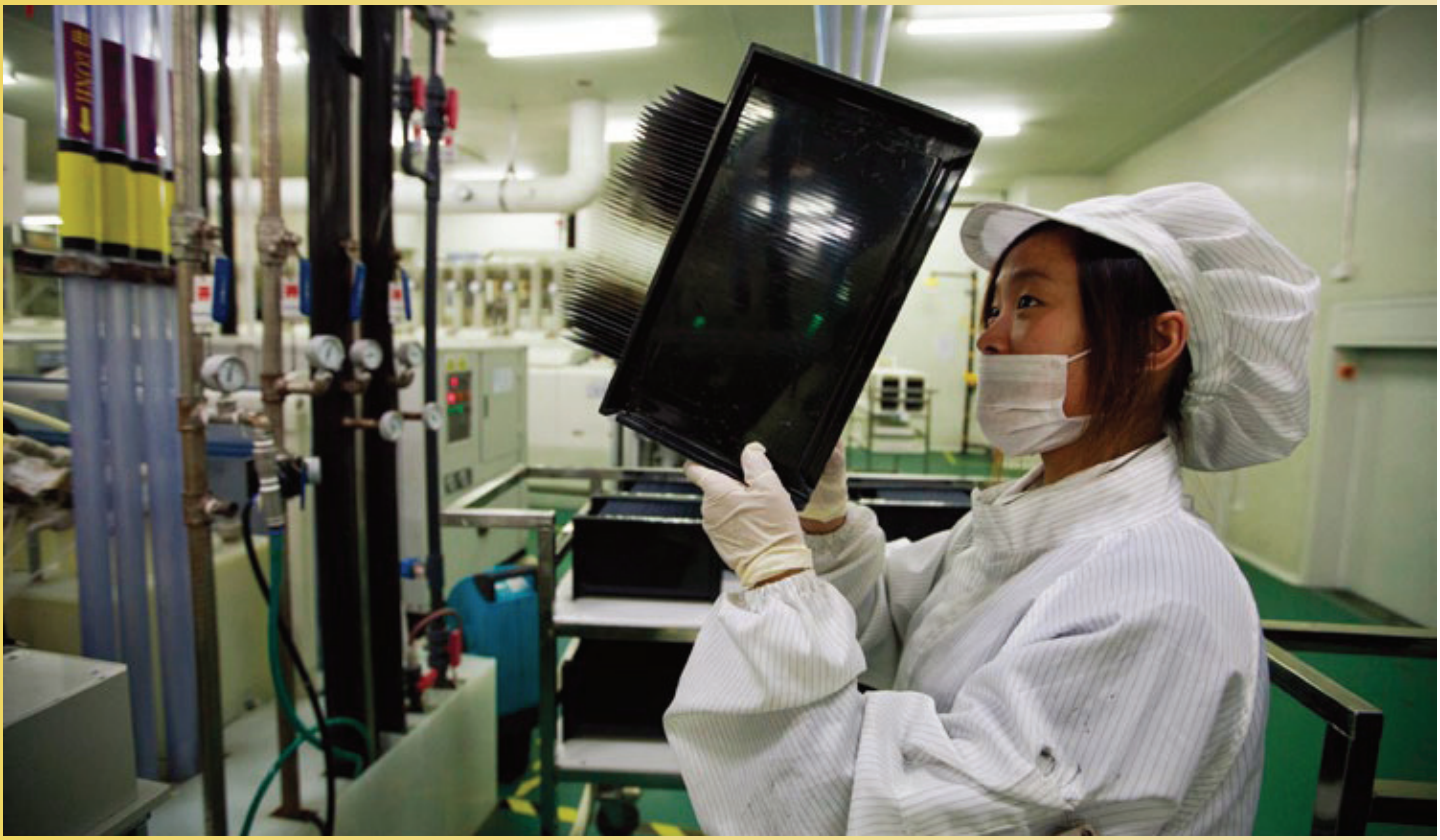
「製造」出來的創新能力

現在談起「製造」，大多數人第一個想到的
都是被稱為「世界工廠」的中國大陸；
至於想到「創新」，
或許很多人會推崇美國的創新能力，
不過以往對創新能力十分自豪的美國人，
現在開始思考：
將大量的製造工作外包，
是不是傷害了美國自己的創新能力？
《工業技術與資訊》上個月的
翻譯文章「明天，我們的創新能力在哪裡？」
即是這樣的反思。
本期我們繼續推出相關系列文章二篇，
看看創新能力，
是如何被「製造」出來。

譯 羅耀宗

電池製造商
中國無錫的一座工廠內，
一台機器使用尚德電力開發的
嶄新流程，蝕刻太陽能電池
結晶矽晶圓的表面，
這個流程能讓電池吸收更多光線。

本刊獨家取得美國麻省理工學院
Technology Review期刊圖文授權
Technology Review, Published by MIT.
TECHNOLOGY REVIEW
Internet URL: www.technologyreview.com
Technology Review PUBLISHED BY MIT



中國的太陽能機器

中國製造商以更快的速度，興建規模更大的工廠，
已經主宰國際傳統太陽能板市場。
現在，它們需要靠創新，以維持領先地位。

文 凱文·布里斯（Kevin Bullis）
攝影 凱文·李（Kevin Lee）

十年前，美國、德國、日本是太陽能板的主要生產國，中國製造商幾乎沒有生產。但是2006年，中國公司尚德電力（Suntech Power）的年產能超過一百萬片矽太陽能板，成為世界上第三大製造商。今天，中國製造商一年生產約五千萬片太陽能板，占2010年全球供應量的一半以上，而且全球前五大太陽能板製造商，中國占了四家。更叫人稱奇的是，其他地方這個產業的規模每兩年增長一倍，中國製造商的表現更好，大約一年產量就增長一倍。

這樣的一片天，不是靠中國工廠的廉價勞工撐起來的，生產太陽能電池需要昂貴的設備和材料，人工只占一小部分的成本；這也不是因為中國公司推出能夠使用更久或者產生更多電力的電池。大體而言，它們生產的矽太陽能板種類，和世界上許多同業相同，也使用相同的設備，它們會成

功，主要是因為建築工人便宜且效率高，以及中國政府的許可流程十分精簡，能以更快的速度和更便宜的成本興建工廠。新廠擁有效率最高的最新設備，有助於降低成本，而規模一大，效率也跟著提高。這麼一來，中國製造商面對其他的矽太陽能板製造商，就能削價競銷，許多新創企業引進嶄新技術的美夢也因此粉碎。

但是太陽能市場正在迅速演變，技術創新日益不可或缺，雖然全球的太陽能發電需求繼續成長，市場卻充斥著太陽能電池板：從2009年到2010年，全球的產能增加一倍以上，2011年繼續增長。由於產能大幅過剩，去年秋天，中國製造商銷售的太陽能板，售價很難高於生產成本。在這種市場中，產品差異化——以及銷售夠高的價格以維持生存——的方式，就是把產品做得比競爭同業要好。

對今天的太陽能產品製造商來說，這表示它們需要研發將日光轉換成電力效率更高的電池。在太陽能板價格下跌之際，安裝成本占太陽能發電成本的百分率更高。顧客想要能夠產生更多電力的太陽能板，如此就可以減少安裝數量。從現在開始，中國製造商降低每瓦太陽能發電成本的最好方式，可能不是降低製造成本，而是提高每一片太陽能板產生的電力瓦數。加州聖克拉拉（Santa Clara）應用材料公司（Applied Materials）負責能源與環境解決方案的執行副總裁馬克·品多（Mark Pinto）說：「營運方式正在轉變，以前只講規模，現在則是在壓低成本的同時，提高轉換效率。」

對於將營運重心放在擴大生產標準技術的中國製造商來說，這聽起來好像是壞消息，但是它們生產傳統太陽能板的經驗，可能有助於它們採行新的設計，顯著提升矽太陽能電池的性能。這些年來，這些製造商因為開發更好的電池製造技術，而能降低成本，它們因此了解在工廠內什麼行得通，以及什麼行不通。它們也擁有資本和工程師，幫它們將比較新的技術，投入大量生產。它們起初或許沒有著手將那些技術商業化，但現在稱霸傳統太陽能板市場之後，正準備那麼做。

迎頭趕上

2010年，美國能源部長朱棣文在全國新聞記者俱樂部（National Press Club）發表演說，談到美國在先進製造領域節節落後的事實，首先便以尚德電力為例，他參觀過這家公司的工廠，對於親眼所見留下極為深刻的印象。「這是一座高科技自動化工廠，」他說，「它不是靠廉價的勞工而成功。」他表示，不只如此，尚德更以創世界紀錄的效率，開發一種太陽能電池。

中國無錫的一座工廠內，
工人將電子接點做好後的太陽能電池依外觀分類。

朱棣文講的話或許令若干觀察者感到驚訝，但尚德創紀錄的太陽能電池的確令人刮目相看。它們所用的技術，掌握了設計和

光照

工人正將電子接頭焊接到太陽能電池，將電池連接起來，形成太陽能板（左）。
電池成串連起來之後，排在光箱上面，電池的前面和後面以封包材料覆蓋，然後送進覆膜機，密封定位（右上）。
在品質管制階段，工人測試太陽能板，在明亮的紫外線下衡量衰退情形（右下）。

製造技術變遷的優勢，從矽收集電荷的導電金屬線，不是用一般的網版印製法（screen-printing）做出來的；相反的，尚德使用的是專有流程，蒸鍍出遠為細小、間隔更為緊密的線路，因此從電池取電更有效率。改變製程，使得這家公司取得的效率和成本降低水準，達到業界2011年發表的發展藍圖鎖定的2020年目標。「觀察所有這些事情，我們不只做得比別人現在做得要好，」尚德的技術長史都華·魏納姆（Stuart Wenham）說，「我們也做得比他們認為十年後能夠做到的還要好。」

尚德到目前為止，根據新技術生產的太陽能板相當少，它將資源集中在修補製造流程，以降低生產傳統矽太陽能板的成本，但是這種做法可能很快就會改變。尚德今年開始增加生產新電池，現在每年生產的數量，足以產生500百萬瓦的電力——約為250萬片太陽能板。這樣的成就，主要是得自這家公司生產傳統產品獲得成功。

新電池使用的技術，是1990年代在澳洲新南威爾斯大學發展出來的，但是實驗室中使用的技術太貴，不適合用於商業化生產。魏納姆說，這是「極其複雜的製程」，包括使用光微影技術、真空蒸鍍「相當奇特的金屬」，以及「各式各樣的化學流程」。魏納姆也是新南威爾斯大學的光電研究計畫主任，而且曾經是尚德執行長兼創辦人施正榮的教授。魏納姆表示，數十年來，這種技術一直停留在實驗室研究發展的階段，直到尚德的研究人員想出如何將它改用於組裝線。「他們找到一種簡單的低成本方法，取代所有那些做法，卻獲得相同的成果，」他說。新技術能提高標準大小太陽能板的電力產出，從205瓦增為220瓦或更高——而電池的生產成本低於傳統電池。

這種技術的個別部分很快就取得成功，尚德將它們引進到標準生產線，目標是只要在成本和效率兩方面領先競爭同業就好，但是擴大整個製程的產量，挑戰相當大。2009年，一條試營運生產

線開始運轉，不過公司必須發展和採用新設備，使良率和生產率達到流程具有經濟性的地步，就這一點來說，尚德是市場龍頭。這證明了新生產設備開發經驗豐富是十分重要的一件事。這家公司不只具備改善製程所需的專長，口袋也夠深，能在多年的時間內不斷研發技術，不需要帶進顯著的收入。

中國的太陽能製造商不是只有尚德找到前景看好的新技術，並且正在尋求各種大規模生產方法。去年9月，保定的英利綠色能源（Yingli Green Energy）宣布和荷蘭研究中心ECN結成伙伴關係，生產出來的太陽能板，能將17.6%的光照能源轉換成電力；目前的平均值只略高於14%。「ECN將技術提供給世界上任何想要的人，」魏納姆說，「卻只有英利接受那種技術，並且想出如何以低成本的製程，大規模生產產品。」

材料優勢

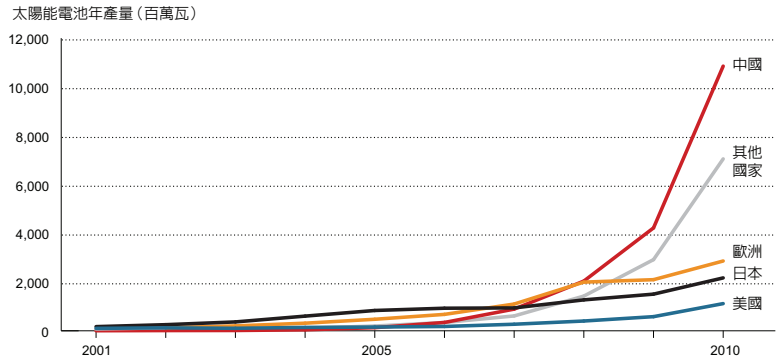
現在中國的太陽能製造商已將注意焦點從生產轉向創新，即使如此，它們選用的材料結晶矽能做的事可能受到限制。這種材料很吸引人，因為矽微晶片的研究已有數十年之久，業界懂得如何利用它。但是和其他的某些半導體比較，它吸收光照的效果不好，砷化鎵等其他的替代性材料，可以做成薄膜，厚度只及典型矽電池的百分之一，卻能產生一樣多的電力，如此一來便可以降低材料成本。這些薄膜也具有彈性：可以捲起來，降低包裝和運輸成本，也可以做到屋頂裡面，降低安裝成本。

雖然具有這些潛在的優點，薄膜太陽能電池卻很難和結晶矽太陽能電池愈來愈低的成本和不斷提高的效率競爭。設在亞利桑納州的第一太陽公司（First Solar）已經成功發展出薄膜太陽能板的低成本製造技術，但這些方法使用的材料——碲化鎘——做出來的太陽能板，效率低於矽太陽能板。也有公司試圖以效率較高的銅銦鎵硒化物薄膜板，和矽太陽能板競爭。但其中一些因為未能迅速降低製造成本而宣告破產和關閉廠房。

儘管有這些失敗的事例，魏納姆相信薄膜技術最後會挑戰傳統太陽能板。如果真是這樣，中國的結晶矽太陽能電池製造商也許不能永遠稱霸市場。但是先求傳統技術擴大生產，再求引進創新性的設計，不斷降低每瓦太陽能的發電成本，這種策略已經使它們立於不敗之地，能夠保持領先地位好幾年之久。在此同時，包括尚德在內的一些公司，正在自行研究生產薄膜太陽能板，一旦薄膜取代結晶矽，中國的製造商將可能是生產主力。（本文作者布里斯是Technology Review能源線的資深編輯）

Copyright © 2012, Kevin Bullis. All Rights Reserved.

遙遙領先 中國的太陽能電池產量遠遠領先其他國家



資料來源：GTM研究（GTM Research）

「疊」出來的科技

製造商利用三維印製法（3-D printing），
可以更有效率地生產現有的產品，
也能做出以前
不可能生產的東西。

文 大衛·佛利曼（David H. Freedman）
攝影 鮑伯·歐康納（Bob O'Connor）

層層堆疊
奇異先從右邊的單層，
用雷射在精確的位置熔化金屬，
生產出左邊的飛機引擎組件。

噴射引擎中的零件必須忍受激烈晃動的力量和高溫，重量也必須盡量減輕，以節省燃料。這表示它們的生產十分複雜，成本也高：奇異公司（General Electric）的技工必須焊接多達二十種不同的金屬組件，製成的產品才能以很高的效率，在燃料噴射器中混合燃料和空氣。但是奇異認為明年即將出爐的新引擎，有更好的方法製造燃料噴射器：把它們印製出來。

奇異用的方法，是以雷射在一床鈷鉻粉末上，臨摹噴射器橫斷面的形狀，將粉末熔化成固體的形式，每次用一層超薄的材料，一層又一層把噴射器做出來。這將比傳統的製造方法便宜，而且應該能夠做出更輕的零件——也就是說，做出比較好的零件。在奇異公司主持一個實驗室的普拉伯約特·辛格（Prabhjot Singh）說，最早做出來的一些零件，將用於噴射引擎。這座實驗室正努力改善和運用這種和其他類似的三維印製流程。但他補充說：「沒有一天，我們不曾聽到奇異的某個事業部對使用這種技術感興趣。」

這些創新走在製造技術劇變的前端，格外吸引航空和汽車等產業先進的應用領域。三維印製不只能以更高的效率生產現有的零件，也能生產以前不曾想像的東西——例如複雜的碗型零件，將重量減到最低，卻不犧牲強度。機製法會留下多達90%的物料在地板上，三維印製則幾乎不浪費任何材料——這是使用鈦等昂貴金屬時的重要考量。使用這種技術之後，也可以將儲存零件存貨的需求降低，因為在第一個零件出爐之後十年再印製另一個零件——或者改善的版本——一樣容易。汽車製造商在接獲安全帶機制失靈的報告之後，可以在幾天之內，將調整結構之後的新組件送交經銷商。

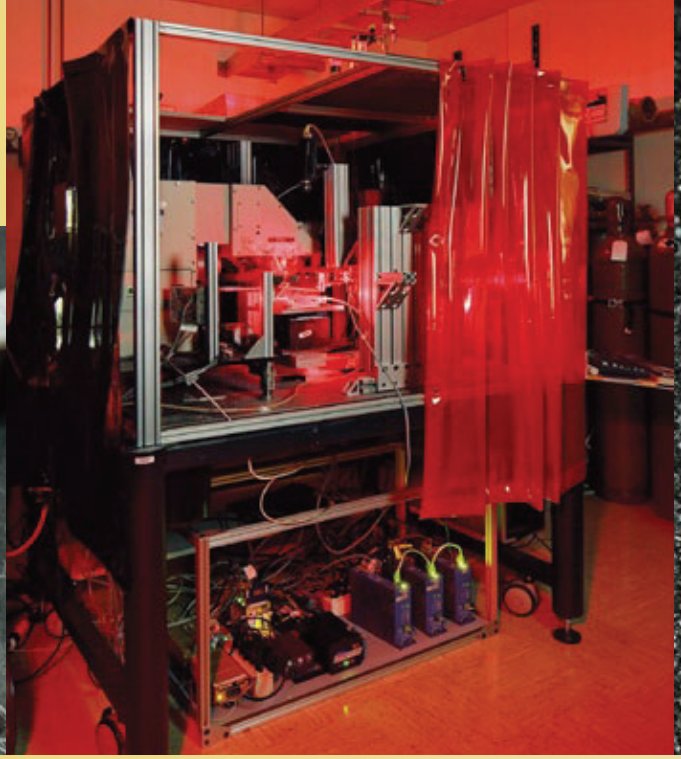
三維印製也稱作疊層製造技術（additive manufacturing）。1980年代中期查爾斯·哈爾（Charles Hull）發明他所說的立體光刻法（stereo-lithography）之後問世，他用紫外光雷射將最上一層樹脂硬化。工程師後來喜歡使用各式各樣的三維印製法，打造新設計的原型，或者生產一些高度客製化的零件。他們可以在電腦輔助設計程式中設計好三維藍圖，然後要印製機在幾個小時後把東西吐出來。這個製程能夠省下先期成本、漫長的前置時間，以及射出成形、鑄造，和壓印等傳統的量產製造技術所遇到的設計限制。但是這種技術只適用於若干材料，而且品質管制出了一些問題。用這種方式生產零件，速度也慢——必須花上一天或更長的時間，才能做出傳統製造法在幾分鐘或幾個小時內能夠做到的事。由於這些理由，三維印製並沒有用於非常大批量的零件生產上。

但是現在的技術已經推進到醫療裝置等利基市場的生產批量，而且未來幾年將打進幾個比較大型的應用。「極其重要的進步已經出現得夠多，使得這種技術在製造終端零件方面真的非常有用，」路易斯維爾大學快速原型製作中心（Rapid Prototyping Center）主任提姆·戈內特（Tim Gornet）說。

往前推進

有幾種技術可以用來「印製」一層又一層的實體物件。在燒結作業中，利用雷射或電子束，射向薄層粉末金屬或熱塑性塑料，在指定的區域將材料熔合成固體；然後加上新的粉末塗層，再不斷重複這個過程。我們也可以經由噴嘴擠壓或噴射加熱後的塑膠或金屬，產生一層形狀，之後再直接在上面加上另一層。另一種三維印製法，則使用黏膠黏合粉末。

航空太空公司正率先採用這種技術，因為飛機往往需要幾何形狀複雜的零件，以因應亂流，並在擁擠的艙室中滿足冷卻的需求。專業疊層製程的製造顧問特里·沃勒斯（Terry Wohlers）說，以雷射燒結的零件，約有兩萬種已經用在波音公司（Boeing）製造的軍用和商用飛機上，包括787夢想飛機（Dreamliner）所用的32種組件，它們不是必須量產的項目，波



音一整年可能只生產幾百個，而且它們沒有有攸關飛行安全，其中包括形狀經過精心設計的冷卻用空氣導管，而這在以前必須以多個部分分開製造。「現在我們能夠針對這些零件的重量設計，取得最適化狀態，並且省下材料和人工，」波音的製造技術策略集團主任麥克·范德威爾（Mike Vander Wel）說。「理論上，這是我們的終極製造方法，」范德威爾表示，雖然三維印製的速度限制，可能使它無法生產波音絕大部分的零件，但這種方法可能用在愈來愈多的零件上。

波音的競爭對手歐洲航空防衛與航太公司（European Aeronautic Defense and Space Company；EADS）正使用這種技術，生產衛星使用的鈦零件，並且準備使用它製造空中巴士（Airbus）飛機數量較高的零件。「我們還不知道疊層製造法可以將使用到什麼程度，但是看不到任何盡頭，」在英國領導EADS創新工作事業部三維印製研究的強·梅耶爾（Jon Meyer）說。

奇異的噴射引擎事業部可能比其他任何組織，更接近三維印製零件大規模商業生產的階段。除了燃料噴射器，奇異也用雷射燒結鈦到複雜的形狀中，用於黏合在風扇葉片前緣襟翼的四呎長條中。這些長條能使碎片轉向，並且產生更有效率的氣流。到目前為止，每一長條需要數十個小時的鍛造和機製作業，整個過程浪費50%的鈦。領導這項努力的奇異顧問工程師托德·羅克斯特洛（Todd Rockstroh）說，改用三維印製，這家公司每具引擎可以省下約25,000美元的人工和材料。葉片前緣和燃料噴射器將在2013年初用於引擎之中，到2016年左右，將整合到數量達數千的整個生產批量中。

在此同時，羅克斯特洛說，該公司希望將三維印製用在更多的零件上，以取得設計上的彈性。他們最近發現燃料噴射器的桿頭承受過高的熱壓力水準，但一個星期內就從印製機做好重新設計的零件。「以前我們必須重新設計20種不同的零件，還必須執行所有的機具整備，」羅克斯特洛說，「有時候甚至不可能做這種事。」而且，使用三維印製讓某些零件的內部起皺，可以減低它們的重量多達70%，為一家航空公司每年節省數百萬加侖的燃料。奇異因此設法尋找印製每一樣東西的方式，從變速箱殼體到控制機件都不放過。「明年我們就要大舉清查減輕重量的目標，」羅克斯特洛說。

汽車也可能因為零件重量減輕而受益。路易斯維爾大學的戈內特表示，印製流程可以減少汽門、活塞和燃料噴射器至少一半的重量。包括賓利（Bentley）和寶馬（BMW）在內的超級豪華與高性能汽車的製造商，已經使用三維

壓印

最左圖是奇異公司印製的一些金屬噴射引擎組件。中圖是微型印製機，奇異用來測試以陶瓷材料生產零件的新方法，研究人員正使用這台機器印製感測器，做為超聲波機器的探測裝置；他們相信這可以節省時間和金錢，同時改良設計。本頁（上）是在印製機中製造的感測器；下是在其他機器精製完成的相同零件。

印製法於生產批量只有幾百件的零件。

有待克服的挑戰

如果不是因為技術上的限制，三維印製的使用範圍會廣得多。「現在速度慢如牛步，」奇異的辛格說。在肯塔基州艾吉伍德（Edgewood）主持一家疊層製造顧問公司的托德·葛里姆（Todd Grimm）估計，如果三維印製要能在大部分的應用中和傳統的製造技術一別苗頭，生產零件的時間必須改進一百倍，未來幾年不會發生這樣的事。

另一個問題是，目前只有少數的塑膠和金屬複合物能夠用於三維印製。舉例來說，雷射燒結中，材料必須能夠形成粉末，接受雷射衝擊時，熔化得相當漂亮，然後迅速固化。符合這種必要標準的複合物，依重量計，成本可能是傳統製程所用原料的50到100倍，部分原因在於需求低，只有少數專業供應商供貨。

但是隨著新應用的需求增加，供應商之間的競爭應該能夠急劇壓低價格；而且，可用的材料清單正緩慢增加。奇異正嘗試使用陶瓷材料，而這將在引擎和醫療裝置等領域開啟新的可能性。

簡單的經驗也對改善這種技術大有助益。到目前為止，製造商沒有夠多的資料能夠準確預測零件如何產出、樣貌如何，或者生產變數——包括溫度、材料的選擇、零件的形狀和冷卻時間——如何影響最後的結果。辛格表示，這令人備感挫折：「三維印製最後竟成了魔法，一個零件由幾千層做成，每一層都有可能出錯；我們仍然不了解為什麼從某台機器做出來的零件，和另一台機器做出的零件稍微不同，甚至同一台機器在不同的日子做出來的也不一樣。」舉例來說，疊層製程往往以難以預測的方式，在層與層之間蓄積壓力，因此有些零件遭到扭曲。零件內部的多孔性也不同，因此令人關切材料疲勞或者脆性，這可能是飛機引擎或者機翼支架的一大問題。「我們曉得如何將金屬做得夠強，」波音的范德威爾說，「但是我們憂慮不可預測的特性，我們能夠重複某個結果，生產出一百個完全相同的零件嗎？我們還沒有十足的把握。」

范德威爾說，即使有這些挑戰，時間還是站在三維印製這一邊，原因不只在於這種製程不斷改進。一般來說，工程師不喜歡採用新技術去製造重要的零件，因為他們得忍受限期完成的壓力、賭上自己的名聲，更別提可能影響飛機上的寶貴人命。這樣的態度是可以理解的。「但是年輕的設計師適應得比較快，」他說，「他們不會馬上就表示：『沒辦法用這種方式生產。』」（本文作者大衛·佛利曼（David H. Freedman），是駐波士頓科學新聞記者，曾在Technology Review2010年11/12月號發表文章談光遺傳學（optogenetics）。最近出版著作《錯：為什麼專家老是出槌》（Wrong: Why Experts Keep Failing Us）。）

Copyright © 2012, David H. Freedman. All Rights Reserved.