



量子科技專利趨勢分析——量子計算與量子感測

林韋廷^{*}、黃同慶^{**}、范士隆^{***}

壹、前言

貳、量子計算

一、量子計算技術概述與分類

二、量子計算專利趨勢分析

參、量子感測

一、量子感測技術概述與分類

二、量子感測專利趨勢分析

肆、結語

* 作者現為經濟部智慧財產局專利二組專利助理審查官。

** 作者現為經濟部智慧財產局專利二組專利審查官。

*** 作者現為經濟部智慧財產局專利二組專利助理審查官。

本文相關論述僅為一般研究探討，不代表任職單位之意見。

摘要

量子科技近年來成為最熱門的新興科技，其利用量子力學的特性在計算、通訊，以及感測等技術領域中掀起了顛覆性的革新並展現出傳統技術所無法比擬的突出效能。在計算及感測技術領域中，量子科技以其強大的計算速度及量測精度，一躍成為如氣候、交通、金融、生物醫療，以及國防等許多國家重要議題的關鍵技術，其技術的研發投入亦成為世界各國爭相發展的目標。本文中對量子計算與量子感測進行技術介紹及專利趨勢分析，藉由專利申請趨勢分析了解各別技術主題當前的國際發展態勢以及研發重心，以作為我國在量子計算與量子感測上研發布局的參考依據。

關鍵字：量子疊加、量子糾纏、量子干涉、量子計算、量子電腦、量子感測、專利分析

quantum superposition、quantum entanglement、quantum interference、
quantum computing、quantum computer、quantum sensing、patent analysis

壹、前言

量子科技以量子特性作為技術原理，產生傳統技術所無法比擬的突出效能，近年來成為各國政府相競發展之項目，例如：美國於 2018 年通過「國家量子倡議法案（National Quantum Initiative Act）」，5 年內將斥資 12.75 億美元開展量子科技研究¹；中國大陸十三五以及十四五計畫中，皆將量子科技列入重點發展項目²；日本於 2018 年提出量子飛躍（Quantum Leap）計畫，將量子科技分為三大領域（量子資訊處理之計算與模擬、量子感測與傳輸、次世代雷射）進行研發³；歐洲斥資 10 億歐元為期 10 年的量子旗艦計畫（Q-Flagship），期望在量子通訊、量子模擬、量子感測以及量子電腦上，取得其在全球的前沿地位⁴，足見量子科技之重要性。

量子計算⁵，以量子位元（qubit）作為運算單位，憑藉量子疊加（Quantum Superposition）與量子糾纏（Quantum Entanglement）之特性，實現超高速運算，可以解決現今電腦無法解決之問題；另外量子感測，憑藉靈敏之量子特性，能夠量測現今感測器所無法偵測之微小訊號，由於其優異之計算速度及量測精度，量子計算以及量子感測將成為如氣候、交通、金融、生物醫療，以及國防等許多國家重要議題的關鍵技術。

本文對量子計算以及量子感測進行技術介紹及專利趨勢分析，以期藉由專利申請趨勢了解此二技術領域的主要發展方向及各國研發重心。本文專利趨勢分析係使用 Derwent Innovation 專利資料庫（下稱 DI 資料庫）檢索 2020 年 12 月 31 日前公開的全世界專利資料，以各領域的關鍵字進行檢索後，再以人工方式逐篇

¹ James Dargan, *15 Countries With National Quantum Initiatives*, THE QUANTUM INSIDER, <https://thequantuminsider.com/2021/04/29/15-countries-with-national-quantum-initiatives/> (last visited Feb. 5, 2022).

² MoneyDJ 新聞中心，量子技術續列陸十四五國家戰略 產業陷布局失衡挑戰，MoneyDJ 理財網，<https://www.moneydj.com/kmdj/news/newsviewer.aspx?a=bf73f944-d3ba-40a7-853b-6efc66741251>（最後瀏覽日：2022/05/23）。

³ Japan Science and Technology Agency, *MEXT - Quantum Leap Flagship Program(MEXT Q-LEAP)*, <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/en/index.html> (last visited Feb. 5, 2022).

⁴ 賴志遠，歐盟量子科技推動簡介，Research Portal 科技政策觀點，<https://portal.stpi.narl.org.tw/index?p=article&id=4b1141427395c699017395c756b31fc5>（最後瀏覽日：2022/02/05）。

⁵ 本文將量子科技分為量子計算、量子感測及量子通訊三大領域；另外，本文多處所載「量子電腦」係指以量子計算為運算模式之裝置。

閱讀專利摘要以選出與技術主題相關的案件進行分析，資料總數量子計算近 4,000 件以及量子感測 1,000 餘件（相同的 INPADOC 專利家族⁶計為 1 件）。本文中的專利分析圖表係以同專利家族的案件計為 1 件進行統計分析，避免因同一專利跨國申請而造成數據失真，使研究數據更能反應實際發明的數量；然而，於受理專利申請之前十大專利局／專利組織的分析圖中，係以統計個別專利局／專利組織實際的申請數進行分析。

貳、量子計算

從 1981 年，物理學家理查·費曼（Richard Feynman）在一篇「以電腦模擬物理（simulating physics with computers）」之文章，提出了量子電腦的概念⁷，至今已 40 餘年，由於許多科學家的努力，量子計算目前得以迅速地發展。2019 年已有研究團隊實現，對於特定演算法，超級電腦需花費 1 萬年的運算時間，量子電腦花費 200 秒即運算完成，宣示量子霸權（Quantum Supremacy）時代的來臨⁸。另外，隨著半導體元件尺度不斷地縮小，量子穿隧效應（Quantum Tunneling Effect）將帶來無可避免地漏電流而降低積體電路的效用，於是摩爾定律（Moore's Law）⁹瓶頸的到來以及半導體研發成本逐漸地提高，也使得各大半導體公司提早布局不同於傳統電腦計算模式的量子計算¹⁰。本章首先介紹量子計算，並參考學術論文輔以 DI 資料庫檢索結果對量子計算做技術分類，最後分析量子計算專利趨勢。

⁶ 國際專利文獻中心（International Patent Documentation Center, INPADOC）專利資料庫定義任何透過優先權主張而與某基礎專利有直接或間接連結的所有專利，即形成一 INPADOC 專利家族，詳見：王俊傑，專利家族 Patent Family，國家教育研究院 雙語詞彙、學術名詞暨辭書資訊網，<https://terms.naer.edu.tw/detail/1678925/>（最後瀏覽日：2022/05/23）。

⁷ Richard P. Feynman, *Simulating physics with computers*, 21 Int. J. Theor. Phys. 467, 474-476 (1982).

⁸ Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al., *Quantum supremacy using a programmable superconducting processor*, 574 Nature 505, 505 (2019).

⁹ 維基百科，摩爾定律，<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%91%A9%E5%B0%94%E5%AE%9A%E5%BE%8B>（最後瀏覽日：2022/02/12）。「由英特爾（Intel）執行長大衛·豪斯（David House）提出：預計 18 個月會將晶片的效能提高一倍（即更多的電晶體使其更快），是一種以倍數增長的觀測」。

¹⁰ 翁書婷、陳君毅、高敬原，量子電腦是什麼？一文詳解讓 Google、Intel、IBM 與微軟都趨之若鶩的關鍵技術，數位時代，<https://www.bnext.com.tw/article/54171/quantum-computer-google-intel-ibm>（最後瀏覽日：2022/04/20）。

一、量子計算技術概述與分類

量子電腦憑藉量子特性實現超高速運算，將有助於解決傳統電腦無法處理之應用問題。量子計算有別於傳統電腦運算模式，以量子位元作為基本運算單元，使用量子疊加與量子糾纏之特性進行運算。傳統電腦進行數位運算時，單一位元在同一時間只能代表 0 或 1，然而量子計算利用量子疊加特性，單一量子位元可以同時代表 0 跟 1¹¹。當需要同時存取 0~7 這 8 個數字時，傳統電腦需要 24 個位元¹²，量子計算僅需 3 個量子位元即可同時表達。隨著需要存取的資訊量越多，量子計算相較於傳統電腦計算模式之優勢將更加顯著，因為它意味著用更多的量子位元組成的暫存器（Register），其存儲量子資訊的速度呈指數增加¹³。另外，量子糾纏，將多個量子位元關聯在一起實現平行運算，再搭配量子位元疊加之特性，一台 32 個量子位元的量子電腦，其計算能力相當於數十億部傳統電腦作平行運算，足見量子計算能力為傳統電腦所望塵莫及¹⁴，也因此量子電腦能夠解決許多傳統電腦無法解決的問題，當中包含了能夠比傳統電腦更快分類出平衡函數與常數函數的 Deutsch-Jozsa 演算法¹⁵、計算速度指數倍於傳統電腦並於可期待時間內破解現今普遍使用的 RSA 加密技術的 Shor 演算法¹⁶以及比傳統電腦更快速計算出最佳路徑解的 Grover 搜索演算法¹⁷。甚至未來量子電腦有機會應用在量子機器學習、交通物流上最佳化的問題、新藥物材料開發之模擬計算、金融上風險管理及投資組合優化、天氣預測等。

理論上，量子計算利用量子疊加與量子糾纏實現高速平行運算，在實踐上，2000 年 IBM 研究員大衛·迪文森佐（David DiVincenzo）對於一個物理系統是否能作為量子電腦列出了五點基本要求¹⁸：

¹¹ 張為民，量子資訊科學：可能成為二十一世紀工業發展的核心，自然科學簡訊第十五卷第四期，頁 120，2003 年 11 月。

¹² 0(000)、1(001)、2(010)、3(011)、4(100)、5(101)、6(110)、7(111)，每組三位元，8 組共 24 個位元。

¹³ 張為民，同註 11，頁 120。

¹⁴ 同前註。

¹⁵ 郭國平、陳昭昀、郭光燦，量子計算與編程入門，頁 100-115，科學出版社，2020 年 5 月第一版。

¹⁶ 同前註，頁 205-250。

¹⁷ 同前註，頁 115-118。

¹⁸ David P. DiVincenzo, *The Physical Implementation of Quantum Computation*, arXiv:quant-ph/0002077v3 1, 2-6 (2000).

- (一) 具有良好特徵之可擴展性量子位元系統 (A scalable physical system with well characterized qubits)。可擴展性 (Scalability)，意指對於一特定計算之需求，能夠製造盡可能多的暫存器¹⁹；良好特徵，例如，能夠明確了解規範量子位元狀態的哈密爾頓運算子 (Hamiltonian Operator)、量子位元系統之間具有耦合的現象或者能夠產生用以控制量子位元狀態的外加磁場或電場等。
- (二) 能夠將量子位元的狀態初始化為簡單的基準狀態，例如 $|000\dots\rangle$ (The ability to initialize the state of the qubits to a simple fiducial state, such as $|000\dots\rangle$)。在結束演算法之運算後，量子位元狀態必須初始化為基準狀態以提供下一演算法之運算需求而能持續地運算下去。
- (三) 量子位元之退相干時間 (Decoherence Time，不受外界干擾所持續的時間) 要比量子邏輯閘運作時間長許多 (Long relevant decoherence times, much longer than the gate operation time)，如此才能保證量子位元於執行運算期間，不受外界干擾而保持適於量子計算的狀態甚至可以進行有效的錯誤更正。
- (四) 具有一套通用的量子邏輯閘 (A “universal” set of quantum gates)，用以控制單量子位元、雙量子位元甚至多量子位元而實現量子演算法。
- (五) 對特定量子位元測量的能力 (A qubit-specific measurement capability)，不只是能夠被測量，而是在有限的量子位元數下，系統具有足夠的可靠性，在經過錯誤更正後仍能具有一定程度以上的測量準確率。

目前存在許多可實現量子計算之量子電腦模型²⁰，包括：量子圖靈機 (Quantum Turing Machine)、量子電路 (Quantum Circuit)、絕熱量子計算 (Adiabatic Quantum Computation)、單向量子計算 (One-way Quantum Computation) 等，而能夠進行錯誤更正之容錯量子計算 (Fault-tolerant Quantum Computation) 係目前

¹⁹ Travis S. Humble, Himanshu Thapliyal, Edgard Muñoz-Coreas, Fahd A. Mohiyaddin and Ryan S. Bennink, *Quantum Computing Circuits and Devices*, 36 Issue: 3 IEEE Design & Test 69, 72(2019). “Scalability implies a manufacturing capability to fabricate and layout as many register elements as needed for a specific computation.”

²⁰ Wikipedia, *Quantum computing*, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_computing (last visited Feb. 12, 2022).

量子電腦發展的遠程目標。量子計算易受雜訊之影響，故於運算過程中存在錯誤率，需要執行錯誤更正（Error Correction）來彌補計算上的誤差。以表面錯誤更正碼（Surface Code）為例，在系統錯誤率 1% 情形下，每 1 個參與實際運算之量子位元需要 13 個量子位元用於錯誤更正而無法參與計算；對於執行複雜的演算法，估計總共需要 1,000~10,000 個量子位元²¹。然而目前業界僅能做到幾百個量子位元系統，故現今量子計算發展狀態正處於未進行錯誤更正之中等雜訊（Noisy Intermediate Scale Quantum, NISQ）階段並在該階段研究新的演算法及應用²²。至於具有錯誤更正功能並可執行複雜演算法的容錯量子計算之通用量子電腦²³係為各大企業及學術研究者的遠程目標。在符合大衛·迪文森佐所列五點基本要求之下為達到容錯量子計算，運算錯誤率持續降低及增加量子位元數目，是目前量子計算的技術進程方向。

綜上，本文將量子計算技術分類於圖 1 所示。藉由檢索後之專利資料發現，**量子電腦模型**以量子電路以及絕熱量子計算最多。量子電路目前有許多平台呈現百家爭鳴，主要包括：超導體、半導體量子點、光子、拓撲、中性原子，以及離子阱等；絕熱量子計算以量子退火（Quantum Annealing）研究最多。量子計算專利中除量子電腦模型之外，還包含不侷限於應用在特定量子電腦模型的**通用量子技術**，其技術內容包括量子位元製備、量子電路處理、量子位元控制、量子狀態測量、錯誤更正、量子計算程式編輯、量子電腦與傳統電腦協同運作及量子演算法之應用等技術。

²¹ Austin G. Fowler, Matteo Mariantoni, John M. Martinis, and Andrew N. Cleland, *Surface codes: Towards practical large-scale quantum computation*, 86 Phys. Rev. A 032324-1, 032324-1 (2012).

²² 王志揚、陳啟東，【專欄】量子計算與量子電腦，中研院訊，<https://newsletter.sinica.edu.tw/23528/>（最後瀏覽日：2022/02/12）。

²³ 宇津木健，圖解量子電腦入門，頁 24，臉譜出版社，2020 年 11 月 5 日初版。

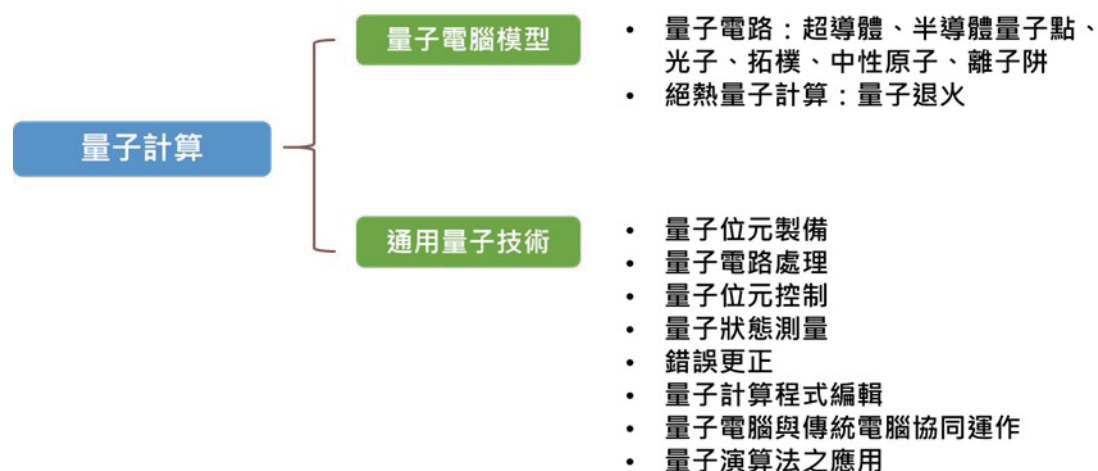


圖 1 量子計算技術分類²⁴

二、量子計算專利趨勢分析

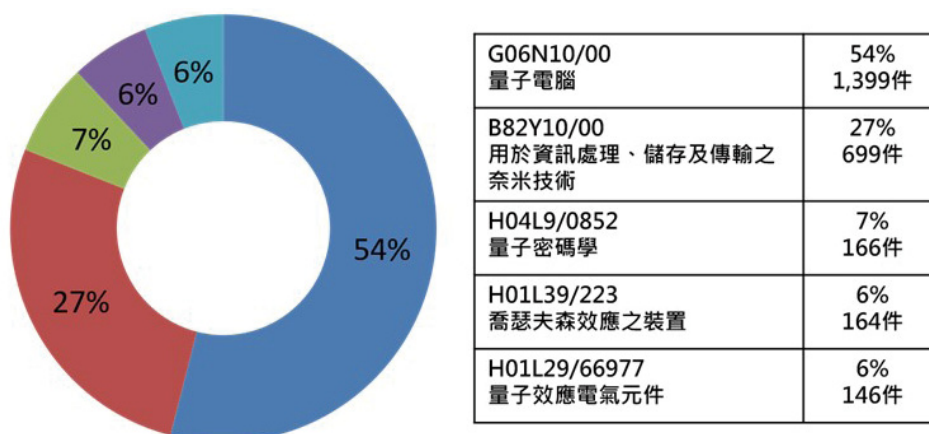


圖 2 量子計算專利 CPC 分類號圓環圖

²⁴ 本文所示圖表，除另有標註來源外，其餘均為自行繪製而成。

量子計算 CPC 分類號分析結果如圖 2 所示，占比最高為 G06N10/00（量子電腦），占 54%；次高為 B82Y10/00（用於資訊處理、儲存及傳輸之奈米技術，例如：量子電腦），占 27%，顯示量子電腦及其內部元件之製造與奈米技術有關；第三高為 H04L9/0852（量子密碼學）占 7%，顯示量子計算之應用與密碼學相關，第四～第五高為 H01L39/223（喬瑟夫森效應之裝置）以及 H01L29/66977（量子效應電氣元件），皆占 6%，說明量子電腦模型中申請量最多的超導體²⁵即係利用許多喬瑟夫森效應（Josephson Effect）產生之非線性振子作為量子位元之量子效應電氣元件。

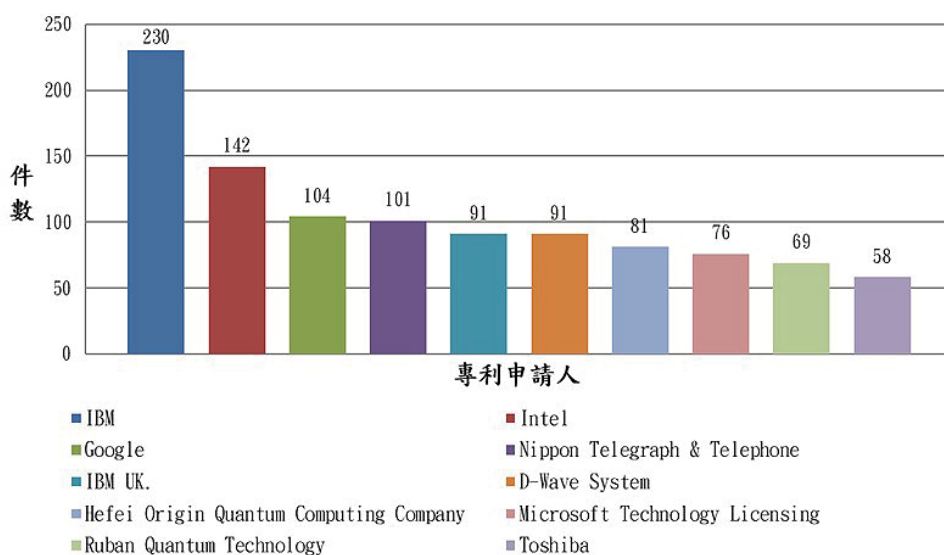


圖 3 量子計算專利申請量前十大申請人

圖 3 為量子計算專利申請人分析。專利申請量排名前三皆為美國公司，分別是國際商業機器（IBM）、英特爾（Intel）以及谷歌（Google），這三大美國公司不僅為現今資訊電腦產業主宰者，更在量子計算專利布局上領先其他公司，足見美國在量子計算研發上所占之分量；第四與第十皆為日本公司—日本電信電話（Nippon Telegraph & Telephone）以及東芝（Toshiba）；英國國際商業機器（IBM UK.）與加拿大公司—D-Wave 系統（D-Wave System）並列第五，其中 D-Wave 系

²⁵ 量子電腦模型中以超導體之專利申請量最多，請參見圖 6 所示。

統專注於量子計算領域中的絕熱量子計算；第七與第九皆為大陸公司——合肥本源量子計算（Hefei Origin Quantum Computing）以及如般量子科技（Ruban Quantum Technology），可見與量子通訊領域不同²⁶，中國大陸申請人於量子計算專利布局上落後於美國申請人；第八為美國公司——微軟技術授權（Microsoft Technology Licensing）。

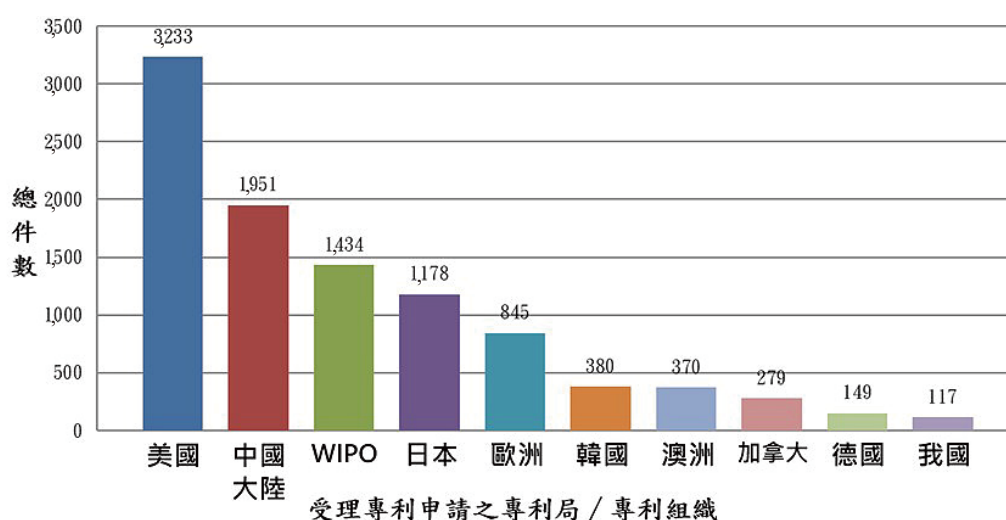


圖 4 受理量子計算專利申請之前十大專利局／專利組織

圖 4 為受理量子計算專利申請之前十大專利局／專利組織。從申請人選擇申請專利的國家或地區可以了解該專利技術於該國家中市場之競爭程度與重要性。量子計算專利申請量前兩大為美國及中國大陸，第三至第十依序為：WIPO、日本、歐洲、韓國、澳洲、加拿大、德國以及我國。於美國與中國大陸提出專利申請之數量總和超過於排名第三至第十專利局／專利組織提出申請量之總和，足見美國與中國大陸為申請人在量子計算專利布局上主要之市場。

²⁶ 參見陳繹安、廖家興，量子科技專利趨勢分析——量子通訊與後量子密碼，智慧財產權月刊 283 期，2022 年 7 月。

圖 5 為量子計算專利申請趨勢。量子計算專利申請量逐年提高，特別是從 2017 年開始，年增加量突破 100 件／年，說明了約在 2015 年開始，各公司不斷地在量子位元數目上及量子電腦硬體技術上相互競爭，突破技術瓶頸，例如：D-Wave 於 2013 年發布了 512 個量子位元的量子退火機，於 2015 年發布了超過 1,000 個量子位元的量子退火機，於 2017 年發布了 2,048 個量子位元的量子退火機和一個包含量子退火機軟體工具的開源存儲庫²⁷；IBM 於 2016 年發布 5 個量子位元之可程式化量子電腦²⁸，於 2017 年展示了一款具有 50 個量子位元的量子電腦，並可將其量子狀態保持 90 微秒²⁹，於 2019 年發布具有 53 個量子位元的量子電腦雲端上線服務³⁰，於 2021 年發布具有 127 個量子位元之量子計算晶片³¹；Google 於 2016 年與加州大學聖塔芭芭拉分校合作，利用量子電腦計算氫分子結構³²，於 2018 年 Google 發布了具有 72 個量子位元之量子晶片³³；2019 年 Google 於 Nature 期刊發布了利用 53 個量子位元並且花了 200 秒解決目前尖端超級電腦需要約 1 萬年才能計算出來的問題，宣示量子霸權之來臨³⁴。

²⁷ Wikipedia, *D-Wave Systems*, https://en.wikipedia.org/wiki/D-Wave_Systems (last visited Feb. 13, 2022).

²⁸ 郭國平、陳昭昀、郭光燦，同前註 15，頁 24。

²⁹ Wikipedia, *Timeline of quantum computing and communication*, https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_quantum_computing_and_communication (last visited Feb. 13, 2022).

³⁰ *Id.*

³¹ Philip Ball, *First quantum computer to pack 100 qubits enters crowded race*, nature NEWS, <https://www.nature.com/articles/d41586-021-03476-5> (last visited Feb. 13, 2022).

³² P.J.J. O'Malley et al., *Scalable Quantum Simulation of Molecular Energies*, 6 Phys. Rev. X 031007-1, 031007-1(2016).

³³ Wikipedia, *supra* note 29.

³⁴ Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al., *supra* note 8.

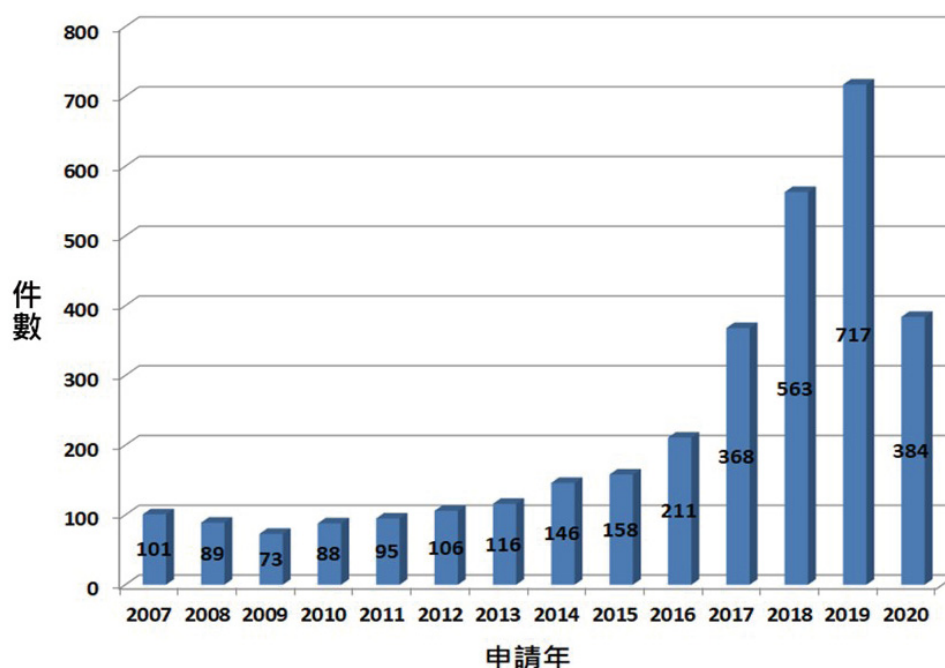


圖 5 量子計算專利申請趨勢³⁵

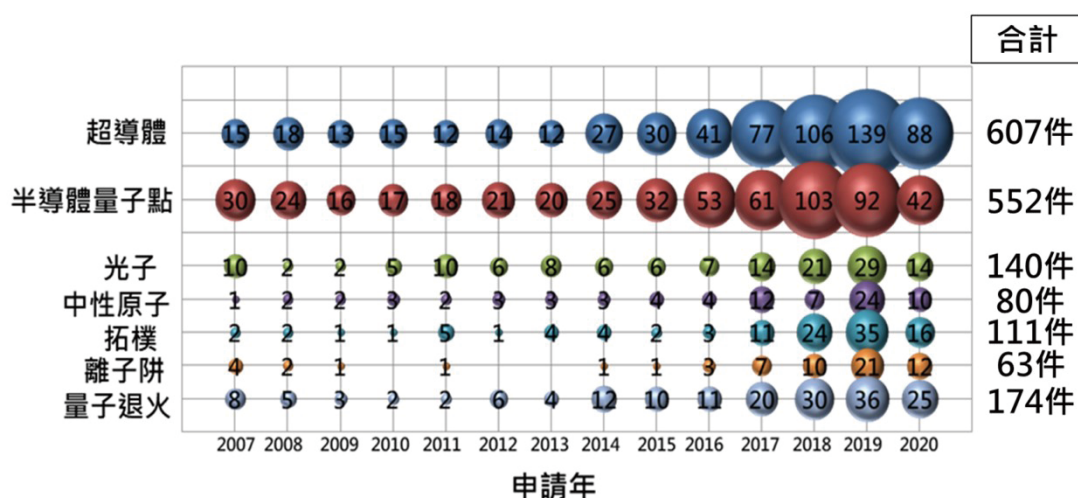


圖 6 量子電腦模型專利申請趨勢³⁶

³⁵ 本文蒐集 2020 年 12 月 31 日前公開之全世界專利資料，因專利有 18 個月早期公開的規定（自申請日或是最早優先權日起算），故 2020 年申請之專利有部分未公開而蒐集不完整，導致數量會下降。

³⁶ 2020 年數量下降之原因同前註。

圖 6 為量子電腦模型專利申請趨勢，圖中數字代表專利申請量。量子電腦模型中專利內容主要包含：超導體、半導體量子點、光子、中性原子、拓樸、離子阱及量子退火。而由圖 6 中可得知，量子電腦模型中超導體以及半導體量子點在申請量上以及申請趨勢上皆遙遙領先其他量子電腦模型，顯示兩者為目前量子電腦模型中專利布局較為競爭之領域。

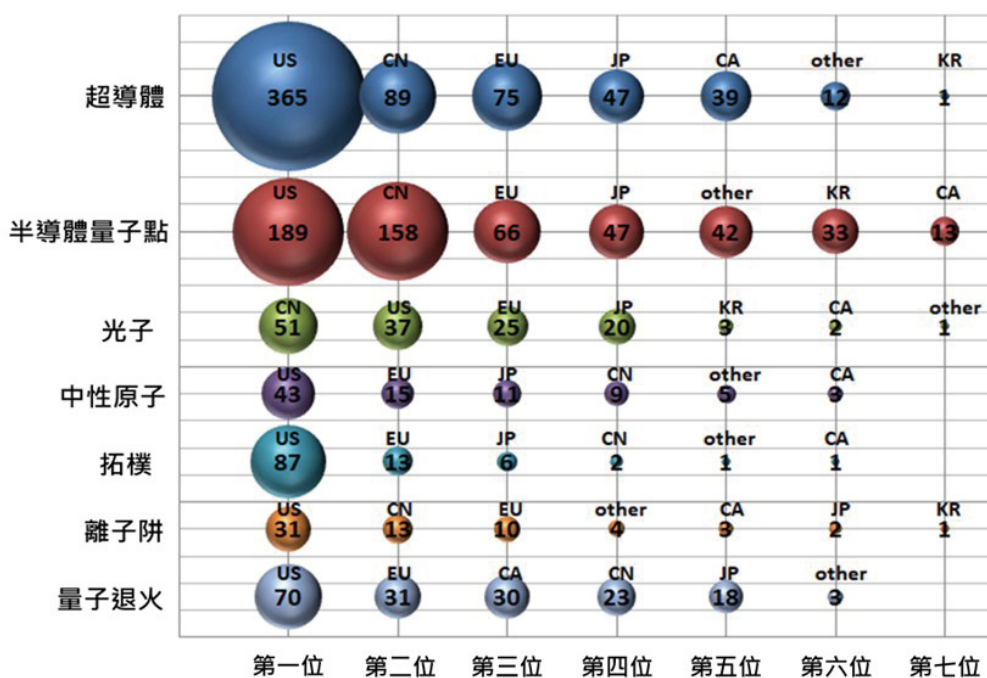


圖 7 量子電腦模型專利申請人國籍分析

圖 7 為量子電腦模型專利申請人國籍分析，圖中數字代表專利申請量，圖中針對特定國家列出數據資料，其餘以總括方式以 other 代表。除了光子類別外，所有量子電腦模型中，美國專利申請人申請量皆排名第一位，足見美國在量子電腦模型專利布局上之優勢。誠如傳統電腦早期，單從專利分析之角度思考，未來量子電腦發展漸趨成熟之時，美國公司將會是量子電腦的領先者。至於光子量子電腦模型申請量以中國大陸申請人為第一位，或許是因為中國大陸專注於研發布局量子通訊領域³⁷，而量子通訊主要係利用光子為量子位元來傳輸資訊，量子電

³⁷ 同前註 26。

腦模型中光子模型與量子通訊傳輸資訊較為相容，因此中國大陸專利申請人在光子量子電腦模型申請量上位居第一位。

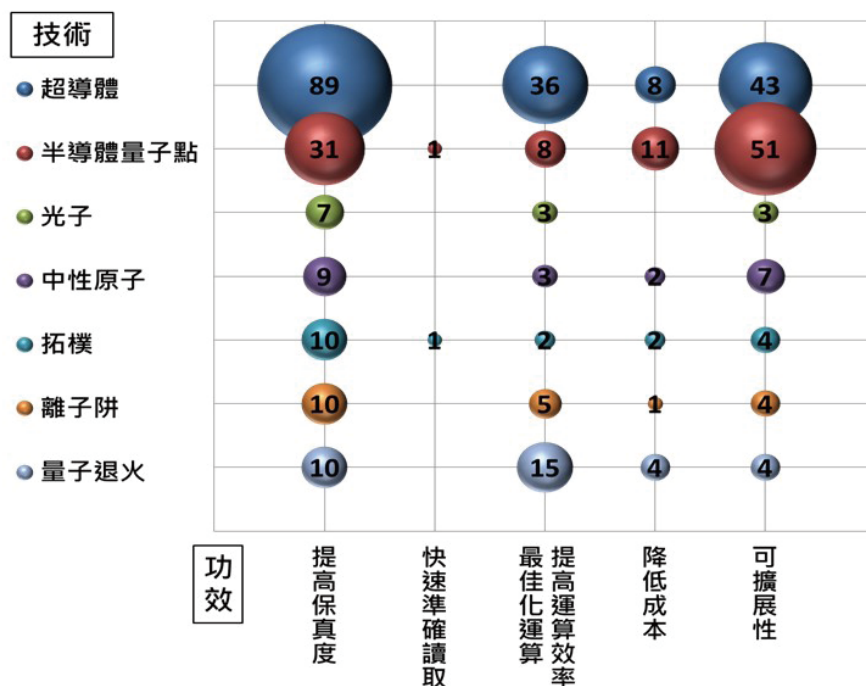


圖 8 量子電腦模型專利技術功效矩陣

圖 8 為量子電腦模型專利技術功效矩陣，圖中數字代表專利申請量。由圖 8 可知，「提高保真度³⁸」、「最佳化運算或提高運算效率」以及「可擴展性」為各量子電腦模型專利技術主要欲達成之功效。在執行複雜量子演算法時，對量子位元操作次數將大幅增加，同時錯誤率會不斷地累積進而影響運算結果，故必須進行錯誤更正來達到所謂的容錯量子計算。為了執行有效的錯誤更正，其關鍵在於「降低錯誤率」以及「增加量子位元數目以作為錯誤更正之使用」。從技術功效矩陣也可看出，「提高保真度」亦即量子邏輯閘在控制量子位元時能降低控制的錯誤率；「最佳化運算或提高運算效率」相當於減少運算所需的時間，讓量子位元在不受外界干擾之持續時間（Decouple Time）內能完成所需之運算，做更有

³⁸ 保真度表徵量子運算操作中，量子位元狀態實際結果與期望結果之差異，保真度越高差異越小，參見 L.H. Pedersen et al., *Fidelity of quantum operations*, 367 Phys. Lett. A 47, 47 (2007).

效、錯誤率更低之量子運算；「可擴展性」能夠擴充更多的量子位元數以作為錯誤更正之使用。量子電腦模型中各模型技術手段多數是朝著「提高保真度」、「最佳化運算或提高運算效率」以及「可擴展性」之功效方向，以期能夠進行複雜演算法之容錯量子計算。另外，降低成本為量子電腦模型所欲達成功效之第四順序考量，由此透露出，在技術研發漸趨完備並朝往商用化同時，考量成本效益漸為重要。

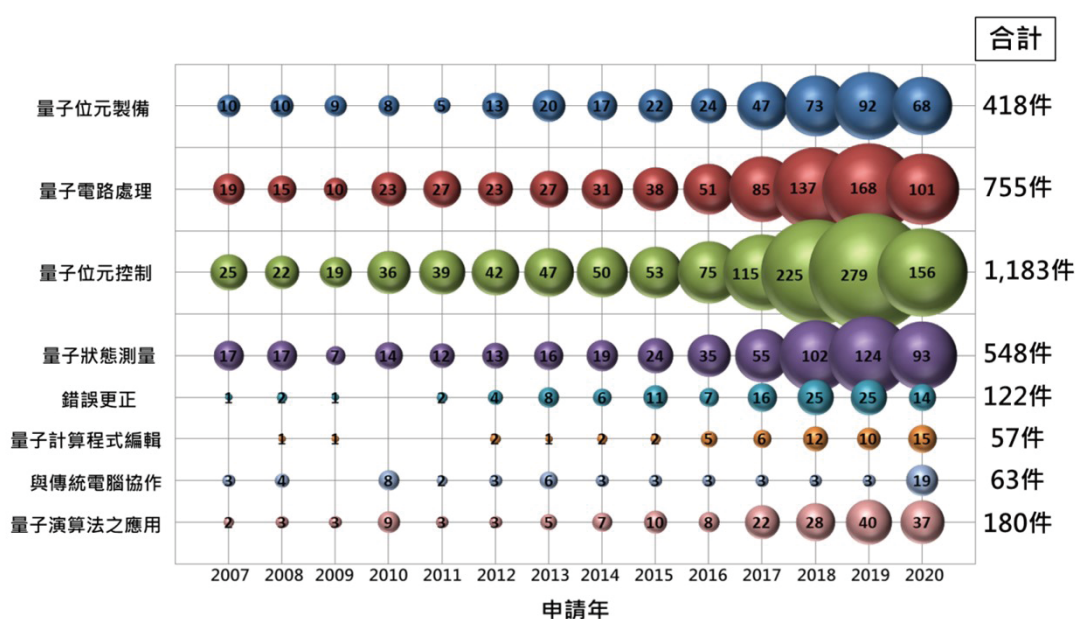


圖 9 通用量子技術專利申請趨勢³⁹

圖 9 為通用量子技術專利申請趨勢，圖中數字代表專利申請量。如圖 9 所示，通用量子技術申請量中以量子位元製備、量子電路處理、量子位元控制以及量子狀態測量為前四位，這四大技術係量子計算過程之核心技術，從執行演算法開始之製備量子位元作為運算需求，並於運算前對演算法對應之硬體操作做電路處理，接著進行量子位元之控制以執行演算法，最後經過演算法操作之量子位元必須測量其狀態來得到運算結果。於 2015 年開始，各大公司發布對於量子電腦模型上之技術突破，於是通用量子技術作為不侷限於應用在特定量子電腦模型之技

³⁹ 2020 年數量下降之原因參見註 35。

術，當中的四大核心技術之申請量也隨之急速成長。另外，申請量位於第五位為解決特定問題之量子演算法之應用，第六位為錯誤更正，第七位為量子計算程式編輯以及第八位為量子電腦與傳統電腦協同運作，其申請量也有成長之趨勢。

圖 10 為通用量子技術專利申請人國籍分析，圖中數字代表專利申請量，圖中針對特定國家列出數據資料，其餘以總括方式以 other 代表。相較於圖 7 量子電腦模型中，各技術分類幾乎由美國申請人拔得頭籌並領先布局，通用量子技術各技術分類中，中國大陸申請人則有數項技術的申請量領先。中國大陸申請人於量子位元製備、量子電路處理、量子位元控制、錯誤更正及應用上為申請量之第一位，美國申請人於量子狀態測量、量子計算程式編輯以及量子電腦與傳統電腦協同運作上為申請量之第一位。

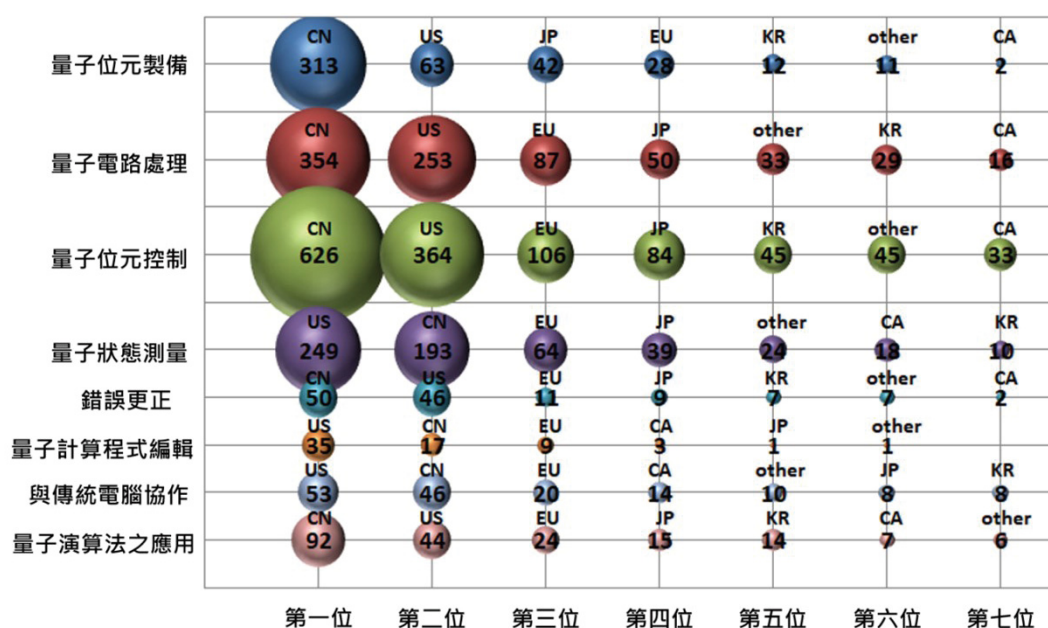


圖 10 通用量子技術專利申請人國籍分析

圖 11 為通用量子技術專利技術功效矩陣，圖中數字代表專利申請量。各種通用量子技術項目中所欲達成之功效，主要是「提高保真度」、「最佳化運算或提高運算效率」以及「可擴展性」，故通用量子技術與量子電腦模型技術進程相同，皆是朝著能夠進行複雜演算法之容錯量子計算的方向邁進。

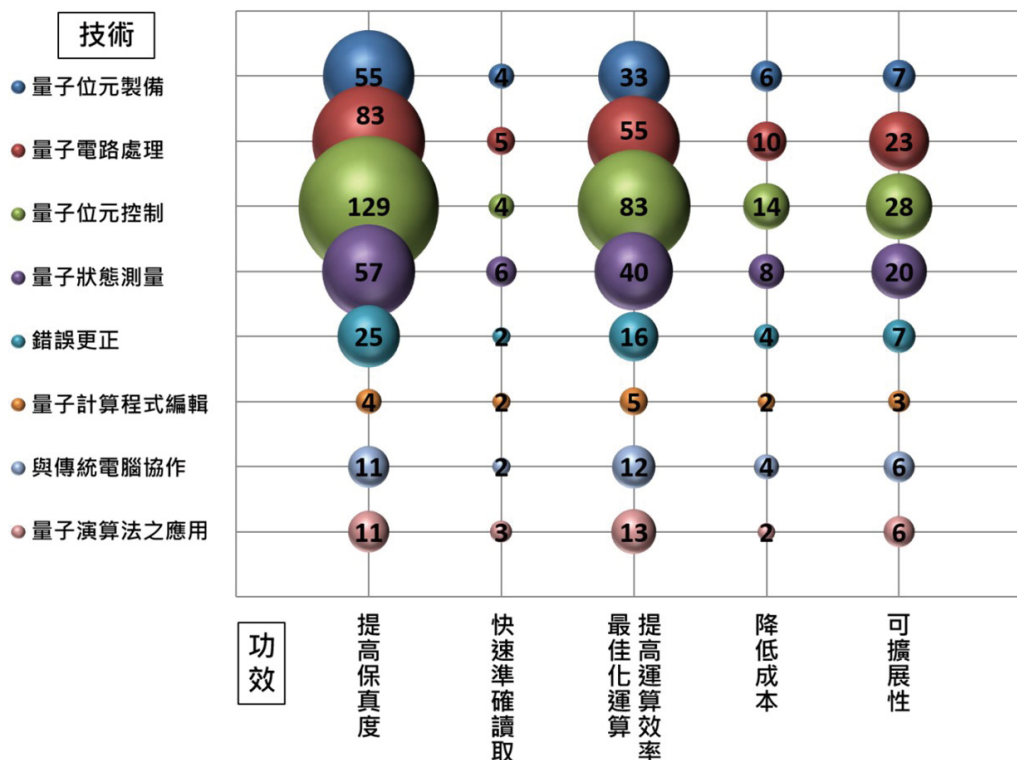


圖 11 通用量子技術專利技術功效矩陣

參、量子感測

量子感測，以靈敏之量子特性作為技術基礎，其量測效能達到比現今感測器測量之訊號還小幾個數量級之程度。本章首先以 DI 資料庫檢索結果對量子感測作技術分類並簡單介紹各種量測技術，最後分析量子感測專利趨勢。

一、量子感測技術概述與分類

國家實驗研究院科技政策研究與資訊中心賴志遠研究員，將量子感測分類為：重力測量、磁場測量、定位導航、目標識別、時間基準等類型⁴⁰，並於「美國 DARPA 量子感測科技研發計畫簡介」一文中認為，量子感測技術的發展一方

⁴⁰ 賴志遠，量子感測科技發展，科技產業資訊室，<https://iknow.stpi.narl.org.tw/Post/Read.aspx?PostID=16993>（最後瀏覽日：2022/02/15）。

面走向利用單原子的操縱方法，或是利用量子力學原理（如量子干涉效應、量子糾纏等）作為量測的機制與原理⁴¹，因此量子感測可分成用以測量重力之量子重力計、用以測量磁場之量子磁力計、用以定位導航之量子導航、用以目標識別之量子雷達以及用以作為時間基準之量子時鐘，然而配合 DI 資料庫檢索結果發現量子時鐘專利申請量甚少，故不列入本文之討論。綜上，如圖 12 所示，本文將量子感測技術分類為「量子磁力計」、「量子雷達」、「量子重力計」及「量子導航」。

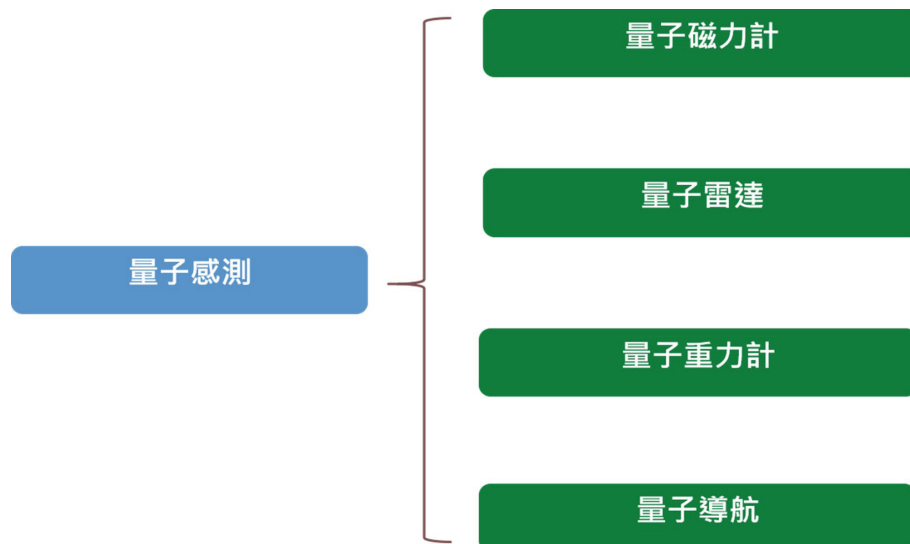


圖 12 量子感測技術分類

⁴¹ 賴志遠，美國 DARPA 量子感測科技研發計畫簡介，Research Portal 科技政策觀點，<https://portal.stpi.narl.org.tw/index?p=article&id=4b1141ea74d7dcc40174f6316f542a66>（最後瀏覽日：2022/02/15）。

(一) 量子磁力計

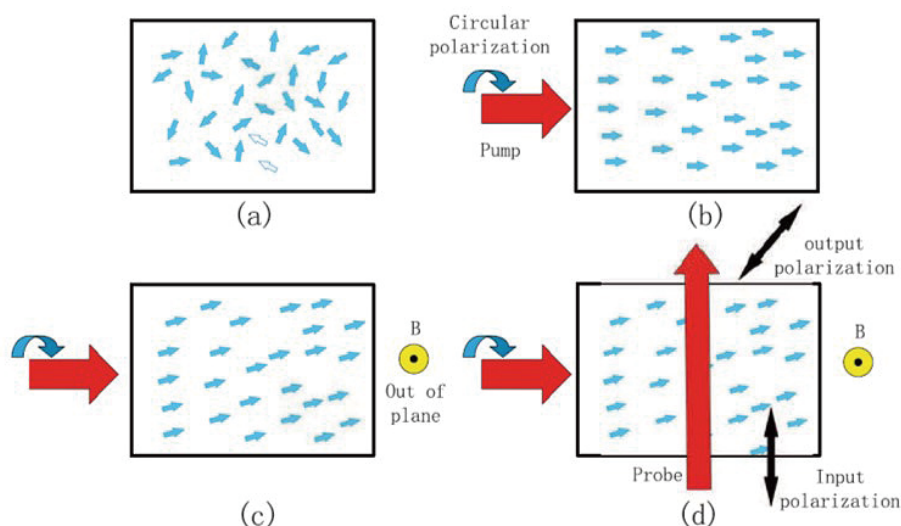


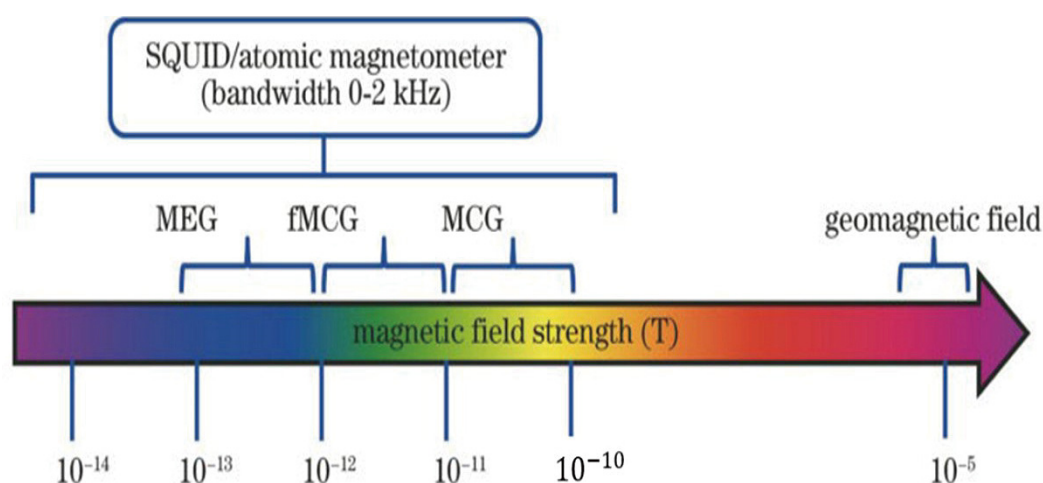
圖 13 原子磁力計運作原理⁴²

量子磁力計，可以量測微弱的磁場，在地質探勘以及生物醫學領域有很大的用途⁴³。其原理以專利申請量占最多之原子磁力計（Atomic Magnetometer）為例⁴⁴，如圖 13 所示，(a) 原子磁矩原本為隨機排列，(b) 利用一泵浦雷射（Pump Laser）將原子磁矩極化，於是原子磁矩朝某一方規則排列，(c) 一待測磁場 B，使原子磁矩發生轉動，(d) 最後照射一探測光（Probe Light），比較探測光出射（Output Polarization）與入射（Input Polarization）之偏振變化可以推測磁矩轉動角度，進而計算出待測磁場 B 之大小。原子磁力計能夠量測非常微小的磁場，如圖 14 所示，地球磁場（Geomagnetic Field）大小約 10^{-5}T ，原子磁力計能夠量測之磁場範圍約 $10^{-11}\text{T}\sim 10^{-10}\text{T}$ 的心磁場（MCG），甚至是磁場大小約 10^{-13}T 的腦磁場（MEG），對於生物磁場探測進而診斷病灶將有莫大的助益。

⁴² 圖片來源：Jundi Li, Wei Quan et al., *SERF Atomic Magnetometer—Recent Advances and Applications: A Review*, 18 NO. 20 IEEE SENSORS JOURNAL 8198, 8199(2018).

⁴³ 劉國賓、孫獻平及顧思洪等，高靈敏度原子磁力計研究進展，物理 41 卷第 12 期，頁 809，2012 年。

⁴⁴ 量子磁力計中以原子磁力計之專利申請量最多，請參見圖 16 所示及其文中之解釋。

圖 14 生物磁場強度⁴⁵

(二) 量子雷達

量子雷達，利用量子特性受環境擾動影響而變化的靈敏反應，相較於傳統雷達具有更高的訊噪比，甚至傳統雷達無法偵測的隱形戰機，在量子雷達之觀測下皆無所遁形。此外，因敵軍干擾機複製雷達發射波後再出射干擾波來反制傳統雷達，故傳統雷達易於受到干擾機之影響而無法準確識別敵機位置。然而，因不可複製原理（No-cloning Theorem）⁴⁶，敵軍干擾機一旦試圖複製量子雷達發射波來影響量子雷達，其發射波之量子狀態一經測量旋即塌縮，敵軍干擾機僅獲得塌縮後的量子狀態，無法如實還原發射波原來之量子狀態，進而對量子雷達失去反制效用。量子雷達工作原理如圖 15 所示，量子雷達產生大量糾纏光子對（Entangled Pair of Photons），各糾纏光子對中之一光子儲存於量子雷達系統中，另一光子被系統發射至空中，該光子被目標物反射而返回至系統，系統經由比較該光子與儲存於系統中之光子兩者之量子狀態，由於兩光子為糾

⁴⁵ 圖片來源：王曉飛、孫獻平及趙修超等，超靈敏原子磁力計在生物磁應用中的研究進展，中國激光第 45 卷第 2 期，頁 162，2018 年 2 月。原著之圖片中所載地球磁場之下一數量級 10^{-14} 應為 10^{-10} 之誤繕，本文呈現之圖已經過訂正。

⁴⁶ Wikipedia, *No-cloning theorem*, https://en.wikipedia.org/wiki/No-cloning_theorem (last visited Mar. 31, 2022).

纏光子對，彼此間之量子狀態有一定程度之關聯性，藉由大量糾纏光子對偵測，可以察覺出空中目標物些微的動靜變化⁴⁷。量子雷達憑藉其高訊噪比（Signal-to-Noise Ratio）、可辨別隱形戰機以及不受干擾機之影響等特性，將對國防工業帶來很大的革新。

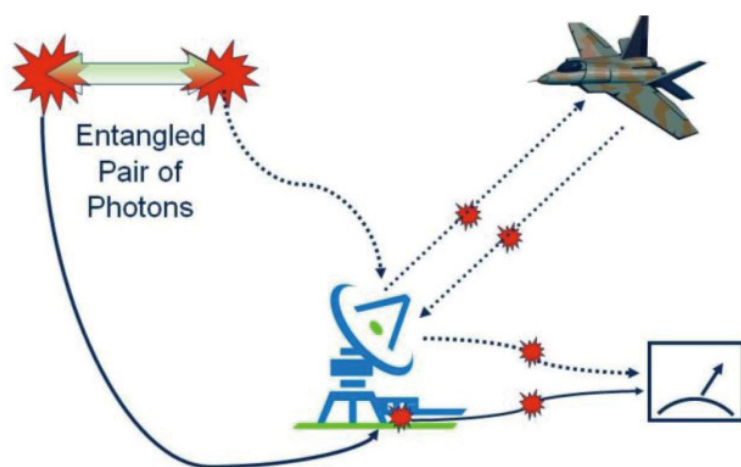


圖 15 量子雷達示意圖⁴⁸

（三）量子重力計與量子導航

系統運動上極細微的變化可以由冷原子物質波的量子干涉效應彰顯出來，故將冷原子製作成干涉儀，可以用來偵測系統極細微的物理運動量變化。將之用來測量重力，即是量子重力計，對於地球重力場背景的變化 10^{-2}m/s^2 ，量子重力計所偵測的重力精度達到 10^{-8}m/s^2 ，可應用於地質探勘、油氣探測、地震火山活動觀測等⁴⁹，不僅攸關國家安全且具有可觀的商業利益。量子導航，係利用冷原子干涉儀於系統三軸上分別觀測各軸之線性加速度以及角速度進而實現無須人造衛星引導之精準自主導航，相較於傳統陀螺儀之自主導航技術，量子導航的精準度將能夠使潛艇航

⁴⁷ Wikipedia, *Quantum radar*, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_radar (last visited Feb. 25, 2022).

⁴⁸ 圖片來源：Marco Lanzagorta, *Quantum Radar*, P67 (2011).

⁴⁹ 朱棟、高世騰及朱欣欣等，量子重力儀在地球科學中的應用進展，地球科學進展第36卷第5期，頁480，2021年5月。

行精確度從傳統陀螺儀中 24 小時航行時誤差為 2 公里提高到航行數個月內只會誤差 100 公尺⁵⁰，將對國防工業帶來技術上飛躍的進步。

二、量子感測專利趨勢分析

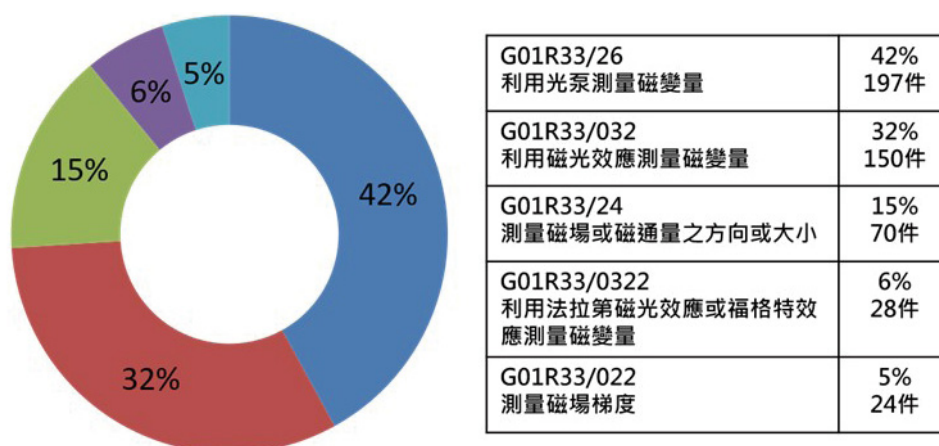


圖 16 量子感測專利 CPC 分類號圓環圖

圖 16 為量子感測專利 CPC 分類號圓環圖。申請量前五大皆為 G01R 33/ 下之分類；G01 之分類為「測量」，G01R 之分類為「測量電變量；測量磁變量」，又 G01R 33/ 分類為「測量磁變量」，此係因量子感測中四個子領域以量子磁力計之專利數量為大宗⁵¹，而磁力計本屬於測量磁變量之技術所致。其中 G01R 33/26 及 G01R 33/032 占有比例超過七成，申請量第一多的 G01R 33/26 為「測量磁變量之裝置或儀器 - 涉及磁共振 - 用於測量磁場或磁通量之方向或大小 - 採用光泵」，第二多 G01R 33/032 為「利用磁光效應，測量磁場或磁通量的方向或大小」，此說明量子磁力計專利申請量中以使用光泵技術及法拉第磁光效應之原子磁力計為大宗。

⁵⁰ 賴志遠，同註 40。

⁵¹ 量子感測中以量子磁力計專利申請量最多，參見圖 20 所示。

圖 17 為量子感測專利申請人分析。專利申請量第一多為法國原子能和替代能源委員會（French Alternative Energies and Atomic Energy Commission），是法國政府資助的能源、國防和安全、訊息技術和衛生技術領域的研究機構⁵²，其申請之專利以磁力計相關為主；第二多為中國大陸申請人，北京航空航天大學（Beihang University），為中國大陸工業和信息化部所屬的 7 所高等院校之一⁵³，其申請之專利以磁力計相關為主；第三多為日本申請人，三菱電機（Mitsubishi Electric Corporation）是源自日本的跨國電機及電子公司，為日本八大電機生產商之一，也是世界五大光電產品製造商之一，其製造產品甚至跨足包含軍事用途的艦用雷達、機用雷達等⁵⁴，故對於量子雷達之專利申請亦有涉獵；第四多為美國申請人，洛克希德公司（Lockheed Corporation）是一家美國航空航太製造廠商，以開發、製造軍用飛機聞名世界，旗下產品皆被諸多國家所採用⁵⁵，而飛機與導航關係甚密，該公司不乏有量子導航相關之專利申請案。

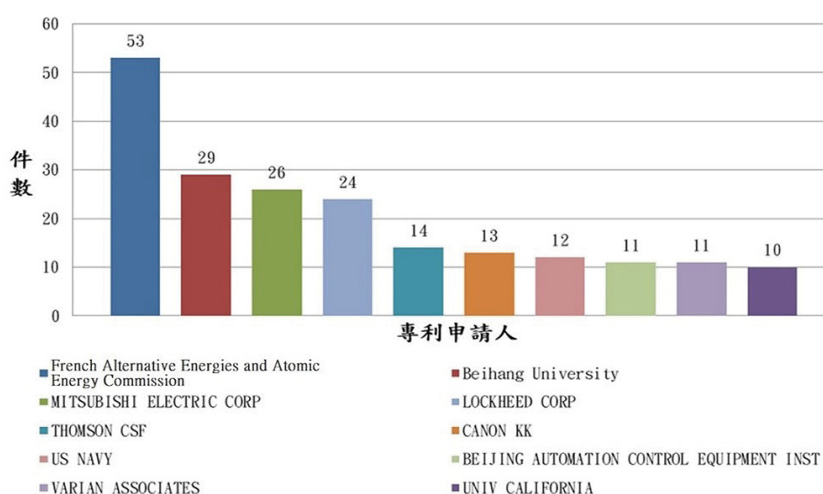


圖 17 量子感測專利申請量前十大申請人

⁵² Wikipedia, *French Alternative Energies and Atomic Energy Commission*, https://en.wikipedia.org/wiki/French_Alternative_Energies_and_Atomic_Energy_Commission (last visited Feb. 16, 2022).

⁵³ 維基百科，北京航空航天大學，<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%8C%97%E4%BA%AC%E8%88%AA%E7%A9%BA%E8%88%AA%E5%A4%A9%E5%A4%A7%E5%AD%A6>（最後瀏覽日：2022/02/16）。

⁵⁴ 維基百科，三菱電機，<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E4%B8%89%E8%8F%B1%E7%94%B5%E6%9C%BA>（最後瀏覽日：2022/02/16）。

⁵⁵ 維基百科，洛克希德公司，<https://zh.wikipedia.org/wiki/%E6%B4%9B%E5%85%8B%E5%B8%8C%E5%BE%B7%E5%85%AC%E5%8F%B8>（最後瀏覽日：2022/02/16）。

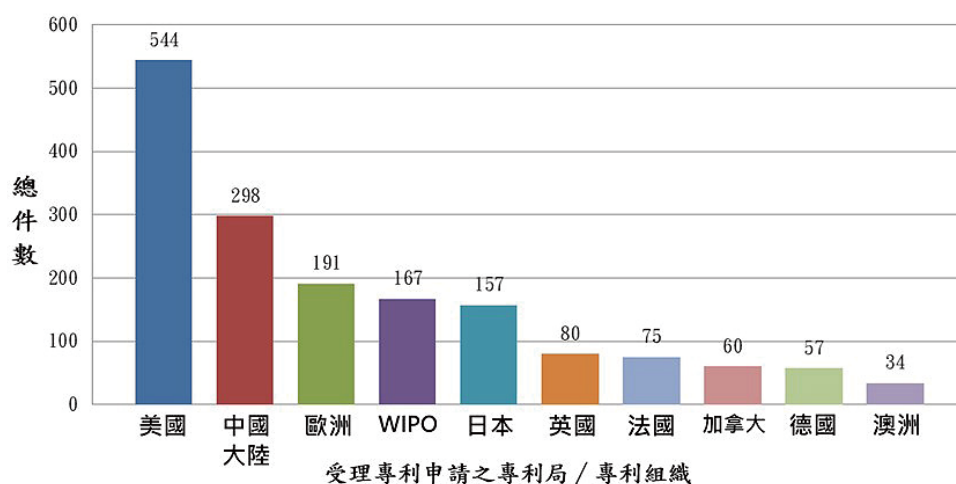


圖 18 受理量子感測專利申請之前十大專利局／專利組織

圖 18 為受理量子感測專利申請之前十大專利局／專利組織。申請量前兩大依序為美國及中國大陸，第三至第十依序為：歐洲、WIPO、日本、英國、法國、加拿大、德國以及澳洲。在美國與中國大陸申請專利數量總和已大於第三至第十申請量總和，足見美國與中國大陸為申請人於量子感測專利布局主要之市場。

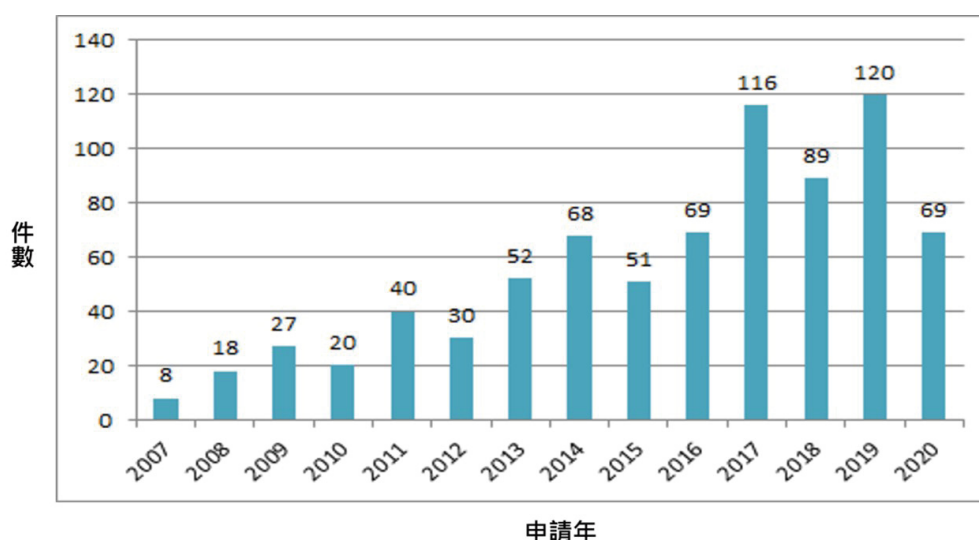


圖 19 量子感測專利申請趨勢⁵⁶

⁵⁶ 2020 年數量下降之原因參見註 35。

圖 19 為量子感測專利申請趨勢分析。量子感測專利申請量 2016 年以前緩慢地提高，於 2017 年開始有顯著的成長，並於該年申請量突破 100 件，足見近年來量子感測技術正處於蓬勃發展之階段。

圖 20 為量子感測各領域專利申請趨勢，圖中數字代表專利申請量。由圖中可得知，量子磁力計申請量遠遠領先其他量子感測領域，其次為量子重力計，第三多為量子導航，最後為量子雷達。由圖 20 所示之申請趨勢可以印證，專利申請之動機為取得技術獨占之市場先機，量子磁力計應用於地質探勘及生物醫學，量子重力計應用於地質觀測、油氣探測、地震火山活動監測，前兩者相較於量子導航與量子雷達之國防應用，其商業利益之專利申請誘因較大，故申請量也較多。另外，各領域中除量子磁力計外，其他領域專利申請量並未有逐年明顯增加之趨勢，可見量子感測近年申請量逐漸增加之主因為量子磁力計申請量之貢獻。

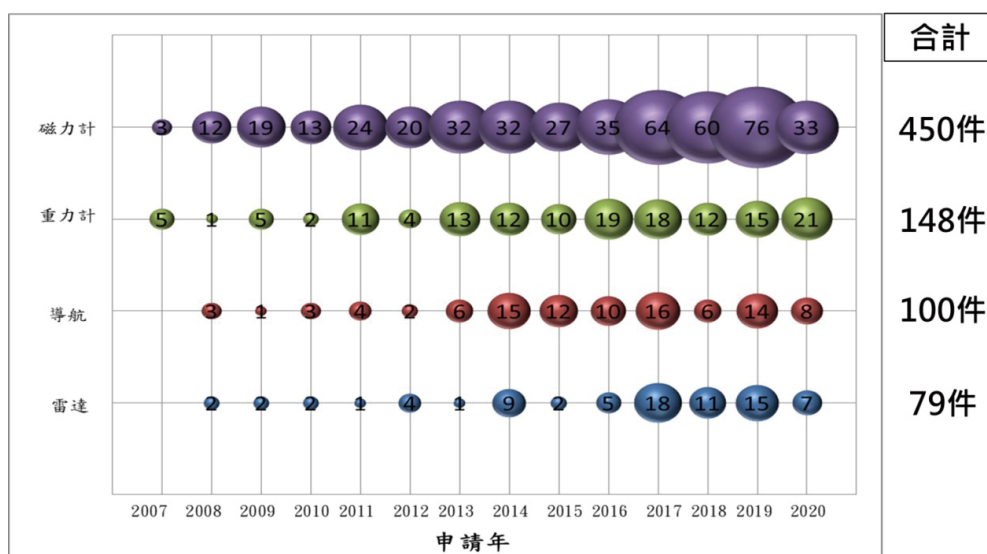


圖 20 量子感測各領域專利申請趨勢⁵⁷

⁵⁷ 2020 年數量下降之原因參見註 35。

圖 21 為量子感測專利申請人國籍分析，圖中數字代表專利申請量。量子磁力計專利申請量以美國專利申請人與中國大陸專利申請人並列第一，量子重力計、量子導航以及量子雷達專利申請量以中國大陸專利申請人皆位居第一。其中，量子導航以及量子雷達專利申請量，中國大陸專利申請人分別為美國專利申請人之約 3 倍及 5 倍，足見中國大陸於有關國防工業領域之量子導航及量子雷達專利布局重視之程度。

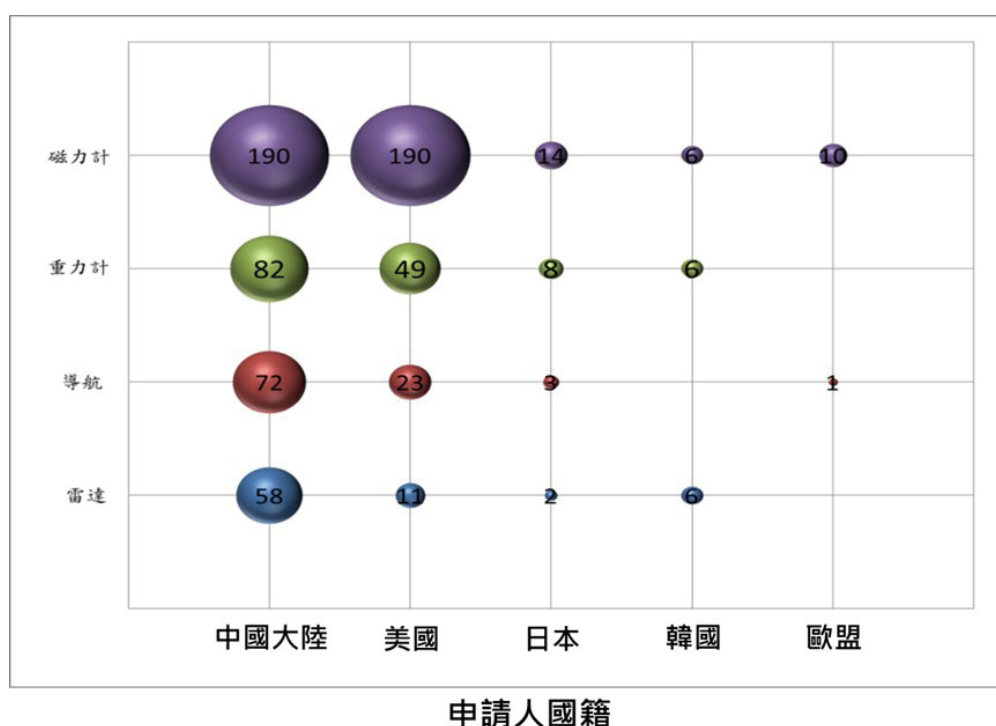


圖 21 量子感測專利申請人國籍分析

肆、結語

一、趨勢分析結論

量子計算專利申請趨勢從 2010 年開始緩慢地增長，直至 2017 年轉為急速增長，其年增量突破 100 件／年，這與各大公司近幾年來在量子計算上不斷地競爭與突破有很大的關係。細部探究，前三大專利申請量為現今資訊電腦產業主宰者

且皆為美國公司：IBM、Intel 與 Google，未來若量子計算技術漸趨成熟，不僅該三者將延續其在電腦產業之領先優勢，且美國仍為電腦產業的技術主導國。從受理量子計算專利申請之前十大專利局／專利組織圖顯示，美國與中國大陸將是量子計算專利布局最競爭之市場。分析量子計算專利技術內容，將量子計算分類為以不同物理模型實現量子計算之量子電腦模型以及不侷限於應用在特定量子電腦模型之通用量子技術。量子電腦模型專利以超導體以及半導體量子點為主流，且二者皆以美國申請人申請量最多。通用量子技術專利以量子計算過程之核心技術居多，依序為：量子位元控制、量子電路處理、量子狀態測量、量子位元製備，除了量子狀態測量以美國申請人申請量最多，其餘三者以中國大陸申請人申請量最多，可見美國申請人以量子電腦模型為專利布局重心，中國大陸申請人以通用量子技術為專利布局重心。量子電腦模型與通用量子技術之技術功效矩陣皆透露出目前技術方向著重在量子位元控制下錯誤率降低之「提高保真度」、於量子位元運算過程中之「最佳化運算或提高運算效率」以及增加量子位元數目之「可擴展性」，而這三者技術功效也揭示量子計算專利技術目前正朝向能夠執行複雜量子演算法之容錯量子計算方向邁進，屆時量子計算將會有越來越多的實際應用。

量子感測專利申請趨勢 2017 年開始正處於蓬勃發展的階段，並於該年突破 100 件。細部探究，申請量以及申請增加量主要為量子磁力計之貢獻，量子重力計之申請量為第二多，量子導航以及量子雷達分居第三及第四位，也相應地代表其商業利益大小的排序。受理量子感測專利申請之前十大專利局／專利組織分析中，美國與中國大陸為申請人量子感測專利布局主要之市場。於專利申請人國籍分析中發現，量子感測四大領域除量子磁力計中國大陸申請人與美國申請人並列第一外，其餘三大領域中國大陸申請人皆獨占第一，甚至在量子導航與量子雷達，中國大陸申請人申請量為位居第二之美國申請人 3~5 倍之多，足見中國大陸於量子感測專利布局之重視以及有關國防工業領域之量子導航及量子雷達布局領先之程度。

二、產業發展建議

量子計算專利分析結果顯示，申請趨勢正朝向能夠執行複雜演算法之容錯量子計算邁進，代表未來量子計算將會有越來越多的實際應用，其商業利益可期。

不論是量子電腦模型抑或是通用量子技術，美國與中國大陸申請人均占申請量排名前二位，兩國專利布局已遙遙領先他國，我國業者若欲切入量子計算技術市場，其專利迴避將是難題，除非另闢蹊徑全力研發截然不同於現有量子電腦模型及通用量子技術之框架，否則將存在專利侵權的風險。然而，研發新的量子計算架構，其資金、專業技術人才等人物力資源需求，甚至可能失敗之風險等因素，必須做謹慎考量。量子計算專利申請量名列前茅者，為現今資訊電腦產業主宰者，如：IBM、Intel、Google。我國產業或可憑藉其半導體製程優勢、優秀的資訊、材料及半導體工程人才，與量子計算專利布局領先者合作，以期作為上游零組件供應商，在各種量子電腦模型中，協助開發通用量子技術（例如：量子位元製備、電路處理、位元控制或狀態測量）之關鍵零組件以優化量子計算效能，在量子計算供應鏈上扮演不可或缺的角色。

藉由專利分析，量子感測專利申請量主要為量子磁力計，其應用於生物醫療磁場感測有助於疾病之診斷，由於醫療設備特別注重設備精密度，量子磁力計或許為我國引以為傲之精密製造產業之契機。我國產業可與掌握量子磁力計關鍵技術者合作並尋求技術授權，憑藉其成熟之精密製造技術，累積量子磁力計相關專業製造技術而作為其穩定之供應商，由於醫療器材產業特色為量少價高且技術密集不易被取代，相信對我國精密製造產業有可期之商機。