

数字工程推动美国高超声速武器研发

Digital Engineering Promoting the Development of U.S. Hypersonic Weapons

■ 张强 李茜 / 中国航发涡轮院

高超声速武器作为美国国防部重点发展的复杂工程项目，在技术开发与成熟方式上并不完全支持工业化解方案。而采用数字工程方法可以使高超声速武器从开发到生产、组装和保障的全生命周期的虚拟化，为实现装备更快的设计、无缝装配和升级打开了方便之门，为高超声速武器开发中存在的问题提供解决办法。

美国国防部在2018年正式发布数字工程战略(Digital Engineering Strategy)，并将其定义为一种集成的数字方法，通过在全生命周期内跨学科、跨领域地连续传递模型和数据，借助超级计算、数据分析、人工智能和机器学习等创新技术以提升工程能力，实现敏捷采办、夯实工业基础、促进制造业变革。

被寄予厚望的数字工程

近年来，美国自认为在高超声速武器进展方面处于相对被动的局面。大国竞争战略下对未来高超声速武器库规模需求，导致美国投入更大精力以提升高超声速武器产能。美国最新发布的“国家高超声速倡议2.0”(NHI2.0)是一份面向未来的长远计划，希望帮助其获得“破坏性和先进的作战能力”，在全球舞台上重获竞争优势。美国国防部认为，为了实现可负担的能力，美国必须打破陈旧方式，以更先进的方式实现更多、更快生产。而美国发展数字工程，就是要对其敏捷供给能力体系进行升级，数字化能力将在美国高超声速武器的“设计—研发—制造”全生命周期发挥重要作用，支持高超声速武器系统的快速规划、



B-52轰炸机发射ARRW导弹

敏捷设计、高效制造与精准保障，以更经济和可持续的方式向作战部队快速交付先进高超声速武器。

2022年7月，为得到制造高超声速武器所需吸气式发动机的能力信息，美国空军在向工业界发布的征询书中，除了要求从事美国国防部高超声速项目的公司概述其当前和未来的生产能力预测外，还要指出在高超声速发动机方面的技术创新以及是否应用了数字工程等要素。数字工程与高超声速武器研发的联系愈加紧密。

数字工程在现有高超声速项目的应用

2022年7月12日，美国国防部高超声速武器负责人迈克·怀特(Michael White)在高超声速论坛中围绕如何最大限度地提供高超声速能力发表专题演讲，指出国防部正在制订一项名为“国家高超声速倡议2.0”的未来战略，希望创造一个更强大的能力通道和采办生态环境，以负担得起、负责任和稳健的方式加快美国高超声速技术发展。NHI2.0战略中降低成本和提高设计制造能力的

目标与美国国防部正在实施的数字工程战略不谋而合，一些军工企业纷纷应用数字工程技术促进高超声速武器的研发。

洛马公司开设智能制造工厂

洛克希德-马丁（洛马）公司承担了美国空海陆三军的多个高超声速武器项目，在美国国防部数字化转型的浪潮下，洛马公司积极参与数字工程建设，在多个项目中采用了数字线索（digital thread）和数字孪生（digital twin）技术。

2018年启动的“空射快速响应武器”（ARRW）项目旨在发展一型战术机载高超声速助推滑翔武器。作为该项目的总承包商，洛马公司在2021年开设了两大智能工厂，助力ARRW导弹的制造。

2021年8月，洛马公司在加利福尼亚州帕姆代尔的臭鼬工厂开设了一个占地2万m²的先进制造厂，支持空军ARRW的初始样机建造工作。该工厂具备数字基础设施，能够集成智能制造手段，搭载物联网并快速、经济地提供尖端解决方案，使项目的快速迭代设计成为可能。

2021年10月，洛马公司又在亚拉巴马州考特兰启用了4号导弹装配大楼（MAB4），重点支持ARRW后续制造工作。MAB4采用了先进的数字技术，如机器人热防护应用能力、智能扭矩工具和基于混合现实的培训与虚拟检查等。同时，制造车间还采用数字线索技术，做到生产设施间的数字化连接，对其状态和运营优化进行全维监测，实现以最高效率优化生产，提升高超声速导弹制造效率，降低生产成本。由于MAB4工厂汇集了洛马公司最先进的生产技术，使科研人员能够充

分利用数字工程在时间和空间上的便利性，彻底改变了开发和生产高超声速武器的方式。

除了ARRW项目，基于数字化制造能力，洛马公司还向国防部交付了其他高超声速武器项目的产品，包括常规快速打击（CPS）和远程高超声速武器（LRHW）。在上述项目中，洛马公司表示将与国防部和科研机构长期合作，利用全公司最好的数字技术，为开发最先进的高超声速打击能力铺平道路。

雷神技术公司采用新型设计流程

高超声速吸气式武器概念（HAWC）项目于2013年启动，旨在发展一型速度达到Ma6的高超声速巡航导弹。雷神技术公司在HAWC项目的开发过程中充分应用了数字工程技术，其项目负责人称“所有的事情都在数字模型中完成”。

在过去的典型设计流程中，雷神技术公司一般是在一种集计算机辅助设计/制造/工程于一体的软件Pro/Engineer或类似工具中完成机械模型，以创建整个结构的3D绘图，进而执行计算流体力学等操作，然后再开展性能模型测试等。在此过程中，工程师需要从一个模型获取

结果并将其输入另一个模型，带来的问题是这种连续工作方法会驱使开发人员进行一系列迭代，在将模型传递到下一步后，需要继续更新模型，十分耗时。而在雷神技术公司的数字工程环境中，所有这些模型都汇集在一起，避免了迭代的过程。同时，随着数字化模型继续发展和成熟，还可以找到区域解决方案，而不是一个点解决方案。这使得整个工作变得有弹性，进行了一定范围的改动后仍能满足任务需求，将更有利于生产。

为验证HAWC项目数字模型和仿真的准确性，技术团队在高速风洞中测试一个缩比样件。试验结果显示，数字化模型仿真结果非常准确，甚至能够通过数字化模型仿真结果观察到风洞试验中存在的异常情况并进行纠正。通过用数字环境中的循环迭代学习代替硬件的制造和试飞以及简化测试，雷神技术公司在HAWC项目中验证了对高超声速飞行环境的建模能力。数字化设计和工程有能力使开发时间缩短30%或更多，甚至可能使试验测试时间缩短更多。

雷神技术公司对数字线索在



雷神技术公司的HAWC导弹

高超声速武器开发中的应用十分重视，从采用开发—信息安全—运营（DevSecOps）的方式进行软件研发开始，将使用、供应链和持续保障等环节整合到统一的数字线索中，从而使开发时间缩短一半，并降低研发成本。

诺格公司成立数字化研发机构

作为美国高超声速巡航导弹超燃冲压发动机的重要供应商，诺斯罗普-格鲁门（诺格）公司在其高超声速项目中积极应用数字工程。诺格公司的研究、技术和工程部门正在尽其所能，努力创造最先进的三维设计技术，并将数字设计与数字制造技术结合起来，更快、更有效地提供更好的产品，优化作战人员的体验。

2021年7月，诺格公司宣布兴建高超声速卓越中心以支持高超声速武器的设计、开发、生产和集成，配备先进的生产技术并采用成熟的数字工程实践经验，使诺格公司能够快速应对技术的不断发展及客户需求的变化，以支持美国军队及其盟友应对新兴威胁。新的高超声速生产设施将优化开发效率，降低生产成本，能更快地将武器交付给作

战人员。此外，卓越中心通过运用数字工程，可实现无损检测的自动化处理，并部署自动化装置来提高安全性和可靠性，优化高超声速导弹开发效率，降低生产成本。

2021年8月，诺格公司在亨茨维尔成立了新的导弹防御未来实验室（MDFL），采用了全面的建模、仿真和可视化技术，以促进开发人员和作战人员之间的创新和协作。该实验室凭借定制的服务器，以及处理和中继来自导弹探测卫星和地面站数据的能力，支持导弹防御系统工程师的研究、建模和模拟，协助开发跟踪软件，以应对核威胁和其他威胁。诺格公司表示，通过与客户在预研和设计之初开始合作，该公司将在国防工业进行数字化转型的过程中处于领先地位。

数字工程在新增高超声速项目的应用

除了以上所述项目，根据最新发布的2022财年预算，还可以看到数字工程在美国其他高超声速项目中的应用，包括高超声速进攻巡航导弹（HACM）项目和高超声速空射

（HALO）项目等。

HACM项目是美国空军在2022财年新增的研发项目，旨在研发以超燃冲压发动机为动力的高超声速巡航导弹原型机并开展演示验证。预算报告显示，该项目将支持原型机的技术开发和测试，支持数字工程、开放系统架构、建模分析和高性能计算环境建设等，为演示验证做技术储备。

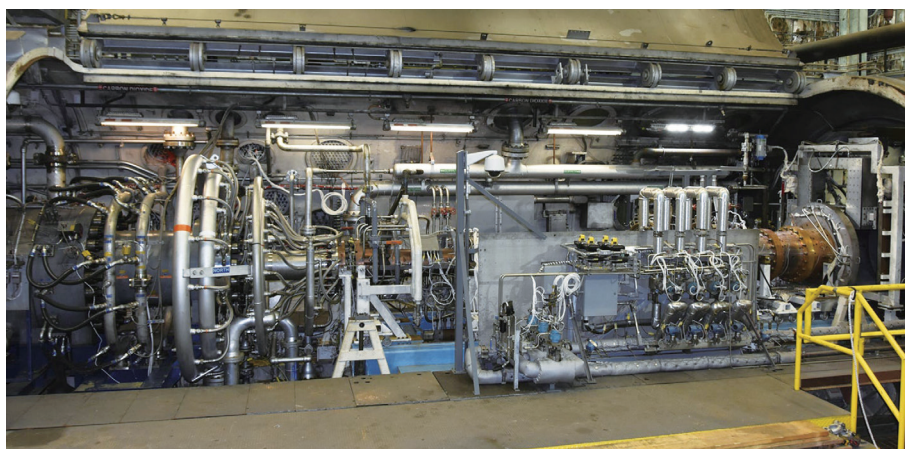
HALO项目在美国海军2022财年预算中被首次披露，时称“进攻性反水面战武器增量II”（OASuW Inc II），作为进攻性反水面战武器（OASuW）的后续型号。据预算信息，美国海军将通过可选方案分析、原型设计及技术演示验证，有针对性地成熟子系统技术，并对组件和全尺寸原型进行设计。在项目的采办计划中，该项目将使用数字工程和基于模型的系统工程实践进行需求确定、设计、贸易研究及分析，并完成未来作战条件下的系统鉴定、组件/子系统试验、制造和维护的相关技术规划。

结束语

当前，以美国雷神技术公司、洛马公司和诺格公司为代表的军工企业积极响应和应用数字工程技术，促进高超声速武器装备的开发和生产。随着数字化模型的仿真度在所有行业中的提高，美国国防部对数字化仿真能力的信心迅速提升，工业界也将更快落地、启动更多具有代表性的数字技术，以期帮助美国通过创新在高超声速项目中获得竞争优势。

航空动力

（张强，中国航发涡轮院，工程师，从事航空发动机设计工作）



诺格公司试验超燃冲压发动机