

美国专家对高超声速武器及平台关键问题的观点

廖孟豪

美国正在开展高超声速助推滑翔导弹和巡航导弹研发，预计未来几年内就可以投入战场。但围绕尺寸更大的、定位于打击与侦察/高速民用和军用运输/甚至多级入轨等任务的高超声速飞行平台，目前仍有大量科研工作需要做。

美国此前开展的高超声速助推滑翔飞行器和吸气式超燃冲压验证飞行器等科研项目取得了一系列研究成果。美国国防部现代化研究与工程局局长马克·刘易斯表示，“我们可以确信，设计研制能够产生正推力的超燃冲压发动机已不存在技术障碍。但从一次性使用的助推滑翔飞行器和巡航飞行器跨越到可重复使用的高超声速飞机，这中间还要做大量的工作。如发动机与机体的一体化，特别是推进系统的模态转换问题。我们需要一个可以从马赫数0加速到马赫数5或6、然后再减速到马赫数0的推进系统，我们正在开展这项研究。但问题是，这应该是一台组合发动机还是多台发动机的组合？能够直接从涡轮转到亚燃冲压/超燃冲压发动机吗？是否需要做一些中间过渡措施？”

尽管超燃冲压发动机已经有几十年的研究经验了，但各种有竞争力的推进概念仍在不断涌现。因此，超燃冲压发动机还是正确的答案吗？刘易斯表示，“我个人认为不一定。我们应该尽量放开思想，认真思考是否还有其他的高速推进选项。我不想现在就收效我们的技术路线。”

推进系统的潜在可选方案

除了涡轮基冲压组合发动机以外，目前正在研究的多类推进方案都有作为马赫数0~6+高超声速飞行器动力的潜力。一类是采用液氢作为热沉和燃料的动力，包括日本航空研发机构(JAXA)研究的ATREX空气涡轮冲压膨胀循环发动机、俄罗斯研究的ATRDC深度预冷空气涡轮火箭发动机、综合了深度预冷涡轮与液体火箭的KLIN发动机以及吸气式火箭发动机等。一类是正在兴起的旋转和脉冲爆震发动机以及磁流体/磁-等等离子体发动机，其中有研究认为，将脉冲爆震发动机与引射冲压、亚燃冲压、超燃冲压和火箭等模态组合起来，可用于实现太空进入。另外还有一个备选方案就是英国反作用发动机公司(REL)正在研制的“佩刀”协同吸气式火箭发动机，研发团队在2019年10月完成了预冷却器样机在马赫数5条件下的地面考核试验。

刘易斯认为，“液态空气循环发动机和深度预冷循环发动机的整个理念都极具发展前景。我不知道它们最终是否能够成功研制出来，但它们看上去都有独到的优势。我真正关心的是我们必须保持充分多样化的研发路线，确保给各类概念都留有足够的发展空间。”

机体/推进一体化

随着速度和高度增加，吸气式飞行器都必须满足一个相对较小的飞行包线的约束。碳氢燃料超燃冲压发动机需要从马赫数3开始启动，燃料热值限制了它最多只能飞到马赫数7.5，而氢燃料则可以将这个速度极限扩展到马赫数14。从飞行高度来看，大多数双模态超燃冲压发动机飞行包线的上边界都限定在500磅力/平方英尺(psf, 约合24千帕, 24kPa)，即从，马赫数5/高度30千米到马赫数15/高度45千米的动压线；下边界一般受结构强度限制，限定在2000磅力/平方英尺(psf, 约合98千帕, 98kPa)，即从马赫数2.5/高度12千米到马赫数14/高度33千米的动压线。

此外，需要面临的挑战还有：设计条件随着马赫数变化带来的气动特性变化而更加复杂；优化机翼面积适应多种飞行模态；高载油系数的飞行器布局设计；以及设计恰当的进气道和尾喷管尺寸，这两个部件的最优外形设计理论上会紧密随着马赫数变化而显著变化。

刘易斯表示，“我们知道怎么设计一个好的进气道，但不知道什么是最好的进气道设计。这里面仍然有大量的研发和优化工作需要做。”高推阻比对于快速加速到马赫数5+至关重要。研究人员发现进气流量与发动机推力必须高度匹配才能在各速度段都获得2以上的推阻比。与此同时，为了使飞行器能够顺利跨马赫数1附近的跨声速段，一方面进气道既要足够大以便捕获足够的空气来获得足够的推力，另一方面进气道和尾喷管又要足够小以便减小飞行器的阻力。

波音公司高超声速首席科学家鲍

卡特表示，“设计进气道要面临方方面面挑战，要兼容大范围变化的空气流量捕获要求和收缩比要求（实现高压比和来流稳定性），还要确保进气畸变足够低和溢流阻力足够小。而以上每个参数的具体要求都会随着马赫数、高度和攻角等飞行参数的大范围变化而变化。”



刘易斯也表示，“过去这么多年，我接触了非常多的高超声速飞行器概念设计，决定它们最终气动外形方案的往往都不是它们的高超声速性能要求，而是跨声速性能要求。你可以设计出一个在马赫数5、6、7或8有良好性能的气动外形，但它们都没法跨马赫数1。推阻平衡在跨声速段总是无法接续上。我们在设计导弹的时候，总是用火箭来快速跨马赫数1，因此也就不存在这个问题了。但低马赫数段的性能就变得非常重要了。”

机体与推进紧密耦合以后又带来了飞行器内部机载系统重量、功率、尺寸等最小化的要求，这使得问题进一步复杂化。刘易斯认为，通过多学科优化等方法实现高度一体化的飞行器架构“绝对是一个关键技术问题。我们35年前就明白了高超声速飞行器必须是一个高度一体化的系统，今天我们对这一点更加深信不疑。”

尺寸与流动问题

尺寸放大会带来诸多问题。美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室防空反导部门负责人大卫·万·怀尔(David Van Wie)表示，“随着飞行器尺寸增加，其他问题又会耦合进来，比如结构

弯曲与屈伸。飞行器不可能都是刚体。飞行载荷将深入影响到发动机乃至推进系统。而尺寸越大，这种耦合影响就越显著和复杂。”

尺寸小了也会有问题。虽然刚度变好了，但又会面临容量和热管理等难题。万·怀尔表示，“NASA很早以前

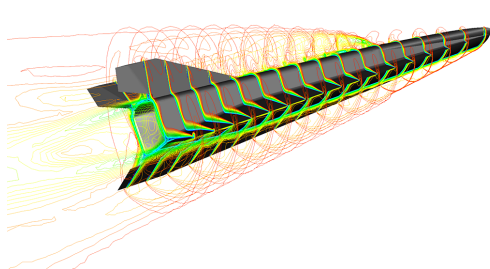
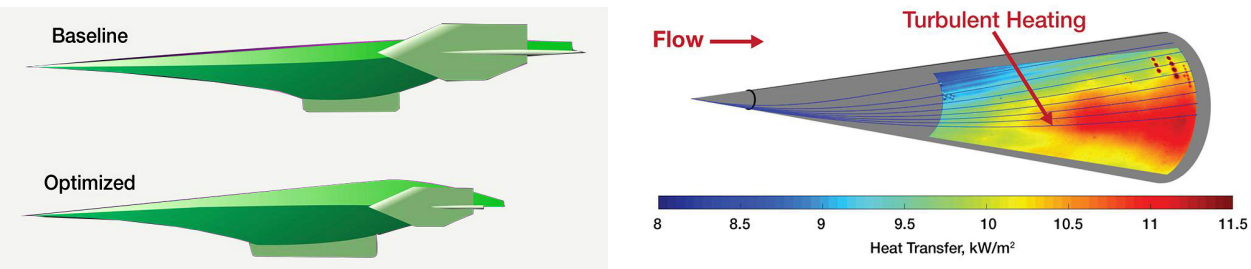
更耐高温的材料

尽管过去几十年在航天器、弹道导弹和超高速飞机等飞行器上积累了大量热防护材料技术成果，但这些都无法解决大气层内高超声速飞行面临的高温问题。当速度达到马赫数6及以上时，飞行器前缘的温度可以达到1600~2200℃，这比钛合金熔点高300℃，比钢的熔点高600℃。巨大的热流密度会在很小的区域内造成非常大的热冲击和热梯度。

万·怀尔认为，“前缘越尖锐，温度就越高。问题是如果你想设计成多尖锐，这本质上可转换成前缘结构材料能够耐受多高的温度。这对于可重复使用飞行器和一次性使用飞行器来说有很大差异。材料耐高温性能越好，你就可以设计越尖锐的前缘，就可以获得更高的升阻比，更好的性能。这个领域还有很大的提升空间。”

飞行器尺寸变化也会对热环境产生影响。刘易斯解释认为，“人们一般不理解尺寸变化的影响。比如，如果把一个特定的高超声速飞行器进行等比例缩小，它的前缘一定会变得更加尖锐（前缘半径减小），这就导致温度更高。因此，我必须增加前缘半径使它变更钝，而这又反过来增加了气动阻力，从而进一步影响气动性能。这样的情况遇到多了以后，我们意识到我们必须对尺寸的问题高度谨慎。飞行器能够在某个特定外形尺寸下满足要求，不代表我们可以将它放大或缩小仍然能够满足要求。”

当飞行器速度超过马赫数5以后，飞行器表面的空气本身也在发生变化。严重的气动加热将会使氧气和氮气发生离解，使得空气组分和特性发生变化，进而影响飞行器表面流场特性。



美国空军正在快速打造下一代空中主宰的“军事物联网”

远航

美空军近三年来在加快和加大力度发展“先进作战管理系统”(ABMS)以及“联合全域指挥与控制”(JADC2)能力。但ABMS并非为美空军近几年的新发展之物。早在空军之前，诺格公司就已经开展了15年名为“先进作战管理系统”的研究。

ABMS又称“军事物联网”，类似于当前人们日常生活中的“物联网”，它是美空军面向未来作战需求而设计打造的一种跨域一体的作战网络，是美军“下一代空中主宰”力量及各域内所有作战元素的连接器，可以连接海、陆、空、太空和网络空间等各个作战域及军种的所有以及任何作战装备。

JADC2是基于ABMS系统而打造的“决策中心战”或“网络中心战”的核心组成能力，可以实现全域或跨域的一体化作战指挥与控制能力。JADC2系统是ABMS系统的一个组成部分。

ABMS以及JADC2都以云技术(包括云存储、云计算、云管理等)、数字技术以及人工智能等新技术为赋能器，以实现作战性能目标。

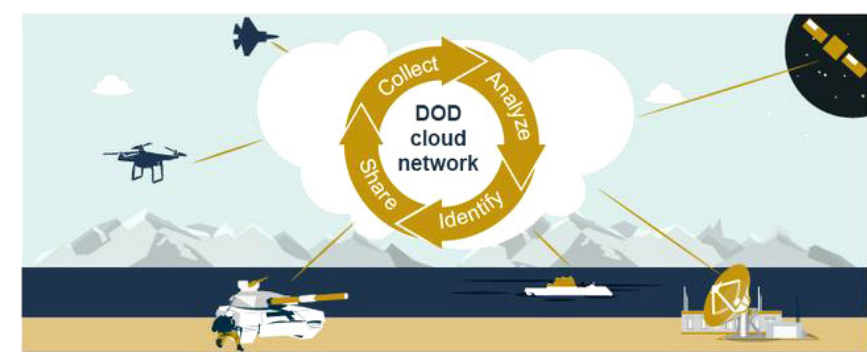
ABMS采用一种分布式、开放型架构，包含多个系统，并采用螺旋式开发方法。按照美空军的计划，未来10~20年内，即到2030~2040年，将实现非常完善的作战网络。

2020年6月9日，美国空军负责采办的助理部长威尔·罗珀表示，“下一代空中主宰”(NGAD)项目的采办规划将在未来几个月内出台。6月5日，美国空军宣布“空军工场”(AFWERX)将在6月15日这一周开始，在拉斯维加斯举行一轮“联合全域指挥与控制”(JADC2)原型演示活动。5月29日，美国空军寿命周期管理中心宣布，授予28家企业共计28份不定期开发/不固定数量合同，每份合同最高限额为9.5亿美元(但起步额度可能从1000美元

不等)，以利用开放式系统设计及现代软件和算法开发JADC2系统能力，实现跨平台和跨域指挥与控制能力的成熟、演示和扩展。近期这一系列的举措，将美国空军围绕下一代空中主宰力量所开发的跨域“先进作战管理系统”(ABMS)以及JADC2系统频繁带入人们的视野范围之内，同时也证实美空军正在加紧开发人工智能赋能的ABMS作战网络以及JADC2跨域指挥与控制能力。

概念、目的及作用

“先进作战管理系统”(Advanced



Battle Management System, 缩写为ABMS, 以下统一简称为ABMS), 是美空军在“多域战”等作战概念的演化下，逐渐提出并力求打造的面向未来作战需求的一种先进网络。它是美空军未来“以网络为中心”的作战方式的一个重要组成，美空军目前正在追求从“以平台为中心”向“以网络为中心”作战方式的转变。但从目前情况分析，美国空军并没有定义一个足够清晰的架构来满足需求，亦即美空军的ABMS系统需求模型尚未完全成型，尚存在着很多不确定性。

在美空军内部，ABMS被称作或视为“军事物联网”，因为它类似于现在日常生活中的物联网，即自己的设备通过无线网络可以自动进行连接。例如现在的智能手机，当进入连接不畅的地区时，它可以无缝地从5G转移到

3G。而未来作战场景中的所有ABMS系统成员(作战平台/设备)通过集成人工智能等先进技术，都可以实现这一功能，即实现联网的灵活性、自动化能力。这可能需要基于云的数据存储技术，以及利用人工智能技术实现对特定信息需求用户的跟踪及数据整理、相关数据推送，从而提高其实用性。

ABMS是一种分布式指挥控制网络，“联合全域指挥与控制”(Joint All-Domain Command and Control, 缩写为JADC2, 以下统一简称为JADC2)是其一种重要能力组成，而JADC2系统是ABMS系统的一个重



要组成。ABMS和JADC2又共同组成了美军未来能力规划的重要部分。2020年4月1日，美国空军全球打击司令部(AFSGC)司令蒂莫西·雷上将在“未来能力规划要点”中指出，未来各军种的远程精确打击能力将极大取决于天军(Space Force)的建设水平，因此各军种应全面参与JADC2计划和ABMS项目。

2020年4月16日，美国政府问责局(GAO)发布评估报告指出，ABMS是一个系统家族，旨在取代老旧的指挥和控制能力并开发情报、监视和侦察传感器网络。其将建立一种网络，以连接飞机、无人机、舰船和其它武器系统上的传感器，从而实时提供所有领域威胁的作战情况。

根据有关信息，ABMS是用来取代已经取消的“联合监视目标攻

击雷达系统”(JSTARS)重组计划。JSTARS主要是指诺格公司的E-8C机载联合监视目标雷达系统。JSTARS飞机队主要是为美国军事力量提供跟踪地面目标服务，并辅助指挥与控制。美国空军期望采用ABMS这种分布式平台架构连接飞机、卫星、船舶、地面车辆和指挥控制站，组成包括无人机在内的多种平台网络，允许指挥官直接和实时共享战场信息，而不是依赖于特定类型的飞机和武装部队的通信系统，从而能够更好的分享数据并提高战斗力。

美空军期望ABMS通过集成传感器和效应器来提供安全的联通和处理能力，并确保作战人员可在需要实现“联合全域指挥与控制”的时间和地点获得数据和应用程序。这一系列能力通过开放式指挥标准以及数字工程技术结合在一起，最终使任何传感器都能通知决策者，并影响陆、海、空、天和网络空间等任何作战域的任何武器。美国空军部首席架构师普雷斯顿·邓拉普(Preston Dunlap)曾表示：“我们的目标是通过可信的联网和智能算法，将情报和瞄准数据转换为及时且可操作的信息，使我们的人员能够专注于决策。在这种构想中，信息是服务，而不是平台，各感知层和通信路径将在对抗环境中提供可靠性和保证。”

总之，美空军对ABMS的最终目标是建设一个集成了“下一代空中主宰”力量的系统簇集群，创造类似物联网的空军装备生态体系，实现跨域作战指挥与控制。

ABMS带来的变化和影响

按照高级战斗管理系统架构师普雷斯顿·邓拉普的说法，因为实施ABMS项目，美空军的确实开始通过由诺格、洛马和霍尼韦尔公司创建的新网关(具备低概率被探测截获能力的通信链路)，来实现海军和空军F-22和F-35战斗机以及其他平台之间的数据传输。其还取消了“全球闪电”

设计出足够鲁棒的气动布局。这是一件很难的事情。”万·怀尔同意这个观点，“不断提高我们的飞行器设计能力，使它在空中飞行时具有足够的操纵鲁棒性，是当前面临的一个更大的问题。你肯定不希望这个飞行器只能按照特定的剖面来飞行。我希望它可以像其他飞行器一样自由飞行。”

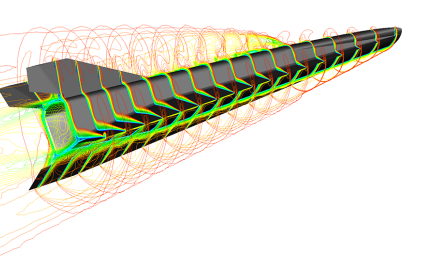
更耐高温的材料

尽管过去几十年在航天器、弹道导弹和超高速飞机等飞行器上积累了大量热防护材料技术成果，但这些都无法解决大气层内高超声速飞行面临的高温问题。当速度达到马赫数6及以上时，飞行器前缘的温度可以达到1600~2200℃，这比钛合金熔点高300℃，比钢的熔点高600℃。巨大的热流密度会在很小的区域内造成非常大的热冲击和热梯度。

万·怀尔认为，“前缘越尖锐，温度就越高。问题是如果你想设计成多尖锐，这本质上可转换成前缘结构材料能够耐受多高的温度。这对于可重复使用飞行器和一次性使用飞行器来说有很大差异。材料耐高温性能越好，你就可以设计越尖锐的前缘，就可以获得更高的升阻比，更好的性能。这个领域还有很大的提升空间。”

飞行器尺寸变化也会对热环境产生影响。刘易斯解释认为，“人们一般不理解尺寸变化的影响。比如，如果把一个特定的高超声速飞行器进行等比例缩小，它的前缘一定会变得更加尖锐（前缘半径减小），这就导致温度更高。因此，我必须增加前缘半径使它变更钝，而这又反过来增加了气动阻力，从而进一步影响气动性能。这样的情况遇到多了以后，我们意识到我们必须对尺寸的问题高度谨慎。飞行器能够在某个特定外形尺寸下满足要求，不代表我们可以将它放大或缩小仍然能够满足要求。”

当飞行器速度超过马赫数5以后，飞行器表面的空气本身也在发生变化。严重的气动加热将会使氧气和氮气发生离解，使得空气组分和特性发生变化，进而影响飞行器表面流场特性。



更高马赫数引起的空气电离还会对高超声速飞行器的通信和制导导航与控制产生影响。

洛马导弹与火控公司技术负责人大卫·亨恩(David Hunn)认为，材料是成功研制一型高超声速飞行器所面临的“第一个”问题。“我不得不基于材料限制来调整我的飞行轨迹和性能设计。我们过去在这个领域探索得比较少。这里面又涉及到主动冷却结构、采用各种主被动热防护的隔热热结构等。但总体上来说，辐射冷却/热结构是一种更好的方式。原因很简单，它不涉及活动部件，而且空间、重量和功率需求更小。”

涂层问题

金属材料一般很难承受这么高的热流和温度，目前一般都会采用碳纤维和碳基复合材料以及陶瓷基复合材料。大卫·亨恩提到，“这类材料虽然能够承受高温，但随之而来的问题就是抗氧化。因此需要靠表面涂层来解决这个问题。能够在1700℃以上工作的涂层包括碳化钨和碳化钼以及硼化钨和硼化锆等。这些陶瓷基材料具有非常好的抗氧化特性，因此大量研究工作都在研究采用这类涂层来作为实现当前高超声速机体结构的近期解决方案。但从远期来看，我们还需要开展更多自然科学研究工作，来找出更适合的材料。大学和研究实验室正在开展相关基础研究，希望能够采用计算材料学和元素周期律等方法理论来实现某种更加适合高超声速飞行的新型材料。”

工业能力就绪度问题

建立一套能够支撑研制生产计划的工业基础能力是最末端且更加紧迫的一项挑战。今年上半年，美国国防部采办系统的领导层组建成立了一个国防部层面的“指挥部”，评估工业供应链存在的薄弱环节。

航空喷气-洛克达因公司防务板块高级副总裁泰勒·埃文斯(Tyler Evans)表示，“X-51A是一架推进技术飞行验证机，已证明了我们掌握了超声速燃烧的科学机理。如今10年过去了，我们应聚焦于使超燃冲压发动机可实战使用、可重复使用和经济上可承受。”洛克达因采购了一家专攻增材制造技术的公司，以便能够降低其固体火箭、液体火箭以及超燃冲压发动机的生产成本。“我们已经把增材制造技术深度融合入到了设计工作中。”

实现互操作性。deviceONE加密数据软件系统。美国空军研究实验室负责开发的一种基于软件的加密数据访问项目。它可以在更好的保护加密数据安全的基础上，更方便部队人员的移动式数据处理需求。

ABMS 开发计划和任务

按照美空军2020年预算，ABMS计划分为七类：数字架构、标准和概念开发；传感器集成；多域数据管理；多域安全处理；多域连接；多域应用；效果集成，包括“开放式智能弹药”、“属性飞机”(attributable aircraft)和“实时更新任务数据文件以提高电子战系统性能”。

美空军 ABMS 演化历程

ABMS于2018年首次提出，是美国国防部创建“作战云”(Combat Cloud)自组织网络的首次尝试，即将民用的“物联网”(IoT)模型转移到战场上。其首次实验于2019年12月在美国艾格林空军基地进行，并计划之后每4个月进行一次实验，以促进快速创新和成熟。

在2019年的国防授权法案中，国会同意了空军取消有人驾驶的JSTARS翻新计划，转而采用大型天基系统ABMS系统。

实际上，早在美国空军取消E-8C“联合之星”飞机项目(JSTARS)，转而采用一个开放式体系结构平台之前，诺格公司就已经开展了15年名为“先进作战管理系统”的研究。但在过去五年中，随着反导系统的发展势头增强，各军种围绕着改进的全领域联合指挥和控制的观念重新受到关注，美空军才真正开始开发相关系统。