



● 作者/Jaren K. Price, Miranda C. La Bash and Bart Land

● 譯者/李永悌

● 審者/馬浩翔

減輕聯合作戰後勤負擔的3D列印

3D Printing for Joint Agile Operations

取材/2019年第四季美國聯部隊季刊(*Joint Force Quarterly*, 4th Quarter/2019)

積層製造(3D列印)可在需要時製造零件，有助實現迅捷作戰構想，並大幅減輕後勤負擔，賦予作戰部隊快速靈活的故障排除能力。

以粉末與雷射列印的鈦合金零件，為研究人員提供未來高強度、耐熱的積層製造實例。

(Source: US Army/David McNally)

位於非洲沿海的美海軍海上基地猶如浮動式蜂巢，有為數眾多的艦艇搭載人員四處移動，並派出飛機與登陸艦艇運送突擊部隊至目標區。技術團隊檢查以氣墊登陸艇登陸灘頭的陸軍及陸戰隊車輛。團隊分為兩組，一組分類車輛損傷，必要時加以維修，俾利車輛更快返回戰場。另一組則評估一輛因觸雷而損傷嚴重的聯合輕型戰術輪車 (joint light tactical vehicle, JLTV)。技術人員申請維修零件。部分零件可立即取自位於海上基地的庫房，專業製造人員同時可從資料庫中提取已無庫存零件的藍圖。不久後，3D印表機開始運轉。於此同時，專業工程小組已為聯合輕型戰術輪車擬定維修解決方案，並由工程師繪製3D設計圖。新繪製的設計圖亦進入印刷製程。零件完成後送交技術人員，接著完成修理。車輛在數小時內即已備便返回原單位使用。



在不久的將來，上述情況極有可能成真。積層製造(additive manufacturing, AM)，亦稱為3D列印(3D printing)技術，將可實現未來迅捷作戰構想(agile operating concept)。透過自行製造所需零件的方式，積層製造將可大幅縮短美國國防部後勤鏈(特別是維修零件)。積層製造賦予美軍快速靈活因應無預警故障或戰損的能力，同時可增加作戰部隊的迅捷度。惟為能充分有效發揮積層製造的潛力，國防部必須為積層製造發展共同資料解決方案，並制定安全、認證與申請程序標準，同時利用優先發展資料科學的作法，以減少成本與執行時的衝擊。聯合作戰部隊必須整合各項作為，以克服各軍種各自為政與技術執行上的挑戰，俾實現聯合敏捷持續支援部隊的構想。

2017年12月，美國國家安全戰略(National Security Strategy)將俄羅斯與中共認定在所有領域中積極與美國競爭的修正主義強權。¹「中」俄發展不對稱武器來刺探美國弱點，並透過「反介入/區域拒止」戰略製造僵局。而在民族國家競爭場域外，美國持續在嚴峻環境下進行人道與反恐行動。這些事態發展迫使美國必須研擬出在高度競爭環境下，及在無法運用基地與基礎設施立即支援作戰行動之處遂行作戰之法。²未來作戰關鍵之一，是如何提供聯合部隊有效支援。

基於此項未來願景，美軍各軍種已提出構想，並開始發展在各種逆境下遂行迅捷作戰的能力與程序。這項新作戰構想規劃持久地面、海軍及戰術空中作戰，期間將拉長不利用港口、機場或中繼基地的時間，並以僅具最低限度後勤支援的

克難機場進行作戰。這些戰術要求後勤計畫人員發展能滿足部隊需求的新方法，在不使用大型陸基後勤設施的情況下即時提供持續支援。這些構想包括美海軍及陸戰隊的海上基地設置構想(Seabasing Concept)、美空軍一系列的分配/迅捷基地設置作戰(Disbursed/Agile Basing Options)，及美陸軍的多領域作戰(Multidomain Operations)等。

無論從浮動海上基地、疏散機場或遠距作戰基地遂行作戰，這些構想皆要求美軍部隊能從戰略距離外機動，並能克服時空因素來整合各種能力，克敵制勝。實行這些構想須有「精準後勤，俾提供可靠、迅捷與反應快速的持續支援能力。」³敵人預期將透過傳統、非傳統及網路等手段，標定美國國內與部署地點的持續支援能力。因此，支援部隊往往必須分散至多個地點，並能承受攻擊，縱使當某些地點遭受攻擊時，亦有足夠備品來維持基本能力。這些構想亦要求支援、保修單位與裝備能盡可能向前方部署。

這些作戰構想的共同主題是盡可能持續向前提供支援、降低大型後勤基地需求，及透過將聯合部隊規模與作戰範圍縮減至最小的方式來維護部隊戰力。相較燃料與彈藥，儘管裝備與零件僅佔持續支援需求的一小部分，在前進據點實行積層製造，仍可透過降低必要備用零件庫存、縮減運輸需求、創造更有彈性的預置囤儲，以及提供重複配置協助等作法來實現前述構想。

積層製造一詞貼切描述了有關增加與黏合層層相連材料的過程，而傳統(遞減式)製造則涉及成形與銑削，通常與專門為創造單一設計而製作的

二級材料(例如模具)有關。傳統製造期間所汰除的材料，浪費掉的基底材料要比積層製造更多。積層製造具備可提供鄰近地區迅速製造零件的能力，消弭供應鏈距離及曠日廢時的籌獲流程。積層製造具有固定單位成本，可有效生產少量訂製零件。除了能重新創造先前已停產的零件，積層製造還可鼓勵部隊層級進行創新作為，例如生產訂製工具以解決特定問題。

題。⁴ 其他積層製造的潛在優點包括網路化智能工廠、改善品質管制、迅速創新、以逐立體像素(voxel-by-voxel)⁵ 數位化修改個案處理，及視需求生產或降低庫存量等。⁶ 將積層製造引進製造流程亦可減少零件數量、組裝時間與重量，同時創造出「無法透過其他方式產生的複雜內、外部幾何架構。」⁷

在距離維修設施與備用零件庫房較遠處，實行迅捷作戰

構想的部隊可自行製造替換品或利用前進基地，如此將大幅減少庫存數量、運輸需求及輸送所需零件前往維修設施的時間。為能在艱困地區遂行作戰，並避免遭敵偵知、減少裝備故障時間，並於遂行任務期間或戰場上獲得最多維修機會，具有積層製造能力的部隊將可隨時依需求製造零件。

目前美軍各軍種皆有機動倉儲系統，可儲存諸如戰機等特

2019年2月25日，美陸軍研究員麥克威廉斯(Brandon McWilliams)博士於馬里蘭州的美陸軍作戰能力發展指揮部陸軍研究實驗室亞伯丁實驗場，拿著以粉末製成的樣品零件。(Source: US Army/David McNally)





定武器系統的替換零件。機動倉庫造就美軍現有遠征能力，惟須進行大刀闊斧改進方可支援迅捷作戰構想。這些機動倉庫仰賴大量需求資料(demand data)，才能精準預測應有的庫存量。需求資料一詞最貼切的解釋，就是對特定物品的需求頻率。經多年蒐集，這項資料可勾勒出現有紀錄中各類系統替代零件的長期需求全貌。

然而需求資料無法用在預測所有重大故障，導致在長期使用武器系統後可能無法滿足任務需求。新系統缺乏需求資料，導致難以評估零件替換時程。舊有武器系統發生無預警故障，代表以往未曾生產需要的替換零件。這些武器系統的零組件有些可能已經停產。積層製造可在有需要時生產，降低無預警需求產生之風險。此外，由於現場製造可降低或消弭零件無庫存的風險，積層製造可進一步精簡機動倉庫的庫存量。

這項技術還不足以取代這些機動倉庫，但仍可讓庫存著重在低密度、高需求，特別是複雜的零件，或是存放所需材料精準度為當前積層製造不易產製的零件。較有效精簡的機動倉庫與全球庫存，預期可減輕運輸資產與分配系統的負擔。如此一來將可大規模減少配送中心、中繼站與迅捷基地(agile bases)人員及物資處理裝備的數量。部分相關人員可接受訓練專職從事積層製造。在減少供應鏈中運送貨品時必要的飛機、船隻、卡車與輕便拖車後，這些運輸資產即可專用在運送作戰部隊與裝備往返迅捷基地。

諸如貨機與貨船等運輸資產，亦將從自身或偏遠地區的積層製造能力受益，進而支援建制維修能力。部隊可於現場製作自己需要的重要零件，

讓配送任務得以繼續按計畫進行。在運輸資產未具備機動倉庫能力或本身距離後勤支援甚遠時，此作法將特別有效。透過此項能力提升運輸資產的可用率後，即可將資源轉用在其他作戰需求上，亦可讓運輸資產更頻繁送往偏遠的迅捷基地，而無需耗費更多資源在運輸資產上。

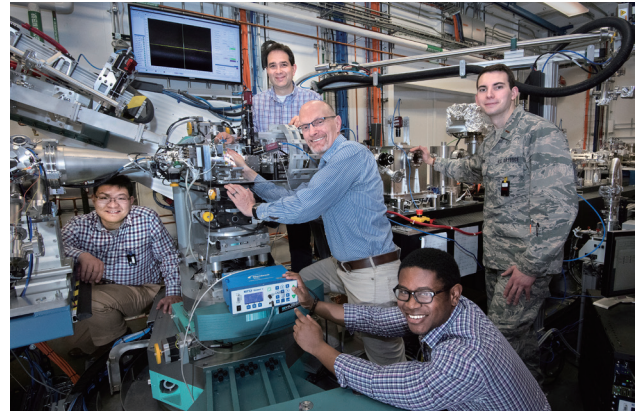
在預置囤儲(prepositioned stock)中增加積層製造能力可大力支持設置迅捷基地的構想。美陸軍、陸戰隊與空軍仰賴預置囤儲船隊以因應危機，惟因各艘船隻運作時須投入極為巨大的成本，是故美國在全世界僅維持數艘預置囤儲船。這些庫存係由品項繁多的軍品所組成，能賦予重要武器系統與作戰人員能力，包括(不限於)物資處理裝備、工程裝備、發電機、無線電、加油裝備、醫療裝備及彈藥等。另可將積層製造用在讓艦艇與倉庫更確實進行艦上維保作業，避免頻繁返港補充物資。返港須花費數天到數週，還不包含在母港曠日廢時的維修周期，不但降低危機行動時的載臺可用率，還增加潛在作戰行動的風險，而積層製造可降低之。

另一項運用積層製造的優點就是避免因老舊或到達服役年限而產生的沉沒成本(sunk cost，或稱既定成本)。由於軍事裝備不斷現代化，預置囤儲亦須與時俱進，因而定期產生再投資成本。此一替代零件庫存品中即便部分從未派上用場，卻因壽期已至而須丟棄。積層製造能在確實有需要時生產裝備，有助降低此類成本。待積層製造技術成熟，並在有需要時增加生產裝備，將可讓一部分大型預置囤儲船轉換為更多小型、但具備相同功能的船隻。由於積層製造能製造出為任務

量身打造的複雜裝備，此構想可望實現。這些船隻可更有效提供遍及全球的作戰支援，創造出反應更迅速的預置囤儲。以此方式改善預置囤儲船隊，對實現迅捷作戰的構想而言極為重要。

美國國防部各單位業已展開創新作為，運用積層製造開發新工具，並簡化保養與補給程序。美陸戰隊的岩國發動機運送工具組(Iwakuni Engine Ship Kit)係由部隊的技術人員運用3D印表機製成，讓待修的飛機發動機在運送期間無須排掉燃油與液壓油。⁸ 美陸戰隊系統指揮部(Marine Corps Systems Command)與陸戰隊設施與後勤司令部(Marine Corps Installations and Logistics)已研發出機動式3D列印原型實驗室——遠征裝配實驗室(Expeditionary Fabrication Lab, X-FAB)，以供隨隊支援的保修部隊使用。美海軍軍令部長的快速創新小組(Rapid Innovation Cell)已在艾色克斯號(USS *Essex*)上永久安裝一部3D印表機，⁹ 同時計劃也要安裝在另外2艘艦艇上。¹⁰ 美海軍海上系統指揮部(Naval Sea Systems Command, NAVSEA)亦已批准第一款積層製造金屬零件在杜魯門號(USS *Harry S. Truman*)上試用一年。¹¹

為支援前進部署的官兵，美陸軍研發工程指揮部(Army Research, Development, and Engineering Command, RDECOM)與快速裝配部隊(Rapid Equipping Force)共同合作，協助其所屬3D列印遠征實驗室相關管理、編配人員與支援事項。該型實驗室可部署在世界各地。美陸軍遠征實驗室為製造實驗室，能在20呎裝運貨櫃內獨立運作，並配備4部3D印表機，目前僅能進行聚合物列印(polymer printing)。¹² 其中一組實驗室部署在阿



美軍大幅投資積層製造技術，各軍種內部積極進行資料庫設計與零件驗證。(Source: Air Force Research Laboratory/Alexa Low)

富汗的巴格蘭姆機場(Bagram Airfield)，另一組則於科威特的阿拉夫賈恩營(Camp Arifjan)附近作業。¹³ 如此將可解決在戰場上發現的問題，惟當前美軍政策仍將積層製造嚴格限制在緊急維修時使用。此外，製造維修零件時，官兵必須同時透過補給系統申請零件。¹⁴

美國國防部已投注大量資源在積層製造技術上，成立於2012年的美國製造所(America Makes，亦即國家積層製造創新研究院[National Additive Manufacturing Innovation Institute])是聯邦政府、民營企業與大學間的公營合作建立之單位。該機構係由美空軍研究實驗室(Air Force Research Laboratory, AFRL)管理。¹⁵ 美國製造所與美國國家標準協會(American National Standards Institute)於2018年6月公布的積層製造標準規劃(AM Standardization Roadmap)2.0版，是這種合作關係發展上的重要里程碑，該文件指陳積層製造零件生命周期標準化步驟的缺失。¹⁶ 該項工作將大幅提升積層製造產業發展，最後將可供



國防部運用。

同時，美軍各軍種內部組織刻正積極進行積層製造的資料庫設計與零件驗證。美海軍已指定海軍軍令部長艦隊戰備後勤室(Office of the Chief of Naval Operations, OPNAV N4)為積層製造主導協調單位。¹⁷ 美陸軍研發工程指揮部與美陸軍軍品司令部(Army Materiel Command)正開發產品資料管理系統，俾維護與共享設計資料。¹⁸ 美陸軍研發工程指揮部、美海軍研究室(Office of Naval Research)及美空軍研究實驗室皆設有可用於進行積層製造研究活動的實驗室。¹⁹

美國政府責任署(Government Accountability Office)於2015年10月建議，由國防部指派部長辦公室(Office of the Secretary of Defense, OSD)主導全部活動與資源系統化作為之發展與執行，俾將積層製造技術引進整個國防部。這項作為的主要動機是為了追蹤實際或潛在性能及作戰能力改良、成本節約及所獲經驗。²⁰ 一年後，美軍軍種、國防後勤局(Defense Logistics Agency, DLA)及美國製造所等主導單位組成之聯合委員會，於2016年11月30日發表美國國防部積層製造規劃(DOD AM Roadmap)，其中揭櫫了積層製造持續發展與執行的高階目標。該委員會大量評估各軍種協調工作，建議必須要有更正式的共享機制與進程評估，包括指派協調美國國防部積層製造規劃修正工作的主要整合單位。²¹ 儘管有所協調，仍無法釐清國防部長辦公室是否已指派主導單位，及各軍種是否已具備各自發展或刻正發展規劃自身積層製造的獨立能力。

為實現積層製造修護與後勤，美國國防部全面實

施積層製造須達到成熟發展階段。美陸、海、空軍獨立擬定的積層製造執行計畫係採不同作法來發展全軍積層製造。唯有採取一致作為，國防部才能有效克服九項重大執行挑戰：

- 物資標準與可得性
- 零件選擇
- 綜合技能發展
- 構型管制
- 重量精度
- 網路安全
- 零件驗證與鑑定
- 製程驗證與鑑定
- 零組件逆向工程(reverse-engineer)能力²²

美軍必須克服上述挑戰，方可實現支援迅捷作戰構想的積層製造能力。就短期且有限之維修零件積層製造運用而言，最重要的是開發、共享，以及維護讓零件得以列印的技術資料套裝軟體(Technical Data Packages, TDPs)的能力，另透過可複製之法，運用設計導向材料製造出具有合宜精確度與品質的能力。為能更廣泛實現積層製造零件生產，成熟的積層製造產業是可靠且具競爭力的備用零件採購先決條件，零件製造商需能運用同等級列表機，以定義明確的材料標準與檔案格式進行生產。²³

大多數零件皆要求工程與後處理強度，這代表想在嚴峻環境下印製合格零件變得相當困難。零件必須經過鑑定或認證，才能符合特定設計規格(一定時間內的溫度、壓力、外力與運動)，並安裝在國防部系統上。在3D零件合格認證方面，該零件必須以合格印表機印製：亦即積層製造印表

機本身已通過驗證，且每次使用皆能以相同規格重製零件。還須採用競爭性招標來評比競標廠商，此將轉化為驗證(由不同公司使用或由不同製造商製造的)多種型號印表機的必要條件，該機型必須能合格用在生產各零件。

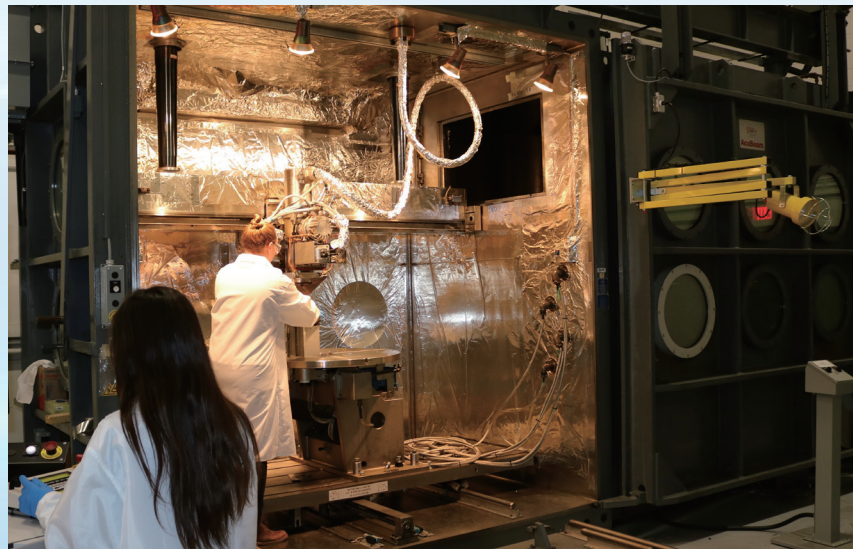
材料亦須以定義完整的標準進行認證，如此將增加國防部要求下把尚未成熟的領域應用在此項任務的發展工作。在合金製造方面，目前僅有部分金屬合乎美國材料實驗協會(American Society for Testing Materials)定義的積層製造標準。而在金屬積層製造技術方面，為達成正確一致的零件製造，目前有許多重要設施與作業需求，包括溫度、濕度、移動控制與可靠的電力、抑制列印粉末以防手邊合金意外轉移或汙染、用於清洗機器的專業裝備，及必須處理的材料——由機器本身產生、充滿粉塵的廢水。²⁴ 直到目前為止，這些限制因素導致野戰列印僅限聚合物。

生產維修零件所需的各式原料是另一項須要考量的限制因素。系統設計工程師必須想方

設法降低材料多樣性，俾能減少積層製造材料的庫存。例如，將某些昂貴材料用來製作實際上毋須用到的零件，俾將單一材料用於數種組件，如此將有利於直接減少庫存中必要積層製造原料的多樣性。為實施積層製造，除支援機動倉庫，庫存替換零件與原料間亦須取得適當平衡，俾獲得最大效能，盡量縮小總體庫存規模。

為能最有效發展積層製造以支援迅捷後勤，美軍須做到以下幾點。首先，全美國防部必須有保密且統一的數位網路，其本身包含經認證的技術資料套裝軟體，及有關印表機、供應商

資料與認證工程活動的元資料(metadata)。美國防後勤局後勤作戰研發小組(Logistics Operations Research and Development)正協同各軍種開發此資料庫。該單位也著手發展可重複運用的供應商認證流程，並已研發出為數不多的積層零件候選識別工具(Additive Part Candidate Identification Tool)，俾協助找出哪些零件應優先利用積層製造予以生產。²⁵ 為發展新系統，合約中處理智慧財產權問題與未來能取得精確技術資料的用語，對能否長期成功運用積層製造能力而言至關重要。



美海軍作戰中心的工程師正在使用電子束積層製造(EBAM)系統作業。

(Source: Naval Air Warfare Center Aircraft Division/Allison Murawski)



其次，國防部必須發展跨軍種標準化流程。美海軍海上系統指揮部、海軍作戰中心(Naval Warfare Centers)及美國防後勤局刻正建立標準化流程與積層製造指導準則，為無法透過正常補給管道獲得的零件開發技術資料套裝軟體。美海軍作戰中心、系統中心(Systems Centers)及海軍研究實驗室(Naval Research Laboratory)正研究如何以最有效的方式鑑定與驗證3D列印零件。美海軍懷尼米港水面作戰中心(Naval Surface Warfare Center Port Hueneme)亦檢視艦艇上的應用程式，尤其針對後勤、資料庫、合約機制與有關資料權

限等問題進行驗證。²⁶ 流程驗證工作仍相當繁重，以三部不同印表機在三處以同一種技術資料套裝軟體印製，俾供國防後勤局後續為該零件的合約製造提出標案。惟作戰中心的材料工程師建議，為實現積層製造的實際潛力，應取消驗證各零件的要求。²⁷ 由於以此方式驗證部隊想要列印或設計的每一項零件並不符合成本效益，已屆系統臨界值門檻的零件，應改採簡化流程驗證。無論標準為何，全美國防部必須採行單一標準。

第三，將積層製造引進籌獲流程，利用集中管理的合格零件資料庫，在需要時印製，而非透過



2018年12月9日，美陸戰隊第7工程支援營(Engineer Support Battalion)及美海軍第5機動工程營(Naval Mobile Construction Battalion)士兵於加州朋德爾頓(Camp Pendleton, California)舉行的3D混凝土列印演習(3D Concrete Printing Exercise)期間，合力將軟管連接上3D混凝土印表機。(Source: USMC/Betzabeth Y. Galvan)



2019年5月15日，美國先進積層製造卓越中心(Advanced and Additive Manufacturing Center of Excellence)以3D列印製作原型零件，為伊利諾州岩島兵工廠(Rock Island Arsenal)聯合製造技術中心(Joint Manufacturing and Technology Center)的機器進行故障排除。

(Source: US Army/Debralee Best)

一般補給管道獲得零件。完善的多功能列印也就在戰區內倉庫進行。儘管美軍各軍種多半會印製不同零件，仍可能會有部分零件重複，在合格列印機與材料部份狀況方面重複更是嚴重，設計出統一與相容系統和進行聯合測試，也就成為提高效率的必備要素。

第四，必須公布實施安全標準。其中包括考量諸如艦上環境或快運貨櫃(conex boxes)等密閉空間的安全性。積層製造的工作環境必須能同時抑制材料飛揚並容許適當通風，俾預防金屬粉末於融合期間釋放有毒氣體造成人員傷害。²⁸ 必須要求人員使用個人防護裝置，在金屬印表機惰性氣體環境中，對可能外洩的氣體適當予以偵測與通風。此功能必須納入安全程序與危險廢棄物計

畫。

就某些零件來看，庫存能比列印提供更大差異化優勢，這要視前方的零件複雜程度、材料與積層製造能力而定。實行積層製造的第五個重要步驟，就是考量應優先開發何種利用積層製造的零件。與排定零件優先順序同等重要的是，發展在進行前進部署時用途最廣的印表機能力。3D印表機的成本與能力差異懸殊，價格從2,000美元的家用塑膠印表機、5萬美元的基本金屬印表機，乃至要價100萬美元以上大型、精確的多材料印表機，就決定何種零件可實際在當地製造，又有何種零件較適合在陸基、戰區內或回歸製造商的專業設施內生產來看，依大小、材料與解析度要求等一系列屬性，來區分零件與印表機顯得至關重要。某些重要但難以精確列印的零件必須維持其庫存量，某些可精確以3D印製且對任務至關重要的零件——例如引擎零組件——無論是蒸汽主機、飛機發動機、武器系統或安全系統，都必須進行一系列材料、印表機與零件驗證，才能確保其符合規格。

第六，美國防部必須廣泛評估何種庫存零件，在轉換為積層製造後可成為經濟與作戰上的優勢。如此即可透過一致作為與潛在聯合跨軍種管道，深入調查全國防部超過500萬種零件的冊列項目。²⁹ 由資料學家從事該工作，將可協助系統工程師排定其任務優先順序。在有需要時實行積層製造的標準，應包括高度或間歇性需求、補給站收貨進度長期遲滯、缺乏零組件將嚴重影響戰備、需要時生產合格零件的印製能力，及取用技術資料套裝軟體資料庫內設計規格等便利性。具



適應性的模型建構與政策調整具體化、聯合合作契機與技術解決方案等，最有助提升前進部署能力，而隨著時間過去，降低成本將為整個國防部找到最有利重心。

最後，決定最符合成本效益的方法與流程至為重要。實行積層製造的成本計算必須包括設施、訓練或與操作人員訂約、具有考量設計智慧財產權機制的統一資料庫、持續製造材料成本、軟體與機械維護合約，及後續計畫管理的總成本。³⁰若美軍各軍種能妥善利用規模經濟，避免重複投

入資源，即可實現大量節省國防部資源的目標，但在發展積層製造時不可過分強調成本擲節。儘管目前美軍各軍種技術資料套裝軟體研發、資料庫建立與維護、簽約方式、安全標準及積層製造政策相對各自獨立，但這些工作可以、也必須共同達成。

目前國防部實行積層製造尚屬初期階段。各軍種的積層製造實驗已證明其可應用於迅速作戰、緊急情況與創新用途。惟在發揮積層製造潛力前，計畫發展上仍有重大障礙。美國防部必須找

註釋

1. *National Security Strategy of the United States of America* (Washington, DC: The White House, December 2017), 25, available at <www.whitehouse.gov/wp-content/uploads/2017/12/NSS-Final-12-18-2017-0905.pdf>.
2. U.S. Army Training and Doctrine Command Pamphlet 525-3-1, *The U.S. Army in Multi-Domain Operations, 2028* (Washington, DC: Headquarters Department of the Army, 2018), iii, available at <www.tradoc.army.mil/Portals/14/Documents/MDO/TP525-3-1_30Nov2018.pdf>.
3. Ibid.
4. Lance M. Bacon, "Here's How Marines Are Using 3-D Printing to Make Their Own Parts," *Marine Corps Times*, April 30, 2016, available at <www.marinecorpstimes.com/news/your-marine-corps/2016/04/30/here-s-how-marines-are-using-3-d-printing-to-make-theirown-parts/>.
5. 立體像素(Voxel)一詞結合了立體(volume)與像素(pixel)，代表3D列印物體的最小可修改體積。
6. Luiz Durão et al., "Additive Manufacturing Scenarios for Distributed Production of Spare Parts," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93, nos. 1-4 (2017), 869-880.
7. Paul Sharke, "How Practical Is 3-D Metal Printing?" *Mechanical Engineering* 139, no. 10 (2017), 44-49.
8. Bacon, "Here's How Marines Are Using 3-D Printing to Make Their Own Parts."
9. Daniel Kent and Michael Carvelli, "Looking at 3-D Printing from All Sides Now: New Technology Offers Major Benefits for Army Maintenance," *Army Magazine*, November 2016, 19-21.
10. Government Accountability Office (GAO), *Defense Additive Manufacturing: DOD Needs to Systematically Track Department-Wide 3D Printing Efforts*, GAO 16-56 (Washington, DC: GAO, 2015), 1-44, available at <www.gao.gov/assets/680/673099.pdf>.
11. "NAVSEA Approves First Metal Additively Manufactured Component for Ship," NAVSEA News, October 11, 2018, available at <www.navsea.navy.mil/Media/News/Article/1659370/navsea-approves-first-metal-additively-manufactured-component-for-shipboard-use/>.
12. Steve Stark, "Why the Hype? Additive Manufacturing Is All the Rage, but Why?" *Army AL&T Magazine*, January 28, 2019, 91-95.
13. Argie Sarantinos-Perrin, "A New Dimension of Acquisition," *Army AL&T Magazine*, November 28, 2016, 82-87.
14. Steve Stark, "Complex Geometry: Additive Manufacturing Holds Great Potential, but Much Work Remains to Be Done for the Army to Get to Additive Nirvana," *Army AL&T Magazine*, January 23, 2019, 75-83.
15. GAO, *Defense Additive Manufacturing*.
16. American National Standards Institute (ANSI), "America Makes and ANSI Publish Version 2.0 of Standardization

出在考慮維修時間與成本等因素後，可產生明顯作戰優勢的跨軍種解決方案。部分最迫切的挑戰包括發展可當地製造零件的資料庫、建立全美國防部的安全、零件與印表機認證方法及需求、決定哪些零件最適合在當地印製、進行庫存或透過傳統補給管道供應。積層製造是達成持續支援聯合迅捷的關鍵因素，但必須將聯合作戰納入設計之中。

世界不斷變化，潛在敵人將計畫奪取美國所有優勢。美軍預期將在無法使用完善後勤基地的嚴

峻地點與地區作戰，若能妥善發展積層製造，將可成為美軍部隊的潛在優勢。

作者簡介

Jaren K. Price 陸軍上校係美國印度太平洋司令部聯合情報作業中心副指揮官。

Miranda C. La Bash 海軍少校係服務於美國太平洋特戰司令部情報處。

Bart Land 空軍少校係美國印度太平洋司令部後勤、工程與安全合作處東北亞後勤計畫官。

Reprint from *Joint Force Quarterly* with permission.

- Roadmap for Additive Manufacturing,” *ANSI.org*, June 28, 2018, available at <www.ansi.org/news_publications/news_story?menuid=7&articleid=fc19f3c2-de56-4d96-9d42-cc0c7a0c8c37>.
17. Jason T. Ray, “Additive Manufacturing in the Navy: State of the Technology,” *Navy Supply Corps Newsletter*, June 2, 2016, available at <<http://scnewsltr.dodlive.mil/2016/06/02/additive-manufacturing-in-the-navy-state-of-thetechnology/>>.
18. Sarantinos-Perrin, “A New Dimension of Acquisition.”
19. GAO, *Defense Additive Manufacturing*.
20. Ibid.
21. Jennifer Fielding et al., *Department of Defense Additive Manufacturing Roadmap*, Report 88ABW-2016-5841 (Washington, DC: Department of Defense, November 30, 2016), 1–34, available at <www.americamakes.us/wp-content/uploads/sites/2/2017/05/Final-Report-DoDRoadmapping-FINAL120216.pdf>.
22. Amanda M. Schrand, “Additive Manufacturing in the DOD,” *DSIAC Journal* 5, no. 4 (Fall 2018), available at <www.dsiac.org/resources/journals/dsiac/fall-2018-volume-5-number-4/additive-manufacturing-dod>.
23. Bill Decker, “Harnessing the Potential of Additive Manufacturing,” *Defense AT&L*, November–December 2016, 31–34, available at <www.dau.mil/library/defense-atl/DATLFiles/Nov-Dec2016/Decker.pdf>.
24. “7 Steps to Prepare Your Shop for Metal Additive Manufacturing,” *Modern Applications News*, available at <www.modernapplicationsnews.com/cms/man/opens/article-view-man.php?nid=2&bid=741&et=featurearticle&pn=10>.
25. Kelly Morris, “Driving Innovation to Support the Warfighter,” *Defense AT&L*, November–December 2016, 43–47, available at <<https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1029460.pdf>>.
26. Edward Lundquist, “As 3D Printing Evolves, So Do Emergency Repairs,” *Naval Forces* 38, no. 2 (March 2017), 65–67.
27. Ibid.
28. “7 Steps to Prepare Your Shop for Metal Additive Manufacturing.”
29. Michael Kidd, Angela Quinn, and Andres Munera, “Additive Manufacturing: Shaping the Sustainment Battlespace,” *Joint Force Quarterly* 91 (4th Quarter 2018), 40–46, available at <<https://ndupress.ndu.edu/Media/News/News-Article-View/Article/1681686/additivemanufacturing-shaping-the-sustainment-battlespace/>>.
30. Mike Vasquez, “Embracing 3D Printing,” *Mechanical Engineering* 137, no. 8 (August 2015), 42–45.