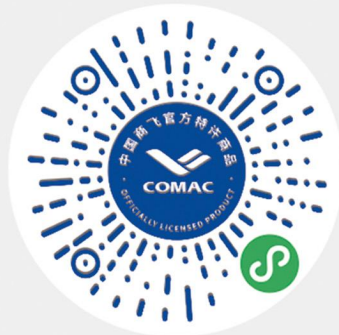


COMAC 飞行员套装

飞行员头盔包



四款魔术贴



135

大飞机 JETLINER

2025.09

民机适航

- 当人工智能遇上适航
- 气象保障：全程适航的基石
- 如何预防飞机“血管堵塞”



大飞机

JETLINER

09 September

2025.09 | 总第135期

ISSN 2095-3399



9 772095 339259



图 | 方兴鸿

P10



P14



P23



P28



P40



P53



P74



05 卷首语

05 以“强”立骨，以“大”行远 | 陈伟宁

06 资讯

10 封面文章

- 10 当人工智能遇上适航 | 乔玉
- 14 气象保障：全程适航的基石 | 张文婷
- 17 如何预防飞机“血管堵塞” | 叶柯华
- 21 气候环境实验室：大飞机适航取证的利器 | 王军朋

23 航空制造

- 23 NASA 公布 2026 财年航空研究计划 | 吴蔚
- 28 波音全力推进 777X 项目 | 曲小
- 32 俄罗斯支线飞机国产替代的启示 | 董帼雄
- 36 公务航空市场机型迭代加速 | 杜婷

40 航空运输

- 40 构建完善民航业并购实施体系 | 王鹏
- 44 民航货运市场的转型与突破 | 丁一璠
- 49 暑运中的全国千万级机场 | 文墨
- 53 人工智能赋能忠诚度计划的创新与应用 | 王双武

58 科普

- 58 飞机涂装面面观 | 张安超

62 产业观察

- 62 走进成飞民机 C919 机头生产线
“我们的目标是做精品” | 欧阳亮 廖天航
- 66 客机衍生型谱系规划四原则 | 张建军

68 回眸

- 68 参与庞巴迪 C 系列项目研制的回顾与思考（上）
| 汪亚卫
- 74 莱特兄弟：终结黎明前最寒冷的长夜 | 王思磊



▼ 本期导读

适航，是指飞机及其部件和子系统在预期的运行环境和使用限制下，具备安全飞行的固有品质和能力。在初始适航阶段，飞机制造商通过开展符合性验证工作表明产品的适航性。在持续适航阶段，飞机制造商通过收集故障、失效和缺陷，开展原因分析、风险评估和改正改进，以保证持续适航性。适航验证与持续适航是保证飞机安全飞行的关键环节。

但在适航验证过程中，人工操作会带来一些困扰：一是对适航条款的解读会出现分歧，二是单个型号飞机的符合性文件数量可达 6000 余份，依赖审查代表人工逐页核对，不仅效率低，而且存在疏漏的风险。在持续适航过程中，同样存在人工操作带来的问题，比如数据分散很难检索，另外事件分析与处置效率也不高。

近年来，人工智能技术迅猛发展，其在知识整合、数据分析、智能决策等方面存在较大优势，为适航领域带来了创新潜力。当然，由于人工智能技术本身还不太成熟，因此其在适航领域的应用也伴随着诸多挑战。

▼ 封面图片 | 王脊梁



- 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。

大飞机

2025 年第 09 期 | 总第 135 期 | 09 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



从世界级头部企业的发展规律来看，答案是清晰的——“做强”应是“做大”的前提与根基，唯有以“强”立骨，方能让“大”行远。

卷首语

以“强”立骨，以“大”行远

文 | 陈伟宁

在企业发展过程中，“做大”与“做强”常被视为一体两翼：企业要发展，必须不断扩大市占率，追求更大的营收规模，从而实现规模效益。然而，如果一味寻求规模扩张，当“规模冲动”盖过“质量敬畏”“效益敬畏”后，却可能陷入“大而不强”“规模不经济”的困境。这指向了企业成长中面临的一个关键命题：“做大”与“做强”，究竟以何为先？

从世界级头部企业的发展规律来看，答案是清晰的——“做强”应是“做大”的前提与根基，唯有以“强”立骨，方能让“大”行远。以消费电子产业为例，2024 年我国厂商共生产手机 16.7 亿部，约占全球总产量的 58%，但利润总额只有 5650 亿元。相比之下，美国苹果公司却以 2.23 亿部的产量，获取了近 8400 亿元利润。为什么会出现如此巨大的反差？究其原因，是因为一些国内厂商在高端芯片、软件系统等核心要素上受制于人，品牌溢价能力弱，故而利润率处于较低的水平。

事实上，从企业发展的逻辑来看，“强”是抵御风险的立身之本。这些年来，华为历经各种风浪的拍打，却越战越勇、越战越强，靠的正是“掌握核心技术”。反观国内一些房地产企业，在市场行情好的时候，一味实行多元化快速扩张，营收急剧膨胀。但一旦市场发生变化，却因缺乏核心竞争力，业务迅速萎缩，陷入资金链断裂危机，甚至破产倒闭。由此可见，企业虽大，若没有技术、质量、管理等强内核的支撑，不过“虚胖”而已，禁不起什么风雨。

当前，我国大飞机事业正处于规模化产业化发展的关键阶段，面临着“做大”与“做强”的双重任务。作为主制造商，中国商飞不仅要紧密团结国内外供应商，不断提升产业链供应链韧性，努力提升规模化水平，更要加快关键技术攻关，努力实现高水平科技自立自强。唯有以“强”立心、以“质”铸魂，才能让大飞机规模化发展经得起市场与时间的检验，才能真正实现有质量、有韧性、有未来的发展。



01

1 南航 C919 入列一周年，运输旅客超 46 万人次

8 月 29 日，C919 入列南航一周年，累计承运旅客超 46 万人次，安全运营约 7800 小时。截至 8 月底，南航 C919 已执行过广州、杭州、上海、长沙、武汉、成都、太原、郑州、海口等 14 个航点，在广州—上海、广州—长沙、广州—武汉、广州—成都、广州—太原、广州—郑州等 6 条航线上实现常态化商业运营，累计执行超 3400 个航班，平均客座率保持在 83% 左右。

今年暑运高峰期，南航 C919 的日利用率最高达 8.3 小时，5 架 C919 飞机全部“全勤上岗”，日均执行航班达 17 班次。

2 首架 C909 医疗机交付中国飞龙通航

9 月 9 日，首架 C909 医疗机在郑州交付中国飞龙通用航空公司，标志着国产商用飞机系列化发展实现新突破。该架飞机交付后将承担紧急救援、远程医疗和重症转运等任务。

C909 医疗机最大设计商载 10 吨，标准航程可达 3700 公里，具备高高原机场起降能力。舱内布局可根据不同救援需求灵活改装，能够满足医疗救援队伍出行、边远地区医疗救助、伤病员转运等多场景应用。



02

3 柬埔寨国家航空订购 20 架 C909

9 月 8 日，柬埔寨国家航空有限公司与中国商用飞机有限责任公司在郑州签署合作谅解备忘录，拟采购 20 架 C909 飞机，其中 10 架为确认订单、10 架为意向订单。双方将围绕飞机引进、运营保障、产业培育等开展密切协作。

柬埔寨国家航空有限公司是柬埔寨王国政府投资并立法确立的载旗航司，系柬埔寨唯一获得国际航空运输协会运行安全审计认证（IOSA）的航司，也是唯一获得 Skytrax 三星评级的航司。

5 C909 商业航班首次飞抵泰国

9 月 2 日，由 C909 飞机执飞的老挝航空 QV441 航班飞抵泰国曼谷素万那普国际机场。这是 C909 商业航班首次飞抵泰国。

据了解，老挝航空于 9 月 1 日接收了第二架 C909 飞机。当天，这架注册号为 RDPL34266 的飞机执行 QV266 调机航班从上海飞往老挝航空主基地所在的老挝首都万象。第二天开始，这架飞机就投入商业航线运营，执飞万象—巴色、万象—桑怒等老挝国内航线，每天飞行 4～6 个航段。

从 9 月 2 日起，此前已投入商业航线运营的注册号为 RDPL34229 的 C909 飞机每天航班任务调整为万象—桑怒—万象—曼谷（素万那普）—万象—曼谷（素万那普）—万象 6 个航段。

4 C909 首航澳门

9 月 10 日 11 时 40 分，东航 MU865 航班从南昌昌北国际机场飞抵澳门国际机场，落地后受到民航最高礼仪“水门仪式”的迎接。

当天上午，在南昌昌北国际机场，东航为 C909 客机开通新航线举办了首航仪式，受邀嘉宾和旅客在首航打卡点合影留念，并获赠东航特别定制的明信片 and 纪念封。东航还为首航航班配备了“品味江西、畅游赣鄱”特色航空餐食，印有“南昌”“滕王阁”等字样的糕点得到旅客好评。



04

6 波音 8 月交付飞机 57 架

8 月，波音商用飞机项目共获得新订单 26 架（5 架 737MAX、14 架 777X、5 架 787-9 和 2 架 787-10），共交付 57 架（42 架 737MAX、1 架 737-700、1 架 767 军用衍生机型、4 架 777 货机、8 架 787-9 和 1 架 787-10）。

截至 8 月底，波音 2025 年累计交付商用飞机 385 架，超过 2024 年全年交付量（348 架）。



10 首架批产型 SJ-100 首飞

9 月 5 日，首架采用批产流程制造的 SJ-100 飞机完成首飞——试飞机组由 3 人组成，历时 1 小时，在总装厂机场进行。

SJ-100 是 SSJ100 的国产替代型号，已实现进口系统的国产化，装配国产 PD-8 发动机，而非 SSJ100 的配套发动机 SaM146。该机型目前仍在开展取证工作，包括对不同构型的原型机开展试验。

12 达美与壳牌合作在波特兰实现首例商用规模 SAF 加注

近日，达美航空宣布与壳牌合作，在美国波特兰国际机场完成了其史上首次商用规模的 SAF 加注。此次 SAF 由壳牌提供，与传统航空煤油按比例混合后直接用于定期航班运行。这是波特兰国际机场首次接收商用规模的 SAF，加注总量超过 40 万加仑，标志着美国西海岸 SAF 供应链进入实际应用阶段。

业内认为，这一项目不仅验证了 SAF 大规模使用的可行性，还为航司、燃料供应商与机场间的协同提供了示范，将加速 SAF 的普及和成本优化进程。

7 空客 8 月交付飞机 61 架

8 月，空客新增订单 99 架（2 架 A320neo、75 架 A321neo、15 架 A330-900、7 架 A350-1000），无订单调减，净订单为 99 架。1～8 月，空客新增订单 600 架，净订单为 504 架。

8 月，空客交付 61 架（7 架 A220-300、3 架 A319neo、12 架 A320neo、32 架 A321neo、2 架 A330-900、5 架 A350），略低于 7 月 67 架交付量，但较 2024 年同期 47 架增长约 30%。

1～8 月，空客交付 434 架（较 2024 年同期 447 架少 13 架）。截至 8 月底，空客储备订单量为 8728 架。

8 空客正考虑停止 A319neo 项目

由于难以满足当前航司对高运力与运营经济性的双重追求，空客正考虑停止 A319neo 项目。这一举措反映出全球民航市场对高座级、单通道窄体机型的结构性偏好，正加速重塑航司机队布局和制造商的产品策略。

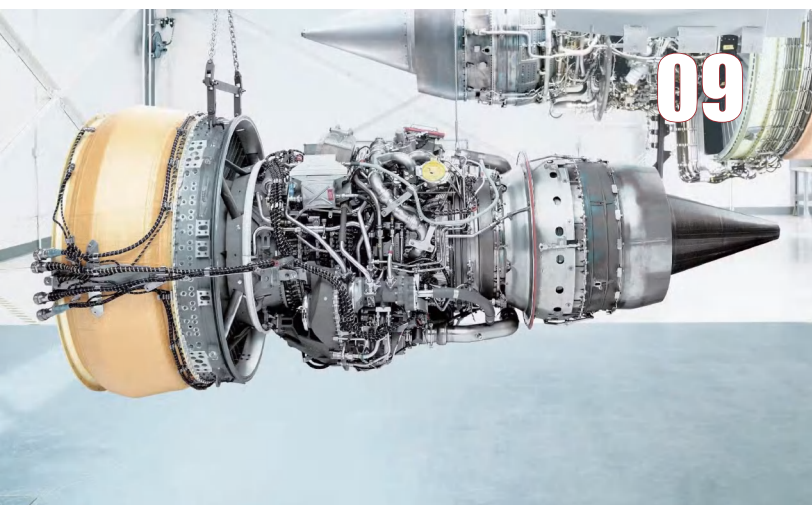
A319neo 是空客 A320neo 系列中体型最小的机型，自 2010 年推出以来，累计订单仅 57 架，远低于同系列的 A320neo 和 A321neo。



13 西南航空启用“第 2 道驾驶舱门”装置

近日，美国西南航空正式投入首个配备“第 2 道驾驶舱门”（即安装物理二级屏障 IPSB，以在主驾驶舱门打开时能阻止乘客进入）的载客航班。当日执飞飞机为新交付的波音 737MAX8，从凤凰城起飞前往丹佛。

根据 FAA 规定，从 2026 年 8 月起，所有新机都必须安装该安全设施，这将成为美国境内新机的标准配置。美西南航空表示，现役机队无需改装，因为 FAA 规则未作追溯要求。



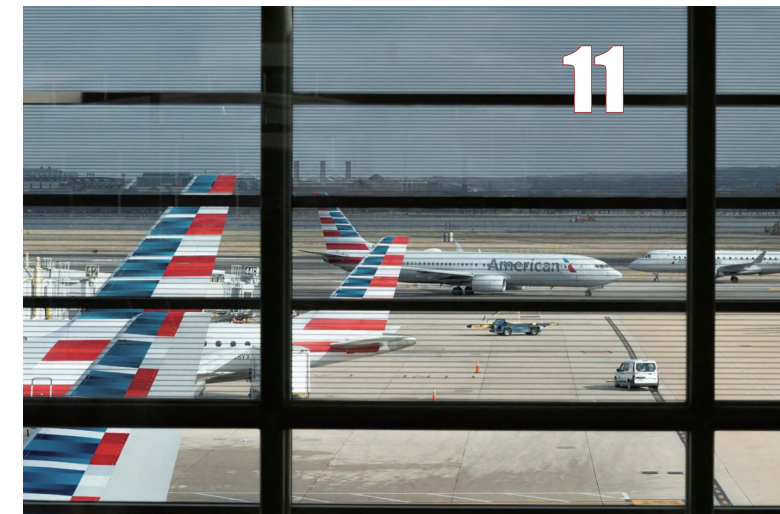
9 GECF34 发动机短缺持续影响巴航工业 E175 生产

9 月 11 日，巴航工业指出，其 E175 飞机的生产正面临 GECF34 发动机短缺的制约，且该问题在 2025 年变得尤为突出，GE 不仅交付量不足，且交付频繁延迟。

CF34 发动机推力级别为 1 万～2 万磅，自 1980 年代问世以来已生产多个型号，是 E175 及部分公务机的动力来源。

11 FAA 将提议修改流程以加快新商用飞机的认证速度

9 月 4 日，美国政府在一份公告中称，FAA 计划提议修改新商用飞机的认证流程，以加快认证速度。FAA 表示，计划在 12 月前提议“对运输类飞机和推进系统的某些认证标准进行现代化修改”。FAA 称，此举将减少“认证过程中所需的豁免、特殊条件以及等效安全水平判定”，从而放宽监管。



当人工智能遇上适航

文 | 乔玉

▼ 图 | 张晖



适航，是指飞机及其部件和子系统在预期的运行环境和使用限制下，具备安全飞行的固有品质和能力。在初始适航阶段，飞机制造商通过开展符合性验证工作表明产品的适航性。在持续适航阶段，飞机制造商通过收集故障、失效和缺陷，开展原因分析、风险评估和改正改进，以保证持续适航性。适航验证与持续适航是保

证飞机安全飞行的关键环节。

近年来，人工智能技术迅猛发展，其在知识整合、数据分析、智能决策等方面存在较大优势，为适航领域带来了创新潜力，同时也伴随着诸多挑战。本文将从应用前景、面临的挑战及解决方案等方面，探讨人工智能在适航验证与持续适航领域的应用。

人工智能与初始适航

适航符合性验证是机型取证与设计更改的关键环节，需要通过工程分析、试验验证等方法证明飞机符合适航要求。目前，适航验证过程存在以下问题：

第一，法规与标准的解读可能不一致。适航要求通常存在“原则性表述多、细节界定模糊”的特点，这种模糊性可能导致制造商与审查方在条款的理解上存在分歧，可能导致不同审查人员对同类设计方案的审查标准不一致，增加验证成本，拉长审定周期。

第二，人工逐份审查文件影响效率。适航验证需提交海量的符合性报告，单个型号飞机的符合性文件数量可达 6000 余份。传统文件审查依赖审查代表人工逐页核对，不仅效率低，而且存在疏漏的风险。

截至目前，中国商飞已完成 C909 与 C919 飞机的适航验证与取证，在适航条款解读与符合性验证方面积累了一定的数据与经验，并固化纳入企业标准。在此基础上，利用自然语言处理与知识图谱技术，构建适航法规智能解读系统，可以解决“解读复杂、标准不一”的问

题。此外，通过建立适航规章、型号设计与符合性报告知识库，基于自然语言处理与计算机视觉技术，对经批准的符合性报告进行学习，开发适航文件辅助核查系统，可以缓解“效率不高、疏漏风险”等问题。

人工智能与持续适航

持续适航通过收集飞机运行过程中的故障、失效和缺陷，开展原因分析、风险评估和改正改进，以保证飞机持续运行安全。目前，持续适航过程存在以下问题：

第一，数据存储分散，整合难度大，利用性差。一方面，国际主流机型的不安全事件调查报告及适航指令散落在各个平台，接口不互通，没有形成规范的参考与利用准则。另一方面，飞机在运行中产生的故障数据散落在局方、航空公司和主制造商不同的系统中，数据格式、存储方式各不相同，数据整合过程复杂烦琐，需要

大量的人工操作，效率低下且容易出错。此外，现有数据应用多停留在“统计汇总”层面，未深入挖掘数据之间的关联关系。调查报告、适航指令、手册等数据主要为 PDF 格式，工程师需手动检索关键信息，无法快速关联故障案例与解决方案，信息获取效率低下。

第二，事件分析与处置效率不高。持续适航事件分析报告编制是事件处置的核心，报告结合事件的原因、受影响范围及风险水平，针对机队制定和发布改正改进措施。当前流程存在瓶颈，事件分析周期长，需人工梳理事件经过及系统原理、匹配历史案例、查阅安全性分析报告，开展分析与评估。经验复用性差，历史事件分析成果未形成结构化知识库，新事件分析时需从零开始，无法快速借鉴同类案例经验。报告涵盖多维度内容，人工编制时易出现表述逻辑错误、数据缺失等质量问题。

中国商飞已有 10 年机队运行经验，形成了一定数量的机队运行数据。此外，也逐步整理了国际主流机型的事故、征候、不安全事件调查报告及适航指令数据。借助新技术，我们可以采用机器学习算法对来自不同系统、不同格式的数据进行分类、匹配和转换，实现数据的对接和整合；建立适航规章、适航安全信息以及机型历史事件知识库，实现智能问答；结合型号设计与符合性报告信息，实现事件辅助分析。

借助人工智能技术，工程师输入事件基本信息后，系统自动匹配同类历史事件，输出故障原因推测、处置措施建议，并关联相关适航条款，缩短事件分析周期。此外，针对事件分析与处置报告，建立核查模型，通过人工智能自动核查报告的表达逻辑、数据完整性，输出核查意见，保证报告及评估结果的质量。



▲ 图 | 王脊梁

面临的挑战与解决方案

尽管人工智能在适航领域应用前景广阔，但在以下方面仍面临一定的挑战：

一是技术层面，人工智能技术尤其是深度学习算法，具有显著的“黑箱”特性，其决策过程难以解释。这一特性与适航验证所要求的可追溯性和可解释性形成了尖锐矛盾。该问题的解决期待于可解释人工智能技术的进一步研发和应用，以及约束、测试、监控系统来论证系统在功能、性能和安全上是可预测、可验证、可保证的。当前阶段，仍需充分发挥适航工程师的作用，无论是适航验证过程还是持续适航过程，针对人工智能系统输出的结果进行二次判断，确保完整性与准确性。

二是数据层面，在人工智能应用中，高质量数据是模型训练和准确决策的基础。然而，在适航领域，数据来源广泛且复杂，质量参差不齐，同时还可能涉及商业信息。对此，可探索建立“主制造商 + 航空公司 + 适航当局”数据共享机制，以及完善的数据使用规则和权限管理规则，明确数据权责与保密规则，实现数据的高效共享与应用。

三是程序层面，目前适航规章及程序主要是基于传统的技术及审定方法制定的，对于人工智能技术的应用缺乏明确的规定与指导。将人工智能技术应用于适航核查或审定时，面临着法规不明确、标准不统一等问题，增加了技术应用的难度和不确定性。飞机主制造商可联合适航当局以及人工智能科研机构，逐步研究制定人工智能辅助适航核查或审定的法规与标准，明确模型验证、数据质量、工作流程、系统运维等要求，为人工智能技术在适航领域的应用提供清晰的指导。

从飞机主制造商视角来看，人工智能技术正成为适航领域效率提升的核心驱动力。展望未来，人工智能可在商用飞机设计、制造、验证及运营方面得到更广泛的应用。人工智能与适航领域的深度融合将推动民航业朝着更加安全、高效、智能的方向发展。对于中国商飞而言，积极探索并在适航工作中应用人工智能技术，有助于提升国产民机的竞争力，助力我国从航空大国迈向航空强国。

▼ 图 | 颜康植





气象保障： 全程适航的基石

文 | 张文婷

当您系好安全带，感受飞机冲上云霄的瞬间，是否想过是谁在幕后与钢铁机翼和精湛飞行技艺并肩作战，确保每一航程的适航与安全？它无形无声，却贯穿飞行始终——气象保障，这位不可或缺的“隐身守护者”，从飞机起飞前到落地后，精密编织着安全网。

洞穿天际的“侦探眼”

“晴空万里，为何延误？”旅客们常有这样的疑问。

其实，飞行远不只是从一个机场到另一个机场的平面移动，而是一场跨越三维空间的复杂旅程，其能否顺利进行，绝不是眼前这片晴空就能决定的。前方航路上可能潜藏着正在悄然移动的雷暴，看似平静的空中或许存在着无形却足以让飞机剧烈颠簸的湍流，甚至目的地机场此刻正被一场突如其来的恶劣天气包围，这些因素都可能让即将起飞的航班不得不按下暂停键。

气象员无疑是航路的“首席侦探”，他们手中的工具堪称“顶配”。卫星云图就像他们的广角镜头，能将大范围的云层分布、风暴系统等尽收眼底，让他们清晰地了解天气的整体态势。而气象雷达则是一把精细的探针，能够深入探测云层内部的结构，精准捕捉到雷暴的强度、降水的分布等细节。无论是雷暴那变幻莫测的诡秘路径，气流形成的不安涡旋，还是台风一路肆虐的轨迹，在气象侦察兵这些“天眼”的严密监控下，都无所遁形。只有当气象员确认整条空中走廊的每一个角落都安全无虞时，签派员才会郑重地执笔签发飞行的“通行证”——飞行计划。

而对于高原、高温、高寒等机场，气象保障更是精准调度的基石：在高原机场，空气稀薄如蝉翼，会削弱飞机升力，而精确的气象数据正是计算飞机起飞着陆极限的标尺；高温机场，空气因“热胀”而变轻，导致飞机推力下降，此时气象实况为精准的业载决策与燃油加载提供依据；高寒机场面临着燃油凝固、液压系统故障的风险，气象预警则成为激活严苛防冻程序的警报器。

规避风暴的“实时导航”

冲入云霄，险情常在云端蛰伏：雷电的狰狞，气流的旋涡，结冰的僵滞，风切的突袭……此刻，气象保障化身为飞行的“动态导航系统”。地面气象雷达站构成“预警网”，卫星俯拍绘制“全息天气图”，机载雷达则是飞行员手中的“夜视镜”。

危险初露端倪，气象保障与空中交通管制即刻联动，为航班规划出一条安全绕行的三维通道。比如航班遇到严重颠簸，气象保障早在前序航班数据和实时天气模型中便捕捉到蛛丝马迹，及时发出颠簸预警。飞行途中，一旦侦测到新的威胁区域，“绕飞指令”就会通过空地通信系统迅速传递至驾驶舱，飞行员根据指令及时调整飞行高度，改变航向，成功规避风险。

结冰威胁也是飞行中需要严密监控的重要隐患。当飞机穿越含有过冷水滴的云层时，这些水滴会迅速在飞机表面冻结，形成冰层。冰层会改变飞机的气动外形，增加飞行阻力，甚至影响飞机的操控性能。

气象保障部门基于先进的气象模型和大量的观测数据，能够精准圈定可能出现结冰的高度层和核心区域。飞行员接收到这些信息后，会即时激活防冰除冰系统：机翼前缘与发动机探针被加热装置温暖地守护着，防止结冰；关键舵面则会喷洒出特制的防冰液，将刚形成的冰晶及时清除——通过这些措施，将致命的冰晶层隔绝于飞机气动外形之外，保障飞机的正常飞行。

修复创伤的“数据钥匙”

飞机安全落地，并不意味着气象保障的守护就此结束。那些曾经遭遇过雷暴、



冰雹、强颠簸等恶劣天气的飞行器，其机身或许已经留下了肉眼难以察觉的“暗伤”。而此时，气象保障提供的详尽记录，就成为飞机维修团队排查隐患、修复创伤的关键线索。

在雷击定位方面，气象数据中包含的精确雷击时间、位置和强度等信息，就像为工程师安装了一个精准的“导航仪”，指引他们有针对性地检查飞机蒙皮是否出现灼痕、电子设备是否受到损伤，乃至复合材料的导电性是否发生改变。

对于冰雹袭击，气象记录中关于冰雹的密度、尺寸等数据，让维修人员在检查时目标明确，能够重点关注雷达罩、机翼前缘、机身蒙皮等部位是否存在凹痕与裂纹。而颠簸数据里的强度等级与发生时段信息，则如同一张详细的“地图”，帮助维修团队检查机身结构是否出现变形、紧固件是否松动、舱内设施的稳定性是否受到影响。

不仅如此，对于那些长期穿梭于海洋上空，暴露在高湿、高盐雾环境中的越洋飞机，气象部门提供的航线腐蚀因子数据（如空气湿度、盐分浓度等）更是意义非凡。这些数据是航空公司为飞机定制抗

腐方案的源头：根据不同航段的腐蚀因子强度，航空公司可以制定出更合理的维护计划，比如加强特定区域航后的清洁频次，及时清除附着在飞机表面的盐分等腐蚀性物质；选用尖端的防腐涂层或耐腐蚀的复合材料来制造飞机部件，提高飞机的抗腐蚀能力；同时，还能依据这些数据更精准地监控飞机关键结构的老化进程，提前发现潜在的腐蚀隐患，让飞机始终远离腐蚀困扰，保持良好的适航状态。

从起飞前对天气状况的精密评估，为飞行计划的制定提供科学依据；到飞行途中对云端危机的实时监测与规避，为飞机指引安全航向；再到飞机降落后，为机库内精准指向病灶的检修工作提供数据支持——气象保障如同一条无形的生命线，深深植入飞行安全的全流程。它所提供的不仅仅是一串串冰冷的数字和图表，更是支撑每一次起飞信心的底气、护航每一段空中旅程的保障、维系飞机持久适航能力的核心力量。正是这份看得见数据、却又难以直观感受其全过程的“看不见”的守护，让每一位乘客脚下的万里归途，都能始终坚定如初，平安抵达。

如何预防飞机“血管堵塞”

文 | 叶柯华

你知道吗，别看宽体客机身躯庞大，可一旦飞到万米高空，它的“血液”却面临着隐秘危机——当飞机在零下 50℃ 的低温云层中持续穿行数小时后，燃油里藏着的小水滴会像“冰晶种子”那样悄悄聚集。这些危险的水分子能在一架载油 80 吨的飞机里凝结成 4 瓶矿泉水的冰量，如同血管里的血栓，可能引发供油故障甚至发动机停止运转。

2008 年 1 月 17 日，英国航空 38 号航班从北京首都国际机场起飞，前往英国伦敦希思罗机场，这架波音 777 客机搭载着 239 名乘客和 16 名机组人员。这本来是一次再普通不过的跨洋飞行。可是，就在距离地面约 600 米高度，飞机准备降落时，意外突然发生——两台遑达 800 型发动机竟同时失去动力。

所幸的是，这次事故中没有人员死

▼ 图 | 余创



亡。经验丰富的机长凭借高超的驾驶技巧,在没有动力的情况下操控飞机滑翔,最终飞机以腹部擦地的方式迫降在机场跑道旁的草地上。巨大的冲击力导致飞机起落架折断,机身严重受损,19 名旅客不同程度受伤,飞机也彻底报废。

事后,英国航空事故调查局对飞机残骸、黑匣子数据进行了全面分析。在排除了机械故障、人为操作失误等多种可能后,调查人员最终将事故的“罪魁祸首”锁定在燃油里的冰上。

燃油中为什么会有冰

在高空飞行时,飞机处于低温环境中,这为燃油中的水分结冰创造了条件。燃油温度会随着飞行高度的增加而降低,在平流层底部,温度常常低至零下几十摄氏度。当燃油温度下降时,水在燃油中的溶解度也随之降低,原本溶解在燃油中的水分会逐渐析出,成为游离状态的水滴。

当温度降至水的冰点(0℃)以下

时,这些游离的水滴就会开始结冰,形成微小的冰晶。随着温度继续降低,冰晶会不断增大。在零下 3℃~零下 1℃范围内,冰晶开始形成;当温度处于零下 19℃~零下 10℃时,冰晶有了一定的附着力,会逐渐黏附在燃油管路的内壁上。其中,在零下 13℃~零下 11℃时,这种附着力达到最大,冰晶更容易在管壁上积聚。

当温度低于零下 20℃时,虽然冰晶的附着力有所减弱,但此时如果燃油流量增大,比如飞机需要加速或爬升时,这些冰晶会被燃油带动,随着燃油一起流动。当它们流经燃油滤网等孔径较小的部件时,就可能造成堵塞,影响燃油的正常供应。

那么,燃油中的水分从哪里来?

飞机燃油中之所以会存在水分,原因是多方面的。在燃油生产、储存和运输过程中,环境中的水分可能会混入燃油。比如,在油罐车装油、加油站加油等环节,如果设备密封不严,遇到下雨或空气潮湿等情况,水分就可能进入燃油。此外,空气中的水蒸气也会因温度变化凝结到燃油中。当燃油温度降低时,空气中的水蒸气会液化并混入燃油;而当温度升高时,燃油吸收水分的能力又会增强。

飞机燃油中的水分主要有三种类型,包括溶解水、悬着水和游离水。它们的特性和对燃油系统的影响各不相同。

溶解水是完全融入燃油中的水分,就像盐溶解在水中一样,无法用肉眼直接观察到。它与燃油形成了均匀的溶液,在通常情况下,不会对燃油系统造成直接危害,但当燃油温度降低时,其溶解度会下降,进而可能析出形成其他形态的水分。

悬着水则使燃油呈现出浑浊、朦胧

的状态,它是水分以微小液滴的形式悬浮在燃油中形成的。这些液滴的直径通常在几微米到几十微米之间,由于表面张力的作用,能够稳定地分散在燃油中。

游离水是相对独立存在于燃油中的水分,它的密度比燃油大,会逐渐沉积在燃油箱的底部。游离水通常是由悬着水经过一段时间静置后,小液滴相互聚集形成较大的水滴,最终沉淀下来形成的。

燃油结冰有哪些危害

燃油系统结冰对飞行安全构成了严重威胁,其危害主要体现在以下几个方面:

首先,冰晶堵塞燃油管路和滤清器是最直接的危害。一旦燃油管路被堵塞,燃油无法顺畅地从油箱输送到发动机,会导致发动机供油不足。在飞机起飞阶段,如果发动机因供油不足而推力下降,可能无法达到起飞所需的升力,造成起飞失败。在飞行过程中,发动机推力不足会影响飞机的飞行高度和速度控制。而在降落阶段,发动机失去动力则可能导致飞机无法正常着陆,后果不堪设想。

其次,冰晶进入发动机燃烧室后,会影响燃烧效率。冰晶在燃烧室内不能充分燃烧,会降低发动机的输出功率。同时,未燃烧的冰晶还可能对发动机的内部部件造成磨损和腐蚀,缩短发动机的使用寿命,增加维修成本。

此外,燃油系统中的冰晶还可能损坏燃油泵、喷油嘴等部件。燃油泵在工作时,需要将燃油加压输送,如果燃油中含有大量冰晶,冰晶会与泵的叶轮等部件发生碰撞和摩擦,导致部件磨损甚至损坏。喷油嘴的孔径非常小,冰晶很容易将其堵塞,使燃油无法雾化喷出,影响燃烧过程的稳定性。

为了预防飞机燃油系统结冰,航空业

为了预防飞机燃油系统结冰,航空业采取了一系列综合措施,从飞机设计、燃油处理到飞行操作等多个环节进行把控。

采取了一系列综合措施,从飞机设计、燃油处理到飞行操作等多个环节进行把控。

如何避免燃油结冰

在飞机设计方面,工程师们采取了多种技术手段。比如,许多飞机的燃油系统都安装了燃油加热装置,这些装置通常利用发动机的废气余热或电加热等方式,对燃油进行加热,确保燃油温度始终高于冰点,防止水分结冰。最典型的就是在燃油管路中设置热交换器,让高温的发动机滑油与低温的燃油进行热交换,提高燃油温度。

燃油过滤系统也是燃油结冰防护的一种重要技术屏障。燃油滤清器的滤网能够过滤掉燃油中的杂质和较大的冰晶,防止它们进入发动机的关键部件。同时,一些先进的燃油系统还配备了冰晶探测器,当探测到燃油中冰晶含量达到一定程度时,会及时发出警报,提醒机组人员采取措施。

严格控制生产、储存和使用等环节燃油的含水量也是关键。燃油生产企业会采用先进的脱水设备,对燃油进行深度脱水处理,确保出厂的燃油含水量符合严格的标准。在储存燃油的油罐中,



气候环境实验室： 大飞机适航取证的利器

文 | 王军朋

大飞机在服役期间可能会经历各种恶劣的极端气候，为了确保飞行安全，在适航取证过程中，试验机常常要飞往最可能出现极端气候的机场，在那里接受严苛的考验。

通过外场极端自然环境来验证飞机的气候适应性，这固然是一个不错的方法，但这种方法有很大的局限性。例如，由于气象预测不可能百分之百准确，在有限时

间内，极端气候条件并不一定就会出现。由于极端气候的出现具有一定的不确定性和季节性，一旦错过将影响飞机的研制进度，增加研制成本。

与“靠天吃饭”的外场自然气候试验相比，实验室气候环境试验不受季节、地区和时间限制，费效比高，试验环境可复现，能够保证研制周期，所以建设大型综合气候环境实验室对于促进我国航空工

▼ 图 | 王军朋



泵，通过动力流在泵的腔体内制造低压区，从而将引射泵入口的燃油吸入并喷出至目标位置处。除水系统还包括除水管路、泵入口及出口的单向阀等设备。

除水系统安装在油箱内。引射泵入口会设计成尽可能贴近油箱最低点。该处也是燃油中沉淀水集聚的位置。燃油泵供油时，会分出部分流量用作引射泵引射的动力。此时，集聚在低处的水分就会被引射泵吸入并转输至燃油泵入口，而后被吸入发动机消耗，形成正向的循环。

当前，除水系统是最广泛采用、也是最成熟可靠的燃油防冰手段之一。它无需额外能源，还保持了纯机械设备的高可靠性，因此，它是当之无愧的“防冰卫士”。

现代飞机为高度集成化设计，油箱也往往被划分为多个区域。航空工程师在利用引射泵除水的同时，也让其担负起向不同油箱内转输燃油的功能。常见的转输形式包括从中央翼油箱向外翼油箱转输，或其他油箱向集油箱转输。

飞机燃油系统结冰是一个复杂的问题，它涉及到燃油的物理化学特性、飞机的设计制造以及飞行环境等多个方面。通过对空难事故的分析，我们更加清楚地认识到其中的危害。随着航空技术的不断发展，预防燃油系统结冰的技术和措施也在不断完善，为飞行安全提供了更加坚实的保障。但我们也不能掉以轻心，仍需持续关注和研究这一问题，不断提升航空安全水平。

只有符合标准的燃油才能加入飞机油箱。此外，加油设备也会定期维护保养，确保其密封良好，防止水分混入燃油。

通常会安装呼吸阀和脱水装置，呼吸阀可以防止潮湿空气进入油罐，脱水装置则能定期排出油罐底部的水分。

航空公司在飞机加油前，会对燃油进行严格的检测，包括含水量检测。只有符合标准的燃油才能加入飞机油箱。此外，加油设备也会定期维护保养，确保其密封良好，防止水分混入燃油。

在飞行操作过程中，飞行员会密切关注燃油温度和燃油系统的工作状态。在飞行前的准备阶段，飞行员会获取航线沿途的气象资料，了解飞行区域的温度情况，提前制定应对低温的策略。在飞行过程中，如果燃油温度过低，飞行员可以通过调整飞行高度或发动机工作状态等方式，提高燃油温度。

此外，飞机维修人员会定期对燃油系统进行检查和维护。他们会排放油箱底部的自由水，清洗燃油滤清器，检查燃油加热装置和冰晶探测器的工作性能，确保这些设备能够正常运行。

大飞机的“防冰卫士”

除水系统是飞机抵御燃油结冰风险的核心防线。除水系统的核心设备是一种纯机械设备，通常被称为引射泵。燃油系统引射泵的动力流来源通常为燃油

业特别是大飞机事业的发展具有非常重要的意义。

在此背景下，我国启动了大型综合气候环境实验室的建设工作。经过十多年建设，一座目前世界体量最大、模拟气候种类最多、技术性能指标最优的大型气候环境实验室在阎良落成，填补了我国室内整机气候环境试验领域的空白。

如今，走进航空工业强度所阎良分所，一座“凸”字形的实验室悄然矗立，在这里可以呼风唤雨，可以洒水成冰，可以随意变换酷暑严冬，只要是飞机在实际使用过程中可能遭遇的气候条件，在这里都可以模拟出来。

气候环境实验室系统组成复杂，技术难度高，在对标国际先进水平的同时，还要符合我国的工业实际。为此，设计人员在概念设计的基础上消化吸收再创新，统筹制定了实验室总体设计方案，将概念设计的大室循环风系统由集中式送风优化为分布式送风，将制冷系统由双级制冷方案优化为复叠制冷方案，使方案更符合国内工业水平，也使实验室内气流均匀度、制冷能力等技术指标优于最初的设想。

值得一提的是，气候环境实验室的太阳辐射试验项目旨在模拟太阳照射对产品的影响，主要测试指标包括光谱分布、辐照度、温度和湿度等。通过控制相关参数，可以模拟不同地区、不同季节的太阳辐射环境，从而对产品的耐候性进行全面评估。如今，太阳辐射试验的应用领域非常广泛，涵盖了航空航天、汽车、电子、建筑、涂料等众多行业。

气候环境实验室是填补国内空白的大型综合试验设施，国内没有建设经验可以借鉴，如何将实验室的复杂设计转化为工程实际是建设团队要攻克的难题。实验室主厂房大温差条件下高承载复合地面施工、大温差条件下冷桥的处理技术、气密

性要求极高的实验室舱结构、保温性要求极高的大门加工安装等，均属于创新性极强的施工方案。同时，实验室设计中应用了大量新技术、新材料，给施工带来了很大难度。建设团队多维度开展集智攻关，最终突破了复杂环境实验室总体设计、超大空间气流组织设计等关键技术，解决了实验室围护结构一体化保温密封技术、宽温域地面施工工艺等难题，为实验室建设提供了技术保障。

实验室启动联合调试开始后，实验室大、小环境室相继完成了极限高温工况、极限低温工况以及温湿工况调试。调试数据表明，实验室温度控制精度、温度波动度、温度场均匀性、制冷和加热设备能力、舱体密封性等指标均满足或优于设计指标要求，完全实现了实验室设计目标及批复的实验室建设技术指标。

实验室建成以后，在民机适航取证环节发挥着不可或缺的作用。以 C919 飞机 APU 系统降扬雪适航符合性试验为例，这是我国首次以整机为对象进行室内气候环境试验，技术难度极大，不仅要满足降扬雪试验的技术指标要求，还要符合国内适航部门严格的审查标准。试验结果表明，实验室环境模拟系统、配套设施及结构、动力系统等各项功能和性能均满足要求。

从“靠天吃饭”到“呼风唤雨”——气候环境实验室的科技攀登之路，正是中国航空工业从“跟跑”到“领跑”的缩影。在新的征程上，气候环境实验室必将发挥强大的创新引擎作用，锐意进取、砥砺前行，向着全面建成“国际领先的飞行器强度研究与验证中心”目标阔步前行。

航空制造

NASA 公布 2026 财年航空研究计划

文 | 吴蔚



2025 年 5 月底，美国国家航空航天局（NASA）公布了 2026 财年预算申请情况。根据有关资料，2026 财年 NASA 的预算为 188 亿美元，较 2025 财年 248 亿美元的拨款额下降 24%。2026 财年，NASA 用于民用航空科技研发的预算为 5.887 亿美元，较 2025 财年 9.35 亿美元的拨款额下降 37%。NASA 表示，将关注解决保持美国在航空领域全球竞争力的最高优先级挑战，同时通过加强与美国联邦航空局（FAA）等部门的合作，共同研发先进技术，努力降低研制成本。

预算基本情况

当前，NASA 的航空研究以“计划 + 项目”的两层结构对科研工作进行管理。计划是科研大方向，是为实现 NASA 航空研究战略目标服务的，在较长时间内保持相对稳定；项目有较具体的科研内容，面向通用的科研需求，或针对专门领域（主题），实施周期各不相同。

2026 财年，NASA 航空研究预算通过 5 个研究计划支持研发活动，各计划的预算额分别为：空域运行与安全性计划（AOSP）0.881 亿美元，先进飞行器计划（AAVP）1.334 亿美元，综合航空系统计划（IASP）1.672 亿美元，变革性航空概念计划（TACP）1.251 亿美元，航空学评价与试验能力计划（AETC）0.749 亿美元。

2026 财年，NASA 航空预算主要支持开展四个方面的创新性研究：

1. 改革航空航天工程方法。加快构建复杂航空航天系统快速、高逼真度的计算与分析能力，这将缩短设计周期、减少昂贵和耗时的地面与飞行试验，带来真实的系统优化。

2. 倡导高速飞行。X-59 验证机将验证超声速巡航飞行中不产生较大声爆，加速

实现陆地上空的超声速飞行。NASA 将继续开展超声速飞行科技攻关，并在组合循环推进、耐用高温材料等领域开展研发工作。

3. 空域与安全性管理能力自动化。NASA 在航空运行自动化系统等方面的研究与 FAA 基础设施现代化一起为美国航空运营的增长和多样化创造了基础。NASA 的研究正在验证民机高效运行的能力，并为小型无人机投送服务和空中出租车服务等新型空中运输能力投入使用打下基础。

4. 先进航空推进系统。推进系统是飞机平台能力和性能提升的核心。随着当前研究活动告一段落，NASA 将关注真正变革性推进能力的长期研究，这将促进未来民机平台性能提升，增强美国技术的竞争力和空中旅行的经济可承受性。

主要研究计划

首先是空域运行与安全性计划。该计划旨在与 FAA 和航空界合作，通过促进国家空中交通管理系统的现代化和变革，方便人员和物资流动。该计划关注开发减少航班延误和运营成本的有关技术，先进空中交通（AAM）第三方空域管理技术，便携式空域管理系统，预测性、安全性管理数据需求。2026 财年，空域运行与安全性计划下的研究项目从之前的 4 个调整为 2 个。具体如下：

空中交通管理与安全性（ATMS）：该项目由之前的空中交通管理 - 探索（ATM-X）、系统安全性（SWS）两个项目合并而来。2026 财年的主要研究工作包括：研究更加安全、高效的航迹管理系统，减少航班延误，降低运营成本；与 FAA 合作开发未来航空安全性信息分析与共享需求，验证不同类型的数据可用于识别潜在安全性问题等。

先进空中交通探索者（AAMP）由空中交通探索者（AMP）和应急响应行动先进

能力（ACERO）两个项目合并而来。该项目主要研究如何将新兴的有人驾驶和自主飞行器安全融入城市和国家空域系统，确保美国持续保持技术领先和工业竞争力。2026 财年的主要工作包括：与 FAA 和工业界合作评估 AAM 运营机构的规避冲突空域技术，完成无人机系统空中监控技术向 FAA 和工业界的转化，完成一种城市空中交通（UAM）代表型飞行器在真实虚拟构造（LVC）环境中验证融入 UAM 空域基础设施和服务网络的飞行试验。

第二部分是先进飞行器计划。该计划支持开发先进工具、技术和概念，使下一代民机更安全、更快速、更安静、能源利用更高效。该计划重点关注：亚声速固定翼飞机和旋翼机的安全性及性能的显著提升；解决高速飞行面临的噪声和其他技术难题，包括用 X-59 验证机验证安静超声速飞行；了解和攻克高超声速飞行的关键挑战。该计划下设项目从上一财年的 6 个减少到 3 个。具体如下：

亚声速飞行器技术与工具（SVTT）由之前的先进空中运输技术（AATT）、创新垂直升力技术（RVLT）、混合热高效核心机（HyTEC）三个项目合并而来。项目研究内容包括：开发下一代垂直起降和亚声速固定翼飞机相关技术与工具，新型高效机体设计、飞机电推进、涡轮燃气发动机研究，探索多旋翼 UAM 飞行器噪声和性能的建模仿真工具开发。2026 财年，NASA 将与 FAA 和工业界合作试验一种创新的非涵道多叶变距风扇，完成环境可持续性先进飞机概念（AACES）2050 项目第一阶段研究。

高速复合材料飞机制造（HiCAM）。该项目是延续项目，将验证大型复合材料飞机主结构件制造技术较 2020 年技术实现高速生产（达到每月 80 架飞机）、降低成本、不产生重量增加，主要面向 21 世纪 30 年代中期服役的单通道飞机机体结构件

的制造；开发基于模型的工程工具，以快速成熟、优化和转移高速复合材料制造和装配方法。2026 财年，该项目将利用下一代热固性材料和树脂灌注两种方法制造机翼蒙皮壁板和翼梁部件，验证复合材料高速制造方法。

高速飞行（HSF）项目。该项目由之前的民用超声速技术（CST）和高超声速技术（HT）两个项目合并而来。项目将开发能实现从马赫数 1 至马赫数 5 及以上的民用高速飞行有关技术；将收集超声速飞行声学数据，并验证预测飞行中声爆的工具；开展高超声速飞行相关的基础和应用研究，关注高超声速推进系统、高温材料和系统分析。2026 财年的主要目标是：收集 X-59 的试飞数据以了解飞机声学特性、验证预测飞行中声爆的工具；在飞行中和飞行后地面试验中，研究双模冲压发动机的控制和可操作性。

第三部分是综合航空系统计划。该计划致力于开展综合系统级的技术探索、评估与验证，发现最有前景的技术，主要包括 2 个验证项目：低声爆飞行验证机（LBFD）和亚声速飞行验证机（SFD）。为节省成本，NASA 计划 2026 财年不再为电推进飞行验证项目（EPFD）提供投资，相关研究和投

▼ 图 | NASA



资将在 2025 年底结束。

飞行验证能力（FDC）。该项目为延续项目，主要研究工作包括：开展小规模飞行研究，验证新技术的优势，利用 NASA 现有飞机平台改装后试飞、验证新技术；使用、维护和增强现有飞行研究设施，包括飞行载荷试验室、德赖登航空试验场、飞行模拟器等。2026 财年，NASA 将利用 F15 飞行试验台完成 X-59 激波结构的精确近场探测与空中成像，支持 X-59 的声学验证试验；完成支持安静超声速（Quesst）任务的超声速公众反应规划。

可持续飞行验证机（SFD）。该项目为延续项目，研究内容是与波音公司合作开展全尺寸薄机翼（thin wing）试验。薄机翼的有关技术将实现阻力降低、油耗减少，这一构型与其他技术综合应用后，将有望实现新机型较现役单通道飞机油耗降低 30%。项目验证的相关技术和设计方案可能转化到 21 世纪 30 年代服役的下一代单通道飞机。

低声爆飞行验证机（LBFD）。该项目为延续项目，主要内容是 X-59 验证机的设计、制造、地面试验和飞行试验。该任务分三个阶段实施：第一阶段，开展 X-59 飞

机详细设计、制造、首飞和包线扩展试飞；第二阶段，开展低声爆声学验证试飞，包括飞机近场、中场和远场及地面声爆信号的数据收集和评价；第三阶段，X-59 验证机将在多个地点开展低声爆公众反应试飞，试飞研究结果将提交给国际民航组织以制定新的超声速客机噪声标准。

第四部分是变革性航空概念计划。该计划支持验证新概念的初步可行性，开发新的革命性解决方案，创建先进的计算工具、技术和实验能力，促进新概念的快速开发。2026 财年，该计划将重点关注科研机构

的创新研究、先进计算工具和基础能力开发，促进创新型技术应用于航空领域。目前，该计划包含 2 个项目，较之前减少 1 个。

变革性工具与技术（TTT）。该项目为延续项目，主要包括：开发创新性计算和实验工具与技术，研究新材料、飞机新构型的控制技术和实验方法。2026 财年，该项目将评估飞机高升力系统等先进技术，开发相关计算模型和计算能力，目标是显著减少飞行取证的要求。

大学创新（UI）。该项目为延续项目，主要包括：支持开展颠覆性技术及新概念研究，支持下一代工程师教育。其中，大学领先倡议（ULI）主要致力于支持大学领导的团队开展创新研究。2026 财年，该项目将持续支持正在进行

的 ULI 研究并结束即将到期的工作。

第五部分是航空学评价与试验能力计划。该计划为 NASA 航空研究的地面试验能力发展提供支持，涉及埃姆斯研究中心、格林研究中心、兰利研究中心等共计 12 个亚声速、跨声速、超声速和高超声速风洞，以及推进系统试验设施。NASA 预计，2026 财年相关风洞的使用率将有所降低，至少有 5 个风洞处于备用状态，其维护程度降至最低水平，因而减少了风洞维护和运行的资金。2026 财年，在该计划支持下，

NASA 将开放新的兰利中心飞行动力学研究设施，替代有 84 年历史的垂直旋转风洞（VST）。此外，还将开发一个航空学数据平台，以存储风洞试验相关数据。

解读与分析

受整体预算削减的影响，2026 财年，NASA 的航空研究预算显著下降，5 个航空研究计划的相关经费均遭削减，每个研究计划下的具体项目也相应减少。

从目前来看，NASA 将研究工作重点放在民用超声速飞行验证、下一代民机和发动机技术、高超声速飞行等领域。与之前相比，NASA 研究工作的主要变化体现在以下几个方面：

空域技术方面，减少了飞行技术验证活动，减少了空域管理与飞行器安全性技术、AAM 等技术开发活动。

先进飞行器技术方面，聚焦下一代民机技术、高速复合材料飞机制造、超声速与高超声速飞行技术等研发。

综合验证方面，取消了电推进飞行验证项目、X-66 验证机试飞工作，转而开展薄机翼技术地面验证。

变革性技术方面，关注大学创新研究、先进计算工具和能力开发，停止排放和气候问题等研究。

试验能力投入方面，降低了风洞维护和运行成本。

总体来看，2026 财年，NASA 的航空研究调整变化表现出三个方面的特点：

一是飞行研究与验证活动大幅削减。电推进飞行验证、可持续飞行验证机两个项目在 NASA 航空研究项目中投资额位列前三（另一个是低声爆飞行验证机），前者直接被砍掉，后者去掉了 X-66 验证机试飞工作并调整相关地面试验。其他与 AAM、新技术有关的试飞活动也大幅减少，



更多地依赖计算与仿真来了解新型飞行器的性能。 ▲ 图 | NASA

二是 X-59 验证机飞行试验是工作重点。随着 2023 年 6 月 X-57 分布式电推进验证项目终止和 X-66 验证机停止发展，X-59 成为 NASA 仅存的验证机，也是 NASA 进入 21 世纪以来发展的首款有人驾驶的 X 系列验证机。近几年，该机发展出现了多次延迟。2025 年 2 月，NASA 对低声爆飞行验证机项目的后续研究工作进行了评估，调整了成本与进度。目前，X-59 的首飞计划在 2025 财年结束前完成。2026 财年，该项目的预算为 6720 万美元，以支撑其开展试飞活动。

三是绿色航空的相关研究规模显著缩小。电推进飞行验证项目计划试飞兆瓦级混合电推进系统技术，该项目被取消和 X-57 终止表明电推进技术已不再是当前 NASA 航空研究的重点。从目前来看，NASA 关于绿色航空技术的研究聚焦于下一代窄体客机的降噪、降油耗等领域。随着 NASA 航空研究经费的削减，X-59 将成为其唯一的亮点。





▼ 图 | 波音

波音全力推进 777X 项目

文 | 曲小

2025 年 8 月，一架注册号为 N2007L 的蓝白涂装 777X 飞机从波音位于西雅图附近的埃弗雷特工厂起飞，顺利完成首次试飞测试。此次试飞时长约为 2.5 小时，飞行高度 39000 英尺，这意味着第 5 架 777X 测试机正式投入试飞。

此前不久，美国联邦航空管理局（FAA）正式批准波音开展 777X 飞机的下一阶段测试工作。在今年 6 月的巴黎航展上，波音曾表示力争在 2026 年完成首架 777X 的交付工

作。然而，要实现这份已经多次更新的时间表绝非易事。9 月，波音总裁奥特伯格在接受媒体采访时表示，777X 的研制已落后于既定计划，摆在波音面前的各项取证工作可以用“堆积如山”来形容。尽管目前 777X 项目的取证没有出现新的技术难题，但由于该项目多次推迟，已经造成了公司数十亿美元的亏损，任何微小的延误将会对公司产生“相当大的财务冲击”，因此波音将全力推进 777X 项目的取证工作。

5 架试飞机已投入试飞

2025 年 7 月，美国联邦航空管理局正式批准波音推进 777X 项目下一阶段的试飞工作。根据计划，第五架飞机将进行高强度辐射场（HIRF）测试，以评估飞机系统对电磁干扰的反应。后续，波音还将对 777X 项目开展一系列测试工作，包括测试辅助动力装置（APU），以确认其在各种条件下的性能和冷却效果；检查飞机的稳定性和操控性，确保飞行安全；进行静电测试，保障系统在降水期间免受静电积聚的影响等。

波音 777X 的研制历程可谓一波三折。2020 年 1 月 26 日，在西雅图的绵绵细雨中，波音 777X 完成首飞。经过近 4 个小时的飞行，当身披蓝白相间原厂涂装的飞机降落时，引擎开启反推扬起的水雾似乎在为这个被寄予厚望的机型的首飞成功开启庆功的香槟。三个月后，第二架 777X 完成首飞，正式加入试飞队伍。当时，波音正处于 737MAX 全球停飞的漩涡中，重压之下的波音需要 777X 首飞这样能够鼓舞人心的消息来向世人证明：波音正在回归正轨。然而，“剧本”却未能向着波音期盼的方向发展。

根据计划，777X 的主要试飞工作包括飞行性能测试，主要验证飞机的飞行控制系统、稳定性、机动性以及其它关键飞行特性；发动机性能测试；结构和耐久性测试，主要验证飞机在不同飞行条件下的结构完整性、耐久性以及抗疲劳性能；机翼设计验证，777X 具有独特的折叠式机翼设计，因此需要验证其在高速飞行时的结构稳定性；机舱舒适性测试。

777-9X 的原型机于 2020 年 1 月首飞，这架飞机先后完成了稳定性和控制测试、高速和低速空气动力学评估、航空电子、飞行控制系统和刹车系统等相关测试工作。第二架测试飞机于 2020 年 4 月加入测试机队。这架飞机主要用于自动着陆系统测试。

2024 年 7 月，第三架测试飞机加入试飞队伍，主要承担发动机测试相关工作，包括用于评估飞行负荷和辅助动力装置的性能以及航空电子设备和发动机的验证工作。第四架测试飞机采用与量产飞机相同的客舱布局，主要承担双发延程飞行测试和航空公司要求的功能测试以及其他可靠性测试。

过去几年，777X 在飞行测试中出现了两次严重影响取证进度的事件。2024 年 8 月，波音在进行例行检查时发现了一个严重问题：推力连杆出现裂纹甚至断裂。这一关键部件负责将重达 9.63 吨的 GE9X 发动机连接到机翼结构上，并传递发动机产生的巨大推力。这一问题最初出现在第三架 777X 测试机上，波音随后检查了其余三架验证机，结果在第四架验证机上也发现了同样的问题。经过调查，波音确认推力连杆的性能不符合设计要求，相关部件必须更换。

另一个则是在飞行测试中出现了“非指令俯仰事件”，即飞机在飞行员未操作的情况下，机头突然发生俯仰运动。早在 2020 年 12 月的一次试飞中，777X 就曾出现过这种情况，该事件引起了美国联邦航空管理局的高度重视并立即叫停了该项目的试飞工作。

在多重因素影响下，777X 的研制进度多次推迟。在 2024 年 8 月被美国联邦航空管理局叫停试飞后，直到 2025 年 1 月才恢复试飞工作。在今年 8 月第五架测试飞机投入试飞之前，4 架 777X 测试飞机已累计完成 4200 飞行小时、1500 多架次试飞。

市场机遇与多次延迟

2011 年 9 月，波音首次在公开场合表示有意研发新一代双发宽体客机。一年多后，在 2013 年迪拜航展上，波音正式宣布启动第三代 777 飞机的研发，并将其正式命名为 777X。在那届航展上，777X 成为当之无愧

愧的明星，共收获 259 架订单，订单总价值超过 950 亿美元。

经过几年研制，2020 年初，波音开始启动 777X 的试飞工作，最初计划 2022 年年底完成适航取证工作后交付市场。根据波音的规划，777X 系列飞机包括 777-8X、777-9X 和 777-8F 货机三个子型号。首先投入运营的将是 777-9X，其次是 777-8F 货机，777-8X 暂时还未公布时间表。

Circum 的数据统计显示，2019 年全球双通道飞机的交付量为 343 架，但 2024 年双通道飞机的交付量仅为 139 架，其中包括 30 架 A330neo、57 架 A350、51 架 787 和 1 架 777-300ER 飞机。造成交付量大幅下降的原因有很多：首先，新冠肺炎疫情后，航空市场的需求发生了变化，航空公司在选购新飞机时变得更为谨慎。其次，供应链产能不足对 A330 和 A350 的产能提升造成了一定的负面影响。第三，由于波音自身原因，787 系列飞机的交付数量大大低于预期。为此，一些航空公司不得不延长 A330-200/300、波音 767、777-300ER 等老旧飞机的服役时间。

从订单来看，截至 2025 年 8 月，波音手握近 600 架 777X 飞机订单。其中，阿联酋航空是 777X 项目最大的客户，德国汉莎

航空为 777X 项目的启动用户。一直以来，中东地区航司都是波音宽体客机的重要客户，在今年 5 月，特朗普还亲自为波音争取到更多中东地区航司的订单。卡塔尔航空订购 210 架波音宽体飞机，其中包括 30 架 777-9X 和 130 架 787 系列飞机，并可选择额外购买 50 架。阿提哈德航空购买 28 架波音 787 系列飞机和 777X 飞机，但未公布两种机型的具体购买数量。

但不可否认，由于多次延迟交付，777X 的直接竞争机型 A350 已经占据了更多的市场份额。数据显示，目前 A350 系列飞机的订单数已是 777X 的 2 倍之多，甚至一些波音宽体客机的老客户如美联航、美国航空、日本航空等已经选择了 A350 或 787 等机型。

相比窄体客机，对于制造商来说，宽体客机的利润率要高得多。当前，A320neo 系列无论在交付量还是订单数方面，都远远领先 737MAX，因此宽体客机市场是波音势必要牢牢守住的阵地。从客观来看，A350 系列和 777X 系列各有优势，前者在超长途低密度航线上占据优势，后者则是高密度中长途航线的利器，同时载客量也更高。777X-9 最多可提供 426 个座位，是当前除了 A380 之外座位数最多的商用飞机。对于未来的民航市场而言，这两款机型或将带来差异化竞争，给予航空公司更多的选择。

适航取证面临的挑战

777X 是当今机身最长的商用飞机，超过了空中巨无霸 A380。777-9X 在上一代 777-300ER 的基础上增加了 4 个机身框，机身部分增长了 2.1 米，全长增加 2.8 米。777X 不仅机身长，还是当今客舱最为宽敞的双发客机。通过对内饰的改进，777X 的客舱宽度比上一代产品增加了 10 厘米，比竞争机型 A350 宽 35 厘米。

另一个“世界之最”也是最被人提及

的——777X 的翼展达到 71.8 米，比 A350 的翼展长 7 米，是世界上最大的复合材料机翼。777X 的翼根宽度达 6 米，面积 467 平方米，展弦比超过 11。在 777X 机翼的生产中，波音采用了大量 787 的成熟技术，机翼主结构中除翼肋采用铝合金之外，主梁、壁板等均为大型复合材料零件。

除了拥有最长的机翼之外，777X 还是第一种使用折叠机翼的商用飞机。777X 的翼展达到 71.8 米，折叠翼尖后，翼展可缩短到 64.8 米。为了便于在机场运营，777X 在起飞前，翼尖放下、锁定，折叠段和固定段形成完整的大展弦比机翼，从起飞、巡航到降落接地，这期间机翼一直保持这个状态。飞机降落后在跑道减速滑行时，当速度低于一定标准后，翼尖向上折叠。此后一直到登机桥，都可以按照 65 米以下标准翼展的普通飞机进行处理，不会增加航空公司的费用。2018 年 5 月，美国联邦航空管理局批准了可折叠翼梢的商用，这对于民航业来说是一次历史性的突破。

但创新技术的使用必然会带来新的问题和挑战，这些在 777X 的适航取证中已得到验证。首先是发动机的问题。大胆采用全新的 GE9X 对提升 777X 的燃油效率有着显著的帮助，但在适航过程中也问题不断。先是 2019 年，在测试中发现了耐久性問題，使得 777X 首飞时间被推迟 1 年。随后在测试飞行过程中，先后发生发动机技术故障和发动机结构件部件损坏问题，但目前这些问题都已得到解决。

其次，创新的机翼设计在适航过程中也遇到不少的挑战。过去几年，波音一直在就折叠机翼的适航问题与美国联邦航空管理局积极探索。尽管 777X 是在 777 基本型上进行附加认证，但由于折叠翼与原来的设计偏离较大，因此这一部分必须进行重新认证。

对于美国联邦航空管理局来说，对 777X 折叠翼的认证不仅针对其在正常使用条

件下的强度、使用寿命，还要特别关注折叠结构的可靠性。如果机翼在起飞或者飞行状态中不能正常打开，或者发生意外折叠，翼展和翼面就会低于设计要求，使飞机损失相应的升力。如果出现一侧打开而另一侧未能打开的情况，还会出现不对称升力和阻力。

为此，美国联邦航空管理局针对 777X 的折叠翼提出了三个必须满足的条件：一是对飞机起飞或飞行过程中出现折叠翼没有放下或锁定不可靠时，要有额外警示；二是要确认折叠翼的受力承载极限；三是要证明地面侧风对折叠后翼尖的影响在可接受范围内。为此，波音在华盛顿州埃弗雷特和西雅图都建立了相应的试验室，全方位测试折叠结构的可靠性。

此外，在试飞中已经出现的一些关键结构件缺陷问题和更为先进复杂的航电系统如何确保其性能等在认证中也将面临挑战。目前，针对 777X 航电系统的认证工作，美国联邦航空管理局对其通用核心系统 (CCS) 等认证工作提出了更高的门槛，要求波音提供更多证明系统安全性的证据。对于推力连杆出现裂纹的问题，波音在 8 月宣布会采用全新设计的推力连杆，可将发动机推力传导至机身结构。波音表示，新的设计可以彻底消除“振动响应”，从而杜绝裂纹的产生。

由于研制进度不及预期，波音希望新的设计能够加快适航认证的进度。但近两年，美国联邦航空管理局进一步加强了对波音安全方面的监管力度，对于 777X 的认证也设置了更为严苛的标准。对此，波音总裁奥特伯格表示：“为改善安全和质量所做的变革正在取得显著成效，随着运营的逐渐稳定，我们正在向客户交付更高质量的飞机、产品及服务。”

▼ 图 | 波音



俄罗斯支线飞机国产替代的启示

文 | 董帽雄

2025 年 9 月 5 日，俄罗斯联合飞机制造公司（UAC）宣布，第一架采用批产流程生产的 SJ-100 飞机在阿穆河畔共青城完成首飞，飞行时间约 1 小时。

对于首架量产型 SJ-100 的成功首飞，UAC 表示，这是由 140 多家一级供应商组成的团队倾力合作的成果，未来公司将进一步加快 SJ-100 飞机的取证进度。根据计划，全国产化的 SJ-100 飞机将在 2025 年年底完成取证工作，2026 年开始交付客户投入市场。

▼ 图 | yakovlev.ru



失败的国际化合作

作为苏联解体后俄罗斯研制的第一款民用飞机，全国产 SJ-100 的前身 SSJ-100 是由苏霍伊民机公司与意大利 Alenia 公司于 2006 年成立的合资公司超级喷气国际公司（Superjet International）作为主体负责研制的。最初俄罗斯对于这款支线飞机的定位是，希望其一方面可以替代图 -134、图 -154 等老旧飞机，另一方面可以借助国际合作，进入全球商用飞机产业链。

在此之前，尽管俄罗斯具备一定的航空工业基础，但其在民用飞机领域一直游离于国际适航体系之外。此外，其飞机产品的安全性也一直被业界所诟病。因此，俄罗斯希望以 SSJ-100 飞机为切入口，加强与国际供应商的合作，并尝试通过建立合资公司的形式来帮助其获得欧美两大适航体系认证。

在 SSJ-100 项目研制中，俄罗斯引入了国际通行的风险合作机制，共有超过 30 家系统及配件供应商参加项目研发。例如，SSJ-100 飞机所采用的 SAM-146 发动机是俄罗斯土星公司和法国赛峰集团合作研制的。如此规模的联合制造在俄罗斯飞机制造业中尚属首次。在生产过程中，俄罗斯依照西方模式建立起全新的管理和技术结构。苏霍伊民用飞机公司对产品的全生命周期负责，即承担设计、制造、适航取证、市场推广、售后服务等工作。

作为 SSJ-100 项目的全方位合作伙伴，意大利 Alenia 公司在适航认证上也提供了大量的技术支持。2004 年 7 月，在 Alenia 公司适航技术部门支持下，俄罗斯向 EASA 提出 SSJ-100 飞机审定申请。2012 年 2 月 3 日，EASA 向 SSJ-100 飞机颁发了型号合格证，这一结果标志着俄罗斯民机首次通过了 EASA CS-25 的审定。

更重要的是，它标志着俄罗斯民机产业结束了游离于欧美主流标准之外的历史。

在售后服务市场，通过选择合作伙伴和外包服务，超级喷气国际公司在较短的时间内从零开始建立起一个遍布全球的网络。在此基础上，超级喷气国际公司还对标波音、空客，推出了“全面超级维护计划”。该计划包括对飞机起落架、辅助动力装置等可修理项目的全面支持。飞机交付后，由于受到国际环境变化的影响，加上发动机存在问题，其市场表现差强人意。2019 年 8 月，墨西哥 Interjet 航空宣布停止运营 SSJ-100 之后，其国际化开拓之路正式告一段落。

在此过程中，由于欧美对俄罗斯的制裁不断加码，2018 年，伊尔库特公司开始着手实施 SSJ-100 的进口替代项目——SSJ-New。之后，该项目作为 SSJ-100 的全国产化替代项目正式更名为 SJ-100。

2023 年 2 月 28 日，超级喷气国际公司宣布，俄罗斯联合航空制造集团（UAC）已与阿联酋资本投资公司 Mark AB Capital Investments（Mark AB）签署协议，前者将自身持有的 SJI 全部 49% 股份出售给 Mark AB。在获得相关机构审批后，UAC 退出了 SSJ100 项目，这意味着 SSJ-100 飞机的国际化探索最终以失败告终。为了满足国内航空市场的需求，俄罗斯最终选择举全国之力发展国产替代型号。

全国产替代的探索

由于国际形势的变化，俄罗斯决心启动全国产化商用飞机研发工作，其中不仅包括 SJ-100，还包括干线飞机 MC-21。

SJ-100 飞机于 2019 年正式开始研制，项目预算为 13 亿～14 亿美元，计划在 2023 年左右完成适航取证后投入市场。由于项目进展不及预期，此后俄罗斯政府又

向该项目追加了至少 3 亿美元的研发投入。SJ-100 的最大起飞重量为 49.45 吨，最大载客量为 103 人，最大航程为 4320 公里。

据媒体报道，SJ-100 飞机上有 40 多个系统，其中包括发动机、航电、起落架、辅助动力装置、综合控制等将完全由俄制产品所替代。PD-8 发动机于 2019 年立项，2022 年在伊尔 -76 飞机上完成了首次装机试飞。但此后，PD-8 发动机的研制进展并不顺利。2023 年 8 月，首架投入试飞的 SJ-100 飞机搭载的依然是 SAM-146 发动机。2023 年 12 月，PD-8 发动机在测试中出现问题，需要完成补充试验，以确保产品的安全性。直到 2025 年 3 月，第二架投入试飞的 SJ-100 才正式搭载国产 PD-8 发动机作为动力装置。

在 PD-8 发动机研制过程中，俄罗斯通过逆向工程和技术积累来推进国产化替代工作，如 PD-8 发动机的研制借鉴了 PD-14 大涵道比发动机的研发经验，但第二架试飞机所装载 PD-8 发动机的轴承和燃油泵依然采用进口产品。虽然 2025 年 4 月投入试飞的第三架 SJ-100 飞机实现了全国产，但是 PD-8 发动机所采用的轴承和燃油泵尚未通过适航认证。

目前，加上 9 月投入试飞的一架量产型 SJ-100，共有 4 架飞机投入试飞。其中，第一架试飞机主要用于测试国产替代部件，如燃油系统、自动压力调节系统等与之前进口系统的兼容性。第二架试飞机着重测试 PD-8 发动机与飞机机身的适配性，目前已完成部分燃油效率测试工作。2025 年 7 月，第二架试飞机完成 9 小时连续飞行，验证了 PD-8 发动机长航时飞行的稳定性。第三架，也是全国产化的 SJ-100 飞机主要用于测试飞控系统、复合材料机翼的气动性能以及极端工况下动力系统的响应能力，以验证相关参数是否符合设计标准。第四架量产型 SJ-100 在首次试飞中，

飞行高度达到 3000 米，在 1 个多小时飞行中测试了起落架、液压系统及多模式飞行状态下各子系统的性能。试飞结束后，机组确认飞机所有设备正常运行，这意味着全国产 SJ-100 飞机项目即将从研发转向量产验证阶段。根据俄罗斯媒体的报道，目前在共青城工厂已有 24 架 SJ-100 飞机处于不同完工阶段。

体系化建设任重道远

早前，由于 SJ-100 飞机的研制出现了多次推迟，俄罗斯为了推动商用飞机的国产化替代工作，从 2023 年开始着手对相关企业进行组织机构调整。2024 年 10 月，俄罗斯政府宣布将雅科夫公司旗下负责 SSJ-100 项目的设计局整合到工程中心，由母公司雅科夫的一把手直接领导。此后，为了提高飞行测试工作效率，又将飞机试验综合体并入雅科夫。从目前来看，这些机构调整在一定程度上减少了项目推进过程中可能存在的内部阻碍，一些关键测试得以一一突破。

动力系统方面，PD-8 发动机通过地面模拟测试（如吞冰雹、鸟撞、风扇叶片破损）及飞行验证，其巡航油耗接近国际水平。极端工况验证方面，第二和第三架测试飞机在北极圈零下 50℃ 环境下完成低温启动测试，起落架和液压系统表现稳定。量产型首架机计划在 2025 年完成高温、高原及复杂气象条件下的飞行认证。

航电系统与飞控系统优化方面，俄制航电系统完成自动着陆算法开发，可满足国际民航组织（ICAO）III B 类标准（跑道能见度 50 米），相关算法通过 200 万次数学模拟验证。第三架测试飞机在试飞中成功实现自动拉平、接地及跑道中心线保持等功能。

由此可见，由于获得了国家层面的大



力支持和政府层面的明确指引，俄罗斯国内配套企业参与商用飞机项目的积极性被充分调动起来，很多企业都加大了自主研发力度，以支持民用航空项目的国产化替代计划。

从目前来看，俄罗斯国产替代计划的实施，促进了部分俄制航空产品的自给和自主可控，促使俄罗斯基本形成了各类航空产品研制、生产的闭环。但需指出的是，尽管俄罗斯目前对外表示供应链的本土化已经达到 95%，但一些精密加工设备、高端原材料等依然依赖进口，如 PD-8 发动机的单晶涡轮叶片依然需要进口熔炉进行生产，俄罗斯国产复合材料的疲劳寿命等也需要进行进一步验证。此外，诸如航电系统、飞控系统的关键核心系统的性能指标和稳定性等也还需要大量的试验进行验证。换言之，尽管国产替代计划在很大程度上带动了俄罗斯国内航空工业的转型和升级，但对于很多核心部件来说，研制只是第一步，后续的技术成熟度和可靠性才是更为严峻的考验。

从适航取证工作来看，尽管俄罗斯民航局正在加快推进认证工作，但依然要求 SJ-100 飞机完成 200 架次试飞，场景覆盖

极端气候、故障模拟等。PD-8 发动机还需要通过吞冰雹、鸟撞等严苛测试，国产航电系统需要满足 III 类盲降要求，这些测试工作都有不小的难度。在国际适航证申请方面，欧洲航空安全局早前曾明确表示，如果 SJ-100 要申请 EASA 的适航证，需要对其所有国产部件进行全方位审查，整个认证过程预计需要 5 ~ 7 年。

从市场来看，目前 SJ-100 在俄罗斯国内共有 252 架订单，但都为意向订单。一方面，相对 MC-21 飞机，俄罗斯国内对 SJ-100 的需求并不大；另一方面，早前 SSJ-100 飞机多次发生安全事故，也令客户对这款飞机信心不足。

综合上述多方面因素，对于俄罗斯来说，要实现航空业的国产替代道阻且长。然而，尽管距离完全自主可控仍然有很长的路要走，但航空业作为国家战略产业，建立完整的航空工业体系和自主可控、安全高效的产业链、供应链具有极其重要的意义。俄罗斯的这些探索无论最终结果如何，都具有一定的借鉴意义。

▲ 图 | yakovlev.ru

公务航空市场机型迭代加速

文 | 杜婷

2025 年 8 月，湾流宇航公司向客户交付了首架 G800 公务机。作为在役航程最远的公务机，G800 公务机于 2025 年 4 月获得美国联邦航空局和欧洲航空安全

局颁发的型号合格证。一年前，另一款湾流旗舰机型 G700 公务机也已开始交付市场。截至目前，已交付超过 50 架，获得了很高的市场认可度。

▼ 图 | 湾流



与此同时，将发展重心转回公务航空赛道的庞巴迪也在加速新一代机型的研发工作。公司在研的全球飞行速度最快的公务机环球 8000 的首架量产型飞机已于 2025 年 6 月完成首飞。作为自协和号飞机之后，飞行速度最快的民用飞机，环球 8000 的飞行速度最高可达 0.94 马赫，最大航程达 8000 海里。

除了这些常规的产品迭代升级之外，可持续航空燃料的开发与应用、电动垂直起降航空器的蓬勃发展也对传统的公务航空市场产生了巨大影响。可以说，随着公务航空市场竞争的日益激烈，新一代产品的迭代升级正在不断加速。

湾流完成机型迭代

一直以来，湾流在大客舱公务航空市场的地位不容小觑。过去十年间，公司不断推出新产品以满足不同客户群体对细分机型的需求，其中就包括超远程公务机 G800、G700，新一代 G500、G600 以及大客舱机型 G400。从市场表现来看，无论是 G500、G600 还是 G400，都取得了不俗的成绩。得益于这些旗舰机型的良好市场表现，2024 年湾流共计交付了 136 架公务机，价值达 82.7 亿美元，稳居全球公务机交付市场榜首。

过去十多年，湾流 G550 和 G650 两款机型的市场表现一直十分耀眼。为了进一步巩固市场地位，湾流分别于 2019 年和 2020 年启动 G700、G800 两款机型的研发。由于受到新冠肺炎疫情的影响，这两款机型的交付时间都比预计时间晚了一年左右。

G700 于 2019 年启动研发，2020 年 4 月完成首飞。飞机机身长 33.25 米，翼展宽 31.39 米，最大飞行速度可达



▲ 图 | 庞巴迪公务机

0.935 马赫，最大巡航高度 51000 英尺，最大航程 8919 英里。G700 选装了罗罗珍珠 700 发动机，采用了公司自主设计的翼梢小翼，配备了多次获奖的预测着陆性能系统和双平视显示器。这种双平视显示器采用了湾流研发的全新组合视觉系统，将增强飞行视景系统与合成视觉系统整合到单一视图中，既提高了飞行员的态势感知能力，又使得飞机能够在更多机场起降。

G700 有超宽敞的客舱，为客户提供了充分的灵活性，可实现高度定制。为满足不同客户的差异化需求，G700 的内饰提供了多项创新配置，包括高速上网套餐、超高清生物节律照明系统、豪华厨房以及配有固定床具和沐浴设施的豪华套房。此外，G700 还采用了多次荣获行业大奖的座椅设计及湾流客舱体验技术，能够保证 100% 新鲜空气、充足的自然光以及超低的客舱压力高度，即在 12497 米的飞行高度下，客舱压力高度为 886 米。

2024 年 4 月，首架 G700 交付客户。

仅仅 13 个月后，2025 年 5 月，第 50 架 G700 交付客户，这样的成绩可见市场对于这款机型的偏爱。数据显示，投入运营一年的时间里，G700 机队的累计飞行时间超过 11700 小时，突破了 80 项城市间飞行速度纪录。

G800 是湾流所有机型中航程最长的一款，最大设计航程为 8000 海里（14816 公里）。G800 能以 0.85 马赫的远程巡航速度飞行 15186 公里，以 0.90 马赫的巡航速度飞行 12964 公里。G800 拥有 16 扇椭圆形全景舷窗，舱内空间可配置多达 4 个起居区。在飞行高度为 12497 米时，G800 的客舱压力仅为 866 米，客舱内实现 100% 新鲜空气循环。此外，经过验证，G800 的平衡跑道起飞距离为 1771 米，着陆距离为 946 米，这些数据优于初始设计标准。

2022 年，G800 完成首飞。2025 年 4 月，G800 获得美国联邦航空局和欧洲航空安全局颁发的型号合格证。8 月，首架 G800 交付客户。过去十多年，湾流凭

借 G550 和 G650 占据大客舱公务机市场的领先地位。如今，随着 G700 和 G800 的交付，新一轮市场交替正式拉开帷幕。

庞巴迪成功转换赛道

在将 C 项目出售给空客公司、CRJ 项目的后续生产出售给三菱飞机公司后，如今庞巴迪已将重心完全转向了公务航空市场。

2025 年 6 月，庞巴迪最新研制的环球 8000 公务机首架量产型飞机成功完成首飞。飞行期间，飞机按照量产验证程序，完成了多项标准化测试任务，所有飞行控制系统均经过精密测试，整体运行稳定，整体性能表现符合预期。根据计划，首架量产型飞机将转往庞巴迪位于蒙特利尔的完工中心进行客舱内饰安装，计划于 2025 年下半年交付客户。

过去几年，庞巴迪一边对环球 7500 进行升级，另一边则在加快环球 8000 的研制工作。目前，全球已有 200 架环球



▲ 图 | 庞巴迪公务机

7500 交付客户，累计飞行超过 25 万小时。2025 年 8 月，庞巴迪宣布环球 7500 已累计创造了 135 项速度纪录，成为创下速度纪录最多的公务机，为超远程公务机树立了全新的性能标杆。

作为一款大型远程公务机，环球 7500 配备了 4 个独立的起居空间、设备齐全的厨房和全尺寸机组休息区。客舱配备的云座（Nuage）采用了新型座椅构架，该座椅能够提供中立的身体姿势，以实现最佳的重量分布。先进的 Nice 触控客舱管理系统是专门为环球 7500 独家设计的，用户通过触控按钮就可以轻松掌控客舱设置和机上娱乐系统。平稳柔性机翼（Smooth Flex Wing）是环球 7500 公务机的又一技术亮点。先进的机翼技术让环球 7500 具备轻型飞机的起降性能，专属的柔性设计有利于缓解飞行颠簸，能够在一些具有挑战性的机场安全运行。

作为环球 7500 的升级版，在环球 8000 这一型号上，庞巴迪将“快”与“远”的理念推向了新的高度。环球 8000 的最大航程达到 8000 海里，可以执飞迪拜至

休斯顿、新加坡至洛杉矶、伦敦至珀斯等远程航线，在真正意义上拓展了全球高端出行的边界。

从市场表现来看，2025 年 2 月美国通用航空制造商协会（GAMA）发布的数据显示，2024 年庞巴迪公司共交付 146 架飞机，交付量同比增长 5.8%，其中包括 73 架“环球”飞机、73 架“挑战者”3500 和 650 飞机。

此外，霍尼韦尔 2024 年 10 月发布的《全球公务航空展望报告》显示，随着市场逐步复苏，全球市场对于新公务机的需求将持续增长，“正常化”和“稳定”将是公务航空市场未来一段时间内的主要特征。霍尼韦尔预测，未来 10 年，全球将需要 8500 架新公务机，总价值达到 2800 亿美元，其中大客舱公务机将占总价值的三分之二。尽管在这一细分市场，湾流是庞巴迪强有力的竞争对手，但如今专注于公务机市场的庞巴迪的实力不容小觑，未来其在大客舱公务机市场的表现值得期待。

▼ 图 | 湾流



构建完善民航业并购实施体系

文 | 王鹏

我国民航业在数十年高速增长后转型高质量发展，运力阶段性过剩、市场同质化竞争、国际竞争力不足以及部分航司高负债运营等问题制约着转型的进程。对此，民航局明确未来民航工作的总体思路是坚持以供给侧结构性改革为主线，扎实推动民航高质量发展。从长远发展来看，我国民航业要提升整体运营效率和国际竞争力，必须进一步深化改革、优化产业结构，构建完善具有自身特色的民航业并购实施体系。

▼ 图 | 徐炳南



锚定国际规律

韩国在整合、优化民航资源配置方面经验丰富。韩国政府在大韩航空并购韩亚航空过程中，高度关注并购后可能形成的垄断局面，主动介入并购活动，将大韩航空原有的首尔至上海等 34 条连接重要经济体的热门航线强制剥离给低成本航司，督促韩亚航空向仁川航空出售 12 架货机。这种“切割式整合”表面上是为了回应垄断担忧而不得不作出妥协，实质上是韩国政府经过深思熟虑后采取的精细化策略。

韩国政府需要让航司意识到不能通过简单的规模叠加就能获取枢纽控制权，政府宁愿放弃部分航线短期垄断收益也要打

破旧格局，重塑市场环境，为仁川机场赢得更加广泛、多元的航线覆盖。这一策略让仁川机场的中转效率飙升了 40%，实现了航空业整体实力的跃升，仁川机场在全球航空网络中的领先优势愈发明显。

我国也可以借鉴相关做法，引导三大航拿出京沪、广深等黄金航线的部分时刻适度开放给一些富有生机的低成本航空公司，实现政策性资源再分配，提升北京大兴机场、上海浦东机场等枢纽机场的航班衔接效率，激活潜力。黄金航线差异化竞争能满足不同旅客群体的需求，促进航空市场繁荣。此外，在时刻资源安排上，可以向乌鲁木齐、昆明等区域关键节点倾斜，这不仅深度契合“一带一路”倡议，也能有力支撑当地机场形成重要次级枢纽，拓展中亚、东南亚航线，使我国民航网络从依赖传统三大枢纽转化为众多节点协同作战、相互补强的全球航空网络。

法荷航集团对北欧航空“渐进式控股”并购操作也是一个十分成功的案例。在并购过程中，法荷航集团为了消除反垄断审查的阻碍，巧妙地运用金融工具延迟认定实质控制权，不动声色地在北欧航空原有股权结构中成为实际主导力量，确保并购工作顺利完成。

我国航司在跨境并购过程中，不妨借鉴法荷航集团的经验和做法。假设我国某航司拟对柬埔寨某航司进行并购，就可以策划联合像阿布扎比投资局、沙特公共投资基金等中东主权资本，在海南自贸港设立专项并购基金，用 20% 股权配以可转债的复合模式完成收购，既符合柬埔寨的监管标准，又利用债转股分期行权的特性将实质控制权获得时间点灵活安排在某个预期的政策窗口期。此方案充分利用了海南自贸港跨境服务贸易负面清单第八条中关于航空运输中方控股的例外条款，实现飞机租赁、航材供应等配套领域外资控股突

破，又能借力中东资本的地缘中立属性缓解美欧方面的审查压力。此外，还可以将天合联盟标准化协议转化为一种技术控制杠杆。当股权比例被监管束缚时，可以运用联盟身份，把柬埔寨某航空吸纳进寰宇一家，借助联盟机制和联运协议，将金边枢纽整合进我国空中丝绸之路航空网络。

锁定关键窗口

一是把握并购时间窗口。我国民航业构建并购战略实施体系，要深刻理解并利用行业周期性波动战略机遇，精准把握行业周期窗口，在行业下行、部分企业负债累累时主动出击进行“逆周期整合”，战略性并购优质资产。大韩航空就是在韩亚航空负债率高达 1400%、年度亏损 661 亿韩元的情况下，以韩亚航空疫情前估值的三成价格完成并购。借助逆周期抄底，大韩航空获得了大量优质资源，在优化自身航线网络的同时，重塑了市场格局。

当前，国内中小航司平均负债率超过 90%，民航业深度整合的时间窗口开启，三大航应果断聚焦具备战略价值且具有重组可行性的目标航司实施精准并购。例如，

深圳航空依托宝安机场在大湾区战略格局中具有区位优势，尽管 2023 年底暂时背负 115.2% 负债率和 96 亿元净资产缺口，国航可以通过增资扩股、剥离非核心业务等方式，保留京深、深港等黄金航线和波音 787 宽体机队，把曾经压得深航喘不过气的 40 亿元债务包袱转化为撬动华南国际航线网络、助其腾飞的关键杠杆。

山东航空获得国航 100 亿元注资后，果断瘦身，挖掘潜力，剥离烟台至首尔等低效航线，将 28 架 C909 转入国航体系专业化运营，将战略资源投入到济南到大阪、青岛到福冈等高盈利航线上，牢牢把握日韩市场的主动权，融入国航环渤海区域整体布局。

二是瞄准地缘政策窗口。大韩航空将四条欧洲黄金航线让给德威航空，以换取欧盟通过并购审批。这一做法看似妥协，实则巧妙运用了中韩两国间的免签政策红利，极大地提升了中转航线的价值。中韩航线客座率的飙升使得仁川枢纽跨洋中转的优势日益明显，大韩航空由此获得的收益远超因放弃几条欧洲航线付出的成本。

我国航司可以主动运用“一带一路”倡议在航空领域的合作机遇，利用航空协定谈判作为核心工具，在东盟商讨“开放天空”时提出一些更富战略考虑的附加条件。例如，强制并购方让渡 15% 的中欧时刻给低成本航司，这一做法既可以缓冲反垄断阻力，又能换取东盟次级枢纽航权。

三是利用监管宽容窗口。北欧航空 2022 年 7 月依据美国《破产法》第 11 章启动破产保护程序。法荷航联合财团敏锐地捕捉到监管宽容窗口期，利用该时间段冻结债权人诉讼、暂停债务偿付等制度性便利，在 6 个月时间内完成对北欧航空 12 亿美元的资本注入及债务重组工作。法院在破产程序初期通常优先处理债务重组事宜，而非启动反垄断监管审查。法荷航将

破产程序转化为监管真空期，先注资后合规的逆序操作降低了交易流产的风险，重塑了跨国并购中资本与监管的博弈规则。

反观捷蓝航空竞购精神航空的失败案例，面对精神航空持续亏损的困境，捷蓝航空没有引导其进入类似的法律保护程序，为并购争取时间和空间，反而让自己暴露在常规并购审查的巨大压力之下。这一案例表明，在复杂的并购过程中，并购方如果不能有效地驾驭监管宽容窗口，容易陷入被动甚至出局。

在海南机场整合过程中，有关方面通过司法重整与区域政策结合，利用“政策宽容窗口”，把企业危机转化为战略并购跳板。海南机场利用《中华人民共和国企业破产法》中“停止计息”与“冻结债权人诉讼”条款，在 6 个月内完成千亿级资产重组，规避经营者集中审核时对航线资源切割的强制性要求。此外，利用“一线放开、二线管住”的自贸港特殊海关监管政策，以国资为主导的并购基金在实施收购的同时，将美兰空港 49% 的股份以信托方式交由中东主权基金持有，既满足了国有控股底线，又为应对域外审查风险提供了缓冲。

资本协同、跨境协同

在大韩航空并购韩亚航空过程中，韩国产业银行的债务置换只是缓解了燃眉之急，为后续操作打下基础。韩国国土交通部要求大韩航空剥离 34 条高价值航线和 4 条通往欧洲的黄金航线给低成本航司运营、强制实施“无自愿裁员”等做法，不仅是为了满足反垄断监管的要求，而且有利于重构产业生态。

我们也可以学习借鉴此类做法。例如，在向深航这样负债率高达 116% 的公司注资时，强制绑定三重兜底义务：一是



▲ 图 | 大韩航空

要求并购方将一定比例的核心航线或黄金时刻让给低成本航司，培育互补生态；二是被重组方要保证继续留用 90% 以上的员工，冗余飞机退出或转租给低成本航司；三是预存核心航线 10% 时刻，建立国家航权储备池。当面临国外审查要求剥离航线时，可以牺牲次级航线运营权以保证战略航线。

在设计跨境并购规避监管策略时，可以考虑利用海南自贸港在跨境投资和资本运作上的优惠政策，设立国内资本和部分国际资本共同参与的混合所有制并购基金，以部分比例设定“延迟转股”条件的结构化融资工具可转换债券收购东南亚航司，既能满足收购初期外资持股比例上限限制的要求，又能通过分期转股条件，将控制权推迟到政策宽松时再行兑现。

通过大韩航空并购韩亚航空、法荷航集团并购北欧航空、捷蓝航空并购精神航空三起案例，我们可以看出，航空业并购不是简单的规模扩张，而是关键枢纽控制权和联盟协同的战略博弈。我国民航业要迈向国际实现高质量发展，最直接的路径就是参与全球跨境并购。为此，我们不仅要精准把握国际并购规则，更要在借鉴中学习借鉴中主动运用规则，深度融合国家战略与市场逻辑，在国际舞台上赢得主动。

▼ 图 | 万全





▼ 图 | 中国东方航空

民航货运市场的转型与突破

文 | 丁一璠

2025 年上半年，中国民航货运业交出了一份亮眼的答卷。这背后，是跨境电商与高端制造业双引擎的强劲驱动。

数据显示，2025 年上半年，中国航空货邮运输总量达到 478.4 万吨，同比增长 14.6%，这一增速不仅稳健，

更重要的是其内部结构的优化。其中，国际航线表现尤为抢眼，完成货邮运输量 203.7 万吨，同比增长 23.4%，在货邮运输总量中的占比攀升至 42.6%，较 2019 年同期提高了 10 个百分点，国际业务已然成为拉动行业增长的重要引擎。

“供应链组织者”

行业调研数据显示，当前中国航空物流市场约有 50% 至 60% 的货源直接来自跨境电商。以 SHEIN、TEMU、TikTok Shop 为代表的电商平台，正以前所未有的力度和速度出海，其“小批量、多频次、高时效”的业务特征，与航空货运的优势天然契合。

这种新型需求正在深刻地倒逼航空物流企业进行自我革命。传统的、仅提供机场到机场运输服务的单一承运人模式，已无法满足电商平台对端到端履约能力的要求。电商平台需要的是能够整合“头程揽收、仓储运营、干线运输、海外清关、末端派送、售后服务”的全链条解决方案，这促使航空物流企业必须加速从“运输商”向“综合物流服务商”和“供应链组织者”转型。

在此趋势下，市场主体正积极应变。以顺丰为例，其依托鄂州花湖机场这一专业货运枢纽，发挥“枢纽 + 国际仓线联动”的核心优势，结合其在全球运营的超过 250 万平方米的海外仓，为电商客户提供高效的“空空中转”和一站式履约服务。

圆通速递也在加速“东方天地港”（嘉兴全球航空物流枢纽）的建设，旨在深度融合其全球物流网络，协同产业链资源，增强在跨境电商物流领域的竞争力。这种深度绑定头部电商平台并围绕其需求构建基础设施和服务能力的模式，如今已成为行业共识。

细分市场正在形成

如果说跨境电商提供了市场的广度，那么高端制造业则赋予航空货运增长的深度。2025 年上半年，高附加值产品出

口表现亮眼，成为航空物流向高端化转型的最有力证明。

根据中国民航网报道，以电动汽车（出口增长 13.1%）、3D 打印机（出口增长 32.8%）和工业机器人（出口增长 45.2%）为代表的“新三样”产品，均实现了两位数的高速增长。这些产品体积大、价值高、对运输时效和安全性要求高，航空运输成为其出海的理想选择。

值得注意的是，新能源汽车整车通过空运出口，正从个案探索走向常态化。例如，顺丰航空在 2025 年 4 月动用波音 747 货机，为车企一次性运输 10 辆整车至欧洲，满足其紧急交付需求。这不仅展示了中国货航运输超大尺寸货物的能力，也预示着一个潜力巨大的新兴细分市场正在形成。

亚欧大陆成热点

2025 年上半年，全国新增 117 条国际货运航线，同比增长 58.1%。数据显示，新增航线主要集中在亚洲和欧洲。其中，亚洲以 54 条居首，占比 46.2%；欧洲紧随其后，新开 45 条，占比 38.5%。这背后是中国与东盟以及欧洲之间贸易往来

传统的、仅提供机场到机场运输服务的单一承运人模式，已无法满足电商平台对端到端履约能力的要求。

的持续深化。比利时、匈牙利等国作为欧洲物流集散地的战略地位日益突出。

相比之下，北美地区仅新开 12 条航线，占比 10.3%。业内专家分析认为，这与美国关税政策调整、取消最低价值包裹免税政策的预期，以及上半年部分需求被提前“抢运”透支等多重因素有关，导致中美航空货运需求出现阶段性下滑。

截至 2025 年 6 月，中国的国际货运航线已通达 50 个国家和地区的 106 座城市，一个覆盖全球核心市场的网络已初步形成。国内航线网络则以主要城市群和都市圈为核心，与国际航线形成高效协同，共同提升了中国航空物流业的市场覆盖率和全球竞争力。

“国家队”与“快递系”

市场的蓬勃发展激发了各类参与者的活力。据不完全统计，2025 年上半年全国货运航空公司有 17 家、货机 249 架，今年上半年货机数量比 2024 年增加 3 架。我国航空企业国际货运市场份额达 44%，同比提高 4 个百分点。在今年发布的全球空运货代 50 强榜单中，共有 14 家中国企业上榜，比去年多 4 家。

国内航线网络则以主要城市群和都市圈为核心，与国际航线形成高效协同，共同提升了中国航空物流业的市场覆盖率和全球竞争力。

以顺丰、圆通、京东为代表的“快递系”航司，凭借其强大的地面网络和客户基础，在航空货运领域持续发力，其机队规模和网络覆盖能力不断提升。

今年上半年，顺丰航空以 90 架全货机的庞大规模稳居亚洲第一，机型涵盖 B747、B767、B757、B737 等，形成了远、中、近程搭配的合理运力结构。依托鄂州花湖枢纽，其“轴辐式”网络效率持续提升。邮政航空机队规模达到 45 架，位居第二，以 B757、B737 为主力机型，2025 年计划新增 3 架 B767，以提升跨境运力。圆通 13 架全货机以 B757、C909 为主，2025 年拟增 2 架 B767。京东航空现有 12 架全货机（含 6 架 B737、6 架 C909），聚焦国内干线市场。

此外，“国家队”三大航旗下的货运子公司中，国货航机队规模为 25 架（含 4 架已退役待转让），以 B777 和 B747 为主力机型，覆盖欧美长航程市场。南航物流运营 19 架 B777F 货机。东航物流机队规模为 16 架，均为 B777 机型。

从财报数据上看，“国家队”三大航的货运子公司在 2025 年上半年均取得了不错的业绩。中国国际货运航空有限公司上半年表现亮眼，实现营业收入 109.35 亿元，同比增长 21.92%；归母净利润 12.4 亿元，同比增长 86.15%。国货航正全力向“综合物流解决方案提供商”迈进。其 2025 年一季报显示，“综合物流解决方案”业务板块收入同比增长 72.39%，成为利润增长的新引擎。

东航物流上半年实现营业收入 112.56 亿元，同比微降 0.26%，但归母净利润达到 12.89 亿元，同比增长 0.9%。在营收基本持平的情况下实现利润增长，显示了其卓越的成本管控能力。东航物流的战略核心在于“延伸”与“融合”。

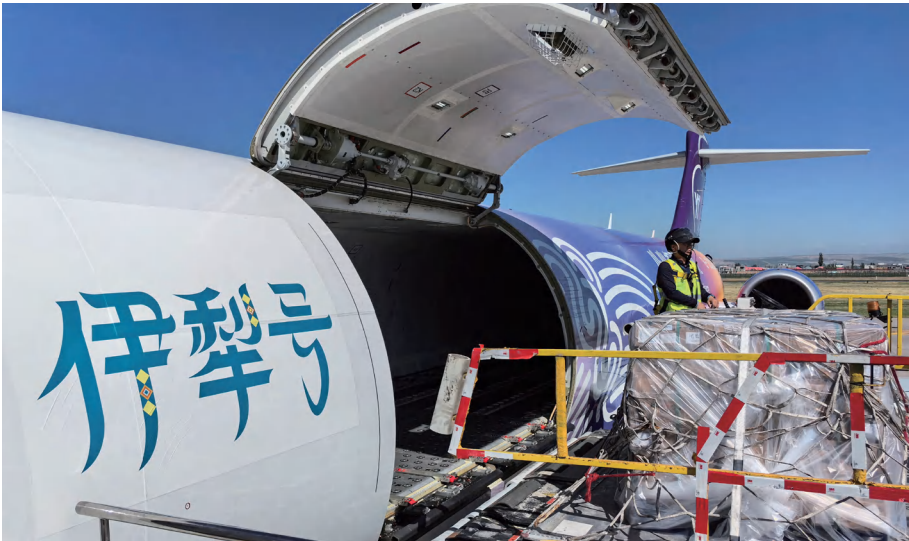
作为民航首家混改试点企业，公司积极推动产业链延伸，将物流服务嵌入产业价值链。同时，大力推进多式联运，特别是与中铁快运的战略合作，旨在打通“空铁联运”，构建覆盖更广、成本更优的物流网络。

南航物流上半年货运及邮运收入为 90.80 亿元，同比增长 4.01%。净利润为 16.01 亿元，在三家中依然最高，但同比出现了小幅下滑。南航物流正通过数字化转型构建“端到端”的全链条服务能力。公司与京东物流合作开发一体化智慧物流平台，并自主研发“航油 e 云”等大数据管理系统，推动智能化运营。在业务创新上，南航物流针对新能源汽车、电子烟等特殊货物研发定制化解决方案，如创新使用国际中转“换单”模式，实现“一票货物、两程航司”高效衔接，显著提升了高价值货物的通关时效。

依托核心业务的稳健发展，顺丰控股（含顺丰航空）上半年实现营收 1468.58 亿元，同比增长 9.26%；净利润 57.38 亿元，同比增长 19.37%。圆通速递上半年快递业务量 148.63 亿件，同比增长 21.79%，市占率稳步提升。公司实现营收 358.83 亿元，同比增长 10.19%；净利润 18.31 亿元，同比下降 7.90%。尽管利润略有下滑，圆通仍在持续加码航空业务，累计开通 150 多条国际货运航线，服务网络覆盖亚洲主要区域及部分东欧市场。

从“量的集中”到“质的协同”

2025 年上半年，中国的航空货运枢纽建设不再仅仅追求货邮吞吐量的数字增长，而是向着功能定位更清晰、区域协同更紧密、运营模式更高效的方向加速发展。



▲ 图 | 王育梁

根据民航局发布的数据，今年上半年，我国内地机场货邮吞吐量达到 1029.9 万吨，同比增长 9.2%，主要货运枢纽机场同比均实现增长。上半年，中西部机场货邮吞吐量同比增长 9.2%，区域发展动能显著增强。鄂州、乌鲁木齐两地机场的货邮吞吐量同比增长超 50%，郑州新郑、成都双流、成都天府机场的货邮吞吐量同比增速超 20%。在“一带一路”倡议的推动下，西安、乌鲁木齐成为我国向西开放的重要桥头堡，国际航线网络迅速拓展。

根据相关统计，2025 年上半年全国货邮吞吐量排名第 1 至第 10 位的机场依次为上海浦东机场、白云机场、深圳宝安机场、首都机场、鄂州花湖机场、郑州新郑机场、杭州萧山机场、成都双流机场、重庆江北机场及上海虹桥机场。除重庆江北机场货邮吞吐量下降外，其余 9 家机场的货邮吞吐量均实现同比增长。

具体来看，上海浦东机场以 191.0 万吨的绝对优势继续领跑全国，庞大的国际航线网络和完善的设施使其成为全球供应链的核心节点。广州白云机场（116.9 万吨）和北京首都机场（74.6 万吨）保持了传统综合性枢纽的领先

单纯依靠运力规模扩张的时代已经过去，未来的竞争将是围绕供应链整合能力、数字化水平、服务创新和价值创造的综合实力的较量。

地位。深圳宝安机场以 14.1% 的强劲增长位列第三，其动力源于大湾区的创新经济，大量高科技产品和跨境电商包裹通过深圳通达全球。鄂州花湖机场以 60.6% 的爆发式增长成为最大亮点。作为顺丰航空的核心枢纽，其“轴辐式”货运网络高效运转，验证了专业货运枢纽模式在中国的巨大潜力。郑州新郑机场以 23.9% 的高速增长领跑，这得益于对周边制造业、跨境电商产业的强大承接能力。成都双流机场（21.7%）的快速增长，反映了成渝地区双城经济圈在电子信息、生物医药等产业的国际物流需求旺盛。

在不确定性中寻求突破

尽管 2025 年上半年中国民航货运业取得了质效双升的成绩，但前行之路并非一片坦途，行业必须直面成本高企、竞争加剧和外部环境变化等多重挑战。

首先，成本压力持续存在。航空物流的成本结构复杂，航油成本通常占总

运营成本的 30% ~ 50%，其价格波动直接影响航司利润。尽管上半年油价相对平稳，但长期不确定性依然存在。此外，人力成本、机场收费等共同构成了刚性支出，在价格战背景下对企业盈利能力构成持续考验。

其次，“内卷式”竞争亟待破局。市场的快速增长吸引了大量运力投入，但在部分航线上已出现供需失衡的苗头，导致出现“旺丁不旺财”的现象。2025 年全国民航工作会议已将“综合整治行业内卷式竞争”列为重点工作。从根本上走出“内卷”，不能仅靠自律与监管，更需要行业找到新的价值增长点，从低水平的价格战转向高水平的价值竞争。

最后，外部环境风险不容忽视。航空货运业作为全球贸易的“晴雨表”，极易受到外部冲击。地缘政治风险可能导致航路变更、成本增加。全球主要经济体的贸易政策变动，如美国对最低价值包裹免税政策的潜在调整，可能会显著影响中美跨境电商业务。全球经济复苏的节奏与力度，将直接影响航空货运的需求基本面。

展望未来，中国民航货运业正站在一个新的历史起点。单纯依靠运力规模扩张的时代已经过去，未来的竞争将是围绕供应链整合能力、数字化水平、服务创新和价值创造的综合实力的较量。从“运输商”到“供应链组织者”的转型，将是行业在不确定性中寻求持续突破、实现高质量发展的必由之路。

航空运输

暑运中的全国千万级机场

文 文墨

2025 年暑运 (7 月 1 日至 8 月 31 日) 期间，中国民航市场延续了稳健的复苏态势。整体来看，各项核心运营指标均实现了正增长，显示出强大的市场韧性与出行需求。

▼ 图 | 陈肖



统计数据显示，2025 年 7 月 1 日至 8 月 31 日，全国机场累计完成客运起降 196.38 万架次，同比增长 2.5%；旅客吞吐量达 2.92 亿人次，同比增长 2.9%。整体执行率达到 91.8%，客座率为 85.8%，反映出市场供需关系健康，运力投放与市场需求匹配度较高。

其中，境外航线的架次和旅客量同比增速分别达到 11.0% 和 12.0%，远超国内市场的 1.9% 和 2.1%，成为拉动整体市场增长的核心动力。这表明国际商务及旅游出行需求正在加速释放。尽管国内旅客量实现了 2.1% 的增长，但暑运期间境内航线平均票价 (含基建燃油) 为 961 元，同比下降 7.9%；座公里收入为 0.551

元，同比下降 8.3%。这反映出国内市场竞争激烈，航司采取“以价换量”策略以维持高客座率 (86.4%)。境外航线执行率高达 101.4%，说明航司为满足旺盛需求，执行了部分加班或包机计划。而境内航线 91.2% 的执行率则相对常规，也反映了市场竞争下航司对运力投放的审慎态度。

图 2 展示了 40 家千万级机场的旅客增长活力。绿色代表正增长，红色代表负增长。可以看到，温州、福州、乌鲁木齐、昆明等机场的增长势头强劲，而南宁、天津、济南、长沙等机场则面临增长压力。增长的驱动力主要来自旅游市场和国际航线恢复，而压力则主要源于高铁竞争和区域经济因素。

枢纽竞争白热化

暑运期间，上海浦东、广州白云、北京首都、深圳宝安、成都天府五大机场旅客吞吐量均突破 1000 万人次，合计贡献全国总量的 22%，彰显了其在国家航空网络中的核心地位。

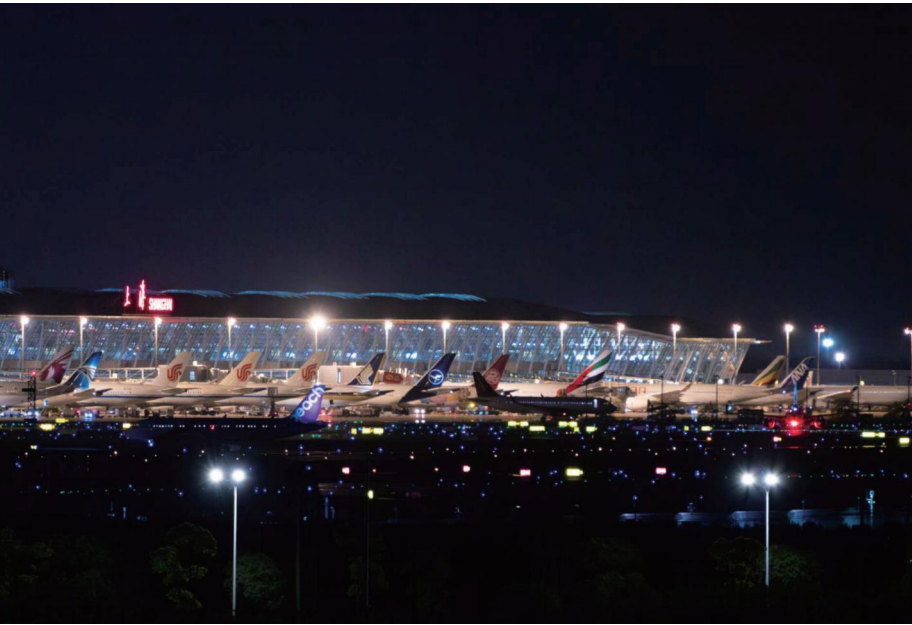
千万级机场的竞争尤为激烈。上海浦东机场凭借 1537.7 万人次的旅客吞吐量，超过广州白云机场，成为 2025 年暑运期间全国最繁忙的机场。同时，浦东机场旅客量同比增长 5.9%，在头部机场中增速领先，这主要得益于其国际枢纽地位带来的境外客流快速回升。

广州白云机场虽然在旅客吞吐量上以 1440.7 万人次位居第二，但其客运架次高达 9.09 万，位列全国第一，同比增长 7.5%，反映出其单机承运效率或国际旅客占比较浦东略低。北京首都机场和深圳宝安机场分别以 1243.5 万和 1122.7 万人次位列三、四名，保持了稳定的市场地位。成都天府机场作为“两场一体”运营模式的代表，以 1080.6 万人次稳居第五，同比增长 4.5%，展现出西部地区核心枢纽的强大动能。作为面向南亚、东南亚的门户，持续受益于区域旅游和经贸往来，昆明长水机场旅客吞吐量同样增速亮眼，同比增长 7.3%，旅客吞吐量和起降架次均排名全国第六。

市场“黑马”涌现

在激烈的竞争中，一批区域性机场凭借独特的区位优势和市场策略实现了远超行业平均水平的增长，成为本年度暑运的最大亮点。

温州龙湾机场的表现最为抢眼，旅客吞吐量和客运架次同比分别增长 11.2% 和 11.7%，成为名副其实的增



▲ 图 | 徐炳南

长冠军，反映出浙南地区旺盛的商务和旅游出行需求。昆明长水机场（旅客 +7.3%）、乌鲁木齐天山机场（旅客 +7.5%）和厦门高崎机场（旅客 +6.6%）等西部和东南沿海的门户机场也表现出色。特别是乌鲁木齐机场，旅客吞吐量同比增长 7.5%，排名跃升至第 12 位。这得益于新疆旅游市场的持续火爆和“一带一路”核心区的区位优势。执行率高达 104.2%，显示出其作为向西开放桥头堡的战略地位和市场热度。

福州长乐机场（旅客 +7.9%）和宁波栎社机场（旅客 +6.3%）同样实现了高速增长，印证了长三角和海西经济区强大的经济活力。温州龙湾机场 (+11.2%) 和银川河东机场 (+8.2%) 同样表现出色，反映了长三角外溢需求和西部旅游热的共同作用。

几家欢喜几家愁

部分机场在暑运期间遭遇了负增长，如南宁吴圩机场下滑最为明显，客运架次和旅客吞吐量分别下降 8.1% 和 5.2%，

▼ 图 1 | 2025 年暑运 40 家千万级机场运营数据排名
数据来源：CADAS

序号	全国机场	旅客吞吐量 (万人次)	同比增长率 (%)	排名	旅客吞吐量 (万人次)	同比增长率 (%)	排名	旅客吞吐量 (万人次)	同比增长率 (%)
1	上海浦东	90076	2.8%	1	1537.7	5.9%	100.1%	85.3%	
2	广州白云	90892	7.5%	2	1440.7	4.9%	97.0%	83.3%	
3	北京首都	73961	1.6%	3	1243.5	2.4%	99.4%	80.1%	
4	深圳宝安	68717	0.6%	4	1122.7	2.9%	95.1%	85.0%	
5	成都天府	71890	3.3%	5	1080.6	4.5%	96.4%	86.2%	
6	昆明长水	63385	6.7%	6	963.3	7.3%	93.7%	88.1%	
7	北京大兴	60114	4.9%	7	956.0	4.8%	100.9%	84.7%	
8	杭州萧山	55860	0.9%	8	026.6	1.6%	98.1%	88.9%	
9	西安咸阳	62121	0.9%	9	922.4	0.1%	96.6%	87.8%	
10	重庆江北	58621	1.1%	10	898.2	1.3%	95.7%	87.8%	
11	上海虹桥	47403	2.6%	11	869.6	3.0%	97.9%	86.1%	
12	乌鲁木齐天山	46256	3.5%	12	643.0	7.5%	104.2%	87.2%	
13	南京禄口	41502	-0.3%	13	616.8	0.5%	93.4%	87.3%	
14	武汉天河	41097	0.8%	14	594.5	-1.9%	90.7%	85.4%	
15	成都双流	36313	3.5%	15	593.7	-0.7%	105.0%	84.6%	
16	长沙黄花	39005	-3.2%	16	591.9	-2.5%	88.2%	88.4%	
17	青岛胶东	37928	3.1%	17	562.5	2.0%	98.1%	85.2%	
18	郑州新郑	37195	1.3%	18	559.1	2.1%	83.3%	88.3%	
19	厦门高崎	34553	6.0%	19	532.3	6.6%	94.5%	85.6%	
20	贵阳龙洞堡	32356	3.9%	20	486.5	3.5%	96.6%	88.7%	
21	沈阳桃仙	30147	2.7%	21	480.0	4.3%	94.1%	89.0%	
22	哈尔滨太平	29567	-0.2%	22	459.9	0.5%	92.8%	89.9%	
23	海口美兰	31408	1.8%	23	457.6	1.0%	89.7%	83.2%	
24	大连周水子	30055	0.1%	24	439.7	1.6%	92.9%	86.3%	
25	兰州中川	27405	1.5%	25	407.8	1.6%	98.1%	88.7%	
26	济南遥墙	24091	-2.4%	26	393.3	-3.0%	94.0%	86.0%	
27	天津滨海	26210	-2.2%	27	373.8	-4.2%	84.5%	86.6%	
28	三亚凤凰	23260	3.0%	28	369.6	0.3%	95.5%	86.3%	
29	长春龙嘉	21900	-1.9%	29	338.3	0.4%	93.1%	88.9%	
30	福州长乐	20424	6.6%	30	311.1	7.9%	85.1%	86.3%	
31	宁波栎社	20513	3.9%	31	310.2	6.3%	91.0%	87.9%	
32	太原武宿	21322	-0.2%	32	308.7	0.1%	92.2%	87.4%	
33	呼和浩特白塔	23357	-5.0%	33	302.5	-2.1%	96.3%	87.4%	
34	温州龙湾	18039	11.7%	34	266.2	11.2%	89.5%	86.4%	
35	合肥新桥	18510	-3.4%	36	256.6	1.8%	84.4%	87.8%	
36	南宁吴圩	16667	-8.1%	37	250.7	-5.2%	91.0%	88.1%	
37	南昌昌北	17814	2.6%	38	249.4	5.3%	86.8%	90.0%	
38	珠海金湾	16853	-1.0%	39	245.3	-0.8%	88.1%	86.0%	
39	石家庄正定	15500	0.2%	41	237.2	3.0%	91.5%	91.1%	
40	无锡硕放	13436	-0.7%	43	196.5	1.1%	95.6%	86.2%	

▼ 图 2 | 2025 年暑运 40 家千万级机场旅客吞吐量同比增长率
数据来源：CADAS

2025暑运40家千万级机场旅客吞吐量同比增长率



市场调整压力巨大。长沙黄花机场（旅客 -2.5%）、武汉天河机场（旅客 -1.9%）、济南遥墙机场（旅客 -3.0%）和天津滨海机场（旅客 -4.2%）等中部及环渤海地区的重要机场也出现了不同程度的下滑。负增长的原因可能较为复杂，包括但不限于：高铁网络的竞争分流、区域内其他机场的崛起、特定航线结构调整或去年同期基数较高等因素。

执行率和客座率是衡量机场及航空公司运营效率的两个核心指标。2025 年暑运期间，各大机场在这两项指标上表现各异，揭示了不同的运营策略和市场状况。

执行率反映了航班计划的完成情况。暑运期间，部分机场执行率超过 100%，如北京大兴 (100.9%)、上海浦东 (100.1%)、成都双流 (105.0%)、乌鲁木齐地窝堡 (104.2%) 等。这表明为应对旺盛的市场需求，航司在原定计划外增加了临时航班，这是市场高度活跃的积极信号。这些市场主要分为两类：一是北京、上海、成都等拥有强大腹地经济和人口支撑的超级枢纽，二是昆明、乌鲁木齐、西宁等拥有顶级旅游资源的门户机场。

客座率直接关系到航班的盈利水平。暑运期间，一批机场展现出强大的客流聚集能力。石家庄正定机场以 91.1% 的客座率高居榜首，南昌昌北 (90.0%)、哈尔滨太平 (89.9%)、杭州萧山 (88.9%) 等也表现优异，说明这些机场的航线网络与市场需求高度匹配。

此外，部分机场高执行率伴随低客座率，可能意味着市场竞争过度，航司为保市场份额而维持航班，但上座情况不理想。如首都机场 80.1% 的客座率在全国前十机场中垫底，广州机场 83.3% 的客座率也低于平均水平（全国机场整体执行率达到 91.8%，客座率为

85.8%）。尽管它们的执行率非常高，但较低的客座率反映出在“一市两场”格局下，部分航线或时刻的客流被大兴和深圳等机场分流。航司在这些传统枢纽的运力投放可能需要进一步优化，以提升盈利能力。

总结与展望

综合来看，2025 年暑运期间民航市场呈现出“稳中有进、结构优化”的总体特征。基于本次暑运的数据分析，总结出以下几个核心趋势并对未来市场作出展望：

第一，国际市场成为关键增长点。随着全球旅行限制的进一步放宽和消费信心的恢复，国际航线的复苏将持续为中国民航市场注入活力，特别是对于大型国际枢纽机场而言，其战略价值将更加凸显。

第二，市场竞争进入“价值战”而非“价格战”。票价的普遍下调反映了竞争的激烈，但长远来看，单纯的价格战不可持续。未来，航司和机场需通过优化航线网络、提升服务品质、推出差异化产品等方式，提升综合价值以吸引旅客。

第三，西部地区航空市场潜力巨大。以新疆、四川、云南为代表的西部地区，凭借其独特的旅游资源和不断完善的基础设施，正在成为中国民航市场最具活力的增长极。

第四，机场格局动态演变。头部机场的座次更迭、新兴枢纽的快速崛起，都表明中国民航的枢纽网络格局远未固化。机场间的竞争与合作将更加复杂，精细化运营和战略协同能力将是制胜关键。

人工智能赋能 忠诚度计划的创新与应用

文 | 王双武

随着人工智能技术的发展和广泛应用，航空公司正在不断加快数字化转型以满足技术进步的需要。对航空公司来说，人工智能不仅会在技术领域带来新的挑战，而且会导致行业规则发生改变。同时，智能化应用也在不断加快航空公司客户忠诚度计划的创新与变革。一方面，航空公司需要

▼ 图 | 汉莎航空集团



不断融入旅客消费场景的应用数据，从而更加精准地定义客户行为和绘制客户画像；另一方面，航空公司还需要通过数据整合和功能完善构建客户营销智能模型，开发更多个性化和人性化的交互应用，不断扩大旅客出行体验智能化应用范围，使忠诚度计划在智能规则管理方面进入崭新的发展阶段。

数字化应用提高出行体验

全球著名市场数据提供商 IDC 在发布的一份报告中指出，2023 年全球民航业在数字化转型技术和服务方面的支出达到 2.3 万亿美元，高于 2018 年的 1.3 万亿美元。报告还指出，为创造新的收入来源和提高效率，航空公司正在全球范围内增加数字化转型的技术投资，以提升旅客出行体验。

卡塔尔航空在其网站和移动 App 上建立了一个忠诚度计划收藏数字平台，使会员在平台上消费积分货币时有“金钱买不到”的体验。该数字平台整合了会员对体育、音乐、文化以及在购物和餐饮方面的兴趣爱好，为会员消费积分

提供极为中肯的建议。这种为会员在积分消费上提供智能化建议的方式，将忠诚度计划融入会员的生活方式中。

汉莎航空基于旅客出行需求重新开发了 App，从今年 2 月起供旅客下载使用。新的 App 不仅界面简洁、清晰，而且运行速度更快。汉莎航空在新推出的 App 上采用更加直观和现代化的设计，使旅客通过一种轻松的方式为出行做好准备，尤其是订座和值机更加高效与便捷。另外，新的数字钱包为旅客出行提供了多种支付方式。随着新 App 的推出，汉莎集团旗下奥地利航空、布鲁塞尔航空和瑞士航空的旅客也能共用一个 App。

为提升旅客的空中体验，阿提哈德航空推出了创新的数字应用工具 Skypad。该工具是由阿提哈德航空数字化转型和创新团队研发的，旨在为旅客提供个性化的航空服务。在公务舱和头等舱服务的乘务员可通过安装有 Skypad 应用的平板电脑进入航班实时更新界面，解决每一位旅客遇到的问题并满足其需求。Skypad 上的订餐功能允许乘务员以简便的操作完成订单，从而为旅客提供更加顺畅的用餐体验。阿提哈德航空方面表示，将进一步加快数字化转型，为旅客在出行的每一个节点提供全面衔接的服务体验。

从今年 3 月开始，新加坡航空与第三方代理合作加快人工智能的应用步伐，将服务云和数据云纳入客户案例管理系统，使其为客户提供更具持续性和个性化的服务。新加坡航空通过这套合作开发的智能系统为销售代理布置特定任务，从而简化客户服务流程，使客户服务代表能够专注于在每次与客户互动中提供个性化的服务和更好的出行解决方案。另外，这套智能系统还能够协助和指导客户服务代表更好地理解和预测客户需

求，并提供定制化解决方案，进一步提高客户维护效率。

人工智能赋能忠诚度计划

人工智能技术已经在航空公司的多个领域产生重要影响，并在一定程度上加快了航空公司在收入管理、舱位定价、辅助收入、客户体验、运行效率等多方面的业务转型和规则改变。人工智能技术的不断发展和应用，将彻底改变航空公司传统的管理模式，并通过高效运营为航空公司和旅客带来更多价值和利益

在航空公司忠诚度计划中，将数据集成到人工智能应用上是一件相对比较困难的事，因其涉及客户投诉、地面服务、空中服务、客票销售、财务结算等诸多单元。这些单元的每一个数据源都有自身的格式、结构和更新频率，而把这些数据集成到一个可完全用于分析的数据库中，本身就是一项挑战。基于旅客出行各个环节的行为数据构建客户维护和营销模型，首先需要打破各个环节的数据壁垒和障碍，从而完善忠诚度计划的人工智能开发与应用。

在忠诚度计划发展过程中，利用人工智能技术是为了进一步强化人工决策能力，而不是由人工智能取而代之。人工智能有助于航空公司利用数据找出问题的精准解决方案，深度洞察客户行为，从而更好地理解客户需求，并在很大程度上帮助旅客在线自助解决出行过程中遇到的任何疑问，从而提升客户出行体验。人工智能建模基于管理规则，可确保技术和输出结果能够被航空公司安全而有效地应用。

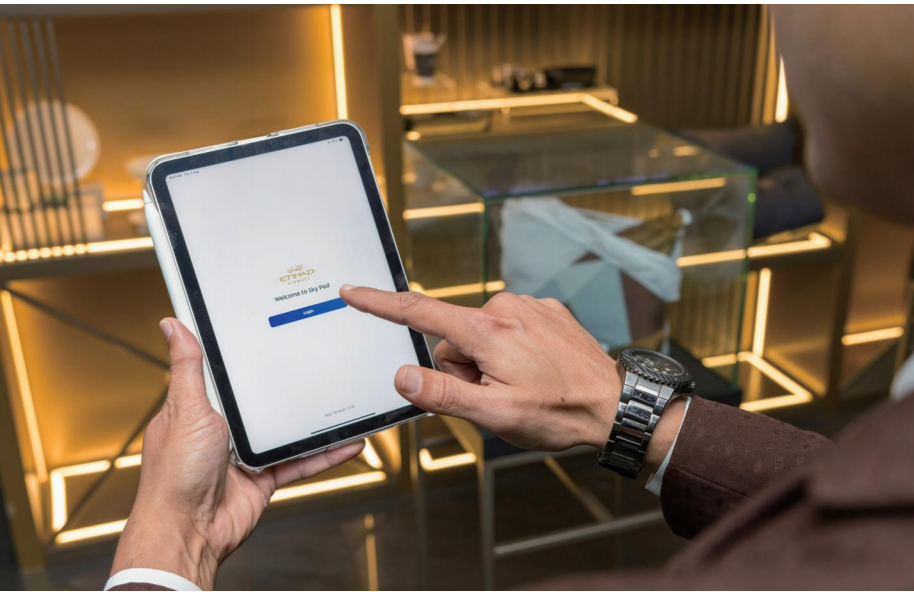
在应用人工智能解决忠诚度计划和旅客出行体验相关问题时，很好地理解和分析这些错综复杂的数据之间的关系

是关键。另外，数据的准确性和真实性是确保人工智能应用完善忠诚度计划的基础。因此，航空公司在会员发展与投诉环节需要采取正确的措施核实数据的真实性，确保人工智能建模的有效性和可靠性。

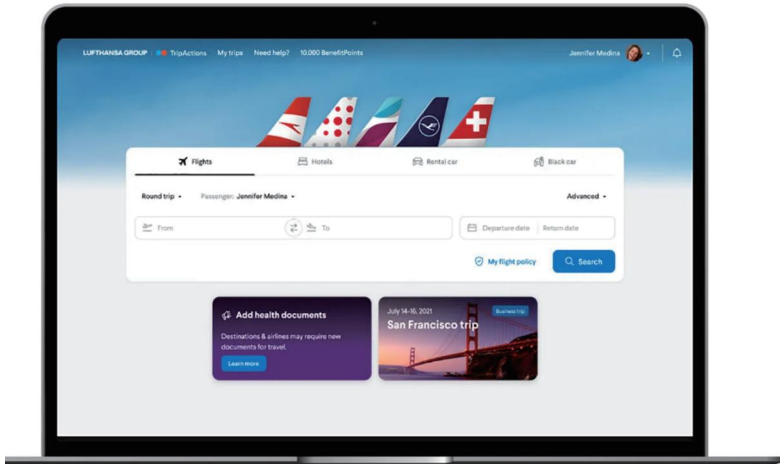
利用人工智能分析旅客旅行历史和出行偏好，可为旅客提供优选的出行和服务方案。汉莎航空推出了人工智能驱动的名叫“霍莉”的旅行顾问，它在考量旅客个性化偏好的基础上，能够智能化提供酒店和旅游目的地的出行选择。另外，汉莎航空还推出了一款基于 ChatGPT 的工具，能够根据旅客预订的航班，在考量目的地、季节和出行活动等多种变量的基础上，为旅客生成一份出行套餐清单。

当前，旅客出行更加偏向于满足个性化需求的专属体验。这种体验贯穿从订票到旅行结束的每一个节点，旅客在每一个节点都能够被航空公司识别和关怀，这样才能更加有效地提高旅客对航空公司的忠诚度。将人工智能整合到服务中，为旅客出行提供更加无缝和个性化的旅行承诺，无疑将进一步提升旅客的出行体验和忠诚度。

▼ 图 | 阿提哈德航空 Skypad



▼ 图 | 汉莎航空集团



加快数字化技术变革

在提升旅客出行体验和服务方面，航空公司要利用数据驱动优化资源和作出决策。但因为内部复杂且没有被集成的完整数据全面反映旅客需求、消费行为和出行计划等，航空公司客户洞察和对市场反应的分析存在片面性和不完整性。因此，航空公司有必要通过技术投资或者加强与相关机构的合作共同提升旅客出行体验。

为减少旅客在机场排队通过安全检查的时间，提升旅客出行体验，达美航空与美国运输安全管理局（TSA）进行紧密合作，从 2021 年开始在美国亚特兰大机场和底特律枢纽机场启用预检无接触识别通道，通过应用生物特征匹配数字身份识别技术，旅客只要看一眼检查摄像头，就能快捷轻松地通过安检，无须出示任何身份证件。后来，达美航空又在美国洛杉矶机场、纽约肯尼迪机场和纽约拉瓜迪亚机场推行了这项服务。据悉，应用数字身份识别技术可比人工进行安检减少 60% 的时间。

▼ 图 | 阿联酋航空沉浸式 3D 内部客舱



民航业完成数字化转型需要对技术和基础设施进行投资，其中就包括升级老旧系统、实施基于云的解决方案以及集成多个平台。从传统意义上说，航空公司内部有许多数据，但这些数据是相互独立的，甚至来自不同数据源。在很大程度上，航空公司的数字化转型必须解决不同口径数据的一致性和连接性问题。

英国航空在推进数字化转型过程中，除了利用自助值机柜台、移动 App 和在整个飞行途中推出机上 Wi-Fi 服务之外，还利用电子商务和社交媒体数据识别旅客个人需求。阿联酋航空引入了沉浸式 360 度 3D 内部客舱，方便旅客在购买机票时提前在公司的应用程序上通过虚拟现实技术浏览相关舱位，获取体验式信息，以增强对飞行的控制感。

在人工智能模式与定价计算方面具有权威性的 PROS 公司，通过开发人工智能软件帮助企业实现收入最大化。PROS 与包括阿联酋航空、澳航、汉莎航空、墨西哥航空、日本航空和美国西南航空等在内的航企进行合作，帮助它们实现收入管理、分销渠道和数字零售等关键数据的有效连接。随着航空公司日益寻求降低运营成本和增加收入，由人工智能驱动对客户数据的使用是不可阻挡的发展趋势。

忠诚度计划走上快车道

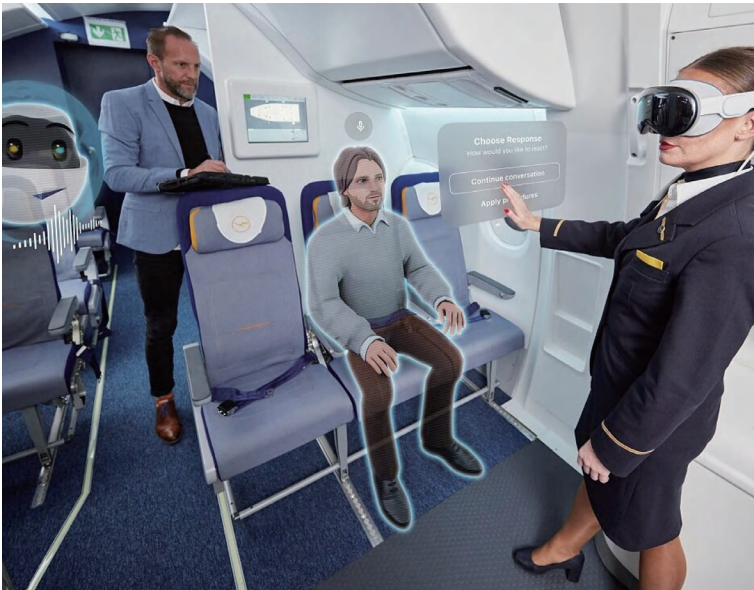
国际航空运输协会在 2024 年进行的一项关于全球旅客出行的调研表明，旅客更加偏爱使用人工智能技术提升出行体验，尤其是 25 岁以下的年轻人更愿意成为人工智能技术应用的拥护者和推广者。调研还表明，即使是超过 25 岁的人也愿意使用生物检测技术和忠诚度计划中的数字钱包支付和出行。另外，在

美国境内，88% 的旅客偏爱使用移动设备完成电子值机。

人工智能与大数据分析在现代忠诚度计划中发挥着关键作用。通过分析旅客的预订模式、旅行记录和行为数据，航空公司能够精准预测乘客偏好，并据此量身定制奖励方案。这种高度个性化的服务不仅提升了用户参与度，更为品牌忠诚度提供了有力支撑。借助这些应用程序，旅客可以使用智能手机轻松完成订票、值机和实时更新等重要操作。数字登机牌、行李追踪和互动式机场地图等能有效减轻压力、提升效率，打造出无缝衔接的旅行体验。

人工智能技术已经成为航空公司在各个环节提高工作效能和降低运营成本的有力工具。航空公司在生产中必须发挥人工智能的经营决策优势，同时通过组织体系变革加快人工智能驱动的数字转型。目前，人工智能驱动的移动 App 已经成为航空旅行的数字化助理，这也成为航空旅客出行偏爱的基础应用工具。人工智能语音助手在为旅客提供航班动态、登机口变更、机上选座、行李运输状态、轿车接送和目的地天气等信息之外，甚至还通过旅客偏好与消费

航空公司通过数字化转型重塑行业与旅客的互动方式，利用大数据预测分析旅客消费行为，打造全流程的无缝衔接和定制化服务，从而提高旅客参与度和忠诚度。



▲ 图 | 汉莎航空集团

行为等提供更加个性化的旅游攻略和出行解决方案。

随着人工智能技术的应用和忠诚度计划的完善，航空公司越来越重视便捷、舒适和个性化的旅客出行体验。从无缝值机、数字登机牌、实时航班动态、出行解决方案到个性化信息推送等，人工智能应用为旅客出行带来了诸多便利。航空公司通过数字化转型重塑行业与旅客的互动方式，利用大数据预测分析旅客消费行为，打造全流程的无缝衔接和定制化服务，从而提高旅客参与度和忠诚度。

当前，如何提升旅客出行体验并完善忠诚度计划已经成为航空公司拓展市场和维系客户的一个重要课题。旅客的出行体验方式从线下走向线上，又从线上逐步走向满足产业价值链发展需求的旅行生态圈。另外，航空商旅市场的发展和个性化旅行需求的增长，加快了民航业在生产经营各个方面数字集成的进程。旅客出行体验在时代潮流中得到了发展与创新，忠诚度计划的更新与完善已经走上了历史发展的快车道。

飞机涂装面面观

文 | 张安超

飞机涂装，不仅仅是“刷上一层油漆”那么简单。它是航空工业美学、工程技术、材料科学和航空产业品牌传播的综合体现。

科学、安全与经济的平衡

飞机涂装材料的研发核心，是在轻量化、耐候性、附着力与环保之间找到平

衡。飞机运行环境极端，其涂装材料也需具备一些特殊能力：飞机飞行高度一般可达 10000 ~ 12000 米，外界温度低至 -50℃；巡航速度高达 800 ~ 900 公里 / 小时，高速气流持续冲刷机身；飞机在高空飞行，长期暴露在紫外线照射环境下，飞机停场期间，也需面对盐雾、雨雪等环境考验；飞机涂装还要尽可能减少重量，以降低燃油消耗。

▼ 图 | 王脊梁



为了满足这些特殊要求，飞机涂装材料一般由树脂、颜料、溶剂、助剂四大部分组成。

树脂：用于形成漆膜骨架，决定飞机涂装的耐候性、附着力和硬度等基础指标，一般有聚酯类树脂、环氧树脂、丙烯酸树脂等类型，聚氨酯有较强的耐紫外线和化学腐蚀特性，环氧树脂附着力极强但耐候性略差。

颜料：主要提供颜色、不透明度和耐候性，一般有无机颜料（如二氧化钛提供白色，氧化铁提供红色）、有机颜料（提供鲜艳色彩）等类型，颜料需具备耐紫外线、不易褪色等特性。

溶剂：主要作用是调节涂料黏度，便于喷涂。其挥发后要求不留残渣且具备环保性，毒性低。

助剂：包括流平剂、防沉剂、抗静电剂、消泡剂等类型，目的是改善施工性、防止气泡、提高表面平滑度。

飞机涂装材料的特殊性能要求包括

轻量化、抗静电、耐腐蚀、环保性等要求：每平方米漆膜厚度只有几十微米，全机涂层重量一般不超过 250 公斤，防止机身积累静电影响通信设备，尤其是海岛机场航线，需要防盐雾，现代航空公司倾向使用低 VOC（挥发性有机化合物）涂料，减少对施工人员和环境的危害。

▲ 图 | 中国东方航空

精细到毫米的工程

飞机涂装不是简单的“喷一层漆”，而是一套严格的工业流程，通常需要在具备抽排风条件的专业机库中进行。喷漆时，环境要保持恒温、恒湿、无尘。

整个流程可以分为以下几个阶段：

表面处理阶段：先用专用清洗剂去除机身油污、旧蜡层、昆虫残骸等，然后采用化学剥漆剂或机械打磨方式去除旧漆，同时要注意避免损伤机体结构。如发现铆钉不平整、机身蒙皮划伤等，需提前修复。如出现裸露金属层，则需要用金属

表面冷氧化工艺进行防腐。

底漆喷涂阶段：底漆的作用是防腐蚀和增加附着力，常用环氧底漆，颜色多为绿色或灰色，喷涂中工人需穿着专用防护服使用静电喷枪等工具均匀喷涂，防止漏喷或堆漆。

面漆喷涂阶段：使用聚氨酯或丙烯酸聚氨酯面漆等，按照图纸要求，分区域进行多层喷涂。通常情况下，按照大面积颜色先喷、局部图案后喷的顺序进行。

标识与图案喷涂阶段：通过贴模版+喷涂完成，航空公司 Logo、注册号、舱门指示、救生出口标识等必须符合国际民航组织（ICAO）和各国民航局标准，特殊涂装往往需要定制喷绘模板。

▼ 图 | 徐炳南



清漆（透明保护层）喷涂阶段：主要是提高飞机涂层的光泽度、耐磨性、耐紫外线等性能。有的航空公司也会选择只喷涂底漆和特殊面漆，以减少喷漆工序和飞机重量。

检验与固化阶段：检查漆层结合力、平整度、颜色、光泽、边界清晰度，确保没有针孔、气泡、流挂等缺陷，漆面固化可自然进行，也可采用加温固化。

一架中型客机的全机涂装通常需要7～12天才能完成，复杂图案或大型宽体客机则可能需要2～3周。

标准化与多样化的结合

标准企业涂装：绝大多数航空公司采用统一配色，一般机身以白色为主（降低漆重、便于散热），辅以公司 Logo 与品牌色用于提升品牌辨识度，如国航、东航和南航的标准涂装。

联盟涂装：加入航空联盟（如星空联盟、寰宇一家、天合联盟）的成员公司，会有部分机队喷涂联盟专属配色用于宣传联盟品牌。

特别纪念涂装：用于纪念航空公司成立周年、重大事件或合作项目，如东航首架 C919 飞机“全球首架”中国印特别涂装、加拿大航空优秀员工涂装等。

文化与旅游推广涂装：与旅游局或文化机构合作，在机身绘制地方特色图案，推广旅游目的地，如东航迪士尼主题彩绘飞机。

广告与商业合作涂装：类似“飞行中的广告牌”，例如部分低成本航空公司与品牌合作方推出广告机身。

品牌、市场与文化的融合延伸

在航空运输的全球化竞争中，个性化



涂装正日益成为提升品牌影响力与市场活力的重要手段。

首先，作为品牌差异化的有效工具，飞机通过独特的涂装设计，能够让航空公司在同质化严重的市场中脱颖而出，形成鲜明的视觉符号。比如，全日空的“星球大战”系列飞机，以高度还原的角色造型成为社交媒体上的热点话题，极大提升了品牌的记忆度与话题性。

其次，个性化涂装能够为航线推广创造额外价值。当新航线开通时，航空公司往往会在机身设计中融入目的地文化元素，使飞机成为“空中宣传品”。在首航仪式与新闻报道中，这类涂装能快速聚焦公众视线，增加旅客对目的地的兴趣。

此外，个性化涂装还能够增强客户参与感与情感认同。一些航空公司会举办设计比赛，邀请公众投票决定涂装方案。当旅客真正乘坐到自己参与设计的飞机时，这种体验往往会带来更深的情感联结，提升客户黏性。与此同时，特殊涂装机型常被航空爱好者追逐，被视为“稀有机体”，甚至促使部分旅客专门购买机票，只为与

之“邂逅”，从而提高了航班的上座率与收益。

个性化涂装还承担着文化交流与国家形象传播的使命。通过在机身上绘制本国传统文化元素，航空公司能够在国际航线上展示独特的文化符号，进而提升国家软实力。它不仅成为一种外观装饰或营销手段，更是航空公司在品牌战略、航线推广、客户关系与文化传播上的重要工具。

飞机涂装，表面看是颜色与图案的组合，实质上是跨越材料科学、工程工艺、品牌传播与文化表达的综合工程。从材料的不同选取到精细化的喷涂工艺，从标准化的企业形象到别具一格的个性化设计，它既是航空技术的一部分，也是工业美学与航空文化在蓝天上的延伸。未来，随着环保涂料的进步、数字喷绘技术的发展以及 AR/LED 机身显示技术的探索，飞机涂装将更轻、更美、更具互动性，让搭乘飞机出行不仅便捷安全，更成为一种艺术与美的体验。

走进成飞民机 C919 机头生产线

“我们的目标是做精品”

文 | 欧阳亮 廖天航



“机头是整架飞机最复杂、最精密的部件之一，是‘神经中枢’，制造难度极高，当时我们认为，大企业要干大事，就要从最难的开始干，所以当年我们就选了机头。”日前，成飞民机副总工程师王伟给《大飞机》杂志记者介绍当年中国引进麦道生产线时，选择机头这项任务的起源。他谈道：“机头的曲率变化是整个飞机最剧烈的，为防鸟撞要使用高强度材料，所以难制造。而我们介入民机制造就是从这个最难的部位开始的。”

从 20 世纪 80 年代为麦道生产机头开始，成飞的民机业务越做越大，产品从机头扩展到舱门、方向舵等，营业收入也从成飞民机成立之初的 0.9 亿元增至 2024 年的 31 亿元。“经过 17 年的发展，成飞民机已初步具备航空结构和系统集成整体解决方案能力，全面构建了国际、国内双循环的发展格局，成为波音、空客、中国商飞等企业的优秀产品提供商。”王伟表示。

从“头”开始

成飞的工业园区位于成都西南一片叫黄田坝的地方。上世纪 50 年代后期，成飞落户于此，一边建设，一边研制飞机，几经磨砺，逐渐成长为中国航空工业的一股重要力量。

2007 年，为做大做强民机产业，原来的成飞“厂内分厂”，独立为一航成飞民用飞机有限责任公司，后于 2011 年更名为中航成飞民用飞机有限责任公司。

因为有生产麦道机头的经验，2002 年 C909 飞机立项后，成飞民机顺理成章地拿下了机头合同。同样，C919 的机头也都在此制造。

“与当年麦道飞机的机头相比，C909、C919 飞机的机头要先进得多、复杂得多，也难得多。成飞民机在与中国商飞合作的过程中，重点攻关且突破了产品设计、装配、大型钣金成形、检测试验、复材制造等核心工艺技术，还培养了一批人才，建立了完善的技术体系、标准。”王伟介绍说，基于这些能力，成飞民机在结构装配之外，还具备系统集成装配交付能力，可实现电气、环控、液压、飞控等系统集成并行制造。

在结构装配方面，成飞民机的产品也不再局限于机头，还包括 A320 登机门、驾驶舱地板，A350 扰流片和下垂板，达索猎鹰 7X、8X 壁板，737 登机门、方向舵，747-8 平尾等。此外，成飞民机还是 787 方向舵的全球唯一供应商。

“当然，最能体现成飞民机技术能力的还是机头。无论是 C909，还是 C919，每次向主制造商交付机头部件，我们都非常激动——它不仅是成飞民机全体员工智慧和汗水的结晶，也是成飞民机在大型复杂部件制造领域综合实力的象征。”王伟表示。

“经过 17 年的发展，成飞民机已初步具备航空结构和系统集成整体解决方案能力，全面构建了国际、国内双循环的发展格局，成为波音、空客、中国商飞等企业的优秀产品提供商。”

机头之难

站在一个 C919 飞机的机头前，成飞民机庄期能给记者解释了造机头之难：

“简单来说，造机头有三难：一是机头结构复杂，二是制造工艺协调性要求高，三是机头的精度要求高。”

“你看机头的外形，与后面的等直段机身相比，明显要复杂得多。”庄期能引导记者观察机头，“机头大尺寸双曲面蒙皮曲率变化较大，成形回弹大，外形控制非常困难，特别是驾驶舱左右侧双曲率蒙皮，与雷达罩框的曲率半径大约为 1.2 米，零件的精加程序需要反复调试与改进，非常难。”

“再看制造工艺协调性的要求。”庄期能介绍，机头不仅与前机身、雷达罩、前起落架之间有很高的协调要求，而且机头上安装的舱门较多，互换性和替换性要求较高。此外，飞机控制系统主要在机头进行安装集成，要求结构与系统成品件完全协调。“这么多的结构、

系统要协调，难度不小。”庄期能表示。

此外，机头作为飞机的一级气动区，对飞机的外形尺寸控制以及波纹度控制要求非常高。同时，机头上安装的总温探头、总压探头、攻角传感器等传感器设备数量众多，并且要求结构零件上的协调孔孔位精度相对角度达到 ± 1.0 度。

“这么高的精度要求，对制造的要求自然也就高了。”庄期能表示。

记者眼前的 C919 机头，长约 6.66 米、宽约 3.96 米、高约 4.13 米，重达 2.4 吨，体量和重量都创下国内民机之最。这个“大家伙”由驾驶舱、前起舱、壁板、机头地板、舱门等几大部件构成，模块 300 多项，安装零件上万件，螺栓、铆钉等标准件多达十几万件。更关键的是，飞机上超过 60% 的传感器设备都集成在机头上，涉及飞控、导航、气象等核心功能，显然对机头的设计、制造与检测均提出极高要求。

成飞民机张永亮也指出，飞行员普遍具有丰富的波音、空客等机型操作经验，对驾驶舱的舒适性、合理性有着极高的参照标准。每一位飞行员对国产民机的反馈，都可能指向驾驶舱区域的调整需求——或是操作界面的角度偏差，或是内饰拼接的细微缝隙，等等。出于以客户为中心的理念，只要飞行员提出的需求具有普遍性，就会启动修改。而这种基于实际体验的精细化调整，使得机头区域的工程变更量极大，进一步增加了制造过程的复杂性。

快速成长

对个人也好，对企业也好，做难而正确的事是进步最快的方式。成飞民机从一开始就选择了机头这个最难的大部段，成长的速度和幅度自然也很可观。

在数字化转型方面，成飞民机引入了先进的数字化技术，将协调方法从模拟量传递转变为以数字量传递为主，简化了流程环节。又通过数字化检测技术验证，实现了大型钣金和机加件等的精确定位和安装。

张永亮介绍：“我们以数字化工厂为支撑，不断优化工艺路径。比如针对 C919 机头，我们在设计初期就与中国商飞上飞院联合展开‘好制造’专项行动，从源头保障了设计与制造的同步性。”

在成飞民机的生产车间，数字化作业界面与自动钻铆设备已经成为常态。一项项从国际合作项目中积累下来的制造经验，如今正反哺于国产大飞机的研发和批产攻坚。

在生产工艺创新方面，成飞民机建设了大型钣金零件生产线，突破了优质蒙皮零件的精确拉伸成型、蒙皮零件的精确数字化切割等技术，拥有了完整的大型钣金零件生产能力。同时，成飞民机积极探索绿色制造技术，攻克了镀锌镍等绿色技术，以替代原来的高污染工艺。

在供应链管理方面，成飞民机建立了集成供应链管理体系，从材料采购到装配交付，实现订单处理、物料跟踪等环节的全流程全要素可视化，确保各型号产品均衡有序生产。

“我们是从系统解决方案出发去设计供应链，兼顾结构制造和系统集成。”成飞民机罗水均介绍，面对疫情后全球民机产业供应链紧张的态势，成飞民机坚持“战略合作 + 风险防控”双轮驱动策略：一方面深化与核心供应商的战略合作，建立长期稳定的供应关系；另一方面，通过建立多元化供应商体系和风险预警机制，有效降低了外部环境波动带来的不利影响。



自豪之基

安全，是大飞机的生命线。习近平总书记在会见 C919 大型客机项目团队代表并参观项目成果展览时指出：“要坚持安全第一，质量第一。”成飞民机始终把习近平总书记的重要指示作为根本遵循，通过系统化管理来筑牢安全和质量的根基。

庄期能表示：“我们的目标不仅是把一个机头做出来，而是把它做成‘精品’，代表国产民机最高质量标准。”为此，成飞民机构建了覆盖六大维度、28 个分支、99 项指标的“精品型号评价体系”，以“一次做好，缺陷为零”为目标，强化每一个生产环节的质量意识。

成飞民机高质量的机头产品已成为“成飞民机人”自豪的基石。在采访中，大多数 C919 项目参与人员表示已体验过 C919 飞机，用“放心”“舒适”“安静”“自豪”来形容飞行体验。“C919 起飞的那一刻，我觉得我们多年的努力都值了。”王伟坦言。



客机衍生型谱系规划四原则

文 | 张建军

客机谱系是飞机制造商基于统一的设计理念、技术平台和供应链体系，综合考虑市场需求、航程、用途、载客量等多方面因素，通过模块化设计、渐进式创新和多场景适配形成的具有共同技术基因且功能互补的机型组合，能实现从“单一型号”到“谱系生态”的跃升，不仅降低了研发风险，而且精准覆盖细分场景，最终形成对竞争对手的立体化优势。

一般来说，飞机制造商可以从三个维度进行谱系规划：一是以航程和载客量为主的纵向维度；二是以扩展功能、实现特殊任务为主的横向维度；三是以换发、复合材料应用、机载系统更新等为主的技术迭代维度。本文重点对横向维度谱系规

划的原则和方法进行探讨，期待读者批评指正。

衍生型谱系规划

衍生机型是在客机的基础上通过加装技术手段，使其具备满足特定要求或能执行特定任务能力。衍生机型是客机谱系的重要组成部分，它不仅能精准覆盖细分市场需求，为客户提供更加多样化、个性化的选择，更重要的价值在于其对客机残值的重塑，即为客户提供资产未来价值的守护，确保客机“老而不废”，实现残值托底和残值保障，降低客户的资产贬值风险，大幅改善客机的全生命周期收益率。

丰富的衍生型谱系有助于技术传承和技术兼容性的提升，有助于客机易改性设计理念的贯彻，为客机的持续改进和发展提供技术支持。“现在购机、未来保值”的衍生型生态，将提升客户融资时的抵押物估值，构成“隐性担保”，尽管其溢价能力高达 5% ~ 8%，但仍然能显著增强客户下单时的信心，提高对新机价格的容忍度，实现从残值管理到销售促进的信任循环，提升飞机制造商的品牌知名度和美誉度，从而扩大市场覆盖范围，降低单位生产成本，提高经济效益。

原则和方法

衍生型飞机运行场景复杂，功能需求多样。依据用途不同，客机衍生型主要分为四类。

公众运营类：服务于社会公众，以商业运营为主，提升社会服务水平，满足特殊公共运营的需要，如公务机、货机等。

应急救援类：服务社会，体现社会责任，满足国家航空应急救援的需要，如医疗机、指挥机、灭火机等。

科研服务类：服务国家，提升国家综合实力，满足国家科学研究和科考任务的需要，如增雨机、遥感机、科考机等。

军用衍生类：满足国家对国防建设的特殊需求。

衍生机型与客机相比，包含的专用任务多、涉及的专业技术广、涵盖的专用场景险，多需求交织、多用户协同、多专业交叉，衍生出众多的利益攸关方和用户。在开展衍生型谱系规划时，重点要加强市场调研，捕获不同客户群体的需求特点和市场趋势，分析各类型客机衍生型的市场需求规模、增长趋势和潜在机会。此外，还要密切关注竞争对手的衍生型谱系规划情况，找出自身的竞争优势和差异化特点。

通常情况下，衍生型谱系的主要规划原则和方法包括如下四个方面。

尽早启动原则。衍生型谱系的规划应在客机立项论证阶段就启动并贯彻于客机项目全生命周期。基于市场需求和技术演进的衍生机型布局，可在快速响应用户定制化需求的同时抢占市场先机。同时，能为关键技术预研和迭代优化预留充足的窗口期，有效控制技术风险并缩短衍生机型研发周期。此外，还能实现资源协同配置，在满足差异化需求的同时，维持规模经济效应。

全面性完整性原则。应从功能需求和运营场景出发，广泛查阅资料，参考竞争机型的衍生型谱系，从公众运营类、应急救援类、科研服务类和军用衍生类分别识别出已有、正在研制、未来可能出现的衍生机型。对识别的衍生机型开展顶层需求指标、主要技术特点分析，结合客机平台自身的限制，开展衍生型改装潜力研究，形成全面、完整的客机潜在衍生谱系。

梯度发展原则。按照不同的技术难度、市场需求窗口期和竞争机型的衍生型战略，分阶段、分层次地开发衍生型号，可以逐步验证技术可行性，降低一次性投入的风险，还可以灵活应对市场变化，根据市场反馈及时调整开发计划，确保每个阶段的投入都能产生最大效益。

市场互保原则。应确保不同型号之间能够相互补充，形成协同效应，共同满足市场需求。不同型号之间应定位清晰、功能互补，避免内部竞争，共同开拓市场。通过提供多样化的型号组合，可以满足客户的多样化需求，增强客户对品牌的忠诚度。飞机制造商可以实现资源共享和优化配置，提升企业的整体效益。

▼ 图 | COMAC





参与庞巴迪 C 系列项目研制的回顾与思考 (上)

文 | 汪亚卫

2017 年 10 月 16 日，一则新闻引起了全球航空工业界的高度关注——空客公司以 1 加元的价格获得了加拿大庞巴迪公司 C 系列飞机项目新的合资公司 50.01% 的股权，C 系列飞机由此被空客公司收入囊中。

不久之后，C 系列飞机更名为空客 A220，这不仅意味着空客在与波音的市场竞争中再下一城，也意味着庞巴迪公司试图以 C 系列飞机挑战波音、空客在全球单通道干线客机市场垄断地位的尝试宣告失败。

对于 C 系列项目，中国航空工业界

更为关注的是：中航工业沈飞当年为什么参与了这一项目？通过这一项目，我们有哪些进步和收获？又有哪些经验和教训？其中的点点滴滴，值得我们回顾和反思。

成为风险合作伙伴

庞巴迪是加拿大一家以生产雪橇起家的公司，后来开始生产轨道交通车辆，经过多年发展，逐步成为一家知名的制造业公司。

1980 年，庞巴迪收购了英国涡桨支

线客机制造商——德·哈维兰公司，接手了该公司研发生产的“冲锋”系列涡桨支线客机，开始涉足民机研制。此后，庞巴迪不断增加对民用飞机项目的投入，通过收购和自身发展快速进入涡扇支线客机和公务机领域。

在上世纪八九十年代世界民用飞机产业重组调整过程中，庞巴迪逐步取代了荷兰福克、瑞典萨伯等欧洲老牌航空工业企业，成为仅次于波音、空客的世界第三大民用飞机制造企业。

庞巴迪的民机业务能够快速发展，除了自身努力外，一个重要的原因是，波音、空客两强只关注 150 座以上的干线客机市场，对涡扇支线客机和公务机市场的投入不大。

随着实力的不断增强，庞巴迪逐渐不满于只研制涡扇支线客机和公务机，力图发展“小干线”与“大支线”之间的临界产品，这就是 C 系列飞机项目的由来。

C 系列飞机项目起初被称为“超级涡扇支线飞机研发计划（BRJX）”，旨在研制一款比竞争对手巴航工业 ERJ 系列飞机更加先进的涡扇支线客机。2004 年，庞巴迪宣布放弃 BRJX 计划，启动命名为 C 系列的全新涡扇客机项目，该机座级已超出支线客机的范畴，为 100 ~ 140 座级的单通道涡扇客机。

2005 年，庞巴迪宣布 C 系列飞机有 110 座的 CS110 和 130 座的 CS130 两个型别，飞机将配置加普惠公司最新研制的齿轮传动发动机 PW1500G，机体结构将大量使用碳纤维复合材料。与同类型飞机相比，C 系列飞机的油耗降低 20%，运营成本降低 15%，环保、省油和低排放将成为 C 系列飞机的最大特色。

明眼人都看得出来，C 系列飞机的竞争对手已不仅是巴航工业的 ERJ 系列

飞机，而是直接闯入了波音、空客的地盘，因为波音 737、空客 A320 两大系列都有 150 座级以下的改进型。

对于研制 C 系列飞机，庞巴迪充满自信，因为加拿大魁北克省政府宣布投资入股 C 系列飞机项目。当时，C 系列飞机急需的是启动订单和风险合作伙伴，经过再三考虑，庞巴迪看上了中国民机市场和中航工业集团。

此前，庞巴迪曾参与中国的轨道交通产业建设，相关产品在中国市场受到欢迎。在航空工业方面，庞巴迪与中航工业沈飞公司开展了民机转包生产合作，沈飞承担了庞巴迪“冲锋”涡桨支线飞机——Q400 的机体转包生产。当时，为降低生产成本，庞巴迪将原本由日本企业承担的 Q400 飞机的机体生产工作转包给沈飞。沈阳市政府鼓励沈飞与庞巴迪开展民机合作，在项目资金和生产基地建设等方面给予了大力支持。

从 2004 年起，庞巴迪反复向沈阳市政府、中国航空工业第一集团公司（简称“中航一集团”）和沈飞公司推介 C 系列飞机项目，并承诺将 C 系列飞机的前后机身、尾段、各种舱门等多个机体结构件的研发设计、试制和批生产全放

▼ 图 | 汪亚卫



在沈阳，希望沈飞成为 C 系列飞机项目的合作伙伴。直接成为国外新型先进涡扇客机项目的国际合作伙伴，这在中国民机发展史上还是第一次，因此受到了中方的高度重视。

当时，庞巴迪是想以允许中国企业参与 C 系列飞机项目的研发，来换取使该机顺利进入广阔中国民机市场的机会，这实际上是难以实现的。因为当时国产 ARJ21 涡扇支线客机的研制正在上海进行，国产大型客机项目的可行性论证工作也已全面展开，空客 A320 已经开始在天津建立总装生产线，庞巴迪 C 系列飞机要进入中国市场绝非易事。然而，能够直接参与国外新型涡扇客机的设计研发，对于渴望加快发展的中国航空工业企业是十分难得的机遇，它可以全面提高我国的民机设计和研发水平。

沈阳市政府对于沈飞公司与庞巴迪合作研制 C 系列飞机项目十分重视，决定予以全力支持。在得到地方政府支持后，沈飞向中航一集团正式提出了参加 C 系列飞机合作研制的请示。中航一集

团召开党组会讨论了沈飞参加 C 系列飞机项目的请示，认为参与该项目对于沈飞提升民机研制水平有重要意义，同时提醒沈飞对该项目的研发投入是有风险的，要采取措施确保项目成功。中航一集团和沈阳市政府的支持，坚定了沈飞参与庞巴迪 C 系列飞机研制生产项目的信心。

2007 年，经过庞巴迪的全力争取，德国汉莎航空率先同意订购 60 架 C 系列客机，启动订单终于落地。不久之后，庞巴迪全面启动 C 系列飞机的设计和研制工作，沈飞作为项目合作伙伴进入了与庞巴迪公司谈判签约、组织技术力量参与 C 系列飞机设计试制工作的阶段。

2008 年 7 月 13 日，在英国伦敦举办的范堡罗航展上，庞巴迪正式宣布启动 C 系列飞机项目。7 月 15 日，沈飞公司董事长罗阳与庞巴迪公司 CEO 波多万在航展上签订了合作协议，沈飞作为项目风险合作伙伴负责 C 系列飞机的前机身、中机身、后机身、中央翼盒、尾锥、8 个舱门、翼身整流罩共 7 个机体工作包的设计、试制、生产制造等工作，工作份额超过整个机体结构工作量的 1/3。

新的机遇就在眼前，新的挑战也随之而来。

集中力量办大事

2008 年底，中航一集团与中航二集团完成整合，成立了中国航空工业集团公司，沈飞公司进入了航空装备公司。我从原中航一集团民用飞机部调到了航空装备公司，有机会继续负责 C 系列飞机的相关工作。

沈飞为承接与庞巴迪合作研制 C 系列飞机项目，专门组建了多元投资的中

方 C 系列飞机项目公司——沈飞国际公司，该公司的投资方有中航工业投资平台和沈阳市投资平台。沈飞国际作为 C 系列飞机项目承担主体，负责投融资和项目全过程的管控，时任沈飞董事长罗阳担任沈飞国际董事长，时任沈飞副总经理纪瑞东担任沈飞国际总经理。沈阳市政府在浑南新区沈飞民机厂房旁边特批了一块土地，交由沈飞国际用于新建 C 系列飞机试制和生产厂房。

2009 年，C 系列飞机的总体设计全面推进，由沈飞国际承担的多个结构工作包的详细设计工作也陆续展开。承担大部件的设计和试制工作，对于民机设计技术力量相对薄弱的沈飞来说是十分困难的事情。经过多年民机转包生产的锤炼，中国航空工业在民机上的长项是按设计图纸进行部件的生产制造，现在要由我们自己来完成新型民机结构部件的设计，谈何容易？我们既缺乏经验，又缺少有能力的设计人员。一段时间以后，沈飞承担的设计工作进度迟缓，庞巴迪着急了，他们派人到中航工业集团总部，希望总部出面帮助沈飞充实设计试制技术团队。

实际上，沈飞已经通过招聘组建了民机部件设计队伍，但新队伍没有工作经验，难以胜任 C 系列飞机的设计工作。本着实事求是的态度，中航工业与沈飞研究后决定，要与庞巴迪公司谈判，争取把原来由沈飞负责的部分设计工作转包出去。由于与庞巴迪的谈判，涉及更改合作协议，转出工作包带来了经费和责任等方面的问题，相关谈判进行得十分艰难。

最后，庞巴迪同意将技术难度较大的几个部件的设计和试制工作从沈飞转出去，由庞巴迪自己和法国、西班牙的企业承担，沈飞保留部分技术难度较小

经过多年民机转包生产的锤炼，中国航空工业在民机上的长项是按设计图纸进行部件的生产制造，现在要由我们自己来完成新型民机结构部件的设计，谈何容易？

的大部件研制工作。同时，中方还将派出技术人员前往承接相关部件研制工作的公司，参与设计试制工作。

艰苦的 C 系列飞机大部件设计和试制工作开始了，沈飞遇到的困难比预想的要大得多。庞巴迪对于设计 110 ~ 140 座级的客机本来就缺少经验，他们派来沈阳负责“指导”沈飞进行设计试制工作的工程技术人员自身能力也不足。另外，出于保护其“知识产权”的需要，庞巴迪对提供给沈飞的设计软件、标准和工具，不仅提供的进度很慢，而且相互不配套，这些都严重影响了沈飞研制工作的进度。从沈飞自身来说，设计团队的水平和能力严重不足，大量新招收的大学生完全没有设计经验，而且专业外语水平不够，派往位于加拿大蒙特利尔的庞巴迪研发中心学习设计软件使用方法的不少设计人员无法胜任工作。

对于庞巴迪方面的问题，沈飞国际主要通过与对方谈判等方式解决；而对于自身设计人员能力不足的问题，则只能靠中航工业出面，动员兄弟单位派出

▼ 图 | 汪亚卫



设计人员予以支持。为此，中航工业领导专门听取了汇报，并在集团公司召开年度工作会议期间，由集团公司领导亲自召开专题协调会，动员全集团的飞机设计单位派人支持沈飞的设计研发工作。

在集团的支持下，沈阳飞机设计研究所、成都飞机设计研究所、洪都公司飞机设计所等飞机设计单位都派出骨干设计人员支援沈飞。中航工业第一飞机设计研究院、西安飞机公司设计所作为中航工业民用飞机设计研制的核心单位，尽管当时正承担国产大型运输机的设计研发任务，两个单位同样派出技术人员支持沈飞，关键时刻显示出了航空工业各企事业单位互相支持、团结合作的精神。

当时，负责调配设计人员支援沈飞 C 系列飞机设计的航空装备公司提出了一个想法：能否向新成立的中国商飞求援，请负责中国大型客机研制的国家队派人支持沈飞设计 C 系列飞机部件？中航工业领导同意了这一设想，我和罗阳随即来到上海，拜访了中国商飞公司的领导。中国商飞的领导在了解我们的想法后，决定从上海飞机设计研究院选派

10 多名富有民机设计经验的设计人员支援沈飞。中国商飞的同志表示，与中航工业一起参与 C 系列飞机的设计研制，既是我们作为民机国家队的责任，也是我们亲历和体验国外新型民机设计研制过程、增强技术能力的好机会。中国商飞公司的全力支持，体现了作为中国民机国家队的风貌和担当，使中航工业和沈飞备受感动，这是“集中力量办大事”在中国民机事业发展中的生动体现。

2010 年 5 月，来自西安、成都、南昌、洛阳的中航工业设计人员和商飞从上海选调的设计人员共计 61 人在沈阳集中了两周，进行赴加拿大参加 C 系列飞机设计工作前的基础培训，随后这 61 名设计人员前往蒙特利尔，与先期到达的沈飞和沈阳飞机设计研究所的设计人员汇合，投入了在庞巴迪公司飞机设计部门进行专用软件和 C 系列飞机设计方法的培训和实习。培训结束后，他们又分别进入庞巴迪相关的设计部门，在庞巴迪的专家带领下开始承担部分 C 系列飞机的设计工作。2011 年春节，中方设计团队的全体同志是在蒙特利尔度过的。

经过中方设计团队的努力工作，沈飞完成了 C 系列飞机后机身筒段的设计和试制工作。2012 年 7 月，首件由沈飞设计并试制成功的后机身筒段空运至庞巴迪公司，这是 C 系列项目交付的第一个大部件。与此同时，由中方派出的工程设计人员正在加拿大、法国、西班牙等地参与其他机体部件的设计和试制工作。这些部件研制成功后，将由沈飞承担批生产阶段的制造工作。

承担 C 系列飞机机体大部件的批生产制造是沈飞参与 C 系列飞机项目的重要目标，它将在沈阳形成一个较大规模的民用飞机生产制造基地。为此，沈飞国际在当地政府的支持下，投资在沈阳

浑南新区建设了新的民机生产厂房，购买了飞机生产设备，定制了专用工装，招聘了生产工人并按照庞巴迪的飞机生产流程和标准开展了培训。

从 2012 年起，沈飞逐步形成了 C 系列飞机机体部件的批生产能力。经过努力，沈飞公司除完全由自己设计试制的 C 系列飞机后机身外，逐步将在设计和试制阶段转出的 C 系列飞机各大部件的生产制造工作包又转回到沈阳。

2015 年 6 月，制造技术难度最大的 C 系列飞机中机身从沈飞公司交付，标志着沈飞承担的这一体量最大、技术难度最高的工作包已经达到交付要求。至此，最初沈飞与庞巴迪签约时承担的 7 个机体大部件工作包中，除中央翼盒和翼身整流罩工作包没有转回外，其余的前机身、中机身、后机身、尾锥和多个舱门等的生产制造工作包都陆续转回了沈飞。

在 C 系列飞机设计试制过程中，由于能力不足，多个工作包被转包了出去，我们派出设计人员到国外参与相关部件的研制工作，在此过程中，他们学习借鉴了国外先进民机设计和试制技术，能力得到了明显提高。项目结束后，设计人员回到了各自原来的工作单位，在不同岗位上发挥了重要的作用。

随着项目推进，沈飞参与 C 系列飞机项目的初衷——待飞机投入批生产后获得稳定的制造工作量，在 2016 年下半年 C 系列飞机开始交付之后逐步得以实现。可见，通过参与庞巴迪 C 系列飞机项目，中国航空工业在民机研制技术水平和生产规模方面取得了明显的进步。

2013 年 9 月 16 日，CS100 首飞成功，2015 年 12 月取得适航证，2016 年 7 月 15 日由瑞士国际航空公司正式投入运营。CS300 于 2015 年 2 月 27 日首飞，



▲ 图 | 汪亚卫

2016 年 7 月取得适航证，同年 12 月 14 日由拉脱维亚波罗的海航空公司正式投入运营。C 系列飞机从 2004 年开始筹划，2008 年正式启动，历经磨难，终于进入国际市场。

从 2012 年 8 月交付 C 系列飞机后筒段开始，沈飞逐步实现了该飞机的前机身、中机身、后筒段、舱门、尾锥等大部件的批生产制造和售后服务工作，并成为该飞机的前机身、后筒段、舱门的唯一供应商。

2021 年 7 月 9 日，第 100 架 C 系列飞机（A220）中机身段在沈阳下线，其准时交付率达到 100%。2025 年 1 月 10 日，第 500 架份的 C 系列飞机（A220）前机身和后筒段在沈飞交付。沈飞成为了如今空客 A220 客机的主要机体供应商，并由此获得了稳定的收入。

（未完待续）

承担 C 系列飞机机体大部件的批生产制造是沈飞参与 C 系列飞机项目的重要目标，它将在沈阳形成一个较大规模的民用飞机生产制造基地。

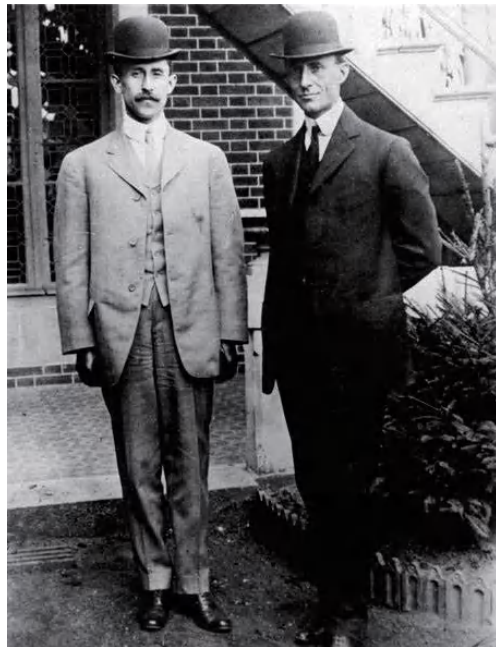
莱特兄弟：终结黎明前最寒冷的长夜

文 | 王思磊

在人类航空发展史上，莱特兄弟的名字如雷贯耳，他们被公认为“飞机的发明者”。在莱特兄弟之前，欧美航空先驱对重于空气的动力飞行进行了不懈的探索，留下了宝贵的试验数据，但他们都未能迈过可操纵的持续飞行这一步，徘徊在黎明前最寒冷的长夜。

1903 年 12 月 17 日，莱特兄弟“站在无数巨人的肩膀上”，驾驶“飞行者 1 号”飞上蓝天，实现了人类历史上首次有动力的、载人的、持续的、稳定的、可操纵的、重于空气的飞行器飞行，终结了“漫长的黑夜”，人类征服天空的梦想变为现实。

▼ 图 | 1905 年的奥维尔和威尔伯



从“竹蜻蜓”开始

1867 年 4 月 16 日，威尔伯·莱特出生在美国印第安纳州的米尔维尔。1871 年 8 月 19 日，奥维尔·莱特在美国俄亥俄州的代顿降生。他们的父亲米尔顿·莱特是一位开明的牧师，十分重视教育与实践的结合，经常鼓励孩子们动手制作玩具、修理机械。这些都培养了莱特兄弟早期对机械的兴趣和创新能力。

1878 年的一个春日，父亲为兄弟俩带回了一个神奇的礼物——竹蜻蜓。这个用竹子和橡皮筋制成的小玩意儿，在兄弟俩手中一次次飞向天空，划出优美的弧线。夜幕降临，兄弟俩的房间还亮着煤油灯，他们不仅反复试飞，还小心翼翼地仿制着不同尺寸的竹蜻蜓。

刨花在指尖飞舞，竹屑在灯光下闪烁着金色的光芒，兄弟俩完全沉浸在创造的喜悦中。这些童年的夜晚，成了莱特兄弟航空梦开始的地方。那些在地板上旋转升空的竹蜻蜓，仿佛预示着未来将改变世界的伟大发明。

自行车铺老板

尽管兄弟二人都未完成高中学业，但他们通过自学掌握了丰富的机械知识与工程技能。1892 年，代顿城第七大街上一家不起眼的自行车铺开张了。店铺门口

挂着“莱特自行车公司”的招牌，店内，兄弟俩正在专心致志地修理自行车，手上沾满了油污，但眼神专注而明亮。这段经历不仅为他们提供了经济支持，更锻炼了他们在结构设计、动力传动和材料强度方面的实践能力。

1896 年，德国滑翔先驱李林塔尔在一次事故中丧生，消息震惊了世界，也深深触动了莱特兄弟。他们开始将关注点转向飞行，系统研究飞行理论，阅读包括李林塔尔《作为航空基础的鸟类飞行》在内的多部著作，并写信向史密森学会请求更多航空资料。

有了前人的著作和经验，莱特兄弟在短时间内就弄清了飞行必备的三个要素：升举、推进和控制。虽然这一点 100 年前的凯利就认识到了，但是而后的 100 年间几乎没有人从总体上把握和综合研究它们。兄弟俩还敏锐地意识到解决飞行器的稳定和平衡问题是关键突破口。他们对鸽子的飞行进行了大量观察，用风筝进行试验，发现了可以用“翼尖翘曲”的方法达到飞行器的平衡，就是通过驾驶者不断操纵机翼偏转翘曲来达到飞行器的自身动态稳定。

厘清了飞行原理后，莱特兄弟开始在滑翔机上试验。1899 年 8 月，他们制成了第一号滑翔机，采用了查纽特的双翼面结构，只有 1.5 米宽，像一只没有尾翼的大风筝。他们用 4 根绳索操纵上下翼面偏转翘曲，方法虽然复杂，但令他们高兴的是证明了“翼尖翘曲”方法是有效的，在控制和稳定上找到了一种可行的途径。

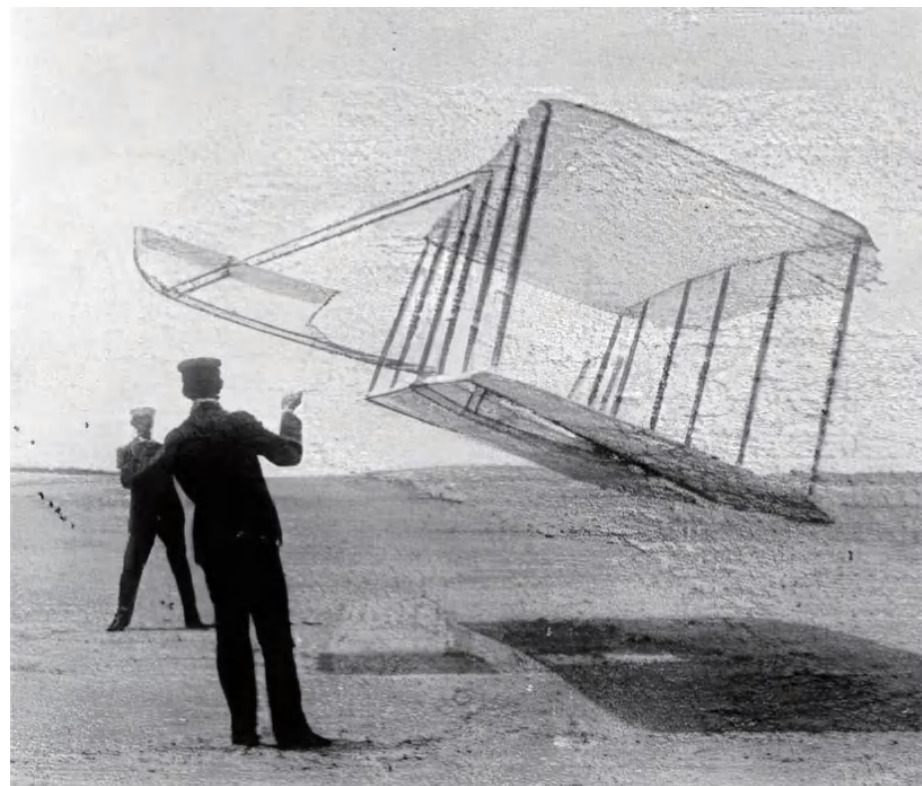
1900 年 9 月，莱特兄弟设计了第一号全尺寸滑翔机，仍然采用双翼面结构，翼展 5.18 米，前面加有水平升降舵面。他们选择了北卡罗来纳州的基蒂霍克作为场地开始飞行试验。由于对试验结果并不满意，这年冬天，他们又制造了第二号滑

翔机，机翼面积提高到 26 平方米，比李林塔尔、查纽特的滑翔机尺寸都大，性能也有了较大提高，但他们还是对机翼不满意。在此后近一年时间里，兄弟俩重点进行了翼型试验。

为了更好地掌握气动理论，莱特兄弟还制造了一个试验风洞，在两个月内试验了 200 多副翼型，研究了双翼机、三翼机的气动布局。通过一次次试验，兄弟俩不仅掌握了大量数据，而且对李林塔尔和兰利的理论进行了修正和补充。

1902 年 9 月，莱特兄弟设计了第三号滑翔机，机翼面积、弯度、展弦比都大大增加，加上飞行员后滑翔机重达 150 千克。9 月末，兄弟俩开始轮流试飞，取得很大成功。威尔伯的最好成绩是在 26 秒内滑翔了 190 米，奥维尔在 21 秒内滑翔了 188 米。下一步，他们要向真正的载人飞行发起挑战。

▼ 图 | 莱特兄弟滑翔机试验



划时代飞行

要想实现载人飞行，莱特兄弟遇到了新的难题，就是解决推进的动力问题，需要寻找合适的发动机。他们向几家发动机工厂求助都被拒绝了，于是只好自己动手制造。

莱特自行车公司有一位能干的技师查理·泰勒，他对发动机很内行。他们一起试制了一台 4 缸水冷式汽油活塞发动机，还利用翼型试验数据并参考船用螺旋桨参数制造出两副螺旋桨。

安装了发动机和螺旋桨的飞机停放在 18 米长的滑轨上，飞机上有 3 个仪表：风速表、计时秒表和连在发动机上的计数器。这架飞机被命名为“飞行者 1 号”。上下两个机翼的翼展达到 12.3 米，面积 47.4 平方米，机身长 6.43 米，前面有两个升降舵，后面有两个方向舵，发动机与螺旋桨的动力传动依靠自行车链条，驾驶员卧在下机翼中间，靠操纵手柄通过绳索操纵飞机。

1903 年 12 月 14 日，莱特兄弟的“飞行者 1 号”在基蒂霍克试飞。“飞行者 1 号”从山坡上沿着辅助轨道向下滑行，由于飞机过早升起，转弯过头，机头一直上仰，结果失速坠地。试飞只持续了 3.5 秒，飞机跳跃上升了 32 米。兄弟俩很不满意，坚决否认这是一次成功的试验。

用了两天时间修好了飞机，兄弟俩做好了全面准备。1903 年 12 月 17 日，天气阴冷，寒风刺骨，但这是人类航空史上意义深远的日子。上午 11 点，奥维尔驾驶“飞行者 1 号”从滑轨上起飞，随着速度不断加快，飞机徐徐升上天空，在空中飞行了 12 秒，飞行距离 36.6 米。虽然时间很短，距离也不远，但这是人类第一次有动力、载人、持续、稳定、可操纵的重于空气的飞行器的飞行。

11 时 20 分，威尔伯又驾驶“飞行者 1 号”进行了第二次飞行，留空时间 11 秒，飞行了 60 米。奥维尔进行了第三次飞行，留空时间 15 秒，飞行了 61 米。最后，由威尔伯进行当天第四次飞行，飞机在空中飞行了 59 秒，飞行距离 260 米。当天，莱特兄弟请来了 6 人作为助手，这 6 人也成了现场的见证人。

从质疑到认可

从 1896 年关注航空，到 1903 年 12 月 17 日成功完成划时代飞行，莱特兄弟用 7 年时间实现了人类几千年的飞行梦想。但是，事情并不一帆风顺，莱特兄弟这彪炳史册的成果却用了更长的时间才赢得世人普遍承认。

“飞行者 1 号”的成功在美国引起的反应很冷淡，当时人们对 9 天前兰利博士的“空中旅行者”的失败记忆犹新，不相信这两个名不见经传的年轻人会完成历史性创举。有人还认为这两个未受过正规教育的兄弟在编造谎言。“人类用重于空气的机器去飞行，不仅不可能，而且极不

▼ 图 | 美国纪念币以 1903 年飞行者一号首飞照片为蓝本



合理。”一位很有名的教授这样评论。德国一家杂志还把这一消息称之为“两个美国人的诈骗”。

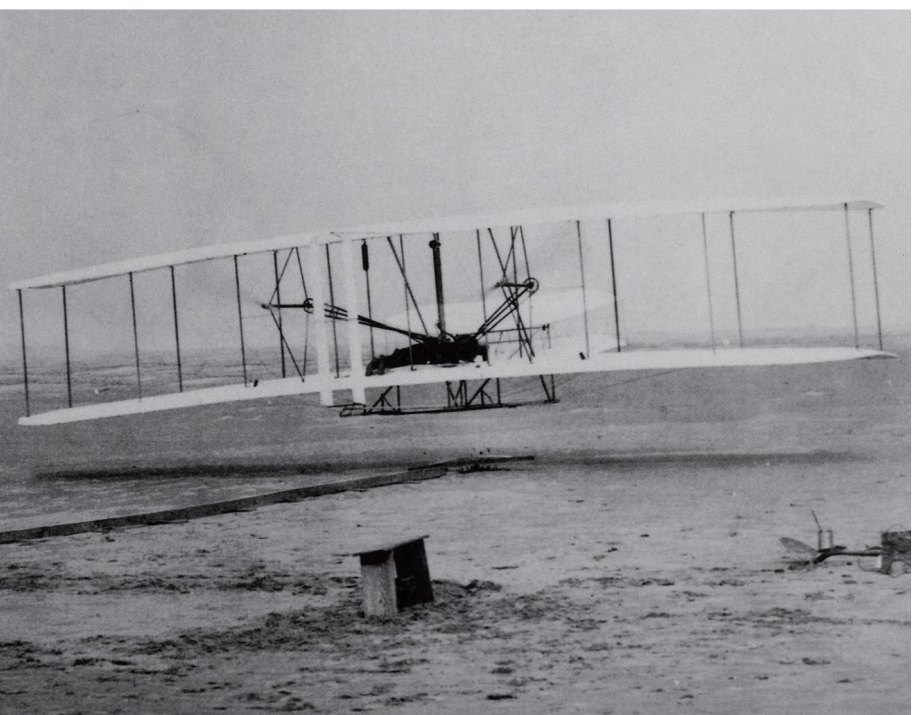
1904 年 5 月，莱特兄弟的第二架飞机“飞行者 2 号”制造出来了。它的结构和尺寸与“飞行者 1 号”相似，发动机也是新制造的。试飞地点改在了代顿以东 13 千米的霍夫曼草原。

从 5 月 23 日到 12 月 9 日，“飞行者 2 号”共飞行了 105 次。最满意的一次飞行了 5 分钟，飞行距离 4.4 千米。他们还首次完成了圆周飞行。但是，“飞行者 2 号”还存在快速转弯失速和容易失去操纵等问题。为此，他们对飞机进行了多项改进，研制出“飞行者 3 号”。

1905 年 10 月 5 日，“飞行者 3 号”进行了一次试验飞行。本次飞行持续了 38 分钟，飞行距离 38.6 千米，平均速度达到 60 千米 / 小时。若不是燃料耗尽，还可以继续飞行。此后，在“飞行者 3 号”50 次飞行中，飞机的起降、转弯以及 8 字飞行等能力得到全面验证，已经具备了实用性。因此，“飞行者 3 号”被认为是第一架实用动力飞机，莱特兄弟兴奋地宣称“实用飞行器时代已经到来了”。

然而，莱特兄弟的新成就仍然没有得到美国人的重视。在此后一年多时间里，他们重点研究新型发动机。1907 年春，莱特兄弟制造了一架新飞机。5 月，威尔伯带着这架飞机来到欧洲商谈专利仿制事宜，但没有取得任何结果。

1908 年 8 月 8 日，威尔伯驾驶新飞机在法国一个赛马场进行欧洲的首次飞行表演，一下子使欧洲震惊了。原来持怀疑态度的法国报纸欢呼这次飞行是“应用科学史上最激动人心的事件”。弟弟奥维尔自 1908 年 9 月 3 日开始，在美国弗吉尼亚州的迈尔堡进行公开飞行表演。9 月 9 日，在华盛顿作了首次表演，持续飞行



58 分钟。这一消息迅速传开，华盛顿万人空巷观看第二次飞行。从此，莱特兄弟的名字家喻户晓。

精神不朽

莱特兄弟全身心致力于航空事业，一生共制造了 32 种飞机。他们还创办了一个飞机工厂和两所飞行学校，并亲自教授飞行。

1912 年，哥哥威尔伯在长期劳累后与世长辞，年仅 45 岁。弟弟奥维尔的晚年则在平静中度过。1930 年，奥维尔被选为代顿第一位荣誉市民。1947 年，美国最大的航空公司泛美航空特意邀请奥维尔乘坐一架豪华客机升空游览，以感受航空事业近半个世纪来获得的巨大进步。就在这次感慨万千的飞行一年后，77 岁的奥维尔于 1948 年 1 月 30 日离开人世。

今天，当我们乘坐飞机穿梭于云间时，不应忘记在自行车铺里埋头苦干、在风沙中一次次起飞的莱特兄弟。在北卡罗来纳州基蒂霍克的纪念碑上，刻着这样一句话：“在这里，人类学会了飞翔。”但真正的纪念碑不在沙石之中，而在每一片被机翼划过的天空里，在每一个仰望星空、梦想飞翔的人心中。

