

量子计算：人工智能与新质生产力的“未来引擎”

2024 年 03 月 22 日

► **量子计算有望成为解决 AI 算力瓶颈的颠覆性力量。**与传统计算相比，量子计算能够带来更强的并行计算能力和更低的能耗，同时量子计算的运算能力根据量子比特数量指数级增长，在 AI 领域具有较大潜力。海外科技巨头带动量子计算产业发展，IBM、微软、谷歌等公司先后发布量子计算路线图，与此同时，国内量子计算产业与海外科技巨头差距不断缩小，2024 年 1 月 16 日我国第三代自主超导量子计算机“本源悟空”上线运行可以一次性下发、执行 200 个量子线路的计算任务，比国际同类量子计算机具有更大的速度优势。

► **量子计算软硬件基础设施不断成熟，为商业化落地打下良好基础。**当前全球范围内针对量子计算机，已经形成超导、离子阱、光量子、中性原子、半导体量子等主要技术路线，以及以量子门数量、量子体积、量子比特数量等核心指标构成的性能评价体系。量子计算云平台将量子计算机硬件或量子计算模拟器与经典云计算软件工具、通信设备及 IT 基础设施相结合，为用户提供直观化及实例化的量子计算接入访问与算力服务。软件方面，量子算法不断发展中，在当前硬件条件下重点是综合考虑 NISQ 算法的容错代价与算法性能之间的平衡，量子软件体系处于开放研发和生态建设早期阶段，正在不断成熟。

► **量子计算有望赋能千行百业，开启 8000 亿美元蓝海市场。**据 ICV 数据，2023 年全球量子计算市场规模约 47 亿美元，预计 2035 年有望超过 8000 亿美元；其中，金融、化工、生命科学领域有望更加受益量子计算产业发展：

- 1) 金融领域：量子计算应用有望在优化预测分析、精准定价和资产配置等问题中产生优势；
- 2) 化工领域：量子计算应用探索主要通过模拟化学反应，达到提高效率、降低资源消耗等目的；
- 3) 生命科学：量子计算可以用于评估药物研发的成本、时间、性能等实验值；
- 4) 密码学：量子加密理论上是不可被破解的；
- 5) 交通物流：量子计算应用主要聚焦组合优化问题，以更优方案实现路线规划和物流装配，提升效率降低成本。

► **投资建议：**量子计算有望颠覆经典计算架构，成为解决 AI 算力瓶颈的颠覆性力量，或成为发展新质生产力的重要抓手，建议关注国盾量子、科大国创、神州信息、科华数据、中国长城、光迅科技等量子计算相关标的，以及电科网安、吉大正元、格尔软件、国芯科技、浙江东方、亨通光电等量子加密通信标的。

► **风险提示：**量子计算技术发展不及预期，行业竞争加剧。

推荐

维持评级



分析师 吕伟

执业证书：S0100521110003

邮箱：lwwei_yj@mszq.com

相关研究

- 1.计算机周报 20240316：公共数据运营迎来政策“破冰期” -2024/03/16
- 2.计算机周报 20240309：两会 AI 与信创重要机遇信号 -2024/03/09
- 3.计算机周报 20240303：计算机行业 2024 年一季度业绩前瞻 -2024/03/03
- 4.计算机行业动态报告：全球算力狂潮下的 AI 硬件“超级行情” -2024/03/02
- 5.计算机行业事件点评：重视央企“国家队”在国产 AI 算力与新型举国体制下的机遇 -2024/02/26

目录

1 量子计算或成为解决 AI 算力瓶颈的颠覆性力量	3
1.1 量子力学颠覆经典计算体系，带来空前加速	3
1.2 巨头争先入场，开启量子计算商业化进程	5
1.3 量子计算机：多种技术路线并行	8
1.4 量子云计算平台：定义云计算 Q-XaaS 新范式	14
1.5 软件：量子算法与软件体系逐渐成熟	15
2 量子计算有望赋能千行百业	17
2.1 量子计算有望开启 8000 亿美元蓝海市场	17
3 投资建议	19
4 风险提示	19

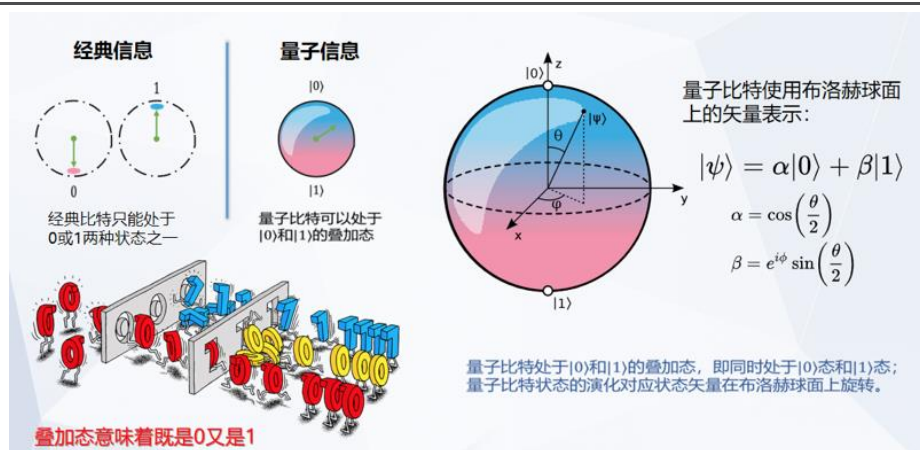
1 量子计算或成为解决 AI 算力瓶颈的颠覆性力量

1.1 量子力学颠覆经典计算体系，带来空前加速

量子计算是基于量子力学的独特行为（如叠加、纠缠和量子干扰）的计算模式，基本信息单位为量子比特。据微软，在物理学中量子是所有物理特性的最小离散单元，通常指原子或亚原子粒子（如电子、中微子和光子）的属性。量子比特是量子计算中的基本信息单位，在量子计算中发挥的作用与比特在传统计算中发挥的作用相似，但经典比特是二进制、只能存放 0 或 1 位，但量子比特可以存放所有可能状态的叠加。量子计算所运用的物理特性主要包括：

- 1) **量子叠加**：处于叠加态时，量子粒子是有可能状态的组合，它们会不断波动，直到被观察和测量；以抛硬币为例，经典比特可以通过正面和反面来度量，而量子比特能够代表硬币的正反面以及正反交替时的每个状态；
- 2) **量子纠缠**：纠缠是量子粒子将其测量结果相互关联的能力，当量子比特相互纠缠时，它们构成一个系统并相互影响，人们可以使用一个量子比特的度量来作出关于其他量子比特的结论，通过在系统中添加和纠缠更多的量子比特，量子计算机可计算指数级的更多信息并解决更复杂的问题；
- 3) **量子干扰**：量子干扰是量子比特固有的行为，由于叠加而影响其坍缩方式的可能性，量子计算机旨在尽可能减少干扰，确保提供最准确的结果。

图1：经典比特与量子比特对比

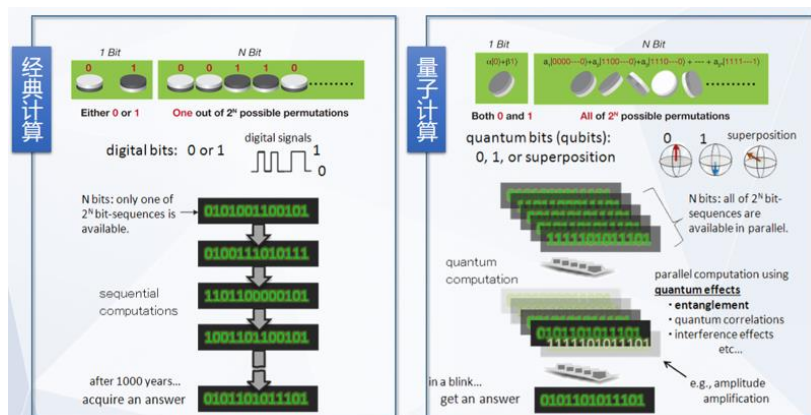


资料来源：爱集微，本源量子，民生证券研究院

与传统计算相比，量子计算能够带来更强的并行计算能力和更低的能耗。据赛迪智库，量子计算通过量子态的受控演化实现数据的存储计算，可以分为数据输入、初态制备、量子逻辑门操作、量子测算和数据输出等步骤，其中量子逻辑门操作是一个幺正变换，这是一个可以人为控制的量子物理演化过程；经典计算机的运算模式为逐步计算，一次运算只能处理一次计算任务，而量子计算为并行计算，可以同时同时对 2^n 个数进行数学运算，相当于经典计算重复实施 2^n 次操作；同时，传统

芯片的特征尺寸很小(数纳米)时,量子隧穿效应开始显著,电子受到的束缚减小,使得芯片功能降低、能耗提高,将不可逆操作改造为可逆操作才能提高芯片的集成度,量子计算中的么正变换属于可逆操作,有利于提升芯片的集成度,进而降低信息处理过程中的能耗。

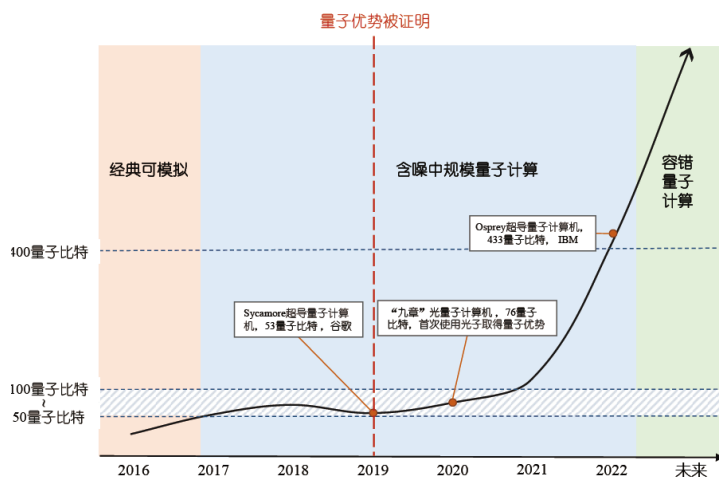
图2: 量子计算与经典计算体系对比



资料来源: 爱集微, 本源量子, 民生证券研究院

量子计算的运算能力根据量子比特数量指数级增长,在AI领域具有较大潜力。在经典计算中,计算能力与晶体管数量成正比例线性关系,而量子计算机中算力将以量子比特的指数级规模增长,据中国计算机学会微信公众号,2012年“量子优势”(同样的计算任务,量子计算速度高于传统计算)的概念被提出,并在2019年由谷歌团队实现了实验验证,2020年,潘建伟院士团队基于高斯玻色采样模型成功构建了76个光子的量子计算原型机“九章”进一步验证了量子优势。量子计算机所能拥有的量子比特数由最初的2量子比特增长到了数百量子比特,并正以可观的速度继续增长,这为实现更可靠、更大规模的量子计算,以及挖掘基于量子计算的人工智能应用带来更多可能性。

图3: 经典计算机与量子计算机运算能力对比

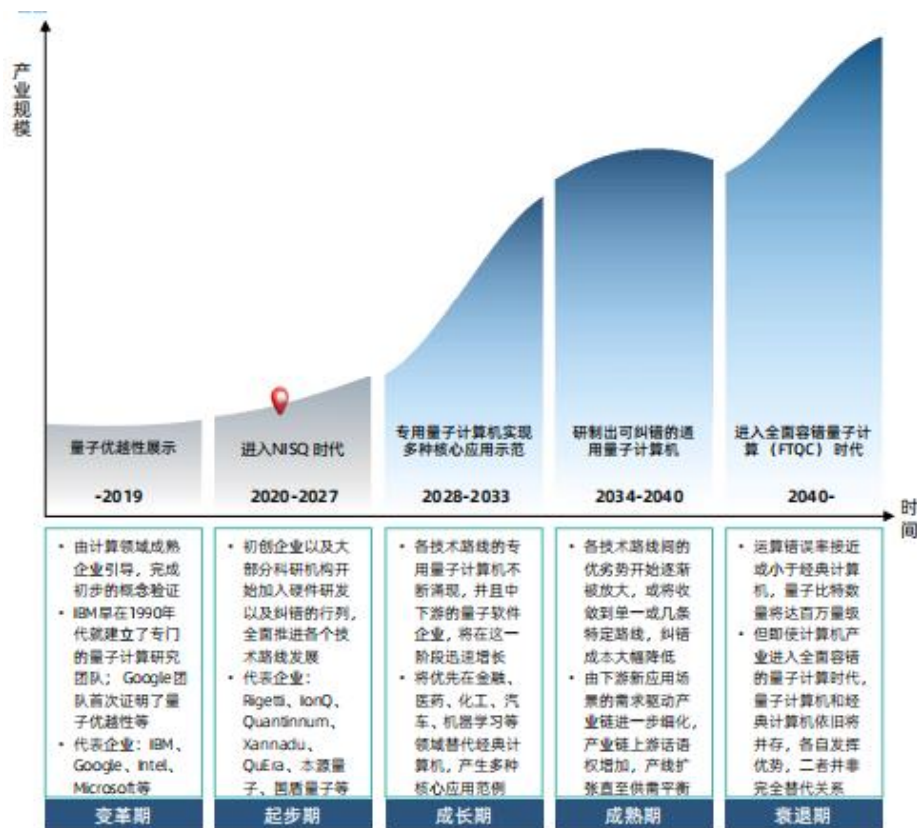


资料来源: 中国计算机学会微信公众号, 民生证券研究院

1.2 巨头争先入场，开启量子计算商业化进程

海外科技巨头带动量子计算产业发展，国内量子计算产业与海外科技巨头差距不断缩小。据量子信息网络产业联盟、ICV 等数据，国外巨头引领量子计算产业发展：2019 年谷歌宣称实现“量子霸权”，首次在实验中证明了量子计算机对于传统架构计算机的优越性，2020 年，IBM 公司公布量子计算机发展路线图，2021 年实现 127 量子比特，2022 年 433 量子比特，2023 年建造 1121 量子比特芯片；与此同时，国内量子计算产业也在政策的支持下快速发展、缩小与海外巨头的差距：2020 年，中国科学技术大学潘建伟等人构建出 76 个光子 100 个模式的高斯玻色取样量子计算原型机“九章”，实现了“高斯玻色取样”任务的快速求解；2021 年，中国科学技术大学潘建伟等人构建了 66 比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之二号”，实现了对“量子随机线路取样”任务的快速求解，“祖冲之二号”的计算复杂度比谷歌的“悬铃木”提高了 6 个数量级；2023 年本源量子交付 24 比特超导量子计算机；2024 年 1 月 16 日我国第三代自主超导量子计算机“本源悟空”上线运行可以一次性下发、执行 200 个量子线路的计算任务，比国际同类量子计算机具有更大的速度优势。

图4：全球量子计算发展历程



资料来源：ICV，民生证券研究院

量子计算软硬件体系已经初具雏形。据信通院：

量子计算产业上游主要包含环境支撑系统、测控系统、各类关键设备组件以及元器件等，是研制量子计算原型机的必要保障，目前由于技术路线未收敛、硬件研制个性化需求多等原因，上游供应链存在碎片化问题，逐一突破攻关存在难度，一定程度上限制了上游企业的发展，国内外情况对比而言，上游企业以欧美居多，部分龙头企业占据较大市场份额，我国部分关键设备和元器件对外依赖程度较高；

量子计算产业生态中游主要涉及量子计算原型机和软件，其中原型机是产业生态的核心部分，目前超导、离子阱、光量子、硅半导体和中性原子等技术路线发展较快，其中超导路线备受青睐，离子阱、光量子 and 中性原子路线获得较多初创企业关注，美国原型机研制与软件研发占据一定优势，我国量子计算硬件企业数量有限且技术路线布局较为单一，集中在超导和离子阱路线，量子计算软件企业存在数量规模较少、创新成果有限、应用探索推动力弱等问题；

量子计算产业下游主要涵盖量子计算云平台以及行业应用，处在早期发展阶段，近年来全球已有数十家公司和研究机构推出了不同类型的量子计算云平台积极争夺产业生态地位，目前量子计算领域应用探索已在金融、化工、人工智能、医药、汽车、能源等领域广泛开展，国外量子计算云平台的优势体现在后端硬件性能、软硬件协同程度、商业服务模式等方面。大量欧美行业龙头企业成立量子计算研究团队，与量子企业联合开展应用研究，我国下游行业用户对量子计算重视程度有限，开展应用探索动力仍需提升。

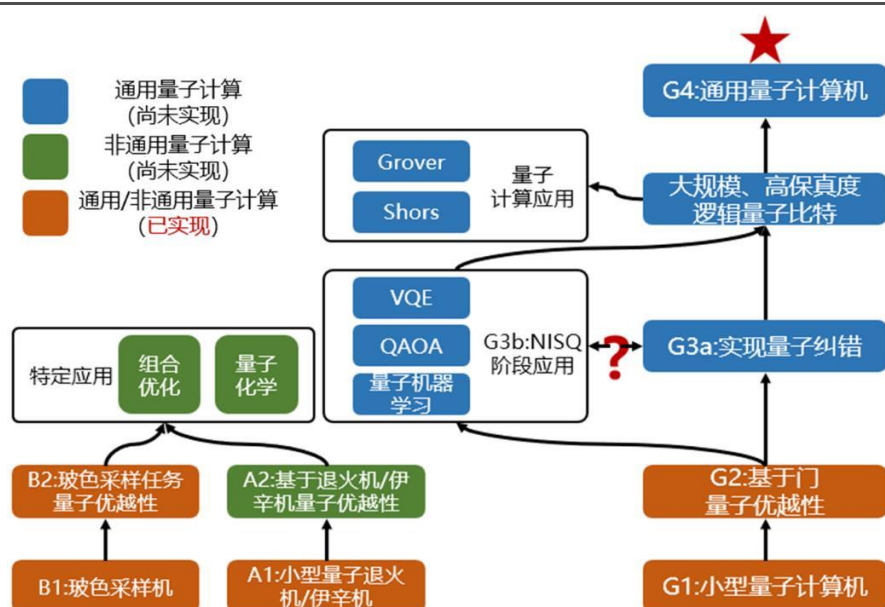
图5：量子计算产业生态与国内外代表性企业概况

产业生态		国际	国内
上游	环境 与 测 控	稀释制冷机: BLUEFORS, Oxford, LT Lab, CryoConcept, Janis ULT, FORM FACTOR, UTLVAC 测控系统: Zurich Instruments, QM, Quantum Machines, QBLOX, Keysight, Menlo Systems 低温组件: STAR, Lake Shore, CODA, AmpTech 真空系统: JVC, Kurt J. Lesker, Leybold, Agilent, Edwards, Pfeiffer, Vacuum 激光器: M, NKT, Thorlabs, Toptica, nLIGHT, OEWaves 光学探测器: SABLE, SCOTTEL, Spot, Pixel Photonics	CryoPride, PHYSIKE 威同量子, ZMX, 国盾量子, FERMILAB 威同量子, FERMILAB, 力美特真空技术(北京)有限公司 威同量子, HOTECH, Accelink 威同量子, SIMINICS, CETC
	原型机	超导: IBM, Google, Rigetti, IQM, OQC, Bleximo, ATLANTIC, SeeQC, QCI, Nerd 离子阱: QUANTINUM, IONQ, AQT, Oxford Ionics, eleQtron 光量子: XANADU, PsiQ, QUANDELA, Quix 硅半导体: Intel, Q, MPP, equal1, QUANTUM MOTIONS, EeroQ, C12, HITACHI, photonic 中性原子: Atom Computing, ColdQuanta, PASQAL, IQMera, Nano, planqc 其他: Microsoft (拓扑), D-WAVE (量子退火), QUANTUM BRILLIANCE (NV色心)	本源量子, Baidu, CETC, SPINQ XTO, QUDCOR, 国盾量子, 威同量子 本源量子, 威同量子, 威同量子 BosonIQ (CIM), SPINQ (核磁)
	软件	HORIZON, b e, Quantagion, CLASSIQ, QUANTASTICA, YRS, blueqat softwareQ, Q-CTRL, ENRONICA LABS, QUBIT, Parity, Quantinuum, LightSaber, qubit, Quantum-Scape, Q, PS, SAVANTY, river lane IQBit, Quemix, QuCo, HPS, QuantFi, QCWARE, GOOD CHEMISTRY, ProtonQu, QUANTUM, ZAPATA QCI, POLARIS, HELIX, CogniFrame, inspiration, SUPRA, GUANOVA, Qubit	Baidu, 百度, HUAWEI, 本源量子 ARC LIGHT, 微光量子, 微光量子 腾讯量子实验室, 京东探索研究院, JD EXPLORE ACADEMY
	云平台	IBM, AWS, XANADU, Rigetti, Quantum Inspire - by QuTech, QMware Google, QUANTINUM, Microsoft, IONQ, IQMera, STRANGE WORKS, PASQAL	HUAWEI, Baidu, 百度, 本源量子 国盾量子, ARC LIGHT, 威同量子, 中国移动 中国移动, 中国移动, 中国移动
	应用探索	JPMorgan, Booz Allen Hamilton, SAMSUNG, BSR, DCC, accenture, AFORE BARCLAYS, AIRBUS, DAIMLER, VW, BMW, NAGASE, MS	建信金科, 光大科技有限公司 中国移动, 中国移动, 中国民生银行

资料来源：信通院，民生证券研究院

量子通信产业发展的核心是突破量子纠错突破平衡点，实现通用量子计算。据信通院、量子信息网络产业联盟，未来，通用量子计算发展的近期或中期重要目标主要有两个：一是提升量子硬件性能和纠错编码能力，实现量子逻辑比特操控；二是在 NISQ 样机平台，探索具有实际应用价值和量子加速优势的“杀手级”应用。其中，量子态的不可克隆性、相干性以及差错连续性等决定了量子纠错（QEC）与经典纠错有本质差异，量子比特当前产生的错误率比经典比特更高，错误类型也更加广泛；QEC 是通过使用多个物理比特编码一个逻辑比特，通过增加信息编码空间的冗余度，使受到环境噪声或退相干影响的量子态可以被识别和区分，并通过纠错操作恢复出原始量子态，使量子计算具备理论可行性的底层解决方案，也是支持大规模量子逻辑门操作，实现通用量子计算的必要环节。

图6：量子计算发展的重要里程碑



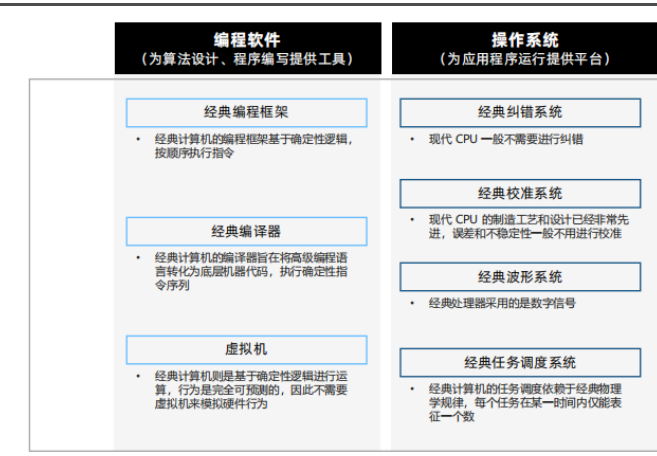
资料来源：量子信息网络产业联盟，民生证券研究院

图7：传统计算的编程与操作系统



资料来源：ICV，民生证券研究院

图8：量子的编程与操作系统



资料来源：ICV，民生证券研究院

1.3 量子计算机：多种技术路线并行

当前全球范围内针对量子计算机，已经形成超导、离子阱、光量子、中性原子、半导体量子等主要技术路线，以及以量子门数量、量子体积、量子比特数量等核心指标构成的性能评价体系，据信通院、ICV 数据：

1) 超导：基于超导约瑟夫森结构造扩展二能级系统，具有可扩展、易操控和集成电路工艺兼容等优势，超导量子计算处理器比特规模和保真度等指标逐年稳步提升，在纠缠态制备、拓扑物态模拟等科研实验方面取得诸多进展，是量子计算领域业界关注度最高的发展方向，代表厂商为 IBM，2023 年 IBM 发布了首款超过 1000 量子比特的量子计算处理器 Condor，其拥有 1121 量子比特；

2) 离子阱：利用电荷与磁场间所产生的交互作用力约束带电离子，通过激光或微波进行相干操控，具有比特天然全同、操控精度高和相干时间长等优点，离子阱路线未来发展需要突破比特规模扩展、高集成度测控和模块化互联等技术瓶颈，未来能否在量子计算技术路线竞争中占据优势仍有待进一步观察，代表厂商 Quantinuum 的相关产品量子体积指标达到 524288，成为业界最新纪录；

3) 光量子：利用可利用光子的偏振、相位等自由度进行量子比特编码，具有相干时间长、室温运行和测控相对简单等优点，可分为逻辑门型光量子计算和专用光量子计算两类，以玻色采样和相干伊辛等为代表的专用光量子计算近年来的研发成果较多，代表厂商中科大的“九章三号”成功构建了 255 个光子；

4) 中性原子：利用光镊或光晶格囚禁原子，激光激发原子里德堡态进行逻辑门操作或量子模拟演化，相干时间和操控精度等特性与离子阱路线相似，在规模化扩展方面更具优势，未来有望在量子模拟等方面率先突破应用，中性原子路线近年来在比特数目扩展和量子纠错等方面进展迅速，有望成为技术路线竞争中的后起之秀，代表尝试 Atom Computing 公司 2023 年发布 1225 原子阵列中性原子量子计算原型机，成为首个突破千位量子比特的系统；

5) 半导体（硅路线）：利用量子点中囚禁单电子或空穴构造量子比特，通过电脉冲实现对量子比特的驱动和耦合，具有制造和测控与集成电路工艺兼容等优势，代表厂商英特尔发布了一种在主流 CMOS 工艺技术上构建的具有 12 个量子比特的量子芯片 Tunnel Falls。它由 12 个量子点构建，可配置 4 至 12 个基于自旋的量子比特，其目的是让研究实验室用不同的拓扑结构来构建更大的系统，特别是测试量子比特的纠错方案，硅半导体路线虽然得到英特尔等传统半导体制造商支持，但由于同位素材料加工和介电层噪声影响等瓶颈限制，比特数量和操控精度等指标提升缓慢。

图9：量子计算发展阶段及其硬件趋势图（单位：量子比特数量）



资料来源：ICV，民生证券研究院

量子计算技术持续突破，比特数与量子体积指标持续提升。据信通院，超导路线在量子比特数量、逻辑门保真度等指标方面表现较为均衡；离子阱路线在逻辑门保真度和相干时间方面优势明显，但比特数量和门操作速度方面瓶颈也同样突出；光量子路线目前在比特数量、逻辑门保真度和相干时间等指标方面均未展现出明显优势；中性原子近年来在比特数量规模、门保真度和相干时间等指标方面提升迅速。

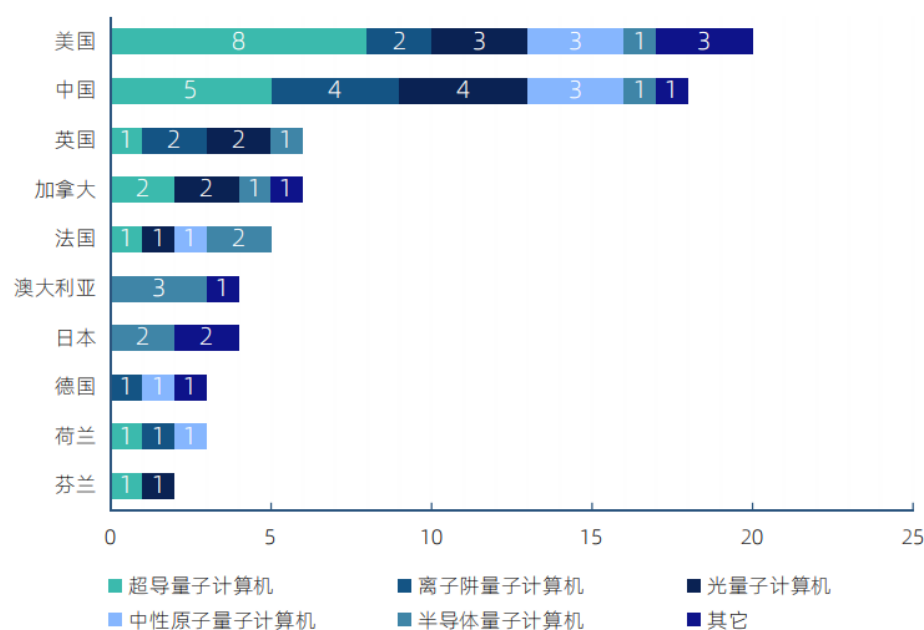
图10：量子计算比特数和量子体积指标发展趋势



资料来源：信通院，民生证券研究院

中美领跑全球量子计算机军备竞赛。据 ICV，中美是中游整机公司最多且类型分布最广的国家，都涵盖了超导、离子阱、光子、中性原子等物理平台，其中美国的代表性企业有 IBM、谷歌、微软、亚马逊、英特尔、Rigetti、IonQ、Xanadu 等，中国的代表产品包括“祖冲之”系列、“悟空”系列、“九章”系列等。

图11：2023 全球各主要科技国整机硬件企业各技术路线分布情况



资料来源：ICV，民生证券研究院

IBM 定义量子计算摩尔定律，2033 年有望生产 1000 个量子比特的超级计算机。IBM 量子计算机采用超导量子路线，认为每年量子计算机的量子体积增加一倍，并发布 2023 年度量子计算路线图，据量子客微信公众号，在路线图上，使用多芯片链接在量子处理器之间建立通信，四年内的错误缓解 Flamingo 处理器将从 2025 年的 5,000 个门增长到 2028 年的 15,000 个门。模拟并验证了为二维最近邻量子比特阵列量身定制的独特纠错协议；到 2026 年，Kookaburra 处理器中的逻辑内存和操作证明大规模噪声抑制是可能的；从 2028 年开始，这种噪声抑制与 Starling 处理器开始稳定增加的电路深度和量子比特计数相结合，可产生超出经典验证所能达到的纠错准确输出；到 2033 年以后，以量子为中心的超级计算机将包含 1000 个逻辑量子比特，从而释放量子计算的全部能力，即真正实现大规模商用量子计算机；在此过程中，IBM 为其正在研究的每个主要组件提供了年度目标。新的纠错码和系统模块化以及互连的构建块将使数百万个量子比特能够提供相同的整体性能，纠错码呈现为数十万个量子比特，并与 IBM 正在创新的新耦合器互连。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/297011046044006055>