

金屬3D列印工法應用於空軍 航材製造與維修之研析

空軍少校 賴啟超

空軍中校 蘇園展

提 要

本文聚焦於航材製造除在現有傳統機械加工程序及其限制，是否有替代工法可克服？預判未來航空產業(運輸)市場將持續蓬勃，航材產製與維修產值將攀升。如此，將更有助於金屬3D列印技術發展與運用。鑑於我國武器及裝備獲得不易，且預判未來武器裝備若陸續屆翻修壽期，於國防預算有限條件下，所需零(附)件採購與籌補將不易，且可能面臨消失性商源問題，造成後勤單位執行窒礙。評估以金屬3D列印工法自製與維修之可行性則為本文探討重點。

關鍵詞：積層製造、金屬3D列印、SWOT

前 言

空軍主要任務為確保我領空主權不被他國侵犯，惟各式航空器能順利飛上天主要依賴其動力核心來源之發動機/模組等重要航材，假設其未來使用若陸續達中後壽期，將可能面臨器材籌補不易，如：供應廠商因開發新產品產線而關閉舊構型零件、停業、或合併等外在因素，無法供應所需零(組)件而逐漸形成消失性商源議題，預判將影響我修護任務遂行。

積層製造(Additive Manufacturing,

AM)技術，該名稱源自美國材料試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)於2009年將快速製造(Rapid Manufacturing, RM)、快速原型(Rapid Prototyping, RP)及3D列印(3D Printer)等名稱正式歸納定名為「積層製造」，並成立技術委員會，並綜合各方學者將積層製造區分為光聚合固化、材料噴塗成型、黏著劑噴塗成型、材料擠製成型、粉床式雷射金屬熔融、疊層製造成型與雷射直接金屬沉積技術等七大類別，¹如表1所示。

1 工研院，《航空零組件積層製造研發能量建置規劃報告》，2016年9月23日，頁4。

表1 積層製造技術分類

製程	材料	市場
Vat Photo polymerization 光聚合固化技術	Photopolymers 光敏聚合物	Prototyping 原型
Material Jetting 材料噴塗成型技術	Polymers, Waxes 聚合物，蠟	Prototyping, Casting Pattern 原型，鑄造模式
Binder Jetting 黏著劑噴塗成型技術	Polymers, Metals, Foundry Sand 聚合物，金屬，鑄造砂	Prototyping, Casting Molds, Direct Part 原型，鑄造模具，直接零件
Material Extrusion 材料擠製成型技術	Polymers 聚合物	Prototyping 原型
Powder Bed Fusion(PBF) 粉末床式雷射金屬熔融技術	Polymers, Metals 聚合物，金屬	Prototyping, Direct Part 原型，直接零件
Sheet Lamination 疊層製造成型技術	Paper, Metals 紙，金屬	Prototyping, Direct Part 原型，直接零件
Directed Energy Deposition(DED) 雷射直接金屬沉積技術	Metals 金屬	Repair, Direct Part 維修，直接零件

資料來源：參考工研院，《航空零組件積層製造研發能量建置規劃報告》，2016年9月23日，頁5。

金屬3D列印應用於航太領域探討

一、金屬3D列印原理

3D列印最早出現在1986年，以光聚合固化技術(vat photo polymerization)為起始的列印技術，初始多應用於概念、想法、設計及原型的製造或呈現等，並隨著工法與技術逐步朝商品化與實務應用發展。相關步序摘述如后(主要製程工法示意如圖1)：

(一)選定標的物並繪製其3D立體圖。

(二)編修物件STL檔，該格式係描述物體的三維表面幾何形狀，且被廣泛應用於現行電腦輔助製造(CAM)機械加工製程或3D列印快速成型等。

(三)透由專業切層軟體將其分割，如層分越多則越密，後續於堆疊時就更近似於標

的物，可想像如同埃及建造金字塔那般，係由人工雕琢石塊並逐層堆疊而造就那偉大的歷史遺跡。

(四)依需求方預設所使用物料材質(如：高分子材料橡膠、陶瓷或金屬等)，搭配對應之專業(工法)機台，逐層堆疊產製初胚。

(五)後製加處理(表面光滑度要求等)。

當我們進一步比較上述工法與傳統機械加工程序，後者主要為減法加工，係針對塊狀材料，藉由車(銑)刀或鑽床等設備將其用不到的材料予以去除，而間接餘留許多加工廢料；試想若該塊狀材料如為貴金屬，對單位成本耗費將依其產量累算而遽增。相較而言，3D列印屬加法加工，從無到有，逐層堆疊，尤針對形狀複雜且具內流道等傳統不易加工者，更可凸顯其效益與優勢，雖於完

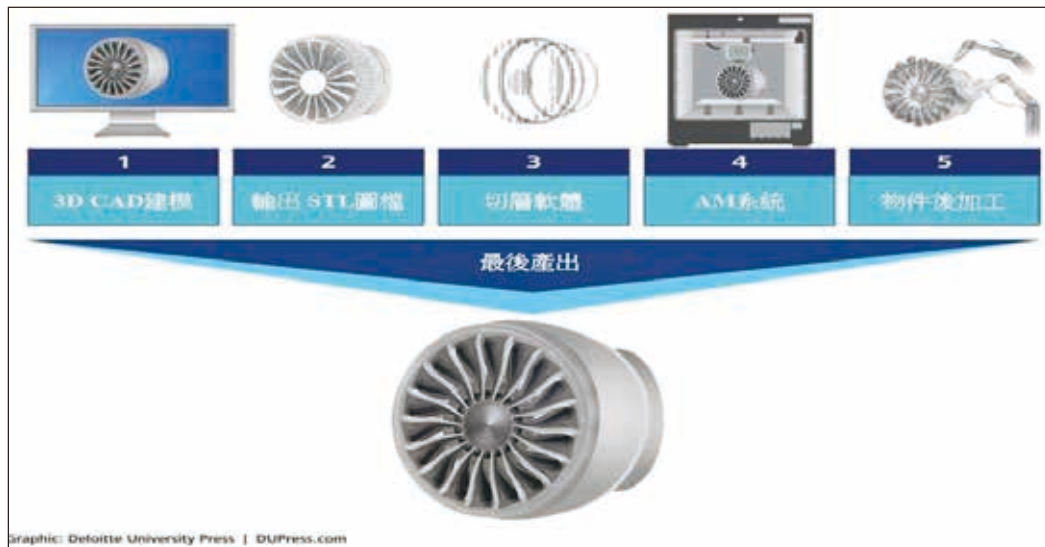


圖1 3D列印製程工法示意圖

資料來源：Mark Cotteleer, Jonathan Holdowsky, Monika Mahto, John Coykendall, “3D opportunity in aerospace and defense,” Deloitte University Press, June 02, 2014, < https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-aerospace/DUP_706_Figure1_AM_process_flow.jpg > (檢索日期：2019年12月30日)

成初胚後依需求仍具後製加工道次，惟其衍生物形狀越複雜則越省時；傳統加工與3D列印工法比較示意圖如圖2所示。

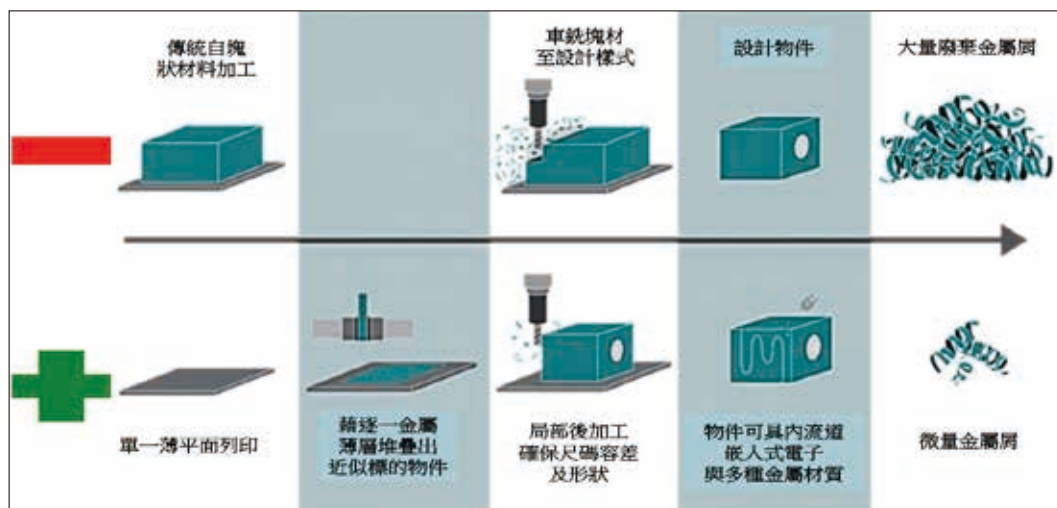


圖2 傳統加工與3D列印工法比較示意圖

資料來源：Mark Norfolk, “The Top 5 Reasons Hybrid Additive Manufacturing Makes Sense,” FABRISONIC, 2018/1/26, < <https://fabrisonic.com/top-five-reasons-use-hybrid-additive-manufacturing-machines-vs-single-focus-special-machines-running-parallel/> > (檢索日期：2019年12月30日)

本文將聚焦於粉床式雷射金屬熔融技術(PBF)及雷射直接金屬沉積技術(DED)等2項，並擇要簡述其工法原理供讀者參考：

(一)粉床式雷射金屬熔融技術(PBF)原理
係應用惰性氣體(氬氣)控制及確保氣場條件，並由設備控制高光束雷射源，配合底

板承接大量金屬粉末，當中經雷射光束掃描之粉末隨即迅速熔融，並配合底板微降與重新鋪粉後，雷射光束再次循設定軌跡掃描，如此依原設定切層路徑逐次掃描、粉末熔融及堆疊，而產製初胚，可用於各種不同金屬標的之建構應用，如圖3所示。

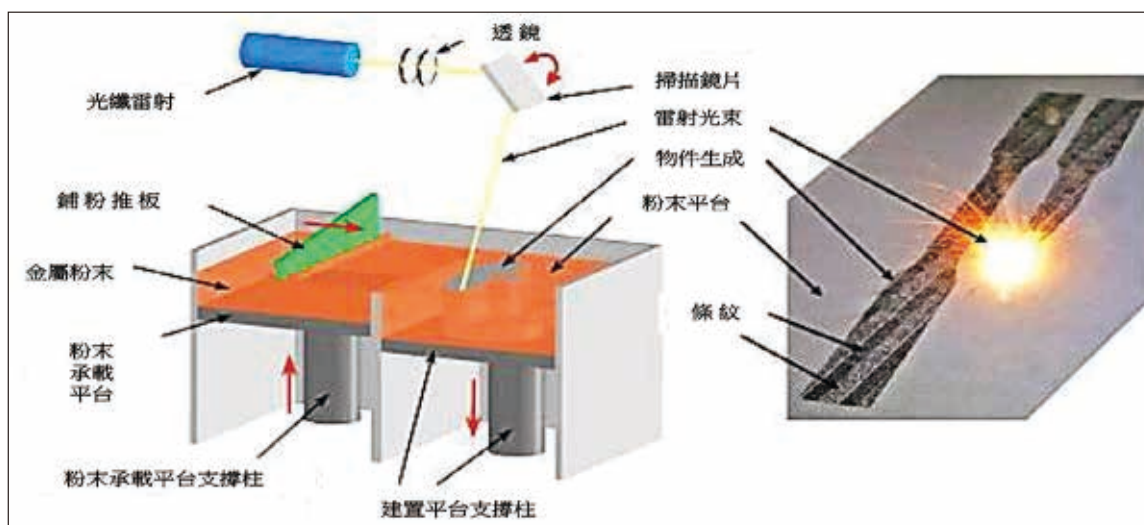


圖3 粉床式雷射金屬熔融技術(PBF)示意圖

資料來源：Luis E. Criaes et al., 2017, “Laser powder bed fusion of nickel alloy 625: Experimental investigations of effects of process parameters on melt pool size and shape with spatter analysis”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, <<https://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0890695516303108-gr1.jpg>> (檢索日期：2019年12月30日)

(二)雷射直接金屬沉積技術(DED)原理

係應用惰性氣體(氬氣)做為屏蔽，以控制及確保其氣場條件，並自噴嘴頭兩側輸送金屬粉末注入中央高功率雷射聚焦光束，並產生小的熔融池，而輸送的粉末被吸收到熔池中，產生金屬沉積物，可用於各種不同金屬標的之修復或建構應用，如下圖4所示。

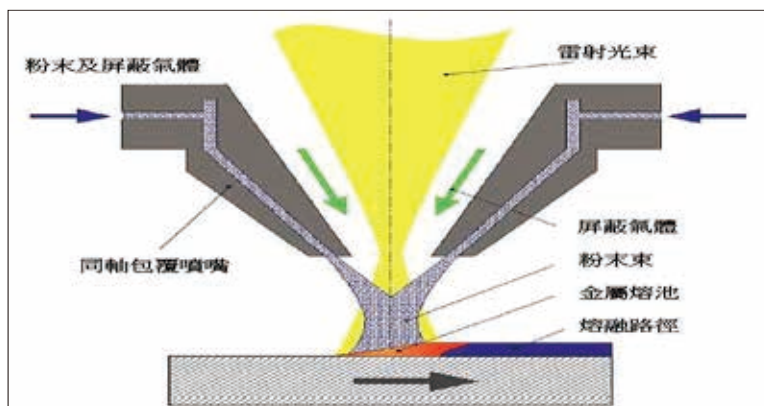


圖4 雷射直接金屬沉積技術(DED)示意圖

資料來源：“3DPRINTER WORLD”，<<http://www.3dprinterworld.com/sites/spch/files/images/efesto/efesto-lmd-process-diagram.jpg>> (檢索日期：2019年12月20日)

二、航空產業發展現況與未來需求

金屬3D列印工法可應用於全球航空飛行器研發、產製、維修及其相關產業，依據 Oliver Wyman 所發表“GLOBAL FLEET & MRO MARKET FORECAST COMMENTARY 2018- 2028”文獻，預判迄2028年間飛行

器數量及其維修金額，全球機體總數量成長3.7%，維修(maintenance, repair, and overhaul, MRO)總額成長4.0%，其中尤以中國10.6%成長為最，其次為印度5.6%、東歐2.0%及北美1.8%，如圖5。

REGION	AFRICA	MIDDLE EAST	ASIA PACIFIC	CHINA	INDIA	LATIN AMERICA	NORTH AMERICA	EASTERN EUROPE	WESTERN EUROPE	WORLD
2018 Fleet										
Narrow-body	453	538	2,074	2,536	394	1,060	4,064	786	3,187	15,092
Wide-body	178	758	1,335	381	61	174	1,229	145	1,012	5,273
Regional Jet	144	64	219	129	2	273	1,834	189	456	3,310
Turboprop	305	24	640	0	54	250	703	133	523	2,632
Total	1,080	1,384	4,268	3,046	511	1,757	7,830	1,253	5,178	26,307
2028 Fleet										
Narrow-body	703	841	3,729	6,024	969	1,596	5,368	1,120	4,688	25,038
Wide-body	273	1,267	1,694	708	106	337	1,528	165	1,299	7,377
Regional Jet	52	25	257	325	14	228	1,671	220	368	3,160
Turboprop	188	64	806	33	86	224	480	79	443	2,403
Total	1,216	2,197	6,486	7,090	1,175	2,385	9,047	1,584	6,798	37,978
Fleet Growth Rates										
2018-2023	1.0%	5.6%	5.0%	10.4%	11.7%	3.3%	1.5%	2.2%	3.5%	4.2%
2023-2028	1.4%	3.9%	3.5%	7.2%	5.8%	2.9%	1.4%	2.5%	2.1%	3.3%
2018-2028	1.2%	4.7%	4.3%	8.8%	8.7%	3.1%	1.5%	2.4%	2.8%	3.7%
2018 MRO (US\$ Billions)										
Airframe	\$0.8	\$1.5	\$3.2	\$1.8	\$0.4	\$1.1	\$4.7	\$1.1	\$4.4	\$19.0
Engine	\$1.0	\$5.7	\$6.6	\$2.2	\$0.8	\$1.4	\$7.9	\$1.3	\$5.8	\$32.7
Component	\$0.4	\$0.8	\$2.1	\$1.2	\$0.3	\$0.8	\$4.0	\$0.6	\$2.8	\$12.9
Line	\$0.3	\$0.9	\$2.2	\$1.4	\$0.3	\$0.7	\$3.2	\$0.6	\$3.2	\$12.8
Total	\$2.5	\$8.9	\$14.1	\$6.5	\$1.8	\$3.9	\$19.9	\$3.5	\$16.2	\$77.4
2028 MRO (US\$ Billions)										
Airframe	\$0.7	\$2.2	\$4.4	\$3.7	\$0.7	\$1.3	\$4.8	\$1.1	\$4.6	\$23.5
Engine	\$1.5	\$8.4	\$9.8	\$7.6	\$1.2	\$2.7	\$10.4	\$1.6	\$9.3	\$52.6
Component	\$0.6	\$1.5	\$3.5	\$3.3	\$0.7	\$1.2	\$4.7	\$0.8	\$3.7	\$20.0
Line	\$0.4	\$1.4	\$3.2	\$3.1	\$0.5	\$1.0	\$3.9	\$0.8	\$4.1	\$18.5
Total	\$3.4	\$13.5	\$20.9	\$17.8	\$3.2	\$6.2	\$23.8	\$4.3	\$21.7	\$114.7
MRO Growth Rates										
2018-2023	3.5%	5.0%	5.3%	10.5%	5.8%	3.5%	-0.5%	0.2%	2.7%	3.5%
2023-2028	2.4%	3.6%	2.7%	10.7%	5.4%	5.8%	4.2%	3.8%	3.2%	4.5%
2018-2028	3.0%	4.3%	4.0%	10.6%	5.6%	4.7%	1.8%	2.0%	3.0%	4.0%

圖5 全球2018至2028年航空飛行器及其維修(MRO)產業市場調查

資料來源：Tom Cooper et al., “GLOBAL FLEET & MRO MARKET FORECAST COMMENTARY 2018-2028”, Oliver Wyman, 2018, P.6, <https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2018/January/2018-2028_Global_Fleet_MRO_Market_Forecast_Commentary_Public_Final_web.pdf> (檢索日期：2019年12月30日)

承前，本文探討標的主要為航材製造，且因應未來航空器(如民用窄體客機汰換週期約莫10至14年)及數量持續增加需求，衍生機體及發動機等零組件後勤維修需求可參

考圖6；總體維修產值於2018年估算為774億美元，五年後至2023年則為919億美元(成長3.5%)，直至2028年估算為1,147億美元(計算10年期間成長率約為4.0%)。



圖6 全球2018至2028年航空器零組件維修(MRO)分布圖

資料來源：Tom Cooper et al., “GLOBAL FLEET & MRO MARKET FORECAST COMMENTARY 2018-2028”, Oliver Wyman, 2018, P.35, <https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/v2/publications/2018/January/2018-2028_Global_Fleet_MRO_Market_Forecast_Commentary_Public_Final_web.pdf> (檢索日期：2019年12月30日)

綜上，可知未來航空產業仍持續蓬勃發展，尤以亞太地區中國大陸及印度等市場成長幅度為最大，預判其地區相關發動機後勤維修需求亦將相對增加，且成為兵家必爭之地。

三、3D列印發展現況及未來趨勢

本節欲探討3D列印發展現況及趨勢，經多方資料蒐集後發現，許多國內外文獻均會參考及引述3D列印專業諮詢機構 Wohlers Associates公布資料，該單位持續彙整與統

計全球各國廠家發展及銷售情況，迄2019年已累積約莫24年資料，具有相當公信度與權威性；舉例如Wohlers 2019報告，係由127家服務供應商、71家工業級AM系統製造商、30家第三方材料和桌面式3D列印機生產商的支持下開發的。它記錄了政府資助的研究與開發，合作與聯盟，以及全球139所學術和研究機構的活動，得益於32個國家的80位共同作者和撰稿人的重要貢獻，²如圖7。

2 Wohler Associates, Wohler Report 2019 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report(USA：Terry Wohler, 2019), <<https://wohlersassociates.com/2019report.htm/>> (檢索日期：2019年12月11日)

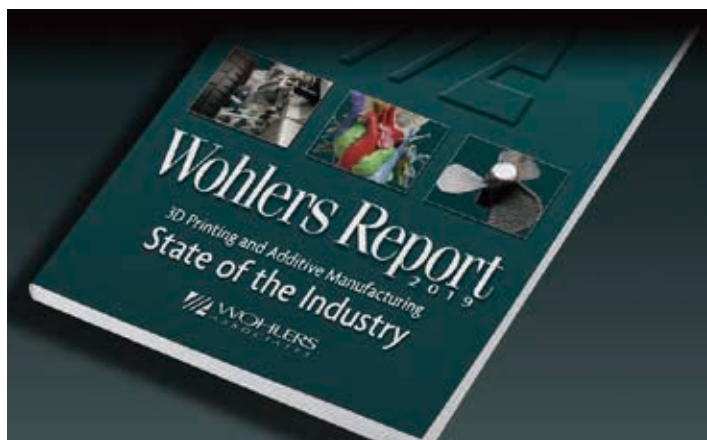


圖7 Wohlers Report 2019專書

資料來源：Wohler Associates, Wohler Report 2019, 〈<http://wohlersassociates.com/blog/wp-content/uploads/2019/03/wr2019.jpg>〉(檢索日期：2019年12月20日)

參考西門子報告³引述Wohler Report 2017統計全球3D列印運用領域分布，如圖8。其中，本項技術現階段主要普遍應用於工(商)業機器(佔18.8%)，其次為本文所關切「航太」領域(佔18.2%)，餘無論是消費/電子產品、醫療、機械交通工具、建築、學術研究、軍事及其他(如美術、藝品創作及食品等)，在在凸顯出3D列印是很好的技術與方法，可藉其將個人創新概念與需求，透過相對應設備與材料而及時實現，則謂為「創客」最佳工具與利劍，無須依賴過往方式投入大筆資源(人力、金錢與時間)去設計與開發模具。

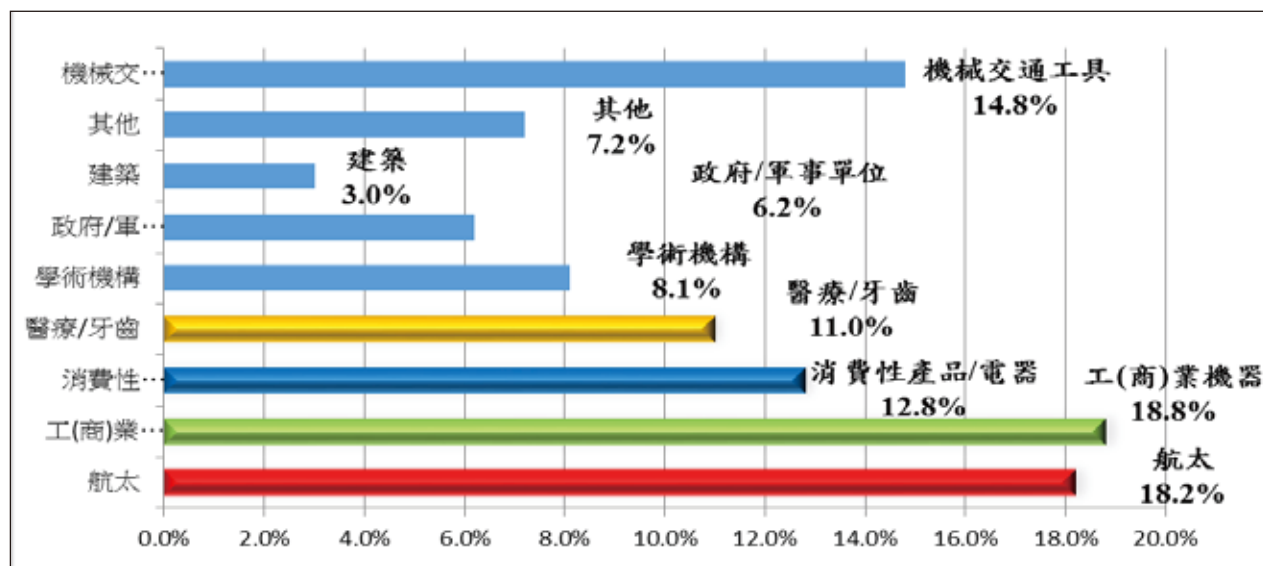


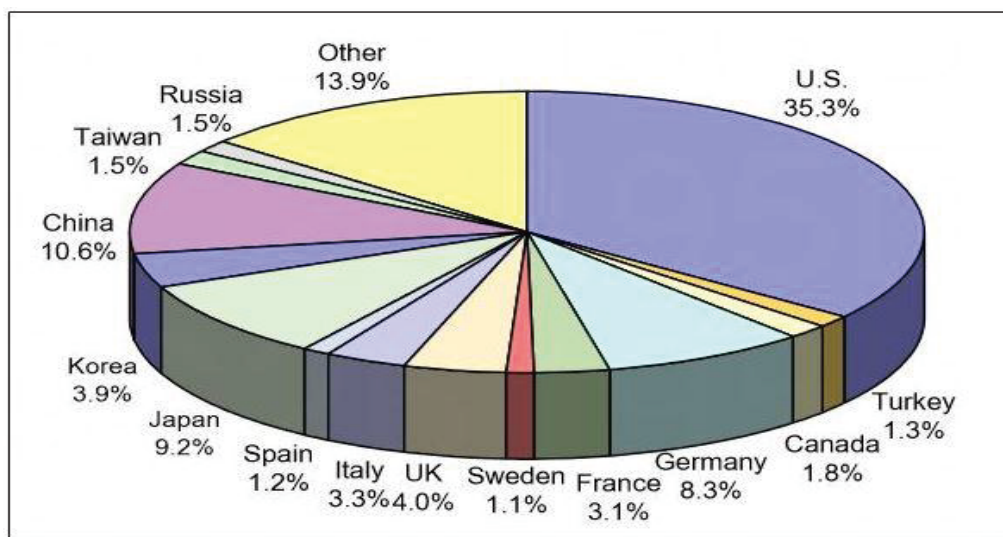
圖8 全球3D列印運用領域分布圖

資料來源：Wohler Associates, Wohler Report 2017 3DPrinting and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report(USA：Terry Wohler, 2017), 〈http://www.aita3d.it/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/07/Siemens.pdf〉(檢索日期：2019年12月11日)

3 Beppe Grimaldi, “Industrialize Additive Manufacturing” Siemens Ingenuity for life, 〈http://www.aita3d.it/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/07/Siemens.pdf〉(檢索日期：2019年12月11日)

Wohler Report 2019以國家來區分，各國工業級列印機台運用分布如圖9，從中可明顯得知美國(35.3%)持續扮演著領頭羊角色且大幅領先，其次國家分別為中國大陸(10.6

%)、日本(9.2%)及德國(8.3%)；尤以中國大陸所佔比例提升主要係源自政府大力支持與推動所致。



Source: Wohlers Report 2019

圖9 各國工業級列印機台運用分布圖

資料來源：Wohler Associates, Wohler Report 2019 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report(USA：Terry Wohler, 2019)P.34, 〈<http://wohlersassociates.com/blog/wp-content/uploads/2019/04/am-adoption.jpg>〉(檢索日期：2019年12月20日)

其次，再針對2016至2018年積層製造工業發展情況，分布如圖10所示，它在過去兩年中增長了近62%。⁴

承前，我們知悉未來航空市場及其衍生後勤補給與維修市場需求仍持續蓬勃發展，除可從圖8知悉3D列印應用於航太領域佔有重要一席之地外，更可藉由圖11觀察本文所

關切西元2000至2017年金屬3D列印機台銷售長條分布情況，已呼應且印證其技術與設備發展對應市場需求是持續增長且可期待。

Wohler 2018專書估算於2017年金屬3D列印機台總銷售數量估計為1,768台，而2016年則為983台，增幅接近80%。⁵凸顯出源自前文所述，未來航空市場持續蓬勃，伴

4 Wohler Associates, Wohler Report 2019 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report(USA：Terry Wohler, 2019), 〈<http://wohlersassociates.com/blog/>〉(檢索日期：2019年12月11日)

5 Wohler Associates, Wohler Report 2018 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report(USA：Terry Wohler, 2018), 〈<https://wohlersassociates.com/press74.html>〉(檢索日期：2019年12月26日)

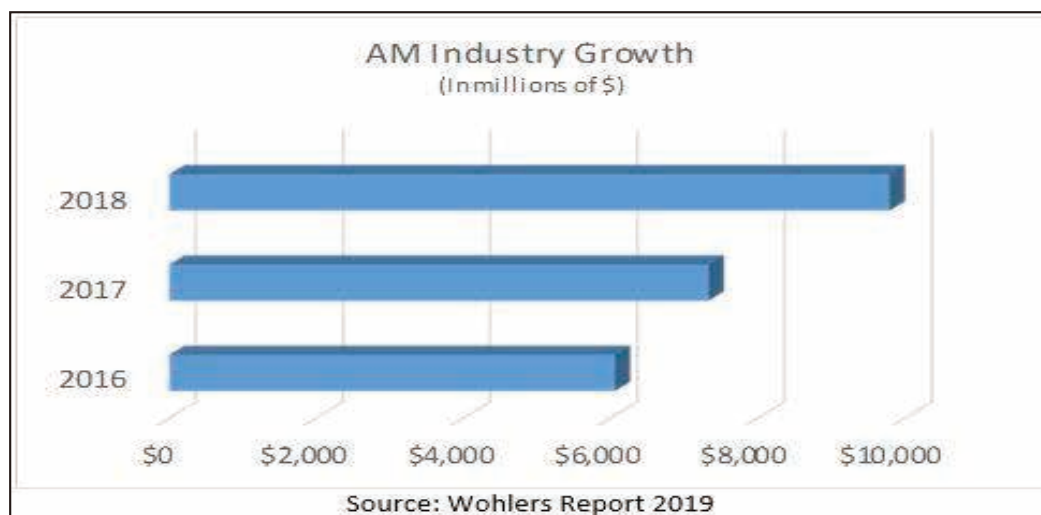


圖10 積層製造工業發展長條圖

資料來源：Wohler Associates, Wohler Report 2019 3DPrinting and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report(USA：Terry Wohler, 2019), 〈<http://wohlersassociates.com/blog/wp-content/uploads/2019/04/2018-AM-growth.jpg>〉(檢索日期：2019年12月20日)

隨衍生需求增加，且該技術不受限於航太產業，由圖8可得知應用領域及範疇相當廣泛，且隨科技不斷進步，更促使廠商願意投

入技術研發，間接提升AM軟(硬)系統監控及其品質，機台生產量增加而促使其售價降低。

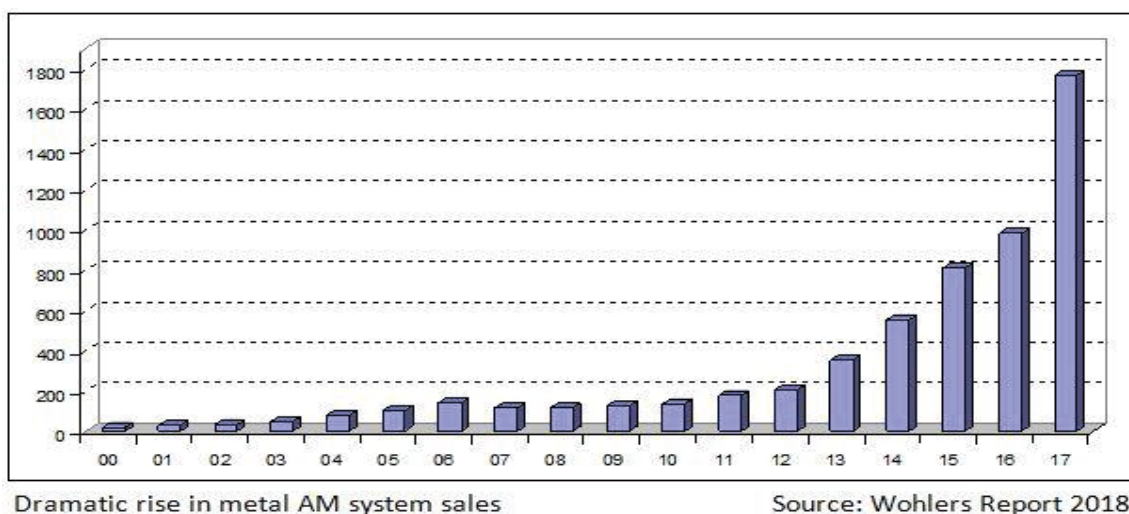


圖11 西元2000至2017年金屬3D列印機台銷售長條圖

資料來源：Wohler Associates, Wohler Report 2018 3DPrinting and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report(USA：Terry Wohler, 2018), 〈<http://wohlersassociates.com/blog/wp-content/uploads/2018/07/service-provider-growth.jpg>〉(檢索日期：2019年12月20日)

鑑於3D列印自發展迄今已逾30年，且近年因部分工法專利權已陸續屆期(如：SLA於2014年)，故而各國紛紛主動制定政策推動金屬3D列印，並將視其為未來發展重點，分述如后：

(一)美國

2011年6月，美國歐巴馬總統提出先進製造夥伴(Advanced Manufacturing Partnership, AMP)計畫，表達振興美國製造業、美國再工業化的強大決心，並於2013年2月的國情咨文演說提出綠色製造(包含數位製造、在地製造)的理念。體認到製造業才是國家經濟長期發展的根本，喊出「讓製造業重返美國」的政策，其中的重點產業就是3D列印。⁶

以美商GE公司為例，2016年9月6日宣布將以14億美元收購(取得75%以上股權)瑞典Arcam公司和德國SLM Solutions集團兩家3D列印公司，此舉，成為全球金屬3D列印技術在工業領域應用的重要性指標，也凸顯出GE早已預見未來金屬3D列印運用於航太產業發展的無窮商機，且藉此收購案，整合既有專利技術與人才納為己用，做為後續研

發應用最佳利器。

2014年7月GE宣布投資5000萬美元以3D列印工法研製LEAP商用發動機之燃油噴嘴組套件(單具裝用量19支)。繼2016年飛行認證後，該發動機在2017年巴黎航展上累計訂單超過14,000具，且GE於2018年10月4日慶祝其第3萬支3D列印燃油噴嘴的成功出貨(滿足發動機總數提升至約1,578具)，⁷亦為金屬3D列印應用於航太零件生產製造的重要里程碑，如圖12。



圖12 美商GE公司慶祝第30,000個燃油噴嘴列印成功

資料來源：〈New manufacturing milestone: 30,000 additive fuel nozzles〉，〈GE Additive〉，2018年10月4日，〈<https://www.ge.com/additive/blog/new-manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>〉，(檢索日期：2019年12月2日)

6 羅裕睿、吳芳怡、林宛儒、林奕均、王紀雯，〈3D列印技術之困難與需求〉，《國立臺灣藝術大學圖文傳播藝術學報》，2016年5月1日，頁159。

7 南極熊，〈第30000個航空3D列印燃油噴嘴出貨，GE數十台金屬機規模化生產〉，《尋夢新聞》，2018年10月9日，〈<https://kknews.cc/zh-tw/news/yexxk3g.html>〉(檢索日期：2019年12月5日)

LEAP是由美商GE公司與法商賽峰(Safran)集團各出資50%組建的合資企業，名為CFM國際(CFM International)研制，現已廣泛用於美商波音737、歐洲空中巴士A320、以及中國大陸的C919等單通道客機。藉應用金屬3D列印該燃油噴嘴，使原傳統製程

需產製與裝配20項分件整合為一，降低單顆噴嘴生產成本30%、減重25%、零件耐用壽限提升5倍以上、且降低分件庫存量95%，且提升了整具發動機燃燒效率，使之更省油及降低二氧化碳排放量，如圖13。



圖13 金屬3D列印LEAP引擎燃油噴嘴優點

資料來源：〈Leap引擎標配 GE航空3萬個3D列印燃油噴嘴出貨〉，《kknews》，2018年10月9日，〈<https://i2.kknews.cc/SIG=1fp1gph/ctp-vzntr/1539055488011599q08no67.jpg>〉(檢索日期：2019年12月2日)

(二)中國大陸

2015年以來，該國務院與工業和信息化部(簡稱：工信部)制定《國家增材製造產業發展推進計畫(2015-2016)年》和《中國製造2025》規劃，明確了3D列印產業發展目標，給予資金和政策支持。2017年12月提出《

增強製造業核心競爭力三年行動計畫》，提及開發3D列印材料，以支持工業化技術。⁸且3D列印技術應用於製造、軍事、醫療、建築及教育等各領域，將隨技術不斷提升與成熟，帶動市場需求；相關政策制定與規劃如表2所示。

8 中商產業研究院，〈2018中國3D打印行業前景研究報告〉，頁23，《中商情報網》，〈<http://www.sh-zhonghuan.com/static/upload/file/20190329/1553871749886241.pdf>〉(檢索日期：2019年12月2日)

表2 中國大陸3D列印相關政策

時間	政策	相關內容
2015年5月	《中國製造》	發展核心基礎零件、先進基礎工藝，關鍵基礎材料和產業技術基礎。
2016年11月	《‘十三五’國家戰略性新興產業發展規劃》	指出打造積層製造產業鏈。
2017年4月	《‘十三五’先進製造技術領域科技創新專項規則》	提出重點解決積層製造領域微觀成型、缺陷分析等問題，結合重大需求發展應用示範，具備發展大規模產業化應用技術基礎
2017年10月	《‘積層製造與雷射光製造’重點專項2018年度項目申報指南》	科技部為積層製造和雷射光製造匡列7億元經費，其中3D列印21項，雷射9項。
2017年10月	《中小學綜合實踐活動課程指導要綱》	支持3D設計與列印技術初步應用，認識與掌握新進技術，提高創新能力。
2017年11月	《高端智能再製造行動計畫(2018-2020年)》	指出在高端再製造。智能再製造行業發展過程中，不斷實踐高端智能化生產，雷射熔覆、3D列印等積層技術再製造領域應用廣泛。
2017年12月	《積層製造(3D列印)產業發展行動計畫(2018-2020年)》	產業保持高速發展，年均成長30%以上，2020年積層製造產業銷售收入超過200億元；技術明顯提升；行業應用顯著深化；體系完善；全球布局初步實現。
2017年12月	《增強製造業核心競爭力三年行動計畫(2018-2020年)》	《新材料關鍵技術產業化實施方案》提到3D列印高分子材料，對其進行研製以符工業化3D列印技術需求。

資料來源：中商產業研究院，〈2018中國3D打印行業前景研究報告〉，頁14，〈中商情報網〉，〈<http://www.sh-zhonghuan.com/static/upload/file/20190329/1553871749886241.pdf>〉(檢索日期：2019年12月2日)。

(三)中華民國

1.工業技術研究院(簡稱工研院)

該院雷射與積層製造中心位於臺南六甲，紮根智動整合兩頭(雷射源及雷射光路)作加減(積層製造〈Additive Manufacturing, AM，3D列印〉與雷射加工)技術發展，致力於發展雷射創新應用及積層製造關鍵自主技術

，結合光機電產業聚落與學研創新合作平台，建構雷射應用產業生態鏈與光谷聚落，⁹如圖14。

該院前於2017年4月27日宣布成功開發國產第一台大尺寸、大面積的50x50x50立方公分金屬3D列印設備，如圖15，成功整合四支雷射同步作業，大幅提升列印品質。¹⁰

9 雷射與積層製造中心編，〈中心研發聚焦策略〉，《工業技術研究院》，〈<https://www.itri.org.tw/chi/Content/Messages/contents.aspx?SiteID=1&MmmID=655641675570172030>〉(檢索日期：2019年12月2日)

10 TechNews，〈工研院發表大尺寸金屬3D列印助台廠拚航太商機〉，《工業技術研究院》，2017年4月27日，〈<http://technews.tw/2017/04/28/itri-developed-big-size-metal-3d-printer/>〉(檢索日期：2019年12月13日)

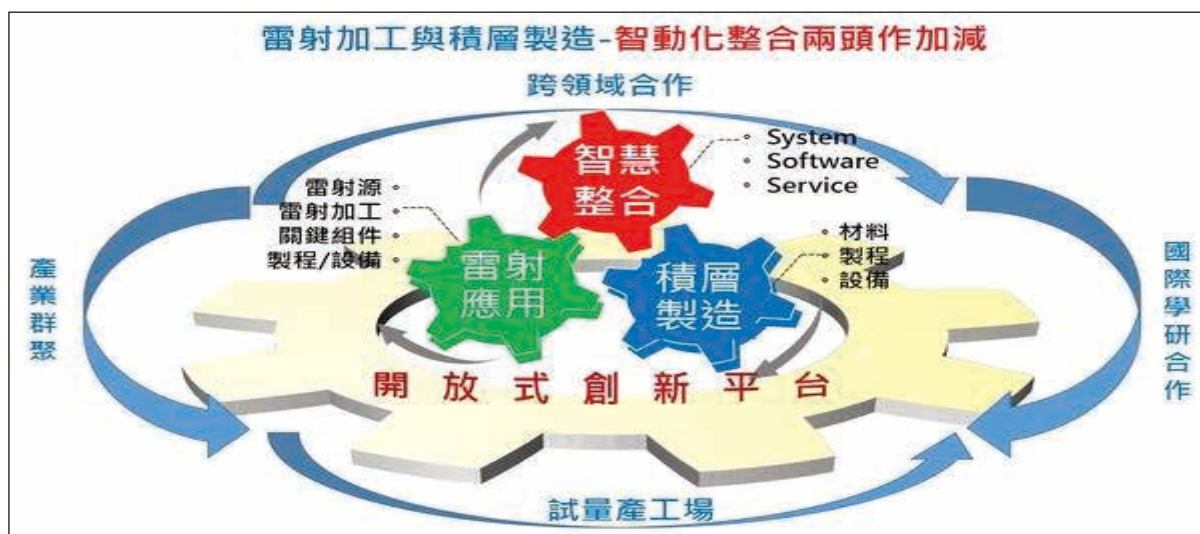


圖14 工研院雷射與積層製造中心研發聚焦策略

資料來源：〈雷射與積層製造科技中心〉，《工業技術研究院》，〈https://www.itri.org.tw/chi/WebTools/Thumbnail.ashx?Siteid=1&MmmID=655641675570172030&fd=Message00_Pics&Pname=u-01.jpg&nw=600〉(檢索日期：2019年12月20日)



圖15 工研院的大尺寸金屬3D列印設備

資料來源：〈工研院發表大尺寸金屬3D列印 助台廠拚航太商機〉，《工業技術研究院新聞室》，2017年4月27日，〈<https://www.itri.org.tw/chi/Content/NewsLetter/Contents.aspx?SiteID=1&MmmID=620605426331276153&MSid=744304106165057406>〉(檢索日期：2019年12月2日)

發展3D列印設備是把加工程序化繁為簡，將少量多樣的產品直接印出來，能省下開模的時間，且工業製造越來越複雜，有些料件內部需要特殊加工，以前設計的出來，但傳統的機台卻做不出來，3D列印可以解決這些問題。以往航太發動機大廠GE使用的噴射發動機，需要經過超過十套以上的模具製造，但藉由金屬3D列印設備可省下大量成本與時間。¹¹

2. 國家中山科學研究院(簡稱中科院)

該院飛彈火箭所在國防部以及經濟部技術處的支持下，於2014年起積極投入金屬3D列印技術的研發工作，進行熱流、結構、控制、材料以及光電等跨領域軟硬體整合，利用所建立之500瓦級偏極化光纖雷射技術，自行設計系統架構，與自製金屬3D積層製造驗證平台整合測試，透過參數的調整與優化，成功開發出搭載自製高功率光纖雷射源之國內首座全自主金屬積層製造系統，如圖16。¹²



圖16 中科院金屬型積層製造系統

11 鄧凱元，〈台灣製造飛機零件用印的〉，《天下雜誌》，2016年3月17日，〈<https://www.cw.com.tw/article/article.action?id=5075223>〉(檢索日期：2019年12月19日)

12 〈國內首座自主開發3D金屬列印機台亮相〉，《國家中山科學研究院新聞中心》，2015年10月6日，〈<http://www.ncsist.org.tw/csistdup/news/NewsPublishDetail.aspx?PostNo=15179>〉(檢索日期：2019年12月5日)。

在中科院極力促成推動下，於106年12月成立「台灣航太積層製造產業協會」，集結了國內頂尖航太工業大廠漢翔、長榮航宇、亞航，及數可科技、圓融金屬粉末等積層製造相關廠商，協助臺灣廠商與國外合作夥伴連結，發揮產業聚落效應；另該院與數可科技簽署成立「航太積層製造研發中心策略聯盟」，如圖17，期結合中科院研發能量及數可科技的行銷與量產經驗，以多尺寸與多材料之航太級金屬積層製造設備共11台，擁有麻時效鋼、高端不鏽鋼、鎳基合金、鈦基合金等多種航太常用之合金材質工件研製能力，符合ISO9001/

AS9100規範，同時建置檢測設備與後加工機台，已為後續批次量產做好準備，以符合航太級零件開發需求，並成為全臺最大航太金屬積層製造研發基地。¹³



圖17 航太積層製造研發中心策略聯盟成立

資料來源：曹松清，〈全台最大航太金屬積層製造研發基地〉，《經濟日報》，2018年4月23日，〈<https://money.udn.com/money/story/5950/3102679>〉（檢索日期：2019年12月2日）

3.設備商東台精機

科技部長陳良基於107年12月25日出席「南科3D列印智造群聚發表會」，對於東台在金屬3D列印的研發成果，與智慧製造的產業貢獻深表嘉許，如圖18。該公司成立於1969年，將邁入50周年的東台，不但擁有最多元的金屬切削加工產品線，近幾年也全

方位投入積層製造產品線，成為國內首家跨入積層製造設備開發與銷售的工具機廠，先後開發出「金屬粉床式積層製造設備AMP系列」、「金屬噴粉式積層製造複合加工設備AMH系列」，並進一步跨入砂模鑄造領域，開發「噴膠式砂模積層製造設備AMS系列」，構成全方位3D列印產品線。¹⁴

13 曹松清，〈全台最大航太金屬積層製造研發基地〉，《經濟日報》，2018年4月23日，〈<https://money.udn.com/money/story/5950/3102679>〉（檢索日期：2019年12月13日）。

14 宋健生，〈科技部長訪東台 鼓勵產業採用MIT積層製造設備〉，《台灣航太積層製造產業協會》，2019年2月21日，〈<http://www.taamia.org.tw/xmdoc/cont?xsmsid=01163585344364499078&sid=0J017422473716106563>〉（檢索日期：2019年12月5日）。

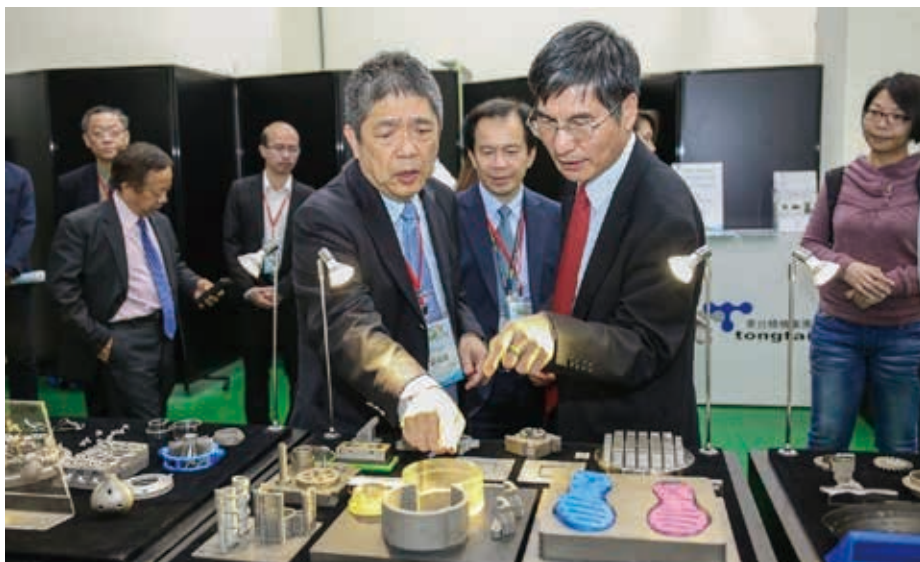


圖18 東台董事長嚴瑞雄為科技部長陳良基講解積層製造展品
資料來源：宋健生，〈科技部長訪東台 鼓勵產業採用MIT積層製造設備〉，
《台灣航太積層製造產業協會》，2019年2月21日，〈http://www.taamia.org.tw/files/file_pool/1/0J017423718088691077/03.jpg〉（檢索日期：2019年12月3日）

與製造解決方案)展主要為製造相關之資訊解決方案，相關智慧製造之先進製造技術於此展會展出，如：AI 技術及3D列印等技術。例如廠商Matsuura 之加減法複合式金屬積層製造技術，展示應用於模具之水路製作，由於3D列印製程可達到傳統加工製程所無法做到之管路形狀，可使模具之成型溫度分布優化，模具冷卻均勻，成型製程時間縮短，提升量產性。

3D列印製造技術於此次展會主要在於可運用材料之演進及製造技術之優化，且數位化、智慧化之製造技術將隨著材料、設備之發展，逐步進入可生產應用化階段，各家

所提出之解決方案將隨著驗證實施案例愈多而更為成熟完整，且進展加速。臺灣產業藉由瞭解全球主要廠商之發展狀況及技術核心，以掌握迄今先進製造技術趨勢及進展，確立未來發展方向。¹⁵

金屬3D列印應用優勢及其限制

一、金屬3D列印的優勢

(一)適合結構複雜，降低生產時程

金屬3D列印透過化繁為簡設計，降低原零件組裝數量，可以減少相關的文件、生產計畫、與管理成本。較少的零件意味著更少的人力、組裝工時與庫儲管理需求，有助

(四)日本

日本工業於全球製造業具有舉足輕重之地位，由日本工業展可了解日本及全球製造產業技術現況及發展趨勢。2017年日本東京展於6月21日~6月23日舉辦，廠商共來自20個國家，數量為2,420家，參訪人數約8萬9,000人次。該工業展(28th Manufacturing World Japan)，包含四個展會，其中DMS(設計工程

15 邱琬雯，〈從日本工業展看3D列印製造技術應用發展〉，《工研院產業經濟與趨勢研究中心(IEK)》，2017年8月14日，〈http://www.laservalley.org.tw/upload/i_technology/epaper09.pdf〉（檢索日期：2019年12月5日）。

於降低總體生產成本。¹⁶

(二)減低零件備品庫儲壓力

各項發動機航材因其裝用位置不同，其製造過程多運用高價合金，且工序複雜，舉例如壓縮段機匣初階段需藉開模鑄造，並經後加工車銑，且考量本體內部需求與壓縮器轉子間隙匹配，機匣內部需再施以絕熱塗層(材質參據各原廠技令所列)噴塗並車回尺碼，使各級壓縮段間隙在原廠規範，以確保整體壓縮比，最終於發動機組裝後執行性能試車可達原廠出廠規範。前述說明尚未將原廠發動機各項零(組)件研製成本納入，加諸全球銷售數量來攤提，更驗證航材多屬高價器材，故原廠及其合約商如何執行其所屬航材庫儲備品管理，且可滿足客戶需求而及時支援，直接影響其營運成本。未來若針對關鍵零件建構金屬3D列印產製或維修能量，將可適時依需求訂單及時生產，降低傳統生產備品(可用資產積壓)及庫儲管理等成本。

(三)降低生產過程材料浪費

本文前述即提及3D列印(應用加法概念製程)，相較傳統機械加工(應用減法加工製程)更可節約材料浪費，如本文圖3所示，尤其針對大型且結構複雜件，更能凸顯其優勢。

(四)客製化設計縮短研製時程及成本

以射出成型所需模具產製與優化為例，傳統模型或模具皆靠人工或加工機台慢慢加工，而金屬3D列印技術逐漸成熟，不同於以往傳統的減法製程，3D列印使用的是加法製造，再也不受限於刀法加工限制，工件的外型得以更多樣、更複雜。¹⁷

(五)輕量化

3D列印技術也允許零件設計以較少的材料達到傳統零件的功能規格。零件輕量化的方法，可以把低應力區的特徵厚度減少，或以拓普最佳化(Topological optimization)¹⁸方法重新設計。另外，在零件內部以格子狀或網狀結構設計來取代實心材料，也可達到輕量化目的，並維持零件外觀形狀。¹⁹

(六)硬體支援

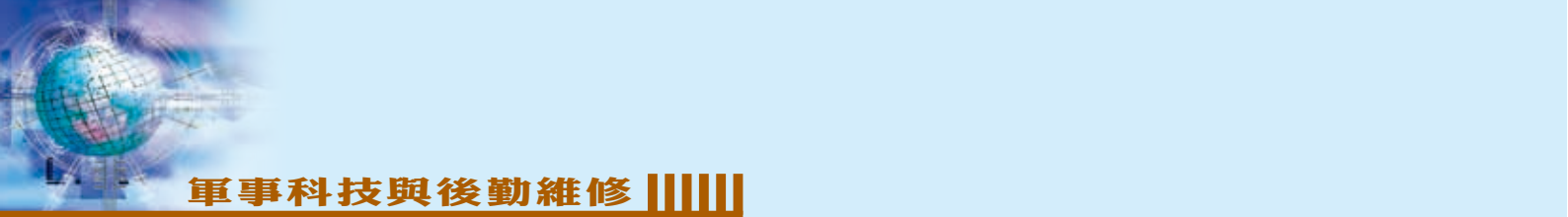
各種金屬粉料的突破給3D列印帶來新的機遇，金屬3D列印正在嘗試進入更多的應用領域，並激發出巨大的市場空間，根據研究機構Context最新報告，2017年前三季3D列印市場處於增長態勢，個人台式列印設備同比增長45%，工業市場印表機增長2%。金屬列印方面GE處於全球領先地位，其次是EOS、SLM Solutions、通快-TRUMPF和3DSYSTEMS。舉例如3DSYSTEMS推出了一系列直接金屬列印(DMP)3D印表機，提供從入門級到全面的工廠解決方案。其中，入門級金屬印表機

16 雲麒維，《3D列印產業概況與進入策略》(新竹：國立清華大學科技管理學院碩士論文，2015)，頁22。

17 同註7，頁164。

18 拓樸最佳化，是結構最佳化的一個分支，它結合了有限元素分析方法、拓樸(材料分配)方法與數值最佳化演算法，在近年來大量的被研究與應用於各有限元素套裝軟體。藉由搭配不同的有限元素分析、拓樸方法與最佳化演算法模組，可探討結構在靜、動態下如何於目標函數與限制條件中達成最佳化。〈<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=拓樸最佳化&oldid=37345949>〉(檢索日期：2019年12月30日)。

19 同註17，頁22。



ProX DMP 100具有建構100x100x100毫米體積，使用金屬粉末為17-4PH不鏽鋼和鈷鉻；另DMP 8500可以建構500x500x500毫米體積，使用於航太、工業和汽車行業的零件製造。²⁰代理3DSystems產品的台灣廠商是實威國際，總經理許泰源指出，三十年前3D印表機剛推出時，一台動輒新台幣二、三千萬元，但經過這幾年技術突飛猛進，工業級的3D印表機，依列印速度和精密度不同，價格範圍已降至一千萬元以內。²¹

(七)軟體支援

舉例如「Amphyon」是一種基於仿真的工藝軟體，用於PBF金屬3D列印製造，於零件建構過程時，以該軟體實施前置模擬、優化與參數分析，提升實作過程時穩定性及品質。主要目的係透過模擬輔助策略取代實驗，做為標的元件金屬3D列印開發之用，以節省成本及時間等資源的耗費。²²

二、金屬3D列印限制條件

(一)人員跨入領域門檻高

本文前述提及欲執行3D列印首要以專業繪圖軟體編修及產製目標件圖檔，輔以切層軟體設定製程參數，始可執行3D列印製作；考量3D列印工法依前文所述目前區分七大類，所運用材料亦不同，相關製程亦有區分；本文主要探討標的為金屬粉末之3D

列印，其技術門檻更高，需納編大量且多方專業如材料力學、熱力學、熱傳學、流體力學、雷射應用、工業設計及機械加工等碩博士人才，相關訓練及實務經驗至少約需3年以上，甫以工作團隊方式進行。故建議未來教育方針，評估是否可將基礎3D教育訓練課程，如應用簡易塑酯材料熔融沉積(Fused Deposition Modeling, FDM)工法，係將熱熔性線材料(Polylactic acid, PLA, 聚乳酸或Acrylonitrile Butadiene Styrene, ABS, 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物)經由噴頭加熱融化，且依已建置妥圖檔與晶片控制噴頭，將熔融線材塗敷在工作檯上，快速冷卻後形成一層截面，並由晶片控制工作檯向下微幅移動間距，再由噴頭作動形成截面，如此反復作動堆疊出3D立體物件，納入我國中、小教育學程，做為未來奠定人才之基礎。

(二)對著作權之挑戰

前述金屬3D列印原理時，已提及欲進行列印作業時，首先要確認標的物，並使用製圖軟體建構(自行繪製或設備光學掃描等)其3D立體圖STL檔，並依選用金屬粉末及列印工法，進行切層參數設定及製程模擬後，執行初階段研製作業。因應近年3D列印技術與市場蓬勃發展，衍生著作權議題亦隨之增加，故而我們開始關注研製過程是否涉及

20 OFweek高科技門戶，〈全球最值得期待的十大金屬3D列印公司〉，2018年2月26日，〈<https://kknews.cc/zh-tw/tech/6e5zg3l.html>〉(檢索日期：2019年12月30日)。

21 李洵穎、陳翊中，〈緊跟3D列印風潮台灣廠商加快腳步〉，《今周刊》，2013年3月28日，〈<https://www.business today.com.tw/article/category/80393/post/201303280028/緊跟3D列印風潮台灣廠商加快腳步>〉(檢索日期：2019年12月30日)。

22 Amphyon, “Simulation Aided Additive Manufacturing,” additiveworks, 〈<https://altairhyperworks.com/partner/amphyon/>〉(檢索日期：2019年12月30日)

著作權，學者王武龍論文內容即研討，摘述重點如后：

1.3D模型檔案的製作方式，對於完成之檔案是否屬於著作權法上之「著作」、是否具「原創性」等問題將有重大影響。

2.3D列印科技可用於製作具實用性 功能之物品，而用以製作這些實用性物品之3D模型檔案，其是否受著作權保護，自需受到實用性原則以及實用性物品原則的限制。

3.3D列印的製造過程中，在各階段可能產生許多著作權直接侵害行為的態樣，如：3D建模階段使用繪圖軟體以及掃描技術製作之行為，是否會有未經授權之重製或是改作的情形？

4.將實體物品轉換為3D模型檔案，並在網路散布，或是自網路上下載檔案並列印出實體模型，故於著作權侵害行為發生時，除了終端之使用者需負直接之著作權侵權責任外，如Thingiverse以及 Shapeways等網路服務提供者，亦可能須負代理、輔助或是誘引侵權等間接侵權責任。²³

(三)精密度與成型時間相衝突

3D列印技術是一層層的將欲成形的部分製作出來，每層的厚度也決定了成品的精密度，在此方面便無法比上傳統削切成型的方法，而若要提高精密度則必須減少每層的

厚度，如此增加列印的層數也增加製作的時間。²⁴

(四)材料問題

由早期塑膠發展至金屬、陶瓷與先進材料；塑膠部分的技術相對成熟，更有許多高價值創新應用，如助聽器、齒模與透明矯正牙套等。各種可商品化的工業設計概念，已因3D列印技術的普及，快速降低設計所需投入的成本與時間，並讓設計的多樣性與創意更能發揮與展現。在金屬、陶瓷與先進材料部分，尚有技術更待努力，亦為先進國家技術研發重點。²⁵

(五)設備高單價

承前文所述，Wohler專書主要探討及蒐集金屬3D列印產業發展情況，迄今已達二十餘年且逐年更新，故該產業鏈之年產值與工業級機台銷售數量等資料可藉由購買或查閱其專書內容而獲悉最新資訊；另礙於金屬3D列印機台屬高單價產品，各廠家販售單價不輕易透露且因採購合約內容與數量等不定因素隨時會異動售價，在此，僅透由網路蒐獲106年某篇報導提及德國廠商EOS金屬機台平均售價約為500萬人民幣(匯率1：5，則約新台幣2,500餘萬)，²⁶且隨著應用軟(硬)體技術的逐年進步與需求端客製化設備要求，設備單價仍有變化出入，故上述單價

23 王武龍，《3D列印的創新應用對著作權法之挑戰》(臺北：東吳大學法學院法律學系碩士，2016)，頁II。

24 黃宏偉，《3D 列印技產業分析與競爭策略研究-以高科技技術採用生命週期觀點分析》(新竹：國立交通大學科技管理研究所碩士論文，2013)，頁18。

25 同註17，頁20。

26 重慶3D虎，〈3D列印技術應用的關鍵挑戰〉，《每日頭條》，2017年4月9日，〈<https://kknews.cc/tech/qylx8j8.html>〉(檢索日期：2019年12月12日)

僅供參考，唯仍屬高單價設備。

(六)製程標準的訂定

本文關注金屬3D列印技術於航(空)太領域的運用，且是否已有相關產製或維修標準制定及公布可供各廠家參考。經查美國聯邦航空管理局(FAA)在2015年便要求SAE²⁷成立技術委員會Aerospace Materials Systems - Additive Manufacturing(簡稱 AMS-AM)，由來自超過15個國家的350多個SAE成員，包括飛行器與發動機原始設備製造商(OEMs)資料供應商、營運商，設備/系統供應商等單位參與此套航(太)空領域標準的編制工作，該類型製程標準含括如后：

1.AMS7000：經應力消除、熱等靜壓和

固熔退火的62Ni21.5Cr9.0Mo3.65Nb耐腐蝕、耐熱鎳合金LPBF積層製造零(附)件。

2.AMS7001：用於積層製造62Ni21.5Cr9.0Mo3.65Nb耐腐蝕耐熱鎳合金粉末。

3.AMS7002：用於航空航太裝備零(附)件積層製造的原材料裝備工藝要求。

4.AMS7003：基於粉末床的雷射熔融工藝。

承上用以協助FAA進行航空航太裝備積層製造零(附)件認證，其中也包括嚴格的商用飛機的認證，以滿足監管部門對積層製造這項新興技術認證指導資料要求。SAE將繼續編制金屬與聚合物積層製造標準，以推動在航空航太領域內的應用。²⁸

表3 金屬3D列印應用於空軍航材製造之SWOT效益矩陣表

	優勢(S)	劣勢(W)
內部條件	1.專業指部修護人員多已具備相關國家級機械加工證照，且人員已具多年工作經驗與資歷。 2.國內精密加工機台產業研發能量高，軟(硬)體整合能力強。 3.金屬3D列印完成初胚後仍需後加工，而專業指部多已具備相關加工設備與能量，無須額外投資。 4.專業指部以機件維修為主，品項繁多，而數量則視單機裝用量而定，且工法多屬原廠技令已具檢修程序，可據以執行。 5.修護人員具有學習熱忱，有意願接觸與學習新知。 6.依國軍武器裝備全壽期管理，納入國防十年建軍及五年兵整計畫，採購或自製新式武器裝備。	1.金屬航材種類多(如鋁合金、鎳基合金、鈦合金等)，考量粉末顆粒甚小，為求高品質，建議單一粉材單一機台，如此購置成本高。 2.專業指部未具金屬3D列印設備。 3.專業指部現有人力暫滿足現階段計修任務，未獲額外編制人力，且人員需具備相關專業學識之碩(博)士人才，訓練與業界實務交流，時程約莫3年以上。 4.預判未來發動機陸續屆中、後壽期，後勤維修成本將增加。 5.金屬3D列印研(試)製修期程長，依機件材質及構型複雜度，快則半年，慢則2年以上。

27 SAE(全名稱爲Society of Automotive Engineers，國際汽車工程師學會)是全球性技術性學會，在全球範圍內擁有超過145,000名會員，會員均是航空航天、汽車和商用車輛行業的工程師和相關技術專家。國際自動機工程師學會最爲知名的成就是它的技術標準和嚴格的自發性標準制定流程，目前世界各地政府法規和文件都援引了國際自動機工程師學會的標準。在航空航天方面，共有241個標委會、10,832位標準制定者、8,463份現行標準及17,000多份歷史標準，同時，飛機認證則都需要遵循國際自動機工程師學會的標準。
(<http://www.sae.org.cn/events/vcpt?tab=24>) (檢索日期：2019年12月25日)

28 小軟熊，〈SAE發佈首套航空航太增材製造資料與工藝標準〉，《中國3D打印媒體平台》，2018年7月6日，(<http://www.nanjixiong.com/thread-128915-1-1.html>) (檢索日期：2019年12月26日)

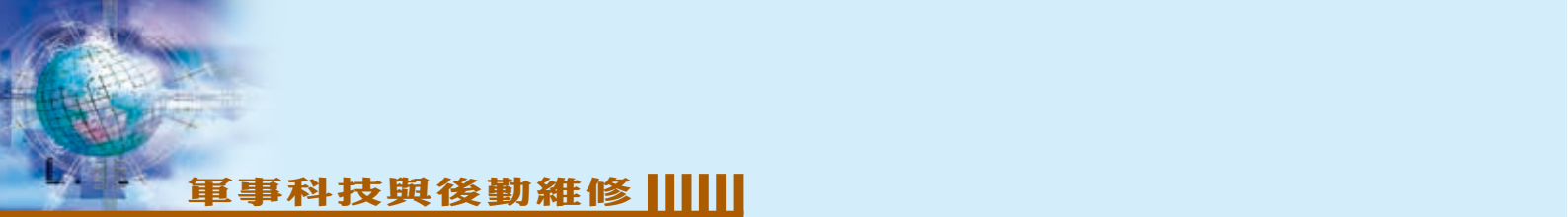
外部環境	機會(O)	威脅(T)
	1.產學單位(如：工研院與中科院)陸續投入人力與物力進行技術開發。 2.金屬3D列印工法技術發展迄今已逾30年，部分技術專利已屆，且隨軟(硬)體技術不斷精進，有利於推升該技術運用與發展，且設備購置成本預判將逐年遞減。 3.中科院已洽國內各專業航太產業成立「臺灣航太積層製造產業協會」與「航太積層製造研發中心策略聯盟」，期協助國內廠商與國外合作夥伴連結，且落實技術深根、發揮產業聚落效應。 4.適用構型複雜且傳統加工不易之物件。	1.目標物掃描或仿製件是否涉及侵權，仍需先行澄清。 2.國內金屬3D列印發展起步中。 3.國外金屬3D列印發展較早且具優勢，早開發較可及早掌握關鍵技術與製程之專利權。

資料來源：本研究整理。

表4 金屬3D列印應用於空軍航材製造之SWOT策略矩陣表

策略選擇	SO策略—增長性(使用強勢並利用機會)	ST策略—多元化(使用強勢且避免威脅)
	1.專業指部修護人員多已具備相關國家級機械加工證照，且人員已具多年工作經驗、資歷及學習熱忱，與產學單位合作跨入金屬3D列印領域較旁人容易。 2.國內精密加工機台產業研發能量高，軟(硬)體整合能力強，若可與業界結盟，集眾人之志，將可加速能量深耕於國內。 3.專業指部若與業界結盟，於金屬列印後加工部分，可提供技術支援，提升彼此能力。 4.專業指部進行維修作業時，可針對構型較複雜、消失性商源零(組)件，優先循產(官)學機構評估自(製)修，改善待料問題。	1.國軍武器裝備獲得多屬外購，欲以金屬3D列印進行機件研(試)修製是否涉及侵權需澄清。 2.國內金屬3D列印技術及設備發展中，專業指部與產(官)學界合作結盟，則較易推展。 3.若具備研製能量，將可掌握先機，而不受制於人。
	WO策略—扭轉性(克服弱勢並利用機會)	WT策略—防禦性(減少弱勢並避免威脅)
	1.國防預算有限，且專業指部未具金屬3D列印技術及設備，與產(官)學機構結盟將可節省人員訓練、設備購置及養護成本。 2.運用業界既有人力技術，避免突增專業指部人力負荷及工時，排擠與影響原計修任務遂行。 3.前置預算編列並循產(官)學機構(如：中科院交流平台等)，協助修(製)程開發及報價，節省自行研發之人力、物力及時間成本。	1.專業指部未具金屬3D列印設備，若欲購置則非僅單一機台，且國內技術發展中，未來仍需仰賴產(官)學專業技術支援，始可確保成品品質。 2.金屬3D列印製造屬高技術門檻，若由專業指部人員編成，則需重新檢討現有員額及人員訓練窒礙，恐無法兼顧原有計修任務，故需增編員額以支應所需。 3.工件製程開發，依材料及其外型複雜性而定，快則半年內，慢則2年以上，故需依發動機中、後壽期前瞻評估，而非於需求產生時才納入檢討，如此將緩不濟急。

資料來源：本研究整理。



金屬3D列印應用於空軍航材製造SWOT分析

本文針對金屬3D列印能量籌建效益，擬採用企業及學界廣泛運用於解決單位相關問題的SWOT分析法²⁹，配合相關文獻探討所獲觀點進行研析。經彙整完成金屬3D列印工法應用於空軍航材製造之效益矩陣表如表3所示；另參據效益矩陣表完成SWOT策略矩陣表如表4所示，由SWOT策略矩陣表中可得知增長性(SO)、多元化(ST)、扭轉性(WO)及防禦性(WT)等四類型策略，俾供相關單位參考運用。鑑此，未來金屬3D列印工法應用於航太領域機件產製與維修將日漸成熟，市場規模更是不可限量，故各國無不積極投入與開發，以掌握未來關鍵市場與專利。預判未來航空產業(運輸)市場將持續蓬勃發展，而航材產製與維修需求市場與產值將不可小覷，如此將更有助於金屬3D列印技術發展與運用。

結語

我國武器及裝備獲得不易，且部分裝備壽期偏高，於我後勤維持預算有限情況下，零(附)件採購與籌補困難，未來可能面臨消

失性商源問題，造成後勤單位執行窒礙。故評估是否可借重金屬3D列印工法來尋求自製可行性，即為本文初始目的。

經由資料蒐集與討論，可知金屬3D列印工法已實際應用於航太產業，且持續蓬勃發展中，例如美商奇異GE公司已成功開發以金屬3D列印LEAP商用發動機燃油噴嘴組合併並於2016年獲得飛行認可，迄2018年10月已產製達30,000個噴嘴(單具發動機19個)，證明金屬3D列印於大批量生產技術的可能。

另國內於政府大力推動下，科技部工程司曾提出103~106年「積層製造-材料領域研究專案計畫」，且持續推動相關專案研究補助，鼓勵各產、官、學界踴躍投入此領域，主要目的係藉由學術、技術或應用創新，以掌握重要專利佈局；另藉此引導國內學術界充沛的研發能量，促進產學研合作聯盟，共同攜手研發。於發展初期，工研院台南六甲分院雷射與積層製造中心優先致力於金屬3D列印技術開發與運用，並將其能量技轉民間企業(如東台精機等)，扶植產業發展，近期則將重點延伸至生醫領域，就如同2017年12月11日於高雄路竹科學園區建置全國首座一站式「3D列印醫材智慧製造示範場域

29SWOT分析法屬於企業管理理論中的策略性規劃，包含了優勢(Strengths)、劣勢(Weaknesses)、機會(Opportunities)以及威脅(Threats)。應用於產業分析主要在考量企業內部條件的優勢和劣勢，是否有利於在產業內競爭；機會和威脅是針對企業外部環境進行探索，探討產業未來情勢之演變。此一思維模式可幫助分析者針對此四個面向加以考量、分析利弊得失，找出確切之問題所在，並設計對策加以因應。在進行SWOT分析後，Wehrich在1982年提出將組織內部的優勢(S)、劣勢(W)與外部環境的機會(O)、威脅(T)以矩陣(matrix)的方式呈現2×2項策略型態，並運用策略配對的方法來擬訂增長性、多元化、扭轉性及防禦性等因應策略。

」，不僅擁有全方位智慧製造流程與設備，未來也將協助國內醫材廠商從設計、試製到商品化製作一氣呵成，開發符合國際認證之金屬3D列印醫材，搶攻3D列印醫材之國際市場。³⁰

此外，國家中山科學研究院於政府推動國防自主及國機國造政策下，於2017年12月成立「台灣航太積層製造產業協會」，集結了國內頂尖航太工業大廠漢翔、長榮航宇、亞航，及數可科技、圓融金屬粉末等積層製造相關廠商，組成國家級隊伍；另與數可科技簽署成立「航太積層製造研發中心策略聯盟」，期結合中科院研發能量及數可科技的行銷與量產經驗，以開發各式航太級零件為目標，從研發設計、生產驗證至批次量產，建立臺灣技術自主能量。

綜上可知國內相關科研機構已具備相當能量，以下提供幾點建議，期盼相關機關單位能持續重視與推動，以提升我國金屬3D列印技術能量，及其應用於航太零(附)件產製與維修市場的蓬勃發展，開啟我空軍後勤物件永續不墜之管道。

(一)金屬3D列印技術所需之人力、專業技術領域門檻高，建議初階段委由國內相關科研機構合作與協助，可有效節省人力及設備維持成本。

(二)科研機構已具設備、人力及技術研發能量，為樽節預算避免重複投資，可由軍

種前置需求檢討，以供科研機構執行試(製)修評估與後續驗證。

(三)政府權責單位整合國內各產、官、學界能量，持續編列預算以鼓勵產學研究，致力於航太及生醫等領域發展，期提升我國金屬3D列印專利技術能量。

(四)軍種單位持續與科研機構保持密切合作關係(如：雙方洽簽合作意願書、參與研討會等)，以獲悉及掌握最新技術與能量現況，俾據以前置研處，及早反映適切需求，供科研機構協處。

參考文獻

中文部分

學位論文

- 一、王武龍，2016。《3D列印的創新應用對著作權法之挑戰》。臺北：東吳大學法學院法律學系碩士。
- 二、黃宏偉，2013。《3D列印技產業分析與競爭策略研究-以高科技技術採用生命週期觀點分析》。新竹：國立交通大學科技管理研究所碩士論文。
- 三、雲麒錐，2015。《3D列印產業概況與進入策略》。新竹：國立清華大學科技管理學院碩士論文。

官方文件

- 一、雷射與積層製造中心編，2016/9/23。〈航空零組件積層製造研發能量建置規劃

30 王友信，〈工研院首座3D列印醫材製造場域，助台廠搶進生醫新藍海〉，2017年12月11日，〈<https://www.itri.org.tw/chi/Content/NewsLetter/Contents.aspx?SiteID=1&MmmID=620605426331276153&MSid=746470773436764261>〉(檢索日期：2019年12月21日)

報告>，《工業技術研究院》，頁4-5。

報紙

- 一、羅裕睿、吳芳怡、林宛儒、林奕均、王紀雯，2016/5/1。〈3D列印技術之困難與需求〉，《國立臺灣藝術大學圖文傳播藝術學報》，頁159-164。

網際網路

- 一、Amphyon, 2019. “Simulation Aided Additive Manufacturing,” additiveworks, 〈<https://altairhyperworks.com/partner/amphyon/>〉
- 二、Beppe Grimaldi, 2018/07. “Industrialize Additive Manufacturing ” Siemens Ingenuity for life, 〈http://www.aita3d.it/wp-content/uploads/dlm_uploads/2018/07/Siemens.pdf〉
- 三、MoneyDJ理財網財經知識庫，2015/1/21。〈R P K 客運收益公里數〉，《MoneyDJ理財網》，〈<https://www.moneydj.com/KMDJ/Wiki/wikiViewer.aspx?keyid=a2ba7228-1894-4daa-8f40-d1b1b0c69e52>〉
- 四、OFweek高科技門戶，2018/2/26。〈全球最值得期待的十大金屬3D列印公司〉，《每日頭條》，〈<https://kknews.cc/zh-tw/tech/6e5zg3l.html>〉
- 五、SAE International website, 2019. “About SAE International,” 〈<http://www.sae.org.cn/events/vept?tab=24>〉
- 六、TechNews, 2017/4/27。〈工研院發表大尺吋金屬3D列印助台廠拚航太商機〉，《TechNews科技新報》，〈<http://technews.tw/2017/04/28/itri-developer-big-size-metal-3d-printer/>〉。

technews.tw/2017/04/28/itri-developer-big-size-metal-3d-printer/〉。

- 七、Wohler Associates, 2019. Wohler Report2019 3DPrinting and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, 〈<https://wohlersassociates.com/2019report.htm/>〉
- 八、軟熊，2018/7/6。〈SAE發佈首套航空航太增材製造資料與工藝標準〉，《中國3D打印媒體平台》，〈<http://www.nanjixiong.com/thread-128915-1-1.html>〉。
- 九、中商產業研究院，2018。〈2018中國3D打印行業前景研究報告〉，《中商產業研究院》，頁14-23，〈<http://www.nanjixiong.com/forum.php?mod=attachment&aid=MTc1MjIyGE4NDg0NjllfDElNTA1OTIzNjl8MHwxMjk4NzY%3D>〉。
- 十、王友信，2017/12/11。〈工研院首座3D列印醫材製造場域，助台廠搶進生醫新藍海〉，《工業技術研究院》，〈<https://www.itri.org.tw/chi/Content/NewsLetter/Contents.aspx?SiteID=1&MmmID=620605426331276153&MSid=746470773436764261>〉。
- 十一、宋健生，2019/2/21。〈科技部長訪東台鼓勵產業採用MIT積層製造設備〉，《台灣航太積層製造產業協會》，〈<http://www.taamia.org.tw/xmdoc/con?t?xsmsid=0I163585344364499078&sid=0J017422473716106563>〉。
- 十二、李洵穎、陳翊中，2013/3/28。〈

緊跟3D列印風潮 台灣廠商加快腳步》，《今周刊》，〈<https://www.business today.com.tw/article/category/80393/post/201303280028/緊跟3D列印風潮 台灣廠商加快腳步>〉。

十三、邱琬雯，2017/8/14。〈從日本工業展看3D列印製造技術應用發展〉，《工研院產業經濟與趨勢研究中心(IEK)》，〈http://www.laservalley.org.tw/upload/i_technology/epaper09.pdf〉。

十四、南極熊，2018/10/09。〈第30000個航空3D列印燃油噴嘴出貨，GE數十台金屬機規模化生產〉，《尋夢新聞》，〈<https://kknews.cc/news/yexxk3g.html>〉。

十五、重慶3D虎，2017/4/9。〈3D列印技術應用的關鍵挑戰〉，《每日頭條》，〈<https://kknews.cc/tech/qylx8j8.html>〉《原來如此-專案管理》，〈<https://sites.google.com/site/mac14914901/swot>〉。

十六、雷射與積層製造中心編，2018。〈中心研發聚焦策略〉，《工業技術研究院》，〈<https://www.itri.org.tw/chi/Content/Messagess/contents.aspx?SiteID=1&MmmID=655641675570172030>〉。

十七、飛彈火箭所編，2018。〈國內首座自主開發3D金屬列印機台亮相〉，《國家中山科學研究院》，〈<http://www.ncsist.org.tw/csistdup/news/NewsPublishDetail.aspx?PostNo=15179>〉。

aspix?PostNo=15179〉。

十八、曹松清，2018/4/23。〈全台最大航太金屬積層製造研發基地〉，《經濟日報》，〈<https://money.udn.com/money/story/5950/3102679>〉。

十九、鄧凱元，2016/3/17。〈台灣製造飛機零件用印的〉，《天下雜誌》，〈<https://www.cw.com.tw/article/article.action?id=5075223>〉。

二十、維基百科編，2019。〈拓樸最佳化〉，《維基百科》，〈<https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=拓樸最佳化&oldid=37345949>〉。

外文部分

專書

一、Wohler associates, 2018. Wohler Report 2018 3DPrinting and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report, P.149.

官方文件

一、Oliver Wyman, 2018. Global Fleet & MRO Market Forecast Commentary 2018-2028, P.6-35.

作者簡介

賴啟超少校，中正理工92年班航空系、航技學院後勤參謀軍官97年班、國防大學理工學院航太工程碩士100年班、國防大學指參學院108年班，現為空軍第三指揮部少校股長。

蘇園展中校，國防大學指揮參謀學院中校教官。