

桂数专报

(政策与技术跟踪专题)

2021 年第 6 期 (总第 49 期)

广西壮族自治区信息中心
广西壮族自治区大数据研究院

2021 年 2 月 23 日

编者按：量子计算机是量子信息领域最具颠覆性的技术，也是难度最大的技术，它具有强大的并行处理数据的能力，可解决现有计算机难以运算的数学问题，因此，成为世界各国战略竞争的焦点。本期将主要介绍相关技术情况。

本期要目

量子计算机是什么？

核心优势价值释放与制约因素并存

下一个时代：盘点量子计算机未来六大应用

市场潜力巨大，商业潜力初现

量子计算机是什么？

量子计算机是基于量子力学原理构建的计算机。量子态叠加原理使得量子计算机每个量子比特 (qubit) 能够同时表示二进制中的 0 和 1，从而相较经典计算机算力发生爆发式增长，形成“量子优越性”。CPU¹算力随比特数 n 的增长呈线性 n 增长，GPU²算力随比特数 n 的增长呈平方次 $n \times n$ 增长，而 QPU 算力随比特数 n 的增长呈幂指数 2^n 增长。

经典计算机使用晶体管作为计算机的功能单位，以晶体管的开闭状态分别表示 0 和 1。由于量子态叠加原理能够同时表示 0 和 1，而量子计算机正好使用两态量子系统，如电子的自旋、光的偏振等作为量子比特。量子比特较经典比特具有更多信息，且呈幂指数级别增加。以 4 位的计算机为例，1 台 4 位经典计算机一次表示 1 种状态，1 台 4 位量子计算机一次表示 16 种状态，则 1 台 n 位经典计算机一次表示 1 种状态，1 台 n 位量子计算机一次表示 2^n 种状态。理论上，1 台 n 位的量子计算机算力等于 2^n 台 n 位的经典计算机算力。

量子计算机通过量子门对量子进行操作。类似于经典计算中基本的与门、或门、非门，量子计算中基本的量子门有阿达马门、受控非门等。根据量子力学，量子系统在经过“测

¹ 中央处理器 (Central Processing Unit)，简称 CPU，包含运算逻辑部件、寄存器部件和控制部件等，并具有处理指令、执行操作、控制时间、处理数据等功能。

² GPU (图形处理器)，全称 Graphics Processing Unit，又称显示核心、视觉处理器、显示芯片或绘图芯片，是一种专门在个人电脑、工作站、游戏机和一些移动设备 (如平板电脑、智能手机等) 上运行绘图运算工作的微处理器。

量”之后就会坍缩为经典状态。同样，量子计算机在经过量子算法运算后每一次测量都会得到唯一确定的结果，且每一次结果都有可能不相同。虽然量子计算机每一次的测量结果都类似“上帝掷骰子”会发生不同，但只要量子算法设计合理，量子计算机运算结果中出现概率最大的结果就是正确结果。

量子计算机还处在早期发展阶段。类比经典计算机，量子计算机还处在经典计算机的电子管时代，最底层的物理载体还没有完全形成。目前主流的技术路径有超导、半导、离子阱、光学以及量子拓扑这五个方向（图 1）。前四种路径均已制作出物理原型机，但量子拓扑尚无物理层面的实现。超导表现为无电阻电流沿回路来回震荡，注入的微波信号使电流兴奋，让它进入叠加态；半导是通过向纯硅加入电子造出了人造原子，微波控制着电子的量子态。离子阱表现为离子的量子能取决于电子的位置，使用精心调整的激光可以冷却并困住这些离子，使它们进入叠加态；光学是利用激光激发量子点产生单光子，通过开关分成多路，再通过光纤导入主体设备光学量子网络，最后利用单管子探测器探测结果。量子拓扑表现为电子通过半导体结构时会出现准粒子，它们的交叉路径可以用来编写量子信息。目前进展最快最好的是超导方向。原因是不仅人类希望借助现有非常先进的技术促进量子计算发展，包括半导体集成、电路工艺和技术。还有超导路径的优势是可扩展性非常强，固态器件、电学方向能够使未来的量子计算与经典的计算机相兼容、融合。未来技术更加成熟之后，将持续发力离子阱和量子拓扑这两个方向。

技术路径		超导	半导体量子点	离子阱	光学	量子拓扑
品质因数						
比特操作方式		全电	全电	全光	全光	NA
量子比特数		50+	4	70+	48	从0到1的过程中
相干时间		~50 μ s	~100 μ s	>1000s	长	理论上可无限长
两比特门保真度		94%	92%	99.9%	97%	理论上可达100%
两比特门操作时间		~50ns	~100ns	~10 μ s	NA	NA
可实现门数		~10 ³	~10 ³	~10 ⁸	NA	NA
主频		~20Mhz	~10Mhz	~100Khz	NA	NA
业界支持 (列举典型)	国外	谷歌、IBM、英特尔	英特尔、普林斯顿、代尔夫特	IonQ、NIST	Xanadu、MIT	微软、代尔夫特
	国内	本源量子、浙大、南大、北京量子研究院	本源量子、中科大	清华、中科大	中科大	清华、北大、中科院物理所
优势		可控性强，可扩展性优良，可依托成熟的现有集成电路工艺	可扩展性好，易集成，与现有半导体芯片工艺完全兼容	量子比特品质高，相干时间长，量子比特制备和读出效率较高	相干时间长，操控简单，与光纤和集成光学技术相容，扩展性好	对环境干扰、噪音、杂质有很强的抵抗能力
需突破点		极为苛刻的物理环境（超低温）	相干时间短，纠缠数量少，低温环境	可扩展性差，小型化难	两量子比特之间的逻辑门操作难	尚停留在理论层面，无器件化实现

图 1 量子计算机技术路径图

量子计算机将经历三个发展阶段。第一阶段是量子计算机原型机。原型机的比特数较少，信息功能不强，应用有限，但“五脏俱全”，是地地道道地按照量子力学规律运行的量子处理器，IBM Q System One 就是这类量子计算机原型机。第二阶段是量子霸权。“量子霸权”实际上是指在某些特定的问题上量子计算机的计算能力超越了任何经典计算机。量子比特数在 50~100 左右，其运算能力超过任何经典的电子计算机。但未采用“纠错容错”技术来确保其量子相干性，因此只能处理在其相干时间内能完成的那类问题，故又称为专用量子计算机。这种机器实质是中等规模带噪声量子计算机（NISQ）。目前采用的特定问题是量子随机线路的问题或玻色取样问题，这些问题仅是 Toy（玩具）模型，并未发现它们的实际应用。尽管量子计算机已迈进到“量子霸权”阶段，但在中等规模带噪声量子计算（NISQ）时代面临的核心

问题是探索这种专门机的实际用途，并进一步体现量子计算的优越性。第三阶段是通用量子计算机。这是终极目标，用来解决任何可解的问题，可在各领域获得广泛应用。通用量子计算机的实现必须满足两个基本条件，一是量子比特数要达到几万到几百万量级，二是应采用“纠错容错”技术。（中国软件开发联盟、中国科学杂志社）

广西壮族自治区信息中心
广西壮族自治区大数据研究院

核心优势价值释放与制约因素并存

一、相较经典计算机具有两大显著的核心优势

(一) 具有更强大并行计算能力。量子态叠加原理使得量子计算机每个量子比特能够同时表示二进制中的 0 和 1，而经典计算机只能一次分别表示 0 或 1 状态，因此量子计算机能够在特定计算困难问题上具有指数级性能提升。在解决实际问题的过程中，CPU 采用“串行”计算，即将一个问题的若干部分按照顺序依次进行运算；GPU 采用“并行”计算，即将一个问题拆成若干个小问题后，同时对每个小问题的一部分进行运算；QPU（量子处理器）则利用量子叠加性快速遍历问题的各种可能性并找到正确答案（图 2）。当问题规模较小时，CPU 实际运行时间有可能较小，但随着问题规模增大，最终运行效率将呈 QPU>GPU>CPU 排列。

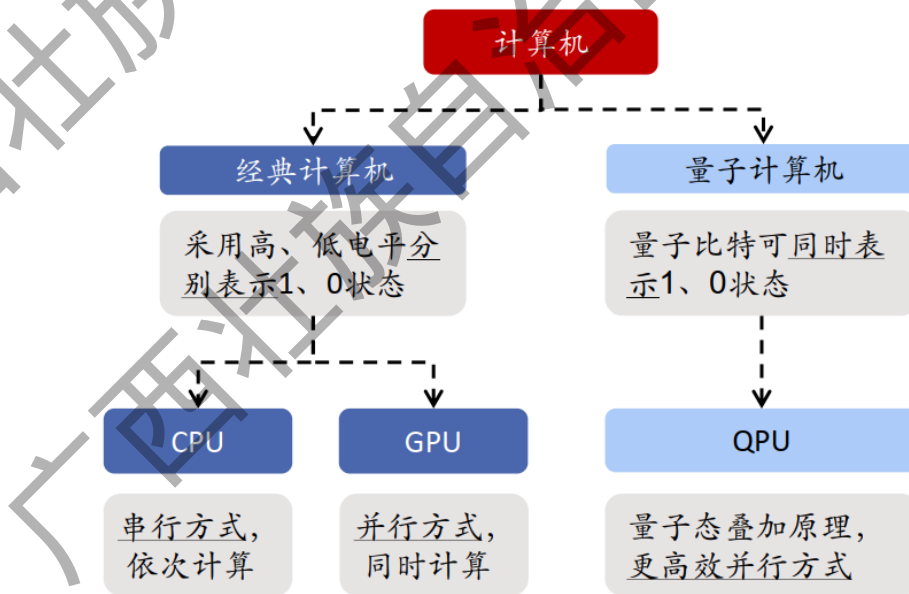


图 2 与经典计算机原理对比：CPU、GPU、QPU

(二) 具有更加高效量子模拟能力。当量子计算编译在电子原子上时，在模拟方面会表现得非常自然，例如新材料的发现，生物医药的药物合成。然而，当使用经典超级计算机来研究微观世界的量子力学问题时，原来强大的计算能力马上就变得捉襟见肘。在由量子力学规律所支配下的微观世界中，物理系统的所有信息都包含在系统的波函数里，如果能够精确地知道系统在某个时刻的波函数，原则上就知道了这个系统在该时刻的所有性质，但精确地描述波函数是一个浩大工程。以最简单的量子系统——两能级系统（通常是一个电子或者一个光子所描述的系统）为例，要描述这个系统的一个量子态，需要 2 个自由参数；描述由两个这样的粒子所构成的系统，则需要 14 个自由参数；如果描述 N 个两能级系统所构成的复合系统的量子态，则需要 $4N-2$ 个自由参数。如果 N 稍稍增加，这将是一个非常庞大的数字，于是计算这样一个由相互作用粒子所构成的量子系统的波函数随时间演化变得异常困难，以至于目前人类最强大的计算机只能计算 30 多个两能级粒子所构成的系统。

研究发现，量子模拟除了擅长模拟量子多体系统随时间的演化，还有可能模拟目前尚没有办法求解的强关联多体系统，而这两类问题困扰多个学科分支（如：凝聚态物理、量子统计力学、高能物理、原子物理、量子化学等）。除此之外，通过量子模拟还有可能构建某些理论上预言，但自然界尚未发现的新型的“虚拟”量子材料，来展现量子世界的神奇应用（如拓扑量子计算）；或是在量子模拟器中模拟目前

真实物理设备所达不到的物理条件，演示已经被理论预言，但是从未在真实世界中观测到的物理现象；或是创建用于求解某些特殊类型的数学难题的专用机器（超越目前超级计算机所能达到的最快求解速度）等。

二、价值能否释放取决于软硬件制约因素能否解决

目前制约量子计算机技术成熟和商业化的因素主要包括量子比特数、相干时间和合适的算法等。科学家认为量子计算机仍然需要在量子比特制备、相干时间长度等软硬件方面继续有所突破，才有望最终实现商用。量子比特数决定单次运算的数据量大小，相干时间决定维持高性能计算的时长，量子算法决定了量子计算机解决问题的范围。

（一）硬件层面制约。量子比特需要超低温。由于外界环境可以非常轻易地干扰量子计算机中量子的相干叠加态及计算结果的稳定性，量子计算机需要使用超导材料与外界环境隔绝，这些超导材料一般需要在约为 0.1 开尔文（即零下 273.05 摄氏度）的环境下工作，比宇宙星际空间的平均温度 2.73 开尔文还要低。相干时间仍然较短。由于量子计算机容易受外界环境的影响而导致退相干，因此所有的运算必须在退相干发生之前完成，才能保证运算结果的可靠性。而目前该时间的上限一般为 100 微秒（ 10^{-6} 秒），意味着量子计算机必须在 100 微秒内完成全部运算流程。运算操作时间不够短。每一个量子门的运算操作时间需要 50 纳秒（ 10^{-9} 秒），再加上纠错所需要的时间。为了获得可靠的结果，只能运行不超过 2000 个运算。

(二) 软件层面制约。从 CPU 时代到 GPU 时代再到未来的 QPU 时代，芯片和算法有如下的关系：CPU 的内部结构较为复杂，具有强大的逻辑判断和通用性能，可以处理各种不同类型的数据，并且随时可以中断各种数据处理，因此 CPU 可以执行所有的算法，尤其是擅长串行运算（如判断较多的算法），但在执行计算密集型算法效率不高。GPU 相比 CPU 具有较多的 ALU³和较少的 Control(控制)、Cache（高速缓冲存储器），理论上 GPU 也能执行所有的算法，但 GPU 的访存延迟较大，在执行非计算密集型程序时效率远不及 CPU，而在并行运算（如矩阵运算）方面 GPU 计算效率则要高于 CPU。目前的 QPU 需要依赖经典芯片（CPU 或专门设计的量子比特控制芯片）对其进行操作，目前只能执行经过巧妙设计后的量子算法（如用于分解质因数的 Shor 量子算法、用于无序数据库搜索的 Grover 量子算法）。量子比特本身量子属性可被用于大分子模拟，Shor 量子算法可被用于破解密码，Grover 量子算法可被用于搜索行业，待量子计算硬件成熟后其实用价值可以快速体现。但在人工智能领域，虽然推测量子计算机能够发挥较大作用，目前仍然缺乏有实用价值的算法。（中国软件开发联盟）

³ ALU 是算术逻辑单元 Arithmetic Logic Unit 的简称，是处理器中的一个功能模块，用来执行诸如加减乘除以及寄存器中的值之间的逻辑运算。

下一个时代：盘点量子计算机未来六大应用

一、人工智能

量子计算机的一个主要应用是人工智能（AI）。人工智能是基于从经验中学习的原则，根据不断给出的反馈，机器的反应会越来越准确，直到计算机程序可以算得上“智能”。这个反馈是基于对许多选择的可能性的计算，因而，量子计算可以解决人工智能计算问题。人工智能承诺会颠覆所有从汽车到医学等各个行业领域，21 世纪人工智能的发展同 20 世纪电的发明一样重要。例如，洛克希德·马丁计划使用 D-Wave 量子计算机来测试目前对经典计算机来说过于复杂的自动驾驶软件，谷歌也正使用量子计算机设计能够区分汽车和地标的软件。

二、分子模型

另一个量子计算机能涉及的领域是在分子模型，在找到化学反应的最佳配置后对分子的相互作用进行精确建模。这种“量子化学”非常复杂，以至于只有其中最简单的分子才能被现在的数字计算机分析。化学反应是自然界的量子变化，它们构成了高度纠缠的量子叠加态。但是如果把这件事情交给高度发达的量子计算机来做，那就事半功倍。谷歌已对此领域做出率先尝试，模拟了氢分子的能量，以便从高端太阳能电池到医用制药等将会制造出更高效产品。

三、密码演算学

现在大部分的网络安全都是依靠将大量数据分解为素数解决问题。虽然现在可以通过使用数字计算机来搜索每一个可能的答案，但这个方法非常费时，使得“破解密码”变得昂贵而不实用。量子计算机可以比数字计算机更高效地执行这些计算。中国科学家最近宣布，他们成功地将一颗轨道“量子”卫星上的纠缠光子发送到地球上的三个独立的基站。

四、金融模型

金融市场是现存最复杂的系统。虽然已经开发出很多的科学和数学工具来解决这一问题，但仍然面临着与其他科学领域都不同的一个问题：没有一个可以进行实验的受控设置。为解决这个问题，投资者和分析人士已经转向利用量子计算来解决问题。这么做的一个最直接的优势是量子计算机固有的随机性与金融市场的随机特性是一致的。投资者希望在随机产生的大量情景下评估结果的分布情况。另一个优势是，像套利这样的金融操作可能需要很多有路径依赖的步骤，而这样做的结果是数量会很快超过数字计算机的能力。

五、天气预报

要想预测天气对不同领域的影响程度，就必须计算诸多变量，因而模拟计算冗长复杂。而量子计算机可以解决控制天气方程式中具有有一种隐藏的波浪特性。谷歌的工程总监哈特穆特·内文指出，量子计算机可以帮助人类建立更好的气候模型，从而让人类更深入地了解人类是如何影响环境的。这些模型是用来对未来气候变暖进行评估的工具，帮助人类确定现在需要采取什么措施来防止灾难的发生。

六、粒子物理学

粒子物理学的模型通常非常复杂，仅通过普通的纸笔来制定解决方案非常难，并且需要大量计算时间进行数值模拟，这使得量子计算成为他们的理想之选。因斯布鲁克大学和量子光学与量子信息研究所使用了一个可编程的量子系统进行模拟实验。在自然杂志上发表的这篇文章中，研究小组使用了一个简单的量子计算机，其中用离子进行了逻辑运算，与实际的物理实验相比，该模拟结果显示出了良好的一致性。（网易智能）

市场潜力巨大，商业潜力初现

目前量子计算云平台以 PaaS⁴模式为主，提供量子模拟器、计算工具和开发套件等软件服务。随着量子计算物理平台与云基础设施的深度结合，以及量子处理器功能和性能的不断f展，IaaS⁵模式比重将逐步增多。未来随着量子计算产业进一步发展成熟、生态逐步开放，将有更多的行业和企业尝试通过 SaaS⁶模式对其业务处理进行赋能。在中期内（图3），量子计算机在达到商业应用程度后，小型化问题依然难以解决并且需要苛刻的低温环境运行。

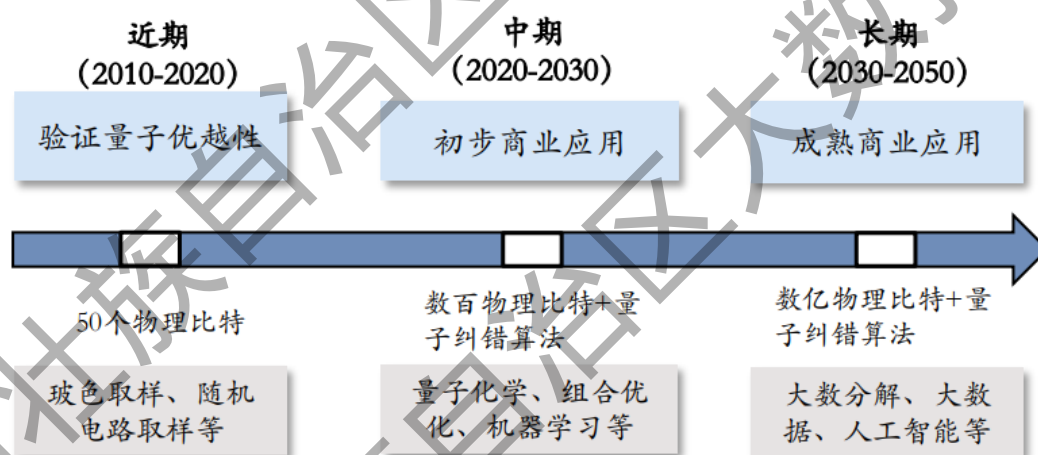


图3 量子计算机商用预测

由于量子计算极易被环境热量或波动干扰致使计算结果出错，因此量子纠错算法对结果的准确性极其重要。若没有解决纠错问题，量子计算就不可能比经典计算做得更好。

⁴ PaaS 是 Platform-as-a-Service 的缩写，意思是平台即服务。把服务器平台作为一种服务提供的商业模式。

⁵ IaaS (Infrastructure as a Service, 基础设施即服务) 是指把 IT 基础设施作为一种服务通过网络对外提供，并根据用户对资源的实际使用量或占用量进行计费的一种服务模式。

⁶ SaaS 是 Software-as-a-Service 的缩写名称，意为软件即服务，即通过网络提供软件服务。

据预测，在不考虑量子纠错算法的情况下，2035 年全球量子计算市场规模为 20 亿美元，2050 年将达到 600 亿美元；在考虑量子纠错算法的情况下，2035 年全球量子计算市场规模为 2600 亿美元，2050 年将达到 2950 亿美元。

通用量子计算硬件技术仍处于早期，产业链尚不成熟。固体系统如超导、半导作为最广泛的量子计算技术路径，依托于现有成熟的硅技术，因此量子计算机企业在产业链上游仍需依赖传统的硅晶圆、半导体加工设备、集成电路供应商。量子计算机体积比常规计算机大数倍，加之严苛的低温运行环境以及千万美元的价格（D-Wave⁷ 1500 万美元售价），使普通个人用户短期内无法使用量子计算机。科研机构 and 大型企业组织成为主要用户。即便是机构用户，采用量子云服务而非购买计算机也是主流的使用方案。此时，第三方云服务商如微软、亚马逊等较之量子计算初创企业的自有云平台，在标准化业务场景中便具有显著的渠道和客户优势。

在量子计算领域，美国近年来持续大力投入，已形成政府、科研机构、产业和投资力量多方协同的良好局面，并建立了在技术研究、样机研制和应用探索等方面的全面领先优势。与此同时，企业自发成立的产业联盟成为量子生态中的重要组成，IBM、微软、本源量子都成立了各自的产业联盟。IBM 发起量子计算联盟 Q Network 推进行业合作，其特点为除用户和科研机构外，主要为软件公司，基本不与硬件公司

⁷ D-Wave 系统公司 (D-Wave Systems, Inc) 是一家量子计算机公司，2011 年 5 月 D-Wave 推出了 D-Wave One，被称为世界上第一个商用量子计算机。

合作。微软成立“微软量子网络”和“西北量子联盟”。与 IBM 不同的是，微软为了弥补缺乏自研量子计算硬件的劣势，联盟包含数家量子硬件公司如 IonQ、QCI、霍尼韦尔、以及自投的 PsiQuantum。我国在加速量子计算技术开发、量子计算应用落地方面进行了积极的探索。2019 年本源量子建立了国内首个量子计算联盟——本源量子计算产业联盟，标志着中国量子计算产业进入实质性发展阶段。2020 年 12 月，我国首台量子计算机原型机“九章”问世，其求解数学算法 5000 万样本的高斯玻色取样仅需 200 秒，速度远超超级计算机，标志着我国成为了第二个实现“量子优越性”的国家。在 2021 年 2 月，我国量子计算又迎来新进展，中国首款量子计算机操作系统——本源司南正式发布，其多任务并行计算和自动化校准这两大新功能解决了此前量子计算机系统的痛点。（中国软件开发联盟）

广西壮族自治区信息中心
广西壮族自治区大数据研究院

编辑部地址：南宁市体强路 18 号广西信息中心 1412 号房

联系电话：0771-6113592

电子邮箱：dsjyjs@gxi.gov.cn

网 址：<http://gxxxzx.gxzf.gov.cn/>



扫描二维码获取
更多决策参考信息