



《麻省理工科技評論》每年鎖定可望造福全世界的創新科技，2024年入選名單正式出爐，無不代表著科技進展有成，有機會在目前或未來幾年發揮影響力。

2024年

10大

突破性科技

插圖／丹頓 (Aaron Denton)
翻譯／連育德

本刊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

**MIT
Technology
Review**

1

無所不在的 人工智慧

ChatGPT等生成式人工智慧 (AI) 工具以空前速度普及化，顛覆整體產業的走勢。

主要研發單位：

Google、Meta、微軟、OpenAI

成熟期：現在

2022年11月，OpenAI低調推出一款免費網路應用程式，名為ChatGPT，萬萬沒人料想得到它會掀起巨變。

到了1月，ChatGPT已成為史上成長最快速的網路應用程式。只要有瀏覽器，每個人都能使用這個有史以來數一數二強大的神經網絡。大家讚嘆之際難掩憂心。

殊不知，AI爭霸戰這時才剛要起跑。2月時，微軟與Google不甘示弱，宣布要將聊天機器人整合於搜尋功能，重新定義我們與網路的日常互動。

初期的展示成效不佳，微軟的Bing Chat捅出糗子，胡亂給答案，而Google的Bard在展示時，被人抓到回答內容有地方與事實不符。但精靈既出，就算怪模怪樣，就不會再回到神燈。

微軟與Google後續把應用範圍從搜尋拓展到辦公室軟體，將聊天機器人助理交到幾十億用戶的手上，可望為電子郵件與會議做出摘要、草擬報告與回覆、製作出完整投影片（標體、要點與圖片一樣也不少），幾秒鐘就搞定。

微軟與Meta發表圖像製作模型，使用者按個鍵，就能生成可分享的創意圖像。網路現在充斥著無厘頭的混搭圖像，甚至有數十張是米老鼠或海綿寶寶開飛機飛向雙子星大樓。

Google新款手機採用AI技術，提供前所未見的照片編輯功能，可以把醜臉換成笑臉、把陰暗午後換成完美夕陽。

生成式AI從實驗原型躍升到消費者產品，速度之快、規模之大，非歷史其他顛覆型技術所能比。可以確定的是，我們才正要一窺堂奧，更別說瞭解它的衝擊了。

AI光環是否變淡了？或許吧。技術每更新一次，就更不容易有驚艷感。但數十億人在2023年首度第一手接觸AI，無疑是重大里程碑。我們現在要摸索清楚的是，它是敵是友？—希文（Will Douglas Heaven）

2

第一個基因編輯療法

CRISPR療法問世，首先鎖定鐮形血球貧血症。

主要研發單位：

CRISPR Therapeutics、Editas Medicine、
Precision BioSciences、Vertex Pharmaceuticals

成熟期：現在

第一個基因編輯療法來了！病患心存感激，稱它「徹底翻轉人生」。

短短11年前，科學家研發出強大的DNA剪輯技術，稱為CRISPR，如今這項技術已走出實驗室，能夠實際用於治療鐮形血球貧血症。

之所以罹患鐮形血球貧血症，是因為從父母雙方同時遺傳到變異的血紅素基因，症狀包括劇烈疼痛，患者平均壽命只有53歲。美國每4千人有1人得病，幾乎全數是非裔民眾。

鐮形血球貧血症是如何成為首個CRISPR成功案例的？生物學的巧合是原因之一。人體還有另一種方法可以製造血紅素，只是出生時關閉了。研究人員發現，只要在骨髓細胞進行簡單的DNA編輯，就能重新開啟機制。

許多CRISPR療法處於實驗階段，但在2022年，位於美國波士頓的福泰製藥（Vertex Pharmaceuticals）率先將相關療法送審核准，便是鎖定鐮形血球貧血症。骨髓細胞經過剪輯後，自願參加試驗的患者幾乎全數不再疼痛。

這固然是好消息，但治療費用預計動輒200到300萬美元。此外，福泰製藥短期並沒有在非洲推出的計畫，偏偏鐮形血球貧血症在非洲最為常見，而且仍會奪走幼童性命。

該公司指出，這是因為療程過於複雜，患者必須住院，而醫生必須取出骨髓、編輯細胞，再植回人體。對於仍舊無法因應基本醫療需求的國家，這項手術仍舊太過先進，未來有待更簡單、更便宜的CRISPR療法問世。—瑞加拉多（Antonio Regalado）

3

熱泵技術

熱泵是行之有年的技術，如今在減碳領域出現實質進展，住家、建築大樓，甚至製造業都可望受惠。



主要研發單位：大金、三菱、Viessmann
成熟期：現在

熱泵時代來臨！

熱泵設備以電力供應冷氣或暖氣。許多建築目前的暖氣系統仍採用化石燃料，又以天然氣為主流。若能改用以再生能源為電力來源的電熱泵，有助於住家、辦公室，甚至是製造工廠大幅降低碳排。

熱泵從20世紀中葉便已應用於建築，但相關技術如今出現新突破。2022年熱泵空調全球銷量成長11%，連續第二年達10位數增幅（然2023年成長力道可能放緩）。歐洲的轉變最大，2022年熱泵裝置數量激增40%，主要是因為俄烏戰爭引

爆能源危機，歐洲各國亦設法降低對天然氣的依賴。

亞洲是另一個成長亮點，中國的裝置數量領先全球，而中國與日本亦合占2010年以來熱泵技術新專利申請數逾半。新型熱泵能夠加溫到更高溫度，因此可望供電產生用於食物加工與造紙的蒸氣，進而降低工業生產的碳排。

熱泵有機會在2030年前降低全球碳排達5億噸，相當於歐洲目前的汽車總碳排。要做到這點，熱泵裝置數量必須在2030年前達6億台左右，形同全球所有建築約兩成的供熱需求。

熱泵技術未來仍舊面臨重大考驗，包括必須擴大產能，因應逐漸攀升的需求，也要確保電網夠強大，足以供電到其他氣候友善技術。但從種種跡象來看，熱泵技術正要步入全盛期。

—柯朗哈（Casey Crownhart）

4

推特殺手

數百萬人棄守「鳥地方」，湧入去中心化的社群媒體服務。

主要研發單位：

Bluesky、Discord、Mastodon、Nostr、Threads

成熟期：現在

有長達17年的時間，推特是全球對話的重鎮，內容或喧鬧或繁雜或暴躁，時而有趣時而嚇人，永

市場一直沒有實力相當的競爭對手，
因為大家沒有離開推特的強烈理由，
也沒有其他服務可用。如今這兩個理由都成立。

遠沒有中斷的一刻。想及時掌握生活大小事和熱門話題，推特是社群媒體霸主。

但馬斯克（Elon Musk）買下推特後，重新更名為「X」、開除大多數員工，還在一定程度上取消了審核與驗證系統。他訂下新的財務結構，卻變相鼓勵了創作者散播與放大謊言與外宣。許多人已開始另尋其他選項，最好是有一種能不受任何個人控制的服務。

在去中心化、「聯邦式」（federated）社群媒體裡，伺服器主機或平台獨立運作，但透過ActivityPub、AT Protocol、Nostr等網通協議彼此溝通。這類社群媒體的審核更精細、更能避免企業主或政府審查單位的一時興起，也有機會掌握自己的社交圖譜，甚至轉換伺服器後還能追蹤同樣一群人。

多年來，不少人期盼市場出現有如推特的去中心化服務，許多業者嘗試過都無疾而終，App.net與Identi.ca是最著名的例子。市場一直沒有出現實力相當的競爭對手，因為大家沒有離開推特的強烈理由，即使離開了，也沒有其他服務可用。如今這兩個理由都成立。

根據網站分析平台Similarweb，X的流量較去年同期萎縮近兩成。市場研究公司Apptopia的研究亦指出，X的每日活躍用戶人數從1.41億人降至1.2億人。相較之下，去中心化服務如Mastodon、Bluesky與幾家Nostr用戶端程式的人氣飆漲。不過，Meta旗下的Threads才是最大贏家。Meta在9月透露Threads每月使用人數將近1億人（截至本刊發稿前，Threads尚未採用ActivityPub協議，但承諾會導入）。宅男宅女最愛的Mastodon遠遠位居第二，活躍用戶人數達150萬人，但逐漸增加。仍舊只採邀請制的Bluesky，使用AT Protocol協

議，有200萬名用戶。

話說回來，真正的推特殺手是誰？正是馬斯克自己。
—霍南（Mat Honan）

5

增強型地熱系統

拜進階鑽探技術之賜，地熱能可望在更多應用領域發揮潛力。

主要研發單位：

AltaRock Energy、Fervo Energy、
Utah FORGE lab

成熟期：3到5年

地熱是一種儲量豐富的無碳能源，可以取代化石燃料，也不會因為天氣或每日早晚而變化。然而，傳統地熱發電廠必須搭配特定的地質條件，特別是需要具有水源的透水岩。

有鑑於此，地熱能只占全球再生能源產能的不到1%。所幸，有項新興技術可望進一步利用就在我們腳下的熱能。

增強型地熱系統自1970年代以來發展至今，近期技術進展有成，新型系統可望大幅提升再生能源產能。費沃能源（Fervo Energy）在2023年選在美國內華達州測試一款系統，結果證實具有商用價值。該公司目前正在猶他州興建另一座新廠，目標在2026年前穩定供應潔淨電力。

有了增強型地熱系統，相關企業能夠在新地點

地熱能只占全球再生能源產能的不到1%。

所幸，有項新興技術可望進一步利用就在我們腳下的熱能。



取得地熱。受到石油天然氣產業廣泛採用的水力壓裂技術，目前也用於裂解相對堅固的岩石，而且比現行地熱鑽井更深許多。接著是將水注入岩石，產生蒸氣，進而驅動渦輪機發電。

此外，費沃能源希望借重增強型地熱技術，研發出可以連通電網的大型地下電池。透過累積或釋放鑽井的壓力，該公司可以在需求較低時儲存電力，需求攀升時增加發電。

這項技術並非沒有潛在風險，尤其是水力壓裂技術對地震活動的影響，科學界尚無定論。儘管有些人認為地震風險很小，但南韓在2017年大地震後調查發現，原因與一座增強型地熱發電廠難脫關係。

另外幾家企業與實驗室正在推動相關試辦計畫與研究。位於華盛頓州的AltaRock Energy，正在研發能夠鑽探極高溫岩石的特殊技術，預計得以大幅提升能源產量。接受美國能源部資助的Utah FORGE，則正在開挖新井，未來將用於測試增強型地熱技術。許多相關計畫仍在實驗階段，但愈來愈能確定的是，增強型地熱是能源產業此刻的熱門話題。

—金俊（June Kim）

6

減重新藥

效果顯著的新型減重藥大受歡迎，但對健康的長期影響仍是未知數。

主要研發單位：

禮來、諾華、諾和諾德、輝瑞、

Viking Therapeutics

成熟期：現在

美國成年民眾有三分之一人口過重，罹患心臟病、糖尿病、癌症的風險較高。包括Wegovy與Mounjaro在內的新型減重藥，有助於打擊這場健康危機。打開Reddit與TikTok等網路平台，到處可見減重成功案例。市面上的高人氣減重藥當中，有兩款便出自藥廠諾和諾德（Novo Nordisk），公司利潤一路長紅，藥局也常常供不應求。

這類減重藥的原理在於抑制食慾，其中大多數原本以治療第二型糖尿病為主，但Wegovy在2021年6月獲准用於減重，成為2014年以來首例。Wegovy與Ozempic（糖尿病藥物，但經常開藥用於減重）都含有Semaglutide，這種活性成分模仿腸道在飯後釋放的一種荷爾蒙，產生飽足感。患者每周在家注射一次，能夠減去約12%到15%的體重，不過許多人後來就進入停滯期。

新型減重藥並非萬靈丹，常見副作用包括噁心、腹瀉、嘔吐等。許多患者必須終生用藥，才能避免復胖，而且這些藥物的長期影響仍是未知數。此外，新型減重藥的價格不菲，每個月要1千美元以上，多數保險並不支付減重用途。

儘管如此，新型減重藥可望改善數百萬民眾的健康，有些研究甚至指出能減緩心臟衰竭的症狀。目前有幾十家企業正在研發次世代減重藥，其中有幾個採口服形式。

2023年11月，美國食品藥物管理局（FDA）核准禮來（Eli Lilly）的糖尿病藥物Zepbound用於減重。目前研發中的減重新藥約有70款，其中6款正在等待審核。展望2024年，預計有更多企業的試驗進入最終階段，尋求核准上市，因應飆漲的市場需求。

—桑尼（Abdullahi Tsanni）

7

小晶片

晶片廠力求延長摩爾定律壽命，紛紛看好體積更小、功能更專精的晶片。

主要研發單位：

超微、英特爾、

Universal Chiplet Interconnect Express

成熟期：現在

封裝聽來無趣，卻是電腦系統製程不可或缺的一環，如今拜技術進展之賜，企業正在定義新一代電子產品的樣貌。

過去幾十年，晶片廠不斷縮小電晶體體積，在晶片塞進更多電晶體，進而提升晶片性能，形成所謂的「摩爾定律」。但這股趨勢逐漸式微，現在的高科技產業需要複雜晶片，進一步縮小電晶體與製造晶片的成本龐大。

有鑑於此，晶片廠逐漸轉向體積較小、模組化較高的「小晶片」（Chiplet），這種晶片旨在執行特定功能（例如儲存數據或處理訊號），也能互相連結而組成一套系統。晶片體積愈小，出現瑕疵的機率愈低，因此能夠降低生產成本。

包括超微（Advanced Micro Devices）與英特爾（Intel）在內的晶片廠，銷售小晶片系統已經多年，但小晶片能否發揮助攻效果，讓晶片產業

維持摩爾定律的效能提升速度，必須仰賴封裝技術，也就是把小晶片並排或堆疊起來，在彼此之間形成快速又高頻寬的電路連結，以塑膠保護膜包覆。

晶片廠目前仍在設法找到成本與效能的平衡點。美國在2022年通過金額高達527億美元的《晶片法案》（CHIPS Act），旨在扶植國內晶片產業，其中110億美元將用於「先進半導體」研究，另計畫成立「國家先進封裝製造計畫」（National Advanced Packaging Manufacturing Program），促進產學合作。

缺乏封裝技術標準，是小晶片目前不易提升採用率的原因，但這點正在轉變，因為晶片產業逐漸採取稱為「通用小晶片互連」（Universal Chiplet Interconnect Express）的開源標準。有了共通標準，不同晶片廠的小晶片理論上更容易整合，業者更能靈活布局人工智慧、航太、汽車等快速變遷的領域。

—歐科特（Mike Orcutt）

8

超高效率太陽能電池

新型太陽能電池結合傳統矽晶與先進鈣鈦礦，可望將太陽能板的效率提升到新高。

主要研發單位：

Beyond Silicon、Caelux、First Solar、
韓華Q Cells、Oxford PV、Swift Solar、
Tandem PV

成熟期：3到5年

2023年11月，有項太陽能技術的效率再創世界新高，備受注目，打下只保持了約5個月的紀錄，但這項新紀錄恐怕也維持不久。效率能有驚



人成長，主要是拜一項次世代太陽能技術之賜，亦即鈣鈦礦串疊型太陽能電池。這類電池在傳統矽晶上堆疊擁有同樣獨特晶體結構的材料。

過去10年，科學家持續試驗鈣鈦礦太陽能技術，轉換效率亦不斷打破紀錄，亦即有多少陽光能轉換成電池電能。鈣鈦礦電池所吸收的光波長不同於矽電池，後者占目前太陽能市場的95%。矽晶與鈣鈦礦在串疊型太陽能電池共同運作時，能夠利用更多太陽光譜，每個電池得以產生更多電力。

矽晶電池的技術效率最高不到30%，而全鈣鈦礦電池的實驗效率約26%，但鈣鈦礦串疊型太陽能電池在實驗室效率已超過33%。這項技術的前景令人期待，倘若大規模部署，預計能比傳統太陽能電池生產更多電力，成本亦更低。

然而，鈣鈦礦電池的部署不易。矽晶太陽能電池的壽命長達數十年，反觀在室外測試過的鈣鈦礦串疊型太陽能板仍屬少數。

礙於鈣鈦礦的電化學組成，這類太陽能板容易吸附水氣，在高溫下也容易受損，但研究人員持續努力，希望為太陽能板研發出更好的阻隔層，並改用更穩定的鈣鈦礦化合物。

2023年5月，英國牛津光伏（Oxford PV）指出，旗下商用規模的鈣鈦礦串疊型電池已達28.6%的轉換效率，面積亦遠大於測試用電池。該公司計畫在2024年推出第一款太陽能板，並擴大產能。其他業者亦可望過幾年推出類似產品。

—莫辰特

（Emma Foehring Merchant）

9

蘋果Vision Pro

有機微發光二極體（micro-OLED）技術已經發展逾10年，如今隨著Vision Pro問世，它的能見度將高於以往。

主要研發單位：蘋果

成熟期：2024年

頭戴式裝置的失敗案例不勝枚舉，Google眼鏡、微軟HoloLens，甚至是Meta的Quest系列，全都雷聲大雨點小。如今換蘋果以Vision Pro試試身手。

蘋果計畫在2023年底開始出貨這款旗下的第一款頭戴式裝置。它能否熱賣還是未知數，但無疑代表技術上的一大突破，性能大幅優於其他既有產品。

蘋果在6月的年度開發者大會首度展示Vision Pro，稱之為「空間電腦」，宣稱可以提升生活體驗，包括觀賞電影、瀏覽照片、與他人互動，甚至是閱讀與創作。

不同於虛擬實境，混合實境將數位內容疊加到真實世界的環境。內建相機與感測器捕捉室內動態，重現於兩個螢幕，一眼各一個。裝置接著加入你所選擇的數位內容，例如衝浪影片，再虛擬投影在正前方。

Vision Pro採用兩個micro-OLED顯示器，解析度與對比度大幅高出多數虛擬實境裝置的液晶顯示器，除了呈現混合實境之外，還能提供前所未見的沉浸式體驗。

但有個關鍵問題有待回答：大家會拿它做什麼？蘋果旗下有許多現成的應用程式可供使用，開發人員也能自創，但Vision Pro會淪為只是拿來觀看影片的奢侈裝置嗎？其次，真的會有人願意戴嗎？蘋果在前螢幕添加了虛擬眼睛，可以顯示出使用者的視線方向，但在6月的開發者大會上，蘋果只秀出展示影片。虛擬眼睛實際上看起來是逼真、還是奇怪？此外，Vision Pro要價3,499美元，價格比其他頭戴式裝置高出幾千美元。

儘管如此，蘋果多年來研發與行銷消費型科技產品有成，非其他企業所能比。在蘋果的投資下，混合實境可能總算有機會掀起熱潮。—諾卓恩（Amy Nordrum）

「前沿」超級電腦每秒的運算能力媲美10萬台筆電。

10

百萬兆級電腦

每秒能夠運算100京次的超級電腦，正在拓展科學家所能模擬的極限。

主要研發單位：

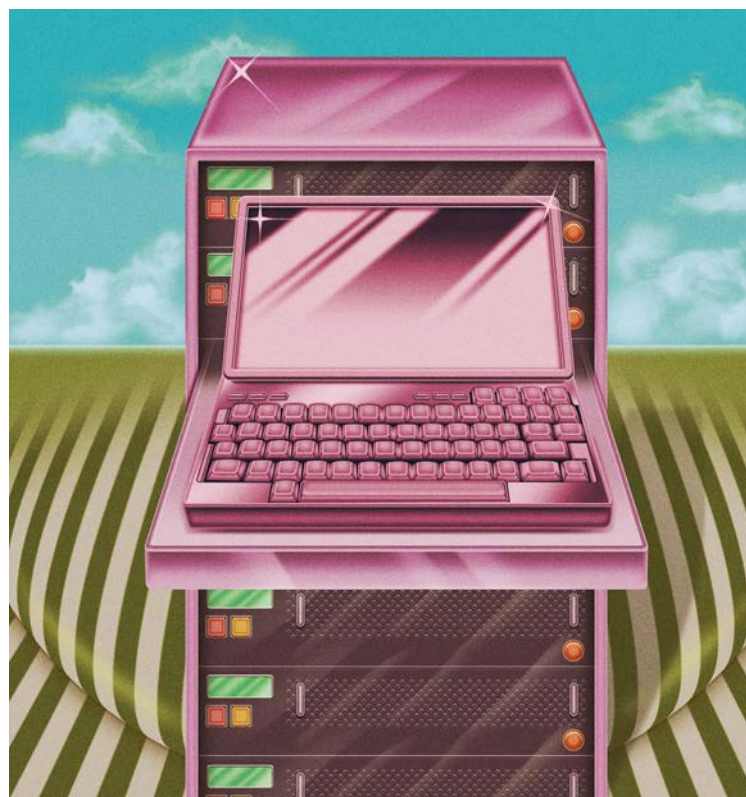
橡樹嶺國家實驗室、Jülich Supercomputing Centre、中國國家超級計算無錫中心

成熟期：現在

2022年5月，全球超級電腦排名因為「前沿」（Frontier）的登場而大洗牌。它現在是全球最快的超級電腦，每秒可達100京（10的18次方）次浮點運算，也就是Exaflop，等於每秒運算能力媲美10萬台筆電。

位於美國田納西州的橡樹嶺國家實驗室（Oak Ridge National Laboratory）推出前沿後，正式開啟百萬兆級運算元年。還有幾個百萬兆級電腦很快會加入陣容。美國的研究人員正在安裝2台超級電腦，運算速度比前沿快1倍，一個是加州勞倫斯利佛摩國家實驗室（Lawrence Livermore National Laboratory）的El Capitan，一個是伊利諾州阿岡國家研究所（Argonne National Laboratory）的Aurora。Jupiter是歐洲的第一台百萬兆級超級電腦，預計在2024年底啟用。中國據傳也有百萬兆級超級電腦，但尚未公布標準指標測試的結果。

科學家與工程人員摩拳擦掌，希望透過這些超級電腦推動眾多領域的發展。天文物理學家已經在使用前沿模擬銀河系內外的氣體流動，不只模擬大如銀河系的移動，也能聚焦在爆炸的新星。從這



個應用可以看出超級電腦的特性，能夠同時以多種規模模擬物體。

進展不會到此止步。過去30年，超級電腦的速度每4年左右就增加約10倍。次世代超級電腦已經在醞釀當中：橡樹嶺國家實驗室正在研發一款超級電腦，運算速度是前沿的3到5倍，預計在未來10年推出。

不過，能源足跡仍舊是一大挑戰。前沿雖然已經採取節能的創新技術，但閒置時仍舊需要龐大電力，足以供電給幾千戶住家。工程人員打造這些巨無霸時，除了考量速度之外，恐怕還要設法兼顧環境永續性。

—陳索妃（Sophia Chen）