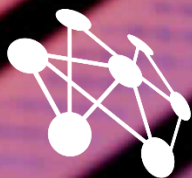


移动技术创新的 下一波浪潮

在志向远大的经济体中, 先进的
移动基础设施正加速产业转型

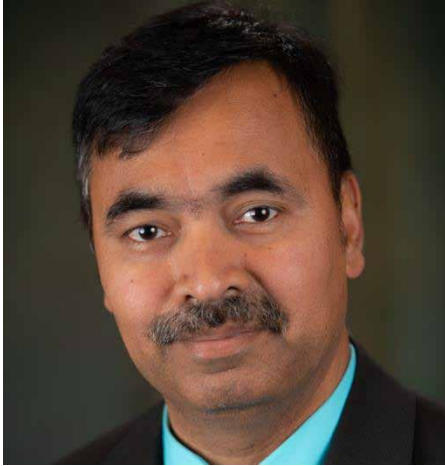


chetan sharma
CONSULTING



ERICSSON

作者



Chetan Sharma
Chetan Sharma Consulting公司首席执行官

Chetan Sharma是Chetan Sharma Consulting公司首席执行官,也是移动通信行业的顶尖战略家之一。

他曾为多家无线通信行业财富100强企业的高层管理团队提供战略咨询,而且可能是唯一一位曾为全球各大洲顶级移动数据运营商提供过顾问服务的行业战略家。

Chetan曾担任或正在担任多家企业及初创公司的顾问委员会成员,其客户涵盖无线和科技行业的领军企业。Chetan撰写或与他人合著了15本关于无线通信的著作,这些著作已被纽约大学(NYU)、斯坦福大学和东京大学等高校的企业培训项目和课程采用,其研究成果在业内被广泛引用。

他拥有堪萨斯州立大学(Kansas State University)电气与计算机工程硕士学位,以及印度理工学院鲁尔基分校(Indian Institute of Technology, Roorkee)电气工程学士学位。www.chetansharma.com



Erik Ekudden
爱立信高级副总裁兼
首席技术官



Magnus Ewerbring博士
爱立信亚太区首席技术官



Peter Linder
爱立信美洲区战略洞察负责人

移动技术创新的下一波浪潮

5G已成为行业史上部署速度最快的技术，5年内用户签约数突破20亿¹。消费者接纳速度之快在美国、中国、印度、韩国和日本尤为显著。此外，固定无线接入（FWA）等新服务已彻底改变了美国的宽带市场竞争格局，在过去几年中几乎囊括了全部净增用户数。

尽管增长迅猛，但5G的全部潜力尚未真正释放，因为多数运营商仍依赖非独立组网（NSA）架构。在全球633家运营商中，仅有26%（即163家²）投资部署了能释放5G全部潜力的独立组网（SA）。没有SA，运营商便无法充分实现其价值：各行业完成工作流程转型所需的大规模自动化、超低时延、网络切片及任务关键型可靠性。

尽管5G的爆发式增长频登各大媒体的头条，但这掩盖了一个关键现实：完整5G的变革性力量在很大程度上仍未得到开发。2024年全球5G签约用户数增速高达42%³，这一惊人数字制造了欣欣向荣的发展假象，却掩盖了只有通过5G独立组网部署才能释放其革命性潜力的事实。

这不仅是技术差距，更是正在重塑全球竞争力的战略鸿沟。超过90%的5G SA客户集中在中国、印度和美国这三个市场，这意味着其他地区在下一代数字基础设施的竞赛中正被甩在后面。那些目前果断推进SA的运营商和国家，不仅仅是在建设网络，更是在铸就其在未来经济中的领先地位；而他们的竞争对手则仍困于老旧技术，误以为5G的营销宣传就是5G的现实。

随着我们进入5G时代的后半程，各国和运营商必须聚焦于建设SA和5G Advanced能力，以帮助扩展5G并将其深度嵌入各行业的业务流程中。已完成部署的运营商正从新的收入来源中获益，建立起可持续十年以上的业务模式，并赢得经得起时间考验的竞争优势。那些在各行业垂直领域培养并吸收5G作为通用技术专业知识的国家，将从5G及相关技术中获得最大收益。反之，未能投资建设此类能力的国家将会落后。这对各国及其生态系统如何努力采纳和实施5G及AI等新技术以加速GDP增长，具有重大的政策启示。

本报告讨论了战略路线图及可行路径，旨在帮助无线行业领导者在2025至2030年间获取最大市场价值，同时为赢得6G领导地位奠定必要基础。对先行市场的分析显示，对固定无线接入（FWA）和先进移动宽带（MBB）解决方案进行针对性投资，可持续带来企业客户满意度提升与收入增长。因此，FWA在固定宽带总线路中的占比将从2024年的11%增至本十年末的18%。

借鉴美国、中国、印度、新加坡、英国、澳大利亚、瑞典和日本的成功经验，我们识别出企业通过战略性垂直整合和基础设施优化来持续实现可持续高个位数增长的机遇。本报告阐述了无线行业高管面临的三大关键要务：可持续收入增长、差异化竞争优势以及下一代技术的战略定位。

¹《2025年移动经济报告》

²《5G独立组网》，2025年4月，GSA

³《爱立信移动市场报告》，2025年6月

我们的研究结果显示，企业越早专注于垂直领域，就越容易确立长期市场主导地位。

本报告提出了一项全新的“移动基础设施成熟度指数”，诠释了行业领军者的成功之道：适时的政策引导、积极采用新技术并成功转化为实际收入的能力，以及保持创新的战略视野。在该指数上的排名直接决定着国家的工业化成熟度，这进而转化为GDP增长、就业机会，以及国家在快速演变的格局中的未来适应性。本报告中的案例研究涵盖港口、医院、场馆、制造业、应急服务与采矿等多个工业领域，帮助我们厘清了从5G投资到新的十亿美元级收入流，再到国家GDP持续增长之间的内在联系。

那些未能调整战略以利用5G机会的国家和运营商，面临着完全错过此轮发展周期的危险。一旦落后，供应链的变迁可能是永久性的，造成的损失也将难以挽回。

每个国家都有其独特的支柱产业。我们使用不同的案例来阐明这一点。各国无需效仿他国的做法，而应理解如何借助5G与人工智能等技术工具，实现本地产业与经济转型。5G的广泛普及对本国产业的可持续性至关重要，否则生产活动将转向效率更高的市场。

通过整合全球最佳实践并利用新兴技术，本报告旨在引导相关利益方在技术价值链中获取更多价值，并通过战略布局在2030年及以后确保连接领域的领导地位，为6G的启动构建必要平台。

工业5G是电信运营商的根本战略，也是数字化转型的核心要素。但若缺乏新能力的持续注入，价值将不断流失。我们预计工业5G/6G将在未来十年产生数万亿美元的经济价值，而最具远见的运营商将成为这一新收入流的积极参与者。运营商的增长与未来命运比以往任何时候都更加依赖于其工业5G战略。

工业5G的全球成功实践

5G标志着移动技术发展周期的一个重要转折。与前几代技术不同，5G既重视新型接入技术，也同样强调核心网络的转型。或许更重要的是，它标志着网络概念本身的改变——网络不再只是通信基础设施，而是一个平台，能够引导并支撑其他产业的转型。

当前行业面临的重大机遇是“规模化工业自动化”（Industrial Automation @ scale）⁴，而5G在其中扮演着重要角色。与其他同步发展的“S曲线”（S-curve）技术一起，5G能够加速工作流程自动化进程。我们不应孤立地看待5G，而应将其视为助力全球工业路线图的重要工具。当企业将5G与人工智能、边缘计算、机器人等技术一同作为自动化的赋能工具时，他们通常能成功将5G融入工业工作流程的架构中。然而，当销售团队向企业单纯推销5G时，却往往遭遇冷遇或收效不佳。

随着企业在自动化进程中不断成熟，移动运营商也可同步演进，提供更复杂的解决方案。对运营商而言，除了提供连接服务，下一步自然是提供云服务、

⁴《5G杀手级功能的变现：规模化工业自动化》，2024年

边缘计算解决方案以及专用网络。此外，运营商可以为企业提供和/或托管垂直领域或企业特定的人工智能/机器学习（AI/ML）模型。在某些垂直领域，运营商可以提供具体解决方案，如中国移动在采矿、NTT DoCoMo在物流、AT&T在车联网、Verizon在公共安全、沃达丰在追踪溯源、Telus在医疗保健等领域的解决方案⁵。这种演进将很好地契合从基础自动化迈向高级自动化、计算与连接解决方案的企业。运营商的收入份额将取决于其在特定垂直领域的参与深度。对企业而言，自动化程度越高，效率提升越显著。

5G已逐步融入企业供应链的各个环节。从基础连接到运行于5G网络上的完整应用体系，企业级5G市场已为移动运营商带来数十亿美元的收入潜力。以下是一些典型案例：

•**5G港口**：全球80-90%以上的贸易通过海港进行，因此任何拥有港口的国家都必须高效地完成船舶周转和集装箱装卸，以实现成本最优化。天津港、新加坡港、坎德拉港（Kandla）和鹿特丹港等领先港口已实现自动化运营，利用自动化重型起重机和自动驾驶电动车运载集装箱。就二十英尺当量单位（TEU，衡量港口处理集装箱数量的标准）“标准箱”处理能力而言，天津港已跻身全球前十。天津港在运营效率和吞吐量方面取得了显著提升，单台起重机的作业效率提升超过40%，借助5G、专用网络、边缘计算和人工智能等技术，该港口已实现100%自动化⁶。

•**5G救护车**：尽管印度的5G部署起步较晚，但这并未阻止其立即启动工业项目。移动运营商Airtel于2022年第四季度推出5G网络后，便与著名的Apollo医院合作，推出了5G救护车。

救护车内的先进设备配备患者监测应用、遥测装置、摄像头以及医护人员佩戴的随身摄像头，全部通过5G网络与医院实时连接。

•**5G采矿**：矿区通常是最恶劣的工作环境，连接与数据的重要性不言而喻。采矿业是最早采用5G、专用网络和边缘计算的行业之一。它们不仅利用这些技术保障工人安全，还通过使用自动驾驶车辆和机器人远程操作来从根本上改变其运营模式。巴西布鲁库图（Brucutu）和卡拉哈斯（Carajas）、中国栾川、瑞典基律纳（Kiruna）以及澳大利亚皮尔巴拉（Pilbara）的矿业公司正在使用这些新工具实现运营自动化和流程优化。

•**5G医院**：全球首个医疗机构商用5G专用网络于2019年底在中国四川上线。此后，韩国、泰国、英国、以色列、印度和美国也陆续上线了5G赋能的医院。医院对数据处理能力和时延要求极高。高带宽专用网络连接与边缘计算节点相结合，不仅提升了现有运营的灵活性，还引入了基于虚拟现实（VR）的疼痛缓解、远程手术辅助和下一代远程医疗等新疗法。

•**5G学校**：疫情暴露了许多国家宽带基础设施的差距，因为学生被迫居家学习却难以便捷地接入互联网。5G固定无线接入技术及时出现，为学生和学校提供了必要的稳定连接。这不仅适用于农村地区，也覆盖了大城市的市中心区域。

⁵《5G与第四浪潮——更新》，2022年

⁶《5G变现与卓越运营》，2024年

•**5G工厂**：制造业是5G应用的热门领域。云机器人等新兴领域结合了云计算、人工智能、机器人技术和5G网络的能力，必将对企业和消费电子产业产生显著影响。在社会层面，关于自动化和机器人在制造业中的作用及其对就业的影响已引发广泛讨论。然而，对于缺乏廉价劳动力或面临劳动力短缺问题的国家（如日本），5G与机器人技术的结合有望开启制造业的新纪元。

长波（Long Wave）理论的学者，如Nikolai Kondratieff⁷、Joseph Schumpeter⁸和Carlota Perez⁹，曾深刻阐述了“创造性破坏”（creative destruction）在振兴经济过程中的作用，即“工业突变不断地从内部革新经济结构，不断地破坏旧结构，不断地创造新结构”。在过去三百年间，经济的这种基本周期结构不断重复。最近，我们经历了互联网、移动宽带和云计算的演进。

5G正在创造新的机遇。如果上一个周期能给我们任何启示的话，那就是：数字化将成为整个生态系统收入增长的中心。如果说4G催生了数字增长曲线，那么5G将由这些曲线来定义。若运营商对自身网络与运营策略缺乏清晰战略，即便启用了5G，其在5G价值链中的角色也将被边缘化。

为实现最大化增长，移动运营商必须采取双重战略：一方面坚持5G部署路线图，另一方面构建企业级产品与服务。在5G方面，他们应部署支持企业应用和服务的先进5G能力，如独立组网5G、边缘计算架构、专用网络解决方案、网络切片等功能，以及5G Advanced升级以支持低时延和大规模物联网

应用。此外，在企业业务方面，移动运营商需要同时在使能层（平台、分发、API、分析、安全等）以及应用和服务层培养专业能力。这将需要投资于系统集成专业知识，并积累使用5G和人工智能部署自动化解决方案的经验。

经济增长引擎的三大支柱—— 基础设施、政策与技术普及

“基础设施作为经济增长催化剂”的理念与人类历史一样古老。古代美索不达米亚（Mesopotamia）、埃及和罗马文明均通过投资基础设施来推动经济发展与就业增长。在现代社会亦是如此。互联网重塑了经济结构，成为推动产业与经济走向现代化的强大平衡工具。过去15年，LTE、云计算与智能手机的兴起塑造了全球经济格局。如今，人工智能、5G、边缘计算、云服务与自主系统等技术正在改变工作流程与业务模式，为企业经营者提供重塑生态系统与客户关系的工具。

进取且前瞻性的基础设施规划是基本前提。基础架构层发挥着经济倍增器的作用。同时，这必须辅以支持增长和创新的政策，鼓励新想法的形成，并推动关键技术的采纳，从而构建经济的支柱。除非在技术普及层面专注执行，否则基础设施与政策无法充分发挥其效能。正是技术的普及赋予了经济真正的活力¹⁰。

因此，基础设施、政策与技术普及三者协同作用，才能为经济体提供加速产业转型所需的动力。

⁷《康德拉季耶夫周期》

⁸《经济发展中的长波》

⁹《技术革命与金融资本》，Carlota Perez, 2002年

¹⁰《5G普及、密度与规模》，2025年

我们已在全球范围内目睹了这一机制的实际运作。部分市场依靠自由市场经济与需求驱动获得发展，例如美国消费市场、重塑美国宽带格局的固定无线接入（FWA）、以及场馆运营与应急响应中的5G技术普及。其他市场则需要政策与技术普及之间的紧密联动，才能推动行业向前发展。

在衡量海港运营绩效的集装箱港口绩效指数（CPPI）前100名中，中国和印度拥有的港口数量最多¹¹。中国在全球“灯塔”工厂网络中拥有的工厂数量最多¹²。

每个国家都有其自身的重要产业。因此，它们的经济架构战略会略有不同，但基础设施、政策与技术普及这一基础框架的协调一致，仍是经济增长的根基。当这些支柱协调一致时，价值链就会蓬勃发展，新的理念和微观经济体将不断涌现。这将成为推动增长与全球竞争力的基础。

¹¹《CPPI指数》，2024年

¹²《全球灯塔工厂网络》，2025年

移动基础设施成熟度指数

各国的移动基础设施成熟度存在显著差异,因此其在一国支持数字化转型举措方面所能发挥的作用也各不相同。

为更好地了解一个国家的移动基础设施发展程度及其竞

争力,可通过一组关键参数进行评估,并按1至5的等级对每项参数的成熟度进行评分。

为评估移动基础设施成熟度,我们选定了六个关键参数。这些被选定的参数是前瞻性指标,能反映移动基础设施对于支撑各类业务关键型和任务关键型应用数字化转型的准备状况。

	1	2	3	4	5
Network/Industries	Enhanced mobile broadband	Fixed Wireless Access/Wireless Access Network	Private cellular networks	Virtual private cellular networks	Mission-critical networks
Differentiated connectivity	Best effort	Fixed Wireless Access slice	Enterprise slices	Consumer slices	Network API enabled
Software maturity	Rel-15	Rel-16	Rel-17	Rel-18	Rel-19
Adoption of standalone architecture	5G-EPC	5GC	Standalone trials	Standalone launch	Commercial standalone services
Midband population coverage	<30%	30-50%	50-70%	70-90%	>90%
Midband spectrum allocations	0-199 MHz	200-399 MHz	400-599 MHz	600-749 MHz	≥750 MHz

图1:移动基础设施成熟度指数构建框架

以下参数是我们进行排名的基础,也非常适合运营商和国家进行自我评估。

第一个参数是5G新中频频谱的分配进展情况,以及市场是否拥有足够的授权全功率频谱(licensed full power spectrum)以支持未来十年的5G容量增长。新的中频频谱是区分国家间5G能力的主要指标,也是自2022年以来被深入分析的话题。评分标准如下:0-199MHz(1分),200-399(2分),400-599(3分),600-749(4分),750以上(5分)。

第二个参数是中频人口覆盖率。5G中频覆盖范围越广,其在户外、城市室内环境的工业应用潜力就越大,对农村地区中小企业的支持能力也越强。5G中频人口覆盖率评分标准如下:低于30%(1分)、30-50%(2分)、50-70%(3分)、70-90%(4分)、高于90%(5分)。

第三个参数是5G独立组网(SA)架构的采用情况,这是一个能力分水岭。仅限于5G非独立组网(NSA)的网络,向企业和政府客户提供的价值主张仅限于5G覆盖和容量。向SA架构转型可实现动态网络切片与5G Advanced能力。向SA过渡的学习曲线陡峭,越早行动,在此过程中积累的经验就越多。SA采用情况的评分标准包括以下演进阶段:5G-EPC(1分)、商用5GC(2分)、SA试验(3分)、SA商用发布(4分)、SA商用服务(5分)。

第四个参数是网络软件成熟度，通过当前商用运营的最新3GPP版本来衡量。3GPP R15是首个引入5G的版本。后续版本中的重要新增特性包括5G SA (R16) 以及5G Advanced (R18、R19和R20)。实际使用的版本也可以清晰地显示一个市场在把握最新机遇以演进网络能力及相关变现潜力方面的积极性。评分范围为R15 (1分) 至R19 (5分)。

第五个参数是移动连接能力的差异化。这是一个从普遍的“尽力而为” (best effort) 连接到支持体验创新的按需质量服务的渐进演进过程。这些能力的评分标准为：尽力而为 (1分)、FWA单切片 (2分)、企业切片 (3分)、消费者切片 (4分)、基于API的差异化 (5分)。

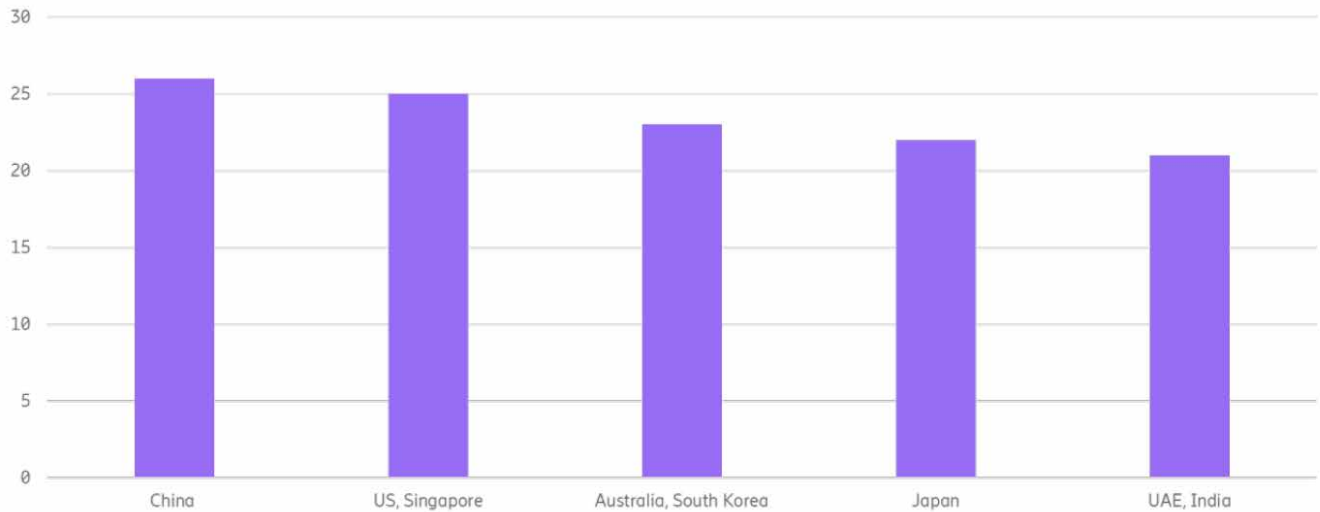


图2：2025年先进5G市场的移动基础设施成熟度

最先进的市场都依赖于所有六个参数的成熟均衡发展。得分越高，代表利用5G基础设施支持产业数字化转型的准备越充分。

授权中频频谱的分配和实际使用情况在先进市场间各不相同，范围从200 MHz到超过750 MHz不等。

5G中频人口覆盖率¹³差异很大，新加坡、美国、中国、印度、韩国和阿联酋均超过90%。

第六个也是最后一个参数衡量网络及行业所能支持的成熟度。这是一个从移动和固定宽带到任务关键型通信的渐进演进过程。评分标准为：增强型移动宽带 (1分)、固定无线接入 (2分)、专用蜂窝网络 (3分)、虚拟专用蜂窝网络 (4分)、任务关键型网络 (5分)。

投资公共5G网络的运营商中有26%投资于5G SA能力¹⁴。这一份额自2022年以来稳步增长。

5G SA的早期采用者推动着差异化连接的普及，并将应用范围扩展至新行业和新网络。

先进市场已开始部署5G Advanced。

该模型非常适合用于自我评估以及与先进市场的基准比较。

¹³《爱立信移动市场报告》，2025年6月

¹⁴《5G独立组网》，2025年4月，GSA

美国5G消费者市场的成功实践

自5G商用发布以来，美国在移动与固定宽带服务方面取得了显著增长。该市场由少数一级 (Tier 1) 运营商主导，采用“双重宽带” (dual play Broadband) 战略¹⁵，5G中频人口覆盖率已超过90%。

为智能手机提供移动宽带服务

91%的美国成年人拥有智能手机，较2021年提升了6个百分点¹⁶。这意味着仍有9%的移动数字鸿沟有待弥合。

5G中频和Massive MIMO技术带来了性能的巨大飞跃。

到2024年底，5G占美国智能手机签约数的70%。这一里程碑比4G提前两年实现。

过去三年，三家一级移动运营商的收入复合年增长率 (CAGR) 为3%。

多业务运营商 (MSO) 提供基于MVNO的智能手机服务，并将其与有线宽带捆绑，从而占据了后付费智能手机签约数净增量的40%。

美国后付费智能手机签约用户的月流失率低于1%。

爱立信预测，到2030年，北美地区5G智能手机普及率将达到91%，人均流量将达到每月43GB。

固定无线接入 (FWA)

过去，FWA与有线网络方案相比存在性能差距。5G是首个能够在性能上成功挑战有线宽带的无线技术。

美国的FWA价值主张进行了重构，其核心在于简洁的服务/价值、短交付周期、简易安装和全面支持。

过去三年，FWA占据了全部固定宽带净增用户，光纤的增长抵消了DSL的下滑，而有线宽带则从持平转为下降¹⁷。

2023年6月至2024年12月期间，美国固定宽带净推荐值 (NPS) 及发展轨迹在不同技术之间差异显著：FWA为44 (增长9分)、光纤为25 (下降10分)、有线为17 (持平)、铜缆/卫星为6 (持平)¹⁸。

2023年，Verizon网络中的FWA用户月均流量为524GB¹⁹，约为同期Verizon光纤网络 (FiOS) 用户月均流量640GB的85%。

2024年，美国有81%的成年人在家中拥有固定宽带接入²⁰，较2021年仅增长2个百分点。

结论

移动宽带已成为扩大中频覆盖范围、采用SA架构及引入网络切片的关键驱动力。所有这些因素共同为企业和工业应用构建了基础性的移动基础设施。

FWA注定将继续在固定宽带增长中扮演主要角色，并在扩大农村地区5G中频覆盖时，有望在弥合固定数字鸿沟方面发挥更大作用。

FWA已大获成功，这一模式正激励着业界将其推广用于企业与工业应用领域。

¹⁵《美国运营商如何通过双重宽带策略开展竞争》

¹⁶《移动技术现状概览》，PEW Research

¹⁷一级运营商财报电话会议及CTIA

¹⁸《固定无线接入成为美洲首选的下一代互联网连接方式》，Recon Analytics

¹⁹《Verizon 2023年消费者连接报告》

²⁰《互联网与宽带事实清单》，PEW Research

工业用例——影响与经验教训

在5G发展的前半程，就工业用例而言，行业并未停滞不前。然而，要真正了解新技术的采用是否带来了实质性收益，必须深入运营层面进行分析。运营管理层只有在发现技术带来可衡量的绩效提升时，才会持续投资。首先，我们在多个国家与行业中发现了具有影响力的案例。其次，随着时间推移，我们逐步洞察了5G的引入如何以及为何能够赋能工作流程转型。我们选取了八个具有代表性的用例，涵盖不同国家与垂直行业，提供了可量化、可提升投资回报率(ROI)的转型洞察。这些用例列举如下：

- 全自动化海港 – 荷兰
- 医院自动化 – 新加坡
- 汽车制造 – 英国
- 体育与娱乐场所 – 美国
- 应急响应 – 美国
- 采矿 – 澳大利亚

后续章节将详细讨论这些案例研究。

全自动化海港 (荷兰鹿特丹世界门户)

高效的海港是现代航运的支柱。提升港口效率始终是优化泊位、起重机与车辆利用率，并减少环境影响的核心目标。鹿特丹世界门户(RWG)是全球首个全电动、碳中和的集装箱码头，同时也是率先利用先进5G基础设施的港口之一。

问题陈述

需建成可停靠全球最大型船舶(长400米，宽60米，运载超过24,000个20英尺标准箱)的码头、泊位和航道。

减少港口运营带来的环境影响——全球航运约占全球二氧化碳排放总量的3%。

降低港口工人的风险暴露——包括卸载集装箱及从船舶到卡车的运输过程。

托运方需实现对集装箱从船上卸载到卡车装载全过程的可控性。

目标成果 / 已验证成果

RWG平均每日处理7,064个集装箱，即每12秒处理一个²¹。

起重机与运输车辆实现远程操作——人工干预从安全可靠的地点进行。

实现全年全天候的全自动化运营。

港口运营实现净零环境影响——码头已实现二氧化碳中和，下一步是为靠港船舶提供环保电力。

向托运方提供涵盖全过程的透明信息处理服务。

解决方案概述

16台远程操作的岸桥起重机——每台起重机每日吊装超过440个集装箱。

64台电动自动导引车(AGV)——每台导引车每日可处理约100个集装箱。

²¹RWG高级码头数据

5G网络解决方案亮点

- 专用蜂窝网络消除了先前的连接挑战。
- 初期采用4G部署，随着频谱释放逐步升级至5G。
- 配置冗余无线系统。
- 专用蜂窝网络已稳定运行9年。

通过加固型平板设备实现集装箱堆场与参照区之间的数据通信。

使用配备专用4G SIM卡的MIFI设备连接笔记本电脑。

客户应用服务器与自动导引车 (AGV) 之间实现数据通信。

结论

港口的室外作业特性，以及岸桥与自动导引车自动化运行的重要性，使专用蜂窝网络成为最优选择。

即使在同一港口，不同泊位的数字化成熟度也各不相同，港口从4G向5G演进的进程取决于频谱资源的可用性。

目前全球采用5G进行自动化转型的港口规模差异超过300倍。

互联医疗/医院 (新加坡国立大学医院)

5G正在为医疗行业带来革命性变革，它实现了先进的连接解决方案，不仅提升了医院内部的手术与护理质量，更将专业的医疗服务拓展至家庭场景。

作为新加坡国立大学健康系统 (NUHS) 旗下的旗舰医院，国立大学医院 (NUH) 率先采用5G作为先进连接技术，开发创新的医疗解决方案，以提升患者体验，并主动改善医疗服务的可及性、可用性与效率。

问题陈述

在高级别手术和患者住院护理中采用新技术，提升患者体验。

高难度手术耗时长，且依赖少数具备专业技能的资深外科医生。

为应用全息医疗 (Holomedicine) 等新技术，NUH评估了医院内的不同连接方案 (Wi-Fi、4G与5G)，以确定最稳定的高速、高带宽、低时延连接方式。该评估旨在通过全息与增强现实 (AR) 头显，帮助外科医生提高手术精度并缩短手术时间。验证结果显示，5G是最适合全息医疗的连接方案。

护理人员短缺，成为医疗服务的瓶颈。

目标成果 / 已验证成果

提高复杂手术的质量和成功率。

自2024年底起，NUH开展5G机器人护士试验，旨在减少护士在日常任务 (如病情监测与药物分发) 上的时间投入。

使用5G验证机器人的精确定位，以确保患者准确获取药物。

运营2年后的验证成果

- 在辅助条件下，手术速度提升约20-30%。
- 机器人护士接管护士30%例行任务的验证正在进行中。

解决方案概述

虚拟专用5G解决方案，基于公共5G网络覆盖并延伸至现有医院，在手术室等受限区域部署小型基站。

由医院资深外科医生兼任国家级创新负责人——这种方法确保创新举措紧密围绕最重要的挑战展开。

为推广5G在医疗领域的最佳实践并推动生态系统准备工作，NUHS联合爱立信、萨尔格伦斯卡医学院 (Sahlgrenska) 和阿斯利康 (AstraZeneca) 共同发起了国际倡议——全球健康创新网络 (GHIN) (2024年)²²。

Microsoft HoloLens在长时间且复杂的手术中为外科医生提供支持。

NUH引入30台“MiSSi机器人” (MiSSi Robots) 进行运营试验，接管部分护士日常任务²³。

演进：在NUHS持续推进5G解决方案演进，探索新的医疗用例，如医护人员无缝连接、5G Advanced功能与新医院规划。

结论

将5G作为医院的先进连接解决方案，可构建高度互联的医疗环境，而且事实证明可显著提升患者体验，并提高医生与护士的工作效率。

虚拟专用5G方案充分利用公共5G网络的覆盖与容量，并通过专用的室内覆盖和容量进行增强。

事实证明，该方案能高效地为手术室提供专用的先进连接解决方案，并确保患者和医护人员无论在手术室、医院其他区域还是必要时在患者家中，都能获得先进的连接服务。

为加速5G在医疗领域的应用，并赋能更多医院采用先进的数字解决方案，医院、技术提供商及生态系统其他参与方之间的持续协作至关重要，有助于推动医疗数字化进程，提升医疗服务的质量、可用性与可及性。

汽车制造(英国捷豹路虎)

制造业是在应用周期中最早采用专用5G网络的行业之一，尤其是在汽车制造领域。

英国索利哈尔 (Solihull) 的捷豹路虎 (JLR) 工厂已部署专用5G网络，并提供了宝贵的洞见。

问题陈述

任何汽车生产厂的生产效率都依赖于所有材料与工具按计划准确到位。计划偏差最小化是核心绩效指标 (KPI) 之一。

先前的无线网络连接不稳定，且未能覆盖工厂所有区域。

有线网络在车型更换时需重新配置，耗时数周。

车辆在总装后需要加载针对特定市场的软件，通常依赖人工操作。

质量保证依赖于在整个生产过程中记录来自传感器和工具的大量数据点。

²²《爱立信支持新加坡全球健康创新网络》

²³《监测患者状况、分发药物的机器人护士将于2025年在NUH进行试运行》

目标成果 / 已验证成果

汽车生产厂的整体生产效率源于对停机的极致控制——每分钟停机成本高达5万美元²⁴。

利用无线连接工具，消除车型更换时的网络重新配置时间，从数周压缩至数秒。

将网络覆盖扩展至难以触及的区域，如喷涂车间及停放所有待运成品车的停车场。

在总装完成后，通过无线方式自动加载面向特定市场的汽车软件，无需人工干预。

从工具与机械中采集性能数据。

面向自动驾驶汽车的前瞻布局：车辆可自行驶下生产线，并在发货前自行驶至指定停车位。

解决方案概述

JLR利用区域5G创新基金，加速采用5G专网²⁵。

爱立信为其提供5G专网²⁶，并逐步扩展至工厂内的各栋建筑。

使用由JLR直接授权的3.8-4.2 GHz频段（n77频段），传输速率可达约900 Mbps²⁷。

与原生及非原生5G设备和制造应用的生态系统伙伴展开合作。

²⁴Thomas

²⁵英国科学、创新和技术部 (DSIT)

²⁶《爱立信5G专网赋能捷豹路虎数字化制造转型》

结论

汽车制造业规模庞大，生产效率提升潜力显著，因而成为大规模5G网络建设的理想领域。

在世界经济论坛 (WEF) 评定的189家全球“灯塔工厂”中²⁸，汽车生产厂占17家，是仅次于电子行业的第二大工厂类别。

美国体育与娱乐场所的商业运营

2020年初，5G技术首次在美国体育与娱乐场所亮相，如今已成为大型赛事期间观众连接网络的主要方式。

除观众可接入的5G公网外，5G专网及5G公网切片正逐步变革此类场馆的商业运营模式。该模式适用于举办定期活动以及年度大型活动的固定场馆。以下为美国的几个示例。

问题陈述

大型体育和娱乐场所的商业运营体系复杂多样，多个业务领域正经历数字化转型。

场馆入口需实现高效票务核验与安检。

各类媒体制作对画质、镜头角度及内容交付时效提出了更高的要求。

场馆内食品、饮料及商品销量大。

²⁷TechInformed

²⁸《全球灯塔网络由189座灯塔工厂组成》，世界经济论坛

目标成果 / 已验证成果

为体育与娱乐场馆的商业运营提供优先连接保障²⁹。

通过智能手机、平板电脑及无线支付终端实现快捷、安全的支付³⁰。

安全地实时捕获数据，并将其从竞赛设备传输给团队，以进行分析³¹。

媒体制作所用的电视摄像机无需有线连接³²，为体育赛事和音乐会带来灵活性及更具创意的媒体制作，并催生新的真人秀节目形式。

缩短体育摄影师从拍摄、编辑到图片发布的交付周期³³。

5G网络能高效传输数据，提供关于可用停车位、洗手间和餐饮点的实时信息³⁴。

在场馆发生紧急情况时为应急响应人员提供优先连接。

解决方案概述

在体育和娱乐场馆部署5G专网或5G公网切片，作为面向观众的5G公网的补充。

在定期举办活动的固定场馆部署永久性无线设备；在赛车场和高尔夫球场等每年仅举办一两场人流量大的活动的场地，提供临时性无线网扩容。

将网络切片与基于QoS API的动态按需服务质量相结合，可为不同的商业运营模式和应用程序提供定制化服务。

在赛艇上安装Ericsson-Cradlepoint边缘路由器，将来自赛艇的传感器数据和视频传输给岸上的工作人员与广播公司。

使用5G数据发射器³⁵连接电视摄像机和无反相机，用于传输静态照片。

结论

5G技术在美国的体育和娱乐场馆已得到广泛应用，既服务于广大观众，也支撑着商业运营。

为美国应急响应人员提供连接服务

升级的移动基础设施可支持任务关键型应用，美国应急响应人员已证明4G与5G基础设施在此类关键场景中的可行性。

问题陈述

2001年美国“9·11”事件的事后分析表明，当时存在一个重要的改进契机：亟需整合各部门间的通信能力。这些洞察直接促成了“FirstNet”这一全国性网络的创建，该网络利用移动技术为应急响应人员服务。

为应急响应人员提供语音和消息传递服务的传统定制网络已达到服务寿命终点；其容量过低，且未能实现对美国国土的充分覆盖。

用于紧急任务的网络与技术存在局限性，降低了任务成功的预期概率。

²⁹ 《赛车运动升级》，Verizon F1案例研究

³⁰ 《赛车运动升级》，Verizon F1案例研究

³¹ 《Sail GP选择爱立信作为2025赛季全球技术供应商》

³² 《T-Mobile为2025 PGA锦标赛打造互联体验新标杆》

³³ 《T-Mobile将于F1 Heineken Silver拉斯维加斯大奖赛首次推出全新的5G观赛体验》

³⁴ 《5G与体育及娱乐》，AT&T Business

³⁵ 《5G便携式数据发射器》，索尼

目标成果 / 已验证成果

实现应急响应人员作业全域的网络覆盖。美国现有移动基础设施已覆盖国土面积350万平方英里中的300万平方英里³⁶，99%应急响应人员所在地均在网络覆盖范围内。

在文本与消息传递服务的基础上，增加支持视频及数据业务的能力。该能力最初基于4G实现，现正逐步向5G演进。

新增专为极端恶劣环境优化的新型专用设备及现有设备改进型。

确保在紧急情况下，应急响应人员相对于普通用户及其他机构享有网络资源优先使用权。

解决方案概述

通过增加现有移动基础设施的功能（而非新建定制专网），为任务关键型应用提供保障。

美国应急响应人员主要拥有两种选择：

- FirstNet：基于AT&T移动网的应急响应人员专用扩展系统，初期投资65亿美元³⁷，近期再获80亿美元的追加投资³⁸。

- 5G公网切片：纽约市选用了T-Mobile的T-Priority服务³⁹，Verizon在50个城市推出了“Frontline”解决方案⁴⁰。

优先采用低频段频谱以最大化现有基站覆盖范围，并通过“扩展化”手段增建新基站填补覆盖缺口。

在无线站点部署备用电源，确保紧急断电场景下的网络持续可用性。

提供加固型设备与应用，满足应急响应人员的地面及空中作业需求。

通过网络切片技术，优先保障为应急响应人员及需求最迫切的各机构分配可用容量。

以非地面网络（NTN）作为补充手段，覆盖美国移动网络未及的50万平方英里偏远区域。

结论

移动网络基础设施已能有效支撑任务关键型应用，美国运营商为此类应用（如公共事业与铁路系统）的发展路径提供了重要的实践范本。

采矿（澳大利亚纽蒙特）

矿业在地下与露天矿场中均可借助5G技术实现升级⁴¹。

澳大利亚纽蒙特矿业公司自2019年起便开始部署4G与5G专网，并在此过程中积累了宝贵的经验⁴²。

问题陈述

在露天矿场操作重型设备时，需提升安全性与作业效率。

位于露天矿场的网络设备需频繁迁移，且重新部署依赖人工干预。

³⁶《FirstNet关键数据一览》

³⁷《AT&T赢得65亿美元FirstNet合同》

³⁸《FirstNet主管机构与AT&T达成10年续约协议》

³⁹《T-Mobile宣布其T-Priority服务重大升级，优先服务应急响应人员》

⁴⁰《Verizon Frontline网络切片服务现已覆盖全美》

⁴¹《蜂窝网络赋能之旅：打造更安全、更智能、更可持续的矿山》

⁴²《5G创新实现更安全、更智能的推土机作业》

现有替代性无线解决方案因频繁停机而制约生产效率。

替代性无线解决方案存在覆盖局限性。

目标成果 / 已验证成果

减少对物理布线的依赖，增强灵活性，并简化安全与操作流程。

将作业人员从高风险区域(例如露天矿场)撤离出来。

实现高吞吐量与稳定连接，以支持远程作业；消除特定区域互联设备类型与数量的限制，需确保132 Mbps的上行链路容量，以满足全装备作业需求。

优化远程操作体验，使其趋近于驾驶舱内操作感受。

减少因网络不稳定与连接中断导致的停机。

具备随生产力提升需求而扩展车队规模的能力。

解决方案概述

允许在矿井中使用5G设备，减少物理布线，提高灵活性，并简化安全与操作流程。

基于5G、Massive MIMO及波束赋形/导向技术，实现对重型土方设备的远程控制。

部署5G专网，仅需单一无线基站即可覆盖整个露天矿场，在3公里/2英里距离内提供100Mbps上行链路容量。

将定向实时音频、视频及触觉反馈相集成，可提升驾驶员操作效率与响应速度，同时缩短培训周期。

构建可满足矿场任意地点任何吞吐量需求的5G平台。

结论

矿业生产环境恶劣，蜂窝通信解决方案的可用性与可靠性对于实现高效远程作业至关重要。

从基础设施全面普及： 实现各节点互联

对于企业领导者而言，关于5G或任何变革性基础设施的探讨，最终都必然回归投资回报率(ROI)与总体拥有成本(TCO)两大核心维度。网速、时延和覆盖范围这些技术指标本身并无意义，除非它们能转化为可被管理层衡量的运营指标：成本削减、流程提速、质量提升以及运营规模扩展的灵活性。

本报告前述各应用场景——从AI引导手术到自动驾驶物流车队——绝非单纯的技术创新展示。它们是根本性的运营突破，唯有依托能够提供低时延连接、实时智能决策与高可靠性通信的底层数字基础设施，这些突破才得以实现。如果缺乏这样的基础，这些解决方案只能停留在原型阶段；而具备了这一基础，它们就能转化为具备投产条件的竞争优势引擎。

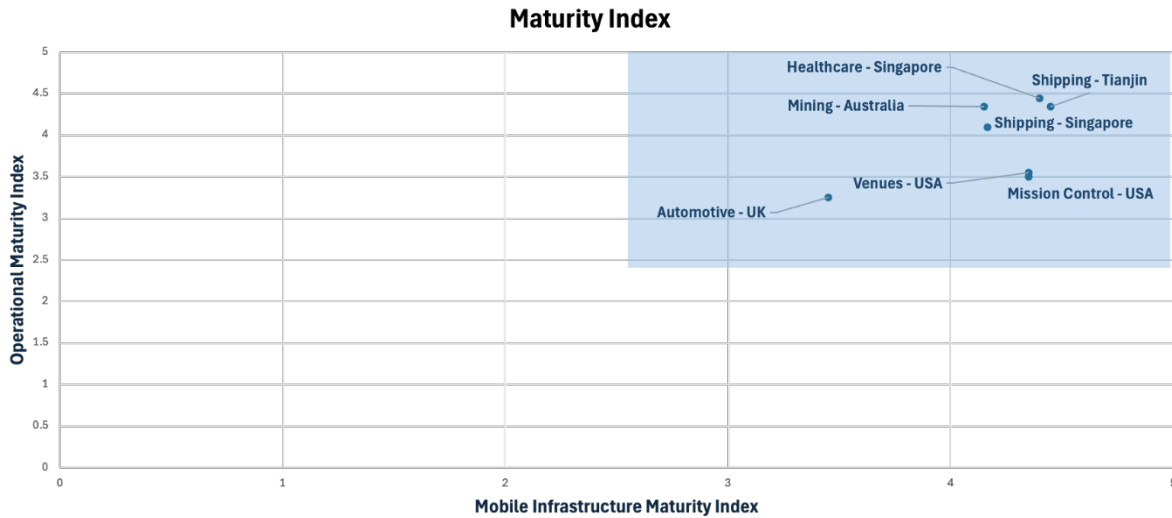


图 3: 指数间的关联

为量化这一就绪程度, 我们引入了“运营成熟度指数”(OMI), 该指数综合了四个关键维度:

1. **成本效益:** 可衡量的节约或浪费规避;
2. **解决方案/服务成熟度:** 日常运营中的稳定性、正常运行时间与抗风险能力;
3. **生产效率提升:** 单位投入 (包括时间、人力和资源投入) 的产出;
4. **灵活性:** 适应不同环境、规模及工作流程的能力。

跨行业比较用例本身非常复杂——医院手术时间节省30%与汽车厂单车成本降低1万美元虽在各自领域均能产生深远的运营影响, 却无法直接对比。然而, 通过在这四个维度上统一度量标准, 我们能够有意义地比较成熟度水平, 并评估投资在哪些领域带来了超额回报。

图3将运营成熟度与基础设施成熟度对应起来, 直观地展示了这一关系。其意义更重于示意而非精确计量。所呈现的结果颇具说服力: 最具影响力的工业用例——智慧港口、汽车制造、互联医院——均密集分布于右上象限。这并非偶然。

这些环境展现出基础设施投资、支持性政策框架与积极技术推广策略之间的高度协同。当这三股力量汇聚时, 产业即从试点部署转向规模化、可重复的影响力。

这对政策制定者、运营者与企业领导者的启示十分明确:

- 有基础设施而不能普及, 则资产效能低下——是无法释放全部经济潜力的沉没成本。
- 在薄弱基础设施上尝试推广会导致试点项目停滞与期望落空。
- 唯有当基础设施、政策与产业普及策略同步推进时, 才能释放5G、AI及其他技术带来的全部生产力红利。

在产业转型的背景下, 这不仅是理论, 更是关乎竞争力的生存法则。当今成功实现这一协同的国家与企业, 不仅将主导5G时代用例, 更将在复杂度与经济利益更为巨大的6G时代赢得决定性先机。

结论与未来展望

5G在全球的部署速度前所未有，但其真正价值并不在于连接数量或覆盖范围，而在于该技术融入全球经济产业结构的深度。5G影响力的真实图景，正在全球的工厂、港口、矿山、电网、物流枢纽与实验室中徐徐展开。

从新加坡NUH医院医生深度参与技术应用以改进操作与效果，到英国捷豹路虎工厂集成超低时延机器人技术，再到澳大利亚智能矿业公司运用5G专网实现设备实时监测。这些案例均揭示了一个明确结论：工业应用场景决定着5G经济潜力的前沿边界。

然而，各国实现这些成果的路径迥然不同。美国以市场驱动模式培育了丰富的私营企业创新生态系统——如爱荷华州⁴³采用5G联网无人机的精准农业，或航空枢纽的AR辅助飞机维护——但在网络密度与统一频谱政策方面仍存障碍，延缓了重工业领域的规模化进程。印度则在运营商的激烈竞争推动下，以创纪录速度实现了5G在消费级市场的快速普及，并开始引入工业试点项目（如苏拉特的5G纺织品质控系统），但仍需应对高昂的频谱成本与光纤回传不足的挑战，无法充分释放企业潜力。

纵观高、中、低收入国家，一道显著的分化线正在浮现：那些仅聚焦基础设施部署的国家，恐面临停滞于转型门槛的风险；而成功协同频谱政策、产业战略与人才发展的国家，正率先创造实实在在的经济价值。非独立组网（NSA）网络的持续存在与先进B2B解决方案推广缓慢的现实表明，若无针对能源、制造、医疗、交通等垂直行业领域的战略性推进，5G的潜力将始终无法充分实现。

抢占5G领先地位的窗口期正在迅速关闭。早期采用者不仅获得竞争优势——更构建起强大的经济生态合作体系，吸引广泛的人才、投资与创新资源向其高度集聚。随着这些先驱者确立市场主导地位，其优势将不断叠加：更深厚的专业积累与生态合作体系、更牢固的合作伙伴关系、以及难以复制的溢价市场地位。

对后来者而言，延误的代价可能是不可逆的。一旦熟练劳动力、风险资本与行业关注度围绕先发企业形成聚合效应，后来者的追赶成本便会呈指数级攀升，甚至可能永无赶超之日。5G的普及法则奖励大胆先行者，惩罚犹豫不决者，在未来的数字经济中，旨在追随的“第二梯队”战略毫无生存空间。

我们希望本报告提供的分析框架，能帮助各国或案例研究对标全球最佳实践，并明确缩小差距所需的关键要素。文中详述的全球用例及其运营细节与绩效指标，亦可为各国与各行业制定自身发展蓝图提供参考。因此，本报告将作为一份动态文件，持续追踪进展并汇集最新实践案例。

5G的普及历程给出了一个明确的启示：一国在通用技术领域的实力，源于其在全国经济中规模化应用该技术的速度与能力。随着世界向6G迈进，未来的领导者正是那些已在今天奠定基础的国家——他们正投资于融合政策、资本与产业应用的综合生态系统。对这些国家而言，5G的故事将无关基站数量，而在于被彻底重塑的行业数量。而这一转型所决定的，不仅是GDP的增长，更是未来数十年的地缘政治影响力。

⁴³《打造5G精准农业连接》