

# 未来民机技术

- 超声速客机的挑战
- 全球航空航天业百强榜单浅析
- 中国民航普遍服务和大众化服务如何破局



**C919**  
全球最新一代大型客机



\* 右图飞机胸针(礼盒款)

# 大飞机

JETLINER

**12** December

2024.12 | 总第126期

ISSN 2095-3399



9 772095 339242



中國東方航空 CHINA EASTERN

民航沪4815

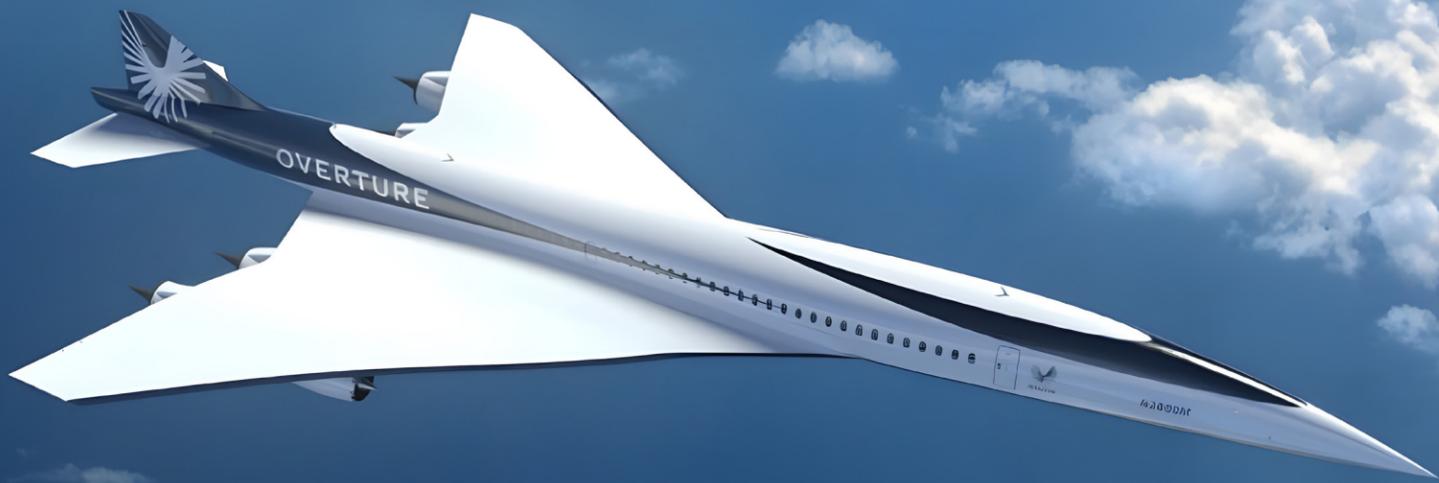
民航沪4815

国产大飞机 C919  
第100万名旅客

国产大飞机 C919  
第100万名旅客

C919累计承运旅客超1000000人次

P10



P30



P62



P53



P70



## 05 卷首语

05 民机技术的“未来之门”还远吗  
| 欧阳亮

## 06 2024 民机产业十大新闻

## 10 封面文章

10 超声速客机的挑战 | 林大楷

14 从昆虫仿生视角看机翼颤振调控  
文 | 殷雅俊 仲政 赵红晓

20 新一代航空宽带：让旅客畅享空中互联  
| 孔祥骏

26 先进涂层材料助力航空创新和发展  
9323 架客机 | 曹刚敏

## 30 航空制造

30 全球航空航天业百强榜单浅析  
| 李若男

34 俄罗斯新一代超声速客机研发之路  
| 贾晨雨 苏霓

39 空客加速新机型研制 | 曲小

44 GE9X：动力之王 | 董帼雄

## 48 航空运输

48 中国民航普遍服务和大众化服务如何破局  
| 赵巍

54 低空经济国内外发展比较分析研究  
| 边琪

58 消费需求结构变化能否为头等舱带来  
新增长 | 王双武

## 62 人物

62 杨颖华：从“工”到“匠”最需  
坚持 | 周岑茗

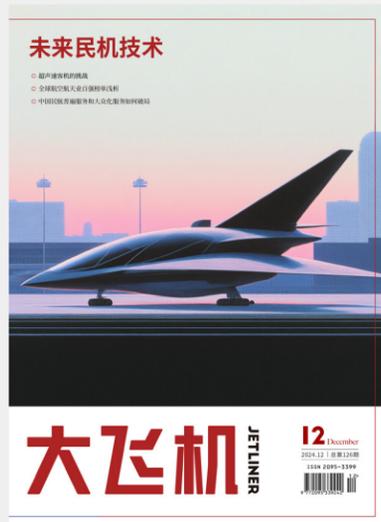
## 66 漫话航空

66 上海低空经济发展策略研究 | 蒋星

70 航空史上的12月 | 钟强

## 73 云端书屋

73 冯如笑对偏见 华商扩股支持  
——《翱翔云端的风筝》(摘编六)  
| 胡海林



#### ▼ 本期导读

因科技含量高、产业链条长、零部件数量多，大型商用飞机的研制周期特别长。波音 2003 年 5 月 7 日发布“7E7”飞机的设计方案，到 2011 年 9 月 26 日才向全日空交付首架 787，前后历时近 8 年；2004 年 12 月 10 日，A350 正式在空客立项，但到 2014 年 12 月 22 日才交付首架飞机给卡塔尔航空，花费了整整 10 年时间。

但是，大型商用飞机机型的研制周期长，并不代表大飞机产业的相关技术迭代慢。一款机型推向市场后，主制造商会不时根据市场的反馈及技术的发展对其进行优化、迭代，从而既推动了技术的发展，又能及时吸收技术发展的最新成果。比如窄体飞机的经典机型波音 737，自 1967 年 12 月 28 日交付首架机给启动用户汉莎航空以来，已过去了 57 年，交付量早已超过 1 万架，其使用的技术，从航空材料到机载系统到发动机，早已迭代多次。

封面设计 | 田济豪



- 关注我们 -  
FOLLOW US

#### 本刊声明：

- 稿件从发表之日起，其专有出版权和网络传播权即授予本刊，同时许可本刊转授第三方使用。
- 本刊作者保证，来稿中没有侵犯他人著作权或其他权利的内容，并将对此承担责任。
- 本刊支付的稿费已包括上述使用方式的稿费。

# 大飞机

2024 年第 12 期 | 总第 126 期 | 12 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  
副主任 谭万庚  
委员 魏应彪 沈波 戚学锋  
于世海 罗兴平 李玲  
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  
总编辑 王刚  
副总经理 徐显辉

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 卢之萍 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



作为“现代工业的皇冠”，商用飞机产业是现代科技的集大成者。在以 AI 为代表的科技革命方兴未艾之际，民机技术的“未来之门”离我们已经不远了。

#### 卷首语

## 民机技术的“未来之门”还远吗

文 | 欧阳亮

因科技含量高、产业链条长、零部件数量多，大型商用飞机的研制周期特别长。波音 2003 年 5 月 7 日发布“7E7”飞机的设计方案，到 2011 年 9 月 26 日才向全日空交付首架 787，前后历时近 8 年；2004 年 12 月 10 日，A350 正式在空客立项，但到 2014 年 12 月 22 日才交付首架飞机给卡塔尔航空，花费了整整 10 年时间。

但是，大型商用飞机机型的研制周期长，并不代表大飞机产业的相关技术迭代慢。一款机型推向市场后，主制造商会不时根据市场的反馈及技术的发展对其进行优化、迭代，从而既推动了技术的发展，又能及时吸收技术发展的最新成果。

比如窄体飞机的经典机型波音 737，自 1967 年 12 月 28 日交付首架机给启动用户汉莎航空以来，已过去了 57 年，交付量早已超过 1 万架，其使用的技术，从航空材料到机载系统到发动机，早已迭代多次。

今天，商用飞机产业的技术发展已到了颠覆性创新的前夜。首先，传统的“筒一翼”结构正面临挑战。美国初创飞机设计公司 Natilus 研发的“科纳”（Kona）飞机原型机已完成制造，将于 2025 年开始飞行测试，计划于 2028 年投入运营。该公司研发的第二款机型“地平线”（Horizon）面向 200 座级的窄体客机市场，与同等座级的机型相比，其重量减轻 25%、载容量增加 40% 且碳排放量减少 50%，具有很大的优势。

其次，超声速客机正试图重返民航市场。美国博姆（Boom）公司正在研制的“序曲号”（Overture）超声速客机预计将在 2027 年首飞，2029 年交付。为规避各国民航局对噪声的控制，该机型将在陆地上空以亚声速飞行，而在海洋上空以 1.7 马赫的速度进行超声速飞行，为乘客节省大量的旅行时间。

第三，如何提升燃油效率以及使用新能源也是科学家们关注的热点。目前，很多公司都在做全电飞机的研发，使用液氢进行试验的公司也不少。比如，空客就在 A380 上进行氢能源的相关测试。但是，液氢上飞机还有很多难题有待解决。比如，液氢储存在飞机的什么位置，目前常见的油箱位置，还是飞机的脊背上，或者尾翼里？如何解决氢脆的问题？如何防止热传导？如何解决氢能源的安全保障问题？无论是在地面的制氢、存储、运输过程中，还是装上飞机以后，氢能源的安全问题都是相关人员首先要考虑的问题。

第四，AI 的导入将为航空产业带来革命性变化。目前，世界正处于一场 AI 革命之中，从 chatGPT 发布以来，各种各样的 AI 产品层出不穷，并正从各个角度为人类的生产和生活带来巨大的变化。具体到商用飞机产业，设计、制造、试飞、运营、维修等各个阶段都在探索如何引入 AI，相信在不久的将来，AI 将给商用飞机产业带来巨大的变革。

作为“现代工业的皇冠”，商用飞机产业是现代科技的集大成者。在以 AI 为代表的科技革命方兴未艾之际，民机技术的“未来之门”离我们已经不远了。

# 2024 民机产业十大新闻



01

## 01 C919 进入多用户运营新阶段

8月28日，中国国际航空公司和中国南方航空公司在中国商飞总装制造中心浦东基地同时接收首架C919飞机，这标志着C919飞机开启多用户运营新阶段。截至12月19日，中国商飞已向三大航交付14架C919飞机，累计开通15条航线，通航10座城市。



03

## 03 C929 确定首发用户

11月12日，中国国际航空股份有限公司与中国商用飞机有限责任公司签署C929客机首家用户框架协议，意向成为C929宽体客机的全球首家用户。



04



05

## 05 空客首家飞机全生命周期服务中心投运

1月24日，位于成都的空中客车飞机全生命周期服务中心正式投入运营。作为首家一站式服务中心，空中客车飞机全生命周期服务中心将面向各种机型，涵盖业务范围包括从飞机停放、存储到维修、升级、改装、拆解、回收以及拆解后的二手可用航材分销业务。

## 02 中国商飞统一飞机产品名称“商飞+”

11月12日，在第十五届中国国际航空航天博览会上，中国商飞宣布ARJ21飞机增加商业名称C909，统一飞机产品名称为“商飞+型号”的形式。至此，中国商飞三款商用飞机产品名称分别为“商飞C909”“商飞C919”和“商飞C929”。

## 04 民航局发布《新时代新征程谱写交通强国建设民航新篇章行动纲要》

2月，民航局发布《新时代新征程谱写交通强国建设民航新篇章行动纲要》（以下简称《纲要》）。《纲要》以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，旨在深入贯彻党的二十大精神，全面落实《交通强国建设纲要》《国家综合立体交通网规划纲要》部署，进一步坚定战略自信、凝聚发展共识、提振行业发展信心，是新时代新征程指引民航业高质量发展的纲领性文件和行动指南。





07

### 06 GE 航空航天分拆成为独立上市公司

4月2日, GE 航空航天对外正式宣布成为一家独立的上市公司, 股票代码为“GE”。目前, 其在全球拥有约 44000 台在役民用飞机发动机。

### 07 史上最大双发客机 777-9 进入认证飞行测试

7月12日, 波音在美国联邦航空管理局 (FAA) 的监管下, 对 777-9 进行了首次认证飞行测试。777-9 被誉为全球范围内最大、最高效的双发喷气式飞机, 在典型两舱布局下可承载 426 人, 航程达 13500 千米。



09

### 09 低空经济正式写入政府工作报告

2024 年被称为“低空经济元年”。年初, “积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎”被写入政府工作报告。紧随其后, 工信部、科技部、财政部、民航局四部门联合印发了《通用航空装备创新应用实施方案 (2024—2030 年)》。方案提出, 到 2030 年推动低空经济形成万亿级市场规模。11 月, 第十五届中国航展首次设立低空经济馆, 40 多家低空经济企业参展; 中央空管委拟在合肥、杭州、深圳、苏州、成都、重庆等六个城市开展 eVTOL (电动垂直起降飞行器) 试点。



08

### 08 中国启动可持续航空燃油 (SAF) 应用试点

根据“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要, 我国民航业正在加快推进绿色低碳发展。在此背景下, 2024 年 6 月, 中国商飞完成了国产民机各型号的首次加注可持续航空燃料 (简称 SAF) 演示飞行; 9 月, 国家发改委和中国民航局启动了可持续航空燃油应用试点; 9 月 19 日, 东航 C919 飞机首次加注 SAF 执行 MU9192 商业航班任务。12 月 18 日, 中国商飞向华夏航空交付的一架 C909 飞机, 首次以 SAF 实现绿色飞行交付。

### 10 中国航空公司年旅客运输量突破 7 亿人次

截至 12 月 15 日, 中国航空公司完成的旅客运输量超过 7 亿人次, 达到 70048 万人次, 日均旅客运输量超过 200 万人次, 同比增长 18.1%, 较 2019 年增长 10.7%, 创我国民航发展历史新高。



10



# 超声速客机的挑战

文 | 林大楷

更快速、更舒适的出行是人们的普遍愿望。未来的某一天，位于北京的张三先生接到了前往伦敦参加会议的通知，他立刻准备材料，10点钟登上超声速客机出发，4小时后降落在伦敦，此时的伦敦还在清晨，经过一番商讨，他顺利结束会议，登上返程的航班，于晚上11点回到北京，从而结束了一天行程。

超声速客机能够极大缩短国际城市之间的飞行时长，因此张三先生从北京出发，全世界各地都能当日抵达，甚至绝大部分的航线都可以实现当日往返。畅想一下，早晨欣赏朝霞中的埃菲尔铁塔，品尝咖啡，中午在夏威夷的蔚蓝海洋里游泳，晚上在长安街欣赏夜景，一切皆有可能。

## 第一代超声速客机的兴衰

20世纪50年代后，随着军用超声速技术的成熟和民机进入喷气时代，航

▼图 | Airliners.net



空界普遍认为速度更快的超声速客机是未来的方向。在此背景下，英法、苏联和美国相继启动了超声速客机计划，英法联合研制出协和客机，苏联研制出图-144客机，美国超声速客机研制则因为资金和技术等问题中途下马。图-144客机由于技术问题，造成安全事故频发，经历短暂运营后即退出市场。协和客机连续运营了27年，飞行速度2.04马赫、载客100人，主要面向跨大西洋航线，相较于亚声速客机节省一半时间，同时开展包机业务，满足政商人等高端出行需求。协和客机采用了在当时非常先进的技术，包括电传飞控、燃油重心调节、下垂机头、涡升力、放宽静安定度以及发动机数字控制等技术。协和客机的成功研制也推动了一批先进民机技术的发展，这些技术在后来都转化应用到空客A300、A320等型号中。

协和客机虽然代表了欧洲当时航空技术的最高水平，但未能大规模商业化运营，最终在2003年全部退出市场。协和客机退出市场的主要原因有以下四个方面，也就是“四高”：高声爆、高油耗、高噪声、高排放。这“四高”使其在经济性、环保性上丧失了竞争力。以高声爆为例，协和客机在高空超声速飞行时，地面所能听到的声爆水平达到107PLdB，相当于在耳边听到打雷的声音。美国联邦航空管理局（FAA）禁止民机在大陆上空超声速飞行，限制了协和客机的很多航线，影响了飞机的订单和运营。因此，新一代超声速客机需要在这四个方面

进行极大改进，才可占有一席之地。

## 超声速客机的回归

人类对快速出行的需求增长呼唤新一代超声速客机。超声速客机是未来大型民机国际竞争高端主赛道之一，具有广阔的市场前景。飞行距离4000公里以上的航线，超声速客机相对亚声速客机节省时间的优势更为明显。据统计，2019年全球航程超过4000公里的航线数量达3430条，年客运量2.29亿人次。据国际航空运输协会（IATA）发布的报告，相比2019年，预计到2040年全球航空旅行的需求量将翻一番，4000公里航程以上航线客运量预计将达到4.6亿人次，全球点对点航线数量6800条。

进入21世纪以来，随着低声爆等技术的突破，美国等航空强国在政策、适航、技术等方面加速推进新一代超声速客机重返蓝天。美国发布了《国家航空科学与技术优先事项》、《NASA航空战略实施规划》等顶层规划，将超声速客机作为航空战略重点方向，加速推进超声速客机回归。俄罗斯组建超声速世界级科学中心，推进超声速客机气动声学、材料结构、发动机等技术研究。全球多个超声速公务机、超声速客机项目正在推进，预计2030~2035年间将有超声速客机产品进入市场。

FAA和国际民航组织（ICAO）也在积极推动超声速客机声爆、噪声和排放适

航标准的修订，以期促使超声速客机早日重返市场。以声爆标准为例，当前的 FAA 超声速飞行禁令是以速度作为限制，禁止民机在陆地上空进行超声速飞行。而理想中的标准是以声爆的幅值或者响度作为标准，选择一个公众能接受的声爆。因此，很多工作就围绕着选取、测试、计算、分析，从而得到一个公众能接受认可的声爆幅值来开展。

为此，美国联邦航空航天局 (NASA) 联合洛克希德·马丁公司推进的 X-59 低声爆验证机项目以声爆响度为依据，修订声爆适航标准。X-59 验证机是单发单座、有人驾驶的飞机，飞行速度为马赫数 1.4。X-59 项目分为三个阶段：第一阶段是验证机的设计和研制；第二阶段是低声爆飞行测试；第三阶段是该验证机在地面社区上空进行超声速飞行，以此收集声爆以及人群感受的数据，并且把这些数据反馈给 FAA 和 ICAO，为声爆标准的制定提供科学依据。

X-59 验证机于 2024 年 10 月 30 日成功启动了其 F414-GE-100 发动机，并在 11 月 6 日宣布，经过发动机运行测试后，预计将在 2025 年初进行首次飞行。

在新一代超声速客机研制过程中，新兴商业力量表现尤为瞩目。美国博姆公司和斯派克 (Spike) 公司对此表现得最为积极。博姆公司正在研制的产品“序曲号” (Overture) 超声速客机在海洋上空进行超声速飞行时的速度为马赫数 1.7，在陆地上空以马赫数 0.94 进行亚声速飞行，以此规避现行的在陆地上空不允许超声速飞行的禁令。“序曲号”超声速客机载客人数为 65 至 80 人，预计将在 2027 年首飞，2029 年交付。“序曲号”技术演示验证机 XB-1 于 2024 年 3 月在加利福尼亚州莫哈韦成功进行了首飞，至 2024 年 12 月 19 日成功完成十次试飞，试飞最大速度达到马赫数 0.95。博姆公司获得美国政府的投

资，开展“序曲号”超声速客机改装为总统专机“空军一号”的可行性分析。

斯派克公司正在研制的 S-512 公务机飞行速度为马赫数 1.6，载客 12 至 18 人，采用低声爆设计，希望能将飞机的声爆值降低到 75 分贝，这样在地面上听起来就相当于拍手声或者轻关车门的声音。

## 我国超声速客机研究进展

相较于欧美航空强国，国内超声速客机研究起步晚。2010 年以来，国内相关航空科研机构 and 高校等单位，围绕超声速客机声爆预测、低声爆设计、低阻力设计等相关技术点，开展了技术研究和地面试验验证。但与欧美航空强国相比，我国在超声速客机技术积累上仍有较大的差距。

但超声速客机仍属于新兴领域，充分利用后发优势，我国在该领域有机会实现并跑甚至领跑。2019 年，中国科协第二十一届年会发布的 20 个前沿科学和工程技术难题，绿色超声速民机设计技术位列其中，包括：低阻力低声爆设计技术、超声速发动机设计技术、结构轻量化设计技术等。2024 年 1 月，工信部等七部门联合印发《关于推动未来产业创新发展的实施意见》提出推进超声速、超高效亚声速、新能源客机等先进概念研究。2024 年 8 月，中国航空学会超声速民机分会在中国商飞北研召开成立大会，分会的成立为国内从事超声速民机研究的专家学者搭建了一个广阔平台，对促进我国超声速民机研究具有重要意义。

## 技术挑战

绿色化和智能化是未来民机发展的方向，超声速客机的回归还需要满足低声爆、低油耗、低噪声、低排放和智能安全要求。

绿色化和智能化是未来民机发展的方向，超声速客机的回归还需要满足低声爆、低油耗、低噪声、低排放和智能安全要求。

超声速客机满足上述要求，还需要突破一系列关键技术，重点包括高低速匹配、低声爆、飞发集成、耐高温轻质材料与结构、先进智能系统设计、运行环境等。

(1) 高低速匹配设计。高速和低速匹配设计是民机设计的重要要求。亚声速涡桨和涡扇客机多采用大展弦比机翼和低速增升装置设计，满足高速减阻和低速增升要求。超声速客机通常采用后掠角更大、展弦比较小的细长形机翼，减小超声速激波阻力。但是大后掠、小展弦比机翼在起降阶段产生的升力较小，需要很大的起降速度弥补升力不足。起飞和着陆速度快，导致起降距离长、起降噪声大，对飞机操纵要求也更高。在突破声速时，飞机阻力激增对动力和控制也提出更高的要求。

超声速客机高低速匹配的关键在于降低超声速阻力的同时，满足低速高升力需求和跨声速性能，未来解决措施包括：超声速层流减阻、鸭翼布局、低速增升、精细化外形设计、变体布局等技术。

(2) 低声爆设计。飞机在高速飞行过程中会产生压缩波，压缩波是以声速向四面八方进行传播，当飞行速度逐渐提升时，压缩波逐渐聚集，尤其是向飞机的前方聚集。当飞行速度超过声速时，压缩波将汇聚成激波，在飞机的机体周围形成一个激波锥，在整个超声速飞行过程中，激波锥扫过的空间或者地面都会产生一种特有的声音，就像雷声扫过地面，这就是超声速飞行所特有的声音——“声爆”。

进入 21 世纪以来，美国等国家相继突破了低声爆设计技术，并完成了风洞和飞行试验验证。低声爆设计措施包括，机头静音锥、垂尾纺锤体、机身鼓包、机翼/机身的精细化修型等，改变机体激波系结构，将强激波变成多个弱激波，尽可能减小向地面传播的激波强度，从而大幅降低声爆。

(3) 飞发集成。飞发集成主要是协调飞机与发动机之间的关系，权衡后实现飞机整体收益的最大化，重点包括发动机、进气道设计、排气系统设计、噪声抑制等关键技术。

超声速客机的进气道、排气系统与亚声速民机相比，有许多不同的地方。超声速客机进气道需要在宽速域的情况下，为发动机提供足量的空气，通常要求进气道的进口是可调的，满足不同流量的需求。喷管的设计也是如此，要求出口面积可调，能够满足不同高度、速度对于发动机排气的要求。超声速客机多采用中小涵道比发动机，排气速度快、噪声大，发动机排气降噪问题突出。

在飞发一体化设计方面，未来需要突破低声爆进气道、多功能高效喷管、排气噪声控制以及飞发集成综合设计技术。

在上述技术之外，为了进一步提升新一代超声速客机的经济性、环保性，需要采用更多前沿技术，比如等效目视驾驶舱技术，可以用来替代传统的机头下垂结构，减小结构重量，提高安全性；也可以采用高精度仿真或“物理+AI”技术进一步挖掘气动和声爆特性；可持续航空燃料能够替代传统燃料，实现减排；也可以采用耐高温的轻质复合材料，实现减重。

笔者相信，超声速客机离我们不会太远。它将带着我们超越时间和空间的束缚，让人们在比声速更快的旅行中体会到飞行的奇迹和无尽可能。■

# 从昆虫仿生视角 看机翼颤振调控

文 | 殷雅俊 仲政 赵红晓

多年以前，笔者与仲政教授和赵红晓博士进行了一次非常漂亮的合作。当时，仲政教授提出了一个跨学科的疑问：蜻蜓为什么飞得好？这个问题非常有趣，奥妙无穷。我们注意到，在所有的昆虫中，蜻蜓是最高明的特技飞行专家——能够悬停、倒飞、急转弯、蜻蜓点水、直上直下……我们虽然不专精气动力学，但我们知道，蜻蜓做出这样的高难度动作，其动力学稳定性控制面临极大挑战。那么，蜻蜓调控动力学稳定性的奥秘何在？这奥秘对我们的飞行器设计有何启示？

## 从悖论出发

通过查阅文献，我们发现很多研究者都认为蜻蜓飞得好的奥秘是在翅膀上。故研究者们都聚焦于翅膀的气动力学性质分析。但我们不走常规之路，而是“剑走偏锋”，紧盯过去研究中存在的一个力学悖论。我们想从悖论入手，找到全新的突破口。

这个悖论是什么？气动力学研究表明，所有扑翼飞行的动物，如蜻蜓、蝙蝠等，仅仅依靠扑翼产生的升力根本不足以平衡重力。例如，按照传统气动力学，一只 10 克重的蜻蜓，靠扑翼飞行产生的升力，只有 8.5 克，还有 1.5 克的体重无法平衡。最后的结论是，所有的昆虫包括蜻蜓，都飞不起来。很显

然这个结论是错的。

我们做了一个与众不同的猜测，即蜻蜓翅膀上一定存在着神秘的增升机制，产生了附加升力。

具体从哪儿入手？我们从蜻蜓的化石中受到了启发。在所有昆虫中，蜻蜓演化的时间最长，超过三亿年。三亿年前的蜻蜓了不得，单侧翅膀“翼展”长达 1 米，左右两侧翅膀长度加起来达 2 米多！它是演化得最长久的昆虫，也是演化得最成功的昆虫。于是，我们决定从最优化的角度理解蜻蜓飞行的奥秘。

做基础科学研究经常用到公理化思想。我们就从最优化角度提了两条公理：第一条是进化最优公理，即蜻蜓翅膀上没有任何结构或者形貌是冗余的，它的最优化已经达到了极致；第二条是飞行增益公理，即翅膀上任何结构和形貌都是为了让蜻蜓飞得更好。

两条公理为我们的研究奠定了逻辑基础。但建构一个公理化系统，仅有公理是不够的，还要定义基本概念——飞得更好。

什么叫飞得更好？我们的定义如下：更大的升力、更大的推力、更小的阻力、更低的能量消耗和更高的稳定性。也就是说，思考的角度都指向最优方向。

## 纤突和表面微纳米形貌的妙用

具体的切入点，应该是蜻蜓翅膀上那些看不见的微纳米结构和形貌。理由很简单：看得见的，应该都被研究过了，当然也就谈不上“奥秘”了。看不见的，要想看见，就需要借助显微镜了。

小时候玩蜻蜓，手指头沿着蜻蜓翅膀表面划过，会感觉到像刀刃一样锐利的东西割了手。是什么东西割了手？我们在电镜下面看，立即在翅脉上发现了非常尖锐的纤突。纤突高度一般为 20~30 微米，最

高的纤突高度可达 90 微米，且纤突的尖端像针尖一样尖锐，两个纤突之间相距大约 50 微米。原来割手的感觉来自纤突的尖端！当时我们就吃了一惊：这么多毛刺样纤突，多累赘啊！此时，第一条公理起作用了：没有任何结构是多余的。

把纤突的表面放大，会看到纤突表面上有非常奇妙且规则的条纹状褶皱。这些条纹状褶皱是干什么用的？

此时，第二条公理发挥作用了。向着优化的方向思考，就有了这样的论断：纤突以及条纹状褶皱，可以调控表面的气流，改变表面气流的方向。而气流方向的改变会增强气流与翅膀的相互作用，进而增加升力。于是最优化公理引导我们窥视到了“飞得更好”的奥秘。

翅膀上除了增升机制，还有减阻机制。显微镜的镜头之下，我们看到了翅脉表面奇妙的波浪状褶皱。

当看到波浪状褶皱时，我们立即联想到大风吹过的沙漠。直观的感觉是，沙漠表面越平坦、越光滑，风吹过的阻力应该越小。但气动力学的研究表明，直观感觉错了：沙漠的表面不是越光滑、越平坦越好，而是演变成沙波纹时，阻力才最小。除了沙波纹，还有水波纹：大风吹过之后，湖面上会看到层层涟漪和波浪，这表明，大风刮过水波纹状表面，遇到的阻力最小。更有鲨鱼皮：鲨鱼皮的表面波纹，有效地调控了水流的脱离，最大限度地减小了阻力。

日常生活中也有类似的案例，比如高尔夫球。高尔夫球刚被发明出来的时候，表面是光的，叫光脸高尔夫球。人们直观理解是，高尔夫球表面越光滑，摩擦阻力越小。但直观理解错了：速度高到一定程度后，高尔夫球就再也飞不远了。人们推测，高速飞行时，光脸高尔夫球遇到了新的阻力。

气动力学研究表明，光脸高尔夫球在高速飞行时，表面气流会产生脱流现象。



脱流后的高尔夫球尾部产生了一个大漩涡区。大漩涡区内气流速度很高。速度高，压强就低。于是，高尔夫球头部迎风面压力高，尾部背风面压力低，前后产生了压力差，压差阻力就生成了。

工程师们怎么解决这个问题？为了降低压差阻力，他们不仅不再追求高尔夫球的表面光洁度，而且反其道而行之——在高尔夫球的表面上制备了麻子坑，这就是现在的麻脸高尔夫球。

高速气流从麻子坑的表面吹过，就会在麻子坑里面形成小漩涡。而小漩涡里面的气流速度也高，速度高就意味着压力低。也就是说，每一个麻子坑都是一个低压区，低压就会把剥离的气流吸到高尔夫球表面上，从而大大压缩了尾部的大漩涡区。减小了漩涡区，就降低了压差的阻力。

从光脸高尔夫球到麻脸高尔夫球，是辩证性思维的一次飞跃。从光脸到麻脸，颇似大禹治水。大禹的父亲治水，一味围堵，一败再败。大禹治水，反其道而行之，疏通为主，疏堵结合，大获成功。以小麻子坑里的小涡控制了尾部的大涡，更是精妙绝伦的思想。以小涡制大涡，像极了中医辨证施治的极高境界——以毒攻毒。以涡治涡，和以毒攻毒，辩证思维如出一辙，颇有异曲同工之妙。



## 历史的天空——发现颤振

在与航空相关的仿生学应用中，我们注意到了历史上一个出人意料的关联：蜻蜓翅膀启发了超音速战斗机机翼的颤振调控。

二战期间，各大交战国家都致力于研发超音速战斗机。英国的超音速战斗机样机成功下线，进入试飞阶段。出人预料的是，试飞时机毁人亡。当时，飞行员不断加速。当飞行速度接近音速时，机翼急剧振动。飞行员紧急跟地面联系，说机翼颤抖很厉害，会不会有事？地面工程师们回答：不用担心，风洞试验验证过这个速度，没问题，只管飞。飞行员就接着加速，越飞机翼颤抖越厉害，颤着颤着，断裂成两半，飞机坠毁。

这是飞行史上的重大事件。力学专家们很快搞清了其中的原因：飞行速度接近音速时，机翼出现了一种新的动力学不稳定现象——颤振。颤振是一种自激振动。其基本机理如下：飞机高速飞行时，机翼会产生两种振动形态（振型），一种是弯曲振动，另一种是扭转振动。而高速气流施加在机翼表面上的作用力会在两个振型上做功。接近音速时，气流往往在每一个振动周期内都对机翼做正功。此时，机翼在每一个振动周期内都从气流中吸取能量，从而机翼振动加剧，导致强度破坏。

## 蜻蜓抑制颤振的启示

澄清了机理之后，就可以寻求抑制颤振的方法。出人预料的是，力学专家们从蜻蜓翅膀获得了启示！

这是不同学科有机融合的漂亮例子——问题是在A学科中提出来的，但解决问题的方案却是在B学科中发现的。确切地说，颤振问题出现在机翼上，而抑制

颤振的方案却存在于蜻蜓翅膀上。

问题是，当年工程师们的思维，是怎样从战斗机机翼飞跃到蜻蜓翅膀的？我们尝试复原当时的逻辑过程。

从颤振的基本机理可知，任何又薄又柔的结构，风载作用下一定会发生颤振。例如，一面大旗，大风吹拂下一定会哗啦啦飘动。这样的例子太多了。因此，“风载下薄一柔结构一定会颤振”这个命题，是如此地具有普遍性，完全可以作为“大前提”而存在。力学专家们注意到，蜻蜓翅膀就是又薄又柔的结构，于是，“小前提”就找到了。最后，“结论”就出来了：蜻蜓飞行时翅膀一定会发生颤振。

随后，我们借助了数学中的反证法。如果颤振发生时蜻蜓不加调控，则翅膀一定会因颤振而断裂。然而，这样的现象日常生活中从来没有出现过。因此，从逻辑上讲，蜻蜓翅膀上一定存在抑制颤振的机制！

那么，翅膀上抑制颤振的机制何在？翅尖前缘的深颜色斑块引起了力学家们的关注。所有的蜻蜓翼尖前缘都有一个深颜色的斑块，昆虫生物学家们称之为“翅痣”。翅痣又厚又硬。力学专家们据此判断：翅痣一定很重。他们进一步推测，正是翅痣的重量压制了翅膀的颤振。于是，他们从中提炼出了新概念——“配重”，并生成了新思想——只需在飞机机翼上设置合适的配重，就可抑制机翼的颤振！实践证明，这是极富想象力和创造性的新思想。从此，工程师们受翅痣启发，在机翼上配置了集中质量块，一劳永逸地解决了机翼颤振问题。

## 淹没在历史中的逻辑漏洞

历史地看，这是学科融合和航空仿生学的非凡典范，已经被载入史册，并被后人津津乐道，顶礼膜拜。然而，我们从这个典范中发现了一个逻辑漏洞：蜻蜓具有

多种特技飞行技能——悬停、倒飞、急转弯、蜻蜓点水、直上直下……而每一种特技飞行动作下，都会发生颤振。特技飞行动作不同，翅膀发生颤振的工况也不同，抑制颤振的方案也应该不同。也就是说，蜻蜓翅膀上应该存在若干种不同的颤振抑制方案。然而，工程师们只发现了一种——翅痣的位置是固定的，重量是固定的，故翅痣只能抑制一种颤振，而不能抑制所有的颤振！于是，令人难以容忍的逻辑漏洞出现了：如果蜻蜓只抑制一种颤振，而别的颤振不加抑制，则翅膀还是会断，但这仍然没有发生！

一旦发现逻辑漏洞，我们就可以将质疑进行到底，并推向极端——既然翅痣抑制不了所有的颤振，那就有可能抑制不了任何颤振。换言之，翅痣根本就不是配重，当年力学家和工程师们判断出错了。

为了证实上述质疑，我们设计了漂亮的判定性试验——超低温下，小心翼翼地将翅痣沿横截面切开，立即发现，翅痣壁薄如纸，内部则是一个大大的空腔！这就证明，翅痣确实没什么重量，做不了配重！

一个优雅的判定性试验，彻底颠覆了力学家和工程师们90年前的论断！

## 不同学科有机融合的新境界

然而，老的质疑打消了，新的质疑又出现了：（a）90年前，力学家和工程师们把翅痣视为配重，并在机翼上设置了配重，有效地抑制了机翼的颤振。前提错得离谱，但结论却完全正确。这太魔幻了。难道工程师的运气就是如此之好，以至于轻而易举地“瞎猫碰上了死老鼠？”（b）蜻蜓翅膀必须抑制颤振，但翅痣抑制不了颤振，这就意味着，蜻蜓翅膀上还应该存在着更神秘的颤振抑制机制。诡异的是，这种神秘的机制隐藏得如此之深，人类竟

然对其一无所知。那么，这种异常神秘的机制到底是什么？

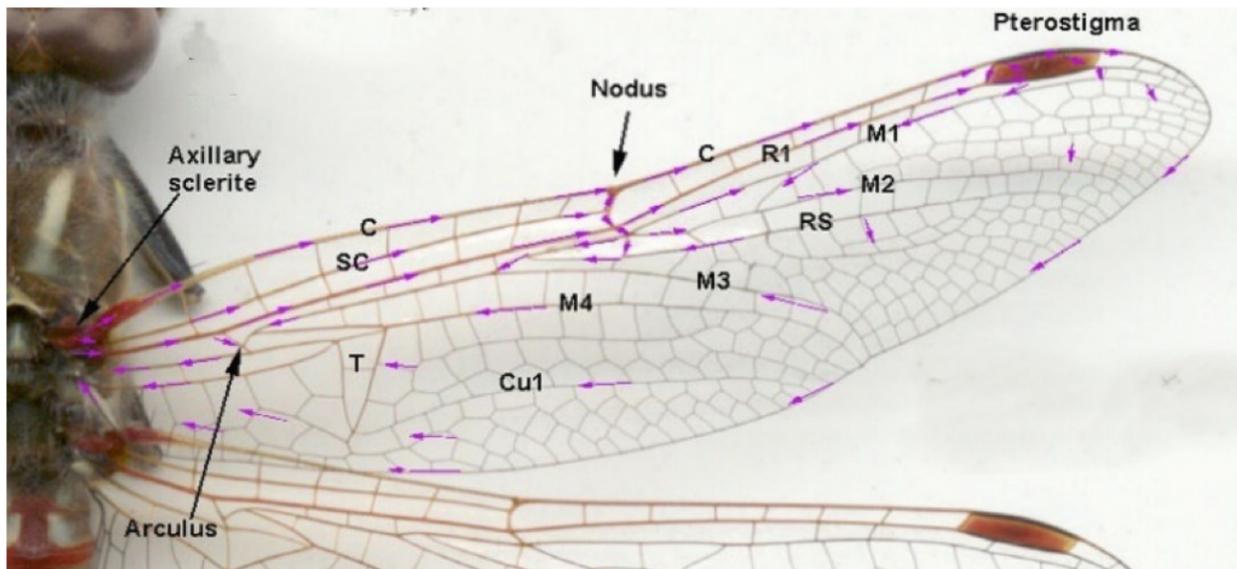
一旦意识到有更神秘机制的存在，我们立即投入力量，追寻其蛛丝马迹。然而，一无所获。困惑之际，我们从网络上发现了一张照片。照片取自一份1964年的研究报告。研究报告的标题是“昆虫翅膀上的血液循环”，作者是加拿大昆虫生物学家J. W. Arnold。Arnold发现：所有的昆虫，大到蜻蜓，小到苍蝇和蚊子，其翅膀的翅脉都是空管。这些空管都是裸露在体外的血管。昆虫体内的血液，先沿着前缘粗大血管流向翅尖方向，再沿着后缘纤细血管返回体内，从而构成完美的血液循环。

有趣的是，Arnold并没有意识到，翅痣内部也是中空结构。现在，我们把中空的翅痣与Arnold循环结合，立即茅塞顿开，消解了所有的疑惑：(a) 中空的翅痣确实不是配重，但充满了血液的翅痣，就成了配重。这就给出了答案：为什么当年工程师们能够“瞎猫碰上了死老鼠”。(b)

蜻蜓只需要调控血液循环，并配合适宜的扑翼姿态，就可以灵活自如地抑制各种特技飞行中的颤振。也就是说，借助血液循环，翅膀上生成了一个实时的、动态的、快速的、可调控的、随机应变的抑制颤振的系统。至此，蜻蜓翅膀抑制颤振的奥秘，彻底暴露无遗。

### 奇妙的否定之否定律

上述案例对我们后来的教学、研究和工程应用都带来了极为深远的影响。蜻蜓翅脉直径为20~200微米。因此，翅脉管内的血液循环非常类似于动物毛细血管内的微循环。于是，就发生了如下赏心悦目的经历：三年前，全国微循环大会，笔者十分荣幸地受邀作大会报告，向与会的医学和生理学专家们分享了上述案例。专家们大为惊奇，他们怎么也想不到，微循环在风马牛不相及的遥远学科中也能大放异彩。



创造性的突破，往往伴随着辩证性思维的飞跃。因此，自觉地将辩证性思想融入我们的教学和研究，是培养学生创造力的好招儿，也是做出创造性工作的捷径。

当年，工程师们认为翅痣是配重，我们借助判定性试验，证实中空的翅痣做不了配重。这是第一次否定。后来发现，Arnold循环可以将血液充满翅痣的空腔，使翅痣又变成了配重。这是第二次否定。至此，完成了“是配重—不是配重—又是配重”的循环。然而，此配重非彼配重——工程师们的配重是翅痣本身，我们的配重是翅痣中的血液。形式相似，但本质各异，再次看到认识的螺旋式上升和波浪式前进。

笔者意识到，创造性的突破，往往伴随着辩证性思维的飞跃。因此，自觉地将辩证性思想融入我们的教学和研究，是培养学生创造力的好招儿，也是做出创造性工作的捷径。

### 对未来的启示

上述案例对未来有什么启示？

第一，理解自然的奥妙，一定要打破常规，因为大自然解决问题的方案和我们人类的想法是不一样的。

第二，学科之间真正做到有机融合，绝非易事。如果不是运气好，偶然发现了Arnold拍摄的照片，我们可能永远参不透蜻蜓抑制颤振的奥秘。Arnold之所以能够发现循环，是因为保持了蜻蜓的活性。只

有在正常生理状态下，翅膀上的循环才会存在。不同于Arnold的试验思想，我们的试验采用了经典生物力学的做法——卸掉蜻蜓翅膀在镜头下观察。悲剧之处在于，翅膀一旦被撕下来，活翅膀就变成了死翅膀，而死翅膀上是不会有循环的。

第三，工程设计，包括航空设计，可以借鉴他山之石。生命体解决问题的方法和工程师们进行航空设计的思维是不一样的。工程师们常规的思维是，结构与功能是一一对应的：飞行器上每增加一种功能，就需要增加一套结构。不同于常规思维，生命体解决问题一定是综合优化。以蜻蜓翅膀为例，翅脉是翅膀上的“梁”，为翅膀提供强度和刚度。翅脉也是血管，为血液循环提供通道。翅脉内循环的血液，除了具备生理学功能，同时又是动态配重，具有抑制颤振的功能。很显然，综合优化是生命体的不二选择，因为这是生命体的进化之道。凡是达不到综合优化的生物，早就被淘汰了，死光了。

第四，在科学探索和工程研发中一定要善用否定之否定规律。否定之否定规律用好实属不易，但一旦用好了，往往伴随着有价值的创造。

打破学科的界限是历史的必然，学科之间的有机融合是创造未来的最佳路径之一。无论是航空器设计，还是我们的教育教学，也都面临着新的挑战，那就是如何激发研究人员和学生的创造力，引导学生把不同学科有机融合起来，我们就有更多机会为航空界输送更多创造性的人才。■

# 新一代航空宽带： 让旅客畅享空中互联

文 | 孔祥骏

现代人习惯了互联网，不管在哪儿，只要联不上网或网速慢，就会很痛苦。这已成为很多人坐飞机的痛点之一。近些年来，随着技术的发展和各种基础设施的建设，新一代航空宽带技术有望为大家解决这一问题。

## 航空通信的现状与要求

航空通信包括几种方式，最常见的就是空中管制的语音通讯。管制员把指令通过甚高频、以语音的形式下达给飞行机组，包括通知飞行机组什么时候可以推出飞机，应该按照什么样的地面滑行路线滑到跑道路口，然后下达起飞等一系列指令。

图 1 | satellitetoday.com



其次，是 ACARS 报文的通信。目前航司用得比较多的是通过它在飞机的重要阶段发布重要报文，比如起飞报、落地报、气象报文，还有一种通信是定时地把飞机的关键数据在飞行过程中下发下来。它的特点是带宽相对窄一些。

笔者曾经和一个中等规模的航司机务负责人交流过，他曾经想要在 ACARS 报文里增加两个有关发动机的监控数据，按照每 15 分钟发一次数据。但机队算一下经济账，最后没有批准。因此，我们把这个数据传输下来，既要考虑到它能够实现，还要考虑它的成本。

航空器运行当中也使用卫星电话，飞行机组在出现特情的时候可以用卫星电话与地面的运控中心进行沟通，相关的机载设备的改装和整个通信成本都是比较高的。现在用得比较多的是高通量的通信卫星，中国民航大概有 4000 多架飞机，截至目前大概有两三百架加装了高通量卫星通信系统。我找到的相对官方一点的数据是说单架飞机通过高通量的卫星，其通信带宽大概是上行 4M、下行 50M。这样的一个数字大家可能没有概念，我跟大家对比一下，2021 年中国信通院公布了 5G 手机的网络上下行带宽平均是上行 70M、下行 370M，也就是说空中卫星通信的带宽和地面的网络带宽差距还是挺大的。

我曾经在从北京到上海、北京到成都的航线上体验过卫星通信的实际情况，实

测下来，其带宽峰值大概上行是 400K 左右，均值可能还要低一个数量级。这样的带宽体验是不可能让乘机旅客畅享空中互联的。

2021 年和 2022 年民航局陆续颁布了两个发展路线图，一个是《航空宽带通信路线图》，一个是《智慧民航路线图》，这两个路线图都对未来民航航空宽带发展提出了要求。《航空宽带通信路线图》提出，在 2023 年要建成新一代航空宽带通信系统，2035 年要能够实现空地一体化新一代航空宽带通信体系。

在智慧出行板块里面，要求在 2030 年的时候能够提供高速、经济的空中互联网服务，到 2035 年的时候要能够让乘机旅客畅享空中互联。智慧空管、智慧出行都对网络提出了比较高的要求，包括实现航空器的空空信息互联共享，实现飞机、车辆、场道、设施等的智能协同应用。

路线图的规划对新一代航空宽带提出的要求是具体的，在空地智能协同方面，它要求我们的航空器和地面的通信要全球覆盖。因为航空器是一种全球化运行的交通运输方式，要求能够全球全流程覆盖，要覆盖航空器在地面滑行、起降、巡航各个阶段，要能够覆盖 ATC 管制的业务，运行监控 AOC 的业务，包括乘机旅客空中上网的业务。

在网络传输数据方面，除了要传输航空器相关的格式化的数字信息之外，还要

能够传输语音信息，带宽要能够支持我们传输视频这样大的非格式化的信息。畅享空中互联一定要有大带宽的支持，成本要能使乘机旅客、航司可接受，并且时延要尽量接近地面网络的时延。工信部对地面网络的时延要求是小于 50 秒毫，空地宽带的技术指标是可以达到的。

### 空地宽带通信技术

空地宽带通信是在地面移动通信的铁塔加装对空辐射的天线，同时在飞机上加装对应的机载设备，实现空地宽带通信的一种模式。它利用现有移动通信资源，包括通信铁塔之间已有的光纤资源、带宽资源，把数据汇集到地面的核心网，在核心网下面连接相关业务支撑平台，比如说给航空器运行提供服务的数据应用平台，给旅客上网提供服务的互联网平台。

2017 年，中国民航科学技术研究院

向民航局申请了基于空地宽带通信技术（ATG 技术）的飞机 QAR 数据实时下载试点，民航局批准试点工作的同时，还批复了用于空地传输专用的无线电频谱资源。

经过一年的试点，航科院利用两架空客 A321 飞机，在北京—成都航线进行了大概 50 个航班的飞行测试验证，最后民航局对这个试点工作进行了评价，有这样三点结论：

1. 通过 ATG 技术可以把飞机的 QAR 数据实时地、完整地下载下来；
2. ATG 相关的运行成本和卫星相比有显著优势；
3. 实时 QAR 数据在航班运行监控、安全监控，包括应急处置方面有巨大的应用潜力。

相关验证见图 2。在图 2 中，是把实时的 QAR 数据下载下来之后，在地面开发了一个模拟座舱的仿真环境。在地面复现了空中驾驶舱里飞行员操纵主要仪表的情

图 2 | 实时数据典型应用验证 (1)



图 3 | 实时数据典型应用验证 (2)

况，可以很直观地知道现在飞机的飞行情况是什么样子的。是我们做的飞机和发动机的状态监控的可视化截图，通过可视化的展现形式，使航空公司的机务部门在飞机飞行过程中第一时间掌握飞机、发动机的健康状态。如果需要维修维护，可以事先做好准备工作，缩短下一站的维护时间。通过把客舱视频实时传输到地面，可以实现客舱视频的在线监控，这样可以应对客舱里出现的一些治安类事件。

2021 年民航局召开会议，我们通过 ATG 网络连接上当时正在空中飞行的一架飞机的机舱内部，让与会者通过视频看到飞机机舱内部的实时情况，与机上的乘务员进行了视频通话。这个技术的应用场景之一，是在飞机出现突发事件时，可以由地面的专家来帮助机组人员进行辅助决策。

相关技术还应用在这几个领域，如图 3 所示，左上图给出的是“黑匣子”实时数据的下载。在出现不安全事件、飞行事

故后要去搜寻“黑匣子”，有了这样的系统之后，在飞行过程中，数据就会实时下发并存储下来了。左下图是把飞机机载气象雷达的数据传输到地面，来丰富气象部门对于气象的探测和预测的能力。右上图给出的是在航班运行过程中飞行机组也需要地面上传实时的航行资料，比如实时的气象情况，现在气象报传输的信息量有限，未来建立宽带之后，气象云图可以直观地传输上去，机组看起来非常明了。当大量的数据可以可视化、完整地传输到地面之后，我们可以在地面建立飞机飞行的孪生系统。

2018 年完成这项试点工作之后，民航局批复 ATG 系统可以建设，并且批复了这段频率可以使用。相关的主要机载设备，包括机上的收发机、通信的天线都已经获得了适航的批准。针对在中国民航占绝大多数的波音 737 飞机和空客 A320 飞机都有现成的改装方案，并且都进行了相应

的应用示范。

其实单独靠一个 ATG 技术还不能够实现飞机宽带数据的下载，还要和无线电的频谱资源结合起来。这里给出的是计划用于 ATG 系统建设所需要的频谱资源，就是民航局已经批复我们可以使用的航空移动频率的频谱资源，我们俗称它是 DME 频段，上下行各 5MHz 的频谱，这个频点大概是 1GHz 的频点，无线电的通信质量非常好，传输非常可靠，而且是一个专用的频率，专门用于 ATG 来建设、传输飞机数据，专频、专网、专用。但很遗憾，按照无线电频率管理的要求，这段频率是不能用来给旅客提供互联网服务的。

于是运营商策划了一个解决方案，将用于地面手机网络的频率拿来，这个频率在手机网络使用的时候是从基站到手机，从上到下覆盖的。他们复用这段频率来给 ATG 提供从通信铁塔到飞机上面的这一段的信号覆盖。现在论证下来，可以用的频率，包括 2.1G 上行的 20MHz 宽度用于从飞机到地面，和 3.5G 下行的 60MHz 用于从地面到飞机，这个频谱的宽度比刚才那个航空移动频率频谱宽度更宽了，能够提供的带宽就会更宽。

2023 年 5 月，工信部批准了 4.9G 频段用于 ATG 的试点试用频段，未来会有更多的频谱资源可以加入到这里面，会使得空地宽带的通道更宽。但同时也带来一个问题：给旅客提供服务的这段频率复用了手机地面网络频率，和手机地面网络之间会有干扰。所以为了高效利用频谱资源，这里面也会通过 ATG 技术来融合有扰频率的使用，实际上它是以航空移动频率的高质量、高可靠性的通信链路来把相关的链路信息传递给有扰频率，来提高其使用效率。

上文提到在后舱网络的无线电频率容易受到地面手机网络的影响，效果变差，为了在空中提供相对稳定的可靠的通信技

目前，ATG 系统技术的商业应用已经很成熟，美国的相关技术设备也是中国设备供应商提供的，所以在这方面我们国家是领先的。跟它相对比，卫星通信的优缺点也很明显，卫星技术覆盖性很好，三颗高轨卫星可以做到全球覆盖。

我们有一项技术叫多链路带宽聚合技术。可以这样理解，如果我们只使用一家运营商的频率，这一家运营商就容易受到地面网络的影响，如果用三家或者多家运营商的频谱资源做这件事情，三家同时受到干扰的概率就很低。我们这个技术就是把三家运营商的频率、带宽聚合到一起使用，这样就保证了飞行过程中会得到相对稳定的带宽资源，更稳定地为旅客提供上网服务。

ATG 的网络性能非常好。对于使用航空移动频率的专网，它能够做到用上下行各 5MHz 的频率实现上行 15M、下行 30M 带宽。我们在试点过程中做过测试，飞机数据传输大概也就是几十 K 带宽资源就够了，传一路高清视频占用的带宽也就是 1M，是完全可以满足要求的。在给旅客提供互联网服务这方面，它预计可以实现的能力是上行 120M、下行 600M，这样的带宽可以满足全舱旅客一起来使用，保证畅享空中互联。

比较一下两种通信方式，前面介绍比较多的是 ATG 这种通信方式，它的缺点很明显，因为要在陆地上建地面基站，所以只能覆盖中国境内航线，对于越洋的、出国的就没有办法覆盖了，优点是容量很大，扩容起来很方便，需要扩容的时候选

择合适的站址资源加密就可以实现了，而且利用现成的网络，所以成本很低，技术全球领先。

目前，ATG 系统技术的商业应用已经很成熟，美国的相关技术设备也是中国设备供应商提供的，所以在这方面我们国家是领先的。跟它相对比，卫星通信的优缺点也很明显，卫星技术覆盖性很好，三颗高轨卫星可以做到全球覆盖。缺点也很明显，就是上行带宽受限。卫星的容量可以做得很大，卫星带宽可以从 10G、100G 做到 1T、2T，但是受限于飞机本身机身的尺寸，还有能量限制，飞机把数据上传给卫星的上行带宽受限。互联网访问对带宽上下行是有比例要求的，当一个方向受限之后，另外一个方向再宽也没用。所以，单一的通信方式不能很好地适应中国民航的需求。

## 星地多链路通信方案

上述两种通信方式各有利弊，航科院提出来把两个通信方式融合起来，就是通过 ATG 的方式在专网的基础上，把公网的资源融合进来提供服务。当飞机越洋了、出国了，再通过卫星传输飞机数据，用其他公用的卫星资源给乘机旅客提供上网服务。

这样的通信方案实际上给机上的天线设计提出了很高的要求。因为现在飞机机

身上已经有很多天线了，这样的设计方案会使得天线更多，所以天线的设计需要做一个整合。根据飞机的运行特点，比如说这个飞机如果只在国内运营，只装 ATG 天线就可以了，如果这架飞机又有国外运行，那两个天线都要装，在安装的时候把尺寸比较小的 L 波段和 S 波段传飞机数据的天线和高通量卫星天线尽量融合，通过一个整流罩覆盖。

整个网络资源组成是这样的，由民航来主导建设一个基础的网络平台，这个网络平台包括传输飞机数据专网的基站、核心网、机上相关的通讯设备和机载天线，这个网络建成之后可以满足飞机运行安全监控的数据传输要求，以基础的网络为打底网或者叫基础网络，把相应运营商的资源融合进来，包括移动运营商的频谱资源、基站资源以及卫星运营商的相关资源，来提供一个既满足航空运行，又能够为乘机旅客提供服务的网络。

按照此方案，未来航空网络分成上下两层，下面一层是 ATG 技术，它有两个链路，一个链路是传飞机数据相关的，另一个链路是公网相关的。当飞机出国了，需要通过卫星来提供服务时，也是这两个链路，一个传输飞机数据，一个公网提供服务。在信关站放一个地面基站设备，把多链路的通信资源汇聚到同一个通信网，就实现了地面的同一张网管控多个链路。

因此，我们可以看到，新一代航空宽带有如下三个方面的优势：

1. 把 ATG 技术和卫星通信技术融合起来，实现全球全业务的覆盖，可以满足飞行安全和运行监控的需要。
2. 利用 ATG 通信大带宽、低成本和低时延，可以实现让全舱旅客畅享空中互联。
3. 相关的技术可以国产化，并且整个方案民航可以自主控制，有专网、有公网，相互之间可以协作，实现可持续发展。■

# 先进涂层材料 助力航空创新和发展

文 | 曹刚敏

商用飞机经常要在各种恶劣的环境下运营，故其所用材料必须具备耐高温、耐磨损、耐腐蚀、抗氧化、阻燃、防冰等特点，而先进涂层技术在这方面都能帮助航空材料达到更高性能，因此在商用航空产业界备受重视，各主制造商和供应商对先进涂层材料的研发也从未止步。

## 新技术呼唤新材料

航空制造本质上是高科技行业，需要用到很多新技术和新材料来实现高性能、高可靠性，比如应用碳纤维复合材料、钛合金、铝锂合金等以提高机身强度，并达到减轻重量的效果。但在很多极端工作环境下，我们发现单一材料并不能满足它的使用要求。

▼ 图 | nbaa.org



比如航空发动机用高温合金来制造燃烧室和发动机叶片，但是现在发动机的工作温度越来越高，因此高温合金的稳定使用也受到了很大的挑战。又比如用碳纤维复合材料做刹车的刹车盘，在刹车过程中会产生超过1500摄氏度的高温，而在高温下碳材料会加速氧化腐蚀。再比如用不锈钢材料做的各种管道和阀门器件，但在活动部件里面这些不锈钢材料很容易受到磨损。

在这种情况下，需要给材料或者零件赋予第二种或第三种性能或者说功能，这时候通常会选择使用涂层技术。涂层涂附在零件表面和材料表面，作用范围涉及装饰性、防护性以及功能性，日常生活中常见的油漆、涂料等等都是装饰性作用。其在工业上的应用主要是用来发挥表面防护、减磨减阻、防腐耐磨等性能。

涂层材料覆盖范围特别大，从高分子材料、无机材料，到陶瓷材料、金属材料，在整个工业中应用很广泛，是一种高性价比，同时也是有高附加值的解决方案。在大多数应用场景下，涂层厚度仅仅是微米级或者毫米级，可以通过增加很小一部分成本来提高整个零件或者整个材料的应用性能。从这个角度来说，不仅在航空上，在所有领域，涂层都有很广泛的应用。

从涂层本身来说，它应该是以零件或者材料为主体的，所以在讨论涂层性能和功能的时候，通常会说它是满足于什么样的工作环境或者满足于什么样的零件。随着我国在航空业和其他工业领域的制造

能力越来越强，将来对于涂层和材料的要求也会越来越多，市场上也会提出各种各样新的要求。在这种情况下，对于航空业乃至对于制造业来讲，涂层的研发和创新会有很多机遇。

## 抗高温的绝缘涂层

航空制造一个始终绕不开的话题就是需要更高的燃油效率、更轻的重量，随之而来一代一代的航空发动机温度会越来越高。航空发动机的温度提高了，周边的支持组件，比如电机驱动设备、电器设备组件的温度也是越来越高。我们曾经做过市场调研，在民用飞机上，目前电器设备的工作温度大概是240摄氏度，而在将来，电器设备的温度要求会提高到300至400摄氏度。电机也好、电缆也好，通常它们的绝缘是依赖于绝缘材料的，现在的绝缘材料主要是高分子材料。高分子材料目前表现比较好的就是聚酰亚胺，聚酰亚胺能够在240摄氏度的条件下工作，但要把温度提高到400摄氏度以上的时候就很难寻找到合适的高分子材料来做绝缘材料了。

为了应对这样的行业趋势，霍尼韦尔研发团队开发出了一种新的绝缘材料，这种绝缘材料使零件能够在450摄氏度稳定工作，可以在航空发动机和各种电器设备上支持很高的温度要求。它对于我们的设计意味着什么？第一，它可以在电动机的设计上提高功率密度；第二，它可以减小我们对于冷却系统的要求，满足了设计上

高集成化和高性能的要求。

霍尼韦尔做了一个高温磁阻电机，第一次测试是在 370 摄氏度环境下进行的，当我们验证完它可以稳定工作以后，我们就把温度继续推高到 450 摄氏度，它也能够顺利地通过测试。基于这种材料或者基于这种应用属性出发，如果把视野放在航空业以外，我们可以看到，在其他的工业领域也有类似的应用需求。

## 复合电镀：把“夕阳”变“朝阳”

由于航空对于安全性和可靠性的严格要求，涂层领域也会用到很多的传统工艺。我们常说的化学工艺有很多种，跟涂层相关的主要是电沉积（即电镀）。大家听到“电镀技术”这个词的时候，可能会关联到很多负面的印象，比如说它是重金属、会污染环境、会危害人类健康……但是电沉积工艺也是跟先进制造结合在一起的，比如在集成电路、芯片、动力电池的制造过程中我们都会使用电沉积工艺。这个技术本身能够广泛应用，说明它还是有很大的优势。在航空上，电沉积技术主要是用于做功能性的（比如防腐耐磨、减阻）的

材料，发动机里面使用的热障涂层的界面层，包括在电子元器件里面使用镀金、镀银、镀锡等，都是电沉积技术在航空领域的广泛使用。

由于世界各国对环保的关注度越来越高，所以电镀工艺被不少人认为是一个夕阳产业，主要原因是因为电镀工艺涉及很多的黑色金属和有色金属。欧盟 REACH 法案就严格禁止了含铬、含镉或含铅的金属盐在整个制造过程中的使用。航空业广泛使用的电镀镉和电镀硬铬在将来迟早会被取代掉。对于镀镉来说，航空业现在已经开发出了锌镍合金电镀来取代镀镉工艺。电镀硬铬的替代面临很多挑战，因为电镀硬铬涉及的零件和应用非常广泛，很难找到一种材料或者找到单一的工艺百分百满足替代要求。

在寻找对有害工艺和有害材料的替代以外，我们也可以充分利用电沉积的特性来开发一些新的工艺和新的材料。电沉积之所以到现在一直在用，是因为它非常适用于复杂表面，只要我们能够给这个零件表面提供一个电场，涂层就可以按照我们的需求去覆盖在这个基体上面。

另外一种工艺叫选择性电镀，就是可

以按照需求在一个连续的表面上只在需要的位置镀上金属镀层，PCB 电路板的图形电镀就是一个典型的例子，或者是在电子元器件的制造上面，这是很好的案例。它可以很方便地去涂附在所需要的零件上面，这也是电沉积技术到现在还能够广泛应用的基础之一。

从新的工艺角度，一方面要结合它的优势，比如易于维护、易于使用和易于修复。另外一方面，也可以通过引入复合电镀的技术来研发或者开发各种各样功能的涂层。复合电镀技术顾名思义就是我们可以在基础涂层里面引入一些有功能性的陶瓷颗粒，或者高分子颗粒。这样一来，就可以很方便地给涂层附加各种各样的功能，既可以快速响应，满足需求，也可以给将来的制造提供多样化的选择。基于以上原因，尽管电镀技术面临很多的法规要求和挑战，它仍然是一种适用于工业生产的、高性价比的金属涂层技术。

上文讲到，电镀硬铬替代是一个非常复杂的话题，在过去的几十年里面，航空业或者说在整个工业界对于电镀硬铬的替代始终是一个研究热点，因为电镀硬铬的技术已经应用超过 100 年了，我们对于硬

铬也有各种各样的功能需求，除了硬度以外还可以提高耐腐蚀性。硬铬的替代还有各种各样的艰难工作。

霍尼韦尔也开发了硬铬替代技术来满足零件对耐磨性和耐腐蚀性的要求，霍尼韦尔开发的工艺仍然基于电镀技术，可以完全匹配电镀硬铬在所有表面上的适用性。另外我们引入了复合电镀的概念，给材料赋予高硬度和高耐磨性的同时，又提高了耐腐蚀性。等于把硬铬和热喷涂一部分优点结合在一起，通过高硬度和高耐磨性和高耐腐蚀性，赋予零件乃至整个组件能够在非常恶劣的工况下运行的功能。

现在航空业正在向绿色航空转型，通过新技术、新材料和新工艺的应用，我们需要逐渐提高节能减排，最终达到零碳排放的目标，在这个过程中势必会有更多的需求来开发新的技术、新的材料。涂层技术是跟零件和材料结合在一起的，在这个过程中也需要大家共同努力，结合应用需求，为将来航空制造业提供更多的高性能的、更加环保的材料，来支持我们对高效率 and 轻量化的要求。■

### FARACORE 电气绝缘技术

用于磁芯、导电表面和漆包线的颠覆性技术

**核心优势**

- 作动器、传感器和关键电磁部件在高达 450°C 的高温环境中可连续运行。（相对于 NBA 短期运行温度为 240°C）
- 增强电机和发电机系统的功率密度
- 在恶劣工作环境下持久运行

**机电设备和系统**

高温致动器

高温位置传感器

轻型电机

密集功率发动机

霍尼韦尔的解决方案可提高功率密度、减轻冷却系统的重量和复杂性，以及增强电磁设备和重要电磁组件的高温工作能力。

Honeywell

**差异化的专有技术**

◆ 专有的电绝缘体系统，可为机电设备提供更高的性能和耐用性

图片：Faracore 技术应用于定子组件和漆包线示例

- 提高功率密度
- 提高耐热性
- 提供工作温度和海拔高度下的电晕/局部放电保护

### HAEP 先进电镀技术

在恶劣工况下给零件表面提供防护

**使用电镀技术 替代硬铬的高硬度和耐磨性 提供优良的耐腐蚀性**

**易于用在复杂表面和内外表面 可以适用于非视距应用NLOS**

**创新技术**

硬铬电镀		热喷涂 HVOF WC/Co	
优点	缺点	优点	缺点
• 成本较低	• 环保合规要求	• 高硬度	• 成本较高
• 非视距应用 NLOS	• 耐腐蚀性一般	• 优秀的耐磨和耐腐蚀性能	• 易脆、易损伤
• 耐磨性能中等		• 不适用非视距应用 NLOS	

HAEP

# 全球航空航天业百强榜单浅析

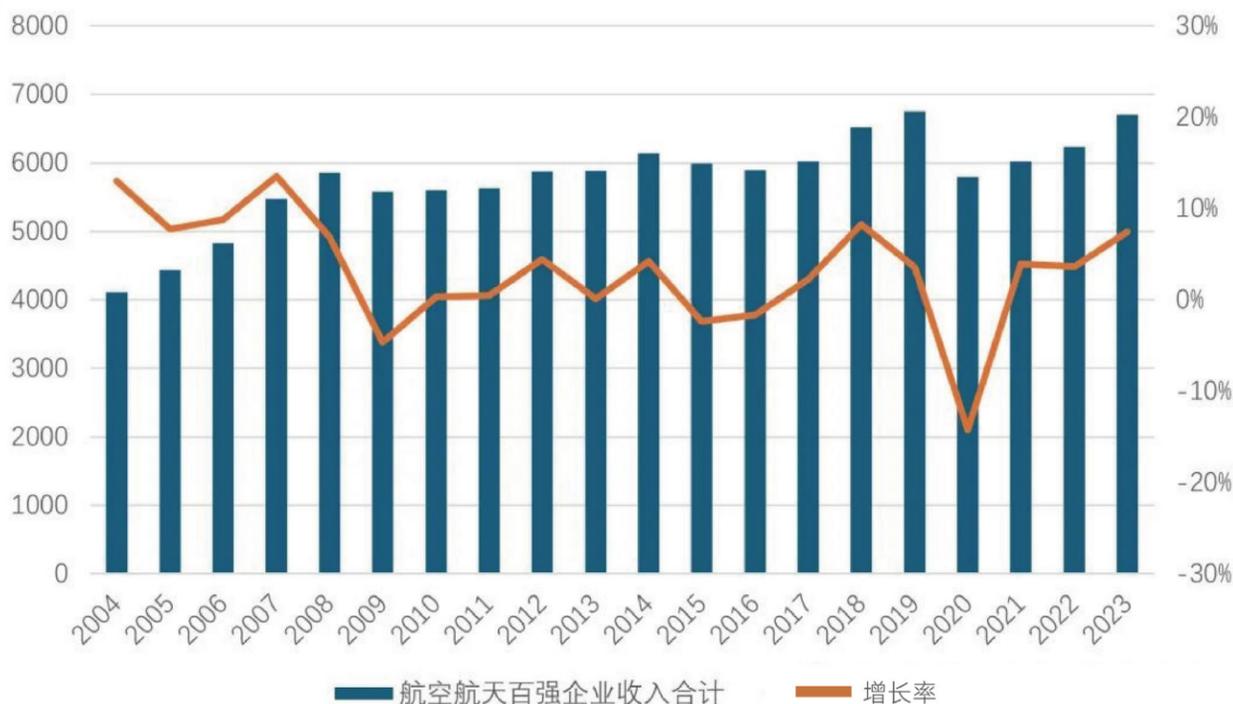
文 | 李若男

2024年9月，英国《飞行国际》按惯例根据各公司2023年的航空航天收入，公布了2024年世界航空航天百强榜单（以下简称“榜单”）。本文根据1991年至2024年的百强榜单企业相关信息，分析榜单企业的经营状况、竞争态势、产业格局，研判航空市场发展环境、产业竞争态势，以期对我国航空事业高质量发展有启示作用。

## 百强企业合计收入重返高峰

2023年，尽管航空航天产业历经诸多挑战，但从营业收入来看，该行业显现出恢复至疫情前正常水平的迹象，全球航空航天百强企业实现收入合计6702亿美元，同比增长7%，已恢复至2019年的99.3%。自2020年来百强企业收入总额受到疫情影响呈现下降趋势，2021年开始增长率逐步上升，此后维持在相对稳定的规模水平，这与宏观经济市场环境增长趋势保持一致。

图1 | 2004~2023年航空航天百强企业收入合计（亿美元）



百强企业所属国家逐渐增多。从所属国家来看，数量有所增长，从1991年的16个国家增长至2023年的20个国家，新增国家包括中国、土耳其、比利时和挪威，全球航空航天产业主力向更多国家拓展。但所属国家在过去30余年的时间里始终保持在20个左右，全球190余个国家中仅约十分之一的国家拥有航空航天较强实力。土耳其于2016年首次拥有入榜企业，现已有2家公司成为航空航天企业百强，这不仅展示了土耳其在航空技术方面的实力，也是土耳其为实现自主创新，不断努力付出的成果。与之相反的是，2024年俄罗斯首次没有企业入围百强榜单，由于难以获取俄罗斯技术国家集团（2023榜单中排名第六）的数据，本次榜单未将其纳入统计。

美国的百强企业集中度与收入集中度更高。美国航空航天百强上榜企业数量在1991年至2024年间，从50家下降到45家，但这些企业的航空收入占百强总收入的比重却从30%左右增至60%左右，在全球航宇行业占领绝对优势。在近20年的发展变迁中，在航空航天百强前10强中，牢牢占据六七席。从数据来看，美国是供应商体系最完备的航空大国，美国公司不仅包含年收入五百亿美元以上的飞机整机企业、两百亿以上的发动机企业，还包括年收入百亿美元的机载企业、数十亿的材料与结构件企业。

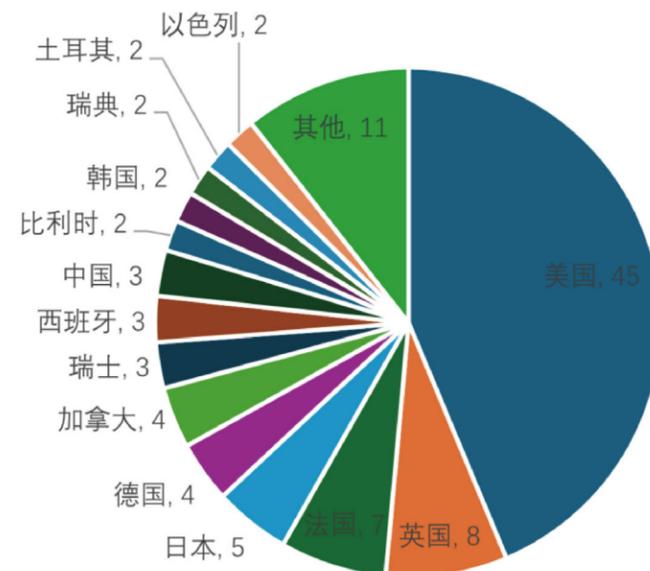
从企业年度收入看，前10名的企业总收入占百强总收入的占比从1991年的45%增长至2020年的66%，前20名的总收入占比同期从67%增长至81%，前30名的总收入占比从1991年的78%增至2020年的88%，全球航宇企业收入的集中度进一步增强，逐渐呈现“二八定律”的特点，即百强中的前20名企业创造了

大约80%的收入。2021年至2023年，前10名和前20名的总收入占比有少许下降，这主要因为近2年百强企业收入规模逐渐恢复，比例逐步恢复到2019年水平。

## 行业变化情况

2023年，全球航空航天企业在收入方面均实现了提升。其中，波音公司营收778亿美元，同比增长率高达17%，高于2019年的766亿美元，回到了航空航天百强企业榜首，表现较为突出，其总收入显示出强劲的发展势头，但该收入规模仍低于其历史最高值——2018年的1010亿美元。对比各企业总收入数据，波音公司总收入表现最为强劲，稳居首位；其次是空客，排除汇率影响，波音与空客2023年收入旗鼓相当。排名第三的雷神公司与第一名相比，存在约90亿美元的较小差距，而排名第四、五的洛马公司和诺格公司与前三名收入差距达300亿美元以上，较为悬殊。这是因为波音、空客和雷神公司是

图2 | 百强企业国家分布



而洛马公司和诺格公司则主要专注于军工业务，其收入主要受到世界主要大国军费开支的影响。

多元化、商业化的航空航天企业，其业务中商用飞机部分占据其较高收入份额，显著推动了整体收入的增长。2023年，波音公司的收入同比增长了111.86亿美元，其中商用飞机业务收入增长78.75亿美元，这得益于国际旅行服务和全球航空运输量恢复到了2019年水平。

2023年，航空百强新晋级7家企业，分别是Space X、Technologies Baykar、

Cirrus、Pursuit Aerospace、General Atomics、AeroVironment、Consolidated Precision Products。从名次来看，SpaceX首次上榜直接排名第28名，可见该公司在航空航天企业中的实力；从历史数据来看，该公司2023年收入45亿美元，低于2022年的66亿美元，SpaceX公司早在2022年就应入榜百强榜单，但未被纳入统计。从公司所属国家来看，7个新入榜企业有4个属于美国公司，可见美国在航空航天行业的企业储备较多。从收入规模来看，收入5亿美元即可入榜百强，可见航空航天百强的门槛值并不算太高。

百强企业中，行业收购和企业并购数量不断增加。2023年，有3家百强企业被收购：2023年5月，Arconic宣布将被阿波罗全球管理公司Apollo Global Management附属公司管理的基金收购，Arconic主要为机体结构和发动机提供解

决方案，目前该公司可供应90%以上的喷气发动机组件。2024年4月，美国私募股权资本弧线(Arcline)投资管理公司以全现金方式完成了对发动机和固定翼制造商卡曼(Kaman)公司的收购，卡曼成为了一家私人控股公司。美国最大的商业遥感公司马克尔技术公司(Maxar Technologies)则被雅维特国际(Advent International)收购。此外，2024年7月，美国私募股权公司Platinum Equity与全球第三大起落架制造公司Heroux-Devtek签署了收购协议。资本的注入将有助于优化财务和运营资源，帮助这些企业增长航空业务。

行业内企业并购方面，2023年8月，BAE系统公司宣布以44亿英镑收购Ball Aerospace(2023年与2022年榜单排名第43名)，意味着Ball将成为BAE巩固美国市场影响力的途径，进一步影响市场格局。另外，受波音737 MAX 9客机的门塞脱落事故影响，波音为缩短质量监控流程、提高管理效率，2024年7月，波音宣布已与势必锐航空系统公司达成协议，将花费47亿美元收购势必锐。同时，空客和势必锐也签署了有约束力的条款备忘录，空客将在波音和势必锐合并交割同时，收购势必锐为空客生产的民用工作包，该交易涵盖了位于美国北卡罗来纳州金斯顿和法国圣纳泽尔的A350机身工厂，以及位于英国贝尔法斯特的前庞巴迪工厂，目前主要生产A220。短期而言，波音和空客的收购对收入影响不大，长期来说，可能会为空客带来更多的市场机会和资源整合优势，将有助于空客巩固其在全球航空制造业中的地位。

2023年航空航天企业展现出强大的盈利能力，从净利润情况来看，百强企业展现出较强的盈利能力。虽然波音公司是2023年度唯一亏损的企业，其净利润明显

不如其他企业，但波音在亏损的情况下，经营性现金流保持良好，展现出强大的竞争力。洛马公司盈利能力表现突出，其净利润达69亿美元，位居行业之首，紧随其后的是空客公司、雷神公司和诺格公司；从经营性现金净流量的角度来看，2023年百强企业均表现出良好的现金流动性。这对企业在复杂多变的市场环境中保持可持续发展至关重要。

### 一些思考

虽然百强榜单难以全面公平反映各公司经营情况、行业实力，但大体可反映航空行业市场经营环境有所好转。《飞行国际》的百强排名评判指标仅涉及营业收入，较为单一；收入统计以美元统计，结果受到汇率影响，统计结果难以公平；部分国家或企业拒绝披露营收数据，导致百强榜单统计不全，榜单难以全面反映企业在行业中实际地位与融入产业链情况。据美国蒂尔集团和空气动力咨询公司联合研究，百强企业收入总额约占全球航空航天行业的70%收入，百强企业榜单可反映航空行业市场经营环境明显复苏。

建议重视参与国外型号重要工作包合作，培育我国配套能力。美国航空工业建立了完整的供应链体系，大中小企业结构均衡，且将欧洲、日本纳入自己主导的供应链体系内。我国构建自主可控的航空工业供应链体系应重视构建大、中、小企业结构均衡。从土耳其的经验来看，建议重视对外国型号合作，培育我国配套能力。■



图 | okcasa.net

# 俄罗斯新一代超声速客机研发之路

文 | 贾晨雨 苏霓

2018年至今,俄罗斯政府支持相关企业进行超声速民用飞机的研发工作。截至目前,俄罗斯已经成立“超声速(SUPERSONIC)”世界级科学中心,启动“雨燕”“西维尔”飞机及发动机验证机项目,完成了大量技术储备,开始进入验证机设计阶段。

## 新一代超声速客机主要技术指标

俄罗斯将以图-144为主的“老”超声速客机称为“第一代超声速客机”,当前研究称为“新一代超声速客机”。相较于上一代超声速飞机经济性差、噪声大、排放高、不环保、安全性差的问题,新一代超声速客机相较上一代应满足如下指标:

环保性方面,要减少排放,噪声从96~106 dBA减少至小于68 dBA,机场噪声减少3~7 dB。具体指标见表1。经济性方面,计划降低油耗至1.0 kg/(kgf·h)。安全性与舒适性方面,未设定具体技术指标。

表1 | 第一代超声速客机环保指标

	第一代超声速客机 (Tu-144、协和)	新一代超声速客机
声爆响度 (dBA)	96~106	< 70
冲击波超压 (Pa)	105~140	< 20
起降噪声, 超过现行标准	ICAO-7 第4章要求基础上 + 25EPNdB	ICAO-7 第4章要求基础上 -7 EPNdB
CO <sub>2</sub> 排放 (g/kN)	50, CAEP 6	降低 60%~75%
NO <sub>x</sub> 排放 (g/kN)	≥ 20	≤ 10



图 | 2019年莫斯科航展TsAGI展台上的超声速公务机模型

关键技术方向方面,俄罗斯认为主要应在以下8个领域进行技术研究:低声爆和低噪声飞机构型的空气动力学和气动性能的多准则优化;基于非常规复合材料仿生结构的结构设计和重量最小化;使用先进的发动机及其与飞机机身的智能集成,确保高燃油效率;开发具有增强超声速运行能力的高效变循环动力装置;确保客舱内热平衡和舒适性的技术;合成视觉一驾驶舱外部环境的人工可视化;机载人工智能用于飞机控制和飞机健康监测;覆盖超声速客机的航空运输系统的空中交通管理技术。在此基础上,“超声速”世界级科学中心设立了气动、声学、结构强度、发动机、人工智能和飞行安全5个实验室。

## 发展路线与组织方式

“新一代超声速客机”研究正式开始于2020年。基于2020年之前已有的技术

储备,俄罗斯采用三步走的战略:

第一步是建立技术储备(TRL1~2),时间是2020年至2025年。俄罗斯中央空气动力学研究院牵头建立“超声速”世界级科学中心,负责技术成熟度(TRL)1~2级的研究,进行技术储备。第二步实现技术验证(TRL3~6),时间是2023年至2030年。NRC组织、TsAGI研发全尺寸飞机验证机“雨燕”、CIAM研发超声速客机发动机“西维尔”,技术成熟度3~6。第三步飞机制造(TRL7~9),时间约2030年后,UAC、UEC、KERT负责开发新一代超声速的机身、发动机、航电系统等。

值得强调的是,俄罗斯并不是从2020年才开始TRL1~2的技术研究,在此之前已经有了不少技术储备,这是俄罗斯大规模经费投入支持超声速客机研制的基本条件之一。TsAGI在2019年莫斯科航展上展示了超声速公务机模型(6座公务机,1.8

马赫、飞行距离 6000 ~ 8000 公里)，并表示已经形成了飞机和发动机的外观和参数方案，采用细长机头、V 形机翼以及两个发动机在机翼尾部上方的方案降低噪声并缓和音爆影响；以空气机头等结构设计减轻飞机重量。TsAGI 认为此时发展超声速客机是“艰巨但可行的任务”，未来俄罗斯有望实现世界领先。根据后续国家政府大量经费支持的事实，显然政府认可了他们的判断。

“超声速”世界级科学中心经费来源于俄教育和科技部。为支持国家级高优先科技研究和发展任务，教育和科技部建立国家“科学”项目，在 2020 年至 2024 年期间补贴 154.6 亿卢布（约 14 亿人民币）创建不少于 9 个世界级科学中心，TsAGI 牵头申请建立的超声速世界级科学中心为其中之一。2020 年 8 月获批，实施周期为

2020 年至 2025 年，总预算 30.9 亿卢布（约合人民币 2.8 亿人民币），其中 80% 的资金来源于国家（25.3 亿卢布，约合 2.3 亿人民币），20% 为预算外资金（5.6 亿卢布，约合 0.5 亿人民币）。

中心研究目标为解决实现超声速飞行所需的基础科学技术问题，使新一代超声速客机在飞行技术、环境和声学表现上获得质的提升，为了使俄罗斯在超声速客机研究领域达到世界领先水平，组建了一支由领先科学家组成的团队，包含外国研究者、青年研究者；建立专用的研究基础设施，支持在超声速客机研究领域取得高质、全新、世界级的科研成果；开展超声速客机气动外形设计，设计加工飞机模型，在风洞、空气动力弹道轨道、火箭轨道上进行计算研究和测试；为超声速客机样机研制提供全生命周期的科学支持。

表 2 | 主要实验室相关工作

实验室项目	牵头单位	参与单位
1 号实验室：空气动力学与概念设计	俄罗斯中央空气流体力学研究院	莫斯科航空学院
2 号实验室：航空声学 and 振动	俄罗斯中央空气流体力学研究院	俄罗斯科学院克尔德什应用数学研究所
3 号实验室：强度和智能结构	俄罗斯科学院乌拉尔分院 彼尔姆联邦研究中心	俄罗斯中央空气流体力学研究院、 莫斯科航空学院
4 号实验室：气体动力学和动力系统	巴兰诺夫中航空发动机研究院	莫斯科航空学院
5 号实验室：人工智能和飞行安全	莫斯科大学	俄罗斯中央空气流体力学研究院、 国家航空系统科学研究院、莫斯科 航空学院



图 | Civil-2025

中心由俄罗斯中央空气流体力学研究院牵头，共 7 个研究机构参与，包括巴兰诺夫中央航空发动机研究院、莫斯科大学、莫斯科航空学院、俄罗斯科学院克尔德什应用数学研究所、俄罗斯科学院乌拉尔分院彼尔姆联邦研究中心、国家航空系统科学研究院。

中心设置 5 个实验室，分别负责空气动力学和概念设计、气动声学 and 振动、强度和智能结构、燃气动力学和动力系统、人工智能和飞行安全。

2023 年，俄罗斯工贸部立项“雨燕”超声速飞机验证机和“西维尔”超声速飞机发动机验证机。其中，前者由俄罗斯中央空气流体力学研究院牵头，后者由巴兰诺夫中央航空发动机研究院牵头。

俄罗斯中央空气流体力学研究院承接了 NRC 战略性综合科技项目 (KSTP) “超声速民用飞机”，开发超声速飞机“雨燕”技术综合体的演示验证机。为降低声

爆水平，验证机选择了加长前机身、特殊几何形状机翼和进气口布置在机翼上方的布局。俄罗斯中央空气流体力学研究院拟继续开展验证机设计的详细研究，计划在 2028 年制造验证机，验证机拟采用已量产的发动机、设备及系统元件等。

为降低音爆水平，选择了加长前机身、特殊几何形状机翼和进气口 / 发动机布置在机翼上方的布局。机身由金属复合材料制成，在轻的同时确保强度。验证机将采用无人驾驶。目前，TsAGI 已为机身主要部件制定了设计文件草案，计划 2028 年使用量产的发动机和飞机设备及系统元件建造验证机，2029 年完成全尺寸验证机准备。按 2029 年出验证机，十年后出原型机计算，莫斯科航空学院院长表示，超声速客机的原型机将不早于 2035 ~ 2040 年确定。

2023 年 4 月 12 日，俄工贸部发布验证机合同，代号 Civil-2025，预计耗资 33.95 亿卢布。项目目标为“全面开发技术，



用于创建有前途的超音速民用飞机的发电厂的组件，元件和系统，以支持技术演示发动机的开发和测试”。

项目目标是在接近真实条件下，验证集成技术的有效性和可行性，以及确保新一代超声速客机发动机创建过程中的技术和解决方案的有效性。技术成熟度达到5~6, 2023~2030年期间完成制造和试验。

项目关键参数为推力约10吨；燃料消耗比(高度1700米、马赫数1.8)约1.05；超声速飞行时长约4小时；双循环马赫数1.5~2.5；寿命约1万小时；符合俄民航规章33(AP-33)要求；净重约3000公斤。

实验燃气发生器主要包括4个技术：压缩机采用高压压气机10~12；低排放燃烧室，采用多喷嘴；涡轮使用新几何构型和材料；换热器采用增材制造。总体而言，该项目旨在通过开发和测试先进的高超声速飞行器发动机技术，推动相关技术发展和应用，以实现未来高速运输系统的突破。

### 一些启示

在商用飞机领域，相比起欧美关注新能源航空器，俄罗斯更关注超声速客机，希

望能在2035年实现超声速客机的商用化。这个选择也不奇怪，俄罗斯具有独特的地理环境，油气资源丰富，气候寒冷，对新能源飞机需求不强。超声速客机一有顶层支持，二有技术基础，可能成为一个弯道超车的方向。俄超声速客机发展之路也有些经验教训供参考：

当前超声速客机难点主要在以下几点。首先是如何实现低噪声/低声爆。俄罗斯认为应主要通过气动外型设计等方式解决声爆问题。其次是如何实现经济且排放符合环保标准，这或许需要开发高效能发动机、控制飞机重量。第三，也是最重要的就是如何保证安全。如何用更先进的飞控技术保证高速下的飞行安全。同时，主机厂也应做好市场评估。俄罗斯认为，因每公里价格超声速客机一定高于亚声速客机，只有在不低于8600公里的长途旅行中，公务旅客认为速度比价格更重要时，超声速飞机才有竞争力。值得一提的是，由于超声速客机研制上，各专业技术提升门槛较高，且需要密切协同，成立超声速研究中心是创举之一，值得学习和借鉴。■

## 空客加速新机型研制

文 | 曲小

进入2024年年末，飞机制造商空客一方面加足马力冲刺全年交付目标，另一方面其客机和货机新机型的研制与交付工作也取得了突破性进展。12月初，空客宣布其首架A350F即将进入总装阶段，预计2025年实现首飞。在此之前，10月30日，空客向启动用户西班牙伊比利亚航空(Iberia)交付了首架A321XLR单通道客机。

图 | Airbus



## A321XLR 开启交付

10月30日，空客向西班牙载旗航空公司伊比利亚航空交付首架A321XLR飞机，前者成为了这款全新单通道飞机的全球首家用户。首架交付的A321XLR飞机搭载CFM国际公司LEAP-1A发动机，将由伊比利亚航空在其欧洲航线网络的多个区域航班中运营，随后计划执行从马德里飞往波士顿的首次跨大西洋航班。

根据公开信息显示，两级客舱布局下，伊比利亚航空的全新A321XLR可容纳182名乘客，其中商务舱配备了可直通过道的全平躺座椅。首架交付的A321XLR还采用了全新“飞行空间”（Airspace）客舱内饰，将为所有舱位乘客提供舒适的远程飞行体验。超大行李箱容量增加了60%，能够为乘客和机组人员提供更轻松的登机体验。此外，机上每位乘客都可以享受互联网络连接，最新一代照明系统也能够提升乘客

的整体体验。

超远程窄体客机A321XLR是空客为了响应市场对于单通道飞机更远程和更大业载的需求，在A320neo系列飞机家族中发展的一款机型，与其他竞争机型相比可以实现更长航线的经济运营，从而为航空公司带来更多的经济收益。A321XLR项目于2019年启动，2022年6月，首架A321XLR在汉堡完成首飞。根据空客已经公布的信息，A321XLR的最大航程可达4700海里（8700公里），与上一代竞争机型相比，单座燃油消耗可以降低30%。

A321XLR的最大特点是增加了拥有12900升燃油容量的后部中央油箱（RCT），以及一个可选的附加中央油箱，这一设计保证了A321XLR的最大航程可扩大到4700海里或11小时的飞行时间。A321XLR的后部中央油箱具有相当于四个辅油箱的容量，但只占两个油箱的空间，重量相当于一个可拆卸的油箱，这种布局可以为货物

腾出更大空间。得益于增加的燃油容量，A321XLR的最大起飞重量与远程A321LR相比，从97吨增加到了101吨，同时空客还对A321XLR的主起落架和前起落架进行了加强，并增加了A321XLR的水箱容量，以满足长途飞行的需要。

在机翼设计方面，空客为A321XLR选择了更简单的单缝襟翼。A321和A321neo上的双缝襟翼确保了飞机更好的起飞和着陆性能，但由于相对A321XLR的单缝襟翼面积略大，考虑到A321XLR将用于长途航线，空客更倾向于为飞机减重，因此选择了重量更轻的单缝襟翼。

此外，空客还对A321XLR的起落架和刹车系统进行升级。在发动机推力没有发生变化的情况下，对空气动力学进行了一些优化，对高升力系统、缝翼和襟翼的物理特性进行了改进，并对飞控系统等重点进行了编程。

2024年6月，搭载CFM国际公司LEAP-1A发动机的A321XLR获得由欧洲航空安全局颁发的型号合格证。根据计划，搭载普惠发动机的A321XLR将在年内完成取证工作。

## A350F 启动总装

12月初，空客公司宣布其最新的A350F货机的首批大部件已经在法国空客大西洋公司和德国空客航空结构件公司完工，同时位于图卢兹的总装线也已完成了总装相关的准备工作。根据计划，很快A350F将进入总装阶段，首架机的交付目标较之前有所推迟，预计在2026年投入市场。

2021年7月，空客宣布，经过董事会批准，公司将启动全新的A350F货机项目，这是继空客启动A380货机项目后，时隔20年，公司再次推出的大型货机项目。

相比竞争对手波音，空客在大型货机项目方面的经验十分有限。在A350F货机项目之前，空客仅推出过A330-200新货机项目。但由于航程短等原因，这一机型并未获得市场认可，在交付38架之后由于缺少订单，这一新货机项目无疾而终。因此，此次空客吸取了之前的教训，在项目启动之初就进行了充分的市场调研，并积极与客户进行沟通交流。项目启动前，空客向包括UPS、DHL、卡塔尔航空等重点客户进行了产品推介。从目前的市场表现来看，A350F已经收获了不少的订单。截至目前，A350F已经获得10家航司的55架订单，包括土耳其航空、国泰航空和新加坡航空等，其中空客的老客户新加坡航空将是A350F的全球首家用户。

空客A350F货机，飞机全长约70米，有效载荷为90吨以上。A350F最大的特点是拥有商用飞机最大的货舱门，这一独特设计使其能够运输超大型货物，如大型航空发动机和其他长尺寸货物。此外，这个大型舱门还提供了舒适的通航环境和安全便捷的地面操作，最大限度地降低了周围结构受损的风险，避免了延误和航班取消。根据设计，在满载情况下，A350F最大航程可以达到8700公里，其全新的大型主货舱门可以实现65度的开启角度，这也使得这款机型具备运送超大型货物的能力。

此外，A350F货机还采用了加固且强度更高的主货舱甲板，其主货舱和腹舱共可装载42个96英寸x125英寸货盘；在快递布局下，则可装载30个AM集装箱和40个LD3集装箱。得益于主货舱和腹舱每个分区都有精细的温度控制，空客A350F货机具备运载包括鲜花、药品以及疫苗等诸多特殊货物的能力。A350F的地板梁设计具有行业中最高的运行负载，使得大多数主甲板托盘位置能够更均匀地

图 | aircraft.airbus.com



分布有效载荷。同时，空客使用铝锂合金代替碳纤维复合材料制造这款飞机的中央翼盒顶盖。中央翼盒是连接飞机左右机翼的关键部件，承受来自机身地板的压力。铝锂合金的使用使飞机最大载货量提高至109吨，比777F多出7吨。

目前，为了顺利完成A350F的总装，空客对其位于图卢兹的罗杰·贝泰耶总装线（FAL）进行了一系列改造。通过安装特殊的夹具和塔台，并对总装线上的八个工位进行调整，生产工人能够顺利进入主甲板货舱门，工作灵活性得以提高。

## 市场表现值得关注

对于A321XLR，空客将其定位为A320neo系列飞机的下一代革命性机型，可满足市场对更远航程和有效载荷的需求，为航空公司创造更大的价值。空客之所以给予这款机型如此高的评价，或许主要出于以下几点考虑。

首先，A321XLR完美契合了当今盈利水平最高和客运需求最大的跨大西洋航线市场。8700公里的航程对于航空公司来说意味着将有机会采用单通道客机开辟纽约至米兰、法兰克福的航线，或是为美国东海岸各城市实现单通道飞机飞往伦敦、巴黎等欧洲城市的航线，最终实现美国东海岸与欧洲的双向村村通。如此一来，乘客将有机会更便捷地从家门口直达欧洲目的地，无需再进行中转。这对于目前的枢纽航空模式也将产生一定的冲击。

事实上，在枢纽机场日渐饱和、长途廉航崛起的今天，A321XLR可以很好地服务一批6~8小时的次级洲际航线。同时，得益于客舱产品的不断进化，即便是全服务航空公司也可以利用A321XLR在这些航线为旅客提供更好的两舱服务。

过去10多年，随着以波音787为首的新机型投入运营，越来越多的次级市场开通了直飞航线，同时得益于近年来油价的低位运行，不少新开辟的航线取得了不错的经济效益。但是仍有一些航线，由于航线上座率低，对于这些航线来说，诸如787、A330这样的宽体客机显然还是太大了。

而对于价格更加敏感的低成本航空公司来说，这款机型的问世意味着他们可以利用现有机务、维修保障、机组的前提下，以更低的成本进一步开拓洲际航线。再加上，A321XLR与A320系列其他机型的共通性，可以帮助低成本航空公司更好地在航线上进行搭配使用。也正因为如此，空客曾公开表示，A321XLR将为低成本航空的发展注入新活力。

最后值得一提的是，A321XLR为窄体客机挖掘高端商务市场的潜力提供了可能。过去提到远程航线上的公务舱，人们首先想到的会是宽体客机的商务舱，但如今在中长途刚需商务市场中，由于单座成本的下降，更大的商务舱布局或者窄体机全商务舱布局都将可能在市场上出现。空客表示，得益于A321XLR所标配的“飞行空间”（Aerospace）客舱，可以根据航空公司的需求，在不同的客舱密度下保证乘客的乘坐舒适性。

而对于价格更加敏感的低成本航空公司来说，这款机型的问世意味着他们可以利用现有机务、维修保障、机组的前提下，以更低的成本进一步开拓洲际航线。



早在2023年的巴黎航展上展示的捷蓝航空一架A321XLR客舱就令人眼前一亮，除了飞机商务舱和经济舱的空间要比预想的大之外，“飞行空间”还配备了情境照明系统和超大尺寸头顶行李箱。由此可见，未来随着A321XLR投入市场，以及发动机技术的发展，窄体客机已经具备了中远程飞行能力，再加上客舱产品的进化，如窄体机全平躺商务舱、空客飞行空间等新一代客舱产品的出现，已经彻底打破了小飞机飞长途航线不舒适的传统观念。未来，在需求量庞大的中远程航线上，A321XLR的加入将有机会让更多的航空公司开发出窄体客机全商务舱的高端飞行产品，对于航空公司和旅客来说，都多了一种选择。

再看货机市场，凭借着747-8F、767F等产品，波音占据了货机市场绝大多数市场份额。根据Cirium机队数据显示，过去10年波音共向全球市场交付了269架大型货机，其中171架777-200LRF和98架747-8F，142架中型货机，全部为767F。相比之下，同一时期，空客仅交付了33架A330-200F。一直以来，空客都想扭转这一态势，却没有合适的时机。但现在，A350F的出现或将帮助空客在货机

市场占据更大的份额。

在2024年的珠海航展上，空客在其发布的市场预测报告中指出，电子商务和全球贸易正在推动对高效航空货物运输的需求，单通道货机和宽体货机对于货运航空公司运营区域和国际航线而言都不可或缺。有鉴于此，其预测，未来20年，中国市场将需要690架货机，其中包括370架单通道货机、220架中型宽体货机和100架大型宽体货机。

在宽体货机方面，A350F推出之前，全球主要的宽体货机全部由波音提供，包括747原生货机和改装货机、777F以及767原生和改装货机，基本上构成了当今远程货机机队的主要运力。而在这一细分市场，空客除了早期的A300/A310系列改装货机收获了一些订单之外，公司之后推出的A330-200F原生货机一直以来都是订单寥寥。未来几年全球市场将迎来宽体货机的更新潮，而目前市场上777货机机队的机龄较小，747F和MD-11F等老旧客改货飞机将陆续更新，因此市场需求十分可观，A350F能否抓住这个机遇，在宽体货机市场分得一杯羹值得关注。■

图 | cargofacts.com



# GE9X: 动力之王

文 | 董帽雄

7月, GE公司宣布, 当今世界最大推力的航空发动机——GE9X的第一台量产产品已正式交付波音, 后续将作为777-9X的动力装置开展试飞取证工作。作为一款专门为777X“量身定制”的产品, GE9X的过人之处不仅在于惊人的推力, 这款GE耗时多年研制的产品采用了包括碳纤维复合材料风扇叶片、陶瓷基复合材料涡轮部件和大量的3D打印部件等诸多创新技术, 使GE9X可以称得上是当今商用航空发动机创新技术的集大成者。

## 安静的“大块头”

2013年, GE正式开始GE9X的研制工作。当年年初, GE进行了GE9X发动机高压压气机的试验, 年中进行了复合材料的性能与运转试验。2014年年中,

▼  
图 | cn.bing.com



进行了陶瓷基复合材料的验证试验。2015年年初, 完成了第一台全核心机的试验。2016年, 首台GE9X试车试验开始。2017年开始了第二台发动机的地面试验, 这也是首台生产型的GE9X发动机。

2018年3月13日, GE9X装在747飞行试车台上进行了首次飞行试验。此后, GE共向波音交付了10台GE9X发动机(8台装机, 2台备份)用于777X的试飞取证工作。为了进行GE9X的结冰试验、冰雹试验、尘埃试验与鸟撞试验, GE还在加拿大马尼托巴湖草原投资2000万美元扩建了原有设施。最终, 完成了5000小时和8000次发动机循环地面测试, 并在GE航空航天的747飞机平台上进行了72次、共计超过400小时的飞行测试。同时, GE还采用了8台发动机原型机进行取证期间的测试。其中001号发动机, 即首台测试整机在完成全部任务后已经被送往博物馆。002号发动机用于叶片包容测试; 003号发动机进行横风测试、循环和反推力装置载荷测试; 004号发动机在飞行测试平台上进行飞行测试; 005号发动机采用不平衡结构进行耐久循环测试, 并评估振动级别, 检查发动机所有的实际极限, 还将用于双发延程飞行认证; 006号发动机用于溅水试验等; 007号发动机进行低压涡轮过热测试后, 在翻修后进行结冰认证测试; 008号发动机用于进行FAA的150小时耐久性测试。2020年1月25日, 以2台GE9X发动机为动力装置的777X飞机完

成首飞, 2020年9月, 美国联邦航空局为GE9X发动机颁发FAR Part33发动机认证。

在GE公司的官方推荐中, 形象地将GE9X形容为“安静低调的大块头”。从主要技术参数来看, GE9X是目前GE公司旗下燃油效率最高的一款发动机产品, 其燃油效率较上一代GE90发动机提高了10%。从节能减排的角度来看, GE9X可以每年为航空公司用户节约约3000公吨燃料, 减少约9500公吨二氧化碳排放。之所以能够实现燃油效率的提升, 很重要的一点是与GE90发动机相比, GE9X的风扇叶片数量从22片减少至16片, 从而更大限度地提升了发动机的燃油效率。10:1的涵道比加上60:1的总压比, 帮助GE9X实现了更高的燃油效率。从排放的角度来看, GE9X的所有排放值都低于当前的监管标准, 其中氮氧化物排放量仅为同级别发动机的一半, 并且支持使用经过批准的可持续航空燃料(SAF)。具体来看, GE9X发动机的NOx排放量比GENx低30%, 低于CAEP/8的要求。在噪声方面, GE9X发动机的噪声值比第五阶段规定的噪声极限低8dB。可以说, 以GE9X为动力的777X投入运营, 标志着大涵道比涡扇发动机进入到了一个崭新的发展阶段。

## 大胆采用创新技术

GE9X项目所采用的创新技术有很多, 其中最引人瞩目的几项包括: 采用第四代碳

纤维复合材料风扇叶片；集成超过 65 个耐热陶瓷基复合材料（CMC）部件，其强度为传统部件的 2 倍；利用增材制造技术（3D 打印）将 300 多个零部件组合成 7 个 3D 打印部件，为发动机整体减重。

GE9X 采用的第四代碳纤维增强树脂基复合材料制作的风扇叶片，数量只有 16 片，是目前世界上所有大涵道比涡扇发动机中叶片厚度最薄、用量最少的（GE90-115B 发动机风扇叶片数量是 22 片，GE9X 发动机是 18 片），叶片的前缘包边材料从钛合金换成了钢，加强了叶片的强度。另外，它还采用了轻质复合材料风扇机匣，这些新材料的使用都有效地减轻了发动机的重量。

与此同时，陶瓷基复合材料（CMC）也是 GE 近年来大力推崇的新材料，在 GE9X 发动机上，这种新材料也被大量使用，GE 也因此成为了全球首家将耐热、轻质的 CMC 材料应用在民用航空发动机热端部件上的制造商。

由于 CMC 材料只有金属合金密度的三分之一，这些重量超轻的 CMC 部件可以大幅降低发动机的重量。此外，这种材料的耐热性还可以大大提高发动机的耐用性和燃油经济性。CMC 材料在高温下远比金属合金耐磨，这也使得航空发动机热端部件需要的冷却空气减少，从而使得用于做功的空气流

—

过去十年中，每一代发动机的数字化应用都越来越显著，因此在 GE9X 中，其传感器套件就达到了数字化革命的顶峰。

—

量增加，达到提升发动机效率的目标。

为了配套 GE9X 发动机的生产，GE 公司在美国亨茨维尔市投资 2 亿美元建立了两家工厂，其中一家用于生产 CMC 材料，另一家用于生产 CMC 部件。两家工厂已先后于 2018 年和 2019 年投产，CMC 材料的年产量可达到 20 吨，而一台 LEAP 发动机使用的 CMC 材料大约为 1 公斤。

此外，GE9X 发动机采用的超高增压比的高压压气机是基于 GE 航空集团的 eCore 核心机设计，采用第 4 代粉末合金材料制造。前 5 级采用整体叶盘结构，涵道比为 10:1，增压比达到 27:1（GE90-115B 的增压比是 23:1）。加上 3 级低压压气机使得总增压比达到 60:1，是目前世界上总增压比最高的大涵道比涡扇发动机。

过去十年中，每一代发动机的数字化应用都越来越显著，因此在 GE9X 中，其传感器套件就达到了数字化革命的顶峰。遥测技术使得 GE 工程师们有能力随时监测发动机的压力、温度、空气流等等，基于大数据和软件分析，运营效率可以大大提高，同时维护成本也得以降低。在 GE9X 发动机中，数字化技术的应用更是无处不在。这意味着通过数字化技术可以对每一台发动机进行数字识别。在发动机投入运营后，一旦出现问题，GE 就可以通过大数据分析来快速锁定具有类似“基因”的发动机，从而可以提前和航空公司一起有效预防可能发生的故障，再也不需要像过去那样一台一台地进行检查和监控，这样不仅提高了发动机的安全性，更大大地提高了航空公司的运营效率，降低了维护成本。

### 助力 777X 项目

在宽体客机市场，波音和 GE 堪称互相成就的典范。1995 年，波音 777 正式投入航线运营，从此全球航空公司的远程宽体

客机机队组成开始发生变化。最初波音 777 系列飞机的动力有 GE90、遑达 800 和普惠 PW4000 三款产品可供航空公司选择。2000 年以后，随着波音推出 777 长航程型号飞机之后，GE90 逐渐成为该系列飞机中最畅销的发动机。这主要是因为 GE 从 GE90 这款产品就开始大胆使用新技术和新材料，使得发动机的燃油效率明显提升。

在 GE90 这款发动机上，GE 公司使用了复合材料风扇叶片，这是商用航空发动机历史上的第一次。GE90 风扇叶片长 4 英尺，重量不到 50 磅，由碳纤维和增韧的环氧树脂基体制成，强度和刚度是钛的两倍。GE90 风扇叶片独特的弯曲设计使其比传统的钛合金叶片更大、更轻，并具有更好的空气动力学性能。重量的减轻和设计的优化使得 GE90 的燃油效率明显提高。同时，优化后的空气动力学设计使 GE90 风扇叶片可将大量空气吸入发动机，增大发动机推力。到波音推出 777-300ER 项目时，GE90-115B 成为了唯一动力装置，这使得 GE 在双发宽体机动力市场逐渐成为领先者。

2004 年，为了挑战波音在宽体客机市场的地位，空客启动了 A350 飞机的研制。作为发动机制造商和波音的战略合作伙伴，GE 公司未雨绸缪地预测到波音很有可能会推出相应的竞争产品，于是在 2010 年，GE 就开始为波音下一代宽体客机的发动机产品积极筹备，GE9X 的雏形在 GE 内部逐渐呈现。一年后，波音不出所料地公布了 777 系列飞机的下一代产品 777X 的研制计划，随后 GE、罗罗和普惠均提供了相应的发动机方案，其中 GE 提出在 GE90 和 GEnx 的基础上发展 GE9X，普惠公司提出发展推力为 440kN 的齿轮传动风扇发动机 PW1000G，罗罗则是在遑达 1000 与遑达 XWB 基础上发展 RB3025。

最终，早有所准备的 GE 赢得了这场竞

争。在 2013 年的迪拜航展上，波音正式宣布启动 777X 飞机项目，GE9X 发动机成为了 777X 系列飞机的唯一动力选择。

虽然 777X 从外形上看与上一代 777 没有太大的变化，仍采用金属机身，但是它采用了 GE 公司最新的，也是当今最大的商用发动机——GE9X 发动机。同时波音对机翼的改良是这款飞机除了发动机以外另一个亮点。777X 飞机的机翼不仅是可折叠的，而且还是当前最大的复合材料机翼。这也意味着 777X 的研制恐怕难以一帆风顺。

根据波音公司最初的规划，777X 投入市场的时间在 2020 年左右，但如今经历多次延期后，777-9X 的交付时间已推迟至 2025 年，777-8F 的交付时间推迟至 2028 年。

从动力装置的角度来看，GE9X 的强劲动力可以帮助大幅提升 777-9X 飞机的航程，使其最大航程可达 15200 公里，比上一代 777-300ER 增长了 400 公里。但在看到优势的同时，诸多创新技术的使用势必有一个磨合的过程，以及后续维护难度和维护成本也有待考量。

今年 8 月，777X 飞机在其首次试飞中就发生了结构出现裂缝的情况。目前波音已经停飞该项目试飞工作，更换故障部件并查明问题原因。波音表示，该部件是发动机和机体之间的结构部件，已通知联邦监管机构和客户相关情况。对于新项目来说，在试飞中发现问题也是行业的规律，但由于 777X 项目已经延迟太久，相比之下，竞争对手的产品已经开始逐步蚕食波音一直占据有利地位的宽体客机市场，因此未来 777X 的项目进展也值得关注。■

# 中国民航普遍服务和大众化服务如何破局

文 | 赵巍

民航普遍服务注重保障公民基本航空出行权利，强调服务的普及性和均等性，具有基础性、公平性、可持续性、政府主导性和社会效应性等特点。而大众化服务则以满足广大民众的多样化出行需求为目标，注重服务的普及性、便利性和个性化，具有价格合理、品质可靠和多样性等特点。两者在服务对象、服务内容和服务质量上既有联系又有差异，共同构成了民航服务体系的完整框架。



图 | 中国东方航空

## 民航普遍服务和大众化服务为什么重要

民航业自诞生之初起，便以独特的地位和作用，在现代交通运输体系中占据了不可或缺的一席之地。特别是在 20 世纪以后，随着科学技术的突飞猛进、各国政策的逐步放开，以及全球经济一体化的日益加深，民航业迎来了前所未有的黄金发展时期。

在全球化和市场化的时代背景下，民航服务的持续变革与发展显得愈发重要。它不仅关乎交通运输系统的整体效率与质量，更是满足人民群众日益增长的出行需求的关键。但是，民航普遍服务和大众化服务两种主要服务形式的界定与实践应用，却常常引发争议和模糊认识。因此，深入辨析这两种服务形式的内涵、特点及其相互关系，对于推动民航服务的均衡与可持续发展具有深远的现实意义。

民航普遍服务，通常指的是为保障公民基本出行权利而提供的普遍性服务，其特点在于普及性和基础性。这种服务形式确保了所有公民，无论地域、经济能力，都能享受到基本的航空出行服务。它体现了社会公平与公正，是民航服务中不可或缺的一部分。普遍服务并不意味着服务的单一性或低质量，而是在保障基础出行的同时，也要追求服务的高效与优质。

民航大众化服务则更注重服务的广泛性和多样性，它以满足广大人民群众多样化出行需求为目标，提供更为丰富和个性化的服务选择。大众化服务的发展，不仅推动民航市场的繁荣，也促进相关产业的创新与进步。从货物运输到旅客运输，从空中快递到旅游休闲，大众化服务的触角已延伸至民航服务的各个领域。

通过辨析民航普遍服务和大众化服务的内涵、特点及其关系，可以为民航服务的未来发展提供更为明晰的指引。在保障普遍服务的基础上，更好地推进大众化服务的发展，满足人民群众的多样化出行需求，推动民航市场的持续繁荣，为现代交通运输体系的发展贡献力量。

## 中国民航普遍服务和大众化服务发展的三大策略

随着经济的快速发展和人民生活水平的不断提高，航空出行需求日益增长。中国民航作为国家重要的交通运输方式，承担着满足人民群众出行需求、促进经济社会发展的重要使命。在这样的背景下，提出普遍服务和大众化服务的三大策略，旨在提高民航服务的覆盖面和可及性，让更多的人能够享受到便捷、高效的航空出行服务。

加大基础设施建设是实现民航普遍服

务和大众化服务的重要基础。目前，我国民航基础设施建设不断加快，商业机场数量持续增加，航线网络日益完善，更多的地区能够享受到航空服务，有效提高了民航服务的通达性。

扶持支线航空发展对于保障老少边穷地区的航空服务至关重要。老少边穷地区往往交通不便，经济发展相对滞后。通过扶持支线航空，可以为这些地区提供便捷的对外联系通道，促进当地经济社会发展。例如，一些偏远地区在开通支线航班后，旅游业得到了快速发展，当地居民的生活水平也有了显著提高。

支持低成本航空发展是推动民航服务大众化普及的有效途径。低成本航空以其低廉的票价吸引了大量消费者，使更多的人能够选择航空出行。近年来，我国低成本航空市场发展迅速，越来越多的航空公司开始涉足低成本航空领域。不仅丰富了消费者的出行选择，也促进了民航市场的竞争，推动了民航服务质量的提升。

## 加大基础设施建设

满足民航普遍服务和大众化服务的商业机场就是提供公共服务和定期航班的商业机场，区别于通航机场。按照国家机场建设规划，到2035年中国商业机场将达到400家，这是普遍服务的底线。2023年底，中国商业机场259家，与国土面积相当的美国1980年代就有600家商业机场的差距巨大。中国民航基本建设和技术改造投资额从2012年的712.2亿元上升到2021年的1222.47亿元，增长71.65%。即使在新冠疫情冲击下，民航投资依然保持增长，2020年和2023年的投资额均达到千亿水平，体现了民航业在基础设施建设上的持续投入。但是，民航投资在中国

交通领域一直属于小众投资，每年固定资产投资只相当于铁路的15%左右和公路投资的5%左右。中国高铁占到全球70%，中国高速公路占到全球68%左右，但是中国商业机场的规模却整体落后于美国，地理覆盖率落后于印度。

在提升机场覆盖的基础上，航线网络的有效通达对于民航服务的提升至关重要，它能够极大地提高旅客出行的便利性和效率。中国民航通过增加航线数量和提升航线质量，增强了航线网络的通达性。从2012年底的2457条定期航班航线增长至2023年底的5206条，实现翻倍增长，显示了中国民航在航线网络建设上的显著成效。国内通航城市数量从2012年的178个增至2023年的251个，提升了航线网络的覆盖范围，更多的城市能够享受到航空服务。但是，应该看到当前距离民航普遍服务的差距依然很大。

未来的十五五期间，加大投资实现全国商业机场全面覆盖，需要加大政府投资补短板。对于东部经济发达地区，依托国家规划，利用社会力量加速空地区机场补位。对于中西部地区，应该加大政府投资，统一规划标准实现行政地区通航工程。

商业机场全面覆盖面临着诸多建设难题，其中资金和土地问题是最为突出的挑战。在资金方面，机场建设需要大量的资金投入，包括土地征用、工程建设、设备采购等。对于一些经济相对落后的地区来说，筹集足够的资金是巨大的挑战。为了解决资金问题，可以采取多种方式。一方面，政府加大对机场建设的财政投入，通过专项资金、补贴等形式支持机场建设。另一方面，引入社会资本参与机场建设，采用PPP模式等方式，充分发挥社会资本的优势，共同推动机场建设。在土地方面，机场建设需要占用大量的土地资源，而在一些地区，土地资源紧张，征地难度较大。



为了解决土地问题，可以通过合理规划机场布局，充分利用荒地、山地等未利用土地，减少对耕地的占用。同时，加强与当地居民的沟通协调，做好征地补偿工作，确保机场建设的顺利进行。此外，技术难题也是机场建设面临的挑战之一。例如，在一些地形复杂的地区，机场建设需要克服地质条件恶劣、气候多变等问题。加强技术研发和创新，引进先进的建设技术和设备，提高机场建设的质量和效率。同时，加强与科研机构、高校等的合作，共同攻克技术难题，为机场建设提供技术支持。

加大基础设施建设，提升商业机场的覆盖范围，增强航线网络的有效通达性，必将为实现民航服务的普遍化和大众化奠定坚实的基础。

## 扶持支线航空健康发展

支线航空发展包括支线机场建设和支线航空公司发展。支线机场建设是中国民航商业机场建设的短板，支线航空公司不

断壮大依然需要全面破局。

支线航空补贴政策在推动老少边穷地区航空服务发展方面发挥重要作用。财政部、民航局修订印发的《支线航空补贴管理暂行办法》明确了补贴范围和标准，为支线航空的发展提供了有力支持。为确保补贴政策的可持续性和有效性，需要不断进行政策调整和优化。一方面，根据地区经济发展水平、人口密度等因素，动态调整补贴范围和标准。对于经济发展较快、人口密度较大的地区，适当减少补贴力度；对于经济发展相对滞后、人口稀少的地区，加大补贴力度，确保航空服务的可持续发展。另一方面，加强对补贴资金的监管和评估，提高资金使用效率。建立健全补贴资金监管机制，加强对航空公司运营情况的监督和考核，确保补贴资金真正用于支线航空的发展。同时，定期对补贴政策的实施效果进行评估，根据评估结果及时调整政策方向和措施，确保补贴政策始终符合支线航空发展的实际需求。此外，探索多元化的补贴方式，鼓励社会资本参与支线航空的发展。吸引社会资本投入支线航

图 | 中国民航网



空领域，共同推动老少边穷地区航空服务的发展。加强与地方政府的合作，共同承担支线航空发展的责任和义务，形成推动支线航空发展的合力。

扶持支线航空发展，尤其是针对老少边穷地区，对于促进区域经济均衡发展和提高当地居民生活质量具有重要意义。政策支持、航线网络覆盖、基础设施建设和航班密度的提升，共同确保这些地区的航空服务发展。支线航空的发展不仅提升航空服务的普及率，还会对当地经济社会发展产生积极影响。

## 推进低成本航空发展

全球范围内，人均年乘机次数成为衡量民航大众化服务的客观指标。当前全球人均乘机次数为0.57左右，美国是2.85，中国只有0.47。中国民航的大众化服务水平落后于美国，落后于全球平均水平。未来10年内，中国民航强国建设必须将民航大众化服务水平提升到全球平均水平的1.5倍左右，也就是说到2035年，达到人均乘机次数1.5次左右。

低成本航空改变世界，成为全球民航大众化服务的主力军。根据国际航空运输协会（IATA）的数据，低成本航空在全球航空市场的份额已从2005年的8.9%增长至2023年的近30%。在中国，低成本航空市场份额虽起步较晚，但增长迅速，已

低成本航空改变世界，成为全球民航大众化服务的主力军。

从2015年的5.9%增长至2019年的9.5%，显示出强劲的发展势头。但是远远落后于全球平均水平，甚至落后于同属发展中国家的印度。在国外，以瑞安航空、西南航空等为代表的低成本航空公司在市场中占据重要地位。这些航空公司通过采用单一机型、简化服务流程、提高飞机利用率等方式降低运营成本，以低廉的票价吸引了大量旅客。而在国内，低成本航空市场也呈现出快速发展的态势。春秋航空等低成本航空公司在国内市场中逐渐崭露头角。与传统航空公司相比，低成本航空公司在价格上具有明显优势，同时在航线布局、服务模式等方面也不断创新，以满足不同消费者的需求。

支持低成本航空发展是中国民航服务大众化普及的关键。在未来发展中，低成本航空面临着诸多机遇与挑战。

一方面，随着人们生活水平的提高和出行需求的多样化，越来越多的人开始关注低成本航空。尤其是在中短途航线市场，低成本航空具有较大的发展潜力。低成本航空通过提供多样化的票价体系和灵活的服务模式，满足不同旅客的需求，特别是中低收入群体。市场份额的增长、服务模式的创新、基础设施的适配以及政策的支持，共同推动了低成本航空的发展，促进了航空市场的多样化和竞争，提高了航空服务的效率和质量。随着中国民航市场的进一步开放，低成本航空公司在国际航线上也展现出竞争力。通过与国外低成本航空公司的合作与竞争，中国低成本航空能够引入先进的管理经验和服务模式，提升服务质量和运营效率。

政策的支持为低成本航空的发展提供了机遇。民航局出台《关于促进低成本航空发展的指导意见》，从市场准入、航线资源分配等方面给予支持，促进低成本航空的快速发展。政策内容包括降低设立低

成本航空公司的门槛、简化审批手续、调整机场收费政策等，为低成本航空的发展提供了有力的政策支持。在降低收费方面，民航局积极协调机场等相关单位，降低低成本航空公司的机场起降费、停机费等费用。放宽准入政策也为低成本航空的发展提供了有力支持。民航局在市场准入方面给予低成本航空公司更多的机会，简化审批流程，鼓励更多的企业进入低成本航空市场。这使得市场竞争更加充分，为消费者提供了更多的选择。此外，在航线资源分配方面，民航局也向低成本航空公司倾斜。优先为低成本航空公司分配一些热门航线的时刻资源，提高其航线网络的覆盖范围和通达性。

然而，低成本航空也面临着一些挑战。首先，行业竞争日益激烈。随着低成本航空市场的不断扩大，越来越多的航空公司涉足这一领域，市场竞争加剧。其次，外部环境变化对低成本航空产生影响。燃油价格的波动、税收政策的调整等都可能增加低成本航空公司的运营成本。此外，消费者对服务质量的要求不断提高，低成本航空公司需要在降低成本的同时，不断提高服务质量，以满足消费者的需求。

## 结论与展望

中国民航普遍服务和大众化服务的三大策略在推动民航发展方面必将发挥重要作用。加大基础设施建设，实现商业机场的全面覆盖和航线网络的有效通达，提升地区交通便利性，促进区域经济发展。扶持支线航空发展，满足老少边穷地区的出行需求，带动当地经济和旅游业的发展。支持低成本航空发展，提高民航服务的大众化普及程度，丰富消费者的出行选择。

具体而言，商业机场全面覆盖将缩短偏远地区与其他地区的时空距离，为当

地经济发展带来新机遇。航线网络有效通达，通过优化航线布局和加强航线协同合作，提高旅客出行的便利性和效率。支线航空补贴政策完善老少边穷地区的航空服务，促进资源流动和经济发展。促进低成本航空发展的措施包括降低收费、放宽准入政策和倾斜航线资源分配等，都取得了显著效果。

三大策略相互配合，共同推动中国民航的普遍服务和大众化服务，为实现民航强国目标奠定坚实基础。

未来，中国民航普遍服务和大众化服务将继续深化发展。在基础设施建设方面，随着科技的不断进步，机场建设将更加智能化、绿色化，提高建设效率和运营管理水平。航线网络将进一步优化，实现更加高效的通达性，满足不断增长的出行需求。

支线航空发展将得到更多政策支持和社会关注。随着地区经济的发展和人们对便捷出行的需求增加，支线航空市场将持续扩大。航空公司加大对支线航空的投入，开发更多适合老少边穷地区的航线，提高服务质量。

低成本航空市场将继续保持快速增长。随着消费者对价格敏感度的提高和出行需求的多样化，低成本航空将不断创新服务模式，提高服务质量，拓展市场份额。同时，进一步加大政策支持，为低成本航空的发展创造更好的环境。

总之，中国民航普遍服务和大众化服务的未来发展前景广阔，将为人民群众提供更加便捷、高效、优质的航空出行服务。未来，中国民航普遍服务和大众化服务的研究还有很大的空间，需要不断深入探索和创新，为中国民航的可持续发展提供理论支持和实践指导。■

# 低空经济国内外发展比较分析研究

文 | 边琪

2021年2月，中共中央、国务院印发《国家综合立体交通网规划》，首次提出发展低空经济。2023年12月，中央经济工作会议正式将低空经济列为战略性新兴产业，并明确为新质生产力。2024年政府工作报告明确提出，要积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎。

## 低空经济定义与范畴

低空经济的定义并不完全统一，普遍来说是以支持各类航空器低空飞行与运营而建立的综合经济形态，包括低空研发制造、消费运营、基础设施、综

图 | [subsites.chinadaily.com.cn](http://subsites.chinadaily.com.cn)

合保障等，构成低空产业链。

低空经济属于产业链型经济，具有多领域、跨行业、全链条等特点，涉及上、中、下游等一系列行业。作为低空经济产业的基础，产业链上游是指原材料及部件，主要包括航空材料、航空部件和软件等。作为低空经济产业的核心，产业链中游是指低空飞行器和机场设备，主要包括无人机、直升机、电动垂直起降飞行器(eVTOL)、空港空管设备及系统软件、相关辅助设备等。产业链下游则为低空配套与服务，主要包括低空飞行服务保障、地面服务保障、运营维护，以及低空物流、低空旅游、航空摄影、空中巡查、医疗救援等各类场景应用。

低空经济具有产业链条长、区域依赖性强、技术依赖性高、创新要素集中、产业融合性强、应用辐射面广等特征。

首先，低空经济产业链较长，涵盖多个领域，主要由低空基础设施、低空飞行器制造、低空运营服务、低空飞行保障四大板块构成。

其次，低空经济发展依托高度聚集的地区产业集群，具有较强的区域依赖性，主要体现在其依赖于高度聚集的地区产业集群。地区产业集群的形成有助于实现产业链的就近集约发展，使得低空经济的相关产业能够在较短的地理距离内实现高效协同。这种协同不仅降低了生产成本，还提高了生产效率，为低空经济的持续发展提供了有力保障。同时，产业集群内的企业可以通过共享技术、市场、人才等资源，形成优势互补，共同提升整个产业的竞争力。

再次，低空经济产业具有技术依赖性高的特点。低空经济产业的形成与发展依赖于低空飞行相关技术。先进的技术不仅提升了低空经济的效率和安全性，还推动了相关行业及其产业链的发展。因此，技术的不断更新与迭代，使低空经济能够持

续满足市场新的需求，并通过提升服务品质与多样化程度增强市场竞争力。

低空经济产业还具有创新要素集中的特点。低空经济产业融合了多种高新技术，该产业不仅涵盖了传统通用航空业态，还融合了无人机、遥感、电子通信等先进技术，这些技术的融合使得低空经济产业在研发、制造、运营等方面都具备了较高的创新水平。同时，低空经济产业的发展推动了相关领域的创新。随着低空经济产业的快速发展，对飞行器设计、制造、自动驾驶、复合材料等相关领域的技术创新提出了更高要求。这些领域的创新不仅提升

表 11 低空经济的特点

内容描述	具体示例
原材料及部件	- 航空材料
	- 航空部件
	- 软件
低空飞行器和机场设备	- 无人机
	- 直升机
	- 电动垂直起降飞行器 (eVTOL)
	- 空港空管设备及系统软件
低空配套与服务	- 相关辅助设备
	- 低空飞行服务保障
	- 地面服务保障
	- 运营维护
	- 低空物流
	- 低空旅游
	- 航空摄影
	- 空中巡查
- 医疗救援	

了低空经济产业的整体技术水平，还推动了相关产业链的延伸和拓展。

最后作为一种综合性经济形态，低空经济具有产业融合性与辐射带动性。作为战略性新兴产业，低空经济产业面向国内需求开展创新活动，向上融合国家战略需求，向下融合本土市场需求。在航空器与多种产业形态融合的基础上，低空经济涉及民用、警用、军用等多个领域，为农业、工业和服务业发展注入新动力。

## 低空经济国内外发展现状

低空经济重在低空飞行活动，是航空产业在低空领域的经济形态体现，与通用航空的主体内容基本一致。在传统通航领域，美欧优势明显，在新通航特别是无人机领域我国优势突出。

低空经济概念起源于20世纪20年代的欧美国家。西方航空发达国家在低空经济领域布局较早，拥有众多世界知名的航空制造企业和科研机构，技术和产品研发投入巨大，均已形成了较为完善的政策法规体系、完整的产业链和成熟的商业模式等。其中，美国、加拿大、法国、德国、英国、巴西等国家的低空经济发展处于世界领先地位，通航产业规模占全球近80%的比例；而美国尤其具有先发优势，依托

低空经济重在低空飞行活动，是航空产业在低空领域的经济形态体现，与通用航空的主体内容基本一致。在传统通航领域美欧优势明显，新通航特别是无人机领域我国优势突出。

其一流的航空制造能力和开放的低空载人、载物运营试点机制，在全球低空经济领域独占半壁江山。

美国联邦航空管理局（FAA）制定了以市场参与为主、航空管理局宏观把控为辅的城市空中交通管理体系架构。欧洲部署了涉及机场运营、空中交通服务、空中交通管理和航空基础设施四大场景领域。德国和英国分别在无人机技术研发和产业应用方面各有侧重。

总结美欧通航发达的经验和因素，主要在于：一是低空空域开放度高，大多数低空空域面向公众开放；二是飞行环境氛围好，政府为广大想飞要飞者创造条件，随时起降、即报即飞、安全自负；三是飞行受众基数大，量大面广的商务、私人出行占其整个通航飞行的60%以上；四是机场、固定基地运营商等基础设施体系十分健全，通用航空产业体系构筑完善。

2010年前后，为推动我国低空经济发展，国务院、中央军委、民航部门等先后颁布了一系列政策法规。2010年以来，我国先后在14个省级行政区推广低空空域管理改革试点，实行空域分类化管理，简化审批流程，积累了宝贵的经验。

2022年，我国低空经济行业市场规模达2.5万亿元，营业收入合计为418.35亿元。涉及低空经济企业数量超过8000家，其中上市公司或新三板挂牌公司共38家。通用航空市场持续扩张，实际运营中的通用航空器共有3177架，飞行时长达1219千小时。民用无人机注册数量达95.8万架，同比增长15.14%，累计飞行时间为2067万小时，产业规模全球领先。随着空域管理改革的深化、技术的进步、基础设施的完善以及政策的推动，低空经济在实践中逐步形成并展示出对高质量发展的强劲推动力、支撑力。

截至2023年底，我国通航企业689家，

我国无人机产业在全球具有领先优势，在技术的支持下不断拓展实际应用场景。

在册通用航空器3173架，全国在册通用机场数量449个，其中已取得机场106个、备案机场343个，是2015年的7.5倍。固定运营基地、飞行服务站、专业维修站、直升机起降点、无人机起降点等基础设施数量逐年增多，已建成飞行服务站32个，为26个省份提供联网服务。航油服务实现通用机场全覆盖，“国家级—区域级—通航飞行服务站”三级低空飞行服务保障体系建设初见成效。全国公布432个通用机场情报资料和全国范围目视航图，2128架通用航空器完成北斗终端安装绑定。

我国无人机产业在全球具有领先优势，在技术的支持下不断拓展实际应用场景。我国在无人机应用技术、无人机导航与控制技术、无人机电动能源技术、无人机光学技术等方面具有核心竞争力，无人驾驶技术也处于全球领先水平。在先进技术的赋能下，我国的无人机销售额在全球占比达到了70%以上，成为全球无人机市场的主要生产国和出口国之一。此外，我国无人机技术已经广泛应用于农林植保、文教娱乐、应急救援、物流运输等领域，依靠低空经济辐射带动能力实现多元产业融合发展。

## 意见与建议

低空经济作为一种新兴的经济发展模式，确实展现了其强大的潜力和广泛的应用前景。通过突破地域局限，缩短时空距离，低空经济在多个领域都发挥了重要作

用，为人们的生活带来了诸多便捷与舒适。

在旅游领域，低空观光成为了一种新的旅游方式，让游客能够以全新的视角欣赏美丽的风景。应急救援方面，低空救援能够迅速到达事故现场，提高救援效率，挽救更多生命。物流配送方面，无人机送货等新型物流方式正在逐渐普及，为快递行业带来了新的变革。此外，低空经济在农业生产、管网巡线、国土资源勘查、工程测绘、环境监测等领域也有着广泛的应用。通过无人机等低空飞行设备，可以实现对农田、管道、土地、地形等的快速监测和测绘，提高工作效率和准确性。在警务活动、交通疏导、气象监测等方面，低空飞行设备也能够提供及时、准确的信息支持，为相关部门的工作提供有力保障。

然而，尽管低空经济具有诸多优势和应用前景，但目前我国低空经济仍处于起步阶段，经济规模相对较小，潜力尚未完全挖掘。为了更快更好地发展我国低空经济，我们需要充分借鉴国际低空经济发展的经验，并结合我国国情进行创新和突破。

一方面，我们可以学习国外在低空经济领域的先进技术和管理经验，推动我国在低空飞行设备研发、制造、运营等方面的快速发展。另一方面，我们还需要加强政策支持和引导，为低空经济的发展提供良好的政策环境和市场环境。例如，可以制定相关法规和标准，规范低空飞行设备的使用和管理；可以加大对低空经济产业的投入和扶持力度，推动相关产业链的完善和发展。

总之，低空经济作为一种新兴的经济发展模式，具有广阔的应用前景和巨大的发展潜力。我们应该充分抓住这一机遇，加强国际合作与交流，推动我国低空经济的快速发展。同时，还需要注重技术创新和人才培养，为低空经济的持续发展提供有力支撑。■

# 消费需求结构变化 能否为头等舱带来新增长

文 | 王双武

国际航空运输协会在近期的一份报告中指出，由于新冠疫情对全球经济造成了前所未有的破坏，全球民航业在疫情3年中遭受了约2000亿美元的损失。疫情防控期间乃至之后，越来越多的休闲旅客成为头等舱等高端舱位的客群。尽管头等舱机票价格约是经济舱机票价格的10倍，但客群需求变化与市场增长再次让头等舱成为一座潜在的金矿。

国际航空运输协会的数据显示，截至2023年底，包括乘坐公务舱和头等舱在内的航空旅行人数已经恢复到2019年水平的86%，而包括经济舱在

内的总体旅行人数恢复到2019年水平的81%。近两年，在欧美一些高收益航线上，虽然商务旅客仅占总人数的12%，但是带来了75%的利润。随着越来越多的休闲旅客偏爱高端舱位出行，头等舱是否将迎来新的生机呢？

## 选择面临两极分化

1995年，在英国航空推出全平躺式头等舱座椅后，全球民航业对头等舱服务的概念与标准开始发生变化。美国航空、达美航空和新加坡航空等相继模仿，在更新头等舱座椅的同时不断完善配套服务，全平躺式头等舱座椅逐步成为主流航空公司的一种标配。

随着市场竞争加剧和服务升级，卡塔尔航空、美国航空、汉莎航空等多家航空公司推出了全平躺式公务舱座椅，其较高性价比在一定程度上影响了头等舱机票的销售，导致一些航空公司开始减少头等舱座位。在头等舱座椅配置方面，达美航空在2008年提供了40万个座位，2018年则减少到20万个。在同一时期，美国联合航空由38万个减少到18万个，新加坡航空由15万个减少到9万个。当然也有例外，阿联酋航空由2008年的31万个增加到2018年的60万个。

目前，新西兰航空和土耳其航空已经完全放弃了头等舱。即使是创新和引领

行业头等舱旅行的英国航空，在最新引进的飞机上也放弃了头等舱。在跨大西洋市场上率先推出全平躺式头等舱座椅，让一度面临经营困难的英国航空和汉莎航空很快赢得了市场先机并增强了高端市场竞争力，也进一步推动了行业服务水平提升。随着全平躺式公务舱座椅的流行，头等舱似乎越来越不受待见。

是什么原因造成航空公司逐渐减少头等舱座位的呢？当然是市场变化导致旅客出行需求发生改变。但如果有人说头等舱会完全消失，目前来看未免有些偏颇，因为不同国家的不同客群在出行方式的选择上存在一些客观差异。例如，海湾地区的阿联酋航空在空客A380客机上打造豪华的头等舱套间，设有专有的淋浴间、酒吧和休息室；阿提哈德航空着力打造“空中官邸”，其设施设备全部按照五星级酒店标准配置，旨在助力有需要的旅客开启奢华的旅行。

2023年6月，卡塔尔航空时任首席执行官阿克巴尔·阿尔·贝克尔公开表示，公司今后在新接收的飞机上不再选装头等舱。在后疫情时代，选择头等舱出行的休闲旅客人数突然增长，市场变化促使卡塔尔航空调整策略。为应对高端市场上阿联酋航空和阿提哈德航空的竞争，卡塔尔航空于今年3月宣布，在2025年底开始交付的约50架波音777-9飞机上继续选装头等舱，以提供私人喷气式飞机出行般的旅行体验。



这些飞机将执飞卡塔尔多哈至英国伦敦、法国巴黎、美国纽约等主要商务航线。

## 消费客群结构变化

新冠疫情暴发前，欧美民航业已经开始出现更多休闲旅客购买头等舱机票的现象，新冠疫情的发生在很大程度上加剧了这种趋势。人们青睐具有独立空间、私密性更强和更舒适的座椅，这导致疫情防控期间头等舱和公务舱的客座率较高，甚至经常出现爆满的现象。即使在后疫情时代，休闲旅客成为头等舱或公务舱主要客群的趋势也没有减弱，反而一直在加剧。

尽管通货膨胀在美国蔓延，但是航空旅行市场似乎并没有受到特别影响，今年春夏季节航空旅行再次出现高潮。达美航空和美国航空均表示，今年夏季旅客出行需求出现了比以往更加强劲的反弹。达美航空和美国联合航空则表示，国际旅行和商务旅行市场快速反弹且已经超预期，出行旅客很明显更加愿意购买头等舱等高端舱位机票。高端舱位收入增长已经超过经济舱收入增长，这使得达美航空开始思考如何优化高端舱位的布局和设计。

疫情改变了一些旅客的出行消费习惯，越来越多的休闲旅客开始选择高端舱位，头等舱成为一些休闲旅客的选择。尽管目前经济增长放缓，但航空公司在这方面的投资仍在继续。在头等舱配置上，一些航空公司制定并遵循服务标准，头等舱也越来越像一个迷你的高级酒店房间，有沙发、电视、办公桌、衣柜、淋浴间，甚至有些航空公司还配备机上厨师提供特色餐饮服务。

过去，在头等舱机票销售方面，航空公司习惯于同传统的商务旅客打交道。但现在情况发生了一些变化，航空公司需要花费更多时间关注那些投入数千美元以充

分享旅行体验的休闲旅客。这些旅客认为航班飞行是他们假期体验的一部分，而不仅是一次旅行。愿意花高价享受私密空间的休闲旅客人数增加，让一些减少头等舱座位的航空公司高管一时感到有些困惑。

目前来看，休闲旅客继商务旅客之后偏爱头等舱的消费趋势，导致高端客群结构发生了变化。随着民航业逐步从疫情危机中恢复，针对高端客群出行发生的结构性改变，航空公司开始采取一些措施对客舱进行改造。后疫情时代头等舱需求增长，又促使一些航空公司竞相制定奢华飞行的新标准。而休闲旅客成为头等舱等高端舱位消费群体的这一转变，引起了航空公司对未来发展趋势的思考，并积极采取应对措施。

## 升级改造悄然兴起

面对市场需求的变化，汉莎航空近两年投资 25 亿欧元实施了包括头等舱在内的设备升级与改造。汉莎航空在今年新交付的波音 787 和空客 A350 飞机前部改造出两个空间独立且完全封闭的头等舱套间，另外还打造了一个双人超级头等舱套间。汉莎航空打造的全新头等舱套间参照新加坡航空、阿联酋航空和阿提哈德航空的设计风格，采用全封闭滑动门设计，房间内除了有超大衣物间，还可方便旅客根据需要自行调节温度，集私密性与舒适性于一体，是结伴出行旅客的首选。

随着跨大西洋商务旅游市场恢复和需求增长，为吸引高收益客群并满足他们的出行需求，作为“提供世界级客户体验”计划的一部分，英国航空从今年 3 月起投资 70 亿英镑实施为期两年的服务转型，其中一项就是在空客 A380 飞机上打造全新和独特的头等舱套间。作为空客 A380 飞机客舱翻新计划的一部分，其全新头等舱套间

预计在 2025 年底至 2026 年初首次亮相。

美国旅客在国内旅行时越来越偏爱腿部空间较大且私密性较强的座椅，并愿意花钱提升飞行体验。从今年 9 月起，阿拉斯加航空在执飞短程航线的窄体机上增加了头等舱座位数量，涉及波音 737-800、波音 737-900ER 和波音 737-9MAX 等超过 200 架飞机。新的头等舱座椅拥有更大的腿部空间、USB 接口以及具有颈部支持功能的六向头枕。阿拉斯加航空还将改善头等舱餐食，提供西部海岸风格的餐食和优质饮料。

目前，美国联合航空正在对执飞国内短程航线的空客 A321neo、波音 737NG 和波音 737MAX 等超过 200 架飞机进行全新头等舱座椅改造。新的头等舱座椅配备了交流电插座、USB 接口、可供蓝牙连接的 13 英寸高清显示屏，内置平板电脑托架和可放置标准笔记本电脑的小桌板。在私密性方面，该头等舱座椅采用一个 11 英寸×19 英寸的皮革挡板与邻座隔开，翼形头枕和从外部扶手展开的托盘桌进一步确保了隐私空间。座椅按照人体工程学设计，既宽敞又舒适。美国联合航空方面表示，预计在 2026 年之前完成这些飞机头等舱座椅的全面改造。

澳航也对宽体机上的头等舱座椅进行了更新，打造了一款相对豪华的头等舱套间。澳航在空客 A380 和空客 A350 飞机上分别配置了 14 个和 6 个头等舱套间，并在独立套间内配备了一把舒适的扶手椅、一张 83 英寸全平躺带记忆床垫的床，以及羽绒被和各式枕头。法国航空方面还表示，将很快推出占有 5 个舷窗位置、业内最长的头等舱套间。

## 航空公司深挖头等舱收益潜力

在过去两年里，美国航空头等舱机

票销售呈上升趋势，而购买头等舱机票的大部分是休闲旅客。在国内航线上，头等舱机票购买比例由 60% 提升到 80%。过去，一些航空公司允许忠诚度计划会员使用积分兑换或者升级到头等舱，尤其在美国境内，主流航空公司的头等舱座位很大比例是被会员使用积分兑换的。

美国航空自 2023 年初实施新的忠诚度积分管理方案以来，对会员使用积分升级到头等舱进行了相对严格的限制，这在一定程度上使会员升级到头等舱变得困难。由于头等舱座位数量相对较少、活动空间舒适，还有特殊的服务与餐食，如果使用积分升舱的会员过多，对航空公司来说远不如收取现金划算。美国航空通过调整使用积分升舱的限制条件，加大了升舱难度，在一定程度上促使有刚性需求的精英会员不得不购买头等舱机票。当然，一些会员对这种做法也有微词。但与达美航空和美国联合航空的升舱条件相比，美国航空的升舱条件要宽松许多。

头等舱的生命力与国家或地区的经济发展程度以及旅客的消费行为存在密切关联。阿联酋航空机队中头等舱和公务舱座位数量占总座位数的 12%，但能带来约 40% 的收入。其头等舱座位收入的 90% 来自销售，而不是让会员使用积分升舱。可以说，头等舱业务真正挣钱的公司就是阿联酋航空。

当然，对阿联酋航空和阿提哈德航空来说，以豪华头等舱套间吸引人们的眼光是一种营销手段。媒体报道的阿提哈德航空的“空中官邸”头等舱套间，在整个机队中仅有 10 个。宣传“空中官邸”头等舱套间更多是一种营销手段，通过豪华头等舱的营销，打造航空公司优质出行体验的品牌形象。■

# 杨颖华：从“工”到“匠” 最需坚持

文 | 周岑茗 图 | 徐炳南



## 杨颖华 Yang Yinghua

2023年上海市五一  
劳动奖章获得者

1980年11月生，中共党员，2004年入职上海飞机制造厂，现任中国商飞上飞公司C909事业部212（翼身对接）工位工段长，飞机铆装工特级技师，曾先后被评为“全国技术能手”“上海市杰出技术能手”，2022年入选第二批中央企业“大国工匠”培养支持计划。

获评2023年“上海工匠”的杨颖华，现任C909事业部212（翼身对接）工位工段长，25年如一日扎根型号生产一线，苦练技术打牢装配基本功、革新技术助力批产再提速、传授技术培养人才队伍……在从“工”到“匠”之路上，杨颖

华始终坚持，逐步从一名普通装配工成长为具有高超技能水平的特级技师。

坚持专业，择一事终一生

“要么不做，要做就要做到最

好。”带着这样的信念，杨颖华从上飞技校铆接专业毕业后便加入上飞，走上了属于他的技能成才之路。也正是因为有了这份从事专业的热爱与坚持，平素里少言寡语的杨颖华每当谈及造飞机的那些事儿时，眼里都会绽放出光彩，充满无限的

热情和干劲。

聊起造飞机，杨颖华立马打开了话匣子，回忆起他与大飞机的点点滴滴。2004年初，彼时二十多岁的杨颖华刚刚参加工作，由于在技校学习的是铆接专业，便被分到了当时的部装车间。那时候父母家人的支持给予了年少的杨颖华坚持大飞机事业的决心。“当时我已经入了党，家人常常同我说党员就要有党员的坚持，年轻人学了一门专业就要坚持下去，好好干，以后定会有出息。”杨颖华爽朗地说道：“或许就是在那时，我心中埋下了要凭借专业技能把手上的活儿干好的种子，这也才有机会乘上了大飞机事业发展的东风。”

日后这颗种子逐渐在杨颖华的心里生根破土、茁壮成长。“要说家人是我坚强的后盾，那么卢师傅便是我职业生涯的引路人，他手把手指导了我很多装配技术。还记得卢师傅最常说的便是‘徒弟出成绩是我最开心的事情’。”杨颖华朴实的话语中流露出对第一任带教师傅卢荣珍满满的感激之情。

师傅领进门，修行在个人。为了不断提升专业技能，在完成好日常工作之余，杨颖华总会拿出业余时间见缝插针开展技能练兵。“别人都在做，但我要做得更出色”，

据他回忆，当时为了把活儿干到更好，每个技能点每次都要加练三遍以上，自己拿着手表卡时间，要在规定的时间内做到自己满意。天道酬勤，正是凭借这份严格要求自己的倔劲，不久之后便让初出茅庐的杨颖华从同龄人中脱颖而出。

2004年下半年，公司举办一年一度的技能竞赛。为了能够在竞赛中取得好成绩，首次参赛的杨颖华丝毫不敢懈怠，日夜加练专业技能，在反复演练参赛级别实操考题的基础上，还不断钻研练习更高级别竞赛的考题。功夫不负有心人，到2010年，杨颖华已连续3年在公司技能比赛中拔得头筹，在大飞机的技能舞台上崭露头角。凭借优秀的竞赛成绩，当年还不到30岁的杨颖华考取了技师资格证书，成为公司的骨干力量。

在自己的领域深耕细作、持续积累，通过专业成为专家。投身大飞机事业的25年时间里，杨颖华全面掌握了翼身对接的所有铆装技能，用过硬的技术能力获得“全国技术能手”“上海市杰出技术能手”等殊荣，诠释了什么是“专业精神”。

坚持专注，干一行精一行

做任何一件事情想要成为能手



都不容易，都需要孜孜不倦地努力与付出。飞机制造和装配是一项技术活儿，很考验操作人员的技术功夫，想要成为能工巧匠更是不易。在杨颖华看来，通过专注来提升效率、效益和质量，把有限的资源和精力投入到最重要的事情上，是带领班组打硬仗、打大仗、打胜仗的关键。

杨颖华先后参加过 C909 飞机研制、批产、衍生型改装及各项技术攻关。2017 年，C909 事业部成立，在工作中已经能独当一面的杨颖华担起了 212 工位“领头雁”的重任。要知道 212 工位是飞机装配流程中难度最大、时间最长的一个工位，面对各项工艺难点，要用到各种操作工具。“在 212 工位，需要各种工具都能流畅使用，各项工艺操作都得精准到位。不仅要自己能干好，还要带着队伍一起干好。”这便是那时的杨颖华心中所想。

专注是长期吃苦，要扛得住诱惑、耐得住孤独、承受住焦虑。212 工位是 C909 飞机进入批产阶段后，首个推行节拍化管理的工

位，一切都是摸着石头过河。面对新的挑战，杨颖华便把过往对技能的钻研劲头用在了研究如何抓实计划管理和抓好定人定岗上，下苦功把 212 工位打造成了节拍化生产的样本工位，为后续规模化生产奠定了扎实基础。

作为班组长，杨颖华会根据工位成员的能力和特点定岗定责，并坚持 AB 角工作制，严抓计划节点完成情况，确保在关键时刻不掉链子。“杨师傅很重节点和承诺，说什么时候完成任务就得什么时候完成，时间节点的‘后墙’绝不能倒。但其间如果碰到我们自己解决不了的难题，随时找他，他都很乐意共同研究困难、倾囊相授技术。”一名 212 工位的成员如是说。

从 C909 飞机研制到批产提速，从最初的管理 20 多人到如今的 100 多人，从专注技能到专注管理……杨颖华把全部热情投入到了生产现场，他用精湛的技能 and 扎实的作风感染带动着班组每一位成员。“我不冲在前面，怎么做表率？”“说一百遍，看一百遍，不

如做一遍。”“要把所学所悟都毫无保留地传给徒弟，对工匠技艺的传承没有任何可以懈怠的理由。”这些都是他常挂在嘴边的话，正是严格的纪律性和高效的行动力，让不少新人在杨颖华的班组中得到快速成长，培养出的骨干更在新成立的浦东产线、大场浦东并线等重大型号生产调整过程中冲锋在前。

“比起坐在办公室，我更乐于去生产现场，贴近飞机，接触没有做过的事，接受新事物新挑战，我很享受这个过程，特别有成就感。”对于杨颖华来说，在工作范围内不断攻克新的难题已成为他的习惯。从干成拿下“百年百架”到保障交付海外，再到确保规模化系列化发展，敢挑战、敢冲锋的杨颖华带领专项团队完成了情化系统改装、EWIS（电气线路互联系统）改装等十余项急难险重任务。

### 坚持创新，钻一行专一行

造飞机是一项综合性的复杂工作，在参与急难险重任务专项攻关的过程中，杨颖华还不断学习特设专业和机械专业的知识。“学习其他专业的知识，是为了把自己的专业干得更好。现如今，没有什么比在具体工作中挑战自己、得到

成长突破、从中学到新的知识能让我更加快乐。”在对问题“发现一解决一发现”这个无限循环中，杨颖华获益良多，也得到更多新的感悟，但他始终难忘当年第二任师傅许大山对他的教诲，“要敢啃硬骨头，更要敢于创新。”

多年前，在许师傅的点拨下，杨颖华开始尝试捣鼓一些“小发明”，初衷本是为了方便自己操作，殊不知这些“小发明”推广后不仅能够提升工作效率，还能提高工作质量。“他十分勤奋刻苦，善于将理论知识转化为具体实践，创新能力和动手能力真的很厉害！”谈到杨颖华，现场操作人员纷纷点赞。

从此，尝到甜头的杨颖华便爱上发明创造，在创新这条路上越走越宽敞，不仅已成功获得 3 项实用新型新型专利，还参加多项课题研究。无论是定位工装，还是辅助工具，但凡是能优化改进的，他都会去思考研究。在翼身与中机身进行调姿时，杨颖华在观察到工装激光标靶的方法之后，他灵感突发，想着是不是也能将工装的这套定位方法应用到调姿中，也许能够对原本的物理定位方法实现改进。“灵感来了就要去实践。”杨颖华想到便去做，立即找工艺员沟通这一想法，尝试采用激光这种数字化手段确定测点



位。在杨颖华的努力下，翼身自动化对接系统调姿方法从一个灵感变成了现实，大幅提升了调姿的效率。

为了更好地激发班组成员们的创新意识，提升整体作战能力，杨颖华不仅自己琢磨创新的事儿，也经常鼓励成员们把一些好的想法尝试“变现”，并帮助他们一起分析创新应用的可行性。

收获“上海工匠”荣誉的杨颖华如今再次审视自己，并定下了新的奋斗目标，“要持续加大创新力度，努力突破现有个位数的成果；要梳理工作笔记，总结传承好的工

作经验；要带好队伍，培养更多能工巧匠。”

“工匠精神是一种认真精神、敬业精神。其核心是树立起对职业敬畏、对工作执着、对产品负责的态度，将一丝不苟、精益求精的工匠精神融入每一个环节、挑战每一项难题，造出打动人心的一流飞机产品。”杨颖华在他热爱的大飞机事业中始终坚持专业、专注、创新，像一个不知疲倦的赶路人，不断向着更高的山峰攀登。■

“我不冲在前面，怎么做表率？”“说一百遍，看一百遍，不如做一遍。”“要把所学所悟都毫无保留地传给徒弟，对工匠技艺的传承没有任何可以懈怠的理由。”

# 上海低空经济发展策略研究

文 | 蒋星

2023年底至今,从中央到地方都对发展低空经济提出要求:2023年12月,中央经济工作会议提出“要打造低空经济等战略性新兴产业”;2024年3月,政府工作报告提出“积极打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎”;2024年7月,党的二十届三中全会提出“要深化综合交通运输体系改革,发展通用航空和低空经济”;2024年7月,上海市印发《上海市低空经济产业高质量发展行动方案(2024-2027年)》,对于发展低空经济产业提出要求。当然,不光是上海,全国各省份都在关注这个话题。

低空经济是以各种有人驾驶和无人驾驶航空器的各类低空飞行活动为牵



图 | news.cgtn.com



引,辐射带动相关领域融合发展的综合性经济形态。低空经济具有数字化属性,科技含量高,因此被认为是一种新质生产力的体现。

发展低空经济有几方面意义,第一是它代表新质生产力;第二是它具有招商价值,能带动地方经济,政府期待着它能像新能源车一样蓬勃发展;第三是能够带动基础设施建设投资;第四是发展低空经济实施空中交通管理过程中需要应用诸多技术,比如城市三维地图信息等,这些基础工作能为智慧城市建设打下基础。

## 低空经济核心痛点: 难以盈利

低空经济发展主要面临四方面问题,其中前三个问题存在制约,有待优化,但不是核心痛点。一是要统筹安全与发展的关系,技术要求高,但是符合安全标准一般能获得飞行。中国民航对安全隐患零容忍,对于低空飞行亦有较高的安全准入门槛。2016年国务院办公厅下发了《关于促进通用航空业发展的指导意见》,在政策支持下,近年来传统通航已经在交通、文旅、应急救援等领域应用。

二是低空空域开放程度偏低,

审批难度大,但是日常运营基本能获批。目前我国真高120米以上空域飞行均需审批,程序较为繁琐;但是多家运营企业表示,对于日常运营,提前一天申报飞行计划即可,一般可以及时完成审批。

三是涉及监管单位多,协调难度大,但是一般问题大部分能协调。目前低空经济管理部门不明确,军方、民航、地方政府均有涉及,协调难度较大,为解决运营问题经常需要多方协调,但是对于多数运营企业来说,日常问题经协调大部分可以解决。

第四个问题是核心痛点问题,即运营成本偏高,消费市场小,难以实现盈利。传统通航发展了十年,始终不温不火,成本居高不下,市场反馈不积极。比如,从苏州乘坐直升机飞到浦东机场的票价为每人每次1600块,很少有人愿意买单。某种意义上来说,传统通航目前实际上是伪需求,而票价高的主要原因是飞行器制造成本高,并且难以降低。从松江区月湖公园乘坐直升机沿黄浦江飞至南浦大桥的旅游产品售价为每架次8000元(折合每人每次2000元),部分乘客愿意首次尝鲜,但很少有人二次买单。深圳对美团、顺丰无人机配送的补贴金额高达每单50元至80元,目

前成本不足以支持商业化运营。这些案例都显示出,商业模式问题长期制约传统通航发展,也将继续成为低空经济发展面临的主要挑战。

## 无人机的商业可行性

低空经济相关市场按照航空器主要分为两大类,即无人机(包括消费级无人机和工业级无人机)和通用航空(包括传统通航和eVTOL)。消费级无人机市场最为成熟,大疆占据70%左右的市场份额,其消费对象主要是个人用户。工业级无人机已在多个成熟场景应用,某医疗器械第三方物流企业使用无人机替代卡车运输成本可以下降50%;某农业企业使用无人机播种效率是人作业的20至30倍,并且目前农业招工十分困难,使用无人机替代人工是必然。

传统通航成本较高,最难实现商业化,目前虽在应急救援等领域有所应用,但多为政府采购,市场认可度不高。eVTOL可以大幅降低飞行器成本,只需要1500万左右,而性能相近的传统通航飞行器售价约为5000万,同时eVTOL相较传统通航飞行器可以大幅降低运营成本。但eVTOL目前尚处于研发取证阶段,实现商业运行仍需

较长时间，中国民航局将其视作中国低空经济弯道超车的重要机遇。

### 上海发展低空经济的SWOT分析

上海民航基础较好，带动传统通用航空起步较早，但目前低空经济发展未能在全国领先：通用航空方面，受到运行环境限制，即使总部设在上海的企业，运营都大部分在外地；无人机方面，无论制造、运营方面，深圳均更为领先。但是应该看到，上海在eVTOL发展、特别是eVTOL制造方面仍有机会

走在前列。

上海的优势在制造。一是产业优势，上海拥有商飞、中航工业，以及很多航空产业链上各环节企业，很多人从商飞等企业出来在相关领域创业。二是国际开放优势，上海是中国开放的前沿阵地，与国际接轨程度高，生产制造企业落户上海将拥有辐射全球的资源优势，有利于其产品卖向全球。三是人才优势，很多低空经济相关公司创始人以及公司的核心团队都是上海人，对上海有感情；还有很多行业骨干对低空飞行充满了激情，这是上海这座城市才能孕育的情怀。

上海的劣势在运营。一是城市化程度高，影响场景应用，在高人口密度区域空中运行的安全标准更高，且噪音带来的影响更大。二是土地成本高，低空经济企业需要面积较大的运营场地，但上海土地成本高得多，很多低空经济相关企业总部设在上海，但运营主要在外地。三是政策支持力度有限，相比其他城市热衷于为低空经济企业提供极具吸引力的财税政策，上海的招商选择更加丰富，这对于尚不成气候的低空经济产业不够友好。

上海的机会在eVTOL。一是因为全球范围内eVTOL均处于发展初期，主要产品均尚处于研发取证阶段，实现商业运行仍需较长时间，若积极布局eVTOL，上海有望代表中国实现低空经济全球领先。二是因为eVTOL制造更能发挥上海的大飞机制造优势，eVTOL产业链与大飞机更接近，eVTOL制造企业研发中心设在上海具备优势。

上海的挑战在无人机。一是上海已注册无人机经营企业数量较少，市场活跃度不足，目前深圳在民航系统获得无人机经营许可证的企业数量为4500家，广东省为12000家；而上海仅有500家，长三角地区1500家，华东地区4500家，华东地区数量与深圳相当。二

是电子制造行业主要集中在深圳地区，无人机设计研发与电子行业有高相关性，上海在这方面没有优势。

### 上海发展低空经济的建议

一、立足当下，结合商业可行性发展无人机。

无人机是现阶段发展低空经济的重点，上海的发展策略应当以商业可行性为牵引，快速迭代成熟场景，同时培育新兴场景。

统筹各应用场景相关管理机构，快速迭代已经较为成熟、具备商业可行性的应用场景。无人机在医疗、农业、应急救援、同城物流等领域形成成熟的应用场景，这些应用场景是当下形成规模效应、降低制造和运营成本的最好抓手，而相关管理机构的支持对于复制推广意义重大。

根据应用场景需要，协调解决安全运行、空域开放、统筹协调等政策问题。一是根据本市应用场景需要，协调民航主管部门推动相关机型审定。二是协调民航主管部门适当放松低空空域管制，并搭建地方无人机运营管理平台，承接运营协调职能。

鼓励无人机制造企业与应用场景相关企业共同成长，培育更多



▲ 图 | news.cgtn.com

应用场景。工业级无人机具有非标准性的特点，需要制造企业针对特定场景定制开发，因此通过政策积极引导制造企业与应用场景相关企业密切合作至关重要。

二、布局未来，聚焦生产制造、兼顾运营场景发展eVTOL。

eVTOL能够大幅降低传统通航航空器制造和运营成本，从而有更多机会开发市场，形成新的商业模式。相比国内大部分城市更适合从运营端切入，上海的特点决定了本市应该从制造端切入，优先聚焦生产制造，兼顾培育运营场景。

发挥优势、集聚资源，重点培育eVTOL相关生产制造企业。一方面集中上海财政、税收、土地等政策重点支持eVTOL制造龙头企业在本市发展；另一方面依托现有民航制造资源，发挥商飞、中航工业等产业优势，孵化eVTOL生产制造各环节企业，培育产业链。

协调优化传统通航发展面临的运营困难：引导投资建设通航机场等基础设施，并逐步提升数字化、智能化、信息化水平；建立协调机构，协同民航、军方、地方有关部门成立工作组，提供一站式服务。■

▼ 图 | 峰飞航空



# 航空史上的 12 月

辑录 | 钟强

1910年12月10日，罗马尼亚人亨利·科安达 (Henri Coanda) 在试验发动机时，他的“喷气式飞机”出乎意料地飞了起来。说它是第一架“喷气”飞机，并不是一架真正的装涡轮喷气发动机的飞机，而是具有今天被称为涵道风扇的发动机。在涵道内，风扇向后驱动空气，产生推力，而风扇本身是用50马力的克莱格特发动机驱动的。当时，科安达的动力装置被称为涡轮推进器或涡轮螺旋桨。

1915年12月12日，德国容克斯公司 J-1 (绰号“铁皮驴”)，装载一台梅塞德斯公司120马力 D. II 发动机在德国德骚首次试飞，是第一架全金属悬臂单翼机。

一架全金属悬臂单翼机。

1918年12月1日，苏俄在莫斯科成立中央流体动力研究院。该研究院现在是世界上规模最大的航空科研中心之一。

1935年12月1日，中国“复兴”号运输机正式投产，第一批产量为5架，1936年5月20日第一架首次试飞成功。该机是旧中国唯一一种自行研制并批生产的飞机，由广东韶关飞机修理厂设计制造。

1935年12月1日，世界上第一个空中交通管制中心开始工作，由美国东方航空公司、联合航空公司、美利坚航空公司和环球航空公司的人员共同操作。

1935年12月6日，美国环球航空公司在加州总部开设女乘务员学校，专门培养在空中照顾旅客的女服务员。当时规定，上 DC-2、DC-3 当乘务员的妇女必须是有执照的护士，举止优雅。训练项目包括保持飞机清洁、正确装卸行李、旅客不舒服时提供呕吐袋等。

1939年12月5日，中苏航空公司通航。该公司是中国交通部和苏联中央航空管理局组建的，总部设在中国新疆迪化 (今乌鲁木齐)，有3架 DC-3，主要经营连接中苏两国航空网的航线。1948年合约期满，公司停办。

1944年12月7日，来自54个国家的代表在芝加哥举行会议，起草了《国际民用航空公约》。根据该公约，于1947年正式成立了国际民航组织。

1950年12月19日，中共中央准备成立航空工业局，从东北调段子俊到航空工业部门工作。1950年12月下旬政务院两次召开会议，讨论我国航空工业建设和发展问题。

1957年12月20日，波音707首次试飞，1958年10月26日开始用于跨大西洋航线。

1957年12月10日，中国南昌飞机制造公司以苏联安-2为样本进行仿制的运5双翼多用途轻型活塞

式飞机由陈达礼试飞成功。1958年3月27日，由国务院军工产品定型委员会批准定型并投入批生产，成为新中国自行生产的第一种运输机。

1958年12月4日，民主德国的 Baade 152 VI 原型机首次试飞，该机也称为德累斯顿 152，是战后德国研制的第一架喷气式客机，1956年至1961年期间进行试飞，没有投产。

1970年12月18日，空中客车工业公司成立，包括法国宇航公司 (Aérospatiale)、德国空中客车公司 (Deutsche Airbus)、荷兰福克公司 (Fokker) 和英国霍克·西德利公司 (Hawker Siddeley)，并在法国注册。在贝泰耶的积极推动下，公司将总部设于飞机总装线所在地图卢兹，以便让潜在客户更直观地感受飞机的制造过程。

1970年12月25日，西安飞机设计研究所设计、西安飞机制造厂试制的运7首飞成功。1982年7月30日运7定型并投入批生产。

1975年12月5日，“协和”号超音速客机在英国取得适航证，在法国取证时间是10月9日。

1975年12月26日，一架载有邮件和货物的图-144离开莫斯科多莫杰多沃机场，飞往2982千米之外的哈萨克斯坦阿拉木图，整个航程

用时不到2小时。1977年11月图-144开始客运，但第二年6月因一系列严重的技术问题难以解决而停飞客运航班，1984年8月全部退出航线。

1975年12月29日，由182厂 (现陕西飞机制造公司) 在汉中制造的运8第二架原型机，在汉中城固柳林机场由张玉勤机组驾驶首次试飞成功。

1976年12月22日，苏联第一种宽体客机伊尔-86首次试飞。

1977年12月5日，波音727成为第一个在全球范围载客达10亿人次的喷气机。

1977年12月22日，苏联安-72原型机首次试飞。1979年，巴黎航

展上，安-72原型机首次在国外亮相。它很像“大耳猴”的奇特外形和出色的短距起降性能，引起人们的兴趣。安-72采用了美国用波音YC-14验证的“上表面吹气增压”(USB)技术，成为世界上第一架采用USB的量产型飞机。

1979年12月5日，上海航空电子研究所研制的中国第一代多普勒半自动导航系统经航委批准设计定型。

1981年12月8日，中国运10客机成功完成从上海到北京的转场试飞。首都各军兵种、各部委领导和群众8000多人，兴致勃勃地参观了我国第一架自行设计的大型客机。

▼ 罗马尼亚人科安达展出的全尺寸“喷气”飞机



▼ 苏联安-72原型机



1982 年 12 月 26 日，苏联安东诺夫设计局研制的安 -124 “秃鹰”运输机首次试飞。1992 年 12 月 30 日，安 -124 运输机民用型取得适航证。

1986 年 12 月 14 ~ 23 日，美国人迪克·鲁坦和珍纳·耶格尔驾驶“旅行者”完成世界上第一次中途不着陆、不加油的环球飞行，用 9 天 3 分 44 秒飞行了 40212.139 千米。

1988 年 12 月 21 日，苏联安东诺夫设计局安 -225 “梦幻”飞机在基辅首飞成功。该机是为驮载“暴风雪”号航天飞机而研制的，装有 6 台发动机，最大起飞重量 640 吨，货舱最大载重 250 吨，机身顶部最大载重 200 吨，机身长度 84 米，翼展 88.4 米，是世界上最重、尺寸最大的飞机。

1992 年 12 月 29 日，俄罗斯伊留申设计局研制的伊尔 -96 在俄罗斯国际航空公司投入商业运营。

1993 年 12 月 26 日，西安飞机工业公司研制生产的运 7-200A 支线客机（改进后为“新舟”60）在阎良首飞成功，首席试飞员吕正修，

副驾驶员梁文。

1994 年 12 月 16 日，乌克兰安 -70 运输机首次试飞，该机装载 4 台相向旋转的涡轮风扇发动机。

1999 年 12 月 22 日，中国自行设计建造的亚洲最大的 2.4 米跨声速风洞在中国空气动力研究与发展中心通过国家验收。

2004 年 12 月 9 日，中国年航空旅客运输量首次突破 1 亿人次，成为继美国之后第二个客运量突破 1 亿人次的国家。

2009 年 12 月 3 日，第一架太阳能动力飞机——“阳光脉动”（HB-SIB）首飞，在瑞士苏黎世杜本道夫小镇飞了 350 米，高度 1 米。该机白天黑夜都能飞行，太阳能充电电池能为飞机在夜间飞行提供动力。

2009 年 12 月 15 日，在数次延期之后，波音 787 终于在美国西雅图成功首飞。

2014 年 12 月 22 日，首架空中客车 A350XWB 宽体飞机交付给卡塔尔航空公司。

2018 年 12 月 7 日，联合国下

属的国际民航组织在蒙特利尔决定，将每年的 12 月 7 日作为“国际民航日”（ICAD）。

2018 年 12 月 17 日，美国湾流宇航公司 G650ER 用 11 小时 2 分钟从新泽西州泰特伯勒飞到迪拜，创造了世界速度纪录。这次飞行的距离为 6142 海里，平均速度为 0.90 马赫，比之前的纪录快出 1 小时 48 分钟。

2019 年 12 月 12 日，巴航工业首架 E175E2 在位于巴西圣若泽杜斯坎普斯的生产基地成功实现首飞。

2021 年 12 月 16 日，空客最后一架 A380/MSN272 交付给了阿联酋航空，这是空客制造的第 251 架 A380，也是阿联酋航空机队中的第 123 架 A380。

2021 年 12 月 17 日，空客公司最后一架 A321ceo (N129DN) 交付达美航空，A320ceo 系列 30 多年的生产史画上句号。

2022 年 12 月 6 日，第 1574 架、也是最后一架 747——工厂编号为 67150 的 747-8F 在华盛顿州埃弗雷特工厂推出，747 半个多世纪的生产结束。

2022 年 12 月 9 日，中国商飞在上海浦东向启动用户中国东方航空交付了注册号为 B-919A 的 C919，采用东航标准涂装，并在机身两侧涂有“全球首架”的专属标志。

2022 年 12 月 23 日，新疆首个高原机场——塔什库尔干红其拉甫机场正式投运。红其拉甫机场标高 3258.4 米，设有 4 个 C 类停机位，跑道长 3800 米，可满足年旅客吞吐量 16 万人次、货邮吞吐量 400 吨、年飞行起降 1900 架次的需求。■

## 冯如笑对偏见 华商扩股支持 ——《翱翔云端的风筝》（摘编六）

文 | 胡海林



试飞失败的消息还是不胫而走，连《奥克兰晨报》都刊登了一则小消息，语带讽刺说：

一群华人躲在市南郊的匹满高地上的伍·吉·典农场，试图研造目前流行欧美的最高端工业科学产品——飞机，结果以失败告终。据说，领导者是一个自制过抽水机、打桩机和无线电收发报机的华人青年冯珠九。有意思的是他以为能做抽水机、打桩机，装配无线电收发报机，就能造飞机。结果经过两年努力，被撞得头破血流，白日梦想被碾得粉碎，最终以消耗光他在中国的父亲的财富而收场。

看到这则消息，冯如哭笑不

得。朱竹泉与司徒恩拿着报纸要去报社讨说法，被冯如拖住，说道：“你们还不嫌事大，人家说得没有错，造了两年，就是没有飞起来嘛！”站在旁边的吴英南筐箕着双手，一脸万分气恼和无奈的表情。黄杞说：“这是小报，又是英文报纸。碍不着我们多大事，或许还是好事呢！”

黄杞的话让几个人的精神劲头上来了，吴英南问：“阿杞，怎么还会是好事呢？”

黄杞分析道：“张南不是专门到致公堂去问过洪魁，就是芒森与那个什么墨菲非要报复冯如，非要搞破坏吗？现在知道阿如的飞机试飞失败了，他们高兴一阵后，也就把阿如造飞机的事忘了。”

几个人点头称是，觉得有道理。黄杞告诉冯如：“无线电收发报机购销合同已经跟致公堂签署了。增加一台备用，所以签了六台，预付款百分之四十。那个发明真空三极管的德福雷斯特，也在帕洛阿托小镇找到了。他的专利全部授权给了洛杉矶一家公司生产销售，给了我们联系方式，我想最近与朱竹泉去一趟洛杉矶，把它采购回来。其余的配件还是让居伊从纽约发过来。”

冯如说：“经过大半个月的研究，跟竹泉一起，验算过关键数据。我决定对飞机结构做大的调整，操纵位置索性改为坐式，把机翼面积扩大，机翼弯度比提升到一比二十四至一比三十间。前向安装的双面升降舵面积也相应提高，再安装两只固定的垂直安定面，用以抵消翼尖翘曲时出现的摆动。”

“为什么要这么改？”黄杞问道。

冯如说道：“我受布雷里奥的启发，他的雅号叫‘蜻蜓’的单翼机，最初设计飞行四十公里距离，已经很厉害。可他在去年 6 月又重新改型，把机翼改小，机身后段上部升降舵之前又增加了一个固定的水平尾翼，相当精巧，飞行路程与时间都增长了一到两倍。”

“可你是要扩大机翼面积呀？”黄杞说道。

冯如笑道：“是啊！我们与布雷里奥恰好技术路径相反，我们跟莱特兄弟的飞机相近，都是鸭式布局的双翼飞机，结构大体相同又有区别。他的动力装置是台十二马力的汽油发动机，可机长达六点五米，翼面积四十七平

▼ A350XWB 宽体飞机



方米，远比我们的飞机大。我们还增加了上下翼的支柱，尾撑杆与他们也完全不同。从空气动力学来说，莱特兄弟的飞机有弊端，翼尖翘曲操纵方式不稳定，所以他们A型飞机就改进了。我们安装两只固定的垂直安定面，目的就是改变翼尖的翘曲。”

冯如接着说：“黄叔，这些改动比我预想的大得多，我原来想在6月间试飞，现在看来要推迟两个月。我很有把握，试飞时让孙小姐，还有《旧金山考察家报》与《旧金山星期日呼声报》的欧文斯、乔治一起来见证。”

“还让洋人来采访见证？”吴英南吃惊地问道。

冯如说道：“这两人是有正义感的职业记者，他们是站在公正、客观事实上进行新闻报道的记者。以前几次对我的报道都帮助很大，我信任他们，就跟我相信尼里一样。我坚信他们能理性看待我们研造飞机，并客观报道出来！”

吴英南不吭声了，黄杞说：“就按阿如的意见办吧。竹泉，我们马上去洛杉矶。”

朱竹泉站起身，跟着黄杞走了。

冯如带着经过反复计算重新修改的图纸，再度出征匹满高地

的伍·吉·典农场。这一次他内心充满自信，感觉自己的思维像刀子一样清晰锋利，对每个细节都有了聚焦解剖，并加以丰富和完善了。

张南、谭耀能、朱兆槐和司徒恩都按时集结到了工屋，开始重新制作部分构件。尼里从家里特意赶过来，最近这段时间，尼里因母亲身体不好，住院治疗，要忙着去医院照顾时玛女士，西娅又怀孕第三胎了，有很长时间没有到东九街359号。这次听说飞机的改设重制已经定案，准备再次试飞，挤时间直接上匹满高地来看。

冯如右手托着左臂，左手的手指和拇指撑住两颊，正望着再次搭齐的机体纵轴、横轴的构件沉思。尼里悄悄走过来，站到冯如身边，轻声问道：“怎么样？”

冯如兴奋地握住尼里的手，说：“我深刻体会到我们中国一句谚语，磨刀不误砍柴工。意思是准备工作不怕花时间，而要充分细致。这句话太有道理了！上次急了一点，经过这小半年的细致工作，对方案作了修正，有效吸收了当今航空的研究成果。你看，我的翼面扩大，机翼弯度比提升了，双面升降舵面、固定垂

直安定面都有了变化。稳定性绝对良好！”

看了眼自信满满的冯如，尼里便围着装配好的机体架，拼接好了的机翼、尾舵、螺旋桨逐一仔细地看了一遍。发现每条经络都蕴含着独具匠心、天工造化的秘密，除了机身本身的复杂外，单是机体上大量支柱、撑杆和张线，就足以让人眼花缭乱，叹为观止。

尼里点着头，感叹地对冯如说：“今天我跟你透个底，当年我们去伦斯勒理工学院见罗伯特教授时，他私底下让我劝你不要搞飞机，他不相信你有这样的智慧与能力，可我相信你有这样的智慧与能力，更重要的是你有这样的决心和意志。历史上，中国人的科学发明曾走在世界的前列，这证明中国人能搞成跟我们西方人一样的东西！”

“谢谢！尼里，你的友谊一直是我的信心来源之一。”冯如感动地再次紧握着尼里的手，“你对我的信任与支持，太重要了。”

朱兆槐走过来说：“师傅，欧文斯与乔治下午到，孙小姐身体有恙来不了。我在奥克兰市内订辆马车到轮渡码头去接他们吧！”

冯如说：“你定吧！”

冯如向尼里解释：“《旧金山考察家报》的欧文斯、《旧金山星期日呼声报》的乔治，两位记者一直要求采访。我同意并邀请他们来看看，希望通过他们的报道来纠正一些谣传。而且他们对航空飞行非常有兴趣，一直跟踪报道这方面的新闻。因此，他们掌握全美甚至全世界的航空发展动态。”冯如接着说，“下午，你也一起跟他们谈谈吧。”

尼里摆摆手，说：“我还要去医院照顾母亲，还要陪西娅产检。试飞的那日我一定会来这儿，在匹满高地见证你的伟大的高光时刻！”

冯如握着尼里的手表达歉意，没有去看望他母亲时玛女士，等试飞结束后一定第一时间去探望。尼里走出工屋，又转身回来对冯如说：“除了请新闻界朋友来外，最好邀请美国航空协会加州分会的人士来参加见证。这方面我们要向寇蒂斯学习。”

冯如点头说：“是的，我有这样的想法，只怕是人家不肯来。看看欧文斯他们能否办得到。”

尼里走了不久，朱兆槐带着欧文斯与乔治两人，坐着马车就到了伍·吉·典农场。

两人走进工屋时，冯如和张南、司徒恩在机体上忙着安装发动机。朱兆槐跑上前告诉冯如，冯如连忙停下手里的活，过来与欧文斯、乔治握手。

欧文斯与乔治虽然写了很多飞机的报道，也现场观摩了莱特兄弟飞机的空中飞行表演，但真正近距离站在飞机旁观看，还是第一次。两人围着飞机转了好几圈，越看越对冯如肃然起敬。朱兆槐搬来两条板凳，端来两杯茶水放在木箱上。三个人就坐在飞机旁的木箱边交流起来。乔治先说今年以来世界航空发展的动态：

法国人布莱里奥，在大雾中成功地飞越了英吉利海峡。两个多月前，法国兰斯举行了第一届国际航空飞行展。短短几天，创造了多项飞行纪录，法尔曼飞行的滞空时间纪录，安东尼特的升限高度纪录，寇蒂斯的飞行时速纪录。冯如首先感谢他们提供了不少当今世界航空发展动态，给了自己很多启发与信心，接着介绍了自己飞机的设计与制作过程，准备试飞的大致时间，并邀请他们来现场见证。

欧文斯首先提问：“刚提到法国航空展，寇蒂斯以他新设计制造的名叫‘金色飞行者’的飞机，

以他的时速证明了他的飞机性能优良，超越许多同行，获得法国飞行大奖并得到奖金。可刚回纽约，也就是上个月，莱特兄弟向纽约法院指控寇蒂斯的‘金色飞行者’侵犯了他们1906年申请的‘飞行中控制飞机的创新机制’专利权。同时，莱特兄弟还指控了几个法国、英国飞行家，有人开玩笑说：‘只要有人跳到空中挥挥手臂，莱特兄弟就会把他告上法庭。’我想问的是，如果你的飞机有侵犯他们的专利权，你不怕他们控告你？作为华人，在美国法庭上肯定是处于不利地位。”

冯如坦然地笑了笑，说道：“莱特兄弟是我的偶像，我曾专程到代顿去拜访过他们，虽然没有见到他们，但我仍然十分崇拜他们。他们和以前众多的航空先驱者不同，莱特兄弟有丰富的机械设计经验，动手能力很强。他们的飞机研制是循序渐进地进行，结合了自己对空气动力学的认知。他们把理论、设计和试验完美地结合起来，最终取得了成功。我也是向他们学习这种方法，总结前人经验，力图体现自我的特性。”说到这儿，冯如起身指着飞机的机体、机翼与起落架说道，“比如，我的飞机的主要部件配置和接驳工艺，都与莱特

兄弟的飞机有巨大区别，特别是起落架，是一种全新的设计。而且我的翼面扩大，机翼弯度比提升了，增加了双面升降舵面、固定垂直安定面。完全与莱特兄弟的飞机不一样，仅仅在外形上，都是鸭式布局而已。”

乔治说道：“你的意思这架飞机超过了莱特兄弟的飞机？”

“不，不。”冯如连连摆手否认，说道，“不能这么说！我这仅是指五年前莱特兄弟申请专利的‘飞行者一号’，它的飞行是人类历史上第一次有动力、可操纵的持续飞行，是划时代、开创性的。他们如今飞得更好了，连战争部都订购他们的B型飞机。”

冯如接着强调道：“之所以我的飞机研造时间拉得这么长，就是我非常重视创新，技术上必须与众不同。身为华人，我时刻明白自己所处的环境与条件！”

乔治说道：“我还有一个问题，之前的采访曾问过你，你研造飞机的经费从何而来？制造飞机耗资巨大，而且失败的概率很大，这意味

着投资风险极大，很可能无法收回。不知冯先生得到了谁的资助？我听说你的父亲，是中国的富商。是他资助你研造飞机？”

冯如哈哈笑了起来，说道：“亲爱的乔治、欧文斯，这正是我要你们帮助澄清的事实。我父亲是个贫困农民，偶尔做点挑担叫卖的小本生意，赚的钱不够养家糊口。至于造飞机的钱从哪儿来？”冯如站起身，指着正忙着干活的张南、谭耀能、朱兆槐与司徒恩，说道：“是他们与我共同出钱，从嘴里抠省出每个美分。”

这时关秋生提着烧开水的水壶蹒跚走来，给大家的茶杯续水。冯如说：“这是我的关伯，他是这个农场的农民，也是我的股东。明白吧？我研造飞机的钱，来自他们，我的旅美华侨同胞！他们都非常爱自己的祖国，只要做对祖国有益的事，他们就不惜代价来支持！”

冯如的回答让欧文斯、乔治面面相觑，好像理解，又好像不理解。乔治向冯如欠了欠身，对冯如说：“请允许我最后再提一个问题，

就在一个多月前，我们报纸登了法国人勒费尔驾驶飞机失事的消息，驾驶飞机试飞是极危险的，难道您不担心自己的安危吗？”

冯如接过话头，马上说道：“人们把飞行比作惊险绝伦的杂技，就说明了它的危险性。当年塞缪利·兰利博士首次驾驶‘空中旅行者’试飞，连人带机倒栽到河里；一个月后再试，飞机弹射后遇到一股阵风，机尾折断，飞机再次掉入水中。去年这时，奥维尔·莱特发生坠毁事故，他自己身负重伤，乘客塞夫利奇中尉摔死。所以，飞行者是刀锋上的舞者，一个献身飞行事业的人是要有牺牲准备的。”

冯如笑了笑，又补上一句道：“科学进步必定要付出代价，包括付出生命的代价！”

乔治会意地笑了，他蓝幽幽的眼睛里充满了对冯如的敬佩。

黄杞与朱竹泉从洛杉矶回来，直接来了伍·吉·典农场，而且刘一枝也来了。

大家就在农场简单吃了点关秋生做的晚饭，商量着准备试飞的事项及即将筹资扩展普通股，还有为致公堂生产交付无线电收发报机等事项。

朱兆槐被吴英南叫去东九街，取来一卷报纸给冯如。是欧文斯与乔治写的报道，已经刊登在《旧金

山考察家报》上。欧文斯特意把报纸邮寄到了东九街359号，还附了一张纸条。

黄杞迫不及待拿了报纸翻开，找到《中国人准备飞行》标题，便在马灯照耀下读了起来。冯如看了眼随报纸带来的纸条，递给刘一枝。纸条上写着：尊敬的冯如先生，很遗憾告诉你，乔治联系了加州航空协会的人。他们根本不相信华人能够自制飞机并飞行成功，拒绝来现场验证。我们建议你们及时联系奥克兰的工业协会或旅游体育协会的人来验证。

黄杞看完报纸的文章，又从刘一枝手里拿过纸条看了一眼，骂道：“这帮鬼佬就是狗眼看人低！我家的槽仔送打桩机到旧金山使命湾白人住宅区的基建地区，与鬼佬聊天，问我为什么不去修理机器，槽仔说我忙着跟他阿如叔在一起研造飞机，鬼佬居然讽刺说我跟阿如是中国道士，是在山顶云雾中打坐冥想，施魔法，变出假飞机来哄人开心！”说到这里，黄杞自己都不由得好笑起来，重复说道：“居然说我们是道士，会施魔法！”

冯如也忍俊不禁，笑道：“那我们就施魔法给他们看看。”

众人跟着笑过之后，刘一枝说：“我建议就不找奥克兰的协会来现场。有两个白人记者来就足够了。

何况他们都是旧金山的大报，也是阿如的朋友。等试飞成功了，我们就到奥克兰市中心的广场上空，看他们认可不认可。”

冯如同意，黄杞、朱竹泉等人也纷纷赞同。

说到具体试飞日期，黄杞说道：“梓材兄在洛杉矶交代我，一定要到庙里去问道抽签，占卦而定黄道吉日吉时。他也一定赶来现场助威。”

这个建议没有任何人有异议，冯如提议由刘一枝、黄杞和张南前往庙宇祭拜求卦，择定吉时。张南说：“阿如，是你开机试飞，你应该去！”

冯如掏出挂在脖子上的霹雳宝铁护身符，笑道：“我老婆早就在恩平的护恩寺代我焚香拜祭求了护佑平安。”黄杞想拿过去看，冯如赶紧把护身符塞回内衣中，扭身躲开，引得众人一阵笑声。

朱竹泉上前建议道：“师傅，要不还是我来先试飞。万一有个什么事，我还有闺女。”司徒恩走到冯如身边，说：“我家兄弟多，要不我来试飞。”

冯如气恼地说：“这事我不是反复跟你们说过吗？不容讨论！飞机是我设计，每颗螺丝、每个眼嵌扣、每根撑木、每根张线，我都熟悉了解它。只有我来试飞！前几天，

我对欧文斯与乔治就说过：飞行者是刀锋上的舞者，一个献身飞行事业的人是要有牺牲准备的。”

冯如一番话，让众人默不作声，不再提了。

刘一枝又说：“记得去年7月间，也是在伍·吉·典农场，我们开会定下飞机试飞后的发展策略。经过阿如与大家的努力，现在差不多水到渠成。大家可以提一提建议。”

黄杞说：“这事，我与竹泉在洛杉矶也跟梓材商议过。他已经在洛杉矶的唐人街华商中筹得普通股一千二百四十股，竹泉也跑了两天他熟悉的华商，也约定了七百多股。如果试飞的消息传出去，我想比原先的预定五千股数只会多，不会少。”

冯如兴奋说道：“太好了，就因为资金紧张，没钱买工具，要不然我们的飞机早就做出来了。”张南也说：“东九街359号的房租欠了快一年了，人家正追讨呢！有些材料还是赊账来的，要还了。”

冯如接着说：“我想第二架飞机，要造大马力，用钢管做纵轴、横轴，我们先在美国进行表演，到法国去参加飞行大赛，通过这些方式积累一些资金，再进行商业合作，然后回国造飞机。”■

“所以，飞行者是刀锋上的舞者，一个献身飞行事业的人是要有牺牲准备的。”冯如笑了笑，又补上一句话，说道：“科学进步必定要付出代价，包括付出生命的代价！”



图 | 纪巧珠