

# 低声爆飞行验证机项目概述

## Low-Boom Flight Demonstrator Project Overview

■ 付玉 / 中国航发研究院

美国低声爆飞行验证机（LBFD）项目旨在降低超声速飞行带来的噪声困扰，并为超声速陆上飞行的适航标准制定提供依据。近年来，该项目取得了稳步进展，有望开启一个全新的商业飞行时代。

较强的声爆会给地面带来巨大的伤害，超声速客机在陆地上空的飞行一直面临着严重的法律障碍，如何削弱超声速飞机巡航时的声爆强度，从而使其满足适航要求，一直是超声速客机研发所面临的重要难题。在此背景下，美国国家航空航天局（NASA）的低声爆飞行验证机（LBFD）项目应运而生。该项目的总体目标是通过一架验证机——即X-59静音超声速技术（QueSST）验证机，来测试和验证降低声爆技术，确保飞机在巡航飞行期间的可感噪声不超过75dB，并建立一个地面社区对超声速飞行的反应数据库，为美国联邦航空局（FAA）和国际民航组织（ICAO）在2025年制定超声速飞行噪声标准提供参考和依据。2017年，NASA启动新航空地平线（NAH）计划，打算在未来10年内设计建造一系列飞行验证机——即X系列飞机（X-Planes），来加速先进绿色航空技术的应用。2018年10月30日，LBFD项目成功达到关键决策点（KDP），正式获准进入研制阶段。

### 项目目标与分工

在低声爆飞行验证机项目下，将制造X-59验证机，并证明其虽然会制造声波“重击”但并不会形成恼人的声爆，以便为民用超声速陆上飞行铺平



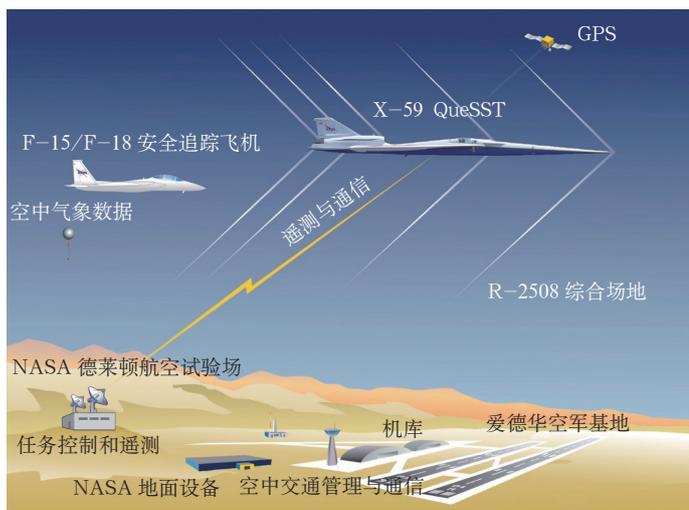
兰利研究中心	系统工程、配置评估、研究数据、飞行系统、项目管理、社区响应测试
克利夫兰格伦研究中心	X-59构型，推进性能
埃姆斯研究中心	X-59配置，系统工程
阿姆斯特朗飞行研究中心	X-59的适航性、安全和任务保证、飞行/地面操作、飞行系统、系统工程、项目管理、社区响应测试

X-59验证机及其项目分工

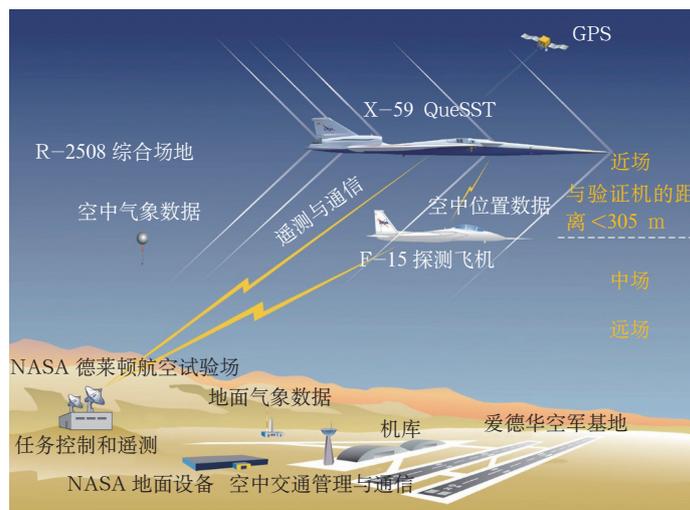
道路。项目的具体技术目标如下：设计、制造并测试一架具有低声爆特性的验证机，并证明该特性能为社区所接受，可应用到未来的民用超声速客机；证明X-59 QueSST能够产生一系列可预测的声爆信号，该信号将有助于低声爆设计工具的验证，并提高人们对大气中的低声爆信号影响的理解和预测；交付能够成功飞行的X-59 QueSST，以收集社区响应数据，帮助监管机构制定基于噪声影响的民用超

声速陆上飞行标准。

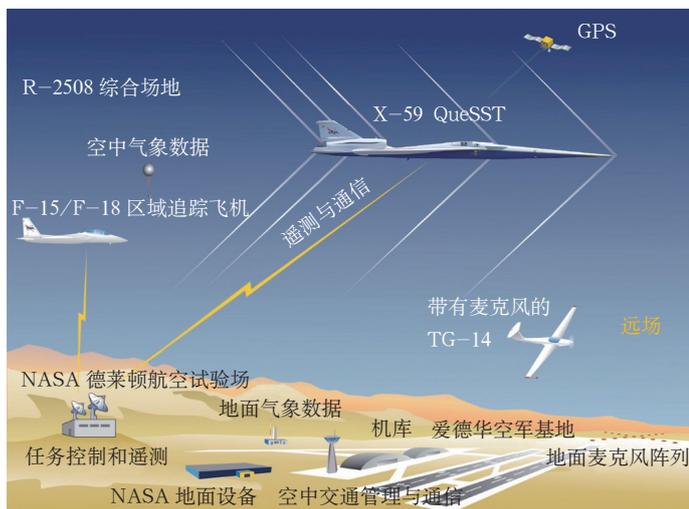
低声爆飞行验证机项目主要在NASA的先进飞行器计划（AAVP）和综合航空系统计划（IASP）中组织进行，并由一个系统项目办公室管理。该办公室的成员跨越两个计划，来自NASA的弗吉尼亚州的兰利研究中心、俄亥俄州的格伦研究中心、加利福尼亚州的埃姆斯研究中心和阿姆斯特朗飞行研究中心等4个航空研究中心。



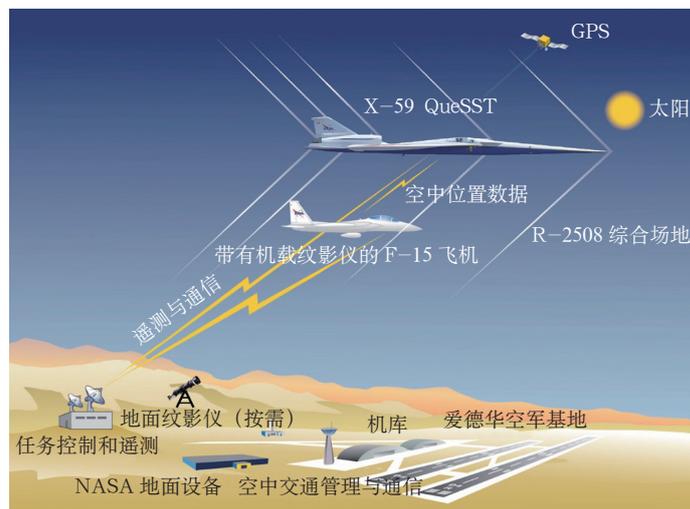
第一阶段——包线扩展



2A阶段声学性能验证——近场和中场测试



2B阶段声学性能验证——远场和地面测试



2C阶段声学性能验证——纹影成像

## 项目阶段划分

根据NASA的计划，该项目主要分为4个阶段进行。

第一阶段（2018—2022年）主要进行飞行器的开发。在这个阶段，X-59验证机将通过一系列的飞行活动以测试其性能，这些飞行“扩展”了它的操作范围，通过一种“先爬后跑”的方法，从亚声速飞行逐渐过渡到最终的超声速飞行。该阶段也被称为包线扩展阶段，将在加利福尼亚州爱德华空军基地的R-2508综合大楼内进行。当这些飞行测试

成功后，NASA将正式从洛克希德-马丁（洛马）公司接收飞机。

第二阶段（2022—2023年春季）将会在不同飞行条件和大气条件下对X-59验证机的近场、中场、远场和地面的表现进行声学性能验证测试，以检验该机所采用的低声爆技术的有效性，并掌握该机声爆的基本特征。第二阶段主要分3个步骤进行：2A阶段进行近场和中场的飞行测试，主要收集X-59产生的声波冲击样本，并验证其是否与预测相符；2B阶段主要进行远场和地面数据测量，在地面

传感器和麦克风阵列进行地面数据收集，远场飞行使用TG-14进行数据收集；2C阶段将在阳光照射背景下采用纹影成像（schlieren imaging）技术，通过另一架飞机对处于超声速飞行状态的X-59进行跟踪拍照，以观测后者机体各处激波的形状和位置，以捕捉并评价X-59产生的噪声信号。

第三阶段的工作将于2023—2025年进行，该阶段将进行长时间的公众反应测试，通过民众对X-59在本地区上空超声速飞行的实际反应来评估该机的声爆削减效果。

NASA计划将于2023年开始选定测试时飞越的城市，并在两年的时间内进行多次部署，收集社区对超声速飞行的反应数据，对这些数据进行分析并简化，开发一个低声爆社区反应数据库，并将这些数据提交给FAA和ICAO的航空环境保护委员会（CAEP），以供其制定和修改商用飞机陆上超声速飞行的相关适航法规，促进超声速陆地飞行的发展；第四阶段将于2026年进行，当低声爆演示验证机项目结束后，将对收集到的数据进行全面分析，并评估美国各个社区的不同人群对该低声爆技术的接受程度，从而为超声速客机陆上飞行扫清道路。

## 项目进展

### X-59验证机进展

该项目于2017年8月由NASA首次公布，目前仍处于第一阶段——即X-59验证机的研发阶段。项目招标以来，只有洛马公司提交了正式投标书，洛马公司选择利用现有的系统来建造飞机，这些系统取自诺斯罗普-格鲁门（诺格）公司的T-38“禽爪”超声速中级教练机和波音公司的F/A-18E/F“超级大黄蜂”战斗机，不仅加速了飞行单元的制造，还控制了开发成本。NASA公布的信息表明，X-59整体长约29.3m，翼展长约9m，尽管尺寸上比未来的超声速客机要小，但会产生相似的声爆信号。飞机整体形状光滑纤细，带有一个尖尖的鸭嘴状头锥，主体呈现三角翼，并带有一个独特的尾翼布局。飞机整体采用“三翼面”设计，三角翼主体位于机体中部的正后方，鸭翼向前，传统的尾翼安装在尾部。除此之外，还有一组更

小的水平尾翼位于单个垂直尾翼的顶部，类似许多军民用飞机采用的“多点尾翼”。X-59前后机体上表面都有隆起的鼓包，用于消除超声速飞行时引起的激波，不过飞行员的视线也因此受到了限制。为了弥补该限制，飞机搭载了一个XVS显示系统，包括一个带有彩色图像的头戴式摄像机，能够在关键的起飞和着陆动作中向飞行员传递态势感知。X-59的速度将达到马赫数（ $Ma$ ）1.4，能够在16700m的高空飞行。

该验证机于2017年6月完成了初步设计评审，并于同年在风洞中进行了低速测试，开始进行建造合同招标。NASA于2018年4月向洛马公司授予价值2.475亿美元的研发合同，同年6月该机获得美国空军授予的X-59编号，正式成为著名的X系列验证机家族成员。该机于2019年10月通过关键设计审查，2019年12月通过关键项目管理审查，2019年年底飞机基本成型。

### 验证机发动机进展

X-59最初计划使用GE航空集团的F404发动机。由于该发动机

也是NASA F/A-18研究型飞机的动力，因此发动机备件和零件的储备很充足，可以降低成本。但由于F/A-18飞机由两台发动机驱动，而X-59仅能容纳一台发动机，因此无法产生足够的推力来实现X-59的超声速飞行目标。

为解决上述问题，GE航空集团以为萨伯JAS 39E“鹰狮”战斗机开发的F414单发版本为基础，推出了既满足X-59的推力需求又能满足实际尺寸配置的独特发动机设计F414-GE-100，该发动机长约为4m，直径约为0.9m。该发动机的核心机与之前的型号非常相似，但是其运行方式和外部设计得到了升级：F414-GE-100是一种基于全新金属材料的发动机，使用了新的控制系统软件，使发动机和飞机能够相互通信；并在新的地方添加了管道，使燃料可以从飞机流向发动机；另外，为了节省质量和空间，F414-GE-100并没有协助安装的轨道硬件，需要依靠人手将其引导到位。该发动机通过无分流器超声速进气方案进行吸气：发动机置于机体后部，边缘



F414-GE-100发动机

与现有机体轮廓相吻合，以保持空气动力效率；进气口在机体后部脊柱的上方，机体末端有一个传统的排气环，因此几乎不需要管道系统就可以使空气通过该装置。作为制造过程的一部分，该发动机已经在马萨诸塞州的试验台上成功运行超过8h，以证明它能够支持X-59的飞行方式；另外，该发动机在GE航空集团的林恩测试工厂进行了试验，证明它可以实现加力燃烧室的长时间使用，其他设计升级也都能按预期目标工作。

虽然今年的新冠肺炎疫情带来了额外的挑战，但在美国军方的支持下，GE航空集团仍将诸多资源集中在该项目上。今年8月，GE航空集团向NASA交付了两台F414-GE-100，其中一台为备用发动机。该发动机目前位于美国加利福尼亚州爱德华空军基地的阿姆斯特朗飞行研究中心作进一步检查，随后将运往美国棕榈谷与飞机进行总装。发动机的成功交付是该项目的一个里程碑。

## 项目管理特点和存在的问题

低声爆飞行验证机项目是NASA航空研究任务事务部（ARMED）管理的第一个重大开发项目，其全生命周期成本高达5.83亿美元。为此，LBFD项目管理层采取了一系列的措施，为项目发展奠定了良好的基础。在采购策略上，尽管NASA已经与洛马公司就验证机的初步设计签订了合同，但NASA规定在下一阶段的投标人既可以使用洛马公司的初步设计，也可以提出自己的设计以满足性能要求，以此保证所有投标人都有公平的竞争机会。另外，为了节约成本，NASA将提供超出预期之外的设备、

零件和系统，供承包商在合同期间使用。根据合同，NASA将提供发动机、弹射座椅、座舱盖系统、生命支持系统、飞行测试仪器系统、配电系统，以及阀门、作动器和开关等658个部件，以降低采购成本，缩短交付周期。

### 进度问题

在NASA批准的LBFD项目计划表中，该项目承诺在2023年10月完成第二阶段的声学验证，并为此预留了13个月的时间，以应对突发事件。截至2020年2月，该项目已经消耗了其中的两个月；由于美国政府于2018年12月到2019年1月的“停摆”消耗了5周的时间储备，并影响了关键设计审查（CDR）、关键决策点D（KDP-D）以及飞行准备审查等关键节点，这一延误的相关成本影响为540万美元；此外，NASA将地面载荷试验地点从加利福尼亚州的棕榈谷重新分配到得克萨斯州的沃思堡，以保证试验的质量和监督效果，消耗了3周的时间储备；最后，在2020年3月，为应对新冠肺炎疫情，NASA开始强制性远程办公并限制出差计划，因此尽管洛马公司仍在坚持工作，但NASA的监督和检查作用几乎形同虚设。目前，疫情对项目成本和进度的长期影响尚不明确。

### 成本控制问题

设计、制造和测试LBFD验证机的最初总合同价值为2.47亿美元。截至2020年2月，洛马公司估计完工成本为2.84亿美元，成本增加了15%，并且该成本并未完全考虑所有潜在的风险。另外，由于遇到制造问题，如供应商交货延迟和零件质量差等，洛马公司将首飞时间从2021年4月

改至2021年8月。经分析，合同成本的增加和进度的延迟主要由于洛马公司无法及时雇用合格的技术人员以及分包商延迟交付零件造成的，这也是航空航天行业普遍存在的问题。例如，由于缺少所需的压力分析人员，以及难以找到合格的分包商，使飞行试验仪器系统的工程图样的发布和零件交付延迟。这些关键工程技术人员的短缺使后期的设计和采购需要更高的成本和更长的周期。

为此，洛马公司正在开展一项“回归绿色”的活动，采取包括增加生产班次等一系列措施，试图弥补该项目在时间和成本上的损失。然而，LBFD项目管理人员表示，虽然这些努力取得了一些进展，但恢复计划没有产生预期的效果。因此，LBFD项目管理层增加了与洛马公司领导层的沟通，以确保LBFD项目仍然是重中之重，并试图更清楚地了解问题的根本原因以及承包商的应对策略。

## 结束语

LBFD项目是NASA多年来在低声爆技术领域研究成果的集成，NASA将通过X-59验证机来验证各种可用于未来新一代超声速客机的低声爆关键技术，并获得相关适航部门的认可批准，从而加速其实用化进程，并使其具备足够的市场竞争力。该项目将为全世界飞机制造商和航空公司打开一个巨大的新市场，并有助于建立更快的贸易航线，创造更多的工作机会，其未来前景值得进一步关注和期待。

航空动力

（付玉，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）