访问《空天力量杂志》网站

免责声明：凡在本杂志发表的文章只代表作者观点，而非美国国防部、空军部、空军教育和训练司令部、空军大学或美国其他任何政府机构的官方立场。

联系本刊编辑

DARPA 突防新技术面面观

DARPA Emerging Technologies *

保罗·卡尔霍恩，美国空军少校（Major Paul Calhoun, USAF）

美国国家实力的一根重要支柱，是军事力量，军事力量保持强大，才能压住敌人气焰，保卫本国利益，其对实现国家战略目标至关重要。在可能构想到的未来各种冲突中，已无确定因素可言，唯一能确定的，就是美国势将面对各种复杂的威胁。作为应对，美国国防部高级研究计划局（DARPA）正在开发各种前沿新技术。

DARPA 的使命，是按照国家安全需要，投资开发突破性关键技术。为了实现这个目标，它关注多个重要领域，设定研发目标，确保美国始终具备能力压制新现威胁，补齐自身短板。DARPA 的研发范围非常宽广，正如其座右铭，即弗朗茨·李斯特（Franz Liszt）的箴言所证："把一支标枪投入无限的未来空间。"本文无法倘佯于无限的空间，只能重点探讨三个领域，这三个领域都关乎天空领域，目的是压制对手的复杂多层一体化防空系统（IADS）。IADS 环境作为更加广义的反介入 / 区域拒止（A2/AD）概念的一部分，是一种能够界定的系统，使我们能看到其战略复杂性，而相应构建未来的兵力结构。我们的同等级对手凭借这个系统，严重挑战着美国的压制能力。为进入对手的 A2/AD 环境，我们正在开展许多研发项目，本文介绍的三个新技术领域尤为相关。第一，研发低成本的航空器，采用散布组网，大量投入 A2/AD 环境，将之饱和而不堪重负。第二，研发高速（高超音速）高机动防区外武器，能在敌方防空火力下适当生存，从拒止区域之外发射，系统化削弱敌方防空能力。第三，研发高能激光武器，用于防御和进攻，不仅提高自身武器平台生存性，也加大敌方对抗的代价。这三个技术领域的因素整合起来，可构成成功的武器组合战略。[1] 即使这些能力从未付诸实战，美国在这些方面所做的投资足以增强其对国际事务的影响。实际上，真正成功的国防战略可以不费一枪一弹就实现其目标。检视这些关键技术领域的发展，有助于我们了解技术能力将如何对日益扩散的地缘政治挑战提供实质性的解决方案。坚持投资和努力，必可构建无人航空器散布组网能力、高超音速打击武器能力，和定向能武器能力，威震对手不敢轻举妄动，加固国家实力中的军事支柱，保护美国的未来战略利益。[2]

DARPA = 美国国防部高级研究计划局
IADS = 一体化防空系统
A2/AD = 反介入 / 区域拒止
ALIAS = 驾驶舱人员作业自动化系统项目
CODE = 拒止环境协同作战项目
GPS = 全球定位系统
AFRL = 美国空军研究实验室

散布组网能力

保持技术优势和高度重视个人生命，是美国武装部队的特征。因此，美国空军在军

* Translated and reprinted with permission from USAF *Strategic Studies Quarterly*, Fall 2016, Vol. 10, No. 3.

备采购中，总是趋向于优先关注技术高端、成本高昂、尺寸和复杂性都越来越大的有人驾驶平台，是以应对现代空中战争越来越高的要求。然而可用资源有限，随着这些大型资产的单位成本上涨，数量相应缩减。今天，我们的预算早已捉襟见肘，一些新兴国家在经济上急起直追，但是全球局势不确定状态又要求我们保持机敏性，因而上述采购趋势无法持久。鉴于数量是增强作战地理灵活性的一个关键因素，要想达到数量，就需要将成本拉平到合理的水平，也就意味着必须根本性调整这种基于大型单一平台的资源分配范式。

早在 1982 年，诺曼·奥古斯丁（Norman Augustine）就指出国防采购有一个趋势：国防预算呈线性增长，而新型军用飞机的单位成本却呈几何级数增长。奥古斯丁幽默地说："到 2054 年，整个国防预算将只能购买一架战术飞机，这架飞机将由空军和海军在每个星期各使用三天半；闰年例外，多出的一天归海军陆战队使用。"[3] 这种真实存在的趋势，制约了我们的作战灵活性，因为数量有限的飞机不可能同时部署到许多地点。此外，对手防空系统越来越先进，因此，即使大把花钱生产最有效能的攻击机也不见得能确保它们的生存性。有鉴于此，必须对资源分配范式进行调整。这种调整有时被称为第三波抵消战略。

国防部副部长罗伯特·沃克（Robert Work）在 2015 年下半年所做的几次政策讲话中，曾明确提出第三波抵消战略的五大组成要素。[4] 它们是：

(1) 机器自主学习

(2) 人机协作

(3) 机器辅助人工作业

(4) 先进的人机战斗组合

(5) 联网化网空加固的半自主化作战能力

这些要素在空中作战领域相互组合，可形成一个新型的系统化兵力结构。在这个预想结构中，有人和无人系统组成团队，通过散布组合网络能力发挥军事作用，增强适应能力，提高对手成本。把作战能力分散部署到多个联网平台上，而不是把所有的功能集中在单一的高成本平台上，可以提高作战灵活性、规模调节性，以及单元专业化程度。作为第一步，用"散布"（disaggregated）这个术语比较合适，因为它明确地有别于把多种能力集中（aggregated）在单一平台的传统做法。但是，随着这个概念渐趋成熟，以及现有平台不具备的新能力逐渐添加到网络中，也许在未来，用"分布式能力"（distributed capabilities）这个术语将更加合适。鉴于本文主要探讨过渡阶段，因此交替使用这两个术语，不刻意区别。散布系统面临若干重要的挑战，包括平台研发、人机界面、保密可靠的网络通信，以及整体系统架构 / 指挥与控制。在 DARPA 内部，这个概念称为系统体系（System of Systems）方式。图 1 是散布系统框架概念的一个示例。

下文探讨 DARPA 目前为发展分布式作战能力而正在进行的三方面努力，目的就是利用第三波抵消战略的组成要素，充分发挥分布式能力的优势，应对上述各种挑战。第一个是"小精灵"项目，研发具有地理灵活性的低成本无人机。第二个是驾驶舱人员作业自动化系统项目，通过开发机器学习能力和增强型人机系统界面，奠定更有效的人机协作基础。第三个是拒止环境协同作战项目，研发人机作战团队组合和半自主化协同作战算法。

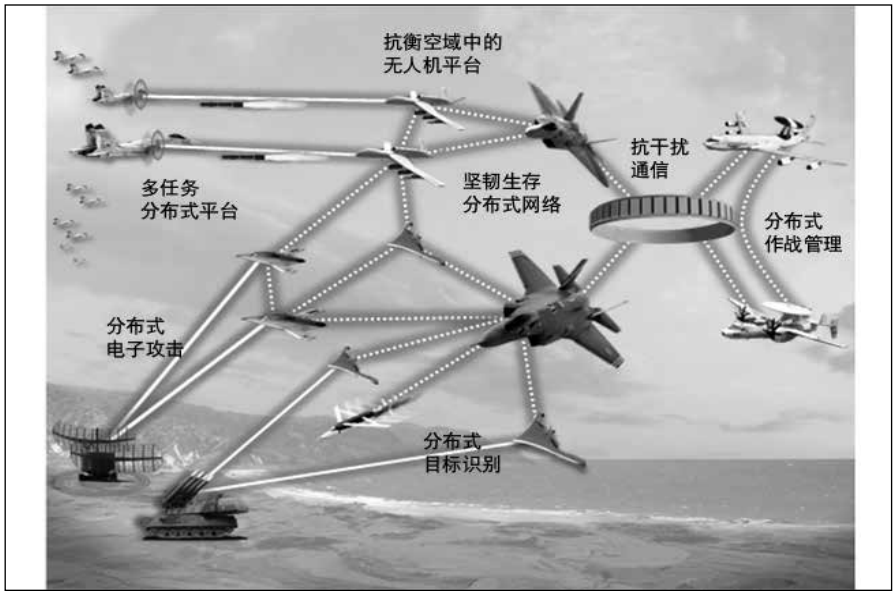

图 1：分布式作战能力

小精灵（Gremlins）项目

建造无人驾驶的有效作战系统有助于调整成本核算方程式，创建成本较低而数量增多的作战资产。这么做不仅可解决地理区域部署机敏性的需求，而且可针对 A2/AD 环境的挑战提出可靠的解决方案。尽管这些系统也许不能够每个都在复杂的防空环境中生存，但是它们可以凭借数量之众使敌方的交战能力达到饱和状态。低成本、可消耗的无人机以集群方式协同作战，可以在高威胁环境中执行复杂的任务，而避免美军飞行员冒生命风险。此外，这么做可以迫使敌方付出一定代价。例如，如果无人机的成本低于敌方对抗无人机所需的导弹成本，就意味着敌方必须付出高昂成本。因此，这个项目的目标是，建造的系统应该具有不容忽视的足够杀伤力，但系统成本又较低，个别系统的损失可接受。作为 DARPA 的一项新努力，Gremlins 项目致力于研发一个无人平台系统，以期避免有人驾驶飞机通常所需的生命支持和复杂防御能力的高成本。[5]

Gremlin 无人机的设计构想是可集群发射，并在空中回收，这样可提供执行各种任务所需的多种能力组合与协同。但是，若要降低成本，这些航空器的尺寸必须较小，因而它们的航程有限。为了克服这个挑战，Gremlin 无人机借助大型母机，把 Gremlin 机群搭载到抗衡空域边缘再发射。由于 Gremlin 航空器可以回收，而不是一次性使用，因此其每次使用成本远远低于巡航导弹或传统型假目标。在这方面的论述中，关于“一次性的”（expendable）、“可消耗的”（attritable）和“可回收的”（recoverable）这三个术语的确切含义，并无一致意见。为了避免混淆，本文将“一次性”定义为单次使用弹药或航空器，在一次交战之后完全耗尽（例如，传统型巡航导弹或“超级郊狼”(super coyote) 无人机）。“可消耗的”含义是，在执行任务时，集群中个

别飞机的损失是可以接受的；任务成功的定义是，达到任务目标，而且在执行过程中被摧毁的弹药或飞机的数量不超过特定的比例。“可回收的”含义是，在任务完成之后，所有尚存的飞机返航，可用于执行以后的任务。

Gremlin 无人机将能从多种飞机发射，包括轰炸机、战斗机和运输机。Gremlins 项目计划做一次飞行演示，构想是在空中把无人机回收到一架带货舱的飞机中。这个项目最具挑战性的技术风险是如何解决在不危及母机的情况下进行空中回收。目前，该构想仍处于研发之中，其设计重点落在在三个关键的捕捉阶段：

(1) 利用以前无人航空系统空中加油项目展示的精准导航技术，在紧接母机尾部强烈紊流区外实施软捕捉。

(2) 用 6 自由度机械臂实施硬捕捉，抓住无人机通过母机尾部紊流区。这个阶段利用先进的机器人技术，需要注意的是，Gremlin 无人机的空气动力表面将收缩，并且发动机将关闭和停止转动，以保护母机。

(3) 把 Gremlin 航空器送入货舱，自动放置在群发数量储存架上。

演示目的是每 30 分钟回收 4 架无人机。成功演示空中回收之后，则可研发各种不同的航空器，以适应特定任务需要。预期研发成功的 Gremlin 无人机的尺寸大致相当于一枚巡航导弹，具有下列重要属性，如表 1 所示。

Gremlin 航空器的体型足够携带进行情监侦和目标识别所需的光电传感器，并且拥有足够的机载功率，可实施电子攻击。在需要的时候，这些航空器可以携带一枚具有足够摧毁力的弹头，用于攻击半加固式目标。载荷和功率要求由若干其他 DARPA 项目设定，包括相干干扰、先进协同合成孔径雷达测绘，以及具有网空效应的电子攻击。对于许多此类射频领域效应而言，速度是重要的效应增强因素。与现有的无人机相比，预期研发成功的系统将达到 0.7 以上马赫的速度，足以提高载荷运用的灵活性。高速度还使得这些无人机能够与其他打击资产协同作战，或者在特种作战渗入 / 渗出团队行动之前飞到作战区域。无人机的高速和高空飞行能力还可增强其生存能力，使传统小型武器和便携式地对空导弹无法打到。无人机的体积小，自然提高隐身低显性，这也是未来的武器系统在设计方面必然要考虑的因素。

空中发射和回收无人机可直接应对美国空军在追求全球机敏性中面临的几个关键挑战。首先，它可提供全球进入和快速响应能力。目前，美军在全球大部分空域享有飞航自由。凭借现有的全球机动资产，从美国本土基地搭载的 Gremlin 无人机可在 36 小时内部署到世界上任何地方，不需要依赖在作战区域邻近设立基地。相较而言，目前的无人机速度较慢，要求在感兴趣区域内设置大量的基础设施。在我们几乎没有前进基地的区域发生紧急事件时，或者在我们不拥有邻近作战目标的陆上或海上控制权的 A2/AD 环境中，要想满足这样的要求是不现实的。空中回收可加快无人机作战循环时间。这些航空器可以很快地进行加油和维护，准备好再次起飞。

DARPA 的 Gremlins 项目将创建载荷散布能力，以这个切实可行的解决方案克服平台问题带来的挑战。空中发射和回收先进无人航空器，其投入作战的规模可调，其作战效应多样，其经济可行性亦高。这种基于载荷散布联网化的作战能力，虽然最主要的也最

表 1：Gremlin 无人机主要性能参数

	阈值	目标值
设计飞行半径	300 海里	500 海里
在设计飞行半径的设计空中巡逻时间	1 小时	3 小时
设计有效载荷	60 磅	120 磅
最大单程距离，无空中巡逻	超出系统设计	
实施回收的空中巡逻时间	根据需要	
最大速度	0.7 马赫	0.8 马赫或以上
最大发射高度	未指定	40,000 英尺或以上（与多种飞机的发射高度对应）
推进系统	预期研发成功的系统可能采用概念化设计发动机模型（按现有技术水平），或者采用现有推进系统或改良型推进系统（例如，添加风扇级）	
载荷功率	800 瓦	1200 瓦
载荷安装	未指定	侧面和头部 / 朝下面向雷达孔径预留位
载荷类型	模块组合式，具有后方级各种不同载荷更换功能，包括射频（RF）载荷和光电 / 红外（EO/IR）载荷。假定典型的 RF 载荷功率密度，藉以确定载荷尺寸 / 体积要求。	
设计使用寿命	未指定	20 次使用
Gremlin 航空器经常性（交机）成本，不包括任务载荷	70 万美元（2015 财年）	最低成本
Gremlin 系统级度量数据		
母机发射平台	B-52、B-1、C-130	适用于尽可能多的飞机种类，包括战术飞机（战斗机）
发射数量	每架母机可发射 8 架或更多	大型母机可发射 20 架或以上
用于回收的母机	C-130	
回收数量和花费时间	在 30 分钟内回收 4 架或更多 Gremlin 航空器；目标是能够总共回收 8 架或更多	
成功回收的概率	在窗口时间内 ⩾ 0.95	
由于 Gremlin 航空器操作而导致的母机（发射或回收飞机）损失的概率	未指定	每个飞行小时 <1x10^-7 个事故
回收和整修周期	在回收后 24 小时内整修完毕，重新搭载母机，准备发射；整修只花费最低人力和人员成本。达到美国空军前方作战基地维护 / 检查架构要求。	
母机系统设备、经常性（交机）成本，不包括指挥 / 控制系统成本	1000 万美元（2015 财年）	200 万美元或以下（2015 财年）

具挑战性的用途是对敌人的多层防御实施饱和作战，它还能在其他各种冲突环境中提高作战资源利用效率。当我们依赖高质量平台而非高数量平台作战时，成本昂贵的平台如果用于无关紧要的环境，仿佛是牛刀杀鸡。例如，使用 B-2 攻击敌方一辆不设防的卡车，尽管达到了效果，但其利用效率肯定很低。散布的低成本平台利用数量对付规模。在严峻的情况下，可以增加平台数量，以饱和作战应对敌方的防守。如对抗相对薄弱的防守环境，则可减少投入的平台数量。这样可以使作战能力的运用更好地匹配任务要求。在面对经济实力相近的敌方时，成本效率是必须考虑的一个战略因素。平台研发只是创建载荷散布能力所面临的众多挑战之一，如何使无人平台与操作这些资产的人脑衔接，同样至关重要。为此目标，DARPA 正在通过机组人员自动化驾驶舱系统项目探索人机协作和机器学习能力的各种可能性。

驾驶舱人员作业自动化系统项目

驾驶舱人员作业自动化系统（Aircrew Labor In-cockpit Automation System, 缩写 ALIAS）项目的目的是研发新的自动化功能，植入到目前飞机中，以期减少实施作战所需的机组人员，同时提高任务效果和安全性。[6] 为此目标，该项目正在大力开拓机器学习能力，研发人机协作的有效方法。该自动化系统将设计为可快速卸装和插接到不同飞机中，要求知识快速应用和灵活实施。为满足此项目要求，目前正在研发核心问题解决算法，此算法一旦成功，很可能将广泛用于各种作战平台自主化和半自主化运作。未来的作战操作人员如何与协作行动的机群互动，很可能将取决于这个项目的研究成果，未来的飞机如何通过人工操作或自主化解决任务挑战，也很可能将依靠 ALIAS 计算核心。这是一个全新的领域，充满了各种可能性，而 ALIAS 迈出了重要的第一步。

该项目最重要的部分是提供飞行管理和系统分析的智能处理核心。大致原理为，通过知识获取系统，将信息馈入 ALIAS 系统，知识获取系统使用真实语言处理来消化正常文本，并把它拆分为可由处理核心查询的逻辑框架。这样，机器可以快速获取关于某个主题的所有打印知识，进行学习，例如执行各种飞行动作的确切程序。ALIAS 系统还可以从专业演示人员获教，吸纳学到的知识。馈入数据按质量优劣排列先后顺序，数据中的矛盾将由专业人员通过人工操作解决。这种快速获取各种数据组并作归纳汇编的能力确实具有革命性，其应用将远远超出这个项目的范围。我们可以设想利用这个项目研发的流程精简情监侦数据分析，或者根据作战准则的应用制定实时指挥与控制建议。在该项目的目前研究范围内，ALIAS 系统将可提供任务和飞行紧急情况无差错分析。ALIAS 系统可以分析各种预选方案，向机组人员提供任务效果反馈。这样，机组人员可以起到任务协调员的作用，专注于高端执行，而不是一般的技术操作。除此之外，智能处理核心将能处理发动机故障等系统紧急情况。它会调阅合适的检查清单，甚至可以激活相应的开关，界定任务效果，向机组人员提供各种预选方案。

ALIAS 项目还在研发一种感知系统。ALIAS 试图成为一种最佳状态的机器，能够测量和监控所有的关键任务要素，例如空速、高度、燃油状况、地点、子系统状态、任务意图和航空器表现。实现这种测量和监控的方法是，利用内部摄像机读取仪表、表盘和开关位置，直接接入符合第 1553 条军用标准的 ARINC 系统（1553/ARINC）或未来的航电仪表维护总线，并且整合数据链路信号或外部摄像机。该项目采用了一个过去未曾充分探索的革命化措施，即在人机交互状况中纳入人工操作员作为参数。为了实现这项措施，可以使用摄像机跟踪飞行员姿态和反应，通过对飞行员控制致动的测量来确定飞行员的注意力集中程度。还有一项引人关注的应用，这就是利用飞行员头戴受送话器或头盔中集成的脑电图（EEG）传感器，直接监控飞行员在飞行中的脑电波活动。这个概念立足于 DARPA 资助的一个研究项目，称为“脑电波驾驶飞机”（BrainFlight），它严密监测飞行员在飞行中的脑电波活动，借以测量飞行员的工作负荷，并预测飞行员诱发的震荡。许多成功的脑电波检测项目都有巨大的应用潜力，可促成人脑更直接地与机器交融。把 EEG 作为 ALIAS 感知系统的输入，是朝着发挥这些应用潜力迈出了令人振奋的一步。至少，监控飞行员表现将为感知系统提供重要的信息，

使它能察觉飞行员是否疲劳了，或者负荷过重，或者没有注意到警告信号。这样，ALIAS 系统和人工操作员之间的双向沟通将更加有效。

最终，ALIAS 系统的设计意图是能够直接操纵飞机飞行，移动开关，并且像人工操作员一样执行作战行动。由于该系统设计成便携式，可以从一架飞机拆卸插接到另一架飞机中，因此致动概念通常以套件形式体现，只是根据目标飞机的具体制约条件而在组配方面略有差别。该套件包括各种机械开关致动器、自动化机械单元、与飞行控制装置的直接机械连接件、直接接入总线的电气界面，等等。没有适用于所有飞机的单一致动系统，但是有若干可用的解决方案。值得注意的是，目前正在研发数字化飞行控制系统中常见的具有高度可靠性和冗余能力的飞行控制应用程序。当前典型的自动驾驶仪一般采用单一路径失灵模式，一旦发生故障便需要人工接替操作，而 ALIAS 飞行控制致动器不同，它采用三重冗余，具备极高的可靠性，不仅在性能上超越目前的自动驾驶仪，在可靠性上也至少不输人工操作，因而在技术上是一大进步。

ALIAS 项目以解决模糊不清的人机团队组合概念为直接目标。典型的飞行员 / 副飞行员功能不能全套照搬地传输给优化的人机团队。人工操作员在执行某些功能时非常杰出，例如应用战术和建立战略；而在其他一些领域，机器则更胜一筹，例如常规战位驻留和快速演算。ALIAS 项目提供的平台可重新界定机组人员的作用，从而实现更有效的人机战斗组合。进一步，ALIAS 项目可让人工操作员在自己的驾驶舱以外工作。随着自己的飞机操纵越来越简化，他们将能协助操纵其他飞机。今后，人工操作员将与半自主化无人驾驶僚机和打击航空器协同作战。与这些散布资产协同作战，需要有合适的算法程序，把人的意图演化成经协调的半自主化行动。由于未来战争可能在射频和全球定位系统（GPS）抗衡环境中进行，实现这种演化的难度可能会更大。人机团队组合和抗衡环境中的半自主化协同作战对于实现这个愿景起着绝对关键的作用，而 DARPA 的拒止环境协同作战项目将提供这个核心能力。

拒止环境协同作战项目

拒止环境协同作战（Collaborative Operations in Denied Environments, 缩写 CODE）项目正在研发先进的自主化算法和监督控制技术，以期增强无人机或尖端导弹在拒止环境的作战能力。[7] 研发工作以四个技术领域为重点：协同作战自主化、航空器层面自主化、监控界面，以及适用于分布式系统的开放式结构。关键的技术发展注重传感、打击、通信和导航等方面的自主化协同作战，以减少所需的通信带宽和人工系统界面。目前正在通过模拟和软件开发试图实现这些目标，最终将使用实体和虚拟资产在 GPS 和通信拒止环境中进行大规模飞行演示。

自主化协同作战的含义比较模糊，但是用几个具体的例子也许可说明问题。假定我方有十二枚巡航导弹射入敌方纵深，寻找一个移动式地对空导弹（SAM）发射阵地。我们可以给每一枚巡航导弹单独指派一个搜索 / 击杀区，期望它找到和摧毁那个 SAM 发射阵地。如果采用协同作战方式，这个巡航导弹组合可以设置一个经协调的搜索矩阵，相互传递有关兴趣目标的信息，调用多个传感器和方位角，提高准确识别目标的概率。此外，假定无法使用 GPS，即失去了外界导航真实信息源，使准确定位和目标选定比较困难。

但利用协同作战网络，则有可能确定相对位置。这个巡航导弹组合可以利用已知的地标或单一导航信标更新它们的位置。实际上，在这个例子中，绝对位置不是那么重要。只要知道与目标的相对位置，就足以形成击杀链。一旦识别了目标，这些巡航导弹可以包围目标，在同一时间实施打击，使得对方的任何导弹防御系统招架不住。协同作战可极大地提高作战效能和效率，并可减少群射的导弹数量。这种基于效应的思路既可节省资源，又可优化任务成功。

协同作战的另一个重要方面是相干射频效应。具有高精度时钟的多个平台可以传送能够有益组合的波形。这样组合的波形其功率按平台数目的平方值增长，而不仅仅是各平台波形功率相加。因此，四个协同作战平台的相干组合信号可以提供高达 16 倍的广播功率。如果相干组合数目更多的信号，则可产生极大的功率，显著扩大探测、通信和电子攻击范围，或者有助于通信信号突破敌方干扰。

在严峻的射频环境中进行协同作战时，有效地使用可用的带宽非常重要。其目的是使整个团队的所有成员都看到共同的态势感知画面。具体的做法是，通过行为和健康建模技术，减少每架航空器为了知道其他航空器的状况而需要获得的信息。例如，每架航空器都能够根据内置模型计算团队内其他航空器上应该还有多少燃油，从而不需要连续不断地发送每架航空器上还有多少燃油的更新信息。因此，燃油状态更新信息只是偶尔发送，或者只需要在实际燃油存量偏离模型预期值时才发送。必须传递的信息有一个指派值，并且根据其对特定任务交战的重要程度予以压缩。早期研究显示，这么做可以逐渐取得极好的效果，把带宽需求减少二十倍之多。

大量的半自主化航空器置于一名任务指挥官的控制之下，必然需要对人与系统交互界面（HSI）有一个新的观念，其中的核心挑战在于如何在通信间歇受阻的拒止环境中与数十架无人机互动。即使在很大的工作压力下，人工操作员也必须能够保持态势感知。高功能自主化作战必须在了解形势的情况下才能采用，不可放弃合适的人工监视和控制。与此同时，自主化航空器必须反应可靠，让人工操作员不断地增强信心。在各种人工操作与航空器遥控匹配模式中，MQ-1 无人机是一个极端例子，它由一名飞行员直接用人工控制所有的飞行功能。今后一个比较可行的模式是，无人飞行器自主应用指挥官的意图。就是说，无人机群带着明确界定的目标出发，即使与任务指挥官的通信中断，也能自主执行任务。根据交战规则，在执行武器投放或飞越地理界线等预定行动之前，必须通知指挥官，以获得其授权。与此同时，相关数据必须递交给任务指挥官，以便他能够做出明智的决定。但把来自众多传感器的原始数据全部传送给任务指挥官，其数量将大到难以承受。因而，可利用显示长期行为和任务相关趋势的特定信息作为行动参照依据，形成最优态势感知。我们在使用分布式人工操作团队方面有非常丰富的指挥与控制经验，可用于指导研发人机协作团队，但是研究工作应该充分发挥人工操作和机器的各自内在优势，不可仅仅因为我们熟悉固有的行为模式而盲目地因循守旧。CODE 项目正在探索一整套任务规划工具和界面，以期克服这些挑战，向人工操作员提供适度的信息，使他们能对机器行使适度的控制。该项目的一个主要研

究方向是找到符合童话故事中“金发姑娘适度原则”（Goldilocks zone）的适度范围。

开放式系统结构对于 CODE 通信干线的发展极为重要。现有的系统和尚未构建的新设计必须能够在允许连续改进的环境中共同运行。若要实现这个目标，必须向所有的相关方提供明确界定的界面，这些界面由政府拥有，适合快速整合、自主适调和灵活测试。开放式结构是一个设计承诺，必须融入系统研发的每一步。鉴于系统目标是促进许多不同资产的协同作战，开放式结构是实现 CODE 愿景不可或缺的条件。

如图 2 所示，目前有许多研发项目支持基于网络的载荷散布能力。能够提高整体作战能力，但是对 CODE 愿景无关键作用的项目，仍应获得持续的资助。技术研发要求按部就班演进，从而具备可预测性，这是系统设计、原型制作和测试有效推进的关键。资金的骤然增加和减少会导致研发进程紊乱变化，从而增加成本。最重要的是，这种不可预测性会造成人才管理困难。只有延揽人才，尽其所能，给予他们探索新思路的自由，才能有创新。创造发明需要时间，科技突破不可预测。因此，只有持续提供稳定的资金流，长期留住人才，整体系统成熟才会有最佳成功机会。

潜在 A2/AD 挑战最大的那些战区，都是地理广袤的区域，具体而言，是太平洋地区、南中国海、台湾海峡、俄罗斯及其以前的卫星国，我们在这些地区设置前进基地的机会极为有限。因此，远程平台对于未来的力量投送极为重要。例如，我们必须大量购置 B-21 远程打击轰炸机，用于支援作战灵活性。我们必须解决战术战斗机的航程局限性问题，还必须仔细考虑后勤支援。未来的战斗情景往往是几十架第五代战斗机和攻击机整装待发，准备突防进入 A2/AD 环境的最纵深部分。

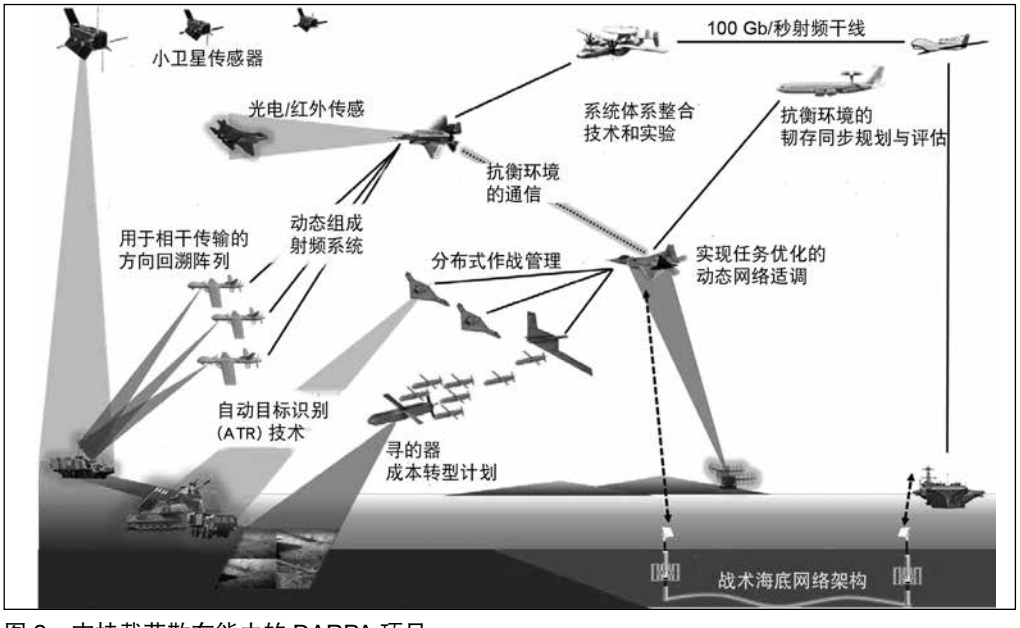

图 2：支持载荷散布能力的 DARPA 项目

大型飞机的武器探测和交战区显著扩大，通常无法就近获得空中加油机的支援，因而战术战斗机或传统型无人机不能发挥作用。我们应该投资提高加油机的生存能力，使它们能够接近作战前缘。用传统型远程机动平台发射的 Gremlin 飞机等非传统型无人机可提供另一个可行的选择方案。我们应该尽一切努力保障在关注区域的前进基地安全无虞。即使采取了这些措施，仍必须优先考虑拥有适当航程和突防能力的平台。对于使用大量战术航程战斗机或传统型无人机的作战情景，必须持怀疑态度。现在是面对现实提出质疑的时候：这些飞机怎么抵达关注区域？如果答案是空中加油和飞行员在战术型单座驾驶舱里每天坚持值勤 20 个小时，显然不可取，会给飞行员的表现和疲劳恢复时间造成严重影响。要想拥有抗衡环境的制空权，需要有远程载人母机平台与不受疲劳影响的可消耗战术无人机协同作战，形成人机团队组合。甚至“战斗机”这个术语本身也可能有些过时，令人想起高度机动的小型格斗飞机。在未来的作战空间，把这些平台视为载人节点或传感平台 / 发射平台也许更加贴切。[8] 我们应该对远程载人控制平台的研发进行重点投资。

DARPA 的战略技术处始终致力于系统体系方法的研究，既是出于必需，也是为了把握内在的机会。部署一支能够按美国民众可以承受的成本击败未来敌方的军队，是该项研究的驱动因素。系统体系方法采用网络化结构，将无人驾驶的低成本、低功能平台与可选用的有人驾驶高成本、高功能平台联网作战。低成本平台能够增强高成本平台的军事效能和生存能力，并能保护系统结构中的人工操作员。不同类型平台的集成有助于整个系统减少薄弱环节。我们可以购买足够数量的低成本平台，借助它们导致敌方的防御能力达到饱和状态，于是一定的数量优势自行转化成质量优势。这样即可取得作战主动权，迫使敌方面对复杂形势和付出一定的代价。开放式结构和较低的投资风险可促进低成本平台的快速创新研发。新型航空器、传感器和指挥与控制核心的周边系统能够快速适调，对整体系统几乎不会带来任何风险。

未来的 A2/AD 作战空间包含多个防御层次，非常复杂。现有的基于平台的战略很可能无法在这种环境中取得制空权，而且在财力方面也是不可持续的。大幅度转向到基于网络的系统体系方法，可以克服这些挑战。DARPA 对 Gremlins、ALIAS 和 CODE 等项目的投资正在开辟通向未来可行解决方案的道路。作为一个研究机构，DARPA 只能在实现这个愿景的道路上走到这一步。要想使愿景成为现实，各军种必须接过火炬，制订支持这些努力的务实计划。空军的高层领导已经反复承诺要实现这个愿景。但是，在较低层级，出于可以理解的原因，对变革仍有很大的阻力。

高超音速打击武器

对付 A2/AD 环境的另一个方法是，使用远程防区外武器，不需要借助搭载平台深入拒阻空间就可以打击那里的目标。高超音速飞行是空天力量的一场重要及必然的革命，其基础是美国和其他国家目前在研发的若干技术。常规的有人驾驶高超音速航空器很可能要几十年后才会问世，而高超音速打击武器预期今后十年内就能投入使用。高超音速飞行通常是指航空器的飞行速度超过 5 马赫，即大约每小时飞行 3600 英里或每秒飞行 1 英里。由于极端的温度和热载荷，以及复杂的空气动力效应，这种类别的航空器面临巨大的技术挑战；但是，它们也拥有巨大的战术

优势。仔细考虑高超音速航空器的优点和挑战，并且审视目前的研发项目，我们可以规划出成功研发高超音速打击航空器的正确方向，这些航空器将从根本上改变力量投送的技术手段。

今天，红外搜索与追踪以及全频谱雷达的发展已能有效地阻止大多数平台深入某些区域。高超音速防区外打击能力可置敌人目标于险境，但不危及本身的发射平台，从而让攻击方重新掌握优势。高超音速打击武器有三个重要的优点。第一，它们以极高的速度压缩时间域，提供灵活快速的响应。第二，防区外精确打击能力可把力量投送到抗衡环境，而且不危及母机。最后，高度机动的高超音速武器能够深入严密防御区域，打击其他手段无法触及的高价值目标，从而使得常规部队能够实施后续攻击。[9]

速度如果超过每秒一英里，势必带有快速响应和灵活能力。从单独一个平台发射一群高超音速打击武器，可以在发射后 10 分钟内同时打击相隔一千英里的不同目标。这样，指挥官可以突破敌方的决策周期，在敌方摸清情况和采取行动之前进行打击。在打击移动目标或进行突袭时，快速行动特别重要。面对太平洋战区或俄罗斯战区等广袤区域的不利地理条件，高超音速武器可缩短到达目标的飞行时间，从而具有战术机敏性。快速打击是空军作战准则的一个关键部分，高超音速打击可让指挥官大幅延伸作战范围和杀伤力。

一架装载着几十枚高超音速打击武器的 B-52 飞机可以面对甚至防御最严密的环境实施有效作战，在敌方交战区外面发射防区外武器。当传统型平台能够参与这种“高端”作战时，指挥官即拥有很大的灵活性。实际上，目前正在研发的武器都趋向于小型化，以便能够从空基或海基战术飞机上发射，借以显著增大可选方案范围。像 B-2 那样真正的雷达突防飞机在数量上极少，因而限制了在多个区域同时做出响应的灵活性。此外，投资于足以实现力量投送目标的相当数量的一次性使用武器，与购买大量的高价高端平台相比，具有更高的成本效益。这么说并非表示不需要一定数量的高价高端平台。但是，利用可观的防区外打击能力可以减少所需的突防平台数量——在预算严重受限的年代，这是一个必须正视的现实。最后，甚至最佳的隐身低显技术也只能风光一时，不需多久就会被下一波新防御技术一览无遗。现在，全频谱搜索与追踪能力已经束缚了我们的隐形平台的用途。随着攻防双方玩猫鼠游戏不断斗智斗勇，拥有强大的防区外作战能力可提供一个重要的制胜保障。

巡航导弹等常规防区外弹药的速度较慢，操纵机动性不高，无法对抗尖端防空系统。因此，如果要用这些弹药对防御严密的目标实施有效攻击，必须大量齐射才能饱和攻击敌方的防御体系。这种方法充其量是不切实际和成本昂贵；在许多情况下，它根本行不通。高超音速武器凭借高速和终端机动性，能够规避先进防空系统，从而只需要少量齐射就可以摧毁目标，而且可以攻击以前无法接近的目标。这些武器将与其他资产协同作战，打击已知的高价值防空目标，使得 Gremlin 无人机群等后续资产能够更有效地执行搜索和摧毁任务。高超音速武器将是未来武库的一个重要部分，可以强有力地突破和遏制 A2/AD 环境。

高超音速武器的运行环境异常恶劣，包含许多巨大的技术挑战。在极高的速度下，气体分子开始分离，在航空器周围产生电离

等离子体。音冲击波缠绕航空器壳体，熵梯度极高，产生干扰边界层的乱流。在本文的论述中，是否理解这个物理问题，并不重要。但是，多年来通过飞行超音速航空器所研发的许多空气动力学和热力学模型不再适用于高超音速领域。此外，动态升温极高，稍有计算错误，即会很快导致毁灭性熔化和结构烧穿。以超音速冲压喷气发动机为例，燃油必须在几毫秒之内与超音速的空气流混合并点燃。一个贴切的比方是，在龙卷风里点燃一支蜡烛并使其保持燃烧。幸亏，这些基本问题有许多已经在以前的研发项目中解决，从而扩充了高超音速飞行控制和热力学知识面。鉴于基本科学原理已经掌握，高超音速打击武器研发的下一步是按照符合战术要求、可负担和一次性使用武器的价位，创建一个可靠的平台。高超音速航空器武器化还需要注重通信、目标锁定传感器、可负担的高温材料和制造方法，以及作战概念。

中国、俄罗斯和印度等其他国家都宣称在实施高超音速研发项目，而且动用了大量资金。仅在 2014 年，中国的 Wu-14 高超音速打击航空器就进行了五次测试。[10] 印度即将部署其高超音速巡航导弹“布拉莫斯 II”型。不久，高超音速打击航空器将成为作战空间的一个现实，而且这些武器有许多将在潜在的敌方手中。这强调了美国持续不懈地进行研发的重要性，附带也凸显了必要性。鉴于本文已论述的许多理由，高超音速武器可能非常难以防御。我们必须努力了解敌方系统和制订有效的防御战略，以减小敌方系统的威胁。仅仅赢得军备竞赛，率先部署高超音速打击武器，并不能解决今后仍有可能挨打的问题。

米切尔航空航天研究所根据持续一致和严谨有序的技术发展准则，描绘了高超音速技术发展路径的关键步骤。高超音速技术的发展史包含若干令人振奋的项目，它们的宏伟目标超越实际能力，因而往往遭遇惨败。最近的研发项目，例如 X-51，取得了成功，因为对其设定的目标相对务实，能够实现，从而持续推动了该领域的技术发展。DARPA 和空军研究实验室（AFRL）正在该项成功的基础上继续努力，争取在今后十年内实现高超音速系统的部署。我们必须坚持对这些项目进行投资，也必须对适当的测试和研究设施进行投资。高超音速技术研发需要有相应的风洞和试验场，而目前这类设施并不存在。此外，热管理、材料和结构、高超音速飞行控制和推进等技术领域需要不断成熟。高超音速武器不再是科幻小说的内容，它们将在大多数人还未曾意识到之前就面世。这些武器可提供巨大的非对称优势，因而任何未来战略都不可忽视它们。若要确保美国不失时机地抓住这个优势，我们必须看到其潜力，建立未来作战愿景，并且不断地进行合理投资。

定向能武器

相应的激光技术发展有望促成性能可靠的高能激光器面世，可提供革命性的新型军事作战能力，例如对抗新出现的传感器威胁以及创建进攻性激光武器。高能机载激光器是飞机防御方面符合逻辑的下一步发展趋势，也是一项重要的未来进攻性打击能力。过去，化学激光器是唯一能够在尺寸和重量受限环境中其功率密度足以提供有军事实用性光束的激光武器。但是，在过去十年间，光纤激光器的使用取得了巨大进展。与以前的化学激光器相比，固态光纤激光器的功能更强大，体积更小，更适用于军事环境。一台光纤激光器以电能启动，然后将其转换成高功率、

高光束质量的激光能。该激光光束被导入光纤电缆，从而可以灵活地传输和组合，形成有军事实用性的光束。[11] 光纤激光阵列、光束组合和自适调光学的发展将促成高能激光器面世，其光束将异常明亮，而其激光功率也许可达到数百千瓦等级。

过去半个世纪以来，微电子器材稳步发展，至今已到处可见，成为最令人不安的趋势之一。在军事领域，这个趋势形成巨大的挑战。先进的成像电路，尤其是焦平面阵列传感器，对机载平台构成很大威胁。[12] 这些先进的导引头直接威胁航空器，但是高能激光器可以对付这种威胁，不过需要采取新的飞机防御范式。鉴于尺寸、重量和功率等条件，可以优先考虑让大型飞机采用下一代高功率光纤激光器作为防御手段。用高能激光器替代目前的红外干扰措施（IRCM）系统，对正在接近的导弹，不仅是干扰，而是摧毁，由此显著提升飞机在半准入环境的生存能力。红外反干扰措施（IRCCM）不断发展，给予目前的导弹越来越强的抗干扰能力。下一代成像导引器的扩散使得这个问题更加复杂。从红外干扰概念变换到用物理方式摧毁导弹，未来的飞机将能够突破渐进式改善的循环。与远距离打击军事关注目标的进攻性激光系统相比，把防御性激光器配备到飞机上，用于摧毁来袭的小型对空导弹，所需的激光功率要小得多。有鉴于此，防御性系统是创建具有作战功能的高能激光系统的良好起步。光纤激光器使用光束组合方法，可立即调整规模，而且其输出功率的主要限制因素是母机平台可用的功率和冷却能力。如果有持续的研究资金，进攻性激光系统目前面临的局限性可在今后十年内克服。

进攻性激光器的打击能力可带来许多显著的战术优势。第一，使用飞机发电的光纤激光武器基本上拥有无限制的发射能力库存。第二，无论好莱坞影片如何渲染，激光在清洁空气中是不可见和无声的。第三，激光武器可达到令人难以置信的精准度，具有实时反馈功能，可连续优化打击定位。最后，激光以光速传播，几乎在发射瞬间即可打击目标。尽管目前仍有若干主要的技术挑战需要克服，上述这些优势足以说明我们应该继续关注激光武器。不久，我们将看到如下情景：在特种作战部队实施突袭之前，一架 AC-130 飞机静悄悄地摧毁了一辆敌方车辆——无声无息、手术般精准、持续不断，激光打击能力可向军事作战策划人员提供重要的备选方案。

机载激光器的另一个重要技术发展是自适调光学技术。该项技术可调整输出光束，借以补偿大气扭曲，使得光束通过空气传播后能够以最大聚焦功率打击目标。传统的做法是，在光线路径中放置一面可变形反射镜。一个波阵面传感器监测传播的光束，并利用反馈算法使反射镜变形，直至打击目标的光束达到最高强度。反射镜变形速度往往是运用这项技术的限制因素。即使反射镜能够每秒变形数千次，紊流混乱现象仍有可能以更快的速度发生。目前仍在进行的研究工作试图更好地确定这些紊流的特性，以便能够预测未来的情况，在实际发生紊流之前把纠正指令输入到控制系统。运行自适调光学技术的另一个方法是，使用由分别可控激光器构成的相控阵列，这就是 DARPA“王者之剑”（Excalibur）项目。

DARPA Excalibur 项目有力推动了先进的高能激光技术在若干领域的发展。这个项目研发了相干光相控阵列，导致可调节规模的激光武器问世。利用低功率电动光纤激光阵列，可产生能穿透大气紊流的高质量光束。

其实施途径是，采用的形状系数比现有化学激光系统轻 10 倍，而且体积更紧凑。Excalibur 项目为进一步研究铺平了道路。为了尽量降低功率要求和缩减重量，目前正在努力创建体积更小和效能更高的光纤激光放大器。另外，正在使用一种系统整合方法，以期确定现有系统的实际载荷周期、功率消耗和冷却周期。

以前，机载激光器的研发曾获得不少投资，但是成效不大。因而不难理解，为何某些高层领导人怀疑该项技术是否已经成熟，或者现在的研发是否会有不一样的成果。具有光束组合和自适调光学技术的光纤激光器可解决导致以前的研究工作无显著成效的许多老问题。目前，若要实现光纤激光系统的实战部署，需要克服的主要障碍是缺乏远见。基于最近的成功实例，这是一项中等风险程度的投资，并且随着 DARPA 和 AFRL 继续发展定向能技术，光纤激光器研发的潜在成效很大。提高作战部队对新技术的认知，对于技术过渡和采用，以及作战概念发展都很重要。激光器是一个独特的武器类别。我们必须努力去理解其局限性和潜力。现在，这项技术已经很先进，因此很难想象今后的作战空间没有激光器发挥重要作用。有鉴于此，现在应该制定战术、作战准则和公共政策，准备好迎接今后必然出现的这种局面。DARPA 和 AFRL 必须继续发展其已经取得的重要研究成果，与此同时，战术部门必须厘清添加这些新的作战能力在作战层面的影响。定向能武器将是未来作战空间的一个重要组成部分，而这个未来必须从作战应用、战略政策和国际法律等角度来考虑。目前，全国各地的若干实验室正在研发实现这个目标的手段。

结语

今天，美国武装部队面临着一个独特的挑战，同时也是机遇。军事力量的每一次演变都会极大地提升个别武器平台的杀伤力和生存能力，但也会导致单位成本的相应上涨。为了获得地理灵活性和压制多层防御的能力，大量使用低成本平台是一个令人信服的备选方案。全球经济趋势和国内经济压力约束了分配给军事支出的资源，致使目前时期成为必须变革的时刻。抓住这个迫切的时刻，则可掌握机遇，创建一种截然不同的兵力结构，它将拥有高效的能力，可减少支出，并且承受较少的风险。DARPA 等高瞻远瞩的机构目前取得的研究成果代表了关于未来作战空间结构的一个愿景，显示了实现这个目标的潜在可能性。总之，DARPA 目前研发项目所启示的方向显示了我们完全有可能抓住技术发展机遇，缩短创新周期，应对多变威胁。这个愿景不会自动成为现实。今天，我们必须踏上创建新兵力结构的征途，建立一支在 2030 年每战必胜的军队。这就要求我们抛弃传统的采购计划，持续投资于载荷散布能力、高超音速打击武器和定向能武器。★

注释：

1. 还有其他许多方面，显然超出本文论述范围，但对于这个未来愿景绝对不可或缺，它们包括：太空、网空和海基力量投送、全频谱低显性、精准导航和报时（PNT）、量子通信和计算、集成电路发展、生物学研究发展、航海技术、制造与材料科学，等等。
2. 除非另有说明，本文提供的信息系基于作者本人在 DARPA 内部参与这些项目的工作经历以及与 DARPA 项目实际管理人员的讨论。

3. Augustine, Norman R. 1997. Augustine's Laws [奥古斯丁法则], Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
4. Mehta, Aaron. 2015. Work Outlines Key Steps in Third Offset Tech Development [沃克概述第三波抵消技术研发大纲关键步骤], DefenseNews, http://www.defensenews.com/story/defense/innovation/2015/12/14/work-third-offset-tech-development-pentagon-russia/77283732/.
5. 关于 Gremlins 项目的更多信息，请参看 http://www.darpa.mil/program/gremlins。
6. 关于 ALIS 项目的更多信息，请参看 http://www.darpa.mil/program/aircrew-labor-in-cockpit-automation-system。
7. 关于 CODE 项目的更多信息，请参看 http://www.darpa.mil/program/collaborative-operations-in-denied-environment。
8. http://www.defensenews.com/story/defense/air-space/2016/04/08/beyond-fighter-jet-air-force-2030/82767356/.
9. Dr. Richard P. Hallion and Maj Gen Curtis M. Bedke, USAF (ret). 2016. Hypersonic Weapons and US National Security [高超音速武器和美国国家安全], Arlington, VA: Air Force Association.
10. 同上。
11. 许多光纤激光二极管输出往往是谱组合或相干组合。谱束组合（SBC）亦称为波长束组合，它利用一个衍射光栅或棱镜把不同的波长组合成单一输出光束。这与白光通过棱镜分解成不同波长构成的彩虹正好相反，但其物理原理却相同。在 SBC 组合激光束中，不同波长（颜色）的激光合并产生单一输出。这个组合方法把每个输入激光流的能量添加到输出光束，因而后者是所有输入光束的总和。在这个系统中，输入光束的相位不是特别重要，从而极大简化了必要的控制措施（请参看 Fan 的论文）。另一方面，相干束组合（CBC）通过相控阵列精细地控制输入光束的相位。一个二极管激光输出被分裂到与阵列输出数目相同的传输通道。每一个传输路径适当控制相位，致使光束实现产生有益干扰的组合。有益干扰的结果是，波峰处于导致输出波强度增大的相位。图 X 显示有益干扰的典型例子，同时列出其对立面有害干扰的例子。在理论上，如果输出孔径尺寸不受限制，针对目标的相干组合激光功率强度按输入光束数目的平方值增长。因此，在增加适当控制措施和相控阵列复杂性所需的成本之后，CBC 激光产生的辐射强度是 SBC 激光的几何级数（请参看 Fan 的论文）。按照所需的应用方式之不同，这两种组束方法在未来的军用激光器中都会有重要的用途。
12. 运用红外光谱的焦平面阵列（FPA）传感器以前仅限于在少数专业化军用实验室内研发。用工业方式制造的此类阵列的像素较大，因而分辨率较低。它们只能小批量生产，成本极高，令人望而生畏。现在，由于集成芯片技术的发展，在今后十年内似乎有可能克服这方面的许多挑战，看到高分辨率、低成本的焦平面阵列红外传感器大量问世和广泛应用。

保罗·卡尔霍恩，美国空军少校（Major Paul Calhoun, USAF），麻省理工学院航空航天学硕士，美国空军试飞员院飞行试验工程学硕士，现任空军实验试飞员，目前在国防高级研究计划局从事科研学者项目。少校飞行过 30 余种机型，拥有超过 3,500 小时飞行经验，其中包括 1,200 小时战斗飞行及高风险试飞。文章中所表达之观点只代表作者本人，不代表美国政府或国防高级研究计划局的官方政策。