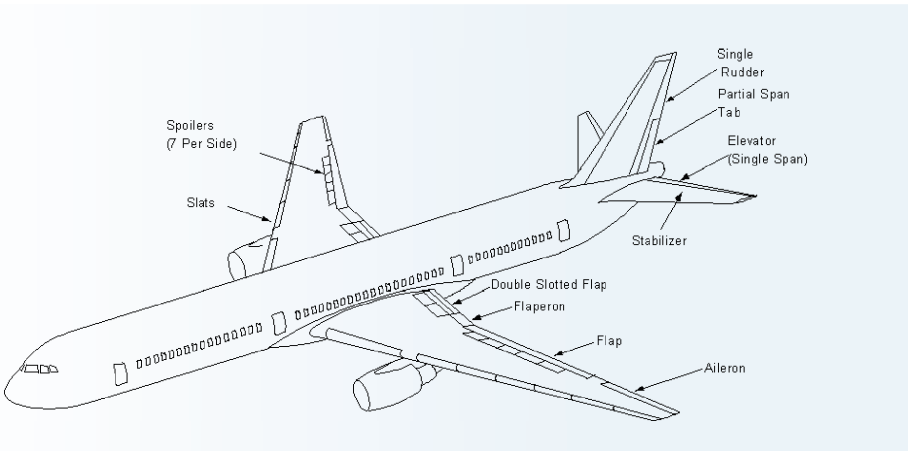
纵观欧美主制造商的相关机型，欧洲主制造商的飞控电子设计较为强调计算机保护，通过主动包线保护来确保飞机不会超出安全边界，以此降低发生飞行员人为错误的风险；而美国制造商关注利用飞控电子系统提供包线保护和增稳功能的同时也让飞行员拥有机械操纵之感。在软硬件方面，欧洲公司采取非相似冗余设计，以不同厂商、不同架构的软硬件执行统一计算任务，以降低共模故障发生的可能；而美国公司则倾向于通过高度冗余的设计来减缓共模故障。

元素：解构控制核心

不论哪种机型，飞控电子这一“神经中枢”的重中之重，无疑是飞控计算机。从本质上来说，飞控计算机是一种满足严苛航空环境要求的“嵌入式系统”：长生命周期、成熟可靠的处理器，可安全保存数据的存储器，连接传感器、执行机构等的 I/O，这些构筑起飞控计算机的硬件配置。在软件层面，飞控计算机的实时操作系统保证了数据计算的高“时效性”要求，各类飞控功能的实现则与基于模型的开发与验证等软件设计方法息息相关。对于关键等级的功能，采用多余度设计 + 监控与表决的机制来提高安全性可靠性、降低风险等级。作为飞控计算机，它的表现不仅仅通过算力高低来评判，在全生命周期下能够提供持续安全可靠的品质更是它的核心价值所在。

展望：持续不断的安全追求

时代的印记下，民用客机飞控电子的

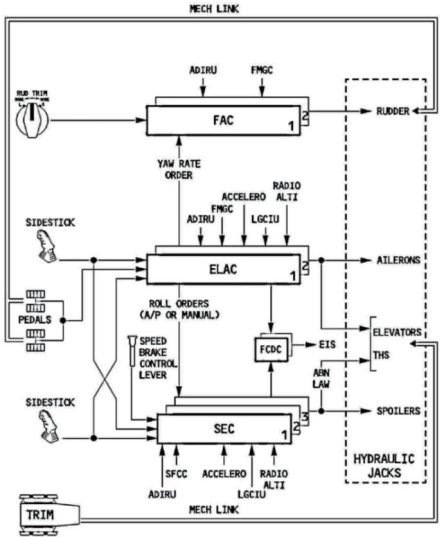


▲ 图 3 | 美国主制造商第一款电传操纵远程宽体飞机飞控系统控制舵面示意

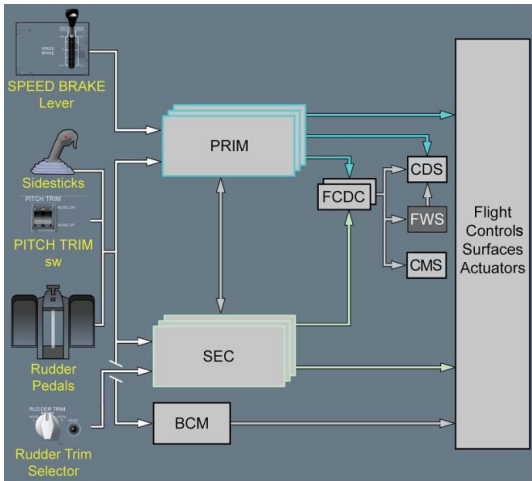


▲ 图 4 | 美国主制造商第二款电传操纵飞机飞控系统控制舵面示意

▼ 图 1 | 欧洲主制造商某中短程窄体飞机飞控系统架构



▼ 图 2 | 欧洲主制造商某远程宽体飞机飞控系统架构



守护飞机安全的“终极防线”

文 | 司马骏 唐志帅 编辑 | 欧阳亮

大飞机机载系统众多，研制保证等级为 A 级的关键系统有 20 多个。其中，飞控系统是安全性要求“BUFF”叠满的机载系统，这些“BUFF”包括高复杂度 / 数量最多的 A 级功能、控制可用性要

求为 A 级、控制完整性要求为 A 级、结构完整性要求为 A 级、全飞行阶段安全关键等。因此，飞控系统是直接关乎生死的关键系统，保证时刻具备飞行控制能力，是飞机安全的底线、红线、生命线。

▼ 来源：www.airbus.com

“金字塔尖”的高安全性

针对安全关键机载系统，SAE AIR7126 (Draft) 基于系统的安全容错等级给出了建议的分类，不同类型系统的安全特性决定了其对故障和差错的容错设计要求不同，飞控系统需具备最高等级的容错能力。

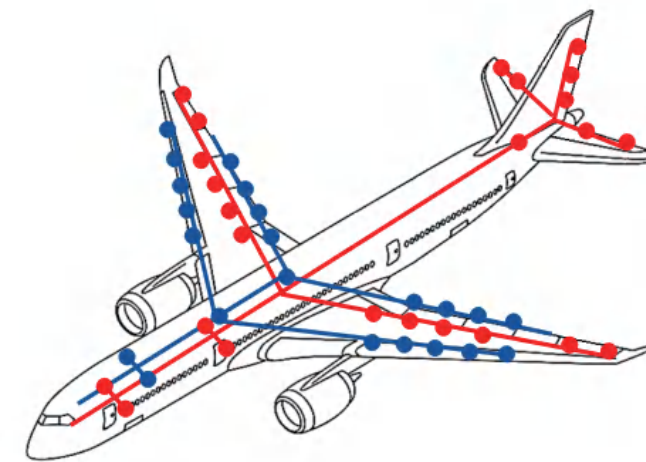
第一类 A 级系统：飞行员在环参与，飞行员通过查看和响应系统展示的数据并参与其中，且系统故障后不会立即产生安全影响，这类系统需具备一般容错能力，如显示系统。

第二类 A 级系统：飞行员实施监控。该类系统直接与飞机能力相关，但该系统故障后可以通过飞行员安全关闭。这类系统需具备中等的容错能力，如自动飞行控制系统。

第三类 A 级系统：飞行员即时反应，其具有直接且即时的控制飞机的能力。该类关键系统故障后短小时内即会产生灾难影响，飞行员无法通过关闭或切断系统恢复安全飞行，需系统本身具备极高等级的容错能力，如主飞行控制系统。



▲ 图 1 | 飞控安全性金字塔

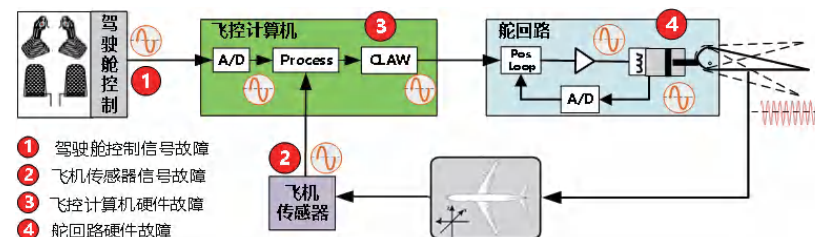


▲ 图 2 | 飞控系统控制链路

飞控安全的“隐性杀手”

飞控系统控制链路遍布整个飞机，从飞机驾驶舱、飞机机身到各个翼面，可谓飞机上布置路径“最长”和“最广”的机载系统。整个控制路径中任一设备或传感器都可能出现故障，如若处理不当，都会带来致命威胁。

以电传飞控系统最具代表性的“舵面振荡”故障为例，图 3 展示了电传飞控系统控制链路中的潜在振荡故障源。飞控系统处于故障状态的电子部件，包括驾驶舱控制传感器、飞机传感器（如惯性基准单元、迎角等）、飞控计算机、



▲ 图 3 | 飞控系统振荡故障示意图

作动控制电子、作动器传感器（LVDT）、作动器伺服阀（EHSV）等都可能产生错误的振荡指令信号。

可能破坏指令信号的完整性的内部原因包括：数据位的丢失、冻结或错误；有害的瞬变；计算机能力饱和；微处理

机对信号的异步处理；传输延迟的比例影响；数字信号的低分辨率；传感器噪声；不可靠的传感器信号；混叠效应；不合适的传感器监控门限；相互作用并可能反馈进入系统运行的结构影响。

电磁环境是电传飞控系统的主要威胁之一，典型的包括雷电、高强度辐射场（HIRF）、静电放电（ESD）等。航空器飞行中不仅要承受雷击等自然电磁环境冲击，还会受到自身航电 / 电气系统的电磁辐射。

一旦电磁干扰入侵电子设备和传输线路，不仅可能导致设备损坏或功能丧失，还可能篡改控制输入所需的传感器信号或者飞控计算机输出指令，影响操纵面的正常动作，严重时甚至直接影响

飞机操纵性与稳定性。

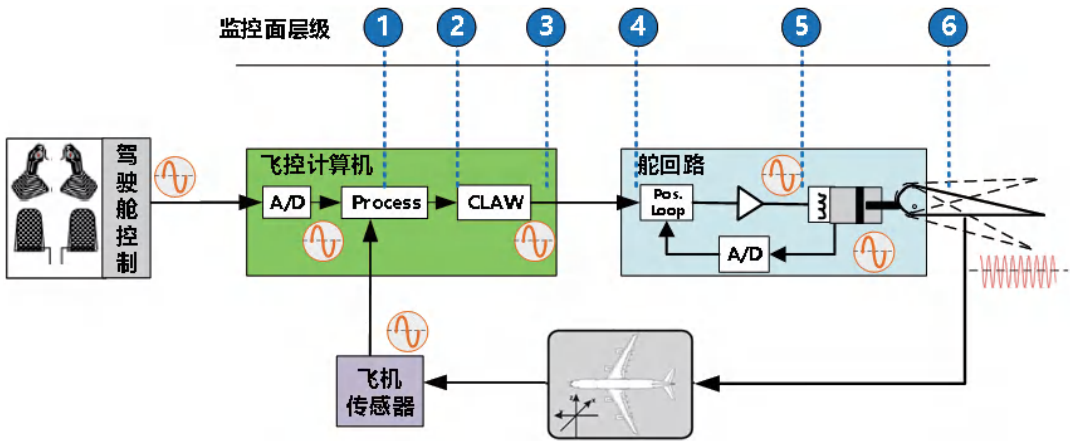
飞控系统是全机 A 级软硬件型别最多的机载系统，其中软件代码量可达千万行，如此庞大的代码量不可避免存在缺陷或漏洞。软硬件设计与实现过程的缺陷可能来源于需求错误、编码错误、软硬件工具缺陷等环节。由于系统功能高度综合与复杂，难以完全依赖于彻底的试验测试来充分暴露软硬件设计实现过程的缺陷。

软硬件设计缺陷 / 差错真正的威胁是其具备高度的隐蔽性，可能在特定飞行操作、运行状态等场景下，这些缺陷会诱发系统非预期的响应和安全风险。控制律算法设计、监控阈值设计与软硬件实现是软硬件风险评估的关键核心，控制律决定了飞机对飞行员输入的响应特性，其设计与软硬件实现必须确保在所有飞行条件包括飞机边界状态下都能提供稳定、可控的飞行品质。

失效—安全博弈的“锦囊妙计”

为保障乘客与机组的生命和财产安全，飞机设计师通常会通过架构冗余与安全备份、多层次监控面构建“安保”体系、分区域布置与物理隔离、软硬件非相似设计等手段确保飞机在部分系统失效的情况下仍能安全回到地面。比如，即使双发失效，人们也指望飞控系统把飞机安全带回跑道或水面。因此，飞控系统是飞机安全的终极防线。

足够的冗余与安全备份已成为飞控系统工程的技术执念，其中飞控计算机的余度设计与余度管理是飞控系统架构设计的核心。如果你觉得飞控系统 1 台主计算机的安全余度不够，那么 3 台主计算机呢？飞控工程师还在系统架构中加入了 3 至 4 台“次级计算机”，作



▲ 图 6 | 监控系统多层次监控示意图

为主计算机的安全备份。

此外，为了进一步提升系统安全性，设计师可能还会在飞控架构中继续引入第三层安全防护——“备份计算机”，作为系统的终极安全备份。

虽然有结构冗余与安全备份，但由于潜伏在飞控系统控制回路的“隐性杀手”众多，为了应付这些危险源可能带来的设备故障或指令信号破坏，在控制链路中往往需要通过多个层面监控器布置，协同构建系统“安保”体系。

典型的电传飞控系统监控的功能主要包括：第 1 层针对传感器输入信号执行在线监控；第 2 层针对多余度传感器输入信号执行比较监控与表决；第 3 层执行计算机控制指令的完整性监控；第 4 层执行控制指令传输的完整性监控；第 5 层执行动作伺服回路的指令完整性监控；第 6 层执行针对舵面的系统级指令一响应监控。

正如鸡蛋不能放在同一个篮子里，飞控系统设备在全机各个区域的安装需要进行隔离布置，以应对由于同一区域事件或特定风险事件带来的安全风险。这在设计上被称为分区域布置与物理隔离。

典型的区域隔离措施包括：多余度

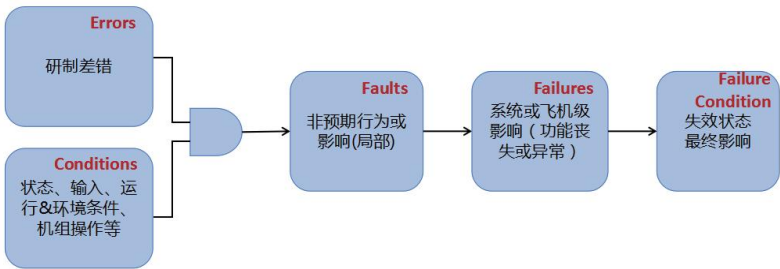
飞控计算机布置在不同电子电气设备舱；EWIS 线束按照不同余度通道进行敷设和布置；同一区域的余度设备保证必要的隔离间距。

在以上所有措施之外，为了防止因单一设计缺陷、共模故障或相同失效模式导致软硬件同时出现故障，设计师们还会采用软硬件非相似设计。

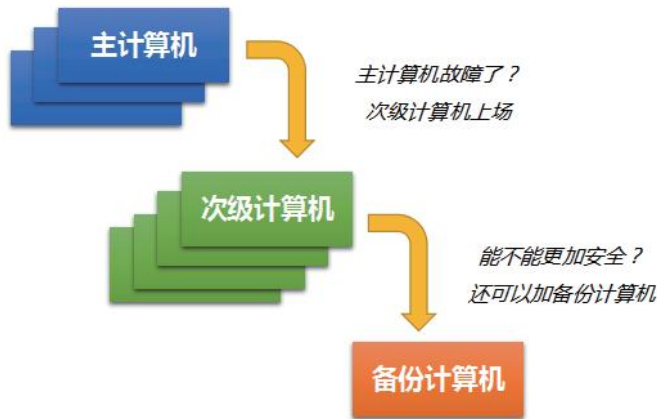
软硬件非相似设计是减缓软硬件设计与实现“失效 - 安全”的常见措施，软硬件非相似设计需充分评估和权衡后选择切实可行的非相似方案，同时要避免非相似设计可能带来的其他问题。常见的软硬件非相似设计包括：不同的软件操作系统；不同软硬件开发语言 / 程序；不同型号的处理或可编程逻辑单元；不同的设计团队和研制过程。

综上，可以认为，飞控系统作为飞机飞行的核心操控中枢，其极致的安全设计是保障飞机从起飞到降落全流程姿态稳定、指令精准执行、规避各类飞行风险、防止系统失效的“终极防线”。

▼ 图 4 | 软硬件研制差错示意图



▼ 图 5 | 飞控系统冗余备份理念示意图





▲ 余创 摄

从操控者到决策者 ——人机协同飞控系统设计重塑飞行员角色

文 | 游思齐 李剑 郭海新 刘兴华 吕延平

编辑 | 欧阳亮

在民航百年发展历程中，飞控系统始终是平衡“飞行安全”与“操作效率”的核心。而飞行员与飞控系统的关系，正经历着根本性的变革：从早期的“人主导机械”单向操控，演变为如今“人-机动态协同”的共生模式。主动侧杆、

主动脚蹬等新一代操控技术的应用，标志着飞控系统不再是简单的指令执行工具，而是能够感知意图、反馈环境变化的“智能协同伙伴”。

这一变革的核心驱动力，是“人在环路”（Human-in-the-loop）设计理

念的深化应用——它重新定义了自动化时代飞行员的角色定位：从主要操作者，转型为至关重要的监控者、决策者与异常干预者。

系统设计的核心逻辑重构

传统飞控系统建立在“指令—执行”的单向通道上，飞行员通过操纵杆/盘、脚蹬发出控制指令，机械或电传系统将指令转化为舵面动作。这种模式在常规环境下尚可运行，但在复杂气象或突发故障时，容易因“人—机信息不对称”导致反应延迟或决策失误。

被动侧杆安装在电传飞机驾驶舱两侧，用于控制飞机的俯仰和滚转。由于被动侧杆左右分离，在设备操纵过程中左右设备互不联动。飞行员无法通过触觉感知另一边侧杆的输入。如飞机在自动飞行模式下，飞行员也无法通过侧杆感知当前阶段飞机操纵状态。

被动脚蹬安装在驾驶舱地板上，用于控制飞机的偏航和刹车。被动脚蹬依赖大量机械联动结构，安装复杂。一旦一侧脚蹬发生卡阻，在没有脱开机构的情况下，将导致另一侧的飞行员也无法通过脚蹬控制飞机的偏航。加之传统设计采用弹簧和阻尼器提供固定的力感梯度和阻尼力，飞行员无法真实感受到飞机的舵面位置和载荷情况。

主动侧杆是“人在环路”理念的典型落地产品。与传统侧杆相比，主动侧杆具备“双向力反馈”能力：当飞机遭遇湍流导致姿态偏移时，系统会通过侧杆施加反向力，提示飞行员及时修正；当飞行员操作力度过大或操纵超出设计的量程范围时，侧杆会通过阻尼力限制操作幅度。这样既避免误操作，又保留了飞行员的操作主导权，为飞行员提供

了关键的情境感知触觉通道。

主动脚蹬既能通过脚蹬内部的位置传感器和力传感器，将飞行员控制方向舵的操纵指令转换为电信号并发送给主飞控系统，又能通过电机，将飞机飞行状态反馈给飞行员。在为飞行员提供与飞机飞行状态相对应的力感特性的同时，主动脚蹬还能在自动飞行时，通过内部

▼ 图 | 干线客机驾驶舱内部 陈肖 摄



▼ 图 | 被动侧杆 王脊梁 摄



电机驱动脚蹬随动，保持飞行员对飞机状态的感知。

角色转型的矛盾与平衡

传统飞控系统的自动化与情境意识的矛盾尤为突出。例如，早期电传飞机的自动驾驶系统能完成大部分巡航任务，但当系统切换至手动模式时，飞行员往往因长时间未操作而对飞机当前姿态、速度感知模糊，导致“手动接管失误”。而主动侧杆与主动脚蹬系统通过“多维度反馈”，将抽象的系统状态转化为飞行员可感知的物理信号，有效解决了这一矛盾。

通过主动操控系统的“操作权限动态分配”，能够平衡自动化与人工干预。例如，在正常巡航阶段，系统赋予自动化较高权限，主动侧杆仅提供轻微力反馈，减少飞行员操作负担；而当进入复杂地形（如山区、机场净空区）时，系统会自动降低自动化权限，增强侧杆与脚蹬的反馈力度，提醒飞行员随时准备

接管。这种“动态权限调整”模式，既发挥了自动化在稳定飞行中的效率优势，又通过反馈机制确保飞行员始终处于“情境感知激活”状态，实现了“自动化辅助”与“人工决策”的无缝衔接。

从功能导向到体验导向

传统飞控系统的人机交互设计以“功能实现”为核心，飞行员需要通过阅读仪表、操作按钮等多步骤操作获取信息并下达指令，这种模式在紧急场景中容易因“操作流程繁琐”导致反应延迟。而主动侧杆、主动脚蹬等新技术的出现，推动飞控系统的人机交互从“功能导向”转向“体验导向”，通过“多模态交互”“意图预判”等设计，让操控更自然、决策更高效。

“人拉操纵杆”到“主动侧杆力反馈”，从“单一仪表监控”到“多模态情境感知”，深化“人一机协同”是飞控技术革新的重要方向。主动侧杆、主动脚蹬等技术的应用，非但没有削弱飞行员的价值，反而通过放大人类在复杂决策、情境理解、异常处理上的独特优势，有效弥补其生理与认知局限，重新定义了飞行员的核心价值。

未来，随着人工智能、虚拟 / 增强现实等技术与飞控系统的深度融合，人机交互将向更智能、更自然、更符合人类认知习惯的方向演进。飞行员作为飞行安全最终守护者的角色将更加凸显，其作为系统监控者、态势决策者与异常干预者的职责，将在人机共生共进的智能航空时代，焕发新的、不可替代的光彩。

主飞控作动系统： 一场隐秘的修行

文 | 黄健 卢靖 龚孝懿

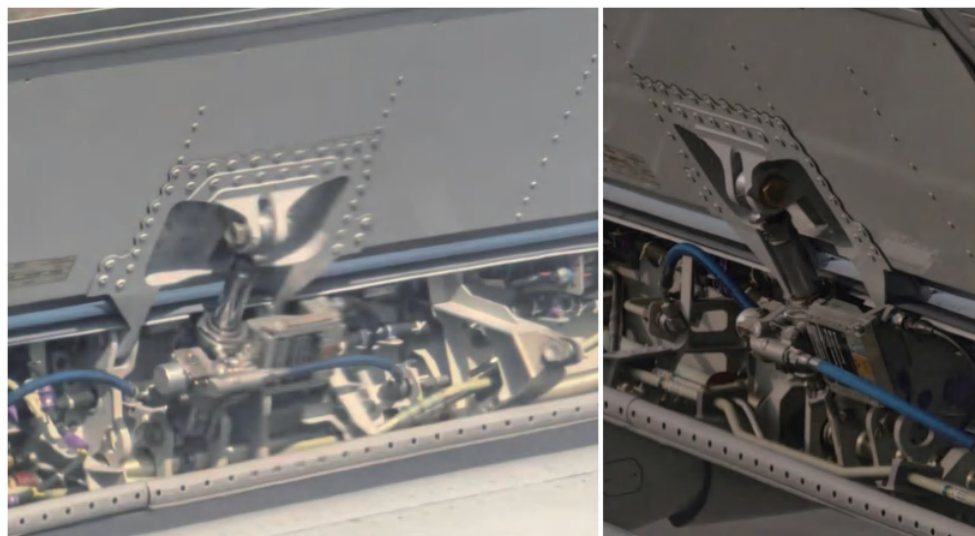
编辑 | 欧阳亮

有人说，航空是现代人的武侠梦。而正在翻看《大飞机》杂志的你，也许是一位满腹家国情怀的航空老炮，或是怀揣着“无限进步”理想的发烧友，也可能是正准备大展拳脚的少年郎。那么，我想你一定会对这样的标签感兴趣：绝世武功、赤诚丹心、藏锋守拙。

《一代宗师》中，赵本山饰演的丁连山说：“一门里，有人当面子，就得有人当里子。”在整个飞控大家族中，就有这么一个“贴着标签的里子”。它就是作动系统，是飞控的实施终端，负责将大脑的每一个意志精准落地。

作动系统很低调。无论是站在飞机外面，还是坐在客舱里面，甚至是驾驶舱里，你都找不到它的踪迹。只有当飞机稳稳地接地着陆打开扰流板减速时透过后半舱的舷窗，你才可以看到有几根金属杆从后缘伸出，牢牢支撑着扰流板，这是作动器的峥嵘偶露。

▼ 图 1 | 多功能扰流板液压作动器

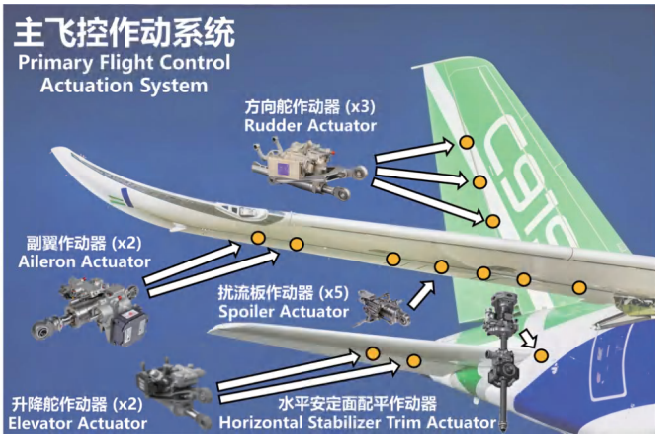


实际上，这几根看似简单的金属杆，正是庞大而精密的飞控作动系统伸向舵面的末端“筋骨”。还有更多的作动器，它们藏在那些看不见的地方，默默地将飞控计算机发出的操纵指令精准、快速、可靠地转化为舵面偏转运动，实现飞机的滚转、俯仰、偏航操纵。

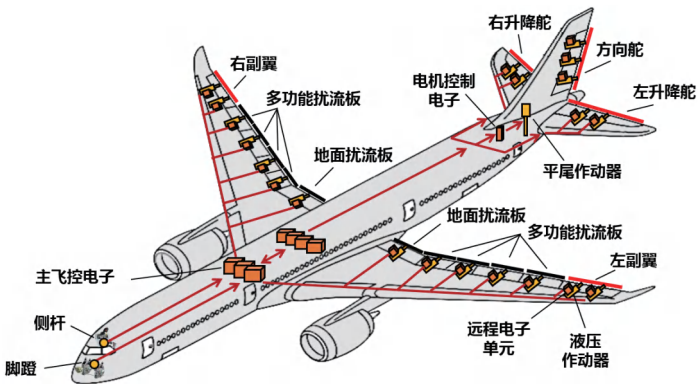
典型的民机飞控系统,由三部分组成:驾驶舱操纵子系统、飞控电子子系统和飞控作动子系统,可以形象地理解成人的“眼睛”“大脑”和“四肢”。飞机的强大,三头六臂都不足以形容。以波音 777 飞机为例,全机共有 29 个飞控作动器,遍布在副翼、襟副翼、升降舵、方向舵、水平安定面、扰流板等各个操纵面上。通常,每个作动器还会配备一个伺服控制器,既可以实现作动器的位置 / 速率伺服控制,也实时监控着作动器的一举一动。

作动器的分类与功能

回到最初的比喻,作动器直接承担着



▲ 图 2 | “看不见的”主飞控作动系统



▲ 图 3 | 主飞控大家族

飞机三轴运动作动的重大责任,是一个个铁肩担道义的侠客。大致上,客机上的作动器可以分为三类:主舵面作动器、扰流板作动器、平尾作动器。

作动器们看似个个都是铜头铁臂,实际本领却各不相同。首先,介绍的是平尾作动器。民用客机平尾面积大、舵效强、气动外载极高,平尾作动器可以说是作动家族中的大力士。窄体干线客机平尾作动器约 80 公斤重,与正常成年男子体重相仿。以如此的身躯,它可以抵挡住 20 吨的载荷不变形,相当于举起了 250 倍的自身重量,远远高于人类大力士的 2.5 倍。

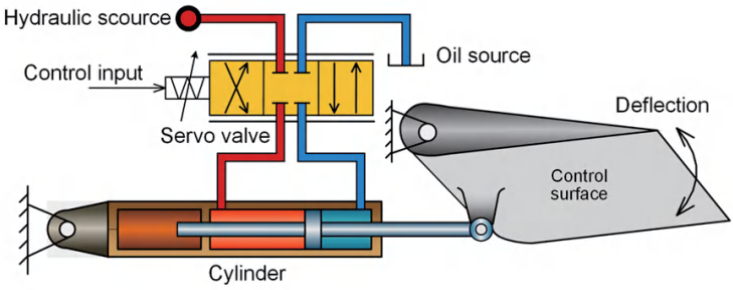
在高压电的进一步加持下,通过多级齿轮系释放扭矩,作动器可输出高达 5 吨的操纵输出力。这就好比成年男子背着个 5 吨的沙袋在操场上跑步,不得不赞叹实在是武功高强。而宽体客机平尾作动器,结构承载能力更是接近了窄体客机的 2 倍,身高远超 2 米,自重也超过了 200 公斤,是不折不扣的钢铁巨兽。

相较于平尾作动器的“一力降十会”,主舵面和扰流板液压作动器的厉害体现在“稳、准、狠”。液压作动器坚硬的金属外壳下,翻涌的是 3000/5000psi 的高



▲ 图 4 | 典型窄体、宽体飞机水平安定面配平作动器

压液压油。这一身的内力通过电液伺服阀 (EHSV) 冷静而又精准地释放。所以人们说,EHSV 是作动器的“心脏”,它接收来自伺服控制器的 mA 级的电流指令,将其按比例转化成高压流体的流量输出,通过改变作动器两个活塞腔的压差变化,进而推动活塞杆往复运动。李小龙高高跃起,可以在空中连续踢出三脚。而液压作动器更是可以在 5 张纸片的厚度内,一秒钟作动 5 次,次次都精确命中。



▲ 图 5 | 主舵面电液伺服作动器示意图

俗话说“一个好汉三个帮”,单打独斗不是作动系统的行事风格,而是讲义气,彼此托付。用我们的行话说,就是“高可用性”。

从最早的民用飞机开始,主飞控作动系统便遵循“多余度”的设计理念,在主舵面设置多个作动器。无论是采用“主—主”还是“主—备”工作,任何一个作动器丧失都会有其他作动器及时顶上。另外,在飞控系统层面,通过给液压作动器配置不同的液压源电源电气指令信号,也能最大程度上保证操纵面的可用性。

平尾作动器同样遵循多余度设计理念。单个平尾作动器内,设置有“主、次”传力路径,确保主传力路径破损后,次传

力路径承载,并固定平尾舵面,避免平尾飘浮引发机毁人亡的灾难级事故。同时,平尾作动器也采用“主—备”或“主—主”工作的双通道电机,以保障配平功能的可用性。

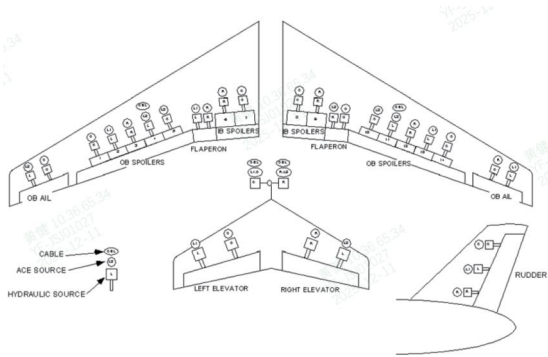
本领高、讲义气之外,更重要的就是守忠诚。换成我们行话,叫做“高完整性”。对于飞控作动系统而言,就是百分百地执行来自总线的控制指令,不会漏执行,更不会错误执行。全机的飞控作动器少则十

余个,多则二十多个。每个作动器在生命周期内,都会执行数百万次的作动,任何一次错误,都可能会导致机毁人亡的事故。

为实现绝对忠诚(满足灾难级失效发生概率小于 1E-9 每飞行小时),就需要通过层层的设计方案来保证:

1. 伺服指令完整性: 采用总线监控器、指令 - 监控架构的伺服控制器,保证作动器收到的指令不会发生错误;
2. 伺服器件完整性: 通过对 EHSV、电机等伺服核心器件进行监控,保证作动器不会由于自身故障导致错误输出;
3. 操纵面完整性: 通过实时比较同个操纵面下不同作动器的位置、输出力等参数,当作动器发生错误时,可以及时识别

▼ 图 6 | 波音宽体客机主飞控系统多余度设计



到并切除,保证操纵面不会发生错误输出。

发展历程与方向

飞控作动系统是“机电液”高度综合的复杂系统,也是现代工业技术的“集大成者”。一代代新技术在这个领域试炼、成熟、发扬光大,“更快、更强、更智能”始终是作动系统不断修行精进的天阶。下文简要介绍一下作动系统的发展历程与方向。

在很长一段时间内,3000Psi 压力体制被广泛应用于欧美主流窄体干线客机。深受国人关注的中国商飞“21 世纪先进支线”客机、窄体干线客机也采用该压力体制。2007 年,空客超远程大型宽体客机横空出世,率先将压力体制推到了 5000psi,其典型产品如图 8 所示。接着,欧美新一代远程宽体客机也纷纷跟进,典型产品如

图 9 所示。更高的压力体制之于飞控作动器,就像武学修炼到了下一境界后的举重若轻,不仅意味着更大的力量,还有更迅猛的速度和更轻的重量。

作为最重要的液压用户,得益于新型密封材料和钛合金加工技术的日益精进,飞控作动系统产品在 5000psi 下的可靠性获得了显著提升。相信在不久的将来,采用 5000psi 压力标准的国产客机也会翱翔蓝天。

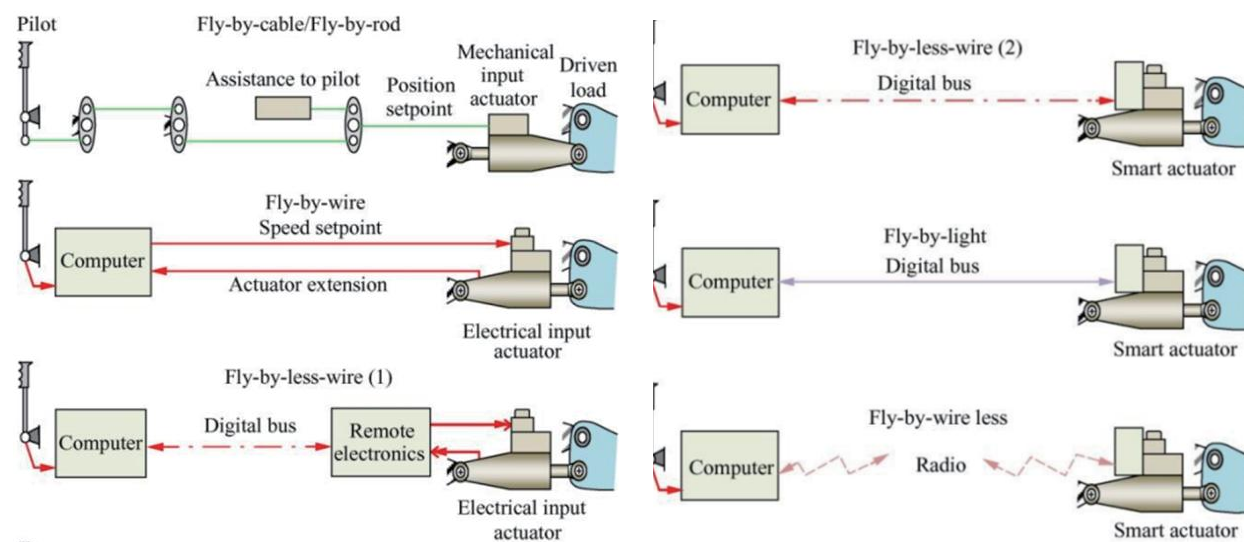
“多电飞机”的概念兴起于军用飞机领域,最早由美国某五代战斗机项目引入,在空客新一代宽体客机上发扬光大,而功率电传作动技术是其中重要的组成部分。这一代的飞机,表面是电气化的“一统江湖”,背后还是终端控制进一步“去中心化”的初探尝试。

正如同电传飞控 (Fly By Wire) 带来了电液伺服作动器,功率电传 (Power By

Wire) 带来的是新一代多电作动器,由功率电代替液压能成为了作动器的能量来源。目前,多电作动器主要有 EHA (电静液作动器) 和 EMA (机电作动器) 两种。EHA

sREU, R (分布式 Remote) 和 E (电气化 Electronic) 是作动系统发展的来时路,smart 是小巧、是灵敏、是智能,是作动专业发展的未来征途。

▼ 图 10 | 飞控系统操纵机构进化历史



接收功率电驱动内部的液压泵工作,仍然利用液压油为介质进行后端的伺服作动。EMA 则是彻底告别了液压油,直接由电机通过传动系控制作动器作动。

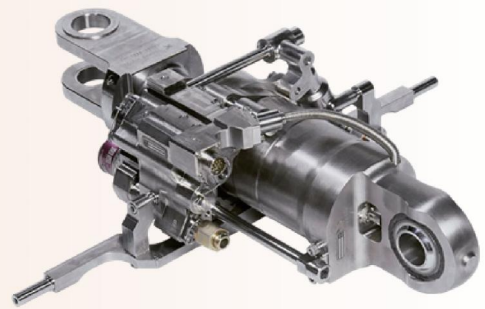
飞控作动系统是个“机电液”高度综合的复杂系统,它的发展离不开工业基础的不断进步。回望过去,从第一次世界大战时期钢索驱动的双翼螺旋桨,到 20 世纪 40 年代的机械液压助力器;从美国第三代轻型通用战机首次采用电传飞控系统,到洛克希德光传飞控样机问世。在电气化、数字化的浪潮不断推动下,作动技术一代代不断向前演进。

中国商飞窄体干线客机是国内首款采用分布式电传飞控系统的飞机,其中的核心部件是安装在作动器上的远程伺服控制器。远程伺服控制器也可以命名为:

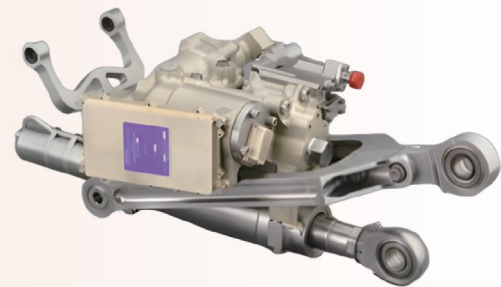
结语

飞控作动系统,就先介绍到这里。当飞机再一次平稳落地,如果你恰好坐在靠窗位,请透过舷窗看看正努力着的扰流板作动器,希望你能记住他们: 绝世武功、赤诚丹心、藏锋守拙。

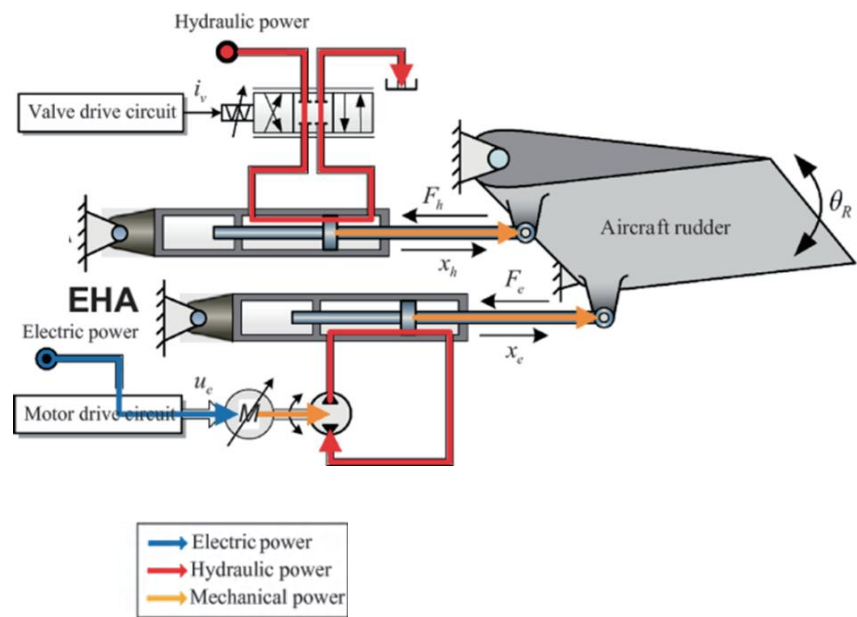
飞机的每一次起降,在无数看不见的角落,那些你不熟知的系统里,一场场隐秘的修行正在开展,而作动系统的故事,只是其中一场。



▲ 图 7 | 空客首款超远程宽体客机扰流板液压作动器



▲ 图 8 | 波音新一代多电宽体客机方向舵液压作动器



▲ 图 9 | 电液伺服作动器（上）和电静液作动器（下）示意图

▲ 图1 | 高升力系统襟翼外观 徐炳南 摄

编辑 | 欧阳亮

机械同步的基础架构

这种设计简单可靠，在多款经典机型中广泛应用，但其局限性也日益凸显：机械交连结构复杂、重量较大，且无法灵活调整不同翼段的偏转角度，难以适配现代飞机对气动效率的更高追求。

机械与电子的协同进化

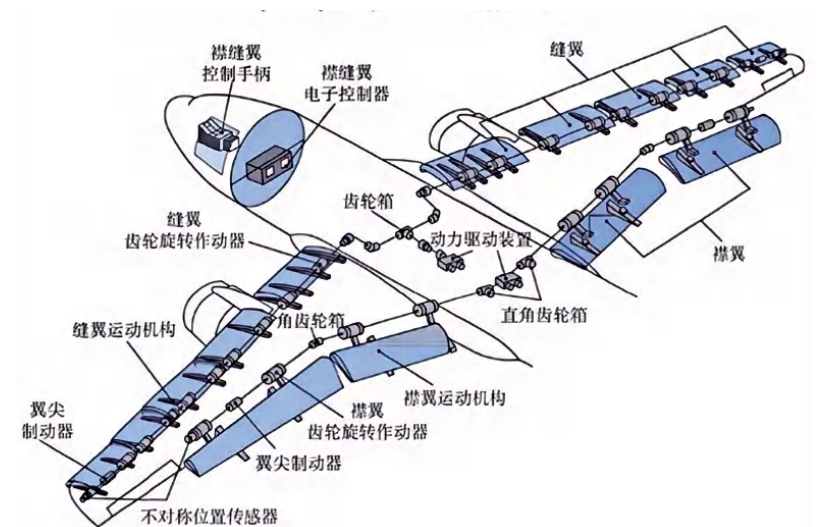
随着高升力系统健康管理功能和数据分析的应用，系统能够预测和监控设备的健康状态，并向着“智能化”逐步迈进。但机械交连仍限制了系统的灵活性，如何在保证安全的前提下突破架构

分布式架构的创新实践

这一突破基于计算机控制技术发展

和传感器可靠性提升，解锁了高升力系统的新功能：通过灵活调整内、外襟翼角度，可适配起飞、巡航、着陆等不同阶段的气动需求，同时降低系统重量和

▼ 图 2 | 典型高升力系统架构

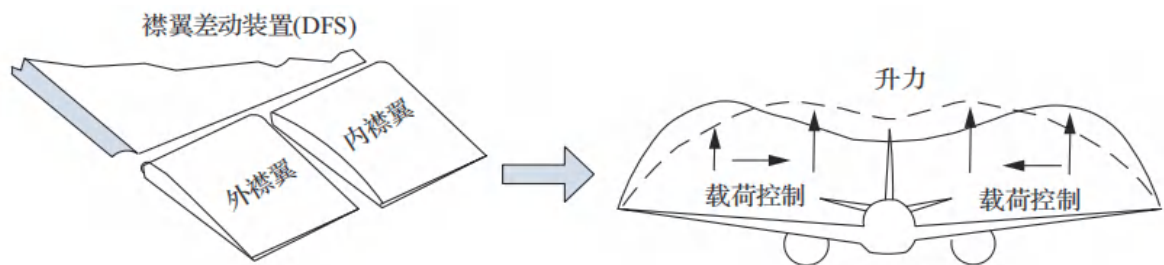


从机械操纵到电传飞控： 飞控系统的技术演进

文 | 杨海鹏 顾晨波 于维倩 王晓梅 编辑 | 欧阳亮

飞行控制系统伴随飞机的问世而发展，早期被称为飞行操纵系统。飞行控制系统的发展经历了机械操纵系统（包括助力操纵系统）、增稳与控制增稳系统、电传飞控系统等主要阶段。

▼ 王脊梁 摄



▲ 图3 | 差动襟翼升力分布示意

维护成本。与此同时，分布式架构对系统监控能力、软硬件设计精度以及系统与结构的综合集成能力提出了更高挑战，为行业发展指明了新方向。

智能与高效的进阶之路

如果说集中式架构是高升力系统的“经典款”，分布式架构是“创新款”，那么未来的高升力系统将朝着“智能高效、集成化、轻量化”的方向持续进化。

为实现更高集成度，未来的高升力系统将打破机械交连的束缚，通过更先进的计算机算法和高精度传感器，实现翼面运动的全数字化控制。未来机型可能进一步优化分布式架构，让每个翼段都能根据飞行状态独立调整，实现气动效率的最大化，同时通过多维度监控确保同步性和安全性。

为实现更轻量可靠，未来的高升力系统将采用新型复合材料和一体化制造工艺，减轻动力驱动装置、传动机构和作动器的重量，降低飞机燃油消耗。此外，还将通过简化系统结构，减少机械故障

点，提升航线运营的可靠性。

为实现更智能协同，未来的高升力系统将主飞控系统、自动飞行系统、航电系统等实现深度交联，通过数据共享实现自适应调节。例如，根据实时空速、高度和迎角，系统自动计算最优襟缝翼角度，甚至可根据气流变化动态调整，让飞机在复杂气象条件下也能保持最佳飞行状态。

从机械交连的基础保障，到机电协同的精准控制，再到分布式架构的智能突破，高升力系统的发展始终围绕着“安全、高效、可靠”的核心诉求。CCAR25.701条款的约束既是挑战也是动力，推动着行业从“机械同步”向“智能协同”跨越。未来，随着航空科技的不断进步，高升力系统这一飞机的“升力魔法”，还将绽放出更强大的能量，为民用航空的安全与高效保驾护航。

机械操纵系统的演变

早期的飞机尺寸小、速度慢，可由简单的机械操纵系统控制，即驾驶杆和脚蹬机构通过拉杆、摇臂或钢索、滑轮等组成的机械传动机构直接操纵飞机舵面（升降舵、副翼、方向舵等）偏转来实现对飞机的控制。1912 年，美国的爱莫尔·斯派雷和他的儿子制成了世界上第一套自动驾驶仪，保持飞机平飞时的俯仰角和滚转角稳定，成为后来自动驾驶仪的雏形。

第二次世界大战期间，飞机的尺寸变大、重量增加、飞行速度明显提高，上述变化带来了双重挑战：一方面，舵面铰链力矩增大，飞行员难以通过人力操纵机械链拉动舵面，从而催生了液压助力器；另一方面，为满足长时间飞行与提升轰炸精度的需求，功能相对完善的自动驾驶仪应运

操纵系统，并且安装了人感系统来为飞行员提供适当的操纵感，切断了驾驶杆与舵面的直接联系，提高了舵面操纵效能，通过多余度配置来实现系统的高可靠性。美国的 F-86、F-104 等均装有此类系统。

20 世纪 50 年代中期以后，随着飞机飞行包线（飞行速度、飞行高度等）不断扩大，飞机的操稳特性也发生了剧烈变化，仅仅依靠改变人工操纵系统和飞机的气动布局，难以对飞机进行有效控制。飞机气动参数的急剧变化以及对飞机使命要求的增加，对飞行控制也提出了更高的要求。最典型的要求即为增稳要求：通过飞行状态变量的负反馈，来改变飞机本身的特性，使之具有满足飞行品质的阻尼比和自然频率。于是，将增稳控制引入到人工操纵中，形成了具有增稳功能的全助力操纵系统。增稳系统在使阻尼比、固有频率提高的同

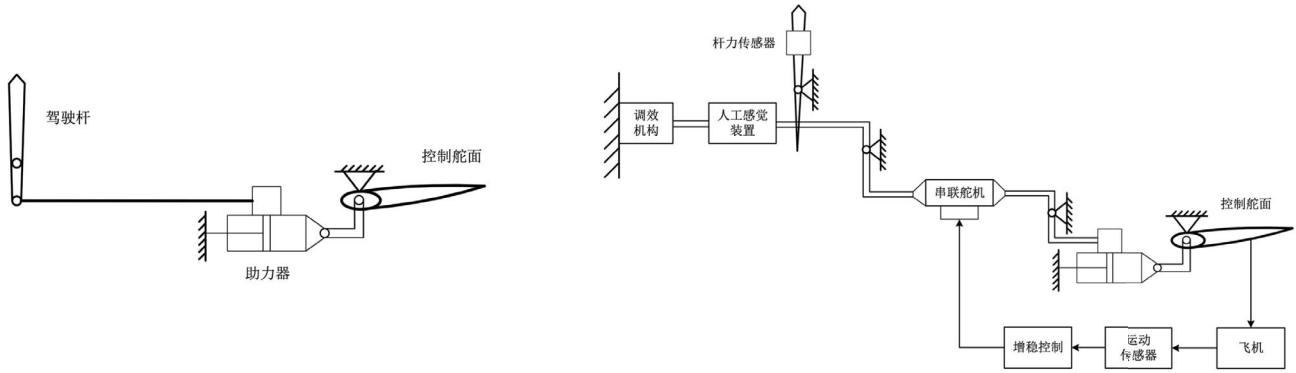
灵敏度，小机动飞行时，具有较小的操纵灵敏度）等。控制增稳的基本工作原理为：驾驶员的操纵信号经由不可逆助力操纵系统构成的机械通道使舵面偏转；同时又经前馈电气通道，由杆力传感器产生电压指令信号通过指令模型形成满足操纵要求的电信号，再与增稳回路的反馈信号综合后使舵面偏转。装有控制增稳系统的飞机有 F-14、F-15 等。典型的控制增稳系统原理图如图 3 所示。

民机的发展晚于军机的发展，1949 年 7 月 27 日，德·哈维兰公司“彗星 1”的首飞，标志着喷气式客机时代的到来。1954 年首飞、1958 年投入运营的波音 707 客机，其飞控系统仍然采用钢索 / 硬连杆机械操纵，但是在方向舵与扰流板上配备了液压助力操纵，开创了客机助力操纵的先河。

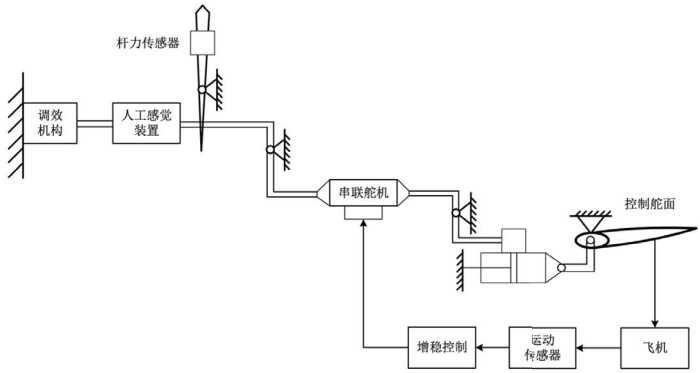
20 世纪 60 年代到 70 年代早期，民用飞机产业迅速发展，液压助力与液压功率作动器广泛应用于飞控系统中，虽然飞控系统仍然采用机械操纵，但是不可逆助力器的广泛应用，使得人感系统成为了必备设备。与此同时，用于改善飞机稳定性的功能（如偏航阻尼器）也逐渐加入了飞控系统中。在一些飞行功能上（如飞机的滚转扰流板、配平和襟 / 缝翼的控制）进行了以电信号来传递驾驶员操纵指令的尝试。

论和余度技术的日趋成熟，20 世纪 70 年代初，在控制增稳系统的基础上，电传操纵系统 (Fly-By-Wire System, FBWS) 应运而生。电传飞控系统取消了驾驶杆到舵机之间的机械传动机构，飞行员操纵指令以电信号的形式直接传输到伺服控制回路，较好地克服了机械操纵系统的固有缺陷，提升了飞机的稳定性和操控性，减轻了飞行员的工作负担。电传飞控系统原理图如图 4 所示。

军机上率先列装电传飞控系统，1974 年首飞的美国 F-16“战隼”战斗机是全球第一款量产型、采用纯模拟式全权限电传飞控（后期升级为数字式）的



▲ 图 1 | 可逆式助力操纵系统原理图



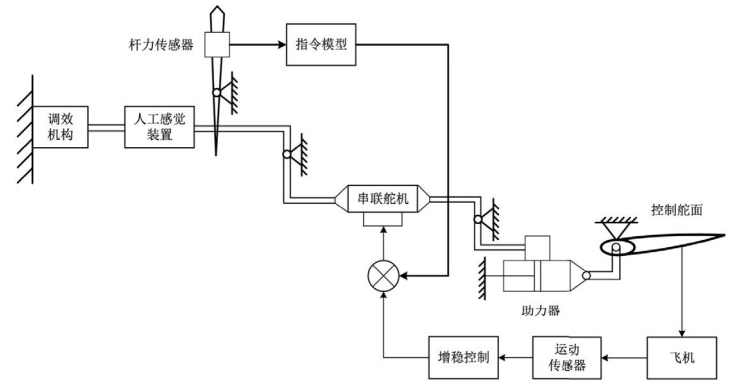
▲ 图 2 | 增稳系统原理图

而生，如美国的 C-1、A-12 等型号。这类自动驾驶仪以姿态稳定作为核心功能，辅以少量自动功能（如转弯、升降、高度保持等）操纵飞机。一个典型的带助力的操纵系统原理图如图 1 所示。

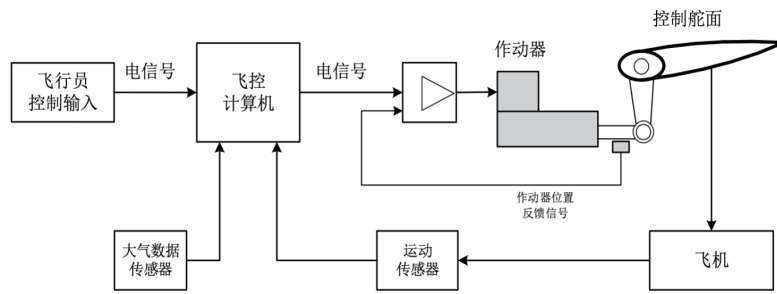
第二次世界大战之后，出现了超音速飞机。此时飞行员操纵时已无法直接承受舵面上的铰链力矩，因此，出现了全助力

时，降低了飞机的操纵反应灵敏度，不利于机动飞行。典型的增稳系统原理图如图 2 所示。

为了改善飞机对操纵指令的响应，在增稳系统的基础上增加了杆力（或杆位移）指令前馈控制，发展成为控制增稳系统，改善了系统的静操纵特性，实现非线性指令模型（大机动飞行时，具有较高的操纵



▼ 图 3 | 控制增稳系统原理图



▼ 图 4 | 电传飞控系统原理图

电传飞控系统的优势

20 世纪 60 年代，随着飞机飞行性能需求的不断提高，传统的机械操纵系统由于机械杆系的存在暴露出了许多难以克服的缺陷，例如：体积大、重量大、结构复杂。控制增稳系统的操纵权限有限，难以满足整个飞行包线内的飞行品质要求等。

随着电子计算机的飞速发展、控制理

飞机，实现了放宽静稳定性设计，使得飞机的机动性和敏捷性得到了大幅提高，在空战中展现出了强大的优势。协和号飞机，作为跨时代的超音速客机，是最早引入电传飞控系统（模拟电传飞控）并投入生产的民用客机。

电传飞控系统相较于机械操纵系统主要优势在于四个方面。首先是性能优化。电传飞控系统放宽了静稳定性，可以设计更高效、更轻、阻力更小的飞机；飞机巡航时由飞控系统自动配平，提高了飞机的燃油经济性；系统内置飞行包线保护（如失速保护、过载保护、超速保护等），保证了飞机操纵安全。

第二个优势是提高了飞机的操纵品质与飞行员体验。电传飞控系统通过精准定义飞机响应特性，无论飞机处于何种重量、速度或高度，在飞控计算机里通过软件编程使飞行员获得一致、稳定、理想的操纵感；能够快速、准确地响应飞行员的指令，使飞机的操控更加灵活、精准；能够实现自动配平、协调转弯等工作，减少飞行员操纵负荷。

第三，在飞机的减重与维护方面，电传飞控系统用线缆代替从驾驶舱到舵面之间冗长、沉重的钢索、滑轮和连杆；电传飞控系统具备自检能力，故障隔离更精准，维护成本降低。

第四，在系统集成与扩展方面，电传飞控系统实现了飞行系统的综合化，电传飞控是自动油门、自动飞行、自动着陆、自动起飞等高级功能的基础；电传飞控是发展主动控制技术（如载荷减缓、包线保护等）的前提。

在电传飞控系统的应用上，民机也逐步跟进。1988 年，空客 A320 横空出世，成为全球第一款采用数字式电传飞控系统的商用客机，确立了空客的技术标杆，并彻底改变了民航业的竞争格局。空客的侧杆概

念是飞机操纵领域的创新，A320 上所有控制面均采用电信号控制，系统采用集中式体系结构，非相似软 / 硬件设计，液压功率驱动，另外在水平安定面和方向舵上提供了机械备份操纵。

为了同空客竞争，波音在电传飞控系统上也加大了研制力度，波音在 777 飞机（1994 年首飞）上采用了其首套电传飞控系统。777 采用中央驾驶杆操纵，用当时最先进的技术进行研发，系统采用了总线体系结构、非相似软 / 硬件设计，液压功率驱动，系统保留了机械备份（水平安定面 and 一对扰流板）。但在设计理念上与空客有一定的差异，飞行员具有最高的操控权限。

空客后续相继推出了 A380/A350 机型，A380 电传飞控系统重要的创新点是采用了两路液压源和两路 270V 直流电源（2H/2E）的功率源，部分舵面采用电静液作动器(EHA)和电备份液压作动器(EBHA)，降低对中央液压系统的依赖，系统采用了 3x2 主计算机和 3x2 次计算机的结构，系统功能进一步综合，把自动飞行功能集成到主飞控系统中，取消了机械备份（采用电备份）。波音 787 飞机把主飞控、高升力、自动飞行和自动着陆集成到同一个飞控计算机中，使得飞控系统的综合程度更高。未来民机电传飞控技术将向着多电(全电)、综合化、放宽静稳定性、主动控制的方向进一步发展。

在这样激烈的技术竞争与快速发展的行业背景下，现代大型客机已逐步成为典型的高技术、高附加值高端装备，其市场长期被波音、空客两个超级寡头所垄断。中国作为全球第二大航空运输市场，中国商飞带着“让中国大飞机翱翔蓝天，承载着国家意志、民族梦想、人民期盼”的使命，应运而生。

作为后起之秀，中国商飞的“先进支线客机”作为我国第一款自主设计、自主集

成并投入商业运营的喷气客机，第一次走完国产喷气客机研制、取证、运营全过程。在“先进支线客机”上国内首创提出了“直接链”三轴电飞行控制架构，通过直接模式模拟控制链保证飞行安全，通过正常模式数字增强控制链提升操稳性能和乘坐品质。中国商飞的窄体干线客机，是国际同类飞机上首次采用基于侧杆的分布式主飞控系统架构，是对既有集中式架构的创新提升，采用了全数字分布式多级容错飞控系统架构，具备完善的飞行包线保护功能。

前沿技术展望

目前，人类正在进入以人工智能技术为代表的第四工业革命时代，在可预见的未来，飞行控制技术将在智能飞控、光传飞控、无人机集群协同控制等方面向更高层次迈进。

在智能飞控与主动控制方面，结合人工智能及先进控制理论，飞控系统将向智能控制、结构重构、自修复和一体化智能控制方向发展。

一是通过机器视觉、强化学习等人工智能技术，使得在低能见度、繁忙机场等场景下，基于视觉、激光雷达和多传感器融合的飞机自主起降成为可能。

二是通过数据孪生提升智能健康管理技术，大数据和智能算法对飞控系统关键部件进行故障预测与健康管理，实现从“事后维修”到“事前预测”的转变。

三是通过多科学优化应用，气动、结构、能源和控制融为一体，飞机成为一个智能体，根据飞行条件和平台状态，飞机平台的结构实现随控布局,系统实现资源重组，保证飞机平台的性能——操纵性、机动性、隐身性能、安全性、经济性等。

四是在超声速客机上通过动力飞控一体化以及燃油系统等深度集成设计，并应

发展阶段	特点	典型机型
机械操纵	驾驶杆和脚蹬机构通过拉杆、摇臂或钢索、滑轮等组成的机械传动机构直接操纵飞机舵面（升降舵、副翼、方向舵等）偏转来实现对飞机的控制。	机械操纵：莱特兄弟“飞行者一号”等早期有人驾驶飞机。 助力操纵系统：F-86、F-104 等，早期民机如空客 A300、波音 737 等。
增稳与控制 增稳系统	增稳系统在机械操纵系统的基础上，通过飞行状态变量的负反馈，来改变飞机本身的特性，使之具有满足飞行品质的阻尼比和自然频率要求。控制增稳是在增稳系统的基础上增加了杆力（或杆位移）指令前馈控制，解决了飞机的稳定性和机动性相互制约这一矛盾。	采用控制增稳的飞机：F14、F15 等。
电传飞控系统	飞行员操纵指令以电信号的形式直接传输到伺服控制回路，提升了飞机的稳定性和操控性，减轻了飞行员的工作负担。	军机：F16、F22、F35 等。 民机：空客 A320/A340/A330/A380/A350、波音 B777/B787、中国商飞支线、干线客机等。

▲ 表 1 | 飞行控制系统的发展阶段、特点和典型机型

用先进控制技术,实现最小燃油消耗飞行，引入先进的主动颤振抑制技术，减缓颤振导致的结构影响，通过载荷减缓与模态抑制降低结构载荷和改善乘坐品质。

在光传飞控方面，以光纤替代电缆作为信号传输介质，具有抗电磁干扰能力强、重量轻、带宽高的绝对优势，是应对强电磁环境、提升系统生存能力的重要方向。因此，光传飞控技术被认为是未来先进飞行控制系统的重要发展趋势之一。

在无人机集群协同控制方面，针对无人机集群，飞控技术的核心将转向分布式智能协同，实现群体态势共享、自主编队、任务动态分配等高级智能行为。通过分布式协同控制飞控算法，能够确保编队的安全间距与稳定形态，在长途货运等场景，通过多机编队飞行大幅降低油耗。

人工智能赋能大飞机 发展现状和展望

文 | 冯鲁文 王元元 杨敏 编辑 | 庄敏

近年来，得益于计算能力的跨越式提升、原始数据的持续积累以及算法的突破性进展，人工智能（AI）技术迎来飞速发展期。尤其在生成式 AI 领域，ChatGPT 一经推出便轰动一时，2024 年底，以 DeepSeek 为代表的国产生成式 AI 产品又取得了令人瞩目的成就。生成式人工智能技术革新意味着 AI 显著提升了语言处理能力，当前已在教育、医疗、金融和制造业等多个领域实现深度应用。

同时，人工智能正深刻改变传统制造业格局，成为产业升级的关键动力。其赋能作用首先体现在智能生产优化上。通过机器学习算法分析海量生产数据，AI 能实时优化工艺参数、预测设备性能瓶颈、动态调整生产排程，显著提升生产效率和资源利用率。数字孪生技术构建物理工厂的虚拟映射，允许在虚拟环境中模拟、测试和优化生产流程，降低试错成本和风险。

其次，AI 彻底变革了质量控制。基于深度学习的机器视觉系统能以远超人眼的速度和精度，进行产品缺陷检测，覆盖从微小裂纹到复杂装配错误，实现全自动、高可靠性的在线质检，极大提升了产品的一致性和良品率。由此可见，人工智能有望赋能大飞机设计、制造、运营、保障等全产业链升级。

产业领域应用现状

大飞机产业作为制造业皇冠上的明珠，同样经历着人工智能技术带来的全方位变革。从产品研发到售后服务，全产业链条均因 AI 技术的深度融入而实现了效率提升与模式创新。

全球知名航空制造商正在积极推进人工智能技术的深度应用。达索公司基于先进的人工智能算法和云计算打造了 3D EXPERIENCE 一站式数字化协作平台，集成三维设计、虚拟仿真等核心功能模块，实现了产品全生命周期管理的智能化升级。空客公司在 2019 年与 Neural Concept 公司合作，共同研发 AI 辅助软件作为计算机辅助工程（CAE）的替代方案，空客工程师在飞机空气动力学分析中实现了革命性突破。该技术将飞机外机身压力场预测时间从传统 CAE 方法的 1 小时缩短至 30 毫秒，运算效率提升超一万倍。

同时，空客公司在其 A320 客机的客

舱隔板设计中创新性地融合了人工智能技术。该隔板位于机舱尾部，用于分隔乘客区与厨房区域，其核心设计灵感源于黏液菌的生物行为——这种单细胞生物在寻找食物时会形成高效的冗余网络结构，AI 算法能够模拟这一自然优化策略：工程师输入包括重量减轻目标、结构强度限制、连接点等约束条件后，系统自动生成超过上万个设计方案，并基于大数据分析筛选出最优解，最终形成了一种类似蛛网的结点互连蜂窝拓扑，实现减重 45%。

在复杂零部件加工领域，人工智能对数据进行毫秒级处理与分析，动态监测工件的实际形变趋势和尺寸偏差。西北工业大学联合领先制造企业共同研发的智能加工过程监控与优化系统取得了突破性进展。该方案的创新之处在于将超高精度的在线测头深度集成到数控机床中，这些测头能在加工过程中实时、非接触式地获取工件关键几何形状的海量点云数据，结合强大的人工智能算法进行实时分析。基于此实时分析结果，系统可自主决策并动态调整数控加工路径、进给速度或切削参数，实现加工过程的自适应闭环优化。这一技术成功攻克了诸如大型飞机蒙皮等超薄、易变形复杂曲面零件加工中的关键难题。

运营与售后服务领域

大飞机运营环节，人工智能技术正在深刻变革现代客机运营的各个领域，通过数据驱动决策、自动化流程和智能预测，显著提升了安全性、运行效率、经济性以及乘客体验。

在机场运营方面，人工智能能够优化地面操作流程，缩短飞机地面周转时间，提升登机廊桥和跑道的使用效率。厦门翔安机场引入 AI 数字孪生技术构建运行管控

本图由 AI 生成

体系，航班出港滑行时间缩短 1.68 分钟（降幅 9.86%），时刻利用率提升 5%。美国航空在达拉斯机场部署的 AI 登机口分配工具，通过机器学习算法预测航班到达时序，实时匹配空闲登机口，将滑行时间减少 20%，单个航班节省约 2 分钟，日均累计节约时间达 17 小时，大幅提升廊桥周转率。

在飞行过程中，人工智能算法能够为每架次航班动态计算并优化飞行路径和飞行剖面，从而大幅降低燃油消耗和碳排放。厦门航空与九章云极平台合作，部署了先进的 AI 预测模型。该模型不仅整合了历史飞行数据、精细化气象预报、飞机性能特征和实时空域信息，更能精准模拟不同飞行策略下的油耗表现，实现航班油耗的高精度预测。基于此预测，厦航得以科学优化航班燃油携带量，在满足安全法规和备降要求的前提下，有效减少了以往为应对不确定性而额外加注的冗余燃油，避免了飞机长期“负重飞行”带来的不必要消耗。

美国阿拉斯加航空公司自主研发的 Flyways 系统则是 AI 在航线动态优化方面的典范。该系统能近乎实时地处理全球气象和空情数据，为执飞机组提供航路动态重构建议。在 2023 年试运行阶段，该系

统成功应用于 25% 的航班，通过智能绕飞不利风区、选择更短或更顺畅航路等方式，累计节省超过 50 万加仑航空燃油，不仅降低了成本，也大幅减少了温室气体排放，验证了 AI 驱动飞行优化的巨大潜力和可扩展性。

在故障预测与诊断方面，人工智能技术通过传感器实时采集飞机关键部件的运行数据，并结合先进的 AI 算法构建预测模型，实现了对潜在故障的早期预警。长龙航空的“飞机健康管理数智平台”通过对整体驱动发电机（IDG）的振动频谱、工作温度等多维度参数进行持续分析，能够异常精准地预判其内部构件的损耗趋势和剩余使用寿命。这种预测的准确性，使得航空公司能够根据部件的实际状态而非固定周期来规划维修和更换，实现了从“按时维修”到“按需维修”的飞跃。

东方航空与菜鸟联合打造全球首个智慧机库，通过 AI 图像识别技术自动检测飞机蒙皮损伤（如划痕、凹坑等），并利用数据挖掘预测潜在结构故障。全球航空巨头 GE 公司也积极拥抱这一趋势，成功开发了一系列 AI 驱动解决方案，如应用于 GEnx、GE9X 和 Leap 等先进发动机的智能叶片检查工具和 AI 辅助探针检查工具等。这些工具利用计算机视觉和深度学习算法，能够自动识别孔探图像中细微的叶片裂纹、变形或烧蚀等缺陷，大幅提升检测的效率和准确性。

在维修辅助方面，人工智能技术通过整合维修手册和历史案例库，为工程师提供实时决策支持。以长龙航空的“民航 AI 维修工程师”为例，该系统在输入故障代码后 1 分钟内即可生成涵盖故障原理、修复步骤、航材清单的完整解决方案，将发动机压气机叶片故障的排故时间从 12 小时压缩至 6 小时，大幅降低了人工检索手册的错漏风险。



未来应用展望

设计环节，空气动力学优化方面，人工智能未来应用主要体现在通过分析海量数据和运行模拟，优化飞机的外形设计，以减少空气阻力、提高燃料效率并降低排放。结构设计与分析方面，人工智能通过生成式设计算法能够帮助设计出更轻、更坚固的飞机结构。仿真加速方面，人工智能未来应用能够显著加快仿真和测试过程，减少设计周期，降低研制成本。通过人工智能驱动的流体动力学计算工具，工程师可以快速验证设计方案，优化空气流动和热管理。此外，人工智能的发散性思维未来能够生成全新的飞机设计概念。

制造环节，未来将发展数字孪生驱动的柔性生产线，通过工业物联网实时采集机床振动、温度等数据，结合机理模型预测刀具磨损趋势，动态调整加工参数。机器视觉与协作机器人深度融合是另一方向，AR 辅助装配系统可投射虚拟定位线引导工人操作；复合材料自动铺带机结合 AI 视觉检测，实时识别褶皱缺陷并调整铺贴轨迹，降低缺陷率。人工智能还能够处理供应商、物流提供者

和维护团队的大量数据，提供实时洞察，识别瓶颈或风险，并快速应对。例如，分析历史需求模式和实时数据，准确预测未来供应需求。

运营环节，未来将实现全域实时协同决策，构建“空天地一体化”数据平台，融合卫星气象、ADS-B 监视，通过流式传输计算数据动态优化航迹，降低油耗。同时，人工智能将成为飞行员最强大的智能副手，通过自然语言处理和意图识别，高效理解指令，将复杂空情浓缩为清晰的可操作建议，或在紧急状况下接管高负荷操作，大幅减轻飞行员认知负担，提升人机协作效能。

保障环节，未来人工智能将更加深刻地变革航空维修保障体系，通过多维度智能化应用显著提升运营效率与可靠性。在预测性维护领域，AI 通过实时分析飞机传感器与飞行数据，精准预判部件故障趋势。AI 驱动的无人机和爬行机器人可自主执行机身扫描任务，在无需拆卸部件的情况下精准识别微米级裂纹，完成无损探伤工作。此外，人工智能数据分析引擎还可以持续挖掘历史飞行记录与维护档案，构建机队健康预测模型。

▼ 来源：news.alaskaair.com



新一代发动机维修网络不断扩大

文 | 赵平 编辑 | 庄敏

随着新一代发动机交付量的增加、机队规模的扩大、机队运行时间的积累以及不断暴露的耐久性问题，商用发动机制造商不但要考虑如何满足发动机送修需求，还要考虑如何解决发动机耐久性改装等需求。上述需求的满足都依赖发动机 MRO 网络的支撑，但现有发动机 MRO 网络的维修产能远不足以承担这种需求压力。与此同时，各商用发动机制造商还要面对 MRO 网络资源的竞争。为了解决这些问题，商用发动机制造商正在通过各种措施加大新一代发动机 MRO 网络建设，提升发动机维修产能。

▼ 陈伟宁 摄



面临挑战与建议

尽管人工智能在赋能大飞机全产业链方面已取得显著成效，但其发展之路依然面临诸多挑战。飞机运行的可靠性要求达到 10^{-9} 这一极高标准，而复杂的航空应用场景对 AI 系统的可靠性提出了极高要求。此外，人工智能的权限管理问题与航空领域的严格安全标准之间存在一定冲突，这一挑战迫切需要通过创新性的解决方案来突破，以确保 AI 系统赋能大飞机产业链更加安全、可靠。综上所述，发展“人工智能 + 大飞机产业”需重点开展以下四方面工作：

第一，构建航空智能技术标准体系与顶层规划，强化自主可控能力。推动人工智能与大飞机产业深度融合，需优先建立系统性技术标准与顶层设计框架。标准化与顶层设计是产业规模化发展的基石，可加速技术从实验室向工程化跃迁，支撑国产大飞机安全性与国际竞争力提升。中国航空工业集团已发布《“人工智能 +”专项三年行动方案》及《人工智能发展规划》，明确“突出航空特色、突出应用导向”的技术路径，聚焦飞机全生命周期智能化。在顶层规划之下，布局底层算法、软件技

人工智能的权限管理问题与航空领域的严格安全标准之间存在一定冲突，这一挑战迫切需要通过创新性的解决方案来突破，以确保 AI 系统赋能大飞机产业链更加安全、可靠。

术攻关，避免核心工具受制于人。

第二，突破复杂场景关键技术，推动人工智能工程化落地应用。针对大飞机产业中的设计、制造、飞行控制等高难度场景，需集中攻坚人工智能技术瓶颈。在设计环节，利用人工智能实现多目标协同优化，压缩设计迭代周期；在制造环节，通过人工智能助力复杂零部件制造装配，推动产业链优化；在飞行环节，探索单飞行员驾驶技术，通过人工智能降低运营成本并提高飞行安全性；在维修保障环节，通过人工智能技术增加预测性维修比例，防患于未然，积极使用自动化探伤技术。

第三，建设航空数据联盟与协同平台，破解数据壁垒与孤岛。大飞机产业人工智能的核心瓶颈在于数据稀缺与割裂。单一企业数据规模有限，且设计、制造、航司、空管等环节数据分散，难以支撑人工智能的训练需求。破解之道在于构建跨领域数据联盟，在保障数据安全与产权的前提下，整合机场、航空公司、零部件供应商的多元数据，构建覆盖“设计—运行—维修”全生命周期的数据池，解决数据碎片化问题。

第四，构建产学研深度融合培养体系，定向培育航空人工智能领域人才。当前，我国航空智能领域面临双重瓶颈：一方面，传统航空工程师对人工智能、认知计算等新技术掌握不足；另一方面，人工智能专家缺乏飞机设计、适航标准等航空专业知识。为此，需构建全新的人才培养体系，如联合高校重塑课程体系，开设《飞行器智能设计》《航空数据挖掘》等交叉课程，将国产大飞机真实案例纳入教学项目。建立终身学习机制，主机厂邀请相关领域专家授课，开设专班，培训一线技术骨干，为“人工智能 + 大飞机”提供可持续支撑。

LEAP 发动机售后市场潜力巨大

尽管 LEAP 系列发动机正式投入商业运营的时间不到 9 年，但 CFM 国际公司已经提前布局了发动机的 MRO 网络建设。这主要是基于三个原因：第一，LEAP 发动机机队规模大，目前现役 LEAP 发动机接近 8000 台。第二，LEAP 发动机机队规模增速快，其交付速度大约是 CFM56 发动机的 2 倍。第三，CFM 国际公司在不断推出 LEAP 发动机的耐久性改装，LEAP 发动机的改装需求也在进一步占用 MRO 网络的维修产能。

尽管面临产能不足与供应链重建等压力，但不断增长的售后市场需求促使 CFM 国际公司在强化内部 MRO 网络建设的同时，也在加速推进外部合作伙伴 MRO 网络建设，以此提升 LEAP 发动机维修能力。

据《航空周刊》预测，到 2029 年，CFM 国际公司的 LEAP 发动机数量将超过 CFM56 发动机，成为全球航空发动机市

场占有率最高的型号。LEAP 发动机未来 10 年的 MRO 支出将达到 2385 亿美元，成为全球窄体飞机发动机维修业务发展的核心驱动力。

2023 年，LEAP 发动机的全球送修量为 725 台。赛峰集团公布的有关资料显示，2025 年 LEAP 发动机的送修量为 1725 台，预计 2028 年的送修量将达到 3500 台，2040 年将超过 5000 台。相比之下，CFM56 发动机在未来几年内的年送修量不会超过 3000 台。

同时，LEAP 发动机的改装需求也在不断增加。CFM 国际公司在提高 LEAP 发动机交付速度的同时，也在不断通过技术革新对其进行性能升级，提高发动机的耐久性。

2024 年 12 月，LEAP-1A 发动机高压涡轮升级改装套件获得美国联邦航空局和欧洲航空安全局的适航批准。该套件包括新设计的高压涡轮一级叶片、导向叶片和前内导向叶片支撑，这是 CFM 国际公司为提高 LEAP-1A 发动机耐久性推出的最新设计，主要针对在中东和亚洲的高温、恶劣环境中运营的空客 A320neo 飞机。CFM 国际公司期望通过高压涡轮升级改装，将 LEAP-1A 发动机的服役时间提高到与 CFM56 发动机相当的水平。

CFM 国际公司在推出该改装套件之后，采取了双线推进策略：一方面，在发动机生产线上进行改装，保证新交付的发动机已完成该项性能升级；另一方面，通过逐步向发动机 MRO 网络交付改装套件，保障送修发动机完成该项改装。

CFM 国际公司正积极推进的另一项改装是 LEAP 发动机的反向引气系统（RBS）改装，该改装是为了解决 LEAP 发动机燃油喷嘴出现的燃油结焦问题。通过对比分析安装 RBS 与未安装 RBS 发动机的运行数据，CFM 国际公司验证了

RBS 系统的有效性，确定 RBS 系统满足设计要求，能够有效抑制燃油喷嘴形成积碳。

从 2024 年 4 月开始，在发动机生产线上完成 RBS 改装的 LEAP-1A 发动机开始交付，但是在役 LEAP-1A 发动机的改装工作从 8 月才开始，并且改装需求不断增加。与此同时，CFM 国际公司针对 LEAP-1B 发动机的 RBS 改装方案还在验证阶段，LEAP-1B 发动机的 RBS 改装开始时间与 LEAP-1A 的 RBS 改装开始时间相差大约 1 年，这与两种型号的发动机投入商业运营的时间相匹配。

在 RBS 改装的实施层面上，CFM 国际公司采取了更为灵活的策略。与高压涡轮耐久性改装一样，RBS 改装在发动机生产线和发动机维修车间同步进行。此外，CFM 国际公司还向航空公司提供 RBS 改装套件，航空公司可根据自身情况对发动机进行改装。该项工作既可以由航空公司自己完成，也可以委托给第三方维修服务供应商执行。针对航空公司将 RBS 改装委托给第三方维修服务供应商来执行的情况，CFM 国际公司 LEAP 发动机客户技术总监表示，许多第三方维修服务供应商并非 CFM 国际公司主动选择的，而是 CFM 国际公司与航空公司协商的结果。大多数情况下，航空公司会提出希望由其指定的维修服务供应商执行 RBS 改装，CFM 国际公司在面对这样的诉求时会积极参与其中。虽然并非所有的此类诉求都能获得 CFM 国际公司的批准，但大多数第三方维修服务供应商都会获得 CFM 国际公司的培训和认可，并最终成为 CFM 国际公司授权的 RBS 改装服务供应商。

CFM 国际公司表示，2024 年已经向全球供应了超过 500 套 RBS 改装套件，目前约有 700 台发动机（含现役机队与新交付发动机）已完成 RBS 改装。除了



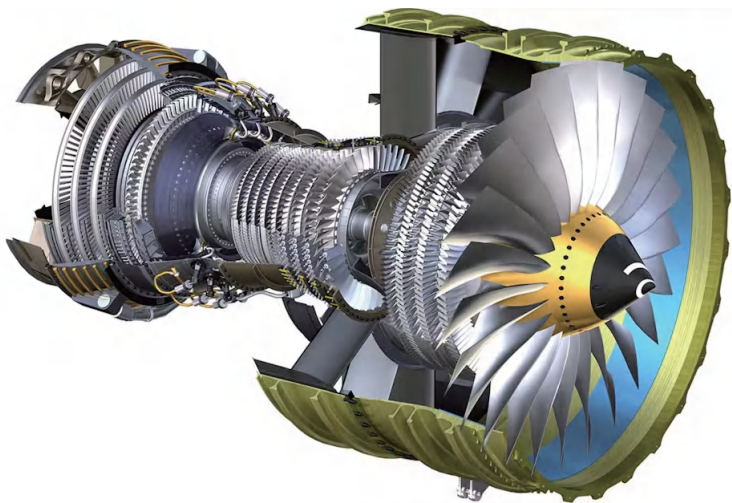
▲ 来源：www.safran-group.com

以上在全球范围内推广的高压涡轮升级改装和 RBS 改装外，在接下来的几年里，LEAP 发动机的其他升级改装工作仍需要发动机 MRO 网络提供有力支持。虽然并非所有的改装工作都需要在发动机维修车间内完成，但很多航空公司会选择在发动机送修时执行这些改装，这在很大程度上增加了发动机维修车间的工时和航材负担。可以预见，随着发动机交付数量的不断提高，MRO 网络面临的压力也将越来越大。

CFM 加速布局 MRO 网络

为应对 LEAP 发动机维修需求变化，赛峰集团与 GE 航空航天正加速全球 LEAP 发动机 MRO 网络布局。2023 年赛峰集团宣布投入超 10 亿欧元扩建内部 MRO 网络，包括在布鲁塞尔新增 LEAP 发动机维修车间，在摩洛哥、印度、墨西哥及法国进行发动机修理设施建设。GE 航空航天同步启动为期 5 年的发动机

▼ 图 | LEAP-1A 高涵道比涡扇喷气发动机



预计到 2028 年, LEAP 发动机的送修量将开始显著增加, 发动机修理服务供应商可能需要在未来 2 至 3 年内相应地提高 LEAP 发动机的维修产能。

MRO 网络投资计划, 重点提升欧洲、亚太及拉美地区现有发动机修理厂的维修能力。

CFM 国际公司当前已构建了包含 8 家授权发动机修理厂的 MRO 生态系统。2024 年, CFM 国际公司推出的 Premier MRO 项目整合了 5 家核心发动机 MRO——汉莎技术公司、法荷航工程维修公司、达美航空技术运营公司、标准航空和新加坡科技工程有限公司, 这 5 家企业均为具有 CFM 品牌服务协议认证的发动机维修服务供应商。

考虑到 LEAP 发动机投入市场的时间相对较短, 目前的送修工作主要集中在发动机快修业务和发动机改装业务上。预计到 2028 年, LEAP 发动机的送修量将开始显著增加, 发动机修理服务供应商可能需要在未来 2 至 3 年内相应地提高 LEAP 发动机的维修产能。

汉莎技术公司近期针对 LEAP-1A 发动机维修产能的投资主要集中在发动机性能升级改装项目上。其中最具代表性的是 RBS 改装, 基于当前 LEAP 机队对于 RBS 改装的市场需求, 预计未来两年内, 汉莎

技术公司将会持续承接 RBS 改装业务, 并形成稳定的业务增长点。

因为 LEAP 发动机采用的是开放式维修网络模式, CFM 国际公司允许与其合作的发动机维修服务供应商提高发动机部件修理能力和对发动机零部件维修进行产业化。汉莎技术公司在发动机零部件维修领域持续投入, 依靠在发动机零部件维修方面的技术积累, 不断扩大 LEAP 发动机零部件的维修能力, 以形成对发动机修理业务的支撑。

总部位于美国的标准航空依托在圣安东尼奥的发动机修理厂, 为 LEAP-1A 和 LEAP-1B 发动机提供快修服务和性能恢复修理服务。2024 年, 标准航空对发动机维修设施进行升级, 为后续执行更全面的 LEAP 发动机维修服务做好准备。目前, 圣安东尼奥发动机修理厂的 LEAP 发动机年维修量为 200 ~ 250 台, 如果市场需求强劲, 标准航空有能力进一步提高年维修量。

联合航空航天维修公司目前专注于 LEAP-1A 和 LEAP-1B 发动机的快修服务, 后续可能拓展其他发动机型号的维修能力。为实现这一目标, 联合航空航天维修公司将在未来两年内取得 LEAP 全系列发动机的维修许可, 并计划在塞浦路斯拉纳卡发动机修理厂扩建一座专用试车台, 以完善维修后发动机的测试能力。

以色列航空航天工业公司正在加速推进 LEAP 发动机维修能力建设。2026 年之后, 年维修量将达到 250 台。此外, 该公司还计划 2027 年在特拉维夫兴建一个 LEAP 发动机维修车间, 进一步扩大 LEAP 发动机的维修产能。

葡萄牙航空维修工程公司于 2024 年成功获得葡萄牙民航局颁发的 LEAP-1A 发动机维修许可证, 涵盖 LEAP-1A 发动机的零件修理、翻修及测试等业务。该公

司已同步获得 EASA、FAA 的维修许可证。目前, 葡萄牙航空维修工程公司正积极申请中国民用航空局的 LEAP-1A 发动机维修许可证。

预计未来几年, CFM 国际公司将在现有授权体系的基础上, 新增 3 ~ 5 家授权发动机维修服务供应商, 进一步完善其全球发动机 MRO 网络。

普惠提升维修产能

普惠公司的齿轮传动涡扇 (GTF) 发动机因耐久性问题导致全球范围内大量飞机停场, 问题主要与受污染的粉末金属材料有关, 这种缺陷可能使 PW1000G 发动机部件在运行中出现裂纹, 导致发动机提前拆下送修。针对这一问题, 普惠公司公布了相关改进计划, 预计在 2026 年前完成 600 ~ 700 台发动机的返厂修理, 受影响的飞机型号涉及空客 A320neo、A220 以及巴西航空工业公司的 E 系列飞机。

GTF 发动机的 MRO 网络包括 10 家发动机维修服务供应商。目前, GTF 发动机 MRO 网络正在不断提高维修产能。其中, 位于佛罗里达州西棕榈滩的发动机修理厂计划增加 40% 的产能。该修理厂在 2021 年完成改造, 为普惠公司 GTF 发动机 MRO 网络中的一员。普惠公司与新西兰航空公司的合资企业——基督城发动机维修中心正在筹备一项 1.5 亿美元的扩建计划。如果该计划顺利实现, 该发动机维修中心将于 2026 年 12 月开展 GTF 发动机的翻修业务。预计到 2032 年, 该发动机维修中心的 GTF 发动机年维修量将超过 140 台。

瑞航技术公司 2024 年在苏黎世扩建的发动机修理车间完成了首台 GTF 发动机的维修工作, 并重新启用了厂内闲置的

发动机测试台以提升对 GTF 发动机的测试能力。瑞航技术公司业务发展副总裁表示, 该公司致力于通过长期投入成为具备 GTF 发动机深度维修资质的发动机维修服务供应商。

需要特别注意的是, 普惠公司作为 CFM 国际公司的竞争对手, 不仅仅在发动机设计制造层面存在竞争关系, 还在全球发动机 MRO 网络上存在竞争。双方在发动机维修服务网络上采取了不同的竞争策略, CFM 国际公司对于 LEAP 发动机的改装没有限制发动机维修服务供应商的自主选择权, 但是普惠公司针对 GTF 发动机建立了一个封闭的 MRO 网络, GTF 发动机的维修服务供应商只能按照普惠公司的分配开展修理业务, 对承修发动机来源没有选择权。

罗罗与 GE 不断扩大服务规模

未来 10 年, 宽体客机发动机维修市场的重心主要集中在波音 787 与空客 A350 的发动机上。罗罗公司是这两款宽体客机的发动机供应商, 在波音 787 的发动机选型上, 罗罗的 Trent 1000 发动

▼ 图 | 罗罗 Trent 1000 发动机



机与 GEnx 发动机形成竞争。此外，罗罗的 Trent XWB 发动机是空客 A350 的唯一选装发动机，而罗罗的这两款 Trent 系列发动机在出售中都附带了全面售后维修服务合同。

目前，罗罗正在努力提升大型发动机维修服务能力。罗罗对位于英国德比的两处厂区以及德国柏林附近的达勒维茨发动机修理厂进行了约 5500 万英镑的投资。位于德国达勒维茨的发动机修理厂在新冠肺炎疫情期间停止了维修业务，主要开展公务机发动机维修。2024 年 12 月，达勒维茨发动机修理厂完成了首台 Trent 1000 发动机的修理，标志着该发动机修理厂正式重启商用发动机维修业务。未来，该发动机修理厂将主要聚焦 Trent 1000 的快修服务。罗罗计划到 2026 年将该发动机修理厂转型为 Trent XWB84 发动机的组装与测试中心。

与此同时，罗罗还采取多种措施，努力提升 Trent 发动机 MRO 网络的产能。罗罗今年计划在其发动机 MRO 网络中增加新认证的发动机维修服务供应商，以应对未来宽体客机发动机维修市场的增长。以罗罗与位于阿布扎比的萨纳德航空技术公司签署的合作协议为例，根据协议，罗罗向萨纳德航空技术公司提供必要的技术支持，使其能够开展发动机维修业务。相较于建立新的合资企业，罗罗更倾向于在现有的发动机 MRO 网络中增加更多经过认证的发动机维修服务供应商。

此外，罗罗在 2024 年 2 月的新加坡航展上宣布了一项价值 10 亿英镑的 Trent 1000、Trent 7000 和 Trent XWB 发动机改装项目，旨在提高这几款发动机的耐久性。

Trent 1000 发动机作为波音 787 飞机的选装发动机，在初期暴露了热端部件的耐久性问题。为了解决这一问题，罗罗

开发了 Trent 1000 发动机高压涡轮改装套件。2024 年 12 月，罗罗完成了 Trent 1000 发动机关键性能改装所需的主要飞行测试。此次高压涡轮段的重新设计是罗罗提高发动机耐用性的重要突破，能够让 Trent 1000 发动机的运行时间增加一倍，这对于重建运营商信心以及扩大发动机的市场份额至关重要。

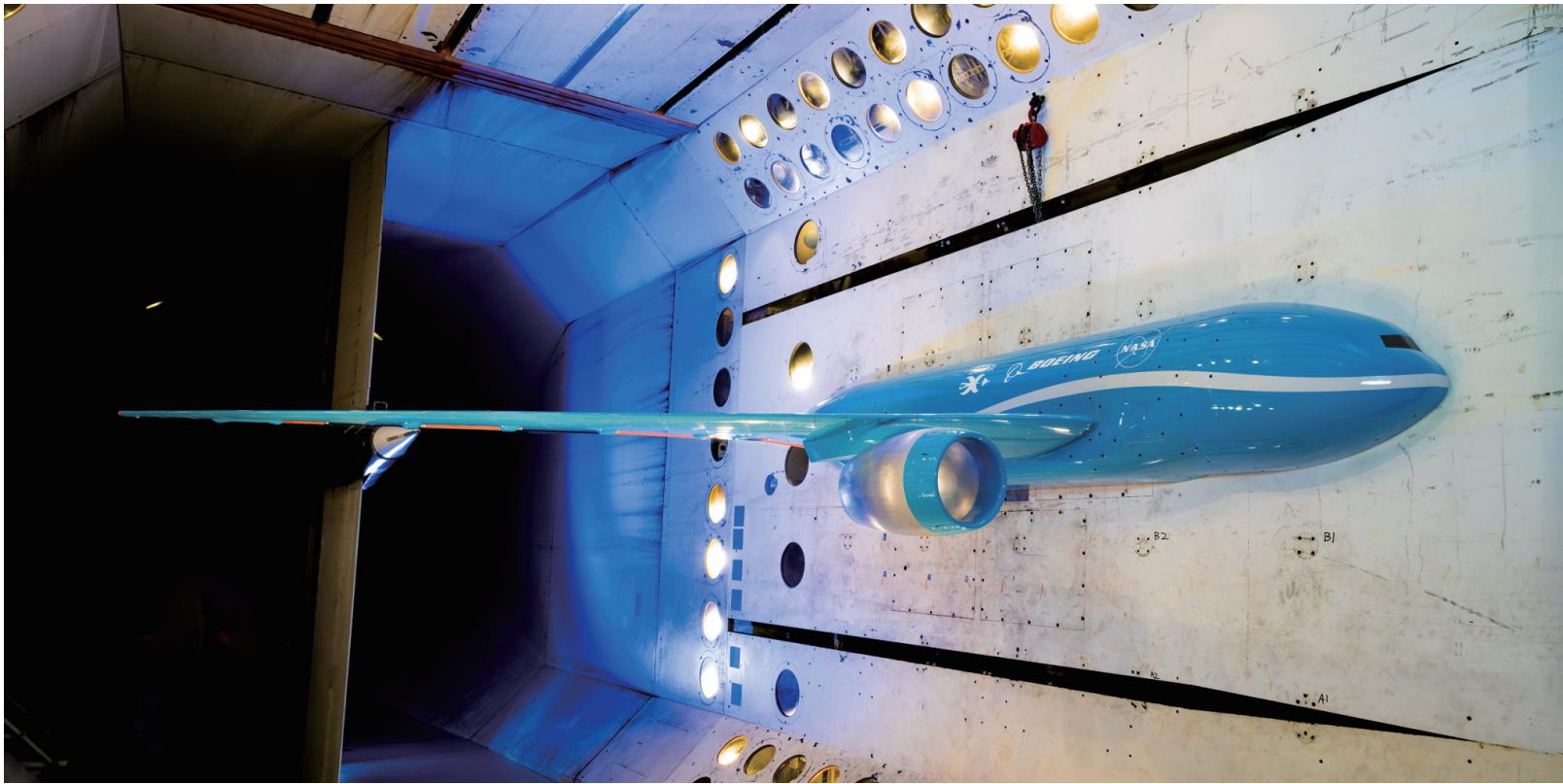
GE 航空航天公司作为 CFM 国际公司的投资方，除了要履行建设 LEAP 发动机 MRO 网络的承诺外，还加大了对 GEnx 发动机售后服务市场的投资。2025 年，GEnx 发动机的售后市场规模达到 59 亿美元。尽管 GEnx 发动机不是波音 787 唯一选装的发动机，但在 Trent 1000 发动机暴露出热端部件耐久性问题的背景下，GEnx 发动机的订单出现了明显增长。

GEnx 发动机的维修体系由 GE 自有的发动机修理厂与第三方维修服务供应商组成。GEnx 发动机的第三方维修服务供应商包括阿联酋 Sanad 集团、德国 MTU、法荷航工程维修公司等。最近，埃塞俄比亚航空也正式成为 GEnx 发动机 MRO 网络的一员。埃塞俄比亚航空作为非洲首家 GEnx-1B 维修服务供应商，有效填补了非洲地区的 GEnx 发动机维修能力的缺口。

此外，法荷航工程维修公司与沙特技术公司签署了一份谅解备忘录，计划通过共同投资的形式成立一家专注 GEnx 发动机的 MRO，目标是扩大沙特技术公司的发动机修理能力和实现 GEnx 发动机维修工作在沙特的本地化，这也是 GEnx 发动机全球售后市场战略扩张的一部分。

NASA 与波音 合作研发新一代机翼

文 | 王泽溪 编辑 | 庄敏



▲ 图 | 集成自适应机翼技术成熟度风洞模型安装在跨音速动力学风洞中

“集成自适应机翼技术成熟化”（IAWTM）项目由美国国家航空航天局（NASA）与波音联合开展，旨在通过主动气动弹性控制技术，解决下一代大展弦比柔性机翼面临的颤振抑制、载荷减缓及气动效率优化等关键工程难题。

尽管全尺寸 X-66A 飞行验证项目经历了战略调整，但 IAWTM 所验证的分布式多输入多输出（MIMO）主动控制技术

已成为确立 21 世纪 30 年代单通道客机能效革命的关键技术路径。

项目最新动态

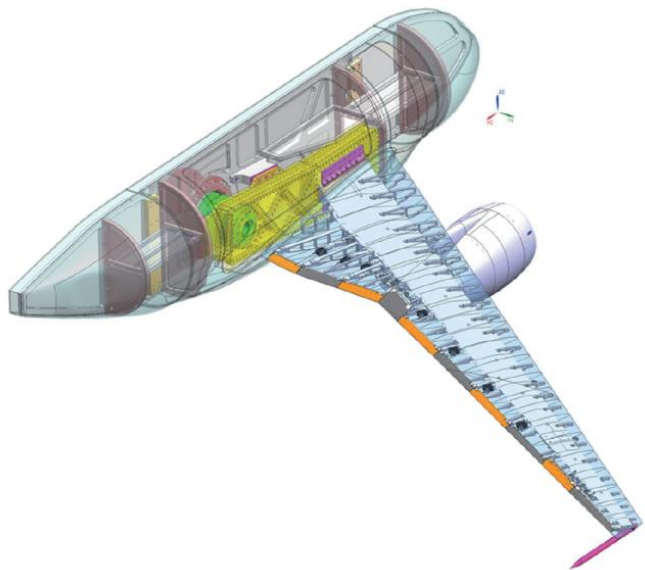
2025 年 12 月 18 日，NASA 与波音公司正式对外发布了 IAWTM 项目的最新研究成果，团队在位于弗吉尼亚州汉普顿的兰利研究中心的跨声速动力学风洞中成

功完成了一系列关键风洞测试。此次测试不仅标志着大展弦比柔性机翼技术从早期的计算流体力学模拟迈向了高保真物理环境验证阶段，更验证了在极端跨声速条件下，通过主动控制系统驯服“长、薄、软”机翼的可行性。

在本次测试中，NASA 与波音的研究团队重点攻克了大展弦比机翼固有的气动弹性不稳定性。这种新型机翼设计相比传统客机机翼更长且更薄，虽然能够显著降低诱导阻力并提升燃油效率，但在飞行中极易发生大幅度弯曲变形，并对阵风和机动载荷表现出极高的敏感性。这种柔性机翼在气流作用下会产生比小展弦比机翼（即当前窄体客机使用的展弦比 10 左右的机翼）更大的振动幅度，若缺乏有效的控制，气流与机翼结构的相互作用可能导致颤振，进而引发灾难性的结构破坏。

此前，研究团队于 2024 年进行了第一轮风洞测试，获得了基准数据，并将数据与 NASA 的计算结果进行比较，据此改进了模型。第二轮测试于 2025 年进行，采用装有 10 个独立控制面的半翼展模型，在控制维度上有质的飞跃。测试数据表明，

▼ 图 1 | 风洞实验半翼展模型结构图



该系统能在实时环境中改变机翼表面的气流分布，有效抑制机翼的振动，并显著缓解模拟阵风带来的结构载荷冲击。数据分析表明，研究团队开发的控制律在提升气动效率的同时，确保了结构的安全性，为未来将这一技术应用于全尺寸客机奠定了基础。

IAWTM 项目详析

IAWTM 项目是 NASA “先进航空运输技术”（AATT）项目下的核心子项目，具体归属于“大展弦比优化机翼”技术挑战板块，主要任务是突破亚音速运输机气动效率的物理瓶颈。

经典空气动力学理论表明，诱导阻力与机翼展弦比成反比。将商用客机的机翼展弦比从目前的 10 提升至 13.5 甚至更高，理论上可显著降低诱导阻力，从而减少燃油消耗。然而，工程实践面临着严峻的结构与气动弹性挑战：在维持机翼重量不大幅增加的前提下，大幅增加展弦比必然导致机翼变薄、变柔。柔性增加导致机翼的扭转刚度降低，使得气动弹性颤振速度降低至飞行包线以内，构成致命安全隐患。同时，长机翼对大气湍流的反应更敏感，翼根弯矩显著增加，这就要求机翼结构必须加重，从而抵消了气动收益。

针对上述挑战，研究团队确立了其核心技术目标：阻力优化、机动载荷减缓、阵风载荷减缓以及主动颤振抑制。项目的最终目标是通过主动控制技术，在不增加结构重量的前提下，确保大展弦比机翼的飞行安全与性能。

IAWTM 项目运作于 NASA 与波音公司签署的合作协议框架之下，NASA 的 AATT 项目为该研究提供了持续的基础资金支持。波音公司通过 NASA 的研究公告（NRA）获得 188 万美元资助（合同号



▲ 图 2 | 用于风洞实验的模型实物

NNL15AA00A，2015 年 1 月 22 日开始，原计划 2019 年 1 月 21 日结束，现已延长至 2026 年 4 月 30 日；原计划投入资金为 41.7 万美元），并自行投入内部研发资金，数额不详。

IAWTM 研究团队汇聚了全美顶尖的气动弹性与控制专家，形成了一个跨机构的联合攻关团队。其中，NASA 团队主要来自兰利研究中心（LaRC）的气动弹性分部和阿姆斯特朗飞行研究中心（AFRC），核心成员包括 Patrick S. Heaney（负责风洞测试规划）、Jennifer Pinkerton（负责气动弹性分析）、Jared A. Grauer（负责控制律设计）等。

波音团队来自波音研究与技术部，核心成员包括 John F. Quindlen（负责飞行器动力学与控制）等，他们负责将工业界的实际需求转化为测试指标。

供应链合作伙伴中，位于加利福尼亚州的 NextGen Aeronautics 公司承担模型设计与制造工作。他们负责将复杂的梁-吊舱结构和微型作动器集成到高保真风洞模型中。

IAWTM 项目是 NASA 与波音此前合

作的 SUGAR 项目的延续。SUGAR 项目提出了由桁架支撑的细长机翼概念（SUGAR Volt），旨在减少 30% 以上的燃油消耗。在研究中，发现细长机翼的气动弹性问题突出，为解决这一问题，2015 年初启动 IAWTM 项目。随后，SUGAR 项目从多个构型收敛到 TTBW 构型；IAWTM 则针对 SUGAR 的大展弦比细长机翼模型开展控制律研究，将控制面由最初的 2 个逐步提升到 10 个，几乎覆盖全部机翼后缘，重点解决 SUGAR 遇到的柔性机翼控制难题，同时也可为 TTBW 外翼段的柔性机翼提供气动弹性解决方案。

NASA 从 2023 年开始计划改装 MD-90 进行全尺寸飞行验证（即 X-66A），此时 IAWTM 作为 X-66A 的风险降低项目，计划将其研发出的控制律直接应用到 X-66A 上。2025 年 4 月，由于商业考量、经费压力、技术成熟度等多重原因，X-66A 项目无限期暂停，而 IAWTM 则作为“为下一代飞机薄翼进行技术积累”的重要项目持续进行。

波音认为，直接进行全尺寸试飞面临着巨大的安全风险和成本压力，特别是

颤振问题若未在地面得到充分验证，可能导致项目彻底失败。通过 IAWTM 项目在跨声速风洞中进行的精细化研究，工程师们可以在受控环境中以更低的成本探索薄机翼在跨声速区域的非线性动力学边界。尽管不再推进 X-66A 的全机制造，但通过 IAWTM 积累的关于薄机翼主动气动弹性控制的技术成果，将被广泛应用于未来的单通道客机产品线，无论是采用桁架支撑构型还是传统的悬臂式构型。因此，2025 年 12 月的风洞测试也是波音在后 X-66A 时代通过底层技术攻关维持在下一代绿色航空领域竞争力的核心举措。

项目技术贡献

为了攻克下一代高展弦比柔性机翼的气动弹性难题，IAWTM 项目在 NASA 兰利研究中心的跨声速动力学风洞开展了里程碑式的测试。该设施的独特性在于使用 R-134a 重气体作为介质，这种高

密度流体环境能够让研究人员在保证动力学相似性的前提下，使用更重、更坚固的模型来精确模拟全尺寸飞机在 3 万英尺高空、0.85 马赫巡航时的真实飞行状态，从而规避了传统风洞中模型过于脆弱的工程风险。

在模型制造上，项目组采用了一种创新的“主梁 - 吊舱”拓扑结构。以精密调校的航空铝合金实心梁作为承力结构、外挂不承力的碳纤维气动蒙皮，既保证了气动外形，又真实复现了长机翼的柔性特征。模型内部植入了三组光纤光栅，能实时重构机翼的三维变形。后缘集成了液压与电动混合驱动的 10 组操纵面，兼顾了抑制高频颤振（快速响应）和优化巡航阻力（低功耗）。

IAWTM 项目构建了与风洞模型高度对齐的数字孪生体系。团队利用高精度的非线性气动弹性仿真模型（基于 FUN3D），在虚拟空间中完成了对颤振边界的精准预测和控制律的迭代设计。通

过系统辨识技术生成的降阶模型，研究人员成功开发出能够驾驭复杂流场的控制算法。这套系统不仅包含了用于应对极端危险工况的鲁棒性设计，还引入了前瞻性的前馈控制逻辑，旨在模拟未来飞机通过激光雷达提前感知气流的能力。这种虚实结合的研发模式，大幅提升了后续风洞测试的效率与安全性。

风洞测试最终验证了三大关键技术，为未来绿色航空确立了新的技术路径：

第一，驯服硬颤振。针对跨声速飞行中可能瞬间破坏结构的硬颤振现象，主动抑制系统展现了强大的保护能力。在远超开环颤振边界的极端动压下，控制面以毫秒级的响应速度，通过微小的偏转动作迅速将发散的振动能量耗散，成功稳住了机翼。

第二，智能抗阵风。实验验证了基于前馈机制的阵风减缓技术。系统在湍流到达机翼前（将来可通过机载激光雷达实现）便提前动作。仿真数据显示，这种预判式的控制策略能将阵风引起的翼根应变降低 75.6%，极大地提升了飞行安全与舒适性。

第三，自适应变弯度。在机动飞行和巡航阶段，控制面能协同动作，一方面在大过载拉起时将升力向内侧转移，以卸载翼根负荷，另一方面在巡航中实时微调外形以寻找最佳升阻比。这证明了通过软件定义的变形机翼来实现结构减重和提升燃油效率的可行性。

对行业的深远影响

随着 X-66A 无限期暂停，IAWTM 及其后续计划的角色发生变化，从降低风险手段提升到为整个波音商用飞机部门掌握薄机翼技术的关键一环。

目前的风洞测试已将主动控制技术

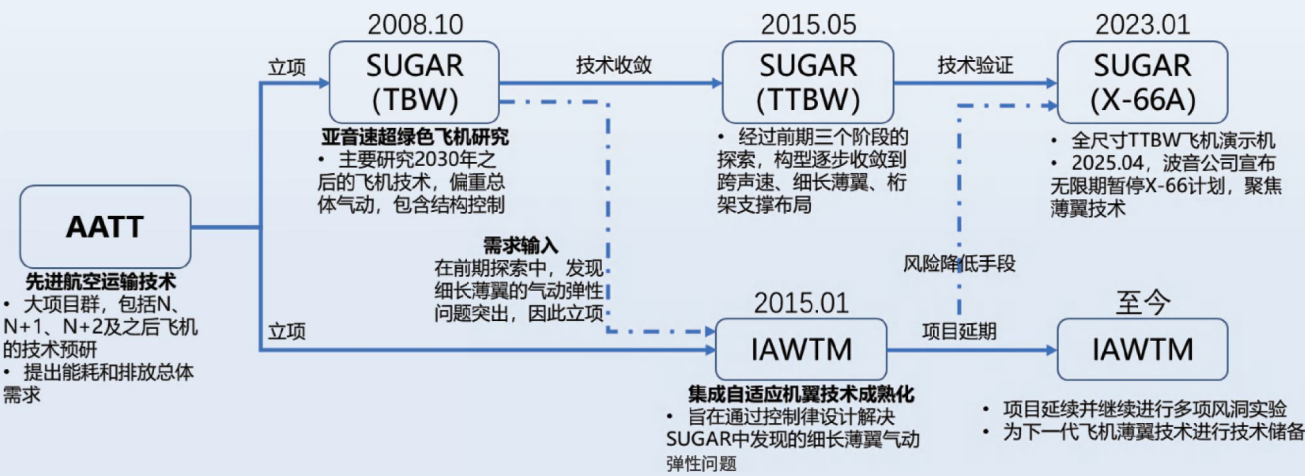
提升至 TRL 4-5 级（在相关环境中验证组件），接下来的工作重心将转向 TRL 6 级（系统 / 子系统模型或原型在相关环境中验证）。这需要构建更复杂的全尺寸地面物理测试环境，包括制造全尺寸的复合材料薄机翼段，在地面加载装置中模拟飞行载荷，并结合半物理仿真验证控制系统与液压 / 电气系统的长期可靠性。

2026 年，NASA 与波音团队将致力于消化 2025 年风洞测试产生的海量数据，重点工作包括利用实测的气动导数修正全尺寸飞机的六自由度仿真模型，以及评估控制律在非线性气动区域（如跨音速抖振等）的鲁棒性边界。

IAWTM 项目的成果将直接影响 2030 年代单通道客机的设计理念。传统飞机设计依靠增加结构重量（物理刚度）来防止颤振，IAWTM 则证明了可以用智能控制算法（即提供虚拟刚度和虚拟阻尼）来替代物理重量，这意味着未来的飞机可以降低结构重量，换取更高的燃油效率。10 个控制面的成功应用预示着未来机翼将拥有更多自由度，控制系统角色将从执行滚转 / 俯仰进化为复杂的气流管理，机翼形态将随飞行状态实时微调，实现仿生学意义上的自适应飞行。

IAWTM 项目在 2025 年取得的风洞测试成功，是航空工程领域的一个里程碑。尽管全尺寸验证机 X-66A 的步伐暂时放缓，但其背后的核心技术，即基于主动控制的超高效薄机翼，已经通过 IAWTM 项目完成了关键的成熟度提升。随着后续地面测试的深入，这一技术有望在未来十年内从实验室走向生产线，彻底改变我们飞行的形式与效率。

图 3 | IAWTM 项目与 SUGAR、AATT 项目的关系及主要历程



全球航空业的经营分化及其发展路径

▲ 来源：www.ey.com

文 | 赵巍 编辑 | 林喆

全球航空业区域发展的失衡态势已成为行业复苏进程中最鲜明的时代特征。国际航空运输协会（IATA）的最新数据显示，行业整体复苏势头强劲向好，2025 年全球航空业净利润达到 395 亿美元，2026 年预计将攀升到 410 亿美元。但是，全球不同区域间盈利水平和增长动力的差距日益拉大，发达市场（欧洲、北美）与新兴市场（亚太、中东等）在盈利逻辑、增长路径上已形成系统性分野。

本文以 IATA 发布的权威数据为基础，结合横向区域比对与纵向年度预判的双重分析维度，聚焦净利润规模、净利润率、单客净利润三大核心财务指标，辅以

RPK、ASK、客座率等运营维度等关键数据，解析全球航空业区域分化的核心特征与驱动原理，为行业发展提供决策参考。

利润规模的阶梯图景

净利润规模是区域航空业市场影响力与规模效应的核心表征，直观反映市场需求容量与行业集中度。基于 IATA 2025 ～ 2026 年的数据分析可以看出，全球六大区域形成了第一梯队垄断、第二梯队追赶、第三梯队滞后的格局，在增长动能方面呈现出新兴领跑、部分区域承压下滑的分化态势。

2025 年，全球航空业各区域的净利润呈现出两极悬殊、中间稳固的特征。欧洲、北美组成第一梯队，利润规模均超百亿美元，合计占比 60.8%，主导全球市场；中东、亚太是第二梯队，利润规模 60 亿至 70 亿美元，合计占比 32.4%，是核心增长引擎；拉美、非洲是第三梯队，利润规模不足 30 亿美元，占比仅 6.8%，发展短板突出。

欧洲的登顶得益于其市场的深度整合与成熟的盈利模式，汉莎、法荷航、国际航空集团、瑞安航空，这四大航企的市场集中度超过 80%，通过航线整合、机队标准化运营得以实现规模与盈利的双重稳健。北美紧随其后，达美、美航、美联航和美西南四大航企掌控美国国内 80% 以上的市场，稳定的商务需求与成熟的常旅客体系为其构筑了盈利护城河。

全球各区域的利润增长速率分化显著：亚太以 6.5% 的增速居首，欧洲以 6.1% 的增速紧随其后，中东、北美分别为 3.0%、4.6% 的稳健增长，拉美净利润下滑 20.0%，非洲增长停滞。

亚太的利润高增长源于新兴市场出行渗透率的提升和国际旅游的复苏。中国和印度中产阶层扩容推动年人均航空出行次数增至 0.6 次，低成本航企释放大众需求。签证便利化叠加跨境旅游回暖等因素，国际 RPK 增长 12.3%，航企的国际运力同步提升 15%。

拉美区域的利润下滑是通胀、汇率波动和燃油成本上涨的结果，商务需求下滑 8.7%，航企降价换份额导致利润收缩。非洲增长停滞的原因在于基础设施不足（机场覆盖率只有 35%）与市场需求疲软（年人均航空出行只有 0.1 次），导致航线扩张与盈利增长遇阻。

展望 2026 年，全球航空业净利润预计将达到 410 亿美元（同比增长 3.8%）。

区域	2025年E	2026年F	增长率	全球排名
欧洲	132	140	6.1%	1
北美	108	113	4.6%	2
中东	66	68	3.0%	3
亚太	62	66	6.5%	4
拉美	25	20	-20.0%	5
非洲	12	10	0.0%	6

▲ 表 1 | 全球各区域航空公司净利润对比（单位：亿美元）

区域	2025年E	2026年F	变化趋势	全球排名
中东	9.3	9.3	保持稳定	1
拉美	5.2	3.8	下降1.4个百分点	2
欧洲	4.8	4.9	小幅上升	3
北美	3.3	3.4	小幅上升	4
亚太	2.3	2.3	保持稳定	5
非洲	1.1	1	小幅下降	6

▲ 表 2 | 全球各区域航空公司净利润率对比（单位：%）

其中，欧洲、亚太将延续高增长态势，北美、中东稳健前行，拉美持续下滑，非洲持平。

区域格局仍将固化，欧美合计占比将升至 61.7%；亚太成核心增长动力，凭借 6.5% 的增速缩小与中东的差距（预计仅差 2 亿美元）；非洲和拉美的落后局面在短期内仍然难以扭转，失衡的态势将进一步加剧。

净利润率的深度解码

净利润率是衡量盈利效率与成本管控能力的核心标尺，全球各区域盈利效率的差异源于商业模式、成本结构与市场环境等多重因素的影响。2025 年全球航空公司的平均净利润率为 3.9%，在区域结构上呈现出中东独树一帜、发达市场稳健、新兴市场承压的分化格局。

中东以 9.3% 的净利润率居全球首位

（是全球均值的 2.4 倍、亚太的 4 倍），商业模式优势显著；拉美以 5.2% 的净利润率居第二位，但可持续性不稳定；欧洲、北美高于或接近全球均值，盈利稳健；亚太、非洲都低于全球均值，盈利压力突出。

中东的高盈利源于其“枢纽转运 + 高端服务”的模式。中东三大航依托核心枢纽构建面向亚、欧、非的长途航线网络，中转旅客占比高达 65%。长途航线单座成本低、票价溢价高，两舱占比高，叠加政策红利，综合成本显著低于欧洲航空公司。

亚太的低盈利是竞争与成本双重压力下的结果。亚太区域航企数量众多，引发激烈的价格战。2025 年，国内航线票价较 2019 年降低 12%，成本却上升了 8%，休闲旅客占比高，商务旅客占比低，低票价与高成本挤压盈利空间。亚太区域的低成本航企票价优势不匹配成本优势，困局难解。

2025 ~ 2026 年，全球航空业的净利润率呈现整体上升、区域分化加剧的特征。欧洲、北美小幅攀升 0.1 个百分点，中东、亚太持平，拉美、非洲分别下滑 1.4 和 0.1 个百分点，下行压力显著。

欧美的利润率提升，源于成本管控与收入优化。欧洲航企通过机队更新、数字化转型等方式降低成本。北美航企通过优化航线网络，客座率将提升至 83.9%，实

现收入成本的良性循环。

拉美的利润率下滑是因为经济恶化与成本飙升，本币贬值推高燃油和租赁成本，政局不稳拖累商务需求，航企降价促销导致盈利收缩。非洲的利润率下滑主要是因为基础设施短板，机场起降费高，航班延误率高达 30%，额外成本侵蚀微薄盈利。

净利润规模与利润率的协同度决定了发展质量。基于 2025 年全球行业的数据，全球区域可以划分为四种类型的发展模式，差异显著。

第一类，规模、效率双高型（欧洲）。132 亿美元的净利润和 4.8% 的利润率，实现了规模与效率的良性循环，成为行业标杆。

第二类，效率领先、规模不足型（中东）。9.3% 的高利润率和 66 亿美元的净利润，特点是商业模式优越，但市场容量限制增长。

第三类，规模较大、效率不足型（亚太、北美）。这两个地区均呈现出规模与效率的不充分适配，北美需要提升效率，亚太需要平衡增长与盈利。

第四类，规模、效率双低型（拉美、非洲）。核心指标居全球末位，受经济、基建等短板制约，需要在政策与投资方面进行突破。

单客净利润的悬殊图景

单客净利润指标能够衡量盈利的质量，反映客户结构、航线布局与商业模式的适配度。2025 年，全球航空业平均单客净利润是 7.9 美元，但是不同区域的差距高达 20 倍，盈利质量的分野显著。

中东的单客净利润为 28.9 美元（是全球均值的 3.3 倍、亚太的 8.8 倍、非洲的 20.6 倍），盈利优势突出；欧洲、北美都略高于全球均值，盈利质量稳健；拉美、

亚太、非洲都低于全球均值，需要提升盈利潜力。

中东的高单客盈利根源于其“长程航线 + 高端客群 + 枢纽转运”的运营模式。长程航线占比 85%，单客收入为短途航线的 3 到 4 倍；商务客占比高，两舱票价溢价显著；枢纽中转效率高，规模化客流摊薄运营成本。

亚太较低的单客盈利是短途航线多、价格敏感客群占比大、竞争激烈的结果。短途航线占比 65%，规模效应难释放；休闲客占比高引发价格战；机场起降费、人力成本高，高成本低收入挤压盈利空间，单客盈利仅为全球均值的 38%。

2026 年，全球航空业的单客净利润分化将进一步加剧。预计欧洲、北美各提升 0.3 美元，中东、拉美、亚太、非洲分别下降 0.3 美元、1.6 美元、0.1 美元、0.1 美元，盈利质量的鸿沟继续扩大。

欧美单客盈利的提升，根源于其客户群体的优化与收入的多元化。欧洲商务需求增长 7.3%，辅营收入同比增长 12%。北美优化常旅客计划，会员单客消费高达 30%，盈利质量提升。

中东的微降是因为长航线竞争的加剧。拉美的大幅下滑是受通胀增长、需求萎缩、票价下调以及燃油成本上升等因素叠加的影响。亚太、非洲的小幅下滑，是成本上升与需求疲软的结果。

增长动力与运营效率

RPK（需求）、ASK（运力）、客座率（效率）三者的协同，决定了区域航空业的增长模式与运营质量。2025 年，全球 RPK 增长 5.2%，呈现出新兴市场领跑、发达区域放缓的特征，运力与供需适配度的差异进一步加剧了行业的分化。

全球各区域 RPK 的增速分化明显。

区域	RPK 增长率		ASK 增长率		客座率	
	2025年E	2026年F	2025年E	2026年F	2025年E	2026年F
亚太	8	7.3	6.6	7.1	84.3	84.4
拉美	7.1	6.6	7	6.5	83.8	83.9
非洲	7.4	6	5.3	5.7	76.1	76.3
中东	6	6.1	5.9	5.4	80.9	84.4
欧洲	5	3.8	5.1	3.8	84.7	84.7
北美	0.2	1.5	4.7	1.2	83.4	83.9

▲ 表 4 | 各区域航司增长动力与运营效率对比 (单位: %)

亚太增速 8.0%，居全球首位；非洲 7.4%、拉美 7.1%，紧随其后；中东 6.0%、欧洲 5.0%，稳健增长；北美 0.2%，增速近乎停滞。

亚太的高增长源于国内大众出行与国际旅游的双重驱动。中国和印度城镇化发展带动国内 RPK 增长 9.2%，签证便利化推动国际 RPK 增长 12.3%，中东、南亚等航线成热点，航企的国际运力提升 15%。

北美的增长停滞是因为市场饱和与需求疲软。年人均航空出行 2.8 次，趋于饱和，商务需求仅恢复至 2019 年的 85%，远程办公削弱短途旅行需求，动能衰减。

ASK 与 RPK 的适配度关乎客座率与盈利。2025 年，全球各区域的运力策略差异化显著。亚太 ASK 增速 6.6%，低于 RPK 增速 8.0%，供需趋紧，推高客座率至 84.3%。中东的 ASK 与 RPK 增速基本持平，供需平衡，支撑 80.9% 的客座率。欧洲的 ASK 增速略高于 RPK，仍维持 84.7% 的高客座率，需求韧性强。北美的 ASK 增速 4.7%，远超 RPK 增速 0.2%，供需失衡，导致客座率仅为 83.4%。拉美的 ASK 与 RPK 增速匹配，客座率 83.8%，相对稳定。非洲的 ASK 增速低于 RPK，但航线布局不合理，导致客座率仅为 76.1%，供需错配制约效率提升。

2026 年，全球各区域将进一步优化运力。亚太将增加运力，ASK 增速 7.1%，客座率升至 84.4%。北美将收缩运力，

▼ 表 3 | 全球各区域航空公司单客净利润对比（单位：美元）

区域	2025年E	2026年F	变化趋势	全球排名
中东	28.9	28.6	下降0.3美元	1
欧洲	10.6	10.9	上升0.3美元	2
北美	9.5	9.8	上升0.3美元	3
拉美	7.3	5.7	下降1.6美元	4
亚太	3.3	3.2	下降0.1美元	5
非洲	1.4	1.3	下降0.1美元	6

ASK 增速 1.2%，客座率提升至 83.9%。中东维持平衡，客座率升至 84.4%。欧洲、拉美、非洲稳定运力，客座率小幅提升。

客座率直接影响单位成本与盈利，IATA 的统计数据显示，客座率每提升 1 个百分点，单客成本降低 2% ~ 3%。

2025 年，全球平均客座率为 81.5%，呈现出发达区域领先、非洲滞后的格局。欧洲 84.7% 居首，亚太 84.3%、拉美 83.8%、北美 83.4%、中东 80.9%、非洲 76.1%。

欧洲的高客座率源于航线网络的优化与需求的相对稳定。欧洲核心航空枢纽与支线之间高效衔接，中转旅客占比 35%，商务与跨境旅游需求稳定，淡季客座率仍超 80%，效率领跑。非洲的低客座率受制于基建落后与航线失衡。机场、航线集中于少数国家，互联互通差。客流集中化、季节性显著，淡季运力过剩，地面交通接驳不畅，限制客流来源，效率难以提升。

发展思路与可行路径

基于以上对综合财务数据与运营指标的剖析不难发现，全球航空业已形成四大

总体来看，亚太的高增长低盈利、北美的高盈利低增长，以及非洲与拉美地区的双低发展困境，共同构成了当前全球航空业的核心结构性矛盾。

典型发展模式。模式的多元分化，本质上是经济基础、地理区位、政策环境与商业模式四大核心因素交织作用的结果，并直接造就了全球航空业各区域的经营绩效分化格局。

其中，欧洲以显著优势登顶净利润规模榜首，中东凭借高利润率与高单客盈利构筑起坚实的盈利壁垒，亚太的高增长态势背后暗藏着低盈利的发展困局，北美则陷入高盈利、低增长的停滞状态，非洲与拉美地区呈现出发展滞后的双低困境。总体来看，亚太的高增长低盈利、北美的高盈利低增长，以及非洲与拉美地区的双低发展困境，共同构成了当前全球航空业的核心结构性矛盾。

具体来看，四大典型发展模式各有特点。

欧洲模式为稳健盈利的规模领航者，市场结构深度整合，CR4 占比超过 80%，收入结构多元，辅营收入占比超过 30%，航线网络遍布全球，运营管理高效精准。但是，欧洲仍然面临增长动能放缓、飞行员缺口及绿色转型的压力。

中东模式是高盈利的枢纽转运典范，依托亚、欧、非中转核心的地理优势，以长途航线为主导，聚焦高端客群，获得政策支持有力支持，成本较欧洲低 18%，其挑战在于地缘政治风险、长程竞争加剧及减排压力。

亚太模式属于高增长的价格竞争者，市场需求旺盛，短途航线密集，国际航线复苏成新动力，但存在盈利质量低、同质化竞争激烈、运营成本高企及高铁替代等问题。

北美模式是高盈利的市场饱和者，呈现寡头垄断格局，商务旅行主导，常旅客体系成熟，运营效率稳定，单位成本较亚太低 15%，核心挑战是市场饱和、商务旅行恢复缓慢及国际竞争加剧。

全球航空业区域差异的核心驱动因素可以归结为四点。

一是经济基础。发达经济体的人均 GDP 超过 4 万美元，支撑稳定的商务与高端休闲需求；新兴经济体的人均 GDP 为 1 万至 3 万美元，大众休闲需求增长快但价格敏感；发展中经济体的人均 GDP 低于 1 万美元，需求不足且波动大。

二是地理区位。中东地处亚、欧、非的几何中心，适配枢纽转运模式，欧美依托区位形成国内枢纽、国际干线的双驱动，亚太国家分散导致航线布局难成规模，非洲和拉美位于大陆边缘且区域合作不足制约扩张。

三是政策环境。中东的基建投资与税费减免，有效实现了降本增效，欧美监管成熟但环保成本上升，亚太准入宽松但运营成本高，非洲和拉美的贸易保护与基建投资不足制约发展。

四是商业模式。中东的转运枢纽模式、欧洲的网络整合模式、北美的寡头垄断模式实现高盈利；亚太的价格竞争模式下，规模增长快但盈利低；非洲和拉美的商业模式单一，缺乏核心竞争力。

针对不同区域的发展困境，结合其模式特征与驱动因素，可采取针对性优化举措。

亚太地区需着力优化商业模式，推动市场整合进程，开发高端差异化产品并创新辅营收入来源，同时借助政策引导降低运营成本，推进空铁协同发展。北美地区应积极挖掘新兴市场航线潜力，培育低成本子品牌，优化现有航线网络布局，创新服务模式以适配远程办公的市场新趋势。欧洲地区需深化数字化转型以实现降本增效，着力解决劳动力短缺问题，加大环保领域投入力度，积极拓展新兴市场空间。中东地区要通过多元化航线布局分散地缘政治风险，持续巩固高端服务优势，推进

亚太地区需着力优化商业模式，推动市场整合进程，开发高端差异化产品并创新辅营收入来源，同时借助政策引导降低运营成本，推进空铁协同发展。

环保技术研发，加强国际合作以提升抗风险能力。非洲与拉美地区则需强化基础设施建设，通过政策优化吸引外部投资，着力培育市场需求，推动区域航空一体化进程以突破发展瓶颈。

对于中国航空公司而言，可立足国内大市场优势与亚太区域特点精准破局。

一是深耕国内细分市场，针对商务、文旅、货运等不同需求开发定制化产品，依托干支联动网络提升枢纽辐射效能，缓解高铁短途分流压力。二是优化国际航线布局，聚焦“一带一路”沿线重点市场打造精品航线，加强与中东、欧洲航企的代码共享与联盟合作，提升国际市场份额与盈利水平。三是加速数字化与绿色转型，通过智慧航司建设降低运营成本，加大新能源飞机投入与可持续航空燃料研发应用，契合“双碳”目标与行业发展趋势。四是强化政策协同与资源整合，借助国家空域管理改革、机场基建升级等政策红利，推进航企间良性竞争与优势互补，提升行业整体抗风险能力与盈利质量。

2025 年六大航司成绩单

文 | 丁一璠 编辑 | 林喆

2025 年，我国民航总体上保持了稳中有进、稳中向好的发展态势。这一年，我国民航完成旅客运输 7.7 亿人次，比 2024 年增长 5.5%，旅客运输量创历史新高。从财务数据来看，2025 年全行业实现盈利 65 亿元，经营效益进一步向好。根据目前已公布的前三季度航司财报数据，六大上市航司均实现盈利，经营状况较 2024 年同期有显著改善，六大航司营收合计 4616.0 亿元，归母净利润合计 125.5 亿元。多家券商对 2025 年全年上市航司的盈利情况持乐观态度。

▼ 来源：www.foxnews.com



ASK	国航	南航	东航	春秋	吉祥	海航
同比2024	3.2%	6.6%	6.8%	12.1%	2.1%	8.20%
相比2019	27.7%	12.3%	17.3%	41.3%	40.2%	-7.9%
RPK	国航	南航	东航	春秋	吉祥	海航
同比2024	5.9%	8.3%	10.7%	12.1%	3.3%	8.6%
相比2019	29.1%	16.3%	22.8%	42.4%	40.8%	-7.5%
旅客运输量	国航	南航	东航	春秋	吉祥	海航
当期值（万人次）	16058.3	17373.1	14995.6	3233.5	2719.5	7057.9
同比2024	3.4%	5.5%	6.7%	12.7%	-1.7%	3.8%
相比2019	39.6%	14.6%	15.2%	44.4%	23.5%	-13.6%
国际旅客运输量	国航	南航	东航	春秋	吉祥	海航
同比2019	10.0%	3.2%	18.7%	13.1%	66.7%	-24.2%
客座率	国航	南航	东航	春秋	吉祥	海航
当期值	81.9%	85.7%	85.9%	91.5%	85.6%	83.8%
同比2024	2.0%	1.4%	3.0%	0.04%	1.0%	0.3%
相比2019	0.9%	2.9%	3.9%	0.7%	0.4%	0.4%
货邮运输量	国航	南航	东航	春秋	吉祥	海航
当期值（万吨）	153.7	195.8	112.6	10.0	16.3	60.0
同比2024	3.9%	6.8%	7.1%	15.8%	18.0%	20.1%
相比2019	7.2%	11.0%	15.6%	53.5%	32.6%	3.0%

▲ 表 1 | 2025 年全年六大上市航司运营数据

春秋航空领跑

各大航司近期发布的 2025 年运营数据显示，六大航司客运市场呈现“国有航司稳规模、民营航司高增长”的分化格局。其中，民营航司的表现尤为亮眼，春秋航空以 12.7% 的增速成为增长最快的航司，展现出差异化竞争优势。

与之形成对比的是，国有三大航的同比增速均在 6% 左右，反映出不同运营模式下的发展差异。从旅客数量来看，南航依旧领先，达到 1.74 亿人次，国航、东航、海航、春秋航空、吉祥航空分别为 1.61 亿、1.50 亿、7057.9 万、3233.5 万、2719.5 万人次。

国际航线复苏

2025 年，入境游需求爆发成为民航业的最大亮点，签证便利化措施显著降低了国际旅客的出行门槛。六大航司国际旅客运输量合计达 7499.15 万人次，较 2019 年增长 9.8%。其中，吉祥航空以 66.7% 的增幅成为国际业务增长最快的航司，东方航空也实现了 18.7% 的显著增长。

东方航空通过新开 24 条国际航线，将航线网络扩展至全球 40 个国家和地区的 255 个航点，国际旅客运输量达 2083.7 万人次，位居六大航司第二。吉祥航空则通过“东亚密集、东南亚广覆盖、欧洲加码、澳洲突围”的策略，重点布局

日本市场（14 条航线），开通澳大利亚直飞航线，国际业务实现跨越式发展。

国际业务的复苏不仅带来了客运量增长,更重要的是提升了航司的盈利水平。特别是远程国际航线的恢复，对航司整体收益水平的提升作用明显。

客座率重回高位

2025 年，行业客座率整体回升至历史新高位，受暑运和国庆黄金周出行高峰

推动，8 月、10 月客座率达到年度峰值。

春秋航空以 91.5% 的客座率位居行业第一，继续保持低成本航司的运营效率优势。吉祥航空以 85.6% 的客座率紧随其后，国有三大航的客座率在 81%～85% 之间，海南航空为 83.8%。值得注意的是，除春秋航空外，其他航司的客座率同比 2024 年均有 1～3 个百分点的提升，反映出行业整体需求的强劲复苏。

客座率的提升主要得益于供需关系的改善。2025 年，我国民航客机机队规模达 4201 架，较 2019 年 年均复合增长率仅为 2.7%，供给增速放缓与需求快速恢复形成鲜明对比,推动了客座率的提升。

ASK 与 RPK 双增长

作为衡量航司运营规模的核心指标，可用座位公里 (ASK) 和收入客公里 (RPK) 在 2025 年均实现显著增长。民营航司在 ASK 和 RPK 增长方面表现得尤为突出，春秋航空两项指标较 2019 年分别增长 41.3% 和 42.4%，吉祥航空分别增长 40.2% 和 40.8%，显著高于行业平均水平。中国国航的表现也较为亮眼，ASK 和 RPK 较 2019 年 分 别 增 长 27.7% 和 29.1%，位居国有航司之首。

截至 2025 年末，六大航司机队总量达 3384 架，全年共引进 205 架，退出 76 架，净增长 129 架，呈现稳步扩张态势。南方航空和国航的机队规模最为庞大，分别达到 972 架和 964 架，位列第一梯队；东方航空、海南航空、春秋航空和吉祥航空的机队规模分别为 826 架、359 架、134 架和 129 架。南方航空以净增 55 架的速度成为机队扩张最快的航司，中国国航和东方航空分别净增 34 架和 22 架。从引进和退出情况看，各航司的机队扩张

策略趋于理性，更注重机型优化和效率提升，空客 A320 系列和波音 737 系列等窄体机仍是机队引进的绝对主力。

货运全面复苏

在客运市场复苏的同时，货运业务也呈现明显回暖的迹象。2025 年，六大航司合计完成货邮运输量 548.5 万吨，较 2019 年增长 11%。全服务航司凭借宽体机优势占据主导地位，南方航空以 195.8 万吨的货邮运输量位居第一，中国国航和东方航空分别以 153.7 万吨和 112.6 万吨紧随其后。

值得关注的是，中小航司的货运业务也实现了高速增长，海南航空、吉祥航空和春秋航空的货邮运输量同比 2024 年分别增长 20.1%、18.0% 和 15.8%，显著高于行业平均水平。业界认为，这与上述航司国际业务的快速扩张密切相关，国际航线的增加为货运业务提供了更多的腹舱资源。

2025 年，我国民航全行业共完成货邮运输量 1017.2 万吨，同比增长 13.3%，六大航司货运量占全行业的 53.9%。随着跨境电商的持续发展和国际物流需求的回升，航空货运有望成为航司新的利润增长点。

行业趋势与未来展望

首先，国际业务成为增长新引擎。2025 年，国际航线的强劲复苏成为行业最大亮点，六大航司国际旅客运输量已超过 2019 年水平。随着全球经济复苏和跨境交流的增加，国际业务有望成为航司未来的主要增长点。东方航空和吉祥航空在国际航线布局上的成功案例表明，差异化的国际航线策略能够有效提升盈利能力。

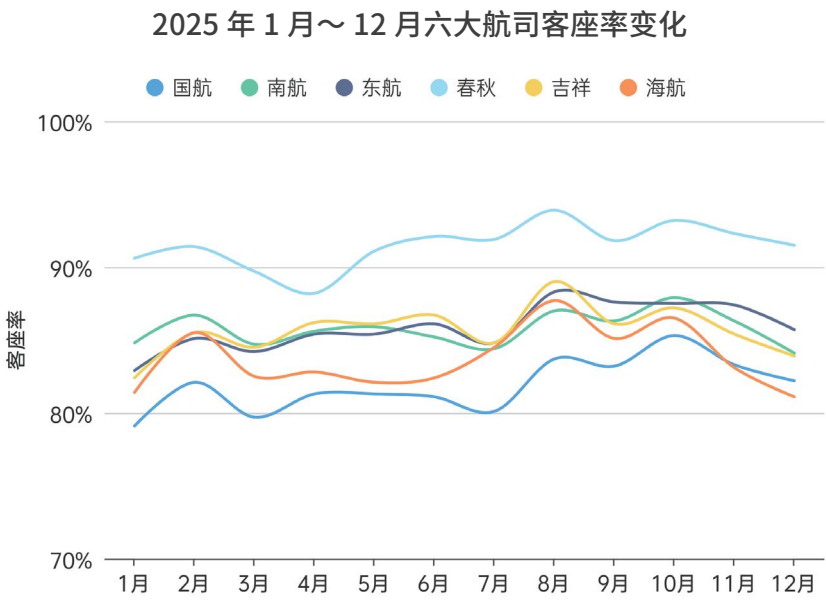
其次，国产飞机加速替代。C919 和 C909 的批量交付标志着国产飞机进入规模化运营阶段。国航、东航、南航已接收多架国产飞机并投入主流航线运营，初步验证了国产飞机的经济性和可靠性。随着国产飞机产能提升和技术成熟，预计未来 5 年国产飞机在机队中的占比将显著提升,有助于降低航司购机成本和维护费用。

再次，行业竞争从价格转向价值。面对持续的价格竞争压力和成本上升，航司开始转向差异化竞争。春秋航空通过高客座率和低成本运营保持优势，吉祥航空则通过国际航线布局提升收益水平，国有航司则在宽体机运营和国际网络方面发挥优势。民航局将“综合整治行业内卷式竞争”列为重点工作，预计 2026 年行业价格竞争将有所缓解。

最后，货运业务潜力释放。随着跨境电商和高端物流需求的增长，航空货运正成为航司新的利润增长点。海南航空、吉祥航空等航司通过增加国际航线提升腹舱载货能力，南方航空等全服务航司则继续发挥宽体机优势，预计未来货运业务占航司收入的比重将逐步提升。

尽管 2025 年民航业表现亮眼，但航司仍面临多重挑战，如市场竞争激烈导致票价承压、人力成本持续上升，地缘政治的不确定性影响国际航线恢复等。此外，飞机交付延迟和供应链问题也可能制约未来增长。总体来看，2025 年六大航司通过优化航线网络、提升运营效率和推进机队更新，实现了客运量和盈利能力的双增长。展望 2026 年，随着国际业务持续恢复和行业竞争环境改善，中国民航业有望迎来更加可持续的增长。

▼ 表 2 | 2025 年 1 月～12 月六大航司客座率变化



▼ 表 3 | 六大航司 2025 年全年机队规模变动情况

六大航司2025年全年机队规模变动情况

客机机队	共引进（架）	共退出（架）	净变动	飞机数量（架）
南方航空	78	23	55	972
中国国航	45	11	34	964
中国东航	48	26	22	826
春秋航空	5	0	5	134
吉祥航空	3	1	2	129
海南航空	26	15	11	359
合计	205	76	129	3384

我国跨境电商空运贸易形势研判及发展建议

文 | 葛金梅 姚津津 汪航

编辑 | 林喆

跨境电商是快速连接各国生产者和消费者的“数字桥梁”，顺应全球消费线上化、订单碎片化的趋势，依托其效率优势和成本优势，正在成为外贸增长的重要引擎。作为航空货运的重要货源，跨境电商贸易的发展对我国航空货运有着至关重要的影响。本文通过分析跨境电商与航空货运的相互支撑关系、发展特征和未来形势，对我国跨境电商空运贸易趋势进行研判，提出跨境电商航空物流发展的政策建议。

▼ 来源：www.stattimes.com

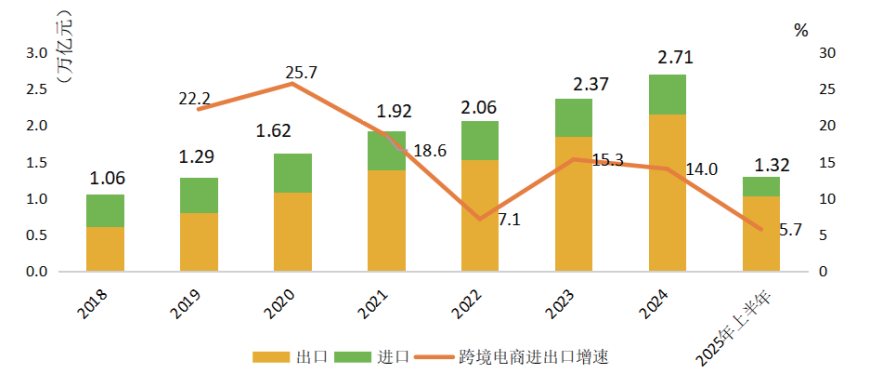


航空货运的重要驱动力量

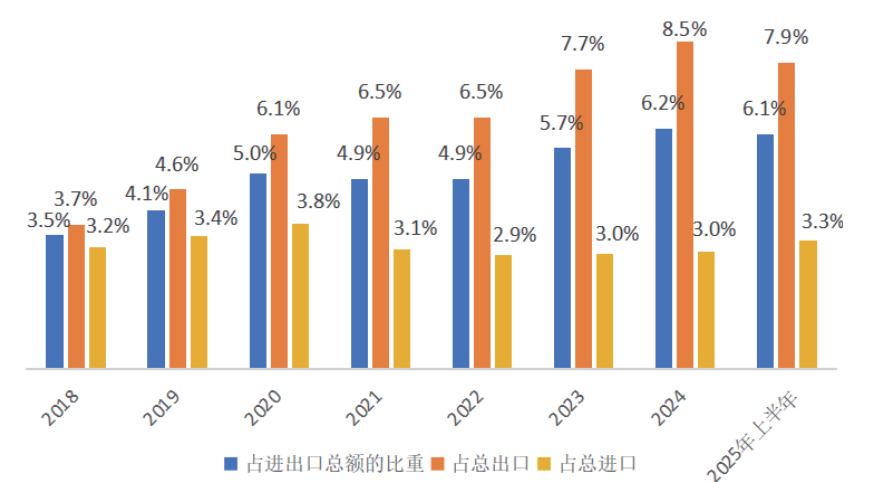
跨境电商贸易是外贸发展的重要引擎。近年来，跨境电商贸易保持两位数增长，出口占据主导。根据海关统计数据，2018～2024年，跨境电商贸易总额从1.06万亿元提升至2.71万亿元，年均增速达到16.7%，高出同期我国外贸发展总体增速10.5个百分点。从结构看，跨境电商以出口为主，其出口比重从57.9%提升至78.0%，远高于我国外贸出口比重（2024年为59.7%），得益于跨境电商以消费品为主的结构，依托我国的产业和品牌优势，中国制造借助跨境电商实现“破浪出海”，形成“卖全球”规模大于“买全球”的总体格局。2025年上半年由于跨境电商关税政策变动，跨境电商贸易总额增速有所放缓。

跨境电商贸易在外贸中的比重逐步提升。2018～2024年，跨境电商贸易额占我国进出口的比重从3.5%提升至6.2%，但进口和出口的比重出现分化，跨境电商出口占外贸出口比重从3.7%提升至7.9%，跨境电商进口占外贸进口比重则从3.2%下降至3.0%，2025年上半年受中美关税政策变动带来的不确定影响出现小幅提升。

我国跨境电商贸易结构特征突出。一是市场聚集程度高。从贸易伙伴看，跨境电商出口货物主要去往美国、英国、德国等，这三国出口贸易额累计占比超过50%，2024年的比重分别为36.2%、11.7%和5.7%，较2022年分别提升1.9、4.0和1.0个百分点。进口货物主要来自日本、美国、德国等，这三国进口贸易额累计占比超过30%，2024年的比重分别为10.5%、15.8%和9.8%，日本、美国的占比较2022年分别下降11.2和2.1个百分点，德国占比较2023年提升3.4个



▲ 图1 | 跨境电商贸易额规模及增速



▲ 图2 | 跨境电商贸易额在外贸中的占比

百分点。从收发货人所在区域看，我国沿海主要外贸大省是跨境电商贸易发展的核心力量。跨境电商出口货物主要来自广东、浙江、福建及江苏，四省占比接近80%。2024年这些省份保税监管场所与海关特殊监管区域物流货物出口较2019年均均有大幅增长。进口货物的消费地集中在广东、江苏、浙江、上海和北京，五省市占比约50%。2015～2024年，广东省跨境电商贸易额从113亿元跃升至7454亿元，年均增速高达71.4%，占全国跨境电商贸易比重超过1/3，规模稳居全国第一。

二是头部平台优势显著。跨境电商平台呈现“一超多强”局面，全球巨头以亚马逊为首，以 TikTok、SHEIN、Temu、阿里速卖通“出海四小龙”为代表的中国平台正在全球崛起，发展势头迅猛，成为国内第一梯队平台企业，各具特色。SHEIN 是优质的“时尚和生活方式在线零售商”，优势在于“小单快反”的柔性按需生产模式；阿里速卖通是国内最早一批发力跨境电商的企业，也是四家中唯一自建物流的跨境电商平台，打造“五日达包邮圈”物流品牌，在韩国电商平台用户排名前三。TikTok 利用平台流量优势，通过直播和短视频激发用户需求，实现内容与电商的结合。Temu 隶属拼多多集团，目前在北美市场的 APP 下载总榜和新用户增速两年来保持第一，吸引海外过亿消费者下载。

航空运输是跨境电商贸易的主要运输方式。根据海关统计制度，跨境电商以在线成交的进出口货物为统计范围，包括但不限于海关监管方式“网购保税”

（代码 1210、1239）、“跨境直购”（代码 9610）、“跨境电商企业对企业直接出口”（代码 9710）及“跨境电商出口海外仓”（代码 9810）项下进出口货物。

航空货运是跨境电商贸易的首选运输方式。跨境电商物流包括 B2B 和 B2C 两种模式，B2B 货物具有大批量、少批次特征，以海运为主要运输方式；B2C 货物具有小批量、多批次、体积小、价值相对较高、时效性强等特点，航空货运的高时效性和全球覆盖能力与之正好匹配，成为跨境电商货物首选的运输方式。据国际航空运输协会（IATA）的数据，约 80% 的跨境电商货物采用航空运输方式运输。

跨境电商贸易模式以跨境直购为主。据统计，跨境直邮在跨境电商贸易中占据主导地位，占比约为 70%。跨境电商直邮模式分为邮政物流、国际专线、国际商业快递，邮政国际邮件持续占据主流地位，占比在 50% 以上，国际专线随着运输能力提高占比持续提升。

跨境电商贸易是航空货运的重要驱动力量。IATA 调研显示，跨境电商产品占航空货邮运输量的 20% 左右。据我国海关统计，我国跨境电商贸易产品中消费品占比超过 97%，其中出口主要为服饰鞋包、手机电脑等各类数码产品及配件、家居家纺用品等，这三类产品在出口产品中占比超过 50%。进口主要为美妆及洗护用品、食品生鲜、医药保健品及医疗器具、奶粉等，这四类产品在进口产品中占比超过 60%。

按跨境电商货品占航空货运的 20% 计，2024 年航空运输的跨境电商产品约 180 万吨。在跨境电商的快速增长驱动下，2024 年我国国际航空货邮运输量同比增速达 29.3%，对全球航空货运

航空货运 货品分类	描述	代表货品	运输模式	主要跨境电商 贸易模式
高价值 高时效	对物流速度和服务质量要求极高，愿意支付较高的物流费用以确保快速交付。	电子产品、奢侈品、精密仪器、紧急医疗物资	国际快递为主	B2C 跨境电商平台
高价值 低时效	高价值但对时效性要求不高的商品，客户更关注商品质量和服务保障，而非快速交付。	定制化产品、大型设备、高价值原材料	国际快递为主	B2B 跨境电商平台
低价值 高时效	低价值但对时效性要求较高的商品。客户希望快速收到商品，但商品本身价值较低。	轻小件商品，如服装、饰品、小配件等	邮政小包和专线物流为主	B2C 跨境电商平台、C2C 跨境电商平台
低价值 低时效	低价值且对时效性要求不高的商品。客户更关注价格，对物流速度和服务质量的要求较低。	普通消费品、日用品	邮政小包为主	中小卖家

▲ 表 1 | 国际航空货运货品中采用的跨境电商贸易模式

增量贡献超过 30%，我国国际航线货邮运输量占比为 40.1%，较 2019 年高出 8.0 个百分点；国际航线货邮周转量占比为 76.7%，较 2019 年高出 6.6 个百分点。中国航司国际航空货运市场份额为 41.2%，较 2019 年提高 3.7 个百分点。

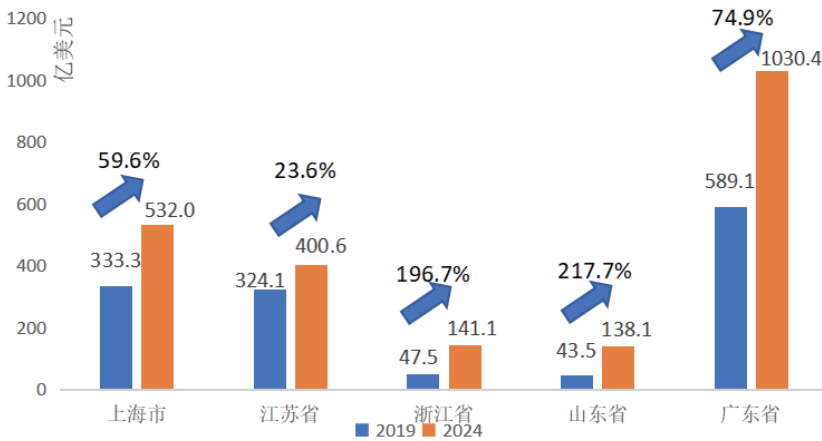
跨境电商空运贸易未来形势研判

我国跨境电商仍处于机遇扩展期，跨境电商贸易未来市场空间巨大。从业务主体来看，据海关统计，我国跨境电商企业数量已超 12 万家，跨境电商企业累计在海外注册商标超 3 万个。在产业生态方面，截至 2025 年 4 月跨境电商综合试验区已达 178 个，跨境电商产业园区突破 1000 个，综合试验区内跨境电商企业已超 12 万家，这些企业

贸易规模占中国跨境电商的比重已超过 95%。据尼克森咨询相关研究报告，从 2017 ～ 2023 年，中国跨境电商平台用户数量每年增长近 20%，2023 年已达 1.88 亿。

从市场规模和渗透率来看，北京研精毕智信息咨询预计 2025 ～ 2029 年全球跨境电商市场以 8.02% 年复合增长率增长。Statista 预测 2030 年全球 B2C 跨境电商市场规模将跃升至 7.938 万亿美元。世贸组织预测 2026 年之前全球 B2C 跨境电商将保持 27% 的增速。Statista 预测 2025 ～ 2029 年北美和欧洲电商市场年复合增长率分别为 8.29% 和 7.95%，电商用户渗透率约达 83.9% 和 94.5%。我国是世界上最大的电商市场和制造业基地，总体规模连续 15 年保持全球第一，制造业增加值占全球比重约 30%，超过美国、日本、德国三

▼ 图 3 | 保税监管场所与海关特殊监管区域物流货物出口规模



国总和。随着全球化的深入推进，我国加强与“一带一路”共建国家、《区域全面经济伙伴关系协定》（RCEP）成员国合作，未来跨境电商贸易潜力和空间巨大。

另一方面，国家高度重视跨境电商发展，出台一系列支持政策。2024 年 6 月商务部等 9 部门联合出台了《关于拓展跨境电商出口推进海外仓建设的意见》，围绕经营主体培育、金融支持、基础设施建设、监管优化及规则建设和国际合作等五个方面为支持跨境电商发展进行系统部署。2024 年 11 月商务部发布《关于促进外贸稳定增长的若干政策措施》，提出持续推进海外智慧物流平台建设，优化跨境贸易结算，支持有条件的地方探索建设跨境电商服务平台。2025 年 5 月商务部等 8 部门印发《加快数智供应链发展专项行动计划》，提出发展跨境电商和海外仓储物流设施，拓展供应链服务网络。2025 年上半年，北京、杭州等多地继续围绕出口退税、通关便利、海外仓建设、试点扩容和生

2025 年中美关税政策调整给跨境电商发展带来冲击，尤其是取消 T86 关税豁免政策，增加了商品成本以及运营风险。随着多个国家或地区取消小额商品的免税政策，跨境直邮的成本将显著增加，海外仓成为企业缓解成本压力和通关风险的重要手段。

态体系完善等重点领域密集发力。

跨境电商发展面临的挑战

受大国博弈、地缘政治局势多变影响，关税壁垒上升，全球贸易增速预计放缓。全球化进程持续演变，全球产业链供应链深度重构，进而导致全球经济增长下行压力加剧，贸易疲软成为未来一段时期的新常态。2025 年中美关税政策调整给跨境电商发展带来冲击，尤其是取消 T86 关税豁免政策，增加了商品成本以及运营风险。随着多个国家或地区取消小额商品的免税政策，跨境直邮的成本将显著增加，海外仓成为企业缓解成本压力和通关风险的重要手段。企业将成本向消费者传导，可能抑制市场需求并造成订单萎缩，从而导致跨境电商贸易规模增速下降。

从政策来看，跨境电商物流涉及多个国家和地区政策法规、海关以及不同平台的政策差异，政策变化引发电商平台的监管趋紧、企业合规压力增加将成为必然趋势。从供应链来看，需求端跨境电商贸易格局变化，引发供应链重构，需要构建兼具效率与韧性的供应链体系。航空公司要加快提升新兴市场网络拓展以及货运机队保障，机场要提升跨境电商货品的地面处理效率等。成本端汇率波动、油价上涨等外部因素以及仓储配送等环节可能造成跨境物流成本的增加，电商平台和企业需要加快海外仓布局。

跨境电商和航空物流发展建议

一是完善物流生态体系。
聚焦货机、航线网络、物流供应链等核心供给要素，完善跨境电商航空物



▲ 来源：www.iata.org

流生态，提升跨境电商航空物流服务体系。加大货机供给，利用航权拓展航线网络的通达性，从而提升对市场需求的适配性。根据市场需求变化对跨境电商航空物流提供时刻、航权支持，建立跨境专线物流。结合跨境电商货品、贸易伙伴的变化趋势，拓展对新兴市场的航线网络覆盖，加强与外国航空公司和跨境物流公司合作，提升中转灵活性，提高运输效率。以跨境电子商务综合服务平台为基础，整合空运以及综合交通、仓储、配送等资源协同运作，开展无人机配送等技术创新，便捷“最后一公里”，构建集成品牌、法律、技术、运营、客服、供应链等服务于一体的跨境电商物流生态链。

二是提升综合保障能力。
聚焦航空口岸开放水平和资质能力，提高跨境电商空运货物的处理和通关效率，提升航空口岸综合服务保障能力。加快专业性货运枢纽建设，加大航空口岸的开放水平，加快与跨境电商贸易产品相关的通关便利化能力建设。设

施方面，提升基础设施保障水平，优化航空物流设施和海外仓布局。效率方面，简化跨境电商货物处理流程，有效提高跨境电商货物在机场口岸的操作效率，降低物流成本。综合交通方面，支持深入开展多式联运，推广多式联运“一单制”等服务模式。

三是提升智慧物流水平。
聚焦人工智能、物联网、区块链等新技术应用，建设跨境电商航空物流信息平台和管理平台，实现跨境电商物流的全程可视化、信息实时化和流程智能化。持续推进航空电子运单推广应用，提升航空货运电子运单渗透率，加强跨境电商企业、航空公司、机场货站、货运代理等多主体数据对接，提升跨境电商航空物流的信息化水平。提升智能化管理手段，在仓储、运输、配送等环节为跨境电商企业提供仓储和运输方式选择、运输路径优化、成本控制等多目标优化解决方案。

封关后，海南如何用好第七航权

文 | 蒋星 编辑 | 陈伟宁



▲ 来源：www.hinews.cn

“2025 年 12 月 18 日，海南自由贸易港正式启动全岛封关，将海南岛建成一个海关监管特殊区域，实施以“一线放开、二线管住、岛内自由”为基本特征的自由化、便利化政策制度。

2025 年 12 月 22 日，哈萨克斯坦斯卡特航空执飞的“三亚往返布拉格”航线顺利首航，成为海南自由贸易港投入运营的首条第七航权航线。海南第七航权政策是中国民航局为了支持、鼓励外航在海南经营，助力海南自由贸易港发展的重要举措。本文从实际运营角度，讨论海南如何用好第七航权政策，助力自由贸易港的建设和发展。

背景情况

2020 年，为支持海南自由贸易港建设，中国民航局出台了《海南自由贸易港试点开放第七航权实施方案》，鼓励、支持外航在现有航权安排外，在海南经营客运及货运第七航权。第七航权，又称“完全第三国运输权”，指一个国家的航空公司完全在另外两个国家之间经营独立的航线业务。相较于第五航权，第七航权无需返回本国，第五航权需由本国出发或返回本国。

在全球民航实践中，各国民航主管部门较少开放客运第七航权，第五航权则相对较为开放。我国民航主管部门参考各国普遍做法，以较为开放的姿态向诸多国家开放了客货运第五航权，但是第七航权此前仅有一次向美国联邦快递公司开放，以支持联邦快递广州转运中心建设。

运用难点

总的来说，海南开放第七航权主要面临以下几个方面的问题和挑战：

一、市场规模不足。总量方面，2024 年，海口机场、三亚机场的旅客吞吐量分别为 2689 万、2143 万，分别位列全国第 19 位、第 24 位，总体来看处于国内中等规模水平。国际方面，2025 年，海口机场、三亚机场的国际旅客吞吐量分别为 152 万、93 万，分别同比增长 26.8%、45.1%。横向对比来看，这两座机场的国际业务规模与一流枢纽机场的差距较大，这说明海南国际旅客的市场规模较小，难以支撑大量国际航班运营，而第七航权主要依靠国际旅客市场。

二、航线网络规模需要进一步提升。中国的优势是人口红利。中国民航局公布的数据显示，截至 2025 年，中国航空总人口超 5 亿，成为全球第一航空人口大国。

国内腹地是我国对外开拓的基础，外国航空公司在海南运营第七航权仍是国外运营权，不可能经营国内市场，而海南现有的国内网络覆盖难以支撑国内国际互转业务的开展。

三、异国运营难。第七航权意味着一家外国航空公司需要经营海南与另一个国家之间的航线，对该航司而言是另外两个国家之间的市场，面临着市场开拓、地面保障、机队调配等各方面困难。一般来说，一家航空公司在海外的一个站点只会安排几名雇员，而运营第七航权航线意味着需要安排大量雇员和高额成本投入。从市场的角度来看，一家外国航空公司想在中国市场打开局面，初期会面临重重挑战。

四、第七航权需要第三国的支持。第七航权的运营涉及三个国家，需要相关国家之间的合作与协调。虽然我国主动对外开放了海南第七航权，但是从全球来看，开放第七航权的国家仍然较少，有意运营海南第七航权的航空公司所在国需要与意向飞往的国家有第七航权安排，这需要航空公司所在国开展大量工作，做好航权储备。

有关案例

在客运方面，我国第五、第七航权应用的案例较少，但是在货运方面有一些成功实践，在此讨论广州、郑州两个成功案例。

一、联邦快递广州第七航权实践。

2004 年，中美两国民航主管部门通过磋商达成一致，签署《航空运输协定》的议定书，增加了“货运枢纽”分条，明确指定空运企业在货运枢纽运营每周 72 架次全货机，并使用当地人员、设施、海关监管保税设施，则可在该货运枢纽享有第七航权。此后，美国联邦快递公司将广

州作为货运枢纽，并获得中国民航局批准，由此可以在广州运营第七航权。

作为全球顶级物流公司，联邦快递在全球布局航线网络，主要采用选址转运中心构建轮辐式网络的方式。轮辐式网络意味着用最少的航班量提供最多的市场城市对，而且市场城市对随着航班量的增长而呈现出指数级增长。在联邦快递全球最大的转运中心孟菲斯，联邦快递每日构建了两个航班波，一个在夜间，一个在中午时分，以满足一日两次的运输需求。每一个航班波，进出港的航班数量接近 150，辐射的城市以美国主要城市为主。

同样的操作方式也被应用在中国广州。由于法律限制，联邦快递在中国只能经营国际快件，而不能经营国内快件，这就导致其可以开展的业务实际上规模不是很大，如果只是依靠广州往返东京、马尼拉等地的货源，很难支撑广州到这

些城市的航线运营，但轮辐式网络解决了这个问题。

联邦快递在广州利用第七航权开通了通往 22 座城市的航线，集中于凌晨进港，两三个小时后又集中出港，由此产生了 420 个城市市场对。这些航线相互支持，从东京飞往广州的飞机上装满了去往其他 21 座城市的货物，与其他 21 座城市飞往广州的货物同时抵达广州。此后，东京来的货物分散至返回其他 21 座城市的航班，完成货物交换后，其他 21 个航班同样装满了来自其他城市的货物，22 个航班一起返回出发地。

二、郑州与卢森堡航空携手发展货运的实践。

郑州机场是近年来国内航空货运枢纽建设的典范。郑州机场 2010 年货邮吞吐量为 8.6 万吨，在全国 175 座机场中排名第 21 位。到了 2025 年，郑州机场的货邮吞吐量突破了 100 万吨，在全国 260 余座机场中排名第 6 位。更重要的是，在市场影响力方面，郑州机场已经从一个在货运方面名不见经传的机场成长为中国重要的国际航空口岸，很多全球航空货运业人士知晓郑州，诸多市场主体落户郑州。

观察郑州的成功路径，应该说是河南省诸多部门联动、多措并举支持下的有效实践，而航权政策也是其中必不可少的环节之一。

首先，引入基地航空公司。2014 年 1 月，河南航投入股卢森堡货航 35% 的股份，成为其第二大股东。卢森堡货航是全球排名前十位的货运航空公司，具有强大的货运能力，河南航投入股后，卢森堡货航毫无疑问地以郑州机场为枢纽机场，构建卢森堡—郑州“双枢纽”网络。在郑州机场发展初期，卢森堡货航的货运量占郑州机场国际货运量的 44%，成为郑州机场货运发展的重要运力来源。



其次，利用好航权政策。2018 年 11 月 23 日，国务院印发《关于支持自由贸易试验区深化改革创新若干措施的通知》，支持郑州机场利用第五航权，明确允许卢森堡航空公司利用第五航权连接郑州和美洲、欧洲、中东、东南亚等主要市场，其中部分条款在中国城市中仅适用于郑州。卢森堡货航由此在郑州构建了通达全球的航线网络。

再次，充分发挥政策的激励和引导作用。郑州机场通过经济激励和政策支持等途径，积极吸引货代企业和货源性企业落户郑州。这些企业是郑州机场重要的货物来源，为其揽收来自全国各地的货源，从而解决了郑州本地货源不足的问题。

相关建议

一、选好枢纽运营人，并通过入股等方式巩固合作关系。从枢纽机场的建设实践来看，枢纽运营人的作用至关重要。海南第七航权开放的本质是便于外国航空公司在海南开展枢纽运营，但前提是外国航空公司有意以海南为基地，并进行大量投

资。因此，选好枢纽运营人是用好第七航权的必备条件。该枢纽运营人需要有较强的实力，具备构建通达全球的航线网络并开展多枢纽运营的能力。

二、根据枢纽运营人的需求开展国际谈判，扩大第七航权的适用范围。中国民航局开放海南第七航权，为外航进入海南开展国际业务提供了前提。但是，该外航所属国必须为开展此项业务提供充足的航权资源，与更多第三国磋商形成第七航权条款。此项工作，中国民航局难以直接参与，需要该外航向所属国政府争取。

三、出台相关政策，支持培育市场。海南市场规模有限，特别是国际市场规模较小，需要财政政策的大力支持。一方面，以低价刺激海南本土旅客的国际出行需求；另一方面，吸引外国旅客来海南中转，逐渐形成出行习惯。从郑州机场的发展经验来看，在市场发展的初期阶段，政府的政策支持发挥了至关重要的作用。

▲ 来源 :www.yuxinbidding.com

▼ 来源：www.by56.com



氢能航空： 从十亿级研发市场迈向百亿级商用市场

文 | 隋丕宁 编辑 | 陈伟宁

2026 年 1 月，总部位于都柏林的知名市场研究机构 Research and Markets 发布《氢能航空研究报告 2026》（下称《报告》），预测全球氢能航空市场将从 2025 年的 21.6 亿美元增长至 2026 年的 26.4 亿美元，再到 2030 年的 55.9 亿美元，5 年间增幅高达 150%。氢能航空这个曾经被认为是未来概念的市场将以超过 20% 的年复合增长率加速扩张。

这一数字的背后，是一场将要重塑全球航空业的技术革命和产业转型，而这场产业转型的背后，是清洁航空从实验室走向商业跑道的使命。从中国航空发动机涡轮院突破 500 公斤推力级氢燃料涡扇发动机技术，到欧洲 GOLIAT 项目建立首个液态氢机场加注系统；从初创公司 ZeroAvia 完成数百小时的燃料电池飞机试飞，到空客宣布 2040 至 2045 年投入商业运营的时间表——氢能航空已经完成了从“是否可能”到“何时实现”的历史性跨越。

来源：www.airbus.com



市场：从量变到质变

《报告》认为，最近几年的氢能航空市场规模看似不大，却代表着氢能航空已经从理论研究和早期探索阶段迈入了系统化研发和原型验证的实质性阶段。这个“十亿级”市场主要由以下三个部分构成：

首先，技术研发投资占据了最大份额。各国政府和航空巨头正以前所未有的力度投入关键技术攻关。比如欧盟于 2023 年启动的 HYDEA（氢能航空验证机）项目，总投资额为 1.167 亿欧元；美国的 DG Fuels 可持续航空燃料项目，仅仅是位于路易斯安那州的首座工厂，总投资额就高达 49.6 亿美元。这类投资不仅关注发动机和燃料电池本身，更延伸到材料科学、控制软件、安全系统等整个技术生态。

其次，原型机与验证平台建设是另一大支出项。从改装现有飞机到制造全新的概念验证机，这些实体飞行平台是连接实验室技术与商业产品的桥梁，而其花费也相当不菲。比如，Universal Hydrogen 公司利用燃料电池、电机与储氢模块对 Dash8 进行改装，于 2023 年成功完成了全球最大氢燃料电池支线飞机的首飞，并于当年 10 月实现兆瓦级液态氢燃料电池在地面长时间运行，验证了技术的可行性。可惜的是，2024 年 7 月该公司所募资金耗尽，不得不清算结业。

基础设施建设的先期投入也耗资不少。虽然大规模的机场氢燃料系统尚未普及，但像空客牵头的 GOLIAT（液态氢飞机地面运营）项目已经启动，旨在解决液氢地面处理、存储和快速加注等核心技术问题。这些早期基础设施项目虽然规模有限，却为未来的商业化运营奠定了基础。

不过，从研发市场向早期商用市场的过渡并非线性增长，而是存在多个关键的拐点。《报告》预测，2030 年第一批氢能飞机将投入商业化运营，这一跨越的实现依赖于以下三个核心条件。

第一，技术成熟度要达到能满足适航取证要求的级别。目前，氢航空技术大多处于 TRL4-6 级（实验室验证到原型验证），需要提升至 TRL8-9 级（系统完成并通过验证）。根据欧盟 Clean Aviation 路线图和德国宇航中心等的预测，这一跃迁将在 2028 至 2030 年间实现，首批 19 座以下的区域支线飞机有望获得适航认证。

第二，成本竞争力要达到临界点。目前，绿氢生产成本正在快速下降，电解槽价格在过去五年间下降了 40% 以上。同时，随着碳交易价格的上升，传统航空煤油的隐性环境成本不断显现。业内权威人士预测，在政府适度补贴下，氢能短途支线航班有望在 2028 年左右与传统航班达到成本平价。

第三，规模化生产须在 2030 年前后做好准备。市场规模的跃升需要制造能力的支撑。目前，包括 Heart Aerospace 在内的多家公司已经开始建设或规划小批量生产线，目标是在 2027 至 2028 年实现年产数十架氢能飞机的产能。

从以上分析可以看出，技术、成本、产能三者都有希望在 2030 年前实现对关键拐点的跨越。因此，我们有理由期待在 2030 年前后首批 19 座以下的区域支线飞机将实现交付，从而使氢能航空市场踏上规模化发展的大道。

技术：齐头并进的方案

在技术上，目前氢能航空领域形成了两条清晰且互补的技术路径：氢燃料电池电推进和氢燃料直接燃烧推进。它们分别瞄准不同的市场细分，共同构成完整的氢航空解决方案矩阵。

氢燃料电池路径以其高达 50% 至 60% 的能量转换效率，成为 19 座以下的小型飞机、通勤飞机和城市空中的士的首选。这一

路径的最大优势在于零碳排放（仅排放水）和较低的噪音水平。Universal Hydrogen 虽因资金问题而遭清算，但其已在技术上证明，采用燃料电池的改装支线飞机可以满足 150 至 200 海里航程的需求，这正好覆盖了大量区域航空市场。

值得注意的是，燃料电池技术本身也在快速迭代。美国公司 ZeroAvia 正在开发高温质子交换膜燃料电池技术，其目标是使整个推进系统的功率密度达到传统低温燃料电池的 2 到 3 倍。该技术的高温运行特性从根本上简化了热管理系统，并彻底避免了低温启动难题。同时，美国公司 HyPoint 也在研发类似的高温空气冷却燃料电池技术，并宣布已达成相近的功率密度目标。这种技术进步将逐步扩大燃料电池飞机的航程。

氢燃烧路径则瞄准了更大的飞机和更长的航程。通过改造现有燃气涡轮发动机或研发全新的氢燃烧核心机，这一路径可以利用航空业在涡轮机械方面积累的深厚经验。四川在线 2025 年 12 月 24 日报道，中国航发四川燃气涡轮研究院联合西南石油大学攻克了 500 公斤推力级氢燃料航空涡扇发动机核心技术，研制样机正在进行调试和验证。此外，罗罗与易捷航空自 2022 年起合作开展氢内燃发动机地面测试，目前已完成多轮关键试验。这些突破与测试，都展示了氢燃烧路径的可行性。

不过，无论是氢燃料电池电推进路径还是氢燃料直接燃烧推进路径，目前都存在尚未攻克的技术难题。燃油飞机的机翼同时也是油箱，但由于液氢必须低温储存（液氢的沸点为零下 253 摄氏度），需要特殊的储氢罐，所以无法放在机翼里。目前解决这个问题有三个方案，一是把飞机拉长，将液氢罐放在加出来的客舱尾部，但是这样做会影响飞机的重心。二是放在飞机机舱顶部，这需要改变飞机的气动外形。第三个方案走得更远，研制翼身融合体飞机，对“简

+ 翼”的外形进行彻底变革。这三个方案显然都有很长的路要走。

对于氢燃料直接燃烧推进路径而言，氢层流火焰速度是甲烷的 3 至 7 倍，湍流火焰速度差异更大，火焰极易逆流向上游传播，进入预混段甚至喷嘴内部，造成局部过热、烧蚀或爆炸。另外，我们都知道氢与氧产生化学反应会生成水，但很多人没注意到，在飞机发动机中与氢产生化学反应的不是纯氧，而是空气。空气中含有高比例的氮，所以氢燃料燃烧后会产生大量的氮氧化物，而氮氧化物不仅会直接危害人体，还会产生空气污染，形成酸雨，所以如何避免氮氧化物的形成也是氢能航空的一大难题。

储氢：成败的关键

当然，无论选择哪种推进路径，安全、轻量化、高效率的储氢系统都是氢能飞机商业化的最大技术挑战之一，也是目前研发投入的重点领域。

低温液态储氢是大型飞机的必然选择。在标准条件下，低温液氢的体积能量密度为 10MJ/L，是 700bar 高压气态氢（5MJ/L）的近两倍，更是 350bar 气态氢（2.5MJ/L）的四倍左右。然而，这仅为航空煤油体积能量密度的四分之一。这意味着，为了存储相同的能量，液氢储罐的体积需要是煤油箱的 4 倍以上。这是氢能飞机设计中面临的最根本的物理挑战。而且，液氢需要在超低温条件下储存，这对储罐的绝热设计和材料选择提出了极高要求。目前的研发重点是多层真空绝热复合材料储罐，其目标是使液氢日蒸发率低于 0.5%，确保长途飞行的燃料保存。

空客 2020 年开始的 ZEROe 项目，在概念设计中提出了一项创新的系统集成方案：将四个液氢储罐以对称形式布置于机尾的后压力隔板之后。这一布局具有双重优势：首先，它将体积庞大的储氢系统完全置于增

压客舱之外，最大程度保全了核心的商业载运空间；其次，通过合理的储罐布局与燃料消耗顺序管理，该设计能够有效控制飞机重心在飞行过程中的变化范围，解决了氢燃料质量大、消耗可能引发配平难题的关键挑战。这种系统级集成思维标志着储氢技术已经从组件研发进入飞机整体设计阶段。

相对简单的高压气态储氢技术，在小型飞机和无人机上应用比较多。目前，新型碳纤维缠绕 IV 型储氢瓶的工作压力已达到 700bar，比传统 350bar 系统存储密度提高约 30%。这对于航程要求不高但频率较高的空运场景是一个实用选择。

解决了飞机上的储氢问题，还必须解决地面上的运输问题。当前，液氢运输技术呈现多元化发展态势，在船舶运输、管道输送和多式联运等领域均取得显著突破。

在船舶运输方面，2025 年 8 月，荷兰 Cjob Naval Architects 公司推出全球首艘无压载水液氢运输船设计，解决了液氢运输的核心难题。在管道运输方面，截至 2025 年 4 月，我国处于规划和在建阶段、已有实质性进展的氢能管道总里程已超过 7000 公里，比如中石化“西氢东送”管道，从内蒙古乌兰察布至京津冀，全长约 1145 公里；还有从康保至曹妃甸的绿氢管道，连接河北张家口与唐山，全长约 1038 公里，建成后将是全球运输量最大的绿氢管道。

这些管道网络清晰地勾勒出中国氢能基础设施“西氢东送、北氢南运、区域成网”的初期格局，但其连接的主要是绿氢生产基地与重工业设施和关键港口，暂时还未输送到各大机场。而且，机场现有的油井设施并不能直接用于储存液氢，所以今后机场将面临一笔较大的基建开支。

另外一个值得注意的问题是，氢的化学特性决定了其容易发生泄漏：一是因为氢分子极小，能穿透许多其他气体无法穿透的微小孔隙和材料缺陷。二是因为氢气

的分子间摩擦力小，流动性极强，在空气中的扩散速度约是天然气的 6 倍。一旦有泄漏点，氢气会迅速扩散开。三是因为在某些条件下（如高压），氢原子会渗透进入金属的晶格结构内部，导致金属材料变脆，容易产生裂纹，从而形成泄漏通道。对于高压储罐、管道阀门等承压部件来说，这无疑是极其严峻的挑战。

不过，氢气的密度只有空气的 1/14，而且扩散速度快，泄漏发生后会迅速垂直向上扩散，不容易在地面聚集并形成燃爆风险。对此，欧洲航空安全局和美国联邦航空管理局正在合作制定“氢动力飞机专用条件”，核心目标是建立一套全新的风险评估和管理框架，涵盖从氢燃料生产到飞机运营的全生命周期，从而确保氢能航空的安全。

结语：迎接新纪元

从十亿级研发市场迈向百亿级商用市场，氢能航空正在经历其发展历程中最关键的转型期。这一转型不仅是市场规模的量变，更是技术体系、产业生态和商业模式的质变。

今天，技术可行性已得到验证，商业模式开始清晰，监管框架逐步建立，资本市场持续关注。虽然挑战依然严峻，从储氢技术的工程难题到基础设施的巨额投资，从经济性的绿色溢价到全球标准的协调统一都存在诸多困难，但解决路径已经显现，行业共识正在形成。

展望未来十年，氢能航空将从特定场景的早期应用到区域航线的逐步普及，最终向中短程航空市场全面渗透。这一进程将与可再生能源成本的下降、碳定价机制的完善、公众环保意识的提升等宏观趋势相互促进，共同推动航空业向净零排放的目标迈进。

200 座级，为何最受航司青睐

▲ 来源：www.boeing.com



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。

文 | 于达维 编辑 | 欧阳亮

在航空业，飞机的座级选择直接影响航司的运营效率、成本控制和市场竞争能力。近年来，200 座级飞机，如空客 A321XLR、波音 737MAX10，成为全球航司的“香饽饽”，其经济性、技术优势证明了这一座级的独特价值。

该座级机型能覆盖中短程（2000 海里至 4000 海里）和部分中长程航线，适应全球大多数干线航线的客流需求，避免了过大或过小的机型带来的运营效率问题。而且，该座级机型能适应中小型机场的滑行道、停机位和登机桥限制，同时保持较高的客流吞吐能力。

在航空运输业进入高投入、低利润率时代后，单位运营成本，特别是油耗成本，成为航空公司选择机型最重要的参考，200 到 240 座级单通道机型因其运营成本、航线适应性和机场适配性，成为航空公司最青睐的机型。

200 座级飞机的航程适应性强，既可用于中短程航线，替代 150 座级飞机，提高单航次载客量，也可用于中长程航线，如 A321XLR、

737MAX10 等，可执行 5 至 6 小时航线，满足洲际市场需求。

在燃油效率方面，其单座燃油消耗低于 150 座级窄体机（如 A320neo、737-8），同时在运营成本上优于 300 座级宽体机，适合中等流量航线。

200 座级飞机的维护成本也更低，因为其机体结构和发动机设计更接近宽体机，但维护复杂度低于大型飞机，因此单座维护成本更低。在机场费用方面，200 座级飞机的起降费用比宽体机更低，且能适应更多机场，降低航司的基建依赖。

从技术角度来看，200 座级飞机在发动机和空气动力学设计上具有显著优势。

这类飞机通常采用先进的发动机（如 CFM LEAP 系列、GEnx）和空气动力学设计（如翼尖小翼、复合材料机身），使其在燃油效率、噪声和排放方面表现优异。在航电和自动化系统方面，200 座级飞机通常配备最新一代航电系统（如波音 737MAX 的 MCAS、空客 A321neo 的 FADEC），提高了飞行安全性和自动化水平。

目前，市场上主流的 200 至 240 座级单通道机型，包括空客 A321neo 系列、波音 757 和 737MAX。

A321XLR 是空客 A321neo 系列的超长航程版本，最大起飞重量 101 吨，最多可载 244 人，航程达 8700 公里，为窄体客机中最高纪录。

波音 757 于 2005 年停产并陆续退役后，挂载两台 LEAP 发动机的 A321neo 成为当下民航市场中最受欢迎的单通道长航程客机，市场份额节节攀升。

可以说，空客研发 A321neo 的目的，就是为了挑战波音曾经牢牢把持的 200 座级单通道窄体客机市场。A321neo 拥有 240 座的全经济舱布局，与 787-8 两舱布局 242 座的载客量基本相当，在中短途航线上成本优势明显。

A321neo 的诞生可以看成当前技术水平之下对飞机综合经济性能极致追求的结果，市场也对该机型表示了足够的认可。目前，A321neo 系列飞机的待交付订单总数已经超过 A320neo 飞机，成为空客公司的“当家花旦”。

中国航空市场是全球增长最快的市场，在未来 20 年内，对飞机的需求将达到数千架，其中 200 座级的单通道客机是竞争最为激烈的市场，因此挑战 200 至 240 座级，正是国产大飞机冲击主流商业飞机市场的关键一步。

时光奔流又一年 质效双升启新程

文 | 詹东新 编辑 | 欧阳亮

▲ 来源：www.bbva.com



作者简介

詹东新，男，浙江杭州人，大学文化，中共党员，长期供职于民航系统。中国作家协会会员。

先后写作、出版科普文集《飞遍天下》《享受飞行》《人类的翅膀》；主编心理学专著《“管制”压力》；撰写纪实文学《万里云天》《中国之翼》《国家名片 C919》等。

中国民航经过了疫情的低谷、艰难的挣扎、缓慢的爬升后，终于迎来 2025 年的大爆发，一跃成为蓝星第一航空人口大国。这一年，民航业在经营效益、国际航线、国产飞机交付三大领域取得突破性进展，交出了一份有质量的答卷。

过去的一年，全行业实现盈利 65 亿元，在 2024 年初扭亏为盈的基础上进一步巩固盈利态势。全年完成运输总周转量 1640.8 亿吨公里、旅客运输量 7.7 亿人次、货邮运输量 1017.2 万吨，同比分别增长 10.5%、5.5%、13.3%，航空人口突破 5 亿，正式成为全球第一航空人口大国。民航旅客周转量在综合交通运输体系中占比提升至 39%，较 2019 年提高 6 个百分点。

运输市场主体表现亮眼，航司与机场盈利能力普遍提升。上市航司中，海航控股以 28.45 亿元净利润领跑前三季度，春秋航空、南方航空分别实现 23.36 亿元、23.07 亿元净利润，国航、东航净利润也分别达到 18.7 亿元、21.03 亿元，华夏航空净利润同比增幅更是高达 102.17%。机场表现同样抢眼，上海机场、白云机场、深圳机场前三季度净利润分别为 16.34 亿元、10.96 亿元、4.68 亿元，首都机场亏损同比收窄 48.11%，行业整体呈现“头部引领、全面向好”的可喜格局。

值得一提的是，2025 年民航业完成固定资产投资 1200 亿元，广州、重庆等枢纽机场改扩建项目顺利完成，丽水、巴里坤等 4 座新建机场投运，净增航路航线里程超 1.2 万公里，总里程突破 27 万公里，空管保障能力持续提升，为行业发展筑牢基础。

过去的一年，国际航线快速复苏，恢复至 2019 年的 90% 以上，国际旅客运输量同比增长 21.6%，成为拉动行业增长的重要引擎。国际航班恢复走势呈现“稳步攀升、结构优化”的特点：一季度周均国际客运航班量恢复至 2019 年的 83.9%，春运高峰周均航班达 6960 班，恢复至 2019 年的 91.3%；2025 至 2026 年冬春航季，国际航班每周 21427 班，同比增长 10.8%，通航国家扩展至 83 个，较 2019

年净增 4 个。其中，中印定期客运航班实现复航，成功开辟至拉美的“南向通道”航线，海南自贸港第七航权航班首飞落地，新开阿塞拜疆、格鲁吉亚等国航线，空中丝绸之路走深走实。

在 2026 年工作会上，中国民航局局长宋志勇指出，行业发展成绩显著，但深层次矛盾与问题依然存在，成为制约高质量发展的瓶颈。这些问题既涉及市场运行机制，也关乎产业基础能力，需要系统性施策破解。

一是“内卷式”竞争加剧，收益水平承压。尽管客运量稳步增长，但“以价换量”策略导致行业收益水平持续承压。2025 年全年经济舱平均票价降至 738 元，同比再降 3.1%，陷入“旺丁不旺财”的困境。

二是供应链瓶颈与自主化不足，产业安全堪忧。当前，全球航空制造业普遍面临发动机供应短缺、熟练技工不足等问题，导致新飞机交付延迟，适航认证周期从 12 至 24 个月延长至 4 至 5 年。

三是发展不平衡、不充分问题依然突出。三四线城市航空服务供给不足与主干线运力过剩并存，部分支线机场利用率偏低。运输结构上，客运依赖度偏高，货运物流的规模化、专业化水平不高，低空经济等新赛道的政策体系与应用场景不够完善。此外，高铁在中短途航线的竞争分流、地缘政治对国际航线的潜在影响、数字化转型深度不足等问题，也对行业高质量发展构成挑战。

2026 年核心发展目标：力争完成运输总周转量 1750 亿吨公里、旅客运输量 8.1 亿人次、货邮运输量 1070 万吨；固定资产投资力争超千亿元，聚焦“十五五”重大工程和“两重”；坚决守牢航空安全底线，深化风险隐患排查整治，持续提升安全监管效能，切实加强低空安全管控能力。

民用飞机驾驶舱的百年演变

文 | 吉亮宇 编辑 | 张克农

驾驶舱作为民用飞机的“神经中枢”与“决策核心”，是飞行员获取飞行数据、操控飞行姿态、完成飞行任务的专属工作空间，其综合设计水平直接关系到飞行安全与飞机性能的充分发挥。纵观民用航空发展史，成熟的驾驶舱设计并非短期迭代的成果，而是伴随航空技术革新与人机工程理念升级，逐步形成了具有鲜明时代特征的发展阶段。

从无到有的雏形时代

1903 年 12 月 17 日，莱特兄弟驾驶“飞行者一号”完成人类历史上首次受控动力飞行，这一里程碑事件也揭开了驾驶

舱设计的序幕。

彼时的“驾驶舱”远非现代意义上的封闭空间——飞机没有座椅，飞行员需俯卧于下翼中央，操控装置仅包括用于调整方向舵的杠杆与控制机翼翘曲、升降舵的简易机构。飞行过程中，飞行员左手掌控升降姿态，右手调节发动机油门，航向则依赖腕部支撑装置调整，且全程无任何飞行仪表辅助，仅通过目视观察与身体感知判断飞行状态，操控方式近乎“原始”。

随着航空探索的深入，在一战前夕，“驾驶杆 + 方向舵”的操纵体系逐渐成型，法国航空工程师布雷盖（Breguet）为飞机加装副翼，大幅提升了横向操纵的精准度与效率。



▲ 图 | 一战时期驾驶舱和仪表盘

一战末期，重型轰炸机的出现推动驾驶舱功能向“多岗位协同”演进——除两名驾驶员外，飞机还配备领航员、通信员与机械师，部分机型的机械师需在发动机舱内实时控制设备，飞行员则通过驾驶舱与发动机舱间的指示灯传递简易指令，初步构建起多角色协作的工作模式。领航员的重要性甚至不亚于机长，需要掌握气象、天文、地理等多方面知识，在空中开展地图作业，帮助机组掌握当前的飞行计划进展，堪比人工版的飞行计划管理计算机。

一战结束后，大量军事飞行员转入民用航空领域，直接推动民航业从“特技表演”向“实用运输”转型，客运、邮运、货运需求的激增倒逼驾驶舱设计持续优化。

1929 年 9 月，美军一位中校驾驶 NY-2 单发双翼飞机，仅依靠仪表完成了 15 分钟无目视飞行。这一试验不仅验证了仪表飞行的可行性，更为后续驾驶舱的数据化奠定了基础。

现代驾驶舱的开端

两次世界大战之间，民用飞机驾驶舱逐步形成具有现代特征的“T 型布局”，包含主仪表板、中央操纵台、顶部板等核心结构，标志着驾驶舱设计从“功能堆砌”向“系统整合”迈进。

这一时期的技术演进集中体现在三个方面：一是封闭座舱成为主流，配合透光性更佳的前风挡玻璃，有效改善飞行员的操作环境与视野。二是随着变距螺旋桨、襟翼、无线电等设备的普及，驾驶舱开始集成更多专业化设备。三是人机协作模式的优化，驾驶舱采用“左右双套飞行仪表 + 中央自动驾驶仪 / 发动机仪表”布局，两侧驾驶盘与中间油门杆的设计，确保左右座飞行员均可独立操控飞机，提升了飞行的安全性。

在这一阶段，道格拉斯 DC-3 的驾驶



▼ 图 | 飞机驾驶舱内部

▼ 图 | 飞行者一号



舱堪称民用航空设计的“里程碑”——不仅配备相对完整的飞行仪表与导航设备，更通过合理的布局规划降低操作复杂度，成为 20 世纪 40 年代民用飞机驾驶舱的“设计模板”。

值得注意的是，这一时期的驾驶舱内集成了大量独立仪表（涵盖姿态、高度、垂直速度、燃油量、发动机转速与温度等数十项参数），被业内形象地称为“钟表店”，密集的仪表虽然满足了飞行数据需求，却也为飞行员带来了较高的信息处理负荷。

二战末期，航空技术的加速迭代进一步推动驾驶舱升级：无线电罗盘、高精度高度表、机载雷达等设备广泛应用，大幅提升了复杂气象条件下的飞行能力。同时，座椅人体工学设计、操控布局的合理性等“人机工效”因素被纳入设计考量，驾驶舱设计开始从“以设备为中心”向“以飞行员为中心”转变。

玻璃座舱的全面普及

20 世纪 70 年代，阴极射线管（CRT）的发明引发驾驶舱显示系统的“颠覆性变



▲ 图 | 电传飞控 + 电子飞行仪表 + 多功能显示器 + 家族化共通设计

革”——传统独立仪表被集成化电子显示替代，实现了“从多到少”的精简升级。

CRT 显示器将关键飞行数据与系统状态整合呈现：主飞行仪表显示（PFD）页面集中呈现姿态、高度、垂直速度、失速 / 超速提示、航向、盲降指引、飞行模式等核心信息，同时嵌入风切变告警、地形警告等安全提示。导航显示（ND）页面则整合地形雷达、气象雷达、飞行计划路径、VOR/ADF 导航与仪表着陆系统，让飞行员可以直观地获取导航信息；发动机指示与机组告警系统（EICAS）页面及系统简图页则专门监控发动机参数与液压、电源、气源等机载系统状态，实现故障信息的集中告警与准确定位。

“玻璃座舱”的普及不仅简化了仪表布局，而且推动了机组配置的优化：随着通信设备简化、星基导航与惯性导航技术成熟、机载设备可靠性提升，传统的通信员、领航员、机械师等岗位逐渐退出历史舞台，“双人制机组”成为主流配置——左座飞行员负责主要驾驶操作，右座飞行员承担信息监控与通讯联络工作，机组协作效率大幅提升。

此外，电传飞控技术的成熟催生了“侧杆布局”的应用，侧杆不仅缩小了设

备占用空间，改善了飞行员正前下方的视野，更因操纵力远小于传统机械传动驾驶盘，打破了体力限制，使女性飞行员也能胜任大型客机的驾驶任务，进一步拓展了飞行员群体范围。

到 20 世纪 90 年代，“电传飞控 + 电子飞行仪表 + 多功能显示器 + 家族化共通设计”成为民用飞机驾驶舱的核心特征——同一制造商的不同机型采用相似的驾驶舱布局与操作逻辑，使飞行员的机型改装培训成本降低 70% 以上，为民航业的规模化发展提供了技术支撑。

以人为本的自动化座舱

进入 21 世纪，民用飞机驾驶舱设计的核心理念升级为“以人为中心”，通过技术创新减轻机组工作负荷、降低人为差错概率，实现“安全与效率”的双重提升。这一阶段的设计突破集中体现在“理念革新”与“功能自动化”两大维度。

在设计理念上，“静暗”与“寂静”成为主流——正常飞行状态下，座舱内仅显示机组主动设置的必要信息，无多余灯光或声音干扰。一旦出现系统故障或异常情况，灯光提示与声音告警会精准触发，引导飞行员聚焦关键问题，避免信息过载。

在功能自动化方面，各大飞机制造商纷纷推出创新性功能：空客 A380 的“刹车至脱离道口（BTV）”功能，允许机组在空中预设跑道脱离出口，飞机落地滑行至目标出口时自动刹车至约 10 节速度，简化了落地后的滑行操作，提升跑道运行效率。波音 787 的“管制员—机组数据链通信（CPDLC）”功能，可将空管指令一键导入自动飞行系统，避免因语音指令误听导致的高度 / 速度设置错误。空客 A350 的“自动应急下降”功能，能在座舱释压、机组失能时，自主将飞机下降至安全高度，最大

程度保障飞行安全。合成（SVS）/ 增强（EVS）视景系统能够在 PFD 或 HUD（抬头显示）上显示外部视景，大幅提升飞机在低能见或夜间运行的能力。

此外，机组告警系统（CAS）与电子检查单（ECL）的普及，彻底改变了特殊情况的处置模式。上一代机型中，飞行员需结合故障特征判断问题、翻阅纸质快速检查单（QRH）执行程序，流程复杂且可能出错。如今，CAS 系统可直接呈现精准故障信息，系统状态页自动跳转至对应界面，部分机型更能主动推送 ECL，引导飞行员按步骤完成处置，大幅提升了特情处置的效率与准确性。

从“飞行者一号”的简陋操控到现代客机的高效座舱，民用飞机驾驶舱的百年演变，既是航空技术不断突破的缩影，更是“以人为本”设计理念持续深化的过程。当前，智能化技术正加速融入驾驶舱设计中，如基于大数据的飞行状态预判系统可提前识别风险，AI 辅助决策模块能提供多套处置方案，进一步降低了机组的决策压力。单人机组探索已进入试验阶段，通过高度自动化系统替代右座飞行员部分职能，仅保留一名飞行员负责关键操作，其特定航线的效率与安全性已接近双人机组。

更长远来看，无人驾驶技术正突破多方面瓶颈，部分小型货运无人机开展试运营，未来民用客机无人驾驶若成为现实，驾驶舱或转变为地面监控中心远程操作界面，重构民航运营模式。这些发展将持续推动民用航空向更安全、更高效、更经济的方向迈进，为全球航空运输体系注入新活力。

▼ 图 | 玻璃座舱



胡戈·容克斯 开创金属飞机飞行时代

文 | 王思磊 编辑 | 张克农

在二十世纪初的蔚蓝天空中，人类的飞行梦想仍禁锢于木质骨架与亚麻布机翼的脆弱躯壳之中。胡戈·容克斯，一位目光如炬的德国人，正在酝酿一场颠覆性的金属革命。他的名字与一系列划时代的“第一”紧密相连：世界第一架全金属客机、第一架从东向西飞越北大西洋的飞机、第一次进行大规模军事空运的飞机、第一次远航中国的飞机……

这些翱翔于时代前列的杰作，都出自容克斯之手。以工程师的冷静与梦想家的热忱，亲手为飞机锻造出钢铁筋骨，不仅重塑了飞机形态，更奠定了现代航空工业坚不可摧的基石，将人类的飞行篇章，

▼ 图 | 胡戈·容克斯



真正引入了坚固、安全与可靠的新纪元。

一生的治学指南

1859 年 2 月 3 日，容克斯出生于德国莱茵河畔的赖特镇。他是一家纺织作坊和砖厂老板的第三个儿子。当时，正是工业革命方兴未艾的时代，父亲作坊里纺织机的节奏、砖窑中火焰的舞动，机械与蒸汽的环绕，成为他最早的技术启蒙。

1878 年中学毕业后，容克斯先后在柏林皇家技术学院、卡尔斯鲁厄理工学院和亚琛工业大学学习机械工程。他采取“半工半读”模式，一边在象牙塔里汲取知识，一边在父亲的工厂里工作。这段“学工结合”的经历塑造了他独特的思维方式：理论必须扎根于实践的土壤。1889 年，30 岁的容克斯创立了自己的第一家工厂，专门生产发动机和加热设备。

在柏林，他遇到了学术生涯中的关键人物——阿道夫·斯莱比教授，一位燃气发动机与无线电技术的先驱。在斯莱比教授的实验室里，容克斯见证了理论与应用的完美结合。“把科研中取得的信息应用到实践中去”——这句教诲如种子般深植他的心中。教授的工作台上，实验数据迅速转化为可操作的机械改进，理论公式在发动机的轰鸣声中得到验证。这种治学方法成为容克斯一生的指南，使他始终站在工程实践的最前沿。

飞行梦想的召唤

1895 年，36 岁的容克斯受聘为亚琛工业大学教授，站在德国工程技术教育的讲台上。他的课堂充满活力，常常带领学生深入工厂车间，将黑板上的公式转化为机床上的操作技能。然而，一次偶然的学术合作改变了他的人生轨迹。

当时，他的同事汉斯·莱斯纳正被飞行试验中的难题所困扰，邀请容克斯共同研究。在亚琛工业大学的实验室里，容克斯第一次系统地接触航空这个全新的领域。两人合作建立的空气动力研究中心，成为德国早期航空研究的摇篮。容克斯亲自动手建造了一个风洞，观察各种形状的物体在气流中的状态。

风洞实验中的发现让容克斯震惊不已——气流掠过不同形状物体的表面时产生的阻力差异巨大，当时的布质蒙皮飞机在结构强度与空气动力学效率上都存在根本局限。在无数次测试中，一个信念在他心中逐渐清晰：将来要开发经济有效的飞机结构，就必须集中精力减少飞机所遇到的阻力，而制造飞机的唯一适合且可接受的材料是金属，因为金属不仅能提供更好的强度重量比，而且能实现精确的空气动力学外形。

全金属飞机的诞生

1910 年 2 月，51 岁的容克斯获得了一项革命性专利：飞翼式飞机设计。在这份专利图纸上，传统的机身几乎消失，巨大的机翼承载着几乎所有的设备与载荷。虽然当时的技术无法实现这一构想，但这个理念预示了航空的未来——今天，每一架飞机的机翼内部都装载着燃油或设备，这正是容克斯理念的延续。

1912 年，为了全身心投入航空研究，



▲ 图 | 容克斯 J-1

容克斯辞去亚琛工业大学的教学工作，回到自己在德绍的工厂。在那里，他组建了一支由工程师、钣金工和机械师组成的团队，开始将金属飞机的梦想变为现实。

第一次世界大战的爆发加速了这一进程。1914 年至 1915 年间，在工程师奥托·梅德的协助下，容克斯团队制造出世界上第一架全金属飞机——J-1“锡驴”。这架飞机采用 0.2 毫米的薄钢板作为蒙皮，内部是钢管骨架。尽管外观笨拙，但它的意义非凡：这是人类首次完全摆脱木材和布料，用金属制造可飞行的飞行器。

J-1 的试飞在德绍郊外的田野上进行。当这架银光闪闪的飞行器在跑道上加速时，围观的人群屏住了呼吸。它成功升空，速度达到 170 千米 / 小时——成为一战中飞得最快的飞机之一。然而，J-1 的操控性差强人意，俯仰稳定性不佳，未能投入量产。但容克斯从失败中看到了方向：金属是未来的材料，但需要更轻的合金。

1916 年，J-3 的研制带来了突破。这一次，容克斯采用了新问世的杜拉铝（硬铝）——一种新型的铝合金，强度接近钢材，重量却轻得多。J-3 的成功证明了金属飞机的可行性，也为未来数十年的航空材料奠定了基础。杜拉铝从此成为飞机结构的主流材料，这一选择影响了整个二十世纪航空业的发展。

F-13 与 JU-52 的传奇

第一次世界大战结束后，根据《凡尔赛条约》，德国不能制造军用飞机。容克斯将目光转向民用航空领域，于 1919 年研制出 F-13——世界上第一架专门设计的全金属运输机。

F-13 的设计体现了容克斯的远见：封闭的客舱可容纳 4 名乘客，他们不再需要飞行服和护目镜；波纹铝蒙皮不仅增强了结构强度，还形成了独特的视觉效果；可靠的发动机和坚固的起落架使其能在简陋的跑道上起降。F-13 的出现意味着民用航空从冒险活动逐渐转变为可行的交通方式。

到 1932 年，F-13 共生产了 322 架，销往全球 30 多个国家。几架 F-13 被卖到美国后，创造了 1900 千米的远程飞行纪录。《纽约时报》撰文指出：“所有美国飞机制造商和专家一致认为，德国人在设计上的成就将给航空领域带来一场真正的革命。”

▼ 图 | 容克斯 F-13



然而，容克斯的视野不止于此。1921 年，他创办了自己的航空公司——ILAG（国际航空集团有限公司），主要使用自己生产的 F-13 和 G-24 飞机运营航线。这是航空业垂直整合的早期范例：从飞机制造到航空运输的全链条控制。尽管 1926 年 ILAG 因经济压力与劳埃德航空公司合并，成为汉莎航空的前身，但容克斯的理念已深入人心。

后来，容克斯又研制了更大的飞机——三发的 G-23/24 和 G-31。1929 年生产的四发 G-38 飞机，翼展 44 米，在整整十年中一直是世界上最大的飞机。

1930 年 9 月 11 日，容克斯飞机设计生涯的巅峰之作——Ju-52/1m 首飞。起初，作为一种单发货机，Ju-52/1m 载重 3 吨，经济实用，但市场反应平平。转机出现在 1931 年，汉莎航空公司提出需要一种更大、更安全的三发运输机。

容克斯团队巧妙地在 Ju-52/1m 的机翼上加装两台发动机，研制出 Ju-52/3m。这款飞机可搭载 17 名乘客和 3 名机组人员，总重量达到 9 吨。独特的三发布局（机鼻一台，两侧机翼各一台）、波纹铝蒙皮和坚固结构，使其成为航空史上的经典机型。

在随后的 25 年里，Ju-52/3m 在德国、法国和西班牙共生产了 5000 余架，成为德国航空工业史上产量最大、出口最广的运输机。在汉莎航空的机队中，Ju-52/3m 是绝对主力，全球数十家航空公司都运营着这种可靠的“容克大婶”（飞行员对它的爱称）。

有趣的是，Ju-52/3m 还曾与中国结缘。1935 年 9 月起，3 架 Ju-52/3m 在中德合资的欧亚航空公司投入运营。有一次，一架 Ju-52/3m 在成都降落时陷入沼泽，中国方面动员了数十名农民和他们的牲口，费尽周折才将这架金属巨鸟拉出泥潭。



▲ 图 | 汉莎公司 Ju-52/3m

政治风暴中的坚守

1933 年，纳粹在德国掌权，开始将整个工业体系转向战争准备。容克斯的工厂成为纳粹觊觎的目标——他们需要这些先进的飞机制造设施生产军用飞机。然而，容克斯与纳粹的理念存在根本冲突。

作为优秀的技术专家和企业家人，容克斯信奉的是通过技术进步改善人类生活。他梦想的是连接世界的民航网络，是普通人能够负担的空中旅行，是金属飞机带来的和平交流。而纳粹需要的，是将这些技术转化为战争工具。

冲突不可避免地爆发。1933 年秋，纳粹以“经济问题”为借口，派遣冲锋队占领了容克斯在德绍的工厂。74 岁的容克斯被赶出自己创立的企业，不得不前往巴伐利亚隐居。在慕尼黑，他建立了一个小型研究中心，将注意力转向金属建筑技术——一种不需要战争应用的金属结构创新。

1935 年 2 月 3 日，容克斯在慕尼黑附近的家中与世长辞。这位航空先驱在孤独中离世，未能亲眼看到自己的理念在现

实世界中开花结果。

容克斯离世后，他创立的公司于 1936 年被国有化，更名为“容克斯飞机和发动机有限公司”。讽刺的是，这个公司被纳粹用于生产 Ju-87 和 Ju-88 等著名轰炸机——这些战争机器与容克斯本人的航空理念背道而驰。

然而，容克斯的真正遗产超越了具体机型，甚至超越了航空领域。今天，全球每天有超过 10 万架民航航班起降，连接着地球的每一个角落，这正是容克斯的梦想——技术应当连接而非分隔人类，应当促进交流而非制造冲突。

慕尼黑德意志博物馆的容克斯常设展以这样的评价结尾：“他不仅让金属飞上天空，更让工程智慧承载了人文价值。在技术决定论盛行的时代，他坚持‘为何飞行’的伦理追问——这一追问在今天的人工智能、生物技术时代，显得更加珍贵。”

