

美国国防部高速系统试验(HSST)项目技术进展研究



张宝珍,赵群力

中国航空工业发展研究中心,北京 100029

摘要:美国国防部高速系统试验(HSST)项目是迄今美国国防部唯一专门针对高速/高超声速试验科学技术开展的专项预研项目,对于高超声速试验基础设施建设及试验能力形成至关重要。本文简述了HSST项目的提出背景,总结了该项目的重点技术领域和重要技术进展情况。在该项目的支持下,美国已经掌握了一系列高超声速试验技术,研制成功了一些重要的高超声速试验设施,如高超声速气动热与推进清洁空气试验台(HAPCAT)、高空激光探测与测距大气传感系统(HALAS)、高保真度自动机载可重构跟踪系统(HAARTS)和“空中靶场”(Sky Range)等,这些能力为开展高超声速技术研究和型号研制奠定了坚实的基础。

关键词:高超声速;试验技术;试验设施;高速系统试验项目

中图分类号:V231.2

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.11.008

近年来,美国为确保其军事优势,加速开发高超声速武器系统。为开展相应的研究工作,需要新建或升级高超声速试验设施,而这些重大科研试验设施本身也有许多技术难题需要解决。为此,美国国防部“试验鉴定科技”计划专门设立了高速系统试验(HSST)项目。该项目致力于长期滚动投资研发高速/高超声速试验测试技术,为开展高超声速重大科研试验设施建设提供技术支撑。

本文简述了美国国防部高速系统试验(HSST)项目的提出背景、经费规模和组织实施,总结了项目技术发展重点,梳理了近年来HSST项目重点技术进展,最后得出了“需要通过超前的统筹规划,长期迭代开展关键技术预研和技术攻关,以确保高超声速试验基础设施建设成功及试验能力尽快形成”的结论,从而为国内高超声速试验设施建设和试验技术开发提供参考借鉴。

1 HSST项目概况

1.1 项目背景

为确保试验与测试技术紧跟武器技术的发展步伐,美国国防部于2002年启动了试验鉴定科技(T&E/S&T)投资计划,通过每年的持续滚动投资,支持成熟度3~5级的先进试验

与测试技术应用研究和先期技术开发,促进成熟度达到6级的试验与测试技术从实验室向试验场/靶场应用快速转化。该计划包括若干重点技术领域,每个技术领域投资若干子项目。最初设立了高超声速试验、频谱效率、多谱试验三个重点技术领域。2006财年,美国国防部将“高超声速试验”重新命名为“高速/高超声速试验”;2009年,更名为先进推进试验技术(APTT);2012年,再次更名为高速系统试验(HSST)并沿用至今。HSST项目中的技术开发优先顺序始终与美国国防部5年期科技重点投资指南保持一致。

1.2 经费规模

HSST项目的主要任务是开发高速系统试验与测试技术,以满足高速和高超声速武器系统试验与鉴定的需要。在大国竞争日趋激烈的背景下,美国持续加大高超武器研发投入,HSST项目资金从2012年的约2300万美元大幅增加到2023财年的约3亿美元,见表1。表1数据来自美国历年的预算文件^[1-11]。

1.3 组织实施

HSST项目主要以阿诺德工程发展综合体(AEDC)为牵头单位,依托政府科研机构、企业及高校等几十家单位联合开展研究工作。HSST的子项目内容主要根据国防部试

收稿日期:2023-07-13;退修日期:2023-09-12;录用日期:2023-10-09

引用格式: Zhang Baozhen, Zhao Qunli. Study of the technical progress of the DOD Hight Speed System Test (HSST) project [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11):57-62. 张宝珍,赵群力. 美国国防部高速系统试验(HSST)项目技术进展研究[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11):57-62.

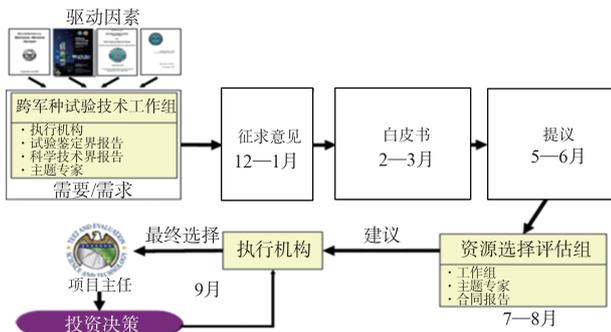
表1 美国国防部对HSST项目投入的经费(单位:万美元)

Table 1 The DOD budget for the HSST project
(Unit: 10000 dollars)

财年	2012	2013	2014	2015
金额	2301.6	1261.5	1797.9	2310.5
财年	2016	2017	2018	2019
金额	3456.4	3207.4	2931.4	3335.5
财年	2020	2021	2022	2023
金额	8946.2	9300.1	17308	29974

验技术规划,每年度编制一次,并通过发布跨机构通告(BAA),充分利用政府科研机构、大学以及企业的研发力量,解决关键试验技术问题。

HSST项目与其他的试验鉴定科学技术项目一样,依据一定的原则,在众多技术项目中筛选出需要重点发展的技术。其主要流程包括跨军种试验技术工作组、征求意见、白皮书和提议项目、资源选择评估组、执行机构5个步骤,如图1所示^[12]。

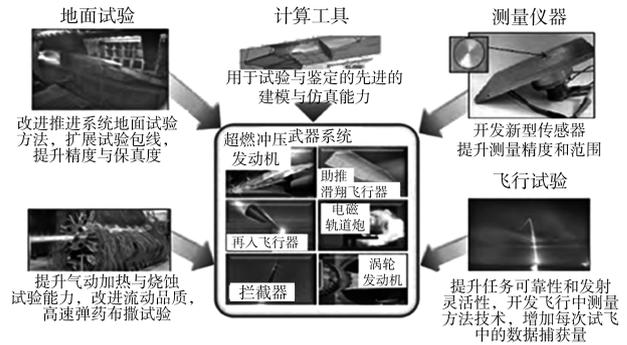
图1 试验鉴定科学技术项目筛选程序^[12]Fig.1 The selection process of the T&E/S&T project^[12]

所提议的项目需遵循的关键原则为^[12]:满足一种试验鉴定需求;需要开展科学技术方面的工作;高回报;应用广泛(多于一个国防部试验机构);具备向试验能力开发的高可转化能力。

2 HSST技术发展重点

HSST项目的投资重点是在国防部试验资源管理中心(TRMC)制定的《试验与评价资源战略规划》(以下简称《战略规划》)的指导下确立的。TRMC专门负责对国家的武器装备试验与评价能力进行统一规划,每两年制定/修订一份试验资源战略规划。高超声速是《战略规划》中确定的十大重点领域之一。基于高超声速未来型号发展对试验测试技术的需求与挑战,HSST项目设置了地面试验、计算工具、测

量仪器以及飞行试验4个重点子领域(见图2),并采用试验鉴定科学技术项目筛选程序,进一步确定HSST项目每个子领域分别开展的研究内容。在此后的每个新财年,HSST项目都会根据上一年度进展情况以及需求变化对子领域的项目进行调整。

图2 HSST项目涉及的技术领域及应用方向^[13-14]Fig.2 The technical areas and application directions of the HSST project^[13-14]

HSST 4个重点子领域的主要研究内容如下^[13-16]。

(1) 地面试验

地面试验包括气动热结构与先进推进试验技术、气动力和气动热试验技术两部分。其中,气动热结构与先进推进试验技术旨在改进推进系统地面试验方法,扩展试验包线,提升准确性和保真度,降低不确定性以及对传感器/导引头的组合气动效应。支撑气动热结构与先进推进试验技术发展的子项目主要包括高超声速吸气式推进洁净空气试验台、大尺寸超燃冲压发动机试验技术、高速系统试验技术改进研究等。

气动力和气动热试验技术旨在提升气动加热与烧蚀试验能力,改进流动品质,支持高速/高超声速武器系统弹药投放试验。该领域的子项目主要包括电弧加热器流动品质、高超声速边界层转捩测量研究等。

(2) 计算工具

高速流场所用的计算工具,主要是高超试验鉴定所用的先进建模与仿真软件。该领域的子项目包括建模与仿真验证与转化研究、X射线断层摄影计算方法研究、瞬态热分析软件工具集(TTAS)、污染效应计算流体力学(CFD)研究等。

(3) 测量仪器

测量仪器包括高速流场所用的测量仪器与诊断技术,旨在开发新型传感器,提升测量精度和范围。该领域的子项目有高压可调谐二极管激光吸收光谱、真实气体力测量

天平系统、中红外热成像技术、高焓表面摩阻传感器等。

(4) 飞行试验

HSST项目的飞行试验与评价技术旨在提升任务可靠性和发射灵活性,开发飞行中的测量方法和技术,增加每次试飞中的数据捕获量,并降低飞行试验总成本。该领域的子项目包括高保真度自动机载可重构跟踪系统(HAARTS)、高空激光探测与测距大气传感系统(HALAS)、自主飞行安全系统(AFSS)、基于无人机的靶场、机载高分辨率多光谱望远镜等。

3 重要技术进展

经过长期持续滚动投资,HSST项目取得一系列重要技术进展,并从各子领域的单项技术开发转向跨领域的多项技术集成开发与应用,形成了多种集成应用平台。这为开展高超声速技术试验工作奠定了坚实的基础。重要技术进展有以下几个方面。

(1) 高超声速气动热与推进清洁空气试验台

高超声速气动热与推进清洁空气试验台(HAPCAT)利用清洁空气加热和可变马赫数(VMN)能力,能够在 Ma 4.5~7.5的模拟飞行条件下进行气动推进、气动热和气动光学试验。其主要目的是通过试验的方法确定气动力和气动热对先进高超声速传感器性能的综合影响。HAPCAT包括三大核心模块,即洁净空气再生蓄热式加热器(RSH)、空气输送系统(ADS)和变马赫数喷管。2015年8月,RSH完成研制并成功试验,实现了约38h的持续运行;2019财年,完成了空气输送系统(ADS)的最终设计、制造和在HAPCAT中的安装,并开始进行完工检查运行;2020财年,完成了RSH和ADS的关键子部件的集成,并完成了可变马赫数喷管能力的初步设计审查;2021财年,对HAPCAT试验台在包线上限进行了完工检查;2022财年,完成了HAPCAT试验设施的组装,计划2023财年开始进行设施运行试验^[2-10,17-18]。

(2) 中压电弧加热器原型样机研制

该原型样机用叠片加热器取代现有管弧加热器,创建的试验包线大约是当前气动热试验包线的三倍。2020财年,完成了电弧加热器流动品质气动热试验技术开发,演示验证了电弧加热器旋转线圈部件的新颖设计,为试验件提供了更高品质的流量,并延长了电弧加热器电极的工作寿命;2021财年,完成了AEDC电弧加热器的多次效率升级;2022年,启动了新的气动热试验技术开发工作,包括提升一种等离子体管的试验能力。这将推进电感耦合等离子体地

面试验设施建设,该设施可以作为电弧喷射加热器能力的重要补充^[2-5]。

(3) CUBRC的LENS系列激波风洞扩建和升级改造

美国卡尔斯潘—布法罗研究中心(CUBRC)的大能量国家激波(LENS)风洞具有高马赫数试验能力,可以开展高超声速气动热、气动光学和表面催化效应等方面的研究,是进行高超声速飞行器、超高速流动、大气层拦截弹、高超声速返回舱等地面试验的主要设备。2015—2017财年,在HSST专项的支持下,完成了LENSII扩建,提升了试验能力,试验运行时间提高了三倍。为满足CUBRC高超声速激波和膨胀风洞进一步发展的需要,最近4年来,HSST完成了用于评估高超声速飞行器传感器和导引头系统的气动光学仪器套件设计集成工作,以及用于评估高超声速系统的多个非侵入式诊断系统。2022财年,成功开发和演示了一个小尺寸试验设施,为建设全尺寸的气动光学和气动热防护系统试验设施提供了重要的技术支撑^[3-10]。

(4) 高空激光探测与测距大气传感系统

高空激光探测与测距大气传感系统(HALAS)采用紫外线激光扫描技术,可沿高超声速飞行器的飞行路径测量大气密度、温度、压力、风速/风向、氧气含量等大气数据,测量高度范围为0~80km,可显著提高试验数据分析和飞行器性能估算的准确性。近年来,HSST项目投资开发了地基和机载两类HALAS。2013—2018财年,HSST完成了陆基便携式激光探测与测距(LIDAR)系统的开发,并开展了LIDAR大气传感测量的试验和演示验证工作。随后这套系统被用于沿海飞行试验场的相关试验,以验证该系统在海上环境的性能。2020财年,机载HALAS被安装在湾流公司的G-IV公务机上,完成了持续收集大气数据的任务^[5-11,19]。

(5) 高保真度自动机载可重构跟踪系统

高保真度自动机载可重构跟踪系统(HAARTS)可提供高超声速飞行器在飞行过程中的高分辨率成像数据。2018财年,HSST完成了HAARTS的最终设计,包括集成到“全球鹰”无人机上的方案。2021财年,成功进行了HAARTS的地面完工检查,并且修改完善了集成到无人机上的系统方案。2022财年,完成了HAARTS系统的制造和系统集成,以及在“靶场鹰”上的初步安装检查,地面测试也已经完成,为2023财年全面安装做好了准备^[3-7]。

(6) 空中靶场

空中靶场在2019财年之前被称作“基于无人机的靶场”,其主要目标是对退役的无人机进行升级改造,弥补当

前高超声速飞行试验基础设施的不足。经过改装的RQ-4“全球鹰”和MQ-9“死神”无人机重新被命名为“靶场鹰”和“靶场死神”，将组成“空中靶场”新型无人机系统，用于高空遥测中继和传感，以补充或取代美国空军或海军的有人数据收集飞机。其中，RQ-4B最大滞空时间达到34h，飞行高度为18km，它能够长时间在靶场上空飞行，可以用更短的时间完成更多的测试。为了完成一款高超声速导弹的遥测工作，可能需要将测量船提前21天部署到位，而使用RQ-4B只需要几小时就能够就位，并且花费的资源更少^[6]。

为支持空中靶场建设，HSST对机载高分辨率多光谱望远镜、高空大气感应传感器以及相控阵遥测技术进行了研究，这些技术研究成果以及HSST开发的机载HALAS都将用于“靶场鹰”无人机。

该项目原计划于2024年开展机载高超声速测试设备验证试验，但出于美军对飞行试验的迫切需求、多部门联合推进，以及诺格公司对“全球鹰”的快速改装、平流层发射系统公司的“大鹏”(Roc)载机与“塔伦”(Talon)系列飞行器原型机研发成功等多方面原因，空中靶场项目定于2023年开始提供试验测试服务，即通过多架“靶场鹰”无人机持续监测“大鹏”双体飞机发射的“塔伦”高超声速飞行器，并获得高质量飞行试验数据^[20]。

(7) 高压可调谐二极管激光吸收光谱

可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)测量系统是利用特定波长的近红外激光能量被特定气体分子吸收形成吸收光谱的原理，来测量流场温度的一种光学测量技术，具有分辨率高、灵敏度高、选择性高以及非接触测量等优点。可以利用不同波长的激光器，对H₂O、CO₂、CH₄以及O₂等进行测量，进而得到流场静温、组分含量、流量和气流速度等重要流场数据，在众多超声速流场测量方法中具有很大的优势。

2018财年以来，HSST专项持续研发高压可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)，最终将集成到HAPCAT中，以在高温和高压下提供准确的空气温度测量。它将用于设施控制和设施状态的确定。TDLAS系统还可用于其他设施中的温度测量^[7,21]。

(8) 真实气体力测量(RGFM)系统

该测力天平系统具有高刚度和频率响应快的特点，使得高超声速流动中的测量持续时间缩短到1~2ms。这将显著提高高马赫数条件下的空气测量精度。HSST利用红外激光器构建了测量高速流中气体性质的先进系统，该系统显著降低了气体性质测量的不确定性，已转交给国防部

的一个地面试验中心和一个研究实验室，研制了一种小型化、温度补偿的超声速外挂物分离测试风洞天平。2017财年，HSST完成了用于短期、高焓试验设施的测力系统技术研发^[8]。

(9) 中红外热成像技术

2014财年，HSST启动了中红外热成像技术(MIRTI)研发工作。该技术可使高超声速模型表面的高焓流动热成像定量化，同时不会捕获有可能遮蔽表面温度成像的流场辐射效应。后续进一步优化了MIRTI的信噪比，并对典型助推滑翔体表面热辐射的测量进行验证试验。2016财年，HSST在脉冲试验设施中测量了典型助推滑翔飞行器表面热辐射数据，以评估不同表面材料组分、处理工艺和滤波频率对热成像的影响。2017财年，HSST开展了对脉冲试验设施中典型助推滑翔飞行器表面热辐射的测量，为助推滑翔飞行器设计获得了有价值的深刻见解，这些成果对未来自在高焓设施上的试验非常有用^[8-9,11]。

(10) 高速流场计算工具

HSST利用超燃冲压发动机试验和边界层试验的统一数据，持续开展了CFD软件的验证与改进工作。开发了一种经过验证的边界层转捩预测工具，可用于复杂三维助推滑翔飞行器几何外形研究。这些软件可支撑对试验样件表面在不同曲率、雷诺数和迎角等条件下边界层转捩特征和程度进行预测和分析。在瞬态热分析软件方面完成了气动热软件模块与结构加热软件模块的集成。该软件由多个机构进行了检测调试，并已经开放给高超声速研究机构，以支撑其对飞行试验的规划和分析。上述计算工具已转化给高超领域的用户，用于建模仿真、地面试验和飞行试验^[8-9]。

4 结束语

HSST项目是美国国防部目前唯一致力于高速/高超声速试验鉴定技术预研的科技专项计划，每年征集工业界、学术界和政府实验室提出的试验能力需求，其最终目标是寻求超前、快速和灵活的高速/高超声速试验鉴定技术。该项目的持续滚动实施，为先进高速/高超声速技术向高速/高超试验领域转化奠定了基础。

美国的经验表明，高超重大科研试验设施通常造价高昂，本身也是一种复杂系统，其建设与研发高超声速飞行器一样富有挑战性，需要通过超前的统筹规划，长期迭代开展试验设施设备建设的关键技术预先研究和技术攻关，才能确保高超声速试验基础设施建设及试验能力尽快形成，为高超声速武器研制提供有力的方法和手段支撑。 **AST**

参考文献

- [1] Exhibit R-2, RDT&E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation/science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2023.
- [2] Exhibit R-2, RDT&E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2022.
- [3] Exhibit R-2, RDT&E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2021.
- [4] Exhibit R-2, RDT&E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2020.
- [5] Exhibit R-2, RDT&E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2019.
- [6] Exhibit R-2, RDT&E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2018.
- [7] Exhibit R-2, RDT& E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2017.
- [8] Exhibit R-2, RDT& E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2016.
- [9] Exhibit R-2, RDT& E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2015.
- [10] Exhibit R-2, RDT& E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2014.
- [11] Exhibit R-2, RDT& E budget item justification: PE0603941D8 Z: Test and evaluation /science and technology[S]. Office of Secretary of Defense, 2013.
- [12] George R. The DoD T&E/S&T program[C]. ITEA Technology Workshop, 2011.
- [13] Geoff W. The DoD T&E/S&T program[C]. ITEA 35th Annual International T&E Symposium, 2018.
- [14] 胡冬冬, 叶蕾. 从高速系统试验(HSST)项目看美国高超声速试验科学技术领域实施现状[J]. 飞航导弹, 2016(4):22-27.
Hu Dongdong, Ye Lei. Analysis of American hypersonic test science and technology through HSST [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2016(4):22-27. (in Chinese)
- [15] Test & Evaluation /Science & Technology Program, High Speed Systems Test Technology Program. AFOSR Aerothermodynamics, Turbulence and Transition Portfolio reviews[C]. AFOSR Aerothermodynamics, Turbulence and Transition Portfolio Review, 2015.
- [16] Timothy D. West. U.S. Air Force Investments in Hypersonic Test Technologies and Infrastructure[C]. NDIA 33rd Annual Test & Evaluation Conference, 2018.
- [17] Fetterhoff T P, Burfitt J W. Overview of the advanced propulsion test technology hypersonic aero propulsion clean air test-bed [C]. 17th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. 2011: 11-14 .
- [18] 刘晓波, 钟萍, 孙杭义, 等. 美国新型高超声速地面试验设施建设研究与启示[J]. 战术导弹技术, 2022(5):81-92.
Liu Xiaobo, Zhong Ping, Sun Hangyi, et al. Research and inspiration of new construction of advanced hypersonic ground test facility in the United States[J]. Tactical Missile Technology, 2022(5):81-92. (in Chinese)
- [19] Spravka J J, Jorris T R. Current hypersonic and space vehicle flight test and instrumentation [R]. ADA619521, 2015.
- [20] 王树博, 杜斌, 姜百汇. 美国高超声速飞行试验测试能力最新发展分析[J]. 空天技术, 2023(1):180-184.
Wang Shubo, Du Bin, Jiang Baihui. Analysis of the latest development of hypersonic flight test capability in the United States[J]. Aerospace Technology, 2023(1):180-184. (in Chinese)
- [21] 李晓峰, 武腾飞. 基于激光诊断的分子标记示踪测速技术研究进展[J]. 计测技术, 2022, 42(5):13-22.
Li Xiaofeng, Wu Tengfei. The progress of molecular tagging velocimetry technology based on laser diagnosis[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(5):13-22. (in Chinese)

Study of the Technical Progress of the DOD High Speed System Test (HSST) Project

Zhang Baozhen, Zhao Qunli

Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China

Abstract: High Speed System Test (HSST) project is the only pre-research project specially developed by the U.S. Department of Defense for high speed/hypersonic test science and technology, which is very important for hypersonic test infrastructure construction and test capability formation. This paper briefed the background of the High Speed Systems Test (HSST) project of the Department of Defense, summarized the focused technical areas and the development of the critical technologies. Through the execution of the HSST project, the US has grasped a series of hypersonic test technologies, and successfully developed some important hypersonic test facilities, such as Hypersonic Aero thermal and Propulsion Clean-Air Test bed(HAPCAT), High Altitude LiDAR Atmospheric Sensing (HALAS), High fidelity Automated Airborne Reconfigurable Tracking System (HAARTS) and Sky Range, etc, which laid a solid foundation for the hypersonic technology research and hypersonic weapon systems development.

Key Words: hypersonic speed; test technology; test facility; HSST project