

增材制造技术:从形式向功能发展

Additive Manufacturing: From Form to Function*

阿曼达·M·希兰德博士(Dr. Amanda M. Schrand)**

我们可能拥有每一种技术资源……但是如果没有充分的语言来表述,我们的想象就飘忽无形,我们的思维和感受就徘徊不前,我们的程序也许带有“革命性”,但带不来改革。

——诗人雅德安·瑞奇(Adrienne Rich, poet)

战略机敏性概念,以灵活、适变和速度为其属性,藉此来应对快速和意外变化带来的挑战。¹ 战役机敏性也是这样,其特征是针对特定的挑战迅速生成多个应对方案,并能在不同的方案之间切换,由此应对新现的威胁。² 增材制造(缩写AM,亦称3D打印)技术适时而生,正好能够满足战略和战役层次的机敏性需要。³ 长远来看,AM有可能是一项改变游戏规则的技术,即能最大限度地利用多域(陆地、天空、海上、太空、网空)整合,从而生成巨大的灵活性。⁴ 正视现实,21世纪的防务挑战不可能用单独一个方案来解决,只能依靠机敏性来提供多种对应方式。飞速的变化既对那些滞后落伍者构成难以逾越的障碍,也为那些机敏应变者带来长久的优势。⁵ 我们虽不需要总是以最快速度行动,但是保持这样的速度选择,就能减少对手的反应机会。⁶ AM技术能保障机敏性,它以快速而低廉的设计和制造,迅速产生出单一或多种原型机件,满足一系列任

AM = 增材制造(亦称3D打印)
FLEGOMAN = 柔性电子器件和通用军械制造
AMRDEC = 航空和导弹研发与工程中心

务需要,包括实地即时修理和更换部件。⁷ 我

们把3D打印设备和材料预置或投放于各战略地点——包括陆地、海洋、太空——就形成按需生产机件的能力,从而缩短设计和装配这两个阶段的制造周期。有充分的理由相信,AM技术有潜力支持美国众多面向的国防使命,同时生成远的成本节约效益。⁸

本文考察美国空军的一些关键报告、规划文件和其他相关资源,通过这些战略框架文件研判AM能力在军队的现状和发展,并在此基础上提出对未来联合研发努力的一些认识和看法。虽然本文主要关注美国空军,但文中的AM研发概念可以适用于国防部的所有军种和机构。本文首先概述AM技术在军队的发展,然后探索此技术在物流和后勤支援领域的作用,进一步,本文评估AM技术对国防采办流程的影响,最后讨论此技术的未来机遇和挑战。

AM技术在军事领域的发展

美国正在大力振兴工业制造业,其中的一项努力是大力拓展AM技术所具备的有效设计复制和快速样机制造能力。例如,《沃勒斯2015年报告》称,AM工业自1995年以来有了巨大发展,最初的市场规模为2.95亿

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

** 作者向下列各位对本文所作贡献表示感激。感谢 Dr. David Lambert (AFRL/RW Chief Scientist) 让我有机会写本文;感谢 Dr. David Luginbuhl (AFRL/XP) 为本文写作给出珍贵指导;同时感谢以下诸位提供各种有益建议: Mr. George Jolly (AFRL/RWMF), Dr. Jon Miller (AFRL/RXCM), Dr. Dan Berrigan (AFRL/RXAS), the AFRL AM IPT, Dr. Sam Emery (Navy), Mr. Keith Roberts (AMRDEC), Ms. Rebecca Taylor (NCMS), Mr. Steve Doremus (ARDEC), Mr. Majid Babai (NASA-MSFC), and Mr. Walker Baird (AFRL Scholar).

美元, 在 2014 年估计达到 41 亿美元。工业 3D 打印机制造商也从 1995 年的 15 家增加了两倍多, 如今在 13 个国家有 49 家公司, 共售出 12,850 套系统, 每套系统价值 5000 美元到 50 万美元不等。使用 AM 技术的主要产业, 按从大到小的顺序排列, 有工 / 商业机械 (17.5%)、消费产品 / 电子产品 (16.6%)、汽车 (16.1%)、航空航天 (14.8%)、医疗 / 牙科 (13.1%)、学术机构 (8.2%)、政府 / 军事 (6.6%)、“其他”产业如油、气、商用产品 (3.9%)、及建筑业 (3.2%)。虽然根据这份报告, 政府 / 军界对 AM 技术和产品的使用仅占统计总值的 6.6%, 但这比之前 2014 年的数据增长了 1.2%。⁹

军队每个军种以及大部分供应基地和军械库, 都在进行独立的 AM 开发努力和上马项目。¹⁰ 比如, 陆军、海军及国防部承包商, 从 2012 年到 2014 年把 3D 打印机前沿部署到了“战地”, 并在继续推进这项努力。¹¹ 军种之间也有重大合作, 所有合作项目已在过去两年内启动或加强, 投资也在持续增加。

为了实现多域整合效果, 美国空军研究实验室设在佛罗里达州埃格林空军基地的弹药部, 正与设在俄亥俄州莱特 - 帕特森空军基地的材料与制造部及传感器部紧密合作, 积极将 AM 技术应用于各种领域, 例如, 开发用于机舱有限空间的灵活及模块化武器、目标变换、共形情报监视侦察, 以及柔性电子器件。AM 技术应用在这些目标领域的逐步成熟, 将有助于提高作战能力, 不仅提升小型武器的杀伤力, 并降低关键部件补充和更新所需的时间和费用。¹²

“柔性电子器件和通用军械制造”(FLEGOMAN)计划从全盘着眼, 研发 AM 技术, 用以制造将装入典型弹药的多种部件和材料,

包括金属外壳、用于电子追踪和电容器的新型导电“油墨”、能与打印兼容的改良含能材料配方, 等等。直接打印电子器件的好处之一是: 比用常规技术加工的电子产品能更有效地利用空间, 也减少浪费。例如, 把武器系统内部或外部的电子器件简化成打印模式, 就能减少重量和尺寸, 并腾出宝贵的内部空间。打印柔性电子产品的其它例子包括: 战士头盔上的无线电天线, 不仅减少佩戴重量, 亦有助于佩戴者行移运动; 还有嵌入服装的电子元件, 既能增加防护, 也可用于健康监测。¹³

空军理工学院也运用 AM 技术完成了小比例侵入机的概念验证设计。这种新颖的设计包括复杂的内部蜂窝特征, 而传统的减材制造技术无法实现这种特征。他们在设计过程中纳入了一种称为“拓扑优化”的方法, 生成了应力分布最优化的战略构架, 从而减少结构总重量。为了增加强度, 他们正在进行金属成分和后加工热处理方面的完善努力。¹⁴

在 FLEGOMAN 计划下, 有关课题组与美国陆军设在新泽西州皮卡汀尼军工厂 (Picatinny Arsenal) 的军备研发及工程中心协作, 用 AM 成功制造出引爆装置。该军工厂的科研一向重视电子打印技术, 现已能喷墨打印和丝网打印出弹药天线、引信元件 (诸如箔爆炸起爆器) 和电池。¹⁵ 运用 AM 技术, 课题组尝试了一系列非传统但极有前途的选用材料, 包括金属纳米颗粒。这些新型制造技术和材料有潜力超越传统制造设备的性能, 同时享有 AM 技术带来的物流灵活性。

陆军设在阿拉巴马州亨茨维尔市的航空和导弹研发与工程中心 (AMRDEC) 正在研制相关的工具和程序, 以推进导弹结构及部

件的拓扑优化状态。拓扑优化是一个设计过程，从中产生的结构能用最少的物料来达到理想的性能，例如最大刚度、预定的自然频率，和优化的热流量。AMRDEC 中心计划将合理简化这个优化/设计过程，改进轻质蜂窝结构，纳入构造方面的考虑，展现优化的导弹结构。该中心通过多个科技项目与设在宾州霍萨姆的材料科学公司、桑迪亚国家实验室，以及匹兹堡大学合作。该中心将在 2017 年建成一个新 AM 设施，专门用于开展这些科研项目，培训 AMRDEC 人员，推进 AM 技术对航空和导弹的应用。

海军也一直积极利用近来突飞猛进的 AM 技术。作为早期采用者，海军在过去的二十年里已经使用了几代的 AM 技术来加快样机研发。最近几年来，海军探索如何应用 AM 技术来解决陈旧部件替换问题。往往，在某系列舰船或潜艇研发期间制造的部件，原厂家早已停止生产，或者已不复存在，这种情况导致了耗资而漫长的采办，有些舰船因此而无法出航。在海军的各舰队战备中心和区域维修中心，他们正以许多方式利用 AM 技术，既省时省钱，又保障舰队战备。¹⁶ 海军改善战备状态的愿望正在海上得到检验。¹⁷ 为了利用 AM 技术随时直接生产零件，而不只是生产原型机件，海军研究局一直在寻求与业界合作，这种合作伙伴关系对于保证 AM 技术生产的部件符合材料和舰队的要求，至关重要。¹⁸ 海军武器部门也积极寻求运用 AM 技术，来解决美国能量制造基础日益缩小的问题，并利用 AM 技术的独特性来改善装备性能并加强安全性，同时缩短在舰队安装新能量系统的时间。¹⁹

AM 技术不仅在陆地找到了用途，现在也进入了太空。美国国家航空航天局(NASA)马歇尔太空飞行中心 (MSFC) 在 2014 年 9

月向国际空间站发送了第一台 3D 打印机，用于测试塑料材料。第二台 3D 打印机在 2016 年 4 月送往国际空间站。除了真正在太空打印之外，NASA-MSFC 也根据 3D 扫描与 AM 相结合的一体化制造过程进行逆向仿制，以缩短从设计到制造的开发周期时间。在 NASA 设在加州帕萨德纳的喷气推进实验室，创新先进概念课题组开发出一个二维传感器。该传感器本质上是一张带有印刷电子元件的透明塑料片，有人建议用它来收集太空或行星大气层的环境数据。

AM 技术在军队物流与后勤支援中的应用

位于俄克拉荷马州廷克空军基地、佐治亚州罗宾斯空军基地，以及犹他州希尔空军基地的空军后勤支援中心，为空军最尖端的武器系统——从最先进的飞机到直升机——提供基地大修维护、供应链运作及管理，和安装支援。对于空中力量后勤支援使命而言，现在时机已经成熟，可以直接把业界成熟的 AM 技术能力运用到空军后勤物流运作的几乎每个方面。然而，在深入探讨具体例子之前，我们必须首先考虑物流和后勤支援都包含什么任务。从广义上说，“物流”的意思是在合适的时间与合适的地点备好合适的物资，其中包括物资和人员的获得、配送、维持和更换。²⁰ 国防部对“后勤支援”的定义是：供应为维持和延长作战行动所必需的物流和人员服务，直到行动圆满完成。²¹

将来，基本物流运行也许要经常调整方向，为前哨站点供给物资，用于直接在当地加工部件而满足紧急需要，同时也节省时间和资金。“空军未来作战概念”文件就描述了这样的未来情景，其想象的做法是空投一个集装箱的聚合物材料，让孤立的哨所自己直接 3D 打印部件。在空投物资最终成功送达时，

打印所需部件的文件资料也通过一个安全的太空链接传送过来, 打印机在几小时之内就能制造出关键的部件, 而不用数天时间, 在其过程中也节省数百万美元。²² 这种做法将为美国国防事业带来非对称优势, 因此激发出有关各界对 AM 的极大热情。还有许多其它例子, 都设想如何利用 AM 来革新物流、后勤支援、采办, 和武器研发。将 AM 技术应用到物流和后勤支援中, 将创造三个机会:

- 可利用 AM 技术进行逆向仿制, 为陈旧飞机生产那些已无库存的备品备件。诸如 B-52 “同温层堡垒” 等古董飞机正在老化, 经常随时需要更换部件, 而这些部件可能几十年前早已停产。三维激光测绘和其它技术可用来精确仿造现有的部件。
- 可对现有零部件进行设计改进然后再制造出定型部件。俄克拉荷马城空军后勤综合中心的克里斯蒂安·奥利维罗 (Kristian Olivero) 博士说: “在你即将对定型部件开始机加工之前, 你还可以先打印五次塑料样品, 确保它的几何形状、误差、接口都准确无误, 然后才加工出最终的部件。”²³
- 可用 AM 技术根据实地需要打印备品备件, 从而减少不必要的部件购买和部件库存。然而, 要将这种新流程纳入供应基地的维护运作, 需要一个实施和管理的学习过程。比如, 发动机的部件更换目前是由购买、发送到场、登记入库, 和按需取用这样一个流程。但未来, 这些备品备件可以根据需要在战地或者在维修和大修场地直接打印, 因此消除了预置各种备品备件的需要。²⁴

国防部专门设立了一个维护作业增材制造 (AMMO) 工作组, 充分表明国防部与业界合作的意愿:

……制定一体化的国防部综合战略愿景, 推动 AM 技术合作的战术实施, 以支援国防部的全球武器系统维护计划。该 AMMO 工作组的活动包括: 制定国防部办公厅指导性建议, 选择和排序 AM 技术的应用机会, 协调和规范 AM 制造活动, 将 AM 纳入现行的国防部维护过程及程序中, 制定和维护《AMMO 路线图》。²⁵

国家制造科学中心作为一个非营利性私营技术发展联合体, 领导并参与各产业领域制造商的相关活动。

上述航空和导弹研发与工程中心正与科珀斯·克里斯蒂陆军供应基地合作, 探索将激光 AM 技术用于对“储存、分析、失效评定和回收”设施内现存的高价值航空资产进行修复、回收和再用, 并分析其中的受益情况。²⁶ AM 技术将被用来演示对目前无法使用传统制造方法加以修复的陆军航空资产的维修。项目目标包括: 缩短部件更换的先期采办时间, 降低对操作与支援以及战备有负面影响的成本, 制定对备用部件的合格修理程序。

AM 技术能否彻底革新采办程序

通过高度简化和创新措施缩短研发周期, 接受最终的风险, 而换取采办速度的加快, 可有助于消除为保持技术优势而越来越沉重的担忧。²⁷ 在采办领域的这样一种机敏性, 可称为“流程机敏性”。建设流程机敏性的努力, 我们在采办改革中已经看到, 其目的是把科技、采办和需求进行无缝融合, 以改进整体能力发展。然而, 这项努力至今未见成功。美国空军最新的重点努力中包括更多的“枢轴点”, 或者说对某些项目做出改变或放弃的决定, 还包括加速制造样机的流程, 目的是通过探索创新运作概念来推动新技术的

应用。²⁸ 我们可以设想，由于 AM 技术的实际应用，未来的采办流程将精简到极致，直接将购得的 3D 打印机、原材料和技术文件发送到战地，在现场打印战车和其他系统。如果这种流程取得成功，可能彻底革新采办速度。

在设计新系统的同时，我们务必要意识到，我们的对手也在进行现代化，也在努力对抗我们的技术，因此，预测新生威胁并规划应对之策必须是研发过程的一部分。²⁹ 为规划及时插入新技术，方法之一是使用模块化结构，这种结构由能被快速更新的可分离部件组成。用 AM 技术生产相对简单的自主驾驶车辆和系统，成本较低而且有模块化选择，因此蕴藏着战略和战役上的机会，允许我军在高度抗衡的环境中灵敏地执行全球精确打击任务。许多这类资产都采用了模块化平台——由传感器、诱饵机、电磁干扰器、弹药等组成——可产生致命和非致命杀伤效果。³⁰ 这些可以消耗的诱饵机或小型无人机提供灵活性，因为它们可以从任意组合的陆、海、空、天资产部署和发射。模块化也可能吸引其他供应商提供产品，从而促进竞争，并开发多种替代方案。³¹

虽然制定和规范任何程序的目的是把差异降到最低并允许可重复性，但有时候，程序本身变得极为复杂，致使我们迷失了最终目标。比如，我们需要审核产品合格检验和认证程序，从而确定是否能更迅速地利用 AM 技术制造出的部件和产品。这可能只是一小步，要根除复杂能力系统过长的开发时间（15-20 年），还有很长的路要走。从“设定的和有限的”系统或组件寿命，转变到“充分适合于”某种应用和某段时间，这种概念上的转变，也将有利于技术的迅速进步。³² 认证程序应该基于 AM 部件的功能性和关键

性来进行，就是说，并非所有 AM 部件都需要经过严格的鉴定过程，我们可以为 AM 技术制造的许多部件设定一个能接受的风险等级，这样才能有效利用 AM 技术带来的机敏性。和模块化的好处相似，以 AM 技术制造可消耗的无人机，可快速部署战场，因此有潜力缩短开发时间并节约资金，同时敢于采用新技术。采用 AM 迅速现场部署技术的另一个可行场合是卫星发射，将有效减少发射成本，而发射成本是美国空军太空司令部当前面临的一个主要问题。³³

这里值得一提的是，一个系统在研发期间，必须与早期研发过程中的发现紧密关联，因为如果缺少与基础研究关联而获得的知识，就可能错过某些技术插入机会。然而如果了解某些相关技术的成熟程度，我们就敢于在自己的采办计划中前瞻规划定期的技术更新，及时纳入目前正在进行研发的这些技术。³⁴ 迄今得到的经验教训表明，美国政府需要把握对相关界面技术（包括软件集成要求的接口）的技术控制和拥有权。³⁵

AM 技术与国家制造创新网络

AM 技术正被纳入国防建设，与正在建立中的美国国家制造创新网络（NNMI）同步前进。NNMI 计划最初由奥巴马总统在 2012 年提议，他在其 2013 财政年度预算中为此增拨了 10 亿美元经费。³⁶ 对 NNMI 的设想是：在 2024 财年之前，政府各部门要联合建立总共 15 个制造创新研究所，这些政府部门包括：国防部、能源部、商务部，和农业部。截至 2015 年，已成立 8 个研究所（国防部 5 个、能源部 3 个）。国防部的五个研究所是：

- (1) 俄亥俄州杨斯顿的 AM 研究所，亦把“AM”戏称为“美国制造”；

- (2) 伊利诺伊州芝加哥的数字化制造与设计创新研究所；
- (3) 密歇根州底特律的轻质和现代金属研究所；
- (4) 纽约州罗切斯特的集成光电制造研究所，亦称“美国制造集成光电研究所”；
- (5) 加州圣荷西的柔性混合电子制造创新研究所，亦称 NextFlex。

能源部的研究所被统称为“清洁能源制造创新研究所”，它们是：

- (1) 北卡罗来纳州罗利的下一代动力电子制造创新研究所，亦称“动力美国”；
- (2) 田纳西州诺克斯维尔的先进复合材料和结构材料制造研究所，亦称“先进复合材料制造创新研究所”；
- (3) 加州洛杉矶的清洁能源 / 智能制造创新研究所。³⁷

另有 7 个新的研究所拟议在 2016 年成立（国防部 1 个、能源部 2 个、商务部 2 个、农业部 2 个），累计总投入为 6.08 亿美元。2016 年由国防部资助的机构是：马萨诸塞州剑桥市的革命性纤维与纺织制造业创新研究所。能源部力争在 2016 年获得 2.41 亿美元，以维持其现存的 4 个研究所，并成立 2 个新研究所。农业部请求得到 8,000 万美元，用于建立两个高级生物制造和纳米纤维领域的研究所。商务部国家标准与技术研究所申请在 2016 年创建 2 个研究所，探索先前没有被选取的制造主题领域。

这些国家制造创新研究所正在从事的研究与开发，涉及许多领域，这部分是受军事需求的影响。研究所的设置由政府资助，也受到由学术界、政府、产业界成员组成的顾

问委员会支持。比如，空军研究实验室通过参与项目评审和技术工作组，以及通过参与机构指示的项目，来支持这些研究所的工作。

AM 技术的未来机遇和挑战

打印零件，目前仍然主要依靠材料的逐层堆积生成 3D 结构。然而，新的技术和使用领域不断涌现。AM 技术将来肯定会看到提供各种应用选择的大量企业，既有能提供高产工业打印机的大公司，也有专精某项独特应用的小型初创公司。在 2016 年，挤压成形和选择性激光烧结打印机的两家龙头制造商，即斯特塔西公司（Stratasys）和 3D 系统公司（3D Systems），与惠普公司（多射流熔融）推出的新计算机辅助印刷技术和碳 3D 公司（Carbon3D）推出的连续液体界面生产技术进行竞争。这些新技术的主要优势有，打印时间比现行打印机快 10-100 倍，并改善表面光洁度。起始原料在产品质量的整体改进中也起着不可或缺的作用。虽然丙烯腈 - 丁二烯 - 苯乙烯共聚物（ABS）和聚乳酸（PLA）塑料丝状体仍然被许多打印机广泛使用，但可以利用的材料种类正在稳步增多，包括专门设计的复合材料、玻璃、陶瓷及导电油墨。新兴打印机公司和材料供应商之间加剧的竞争促进了 AM 技术的应用，但随着大规模采用 AM 技术，材料的成本将始终是一个担忧。有些讨论在思考如何利用本地资源与资产，例如使用回收材料，这种思考对于那些需要远程运送物资来打印物件的边远地区，尤其相关。³⁸ 天然资源，比如沙、粘土、有机物残骸、可采收的海洋物质等，也正被考虑用作可选材料。³⁹

3D 打印出的结构尺寸越来越大，包括中国、意大利和美国，都已在制造低成本的模块化建筑物。这种大型结构的逐层可调节建

筑物，被比作千年古老的金字塔——不仅规模雄伟壮观，而且含有复杂的内部通道。⁴⁰虽然这些结构的规模非常了不起，但是要使 AM 成为“改变游戏规则的革命性技术”，只有提高基本建筑块体材料和打印机配置的功能性，才有希望促成最具革命性的军事应用。一些前期工作已经证明，选取传感器并置入打印结构来实现功能“嵌入”，是向更先进 3D 打印装置迈进的一步。促成电子产品导热和导电性的材料（例如迹线、焊料等）利用纳米成分（例如银和碳纳米管）的独特性能，正在迅速发展。配方的发展导致了呈现剪切稀化的“油墨”，可适用于能在市场买到的、使用注油筒式打印的 3D 打印机，也适用于由商用打印机改造的多打印头、多材料印刷打印机。⁴¹这些都是向功能性产品——即由单一系统堆积多种不同材料而制成——迈进的重要发展。

政府部门在推进技术方面，起着影响商业创新方向的作用。例如，在将下一代制造技术应用于多域国防战略方面的实例，可能包括优化 3D 打印和嵌入电子部件、应变仪和其它传感器，将其纳入气动结构和作战人员的战斗装备中，用于监测环境、操作表现及磨损情况，并提供通信冗余。⁴²有些技术，如为了更适合女飞行员体型结构的座椅拓扑优化设计，可以根据 3D 打印的座椅原型来改进，结果会更舒适并减少事故。⁴³座椅、头盔及其它装置甚至可以为每个人量身定做，从而创造一个真正适合个人的飞行环境。随着先进材料和打印机系统的出现，我们也能期望看到越来越多完全是打印出来的无人机和机器人执行危险任务。⁴⁴AM 纺织品领域的发展，有助于制造出军用的生物监测智能纤维织物，还可以打印按需设计的营养，作为军人伙食替代品。大规模打印的结构，尤其

是使用本土材料，适合用于救灾和迅速建造军营。

利用传统上一直用于减材制造的软件来制作原创 3D 打印设计，依然存在着挑战。现在，许多公司正在努力开发真正增材性质的软件，即从白板一块开始，而不是从全部填满材料的板块着手。随着软件的发展，生产原创设计需要的实际时间，会成为快速样机制造的一个限制因素。解决方案之一是对一个相似物件进行扫描，形成文件，然后进行修改。或者，可以根据一个部件编号或扫描物体进入一个储存高分辨率文件的数据库，进行挑选。迪斯尼公司已经申请这样一个“用于 3D 打印物体识别”的专利，即，利用一份低分辨率扫描文件，来匹配数据库中的高分辨率复印件，并打印成物体。⁴⁵这种技术一旦广泛流行，采办过程就能被缩减到最简单的形式，也会通过 AM 而变得远更灵敏而快捷。比如，可以获取打印机，并与有关材料及文件一起投放到战地，在现场打印需要的战车和系统。

政府和军方努力中的一个首要挑战，是有效地协调 AM 研发活动。日益上升的担忧是：高度官僚性质的国家制造研究所和有关单位之间普遍缺少共识与协作，正导致一种各自为阵的零敲碎打性研发，造成努力重复和成本升高，也削弱 AM 带来的最终利益。⁴⁶一种补救措施是，建议用严格但灵活的治理结构形式重组所有 AM 活动，比如，在政府各部门设置中央 AM 领导人，其职责包括协调 AM 战略和政策，并向所有计划实施 AM 的各部门组织（从野外的作战单位到全球的后勤支援中心）发布指导。⁴⁷具体建议由国防部部长办公厅，尤其是其属下的新兴能力与原型设计办公室来主导这项改革和制定战略愿景，作为一项解决方案。⁴⁸因此，要想

形成真正的前进动力, 需要随着技术革新的发展步伐, 及时改革 AM 努力的目前结构, 将之推向更具前瞻性思维的态势。⁴⁹ 我们不仅要把握并推进本文谈到的美国空军高层战略文件中描绘的愿景, 我们的领导人更需要破除各种虚浮宣传, 了解并展现关键的差距, 以及弥补这些差距的技术挑战。例如, 在军队供应基地层次实施 AM 技术方面我们目前面临着什么挑战? 此外, 与整个 AM 领域的技术进步相比, 军事应用方面在近期可获得哪些收益?

结语

为了扩大 AM 技术在军事领域的战略应用, 我们应该充分利用种类繁多的现有材料、日益发展的打印机技术和既定的各种计划(包括国家制造创新研究所), 发挥这三者联结所

产生的合力, 来实现全军为长远努力而规划的愿景。我们的目标, 是随着材料的发展(例如导热/导电油墨)和打印能力的提升(例如多材料打印), 而推动 AM 技术从形式向功能发展, 这种努力已初见成效, 例如我们已制造出嵌入式传感器。运用 AM 技术尽可能提升我军的战略和战役机敏性, 可为决策者提供多种可行方案, 来应对国家面临的多领域挑战。⁵⁰ 将 AM 技术纳入军事应用, 对物流和后勤支援意义广泛深远, 因为它能形成快速实地制造能力。AM 带来的时间和成本节约效益, 有可能彻底改变国防采办流程, 并重新界定系统产品的合格鉴定和认证过程。因此, 我们必须大力开发 AM 技术应用, 把握这个机会, 提升我军实施多元多域国防使命的机敏能力; 跨出这一步, 将有助于保障美国保持全面优势, 从容应对国家安全面临的各种新现威胁。★

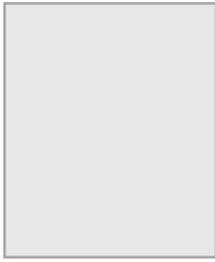
注释:

1. Deborah Lee James and Mark A. Welsh III, America's Air Force: A Call to the Future [美国空军 : 响应未来召唤], (Washington, DC: Department of the Air Force, July 2014), http://permanent.access.gpo.gov/gpo52086/AF_30_Year_Strategy_2.pdf; 另参看 Deborah Lee James and Mark A. Welsh III, USAF Strategic Master Plan [美国空军战略总体规划], (Washington, DC: Department of the Air Force, May 2015), http://www.af.mil/Portals/1/documents/Force%20Management/Strategic_Master_Plan.pdf.
2. Deborah Lee James and Mark A. Welsh III, Air Force Future Operating Concept: A View of the Air Force in 2035 [美国空军未来作战概念 : 展望 2035 年空军], (Washington, DC: Department of the Air Force, September 2015), <http://www.af.mil/Portals/1/images/airpower/AFFOC.pdf>.
3. 这种联系记述在多份美国空军重要报告和计划中, 包括 the Office of the USAF Chief Scientist, Global Horizons [全球地平线], (Washington, DC: Department of the Air Force, 3 July 2013); James and Welsh, A Call to the Future [美国空军 : 响应未来召唤]; Frank Kendall, Better Buying Power 3.0 [更优购买力 3.0 版], US government white paper, (Washington, DC: DOD, 19 September 2014), [http://bbp.dau.mil/docs/2_Better_Buying_Power_3_0\(19_September_2014\).pdf](http://bbp.dau.mil/docs/2_Better_Buying_Power_3_0(19_September_2014).pdf); James and Welsh, USAF Strategic Master Plan [美国空军战略总体规划]; 以及 James and Welsh, Air Force Future Operating Concept [美国空军未来作战概念]。
4. 同注 2 “美国空军未来作战概念”。
5. 这种联系记述在多份美国空军重要报告和计划中, 包括 the Office of the USAF Chief Scientist, Global Horizons [全球地平线]; James and Welsh, A Call to the Future [美国空军 : 响应未来召唤]; Kendall, Better Buying Power 3.0 [更优购买力 3.0 版]; James and Welsh, USAF Strategic Master Plan [美国空军战略总体规划]; 以及 James and Welsh, Air Force Future Operating Concept [美国空军未来作战概念]。
6. 同上。
7. 同注释 3 “全球地平线”。

8. Matthew J. Louis, Tom Seymour, and Jim Joyce, “3D Opportunity for the Department of Defense: Additive Manufacturing Fires Up” [3D 打印在国防部大有用武之地: AM 技术即将火爆], Deloitte University Press (web site), 20 November 2014, <http://dupress.com/articles/additive-manufacturing-defense-3d-printing/>.
9. 这些数据取自沃勒斯公司 (Wohlers and Associates) 的《沃勒斯年度报告》, 该公司自 1996 年以来一直跟踪介绍 AM 或 3D 打印 (两个术语可互换) 的工业和技术发展状况。该年度报告篇幅最初为 40 页, 到 2015 年扩展到 315 页, 它涵盖 3D 打印的历史、过程与材料、系统制造商、工业发展、全球报告、直接部件生产、研究与发展, 并提供对未来的展望。
10. Jon R. Drushal, “Additive Manufacturing: Implications to the Army Organic Industrial Base in 2030” [AM 技术在 2030 年对陆军自身工业基地的影响], (fellows paper, US Army War College, April 2013), <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA593246>; 另参看 Heidi Milkert, “3D Systems Is Working with Marine Corps on a War Game Involving 3D Printing & Scanning” [3D 系统公司正与海军陆战队联合准备一次涉及 3D 打印和扫描的军事演习], 3DPrint.com, 25 August 2014, <http://3dprint.com/12861/3d-systems-marines-3d-print/>; 另参看 Sean R. Walsh, “3D Printing: Enhancing Expeditionary Logistics” [3D 打印: 加强远征军物流后勤], Marine Corps Gazette 99, no. 3 (March 2015), <https://www.mca-marines.org/gazette/2015/03/3d-printing>; 另参看 Julia Bergman, “Coast Guard Academy Professor Uses 3-D Printer on Arctic Icebreaker” [海岸警卫队军官学校教授在北极破冰船上使用 3-D 打印机], Military.com, 28 September 2015, <http://www.military.com/daily-news/2015/09/28/coast-guard-academy-professor-uses-3d-printer-board-arctic.html>.
11. Adam Asclipiadis, “Rapid Equipping Force Uses 3D Printing on the Frontline” [快速装备部队在前线使用 3D 打印]; Army Technology Magazine 2, no. 4 (July/August 2014), <https://www.army.mil/e2c/downloads/353505.pdf>; 另参看 Jennifer McArdle, “Transforming Defense: The Potential Role of 3D Printing” [改革国防: 3D 打印的潜在作用], American Foreign Policy Council Defense Dossier, February 2015, no.13, http://www.afpc.org/files/defense_dossier_february_2015.pdf; 另参看 Meghann Myers, “Sailors Design Parts on Gators 3-D Printer” [船员在“鳄鱼”3-D 打印机上设计零件], Navy Times, 18 May 2014; 另参看 Jordan Golson, “A Military-Grade Drone That Can Be Printed Anywhere” [可在任何地点打印的军用无人机], Wired, 16 September 2014, <http://www.wired.com/2014/09/military-grade-drone-can-printed-anywhere/>.
12. 这项工作得到多项计划的支持, 包括空军研究实验室指挥官的研究与发展基金 (CRDF), 柔性电子及通用军械制造 (FLEGOMAN) 计划, 以及空军科研办公室 (AFOSR) 的极端环境电子集成电路 (ICE3) 计划。ICE3 计划重点研究导电纳米复合材料“油墨”的新发展, 这种油墨能够被优化从而产生分层的导体、半导体、或电阻体。参看 John James, “AFRL Additive Manufacturing Program Advances Functional Prototyping” [空军研究实验室 AM 计划推进功能性样机制造], Air Force Print News Today, 13 January 2016, http://www.wpafb.af.mil/news/story_print.asp?id=123466848.
13. Audra Calloway, “3D Electronic Printing Holds Promise of Various Applications for Soldiers” [3D 电子打印为战士带来多种应用前景], US Army News, 2 December 2013, https://www.army.mil/article/116189/3D_electronic_printing.
14. Hayden K. Richards and David Liu, “Topology Optimization of Additively-Manufactured, Lattice-Reinforced Penetrating Warheads” [AM 制造乳胶加固穿甲弹头的拓扑优化], (presentation, American Institute of Aeronautics and Astronautics SciTech Forum and Exposition, Kissimmee, Florida, 5-9 January 2015), <http://www.i3dmfg.com/wp-content/uploads/2015/07/Richards-and-Liu-AM-warheads.pdf>; 另参看 Allison Dempsey, David Liu, Anthony Palazotto, and Rachel Abrahams, “Dynamic Properties of Additively Manufactured Stainless Steel” [AM 制造不锈钢的动态性能], (presentation, American Institute of Aeronautics and Astronautics SciTech Forum and Exposition, San Diego, California, 4-8 January 2016), doi: 10.2514/6.2016-1510; 另参看 William T. Graves, David Liu, and Anthony N. Palazotto, “Topology Optimization of a Penetrating Warhead” [穿甲弹头的拓扑优化], (presentation, American Institute of Aeronautics and Astronautics SciTech Forum and Exposition, San Diego, California, 4-8 January 2016), doi: 10.2514/6.2016-1509.
15. 同注 13 “3D 电子打印为战士带来多种应用前景”。
16. Phillip Cullom, “5 Things to Know about Navy 3D Printing” [关于海军 3D 打印应知道的 5 件事], Navy Live (blog), 15 July 2014, <http://navylive.dodlive.mil/2014/07/15/5-things-to-know-about-navy-3d-printing/>.
17. Sydney J. Freedberg Jr., “Warship Is Taking 3D Printer to Sea; Don't Expect a Revolution” [战舰带 3D 打印机出海: 不要期待革命来临], Breaking Defense News, 22 August 2014, <http://breakingdefense.com/2014/04/navy-carrier-is-taking-3d-printer-to-sea-dont-expect-a-revolution/>.
18. Bryant Jordan, “Navy, Going Big on 3D Printing Next Year, Looking for Industry Ideas” [海军明年将大力推进 3D 打印, 寻求业界思路], Defense Tech (web site), 1 July 2015, <http://www.defensetech.org/2015/07/01/navy-going-big-on-3d-printing-next-year-looking-for-industry-ideas/>.

19. Naval Air Systems Command, “Energetic Materials Additive Manufacturing” [含能材料用于增材制造], (PowerPoint presentation, 2014), <http://www.navair.navy.mil/osbp/index.cfm?fuseaction=home.download&id=597>.
20. “What Is Logistics?” [什么是物流后勤?], Logistics World (web site), 2016, <http://www.logisticsworld.com/logistics.htm>.
21. 关于美国国防部对后勤支持的正式定义, 参看 “U.S. DoD Terminology: Sustainment” [美国国防部军语词典: sustainment 词条], Military Factory (web site), 2016, http://www.militaryfactory.com/dictionary/military-terms-defined.asp?term_id=5234.
22. 同注 2 “美国空军未来作战概念”, 第 29 页。
23. John Parker, “Planning a Larger Role for 3-D Printing” [规划 3-D 打印发挥更大作用], Tinker Air Force Base Public Affairs, 19 October 2015, <http://www.af.mil/News/ArticleDisplay/tabid/223/Article/624703/planning-a-larger-role-for-3-d-printing.aspx>.
24. 同注 1 “美国空军战略总体规划”。
25. Debra Lulu, DoD Additive Manufacturing for Maintenance Operations (AMMO) Working Group Charter [国防部维护作业增材制造 (AMMO) 工作组章程], (Ann Arbor, MI: Commercial Technologies for Maintenance Activities, May 2015), 20, http://www.ncms.org/wp-content/gallery/2015-CTMA-Partners-Meeting/CTMA_Program-2015-Digital.pdf.
26. US Army Manufacturing Technology (ManTech), “Additive Manufacturing to Restore/Reclaim/Reuse High Value Aviation Assets” [AM 技术用于修复 / 回收 / 再用高价值航空资产], no date, <http://www.armymantech.com/AMTRRRHVAA.php>.
27. 同注 3 “更优购买力 3.0 版”。
28. 同注 3 “更优购买力 3.0 版”; 另参看 “Air Force’s 30-Year Plan Seeks ‘Strategic Agility’” [空军 30 年计划追求 “战略机敏性”], Defense Systems (web site), 31 July 2014, <https://defensesystems.com/articles/2014/07/31/air-force-30-year-strategy.aspx>.
29. 同注 3 “更优购买力 3.0 版”。
30. 同注 2 “美国空军未来作战概念”, 第 28 页。
31. 同注 3 “更优购买力 3.0 版”。
32. 同注 3 “全球地平线”。
33. Committee on Space-Based Additive Manufacturing, Aeronautics and Space Engineering Board, National Materials and Manufacturing Board, Division on Engineering and Physical Sciences, and National Research Council, “A Possible Way Forward for the Air Force” [美国空军可能的前进方向], 收录于 3D Printing in Space [3D 打印技术的太空应用], National Research Council (Washington, DC: National Academy of Sciences, 2014).
34. 同注 3 “更优购买力 3.0 版”。
35. 同注 3 “更优购买力 3.0 版”。
36. Joel Hans, “Obama Asks Congress to Deploy Manufacturing ‘Institutes’” [奥巴马要求国会部署制造研究所], Manufacturing.net (web site) 13 February 2013, <http://www.manufacturing.net/news/2013/02/obama-asks-congress-deploy-manufacturing-institutes>.
37. White House, “President Obama Announces Winner of New Smart Manufacturing Innovation Institute and New Manufacturing Hub Competitions” [奥巴马总统宣布竞争新智能制造创新研究所和新制造创新中心获胜单位], White House, 20 June 2016, <https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2016/06/20/fact-sheet-president-obama-announces-winner-new-smart-manufacturing>.
38. 同注 33 “美国空军可能的前进方向”。
39. Scott Cheney-Peters and Matthew Hipple, “Print Me a Cruiser!” [给我打印一艘巡洋舰], Proceedings 139, no. 4 (April 2013).
40. Dale Brosius “Additive manufacturing: The Past, Present—and Future—of Composites” [增材制造: 复合材料的过去 / 现在 / 未来], Composites World (web site), 31 July 2015, <http://www.compositesworld.com/articles/additive-manufacturing-the-past-present-and-future-of-composites>.

41. James O. Hardin, Thomas J. Ober, Alexander D. Valentine, and Jennifer A. Lewis, "Microfluidic Printheads for Multimaterial 3D Printing of Viscoelastic Inks" [用于多材料粘弹性油墨 3D 打印的微流控打印头], *Advanced Materials* 27, no. 21 (3 June 2015): 3279-84, doi: 10.1002/adma.201500222.
42. "Stereolithography Expedites Impeller Design" [立体平版印刷术加快叶片设计], *Design News*, 7 September 1998, http://www.designnews.com/document.asp?doc_id=223384; 另参看 National Research Council, *3D Printing in Space* [3D 打印技术的太空应用], National Research Council (Washington, DC: National Academy of Sciences, 2014), 21.
43. Todd Rose, "When U.S. Air Force Discovered the Flaw of Averages" [当美国空军发现了平均值的缺陷时], *Toronto Star*, 16 January 2016, <http://www.thestar.com/news/insight/2016/01/16/when-us-air-force-discovered-the-flaw-of-averages.html>; 另参看 Yolanda Nicole Andrade, "An Ergonomic Evaluation of Aircraft Pilot Seats" [对飞行员座椅的人体工程学评估], (Masters thesis, Embry-Riddle Aeronautical University, 2013).
44. 同注 39 "给我打印一艘巡洋舰"。
45. Alec, "Disney Patent for 3D Scanning and High Resolution 3D Printing Approved by US Patent Office" [迪斯尼公司的 3D 扫描和高分辨率 3D 打印技术专利申请获美国专利局批准], *3ders.org* (web site), 22 February 2016, <http://www.3ders.org/articles/20160222-disney-patent-for-3d-scanning-and-high-resolution-3d-printing-approved-by-us-patent-office.html>.
46. 同注 8 "3D 打印在国防部大有用武之地"; 另参看注 11 "改革国防: 3D 打印的潜在作用"。
47. 同上。
48. 同注 11 "改革国防: 3D 打印的潜在作用"。
49. 同注 11 "改革国防: 3D 打印的潜在作用"。
50. Torri Ingalsbe, "Strategic Agility Is the Future of the Air Force" [战略机敏性是美国空军的未来], *Air Force Print News Today*, 30 July 2014, <http://www.afmc.af.mil/news/story.asp?id=123419625>.



阿曼达·M·希兰德博士 (Dr. Amanda M. Schrand) 是引信电子学与设计项目的首席研究员, 她负责美国空军研究实验室弹药部 (AFRL/RX) 的“柔性电子与通用兵器制造” (FLEGOMAN) 和“极端环境中的电子集成电路” (ICE3) 项目。她获得代顿大学材料工程博士学位, 其研究领域有纳米材料, 纳米毒理学、纳米动力学、仿生设计、分析化学和物理学。