9月新品 NEW ARRIVALS

COMAC 吨吨杯



材质：316不锈钢（内）
201不锈钢（外）

容量：730ml

微店丨小程序 大飞机文创

俄罗斯航空产业

- 从国家层面看俄罗斯民用航空国产替代之路
- 从 0 到 1：俄罗斯民用航空发动机实现系列化发展
- 俄罗斯面向下一代飞机的技术储备



大飞机 JETLINER

09 September

2026.09 | 总第147期

ISSN 2095-3399

9 772095 339266 09

2026.09

2024 年 9 月 19 日，南航 C919 首航广州白云—上海虹桥航线，即将起飞时偶遇跑道外等待的南航 C909，“从你手中接过国产客机的接力棒”。

富嘉俊 摄













05 卷首语

05 俄罗斯航空工业国产化攻坚的镜鉴 | 庄敏

06 资讯

10 封面文章

10 从国家层面看俄罗斯民用航空国产替代之路 | 苏霓

16 从 0 到 1：俄罗斯民用航空发动机实现系列化发展 | 李蕴

22 俄罗斯面向下一代飞机的技术储备 | 苏霓 贾雨晨

27 航空制造

27 美欧下一代窄体客机竞争格局对比与分析 | 刘雪蓉 杨敏 张洋 冯鲁文

32 氢电公务机距离运营还有多远？ | 陈玉洁

35 可持续发展的压力重塑航空售后市场 | 赵平

40 航空运输

40 新金融方式对支线航空市场的支撑 | 马宁

45 2026 年上半年国内航空公司经营效益总结与展望 | 柴雨丰 葛冬瑞

50 美国低成本航空商业模式的收敛与分化 | 赵巍

56 上海国际航空枢纽建设建议 | 商承灏

60 产业观察

60 追逐日出——空客 A350-1000ULR 创纪录飞行背后的系统工程启示 | 乔善勋

65 新加坡樟宜机场打造航空枢纽的实践 | 蒋星

69 科普

69 没有 RNP AR，飞机能不能上高高原？ | 邵文馨 陈吟文

73 一排铆钉与 520 条生命
——飞行是如何一步一步变得如此安全的？（二） | 陈伟宁

76 回眸

76 76 年后话上飞 | 蒋斯来



▼ 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 09 期 | 总第 147 期 | 09 月 30 日出版

中国标准连续出版物号
ISSN 2095-3399 CN 31-2060/U
主管主办 中国商用飞机有限责任公司
出版发行 上海《大飞机》杂志社有限公司

编委会

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

上海《大飞机》杂志社有限公司

总经理 程福江
副总经理 徐显辉 郭宗磊

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

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

发行总监 刘 影
广告主管 瞿席燕

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

卷首语

俄罗斯航空工业国产化攻坚的镜鉴

文 | 庄敏



“全球没有任何一个国家能够完全自主生产一架飞机所需要的全部零部件，但俄罗斯现在不得不全国产化”

2022 年俄乌冲突大规模爆发后，一场几乎覆盖商用飞机全产业链的外部制裁骤然降临俄罗斯。为此，俄罗斯政府不得不出台一系列战略举措，举全国之力推动商用航空产业全链条国产化替代，一场产业自救全面拉开帷幕。

俄罗斯的这场产业攻坚并非白手起家。从苏霍伊到图波列夫，从伊尔库特到伊留申，俄罗斯拥有从塔甘罗格到阿穆尔河畔共青城延绵数千公里的航空产业带。于是在制裁伊始，凭借深厚的航空工业基础，涵盖飞机总体设计、发动机研制、试飞验证等核心能力的大批国内科研院所与制造企业迅速转向国产替代任务，意在向外界展示本土工业体系的抗压能力。然而理想的蓝图与现实的差异是巨大的，国产替代项目在研制过程中不断遭遇现实桎梏：本土配套企业产能和制造工艺不及预期、高端精密设备严重短缺、自研复合材料性能大打折扣，最终俄罗斯不得不以舍弃性能为代价，以求加速产品的研发进度。如今，PD-14 发动机已定型交付，全国产 MC-21-310 也已完成首飞，但这仅仅是万里长征的第一步，后续的产业链协同、适航认证、批产交付等每一项对于这个有着百年技术沉淀的传统航空大国来说都是全新的课题。

过去几十年，全球化分工促进了航空业的繁荣发展，开放的供应链实现了资源的最优配置。然而地缘冲突带来的外部制裁，彻底打破了这套运行多年的产业范式，把俄罗斯商用航空产业推向了一场前所未有的工业大考。对此，俄罗斯工业和贸易部部长曾悲壮地说过，“全球没有任何一个国家能够完全自主生产一架飞机所需要的全部零部件，但俄罗斯现在不得不全国产化”。尽管现在判断俄罗斯的国产化之路究竟能走多远还为时尚早，但面对当今世界百年未有之大变局，如何平衡产业链效率与产业链的安全可控是行业更多企业需要思考的问题，而俄罗斯在这场特殊环境下所经历的攻坚之路或许可以为更多企业提供参考和借鉴。



▲ 周昊臻 摄

1 中国商飞参加第四届 CATA 航空大会

9 月 17 日，第四届 CATA 航空大会在北京开幕。大会期间，中国商飞公司展出了 C909 基本型和衍生型，C919 基本型、高原型、加长型以及 C929 飞机模型等，展示最新运营成果和服务保障能力，并创新打造了“边疆快线”主题展，系统呈现“边疆快线”发展成果，展示“边疆快线”品牌形象。

▼ 来源：中国南方航空



2 C919 广州—青岛新航线开通

9 月 28 日，南航 C919 飞机正式执飞广州往返青岛航线，并首次在青岛机场执行定期商业航班，标志着国产大飞机正式加入粤港澳大湾区与胶东经济圈之间的空中通道运营。目前，南航已拥有 13 架 C919 飞机，已执行航班近 1.6 万班次，运送旅客近 220 万人次。

3 C909 医疗机赴吉尔吉斯斯坦开展医疗公益活动

9 月 24 日，“五官健康 C909 飞机医院”吉尔吉斯斯坦公益行活动在比什凯克玛纳斯国际机场举办。当天，来自复旦大学附属眼耳鼻喉科医院的专业医疗团队在 C909 医疗机上成功开展全球首台耳鼻喉科机上手术。活动期间，该医疗团队依托机载手术室及专业设备，为更多民众提供公益诊疗及手术。

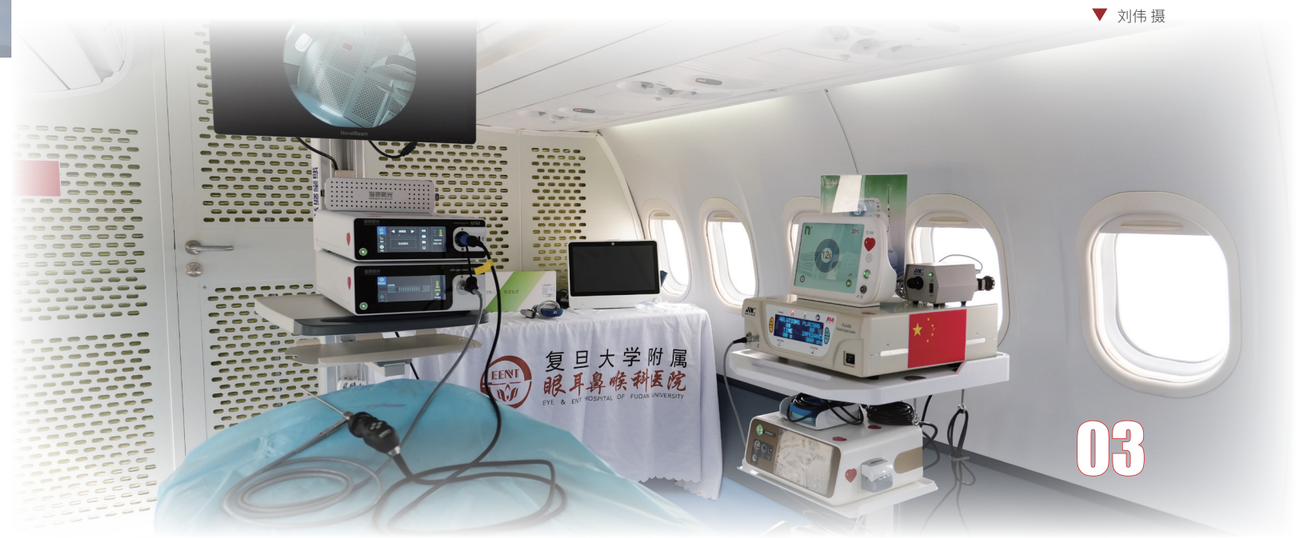
此次医疗公益活动是服务共建“一带一路”、深化中吉医疗卫生领域务实合作的生动实践，充分展现了 C909 医疗机的实际应用能力。

4 波音披露 737MAX 驾驶舱软件缺陷

据外媒报道，波音公司近日表示，737MAX 部分飞机的软件存在故障，该故障可能导致自动导航系统在着陆过程中失效，相关问题已引起美国联邦航空管理局（FAA）关注。

波音和 FAA 将分别发布专门通告，说明故障识别及处置方法，波音与软件供应商 GE 则在开发修复版本，但软件问题仍可能影响飞机交付。西南航空和美联航已表示，不会接收安装缺陷软件的 737MAX7 和 737MAX10。

▼ 刘伟 摄



5 空客 A350F 货机成功首飞

9 月 29 日，空客 A350F 货机首架测试飞机（MSN 700）在法国图卢兹完成首飞。首飞历时 4 小时 10 分钟，机组重点验证了飞机的基础适航性与基本飞行特性，并确认各基础系统均按预期运行。这也标志着为期 9 个多月的飞行测试计划正式开启。

6 霍尼韦尔完成兆瓦级氢电推进电源系统集成

近日，霍尼韦尔航空航天公司与合作伙伴已经完成“新生计划”（Project Newborn）氢电推进系统各子系统的集成。其位于捷克布尔诺的工程团队已经建立起一套能够为飞机产生并提供电力的功能性氢能电源。

“新生计划”面向未来按照欧洲航空安全局 CS-23 部规章认证的飞机，目标是研制兆瓦级推进系统。项目由欧盟清洁航空联合执行体资助，计划在 2028 年支持使用验证机开展飞行试验。

7 罗罗公司牵头欧盟混合电推进验证项目

近日，罗罗披露，欧盟清洁航空计划已选定该公司牵头实施航空电气化技术验证与演示（ELEVATED）项目。项目将把混合电子系统集成到燃气涡轮发动机试验平台，并评估其在遄达风扇 30 技术验证机上的应用。

ELEVATED 是清洁航空计划第四轮征集公布的 19 个项目之一。这批项目还包括氢动力飞机和高效率支线飞机构型等方案，最高可获得 2.9 亿欧元欧盟资金；计入公共和私人投入后，相关项目总投资为 6.64 亿欧元。



▲ 来源：中国航空新闻网

8 巴航工业 E 系列飞机交付达 2000 架

9 月 2 日，巴航工业在位于巴西的圣若泽杜斯坎波斯工厂举行飞机交付仪式，向巴西蔚蓝航空（Azul）交付一架全新 E195-E2 飞机。这架飞机是巴航工业 E 系列（E-Jet）自投入商业运营以来的第 2000 架交付飞机，也是该家族发展史上的重要里程碑。

9 俄航追加订购 90 架 MC-21-310，国产窄体机队总订单达 108 架

9 月 18 日，俄航与联合航空制造公司（UAC）、租赁公司 Aviacapital-Service 和联合发动机公司（UEC）签署合同，追加订购 90 架 MC-21-310。加上 2023 年已订购的 18 架，俄航对该机型的购买量达到 108 架。该订单目前面临适航认证（预计 2027 年取证）和产能爬坡（目标年产 36 架）两大门槛，短期内 MC-21 将与俄航现有约 130 架空客、波音窄体机共同运营而非立即替换。



▲ 来源：UAC

10 八月全球航空货运需求增长 4.4%

据国际航空运输协会（IATA）发布的 2026 年 8 月全球航空货运市场定期数据显示：航空货运总需求（按照 CTK 货运吨公里计算）同比增长 4.4%，国际需求增长 5.3%；运力（按照 ACTK 可用货运吨公里计算）同比下降 0.1%，国际运力增长 0.1%。货运收益自 4 月以来首次环比回升，全球货物贸易仍在持续增长。





从国家层面看俄罗斯民用航空国产替代之路

▲ 来源： www.aerotime.aero

文 | 苏霓　　编辑 | 庄敏

2022 年，俄乌爆发大规模冲突后，西方国家迅速对俄罗斯航空工业进行制裁，先后停止飞机产品销售、航空维修服务和零部件供应等。彼时俄罗斯机队中进口飞机占比高达约 70%，制裁直接导致机队中大量飞机适航性降低，最终使得俄罗斯出现缺飞机的窘境。在此背景下，俄罗斯政府第一时间明确要用国产民机替代国外飞机的战略，通过发布战略规划，明确了国产民机的批产交付计划，并为此投入了大量国有资金。然而，国产替代任务推进的难度远超预估，MC-21、SJ-100 等关键型号的首飞、适航取证、交付等目标都出现了大幅推迟。为此，2024 年前后，俄罗斯政府进行了战略规划调整，要求企业在技术层面之外，通过机构调整、管理创新等提升国产替代工作的研制进度。

国产化整体目标

俄乌冲突爆发之时，俄罗斯民航机队中，宽体客机和窄体客机 100% 使用波音、空客飞机，支线飞机主要使用 SSJ-100，70% 的零部件为国外生产，发动机为法俄联合生产。遭受制裁后，对俄罗斯民航运输业最直观的影响是在役国外飞机适航性降低，若无国产飞机补充，长期将导致逐渐无飞机可用。

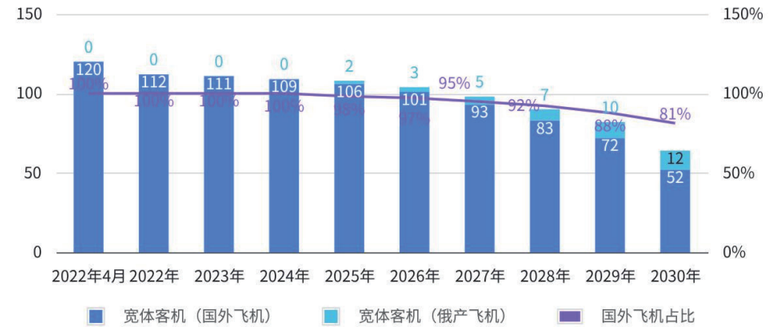
为了实现“自救”，短期俄罗斯需要在国产飞机无法实现替代前，通过维修延长在役飞机适航性，确保在安全的前提下满足国内客运市场需求；中长期则需要尽快研制交付国产飞机，代替机队中的国外飞机。在此背景下，2022 年 6 月 27 日，俄罗斯政府编制并发布了《至 2030 年俄罗斯联邦航空运输业发展综合规划》（以下简称《规划》），明确提出核心战略任务为俄罗斯民用航空国产化，到 2030 年俄罗斯全国产化民机在机队中的占比要达到 81%。

对于国产飞机的替代工作，俄罗斯的战略规划是宽体飞机机队缩减，短期仍然主要依靠国外飞机，包括 A330、A350、747、767、777 等。每年生产 1～2 架伊尔 -96-300 作为补充。随着国外飞机退役，宽体客机机队总量将呈下降趋势，2030 年宽体客机机队总量将从 2022 年的 120 架下降为 64 架。这主要是因为，俄罗斯认为受制裁影响，国内对远程国际飞行需求减少以及国内高密度长距离航线需求较少，因此窄体机将是未来的主力机型。俄罗斯制定的计划如表 1 所示。

窄体飞机以 MC-21 作为主力，图 -214 作为补充。窄体机为俄罗斯商业航空运

▼ 表 1 | 至 2030 年俄国产飞机交付计划

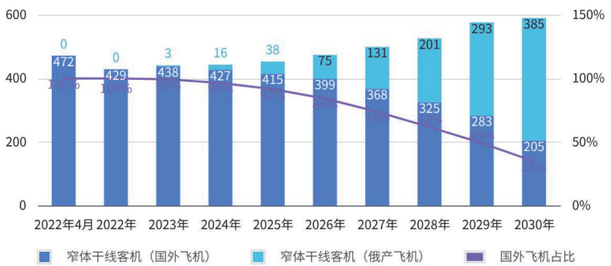
	座级（人）	总计	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
伊尔 -96-300	237～300	14	1	1	0	2	1	2	2	3	2
MC-21-310	181～211	270	0	0	0	9	31	36	50	72	72
图 -214	150～215	115	1	1	1	4	7	17	28	28	28
SJ-100	98～103	142	0	0	0	0	30	28	28	28	28
伊尔 -114-300	64～68	51	0	0	0	0	3	12	12	12	12
总计		592	2	2	1	15	72	95	120	143	142



▲ 图 1 | 2022 年～ 2030 年宽体客机机队构成

输的主力，应以国产飞机取代 A320 系列和 737 系列，目标为到 2030 年交付国产飞机 385 架，其中 MC-21 达到 270 架，图 -214 为 115 架。窄体机队中国产飞机比例达到 65%。

MC-21 毫无疑问是俄罗斯民用航空工业领域最重要的项目之一。2022 年《规划》要求 2024 年开始交付首批 MC-21，但时至今日这款飞机尚未完成适航取证。全国产化机型于 2025 年 10 月完成首飞，预计最快 2026 年底才能完成适航取证。但俄罗斯对 MC-21 的交付要求截至 2024 年 4 月尚未调整，仍是最初设定的 270 架，这意味着 2027 年开始平均每年需交付 60 ～ 70 架，交付任务过于艰巨。俄罗斯工贸部明确表示，会在 MC-21 等关键型号取证后，再次调整《规划》，大概率会减少 MC-21 交付总量。然而，即使减少，对一个新型号来说交付压力仍然相当大。

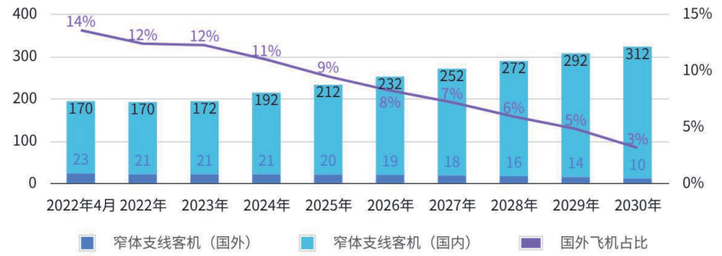


▲ 图 2 | 2022 年～ 2030 年窄体客机机队构成

此外，由于国产复合材料、国产发动机超重等原因，MC-21-310 国产版增重 5.75 吨。2025 年 11 月，俄罗斯已确定将飞行航程从 5100 公里降至 3830 公里。为满足长距离飞行供给，确定开发 MC-21 的缩短版 MC-21-210，设计座级为 140 人（MC-21-310 座级约 175），航程超过 5000 公里。2024 年 4 月已启动 MC-21-210 的初步设计，工贸部拨款 19.4 亿卢布用于初步设计工作，要求 UAC 2025 年底前完成方案设计。俄罗斯联邦第一副总理曼图罗夫表示，相关工作预计 2029 年完成。

支线飞机机队扩张，继续减少外国飞机比例，主要机型为 SSJ-100 的全国产化版本 SJ-100。机队飞机数量将从 2022 年的 170 架增加为 312 架，增长 83%，旨在作为 MC-21 窄体客机的补充，成为俄罗斯国家航空运输网络中的第二主力。

SJ-100 是俄罗斯民机领域第二大重要项目，然而 SJ-100 的取证以及批产进



▲ 图 3 | 2022 年～ 2030 年支线客机机队构成

度同样不及预期。在最初版本《规划》中，应在 2023 年开始首批交付，实际至今未完成适航取证，计划最快于 2026 年完成适航取证。同时，相较 2022 年发布的版本，2024 年发布的最新版本《规划》中并没有减少交付总量，至 2030 年需交付 SJ-100 142 架，即从 2027 年起每年交付 35 架。但俄罗斯机队是否需要这么多 SJ-100？市场已经有了答案：2024 年 6 月，俄航已明确表示，计划放弃采购 89 架 SJ-100 与 40 架图 -214，转而采购更多 MC-21。

重点任务与国家投入

《规划》的目标是维护俄罗斯航空运输联通性，保障飞行安全和航空运输业技术主权，主要任务包括：

首先是民机国产化。包括国产飞机的研制、适航与批产，发动机等零部件的配套交付；建立国产飞机配套售后服务网络；基础设施建设和技改，用于提升产能，保障交付。其次是补贴租赁公司和航司，降低其飞行器采购、租赁、维护成本。第三是人员培训，重点保障飞行员、维修人员的规模和专业性。第四是维持国外飞机适航性以保障民航运输安全。

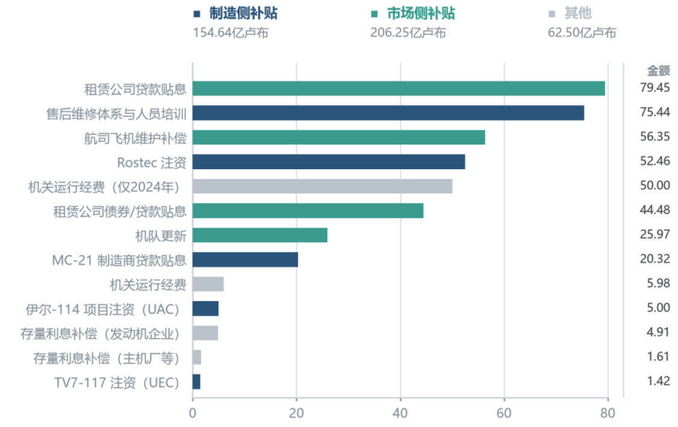
此外，《规划》中还明确采取的手段包括向 11 家维修单位授予维修许可，尽快建立 C、D 检等维修能力；部分维修可以去境外进行；当前储备耗材和零部件仅可支持 2 ～ 5 个月，需尽快生产国产轮胎；允许使用美国、加拿大、巴西、中国、英国、土耳其、阿联酋等 13 个国家地区适航认证的零部件；研制生产国外飞机配套零部件，包括耗材（垫片、密封件等）、除冰液、燃料滑油等。

为实现上述目标，俄罗斯进行了大量资金投入，主要为政府财政预算和国家福利基金。政府财政预算主要通过《俄罗斯联邦“航空工业发展”国家规划》支出。2022 年起，每年经费规模为 340 亿～ 490 亿卢布。该渠道约四成的经费用于补贴制造企业，五成的经费则是用于补贴租赁公司和航司，还有少量经费用于政府管理支出等。以 2024 年预算数据为例，423.39 亿卢布预算中，37%（154.64 亿卢布）用于补贴制造侧，项目包括注资企业进行售后维修体系建设和人员培训（75 亿卢布）、向俄罗斯技术集团（Rostec）进行注资补贴（52 亿卢布），以及针对 MC-21、伊尔 -114、TV7-117 发动机的定向补贴（合计 27 亿卢布）；49%（206.25 亿卢布）用于市场侧补贴，其中租赁公司补贴 124 亿卢布、航司飞机维护补贴 56 亿卢布、机队更新补贴 26 亿卢布。

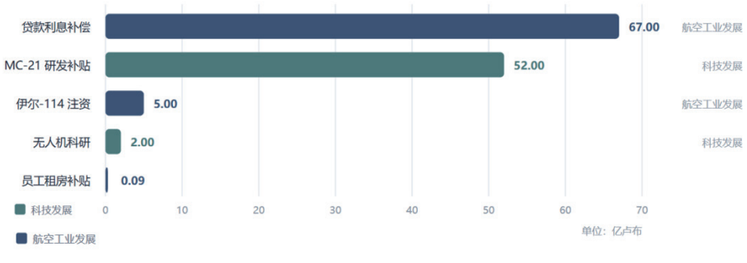
政府通过《俄罗斯科技发展国家规划》提供科研经费补贴，每年约 390 亿卢

布左右，用于国产飞机和配套零部件的研制。通过以上两个渠道，企业获得政府补贴。以 UAC 为例，2024 年公司政府补贴合计约 126 亿卢布，其中通过《俄罗斯科技发展国家规划》获得 MC-21 研发补贴 52 亿卢布、无人机科研 2 亿卢布；通过《俄罗斯联邦“航空工业发展”国家规划》获得贷款利息补偿 67 亿卢布、伊尔 -114 注资 5 亿卢布，另获员工租房补贴 0.09 亿卢布。

另一个补贴途径是国家福利基金提供低息贷款。俄政府在 2023 年至 2024 年期间，向 Rostec 提供了 2837.87 亿卢布的低利率（1.5%）贷款，注资 Rostec 旗下五个主要民机工业企业——联合飞机制造集团（UAC）、联合发动机制造集团（UEC）、无线电电子集团（KRET）、航空机电系统集团（Technodynamic）、联合仪表公司（OPK），用于国产民机及配套零部件的技改与产线建设、配套零部件的国产化替代研制，以及飞机售后服务体系建设。政府明确相关贷款可以以同等条件（1.5% 利率）将资金转贷至配套供应商。这意味着资助不仅覆盖主机厂，同时覆盖民机产业链上其他供应商。



▲ 图 4 | 2024 年《俄罗斯联邦“航空工业发展”国家规划》预算



▲ 图 5 | UAC 2024 年获国家资助内容及金额

根据协议，企业每 3 个月支付 1 次利息，设 2 年宽息期，15 年后（2039 年）还本，政府通过“航空工业发展”国家计划提供贷款利息补贴。俄政府认为，俄民机发展将分为建设期和运营期。2023 年～ 2030 年进行国产民机的研制、生产和产能扩充，该阶段前期资金主要来自于资金支持，2025 年之后国家财政逐渐退出，转为企业自行进行融资。2031 年开始进入运营期，企业应用营收偿还早期国家提供的贷款。

第三则是企业层面的调整与整改。2023 年，工贸部与俄罗斯技术集团宣布国产飞机交付时间延后。政府不满意企业进展，裁撤了 UAC 集团一把手，并要求企业进行管理提升。2024 年 11 月，UAC 新总经理上任后，宣布将民机项目管理权从雅科夫列夫公司收归至集团总部，UAC 的一把手直接兼任雅科夫列夫公司负责人，同时 UAC 副总兼任图波列夫公司一把手。此外，MC-21 项目负责人由前 SSJ-100 项目负责人继任。

为整合资源，新的管理层还提出了“一个 UAC”的治理改革计划，采用目标矩阵管理模式。具体举措包括：继续建立“专业化中心”体系，包括发动机短舱、挂架、机身壁板（伊尔 -114 流水线和 MC-21 两条 U 形生产线投产）、舱门、铸造（3D 打印砂型）、标准紧固件集中供应。对集团旗下设计局进行整合。2024 年 10 月，将雅科夫列夫公司下负责 SJ-100 的支线飞机分部设计局整合到工程中心，将集团设计能力整合至一处。重新调整试验试飞机构，2024 年 4 月，飞机试验综合体被并入雅科夫列夫公司。



▲ 来源： media.www1.ru

总体来看，这些年俄罗斯民用航空产业国产替代工作取得了显著的成效，但也暴露出了一些问题。最突出的问题是激进的目标导致资源浪费，进而使得国家层面的战略目标无法实现。尽管企业在关键型号国产飞机交付不及预期上存在不可推脱的责任，但国家层面制定的战略目标也不尽合理。例如，《规划》中对俄罗斯国内国产飞机需求量的统计，是通过向航司发放问卷，询问需要的飞机数量得来的。2024 年初，俄工贸部对 UAC 进行外部审计，审计认为俄罗斯旅客规模约为每年 1.13 亿人次，机队数量 880 架即可满足需求，为替代国外飞机，每年需交付国产飞机 50 ～ 60 架，而非规划中的 140 ～ 270 架。国家和企业已投入了大量资源扩产能，如果最终市场对飞机需求不足，将导致产能浪费。同时多个急难险重型号任务叠加，也将导致关键需求无法得到满足。

此外，国家补贴不是长久之计，企业需要建立可持续发展能力。每年国家财政向 UAC 注资百亿卢布，贷款更是已达到千亿。然而，国家财政支持会不断撤出，企业需要思考可持续经营能力，不断评估订单量，避免产能过剩，并进行系统性降本工作。从这些角度出发，产品研制只是俄罗斯国产替代计划中的第一步，后续如何进行合理规划仍然有待进一步探索与明确路径。



从0到1：俄罗斯民用航空发动机实现系列化发展

▲ 来源：UAC

文 | 李蕴　编辑 | 庄敏

2026 年，俄罗斯 PD-14 发动机随首架量产型全国产 MC-21-310 飞机完成首飞，PD-8 发动机取得型号合格证并交付首批 2 台量产型发动机，PD-35 发动机及其衍生型号推进研制。可以认为，俄民用航空发动机的国产替代已经取得了重大突破，初步形成了系列化产品，未来或可有效支撑俄国产干支线飞机的自主化发展。

研制进展

俄罗斯民用航空发动机自主发展不是短期的“全面替代”，而是以 PD-14 发动机为技术和产业化起点，开发通用核心机、派生关键技术，根据不同装机对象，系列化发展 PD-8、PD-35 及其衍生型号，逐步形成覆盖研制、试验、材料、制造、适航、维保的自主发展体系，探索出一套民用航空发动机正向设计流程。

以 PD-14 发动机为核心，建立俄现代民用航空发动机自主研发基础。PD-14 发动机于 2008 年正式立项，起飞推力 14 吨，2012 年完成首台验证机地面台架试验。2014 年乌克兰克里米亚危机爆发后，美西方对俄航空技术禁运逐步升级，俄加速 PD-14 发动机研发。2015 年，PD-14 发动机在伊尔 -76LL 飞行台完成首飞，2018 年取得俄型号合格证，2020 年配装 MC-21-310 飞机成功首飞，2021 年获得生产许可证。其间，俄对 PD-14 发动机持续开展了超 20 项设计修改，改善发动机运行条件并提升寿命。2025 年，PD-14 发动机开启批量生产交付，2026 年首架量产型 MC-21-310 飞机完成首飞，标志着俄基本突破美西方对其大型民用航空发动机的技术封锁。此外，俄还在该发动机基础上分别研制减推型 PD-14A（起飞推力超 12 吨）与增推型 PD-14M（起飞推力 15.6 吨），但披露信息较少。

PD-14 发动机先后攻克了低污染排放燃烧室设计、钛合金空心宽弦风扇叶片制造等多项关键技术，开发了单晶铼钌合金、镍基高温合金等多种新材料。同时，PD-14 发动机采用了单元体结构，总计 14 个单元体中，7 个单元体可在发动机在翼条件下更换，降低发动机维护成本、提升飞机运行时间。其中，相当一部分关键技术、新材料、单元体设计理念与标准可在其他发动机上移植复用，缩短了研制时间，有效抵消了美西方制裁造成的不利影响。

目前，PD-14 发动机已进入批产扩产阶段，MC-21-310 飞机适航审定也完成了 50% 以上，预计 2027 年至 2028 年有望进入商业运营。



▲ 来源：air-journal.fr

PD-14 发动机的发展可用三个“第一”概述：一是该发动机是苏联解体后俄自主研制的第一型大型民用航空发动机；二是俄第一次系统建立起民用航空发动机材料、制造、试验和配套产业能力；三是俄第一次以“通用核心机 + 系列衍生”的方式规划后续产品。通过该项目，俄成功带动了本土航空发动机行业发展，缩小了与国际先进技术水平的差距。

以 PD-8 发动机为牵引，推动俄民用航空发动机自主化向产业化迈进。PD-8 发动机于 2019 年前后正式立项，起飞推力 8 吨，主要应用于 SJ-100 支线飞机的国产替代。2022 年，PD-8 发动机首台原型机完成地面台架试验，2023 年完成首次飞行试验，随后进入密集试验与认证。2025 年，该发动机配装俄国产 SJ-100 支线飞机首

飞。2026 年 5 月，PD-8 发动机完成全部适航认证试验，总试验时间超 6500 小时；6 月，该发动机取得型号合格证。

PD-8 项目广泛吸收了 PD-14 研发过程中形成的设计方法、技术方案和生产经验，采用大量通用化、标准化零部件，实现了不同推力等级、不同应用范围发动机之间的技术继承，较传统民用航空发动机研制时间大幅缩短。

该项目还开发了新型超声速高压涡轮级、新型喷嘴导向叶片、耐高温镍基合金等 17 项新技术，并广泛运用仿真建模与分析技术，建立数字孪生体，在虚拟环境中开展大量测试，并采用全国产电子控制系统及电子元器件。

目前，PD-8 发动机已进入量产交付阶段，俄联合发动机公司（UEC）投入了约 100 台生产设备，保障 PD-8 的零部件供应，首批 2 台量产型发动机已于 2026 年 8 月交付。

PD-8 发动机项目不仅有力支撑了 SJ-100 支线飞机的全国产化，更通过继承 PD-14 发动机项目的技术和工程经验，显著缩短了新型号的研发周期，首次验证了已有设计、技术、理念跨型号复用的研发模式。

▼ 来源：UEC



以 PD-35 发动机为拓展，系列化推进宽体客机、大型运输机动力自主。PD-35 发动机于 2017 年正式启动研制，起飞推力 35 吨，2021 年完成核心机试制并开展测试，2024 年完成技术验证机第一阶段地面台架试验，最高推力多次超 35 吨，验证了该发动机的技术方案可行。2025 年，启动技术验证机第二阶段试验，重点评估采用新型材料制造的高压压气机、高压涡轮叶片、低压涡轮轴等性能。该发动机目前仍处于技术验证阶段。

在技术路线方面，PD-35 发动机大量沿用 PD-14 发动机形成的技术体系，并新开发 20 余项关键技术，包括复合材料、增材制造技术等。

但与 PD-8 不同，PD-35 发动机项目不仅是研制一款用于单一机型的发动机，而是成为俄验证大推力民用航空发动机新设计、新材料、新工艺，推动相关技术由试验向工程应用转化的重要平台。一方面，通过研制 PD-35 发动机填补俄大推力民用航空发动机自主研制的空白，积累工程经验；另一方面，以该项目形成的技术体系、人才团队等作为基础，开发推力范围 24 ～ 50 吨的系列衍生型号，完善产品谱系。

PD-24、PD-26、PD-28（对应起飞推力 24 吨、26 吨、28 吨）是俄基于 PD-35 发动机先后提出的三型衍生发动机，主要面向军用运输机、大型民用飞机等平台。

2025 年，随着俄对上述平台的不断深化论证，提出将 PD-26 发动机作为主要衍生型号启动研制。该发动机基于 PD-35 的通用核心机，采用模块化、标准化设计理念，大量使用增材制造、陶瓷基复合材料、叶片主动冷却系统等新技术，预计配装伊尔 -100 重型军用运输机（有效载荷约 100 吨）和远程宽体飞机。2025 年 9 月，该发动机完成初步设计。

2026 年，在第 20 届俄罗斯风险投资论坛期间，图波列夫公司现场展出了 MC-21-500 飞机和 PD-24 发动机的模型，但未公布相关研制进展。MC-21-500 飞机是 MC-21 系列飞机的最新加长改进型，可搭载 270 名乘客，航程预计达 9000 千米。



▲ 来源：aviation21.ru

政策保障

俄罗斯建立了由国家战略、产业战略、企业发展战略等共同构成的多层级保障体系，从上至下有力支撑了俄民用航空发动机产业的自主发展。

将航空发动机自主发展纳入国家安全与科技自主框架。俄罗斯工业体系长期存在技术基础更新不足、产业结构不合理、创新能力欠缺等结构性问题，尤其是在 2014 年乌克兰克里米亚危机爆发后，俄高端设备、关键零部件和先进技术进口面临严峻挑战。在此背景下，俄于 2014 年先后出台《工业发展和提高工业竞争力国家计划》《工业进口替代促进计划》，明确在重要行业内开展国产替代，通过改变产业结构、发展先进科技与高端制造能力，提高自主保障水平与工业竞争力。

2015 年，俄成立政府进口替代委员会，统筹协调各政府机构、地方政府、科研机构和工业企业，将进口替代目标与政府采购、国有企业采购、财政补贴、研发支持和投资项目相结合，形成从政策规划到产业实施的组织保障。该委员会在第一次全体会议上明确指出，自主研发先进航空发动机是“最具挑战性”的任务之一。

在政府进口替代委员会成立文件中，首任委员会主席为俄时任总理梅德韦杰夫。2025 年，俄进一步将政府进口替代委员会改组为政府工业委员会，在保留原委员会职能基础的同时，将职责扩展至工业政策、技术领先、产业供需协调和国际竞争力产品培育。

此外，俄还于近年先后发布《俄罗斯联邦制造业发展综合战略》《俄罗斯联邦国家安全战略》《2030 年前技术发展概念》等多份战略性文件，将航空发动机直接纳入事关国家安全与科技自主发展的战略性产业。

逐步完善航空产业政策体系，全面支撑航空发动机研制。在国家战略总体框架下，俄逐步形成了较为完整的航空产业政策体系，核心文件包括《俄罗斯联邦“航空工业发展”国家规划》《俄罗斯联邦 2030 年前航空运输行业发展综合规划》《2030 年前航空行业发展综合规划》（2024 年新版）等。这些文件并非彼此

独立，而是随形势变化不断演进、完善，覆盖航空产业全链条。

2014 年，俄发布《俄罗斯联邦“航空工业发展”国家规划》（以下简称“国家规划”），下设飞机制造、航空发动机制造等多个子规划，涉及 PD-14、PD-8、PD-35 等国家重点航空发动机项目与能力建设相关目标。2022 年，发布《俄罗斯联邦 2030 年前航空运输行业发展综合规划》，该规划将《国家规划》整体纳入，并明确提出了目标任务、航空运输业现状评估和发展预测、航空工业发展评估、飞行人员需求、评估制裁对运维的影响等，并要求相关企业的发展战略与该规划衔接。此后，该规划经多次修订，于 2024 年形成新版《2030 年前航空行业发展综合规划》，调整了主要任务目标与时间节点。

上述规划提出了一系列具体保障措施，例如：建立集成化设计、研制、生产管理系统，将实物资产数字化，提升管理效能；大范围培训研发人员，推动企业数字化转型；全流程广泛应用数字孪生技术；围绕核心企业，建立涵盖中小企业、大学、科研组织、工厂的产学研集群；引入政府激励制度，鼓励企业参与飞机及发动机全周期基础和应用研究；制定税收减免、补贴贷款利率、加大预算拨款等政策，提升各级产业链研发积极性，减轻企业经营负担；与友好国家在零部件、适航认证、运维保障等方面开展合作。相关措施基本涵盖了航空装备与航空发动机研发、试验、批产、装机、运营和维修的全寿命周期。

发动机企业资源整合，落实自主发展目标。在国家和航空产业发展战略指导下，俄依托国家技术集团（Rostec）对航空发动机产业实施集中整合，将联合发动机公司（UEC）纳入统一组织体系，由其统筹国内主要航空发动机设计、制造和服务企业，集中研发、生产和投资资源。

▼ 来源：https://media.ixbt.site/



在此基础上，UEC 将国家自主发展目标具体落实到技术研发和产品谱系建设，协调下属企业联合开展工作。UEC 制定了公司到 2030 年的科技发展战略，以及到 2036 年的行业前景，包括开发 3 型技术验证机在内的 16 项重点任务。这一模式使企业战略与国家产业战略形成衔接，将自主发展进一步夯实为核心技术自主、产品系列自主和产业化能力自主。



▲ 来源：https://media.ixbt.site/

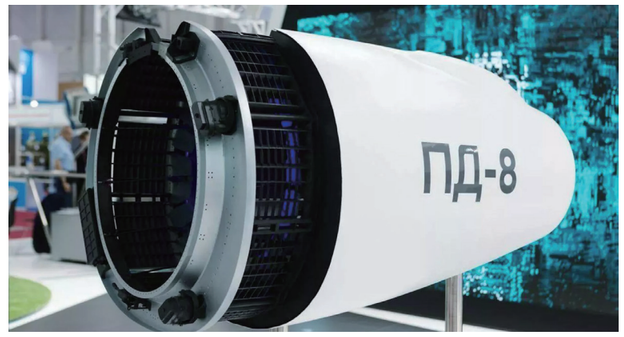
思考与启示

俄民用航空发动机自主发展道路清晰、执行有力，呈现出以下突出特征。

第一，战略主动与危机驱动相互强化。PD-14 发动机在俄被大规模制裁断供前就已立项，其研发逻辑并未停留在应急替代层面，而是将外部压力转化为重构国家航空动力体系的战略契机。国家战略、产业规划和企业战略层层衔接，使俄民用航空发动机自主化从“补短板”上升为“保安全、争主权、塑能力”的长期工程，总体上具有强国家意志、长周期投入和抗短期市场波动的特征。

第二，体系化培育市场产品。俄以 PD-14 型号工程为核心，完成了突破关键技术、培养工程人才、筑牢材料、制造、试验等工业基础能力相关任务，后续 PD-8、PD-35、PD-24、PD-26、PD-28 等发动机则进一步将前期形成的能力向不同推力等级延伸。这种体系化、模块化、标准化的设计思路，摊薄了研发风险、缩短了研制周期，在资源受限和市场不足条件下，具有较高的技术经济合理性。

第三，形成了全周期覆盖、动态迭代的保障体系。俄将航空发动机自主化分解为产业整合、可考核的规划任务、采购需求、财政支持等方面，使政策不停留于宏观倡导，而是贯穿型号发展的全寿命周期。同时，



▲ 来源：cdn.sputniknews.cn

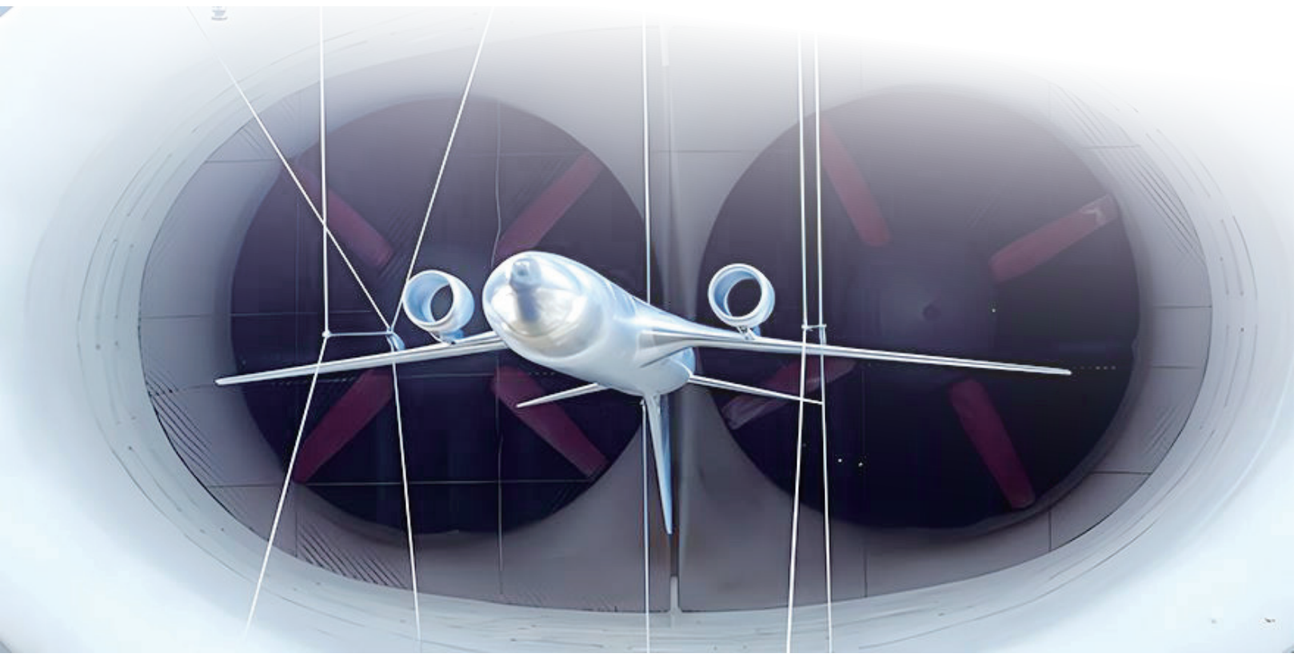
依据制裁态势和项目进展，滚动修订规划、调整时间节点，既保持了政策连续性，又增强了执行弹性，形成了对航空发动机系列化发展的持续制度支撑。

俄民用航空发动机的自主化已越过“有无”关口，到达关键分水岭，只有将批产一致性、全寿命周期成本、维修保障、客户支持等商业运营做扎实，切实具备市场竞争力，这条自主发展道路才算真正走通。

俄罗斯面向下一代飞机的技术储备

文 | 苏霓 贾雨晨　编辑 | 庄敏

当前，俄罗斯航空工业在加速推进国产替代的同时，还有一项重要的工作是在政府的主导和支持下，为下一代干线飞机研制进行技术储备。其中，茹科夫斯基国家研究中心（NRC）整合旗下多家俄科研机构，于 2023 年开始了名为“Integral-MS”的项目。该项目计划投入 79.2 亿卢布（约 6.5 亿人民币），相关预研技术将在 2030 年前后用于新一代干线飞机。



▼ 来源：TsAGI

项目背景

俄罗斯航空业的布局大致可分为科研机构、设计局、主机厂三类。其中俄罗斯中央空气流体力学研究院（TsAGI）、俄罗斯西伯利亚航空研究院（SibNIA）、俄罗斯中央航空发动机研究院（CIAM）、俄罗斯航空系统研究院（GosNIIAS）等苏联时期成立的老牌科研机构在俄航空工业中发挥着至关重要的作用。2014 年，为了“集中力量办大事”，俄罗斯工业和贸易部设立茹科夫斯基国家研究中心（NRC）作为管理机构，职责为制定战略方向，分配科研资金，组织开展科研工作。2022 年，经过长期论证，NRC 提出了 3 个航空战略性综合科技项目 (KSTP)，Integral 即为其中之一，另外两个项目为超声速民机项目和高速旋翼机项目。

Integral 项目全称为“为制造有前途的新一代长途和支线飞机建立科学基础”，旨在为下一代干线、支线飞机进行技术储备。目标是在 2027 年完成一架新构型干线飞机验证机、一架支线飞机验证机的生产制造，以及其他关键技术的验证产品。项目投资总金额为 224.4 亿卢布，包括 4 个子项目：干线飞机关键技术（Integral-MS）、支线飞机关键技术（Integral-RS），以及 2 个干线飞机、支线飞机的共性技术研发项目，分别是辅助驾驶、智能飞行相关的智能技术项目、混电相关技术项目。本文主要聚焦 Integral-MS 项目。

新飞机构型已明确

Integral-MS 项目全称为“研究长途飞机非传统空气动力学方案的有效性，同时考虑新技术和替代燃料的使用”。目标为打造载客量更大、能耗更低，使用新布局的未来干线飞机。为实现该目标，项目主要聚焦 4 个方向：采用新气动布局，改善飞机气动性能，减少油耗；使用复合材料、采用新的结构设计减轻飞机重量；降低地面噪声；提高乘客舒适度。俄罗斯中央空气流体力学研究院为牵头研制单位。

当前项目已经进行到第二阶段。第一阶段项目周期为 2023 年至 2024 年，已投入 25.8 亿卢布；第二阶段（代号 Integral-MS-2）周期为 2025 年至 2027 年，预计投入 53.4 亿卢布。在已经结束的第一阶段项目中，TsAGI 明确了新的布局方案，计划 2027 年完成验证机制造，其中项目详细技术指标如表 1 所示。

▼ 表 1 | Integral MS 二期项目（2025 年至 2027 年）规定研究内容及应达到的技术成熟度

	技术	目标	2025 年技术成熟度	2027 年目标技术成熟度
1	采用翼身融合的中置机翼，形成气动布局和结构方案	完善气动特征和结构	3	4
2	创建椭圆形横截面的机身结构	改进飞机的结构动力布局，为乘客提供更舒适的机舱环境	2	4
3	使用增材制造技术制造轻质和耐用的结构件，包括具有热塑性基体的材料	减轻飞机重量，增加飞机使用寿命	1	3
4	创建金属基复合材料对接组件，以实现更高的结构强度和可靠性	减轻飞机的重量	3	4
5	降低机械化机翼流动噪声，包括机械化元件附近的流动噪声、发动机射流与襟翼相互作用产生的噪声	满足国际民航组织对未来干线飞机噪声的要求	2	3
6	主动减震、减少载荷	提高重量效率并减少飞机结构的损坏	4	5
7	动力装置构架采用混合金属基复合材料	减轻飞机的重量	2	3
8	开发具有高燃油效率的小型燃气涡扇发动机（发动机用于试验研究）	开发国产节能小型发动机	3	4



▲ 来源：TsAGI

根据 TsAGI 已经公布的信息，俄罗斯新一代飞机的设计航程 8000 ～ 9000 公里、座级 220 ～ 250 座、巡航速度 0.82 马赫。飞机构型方面，基本确定采用椭圆形机身、中置机翼、翼身融合布局。同时，根据俄罗斯工贸部要求，飞机在设计阶段就考虑复合材料的应用，拟采用金属复合材料制造连接件、使用增材制造技术制造轻质和耐用的结构件等，全俄航空材料研究院（VIAM）参加了相关研究。

动力系统方面，2023 年茹科夫斯基国家研究中心提出拟采用推力 24 吨的 PD-24 发动机。然而由于俄发动机研制进度不及预期，后续可能会采用 PD-35，或者 PD-35 系列中的 PD-26 发动机作为动力装置。

此外，俄工贸部还明确提出新一代干线飞机应考虑使用新能源，如混动系统或氢能源。为此，TsAGI 在未来干线飞机外形设计时考虑了氢能源，提出椭圆形机身空间更大，未来可用于放置氢动力装置。但 Integral 项目框架中，并没有对混动、氢能技术本身投入大量资源，只在第二阶段的 Integral-Electron 中进行了少量布局，研究高压直流供电系统、高功率电动涡轮增压器、混动涡轮发动机。

至于机身为何选择椭圆形机身，这并不是 TsAGI 的突发奇想，而是苏联时期以来俄罗斯航空界一直没放弃的研发方向。椭圆形机身最早可追溯到上世纪 90 年代苏联图波列夫设计局。图波列夫设计局在 20 世纪 90 年代就提出了一批下一代客机方案，包括基础款的图 -204、翼身融合的图 -404，以及椭圆形机身的图 - 304。图 -304 设计航程 10000 公里，当时试图凭借航程与波音 777 一较高下。但当时时局动荡、缺乏政府支持、市场偏好欧美飞机等原因，该项目和其他许多俄罗斯民机项目一样，未能得到进一步发展。2010 年左右，图 -304 项目负责人瓦伦丁·克里莫夫的儿子亚历山大·克里莫夫组建了初创公司，重启图 -304 方案，并将项目命名为 Ecojet。根据公司 2017 年公布的信息，飞机初步设计起飞重量 140 吨、可搭载 300 名乘客、航程 3500 公里。TsAGI 参与了飞机气动构型、结构强度的大量研究。后由于制裁缺乏可用的发动机，项目进入停滞期。

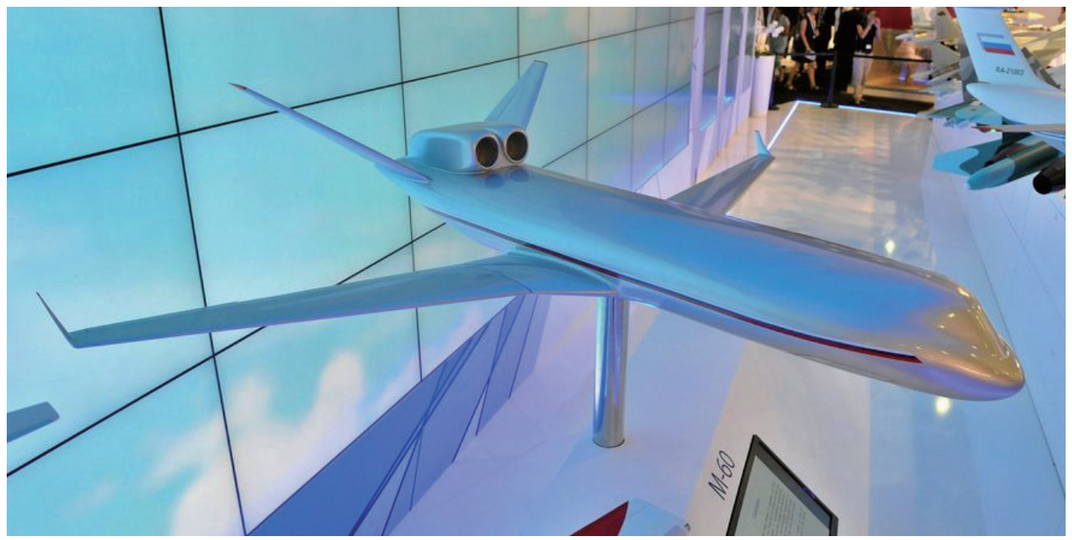
联合飞机制造公司（UAC）同样对椭圆机机身表示了兴趣。在 2017 年巴黎航展上，UAC 展示了 M-60 客机概念机模型验证机。椭圆形机身大量采用复合材料，搭配高展弦比机翼和 V 型尾翼，发动机置于机尾上方。概念机初步设计为 50 座级、三通道，航程可达 4800 公里。前舱门宽大，也可作为货机。模型验证机由 TsAGI 和米亚西舍夫设计局联合研发，为米亚西舍夫设计局开发的 M-60 系列飞机的一部分。

除气动外形外，椭圆布局的另一个重点是结构方案设计。相比圆形和双气泡机身方案，椭圆形机身布局存在内压分布不均的问题，需要进行结构方案优化。同时，为保证经济性，在保证结构强度的同时还要尽可能减轻机身重量。

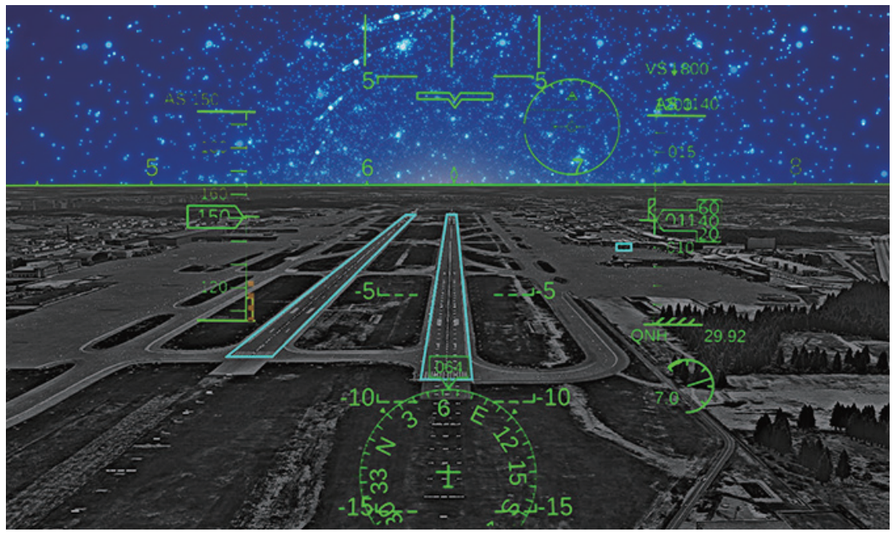
在 Ecojet 项目中，TsAGI 在 M-60 的基础上，重新调整了结构方案，飞机机身长度 46 米左右，三通道设计，通道宽度不小于 0.5 米，座间距不少于 0.81 米。同时，针对内部压力问题增加了顶部横梁，利用客舱、货舱地板及横梁吸收内部载荷。据悉，Integral-MS 结构设计思路类似，但实际设计参数尚未公开。

新技术与新能源布局

此外，Integral 项目还强调了智能飞控技术在新一代干线飞机的应用。相关工作在“Integral-T”（2022 ～ 2024 年）子项目下由俄罗斯航空系统研究院（GosNIIAS）牵头研究，项目经费为 28.9 亿卢布。目前，GosNIIAS 已完成了一套分布式高容错飞机控制系统架构的开发工作，可在所有飞行模式下对飞



▼ 来源：UAC



▲ 来源：GosNIIAS

机进行智能控制，并在机场区域对飞机进行安全控制，技术成熟度达到4～7级。

具体内容包括：采用神经网络算法，检测识别机场跑道标记和机场上的物体；开发测试自动改道功能。滑行路线修改后，信息可以通过地面运营商更新至飞机，飞机可自动改道，或可远程控制飞机自动改道；机载导航和监控系统方面，在惯性光学导航的基础上，采用多频卫星导航和着陆模块确定飞机坐标位置，确保获得完整信息。

2025 ～ 2027 年，项目计划投入 25 亿卢布，开发 5 类技术：自动飞行控制、机组人员智能支持技术、紧急情况下的辅助自动飞行、机载计算平台研发、机载设备状态数据采集与统一，2027 年技术成熟度预计达到 5 ～ 6 级。同时，考虑到规划中机上使用智能算法相关技术的技术成熟度已到 5 ～ 6 级，俄罗斯将同时准备相关法规，弥补当前国内缺乏对机上使用智能算法的空白，帮助后续技术的开发和实施。

同时，GosNIIAS 还在开发 VR 系统（GosNIIAS 称其为外部视觉系统）和语音助手，拟用于未来超声速民机、MC-21 等民机型号，以及未来干线、支线飞机。

在与主机厂的协同方面，项目的主导机构 NRC 主动与未来新技术的使用方，即俄罗斯联合航空制造集团公司（UAC）沟通，在立项、验收时均邀请后者参与。同时，Integral 项目经费来源于俄罗斯工贸部《俄罗斯联邦“航空工业发展”国家规划》这一渠道，因此俄工贸部也发挥一定管理与协调作用。然而，当前技术方案多大程度使用在下一代民机上还将由 UAC 评估并决定。因此，2027 年项目结束后，UAC 如何使用项目成果值得关注。

航空制造



▲ 来源：空客

美欧下一代窄体客机竞争格局对比与分析

文 / 刘雪蓉 杨敏 张洋 冯鲁文　　编辑 | 庄敏

近日，美国《航空周刊》分别采访空客公司新任首席执行官纪尧姆·福里和波音公司首席执行官凯利·奥特伯格，重点聚焦下一代窄体客机（NGSA）研发计划。在采访中，空客表示计划研发 A320 换代机型，公司内部代号 eAction，预计将在 2030 年正式立项，2037 ～ 2038 年投入运营，但未披露其他细节；波音则认为下一代窄体客机在市场、资金、产能和技术等方面准备尚不成熟，当前不急于推

出新机型。

总体来看，窄体客机换代机型发展，从最初波音的“先声夺人”到现在空客的“高调披露”，两大巨头在同一时间段的表态形成了表象上的“反差”。但进行综合研判后就可以发现，美欧下一代窄体客机竞争格局已初现端倪，双方都已确定采用新研换代产品这一发展策略。区别在于，空客锚定了本世纪 30 年代末投入运营这一目标节点，波音则可能更晚一些。

空客“跨代产品”的技术研判

对于新一代窄体客机的研制战略选择，空客明确将新研 A320neo 家族换代产品。新一代飞机的燃油效率预计较现役 A320neo 家族提高 20% ～ 30%，同时支持可持续航空燃料（SAF）运行。总体看，eAction 将是渐进式发展而非颠覆性跃升的机型，采用传统总体布局，但将应用先进的气动设计、动力装置、材料结构和制造工艺等。

为锚定 21 世纪 30 年代末投入市场运营这一目标节点，空客表示，预计 2026 ～ 2029 年为下一代窄体客机预研收敛期，2027 年前确定发动机供应商和选型，2030 年正式启动整机研制，2037 ～ 2038 年投入商业运营。总体来看，这一时间表对于空客来说，既能“先发制人”又能“从容推进”。

窄体客机要实现“跨代”，除了继续满足高安全性和高舒适性两大核心要求，重点要在以燃油效率为核心的运营经济性、以排放水平为核心的环境友好性方面实现显著提升。气动布局方面，空客可能采用超高展弦比折叠式机翼。通过“明日之翼”计划，空客设计、开发和试验了超高展弦比海鸥形薄机翼与多段式折叠翼梢，飞行翼展（全展翼展）下的展弦比较 A320neo 增大 50%（展弦比 15，A320 为 10），有望减阻 5%，使气动效率提高 20% ～ 25%。目前，空客已生产了 3 架 17 米长的全尺寸机翼地面试验机，并计划 2029 年在 A321neo 上对实验性机翼延伸段进行飞行测试。

动力装置方面，CFM 国际公司的开式转子发动机是最具竞争力的方案。A320neo 发动机长期采用 LEAP-1A 和 PW1100G 双供应商、两型配置（由购机客户选择）。综合研判，下一代窄体客机动力装置首选方案仍将是 RISE 项目研发的开式转子发动机，同时保留普惠新一代齿轮传动风扇发动机备选路线，两条路线同步开展地面试验，2027 年确定最终选型。其中，RISE 项目研制的开式风扇发动机性能指标明确、预期进展也较快。截至 2026 年 7 月，RISE 项目已完成约 500 次测试任务，积累了 3000 多次耐久循环测试，其中包括开式风扇、紧凑型核心机和混合动力系统等先进架构的测试，并已完成开式风扇和紧凑型核心机模块设计方案评审。CFM 国际公司计划在 2030 年前完成飞行试验，30 年代中期投入使用。

普惠正孵化新一代齿轮传动风扇发动机的关键技术，但预期投入使用时间较晚。普惠通过齿轮传动风扇优势（GTF Advantage）计划持续发展其齿轮传动风扇发动机，当前重点是通过全新设计热端部件、采用双层壁结构与新型冷却孔等技术路线提升耐用性。2026 年 6 月 A320neo 整机配装改进型齿轮传动风扇发动机通过欧洲航空安全局（EASA）的适航认证，推力增大 4% ～ 8%，在翼运行时长为上一代齿轮传动风扇发动机的 2 倍，支持可持续航空燃料运行。普惠正以此为基础为第 2 代齿轮传动风扇发动机积累技术数据，但是预测该跨代产品推迟至 2040 年投入使用。

材料结构方面，重点为复合材料及相关的高效率、低成本自动化制造与检测技术。A320 复合材料主要用于平尾、垂尾，按重量计算约占机体的 15%；宽体客机 A350 则用于机翼等主承力结构，重量占比达约 53%，窄体客机仍有巨大减重空间，并很可能直接采用新一代复合材料结构，相比现役一代可减重 10%，与金属结构相比则减重 20% ～ 30%，由此空客下一代窄体客机的复合材料占比有望突破 60%。



▲ 来源：波音

空客供应商一致认为下一代窄体客机机翼极可能采用复合材料，而空客通过“明日之翼”计划，也已对复材机翼基准方案进行了试验验证，机身则同步论证热塑性和热固性复合材料两种方案。其中，热塑性复合材料凭短周期冲压、焊接成型，无需热压罐、可回收等优势成为机身、整流罩选材热点，虽然树脂成本高出 40%，但寿命周期综合成本优于热固性树脂，具体选择尚需未来更精细的效费综合权衡。此外，复合材料结构高效率低成本自动化制造与检测技术已取得突破和应用，或将在下一代窄体客机生产中发挥核心作用，空客可能在此基础上再采用柔性自动化技术，使同一套设备可兼容多道工序、多种零部件生产，或可将制造成本再降低 5% ～ 10%。

波音的“两套方案”

波音当前仅靠 737MAX 这一单一平台系列产品与空客竞争，该系列产品在技术水平、性能指标和竞争力方面与 A320neo 家族存在较大差距。同时，波音暂无类似 A220 的小型窄体平台，在 100 ～ 130 座级区间存在产品空白。

对于下一代产品的发展策略，波音在明确新研产品的同时还在探索替代型窄体客机与“新中型客机”这个产品方

向。截至 2026 年 7 月，波音已向供应商发出至少 4 份关于下一代客机的信息征询书（RFI），同步评估 2 套设计方案：一套是可全面替代 737MAX 全系列的新窄体客机；另一套是加长至 220 ～ 270 座的“新中型客机”（NMA）衍生型，以填补 757 退役后波音面临的中远程窄体干线客机产品空白。波音认为，下一代窄体客机的燃油效率应比 737MAX 提高至少 20%，与空客基本一致。接受《航空周刊》采访时，波音称现阶段主要工作是完成 737MAX7/10、777-9 宽体客机的适航取证与交付，回笼运营现金流支撑新机研发投入，并未提出下一代窄体客机产品的时间表。

总体方案选择取向上，波音与空客趋同，首选总体相对保守、但应用多项先进技术的方案。在动力装置选择上，波音同样暂时搁置了氢能动力方案，公司认为氢能窄体客机实现规模化商业运营仍需至少约 20 年的技术沉淀。

但受到资金的约束，2026 年波音仅启动了下一代窄体客机前期概念设计，项目立项将推迟至 2030 年底，投入市场运营时间会“整体延后”，甚至可能推迟至 30 年代之后，比空客晚 2～3 年。波音认为，公司财务完全企稳、核心技术成熟验证、全球订单充足是下一代窄体客机立项的三大硬性条件。

在技术特征方面，波音下一代窄体客机的气动布局方面可能在传统大展弦比机翼的基础上吸收桁架支撑机翼技术预研成果。随着波音跨声速桁架支撑机翼（TTBW）项目 X-66A 演示验证机的试飞和后续研发计划取消，优化传统大展弦比机翼设计并在其基础上吸收桁架支撑机翼技术预研成果，已成为波音下一代窄体客机机翼形态最合理可行的选择。一方面，波音已考虑优化传统大展弦比机翼设计，如在 737MAX 现有机翼的基础上进一步增大翼展、提高展弦比，并通过机翼材料、气动优化实现性能显著提升。另一方面，波音跨声速桁架支撑机翼项目形成的技术成果中有部分可用于传统大展弦比机翼。2023 年 6 月美国航空航天局（NASA）和波音宣布将该项目演示验证机编号为 X-66A。其特点是以斜向桁架支撑的大展弦比后掠超薄机翼取代传统的悬臂式机翼，在马赫数 0.8 跨声速巡航时，桁架分担气动载荷、抑制机翼颤振，可大幅降低诱导阻力；同时翼下可以预留充足空间适配大涵道发动机，与现役窄体客机相比，整机油耗和碳排放有望降低 30%。但存在桁架气动干扰、机翼颤振控制等工程难题。2025 年 4 月波音宣布无限期暂停 X-66A 全机改装、不再优先推进完整桁架支撑机翼整机试飞，但持续开展超薄机翼、气动弹性、材料等技术研究，形成具备广泛适用性的超薄机翼基础技术储备。同时，波音已明确表示，不同技术方案是并行研究的技术选项，不是二选一的产品决策；未来生产型机可采用优化的常规机翼，也可以吸收跨声速桁架支撑机翼项目中的超薄机翼、主动飞控等成果，形成混合方案。



▼ 来源：波音

动力装置方面，首选新一代齿轮传动风扇发动机。2026 年 6 月波音向发动机制造商发出信息征询书，要求开发推力约 3 万磅级（约 13.6 吨级）的先进涵道推进系统方案，将用于 737 窄体客机后继机。普惠和罗罗预计将分别为波音提供齿轮传动风扇发动机方案。其中，罗罗瞄准 30 年代重返窄体客机发动机市场目标，正着力研发“超扇 -30”（UltraFan 30）齿轮传动风扇发动机演示验证机，已于 2026 年 7 月完成设计方案评审。该发动机风扇直径 90 英寸（约 2.29 米），涵道比最高可达 15:1，采用 20 兆瓦动力齿轮箱，计划 2028 年启动整机地面测试。同时，CFM 国际公司的 RISE 计划虽然重点是研制开式风扇发动机，但公司拟依托该计划下开发的高压核心机等技术研制 Advance 涵道版发动机，风扇直径约 85 英寸（约 2.16 米），可能利用空客 A380 试验台进行试飞。

材料结构方面，重点可能是低成本、高效率制造技术实现超高产能。波音深度参与了美国航空航天局 2021 年启动的“高速率复合材料飞机制造”（HiCAM）项目，目标是大幅降低复合材料飞机组件制造成本，同时大幅提升制造效率，实现月产 80 架份机翼，计划 2027 ～ 2028 年完成全尺寸结构件制造验证，将技术成熟度等级提升至 6 级。同时，波音并未舍弃金属制造工艺，依托 737 系列多年批生产经验持续迭代优化，其中自动化翼板装配线（PAL）将机翼长桁与蒙皮装配效率提升一倍，生产周期缩短 30% 以上，装配缺陷减少 60%，占用厂房空间缩小 50%。

同时，空客、波音正在从现役产品制造着手为大幅提高产能做好准备。按两家公司的产能目标保守测算，2028 年或 2029 年 A320neo、737MAX 的年交付量合计将突破 1460 架，满负荷扩产后可达 1656 架。目前，787、777X 宽体客机应用的全复合材料机翼技术，生产线峰值月产能尚达不到下一代窄体客机批生产需求的六分之一。在两家的下一代窄体客机都极可能大幅提高复合材料用量、选用复合材料机翼的情况下，低成本、高效复合材料飞机制造技术可能成为影响双方产品竞争力的一个关键；30 年代后期预计就是全球运营商更换现役窄体客机产品的首个需求高峰期，波音很可能想实现制造技术领先，从而将更短周期交付作为其下一代窄体客机产品市场竞争力的重要来源。



▲ 来源：Beyond Aero

氢电公务机距离运营还有多远？

文 | 陈玉洁　编辑 | 庄敏

由于“宽敞客舱”和“长航程”的特性与“低排放推进系统”的体积和重量存在天然矛盾，公务机的减排一直是难点问题。如今，氢电公务机正在成为航空业实现零排放飞行的重要突破口。其中，法国初创公司 Beyond Aero 研制的 BYA-1 氢电公务机是全球在研氢电公务机产品中技术成熟度最高的产品，已于 2026 年 3 月完成初步设计审查（PDR），标志着项目从概念验证正式迈入符合国际商用航空标准的认证流程。

最快氢电力公务机

BYA-1 是一款专为氢电推进系统设计的公务机，旨在实现零碳排放的短途商务飞行。BYA-1 最大航程 800 海里（约 1500 公里），最大起飞重量 9600 公斤，设计巡航速度 300 节（约 550 公里 / 小时），飞行高度 25000 英尺，可搭载 6～8 名乘客和 2 名飞行员。由于起飞重量的提升，BYA-1 将根据欧洲航空安全局（EASA）针对运输类飞机的 CS-25 适航法规进行认证。

BYA-1 配备了六个加压罐，可容纳 193 公斤气态氢，为六组堆栈、2.4 兆瓦的燃料电池系统供能，该系统为两台 1 兆瓦电动发动机提供动力，每台发动机驱动一个直径 2.8 米（9.2 英尺）的后推式螺旋桨。所有液压系统都被取消，飞行控制、起落架和刹车均为机电式。

BYA-1 选择恒速变距螺旋桨而不是涵道风扇，是为了满足单发失效和高温天气下的适航和爬升性能要求，并优化巡航时的能源消耗。短舱安装在后机身上部，将螺旋桨置于后压力隔板之后和垂直尾翼之前。飞机采用这种独特的后推式布局，将两台发动机置于机身后部，驱动螺旋桨朝后吹风。这种设计不仅优化了机翼上方的气流，提升了气动效率，还能有效降低机舱噪音和振动，为乘客提供更安静的飞行体验。

BYA-1 的氢气储存在六个相同的复合材料罐中，每个罐在 700 巴压力下可容纳约 32 公斤氢气。这些罐安装在加压机身外部的气动整流罩内和翼尖处，以便在泄漏时自然排放。出于同样的原因，高压氢气管路沿着翼盒外部的后缘从翼尖油箱延伸到翼根。

氢气以 20 巴的压力供应给六个由 EKPO 开发的低温质子交换膜（LTPEM）燃料电池堆，每个额定功率为 400 千瓦，电压调节为 850 伏，安装在后机身压力隔板之后，以便自然排放。额定巡航功率为 60% 以提供余量，剩余的 40% 可用于起飞、爬升和单发失效情况。LTPEM 燃料电池的能量转换效率超过 55%，在最大连续功率下以 95° C 运行，在最大起飞额定值下以 105° C 运行。设计人员在燃料电池寿命和高温运行时所需的功率之间进行了权衡，设计使用寿命在服役时超过 5000 次循环，并预计随着运营经验的增加而增加。

所有油箱都安装在翼盒上方，翼盒在迫降时会首先接触地面并保护它们。碳纤维油箱的设计寿命超过 5000 次循环（约 10000 飞行小时），油箱上的光纤传感器监测结构应变和温度、计算循环次数并估算剩余寿命。

在安全性设计方面，BYA-1 每个短舱包含推进电机、为燃料电池供应空气的电动涡轮压缩机以及用于燃料电池液体冷却的热交换器和鼓风机。Beyond Aero 公司正在与三家潜在的电动发动机供应商谈判，该发动机在起飞时额定功率为 1 兆瓦（持续 5 分钟），最大连续功率为 850 千瓦。

为满足严苛的 CS-25 认证标准，推进系统被完全隔离为左右两侧，燃料电池安装在后机身下部的两个独立隔间中，由防火墙隔开。燃油系统也是隔离的，故障情况下，交叉供油阀以 20 巴的供应压力连接独立的两侧。所有液压系统均被取消，飞行控制、起落架和刹车均采用更轻量化的机电系统。

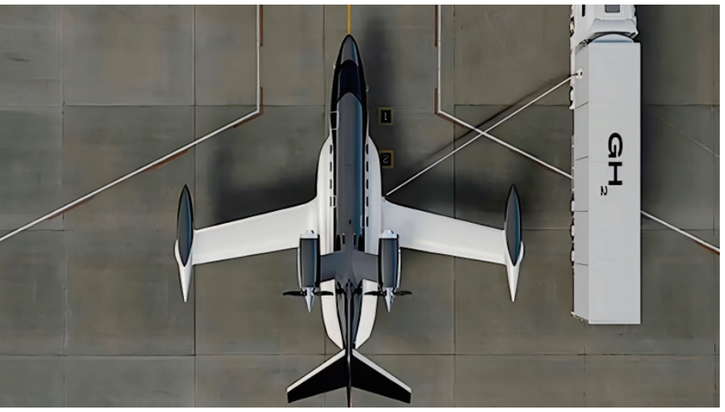
Beyond Aero 公司表示，在 300 节巡航速度下，使用 700 巴的氢气可实现 800 海里设计航程，涵盖欧洲和美国市场 80% ～ 86% 的公务航空航线。将巡航速度降低到 250 节可以降低功率并提高燃料电池的效率，将航程提高 15% ～ 20%。

BYA-1 采用椭圆形舷窗，面积较传统公务机扩大 27%，可提升采光与视野通透性。低噪电推进系统配合先进隔音技术使舱内噪音降低 15 分贝，打造静谧

飞行环境。BYA-1 采用全电驱动系统，运动部件减少 90%，无需高温涡轮并配备模块化发动机更换系统，使维护复杂度降低 55%。

项目进展与运营规划

2024 年，BYA-1 飞行验证机在法国成功完成首次载人全氢电飞行试验。该验证机由 85kW 的氢燃料电池 / 电池系统提供动力，使用三个储罐储存气态氢，储氢质量为 1.3 公斤，压力为 34MPa。试飞期间，飞机飞行高度达到 701 米，



▲ 来源：Beyond Aero

时速达到 110 公里 / 小时。经过三个月的动力系统台架试验，该验证机在 2024 年内完成了 10 次起飞和 2 次完整飞行。在氢电推进系统中，2/3 的动力来自氢燃料电池，其余 1/3 由电池提供。

2025 年，Beyond Aero 收购 Universal Hydrogen 公司的资产和技术，包括专利组合、飞行测试数据及电动涡轮压缩机等关键测试台组件，并吸纳多名前工程师加入团队。

同年 10 月，BYA-1 的全尺寸燃料电池系统通过台架性能测试，持续功率水平超过 400 千瓦，达到技术成熟度 6 级（TRL6）。测试在图卢兹的新驱动实验室进行。系统通过三组独立测试通道（总功率 1200 千瓦）并行运行，搭配不同燃料电池供应商设备，成功验证了 700 帕高压氢气的全流程管理能力，包括压缩、储存及终端使用环节。

2026 年 1 月，使用 1:8 比例模型的 BYA-1 在荷兰马克内塞德荷风洞公司完成首次风洞测试试验，测试速度高达 288 千米 / 时，全面验证了飞机的气动性能。同年 3 月，BYA-1 通过初步设计审查，项目进入详细设计阶段。关键设计审查计划在 2026 年年底进行，2027 年完成设计定型，2029 年首飞，2030 年底获得型号认证并投入商业运营。目前公司正在与欧洲航空安全局密切合作推进适航审定工作。

运营规划方面，2026 年 4 月，Beyond Aero 公司宣布与全球第二大公务航空运营商 Luxaviation 达成战略合作，以勒布尔热机场为首个机场开始筹备将氢电飞机投入公务航空运营。据合作协议，Beyond Aero 与 Luxaviation 将在现行及未来 EASA 监管框架下，联合评估与氢电飞行相关的实际任务、航线、能源需求及地面运营事宜。在 Beyond Aero 推进适航认证的过程中，双方将通过评估典型公务航空飞行任务、筹备地面及机场端运营（包括氢气储运条件）、制定操作流程、培训体系及安全框架、开展早期示范飞行与监管沟通等系列工作，打造符合运营要求的氢电飞机。



可持续发展的压力 重塑航空售后市场

▲ 来源：RubbMEA

文 | 赵平　　编辑 | 庄敏

当前，可持续发展的浪潮正在深刻重塑全球航空售后服务市场，其影响已突破传统航空器及零部件维修作业的边界，直接延伸至原始设备制造商（OEM）的零部件研发设计环节。飞机拆解服务商、维修企业（MRO）、航材零部件供应商已逐步形成行业共识：OEM 端的设计变革，正在重新定义零部件的翻新、性能恢复乃至全周期持续服役的能力边界。

对此行业正在逐步形成这样的共识：推进可持续发展的核心路径，并非“推倒重来”式的全新零部件研发，而是通过优化现有设计提升零部件的维修经济性。现阶段的设计优化主要聚焦三大方向：零部件拆装便利性、维修可达性，以及全生命周期末端的可循环使用性。

设计变革促发行业转型

当前 OEM 的设计趋势正在从根本上重塑航空售后市场格局，尤其对飞机拆解效率和零部件维修经济性产生深远影响。随着复合材料机身与高度集成化结构设计在航空领域的普及，传统结构零部件的维修方式、回收复用路径以及持续服役能力都发生了根本性改变。与此同时，OEM 推向市场的封装式、非模块化零部件占比持续提升，这类产品不仅直接压缩了传统MRO的业务空间，还大幅提高了后期拆解作业的技术难度。此外，高端合金材料与特种防护涂层的广泛应用，虽显著提升了零部件的



▼ 来源：Popular Science



▲ 来源：MotionArray

耐用性与运行性能，却也为 MRO 设置了更高的技术准入门槛——企业必须投入大量资源配置专业设备、掌握专属工艺，才能获得这类零部件的维修资质。

因此总体来看，现阶段零部件维修、翻新与延寿工作主要面临三大核心难题：第一，新型零部件普遍采用高度集成的航电、机电一体化总成；第二，老旧零部件因停产淘汰，维修周期大幅拉长；第三，封装模块、内嵌式软件成为主流设计趋势，大幅缩减了零部件的可维修空间。

尽管上述技术升级能够帮助航空公司降低运营成本、提升运行效率，却也倒逼全行业 MRO 全面调整自身经营策略。相关专业机构曾指出，当前行业存在诸多潜在制约MRO企业发展的因素。其中最大的技术壁垒在于高度集成化的零部件和特殊的内嵌式数字控制系统的广泛使用。这种高度集成化的零部件在研发设计阶段优先考量性能提升与减重，往往舍弃模块化设计特性，进而降低了零部件的可维修性。

此外，行业大范围普及的先进涂层技术与嵌入式传感器技术虽提升了运行效率、优化了设备状态监测能力，但在MRO 企业申请维修能力时，在维修方案、工具设备获取和数据所有权方面受到了更严苛的限制。事实上，MRO 企业目前完全具备对应的维修技术能力，但相比 10 年前，MRO 企业在商业授权和合规监管上却受到了更为严苛的限制。

供应渠道持续收紧的行业困境

一些主营飞机拆解与航材供应业务的公司表示，当前 OEM 的全新设计并未直接制约其向客户提供零部件的能力，但大量老旧构型零部件即便在技术层面仍具备维修价值，却越来越多地被划定为“超经济维修（BER）”范畴。其核心根源在于 OEM 掌握着零部件维修手册的绝对话语权，大幅压缩了独立 MRO 自主创新维修工艺的空间。

当前 OEM 垄断态势不断加剧，次级零部件及原材料的独立供应渠道持续萎缩，已成为制约 MRO 维修效率提升的主要障碍。尽管 OEM 在研发和适航取证阶段投入了巨额成本——普通零部件厂商投入数百万美元，头部发动机厂商的投入甚至高达数十亿美元，OEM 需要依托售后市场收回前期研发成本。但零部件独家供货、维修授权限制、专利使用费叠加各类行业壁垒，直接导致有能力承接维修业务的 MRO 企业数量持续减少，最终推高了航空公司的整体维修成本。当前的现状是，判定一件零部件是否具备维修价值、是否划定为超经济维修的决定性因素是维修成本，这一现状与可持续发展关联度极低，核心驱动因素仍是商业利益。

可持续发展带来的行业压力

同时航空公司的供应商选择逻辑也在发生转变，越来越倾向于与自身可持



▲ 来源：WorkBC

续发展和环保举措高度契合的售后市场供应商合作，这也让售后市场全链条企业承受的可持续发展压力持续增大，逐步影响航空公司在零部件修理、再利用和更换环节的决策逻辑。

举例来说，曾有一段时期航空煤油（Jet A-1）价格从每吨约 700 美元暴涨至近 1900 美元，时寿件（LLP）成本每年的涨幅接近 10%。在这样的大背景下，可持续发展相关举措极易被视为成本高昂的“锦上添花”项。环保项目往往需要前期大量投入，在行业发展处于低迷时期更像是一种奢侈选择，而非刚需。尽管如此，二手航材能带来实实在在的环保收益，这一点毋庸置疑。

如果核算零部件全生产流程的总能耗，从矿石开采、熔炼，到锻造、机械加工、装配，每一件零部件都承载着大量能源消耗和二氧化碳排放。因此，最大限度挖掘每一个零部件的全寿命潜力，能够产生显著的可持续发展效益。特别是时寿件与发动机零部件，如果发动机翻修方案设计合理，能够平衡排气温度



▲ 来源：AlberthAviation



▲ 来源：Horix

裕度（EGTM）和时限件剩余寿命的关系，就能同步实现经济效益与环保效益的双重提升。

同时，可持续发展理念正持续影响客户的采购决策，客户的决策逻辑始终以经济因素为核心基础，同时融入可持续性考量。当前关于零部件维修还是更换的讨论，不再仅仅基于成本和备件供货情况，碳足迹、减排成效和材料循环再利用都已纳入综合评估体系；可持续发展理念也在深刻影响资产退役处置环节，受维修成本走高、新航材交付周期拉长、供应链持续动荡等多重因素推动，飞机拆解业务迎来快速增长，相比直接整机报废，拆解回收可用件逐渐被视作商业可行性更强、环境效益更突出的处置方式。

长期跟踪空客与波音窄体机队的战略运营趋势的专业人士指出，当前航空公司更倾向于通过维修、改装延长资产寿命，而非直接更换全新零部件。受 OEM 零部件售价暴涨影响，航空公司更多采用交换件模式控制维修成本；同时新飞机交付延期的行业现状，也促使航空公司主动延长现有飞机的服役周期，这一局面将逐步加剧二手航材市场的供给紧张态势。

但对于客户来说，可持续发展并不是首要考量因素，价格和质量仍是维修决策的主要考量因素。售后市场上经过修理和重新取证的部件能够满足可持续性发展的要求，使得这些部件对某些客户更具吸引力。

对此许多咨询公司指出，如今越来越多的航空公司，尤其是大型航空公司，已直接将环保因素纳入采购策略。零部件采购决策不再只是简单权衡成本与供应能力，供应稳定性和环境影响正在越来越深地影响最终选择，这种变化集中体现在两大方向：一是在可靠性有保障的前提下，航空公司越来越多地通过使用二手可用航材和优化维修方案延长飞机服役寿命；二是飞机租赁公司在退租标准上提出全新要求，优先支持零部件循环使用，并要求配套完整可追溯的维修记录。总体来看，二手航材能够带来可量化的可持续发展效益，航空公司也认可其可靠性与供货稳定性。

ATR 的设计理念

当前已有一些原始设备制造商开始从研制之初调整设计理念，其中支线飞机制造商 ATR 公司的一些做法值得借鉴。ATR 通过收集运营商反馈与服役运行数据，筛选出一批可通过优化设计延长维修间隔、减少拆装次数、缩短物流周转时间的零部件。长期来看，该举措能直接降低物料消耗和零部件运输产生的碳排放。

在设计阶段，ATR 就将飞机寿命末期的处置方案纳入考量。目前该公司生产的飞机整机约 85.5% 的重量均可回收利用，这一成果主要得益于设计阶段大量采用易回收的金属结构部件。ART 公司在联合其绝大多数供应商开展全生命周期分析时，会充分评估拆解可行性、材料可回收性及退役处置方案，确保飞机的整机设计方案始终与工业实际和行业通用规范保持一致。

自 2025 年起，ATR 公司的所有全新设计方案与机型改装项目，除通过技术、安全、适航取证指标审核外，还需要同步完成环境影响评估，杜绝脱离全生命周期分析和环境影响评估的单一材料选型。例如，铝合金材料与复合材料在选型时会有完全不同的环境影响考量。铝合金材料回收利用率极高，而复合材料的减重效果突出，能大幅降低飞机运营阶段的燃油消耗——飞机运营阶段恰恰是飞机全生命周期内碳排放占比最高的环节，因此在多数材料选择场景下，减重仍是决定性指标，因其对运营阶段的减排有巨大贡献。尽管如此，材料可循环性的评判标准，包括材料耐用性、可拆解性、生产废料占比、物流运输影响、寿命末期处置难度等，正在 ATR 内部决策流程中形成标准化规范。ATR 的目标并非推行单一的最优设计方案，而是基于全生命周期综合表现进行多维度权衡，并尽可能采用量化分析工具开展科学评估。



▲ 来源：SpartanCollege

因此从全产业链的角度来看，面对可持续发展对售后市场带来的压力不仅需要 MRO 主动进行“自我调节”，也需要全行业的共同努力。其中，飞机制造商需要不断迭代全生命周期设计理念，将可持续发展影响纳入核心决策体系，并推动全链条供应商共同践行相关标准；MRO 企业要加速建设与 OEM 新设计相匹配的维修能力，大力拓展二手可用航材的维修复用业务；航空公司也要将可持续发展作为零部件采购的重要考量维度，通过零部件维修、改装延长资产使用寿命，加大二手可用航材的应用比例，共同应对全行业的可持续发展转型压力。



新金融方式
对支线航空市场的支撑

▲ 来源：Planespotters

文 | 马宁　　编辑 | 林喆

中国支线航空市场深陷“需求不足—成本高企—依赖补贴—财政承压—航线停飞”的负向循环。对于支线航空运营成本与实际需求之间的资金缺口，往往是通过财政补贴的方式，来解决公共基础设施供给。虽然有固定、保底、小时计费等多种方式，但难以从根本上破解困局。这一困境本质上是市场机制在公共服务领域的失灵，中国支线航空具有“服务全体人民、协调区域发展”的鲜明政治使命，因此这个局面是必须要面对的。解题的关键，不在于寻找更精明的风险定价模型，而在于从简单的补贴模式升级，构建一种能内生性共担风险、完成使命的新型金融架构。

一个“必须做”的行业与一个“算不过账”的市场

中国民航承担着服务全体人民出行、服务国家区域协调发展战略的根本使命。这一使命要求民航网络不能“挑肥拣瘦”，不能只飞客流充沛的干线黄金航线，而必须将航空服务延伸至需求稀疏的偏远地区、革命老区、边疆地区和民族地区。因此，发展支线航空，不是一个可以讨论“做不做”的商业选择题，而是一道关乎社会公平、民族团结和区域平衡发展的“必答题”。

然而，这道必答题在现实中却深陷一个令人尴尬的负向循环。从单位经济学来看，支线客机座位少，但飞行员薪酬、起降费、航路费、燃油消耗等成本项，并不与座位数成比例下降。在需求端，支线市场客流稀疏且波动幅度大，无法通过高频次航班摊薄固定成本。成本刚性遭遇需求不足，航线亏损成为常态。

于是，政府补贴成为维系运营的生命线。航司靠补贴经营航线，政府花钱买连接、买吞吐量。但这种关系很脆弱：对航司而言，面临政府补贴水平变动和支付延迟的风险；对政府而言，一旦财力吃紧，削减补贴就成为本能反应。补贴一断，航司第一选择就是停航。而支线航空的客流需要持续开发，每次停航都是对市场培育的重大打击。一个“需求不足—成本高企—依赖补贴—补贴断供—航线停飞—客流不足”的死结就此形成。

在这个循环中，金融工具被寄予厚望。但传统思路多聚焦于“如何为补贴增信”或“如何转移风险”，希冀将风险转嫁给银行、保理公司或保险公司。这种思路的致命缺陷在于，在一个市场机制已经失灵的领域，追逐利润的商业资本不可能成为最后的接盘侠。当政府信用都不可靠时，没有任何商业机构愿意为一条亏损航线的未来买单。

因此，本文提出一个根本性的逻辑转向：金融工具在支线航空领域的真正价值，不在于转移风险，而在于重构风险分配；不在于追求风险定价的精巧，而在于以完成社会使命为出发点，创造出一种能使各方“坐到一条船上”的共担结构。

北欧航空资本（NAC）的模式解剖与边界分析

在讨论中国方案之前，有必要深入解剖全球支线飞机租赁领域的标杆——北欧航空资本（Nordic Aviation Capital, NAC）。NAC 是全球最大的支线飞机租赁商，机队规模约 500 架，专注于 70 ～ 130 座级的涡轮螺旋桨及喷气式支线客机。其近三十年的实践，为理解金融工具如何深度介入支线航空产业链，提供了一个不可多得的样本。

NAC 的商业模式并非一开始就如此精妙，而是逐层进化而来，其核心可解构为三个层次。

第一层是以规模构建全球“运力池”。NAC 通过大规模、多品种的采购和回收，打造了全球流动性最强的支线飞机“运力池”。支线客机市场机型庞杂，制造商包括 ATR、庞巴迪（现为空客 A220 系列）、巴航工业等。二手市场由于支线机盈利难导致分割严重。NAC 凭借其资本实力和长达数十年的行业深耕，成为连接这些分散市场的“中央水库”，将拥有支线客机资产的风险（残值波动、技术淘汰等）从运营端剥离至专业的资本管理端。

第二层是以“柔性租约”实现风险共担。这是 NAC 模式区别于传统租赁公司的质变点。传统经营租赁虽然免除了航司的资产处置之忧，但其固定租金的支付义务，对于客源不稳的支线航线而言压力依然很大。

NAC 的革新，在于其将租金支付方式拆成了两部分，设计了与使用量，甚至与航线收入挂钩的“柔性租约”。一是“按小时付费”租约，租金被拆解为两部分——覆盖资金成本和基本管理费的极低固定租金，以及基于实际飞行小时数或起降架次计算的变动租金。飞机不飞，航司仅承担极低的固定租金。二是收益分成租赁，将航线客运收入的一定比例分给 NAC，如果盈利情况好，NAC 也会收到比一般经营租赁更高的租金。这两种合约的法律形式是租赁，但其经济实质已近于股权式合作。

第三层是以全球残值管理能力构筑“安全垫”。仅凭上述两条，我们直观感受是 NAC 租赁收入能回本吗？事实上支撑上述柔性租约的，是 NAC 强大的资产处置能力。当一家航司经营不善退回飞机，NAC 能凭借其遍布约 70 个国家的客户网络和技术能力，迅速为这架飞机找到下一个承租人，或将其拆解，出售发动机、起落架等高价值航材。这种跨越国界、跨越经济周期的资产调配能力，是 NAC 敢于向航司让渡部分运营风险的底气所在。它赚取的，已不仅是资金利差，更是资产在全球范围流转中产生的流动性溢价和管理价值。

▼ 来源：WikimediaCommons



然而，尽管 NAC 模式在微观层面极其精巧，但其在全球范围内也未能从根本上解决支线航空的困境，其适用范围存在清晰的边界。理解了这些边界，才能看清中国为什么不能照搬，而必须走自己的路。

第一个边界是资产流动性的“先有鸡还是先有蛋”困境。 NAC 的全球运力调配网络，是在近三十年的时间里，一架飞机一架飞机积累起来的客户关系、技术档案和市场信誉。这是一个典型的网络规模效应生意——网络越大，流动性越强，对新客户的吸引力越大。但对于任何后发的模仿者，尤其是新兴市场国家而言，没有这一网络，就不敢接盘；不敢接盘，就永远建不起网络。

第二个边界是高交易成本排斥最需要帮助的弱小航司。“按小时付费”和“收益分成”合约，需要精确的飞行数据监控、透明的票款收入清分系统、复杂的会计处理以及对航司诚信的极高信任。这套机制的谈判和监督成本极其高昂，注定了它只适用于规模较大、信息系统完善的航空公司。而现实中最需要此类创新支持的，恰恰是那些挣扎在生存线上的、执飞最偏远航线的小型航司，它们反而因门槛过高被排斥在外。

第三个边界是不对冲系统性风险。 NAC 模式擅长化解的是某家航司经营不善或新开航线需求不足这类个体性微观风险。但对于油价持续暴涨、全球性经济衰退、区域安全事件等系统性冲击，NAC 同样束手无策。

第四个边界也是最根本的， 无论合约多么柔性、姿态多么共担，NAC 的最终目标是股东回报最大化。它没有义务、也没有意愿去服务那些注定无法产生足够经济回报的地区和航线。当一条航线从纯商业视角看“永远不可能盈利”时，NAC 模式就会自动退出。而中国支线航空需要解决的，恰恰大量是这种“永远算不过账”的航线的存续问题。



▲ 来源：WikimediaCommons

中国支线航空的金融解困逻辑

NAC 模式的天花板，恰好映照出中国支线航空问题的特殊性。中国要发展的不是几条能从亏损发展到盈利的支线，而是一个覆盖国土、服务全民、支撑区域协调发展战略的基础性公共服务网络。这个网络中的大量节点，从纯粹市场逻辑出发，是“应当被淘汰”的。但从国家大局出发，这些航线是连接发达地区与欠发达地区的纽带，是必须守住的“最后一公里”。

这就带来一个根本性悖论：一个必须完成的使命，面对的却是一个市场机制注定失灵的领域。传统商业资本在此退却，是理性的；政府单纯依靠行政命令和直接补贴维系，是脆弱的。目前受限于高单座成本和低产出，航司对支线航空的经营手段有限，投入也不够。补贴少的时候，航司刺激客流量的手段放不开；而一旦补贴高，航司能靠补贴养活航线，又懒得使劲了，客流量就总也上不来，支线航班能完成商业化目标的少之又少。

解题的关键，在于找到一种既能承接政治使命、又能以市场化和专业化方式运行的新型主体。

这个主体，应当是国有金融资本牵头组建的“国家级支线航空资产管理平台”。 这不是一家普通的租赁公司，它是一个带着任务而来的“使命驱动型”金融工具。其核心逻辑必须与 NAC 形成根本性分野。

第一，目标函数不同。 NAC 追求的是资产回报最大化，而这个平台的目标是“以最小的全生命周期成本，完成国家支线航空普遍服务任务”。第一目标是完成支线发展任务，利润排第二，保持持续运营即可。或者说，运营同样的支线航班，其支出小于原有的各地政府补贴总支出，就意味平台完成了任务。它将原本属于国有资本回报的部分利润主动让渡出来，分享给产业链上的其他参与方。

第二，成本承担逻辑不同。 这个平台的成本承担能力来自两个部分的统筹：一是各级政府原本就要花出去的航线补贴资金；二是国有金融资本原本在常规租赁业务中要赚取的利差收益。这一条在近期国产飞机的推广中已经在尝试。国有资本可以倾斜于国产飞机，也可以倾斜于支线航空，为国产飞机飞支线航空提供更多机会。

第三，解放航司与渠道。一旦这个平台承接了大部分的成本风险和资产压力，航司的角色就可以被极大简化——从背负沉重资产包袱和盈利压力的全能型运营商，转变为专注于安全运行和市场经营的“轻资产运营服务商”。与之配套的是，要对航线客座率或者客流量的增长提出一定的目标和要求。

综上，这家公司的使命是与各航空公司共同承担支线经营风险，用释放航空公司经营压力、激发市场活力的方式，增加支线航空总供给，同时减少中央及各地方对支线航空的总投入。用一句不太完整但比较直接的话来描述，地方政府现在每年花 1 个亿补贴了 10 条航线每天 10 个航班，这个平台公司只收 9000 万，但要保持同样数量的航班航线供给。

让金融成为使命的“架构师”

这样的一个平台，并不是一家只会签合同、收租金的传统金融机构可以胜任，它要求对航空业有深度了解，又熟练掌握金融与经营技能。平台的核心团队，必须实现三种知识的深度交融。

一是懂金融，精通飞机融资、资产证券化、残值评估与风险管理，能设计复杂的柔性租赁合约，并在全球市场进行资产配置；二是懂航空运营，深刻理解支线航空的运营模式，能与航司就飞行小时数、维修储备金、技术状态监控等专业议题在同一频道对话；三是懂区域经济，能协助地方政府进行航线产品开发，对支线刚需客源有精确画像，并能将这些洞察转化为航线网络规划的依据。

此外，柔性租赁合约的正常运行，严重依赖一套高可信度的数字基础设施。这包括：与航司运行控制系统直连的飞行数据自动采集系统，确保“按小时付费”的计费依据透明不可篡改；与 GDS（全球分销系统）及主流 OTA 对接的票款清分系统，确保“收益分成”模式下的收入数据真实完整；以及覆盖全机队的数字化技术档案系统，对每架飞机的维修记录、部件状态进行实时监控，支撑精准的残值管理。

回到本文开篇提出的那个死结。需求不足、成本高昂、补贴依赖、航线停飞……这个循环的每一个节点，看起来都是“经济账”算不过来。但如果我们的视野只停留在“经济账”本身，就永远找不到答案。因为中国支线航空的底层逻辑，不是一本经济账，而是一本政治账、一本民生账、一本关乎国家长远发展格局的战略账。

金融工具在此的终极角色，不是充当算账的“精算师”，在风险与收益之间寻找一个精准的定价，然后安全地抽身而退。在支线航空这个领域，没有这样的安全位置留给资本。金融工具必须升维，成为整个事业蓝图的“架构师”——它将国家的政治使命、地方的发展诉求、国有资本的承受能力、航司的运营专长、渠道的市场嗅觉，编织在一个精巧而又坚韧的制度结构里。

在这个结构中，国有金融资本的本质任务不是赚钱，而是以让渡利润为代价，将航空公司的刚性成本焦虑解除，将销售渠道的创造力释放。当航司不再为飞一趟航班亏多少而心惊胆战，当地方政府不再为补贴何时到账而焦头烂额，当旅游平台能把一张机票变成一个美丽乡村的故事时，那个看似无解的死结，或许才能迎来松动的那一刻。

2026 年上半年国内航空公司经营效益总结与展望

文 | 柴雨丰、葛冬瑞　　编辑 | 林喆



2026 年以来，中东冲突导致国际油价快速飙升。此轮地缘政治冲突着实搅乱了国内民航业的发展，大幅挤压了行业的盈利空间。但即便此黑天鹅事件平息，后续民航业的发展仍不乐观。

▼ 方兴鸿 摄

上半年经营效益表现

上半年国航、东航、南航利润总额合计亏损 74.5 亿元，同比增亏 37.3 亿元；春秋、吉祥、华夏利润总额合计盈利 16.2 亿元，同比减利 9.1 亿元。六家公司一季度利润总额合计盈利 83.8 亿元，同比由亏转盈增利 104.6 亿元，二季度利润总额亏损 142.2 亿元，同比由盈转亏减利 150.9 亿元。中东局势升级使二季度航油价格较 2025 年同期增幅超过了 100%，是上半年航空公司亏损的最大推手。3 月份以来各公司在高油价下采取了提质控量的策略，实施大改小、航班合并飞等精细化管控措施，正班客座率 85.7%，同比提高 1.6 个百分点。全行业上半年飞机日利用率 8.9 小时，较去年同期被动下降 0.1 小时。得益于人民币的坚挺，上半年三大航实现汇兑收益 22.4 亿元。

项目	国航		东航		南航		三大航合计	
	2019 年 12 月	2026 年 6 月	2019 年 12 月	2026 年 6 月	2019 年 12 月	2026 年 6 月	2019 年 12 月	2026 年 6 月
国内航线平均航距（公里）	1,493	1,544	1,311	1,462	1,517	1,626	1,442	1,548
国际航线平均航距（公里）	5,067	4,680	4,198	4,420	4,227	4,146	4,478	4,401
宽体机架数	127	130	93	114	110	100	330	344

▲ 表 1 | 三大航平均航距对比

货运市场方面，专业货运公司保持盈利态势，顺丰控股、东航物流、国货航上半年利润总额合计盈利 111.6 亿元，同比减利 0.7 亿元。其中一季度同比增利 2.8 亿元，二季度同比减利 3.5 亿元，高油价对三家货运公司的效益影响不明显。

航线塑造方面，三大航国内航线平均航距 1548 公里，较 2019 年增加 106 公里，便于发挥国内长距离运输的优势。三大航国际航线平均航距 4401 公里，较 2019 年减少 77 公里。值得注意的是，尽管 2026 年上半年三大航国际航线 ASK（可用座公里数）较 2019 年上半年增长 7.1%，但航网结构今非昔比。据航班管家统计，上半年前 20 个通航国家中，韩泰日航班量位列前三，赴韩航班量超 2019 年水平，赴泰国、日本恢复率仅 64.7%、53.5%，美国恢复率不到 50%。三大航宽体机 344 架，较 2019 年净增加 14 架，今后宽体机运力的消化还是一大挑战。

上半年经营虽然困难重重，但全行业也在不断尝试转危为机。2 月底的中东地缘危机导致卡塔尔航空、阿提哈德航空、阿联酋航空纷纷停航，使一些原本通过中东航司中转的旅客改乘国内航司的国际航班，拉动国际航线票价、客座率的提升。自俄乌冲突后，俄罗斯领空对欧美航司关闭，国内航司的欧洲航线可飞越俄罗斯领空，其用时短、运行成本低也形成了产品的竞争优势。在一些不温不火的传统市场，外航受供应链紧张导致运力紧缺，无暇顾及中国市场，国内航司抢占市场先机，比如中澳市场，中国航司的执飞航班量上升为 70%。

行业正在经历的几个窘境

一是航空公司经营处境持续艰难。近年来国内航司在消费乏力、行业内卷、供应链、国际形势等多重因素的影响下，经营步履艰辛。主流航司的连年亏损掏空了家底，国、东、南三家上市公司的未分配利润总额由 2019 年 12 月底的 821.5 亿元降为 2026 年 6 月底的未弥补亏损 -1383.8 亿元，填平亏损窟窿、给投资者分红、降杠杆减负债的压力巨大。当下航司的生存，不仅要看其造血能力，更比拼的是输血能力。连年亏损使航空公司“吸金兽”的特征突显，三大航股本由 2019 年底的 431.7 亿元增长为 2026 年年中的 607 亿元。三大航旗下的子公司均不同程度得到了增资，如深航股本从 53.6 亿增长为 212.4 亿元。但小公司的家底薄、股东背景弱，银行的放贷条件也更苛刻，没有国资央企的融资优势。

二是股权及运营的被动集中。2020 年后国内民航发展急转直下，潜在投资者支付更高溢价去收购一家航司的意愿并不强烈，比如幸福航空全面停航后接盘侠迟迟未出现。对没有深厚背景的小公司而言，能活下去恐怕是当前最紧迫的任务，后续可能会迎来一波“拉郎配式”的重组潮。从行业监管看，政策更倾向于支持管理基础较好的大公司，航空集团的母子公司开始尝试合并运行以争取获得更大的协同效应，比如国航与内蒙航、东航与东航云南公司之间的合并运营新合作方式，这些公司正在经历由数量致胜向质量致胜的转变。

三是与高铁竞争的短板劣势。国内客运运输的竞争力体现在旅客出行便捷性、性价比体验、运输准点率、运营方的成本优势等方面。而铁路客运具有准点、服务弹性大、出行便捷、非运行时长占比低等优势。铁路运行受极端天气的影响低，没有三超行李、3C 电池、二次安检等繁琐的要求，车站距离市中心较近，提前 3 ～ 5 分钟停止检票上车，候补灵活，同一车站中转衔接可在 15 分钟内完成。铁路的优势恰恰是民航难以逾越的短板，

项目	国航	东航	南航	三大航合计
2026年1季度国际航线ASK同比2025年增速（%）	7.4%	10.8%	16.1%	11.4%
2026年1季度国际航线客座率同比2025年变动（pt）	7.4pt	5.2pt	0.9pt	4.5pt
2026年2季度国际航线ASK同比2025年增速（%）	0.9%	1.1%	10.0%	3.9%
2026年2季度国际航线客座率同比2025年变动（pt）	7.1pt	4.6pt	-0.6pt	3.8pt

▲ 表 2 | 三大航国际航线 ASK 增速及客座率变动对比

▼ 来源：国航



在部分线路上民航机票价格已经倒挂低于高铁二等座票价。

四是票价疲软与成本坚挺形成效益剪刀差。近年来受供大于求、高铁替代、消费下行等因素影响，航空票价整体呈现疲软态势。2026 年上半年国、东、南三家公司含燃油附加费收入的座公里收入 0.434 元，同比增长 0.0278 元，座公里航油成本 0.182 元，同比增长 0.0451 元，因收入无法完全弥补油价上涨差价导致同比减利 91.7 亿元。此外，航司成本增长还有以下几方面原因，受供应链困扰，购机价格、维修开销刚性增长，维修周期拉长、非计划停场等间接损失；极端天气愈发严重，影响范围广、发生频次高、持续时间长，除对民航安全、正常运行的影响外，航延、赔偿、停场损失等隐性成本不容小觑；飞机日利用率不理想，人工成本、折旧费、管理费用等固定性开支无法有效摊薄。

后续重点工作建议

同受高油价的影响，国泰、春秋上半年盈利势头依旧不减。借鉴盈利航司经验，后续民航业需打破对行业发展的惯性思维，在战略规划、枢纽网络、服务、跨界合作、深化改革等方面全面发力。

首先，筑牢民航发展的规划基本盘。前期对行业增长的乐观估计，以及应对高铁冲击的措施乏力，造成民航在局部市场的供给过剩。要从大交通体系下的中长期规划入手，解决铁路与民航在国内中长距离运输中的分工合作和规划协同问题，形成统一的规划发展意见。交通运输部、发改委可组织民航、铁路等部门，认真梳理国内中远程客运运输市场“十五五”规划和“十六五”展望，民航规划与铁路规划要一揽子考虑，避免低效、重复的投资。民航内部对市场规模、机队数量、航网布局、机场建设、空域保障能力、飞机引进批文等要进行通盘考虑，按照“木桶原理”匹配增长预期和发展规划。全行业在相当长的时期内受供应链及航油等刚性成本制约，低票价无法维系生存，应放弃一味追求规模指标的增长，采取收缩战略，找准民航的市场定位，积极进行供给侧结构性改革。

其次，坚持枢纽发展战略。结构性充分发挥北京、上海、广州、深圳、成都、昆明、乌鲁木齐等地的经济、政治和区位优势，强化其航网的辐射作用。国际航班继续争取对传统市场的投入，同时向一带一路沿线国家飞、向新兴市场飞、向周边热点市场以快线形式飞。国内航班重点聚焦在商务快线、高高原航线、跨海航线、纯飞行时长 2 小时以上航线、没有高铁覆盖的区域或高铁班表时刻以外出发的错峰线等。对于航空总出行时长超过或接近高铁总出行时长、且高铁密集的短距离航线，比如成都—西昌的航班等要适时退出，不搞政绩通工程。积极拓展中转联程业务，丰富新疆、内蒙、青海等省份干支通、全网联的产品组合，增加航空出行的粘性。积极推动千万级机场市政地铁项目的落地，在京沪蓉等双机场运营的城市或珠三角、长三角等机场群，积极呼吁铁路部门在两场之间建设高铁站，通过市政地铁、城际铁路等方式将两场连接起来，为综合交通出行解决方案提供硬件条件。



▼ 来源：南航



▲ 来源：南航

第三，聚焦旅客便捷出行需求。旅客便利出行体验是检验民航运输服务工作的重要指标。当前旅客乘机出行的非飞行时长、无效运输时长占比较高，比如枢纽机场地面滑行时间普遍较长、空域开放不合理等原因导致的航线非直线系数偏大，班表时刻预留时长区间较大，航班并没有飞得快、飞得直、飞行准点的优势。随着各类手机软件的应用，航班的运行信息是透明的，旅客对于绕飞、长距离滑行、原地长时间待飞等情况很不理解。行业中有一个怪相，旅客对服务的不满和宣泄全部集中在航空公司一方，但航司只是服务链条中的一小环。民航的飞行器、航站楼、停机位、航路、航线时刻资源、其他各类保障资源等均由不同的市场参与主体控制，因各主体间有不同的管理要求和利益诉求，全行业的合力效应自然发生损耗。因此局方、空管、机场及其他驻场保障单位必须打破门户界限，要有唇亡齿寒的危机感、使命感。

第四，加速与其他交通方式的实质合作。空铁联运不单是旅客在 APP 上能一站式购买空铁两段的客票，还要有实实在在的便民服务。比如机场要打造进出港的航班波，高铁站要围绕进出港航班波进行适当的铁路运行调度，明确合理的最短空铁衔接时间。当空铁一方延误导致旅客无法按原计划中转时，要有免费签转的保障。空铁双方要保持联运产品的供给比例，通过联程产品来引导旅客出行习惯，不能因为旺季保高收益就降低联运产品的供给比例。在服务标准方面，空铁双方要安检标准一致、安检互免、行李额度互认等。当前枢纽机场空铁合作一强一弱的格局很难打破，而成都市将在双流、天府两场间建设高铁站，以城市地铁将两个机场和高铁站快速连接起来，将是实现空铁合作均衡发展的有益尝试。



美国低成本航空商业模式的收敛与分化

文 | 赵巍　　编辑 | 林喆

▲ 来源：SimpleFlying

美国航空业放松管制之后，低成本航空凭借单一机型、点对点航线、简化机上服务、次级机场运营、直销票务等闭环运营体系持续抢占传统全服务网络航司市场份额，西南航空是该模式的标杆代表。但 21 世纪 20 年代中期美国航空市场呈现出矛盾的格局：需求端，2026 年假期旅客量再创新高，叠加重大节庆赛事拉动，市场总需求并未萎缩；供给端，达美、联合等全服务航司依靠高端舱位与会员体系维持盈利，而低成本航司阵营却集体经营恶化。捷蓝航空自 2019 年后连续七个财年亏损，边疆航空多数季度陷入亏损，精神航空最终清算退出。在此背景下，西南航空成为重要反例，作为传统低成本模式的开创者，2026 年上半年营业利润 6.15 亿美元，已经超过 2025 全年水平。

由此本文提出三个研究问题：第一，西南航空与捷蓝航空经营绩效分化的核心财务与战略因素是什么；第二，2026 年在航油冲击下如何检验两家航司的商业模式韧性；第三，美国低成本航司的经营困境是属于周期下行，还是商业模式的结构性筛选。

理论框架与分析思路

低成本航空的成本优势可以归纳为一套协同运营组合：采用单一机型降低培训、维修与备件库存成本；点对点航线规避枢纽运行损耗；提升飞机日利用率摊薄固定成本；简化机上服务压缩直接运营支出；直销模式减少分销费用；选用次级机场压低起降与场地租金。整套运营逻辑指向压低单位运力成本，旅客选择该类航司的核心诉求是低票价，对服务品质差异敏感度较低。

航司核心经营恒等式：营业利润＝（单位运力收入－单位运力成本）× 可用座位英里。其中，可用座位英里代表投放运力规模，单位运力收入为单位运力带来的营业收入，单位运力成本为单位运力对应的运营成本。该公式剥离了企业规模的干扰，将盈利拆解为单位收入获取、单位成本管控两项可比指标。

本文搭建三层分析框架：第一层为单位经济层，单位运力收入与单位运力成本的差值，决定常态盈利能力；第二层为资产负债层，股东权益厚度与债务结构，决定外部冲击下的亏损容错空间；第三层为战略行为层，商业模式重构的时机与执行效果，决定前两层指标长期演化路径。

本文采用比较案例研究，西南和捷蓝两家同为老牌低成本航司，同处美国本土市场，共同经历疫情与油价冲击，但经营结果迥异。财务数据取自企业向美国证券交易委员会提交的年报、季报及投资者公告；研究过程对政府补贴、统计口径差异做剔除标注处理。

经营轨迹与分析拆解

2019 年，两家航司均实现盈利，西南航空净利润 23.00 亿美元，净利率 10.26%；捷蓝航空净利润 5.69 亿美元，净利率 7.03%。疫情冲击后业绩显著分化，西南航空 2021 年账面盈利，剔除政府薪资补贴后实际亏损，自 2022 年实现内生性年度盈利；捷蓝航空自 2020 年持续亏损，累计亏损超 31 亿美元。

西南航空保持盈利，但 2022 ～ 2025 年盈利质量明显下滑。2025 年营业收入较 2019 年增长 25.1%，而净利润仅为 2019 年的 19.2%，净利率降至 1.57%，传统低成本模式的红利在逐步消退。2026 年上半年转机出现，净利率回升至

▼ 表 1 | 两家航空公司核心财务指标（2019 年至 2026 年上半年，单位：百万美元）
数据来源：上市公司年报、季报、投资者关系公告；净利率以百分比计。

年度	西南航空营收	捷蓝航空营收	西南航空净利	捷蓝航空净利	西南航空净利率 (%)	捷蓝航空净利率 (%)
2019	22428	8094	2300	569	10.26	7.03
2020	9048	2957	− 3074	− 1354	− 33.97	− 45.79
2021	15790	6037	977	− 182	6.19	− 3.01
2022	23814	9158	539	− 362	2.26	− 3.95
2023	26091	9615	465	− 310	1.78	− 3.22
2024	27483	9279	465	− 795	1.69	− 8.57
2025	28063	9062	441	− 602	1.57	− 6.64
2026 上半年	15682	4937	460	− 566	2.93	− 11.46

年度	西南航空单位运力收入	西南航空单位运力成本	西南航空单位营业利润	捷蓝航空单位运力收入	捷蓝航空单位运力成本	捷蓝航空单位营业利润
2025 年	15.59	15.35	+0.24	13.94	14.51	− 0.57
2026 年第二季度	18.34	17.72	+0.62	15.71	16.53	− 0.82
差值（西南航空、捷蓝航空）	+2.63	+1.19	+1.44			

▲ 表 2| 分解结果（美分 / 可用座位英里）

2.93%，营业利润显著修复。

分析得出反常结论：2025 年，西南航空单位运力成本为 15.35 美分 / 可用座位英里，高于捷蓝航空的 14.51 美分 / 可用座位英里。捷蓝在传统成本控制维度并不弱于西南。2025 年捷蓝单位运力成本同比下降 3.8%；西南剔除燃油与员工利润分享后的单位运力成本同比上涨 3.1%，成本差距并不是两家公司盈利鸿沟的根源。

▼ 来源：西南航空



两家公司的决定性差异集中于收入端。2025 年，西南航空单位运力收入较捷蓝高出 11.8%，收入溢价覆盖更高成本后形成正向单位营业利润；捷蓝收入无法覆盖成本，单位营业利润为负。2026 年第二季度，二者的差距进一步拉大，盈利分化持续加剧。

西南航空收入溢价来源在于重构了传统低成本航空运营逻辑。2025 ～ 2026 年，西南航空实施公司史上力度最大的商业模式改革，多项举措颠覆沿用五十年的低成本运营传统：取消免费开放式选座，推出付费指定座位与加大腿部空间服务；取消两件免费托运行李，实施行李收费；上线基础经济舱，收紧积分过期规则；重构会员积分体系，重新谈判联名信用卡协议；接入第三方票务分销平台；拓展企业商务客户；同步优化人员结构、退役老旧机型，推进机队现代化。

改革的本质是将原有的免费旅客权益进行商业化定价，挖掘增量收入。根据西南航空管理层的测算，选座、座椅升级等增值服务可贡献超 10 亿美元的息税折旧摊销前利润。2026 年第二季度，商务出行收入同比增长 30%，会员规模接近 1 亿人。

捷蓝航空同步推进转型战略，升级商务舱、建设贵宾休息室、搭建辅营收入体系，但转型属于成熟市场的短板补齐，受品牌认知、客群结构约束，产品溢价空间有限。2026 年第二季度，西南航空单位运力收入增长属于结构性提价，捷蓝的收入提升更多来自油价倒逼的被动涨价。

截至 2025 年末，捷蓝机队规模约 285 架，在美国国内的市场份额不足 5%，属于典型的中等规模航司。该规模既不足以对标头部航司搭建完整的网络与会员体系，也达不到超低成本航司的极致成本水平，落入“中间陷阱”。其在纽约主场的份额持续被达美航空蚕食，在波士顿基地的竞争优势因反垄断判决而削弱。2019 ～ 2025 年，捷蓝运营成本累计上涨 29%，而营业收入仅增长 13%，成本与收入的“剪刀差”持续扩大。

航油冲击压力测试

2026 年 2 月底，中东地缘冲突推高航油价格，34 天内美国航油价格涨幅达到 95%，形成理想的外生冲击实验。两家航司均未开展实质性燃油对冲，业绩差异不受衍生品干扰。

2026 年第二季度，西南航空燃油支出增加 8.89 亿美元，同期营收增量 11.88 亿美元，新增收入完全消化油价上涨压力，营业利润实现同比增长。捷蓝航空燃油支出增加 4.07 亿美元，但营收增量仅 3.41 亿美元，出现现金流增量倒挂，由盈利转为亏损，营业利润率 5.2%。

冲击之下的结果来源于三点结构性差异：一是收入缓冲厚度，西南单位运力收入基数更高，同等票价上涨带来更大边际收入；二是旅客价格弹性，捷蓝客群以价格敏感的休闲旅客为主，仅可转嫁约 50% 油价涨幅；三是资产负债安全垫，西南具备高流动性与投资级评级，捷蓝股东权益薄弱，风险缓冲不足。

指标	西南航空	捷蓝航空
燃油单价（美元 / 加仑）	2.35 → 3.92（+67.0%）	2.40 → 4.23（+76.3%）
燃油总支出（百万美元）	1326 → 2215，增加 889	504 → 911，增加 407
同期营业收入增量（百万美元）	+1188（同比 + 16.4%）	+341（同比 + 14.5%）
燃油增量收入增量差额	+299，新增收入覆盖新增燃油成本	+66，增量收入不足以覆盖燃油增量，现金流倒挂
燃油占营业支出比重	约 27%	21% → 32%
营业利润（百万美元）	+285（同比 + 26.7%）	+141（去年同期 + 6）
营业利润率	+3.4%	− 5.2%
成本端	退役老旧 737700，接收新飞机	持续迭代

▲ 表 3| 2026 年第二季度航油冲击传导效果对比

从资产负债看战略容错空间差异

航空属于重资产高杠杆行业，企业生存能力不仅取决于当期盈利，更取决于亏损耐受空间。截至 2026 年 6 月末，西南航空股东权益 70.8 亿美元，资产负债率 76.5%，总流动性 53 亿美元，实现净利息收益；捷蓝股东权益仅 15.9 亿美元，半年权益缩水 25.1%，资产负债率高达

▼ 来源：ARCRefuellers





▲ 来源：SimpleFlying

90.3%，为投机级信用评级，2025 年利息费用 5.88 亿美元，财务负担沉重。

回溯 2019 年末，两家航司股东权益分别为 98.3 亿美元、39.5 亿美元，七年间捷蓝股东权益缩水近六成。虽然捷蓝债务到期节奏分散，2029 年前无大额集中偿付，为转型留出窗口期，但持续亏损会不断侵蚀股东权益，生存风险持续存在。

结合实证结果构建三层归因模型。外层为战略行为层，西南在机构投资者推动下快速完成商业模式转型；捷蓝资源消耗于失败的并购与联盟战略，错失转型窗口。中层为单位经济层，西南依靠收入溢价抵消成本劣势；捷蓝收入难以覆盖成本，外部冲击进一步放大亏损。内层为资产负债层，西南充足的财务缓冲支撑改革落地；捷蓝高杠杆几乎没有容错空间，外部冲击直接演变为生存压力。三层机制相互强化，形成正负反馈闭环。

▼ 表 4 | 资产负债表关键指标（截至 2026.06.30）

指标	西南航空	捷蓝航空
总资产 / 总负债	301.2 亿 / 230.4 亿美元	163.7 亿 / 147.8 亿美元
股东权益	70.8 亿美元	15.9 亿美元（2025 年末 21.2 亿）
资产负债率	76.5%	90.3%
总债务（含融资租赁）	约 68.9 亿美元	84.8 亿美元
现金及证券投资 / 总流动性	38 亿 / 53 亿美元	22 亿 + 6 亿未动用授信额度
无抵押资产规模	约 157 亿美元	约 65 亿美元
信用评级	投资级	投机级
2025 年利息费用	1.67 亿美元，净利息收益	5.88 亿美元
2026 上半年经营活动现金流	19.47 亿美元	− 0.35 亿美元

结论

波特的“中间陷阱”理论认为，企业同时推进成本领先与差异化却均无法做到极致，将陷入战略两难。本文做出两点修正：第一，陷入夹心困境的根源并非战略组合本身，而是企业是否拥有支撑差异化向上定价的异质性资源。捷蓝受网络、会员、融资条件约束落入困境；西南依托规模化网络、高渗透会员、投资级信用，可以同步推进降本与产品升级。只有资源禀赋不足时，双重战略才会走向失败。第二，后疫情时代人力、租赁、维修成本上行，低成本航司传统成本红利消退，与全服务航司成本差距持续收窄。当成本优势不再可靠，竞争重心转向收入创造能力，而收入能力高度依赖稀缺异质性资源。



▲ 来源：WikimediaCommons

近年来，美国低成本航空呈现显著分化：精神航空清算退出，捷蓝、边疆航空深陷亏损；西南完成模式转型，部分深耕细分市场的低成本航司保持盈利。行业困境属于商业模式的结构性筛选，而非简单周期下行，可以归纳为三项命题。

命题一，失效的不是低成本航空模式，而是高杠杆、以价格战为主要手段的低成本模式。避开主流市场内卷的航司经营稳健；依靠高负债在枢纽市场打价格战的航司，油价波动即可威胁生存。

命题二，低成本航空由行业颠覆者转为双向挤压的市场参与者。全服务航司向下布局基础经济舱抢占低价市场，向上依托高端产品收割高价值客群，低成本航空原有利基空间持续被蚕食。

命题三，低成本航空存在“成功悖论”。成熟市场中，低成本更适合作为过渡路径而非终极定位。西南盈利改善的重要前提，是放弃免费托运行李、开放式选座等传统标志性规则。模式跃迁的必要条件是规模化网络、成熟会员体系与健康的资产负债表。

北美航空市场的演变表明，全球低成本航空已经告别单纯成本比拼，竞争升级为成本效率、收入创造、财务抗风险能力的综合博弈。低成本是动态迭代的战略工具，航司需要在成本、收入、财务安全之间实现动态平衡，规避低价依赖、缺少定价权、高杠杆扩张等风险，对内卷竞争的亚太市场具备较强借鉴意义。

亚太低成本航司普遍面临同质化竞争、油价汇率扰动、骨干航司挤压；中国还面临高铁替代、核心机场时刻约束，东南亚需要警惕盲目投入远程宽体机。据此提出实操建议：理性控制扩张节奏，避免恶性价格战，挖掘细分航线打造局部定价权；发展分层票价与增值服务，提高辅营收入占比，降低对基础票价的依赖；严控有息负债，优化债务周期，将流动性安全提升至战略高度；实施错位竞争，国内航司优先布局长距离及区域国际航线，东南亚航司夯实短途基本盘，审慎拓展远程市场。亚太航司不必照搬西南全套改革举措，但应当把握核心逻辑，成本效率是立足基础，定价权与财务容错能力是穿越周期的根本保障。

航空运输

上海国际航空枢纽建设建议

文 | 商承灏　　编辑 | 林喆



▲ 徐炳南 摄

2024 年，民航局与国家发展改革委联合印发《关于推进国际航空枢纽建设的指导意见》，明确上海建设全方位门户复合型国际航空枢纽的定位。2025 年，上海浦东机场旅客吞吐量约 8499 万人次、货邮吞吐量约 409 万吨，上海两场旅客吞吐量合计超过 1.35 亿人次，枢纽规模和货运基础已居全球前列。但从高质量发展要求看，上海仍面临国际航线网络深度不足、主基地航司全球组织能力有待增强、两场及长三角机场协同不够、航空运输与重点产业结合不深等问题。本文提出“价值枢纽”思路：在继续提升网络连接、中转效率和运行品质的基础上，依托上海及长三角的产业、贸易、科创和总部经济优势，使航空流量更深嵌入产业链、供应链和创新链，实现由规模扩张向价值创造转变。

上海航空枢纽发展的基础与主要问题

《关于推进国际航空枢纽建设的指导意见》将上海列为全方位门户复合型国际航空枢纽，要求增强洲际连接能力和全球辐射能力，推动稀缺航权、时刻等资源向枢纽和主基地航空公司集中。从规模看，2025 年浦东机场完成旅客吞吐量约 8499 万人次、货邮吞吐量约 409 万吨，虹桥机场完成旅客吞吐量约 5015 万人次，上海两场旅客吞吐量合计超过 1.35 亿人次。浦东机场在国际客货运输方面具有突出表现，虹桥机场则承担国内干线、商务出行和区域门户功能，两场共同构成上海航空枢纽的基本格局。与此同时，上海地区生产总值已达到 5.67 万亿元，集成电路、生物医药、人工智能、金融贸易、总部经济和会展经济等产业对国际航空运输具有稳定而高价值的需求。这意味着上海已经具备从“扩大流量”转向“提升流量质量和价值”的现实条件。

但上海的国际航空枢纽发展仍存在四方面结构性短板。一是国际网络的广度和韧性仍需增强。上海已连接全球主要经济体，但部分远程航线的班次密度、航班时刻衔接和二线城市覆盖仍有提升空间，枢纽对全球资源的组织能力尚未充分释放。二是主基地航空公司的枢纽组织能力仍需加强。国际一流枢纽通常依托具有强大远程机队、航班波组织和全球销售能力的基地航空公司，上海需要进一步形成机场、基地航司和口岸单位共同建设枢纽的稳定机制。三是客货运流程与国际化服务仍有断点。跨航司联程、行李直挂、国际转国际及国内国际互转、特殊货物查验等环节涉及多个主体，信息系统和作业标准尚未完全贯通。四是两场和长三角机场群协同仍偏重基础设施连接，航线分工、货源组织、备降保障和地面集疏运等方面尚未形成统一高效的区域运行体系。

国际枢纽发展经验及启示

迪拜和新加坡的发展表明，国际航空枢纽并非单纯依靠航站楼规模形成。迪拜以基地航空公司的全球网络为核心，将机场、航空物流、维修保障、自由区和城市开发结合起来；阿勒马克图姆国际机场新一轮建设也被纳入迪拜南部航空城和综合物流体系，而不是孤立的机场扩建。新加坡樟宜机场则长期通过开放的航空政策、高效的通关服务、优质的旅客体验和机场商业体系增强全球连接，并持续强化航空物流、贸易和创新功能。两地路径不同，但共同点是把航空网络转化为贸易、消费、就业、产业集聚和城市竞争力。

上海既不具备迪拜处于洲际航路交汇点的条件，也无需复制樟宜以高度国际中转和体验消费为主的模式。上海最大的比较优势是超大规模腹地和完整产业体系：长三角集聚先进制造、科技创新、



▼ 来源：english.shanghai.gov.cn

跨境贸易和高端服务业，航空运输具有大量真实的始发终到需求。因而，上海仍要补齐国际航线网络、中转效率和服务体验短板，但不宜把提高中转比例作为唯一目标。更重要的是要提高单位航空流量所承载的贸易额、产业价值、知识交流和总部功能，使机场成为区域产业升级和全球资源配置的基础设施。

国际枢纽的竞争具有明显的长期性。重大地缘事件、公共卫生风险、极端天气、航空公司经营波动和供应链中断，都可能在短期内改变航线和客货流向。上海在追求运行效率的同时，应保留必要的备份能力和跨区域协同空间，避免把资源过度集中于单一航司、单一市场或单一业务模式。机场基础设施建设、航线培育和产业服务平台也应按全生命周期进行评估，既计算建设投入和直接收入，也评估其对贸易便利、产业安全、应急保障和城市开放功能的长期贡献。

“价值枢纽”的内涵与上海定位

航空城理论强调机场周边产业和城市功能集聚。随着高速公路、城际铁路、数字平台和供应链管理的发展，机场对产业的影响已经突破邻近空间，功能联系的重要性不断上升。本文所称“价值枢纽”，是指以全球航空连接为基础，以服务区域实体经济和高水平开放为核心，通过客运、货运、商务、信息和创新要素的协同，使航空流量深度嵌入产业链、供应链和创新链，并形成可持续价值创造能力的枢纽形态。它不是对传统中转枢纽的否定，而是在效率和体验基础上增加产业嵌入与价值转化维度。

综上，上海航空枢纽的评价应由单一吞吐量导向转向两类指标并重。第一类是枢纽基础能力指标，包括洲际航点和班次密度、航班波衔接、最短中转时间、联程旅客比例、航班正常率、口岸通关效率和地面集疏运水平。第二类是价值产出指标，包括高时效和高附加值货物占比、重点产业航空物流时效、航空相关产业增加值、国际商务和会展客流、跨国企业区域总部集聚、航空维修和供应链服务收入等。通过统一定义、稳定统计和年度评估，避免只以旅客量、货邮量或中转比例衡量枢纽成效。

浦东机场应强化国际远程客运、全球航空货运和高水平开放门户功能；虹桥机场应发挥国内高频商务网络、长三角综合交通和虹桥国际开放枢纽优势；上海东站及东方枢纽区域应成为航空、高铁、城市轨道和国际商务制度创新的连接点。两场之间不是简单分流关系，而应通过航线结构、时刻安排、空铁联运和信息平台形成互补。上海还应把南京、杭州、合肥、宁波等机场视为区域枢纽体系的重要组成部分，构建多节点、分层次、有韧性的长三角机场群。

实施路径与政策建议

一是建立跨部门枢纽治理和绩效评估机制。建议建立由上海市统筹，机场集团、基地航空公司、空管、海关、边检、铁路和重点产业部门参加的枢纽建设协调机制。围绕国际航线拓展、中转流程、货运保障、综合交通和重大项目形成年度任务清单，明确责任主体和完成时限。同步建立“基础能力 + 价值产出”指标体系，定期发布上海航空枢纽发展报告。对中转时间、行李衔接、口岸查验和特殊货物保障等跨部门事项，应以全流程旅客体验和供应链时效为标准，而不是分别考核单个单位。

二是以枢纽贡献度优化航权和时刻配置。在国家航权和时刻管理制度框架下，建立公开透明的枢纽贡献度评价机制。重点考察航线对洲际网络完善、航班波衔接、基地投入、持续运营、国际货运和国家战略的贡献。对主基地航空公司开辟远程战略航线、增加高频国际航班和配置宽体运力给予稳定预期，同时鼓励吉祥航空、春秋航空及外国航空公司发展差异化网络。

三是提升基地航空公司和机场的联合枢纽运营能力。推动机场与基地航空公司共同优化航班波结构，扩大联程产品和行李直挂范围，加强不正常航班下的旅客保护和快速改签。建设统一的枢纽运行数据平台，打通机场、航空公司、空管、口岸和地面交通信息，为旅客提供一体化中转指引，为货主提供全程可视化物流信息。国际中转时间的压缩应在安全合规前提下分类推进。

四是建设服务重点产业的高价值航空物流体系。围绕集成电路、生物医药、高端装备、航空维修和跨境电商，建立重点企业航空供应链需求清单。鼓励机场货站、航空公司、物流企业与产业园区共建数字接口，提前获取货物品类、温控、查验和航班需求，实现预约保障和分类作业。对医药、科研样本、紧急备件等高时效货物，应探索覆盖申报、查验、转运和交付的全链条服务标准，并以平均通关时间、温控完整率和应急响应时间进行考核。

五是深化长三角机场群和空铁联运协同。依托长三角一体化发展机制，建立跨省市机场、航空公司、铁路、海关和物流企业参与的协同平台。根据航线网络、货物时效和综合物流成本推进功能互补。浦东重点保障国际远程客运和高价值航空货运，虹桥强化国内商务与空铁联运，区域机场发挥支线衔接、快件分拨、备降和专业货运功能。加快上海东站与长三角主要城市铁路班次衔接，完善异地值机、行李联运和异地货站标准。建立大面积航班延误、极端天气和区域空域受限情况下的联合保障预案，提高机场群整体韧性。

六是同步推进数字化、绿色发展和专业人才建设。数字化不能停留在单个业务系统升级上，应围绕旅客一次出行和货物一次运输形成统一数据链。绿色发展方面，应统筹航班运行优化、地面设备电动化、绿色建筑、可持续航空燃料应用条件和多式联运减排，建立可核算的单位旅客、单位货邮碳排放指标。同时加强国际航线经营、航空物流、口岸规则、数据治理和枢纽规划等复合型人才培养，支持机场、航空公司、高校和研究机构建立长期交流机制，为枢纽持续创新提供专业支撑。

来源：ChinaAirlineTravel.com



追逐日出——空客 A350-1000ULR

创纪录飞行背后的系统工程启示

文 | 乔善勋　　编辑 | 林喆

2026 年 7 月 27 日，法国图卢兹布拉尼亚克机场，一架涂装尚未完成的空客测试机缓缓滑入停机位。这架专为澳洲航空“日出计划”打造的 A350-1000ULR（注册号 F-WULR、生产序列号 MSN707），刚刚完成航空史上具有里程碑意义的飞行。从澳大利亚墨尔本起飞，历经 24 小时 24 分钟不经停飞行，跨越 12460 海里（约 23075 公里），穿越太平洋、大西洋与三大洲，安全返回图卢兹。



▲ 来源：空客

▼ 来源：空客



这一数字超越了波音 777-200LR 在 2005 年创下的 22 小时 42 分钟商用飞机最长飞行纪录。FlightRadar24 数据显示，呼号 AIB35LR 的测试机成为该平台历史上第二受关注的航班，超过 360 万人在线追踪其航迹。在整整一天的飞行中，机上人员两次目睹日出、两次经历日落——这正是“日出计划”名称的由来，无论从地球哪一端起飞，乘客都将在目的地的日出时分抵达。

然而，这绝非一次简单的“刷纪录”公关飞行。从系统工程视角审视，超长航程商业飞行本质上是涉及空气动力学、燃油系统架构、适航安全边界、客舱环境控制与人体生理学极限的多学科高度耦合难题。支撑这场 24 小时飞行的，是一整套重新定义民机工程边界的技术体系。

24 小时的运筹学

在航空工程语境中，此次双向试飞被严格界定为“开发性飞行测试”，而非“认证飞行测试”。开发测试的核心目标是在客户预期的 21 小时 40 分钟商业航程基础上，验证飞机能否安全执行 23 小时以上的“轮挡时间”任务——涵盖起降滑行、空中盘旋及备降所需的全部冗余。

回程航班的航线规划本身便是一次精密的运筹学实践。测试机从墨尔本起飞后，未选择民航惯用的西北向传统航路，而是向东北切入太平洋，跨越国际日期变更线，沿北美西海岸北上，再取偏北大西洋航线经格陵兰、冰岛返回图卢兹。

空客试飞员 Xavier Pepin 解释，偏北航线主要为规避航空公司密集使用的固定航路。测试飞行计划具有高度不确定性，偏离拥挤航路可最大程度避免与空管系统冲突。更重要的是，这条航线本身就是对飞机续航能力的极限压力测试——在不同大气温度、风场条件下验证发动机持续工作的可靠性，燃油系统在各种姿态下的供油稳定性，以及飞控系统在超长航时任务中的鲁棒性。

人类生理极限是超长航线无法回避的“短板”。去程配备四名空客试飞员，回程增加两名澳航客座飞行员，机组总数六人，并配套多名试飞工程师和地面测试工程师。疲劳管理的核心机制是严格的“四小时轮班、两小时交接”错峰轮换：每当新飞行员进入驾驶舱，将与即将休息者有两小时重叠期，确保天气趋势、燃油状态、系统异常、空管指令等关键信息完成情境感知的无缝传递。

适航责任划分同样严谨：任何有澳航飞行员操纵的阶段，驾驶舱内必须至少有一名空客试飞员在座。一个有趣的细节是，全新双入口飞行机组休息区（FCRC）在此次飞行中被通风测量仪器占据，机组转而使用尾部八铺位乘务员休息区。测试平台

上数据采集优先于人员舒适，所有“不舒适”都是为了未来商业运营中的“更舒适”。

在规章空白处书写安全

超长航程的本质，是在结构重量、可用空间与燃油装载量之间寻求极致三角平衡。A350-1000ULR 能在不大幅改动基础气动外形的前提下实现航程突破，核心密码便藏在机身中后部的“后中央油箱”（RCT）里。

支撑近 10000 海里航程的 RCT，不是在机腹简单焊接一个独立油箱。它是真正意义上的保形机身结构油箱——飞机外部蒙皮本身构成油箱壁的一部分，油箱与机身下部结构完全融为一体。RCT 位于中央翼盒之后、主起落架舱前方，部分取代后货舱空间，不破坏外部气动外形，避免了外挂副油箱的阻力惩罚，将原本被结构件、管线占据的“死空间”转化为约 20000 至 20900 升燃油容积，增加近 1800 公里航程。

创新架构不可避免触及适航规章盲区。CS-25 和 14 CFR Part 25 制定于机翼油箱时代，对这种位于机腹、紧贴客舱地板下方的大型共形油箱，防火防撞标准完全空白。EASA（欧洲航空安全局）为此出台专门“特殊条件”，其中 SC-D25.856-01 文件最具代表性，标志着认证理念从“规定性标准”向“基于性能的标准”转变——规章不再告诉你“用多厚的钢板”，而是要求你证明“在威胁下系统是安全的”。

博弈焦点集中在三个维度。其一是外部池火热传递与客舱疏散。RCT 在地面池火高温下，热量可能传导至客舱地板妨碍疏散，或引燃油箱蒸汽。空客必须通过复杂隔热材料缓解，但又不能阻碍机身减压面板功能。其二是结构抗坠毁性。机腹油箱比机翼油箱更易受地面物体穿透，解决方案是采用高抗穿透、高阻燃的纤维金属层压板制造下部外壳，并配备带滑动垫的增强型机腹整流罩作为擦地缓冲。其三是 ATA28 章燃油调度与重心管理。RCT 加入意味着燃油管理逻辑必须重写，飞控计算机优先将 RCT 燃油向前转移至中央翼盒，维持整个飞行剖面的最佳重心包线，最大化巡航气动效率。

此次创纪录飞行的重要价值，正是在真实超长航时工况下验证了油泵在极限倾角、低油位下的持续工作能力，以及燃油传输逻辑在各边界条件下的正确性。

▼ 表 1 | A350 家族关键技术规格对比

技术参数	A350-900	A350-1000	A350-1000ULR
典型三舱座位数	332 ～ 352 座	375 ～ 400 座	238 座（日出计划低密度）
最大航程	8500 海里 /15750 公里	8700 海里 /16100 公里	超过 9700 海里 /18000 公里
最大起飞重量	283.9 吨	319 吨	322 吨以上
动力装置（推力）	Trent XWB-84（84000 磅）	Trent XWB-97（97000 磅）	Trent XWB-97（97000 磅）
特殊燃油架构	传统中央与机翼油箱	传统中央与机翼油箱	集成后中央油箱（新增约 20000-20900 升）

对抗 20 小时生理边界

RCT 解决了“能不能飞到”，客舱人因工程回答的则是“能不能健康走下飞机”。超过 20 小时的密闭空间里，任何微小不适都会被时间放大为难以忍受的煎熬。

A350-1000ULR 引入的新一代空气冷却器（NGAC）代表了 ATA 21 章客舱环境控制的理念升级。传统宽体机采用中央制冷，通过遍布全机的管路输送冷量——管路长、损耗大、调节精度低。NGAC 采用分布式局部制冷架构，直接在各厨房区域部署独立冷却单元，既减轻了管路重量、降低泄漏风险，又能对超长航班大量新鲜食材进行分区精准温控，同时减少中央制冷热负荷对主空调的干扰。

为验证系统有效性，空客在客舱内布置了重达 5 吨的飞行测试仪器（FTI），含上千个高灵敏度传感器。值得称道的是“非破坏性轻量化 FTI”设计：所有橙色线缆都穿过现有座椅轨道和厨房预留通道，不在机体上额外钻孔。这意味着测试完成后飞机可快速恢复商业交付状态，无需结构修补。工程团队还使用散发与真人等量热量的“热假人”模拟客舱热负荷，既避免志愿者健康风险，又获得可重复的热环境数据。

把客舱变成“时区重置器”

澳航还联合悉尼大学查尔斯·帕金斯中心、莫纳什大学等机构，开展了航空史上最严谨的飞行生理学研究，首次将临床医学级健康干预作为产品设计标配。

在前期纽约 / 伦敦至悉尼的测试飞行中，受试者佩戴可穿戴设备和脑电图（EEG）监测仪，研究人员甚至通过尿液样本全程监测褪黑素水平。数据显示，系统干预可有效改善空中睡眠质量，提升到达后两天内的认知表现，显著减轻主观时差感。238 座的低密度布局服务于同一目标：比标准 A350-1000 少近一半座位，换来更大个人空间、更充裕活动区域、更低客舱二氧化碳浓度和噪声水平。按计划，首架命名为“Vega”的飞机将于 2027 年 4 月交付，同年 10 月开通悉尼至伦敦每日直飞航班。

从特型机到全机队的涟漪

A350-1000ULR 验证的技术绝非仅服务于十几条特殊航线。在平台化、模块化发展逻辑下，特型机型往往成为新技术的“先导验证平台”，成果向整个产品线溢出。

RCT 技术最直接的受益者是 A321X-LR。该机同样在中后机身集成约 12900 升保形后中央油箱，航程达 4700 海里，可执行 11 小时单通道跨洋飞行。由于两者面临相似的 FAA/EASA 适航审定，A350 积累的合规数据、纤维金属层压板设计经验，直接为后置结构油箱适航审定铺平道路。这一路径证明：通过优化内部空间而

▼ 表 2 | “日出计划”客舱干预策略与传统长途航班对比

干预维度	传统长途航班模式	“日出计划”优化模式
照明系统	正餐后长时间关灯	全 LED 照明（1670 万色）按目的地时区模拟日出日落光谱，调节褪黑素分泌
餐食时机	按起飞时区固定供餐	餐饮时间强制对齐目的地时区节律
饮食成分	标准高热量航餐与酒精	促眠期：富含色氨酸的鱼禽、快吸收碳水；觉醒期：辣椒、巧克力等刺激性食物
活动空间	仅限过道短暂停留	专设“健康活动区”，视频引导拉伸运动，预防深静脉血栓
座椅密度	A350-1000 通常 350 座以上	全球最低密度：238 座（6 头等 +52 商务 +40 超经 +140 经济）



▲ 来源：空客

非改变气动外形即可显著增程，未来将有更多机型采用“牺牲部分下货舱换取航程”的设计，用窄体机成本开通以往只有宽体机覆盖的点对点航线。

A350F 全货机同样从这些测试中获益。该机最大业载 111 吨、航程 4700 海里，是唯一符合 ICAO 2027 年 CO_2 排放标准的新一代大型货机。货机设计中重心包线极端变化与地板承重密切相关，ULR 版本在后机身强化、起落架适配、燃油热管理方面的经验，可直接转化到 A350F 的地板承重与消防抑爆系统。两者共用 Trent XWB-97 发动机，在安装、燃油系统等方面高度共通。

客舱算法的溢出效应可能最广也最易被忽视。昼夜节律算法和疲劳管理指南本质是软件和服务流程，无需硬件改装即可应用于现有机队。空客可通过客舱系统软件升级，将基于时区的照明光谱、温度调节策略推送给现役 A350、A330 机队。航司也将以此为标杆重新设计长途航班餐谱与服务流程。这种“软性升级”成本极低但体验提升显著，代表民机竞争从“硬件参数”向“体验算法”延伸的新趋势。

MSN707 在 24 小时 24 分钟里飞越两万三千公里，在地球曲率上画出一道壮丽弧线。航空史的魅力，从来不止于那些被刷新的数字。真正推动边界向前的，是数字背后看不见的工程智慧——在规章空白处定义安全的勇气，在多学科耦合中寻找最优解的耐心，把人体科学织入管线代码的细致，让一项特型技术涟漪般扩散到整个机队的平台思维。从伦敦到悉尼，从纽约到墨尔本，那些曾经需要在中转站疲惫等待的漫漫长夜，正在被工程的力量一点点缩短。

展望不久的将来，当澳航首架“Vega”号搭载着 238 名乘客从悉尼起飞，在伦敦的晨雾中准时降落，“日出计划”便从测试手册走进了普通人的登机牌。追逐日出的航程没有终点，下一道地平线在哪里，工程师的图纸就会延伸到哪里。



▲ www.winsonlo.com

新加坡樟宜机场打造航空枢纽的实践

文 | 蒋星　　编辑 | 林喆

新加坡樟宜机场作为全球知名国际航空枢纽，充分发挥其优势市场地位，锚定东南亚、大洋洲等腹地，凭借通达全球的航线网络、高效便捷的中转流程、完善的智能导览体系、丰富的商业娱乐配套以及成熟的过境观光项目，为全球中转旅客打造了舒适、多元且人性化的过境体验。本文围绕新加坡打造国际航空枢纽的实践进行讨论，以期为国内机场提供借鉴。

设施情况

新加坡樟宜机场为 4F 级国际航空枢纽，24 小时运营，飞行区有 3 条全长 4000 米的高标准跑道，以及 7 条滑行道，能够满足 A380 等超大型客机起降。现有停机位 159 个，包括 117 个廊桥机位和 42 个远机位。

目前共有 4 座航站楼，其中 T1、T2、T3 航站楼均采用进港和出港混流的模式，3 座航站楼之间通过连廊步行可达，步行时间只需要几分钟。同时在每座航站楼之间设有捷运，通过捷运 2 ～ 3 分钟可以连通。通过便捷的步行及捷运系统，把 3 座航站楼连为一体，对于中转旅客十分便捷。T4 航站楼相对独立，需要通过巴士转运连接到其他 3 座航站楼。此外设有“星耀樟宜”综合体，集购物、餐饮、景观于一体。

▼ 表 1 | 亚太主要机场分区域通航点数　数据来源：OAG，2026 年 8 月

区域	新加坡	香港	首尔仁川	东京成田	东京羽田	北京首都	上海浦东	广州白云
大洋洲	12	8	3	8	1	3	5	8
东北亚	9	17	32	24	52	9	14	5
东南亚	51	23	25	13	7	10	19	24
非洲	3	2	1	1		3	2	5
港澳台	4	4	5	5	3	3	5	2
美洲	6	10	22	19	16	9	8	5
欧洲	17	14	20	8	10	31	33	11
中东中亚	26	13	13	12	5	13	12	19
中国	29	47	43	15	9	124	141	127
合计	157	138	164	105	103	205	239	206

▼ 表 2 | 亚太主要机场分区域周航班量　数据来源：OAG，2026 年 8 月

区域	新加坡	香港	首尔仁川	东京成田	东京羽田	北京首都	上海浦东	广州白云
大洋洲	276	122	33	47	35	17	51	48
东北亚	215	696	1182	811	3625	235	547	84
东南亚	1569	751	868	308	194	138	593	653
非洲	17	14	6	2		15	17	29
港澳台	178	398	304	347	126	162	286	39
美洲	61	168	336	259	266	49	67	14
欧洲	208	138	163	49	135	284	283	72
中东中亚	383	134	98	66	48	75	92	133
中国	542	790	929	166	212	3885	3680	4587
合计	3449	3211	3919	2055	4641	4860	5616	5659

航线网络

新加坡虽然本地市场规模有限，但是依靠强大的枢纽运营，已经构建了辐射全球的航线网络，在此以香港、首尔仁川、东京成田、东京羽田、北京首都、上海浦东、广州白云等亚太主要机场进行对比分析。从总通航点和航班量来看，新加坡机场并没有优势，但是细分到东南亚、大洋洲等部分区域，则优势凸显。

东南亚方面，樟宜机场服务 51 个通航点，每周航班量达到 1569 架次，相比之下，香港、首尔仁川、广州白云、上海浦东等机场只辐射了 20 余个通航点，航班量也只有新加坡的一半左右，东京成田、东京羽田、北京首都则更少。

大洋洲方面，樟宜机场通航 12 个通航点，每周航班量 276 架次，也远高于对标机场。特别是航班量，除香港外，其他对标机场航班量不足新加坡机场的 20%。

中东中亚方面，樟宜机场通航 26 个通航点，每周航班量 383 架次，对标机场基本通航 12 ～ 13 个通航点左右，东京羽田仅通航 5 个。

而在美洲、欧洲、东北亚区域，由于其他对标机场都处于东北亚区域，樟宜机场从地理角度来看对欧美、东北亚区域的辐射更为密集，在通航点和航班量方面均充分体现。

可以清晰看出，由于地理位置处于亚洲南部，樟宜机场的辐射范围非常明确，主要是服务东南亚和大洋洲，事实上新加坡已经成为全球进出东南亚和大洋洲的重要门户。

新加坡航空（SQ）及其全资低成本子公司酷航（TR）是樟宜机场的基地航空公司，两家公司在樟宜机场市场份额高，航班量和座位数分别占比达到 53.4% 和 57.4%。两家公司定位存在不同，洲际通航点均由新加坡航空（SQ）负责运营，少量开通亚洲航线，而酷航（TR）则主要辐射亚洲区域，以东南亚、大洋洲等通航点为主，两家公司分工合作，共同支撑樟宜机场枢纽建设。

除了两家基地航空公司，在新加坡机场运营航班量前五位的航空公司分别为马来西亚亚洲航空、东方航空、马来西亚航空、印度靛蓝航空、澳洲航空，航班量占比分别达到 3.4%、2.5%、1.9%、1.9%、1.9%。

为了更好开展中转业务，新加坡航空和酷航全力打造航班波，尽可能压缩中转航班衔接时间，目前已经构造了质量较高的航班波。第一个航班波（22:00 ～ 1:00 进港，0:00 ～ 3:00 出港），进港主要服务大洋洲、东南亚旅客，转机出港至东北亚、欧洲、中国。第二个航班波（5:00 ～ 8:00 进港，7:00 ～ 10:00 出港），进港主要服务欧洲、中东中亚、中国，转机出港至东南亚、中国。第三个航班波（10:00 ～ 13:00 进港，12:00 ～ 15:00 出港），主要服务东南亚区域内的中转。第四个航班波（14:00 ～ 19:00 进港，16:00 ～ 21:00 出港），进港主要服务欧洲、美洲、东北亚、东南亚，转机出港至中东中亚、东南亚、欧洲。

2025 年，新加坡樟宜机场中转旅客量达到 1999.9 万人次，中转率达到 28.8%。在中转区域中，东南亚转东南亚占比最高，达到 8.1%，东南亚转欧洲、大洋洲转欧洲、中亚中东转大洋洲、欧洲转东南亚排名 2 至 5 位，前五位占比达到 32.0%，前十位占比达到 57.8%，前十位中转区域均为进出东南亚地区或大洋洲地区。

二字代码	航空公司	通航点数	周航班量	座位数	航班量占比
SQ	新加坡航空	76	1171	310082	33.9%
TR	新加坡酷航	82	707	160652	20.4%
AK	马来西亚亚洲航空	4	118	22952	3.4%
MU	东方航空	10	87	19046	2.5%
MH	马来西亚航空	1	67	11658	1.9%
6E	印度靛蓝航空	7	67	13822	1.9%
QF	澳洲航空	7	64	18074	1.9%
CZ	南方航空	2	56	11594	1.6%
CX	国泰航空	1	56	15330	1.6%
GA	印度尼西亚鹰航	2	49	7938	1.4%

▲ 表 3 | 新加坡机场主要航空公司情况　数据来源：OAG，2026 年 8 月

始发区域	目的地区域	中转旅客量	占比
东南亚	东南亚	809649	8.1%
东南亚	欧洲	611506	6.1%
大洋洲	欧洲	602427	6.0%
中亚中东	大洋洲	587629	5.9%
欧洲	东南亚	586593	5.9%
欧洲	大洋洲	555770	5.6%
大洋洲	东南亚	545629	5.5%
大洋洲	中亚中东	535854	5.4%
东南亚	大洋洲	524579	5.2%
亚洲其他	东南亚	421398	4.2%

▲ 表 4 | 中转区域情况

中转服务

樟宜机场打破了传统中转候机单调的等待模式，将航班换乘、休闲购物、景观游览、城市观光融为一体，通过丰富的中转服务，适配不同停留时长的中转旅客需求，是长途国际航线优质的中转选择。

由于机场航站楼之间交通体系十分成熟，T1、T2、T3 均通过捷运连接，加之便捷的海关、边检、安检流程，旅客在此中转非常方便。国际旅客到达樟宜机场后，直接进入中转换乘区域，根据下一程航班安排寻找登机口，无需办理海关、边检等任何手续，如果同楼只需要

几分钟就能完成中转，即便是跨楼通过捷运也能在十几分钟抵达下一程登机口。值得一提的是 T1、T2、T3 实施登机口安检，使得整个中转流程非常高效便捷。

同时，樟宜机场在航站楼实现多语言标识全覆盖，所有指引牌、登机口提示、通道指示、设施路标均配备通用国际语言文字，清晰区分中转动线、入境动线、出发动线、商业动线。机场广泛布设高清电子屏，实时滚动播放多语言航班动态、登机口变更、天气信息等内容。机场还多处配备智能自助导览终端，可查询航站楼地图、设施位置、商铺分布、登机口距离、接驳交通时长。

机场内部商业配套体系成熟、品类齐全，覆盖全时段、全场景消费需求。航站楼内遍布大型免税商圈，同时汇集全球各地特色餐饮，大量店铺支持全天候营业，适配凌晨、深夜等不同时段的中转旅客用餐需求。此外机场支持多元化支付方式，购物结算便捷高效。

休闲娱乐与景观设施是新加坡樟宜机场的核心特色，让转机时间有限的中转旅客无需出境即可沉浸式休闲放松。作为机场地标，星耀樟宜的雨漩涡巨型瀑布、多层森林谷景观全天候开放，自然绿植遍布场馆。此外，机场设有免费公共影院、休闲躺椅、全域免费高速 Wi-Fi、充电接口等基础设施，配备付费睡眠舱、淋浴间、贵宾休息室等。

针对停留时长充足的中转旅客，樟宜机场推出了体系完善的免费中转城市观光项目。凡符合过境政策、中转停留时长在 5.5 至 24 小时之间的旅客，均可免费提前预约该项目，或在 T2、T3 专属中转服务柜台现场报名，充分利用中转间隙游览新加坡城市风光。同时，新加坡也推出了 96 小时过境免签政策，对于喜欢中转旅游的旅客而言，也可体验为期 4 天的新加坡自由行。

有关启示

新加坡樟宜机场枢纽建设的路径体现出精准的战略定位。樟宜机场建设国际航空枢纽的先决条件其实并不理想，一是新加坡本地需求很小，没有腹地市场，和全球主要航空枢纽相比，新加坡基本无法依靠地面交通辐射一定的客源市场。二是新加坡所处地理位置并不优越，处在亚洲南部地区，导致其连通欧洲、美洲等主要发达国家的航程距离较远，运行成本较高，这在机场的航线网络中也充分体现，因此新加坡通航欧美的航班频次和航点数并不多。

面对诸多发展困境，樟宜机场精准定位为全球进出东南亚和大洋洲的中转枢纽，首先以新加坡航空和酷航为主，构建辐射这两大区域的航线网络，并构建航班波，以达到尽可能高效的航班衔接。其次不断优化提高中转效率，同时在安检模式选择中，更多考虑中转旅客诉求，实施登机口安检。第三提供优质的中转服务，机场内的商业娱乐设施、96 小时过境免签等系列配套，为各种中转时长、各种出行诉求的旅客提供了完善的中转休闲旅游方案。

在先天条件并不好的情况下，樟宜机场通过精准定位，极致发挥自身优势，一路进阶成为享誉全球的国际航空枢纽，其发展路径值得借鉴。



科普

没有 RNP AR，飞机能不能上高高原？

文 | 邵文馨 陈吟文　　编辑 | 张克农

▲ 王脊梁 摄

RNP AR 是一种基于高性能的导航技术，可以提供更灵活的航迹规划，飞机利用机载设备和全球卫星导航系统引导自身起降，具有避开地形或障碍物，缓解空域限制、提升机场容量等优势，是目前航空界公认的未来飞行导航的发展技术。

RNP AR 技术的实现需要飞行管理系统、自动飞行系统、导航系统、显示系统等系统的深度交联和协同工作，让飞机拥有安全、精准的“三维导航”能力。这些听上去是不是有些抽象，今天我们就用一期科普，把 RNP AR 说清楚。

什么是 RNP AR

RNP（Required Navigation Performance），直译“所需导航性能”，可以理解为“导航的精度指标”。它规定飞机在某个飞行阶段，95% 的飞行时间内，实际位置与预设航线的偏差不能超过某个数值。这个数值用海里表示，数字越小越精准。例如，RNP0.1 意味着偏差不超过 0.1 海里（约 185 米）。

AR（Authorization Required）和“增强现实”的 AR（Augmented Reality）没

有任何关系，只是恰好首字母缩写一致罢了，Authorization Required 的含义是“要求授权”。RNP AR 不是随便哪架飞机、哪个飞行员想飞就能飞的，它需要民航局对航空公司、飞机、飞行员三方的特殊批准，是一项“持证上岗”的高阶操作。

RNP 分很多等级，就像驾照有 C1、C2，也有 A1、A2，RNP AR 就是 RNP 体系里要求最高、门槛也最高的那一档。普通 RNP 进近（RNP APCH）在最后阶段要求精度 0.3 海里（约 555 米），而 RNP AR 的精度最高可以做到 0.1 海里，精度差了整整三倍。此外，RNPAR 还能引导飞机沿固定半径的圆弧航段进行转弯，这种特殊飞行航段的能力被称为 RF 航段能力。

▼ 传统导航对比 RNP AR 导航



本图由 AI 生成。



本图由 AI 生成。

传统导航 vs RNP AR

RNP AR 是当前全球航空界公认的，用于解决复杂地形和提升终端区运行效率的先进导航规范。要理解 RNP AR 的先进性，还得先搞清楚 RNP AR 和传统导航工作的区别。

传统导航是基于传感器、设备的导航。飞机依赖地面导航台发射无线电信号，按照预定径向线、航迹飞行。传统导航的短板在于飞机依赖地面导航设施。导航台建在哪儿，飞机只能往哪儿飞，信号被山挡住，飞机就抓瞎。

RNP AR 的导航不依赖地面的导航台，而是使用卫星导航系统（包括 GPS、北斗等）与机载导航设施的高精度配合来确定实时位置。飞机按照程序的预设路径飞行，同时通过机载监控系统随时检查有没有“跑偏”。

总之，RNP AR 实现了航空器导航从“陆基导航”向“卫星导航”的跨越。这也开启了我们下一节的话题：RNP AR 到底能解决什么实际问题？为什么高高原机场会青睐于 RNP AR？

破解高高原运行难题

我国是全球拥有高高原机场最多的国家。所谓高高原机场，指海拔 2438 米以上的机场，大多坐落在青藏高原等高海拔地区，周围地形复杂、气象多变，飞行难度远非平原机场可比。

在这种环境下，传统导航方式常常力不从心，高山会遮挡地面导航台信号、造成盲区；传统导航只能规划直线航段，遇到山峰只能硬着头皮直线拉升去翻越，在狭窄河谷中根本没有这样的安全空间。

RNP AR 则完全不同：它不依赖地面台，靠卫星定位，山挡不住信号。更重要的是，它的 RF 航段能力，能让飞机实现固定水平航径飞行（即含固定半径转弯航径），让飞机像鹰一样沿精准弧形轨迹绕过障碍物，既省力还更安全。

位于青藏高原东南部的林芝米林机场是 RNP AR 价值极致体现之一。机场坐落在雅鲁藏布江河谷中，两侧山体平均宽度不到 4 公里。传统导航要求云高 600 米才能运行，而林芝常年云高就在 600 米左右——如果依赖传统方式，林芝米林机场的飞机几乎寸步难行。

2006 年 9 月，林芝米林机场开航并成为全球唯一只使用 RNP AR 程序的机场，使这个“最不可能建机场”的地方真正实现了安全运行。

拉萨贡嘎机场是另一个典型。2008 年之前，传统导航在夜间低能见度条件下无法提供足够安全保障，拉萨贡嘎机场自建成后持续 43 年没有夜航。2008 年 6 月，国航机组利用 RNP AR 完成首次夜航试飞，同年 11 月，拉萨机场正式开通夜航航班。RNP AR 不依赖目视参考，依靠卫星定位和机载计算机引导飞机沿精准三维路径飞行，可以实现全天侯监测以及进近着陆。

RNP AR 不仅解决了高原地区“能不能飞”的问题，也对提升高原、高高原航线运营效益有帮助。在 RF 航段能力加持下，RNP AR 可以让飞机以更平缓、更省油的方式起降，飞机节省下来的载重能力就可以用来搭载更多乘客或货物。就拿 C909 来说，运营拉萨飞成都航线，C909 安装了 RNP AR 后，比没安装时可多载客 10 余人。

需要澄清的一点是高高原机场不一定非要用 RNP AR。决定用不用 RNP AR，关键看三个因素：机场有没有公布 RNP AR 程序、飞机有没有获得 RNP AR 资质、运行环境是否“逼”你不得不动用它。



▲ 就像人爬山那样，缓坡绕行要比直爬翻越轻松许多
RF 航段能力让飞机穿越群山时可以绕行上升，安全省力



▲ 王脊梁 摄

林芝米林机场只公布了 RNP AR 程序，所以所有飞机都得用。拉萨贡嘎机场同时有传统程序和 RNP AR 程序，飞机可根据自身能力选择。天气好、能见度高时，传统程序完全够用，遇到低云、大雾、夜航时，RNP AR 就成了唯一的救命稻草。因此准确的说法是：RNP AR 让高高原从“几乎不能飞”变成“可以常态化飞”，而非“非它不可”。

RNP AR 也不只是高原机场的“专属工具”。在繁忙枢纽机场，它同样能发挥重要作用，特别是在提升运营效率等方面。

2025 年，杭州萧山机场成为华东首批试点 RNP AR 的机场之一。执行该程序的航班全程减少飞行距离约 10 公里，缩短时间约两分钟——对于每天数百架次进



▲ 王脊梁 摄

港的繁忙机场，每班省 2 分钟累积起来就是巨大的效率提升。此外，RNP AR 还有以下特殊功能：

优化噪音分布。RNP AR 允许设计飞行路径时选择飞越非住宅区（如农田、工厂），有效减小对周边社区的噪音影响。

解决空域冲突。在空域受限严重的机场（如紧邻其他机场或限制区），RNP AR 可利用其高精度和 RF 航段能力，在繁忙空域中设计出安全航径。2026 年，深圳机场完成了国内首次基于 RNP AR 的独立平行进近（EOR）双机同时验证试飞，两架飞机在最后进近阶段的间隔仅 1.6 公里，证明 RNP AR 的高精度航迹保持能力能够支撑多跑道同时独立运行。

具备 RNP AR 能力的飞机

具备 RNP AR 能力的飞机，是被“双倍武装”的精密飞行器。RNP AR 有一条铁律——任何单一设备故障，都不能导致飞机失去精准导航能力。RNP AR 的每一个关键设备都要有备份，坏了一个，还有另一个能顶上。

例如，双套全球导航卫星系统（GNSS）、双套飞行管理系统（FMS）、双套大气数据系统、双套主飞行显示器和导航显示器、双套飞行指引仪、双套无线电高度表，此外还需要至少一套地形提示与告警系统（TAWS）。

除了双套配置，RNP AR 还涉及三项核心技术。

一是精确定位。RNP AR 靠卫星（GNSS）确定飞机位置。飞机通过卫星信号计算实时位置，再与飞行管理系统中预设的航路点比对，就知道自己“在哪儿”以及“该往哪儿飞”。

二是机载性能监控。飞行管理系统（FMS）持续监控飞行轨迹，并与预设航径对比。如果飞机偏离航线，系统会向机组发出告警。

三是灵活航径设计。程序利用特殊的航段终止码（如 RF 航段）来定义曲线航径，使飞机能沿弧形而不是仅沿直线飞行，从而精准绕过障碍物或限制区。

从“跟着地面信号走”到“精准定位自主监控”，RNP AR 靠着先进导航理念及一整套精密系统的协同配合，重新定义了飞机在复杂环境中的飞行方式。你在航班信息屏上看不到它，但它让高高原机场的航线运营有了质的飞跃——这大概就是一项默默奉献的好技术，一种让人敬佩的存在方式。

一排铆钉与 520 条生命：

——飞行是如何一步一步变得如此安全的（二）

文 | 陈伟宁　　编辑 | 张克农

▼ 当天起飞前的日本航空 123 号班机
来源：www.reddit.com

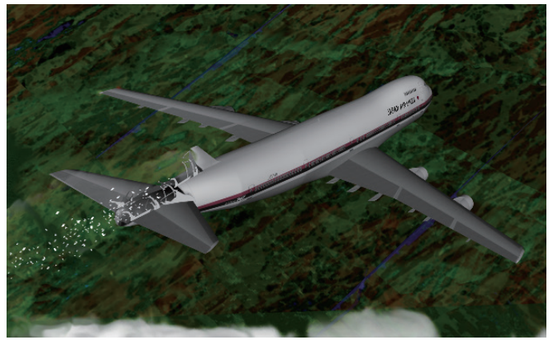




▲ 日本航空波音 747-100SR 客机 来源：www.techbang.com



▲ 航班上一名乘客拍摄的机舱内画面 来源：www.reddit.com



▲ 失事时垂直尾翼损毁示意图 来源：zh.wikipedia.org

1985 年 8 月 12 日，日本盂兰盆节前夕，东京羽田机场人流如潮。

傍晚 18 时 12 分，日本航空 123 号航班（机型：波音 747）搭载 509 名乘客与 15 名机组人员，腾空而起，飞往大阪。令人遗憾的是，这趟仅需 56 分钟的短途旅程，最终却是一场永不抵达的悲剧。

起飞 12 分钟后，一声巨响撕裂了暮色。飞机尾部发生爆炸性减压，液压系统全线崩溃——飞机成了一头失去缰绳的巨兽，再也无法被正常操控。客舱内，氧气面罩落下，天花板崩塌，恐慌与窒息蔓延。驾驶舱里，机长高滨雅再三权衡之后作出了一个艰难的决定：放弃直飞距离更近的名古屋机场，返航羽田机场，因为那里的跑道足够长。

接下来的 32 分钟，是人类航空史上最悲壮的一段飞行。飞机的垂直尾翼早已脱落，液压管线尽毁，机组成员用一种匪夷所思的操控方式——通过调节左右四台发动机的推力差来转向、升降。他们在群马县的群山间跌跌撞撞地挣扎，一次次规避山岳，试图将巨鸟引回人间。事后模拟显示，没有飞行员能在这种状况下坚持超过十分钟——而他们，撑了整整 32 分钟。

18 时 56 分，飞机坠毁在高天原山。520 人罹难，仅 4 名女性幸存——这是全球航空史上死伤最惨重的单一飞机空难。

调查结果表明：7 年前，该机尾部曾因擦地受损，波音公司维修时，将后部压力隔板本该用两排铆钉固定的地方，只用了一排。7 年时间、12319 次飞行，那道裂缝在每一趟起飞与降落中缓慢生长，最终在一万米高空轰然撕裂。

有些教训，用鲜血写就；有些安全，以死亡丈量。当灾难被铭记，逝者便不再只是冰冷的数字，而是一块块垫在生者脚下的沉默基石。

除了进一步严格规范飞机维修程序和检查之外，这场灾难最直接的遗产，便是推动航空界深入研究“液压控制失效下的应变措施”。这直接催生了两项关键技术：

一是电子控制系统：用电信号代替液压来控制飞机的翼面。

二是引擎推力控制系统：通过调节两侧发动机的不同推力来实现飞机的转向和升降。

这些技术在后来的航空器设计中得到广泛应用。1989 年的美国苏城空难中，机组正是借鉴了日航 123 空难后的相关研究经验进行迫降，才挽救了大部分机上人员的生命。

这起空难对日本航空自身的影响更为深远，催生了一场深刻的内部文化变革。为了防止悲剧被遗忘，日航在 2006 年建立了安全推广中心。这个中心被设置在羽田机场的维修区，所有日航员工（特别是新入职员工）都被要求必须参观。馆内陈列着 123 航班的机尾残骸、驾驶舱通话记录器、乘客遗书等真实资料。此举旨在将灾难的痛苦记忆，转化为全员内化的安全准则。

航空安全专家指出，日航在标准作业程序和行事方面所拥有的“严格文化”，正是基于这场悲剧的长期反思和警醒。这种对安全近乎苛刻的态度，使得日航在此后的近 40 年里保持了出色的安全纪录。



▲ 事故客机波音 747-100SR（日本航空 123 号班机） 来源：zh.wikipedia.org



76 年后话上飞

文 | 蒋斯来　　编辑 | 陈伟宁

1949 年 5 月 27 日上海解放。新中国成立后，1949 年 11 月 9 日，“两航”起义（国民党时期的中国航空公司和中央航空公司），12 架飞机从香港启德机场分别飞往北京和天津，回到了祖国的怀抱。

1950 年 3 月，部分回归人员被分配到上海，与当时的两航护厂的留沪人员一起组织起来学习。5 月，军委民航局上海办事处成立，负责上海地区的航空事业。

解放前，“两航”在迁港时留下了一部分 C-46、C-47 运输机，但都残缺不全。办事处的同志问两航人员，这些飞机还能不能修好，当时的技术人员和工人们热情很高，表示再大的困难也要克服，尽全力将这些残机修复。

于是，办事处决定，从参加学习的两航员工中抽调一部分人，组成一个临时飞机修理队。经过严谨检查，修理队根据原机的破坏情况，确定了修理方案。当时，离上海不远的浙江舟山尚未解放，国民党的飞机经常由舟山起飞到上海来捣乱，时而轰炸，时而扫射。

为了麻痹敌人，修理的那架飞机仍旧停留在原处，先修机内的有关部件，完成后，再修机外的其他部件。缺乏的许多器材、部件等，大家就到旧材料堆里去找，或从其他破旧的飞机上拆下来整修后，再装上飞机。为了抢时间，每人都发挥了主人翁精神，日以继夜地苦干巧干。

经过十多天抢修，终于完成了第一架飞机的修理任务，接下来就进入地面试车。试车的任务相当艰巨，因为试车开发动机，轰鸣声会振及四周，难以隐蔽。

为了防止敌特发现及破坏，决定只在深夜进行，尽管如此，头天夜里试车，因航空发动机巨大的轰鸣声，次日清晨，必有敌人的“蚊”式飞机到机场上空盘旋。有时，又会飞来“野马”式的 P-51 战斗机。由于修理完成的飞机已经被转移，并用伪装网巧妙地进行了覆盖，所以才没有被敌机发现。

修复后的飞机，经上海市军管会批准，命名为“上海解放号”（编为“上海一号”），机身的两侧都用红漆喷上了这几个字，分外醒目。机翼上喷涂了“八一”军徽，闪闪发光。

很快就到了正式试飞的前一天，飞机进入起飞前的全面检查。当天晚上，伪装网下灯火通明，修理队的所有成员都精神抖擞、紧张地工作。午夜，去除了伪装网，给飞机加油，次日凌晨 3 点钟，飞机进行移交前的地面试车。试车员张达孝坐在驾驶舱正驾驶员的座椅上，将左右两台发动机先后启动。

此时，陈毅司令员在华东空军航空机务处领导的陪同下，从左侧扶梯也登上了飞机，坐到了驾驶舱副驾驶员的位置上，他一直关注着，直到 15 分钟的试车完成。

黎明前，机场静悄悄，以谢佩芬为机长的机组成员都来了，又进行一次试飞前的检查和地面试车。之后，机长在驾驶舱的左侧窗口打了一个手势，示意一切正常。



于是，地面撤去了轮档，飞机滑向跑道，等待起飞的指令。东方微露朝霞，接到指令后，飞机滑行、腾空而起，直击空中，翱翔蓝天，修理的飞机试飞成功了。它宣告：上海航空人有信心、有能力、有技术开启中国的航空事业。

这支飞机修理队，用自己的行动证明了自身的价值和航空人的力量。1950 年 9 月 1 日，军委民航局上海办事处将当时的两航留沪人员和两航起义回沪人员组织起来，在黄浦江畔、龙华塔旁的龙华机场，正式成立了飞机修理队，并任命军代表章华为修理队的队长，于涌泉、曹森立任副队长。

这个日子，就成为了上海飞机制造厂（简称上飞厂）的诞生日（2009 年 5 月 25 日改为上海飞机制造有限公司，简称上飞公司）。

当年 12 月，第二架 C-46 飞机也修复成功，编号为“上海二号”。从此，上海航空工业史翻开了新的一页。这是中国商用飞机产业的新起点，也奠定了中国大飞机事业的基石。



2026 年 9 月 24 日，C909 医疗机赴吉尔吉斯斯坦开展医疗公益活动。

刘伟 摄