

C919 C909

复材切片模型



132

大飞机 JETLINER

2025.06

复合材料

- 面向工业化的复合材料结构技术发展对策
- 民机复材制造业的“轻盈革命”
- 从新材料、新工艺看复合材料的发展

大飞机

JETLINER

06 June

2025.06 | 总第132期

ISSN 2095-3399



9 772095 339259





P08



P22



P27



P58



P43



P75

05 卷首语

- 05 系统融合工业化范式下的复材发展方向 | 肖辉江 汤家力 闫国良

06 资讯

08 封面文章

- 08 面向工业化的复合材料结构技术发展对策 | 肖辉江 汤家力 闫国良 廉伟 何瑞 周晖 谢娜 陈超 宋清华 孙熊
- 14 民机复合材料结构设计中的不确定性挑战与应对之道 | 季少华 汤家力 张佳锦
- 18 民机复材制造业的“轻盈革命” | 宋清华 马继宸 刘军 刘卫平
- 22 从新材料、新工艺看复合材料的发展 | 杨洋 袁宇慧
- 27 由赋能到引领：仿真技术为复合材料研制注入新动能 | 林德志 汤家力 王春寿
- 33 结构健康监测技术助力民机复合材料应用 | 邱雪琼 汤家力 王春寿 奚蔚

38 航空制造

- 38 SAF 发展陷入“观望”：谁将打破僵局 | 王美廷
- 43 谨慎看好：全球三大飞机制造商发布最新市场预测 | 静宇
- 48 美国欲重燃超声速飞机计划 | 董帼雄
- 52 发动机制造商加大 MRO 网络建设 | 赵平

58 航空运输

- 58 支线飞机与干线飞机利用率比较研究 | 郭才森 黄祖欢
- 63 以“干支通、全网联”破解结构性矛盾 构建中国民航高质量发展新格局 | 商承源
- 67 航空公司的成本解困之路 | 柴雨丰
- 71 达美航空：股权投资构建全球运营网络 | 王双武

75 科普

- 75 什么是缩比飞行验证 | 马茹冰

78 回眸

- 78 被时代低估的航空先知——克莱芒·阿代尔 | 王思磊

81 云端书屋

- 81 什么是低空经济——《未来已来——我国低空经济的机遇与挑战》摘编（一） | 任和



▼ 本期导读

复合材料作为现代民用飞机结构轻量化与高性能化的核心手段，其应用水平已成为衡量民机产品竞争力的关键指标。波音 B787 与空客 A350 凭借复材用量突破 50% 的里程碑，不仅重塑了民机市场格局，更以卓越的产品特性树立了世界一流民机复材结构产品的标杆。

自上世纪 80 年代，波音公司在 737 的扰流板和 727 的方向舵上首次实现了 T300 级复合材料的装机应用以来，碳纤维复合材料已经发展到以东丽公司 T1100 为代表的第三代产品，并已在飞行器上广泛使用。

通过实现结构减重、提升承载能力从而降低油耗、提升民机的经济性是复合材料在民机结构中逐步扩大应用的直接动因，但复合材料的生产也存在原材料价格高、生产效率低、生产周期长以及固定设备投入大等问题，因此降成本、提效率成为目前复合材料研究的一大热点。



- 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

2025 年第 06 期 | 总第 132 期 | 06 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 罗兴平

李玲 张小光 吴文生

学术顾问 吴光辉

上海《大飞机》杂志社有限公司

总经理 程福江

副总经理 徐显辉

副总经理 郭宗磊

主编 欧阳亮

执行主编 庄敏 林喆

副主编 柏蓓

文字编辑 哲良 张凯敏

美术编辑 刘晓雨

采访主任 陈伟宁

记者 王脊梁 李琰 管超

商务总监 刘影 021-20887168

发行主管 颜康植 021-20887121

国内发行 上海市报刊发行局

国内订阅 全国各地邮局

邮发代号 4-883

地址 上海市浦东新区世博大道 1919 号

邮编 200126

电话 021-20887197

网址 www.comac.cc

电子邮箱 dfj@comac.cc

定价 人民币 20 元

印刷 上海申江印刷有限公司

法律顾问 上海大邦律师事务所

卷首语

系统融合工业化范式下的复材发展方向

文 | 肖辉江 汤家力 闫国良



工业品上规模便不再是简单的产能复制，而成为技术、管理、制度创新的函数曲线。未来规模之战，必属于深谙融合之道的系统创新者。

在当今全球航空市场竞争日益激烈的背景下，民用飞机的研发与制造面临着前所未有的挑战与机遇。复合材料是国产民机高质量发展的重要基石，也是带动国内航空装备制造业水平提升的重要举措。复合材料应用水平成为衡量民机产品竞争力的关键指标。国产民机在研制过程中，始终重视复合材料技术的探索应用，不断提高复合材料的应用比例，波音 B787 与空客 A350 复材用量突破 50%，这一趋势不仅推动了技术的进步，更引发了“复材人”对民机复合材料结构研发模式的重新思考。

本期杂志封面文章栏目围绕世界一流民机复材结构产品安全可靠、成本具有竞争力、生产效率高三大核心特征，深入探讨民机复合材料研发中的一些关键技术与管理策略，如如何系统做好需求管控、成本控制、提高生产效率及绿色化、智能化转型等。

当下工业文明的竞争，本质是产品系统融合度的竞争。规模化的本质是可持续的成本优势。需打破“单点突破”的局限，将碎片化工业环节整合为全生命周期闭环，为规模化奠定高可靠性基础。工业品上规模便不再是简单的产能复制，而成为技术、管理、制度创新的函数曲线。未来规模之战，必属于深谙融合之道的系统创新者。

文章作者团队借鉴国际最佳实践和汽车行业成功经验，研究产品研制与批生产阶段各环节面向世界一流产品的要求、指标和评价方法。提高需求的完整性、科学性：基于系统工程策划代替传统研制流程的“试错迭代”。全方位捕获、识别关键利益相关者的需求，将需求贯穿于产品研发的全过程。用系统工程的方法将成本工程落到实处：低成本、批生产需求落实到每一个环节，通过全生命周期管理提升研发过程的效能，从而确保产品的竞争力。推行全生命周期管理，提升研发过程效能：设计制造一体，DBMOCT (D-Design, B-Build, M-Maintenance, O-Operation, C-Cost, T-Test) 全要素融合，开展协同设计，实现全局最优，在程序、方法、管理手段等方面优化提升。

在向绿色化、智能化转型的过程中，复材研制必将民机研制为牵引，以“需求牵引、多专业协同、数智驱动、技术创新”为核心，联合产业链上下游企业、高校和科研机构，共同攻克核心领域关键技术难题，不断提升复合材料的性能、可靠性和经济性，共同推动复合材料技术的成果转化和产业化应用，为世界一流产品研发注入复材力量。



01 中国商飞公司参加 2025 年巴黎国际航展

6月16日，第55届巴黎国际航空航天展览会开幕，中国商飞公司向公众展出了C909、C919和C929基本型飞机模型，以及C909和C919衍生型飞机模型。航展期间，中国商飞公司与赛峰和克瑞等公司签署了C929项目合作谅解备忘录。

02 空客飞机在华市场占有率达 55%

6月25日，空中客车在民航博物馆举行仪式，庆祝其与中国民航合作40周年。空客中国首席执行官徐岗表示，2025年是空客与中国航空业合作40周年、A320系列进入中国30周年。截至2025年4月底，中国民航在役空客飞机超2200架（占55%的市场份额），1/3由天津工厂交付。

03 空客计划推出 160 座 A220-300

空客计划2025年内启动最大座位数提升至160座的A220-300的取证工作，该项工作或将持续1年。目前，空客尚在等待首架160座的A220-300订单。此外，空客还在优化A220其他功能，如研究增加GTF发动机在翼时间，推出减重和扩容的行李舱等。

04 空客成都服务中心完成 3 架飞机拆解回收利用

自2024年启动拆解回收业务以来，空客（成都）飞机全生命周期服务有限公司（ALS）已完成3架飞机的拆解回收利用工作；空客称该服务中心具备专业化的流程、设备、分类和回收渠道，当下回收利用率达91%，超出预期目标。



03

05 波音预测未来 20 年全球需要近 4.4 万架新商用飞机

6月15日，波音在巴黎航展前发布2025版《商用飞机市场展望》（CMO），预计未来20年全球将需要43600架新商用飞机，其中窄体机33285架，宽体机7815架，支线飞机1545架，货机955架。

06 波音发布下一代窄体机发动机信息征询书

近日，波音表示，已向发动机制造商发布信息征询书（RFI），寻求推力为3万磅级的先进涵道推进系统，用于未来窄体机。此举显示波音正积极布局下一代窄体机技术储备。

07 波音 777-9 取证在即

随着波音777-9项目进入取证收尾阶段，GE Aerospace正通过飞行测试验证其GE9X发动机的最新改进。波音预计777-9的大部分FAA飞行测试将在2025年底完成，计划于2026年开始交付。GE9X包含多种GE制造的陶瓷基复合材料（CMC）部件，燃油效率较GE90最大型号提高10%，测试已累计超过2.7万个循环和1.7万小时。

08 IATA 发布全球航空运输展望

6月2日，IATA发布全球航空运输展望：2025年全球经济增速放缓至约2.5%。航空客运量增长放缓，预计2025年客运量同比增长将从2024年的10.6%放缓至5.8%。亚太地区将是增长最快的地区，预计同比增长9%，欧洲预计增长6%，中东增长6.4%，拉丁美洲增长5.8%，北美增长0.4%。同时，货运量增长大幅放缓至0.7%。但航空业利润有望保持稳定，净利润预计为360亿美元，净利润率3.7%。

09 第 3 架 SJ-100 原型机首次开展远距离飞行

6月20日，俄首架国产型同时是第3架SJ-100原型机首次开展远距离飞行，总航程约6000千米，飞行时长9小时。目前，SJ-100项目的试飞进度约为30%至40%，地面试验进度约为50%。



07

10 庞巴迪环球 8000 首架量产飞机完成首飞

6月7日，庞巴迪宣布，首架量产型环球8000飞机成功完成首飞。庞巴迪环球8000最高速度为0.94马赫，是世界上速度最快的公务机，航程为8000海里，拥有2900英尺的超低客舱高度和豪华客舱，将于2025年下半年投入使用。

11 航电市场预计到 2030 年达 823.3 亿美元

根据Markets and Markets的报告，2030年全球航电市场预计从2025年的562.2亿美元增长至823.3亿美元，年复合增长率7.9%。增长驱动因素包括航空旅行需求增加、航司机队扩张以及对先进驾驶舱系统和下一代航电设备的需求。

12 霍尼韦尔等 4 家公司成立 SAF 技术联盟

6月5日，霍尼韦尔、Johnson Matthey、GIDARA能源和三星工程宣布成立战略技术联盟，研究利用生物质和城市固体废物生产SAF。联盟公司计划推出新的联合技术方案，利用费托合成生产工艺生产SAF。

面向工业化的复合材料结构技术发展对策

文 | 肖辉江 汤家力 闫国良 廉伟 何瑞 周晖 谢娜 陈超 宋清华 孙熊

复合材料作为现代民用飞机结构轻量化与高性能化的核心手段，其应用水平已成为衡量民机产品竞争力的关键指标。波音 B787 与空客 A350 凭借复材用量突破 50% 的里程碑，不仅重塑了民机市场格局，更以卓越的产品特性树立了世界一流民机复材结构产品的标杆。世界一流民机复材结构产品主要呈现三大核心特性：一是安全可靠，基于系统工程理念构建的安全可靠性体系，通过覆盖设计、制造与运营环节的闭环可靠性管理，确保产品在复杂环境下的长期服役安全；二是成

本具有竞争力，通过全价值链成本控制能力实现具有显著竞争优势的全生命周期成本；三是生产效率高，自动化产线与数字化技术驱动的高效应用，赋予复材产品优异的经济性与稳定的交付保障。

反观我国民机复材结构研发能力，虽

已在大飞机项目中取得突破性进展，但与国际领先水平相比仍存在一定的差距，深层次反映出系统工程能力的不足：需求管理与产品定义的精准性不够、成本工程与性能目标的协同性不强、研发过程控制的系统性不全，尚未形成贯穿产品全生命周期的融合创新机制。

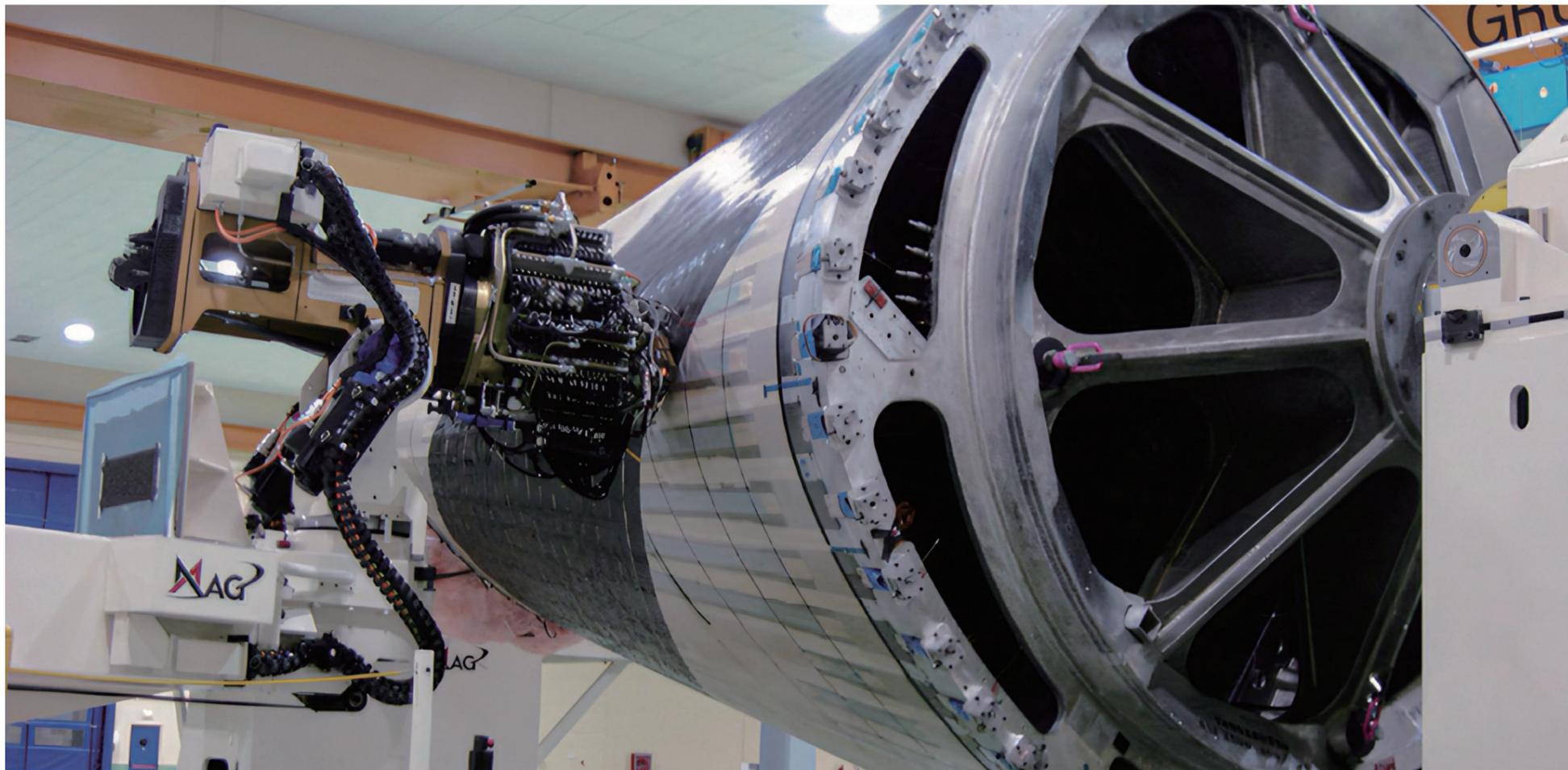
面对当今全球民机市场日益激烈的竞争态势，吃透工业化需求、降低批生产成本、管好全要素过程，就是研发世界一流民机复材结构产品过程中最重要的三个方面。

提高需求的完整性、科学性

需求是产品研究的起点。在研发一款有世界竞争力的产品时，国际先进民用飞机制造商都非常重视广泛捕获、系统整合攸关方需要，形成产品需求和研制要求，结合 N-F-R-P 的需求管理过程和双 V 验证过程实施系统工程，并且通常将需求管理活动延伸至包括部段、专业化、成品件和标准件在内的整个制造领域和产业链。通过一系列的制造效率评估、爬坡准备、全速率压力测试等验证活动，实现目标制造质量水平和交付速率。公开数据显示，空客公司将初始生产速率仅 3 架 / 月的 A350 飞机在短期内即提升至 10 架 / 月。

国产民机初步解决了可制造问题，但对包括好制造、易制造、快制造等在内的成本和速率等工业化需求管理薄弱，缺少量化分解、过程控制和实现验证的有效方

图 | 波音 B787 客机机身蒙皮工艺



法,支撑质量、成本、速率实现的标准化、规范化、有序化、节拍化、数字化、信息化、模块化、专业化等因素也未有效地贯彻到复材产品研制过程中。

对标最佳实践,为确保所研制的复材产品满足世界一流产品的竞争优势,在通用系统工程和需求管理架构的基础上,为提升复材产品需求的完整性和科学性,要着重解决包括成本、生产速率等在内的需求完整性、分配准确性和验证充分性等问题,还需从以下三个方面开展管理创新:

1. 全面捕获、识别攸关方需求

研发世界一流复材产品,需要将安全性、可靠性、经济性、可制造性、维修性、竞争力指标等关键要素全面捕获,特别是

将当前比较薄弱的成本、批产速率等需求识别与分配验证过程有机融入研制流程,实现各要素的全面、定量、精准传递与分配,同时坚持“问题导向”,反向捕获、识别、补充隐含需求与衍生需求,结合关键技术攻关、产品定义、产品研发/试制/验证等过程,结合分析仿真、爬坡测试、精益管理手段,实现批产效率和成本控制的有效提升。

2. 批产效率定量需求的分解、落实及验证方法探索

批产效率是制造商开发具备世界一流竞争力产品的重要指标之一。领域上,批产效率涉及工程领域和制造领域全过程。要素上,批产效率涉及人、机、料、法、环、测等全要素。相应的需求通过设计制造迭代、产品研制试制活动、三工协同过程,在研制门禁各阶段通过工程优化、分析评估、模拟仿真、产能测试、精益管理等方法,验证需求分配传递的合理性及最终的符合性。

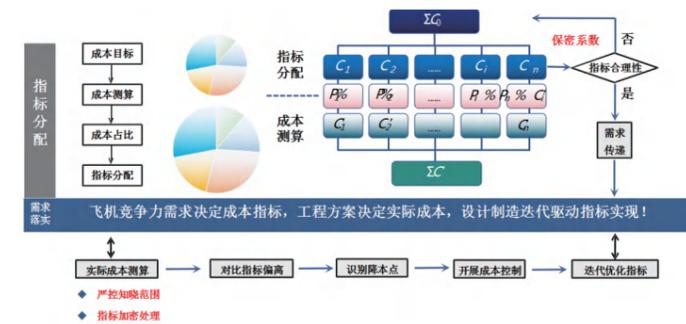
3. 成本指标需求的分解、落实及验证方法探索

经济性是商业产品的关键属性。成本指标是复材产品的关键指标。但成本指标因可能涉及商业秘密等原因,通常在需求管理体系中不开展显性管理,但这并未降低成本指标分解分配和指标符合性的重要性。在项目早期,成本指标无法精准分配的条件下,建议按照“比例法”开展成本指标分解。即,根据组成相关产品单元的成本测算结果占比,按照比例分配成本指标,并在设计和研制各阶段予以评估确认。同时,结合产品研发与试制的过程,基于“虚拟制造”方法,收集基础数据,明确测算方法,面向材料、工序、设备均摊等逐层级迭代,优化、细化成本指标分配方法,使得成本指标分配过程、成本控制过程、指标符合性确认过程全面融入研制流程。

用系统工程的方法将成本工程落到实处

随着现代民机的发展,复材的大量应用是结构轻量化的关键,但复材的研制成本高、原材料价格高和制造成本高等问题给制造商带来了严峻的成本挑战。如何有效开展成本控制成为复材大规模应用的核心问题。国际上对复合材料低成本、快速成型技术的研究和应用非常重视,发起了一系列技术攻关项目和计划,例如欧洲的ALCAS(Advanced and Low Cost Airframe Structure)、明日之翼(Wing of Tomorrow)、洁净天空(Clean Sky)、洁净天空2(Clean Sky2)计划和TAPAS(Thermoplastic Affordable Primary Aircraft Structure)项目,美国的CAI(Composite Affordable Initiative)和RAPM(Rapid high-Performance Manufacturing)等计划,西方国家通过数十年研究,在大量的技术支撑下,形成了较为先进的全生命周期成本体系和控制方法。在飞机研制过程中,制造商会预先设定目标价格,并据此推算出目标成本,再将成本指标分解至各个子系统和零组件进行控制。通过设计、制造和供应链管理等环节的协同以及项目关键里程碑节点的经济性评估和管控,确保成本目标的实现,进而保证飞机竞争力。

为提升复材结构产品成本竞争力,需针对当前在成本控制方面的差距和不足加快推进五方面工作:一是技术储备方面,加强复材低成本新技术的预研,推动技术能力的提升,创新发展,确保产品应用的技术先进性;二是成本门禁方面,将成本指标作为产品属性加强管控,全生命周期的成本状态和指标成本差异严格管控,实时监控整个研发过程中的成本数据,成本与各专业协同迭代,提升成本管控能力;三是成本目标方面,综合竞争力需求和产品技术特征,确定合理的成本目标,并将成本目标通过适当的方法分解



材料结构产品研制过程中的试行和落地, 将是在研制体系改革中借鉴、运用工业社会文明的优秀成果, 在程序、方法、管理手段方面优化提升, 实践高质量发展的捷径。

基于 AS9145 的 APQP 作为核心工具已在空客、霍尼韦尔等企业取得了显著成效。空客 A320neo 项目通过 APQP 应用, 不合格品率下降 30%; 霍尼韦尔通过实施 APQP, 在 5 年内成功将其零件缺陷率降低 78%, 验证了该体系在控制质量成本、优化流程迭代方面的技术优势。

在工业化转型的需求驱动下, APQP 的引入需与现有质量管理体系深度耦合。首要任务是重构现有质量管理体系架构, 通过解构 AS9145 标准核心要素, 识别出工艺确认规范、变更追溯流程等强化模块。

质量工具的工业化适配是另一关键环节。以失效模式及影响分析 (FMEA) 为例, 需针对复材结构内部分层、纤维屈曲等典型制造缺陷, 构建多维度故障模式知识图谱, 形成覆盖多设计场景的解决方案库, 为前期产品设计、工艺流程验证等提供科学依据。在过程控制层面, 引入统计过程控制 (SPC) 手段, 对产品制造过程实施动态监控, 通过数据驱动的精准调控, 实现 APQP 方法有效落地, 从而提升研发制造过程的稳定性和一致性。

风险防控体系的再造需要多维度突破。通过数字孪生技术的应用可提前识别潜在风险, 注重专业的失效风险分析工具如过程功能失效模式及影响分析 (PFMEA) 和设计失效模式及影响分析 (DFMEA) 的应用, 优化风险管控流程, 确各环节的责任人和工作要求, 加强跨部门之间的协同管理, 确保风险管控措施的有效实施和信息的及时共享。

从体系重构到工具落地, 从风险防控到生态培育, APQP 的深度应用将推动民机复合材料结构制造实现质的飞跃, 这不仅是一次技术升级, 更是一次管理模式的革新。

确保理念落地的关键举措

复合材料结构应用技术工业化水平直接关系世界一流产品的核心竞争力。我国在打造世界一流产品复合材料结构应用进程中仍存在诸多瓶颈, 亟须从权衡技术、面向 X 的设计 (DFX) 及数智化等多个维度系统突破, 以实现从“能用”到“高效用”的跨越。

产品工业化设计是指将产品从设计阶段到生产阶段的过程中, 通过工业化的手段来提高产品的生产效率和质量。复合材料结构设计作为多目标优化问题, 其核心在于基于需求的全方位捕获, 并通过权衡技术实现性能、成本、工艺性等综合最优解。该技术通过数据驱动的决策机制, 将传统经验设计模式升级为基于证据的科学决策体系。破局关键在于: 首先, 应建立权衡数据库, 整合材料性能、工艺成本和服役损伤等数据, 为普氏矩阵分析 (一种用于多准则决策的分析工具, 可在多个方案中快速识别出最佳方案) 提供可靠输入, 提升权衡决策可靠性; 其次是嵌入标准流程, 采取引入六西格玛 (DFSS)、质量功能展开 (QFD) 和普氏矩阵等方法, 并将权衡团队纳入集成产品开发组织架构, 确保技术与业务匹配。

DFX 方面, 聚焦于面向制造与装配的模块化设计, 其核心是将制造、装配等约束有组织、有程序、有效前置到设计阶段, 让设计阶段的每个决策都包含制造和装配环节的可行性考量, 丰富或完善结构工程定义或定位。但当前实施存在专业协同不足、模块化程度低、标准化缺失等诸多挑战。改进对策从三方面切入: 首先, 需制定 DFX 手册, 规范各阶段多专业输入输出, 如设计阶段引入自动铺丝 (AFP) 工艺仿真, 模拟先进的路径规划; 其次, 重构产品分解结构 (PBS) 逻辑, 以“高内聚、低耦合”为原则划分模块; 最后, 工程表达标准化, 如定义四类功能孔 (定位 / 导引 / 工装 / 吊

装孔), 发布设计规范, 消除装配协调误差等。

数智化方面, 以热压罐固化大数据模型实践为例。热压罐固化工艺作为航空航天高性能复合材料制造的核心环节, 其工艺优化直接关系到产品质量、成本与交付周期。传统固化工艺参数设定高度依赖工程师经验试错, 面临研发周期长、质量稳定性差、成本高昂等突出工业化瓶颈, 尤其在追求规模化量产时矛盾更为尖锐。该实践的核心主要从三个方面入手: 一是通过深度整合热压罐内多区域温度传感器实时数据、材料特性库及历史工艺数据库, 运用计算流体力学 (CFD) 技术构建高保真数字孪生模型; 二是基于深度神经网络 (DNN), 开发端到端的智能预测模型; 三是集成高保真模型与 AI 预测模型, 应用多目标遗传算法 (MOGA) 进行全局寻优。系统以“质量最优”和“成本最低”为冲突优化目标, 自动搜索并推荐帕累托最优的工艺参数组合, 实现科学高效的权衡决策, 彻底替代传统低效的试错模式。热压罐大数据模型的工业化应用显著降低了固化参数偏离风险, 大幅提升了产品一次合格率和质量稳定性。同时, 工艺稳定性的增强直接减少了废品率和返工, 大幅节约了昂贵的材料成本, 彰显了复合材料核心制造工艺正经历向数据驱动、智能化和数字化的纵深转型。

综上所述, 世界一流产品复合材料结构应用技术的突破需以“需求牵引、多专业协同、数智驱动、技术创新”为核心: 在设计端嵌入权衡决策体系, 在制造端攻坚低成本规模化工艺, 在管控端实现数智化跃迁。通过这三大关键举措, 我国复合材料产业有望实现从“跟跑”到“并跑”的跨越, 为高端制造强国建设提供重要战略支撑。

总结

当前, 我国必须以“适航安全是基础、结构效率是关键、成本竞争是核心、实现批

产是要务”为指导思想, 扎实推动世界一流民用飞机复合材料结构产品研发。多年实践深刻表明, 实现世界一流复材结构产品的研发目标, 过程艰巨且高度复杂。其挑战不仅包括设计、制造、验证、产线、信息化等关键技术领域, 也延伸至节拍化管理、供应链培育和精益制造现场等管理维度。因此, 亟须把复材产品研发过程中的各个专业要素进行高效统筹, 而需求管理、成本工程、过程控制是贯穿产品研发至批产交付全生命周期的最关键三条主线, 有效聚焦并抓实这三条主线, 便掌握了“世界一流产品”研发成功的关键杠杆。

一是在复材产品需求管理方面, 需进一步建立健全复材产品需求管理流程与方法, 全面实施需求管理, 贯彻系统工程理念, 实施需求牵引, 强化技术驱动, 开展正向研制, 从而确保复材产品研发的高效性和目标达成。二是在成本方面, 建立系统化的复材成本管控流程, 实现复材成本目标的合理分解与有效实施, 将复材成本设计管控要求全面融入飞机研制活动。建立完善成本设计标准、方法和指南, 从设计源头全面开展产品成本设计控制, 实现成本管理的系统化与规范化。三是在研发过程控制方面, 基于复材结构研制过程管控专题研究成果, 结合型号深入开展产品关键特性 (KC) / 关键工艺参数 (KPP) 识别及优化专项工作研究, 形成可完整支撑复材结构研制全流程的失效模式及影响分析方法, 并将要求结合到门禁制度中, 对各个设计研发阶段进行必要管控。

新的阶段标志新的使命, 新的时代孕育新的变革。面向未来, 我们更需要放眼世界、正视差距、充分借鉴工业界的优秀成果, 以更好地满足民机复材产品低成本、大批量生产和准时交付的需求, 并带动全产业链转变理念、协同创新, 共同开创民机复材研制新局面, 为世界一流产品研发注入中国力量。■

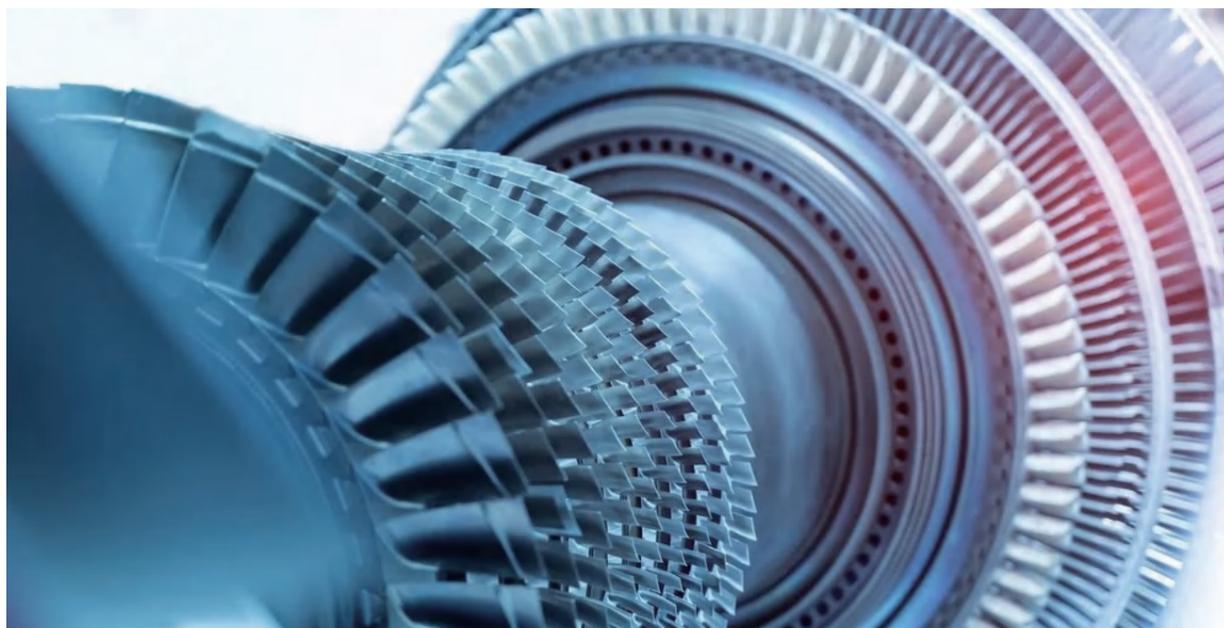
民机复合材料结构设计中的不确定性挑战与应对之道

文 | 季少华 汤家力 张佳锦

要把安全可靠放在第一位，这是民机产业发展的根本原则，也是航空人应承担的核心责任。复合材料凭借其显著的轻质高强性能，正在改变着现代民机的结构设计。然而，材料的先进性绝非安全性的天然保证。复合材料结构从微观材料特性到宏观服役行为中普遍存在的“不确定性”，如同潜藏于性能光环下的暗流，时刻挑战着我们对结构安全边界的精确掌控。传统设计方法通过采用各种安全系数、折减系数以及保守假设等方式预测结构承载能力，虽满足适航要求但制约复合材料结构效率的提升。

这一挑战要求我们突破基于金属结构的既有经验范式，将飞机系统可靠性工程的百年积淀深度融入复合材料研制体系，对当前“基于经验”的结构安全性研发验证体系进行系统性变革，最终建立以结构分析、系统不确定性和概率统计为基础的结构可靠性设计方法。能否有效驾驭这些不确定性，决定了复合材料结构能否实现更高水平的安全保障，这既是关键的技术攻关方向，也将成为研发下一代民机的战略支点。

图 | Shutterstock.com



不确定性之源与复杂性挑战

民机复合材料结构的不确定性非凭空而生，它深植于材料本质、工艺过程、服役环境及人类认知能力的多重维度，交织成一张复杂而独特的挑战之网。

材料本质的“天生变数”构成了第一重迷雾。即便最先进的碳纤维生产线，也难以保证每一束纤维的强度模量绝对均一；树脂基体的固化反应活性、韧性表现，在不同分子链的微观世界里悄然变化。更为关键的是，纤维与树脂界面的结合状态——这个决定载荷传递效率的微观桥梁，对湿热环境极其敏感，其性能的精确表征至今仍是材料科学的难点，成为宏观性能分散的重要推手。

制造工艺的“指尖魔术”则引入了第二重变奏。无论是依赖工匠经验的手工铺层，还是高度自动化的铺丝铺带 (AFP/ATL)，纤维角度的微妙偏差、铺放张力的细微波动、层间拼接的微小间隙或褶皱，都在悄然改变着结构的“筋骨”。而热压罐内温度场与压力场那难以捕捉的局部不均匀性，如同指挥着一场复杂的物理化学交响乐，最终导致树脂流动、纤维压实、孔隙 (尺寸、形态、分布) 乃至层间残余应力的差异。即便是钻孔、胶接、螺栓连接这些看似成熟的装配环节，其引入的局部应力集中效应和潜在缺陷，也充满了难以精确预测的变数。

服役环境的“无形之手”叠加了第三重压力。飞机穿行于万米高空与地面之间，结构经受着从 -55°C 极寒到高温、从沙漠干燥到海洋高湿的极端循环。湿热环境不仅会弱化树脂基体，更可能引发界面退化，这种环境与载荷的耦合效应远非线性叠加那么简单。反复的客舱增压卸压、起降冲击、气流扰动，使结构承受着高度复杂且难以完全预测的载荷谱。更遑论冰雹撞击、工具掉落、闪电雷击等难以预见的偶然事件，其冲击能量、作用位置都充满随机性。

最后，人类认知与建模能力的“边界”构

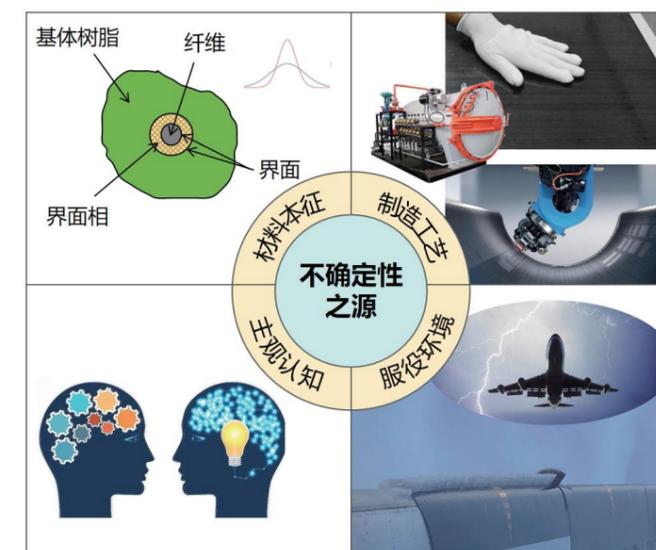
成了第四重限制。复合材料的多尺度 (微观 - 细观 - 宏观)、多物理场 (力 - 热 - 电磁 - 化学) 耦合行为异常复杂。当前的分析模型，无论多么精细，也难以完全复现材料在真实复杂应力状态 (尤其是层间剪切、挤压) 下的失效机理。对极端环境 (如长期高温老化、雷击后损伤演化) 下的性能退化规律，我们的认知数据库仍显不足。在预测超大尺寸复杂结构 (如整机翼盒) 在极端载荷下的系统级响应时，计算模型的简化假设与真实世界之间依然存在鸿沟。

系统性的不确定性量化与驾驭体系

面对无处不在的不确定性迷雾，复材结构设计专业从飞机系统可靠性工程中汲取智慧，发展出一套日趋成熟、系统化的应对策略，推动着复合材料结构安全范式的变革，从安全系数、材料性能分布、载荷场景，再到符合性验证方法，颠覆性突破“基于经验”的现有结构安全性研发验证体系，逐步建立基于结构分析、系统不确定性和概率统计的结构可靠性设计方法。

核心突破在于颠覆“经验安全系数”

图 1 | 民机复合材料结构的不确定性之源



的固有逻辑。传统金属结构依赖的单一安全系数(如 1.5),在复合材料各向异性、失效模式耦合环境敏感的特性面前略显单薄。科学量化的第一步是建立概率统计方法与设计许用值体系。通过在不同环境条件下(干态/湿态/高温/低温)对大量材料试样件和典型元件进行测试,运用统计学方法(特别是考虑材料批次、工艺波动带来的固有分散性)计算出关键的设计许用值。其中,B 基准值成为设计中的关键门槛——它意味着在 95% 的置信度下,至少有 90% 的样本性能高于此值。这套许用值体系为结构设计提供了对抗材料与工艺波动的第一道科学防线。然而,采用 B 基准值作为许用值进行确定性强度校核,依然不足以发挥出统计学的魅力。将材料性能概率分布直接作为结构可靠性设计的输入,可实现基于材料与工艺随机特性的精确可靠性评估。

更深层的革新在于重构载荷定义体系。复合材料对湿热、冲击、缺陷的极端敏感,要求彻底超越传统气动/惯性载荷的单一维度。通过构建“多物理场耦合威胁场景库”——融合温度场、湿度场分布模型、冲击损伤概率模型、制造缺陷允许阈值,形成覆盖“湿热+冲击+缺陷”等最恶劣组合的载荷场景。这一方法论直接借鉴系统可靠性

工程的故障树分析(FTA),通过穷举潜在失效路径,确保设计抵御所有合理可预见的极端工况。

而符合性验证方法正经历从“试验堆砌”到“模型主导”的变革。金属时代的“无缺陷”假设被彻底摒弃,基于损伤容限(DT)与概率损伤容限(PDT)的设计理念是驾驭服役不确定性的核心支柱。我们清醒地认识到,结构在制造和服役中必然携带损伤(如目视勉强可检的 BVID 或允许存在的制造缺陷)。DT 设计确保这些含损结构在规定的检查间隔内,仍能承受极限载荷而不发生灾难性破坏。而 PDT 则更进一步,借鉴可靠度理论和蒙特卡洛仿真等理念,将材料性能的分散性、载荷不确定性、损伤随机性以及检测概率等因素纳入模型,定量计算结构在剩余寿命期内的失效概率,为制定科学、经济且安全的检查大纲提供了坚实的理论依据,有效应对了载荷与环境未知性的挑战。由此带来的验证模式为,基于高置信度物理模型(经“积木式”试验充分验证)的虚拟仿真成为主体,实物试验则聚焦于最大风险验证和模型最终确认,效率实现量级提升。其中,“积木式”试验从底层的材料/试样件级基础数据出发,逐步攀升至元件/典型结构件级(验证连接、开口、加筋板等含损伤行为)、组合件/部件级(机翼盒段、机身筒段试验),直至顶层的全机级静力、疲劳和损伤容限试验,每一层级的试验不仅验证本层设计,更校准下层的分析模型,并为上层提供输入。

数字化与智能化技术正成为穿透不确定迷雾的崭新利器。基于高保真物理模型和不确定性参数(如材料属性、几何公差、载荷谱等)的模拟手段,可以在虚拟空间中反复“飞行”,评估设计在各种极端和随机组合下的鲁棒性和可靠性。结构健康监测(SHM)技术,如嵌入机身机翼的光纤光栅(FBG)传感器网络,如同为结构装上“神

经未梢”,实时感知应变、温度、冲击事件甚至损伤萌生等,将服役中的“未知”转化为可观测的“已知”。而数字孪生(Digital Twin)技术则构建起物理结构的动态虚拟映射,融合设计、制造、实时飞行载荷、SHM 等多源数据,实现服役状态下的动态可靠性评估与预测性维护,极大提升了应对环境与载荷复杂性的能力。同时,人工智能(AI)与机器学习(ML)正深度应用于分析海量试验与服役数据,辅助识别潜在失效模式、优化设计许用值、提升寿命预测精度,不断拓展人类认知的边界。

研发下一代民机的战略支点

驾驭复合材料结构的不确定性,绝非单纯的技术课题,更是研发下一代民机的战略支点。

构建自主可控的材料与工艺数据库及标准体系是立足之本。我国必须持续投入,建立涵盖国产材料体系(包括热固性/热塑性复合材料、液体成型材料等)在复杂环境、长期老化、动态载荷下的全谱系性能数据库。同时,发展基于大数据和机器学习的智能化工序窗口优化与在线质量监控技术,显著压缩制造变差带,从源头降低不确定性。只有掌握这些核心数据和标准,才能摆脱对外部体系的依赖,为正向设计奠定坚实基础。

发展正向设计能力与集成研发体系是破局关键。必须将可靠性目标与不确定性量化前置到方案设计阶段,成为驱动构型选择、材料选型、工艺路线决策的核心输入。基于结构分类、分级,开展可靠性分配,推动基于可靠性的多学科设计优化的深度应用,将重量和成本作为优化目标,将失效概率、检查间隔等可靠性指标直接作为约束条件,实现性能、重量、成本与可靠性的全局最优。这要求打破专业壁垒,实现设计、材料、工艺、

制造、适航、运营团队的全流程深度协同,形成对抗系统不确定性的合力。

引领预测性维护与全生命周期管理是价值高地。深度融合 SHM、数字孪生与 AI 分析技术,构建覆盖机队全生命周期的智能健康管理平台。这不仅能为每架飞机“量体裁衣”地制定维护计划,最大化利用结构潜能,更能将宝贵的服役数据实时反馈至设计端,形成“设计—制造—服役”闭环优化,持续提升未来产品的可靠性与经济性。这种基于真实数据的持续进化能力,将成为民机主制造商提供差异化客户价值的利器。

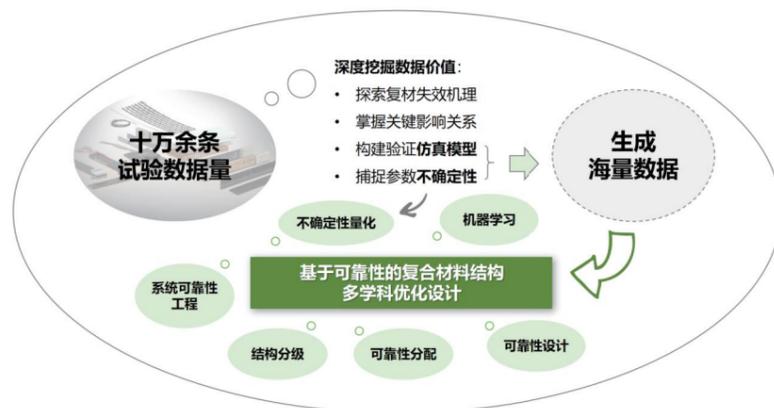
培育应对新型不确定性挑战的前瞻能力是未来之钥。面对电动/混动飞机带来的高电压绝缘、电磁兼容、电池热防护等新挑战、高超音速民机面临的极端热力载荷难题,以及新型智能复合材料的功能—结构耦合可靠性问题,必须提前布局基础研究和技术及人才储备,以确保在下一代民机研制过程中解决这些问题。

在未知中锤炼可靠的翅膀

民机复合材料结构设计中的不确定性,与其说是一道难题,不如说是一面镜子,映照出工程科学的严谨与局限,也映射出人类探索蓝天的勇气与智慧。它提醒我们,在拥抱材料革命带来的轻量化红利时,必须对自然的复杂性保持敬畏,对“未知”保持清醒。

驾驭这些不确定性,将其纳入可控的轨道,是我们这一代航空人不可推卸的使命。这需要持之以恒的基础研究积累、严谨务实的工程验证精神、开放协同的研发体系支撑,以及拥抱数字化、智能化的创新勇气。每一次对材料微观变异的精确捕捉,每一次对工艺窗口的优化控制,每一次对服役数据的深度挖掘,每一次对分析模型的迭代提升,都是拨开迷雾、向“确定”的可靠迈进的一小步。■

图 2 | 试验验证模型,模型反哺设计



民机复材制造业的“轻盈革命”

文 | 宋清华 马继宸 刘军 刘卫平

碳纤维增强树脂基复合材料以其高比强度、出色的可设计性及可整体成型，成为实现飞机轻量化的核心路径之一，其用量已经成为衡量民机先进性的重要指标之一。从单通道民机 B737 复材用量占结构重量约 10%、A320 占比约 15%，到双通道民机 B787 占比约 50%、A350 占比约 52%，碳纤维增强树脂基复合材料正深度重塑民机结构与制造体系。民机复材用量的提升离不开自动铺放、自动化预成型等先进自动化制造技术的应用，但如何进一步提升自动化制造效率、降低生产成本，是全球民机制造商都在思考的问题。

图 | aerodinecomposites.com



在这一背景下，数字化与智能化的深度融合正掀起一场航空制造业的范式革命，通过将材料科学、工艺机理与人工智能、物联网、机器人技术深度融合，航空制造业正构建覆盖设计、生产、检测、运维的全数字链路，推动复材制造从“自动化”迈向“数智化”的新纪元。

战略价值： 智能制造的四大重构效应

在制造质量提升方面，数字化技术正创造新的精度标杆。复合材料零件的性能高度依赖铺层精度、纤维取向和孔隙率等，针对大尺寸机身、机翼等民机复材零件的制造，自动铺带 (ATL) 与自动铺丝 (AFP) 装备通过集成多轴运动控制、在线实时监测和激光投影定位系统，不仅提升了纤维铺放速度，同时还保证了铺层精度及铺放质量的一致性。在实现自动化的基础上，法国 Coriolis 及西班牙 M·Torres 等公司开发了自动铺放缺陷在线检测集成系统，可在铺丝过程中同步识别丝束间隙、重叠、扭曲等缺陷，大幅提升了铺放效率。更值得关注的是基于制造运营管理的数据追溯体系，构建起了贯穿“材料—设计—工艺—质量”的数字纽带，可满足民机对制造符合性与可追溯性的严苛要求，支持从原材料到零件的双向溯源，为民机适航认证奠定了数据基石。

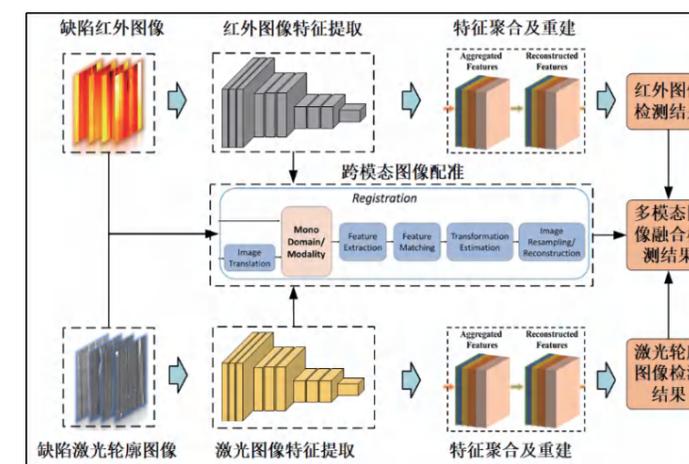
生产效率与成本结构的优化同样令人瞩目。复合材料的制造成本长期居高不下，采用智能制造有效实现了对整个产线的结构优化。首先是引入人机协作模式，通过 AGV 转运系统、翻转机器人、自动封边机器人、工刀具转运机器人，大幅降低了大型机翼蒙皮铺贴中的人工干预时间。其次是虚拟仿真技术与数字孪生的应用，其核心在于构建一个与物理工厂全要素、全过程、全生命周期动态映射并实时交互的虚拟镜像，全面覆盖

物理层、虚拟层、连接层。目前已经实现了热压罐固化过程的动态映射，零件报废率显著下降。预测性维护技术则是利用物联网传感器，采集热压罐、固化炉、自动铺放、机械加工等关键设备状态数据，结合机器学习进行健康诊断，有效规避非计划停机造成的产能损失。

产业链协同生态的重塑打破了传统的自动化制造壁垒。设计制造一体化使工艺参数优化与结构设计同步进行，三维数模成为沟通设计与生产的共同语言。供应链数字互联则构建起主制造商—供应商生态圈，实现从预浸料生产到部件装配的全流程透明化管理，这种网络化协同生态大幅缩短了新品开发周期。

在绿色制造范式的转型方面，智能制造同样具有重要意义。复合材料制造的能源消耗与废弃物排放问题长期备受关注。数字化智能化技术开辟了新的绿色路径。热塑性复材原位固化技术可以省去热压罐环节，降低了能耗。采用 AI 排料算法，大幅提升了预浸料的利用率，每年可减少数千吨碳纤维废料。数字孪生驱动的复材零件“碳足迹档案”系统，可以完整记录零件全生命周期的环境影响，为复材回收利用提供数据支持。

图 1 | 自动铺放缺陷在线检测集成系统



技术演进： 三十年数字化征程

回溯智能技术演化的起点，2000年~2010年的萌芽阶段以设备自动化和计算机辅助设计为核心特征，重点解决基础工艺机械化问题。首代自动铺带机投入使用，实现了热固性预浸料平面和低曲率构件自动铺贴。CATIA 复材模块初步支持铺层设计，数字化设计工具逐渐普及，但此时工艺仿真能力薄弱，设备与软件间缺乏集成，数据孤岛问题突出。

步入系统集成时代则是在2011年~2020年，随着工业互联网与MES系统成熟，逐渐催生制造协同革命。自动铺放、固化、检测的集成产线大幅提升了复材零件制造的自动化率。固化过程多物理场耦合模型实现温度—压力—树脂流动精准预测，仿真精度提升使物理试验量大幅减少。制造执行系统(MES)与产品数据管理系统(PDM)的对接，首次实现了材料寿命预警、计量器具定检的在线化管理，质量数据采集与生产管理效率大幅提升。

当前的复材智能浪潮主要由数字孪生与人工智能引领，旨在通过人工智能与数字孪生技术引领新一代制造体系。例如，采用AI超声检测系统实现了孔隙率智能判读，热压罐固化数字孪生模型通过虚拟传感器预测固化度，还有智能工厂、透明工厂的建设与推广，复材制造正在从“参数执行”逐步迈向“自主决策”。

未来图景： 全链路智能化突破

未来十年，复合材料智能制造将聚焦四大技术高地，实现从“渐进改良”到“代际跃迁”。

热塑性复材高效制造将成为首座技术高地。可变光斑激光与电磁感应加热技术的开发正在突破热塑性预浸料铺放速率的瓶颈，美国EI公司与英国Victrex合作已将铺放速度提升至101.6m/min，未来目标突破200m/min。欧盟“洁净天空”试制的8.5m整体化热塑性机身，预示着一体化成型的未来将逐渐到来。

自主决策工艺大脑的诞生将改变制造逻辑。基于强化学习的自适应系统，能根据材料批次差异自动优化工艺参数。

西门子开发的Process Simulate系统已实现3D环境中流程执行的建模仿真，实现了整个产品生命周期中的虚拟验证。

数字主线的全域贯通将构建全生命周期数据链。从分子动力学模拟指导原材料设计，到服役状态监控(PHM)预测剩余寿命，数据流将贯穿产品全生命周期。

绿色技术体系创新同样关键，其重点在于开发生物基树脂、可回收纤维与低温固化工艺，比如聚乳酸基复材，其碳足迹较环氧树脂大幅降低。回收碳纤维认证体系的建立，将进一步提高航空复材的循环利用效率。

中国路径： 自主创新与全球协作

装备自主化攻坚是首要突破点。比如当前国产自动铺放设备的铺放速度依然低于进口设备，亟须突破高精度丝束导向机构、多轴联动控制系统等核心部件研发，推动国产自动铺放设备从“解决有无”迈向“好用易用”。

工业软件生态培育则关乎产业安全。开发自主可控的复材专用CAE软件，攻克工艺知识库与AI算法模块，是打破国外垄断的关键。只有建立完备的复材工艺数据库，积累足量工艺参数，才能为国产软件提供核心知识底座。

标准与人才体系建设奠定发展根基。目前，制定数字孪生构建规范、数据字典标准，建设跨学科实训平台迫在眉睫。只有产学研全面发力，培养兼具材料学与信息科学的复合型人才，才能在智能制造浪潮中不断取得突破。

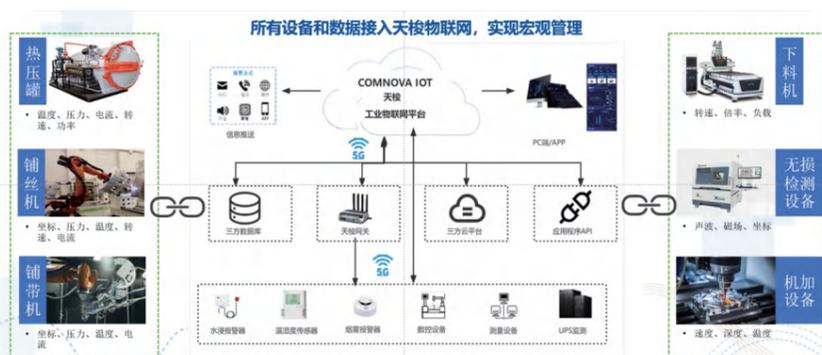
在全球协作维度，在“双循环”战略下，中国民机复材产业需平衡自主创新与国际合作。借鉴波音开放架构经验，吸引西门子、达索等国际企业参与中国智造生态。同时，

在低空经济与国产大飞机的双重机遇下，数字化智能化制造将为中国航空工业锻造“轻盈之翼”，助力中国在2035年实现全面建成航空强国的宏伟目标。

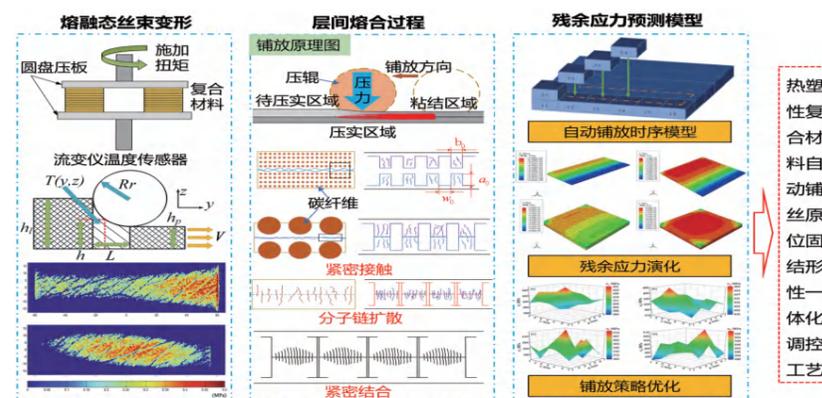
要不断加强自主创新，实现智能制造产线的自主可控。争做低碳标准引领者，推动航空复材回收碳纤维认证体系建立，抢占绿色标准话语权。

民机复合材料零件的数字化智能化制造，不仅是技术的革新，更是航空制造范式的根本变革。当前中国航空工业正经历从“跟跑”到“并跑”的关键跃迁。未来十年，随着热塑性复材高速制造、自主决策工艺大脑等技术的成熟，复合材料制造将迈入“质效双升”的新阶段。中国需在高端装备自主化、工业软件生态培育、绿色标准制定等方向加速突破，构建“材料—设计—工艺—质量”四位一体的创新体系，实现民机复合材料零件制造的专业融合、产业融合、需求明确、全局最优。道阻且长，行则将至；行而不辍，未来可期。在低空经济与国产大飞机的双重机遇下，数字化智能化制造将为中国航空工业锻造“轻盈之翼”，助力中国在2035年实现全面建成航空强国的宏伟目标。■

▼ 图2 | 复材超级链接



▼ 图3 | 热塑性复材高效制造工艺



从新材料、新工艺看复合材料的发展

文 | 杨洋 袁宇慧

先进复合材料用量是衡量大型民用客机先进性的重要指标。近年来，各种机型的复合材料用量不断攀升。例如，波音和空客公司最先进的宽体客机机型（B787、A350）复合材料结构均超过了机体结构重量的 50%。我国自主研发的宽体客机复合材料结构也将处于同一水平。当传统复合材料的使用达到如此高的占比后（复合材料机身、机翼等），航空复合材料的进一步发展成为了必须面对的问题！

近年来，诸多新材料和新工艺的出现，不断推动先进复合材料向着高性能、高效率、低成本和可持续等方向发展，这将进一步提升民机复合材料的应用水平。

图 | Shutterstock.com



航空复合材料应用情况

目前复合材料用量最大的民用客机为空客公司的 A350 飞机，其复合材料用量为结构重量的 53%，其次是波音公司的 B787 飞机，用量为 50%。从结构上看，飞机的机身、机翼等主要结构都采用碳纤维复合材料制造，很多次承力部件，如方向舵、升降舵、襟翼、副翼等也均为复合材料结构。大型主承力零件全部使用高性能环氧基碳纤维复合材料，部分次承力零件应用了液体成型工艺、模压技术等非热压罐技术（如扰流板、窗框等）。总体上复合材料用量达到 50% 以上的水平，其中 90% 以上通过热压罐制造，选材则以高性能环氧碳纤维为主，部分为玻璃纤维增强。在产能方面，空客计划到 2028 年将 A350 的产量提升至每月 12 架，波音 B787 飞机的历史最高产量约为 13 架 / 月。

以上机型的实践，将先进复合材料在民用航空的应用推向了新高度。复合材料零部件相关的设计、制造及验证等技术不断提高，在现有构型下接近了其使用极限。未来复合材料的使用将从量变转向质变发展，很多新材料、新工艺迅速发展成熟，将推动民机复合材料向更高水平发展。尤其在下一代机型上，这种趋势将更加凸显。

复合材料液体成型技术

随着商用飞机复合材料用量的提升，预浸料制造工艺复杂、复合材料热压罐工艺、装配过程成本高等问题愈加明显，为取代热压罐技术，自上世纪 90 年代直至 2030 年，欧美和俄罗斯逐步制定了一系列低成本复合材料制造技术的研发计划，如复合材料经济可承受计划 (CAI)、先进复合材料技术计划 (ACT)、飞机效能计划 (ACEE)、先进亚音速技术计划 (AST)、先进低成本机体结构计划 (ALCAS)、近期商业目标与对象的技术应用计

划 (TANGO) 等。其间涌现了多种液体成型技术，形成了树脂传递模塑成型 (RTM)、真空辅助树脂灌注 (VARI)、树脂膜熔渗 (RFI) 等现代液体成型工艺。目前，复合材料液体成型技术已经成为主要的树脂基复合材料非热压罐制造技术，并逐渐在国内外航空航天领域获得了应用。近年来，随着工艺过程自动化程度的提高和相关原材料的性能提升（如更高性能的碳纤维材料、高韧性的环氧树脂等），该技术正快速向部分主承力结构（如 A220、MC-21 机翼结构）推广应用。

传统的低成本液体成型技术主要采用手工铺放织物，并结合树脂灌注方式来实现零件的制造，该工艺已成功应用于 B787 的襟翼及活动板、A350、A380 的龙骨梁角片、国内某型飞机的缝翼、梁、窗框及

图 1 | 液体成型工艺在 A380 上的典型应用



图 2 | 液体成型工艺 B787 外副翼加筋壁板



舱门等零件制造。液体成型工艺的应用，大大降低了上述复杂结构零件的制造成本和装配要求。

随着材料技术和工艺技术的发展，液体成型制造的复合材料正快速从小尺寸次承力结构向大尺寸主承力结构应用延伸。

借助装备和自动化技术的发展，如大型可加热模具、干纤维自动铺放技术等，液体成型复合材料结构尺寸不断突破，由早期的采用 RTM 工艺制造小尺寸制件向大型尺寸结构发展，如借助自动设备和辅助 VARI 成型，庞巴迪 C 系列飞机和俄罗斯 MC-21 飞机液体成型机翼零件尺寸达到了 16 米以上。

同时，该工艺也从次承力结构不断向主承力结构延伸。早期的液体成型复合材

▼ 图 3 | MC-21 客机液体成型机翼结构



▼ 图 4 | B787 主起落架复合材料后撑杆



料主要应用于舱门、活动翼面和整流罩等次承力或不承力结构，如今正逐步向起落架、机翼、翼梁和机身等绝对主承力结构应用拓展，如 B787 起落架撑杆、MC-21 机翼与翼梁等，西班牙的 MTorres 公司甚至通过干纤维铺放 VARI 成型工艺尝试制造了通用飞机整体化复合材料机身。

以上主承力结构应用的实现，也得益于液体成型复合材料的综合性能不断提升，其性能逐步向预浸料热压罐复合材料性能靠近。通过纤维材料和环氧树脂性能的不提升，之前作为液体成型复合材料的性能短板之一的冲击后压缩强度 (CAI) 已经达到了新一代预浸料热压罐复合材料的水平。如由 Hexcel 公司的 HiTape® 和 Cytec 公司 DryTape® 干纤维制备的液体成型复合材料，其 CAI 值甚至超过 300MPa。

由于液体成型工艺不需要预浸料、可整体成型、不需要热压罐等特点，在制造成本上存在明显的优势。随着自动化程度的提高、工艺仿真技术的进步，其产品一致性和可靠性将不断提升。未来可望实现大尺寸、主承力结构的大规模应用和批产。

热塑性复合材料技术

航空热塑性复合材料及其应用技术近年来发展迅速。与环氧树脂基复合材料等热固性复合材料相比，其自身具有韧性高、阻燃性好、耐湿热、方便回收利用等突出优点。加工制造方面，热塑性复合材料可选择多种非热压罐制造工艺，如模压成型、拉挤成型、原位固结等。同时，其成型周期短（无化学反应固化过程），这也使得原材料不需要昂贵的低温运输和保存。因此热塑性复合材料可以在成本降低的同时，依然保持较高的生产效率。

欧盟开展的“洁净天空”计划中，尝

试采用热塑性复合材料制造下一代窄体客机的机身结构。其目标为较现有的铝合金结构，减重 20% 以上，并实现月产 100 架，以期在不降低生产效率的条件下，提升窄体客机的先进性。

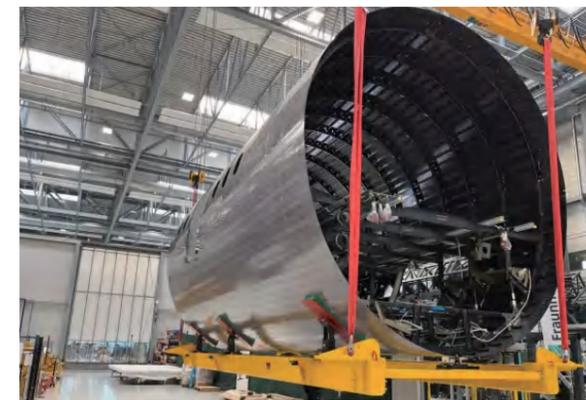
目前，该项目完成了热塑性复合材料机身整体筒段的制造和装配。制造过程中验证了多项工艺技术。如机身蒙皮采用热塑性预浸料原位固结工艺和热压罐成型，长桁、框、角片等采用模压、冲压工艺制造。地板梁采用了预浸料自动铺放与热压罐成型工艺等。

同时，由于使用了热塑性复合材料，使得零件之间的焊接成为可能。这降低了复合材料制孔的需求，避免大量使用紧固件。减重的同时提升了装配连接效率。

在机身壁板制造中，大量使用热塑性复合材料的焊接技术。其中长桁与蒙皮的连接采用超声波焊接，框与机身连接采用电阻焊接技术，上下机身壁板的装配中创新性采用了激光焊接技术。以上焊接技术的应用为复合材料零件的连接和装配提供了新的选项。

美国 NASA Langley 研究中心主导的 The Hi-Rate Composite Aircraft Manufacturing (Hi-CAM) 研究计划中，同样将航空热塑性复合材料制造技术列为重点研究项目。其主要集中在热塑性复合材料成型技术、装配技术和自动铺丝技术 3 个方面。HiCAM 项目总目标为通过对热塑性复合材料在内的多项高效率制造技术的开发，实现整机复合材料生产效率 60 ~ 80 架份 / 月的目标，同时制造成本下降 30% ~ 50%。

随着航空产业对制造效率需求的牵引，热塑性预浸料及相关技术的不断进步。凭借可重复加工、制造工艺灵活的特点，其正在推动航空复合材料的低成本、高效率制造和可持续发展。目前，热塑性复合材料及其相关技术已经成为发展最快的方向之一，研究应用工作持续升温，创新成果也不断涌现。在下一代机型上的大规模应用也在持续酝酿，



▲ 图 5 | 热塑性复合材料机身筒段试验件



▲ 图 6 | 热塑性复合材料的超声波焊接

必将成为未来航空先进复合材料应用的重要增长驱动。

绿色复合材料技术

复合材料及其制品绿色化，是推动复合材料可持续发展的重要手段。具体为采用可循环、天然的原材料研制复合材料，并应用于民用飞机的结构制造（尤其是内饰结构）。

随着复合材料在民用飞机上的应用比例不断提高，复合材料的大规模应用带来了资源回收利用及环境影响等新的问题。在 2013 年欧盟政府启动其最大的科研创新框架计划《地平线 2020 (Horizon2020)》中，“可持续发展与天然资源”在 5 个重

点资助领域排名第二，其中就包括绿色航空复合材料。我国“十三五”规划纲要和《中国制造 2025》规划中，也多处提出“绿色制造”概念和指标，开发“航空绿色复合材料”已经成为当前世界各国关注和研究的热点。

目前绿色复合材料多处于研发验证阶段，主要采用可降解的高分子材料、来自植物资源的生物质树脂、植物纤维材料、绿色纸蜂窝材料等来制备性能相当但更环保的复合材料，同时开展提高复合材料的可加工性、阻燃性及力学性能等研究。绿色复合材料的研发和应用对促进扩大内饰结构复合材料应用、推动航空复合材料可持续发展具有不可替代的作用。

预浸料新产品

随着材料技术的进步，更强的纤维材

▼ 图 7 | 美国 HiCAM 项目中热塑性预浸料自动铺放试验



▼ 图 8 | 东丽公司热固性预浸料产品



料、性能更加优异的高分子树脂使得复合材料的性能不断提升。

美国赫氏公司首先推出了 IM10 碳纤维，其拉伸强度接近 7000MPa，模量突破了 300GPa。随后东丽公司于 2021 年推出 T1100/3960 预浸料系统，其中碳纤维 T1100 的拉伸强度达到 7000MPa，模量为 324GPa。3960 树脂为高温固化的高韧性环氧树脂，该预浸料可使用非热压罐固化成型。这意味着更低的制造成本和更轻的复合材料结构重量。

东丽先进复合材料 (Toray advanced composites) 近期推出了用于夹层结构的聚醚砜基碳纤维预浸料 TC1130，其与蜂窝具有良好的粘接性能，解决了热塑性复合材料粘接强度低的问题，可广泛应用于航空内饰结构。这使得蜂窝夹层结构的制造更加方便，产品更加耐用。

性能更加优异、功能更加丰富的新材料不但拓宽了航空复合材料的应用范围，也使得现有零件的性能不断提升，复合材料结构的应用将会获得更大的收益！

结语

回顾商用飞机发展的历史，复合材料的应用技术和水平不断提升，复合材料的创新发展也日新月异！下一代飞机的复合材料水平必定会达到一个更新的高度。新材料、新工艺的不断成熟与应用有力推动了商用飞机复合材料的高水平发展。其中液体成型技术、热塑性复合材料、绿色环保复合材料和性能更优异的预浸料新产品等是重要的技术发展方向，具有重大产业价值。国内需加大对上述技术的投入和布局，为商用飞机复合材料的高水平应用和发展提供技术和政策保障，更好地面对未来的挑战和机遇！ ■

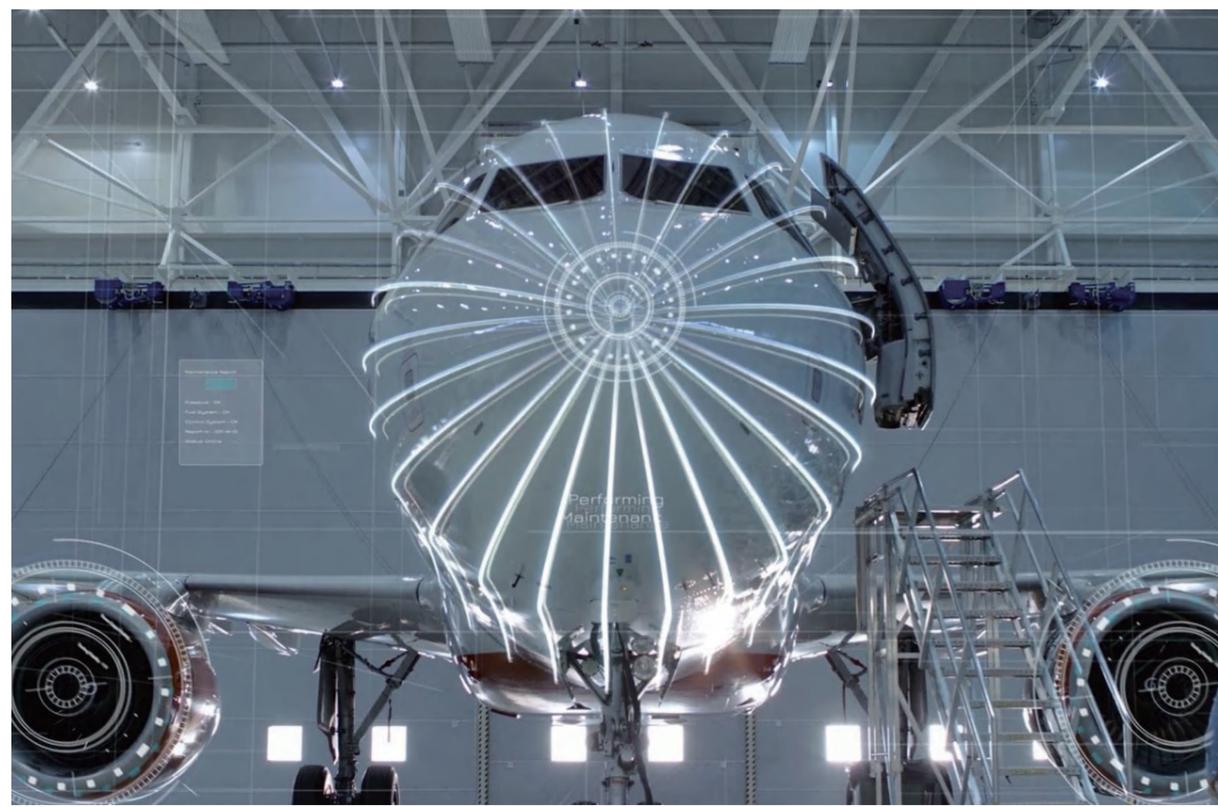
由赋能到引领： 仿真技术为复合材料研制注入新动能

文 | 林德志 汤家力 王春寿

在商用飞机追求经济性、舒适性的过程中，复合材料因具备轻量化、高强度、耐疲劳等特性，已成为现代大飞机结构设计的核心材料，其应用规模与技术成熟度正成为衡量航空制造能力的关键指标。然而，传统复合材料研制依赖“试错—修正”的经验模式，面临设计周期长、制造成本高、多物理场耦合机理复杂等痛点，亟须技术革新突破瓶颈。

仿真技术作为数字孪生的核心工具，正以“虚拟验证协同物理试验”的颠覆性路径，推动复合材料研制从“经验驱动”向“数据驱动”转型：从早期辅助设计

▼ 图 | 柯林斯航空航天



的“赋能者”，逐步成为贯通“设计—制造—验证—运维”全流程的“引领者”，其不仅可以重构研制效率边界，更可以催生以仿真技术为支撑的“材料—设计—制造—维修—运营—成本—试验”一体化数字化设计新型研发模式。

什么是仿真

仿真是一种利用模型复现实际系统中发生的本质过程的技术。从本质上来

▼ 图 1 | 仿真技术理论层级



▼ 表 1 | 仿真技术分类

类别	描述
物理仿真	用于模拟物理现象和过程，如空气动力学、热力学、电磁学等
化学仿真	用于模拟化学反应和物质转化过程
生物仿真	用于模拟生物系统的行为和功能
社会仿真	用于模拟人群和社会组织的行为模式和发展趋势
经济仿真	用于模拟经济活动和市场行为
工程仿真	用于模拟工程结构和设备的性能和行为
数值仿真	用于计算和分析复杂的数学模型，如流体力学、热传导等
图像仿真	用于生成逼真、高质量的图像
虚拟现实仿真	利用计算机技术和交互设备创造出可以让用户身临其境的虚拟环境
验证性仿真	用于验证和评估已有理论或设计的正确性和可行性
预测性仿真	用于预测未来的发展趋势和行为模式
优化性仿真	在满足特定要求的前提下，寻求最优解或最佳方案的过程
基于规则的仿真	用于描述和实现复杂的逻辑关系和行为模式
基于对象的仿真	以对象为核心，通过对象之间的交互来模拟系统行为的方式
基于事件的仿真	以事件触发为基础，通过事件间的相互作用来模拟系统行为的方式
其他	其他可以通过计算机/模型等方式表达的非真实场景

看，仿真技术可以拆解为三层：数学+物理学（底层）、计算机科学（中层）、工程学（外层）。从底层的物理规则和数学公式出发，以现实系统的规则打造仿真内核；而后这些法则经过计算机语言编程和算法封装，沉淀为仿真计算求解器，并利用计算机图形学实现可视化和用户交互；最后，结合特定领域工程学的需求，解决工程中的实际问题。它是综合运用数学、物理学、计算机科学等多种学科知识，以及模型构建、数据分析和计算机编程等技能的一种现代科技手段。仿真技术可以应用于科学研究、工程技术、经济管理和军事等领域，为人类解决复杂问题提供了重要的技术支持。

仿真技术的分类主要根据其研究对象、方法和目的等方面进行区分。主要概括为以下几种：

根据研究对象的不同，仿真技术可以分为物理仿真、化学仿真、生物仿真、社会仿真、经济仿真、工程仿真等。

根据方法的不同，仿真技术可以分为数值仿真、图像仿真、虚拟现实仿真等。其中，数值仿真主要用于计算和分析复杂的数学模型，如流体力学、热传导等；物理仿真主要用于模拟物理现象和过程，如电磁场、声波传播等；图像仿真主要用于生成逼真、高质量的图像；虚拟现实仿真则是指利用计算机技术和交互设备创造出一种可以让用户身临其境的虚拟环境。

根据目的的不同，仿真技术可以分为验证性仿真、预测性仿真和优化性仿真等。其中，验证性仿真主要用于验证和评估已有理论或设计的正确性和可行性；预测性仿真则用于预测未来的发展趋势和行为模式；优化性仿真则是在满足特定要求的前提下，寻求最优解或最佳方案的过程。

不可或缺的仿真技术

仿真技术在大型飞机的复合材料应用研制过程中起着至关重要的作用，它的应用范围涵盖了从材料选择、结构设计、生产制造、维修维护、运营管理、成本控制到试验验证的整个流程。通过仿真技术的运用，可以显著提高飞机结构的效率，增强飞机的安全性能，并激发创新的潜力。

在材料选择阶段，仿真技术可以帮助研发人员预测不同复合材料在不同环境下的性能表现，从而选择最适合的材质。在结构设计阶段，仿真技术能够模拟各种设计方案的力学行为，优化结构设计，确保设计方案的合理性和可行性。在生产制造阶段，仿真技术可以预测制造过程中可能出现的缺陷和问题，指导生产流程的优化。在维修维护阶段，仿真技术能够模拟维修方案的效果，确保维修措施的有效性。在运营管理阶段，仿真技术可以帮助预测飞机在不同飞行条件下的性能表现，为运营决策提供科学依据。在成本控制方面，仿真技术可以减少实物试验的次数，降低研发成本。在试验验证阶段，仿真技术可以辅助进行试验设计和结果分析，提高试验的效率和准确性。

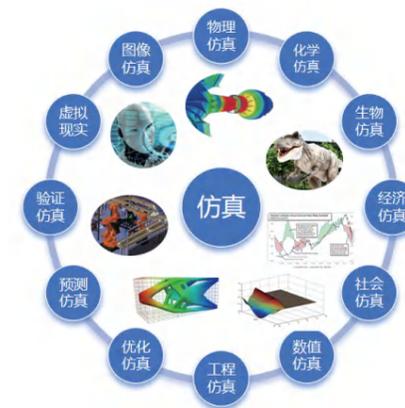
总的来说，仿真技术是大型飞机复合材料应用研制中不可或缺的工具，它对于提升飞机的性能、保障飞行安全、促进技术创新具有重要作用。

赋能复合材料应用研制

在大飞机复合材料应用研制工作中，仿真技术在材料选型、结构设计优化、试验设计与验证、制造工艺仿真与优化、维修维护虚拟设计与验证等方面发挥了重要的作用。

在复合材料应用材料选型工作中，

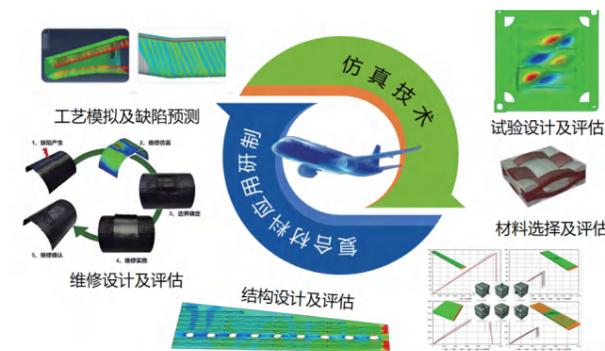
基于仿真技术预测和评估不同材料在不同工况下的性能表现。通过建立材料模型和仿真模型，模拟材料在不同温度、湿度、应力等条件下的力学性能、耐久性能等关键指标。这些仿真结果可以为原材料选型提供重要的参考依据，帮助决策者选择最适合的材料。



▲ 图 2 | 仿真分类示意



▲ 图 3 | 仿真技术的主要作用



▲ 图 4 | 仿真在复合材料应用研制中的作用

在复合材料工艺性能评估工作中, 仿真技术用于优化复合材料的设计和制造工艺。复合材料的性能不仅取决于原材料的选择, 还与材料的制备工艺密切相关。通过仿真技术, 对不同工艺进行模拟和优化, 以获得最佳的材料性能和制造效率。这对于提高复合材料的质量和降低成本具有重要意义。

在复合材料结构设计中, 仿真技术在复合材料结构强度分析、结构优化设计、结构虚拟试验、结构疲劳与损伤及维修维护等工作中也发挥着重要的作用。在结构强度分析中, 面向复合材料结构静强度、动强度、疲劳强度等分析内容, 已逐步形成多层次仿真分析技术体系以及工作流程。

在复合材料结构设计优化中, 基于仿真技术开展面向刚度剪裁的设计优化, 通过复合材料的刚度方向性及其变形耦合来控制翼面结构的静力或气动弹性变形。采用拓扑优化、尺寸优化和几何参数优化等优化仿真技术开展结构优化设计, 为结构效率提升提供数值参考。

在复合材料结构试验设计与优化中, 仿真技术可以用于优化复合材料结构的试验方案确定及试验风险评估等工作。通过建立复合材料结构的有限元模型, 可以模拟不同载荷条件下的应力、应变和变形情况, 并根据仿真结果确定最佳的试验方案, 包括加载方式、贴片方案、加载路径、加载点等。当前, 复合材料结构虚拟试验分

析已成为物理试验实施前的必做科目, 通过建立基于试验仿真的试验工作基本流程, 为试验顺利开展、降低试验风险提供了有力的支撑。

复合材料结构试验设计及实施过程中, 试验件设计方案的评估、试验夹具的设计及试验失效模式的预测等工作均基于仿真技术提前开展, 同时在试验数据处理、跨层级试验件数据应用等方面, 依托仿真技术进一步提高试验数据的应用水平。

在复合材料结构制造工艺研发过程中, 基于虚拟工艺仿真分析技术开展预成型缺陷预测、热分布固化变形及液体成型仿真分析等工作。对热固性复合材料, 进行成型过程中预浸料温度控制、成型过程中压力、温度等环境参数的优化。对热塑性复合材料, 进行成型过程温度、压力的最优选择。在工装方案优化中, 通过仿真技术可以模拟不同模具设计方案下的成型过程, 以找到最佳的模具设计方案, 确保复合材料的质量和表面光滑度。

在针对复合材料结构维修维护的仿真分析中, 通过开展维修可达性、维修方案确定及确认等方面, 基于仿真技术评估维修操作的可行性和效果, 模拟不同维修方案的强度水平与维修可行性, 为维修决策提供科学依据, 确保结构安全可靠。同时, 仿真技术还可用于预测维修后结构的长期性能, 优化维修周期, 降低维护成本, 提升复合材料结构的使用寿命和经济效益。

针对复合材料自动化制造应用, 通过仿真技术模拟不同参数设置下的纤维铺放过程, 以找到最佳的参数(温度、压力、速度)组合, 确保纤维的均匀分布和良好的层间结合。通过仿真技术可以模拟不同纤维铺设方向对复合材料性能的影响, 从而确定最佳的纤维铺设方向。

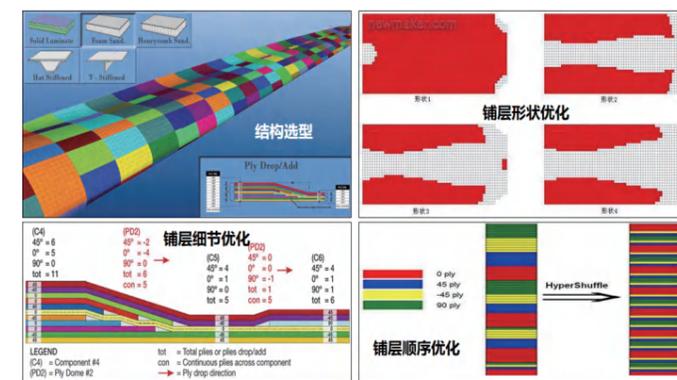


图 9 | 铺层优化示意图

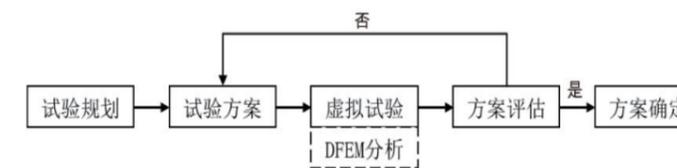


图 10 | 试验设计流程

图 5 | 基于 DIGMAT 的虚拟材料性能试验

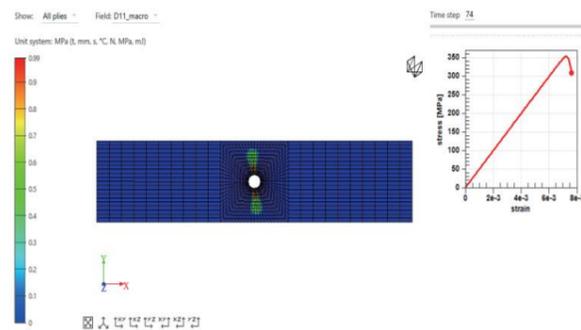


图 7 | 复合材料多层次强度仿真分析验证体系

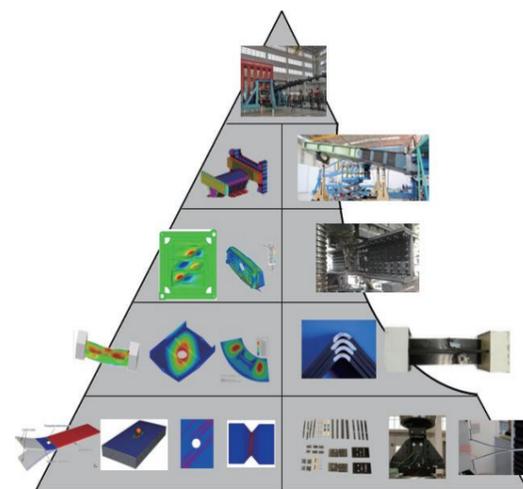


图 6 | 预浸料材料成型性能评估

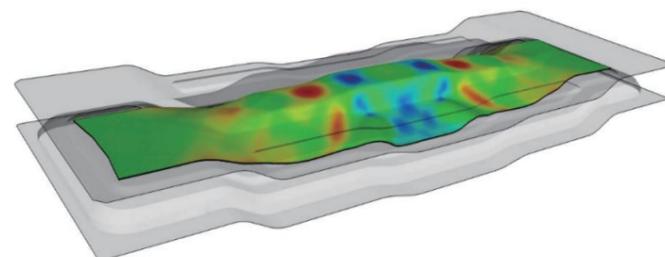


图 8 | 仿真在结构设计中的典型应用

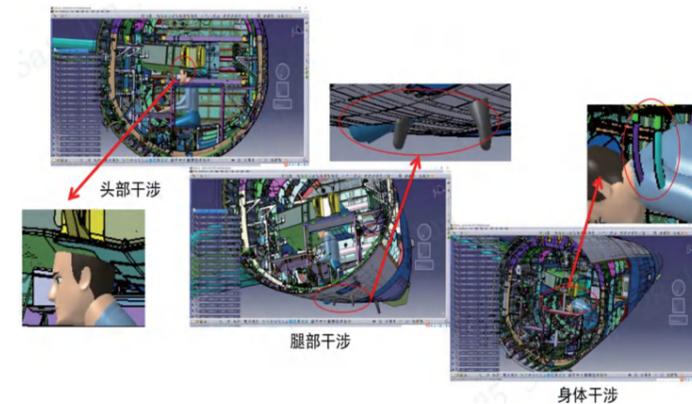
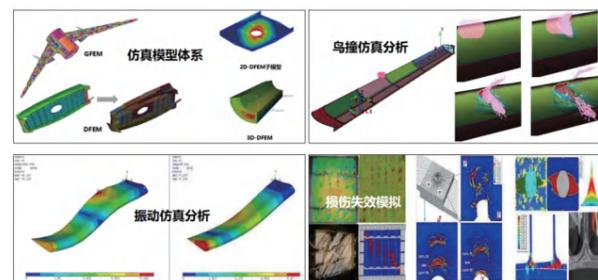


图 11 | 维修可达性仿真示意图

引领未来复合材料应用研制

仿真技术正从辅助工具演变为复合材料创新的核心引擎, 其价值不仅在于缩短研发周期、降低成本, 更在于解锁传统手段难以触及的设计自由度。随着量子计算、AI 大模型的渗透, 未来复合材料研发或将进入“虚拟优先”时代——材料性能由算法定义, 应用场景由仿真开拓, 而实验仅作为关键验证节点存在。

仿真技术如何引领复合材料研制？

首先，以仿真技术为支撑，强化以取代或减少物理原型为目的的虚拟设计与优化。在复合材料多尺度建模与仿真分析方面，实现从微观(纤维/基体界面)、细观(单层板)、宏观(整体结构)进行一体化建模，精确预测材料性能和结构行为。

其次，在设计优化方面，实现以满足性能(强度、刚度、振动、疲劳与损伤容限等)和约束(制造工艺、装配、成本)为目的的仿真优化，自动寻找最优的材料分布、铺层

图 12 | 自动铺放路径模拟仿真

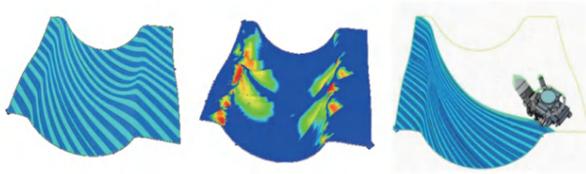


图 13 | NASA 多尺度仿真技术远景规划

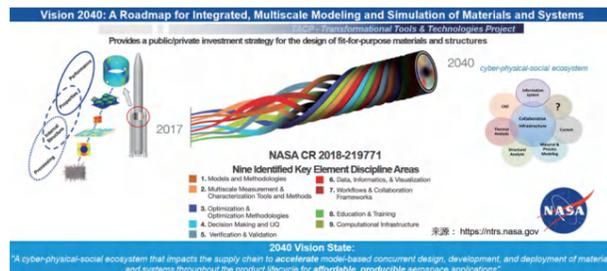


图 14 | 以仿真技术为依托的复合材料卓越设计

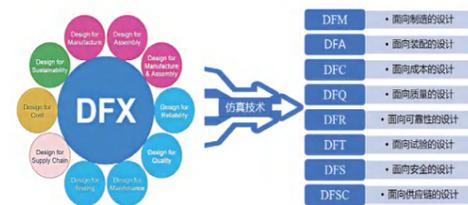


图 15 | 以仿真技术为链接的复合材料设计制造一体化



顺序、纤维取向等设计参数。

在制造工艺方面，开展制造工艺模拟与缺陷预测，如依托多物理场仿真技术为支撑的复合材料固化过程模拟，预测固化过程中的温度场、固化度、残余应力/应变、变形翘曲等，优化固化工艺曲线(温度、压力、时间)，减少残余应力和变形。以流固热化耦合仿真为基础的树脂流动与浸润(RTM, VARTM等)，模拟树脂在预制体中的流动路径、充模时间、压力分布，预测干斑、孔隙等缺陷，优化注胶口位置、真空策略。面向自动铺放/纤维缠绕路径规划仿真，模拟铺放/缠绕路径，预测层间贴合度、张力影响、潜在的褶皱或桥接。在增材制造(复合材料3D打印)方面，模拟熔融沉积、挤出过程的热-力耦合，预测层间结合、变形、残余应力等。

结语

仿真技术已经从辅助工具演变为复合材料研发的核心驱动力和战略制高点。通过实现虚拟化、精准化、智能化和协同化，仿真技术正在重塑研发范式，从“设计—制造—测试—失败—修改”的串行循环转向“虚拟设计—虚拟验证—优化—物理验证”的高效并行模式。同时赋能创新设计，解锁传统方法无法实现的复杂结构和多功能集成。也在打通研产用全链条无缝连接材料设计、结构设计、工艺制造、性能验证和服役预测。

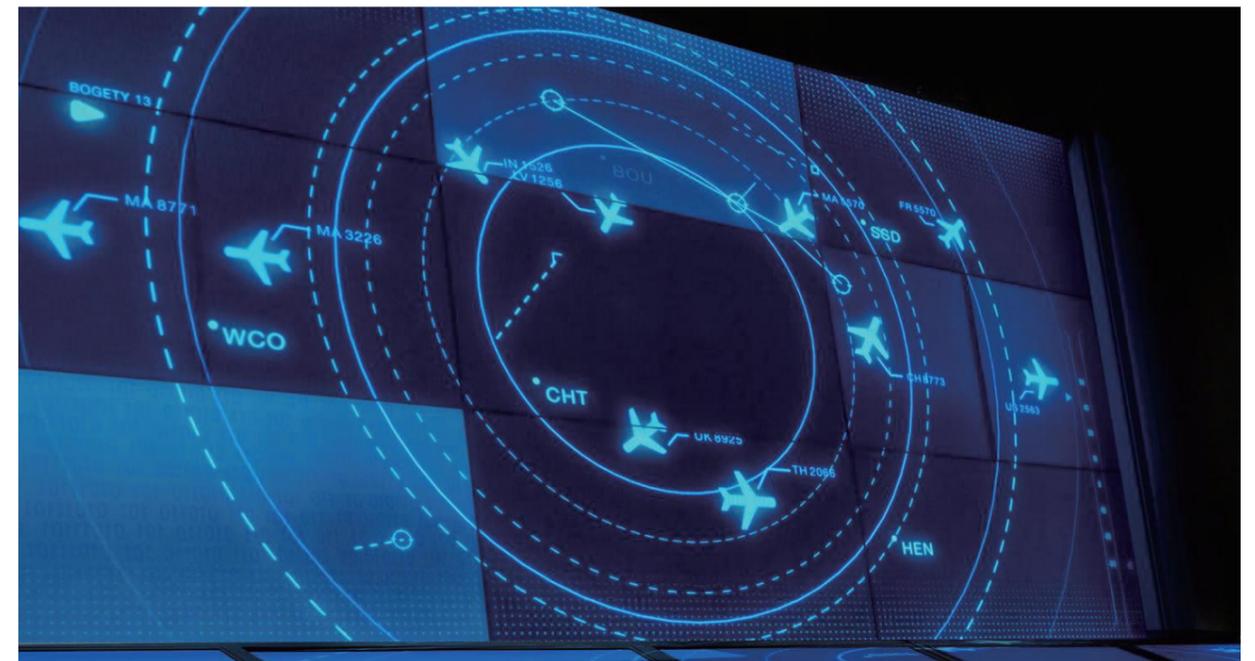
未来，随着仿真技术自身(AI融合、多尺度、数字孪生等)的不断突破，以及计算资源的日益强大和普及，其在复合材料领域的引领作用将更加深入和全面。谁能更有效地掌握和运用先进的复合材料仿真技术，谁就能在未来的高性能材料应用竞争中占据显著优势。仿真技术不仅是研发的工具，更是复合材料创新应用的“孵化器”和“加速器”。■

结构健康监测技术助力民机复合材料应用

文 | 邱雪琼 汤家力 王春寿 奚蔚

复合材料结构的损伤模式复杂多样，其结构本身的强度以及破坏失效模式难以预测，并且复合材料的损伤具有隐蔽性，飞机结构设计时，机体结构的安全性和可靠性主要依赖增加设计裕度，如：增加铺层厚度、降低许用值、设置安全系数等，以及足够的积木式试验验证和运营中定期维护来保障。复合材料结构设计值拘泥于含目视勉强可见冲击损伤的剩余强度，目前的复合材料结构设计方法往往偏保守，这限制了复合材料轻量化优势的发挥。提高设计值以及提升结构安全性的一个有效途径是采用新型结构健康监测技术(SHM)替代目视检测，更精准可靠地检出威胁结构安全的冲击损伤。

图 | 柯林斯航空航天



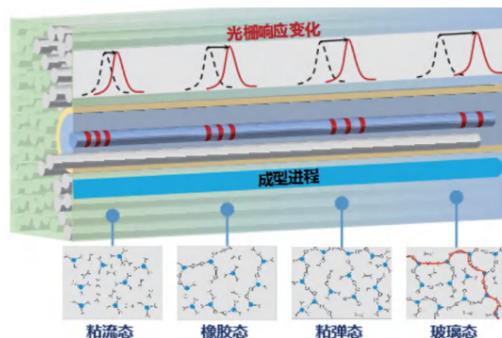
SHM 技术是利用传感器获取飞机结构状态参数，通过对监测数据预处理和特征提取，经过损伤模型和损伤容限寿命模型分析，识别并量化结构状态，实现对飞机结构健康状态的监测、诊断与评估，指导飞行任务决策和飞机维护保障，其过程类似于人体利用分布于全身的神经网络来感知和判断自身的健康状况。SHM 在增加民机复合材料用量、减少飞机运营成本、提高飞行安全等方面具有非常突出的潜力和优势，是确定结构完整性的革命性创新技术。

SHM 技术在飞机复材结构研制的不同阶段都能带来收益。在制造阶段，制造全程数据监控能提升生产效率，降低成本，提高产品质量；在试验阶段，通过更广的过程精确监控提升试验可靠性，降低试验周期，探索极限边界；在运营阶段，实时状态监控保证飞机的安全性，视情维护策略可缩短维护时间、提升经济性、延长飞机寿命；在设计阶段，基于创新监测数据的设计能带来结构效率的提升、结构的减重。

▼ 图 1 | 结构健康监测技术概念



▼ 图 2 | 复合材料中埋入 FBG 监测固化成型进程



智能制造： 优化制造工艺、提升产品质量

热压罐成型是飞机复合材料结构较为常用的成型工艺，但是热压罐体积大，难以维持罐体内环境温度、压力分布的均匀与稳定。不均匀的温度、压力不仅会造成材料各部位热膨胀程度不同，导致材料发生形变，更使得复合材料各部分固化速率不一致，导致固化过程中材料内部形成较大的残余应力，冷却脱模后材料的自由形状、强度等性能参数与预期存在差异，严重时会导致材料制备的失败。

光纤布拉格光栅传感器（FBG）具有体积小、灵敏度高、不受电磁干扰、抗化学和电腐蚀，同时和碳纤维具有相同的丝状形态，与碳纤维复合材料具有较好的相容性，因此可以方便地埋于复合材料内部，并对固化成型过程中的工艺参数进行监测。通过拉丝塔在线光栅刻写技术，目前可实现 80 μ m 小芯径 FBG 阵列光纤的制备，单纤上 FBG 数量可大于 1000，通过多种复用方法可实现单根光纤上密集 FBG 的解调分析，从而实现复合材料多位置、多层的监测，通过涂覆聚酰亚胺材料，传感器耐高温性能可超过 300 $^{\circ}$ C。在复合材料预浸料铺层中埋入 FBG，能够提供材料内部准确的温度与应变数据及发展历程，实现由表及里、由点及面、由静及动的数据采集，经分析获得内部残余应变与工艺过程的映射关系，从而帮助优化复合材料固化工艺规范，提升制造质量。同时为复材工艺仿真研究提供大量基础数据，这对减少未来飞机复材结构研制成本与缩短研制周期意义重大。

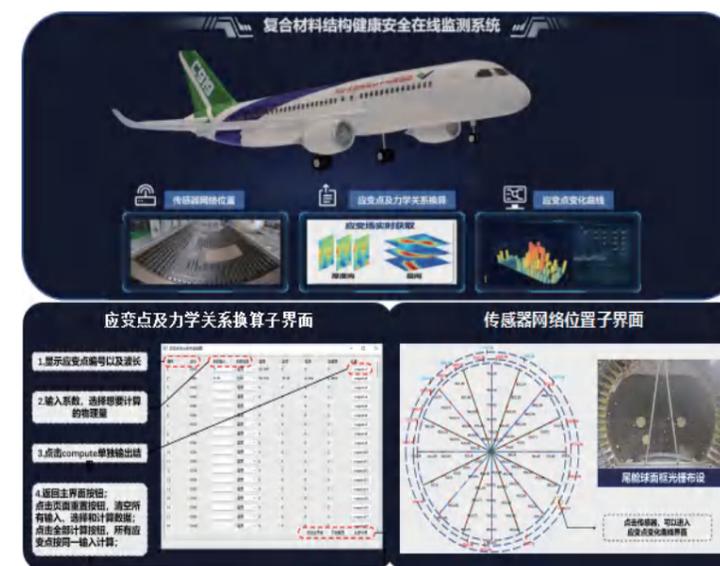
在热压罐工艺外，复合材料结构各种制造场景对于温度场、压力场、应变场、

流动场的精准智能监测均有需求。固化反应阶段工装和零件热分布、复合材料零件固化超温评估、固化反应前设备（固化炉、热压罐等）温均性评估，均需要温度场监测；热压罐工艺成型、液体成型工艺成型、热塑成型工艺等成型过程固化反应阶段需要压力场监测；各种成型工艺零件固化后或脱模后的残余应变/应力也需要监测；此外，液体成型工艺流动前沿还有流动场监测需求。基于以上精准智能监测，可获得各种成型工艺制造场景固态—液态—固态历程中物理量变化曲线及云图，识别监测参量在时间或空间上的突变与分层、厚度不均等的关联，据此开展工艺优化，以期提升产品质量。

高效试验： 提升试验效率、降低试验成本

传统复材结构静力和疲劳试验通常采用应变片测量结构应变，应变片是一种测量应变很成熟的方法，成本也较低，但其尺寸较大，当涉及大型部件大面积多位置监测时，检测通道较多，布置和操作系统较为复杂、繁重的采集线路安装工时较长。此外，当进行环境试验，如热应力试验时，还要求传感元件及其连接线路具有耐高温性和高温测量准确性，热应力试验中温度是不断变化的，因此还需要对应变片做动态的温度补偿，这增加了数据测定和工程实际应用的难度。

工程上地面力学试验及试飞试验中已开展了大量 SHM 应用研究，如基于分布式光纤传感器的结构状态实时感知，实现了受载状态下复合材料翼梢小翼的应变场实时感知，可实现大型结构的表面应变场重构；基于超声导波的主动式损伤诊断技术用于监测静力加载下的加



▲ 图 3 | 大型结构可视化应变监测系统

强筋界面损伤，可实现变温下复合材料结构的局部多损伤诊断；分布式光纤传感网络应用于大型襟翼结构热应力试验中，解决了传感元件及连接线路耐高温难题，及动态温度历程下的应变测量难题；SHM 技术在积木式验证试验各个层级的应用与验证，已积累了大量数据，基于监测数据库构建各种损伤失效模型，开发了对应的损伤与剩余强度评估软、硬件系统，及在线可视化应变监测系统。

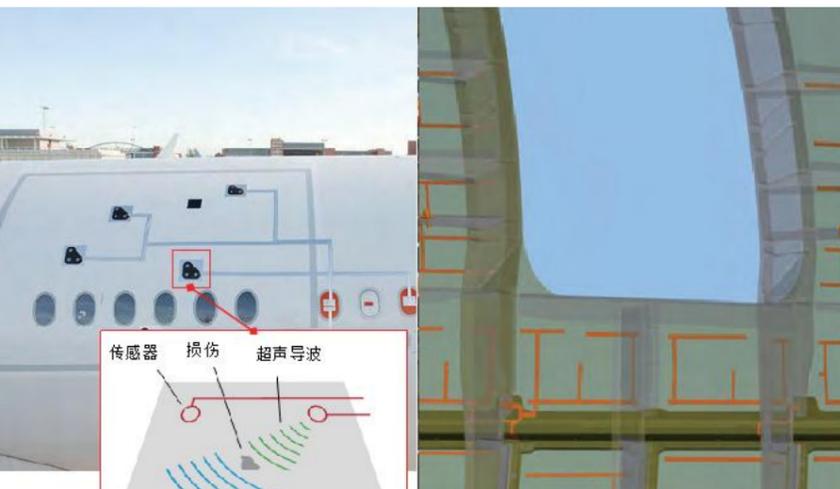
在静力和疲劳试验中加装结构健康监测监测系统，可以及时发现试验中结构的损伤萌生和扩展，以及难达部位的损伤监测情况，极大地降低结构日检和定检时间，并且可以有效减少结构无效拆装和由此引发的二次损伤，提高试验效率，缩短结构的研制周期，同时，形成飞机地面强度试验数据中心，在此基础上可以促进飞机结构数字孪生、虚拟试验、虚拟现实等诸多技术的发展，帮助缩减积木式验证试验的物理试验矩阵，降低试验成本。

视情维护： 提升飞行安全、降低运营成本

SHM 技术在飞行试验和服役状态监测应用方面，目前报道的主要是在小型无人机上的应用，NASA 采用光纤光栅传感器网络布设在无人机机翼结构中，实时感知机翼变形，实现亚声速固定翼飞机姿态控制；韩国航空研究所与韩国科学技术院也采用光纤光栅传感器对无人机的飞行历程和姿态变化进行了监控，并开发了通过无线网络连接的机上一机下数据传输系统，实现在线监测；空客在 A350XWB 飞行验证机的复合材料机身蒙皮及客舱门周围布置声—超声传感器监测冲击损伤。

SHM 技术在飞机运营维护方面可发挥如下作用：一是提供民机结构健康状态信息，可以及时发现结构，特别是检测维护难达区域的结构安全隐患，从而提高结构的安全性；二是通过采用更自动化的 SHM 设备，减少间接任务项，能节约检查维护时间和成本，如对难以进入、需要拆卸的区域，使用 SHM 技术会产生一

▼ 图 4 | A350 机身上布置声—超声传感器监测冲击损伤



系列优势，包括减少拆卸、检查和重新组装难以进入的区域的维护人力；三是基于 SHM 数据的视情维护 (CBM) 策略，可以优化检查间隔，降低结构的运营成本，提高飞机的使用频次，延长结构预期寿命。

视情维护是 SHM 技术在民机应用的长远目标，其带来的效益可从以下方面来实现。

首先，在手册规定的检查计划之前通过监测与结构潜在损伤有关的环境条件或参量，可改进维修计划或飞行操控，例如，监测特定结构区域导致腐蚀的环境条件，在手册规定的维护要求之前就可根据监测的信息开展检查，在早期就采取简单的小修，避免以后的大修。

其次，SHM 技术监测到飞机结构实际运营环境没有设计的严酷，能让检查间隔增长、优化或自定义，如增压舱在短程任务下并没有达到所设计的巡航运营条件。

第三，SHM 技术让结构寿命评估可以比基线参量更精细，当结构在比设计预期更低的载荷或环境下工作时，结构的预期寿命可延长，另外，对关键结构部位、老龄结构以及维修后的结构进行在线的健康监控，及时掌握飞机结构的健康状态，并采取相应的维护手段，可延长结构的使用寿命。

创新设计： 提升结构效率、发挥复材优势

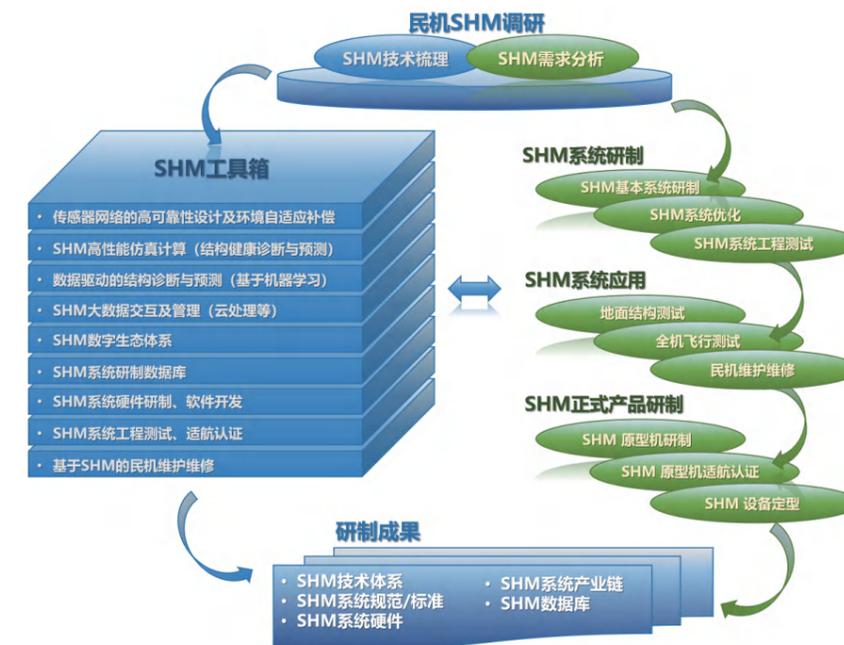
运营阶段积累的结构状态数据可辅助结构设计优化，结构的设计和维护程序是多种参量，如载荷、材料、尺寸、重量、可制造性、可维护性及所有相关成本，共同优化迭代后的结果。SHM 系统不会直接单独影响这些因素，但能帮助形成更优的结构，如重量、成本等方面的优化。

基于实时、高精度的损伤数据和视情维护策略，可以提升结构设计值，对工作载荷去保守、或者降低安全系数，支持更高效的结构设计。近期目标可初步探索基于飞机结构健康监测数据的结构耐久性损伤容限设计，实现部件级的结构减重；远期目标将实现广域在线监测应用，随着关键技术逐步健全、积木式验证逐渐完整，建立针对型号的耐久性损伤容限分析系统和各类数据库，将实现全机级的飞机减重和完全视情维护。

展望与挑战

SHM 技术在民机应用的发展历程是对复材结构状态的认知逐级加深的过程。第一阶段实现结构试验中的应用，在结构分析和试验中获益；第二阶段实现航线飞机的离线监测，在飞机航线维护中获益；第三阶段实现航线飞机的在线监测，除了在飞机检测维护中获益，还将实现部件级结构的减重；最终将建立航线飞机全集成的传感系统，实现全机的结构减重和飞机维护获益。

未来 SHM 技术将从实验室及模拟飞行条件下的验证到现实的飞行应用；从少量传感器对单个或少数参数的局部监测到大型传感器网络全局多参数的监测；从相对简单的结构状态参数测量及检测事件是否发生和定位，到结构损伤的直接定量监测，及对复合材料结构剩余寿命进行预测；从制造、服役、维修各环节中各自应用到集成化传感网络对复合材料结构进行全寿命周期的健康监测。这将面临众多的工业化挑战，包括传感器系统本身的高可靠性、稳定性、耐久性，传感器系统与结构乃至监测系统与飞机全机的高度集成，海量数据的存储、管理并从中取得有效的特征信息以实现结构的精确监控，以及在



▲ 图 5 | 民机结构健康监测技术路线

重量、成本、适航符合性方面的挑战等等。

民机结构健康监测应用的重点任务包括通用 SHM 关键技术研究 and 针对具体场景的飞机 SHM 系统研制。首先，通过调研明确民机结构健康监测需求，梳理民机 SHM 技术体系。然后，按照 SHM 关键技术和系统研制两条主线任务开展：一方面，研究 SHM 关键技术问题，构建 SHM 工具箱；另一方面，研制民机 SHM 原型机，在地面结构测试、全机飞行测试和民机维护维修中进行试用，开展机载应用验证，在此过程中迭代完善 SHM 工具箱，最终完成设备研制和定型。通过上述研究，最终将研制出型号应用的各种 SHM 设备，发展出完整的民机 SHM 技术体系和标准规范，建立起面向大数据分析的民机 SHM 数据库，初步形成中国民机 SHM 系统的研制产业链。■

SAF 发展陷入“观望”：谁将打破僵局

文 | 王美廷

目前，全球 SAF 产业正处于技术链条重组、投资机制转变、碳减排价值量化的重要时期，在诸多不稳定因素下，打破生产商和航空公司相互观望的局面，是恢复 SAF 市场活力的关键。

尽管全球航空业普遍认同可持续航空燃料（SAF）是实现脱碳的关键路径，今年实际投资和项目推进却陷入了僵局。根据波士顿咨询公司（BCG）3月份的调查显示，约三分之二的企业将采取谨慎策略，极少数愿意承担先行者风险。分析原因，主要是资本在政策扰动下回归了理性。

▼ 图 | 芬兰耐思特石油



美国：战略“转弯”

2025年初，特朗普上台后冻结了部分清洁能源项目的拨款，但于2月宣布向蒙大拿可再生能源公司生物燃料生产厂提供16.7亿美元贷款担保。该资金将用于蒙大拿州大瀑布城一家可再生燃料工厂的扩建，以生产SAF、可再生柴油（RD）和可再生石脑油（RN）。迄今为止，特朗普政府对可再生能源表现出来的态度依旧趋于保守。《通胀削减法案》（IRA）中的40B和45Z条款原本是联邦层面对清洁燃料的重要优惠措施，也是引导市场投资的重要杠杆。适用于2023年至2024年的40B条款是SAF的短期专项激励政策，规定SAF的减排百分点达到至少50%，企业能够享受税收抵免优惠；每超过一个百分点，企业获得0.01美元的单位抵免，总抵免上限为每加仑1.75美元。45Z条款则用于从2025年起依据温室气体减排效果的差异化补贴；然而，45Z条款的实施细则至今仍未发布，造成市场不确定性上升，部分企业因此暂停新项目的资金决策。

在联邦政府指向不明确的环境下，美国州级SAF激励机制仍在生效。这在一定程度上稳定了市场预期，成为目前企业投资SAF的安全锚。

以华盛顿州为例。2023年7月出台的《第5447号参议院法案》（SB 5447）适用于累计生产能力至少每年200万加仑的SAF设施，为SAF的生产和使用提供了强有力的税收激励。近两年内，资本在SB 5447等地方政策引领下不断涌入。创业公司Twelve在2024年9月宣布获得6450万美元的资金，并表示将用共计7亿美元（包含2023年筹集的6.45亿美元）建设其位于华盛顿摩西湖的SAF生产设施AirPlant One。该工厂将使用可

再生能源将二氧化碳和水转化为SAF，目前处于建设的最后阶段，预计将在年中正式投产。SkyNRG公司的Project Wigeon项目从垃圾填埋场、污水处理设施和畜禽粪便中收集生物甲烷用于生产SAF和RD。受益于华盛顿州的清洁燃料标准、气候承诺法案以及州内SAF生产立法，该项目计划明年在华盛顿Wallula Gap工业园区动工，并于2029年投产。今年2月，华盛顿州商务部通过州长经济发展战略储备基金给该项目拨款150万美元，用于前期的文化和地质勘察。

此外，伊利诺伊州自2023年7月1日至2032年底实施可持续航空燃料购买抵免（SAFPC），航司在州内每采购或使用一加仑SAF可获得1.50美元。税收抵免上限为1000万加仑由大豆油制成的SAF，一年内购买超过这个量时，企业将不再获得额外抵免。明尼苏达州提供可退还的生产端税收抵免，最高可达每加仑2美元。这包含每生产或混合一加仑SAF可获得的1.5美元补贴，以及对于生命周期内温室气体减排超过50%的SAF产品0.5美元/加仑的额外激励。该政策从去年7月1日起生效，持续6年。

▼ 图 | 蒙大拿可再生能源公司



产业发展背景变化

当下的政策扰动正发生在 SAF 产业调整的关键时期。一是 SAF 生产技术日趋多元、各路线竞争加剧，二是产业投资逻辑正在经历系统性转变，三是 SAF 的碳减排价值正通过嵌入碳市场交易体系进行量化并成为企业履责的重要抓手。

从技术路径来看，传统的油脂加氢（HEFA）路线由于废油脂等原料供应紧张且碳减排边际收益趋弱，逐渐不被投资者青睐。醇制油（ATJ）、电转液（PtL）等多种路线并存发展，相继进入商业化阶段。如美国能源部太平洋西北国家实验室（PNNL）从 2010 年开始和 LanzaTech 公司合作开发的 ATJ 技术已于去年年底实现商业化应用。该技术早在 2018～2019 年期间就在维珍和全日空的商业航班上通过了试飞验证；2024 年初，LanzaTech 子公司 LanzaJet 的工厂 Freedom Pines Fuels 在佐治亚州索普顿开业，半年后建成，年底全面投入生产，预计年产 900 万加仑 SAF 和 100 万加仑 RD。

当下的政策扰动正发生在 SAF 产业调整的关键时期。

一是 SAF 生产技术日趋多元、各路线竞争加剧，二是产业投资逻辑正在经历系统性转变，三是 SAF 的碳减排价值正通过嵌入碳市场交易体系进行量化并成为企业履责的重要抓手。

从投资机制看，SAF 产业正从单一采购合同（offtake）向股权投资+技术联盟转变。航空公司从被动买家向主动资本方和共同开发者的角色转型。早在 2022 年，捷蓝航空下属的 CVC（企业风险投资）JetBlue Ventures 宣布参与 Air Company A 轮融资，参投其用二氧化碳制乙醇和甲醇进而生产 SAF 的项目。

2023 年，美联航设立了 1 亿美元的“可持续飞行基金”，至今已吸引超过 20 家企业加入。该基金直接投资了 Viridos 和 Dimensional Energy 等初创公司，推动 SAF 产业从技术研发、商业模式验证迈向规模化验证和实际场景落地。2024 年，空客与法航荷航集团、澳航等合作伙伴共同设立了“可持续航空燃料融资联盟”（SAFFA）基金，吸纳了约 2 亿美元。它投资的首个项目就是位于美国伊利诺伊州的 Crysalis Biosciences，支持改造原有乙醇工厂生产 SAF。这些实例标志着 SAF 需求方已不再满足于只签署中长期采购合同，而是通过控股、参股、组建战略联盟等方式深度绑定上游项目、提升产能，推动技术布局转型、降低产品原料供应与价格波动的风险。

从碳交易市场看，SAF 使用量已通过碳补偿机制计入碳交易市场，航司通过交易行为体现对绿色航空的履责。碳补偿机制将风电、光伏、森林保护等项目减少排放或吸收的二氧化碳量化为碳信用额，企业通过购买碳信用额来抵消其难以直接削减的温室气体排放量。其中，自愿交易的额度为核证碳单位（VCUs）形式。早在 2022 年，可持续生物材料圆桌会议（RSB）就推动 SAF 减排效益通过 VCUs 计入碳信用额体系，打破 SAF 供应链中的地理限制。除此之外，碳信用额度还包括欧盟碳市场（EU ETS）、中国国家核证减排量（CCER）、国际航空碳抵消和减排机

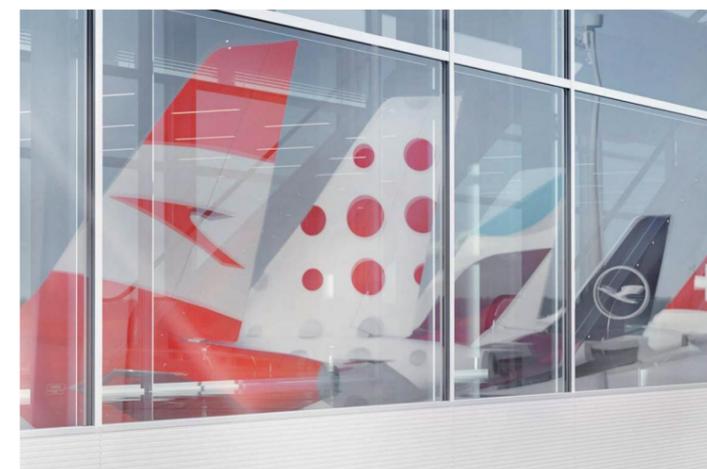
制（CORSIA）等签发的额度。美联航将 Eco-Skies Alliance 项目使用的 SAF 折算为碳信用额，与客户共享碳减排效益。汉莎航空等航司从去年开始将购买的碳信用额纳入企业年度 ESG 报告，以此宣传企业可持续治理能力。

中国产品回流与亚洲跃升

在“十四五”规划和“双碳”目标的引领下，中国 SAF 产能持续增加。2024 年，废弃食用油（UCO）等 SAF 主要原料以出口为主，全年出口量达 295 万吨（同比大幅增长 43.49%）。而 2025 年出口量同比下降 42%，1～2 月累计同比减少约 17.21%。SAF 重要原材料出口量从高位回落，分析原因主要有三。

一是欧盟方面，反倾销税限制中国 UCO 出口。欧盟《清洁燃料标准》要求逐年提升可再生柴油占比，去年强烈刺激了 UCO 进口。今年 2 月 11 日，欧盟委员会发布公告，对原产于中国的生物柴油作出反倾销肯定性终裁，决定对涉案产品征收 10.0%～35.6% 的反倾销税。虽然 UCO 本身不在加征关税产品名录内，但该法规限制了从中国进口生物柴油，而 UCO 作为生物柴油（可再生柴油）主要原料，在出口产品中的需求量显著减少。

二是美国方面，年初打响的中美贸易战加剧了政策扰动形势，导致美国几乎停止了从中国进口包括 UCO 在内的诸多产品。《通胀削减法案》等联邦政策以及加州低碳燃料标准等州级激励措施曾使美国对中国 UCO 的需求一度飙升至 130 万吨，但是今年关税战使得进口商品订单锐减。清洁燃料生产税收抵免（即 45Z 条款）初步指导意见将来自中国的餐厨废油生产的酯基生物柴油（FAME）、氢化植物油（HVO）和 SAF 等都排除在外，进一步



▲ 图 | 汉莎航空

提高了从中国进口的成本。

三是中国方面，自去年 12 月 1 日起取消了 UCO 的出口退税（13%），影响到了出口商的盈利水平。2025 年，国内回收体系逐步完善，利润因素将导致出口产品转向内销，有利于本土 SAF 产业发展。在国际政策扰动与产能利用率的不确定性下，建议中国企业密切关注国际市场需求变化，制定相应的市场策略；提高自身的成本控制能力，以抵御外部风险、支撑长期创新。

亚洲今年 SAF 产能预计达到 350 万吨，超过 2024 年的两倍，可能出现供应过剩，进而导致价格下行压力加大，因此必须增加出口。泰国、日本、马来西亚将为亚洲贡献绿色航空燃料新增产能。今明两年内在亚洲启动的部分可持续航空燃料初创项目呈现出多点开花的态势。

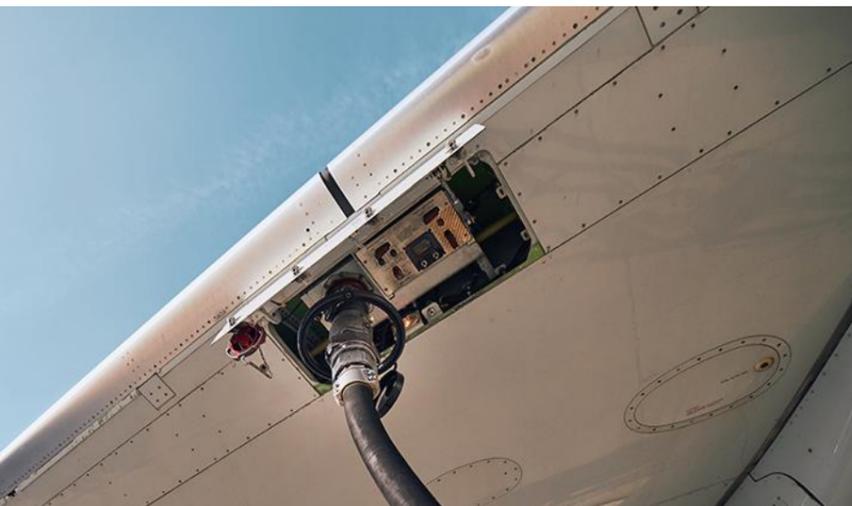
对比现在从欧盟及英国机场出发的航班燃油里必须至少 2% 是 SAF，亚洲政府对使用 SAF 的强制要求仍然起步较晚。明年起，新加坡和泰国才执行 1% SAF 使用量的强制规定，彼时本地 SAF 需求仅占产

能的 14%。其他亚洲国家的强制规定生效更晚，比如韩国要求 2027 年开始使用 1% 的 SAF，而日本是 2030 年起强制使用 10%。预计产能过剩导致了一些亚洲 SAF 项目推迟，尽管如此，亚洲地区 SAF 产业依旧呈现强劲的发展势头，有望在全球航空业脱碳进程中发挥重要作用。

未来趋势研判

明确的政策与先行者机制是为产业赋能的关键因素。不清晰的政策信号将持续压制资本进入的意愿，“政策不明确→投资观望→产能不足→无规模效应→成本维持高位→利好政策缺乏动力”是在美国尤其明显的恶性循环。政府对 SAF 发展目标、补贴机制、技术路径、碳减排核算方式等方面的政策可持续性、可预测性有待加强，执行细则有待明确。航空公司依赖中长期采购合同（如 Amazon、Alaska Airlines 等与 Neste 签署的协议）作为支持工具，未形成全球性市场掺混约束，导致短期商业模式下市场波动较大，项目融

▼ 图 | 芬兰耐思特石油



资效率低、企业投资决策推迟。

先行者机制是指少数企业率先开展商业化试点、技术布局、市场开拓，在尚未形成稳定市场环境前，通过示范效应吸引后继企业加入并逐步加深行业共识、拓展合作网络。World Energy 在加州扩建的工厂将于今年 7 月投入商业运营，年产能从 2000 万加仑提升至 7500 万加仑；Neste 在新加坡 Tuas 的工厂将成为亚洲最大生产基地之一，预计今年中期将 SAF 产能提升至 100 万吨/年；荷兰 SkyNRG 在美国德克萨斯的 SAF 项目启动建设，预计在明年初实现 2000 万加仑产能目标，进一步巩固全球布局。这些项目具备先行者特征，有望成为政策试点和投资机构优先支持的对象。

除此之外，国际碳交易市场上的碳补偿机制有待完善。不同市场差异较大的碳信用认定标准制约了跨区域交易，未来需加强管理碳信用额相关项目的认证流程、推动包括 SAF 在内的碳减排项目纳入统一的核算标准。同时加强对项目透明度的要求，发展区块链、遥感等技术提升碳评估与监测效率，确保碳市场交易体系的完整性，提升市场公信力。解决碳补偿机制标准不一、监管不足的痛点。

综上所述，未来美国清洁燃料生产税收抵免实施细则的公布可能会稳定投资者信心，在政策推进和产能建设上提高确定性；全球 SAF 发展的区域不平衡加剧，亚洲产能扩张，积极布局，表现活跃。SAF 产业的发展亟待优化财政激励机制、形成制度性保障、明确补贴规则与减排核算标准、加强典型项目的示范带动作用、引导资本与技术加速集聚。同时，各国亦应协同发展，在政策、资本、技术与区域之间实现动态平衡，以构建更稳固、韧性更强的绿色航空燃料供应链体系。■

谨慎看好： 全球三大飞机制造商发布最新市场预测

文 | 静宇

航展被誉为航空业发展的风向标，而每一届大型国际航展前夕，各大飞机制造商发布的预测年报也是业界关注的焦点。6 月 16 日，第 55 届巴黎国际航空航天展览会在法国巴黎布尔歇展览中心正式开幕，在此之前作为航展的传统“热身项目”，波音、空客、巴航工业这全球三大飞机制造商先后发布了未来 20 年（2025 年~2044 年）商用飞机市场预测报告。尽管三家的报告各有侧重，但鉴于当前全球贸易竞争局势以及局部地区的不稳定性，三家制造商对于未来全球航空市场都持谨慎态度。

▼ 图 | 廖天航



空客：中产增加和经济增长是关键驱动因素

空客发布的《2025年~2044年全球市场预测》中指出，未来20年，全球旅客周转量（RPK）的年均增长率为3.6%，全球市场将需要43420架新飞机（包括货机），这一预测较其一年前发布的预测数据（42430架）上调了990架。具体到机型来看，这份最新的市场预测报告显示，未来20年市场将需要单通道客机34250架，较其上年预测数据33510架略有上升；宽体客机9170架，较其上年预测的8920架有所下降。报告预测，到2044年，全球在役机队将增加24480架，约18930架飞机将退役。

在空客的这份市场预测报告中特别指出，航空运输业长期的发展受到两个强大的基础性驱动因素支撑：经济增长和人群。空客指出，由于全球贸易增长、GDP增长、全球人口增长等因素共同作用，航空客运量在短期反弹后，预计中长期年均增长率在3.6%左右。具体来看，空客预测，全球国内生产总值（GDP）预计将以每年平均2.5%的速度增长，推动商务和休闲旅行的需求。全球中产阶级的增长将成为支撑航空运输业增长的关键因素。预计到2044年，全球将有15亿人加入中产阶级，这一群体最有可能选择航空出行。城市化和连接性也将推动航空运输业的发展。预计到2044年，将有13亿人生活在城市中心，进一步增加对高效航空连接的需求。此外，全球范围内航空基础设施的进一步完善、航空可达性的进一步提高、航空技术的进步推动航空出行成本的下降等都将进一步激发人们航空出行的需求。

从区域来看，空客预测未来20年，与全球其他区域将以温和的速度增长不同，亚洲和中东地区旅客周转量将大幅领

先全球增长水平。其中，印度将成为最具活力的市场，空客预测其旅客周转量的年增长率将达到8.9%，远超全球平均水平；其次是中国，预计将达到8.5%；第三是中东地区，预计将达到5.3%。事实上，近年来印度已经成为全球重要的新飞机采购国。从2023年至今，印度国内航空公司已经从波音、空客这两大飞机制造商采购了超过千架新飞机。

此外，空客还在报告中指出，航空运输业是全球经济的重要组成部分，它贡献了全球GDP的3.9%，并创造了8650万个就业岗位。未来20年，随着全球机队数量的进一步增长，将需要更多的飞行员、机务、乘务等专业人员，并为整个航空产业链创造更多的就业机会。同时，空客也指出，航空运输业的发展同时也伴随着社会责任，那就是引领航空业的可持续发展，这也意味着未来制造商要生产更多更高效、节能、环保的飞机。为此，空客在2024年，围绕打造更高效环保的飞机投入了27亿欧元的研发资金。在可持续航空燃料的使用方面，目前空客所有在产飞机都支持使用50%的可持续航空燃料，预计到2030年这一比例将增至100%。

波音：小幅下调预期

纵观全球主要三家飞机制造商发布的市场预测报告不难发现，波音此次发布的《未来20年全球商用飞机市场预测报告（2025~2044）》是三家中最保守的。

波音在这份最新的市场预测报告中指出，未来20年，全球市场将接收43600架新飞机，去年公司发布的预测数据为43975架，预期略有下调。具体来看，波音预测未来20年，全球航空旅客周转量的年增长率为4.2%（上一年其预测为4.7%），全球机队规模增长率为3.1%（其上一年预测为3.7%），全球经济GDP的增长率预测则从一年前的2.6%下调至此次的2.3%，可以看出波音对未来20年全球航空业的发展呈谨慎的态度。

从具体机型来看，波音预测未来20年，全球市场将交付1545架支线飞机、33285架单通道客机、7815架双通道客机和955架货机，到2044年全球机队规模将达到49640架。

波音在市场预测报告中指出，2024年全球航空运输总量首次重回疫情前水平，标志着行业的强劲复苏。事实上，在

波音预测未来20年，全球市场将交付1545架支线飞机、33285架单通道客机、7815架双通道客机和955架货机，到2044年全球机队规模将达到49640架。

过去25年里，航空业都呈现了卓越的韧性，成功应对了各种区域性和全球性危机，尤为值得一提的是，在过去的25年里，全球航空客运量（按收入客公里计算）增长了三倍，机队规模也翻了一番，这凸显了整个行业生产力持续提高的趋势。因此，波音预计到2044年，全球在役商用飞机数量将接近50000架，比2024年略超过27000架的机队增加1.8倍。这一增长主要由单通道飞机推动，预计未来20年，全球单通道飞机交付量将占总交付量的76%，单通道飞机在全球机队中的份额也将从2024年的66%增长至2044年的72%。

同时，波音还在报告中指出，与20多年前不同，当时约有70%以上的新飞机交付是为了满足扩大机队规模的需求，未来20年，新交付的飞机中，一半将用于扩大机队规模，另一半则用于老旧飞机的更新换代。

针对货运市场，波音在报告中指出，2024年航空货运行业迎来了强劲的增长，主要得益于一般货物贸易的复苏以及东亚电子商务需求的强劲增长。波音预测，整体行业将在2044年前继续以平均每年3.7%的速度增长，主要受到全球GDP、全球贸易和工业生产增长的推动。

此外，全球供应链的去风险化和多元化将增加制造业对航空货运的需求，因为供应链将在更广泛的地理范围内变得更加多节点化。同时，电子商务和快递网络的扩展——特别是在那些人口众多但在线零售市场尚处于初期阶段的国家——将进一步促进航空货运流量。鉴于这些因素，南亚、中国和东南亚的市场预计将在未来20年内实现最快的增长。

具体来看，波音预测，全球货机机队将在2024年2375架的基础上增长约67%，预计到2044年达到3975架。货机

交付量预计将达到 2900 架，其中约 45% 用于替换退役飞机，其余部分将用于扩大机队规模，提升货运运力。大约三分之二的货机交付将是改装的客机。其中，近 60% 的改装飞机将是标准机身货机。

亚太地区和北美地区将是货机需求最大的两个市场。全球将有超过三分之一的货机需求来自亚太地区航空公司，新飞机的交付将使该区域货机规模翻倍。全球另外三分之一的货机将交付北美地区，其中有三分之二将用于老旧货机的替换。

针对中国市场，波音在报告中做了单列。波音预计，未来 20 年，中国 GDP 年均增速 3.7%，旅客周转量年均增长 5.3%，机队规模年均增长 4%。波音指出，2024 年中国民航市场客运量较 2019 年增长了 10%，未来 20 年，中国市场航空客运量的增长幅度将超过 GDP 的增速。这主要是因为未来 20 年，预计中国中等收入家庭的比例将从 24% 增长至 43%，这也意味着将有越来越多的人将可以享受到航空出行。为此，波音预测未来 20 年，中国喷气飞机的机队规模将达到 9755 架，其中新交付的飞机中很大一部分将用于替换现

有机队中的老旧飞机。10 年前，中国市场新交付的飞机中有约 27% 用于替换老旧飞机，未来 20 年这一比例将提高至 41%。

同时，波音也指出，随着运行效率更高的新一代单通道客机进入中国市场，未来航空公司将减少在短途航线运营宽体飞机的数量。这一趋势在往返其他亚洲地区的航线上尤为明显，过去五年中，由宽体飞机运营的航班比例从 15% 下降至 12%。但中国航空公司在主要长途航线上的运力份额在过去十年中增加了 20 多个百分点，目前已达到 65%。尽管增长将放缓，但长途航线的客运量预计将以 6.5% 的速度增长，这将推动对 1540 架新宽体飞机的需求。

巴航工业：中国引领 RPK 增长

与波音和空客发布的市场预测有所不同，巴航工业的这份《未来 20 年市场展望》只针对 150 座级以下飞机市场。在这份市场展望中，巴航工业分别对全球七大区域作了分析，展望了不同市场对于 150 座级以下飞机的需求趋势。与波音不谋而合的是，鉴于中国市场在商用航空领域的重要性日益提升，巴航工业在本年度的市场展望中同样将中国市场的进行了单列分析。

巴航工业的预测报告中指出，未来 20 年全球市场对 150 座以下喷气飞机及螺旋桨飞机的总需求量将达 10500 架，其中喷气式飞机 8720 架，螺旋桨飞机 1780 架，新飞机市场价值约 6800 亿美元。未来 20 年，巴航工业预计全球旅客周转量 (RPK) 每年将增长 3.9%，但中国的 RPK 增速将领跑全球，达到 5.7%。其次是拉美地区 4.7%、非洲 4.4%、中东 4.4%、亚太 4.1%、欧洲及独立国家联合体 3.1%、北美 2.4%。从具体新飞机交付情况来看，8720 架 150



座以下新喷气式飞机中，2680 架将交付北美客户、1990 架交付欧洲及独立国家联合体、1500 架交付中国、1050 架交付亚太市场、770 架交付拉美市场、380 架交付非洲市场、350 架交付中东市场。1780 架新交付的涡轮螺旋桨飞机中，640 架交付亚太市场、280 架交付北美市场、260 架交付欧洲及独立国家联合体市场、220 架交付非洲市场、200 架交付中国市场、160 架交付拉美市场、20 架交付中东市场。

巴航工业还特别指出，新冠疫情后，其引发的诸多结构性变化已被证实具有长期性影响。公司在首份后疫情时期的市场展望中，就已强调全球航空运输格局正在经历深刻演变。当前，随着各地区航空网络的深化发展，区域性航空运输需求将持续增长。巴航工业相信，由小型窄体飞机与大型窄体飞机组成的混合机队，对行业的长期发展至关重要。这种模式能够提供更大的灵活性、更加精准地匹配运力与需求、拓展航线网络，并支持国家地区的发展目标。这一点巴航工业在 2024 年的预测报告中，专门提及了中国市场。

巴航工业在 2024 年发布的市场预测

报告中指出，中国未来 20 年需要 1630 架客座数在 150 座以下的中、小型窄体机，其中 1430 架为 E 系列喷气式客机，200 架为涡桨飞机。中国机队的机型分布与市场环境不匹配，仅有 1% 的涡桨飞机，5% 的 90 座级以下喷气式飞机（如 C909）和 10% 的 100 ~ 150 座级喷气式飞机，美国的比例分别是 10%、4%、18%。中国国内支线机场出发的航线中，65% 由 150 座以上的大型窄体机执飞，作为对比，欧洲这一比例为 45%，美国仅为 19%。这就在一定程度上造成大飞机飞小机场，上座率不高，航空公司不愿飞，航线少，机场通达性差的连锁反应。实际上，随着中国经济和城镇化发展，三线及以下城市的低密度航空市场蕴含巨大发展空间，且年旅客运输量增速可达一线城市的三倍。因此，巴航工业建议，中国航司可以考虑更加科学细致地规划机队布局，选择更便宜、高效的中小型窄体机执飞中、低密度航线市场（日单向客流 300 ~ 800 和小于 300 的城市对）。通过精细化管理机队，航司能够降低成本，开发更多航线，提高收益和盈利水平。■

▲ 图 | 廖天航

▼ 图 | 廖天航



美国欲重燃超声速飞机计划

文 | 董桐雄

2025年6月，特朗普政府签署行政令，正式终结自1973年开始实施的“陆上超声速飞行禁令”，并要求美国联邦航空局（FAA）启动制定临时的基于噪声的认证标准，并同时废除其他妨碍超声速飞行的相关法规。特朗普政府的这一举措被外界视为美国希望重塑在全球科技领域领导力的关键一步，也是美国“航空复兴”计划的一部分。但对于超声速飞行来说，从协和号飞机曾经的惨痛经历中，人们已经得出了结论，那就是航空技术的进步只是超声速飞行能否得以实现的一个方面，超声速飞机何时能够真正重归商用航空市场仍有很多不确定因素。

▼ 图 | 博姆（Boom）公司



航空复兴计划重要一环

2025年6月，特朗普政府签署行政令，围绕美国航空复兴计划，聚焦提升国家航空实力、推进科技创新与强化国家安全，旨在从技术、制度与安全等多个维度重塑美国航空业。特朗普政府主导的美国航空复兴计划有三个主要项目。一是无人机安全与运营升级，计划设立联邦专责小组以增强机场与公共活动的无人机检测能力，同时推动“超视距”商业无人机的使用，减少对海外供应商的依赖。二是围绕电动空中出租车（eVTOL）项目，加速电动垂直起降飞机认证，支持 Joby Aviation、Archer Aviation 等企业的发展。三是“陆上超声速飞行禁令”，并要求 FAA 制定新的噪声标准，推动 Boom Supersonic 等公司商业化发展，巩固美国在超音速领域的领先地位。

此外，特朗普签署的行政令中还强调了必须全面改革空中交通管理系统，以提升安全性与效率。具体行动计划包括：一是，计划投资数十亿美元，对雷达、通信设备、塔台设施等进行设备更新；扩大空管人员数量，确保飞机监控数量与管制人员数量达到理想水平，预计这一计划完成实施需要3~4年。二是，提出了将空管系统私有化的方案，即由非政府机构运营，美国联邦航空局专注监管职能，以此提高空管运营效率。据悉，特朗普政府提出的这项针对空中交通管理系统的改革计划已

经得到了美国国内五大航空公司的支持，交通部长呼吁航空业界一起努力寻求国会批准这项计划，并划拨相关资金。

针对超声速飞机计划部分，首先是要撤销自1973年开始实施的陆上超声速飞行禁止规定，即废除美国联邦航空局14 CFR91.817、91.819、91.821。对此，早前美国博姆超声速公司的相关负责人就曾表示，“音障从来不是物理上的，而是监管上的。”根据这份行政令要求，美国联邦航空局需要在180天内启动相关法规废除程序，并设立“临时基于噪声的认证标准”，前提是超声速飞机的飞行不得在地面产生可听音爆。最晚到2026年年底，美国联邦航空局必须发布提案用于设定噪声阈值，并在24个月内指定最终法规。同时，行政令还要求美国联邦航空局与OSTP、NASA等机构合作，统一研发与测试流程，并与国际民航组织和各国航空监管当局加强协调合作，共同制定噪声与安全标准。

XB-1 项目进展

特朗普政府之所以在这个时间点推出这一行政令，一个很重要的因素就是近几年来，美国国内一些超声速飞机项目取得了不错的进展，同时也有诸如美联航、美国航空、日本航空等多家航空公司有意订购超声速客机。2025年2月，美国博姆（Boom）超声速公司研制的XB-1超声速

验证机完成了无声爆超声速试飞。

目前，在研的超声速商用飞机都采用了“先技术验证、后型号研制”的方法。2016年，博姆公司正式公布了“序曲”（Overture）超声速民用飞机的设计方案和技术参数。其中包括，飞机设计机长为21米，翼展为5.2米，最大起飞质量为6100千克。飞机整体采用了流线型和高细度比（飞机长度与宽度之比）设计来减小阻力并提高飞行效率。机翼采用了三角翼设计，使飞机能够在较宽的速度包线内平衡飞行控制和稳定性。同时，公司也宣布将在“序曲”的原型机正式生产之前制造一款名为XB-1的技术验证机。

XB-1技术验证机，又名“婴儿潮”，其寓意是希望它可以延续全球首款超声速飞机X-1的辉煌。XB-1原型机尺寸是“序曲”超声速民机的三分之一，外形设计上与协和号十分相似。XB-1原型机只有两个座位，其作用是用来验证全尺寸“序曲”超声速客机的各项技术，其中包括高效的空气动力学设计、先进复合材料和高效的推进系统等。

从设计上来看，XB-1具有独特的进气道设计，能够保证为发动机提供稳定的气流；采用碳纤维、环氧树脂等轻质复合材料制成，每个组件都经过了单独设计以平衡强度、质量和稳定性。从用户体验的角度来说，博姆将客舱座位分为两列单座，保证每位乘客都能享受窗

外的美景和充足的过道空间。为了尽可能减少飞行时间，飞机将在6万英尺的高空航行，每位乘客都可以透过舷窗一睹地球弧线。从当时来看，博姆公司对XB-1飞机的很多设计较为“激进”，为此在后续几年时间里，公司也对一些原始设计进行了更改。但无论如何，当年被业界称为“疯狂”的博姆正在推动行业加速重回超声速时代。

2024年3月22日，美国博姆超声速公司宣布，XB-1超声速验证机完成首飞，这不仅意味着该项目迈出了历史性的一步，同时对于航空业来说，这也是自协和号飞机之后，首个完成首飞的民用超声速飞行器。2025年1月，XB-1完成首次超声速试飞。

根据《国际航空》杂志报道，2025年2月，博姆超声速公司宣布，XB-1验证机完成了第13次试飞，也是第2次超声速试飞，试飞最高速度达到Ma1.18，试飞时长41分钟，高度约11129米。尤为值得一提的是，在XB-1的试飞过程中，由于“马赫截止”（Mach cut-off）现象，声爆并没有达到地面。试飞前，博姆公司在试飞路线下方设置了麦克风阵列，但随着试飞速度超过Ma1，地面并没有接收到声爆，这也意味着XB-1实现了无声爆巡航，而这也为特朗普政府发布行政令提出“政策松绑”创造了空间。

根据博姆超声速公司的规划，XB-1验证机试飞所积累的数据未来将帮助“序

曲”超声速客机的研发和设计工作。例如，在材料方面，XB-1验证机采用与波音787类似的复合材料，整机质量比“协和”号要轻了不少。从用户体验的角度来说，博姆公司计划将客舱座位分为两列单座，保证每位乘客都能享受窗外的美景和充足的过道空间。此外，XB-1验证机还采用了前视觉系统，可创建跑道的虚拟视图。这一系统包括两个冗余摄像头、一个多功能显示器、数据采集系统和惯性导航系统，这一技术相对于之前的协和号飞机，将大大降低飞行员操控飞机的难度。针对航空业对环保的要求日益严苛，博姆公司与合作伙伴一起探索可持续航空燃料在XB-1验证机上的使用。博姆公司的合作伙伴Prometheus燃料公司采用可再生能源中的电能从空气中提取二氧化碳，去除氧气，然后将其与氢气结合形成碳氢化合物燃料。目前，博姆公司已经在地面试验中对这种可持续航空燃料进行了测试。

博姆公司为“序曲”超声速飞机规划了4250海里（约7867公里）、巡航高度6万英尺（约18288米）的设计参数，可以在纽约至法兰克福、东京至西雅图等航线上实现直飞。研发时间表上，博姆公司制定的目标是2026年首架“序曲”实现总装下线，2027年开始投入试飞，2029年获得型号合格证。根据博姆公司公布的数据，目前“序曲”已经获得了总计130架的确认订单和意向订单。

但是对于商用飞机来说，技术成功与市场成功并不能划等号，因此“序曲”想要真正重新拉开超声速市场的序幕仍有很大的挑战。

首当其冲的是经济性问题。众所周知，“协和”号飞机的失败，并不是其技术不够先进，相反在当时，“协和”号飞机算得上是一款技术十分领先的产品，但是对于航空公司运营来说，其经济性实在难以恭维。对此，博姆公司在公开宣传材料中表示其已经做了大量的工作以提高“序曲”的经济性。首先，基于气动外形和飞行控制技术的进步，“序曲”将获得阻力更小、巡航效率更高的气动和飞控设计方案；其次，基于材料和结构设计制造技术的进步，将获得更轻、更耐用、更易于维护、维修间隔更长的机身，特别是大量复合材料和钛合金的应用；第三，是基于发动机技术的进步，将大大提高“序曲”的燃油效率。

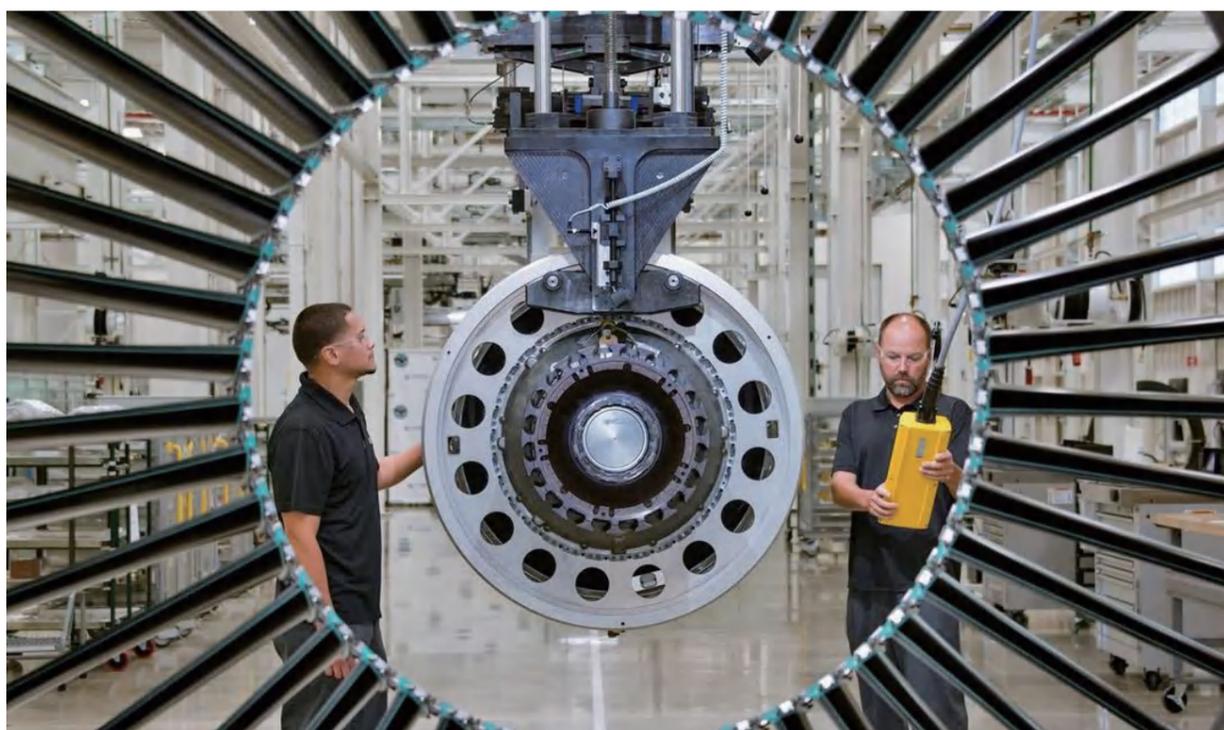
但目前，尽管博姆公司已经与罗罗、GE等航空发动机巨头进行商谈，但至今仍未有能够满足“序曲”要求的发动机产品。这主要是因为“序曲”无法通过对现有商用发动机的改进来满足其需求。而对于航空发动机制造商而言，研发一款全新的产品研发周期长、资金投入巨大，因此短期来看专门为“序曲”研发新产品的可能性微乎其微。从这个角度来看，缺少满足条件的发动机将是“序曲”项目最大的不确定因素。■

发动机制造商加大 MRO 网络建设

文 | 赵平

随着新一代发动机交付速率的提升、机队规模的增大、机队运行时间的积累以及不断暴露的耐久性问题，商用发动机制造商不但要考虑如何满足发动机送修需求，还要考虑如何解决发动机耐久性改装需求。这两种需求都依赖发动机 MRO 网络的支撑，但现有发动机 MRO 网络的维修产能远不足以承担这种需求压力，与此同时，各商用发动机制造商还要面对相互之间对发动机 MRO 网络资源的竞争。为了解决这些问题，各商用发动机制造商正在通过各种措施加大新一代发动机 MRO 网络建设，提升发动机维修产能。

图 | 普惠公司



CFM 国际：提前布局

尽管 LEAP 系列发动机正式投入商业运营的时间不到 9 年，但 CFM 国际公司已经提前布局了发动机的 MRO 网络建设。公司主要基于三个因素综合考虑，一是 LEAP 发动机机队规模大，目前现役 LEAP 发动机机队规模接近 8000 台。二是 LEAP 发动机机队规模增速快，LEAP 发动机的交付速度大约是 CFM56 发动机的 2 倍。相比 CFM56 发动机来说，LEAP 发动机的巨大机队规模和快速交付会产生更大的发动机送修需求。三是，CFM 国际公司在不断推出 LEAP 发动机的耐久性改装，改装需求也在进一步占用发动机 MRO 网络的维修产能。

尽管持续面临来自产能不足与供应链重建的压力，但不断增长的售后市场需求促使 CFM 国际公司在强化内部 MRO 网络建设的同时，也在加速拓展外部合作伙伴 MRO 网络建设，通过对 LEAP 发动机全球 MRO 网络的持续投入来提高 LEAP 发动机的维修产能。

据《航空周刊》最新预测，预计到 2029 年，CFM 国际公司的 LEAP 发动机数量将超过 CFM56 发动机，成为全球航空发动机市场占有率最高的型号。LEAP 发动机未来 10 年的 MRO 支出将达到 2385 亿美元，成为全球窄体飞机发动机维修业务发展的核心驱动力。

2023 年 LEAP 发动机的全球送修量为 725 台。赛峰的最新预测显示，2025 年的年送修量将达到 1725 台，2028 年的年送修量将增加到约 3500 台，大约到 2040 年，LEAP 发动机的年送修量将超过 5000 台，达到年送修量的高峰。相比之下，CFM56 发动机在未来几年内的年送修量不会超过 3000 台。

CFM 国际公司在提高 LEAP 发动机交付速度的同时，也在不断通过技术革新对 LEAP 发动机进行性能升级，提高发动机耐久性。

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

CFM 国际公司在推出该改装套件之后，采取了双线推进政策：一方面在发动机生产线上对于发动机进行改装，保证新交付的发动机已完成该项性能升级；另一方面通过逐步向发动机 MRO 网络交付改装套件，保障送修发动机完成该项改装。目前，CFM 国际公司正在为 LEAP-1B 发动机开发类似升级方案，预计在 2025 年底前获得 FAA 的适航批准。

CFM 国际公司正积极推进的另一项改装是 LEAP 发动机的反向引气系统（RBS）改装，该改装是为了解决 LEAP 发动机燃油喷嘴出现的燃油结焦问题。通过对比分析安装 RBS 与未安装 RBS 发动机的运行数据，CFM 国际公司验证了 RBS 系统的有效性，确定了 RBS 系统满足设计要求，能够有效抑制燃油喷嘴形成积碳。

从 2024 年 4 月开始，在发动机生产线上完成 RBS 改装的 LEAP-1A 发动机开始交付，但是在翼 LEAP-1A 发动机的改装工作从 8 月才开始，并且改装需求不断增加。与此同时，CFM 国际公司针对

LEAP-1B 发动机的 RBS 改装方案还在验证阶段，LEAP-1B 发动机的 RBS 改装开始时间与 LEAP-1A 的 RBS 改装开始时间相差大约 1 年，这与两种型号的发动机投入商业运营的时间相匹配。

在 RBS 改装的实施层面上，CFM 国际公司采取了更为灵活的推进政策，与高压涡轮耐久性改装一样，RBS 改装在发动机生产线和发动机维修车间同步进行，此外，CFM 国际公司还向航空公司提供 RBS 改装套件，航空公司可根据自身运行情况对发动机执行改装，既可以由航空公司自己完成，也可以委托给第三方维修服务供应商执行。CFM 国际公司表示，2024 年已经向全球供应了超过 500 套的 RBS 改装套件，目前约 700 台发动机（含现役机队与新交付发动机）已完成 RBS 改装。

除了以上在全球范围内推广的高压涡轮升级改装和 RBS 改装，在接下来的几年里，LEAP 发动机的其他升级改装工作仍需要发动机 MRO 网络提供有力支持。虽然并非所有的改装工作都需要在

发动机维修车间内完成，但很多航空公司会选择在发动机送修时执行这些改装，因此这就一定会增加发动机修理车间的工时和航材负担。如果在翼执行改装过程中发现发动机本体部件失效或者损伤超标的情况，很大可能需要拆下发动机送到发动机修理车间进行维修，在翼执行改装的风险也同样会增加 LEAP 发动机 MRO 网络的产能压力。

为应对 LEAP 发动机维修需求变化，赛峰集团与 GE 航空航天正加速全球 LEAP 发动机 MRO 网络布局。2023 年赛峰集团宣布投入超 10 亿欧元扩建内部 MRO 网络，包括在布鲁塞尔新增 LEAP 发动机专修车间、在摩洛哥卡萨布兰卡、印度海得拉巴、墨西哥及法国进行发动机修理设施建设，并计划招聘 4000 名员工；GE 航空航天同步启动 5 年期发动机 MRO 网络投资计划，重点提升欧洲、亚太地区及拉美地区内现有发动机修理厂的维修产能。

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

考虑到 LEAP 发动机投入市场相对时间较短，目前 LEAP 发动机的送修工作主要集中在发动机快修业务和发动机改装业务上。预计 2028 年 LEAP 发动机的送修量开始显著增加，发动机维修服务供应商可能需要在未来 2~3 年内相应地提高 LEAP 发动机的维修产能，以下是几家 LEAP 发动机维修服务供应商提升产能的情况。

普惠： 重点关注突出问题

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

GTF 发动机的 MRO 网络包括 10 家发动机维修服务供应商。目前，GTF 发动机 MRO 网络正在不断提高维修产能，其中位于佛罗里达州西棕榈滩的发动机修理厂计划增加 40% 的产能。该修理厂在 2021 年完成改造，成为普惠公司 GTF 发动机 MRO 网络中的一员。

普惠公司与新西兰航空公司的合资企业——基督城发动机维修中心正在筹备一项 1.5 亿美元的扩建计划。如果该计划顺利实现，该发动机维修中心将于 2026 年底开展 GTF 发动机的翻修业务。预计到 2032 年，该发动机维修中心的 GTF 发动机年维修量将超过 140 台。

瑞航技术公司 2024 年在苏黎世扩建的发动机修理车间执行了首台 GTF 发动机的维修工作，并重新启用了厂内闲置的发动机测试台以提升针对 GTF 发动机的测试能力。瑞航技术公司表示，该公司正致力于通过长期投入成为具备 GTF 发动机深度维修资质的发动机维修服务供应商。

需要特别注意的是，普惠公司作为 CFM 国际公司的竞争对手，不仅仅在发动机设计制造层面存在竞争关系，还在全

未来 10 年，随着宽体飞机市场的发展，宽体飞机发动机维修市场的业务重心主要集中在波音 787 飞机与空客 A350 飞机的发动机上。

球发动机 MRO 网络上存在竞争。双方在发动机维修服务网络上采取了不同的竞争策略，CFM 国际公司对于 LEAP 发动机的改装没有限制发动机维修服务供应商的自主选择权，但是普惠公司针对 GTF 发动机建立了一个封闭的 MRO 网络，这样 GTF 发动机的维修服务供应商只能按照普惠公司的分配执行 GTF 发动机的修理业务，对承修发动机来源没有选择权。

罗罗： 重点关注遑达系列

未来 10 年，随着宽体飞机市场的发展，宽体飞机发动机维修市场的业务重心主要集中在波音 787 飞机与空客 A350 飞机的发动机上。罗罗公司是这两款宽体飞机的发动机供应商，在波音 787 飞机的发动机选型上，罗罗公司的 Trent1000 发动机与 GENx 发动机形成竞争；在空客 A350 飞机的发动机选型上，罗罗公司的 TrentXWB 发动机是空客 A350 飞机的唯一选装发动机，而罗罗公司的这两款

图 | asianaviation.com



Trent 系列发动机在出售中都附带了全面售后维修服务合同。

罗罗公司全球售后市场业务总监表示，目前罗罗公司正在努力扩展大型发动机维修服务的规模，估计每年能够提供 200 ~ 250 台发动机的翻修服务，中期发展规划主要是侧重发动机维修产能储备，以应对未来送修量的大幅增长。

罗罗公司在积极进行发动机 MRO 网络建设的同时，还进行了 Trent 发动机的耐久性升级。

加大对 Trent 发动机 MRO 网络的投资。罗罗公司对位于英国德比的两处厂区以及德国柏林附近的达勒维茨发动机修理厂进行了约 5500 万英镑（约 6700 万美元）的投资。位于英国德比的发动机修理厂预计今年投入运营。位于德国达勒维茨的发动机修理厂在疫情期间停止了商用发动机维修业务，主要开展公务机发动机维修业务。2024 年 12 月，达勒维茨发动机修理厂执行了首台

提高 Trent 发动机 MRO 网络的产能。罗罗公司今年计划在其发动机 MRO 网络中增加新认证的发动机维修服务供应商，以应对未来宽体飞机发动机维修市场的增长。

Trent1000 发动机的修理，标志着该发动机修理厂正式重启了商用发动机维修业务。后续该发动机修理厂将主要聚焦于 Trent1000 的快修服务。罗罗公司计划到 2026 年将该发动机修理厂转型为 TrentXWB-84 发动机的组装与测试中心。

提高 Trent 发动机 MRO 网络的产能。罗罗公司今年计划在其发动机 MRO 网络中增加新认证的发动机维修服务供应商，以应对未来宽体飞机发动机维修市场的增长。以 2019 年罗罗公司与位于阿布扎比的萨纳德航空技术公司签署合作协议为例，对于这种技术合作模式进行了解释。根据双方达成的协议，罗罗公司向萨纳德航空技术公司提供必要的支持，使其能够开展发动机维修业务。罗罗表示，相较于建立新的合资企业，罗罗公司更倾向于在现有的发动机 MRO 网络中增加更多经过认证的发动机维修服务供应商。

罗罗公司正在增加其 MRO 网络的维修产能，其中包括位于德国的 N3 发动机修理厂（罗罗公司与汉莎技术公司合资成立的发动机修理厂），N3 发动机修理厂正在计划提升 TrentXWB 和 Trent1000 发动机的维修产能。罗罗公司计划未来将发动机年维修量从 160 台增加至 250 台。此外，通过与新加坡航空发动机服务有限公司和新加坡科技工程有限公司的合作，罗罗公司计划将 TrentXWB 和 Trent1000 发动机的年维修量提高 40%。

北京航空发动机服务有限公司是罗罗公司与中国国际航空股份有限公司在北京成立的合资企业，计划于 2026 年投入运行，主要开展 Trent 系列发动机的维修业务。预计到 2035 年实现满负荷运营后，每年能够完成 250 台 Trent 系列发动机的维修工作。

推出 Trent 发动机耐久性改装项目。罗罗公司在 2024 年 2 月的新加

坡航展上宣布了一项价值 10 亿英镑的 Trent1000、Trent7000 和 TrentXWB 发动机改装项目，旨在提高这几款发动机的耐久性。

Trent1000 发动机作为波音 787 飞机的选装发动机，在初期暴露了热端部件耐久性问题。为了解决这一问题，罗罗公司开发了 Trent1000 发动机的高压涡轮改装套件，2024 年 12 月，罗罗公司完成了 Trent1000 发动机关键性能改装所需的主要飞行测试，截至 2025 年 1 月，FAA 对该改装的适航审定仍在进行中。此次高压涡轮段的重新设计是罗罗公司提高发动机耐用性的重要突破，能够让 Trent1000 发动机的运行时间增加一倍，这对于重建运营商信心以及扩大 Trent1000 发动机的市场份额至关重要。

罗罗表示，公司在确保新技术以最快的方式投入到现役发动机机队中，而这些涉及新技术和新设计的改装也需要发动机 MRO 网络的支持。因此，罗罗公司不仅是对于德比和达勒维茨的发动机修理厂进行投资建设，还在采取更多举措提高 Trent 发动机 MRO 网络的维修产能。

GE： 持续完善自有体系

根据《航空周刊》的预测数据，GE 航空航天公司的 GEnx 发动机自 2011 年投入商用运营以来，随着技术趋向成熟和机队规模不断扩大，GEnx 发动机的年送修量将从 2028 年开始会出现大幅增加，并持续攀升至 2034 年。

GE 航空航天公司作为 CFM 国际公司的投资商，除了履行建设 LEAP 发动机 MRO 网络建设的承诺外，还加大了对 GEnx 发动机售后服务市场的战略投资，预计 2025 年 GEnx 发动机售后市场规模



▲ 图 | GE 航空航天

将达 59 亿美元。尽管 GEnx 发动机不是波音 787 飞机唯一选装的发动机，但在 Trent1000 发动机暴露出热端部件耐久性问题的背景下，GEnx 发动机正在努力获得更多的波音 787 发动机订单。

GEnx 发动机 MRO 网络经过十多年的构建形成了 GE 自有的发动机修理厂与第三方维修服务供应商组成的 MRO 网络。其中 GEnx 发动机的第三方维修服务供应商包括阿联酋 Sanad 集团、德国 MTU、法荷航工程维修公司，最近埃塞俄比亚航空也正式成为 GEnx 发动机 MRO 网络的一员。埃塞俄比亚航空作为非洲首家 GEnx-1B 维修服务供应商，有效填补了非洲地区的 GEnx 发动机维修能力的缺口。

2024 年底，法荷航工程维修公司与沙特技术公司签署了一份谅解备忘录，计划通过共同投资的形式成立一家专注 GEnx 发动机的 MRO，目标是扩大沙特技术公司的发动机修理能力和实现 GEnx 发动机维修工作在沙特的本地化，这也是 GEnx 发动机全球售后市场战略扩张的一部分。■

支线飞机与干线飞机 利用率比较研究

文 | 郭才森 黄祖欢

航司制定机队规划，增加或者减少机型，增加或者减少飞机数量时，要进行机型盈利能力对比分析，通过机队规划与航线网络规划的优化与实施，更好地实现机型与航线、市场的匹配，提升公司盈利能力。

图 | 徐炳南



机型固定成本对比分析是机型盈利能力对比分析的重要内容。按照行业惯例，一架飞机一定期间的总固定成本除以该期间的飞机总运营时间（一般用轮挡时间计算）得出该飞机每运营小时的固定成本，根据一个航班的运营小时数可以计算出该航班分摊的固定成本。在选用机型利用率数据时，航司一般将本公司各机型当前一段时间的日利用率作为计算该机型固定成本的日利用率，对于该公司没有的机型，一般以在该机型行业平均利用率基础上进行一定的调整的日利用率，作为该公司未来运营该机型的日利用率。航司使用这样确定的机型日利用率数据，进行机型固定成本和盈利能力对比分析。

表1是中国民航局统计的主要干线飞机和支线飞机2015年至2019年的日利用率数据。这些数据显示，支线飞机的日利用率低于干线飞机。各航司自己的运营数据也会显示同样的规律：支线飞机的日利用率低于干线飞机。

由于支线飞机的日利用率低于干线飞机，支线飞机每运营小时分摊的固定成本较高，这个因素也导致支线飞机每运营小时的总成本较高，从而导致支线飞机在与干线飞机的盈利能力对比分析中处于劣势。

笔者认为，民航局统计的机型日利用率数据和各航司统计的机型日利用率数据都是准确的，但是，用这些数据进行机型盈利能力比较却是不合适的。原因在于，这些数据是支线飞机与干线飞机在不同市场条件下运营的结果。进行机型盈利能力对比分析时，应当采用支线飞机与干线飞机在相同市场条件下运营时的日利用率数据，不应当直接使用在不同市场条件下的日利用率进行机型固定成本对比分析的做法，低估了支线飞机的日利用率，

高估了干线飞机的日利用率，从而高估了支线飞机的固定成本水平，低估了干线飞机的固定成本水平，降低了机型盈利能力对比结果的准确性，对航司决策造成不利影响。笔者试对此进行分析，并就机型盈利能力对比分析的日利用率指标选择确定提出建议。

机型盈利能力对比分析应当在相同的市场条件下进行

我们先看一个企业绩效考核案例：

某公司生产一种产品，在全国各省、自治区、直辖市销售，每个省区市各派一名销售员负责销售工作。为提高销售员的工作积极性，该公司制定了绩效考核办法，要求每个销售员每年完成200万元利润的销售指标，根据销售利润完成情况按照同一比例进行奖罚。市场条件好的北京、上海、广东等省市的销售员很容易地完成销售指标，市场条件不好的新疆、青海、西藏等省区的销售员无论怎样努力，离完成销售任务指标都很远。公司按照这样的绩效考核方案和完成情况进行奖罚，市场条件较差省区的销售员意见很大，激励效果不好。

表1 | 中国民航主要干线飞机与支线飞机2015年至2019年日利用率比较表

类别	干线飞机						支线飞机					
	A320 飞机			B737-800 飞机			EMB-190 飞机			CRJ-900 飞机		
指标名称	期末架数	在册日利用率	可用日利用率	期末架数	在册日利用率	可用日利用率	期末架数	在册日利用率	可用日利用率	期末架数	在册日利用率	可用日利用率
2015	645	10.05	10.38	855	9.60	9.89	78	7.85	8.27	20	8.86	8.86
2016	726	9.95	10.30	977	9.43	9.80	90	7.56	8.31	26	8.77	8.77
2017	800	9.93	10.28	1,107	9.48	9.75	101	7.52	8.09	32	9.13	9.13
2018	839	9.66	10.10	1,204	9.25	9.54	105	7.11	7.76	38	8.87	8.87
2019	805	9.72	10.20	1,195	9.40	9.73	99	6.77	7.99	38	9.37	9.37

显而易见，案例中公司的绩效考核方案是不恰当的。绩效考核的目的是衡量销售员的工作能力和工作努力程度，并根据考核结果对销售员实施适当的激励措施，提高销售员的工作积极性。不同省区市的市場条件不同，应当根据每个省区市的市場条件设置不同数额的利润指标，市場条件好的省市可以设定高于 200 万元的利润指标，市場条件差的省市应当设定低于 200 万元的利润指标，最后完成的利润指标应当能反映出各销售员的工作能力和努力程度。该公司将每个省区市销售员的利润指标都设定为 200 万元，其实际完成情况不能反映各销售员的工作能力和努力程度，这样的绩效考核方案很不恰当。

在航司的运营中，基于利润最大化的经营目标，航司将支线飞机和干线飞机配置到不同的市場上运营，支线飞机和干线飞机的市場条件有很大差异，在一家航司同时运营干线飞机和支线飞机时尤其明显。干线飞机主要运营大流量航线，平均航程较长，平均航段时间也较长；支线飞机主要运营小流量航线，平均航程较短，平均航段时间也较短。民航局和航司统计

的干线飞机与支线飞机日利用率数据就是在这样的市場条件下产生的。

尺有所短，寸有所长，支线飞机、窄体飞机和宽体飞机都有自己的经济运营范围，一家公司将机型与市場、航线更合理地匹配，将提高自己的盈利能力和市場竞争力。航司进行机型盈利能力对比分析的目的，是衡量哪种机型在特定的航线与市場条件下盈利能力最大，就用哪种飞机在这些航线与市場条件下运营，从而引进或者保持适当数量的适当机型飞机，实现本公司利润水平最大化。基于这一目的，在进行机型盈利能力比较时，应当使用在相同市場条件下运营产生的日利用率数据。

由于支线飞机和干线飞机是在不同的市場条件下运营的，实际上没有相同市場条件下的实际日利用率统计指标，这就需要影响支线飞机与干线飞机利用率的因素进行分析，在现有统计数据基础上选择确定机型盈利能力分析时采用的利用率数据。

支线飞机与干线飞机在相同市場条件下的利用率比较分析

航空运输市場有淡旺季之分。在我国，每年的夏季、春节、五一、国庆假期都是航空运输需求旺盛时期，航司会运营更多的航班，客座率和价格都很高，更多的航线、航班都是盈利的。相反，在淡季，更多的航线、航班变为亏损的。伴随着航线、航班收益水平的这些变化，航司在淡季要停飞一些航班，停飞一些干线飞机，用支线飞机代替干线飞机运营干线飞机的亏损航线。

从左图中可以看出，我国民航市場有明显的淡旺季之分，每年淡季停飞大量航班。

根据这一规律，在旺季，干线飞机和支线飞机的利用率都高，在淡季，干线

飞机的利用率低，支线飞机的利用率高。也就是说，支线飞机全年都是高利用率，干线飞机只有在旺季才是高利用率。

航空运输市場不仅存在淡旺季的差异，每天不同时段的市场需求也是不同的，一天中存在市场需求的高峰与低谷之分。每天太早、太晚的时间都是人们的休息时间，航空运输需求少，航班客座率和价格都低，此时的航班盈利水平低或者亏损。

航司的航班可以分为盈利航班、相对亏损航班和绝对亏损航班等三类，对这三类航班要采用不同的方式对待。盈利航班飞得越多，航司利润越多，当然要多飞；相对亏损航班虽然不盈利，但边际贡献大于零，这种航班飞得越多，公司亏损越少，也要多飞；绝对亏损航班的边际贡献小于零，这种航班飞得越多，公司亏损越严重。因此，对航司来说，绝对亏损航班越少越好，最好能没有。

支线飞机的变动成本比干线飞机低不少。据了解，按照 2024 年的成本水平测算，C909 飞机每小时的变动成本比 B737 和 A320 飞机低 6000 至 10000 元，不同公司有差异。另外，一些支线航线有航线补贴，支线飞机的航线补贴一般比干线飞机多，例如：根据《支线航空补贴管理暂行办法（2023 年修订）》，支线飞机每小时补贴 10000 元，干线飞机每小时补贴 5000 元。每天太早或者太晚的航班，由于需求较少，无论用干线飞机运营还是用支线飞机运营，销售收入都差不多。由于支线飞机的变动成本比干线飞机低不少，支线飞机的航线补贴比干线飞机多，一些干线飞机运营的早晚绝对亏损航班，用支线飞机运营后，将变为相对亏损航班或者盈利航班。

根据上述分析，在同一条航线上，支线飞机运营的早出港航班可以出发得更早，晚进港航班可以回来得更晚。因此，



▲ 图 | 徐炳南

在一个运营日中，与干线飞机相比，支线飞机的总运营时间可以更长，扣除相同的航班经停时间，支线飞机的有效运营时间也可以更长。按运营日对可用飞机统计的飞机每日有效运营时间就是飞机的可用日利用率。

按照上述分析逻辑，在同样的市場条件下，支线飞机的可用日利用率高于干线飞机的可用日利用率。

最后是可用率的影响。综合反映一个航司飞机利用效率的指标不是可用日利用率，而是在册日利用率。

在册日利用率 = 可用日利用率 × 可用率。

如果一家航司的可用日利用率很高，但因飞机检修、资源保障等原因导致可用率很低，这家公司的飞机在册日利用率仍然不高。表 1 中既有在册日利用率数据，也有可用日利用率数据，我们应当使用在册日利用率数据衡量飞机的利用效率。

在支线飞机与干线飞机的技术水平和飞机成熟度基本相同的情况下，支线飞机与干线飞机的可用率基本相同，对飞机

▼ 图 | 中国民航航班量月度变动趋势图



在册利用率不会产生大的影响。

支线飞机全年高利用率运营，干线飞机仅旺季高利用率运营；在相同的市场条件下，支线飞机的可用日利用率高于干线飞机；成熟支线飞机与干线飞机的可用率基本相同。综合上述分析，在相同的市场条件下，支线飞机的在册利用率高于干线飞机，也就是支线飞机的总体利用效率高于干线飞机。

其他因素对实际运营中飞机利用率的影响

在实际运营中，干线飞机既运营长航线，也运营短航线，平均航距长，平均航段时间也长；支线飞机主要运营短航线，也运营少量长航线，平均航距短，平均航段时间也短。在每天的总运营时间相同的情况下，与干线飞机相比，支线飞机运营的航段多，在地面经停次数多，地面经停时间占比高，有效运营时间占比低，这一因素导致支线飞机的实际日利用率低。如果干线飞机去运营支线运营的航线，在每日总运营时间相同的情况下，干线飞机的日利用率就会和支线同样高。

支线飞机主要运营市场需求少的小客流量航线，干线飞机主要运营市场需求多的大客流量航线。在这种情况下，干线飞机每日总的可用运营时间与支线飞机基本持平，甚至比支线飞机多。在相同的市场需求条件下，支线飞机的每日总可用运营时间应该大于干线飞机。

在上面两个主要因素的影响下，支线飞机在实际运营中的利用率低于干线飞机。

机型技术水平和成熟度对于实际利用率也有影响。低技术水平和低成熟度飞机的利用率也会低一些。本文讨论的是技术水平基本相同的成熟支线飞机与干线飞机的利用率。

实际统计中的机型利用率数据，可以用于会计核算与经营分析，可以用于分析不同市场的盈亏情况，可以进行不同期间的运营能力与盈利能力对比分析。但是，在用于不同机型的盈利能力和固定成本对比分析时，这些数据就不能直接使用了。

支线飞机与干线飞机盈利能力分析时的利用率选择

多机型运营的航司在运营过程中面临着特定航线上如何配置飞机的问题。例如，在大客流量航线上使用宽体机还是窄体机运营、在较大客流量的航线是使用座位数多的窄体机还是座位数少的窄体机运营、在小流量航线上使用窄体机还是使用支线飞机运营。选择的原则是，哪种飞机运营该航线的利润越多就使用哪种飞机。

由于航班运营利润=航班运营收入-航班变动成本-航班固定成本。航班运营收入与航班变动成本都是与航班运营直接相关的，比较容易识别和计算。航班固定成本是分摊的与该机型运营有关的成本，机型固定成本的归集范围、方法和飞机利用率的选择对航班固定成本的计算都有影响。

由于机型盈利能力比较是在特定航线和市场条件下进行的，因此，应当使用不同机型在相同市场条件下的日利用率。具体来说，在比较小流量航线上支线飞机与干线飞机的盈利能力时，使用的支线飞机日利用率数据不应当低于干线飞机，甚至应当高于干线飞机。都可以使用支线飞机的日利用率统计数据，或者支线飞机使用支线飞机的日利用率统计数据，干线飞机使用的日利用率在此基础上适当调减。■

以“干支通、全网联”破解结构性矛盾 构建中国民航高质量发展新格局

文 | 商承源

近年来，我国航空运输市场在经济持续增长与居民生活水平提升的双重驱动下，规模不断扩大，旅客运输量稳步上升，展现出蓬勃的发展活力。然而，在繁荣的背后，发展不平衡、市场竞争加剧和资源紧张等问题日益凸显。在高质量发展的关键时期，“干支通、全网联”通过优化航线网络、提升中小机场效能、满足多样化出行需求和消化过剩运力等多方面发力，推动我国民航业从规模扩张向高质量发展转型。本文将从政策价值和市场潜力两个维度，深入剖析“干支通、全网联”的核心作用，激发行业发展动能，助力民航高质量发展。

图 | shairport.com



“干支通、全网联”的现实必要性

长期以来，我国航线网络呈现“干线密集、支线稀疏”特征。据统计，截至2024年底，我国共有运输机场263个。其中，支线机场186个，占机场总数的70.7%。然而，支线机场客运起降约96.6万架次，占总起降架次的9.5%，且日均1班次及以下的航线占比高达90.6%，日均2班次及以上的航线仅占2.5%。同时，资源过度集中于东部枢纽城市，如北京、上海、广州等城市集中了大量航空运力，而中西部地区航空服务供给不足。

从全球范围来看，均衡的航线网络可以有效支撑区域经济均衡发展。例如，美国国土面积为915万平方千米，依托5000多个公共机场和6600余架飞机，编织出数十万条航线，其中支线航班占比达31.7%；欧洲则通过300多家航空公司协同，在3000多个机场间搭建上万条航线，短途航线占比达70%。

目前，我国支线航空仍处于发展的初级阶段，亟须重构网络布局。2021年，民航局印发《民航旅客中转便利化实施指

南》，推广通程航班服务，串联干线与支线，推动全国民航网络化发展。西藏自治区拉萨贡嘎机场联合成都天府机场推出“拉萨—天府—首都”通程快线，实现70分钟高效中转，2024年累计备案通程航班1217个，覆盖18家航空公司，显著提升该地区航线网络通达性。河北石家庄机场“从家飞—乐享中转”品牌通过优化航线组合，将中转旅客占比提升至8.9%，增强机场网络辐射能力。这些实践案例证明，“干支通、全网联”在完善航线网络、提升整体运输效能方面具有积极作用。

长期以来，我国中小机场普遍面临航班量少、保障成本高、安全隐患多等困境。以新疆为例，部分支线机场日均航班量不足5班，维持运营需固定投入大量人员和设施，单个航班保障成本为干线机场的3倍。同时，低频次运营还导致人员技能生疏，在一定程度上影响机场安全运营和服务质量。

“干支通、全网联”模式有助于提高中小机场的利用率。例如，成都航空在新疆投运9架C909支线飞机后，已开通24个支线航点，机型日利用率达到6.79小时，远超行业平均水平。同时，“国内通程航班管理平台”与“民航中转旅客服务平台”的融合，也有助于提升中小机场信息化水平。例如，内蒙古鄂尔多斯机场通过整合平台，利用空铁联运接驳高铁网络，将辐射范围扩展至周边200公里，旅客吞吐量同比增长40%，彰显数字化与多式联运在破解中小机场困局中的潜力。

在传统模式下，由于航线开通依赖航空公司规划，三四线城市航空出行需求长期被忽视。新疆试点“干支通、全网联”后成效显著，2024年备案通程航班航线数量达8963条，乌鲁木齐的国内

通航城市从91个扩展至155个，库尔勒从38个扩展至105个，阿克苏从41个扩展至106个。2024年，乌鲁木齐机场中转旅客人数达187.1万人次，同比增长14.7%，中转旅客吞吐量占比达15.6%；库尔勒机场中转旅客人数为13.7万人次，同比增长104.5%，中转旅客吞吐量占比达11.4%，这充分证明中小城市出行需求旺盛。

此外，“干支通、全网联”模式还能够保障偏远地区居民“飞得起、飞得到”。内蒙古通过“通用航空+支线”模式，实现12个盟市全通航，年人均航空出行次数从0.2提升至0.8，接近全国平均水平，契合《交通强国建设纲要》“普惠均衡”目标，助力乡村振兴与区域协调发展。

新冠疫情后，中国民航运力冗余问题凸显。截至2019年底全行业运输飞机3818架，2023年底增至4270架，4年间净增452架。2024年我国国际航班仅恢复至2019年的84%，国内日航班量却达1.7万班，反超疫情前的21%，大量运力投入国内市场，航空公司陷入“旺丁不旺财”困境。

拓展支线网络可激活闲置运力。C909飞机在支线市场规模化应用后，单机日利用率大幅提高。此外，“通程航班”模式也通过优化中转衔接，提高了宽体机利用率，既有效缓解了运力过剩问题，又为将来的国际市场复苏储备了充足运力，为航空公司的战略发展提供了更为灵活的空间和更强大的保障。

运力的储备与消化不仅是短期的市场需求，更是长期的战略布局需要。国际航空运输协会预测，全球航空需求将全面复苏，中国民航应保持机队规模和技术能力，这样方可在全球航空市场中占据有利地位。通过支线运营积累经验，可为未来国际航线拓展奠定基础，避免“技术断层”

风险，确保我国民航业在全球竞争中持续保持强劲的发展势头和竞争力。

民航业对经济带动作用显著，每百万旅客吞吐量可带动18.1亿元经济效益，创造5300个就业岗位。“干支通、全网联”在激活中小机场活力、促进临空经济区发展方面成效显著。郑州航空港依托航空优势，汇聚富士康等企业，已形成千亿级电子产业集群，充分印证了民航对区域经济的强大辐射效应，有效推动了国内产业链的协同升级与消费升级，为国内大循环注入强劲动力。

《关于推进国际航空枢纽建设的指导意见》明确，强化北京、上海、广州等国际航空枢纽全方位门户复合型功能，打造一批面向特定区域的国际航空枢纽和区域航空枢纽。通过“干支通、全网联”培育超国内民航市场，其释放的出行需求可为国际枢纽、区域枢纽提供充足客源，不但有助于提升国际枢纽的连通性和竞争力，还有助于形成国内、国际航线网络分层衔接的双循环格局。同时，超大的国内市场可以提供稳定的客源，不仅是超级承运人的“流量池”，更是其技术迭代、模式创新、全球扩张的保障基地。

推进“干支通、全网联”建设的举措

“干支通、全网联”建设是一个长期而复杂的系统工程，需要政府、企业和社会各方共同努力、协同推进。

在综合交通运输体系框架下，航空运输应加强与铁路、公路等运输方式的衔接协同。将机场作为综合交通枢纽的重要组成部分，实现无缝对接，提升综合交通运输体系的整体效能，打造高效、便捷、绿色的综合交通运输网络。一要加强民航业内不同运营主体协同，制定

图 | 王脊梁



统一服务质量、安全标准和信息共享标准，利用数字化手段实现航班信息实时共享。二要推动“干支通、全网联”与空铁联运衔接，统一标准，实现时刻表协同与安检互认。三要加强民航业与其他行业及地方政府的协同，推动旅游城市纳入“干支通、全网联”航空运输服务网络体系，带动相关产业繁荣。

在深化市场化改革、激发主体动能的过程中，要尊重市场规律，发挥航空公司、机场、通用航空企业以及在线旅游平台（OTA）等多元化市场主体作用。航空公司要深入了解市场需求，合理规划航线、安排运力、制定票价。大型航空公司可利用干线网络优势与支线航空公司合作，中小航空公司可专注细分市场提供个性化服务。机场集团要发挥规模化运行优势，为相关驻场单位及旅客提供高效、统一的服务保障。通用航空企业可利用其灵活性在短途运输、文旅融合等领域发挥补充作用。OTA平台可整合航空出行与其他相关服务，为旅客提供一站式、全方位的旅行解决方案，提升旅客出行体验，激发潜在需求。各参与主体积极作为，将航空运输市场的“蛋糕”做大，从而推动“干支通、全网联”建设的可持续发展。

“干支通、全网联”建设的成败关键在于能否获得旅客的认可、认同。在建设过程中，必须以旅客需求为导向，提供个性化、差异化、高品质的服务。要着力解决通航短途运输航线在干支机场的中转服务断点，打通民航中转全流程服务闭环，实现无缝中转，切实增强旅客乘坐通航短途运输航班的意愿。可设定统一服务质量红线，对支线航班实行与干线一致的准点率考核，强制披露中小机场平均安检等待时间（目标≤15分钟），以保障旅客的出行权益和服务质量。同时，加大监管力度，打破市场垄断和行政垄断，维护

公平竞争的市场秩序，打击各类违法违规行爲，保护消费者权益，为“干支通、全网联”建设营造良好的市场环境，确保其健康发展与良性运行。

“干支通、全网联”充分发挥潜力，需要政策的长效支撑，因此政府应充分发挥政策引导作用，在航线航班许可、资金补贴、税收优惠、机场建设审批等方面给予政策倾斜，鼓励航空公司发展通程航班和中转联程业务，提高其参与“干支通、全网联”建设的积极性。例如，《中国民航国内航线航班评审规则》鼓励航空公司开展国内通程航班业务，对通程航班量排名前3的航空公司，每次评审豁免3个航段客座率考核，这一政策实施以来取得了良好的效果，有效激发了航空公司的参与热情。建议随着“干支通、全网联”建设的推进，持续探索出台相应支持政策。此外，可设立政府和企业共同出资的市场培育基金，支持“干支通、全网联”建设关键项目，补齐薄弱环节，对新开通航线和中转产品给予资金支持。同时，可建立与运营绩效、服务质量挂钩的补贴机制，激励航空公司提高效率、提升服务，对偏远地区航线运营等表现突出的航空公司给予更多补贴。

“干支通、全网联”是中国航空运输市场实现从规模扩张向高质量发展转变的必然选择。通过构建覆盖全国、通达全球的航空运输网络，能够有效解决当前航空运输市场存在的发展不平衡、运力过剩等突出问题，推动航空运输业持续健康发展，为建设交通强国提供有力支撑。我们应当坚定信心、抓住机遇，凝聚政府、企业和社会各方的力量，大力推动“干支通、全网联”建设，共同开创我国民航业更加美好的未来，让航空运输更好服务于经济社会发展和人民群众的美好生活需要。■

航空公司的成本解困之路

文 | 柴雨丰

我国民航业在消费降级、行业内卷、高铁冲击等多重不利因素影响下，全行业并未彻底走出亏损的阴霾。近年来尽管油价相对平稳，国家宽松信贷政策下的融资成本低廉，但航空公司仍面临着成本增长的重重压力。而春秋航空、九元航空、西部航空等低成本航空公司的效益表现亮眼，其成本控制功不可没，各航空公司积极探索并形成一条适合本企业发展的成本管控之路迫在眉睫。

▼ 图 | 达美航空



现阶段成本控制的难点分析

首先，全行业面临供应链的共性难题。新冠疫情、俄乌冲突、中东冲突等事件带来技术人员流失、产能扩张乏力、基础材料供应不足等负面影响，全球维修产能严重不足，行业供应链紧张问题日益凸显。航材卖方市场特征明显，导致航材价格连续数年普涨、交货周期无限拉长，短期内没有任何缓和迹象。新发及备发严重不足，全球发动机大修资源供不应求，而发动机一次深度大修的成本开支额几乎等同于购买一台新的发动机所需的资金。据贝恩咨询公司分析，新一代发动机的维修周转时间比疫情前的基准时间高出 150%，传统发动机的维修周转时间比疫情前高出 35%，而航空公司别无选择，也无法得到相应的损失赔偿。维修供应链问题已经影响了航班的正常供应，全球各航空公司均发生了不同程度的被动停场，在此期间的飞机折旧费、租赁费等照常发生，并且没有任何收入贡献。根据媒体 Simple Flying 的分析，2025 年欧洲约有 10% 的运力因供应链问题被动停场。

其次，飞机引进过程中的被动处境。飞机及相关的零部件、技术服务长期被国外厂商垄断，其买卖不遵循商品随着产能扩张而价格逐年下降的价格规律，且供应商在报价时均会考虑物价指数的影响，成交价格呈现逐年上涨的走势，特别是近年来受供应链的影响，个别航材的价格出现翻倍。而新机型的成交价格更是较原机型价格高得离谱，航空公司无力左右这种价格走势。制造商出于占据市场、环境监管等方面的考虑，快速推出新的产品和技术，但新技术并不代表着稳定技术，航空公司还承担着技术迭代的用户风险。比如新型的普惠

GTF 发动机、CFM 的 LEAP 发动机、罗罗的 Trent 1000 和 Trent XWB 发动机均不同程度出现了技术问题，厂商以不可抗力等理由拒绝赔付停场损失，仅给予适当金额的封顶现金赔偿或贷方权益补偿。

第三，飞机与航线的不匹配形成隐性成本。受运力过剩及行业缓慢复苏的影响，飞机的日利用率不理想，航线结构及投入占比较疫情前均发生较大变化。而发动机大修（包修或自修）是建立在一定的年飞行小时数、小时循环比（即该发动机一年中执飞的所有航班的平均飞行时长）假设基础之上的，如果达不到费率的假设基础，将触发调整包修收费矩阵、收取保底飞行小时数对应的大修费、提前下发等解决方案。国内 460 余架宽体机并未完全匹配到稳定的国际长航线，大量宽体机执行国内航线或国际短航线的占比偏高，导致小时循环比缩短，降低了发动机大修的下发间距，直接拉高了单位大修成本水平。各公司对发动机大修的会计处理方式不同，有些发动机大修被资本化处理，虽未对当期损益造成直接的影响，但该支出将以摊销等方式在未来受益期显现，同时高昂的大修支出为未来飞机残值的处置埋下了隐患。另外中小航空公司的航网结构不合理，大四段排班机组被迫占座、虚耗机组出勤时间等情况较普遍。

第四，无效运行投入有较大提升空间。民航无效运输占用时间比较突出，比如枢纽机场地面滑行时间普遍较长，空域开放不合理等原因导致的航班非直线系数偏大，各种复杂的进近、绕飞程序等与欧美相比有很大的差距，影响旅客便捷出行体验，造成飞行时长的增长和航班运行成本的虚耗。根据全国政协委员赵东的分析，如果将我国空域航路

效率提升至欧美水平，可有效减少飞机在空中绕飞，每个航班可节约飞行时间 13 分钟，并可间接减少存量飞机保有量，降低票价水平，同时还可节省空勤人员的成本支出、飞机维修成本支出等。为保证航班准点率，国内航班编排时前后航班的间隔预留时间较长，仍可进一步挖潜以节约运力占用。

第五，执行从严标准产生的额外成本增量。航空公司出于万无一失的安全管理理念，在维修标准的执行环节，会严于厂商的推荐标准。比如针对执飞高原航班的飞机，航空公司、局方在厂商推荐下发时间的基础上，进一步从严下调发动机大修的下发间隔，超过自定标准的发动机不得再执行高原任务，而通过内部串发以减少大修次数的调剂空间又十分有限，导致该类发动机在全生命周期内的大修次数多于厂商推荐的大修次数。在机组编排方面，执飞高原机场或复杂机场时要求双机长执勤，而安排单机长加一名运行经验丰富的副驾驶足以完成任务。空勤人员舟车劳顿去异地疗养的方式是否有其他的休养替代方案？国内对二手航材、国产替代航材的推广使用态度不坚决、不积极，大面积普及尚需时日。对通过更换滑油、胎皮等易耗品品牌以降低采购成本持谨慎观望的态度。

最后，其他成本管理方面的挑战。全球气候治理进程稳步推进，国内航空公司面临着加注可持续航空燃料（SAF）的挑战。SAF 价格通常是传统航油价格的 2~4 倍，而与之配套的税收优惠、财政补贴、向旅客收取 SAF 附加费等政策不明朗。随着民航运输量的增长，国内机场越修越大、造价越来越高，日常运营成本居高不下。而机场航空性业务收费标准已经执行了十多年，各机场

通过提价来消化成本增量的呼声越来越高，将来势必加重航空公司的成本负担。近年来，以美元为代表的外币汇率波动巨大，而飞机引进多以美元结算，外币销售占比极低，无法自然抵消汇率波动带来的损失。

成本管控工作的突破口

航空公司效益的根本在于收入端，把收入的蛋糕做大、做优，但我们有必要对与之匹配的成本端有一个持之以恒、常抓不懈的思想准备和行动方案，成本管理得好往往会对效益产生锦上添花甚至是雪中送炭的奇效。

飞机引进工作要从长计议。必须发挥大交通体系下的大规划协同作用，认真组织国内中远程市场“十五五”规划和“十六五”展望，民航规划与铁路规划要一揽子考虑后确定增长目标，积极进行民航供给侧结构性改革，控制运力的总体规模。通过精简机型，可集中引进环节的谈判筹码，降低后期飞机维修成本、人才培养和管理成本。但近期新机相继出现的技术问题给航空公司带来了不少的麻烦，飞机引进规避技术风险要遵循同一时期不能把鸡蛋放在一个篮子里的原则，新型发动机的选型不能单一，要充分考虑新技术风险的损失补偿。另外可退而求其次，引进时考虑相对低机龄、技术稳定、成本相对低廉的 A320CEO、737NG 二手机。逐步形成自购、经营性租赁相结合的引机方式，通过不同租期的合理搭配，为后期机队调剂预留空间。培养对民航高龄飞机的拆解能力，挖掘老旧航材再利用价值。

精心组织，控制成本水平。严格控制单位成本水平，追求成本投入的回报。比如针对新机型，选装面积较小的新型

卫生间,选择轻薄座椅增加客舱座位数。适应消费降级趋势,简化娱乐设施的配置,将公务舱改为座位数更多的经济舱。国内航线取消配餐或优化配餐标准,对于在购票阶段明确不选餐的旅客,奖励适当的消费积分。加强飞机与市场的匹配研究,通过提高小时循环比,拉长发动机大修的下发间隔。在运行环节,减推力运行、飞机瘦身、申请临时航路、控制APU使用时长等措施要常抓不懈。增收就是对成本的最大贡献,旺季保投入量,争取更大的市场份额,维修单位的飞机可用率、机长月均贡献小时数、空勤干部的飞行小时数、主基地的出港正常率及市场占有率等指标要提上去。丰富边际创收手段,如开展登机口升舱、机下候补货、提供定制化的收费服务项目等。在有边际贡献的前提下,要应飞尽飞,提高飞机的日利用率。

对成本发生标准进行评估与重塑。航空公司存在各种成本业务发生的执行标准,有必要进行梳理和优化。维修间隔缩短等操作并不意味着绝对的安全,飞机不动是最安全的,只要运行都有可能出现问题。因此执行一个什么样的维修标准绝不是拍脑子决定的,经厂商、航司、局方充分论证后的标准更具权威性,更贴近实际。人机比取决于该公司在整个服务链条中自有保障力量的参与程度及其工作效率,要综合考虑自有成本、服务外包成本,并没有一个绝对权威的人机比参考标准,但可以按工种对人机比、人均业务量等进行对比分析。申请政策偏离,安全员能否兼顾客舱服务员的职责,减少空乘配备量。对国产航材、二手件要持开放、包容的态度,支持国货,给民族制造业发展的机会,分步实施国产替代的应用。

形成成本管控的行业合力。无效运

行投入和航班非直线系数偏大的问题不单纯是航空公司一方的成本问题,更关系到民航业在综合运输体系中的竞争地位和市场份额,各相关单位要有唇亡齿寒的危机意识。因此成本管控不仅仅是航空公司一方的事情,必须牢固树立大民航、大服务、大成本管控的理念,局方、空管、机场及其他各驻场保障单位必须打破门户界限,各相关单位要主动为航空公司营造良好的运营环境,主动领任务、扛考核指标。包括但不限于飞机进离港程序、截弯取直、批准高高度飞行、开放临时航路、全国大通道持续调整优化、在多跑道机场中起降跑道与停机位的就近分配等工作。局方要支持航空公司的旺季生产,飞行干部要飞足旺季小时数,对于航空公司的合理诉求给予政策偏离。

建立成本管理的层层传导机制。要颠覆对一些刚性成本的认知,建立经营压力的传导机制,形成产业链上下游之间、企业与员工之间的风险合理共担,打造唇亡齿寒、同呼吸共命运的利益相关体。各类成本要素有协商调整的空间,包括飞行员的转让费、员工的薪酬福利、空勤的小时费标准、差旅费标准等。要积极争取商业折扣、商业减免、延期支付等优惠待遇,通过合同文本来固化商业变更谈判的结果。必要时采取债务重组等措施,实现对原有债务的法定削减。成本内部管理要严管厚爱,拉下脸、狠下心,要向春秋航、西部航等民营企业学习,对各项成本开支要锱铢必较,要有严格的奖惩措施。针对行业强周期板块的特点,成本管理在任何时候都不能放松,要克服小富即安的思想,要像冬眠动物冬储一样打实成本基础。■

达美航空： 股权投资构建全球运营网络

文 | 王双武

代码共享合作是航空公司之间为开展联合销售并拓宽运输网络而采取的一种常规做法。在此基础上,航空公司还会通过联营方式来深化合作伙伴关系,以实现营销资源的优化和航线收益最大化的目标。随着市场竞争加剧,为了能够在市场上采取主动的应对措施,一些航空公司还会在联营基础上采取股权收购方式,与被投资公司开展深度合作。

在联营与股权收购方面,美国达美航空在全球范围内构建了一张天合联盟内外部成员参与的运输网络。达美航空通过股权收购,一方面能够发挥自身对市场的影响力,另一方面又能以股东身份在参股公司董事会中占有席位。在达美航空股权投资的航空公司中,基本上是那些有过联营合作的公司,如维珍大西洋航空、法航-荷航集团和大韩航空等。

▼ 图 | 达美航空



与低成本公司联姻

达美航空于 2011 年与加拿大低成本公司西捷航空建立了合作伙伴关系，在美国与加拿大之间以及海外市场上通过网络运输合作，为双方旅客提供了有效的航班无缝衔接服务。2024 年夏季，西捷航空国际航班运力比 2023 年增长了 11%，其每周在 29 个机场的离港国际航班量超过了 900 个。西捷航空借助与达美航空的代码共享合作，通过达美航空在亚特兰大、波士顿、芝加哥、洛杉矶、纽约和西雅图等主要枢纽机场，为中转旅客提供紧密的航班衔接和交运行李直挂目的地的服务。

今年 5 月，达美航空和大韩航空分别对外宣布，达美航空将投资 3.3 亿美元收购西捷航空 15% 的股权，大韩航空将投资 2.2 亿美元收购西捷航空 10% 的股权。达美航空和大韩航空收购西捷航空 25% 的股权后，三方的合作范围和经营形式将会有进一步的改变，也将为旅客在全球范围内的出行提供更多的权益和航班衔接服务。

另外，印度低成本航司靛蓝航空于 2022 年与法航 - 荷航集团和维珍大西洋航空建立了合作伙伴关系，法航 - 荷航集团和维珍大西洋航空的旅客通过靛蓝航空网络可衔接到印度国内超过 30 个目的地。通过双边及多边的合作，对于靛蓝航空来说，通过荷航阿姆斯特丹可衔接欧洲 30 个目的地，通过达美航空和荷航在阿姆斯特丹机场的运营，可衔接去美国和加拿大的目的地，还可通过维珍大西洋航空在英国曼彻斯特机场衔接去美国诸多城市。

2025 年 6 月，达美航空、法航 - 荷航集团和维珍大西洋航空宣布，计划与印度靛蓝航空建立一种行业领先的合作伙伴关系，满足国际旅行市场增长需求，并通过有效的方式在全球行业内制定一种航班衔接与合作新的运营标准。与此同时，达美

航空计划在年内恢复亚特兰大至德里的非经停航班。基于双边和多边的合作，这些公司计划就网络拓展、忠诚度计划、销售推广等展开深度合作，还将探讨在航空器维修、培训、地面服务等领域的合作。

达美航空方面表示，通过整合与法航 - 荷航集团、维珍大西洋航空和印度靛蓝航空的网络优势，能够在欧洲、北美与印度之间开展极具竞争力的航班网络衔接，在不断扩大全球范围内的合作规模基础上，确保为旅客提供更高标准的服务和出行体验。

强化跨大西洋联盟

代码共享合作伙伴关系仅仅是一种销售与联运方式的递进，并不涉及会员权益和航班协调。因此，作为联营合作伙伴，双方会通过协调航班计划、航线规划和航班量等来优化资源，并且还会共享经营利润或者共担经营损失。2009 年 12 月，达美航空首先与法航和荷兰航在跨大西洋航线上开展了联营。2017 年 7 月，达美航空投资 3.75 亿欧元收购法航 - 荷航集团 10% 的股权。2023 年 10 月，法航 - 荷航集团又收购了北欧航空 20% 的股权。

达美航空方面表示，在投资收购西捷航空股权之后，将来在适当时机将 2.3% 的股权转让给法航 - 荷航集团。达美航空与法航 - 荷航集团是天合联盟的核心成员，在跨大西洋市场上通过联营方式与其他联盟成员公司展开竞争。如果达美航空将收购西捷航空的部分股权出让给法航 - 荷航集团，无疑会进一步整合北美地区和跨大西洋市场的营销资源，有效提高天合联盟的整体竞争力。

在获得欧盟和美国司法部的批准后，2012 年 12 月，达美航空与维珍大西洋航空开展联营。2013 年 6 月，达美航空收

购了维珍大西洋航空 49% 的股权，双方在北美与英国跨大西洋市场上 66 个目的地和 108 条航线上实行代码共享。

因受新冠疫情的严重影响，维珍大西洋航空从 2020 年 3 月起连续 3 个月被迫停止客运航班的运行。为了尽快恢复跨大西洋市场的运输，2020 年 9 月，维珍大西洋航空发起了 12 亿英镑的私募基金资本重组计划。其中有 2 亿英镑是来自维珍航空大股东理查德·布莱森的投资。在此形势下，为了继续维持维珍航空 49% 的股权，达美航空向维珍大西洋航空注资了 1.96 亿英镑。在多方注资的情况下，维珍大西洋航空逐步减少了公司债务。

达美航空方面表示，战略性收购维珍大西洋航空股权极大地改善了达美航空经营伦敦希思罗机场的状况，同时也提高了达美航空在跨大西洋市场上的竞争力。旅客除了选择达美航空外，还能在纽约与伦敦之间选乘维珍大西洋航空每天执飞的 6 个航班。

在会员权益方面，达美航空与维珍大西洋航空的会员在乘坐达美航空或者维珍大西洋航空的所有航班（不仅仅是代码共享航班）时，还能最多赚取 125% 的升级里程。那些高舱位旅客或者金卡、白金卡和钻石卡等精英会员在全球范围内乘坐达美航空或者维珍大西洋航空的所有航班（不仅仅是代码共享航班）时均享有优先值机、优先登机、优先行李处理和额外免费行李托运等权益。

缓解拉丁美洲的困局

达美航空于 1994 年开始与墨西哥航空开展代码共享合作。为了稳定在美国与墨西哥之间的航空市场地位，强化自身在市场上的主导作用，2012 年 6 月，达美航空向墨西哥航空注资了 6500 万美元收



▲ 图 | 印度靛蓝航空

购其 4.17% 的股权，并在墨西哥航空董事会中获得了一个席位。这也是墨西哥航空首次出售股权给外国航空公司。自此，达美航空在拉丁美洲就拥有了一个新的盟友，并拓宽了与墨西哥航空的代码共享航线范围。

2017 年 3 月，达美航空出资 6.2 亿美元额外收购墨西哥航空 32% 的股权。完成股权投资收购后，达美航空持有墨西哥航空 49% 的股权。自此，两家公司间进一步密切合作，在拉丁美洲构建了强大的国际运输网络。但在 2020 年新冠疫情暴发后，墨西哥航空在经营上出现了困境，并在 2021 年 12 月申请破产保护。

在墨西哥航空破产重组的过程中，达美航空原先持有的该公司股权面临着被稀释的风险。尽管达美航空在墨西哥航空破产重组过程中通过增加投资发挥了一定的作用，但是在 2022 年第一季度墨西哥航空完成重组后，达美航空持有的股权比例由疫情前的 49% 下降到 20%。在重组后的墨西哥航空新的董事会中，达美航空保留了两个董事席位。此时，两家公司在跨境网络中构建了超过 40 条商务与休闲航线。

2019 年，达美航空投资 19 亿美元收购了拉丁美洲最大的航空公司拉塔姆航空

20%的股权。2020年初，达美航空与拉塔姆航空正式开展代码共享合作，并希望与拉塔姆航空签署全面联营合作协议。在2021年12月之前，他们之间的联营合作协议就差美国主管部门的最后批复了。然而因在疫情期间遭遇了与墨西哥航空同样的问题，拉塔姆航空经营陷入困境，最后也走上了申请破产保护的道路上。

由于拉塔姆航空在重组过程中的股权发生了变化，达美航空持有拉塔姆航空的股权也被稀释。尽管达美航空也增加了对拉塔姆航空的投资，但是持有的股权由原先的20%下降到10%。达美航空方面认为，对墨西哥航空和拉塔姆航空的投资将会进一步促进达美航空的商业增长，有助于提高在拉丁美洲的竞争力和构建一个全球性的网络运输平台，也能为旅客提供更好的航班衔接和出行体验。

密切亚太航空合作

大韩航空是天合联盟创始成员公司之一。为了进一步改善客户出行体验和提高网络盈利能力，2018年5月，达美航空与大韩航空在跨太平洋航线上建立了联营合作伙伴关系。双方通过网络运营，在美国境内超过290个目的地和在亚洲超过80

个目的地之间建立了有效的航班衔接。通过与达美航空的联营合作，大韩航空已经成为跨太平洋市场上运输能力最强的航空公司之一。

在与大韩航空成功联营合作的基础上，2019年，达美航空收购了大韩航空4.3%的股权。后来，达美航空加大投资力度，持有大韩航空的股权上升到了10%。在完成收购大韩航空10%股权之后，达美航空与大韩航空进一步强化了战略合作伙伴关系，双方密切合作，有效地整合了市场资源和营销资源，不断提高和改善旅客出行权益，各自会员在乘坐对方航班时均能累积里程和兑换机票，稳固并扩大了在跨太平洋市场上的竞争地位。

达美航空与中国东方航空同属天合联盟，之前双方在中美航线上已经开展过代码共享合作。为了扩大联盟合作伙伴关系和深化跨太平洋航线的合作，2015年7月，达美航空与东航签署新的合作协议，其中包括达美航空向东航注资4.5亿美元并收购该公司3.55%的股权，达美航空在东航董事会中保留一个观察员席位。

达美航空方面表示，注资东航能够更加深化彼此的合作，尤其是在中美航线上能够为双方带来更多的收益，也能为旅客提供更满意的客户服务。达美航空与东航在美国的30条国内航线和中国的43条航线上实行代码共享合作，为出行旅客提供更加便捷的航班衔接，增加了更多的出行权益。

全球航空运输企业在发展与扩张的道路上，面临着不同经营方式的选择。为了提高区域乃至全球范围内的竞争力和赢取市场拓展的主动性，达美航空已经从传统的代码共享合作逐步走向资本扩张的股权投资道路。达美航空通过股权投资的方式进一步提高了联盟网络运输能力和航班无缝衔接保障能力，构建了一个全球性的网络运营平台。■

▼ 图 | 达美航空



什么是缩比飞行验证

文 | 马茹冰

近几年，无人机越来越多地出现在公众的视野中。无人机送外卖、无人机巡查电力线路、无人机喷洒农药等场景的出现，是现代科技改善人们生活、提升生产效率的体现。在民机研制中，也有一种“无人机”——按照一定的相似准则制造的缩比验证机。飞机设计师们按照一定比例（比如1:10或1:20）缩小飞行器尺寸，制造出缩比验证机，并让其在实际飞行环境中进行飞行试验，这叫“缩比飞行验证”。

缩比飞行验证的核心特征在于通过小尺寸飞行器的飞行来验证大尺寸原型机的飞机特性，是一种高效、低成本且相对安全的飞行器设计验证手段，能够提前发现和解决飞行器设计中的问题，为真实飞行器的研发提供关键数据支持，降低研发风险和成本，是民机研发的关键一步。

▼ 图 | NASA



在全球航空研发进程中，主制造商如波音（X-48B 验证机，用于布局与控制律验证）、空客（Maveric 验证机，用于控制律鲁棒性研究）、洛克希德·马丁（X-56 验证机，用于气弹与颤振试验）等公司都曾采用缩比验证机进行飞行试验。

缩比飞行的发展史

缩比飞行试验经历了从早期的飞机投放模型进行无动力自由飞行，到后来利用火箭动力助推实现模型跨声速、超声速、高超声速、高高空自由飞行，再到近年来利用带动力及自主控制的缩比验证机开展新概

念气动布局、高新技术先期演示验证的探索及发展过程。

1947 年以来，美国波音公司率先开展的 X 系列技术验证机计划，打开了缩比飞机验证技术的道路。此后的 70 余年间，美国共研制了 50 多种 X 系列飞行器，早期以有人驾驶为主，随着自主飞行控制技术的发展，自 X-36 开始都为无人飞行模式。

空客同样针对 A320、A321 飞机开展了缩比验证飞行研究，以评估计算机建模与真实飞行测试间的差距，并进行新技术验证。

国外针对非常规布局和新概念方案的缩比飞行试验主要集中在气

动特性、飞行力学研究、专项关键技术验证等方面。对于常规构型民用飞机的缩比飞行试验研究主要包括边界特性、故障状态与控制律研究、仪器搭载试飞等。

我国从 20 世纪 60 年代开始发展缩比飞行试验技术研究。钱学森先生曾说：“我们发展自己的飞机，要发展模型自由飞这种办法，解决风洞吹风不易解决的气动问题。”目前，相关单位创新性地开展了带动力、自主控制的无人飞行验证平台的开发与应用，先后开展了多个构型的缩比飞行验证试验，突破了相似性验证技术难点，打通了无人飞行验证实施路径。

缩比飞行的原理

缩比验证机和风洞模型均遵循相同的相似准则理论，采用与原型机在几何、质量、运动等方面经过相似准则换算后的模型，在真实的大气环境中飞行，通过对缩比飞行数据的处理与分析，可以获取丰富的数据，更好地逼近原型机试飞环境和本体特性。

缩比验证机为了保证与原型机的相似变换关系，必须满足几何相似、运动相似和动力学相似等条件。几何相似是力学相似的前提条件，动力学相似是决定运动相似的主导因素，而运动相似则是几何相似和动力相似的表现。动力学相似包括不同的动力学相似准则，如雷诺数（Re）相似、马赫数（Ma）相似、弗劳德数（Fr）相似、斯特劳哈尔数（St）相似等。

对于缩比飞行验证的低速试验，不考虑压缩性影响，遵循的相似准则主要是弗劳德数（Fr）相似，表征的物理意义是：缩比模型的惯性力与缩比模型的重力之比等于原型机的惯性力与原型机的重力之比。马赫数表征惯性力与弹性力（可压缩力）的比值，在压缩性效应占主导地位时，应遵循马赫数相似。

缩比飞行和模型飞行的区别

一般来说，缩比验证机在进行飞行试验的时候，地面除了有测控车遥测指挥，监控各种参数状态，还会安排一位飞手拿着遥控器待命。这场景容易让人想起航模飞行。那么缩比飞行与模型飞行有什么区别呢？

这两者的区别是非常大的。一是目的不同。缩比飞行试验是一项以工程研究为目的的科研试验，用来研究全尺寸原型机的飞行特性；而航模运动是一项国际级户外体育运动，通常追求飞行性能的超越极限。

二是模型不同。为了实现试验目的，验证全尺寸飞机的特性，缩比验证机需要满足多种相似准则，模型的外形尺寸、重量、惯量速度等参数都存在着特性的比例关系；而航模运动的模型一般追求的是外形与原型机的神似以及模型本身优异的飞行性能。

三是飞行数据的采集不同。缩比飞行试验时一般搭载了专业的测控设备和系统，能够对全过程的各项飞行参数进行实时的监控与记录；而航空运动一般仅装备必要的遥控设备，很少再额外搭载其他飞行参数采集设备。

缩比飞行有效吗

随着满足科研要求的小型化飞行数据采集设备、小型动力系统、轻型结构、可靠的数据链以及微小飞控系统等成熟产品的大量使用，缩比飞行试验逐渐发展成为一种可有效降低研制成本、缩短研制周期、释放技术风险的验证途径。

目前，缩比飞行试验是气动研究的三大技术途径之一，可以研究和验证原型机的气动特性、危险边界、新布局和新技术，具有周期短、风险小、成本低等优点。与风洞试验相比，缩比模型飞行试验具有模型尺寸不受限、试验高度范围大、试验马赫数范围宽、雷诺数高、动态特性综合模拟能力强、可以在真实大气环境中开展无约束自由飞等特点。

全球多个民机项目所进行缩比飞行验证的结果表明，缩比飞行验证在气动特性参数辨识、飞行品质评估等方面对型号研制具有巨大的推动作用，而且在高风险科目的试飞验证上，对于民机试飞安全性验证具有重要意义。

未来，随着相关技术的进一步发展，缩比飞行验证将有望在民机型号研制过程中发挥更大的作用。■

图 | 波音 757 验证机（左，颠倾恢复和其他安全问题研究）、空客基于 A321 的验证机（中，载荷减缓研究）、L-1011 验证机（右，单发，飞行力学和控制系统试验）



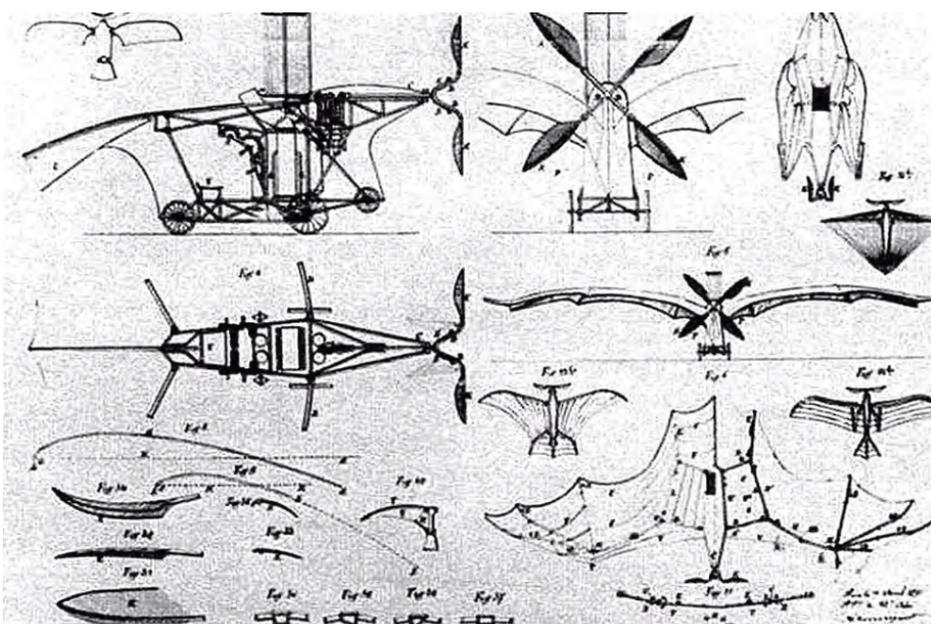
被时代低估的航空先知

——克莱芒·阿代尔

文 | 王思磊

1784年，当詹姆斯·瓦特改良的蒸汽机在伯明翰的工厂里轰鸣时，谁也不会想到，这个改变世界的发明，将在百年后托起人类飞向蓝天的梦想。在第一次工业革命的浪潮中，法国工程师克莱芒·阿代尔在人类征服天空的史诗中留下了独特的印记——他是第一个驾驶有动力的飞行器“离开”地面的人，也是给“飞机”取名的人，他用一生的实践讲述了一个关于羽毛、蒸汽机与执着梦想的故事。

▼ 克莱芒·阿代尔的飞机草图



机械、画图与鸟类

1841年4月2日，克莱芒·阿代尔出生在法国小城米雷的一个木匠家庭。这个在第一次工业革命末期出生的孩子，从小就被新时代的机械奇迹所吸引。1851年伦敦万国工业博览会上展出蒸汽机车和纺织机械的消息传到法国，10岁的阿代尔在日记中画满了各种机械装置。

1855年，阿代尔成为图卢兹圣约瑟夫学校的寄宿生。在校期

间，老师们发现，这个14岁学生的数学作业边缘总是标注着奇怪的参数：“翼展2.3米时，迎角15°升力最佳……”虽然当时第一辆汽车尚未完全研制出来，但阿代尔却已经在设想一种能将人带入空中并能像他经常看到的鸽子那样随意飞行的机器了。他还根据一种昆虫的身体，设想研制一种微型的螺旋桨飞机。1857年的学生日记显示，他已构思出微型螺旋桨飞机的草图——那时莱特兄弟尚未出生。

1870年普法战争爆发，29岁的阿代尔作为铁路工程师，却在写给法国陆军部的信中大胆预言：“未来的战争将在空中决定胜负。”他向法国军事当局介绍了自己设想的飞行器。普法战争后，法国掀起了铁路建设高潮。作为铁路工程师的阿代尔，每天与蒸汽机车打交道。他在1873年的工作笔记中写道：“蒸汽机的力量如此之大，若能将其用于飞行……”正是这段铁路工作的经历，让他萌生了用蒸汽动力飞行的想法。

也正是在这一年，阿代尔在巴黎郊外一间废弃的陶瓷厂里，制造出了一只“机械鸟”——一种用木头和羊肠线缝制成的滑翔机。

这只“机械鸟”翼展12米，机翼是空心木质，覆以纤维和翼肋，上面插满了从周围农场收集来的鹅毛。“机械鸟”的机翼由关节连接起来，能够很容易地抬起、放下和移动，尾翼也是由羽毛组成，可以偏转。通过一系列手柄来操纵“机械鸟”，就可以再现一只鸟在飞行中的所有运动。

但当时，无论是公众还是专家，对阿代尔的羽毛滑翔机都没有多少兴趣。村民们私下都嘲笑他做这种古怪的东西太荒唐。《科学评论》在1874年2月刊中写道：

“这个疯子用2184根鹅羽和羊肠线制作翼面，每根羽毛都经过蜡封处理。”当这个重达180公斤的“机械鸟”在塞纳河畔试飞时，围观者没注意到，它创造了23米的滑翔纪录——这是人类首次实现可控的翼面飞行。

蝙蝠的启示与“飞机”的由来

制造能飞的“机械鸟”的想法始终萦绕在阿代尔的心头，他甚至花了很多钱在自己巴黎住房的花园里建了一个大鸟舍。

1882年，阿代尔去斯特拉斯堡用3个月的时间研究鸬的飞行，



▲ 阿代尔所发明的飞机形式

后来又回到阿尔及利亚的康斯坦丁研究兀鹫的飞行。他确信，如果人能遵循几条原理，再有一对翅膀和一个发动机，总有一天能像鸟儿一样飞翔。

回国后，他在花园的大鸟舍附近建了一个车间，继续飞行研究。在此，他先后解剖了37只蝙蝠，试图从蝙蝠的身体结构中寻找方案，以蝙蝠为模型建造他的飞行器。起初是他一个人干，后来又找了两个人——瓦利尔和埃斯庞诺萨，他们成为了阿代尔的忠实助手。

1890年，阿代尔与助手们终于完成了第一架飞行器的制造，取名为“风神”。“风神”长6.5

米，翼展14米，丝绸覆面的折叠机翼精确复制了蝙蝠的前肢骨骼结构。一台14千瓦的发动机，通过酒精加热的锅炉提供蒸汽动力，驱动4叶螺旋桨。机身装有四个轮子，两个在中央，第三个在尾部，第四个在前面，以防止向前翻倒。整个飞行器看起来就像一只硕大的蝙蝠。

1890年4月19日，在注册的专利中，阿代尔为他的发明取了一个名字——“Avion”，也就是法语“飞机”的意思。从此，这一名字被广泛使用，直到现在。

1890年10月9日下午4点，米雷小镇的一个庄园里，阿代尔坐到驾驶座上，跑道上的“飞机

什么是低空经济

——《未来已来——我国低空经济的机遇与挑战》摘编（一）

文 | 任和

1号”震颤着喷出蒸汽，然后突然地抖动起来，并发出轰鸣声。随后发生的事情阿代尔记录在1921年出版的一本书里。其中一段话是这样的：“于是我加速，轮子几乎立即停止在地面上摩擦，有几秒钟，我发现我腾空起来，感到一种莫可名状的轻飘的感觉。但是这时飞机已经快到跑道的尽头，不能再往前走了，我立即关掉发动机，飞机又向前滑行了几十米停住了。这是发生在1890年10月9日的一件小事。”

“一件小事”，多么谦虚，阿代尔只让他的两个助手来看他的飞行，而躲在灌木丛中的园丁后来回忆：“它（飞机1号）像只惊醒的蝙蝠突然跃起。”后经现代航空学考证，当时“飞机1号”确实实现了20厘米高度、50米距离的动力飞行，而这比莱特兄弟早了整整13年。

折断的翅膀与迟来的加冕

这个本该被载入史册的时刻，却因没有多少人看见而被埋没，阿代尔面对的是公众的不相信和政府的漠然处之。尽管1892年2月，法国陆军部与他签订了一个合同，但阿代尔直到5年之后才

有机会向当局展示他惊人的发明，因为他制造的第二架原型机“飞机2号”，不幸于1891年发生事故而不能飞了。

第三架“飞机3号”的试飞工作在1897年10月14日进行。法国陆军将领们聚集在萨托里试验场，改进版的“飞机3号”装载着两台蒸汽机，时速可达64公里——这个纪录直到1905年才被莱特兄弟打破。可当“飞机3号”行进到300米时，一阵侧风袭来，飞行员失去了对飞机的控制，飞机重重地摔在了地上，而且远离跑道。由于失败的原因不能确定，陆军部不想继续进行这个费用昂贵的试验，于是在档案里冰冷地记载：“项目终止。”

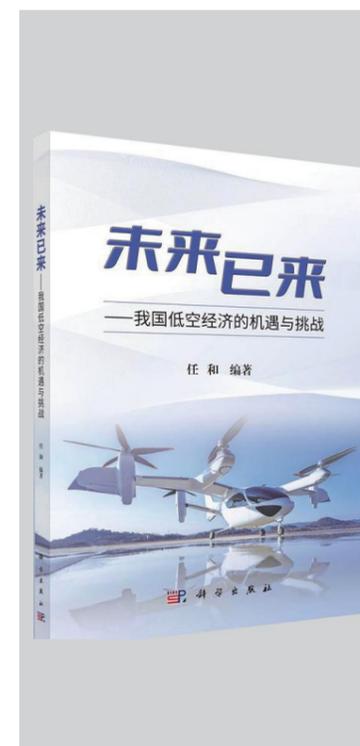
阿代尔气恼地病倒了。1902年，他决定中止他的航空研究。伤心至极的他请人把除了“飞机3号”之外的所有东西都清除干净，不留一点痕迹。“飞机3号”后来进了博物馆。

1910年，第一次世界大战爆发前4年，他写道：“那些没有认识到空军是未来武器的国家准会遭殃。”在一本名叫《军事航空》的书中，69岁的阿代尔发出惊人的预见：“随着军事航空的出现，英吉利海峡将不再那么重要了，

无数战舰将变得无用。那时英国必须成为自己领空的主人，海军部的工作将集中在保卫伦敦……”

一战期间，80岁的阿代尔目睹自己预言的空中战争成为现实，他的预见性思想和发现终于迎来赞扬。1924年10月，在他的飞机第一次飞行34年之后，83岁的他坐在轮椅上，接受米雷镇的致敬。1925年5月3日，阿代尔满载荣誉在图卢兹去世，享年84岁。临终前，他还发出这样的预言：“谁掌握天空，谁就主宰世界……”英国空军元帅特伦查德后来承认：“我们花了20年才理解他划时代的思想。”

2003年，NASA在“极光计划”中重新研究了阿代尔的蝙蝠翼设计，那些曾被嘲笑的理念——可变形机翼、蒸汽动力航空器——正在21世纪的航天领域“复活”。2017年，法国航空航天学院的风洞实验报告证实：“风神”的升力系数与现代轻型飞机相当。正如法国航空史学会主席皮埃尔·克劳斯特所言：“阿代尔真正的飞行，发生在他死后——当人类终于追上他的想象力时。”■



编者按：

近几年，低空经济异军突起，不仅作为新质生产力的典型代表被写入政府工作报告，而且以其产业链条长、服务领域广、带动作用强等特点，成为国家促进消费、带动投资、推动转型的新兴战略行业。

《未来已来——我国低空经济的机遇与挑战》是一部全方位介绍低空经济的科普性教科书，系统地介绍了全球低空经济发展态势、相关政策法规、相关技术和应用场景，以及面临的问题。本刊特予摘编，以飨读者。

2024年以来，低空经济的快速发展是在习近平总书记提出的新质生产力理论的指引下取得的。新质生产力理论为低空经济的发展指明了方向，开辟了道路，开拓了空间，是低空经济发展的根本遵循。2023年7月以来，习近平总书记在四川、黑龙江等地考察调研时，提出新质生产力概念，并在多个场合对这一概念进行阐发。2024年1月31日，在主持召开二十届中

央政治局第十一次集体学习时，习近平总书记对新质生产力的内涵进行了全面的阐释，指出新质生产力是创新起主导作用，摆脱传统经济增长方式、生产力发展路径，具有高科技、高效能、高质量特征，符合新发展理念的先进生产力质态。新质生产力由技术革命性突破、生产要素创新性配置、产业深度转型升级而催生，以劳动者、劳动资料、劳动对象及其优化组合的跃升为基

本内涵，以全要素生产率大幅提升为核心标志，特点是创新，关键在质优，本质是先进生产力。

我国经济发展的战略选择

低空经济被视为新质生产力，主要有以下几个原因。

技术创新：低空经济的发展离不开无人机技术、通用航空技术的创新和应用，这些新技术的出现推动了生产力的提升。

产业融合：低空经济涉及航空、旅游、物流等多个产业的融合，这种跨领域的融合能够产生新的经济增长点。

市场潜力：随着社会经济的发展 and 人们生活水平的提高，对于低空经济的需求也在不断增长，市场潜力巨大。

政策支持：许多国家和地区都出台了相关政策，鼓励和支持低空经济的发展，这为其提供了良好的发展环境。

创造就业：低空经济的发展可以带动相关产业链的发展，从而创造更多的就业机会。

以新质生产力促进低空经济发展可以围绕劳动者、劳动资料、劳动对象及其优化组合等维度给予政策支持。

高素质的劳动者是新质生产力的第一要素。不同于传统产业，低空经济产业所需要的劳动者需要立足科技创新前沿，具备较强的知识迭代能力，熟练掌握新型生产资料。因此，要搭建低空经济的人才培养体系，打造低空经济人才队伍，营造良好的低空经济人才发展氛围，培养符合新质生产力要求的一流科技领军人才和应用型人才。

新质生产力的生产工具具有极强的科技属性，低空经济的发展需要将数字技术、智能技术、数字孪生技术、移动技术、定位技术、现代飞行技术等高新技术结合应用到低空空域，并要促进人工智能、虚拟现实和增强现实、自动化制造设备的使用利用，从而形成新质生产力的强大驱动力。

培育和壮大战略性新兴产业和未来产业可以有效夯实新质生产力物质基础，低空是人类经济活动向更广范围的劳动对象的拓展，作为新的增长引擎，发展低空经济需要从国家战略层面进行谋划布局，推动低空产业前沿科技和产业变革。

低空经济是立体经济。从二维扩展到三维，要根据国情，实质性地进一步改革空域管理，将空域真正作为如土地、海洋一样的资源

对待。低空经济是协同经济。没有哪种经济形式，如低空经济这样，拥有与生俱来的协同性。发展好低空经济，也就要求拥有高度自觉的协同精神与良好的协同模式，包括上下（政企）协同、军民协同、空地协同、用（户）服（务）协同等，构成全方位、全链条、全要素协同。

2021年2月，中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划纲要》。在文件中，首次提出发展低空经济，具有标志性意义，低空经济的概念开始进入人们的视野。

2023年12月11日至12日，中央经济工作会议在北京举行。会议强调：以科技创新引领现代化产业体系建设。加强质量支撑和标准引领，打造生物制造、商业航天、低空经济等若干战略性新兴产业，广泛应用数智技术、绿色技术，加快传统产业转型升级。鼓励发展创业投资、股权投资。

2024年1月4日，全国民航工作会议指出：深化拓展航空医疗救护、无人机物流、应急救援、新兴消费等业态发展。支持以民用无人驾驶航空试验区（基地）为基础，推动打造若干低空经济发展示范区。

2024年3月27日，工业和

信息化部、科技部、财政部、中国民航局四部门近日联合印发《通用航空装备创新应用实施方案（2024—2030年）》。文件提出，到2027年，我国通用航空装备的供给能力、产业创新能力显著提升，现代化通用航空基础支撑体系基本建立，高效融合产业生态初步形成，通用航空公共服务装备体系基本完善，以无人化、电动化、智能化为技术特征的新型通用航空装备在城市空运、物流配送、应急救援等领域实现商业应用，创新能力显著提升。绿色化、智能化、新构型通用航空器的研制创新居世界先进水平，形成一批通用航空领域产学研用联合实验室、科技创新中心及科技创新服务平台。通用航空法规标准体系和安全验证体系基本建立，示范应用成效明显。航空应急救援、物流配送实现规模化应用，城市空中交通实现商业运行，形成20个以上可复制、可推广的典型应用示范，打造一批低空经济应用示范基地，形成一批品牌产品，产业链现代化水平大幅提升。打造10家以上具有生态主导力的通用航空产业链龙头企业，培育一批专精特新“小巨人”和制造业单项冠军企业，通用航空动力实现系列化发展，机

载、任务系统及配套设备模块化、标准化产业配套能力显著增强。

到2030年，以高端化、智能化、绿色化为特征的通用航空产业发展新模式基本建立，支撑和保障“短途运输+电动垂直起降”客运网络、“干支末”无人机配送网络、满足工农作业需求的低空生产作业网络安全高效运行，通用航空装备全面融入人民生产生活的各领域，成为低空经济增长的强大推动力，形成万亿级市场规模。

低空经济作为战略性新兴产业发展的一条新赛道，是全球主要经济体竞相角逐的新领域，被美国喻为“不能输掉的一场比赛”。低空经济上下游链条长、服务领域广、带动作用强，将撬动低空制造、低空飞行、低空保障和综合服务领域高速增长。因此，低空经济成为我国经济发展的又一战略选择。

低空经济的内容与模式

从产业构成来看，低空经济主要包括低空制造、低空飞行、低空保障和综合服务等行业，具有辐射面广、产业链条长、成长性和带动性强等特点，在拉动有效投资、创造消费需求、提升创新能级方面具有广阔空间。通用航空是低空

经济的主体产业，无人机是低空经济的主导产业。发展低空经济，可有效带动相关领域融合发展，有利于扩大内需，拓展发展空间，打通生产、分配、流通、消费各个环节，对构建新发展格局、推动高质量发展有重要意义。

全球低空经济发展至今先后经历了早期应用探索阶段和规范化发展阶段。其中，在早期，由于低空技术不成熟，以低空旅游和在农业、工业方面的探索应用为主。2010年以后，随着低空飞行技术的愈发成熟和应用的多元化，规范化监管成为这一时期各国低

空经济发展的主要任务。当下，全球低空经济正处于进一步的应用普及阶段。

低空经济主要由低空航空器制造业、低空飞行产业、低空保障产业和低空综合服务业四大部分组成，涵盖融合了第一、第二和第三产业，对我国经济、社会和国防建设都会产生巨大的积极影响。

目前，低空领域的主要产品是eVTOL飞行器、无人机（消费级、工业级）、直升机、通航类飞机等。从应用场景区分，低空经济可以划分为城市场景（城市空中交通）

▼ 图 | 多构型低空飞行器示意图



和非城市场景（偏远地区的工业、农业、林业、渔业和建筑业的作业飞行及医疗救援、抢险救灾、气象探测、海洋监测、科学实验、教育训练、文化体育等方面的飞行活动）。

近年来，以通航和无人机为主导的低空经济，如无人救援、无人安防、无人物流、无人送餐等新业态已经形成了一套成熟的商业模式。随着互联网、北斗+低轨卫星等监管技术的完善和低空空域的逐渐开放，出现了低空经济已然蓬勃发展的态势；催生了新需求，新模式、新服务；出现了大市场、大经济的模态。根据国家低空经济融合创新研究中心发布的《中国低空经济发展（2022—2023）》预测，到“十四五”末，我国低空经济对国民经济的综合贡献值将达到3万亿~5万亿元。2023年底统计，我国传统有人运输飞行总时长为135.7万小时，而通航无人机飞行时长达到2311万小时（含无人机飞行）。国内注册登记无人机有118万架，其中中大型无人机有10万架。无人机生产厂家有2200多家，与2022年底相比增幅达15.9%。无人机操控员执照已颁发18.2万本，全国注册无人机运营企业已超过1.7万家。

发展低空经济，有利于拓展市场、扩大内需；有利于推动创新、丰富供给；有利于打通隔阻、促进融合。当前，我国在技术、基础设施和政策方面都为低空经济的发展提供了良好的发展环境，有助于实现我国低空经济高质量发展。

近年来，随着新能源技术的发展及航空领域技术的积累，在全球范围内兴起电动垂直起降飞行器的发展热潮，据不完全统计，截至2023年11月，全球约有300多个在研的eVTOL项目。eVTOL飞行器利用电力实现垂直起降及巡航飞行，具有采用清洁能源、低噪声、高度自动化等特征，是发展低空经济的主力代表产品。

低空经济具有立体性、局地性、融合性和广泛性四大特点。低空经济以低空空域为活动空间，以有人驾驶和无人驾驶飞行器的飞行活动为核心，带动相关产业融合发展的新型经济形态，主要包括以下几方面。

低空制造产业：涉及通用、警用、海关及部分军用航空器的研发制造，如无人机及其零部件和机载设备的生产。

低空飞行产业：包含各类低空飞行活动，由生产作业、公共服务和航空消费等组成，如农林航空、

医疗救援、旅游观光等领域的飞行服务。

低空保障产业：提供空域安全和飞行服务保障的产业，包括低空空域管理系统、通用机场、飞行营地、直升机起降点等设施，以及通信、导航、气象等相关服务。

综合服务产业：支持低空经济发展的地面服务性产业，如航空会展、教育、传媒、信息、租赁保险、中介代理等服务。

低空经济的发展对国民经济和社会公共服务具有重要意义，它能够为区域经济发展提供新动力，推动立体化经济发展，并为国防事业提供新支撑。随着技术的进步和政策的推动，预计低空经济将展现出巨大的发展潜力和战略价值。

低空经济的价值与作用

低空经济对国民经济发展具有显著的推动作用，可能体现在以下几个方面。

经济增长：低空经济通过提供新的服务和产品，创造新的市场和需求，直接增加了国民经济的总量。例如，低空旅游、无人机物流等新兴服务的发展，为经济增长提供了新的动力。根据权威机构统计，对通用航空的投入



▲ 图 | 未来城市空中交通示意图

与产出比是1:10。

产业升级：低空经济的发展促进了相关产业的技术创新和产业结构的优化。它推动了航空制造业、服务业及信息技术等行业的进步，加速了传统产业的转型升级。

创造就业：随着低空经济的兴起，一系列相关职业和工作岗位被创造出来，如无人机操作员、低空交通管理人员等，这有助于解决就业问题，提高社会就业率。根据权威机构的统计，对通用航空的投入就业带动率是1:12。

基础设施建设：低空经济的发展需要相应的基础设施支持，如建设通用机场、飞行服务站等，这

些基础设施的建设和完善对于提升区域经济发展水平具有重要意义。

促进区域均衡发展：低空经济的发展有助于缩小地区发展差距，特别是对于地形复杂、交通不便的地区，低空交通工具可以提供更便捷的出行方式，促进当地经济的发展。

新发展格局构建：低空经济通过整合不同的资源和服务，有助于构建新的发展格局，推动经济社会向更高质量、更有效率的方向发展。

全面现代化推进：作为现代化进程的一部分，低空经济的发展是推进国家全面现代化的重要力

量，它涉及生产、生活和生态等多个方面，对于提升国家综合实力和国际竞争力具有重要作用。

综合贡献增长：据中商产业研究院的报告，低空经济对国民经济的综合贡献值在逐年增长，预计未来几年将继续保持稳健的增长趋势。

综上所述，低空经济不仅在经济总量上为国民经济作出了贡献，而且在产业结构、就业、基础设施建设、区域发展等方面都发挥了积极作用，是推动国民经济高质量发展的重要力量。随着技术的不断进步和政策的支持，低空经济有望在未来发挥更大的潜力。■



图 | 天山网