

超声速民机动力发展分析

Analysis of Engines for Supersonic Airliners

■ 韩玉琪 / 中国航发研究院

超声速民用飞机对于跨洋航线等长距离、长航时航线具有显著优势，是未来民机发展的重要方向。近年来，随着包括动力在内的航空技术水平的提升，传统的制约民用超声速飞行发展的因素逐渐消除，超声速民机再次成为全球航空业的研究热点。

超 声速飞行并非新鲜事物，早在1947年便首次实现。20世纪70年代，“协和”号和图-144等第一代超声速民机投入运营，美国、日本和欧洲等国家和地区为抢占世界民机技术发展的制高点，始终在积极开展技术预研。随着包括动力在内的航空技术水平的提升，近期有众多商业公司，尤其是初创公司，推出了超声速民机产品规划。纵观超声速民机的发展历程，始终受制于高空空气污染、机场附近噪声和巡航声爆等诸多难题，而动力装置的发展无疑是解决上述难题的关键。



“协和”号（左）与图-144飞机

总体情况

早期发展

英法合作研制的“协和”号飞机于1976年服役，依靠政府补贴勉强维持商业运营至2003年。“协和”号飞机巡航速度为马赫数 (Ma) 2.02，配备了4台奥林帕斯 (Olympus) 593 MK610涡喷发动机，单台推力169.32kN。苏联研制的图-144飞机1975年服役，1984年全部退出商业航线飞行，其中载客运营仅半年时间，巡航速度为 Ma 2.2，配备了4台NK-144涡扇发动机，单台推力

196.2kN，或4台RD-36-51涡喷发动机，单台推力200kN。这两者运营中均存在油耗高、航程短、载客少、使用成本昂贵、起降噪声大和声爆问题严重等缺陷，而上述缺陷大多可归结为存在“动力不适”的问题。

各国掀起研发热潮

美国从未停止过超声速民机相关技术的研究，美国国家航空航天局 (NASA) 的“N+3”计划 (2008—2035年) 提出了“三步走”策略，即按照声爆水平、机场噪声、巡航速度、污染物排放、航程、载容量

和油耗等牵引指标从小到大、从易到难，分为3个阶段开展技术攻关，以确保所有技术在2035年达到技术成熟度6级。

俄罗斯仍在开展新型超声速公务机/小型客机的相关研究，过程中非常重视改善环保性，采用了一系列先进技术以满足相关国家的适航标准。同时，俄罗斯也没有放弃由军机改型发展超声速民机的做法，研究在图-22M、图-160轰炸机基础上衍生发展超声速公务机的可行性，俄罗斯的新一代超声速公务机/小型

客机有望在10年后陆续面世。

欧洲在航空领域保持着技术创新的传统，对超声速/高超声速飞机始终予以高度重视。欧洲航天局（ESA）自2005年起实施长期先进推进概念与技术（LAPCAT）计划，第一阶段开展巡航速度为 $Ma4.5$ 、 $Ma5$ 和 $Ma8$ 的3种概念飞行器研究，第二阶段开展载客量300人、巡航速度分别为 $Ma5$ 和 $Ma8$ 的两种飞行器的后续研究。

日本多年来致力于新一代超声速民机技术的研发。日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）在1997—2006年主导实施了国家超声速运输机试验（NEXST）计划，随后又开展了后续的静音超声速技术论证（S3TD）计划，对相关技术进行研究验证，使飞行器具备低声爆、低噪声、低排放和超声速巡航飞行能力。在此基础上，JAXA提出了一种高升阻比、低噪声、巡航速度 $Ma2$ 以上、载客200~300人、航程11000km的超声速民机方案。与“协和”号飞机相比，该方案声爆强度降低50%、噪声降至1/10、氮氧化物排放降至1/4，且运营票价仅相当于波音747飞机的1.3倍。

商业公司推出系列产品规划

各商业公司的产品规划主要针对 $Ma2$ 级别（ $Ma1.4 \sim 2$ ）和 $Ma5$ 级别的民机， $Ma2$ 级别的民机计划于2025—2030年投放市场， $Ma5$ 级别的民机计划于2030—2050年投放市场。美国博姆（Boom）公司提出的“序曲”（Overture）飞机巡航速度为 $Ma1.7$ ，计划2029年进入市场。美国斯派克（Spike）公司提出的S-512飞机巡航速度为 $Ma1.6$ ，计划2025年实现交付。美国Exosonic公司提

出了静音超声速客机概念，巡航速度为 $Ma1.8$ ，计划2029年飞机通过认证。俄罗斯图波列夫公司提出的超声速公务机巡航速度为 $Ma2$ ，计划2026年完成详细设计。美国赫尔墨斯（Hermeus）公司2019年公布了 $Ma5$ 级高超声速民用飞机，初步目标是在2030年前投入商业运营。波音公司2018年提出了 $Ma5$ 级别的民用客机，投入运营的时间点大概是2040年。

超声速民机对动力装置的需求

超声速民机对动力装置的要求为“四低一高”：低声爆、低噪声、低排放、低油耗和超声速巡航高推力。

感觉声压级75dB是陆地上空超声速飞行的可接受声爆水平，“协和”号飞机超声速飞行时的地面声爆高达108dB，因而被多个国家禁止在陆地上空进行超声速飞行，而目前国际先进的超声速民机的声爆水平为80~85dB。

大涵道比涡扇发动机是当前亚声速民机的主流动力，但其无法用于超声速飞行。小涵道比涡扇发动机和涡喷发动机可用于超声速飞行，但因排气速度较高导致起降阶段噪声较大，亚声速时耗油率高、污染物排放量大，不是理想的超声速飞行动力。同时，为实现超声速巡航的经济性，新一代超声速民机动力需要在满足低声爆、低噪声、低排放、低油耗的同时，具备大推力以实现无加力超声速巡航。

对于 $Ma2$ 级别的民机，为了兼顾起降时的低排气速度、亚声速巡航时的低耗油率、超声速巡航的大推力等矛盾需求，适合采用变循环

发动机（VCE）。对于 $Ma5$ 级别的民机，结合传统燃气涡轮发动机和冲压发动机各自的高效率工作范围，适合以两者为基础形成涡轮基组合循环（TBCC）发动机。

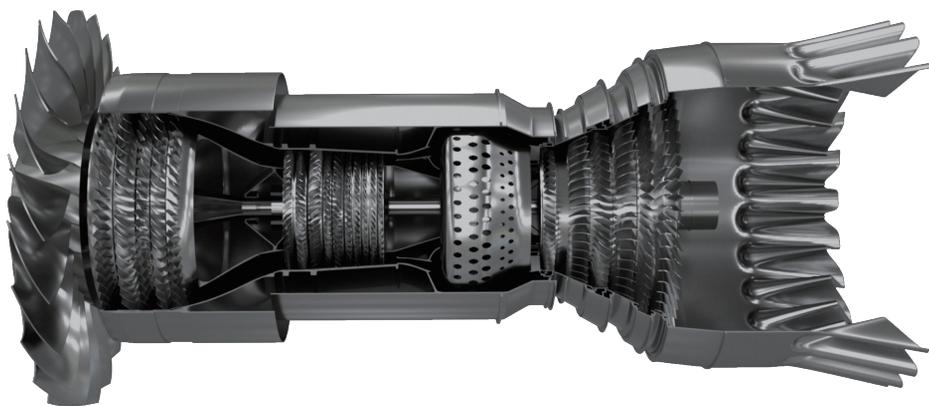
超声速飞机的军民两用特征

超声速民机及其动力稍做改动后即可用于军用运输、侦察监视和信息对抗等任务，提升作战支援保障能力。赫尔墨斯公司与美国空军合作开展快速评估 $Ma5$ 飞机的改装以实现军事用途，该公司于2021年7月获得美国空军授出的为期3年的6000万美元科研合同，要求完成一型涡轮基冲压组合发动机的飞行验证和3架“夸特马”（Quarterhorse）高超声速飞行验证机的研制试飞等工作，这是美国空军近十余年以来首个高超声速飞行验证机研制项目，也是美国航空业正式获得军方投资开展的高超声速飞行验证机研制项目。

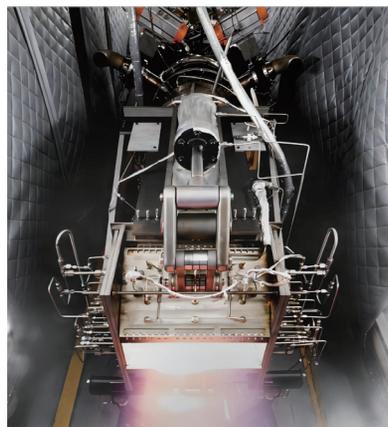
近期进展

NASA的X-59飞机

NASA和洛克希德-马丁（洛马）公司合作设计、开发、制造和飞行测试X-59静音超声速技术（Quesst）验证机，旨在收集超声速噪声信号的数据，可用于对地面超声速飞行禁令的重新评估。X-59飞机的巡航高度为16800m，巡航速度为 $Ma1.4$ ；动力装置为1台F414-GE-100涡扇发动机，推力为98kN。2022年，X-59飞机进行了缩比模型低速风洞测试，确认了飞控数据；2022年11月，F414-GE-100发动机被安装在X-59上，表明X-59即将完成整机组装，经过一系列地面试验，将于2023年首飞；在声学验证



“交响乐”发动机



“奇美拉”发动机完成模态转换试验

试验之后，将于2025年左右开始数据收集飞行，目标是及时将数据提交给国际民航组织（ICAO），随后ICAO将审议超声速标准。

博姆的“序曲”飞机

2022年1月，博姆公司开始测试为其XB-1超声速验证机提供动力的J85涡喷发动机，XB-1地面测试将验证所有飞机系统的功能，并确定每个系统是否符合或超过技术指标。2022年12月，博姆公司与克雷托斯（Kratos）公司合作，为其“序曲”超声速飞机研发发动机“交响乐”（Symphony）。“序曲”飞机配装4台发动机，搭载65~88名乘客，巡航速度 $Ma1.7$ ，航程7871km，能将跨大西洋飞行时间缩短至3.5h。预计首架“序曲”飞机将于2026年出厂，次年开始试飞，目标是在2029年获得认证。“交响乐”是一型双转子中等涵道比涡扇发动机，设计特点包括：轴对称超声速进气道、低噪声设计的单级风扇、被动冷却的高压涡轮、无加力燃烧室、可变几何形状的低噪声喷管。

赫尔墨斯的系列飞机

2022年6月，赫尔墨斯公司宣

布，已完成首架高超声速飞机“夸特马”的TBCC发动机“奇美拉”（Chimera）的地面试验，验证了该发动机可在地面上实现全状态运行。2022年11月，赫尔墨斯公司完成“奇美拉”发动机的模态转换试验：在低速时，“奇美拉”处于涡喷发动机（采用的J85）模式；当速度达到 $Ma2$ 时，“奇美拉”的预冷器可降低来流温度以提高涡喷发动机性能；当速度达到约 $Ma3$ 时，切换到冲压发动机模式。按计划，赫尔墨斯公司将在2023年对“夸特马”进行首飞。同时，赫尔墨斯公司正在加速开发下一代“黑马”（Darkhorse）高超声速无人机，“黑马”将采用TBCC发动机“奇美拉”II。2022年12月，赫尔墨斯公司宣布采用普惠F100涡扇发动机作为“奇美拉”II的涡轮部分，这将为赫尔墨斯公司节省数十亿美元的研发成本和数年的研发时间。2023年3月，赫尔墨斯公司确定了F100发动机的基准性能，在此基础上，对“奇美拉”II发动机的进气道、涵道系统、预冷器、冲压燃烧室和排气喷管等部件进行了改造。F100能够将飞机从静止状态加速到

$Ma2.8$ ，然后过渡到冲压模态，进而将飞机加速至 $Ma5$ 的目标速度。赫尔墨斯公司计划在2024年进行“奇美拉”II发动机测试。基于“黑马”平台开发、飞行试验、适航和运营经验，可为赫尔墨斯公司开发的商用20座、 $Ma5$ 级高超声速客机“翡翠鸟”（Halcyon）提供参考。

结束语

超声速民机可持续牵引先进航空技术研发，是世界民机技术发展的制高点。同时，有预测认为，新一代超声速民机有望在2025—2030年投入商业客运，将极大改变商用航空规则，超前布局新一代低噪声、经济、安全、高效的绿色超声速民机动力十分必要。

航空动力

（韩玉琪，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报与战略论证研究）

参考文献

- [1] 付玉,任耀."序曲"超声速客机前景不明[J].航空动力,2022(5):2.
- [2] 李茜.2022高超声速技术进展[J].航空动力,2023(1):4.