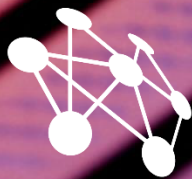


行動通訊的 創新浪潮

先進的行動基礎設施正在加速產業轉型，助力高成長潛力經濟體實現願景。



chetan sharma
CONSULTING



ERICSSON

作者



Chetan Sharma

Chetan Sharma Consulting 執行長

Chetan Sharma 是 Chetan Sharma Consulting 公司的執行長，也是行動產業的頂尖策略家之一。

他曾擔任多家《財富》100 強無線領域企業的資深顧問，也可能是業內唯一一位為全球各大洲領先行動通訊營運商提供策略諮詢的產業專家。

Chetan 曾在或正在多家公司和新創企業的顧問委員會任職。他的客戶名單包括了無線 / 科技產業的眾多知名企業。Chetan 是 15 本無線領域書籍的作者或合著者，這些書籍已被多家企業培訓項目以及紐約大學、史丹佛大學和東京大學的課程所採用。他的研究成果在業內得到廣泛的引用。

他擁有堪薩斯州立大學電氣工程與電腦工程理學碩士學位，以及印度理工學院魯爾基分校電氣工程理學學士學位。www.chetansharma.com



Erik Ekudden

愛立信全球資深副總裁暨技術長



Magnus Ewerbring 博士

愛立信亞太區技術長



Peter Linder

愛立信美洲區思想領導力負責人

行動通訊的創新浪潮

5G 是迄今為止部署速度最快的產業技術，五年內用戶數已突破 20 億。¹ 美國、中國、印度、韓國和日本的消費者對 5G 技術的快速接受程度顯而易見。此外，固定無線接入（FWA）等新興服務徹底改變了美國的寬頻競爭格局，在過去幾年中幾乎涵蓋了所有新增用戶。

儘管 5G 技術發展迅速，但由於大多數營運商仍依賴非獨立組網（NSA）部署，其全部潛力尚未得到充分釋放。全球僅有 26% 的營運商——633² 家營運商中的 163 家——投資了獨立組網（SA）5G，這一架構能夠釋放該技術的全部潛力。沒有 SA，營運商就會錯失價值：大規模自動化、超低延遲、網路切片以及任務關鍵型可靠性——這些正是各產業實現工作流程轉型的核心要素。

儘管各大頭條新聞紛紛慶祝 5G 技術的迅速發展，但它們卻掩蓋了一個關鍵現實：5G 所蘊含的變革力量很大程度尚未被挖掘。2024 年全球 5G 用戶數量驚人地增長了 42%³，這種增長營造出一種危險的進步假象，掩蓋了一個事實：唯有部署獨立組網的 5G 網路，才能真正釋放其革命性的潛力。

這不僅僅是一個技術差距——而是一條正在重塑全球競爭力的策略鴻溝。超過 90% 的 SA 用戶集中在中國、印度和美國這三個市場，這導致其他地區在下一代數位基礎建設競爭中顯著落後。如今果斷推進 SA 的營運商和國家，不僅僅是在建設網路，更是在鞏固自己在未來經濟中的地位，而競爭對手卻仍在採用過去的技術，將 5G 行銷錯誤的當作 5G 現實。

隨著 5G 發展進入下半段，各國政府和營運商必須合力建構 SA 和 5G Advanced 功能，助力擴展並推動 5G 技術融入各產業的工作流程。已經採取這些措施的營運商正在獲得顯著收益：開闢新的收入流，建構可持續經營十餘年的業務，並建立經得起時間考驗的競爭優勢。那些能夠將 5G 作為通用技術融入各產業垂直領域的國家，將從 5G 及相關技術中獲得最大的收益。反之，那些未能投資於建設此類能力的國家將處於落後。這對於各國及其生態系統如何採納和實施 5G、人工智慧（AI）等新技術，以加速國內生產毛額（GDP）增長，具有重要的政策意義。

本文探討了無線產業領導者在 2025 至 2030 年間實現市場價值最大化、同時為奠定 6G 的領導地位打下關鍵基礎的策略及可行路徑。對先行者市場的分析表明，針對固定無線接入（FWA）和先進行動寬頻（MBB）解決方案的精準投資，始終能夠為企業市場帶來卓越的客戶滿意度與收入增長。因此，FWA 將在十年內增長至占固定寬頻線路總量的 18%，而在 2024 年，這一比例僅為 11%。

參考美國、中國、印度、新加坡、英國、澳洲、瑞典及日本等市場的成功模式，我們歸納出多項可行的企業發展機會，透過策略性垂直整合與基礎設施優化，實現長期穩健的中高個位數成長。本文探討了無線產業高管所面臨的三大關鍵事項：可持續的收入增長、差異化競爭以及針對下一代技術的策略定位。

¹ [《2025 年行動經濟報告》](#)

² [《2025 年 4 月 5G 獨立組網》](#)，全球行動供應商協會（GSA）

³ [《愛立信行動趨勢報告》](#)，2025 年 6 月

我們的研究發現，企業在早期階段的垂直專業化與其長期市場主導地位之間存在顯著的相關性。

本文探討了一種創新的行動基礎建設成熟度指標，該指標揭示了如何通過及時制定政策、積極採納能夠轉化為實際收益的新技術，以及保持持續創新的策略思維造就產業領導者。該指標的排名直接影響一個國家的工業化成熟度，這將轉化為 GDP 的增長和就業機會，並使該國在快速變化的環境中具備未來競爭力。案例研究展示了對港口、醫院、場館、製造業、緊急服務及採礦等不同產業領域的分析。它們幫助我們串聯起從 5G 投資到新增數十億美元收入來源，再到國家 GDP 持續增長的各個環節。

那些錯失良機未能制定策略以把握 5G 機會的國家與營運商，將面臨徹底錯失發展週期的風險。一旦落後，供應鏈的轉變可能是永久性的，其造成的損害將是無止境的。

每個國家都有推動其經濟發展的獨特產業體系。我們將通過不同的範例來闡明這一觀點。無需完全仿照其他國家的模式，關鍵在於理解如何運用 5G 和 AI 等技術工具來推動本國產業與經濟的轉型。5G 技術的普及對國內產業的永續發展至關重要，否則生產將會轉移到更高效的市場。

通過整合全球最佳實踐並運用新興技術，本文旨在引導利益相關者在技術價值鏈中獲取更大的價值，並通過制定一項策略，建構啟動 6G 所需的必要平臺，確保在 2030 年及其後續時期繼續保持連接領域的領導地位。

工業 5G 作為電信基礎策略的一部分，是數位化轉型的關鍵要素。然而，如果缺乏新能力的注入，其價值將持續流失。我們預計在未來十年內，工業 5G 和 6G 將創造數兆美元的經濟價值，而那些具有前瞻性的營運商將積極參與這一全新收入來源。營運商的發展與命運比以往任何時候都更加緊密地與工業 5G 策略相互關聯。

工業 5G 的全球成功應用

5G 標誌著與早期行動技術週期的重大分水嶺。與前幾代技術相比，5G 技術不僅注重新的接入技術，同時也強調核心網的轉型。或許更為重要的是，它標誌著網路概念本身正經歷轉變，即網路演變為一個吸引並穩固經濟體中其他產業的轉型平臺。

產業面臨的最大機會是大規模工業自動化⁴，而 5G 在其中將發揮重要作用。與其他處於同步成長階段的 S 曲線技術結合時，5G 能夠加速工作流程的自動化進程。不能孤立地看待 5G，而應將其視為全球工業發展路線圖中的重要工具。當企業將 5G 技術與 AI、邊緣計算及機器人技術等相結合，作為自動化的賦能工具時，它們通常能夠成功地將 5G 融入工業工作流程。然而，當銷售團隊向企業推銷 5G 時，卻遭遇了冷淡的反應，效果也不盡如人意。

行動營運商也能夠隨著企業自動化進程的不斷推進而持續發展，為企業提供更加複雜的解決方案。對於營運商而言，除了提供連接之外，下一步的自然發展方向是推出雲端計算和邊緣計算解決方案以及私人網路。

⁴ [《5G 殺手級功能變現：工業大規模自動化》，2024 年](#)

此外，營運商可以為垂直領域的企業或特定企業提供和 / 或託管 AI/ 機器學習模型。在某些垂直領域，營運商可以提供解決方案，例如中國移動在採礦業、NTT DoCoMo 在物流產業、美國 AT&T 在聯網汽車領域、Verizon 在公共安全領域、Vodafone 在追蹤領域、Telus 在醫療保健領域等提供的解決方案。⁵ 這一發展進程將與那些從基礎自動化、計算和連接解決方案逐步邁向高度先進解決方案的企業完美契合。營運商的收入份額將取決於他們在特定垂直領域的參與深度。對於企業而言，自動化程度越高，效率提升的效果就越明顯。

5G 技術正逐步融入企業供應鏈的各個方面。從基礎連接到在 5G 網路上運行的全套應用程式，行動營運商的企業 5G 市場規模已經達到數十億美元。以下是一些範例：

- **5G 港口：**全球貿易中超過 80-90% 是通過海港進行的。因此，對於任何擁有港口的國家而言，高效地完成船舶周轉，並以最經濟實惠的方式進行貨櫃的裝卸至關重要。天津、新加坡、坎德拉和鹿特丹等主要港口已實現自動化作業，涵蓋重型起重機及運載貨櫃的自動駕駛電動車。按二十英尺當量單位 (TEU) 計算——衡量港口處理貨櫃數量的指標——天津港躋身全球十大港口之列。天津港在營運效率和輸送量方面取得了顯著提升。單台起重機的作業效率提升超過 40%，借助 5G、私人網路、邊緣計算和 AI 等技術，港口已實現 100% 的自動化。⁶
- **5G 救護車：**儘管印度在 5G 領域起步較晚，但這並未妨礙其迅速開展相關工業項目。行動營運商 Airtel 於 2022 年第四季度推出 5G 網路，並與著名的阿波羅醫院合作推出了 5G 救護車。救護車內的先進設備配備了患者監測應用程式、遙測設備、攝影機以及護理人員的隨身攝影機，所有設備都通過 5G 網路與醫院相連。

- **5G 礦業：**礦山通常是最為惡劣的工作環境，而在此環境中，連接和資料的作用至關重要。採礦業是最早採用 5G、私人網路和邊緣計算的產業之一。它們不僅利用這些技術保障工人安全，還通過使用自動駕駛車輛和機器人遠端操作從根本上改變了營運方式。巴西的布魯庫圖 (Brucutu) 和卡拉加斯 (Carajas)、中國的樂川、瑞典的基律納 (Kiruna) 以及澳大利亞的皮爾巴拉 (Pilbara) 等地的礦業營運商正在利用這些新工具實現營運自動化並提高效率。
- **5G 醫院：**2019 年末，中國四川的一家醫療機構推出了首個商用 5G 私人網路。此後，韓國、泰國、英國、以色列、印度和美國相繼啟用了 5G 醫院。醫院需要應對一些最嚴苛的資料和延遲要求。高速寬頻私人網路連接與邊緣計算節點相結合，不僅為現有營運提供了更大的靈活性，還催生了如基於虛擬實境的疼痛緩解、遠端手術協助和下一代遠端醫療等新療法。
- **5G 學校：**疫情暴露了許多國家在寬頻基礎建設方面的差距，因為學生被迫遠端學習，卻難以輕鬆接入互聯網。5G 固定無線技術的出現恰逢其時，為學生和學校提供了所需的穩定連接。這一技術不僅惠及農村地區，城市中心同樣從中受益。

⁵ [《5G 與第四波浪潮——最新情況》，2022 年](#)

⁶ [《5G 變現與卓越運營》，2024 年](#)

- **5G 工廠：**製造業是 5G 技術應用中一個令人振奮的領域。雲端機器人等新興領域正蓄勢待發。這些領域融合了雲端計算、AI、機器人技術以及 5G 網路的能力，將對企業和消費電子產業產生重大影響。在當今社會，關於自動化與機器人技術在製造業中的作用及其對就業產生的後續影響，展開了廣泛的討論。然而，對於那些缺乏廉價勞動力或面臨勞動力短缺的國家，例如日本，5G 技術與機器人技術的結合有望為製造業開創一個嶄新的時代。

長波理論的學者，例如 Nikolai Kondratieff⁷、Joseph Schumpeter⁸、和 Carlota Perez⁹，精彩地闡述了創造性破壞在振興經濟過程中的作用，即「產業突變不斷從內部徹底改變經濟結構，既持續摧毀舊有結構，又不斷孕育出新的結構」。在過去的三個世紀裡，我們目睹了這種基本的經濟週期性結構不斷重演。近年來，我們經歷了互聯網、行動寬頻及雲端計算的發展演變歷程。

5G 技術正在創造新的機會。如果上一輪週期能夠提供任何借鑒，數位領域將成為生態系統收入增長的核心驅動力。如果說 4G 技術推動了數位增長曲線，那麼 5G 將由這些曲線所定義。如果營運商對如何營運網路和開展業務缺乏信心，即使他們推動了 5G 的發展，其在 5G 產業鏈中的作用也將逐漸減弱。

為了實現最大程度的增長，行動營運商必須採取雙重策略：一方面堅持 5G 部署路線圖，另一方面打造面向企業的產品和服務。在 5G 領域，營運商應部署支援企業應用和服務的先進 5G 功能，例如 5G 獨立組網、邊緣計算架構、私人網路產品、切片等功能，以及 5G Advanced 升級，以支援低延遲和大規模物聯網應用。此外，在企業業務領域，行動營運商需要在賦能層（平臺、分銷、應用程式設計發展介面（API）、分析、安全等）以及應用和服務層發展專業能力。這將需要對系統集成

專業技能進行投資，並積累在 5G 和 AI 領域部署自動化解決方案的經驗。

經濟引擎增長的三大支柱——基礎建設、政策和技術普及

「基礎建設是經濟增長的催化劑」這一觀點，早已與人類歷史相伴而生。美索不達米亞、埃及和羅馬等古代文明都曾投資基礎建設以推動增長和就業。在現代社會，這同樣適用。互聯網重塑了經濟，成為推動各產業和經濟體走向現代化的重要力量。過去 15 年，長期演進技術（LTE）、雲端和智慧手機的出現塑造了時代發展。同樣，AI、5G、邊緣計算、雲端、自主系統等正在深刻重塑工作流程和業務流程，為企業經營者提供工具，幫助他們重新構想自身的生態系統和客戶群體。

積極且不受限制的基礎建設計畫是實現目標的必備條件。基礎建設將成為經濟成長的根基。這必須得到有利於增長和創新的政策支持，這些政策應當鼓勵新想法的形成，並推動採用構成經濟支柱的技術。除非在技術普及方面一致地執行，否則基礎建設和政策無法充分發揮潛力。正是技術的普及賦予了經濟活力。¹⁰

因此，基礎建設、政策和技術普及協同作用，為經濟注入了加速產業轉型的必要動力。

⁷ [康得拉季耶夫週期](#)

⁸ [經濟發展中的長波](#)

⁹ [《技術革命與金融資本》, Carlota Perez, 2002 年](#)

¹⁰ [《5G 普及、密度與規模》, 2025 年](#)

我們已經在全球見證了這一進程的逐步發展。市場的某些領域受到自由市場經濟和需求的推動，例如美國消費市場、徹底重塑美國寬頻市場的 FWA 技術、場館營運和緊急回應中的 5G 普及。其他領域則需要政策與技術普及執行緊密結合，才能推動產業向前發展。

在衡量海港營運績效的全球貨櫃港口績效指數 (CPPI) 排名前 100 的港口中，中國和印度擁有的港口數量最多。¹¹ 中國在全球燈塔網路中的工廠數量最多。¹²

每個國家都有自己重要的產業。因此，各國建構經濟的策略會略有不同，但基礎建設、政策和技術普及的底層框架保持一致，仍是經濟增長的根本基礎。當這些支柱協同作用時，價值鏈便能蓬勃發展，新的理念和微型經濟體將隨之出現。這將成為經濟增長和全球競爭力的基礎。

¹¹ [CPPI 指數, 2024 年](#)

¹² [全球燈塔網路, 2025 年](#)

行動基礎建設成熟度指標

各國行動基礎建設的成熟度存在顯著差異，因此行動建設在支持各國數位化轉型所發揮的作用也有所不同。

要更深入地瞭解一個國家的發展程度及其行動基礎建設的競爭力，可以通過綜合一組關鍵參數，

並對每個參數的成熟度進行 1 至 5 級的排名來衡量其成熟度。

我們選取了六個參數作為衡量行動基礎建設成熟度的基準。這些參數旨在衡量行動基礎建設是否準備好支持業務關鍵型和任務關鍵型應用的數位化轉型。

	1	2	3	4	5
網路/產業	增強型行動寬頻	固定無線接入/無線接入網路	專用行動網路	虛擬專用行動網路	任務關鍵型網路
差異化連接	盡力而為	固定無線接入切片	企業切片	消費者切片	支援網路API
軟體成熟度	Rel-15	Rel-16	Rel-17	Rel-18	Rel-19
採用獨立組網架構	5G-EPC	5GC	SA試驗	SA上線	獨立組網商用服務
中頻段人口覆蓋率	<30%	30-50%	50-70%	70-90%	>90%
中頻段頻譜分配	0-199 MHz	200-399 MHz	400-599 MHz	600-749 MHz	>750 MHz

圖 1. 行動基礎建設成熟度指標發展框架

以下參數是我們進行排名的基礎，也適用於通訊服務提供者及各國進行自我評估。

第一個參數涉及 **5G 新中頻段頻譜分配** 的進展情況，以及市場是否具備足夠的已授權全功率頻譜，以支持本十年內 5G 容量的增長。新的 5G 中頻段頻譜是各國之間的主要差異所在，也是自 2022 年以來被深入分析的議題。採用的等級如下：0-199 MHz (1)、200-399 MHz (2)、400-599 MHz (3)、600-749 MHz (4)、>750 MHz (5)。

參數二涵蓋 **中頻段人口覆蓋**。隨著 5G 中頻段頻譜覆蓋範圍的持續擴展，其在戶外及城市室內環境中的工業應用潛力日益增強，同時也更有效地支

援了農村地區中小型企業的發展。5G 中頻段人口覆蓋採用的等級如下：<30% (1)、30-50% (2)、50-70% (3)、70-90% (4)、>90% (5)。

5G 獨立組網 (SA) 架構的採用是第三個參數，代表著能力的分水嶺。僅支援 5G 非獨立組網 (NSA) 的網路，其對企業和政府的價值主張局限於 5G 覆蓋範圍和容量。向 SA 架構的過渡使得動態網路切片和 5G Advanced 功能得以實現。向 SA 架構的轉型需要進行大量學習，越早開始這一轉型過程，所積累的經驗就會越豐富。SA 架構採用的等級涵蓋幾個關鍵的演進步驟：

5G 演進分組核心網 (5G-EPC) (1)、商用 5G 核心網 (5GC) (2)、SA 試驗 (3)、SA 商用上線 (4)、商用 SA 服務 (5)。

第四個參數通過定義商用營運中最新的 3GPP 軟體版本來衡量**網路中的軟體成熟度**。3GPP R15 是首個引入 5G 的版本。後續版本的顯著新增功能包括 5G SA (R16) 和 5G Advanced (R18、R19 和 R20)。實際使用的版本也清晰地表明瞭市場對把握最新機會以提升網路能力和相關變現潛力的迫切需求。採用的等級範圍為 R15 (1) 至 R19 (5)。

參數五**涵蓋網路差異化連接**。從通用的「盡力而為」連接逐步演進到按需提供品質服務，以支援體驗創新。這些能力的排名依次為：盡力而為(1)、FWA 單切片(2)、企業切片(3)、消費者切片(4)和基於 API 的差異化(5)。

第六項也是最後一項衡量標準定義網路 / 產業網路所能支援的成熟度。從行動和固定寬頻逐步演進到任務關鍵型通訊。排名依次為：增強型行動寬頻(1)、固定無線接入(2)、專用行動網路(3)、虛擬專用行動網路(4)和任務關鍵型網路(5)。

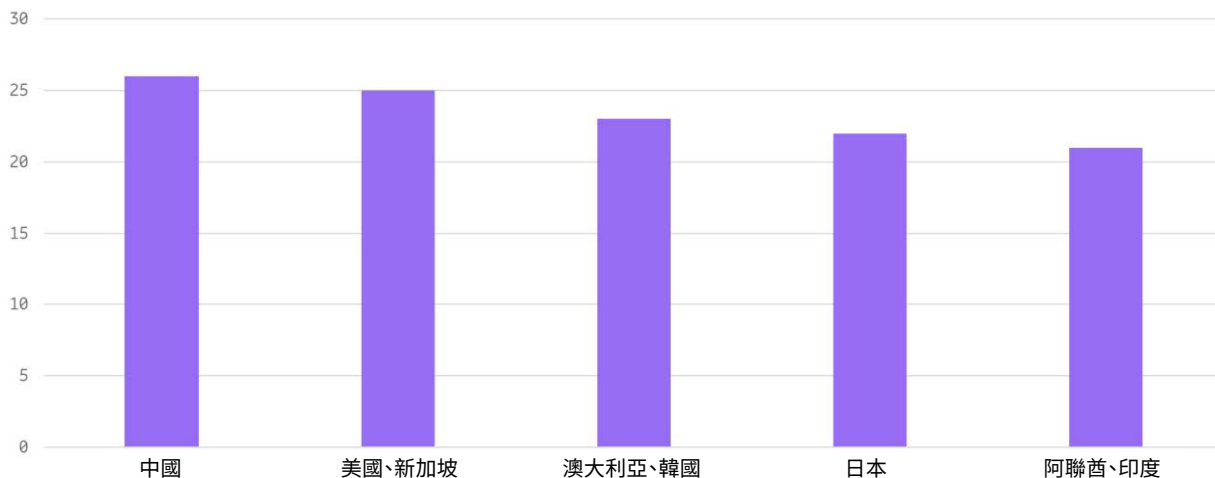


圖 2.2025 年先進 5G 市場的行動基礎建設成熟度

最先進的市場依賴於這六個參數的成熟組合。得分越高，表明借助 5G 基礎建設支持產業數位化轉型的能力越強。

在先進市場之間，許可中頻段頻譜（從 200 MHz 到超過 750 MHz）的分配和實際使用情況各不相同。

5G 中頻段人口覆蓋率存在顯著差異，新加坡、美國、中國、印度、韓國和阿聯酋的覆蓋率均超過 90%。

投資公共 5G 網路的營運商中，有 26% 選擇投資 5G 獨立組網 (SA) 能力。自 2022 年以來，該比例持續呈現適度增長的趨勢。

5G 獨立組網的早期採用者推動了差異化連接的應用，並拓展了服務範圍，以滿足新興產業和網路的需求。

先進市場已經部署了 5G Advanced。

該模型非常適合進行自我評估，並與先進市場進行對標。

¹³《愛立信行動趨勢報告》，2025 年 6 月

¹⁴《2025 年 4 月 5G 獨立組網》，全球行動供應商協會 (GSA)

美國 5G 消費者市場的成功經驗

自 5G 技術推出以來，美國在行動和固定寬頻服務的發展取得了巨大成功。該市場由少數幾家一級供應商提供服務，這些供應商採用雙寬頻策略¹⁵，5G 中頻段人口覆蓋率超過 90%。

行動寬頻與智慧手機

91% 的美國成年人擁有智慧手機，較 2021¹⁶ 年上升六個百分點。這意味著仍有 9% 的數位落差有待彌合。

5G 中頻段和大規模陣列天線 (Massive MIMO) 技術實現了性能的大幅提升。

截至 2024 年底，5G 在美國智慧手機用戶方案中的占比達到 70%。這一里程碑比 4G 提前了兩年實現。

過去三年，三家一級行動服務營運商的收入複合年增長率 (CAGR) 達到 3%。

多家服務營運商提供基於行動虛擬網路營運商 (MVNO) 的智慧手機服務，並與有線電視寬頻捆綁銷售，佔據月租型智慧手機用戶淨增數的 40%。

美國月租型智慧手機用戶的月流失率低於 1%。

愛立信預測，到 2030 年，北美 5G 智慧手機普及率將達到 91%，平均每月流量將達到 43GB。

固定無線接入 (FWA)

歷史上，固定無線接入 (FWA) 與有線網路替代方案相比存在性能差距。5G 是首項能成功與有線寬頻競爭的無線技術。

美國在 FWA 領域的價值主張基於對簡單性的重新構思，涵蓋服務 / 價值、交付時間短、易於安裝和支援。

在過去三年，FWA 佔據所有固定寬頻的淨增份額，光纖網路的增長抵消了數位用戶線路 (DSL) 的下降，而有線電視寬頻則經歷了從增長停滯到下滑¹⁷ 的轉變。

2023 年 6 月至 2024 年 12¹⁸ 月期間，美國固定寬頻的淨推薦值 (NPS) 和發展趨勢呈現顯著差異：FWA (44，上升 9)、光纖 (25，下降 10)、有線電視 (17，持平) 和銅纜 / 衛星 (6，持平)。

2023 年¹⁹，Verizon 網路中的 FWA 平均每月產生 524 GB 的流量。這大約是同期 Verizon 光纖網路 (FiOS) 每月產生的 640 GB 流量的 85%。

2024 年²⁰，81% 的美國成年人在家中能夠使用固定寬頻，這一數字自 2021 年以來僅增加了 2 個百分點。

結論

行動寬頻一直是擴大中頻段覆蓋範圍、採用獨立組網架構和引入網路切片的重要驅動力。所有這些因素共同建構了企業與工業應用的行動基礎建設。

FWA 有望繼續在固定寬頻增長中發揮主要作用，同時在擴大 5G 農村中頻段覆蓋範圍時，亦可能在彌合固定數位落差發揮更為顯著的作用。

FWA 取得了巨大成功，值得在企業和工業應用中推廣複製。

¹⁵ [美國供應商如何通過雙寬頻戰略展開競爭](#)

¹⁶ [《行動情況說明書》](#)，皮尤研究中心 (PEW Research)

¹⁷ [一級服務供應商財報電話會議和美國無線通訊和互聯網協會 \(CTIA\)](#)

¹⁸ [固定無線是美洲首選的下一代互聯網連接方式](#)，睿勤分析公司 (Recon analytics)

¹⁹ [《Verizon 2023 年消費者連接報告》](#)

²⁰ [《互聯網、寬頻發展說明書》](#)，皮尤研究中心

工業應用案例——影響與經驗

在 5G 發展的前半階段，就工業用例而言，產業並非停滯不前。然而，要全面瞭解新技術的導入是否帶來了實質性收益，就必須深入研究營運的狀況。只有當營運經理看到實際的優勢，能夠改善關鍵績效指標 (KPI) 時，他們才會繼續投資。首先，在各國及不同產業中均存在一些具有重要影響力的案例研究。其次，隨著時間推移，我們逐漸深入了解 5G 技術如何以及為何能夠推動工作流程的轉型。我們整合來自不同國家和垂直領域的八個應用案例，這些應用案例為可量化的轉型提供了深入的洞察，並能夠實現投資回報率 (ROI)。這些用例包括：

- 全自動化海港——荷蘭
- 醫院自動化——新加坡
- 汽車製造——英國
- 體育與娛樂場館——美國
- 前線人員前線人員——美國
- 礦業——澳大利亞

以下各章節將詳細討論這些應用案例。

全自動化海港（荷蘭鹿特丹世界門戶貨櫃碼頭，RWG）

高效的海港是現代航運的支柱。提高碼頭效率需要不斷優化碼頭、起重機和車輛的利用率，並減少對環境的影響。鹿特丹世界門戶貨櫃碼頭 (RWG) 是全球首個全電動、碳中和的貨櫃碼頭，也是一個充分利用先進 5G 基礎建設的港口。

問題說明

碼頭、泊位和航道為全球最大的船舶提供服務——這些船長 400 公尺、寬 60 公尺，能夠乘載超過 24,000 個二十英尺 (TEU) 的貨櫃。

減少港口營運對環境的影響——全球航運占總碳排放的 3%。

降低港口工作者的風險——包括卸載貨櫃以及將貨櫃從船舶運輸到卡車。

托運人員需對從船舶卸載到卡車上的集裝過程進行監測。

目標結果 / 成果驗證

RWG 平均每天處理 7,064 個貨櫃，大約花 12 秒處理一個²¹。

遠端操作起重機和車輛——在安全可靠的地點進行人工管理。

全自動化營運——全年無休，每天 24 小時不間斷。

所有港口營運均實現淨零環境影響——碼頭已經實現碳中和，未來是為靠泊船舶提供環境友善的電力。

在港口處理過程的各階段，為貨主提供透明的資訊處理服務。

解決方案概要

16 台遠端操作的碼頭起重機——每台每天可吊起超過 440 個貨櫃。

64 輛電動自動導引車——每輛每天可處理約 100 個貨櫃。

5G 網路解決方案洞察

- 行動專用網路解決過去連網的難題。

²¹ [RWG 進階碼頭數據](#)

- 最初採用 4G 網路，隨著頻譜的推陳出新逐步升級到 5G。
- 多餘的無線電配置。
- 使用行動專用網路營運已有 9 年的時間。

透過加固型平板電腦在貨物集裝區和參考區域之間進行資料傳輸。

將配備專用 4G SIM 卡的 MIFI 設備連接到筆記型電腦。

客戶應用伺服器與自動導引車 (AGV) 之間的資料傳輸。

結論

港口的戶外環境、岸肩橋式起重機和自動導引車自動化操作的重要性，使得行動專用網路成為最佳選擇。

同一港口不同泊位的數位化成熟度存在差異，而港口從 4G 向 5G 的網路演進取決於頻譜的取得性。

在自動化進程中採用 5G 技術的港口規模存在超過 300 倍的差距。

智慧醫療 / 醫院 (新加坡國立大學醫院, NUH)

5G 技術正在重塑醫療產業，它提供了先進的連網解決方案，改善了醫院的手術和照護服務，並將醫院照護服務延伸至居家環境。

作為新加坡國立大學醫療系統 (NUHS) 的主要醫院，新加坡國立大學醫院 (NUH) 採用 5G 作為先進的連接解決方案，以開發創新的醫療解決方案，改善患者體驗，並積極提高醫療服務的可取得性、開放性和效率。

問題說明

在醫院的先進手術和患者護理中採用新技術，提升患者體驗。

複雜手術耗時極長，且依賴於少數具備專業能力的頂尖外科醫師。

為了應用全像醫療等新技術，NUH 評估了醫院內的不同連網解決方案 (Wi-Fi、4G 和 5G)，以確定最穩定、高速、高頻寬和低延遲的連網解決方案。此次評估旨在透過應用全像和擴增實境 (AR) 配戴設備，欲提高外科醫生的手術準確性並縮短手術時間。驗證結果顯示，5G 是最適合全像醫療的解決方案。

護士的短缺成為照護服務的瓶頸。

目標結果 / 成果驗證：提高複雜手術的品質和成功率。

自 2024 年底起，對一款以 5G 技術為主的護士機器人持續進行測試，旨在減少護士在日常護理工作中的耗時，例如追蹤患者狀況、分配藥品等面對所有患者的日常工作。

5G 技術用於驗證機器人的精確定位能力，以確保患者能夠取得藥物。

營運兩年後的成果驗證

- 在輔助下進行的手術速度提升約 20% 至 30%。
- 目前正在對機器人護士承擔 30% 日常護理工作的效果進行驗證。

解決方案概要

虛擬企業專網 5G 解決方案利用公共 5G 網路覆蓋範圍，延伸至現有醫院，並在管制區域中的手術室部署小型基地台。

一位資深外科醫生並兼任國家創新負責人——這種方式確保創新措施能夠確實聚焦於最關鍵的挑戰。

為推廣 5G 在醫療保健領域的最佳實踐，並推動生態系統的全面就緒，NUHS、愛立信、薩赫爾格雷斯卡醫院 (Sahlgrenska) 和阿斯特捷利康於 2024²² 年共同發起了一項國際倡議——全球健康創新網路 (GHIN)。

微軟 HoloLens 在長時間複雜手術中為外科醫生提供支援。

NUH 推出「MiSSi 機器人」(30 台) 進行營運測試，以接替護士的部分日常工作。²³

發展：NUHS 將繼續推進 5G 解決方案的進步並著重於新的醫療應用場景，例如為醫護人員提供順暢的連接、5G 先進功能以及規劃新醫院。

結論

在醫院採用 5G 作為先進的連網解決方案，可以打造緊密連結的醫院，成效顯示這不僅能提升患者體驗，也能提高醫生和護士的工作效率。

虛擬企業 5G 專網解決方案利用 5G 公共網路的覆蓋範圍和容量，通過專用室內覆蓋和容量進行增強。實務運作中已證實，該方案既能為手術室提供專用的先進連網解決方案，又能確保患者和護

理人員無論身處手術室、醫院，甚至必要時在患者家中，都能獲得進階連網服務。

為加速 5G 技術在醫療照護領域的應用，並為更多醫院提供新的進階數位解決方案，醫院、技術供應商和生態系統中的其他參與者之間的持續合作相當關鍵，這將加速醫療照護的數位化進步，提高醫療品質、可取得性和可用性。

汽車製造 (捷豹路虎英國公司, JLR UK)

製造業是早期導入企業 5G 專網的產業之一，尤其是汽車製造業。

位在英國 Solihull(索利赫爾) 的捷豹路虎工廠已採用企業專網 5G 網路，並帶來重要的啟發。

問題陳述

任何汽車工廠的生產效率都取決於能否按照計畫和將預期的所有材料、工具放置於正確的位置。最大幅度地降低與計畫的誤差是一項核心關鍵績效指標 (KPI)。

以往的無線網路穩定性不足，且無法涵蓋工廠的所有區域。

在車型變更時，針對以有線方式連接的設備進行網路的重新配置，通常需要數週才能完成。

汽車在最終組裝完成，會安裝針對特定市場的軟體，這一過程多半仍仰賴人工操作。

品質控管仰賴於在生產過程中從感測器和設備記錄的大量資料。

²² [愛立信支持全球健康創新新加坡網路](#)

²³ [監測患者狀況的機器人護士,將於 2025 年在 NUH 進行試點。](#)

目標結果 / 成果驗證

汽車工廠的整體生產效率取決於最大程度地降低停機時間。每分鐘的停機成本高達 5 萬美元。²⁴

無線連網設備可消除因車型變更時所需的網路配置時間。將原數周的時間縮短至僅需數秒。

將網路覆蓋範圍擴展到難以到達的區域，例如噴漆車間以及存放所有待發貨組裝車輛的區域。

特定市場車輛軟體在最終組裝後可通過空中下載（Over The-Air, OTA）方式自動上傳，無需手動安裝。

蒐集設備與機器的效能資料。

為自動駕駛車輛做好準備，讓車輛能在產線完成後自動駛離，並於出貨前行駛至指定停放位置。

解決方案概要

英國的捷豹路虎公司（JLR）利用區域 5G 創新基金加速企業 5G 專網²⁵的部署。

愛立信為該工廠提供涵蓋廠區建築的企業 5G 專網²⁶，並逐步擴大其覆蓋範圍。

採用 JLR 直接授權的 3.8–4.2 GHz（n77 頻段），傳送速率約為 900 Mbps。²⁷

同時攜手生態系夥伴，支援原生與非原生 5G 裝置及製造應用。

結論

汽車製造業因其龐大的規模且具顯著的產能提升潛力，成為大規模 5G 網路建設的目標應用領域。

世界經濟論壇（WEF）將全球 189 家工廠列為「燈塔工廠」²⁸，其中 17 家為汽車工廠，僅次於電子產業的第二大類別。

美國體育和娛樂場館的業務營運

2020 年初，5G 技術首次在美國的體育與娛樂場館導入，讓球迷提體驗，如今已廣泛成為球迷在大型活動中連網的方式。

除了球迷可以連接的公共 5G 網路外，企業 5G 專網和公共 5G 網路切片已開始改變體育和娛樂場館的業務營運模式。

此方案適用於經常舉辦活動的固定場館，以及各類年度大型盛會。以下為美國的實際案例。

問題說明

主要體育與娛樂場館的營運面向的多元性，許不同的行業領域正在推動著數位轉型。

場館入口處需要流暢的檢票證流程與安檢效率。

各類媒體製作對影像品質、拍攝角度與內容傳輸的速度之要求日益提升。

食品、飲料和商品的高銷量。

²⁴ [Thomas](#)

²⁵ [Department of Science, Technology and Innovation, UK](#)

²⁶ [愛立信專用 5G 支援捷豹路虎的數位化製造轉型](#)

²⁷ [TechInformed](#)

²⁸ [全球燈塔網路由 189 座燈塔工廠組成](#)，世界經濟論壇

目標結果 / 成果驗證

讓體育和娛樂場館²⁹ 商業營運的優先連網方式。

透過智慧手機、平板電腦和電子支付終端³⁰ 實現快速又安全的交易。

即時且安全地將比賽中的設備所產生的資料傳輸給團隊進行分析。³¹

透過無線連接³² 電視攝影機，讓體育賽事、音樂會和新型實境節目的製作更具彈性與創意。

縮短體育攝影師從捕捉精彩瞬間、編輯到發佈照片³³ 的時間。

5G 網路能夠高效傳輸資料，提供即時的可用停車位、洗手間和食物攤販的訊息³⁴。

在場館發生緊急情況時，為前線人員提供優先的連網。

解決方案概要

在體育和娛樂場館部署企業 5G 專網或公共 5G 網路切片，以便提供球迷使用的公共 5G 網路。

在常用場館內安裝永久性無線設備，並於賽車場和高爾夫球場等每年舉辦一至數場大型活動的場所，增加臨時無線網路容量。

網路切片與服務品質隨選 (QoS) 網路 API 實現的動態服務品質相融，為客制化服務提供可能性，以滿足不同營運和應用需求。

裝載在船上的愛立信 Cradlepoint 邊緣路由器將參賽帆船的感測器數據和影像傳輸給岸上團隊和廣播公司。

5G 數據傳輸器³⁵ 連接電視攝影機和無反光鏡相機，可拍攝靜態照片。

結論

5G 在美國的體育和娛樂場館已得到廣泛應用，既為球迷提供服務，也支援場館的業務營運。

連接美國前線人員

升級後的行動通訊基礎建設可支持任務關鍵型的應用，升級後的行動基礎建設可支持任務關鍵型的應用，美國前線人員已經證明 4G 和 5G 基礎建設在任務關鍵型應用中的可行性。

問題說明

美國在 2001 年 911 事件後的分析發現，各機構間在通訊協調方面仍有明顯的改善空間。這促成了 FirstNet 的建立；一個旨在利用行動通訊技術、專為前線人員提供服務的全國性網路。前線人員使用的傳統專用語音和訊息服務網路已達使用上限；這些網路的容量過低，且無法覆蓋全美國土。

因受限於網路與技術條件，常使緊急任務無法達到預期的成功率。

²⁹ [《賽車運動升級》](#)，Verizon F1 案例研究

³⁰ [《賽車運動升級》](#)，Verizon F1 案例研究

³¹ [帆船大獎賽 \(Sail Gp\) 選擇愛立信作為 2025 賽季的全體技術供應商](#)

³² [T-Mobile 為 2025 年美國職業高爾夫球錦標賽 \(PGA Championship\) 提供了有史以來連線性最強的賽事體驗之一](#)

³³ [T-Mobile 將在一級方程式海尼根銀級拉斯維加斯大獎賽上首次推出由 5G 驅動的全新球迷體驗](#)

³⁴ [5G 與體育和娛樂](#)，美國電話電報公司商業部

³⁵ [5G 可攜式資料傳輸器](#)，索尼 (Sony)

預期結果 / 成果驗證

網路已覆蓋前線人員所有的出勤區域。美國目前的行動通訊設備覆蓋 350 萬平方英里土地中的 300 萬平方英里，³⁶ 相當於涵蓋 99% 的前線人員。

在文字與訊息服務之外，持續擴充容量以支援影音與數據傳輸服務。最初由 4G 技術支援，目前正逐步向 5G 技術演進。

導入新型專用設備，並優化現有裝置的版本，使其能在嚴苛環境下穩定運作。

在緊急情況下，當前線人員與一般用戶及其他單位共用網路資源時，可獲得優先連線權限。

解決方案概要

透過增強現有行動通訊設備的功能來支援任務關鍵型的應用，而非建立新的私人網路。

美國的前線人員有兩個主要選項：

- FirstNet：AT&T 行動網路為前線人員提供的專用擴充網路，最初投資 65 億美元³⁷，近期又追加 80 億美元的擴充投資³⁸。
- 公共 5G 網路切片：紐約市選擇了 T-Mobile 的 T-Priority 服務，威瑞森前線（Verizon Frontline）已於 50 個城市³⁹ 推出。⁴⁰

優先運用低頻段頻譜，以最大程度擴大現有建設基地台設備的網路覆蓋範圍，並搭配「網路擴展」策略，透過新建基地台補足覆蓋缺口。

在無線電網站配置備援的電池，以確保在緊急情況導致停電時，網路仍可運作。

強化設備和應用程式，以滿足前線人員在地面和空中的需求。

透過網路切片技術，優先將可用頻寬資源分配給第一線應變人員及其他執行緊急任務的單位。

同時以非地面網路（NTN）補強覆蓋範圍，延伸至美國境內尚未由行動網路覆蓋的最後 50 萬平方英里地區。

結論

行動通訊基礎設備可為任務關鍵型之應用服務，並且美國的供應商已為所有任務關鍵型應用提供方向，例如公用事業和鐵路領域。

礦業

（澳大利亞紐蒙特公司，Newmont）

5G 技術可用於地下及露天礦場協助採礦業⁴¹。

自 2019 年以來，澳大利亞紐蒙特礦業公司便開始利用企業 4G 及 5G 專網，並在此過程⁴² 中取得可借鏡的經驗。

問題說明

提高在露天礦場操作機具設備時的安全性和效率。

露天礦場中的網路設備需要頻繁遷移，且遷移時需要人工操作。

³⁶ [FirstNet by the Numbers](#)

³⁷ [AT&T 獲得 65 億美元 FirstNet 合約](#)

³⁸ [FirstNet 管理局與 AT&T 簽訂 10 年擴展合約](#)

³⁹ [T-Mobile 為 T-priority 推出重大措施，將第一線救災人員放在首位](#)

⁴⁰ [威瑞森前線網路切片現已在全國範圍內可用](#)

⁴¹ [A journey to cellular and the safer, smarter and sustainable mine](#)

⁴² [5G 創新助力推土作業更安全、智慧](#)

其他無線解決方案的斷線情況正影響生產效率。

而其他的無線解決方案覆蓋範圍亦有限。

預期結果 / 成果驗證

減少對實體佈線的依賴，提高靈活性，精簡安全和操作流程。

將人員從高風險區域（即露天礦場）撤離。

實現高輸輸量和穩定連線，支持遠距操作。消除特定區域內連接設備類型和數量的限制；全面作業需要 132 Mbps 的上行網路容量。

提升遠距操作體驗，使其更接近於在駕駛室內進行操作的體驗。

減少因不穩定和網路中斷而導致的停機時間。

隨著提高生產效率需求的增加，能夠擴大車隊規模。

解決方案概要：支援在礦區中部署支援 5G 的設備，減少實體佈線，提高靈活性，簡化安全和操作流程。

透過 5G、大規模陣列天線（Massive MIMO）以及波束成形 / 轉向技術實現大型施工機具的遠端操控。

企業 5G 專網僅需配置單一無線電設備，可在長達 3 公里 / 2 英里的距離內提供 100 Mbps 的上行鏈路，為露天礦場提供足夠的覆蓋和容量。

結合定向即時音訊、影像和觸覺回饋技術可提高駕駛員的工作效率和反應速度，同時縮短練訓時間。

能夠滿足礦區的任何地點、任何輸送量要求的 5G 平臺。

結論

採礦業嚴苛的作業環境，行動專用網路解決方案的穩定性與可靠度是實現高效遠距操作的關鍵。

基礎建設到推廣應用：連接各個環節

對於企業領導者而言，圍繞 5G（或任何變動性的基礎建設）的討論最終都歸結為投資報酬率（ROI）和總持有成本（TCO）。除非網路速度、延遲和覆蓋範圍能夠轉化為企業高層可量化的營運指標，例如降低成本、加速流程、提升品質和提高營運規模的靈活性等，否則這些指標毫無意義。

本文的應用案例，從 AI 導入手術到自動化物流車隊，並非僅是技術層面的創新。它們代表營運上的一大突破，而這些則依賴於能夠提供低延遲連線、即時運算能力和高可靠度通訊的根本數位基礎建設。若缺乏這樣的基礎，這些方案僅能停留於原型階段；而有了它們，便能成為推動競爭優勢的實際動力。

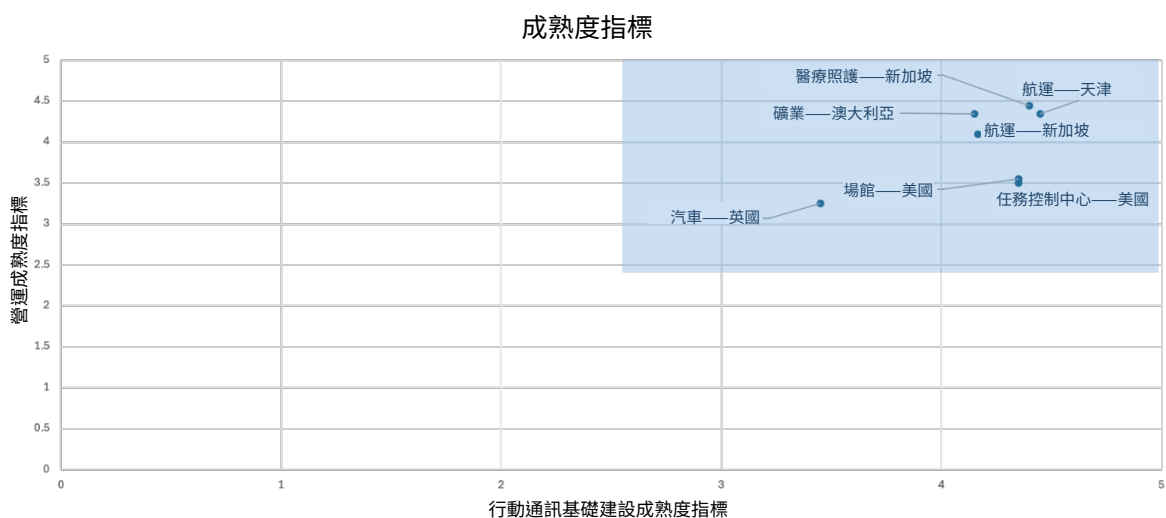


圖 3. 連接各指標間的環節

為量化完備程度，我們使用了營運成熟度指標 (OMI)。該指標綜合考慮了四個關鍵面向：

1. 成本效益——可量化的節省與資源浪費的減少；
2. 解決方案 / 服務成熟度——日常營運中的穩定性、正常執行時間和恢復能力；
3. 生產力提高——每單位投入（無論是時間、勞力還是資源）的產出；
4. 靈活度——適應不同環境、規模和工作流程的能力。

跨產業比較應用案例是複雜的——醫院手術時間 30% 的縮短與汽車工廠每輛車節省 1 萬美元，儘管在各自領域都具有深遠的營運影響，但兩者之間並不能直接地比較。然而，透過這四個面向的指標進行標準化處理，我們得以更精準地比較各項成熟度，並評估哪些投資能創造超額回報。

圖 3 以運作成熟度與基礎建設成熟度為軸，對兩者的關係進行視覺化呈現。此一示意圖，而並非精確的比較。從圖中可見：最具影響力的產業應用為——智慧港口、汽車製造、智慧醫療——都集中在右上角。這非巧合。這些環境展現，基礎

建設投資、支持度高的政策框架和積極的推廣策略間的高度協調。當這三方彙聚時，各產業將能夠從試驗性部署階段邁向可規模化、可複製的實質影響階段。

對於政策制定者、營運商和企業領導者來說，訊息相當明確：

- 只有基礎建設而缺乏推廣應用，將使投資淪為效益不彰的資產——也就是一筆無法充分展現經濟潛力的沉沒成本。
- 建設若在缺乏完善基礎建設的情況下嘗試推廣應用，往往導致測試項目停滯，難以達到預期效果。
- 唯有當基礎建設、政策和產業採用同步的策略時，才能在經濟上才能充分釋放 5G、AI 及其他技術所蘊含的生產潛力。

在產業轉型的背景下，這不僅是理論——更是關乎競爭性生存的關鍵。能掌握整合能力的國家和企業，不僅將在 5G 時代的應用中取得領先地位，更將在 6G 時代獲得決定性的優勢——屆時，複雜度與經濟風險將愈發顯著。

結論與未來工作

5G 在全球的部署速度前所未有，但其真正的價值並不在於連線數量或覆蓋範圍——而在於這項技術能融入全球經濟的產業結構中。5G 影響力的真實案例體現在全球各地的工廠、港口、礦區、能源網、物流樞紐以及研究實驗室中。

從新加坡國立大學醫院的醫生們積極利用技術提升手術流程和結果，到英國的捷豹路虎工廠引入超低延遲機器人技術，再到澳大利亞的智慧採礦作業利用企業 5G 專網實現設備的即時追蹤，結論相當明確：工業應用案例劃定了 5G 經濟潛力的前沿。

然而，各國在實現成果的途徑上不盡相同。以市場導向為核心的美國，打造了促進企業創新的多元生態系統——例如愛荷華州⁴⁵利用 5G 連接的無人機進行精準農業噴灑，或航空航太樞紐利用擴增實境（AR）技術輔助飛機維修——但在網路密度和頻譜政策整合方面仍面臨許多挑戰，限制了重工業的大規模發展。在營運商競爭激烈的背景下，印度以驚人的速度實現了消費者的廣泛連網，並開始導入工業測試應用——例如蘇拉特（Surat）的 5G 紡織品質檢測系統，但仍面臨頻譜成本高和光纖回程不足的問題，仍限制了企業潛力進一步的釋放。

在高、中、低收入國家之間，差距正在逐漸擴大：那些只專注於基礎建設部署的國家可能會在轉型的門檻前停滯不前，而那些整合頻譜政策、產業策略和勞動力發展的國家則在創造實際經濟價值方面領先一步。非獨立組網（NSA）網路的持續

存在以及先行企業對企業（B2B）解從決方案的緩慢推廣可知，如果不積極推動 5G 在能源、製造、醫療、交通等產業的應用，5G 的潛力將難以得到充分發揮。

5G 領先優勢的窗口正在迅速關閉。早期採用者不僅能取得競爭優勢——還能掌握整個經濟生態系統，形成強大的吸引力，吸引人才、資金和創新。隨著這些先行企業確立市場的主導地位，它們將獲得更多優勢：包括更深厚的專業實力、生態系、更穩固的合作關係，以及難以被複製的領先地位。

對於後進者而言，拖延的代價可能是無法挽回的。一旦人力、風險投資和產業關注都匯集於早期領導者周圍，想要追趕的成本將呈倍數上升——甚至可能再也無法追上。5G 的推進應用鼓勵著先行者，猶豫不決的話將錯過轉型契機，在未來的數位經濟中，沒有第二名的生存空間。

本報告旨在提供一套評估框架，評估國家、案例研究與全球各產業的實踐，縮小差距及所需的關鍵行動。本文還探討了來自多國的應用案例，供產業與政策制定者參考，制定自身的發展藍圖。因此，本文是一持續更新的檔案，既能追蹤進展，又能在新的應用案例出現時補充具體案例。

5G 應用推廣的啟示十分明確：國家在通訊技術領域的實力，取決於其能否在整個經濟體層面上快速且有效地落實與擴散這些技術。隨著全球邁向 6G 時代，那些放眼於長遠投資和整合政策、資本與產業力量的國家，將成為下個引領者。

對它們而言，5G 的故事不在於建造了多少基地台，而在於改變了多少個產業。這種轉型不僅將決定未來數十年的 GDP 增長，更將塑造地緣政治格局的影響力。

⁴¹ [建立 5G 精準農業連接](#)