

# C919 徽章拼图

「让大飞机的历史瞬间  
触手可及」



## 智能制造

- 从“制造”到“智造”——大飞机制造技术的演进
- 民机的“大考”：总装测试如何托举安全起飞
- 增材制造如何定义航空智造新范式



# 大飞机

JETLINER

03 March

2026.03 | 总第141期

ISSN 2095-3399







## 05 卷首语

05 从“造得出”到“造得好”  
智能制造开启大飞机产业升级新征程 | 林喆

## 06 资讯

## 10 封面文章

10 从“制造”到“智造”——大飞机制造技术的演进 | 吴红

14 民机的“大考”：总装测试如何托举安全起飞 | 余郅恬 童彦

18 增材制造如何定义航空智造新范式 | 李小涵

22 航空制造表面工程的“表面功夫” | 唐俊榕

## 26 航空制造

26 从百年积淀到未来图景：民用航空“五化”技术浪潮 | 王元元

31 俄罗斯发布《至 2050 年俄罗斯民用航空科学与技术  
发展预测》 | 贾晨雨

36 空客在华供应链发展与启示 | 王瞳

## 42 航空运输

42 关于“干支通、全网联”航空运输服务体系建设的三个科学问题 | 钟山

47 中东冲突或将重塑全球航空版图 | 丁一璠

52 自贸港建设背景下三亚机场国际航线网络拓展研究 |  
程欢 武勇彦 齐险峰

## 58 专栏

58 飞机的“伞降梦”，只能在无人机实现？ | 于达维

## 61 产业观察

61 固本 融合 升维——泉州机场探索中小机场特色发展之路 | 商承灏

64 罗马城不是一天建成的——波音客户服务体系的演变 | 姜国权

## 69 科普

69 飞机的“魔法缝隙”：从有缝到无缝 | 刘苍松 刘嘉锡

## 72 回眸

72 征战 AG600 水上首飞的日子（之二） | 汪亚卫



#### ▼ 本期导读

“十五五”规划提出要坚持智能化、绿色化、融合化方向，加快建设制造强国，同时也提出要推进国产大飞机规模化系列化发展。如何更好地以智能制造为核心引擎，为国产大飞机制造注入强大的新质生产力成为了我们必须解决的问题。本期封面文章以“智能制造”为主题，组织了《从“制造”到“智造”——大飞机制造技术的演进》《增材制造如何定义航空智造新范式》《航空制造表面工程的“表面功夫”》等稿件，细数大飞机智能制造的发展进程。

此外，航空制造栏目的《俄罗斯发布〈至2050年俄罗斯民用航空科学与技术发展预测〉》，航空运输栏目的《中东冲突或将重塑全球航空版图》也值得一读。

#### ▼ 封面图片 | 徐炳南



- 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03期 | 总第141期 | 03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 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

商务发行

总监 刘影 021-20887168

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

## 从“造得出”到“造得好” 智能制造开启大飞机产业升级新征程

文 | 林喆

随着C919和C909商业运营的市场版图不断扩大，中国大飞机早已实现“造得出”的历史跨越，站上全球航空产业舞台。但从“能造”到“造好”，绝非简单的产量叠加，更是以智能制造为引擎，实现质量、效率、可靠性与产业链协同的系统性升级。

“造得出”只解决了有无问题，“造得好”才直面产品品质与竞争力的严酷考验。而智能制造，正以蓬勃发展的态势，源源不断地为“造得好”注入强大的新质生产力。可以说，在制造业数字化、智能化转型的浪潮下，智能制造不再是单纯的技术选项，而是推动产业升级、打破技术壁垒、建设航空强国的必由之路。

大飞机制造素来以高精度、高可靠性、高复杂度著称，传统制造模式面临诸多瓶颈。从零部件加工到整机装配，每一个环节都需要投入大量的人力物力财力。智能制造的融入，正彻底重塑大飞机制造的全流程。

例如，航空工业成飞自主研发了企业级人工智能开放平台“成飞易智”，实现了场景、算力、算法的共建共享共用，超50%的生产场景已完成人工智能赋能。其打造的“黑灯工厂”实现24小时无人化作业，人员仅为传统的15%，产出却提升3倍。

当然，智能制造不仅是民机产业提质增效的“加速器”，更是构建产业链协同生态的“压舱石”。民机产业链涉及新材料、新技术、航空电子等众多领域，技术壁垒高、国际竞争激烈。推进智能制造，能有效推动产业链上下游协同创新，深度融合，整合研发、生产、供应资源，攻克关键核心技术，为构建起共创共赢的产业链生态圈筑牢基石。

面向未来，放眼全球，航空巨头纷纷布局智能制造，抢占产业未来制高点。空客联合达索系统部署3D EXPERIENCE平台，以数字孪生技术支撑下一代飞机设计、仿真与制造全流程，加速新机型研发周期。波音南卡罗来纳州工厂则以150台协作机器人承担787机身复合材料钻孔与铆接，将缺陷率从0.3%降至0.05%，显著提升飞机结构疲劳寿命。

立足新起点，唯有深耕智能制造，不断增强自主创新能力，我们才能迅速完成从“造得出”到“造得好”的历史使命的转换，才能让国产大飞机飞得更稳、更远，在浩瀚蓝天书写中国智造的崭新篇章。



“造得出”只解决了有无问题，“造得好”才直面产品品质与竞争力的严酷考验。



02

▲ 来源: @ 中国国际航空

## 1 中国商飞召开供应商大会

3月26日,中国商飞公司2026年供应商大会在四川成都举行。来自供应商、航空公司等企业的600多名代表齐聚一堂,围绕大飞机产业发展新形势、新任务,凝聚共识、深化互信、共谋发展、开拓新局。

中国商飞表示,为客户提供更加安全、经济、舒适、环保的商用飞机是永恒的共同追求,将始终坚定发展信心、始终深化生命共同体、始终保持开放合作,期待与所有合作伙伴一道,共享时代机遇和大飞机事业机遇,共同书写大飞机事业发展新篇章。

## 2 新航季: C919 航线上新

3月29日民航迎来新航季,中国东方航空、中国国际航空、中国南方航空分别发布C919运营信息。

东航表示,将使用C919新开西安—厦门航线,恢复上海虹桥—沈阳航线。国航C919将正式执飞北京首都—厦门高崎航线,以及北京首都—哈尔滨太平航线。南航表示,C919将执飞广州至北京大兴、西安、杭州、宁波、南京、长沙、武汉、温州,以及长沙至北京大兴、上海浦东等10条常态化商业航线,通达21座国内主要城市。

## 3 C909 加密南宁—万象航班

3月22日,南宁—万象国际客运航线航班加密。当天起,老挝航空使用C909执飞该航线。

新增航班具体信息为:QV878,万象19:20起飞,20:50抵达南宁;QV879,南宁22:10起飞,23:40抵达万象(以上均为北京时间)。

据介绍,前期,中国商飞、老挝航空与南宁吴圩国际机场围绕国际航线开通进行多轮沟通与商洽,最终在航线规划、机型适配、运行保障等方面形成高效协同。

南宁吴圩国际机场表示,通过“国产民机+区域枢纽+东盟航司”的合作模式,进一步深化广西与东盟国家之间的互联互通注入新动能。



▲ 徐炳南 摄

## 4 全球油价飙升,航司或面临“生存威胁”

中东冲突升级已刺激油价飙升至历史高位,据相关媒体消息称,其冲击波正蔓延至全球各大航空公司。

德意志银行分析师表示,飙升的航空燃油成本对航空公司来说是一种“生存威胁”,并发出警告称:“若短期内无法获得缓解,全球各地的航空公司恐将被迫停飞数千架飞机;而业内财务状况最为脆弱的部分航司甚至可能被迫中止运营。”

3月22日,越南交通运输部发布行政指令,明确自4月起实施航班规模压缩方案,全力应对航空燃油短缺危机。

马来西亚政府稍早前表示,如果中东战事导致燃油成本大幅飙升,航空公司可能不得不暂停部分航班。

新西兰航空则采取了被认为迄今为止最为激进的举措,宣布取消截至5月初的约1100个航班——占其总航班计划的5%左右。

## 5 波音787“增程”方案获批准

3月23日,波音公司宣布美国联邦航空管理局(FAA)已批准787-9和787-10的最大起飞重量提升方案。

据了解,787-9的最大起飞重量将提升约10000磅,使其能够额外运载约3吨的业载,或将航程增加超过300海里;787-10的最大起飞重量将提升约14000磅,使其能够额外运载约5吨的业载,或将航程增加超过400海里。

波音公司表示,这一变更将赋予航空公司客户更大的灵活性,使其能够利用这两款宽体客机运载更多业载,或执飞更长距离的航线。

**6** 空客收获东航 101 架飞机订单

3月25日，中国东方航空公告披露，与空客公司正式签订了 101 架 A320NEO 系列飞机购买协议。

公告显示，本次购买飞机的目录价格合计约 158.02 亿美元（约合人民币 1088.93 亿元）。

东航表示，此举旨在对存量老旧机型进行置换更新。据了解，这 101 架 A320NEO 系列飞机包含 A320NEO、A321NEO 和 A321XLR 等子机型。

**7** 芬兰航空订购 18 架 E195-E2

3月23日，芬兰航空宣布订购 18 架 E195-E2 客机，以更新其欧洲机队。

据媒体报道，这笔订单是芬航近 20 多年来的最大一笔投资。芬航还表示，计划从二手飞机市场购入至多 12 架空客 A320 或 A321。

芬兰航空表示，这笔巴航工业飞机订单还包括 16 架飞机的增购选择权和另外 12 架飞机的购买权。



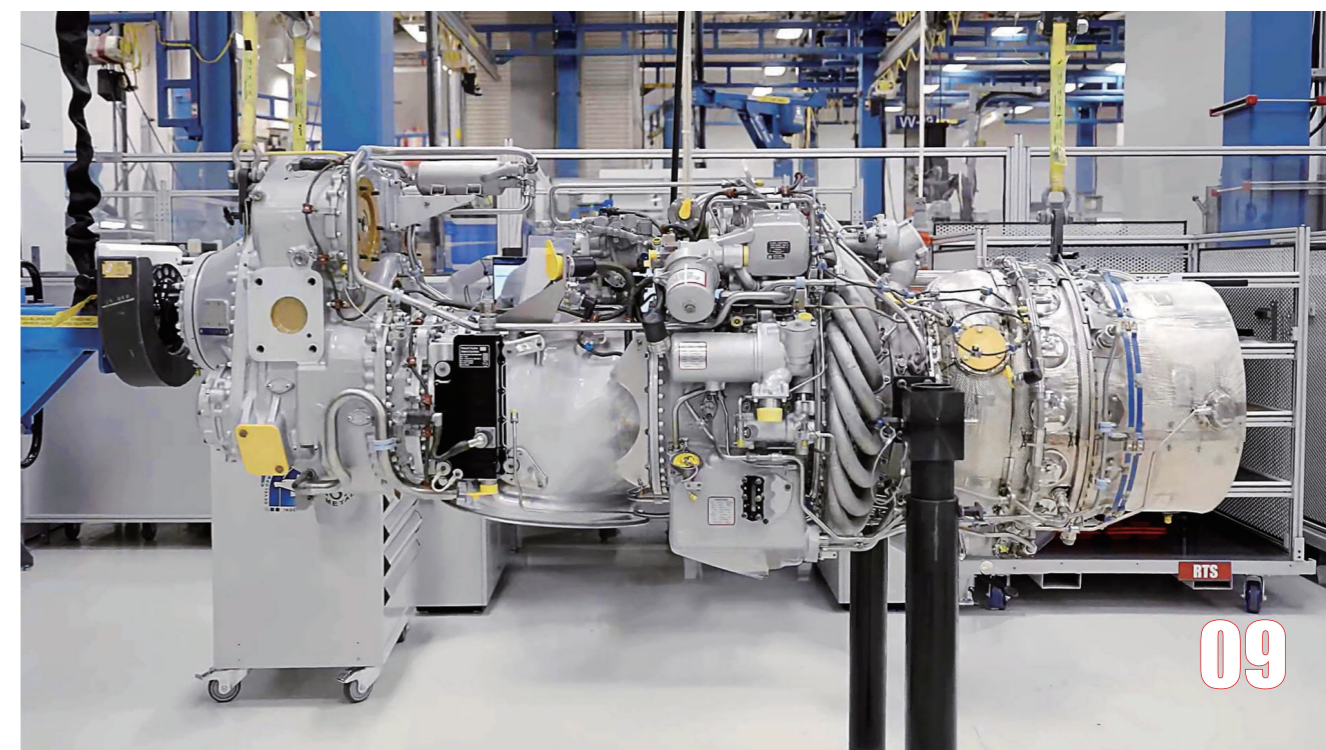
▲ 来源：www.rolls-royce.com

**8** 罗罗推进 UltraFan 30 研发

罗罗公司近日宣布，已从欧盟清洁航空联合倡议（CAJU）获得 6400 万欧元资金，将牵头开展超新型创新全集成发动机验证（UNIFIED）合作研究项目，支持 UltraFan 30 技术验证机的研发与地面测试工作。

该项目将着眼于未来窄体机应用的下一代推进技术，推动技术成熟与进步，支持 UltraFan 30 技术验证机按计划于 2028 年开展地面测试。

UNIFIED 项目计划于 2035 年投入运营的中短程飞机，其温室气体排放量相较于 2020 年的最先进技术水平减少 30%。



▲ 来源：www.rtx.com

**9** 普惠披露 PW127 发动机混动化方案

近日，普惠公司披露了正在研发的混动电动 PW127 涡桨发动机细节。该发动机旨在成为目前装配在 ATR42/72 系列飞机上的主流涡桨发动机。

据介绍，该方案将一台 250 千瓦的柯林斯航空电动机与 PW127 发动机的改进型进行结合。目标是相比 2020 年基准机型实现 20% 的燃油消耗降低，后续将由飞机制造商通过另一项清洁航空项目开展试飞验证。

▼ 来源：www.hypersonix.com

**10** 首款全 3D 打印高超音速飞行器试飞成功

澳大利亚 Hypersonix Launch Systems 近日发布公告，宣布在美国弗吉尼亚州成功发射新一代 DART AE 高超音速飞行器。

该飞行器搭乘 Rocket Lab 的 HASTE 运载火箭升空，在本次代号为“食火鸡验证”（Cassowary Vex）的核心任务中，最高时速达到了 8 马赫。在制造工艺和动力系统方面，DART AE 是全球首款完全采用耐高温合金并依托 3D 打印技术制造的高超音速飞行器，并搭载了吸气式 SPARTAN 超燃冲压发动机，创新性地使用绿色氢能作为燃料。这种组合不仅提升了推进效率，还大幅降低了传统燃料带来的环境负担。





▲ 王脊梁 摄

# 从“制造”到“智造” ——大飞机制造技术的演进

文 | 吴红 编辑 | 欧阳亮

在国产大飞机翱翔蓝天的过程中，我们不仅见证了中国航空工业的历史性飞跃，更是亲历了一场以精密制造现场为阵地、以先进加工技术为引擎的全新技术革命。

随着民用飞机对高性能、长寿命、轻量化的不懈追求，钛合金、高强度钢、碳纤维复合材料等难加工材料，以及机翼壁板、整体框梁、带筋筒段等复杂零部件被广泛应用。然而，传统加工方式在面对这些“硬骨头”时，往往效率低下、材料去除率低、刀具寿命短、加工精度和表面质量难以保证，这些成为制约航空产业升级的突出瓶颈。如今，一场融合智能化、绿色化、数字化的制造新范式已悄然推进，一批先进加工技术应运而生，如同为传统制造业赋予“智慧大脑”、植入“绿色心脏”、练就“灵

“振动按摩”。复合能场加工技术并非简单替换传统刀具，而是将电场、磁场、超声场、激光场等不同能量场与传统机械加工进行结合，同时对加工状态和结果进行实时监测、对参数或工艺进行实时调整，实现加工过程的智能化控制，形成“1+1>2”的协同效应。

复合能场加工技术不仅能将切削力降低 60% 以上，大幅延长刀具寿命，更在提升加工效率和表面质量的同时，满足飞机零件高精度制造要求。目前，在航空大型钛合金、高强度钢、复材叠层、弱刚度结构件等关键部件的精密制造中，该技术已成为显著提升材料的切削加工性、降低机械加工难度、提升材料去除率、延长刀具寿命和提高加工质量的关键。

如果说复合能场加工是“尖兵利器”，云边端协同制造技术则是调度全局的“智慧神经网络”，它将计算与智能分布在“云—边—端”三层架构中，为生产流程优化、效率提升提供了全新的解决方案。云端如同决策大脑，凭借强大的计算资源汇聚海量数据，进行数据分析、复杂模型训练与全产业链资源优化调度；边缘端类似敏感神经，部署于车间，对机床传感器数据进行实时处理，实现毫秒级的工艺参数自适应调整、质量在线诊断与预测性维护；终端作为执行者，对数控机床、机器人等设备精准执行指令，并实时反馈状态。面向航空整体结构件加工效率低、加工过程难以管控、智能化程度低等制造难题，这种技术新范式不仅颠覆了传统制造模式，更催生出新型生态体系，为航空产业实现弯道超车提供战略机遇。智能制造的三层协同架构虽然还未在国产大飞机领域开展实践应用，但其在波音 787 机翼装配场景、空客 A320 总装线、宁德时代动力电池制造等方面已展现出制造效率和产品质量提升的巨大潜力。

巧双手”，推动航空制造从“经验驱动”向“数据驱动”跨越，从“资源消耗”向“可持续循环”演进，赋能国产大飞机高质量发展。

## 智能化加工： 从“自动”到“自主”

智能化的精髓，在于赋予加工系统“感知—分析—决策—优化”的闭环能力，让机器不仅会执行，更懂得如何更好地执行。以复合能场加工技术为例，想象一下，就像在切削坚不可摧的金属前，用一束高能激光对其进行局部“软化”，或在加工脆性材料时，用超声波施加高频

## 绿色化加工： 从“消耗”到“低碳”

航空工业的先进性，不仅体现在性能上，也体现在其环境责任上，绿色制造正从成本项转变为核心竞争力。在这方面，静电雾化微量润滑加工技术是一项突破，它彻底颠覆了传统切削液“大水漫灌”的方式，宛如一把拥有“精确制导”系统的微型喷雾枪，通过高压电场作用将极少量的润滑液雾化成微小带电液滴，这些雾滴像被磁铁吸引一样，精准均匀地喷射吸附在加工区域，实现靶向润滑与冷却。与传统加工相比，该技术可将润滑液用量减少90%以上，实现“近乎干切”的清洁作业，从源头杜绝了废液处理难题，其卓越的渗透性使冷却润滑效果更佳，在加工钛合金、复合材料时，可将刀具寿命提升70%左右，

成为兼顾质量与环保的关键工艺。

绿色制造不仅是工艺环节的改进，更是一个涵盖设计、生产、回收的系统工程。可持续切削加工技术则构建了从刀具设计、材料循环到工艺革新的完整资源循环体系。通过高性能涂层刀具创新，提升刀具硬度和耐磨性，大幅延长刀具寿命；开发可转位刀具模块化结构，支持局部磨损更换，降低刀具全生命周期成本；建立高频伺服电机与能量回收系统，显著降低加工系统能耗；对航空级铝、钛等昂贵金属切削进行精细化分类、净化与再生，将材料综合利用率提升至90%以上，变废为宝；全面推广微量润滑、低温风冷等节能工艺，提升减排能力。

如今，静电雾化微量润滑加工技术、可持续切削加工技术等组成的“组合拳”不仅带来了显著的环境效益，更通过资源节约创造了直接的经济价值，让“绿色”成为一门“好生意”。

## 数字化加工： 从“试错”到“模拟”

数字化，是连接智能与绿色的桥梁，通过构建高保真的数字孪生模型，将物理世界的制造先试一次，并一次做对。飞机机翼的气动外形，是决定性能的关键，传统依赖经验和反复试错的成形方法，周期长、成本高，而数字化喷丸成形技术是将制造过程从依赖“老师傅经验”转为“基于数据精准推演”的典范。该技术的第一步是建立零件与喷丸工艺的精确数字孪生模型，第二步是通过有限元仿真，预测每一处被弹丸冲击后的残余应力与变形量，第三步是在虚拟空间中迭代优化出最优的喷丸路径、速度与弹流量方案，基于模型的深度学习方法预测飞机壁板变形并主动设计喷丸参数示意图。

目前，该技术已完成数十米级机翼壁板制造，实现大型复杂曲面件的高精度、

高一一致性无模成形，将研制周期与成本压缩了数倍，为航空整体壁板等关键构件制造提供技术支撑。

同样深刻的变革体现在航空带筋筒段复杂结构整体旋压成形技术上，传统工艺需经过“锻造—焊接—机械加工”等多道冗长工序，材料浪费严重。整体旋压成形技术则通过数字化模型精确规划旋压路径与压力，使一个环形金属坯料在旋转中发生塑性流动，一次性整体成形出带加强筋的薄壁筒体，使材料利用率从10%提升至90%以上，且消除了纵向焊缝，结构强度和可靠性大幅提升。

该技术不仅极大缩短了制造流程，也因减少焊接环节而提升了结构可靠性，成为轻量化、高强度航空结构件的首选制造方案。

孤立的技术如同散落的珍珠，通过集成融合方能串成璀璨的项链，智能化、绿色化、数字化并非三条平行线，而是深度缠绕、相

互增强的技术螺旋。智能驱动融合，云边端协同的“智慧大脑”，为复合场加工实时提供最优能量参数，为数字化喷丸动态调整工艺路径，让智能贯穿每个工艺细节；绿色承载融合，静电雾化润滑、可持续切削等绿色工艺，是智能化、数字化技术落地时必须恪守的“环境底线”与“效益基线”，确保高效不以牺牲可持续性为代价。数字赋能融合，数字孪生技术构成了从虚拟验证到物理实现的统一平台，是智能决策与绿色实践的共同基础。

这场从“制造”到“智造”的深刻变迁，其意义远超技术本身，它标志着国产大飞机制造正从体系跟随者向规则并行者乃至领域引领者转变，为中国迈向制造强国、实现高水平科技自立自强奠定了坚实基础。未来，随着这些先进加工技术的不断演进与普及，一个更智能、更绿色、更高效的制造新纪元正加速到来。

▲ 来源：www.wired.com



# 民机的“大考”： 总装测试如何托举安全起飞

文 | 余郅恬 童彦 编辑 | 欧阳亮

当一架现代民用飞机在跑道上加速滑跑、冲向云霄时，人们往往惊叹于其优美的流线型外观和舒适的客舱环境。同时也不免要问，这架钢铁巨鹰是如何从上百万的零部件变成一个拥有敏锐感知和强健行动

力、能精确判断的“生命体”呢？答案就隐藏在鲜为人知的“民机总装测试”之中。

民机总装测试不仅是飞机制造过程中的一道工序，更是一场关乎生命安全的极限“大考”。

## 测试：造得好不好

在民用飞机从孕育到服役的整个生命周期中，测试活动贯穿于设计研发、总装制造、飞机交付和航线保障等各个阶段。在设计研发阶段，工程师们主要进行的是“设计符合性验证”。这是一场数字与物理的博弈。通过复杂的理论分析、地面试验和计算机仿真等手段，设计团队必须确保民机的每一个设计细节都严丝合缝地满足适航规章的要求。

在这个阶段，有一项听起来颇具神秘色彩的测试——“三鸟联试”，即飞机级性能测试。所谓的“三鸟”，通常指的是“铁鸟”——机械系统试验台、“铜鸟”——供电系统试验台和“电鸟”——航电系统试验台。工程师们将真实的飞机系统安装在地面台架上，模拟飞机在空中的各种姿态和工况。虽然它飞不起来，但拥有了飞机的全部“内脏”和“神经”。在这个阶段，主要的工作内容涵盖了设备级性能测试、系统级性能测试以及最高层级的飞机级性能测试。

当设计蓝图经过了千锤百炼，确认无误后，飞机的生命旅程才会迈入下一个关键节点——总装制造阶段。从验证“设计得对不对”，转向验证“造得好不好”，即制造符合性。同样按照设备/系统/飞机的层级，在总装线上进行成品测试和机上测试，确保实际制造出的飞机系统安装的可靠性，符合经过适航批准的设计要求。

为什么说民机总装测试至关重要？因为它承担了飞机8大系统、70多个子系统、600多个机载设备的安装可靠性、功能完整性等验证保障任务。具体而言，在机载设备装上飞机前，需进行严格的成品入厂验收和测试，这是确保飞机安全的第一道基石。当这些合格的设备精

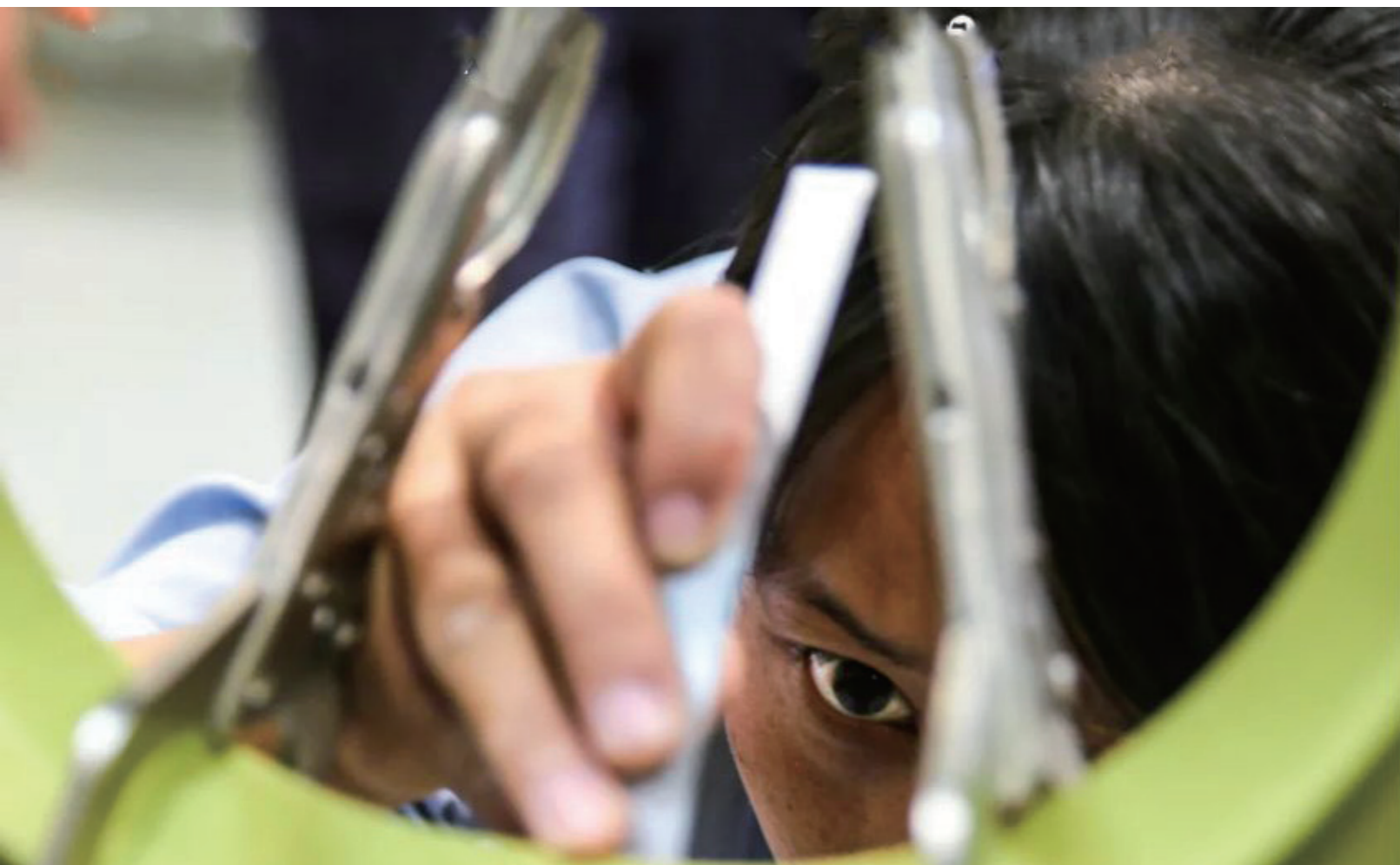
准无误地安装在机体上后，我们将开展系统级总装机上测试，例如飞控系统能否准确响应指令、起落架系统收放是否顺畅及时、航电指示是否准确无误等，这一环节将逐一确认各项功能。在所有系统完成自身功能验证后，接着进行飞机级总装机上测试，让所有已测试的系统在同一架飞机上“共事”，验证它们之间的信息交互和联动是否完美契合，这是检验飞机作为一个有机整体是否合格的最终集成大考。系统级和飞机级总装机上测试占据了总装产线的两大工位，工作占比高达67%，是飞机总装过程中涉及面最广、工序最为复杂的环节。

## 民机总装测试的演进

民机总装测试面临“四个发展”形势。一是规模化发展。民机批量化、高效率的生产节拍势必要求自动化测试技术与之匹配，成为批产提速的“助推器”。二是谱系化、系列化发展，要求我们的测试产品必须具备强大的“柔性”，一套测试产品能够灵活适配多型号、型号多系列的快速测试响应。三是信息化发展，响应信息化大环境发展趋势，测试技术须全面拥抱数字化、网络化，推动测试技术向智能化转型。四是引领式发展。作为大飞机制造的主体，则要求我们建立行业标杆级航空测试标准，不仅要保障自身产品的卓越品质，还要有力地支撑和牵引国内航空测试产业集群的整体跃升。

伴随着民机制造技术的发展，民机总装测试技术已从第一代发展至第三代。第一代总装测试技术，称为“手段单一的系统测试”，主要采用手动操作方式，依赖人工记录数据，导致可追溯性较差。此外，人工查阅手册资料等步骤烦琐，

▼ 王脊梁 摄



耗时较长。

第二代总装测试技术，即“基于信号激励的集成测试”，其核心特征在于“自动化”。这项技术是如何在国内飞机上得到应用的？答案隐藏在两个关键词之中：一是“吸收国外经验”，即“引进来”；二是“自主创新开发”，即“再创造”。面对国外的先进经验，我们并未止步于简单的模仿，而是将国际经验与国产民机需求进行深度融合。通过吸收法国斯菲拉公司（SPHEREA）的集成测试经验，成功打通了集成测试的自主创新路径，最终构建出飞机总装功能集成测试系统，并将其成功应用于国产民机总装功能测试现场。这一举措不仅提升了型号测试的高可靠性，还显著加快了批产速度。

第三代总装测试技术，即“基于总线监视的网络测试”，其核心特征在于“网络化”，仅通过一个微小的 OBD 接口，便能实现对发动机、排放系统等核心部件的全时总线监控，使安全隐患的发现从“被动检修”转变为“主动预警”。该技术虽应用于飞机测试，灵感其实源于汽车行业。我们汲取汽车 OBD“总线监听”的精髓，融合第二代总装测试技术的深厚积淀，提出了基于航空总线监视的网络测试新方法。当航空总线成为“神经网络”，第三代测试系统便是最

为敏锐的“听诊器”。

## 民机总装测试的新引擎

飞机系统设计经历了从传统的基于文档的系统设计到基于模型的系统工程 (MBSE) 设计的转变。基于文档的设计存在两大不足：首先，理解一致性差。静态文档采用非格式化语言，不同系统和层级的工程人员需经过“阅读—理解—转化”的过程，容易导致信息失真。其次，可追踪性差。文档之间的依赖性较强，难以进行有效追踪和版本控制。

而基于模型的系统工程 (MBSE) 设计拥有得天独厚的优势。因此，中国商飞提出了第四代总装测试技术，即“基于系统模型的虚实协同测试”。第四代总装测试技术的优势在于两点。首先，载体统一，通过构建实时、单一、在线的数字样机，为不同专业、不同系统、不同阶段的产品集成和实施验证提供了极大便利；其次，信息一致，以模型为载体的连续传递，确保了不同业务数据在转换前后的信息完整性和一致性。

基于模型的系统工程 (MBSE) 涵盖了产品全生命周期、表达唯一性、知识积累与传承，以及利益攸关方共享资源。MBSE 的核心是模型，如何把模型的价

值发挥至飞机全生命周期应用，贯穿飞机全生命周期的“最后一公里”，是最为关键所在。在传统的飞机研制中，模型的价值仅停留在“设计端”，如何把模型价值传递至总装和试飞运营端，仍是一片待开发的蓝海。在我国未来的飞机研制中，模型将伴随机载件交付，让模型价值充分传递，击穿“端到端”的壁垒，构建非对称竞争优势。因此，这正是我们提出第四代总装测试技术即“基于系统模型的虚实协同测试”的历史性意义。

第四代总装测试技术的特点主要涵盖四个关键领域：一是模型驱动的柔性信号实时仿真。通过加载模型资源定义实时仿真机的功能，构建具备多总线信号生成能力的标准化、柔性化信号激励终端。可替代物理机载设备，实现高保真的总线信号激励支持，满足系统级交联测试、部段模块化测试、机载设备级接口测试等多层级验证需求。二是模型驱动的功能测试机理透明。通过实现基于线路引脚级别的功能机理透明化，有效辅助故障排查。此外，进一步支持对总装功能测试覆盖率的深入研究，包括对试验程序的冗余、漏检、误检等隐性关系的精准识别，从而优化试验程序。三是模型驱动的机上动态测试。试飞测试涉及高风险和高成本，通过试飞环境模拟，在总装阶段提前进行试飞预评估，为真实飞行提供预决策支持。具体内容包括模拟飞行环境，如空速、高度、大气参数等，以及飞机的运动状态和力学行为，从而支持在地面环境中开展基于飞行包线内各状态点的动态试验科目。四是基于模型驱动的数字孪生试验。借助数字孪生可视化技术，试验前可进行过程预演，全面掌握全局流程；试验中则实时监测关键测点。此外，通过应用

沉浸式技术 (如 MR 等) 构建虚拟环境，赋予测试人员远程操控复杂任务的能力，从而拓展测试操作的广度与深度。

在应用实施层面，第四代总装测试技术能实现“一云多端”测试模式。综合管控、测试服务、模型开发与部署、数据管控等关键功能资源均部署于云端，底层则涵盖“飞机级”“系统级”“设备级”的 N 端应用场景。在云端完成测试策划后，将模型下发至 N 端，各端的实时仿真机随即调用模型资源，从而高效完成硬件在环测试 (HIL)、快速控制原型测试 (RCP) 等任务。该架构的重大突破在于，基于统一的测试平台，兼顾“飞机级”“系统级”“设备级”等多层级测试需求，有效解决了总装多层级测试中存在的可复用性差和柔性不足等问题。

从一颗螺丝的校验到全机系统的协同“大考”，从传统人工测试到“模型驱动、虚实协同”的智能跃迁，民机总装测试早已不只是产线上的一个环节，而是贯穿设计、集成、验证与未来运营的智慧中枢。它既是飞机安全起飞的“守门人”，也是中国智造迈向高端的“领跑者”。面对规模化、谱系化、信息化与引领式发展的时代浪潮，我们正以第四代测试技术为引擎，用数据驱动闭环，用模型打通全链，将每一架银鹰的腾空而起变为可预演、可追溯、可复制的智慧奇迹。这不仅是一场技术变革，更是一次从“制造”到“智造”的华丽蝶变——让中国大飞机不仅飞得更高，还“测”得更远。





▲ 来源: GE

# 增材制造如何定义 航空智造新范式

文 | 李小涵 编辑 | 欧阳亮

一架现代化客机上，密布着超过百万个独立零件。其中，一个不起眼的发动机燃油喷嘴，在过去需要将20个精密零件单独制造，再小心翼翼地组装焊接。今天，得益于一项被称为“增材制造”或“3D打印”的技术，这个复杂的部件可以被设计成一个整体，从无到有地“生长”出来，性能还提升了五倍。

这并非科幻场景，而是航空制造业正在发生的深刻革命。增材制造，这种以数字模型为基础，通过逐层叠加材料来构造物体的技术，正经历着从实验室的“快速原型”工具，到生产线上的“关键承力”核心工艺的史诗般演进。它不仅在重新定义单个零件的形态与性能，更在根本上重塑着飞机设计、制造乃至整个航空供应链

的哲学。

## 从堆叠原型到智能创成

增材制造的思想火花，最早可追溯至1980年代。1983年，被誉为“3D打印之父”的查克·赫尔（Chuck Hull）在实验室里用紫外线逐层固化液态树脂，制造出第一个立体光刻（SLA）原型，并由此创立了3D Systems公司。几乎同期，美国工程师斯科特·克伦普（Scott Crump）发明了熔融沉积成型（FDM）技术，之后选区激光烧结（SLS）技术也相继问世。这三大技术路径奠定了增材制造的基石，但当时由于设备昂贵、打印速度缓慢，其主要价值只在于“快速原型”，为设计师提供一个看得见、摸得着的模型。

真正的第一次飞跃，源于材料从树脂、塑料向高性能金属的突破。21世纪初，直接金属激光烧结（DMLS）等技术的成熟，使得打印全密度的钛合金、高温合金零件成为可能，其强度可达传统锻件的95%。航空领域敏锐地捕捉到了这一变革，波音率先将3D打印的钛合金部件用于F-15战斗机的轻量化。

设备能力的边界也在不断被打破。早期打印受限于有限的成型仓尺寸。而定向能量沉积（DED）等技术，如同精密的“金属焊接机器人”，能够脱离封闭舱室，在大型基材上直接沉积金属，甚至可用于修复高价值的航空发动机叶片或制造大型火箭发动机部件。打印速度也在持续提升，从SLM（选择性激光熔化）技术的单激光束到四激光束同步扫描，效率呈几何级数增长。

当前，增材制造正经历第二次飞跃，与数字技术的深度融合使其从精密“叠加”迈向真正的“智能创成”。这场变革的核心在于破解金属打印中质量一致性的终极难题，其路径宛如为制造过程赋予“感知”

与“先知”的能力。

现代高端金属打印机已装备了敏锐的“感官”——集成的熔池监控与红外热成像传感器，能够实时捕捉每一层金属熔融与凝固的微观物理现象，生成堪比医学CT扫描的详尽过程数据。然而，海量的数据本身并非答案，而是需要被理解的“语言”。于是，人工智能扮演了“大脑”的角色，它像一位经验丰富的医师审阅影像，从这些数据流中实时识别气孔、未熔合等缺陷的早期征兆，实现从被动检测到主动预测的跨越。瑞典公司Interspectral凭借其AI驱动平台AM Explorer，将工程师分析工艺数据的时间锐减90%，并帮助客户单台设备每年避免高达5万欧元的潜在损失。

这一“感知—预测”的闭环，最终凝结为每个实体零件的“数字孪生”。它并非简单的三维模型，而是一个涵盖了设计基因、工艺参数、实时监测档案及最终检验报告的完整数字生命体。借此，零件的质量追溯得以贯穿其全生命周期，更可通过模拟仿真，在其“诞生”之前就预测和优化其在未来严苛服役环境中的性能表现。

至此，增材制造已彻底进化，从一个独立的“制造方法”，嬗变为一个集智能设计、过程感知、实时调控、性能预测于一体的完整数字制造生态系统。智能化的浪潮，正将这门层叠的艺术推向前所未有的高度与确定性。

## 从非承力部件到“骨骼”“心脏”

增材制造在航空领域的渗透，并非一蹴而就。它遵循着一条由易至难、由外及内的清晰路径，从提升客舱体验的非承力部件开始，逐步迈向飞机的“骨骼”与“心脏”，最终挑战整个制造与认证体系。

航空业对减重永恒的追求，首先在客舱内部找到了增材制造规模化应用的突

破口。这项技术的早期价值在于实现“功能集成式轻量化”——将传统需要多个零件组装、带有复杂卡扣与加强筋的组件，直接设计并打印为一个拓扑优化的整体结构。这种思路不仅可实现高达40%以上的减重，更彻底省去了模具开发与装配成本，为小批量、定制化的高端内饰提供了完美解决方案。空客A350XWB应用超过1000个3D打印聚合物部件的实践，与波音为787定制打印内饰组件的策略，共同标志着该技术已超越原型验证，步入成熟的批量工程应用阶段。

当技术可靠性在实践中得到反复验证后，增材制造的使命便自然延伸至飞机更关键的力学承载部位——次承力与主承力结构。这里的革命性优势在于，它能将设计与制造从传统工艺的几何束缚中彻底解放，实现性能的阶跃式提升。传统制造中，一个复杂承力件往往需要从巨型锻件上切削掉绝大部分材料，而增材制造则以近乎“净成型”的方式，精准生长出仿生学的中空、异形轻量化结构。

在更具挑战的承力结构上，国产航空装备的探索取得了实质性进展。以C919大型客机的舱门铰链接头为例，这一连接机身与舱门、承受反复载荷的关键件，已

成功应用激光选区熔化（SLM）技术实现一体成型。相比传统的多零件拼焊方案，一体化打印从根本上减少了潜在的疲劳源，显著提升了结构完整性与寿命，是我国将增材制造应用于关键机体结构的一次重要工程飞跃。放眼全球，空客A350的钛合金机翼支架实现减重30%，以及利勃海尔提供的A350前起落架传感器支架在刚度倍增的同时成功减重，都印证了增材制造正在全球范围内重塑飞机结构的设计哲学。

航空发动机那超过2000°C的高温与巨大应力的极端环境，构成了对制造技术的终极考验，也恰恰成为增材制造展现其无可替代价值的顶级舞台。涡轮叶片内部错综复杂的“迷宫”式随形冷却通道、燃油喷嘴高度一体化的精密结构，这些传统工艺几乎无法实现的设计，正是增材制造的“主场”。

GE航空将LEAP发动机燃油喷嘴从20个零件合为一体的经典案例，开启了这场变革。如今，赛峰集团为其下一代RISE发动机设定的目标更为激进：计划将25%的部件采用增材制造。视线投向更遥远的未来，技术的想象力已超越大气层：NASA及领先的商业航天公司正积极研究，利用定向能量沉积（DED）等大型

化增材制造技术，在地外环境中直接建造大型航天器结构或月面基地构件。这预示着一个“在哪里需要，就在哪里制造”的太空制造新时代即将到来，将彻底摆脱地球工厂的尺寸局限和天文数字的运输成本。

## 跨越规模应用的必经之路

不过，尽管前景令人振奋，但增材制造若要真正从“先进技术”转变为航空制造业的“主流工艺”，仍需穿越一段峡谷。其面临的并非单一技术障碍，而是一个由认证体系、经济性与生产一致性相互交织构成的系统性挑战。

首要且最根本的挑战来自严苛的适航认证体系。对于将安全视作生命的航空业而言，如何向中国民航局（CAAC）、美国联邦航空管理局（FAA）等权威机构证明，每一批次、在不同设备上生产的零件都具有无可置疑且完全一致的性能与可靠性，这是一项艰巨的任务。认证的对象远不止最终零件，它涵盖了从专用材料粉末的批次稳定性、工艺参数包的权威性、设备状态的全程监控，到处理流程规范化的全链条。

在这一领域，中国商飞增材制造的实践提供了具有示范意义的答案。面对民机适航对高可靠、全链控、强溯源、严验证的极限要求，中国商飞成功构建了具有自主知识产权的增材制造产品应用技术体系。该体系不仅推动了30余项增材制造产品在C919客机上通过适航认证，实现了我国在增材制造民机适航零的突破，更标志着中国实现了增材制造产品的自主设计、自主制造、自主验证与自主适航的全链条能力闭环。如今，每一位C919的乘客都是增材制造技术一飞冲天的见证者，当你登上C919飞机，在登机门上就能看到那闪着银

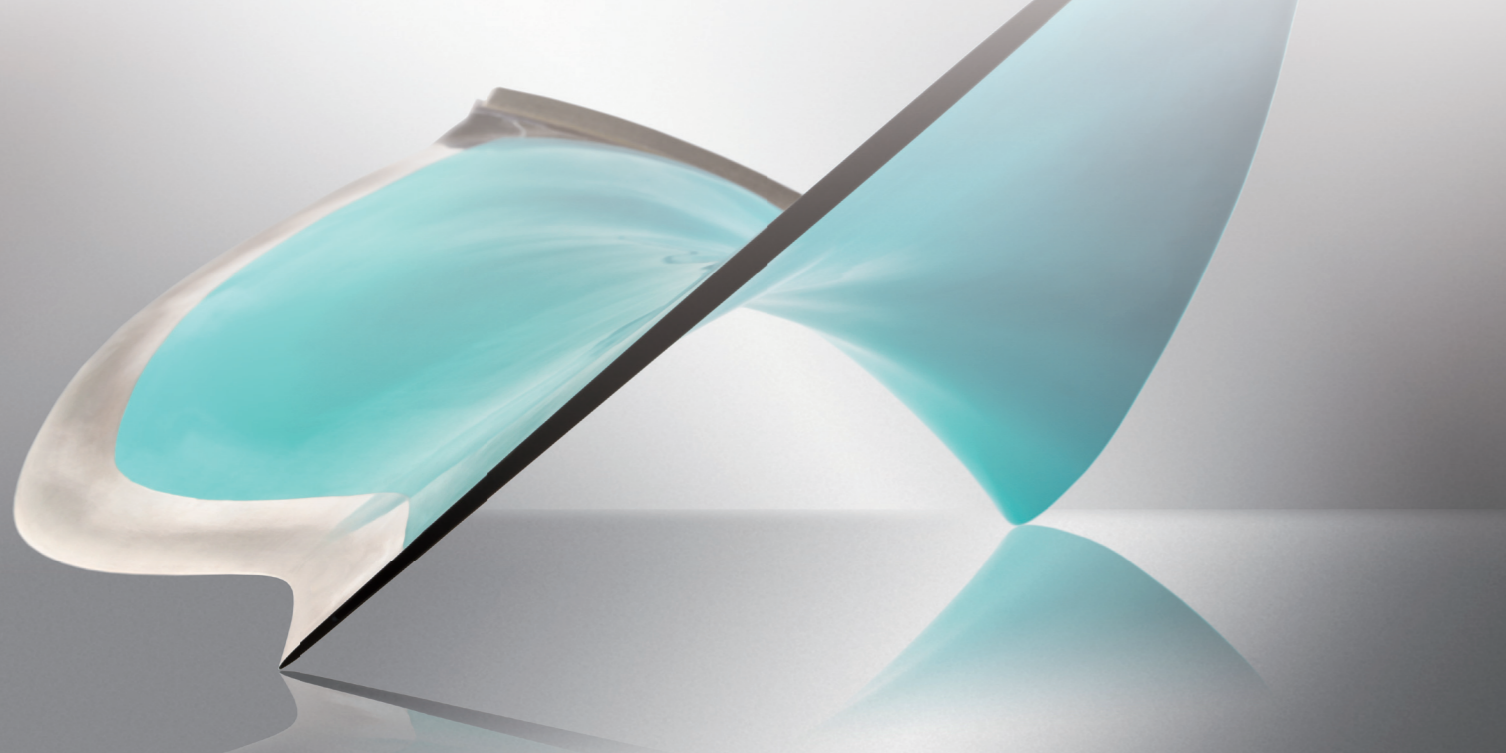
灰色泽的钛合金增材制造零件。

“成本低，供应链安全，关键技术自主可控，是保证民机增材制造生命力的三大要素”。随着国产飞机型号的不断发展，增材制造产品也发生着从中小批量向规模化应用的变化，进而衍生出对规模批产质量控制、降低制造成本的迫切需求。围绕这一目标，突破增材制造装备技术壁垒、优化产品制造工艺提升质量与效率、创新新产品适航方法等专项工作已然成为民机增材制造开足火力、聚智攻关、规模应用、降本增效的关键突破口。相信不久的未来，我们就可以通过增材制造让国产大飞机更加轻盈、安全和经济环保。

## 结语

回望增材制造的航空征途，它是一部从内饰配角到结构主力，并矢志问鼎动力核心的进化史诗。它已然颠覆了航空器的设计语言，将工程师的思维从“如何制造出来”解放为“最优性能应如何”。在C919、LEAP发动机等国内外项目中的深度应用，标志着这场变革已从概念进入工程现实。

质量第一，安全第一，安全永远第一，突破技术、健全体系、优化管理，其背后无法磨灭的是对安全和可靠性的绝对敬畏。适航认证的漫长征途、规模化成本控制的严峻考验，以及对极致工艺一致性的永恒追求，共同构成了这项技术从“示范应用”迈向“全面主导”的必经之路。飞机复杂产品的需求不断迸发，增材制造的下半场竞赛，将不仅是热源与材料的共舞，更是其与百年航空工业形成的严谨质量体系、成熟经济模型和全球供应链网络的深度磨合与融合。我们也将时刻准备着，迎接这一场航空智造新范式带来的制造革命。





# 航空制造表面工程的“表面功夫”

文 | 唐俊榕 编辑 | 欧阳亮

在航空制造这一尖端领域，性能的极限不仅取决于材料的筋骨——基体，更依赖于其表面的“皮肤”。极端的环境——万米高空的低温、高速飞行带来的摩擦、海盐与潮湿的侵蚀，对飞机每一个部件的表面提出了近乎苛刻的要求。表面工程技术，正是为这些关键部件披上“隐形铠甲”的科学和艺术。它不仅关乎飞机的耐久与安全，更是航空业实现轻量化、长寿命和绿色环保目标的核心驱动力。

表面工程技术，正经历着一场从“被动防腐”到“主动防护”，从“性能至上”到“绿色智能”的深刻变革。这项技术通过对关键部件进行表面强化，为其披上“智能皮肤”，是保障航空器在万米高空、极端温差、盐雾侵蚀和高速磨损等苛刻环境下安全、长寿命服役的关键。

本文将聚焦于电镀锌镍、超音速火焰喷涂、冷喷涂及离子镀铝这四种各具特色的

先进表面技术，深入探讨它们在航空制造领域的创新应用与发展图景。

## 电镀锌镍合金：紧固件与结构件的“绿色卫士”

电镀锌镍合金工艺的兴起，是航空制造业向绿色环保转型的标志性成果之一。长期以来，飞机起落架、高强度连接件等关键钢质部件主要依赖镀锌工艺，但镉的高毒性对操作人员和环境构成了严重威胁。因此，寻找一种性能相当甚至更优且环境友好的替代技术成为行业刚需。电镀锌镍技术正是作为一种高性能、环境友好的替代方案而蓬勃发展。它通过调控电镀液中的镍含量和采用复合络合剂，在钢基体上沉积出锌镍合金层。与传统镀锌相比，锌镍镀层不仅避免了剧毒物质的使用，而且展现出更高的硬度和更优异的长期耐腐蚀性能，综合成本也更低。美国空军通过其小企业创新研究计划，已成功研发了用于高强度起落架部件的低氢脆锌镍镀层工艺，并已建立了专门的电镀生产线，目前已有超过 2000 个采用该涂层的起落架部件投入实际使用。

这项技术的突破不仅解决了历史遗留部件的环保翻修难题，也为新机设计提供了更优的防护方案。然而，电镀锌镍工艺的优化并未止步，当前研究仍在继续探索其在更多种航空高强度材料上的应用潜力，以实现从紧固件到更复杂结构件的全面覆盖，实现环保与性能的双赢。

## 超音速火焰喷涂：烧出“金刚不坏”之身

当部件需要直面极端磨损和冲击时，一层坚硬的陶瓷或金属陶瓷涂层便不可



▲ 图 1 | 电镀锌镍螺栓典型件

或缺。超音速火焰喷涂 (High Velocity Oxygen Fuel, HVOF) 技术是制备这类高性能涂层的利器。其原理是将燃料 (如航空煤油、乙炔等) 与氧气混合燃烧，产生高达 3000°C 以上的高温高速气流，将喷涂粉末材料 (碳化钨、碳化铬等硬质合金粉末) 加速至超音速 (通常超过 1000 m/s) 并喷射到基体表面，通过强烈的塑性变形形成致密、高结合强度的金属陶瓷涂层。

这一特性使其成为替代传统电镀硬铬，用于飞机起落架主支撑、发动机轴、襟翼滑轨等关键运动部件耐磨防护的理想选择。例如，针对飞机燃油泵磨损的电机转轴，通过精确调控喷涂煤油流量，改变了硬质合金粉末粒子的熔融状态和动能，可以优化碳化钨-钴涂层的微观结构，显著降低孔隙率，从而大幅提升其显微硬度和耐磨性，实现精密部件的尺寸恢复与性能再生。

不过，超音速火焰喷涂也并非毫无挑战，其工艺过程中伴随的表面喷砂预处理和较高的热输入，是一把双刃剑：一方面可能引入有益的残余压应力，另一方面也可能对基体材料的微观组织和疲劳性能产生不利影响，甚至引发从涂层界面起源的疲劳裂纹。因此，现代航空维修与制造中，对该技术的应用已进入精细化调控阶段。通过优化粉末特性 (如粒径和松装密度) 来改善粒子撞击行为，进而调控

界面残余应力状态，成为提升喷涂部件整体疲劳寿命的关键手段。

此外，HVOF 技术还广泛用于制备发动机压气机叶片、涡轮环等部件的耐磨封严涂层，以及燃烧室部分区域的热障涂层底层。其核心优势在于涂层极其致密（孔隙率可低于 1%）、结合强度高（常超过 70MPa），且对基体的热输入相对较低，避免了零件变形和性能退化。

未来，超音速火焰喷涂技术正朝着使用纳米结构、实现喷涂过程的智能化闭环控制，以及与其他技术（如激光熔覆）复合以制造梯度功能涂层的方向发展，实现涂层性能可编程化设计。

## 冷喷涂：低温高速的“精密修复师”

对于热敏感材料（如钛合金、高强铝合金）或需要避免相变、氧化的精密部件，传统热喷涂技术的高温成了致命缺点，冷喷涂技术则展现出了无可比拟的“冷”优势。它另辟蹊径，利用高压气体（压缩空气、氮气、氦气）将粉末颗粒加速至临界速度（通常 500 ~ 1200 m/s），在远低于材料熔点的温度下，完全依靠粒子的巨大动能产生塑性变形，实现与基体或已沉积颗粒的冶金—机械结合。

这种“冷”的特性意味着修复过程对基体的热输入极低。香港理工大学的研究指出，冷喷涂能最大限度减少部件修复时的热应力，避免热影响区、相变和氧化，从而保持基体材料的原始性能，延长部件整体寿命，这是传统焊接或热喷涂难以做到的。因此，冷喷涂特别适用于铝合金机身结构、机翼梁、钛合金叶片、机匣等结构的在线或原位修复，能在不损伤基体的前提下延长昂贵核心部件的服役周期。

行业巨头空客公司正积极推动该技术

的实用化，其研究重点在于攻克成本瓶颈。传统的冷喷涂为达到足够高的粒子速度以突破材料表面的氧化层屏障，多使用昂贵的氦气作为工艺气体。空客的最新探索旨在通过粉末改性（如改变粉末形貌或表面状态）来补偿使用廉价氮气或压缩空气时带来的动能损失，从而开发出经济高效的结构修复方案。

与此同时，技术创新也在不断涌现，如剑桥大学开发的激光辅助冷喷涂技术，通过激光局部预热粉末流，进一步提升了沉积效率和材料结合的可靠性，为沉积高熔点材料或制造复杂三维结构开辟了新路径。可以预见，随着机器人自动化、在线监测技术与适航认证体系的完善，冷喷涂将从一种先进的修复工艺，逐步迈向航空部件数字化精准再制造与功能梯度材料增材制造的新领域。

## 离子镀铝：面向未来的“全环境友好铠甲”

在环保法规日益严格的全球背景下，寻找镀镉镀层等传统高污染工艺的替代品已成为全球航空业的紧迫课题。离子镀铝技术，特别是离子辅助热蒸发复合磁控溅射镀铝技术，作为一种全真空、无污染的物理气相沉积技术，提供了完美的解决方案，为航空制造业提供了一条彻底告别有毒化学品的“绿色镀膜”路径。

该技术在高真空环境中，通过电弧或磁控溅射产生高纯铝离子，在工件负偏压的吸引下，高能铝离子轰击并沉积在工件表面，形成极为致密、纯净且结合力强的纯铝涂层。整个过程完全不涉及电镀液、酸洗等湿化学工序，无废水、废气排放，彻底解决了传统电镀镉、铬工艺带来的重金属污染和氢脆风险问题。离子镀铝涂层通过形成致密的氧化铝钝化膜，为基体提供



卓越的屏障式腐蚀保护。

研究成果显示，采用离子辅助热蒸发复合磁控溅射技术制备的铝涂层，已在航空紧固件（螺钉、螺帽）和直升机撑杆上实现应用验证。该技术基材适应性极广，可覆盖铜、钛、不锈钢及各类钢基体，适用于从陆基到海上环境的各种飞机外露件、连接构件和起落装置。随着欧盟 REACH 等法规对有害物质的限制愈发严格，离子镀铝正迅速获得国际认可，其相应的材料与工艺标准也已制定，标志着该技术正在成为航空紧固件等领域替代镀镉的标准方案。未来的发展将聚焦于装备的大型化与自动化以提升生产效率，并探索沉积铝基合金（如 Al-Mg、Al-Si）以进一步拓展涂层的力学性能和特殊功能。

航空表面工程发展正呈现以下鲜明特征：一是绿色化，以离子镀铝、无氰电镀为代表的环境友好技术将全面替代传统污染工艺。二是复合化，如激光辅助冷、热喷涂技术所预示的，多种技术联用以实

现性能叠加成为创新热点。三是智能化与数字化，通过机器人、在线监测和机器学习，实现涂层工艺的精准预测与控制。四是功能一体化，涂层不再仅仅是防护层，而是集防腐蚀、抗磨损、隔热、防冰等多功能于一体的“智能皮肤”。

在追求更高、更快、更远的航空梦想中，表面工程技术如同一位沉默的巨匠，在方寸之间施展着改天换地的魔力。随着材料科学、流体力学、等离子物理等多学科的持续交融与突破，这些“隐形铠甲”必将被锻造得更加坚韧与智能，不仅为保障航空器在万米高空、极端温差、盐雾侵蚀和高速磨损等苛刻环境下安全、长寿命提供永不褪色的守护，更推动着整个行业向更高效、更环保、更智能的未来发展。

# 从百年积淀到未来图景： 民用航空“五化”技术浪潮

文 | 王元元 编辑 | 庄敏



本图由 AI 生成。

百年民用航空，以安全为根基、以效率为追求，从活塞式飞机起步，经波音 707 开启喷气时代，再到新一代先进民机迭代升级，依托动力、气动、材料三大领域持续创新，燃油效率不断攀升。面向碳中和愿景与数字智能时代浪潮，全球航空技术正迎来新一轮变革。当前，民用飞机技术已形成高效化、高速化、绿色化、互联化、智能化五大核心发展趋势。五大方向深度融合、协同突破，全面重塑航空器性能、能耗、运行与服务模式，引领民用航空迈向更高效、更快捷、更低碳、更协同、更智慧的全新阶段，开启产业高质量发展可持续发展新征程。

## 高效化

喷气式民航客机服役 70 多年以来，通过动力、气动、材料等技术的持续创新，民航飞机的燃油效率以年均 1%~1.3% 的速度提升，座百公里油耗累计降低近 80%。现代大型民航客机在满载、长途、高客座率下，人均座公里油耗已和普通家用燃油车相当。可以预见，未来这种趋势仍将继续，不过随着技术边际效应逐渐逼近，基础理论和传统技术日益成熟，实现大幅度燃油效率提升难度增加，需要探索更加突破性的技术。

动力技术方面，围绕下一代大型飞机的新型动力，目前主要有两条技术路线，一条是延续现有的涡扇发动机架构，通过持续提高发动机核心机热效率、提高涵道比降低油耗，如罗罗的超扇、普惠的下一代 GTF，但受制于短舱尺寸的限制，涵道比增加有限；另一条则是采用全新的架构，以 GE 和赛峰的开式转子发动机为代表，这种构型采用超大尺寸无涵道风扇（移除机匣），风扇直径可大幅增加至 3.3 米至 3.96 米，直接驱动“等效涵道比”

达到前所未有的 45:1 至 60:1，预计可实现 20% 效率提升；同时，该架构将采用变桨距系统，前排的风扇叶片和其后方的静子叶片均具备可变桨距功能，不仅用于优化不同飞行阶段的气流，还取代了传统的反推装置，通过调整叶片角度阻挡气流实现减速，据称可实现单台减重 1 吨。

气动布局创新与层流控制是大型飞机高效化的核心方向。翼身融合体（BWB）经麦道、波音 X-48 系列验证机验证，气动效率可提升 30% 以上。Jetzero 公司推出 250 座级 Z4 方案，计划 2035 年替代波音 757/767，并计划 2027 年试飞 XBW-1 全尺寸加油机验证机。未来仍需攻克非圆形截面客舱承压设计、薄壁加筋结构屈曲稳定性设计、无尾布局飞控系统、高低速匹配设计、运营适应性设计等关键技术。

桁架支撑翼（TBW）通过桁架支撑实现大展弦比、薄翼型设计，气动效率提升 10% 以上。波音与 NASA 历经 6 阶段研究，2025 年 4 月完成全部风洞试验。但薄翼与桁架结合处易结冰，需增设大面积防冰系统，会带来重量增量，收益或低于预期。

层流技术方面，当前自然层流仅覆盖机翼前缘约 5% 弦长。空客 BLADE 项目基于 A340-300 验证机，对比一体成型与传统分体机翼，成功实现大范围层流，为层流机翼商用化奠定基础。NASA 的 CATNLF 横流衰减层流技术，可将大后掠角机翼层流区扩展至 50% 以上，2026 年 1 月完成首飞测试，预计可为宽体机节油 10%。

## 高速化

自从协和号和图-144 退役后，人类进行远程洲际旅行的速度就被限制在了约

1000 公里时速内，导致乘客需在狭小空间内动辄呆上 5 小时以上，飞行舒适性大打折扣。然而，市场对超声速客机的需求激励着业界从未放弃对技术的不懈探索。2025 年 10 月，NASA 超声速低声爆技术验证机 X-59（最大起飞重量 14 吨，最大巡航马赫数 1.5）首飞，为沉寂多年的超音速客运梦想重新点燃了希望。欧洲方面，法国达索公司牵头发起 HISAC 项目，正联合俄罗斯苏伊霍、法国斯奈克玛等公司研发超声速客机验证机，目前已进入风洞试验阶段。俄罗斯于 2020 年，设立了由中央流体动力学研究中心牵头，6 家国家级科研机构 and 高校参加的“超声速世界级科学中心”，5 年来围绕超声速气动力学、气动声学 and 振动、强度和智能结构、燃烧动力学和动力装置、人工智能和飞行安全等开展多项研究，目前正在研发“雨燕”超声速客机验证机（最大起飞重量 17.2 吨，最大巡航马赫数 2）和“西维尔”超声速客机发动机验证机（推力 10 吨）。从目前上述超声速技术研发项目的进展看，后续开发超声速民航客机还需重点解决低声爆设计、小涵道比低油耗涡扇发动机设计、超声速飞行天地通信、细长前体驾驶舱设计技术等难题。

## 绿色化

民用飞机绿色化是应对气候变化、实现产业可持续发展的必然要求，也是新一轮航空科技革命与产业变革的核心方向。绿色化贯穿设计、制造、运营、维修、回收全生命周期，以低碳、节能、环保、可持续为目标，通过能源、材料、动力、运营与管理创新实现降碳减排，支撑全球航空碳中和目标，关键技术包括新型替代能源、先进动力、可回收材料、高效气动



本图由 AI 生成。

及智能运营等。

近年来，民机绿色化呈现三大重点趋势。一是非二氧化碳排放影响备受重视。ICAO 提出 2050 年国际航空净零碳排放目标，全球多国加入 CORSIA 机制。研究显示，航空颗粒物、航迹云、氮氧化物等非二氧化碳排放的温室效应可达 CO<sub>2</sub> 的 2~3 倍。SAF 可减少烟尘颗粒与凝结尾迹，美国航空联合谷歌利用 AI 优化航线，实现 54% 的航迹云减缓，有效降低附加温室效应。

二是新能源与新构型动力兼顾绿色与低能耗。民航客机碳排放占航空总排放 95% 以上，SAF、混合电推进、氢能源成为主流技术路线。2025 年全球 SAF 产量约 190 万吨，仅占航油消耗的 0.6%，规模化应用仍受产能、成本与供应链制约。混合电推进聚焦兆瓦级方案，加普惠完成 2 兆瓦并联混动系统地面测试，GE 将混动技术融入 RISE 开式转子发动机，预计可降低整机能耗 5%。氢能源同步推进燃料电池与涡轮发动机路线，但其密度低、存储代价大，需平衡绿色收益与能耗成本。

三是航空材料闭环回收取得

重要突破。目前飞机铝合金回收率 90%~95%，钛合金约 85%，复合材料仅 20%。2025 年，空客联合 EcoTitanium 实现航空级钛废料闭环回收，生产出含 75% 回收钛的航空级铸锭，能耗仅为传统工艺的四分之一，建成“废料—铸锭—锻件—装机”全链条体系。同时，空客联合东丽、Daher 开展 A380 热塑性复材回收，再生件强度保留 95% 以上，可用于 A320neo 次级结构，形成可复制工业化流程，并荣获 2026 年 JEC 创新奖。

## 互联化

当前民航飞机互联以“窄带宽空管+客舱娱乐”为主，普遍存在功能孤岛、链路割裂、性能有限问题。现代民航客机近百个子系统中，90% 以上数据仅本地使用，无法空地实时共享；空管、运营、客舱三类链路相互独立、无法统一调度；空管数据链路带宽不足 30kbps，时延高、可靠性差，难以支撑数字化运行。2024 年，ICAO 正式提出互联飞机（Connected Aircraft）概念，以数据驱动与性能标准为核心，构建多方协同运行框架。波音也提出，飞机将升级为飞行中的智能节点，形成覆盖乘客、机组、空管与制造商的实时数据闭环。

未来互联飞机需突破五大关键技术：多链路融合通信、安全域隔离与跨域交互、机载统一数据中枢、航空级网络安全、4D 轨迹与协同运行，实现空地全域高效、安全、智能互联。

2025 年，机上互联技术取得重要进展。4 月，ThinKom 与 Quvia 推出首款商用飞机 AI 驱动 QoE 平台，实现多星座智能调度、无缝切换与开放架构，兼顾民航与低空飞行器需求。12 月，波音与美

联储使用 737-8 开展 IPS 架构飞行验证，以互联网协议统一封装数据，兼容航空专用链路 with 5G、卫星等商用网络，将飞机变为空中互联网节点，大幅提升空地信息流通效率，是支撑基于航迹运行、提升安全与效率、降低油耗与排放的关键技术。

波音 2025 年“环保验证机”项目与美国联合航空合作，使用一架波音 737-8 作为“探索者”飞机，以评估一种旨在改善驾驶舱、空中交通管制和航空公司运营中心之间信息流的现代化数据通信系统。

## 智能化

受成本、安全、运行效率三大需求驱动，民用飞机正加速向智能化演进。航司需要通过智能化降本增效、优化航线、减少延误；大规模机队与拥挤空域需要智能辅助决策、故障预判，将安全防线前移；传统空管模式难以支撑增长，必须依靠空地协同智能网络提升容量。

智能化核心是从功能自动走向决策智能：一是自主飞行与辅助决策，打造可协同、可接管的“智能副驾驶”，减轻机组负荷；二是系统级健康管理，由定时维



本图由 AI 生成。



护转为预测性视情维护；三是智能与互联深度融合，飞机成为空中智能节点，实现空地协同最优轨迹规划。

2025年，德国宇航中心“达尔文”项目推进顺利，以单飞行员驾驶（SPO）为目标，开发AI驾驶舱与自动化技术，总投资超5亿欧元。项目聚焦可信机器推理、飞行员状态监测、人机协同任务分配三大方向，已完成“数字副驾驶”试飞与“人机协作显示器”模拟测试。试飞验证了系统在疲劳、失能、乘客突发疾病等场景下的自动告警、任务转接与应急改道能力；模拟器测试表明，该系统可有效分配任务、支持决策，适配未来精简机组运行。

在健康管理领域，AI预测性维护正重构运维模式。发动机健康管理预测准确率超90%，GE Predix平台监控3万余台发动机，可提前14天预警，非计划拆换率降25%、维护成本降15%。其ABM AI工具可快速判读涡轮叶片孔探图像，效率大幅提升，在印度靛蓝航空应用后非计划拆换率

降约75%。未来预测性维护将成为行业标准，平台开放化、AI生成方案与5G实时传输将进一步提升运维效率与安全水平。

高效化、高速化、绿色化、互联化、智能化的深度融合，正重塑民用航空的未来图景。高效技术持续突破性能边界，高速飞行让洲际出行更便捷，绿色化推动航空全生命周期降碳，互联化构建全域协同数字生态，智能化实现从自动到自主的跨越。未来，五大领域将形成合力，破解能耗、排放、效率等行业难题，让飞机成为兼具环保属性与智能能力的空中数字节点，让航空出行更高效、更绿色、更舒适。民航业也将借此实现安全与效率、发展与环保的统一，在百年发展积淀之上，飞向更可持续、更智能的全新未来。

## 俄罗斯发布《至2050年俄罗斯民用航空科学与技术发展预测》

文 | 贾晨雨 编辑 | 庄敏



▲ 来源: TsAGI

2026年1月，俄罗斯茹科夫斯基国家研究中心（NRC）发布了《至2050年俄罗斯民用航空科学与技术发展预测》（以下简称《预测》），明确了俄罗斯民用航空飞行器在短期（2025年~2030年）、中期（2030年~2036/2040年）、长期（至2050年）的主要任务，将任务拆解成了需要解决的科技问题，确定了N+1（一代技术）、N+2（二代技术）的布局，包括发展四个新型号（未来干线飞机、未来支线/区域飞机、超声速民机、高速旋翼机），开展基础技术储备等。这是俄罗斯继2016年发布的《2016~2030年飞机制造科学技术发展计划（第一版）》以来，久违的民用航空科技领域战略性文件，将成为后续科研项目立项的指导性文件，重要性高，

值得关注。

## 《预测》编制不再停留在“专家意见”层面

2022年俄乌冲突后，俄罗斯联邦工业和贸易部（工贸部）要求俄罗斯茹科夫斯基国家研究中心针对俄罗斯航空面临的挑战，编制新版民用航空领域科技发展预测。2023年底立项，2025年初，《至2050年俄罗斯民用航空科学与技术发展预测》获得工贸部批准，2026年年初，NRC正式对外发布该《预测》。

外部制裁对俄罗斯民用航空运输及航空工业带来了颠覆性影响。为保证国内交通连通性，俄罗斯需研制国产化飞机，实现航空技术独立自主。在此背景下，相较2012年发布的《至2030年航空科学技术发展》、2016年发布的《2016~2030年飞机制造科学技术发展计划（第一版）》，本次《预测》在战略重心、编制方法上完全不同。以往航空科技规划主要对标世界航空及航空科技发展趋势，而《预测》的目标是响应国家发展目标，确保国家安全。要求《预测》结合俄罗斯社会、经济等综合情况，确定民用航空业发展的目标和任务，进而拆解出需优先开展的技术研究。《预测》表示，文件的制定不仅仅是航空科技领域的战略规划，更是代表一种“认知独立”，不再全方位复制“全球趋势”，而是结合自身国情和国家利益确定技术布局。在编制方法上，《预测》强调，决策优先考虑模型测算结果，而非专家意见。

《预测》首先明确了6个趋势判断，作为制定民航发展任务及科技布局的基础。《预测》认为，首先，传统构型飞机的潜力已接近枯竭，微小的改进需要巨大

的成本。为满足俄罗斯国内民航运输需求，应重点研制新构型飞行器，而不是在传统外观基础上改进。

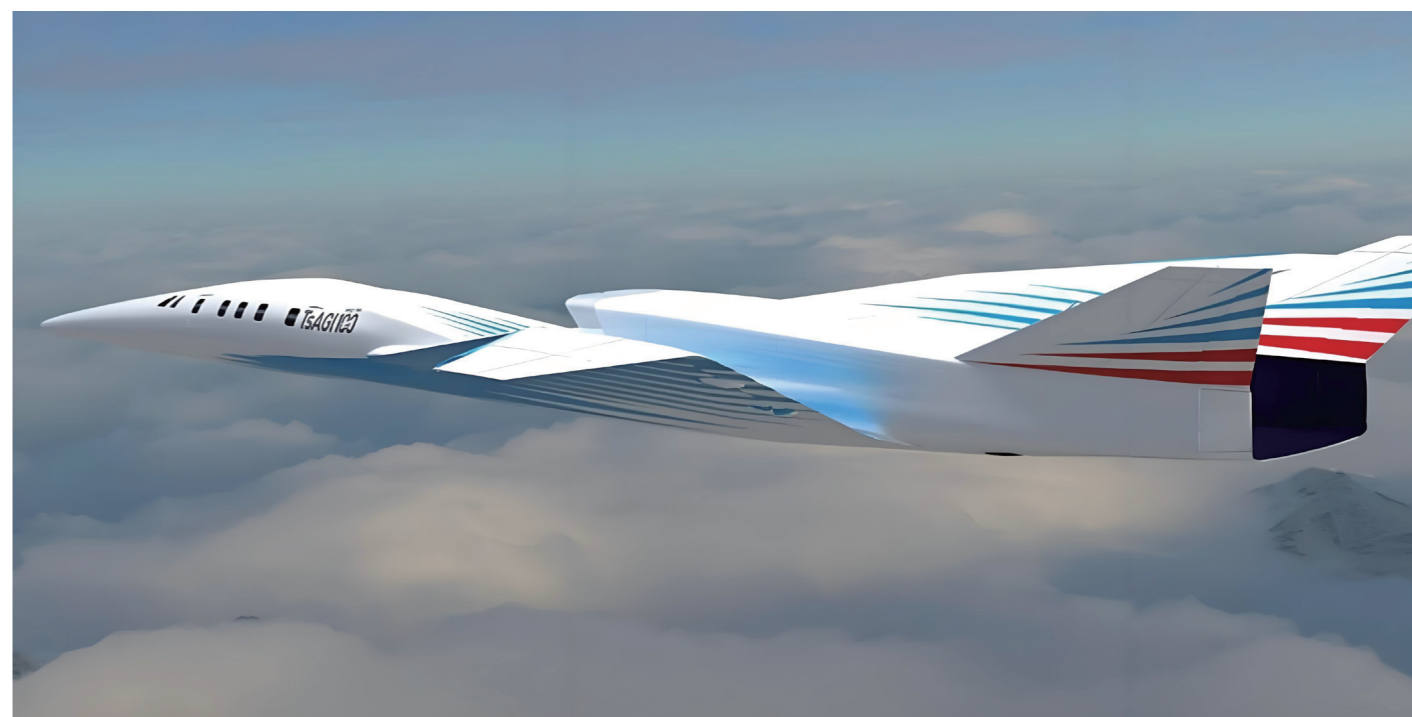
第二，航空业不只有飞行器，还有整个生态。生态系统包括航线网络、机队、能源与燃油保障系统、地面基础设施（机场）、空域管理系统、防空系统、飞行安全管理系统、人员培训系统等。通过对生态的集中管理，可以提高航空服务的安全、质量，降低成本和对环境的影响，提供更好的服务。

第三，要尽可能减少机队中的型号数量，最大程度减少飞机的研发、生产、运营成本。由于俄罗斯民机的市场规模有限，对某一机型的需求和采购量低于空客、波音等全球领导企业，例如2029年MC-21产量约等于A320neo系列2017年产量。产量同平均生产成本、平均运营成本呈负相关。订单少、产量少，导致俄罗斯民机生产和运营成本高，市场竞争力低。为了降低相关负面影响，需减少开发的机型数量，使机队中机型尽量统一。

第四，军民融合、技术转移有利于实现产品统一化。从探索性、应用研究阶段即开始军民机的系统性协同，使得研发、生产阶段可以整合民用与军用技术资源。主要原因是，俄罗斯希望将其在军机上的优势技术用于民机。

第五，国际上对环保的要求是一种保护主义策略。近年国际上持续提出航空减排目标及对应举措。《预测》认为，此种对环保的要求是一种保护主义举措，俄罗斯在型号研发时不应优先考虑国际标准，而应根据自身国情和需要，制定降噪、温室气体排放等的标准。俄罗斯将放弃无条件遵守“国际规则”，因为相关要求没有反映俄罗斯的国情和实际能力，直接违背了俄罗斯国家利益。

第六，人工智能、自动化技术正在



▲ 图2 | 来源: <https://www.aerotime.aero/>

发展并被广泛应用。应在航空领域引入相关技术，减少人为因素在驾驶过程中的作用，提升飞行安全。由于航空技术的发展、适航体系的完善，当前航空事故率大幅减少，而少量已发生事故的主要原因是人为技术操作有误、空中交通管制失败。减少人工决策、提升自动化水平可以提高飞行安全水平。

## 民机领域重点发展任务

《预测》指出，从短期来看（到2030年），俄罗斯民用航空业需解决外部制裁对俄罗斯民机的影响，保障俄罗斯连通性。主要包括两方面内容：一是，确保独立研制生产俄罗斯国产民机，拥有技术主权，到2030年，国产飞机比例达到81.3%。

俄罗斯当前机队可能面临出行安全问题，一方面剩余的进口飞机因制裁导

致零部件、售后短缺，另一方面此前俄罗斯与国外联合研制、正在运营中的飞机飞行数据少，设备可靠性不足。需要开发飞机状态监测、诊断、预测技术，保证飞行安全。《预测》中明确目标为事故率下降至每百万架次发生飞行事故数量不超过1起。此外，预计到2030年，无人机将大量应用于货运、农林等行业，需同步发展空管系统、无人机飞行管控技术，将无人机融入非隔离空域。

从中期来看（到2036~2040年），俄罗斯民机要满足政府交通规划要求。俄罗斯政府在《到2030年俄罗斯联邦国家发展目标统一计划及到2036年远景规划》中明确提出了3个目标，需要俄罗斯航空工业领域支撑落实：在2030年实现每人每年乘坐飞机次数1.08次。当前俄罗斯人年均乘坐飞机次数为0.76次，欧洲为1.9次，美国为2.7次；到2035年，人口超10万的城市间通行时间不超过12小

时，当前为 13 小时；2030 年，在莫斯科中转的航线比例下降到 53%，2035 年从当前的 75% 下降至 54%。

为实现上述目标，需要一方面降低票价；一方面设置更多的直达航线、新建更多的机场，并增加可用的飞行器数量。航空业的任务一是降低飞行成本，进而从根本上降低票价。经测算，到 2035 年机票相对价格（机票 / 居民收入水平）需至少下降 37% ~ 52%。二是，为偏远地区设计符合当地要求的飞行器。偏远地区大量设置直达航线，需结合当地复杂的地理、气候环境，提供当地可用的、不需要完善机场及跑道的飞行器，满足地方需求。

无人机、轻型飞机的使用方面，《预测》提出，在俄罗斯可以重点在四个领域使用轻型飞机，提升相关领域的工作效率，降低成本，同时为航空制造业带来营收。四个领域分别为森林防火与救火、执法、偏远地区医疗、天然气管道巡逻。

长期来看，到 2050 年，俄罗斯国内交通连通性应进一步提升，居民可以在俄罗斯各城市、区域自由定居。一方面，可以进行高频的城市间飞行（飞行距离几千公里），航空客运量进一步提升至每人每年飞行 8 次 ~ 12 次。连通性的增加将鼓励企业移向欠发达城市，促进工业企业专业化分工，助力区域间经济均衡发展。另一方面，明确提出发展城市空运，助力城市发展。开展城市间、城市—郊区间的短途飞行（飞行距离为几百公里），居民可以从城市转移至城郊，缓解城市压力。这样的理想场景中，民用航空工业需要完成的任务如下：

更高密度的飞行会导致环境污染，因此干线飞机应使用替代燃料，包括液氢（可能性高）、第三代生物燃料等。俄罗斯国土面积大，飞行航程长，开发

超声速民机，显著缩短飞行时间。需主要解决声爆问题；需研制城市空运（城郊通行、城市内飞行）所需的旋翼飞机。

飞行器应大规模推广应用，因此需要飞行器大规模生产、价格合理、运维成本低、易于操作、环保、安全。需要飞行器采用电动或混动，可采用分布式布局，实现低噪声、低排放，高机动性；采用智能操作或辅助操作系统，使驾驶更容易，更易推广；采用碳纤维复合材料结构，可大规模生产，易维修。同时，面对日益复杂、密度高的飞行网络，发展空域管理技术保障安全，需要考虑网络攻击风险。

## 重点技术布局

为满足以上任务要求，《预测》提出了三代技术的概念：N（当前已有技术）、N+1（一代技术）、N+2（二代技术）。其中 N 为当前已经具备的技术，可用于解决短期任务。N+1 为已布局的技术，部分在 2030 年至 2035 年可达到技术成熟度 6，可用于批产所需的飞行器（先进干线飞机和支线飞机），用于解决中期问题，部分技术服务长期任务（超声速、城市空运飞行器等）。N+2 旨在面向更长远未来，提前进行技术布局。《预测》在短中长期技术布局的基础上，进一步分析了民用航空可能存在的不足，并提出了为应对不足所需的技术及基础科学储备。

N+1 技术方面，为实现全部目标，《预测》明确需布局以下技术：电动与混合动力装置技术，以及应用新型燃料（包括氢能源）的技术；航空系统智能控制技术，包括飞行器单机运行与飞行控制，任务执行时整体航空运输系统管控（综合航空系统）；基于人工智能的飞行器状态预测、诊断技术；高速飞行相关技术；新型智能

优化方向	具体技术	预期效果
升力提升	层流流动设计	油耗及 CO <sub>2</sub> 排放量减少 10%
	干线飞机新气动布局	油耗及 CO <sub>2</sub> 排放量减少 10%
	飞机发动机气动一体化（干线飞机用主动流动控制；短距起降飞机适配该技术）	干线飞机油耗降低 5% ~ 7%；短距起降飞机起降距离减少 30%
	低声爆的气动布局设计	超声速民机可在人口稠密地区上空超声速巡航飞行
动力改进	干线飞机传统燃气涡轮机改进（引入陶瓷材料 + 电气化、智能化）	发动机重量减少 30%，效率提高 1% ~ 2%
	城市空运飞行器、超轻型飞机等短途飞行器采用全电力	CO <sub>2</sub> 排放量减少 100%；运营成本降低 30% ~ 50%；9 座 MVL 飞机飞行距离可达 200 公里；电池单位容量 0.3kW h/kg，无 CO <sub>2</sub> 排放
	支线飞机采用混合动力	油耗降低 10% ~ 20%；起降距离减少 20% ~ 30%；运营成本降低 10% ~ 15%；发动机使用寿命提高 10% ~ 15%；燃料消耗和 CO <sub>2</sub> 排放量减少 10%
	未来干线、支线飞机采用传统氢动力	CO <sub>2</sub> 排放量减少 100%；NO <sub>x</sub> 排放量减少 10% ~ 15%
	未来支线、短途飞机采用氢动力燃料电池	CO <sub>2</sub> 排放量减少 100%；NO <sub>x</sub> 排放减少 100%
	干线、支线飞机采用低排放燃烧室	降低污染物排放（未标注具体数值）
结构强度	干线飞机国际航线采用 SAF	低排放（未标注具体数值）
	采用复合材料和新结构（仿生结构等）	减少燃料消耗和 CO <sub>2</sub> 排放（未标注具体数值）
管理	飞机和航空运输系统状态监测、控制、预测技术应用	事故率下降 10% ~ 12%；飞机平均使用寿命增加 10%，发动机平均使用寿命增加 20%，运营成本降低 20% ~ 30%
	管理自动化和决策支持技术应用	事故率下降 10% ~ 15%；人为驾驶失误导致的航空事故率从 56% 降至 10%；飞行员与飞机间信息交互减少 20%；飞行时油耗降低 3%；飞飞行员飞行要求从 4000 小时降至 1500 小时；油耗和有害物质排放降低 10% ~ 15%；飞行行运营成本降低 30%

▲ 表 1 | N+2 技术布局

材料与制造技术，构建轻质、坚固的航空结构所需的技术储备；飞行器新布局，包括充分发挥新型动力装置、新材料与智能控制优势的布局方案。

如何组织实施技术布局方面，俄罗斯的方法为立项四个新型号，建立由多家科研机构组成的研发团队。针对四个机型需要的共性技术，安排相关科研机构等进行研究。四个型号分别为：低油耗干线飞机、短距起降的支线飞机、超声速民机、旋翼机。通用技术为：飞行自动控制和辅助决策、电动 / 混动 / 替代燃料的使用、轻质耐用的智能材料和结构、飞机监测与预测。

N+2 技术方面，《预测》提出应发展的四类技术：升力提升、动力改进、结构强度、管理。具体如表 1 所示。

《预测》中的技术布局与近年俄罗斯对外公布的技术发展重点、航空科研成果基本一致。《预测》的 N+1 技术，明

确了俄罗斯民用航空科技领域重点发力方向：智能飞控 / 辅助驾驶、智能状态监测及问题预测、轻质材料与结构、采用新布局的低油耗干线飞机、短距起降支线飞机、超声速民机相关技术（声爆为重点）、城市空运用旋翼机。

《预测》首次明确了俄罗斯在新能源领域的布局，明确中期（2036 ~ 2040 年），干线飞机仍用传统发动机，执飞国际航班的干线飞机采用 SAF 等环保燃料；支线 / 区域飞机采用混动技术。长期（到 2050 年）干线飞机大概率采用氢动力，未来干线、支线和短途飞机采用氢动力燃料电池，城市空运飞机采用纯电技术。



▲ 来源：空客

# 空客在华供应链发展与启示

文 | 王瞳 编辑 | 庄敏

2026年初，空客位于天津港保税区的新建厂房将全面投入运营，最大单体209号总装车间可同时总装5架A320系列飞机。届时，空客公司在中国的A320系列飞机产能将翻倍，占空客公司A320系列总产能的20%，可大幅提升对中国航司的交付速度，并辐射欧洲、中东及东南亚市场，这标志着其在中国的产能布局迈入新阶段。

相应地，中国已成为空客公司全球供应链体系的关键节点。截至2024年末，空客公司认证的中国供应商数量已增至82家，同时境内有约200家供应商支持空客公司民机的生产，涵盖从上游原材料到下游系统装配的全产业链。本文将从供应链体系、技术标准、产业协同、可持续发展、国际地缘战略5个维度，深入分析

空客公司在华供应链发展现状、核心特点和未来趋势，为民机产业投资提供参考。

## 在华供应商体系和布局特征

空客在华供应商体系涵盖央国企、民营企业、外资企业等多种类型，呈现核心稳固、外围拓展的分层式结构特征。国内一级供应商已达到23家，形成了以天津为中心，辐射西安、沈阳、成都、杭州等地的民机产业集群。

核心稳固是指中国航空工业集团在空客公司中国供应商体系中占据绝对主导地位。空客公司在中国直接采购的项目包中，超过90%的份额由中国航空工业集团下属企业承担，为天津总装线及其全球产能提供支持，中国航空工业集团已成为空客公司全球第二大非发动机供应商。代表企业有：中航西飞负责A320系列机翼制造及机身系统装配，沈飞民机参与A220机身桶段、舱门及A320机翼前缘制造，成飞民机承担A350辅材结构件及多型号飞机舱门生产，哈飞空客参与A350机体制造并承担多型号飞机方向舵生产等。

外围拓展是指民营企业供应商的崛起和外资供应商的本土化布局，进一步完善了空客公司在中国的供应链生态。一方面，民营企业通过技术创新和精益生产，已成为空客公司供应链中的重要力量，如西子航空已成为空客A320机翼小肋全球唯一供应商、A320机翼大肋的中国总装线唯一供应商，赛象科技承担了空客公司中国天津总装线及美国莫比尔总装线的大部件运输夹具生产任务。另一方面，空客公司鼓励其国际供应商在华投资建厂，带动航空领域多家外资企业入驻中国，如生产金属结构件的普美航空（Primus International）落户苏州工业园区，制

造飞机风挡玻璃的吉凯恩航宇（GKN Aerospace）入驻江苏靖江，生产密封胶的凯密特尔在国内多地设立合资公司。

目前，空客公司在华供应链的本土化程度已达到较高水平，天津总装线实现A320系列本土化率达到50%。特别是关键部件如机翼、机身结构件的本地化生产，显著降低了对欧美供应链的依赖，中航西飞在天津本地供应的机翼占总装线所需机翼的80%，大大降低了生产物流周期和制造成本。空客公司使用的全球供应链协作平台Air Supply已覆盖国内主要供应商，实现产能计划、订单跟踪及供应商管理库存（VMI）的数字化协同，通过该平台，中国供应商可实时获取全球需求数据，订单响应周期已缩短30%。2024年，在全球供应链持续紧张的背景下，空客公司在华供应链展现出强大的韧性，以中航西飞为代表的中国供应商准时交付率达到98%，有力地支撑了空客公司产能爬坡。

## 在华进行技术研发和标准对接

早在2005年，空客公司已成立了空客（北京）工程技术中心，作为推动技术创新与协同发展的核心平台。该中心最初的主要任务是承担部分A350飞机的研发工作，兼顾部分在役飞机的升级优化与生产制造中的工程支持。在A350项目中，中国工程师展现了卓越的创新能力和卓越的设计任务；此后中国技术团队继续参与了A320neo、A350等机型的设计优化。除传统的结构设计之外，空客公司中国技术团队还在新材料、智能制造、绿色技术等前沿领域开展研究，也进一步推动了空客供应商本土化进程。

空客公司建立了严格的供应商认证体系，包括技术能力评估、质量管理体系



审核、产品样品测试等多个环节。例如，在碳纤维材料领域，多家国内企业凭借技术创新优势进入空客公司供应商体系，在中国的碳纤维供应链已形成多层次本土化布局。中国建材旗下中复神鹰 T800/T1000 级碳纤维通过空客公司认证，经由欧洲分销商进入空客体系，2024 年全球市占率提升至 5%，未来将直接参与 A320 系列次承力结构的供应；启赋安泰复材按照 NADCAP 标准，顺利通过空客公司认证，已成为直接参与核心部件制造的一级供应商，也是国内唯一同时通过空客、波音认证的碳纤维复合材料供应商；江苏恒神自 2023 年起作为二级供应商为空客 A350 方向舵提供碳纤维面板，2024 年出口量达到 420 吨。

在其他关键供应链环节，中国企业通过与空客公司的合作，共同进行材料性能测试和适航认证，逐步建立了与国际接轨的技术标准体系。例如，在航空铝合金领域，南山铝业不仅通过了空客 A320 机翼长桁用挤压型材产品认证，还在 2023 年通过空客 A350 机翼上桁条 7150 型材

认证，成为国内首家具备该合金供货能力的航空铝合金挤压型材供应商。

### 在华产业集群效应与区域协同

自 2006 年空客公司与中国签署天津 A320 生产线协议以来，经过近 20 年的发展及整合，其在中国供应链已形成多个具有特色的产业集群，各集群之间形成了良好的协同效应。

天津作为核心基地，不仅拥有两条 A320 系列飞机总装线，还呈现出“本地化生产+全球化协同”的供应链生态，已形成覆盖关键部件制造、系统集成、物流配送的全链条产业集群。一级供应商中，中航西飞承担天津总装线的机翼制造和机身系统装配，实现了向总装线的“门对门”交付，物流时效提升 50% 以上；柯林斯宇航在天津设立短舱预组装中心，为 A320 系列飞机提供短舱部件，法国赛峰在天津滨海新区综合保税区成立赛峰短舱（天津）航空制造有限公司，进行 LEAP-1A 发动机与短舱的集成装配；目前 A320 系列飞机机翼已实现主要在

天津交付，飞机短舱已实现 100% 在天津配套。此外，天津港保税区通过“磁吸效应”吸引了 50 余个航空配套项目，形成覆盖材料、航电、内饰等领域的二级供应链网络。空客天津总装线与核心供应商的地理距离均在 10 km 以内，实现了零部件的“小时级”配送，这种“集群式”布局还带动了天津航空产业物流、检测、维修等配套服务的发展。天津海特作为国内最大的民营飞机维修企业之一，已承接大量空客 A320、A321 等飞机客改货订单。

长三角产业集群以上海、苏州、杭州、靖江为节点，汇聚了西子航空、南山铝业、普美航空、吉凯恩航宇等重要供应商。该集群在金属材料、复合材料、精密加工等领域具有明显优势。成渝产业集群以成都、重庆为中心，成飞民机承担了 A350 飞机辅材结构件的生产任务，成都还建有中国首个飞机全生命周期服务中心，为空客公司提供从停放、存储到拆解回收的一站式服务。

产业集群之间通过高效的物流体系 and 信息系统实现协同。中远海运作为空客公司亚洲总装线项目唯一的海运服务供应商，自 2008 年首架次运输以来，已连续 17 年承担空客 A320 系列飞机大部件及其他零部件的跨洋全程物流服务，形成了覆盖欧洲段驳船运输—远洋集装箱航运—天津段内陆配送的全链条解决方案，累计交付超 800 架次飞机部件，并创下连续 17 年零事故接卸的行业纪录。

### 在华可持续航空燃料探索

在全球应对气候变化的大背景下，空客公司与中国在绿色技术领域的合作成为新亮点，可持续航空燃料（SAF）已成为航空业实现碳中和目标的关键技术路径，在该领域的合作已取得实质性进展。早在 2011 年，空客公司就与中国石化、中国航

油、东航签署合作协议，共同推动 SAF 燃料的应用，中国石化采用自主研发的生物航空煤油专有技术和催化剂，通过加氢脱氧、加氢裂化、异构化等一系列化学反应，利用餐饮废油生产 SAF，已实现生产技术突破，将餐饮废弃油转化为符合航空煤油标准的油料产品。此外，中国企业在 SAF 生产技术方面还进行了多路径探索，除了餐饮废油路线，还包括生物质气化-费托合成（G+FT）技术路线，针对甲醇、乙醇的低碳醇脱氧、低聚、加氢合成路线。

2022 年第四季度起，空客公司开始在天津交付中心的测试飞行和交付飞行中添加 SAF。2022 年 10 月，交付中心首次使用 5% 混合比例的 SAF 进行 A320neo 交付飞行；2024 年，天津总装线测试飞行中 SAF 的使用比例达到 40%。2025 年 10 月，空客联合中国民航局、中国国航发布《中国可持续航空燃料生产技术路径多元化发展倡议》，持续推动 SAF 原料供应、标准制定等全链条的创新，国航在成都—北京航线完成首次 SAF 商业飞行。空客公司计划到 2030 年将 SAF 使用量占比提高到 10%，到 2050 年实现 100% 使用 SAF 进行商业飞行。

### 中欧航空合作与国际地缘战略

空客在中国的发展历程，映射了中国与欧洲航空产业合作的步伐。从 20 世纪 80 年代开始，以技术引进与初步产业合作为特点，中国市场开始引进购买空客飞机，1985 年中航西飞与空客公司签署首个合作协议，开始转包生产飞机零部件，中国航空制造业开始融入全球供应链。从 20 世纪初到 21 世纪 10 年代，以产业协同与体系化合作为特点，2008 年空客公司在天津设立 A320 系列总装线，2017 年启用天津 A330 宽体机交付中心，2019 年，中欧签订《民用航空安全协定》及适航审

定附件，建立互认机制，为国产飞机出海奠定基础。自 2020 年以来，C919 大型客机开启 EASA 认证，天津第二条 A320 总装线建成，供应链本土化持续深化，中欧无人机、低空经济、绿色航空领域合作启动，中欧民用航空产业持续加强绑定。

目前，空客公司在中国市场已占据领先地位，且优势不断扩大。截至 2024 年末，空客飞机在中国大陆在役机队超过 2200 架，市场份额约为 55%（仅统计 100 座以上飞机），而波音的市场份额约为 40%~41%。得益于空客在华的深度本土化布局与中美贸易争端的影响，空客在新增订单市场优势更加明显，空客飞机占比高达 80%，波音仅占约 20%。2024 年，中国内地航司共引进 237 架飞机（全口径），其中空客占 49%，波音占 32%，中国商飞占剩余部分。随着中国商飞 C919 的规模化生产和 C909 的市场拓展，中国市场将形成空客、波音、中国商飞三足鼎立的格局。

面对国际地缘政治的不确定性，空客公司的“双源供应”策略成为重要的供应链风险管控手段，该策略的核心是对关键零部件、系统采用双重供应体系，选择两个不同地区的供应商，空客 CEO 傅里表示未来可能对所有工作包采用“双源供应”体系，以

▼ 空客公司在华供应商重点布局领域

主要类别	供应商重点布局领域
航空材料	碳纤维、铝合金、钛合金
机载设备	航电、飞控、液压等
系统集成	机身系统、发动机短舱等
售后服务	航材保障、飞机维修、飞行员与地勤培训

增强供应链韧性。目前，这一策略已在发动机、航电系统、关键结构件等领域全面实施。通过“双源供应”，空客虽然增加了供应链管理成本，但显著降低了供应链中断的风险，根据业内共识，采用“双源供应”策略可将供应链风险降低 60%~70%，而成本增加仅为 10%~15%。

基于上述环境因素与竞争策略，中国在空客“双源供应”体系中的地位将持续提高，空客公司将重点在以下领域推动中国供应商发展。

以 A320 系列为基础，中国供应链已从零部件供应升级为全产业链协同，成为空客公司全球战略的核心支柱。空客公司同时强化在华供应链管理团队，完善风险管控机制，通过分散化生产、建立战略库存、建立应急响应中心等多种手段管控供应链风险，对抗国际地缘战略的不确定性。

### 对民机产业投资的启示

经过 40 年的发展，空客公司在华供应链已从最初的组装工厂模式逐步转型为全球战略枢纽，形成了覆盖研发、制造、总装、售后全产业链的深度本土化体系。空客公司为中国民机产业发展和民机供应链建设做出了样板。对比而言，中国民机产业链注重以下几点：

一是正视差距，以长期资本投入支持有关企业突破薄弱领域。受限于民用技术可靠性要求与国际适航认证标准，民用航空领域航电系统、飞控系统、发动机等关键技术仍主要依赖欧美供应商，中国企业在这些领域的参与度有限，呈现外资合资企业主导、本土企业追赶特点。因此，在持续科研投入的基础上，以国家级产业基金、央企战略性产业基金、地方政府长期引导基金为代表的“耐心资本”可作为重要补充，长期稳定支持民机最关键领



域的发展。例如，综合模块化航电（IMA）、北斗导航、电（光）传飞控及控制算法、高温单晶叶片及精密铸造等领域，会提供更多的市场化投资机会。

二是持之以恒，加码对关键材料、零部件的进口替代与高端化升级。如前文所述，中国企业在航空碳纤维材料领域已取得了巨大的突破，成功地打入欧美民机产业链，可通过市场化投资助力相关企业持续提升材料的结构性能，提升在新型复合材料航空级产品的渗透率，进一步推进机体结构减重以优化燃油经济性；同时加速布局陶瓷基复合材料在民机及发动机的应用。在高端产品仍依赖进口的航空零部件领域，应持续关注细分赛道头部企业的技术迭代与工艺革新，支持增材制造等先进加工工艺、加工设备在飞机结构件生产中的应用。

三是首尾兼顾，布局维修保障（MRO）与增值服务大市场。截至 2025 年 6 月，全球商用飞机机队总数为 35 550 架，其

中现役飞机 30 300 架，封存飞机 5250 架；2024 年末，中国内地航司机队总数为 4172 架（含客机和货机），预计 2025 年末将突破 4600 架，“十五五”末将达到 6000 架以上，维修保障市场规模也呈现稳定增长态势，飞机维修、发动机维修、飞机客改货改装、地面服务、AI 运维辅助需求将随之上升，具备相关资质且围绕核心航空枢纽的维修保障企业具有投资价值。再向后端延伸，飞机拆解回收、材料循环利用等领域蕴含巨大商机，空客成都飞机全生命周期服务中心成功拆解了首架空客 A330-200 飞机，约 27% 飞机重量的部件经过无损检测与再认证后作为二手航材重新进入市场，机身框架等铝合金材料可再次用于汽车、建材等行业，其余可回收复合材料经处理后成为绿色建材填料。随着未来更多民航飞机的退役，航空循环经济将持续增长。

▲ 来源：空客官网



▲ 来源：天骄航空

# 关于“干支通、全网联” 航空运输服务体系建设的三个科学问题

文 | 钟山 编辑 | 林喆

近年来，为提升民航网络通达通畅性，促进国内干线与支线机场协同互促发展，民航局提出了“干支通、全网联”战略工程，并在全行业推广实施。“干支通、全网联”是指以国内通程航班为主要载体，以中转便利化为支撑，推动构建干线、支线、通航短途运输间航线互联、机场互通的航空运输网络，其发展目标为实现国内主要城市高效畅通、偏远地区城市有效连通，形成“全国民航一张网”。这一理念

的核心要义是通过国内通程航班或中转便利化将不同机场、不同航司的网络衔接起来，并且依托各自优势与资源，发挥出更大的综合效应，形成“中转+”生态圈。

## 背景与意义

多年来，民航局出台了《民航局创新“干支通、全网联”服务模式实施意见》《国内通程航班管理办法》《民航旅客中

转便利化实施指南》等三维政策体系，推动建立“国内通程航班服务管理平台”“民航中转旅客服务平台”行业级数字化双平台，打通企业间信息壁垒，实现国内通程航班的备案、运行、投诉等服务的标准化。搭建数字化平台，并围绕航线、航班、时刻、运力等方面持续优化支持政策与保障机制，加快在全行业推广普及“干支通、全网联”与国内通程航班。

在全行业的共同努力下，现阶段“干支通、全网联”已取得了显著进展，实现了“从无到有”的转变。一是规模实现跨越式增长。数据显示，2025年1~11月，共保障国内通程航班86万班，累计为278万名旅客提供“一次支付、一次值机、一次安检、行李直挂、全程无忧”的高标准国内通程航班服务，同比增长1.6倍。我国居民日益增长的个性化、多样化、品质化出行需求推动通程旅客市场不断扩大；二是主体参与积极性高。截至目前，所有客运航空公司、95%以上的运输机场（包括全部枢纽机场）、5家主要的OTA均接入“国内通程航班管理平台”；三是产品覆盖范围广。通过航空公司、机场等统筹推进和深度合作，形成了不同模式、不同组合的“干支通、全网联”的国内通程航班产品，2025年前三季度累计新增3433组城市对接，有效提升了国内航线网络服务水平。

事实上，“干支通、全网联”是一项涉及主体多、服务流程长、关联产业多的系统性工程。一是以国内通程航班为例，开通一条航线产品往往需要关联至少3家机场、2家航司、2家地面服务代理在内的7家主体；二是国内通程航班提供具有“一次支付、一次值机、一次安检、行李直挂、全程无忧”的高标准全流程服务，覆盖了从票务销售、值机中转、行李直挂、航延保障、投诉处理等旅客出行全链条；

三是多数机场要提升“造血”功能，不仅需要通过网络衔接增加旅客流量，还需与旅游、交通、制造等产业深度融合，促进机场可持续发展与地方经济转型升级，推动偏远地区连通性和航空服务效率的整体提升。下一步，纵深推进“干支通、全网联”就要从上述特征出发，需要有效解决资源配置、产品供给和效益评价等重要问题，从而更好服务区域协调发展、乡村全面振兴、国产民机商业化运营等国家战略需要，更好促进民航供给侧结构性改革和着力扩大有效需求协同发力，发挥好民航行业基础性、先导性、战略性作用。

## 最优关键资源配置问题

最优资源配置问题属于运筹学问题。“干支通、全网联”属于衍生服务产品，它是基于已有的航线航班进行有机组合，从而形成了各式各样的中转出行产品，即使在不增加机队、机场等增量资源投入的前提下，对民航存量资源进行更精准的深入挖掘，增加现有支线、通航短途运输机场之间的通达性，提升航线网络运行效能，进一步强化比较优势，提升民航核心竞争力。为此，如何建立行业级的模型来分析和优化现有航线网络、提升航线网络通达性与客运规模首当其冲。

早在1978年，国外就对联程中转开展了相关研究，这类问题可以概括为集中星型网络模型（Hub-and-Spoke Structure）。该模型由中心枢纽（Hub）和连接枢纽的支线（Spoke）组成，所有节点（如城市或机场）通过支线连接到一个或多个枢纽，而节点之间的直接连接则通过枢纽进行中转。这种模型旨在优化物流或运输效率，通过集中流量来降低整体成本和运输时间。在航空运输业中，集中星型网络模型被广泛应用

于航空快递和客运网络。如达美航空（Delta）和联邦快递（FedEx）等通过这一模型建立起亚特兰大和孟菲斯等大型枢纽机场，集中客流与货流，再通过支线网络分发到各地。

集中星型网络模型主要有三方面优势。一是成本优势，通过集中流量，航空公司可以减少航线数量，优化飞机利用率，从而降低运营成本；二是效率优势，枢纽机场能通过汇聚支线机场的分散客流，实现快速中转和规模化发展，同时缩短整体运输班次与运输时间；三是竞争优势，这一模式有助于航空公司能覆盖更广的网络，同时通过规模经济提高服务可靠性。该模型一般采用多目标规划方法来求解。实际上“干支通、全网联”将民航业作为一个整体，来建立相关的集中星型网络模型，同时，也提出了各中心枢纽（Hub）的航班波建设问题，其核心也是构建多目标优化模型，可运用遗传算法等，通过优化机场进出港时刻安排，使中转机会最大化，从而提高中转效率和运行容量。

站在全行业的角度看，一方面，民航现有机队运力、航权时刻、航线航班、基础设施等资源均存在“天花板”，近期全行业的航班客座率、飞机日利用率、枢纽机场时刻利用率等各项指标均处于高位；另一方面，从各地支线航空发展经验看，难以通过点对点航线实现二三四线城市的航班服务，因此，提升现有中转服务水平是现阶段解决支线城市航空通达性问题的有效举措。未来要建成航空运输强国，基本实现航空出行国内主要城市3小时覆盖，就需要思考如何通过“干支通、全网联”等模式创新来优化资源配置，提升现有民航业整体的资源利用效率，寻找行业资源投入整体最优与个体最优的均衡解。

## 产品供给体系优化问题

“干支通、全网联”的核心是优化产品供给体系，这一问题研究属于公共管理学的范畴。通过推动民航业自身供给侧结构性改革，提升行业发展质量和运行效率，促进行业各类航线产品更加满足人民群众个性化、多样化、差异化的出行需求，让供给更精准地匹配需求。一方面，通过减少低客座率、低收益率的航线产品，减少低效产品供给；另一方面，随着三四线城市出行需求逐渐增加，通过优化国内通程航班与中转便利化产品，促进航线网络更好服务于下沉市场，持续扩大有效供给，从而在不增加成本的前提下，提高全要素生产率，这也是推动民航业高质量发展的关键战略。

供给侧结构性改革涉及的理论研究很多，包括宏观经济学、制度经济学、发展经济学等，这些研究从生产、分配、交换、消费关系理论出发，通过推动体制与机制等制度创新，从而推动供给效率提升，实现降本增效。“干支通、全网联”作为行业的一项重要战略，具有参与主体多、保障环节长等特点，既要解决干线机场的关键资源高效利用问题，又要解决支线机场的可持续发展问题。

支线机场具有市场小、成本高、收益低的显著特征，因此，在“干支通、全网联”实施初期，聚焦干支衔接、支支互通的任务内容具有显著的公益性，需要更好发挥“有为政府”作用，通过完善运力投放、航线航班、起降时刻、航路划设、资金补贴等支持政策体系，进一步优化资源配置，增强支线机场的“引流功能”。干线机场虽有一定市场规模，但依然不同程度存在时刻资源利用率不高、网络覆盖广度不足、造血功能偏弱等问题。因此，需要进一步发挥“有效市场”作用，鼓励航空公司、

机场等市场主体通过创新技术、产品和商业模式，推进政策、管理、技术和服务创新，持续提升“干支通、全网联”的中转便利化水平，从而提升干线机场的“枢纽功能”。如武汉机场通过“恩施-武汉-X”国内通程航班模式，保障了恩施机场约40%的旅客吞吐量，还促进武汉机场中转旅客占比提升约5个百分点，实现了武汉与恩施机场的协同互促模式。

近年来，全行业通过积极践行以旅客需求为导向的“干支通、全网联”战略工程，激发和满足了更多旅客的航空出行需求，从而提振机场、航空公司的客流水平。据中国航信统计，2024年，累计保障中转旅客7030万名（换算成旅客运输量为1.41亿人，平均每5人就有1人为中转旅客），业务规模凸显；特别是2025年1~9月，全行业新增航空人口4720万，其中超过半数来自二三四线城市，为加快形成国内大循环格局贡献了重要力量。当前，“干支通、全网联”相关的航线、时刻、价格等支持政策尚未形成合力，激励措施尚未有效落地，后续还需深化相关问题研究，完善政策工具箱，通过鼓励航空公司“调整市场策略，深耕细分市场，形成差异化竞争优势”，形成“大网带小网、小网促大网”的良好发展局面。

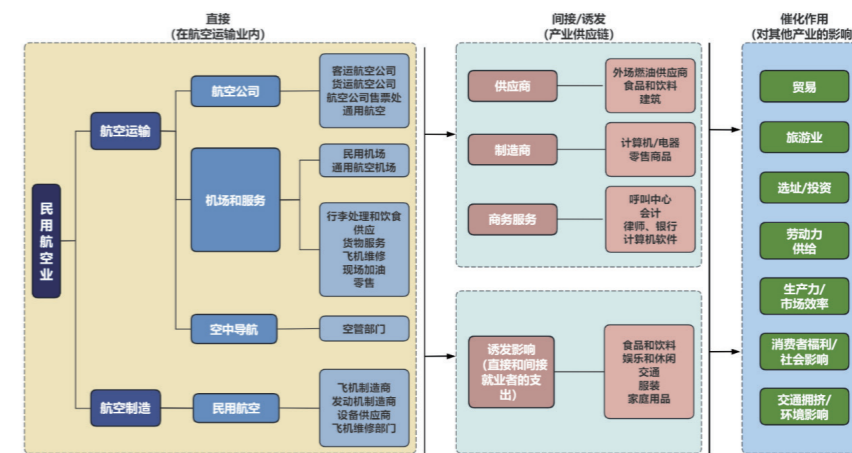
## 经济社会效益评价问题

国际航协（IATA）等国际组织采用投入—产出分析法来研究民航业的社会经济贡献评价问题，投入产出分析是数量经济学的范畴，其理论体系由苏联经济学家瓦西里·列昂惕夫（Wassily Leontief）系统构建，并因此获得1973年诺贝尔经济学奖，该理论广泛应用于产业间关联关系的量化分析研究。民航机场作为国家综合交通运输体系的重要组成部分，不仅可以改善当

地居民的出行方式，提高人们的生活质量，密切地区与外界的联系，还能够通过生产、投资、消费等环节，与各地上游、下游关联产业间协同联动，促进地方的经济繁荣与竞争力提升，成为城市和地区经济建设的“新引擎”。近年来，“干支通、全网联”依托各地机场的航线网络，通过与餐饮、旅游、娱乐等上下游产业联动，结合“一次值机”“一次安检”“行李直挂”等中转便利化服务的推广普及，中转旅客在中转机场无需再次托运行李，省去了排队时间，充分解放了“双手”和“时间”，为提升旅客在中转时的消费、休闲、文旅等体验提供机会，形成基于不同地区特色产业资源的“中转+”产业集群，成为开展机场“中转+”模式的投入—产出模型研究的实践基础。

此前，笔者参照国际民航组织的评价方法，从我国机场实际出发，利用投入产出分析方法和增加值法，全面科学分析中国机场业的经济贡献，从产出和就业两方面进行评估，将机场的经济贡献分为直接、间接、诱发和催化四个效应（如图1）。

直接效应，即机场商业系统本身创造的产出和就业，包括机场、机场内航空公司、机场内空管、行李处理、贵宾服务、



▲ 图1 | 民航机场业的经济社会贡献示意图

航油供应、维修及直接满足机场运营的所有商业活动。间接效应，即由于向机场提供产品和服务，相关供应商的经济活动所创造的产出和就业，如航油供应商、机场设施建筑公司、场内零售商品制造商及商业服务部门中的各种工作和活动等。诱发效应，即为满足直接和间接影响引发的就业人员的最终消费需求，相关行业或部门的各种经济活动所创造的产出和就业，如制造业、零售业、餐饮业等，也即是航空运输带动其他消费行业所产生的直接或间接效益。催化效应，指由于机场的存在，使得当地产业效率提高，从而推动当地经济的发展。催化效应相当于对其他行业的副效应。如促进当地对外贸易、旅游业、扩大当地企业投资和市场范围等所带来的产出和就业。

研究表明，我国机场的投资乘数为 1:5，即对机场业投资增加 1 元，可拉动 GDP 增加 5 元；带动效应为 1:8，即机场业创造的直接效应增加 1 元，可拉动总效应（即直接、间接、诱发和催化四个效应的总和）创造 8 元；并将总效应带来的增加值、就业岗位分别与机场旅客吞吐量相除，得到平均每百万旅客吞吐量带来 18.1 亿元的增加值和 5367 个就业岗位。

“干支通、全网联”战略工程的实施有助于各地机场提升旅客流量，构建主体多元、模式各异的“中转+”产业链与生态圈，形成了显著的规模效应。直接效应方面，国内通程航班与中转航班的增加，将为机场、航空公司带来更多的主业收入，包括停场、起降、加油、机组人员过夜等费用。间接效应方面，通程中转旅客在等待下一段航班时将在机场内进行餐饮、购物、休息等消费，为机场、航空公司带来可观的非航收入。诱发效应方面，航空相关收入增多可增

加机场、航司职工收入，从而增加当地的消费需求。催化效应方面，除去增加当地机场的投资机会和土地增值等效应外，部分航空企业还可以通过与当地旅行社、特色企业开展合作，推出具有吸引力的“航空+旅游”“航空+文化”等产品，增加机场的乘数效应。基于此，“干支通、全网联”可显著增加枢纽机场的常旅客群体与盈利能力，按照 2024 年中转旅客规模测算，“干支通、全网联”将为全行业至少带来约 35 亿元的经济效益，按照 IATA 的相关测算结论（全球航空运输业对自身及关联产业的带动效应为 1:8），预计将拉动关联产业带来超过 280 亿元的经济社会贡献。后续需要深化研究，聚焦不同类型、不同规模的机场建立各自的“干支通、全网联”社会经济贡献量化模型，同时探索形成相关经验法则，为民航业相关投资决策提供理论基础。

综上，本文聚焦“干支通、全网联”战略工程实施过程中出现的主要问题与关键瓶颈，结合数学、管理学与经济学三大理论领域，提出了三个互有关联的理论问题。本文提出的问题虽分属不同研究方向，但均要面对非线性、不连续性和不确定性等挑战，并在方法、理论和应用场景上存在内在联系，本文拟吸引更多业内外相关人士开展系统研究，进一步应用新模型与新工具，深化交通行业理论研究，为民航业提升核心竞争力与推进高质量发展提供有力支撑。

航空运输

# 中东冲突或将重塑全球航空版图

文 | 丁一璠 编辑 | 林喆

2026 年 2 月 28 日，随着美国与以色列联军对伊朗的联合空袭行动展开，中东地区的安全局势骤然升级至临界点。作为全球航空运输最关键的十字路口，该区域的空域安全屏障瞬间瓦解。在接下来的数小时内，一场多米诺骨牌式的紧急空域关闭潮席卷而来。伊朗、伊拉克、叙利亚等国率先通过紧急航行通告宣布领空禁航，紧接着，以色列、巴林、卡塔尔、科威特等国也采取了同样措施。作为全球最繁忙的航空枢纽之一，阿联酋亦关闭了部分空域，导致迪拜国际机场与阿勒马克图姆国际机场的运营陷入停滞。这场突发事件的波及范围和烈度，堪比 2010 年冰岛火山灰危机，甚至在对全球网络连通性的冲击上更为剧烈。

## 停航概况与背景

市场的恐慌情绪迅速在航班数据上得到验证。根据航班数据服务商 VariFlight 在 3 月 17 日基于原始数据的测算分析，此次危机的破坏力显露无遗。若以冲突爆发前的 2 月 21 日作为“正常日”基准，当日中东区域的航班执行率维持在 94.8% 的健康



水平，实际起降航班达 9680 架次。然而，进入冲突后的第一个完整周（3 月 10 日至 16 日），尽管计划航班总量相较于之前正常周（2 月 21 日至 27 日）仅出现 2.5% 的微小下滑，但实际运营的航班数量却从 64621 架次锐减至 44841 架次，蒸发了近三分之一的运力，降幅高达 30.6%。

航班取消数据则更为惊人。在冲突爆发后的一个完整周内，被取消的航班数量从之前同期的 1041 架次飙升至 13509 架次，增幅接近 13 倍。同时，大量航班虽未被正式取消，但实际并未执行，这类“幽灵航班”的数量也从 2862 架次攀升至 8460 架次。双重压力之下，区域整体的航班执行率由之前的 94.3% 断崖式下跌至 67.1%。在停航初期的混乱顶峰（3 月 1 日），中国与中东间的航线受创尤为严重，航班取消率一度触及 62.6% 的高点，这意味着当日计划往返于两地的航班中，超过六成凭空消失。

国际航空运输协会（IATA）随后发布的报告也从宏观层面证实了这场运营灾难。3 月第一周混乱高峰期，全球取消航班超 21300 架次，创下 2020 年疫情以来单周运力损失之最。

## 海湾巨头遭重创

这场风暴的中心，是以“枢纽—辐射”模式构建全球网络的阿联酋航空、卡塔尔航空和阿提哈德航空。这三家海湾巨头不仅是航空公司的代名词，更是其母国经济多元化战略的旗舰。然而，由于其基地机场正处于冲突核心区或被禁飞空域包围，它们的全球网络在一夜之间被撕裂。考虑到阿联酋航空对迪拜 GDP 高达 15% 的贡献率，此次停运对其造成的每日财务损失可能高达数千万美元，对其母国经济的冲击亦不容小觑。



VariFlight 的数据通过“受冲击程度”（即取消与未执行航班占冲突前总量的比例）这一指标，量化了各大机场的“伤情”。根据 3 月 10 日至 3 月 16 日的数据显示，巴林（BAH）的业务几乎完全停摆，受冲击程度高达 95.3%；多哈紧随其后，为 91.6%；科威特（KWI）也达到了 82.2%。即便是实力雄厚的阿布扎比（AUH）和迪拜（DXB），其受冲击程度也分别达到了 63.2% 和 43.8%。这些冰冷的数字背后，是数十年心血构建的全球中转网络的系统性崩溃。

与此同时，位于冲突外围、拥有独立空域控制权的国家迅速承接了溢出的航空流量。土耳其、沙特、埃及和摩洛哥等国在执行航班份额上实现了显著增长。其中，土耳其及其旗舰航司土耳其航空无疑是最大的受益者。凭借其横跨欧亚的独特地理优势和未受直接波及的广阔空域，伊

斯坦布尔（IST）迅速成为了替代海湾枢纽的首选，大量原本计划经迪拜或多哈的客流和货流转向于此。

航班恢复率的数据清晰地展示了这场“流量大迁徙”。安卡拉埃森博阿机场（ESB）的实际执行航班量甚至反超冲突前水平，恢复率达到惊人的 103.3%。伊斯坦布尔（IST）和萨比哈·格克琴（SAW）两大机场的恢复率也分别高达 96.9% 和 96.0%。这种此消彼长的态势，导致以广义中东、北非和土耳其机场为代理指标的中转连通度整体下降了 25.1%，而衡量网络广度的中转机场对机会总和更是锐减 36.5%，这表明海湾地区作为全球超级连接器的功能遭受了结构性损伤。

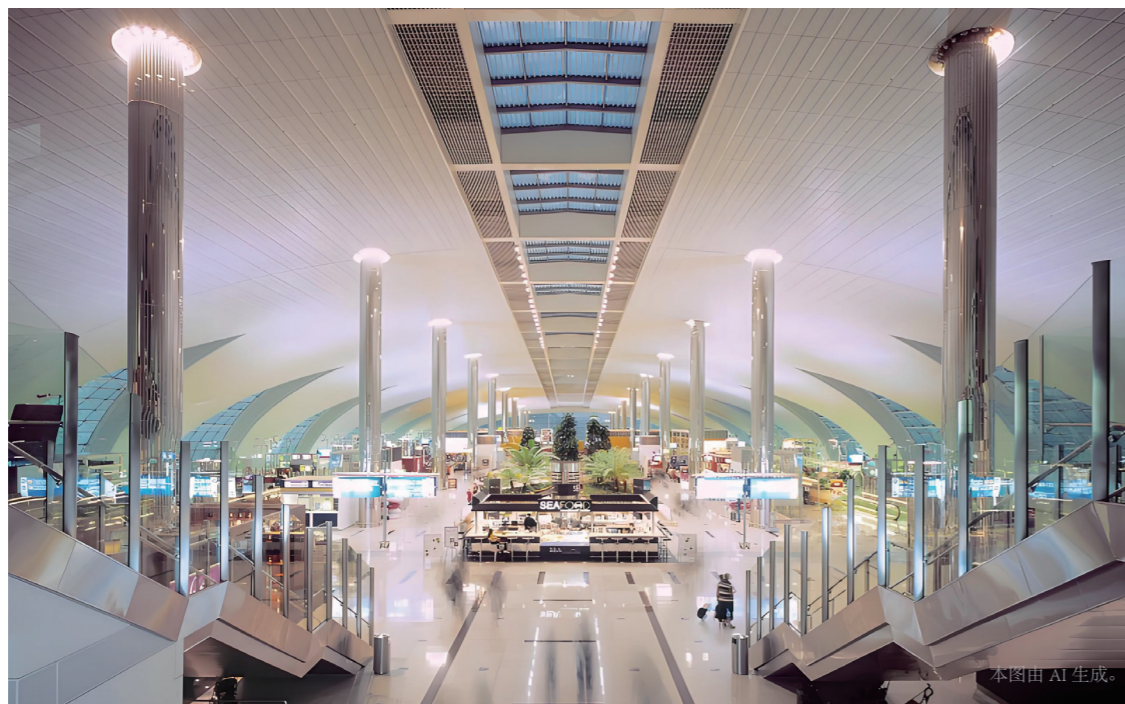
## 绕飞的代价

对于全球航司而言，中东核心空域

的关闭意味着运营手册中最为经济高效的“黄金航线”被瞬间抹除。摆在它们面前的只有两个艰难的选择：向北绕行途经高加索地区拥挤的空中走廊，或是向南选择航程极为漫长的非洲之角航线。无论哪种选择，都意味着一场后勤与成本的噩梦。绕飞最直接的后果是飞行距离和时间的急剧攀升。根据航迹数据分析，冲突后中东相关航线的平均绕飞距离比正常情况增加了约 1200 公里，这几乎等同于北京到上海的直线距离。在一些极端案例中，增加的航程更是令人咋舌。例如，阿联酋航空从东京羽田飞往迪拜的 EK319 航班，为避开禁飞区，单程额外飞行了 7589 公里，其航迹几乎是从东亚绕道欧洲再折返中东，原本 9 小时的航程被大幅延长。同样，土耳其航空从新加坡飞往伊斯坦布尔的 TK209 航班，因原经停地多哈机场关闭而被迫改道，飞行时间净增 3.5 小时。

此外，一些航班的碳排放峰值也显著上升。例如，俄罗斯航空 SU321 航班和土耳其航空 TK209 航班在实测中，单趟额外碳排放峰值高达 57 吨。这表明停航期间，不仅航班运营效率下降，环境成本也大幅增加。

更具长远影响的是，这场危机迫使全球航空业，尤其是远程航线运营，仿佛一夜之间倒退回了上世纪的“技术经停时代”。由于绕飞导致的总航程超出了许多现代化客机的极限航程，航空公司不得不重新设计航线网络。行业分析师普遍预测，在伊朗、伊拉克等核心空域完全恢复安全通行之前，远程国际航班在雅典、吉达、新加坡等城市进行中途技术加油将成为新常态。这不仅意味着旅客的旅行时间将普遍增加数小时，更对航空公司的机组排班、飞机调配和地面保障资源提出了前所未有的挑战。



## 油价回落掩盖下的航油成本危机

如果说航线绕飞是航司面临的物理性障碍，那么燃油成本的诡异波动则是刺向其财务心脏的一把“暗箭”。在此次危机中，一个反常的经济现象——“裂解价差悖论”成为了主导航空业成本结构的关键变量。

在传统认知中，地缘政治冲突通常会推高国际原油价格，进而带动航空煤油价格上涨。然而，在 2026 年 3 月的市场表现中，这一逻辑链条被打破。尽管主要经济体协同释放战略石油储备，成功将布伦特原油价格从每桶 119 美元的高位压制回 82 美元至 103 美元的区间，但这一看似利好的消息并未给航空公司带来任何喘息之机。其根本原因在于，冲突直接导致了红海地区的炼油设施受损，更重要的是，全球航空煤油出口所依赖的霍尔木兹海峡航道受阻，造成了精炼航空煤油的实物供应出现严重瓶颈。其结果是，原油（输入端）与航空煤油（输出端）的价格走势

出现了惊人的脱钩。航司实际采购的航空煤油价格并未随原油价格回落，反而因为“裂解价差”（即成品油与原油之间的价差，反映炼油利润）飙升了 200% 而维持在历史高位。航空公司支付的成本，不再仅仅是原油价格，更叠加了因供应短缺和运输风险而急剧放大的精炼与物流溢价。

在极端高企且难以预测的航油成本面前，航空公司的命运被其风险对冲策略和资产结构所决定，呈现出显著分化。

达美航空：凭借其独树一帜的垂直整合战略——全资拥有宾夕法尼亚州的特雷纳炼油厂，在此次危机中展现出非凡的抗压性。通过内部生产部分航油，达美实现了成本的“天然对冲”，有效缓冲了市场裂解价差暴涨带来的冲击。

美国联合航空：由于在 2025 年放弃了传统的燃油套期保值工具，美联航在此次危机中完全暴露于成本风险之下。为应对危机，美联航被迫将雅典设为临时加油与机组轮换枢纽。复杂的航线调整叠加失控的燃油价格，导致其单位成本急剧上升，对 2026 年上半

年的盈利预期构成了严重威胁。

亚洲航空公司：由于高度依赖从海湾地区进口的廉价精炼燃油，它们受到的冲击尤为直接。为了转嫁成本压力，国泰航空、印度航空、泰国航空等纷纷宣布将长途航线的燃油附加费翻倍。然而，即便将票价推升至近十年来的高点，面对失控的成本，这些航司的利润空间仍在被迅速侵蚀。

## 全球航空货运命途多舛

有业内专家分析指出，本次空运危机的核心并非单航线停飞，而是全球航空货运中转网络核心节点断连，具体体现在以下三大不可逆影响：运力供给断崖式下跌，中东三大枢纽（迪拜、多哈、阿布扎比）承担中国至欧洲、非洲 60% 以上跨境电商快件及高附加值普货中转分拨功能。枢纽停摆导致欧亚航线空运可用运力短期内收缩 40% 以上，运价出现报复性上涨，部分航线运价甚至翻倍；时效与损耗风险激增，绕飞导致航班时长增加 3~5 小时，航权审批难度加大，航班准点率大幅下滑。冷链、生鲜、时效敏感型货物（如医药、电子产品）的损耗与违约风险陡增，部分货物可能因延误无法按时交付，引发合同纠纷和客户流失；全网络传导效应下，剩余可用运力向中欧、中亚航线快速转移，短期内带动全航线空运运价普涨。这不仅直接影响涉及中东的航线，还会波及全球航空货运市场，导致物流成本整体上升，外贸企业利润空间被压缩。

## 运力重配与网络重构

此次事件在造成巨大冲击的同时，也如同一场压力测试，暴露了全球航空网络的脆弱性，并加速了其结构的重塑与优化。如国航、东航和南航等国内航司，或成为

直接受益者。随着中东中转网络陷入瘫痪，它们运营的中欧直飞航线成为了连接两大经济体最可靠的空中桥梁。对时间敏感的商务旅客和高价值客户，为规避中转延误和不确定性，纷纷转向票价更高的直飞航班，这显著推高了这些航线的票价水平和客公里收益。例如，上海至法兰克福等黄金商务航线的公务舱价格出现了数倍的上涨。同样，运营跨太平洋航线的航空公司，如美联航和国泰航空，也从部分原计划经中东中转的亚美客流转移中分得一杯羹。

从更长远的战略视角审视，这场冲突正在加速全球航空业两大根本性的结构转变：首先，是从“枢纽—辐射”模式向“点对点直飞”模式的再平衡。中东超级枢纽模式的脆弱性在此次事件中被彻底暴露。未来的航线规划，安全和燃油效率的权重将被提升至前所未有的高度，航空公司将更有动力去开辟能够避开传统地缘政治热点区域的点对点直飞航线。这为过去处于全球航线网络边缘的二线机场，特别是位于东欧、中亚等地的机场，提供了成为新兴补给站或区域性枢纽的历史性机遇。

其次，是全球航司机队结构的加速迭代。在航油成本持续高企和远程绕飞成为常态的背景下，燃油经济性已从一个重要的运营指标，上升为决定航空公司生死的胜负手。那些机队中拥有大量四引擎“油老虎”机型的航空公司，其运营成本将变得难以维系，行业将不可避免地加速淘汰这些老旧机型。与之相对，具备超长航程和卓越燃油效率的新一代双引擎飞机，尤其是能够执行“瘦长航线”的窄体客机，其战略价值将得到极大凸显，成为航司在“后中东冲突时代”构建更具韧性和盈利能力航线网络的核心资产。

# 自贸港建设背景下三亚机场国际航线网络拓展研究

文 | 程欢 武勇彦 齐险峰 编辑 | 林喆

海南自贸港建设对三亚凤凰国际机场（以下简称三亚机场）发展赋予了重要的战略使命，同时，要求三亚机场加快提升枢纽的国际功能、持续拓展国际航线网络。三亚机场国际航线网络建设具有一定的发展基础，拥有得天独厚的区位条件、资源优势和战略机遇，但同时也面对着竞争激烈、设施受限等现实挑战。如何有效把握战略机遇，抓住政策红利，积极拓展国际航线网络，促进三亚机场及民航市场高质量发展，是三亚机场面临的时代问题。



## 三亚机场国际航线网络发展基础

2024年，三亚机场国内航线通航我国74个机场，覆盖除西藏、甘肃、青海、宁夏以外的所有省级行政单元，与国际枢纽实现高频连接。除哈尔滨、乌鲁木齐、昆明外，日航班班次在5班及以上，为三亚机场国际中转/经停航线建设奠定了良好基础，但仍存在国际航线网络竞争能力不足的问题。

2024年，三亚机场国际地区航线通航17个城市，集中在东南亚、东北亚、中亚及俄罗斯等地。从覆盖广度看，国际航线集中于“一圈”和俄罗斯市场，网络结构单一，对欧美等发达经济体和全球经济中心覆盖与连通不足。从连通强度看，核心航线频次较低，与主要旅客客源地、发达经济体联系强度不够。2024年，周班次在3到7班之间的仅莫斯科。从区域竞争看，国际通航点及航班频次明显低于巴厘岛、普吉岛等以旅游为主的海岛型机场，以及区位类似、具有高度竞争关系的海口机场。

从区位、腹地、中转条件来看，三

亚机场具有发展国际航空运输网络的优越条件。首先，区位优势突出。海南省地处东亚与东南亚国际空中航路要道，是连接我国与东南亚、南亚、大洋洲的天然中转站，广泛辐射“一带一路”共建国家。第二，腹地市场规模大。以三亚机场为中心，5小时航程（4000公里）覆盖东北亚、东南亚及南亚大部分地区，覆盖人口规模超过30亿。第三，中转条件便利。欧洲—大洋洲、东南亚—东北亚中转市场，经停三亚航线绕线率优于区位条件类似的其他机场。

但是，三亚机场还是存在着国际

航线类别	航线	距离 (千米)	绕航率	
洲际	悉尼 - 伦敦	无经停	17016	
		经停三亚	17020	0.02%
		经停新加坡	17176	0.90%
		经停迪拜	17544	3.10%
	悉尼 - 巴黎	无经停	16942	
		经停三亚	16946	0.02%
		经停广州	16980	0.22%
		经停厦门	17027	0.50%
洲内	仁川 - 金边	无经停	3591	
		经停三亚	3591	0.00%
		经停广州	3591	0.00%
		经停厦门	3646	1.53%
	郑州 - 胡志明	无经停	2725	
		经停三亚	2729	0.15%
		经停广州	2795	2.57%
		经停南宁	2746	0.77%

▼ 表1 | 三亚机场国际地区航线航班频次 数据来源：OAG

周频次	2024年国际地区通航点
3班≤周频次<7班	莫斯科
1班≤周频次<3班	釜山、新加坡、雅加达、曼谷、金边、首尔、克拉斯诺亚尔斯等
低价值低时效	低价值且对时效性要求不高的商品。客户更关注价格，对物流速度和服务质量的要求较低。

▼ 表2 | 2024年国际地区航线通航点及周频次对比 数据来源：OAG

机场	国际通航点数量(个)	国际航线周频次(班)
巴厘岛	41	1381
海口	23	181
普吉岛	94	1060
三亚	17	30

▲ 表3 | 部分航线经停三亚机场与其他机场绕航率对比 数据来源：根据地理位置测算

旅客保障能力不足，无法支撑国际市场的持续发展和网络拓展的突出问题。三亚机场国际航站楼面积不足2万平方米，根据《民用机场总体规划规范》（MH5002-1999），国际航站楼保障能力约125万~167万人次。2019年，三亚机场国际地区旅客吞吐量超过120万人次，国际航站楼保障能力接近饱和。

此外，基地航司市场份额不高，国际航线严重依赖外航。航空公司是枢纽建设与运营的重要主体，在机场航线网络建设中发挥着重要作用。2024年，三亚机场首位度航司市场份额不足30%，国内航司在国际市场运力投放严重不足，国际地区航线外航航班量占比高达98%，这些都是制约三亚机场国际航线网络持续拓展和健康发展的不利因素。

高水平航权开放政策落地实施需要

国内市场		国际市场	
Top5 航司	市场份额	Top5 航司	市场份额
南航	25.1%	俄罗斯国际	31.0%
海航	16.6%	香港航空	20.7%
首都航	9.7%	柬埔寨航空	11.2%
东航	7.0%	香港快运	9.1%
川航	5.0%	釜山航空	8.9%

▲ 表4 | 2024年三亚机场主要航司市场份额 数据来源：OAG

多方协同，现阶段三亚机场第五、第七航权航线开辟不足。从2003年试点开放第三、四、五航权，到2020年试点开放客货第七航权，海南代表了我国航权开放的最高水平。新加坡、迪拜等全球主要国际航空枢纽的发展经验表明，灵活运用第五和第七航权，对于提升国际航空运输网络的通达性、吸引客货集聚和

中转、强化枢纽地位、提升枢纽竞争力、促进国际贸易和旅游发展具有重要意义。然而，航权政策的落地实施需要产业、资源等相关政策配套支持，以及民航、海关、商务、文旅等多部门协同。2025年12月“三亚—布拉格”航线开通，是我国首条第七航权客运航线。

作为海南省两大航空枢纽，三亚机场与海口机场协同发展对优化区域航空网络、提升国际旅游服务水平，以及提高海南面向东南亚区域民航竞争的核心竞争力具有重要意义。现阶段，三亚机场与海口机场协同发展不足，国际航线尤其是高频航线高度重叠，国际航线补贴各自为政。从两场国际航线运营来看，2024年三亚机场高频国际航线与海口机场几乎完全重叠，且频次更低，一定程度上削弱了三亚机场国际航线吸引力。

### 三亚国际航线网络建设迎来战略机遇期

在中国式现代化进程中，自由贸易港建设是海南的使命担当，为海南民航发展带来重大战略机遇。2018年，党中央做出建设海南自由贸易港的重要战略部署，自贸港建设为三亚民航发展带来“政策红利”及“流量红利”。首先是免签政策，海南实施59国人员入境免签政策，与单免、互免政策相比，免签国家范围更广、从事活动范围更大、停留时间更长，有利于吸引更多国际旅客，有效推动航空市场需求激增。其次是航权开放政策，海南是我国首个试点开放客货第七航权的省份。此外还有免税政策，离岛免税额度提升至10万元/年，能够有效刺激“航空+购物”的旅游模式的发展。在多种政策的叠加作

海口机场		三亚机场	
通航机场	周频次	通航机场	周频次
香港国际机场	39	香港国际机场	9
曼谷素万那普机场	35	曼谷廊曼机场	2
新加坡樟宜机场	27	新加坡樟宜机场	2
莫斯科谢列梅捷沃机场	2	莫斯科谢列梅捷沃机场	5
釜山金海国际机场	4	釜山金海国际机场	3
金边机场	4	金边机场	2
首尔/仁川国际机场	3	首尔/仁川国际机场	1
河内机场	2	河内机场	0.3
曼谷廊曼机场	2	苏加诺哈达机场	2
吉隆坡国际机场	9	叶梅利亚诺夫机场	2
万象机场	8	符拉迪沃斯托克机场	1
悉尼机场	7	哈巴罗夫斯克诺维机场	0.7
澳大利亚墨尔本机场	6	叶卡特琳堡机场	0.7
澳门国际机场	6	新西伯利亚机场	0.7
奥克兰国际机场	6	成吉思汗国际机场	0.3
芽庄金兰国际机场	4	塔什干机场	0.3
胡志明市机场	4		
阿布扎比国际机场	3		
槟城机场	3		
琅勃拉邦机场	3		

▲ 表5 | 2024年三亚机场与海口机场国际航线对比 数据来源：OAG

用下，有助于形成“购物+旅游+中转”的复合型枢纽发展模式。

三亚市在海南自由贸易港建设中的定位已经明确，未来的实施路径已经确定。《三亚市国土空间总体规划（2020-2035）》（征求意见稿），明确三亚城市功能定位为世界级的热带海滨风景旅游城市、开放创新的海南自

贸港标杆城市、生态文明与宜居宜业的幸福城市、经略南海与科技创新的支点城市。《中共三亚市委关于贯彻落实〈海南自由贸易港建设总体方案〉的行动计划》明确了三亚市推进海南自贸港建设的“12345”总体思路，提出26项重点任务。

支撑自贸港建设对三亚机场提升国

际枢纽功能提出了更高要求。在《关于加快海南民航业发展支持海南全面深化改革的实施意见》中，明确了要将海南打造成为面向太平洋、印度洋的航空区域门户枢纽。作为海南最重要的两个航空枢纽之一，建设面向“两洋”区域门户枢纽，必然要求三亚机场进一步提升枢纽能级，拓展国际航线网络，加强与全球高等级城市、自由贸易城市、主要经济中心等连通方面作出更大贡献。

### 推动三亚机场国际航线网络发展的建议

面向未来发展，三亚机场国际航线网络构建应紧密围绕国家战略要求，充分发挥区位、资源及政策优势，更好地服务于三亚城市功能定位及面向“两洋”区域门户枢纽建设需要。

一是明确重点方向，采取差异化拓展策略。加强与全球高等级城市、经济中心、自由贸易港、主要航空枢纽，以及海南省主要对外贸易伙伴等的连通，覆盖全球主要消费市场，吸引高端消费群体。聚焦入境游客客源地、主要贸易对象、主要自贸港、“两洋枢纽”、“一带一路”国家、RCEP 国家等 6 个关键因素，开展国际市场连通潜力评估。根据连通潜力分析结果，重点拓展方向是港澳台、日韩、新加坡、马来西亚、泰国、印尼、菲律宾、越南、俄罗斯、意大利、德国、法国、美国、加拿大，澳大利亚、新西兰等。

考虑不同市场特征，采取差异化拓展策略。港澳台、日韩、东南亚等洲内航线，具备较好的航线基础，主要问题是通航点覆盖广度不足、航班频次较低，重点是增加通航点，加密航班，全面提升航线服务品质。欧洲、北美、澳新等

洲际远程航线，市场基础相对不足，具有较大市场空间，以经停航线为主，分阶段推进的拓展策略，打破航线空白。综合考虑战略要求、市场需求、区位便利等，选择三亚—国内—欧洲、国内—三亚—澳大利亚等洲际经停航线作为突破点，强化与十大国际航空枢纽的高效连通，为远程洲际经停航线提供支撑。

强化俄罗斯航线，增强三亚机场在东南亚区域枢纽中的竞争力和吸引力。一直以来，俄罗斯是三亚机场最重要的国际市场，与曼谷、普吉岛等东南亚同类型旅游城市相比，三亚机场俄罗斯航线通航点数量、航班频次及高频航点数量均有一定差距。针对莫斯科、新西伯利亚、叶卡捷琳堡等主要经济中心城市，着力提升航班频次和航点覆盖，逐步将航班频次提高至 5~7 班/周及以上。

二是建立协同机制，加强三亚、海口两场协同发展。由政府部门牵头，联合民航局、监管局、机场集团等，建立协同发展领导小组，从两场战略定位、发展规划、航线开发、一体化服务产品打造、数据共享、协同运行等各个层面谋划协同发展。构建差异化、互补型航线网络。根据两大核心枢纽功能定位，协调驻场航司发展战略，实现差异化和错位发展。海口机场依托省会优势，重点服务商务、政务及跨境物流等需要，打造连接东南亚、东北亚各国首都的直飞航线，连通欧美枢纽的洲际航线。三亚机场聚焦国际旅游消费中心，重点服务国际旅游、离岛免税、医疗康养、商务会展等，需加密俄语地区、中东等传统客源地直飞航线，加密东南亚旅游城市航线，打造“三亚—东南亚”旅游环线，拓展欧洲、南太平洋核心城市经停航线。同时打造联合营销模式。联合航司、旅行社推出“自贸港+旅游”主题产品，



推动海口—三亚国际航班“一票联程”，国际旅客“双机场进出”模式。推动形成“海口枢纽—三亚门户”的协同发展格局，全面支撑自贸港“国际运输走廊”和“国际旅游消费中心”建设。

三是深度挖潜扩容，推进保障能力提升。基础设施保障能力是支撑机场发展和服务升级的关键，我国主要航空枢纽在国际化战略推进过程中，均进行过机场改扩建或者新建转场以提升基础设施保障能力，用高质量供给能力支撑和引领国际市场更好发展。近期，加强对三亚机场基础设施保障能力深度挖潜，推进智慧创新应用，推动空域结构优化，提升空侧保障能力及单跑道运行效率；远期，加快推进新机场项目前期工作，科学规划机场主体设施与配套功能设施，从根本上解决单跑道运行的保障能力限制，更好地支撑国际市场发展及网络拓展都势在必行。

四是强化政策配套，推动航权政

策落地。开放第五、第七航权是国际航空运输自由化的重要举措，目的是吸引外国航司开通直达海南或经停海南至第三国的客货运航线。促进第五、第七航权航线落地及保障航权开放政策实施效果，要加强相关政策措施配套。在空域、时刻等核心资源保障能力有限的制约下，资源配置应向国际航线倾斜，加强面向东南亚、东北亚等优势市场的空域资源配置。构建民航与海关、商务、旅游等多部门协同合作、信息共享的监管及保障机制，优化通关流程，提升通关效率，推动更便捷的通关服务。制定更有针对性的国际航线补贴政策，吸引航司在三亚机场加强运力投放，开拓国际航线。



▲ 来源：解放军报



# 飞机的“伞降梦”，只能在无人机实现？

文 | 于达维 编辑 | 欧阳亮

## 作者简介

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

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

2026年2月1日起，《民用无人驾驶航空器降落伞系统规范》(MH/T 6140-2026)开始施行，适用范围包括最大起飞重量不超过150公斤的微、轻、小、中型民用无人机降落伞系统的设计、生产、验证测试和运行风险评估。

该系统规范规定了无人机降落伞所能够实现的稳定下降速度、最低开伞高度、开伞冲击载荷等关键参数，要求降落伞在展开后能确保无人机以安全速度下降。

新规强调降落伞系统作为无人机安全运行的重要保障措施，要求无人机运营人根据飞行场景和风险等级，合理配置降落伞系统，并在飞行前进行预位检查和测试。

在人口稠密区、管制空域等高风险区域飞行时，降落伞系统的可靠性和有效性成为监管重点，运营人需确保降落伞系统符合规范要求，以降低

无人机失控对地面人员和财产的风险。

目前新规主要聚焦于降落伞系统的技术标准和验证要求，具体飞行活动中是否强制要求配备降落伞，需结合当地空域管理规定和飞行场景综合判断。但对整个无人机产业，尤其是民用应用层面，却意义重大。它标志着中国在系统性解决无人机安全风险方面迈出了关键一步，这不仅是条款的落地，更是无人机从“玩具”向“可持续产业”转型的里程碑。

在第一次世界大战结束时，降落伞还不是军队飞行员的标配。为了解决人们对降落伞使用的担忧，发明家弗洛伊德史密斯(Floyd Smith)设计了第一个带有手动拉绳的降落伞，这一发明改变了航空世界，挽救了无数飞行员的生命。

二战时期，盟军士兵从高空坠落的生还率，与无伞者相比几乎翻倍。更关键的是，对飞机本身而言，降落伞被视为“最后的安全保障”——当引擎失灵、结构损毁或飞行员失控时，一个恰当的降落伞，能把飞机安全送回地面。

而对无人机来说，其定位从一开始就是“低风险、低成本、多功能工具”，尤其民用场景(农业、测绘、物流、巡检、救援等)更是追求“高效、低成本、高周转”。然而，随着应用场景的深入——从城市低空配送快递到大型无人机执勤、甚至未来的空中出租车(eVTOL)——安全问题从“可有可无”变成了“不可妥协”。

一次意外坠落，可能的不只是设备损失，而是财产损失、人身伤害，甚至引发连锁事件。更关键的是监管趋严，欧美、日本等国已将无人机安全纳入强制监管框架，而国内监管也在加速完善。没有安全保障的无人机，就无法获得大规模、常态化的市场准入。这就是降落伞系统成为“刚需”的核心原因。

要求确保飞机在展开降落伞后能

以安全速度稳定下降(避免冲击损伤)，达到最低开伞高度(确保足够缓冲时间)、开伞冲击载荷(保护关键部件不被毁坏)等硬性指标。从系统设计、部件试验到整机验证测试运行风险评估，形成完整闭环。

这不再是纸上的“建议”，而是制造商进入市场的“通行证”。没有符合规范的降落伞系统，新无人机无法获得适航证或市场准入。安全规范的强制落地，为行业注入了“健康发展”的基因，也为技术创新指明了方向。

无人机追求轻量化，每增加几克伞装置，都直接“吃掉”飞行时间或载荷。如何在极小重量(常需<5%机体重量)、小体积、强可靠性下实现可控展开、缓冲效果？这需要材料科学、流体力学和结构工程的精密平衡。

系统必须在各种环境下可靠触发，且在展开后能快速、干净地回收，甚至重复使用(对某些任务场景至关重要)。故障率必须接近零，且维修必须简单。

当前，越来越多企业意识到，安全系统是打开高值应用场景(如城市物流、大型植保、紧急救援)的关键。

越来越多新上市的民用无人机，尤其是大型应用场景(如载人货运、超远距离植保)，将降落伞系统纳入标准配置。如同汽车的安全气囊，它不再是“锦上添花”，而是“安全底线”。

安全可靠的无人机，将极大提升在城市物流、野生动物监测、紧急医疗救援、大型基础设施巡检等高风险、高价值场景的可行性，直接推动无人机产业向更高阶、更规模化方向扩张。

无人机可以有降落伞，为什么大型飞机没有降落伞？这在航空史上曾被无数次提出，也被无数次尝试过——但最终都以失败告终。因为重量、成本、气动复杂性、



▲ 图 | 来源: in.szby.cn

可靠性、监管风险等多重因素,构成了一个几乎无法逾越的技术壁垒。

好消息是,轻型飞机的整机降落伞已经有了几十年的应用,成功挽救了很多生命,显著提升了轻型飞机的安全性水平。

2015年,一名飞行员驾驶着西锐SR-22飞机在由旧金山飞往夏威夷的途中燃油耗尽,情况紧急。不过由于西锐SR-22配备整机降落伞,开启降落伞后,飞机安全地降落在海面上,所有乘客均毫发无伤。

整机降落伞的专业术语是弹道式降落伞救生系统,起源于航天技术中的弹道回收技术,这种降落伞不同于跳伞爱好者所使用的降落伞,而是更加接近于收宇宙飞船的降落伞系统,工作原理相当于汽车上的安全气囊。

目前,西锐飞机安装的是CAPS弹道式降落伞救生系统,在飞机遇到危险的时候,CAPS弹道式降落伞会从座舱后部弹射出来,在经过几秒的开伞动作之后,主伞打开,降低飞机的坠落速度并使飞机保持水平状态,缓缓落向地面。着陆时,由于起落架的减震设计,可以使飞机完整地落到地面,尽最大可能保证舱内人员的安全。

除了西锐,现在装配整机降落伞的轻型飞机越来越多,渐渐加入到飞机的标准配置之一。

市场上提供整机降落伞的主要企业,包括为西锐提供降落伞的美国BRS系统公司,捷克的Galaxy GNS系统公司等。BRS公司由鲍里斯·波波夫(Boris Popov)在1977年创建,1998年,BRS公司与西锐飞机公司合作研发了世界上首个与整机同步开发的整机降落伞,西锐SR-20飞机成为世界首款将整机降落伞作为标准配置的机型。

BRS各类型号在全球销量已经超过25000个,在各种飞行事故中已经成功拯救了473位乘员的生命,该公司的名称“BRS”

已成为整机降落伞的代名词。鲍里斯认为理论上可以将降落伞安装在体积更大的飞机上,甚至可以安装在大型客机上。

但是,对大型客机来说,和其重量相配的降落伞可能需要几个足球场那么大,极易在高空发生缠绕,携带也不便。假设一架大型客机的最大起飞重量为45吨,而每平方米的降落伞能承受20公斤的重量,那么支撑整架飞机重量的降落伞就要达到2250平方米。

其次,安装降落伞系统还需要改变飞机的结构,种种改变无疑增大了飞机的复杂性和成本,反而增加了飞行风险。因此,综合来说,民航客机安装降落伞是一个不切实际的方案。

因此很多人对鲍里斯的想法持怀疑态度,根据他们的估算,可以搭载大约500名乘客的波音747安全着陆,需要使用21个降落伞,每个降落伞的尺寸相当于一个足球场。但是鲍里斯提出,为了减少降落伞伞盖的数量,可以采用的一种方法是在发生紧急情况时抛弃飞机的所有重型组件,例如机翼和发动机,降落伞只负责拯救客舱。

这种想法足够大胆,但这对民航飞机整体结构,将是伤筋动骨的改变,民航业能否配合,不得而知。至少从目前的技术水平来看,民航飞机整机降落伞系统在技术上不可行、经济上不可接受、监管上不可行,而轻型飞机和无人机的降落伞系统,则因其轻量化、低成本、高可靠性,成为安全设计的最佳选择。

这不仅是技术路线的选择,更是航空安全哲学的根本差异。未来,随着无人机技术的成熟,我们或许会看到更多无人机配备降落伞系统,但民航飞机的“伞降梦”,可能终将永远停留在不切实际的幻想中。

## 固本 融合 升维

### ——泉州机场探索中小机场特色发展之路

文 | 商承灏

编辑 | 欧阳亮

在“干支通、全网联”战略纵深推进与民航业从“量的积累”向“质的飞跃”转型的关键阶段,中小机场作为国家航空网络的节点,其可持续发展路径始终是行业高质量发展的重要命题。

泉州晋江国际机场——这座承载着中国首个由民营资本集资建设创新基因的机场,以其市场化与生俱来的敏锐与活力,在2024年交出了一份旅客吞吐量884.3万人次(突破2019年历史峰值)、国际航线旅客量恢复至疫情前52.6%、跃居全国中小型机场榜首的亮眼答卷,不仅彰显了“爱拼敢赢”的晋江精神,更系统性地探索出一条“固本强基、融合共生、网络升维”的内涵式发展道路,为行业提供了极具参考价值的泉州样本。

## 固本强基，筑牢发展生命线

机场的本质是运输保障设施，安全、高效、正点的运行品质与顺畅、便捷、人性化的服务体验，是所有价值延伸不可动摇的基石。面对军民合用的约束，泉州机场发扬务实求精的作风，将效率攻坚延伸至每一个保障触点。在运行端，通过深化军民航协同、应用全国流量管理系统（NTFM）、创新引入点融合进近程序（PMS）等组合拳，将航班正常率提升至 87.19%，空域容量利用率提升 23%。与此同时，通过动态优化机位分配，旅客航班靠桥率长期保持 91.71% 的高位。

尤为突出的是，机场将效率革命深入至旅客出行流程的“最后一米”：通过流程再造，将国际、国内航班截载时间分别缩短至 30 分钟和 25 分钟，在候机楼入口设置“便捷登机”服务站，推出“急客行”服务，实现从旅客进门到登机口全程仅需 6 分钟的极致体验。这些举措的核心在于——通过精

图 | 来源: www.fjdaily.com



细化管理，主动消除旅客的时间焦虑，将运行效率转化为可感知的服务温情。扎实的保障能力有效支撑了其中转能力，目前泉州机场已备案通程航班 2902 个，2025 年前 11 个月保障中转旅客近 9 万人次，其中国际中转占比达 47%。这充分证明运行与流程的双重卓越，是构建网络黏性与旅客信任的核心，是赢得发展主动权的“压舱石”。

## 融合共生，拓宽价值航道

如果说运行效率是机场必须练好的“内功”，那么与地方经济文化的深度融合，则是其跳出同质化竞争、构建独特优势的“巧劲”。泉州机场凭借对本土资源的高效整合与创新运用，实现了从“城市机场”到“机场城市”的角色跃迁。

例如，泉州机场打造的“城市海丝会客厅”就是这方面的典范：一方面，将闽南传统建筑符号与地域文化元素植入 13 个登机口，使候机成为一种沉浸式的文化体验；另一方面，创新“航空 + 金牌导游”直播，联动推广世遗景点、非遗项目与特色美食，推出“一张机票免费游世遗”活动。2024 年，该模式直接带动消费 5126 万元，航站楼商业营收同比增加 22.51%。

这种融合的本质，是机场将自身流量转化为服务地方发展的“留量”与“销量”，其关键在于找到自身运营与地方独特文化、产业基因的连接点，合力打造“机场繁荣助力城市发展、城市发展反哺机场繁荣”共生循环。“城市海丝会客厅”的探索和实践，为中小机场提供了一条“向本土要特色、向融合要动能”的发展路径样本。

## 网络升维，融入国家格局

练好内功并深度融入地方经济发展之后，一个机场在区域乃至全国航空网络中

的独特价值便会自然浮现。未来的国家航空运输网络，是一个“枢纽为纲、节点为目”的有机生态系统。国际枢纽是“纲”，承担连接世界、辐射全国的战略支点功能；泉州机场这类中小机场是“目”，承担着深耕区域、激活末梢的关键支撑功能。

依托闽南侨乡网络，泉州机场的国际航线聚焦东南亚市场，成为重要的情感与文化纽带；凭借高效的中转衔接能力，它有机联通了长三角粤港澳大湾区与内陆市场。客观而言，泉州机场的这一定位并非源自顶层预设，而是通过“向内整合资源、向外创造需求”，由市场与禀赋共同塑造的结果。

从某种程度上来说，这正是“因地制宜发展新质生产力”的生动写照：不是追逐抽象通用的模板，而是基于自身最突出的特点（如民营活力、侨乡网络、世遗文化等）与城市最根本的优势进行创造性结合，塑造出独一无二、富有韧性的新型服务能力。它深刻地启示我们，中小机场无需陷入“规模焦虑”，完全可以立足本位，通过积极、主动融入地方经济社会发展，为自身的长远发展打下扎实的基础。

## 范式参考，释放行业价值

泉州机场的实践，为中小机场特别是拥有特色资源或面临条件约束的机场，提供了一套可借鉴的发展逻辑。要将其个体经验转化为行业的普遍生产力，需要多方协同发力。

行业指导需“分类施策”：建议主管部门在资源配置与评价中，打破“唯吞吐量论”，引入包含运行效能、融合创新、地方贡献等维度的“特色发展指数”。对定位清晰、模式有效的机场，给予更灵活的航线时刻、政策试点等定向支持，并提炼其成熟经验进行推广。

地方协同需“命运与共”：地方政府需

将机场视为城市发展的重要战略资产，推动城市规划、文旅推介、产业招商与机场深度绑定，实现“规划同图、建设同步、营销一体”，并通过优化集疏运体系与临空配套，让机场发展成果直接转化为城市竞争力。

机场自身需“专精特新”：中小机场应聚焦“我是谁、为谁服务、为何不可替代”等根本问题，摒弃盲目扩张，秉持“眼睛向内整合资源、眼睛向外创造需求”的思路，在运行、服务、融合等细分领域做精做优，立志成为航空网络中“小而美、小而强”的重要节点。

泉州机场的实践表明，破解发展困局的钥匙往往就藏在机场自身与所在城市的基因里。它无需宏大叙事，始于对航班正点的每一分争取，对旅客流程的每一秒优化，对地方文化的每一次真诚展示。

从开创性的民营资本实践，到全国中小机场的特色化实践，泉州机场的发展路径验证了“固本、融合、升维”这一发展逻辑的可行性。这一过程，正是“因地制宜发展新质生产力”的生动实践——依据自身禀赋苦练内功，紧密结合城市基因确定方向，所培育出的发展动能最为坚实，所形成的竞争优势也最具韧性。

在“干支通、全网联”的宏伟蓝图中，我们既需要大型枢纽作为“纲”来引领方向，也期待涌现出更多像泉州这样特色鲜明、根深叶茂的“目”。当更多的中小机场不再焦虑于规模对比，而是沉心静气、苦练内功，切实筑牢长远发展的根基，中国民航必将迎来一个百花齐放、韧性十足的高质量发展新阶段。

# 罗马城不是一天建成的

## ——波音客户服务体系的演变

文 | 姜国权 编辑 | 陈伟宁

波音的客户服务职能是从派遣服务代表开始的。1970年以前，波音虽存在零散的客户技术支援人员，但服务职能分散于试飞、工程、维修等几个部门，无统一管理且专职的客服团队。1970年波音747客机交付后，德航、法航等众多航司投诉747飞机发动机故障频发却缺乏及时的售后支持，波音管理层才意识到客户服务的重要性。

▼ 来源: services.boeing.com



随后，波音成立了独立的客户服务部门，将原本分散在试飞、工程技术、维修和器材保障等部门的职能都归属到客服部门。同时，波音还组建了独立的技术支援小组，在飞机交付后会根据需求派遣规模不等的特遣小组对接客户。此后，波音公司逐步形成了飞机交付客户后派出特遣组支援的机制，并在实践中探索完善了客服/售后支援保障综合体系。

### 波音客服的发展历程

1980年后，波音除了派遣驻场服务代表以外，按需派出特遣小组的机制亦逐渐常态化。一般情况下，客服团队成员的主要工作地点以西雅图为核心，同时在客户集中的区域或重要客户主基地增设驻场代表站点。

1999年，波音客服部门在原有职能的基础上成立了快速响应中心，专门处理飞机运营中出现的紧急情况，将客服从常规保障延伸至24小时应急支援。客服职责开始向飞机全生命周期服务拓展，涵盖飞机日常维修、快速响应等领域。在此期间，客服团队成员的主要工作地点除西雅图外，逐步联动埃弗雷特生产基地，实现了生产与售后的近距离协同。

1997年波音与麦道合并后，波音将麦道公司的客服职能进行整合，合并后不久就成立了商用航空服务部门(CAS)。此后，波音又将飞机改装业务和原来属于综合保障部门的航材等业务整合进客服部门，其服务方式也从被动响应转变为主动保障。

2002年，路易斯·曼奇尼出任波音客户支持副总裁兼总经理，负责管理波音工程和技术专家团队，为全球近1.3万架波音和麦道飞机的运营提供技术支持。曼奇尼曾就职于美联航工程技术部门，

拥有多年航司维修工程管理经验，深知用户在客户服务领域的痛点。在他的领导下，波音客服团队的客户满意度在全球同行评比中处于领先地位。

2012年，波音推出Boeing Edge服务品牌，整合航材、飞行、信息等多类服务。此后，又将快速响应中心的职能融入其中。

2016年，波音宣布组建波音全球服务集团(BGS)。BGS旗下涵盖负责航材供应链管理的Aviall公司、提供飞行数据服务的Jeppesen公司等，从而囊括了波音客服的大部分职能。

### 整合麦道客服体系

1997年，波音与麦道完成合并后，波音客服体系的合并融合围绕“架构统一、资源整合、标准对齐、服务协同”四大核心逻辑推进，分阶段实现从独立运营到一体化服务的转型。

新的客服组织架构以波音原有的体系为核心，搭建分层整合框架，将麦道商用飞机与军机客服业务部门分别划入波音商用飞机集团和综合防御服务对应的业务板块；麦道客服的核心骨干纳入波音中层管理序列，确保决策与执行的一致性；区域服务方面，撤销麦道独立的区域客服站点，将其人员与场地并入波音对应的区域服务网络，形成了全球统一调度、区域协同响应的布局。

在资源互补融合方面，波音客服实现了服务能力升级，涉及的主要领域包括聚焦航材保障供应、维修支援、客户对接等三大核心业务，推动双方资源深度融合与协同。整合双方的航材库存，将麦道机型的备件纳入波音全球备件中心统一管理，合并后的业务范围覆盖所有波音及麦道的在役飞机，实现了备件

单点下单、全球速达的服务水平。消除双方航材采购与调配系统的差异，统一备件编码和仓储标准，利用波音更成熟的供应链管理能力和优化麦道机型备件的生产与补货效率，避免稀缺备件断供。

在维修与技术支持协同方面，波音客服统一了维修技术标准，将波音严格的工程师资质认证体系推广至麦道客服维修团队，同时吸纳麦道机型上的维修经验，形成覆盖双方全部机型的技术知识库。

在人员轮调轮训方面，要求波音驻场客服人员掌握麦道主流机型的维修技术，麦道维修人员需参与波音机型服务和培训，确保单一客服团队可应对多机型支援需求，提升服务灵活性。

在客户关系无缝对接方面，波音客服为麦道原有客户分配专属客服经理，实行一对一衔接，同步将客户服务档案、历史需求、维修记录等数据迁入波音客户管理系统，避免客户信息丢失或重复对接。针对麦道的重点客户，保留原麦道对接专员作为波音客服团队的专项联

络人，确保平稳过渡。

在标准与文化对接方面，波音客服统一了运营标准，以波音客服的服务流程、响应时效、质量考核标准为基准，修订麦道原有的客服规范及维修服务质量标准验收标准，确保所有客户均能享受到标准统一的服务。

在人员和文化融合方面，波音客服以能力匹配为核心优化人员，通过绩效考核筛选，保留核心骨干与技术专家，冗余人员转岗或培训后再分配。客服团队在波音工程师文化的基础上，吸纳麦道注重团队合作的理念，通过联合培训、业务复盘等活动，提升团队工作效率。

波音与麦道客服体系的整合并非简单的吞并和替代，而是以波音体系为框架，充分吸收麦道客服的机型经验和区域资源，通过架构、业务、标准的融合，最终实现服务能力的协同升级，在保障客户权益的同时，提升了波音在全球的竞争力。

1998年，波音又一次对客服体系进

行升级，将民机集团的客服工作整合成6个业务部门，主要包括：客户支援作为客服前端核心，负责对接客户各类需求，处理服务咨询、紧急技术问题，搭建全球客服通信网络，是客户需求传递与解决方案落地的首要环节；航司物流支持整合了原波音与麦道的航材供应链资源，负责航材调度、库存管理及全球配送协调，保障航空公司机队运行的物料供应稳定性；改装与工程服务承接飞机改装、结构优化、航电系统升级等业务，提供定制化工程解决方案，延长机队使用寿命、适配新运营需求；飞行安全培训业务提供飞行员、维修人员等专业培训，业务范围涵盖模拟器训练、课件教学、现场实习等全场景培训服务；公务机服务专项负责波音公务机客户的专属客服，包括公务机维修、定制化改装工作支持、专属航材保障等高端服务；基础客服职能协调范围包括原麦道客服中技术出版物、现场技术支持等核心能力，与上述模块协同，提供飞机手册更新、异地和现场技术指导等配套服务。

## CAS 的四大核心职能

2012年，波音推出整合式售后服务品牌 Boeing Edge。借助 Boeing Edge，波音将航材服务纳入 CAS 的核心职能，使之成为与机队服务、飞行服务、信息服务并列的主要业务部门之一。CAS 的四大核心部门的职能分工紧密贴合航空公司的运营场景，贯穿飞机全生命周期。

在航材服务方面，CAS 作为航材保障的核心部门，聚焦航材供应链的全流程支持。其核心职能包括：零部件供应、库存管理及服务优化，依托全资子公司 Aviall 的全球网络，覆盖 200 万件目录产品的分销与调配；提供航材维修服务，

2012年，波音推出整合式售后服务品牌 Boeing Edge。借助 Boeing Edge，波音将航材服务纳入 CAS 的核心职能，使之成为与机队服务、飞行服务、信息服务并列的主要业务部门之一。CAS 的四大核心部门的职能分工紧密贴合航空公司的运营场景，贯穿飞机全生命周期。

涵盖电瓶、机轮、刹车等关键部件维修，以及软管组装、喷漆等配套服务；满足航材应急需求，支撑 AOG/ 飞机故障停场事件快速响应，通过逆向物流、自动化库存管理等方式，降低客户航材持有成本。

在机队服务方面，CAS 专注于机队全生命周期的价值提升。其核心职能包括：提供飞机维修改装服务，包括客改货服务、机型性能升级、部件更换与故障修复，保障机队适航性与运营灵活性；推出全生命周期解决方案，覆盖机队日常维护、性能监控及成本管控等；整合全球技术资源，为客户提供机队运营效率咨询，通过精益化服务延长飞机服役周期，提升资产回报率。

在飞行服务方面，CAS 聚焦飞行安全与机组能力提升。核心职能包括：开展飞行员、机组及维修人员专项培训，提供理论教学与实操训练；依托子公司杰普逊提供专业导航服务，包括航图编制、航行资料更新、飞行规划系统支持；提供实时飞行监控、应急处置技术支持等服务，协助机组应对飞行中的各类突

来源:www.inc.cn



发情况。

在信息服务方面，CAS 以数字化技术为核心，为客户提供数据驱动运营决策支持。核心职能包括：搭建数字化服务平台，整合飞机运行数据、故障记录、维护日志等信息，实现数据高效传递与共享；提供空中交通管理解决方案、技术出版物服务和数据分析服务，帮助客户优化航班调度、预判设备故障、提升运行合规性；支撑客户服务协同管理，通过 CRM 系统升级、电子商务网站推广等方式，强化与客户的沟通联动，精准响应个性化需求。

### BGS 的三大升级

2017 年，BGS 正式成立后，将总部迁至得克萨斯州普莱诺，整合了民用与防务领域的客服资源，在全球拥有 2 万名员工。

从 CAS 到 BGS，波音客服的职能实现了以下重要转变：

▼ 来源 :www.boeing.cn



首先，服务范围从单一的商用航空客户拓展至全品类客户。CAS 阶段的客户服务聚焦于商用航司客户，仅为波音民用机队提供服务；而 BGS 的客户群体新增了军用客户和航天客户，同时纳入 Aviall、杰普逊等子公司的服务资源，实现了客户服务全覆盖。

其次，职能定位从提供基础保障升级为输出战略解决方案。CAS 时期，职能以航材供应、现场技术支援、基础维修等保障性服务为主；BGS 阶段，升级为提供全生命周期解决方案，通过融入数字分析、定制化服务等核心能力，将客户服务从被动响应转变为主动赋能。

第三，从内部的松散联动转变为全球一体化整合。CAS 阶段，各服务模块（航材、培训、维修）的协同依赖部门之间的衔接；BGS 则通过搭建全球统一的服务架构，打通子公司与各业务线的信息流和物流，建立起高效的全球协同运营体系，应急响应与资源调配效率大幅提升，核心区域紧急服务交付速度进一步优化。

### 结语

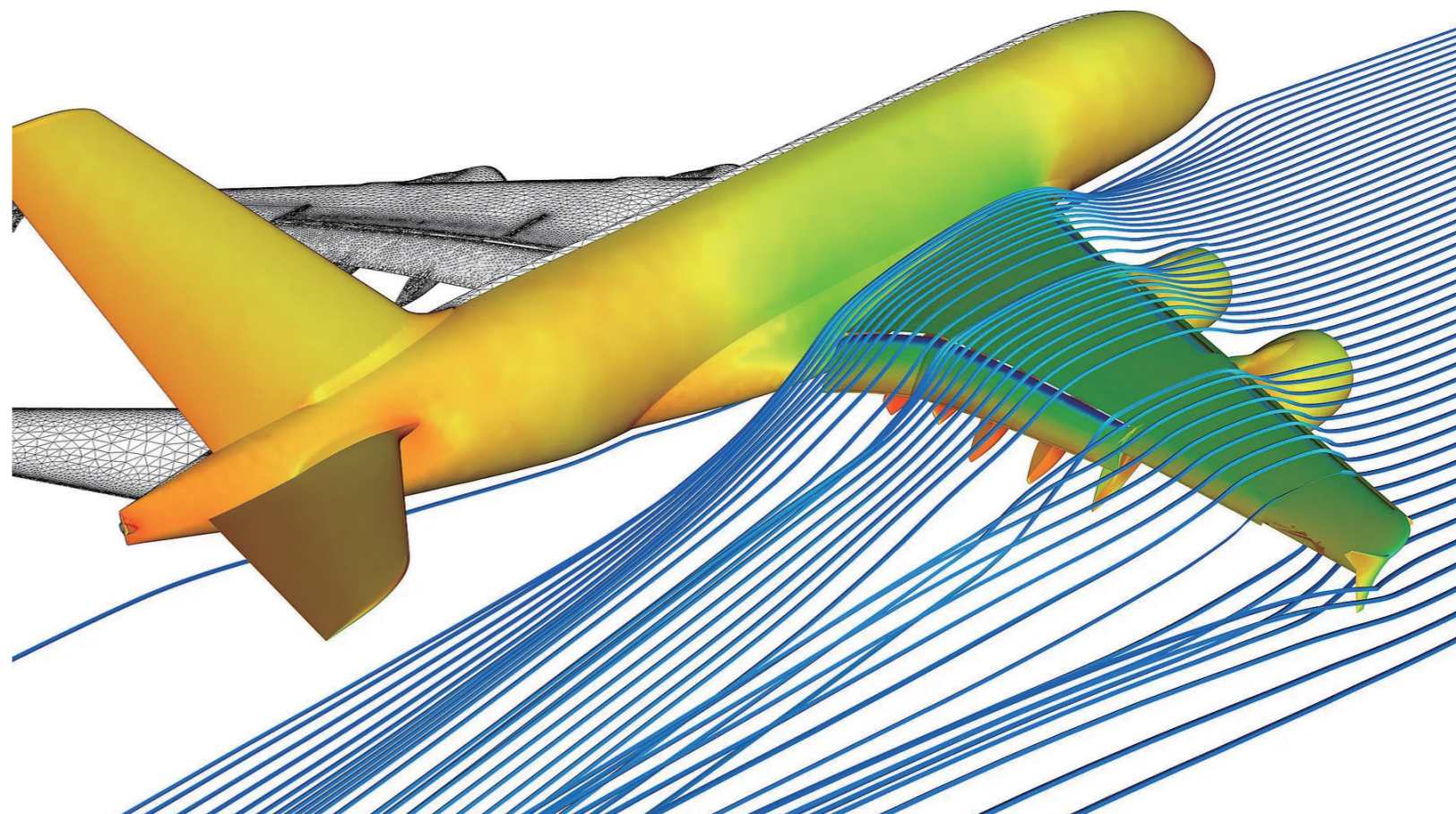
波音客户服务体系的发展历程表明，要想在激烈的市场竞争中胜出，飞机制造商不能单单着眼于卖产品的那“一锤子”，而必须服务客户“一辈子”。制造商只有用知识与服务替客户兜底所有的“不可预期”，客户才愿意把 30 年的运营利润与制造商共享，从而形成“先让客户赢，再一起赢”的共生循环。从这个角度说，客户服务的好坏才是决定制造商生死的关键因素。

# 飞机的“魔法缝隙”： 从有缝到无缝

文 | 刘苍松 刘嘉锡 编辑 | 张克农

当我们抬头仰望天空，看到一架巨大的飞机如同鸟儿般轻盈地降落在跑道上时，很少有人想到，这背后隐藏着一场精妙的空气动力学魔术。这场魔术的关键道具，就是机翼上那些会变形、会开缝的“增升装置”。今天，我们就来聊聊其中的一个核心概念——“缝道”，以及为什么新一代飞机又开始追求“无缝”。

▲ 来源：medium.com



## 为何需要魔法缝隙

想象一下你正开车在高速公路上，把手伸出窗外。如果你的手掌平放，风会平滑地流过。但如果你把手向上倾斜一个大角度，你会感到手被猛地向后推，同时开始剧烈抖动——这就是气流在你的手背上“分离”了，失去了平滑的流动。

在飞机起飞和降落时，机翼面临的正是同样的问题。为了飞得慢、落得稳，机翼必须大幅度向上倾斜，以大迎角姿态来“抓住”更多的空气，产生足够的升力。但迎角太大，机翼上表面的空气流就会“跟不上”弯曲的路径，从而剥离、紊乱，导致升力瞬间消失。这就是可怕的“失速”，好比汽车突然失去了抓地力。

早期的飞行员面对失速束手无策，而工程师们则在努力寻找解决方案。通过风洞试验和飞行测试，英国工程师汉德利·佩奇等人发现，在机翼前缘增加一个可以

打开的小翼面，形成一条让气流通过的缝隙，能奇迹般地推迟失速。

后来人们惊奇地发现，大自然早已掌握了这项技术：鹰和信天翁等鸟类在降落时，会展开翅膀的初级飞羽，使羽毛之间产生缝隙。鸟类翅膀成为解释这项人类发明工作原理的完美自然范例。受此启发，工程师们不断完善，最终在钢铁的翅膀上创造出了前缘缝翼和后缘襟翼这套复杂的增升系统。

缝道在其中扮演着“能量补给站”的角色。机翼上表面即将分离的气流，如同一位筋疲力尽的跑者；而机翼下表面的高压空气则通过缝道被加速，化作一股强劲的高速气流，精准地吹向上表面。这股新生力量仿佛及时注入的士气，托举着原气流，使其得以继续紧贴机翼表面前行，从而有效推迟了气流分离和失速的发生。

此外，这股高速射流还带来了“改变形状”的效果——即增加机翼的弯度。

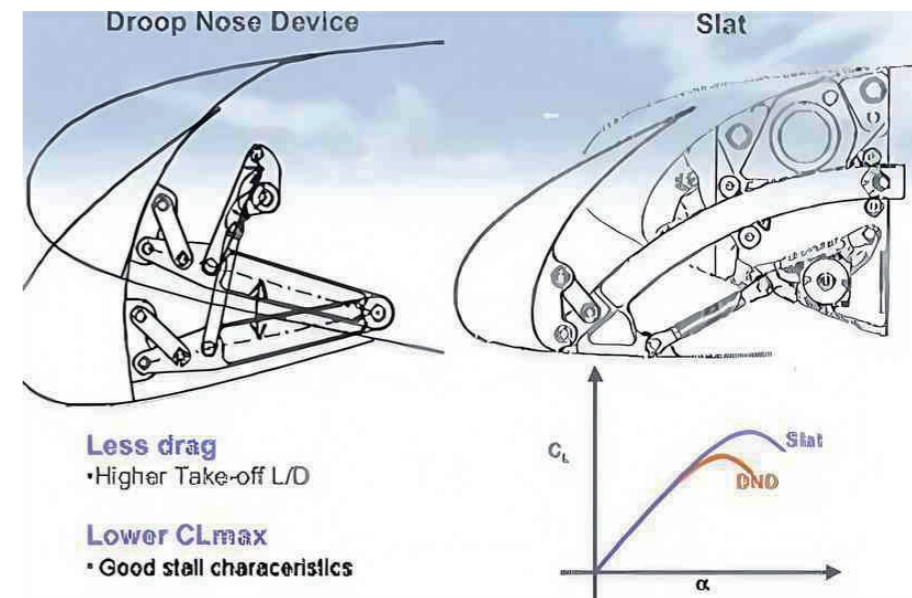
它如同一位魔术师，悄然改变了机翼的“虚拟形状”，使其看起来更弯曲。弯度更大的翼型能更高效地驾驭空气：其特殊形状迫使上方气流加速，产生强大吸力，同时下方气流提供稳定支撑。这一吸一托之间，升力随之显著增强。

这条“魔法缝”让机翼在低速时也能爆发出强大的升力，使飞机起飞需要的跑道更短、爬升更陡、降落更稳，半个世纪以来始终是民航客机的标配。

## 为何选择“无缝”

传统缝翼就像一位身经百战的老将：拉开缝隙、引高压气流，瞬间把机翼吸力提升一大截，几十年来靠这一招帮无数飞机腾空而起。然而，这位“升力猛将”也有副作用——那条几厘米宽的缝，像给气流开了一扇“泄洪闸”，湍流、涡流、空腔哨声一并涌出，阻力陡增、噪声刺耳，飞机爬升时像背了个沙袋。更麻烦的是，一旦迎角踩过红线，外侧机翼可能“啪”的一声整体失速，副翼失效，飞机瞬间变成横滚的陀螺。

于是，工程师们提出了一个新剧本：把缝“抹平”，让前缘像手机贴膜一样光滑。波音787的“Krueger+可变弯度”组合、A350的“Droop Nose”整根下垂，起飞时看不到传统缝翼的“鲨鱼鳃”，只剩一条发丝级间隙。好处立刻显现：一是升阻比“暗涨”。缝一关，气流像被抚平的地毯服帖滑过，阻力立减一成，升阻比悄悄地增加0.7。坡度更陡的爬升，让高原机场多出32张票，地面居民也少听一次电钻声。二是失速“先内后外”，内侧先“装腿软”放警报，外侧仍稳托副翼；机头被自然低头力矩轻压回去，试飞员笑称这是“绅士喷嚏”——先提醒，再自愈。三是重量与维修“偷笑”。少了滑轨液压，一



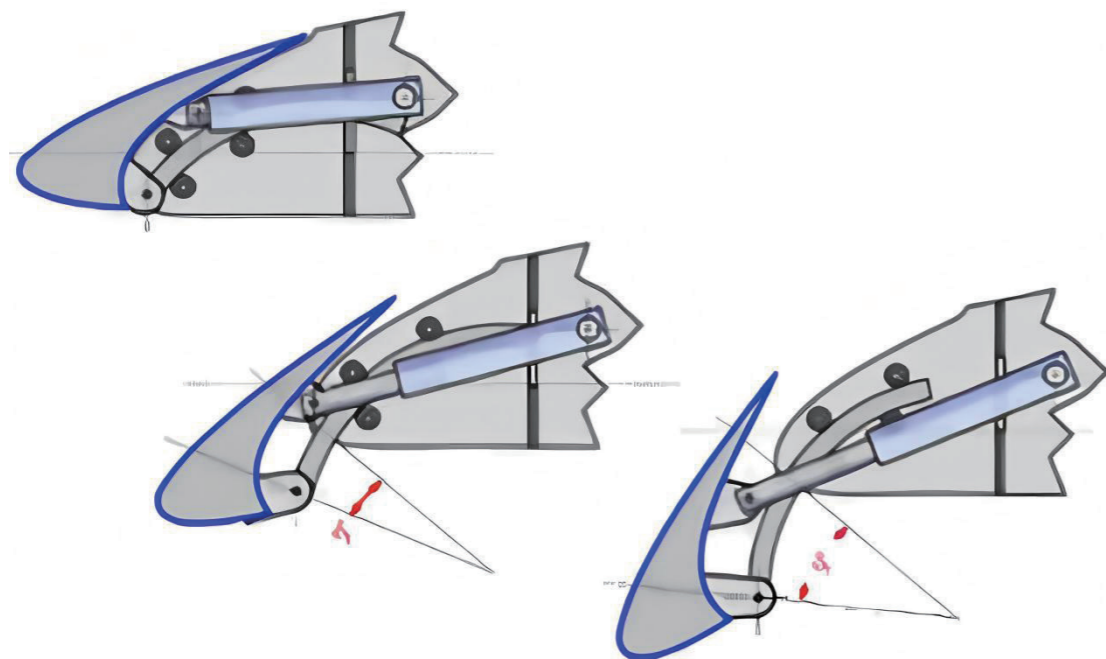
▲ 图 | 无缝前缘装置与传统缝翼的区别

架飞机轻80千克，积冰卡阻没影，维修工直接划掉一整行检查单。

有人担心缝没了，最大升力会不会缩水？确实，在极端迎角下，传统缝翼仍是“升力冠军”。但现代民航99%的飞行时间并不需要那块“最后的拼图”。工程师们用一点点极限升力，换来日常工况更高的效率、更轻的重量、更温顺的失速和更友好的噪声。

从“不惜代价推高升力”到“让飞机更会妥协”，无缝前缘不是简单的技术迭代，而是航空哲学的一次“成人礼”：承认世界没有免费午餐，学会用全局最优解取代局部极限。当坐在飞机客舱里，看见机翼前缘光滑如瓷，不要忘记那条消失的缝隙，正悄悄托着整架飞机，以更轻、更静、更优雅的方式飞向世界每一个角落。

▼ 图 | 缝翼和缝道图



# 征战 AG600 水上首飞的日子 (之二)

文 | 汪亚卫 编辑 | 张克农

## 水上试飞前的改进

2018年2月6日，AG600飞机年度工作会在珠海的中航通飞公司召开，这是我首次参加AG600项目的会议。

在这次会议上，中航工业集团公司领导提出，项目研制全线要振奋精神、强化管理、科学谋划，坚决完成水上首飞任务。飞机总设计师黄领才和中航通飞有关领导在会上作了工作汇报，我在大会上就做好飞机水上首飞的管理工作作了专题发言。会议要求，各参研单位要通力合作，发扬航空工业“一盘棋”的优良作风，明晰责任、落实计划、严把质量关，抓紧解决首飞所面临的各种问题。

2018年项目年度工作会议之后，按照航空工业“每逢首飞、靠前指挥”

▼ 来源：中航工业



的惯例，我带领项目管理人员来到珠海，在飞机研制现场开展管理工作。

按照项目工作会议确定的目标，我们逐项梳理AG600水上首飞所面临的各种问题。经过梳理，我们决定缩短战线，突出重点，集中技术资源，将精兵强将全部投入到AG600水上首飞的研制试验工作中。此外，要尽快解决前一段工作中暴露出来的飞机设计与研制生产两个责任主体之间不协调的问题。经过慎重研究决定，将负责飞机设计责任的中航通飞研究院与负责飞机研制生产的中航通飞华南公司合并，组建设计制造和试飞一体化的中航通飞华南基地，任命了新的中航通飞华南基地领导班子，由他们承担后续的研制生产工作。中航通飞制定了新的管理流程和制度，明确由合并后的中航通飞华南基地统一负责AG600飞机项目的设计、研制、试验试飞、适航取证、市场营销、生产制造和服务保障等责任。人力资源的调配和管理关系的理顺，为AG600顺利开展水上首飞前的各项工作奠定了坚实的基础。

2018年1月24日，AG600飞机在珠海进行了地面首飞之后的第二次试飞，全面检查了飞机状况。此后，项目团队开始着手对飞机进行改进。水上首飞之前要进行的地面和水面的试验项目很多，需要完成的改进工作主要包括：

一是要对飞机在地面首飞中暴露出的设计问题进行改进。二是对飞机在水上首飞时必须使用的新系统进行安装并试验。三是飞机水上首飞前需要从广东珠海转场到湖北荆门，需要转场飞行一千多公里，对飞机长途转场需要使用的任务系统进行安装并试用。四是飞机在水上首飞前要完成全机水密试验、水动力试验和水面滑行试验。

此外，按照计划，AG600飞机试飞机组的全体成员还要前往加拿大的水上飞

机训练基地进行专项培训。由于当年11月初要举行珠海航展，广东省和航展组织方都希望AG600飞机能够在此届珠海航展开展之前完成水上首飞，并飞回珠海参加航展。因此，水上首飞前的各项工作需要在不到十个月的时间里完成，这一目标对于AG600设计研制团队来说无疑是极其严峻的挑战。

确定了工作目标之后，相关工作迅速展开。在AG600地面首飞之后，由于强度方面的原因，飞机机翼下的浮筒需要进行更换并重新生产。在承制单位哈飞工业公司的努力下，浮筒的重新生产和更换工作顺利完成了。

另一个需要立即解决的问题是，飞机座舱的风挡玻璃在鸟撞试验中出现了破碎，座舱风挡玻璃需要重新研制。为此，4月11日，我带领中航工业AG600飞机项目主管人员和飞机研制团队人员专程来到中国航发北京航空材料研究院，寻找新的飞机座舱风挡玻璃。

我们受到了航发集团和北京航材院领导的热情接待。在航材院透明体研究所科研试制现场，飞机风挡玻璃专业技术带头人颜悦研究员向我们介绍了飞机整体座舱盖透明件、超轻电加温风挡玻璃的加工情况，他表示将尽快交付改进后的风挡玻璃。在北京航材院科研人员争分夺秒的努力下，AG600新的座舱风挡玻璃很快就运到了珠海，并通过了鸟撞试验。

然而，新交付的座舱风挡玻璃在后续的试飞中又出现了波纹变形的新问题。7月25日，我带领研制团队的同志又一次来到北京航材院的风挡玻璃试制现场，提出了进一步改进的要求。北京航材院风挡玻璃试制团队加班加点，通过调整玻璃配方，试制出新的风挡玻璃，解决了波纹变形的这个问题。这一个小小的例子表明，AG600飞机的研制凝聚了众多中国航空

人的智慧、拼搏和奉献。

按照研制计划，在水上首飞之前，要先完成飞机的铁鸟试验、起落架落震试验、全机电磁兼容性试验、全机水密试验，以验证飞机满足设计要求，并达到适航审定的标准。

为争取时间，研制团队决定能够在珠海完成的试验都尽可能在珠海完成。为了验证飞机的水密性，中航通飞华南基地用最短的时间在珠海建起了试验设施。水密试验时，要将 AG600 飞机推进盛满水的大水池中，检查机身中下部机体结构是否会出现漏水的情况。

AG600 飞机的外形尺寸如同波音 737 客机，这么大尺寸飞机的水密试验设施，在中航通飞华南基地的平地上怎么建呢？研制团队找到了相关的专业机构，他们在停机坪上划出了一片可以停放 AG600 的区域，在 AG600 飞机的四周用水密封材料搭建起一个巨大的密闭水池，然后向密闭的水池内灌水并达到试验所需高度，从而进行水密试验。

就这样，AG600 在珠海机场的平地上顺利完成了全机机体结构静态水密试

▼ 来源：中航工业



验。对于在试验中发现的少量漏点，项目团队及时进行了结构补强。这一试验的成功，不仅保证了 AG600 水上首飞得以按计划实施，还为今后水陆两栖飞机开展水密试验和检测提供了可靠的方案。

### 铁鸟试验中的问题

随着 AG600 水上首飞准备工作的推进，研制团队开始把位于湖北荆门的中航工业特飞所作为下一步工作的主战场。我们在荆门组织了包括特飞所、通飞华南基地、航空工业试飞院、中航通飞机场公司等单位人员的联合工作团队，有条不紊地开展相关的准备工作。

位于荆门的中航工业特飞所建于 1961 年，该所不仅研制了国产水上飞机水轰 5，还设计了多种中小型水上飞机以及大型实用载人充气艇和地效飞行器。特飞所拥有国内唯一的高速水动力实验室、浮空飞行器综合试验室和腐蚀防护与控制试验室，还为 AG600 专门建设了大型飞机综合铁鸟试验台，AG600 的 277 项铁鸟试验全都要在这里完成。然而，在 AG600 进行铁鸟试验时，飞机的起落架应急收放系统出现了重大问题。

由中航工业起落架公司研制的 AG600 飞机起落架系统是国内高度最高、收放系统最复杂的单支柱起落架。过去，国内各类飞机的起落架大都是由飞机主机设计所或飞机研制厂设计完成的，但 AG600 飞机是由中航工业起落架公司承担起落架系统的设计、试制和生产全部工作。

AG600 飞机的高支柱起落架，承力结构和收放比较复杂，设计和试制的技术难度相当大。由于 AG600 飞机的底部为船体外形，机翼是上单翼，主起落架不能收在机腹或机翼内，而是收在机身侧面的主起落架整流罩内，主起落架采用了悬臂



外伸式高单支柱布局，以减轻重量。

2017 年底，AG600 在珠海进行地面首飞时，飞机起落架在试飞全过程中是不收起的，但在进行水上首飞时，飞机必须收起并放下起落架。因此，起落架应急收放试验至关重要。这是因为作为在飞行过程中的安全备份，当起落架正常收放系统失灵时，需要紧急启动起落架应急收放系统。为确保安全，起落架应急收放系统必须先铁鸟试验台上进行试验，才能在试飞中进行验证。

令人意外的是，在进行铁鸟试验时，出现了一侧起落架在应急放下时被卡死、无法正常收放到位的情况，而且经过多次试验均不成功。飞机总设计师黄领才在试验现场召开会议紧急研究解决方案，我和项目管理团队紧急赶到荆门试验现场。中航工业起落架公司派出技术团队火速赶到特飞所，他们将铁鸟试验台架上一侧的起落架拆下后重装再试，结果放下时仍然被卡死。后来，他们又将 AG600 飞机左右两侧的起落架进行对调后，出问题的起落架应急收放系统仍然卡死。这一试验结果

让飞机研制团队顿时紧张了起来，因为起落架应急收放问题不解决，就意味着飞机无法进行水上首飞。

AG600 项目指挥系统随即在荆门召开专题会议。经过充分讨论，我们决定将产品运回中航工业起落架公司继续攻关。

由于当时中航工业起落架公司并没有生产供备份用的 AG600 起落架应急收放系统，如果这套起落架应急收放系统弃用，再重新制造一套新的系统，水上首飞的时间就只能大大推迟。

危急时刻，中航工业起落架公司的同志们以严谨认真的工作态度，对这套装机试验的起落架系统进行了全面的复查和检验，终于发现是在元器件安装和调试中出了问题。经过排查后，起落架应急收放系统再次进行铁鸟试验时获得了成功。挡在研制团队面前的“拦路虎”终于被搬掉了！AG600 项目朝着水上首飞的目标又迈进了一步。（未完待续）

▲ 来源：中航工业

侯鸣举 摄



港中心