C919
C909
复材切片模型

系统工程

- 从一滴水到整片海——浅析什么是系统工程
- 穿透 V 模型：马斯克复杂产品敏捷研发的系统工程逻辑
- 从图纸到数字魔法的航空革命

大飞机 JETLINER

04 April
2026.04 | 总第142期
ISSN 2095-3399
9 772095 339266 04>

中国商用飞机有限责任公司
C919
B-001E
C919
B-001F
中国商用飞机有限责任公司
C919
← 2100m
07-25
A3

余创 摄

05 卷首语

05 邂逅系统工程 | 梁德刚

06 资讯

10 封面文章

10 从一滴水到整片海——浅析什么是系统工程 | 梁德刚 韩建宾 董大为

15 穿透 V 模型：马斯克复杂产品敏捷研发的系统工程逻辑 | 钱仲焱 唐凌巍 郝放 王宇航

20 从图纸到数字魔法的航空革命 | 李浩敏 詹超 于苗

24 AI 赋能系统工程：揭开商用飞机研制未来一角 | 董宝玉 付昱 余颖婷

28 航空制造

28 全球通用航空市场发展态势良好 | 王妙香

33 混合动力推进系统重振支线航空 | 陈玉洁

38 从满足功能到体验重构——有感第 25 届德国汉堡飞机内饰展览会 | 董帼雄

43 航空氢动力距离商业运营还有多远？ | 王翔宇

48 航空运输

48 支线航空网络构建机制研究 —— 基于串飞航线视角 | 张晓

53 燃油附加费上调背景下中国航司的增收策略 | 于占福

58 民航新质生产力的核心内容和主要命题 | 赵巍

64 产业观察

64 从造船厂到全球单通道之心：空客汉堡工厂的进化之路 | 张蕴涵

68 “拆飞机”行业标准正在定义 | 王静仪

72 专栏

72 人间四月天，夏秋航季如约登场 | 詹东新

74 人物

74 怀念程不时 | 张晓鸣

78 科普

78 边飞边发电！飞机电源系统原来是这样工作的 | 晴天

82 回眸

82 征战 AG600 水上首飞的日子 (之三) | 汪亚卫

▼ 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 04 期 | 总第 142 期 | 04 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

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

邂逅系统工程

文 | 梁德刚

公元前 2560 年，埃及法老胡夫动用数万人力、耗费二十多年光阴，筑起一座 146 米高的吉萨大金字塔。其间，用于金字塔外层饰面的优质石灰岩从尼罗河东岸开采，经水路运至工地，再与吉萨本地石材层层垒砌——这场横跨数十道工序的世界七大奇迹之一，至今仍让世人惊叹。两千三百年后，在中国四川岷江峡谷，李冰父子主持修建都江堰，没有大坝、没有高坝，而是“分水鱼嘴”四六分洪、“飞沙堰”溢洪排沙、“宝瓶口”引水控流，三大工程系统相互配合、顺势而为，2200 余年后仍在滋养被誉为“天府之国”的成都平原。

这些都是人类记载最早的复杂系统工程实践——没有蒸汽机和内燃机，更没有计算机和互联网，却实现了数万到数十万人的大规模协作、超长时间跨度的项目成功，其背后的朴素智慧，时至今日仍令人惊叹。

然而，人类改造世界的决心从未止步于此。上世纪 40 年代，二战将系统工程推向舞台中央——曼哈顿计划三年铸就原子弹；上世纪 60 年代，阿波罗登月让系统工程成为全球航天领域黄金法则；同一时期，钱学森将系统思维带回中国，从“两弹一星”到国产大飞机，构建了具备东方特色的系统工程方法论。

如今，基于模型的系统工程（MBSE）将纸质文档化为数字模型，让飞机在制造之前就能够在虚拟世界飞行千百遍；大模型与智能体的崛起，正将系统工程推向“智能驱动”的新纪元；而马斯克的 SpaceX 与特斯拉，则用第一性原理与极限验证，为传统 Vee 模型注入了敏捷的时代活力。

从尼罗河畔的巨石奇迹，到岷江之上的千年治水；从原子弹的惊天巨响，到月球表面的人类足迹；从数字孪生的虚拟推演，到智能时代的浪潮奔涌，人类文明的每一次进阶，都镌刻着系统工程的深刻印记。如今，这份力量描绘出大飞机划破云霄的中国航迹，以百万零件的极致协同、全产业链的同心聚力、跨越数十载的坚守求索，续写着中国民机系统工程的时代新篇章。

本期杂志“封面文章”栏目以“系统工程”为主题，介绍了系统工程的发展历程和深刻内涵，马斯克“敏捷系统工程”的应用逻辑，MBSE（基于模型的系统工程）对大飞机研制带来的革命性变化，以及 AI 为系统工程注入的创新活力等，为读者带来一场关于系统工程的深度探索之旅。

这份力量描绘出大飞机划破云霄的中国航迹，以百万零件的极致协同、全产业链的同心聚力、跨越数十载的坚守求索，续写着中国民机系统工程的时代新篇章。

01

▲ 汪洋 摄

1 东航推动 C919 执飞入疆航线

4 月 22 日，中国东方航空新疆分公司在乌鲁木齐揭牌成立。东航表示，持续完善国内航网，探索拓展国际航线，推动 C919 执飞入疆航线，助力新疆打造亚欧黄金通道和向西开放桥头堡。

今后，新疆民航市场将形成“三大航”齐聚、干支协同、竞合有序的良性发展格局。目前，东航在新疆已形成覆盖乌鲁木齐、伊宁、喀什、库尔勒等 13 个航点的航线网络，通达上海、西安、昆明等国内核心枢纽。

▼ 邹大鹏 摄

02

2 C909 首航越南岘港

日前，老挝航空使用 C909 飞机开通老挝万象至越南岘港航线。这是 C909 首次执行商业航班飞往岘港，也是继河内、胡志明市后老挝航空开通的第三条越南航线。

岘港是越南第四大城市，也是越南著名旅游城市，拥有美溪沙滩、巴拿山、山茶半岛、占婆雕刻博物馆等知名景点。岘港国际机场是越南第三大国际机场。

3 民航局发布高原运输机场建设指南

近日，中国民航局发布《高原运输机场建设指南》，于5月3日起施行。

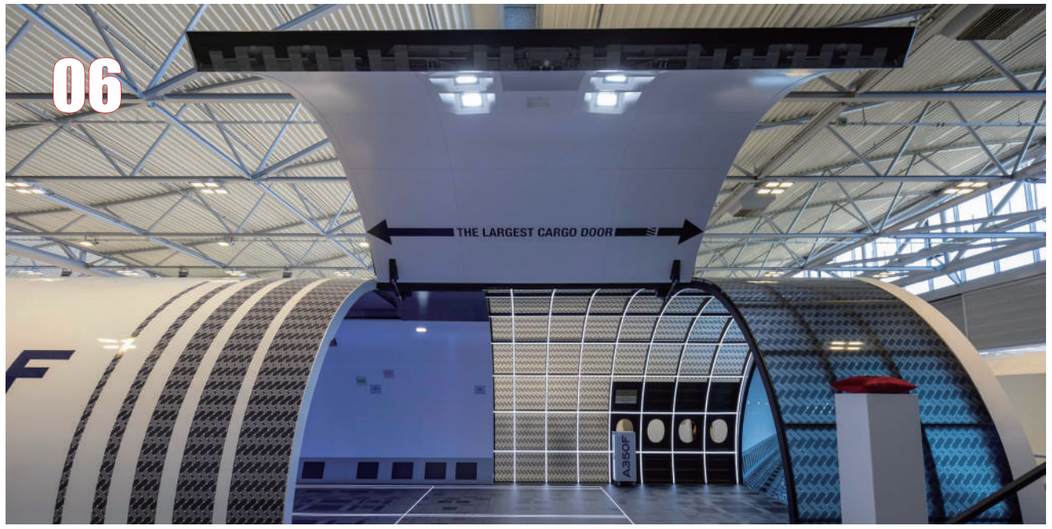
指南分为总则、术语和缩略语、基本规定、选址、总平面规划、设计、施工共 7 章，旨在更好指导高原运输机场建设，提升规划设计品质，提高工程质量和建设水平，科学防范安全风险，推动高原运输机场实现高质量发展。

目前，我国已顺利建成了46 座高原运输机场，未来还有一定数量的高原运输机场需要建设。

4 国内机场首次完成基于 RNP AR 独立平行进近

日前，深圳机场上空两架客机分别对准深圳机场两条平行跑道，以几乎“并驾齐驱”的姿态完成进近着陆。

此次试飞成功标志着深圳机场完成了国内首次基于 RNP AR 的独立平行进近 (EoR，Established on RNP AR) 双机同时验证试飞工作。两架飞机在最后进近阶段最小间隔仅 1.6 公里，创造了国内 EoR 试飞新纪录，在航行新技术应用、多跑道高效运行等领域实现了重要突破。



06

▲ 来源：www.news.carnoc.com

5 波音维持 787 交付目标不变

尽管高端座椅和发动机供应链出现延误，波音近期仍预计今年能交付 90 至 100 架 787 双发飞机。今年前三个月，波音交付了 15 架 787 客机。

波音首席执行官凯利·奥特伯格在 4 月 22 日举行的第一季度简报会上表示，波音正在与客户以及 FAA 合作，通过在开发过程的早期阶段加强合作，并设立“合同退出机制”，避免未来出现交付延迟的情况。他表示，波音已将查尔斯顿工厂的 787 客机月产量提高至 8 架，并稳定在这一水平。

6 空客完成首架 A350F 货机主货舱门制造

日前，空客位于西班牙伊列斯卡斯的工厂完成首架空客 A350F 货机主货舱门的制造和组装。

该部件已交付至图卢兹总装线，将在未来几周内被安装到首架测试飞机的机身上并进行测试。空中客车正在制造两架空客 A350F 货机用于 2026 年至 2027 年的试飞。

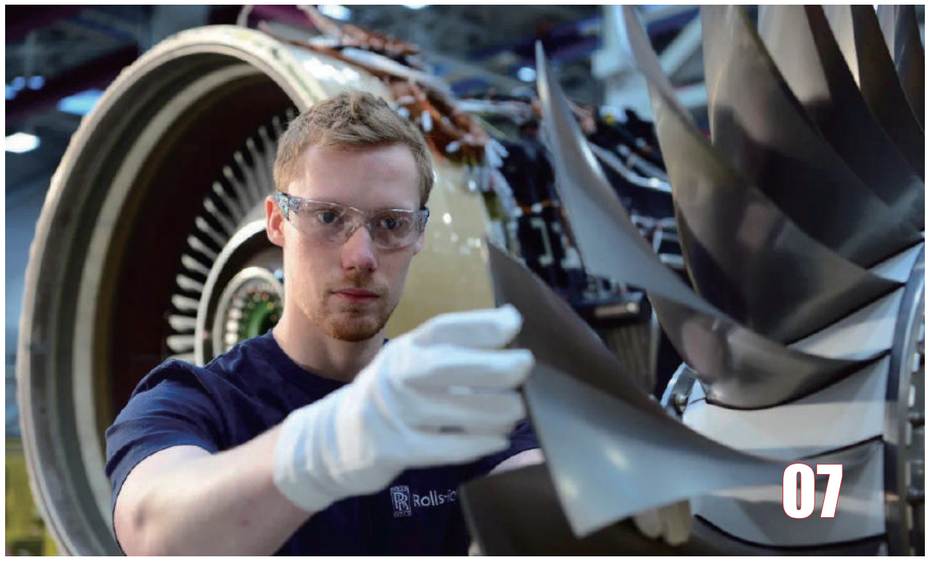
空客位于伊列斯卡斯的工厂是公司制造大型、复杂复合材料表面的主要设施之一，负责制造蒙皮并组装舱门，然后将其交付进行机身安装。

7 罗罗将牵头研发低碳窄体机发动机

近日，罗罗公司宣布，已获得欧盟 6400 万欧元专项拨款，将牵头组建跨国研究联盟，推进新一代窄体客机航空发动机技术的研发与验证。

本次获资助的项目代号为 UNIFIED（超新颖创新全集成发动机验证项目），将聚焦 UltraFan 30 发动机验证机的研发与地面测试，相关测试计划于 2028 年开展，同时项目已规划后续飞行测试的技术路径。

该项目联盟由罗罗牵头，汇聚了来自法国、德国、荷兰、挪威、西班牙、英国的工业企业、高等院校及科研机构合作伙伴。



▲ 来源：罗罗

8 多家大型航司计划削减运力

受美以伊冲突影响，全球航空业正陷入一场前所未有的“燃油危机”。据航空数据分析公司 Cirium 的最新数据，全球前 20 大航空公司中，已有 19 家计划在未来几个月削减运力。自 3 月初以来，全球航班计划运力已下降了 3 个百分点。

国际能源署（IEA）署长法提赫·比罗尔（Fatih Birol）日前向美联航表示，欧洲的航空燃油储备可能仅剩“约六周”。国际航空运输协会（IATA）总干事威利·沃尔什（Willie Walsh）也表示，亚洲部分地区已出现因缺油而取消航班的情况，如果局势持续，欧洲可能在 5 月底面临同样困境。

9 新西兰航空推出经济舱卧铺

新西兰航空最近发布针对波音 787 经济舱旅客的经济舱卧铺产品 Skynest。

据披露，6 个单独的卧铺空间呈“上下铺”式排列，每个空间内均配备床垫及寝具、隐私帘、安全带、阅读灯、充电接口以及洗漱用品包。新西兰航空将从 11 月开始在部分航班上提供该产品，预订通道将于 5 月 18 日正式开启。

10 HH-200 无人机成功首飞

4 月 15 日，HH-200 航空商用无人运输系统在渭南完成首飞。飞机各系统工作正常、飞行姿态平稳、整体状态良好，顺利完成预定飞行科目。

HH-200 采用方形直通机体、双发上单翼、双尾撑设计布局，机长 12.2 米，翼展 16.8 米，机高 3.7 米，货舱标准容积 12 立方米，可扩展为 18 立方米，最大商载 1.5 吨，最大巡航速度 310 公里 / 时，最大航程 2360 公里。

▼ 来源：新华社

从一滴水到整片海
——浅析什么是系统工程

文 | 梁德刚、韩建宾、董大为　　编辑 | 林喆

大家有没有想过一个问题：为什么制造一架大飞机需要数以百万计的人共同参与？从市场需求到跑道起飞，一架商用大飞机涉及成千上万个供应商、几百个专业学科、数十万道工序。每一个零件加工都要精确无误，每一套系统都要反复迭代，任何一个环节的疏漏都可能导致灾难性的后果。

面对如此庞大的复杂性，人类是如何组织的？答案呼之欲出，就是系统工程——一门关于复杂系统如何被有效组织实现的学问。

从战争中诞生的智慧

系统工程的诞生，本身就是一个“系统工程”的典型案例。

上世纪 40 年代，第二次世界大战爆发。战争的紧迫性迫使各国政府将来自不同领域、不同背景的科学家、工程师组织起来，共同解决前所未有的复杂问题。其中最著名的当属美国的曼哈顿计划——从理论突破到工程实现，仅用三年多时间就研制出原子弹。项目实施期间，人们意识到，在面对复杂系统开发时，传统“头痛医头、脚痛医脚”式的管理方法已然失效，必须有一种全新的方法来组织和管理大规模协作。

1957 年，苏联发射了人类第一颗人造卫星斯普特尼克，这记“太空惊雷”让美国举国震动。为了在太空竞赛中赶超苏联，美国宇航局（NASA）应运而生，阿波罗登月计划成为系统工程最早的大规模实践舞台。

而正是在这一背景下，系统工程作为一门正式学科在上世纪 60 年代正式诞生。

在实践中完善的理论

后续伴随着工业革命、军事竞赛与航空产业的发展，西方系统工程走出了一条标准化、体系化、工具化的发展路径，形成了全球普及度最高、行业适配性最强的系统工程知识体系与实践框架。而这套规则的核心制定者，就是国际系统工程协会（INCOSE）。自 1990 年成立至今，INCOSE 所出版的《系统工程手册》是一本全球航空航天等复杂装备公认的“操作指南”，它将系统工程定位为“一种以跨学科整合为途径，利用系统原理和概念，以及科学的、技术的和管理的方法，使得工程系统能够成功实现、使用和退役”。简而言之，系统工程是一套跨专业的做事方法，让几百万人、上千个专业一起干活的时候，不跑偏，不内耗，最终的产品能完全满足要求。

造大飞机最怕什么？怕“拍脑袋干活”，怕前面的需求没说清，后面的人瞎做，最后拼到一起才发现完全对不上，出了问题都找不到是谁的原因。INCOSE 系统工程最核心的逻辑，就是“管好了过程，结果才不会错”。

这里最经典的就是 1991 年由福斯伯格与穆兹共同提出的 Vee 模型，可以把它理解成造大飞机的“黄金做事流程”，全世界的航空工业都在用，核心就是“先拆解，再集成”。

它的左半边，是“从上往下的拆解验证”：就像要盖一栋能住万人的摩天大楼，不是先搬砖砌墙，而是先定死“要盖 100 层、抗 8 级地震、满足消防规范”

的总目标，再拆成地基要多深、钢结构要多结实、水电消防怎么布局，直至每一块砖、每一根钢筋的标准。造飞机也一样，先定“飞机要飞多远、坐多少人、必须满足哪些安全要求”，再层层拆解为航电、飞控、发动机这些系统的要求，直至每一个零件、每一行代码的要求，同时也要验证确保顶层的每一条要求都能落实到设计方案中。

它的右半边，是“从下往上集成确认”：楼不是盖完才验收，而是先验钢筋合不合格，验墙体砌得对不对，再验一层楼的水电消防，直至验收整栋楼。造飞机也一样，先确认每个零件、每个软件，集成后再确认子系统，直至完成整架飞机的确认，而且每一步确认，都严格对应到左半边每一层拆解的要求，确保所做的每一件事都能符合标准，而不会出现“虎头蛇尾”的笑话。

百余年来，全球民机领域始终呈现持续拓展的发展态势，这一进程离不开系统工程理念在民航安全监管规则中的深度融入与应用。

以开餐馆为例，市监局要查一家餐馆合不合格，不是只尝一口端上桌的美味佳肴，而是要查食材采购、后厨操作、餐具消毒、人员健康的全流程，是不是都按食品安全规范来执行，每一步有没有留记录。民航的适航监管也是同样的道理——全球各个国家的民航局（比如美国 FAA、欧洲 EASA、中国 CAAC），不会去检查飞机上的每一颗螺丝钉，而是要查研制飞机的全过程，是不是按规矩来，能不能拿出完整的证据，证明所生产的飞机是安全可靠的。

而这套系统工程，就是完全贴合监管要求做的“标准化操作手册”按这套流程走，每一步都留好证据，就能给监管部门证明“飞机满足所有安全要求”。反过来，监管部门的强制要求，也逼着所有研制飞机的企业，必须把系统工程做扎实。现在咱们常听到的民机适航标准，比如 ARP 4754、DO-254 等，都是跟着系统工程的基本逻辑来定的，这也让系统工程成了民机研制的“必修课”。

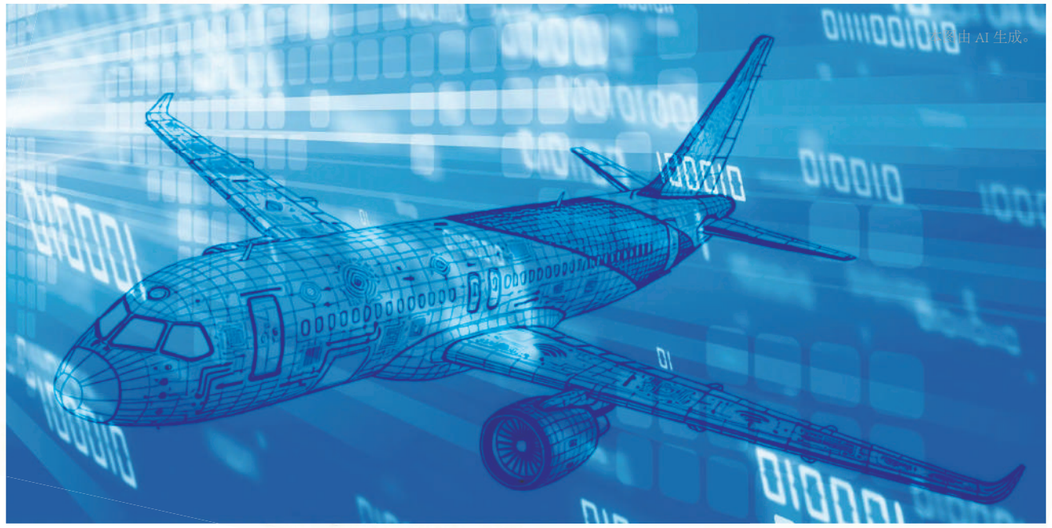
中国特色系统工程

很多人对钱学森的印象，停留在“中国航天之父”“两弹一星元勋”，但很少有人知道，钱学森晚年最核心的工作，不是研发导弹、卫星，而是搭建了中国自己的系统工程体系，让这门从尖端工程里诞生的学问，成为了中国航空航天领域的核心方法论。甚至可以说，从“两弹一星”到载人航天，再到今天的大飞机、高铁，这些项目的成功，背后都有钱学森系统工程思想的支撑。

早在 20 世纪 30 年代留美期间，钱学森在加州理工学院师从冯·卡门，参与创建喷气推进实验室（JPL），开创了火箭导弹的系统工程实践。1950 年代出版的《工程控制论》，首次将系统思维系统化、理论化地整合到工程控制领域，奠定了该领域的现代理论基础。这些工作影响了美国早期航天工程，更为中国系统工程学派建立提供核心方法论。

1978 年 9 月 27 日，钱学森联合许国志、王寿云，在《文汇报》发表了《组织管理的技术——系统工程》。这是第一次在大众媒体上，把这门原本用在国防绝密工程里的学问，系统地讲给普通人听，也正式拉开了系统工程在中国普及、发展的序幕。

钱学森将系统工程定义为“组织管理‘系统’的规划、研究、设计、制造、试验和使用的科学方法，是一种对所有‘系统’都具有普遍意义的科学方法”，至今仍被国内行业奉为经典，通俗地说就是，系统工程是管大事的科学方法——不管是造导弹、发卫星，还是搞复杂大项目，怎么做好从规划、设计、制造、试验到落地使用的全流程统筹，怎么把成千上万的人、无数的专业和资源组织好，最终把事干成、干好。



钱学森开创的中国系统工程学派，带着鲜明的东方统筹智慧，提出了诸如一切从总体设计出发、用综合集成解决难题等理念方法，在我们国家的重大工程里得到了充分验证，并从工程领域拓展到了社会、经济、生态等更复杂的系统，让系统工程的用处，远远超出了工业领域的范畴。

大飞机系统工程，继往开来

C919 承载着中国航空工业几代人的梦想，它不仅是一架飞机，更是中国民机系统工程的典型实践。从钱学森“总体设计部”的理念出发，中国商飞在 C919 项目中，真正实现了“举全国之力、聚全球之智”的系统工程实践。

项目从设计之初就明确了“自主研制、国际合作、国际标准”的技术路线。中国商飞联合包括中国在内的全球 20 多个国家、500 多家供应商，共同打造了这架拥有自主知识产权的国产大飞机。在项目推进过程中，中国商飞同样充分发挥“全国一盘棋”的制度优势，从上海到成都，从西安到沈阳，各省市、各单位近 30 万人不计较“局部”得失，全都围着这一项目凝心聚力。

为加强系统工程理念在型号研制期间的贯彻落实，实现 C919 能够更安全、更经济、更舒适、更环保地翱翔蓝天，2015 年 6 月，在时任中国商飞公司总经理贺东风的倡导和要求下，公司成立了中国商飞公司系统工程工作组，并于 2017 年 2 月正式出版《中国商用飞机有限责任公司系统工程手册》。该手册旨在与国际最新标准、实践对齐，充分结合我国民机研制现实条件，提出了产品正向设计 N—F—R—P（需要—功能—需求—物理）模型、产业链供应链“X”模型、DBMOT（设计、制造、维修、运行、试验）协同团队以及“两透一控，双五归零”等一系列创新举措，填补了国内民机系统工程领域顶层方法学的空白。

C919 项目最引人注目的创新之一，便是它首次在国内参照 ARP 4754A 标准，实现了对飞机及关键系统(主飞控、自动飞行、航电系统）的正向设计，完整走过了 Vee 模型的左右两边，标志着中国民机系统工程正式迈入了国际标准的轨道。C919 从客户需求出发，层层分解系统要求，确保每个环节都满足安全性和可靠性要求。这不仅是技术上的突破，更是系统工程方法论的成熟应用。

C919 的成功，离不开研制团队对系统工程的创新应用。基于多年的民机研制实践和思考，中国商飞提出了自己的定义："系统工程是以满足客户需求为目的，围绕产品全生命周期，通过产品集成与过程集成，实现全局最优的一种跨专业、跨部门、跨企业的技术和管理方法。"这一定义，既吸收了 INCOSE 的核心理念，也继承了钱学森系统工程的思想精髓，同时又结合了型号项目的实战经验，体现了中国系统工程的独特价值。

2022 年，C919 获得中国民航局适航证，2023 年正式投入商业运营，标志着中国成为全球少数能独立研发干线客机的国家。截至目前，C919 航线累计承运旅客数量已突破百万人次，这一实践不仅让国产大飞机"飞"出技术突破，更重塑了航空工业的协作模式：系统工程不是抽象理论，而是用科学方法把"中国制造"变成"中国智造"的桥梁。

系统工程，离我们每个人都很近

聊到这里，我们再回头看开头的那个问题：为什么造一架大飞机，需要数以百万计的人共同参与？

答案其实很简单：大飞机从来都不是几百万个零件的简单堆砌，就像整片大海，从来都不是无数滴水的简单相加。大海里的每一滴水、每一股洋流、每一片海域都相互关联、相互影响；而大飞机里的每一颗螺丝钉、每一行代码、每一套系统，乃至每一个参与设计、制造、验证的人，都环环相扣、牵一发而动全身。而系统工程，就是一门能把这种极致的复杂性，理得清清楚楚、管得明明白白的学问——它不是教你怎么造好一颗螺丝钉、写好一行代码的手艺，而是教你怎么把无数零散的部分，拼成一个安全、可靠、能完成既定目标的整体，是一门"组织复杂性的艺术"。

很多人会觉得，系统工程是造飞机、发卫星才用得上的"高大上"学问，离普通人的生活太远了。但其实今天，它早就走出了航空航天的实验室和总装车间，渗透到了我们生活的方方面面。

我们坐的高铁，能实现千里京沪一日还，靠的不只是先进的列车和铁轨，更是全国高铁网的线路规划、行车调度、信号控制、供电保障、应急处置的全链条协同，这背后就是系统工程的支撑；我们手里的智能手机，从芯片设计、系统开发，到整机制造、供应链协同，上千道工序、上百家企业配合，离不开系统工程的统筹；甚至我们生活的城市地铁线路怎么规划更便民、暴雨天怎么防控内涝、城市电网怎么稳定供电，本质上都是在用系统工程的思路解决复杂的现实问题。

小到一个项目的落地，大到大飞机的诞生、一座超大城市的有序运转，我们能享受到的现代工业便利、国家重大工程的成就，背后都藏着系统工程的身影。而这门从战争中诞生、在复杂装备工程里成熟、在东西方实践中不断丰富的学问，还在陪着我们，去挑战更多更复杂的困难，把更多"不可能"变成现实。

穿透 V 模型：马斯克复杂产品敏捷研发的系统工程逻辑

文 | 钱仲焱 唐凌巍 郝放 王宇航　　编辑 | 林喆

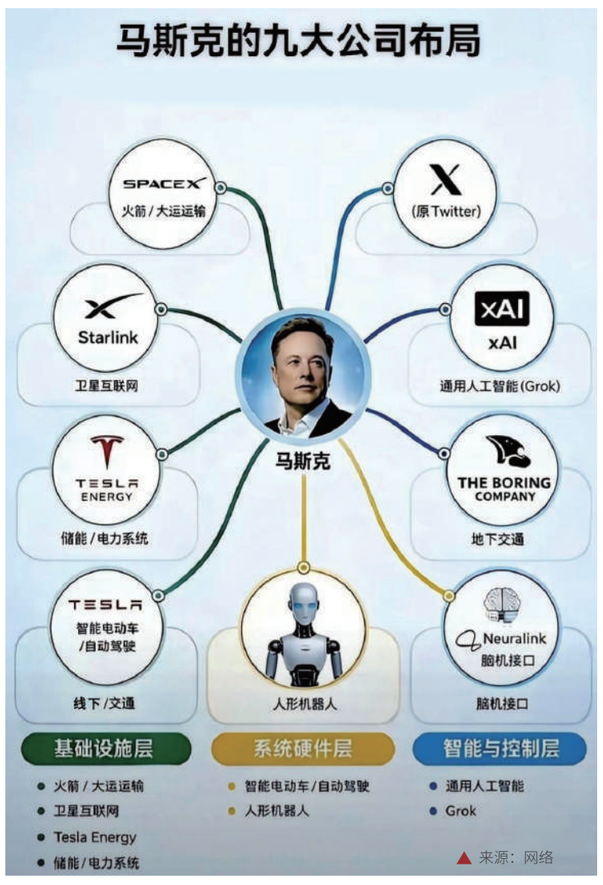
在商用飞机研制中，V 模型作为系统工程的重要方法论，包含需求定义、架构设计、集成验证等过程，构成了一种线性、严谨的闭环。然而，随着全球科技革命和生产模式变革的加速，传统的串行研发正日益显露出响应迟缓、试错成本高的效能之困。埃隆・马斯克在特斯拉、SpaceX 的复杂产品"敏捷研制"中，为科技创新和产业创新深度融合树立了标杆，也可作为我们加快推进新兴航空器研制、抢占低空经济与未来产业制高点的有益借鉴。

马斯克体系的核心逻辑可概括为"哲学定向、工程闭环、商业牵引、文化固盘"。该体系以"第一性原理"与"成本最优"为双轮驱动，全面贯穿于复杂系统研制的全生命周期。将线性的系统工程转变为螺旋上升的敏捷引擎：需求端直击物理本源，设计端奉行极致简化，制造端通过垂直整合提速，验证端落实尽早验证、极限验证、持续验证闭环。支撑这一切的，是以"初创引领、工程优先、试错即经验"为核心的文化底色，以及高度扁平化、全流程数字化支撑的敏捷协同机制。这与国际系统工程协会（INCOSE）倡导的"物理本源正向设计，极限验证闭环迭代"方向高度契合。

需求端：穿透表象定真章，技术驱动创需求

V模型左侧的核心在于“做正确的事”与“正确地设计”。马斯克既做减法也做加法。向内的工程执行，极致做减法。用第一性原理打破思维定式，质疑一切既有需求，砍掉所有非必要的零件和流程。向外战略破局中，打造出极具技术和成本优势的产品，创造全新的市场需求。

需求定义最易陷入“将现有方案等同于需求”的误区，原因是不能以发展的眼光看问题，没有深入思考需求的本质、要解决的核心问题、条款背后的考量是什么？马斯克认为，现有需求都具有历史局限性，都必须受到质疑。因此他将“需求”降级为可协商的“设计准则”，鼓励工程师质疑一切假设。



来源：网络

以载人龙飞船驾驶舱设计为例。传统航天飞机上超过1000个按钮，不但线束重，且功能变更时需重新布线。SpaceX以消费级触控屏替代，仅保留约30个关键应急实体按钮。标配三块全权限触控屏，互为多余度设计，遇单屏故障可迅速平替。NASA实测，这种设计可让软件替代宇航员大约99%的工作量。其背后根本原因是基于飞船是全自动飞行器，宇航员已转变为更高级的监视和决策者，实体化按键因此就成了伪需求。截至目前，龙飞船已成功完成了近20次载人轨道飞行（输送超70人次），遥遥领先竞争对手波音的星际客机。

在创造新需求方面，V模型左侧的利益攸关方需求，隐含了客户知道自己想要什么。在渐进式创新中，这种以客户为中心的理念行之有效。但在代际跨越面前，正如汽车大王亨利·福特的名言：“如果我去问顾客想要什么，他们只会告诉我想要一匹更快的马，而不是汽车。”这类由跨代技术牵引出的需求屡见不鲜。猎鹰可回收技术研发初期，全球卫星发射需求非常有限。但因为可复用技术突破带来了数量级的降本，才创造出了诸如低轨卫星互联网星座、太空数据中心这类海量隐性新需求。

设计端：源头重构去冗余，产研一体强协同

马斯克倡导“最好的零件就是没有零件”的极致系统工程理念。他要求工程师从物理定律和成本方程出发重新思考和建模。每个零件都必须经历“灵魂三问”：它真的必要吗？有无更简单的替代？能否与其他功能整合？例如，猛禽发动机迭代中，通过精简外部管路、法兰、传感器和隔热罩等，推力提升51%的同时减重26%、降本70%。

马斯克团队通过重新定义系统边界精简设计，例如，超重型助推器没有沿用猎鹰9着陆腿的成功经验，而是采用机械臂回收，将“着陆功能”从飞行器转移到地面。特斯拉Model 3从分布式架构转向区域化控制器架构，传感器与执行器就近接入，并以电子保险丝取代配电盒，辅以高速主干网进行数据回传，线束长度较早期车型缩短50%。

马斯克团队坚持“核心聚焦、分段清零”模式，严格按时序优先级开展工作，凡是被评估为后续迭代周期的“远期问题”，在当前节点不予讨论。将有限资源聚焦于当前最紧要的3至4项核心问题，避免过度设计与资源空耗。

在设计制造一体化方面，马斯克通过物理空间的重构、管理职权的前置、面向制造的设计来推进。SpaceX霍桑工厂办公区建造在焊接和施工区中间，工程师穿过车间办公，设计直接受现场工艺反馈驱动。由现场驱动设计，领导者与工程师深耕一线，设计决策基于现场实际情况，而非单纯依赖模型。在Model 3产能爬坡最困难时期，马斯克吃住在工厂3个月，日以继夜地与团队发现并解决问题。用设计精准服务生产，产品高度标准化，如星舰统一的六边形隔热瓦，以及特斯拉机器人将28个结构执行器精简为6款易于冲压组装的标准件，大幅降低制造复杂度。

制造端：垂直整合掌命脉，跨域融合破壁垒

V模型底部和右侧是系统从图纸走向实物的关键阶段。复杂产品敏捷研制的瓶颈在于硬件实物制造周期长、迭代成本高，马斯克团队的核心破局点是在垂直整合和跨域融合方面降本提速。对高价值核心系统坚持深度自研自制，以此实现对进度和成本的自主可控；而在底层元器件层面，则敢于打破传统航天对“宇航级”标签的路径依赖，建立一套“系统级冗余设计包容底层器件失效”的供应链与过程保证体系。

SpaceX实施全产业链垂直整合，旨在破除传统承包商的低效高价、供应链依赖及行业排挤、降低大量外包的交易和沟通成本。在业务布局上贯通火箭、发动机、飞船、卫星及星链运营全流程；在组织效能上实行两级扁平化管理与数字化协同，工程技术人才占比高达90%，以全美同业1.18%的人力规模承担了80%的发射任务；在成本管控上，构建覆盖全生命周期成本管理体系，实现研发业务与财务体系的深度融合。依托上述纵向一体化模式，SpaceX在卫星造价、单箭运力及火箭回收等关键领域确立了全球领先的低成本优势。

《硅谷钢铁侠：埃隆·马斯克的冒险人生》一书记录道，猎鹰1号的推力矢量控制作动器，航空供应商报价12万美元且需18个月，而自研仅耗时9个月、花费3900美元完成并成功应用。行业研究显示，猎鹰9号初期的自制比例约70%，星舰已攀升至85%至90%，星链卫星也在85%以上。即便是在充分竞争的汽车供应链领域，特斯拉多款车型的内部自制比例约80%，远超同行的30%至40%。

马斯克团队敢于剥离“宇航级”标签，通过跨界复用，打破路径依赖和降低成本。例如，星链卫星以工业级、车规级现货零部件替代宇航级元器件，辅以系统架构层

面的高冗余软件算法兜底；Optimus 机器人直接嵌装特斯拉自研 SoC 芯片、平移车辆摄像头架构、复用车规级电池包与电源管理系统。同时，以工业级自动化产线取代传统航天单件手作，将汽车压铸工艺引入火箭贮箱制造，建立高度自动化的卫星及隔热瓦专属工厂，实现低边际成本的快速量产。

SpaceX 的批量化、模块化和通用化制造能力为快速试错提供了坚强保障。例如，在星舰项目中，SpaceX 全面推行产线并发制造与多代次构型同步推进机制。试飞的同时工厂内已有 2 至 4 架后续原型机在总装或测试。

验证端：验证左移控风险，数据驱动铸闭环

验证通常被视为是证明产品符合性的既定程序。在马斯克的体系中，验证并非设计完成后的终点，而是驱动设计走向成熟的起点。要通过验证活动大幅左移，高频次实施软硬件在环测试，以及对系统极限性能边界的深度探索，将测试转变为驱动设计演进的核心引擎。

虚拟先行与低成本摸底。在研制前期，依托基于模型的系统工程（MBSE）构建全机“数字孪生”，在虚拟环境中完成多学科优化与系统交联验证。丰田团队调研时发现，特斯拉在 Model S 开发中高度依赖数字仿真，特斯拉仅用 15 辆测试车，而丰田同类项目通常需要 250 多辆。马斯克团队还同步引入 3D 打印和非航天级商用现货器件搭建半物理平台。例如，“蚱蜢”火箭专门用于测试垂直起降能力，通过密集开展低空短距起飞测试，在真实动态环境中验证了垂直回收的控制算法，为猎鹰 9 垂直回收扫清了障碍。

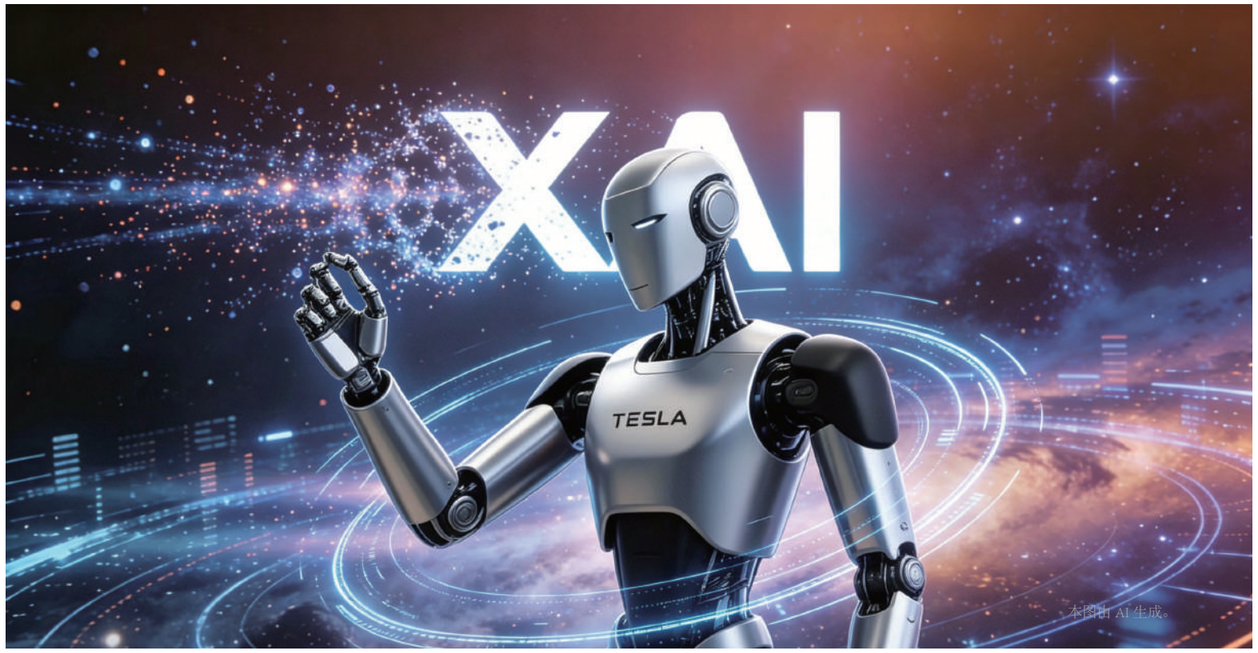
极限测试与敏捷归零。打破温室审查，实机验证确定物理包线。星舰和超重型助推器在 18 个月内开展了 5 次综合飞行测试，马斯克指出，星舰原型机爆炸的原因没有任何一项在预测的风险清单中。通过尽早进行整机测试，暴露了所有无法预见的故障点，获得最真实的工程数据。资深航天记者埃里克·伯格曾在 SpaceX 深度驻厂调研，他在专著《Liftoff》指出，早期猎鹰火箭发射后，团队不是退回办公室走论证流程，而是在发射场就地拆解残骸，数小时内便锁定了故障来源，将遥测数据快速变成了新版图纸。

交付是更大规模验证的起点。载人龙飞船首次对接空间站的过程中，激光传感器突发故障，团队在不到三小时内通过远程上传新软件、调整传感器帧数，在轨完成了逻辑重构，将潜在的任务失败转化为成功的实战验证。特斯拉通过空中下载技术（OTA），使车辆具备了在用户端自动修复软件故障的能力。这种能力本质上是将产品的维护阶段转变为持续的进化期，极大地提高了售后响应速度。

展望：“两透一控”新内涵

随着航空产业绿色化、智能化、网联化的跃升，现代飞机正快速演变为“由软件定义的飞行智能终端”。在前沿型号的研制征途中，我们要坚守科学严谨的适航底线，更要焕发敢于颠覆、勇于试错的创新锐气。

中国商飞系统工程的核心是“两透一控”（吃透需求、吃透技术、构型控制），在严格的适航要求下，该体系为大飞机研制构筑了坚实的管理基准。但对于从“0 到 1”开始创新产品，针对新形势、新技术、新业态，我们需要在守正创新的实践上结合自身实际，为“两透一控”赋予全新的时代内涵与敏捷外延，形成



本图由 AI 生成。

“经典基线 + 敏捷策略”的融合式战法。

吃透需求：回归物理本源，从“承接需求”向“定义价值”转变。不仅要知其然，更要探究其背后的物理本质。要摒弃历史惯性与传统的“零件思维”，坚持以“功能思维”审视顶层架构设计。面对新技术、新产品、新业态，敢于利用物理定律和成本方程重新推演产品逻辑，在坚决删减伪需求的同时，主动引导并创造前瞻性需求，从源头上定义产品的核心商业价值。

吃透技术：实施垂直穿透，从“系统集成”向“底层赋能”深化。要强化技术主权意识，锻造过硬的技术能力是实施敏捷研发的根本前提，也是垂直整合和跨域融合的关键抓手。既要吃透新技术，推动系统级创新，更要吃透子系统、设备级技术，突破供应链路径依赖。向下穿透供应商的技术黑盒，建立清晰的成本模型，依托技术穿透力掌握主导权，将外部资源的整合内化为核心竞争力。

构型控制：护航快速迭代，从“静态管控”向“动态演进”升级。构型管控是驾驭复杂系统快速演进的基石。要建立统一的工程数据平台，打通设计与制造数据。在样机研制阶段，按架次实施滚动更改。下放局部构型审批权，以验证数据支撑变更。严格固化系统级接口，通过软硬解耦控制更改边界。依托基于模型的系统工程与数字化基线，确保快速迭代时，做到状态清晰可追溯、全链条风险可收敛。

面对低空经济崛起和新质生产力发展的时代呼唤，马斯克的复杂系统敏捷实践为我们提供了一面镜子。唯有打破路径依赖，将系统工程的严密性与敏捷开发的高效性辩证统一，切实将技术、理念和模式创新转化为型号研制的现实生产力，才能在全球商用飞机的赛道上跑出中国速度。

从图纸到数字魔法的航空革命

文 | 李浩敏、詹超、于苗　　编辑 | 林喆

当你乘坐民航客机穿梭在云层之上，是否好奇过这样一架几十吨重的“钢铁大鸟”是如何被设计出来的？它不仅要兼顾舒适、高效与绝对安全，还要把数十个复杂系统完美融合。从早期依靠纸质文档开展设计，到如今全面探索基于模型的数字化设计，这样的变革因何而来、如何落地、又带来了怎样的改变？今天，就让我们一起揭开这套数字设计魔法的神秘面纱。

从纸质时代到数字时代

早期的飞机设计，完全依赖纸质图纸与文字文档。一架民航客机的研制，会产生成千上万份技术文件。文字描述容易产生歧义，信息传递容易出错，设计修改更是费时费力，大量文档也让质量管控变得十分困难，直接影响飞机研制的进度与成本。

为了解决这些问题，MBSE（基于模型的系统工程）应运而生。早在 1993 年，“基于模型的系统工程”概念被正式提出，为复杂系统设计指明了新方向。随后十几年间，统一建模语言逐步发展成熟，最终形成了标准化的系统建模语言，为 MBSE 打下了坚实基础。

2007 年之后，MBSE 进入快速推广期，在航空航天、汽车、高端装备等领域广泛应用。在国际系统工程学会的推动下，国外的军工企业、行业协会、政府机构也都纷纷参与进来研究。波音、空客等国际航空企业率先将 MBSE 用于新一代客机研制，显著提升了设计效率与安全性。而国内，中国商飞、中航工业、航天科工等也相继学习和采用 MBSE 开展产品研制。随着国家在“十四五”规划中提出要推进工业化和信息化的融合，推进 MBSE 的规模化应用，MBSE 在《中国制造 2025》中发挥着越来越重要的作用。

从纸质图纸到数字模型，从零散文档到统一体系，MBSE 用几十年时间，完成了一场飞机设计方式的深刻变革。

造飞机就像搭“数字乐高”

造民用飞机就像做一道超复杂的“满汉全席”：要满足乘客“坐得舒服、飞得快”，航空公司“省油、好修”，国家“绝对安全、符合标准”，还要把发动机、机翼、航电、空调、起落架等几十个系统完美拼在一起。

MBSE 就是这道“大菜”的总菜谱加总导演，以数字模型为核心，沿着场景分析、需求捕获、架构设计、仿真验证四条主线层层推进，把复杂的飞机设计变得有序、精准、好懂。

摸清飞机“要经历哪些”

什么是场景分析？就是先把飞机从地面到天上、从正常到故障的所有“经历”都摸清楚，就像运动会前，先把比赛流程、天气情况、突发状况全都预判一遍。

飞机可不是只在晴天飞，它要面对各种各样的场景：地面滑出、跑道起飞、空中巡航、着陆滑跑、滑入停机位，这些是正常场景；遇到大侧风、低能见度、高温高寒，这些是特殊场景；发动机故障、方向舵失效、控制系统故障，这些是故障场景。每一个场面，飞机该怎么动、飞行员怎么操作、系统怎么配合，都要提前想明白。

传统设计中，这些场面全靠工程师写在文字里，东一条西一条，很容易漏掉最危险的情况，设计自然就有漏洞。而通过模型，把所有场景画出来，像连环画一样，飞机在什么条件下做什么动作、和谁配合、出现故障怎么办，清清楚楚。场景分析就是给飞机“排演全剧本”，先把一辈子要遇到的情况都演一遍，后面的设计才不会脱离真实使用。

给飞机列“愿望清单”

什么是需求定义？就是搞清楚“我们要造一架什么样的飞机”，就像你出门旅游前列清单，要带衣服、书包、水杯，还要坐得舒服、走得快。

但民机的需求不是随便写的，而是从场景里“抓”出来的，这是 MBSE 最核心的思路——先看飞机要经历什么场景，再定场景里需要什么能力。

“能坐 290 人”“每百公里油耗比老飞机少 20%”“维修一次只要 2 小时”…… 这些都是用户需求，就像你旅游的核心愿望。通过分析用户需求，把这些愿望变成需要严格遵守的“规矩”和可测量的数字，不再是模糊的“飞得远”，而是精确的“航程≥ 4000km”；不是坐得舒服”，而是“座椅宽度≥ 45cm，机舱温度 22℃～ 26℃”。这一条条“硬指标”，就像老师给作业定的“评分标准”，达不到就不能及格。

在传统文档方式里，需求写在零散

的文件中，拆分时容易遗漏，修改时要手动更新多处，很容易出现前后矛盾。而通过模型把所有需求整合在一起，从飞机级，一步步分解到系统级、设备级，每条需求都能追溯、能关联，既不会漏掉关键要求，也不会出现设计和需求对不上的情况，让所有设计都有明确依据。

给飞机搭 “骨架”

搞清楚需求和功能后，就要给飞机搭架构，也就是飞机的“骨架”和“布局”，就像搭乐高先搭底座和框架，再装零件；盖房子先搭钢筋骨架，再砌墙。

什么是架构设计？就是把需求变成飞机真正的“身体结构”，就像搭乐高先搭框架、盖房子先扎钢筋，骨架稳，飞机才稳。

从功能入手，飞机需要提供推力、升阻控制、供电、供液压……理清功能之间的信号、能量传递关系，形成功能架构；再根据功能关联程度，组合成逻辑组件，明确彼此的交互逻辑；最后结合实际物理实现，转化为具体的飞控计算机、作动器、刹车等物理设备，同时考虑冗余设计，保障故障状态下的安全性。

传统设计靠图纸和文字描述架构，结构零散、修改后难以同步，常常出现“想法很好却造不出来”的问题。MBSE 用模型把功能、逻辑、物理三层连在一起，系统分工和接口一目了然，还能同时对比好几种方案，就像你选书包，要权衡“轻、能装、好看”，最终选“最优解”。架构设计，就是把“愿望清单”变成“可建造的蓝图”。

在电脑上 “试飞”

什么是仿真分析？就是不造真飞机，先在电脑里用模型 “飞一遍”，就像玩赛车游戏先跑一圈赛道，知道哪里会失误，再真正上场。

需求定好、架构搭好，仿真会把飞机的动力学、发动机、起落架、气动、侧风等全部做成模型，还原真实的飞机运行场景，然后在电脑上用模型“数字试飞”，不用等真实飞机产品，就能知道飞机飞得稳不稳、安全不安全、省油不省油，这正是模型的优势。比如：减推力起飞，看飞机能不能在跑道上顺利起飞；巡航阶段，看油耗是不是达标；发动机坏了一个，看飞机还能否确保安全；飞控、航电、液压系统一起工作，看它们能不能默契配合，会不会“打架”。

本图由 AI 生成。

传统方式里，设计问题往往要等造出原型产品后，通过试验试飞才能发现，返工成本极高。而基于模型的仿真分析，为早期的设计确认和验证提供了有效手段，发现问题直接在模型里修改优化，反复迭代直到满足所有要求。通过模型的手段，我们可以提前识别并解决大量设计问题，让试飞更顺利、更安全。

通过场景分析、需求定义、架构设计和仿真分析，MBSE 已经能够把一架大飞机在数字世界里完整地设计出来。但这并不是终点，随着技术不断向前发展，MBSE 的能力还在持续拓展。那么，未来的 MBSE 将会走向何方，又会给航空工业带来哪些新的可能呢？

大飞机的数字新引擎

现在数字化、智能化发展得越来越快，MBSE 也不再是可选的技术，而是成了高端制造的必需品。它的用处也不再局限于某一个环节，未来会贯穿产品从研发到落地的全流程，还能跨行业应用，让复杂的产品研发变得更智能、更省事。

数字飞机其实就是 MBSE 数字孪生技术的终极版，它不只是给飞机拍个“数字影子”这么简单，而是做一个能和真飞机实时联动的“数字分身”。可以想象一下，从飞机造第一个零件开始，到试飞、日常飞、维修，再到最后退役，飞机所有的状态、损耗、数据，在数字飞机上都能实时看到、记下来。工程师不用登机，对着屏幕就能知道发动机、机翼好不好，还能提前模拟极端天气怎样飞更安全，让飞机从“出生”到退役都被“照顾”得明明白白，安全和维修都更省心。

未来，MBSE 也不只是用来设计飞机了，从确定设计需求、模拟飞行，到做最终测试，全流程都能使用。而 AI 就是 MBSE 的最佳搭档，能自动修正模型的小偏差、提前发现系统间的矛盾、帮助解决研发难题，就像给工程师配了个超级智能助手。两者结合能创造出不断更新的数字模型，研发时的每一个决定都有精准数据支撑，不同团队一起干活也更顺畅，研发速度自然就提上去了。

此外，未来 MBSE 也不再是航空航天的专属工具，它会快速应用到新能源汽车、轨道交通、智能制造、医疗器械等领域。随着技术越来越成熟，成本也会降下来，不光大企业能用，中小企业也能轻松上手，再也不用靠纸质文档、反复试错搞研发。以前要人工反复核对、调整的枯燥工作，有了 MBSE 都会自动完成，不管造智能汽车还是研发高端医疗设备，都能又快又好。

总而言之，未来的 MBSE 早就不是单一的研发工具了，它会靠技术创新改变传统的研发模式，成为航空航天、高端制造的 “数字引擎”，推着各个行业往数字化走，也会成为企业甚至国家的核心竞争力。

AI 赋能系统工程：揭开商用飞机研制未来一角

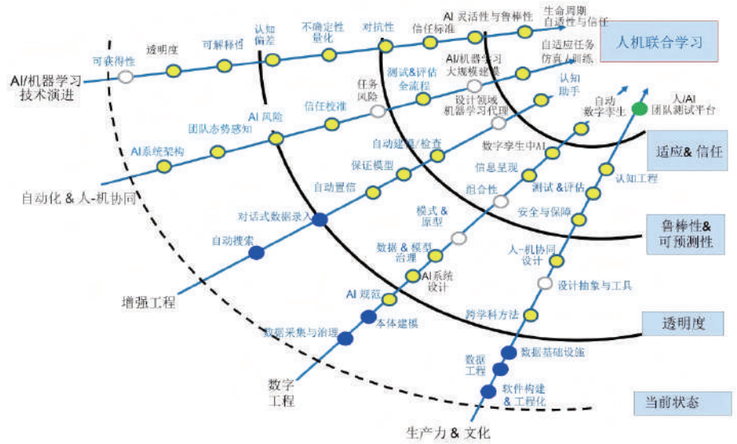
文 | 董宝玉、付昱、余颖婷　　编辑 | 林喆

当时间来到 2026 年，人们在工作、生活中遇到未知问题时，第一反应不再是翻书查资料，打开搜索引擎进行搜索，而是呼唤豆包、DeepSeek 等智能助手，这不是简单的“问与答”，而是智能助手已经深度融入日常的真实写照。

豆包、DeepSeek 等的爆火，并非偶然，它背后是人工智能（AI）技术的成熟落地，更是 AI 从“被动响应”向“主动执行”的跨越，这种“自主感知、自主决策、自主执行”的核心能力，正逐步渗透到各行各业的复杂场景中，尤其为解决系统工程的复杂性、实现“全局最优”提供了全新可能。

根据国际系统工程协会（INCOSE）的定义，系统工程是一种跨学科的综合实施方法，旨在利用系统原理和概念以及科学、技术和管理方法，使工程系统能够成功实现、使用和退役。

2019 年，在 INCOSE 主办的系统工程未来（FuSE）研讨会上，首次提出了“AI for Systems Engineering（AI4SE）”与“Systems Engineering for AI（SE4AI）”的概念，即将人工智能应用于系统工程实践中，从而为决策制定、优化及高效的资源分配赋能。2023 年，在美国系统工程研究中心（SERC）举办的第 4 届 AI4SE 与 SE4AI 研讨会上，McDermott 等人发布了最新一版的 AI4SE 与 SE4AI 的研究路线图，该路线图相比上一版路线图，在不同的方面进一步补充了部分能力指标，同时将各种能力的成熟度用不同的颜色圆圈进行区分，为了最终实现人机共同学习的目标，人工智能和系统工程都需要经历一系列“浪潮”或成长阶段，见图 1。



▲ 图 1 | 2023 版 SE4AI&AI4SE 路线图

破解“金字塔尖”的难题

商用飞机作为典型的复杂系统工程，是国家科技实力与工业水平的集中体现，其研制过程涵盖机械、电子、材料、气动、航电等数十个学科，同时系统工程活动贯穿飞机全生命周期中的市场分析、需求捕获、设计综合、产品实施、产品验证、产品确认、交付运行、报废回收等各个阶段，其技术复杂度、协同难度与安全性要求均处于工业体系的金字塔顶端。

当前商用飞机的研制正处在从基于文档的系统工程（DBSE）转向基于模型的系统工程（MBSE）、基于模式的系统工程（PBSE）的过程中，但随着新技术的不断出现以及项目复杂度的急剧增加，当前“基于文档的系统工程（DBSE）”、“基于模型的系统工程（MBSE）”和“基于模式的系统工程（PBSE）”都存在着不同程度的局限性：DBSE 存在文档间数据关联关系难以追溯的问题；MBSE 存在模型复杂，学习门槛过高的问题；PBSE 则存在高质量模型库建立对工程师个人经验能力要求过高的问题。

面临上述痛点，恰好是 AI 能够发挥核心价值的关键领域。基于深度学习技术及自然语言处理方法，可以通过建立知识图谱，紧密地将数据之间关联起来；基于大语言模型技术，可以直接将人类的“碳基”语言转为计算机能理解的“硅基”语言，建模的学习门槛以及对经验的依赖被大幅降低。

AI 的三驾马车：深度学习、大模型与智能体

AI4SE 作为人工智能与系统工程深度融合的产物，它将 AI 的感知、学习、推理、决策能力与系统工程的全生命周期管理理念有机融合，打破传统研发模式的桎梏，推动大飞机研发从“经验驱动”向“数据驱动”再到“智能驱动”转型。

深度学习、大模型技术、智能体是 AI 领域应用最广泛、最核心的三大工具。首先，深度学习是机器学习的重要分支，核心是通过模拟人类大脑神经网络结构，构建多层级神经网络，实现对数据的特征提取、模式识别与预测分析。与传统机器学习相比，深度学习具备更强的特征学习能力，可自动从海量数据中挖掘隐藏特征，无需人工手动设计特征，尤其适合处理图像、声音、文本、时序数据等复杂数据类型。见图 2。

其次是大型语言模型，是指拥有超大规模参数（通常在十亿个以上）、复杂计算结构的机器学习模型，是“大数据 + 大算力 + 强算法”结合的产物，凝聚了大数据内在精华的“隐式知识库”。与传统 AI 模型相比，大模型具备更强的泛化能力、理解能力与生成能力，可处理更复杂的任务，且无需针对特定任务进行大量微调，仅通过少量数据适配，就能应用于多个场景。

最后是智能体（Agent），是一个接收环境状态的信息实体，可以选择不同的动作来影响环境状态，并能够自主感知环境、自主决策、自主执行任务的智能系统。可能有人会问，豆包、DeepSeek、GPT 等是智能体吗？答案是：是又不是。准确来说，它们只是负责思考的大脑，大脑加执行工具，才构成一个完整的智能体，它能听懂你的需求、自动拆解任务，查资料，写代码，像真人助理一样帮你搞定复杂问题。比如，你要出门旅行，可以告诉智能体帮你写一份旅行攻略，智能体会拆解你的需求，从订票、路线规划、酒店入住等各个环节，帮你搞定。

从“人工梳理”到“自动建模”：AI 在核心场景的实战演练

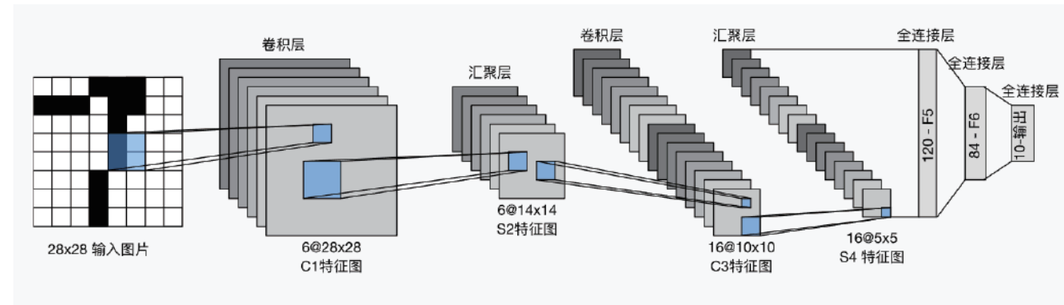
一是 AI 赋能需求管理。

对于商用飞机研制而言，需求管理是整个研制过程的“第一粒纽扣”，直接决定着后续千万个零部件设计、上百个系统集成的方向，更关系到飞行安全与适航合规的底线。飞机的需求来源繁杂，既要满足航空公司的运营经济性、旅客的乘机舒适性，也要符合民航局的适航标准，还要兼顾研发成本与进度，这些需求往往多达数百万条，涵盖气动、航电、材料等数十个学科。

在过去，需求管理虽有 DOORS 等信息化工具辅助，但核心环节仍依赖人工推进：工程师们要从海量的调研报告、合同文件、适航条款中梳理需求，逐一对接不同利益攸关方，不仅耗时耗力，更易出现需求模糊、表述歧义、条款冲突等问题，这些问题一旦遗留到后续设计环节，轻则导致设计返工、延误进度，重则影响飞行安全，造成巨大的经济损失。更棘手的是，需求之间的关联关系错综复杂，人工构建需求追溯矩阵往往需要数月时间，且易出现追溯断层。AI 的引入实现了需求管理的精准化、自动化。例如美国 SPEC INNOVATIONS 公司基于自研的自然语言处理（NLP）算法，开发出一款需求管理工具，可在对需求文档进行一系列结构化处理后，根据国际标准中对需求质量的要求，自动评估需求条目的质量，并对缺失或错误的需求条目属性进行提示，同时还建立了需求关系的追溯矩阵，实践表明，引入 AI 后，相比于传统的 DOORS 方法进行需求追溯，效率提升 85%。

二是 AI 赋能 MBSE 建模。

基于模型的系统工程（MBSE）是实现多学科协同、提升设计精度的核心手段，它通过构建数字化模型，将大飞机的复杂系统、零部件关系、接口逻辑等全部可视化，替代了传统的文档化设计，大幅提升了研发协同效率。但长期以来，MBSE 建模一直存在着效率“瓶颈”——建模过程需要工程师熟练掌握 SysML 等专业建模语言，精通复杂的建模语法与逻辑，还要具备深厚的大飞机系统设计经验。这对公司和工程师而言都是巨大的学习和时间成本。最近，美国 CELEDON SOLUTIONS 公司开发了一款基于人工智能的建模软件——Davinci，它使用大语言模型，为 MBSE 提供了一种新的建模范式。它通过自然语言中声明模型中的关系和对象，并基于 SysML2.0 使用自然语言交互的方式进行建模。它可以根据人类的自然语言指令快速进行建模、系统架构开发和分析并依靠人工智能进行系统设计的审查，无需深入学习建模软件以及计算机编程知识，为企业节省了大量成本。



▲ 图 2 | 深度学习卷积神经网络结构

AI4SE，未来已来

从豆包、DeepSeek 的爆火到 AI4SE 在商用飞机研制各环节的深度落地，人工智能正以不可逆转之势，重塑系统工程的运行模式。

从价值层面来看，AI4SE 的核心意义在于打破传统系统工程的效率瓶颈与能力边界——它以深度学习、大模型、智能体为核心工具，嵌入需求管理、建模等典型场景中，切实解决了传统模式下需求模糊、协同不畅、学习成本高昂等痛点，实现了研发效率、质量的全方位提升。

但我们必须清醒地认识到，AI4SE 目前仍存在明显的局限性，其中最突出的挑战便是 AI 的可解释性不足，这也是众多专家学者重点关注的核心问题。当前，AI 模型（尤其是深度学习、大模型）本质上是“黑箱”模型，其决策过程难以用人类可理解的逻辑进行解释。而商用飞机研发属于高安全、高可靠要求的行业，每一个决策、每一个设计参数都直接关系到飞行安全，必须具备完整的可追溯性与可解释性，才能满足适航条款的严格要求。此外，AI 模型的训练依赖海量高质量数据，而商用飞机研发中部分核心数据（如新型号试飞数据、关键零部件设计数据）积累不足，可能导致 AI 模型的泛化能力不足；同时，AI 模型的安全性、稳定性仍需长期验证，避免出现因模型偏差导致的设计失误或运维风险，这些都是 AI4SE 落地过程中需要逐步解决的问题。

正视挑战的同时，我们更要看到 AI4SE 的广阔发展前景——未来，随着 AI 技术的不断迭代与系统工程理念的持续升级，AI 在商用飞机研制过程中将逐渐走向舞台中央，并可能推动大飞机设计模式发生革命性变革。

全球通用航空市场发展态势良好

文 | 王妙香　　编辑 | 庄敏

来源：https://samchui.com/2020/10/06/airbus-corporate-jets-launches-acj-twotwenty-business-jet/

2025 年全球通用航空市场继续保持增长势头，全球通用航空器交付量连续第三年超过 4000 架，销售额连续第二年超过 300 亿美元。此外，2025 年的交付数据还实现了两个重大里程碑。首先，活塞飞机的交付价值再次创历史新高，达到 14 亿美元，同比 2024 年增长 9.1%；其次，相比 2024 年，喷气公务机的交付量增长了 11.8%，达到了自 2010 年以来的最高水平。

市场表现强劲

2026 年 2 月 18 日，美国通用航空制造商协会（GAMA）发布了《2025 年全球通用航空航空器交付和销售额报告》（以下简称《GAMA 统计报告》）。报告显示，2025 年全球通航制造商共交付 4234 架飞机，交付量连续第三年超过 4000 架。其中活塞通用飞机和电动飞机交付 1782 架，涡桨飞机交付 594 架，喷气公务机交付 854 架，连续第三年超过 3000 架，相比 2024 年同比增长 2.2%，创 10 年来新高；直升机 1004 架（活塞直升机 206 架，涡轴直升机 798 架），同比降低了 3.0%，如表 1 所示。相比 2024 年，除了涡桨飞机和直升机的交付量外，该行业其他细分市场 2025 年的交付量均有增加。

2025 年，全球通用航空器交付总价值为 357 亿美元，与 2024 年相比增长 14.6%。近 10 年来，年销售额连续第二次超过 300 亿美元。其中固定翼活塞通用飞机、涡桨通用飞机和喷气公务机的总销售额为 310 亿美元。本文重点分析固定翼通用飞机。

根据《GAMA 统计报告》，2025 年，全球固定翼通用飞机交付量 3230 架，交付量创 10 年来新高，相比 2024 年的 3162 架，增长 2.2%，交付额从 2024 年的 267 亿美元上升到 2025 年的 310 亿美元，增长 16.1%，主要增长动力来自喷气公务机的交付量增长。2025 年第四季度，制造商交付了 1027 架固定翼通用飞机，订单金额为 116.41 亿美元，包括 542 架活塞动力和电动飞机，185 架涡轮螺旋桨飞机和 300 架喷气公务机。

飞机类型	2024 年	2025 年	增长率
活塞通用飞机和电动飞机 / 架	1772	1782	0.6%
涡桨通用飞机 / 架	626	594	-5.1%
喷气公务机 / 架	764	854	11.8%
固定翼通用飞机总数 / 架	3162	3230	2.2%
固定翼通用飞机总价值 / 亿美元	267	310	16.1%
活塞直升机 / 架	210	206	-1.9%
涡轴直升机 / 架	825	798	-3.3%
直升机总数 / 架	1035	1004	-3.0%
直升机总价值 / 亿美元	51.7	54.4	5.2%

表 1 | 2025 年通用飞机交付量和交付额

各细分市场表现

在活塞通用飞机市场，2025 年，活塞飞机和电动飞机交付量达到 1782 架，占全球固定翼通用飞机交付量的 55.2%，相比 2024 年的 1772 架增加了 10 架，增长了 0.6%，次于喷气公务机的增长幅度。活塞飞机的交付价值再创历史新高，达到 14 亿美元，增长 9.1%。单发活塞飞机和电动飞机共交付 1585 架，其中，欧洲交付 339 架，美国交付单发活塞飞机 1258 架。多发活塞飞机交付 197 架，其中，欧洲交付 165 架，美国交付 32 架。

活塞类飞机市场份额增长的厂商主要是西锐公司和隶属德事隆航空的赛斯

纳飞机公司，泰克南公司和钻石公司的交付量均有不同程度的下降。西锐公司 SR22T 交付 384 架，使其成为 2025 年交付量最高的飞机。德事隆航空单发活塞动力赛斯纳 172S Skyhawk SP 飞机交付 191 架，成为第二受欢迎的飞机，排在第三位的是派珀飞机的单发 PA-27-181 Archer/Pilot 100i, 交付 188 架。西锐公司 2025 年交付 SR 系列活塞通用飞机 691 架，相比 2024 年的 630 架，增长 9.7%；德事隆航空 2025 年的活塞通用飞机交付量 322 架，相比 2024 年交付的 281 架，增加了 14.6%；意大利泰克南 2025 年交付了 216 架，2024 年交付 283 架，减少 67 架，同比降低 23.7%；钻石公司 2025 年交付了 235 架，2024 年交付了 252 架，减少 17 架，同比下降了 6.7%。

在涡桨通用飞机市场，2025 年，全球涡桨通用飞机年度交付量 594 架，占全球固定翼通用飞机交付量的 18.4%（2024 年的占比 19.8%），其占比也在逐年下降，相比 2024 年交付的 626 架，减少了 32 架，下降了 5.1%。

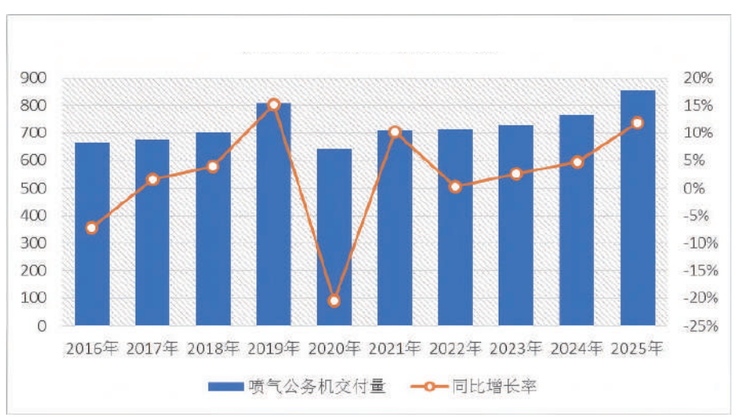
瑞士皮拉图斯公司 PC-12 交付量减少 14 架，共交付 PC-12 飞机 82 架，而 2024 年度交付 96 架，同比下降 14.6%；法国大合飞机 2025 年交付了 76 架 TBM 和 Kodiak 涡轮螺旋桨飞机，相比 2024 年交付 82 架，下降 7%；空中拖拉机公司 2025 年交付了 178 架，相比 2024 年交付的 202 架，同比减少 11.9%。此外，画眉鸟（Thrush）的 S2R 系列农用飞机的交付量从 2024 年的 27 架降低到 2025 年的 20 架，减少了 7 架等。

涡桨通用飞机交付量增加的公司主要是德事隆航空公司和美国史诗（Epic）飞机公司。德事隆航空的“空中国王”系列 2025 年共交付 46 架，较 2024 年交付 44 架增加 2 架；“空中信使”2025 年全年交付 14 架，比 2024 年的 13 架增加了 1 架；“大篷车”飞机 86 架，而 2024 年同期为 70 架，增加 16 架。美国史诗飞机公司交付了 28 架飞机，包括 21 架 E1000AX 和 1 架 E1000 GX 飞机，相比 2024 交付的 26 架，增长了 7.7%。

在喷气公务机市场，2025 年，全球喷气公务机交付 854 架，占全球固定翼通用飞机交付量的 26.43%（2024 年的占比为 24.2%），其占比略有增加。与 2024 年相比，喷气公务机的交付量增加 90 架，增长 11.8%，达到自 2010 年以来的最高水平，销售额增长了 16%。活塞飞机、涡轮螺旋桨飞机和喷气公务机在 2025 年总共创造了 310 亿美元，其中 272 亿美元来自喷气公务机。

美国德事隆航空公司、湾流宇航公司、加拿大庞巴迪公司和巴西航空工业公司的交付量分别达到 171 架、158 架、157 架和 155 架，位居前四，交付量和销售额均有所增加。德事隆航空 2025 年交付 171 架喷气公务机，高于 2024 年的 151 架，同比增长 13.2%。湾流公司 2025 年交付 158 架（22 架超中型 G280 和 136 架大型客舱）喷气公务机，较 2024 年的 136 架（18 架 G280 和 118 架大型客舱）增加 22 架，2025 年收入同比增长 17%，飞机交付额超过 100 亿美元。庞巴迪公务机 2025 年共交付 157 架公务机（71 架挑战者飞机和 86 架环球飞机），而 2024 年的交付量 146 架（73 架“环球”飞机和 73 架“挑战者”3500 和 650 飞机），同比增长 7.5%。巴航工业 2025 年共交付 155 架公务机，创下 15 年来的最高交付量，比 2024 年同比增长 19%。达索猎鹰公务机交付量从 2024 年的 31 架增长到 2025 年的 37 架，略低于原定的 40 架年度交付目标，营收从 17 亿美元增至 21 亿美元。

▼ 图 1 | 喷气公务机近 10 年交付总量及年度增长率



北美市场仍占据半壁江山

根据《GAMA 统计报告》，从通用飞机交付地区来看，2025 年北美继续占据全球通航飞机交付量主导地位，但占比份额略有降低，其他地区的占比份额略有波动。其中，拉美地区表现非常强劲，在活塞、涡桨、喷气等领域的占比份额都有不同程度上升，活塞和涡桨领域已跃居第二大市场，喷气领域也已上升到第三位。

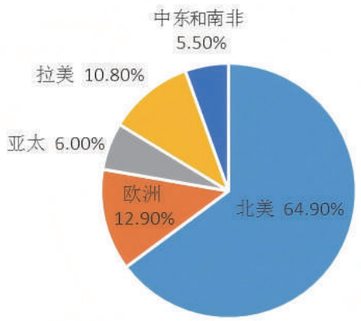
在活塞通用飞机领域，北美地区一直占主导地位，2025 年依然是最主要的市场，占比 72.6%，相比 2024 年 77.7%的份额有所降低；拉美地区已经超越欧洲和亚太地区，从第四名一举跃升为第二大市场，占比 9.0%；欧洲占比 8.3%，相比 2024 年 11.7% 的份额有所降低，达到近 10 年来的最低水平，欧洲地区连续四年超过亚太地区，成为活塞飞机领域的第三大市场。亚太地区占比为 6.9%，相比 2024 年 4.7% 的份额有所增加，是在连续四年下降后的又一次占比增加，但已降为第四大市场。

在涡桨通用飞机领域，仍然是北美地区占主导地位，2025 年占比 57.6%，相比 2024 年的 54.3% 有所增加并连续两年实现占比增加；第二大交付市场是拉丁美洲市场，占比 17.3%，相比 2024 年的 19.0% 份额有所降低，已连续第 5 年超过亚太地区；欧洲地区占比 14.0%，相比 2024 年的 15.7% 略有降低，排名第三，亚太地区近 10 年来涡桨通用飞机的采购占比越来越少。

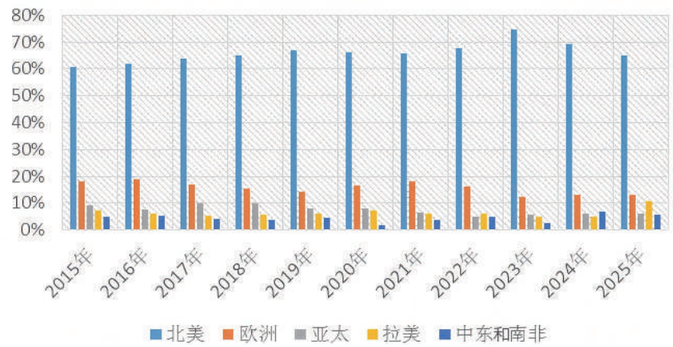
在喷气公务机领域，北美地区一直居全球首位，其次是欧洲地区。从增长趋势看，北美在全球的比重呈上升趋势，而亚太地区、拉丁美洲地区占比波动性较大。2025 年北美占全球交付量的 64.9%，相比 2024 年的 69.4% 继续下降，连续第二年下降，并低于疫情前水平；欧洲是公务机交付量的第二大市场，占比 12.9%，相比 2024 年的 13.0% 基本持平；拉美地区公务机采购占比为 10.8%，达到近 10 年来最高，相比 2024 年的 4.8% 实现大幅增长，超越中东和南非市场以及亚太地区，位居第三，并达到近 10 年来的最高份额。亚太地区占比 6%，相比 2024 年的 5.9% 略有增加，位居第四，并超过了中东和南非市场。中东和南非市场占比 5.5%，相比 2024 年 6.9% 的份额有所降低，位居第五。

未来展望

根据 GAMA 近几年发布的通航数据统计报告，自疫情之后，活塞通用飞机的交付量增长较快，是通用飞机市场表现较强劲的领域之一，2024 年开始增长势头有所减缓，2025 年保持微弱的 0.6% 的增长率，笔者预计 2026 年至 2034 年预测期内的交付量年增长率保持在 1%



▲ 图 2 | 各地区喷气公务机采购占比情况



▲ 图 3 | 喷气公务机近 10 年采购占比变化

到 3% 之间。涡桨通用飞机自疫情之后到 2023 年一直保持较快的增长趋势，但 2024 年的交付量略有下降，2025 年交付量下降 5%，根据其近 10 年的交付量变化趋势，涡桨通用飞机的交付量起伏较大，预计 2026 年至 2034 年的预测期内的年增长率保持在 -6% 到 2% 之间；喷气公务机近几年的交付量保持稳定，增长比较平稳，但 2025 年度增幅最大，可能与新机型的加速交付有关，预计 2026 年至 2034 年预测期内的交付量年增长率不超过 10%。

从通用飞机的交付地区分布来看，无论是活塞飞机、涡桨飞机还是喷气公务机，北美依然会占据全球通航飞机交付量主导地位。从增长趋势看，北美在全球喷气公务机领域的比重呈上升趋势，但 2025 年的份额开始降低，后续预估维持在这个水平；活塞飞机领域，北美地区依然占主导地位，但自 2023 年占比份额达到最高后，开始连续两年降低占比，预计后续北美依然是活塞领域的第一大市场，但份额可能还会继续下降，拉美地区 2025 年的份额反超欧洲和亚太地区，成为活塞飞机领域的第二大市场，欧洲地区连续四年超过亚太地区，位居第三，亚太地区占比在连续三年下降后，2025 年份额略有增加，位居第四，后续可能保持这个排名。涡桨飞机领域，北美地区依然占主导地位，并自 2021 年以来，北美在全球涡桨通用飞机领域的比重呈逐年上升趋势，拉丁美洲市场继 2023 年落后欧洲市场后的涡桨飞机采购量又一次反超，并又一次成为涡桨飞机领域第二大市场，拉美市场已连续五年超过亚太地区，预计后续继续保持第二的位置。

▲ 图 1 | ATR 公司的 EVO

混合动力推进系统重振支线航空

文 | 陈玉洁　　编辑 | 庄敏

当前，欧洲和北美正在进行多个混合动力推进系统的地面和飞行演示项目，以降低相关的风险。因为功率和性能要求在能达到的技术范围内，认证方面的挑战也更容易处理，大多数项目都集中在支线飞机上。支线航空的重振势头正在增强，随着今年多型混合动力推进系统将进行测试，重振支线航空的进程将全面提速。

“清洁航空”计划中的新项目

欧洲于 2022 年启动了“清洁航空”计划，主要包括三大研发领域：混合动力支线飞机（HERA）、超高效中短程飞机和氢动力飞机（HPA）。2022 ～ 2025 年，在“清洁航空”计划第一阶段，在 HERA 计划和 HPA 计划下，都启动了与支线航空相关的

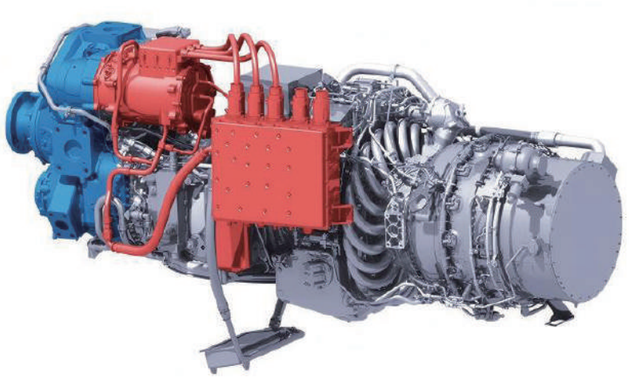
混合动力和氢能项目。

但是，业界的想法发生了转变。2025 年初，空客将其氢动力零排放客机的投入运营计划推迟到 2040 年以后，理由是相关技术和基础设施尚未准备就绪。ATR 公司也推迟了其支线涡桨飞机混合动力 Evo 的服役目标日期，因为原本计划为 Evo 研发全新发动机未能满足预期目标。

这些决定迫使“清洁航空”计划改变战略，不再执着于短期内的飞行演示，而是聚焦于提升关键技术的成熟度。

2026 年 1 月，“清洁航空”计划在“超高效支线飞机”（UERA）专项下同时启动了四个紧密相关的项目：Demetra（电气化现代高效运输支线飞机验证机）、Heracles（低排放混合电推进支线飞机概念）、Osyrys（混电支线飞机相关机载系统）和 Phares（支线段动力装置混合应用），为一个共同的飞机概念和演示提供互补的构建模块。

此外还有两个较小的快速通道项目为其提供支持：Modabat 项目负责研发可认证的电池，Power4Air 项目负责研发电力电子设备。这些项目总耗资 2.32 亿欧元，旨在为混合电推进支线飞机准备相关技术。



▲ 图 2 | Phares 项目电机与发动机集成

Phares 项目耗资 1.017 亿欧元，由普惠加拿大公司（P&WC）牵头，旨在开发并联式混合动力推进系统。该系统基于热效率提升的 PW127XT 发动机，并配备了一台来自柯林斯公司的 250 千瓦电池驱动电机，两者通过优化的齿轮箱连接，驱动一副推进效率更高、噪音更低的先进螺旋桨。P&WC 表示，地面测试计划于 2028 年底进行，该混合动力系统将替换 ATR 72 飞行验证机上的其中一台 PW127 涡桨发动机。“清洁航空”计划预计，Phares 项目将贡献预期 30% 燃油消耗减少量中的 20%。

Osyrys 项目耗资 5690 万欧元，由赛峰集团主导，将聚焦机载电力分配、热管理系统以及用于高效能源管理的航空电子设备。Demetra 和 Heracles 项目由 ATR 公司牵头。Demetra 项目耗资 5690 万欧元，在该项目下将对 ATR 72 验证机进行改装和飞行测试。该项目还将在风洞中测试先进螺旋桨、优化的短舱和机翼，并为涡轮发动机和电机开发单杆控制系统。Heracles 项目耗资 1660 万欧元，在该项目下 ATR 公司负责飞机集成设计，整合来自 Osyrys 和 Phares 项目的技术模块，并协调欧洲航空安全局参与制定混合动力飞机的法规。

这四个项目将从“清洁航空”获得总计 1.4 亿欧元（1.61 亿美元）的资金，并辅以超过 2 亿欧元的实物投入。目标是在 2030 年前达到技术成熟度 6 级，转入产品开发阶段。

支线专项

此外，ATR 公司正在协调“清洁航空”计划的支线航空专项。“清洁航空”联合执行体、ATR 及各项目合作伙伴已规划在 2028 至 2029 年进行广泛的评估，包括：PW127XT 发动机的测试将于 2028 年进行，旨在评估其在地面试验台上的性能。针对高压系统，计划于 2028 年第四季度开始运行一个包含电池的集成测试台。

针对单杆控制和能源管理系统的概念验证，计划于 2029 年第二季度运行一个系统集成测试台。将在 PW127XT 发动机上配备全权限数字发动机—螺旋桨控制系统，自动油门与新控制系统的结合将有助于降低燃油消耗。

改进后的 Ratier-Figeac 螺旋桨将于 2029 年与机翼和短舱一起进行集成风洞测试。完整的验证机计划于 2029 年第四季度首飞，以评估在飞机上集成混合电推进系统的可行性，并测试螺旋桨和集成控制系统。

在 UERA 新项目启动的同时，在由 Avio Aero 公司牵头的 Amber（混电支线应用创新验证机）项目和罗罗公司牵头的 HE-ART（支线飞机混电推进系统）项目下开发的多兆瓦混合动力系统计划于今年年底完成地面测试，以验证支线飞机并联式混合动力涡桨（e-TP）发动机的可行性。

Amber 项目正在开发一种 2 兆瓦的混合动力系统，将 GE 航空航天公司的 Catalyst 涡桨发动机与电机结合。HE-ART 项目正在演示一种 2.5 兆瓦的混合动力涡桨发动机，结合了赛峰的 Tech TP 涡桨发动机及其 500 千瓦、800 伏的 ENGINeUS 电机。HE-ART 的设计围绕机载电池能源，而 Amber 则围绕氢燃料电池。Amber 项目的目标是实现至少 50% 的混合动力化，这大大高于 P&WC 公司 Phares 项目的 12% 混合动力化水平，而后者更接近实际运营中的支线飞机的预期水平。

罗罗公司表示，HE-ART 验证机——包括涡桨、电机、齿轮箱、螺旋桨、短舱和两相热交换器——已准备好在赛峰进行地面测试。HE-ART 动力总成（含齿轮箱、短舱和六叶螺旋桨）将在之前欧洲项目用于测试 Tech TP 的设施中运行，并已升级以运行更高的功率和直径 13 英尺的螺旋桨。此外，将在罗马尼亚的国家航空航天研究所对更先进的八叶螺旋桨进行风洞测试。整个 HE-ART 项目将在今年底结束。

当“清洁航空”计划的重点转移到 Phares 和 ATR 飞行演示项目时，P&WC 已经开始为 RTX 公司计划已久的 HEP（混合电推进）飞行验证机制造硬件。目前，飞行发动机设计已接近完成，公司将在 2026 年第一季度末获得锻造零件。P&WC 公司不愿透露验证机预计何时飞行，但表示将在 2026 年向飞机方 AeroTEC 公司交付硬件。

HEP 项目旨在研发一个 2 兆瓦的混合动力系统，目标是减少 30% 的燃料消耗，它结合了一个针对巡航优化的热力发动机和一个用于提高起飞和爬升功率的电动机。

公司目前正在改进热机，以提高热效率。发动机细节尚未公开，但业界怀疑其工作循环不同于传统涡轮发动机。柯林斯提供的电机由瑞士初创公司 H55 开发的 200 千瓦时锂离子电池系统供电，额定功率为 1 兆瓦。

该配电系统的工作电压为 1200 伏，远高于实际服役中可能使用的 800 伏电压。虽然这带来了电弧风险和技术挑战，但也为未来更高功率密度的航空电气化积累了宝贵经验。为了满足安全要求，验证机必须增加一个高压配电和接线盒，以防止连接处产生电弧。高压和大容量电池也需要独特的地面充电器，该充电器由魁北克的创新车辆研究所和加拿大国家研究委员会开发，安装在两辆拖车中，充电电压

高达 1500 伏。公司称，在飞行测试的第一阶段中不会进行充电，但所有硬件都已就位，以便最终能在飞行中充电。

不同于设计全新飞机，HEP 项目选择改装成熟的 Dash 8-100 飞机，并保留了原有的齿轮箱和螺旋桨，仅替换一侧发动机。这种改装策略降低了风险，加快了验证速度，还采用了独特的单杆控制逻辑——油门行程的前半段控制热机，后半段控制电机，简化了飞行员的操作。

公司于 2023 年进行了热机和电机的独立运行测试。2024 年，在没有电池供电的情况下运行了混合动力发动机，2025 年开启了电池系统的全功率运行，并计划于 2026 年向 AeroTEC 交付硬件进行飞机改装，随后进行地面和飞行测试。第一台飞行用发动机在交付前将经过 50 小时的测试，另一台并行制造的发动机也将进行耐久性测试，以制定验证机的维护计划。

自重启 HEP 项目以来，P&WC 公司已获得了“清洁航空”计划的 Phares 项目，并与电动支线飞机初创公司 Evio Aero 合作开发其 PT6E 涡桨发动机的混合动力版本，还与 Maeve Aerospace 公司合作开发源自 HEP 动力系统的混合动力开式风扇动力装置。公司预计量产型支线飞机的混合动力化水平不会像 HEP 项目那样高达 50%，而 Phares 项目和 ATR 主导的 Demetra 飞行验证机“更接近于产品”。

尽管各项目已经取得了进展，但混合动力支线航空的实现时间表已推迟到 2030 年代中期甚至更晚。对于氢动力飞机来说更是如此。

氢能飞机项目延期

“清洁航空”计划的重心已转向下一代技术，并聚焦于氢电推进系统。空客已选定该系统作为其首选的 100 座、1000 海里航程的 ZEROe 概念飞机动力方案。“清洁航空”计划执行董事称，第一期项目证明了整体可行性，但在重量和体积方面存在巨大的性能差距。这导致计划总体目标发生了转变：到 2030 年将第二代氢电推进系统的技术成熟度提升至 4 级，而最初的目标年份是 2027 年。

“清洁航空”计划第一期下的氢能相关项目均计划于今年结束。其中包括由 MTU 航空发动机公司主导的耗资 4040 万欧元的 Herops（氢电零排放推进系统）项目，该项目旨在对基于 600 千瓦核心模块的 1.2 兆瓦燃料电池推进系统进行地面演示。由霍尼韦尔公司主导的耗资 4480 万欧元的 Newborn（下一代机载高功率燃料电池）项目旨在演示一种基于 300 千瓦核心模块的架构，该架构可扩展至 8 兆瓦。此外，由空客主导的耗资 5240 万欧元的 Fame（兆瓦级燃料电池飞机）项目专注于使用液氢的兆瓦级燃料电池推进系统，这正是 ZEROe 概念机的规划方案。

尽管空客决定缩减其 ZEROe 计划的资金，目前没有宣布飞行测试的计划，但“清洁航空”计划在 2025 年 12 月发布的第四轮项目提案征集中，仍拨出 1.01 亿欧元用于持续的氢能相关研究，以解决氢能技术目前面临的研发延期、进展放缓的问题。该专项资金将用于两项核心任务：一是验证全电动氢燃料电池飞机的集成式氢燃料系统；二是研发氢燃料电池飞机专用的先进燃料电池推进技术模块。同时，计划还将对氢燃烧推进系统与氢燃料电池推进系统展开评估，并考量两种氢动力飞机设计方案。

从最初对氢能和混合动力技术的激进时间表，到如今面对技术瓶颈与基础设施挑战时的战略收缩，行业正经历一场深刻的“现实检验”，试图通过更务实的路径推进技术验证。“清洁航空”计划的战略调整正是这一思路的体现——聚焦于提升关键技术的成熟度，为本世纪 30 年代中后期的产品化奠定坚实基础。

与此同时，行业也在重新定义合作模式。公私伙伴关系、跨国企业联盟以及初创公司的参与，正在形成一个更具韧性的创新生态。从 P&WC 与 Evio Aero 的合作，到赛峰、MTU 等企业在氢能领域的布局，各方力量正围绕共同目标协同发力。这种协作不仅加速了技术迭代，也为未来制定统一的适航标准和安全规范铺平了道路。

尽管支线航空仅占全球商业航空市场的 5%，但其作为新技术“试验田”的战略价值不容忽视。一旦混合动力或氢能源技术在支线飞机上取得成功，其经验将迅速向更广泛的航空市场推广，为整个行业的脱碳进程提供关键支撑。

▼ 图 3 | RTX 公司 Dash 8 验证机

▲ 图 4 | 氢能飞机

▲ 来源：aircraftinteriorsexpo.com

从满足功能到体验重构
——有感第 25 届德国汉堡飞机内饰展览会

文 | 董帼雄　　编辑 | 庄敏

4 月 14 日至 16 日，全球航空客舱内饰行业一年一度的盛会——第 25 届德国汉堡飞机内饰展览会（Aircraft Interiors Expo, AIX）在汉堡展览中心举行。本届展览会以“25 周年，重塑飞行体验”为主题，吸引了来自全球 30 多个国家和地区的 450 余家参展商，展览面积达到 24000 平方米，创历史之最。在为期三天的展会中，参展商展示的产品从革命性的航空座椅到沉浸式的机上娱乐系统，再到颠覆性的环保材料，全方位展示了飞机内饰领域最新的技术和成果。

航空座椅不再满足于舒适

从技术发展趋势来看，近年来全球飞机内饰行业正在经历着从功能满足到体验重构的深度转型。在绿色环保、技术迭代等多重因素的共同作用下，可持续、轻量化、智能化、空间重构、模块化定制等已成为飞机内饰行业核心发展趋势，并正深刻地重塑产业格局。在本届汉堡飞机内饰展上，航空座椅制造商们重点围绕“可持续、轻量化、舒适性、多功能性”四大方向，推出了一系列突破性产品。

在经济舱座椅产品方面，制造商通过一系列的技术创新，证明了即使在紧凑的空间里，也能实现舒适性的显著提升。柯林斯宇航在本次展会上提出了一个名为“SkyNook”的经济舱空间产品。这一创新产品巧妙地将宽体客机后舱原本被浪费的机身侧壁空间，改造成了半私密的“空中角落”。科林斯宇航为这一独立的小空间配备了可调节的座椅、小桌板和充电接口，特别适合家庭出行、带婴儿的旅客或者需要安静工作的旅客。柯林斯宇航表示，SkyNook 不需要对飞机结构进行任何重大改装，只需在现有客舱布局基础上进行简单改造即可实现，大大降低了航空公司的使用成本。

在商务舱座椅方面，此次展出的新产品更倾向于为乘客提供更加智能化、互动化的产品。作为高端航空座椅的知名生产企业，德国瑞卡罗公司在已投产的 R7 商务舱座椅平台基础上搭载了一套名为 Horizon 的座椅系统，该系统集成了 AI 驱动的语音控制系统，支持 90 多种语言的自然语言指令，乘客只需说出“把座椅调平”“打开阅读灯”等简单语句，就能完成各种操作。此外，它还配备了“Lumina Sync”智能照明系统，能够根据飞行中的日夜更替来自动调节灯光颜色和强度，此外座椅内置的传感器还能实时监测座椅的使用状态，实现预测性维护，帮助航空公司降低运营成本。

总部位于北爱尔兰的汤普森航空座椅公司长期专注于公务舱和头等舱市场，并以标志性的 Vantage 系列产品闻名于世。在这次展会上，公司带来了“VantageXL+ First”座椅概念，产品最大的亮点就是增强了社交功能。座椅之间的隔断可以灵活升降，当隔断降下时，相邻的两个座椅就变成了一个小型的社交空间，乘客可以面对面交流、用餐或者工作。这种设计满足了商务旅客在长途飞行中进行团队协作或者社交互动的需求。

在头等舱产品方面，空客在此次展会上展示的一架 A350-1000 飞机的头等舱创新性地采用 1-1-1 布局，每排只有三个套房，最大限度地保证了乘客的隐私和空间。位于客舱中央的“头等舱主人套房”专为两位同行的乘客设计，配备了可转换为双人床的沙发、双人餐桌、迷你酒吧、独立的更衣室和私人卫生间。最令人惊叹的是，由于中央套房没有实体窗户，空客采用了“虚拟全景窗户”技术，通过安装在机身外部的高清摄像头，将窗外的景色实时投射到套房内的大型弧形显示屏上，不仅解决了采光问题，还能提供比真实窗户更广阔的视野。

加拿大航空则在一架 A321XLR 窄体客机上展示了名为 Aurora Suites 的头等舱产品。这一具备全平躺功能的头等舱套房配备了高隐私门、19 英寸 4K OLED 显示屏、无线充电功能和定制化的储物空间

▲ 来源：aircraftinteriorsexpo.com

等，未来将率先在加航 A321XLR 机队上进行配置，这也意味着乘客可以在窄体客机上享受到接近于宽体客机头等舱座椅的体验，也更有助于加航窄体客机机队在跨大西洋航线和跨美洲长途航线上吸引更多高端商务客户。

轻量化设计与绿色环保

当前全球飞机客舱内饰行业面临两个主要的焦点问题。一是客舱内饰需要通过轻量化的设计来减少碳排放。客舱内饰重量约占飞机总重量的 10%，轻量化的客舱内饰设计不仅能够有效减少飞机全生命周期的碳排放，还能通过减少燃油消耗，降低航空公司的运营成本。二是客舱内饰的可持续性设计能够有效减少环保问题。根据空客公司 2019 年的统计数据，飞机平均使用寿命是 22 年，在此期间客舱内饰会进行多次整体翻新，飞机客舱翻新项目产生高达数吨的塑料被直接当作垃圾处理，这不仅是资源的浪费，更是很大的环保问题。本届展会上，制造商们围绕这两个焦点问题，也推出了不少颇具创意的产品。各大材料供应商纷纷推出了各种环保、轻量化的新材料，为航空内饰的绿色转型提供了有力支撑。

在再生材料方面，全球高端航空内饰材料供应商瑞士兰塔纺织集团（Lantal Textiles）展示了由 100% 再生聚酯纤维制成的座椅面料；爱尔兰博塔尼纺织公司（Botany Weaving Mill）推出了由再生羊毛和棉花混纺而成的飞机地毯。这些材料不仅减少了对自然资源的消耗，还降低了产品的碳排放。在生物基材料方面，竹子、亚麻、甘蔗等天然材料开始得到更广泛的利用。瑞卡罗公司正在研发由甘蔗制成的座椅靠背和由天然纤维制成的扶手，这些材料不仅可生物降解，而且重量更轻。一些公司还展示了由植物基皮革替代品制成的座椅表面，这种材料具有与真皮相似的手感和耐用性，但生产过程更加环保。

在轻量化材料方面，航空级碳纤维复合材料、蜂窝结构板材、超薄防火材料等继续得到推广应用。瑞典戴铂（Diab）集团展示了最新的热塑性复合材料，这种材料具有更高的强度重量比，同时更容易加工和回收。

在轻量化产品方面，迪尔航空（Diehl Aviation）的“生态行李舱”（Eco Bin）技术值得一提。这种完全可回收的客舱行李舱不仅提高了材料回收的可行性，还在轻量化方面有了很大改进。在可回收方面，该生态行李舱仅由聚醚酰亚胺热塑性复合材料和金属两种材料制成，这两种材料都是可回收材料。部件通过螺栓连接在一起，避免使用胶水或粘合剂，便于后续拆装和回收，这种设计能够降低使用多种材料后的回收分拣难度。生态行李舱的设计使用寿命长达 20 年，而且可以实现材料回收重新制造其他内饰部件的循环。在轻量化方面，生态行李舱设计时融入了轻量化的理念，使用更轻的部件抵消使用螺钉带来的重量增加。

此外，为了提高航空公司的客舱服务质量、提升航空公司在客运市场的竞争力，客舱内饰供应商正在根据市场需求和航空公司的要求积极进行客舱无障碍性设施的研发，本届展会展示的一些创新产品得到了业界的关注。

对于使用轮椅的乘客而言，在航空旅行中需要地面服务人员协助登机，并且不得不将轮椅进行托运，这样不仅不利于乘客的登机和下机，还增加了轮椅损坏的风险。近年来，这个问题在残疾人权利组织的反复强调下引起了广泛关注。英国 Airchair 公司是全球领先的飞机客舱专用轮椅的制造商，长期专注于航空无障碍出行。在本届展会上，公司展示了一款名为 Airchair II 的轮椅，这款轮椅专门为飞机客舱设计，能够轻松通过狭窄的过道，并且可以直接停靠在座位上，无需进行托运。目前，美国西捷航空已经订购了 22 台 Airchair II 轮椅，用于其波音 737 机队 。

迪尔航空推出了一款名为自适应用户路由系统（AURS）的产品。这套系统专门为盲人和听障乘客设计，通过数字界面、视觉提示和触觉引导，帮助他们能够独立找到卫生间、座位和紧急出口。系统还支持语音导航和手语视频通话，可为残障乘客提供全方位帮助。此前，迪尔航空就曾针对视觉障碍乘客的需求，推出过一套机上盥洗室的照明方案，通过增强照明区域的对比度和突出标志，帮助视觉障碍乘客更加方便地找到水龙头、皂液器等服务设施。同时，还在卫生间内配置了盲文说明和合成语音提示（如“您已找到冲水按钮”等）。为提升卫生间的无障碍性，迪尔航空研究了行动不便的乘客如何从轮椅转移到马桶的过程，在卫生间设计中增加了折叠扶手和一个可拆卸的吊杆。此外，迪尔航空还开发了“并联式卫生间”，当有特殊需求时，空中乘务人员可将两个卫生间之间的隔断墙折叠收起，从而为乘客和轮椅腾出更大的空间。

▼ 来源：aircraftinteriorsexpo.com

虽然在客舱内饰的可持续性和无障碍性设计及应用中会遇到各种各样的问题，但随着材料等技术的不断发展，客舱内饰市场的参与者在客舱内饰设计中可以将更多对于可持续性和无障碍性的思考转化成可以落地的方案，并充分发挥客舱内饰开发周期短、便于全生命周期设计的优势，不断完善适航规章和审定体系的建设，推出更具市场竞争力的产品，推动客舱内饰市场的发展。

▲ 来源：aircraftinteriorsexpo.com

公务机与 eVTOL 内饰

本届展会首次设立了公务机内饰专区（BizJet Interiors Zone），吸引了 Jet Aviation、Fokker Services 等多家行业领先企业参展。这反映了公务航空市场在疫情后的复苏，以及市场对高端定制化内饰的需求正在逐步恢复。

公务机内饰展区展示了各种豪华公务机内饰解决方案，从私人影院模块到豪华卧室套件，从定制化吧台到艺术化照明系统，应有尽有。总体来看，公务机内饰领域主要呈现 4 个主要特点。一是数字化体验，AI 语音控制、全息投影、沉浸式娱乐系统已成为标配。二是生物材料、绿色制造工艺等开始广泛使用。三是空间进一步优化，模块化设计进一步实现“一室多用”，提升客舱的利用率。此次展会上，汉莎技术公司和宝马集团联合研发的“The BOW”模块化窄体公务机客舱产品能够根据不同的使用需求来灵活配置客舱空间，既可以作为机上办公场所，也可以随时“切换”成休息和娱乐空间。四是客舱健康问题被进一步关注，抗菌材料、空气净化系统、智能温控等已经成为高端公务机产品的必备选项。

电动垂直起降飞行器（eVTOL）内饰也成为本届展会的一个新热点。随着城市空中交通的快速发展，各大企业开始关注 eVTOL 的内饰设计。展会上展示的 eVTOL 内饰解决方案，普遍具有轻量化、紧凑型、高安全性和高舒适性的特点，同时融入了智能化和可持续发展的理念，为未来的城市空中出行描绘了美好的蓝图。

此外，值得一提的是，在本届展会上中航客舱、航宇嘉泰等中国企业的表现可圈可点，不仅在展会上发布了一系列自主研发的新产品，还实现了海外订单的突破。

在展会上，航宇嘉泰与海南航空联合发布了可用于 A320neo 和 737MAX 的长航程经济舱座椅——JT520E。新座椅采用大座宽、大角度后倾设计，并搭载大屏机上娱乐系统。此外，公司还获得了沙特阿迪尔航空（Flyadeal）的订单，为其 10 架 A330-900 飞机选购了公司的座椅产品，成功开拓中东低成本航空市场。目前，航宇嘉泰的多款产品已经获得了中国民航局、欧洲航空安全局、美国联邦航空安全局的认证，正逐步成为全球重要的座椅生产商之一。

▲ 来源：空客

航空氢动力距离商业运营还有多远？

文 | 王翔宇　　编辑 | 庄敏

过去 10 年大推力氢涡轮动力的产品研发从高潮逐渐趋缓，针对其发展预期更加务实，而氢燃料电池动力的研发热度则依旧高涨，市场潜力有望进一步释放，氢电融合可能代表着未来一个时期航空用氢的先行方向。在多重因素的影响下，主要面向干线平台的氢涡轮动力的市场化应用延期已成必然，其对应的碳减排贡献也被大幅调减。与此同时，越来越多的市场参与者开始加大对氢燃料电池动力的研发力度，相关目标细分市场正在从通用航空向支线航空拓展。

发展路线出现重大调整

氢涡轮动力主要改变了燃气涡轮发动机的燃烧室以及燃料储存和输送部件，在零碳排放的同时可充分发挥燃气涡轮发动机大推力、长航程的优势，是“2050 年航空净零排放愿景”下商用飞行的重要动

力选项。但从目前的情况来看，围绕窄体飞机这一最大碳排放细分市场，想要在 2035 年开始实现氢涡轮动力换装替代，还存在较多的产业配套挑战和技术攻关瓶颈。

2025 年 2 月，由于技术研发进度低于预期以及基础设施建设难题的双重制约，空客公司将氢能飞机的服役时间从预期的 2035 年延后 5 ～ 10 年。同时，空客公司还削减了 ZEROe 项目 25% 的预算，并终止了部分子项目，包括使用 A380 平台进行氢燃料电池动力系统的飞行测试。空客公司在 2020 年 9 月正式推出的 ZEROe 项目，包括氢涡桨动力支线飞机（100 座级、航程约 1800 公里）、氢涡扇窄体飞机（120 ～ 200 座级，航程约 3500 公里）、氢涡扇翼身融合飞机（200 座级，航程约 3500 公里）3 种设计概念。2020 年 12 月，空客公司又公布了以 6 个 1.2 兆瓦级分布式动力单元为主要特征的氢燃料电池支线飞机构型。

2025 年 3 月，空客公司在其 2025 年峰会上更新了未来几十年的商用航空发展路线图，延期后的 ZEROe 项目从氢涡轮和氢燃料电池的并行方案收敛为以氢燃料电池为主要动力选项，改进设计后的 100 座级支线飞机将采用 4 个动力单元，每个动力单元集成 2 台兆瓦级电动机。目前，全球首型遵循航空标准的兆瓦级低温质子交换膜氢燃料电池组已进入性能优化阶段，预计氢燃料电池动力系统综合地面测试将于 2027 年进行，空客公司将结合推进试验台和氢能分配系统进行全面的系统验证，未来还有可能融合低温超导等前沿技术。

▼ 来源：空客

2025 年 2 月，欧洲航空业多家机构联合对《目标 2050》（Destination 2050）航空可持续发展战略进行了更新。与 2021 年发布的初始版本相比，氢动力技术所带来的航空碳减排占比从 20% 下降到了 6%。对应的产品类型依旧为改装氢燃料电池的现役涡桨支线飞机、全新研发的氢燃料电池动力支线飞机，以及氢动力窄体飞机（巡航阶段由氢涡轮提供动力，在具有更高功率要求的飞行阶段辅以氢燃料电池）三大类。不过除了改装氢燃料电池的预期服役时间维持在 2030 年不变外，后二者则各延后了 5 年（分别为 2035 年和 2040 年），进一步体现了氢动力从改装到新研、从支线到干线、从氢燃料电池到氢涡轮的递次发展路径。

2025 年 6 月，吉凯恩（GKN）公司大幅缩减了与氢动力相关的研究和技术活动。此前，GKN 公司在英国航空航天技术研究院（ATI）的支持下开展了多个氢动力项目研究，期望将这些研究成果应用于空客公司的未来机型。面对主要客户研发进度的放缓，除了旨在开发 1 兆瓦级氢燃料电池动力系统的 H2GEAR 项目将按原计划在 2026 年年底完成外，GKN 公司已决定终止 HyFIVE 项目中关于低温储氢罐的研发合作，同时还对 H2GEAR 的接续项目 H2FlyGHT 的研究范围进行大幅调整，放弃其中燃料电池堆和电动机元件的研发（空客公司已与德国爱尔铃克铃尔公司成立了氢燃料电池合资企业），将重点聚焦在低温冷却配电系统的成熟。

2025 年 9 月，欧盟清洁航空（Clean Aviation）计划公布了第三次项目提案征集结果，在该计划的第二阶段将投入 9.45 亿欧元资助 12 个突破性项目，预计 2026 年年初正式启动，首轮飞行测试计划于 2028 ～ 2029 年进行。相比第二次项目提案覆盖的技术领域，对标窄体飞机的超高效中短程（SMR）飞机和超高效支线（UERA）飞机得以保留，而氢动力飞机（HPA）则被飞机概念集成与影响评估（ACI&IA）项目和“快速通道”（FTA）项目所替代。此外，原属于 SMR 技术领域的氢涡轮动力研发也被取消，将不会进行氢燃料燃烧的飞行试验，不过机载低温液氢储存相关技术则在 FTA 项目技术领域中得到了继续支持。

氢燃料电池动力系统研发持续火热

氢燃料电池是把氢燃料所具有的化学能直接转换成电能的化学装置，从产品特性来看应归属于电推进领域且较锂电池具有一定的错位竞争优势（能量密度发展潜力更大），作为氢能航空的“开胃菜”，某种意义上也是未来氢涡轮动力真正打开市场的“跳板”。当前，传统航空制造商和新兴参与者均积极布局氢燃料电池动力的研发，推动其从数百千瓦级到兆瓦级的演示验证。

2025 年 3 月，联合治疗公司（United Therapeutics）宣布成功试飞了全球首架由氢燃料电池驱动的有人驾驶直升机。该直升机在罗宾逊 R44 直升机的基础上进行改造，其 90% 的动力由 2 个低温质子交换膜（LT-PEM）氢燃料电池组提供，其余则由常规电池满足瞬态大功率电力需求，该燃料电池混合动力系统的最大输出功率达到 178 千瓦。为满足燃料电池的冷却需求，R44 直升机两侧滑橇起落架上方还分别安装了类似发动机短舱的附加热管理系统。联合治疗公司表示，后续将用液氢替代高压氢气，从而进一步提升直升机的续航里程，并计划在 2028 年左右形成氢燃料电池动力机队用以开展医疗救护等任务。

2025 年 6 月，在欧盟清洁航空计划框架下，由 MTU 公司牵头的氢电零排放推进系统（HEROPS）项目完成了兆瓦级动力系统的初步设计，标志着大功率氢燃料电池技术向规模化应用迈出了关键一步。HEROPS 项目从 2024 年年初开始将持续到 2026 年年底，基于 MTU 公司飞行燃料电池（FFC）项目相关成果（实现了 600 千瓦电动机以 96% 高效率运行、500 千瓦燃料电池组测试单元开始投入使用）开展 2 ～ 4 兆瓦动力系统研发，目前正在制造 1.2 兆瓦地面验证机，最终目标是 2035 年在支线飞机平台实现商业应用。与此同时，在第 55 届巴黎航展期间，MTU 公司还与空客公司签署合作备忘录，共同研发商用航空氢燃料电池动力技术。

2025 年 9 月，德国航空航天中心（DLR）的氢燃料电池推进系统（BALIS）项目完成里程碑测试，氢燃料电池系统和电动机部件运行功率超过 1 兆瓦。该燃料电池系统实现了 12 个燃料电池模块的高效集成，每个模块又包含了 400 多个单体燃料电池。DLR 计划下一步通过制定复杂控制系统的运行策略，实现兆瓦级输出功率的长期稳定运行，再在不同高功率输出、不同持续时间情况下动态运行以模拟真实工况，未来相关技术成果可应用于船舶、地面重型车辆及航空等领域。根据

BALIS 项目的发展目标，到 21 世纪 30 年代初应实现 2 兆瓦氢燃料电池动力系统的商业化应用。

2025 年 9 月，由霍尼韦尔公司主导的航空下一代高功率燃料电池（NEWBORN）项目开始开展兆瓦级燃料电池子系统测试，低温氢燃料储存和分配系统的测试则计划在 2026 年年初进行，目标是在 2026 年年底前交付全尺寸的液氢动力系统（含电动机和螺旋桨）以进行地面测试。该燃料电池系统由 3 个电池组组成，可提供 720 ～ 750 千瓦的输出功率（高空 720 千瓦、地面 750 千瓦）。由于最大输出功率为 1 兆瓦，还需要使用锂电池额外提供 250 千瓦的功率用于起飞等高功率需求阶段。目前 300 千瓦燃料电池组的性能已被验证符合设计要求，未来还将采用变压系统来增强燃料电池组的耐久性以达到 20000 运行小时的目标。

2025 年 9 月，法国航空初创公司 Beyond Aero 宣布其正在研发的 BYA-1 公务机氢燃料电池推进系统成功完成全尺寸原型机验证，已达成技术成熟度 6 级。BYA-1 为仅由氢燃料电池系统提供动力的 8 座级公务机，最大航程为 1482 公里，巡航速度高达 667 公里 / 小时，目前正处于初步设计评审阶段，计划于 2030 年推向市场。其氢燃料电池动力系统功率为 2.4 兆瓦，将从集成在翼盒结构上方的储氢罐获取气态氢燃料，驱动安装在机身尾部的电动涵道风扇。这种设计取消了加压舱内的高压输氢管道，有效地降低了安全风险，更符合航空安全规范。此前 Beyond Aero 公司已收购美国环球氢能（Universal Hydrogen）公司的全部专利和飞行数据等资产。

前沿技术探索成效显著

尽管大型氢涡轮动力产品的市场应用预期有所延后，但相关技术的集成验证试验并未停止，技术进步正以较快的速度推动系统性能提升和应用场景拓展。各国科研机构和航空制造企业持续探索多种新构型和新概念，推动氢涡轮动力系统与氢燃料电池动力系统的协同创新，以期在未来的航空动力体系中实现更高的效率、更低的排放和更强的任务适应能力。

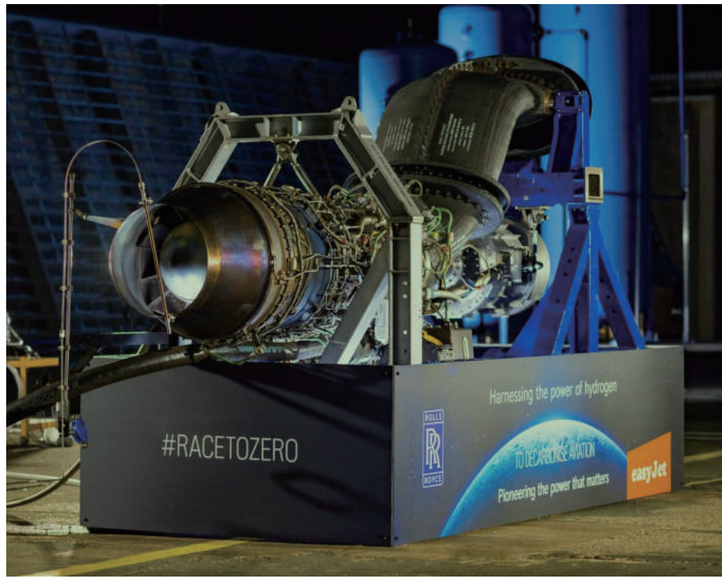
2025 年 1 月，涡轮技术（Turbotech）公司、赛峰集团和液化空气（Air Liquide）公司成功完成首台面向轻型航空市场的液氢燃气涡轮发动机地面试验，该发动机与 Air Liquide 公司开发的低温（-250 °C）液氢储存系统相连，基本达到了与常规航空燃料系统相似的能量密度，验证了发动机与飞行平台端到端集成时的所有功能，未来有望直接集成到轻型飞机上。在此基础上，Turbotech 公司进一步开发了可从常规航空燃料无缝过渡到氢燃料的燃气涡轮发动机，通过先进仿真工具提供了火焰形状和温度的关键预测并形成最优喷嘴设计，在氢燃烧测试 30 小时后仍保持稳定，2025 年 6 月已对其进行了验证。

2025 年 2 月，美国国家航空航天局（NASA）宣布资助伊利诺伊大学牵头开展可持续航空氢燃料混合动力（Hy2PASS）项目。不同于常规的混合动力系统，Hy2PASS 系统中液氢同时为燃料电池和燃气涡轮发动机提供能源。燃料电池产生的电能驱动独立的电动压气机，智能算法实时调节空气分配，一部分空气输往涡轮燃烧室，另一部分则供给燃料电池阴极。燃气涡轮依旧通过液氢燃烧驱动风扇产生推力，类似常规发动机。这一方案的核心优势在于压气机与涡轮的机械解耦、可独立调节压缩比，既消除了机械联动损耗，又实现供气参数动态优化，使发动机在高空飞行时能够优化推力输出，为新型氢动力飞行平台设计提供更多可能性。

2025 年 5 月，美国初创公司 Hinetics 展示了全球首台不依赖液氢等低温介质对元件进行冷却的超导电机，其三分之一缩比模型已具备 5 兆瓦验证机的全部关键功能，且相关研究已得到美国能源部预先研究计划局（ARPA-E）的资助。Hinetics 公司正联合 NASA 推进超导电机原型机的开发。该架构需整合液氢低温系统，通过与航空燃料电池的氢燃料供给系统深度耦合实现能效倍增。当飞机巡航时，燃料电池产生的废热可辅助维持超导体的低温环境，形成闭环能量管理。Hinetics 公司表示，该超导电机未来可满足 ATR72 级别支线飞机的动力需求，其瞬时扭矩输出较常规燃气涡轮发动机可提升 300%。

2025 年 10 月，罗罗公司公布全球首套低温液氢储存与输送系统专利，通过外挂式储氢罐与智能预热装置，实现氢燃料、常规航空燃料及混合动力的自由切换，为航空用氢提供全新解决方案。该技术的创新点包括 3 个方面：一是采用多层隔离防护储氢罐，在极限低温下保持液氢稳定；二是通过冗余管道网络与多重隔离阀设计，降低泄漏和火灾风险；三是基于发动机废热或电加热装置将氢气预热后送入燃烧室，可适配新发动机或改装现有机型。目前，罗罗公司与易捷航空公司、空客公司组成航空氢能联盟，通过共享试验平台、模拟系统及数据资源，加速航空氢动力认证与安全标准制定，预计在 2030 年前开始试飞活动。

总体来看，航空氢动力发展过程中的一些问题在 2025 年开始集中暴露，尽管技术上已展现出可行性，但距离真正的商业化应用仍面临重重挑战，受制因素包括机场氢燃料生产设施和传输基础设施缺乏、氢燃料储存与平台集成冲突、高空散热与热管理难题，以及适航认证与安全标准空白等。具体来看，中短期内氢涡轮动力仍将以集成验证为主，难以一步到位直接形成面向干支线航空的产品，其中前所未有的技术风险、经营风险乃至民众的接受风险都意味着氢涡轮动力发展只能是从小到大、步步为营。与此同时，氢燃料电池正在加速与先进电气技术融通，相比常规电池动力系统已经表现出了错位竞争潜力，除了面向低空经济需求外，还在不断向支线市场拓展，相关军事应用场景论证也日趋深入。随着航空氢动力逐渐从技术驱动向产品导向转变，有必要在常态化聚焦场景特征多元布局的基础上体现阶段性发展的侧重方向，根据氢能航空产业整体态势保持细节与节奏调整的灵活性。



▲ 来源：罗罗

▲ 王脊梁 摄

支线航空网络构建机制研究
—— 基于串飞航线视角

文 | 张晓　　编辑 | 林喆

支线航空作为连接中小城市、服务偏远地区的重要交通方式，是完善综合交通运输体系、促进区域经济协调发展、助力交通强国建设的关键环节。《新时代新征程谱写交通强国建设民航新篇章行动纲要》明确提出支持支线航空、短途运输发展的要求，为支线航空高质量发展锚定了方向、明晰了路径。《国务院办公厅关于加快场景培育和开放推动新场景大规模应用的实施意见》提出加强交通与商业、文化、旅游等消费跨界融合，为支线航空突破发展瓶颈、创新航线组织形式提供了重要的发展思路。但现阶段，我国支线航空发展仍面临多重瓶颈：市场需求规模有限且季节性波动显著，运营成本高企导致盈利能力偏弱，航线网络呈现“单枢纽依赖型”结构，支线机场间缺乏直接连接，资源配置失衡与跨主体治理协同不足等问题相互交织，严重制约了支线航空的健康可持续发展。

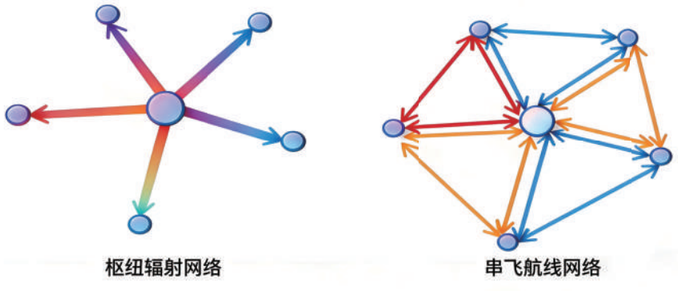
串飞航线作为创新型航线组织形式，通过单架飞机连续起降多个机场，串联起枢纽与支线机场、支线机场与支线机场间的航线联系，能够有效提升飞机利用率、降低单位运营成本、强化支线网络连通性，更能成为推动交通与文旅等消费跨界融合的重要载体，成为破解当前支线航空发展困境的可行路径。

近年来，内蒙古、甘肃、贵州、黑龙江、新疆等多地率先探索开通串飞航线，取得了积极的实践成效。基于此，本文从串飞航线视角切入，探究支线航空网络的构建机制与优化路径，以期为推动我国支线航空高质量发展、落地民航“干支通、全网联”布局提供实践参考与理论借鉴。

区域支线航空网络发展现状

我国区域支线航空网络发展的困境体现在网络结构、市场需求、资源配置、运营成本四大维度。各维度问题相互叠加，成为支线航空高质量发展的主要制约因素。

一是网络连通性与韧性不足。我国区域支线航空网络普遍呈现“单枢纽辐射状”结构特征，枢纽与支线机场间的点对点航线布局相对完善，但支线机场间缺乏直接通航链路，网络结构性失衡问题凸显。据 OAG 数据，截至 2025 年底，全国 51.90% 的机场平均每日出港班次不足 10 架次，机场运营效能偏低的问题尤为突出。单一的网络结构带来三重现实痛点：一是支线城市间通行需经枢纽二次中转，大幅增加旅客的出行时间与经济成本，尤其对于地理位置相邻但分属不同枢纽辐射范围的支线城市，航空出行的便捷性大打折扣；二是支线航线过度依托枢纽机场运行，进一步挤占枢纽的时刻资源和地面保障资源，加剧枢纽运行压力的同时，也制约了支线航线网络的进一步拓展；三是网络整体抗风险能力薄弱，一旦枢纽机场因天气、流量控制等因素出现运行受阻，整个区域支线航空网络便易陷入瘫痪，缺乏有效的备用通行通道和应急响应机制。



▲ 图 1：枢纽辐射网络与串飞航线网络对比示意图

二是市场供需匹配难度大。支线航空市场需求的复杂性是制约其发展的根本性因素。单一支线城市对的客流量有限，难以支撑独立航线的经济运营，淡季客座率偏低导致航空公司经营压力较大；旅游型支线市场季节性波动显著，旺季客流集中、淡季运力闲置，运力资源配置难以实现供需平衡，未能有效依托交通与旅游跨界融合培育稳定的航旅消费新场景；航空需求区域分布不均，不同支线城市因经济发展水平、旅游资源禀赋差异，客流规模差距较大，难以形成均衡的网络布局；出行需求类型多元化，商务出行、探亲访友、旅游观光等不同出行目的对航线频次、时刻、价格的要求差异显著，单一航线设计难以满足全场景需求。

三是运营保障能力薄弱。支线航空网络发展面临时刻、运力、保障、空域等多重资源约束。枢纽机场时刻容量趋于饱和，新开支线航线时刻获取难度大，且多为非

出港班次分布区间	机场数量	占比
0 ～ 10	137	51.90%
11 ～ 50	77	29.20%
51 ～ 100	8	3.00%
101 ～ 200	19	7.20%
201 ～ 300	10	3.80%
301 ～ 500	8	3.00%
500+	5	1.90%

▲ 表 1:2025 年我国机场日出港班次分布区间统计

高峰时段，市场竞争力不足。根据 Cirium 机队数据，我国仅有 75 个机场有驻场飞机，航空公司基于成本收益考量，缺乏在支线机场投放过夜运力的意愿，支线航线主要依赖枢纽基地飞机执飞，运营灵活性受限。部分支线机场设施陈旧、停机位紧张、服务配套不完善，难以满足串飞航线快速过站的保障需求。部分边境地区、军民合用机场空域资源紧张，审批协调周期长，延缓航线开通进程。

四是运营成本居高不下。支线航线运营面临结构性成本压力，盈利能力不足成为行业共性问题。一方面，支线航线多使用小型飞机，座位数少导致单位座公里固定成本分摊显著高于干线航线；另一方面，市场需求有限使得支线航线平均客座率低于干线，收益水平难以覆盖运营成本。此外，冬季除冰费用、备降成本等因素推高季节性运营成本，最终导致支线航班陷入亏损。

串飞航线网络构建的核心机制

针对区域支线航空网络发展的多重困境，串飞航线网络构建形成需求驱动、资源优化、协同治理、动态响应四大核心机制。各机制相互关联、协同作用，构成串飞航线网络建设的理论支撑，推动支线航空网络从碎片化向一体化升级。

需求驱动是串飞航线网络构建的逻辑起点和根本动力。串飞航线通过串联多个节点机场，突破传统点对点航线的单一服务局限，实现市场需求的聚合与创造。串飞航线能够延续枢纽—支线辐射需求，以枢纽为起点辐射多个支线城市，保障支线旅客经枢纽中转至全国乃至国际目的地，发挥轮辐网络的集散功能；串飞航线创造了支线间横向连接需求，在支线机场间建立直接航线，旅客无需返回枢纽即可实现跨支线城市通行，大幅降低出行成本，激发区域内部潜在出行需求；串飞航线有效培育旅游环线需求，串联互补性旅游资源城市，打造“一次出行、多点游览”的航空旅游产品，提升区域旅游整体吸引力，打造带动面广的航旅消费新场景，创造新增市场需求；响应支线机场到支线机场的时间敏感性需求，减少中转环节、缩短总旅行时间，满足细分市场的核心需求，适配多样化的消费体验要求。

资源优化是串飞航线网络构建的核心优势。通过整合多条航线资源，实现飞机、时刻、人力等资源的系统优化配置，从根本上改善支线航线的经济性。最大幅度提升飞机利用率，一架飞机在一个飞行波次内服务多个城市，显著提高飞机日利用率，降低单位飞行小时的固定成本分摊；提高枢纽机场时刻资源利用效率，将多条独立航线整合为一条串飞航线，大幅减少对枢纽机场时刻的占用，缓解枢纽时刻紧张压力；优化航空公司人力资源配置，飞行机组、乘务组在一个航班波次内完成多段飞行，提高人均工作效率，降低人力成本；在区域内产生网络协同效应，使支线城市从孤立的网络端点转变为相互连接的节点，为航空与文旅等跨界融合的消费新场景提供网络支撑，实现“1+1>2”的增值效应，提升整个支线网络的价值。

串飞航线网络涉及政府、机场、航空公司、旅游企业等多元主体，跨越交通、文旅、财政、空域管理等多个领域，有效的协同治理机制是网络构建的组织保障。在政府层面，推动发展改革、交通、文旅、财政等跨部门协同，在规划编制、政策制定、资金支持等方面形成合力，避免各自为政；在机场层面，促进枢纽与支线机场的协同合作，在航班时刻、地面保障、市场营销等方面加强联动，形成利益共同体；在航空公司层面，鼓励运力投放、代码共享、票价制定等方面的合作，扩大市场规模、降低运营成本；在空地衔接层面，推动航空与地面交通的无缝对接，在时刻设计、联程票务、接驳服务等方面协同发力，提升旅客出行体验。

航空市场需求具有动态性和不确定性，动态调整机制是串飞航线网络保持活力的关键，确保网络能够灵活适配市场变化、实现供需动态平衡。动态调整航班频次，根据旅游旺季、重大活动、客流波动等因素，旺季增班满足高峰需求，淡季减班控制运营成本；动态优化航线结构，基于运营数据和市场反馈，及时调整低效航线的组合形式、频次，或退出市场，同时挖掘潜力市场开辟新航线，保持网络的新陈代谢；动态调整运力配置，实施跨航线、跨季节的“候鸟式”运力部署，在不同航线间灵活调配飞机，提高资源在时间和空间上的利用效率；动态调整定价策略，运用收益管理理念实施动态定价，淡季降价刺激需求，旺季溢价平衡供需，提升整体收益水平。

国际经验借鉴与启示

美国幅员辽阔，国土规模与空间跨度与中国相近，具备支撑大型航空网络的地理基础。美国民航业起步早、市场化进程充分，历经放松管制与多轮并购整合，已形成寡头主导、高度成熟、盈利稳健的市场结构。

结合中美 TOP50 机场经停航班班次占比可以看出，两国经停航班的功能定位存在明显差异。与中国经停航班主要集中在偏远及区域型机场（如乌鲁木齐、海口、哈尔滨等经停占比超 20%）不同，美国经停航班的分布更具均衡性，并非仅服务于偏远地区。无论是腹地发达的核心枢纽（亚特兰大、达拉斯），还是区域枢纽（洛杉矶、旧金山、芝加哥），经停航班占比普遍维持在 15% ～ 31% 之间，经停航班是美国航线网络的常规组成部分，核心作用是优化运力配置、提升网络韧性，而非单纯补充偏远地区的通达性。美国机场的核心枢纽侧重中转集散，区域枢纽兼顾直飞与中转，形成“全国中枢 + 区域节点”的网络化布局。这种布局通过枢纽整合运力，提高飞机利用率和航班频次，既降低了单一航线的运营风险，又形成了难以替代的网络壁垒，提升了整体航空市场的稳定性和竞争力。

结论与建议

本文系统探究了串飞航线驱动的支线航空网络构建机制，肯定串飞航线是破解支线航空网络碎片化、资源配置低效、运营成本高企的有效模式之一，兼具轮辐网络集散优势与点对点网络直连特性，是民航“干支通、全网联”布局落地的重要载体；需求驱动、资源优化、协同治理、动态响应四大核心机制协同发力，构成搭建串飞航网的重要支撑，其中需求驱动机制深度契合航旅消费新场景的拓展，为支线航空

▲ 魏萌 摄

市场注入新的发展活力。

为推动串飞航线网络建设落地、助力支线航空高质量发展，提出以下建议：

一是转变“直飞”发展理念。要充分认识到经停或中转航班是成熟航线网络的重要组成部分。当前多数机场追求直飞占比，部分支线航线因客流不足难以维持，核心枢纽的集散功能未得到充分发挥。要合理控制核心枢纽的直飞占比，预留一定比例的经停或中转班次，通过枢纽中转覆盖更多中小城市，实现“广覆盖、高效率”的网络目标。

二是分阶段推进串飞航网建设。优先选取保障条件好、客流潜力足、旅游资源丰富的机场开展试点，验证模式可行性；成熟后由简到繁拓展网络，丰富枢纽 - 支线等多类型串飞航线；后期依托运营数据动态优化结构，创新运营模式、提升服务质量，实现网络可持续发展。

三是强化运力供给保障能力。加强与航空公司的战略对接，吸引航空公司加大在区域市场的资源配置；以有力的政策支持和完善的配套设施，激励航空公司在重点支线机场投放过夜运力；推动运力实现季节性、跨航线的动态调配，引入支线航空公司和低成本航空公司丰富供给，形成差异化竞争格局。

四是完善精准财政支持体系。设立省市联动的航线专项补贴资金池，降低航空公司市场进入与初期运营风险；实施差异化补贴政策，根据航线重要性、运营绩效、季节特征等因素动态调整补贴标准；拓展税费减免、市场培育、风险分担等多元化支持方式，建立绩效挂钩、逐年递减的补贴退出机制，推动航旅消费新场景常态化发展。

航空运输

本图由 AI 生成

燃油附加费上调背景下中国航司的增收策略

文 | 于占福　　编辑 | 林喆

2026 年 4 月 5 日起，受中东冲突连锁反应影响，中国国内航线燃油附加费正式执行新标准：800 公里以下航段每人收取 60 元，800 公里以上每人收取 120 元，分别较原标准上调 5 倍。这一调整不仅是成本冲击的直接显现，更是中国民航在“成本端几近枯竭、竞争格局持续内卷”双重压力下走到结构性拐点的信号弹。

本文聚焦成本传导机制、竞争格局压力与增收路径三个核心维度，系统梳理中国航司的战略应对方向与优先级选择，以期为行业提供决策参考。

成本传导：从波斯湾动荡到每张机票

2026 年 2 月 28 日，美以伊冲突骤然升级。布伦特原油价格当日暴涨近 13%，升至每桶 82 美元；3 月第二周周均价进一步攀升至 87.48 美元，较冲突前涨幅超 24%；3 月 23 日盘中一度触及 113 美元以上的阶段高点。整个 3 月，国际油价在 100 ～ 120 美元区间高位震荡，霍尔木兹海峡航运近乎中断所形成的地缘风险溢价，表现出异乎寻常的韧性。

国内传导链条清晰可见。航煤综合采购价从 2 月初的 5050 元 / 吨攀升至 3 月下旬的 5680 元 / 吨，涨幅约 12.5%。国际航线率先响应，各大航司陆续上调燃油附加费，涨幅普遍超 50%，部分航线翻倍，南航对飞往美国航线的经济舱附加费上调 250 元、公务舱上调 500 元。紧随其后，国内航线附加费于 4 月 5 日统一执行新标准。

从地缘冲突到国内航煤价格攀升，再到国际、国内航线附加费的双轮上调，这条传导链条清晰而完整，已真实地落在了每一位旅客的机票价格标签上。值得一提的是，附加费随航油价格联动调整的机制安排，本身也体现出监管层对航司成本压力的正视与疏导，是对行业持续经营能力的一种保护性安排。

两面夹击：燃油涨价叠加竞争白热化

油价上涨对航空公司而言，从来不只是成本问题，更是一道关于竞争格局的艰难选择题。2025 年三大航合计营收超 4900 亿元，全面超越 2019 年同期，但利润端却是另一幅图景：国航归母净利润 -17.7 亿元，东航 -16.33 亿元，南航在货运业务并表的情况下勉强实现六年来首次盈利，录得 8.57 亿元。“增量不增利”，是行业对这份成绩单最简洁的评语。

在同业竞争维度，国内干线运力过剩、票价内卷的基本盘并未改变。2024 年民航经济舱平均票价已降至约 767 元，同比下降 12.1%，比 2019 年还低 3.8%；2025 年全年均价进一步降至约 738 元，行业整体仍处于低价竞争格局，航空公司争夺旅客靠的几乎是单一的价格杠杆。

与此同时，高铁以电力为驱动，对航油价格基本免疫。在约 70 美元 / 桶的油价条件下，三大航的单座公里成本约为 0.43 ～ 0.46 元，已接近高铁二等座票价水平（约 0.46 元 / 公里），民航几乎已无向上浮动定价的空间。国内 1500 公里以内中短途航线占全国航班比例超 60%，恰恰是高铁竞争最激烈的区间（约 500 ～ 1300 公里）。截至 2025 年末，中国高铁营业里程已达 5.0 万公里，网络仍在持续延伸。随着油价突破 100 美元，民航单位成本明确翻转至高于高铁对外票价的劣势处境。

涨价，极可能将价格敏感旅客直接推向高铁；不涨价，成本上涨将直接侵蚀利润。

2026 年全国民航工作会议已明确严控低效航线运力供给、建立运价监测预警联动机制，行业层面已在推动反内卷，但供给侧的结构性调整需要时间，短期内定价困境不会自动化解。这不是一次靠熬就能过去的周期性波动，而是一次对中国民航商业模式韧性的系统性考验。

降本空间枯竭：战略重心须切换至收入端

成本端的弹性已接近耗尽。

航油成本占三大航总运营成本的 30% ～ 40%，是最大的单项刚性支出，且随油价被动联动，航司自身几乎无法控制。国航财报测算显示，油价每变动 5%，其成本随之变动约 25 亿元；南航测算则是油价每变动 10%，其成本变动约 52 亿元。飞行员薪酬、维修、机场收费、融资成本同样高度刚性，成本端可供挖掘的弹性已极为有限。

真正有弹性的出口，只剩收入端。增收的路径大致有两条：路径一，把机票本身做精，重建产品定价权与溢价空间，核心工具是品牌运价的精细化经营以及支撑多渠道分发的 NDC 技术能力；路径二，在机票之外激活相邻收入流，包括 MRO 机务维修商业化、航食地面服务商业化、常旅客计划深度货币化、旅游产品打包平台等全球已有充分实践的领域。

需要客观指出的是，中国的航空公司，尤其是头部的三大航对这两条路并非毫无布局，但整体存在“布局了但没做精”的问题，尚未形成真正显著的新增收入流。问题不在于方向没选对，而在于执行的深度和系统性不够。这一次油价危机，或许正是倒逼战略重心切换的最好窗口。

路径一：以产品精细化重建定价权

机票是高度同质化的商品、没有定价权可言，这是中国民航业内长期存在的一个误解。更准确的表述是：在没有做好产品精细化和渠道分发的情况下，机票的确呈现同质化，但这是经营结果，而非本质规律。

全球头部全服务航司已提供了清晰对标。英国航空将同一航线的经济舱细分为五档品牌运价：Economy Basic（基础经济舱）、Economy Standard（标准经济舱）、Economy Semi-Flex（半灵活经济舱）、Economy Flex（灵活经济舱）和 Economy Fully-Flex（全灵活经济舱）。五档之间的价格梯度显著——以本文所截取的跨大西洋航线的实际售价为例，Basic 票价为 912 英镑，Fully-Flex 票价高达 2202 英镑，最高档溢价幅度达 141%。

差异化的权益设计一目了然：行李方面，Basic 仅含手提行李，不包含托运额度，Standard 及以上各档均含一件 23 公斤的托运行李；选座方面，Basic 需自费选座，Standard 和 Semi-Flex 可在起飞前 24 小时内免费选座，而 Flex 和 Fully-Flex 则从购票时即可免费锁定席位；改退签方面，Basic 和 Standard 均需支付 150 英镑改签手续费且不可退票，Semi-Flex 免手续费但退票须缴 50 英镑，Flex 和 Fully-Flex 则可在起飞前全额退款且无改签手续费。这套体系的核心逻辑并非简单涨价，而是将旅客最在意的“确定性维度”逐一拆解后单独定价：行李、选座时机、改退签灵活度，每一个维度都成为可定价的独立权益单元，让旅客为“真正需要的”部分付费。

结合中国市场的消费特点，适合本

土旅客的差异化品牌运价可以考虑聚焦于确定性权益的供给，例如：准点保障类（延误超 2 小时自动改签、优先候补、延误里程补偿）；出行链路一体化类（机场接驳、快速安检、优先登机打包为“全程省心包”）；轻量化弹性退改（低价位附加有限退改权益，满足计划易变动的刚需人群，而非全额 Flex）；以及家庭与同行专属包（多人同行统一座位、儿童优先、同行合并改签）等。品牌运价的本质不是涨价，而是把旅客最害怕的不确定性、可能出现的问题与隐性支出，转化为可购买的确定性服务。

在对抗高铁方面，民航可以构建三层结构性错位策略：一是航线结构错位，聚焦 1500 公里以上长途干线，集中打造高铁无法企及的时效骨干通道；二是枢纽网络错位，放大枢纽中转的通达优势，构建“高铁做通勤、民航做跨区通达”的分工格局；三是产品时效错位，推出更丰富的“商务快线”“准点承诺”“当日往返”等高时效标签产品，用不可替代的时间价值对抗高铁的价格优势。

民航的真正护城河，从来不是票价，而是不可替代的时空覆盖能力与时效价值。

品牌运价设计得再精细，如果只能在官网呈现，无法通过 OTA 和企业商旅平台触达大量用户，溢价设计就只是纸上工程。NDC（新分销能力）体系正是解决渠道分发一致性的关键技术路径，允许航司将精细化产品完整、及时地分发至所有销售渠道，而不受制于传统 GDS 系统的标准化束缚。目前全球超 60% 的航司已部署 NDC，2024 年第一季度 NDC 订单已占参与航司间接分销总量的约 30%，欧洲航司渗透率更达 41%。中国三大航当前的局面是产品端精细化程度不足，且已有的差异化设计难以在 OTA 渠道完整呈现。

在具体推进中，还需关注监管边界的现实约束。以付费选座为例，国内付费选座需在现行监管框架内开展，当前可开放比例与国际全量开放存在差异；辅营收入的征税口径、退改规则的信息披露要求，同样是产品精细化落地过程中不可回避的合规前提。国际经验需要在中国市场的监管框架内有所取舍，核心原则是：在现实的边界之内，把每一寸空间做到极致。

路径二：机票之外，全球航司已证明了什么

全球民航业已用真实财务数据证明，机票之外确实存在可以形成显著贡献的相邻收入流。

常旅客计划的深度货币化潜力最为直观。2025 年，达美航空从与美国运通的联名信用卡合作中获收入约 82 亿美元，占达美全年运营收入的约 13%，且不随航油价格和季节性需求波动，在经济逆周期中提供最稳定的现金流支撑。美联航更在 2020 年将 MileagePlus 计划单独剥离为独立法律实体，以此抵押完成 68 亿美元融资，彼时独立估值约 220 亿美元，一度超过航空主业本身的市值。

在中国，国航凤凰知音截至 2025 年已突破 1 亿会员规模，2023 年会员购票贡献客运收入 415 亿元，占国航客运收入的 52.8%，但来自银行等第三方的里程变现收入占比极低。造成这一差距的根本原因在于结构性土壤——中国人均信用卡持有量不足 0.6 张，且持续收缩，移动支付的极度普及令信用卡公司缺乏足够的刷卡手续费空间高价购买里程，三大航碎片化地与十余家银行合作，每家分到的份额和黏性都有限，里程商业价值被系统性低估。这个现状短期内不会改变，但在现有约束框架内仍有可以深化的空间：与单一核心银行构建独家战略合作、提升年度里程销售量级；在会员商城中引入餐饮、酒旅、电商等高频非航空消费场景，使积分从“候补机票凭证”升级为日常消费货币；以及探索会员数据资产的合规商业化，均是在不改变现有监管框架前提下可以系统推进的方向。

MRO 机务维修的商业化同样值得高度重视。汉莎技术 2024 年 MRO 业务收入 74.41 亿欧元，调整后 EBIT 高达 6.35 亿欧元，服务超 800 家外部客户，外部商业服务占比超 89%，已彻底跳出“内部后勤”定位，成为独立的全球化商业实体。国内三大航庞大的机队是极强的能力孵化器，但向外商业化服务的规模与汉莎技术之间存在量级级别的差距。以国航旗下 Ameco（北京飞机维修工程有限公司）为例，2024 年盈利约人民币 4 亿元，是国航少数稳定盈利的子公司之一；东航技术、南航工程技术均积累了规模可观的工程能力，但对外商业化服务的规模和定价能力与汉莎技术的差距显著，转化商业价值的步伐急需加快。

此外，旅游打包平台（达美假期 2024 年贡献收入约 7.7 亿美元）、航食与地面服务商业化（SATS 2025 财年营收约 58 亿新加坡元）、飞行培训市场化（汉莎航空训练年收入约 7 亿美元、服务超 200 家外部航司）等方向，均属于航空运输主业的合理延伸，均有成熟的全球对标，均与中国三大航现状之间存在可观提升空间。

亚太地区是全球飞行员短缺最为严峻的区域，未来二十年的需求缺口极为庞大，三大航拥有规模可观的飞行训练中心和模拟机资源，却几乎全部停留在内部供给逻辑——这是一个与主业逻辑联动清晰、却至今未被认真商业化的增量方向。

结语

全球民航业已经证明：机票只是旅客关系的起点，不是终点。凡是穿越过油价周期并保持健康经营的头部航司，无一例外都在主营收入之外构建了多元稳健的非航收入结构，并持续将品牌运价体系与分销能力作为核心内功不断打磨。

在战略优先级的安排上，全行业可遵循清晰节奏：最优先、最快见效的，是路径一的产品与渠道能力升级——品牌运价精细化与 NDC 分销体系完善，是所有航司均可落地的内功，也是应对低价内卷最直接的武器；次优先、中期突破的，是常旅客计划的深度商业化，关键在于把流量变成可持续收入；中长期布局的，是 MRO、旅游平台、飞行培训等辅营业务的商业化，适合有资源的航司逐步构建第二增长曲线。

对中国所有客运航司而言，成本端已无退路，向收入端系统性重构、向精细化经营要效益，已是全行业共同面对的必答题。

航空运输

民航新质生产力的核心内容和主要命题

文 | 赵巍　　编辑 | 林喆

▲ 安京 摄

在全球航空业竞争格局调整与中国经济高质量发展转型的双重背景下，民航新质生产力是推动民航业从“规模扩张”向“质量跃升”转型的核心引擎。本文基于民航业高技术密集、高安全要求、强外部性、资源约束性的产业特征，剖析民航新质生产力以智能技术为支撑、数据要素为载体、绿色低碳为目标的核心内容；探讨多类型飞行活动融合下，航空安全与效率平衡、空域资源优化配置、低空经济与运输航空协同三大核心命题；结合行业实践提出针对性政策建议，提炼其对中国民航及全球航空可持续发展的战略价值，为行业高质量发展提供理论参考与实践路径。

产业特征与新质生产力的特殊要求

民航业的产业特征包括：高技术密集性。民航业涵盖航空器制造、空管系统研发、机场运营等多个核心环节，需整合航空航天、人工智能、通信技术等多领域技术成果，例如空管自动化系统的运行精度、航空器材料的技术壁垒等均处于较高水平。

高安全要求性。安全是民航业的生命线，适航认证、空管保障、运营管理等全流程均需严格遵循国际国内双重标准，对安全水平的追求具有持续性与无限性。

强外部性。民航业的发展可直接带动航空制造、航空服务等相关产业升级，拉动旅游、物流、商贸等关联领域增长，同时其碳排放、噪声污染等负外部性问题需在“双碳”目标框架下逐步破解。

资源约束性。民航业高度依赖空域、机场、航油等稀缺资源，当前中国空域分布存在区域不均衡问题，管理体系与国际标准尚未完全接轨，部分枢纽机场容量已达饱和状态，航油供应稳定性对成本控制构成直接影响，上述因素共同制约行业高质量发展进程。

而民航新质生产力的特殊要求则包含：安全与效率的平衡要求。高安全门槛决定民航领域的技术创新与模式变革需要以安全为首要前提。在多类型飞行活动融合发展的背景下，空管系统与机场运营体系面临安全管控与效率提升的双重挑战，需要建立安全与效率的动态平衡机制。

空域资源的优化配置要求。空域作为民航业的核心战略资源，需要通过制度创新与技术赋能提升利用效率，满足通用航空与低空经济发展的多元化需求。

产业链的协同创新要求。民航产业链涵盖研发、制造、运营、服务等多个环节，传统发展模式下存在行业壁垒较高、协同联动不足等问题。新质生产力发展需要打破环节壁垒，推动技术协同研发、数据共享流通与资源高效整合。

民航新质生产力的核心内容

民航新质生产力的核心内容围绕“技术创新－要素配置－发展目标”形成有机整体，以智能技术应用为基础支撑、以数据要素配置为核心载体、以绿色低碳转型为发展目标，三者相互关联、相互促进，共同推动民航业实现高质量发展。

新一代信息技术与民航业的深度融合，正持续重塑行业运营模式。例如，在机场运营领域，鄂州花湖机场“云镜”数字孪生系统实现三大业务板块的协同联动，入选国家级产业转型示范案例；上海虹桥机场 AI 滑行引导系统、浦东机场智能调度系统，有效缩短航班滑行时长，显著提升航班周转率。

在空管领域，华为技术和中兴通讯的 5G-A 通感一体试点实现 100 ～ 600 米低空覆盖，无人机探测完整度达到较高标准，探测精度维持在较高水平；民航局推动空管自动化系统云架构升级，国产新系统实现全国部署，数据处理能力与系统可靠性得到显著提升。

在航空物流与旅客服务领域，5G 定位手环优化路径规划效率，智能分拣系统降低分拣误差率至较低水平；航空公司通过 AI 预测性维护实现故障提前预警，依托大数据技术优化航班布局，旅客满意度提升至较高区间。民航局发布的智慧民航路线图等政策文件，为技术融合应用提供了制度保障。

数据是连接技术创新与市场需求的

▲ 徐英睿 摄

关键纽带。在政策层面，2025 年国家发改委《关于推动物流数据开放互联的实施方案》明确要求建立民航数据共享清单，民航局《关于民航大数据建设发展的指导意见》进一步规范数据采集标准与共享规则。

在数据安全共享方面，双公钥加密技术实现空管数据保密与高效读取的平衡，区块链技术提升数据不可篡改性至较高水平。应用场景中，空管大数据预测模型优化空域配置效率，南京航空航天大学研发的风险预警模型降低航班延误率至较低区间；航空物流平台通过实时数据共享提升货运透明度，旅客数据个性化推荐系统优化出行体验。未来，随着数据交易平台的完善与跨行业数据互联的推进，将催生数据服务新业态。

“双碳”目标背景下，绿色低碳已成为民航业发展的必然方向。可持续航空燃料（SAF）是实现低碳转型的关键抓手，中国“十四五”规划明确要求 2025 年 SAF 消费量达到预期规模，欧盟和美国均出台关联补贴政策支持 SAF 产业发展。

在技术应用层面，清华大学和中国石化关联项目已正式投产，碳排放降低幅度达到显著标准；行业内正积极探索低成本技术，推动 SAF 生产成本降至合理区间。

在机场绿色建设领域，光伏建筑一体化、污水处理循环利用等技术降低机场能耗与碳排放量，部分机场能源消耗降低至较高水平，水资源循环利用率提升至 80% 以上。新能源飞机试点项目稳步推进，为行业长远实现“碳中和”奠定基础。

民航新质生产力发展的主要命题

在民航新质生产力的发展过程中，面临一系列亟待解决的重大命题，这些命题既涉及技术创新与安全监管的平衡，也涉及制度改革与产业协同的协调，是制约民航新质生产力进一步发展的关键瓶颈。深入分析并解决这些命题，对推动民航业高质量发展具有重要意义。

一是要探索在多模式融合背景下航空安全与效率提升的动态平衡路径。在多类型飞行活动融合发展背景下，空管系统需要应对多元化飞行需求，安全管控与效率提升的压力显著叠加。空管层面，安全水平持续稳定，但仍存在极低比例的不正常事件，需要通过技术优化进一步提升空域配置精度；机场层面，部分枢纽机场容量已达饱和状态，智能技术应用需要与安全管理流程深度融合，避免数据误差与调度冲突；航司层面，AI 预测性维护技术需要建立统一验证标准，5G 监控系统需要保障数据安全水平。

民航业可以从三个方面协同探索：技术上，融合智能技术与安全监管技术，开发空管多类型飞行协同调度系统、机场安全风险智能预警平台，提升安全预警与防控能力至较高水平；制度上，完善安全监管规则，建立适配新技术的评估机制；管理上，推动空管、机场、航空公司协同联动，建立“安全－效率”一体化体系，实现动态适配。

二是要通过制度改革与技术创新协同推动空域资源优化配置及高效利用。中国空域资源总量有限，优化配置需要依托制度改革与技术创新协同发力。在制度层面，现行空域分类与 ICAO 标准存在一定差距，低空空域中监视、报告类空域占比未达理想水平，标准体系存在碎片化问题；在技术层面，空域规划缺乏动态调整能力，调度智能化水平有待提升，低空探测精度需进一步优化，制度与技术的协同联动不足，军民空域协调机制尚未完善。

民航业可以从三个方面发力：一是加快空域分类改革，参考 ICAO 七类标准，结合中国实际调整空域分类，提高监视与报告空域比例至合理水平，建立负面清单管理模式，释放技术应用空间；二是加强技术研发，推动空域动态规划、多类型飞行协同调度、低空全域探测技术发展，将创新成果转化为管理效能；三是建立军民空域协同机制，完善协调流程，设立协同管理平台，推动资源共享，实现军民层面制度与技术的深度融合。

三是要构建低空经济与航空运输协同创新体系，实现优势互补与产业融合。低空经济与运输航空存在紧密关联，需要构建系统性协同创新体系。在空域共享方面，低空空域与运输航空进近空域存在重叠；在技术标准方面，eVTOL 适航标准存在碎片化问题，无人机标准兼容性不足，制约协同发展；在基础设施方面，运输机场闲置场地改造为 eVTOL 起降场缺乏统一标准，通信设施协议兼容性不足；在商业模式方面，“中长途航空 + 短途 eVTOL”一体化服务尚未形成成熟培育机制。

本图由 AI 生成。

民航业可以从四个方面构建体系：一是建立空域共享机制，制定统一使用规则，开发动态分配与协同调度系统，实现不同飞行空域的高效避让与共享；二是统一技术标准，加快 eVTOL、无人机适航认证标准制定，推动空管、通信导航标准的互联互通；三是推动基础设施共享，制定运输机场与低空经济设施共享标准，鼓励运输机场改造为“航空 + 低空”综合枢纽；四是创新协同商业模式，培育“中长途航空 + 短途 eVTOL”“枢纽机场 + 低空物流”“航空旅游 + 低空观光”等一体化模式，推动市场协同，形成“1+1>2”的融合效应。

促进民航新质生产力发展的政策建议

基于民航新质生产力的核心内容与主要命题，结合民航业发展实践，提出以下政策建议，为民航新质生产力的发展提供制度保障与政策支持。

首先，加强智慧空管系统建设与国产化替代。智慧空管是民航新质生产力发展的重要支撑，加强智慧空管系统建设与国产化替代，不仅能够提升空管系统的运行效率与安全水平，还能增强民航业的自主可控能力。建议加快国产空管自动化系统在全国范围内的部署与应用，建立空管设备国产化评估与认证机制；加快推动空管自动化系统云架构升级，建立全国统一的空管数据云平台，提升数据处理与分析能力，为智慧空管建设提供技术支撑；加强空管人才队伍建设，实施“空管人才工程”，培养适应智慧空管需求的复合型人才，为智慧空管系统的运行与维护提供人才保障。

其次，完善民航数据要素市场化配置机制。数据要素是民航新质生产力的核心载体，完善民航数据要素市场化配置机制，能够充分释放数据要素的价值，推动民航业高质量发展。建议建立全国统一的民航数据交易平台，明确空管数据、航班动态数据、机场运营数据等核心数据的确权规则与共享机制，推动数据要素的有序流通；加强区块链与双公钥加密技术在数据安全共享中的应用，建立民航数据安全保障体系，确保数据共享的安全性与可靠性达到较高标准；推动跨行业数据互联，加强民航数据与物流数据、旅游数据、气象数据的融合应用，培育数据服务、数据分析等新产业形态；加强国际交流与合作，推动民航数据标准的国际互认，提升中国民航在国际数据治理中的话语权。

本图由 AI 生成。

第三，加大可持续航空燃料（SAF）的支持力度。SAF 是民航业绿色低碳转型的关键，加大 SAF 的支持力度，能够推动民航业实现“双碳”目标，提升国际竞争力。建议参考欧盟和美国的经验，设计阶梯式可持续航空燃料补贴政策，对生产企业给予生产补贴，对使用 SAF 的航司给予税收优惠，推动 SAF 应用成本降至合理区间；加快推动 SAF 认证标准的国际互认，推动中国标准与国际标准对接，消除国际化应用的技术壁垒；加强技术研发支持，设立 SAF 技术研发专项基金，建立产业链协同机制，推动生产企业、航油供应企业、航空公司之间的合作，形成“生产－供应－使用”一体化的产业链体系。

四是推动空域分类管理改革。空域分类管理改革是提升空域利用效率的关键，推动空域分类管理改革，能够为低空经济与通用航空发展提供空域保障。建议加快推动《空域管理条例》出台，参考 ICAO 七类空域划分标准，结合中国实际情况调整空域分类，提高监视空域与报告空域的比例至合理水平，建立负面清单管理模式；根据不同区域的人口密度、飞行需求，灵活调整低空非管控空域的底高；加强空域管理技术研发，推动空域动态规划技术、多类型飞行协同调度技术的应用，提升空域管理的智能化水平至较高区间。

五是促进低空经济与运输航空的协同发展。低空经济与运输航空的协同发展是拓展民航业发展空间的重要路径，促进二者协同发展，能够形成新的产业生态。建议国家出台产业协同指导文件，明确低空经济与运输航空在空域共享、技术标准、基础设施等方面的协同发展目标与路径；推动 eVTOL 等新型飞行器与传统客机在空域使用、飞行计划、安全监管等方面的统一标准，降低协同成本至合理水平；加强地方政府与民航局的联合试点，在深圳、苏州等低空经济示范区探索“航空 + 低空”一体化服务模式，总结试点经验并在全国推广；鼓励运输航空机场改造为“航空 + 低空”综合交通枢纽，推动机场闲置场地改造为 eVTOL 垂直起降场，实现基础设施共享；培育协同商业模式，支持航空公司与 eVTOL 运营企业合作，推出“中长途航空 + 短途 eVTOL”的一体化出行产品，满足旅客多样化出行需求。

展望未来，随着智能技术的持续突破、数据要素价值的充分释放、绿色低碳技术的广泛应用，民航新质生产力将推动中国民航业在全球航空业竞争中实现“弯道超车”。到 2030 年，智慧民航建设将取得显著成效，空管设备国产化率达到较高水平，航班正常率稳定在较高区间；SAF 消费量实现规模化增长，占航油总量的比例达到预期水平；低空经济规模突破至较大体量，成为民航业新的增长引擎。民航新质生产力不仅将提升中国民航的国际竞争力，还将为全球航空业的可持续发展提供中国方案与中国智慧。

▲ 来源：空客官网

从造船厂到全球单通道之心：空客汉堡工厂的进化之路

文 | 张蕴涵　　编辑 | 林喆

从空中俯瞰德国北部的汉堡港，一片规整庞大的工业区域映入眼帘：巨大的厂房、笔直的跑道、密布的滑行道，以及一架架等待起飞或交付的飞机。这并不是传统意义上的机场，而是一座“飞机的诞生之城”。这里，就是空客在欧洲最重要的生产基地之一——汉堡工厂。

从造船厂到航空制造厂的转变

这座工厂的故事，并不是从飞机开始的。1933 年，面对造船业的持续低迷，布洛姆与福斯船厂决定另辟蹊径，成立汉堡飞机制造有限公司（HFB），尝试进入尚处起步阶段的航空制造领域。从 Ha 135、Ha 136 等早期机型的研制，到 1937 年企业重组为专门的航空部门，再到 1939 年芬肯维尔德工厂的建成，这一系列动作逐步搭建起完整的飞机制造与测试能力，也让这片土地第一次具备了航空工业的基本雏形。

二战期间，这里一度成为重要的航空制造基地，研发生产了包括远程邮件机、水上侦察机乃至大型飞机在内的多型机种。但随着战争结束，德国航空工业被全面禁止，工厂被迫停摆，刚刚起步的产业体系几乎被清零。直到 1955 年，德国重新获得航空工业自主权，芬肯维尔德工厂才得以恢复生产，重新积累技术与制造能力。

真正的转折发生在此后的工业整合中。1969 年，梅塞施密特 - 伯尔科公司收购 HFB，并组建梅塞施密特 - 伯尔科 - 布洛姆公司（MBB），成为当时西德最大的航空企业。这一整合不仅推动了德国航空工业的整体复兴，也为其参与更大范围的国际合作创造了条件。1970 年空客工业公司成立后，MBB 作为德国的重要参与方，开始在汉堡生产 A300 机身部件，汉堡由此被纳入欧洲航空制造分工体系之中。

进入 20 世纪 80 年代，随着 A310、A320、A340 等项目推进，汉堡工厂的角色进一步强化——不仅承担关键机身结构制造，还逐渐接管了所有空客飞机的客舱内饰装配任务。这一处于制造后端的环节，直接连接客户需求与最终交付，使汉堡在空客体系中的价值不断凸显。也正是在这一阶段的积累之上，汉堡迎来了属于自己的关键机遇——A320 时代的到来。

让汉堡成为“全球单通道中心”

若论真正改变汉堡工厂命运的机型，A320 系列无疑最具代表性。1994 年，第一架在汉堡完成总装的 A321 下线。这一事件的意义不止于“多了一条产线”，而是标志着汉堡从部件制造基地，转型为整机总装制造中心。短短几年后，汉堡已经承担了全球超过一半 A320 系列飞机的交付任务。到 1999 年，这里交付了 121 架 A320 系列飞机，占当年全球交付量的 55%。这背后其实是航空业结构的变化。相比远程宽体机，单通道飞机更适合高频航线，市场需求更稳定，规模更庞大。空客准确把握了这一轮市场变化，汉堡工厂也因此逐渐成为全球最重要的单通道飞机制造中心之一。

▼ 来源：www.wired.com

汉堡工厂拥有 4 条 A320 系列总装线，分别位于 14 号厂房（2 条）、9 号厂房（1 条）以及 213/214 号厂房（1 条）。走进汉堡的总装车间，会看到一种高度标准化却又节奏紧凑的生产方式：机身分段在不同工位逐步对接，机翼、起落架、系统设备依次安装，随后进入客舱装配与测试环节。一架飞机在各工位间依次流转，按照预设节奏完成装配与测试。

在汉堡，A320 不仅在生产线上“诞生”，也在一套成熟的交付体系中完成“最后一程”。围绕总装线设置的交付中心，承担着最终测试、检查与客户验收等关键环节。配套的办公与仓储设施共同支撑整个流程高效运转，使飞机能够顺利从生产阶段过渡到实际运营阶段。

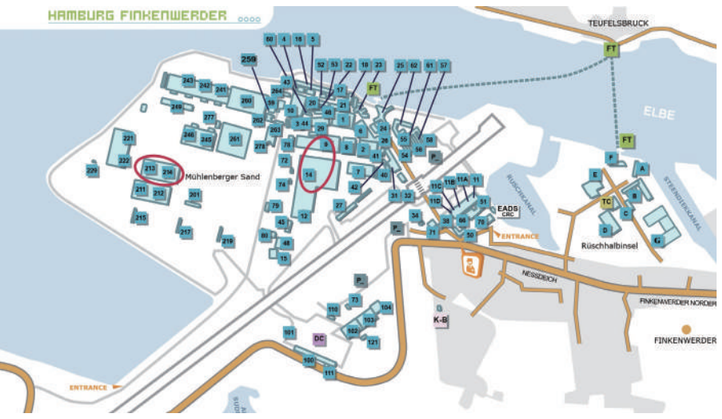
一次宏大而短暂的扩张实验

进入 21 世纪，空客押注 A380 项目，汉堡工厂也随之迎来一次前所未有的扩张。为了容纳这一“空中巨无霸”，工厂通过填海将面积从 167 万平方米扩展至 310 万平方米，大量新厂房迅速建成，包括装配大厅、涂装设施以及专门的交付中心。整个工厂仿佛被重新“放大”了一倍。

2007 年，汉堡工厂成为 A380 的客舱装配与涂装中心。同年，新加坡航空作为启动用户接收全球首架交付的 A380，并率先投入商业运营。其首创的头等舱套间、宽体全平躺商务舱以及全新设计的经济舱产品，一度成为全球航空业关注的焦点。那段时间，这里更像一座展示舞台：航空公司客户在宽敞的交付大厅接收飞机，透过高大的玻璃幕墙，便能近距离看到一架完成涂装的 A380。

但 A380 时代并未持续太久。随着航空市场转向更灵活、更高频的运营模式，超大型飞机逐渐失去优势。2019 年至 2021 年间，伴随 A380 项目走向终点，汉堡工厂也开始着手调整产能布局。那些曾为“巨无霸”准备的厂房，由此迎来新的使命。

▼ 图 | A320 总装线厂房对应位置



从“大飞机时代”走向“高效率时代”

从 2019 年前后开始，随着 A380 项目逐步谢幕，汉堡工厂启动了一场低调却深刻的产能重构。原本服务超大型飞机的装配厂房，被陆续改造用于 A320 系列生产。曾承载“巨无霸”梦想的大型设施，如今转向更高频、更高效的单通道飞机制造。其中，A321XLR 最具代表性。围绕这一远程单通道机型，空客在汉堡新建并升级了多条机身结构与设备装配线，使工厂的生产体系更具灵活性，也更贴近当前航空市场需求。

与此同时，生产方式也在持续升级。2018 年第四条 A320 总装线投产，这条由原 A380 机库改造而来的产线，大量采用自动化与数字化技术：机身、机翼等大型部件通过电动移动平台在各工位之间流转，激光系统负责快速精准定位，两台六轴机器人完成大批量钻孔与铆接作业。配合数字化管理系统，物料、工序与设备状态能够被实时追踪和协调。相比传统装配线，这里正加速向以数据驱动效率的智能化工厂转型。

值得注意的是，自动化并没有完全取代人工。在客舱安装等环节，仍然需要大量人工参与。原因在于航空公司之间的需求差异显著，而这些“个性化”，正是商业价值所在。于是，这里形成了一种典型的现代制造模式：机器人负责精度和效率，人类负责复杂性与灵活性。

从工厂到系统：汉堡的另一种进化

如今的汉堡工厂，已不再只是传统意义上的制造基地，而是高度协同运转的航空产业系统。围绕其核心生产区，逐步形成了集研发、供应、物流与装配于一体的产业网络。芬肯维尔德创新园区便是其中的典型代表。这里集聚了空客技术园区、客舱设备中心、ZAL 研究中心及多家配套企业，涵盖研发、制造、测试与人才服务等多个环节。技术机构、客舱供应商与科研单位在此紧密协作，使创新成果能够更快转化为生产能力。

此外，客户定制中心也成为一个颇具代表性的存在。这座由旧机库改造而来的设施，专门面向航空公司提供客舱规划与定制服务。客户可以在这里借助实体样板、材质展示区以及虚拟现实系统，直观体验未来机舱的整体效果，并对布局方案进行调整。从灯光色调到座椅配置，从储物细节到整体氛围，一架飞机的“个性”往往在这里逐渐成形。

▲ 图 | 空客汉堡工厂厂房布局

也正因如此，汉堡工厂不仅承担着飞机制造职能，也在一定程度上参与塑造航空公司的品牌形象与乘客的飞行体验。

目前，汉堡工厂拥有约 1.5 万名员工，是空客最重要的生产基地之一。尤其在单通道飞机领域，它已成为全球航空运输网络背后的重要支点。回顾近百年发展，从最初的造船厂转型，到融入欧洲航空工业协作体系，再到成长为全球单通道飞机制造中心，汉堡工厂的演变在某种程度上映射了整个航空工业的发展逻辑。通过持续的技术创新与战略调整，这里不仅完成了从传统制造向智能制造的升级，也逐步构建起覆盖飞机全生命周期的产业体系。其发展历程既展现了空客应对市场变化的调整能力，也体现出其在全球航空制造竞争中的长期领先地位。

产业观察

“拆飞机”行业标准正在定义

文 | 王静仪　　编辑 | 郑小芳

据统计，一架飞机的服役年限通常为 20 年左右，当前中国民航客机的使用年限普遍在 10 年以内。按业内估算，未来 10 年，中国大约有 1000 架客机面临退役。中国民航业正站在一场“飞机退役潮”的起点。

▼ 徐炳南 摄

复材回收仍是全球难题

位于成都的空中客车飞机全生命周期服务中心内，一架退役的空客 A319 静静伫立，等待之后的回收和拆解。工人会先取下还能用的部件——发动机、APU（辅助动力系统）、起落架这“三大件”价值最高，经过维修和认证后，重新装上其他飞机继续飞行。剩下的部分则被清洗、切割，回归最原始的形态：铝片做成易拉罐，蒙皮变成文创产品，回到日常生活。

空客飞机全生命周期服务中心于 2024 年 1 月正式投运，拥有 100 个停机位及两个维修机库。目前，已有 4 架飞机完成这样的“重生”。今年 4 月，第 5 架正在拆解中。

据空中客车（成都）飞机全生命周期服务有限公司商务负责人杨树栋介绍，在这里，一架飞机的 91% 都能被回收利用，超过行业平均 60%~70% 的利用率。

杨树栋介绍，单纯的潮湿并不影响飞机状态，但湿润而含盐分的空气就不行，整体来说，成都的气候对于飞机停放和存储是不错的。

真正的门槛是技术。工程师要依据每架飞机的随机档案、维修记录和部件编码，评估其潜在价值，并量身定做每架飞机的专属拆解方案。第一步是拆除可用航材进行二次利用。优先拆解发动机、起落架、APU 等高价值“三大件”，再拆里面完整度比较高的系统件或零件，比如导航和雷达。在飞行适应性检测合格后，这些可用航材可重新回到航空市场。

拆除可用航材后，就进入更难的第

▼ 来源：sichuan.scol.com.cn

二步：循环回收，让飞机彻底化整为零。这也是卡住大多数拆解企业的难点。在成都，工作人员要拆掉座椅、厕所等所有机上设施，把机舱四壁清除干净，让机身露出原材料的本来面目，随后对不同部件的材料进行识别和分类等。分类后是拆解和切割，材料按属性流入对应的二手资源回收市场。

但如何回收以碳纤维为代表的复合材料，仍是全球性的难题。这种复合材料不能简单地融合和重组，通常不得不粉碎、焚烧或填埋处理。杨树栋说，空客成都正在和合作伙伴探索复合材料回收利用的可能性，已有初步成果，还在研究更多回收方案。

▼ 图 | 空客成都的工作人员 来源：空客官网

▼ 图 | 空客成都的工作人员 来源：空客官网

要拆得好，也要能流通

发动机是一架飞机中价值最高的部件，约占整机销售价格的 60%。“现在航材短缺，二手航材市场相对处于井喷的状态，航材价格比原来要高很多，销售情况远超此前预期。”欧航航材成都公司总经理陈明洋表示。

陈明洋强调，二手航材回流市场，需要经过民航局的严格认证，安全有保证，此外，这些航材只会被用在正在服役的飞机上，不会用于新飞机。整体和二手汽车的流通逻辑类似，只是飞机的技术、认证和安全门槛更高。

陈明洋和航材打了 20 多年交道，他说，这 20 多年来，二手飞机的价格一直在上涨，现在一架带有发动机的二手飞机可以卖到 1000 万美元以上。

“极端一点的情况是，发动机还没拆下来，就已经被客户预订走了。”陈明洋说，二手航材销售情况远超预期。

拆好一架飞机，既是工程和技术的活，也是金融和销售的账。在成都，退役飞机由陈明洋负责的欧航航材买下，转交给同在空客旗下的工程团队进行拆解，而拆下来的航材回到欧航航材进行分销，构成完整的价值链条。

更为重要的是，拆解下来的二手航材如何迅速进入到区域甚至是全球的航材流通体系。能否为拆解（并完成检修、维护）的零部件找到顺畅的流通渠道，是这个生意更有门槛的环节。

在陈明洋看来，飞机拆解可分为工程能力和市场能力两部分，拆解企业销售零星二手航材不难，但当后期拆解数量增长，大量航材待流转，更考验企业的销售网络、客户服务等体系化能力，以及从无到有建设起一个全行业的二手航材流转市场。

目前国内尚缺乏成熟的二手航材交易市场，也缺少完善的估值和检测体系，整个行业仍处于早期阶段。

长期趋势乐观，短期机源不足

杨树栋表示，尽管中长期趋势乐观，但短期面临机源不足的问题。空客成都拥有年拆解 25 架飞机的能力，投运两年只拆解了 4 架飞机。其原因在于，新飞机因为供应链短缺而交付困难，航空公司无新机可用，只能适当延后老飞机退役时间。

不过，飞机到期退役是必然规律，其中大多数将走向循环利用。杨树栋希望，在服务好国内市场每年 100 架退役飞机的基础上，政策法规能允许境外飞机入华拆解，进一步打开市场空间。

据了解，国内获得飞机拆解维修许可证的企业超过 20 家，近年快速增多，位于全国多个省份。这些企业大多数本就是飞机维修厂，顺势开展拆解业务，其中又以航空公司自有的拆解厂居多，主要为了拆下二手零部件供旗下其他飞机使用。

拆解回收率是体现发展水平的重要指标，通过高效回收再利用飞机的部件和材料，可最大限度地发挥退役飞机的剩余价值。而更难的是，那些不易回收的部分如何处理，尤其关乎行业发展是否坚持绿色可持续。

杨树栋透露，民航局正酝酿出台新的行业标准，对拆解回收率提出强制标准，“成都标准”有望推广到全行业。

▲ 图 | 拆解下来的航材被分门别类码放在货架上 王静仪 摄

▲ 图 | 在空客成都，工作人员正在介绍飞机拆解的流程 王静仪 摄

一架飞机虽退役，但从经济价值到环境社会价值，堪称“全身都是宝”。随着大规模飞机退役潮的来临，这门“拆”出来的生意，正从野蛮生长走向标准与体系，成为中国航空产业链上不容忽视的一环。

专栏

人间四月天 夏秋航季如约登场

文 | 詹东新　　编辑 | 欧阳亮

作者简介

詹东新，长期供职于民航系统，中国作家协会会员、上海市作家协会理事。

先后写作、出版科普文集《飞遍天下》《人类的翅膀》；航空长篇小说三部曲《马上起飞》《飞往中国》《晨昏线》；长篇纪实文学《万里云天》《中国之翼》《苏州河的早晨》《国家名片 C919》等。

当江南的梨花绽放、塞北的积雪融尽时，2026 年民航夏秋航季如期拉开帷幕。这场为期半年的航空运力调配，勾勒出中国民航市场复苏前行的清晰脉络。

2026 年夏秋航季自 3 月 29 日起正式实施。据民航局官方发布的计划数据，本航季共有 222 家国内外航空公司参与运营，全国每周计划安排客货运航班总量达到 12.1 万班，与去年同期相比基本持平，整体运力保持稳定且有序释放。其中，国内客运航班每周计划执行 97428 班，34 家航空公司聚焦市场空白与区域发展需求，新开 434 条国内航线，通航城市拓展至 186 个，航线网络的覆盖广度与衔接密度再上新台阶。国际客运与货运航线同步稳步增长，每周航班量达 21047 班，同比上涨 1.8%，通航国家增至 86 个，新增塞浦路斯通航点，进一步织密了我国与全球各地的空中联络网，为跨境商务往来、旅游出行、货物运输搭建了更顺畅的通道。

今年夏秋航季的航班布局，深度契合区域协调发展战略，重点向西北、东北、西南等支线地区倾斜，着力完善“干支通、全网联”的航空服务体系。以往交通相对不便的西部支线城市如敦煌、和田、嘉峪关等地，与南京、杭州、武汉、成都等国内枢纽的航班班次显著加密，越来越多小众旅游目的地、偏远城镇通过空中航线融入全国出行网络，既满足了民众探亲访友、旅游休闲的出行需求，也为地方文旅产业发展、区域经济交流注入了动力。同时，国产 C919 客机在本航季投入更多干线、支线航线运营，进一步丰富了运力供给。

然而，4 月初国内航线燃油附加费迎来大幅上调，给蓬勃铺开的航空出行版图蒙上了一层成本重压的阴影。根据国内多家航空公司发布的公告，自 2026 年 4 月 5 日起，国内航线燃油附加费执行新的收费标准：800 公里（含）以下短途航段，每位旅客收取 60 元；800 公里以上长途航段，每位旅客收取 120 元，相较于调整前的收费标准，短途涨幅高达 5 倍，长途涨幅达 6 倍，调整幅度创下近年同期新高。对于普通旅客而言，出行成本的大幅增加是切实可感的。

此次燃油附加费上调，并非航空公司主观行为，而是国际油价持续波动、行业运营成本陡增下的被动应对，是民航市场转化成本传导机制的必然结果。航空燃油向来是民航业最主要的刚性运营成本，占据航空公司总运营成本的近三成，其价格波动直接影响航司的经营效益与生存发展。2026 年上半年，受全球地缘政治冲突，国际原油市场供需失衡等因素影响，国际油价持续走高，突破每吨航油调价临界值，国内航司的燃油采购成本大幅攀升，运营压力急剧加大。在航班量增加、运营成本上涨的双重压力下，通过燃油附加费将部分成本合理传导，是航空公司维持正常运营、保障飞行安全与服务质量的必要手段，也是行业应对外部市场波动的常规操作。就行业而言，这是维系可持续发展的无奈之举；于旅客而言，却实实在在加重了出行负担，尤其是高频商务旅客、家庭出游旅客等。不少旅客开始权衡短途航班与高铁的性价比，调整出行交通计划。

行业的发展终将在新的矛盾中螺旋上升，一面是扩容提质、服务升级的行业发展大势，另一面则是成本高企、压力传导的市场现实。2026 年夏秋航季的民航业，正在玩“扩张”与“负重”的平衡术。两者看似矛盾，实则构成了当下中国民航发展的真实生态。

从长远看，民航业的发展始终与民生需求、国家战略同频共振。航班网络的不断完善，让“说走就走”的出行梦想照进现实，缩小了地域间的时空距离；而成本压力的短期波动，也是行业前行路上不可忽视的风浪。当前，多家航空公司已推出早鸟优惠、联程折扣、商旅套餐等产品，尽力抵消燃油附加费上调带来的影响，民航部门也持续推动行业降本增效、优化服务，平衡行业发展与保障旅客权益等举措。

怀念程不时

文 | 张晓鸣　　编辑 | 张克农

4 月 12 日凌晨，新中国第一代飞机设计师、“运 -10”飞机副总设计师程不时先生在全家的陪伴下，听着他最喜爱的贝多芬《春天奏鸣曲》安详地闭上了双眼，享年 96 岁。

程不时生于 1930 年 4 月，湖南醴陵人。1947 年考入清华大学航空工程系。毕业后，先后在重工业部设计处、二机部四局生产处、沈阳 112 厂等单位工作，历任设计员、主管工程师、总体组组长。1971 年，调入“708 工程”设计组，后在上海飞机设计研究所工作，先后担任总体组副组长、室主任、副总设计师、科技委副主任等职务。曾担任“歼教 -1”总体设计师，主持“初教 -6”等飞机总体设计，担任“运 -10”飞机副总设计师及总体设计负责人、“运 -12”飞机适航审定委员兼技术审定组组长。

程不时是新中国第一代飞机设计师的优秀代表。七十余载矢志航空报国，永不放弃，他的名字和老一辈航空人的精神，将永远镌刻在大飞机事业的丰碑上。笔者和数位同事曾经有缘多次采访程不时。读懂程老，也就读懂了中国飞机发展史，读懂了永不放弃的中国人。

▼ 陈宇辉 摄

生不逢时，生逢其时

有人说，程不时“生不逢时”——如果当年“运 -10”没停下来，他个人的成就也许更加辉煌。

对此，程不时表示，父亲给他取名“不时”，是希望他不去赶时髦，老老实实做实事，更要勇于创新、开拓。而自己作为一名飞机设计师是“生逢其时”，赶上了中国航空事业发展的好时代，并为此作出贡献。

程不时少年时代恰逢山河破碎。日军的战机在华夏上空肆虐，炸弹撕碎城市的安宁，逃难路上的满目疮痍，在他幼小的心灵里刻下深深的烙印。“为什么我们没有自己的飞机保卫天空？”这个念头，成为他一生航空报国的初心。

1947 年，他毅然报考清华大学航空系，即便系主任坦言“航空专业就业难”，劝他转系，他也未曾动摇——这份志向生于民族危难之际，早已成为刻入骨髓的信念。1951 年，刚毕业的程不时赶上新中国航空工业初创的浪潮，从此开启了长达七十年的飞机设计生涯。

1956 年，航空工业局在沈阳成立“第一飞机设计室”，主任是科班出身的徐舜寿，程不时担任总体设计组组长，当时他只有 26 岁，设计组的平均年龄仅为 22 岁。1958 年，“歼教 -1”首飞成功。这是中国自行设计和制造的第一架喷气式飞机，也标志着中国的自主设计能力进入喷气式时代。

谈及为何自己的重心从军用转向民用，程不时说：“上世纪 60 年代，周总理出国，只能向巴基斯坦借飞机，中国航空业离世界太远。我们明白不是某个人落后，而是国家、民族落后了。”

20 世纪 70 年，国家启动“708 工程”，代号“运 -10”的大型喷气客机项目正式立项，41 岁的程不时被任命为副总设计师，来到了黄浦江畔，扛起了这一关乎国家航空尊严的重任。

程不时有段描述，情景再现了奋斗的日子：20 世纪 70 年代，一群年轻人总是昼伏夜出，每晚 12 点到次日清晨 6 点，他们与上海最大的一台计算机共同运作。炙夏时节，龙华机场草地深处，大家用报纸裹住小臂，防蚊更防汗水滴落在图纸上。他们眼前所见、心里所念，是中国第一架拥有自主知识产权的民用客机“运 -10”。

十年磨一剑，1980 年 9 月 26 日，在上海大场机场，“运 -10”飞机昂首起飞，直冲云霄，首飞圆满成功。这架国产四发喷气式客机，是继美苏欧之后，世界上第四个能自主研制大型喷气客机的国家的标志性成果。它最大起飞重量 110 吨，航程超 8000 公里，能搭载 150 名乘客，先后七次飞抵海拔 3500 多米的拉萨，成为当时唯一能飞上世界屋脊的国产大飞机。首飞成功的消息传来，举国振奋，远在海外的华人华侨热泪盈眶，美国波音公司也发来贺电。

程不时曾乘坐“运 -10”飞机从上海转场至成都。途中，他从舷窗向外看，长江犹如一条蜿蜒的巨龙摆动。“如果没有长江，就不会孕育流域的文明和繁荣。正如中国的产业，如果没有航空产业的打造，就不会有中国工业发展的黄金龙骨，显示不出我们民族的气派和对全世界民族的贡献。”

永不放弃，薪继火传

实现大飞机梦，绝不是坦途。“运 -10”倾注了程不时等一代航空人的青春年华，然而，它却由于种种原因中途搁浅了。

在中国商飞总装基地摆放着一架“运 -10”飞机，虽然外表依然没变，但内部的设备已经都被拆除，它只剩下了一个空荡荡的身躯，就像一个年迈的老人，安静地注视着生龙活虎的晚辈。在他的身边坐落着一尊雕塑，上面刻着四个字：“永不放弃”。

“‘永不放弃’四个字，不是不放弃‘运 -10’，而是不放弃我国自主设计民航客机，发展本国工业体系的道路。”程不时说，“遭遇‘运 -10’这样的挫折，我感到无奈。但是前进路上我们不能害怕困难。经过‘运 -10’项目的洗礼，我始终相信我们有能力研制大飞机。”

最艰难的时刻，仍然是对工作的热情，以及对梦想的追逐支撑着他，让程

不时充满斗志。他仍然心甘情愿地做逐梦路上的一分子，哪怕只是一块铺路石。

甚至在退休后，为了让大飞机项目重新启动，程不时每天要花十几个小时撰写对我国自主发展大飞机的意见。有时，写到中午，饿了，他就跑到街上买两个包子吃；累了，就在沙发前面的空地上打地铺躺一会。其间，他还参加了香山科学会议、全国经济界讨论会，对“中国如何走出大飞机的路”陈述他的意见。

2007 年，经过长期的论证，我国大型飞机重大科技专项正式立项。十年磨一剑，2017 年 5 月 5 日，C919 首飞现场，作为专家组的成员，时年 87 岁的程不时成为仪式上最年长的出席者。

当看着 C919 推上油门，在跑道加速，轻盈离地，昂首飞上天空时，他的眼里充满泪水，喉头哽塞。他极力控制着颤抖的声音，大声地说：“我们国家多少人为 C919 的腾飞努力了几十年，终于走到了这一步！这是一个了不起的胜利，一个非常重要的成就！”

在程不时看来，民机制造领域，过去曾存在两条岔路：一条是闭关锁国，独自发展；一条是崇洋媚外，抱国外的大腿。而 C919 走出了一条自主创新与全球合作结合的路。

程不时说：“过去中国长期处于封闭状态，所以形成了一个惯性思维，干什么事都要从金字塔的底端做起，老觉得没有下面的砖，怎么能建高楼？其实世界已经形成了一个开放的市场。现在不是要从砖瓦做起，而是要占领金字塔的顶端，顶端是飞机的总体集成。C919 的主制造商是中国商飞，最重要的思路是要拿住制高点。”

一项伟大的事业往往需要一代人，甚至几代人砥砺前行。

“我们今天仍然应该敬佩詹天佑、茅以升、徐舜寿，他们到国外学习先进技术，目的是用来振兴自己的国家民族，并在这项事业中万死不辞。他们在留学过程中，拒绝了国外的各种诱惑；在遇到挫折时，也没有愤而抛弃自己的国家，而是和国家一起共患难，报国之心从未降温。”程不时说，“21 世纪中国航空产业的振兴，需要一批真正用科学思想武装起来的、充满朝气的、生气勃勃的人才，他们一定会是时代的主流。”

学霸出圈，艺术相伴

在生命中的最后几年，程老的不平凡人生，由于在《开讲啦》《出彩中国人》《朗读者》等多个节目中出现而更多地为人所知，年轻人亲切地叫他“清华学霸爷爷”，向他表达敬佩之情。

“我每天会上两个小时的网。”程老说，“我也看到了网友们对清华校友合唱团演唱《我爱你中国》的评价，有这么大的反响很意外，也很高兴。我觉得，我和其他头发花白的老专家之所以能成为‘网红’，是因为国家真的进入了尊重科学、尊重知识分子的时代。”

而在程老之前的采访中，笔者和同事们对他的第一印象就是：低调，但是有腔调。

程不时的家，是静安区的一处公房。

房子修建于上世纪 80 年代，已经有些年头，老化的墙纸快要看不见最初的底色，斑驳的地板踩上去会发出吱吱的响声。

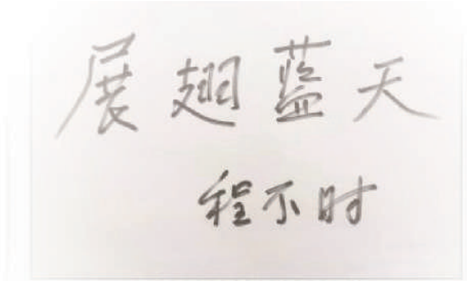
进门就是厨房，拥挤显而易见，灶台上放着烧得变色的水壶和铁锅，搓衣板立在墙根，洗碗池也同样是洗脸池、洗衣池。朝北的一间小屋被他改造后，兼具客厅和书房的功能，木凳、沙发椅、靠椅分开摆放，静静地等待客人的到来。

今天，无论用如何平常的眼光去看，程老的住房环境都还是简陋和逼仄的。

在这样一个看起来有些杂乱的老屋里，每个人第一次看见程不时的样子，都足够让人吃惊。他显然是个“讲究”的人。会见客人，满头华发的他精心打扮，白衬衫搭配着黑色背带西裤，脚上穿着黑皮鞋，举手投足间都是绅士风范。同行的女同事看到，连声发出“好帅”的赞叹。交谈中，尽管已是高龄，程老精神健旺，风采奕奕，说起话来紧言密语。

除了工作，程不时有丰富的业余生活。科技和艺术是他生活的两条平行线，一个是正业，一个是爱好，两条独立的线互相烘托。

从小喜爱音乐与文学的程不时，从进入清华大学开始就与小提琴为伴，大学毕业时的程不时已经成为清华大学管弦乐队的指挥，指挥过莫扎特交响曲和西方序曲，以及不少中国的管弦乐作品的演出。之后，紧张的飞机设计工作中，



音乐一直陪伴着这位不断迸发创作灵感的业余作曲家，自创自演的音乐作品鼓舞着当时热火朝天的生产建设。

程不时喜欢巴赫、亨德尔、海顿、莫扎特等人的小提琴奏鸣曲和协奏曲，最常练习的，是贝多芬的《D 大调小提琴协奏曲》。“贝多芬是个硬汉，我很喜欢他那种大调风格带男子气的庄重，不怕痛苦，直面艰难险阻。”

程不时说：“飞机设计是我一生的事业，音乐是我一生的爱好。”程不时建议年轻人要开发右脑，用艺术陶冶自己，不断开阔视野和开拓新的思维方式，这样左右脑同时开发，做学问才会事半功倍。

早在 20 多年前，程不时在《文汇报》科技文摘开设专栏，多次撰写科普稿件。他在《文汇报》上刊登的《21 世纪航空技术展望》《从 36 米到洲际飞行——世界百年航空回顾与展望》《是“通才”而不是“专才”——如何做好一名飞机设计师》等文章，启迪了不少青年人投身航空事业。

如今，程不时先生虽已离去，但他的精神永远照亮着中国航空的前行之路。在缅怀他的人们心中，他依然生活在他那个独有的精神家园里，那里有世界上一切最灵动的人物，容得下他将要设计的世界上最大最快的飞机起降翱翔，也容得下他气定神闲地画一幅油画、拉一首小提琴曲……

▲ 来源：www.aviagesystems.com

边飞边发电！

飞机电源系统原来是这样工作的

文 | 晴天　　编辑 | 张克农

今天，飞机已经成为我们日常生活中很常见的交通工具。但乘坐飞机的时候，你是否想过，万米高空并没有陆地上的电网，飞机在高空飞行的时候，舱内不但能灯火通明，还能保持舒适的温度，甚至我们还能在机舱内看电影听音乐，一些飞机的座椅上还会出现 USB 充电接口。那么飞机的导航仪器、飞行控制系统、客舱照明、空调系统等使用的电究竟是从哪里来的？其实答案并不复杂，飞机自己内部有个“深藏不露”的移动发电站，可以实现一边飞行一边发电。

通常来说，飞机的供电系统主要由三大部分组成：主电源、辅助电源和应急电源。它们共同协作，确保飞机在任何情况下都能获得稳定、可靠的电力供应。这篇文章我们首先来说说飞机上的主电源。

机械能转化为电能 发电机与发动机相连

每架民航客机都拥有大推力、大功率发动机。从某种意义上说，发动机就是飞机的心脏。发动机内部的叶片以超高速转动产生超高温。一边是每分钟上万转的疯狂转动，一边是近两千摄氏度的高温灼烧。发动机前部的风扇叶片吸入大量的空气， 中间的压气机叶片把空气层层压缩 ，后部的涡轮叶片被高温燃气吹动，以每分钟上万转的高速带动整台发动机持续运转，为飞机飞行提供强有力的推动力。

鲜为人知的是，高速旋转的涡轮叶片还连接着 1 ～ 2 台小型发电机，那就是飞机上的主电源所在，这类的发电机通常位于发动机附件齿轮箱（AGB）上或通过恒速传动装置（CSD）与发动机连接。飞机的发电机内部装有磁铁和线圈，在涡轮叶片的高速带动下，线圈不断切割磁场产生电磁感应，从而源源不断地产生电能。而这些电力，正是飞机上各类用电设备的主要能源来源。

飞机的主电源的发电原理，就跟小时候玩的手摇发电机一模一样，把机械能变成电能，只不过飞机的“手”，是每分钟上万转的高温高速涡轮。由于发电机与飞机发动机直接相连，只要发动机正常运转，就能够持续提供电力，这就是一边飞行一边发电的秘密所在。

耐受各种极限环境 与众不同的轻便发电机

飞机上的发电机和工业上普通发电机有显著不同，它是为航空极端环境量

▼ 余创 摄

身定制的。可以耐受零下 55 摄氏度的低温和 125 摄氏度的高温，还能承受发动机剧烈振动与起降冲击，也可以忍受万米高空的低气压和低氧环境。飞机发电机还很轻盈，主要材料有铁钴钒（Fe-Co-V）合金、钛合金（如 TC4、Ti-6Al-4V）、高温合金（如镍基单晶合金）等，波音 737、空客 A320 发电机主体只有 17 公斤，波音 787、空客 A350 的发电机主体也只有 20 公斤到 28 公斤之间，相当于一个普通行李箱的重量。

可以预见的是，随着材料科学和电子技术的不断进步，未来的飞机发电机还将更加高效、轻便、可靠，通过新型材料和最新技术的运用，会继续提高发电效率，减小体积，减轻重量。

有意思的是，飞机供电系统的电压和频率与民用市电并不相同。民用市电通常为 220 伏、50 赫兹，而飞机上采用的是 115 伏、400 赫兹的交流电。为什么会不一样呢？

原来之所以采用 115 伏、400 赫兹交流电，主要有两个原因，其一是减轻发动机重量和缩小设备体积，其二是确保飞机安全。

当频率从 50 赫兹提升到 400 赫兹，变压器、发电机等电磁设备的铁芯可以做得更小、更轻；而 115 伏的电压在高空、低气压、潮湿环境下也更安全。因为在高空空气稀薄、气压低的环境里，电压越高，越容易击穿空气形成电弧，也就是电线之间、插头附近凭空打出电火花，轻则干扰设备，重则引发火灾、短路。

此外，当高空机舱内外气压低、空气绝缘性能变差，再加上飞机线路密集、振动大，电压越高越容易出现绝缘击穿、电流泄漏的情况，也就是漏电。而飞机采用 115 伏低压供电，能有效降低绝缘层被击穿的概率，减少线路老化、磨损带来的漏电风险，同时又能满足机载设备（雷达、仪表、空调、照明等）的功率需求，传输损耗也可控，并能保障机载设备和人员安全。

▼ 陶冉 摄

按照需求调节发电 绝对安全的智能发电机

今天，民航客机普遍配备的是综合驱动发电机（IDG），也就是常说的“智能发电机”。它自带恒速传动装置，不管飞机发动机转速忽快忽慢（起飞、爬升、巡航、下降），它都能自动调节转速，把输出稳定在 400 赫兹所需的转速。内部的交流发电机在恒速控制下，也可以稳定输出 115 伏三相交流电，给全机供电。就如同一个精密的机载稳压器，时刻保障机载用电设备安全、可靠运行。其可用总寿命能达到 30000 ～ 40000 飞行小时。

此外，我们乘坐的普通民航客机一般有 2 台发动机，会连接 4 台发电机。但例如波音 747、空客 A380 等机型有四个发动机，就会拥有 6 ～ 7 台发电机。飞机上的每一台发电机都是独立工作的，但它们又能互相配合，这是为了绝对安全。正常飞行时，多台发电机会并联在一起，共同给飞机供电，保证电压稳定。但是一旦某台发电机出现故障，系统会立刻把它隔离断开，不让它拖累整个飞机上的“小电网”，剩下的几台发电机会继续合力支撑全机的用电。可以说，飞机的发电系统既高效又可靠，默默为每一次飞行保驾护航。

据测算，波音 737 和空客 A320 等窄体机飞行两个小时可以发出近 300 度电，而波音 787 这种宽体机飞行两个小时的发电量可以达到 800 度，足够普通家庭用上几个月。所以飞行主电源的供电量是十分充裕的。国产大飞机 C919 的发电机发电能力略超同级的波音和空客机型，两小时发电量可以达到 320 度，完全可满足干线运营需求。

> 飞机发电机的市场很庞大，根据 2025 年发布的产业分析报告，2025 年中国飞机发电机市场规模达 139.03 亿元，全球市场规模为 462.36 亿元。

飞机上用不完的电，不会被存起来，也不会被浪费，而是直接“少发一点”。飞机供电系统采用的是按需调节的模式，用多少电就发多少电。可以将飞机发电机发电想象为“骑自行车”，当道路平坦、天晴无风时，用电不大，就不用使劲蹬自行车；当上坡和逆风时，用电量就增多，此时就需要我们用力蹬自行车。

飞机发电机的市场很庞大，根据 2025 年发布的产业分析报告，2025 年中国飞机发电机市场规模达 139.03 亿元，全球市场规模为 462.36 亿元。目前全球飞机发电机市场中前四均为欧美企业，总市场份额合计达到 60%，其中法国的赛峰电气份额最高，稳居第一。而中国飞机发电机产业正从“配套跟随”迈向全球第一梯队。其中中航工业西安庆安集团（中航庆安）是国内最大、综合实力最强的航空电源和发电机供应商，代表了当前国产机载电源的最高水平。

征战 AG600 水上首飞的日子（之三）

文 | 汪亚卫　　编辑 | 张克农

发起最后的冲刺

2018 年 8 月，AG600 转场荆门前的准备工作大部分已经完成，进入了飞机转场之前的最后试飞准备阶段。

由于荆门樟河机场的跑道长度比珠海金湾机场的短，樟河机场为完成 AG600 的水上首飞，刚刚进行了改造升级，机场的通信导航设备还处于磨合阶段，所以项目指挥部决定将飞机水上首飞前的所有地面飞行试验全部放在珠海机场完成，飞机转场荆门后只做水动力试验、水面滑行和水上起降。因此，我和中航工业民机部的有关同志一起，又一次回到珠海“靠前指挥”。

与此同时，在陕西阎良的另一条战线上，AG600 飞机的水上强度试验正在中国飞机强度研究所紧张进行。与陆基起降飞机不同的是，AG600 飞机强度试验中最特殊的项目是飞机水上工况水载荷静力试验，它是水陆两栖飞机特有的试验项目，在国内是首次进行。

▼ 来源：中航工业

AG600 飞机水上工况静力试验包括水舵、浮筒等部件和对称船首、船尾、断阶着水工况等试验，通过试验可以获得飞机的结构强度和刚度等数据，只有试验结论证明飞机满足了强度设计要求，水上首飞才能够进行。在中航工业强度所和 AG600 研制团队的共同努力下，AG600 水上工况水载荷强度试验在 8 月底成功完成。

承担转场飞行和水上首飞任务的是中国试飞院的 AG600 试飞团队。在这支屡建战功的队伍中，有许多我国知名的试飞员。AG600 首飞项目总指挥是赵鹏副院长，他于 1992 年毕业于北京航空航天大学航空发动机专业，1998 年获得西北工业大学飞行器设计硕士学位。赵鹏作为试飞员先后飞过 30 多种机型。2001 年，他成为中国民用航空局局方试飞员，曾担任过 C909 客机的首飞试飞员，是中国民用飞机试飞战线的技术领军人物。

AG600 飞机试飞项目的塔台指挥员汤连刚是空军特级试飞员，他曾担任过中国试飞院总飞行师。汤连刚 1975 年招飞入伍，1983 年成为空军试飞员。2008 年，他从西北工业大学毕业，成为空军首批硕士试飞员。汤连刚试飞过多型国产战斗机、运输机和直升机，是歼 10 战斗机和 C909 客机首飞时的塔台指挥员。

AG600 试飞机组成员都是中国试飞院的精兵强将：机长赵生、副驾驶陈明都是从西北工业大学毕业的高水平试飞员，他们是经验丰富的民用飞机试飞员；机械师魏鹏富、监控观察员孙康宁也是民机试飞的高手。当我在珠海见到老朋友赵鹏副院长时，他告诉我，他从西安来珠海是驾驶民航客运航班飞来的，原来他有中国民航航班的飞行员执照，为了体验转场航路的实际情况，经批准他参加了民航客运航班飞行员机组，驾驶着客运航班飞机飞到了珠海。

AG600 飞机研制团队与试飞员团队密切配合，在飞机转场前的最后阶段试飞中又解决了两个新的问题。

第一个问题是 AG600 在珠海附近的空域进行长航时试飞时，四台发动机中的一台突然发生了空中停车，随即出现顺桨，后来飞机在顺桨状态下飞回机场降落。通常情况下，民用飞机在执行航班飞行时发生顺桨情况，会导致该飞机停飞。中国航发南方发动机公司得知这一情况后，马上派出专业团队来珠海进行排故。经过调试和重装安装后，发动机在后续飞行中没有再发生空中停车和顺桨等异常情况。

第二个问题是 AG600 飞机的气象雷达在试飞时出现乱码。气象雷达在 AG600 此前的飞行中并没有安装使用过，由于从珠海到荆门转场飞行的路途较远，航路中会穿云飞行，为了保证飞行安全，转场飞行中需要使用气象雷达。当 AG600 在试飞时首次开启机上气象雷达之后，雷达屏幕上出现了乱码现象。随后，AG600 又进行了两次试飞，气象雷达开启后都出现了类似的问题。

研制团队当即决定，请当时正在珠海试飞现场的气象雷达研制单位技术人员随机组登上飞机。在飞行过程中，技术人员目睹了气象雷达无法正常使用的情况。当晚，该厂家将气象雷达从飞机上拆下后连夜进行重装和检测，果然发现了雷达线路虚接的问题。对雷达线路进行加固后，气象雷达再次被安装到飞机上。第二天，飞机在试飞中启动气象雷达后，雷达工作正常。

至此，在珠海最后试飞阶段中出现的技术问题全都解决了。飞机设计研制团队与试飞团队一起召开了 AG600 转场技

术交底会。会议达成了一致意见：AG600 已经具备了转场飞行的条件。

从珠海转场到荆门，要飞越广东、湖南、湖北的空域。为了保证 AG600 这架没有气密舱的大型飞机在一千多公里航路上的飞行安全，飞机在航路中除了要避开雷雨等恶劣天气外，还要保证在 AG600 飞机飞行高度区域内没有军机训练和通用飞机飞行。为此，中国民用航空局给予了大力支持，指示民航中南管理局召开专题协调会。为避免转场沿途出现雷雨天气，必须选择一个理想的天气窗口。经过反复协商，我们最终将时间定在 2018 年 8 月 26 日早上。

8 月 26 日清晨 5 点多钟，位于珠海金湾机场旁的中航通飞华南基地，研制团队与试飞团队一起举行了 AG600 飞机转场准备会，我参加了这次会议。当时的天气预报表明，航路上有雷雨云团会自东向西移动，为尽可能躲开此云团，飞机需要提早起飞。

早上 6 点 30 分，起飞的命令下达了。望着 AG600 飞机从珠海金湾机场平稳起飞，渐渐消失在茫茫云海之中，大家的心也悬了起来。在珠海航展展区楼上建立的临时指挥中心里，转场飞机的航迹和航路天气变化情况清晰地显示在一个大屏幕上。飞机飞过湖南衡阳之后，自东向西的雷雨云团距转场飞机的规划航线越来越近。此时，转场飞行总指挥赵鹏果断指挥着飞行，飞机一会儿升高进入云层，一会儿稍向西以躲开雷雨。飞机进入湖北后，天气状况开始好转，大家的心也渐渐放了下来。

上午 9 点 43 分，AG600 飞机稳稳地在荆门漳河机场跑道上降落，飞机转场圆满成功了！珠海飞行指挥大厅里一片欢腾，身处现场的我，心情十分激动。转场成功，表明 AG600 飞机的状态良好，几个月来对飞机进行的一系列改装和新系统试验试飞工作取得了成功。

从 9 月 2 日到 10 月 18 日，AG600 飞机在湖北荆门漳河水库上先后完成了 19 次低速、中速、高速水上滑行试验，均获得了成功。在荆门进行的一系列试验，验证了飞机的气水动操纵性、稳定性、水密性能，验证了水上起降时飞机的姿态控制、喷溅特性等。

9 月 29 日至 30 日，AG600 飞机在荆门通过了中航工业组织的飞机水上首飞技术质量评审和放飞评审。

▼ 来源：中航工业

水上首飞获得圆满成功

2018 年 10 月 20 日，AG600 大型水陆两栖飞机在湖北荆门漳河水库成功完成了水上首飞，验证了飞机在水面起飞和降落的性能。

当天上午 8 点 51 分，AG600 飞机在赵生、陈明试飞机组的驾驶下，从樟河水库的水面上平稳起飞，按预定科目飞行了 14 分钟，于 9 点 05 分着水降落，顺利完成了水上首飞任务。

在水上首飞现场，工信部领导宣读了习近平总书记发来的贺电，试飞现场一片欢腾。我与飞机研制团队、试飞团队的战友们一起欢呼雀跃，流下了激动的泪水。能在自己即将退休之前为国产大型水陆两栖飞机 AG600 水上首飞的成功贡献自己的力量，是我航空职业生涯中莫大的荣幸。

2019 年 3 月，中航工业对外宣布，为加快 AG600 飞机的研制进度，决定将陆续投产 4 架试飞飞机，全力以赴加快适航取证的进度。2020 年 7 月 26 日，AG600 在山东青岛附近海域成功完成了海上首飞，为飞机开展海上试验奠定了基础。

2025 年初，我作为中航工业科技委派出的专家，又一次带领专家组来到珠海中航通飞华南基地，检查 AG600 飞机申请中国民航型号合格证（PC）和生产许可证（TC）的准备情况。在这里，我见到了许多一起奋战过的战友，看到了经过一轮又一轮优化设计后的最新型的 AG600 飞机，激动的心情久久不能平静。

此后不久，好消息不断传来。2025 年 4 月 20 日，AG600 飞机取得了中国民航局颁发的型号合格证；6 月 11 日，AG600 飞机又取得了中国民航局颁发的生产许可证。如今，AG600 飞机已经投入批量生产，很快将加入到我国空中应急救援装备的行列之中。AG600 为中国和世界提供了一款先进的大型水陆两栖飞机，为中国民用航空工业的展作出了新的贡献。

综观 AG600 大型水陆两栖飞机的设计和研制生产，我认为有以下重要意义：

第一，该机对于我国建立和完善国家应急救援系统，特别是加强航空应急救援装备体系建设具有重要作用。中国的自然灾害较多，但过去我国航空工业服务于国家抢险救灾的专用航空装备较少，所以每当发生大灾大难时，国产航空装备在救援抢险中发挥的作用比较有限，AG600 的成功将有力推动中国空中应急救援装备水平的提高。

▲ 来源：中航工业

第二，我国的海疆广阔，随着南海维权和开发利用的展开，对于能在海面上起降和执行救援抢险任务的大型水陆两栖飞机的需求日趋强烈，AG600 飞机的研制成功十分及时，该机在海上的应用范围会越来越广。

第三，AG600 飞机项目对于中国大型飞机、特别是大型水陆两栖飞机设计研制能力的提升作用十分明显。AG600 飞机的机体、发动机、机载设备和装机成品全部都采用了国产产品，在研制过程中又通过了严格的适航审定，这对于中国大型飞机产业技术水平的提高，特别是尽快弥补国产民机机载产业和民用航空发动机产业的短板，是十分难得的实践机遇。通过 AG600 飞机的研制生产，中国民用航空工业技术水平又有了长足的进步。

第四，AG600 飞机是目前世界上少有的先进大型水陆两栖飞机，通过积极的国际市场开拓，相信 AG600 飞机在国际市场上能够找到更多的用户，成为中国航空工业走向世界的一个重要产品。

（全文完）

李奇霖 摄