

德国高超声速技术发展历程及动力系统研究

Research on the Development of German Hypersonic Technology and Power System

■ 王刚 / 中国航空工业发展研究中心 姜德仓 / 中国航发涡轮院

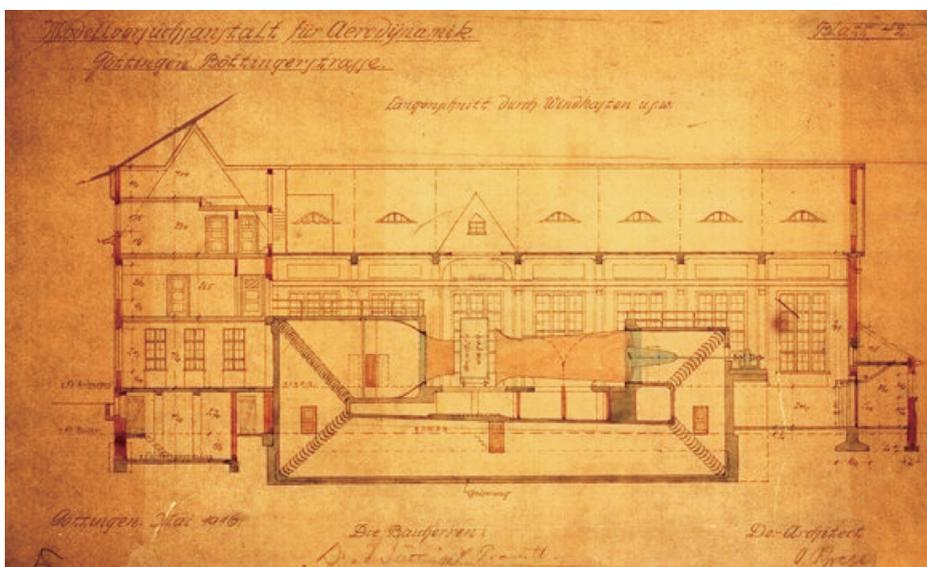
德国历来重视基础研究，凭借在空气动力学等领域的理论成果和以涡轮基冲压组合发动机为代表的技术探索，主导开展了一系列高超声速技术验证计划。

高超声速技术是理论物理学、空气动力学以及推进技术等科学技术的集中体现，也是未来航空航天技术的大集成。德国于20世纪40年代率先研制出远程制导弹道导弹V2及液体燃料火箭发动机，在第二次世界大战、美苏冷战期间则进一步加强了试验设备、基础技术等方面的研究投入。进入21世纪，德国借助欧盟的国际合作平台，主导开展了以锐边飞行试验（SHEFEX）项目为代表的一系列重大技术验证规划，并在涡轮基冲压组合（TBCC）发动机、可重复使用火箭发动机的研究方面取得了阶段性成果。

研究探索阶段——液体燃料火箭发动机、冲压发动机得以研制和使用

德国于19世纪初通过大学改革，把高等教育和科学研究紧密结合起来，成为世界上第一个创立导师制的国家。全新的科研教学体制，不仅吸引了当时世界上最优秀的科学人才，还极大地加快了科技成果的应用转化速度，使德国从19世纪70年代起一跃成为工业强国和科技强国。

被后世尊称为“空气动力学之父”的路德维希·普朗特于1904年



普朗特空气动力学风洞

提出边界层理论，开启了空气动力学研究，并在其学生的协助下进一步开展了理论探索，如1908年与西奥多迈耶建立激波和膨胀波参数分析理论、1929年与阿道夫贝斯曼创立后掠翼理论及超声速喷管设计方法。此外，普朗特在低速翼型升力的基础上创立了考虑可压缩性的修正算法，为超声速/高超声速飞行提供了理论基础。

在风洞研究方面，1907年普朗特创造性地设计出封闭式循环风洞，成为现代风洞的开端和模板，并在哥廷根大学建造起一个小型超

声速风洞进行气体动力学研究和验证。1934年亚琛大学的卡尔·维森伯格建造了世界上第一个暂冲式风洞，这种风洞所需要的能量较低，借助一个真空球罐，通过喷管的膨胀实现马赫数（ Ma ）3.3的最高流速。虽然这个风洞的试验段直径仅有10.16cm，但它的应用将德国的超声速研究提升到当时世界的先进水平。维森伯格的助手鲁道夫·赫尔曼后来前往佩内明德的空气动力研究所任职，并在此建立起一个试验段直径为40.64cm、最大流速为 Ma 4.4的暂冲式超声速风洞。这些风洞的建

立和使用为高超声速研究提供了充分的数据验证。

在火箭技术及其动力系统方面，被后世尊称为“德国太空飞行之父”的赫尔曼·奥伯特于1923年年底出版了《火箭进入太空》一书，详细阐述火箭科学和太空飞行的数学原理，不仅掀起火箭技术的研发热潮，还在1927年催生出世界上第一个太空飞行协会。受此影响，德国陆军从1930年起授权沃纳·冯·布劳恩组建团队研究如何将火箭应用于实战。冯·布劳恩团队在波罗的海的佩内明德岛建立起流速达到 $Ma4.4$ 的暂冲式风洞，花费9年时间成功研制出V2远程弹道导弹，并为其专门配备世界上第一种液体燃料火箭发动机。该型发动机使用蒸汽涡轮驱动两个泵，分别将液氧和酒精以 72kg/s 、 58kg/s 的流量，在23个大气压力(atm)下喷射注入燃烧室进行燃烧，产生约 245kN 的起飞推力，其燃烧室温度高达 2700°C ，壁面采用液体酒精进行冷却，排气速度达到了 2000m/s 。

与此同时，德国军方也在资助火

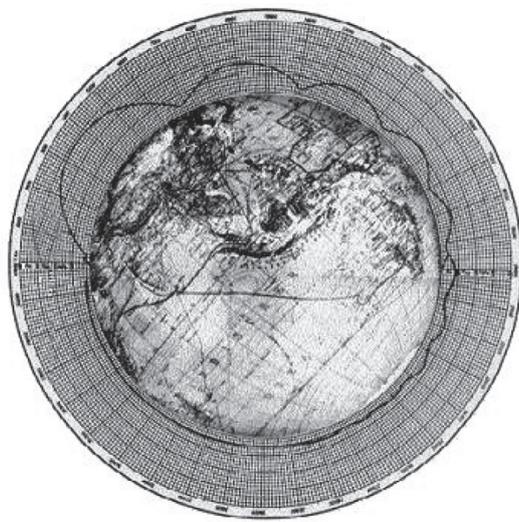
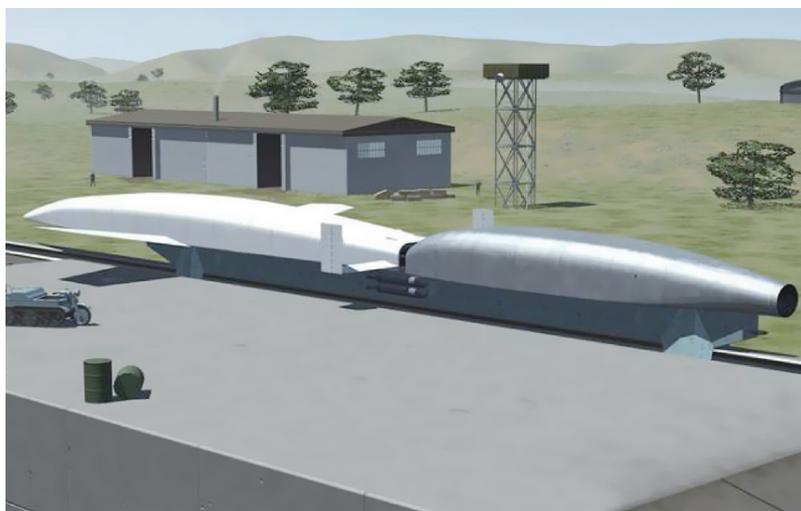
箭技术专家桑格尔博士，进行动力系统研究工作。在1930—1935年，桑格尔团队研制出再生冷却液体燃料火箭发动机，该型发动机同样以液氧和酒精作为推进剂，由于采用了再生冷却设计，在实现发动机壁面冷却的基础上，进一步提升了燃料的压力，使发动机的排气速度达到 3048m/s 。在1939—1944年，桑格尔团队对冲压发动机进行了大量试验并创新性地提出在充分利用冲压发动机推力的前提下，控制飞行器在大气层边缘进行水漂式运动，从而实现高超声速飞行。在德国军方的资助下，桑格尔团队启动了“银鸟”(Silver Bird)轰炸机的试制工作。这种火箭动力轰炸机采用水平起降、高超声速滑翔的飞行模式，其理论航程达到 $4000 \sim 6000\text{km}$ ，相关研制工作随着第二次世界大战的结束而终止。

重建和恢复阶段——涡轮基冲压组合发动机进入研究人员的视野

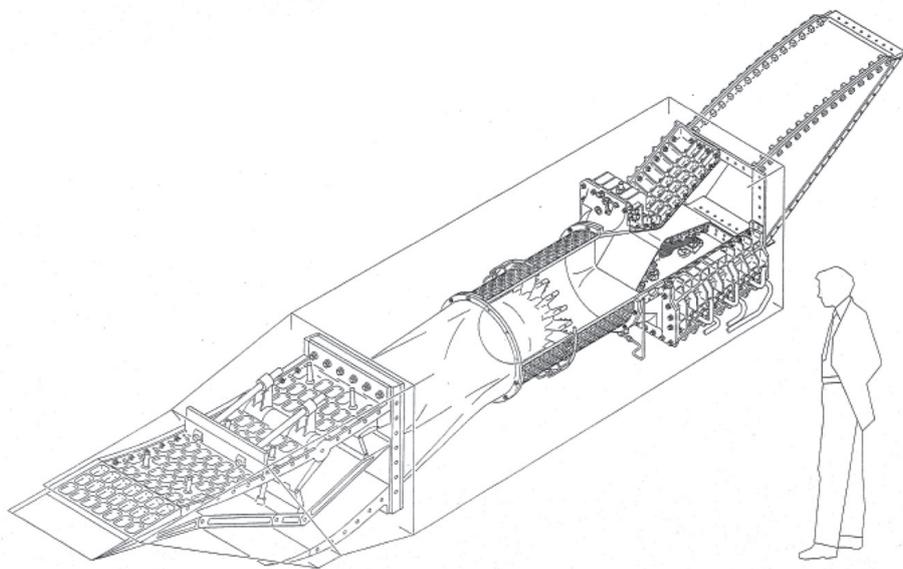
20世纪60年代，美国、苏联全面展

开太空竞赛。受此影响，联邦德国MBB航空航天公司得以在1962年启动空天飞机的研制工作，项目总研制费用为1.65亿德国马克，相关的动力系统设计活动也随之展开。桑格尔博士根据MBB航空航天公司委托，组建研制团队并主持设计载人两级入轨带三角翼飞行器Sanger I。按照设计方案，该型飞行器在一个 3km 长的水平轨道上以 900km/h 的速度进行释放。第一级和第二级都装有推力达到 490kN 的液氧/液氢火箭发动机。第一级与第二级在 150s 内到达 60km 高空后分离，第一级滑翔返回基地；第二级继续爬升至 300km 高度的近地轨道。1969年该项目因为技术、经费等方面的原因而终止，部分研制成果直到1985年才重新应用到MBB航空航天公司启动的Sanger II空天飞机项目上。

得益于1987年启动的德国高超声速技术计划(HTP)，MBB航空航天公司筹集4.5亿德国马克的研制经费，在推进技术、材料和结构、气动热力学、飞控和系统4个方面，为



“银鸟”轰炸机结构概念图及其飞行轨迹



Sanger II 两级入轨空天飞机及其发动机设计概念图

Sanger II空天飞机提供支撑性技术研究和地面/飞行试验验证。为了实现真正的水平起降和可重复使用，Sanger II设计方案将第一级设定为采用吸气式TBCC发动机的高超声速飞行平台，计划在飞行加速达到 $Ma6.8$ 时，实现两级分离，并于1991年启动发动机地面试验。虽然该项目于1995年终止，但是大量的设计成果和试验验证使科学界对于水平起降的吸气式动力方案产生了较为明确和统一的认识。特别是在1994年，Sanger II空天飞机设计方案入选欧洲航天局（ESA）的未来欧洲空间运输系统研究计划（FESTIP），和其他15种设计方案一起得到全面评估。在高超声速飞行可行性、低成本/可重复使用等方面为后续项目的发动机研制提供了有益的参考。

需要指出的是，德国高超声速飞行平台及动力系统的阶段性研制成果，是与其在美苏冷战期间开展的基础研究和保障性设施建设离不开的。航空航天军事装备/技术方面

的研究限制，反而使德国能够集中精力研究高超声速数值模拟方法并持续提高计算能力，同时也集中建设了一系列重要的试验设施/设备，如德国航空航天中心（DLR）于20世纪70年代建造的 $Ma6 \sim 11$ 暂冲式风洞H2K、于20世纪90年代初期建造的高焓风洞HEG和电弧加热设备LBK。此外，德国还在哥廷根大学建立起专门研究转捩区气体与表面相互作用的低密度风洞。这些试验设施/设备的建设提高了航空航天装备的研制效率，也使科学家、工程师的关注焦点聚集到高超声速流动所涉及的激波/膨胀波、稀薄气体流、边界层的转捩、摩擦力与气动热、热密封等更为复杂的物理现象及影响机理上，为德国在21世纪的高超声速研究提供了丰富的技术储备。

全面发展阶段——可重复使用火箭发动机成为关键

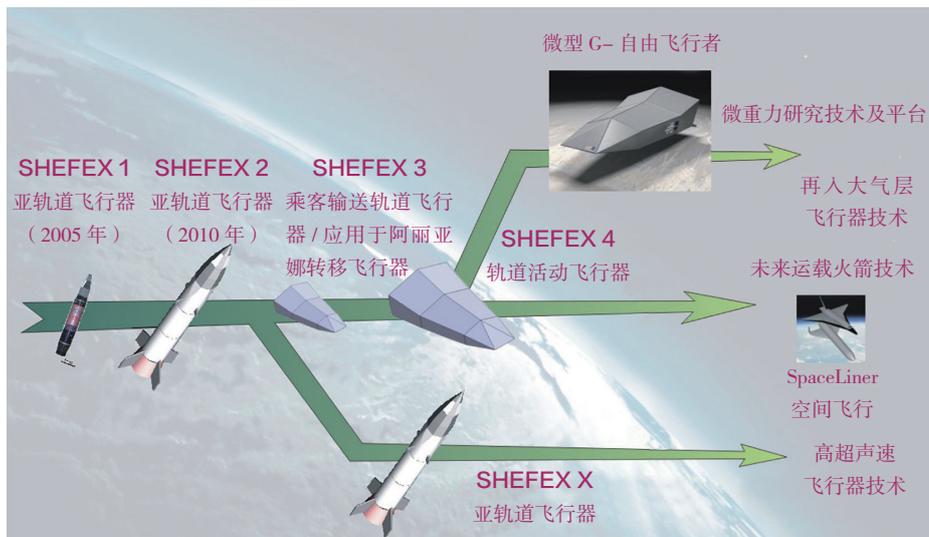
进入21世纪，高超声速技术成为各大大军事/科技强国研究、投资的重点

领域。与美国、俄罗斯侧重于高超声速技术研究的平台化、武器化不同，德国更为关注基础研究。

DLR启动了SHEFEX项目，提出明确而清晰的发展规划。该项目以降低载人航天器的使用成本、改善其空气动力学性能为目标，重点研究锐边飞行器的气动、结构及热力学性能。相关研究成果也可用于其他种类的高超声速飞行器，如空天飞机等。DLR分别于2005年和2012年在挪威完成了高超声速飞行器SHEFEX1和SHEFEX2的飞行试验。其中SHEFEX2的最大飞行速度达到 $Ma11$ ，成功经受了 $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的考验，同步采集到大量数据，目前正在开展SHEFEX3的研究工作。

在开展自主研究的同时，德国也非常重视国际合作。尤其是在欧盟科技合作框架下主导了多个高超声速项目的发展，取得了显著成果。

从2005年开始，欧盟第六科技框架将发展民用高超声速飞行器列入研究计划。由此展开的



SHEFEX 项目发展规划

SpaceLiner 基于欧盟投资支持的未来高空高速运输 (FAST20XX) 项目, 由欧盟范围内 16 家参研单位针对 DLR 提出的先进亚轨道飞行器概念进行系统分析和飞行轨迹优化。同时在混合动力、新型高性能冷却技术、分离技术、流动控制、制导和导航控制技术以及安全性分析技术等方面开展深入研究, 从而固化最终设计方案。SpaceLiner 作为两级入轨的可重复使用飞行器, 动力系统采用以液氢/液氧为推进剂的火箭发动机, 该型发动机设计使用次数超过 25 次。

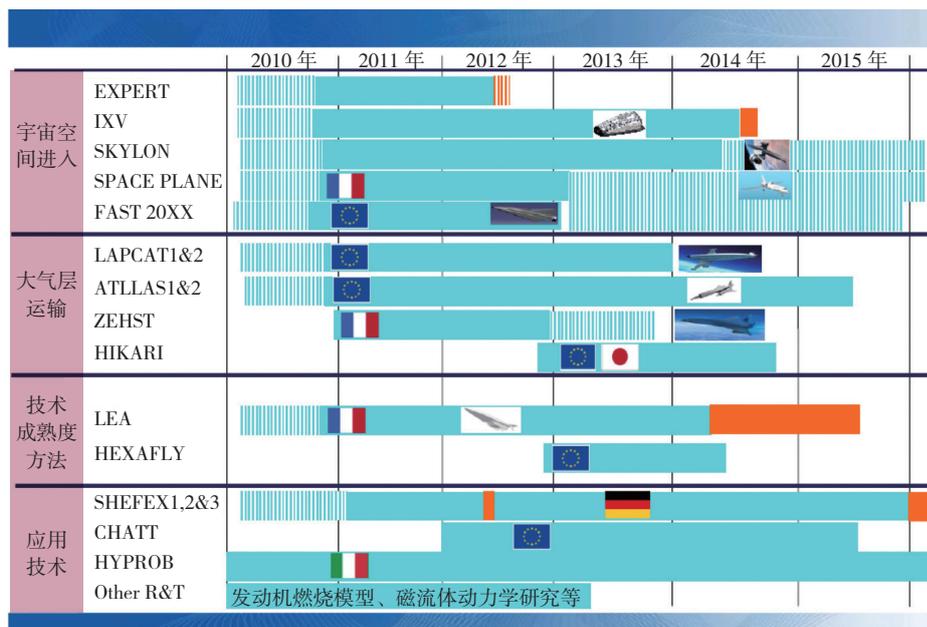
欧洲再入飞行试验平台 EXPERT, 着重研究高超声速再入过程中的高温气体效应。其主要目的是为典型环境下的热力学模型、程序开发和地面试验设备提供飞行测试与验证平台。项目研究团队在飞行器表面采用了十余种特种飞行测试技术, 搭载了大量测试传感器, 这些设备一半以上由德国研制。虽然为了加

LAPCAT- I / II、ATLLAS- I / II、HEXAFLY 和 HEXAFLY-International 等研究项目前后延续十余年, 其主要目标是开发/掌握关键技术、建立欧盟的专业研究团队。其横向研究范围涵盖高超声速技术基础研究、大气层内高超声速运输以及空间再入等领域, 纵向研究对象包括概念分析、基础研究、工程方案和演示验证等内容。德国的研究机构、高等院校和制造企业均在其中扮演着核心角色。

以 LAPCAT 项目为例, 该项目于 2005 年启动, 旨在将欧洲各研究机构独立开展的高速吸气式推进系统基础研究成果进行有效整合。涉及德国 3 个研究机构, 研制经费占比高达 32%。其主要研究内容包括: 飞行器及吸气式动力循环分析; 整机气动热力学 (计算流体力学和地面试验); 高超声速进气道气动热力学; 在直连式和自由射流设备上开展超声速燃烧试验; 空气涡轮火箭燃气发生器燃烧室的试验及数值模拟; 超声速燃烧过程中的雾化、掺

混过程建模; NO_x 降低和环境化学建模。

2010 年后, 德国充分应用高超声速基础研究的技术成果, 将研究重点扩展至飞行平台及动力系统的集成和验证方面。其中最具代表性的是亚轨道飞行器 SpaceLiner 和再入飞行试验平台 EXPERT。



欧盟的高超声速研究总体路线图

快研制速度，EXPERT后续飞行验证活动将采用火箭动力进行发射任务。相关动力系统研究团队也在全面开展TBCC发动机方案设计，并同步进行燃烧、冷却、热防护和材料等方面的基础研究。

技术革新阶段——充分开展前沿性探索验证，为下一代飞行平台及推进系统提供充分的技术储备

近年来，得益于欧盟科技合作战略，德国凭借其高超声速基础研究成果，更为深入地参与国际合作。携手俄罗斯、澳大利亚等国家，共同打造多个新一代高超声速飞行验证平台。

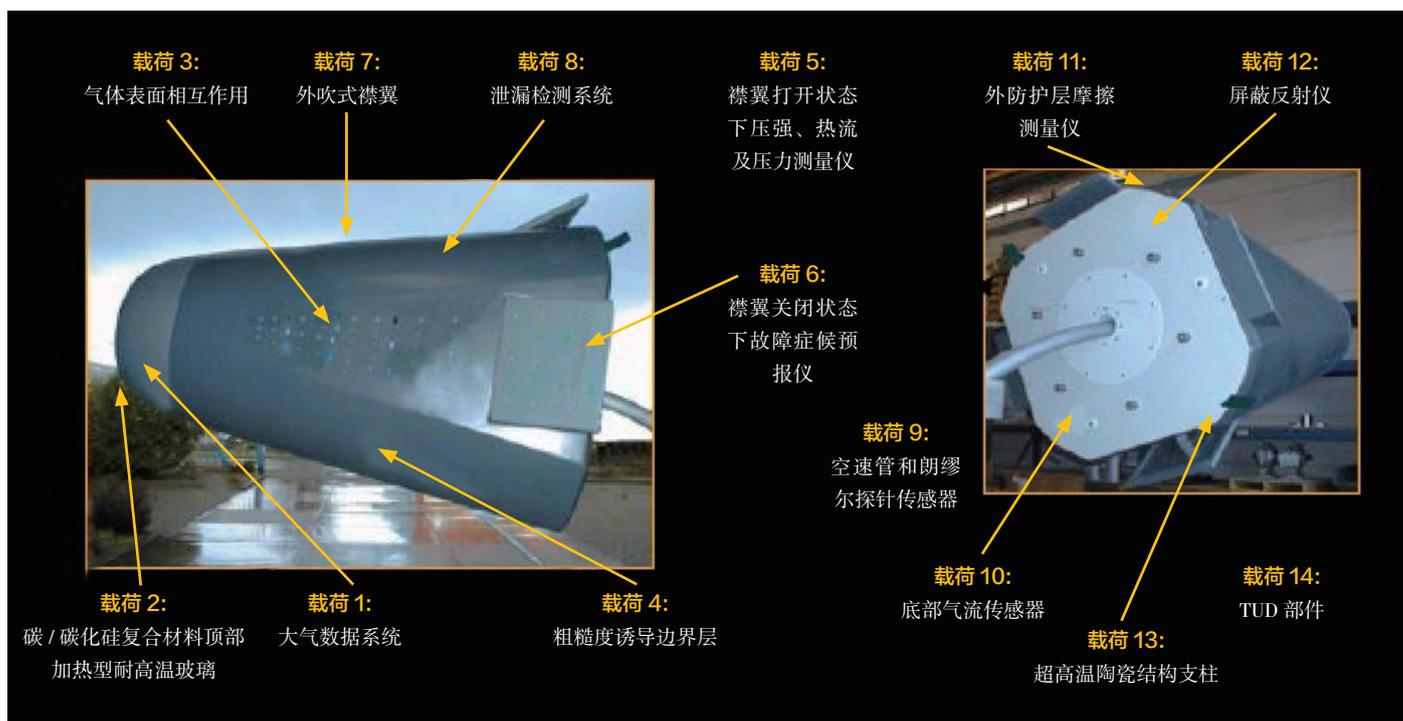
其中最具代表性的是自2014年启动的国际合作框架下的高超声速飞行试验(Hexafly-Int)项目。该项目力图打造一个凝聚多学科研究成果的飞行验证平台，集成并试验各种前

沿性、突破性的技术，打造一款兼具超远航程和可承受耗油率的民用飞行器。为了实现这一目标，研制团队必须克服多个方面的技术挑战，从总体结构设计、不同巡航速度下飞行稳定性控制、发动机结构设计，到抗氧化/抗疲劳高温材料制备、健康管理系统设计、污染物排放控制，无不对现有的设计理念、制造工艺和试验手段提出了巨大的挑战。

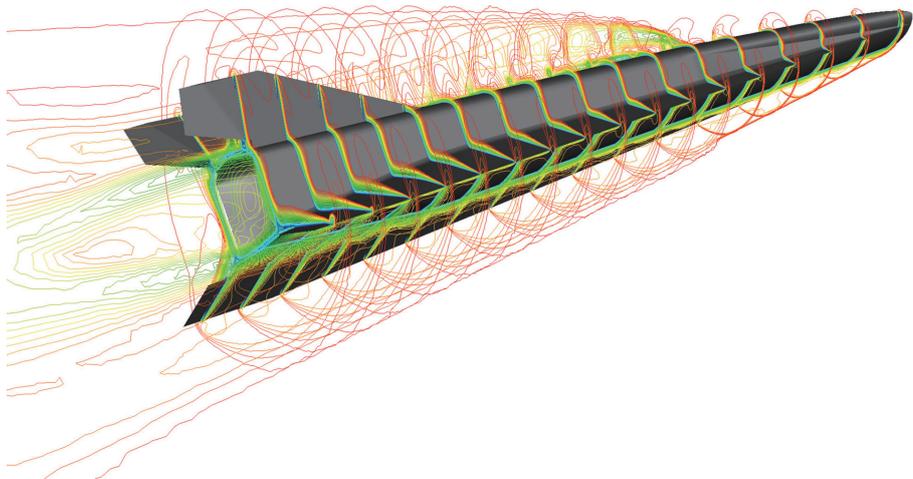
对于德国而言，由于在基础研究中取得了阶段性成果，以及早期参与多个高超声速飞行平台的研制，因此可在多个方面有效开展验证工作。首先，充分优化飞行器的流体力学结构，在与欧洲航天局、俄罗斯中央空气流体动力学研究院等机构的合作中，DLR可以使用高性能计算机，充分开展流体动力学数值计算(CFD)，有效缩短从实验室验证到飞行验证的时间。其次，与法国

航空航天研究院、意大利航空航天研究中心等欧洲科研机构开展联合研制活动，结合各自的机载设备/任务载荷研究优势，不断提升飞行器有限负载能力(体积及质量)的最大利用率。再次，针对下一阶段的高速滑翔飞行验证(Ma7~8)，持续改进飞行器蒙皮、发动机燃烧室等单元体/部件高温材料的性能，使其能够有效满足长时间高超声速巡航(如洲际飞行)的机体寿命和热管理需求。最后，抓住国际合作的机遇，有效利用俄罗斯、澳大利亚的大型试验设施(如悉尼大学的Marulan低速飞行试验场，以及俄罗斯中央空气流体动力学研究院的T-116风洞)和巴西的航天发射设备，扩大试验内容，开展更高水平的验证活动。

此外，在欧盟地平线2020项目中，DLR与其他5家企业联合开



EXPERT 试验载荷



Hexafly-Int项目气动外形数值仿真计算示意图

展了可重复火箭关键技术及验证 (RETALT) 项目。该项目研究周期为3年, 团队研究了可回收火箭所涉及的空气动力学、气动热力学(如全轨迹范围内飞行器表面的温度变化)、飞行动力学、制导和导航、先进的结构部件和材料力学等基础研究。研制团队先后提出了两种类型的发射系统, 一种是与传统的火箭发射系统(如“猎鹰”9、阿丽亚娜5等)类似的两级火箭发射系统, 设计概念中将对发射系统的第一级进行回收; 第二种发射系统仅有一级, 这是一种更具研究价值的构型, 根据设计构想, 火箭在重返大气层后, 依靠可回收的推进系统以及大面积气动构型底座进行降落。为了验证飞行的安全性和技术有效性, RETALT项目将在DLR的高超声速风洞中进行试验, 并试制1/3比例的火箭模型以进行可回收技术试验。

在军事装备研制领域, 随着美国、俄罗斯开始装备高超声速武器并展开持续性研究, 为了应对潜在的威胁, 德国军方也于2018年启动了高超声速滑翔飞行器的研制计划。

根据欧洲导弹集团(MBDA)的代表透露, 德国计划开展的研究对象并不是高超声速进攻性武器, 而是一种专门防御高超声速飞机/导弹的反导系统。目前该项目仍处于初期研制阶段, 计划在近两年内开展试验、验证工作。

动力系统的演变思路——吸气式涡轮基冲压组合发动机是未来的研究方向

德国经历了高超声速研究的各个阶段, 伴随着研究水平的不断深入, 德国的科学家、工程师对于高超声速飞行平台应该配备一套怎样的动力系统, 以及如何进行相应的工艺、材料、结构设计, 进行了长期而深入的思索。

20世纪40年代研制成功的液体燃料火箭发动机和冲压发动机, 不仅为V2和“银鸟”等多种飞行器提供了足够的推力和推进速度, 其装备、技术层面的衍生品更是为苏联人造地球卫星成功发射、美国阿波罗登月等科学里程碑项目提供了借鉴和参考。由于火箭发动机的一次

性使用周期, 导致高超声速飞行器发射成本居高不下。德国研究团队开始采用涡轮基冲压组合发动机与液体燃料火箭发动机相结合的形式实现飞行器两级入轨, 从而在工程应用角度将概念化的设计方案转换为可客观评估和量化研究的系统平台。虽然还存在着诸多至今都需要攻克的技术难题, 再加上可重复使用火箭发动机的成熟应用, 在可预见的时期内还要依靠后者完成大量发射任务; 但是超过100次的全生命周期重复使用次数、灵活的发射/着陆地点、可调节的推力和推进速度等使得吸气式涡轮基冲压组合发动机成为高超声速飞行器在动力系统方面公认的发展方向。与之相配套的材料、工艺、结构等方面的基础研究工作也得到了持续和稳步的推进。

结束语

现如今, 围绕高超声速技术研究展开的国际竞争不断加深和扩大。作为其中的主要参与者, 德国对于自身的研究实力和发展后劲有着非常清醒的认识, 其研究模式有着极高的参考价值: 首先, 有效整合国内的研究资源, 通过经济手段将分散的研究机构、专业院校及制造企业, 聚合形成一体化的研制团队; 其次, 在国际合作的平台下, 以研发项目需求为牵引, 以常态化的基础研究为储备、以技术突破为着力点, 实现研究资源的最优化分配; 第三, 同步开展飞行平台和动力系统研究, 在军事、商业项目之间充分共享技术成果。

航空动力

(王刚, 中国航空工业发展研究中心, 工程师, 主要从事航空科研声像工作)