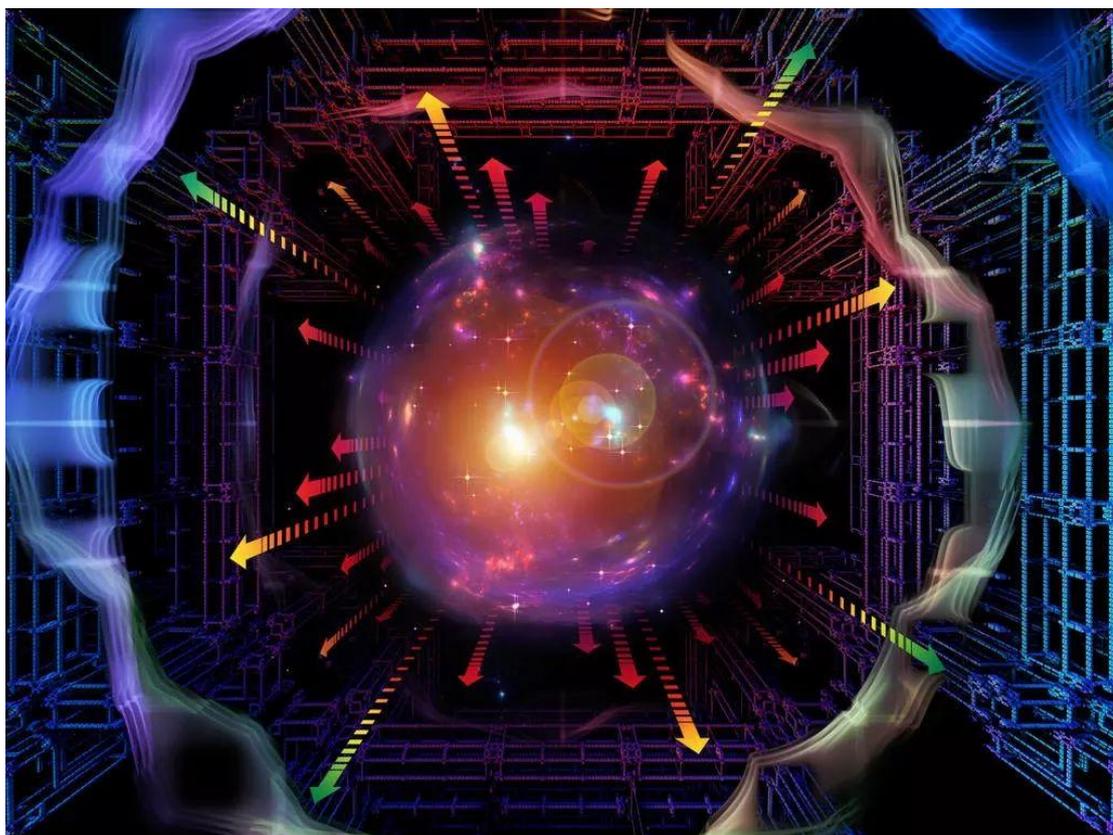




量子计算系列报告

Quantum Computing Series Report

量子计算机整机



光子盒研究院
2021年9月

目录

目录.....	i
图表目录.....	ii
编者序.....	iii
光子盒简介.....	iv
声明.....	v
第一章 量子计算机发展历程简介.....	1
第二章 量子计算机发展的三大阶段.....	7
一、实现量子计算优越性.....	7
二、制造专用量子模拟机.....	8
三、制造可编程通用量子计算机.....	8
第三章 量子计算机的工作原理.....	10
第四章 量子计算机的技术路线.....	13
一、超导.....	14
二、离子阱.....	15
三、光量子.....	16
四、量子点.....	19
五、冷原子.....	22
第五章 量子计算机的性能衡量.....	25
第六章 中国量子计算整机重大进展简介.....	28
一、“九章”量子计算原型机.....	28
二、“祖冲之号”量子计算原型机.....	29
三、“本源悟源”超导量子计算机.....	33
第七章 总结.....	34
关于作者.....	35

图表目录

图目录

图 1 量子计算发展的主要阶段（基于门的量子计算机）	9
图 2 未来十年通往广泛量子优势之路.....	9
图 3 量子计算机的工作原理.....	10
图 4 超导量子计算机的工作流程.....	11
图 5 IBM 量子计算机运行流程图.....	12
图 6 Xanadu 光量子计算机处理器.....	17
图 7 Xanadu 的 X8 光子量子处理单元.....	18
图 8 由 GlobalFoundries（格罗方德）制造的 PsiQuantum Q1 芯片层.....	18
图 9 英特尔低温控制芯片 Horse Ridge.....	21
图 10 Atom Computing 第一代 100 原子量子计算机——Phoenix.....	24
图 11 商业化量子计算机外观对比.....	25
图 12 影响量子体积的因素.....	26
图 13 “九章”的光量子干涉实物图.....	29
图 14 “九章”2.0 技术示意图.....	29
图 15 “祖冲之号”的二维超导量子比特芯片示意图.....	30
图 16 “祖冲之号”66 量子比特超导量子处理器示意图.....	31
图 17 “祖冲之号”2.1 升级版高性能量子处理器器件示意图.....	32
图 17 本源悟源量子计算机外观.....	33

表目录

表 1 各技术路线主要参与者及机构类型.....	13
表 2 “九章”和“祖冲之号”量子计算原型机对比.....	32

编者序

20 世纪 80 年代初，Paul Benioff、Yuri Manin 和 Richard Feynman 提出了各自的想法，他们为量子计算机的发展奠定了基础。1985 年，David Deutsch 描述了基于门的量子计算机。1994 年，Peter Shor 提出一种可以在量子计算机上实现的量子算法，该算法的提出使人们意识到量子计算的巨大潜力。至此，科学界掀起了第一波量子计算机的研究热潮。

在量子科技这轮角逐中，美国、加拿大、欧洲等国都参与其中，竞相争夺制造出第一台量子计算机。2019 年，IBM 发布 IBM Q System One，这是世界首个量子计算集成系统。同年，谷歌 Sycamore 量子处理器，第一次向世人展示量子计算优越性。2020 年和 2021 年，我国自主研发的量子计算原型机“九章”和“祖冲之号”相继问世，并展示了超越谷歌的量子计算优越性。这些研究进展令科学界和产业界兴奋，并期待着更加强大的量子计算机的尽快问世。

量子计算从设想到实验室再到可以脱离实验室环境运行，这一路已经走了 40 年，距离真正实现商业价值的几百万量子比特的量子计算机还有很大差距。为了更好地预测量子计算机的未来发展方向和进程，研究量子计算机的过去和现在便成了基础。光子盒基于此目的编写了这份报告，希望能为中国量子计算产业发展提供参考和借鉴。

本报告是光子盒研究院出品的《量子计算系列报告》第 3 期，介绍了量子计算机的发展简介、发展阶段、工作原理、性能衡量等内容。希望通过此文章，可以加深您对量子计算机这一新事物的理解。更多关于量子计算或量子计算机的信息，详见光子盒研究院《量子计算系列报告》其他子报告。

关键词：量子计算机发展简介；量子计算机发展阶段；量子计算机工作原理；量子计算机技术路线

光子盒简介

光子盒创立于2020年2月,名称来自于在1930年第六届索尔维会议(Solvay Conference)上,爱因斯坦在其与玻尔的争论(Bohr-Einstein debate)中提出的一项光子盒实验(photon-box experiment)。

光子盒定位为量子产业服务平台,通过推送前沿量子科技新闻、科普量子知识、解读量子技术、发布年度和专题报告等形式,致力成为中国量子科技产业最值得信赖的服务机构。截至2021年7月,光子盒已公开发布了20余份量子科技领域的专题报告,并且为10余家中国量子科技领军企业提供量子行业咨询和数据服务等。

2021年5月,光子盒作为协办方,与主办方中国电子科技集团公司电子科学研究院、社会安全风险感知与防控大数据应用国家工程实验室和中国工程科技发展战略安徽研究院,在安徽合肥成功举办了“2021中国量子科技产业‘双循环’高峰论坛”。

光子盒正在不断扩充自有量子科技产业数据库的广度与深度,建立多维量子产业数据信息,提供客观、专业、深入及具有时效性的量子行业报道与咨询服务。光子盒未来还将承办量子科技领域的论坛,提供更为丰富的主题和内容,联合量子产业科技公司、金融行业投资公司、国家/省级量子相关科研院所、政策战略研究单位等共同促进量子产业持续向好发展。

声明

本报告采用的数据均来自公开渠道或对公开数据进行的整理。本报告发布的观点力求独立、客观和公正，结论不受第三方授意或影响，不构成任何广告。

光子盒所有原创作品版权归光子盒所有。其他媒体、网站或个人转载使用时不得进行商业性的原版原式的转载，也不得歪曲和篡改本网站所发布的内容。如转载须注明来源为“光子盒”，不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删减和篡改。未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制或发表。如征得光子盒同意进行引用、刊发的，需在允许范围内。违规使用本报告者，法律必究。

光子盒引用其它媒体作品或数据的目的在于传递信息，并不代表光子盒赞同其全部观点，不对其真实性、时效性负责；其他媒体、网站或个人转载使用时，必须保留光子盒注明的来源，并自负法律责任。

若报告涉及动态数据的，仅表达截至发稿时的情况，不代表未来情况。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成投资建议。

如因作品内容、版权和其它问题需要同光子盒联系的，请联系王女士（邮箱：wangsy@chinafincon.com）。

第一章 量子计算机发展历程简介

量子计算机是一种按照量子力学规律运行的物理设备,它能够进行高速的数学和逻辑运算,并存储和处理量子比特信息。由于量子力学有叠加、相干、纠缠等不同于经典力学的特性,使得量子计算机可以在很短的时间内解决某些在经典计算机上难以解决的问题。

目前,量子计算机主要分为两类,通常意义的量子计算机是 David Deutsch 提出的基于量子逻辑门(或称为量子门)的量子计算机,量子门类似于今天经典计算机中使用的操纵信息的逻辑门,另一类是上世纪 90 年代末提出了量子退火计算机,量子比特无需相互纠缠,也没有量子门,用于解决最优化问题,这是量子计算发展早期的折中方案。

实现基于门的量子计算需要满足 David DiVincenzo 提出的 5 个基本条件:

- 物理上可扩展,使量子比特数量能够增加
- 量子比特可以初始化为任意值
- 量子门操作快于退相干时间
- 通用量子门集
- 量子比特易于读取

关于通用量子计算机的说法,由于目前命名没有进行统一,“通用”大致包括两层含义:从解决问题的范围来说,理论上,通用量子门(例如 Hadamard 门、相位门、CNOT 门、 $\pi/8$ 门)可以运行各种类型的量子算法,量子计算机上任何可能的运算都可以简化为一组通用门,因此有时媒体口中的通用量子计算机指的就是基于门的量子计算机,而量子退火机这种只能解决单一问题的机器称为专用量子计算机;从解决问题的能力来说,通用量子计算机需要满足以下条件:量子比特数目达到百万量级,容错阈值 $>99.9\%$,实现容错量子逻辑门。

以下总结了量子计算发展相关的多个重要节点:

20 世纪初,量子力学作为物理学的一个分支出现,以在原子尺度上解释自

然，并促进了晶体管、激光和磁共振成像等技术进步。¹

1970 年代，将量子力学和信息理论结合的想法出现，量子信息理论诞生。

1980 年，Paul Benioff 首次描述了基于量子力学的图灵机模型。他认为量子计算的过程是可逆的，在计算的中间过程几乎没有耗散，只在计算的最后进行测量，能量的耗散形式不同于经典计算。并且，量子计算需要操作的步骤和需要的资源都比经典计算少，因此热耗散比经典计算小很多。当然，在量子计算的过程中仍有热量耗散。

1980 年，Yuri Manin 撰写了一篇关于量子信息的论文——Computable and uncomputable，这被认为是量子计算领域的基础之一。²

1981 年，在 MIT (麻省理工学院) 和 IBM 联合举办的计算物理会议 (Physics of Computation Conference) 上，美国理论物理学家 Richard Feynman 在演讲中提出利用量子效应对量子系统行为进行模拟的想法。1982 年，*International Journal of Theoretical Physics* 出版了费曼在该次会议上作的题为“Simulating physics with computers”的主旨报告。³

1985 年，英国物理学家牛津大学的 David Deutsch 描述了通用量子计算机的量子逻辑门的构造。

1994 年，美国计算机科学家 Peter Shor 在美国电信服务商 AT&T 的 Bell 实验室任职期间设计了一种算法，用量子计算对数字进行因式分解，该算法只需要 6 量子比特便能够有效地解决经典计算机难以破解的密码学问题。⁴这种算法后被称为 Shor 算法。

1996 年，计算机科学家 Lov Grover 提出一个非结构化的量子搜索算法。⁵这种算法后被称为 Grover 算法。

1997 年，IBM Almaden 研究中心的 Isaac Chuang、麻省理工学院的 Neil Gershenfeld 和加州大学伯克利分校的 Mark Kubinec 创建了第一台可以加载数据

¹ <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK538701/>

² <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/quantum/concepts-overview>

³ http://physics.whu.edu.cn/dfiles/wenjian/1_00_QIC_Feynman.pdf

⁴ P. W. Shor, "Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring," Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1994, pp. 124-134, doi: 10.1109/SFCS.1994.365700.

⁵ <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/9605043.pdf>

并输出解决方案的量子计算机（2 量子比特）。⁶

1998 年，洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Emanuel Knill、Raymond Laflamme 和 Rudy Martinez 以及麻省理工学院的 Ching-Hua Tseng 发布他们使用巴豆酸的原子核（nuclei of crotonic acid），创建了 7 量子比特的量子计算机。⁷

2007 年 2 月，加拿大 D-Wave Systems 公司在美国加利福尼亚州硅谷的计算机历史博物馆演示了在笔记本电脑上解决数独谜题，而解决这一难题的是通过互联网连接的另一台计算机完成的。该台计算机的处理器名为“Orion”（猎户星座），使用传统光刻技术由超导金属铌制成，有 16 量子比特。⁸

2009 年 11 月，美国 NIST（国家标准和技术研究所）制造出世界首台可编程的通用量子计算机。⁹

2011 年 5 月，加拿大 D-Wave Systems 公司发布了号称全球第一款商用型量子计算机 D-Wave One，拥有 128 量子比特处理器，只能处理一些特定任务。¹⁰

2011 年 9 月，奥地利因斯布鲁克大学 Rainer Blatt 实验组实现了 14 离子量子比特的 Greenberger-Horne-Zeilinger 纠缠态的创建。实验成果以 14-qubit entanglement: creation and coherence 为题发表在学术期刊 *Physical Review Letters*。

11

2013 年 5 月，D-Wave Systems One 升级为 512 量子比特的 D-Wave Two。该计算机不是通用的，而是为量子退火而设计。具体来说，这些计算机旨在使用量子退火来解决称为二次无约束二元优化的单一类型问题。

2015 年 8 月，D-Wave Systems 宣布 D-Wave 2X 量子计算系统上市。D-Wave 2X 具有超过 1,000 量子比特的量子处理器和众多设计改进。

2016 年 8 月，美国马里兰大学 C. Monroe 实验组展示了一个 5 量子比特的俘获离子量子计算机，它可以在软件中编程，通过执行任何通用量子逻辑门序列来

⁶ https://www.researchgate.net/publication/239640996_Experimental_Implementation_of_Fast_Quantum_Searching

⁷ <https://arxiv.org/pdf/quant-ph/9908051.pdf>

⁸ <https://physicsworld.com/a/quantum-computing-a-commercial-reality/>

⁹ <https://www.nature.com/articles/nphys1453>

¹⁰ <https://www.engadget.com/2011-05-18-d-wave-one-claims-mantle-of-first-commercial-quantum-computer.html>

¹¹ <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.106.130506>

实现任意量子算法。我们将算法编译成一组完全连接的门操作，这些门操作是硬件原生的，平均保真度为 98%。重新配置这些门序列提供了在不改变硬件的情况下实现各种算法的灵活性。实验还实现了 Deutsch-Jozsa 和 Bernstein-Vazirani 算法，平均成功率分别为 95% 和 90%。该成果以 *Demonstration of a small programmable quantum computer with atomic qubits* 为名，发表在学术期刊 *Nature* 上。¹²

2017 年 1 月，D-Wave Systems 宣布 D-Wave 2000Q 量子计算机全面商用。凭借 2,000 个量子比特和新的控制功能，这个新系统可以解决比以前更大的问题，并具有更快的性能，为优化、网络安全、机器学习和采样等生产应用迈出了一大步。¹³

2017 年 5 月，中国科学技术大学（以下简称“中科大”）潘建伟教授及其同事陆朝阳、朱晓波等，联合浙江大学王浩华教授研究组，在 2016 年首次实现 10 光子纠缠操纵的基础上，利用自主研发的高品质量子点单光子源，构建了用于玻色取样任务的多光子可编程量子计算原型机，是世界上第一台超越早期经典计算机的基于单光子的量子模拟机。实验测试表明，该量子计算机的取样速度比国际同行类似的实验加快至少 24,000 倍，比人类历史上首台电子管计算机（ENIAC）和首台晶体管计算机（TRADIC）运行速度快 10~100 倍。¹⁴

2018 年，牛津量子电路公司（Oxford Quantum Circuits）建造并推出了英国第一台超导量子计算机。¹⁵

2018 年 5 月，上海交通大学光子集成与量子信息实验室金贤敏团队制备出世界最大规模的三维集成光量子芯片，并演示了首个真正空间二维的随机行走量子计算。该成果以“*Experimental two-dimensional quantum walk on a photonic chip*”（光子芯片上的二维量子行走实验）为题发表在 *Science Advances* 学术杂志中。

¹⁶这也是国内首个光量子计算芯片。这项研究进展对于推进模拟量子计算机研究

¹² <https://www.nature.com/articles/nature18648>

¹³ <https://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-announces-d-wave-2000q-quantum-computer>

¹⁴ <http://xcb.ustc.edu.cn/info/1003/1158.htm>

¹⁵ <https://oxfordquantumcircuits.com/oqc-delivers-first-uk-qcaas>

¹⁶ <https://advances.sciencemag.org/content/4/5/eaat3174>

具有重要意义。2018年10月，上海交通大学金贤敏研究团队在该研究团队在飞秒激光直写制备的三维光量子集成芯片中成功构建了大规模六方粘合树并演示了量子快速到达算法内核，相比经典情形展示了平方级加速，而且最优效率提高十倍。实验成果以“Experimental quantum fast hitting on hexagonal graphs”（六边形图上的实验量子快速命中）为题发表在学术期刊 *Nature photonics* 中。该项研究提供了利用量子系统的维度和尺度作为全新资源研发专用光量子计算的路线图。¹⁷

2019年1月，IBM发布了世界上第一个为科学和商业用途而设计的通用量子计算系统 IBM Q System One。¹⁸

2019年10月，美国物理学家 John M. Martinis 带领的谷歌团队宣布研制出 53 量子比特的处理器——Sycamore（悬铃木）。“悬铃木”完成 100 万次随机线路取样任务只需 200 秒，而当时世界最快的超级计算机 Summit 需要 1 万年才能完成。谷歌因此宣布其实现了“量子计算优越性”（也译为“量子霸权”）。¹⁹

2020年6月，Honeywell（霍尼韦尔）发布了第一个商业量子计算系统 System Model H0，该系统达到了 64 量子体积（Quantum Volume, QV），是当时其他系统的两倍。

2020年9月，霍尼韦尔发布量子计算系统 System Model H1，拥有 10 量子比特，以及 128 量子体积。2021年3月，H1 达到 512 量子体积；2021年7月，H1 达到 1024 量子体积，创造了新的世界记录。²⁰

2020年9月，D-Wave Systems 发布第五代量子计算机——Advantage™系统，该系统具有超过 5,000 个量子比特和 15 路（15-way）量子比特连接，整合了新的硬件、软件和工具，在 Leap™量子云服务中提供，还有一个扩展的混合求解

¹⁷ <https://www.physics.sjtu.edu.cn/node/2647>

¹⁸

<https://newsroom.ibm.com/2019-01-08-IBM-Unveils-Worlds-First-Integrated-Quantum-Computing-System-for-Commercial-Use>

¹⁹ <https://ai.googleblog.com/2019/10/quantum-supremacy-using-programmable.html>

²⁰

<https://www.honeywell.com/us/en/news/2021/07/honeywell-sets-another-record-for-quantum-computing-performance>

器服务，可以运行多达 100 万个变量的问题。²¹

2020 年 12 月，中科大潘建伟、陆朝阳团队与中科院上海微系统与信息技术研究所、国家并行计算机工程技术研究中心合作，成功构建了 76 个光子的量子计算机原型“九章”，成为继谷歌后全球第二个实现“量子计算优越性”的量子计算系统。²²

2021 年 5 月，中国科大中科院量子信息与量子科技创新研究院(以下简称“量子创新研究院”)潘建伟、朱晓波、彭承志等组成的研究团队，成功研制了 62 量子比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”。²³

2021 年 5 月，北京大学物理学院、人工微结构和介观物理国家重点实验室、纳光电子前沿科学中心极端光学创新研究团队与合作者发展了大规模硅基集成的可重构光量子芯片技术，近期研制了一款可惠勒延迟选择测量装置的多路径马赫-曾德尔干涉仪。该芯片单片集成 350 多个光子元器件和近 100 个可调相移器，是目前规模最大的光量子芯片之一。²⁴

2021 年 6 月，“九章”光量子计算机升级为九章 2.0，将探测光子数量增加到了 113 个，速度相比九章 1.0 提升了 9 个数量级，再次实现量子计算优越性。

2021 年 6 月，量子创新研究院潘建伟、朱晓波研究团队成功研制的 66 量子比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”，并利用其中的 56 量子比特完成了“量子计算优越性”实验。²⁵

²¹ <https://www.dwavesys.com/solutions-and-products/systems/>

²² http://www.cas.cn/cm/202012/t20201207_4769608.shtml?from=timeline

²³ <http://news.ustc.edu.cn/info/1055/74972.htm>

²⁴ <https://news.pku.edu.cn/jxky/9b712446d4e64026ae0fc99fc21a8163.htm>

²⁵ <https://arxiv.org/abs/2106.14734>

第二章 量子计算机发展的三大阶段

对于量子计算机的研究，本领域的国际同行公认有三个指标性的发展阶段：

一、实现量子计算优越性

实现量子计算优越性，即量子计算机需要在某一方面或某些方面的计算能力超越经典计算机，这大约需要 50 至 100 量子比特。量子计算机非常适合在随机量子线路采样（random circuit sampling）、IQP 线路（instantaneous quantum polynomial）、高斯玻色采样（Gaussian Boson sampling）这样的特定问题上发挥其计算潜力，展现其量子计算优越性。这一阶段由于量子计算机噪声较大，量子比特数量较少，也可称为中等规模含噪声量子（NISQ）时代。

2019 年 10 月，谷歌与 NASA（美国宇航局）、橡树岭国家实验室等合作，展示了“悬铃木”在几秒钟内计算出即使是当今速度最快的超级计算机也需要上万年才能完成的计算能力，宣布其实现了量子计算优越性。²⁶该成果以 Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor 为名，发表在学术杂志 *Nature* 中，实验结果表明，谷歌 54 量子比特（实际只使用了 53 量子比特，1 个量子比特坏了）的可编程超导量子处理器“悬铃木”在 200 秒可进行 100 万次随机量子线路采样任务，而橡树岭国家实验室的超级计算机 Summit 需要 1 万年才能完成相同的任务。²⁷但后来 IBM、阿里巴巴和中科院的研究人员证明，通过一些方法可将经典计算机执行该任务的时间缩短至几天。

2020 年 12 月，中科大潘建伟、陆朝阳等组成的研究团队，与中科院上海微系统所、国家并行计算机工程技术研究中心合作，构建了 76 个光子的量子计算原型机“九章”，实现了具有实用前景的“高斯玻色取样”任务的快速求解。中国成为继美国后全球第二个实现“量子计算优越性”的国家。

2021 年 2 月，中科大潘建伟、朱晓波、彭承志等组成的研究团队成功实现 62 比特可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”，并在此基础上实现了可编程的

²⁶ <https://www.nasa.gov/feature/ames/quantum-supremacy>

²⁷ <https://ai.googleblog.com/2019/10/quantum-supremacy-using-programmable.html>

二维量子行走。2021年6月，“祖冲之号”升级为66量子比特的“祖冲之2.0”，并利用其中的56量子比特实现了量子计算优越性，采样任务的经典模拟复杂度比谷歌“悬铃木”高2到3个数量级。2021年9月，“祖冲之2.1”实现了更大规模的量子计算优越性。“祖冲之2.1”与“祖冲之2.0”相比，量子比特数量仍为66，但是完成了更大规模的随机电路采样。“祖冲之2.1”系统规模达到60量子比特24层循环（“祖冲之2.0”为56量子比特20层循环），采样任务的经典模拟复杂度比谷歌“悬铃木”高6个数量级，比“祖冲之2.0”高3个数量级。

二、制造专用量子模拟机

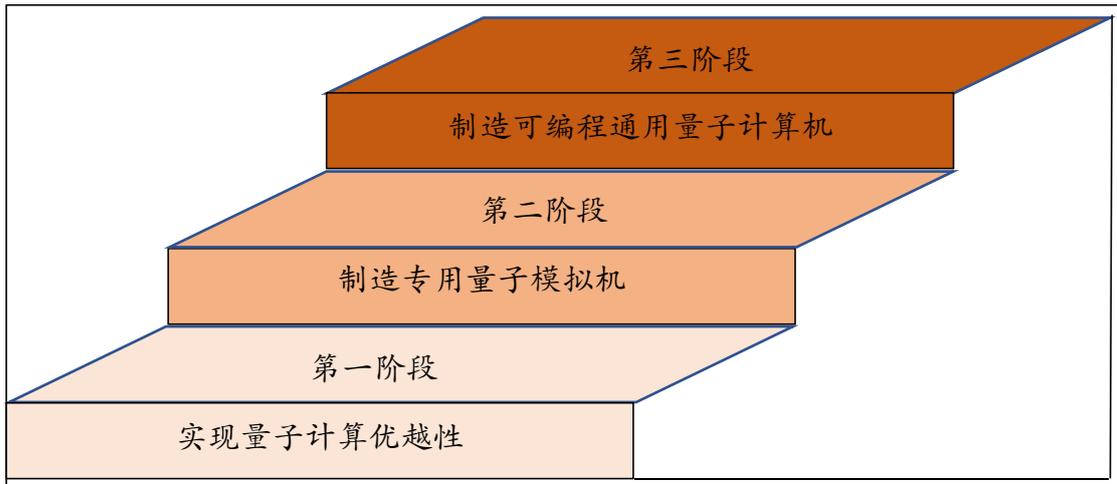
第二阶段是制造专用量子模拟机，通过对规模化多体量子体系的精确制备、操控与测量，研制可相干操纵数百个量子比特的量子模拟机，用于解决若干超级计算机无法胜任的具有重大实用价值的问题，例如量子化学、新材料设计、优化算法等。

仅从量子比特数量的角度来看，2021年有望步入这一阶段。包括谷歌、IBM在内的科技巨头都计划在今年内推出100+比特量子计算机，中性原子量子计算初创公司Atom Computing和ColdQuanta则率先推出了100+量子比特的机器。目前在性能方面领先的“祖冲之号”已有66量子比特，距离100比特的目标不远，2021年9月，国内初创公司本源量子发布技术路线图，预计到2022年将实现100+量子比特。

三、制造可编程通用量子计算机

通过积累在专用量子计算与模拟机的研制过程中发展起来的各种技术，提高量子比特的操纵精度使之达到能超越量子计算苛刻的容错阈值（>99.9%），大幅度提高可集成的量子比特数目（百万量级），实现容错量子逻辑门，研制可编程的通用量子计算原型机。到时候，量子计算机将实现广泛量子优势，不同于仅在某个特定任务上实现的量子计算优越性。未来，通用量子计算机很大可能将与经典计算机互补。各自发挥比较优势，共同促进人类社会各领域的飞速发展。

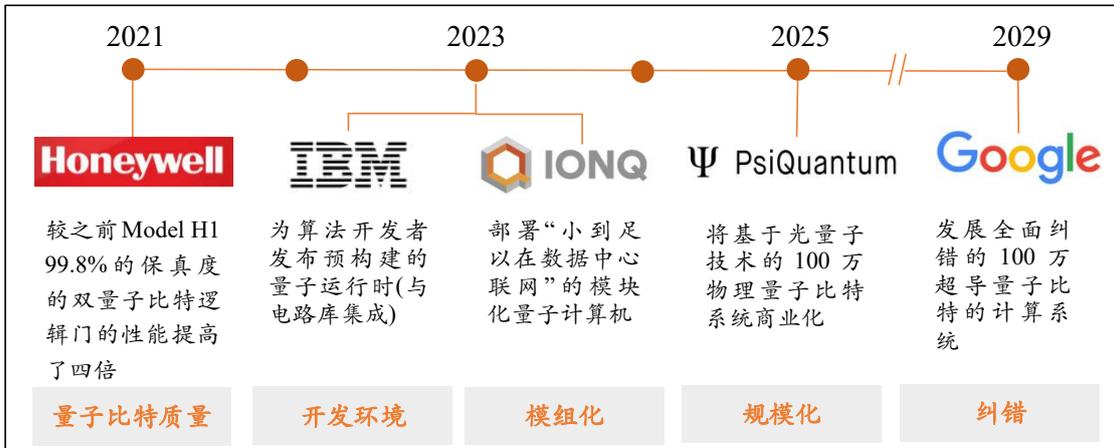
图 1 量子计算发展的主要阶段（基于门的量子计算机）



来源：光子盒研究院

下图选取了 5 家量子计算硬件厂商，它们采用不同技术路线：超导量子（IBM、谷歌）、离子阱（霍尼韦尔、IonQ）和光量子（PsiQuantum）。随着许多主要参与者发布了量子计算路线图，通往广泛量子优势的道路变得更加清晰。除了纠错之外，未来十年需要关注的里程碑包括更高质量的量子比特、模型开发人员抽象层的开发、大规模和模块化系统以及机器的扩展。在未来五年内，任何一家公司都不太可能将这些里程碑式的突破整合在一起。尽管如此，一旦开发人员同时达到五个关键里程碑，那么它们构成了广泛的量子优势的基本要素，在接下来的几十年中，先进的架构模块化和扩展以实现全面的容错将成为现实。

图 2 未来十年通往广泛量子优势之路



来源：BCG²⁸，光子盒研究院

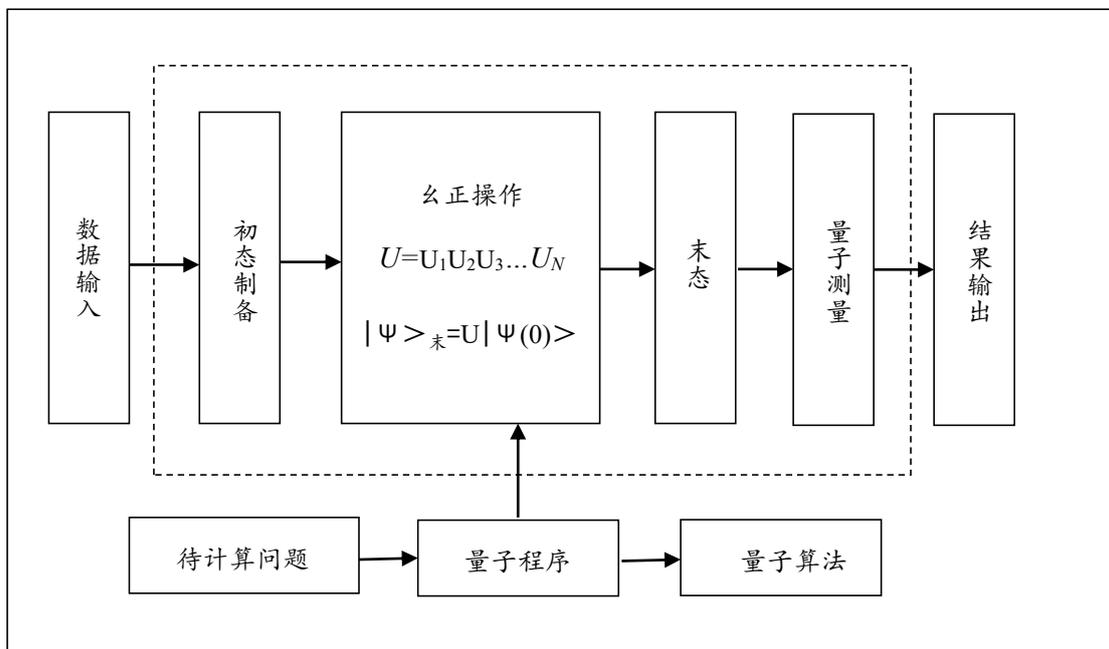
²⁸ <https://www.bcg.com/publications/2021/building-quantum-advantage>

第三章 量子计算机的工作原理

量子计算机与经典计算机一样，其核心都是为了解决某种问题而进行的数学计算，区别在于两者处理数据的方法有本质差异。相比于经典计算机可以直接对经典数据形式处理，量子计算机需要将经典形式的数据制备在量子计算机整个系统的初始量子态上，经由一系列幺正操作演化为量子计算系统的末态，对末态实施量子测量，输出运算结果。

下图中虚线框内按照量子力学规律运行。幺正操作（U 操作）是信息处理的核心，其本质是针对量子态进行相应变化所需的控制指令，确定 U 操作的方法首先是选择适合于待求解问题的量子算法，然后将该算法按照量子编程的原则转换为控制量子芯片中量子比特的指令程序，从而实现 U 操作的功能。²⁹由于对于量子态进行操作完全不同于经典计算机的二进制数据的操作，所以针对于解决某一具体问题而言，量子计算机需要重新设计相应算法。

图 3 量子计算机的工作原理



来源：郭光灿，陈以鹏，王琴《量子计算机研究进展》，《南京邮电大学学报》，2020年10月

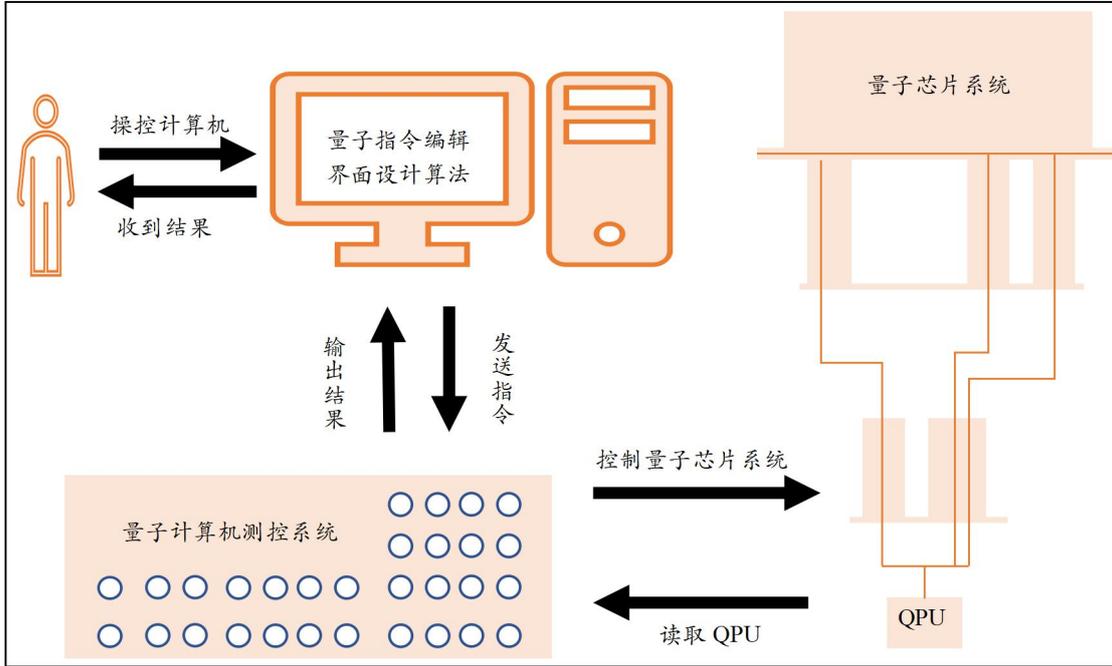
量子计算机运行主要涉及三大部分：

- 经典计算机：通过装有量子软件（指令编辑器）的经典计算机发出指令；

²⁹ 郭光灿,陈以鹏,王琴. (2020.10). 量子计算机研究进展. 南京邮电大学学报 (自然科学版). 40 (5)

- 量子芯片系统：量子处理单元，在超导等系统下，需要稀释制冷机；
- 量子计算机控制系统：控制和测量的微波电子设备等。

图 4 超导量子计算机的工作流程



来源：光子盒研究院整理

以 IBM 量子计算机为例，超导量子计算机的工作步骤大致如下：

第一步，用户在经典计算机上用量子指令编辑器设计指令，向量子计算机下达执行任务。工作指令通过云端排队后发送到量子计算机控制系统；

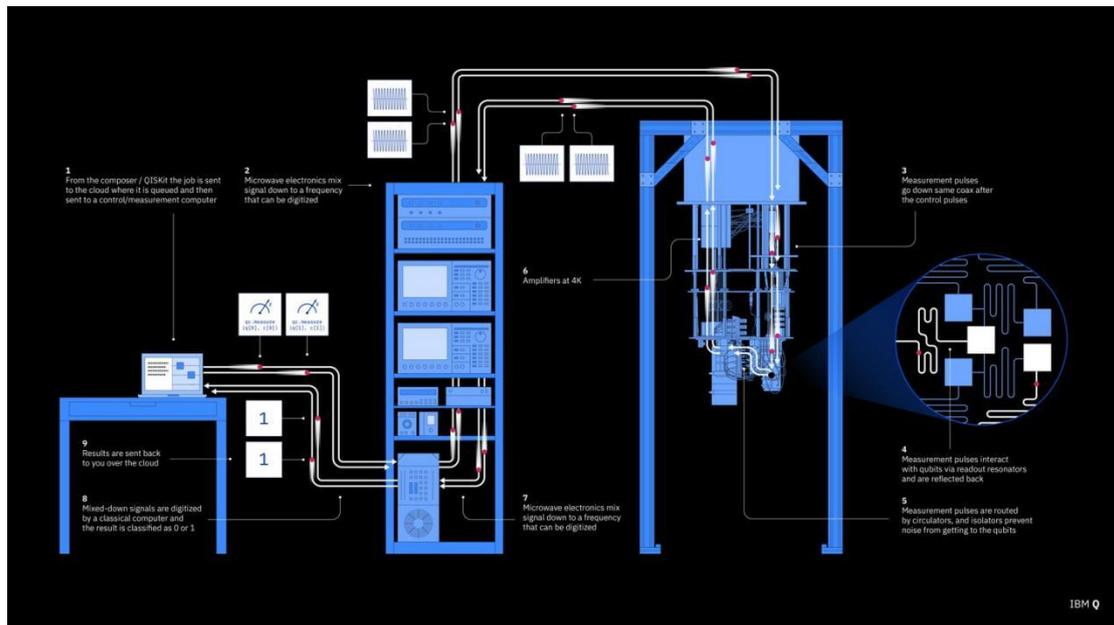
第二步，操作指令被发送到量子计算机控制系统中，控制系统是一套微波电子设备，由于量子比特必须以适当的格式接收控制信号，因此需要被转换成相应频率、相位和持续时间的微波脉冲；

第三步，测量脉冲在控制脉冲之后沿同一同轴电缆传输到量子处理器(QPU)，以操纵芯片上量子比特的量子态来执行程序；携带控制和测量信号到量子芯片的微波通过同轴电缆传输。当脉冲（以 4 GHz-6 GHz 左右的频率振荡）穿过稀释制冷机的每个温度层（40K→3K→0.9K→0.1K→0.015K³⁰）时，噪声衰减器将确保热噪声不会影响处理器结果；

³⁰ K, 即 Kelvin, 译为开尔文, 符号 K, 是国际单位体系 (SI) 中的温度单位, 以英国著名物理学家 Lord Kelvin (1824 - 1907) 命名。0 K = -273.15 摄氏度 = -459.67 华氏度。

- 第四步，测量脉冲通过读出谐振器³¹与量子比特相互作用并被反射回来；
- 第五步，测量脉冲由微波循环器³²输送，隔离器可防止噪声影响量子比特；
- 第六步，信号经过4K 低温放大器；
- 第七步，微波器件将信号混合到可以数字化的频率；
- 第八步，混频信号由经典计算机数字化，结果分类为0 或1；
- 第九步，结果通过云端发送给用户。

图 5 IBM 量子计算机运行流程图



来源：IBM

³¹ 谐振器主要起频率控制的作用，所有电子产品涉及频率的发射和接收都需要谐振器。

³² 微波循环器的作用就像是交通环岛，它只把电信号朝同一个方向（顺时针或逆时针）输送。

第四章 量子计算机的技术路线

量子计算机技术方案间的差异,即是不同技术下量子比特物理实现间的差异。根据 2000 年提出的 DiVincenzo 判据,通用量子计算机的实现需要同时满足五条标准(详见第一章)。找到一种能够满足上述五条标准的量子技术方案绝非易事,这是因为这五条标准从某些角度而言是需要有所权衡的。

围绕量子计算的一大热门问题是哪种硬件技术将最终赢得比赛。目前,主要有五个资金充足且经过充分论证的候选方案正在竞争:超导、离子阱、光量子、半导体量子点和冷原子(或称为中性原子)。所有这些方案都是在 20 世纪 90 年代开创性的物理实验和实现中开发的。超导量子计算机方案是目前国际上进展最快的方案。

与国外相比,中国在量子计算各路线的进展中,超导方面,我国超导量子计算的实验起步较晚,但近些年随着各方大力支持,国内各研究小组表现强势。性能方面,超导量子计算机“祖冲之号”在 2021 年 7 月 15 日 *Scientific American* (科学美国人) 发布的文章中被评价为“世界最强量子计算机”。³³ 由于领先的研究团队较少,整体水平上与美国还有差距。光量子方面,我国在光量子计算的研究中处于国际领先水平。离子阱方面,国内对于离子阱量子计算机的实验研究只有不到十年的时间。半导体量子点和冷原子方面,虽然我国有所布局,但整体上参与的单位较少,研究时间也较短,还需要更多的积累和发展。

表 1 各技术路线主要参与者及机构类型

技术路线	机构类型	采用机构
超导	学术团队	加州大学圣巴巴拉分校 (UCSB)、耶鲁大学、麻省理工学院 (MIT)、美国国家标准与技术研究院 (NIST)、加州大学伯克利分校、马里兰大学、芝加哥大学、荷兰代尔夫特大学 (TU Delft)、瑞士苏黎世联邦理工学院 (ETH)、中科大、清华大学、浙江大学、南京大学、南方科技大学、日本理化学研究所 (RIKEN)、北京量子院、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、中国科学院物理研究所、法国 CEA 研究中心、IBM 苏黎世研究所
	公司	IBM、谷歌、Rigetti、D-Wave、英特尔、NEC、QCI、Oxford Quantum、本源量子、国盾量子、量旋科技、亚马逊
离子阱	学术团队	哈佛大学、MIT、马里兰大学、杜克大学、牛津大学、清华大学、国防科技大学、中科大、中国人民大学、中山大学、中科院量子信息重点实验室、因斯布鲁克大学、苏塞克斯大学 (Sussex)、NIST、Sandia 国家实验室、中国科学院

³³ <https://www.scientificamerican.com/article/china-is-pulling-ahead-in-global-quantum-race-new-studies-suggest/>

		量子信息与量子科技创新研究院、北京量子院
	公司	霍尼韦尔、IonQ、Alpine Quantum Technologies (AQT)、Universal Quantum、启科量子
光量子	学术团队	牛津大学、MIT 电子研究实验室、维也纳大学量子科学与技术研究中心、布里斯托大学量子光学研究中心、昆士兰大学量子计算与量子通信技术研究中心、中科大、南京大学、山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室、RIKEN、日本国立研究开发法人量子科学技术研究开发机构、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院
	公司	Xanadu、PsiQuantum、惠普、图灵量子、玻色量子、法国 Quandela、英国 Tundra systems
量子点	学术团队	普林斯顿大学、TU Delft、东京大学、北京大学、中科大量子信息重点实验室、新南威尔士大学 (UNSW)、澳大利亚国家量子计算与通信技术研究中心 (CQC ² T)、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、RIKEN、法国 CEA-CNRS Grenoble 研究中心、比利时 IMEC 研究中心、美国 HRL Laboratories、美国 Sandia 国家实验室、日本 NTT、威斯康辛量子研究所 (WQI)
	公司	英特尔、本源量子、Silicon Quantum Computing (SQC)
冷原子	学术团队	哈佛大学、香港科技大学、中科大、中科院量子信息重点实验室、清华大学、山西大学、中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、中国科学院武汉物理与数学研究所
	公司	ColdQuanta、Atom Computing、QuEra Computing、PASQAL

来源：光子盒研究院

一、超导

超导量子计算技术使用电荷量子比特 (charge qubit)、磁通量子比特 (flux qubit) 和相位量子比特 (phase qubit) 这三种方式来形成量子比特。目前普遍采用的 transmon 量子比特 (transmission-line shunted plasma oscillation qubit, 传输线分流等离子体振荡量子比特), 是一种基于电荷量子比特的改良的设计, 该设计可以减小量子比特对于电荷噪声的敏感度, 从而提高退相干时间, 使得测量操纵变得更加容易。

超导量子比特是人造原子, 在操控、耦合、测量、扩展等方面具有独特的优势。目前超导量子技术路线的难点在于易受环境噪音影响而导致退相干时间短, 但该技术路线的发展并无原则性障碍。当前的发展主要侧重于可控耦合量子比特的数目与可以连续进行的高保真度多量子比特逻辑操作次数的继续提高。长远来看, 该条技术路线在未来比较容易实现规模化。

超导量子计算机拥有最多的技术追随者, IBM 和谷歌凭借其深厚的技术积累和雄厚的资金实力发展迅猛。

IBM: 根据 IBM 量子计算路线图, 预计 2021 年年底前, IBM 将发布 Eagle

处理器（127 量子比特）。在整机商业化方面，IBM 量子计算机——IBM Q 已经交付给除美国以外的德国和日本。在交付本土以外的产品这一方面，IBM 的表现优于大多是量子计算机厂商。

谷歌：谷歌在 2019 年首次实现量子计算优越性后，在硬件方面至今还没有振奋世界的突破。谷歌于 2021 年 5 月在加州圣巴巴拉推出了一个新的量子人工智能园区，其中包含一个量子数据中心、硬件研究实验室和量子处理器芯片制造设施。³⁴谷歌计划在 2029 年前制造出有用的、纠错的量子计算机（100 万个量子比特），加速解决例如可持续能源和减少排放以养活世界不断增长的人口，以及更有帮助的人工智能等。它将在未来十年内花费数十亿美元开发这项技术。

中科大“祖冲之号”：详见第二章第一节及第六章第二节。

二、离子阱

离子阱的技术原理是利用电荷与电磁场间的交互作用力牵制带电粒子运动，并利用受限离子的基态和激发态组成的两个能级作为量子比特，利用微波激光照射操纵量子态，通过连续泵浦光和态相关荧光实现量子比特的初始化和探测。

离子阱技术路线的优势在于相干性好，可纠缠量子比特数目多，逻辑门保真度高，而劣势表现为量子比特操纵速度相对较慢，并且随着量子比特数量的增加，量子比特的操纵仍有一些技术困难。离子阱系统是美国政府资助最多的两个量子计算研究方向之一（另一个是超导系统），除量子计算机以外，还被广泛应用于量子化学、相对论量子力学、量子热力学等领域的量子模拟研究。

离子阱量子计算至今已经发展 20 余年，与超导量子计算的发展旗鼓相当。国际上，霍尼韦尔、IonQ 和 AQT 在离子阱量子计算机的商业化方面进展较快。

霍尼韦尔：霍尼韦尔在 2020 年 6 月发布离子阱量子计算 H0 系统。9 月发布 H1 系统，物理量子比特为 10，典型的极限保真度 99.5%，相干时间 T1 超过 100 万秒，T2 约为 3 秒。³⁵量子体积（QV）方面，霍尼韦尔 H1 系统成为第一台通过 1024 QV 基准测试的量子计算机。根据技术路线图，下一阶段，物理量子比

³⁴ <https://blog.google/technology/ai/unveiling-our-new-quantum-ai-campus/>

³⁵ <https://www.honeywell.com/us/en/company/quantum/quantum-computer>

特数将由 10 升至 40，预计到 2030 年发布 H5。³⁶此外，2021 年 6 月，霍尼韦尔量子解决方案 (HQS) 和剑桥量子计算 (CQC) 将合并为世界上最大的独立量子计算公司。³⁷

IonQ: 公司由 Chris Monroe 和 Jungsang Kim 于 2015 年创立，总部位于美国马里兰州大学公园市 (College Park)，科研团队孵化自美国马里兰大学和杜克大学。2020 年 9 月，推出 32 量子比特离子阱量子计算机，量子体积在理论上高达 400 万。2021 年 9 月，推出业内首个可重构多核量子架构 (RMQA)。³⁸该公司于 2021 年 3 月宣布将在纽约证券交易所上市，目前已经到了合并的最后阶段。

AQT: 由来自奥地利因斯布鲁克大学 Rainer Blatt 教授、Thomas Monz 博士和 Peter Zoller 教授于 2018 年创立。2021 年 1 月，AQT 与因斯布鲁克大学合作的研究在 arXiv 上发布，展示了紧凑型离子阱量子计算在两个 19 英寸机架中的室温设置中 24 量子比特 GHZ 纠缠。这次展示意义重大，因为传统实验室装置的性质并不容易扩展系统规模或允许实验室级环境之外的应用。³⁹ AQT 正在开发容量超过 100 量子比特的模块化离子阱量子计算机。

三、光子

光子量子计算机是利用光子的偏振、路径、轨道角动量、时隙等自由度，将其编码量子比特的技术路线实现。由于光子不易于收到外界环境影响，所以由光子编码成的量子比特抗退相干能力强。同时由于光子具有多个自由度的特性，可以用更少的光子数实现更多的物理量子比特。

由于光子之间相互作用非常微弱，传统的光量子计算机技术只能实现光子的概率性逻辑门（对应确定性逻辑门），这也是光量子技术路线实现通用量子计算道路上目前最大的阻碍。不过目前已有一些光量子方案实现了确定性和可重构性。

³⁶

<https://www.honeywell.com/us/en/news/2020/10/get-to-know-honeywell-s-latest-quantum-computer-system-mode-l-h1>

³⁷

<https://www.honeywell.com/us/en/press/2021/06/honeywell-quantum-solutions-and-cambridge-quantum-computing-will-combine-to-form-worlds-largest-most-advanced-quantum-business>

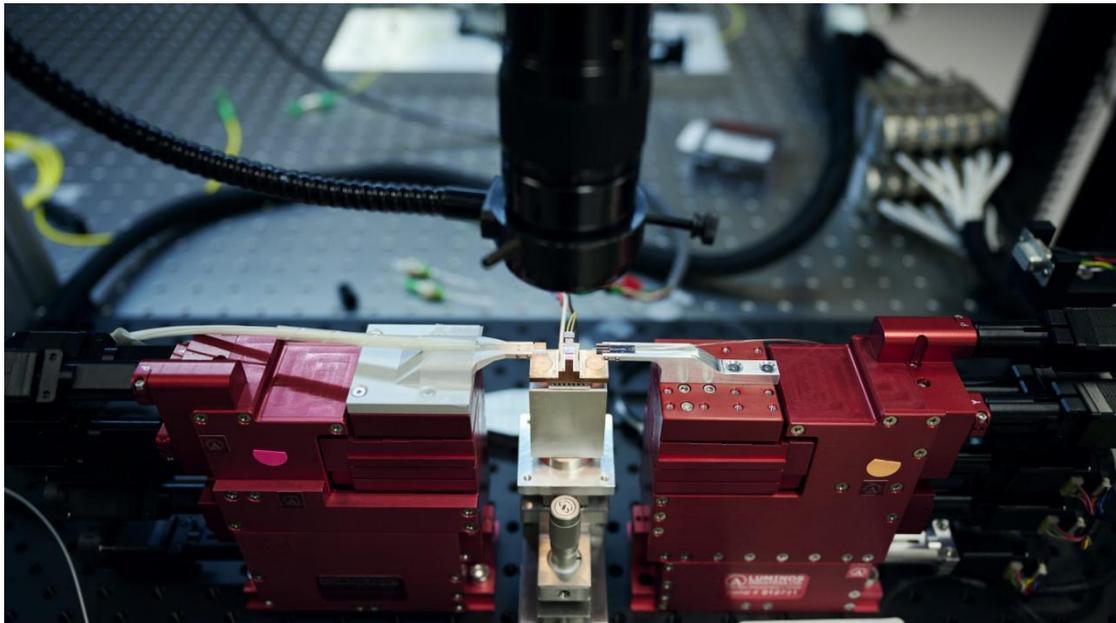
³⁸ <https://ionq.com/posts/october-01-2020-introducing-most-powerful-quantum-computer>

³⁹ <https://www.aqt.eu/24-qubit-entanglement/>

光量子是除超导量子 and 离子阱之外研究进展较快的技术路线，国际上，Xanadu 和 PsiQuantum 是两家发展较好的光量子计算机研制厂商，以下为它们的近期进展。

Xanadu: Xanadu 成立于 2016 年，是一家位于加拿大多伦多的量子计算硬件和软件初创公司。Xanadu 选择光量子路线，专注于开发可编程高斯玻色子采样 (GBS) 设备。2020 年 9 月，Xanadu 推出第一台可在室温下运行的量子计算机，通过 Xanadu Quantum Cloud 平台，Xanadu 的用户和合作伙伴远程访问配备 8、12 和 24 量子比特处理器的量子计算机。该公司还计划每六个月将这些机器的性能翻一番。Xanadu 系统的当前限制源于他们使用的超导光子计数器。这些计数器需要 1K 以下的超低温。然而，该公司指出，未来的探测器可能不需要超导或低温。⁴⁰

图 6 Xanadu 光量子计算机处理器

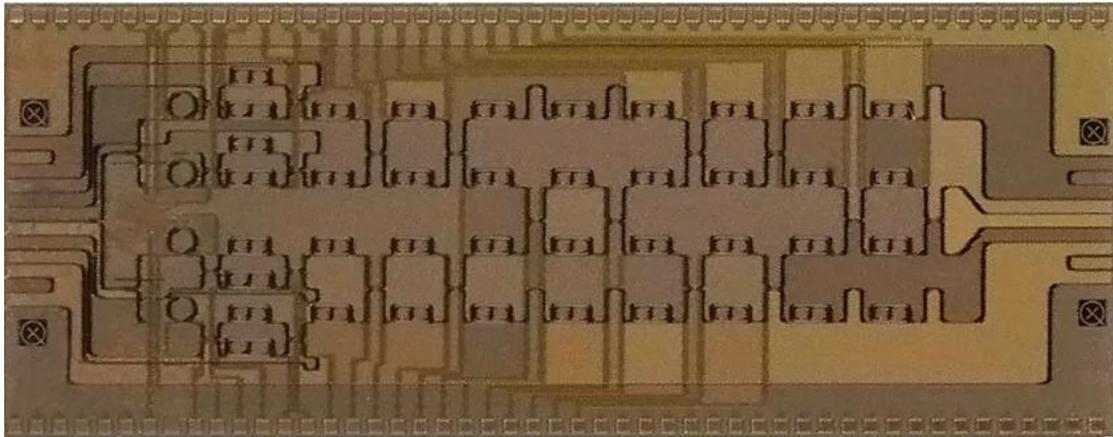


来源：Xanadu

40

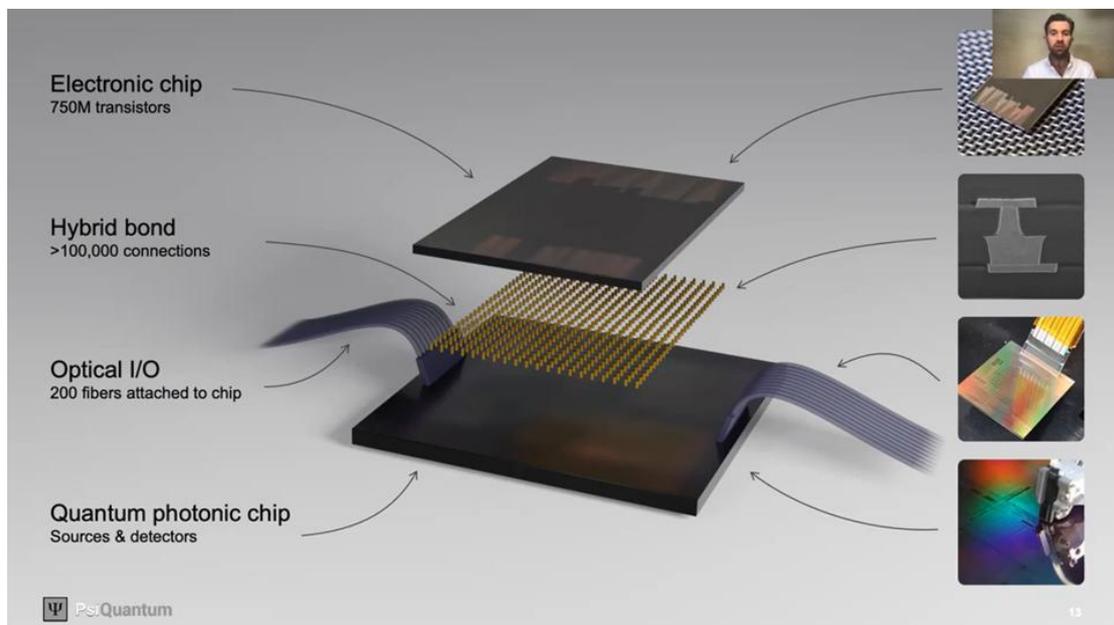
<https://www.itpro.co.uk/technology/356979/xanadu-launches-first-quantum-computer-that-can-operate-at-room-temperature>

图 7 Xanadu 的 X8 光子量子处理单元



来源：Xanadu⁴¹

图 8 由 GlobalFoundries（格罗方德）制造的 PsiQuantum Q1 芯片层



来源：PsiQuantum⁴²

PsiQuantum: 公司由英国布里斯托大学（University of Bristol）教授 Jeremy O'Brien 和其他三位学者于 2016 年创立。PsiQuantum 的核心技术概念诞生在布里斯托大学研究实验室。2009 年，O'Brien 发表了一篇研究论文，描述了如何使用编码的光子进行量子计算。光子计算机有两种主要类型，压缩光和单光子。PsiQuantum 使用单光子作为其量子计算机的量子比特。

⁴¹ <https://spectrum.ieee.org/photonic-quantum>

⁴²

<https://www.forbes.com/sites/moorinsights/2021/05/10/last-weeks-big-technology-reveal-psiquantums-previously-secret-q1-photonic-quantum-computer-with-globalfoundries/?sh=4ab25407196d>

PsiQuantum 的唯一愿景是构建一个纠错的百万量子比特量子机器，它可以在数百个逻辑量子比特上使用数百亿个门。O'Brien 和他的团队对于构建小型 NISQ 计算机作为大型计算机的过渡并不感兴趣。公司目前有 100 余人的规模的技术团队。

2017 年，PsiQuantum 和 Globalfoundries（格芯/格罗方德）建立合作伙伴关系，开发流程以适应 PsiQuantum 尚未建造的大型光子量子计算机 Q1 的未来生产所需的独特特征和功能。⁴³

中科大“九章”：详见第二章第一节及第六章第一节。

图灵量子：公司成立于 2021 年 2 月，创始人是上海交通大学物理与天文学教授金贤敏。图灵量子是我国率先开展光量子芯片和光量子计算机商业化的公司。创始团队拥有自主知识产权的三维和超高速光量子计算芯片核心技术和工艺。2021 年 5 月，公司宣布完成天使轮近亿元人民币的融资。

玻色量子：公司成立于 2020 年 11 月，创始人兼 CEO 为文凯博士，本硕毕业于清华大学，博士毕业于美国斯坦福大学。2021 年 6 月完成天使轮融资，融资金额 1000 万元人民币。玻色量子也采用了光量子技术路线，其技术方案“相干量子计算方案”是一种新型光量子计算技术。通过对激光的精准控制，不需要超低温超导环境，在室温下即可运行，具有稳定的状态、稳定的操控和稳定的结果“三稳”特点。目前玻色量子已完成光量子实验室的搭建，将集中研发 1000+量子比特级别相干量子计算的工程样机，以及相应的加速算法。

四、量子点

半导体量子点可以作为量子比特，也叫自旋量子比特（spin qubit）。量子点是一种纳米大小的半导体粒子，一般为球形或类球形。由于这种纳米半导体粒子拥有限制电子和电子空穴（electron hole）的特性，这一特性类似于自然界中的原子或分子，因而被称为量子点（quantum dot）。常见的量子点有硅量子点、锗

⁴³

<https://www.forbes.com/sites/moorinsights/2021/05/10/last-weeks-big-technology-reveal-psiquantums-previously-secret-q1-photonic-quantum-computer-with-globalfoundries/?sh=4ab25407196d>

量子点、硫化镉量子点和砷化镓量子点等。而半导体量子点或量子自旋技术路线是利用半导体量子点中的电子制造量子比特,将其电子的自旋方向编码为量子态,用来存储量子信息。

由于半导体量子点计算机结合了当前的半导体工业技术,未来可以快速实现产业化,同时由于半导体量子比特体积较小,较超导技术路线和光量子技术路线而言更容易实现芯片化。但当前半导体量子比特的数量较少,且相干性较弱。

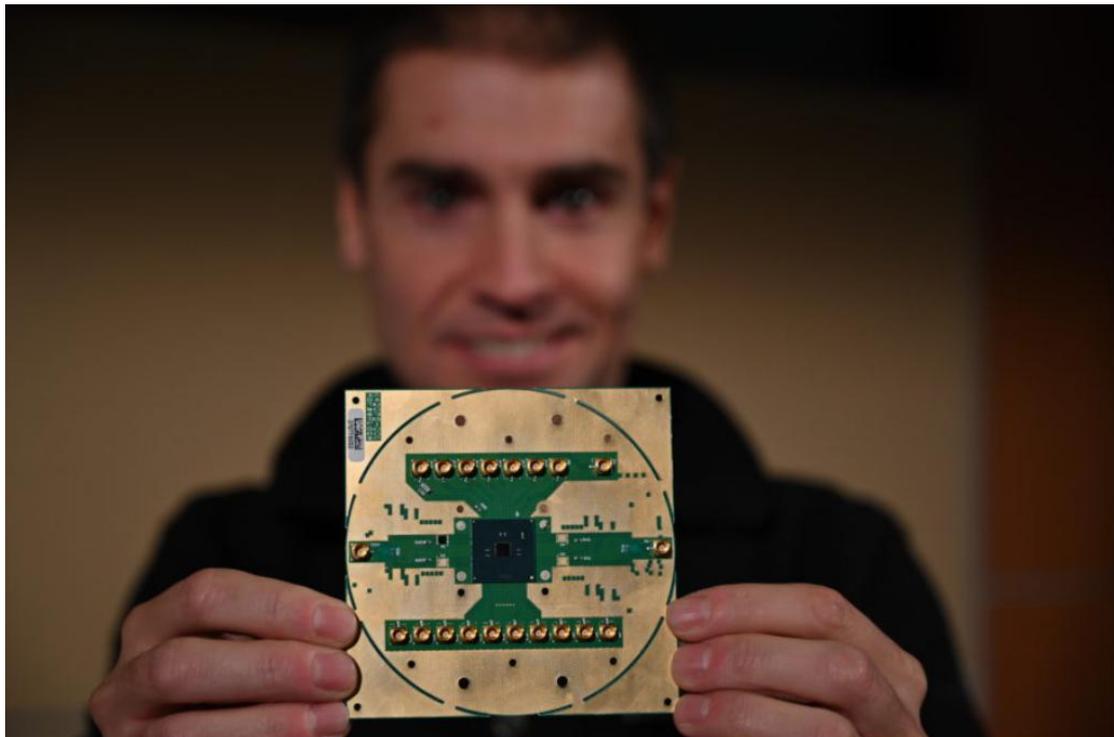
硅自旋量子比特方面,美国英特尔、荷兰代尔夫特理工大学和 Qutech、澳大利亚 SQC 公司、日本理化学研究所 (RIKEN), 以及中科大和本源量子等正在研究此类技术。

英特尔:英特尔在量子计算方面选取了超导量子比特和硅自旋量子比特两条技术路线。硅自旋技术路线利用电子自旋并以微小的微波脉冲控制运动,从而释放量子能量,而且非常适合英特尔现有的一整套硅半导体工艺。2019 年 12 月,英特尔首次亮相其低温芯片——Horse Ridge, 与其合作伙伴 Qutech 用于演示双量子比特量子计算。2020 年 12 月,英特尔升级的 Horse Ridge II 继续使用英特尔 22nm 低功耗 FinFET 工艺制造 (22FFL), 已经能够在 4K 温度 (约-269.15°C) 下得到验证, 也就是仅比绝对零度高 4°C。⁴⁴

44

<https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/2nd-gen-horse-ridge-cryogenic-quantum-control-chip.html#gs.ai1jkj>

图 9 英特尔低温控制芯片 Horse Ridge



来源：Intel⁴⁵

中科大：郭光灿院士团队在硅基半导体锗纳米线量子芯片研究中取得重要进展。该团队郭国平、李海欧等人与中科院物理所张建军和本源量子计算有限公司合作，首次在硅基锗空穴量子点中实现朗道 g 因子张量和自旋轨道耦合场方向的测量与调控，对于该体系更好地实现自旋量子比特操控及寻找马约拉纳费米子有着重要的指导意义。研究成果以 *Anisotropic g -factor and Spin-Orbit Field in a Germanium Hut Wire Double Quantum Dot* 为题，发表在 2021 年 5 月出版的国际纳米器件物理知名期刊 *Nano Letters* 上。⁴⁶

本源量子：公司已推出第二代硅基自旋二比特量子芯片——玄微 XWS2-200，通过调节栅电极上的超快电脉冲以及微波脉冲，实现了硅基半导体自旋量子比特的单比特和两比特普适量子逻辑门单元。⁴⁷本源半导体量子计算机——OriginQ B 悟本将搭载玄微 XWS2-200，该设备正在紧张研制中。2021 年 8 月 31 日，本源

⁴⁵

<https://newsroom.intel.com/news/intel-introduces-horse-ridge-enable-commercially-viable-quantum-computers/#gs.ai1q90>

⁴⁶ <http://quantumcas.ac.cn/2021/0519/c20525a506768/page.htm>

⁴⁷ <https://www.originqc.com.cn/website/productDetail.html?id=205&bannerId=115>

量子计算科技有限责任公司与合肥蓝科投资有限公司签订合作协议，双方将携手在合肥打造国内首个量子计算产业园。产业园二期、三期计划建设量子计算超导量子芯片+半导体量子芯片中试线、量子芯片研发与制造中心等。⁴⁸

SQC: 由 Michelle Simmons AO 教授 2017 年 5 月创立于澳大利亚，致力于打造商用规模的硅基量子计算机并将量子计算推向市场。SQC 由澳大利亚联邦政府、悉尼新南威尔士大学 (UNSW)、澳大利亚联邦银行、Telstra 有限公司和新南威尔士州政府组成的财团成立，资金为 8,780 万澳元。SQC 的基础知识产权是在澳大利亚量子计算和通信技术卓越中心 (CQC2T) 开发的，包含多个“世界第一”，例如最长的相干时间；固态中最高保真度的量子比特；光学寻址硅中单个掺杂原子的能力；噪声最低的硅器件；和硅中的前两个双量子比特门。⁴⁹2020 年 9 月，帮助谷歌实现量子优越性的前量子科学家 John Martinis 教授加入 SCQ，以加速其开发基于硅的量子计算机。⁵⁰SQC 准备在 2023 年扩展到 10 量子比特，并在十年内扩展到 100 量子比特。

RIKEN: RIKEN 成立于 1917 年，是日本最大的综合性研究机构，目前设有“量子计算中心 (ROC)”实验室⁵¹。近日，RIKEN 的六名科学家首次在硅中完全可控的自旋量子比特阵列中实现了 3 量子比特纠缠态。⁵²该研究成果以 Quantum tomography of an entangled three-qubit state in silicon 为题，由 *Nature Nanotechnology* 于 2021 年 6 月 7 日发布。⁵³

五、冷原子

冷原子 (cold atom) 量子计算技术，也有称中性原子 (neutral atom) 或中性冷原子 (neutral cold atom)，是指提高激光制冷计算将限制原子的运动，进而将

⁴⁸ http://csj.xinhuanet.com/2021-09/03/c_1310165366.htm

⁴⁹ <http://sqc.com.au/>

⁵⁰

<http://sqc.com.au/2020/09/30/googles-former-top-quantum-scientist-professor-john-martinis-has-joined-the-sqc-team/>

⁵¹ <https://www.riken.jp/en/research/labs/rqc/>

⁵² https://www.riken.jp/en/news_pubs/research_news/rr/20210903_1/index.html

⁵³

https://www.nature.com/articles/s41565-021-00925-0?utm_source=xmol&utm_medium=affiliate&utm_content=meta&utm_campaign=DDCN_1_GL01_metadata

原子冷却到极低温，这比当前稀释制冷机所能达到的最低温度还要低几个量级。冷原子技术路线在进行量子模拟方面具有明显优势。

PASQAL: PASQAL 位于法国巴黎地区，在 2011 年就开始建造由中性原子阵列制成的可编程量子模拟器。2020 年 6 月，PASQAL 发布了“使用中性原子进行量子计算”的白皮书，说明了其应用程序如何从优化挑战到量子系统模拟，可以在数字级别（编程基于门的电路）或模拟级别（编程哈密顿序列）进行探索；证明了中性原子量子处理器在 100-1,000 量子比特范围内的内在可扩展性，并介绍了量子计算以外的应用的前景。⁵⁴

Atom Computing: 公司成立于 2018 年，由 Jonathan King 博士等人共同创立，位于美国加州伯克利，是第一家用碱土元素制造核自旋量子比特的公司。尽管与其他冷原子或中性原子方法有相似之处，但 Atom 的方法略有不同，因为他们使用了由铯原子组成的所谓核自旋量子比特。这些原子被激光捕获、定位和操纵。2021 年 7 月，公司宣布推出其拥有 100 量子比特的第一代量子计算机——Phoenix。融资 1,500 万美元将用于改进该系统，为公司最快在 2022 年将其投入市场做好准备。与此同时，公司将开始开发其第二代系统，目标是扩大量子比特的数量，以提高性能和可靠性。⁵⁵

⁵⁴ <https://arxiv.org/pdf/2006.12326.pdf>

⁵⁵

<https://www.wraltechwire.com/2021/07/21/quantum-computing-startup-with-executive-office-in-cary-raises-15m-lanches-first-generation-computer/>

图 10 Atom Computing 第一代 100 原子量子计算机——Phoenix



来源：Wraltechwire

ColdQuanta: 公司成立于 2007 年，位于美国科罗拉多州。2021 年 7 月，该公司宣布在量子计算机的发展上取得了一个重要的里程碑。该公司在一个大型且稠密的二维冷原子阵列中，捕获和寻址了 100 个量子比特。⁵⁶

QuEra Computing: QuEra 是一家由麻省理工学院和哈佛大学的研究人员和教授创立的量子计算公司，位于美国波士顿。2021 年 7 月，公司的研究成果以 Quantum phases of matter on a 256-atom programmable quantum simulator 为题，发表在学术期刊 *Nature* 上，实验展示了一个可编程的量子模拟器，基于确定性准备的二维中性原子阵列，具有由相干原子激发到里德堡态控制的强相互作用。使用这种方法，他们实现了一个量子自旋模型，该模型具有针对 64-256 个量子比特的系统大小的可调相互作用。⁵⁷

⁵⁶

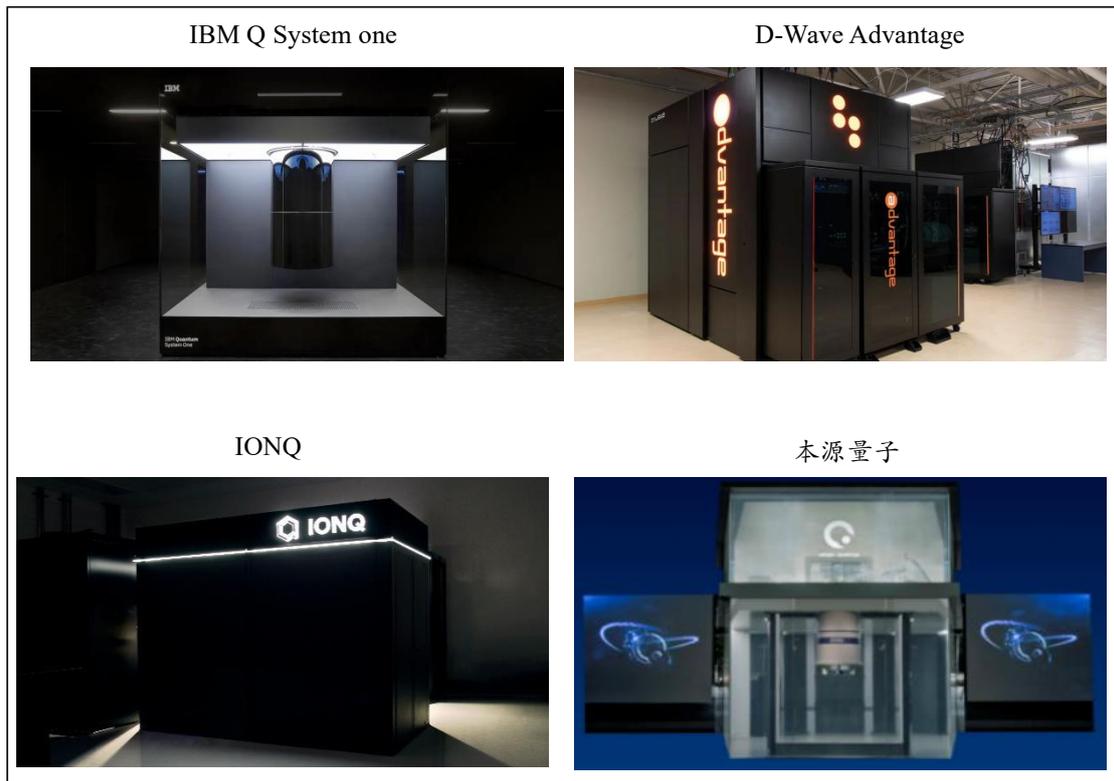
<https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/07/07/2259086/0/en/ColdQuanta-Reaches-Quantum-Computer-Milestone-By-Demonstrating-Immense-Scalability-of-Cold-Atom-Processor-Approach.html>

⁵⁷ <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03582-4>

第五章 量子计算机的性能衡量

目前，少数量子计算公司如 IBM、D-Wave、谷歌、IonQ 和本源量子公布了量子计算机外观。当前的量子计算机整机体积都较大，一般都有特制的外壳罩住主体部分，并在旁侧附有测控机柜。目前，核磁共振、NV 色心等技术可以实现桌面量子计算机，但量子比特数量最多 5 个。

图 11 商业化量子计算机外观对比



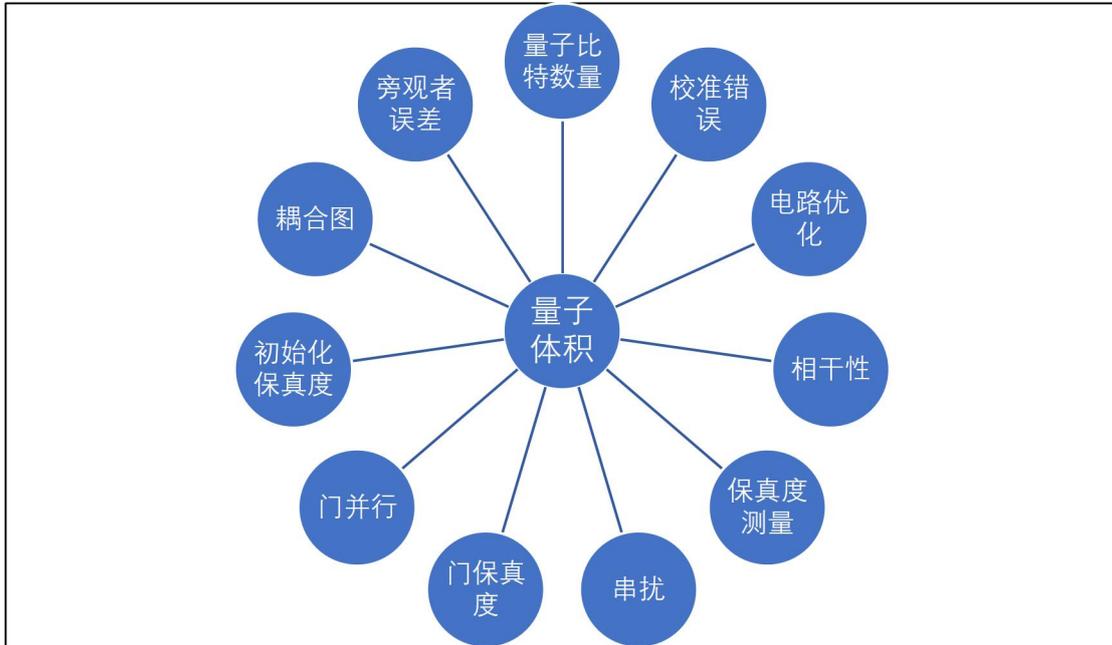
来源：光子盒研究院

由于当今量子计算机使用了不同的技术路线和指标，这令专家都很难对比机器的整体性能。不同技术路线的量子计算机不能只从量子比特的数量来衡量，而忽略了影响计算能力的其他重要因素。为了衡量不同技术路线下的量子计算机性能，需要建立一套指标体系。

2017 年，IBM 的研究人员引入了量子体积（Quantum Volume, QV）这一与硬件无关的指标进行简单的量子计算机性能衡量。简单来说，量子计算机的 QV 越大，它可以解决的问题就越复杂。量子比特的数量和可以执行的操作数量称为量子电路的宽度和深度。量子电路越深，计算机可以运行的算法就越复杂。量子

电路深度受诸如量子比特数量、量子比特互连方式、门和测量错误、设备串扰、电路编译器效率等因素的影响。

图 12 影响量子体积的因素



来源：IBM⁵⁸、光子盒研究院

以下选取几个影响量子体积的因素作以解释：

相干性（coherence）：相干时间 T1：表示量子比特自然弛豫的时间，即处于高能状态的量子比特自然会衰减到低能状态，与这种衰减相关的时间称为相干时间 T1。相干时间 T2：表示量子比特受环境影响的时间，即量子比特也有可能与环境相互作用并在弛豫到 $|0\rangle$ 状态之前遇到相位错误，与这种衰减相关的时间常数称为相干时间 T2。

保真度测量（fidelity measurement）：量子计算机通过操纵比特的状态来执行计算——将比特从 0 更改为 1，将 1 更改为 0。保真度是衡量尝试翻转导致正确量子比特状态两个量子态“接近程度”的度量。由于环境噪声及量子处理器自身品质的影响，实际量子处理器执行结果往往与理想情况下经过量子门操作得到的结果有一定的偏差。这种偏差可以用理想量子态和实际量子态之间的保真度来衡

58

<https://moorinsightsstrategy.com/quantum-volume-a-yardstick-to-measure-the-performance-of-quantum-computer-s/>

量。保真度数值越大，代表偏差越小，系统的计算结果就越好。计算的准确性取决于以非常高的成功率或“保真度”执行这些“比特翻转”的能力。霍尼韦尔量子计算系统 99.997% 的单个量子比特操作保真度是目前所有可寻址量子比特技术中报告的最佳性能。

串扰 (crosstalk)：串扰在电子学上是指两条信号线之间的耦合现象。数据通信速度不断加快，而器件体积越来越小，电路密度越来越高，这使得多个高速信号彼此非常接近，因此器件中的串扰问题越来越突出。

旁观者错误 (spectator errors)：“旁观者”指不参与门的附近量子比特，它们可能会以在单独执行门时不明显的方式破坏系统性能。这种损坏可能是在门期间与“旁观者”量子比特发生不必要的纠缠或经典串扰的形式。

耦合图 (coupling map)：在电子学中，耦合指从一个电路部分到另一个电路部分的能量传递。例如，通过电导性耦合 (conductive coupling)，能量从一个电压源传播到负载上。也可以利用电容器允许通过交流成分、阻挡直流成分的性质，可以将电路的交流部分和直流部分耦合起来。在 IBM 的 Qiskit 中，有 coupling map，其基础功能是：（1）指定固定耦合的有向图。（2）节点对应于物理量子位（整数），有向边对应于允许的 CNOT 门。（3）创建耦合图。默认情况下，生成的耦合没有节点。⁵⁹

⁵⁹ <https://qiskit.org/documentation/stubs/qiskit.transpiler.CouplingMap.html>

第六章 中国量子计算整机重大进展简介

目前，中国布局了多条量子计算机的技术路线，其中发展最快的是超导量子
和光量子，以下将简要介绍我国已初具雏形的量子计算机“九章”、“祖冲之号”和
“本源悟源”。

其他的量子计算机技术路线研究例如，国内初创公司启科量子在中国率先开
展了分布式离子阱量子计算机的研发，并预计在2-3年内完成“天算1号”离子阱
量子计算机项目，该项目的技术指标可达到100个可操控量子比特以上，量子体
积将达到亿级⁶⁰。中科大郭光灿院士团队郭国平、李海欧研究组与本源量子计算
公司等合作，在硅自旋技术上也取得一定进展。⁶¹

一、“九章”量子计算原型机

1、九章 1.0

“九章 1.0”⁶²是76光子量子计算原型机，它实现了具有实用前景的“高斯玻色
取样”（Gaussian Boson Sampling）任务的快速求解。该成果于2020年12月18
日发表在学术杂志 *Science* 中⁶³。实验结果表明，该量子计算系统处理高斯玻色
取样的速度比目前最快的日本超级计算机富岳⁶⁴快一百万亿倍，即“九章”一分钟
完成的任务，富岳需要一亿年才能完成。

⁶⁰ <http://www.qdoor.cn/news/30>

⁶¹ <http://kjt.ah.gov.cn/kjzx/mjji/120363131.html>

⁶² 《九章算术》是现存的中国古代数学著作之一，该量子计算原型机以此命名。

⁶³ <https://science.sciencemag.org/content/370/6523/1460>

⁶⁴ 注：Fugaku，译为富岳，是富士通与日本 RIKEN 共同研发的超级计算机，2021年正式启用，拥有世界
最快计算速度。

图 13 “九章”的光量子干涉实物图



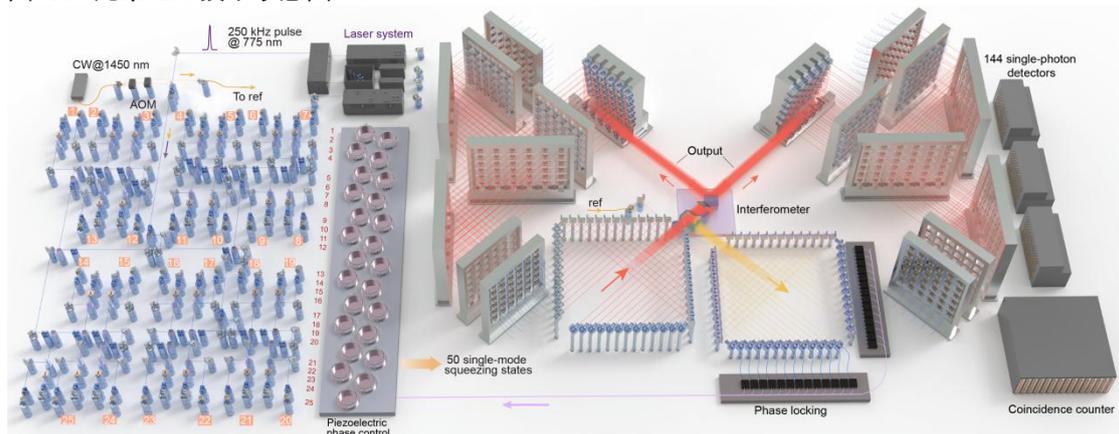
注：左下方为输入光学部分，右下方为锁相光路，上方共输出 100 个光学模式，分别通过低损耗单模光纤与 100 超导单光子探测器连接。

来源：Quantum computational advantage using photons

2、九章 2.0

2021 年 6 月 29 日，中科大潘建伟、陆朝阳教授等人组成的研究团队在 arXiv 发表了实验成果。研究人员将光量子计算机“九章”探测到的光子从 76 个增加到 113 个。速度相比九章 1.0 提升 9 个数量级。

图 14 “九章”2.0 技术示意图



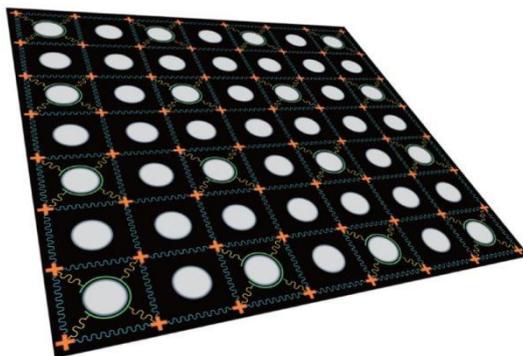
来源：Phase-Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light

二、“祖冲之号”量子计算原型机

1、“祖冲之号”1.0

“祖冲之号”⁶⁵是 62 量子比特可编程超导量子计算原型机。研究团队在二维结构的超导量子比特芯片上，观察了单粒子及双粒子激发情形下的量子行走⁶⁶现象，实验研究了二维平面上量子信息传播速度，同时通过调制量子比特连接的拓扑结构的方式构建马赫-曾德尔干涉仪，实现了可编程的双粒子量子行走。2021 年 5 月 28 日在国际学术杂志 *Science* 发表了这一成果⁶⁷。它为在超导量子系统上实现量子优越性展示及可解决具有重大实用价值问题的量子计算研究奠定了技术基础。此外，基于“祖冲之号”量子计算原型机的二维可编程量子行走在量子搜索算法、通用量子计算等领域具有潜在应用，将是后续发展的重要方向。

图 15 “祖冲之号”的二维超导量子比特芯片示意图



注：每个橘色十字代表一个量子比特

来源：Quantum walks on a programmable two-dimensional 62-qubit superconducting processor

2、“祖冲之号”2.0

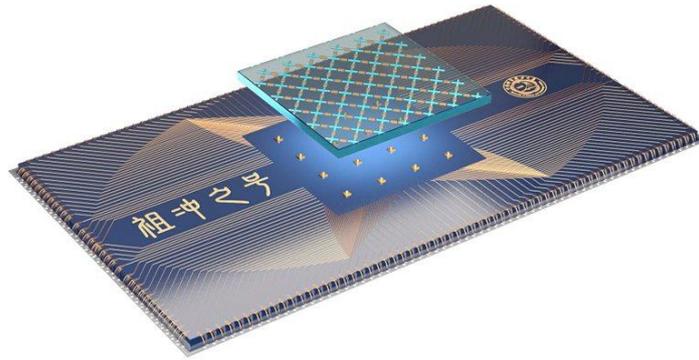
2021 年 6 月 28 日，“祖冲之号”升级为 66 量子比特，发布 arXiv 预印论文。研究团队利用其中的 56 量子比特扩大了之前由其实现的“量子计算优越性”的实验。

⁶⁵ 祖冲之是中国古代著名的数学家，为纪念他，该量子计算机以此命名。

⁶⁶ 量子行走：量子行走又叫量子游走，是经典随机游走在量子情况下的对应和推广。量子行走的行走者一般为微观粒子或准粒子激发，每次都按照一定的规律行走，但其状态需要用量子力学的叠加态来表示。

⁶⁷ <https://science.sciencemag.org/content/372/6545/948>

图 16 “祖冲之号”66 量子比特超导量子处理器示意图



注：祖冲之量子处理器由两颗蓝宝石芯片组成，一个携带 66 个量子比特和 110 个耦合器，每个量子比特耦合到四个相邻的量子比特（边界处除外）。另一个承载读出组件和控制线以及接线。这两个芯片通过铜凸块对齐并绑定在一起。

来源：Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor

3、“祖冲之号”2.1

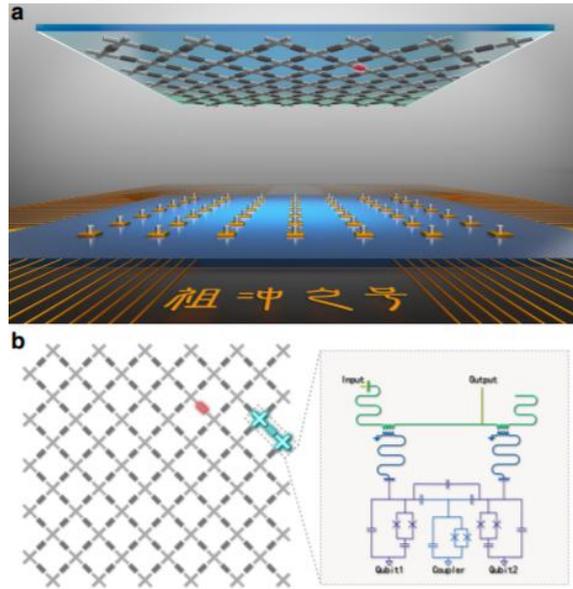
2021 年 9 月 9 日，根据 arXiv 预印论文，“祖冲之 2.1”已实现 60 量子比特、24 层循环的大规模随机量子电路采样，产生的希尔伯特空间维数高达 2 的 60 次方。采样任务的经典模拟复杂度是祖冲之 2.0 的 5,000 倍左右，从而使量子计算优越性得到了显著提高。⁶⁸

祖冲之 2.1 是祖冲之 2.0 的升级版本。祖冲之 2.1 是一个由 66 个 Transmon 量子比特组成的 11×6 二维矩形超导量子比特阵列。除了边缘的量子比特外，每个量子比特都有四个可调谐耦合器耦合到其最近的相邻量子比特，其中耦合器也是 Transmon 量子比特，其频率比数据量子比特的频率高几 GHz。下一步的工作将研究随机量子电路在 NISQ 设备上的实际应用，如认证随机位、纠错和流体力学模拟，而不仅仅是抽象采样任务。

据估计，祖冲之 2.1 采样任务的经典模拟复杂度比谷歌“悬铃木”高 6 个数量级，比祖冲之 2.0 高 3 个数量级（5000 倍）。采用目前最先进的经典算法（张量网络）和超级计算机（Summit）进行经典模拟随机电路采样实验，耗时长达约 4.8 万年，而祖冲之 2.1 只需约 4.2 小时，速度快了 1 亿倍，大大提高了量子计算优越性。

⁶⁸ <https://arxiv.org/pdf/2109.03494.pdf>

图 17“祖冲之号”2.1 升级版高性能量子处理器器件示意图



注：图 a，祖冲之 2.1 量子处理器由两颗蓝宝石芯片通过倒装芯片技术组合而成，一颗拥有 66 量子比特和 110 个耦合器，另一颗承载所有控制线；图 b，量子比特、耦合器和读出器的简化电路原理图。左侧面板中红色标记的耦合器工作不正常，只能提供耦合强度约为 7.5 MHz 的固定耦合。

来源：Quantum Computational Advantage via 60-Qubit 24-Cycle Random Circuit Sampling

表 2 “九章”和“祖冲之号”量子计算原型机对比

	九章		祖冲之号		
技术路线	光子		超导		
核心成员	潘建伟、陆朝阳等		潘建伟、朱晓波、彭承志等		
实验任务	高斯玻色采样		随机量子线路采样		
实验规模			-	56 量子比特 20 层循环	60 量子比特 24 层循环
读出保真度			-	平均 95.48%	平均 97.74%
发布时间	九章 1.0 2020.12	九章 2.0 2021.6	祖冲之号 1.0 2021.2	祖冲之号 2.0 2021.6	祖冲之号 2.1 2021.9
论文题目	Quantum computational advantage using photons 使用光子的量子计算优势	Phase-Programmable Gaussian Boson Sampling Using Stimulated Squeezed Light 使用受激压缩光的相位可编程高斯玻色子采样	Quantum walks on a programmable two-dimensional 62-qubit superconducting Processor 在可编程二维 62 量子比特超导处理器上量子行走	Strong quantum computational advantage using a superconducting quantum processor 使用超导量子处理器的强大量子计算优势	Quantum Computational Advantage via 60-Qubit 24-Cycle Random Circuit Sampling 60 量子比特 24 层循环随机电路采样的量子计算优越性
量子比特	76	113	62	66	66
可编程否	否	是	是	是	是

注：发布时间以 arXiv 在线发表时间记录

三、“本源悟源”超导量子计算机

2020年9月，本源量子发布超导量子计算量子云平台，其后端为超导量子计算机——本源悟源1号。2021年2月，本源悟源2号正式上线，用户可通过本源量子云使用该量子计算机。本源悟源2号搭载了6量子比特芯片夸父KF C6-130和本源量子测控一体机。KF C6-130单量子逻辑门保真度为99.7%。2021年9月，本源量子在首届量子产业大会上发布本源量子云平台国际版。

图 18 本源悟源量子计算机外观



来源：本源量子

第七章 总结

本文首先以时间顺序简要梳理了量子计算从科学家的思想逐渐演变为一个大型物理实体（整机）的历程。接下来介绍了量子计算机发展必经的3大阶段。随后以当前技术较为清晰的超导量子计算机为例，介绍其运行原理。第四章介绍了5大目前获得资金较多的研发技术路线。第五章提供一套衡量各路线量子计算机性能的指标体系。第六章介绍我国在此番量子计算机制造的竞争中收获的重大成就。

总结来说，量子计算机的技术方路线多且尚未收敛，不同技术方案各有优势劣，未来哪条技术路线将在商业化中取胜目前都是未知。未来也有可能是不同的技术路线使用在不同的应用场景或解决不同的实际问题。此外，不同技术方案的逻辑门操作是有差异的，这会导致量子编程语言、量子开发工具和量子算法将有所差异。未来可能针对不同的实际问题，选择最适合解决该问题的技术方案。但在接下来的一段时间内，各条技术线仍会继续向前探索。

预计近十年内，量子计算机更多的将会以量子云平台的形式存在，为硬件、软件、算法等研究人员提供支持。量子计算在非常长的一段时间内不会像笔记本电脑、智能手机这样直接参与到我们的工作和生活中。对那些算力需求大的金融公司、制药公司而言，10立方米大的量子计算机若能带来的上万倍的算力加强是绝对值得的。在这一期间，量子计算机最主要追求的应该是算力上的极限而非集成度上的极限。当算力满足实际应用的最低要求时，集成化和商业化将是下一个阶段的重点，这个过程可以参考经典计算机发展的过程。

关于作者



编译/撰写：Shuo Wang、Suyan Wang、Xingqiao Cai



撰稿指导：Dr. Gu



商务咨询：wangsy@chinafincon.com



科技咨询：caixq@chinaquantum.com



公司地址：北京市 东城区 朝阳门 SOHO 1506 室



下载方式：光子盒微信公众号/光子盒微店

了解更多信息，请扫一扫光子盒微信公众号





公众号：光子盒

邮箱：caixq@quantumchina.com

地址：北京市东城区朝阳门SOHO 1506室