

美国卢格系列高超声速组合发动机概念研究

Research Progress of Lugg's Companies' New Engines for Supersonic Airliners

■ 刘腾跃 / 中国航发 刘金超 李明 / 中国航发研究院

近年来，超声速客机概念回暖，虽然提出了多种方案，但确定了动力系统的不多。2020年3月，有报道称，美国加州的初创公司HSP(HyperSpace Propulsion)正在研发一种用于高速飞行的新型高超声速组合发动机，融合了超导电动机/发电机、燃气涡轮发动机、冲压/超燃冲压发动机和磁流体动力(MHD)等先进技术。

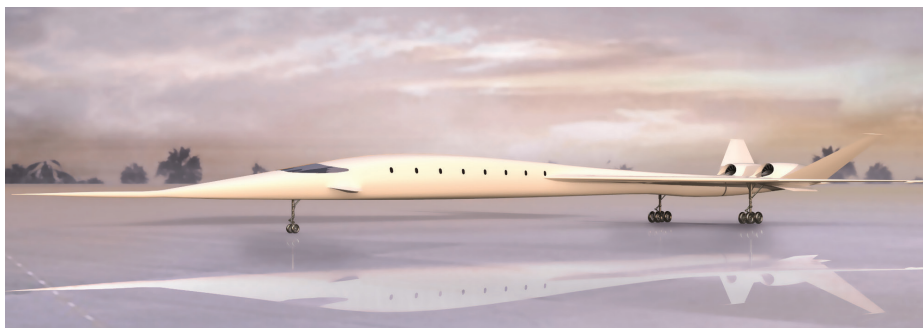
近年来，超声速客机概念重回大众视野，虽然一直未有产品投入运营，但涌现出了一批方案。这些方案既有来自于洛克希德-马丁(洛马)公司、波音公司等传统航空企业的，也有不少由艾利安、博姆等初创公司提出。其中较为引人瞩目的是一位拥有航空航天工作背景的美国创业者理查德·H.卢格(Richard H. Lugg)创建的一系列公司，包括HMA公司(HyperMach Aerospace)、SBA公司(SonicBlue Aerospace)和HSP(HyperSpace Propulsion)公司等，主要开展高超声速客机和发动机的研发。在不断调整设计、改变指标的过程中，卢格的公司提出了一系列的高超声速客机及新概念组合动力方案，并取得了多个核心技术专利。

HMA的超声速客机项目

HMA公司主要进行的是超高速和高超声速客机的研发工作，迄今已推出了数型客机的概念。

SonicStar 超声速公务机

早在2011年，HMA公司就在巴黎航展上公布了 $Ma3.5$ 的超声速公务机概念方案SonicStar，航程11100km、飞行高度19000m，可载客10~20人，能用不到2h的时间从纽约飞到巴黎，并计划2021年实现首飞。飞机采用大



SonicStar 超声速公务机

后掠、层流、双三角翼，长68.8m，翼展22.5m。SonicStar 配装两台“超声速型先进电磁涡轮喷气式”(Supersonic-Magnetic Advanced Generation Jet Electric Turbine, S-MAGJET)发动机，型号为S-MAGJET 4000-X。该项目得到了美国国家航空航天局(NASA)的部分资助。

SonicStar 客机采用等离子体减阻技术(EDRT)，以减小气动阻力及降低声爆。原理是利用S-MAGJET发动机产生的电力，加热、电离来流空气，产生等离子体，在飞机激波前注入等离子体，改变飞机周围局部流场，将湍流变成层流，避免产生激波或降低激波强度，以减小气动阻力并抑制声爆。飞机的机头、机尾，以及机翼前缘、垂尾前缘、进气道唇口等主要迎风部位都安装了此类电

离装置，并进行整机统一控制，以达到减阻降噪的最佳效果。HMA公司在实验室中验证利用EDRT进行流动控制时发现，在 $Ma3$ 及更高的速度下，EDRT的控制效率高达90%。利用等离子体控制气流，飞机还可摒弃传统的襟翼等飞行舵面，以更适应高速飞行。

HyperStar 高超声速公务机

2012年年底，HMA公司提高飞机设计指标，速度增至 $Ma4.5$ ，航程增至12000km，搭载36人。2016年，指标被再度调高，速度为 $Ma5$ ，航程为13000km。新方案被称为HyperStar，计划2025年首飞，2028年取得认证并开始运营。

HyperStar采用更大的细长机身、更大的弧形三角翼、重新设计的V形垂尾，以及一对新型“高超声速型



SonicStar的S-MAGJET发动机安装布局



HyperStar高超声速公务机

先进电磁涡轮喷气式” (Hypersonic-Magnetic Advanced Generation Jet Electric Turbine, H-MAGJET) 发动机, 型号为H-MAGJET 5500-X。

HMA公司新客机

HMA公司聚焦Ma6.65、可载200人、航程19630km大型高超声速客机概念, 暂定目标是在21世纪30年代初进入商业运营。采用4台高超声速混电超导冲压磁流体(Hypersonic hybrid superconducting combustion ram accelerated magnetohydrodynamic, Hyscram) 发动机。

MAGJET系列发动机

MAGJET系列发动机由SBA公司研

制, 目前主要包括两种型号。

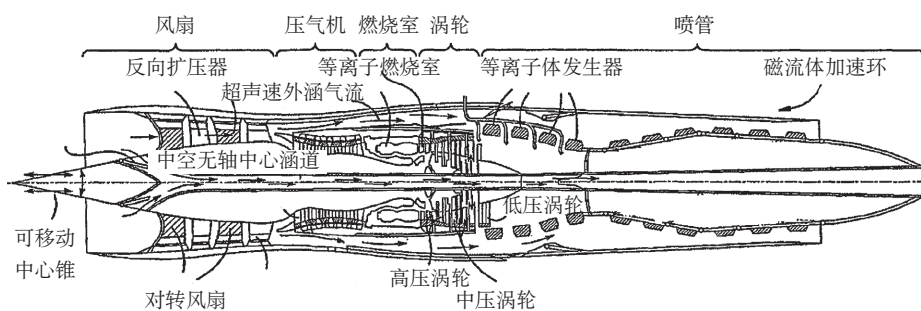
MAGJET基本原理

先进电磁涡轮喷气式 (Magnetic Advanced Generation Jet Electric Turbine, MAGJET) 系列发动机是一种全新油电混合变循环发动机, 集成了燃气涡轮发动机、超导电机、

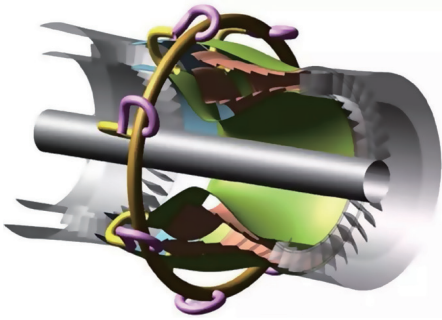
等离子燃烧室等技术。这种发动机的基本原理是: 燃烧室产生的高温燃气通过叶片带动涡轮盘旋转, 使环形超导发电机产生电力, 通过专门电源管理系统, 驱动超导电动压气机和风扇; 发动机产生推力的同时, 为飞机其他辅助系统供电。

MAGJET系列发动机的一个主要特点就是全电动设计, 电功率传输取代了传统的高低压机械轴功率传输, 风扇、压气机、涡轮等旋转件之间无硬件连接。每级涡轮驱动独立的环形超导发电机, 每级风扇、压气机由独立环形超导电动机驱动。机械解耦后的发动机各级叶片在整个飞行过程中, 能迅速响应不断变化的大气环境和飞机性能的要求, 分别调整至最佳转速。由于各旋转件能以最佳的转速运行, 各部件能达到较高的效率, 进而也能提高压比、减少压缩系统级数。

环形超导电动机是其中核心技术之一。电动机由两个同心同面的内外圈构成。内圈是转子, 主要包括风扇/压气机叶片、安装环、超导感应线圈, 以及叶片和线圈的被动冷却通道, 转子的支承和定位使用了磁悬浮系统。外圈是定子, 包括大功率超导电磁体、液氮极低温冷却系统, 以及用于悬浮和定位的海尔贝克 (Halbach) 阵列, 能产生传统环形电



MAGJET发动机原理



等离子体燃烧室及中心涵道

机4 ~ 5倍的扭矩。由于取消了高低压机械轴，MAGJET发动机在中心轴的位置空出一个中心涵道。通过前端中心锥的前后移动，控制进气流量及分配，在调节涵道比、改变循环参数，适应不同飞行条件的同时，也可以冷却燃烧室、涡轮等热端部件。

MAGJET发动机的另一个主要特征是等离子燃料燃烧。等离子燃烧室接收涡轮超导发电机的电能，燃料经一系列专门喷嘴喷入燃烧室，由有源等离子线圈发生器电离，后被燃烧室的电磁场控制，改变火焰结构尺寸等，进而能主动控制和稳定燃烧过程，使离子化燃料充分燃烧。离子化燃气在流经涡轮后，会被磁流体动力（MHD）环加速喷出，进一步提高推力，主要用于控制飞机在起降时的推力。

MAGJET发动机分类

MAGJET发动机主要分为S-MAGJET和H-MAGJET两种型号，分别适用于超声速和高超声速飞机。

S-MAGJET由SBA公司针对超声速客机研发，主要由2级对转风扇、8级压气机、等离子燃烧室、8级对转涡轮（2级高压、4级中压、2级低压）和集成的超导电机构成。每级风扇下游设置了扩压器，以降低超声速来流的速度，减少气流旋涡，提高压

力。由于压气机可以设计为负荷更高、效率也更高，因此每级叶片数量可减少15% ~ 20%，从而减轻了质量。发动机总压比高达60 ~ 70 : 1，是当前常规燃气涡轮发动机的2倍，提高了空气流量和燃烧效率。

HMA公司表示，风扇与压气机解耦这一项技术就能将发动机整体效率提高70%。相比“协和”超声速客机使用的奥林帕斯（Olympus）593加力涡喷发动机，S-MAGJET发动机的燃油效率高30%，在Ma3.5速度下，能达到0.104kg/(N·h)的低耗油率。

240kN推力量级的S-MAGJET发动机在巡航条件下（速度Ma3.4，高度21000m），其涡轮超导发电机能产生30.5MW的电力，大部分用于驱动风扇和压气机，其余7MW用于满足飞机的电力需求，如飞机健康监测、导航控制、电动起落架、航电设备和飞控系统。

H-MAGJET是SBA公司在S-MAGJET基础上进一步发展的超声速发动机。核心技术仍是涡轮超导发电机、等离子燃烧室、超导电动压气机和风扇。发动机共有5级涡轮，每级都能产生兆瓦级功率，其中第一级可输出功率超过10MW，以驱动电动压气机

和风扇。发动机总计能产生65MW的电功率，推力高达340kN。

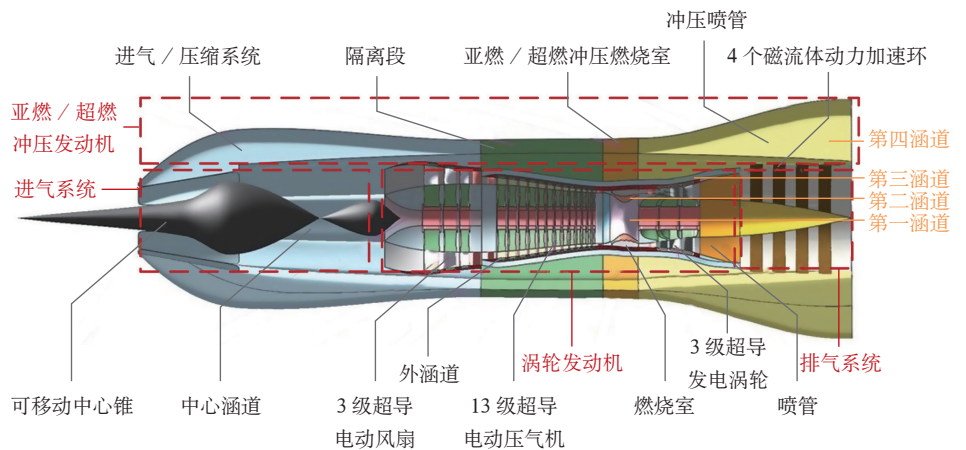
Hyscram发动机

最新型的Hyscram发动机源于H-MAGJET，主要原理和结构与其类似，但推力高达惊人的845kN量级，旨在为大型高超声速飞行器从静止起动到加速至Ma8+飞行提供全程推力，可以用于军民领域飞行器，还能承担太空发射任务。

Hyscram发动机结构

Hyscram发动机主要由进气系统、涡轮发动机、冲压/超燃冲压发动机、排气系统等4大部分组成。涡轮发动机周围布置的是9个双模态亚燃/超燃冲压发动机阵列，前后是进排气系统。其中，进气系统包括进气道和可移动进气锥；涡轮发动机包括3级超导电动风扇、13级超导电动压气机、燃烧室、3级超导发电涡轮和喷管；亚燃/超燃冲压发动机包括进气/压缩系统、隔离段、亚燃/超燃冲压燃烧室、4个磁流体动力加速环；排气系统主要指4个磁流体动力加速环。

该发动机有4个涵道，由内往外，第一涵道是涡轮发动机的中心涵道；第二、第三涵道是涡轮发动机的内涵



Hyscram发动机结构

道、外涵道；最外涵道（第四涵道）是冲压/超燃冲压发动机通道。在不同的运行工况下，中心锥前后移动，调节各涵道的空气流量，改变循环参数，优化整体效率，产生适当的推力和电力。使用中，涡轮发动机利用地面电源起动。当有外界电力输入时，感应电机起动，使涡轮盘旋转，开始吸入并压缩空气，逐渐达到燃烧转速，实现发动机起动。

Hyscram发动机主要特点

就基本原理结构而言，该发动机本质上是并联式涡轮基组合循环发动机（TBCC），内外环布置的结构形式避免了完全分离涡轮发动机与亚燃/超燃冲压发动机，减小了发动机体积和质量。

涡轮发动机外壁和冲压发动机内壁之间的空间，可用于存储燃油和冷却系统，以及放置电磁电源系统和控制件。中心涵道还可用于将涡轮产生的电力向前传输到风扇和压气机。发动机的核心是磁悬浮的风扇、压气机、涡轮以及一系列超导电机，等离子燃烧室产生离子流与燃气一起通过4个磁流体动力（MHD）加速环加速后排出。由于各级电动压缩系统在机械结构和电源上都相互独立，可以根据飞行条件，适时调节各级的运行。如在冲压模式下过渡到高超声速时，不需要前3级压气机，便可以方便地断电关闭；而在Ma5.5左右时，超燃冲压模式下只要3级左右的压气机，其他级就可独立关闭。

燃烧室高温高压燃气带动涡轮做功，同时产生电力和推力。涡轮产生的电力除用于压缩空气外，还用于磁流体加速排气增强推力，以及为冲压/超燃冲压发动机中的等

离子燃烧室，提供稳定的点火电源，使亚燃/超燃冲压发动机在Ma5 ~ 8速度时，所有飞行条件下都能起动并稳定工作，甚至用来对飞机流场进行主动控制、激波管理等。由于是无轴电动设计，各旋转机械都由有源永磁空气轴承固定在适当位置，省去了机械支撑轴、滑油系统或齿轮等相关零部件系统，旋转机械的所有负载都由发动机的外骨架承载，因此涡轮发动机可以在很高的速度下运行。涡轮发动机工作到Ma5 ~ 6的速度后，过渡到超燃冲压发动机，再加速至Ma8+。在整个飞行包线内，涡轮发动机都需产生大量电力，因此即使在Ma5 ~ 6以上的速度时，系统仍保持涡轮发动机工作，但其主要功能转为发电，推力则依靠冲压/超燃冲压发动机。

后续发展

虽然此类新型发动机发展比预期缓慢得多，但HSP公司表示，美国国防部近期对高超声速技术的兴趣增加，为这种新型发动机注入了新的发展动力。如果公司在发动机技术上取得成功，可用于美国海军武器装备，也可用于民用超声速客机。

根据与美国海军研究实验室（NRL）的合作研究与开发协议，HSP公司将开展单个具有代表性的混合亚燃/超燃冲压发动机的初始测试。测试计划在2020年秋季开始运行的NRL高超声速风洞中进行。测试计划分为3个主要阶段：最初的研究重点是对小型混合亚燃/超燃冲压发动机的风洞测试；然后是在2023年的飞行试验机上的演示验证；如果项目获批的话，后续阶段将测试更多的系统集成，以及这种高度创

新Hyscram发动机的整机。

新的研究测试设施建在NRL的高速空气动力学实验室，该实验室位于美国华盛顿州的海军空间技术中心，是一个能够进行高度和速度实时变化的空气动力测试点。该测试设施利用高压气源和收敛—扩张喷管能够达到需要的测试工况，能力范围宽泛，高度为从海平面到30000m，速度为从Ma1.3到Ma6以上。

结束语

综上所述，卢格系列公司提出的新概念动力借用了传统TBCC的原理，但同时又融合了超导电机、等离子主动控制、磁流体动力、多涵道变循环等系列先进技术，完全改变了涡轮发动机的架构（当然，该“激进”方案的理论性能也是多数动力无法达到的）。这一系列新概念动力经过十多年的发展，针对不同装机平台需求，产生了系列方案，但基本都停留在计算仿真等阶段，技术成熟度低。在后续发展中，这些动力概念将面临在高温环境下超导电机极低温（-250℃）冷却、大功率（几十兆瓦）电力管理、多涵道流量控制、多模态转化等技术挑战，在各项技术成熟后，还需要处理系统集成、工程化等诸多难题。

由于商用飞机高速、经济、环保的发展趋势，以及军用飞机对高速、定向能武器的发展需求，飞机对推力、电力的需求发生飞跃性提升，传统动力形式的发展潜力已渐消失殆尽，需要寻求新的突破，而HAGJET、Hyscram等创新型发动机不失为一种发展可能，值得持续关注。 **航空动力**

（刘腾跃，中国航发，工程师，主要从事航空发动机项目管理和综合管理）