

乘风  
破浪

# 2023全球量子计算 产业发展展望

量子信息年度系列报告

2023年2月

# 序言

量子计算机是一种新型的、正在研发中的下一代计算机，量子计算因其强大的并行计算能力，将极有可能推动新一轮的信息科技革命。

目前全球主要科技国均已开展相关技术研发，积极布局和发展量子计算产业。一旦实现大规模量子计算，将对目前的加密体系降维打击，因此对于国家信息安全具有重要战略意义。此外，其下游广泛的应用前景未来很可能会改变银行业、药物研发、物流等行业的规则。

2022年，量子计算的各技术路线未收敛的特点愈发明显，各个路线均有不同程度上的突破，全球量子计算的先驱者们伴随着量子纠错的主趋势，正快速穿越NISQ时代，其中超导量子比特数量有望在新的一年里进入千位量子比特时代。

2022年是“中性原子元年”，无论是在技术还是商业成熟度上，中性原子技术路线都呈现出跨越式的发展。我们很惊讶地发现，过去三年，每年我们都有一个主题，如2019年是“超导元年”，2020年是“离子阱元年”，2021年是“光量子元年”。我们也可以憧憬一下，2023年会是“半导体元年”吗？

然而，技术的快速发展并没有带来企业估值和融资的好消息，2022年全球整体融资增速出现了自2018年以来的首次放缓，市场机构的投资热情和投资信心似乎出现了短暂的休整，这或许不是坏事，因为部分企业包括媒体在这几年所吹起来的泡沫正好需要挤挤。

2022年，各主要科技国不断加强政策支持，加快布局量子计算已经成为过去一年全球前沿科技发展的主旋律，其中以美国和中国两强最为突出，他们之间的竞争与对抗也愈发积累。

尽管我们不能准确预测量子计算在未来某年将会达到多高的量子比特数目、多低的计算误差率以及会有哪些完全颠覆现有认知的应用，但从经典计算机的发展历史中，我们可以清楚地认识到，人类对于算力的需求是永无止境的。因此，我们对全球量子计算机产业的未来仍然抱有极大的信心和热情，量子计算机也必定会将人类的新征程推向星辰大海！

ICV 前沿科技咨询总监、高级副总裁：Jude Green



# 声明

本报告阐明的观点力求独立、客观，不构成任何广告。

本报告数据以公开信息为主，以及对公开数据的整理。

本报告版权归ICV TAnK和光子盒所有，其他任何形式的使用或传播，包括但不限于刊物、网站、公众号或个人使用本报告内容的，注明来源（2023全球量子计算产业发展展望. ICV TAnK&光子盒 2023.02）。

使用本报告内容时，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。如征得同意进行引用、转载、刊发的，需在允许范围内。违规使用本报告者，承担相应的法律责任。

本报告引用数据、事件及观点的目的在于收集和归纳信息，并不代表赞同其全部观点，不对其真实性负责。

本报告涉及动态数据，表达截至发稿时的情况，不代表未来情况。

本报告中的信息或所表述的观点均不构成投资建议，请谨慎参考。

如有其它问题，请联系infer@icvtank.com，zhangxinyu@quantumchina.com。

## 致谢

本篇报告由全球前沿科技咨询机构ICV邀请中国量子科技平台公司光子盒联合研究和发布。

感谢包括但不限于以下公司给予技术和素材的支持：

IBM Q

intel

Google AI  
Quantum

XANADU

国盾量子  
QuantumCTek

rigetti

Boson  
玻色量子

QUANTINUM

IONQ

Microsoft

ColdQuanta

本源量子  
ORIGIN QUANTUM

SPINQ  
量旋科技

D-WAVE  
The Quantum Computing Company

中科酷原  
CAS COOL ATOM

atom  
computing

QUDOR  
启科量子

QUANTUM  
BRILLIANCE

PASQAL

Silicon  
Quantum  
Computing

$|\Psi\rangle$  PsiQuantum

riverlane

微观纪元  
MiDro Era

Q-CTRL

---

# 目录

|    |                  |    |
|----|------------------|----|
| 1  | 2022产业发展透视 ..... | 01 |
| 2  | 量子计算机硬件 .....    | 06 |
| 3  | 核心设备与器件 .....    | 17 |
| 4  | 软件、算法、云平台 .....  | 25 |
| 5  | 国家政策 .....       | 49 |
| 6  | 投融资 .....        | 54 |
| 7  | 供应商评价 .....      | 59 |
| 8  | 产业分析与预测 .....    | 66 |
| 9  | 产业展望 .....       | 72 |
| 10 | 附件 .....         | 83 |

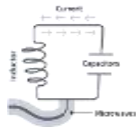


I 01

2022产业发展透视

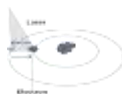
仍在早期快速发展阶段

回顾2022年，无论是各硬件技术路线还是软件开发与平台的扩充，总体上量子计算行业仍处在早期快速发展的阶段。



超导

- 目前通用超导量子计算机的研制正处于跨越NISQ时代重要阶段，主要围绕提高广度和深度两个方面开展工作。广度是量子比特数目，目前以IBM宣布的**433量子比特**Osprey为最高；深度是指可以连续进行的高保真度多量子比特逻辑操作次数。



离子阱

- 离子阱系统则是美国政府资助最多的两个量子计算研究方向之一。除通用量子计算机以外，离子阱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。



光量子

- 光量子计算的Xanadu在2022年成功展示了量子计算优越性。



中性原子

- 2022年的最大惊喜来自中性原子量子计算机。3月由美国芝加哥大学创造，在实验室环境下，中性原子实现了**512个量子比特**。此外，8月由日本国立自然科学研究员实现6.5纳秒超快双量子比特门，打破了世界纪录。



其它

- 半导体、金刚石NV色心、核磁共振以及拓扑路线在2022年也有不同程度上的技术进展。

与硬件各路线百花齐放所不同的是，量子软件开源成为当前产业发展的主要特征之一。



加拿大

1月

Agnostiq发布了专门为量子计算和HPC技术设计的开源工作流编排平台Covalent。



中国

5月

腾讯量子实验室发布的一款量子计算领域的开源软件产品Tensor Circuit，它是面向有噪声中等规模量子计算（NISQ）的下一代量子计算软件。



美国

7月

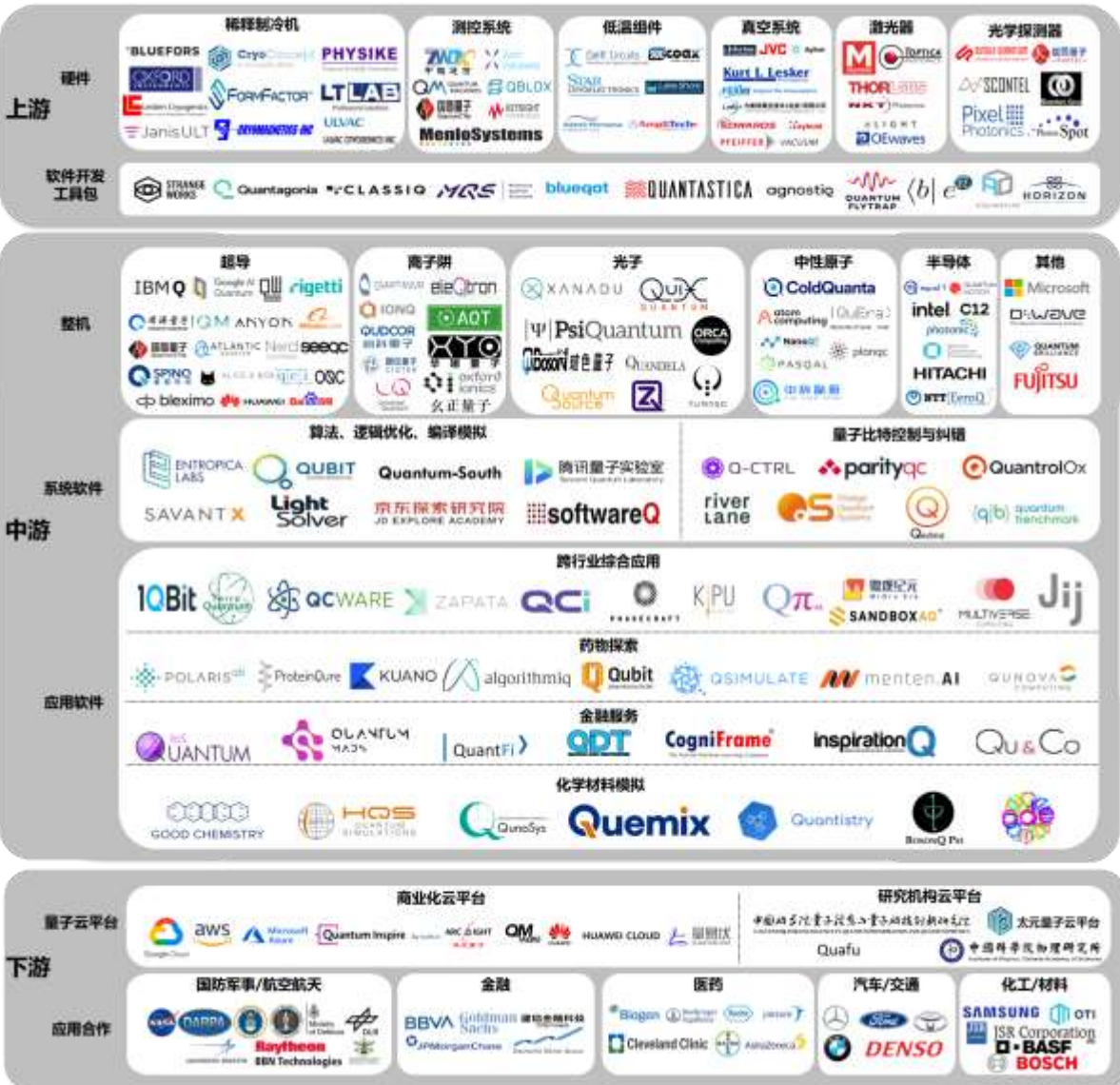
QuEra Computing发布了公开测试版的Brocade程序，它是一个开源的Julia语言包，用于基于中性原子架构的量子计算和量子动力学，允许用户在模拟模式下模拟量子处理器。

目前由于开源软件的开放性和基于社区的共享性使得源码中经常包含很多漏洞，导致缺陷处理的成本大幅增加，阻碍了开源软件的应用推广。因此，当前研究的热点之一是**如何有效、准确地发现软件缺陷，并快速修复软件缺陷。**

## 产业链逐渐清晰与完善

随着量子计算机各个路线研发工作的逐步推进，整机所需的上游硬件设备与器件选型逐渐清晰，同时，量子计算机的软件系统也在不断跟进，整个产业链上下游各环节的构成逐渐清晰与完善，各环节的参与者也在逐渐增多。

图表 1-1 量子计算产业链图谱



注：部分整机公司为全栈量子计算机公司，业务包括软件算法开发。

## 上游

主要是硬件和软件开发工具包，目前上游的硬件设备与器件是最大构成部分，主要原因是目前全球各个公司和团队都将研发整机原型机作为最主要的目标在努力推进，物理层研发突破是当前最重要的工作任务。

## 中游

主要是整机与操作系统软件，以及算法和应用软件。其中整机部分目前以超导、离子阱、光量子和中性原子等几个技术路线最为突出，如IBM在2022年完成了既定路线图目标，实现了**433**个量子比特芯片的制备，这是目前所有路线中最高量子比特数，离子阱也依旧保持着最高的双比特门保真度，而2022年的最大惊喜来自中性原子量子计算机，其路线代表Cold Quanta以及Pasqal等公司在2022年均有着跨越式的发展。

## 下游

主要指量子计算主要的应用领域，当前已有多细分行业领域的代表性企业与量子计算公司展开合作，共同探索应用开发，随着量子计算机技术的逐步完备，特别是专用量子计算机的问世，将有望在5年内，实现实际的下游应用。

## 积极探索下游应用

量子计算基于量子力学的全新计算模式，具有原理上远超经典计算的强大并行计算能力，为人工智能、密码分析、气象预报、资源勘探、药物设计等所需的大规模计算难题提供了解决方案，并可揭示量子相变、高温超导、量子霍尔效应等复杂物理机制。这是量子计算机为我们展现的强大力量，目前受限于真实量子计算机的研发进度，尚无法提供量子计算机的强大算力来实现完整的量子应用，但目前完全可以开发各类垂直行业应用的量子算法，利用数字计算机的算力来验证，从而为未来的实际应用做好积累和铺垫。



化学化工领域

- **本源量子**和**复旦大学**利用量子叠加态的并行计算能力设计出了一种新的分子晶体结构预测算法
- **萨里大学**使用量子计算发现了二维材料的新阶段，帮助格拉茨理工大学研究了作为二维材料极有前途的六方氮化硼（h-BN）。这些研究证明量子计算对于预测分子结构、开发下一代材料和电池等方面的巨大潜力。



金融领域

- **CaixaBank**和**D-Wave Systems**合作开发了量子混合应用程序，据称显著减少了解决复杂金融问题的时间，改进了投资组合优化，提高了债券组合的内部收益率
- **本源量子**开发了量子mRMR算法，加速识别金融风控领域的债务违约。
- **IBM**将量子计算引入法国金融业，国民互助信贷银行与IBM合作培训团队并探索量子在金融服务用例和概念验证，计划扩展法国的量子生态系统。



- IonQ宣布与空中客车公司合作，探索量子计算在航空航天服务和乘客体验方面的潜在应用和优势。双方共同启动了为期12个月的量子飞机装载优化和量子机器学习项目，并将最终呈现出一个飞机装载优化的原型（应用程序），为空客的开发人员和工程师提供指导。

## 商业拓展初步探索

2022年，全球范围内的量子计算整机仍然以原型机为主，我们仍处于NISQ时代的早期阶段，量子计算机在实际应用和解决实际问题方面仍然没有太多进展。虽然一项新技术的出现势必引来资本和社会的追捧，泡沫的产生存在一定的合理性，但ICV还是要明确地告诉各方，量子计算机的研发仍处于早期阶段，离实用化还很远，全球范围内可以验证的应用几乎都是在量子计算模拟器上进行的。

ICV预计在2030年之前，人类最有可能实现专用量子计算机，即相干操纵数百个量子比特，应用于组合优化、量子化学、机器学习等特定问题，指导材料设计、药物开发等。

目前全球量子计算机公司包括科研院所在积极探索自己的盈利模式，主要如下：

### 提供量子计算云服务

由于量子计算机建造成本高、维护费用高、占地面积大、运行环境苛刻，对于大多量子计算的潜在用户来说，使用云计算的方式接入量子计算机更为经济和方便。目前大部分具有量子计算硬件的公司都开发了云平台，IBM是第一个开发量子计算云平台且当前运营较为成功的案例，除此之外，绝大部分量子云平台访问量堪忧。

### 提供量子计算整机

目前购买量子计算机整机的行为几乎为各个国家主导，有能力购买单位主要是各国军方与国家级科研机构。量子计算机目前距离实用化还需要时间等待，市场上出现的购买整机行为，一方面为量子计算机公司提供收入、给予支持，另一方面也是国防军事部门的积极介入，以期加速推进实用化进程。

### 提供行业的量子方案

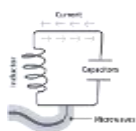
量子计算机未来强大的能力也吸引着下游行业客户在当前开始参与进来，比如金融客户就非常迫切需求为未来技术提前布局，目前部分量子计算机公司可以为这类行业客户提供适合的服务方案，如量子算法、模型优化、蒙特卡洛模拟等。目前此类合作多为战略合作，量子计算机公司与行业客户共同开展某个课题的研究，这对未来的具体的行业开展有着很好的前期积淀作用。



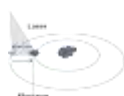
102

量子计算机

2022年，量子计算的发展成果呈现多元化特征，量子比特数量、门保真度、量子体积、相干时间等关键指标均突破原有记录，纠错、控制等方面也取得较大进展；ICV对超导、离子阱、光量子、中性原子、硅自旋、拓扑等主要六种技术路线的发展态势进行总结和分析。



- **超导量子计算路线**：在过去的一年里仍然是最为瞩目的路线，技术突破也最为迅猛，在所有路线中位于榜首。IBM如期发布433量子比特的Osprey处理器，严格按照技术路线图推进，预计2023年将达到1000量子比特。



- **离子阱量子计算路线**：在量子比特的质量方面取得进展，量子体积屡创新高，SPAM保真度世界第一，更是创造了保真度高于物理量子比特的逻辑量子比特。



- **光量子计算路线**：代表企业Xanadu，通过使用最新的可编程光量子计算机Borealis完成高斯玻色采样实验，展示了量子计算优越性。



- **中性原子量子计算路线**：主要公司均已突破100量子比特，ColdQuanta、Pasqal等获得巨额融资，商业化进程加快，在量子模拟中体现出的优势也愈发明显。



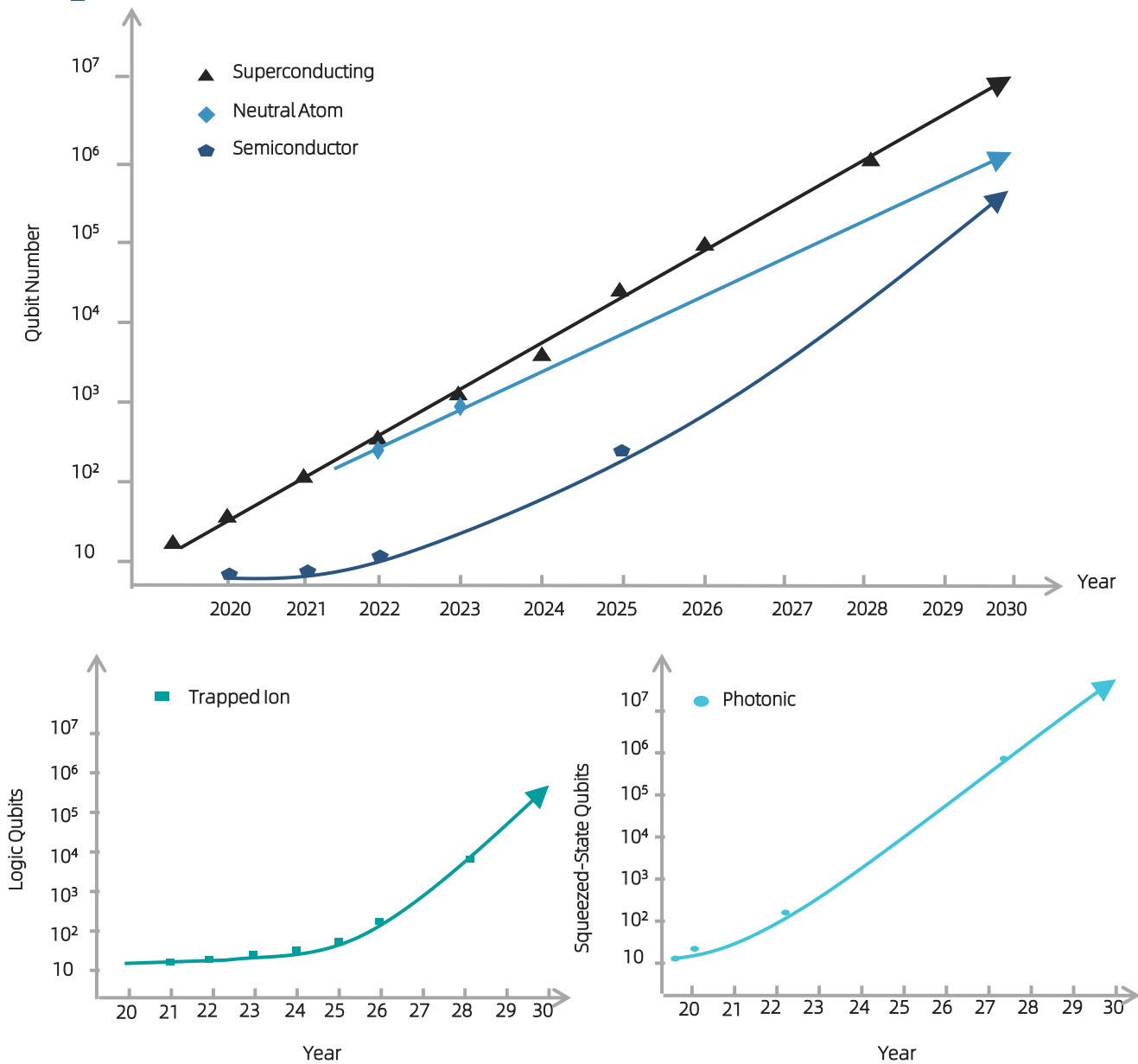
- **半导体量子计算路线**：Intel所研发的半导体量子比特芯片良率达到95%，同时刷新硅自旋量子比特数量的新纪录12个。



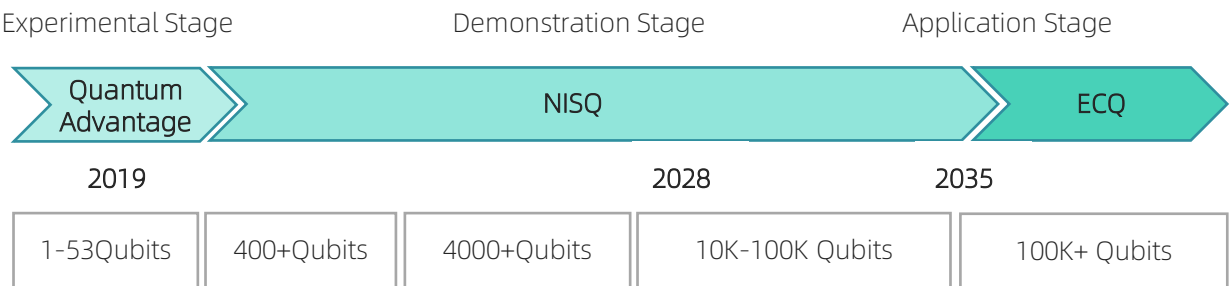
- **拓扑量子计算路线**：微软通过马约拉纳零能模和可测量的拓扑间隙创建和维持量子相位的能力，消除了产生拓扑量子比特的最大障碍。

目前硬件层面的主要发展方向还是着重于增加量子比特数量、密度和连通性，提高量子比特的质量，包括更好的相干时间和门保真度；以及设计和实施新的架构，包括3D设置和新的组装技术；还有开发可组装和集成大型量子处理器的工业规模制造设施；演示不同量子计算机之间的互联和信息交换等。目前量子计算的多种技术路线边并驾齐驱，各自展示着自己的优势，每条路线都有机会大放异彩。

图表 2-1 量子计算硬件路线图



图表 2-2 量子计算发展阶段



## 超导量子计算

### IBM遥遥领先

当前IBM公司引领着全球超导量子计算的技术发展，从当前的发展态势来看，包括Google在内的其他超导量子计算公司短时间内很难超越，IBM也代表了美国在超导量子计算机领域的国际地位。

IBM宣布推出的**433量子比特Osprey**，除量子比特数量的领先外，其多级布线，为信号路由和设备布局提供了灵活性。这种将读出和控制所需的导线和其他组件分离到各自层上的布线有助于保护脆弱的量子比特免受破坏，帮助处理器纳入更多的量子比特。与芯片Eagle相比，Osprey拥有两个更主要优势：

一个是用柔性带状电缆取代了IBM以前的量子处理器所使用的同轴电缆，同时还加入了集成滤波功能，以减少噪声和提高稳定性。该柔性带状电缆适用于低温环境，电阻和热阻是量身定做的，以帮助微波信号传输，同时不传导可能干扰量子比特的太多热量。这使得芯片的连接数量增加了**77%**，几乎是之前线缆的两倍，更有助于扩大其量子计算机的规模。

另一个优势是新一代的测控系统，该装置用于发送和接收进出量子处理器的微波信号，较之前一代更为专业，也更适合量子设备，可以产生计算需要的确切信号以及频率。

未来，IBM将专注于以下两个以硬件为中心的大型项目。一个是涉及量子处理器之间的各种类型的通信：实时经典、芯片到芯片量子门（量子多芯片模块）和远程量子通信——以量子为中心的超级计算机的基本组成部分；另一个是引入低温 CMOS 测控。

### 以纠错为核心

2019年，Google首次实现量子优越性所使用的“悬铃木”量子处理器是**53个量子比特**，2022年已经扩展至**72量子比特**。与IBM不同，尽管Google量子比特数远不如IBM，但他们更关注量子比特的质量，在量子纠错方面已取得持续进展。Google采用5码距的表面码在拥有**72个transmon量子比特**和**121个**可调谐耦合器的“悬铃木”设备上实现了纠错。更为重要的是，以往的纠错研究随着比特数的增加，错误率会提高，都是“越纠越错”，而这次Google首次实现了“越纠越对”。也就是说，突破了量子纠错的盈亏平衡点，这是量子计算“万里长征”中的重要转折点，为实现通用计算所需的逻辑错误率指出了全新途径。

IBM目前的重六边形二维量子比特阵列，每个量子比特都以某种重复模式连接到芯片表面上的其他附近的量子比特。同时IBM已经开始研究在芯片上的远距离量子比特之间建立连接，以及在这些连接之间进行交叉，这可能为以后实现高效容错代码的机器铺平道路。

总的来说，2022年超导量子计算技术路线的成果主要集中于门速度、门保真度、信号的读取、相干时间以及量子比特数量方面。可以预见，超导路线在IBM的带领下，在未来3年仍将持续领跑其他技术路线。但同时，该技术路线仍有很多困难要克服，更远的将来是否会继续保持领先地位仍未可知。

## 离子阱量子计算

### 向容错量子计算机迈进

离子阱的一大优势就是天然离子具有全同性，所以它们的相干时间特别长，并且门保真度也非常高。在此基础上，2022年，离子阱量子计算技术路线的主要成果之一为继续提高状态制备和测量（SPAM）保真度。主要成果来源于Quantinuum和IonQ两家量子企业。两家公司将SPAM保真度，分别提高到了**99.9904%**、**99.96%**，处于行业的领先水平，这也得益于离子阱相较于其他技术路线在保真度上的天然优势。

更重要的是，霍尼韦尔旗下量子计算公司Quantinuum通过实验首次演示了在两个逻辑量子比特之间的纠缠门，并以完全容错的方式完成实时纠错；首次演示了比相应物理电路具有更高保真度的逻辑电路；这一里程碑式的成就标志着逻辑量子比特性能优于物理量子比特——这是迈向容错量子计算机的关键一步。

### 探索扩展量子比特的方式

提升离子阱互联能力、扩展系统比特数目，是离子阱企业殊途同归的发展方向。2022年初，IonQ宣布将在新系统中使用钡离子，取代此前的镱离子，因为它更适合光子 - 离子纠缠。该公司于3月发布其最新一代的量子系统IonQ Forte，包含**32个量子比特**，拥有能够处理多达**40个**单独离子量子比特的AOD系统。离子阱体系本身存在扩展难的问题，但随着IonQ提出了多核架构，未来1—2年离子阱量子计算机也将**突破100量子比特**。2023年1月，Entangled Networks团队加入IonQ，主要从事下一代网络量子计算机架构和全栈式量子编译器的研究。这项收购支持IonQ通过在多个分布式量子处理器上实现计算来构建大规模量子计算机的努力。

除了量子比特数可以衡量量子计算机的性能外，其他参数，包括相干时间、计算速度、线路深度、错误率、连通性等同样可以很好地表示量子计算机性能的好坏。

离子阱的最大优势可以在QV这个指数上体现出来（离子阱路线目前最大量子体积（QV）达到了**8192**，也是所有量子计算机路线中最大的）。首先是它的量子比特间的全连接度，其次是它的退相干时间长；这两个优势目前弥补了量子比特数目少的缺陷。

### 探索多样的技术路线



- 现在所使用的是在一个阱中做的量子比特，技术是离子受激光照射后发出光子、光子 - 离子纠缠、将纠缠光子传送到另一边以使两个离子阱进行纠缠。IonQ的方案中，“离子不动，光动”，就是说声光调制器在离子阱外面寻址不同离子。



- 使用的是QCCD架构：利用分段式的离子阱，内部离子可以在里面来回穿梭、在不同的区域寻找激光进行相互作用；“光不动，离子在里面动”。

IonQ路线的优点是离子可以简单地实现相互作用，Quantinuum的技术路线若想达到这个效果，就需要把对应离子“挑”出来到相应区域，再去和激光相互作用；Quantinuum着重解决的是单个离子阱里容纳更多的离子的问题。



- AQT的19英寸机架由光学机架以及“陷阱”机架构成，包含了光学系统，通信和读出系统，放大器和电子设备，光纤路由和交换器以及其他核心模块。其中光学机架主要包含光产生，切换和路由模块以及相关的电子设备，包含相干射频（RF）和数字信号生成模块，“陷阱”机架容纳主要的陷阱模块以及相关的驱动电子设备以及通信和远程控制集线器。不同于Quantinuum的QCCD架构，AQT的架构虽然相干时间较短，但更容易集成光学系统。



- 拥有中国具有自主知识产权的ARTIQ（量子物理学高级实时基础设施）架构量子计算测控系统——QuSoil。该架构系统是量子信息实验的尖端控制和数据采集系统，也是目前全球最先进且使用最广泛的量子测控系统之一，未来有望通过该架构体系建立通用的平台。

## 光量子计算

### 各项指标均有所突破

在量子计算优越性展示方面，2022年6月，光量子计算的代表企业Xanadu，通过使用最新的可编程光量子计算机Borealis，完成高斯玻色采样实验，展示了量子计算优越性。该公司的下一个目标是建立一个能够扩展至**100万量子比特**的容错和纠错的量子计算机。同样有此目标、且累计融资达**6.65亿美元**的PsiQuantum公司，2022年在纠错量子计算架构方面取得一定突破，但并未推出任何产品或样机。

在光量子处理器方面，荷兰光量子计算公司QuiX Quantum于2022年3月推出新的**20量子模式**（qumode）处理器。这是一种基于连续变量（CV）的光量子处理器，不同于PsiQuantum的路线，后者是采用离散的光子量子比特。

在纠缠光子的数量方面，8月美国马克斯普朗克量子光学研究所（MPQ）成功地以明确的方式有效地纠缠了**14个光子**，创造了新的世界纪录。

### 高维光量子计算显露优势

2022年3月，北京大学团队实现了高维（quantum dit, **qudit**）量子计算芯片，在大规模集成硅基光量子芯片上实现了高维量子位初始化、操作和测量器件的单片集成，通过编程重构该量子处理器，运行了上百万次高保真度量子操作，执行了多种重要的高维量子傅里叶变换类算法，进而证明了高维量子计算具有比二进制量子比特（quantum bit）编码的量子计算更大的计算容量、更高的计算精度和更快的计算速度等显著优势，有望加速构建大尺度光量子计算机。

利用光量子的高维量子态做计算总的来说并不是一项非常新的技术。早在2019年8月，奥地利科学院和维也纳大学的团队（Anton Zeilinger）就首次成功地传送了三维量子态，即高维量子系统可以传输比量子比特更多的信息，这将有助于将量子计算机与量子比特以外的信息容量连接起来。

光量子的高维量子态主要是用光的路径来进行编码，如编码在4条路径上来形成4维量子态；区别于多自由度，比如两个光子同时对其角动量、偏振、路径等同时进行编码。**光量子做高维量子计算主要有三方面的优势：**

- 可以减少损耗。在减小或保持损耗的情况下，能够把希尔伯特空间做大；
- 简化量子门的构建与编译。在量子计算中，要实现一个二维的不可逆门，比如与或非这样经典操作的门，可以把它扩展到三维的量子位，用多余的量子位去存储在计算过程中冗余的信息，让门变成可逆，就可以更好地实现这样一个操作；
- 一次可以输入更高维度的信息。即在相位估计中，用迭代相位估计的方法，迭代一次可以得出4位，相当于芯片跑一次就可以得出4位的结果。这不仅是在计算过程中将体系变大了，而且每次得到的结果与能输入的结果也都变多了。此外跟经典结合的时候，高维量子计算也会有一些优势。

## 中性原子量子计算

该技术的一个主要优势是可以将多种类型的光镊（其中一些可以快速移动）与它们携带的原子结合起来。该路线目前已经利用光镊技术建立了由**200多个**中性原子组成的阵列，并且正在迅速结合新的和现有的技术，将这些原子变成完全工作的量子计算机。这种光镊使得该技术比其他平台（如超导体）更加灵活，可以与更大范围的原子互动，而在超导体中，每个量子比特只能与芯片上的直接邻居互动。

## 2022年“中性原子元年”

2022年，各个路线量子计算机均有一些颇为亮眼的表现，但中性原子路线的量子计算机可以说是2022年度不折不扣的年度黑马，主要成果包括原子比特数的刷新、相干时间和最快双量子比特门速度、大规模原子量子处理器的发布等，无论是在技术还是商业成熟度上，都呈现出跨越式的发展。



2022年年末实现了一些商业化进展：QuEra在AWS上推出**256量子比特**模拟量子处理器，QuEra的QPU是亚马逊Braket上第一个能够进行“模拟哈密顿量模拟（AHS）”量子计算范式的设备；MSquared公布了英国第一台商用中性原子量子计算机的原型机——Maxwell系统。

## 在专用量子模拟机上优势明显

中性原子路线在过去的一年取得了如此令人骄傲的进展绝非偶然。究其根本原因，主要是量子计算机在其量子比特数量、容错能力、相干时间等各项技术指标尚不具备实现通用量子计算之前，专用量子计算机或将成为量子计算领域近期的主要发展目标。超导等路线作为通用的量子计算路线，可以与中性原子一样去做量子模拟。但中性原子路线比超导路线做量子模拟机的优势就在于原子的天然哈密顿量之间的相互作用。对于同样的问题，处理得到同样的结果，中性原子路线并不需要庞大且昂贵的稀释制冷机来为芯片提供超低温环境，当然光量子计算也有同样的发展优势。

## 技术原理多领域通用

中性原子技术的应用场景也是多样的，其细分路线中的里德堡原子可以在量子通信中做原子天线、在量子计算领域做芯片，以及在量子精密测量领域也有广泛的应用。除此之外，另一条冷原子路线还可以用来做量子中继以及量子存储器。

综上所述，中性原子以其广泛的应用前景也间接地带动了关于其科研以及商业化的进程，促进了该路线的高速跨越式发展。

## 半导体量子计算

### 保真度实现突破

目前硅基量子技术的优势在于利用了类似小芯片中集成数十亿个晶体管的半导体纳米结构，因此可以利用当前成熟的半导体技术：得益于硅基自旋量子比特与成熟的纳米加工技术的兼容性，半导体量子计算在过去的一年，容错上进展明显。



1月

新南威尔士大学、代尔夫特理工大学以及RIKEN在《自然》杂志同时刊登了三篇关于硅量子计算的论文，并且全部实现双量子比特门保真度99%以上，超越了量子计算表面码纠错编码的容错阈值，跨进容错量子计算的门槛，展示了硅基半导体量子点体系实现容错量子计算的可行性。



8月

日本理化学研究所（RIKEN）研究人员展示了硅自旋（半导体量子点）三量子比特计算系统中的纠错，相关研究以《使用硅自旋量子比特进行量子纠错》为题，发表在《自然》杂志上。这是半导体量子计算首次实现纠错，为迈向大规模量子计算机奠定了基础。



9月

代尔夫特理工大学量子计算研究所QuTech创建了一个六自旋量子比特的硅芯片，该芯片在通用操作、状态准备和量子比特的测量方面取得了可观的保真度，同时与其他架构相比，错误率有所下降，这是朝着创建基于硅的容错量子计算机迈出的宝贵一步

### 走向可扩展性

当前半导体量子芯片的扩展性一直是该路线研究的难点之一。2022年，半导体路线解决了诸多难题，在传输方式、工作温区以及量子比特数量上都取得了很大的阶段性进展。



9月



德国亚琛工业大学和于利希研究所成功地将电子（量子信息的载体）在一个半导体量子芯片上传输了几微米，他们的“量子总线”（quantum bus）可能是未来扩展到数百万量子比特的关键部件。



10月

澳大利亚的Archer Materials宣布在开发其12CQ芯片方面取得了“阶跃式变化”进展，该芯片目前能够在室温下检测量子比特材料中的量子信息，该突破为半导体量子计算未来拓展到常温打下了坚实的基础。



10月

Intel在芯片的生产研究方面达到关键里程碑。该半导体量子比特芯片良率高达**95%**，同时刷新了硅自旋量子比特数量的新纪录达到了**12个**，超过此前《自然》杂志报道的6个量子比特。这意味着硅自旋量子比特芯片已经非常接近量产，是朝着商业量子计算机所需的数千甚至数百万量子比特迈出的关键一步。

目前硅基技术的主要挑战是每个量子比特的质量不一样，这也是科学家致力于解决的主要困难。基于当前已实现的技术状况来看，下一步硅半导体量子计算的核心研究任务依旧是如何采用现代半导体工业产线技术实现多量子比特耦合和普适量子逻辑门操控，从而构建大规模可扩展的硅量子芯片，实现可容错的量子计算原型机。

2022年对量子计算来说是一个积极和充满希望的结束。研究电子输运，开发容错的自旋量子比特系统，以及通过使用传统电子技术模拟量子结构，可能成为规避量子力学定律所带来的限制、将量子计算机带出实验室、进入现实世界和解决现实世界的复杂问题的关键。

## 拓扑量子计算

拓扑量子计算作为当下炙手可热的一个技术路线，其优势是硬件层面的纠错。原理比较复杂，简单来说，量子比特是一个单独的个体，与其他量子比特相互作用，是很容易出错的，而且量子比特数越多，越容易出错，出错了信息就可能丢失。但拓扑量子计算机是将几个量子比特组成起来形成一个固定结构，无论受到外界何种干扰，不会造成信息丢失。

对于拓扑量子比特来说，目前研究最多的马约拉纳费米子只是一种预言的费米子，它的反粒子就是它本身。但马约拉纳费米子仍未在自然界中找到，因此科学家们希望制造一种叫做马约拉纳零能模的任意子。与自然存在于真空中的电子或光子等基本粒子不同，马约拉纳任意子需要在混合材料中产生。

### 持续探索新材料

目前构成拓扑量子计算可能的系统有三大类：**分数量子霍尔、拓扑超导体以及拓扑绝缘体**。目前科学家所实验出来的代表材料分别为GaAs/AlGaAs、Pb上的Fe原子链以及非阿贝尔Jackiw中的Rebbi（-like）模式（仅提案）。



1月

瑞士保罗谢勒研究所比较了两种半导体及其氧化物层下方的电子分布。研究人员使用“软X射线角分辨光电子能谱”（SX-ARPES）研究方法，比较了砷化铟和锑化铟及其天然氧化物层。最终证明了锑化铟在其氧化物层下方的电子密度特别低，有利于在纳米线中形成拓扑马约拉纳费米子，这意味着锑化铟比砷化铟更适合用作拓扑量子比特的载体材料。



2月

瑞士保罗谢勒研究所开发出“拓扑量子比特”。通过利用不同半导体和超导材料薄膜中产生的奇异电子态，研究团队能够创建定义为“拓扑量子比特”的新物质，并最终证明了锑化铟具有在纳米线中形成所需拓扑马约拉纳费米子所需的特性。从氧化物层下的电子分布的角度来看，锑化铟更适合作为拓扑量子比特的载体材料。



6月

中国科学院物理研究所对铁基超导体 $\text{LiFeAs}$ 进行了更加细致而深入的研究，发现应力可以诱导出的大面积、高度有序和可调控的马约拉纳零能模格点阵列。



11月

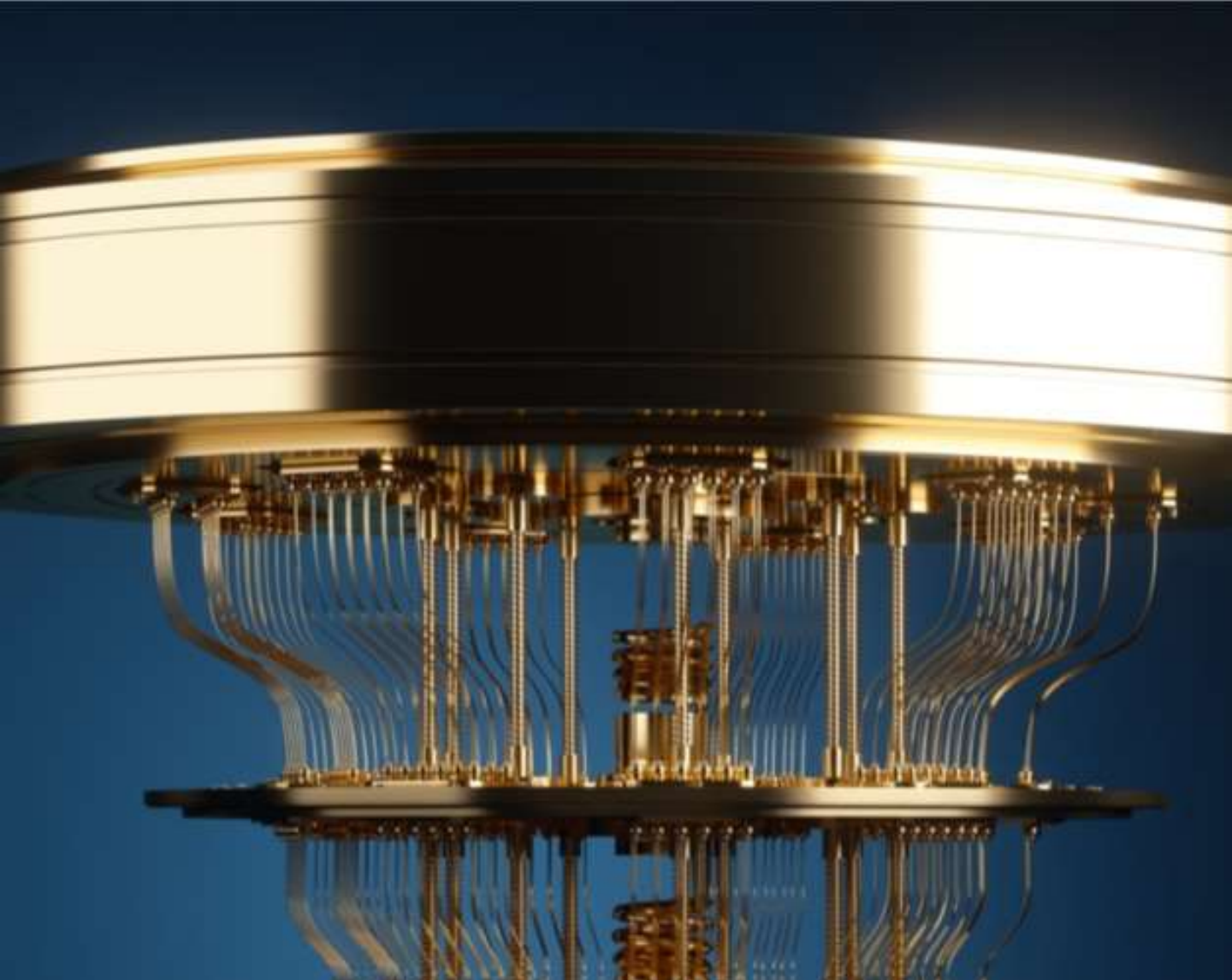
美国芝加哥大学科学家发现了用于拓扑量子计算机的新材料 $\text{MnBi}_6\text{Te}_{10}$ ，可用于创建电子可以沿其移动的量子高速通道。电子通道可能有助于连接强大、节能的量子计算机内部组件。

总的来说，拓扑量子计算的研究目前还停留在基础研究领域，很难甚至不能断定研究的哪个系统，以及该方向是否值得研究。但从长远利益的角度上来看，具有容错特性的拓扑量子计算的研究，应该得到更多鼓励。

## 技术原理取得突破

拓扑相的特征是基态的长程纠缠，传统实验探针不容易获得。2022年3月，微软Azure Quantum团队提出的“拓扑间隙协议”（TGP）解决了这个困难，作为通过量子输运测量确定拓扑相的标准。如果能够通过该协议，就证明存在拓扑间隙。为此，他们设计了一种设备：拓扑超导线的末端有马约拉纳零能模。线的两端都有一个实数费米子算符。最终，微软团队在这个设备上测量到了超过 $30\mu\text{eV}$ 的拓扑间隙，消除了产生拓扑量子比特的最大障碍。

这些里程碑式的技术进步，都是未来制造拓扑量子计算机的关键原理步骤。拓扑量子计算非常依赖于任意的融合和编织（拓扑准粒子的两种原始操作），而拓扑间隙控制着物质的基本状态为这些操作提供的容错能力。因此不论是微软通过马约拉纳零能模和可测量的拓扑间隙创建和维持量子相位的能力，消除了产生拓扑量子比特的最大障碍，还是普林斯顿大学所研究的分数量子霍尔效应。基于拓扑量子比特的量子计算机都将比其他已知量子比特构建的机器表现更为稳定。



103

核心设备与器件

硬件系统中，mK级稀释制冷机（包含GM脉管预制冷设备）以及微波控制电路系统（包含一体化量子计算测控系统、射频微波线缆、低温电子器件、射频微波仪器仪表等）是超导或半导体量子计算机的核心设备。射频微波线缆（同轴电缆、柔性电缆等）是连接处于低温的量子芯片和处于室温的测控系统之间的桥梁，低温电子器件则又包含低温耦合器、低温低通滤波器、低温隔离器、红外滤波器、低温放大器等细分部件。

对于量子比特控制与测量，根据其技术路线不同，量子计算测控系统主要分为两大类型：一类是光学系统，包括光子源、单光子探测器、激光机等部分。主要负责光量子、离子阱以及中性原子等路线量子计算的测控；另一类是微波控制电路系统，主要包含任意波形发生器、锁相放大器等一系列微波器件。该系统主要负责超导以及半导体量子计算的测控（也负责如离子阱、中性原子、金刚石NV色心等路线的控制）。

### 稀释制冷机

目前，能达到mK极端低温的技术包括在空间科学卫星上应用比较广泛的绝热消磁制冷器，以及在地面实验研究和空间科学卫星上也已经成熟的吸附式制冷机。在这些极端低温技术中，吸附式冷却器可以满足250mk以上温度区的任务要求，但绝热消磁制冷器结合吸附式冷却器或其他预冷方法可以满足250mk以下温度区的要求。

稀释制冷机在不同低温领域均有应用，量子计算机则为其主要应用领域。其中超导量子计算机、半导体量子计算机以及拓扑量子计算机对稀释制冷机有较高的低温要求，且目前稀释制冷机的主要工作温度区间为5mk-4k之间。

### 目前唯一适合量子计算机的制冷技术

当前其他类型的超低温冷却器可以达到几乎与稀释制冷机一样低的温度，但它们不适合用于量子计算，而是适用于预冷，如绝热退磁冷却器，它是一次性的低温方法，不能提供持久的低温环境，不适合直接用于支持量子计算和量子模拟。

通常情况下，对于拓扑量子计算的研究大多是由稀释制冷机来为其创造接近0K的温度，而更低温则是由绝热核退磁制冷机经过稀释制冷机预冷，来达到凝聚态中的最低温度，这也是将宏观物体冷却到微开尔文（ $\mu\text{K}$ ）的唯一方法。

### 破除体积限制是当前研发重点

2022年3月，美国丹佛初创公司Maybell Quantum推出了为下一代量子计算机提供动力的低温平台——Icebox稀释制冷机。该机器在十分之一的空间中支持的量子比特数量是原来的三倍，且制冷机中有4500条超导柔性线。这是第一个带门的系统，可以在不拆开它的情况下访问量子比特。

IBM于2021年公布了他们的“黄金眼（Goldeneye）项目”，即为量子计算机造一台前所未有的超大稀释制冷机——包含**1.7立方米**的实验容积，可以将比三个家庭厨房冰箱更大的容积冷却到比外太空更冷的温度，而之前的制冷机在**0.4-0.7立方米**的范围内。后于2022年9月成功地将“黄金眼”冷却到工作温度（**~25 mK**），并在内部连接了一个量子处理器。

12月，美国能源部费米国家加速器实验室的研究人员宣布他们正在建造Colossus，建成后它将成为迄今为止mK温度下最大、最强的稀释制冷机，黄金眼仅为Colossus容积的**三分之一**。这台巨型制冷机将能够容纳数百到数千个高度相干的腔和量子比特，为标准商业稀释制冷机在该温度下冷却能力的**10倍**和体积的**15倍**。然而，由于其像一个倒置的婚礼蛋糕，最大直径约为2米，包含七个直径、每一直径越来越小、温度越来越低，且需要将这些盘子相互悬挂，形成Colossus的低温结构，这些成为目前Colossus的建造面临的挑战。

### 中国有望实现技术突破

2023年，对于中国来说，10mK以下的稀释制冷机的禁运将迫使其加速自主研发的进程。中国目前除中科院物理所的姬忠庆团队在无液氦稀释制冷机上率先实现了**8mk**的温度外；中电科十六所的稀释制冷机有了阶段性的突破，其连续循环工作温度达到**9.3mK**；中船重工鹏力超低温稀释制冷机目前采用GM制冷机作为预冷冷源，最低温度也达到了**12mk**（连续运行）。

中国当前稀释制冷机自研道路上的难点主要包括研制稀释制冷机所必需的同位素<sup>3</sup>He、预冷所需的脉冲管和冷头等预制冷设备严重依赖进口，以及一些低温设备焊接工艺难题。此外还有需克服像冷漏、超漏问题、盘管热交换器和银粉热交换器等一系列技术难题。在核心的稀释制冷机磁共振冷头技术方面，中国有中船重工鹏力、万瑞冷电和氢合科技这几家企业可以做到4k的温度，是否能有效工作不得而知。

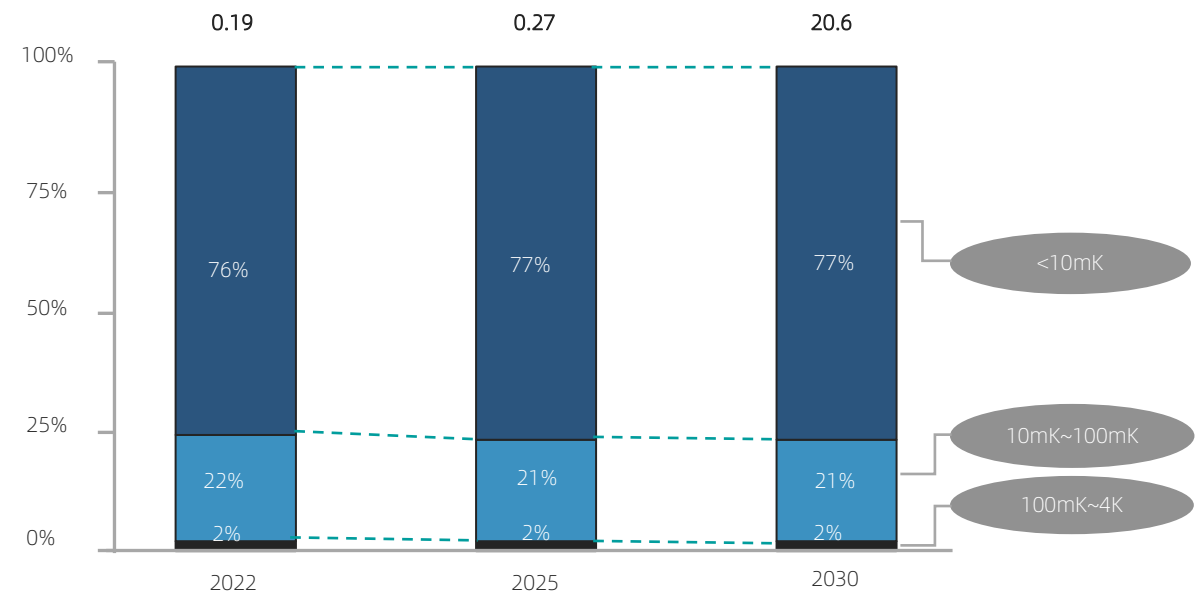
### 市场规模与预测

随着量子计算机的不断发展，日近成熟的超导量子计算机将是推动稀释制冷机市场份额不断增长的原动力。此外，受益于相同量子比特环境，半导体量子计算机将随着超导量子计算机的脚步持续发展，由此带来的增量需求将是未来稀释制冷机行业的一个增长点。

2022年，全球稀释制冷机的市场总规模为**1.93亿美元**，以不同的温区划分，其中10mK以下温区（超导量子计算机用）的稀释制冷机市场规模占比约为**76%**，为**1.47 亿美元**，10mK-100mK温区的稀释制冷机市场规模占比约为**22%**，为**0.42亿美元**。

预计到2025年，全球稀释制冷机的市场总规模为**2.66亿美元**。

图表 3-1 全球稀释制冷机市场规模（2022~2030）  
单位：十亿美元



ICV TANK | Version Feb 2023

全球稀释制冷机的主要参与者有：Bluefors（芬兰）、Oxford instruments（英国）、Leiden Cryogenics（荷兰）、CryoConcept（法国）、Form Factor（美国）、Maybell Quantum（美国）、Quantum Design（美国）、Ulvac Cryogenics（日本）、Zero Point Cryogenics（加拿大）。其中Bluefors和Oxford instruments两家占据了全球主要的市场份额，Form Factor则是通过收购了Janis ULT成了北美很有竞争力的供应商之一。

测控系统

在实现实用化量子计算机的道路上，最大的挑战之一是实现百万个量子比特。而这一实现过程，离不开量子计算测控系统。无论量子计算机的体积和形态如何变化，测控系统或者说这一功能组成都会存在。对量子比特实时控制、测量和读取结果、反馈结果这一系列过程的设备简称为量子计算测控系统或量子测控系统。

超导量子比特的门操作和测量可以通过微波和射频脉冲实现。这是超导量子比特与其他物理系统构建量子比特（原子、离子和光子）的不同之处。

如何应对更多量子比特的测控

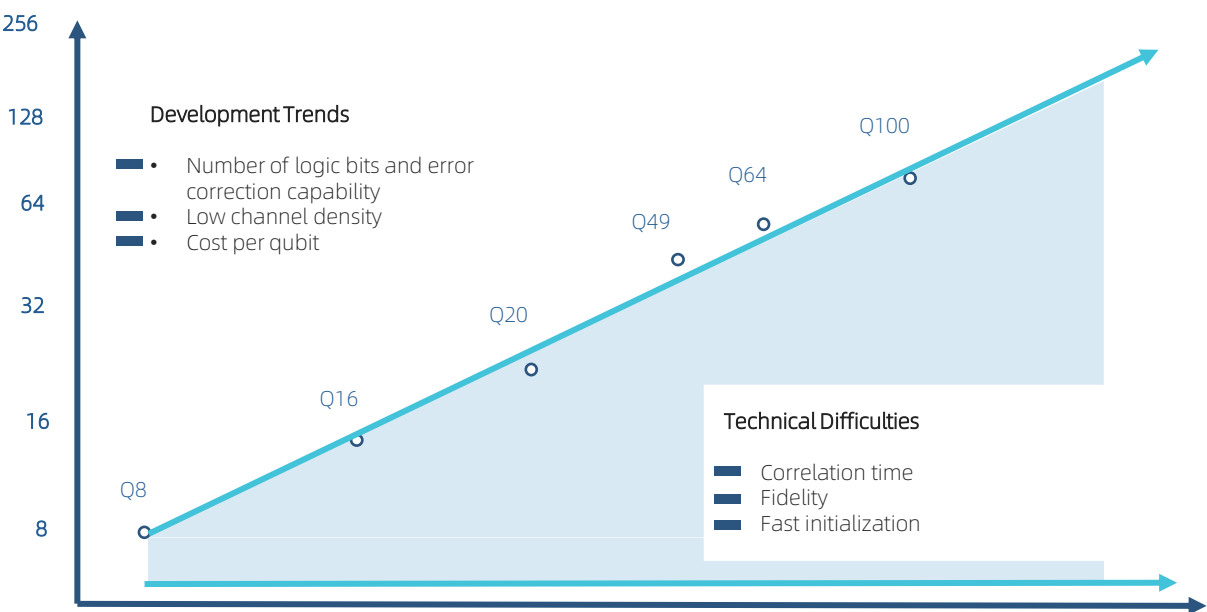
随着量子比特数量的增加，理论上，测控设备的测控线路数也会相应增加，因此，未来量子测控系统除了提升硬件原有性能之外，还需提升对扩展性的需求。应对的措施除了对测控芯片的集成度增强以外，还有为对测控系统进行机箱内扩展和机箱间扩展以及提升系统的通道密度等。机箱内扩展是在机箱内插入对应模块性测控板卡；机箱间扩展则是连接多个硬件机箱来扩展，以针对更多的测控需要。当然，这是目前在几百量子比特下的过渡方案，未来在超千比特数下，机箱方案是绝对无法满足要求的，这就要立即开展低温CMOS的控制方案研究。

量子反馈延迟时间需要在100ns量级上

为了实现读出和控制的快速反馈，包括减小测控数据的上传与下载之间的延迟、板卡之间以及设备之间的控制延迟、AWG的输出延迟等，整个量子态的读出操作、读出数据的分析以及生成反馈操作的过程，必须在量子比特退相干之前完成，就目前来看量子反馈延迟时间需要在100ns量级上。

目前，限制测控系统的技术难点对应了DiVincenzo标准，如果未来的发展逻辑是按照可纠错量子计算来部署的，那么目前业内的评判标准是对逻辑比特个数、增加一个量子比特的花费，以及是否能达到低的通道密度这些方面进行考量。随着时间的推移，下图结合了量子比特个数和时间刻度的关系，苏黎世仪器公司给出了里程碑预测。

图表 3-2 量子计算微波测控系统发展趋势



注：目前各大硬件制造商都给出了自己的里程碑（Roadmap），目前多数主流制造商依然把“实现1000个量子比特测控”当作下一个里程碑点。

来源：Zurich Instruments

### 在提高同步性、减少噪声和串扰方面仍有提升空间

量子测控面临多通道之间、机箱之间以及控制读取之间的高同步性的需求。高的同步性有利于减小通道间相对相位漂移引起的噪声，减小实验校准复杂度。减小噪声无论是现在和未来都始终需要讨论的焦点之一，因为量子测控系统的随机不可控噪声以及量子比特本身周围环境的噪声是引起退相干和测控操作保真度低下的主要原因。

- 目前减少噪声一般是从材料、工艺、制冷机内部设计等方面去提升的。例如新材料在transmon类型的量子比特可以将热弛豫退相干时间增加到300us左右；添加Purcell滤波器可以降低Purcell效应对热弛豫退相干时间的影响；在稀释制冷机内部添加红外滤波器等也可以一定程度上提高热弛豫退相干时间。
- 除了提升硬件系统的性能使得系统具有良好的可扩展性、同步性和低延迟外，设计高效的信号波形算法也是量子测控系统关注的重点。例如目前可以通过优化DAC波形的产生逻辑，来减小控制量子比特的延迟。
- 改善信号的串扰也是重点工作。串扰的来源是因为控制信号在传输中，受到隔离不好的原因而产生了其他的微小信号。目前主要的避免方式还是通过真空和低温冷却环境来隔离量子比特与其周围的环境。未来将关注不同的隔离方式来避免串扰对测控的影响。

### 低温芯片化是未来

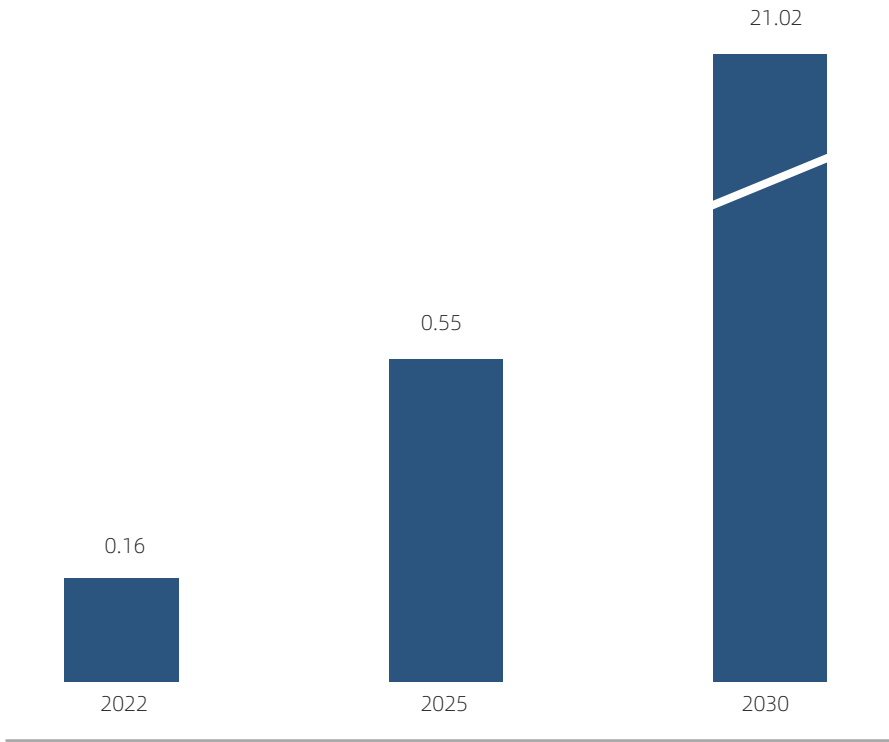
低温环境能显著降低温度带来的热噪声，能提供量子门操作的保真度。低温化的趋势和芯片化是难以分割的，因为根据现有的量子比特控制方法，是需要大量地从室温到10mK以下量子芯片处的控制线去连接量子测控系统的。

随着量子比特数目的增加，现有的量子比特控制方法必然会带来稀释制冷机的功率与体积的问题，目前的量子计算机需要为每个量子比特配备对应的控制和读出设备，对一百个量子比特以内尚可，但面对成千上万个量子比特（此等规模的量子计算机才被认为可实用化）则将无法以当前方式实现。为了解决这些问题，低温集成控制成为一种解决方案，以读出多路复用的方法，减少稀释制冷机内部所需电子设备和连接线数量。

### 未来市场的增长趋势明显

2022年，全球量子计算测控系统市场规模为**1.60亿美元**。预计到2025年，该市场总规模将达到**5.45亿美元**。

图表 3-3 全球量子计算测控系统市场规模（2022~2030）  
单位：十亿美元



ICV Tank | Version Feb 2023

全球主要供应商有罗德施瓦茨（德国，收购瑞士苏黎世仪器）、是德科技（美）、Qblox（荷兰）、中微达信（中）、本源量子（中）及国盾量子（中）等。其中以罗德施瓦茨以及是德科技占据全球测控系统的绝大部分市场份额。

## 激光系统

为满足量子计算机的特殊需求，所需激光器必须具有高稳定性、高精度的调谐能力以及较低的漂移，以保证量子信息的精确性和可靠性。此外，在量子计算机中，激光器还需要能够生成特定的光学信号，例如单光子脉冲或单模光，用于制造和操纵量子比特。

量子计算机所使用的激光器主要是以固体（晶体和玻璃）激光器或者半导体激光器阵列作为抽运源，掺入金属离子的晶体或玻璃基质作为增益介质的全固态激光器。从某种意义上讲，全固态激光器整合了半导体激光器和固体激光器两者的优点，具有体积小、质量轻、寿命长、性能稳定、可靠性高、光束质量好、转换效率高等一系列优势，发展前景巨大。且它可通过变频获得宽波段可见、红外、紫外甚至深紫外激光输出，采用电激励的方式也便于模块化。

在各类全固态激光器中（圆棒激光器、板条激光器），ICV比较感兴趣的是**光纤激光器**，它是利用光纤作为激光介质的激光器，主要用于光量子、中性原子以及离子阱量子计算中。

### 单光子探测器

单光子探测器必须具备几个主要品质：高性能检测、低成本以及存在集成到现有系统中的可能性。但这种探测器也面临的一个重要挑战，那就是如何在硅光工艺上集成其他光学元件。

量子计算用单光子探测器可以分为单光子雪崩二极管（SPAD）、超导纳米线单光子探测器（SNSPD）、电子倍增电荷耦合器件（EMCCD）探测器等几种类型。前两类主要应用于光量子信息技术，EMCCD则在离子阱和中性原子量子计算机中有广泛应用。

以超导纳米线单光子探测器（SNSPD）为例，其在中国“九章”光量子计算机中起到了不可或缺的重要作用，该计算机共使用了100个平均系统探测效率为0.81的高性能SNSPD。2021年10月，“九章2.0”的光子数从1.0版本的76个提升至2.0版本的113个，这也是所有物理体系中量子信息处理单位数量首次突破100个。

典型的SNSPD是一个开关型器件，它具备单光子探测能力，但其响应波形并不对光子能量或光子数具有明显的分辨能力。因为响应波形的特性主要由SNSPD的材料、偏置电流和动态电感等参数确定。

### 光子源及其他光学组件

在纠缠光子源方面，偏振纠缠的光子产生大都以自发参量下转换过程（Spontaneous Parametric Down Conversion，简称SPDC）为主。它是光与晶体的一类典型的非线性过程，这种过程可以简单描述为一束激光（在非线性光学中称为泵浦光）入射到晶体上。当满足一定条件时，入射光子会转化成两个在频率、偏振、传播路径和时间上都具有强烈关联的光子。

目前纠缠光子源面临的两个问题是退相干现象和亮度低。其中退相干现象指的是所产生光子的各个叠加部分的相对相位发生改变，从而使得各个部分的相干叠加性被破坏，影响纠缠作用。在实验中与退相干相关的一个指标是对比度，对比度是衡量光子之间纠缠作用强弱的物理量，退相干越严重，对比度越低。

在单光子源方面，长久以来，其纯度问题一度困扰科学家们很长的时间，基本的方案都是通过准相干技术，例如双光子产生（SPDC）、单晶材料生成单光子源等。通过这些技术，能够生成具有较高纯度的单光子源，从而满足量子信息科学研究的需求。

2022年，华中科技大学提出了目前最好的方案。课题组利用里德堡原子之间的相互作用实现了超级原子量子态的高精度激发与操控，并基于此制备了纯度达**99.95%**和全同度达**99.94%**的高质量单光子源。随后将其应用到基于KLM方案的光量子逻辑门实验中，并成功地将真值表保真度提高到了**99.84%**。利用该高保真度的光量子逻辑门，最后通过量子层析及贝尔不等式等方式进行了量子纠缠测量，其纠缠门保真度达到了**99.69%**。

# I 04

软件、算法、云平台

经典计算机的生态圈是围绕着操作系统而存在的，量子计算机也不例外。同样，编译软件、软件开发工具和行业应用算法与软件也一样不可或缺。

从各国量子计算机系统软件、量子算法和量子软件技术发展水平上来看，2022年美国无论是在量子算法，软件及开发工具包还是在纠错软件等方面，都处于世界领先地位；中国、加拿大、日本和法国等国紧随其后，在各个细分领域都有各自突出的表现；其他国家如德国、西班牙及英国等也对部分细分领域做出了重要的贡献。

系统软件进展主要体现在纠错当中，编译软件则是多数硬件厂商均发布了自己的量子计算编程语言，而对于软件开发工作来说，未来的社区开源发展将成为一种主流的模式，对于应用软件的研发来说，主要还是不断拓展与下游行业的联系，深度挖掘下游不同领域的企业需求，找准量子并行运算的优势。

量子云平台大体可分为三种应用场景：在量子研究中，科学家可以使用量子云平台来测试量子信息理论，进行试验，比较架构等；在量子教学中，教师可以使用量子云平台帮助学生更好地理解量子力学，以及实现和测试量子算法等；在量子开发中，程序员可以使用量子云平台创建量子教学游戏，向人们介绍量子概念，又或者开发量子编程软件，丰富量子开发工具。

## 量子软件

目前软件层面的主要发展方向还是着重于开发具有自动调度功能的量子编译器，以及演示多个硬件控制后端的分布式编程能力；还有标准化跨多种技术工作的中间表示框架；此外还包括开发基于API和编译器指令（pragma）的混合经典/量子软件堆栈等。

本节主要列举了2022年度，系统软件、编译软件、软件开发工具、应用软件等重要细分领域的技术进展，并对未来整体软件可能的一些发展趋势做了小结。

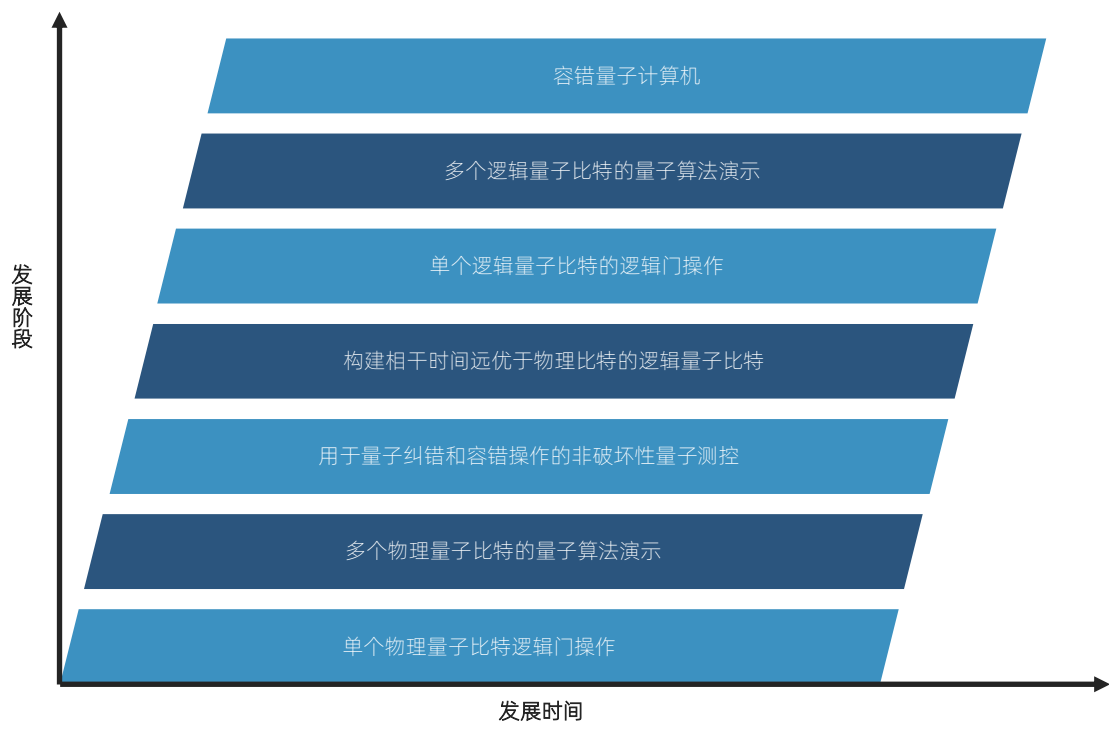
### 系统软件

#### 软件纠错的受关注的提升

从2022年整体来看，二维表面码在纠错方面依旧为领先者。然而它有两个重要的缺陷：一方面，在这种模式下大部分物理量子比特都将用于纠错。随着表面码的距离增长，物理量子比特的数量必须像距离的平方一样增长，以编码一个量子比特。例如，一个距离为10的表面编码将需要大约200个物理量子比特来编码一个逻辑量子比特。另一方面，要实现一套计算上通用的逻辑门是很困难的。它需要额外的资源，不是简单地将量子信息编码为纠错码。这些额外资源的时空成本对于中小规模的计算来说可能过于昂贵。

随着量子比特数目的逐年增加，不断地向容错量子计算迈进，对于量子计算机纠错上面的需求也在逐年抬升。除了拓扑量子计算机这种从硬件本身就可以实行纠错的路线外，其他路线对于软件层面的纠错都是急切且必要的。可以预见在不久的将来，致力于研发纠错软件公司将会在整个系统软件领域获得举足轻重的地位。目前已有几家软件公司在这一方面取得了不错的进展。

图表 4-1 量子计算发展阶段



来源：信息通信技术与政策 2020年第七期，量子计算技术产业发展现状与应用分析

例如Q-CTRL于3月在芝加哥举行的美国物理学会（APS）3月年会上（世界上最大的物理会议）公布硬件基准测试实验结果。开发人员可以通过Q-CTRL的技术（包括其旗舰产品Boulder Opal）获得硬件稳定、错误减少和自动化的底层软件工具。

除此之外，在软件纠错的标准制定上也有了一定程度上的推进。2022年美国量子经济发展联盟（QED-C）已对IEEE表示，有兴趣开发适合新兴量子信息市场的标准。量子信息标准可能会随着时间的推移从非正式转向为正式规范。目前，有四个活跃的量子标准项目，其中之一的P3120标准就定义了量子计算机的技术架构，包括硬件组件和低级软件（例如，量子纠错等）。

### 测控系统软件受到重视

测控系统软件作为量子计算软件类的衍生品，随着人们对于纠错要求的不断提升，呈现出一种水涨船高的态势，渐渐地从边缘化的状态走入了核心的部分，从2022年的技术更新占比来看，该细分的未来发展不容小觑。

2022年1月，苏黎世仪器推出的新一代8.5 GHz量子测控一体机SHFQC以及配套的控制软件LabOne®、LabOne QCCS和Python APIs。拥有低相噪、低杂散、大输出功率范围，可满足快速和高保真的门操作；实时信号处理链路，具有匹配滤波器和多态鉴别功能。仪器内即可完成反馈测控，延时300ns。减轻了量子计算机整体的纠错负担。

同年10月，该公司推出了最新一代测控软件LabOne Q，其可以用于可扩展量子计算的直观软件框架。LabOne Q基于Python的高级编程界面使用户能够专注于直观、高效的实验设计，同时自动考虑仪器细节，并最大限度地延长有用的计算时间。软件和硬件之间的紧密系统集成确保了从单个量子比特到100个或更多量子比特的无缝用户体验。

对于测控软件的要求基本有以下几点：

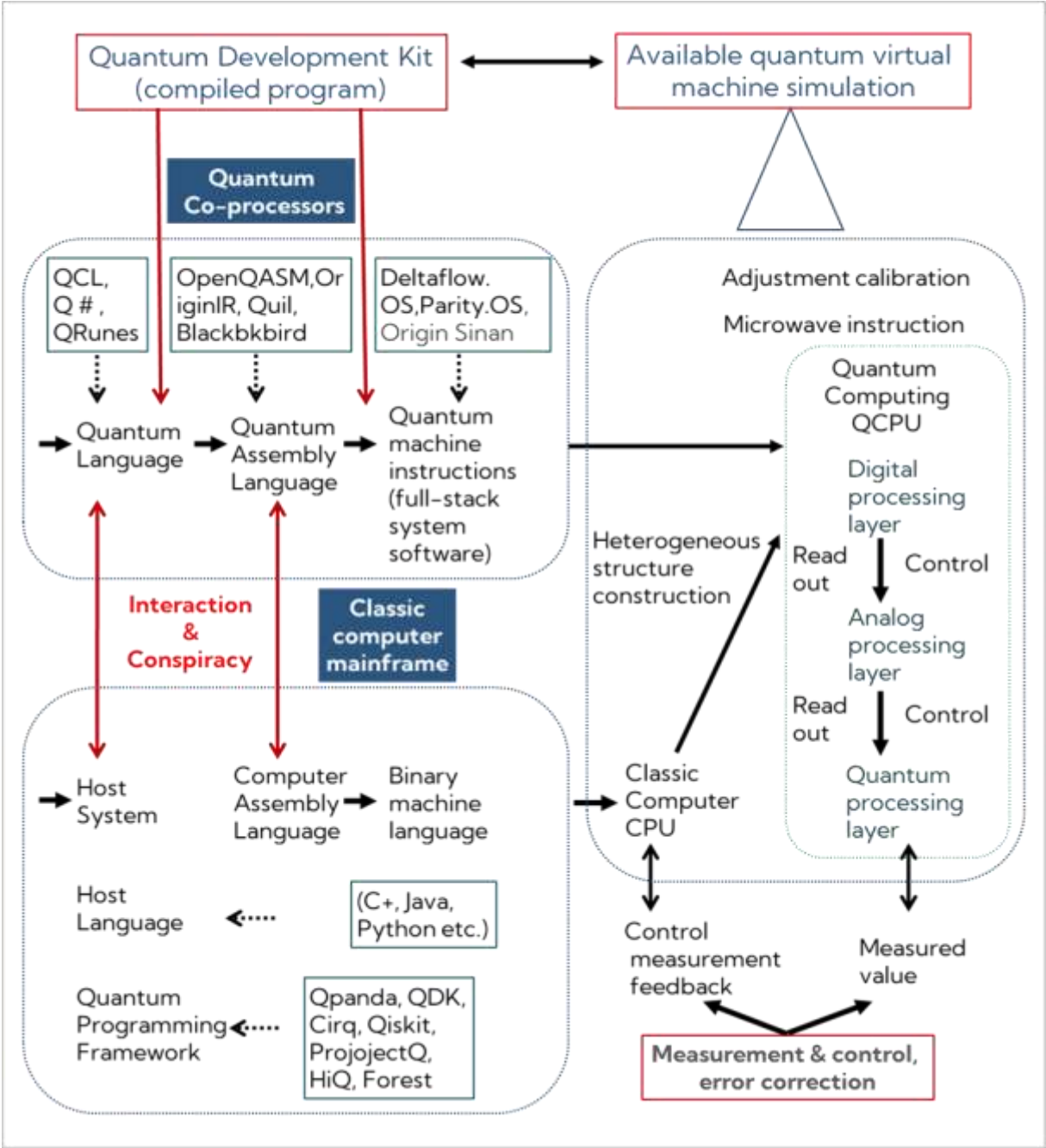
- **正确性**：测控软件应该对时序编排、波形控制、设备连接等有明确的结构，能够正确地完成高层发出的指令。
- **实用性**：程序应该尽可能包括正常实验中的所有程序，所有情况应该都考虑到，让调用更加方便，实验更加有效率。
- **简明性**：每一个程序文件的作用应该明晰，不同功能的文件，不同等级的文件应该分清楚，尽量避免程序间的交叉混用。
- **设备无关性**：程序应很容易改变各个硬件的对应值，应很容易改变不同的硬件，避免与硬件之间有过多的交流。应该有中间层去完成软件与硬件的隔离。
- **抽象性**：程序应该保持较高的抽象性，来更方便地执行一些操作。比如把各种比特门的参数与门符号对应，其就能执行用门操作语言描述的功能了，要比控制底层很多参数方便很多。
- **灵活性**：包括更加容易地添加各种特定功能的代码，更加容易地去适应各种参数的输入。这要求刚开始写底层程序的时候就要考虑到很多实验因素，给以后的一些特殊实验留下更大的自由空间来增添功能参数。
- **可模拟经典算法**：用Qutip（一个量子模拟Python库）把一些简单的量子比特模拟参数和门操纵添加进来。这样更能灵活地与实验相对比，更容易模拟各种实验参数。

好的测控软件不但能优质地完成自己的测控职能，同时还能减少对整个脆弱的量子体系的干扰，未来伴随着纠错软件不断发展，以及对容错需求的不断增加，在测控软件这个小的相对成熟的细分领域公司，也会有一个比较好的利润增长。

编译软件

每个量子计算机研发公司或机构都有自己的量子开发工具，导致用户在选择开发工具时有时也会产生困扰。总的来说，这一层面的工具大体可以被分成3类，即量子语言、量子编程框架以及量子中间表示（Quantum Intermediate Representation），虽然这些工具总体上都可以被称作“量子编程语言”但是实际上它们是3种不同层次的开发工具。

图表 4-2 量子计算机异构编程模型



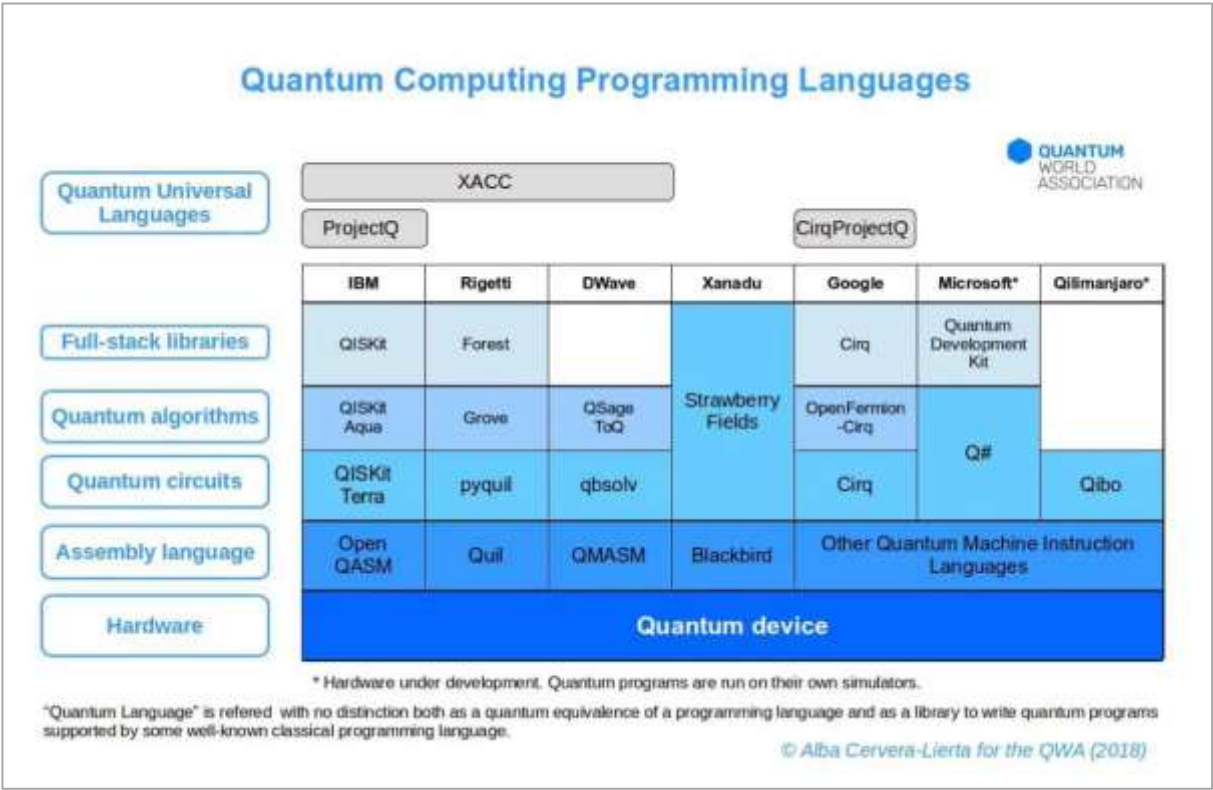
量子语言

量子语言实现了量子专用的语法，构成独立、全新的程序语言，可以用来编写运行在量子计算机中的量子算法和程序，常用的量子语言有QCL、Q#以及QRunes等。量子语言直接体现了量子计算技术中特有的量子特性，也原生支持量子算法中常用的操作，同时还可以支持量子 and 经典的混合编程，而这些特性在经典程序语言里面是没有的。

当然，作为全新的程序语言，量子语言对于开发者来说通常有较高的学习成本。但是，由于量子语言从诞生开始就注重于充分利用和发挥量子计算的优势，这对于未来大规模量子应用开发是有利的，也是长期量子计算开发工具的发展趋势。现阶段，量子语言往往会被编译到一种量子编程框架上进行处理，从而实现量子 and 经典混合计算的任务。

量子编程框架

图表 4-3 量子编程框架



来源：Quantum World Association

量子编程框架则更着眼于当前技术条件下量子程序的快速开发。量子编程框架通常以传统编程语言为宿主语言，在上面添加描述量子计算体系的变量、函数、对象等元素，然后通过对这些元素的程序处理，实现量子算法并开发出量子软件。

由于宿主语言的存在，量子编程框架技术可以很方便地实现量子 and 经典的混合编程。常用的量子编程框架包括QPanda、QDK、Cirq、Qiskit、ProjectQ、HiQ以及Forest等。由于量子编程框架是在经典宿主程序语言下引入量子计算的元素和概念，把量子芯片看作一个特殊的设备或对象，因此这对于开发者来说也是相对熟悉的开发范式。

2022年7月，Google Quantum AI团队宣布发布开源量子编程框架Cirq的第一个完整版本。它是为近期的量子计算机设计的一个用于编写、运行和分析程序结果的Python框架。1.0版本的意义在于支持这些系统的绝大多数工作流程，并且被认为是一个稳定的应用程序交换程序接口（API）。

这些由量子编程框架开发的程序经过编译后，其中经典程序代码部分转化成机器指令并后续在经典处理器上执行，而描述量子算法的量子线路代码部分则通常转化为量子中间表示，并后续发送给量子芯片控制系统处理。

量子中间表示（量子汇编语言）

量子中间表示只包含分离之后的量子经典混合代码中的量子线路代码部分，提供了统一的表示量子算法程序数据的方式，描述了量子逻辑门等底层操作以及操作的时序，并且是直接和量子硬件对接的。量子中间表示由更高级的描述量子算法的语言转化而来，但是更面向于硬件层，也更容易让编译器去分析和优化。量子中间表示类似经典计算机中的汇编语言或者指令集结构，但通常并不是机器指令。目前，常用的量子中间表示有OriginIR、Quil以及Blackbird等。



1月  
麻省理工学院创建了最新的量子计算编程语言——Twist。Twist语言可以描述和验证量子程序中纠缠了哪些数据，也可以为量子算法编写程序并识别其实现中的错误。



2月  
中国科学院量子信息与量子科技创新研究院（上海）量子计算云平台上新“青果”（Quingo）量子编程语言。以该语言为基础，设计实现了首个全面的量子 - 经典异构编程框架，创新提出了高级量子编程语言层面的量子操作时序控制、量子运行时系统等一系列先进技术。



3月  
IBM、AWS于2022年3月联合推出了Open QASM。对于整个量子计算汇编语言来说，有多种相互竞争但通常互补的量子比特技术。客户可以从一系列开源最终用户库中进行选择，但都需要向量子处理器发送一组指令，即量子程序来执行。量子中间表示的处理过程需要把程序中量子比特往量子芯片中量子比特的实际位置映射，并且根据量子程序产生量子逻辑门控制序列，最终通过量子测控硬件驱动量子芯片的运行。

### 量子虚拟机

对当前量子程序的开发而言，量子虚拟机也是很重要的工具，它利用经典计算机去模拟量子计算机的运行，执行量子程序并给出运行结果。量子虚拟机提供了对量子算法和量子程序进行分析和调试的便捷工具，同时也有助于验证量子硬件的正确性，对于当前量子计算技术的软件和硬件的研发都非常有帮助。量子编程框架中通常都会包含量子虚拟机，同时量子虚拟机也可以不依赖于其他软件而独立存在，并广泛应用于量子云系统中。此外，本源量子、Atos都开发了量子学习机产品，量子学习机本质上也是一种量子虚拟机，同时还附加了更多的量子计算技术教育和培训等功能。

综上所述，对于整个编译软件来说，虽然这些厂商之间的竞争在所难免，但从长远来看，未来量子计算的发展一定是开放、互通、融合的，这一点在量子计算软件系统方面尤为如此。IBM、Google、微软以及 Rigetti 等公司在量子计算研发和应用领域都非常活跃，主导了技术和产业的发展方向，这与其长久的技术积累和雄厚的资金投入是分不开的。

对于全栈式的量子计算企业的来说，其软件进展很大程度上取决于该公司在硬件路线上的成就。在量子比特数目尚未达到可实际应用的数量级的今天，谁先突破这一瓶颈，其对应路线的量子计算机软件势必会迎来更大规模的使用。

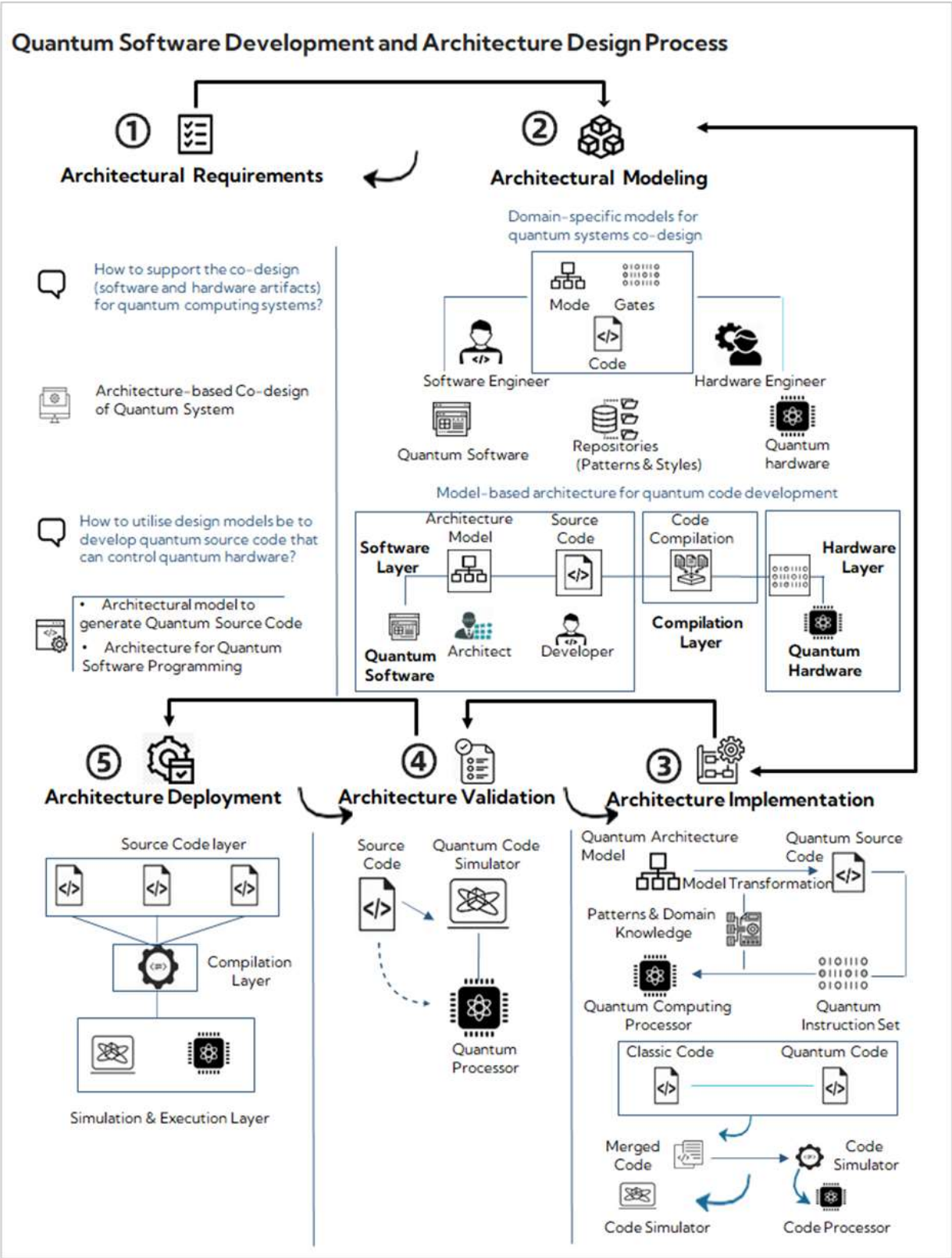
### 软件开发工具

量子软件包含量子算法，但是软件是由代码、结构、算法、数据等等结合而成的，如果是单独的算法无法形成一个软件，顶多是一种规则。而量子软件开发工具包广义上则是指辅助开发某一类量子软件的相关文档、范例和工具的集合。

### 软件开发与架构设计日趋完善

2022年7月，英伟达宣布推出一个名为QODA（量子优化设备架构）的新平台，该平台支持混合环境开发和编译量子经典程序，包括连接在一起的经典中央处理器（CPU）、图形处理器（GPU）和量子处理器（QPU）。目前QODA平台的基本编程接口是C++，并计划未来添加Python的接口。

图表 4-4 量子软件开发与架构设计流程



来源：Software Architecture for Quantum Computing Systems - A Systematic Review

量子软件开发目前非常复杂且繁琐，其中架构要求是开发过程的初始活动，旨在分析、澄清和/或重新制定架构关注点，以得出一套具有架构意义的要求（又称架构要求），这项活动的目的是确定架构需要解决的问题。

### 开发工具代码开源

创建和使用开源软件开发工具可以让更多的研发人员参与到量子软件的开发当中，并且可以让量子算法的设计者们在更真实的环境（实际噪声和物理资源限制）中探索新的算法。

2022年9月，英特尔在创新大会上发布了自己的开源软件开发套件（SDK），正式成为了全栈式的量子计算公司。目前客户可以通过英特尔的开发者云平台Dev Cloud使用该公司SDK的测试版。

从技术上来说，使用分层软件架构有三点好处。首先，使用分层架构可以让研发者更容易在已有的工具套件中添加新工具，简化了对工具的维护和改进过程。其次，目前研究人员仍不知道如何最好地优化量子电路以避免噪音，而利用分层架构可以更方便的让研究人员试验新的算法，并对上述问题进行模拟验证。最后，在经济方面，开源软件的开发成本可以由不同软件开发团体来共同分担，降低了单个团体的研发成本。

### 应用软件

量子计算的**实际商业应用**有两个主要先决条件：具有足够量子比特来运行量子模拟的处理器和解决应用程序底层数学问题的量子算法。目前大多数量子企业的发展方针都是产研结合，以“沿途下蛋”为主。

### 量子模拟软件发展迅速

从2022年全年来看，量子模拟在化学、生物、金融等众多领域都开展了很多积极尝试。利用量子模拟软件可以对化学分子进行建模，有望极大地推动制药行业药品研发、药物审核以及材料行业新材料研发的进展。在生物领域的应用可以小到模拟分子的生物结构，也可以大到模拟神经网络，甚至在未来可能模拟人工生命。由于金融市场复杂度较高，且和量子系统一样具有随机性，利用量子软件来模拟金融市场具有相当优势，如蒙特卡洛模拟等。

2022年3月，Google量子人工智能团队发表的《自然》论文表明，该团队在“悬铃木”量子计算机上已经完成了**16个**量子比特的化学模拟，且为当时最大规模的化学模拟。12月，Qubit Pharmaceuticals通过使用混合量子计算加速药物分子模拟和建模，显著减少了在肿瘤学、炎症性疾病和抗病毒药物方面有前景的治疗方法所需的时间和投资。该公司使用英伟达QODA编程模型为混合量子经典计算机及其Atlas软件套件构建药物发现平台，创建了物理分子的详细模拟。与传统研究方法相比，计算速度提高了**100000倍**。

可以预见，未来量子模拟的应用领域会非常广泛，尤其在随机性和复杂度较高的应用中。而对应海量的下游细分领域的量子模拟软件，在不久的将来也会因庞大的需求而迎来新一轮的爆发增长。

### 与各个垂直领域积极合作

当前已有多个领域的领头企业与量子计算相关公司展开合作，共同探索其可能的应用场景。随着各公司对应用软件的不研发拓展，除了医药、化工、金融等主要应用方向之外，未来也将会和越来越多的领域深度合作的机会。

### 与活跃在该领域的技术老牌企业合作

例如 IBM 和微软，其对下游各领域龙头企业都是有巨大吸引力的。就大的科技公司而言，他们正在围绕自己的技术解决方案构建全面的量子计算生态系统，将学术界、创新的量子初创公司和大型潜在客户公司聚集在一起。

2022年9月，JSR公司表示其与Quantinuum 很早建立了密切合作关系。并且参与了In Quanto的beta测试，其主要用于新材料的研发和性能预测，且非常容易使用。并且除JSR外，Quantinuum也公布了与三星、新日铁和宝马的合作伙伴关系，共同探索以解决材料科学、供应链和物流优化方面的问题。

### 与量子初创公司合作

这些初创企业往往偏向于专注于量子软件和算法的开发。例如在金融领域，量子计算在该领域的应用主要包括：投资组合优化、高频交易、量化交易、交易以及欺诈侦测。其中就涉及大量的模拟与算法的开发，而一个好的量子算法的来源则不仅仅局限于头部企业。

2022年3月，两家领先的计算化学软件公司 Open Eye Scientific 和 Gaussian 宣布，Open Eye的Orion<sup>®</sup>分子设计平台现在支持 Gaussian 及其具有自动化科学工作流的电子结构建模软件，以促进更快速和全面的量子化学计算。西班牙量子计算初创公司Multiverse Computing在8月，将量子计算视觉检测首次用于汽车制造业，通过量子人工视觉系统的图像分类检测制造的汽车部件中的缺陷，优于经典方法。10月，量子计算公司QCI推出Path to Quantum咨询、Qatalyst<sup>™</sup>软件和量子光子系统硬件确定无人机的最佳飞行轨迹等。

### 与学术界和政府机构合作

这种合作模式其主要目的旨在获得第一手的、可能是独家或半独家的知识和技术，如中国的合肥量子产业园等，但这些伙伴关系大多都是区域性的。

典型进展例如2022年9月，Multiverse Computing加入由雷诺领导的西班牙行业联盟项目，其目标是推广电动、自动驾驶和联网汽车。该项目名为“西班牙电动和联网汽车的创新工业生态系统”，已获得西班牙政府的批准，旨在使该国成为欧洲可持续交通领域的领导者。

可以预见的是，在不久的将来，各类量子计算应用软件也将能充分发挥其硬件的高速并行计算的独特优势，在算力需求极高的特定场景中优先发挥作用。例如科学计算、人工智能、大数据、太空探索等领域，对科技创新、产业发展乃至经济社会的各个方面带来颠覆性影响。

### 应用场景扩阔

#### 人工智能

时至今日，人工智能已嵌入人类社会的方方面面并在不断发展。未来，随着量子计算硬件设备的成熟完善，以及量子人工智能算法的发展，量子计算有望在机器学习、图像识别等领域助力实现深度人工智能场景。量子计算有望成为人工智能市场增长的重要驱动因素。

#### 化工领域

在化工领域，量子计算可用于改善农业中的氮肥制造工艺。氮肥是当今世界上最流行的农业肥料，但它不是天然产物，而是氮气和氢气的人工合成物。20世纪发明的“Haber-Bosch法”大大提高了氮肥的生产效率，但同时其高温高压的合成过程无法避免极高的能耗。固氮菌中有效的固氮酶分子可以通过复杂的催化过程将氮气转化为氨气，无需高温高压条件，大大降低了能源成本，但固氮酶的转氨催化组合数量太大，超级计算机无法处理。

Google利用量子计算纠错装置模拟了固氮酶的活性中心——铁钼辅助因子的催化过程。该实验使用了超过100万个量子比特来进行相关计算，是通过改进哈布吉工艺来提高能源密集型化肥工业效率的关键一步。这不仅是一个商业上的突破，而且从长远来看，由量子计算实现的改进的农业化肥生产过程将有助于满足地球上75亿人的粮食需求，并应对气候变化的影响。

量子计算在化工领域的应用其主要聚焦于新材料（包含生物材料）的探索以解决工业、农业等生产生活中的问题。



- **微观纪元**利用量子编码大幅改善了量子化学中大分子基态求解问题，这一突破有望在计算化学和量子算法领域引起重大变革，该公司的经典+量子的软件平台也填补了中国在算法和应用软件间的空缺。



- **HQS Quantum Simulations**（德国）在开发预测高性能材料，特种化学品和制药公司的分子特性的量子算法。



- **Good Chemistry**（加拿大）则提供 QEMIST Cloud。这是一个云原生、人工智能驱动的量子计算兼容平台，可实现高通量高精度计算化学模拟。还有Qu&Co，它是荷兰的一家量子计算算法和软件开发商，使其企业客户能够以前所未有的准确性和速度解决化学，材料科学，流体动力学和计算金融领域的宝贵问题。

### 药物研发

在制药领域，研制品性状测试需要通过反复实验才能够获得，新药研发进程缓慢。量子计算可模拟分子特性，有望通过计算机数字形式直接帮助研究人员获得大型分子性状，缩短理论验证时间，新冠肺炎疫苗、抗癌药有望得到加速开发。量子计算的成熟可能会使得研发侧用于样品制备的费用减少，而用于量子计算开发的费用会增加，增强其数字化；销售侧由于新型药物产品线的丰富，市场规模有望呈指数提升。量子计算在新药研发应用中的企业较多。典型的如：



- **Polaris Quantum Biotech**（美国）主要是将量子计算与人工智能和精准医学相结合来彻底改变药物设计。目前该公司平台每年将产生多达100个药物蓝图，并将临床前候选药物的交付时间从5年压缩到4个月，从而实现对精准医疗市场的实时适应性。以及加拿大的ProteinQure，它是一家生物技术公司，使用计算研发工具在计算机中执行药物设计，主要利用量子计算、分子模拟和强化学习来设计新的治疗方法。



- **Qubit Pharmaceuticals**（法国）开发名为ATLAS的软件模拟平台，该平台旨在通过从近似到预测来改变药物的开发方式。平台允许以最高精度计算分子的绝对自由结合能。加拿大的Menten AI，它使用利用机器学习和量子计算的下一代技术开发蛋白质设计软件平台。该团队通过在量子计算机上开发第一个完全可扩展的肽和蛋白质设计算法，并在量子计算机上创建世界上第一个肽，在实现目标方面取得重大进展。

### 金融领域

量子计算所带来的算力增长为开发新的金融服务和产品带来了无限可能性，量子计算在金融领域的应用主要包括三个次领域：**投资组合优化、高频（量化）交易以及诈欺侦测**。

高度复杂或异常快速的模型的用例。股票和外汇交易提供了巨大的可能性，因为市场风险和情景计算越来越精确，原始计算能力在智能路由和交易匹配中的效用越来越受到重视。例如，在估值方面，快速确定最优风险调整投资组合的能力可能会创造显著的竞争优势。对于贷款和债券投资组合，更精确的信用敞口估计应该会带来更好的优化决策。

更加广泛地说，通过洞悉风险的规模和重要性，可以改善一系列企业融资活动的资本配置，同时可以通过更好的加密来保护支付和转账。

### 其他领域

如在**物流领域**，当物流问题涉及多个变量，比如车辆如何选择最短路线，如何部署货轮以满足用户需求的运输网络等等，这对于经典计算是一个耗费高昂、耗时极长的过程。例如，典型的卫星导航系统依赖于经典计算技术来重新计算路线。如果为每一辆车计算最优路线，经典计算在有效时间内不可能完成任务，而量子计算机可以同时处理多个变量，通过量子计算提速可以达到指数级。

在**航空领域**，量子计算有助于解决航空航天行业面临的一些最严峻的挑战，从基础材料科学研究、机器学习优化到复杂的系统优化，并有可能改变飞机的制造和飞行方式。

## 量子算法

随着量子计算机应用前景越来越广阔，HHL、QAOA、QSVM、VQE等算法如雨后春笋般被提出，不断优化，硬件端的量子比特数也在逐年提高，投身算法研发的企业也络绎不绝。

并且随着量子技术研究人员的增多，量子算法的开发速度大大提升，目前的量子算法已经结合到医药、化学、金融、交通等多个实际行业的应用当中。由于通用量子计算机的实现还有较长的路要走，解决特定问题的专用量子计算机有望在未来5—10年陆续推出，专用量子计算机将更多与特定行业解决特定问题相关联，而量子算法就是量子计算机与某一特定研究领域问题之间的媒介。

### 量子算法进展

#### 对实际问题的优化算法仍需加强

量子算法在很多问题上都比传统算法更快，但因为目前量子计算机价格太高及量子比特数量也很难满足要求（或只在特定领域可用，如高斯玻色采样等），所以目前它的理论分析和实验成本都很高。

连续变量的量子优化算法是最近几年的发展方向，而且在很长一段时间里，都将成为一个热门的领域。但这并不是说组合优化不重要，而是因为很多问题都是NP问题，所以要找到一个有效的量子算法是一个很有挑战性的问题。

量子优化使用的基本量子技术核心思想大多都是1995—2008年提出的，HHL算法和Jordan量子梯度估计方法是1995年相位估计算法框架的扩展，振幅放大技术是1996年Grover算法的扩展，哈密尔顿模拟算法和量子随机存储技术则有10-20年的历史。

当然，2022年就整体的优化问题来看，也是有一些不错的技术进展。



4月

因斯布鲁克大学使用里德堡原子实现量子近似优化算法

（QAOA）的新方案，模拟了如何在光学镊子（由激光束固定到位）和里德堡原子（比其他原子更有能量和更大）捕获的电中性原子系统中实现精确校准附近原子之间的相互作用。



10月

NIST和摩根大通等机构使用量子计算机来解决与行业相关的约束优化问题，有望成为实现量子优势的一条强力途径。在探索道路上，他们精炼总结了约束优化问题，并展示了当时最大的量子优化算法执行，该算法基本保留了对量子硬件的约束。

但总的来看，目前现有的优化问题依旧很少，在优化方面还有很多问题需要研究。如优化领域的难题—非凸优化等。但是在未来5—10年，量子计算机将在各种优化计算中发挥极大的优势，根据是IBM在2019年提出的量子计算未来三个阶段的应用，第二阶段也就是NISQ时代的下游应用探索中，随着量子优化的大规模普及，相关的软件公司将迎来新一轮爆发增长。

急需探索新的算法

量子计算已经被Shor算法、Grover算法（或其优化形式）和量子模拟算法证明其具有强大的并行计算能力。传统算法对幺正演化的要求，限制了新算法的提出。对偶量子算法作为新的计算模式，能够通过酉算符的线性叠加实现非幺正演化。因此，对偶量子计算可以实现非幺正的量子算法。

最近发展的HHL对偶量子算法、稀疏Hamiltonian系统的对偶量子模拟算法、高精度对偶量子模拟算法、开放体系对偶量子模拟算法等4个量子算法都采用了算法的线性组合进行计算，显示出它们在相较于传统量子算法的优势。例如布尔满足性问题（SAT）是一类众所周知的困难（NP完全）计算问题。寻找这些问题的解决方案的过程可以使用量子计算机进行。例如使用Amazon Braket上的Classiq平台解决SAT问题。

总的来说，2022年也诞生了一些新的量子算法



但从Shor提出大数质因数分解算法到现在，对比经典计算机的各种算法来说，好的量子算法少之又少，有如下几方面原因：首先，找到一个好的经典算法并不容易，如经典的大数质因数分解算法。其次，量子算法要优于经典算法才有实际意义，否则花费大量成本来开发量子计算机就得不偿失了。最后，人类的直觉更偏向于经典的现实世界，其本身并不会会有猫既死又活的“量子思维”。因此很难从叠加的角度去思考量子语言。

量子算法应用示例

量子机器学习

量子机器学习（QML）是机器学习基于量子计算的高并行性发展起来的一门交叉学科，以达到利用量子力学对传统机器学习进行优化的目的。量子机器学习经历了从量子线性代数、量子机器学习、量子深度学习三个不同的阶段。

量子机器学习的研究意义和价值就在于利用量子计算的高并行性，提高机器学习面对大数据的处理、分析和挖掘能力；借鉴量子力学原理，促进新型机器学习算法的产生；借鉴传统机器学习算法，提出量子力学领域新的研究方法，如提出新的量子断层分析方法。



7月

Zapata Computing和IonQ的研究人员展示了首个量子 - 经典生成算法的实际和实验实现，该算法能够使用最先进的基于门的量子计算机生成手写数字的高分辨率图像。这一结果是朝着构建能够超越经典机器学习能力的量子设备迈出的重要一步。



8月

1QBit、加拿大滑铁卢大学和圆周理论物理研究所共同开发了神经误差缓解，这是一种基于机器学习算法的可以改善使用量子模拟获得基态估计的新策略。

模拟

随机过程通常被用来为物理科学、生物学、流行病学和金融学中的现象建模。在金融领域，随机建模经常被用来帮助做出投资决策，通常以收益最大化和风险最小化为目标。描述市场状况的数量，包括股票价格、利率及其波动率，通常用随机过程建模，并以随机变量表示。绝大多数金融模型涉及更复杂形式的SDE，必须求助于蒙特卡罗积分算法来求解随机微分方程。

蒙特卡罗算法是一种用来随机估计一个系统的性质的技术，通过对系统的统计抽样实现。该算法是为了解决数学、物理、工程技术等方面的问题，其基本思想是一种用来随机估计一个系统的性质的技术，通过对系统的统计抽样实现。该算法是为了解决数学、物理、工程技术等方面的问题。

2022年2月，中国香港大学就开发了一种新的、更有效的蒙特卡罗技术量子算法，用这种算法来测量物体的Rényi纠缠熵。使用这个新工具，他们在量子临界点（DQCP）测量了 Rényi 纠缠熵，发现熵如何随系统大小而变化，与经典LGW类型相变的描述形成鲜明对比。

该方法的基本思想是首先建立一个概率模型或随机过程，使它的参数等于问题的解；然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特征，最后给出所求解的近似值。蒙特卡罗算法真正地突出之处在于处理无法通过分析或通过其他方法来处理的超大或复杂的系统。在金融中，随机方法通常用于模拟影响股票、投资组合或期权的不确定性，这使得蒙特卡罗方法适用于投资组合评估、个人理财规划、风险评估和衍生品定价。

### 优化

在优化方面，2022年，12月，Quantum-South找到了一种解决方案，通过使用量子退火机的混合方法来优化客机的货运，从而改进货物装载计划。该企业使用了混合技术，包括从D-Wave到亚马逊Braket的量子退火机。而国际航空集团（IAG）的货运处理部门IAG Cargo试用了Quantum-South的新服务，用于探索使用量子算法优化航空货运。

Quantum-South自5月就开始了概念验证，探索使用量子计算优化ULD飞行装载的可能性，特别是在优化工作流程的飞行交接阶段。在IAG Cargo的一个测试案例中，Quantum-South算法揭示了在规划ULD装载、实际航班、装运和特定格式的ULD数据样本时应用的业务规则，以简化装载计划。Quantum-South的解决方案由D-Wave等量子退火技术与Amazon Braket等云提供商的传统系统相结合提供支持。可用的运输包装被分成几个ULD，然后组织起来以适应每个ULD。

第一次试验结果表明，该解决方案的进一步应用可以带来飞行载荷计划的优化改进，从而在繁忙航班上的优先组合、重量和体积加载方面带来好处。同时还有望提高流程效率，从而减少手动分析和优化每次飞行所需的时间。该解决方案还可以带来显著的工作负载效率，因为当前的优化过程专注于所有航班的一个子集，并且有可能允许优化整个货运承运人网络。

### 量子算法应用前景

当前量子算法在多个领域有所应用，包括**金融、化学、生物学、医学、人工智能、航空**等。如金融领域的组合优化、模拟定价、机器学习；化学领域的化学工业与催化剂设计、生物制药、材料研发；人工智能领域，利用量子算法加快机器人的学习时间、使用最新的机器学习技术；航空领域，利用量子算法帮助城市空中交通开发更多飞行路线、改善铁路交通线路的重新调度等。量子算法在很多问题上相对于经典算法带来了加速优势，但由于中等规模量子计算机目前依然昂贵，大型的通用量子计算机难见踪迹，因此量子算法的设计存在理论分析难、实验成本高等瓶颈，而量子计算在基础理论与软硬件技术上的进一步突破对于量子算法发展来说至关重要。

量子算法显著扩展了量子计算机的应用范围，使量子计算机在数据快速搜索与排序、量子化学模拟、人工智能与机器学习等诸多领域表现出可观的潜力。寻求可在NISQ时代的量子处理器上运行、能够解决实际问题的算法，是当前量子计算领域的核心研究问题。

## 量子计算云平台

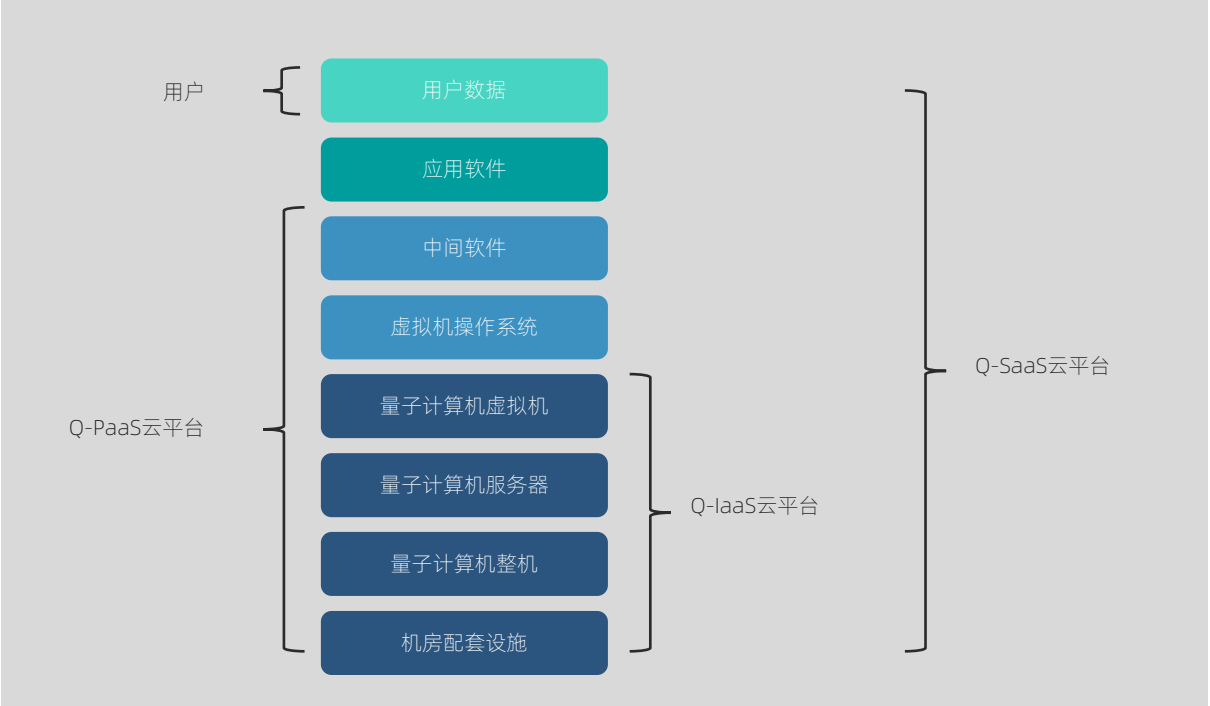
云计算是一种按使用量付费的模式，这种模式提供可用的、便捷的、按需的网络访问，进入可配置的计算资源共享池（资源包括网络、服务器、存储、应用软件、服务），这些资源能够被快速提供，但只需投入很少的管理工作，或服务供应商进行很少的交互。

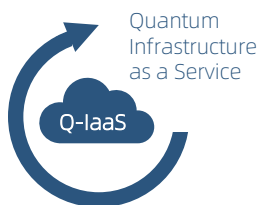
量子云平台好比连接量子计算机和用户之间的桥梁——用户使用经典计算机访问量子云，然后经由量子云将处理过的指令传输到后端，后端完成量子计算后经由量子云把结果输送给用户。通过量子云平台，即使不能实地使用量子计算机，用户也可以完成所需的量子计算。

### 量子计算云平台服务类型

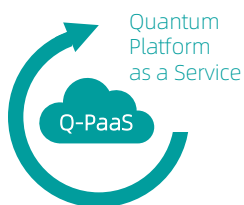
当前各公司量子云平台的逻辑架构基本相同，与云计算分类相似。根据提供服务的类型不同将量子云平台提供的服务细分为**量子基础设施即服务**（Quantum Infrastructure as a Service, Q-IaaS）、**量子平台即服务**（Quantum Platform as a Service, Q-PaaS）和**量子软件即服务**（Quantum Software as a Service, Q-SaaS）三种。部分量子云平台提供的量子计算服务包括其中的两种或三种，如D-Wave提供的服务类型包括Q-IaaS和Q-SaaS，IBM包括了上述三种。

图表 4-5 量子计算云平台服务类型





- **Q-IaaS**是指把量子计算机的硬件及配套设施作为服务来在量子云平台上提供给用户。对于提供Q-IaaS类服务的量子云平台，用户可以通过量子云平台调用量子计算机的所有硬件而不用费时费力地对其进行维护。这类量子云平台的主要用户是量子计算机底层开发人员和科研人员。



- **Q-PaaS**是指将量子计算机的基础设施与中间件组成的开发平台作为服务来在量子云平台上提供。应用此类量子云平台，所有用户都可以方便地在云平台上进行自己特定的软件开发，但这同时也限制了用户在不同云平台上进行迁移。目前来看提供Q-PaaS类型服务的量子云平台是数量最少的，这是因为它既不能彻底绕开复杂的量子知识来开发软件满足自身的需求，也无法满足研究所和高校这类针对具体的量子特性进行研究的需求。



- **Q-SaaS**是指整个量子云平台提供的是一种软件类型的服务。目前Q-SaaS类型的量子云平台主要是面向其他领域的大型企业。这些企业希望在量子时代能够依靠量子技术的强大算力解决当前难以解决的实际问题，继续保持自身行业内的领先地位。虽然目前量子云平台所提供算力尚不足满足大多数企业实际应用需求，但他们已经在通过和量子云平台间的合作，开发、完善适合自身的软件，静待量子硬件领域下一次突破。

目前来说大部分量子云平台的服务以Q-SaaS为主，这是由于当前量子计算机开发人员需要同时掌握一定程度的量子知识和编程能力，相应人才供不应求，而Q-SaaS类型的服务则可以绕过这些人力与技术难关。

预计在未来随着量子开发人员的逐渐增多，部分大型企业会出于保障自身数据安全，降低营运风险，以及自身差异化产品开发的考虑，完成由选择Q-SaaS服务到选择Q-PaaS、Q-IaaS服务的逐渐转变。

### 量子计算模拟器

当前，量子云平台能接入的量子计算机数量及算力不能满足人们对量子比特数的设定值，这将会导致很多实际应用的验证过程和结果受到影响。为解决这一问题，量子计算模拟器应运而生。

量子计算模拟器是指通过经典计算机底层编程来模拟量子特性，依靠模拟出的“量子”搭建量子计算机来进行相应计算。量子计算模拟器可模拟量子纠错、量子噪声等特性，支持量子指令，满足了量子软件及算法的开发需求。量子计算模拟器与当前真实量子计算机相比，具有成本低、算力强、支持更量子比特数高、不易受外界环境干扰等优势，使其在量子算法以及量子软件的开发中被广泛应用。

目前各类量子云平台提供的真实量子计算从几量子比特到十几量子比特不等，而同平台下的使用超级计算机模拟的量子计算则可以提供从几十量子比特到上千量子比特不等。如IBM提供了5,000量子比特的可以用作噪声模拟的simulator\_stabilizer和100量子比特的可以用来模拟量子弱纠缠的simulator\_mps等多种量子计算模拟器。本源量子则提供了4种模拟器后端：35量子比特的全振幅量子计算模拟器、68量子比特的部分振奋量子计算模拟器、200量子比特的单振幅量子计算模拟器和32量子比特的含噪声量子计算模拟器。

Google的高性能开源量子电路模拟器Qsim已证明能在111秒内在一个谷歌云节点中以14栅极深度模拟一个32量子比特量子电路。Amazon Braket提供完全托管的高性能张量网络模拟器（TN1），这种基于张量网络的电路模拟器可以支持高达50个量子比特的量子计算模拟。Atos是第一个成功模拟量子噪声的公司，其开发的量子模拟器Atos量子机器学习机（Atos QLM）被称为世界上性能最好的商用量子模拟器，该模拟器将高功率、超紧凑的机器与通用编程语言相结合，使研究人员和工程师能够开发和试验量子软件。

图表 4-6 量子计算云平台服务类型

|                     | Type                                 | Name                          | Quantum Bit | Noise Modeling         |
|---------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------|------------------------|
| Statevector         | Schrödinger wavefunction             | simulator_statevector         | 32          | Yes                    |
| Stabilizer          | Clifford                             | simulator_stabilizer          | 5,000       | Yes<br>(Only Clifford) |
| Extended stabilizer | Extended Clifford (e.g., Clifford+T) | simulator_extended_stabilizer | 63          | No                     |
| MPS                 | Matrix Product State                 | simulator_mps                 | 100         | No                     |
| QASM                | General, context-aware               | ibmq_qasm_simulator           | 32          | Yes                    |

来源：IBM已发布的量子计算模拟器对比

尽管量子计算模拟器的发展给量子计算机的软件与算法的研发提供了极大便利，但量子计算模拟器模拟量子比特数目受限于经典计算机算力及相关算法，同时较高的能源消耗也在一定程度上限制了各平台量子计算模拟器算力的无限增加。在量子硬件技术仍有待进一步突破的今天，应用量子计算模拟器不仅满足了绝大部分量子软件与算法的研究，而且也将研发成本降到了最低，是当前发展量子计算的重要支撑力量。

量子计算云平台发展现状

量子计算云平台综合了量子计算与云计算的优势，满足量子计算研究与开发需求。目前全球约有二十多家量子计算云平台的提供商，他们将量子计算机与云计算，可以在没有物理量子计算机的情况下通过网络访问。这意味着用户可以在云计算环境中使用量子计算机，云平台的出现使得更多人比以前更容易获得量子计算的体验。量子计算云平台主要提供商包括Amazon Braket、D-Wave的Leap、IBM的IBM Quantum Experience、Google的Cirq、Rigetti的Quantum Cloud Service、微软的Azure Quantum、Xanadu的Strawberry Fields、本源量子云平台、华为的HiQ等。

2022年，量子计算云平台发展成果总结如下：



- **D-Wave**推出可通过位于美国的Leap™量子云服务访问的第一台Advantage™量子计算机，提供5000量子比特；



- **Amazon Braket**宣布支持IBM的一款量子软件开发工具包Qiskit，且在Qiskit上编写的程序可以在Braket的任何门机器上运行；



- **中科酷原**推出中国首个原子量子计算云平台——“酷原量子云”，目前提供中性原子量子计算模拟器及qiskit量子计算模拟器；



- **IonQ**宣布在Azure Quantum平台上推出IonQ Aria，IonQAria是继2019年底推出IonQ Harmony后，加入Azure Quantum平台的第二个IonQ系统；



- **Rigetti Computing**在Microsoft的Azure Quantum平台上以公共预览版推出Rigetti QCS™，Azure Quantum用户按需访问Rigetti的Aspen-M-2 80量子比特和Aspen-11 40量子比特超导量子处理器，以开发和运行量子应用程序；



- **Arqit**将其Quantum Cloud平台部署在亚马逊网络服务AWS产品上。

图表 4-7 全球量子计算云平台分布图



注：图中不包含已开发出量子计算云平台的研究机构（例如，中国科学院量子信息与量子科技创新研究院、浙江大学计算机科学与技术学院、中国科学院物理研究所、美国桑迪亚国家实验室）

ICV Tank | Version Feb 2023

量子计算云平台发展趋势

“云计算+量子计算=量子计算云平台”，这一有机结合一定程度上解决了当前量子计算机资源紧张的问题，扩大了量子计算的覆盖范围，同时，也将推动量子算法与量子软件的开发进程。未来几年，随着量子计算业务的增长，一些重要的因素将有可能为量子云带来新的发展机会。

| 服务类型的转换                                                                                                                      | 量子计算云平台                                                                                                                                      | 量子计算模拟器                                                                          | 安全问题                                                                                                                          | 向量子互联网过渡                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 随着量子基础技术的突破，在未来，应用覆盖范围的扩大和应用程度的深化势必会促进一部分Q-SaaS云平台用户随着对于量子计算技术和量子编程的了解深入而逐渐转化为Q-PaaS和Q-IaaS云平台用户。这一发展趋势在当今云计算市场规模的变化中也能略见一二。 | 后端（量子计算机硬件）有设定的操作序列并按顺序执行计算任务，用户发送任务至云端后，机器往往不是可以立即运行，非计算因素导致的延时会影响实验进程。对此，一些供应商已实现预定功能，用户可通过预定后端时间来解决问题的等待时间较长这一问题。在用户体验方面，供应商还有待进一步提高服务能力。 | 在NISQ时代，量子计算模拟器在量子算法和量子软件开发等方面是当下性价比极高的选择。但到纠错量子计算机时代，量子计算机模拟器的效用可能会降低，或是寻求新的发展。 | 由于量子云平台是线上平台，不可避免地存在着对数据安全性的挑战。量子计算技术正处在发展的初期，对量子云平台如何防止黑客攻击、如何保证数据安全等相关方面的研究还有待深入。云加密的漏洞日益增加，除了技术层面需要不断提升，在政策和立法支持方面也需要同步推进。 | 目前的量子云是通过经典云访问的，但随着量子技术进一步发展，量子互联网有望扩大其覆盖范围，如何将现在的经典云访问融合到传输量子比特的量子互联网中，是下一步需要考虑的问题。 |

整体来看，量子云平台在未来很长的一段时间都是量子计算领域不可或缺的一部分，且为量子计算产业的商业化贡献活力。当下首要的任务是继续优化量子云平台产品和服务，以提供量子基础设施或者差异性软件开发等服务形式扩大自身市场份额，为迎接将要到来的量子计算时代做好准备。

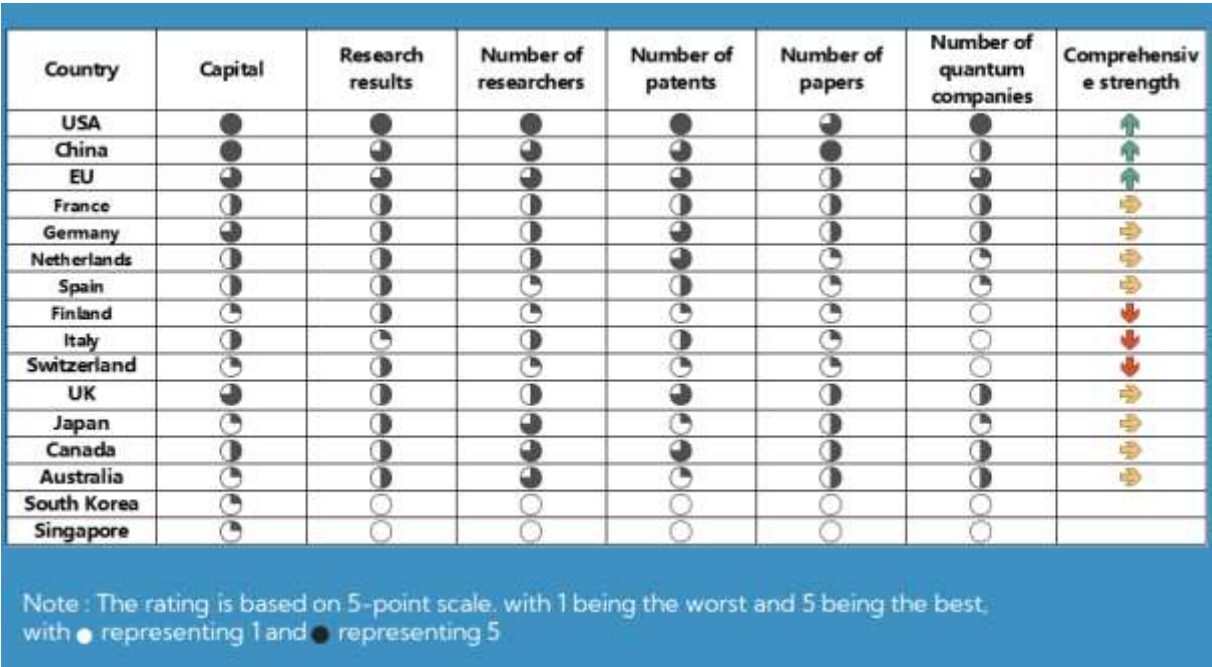
The background is a detailed, close-up photograph of a circuit board. It features numerous gold-colored pins and components that are illuminated with a warm, golden-yellow light, creating a bokeh effect in the background. A semi-transparent, light-colored rectangular area is positioned in the lower half of the image, serving as a backdrop for the text.

105

国家政策

通过对目前全球主要量子参与国家在资本投入、研究成果、研究员数量、专利数量、论文发表数量和量子公司数量6个维度进行评价，可以看出，目前美国和中国最为领先，其次是欧洲各国如德国法国等。此外加拿大与澳大利亚在专利申请数量上也位于前列。

图表 5-1 全球量子主要参与者评价体系



注：评分采用5分制，1为最差，5为最优，○代表1分，●代表5分。绿色箭头表示综合实力较其他国家/地区较好，黄色和红色依次次之。

ICV TAnK | Version Feb 2023

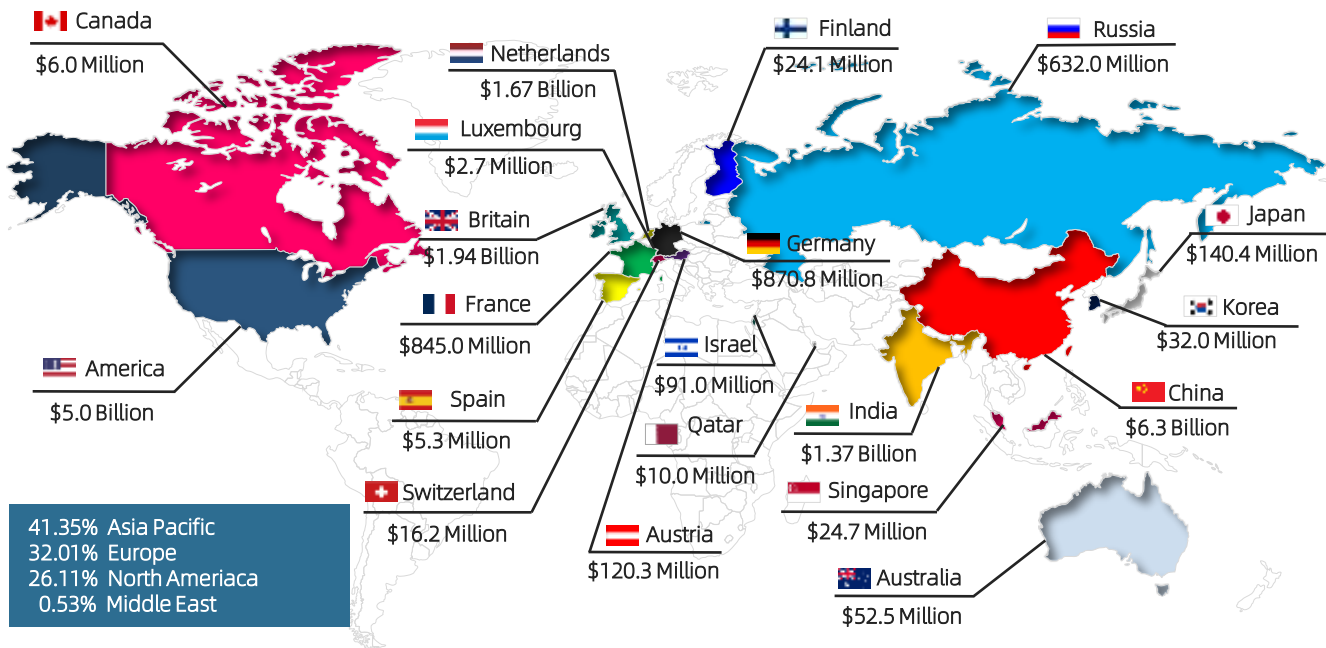
报告梳理了2022年全球量子计算主要参与国所发布的相关政策，并从资金支持类政策、国际合作类政策以及战略制定类政策三方面分别进行分析。

政府资金支持日益加大

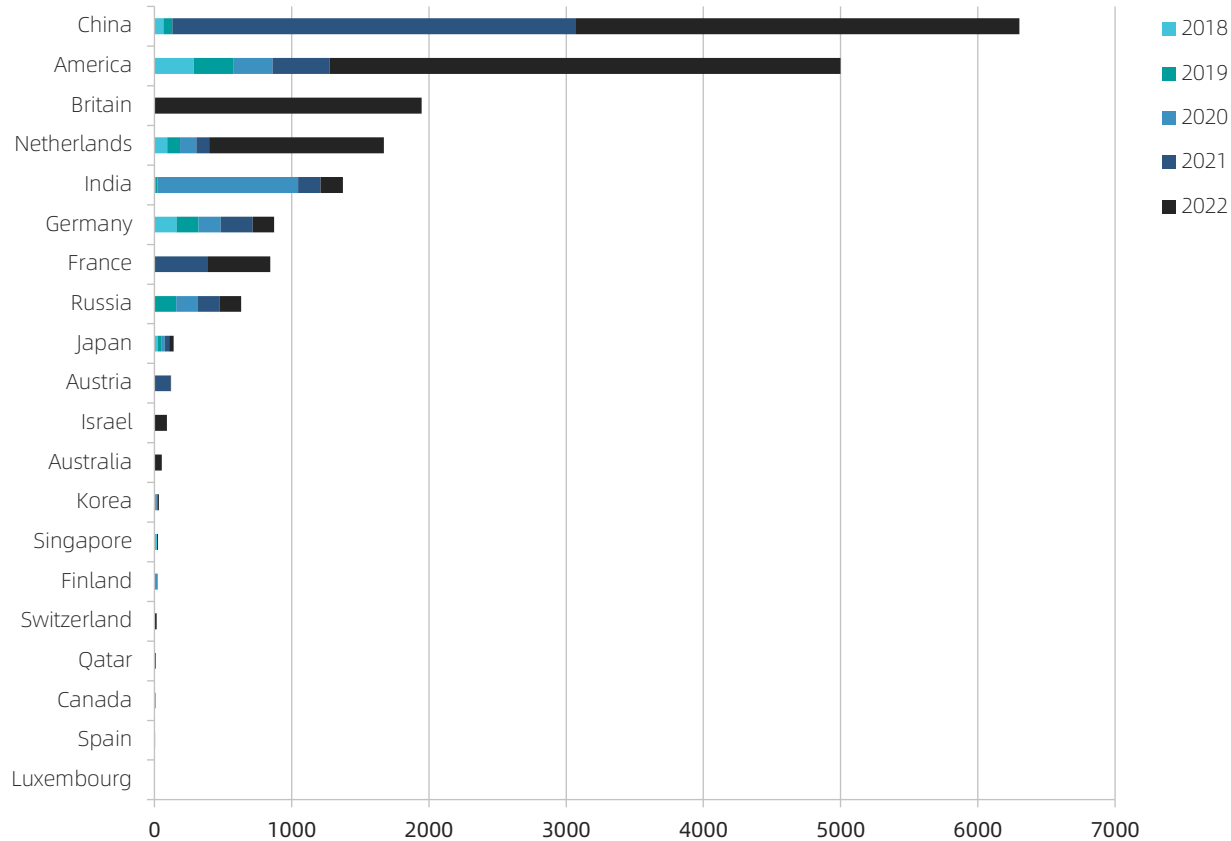
量子科技属于前沿科技领域，且当前处于早期发展阶段，而各科技大国显然都发现了量子信息科技是未来科技竞争的那颗明珠，需要在目前和将来投入大量的资金支持其发展，而各国政府必须是量子科技发展的投资主力。

2022年，全球主要科技国家均提出在量子科技领域提供政策资金支持,但不同国家在资金支持力度方面存在较大的差异，资金投入主要集中在发达国家或其他较早开始布局量子技术的国家，比如美国、中国、欧盟及其成员国、英国、以色列、加拿大、澳大利亚和日本等。

图表 5-2 2018-2022全球QIS投资



图表5-3 2018-2022全球QIS投资（按年度）



综合来看，资金主要的投入领域包括量子计算、量子人才、建立量子研究机构等。

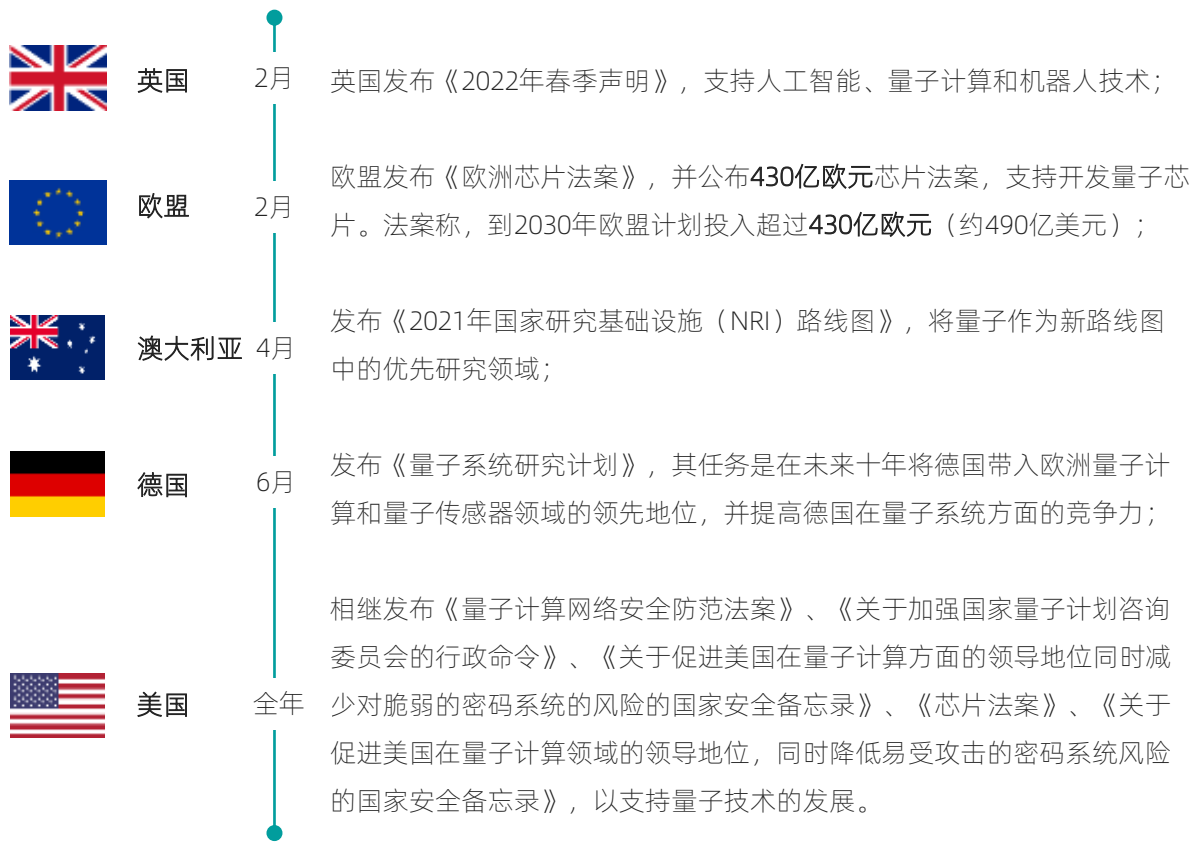
量子计算方面，2022年2月，以色列拨款 **6200 万美元**建造该国第一台量子计算机；10月，德国投资**2亿欧元**开发基于离子阱的量子计算机。

量子人才方面，2022年5月，澳大利亚工党承诺提供**400万美元**支持量子研究人才发展；6月，由美国乔治梅森大学量子科学与工程中心运营的 K12 量子人才发展项目获得了 3.5 亿美元的众议院拨款法案中的 **65万美元**；7月，美国政府投资**300万美元**，用于量子科学研究生培训计划。

研究机构的建立方面，2022年4月，卡塔尔拨款**1000万美元**启动国家量子计算计划，资助卡塔尔量子计算中心（QC2）的建立，进行与量子计算、量子密码学和量子人工智能（AI）的相关领域的创新研究；2022年7月，以色列宣布斥资**2900万美元**成立量子计算研发中心。

各国纷纷制定量子战略

2022年，美国、中国、英国、澳大利亚、德国、欧盟等国家/地区均发布了量子科技规划或法案，以支持量子科技发展。



### 国际合作与对抗并存

以G7为核心的西方发达国家在2022年明显地加强了联盟科技联盟的行动，包括美国、加拿大、澳大利亚、法国、德国、瑞士、芬兰、日本等都互相开展政府层面的战略合作，共同制定发展规划或共同投入资金开发量子项目，合作培养下一代量子人才与共同投入研发基础设施等，以促进量子技术研究与量子产业发展。

比如，2022年，美国分布与英国、澳大利亚、芬兰、瑞典和法国都签署了《量子信息科学技术（QIST）合作联合声明》。联合声明将使各自双方能够利用各自在QIST中的优势，建立全球市场和供应链、创建相互尊重和包容的科学研究社区，并培养未来一代的技能和潜在人才。

相比于美国与西方发达国家之间的密切合作，美国带领其盟友对中国展开了科技封锁，无论是美国颁布的《关于加强国家量子计划咨询委员会的行政命令》和《关于促进美国在量子计算方面的领导地位同时减少对脆弱的密码系统的风险的国家安全备忘录》，还是针对半导体行业的《2022年芯片和科学法案》，都在不断限制中国的量子科学技术研发与产业发展。相比于美国及其盟友间广泛且深入的量子科技交流与合作，中国只能依靠自己内部人才、技术、上游设备与器件供给，来实现量子技术的进步。

如果我们观察在20世纪，中国在国际极限封锁情况下完成的了不起的国家重大科技工程，到如今他们将量子计算机作为国家重大科技目标，发挥其举国体制的优势，那美国应该不愿意看到最终的竞赛结果。

The background of the entire page is a blurred financial chart. It features a grid with vertical and horizontal lines. There are several data series: a prominent red line that trends upwards from left to right, and several vertical bars in shades of blue and green. Some numbers are visible on the grid, such as '10', '12', and '15'.

| 06

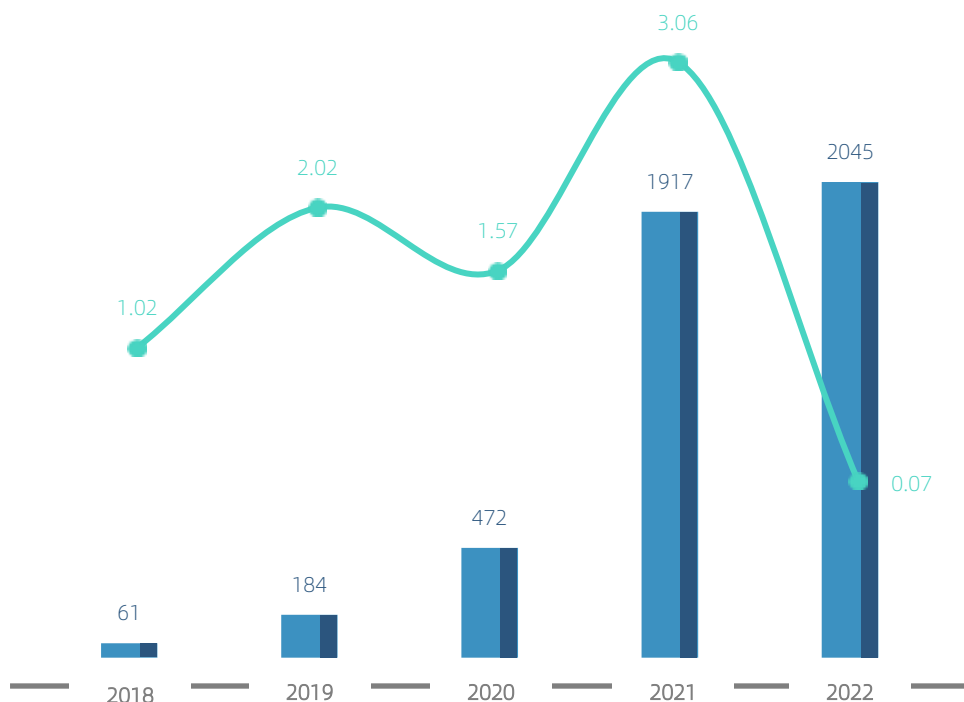
投融资

## 融资规模增速放缓

量子计算作为前沿科技和未来产业的重点，属于颠覆性技术，投资机构的投资热情来自2方面，国家支持与国际竞争，以及技术突破所带来的预期。

ICV统计了2018年至2022年全球主要量子计算企业的融资情况，涉及14个国家，67家量子计算企业，136笔融资。具体如下：

图表 6-1 融资金额&增长率  
(2018-2022) (单位：百万美元)



ICV Tank | Version Feb 2023

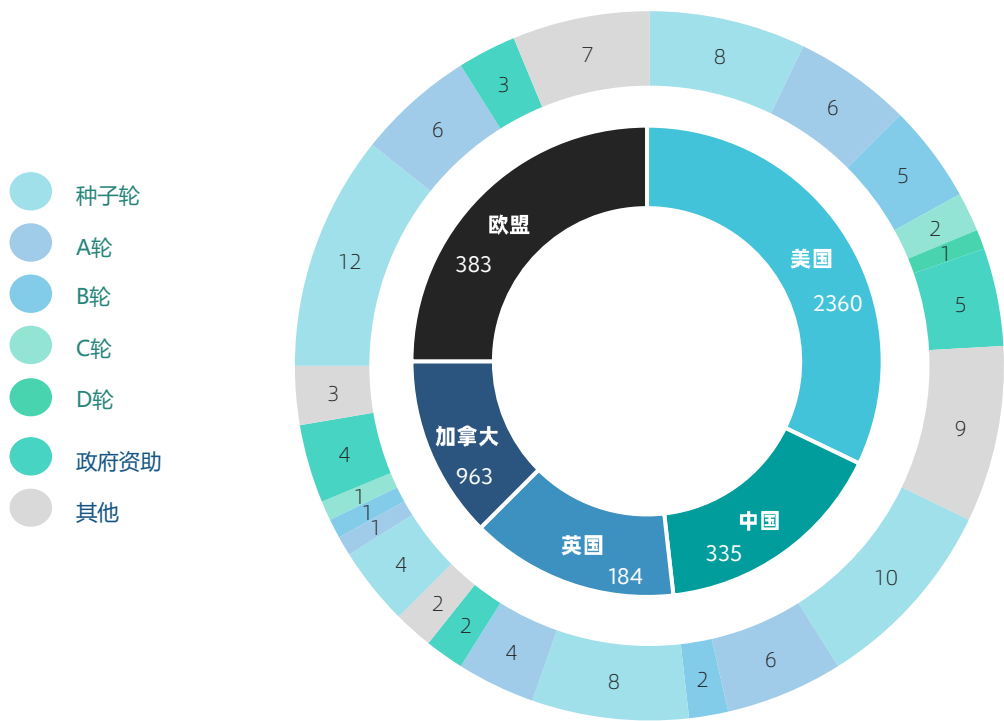
2018年至2022年，全球量子计算融资金额从0.61美金快速增长至**20.45亿美金**，五年增长了**33.5倍**，五年的**CAGR为140.6%**；尤其是2021年，全球量子计算的融资金额呈爆发式增长，约为2020年的**4.5倍**。2022融资金额虽较2021年有所增长，但增长幅度不高，增长率**仅为7%**，似乎全球对量子计算的投资热情出现了短暂的回落，未能将前几年的动能进行延续。

2022年投资表现背后可能原因主要有几方面：首先是受通货膨胀、美联储加息和经济衰退阴霾影响，全球范围内资金避险需求增加，VC市场进入了调整期；其次是多家量子计算上市公司在2022年表现得十分糟糕，二级市场的投资回报率极大打击了一级市场的机构信心；第三，实用型量子计算机还需要数年的等待，较长周期的投资模式压缩了机构范围；最后，2022年全球范围内新增量子计算公司出现了下滑，没有更多的融资主体出现在市场上。总体来说，还是机构投资热情和投资信心出现了问题。

2022年全球融资特点分析

2022年，量子计算产业共融资**20.45亿美元**，与2021年总融资额相比增长有所放缓，但从整体来看，量子计算行业投融资长期仍保持增长态势。对于投融资市场增速放缓，更为细节的表现如下。

图表 6-2 国家及各融资轮次、数量、金额  
(2018-2022) (单位：轮次、笔数、百万美元)



注：其他包括上市增发（1）、未披露（4）、赠款（3）、IPO（1）、第三方配售增资（1）、风投（1）、股权+赠款（2）、股权投资（1）、合并注资（1）、合同签订（1）、可转换票据（1）、可转换债券（1）、债务融资（2）、PIPE（2）  
欧盟：荷兰、芬兰、德国、法国

### 融资事件呈线性增长态势

从2018至2022统计的融资事件看，全球量子计算企业获得的融资笔数呈线性增长态势，继美国Google于2019年宣布首次实现量子优越性后，增长较为明显。

但从融资事件来分析，我们并未发现融资规模出现放缓的明显趋势，虽然2022年只比2021年多了**8笔**，而2021年却比2020年增加了**17笔**。但如果我们观察融资阶段的情况，我们就会发现2022年在天使轮阶段的融资少了很多。

缺乏人才也可能是重要原因之一，即量子人才总的培养周期较其他行业来说更长。量子相关人才培养大约需要7—8年的时间，培养完成之后仅有70%—80%有机会加入科研团队。并且进入所在科研团队之后还要继续培养一年左右，才能彻底适应所在岗位。除此之外仍有部分成员在后续工作中因不适应或未达到心理的预期而选择转行，造成相关教育资源浪费。

人才的缺乏也会导致初创公司减少，研发进展缓慢等一系列问题，从而间接导致总融资需求下降。

### 美国企业觅得全球最多融资款



- 从2018年至2022年，美国的量子计算机公司合计获得融资达到**23.6亿美金**，不仅是单一融资最大国，更是比后面的加拿大、中国、芬兰、英国、澳大利亚、以色列、法国、荷兰和德国，一共9个国家的融资加总还要多，这充分展现了美国量子计算创业公司的竞争力和最为成熟的资本市场体系。



- 排名第二位的是加拿大，加拿大拥有Xanadu和D-Wave两家量子计算明星公司，并且在技术和人才等方面也紧追美国，拥有强大的竞争力。



- 中国从2018年开始也出现了好几家量子计算机创业公司，虽然他们的真正的技术能力一般体现在科研院所里，但都不妨碍这些公司受到了资本的追捧，比如本源量子通过4-5轮融资，估值接近**13亿美金**。

## SPAC成为2022年量子公司上市的主要方式

2022年2月，D-Wave 公司与公开交易的特殊目的收购公司DPCM Capital, Inc.（纽约证券交易所代码：XPOA）（“DPCM Capital”）签订了最终交易协议，并在纽约证券交易所（NYSE）进行交易。该SPAC上市融资**3.4亿美元**，当时估值约为**16亿美元**，最终实际募资不足。3月，Rigetti Computing（纳斯达克股票代码：RGTI）与 Supernova Partners Acquisition Company II, Ltd.（“Supernova”）（NYSE: SNII）完成业务合并。Rigetti 的普通股和认股权证将在纳斯达克资本市场交易，该 SPAC 融资 Rigetti 总计获得了大约 **2.6 亿美元**。

可以看出，二级市场上的量子计算公司在 2022 年主要是以SPAC形式上市并获得融资。用SPAC的方式融资不仅节省时间，费用也相对低很多，并且充分符合美证监会规定的最低公开上市标准要求；而相对于传统的买壳上市，SPAC 的壳资源干净，没有历史负债及相关法律等问题。

## 股价暴跌凸显行业整体低迷走势

目前美股量子计算相关初创企业整体走势十分低迷、且涉及一些负面新闻（如糟糕的现金流等），有些甚至面临退市风险。将颠覆性技术转化为商业成功是极为困难且罕见的，既需要将科学进步转化为实用产品，从付费客户那里创造需求，也需要从耐心的投资者那里筹集足够的资金。

当前量子计算正处于含噪声的量子计算阶段，也就是NISQ时代的早期阶段。漫长的技术突破等待与付费用户的稀缺与吝啬，对量子计算机行业整体都是持续的威胁。2022年显然是让大家感受到了实在的威胁，虽然夹杂着新冠疫情、全球经济放缓及科技对抗等多重因素，但这种威胁才刚刚开始。

如何将先进技术转化创造为有效需求，并且获得持续的耐心的资金，是接下来所有量子信息从业者必须要关注的首要问题。



107

供应商评价



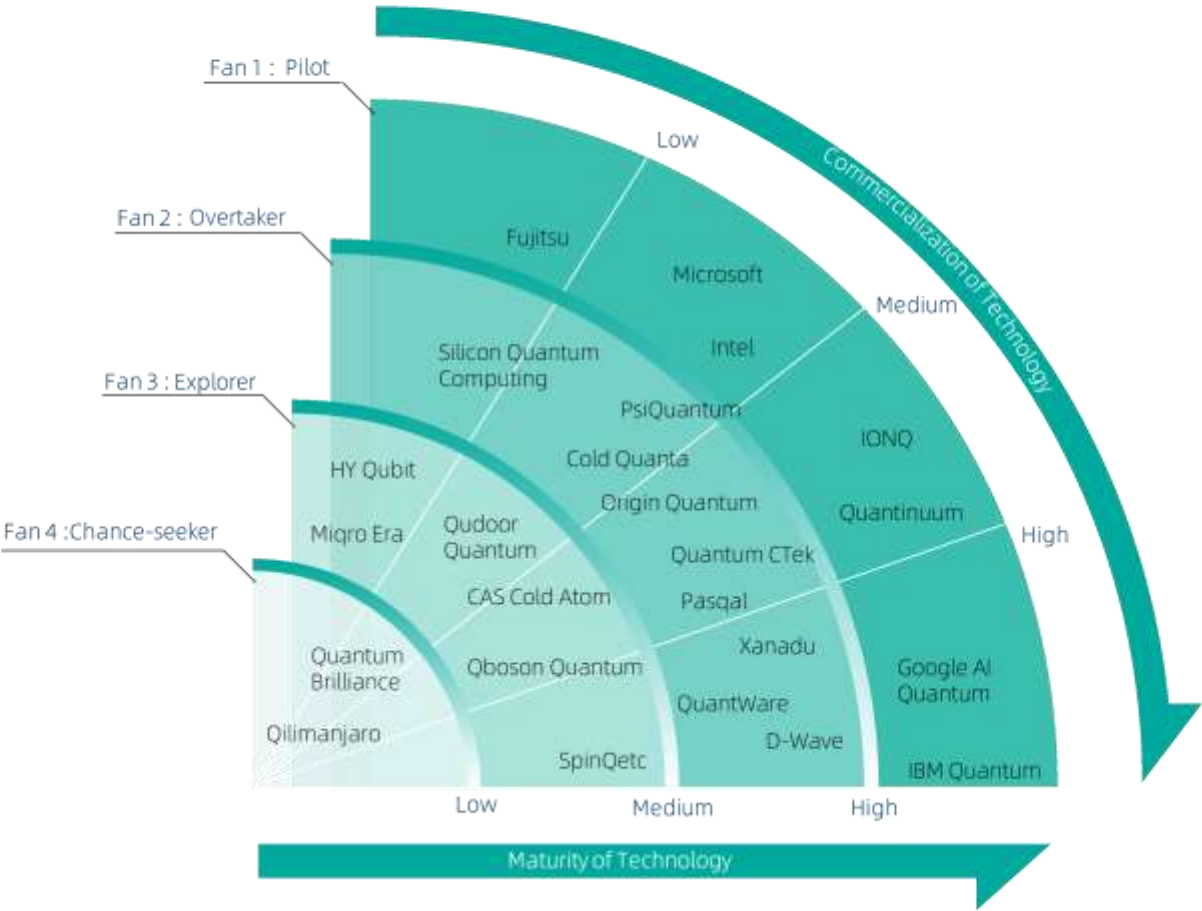
CTF模型是帮助公众了解前沿技术领域及对应公司的发展情况，前沿科技具有技术路线未收敛、技术发展存在高度不确定性、商业化推进处于早期等诸多特点，随着技术的不断发展，对公司的评价需要一套合理的模型，对特定时期前沿技术供应商的综合评估形成“共识”。

CTF模型由4层不同大小的扇形区域纵深呈现，以及3维坐标共同构成。横向坐标 **Maturity of Technology**（技术层面，即供应商的技术、研发、团队等）、侧向坐标 **Commercialization of Technology**（商业层面，即供应商的营收、客户、用例等）以及隐含变量 **Implicit Variable**（底蕴层面，即供应商长期经营所积淀的能够助推企业发展的要素）。CTF模型根据供应商在不同维度的综合表现，将其划分如下四个扇面中：**Pilot**（领航者）、**Overtaker**（超越者）、**Explorer**（探索者）和 **Chance-seeker**（寻机者）。

由于新兴技术处在高速成长期，也存在高度不确定性，因此，各细分领域的CTF图需要不定期进行更新。CTF模型含义见附件。

全球量子计算竞争格局分析

图表 7-1 全球量子量子整机供应商评价体系



Fan1—  
Pilot

- **第一类如IBM**，其为行业的绝对领导者，凭借庞大的公司体量以及先进的科学技术领跑整个量子计算赛道。
- **第二类为Intel或Rigetti**这样的公司，其技术就绪度在各自路线均位于领先地位，且同样为上市公司企业规模较大但缺乏一定的商业化手段，导致整体进度较IBM、Google等第一梯队有所放缓。
- **第三类如微软**，规模庞大且为成熟的科技公司，但由于选择了较为困难的拓扑量子计算赛道，导致技术上迟迟未能取得突破，因此也拖累了公司的商业化进程。

Fan2—  
Overtaker

- **第一类如D-Wave这样的公司**，商业化能力很强，曾卖出世界首台商用量子计算机。但由于其未选择基于逻辑门的量子计算而是使用量子退火，因而带来了技术上的局限，无法作为通用量子计算机来使用。
- **第二类如IONQ、Pasqal以及本源量子、国盾量子**等公司，占据了整个量子计算供应商的绝大部分比例。他们的特点是技术水平较第一梯队仍有一定差距，但均在各自路线上稳步发展，并且公司经过几年的运营已初具规模，渐渐有了自己个性化的产品，逐渐得到了下游合作公司的认可，积极探索该公司产品可能的应用，为整个量子计算赛道的中坚力量。

Fan3—  
Explorer

- **第一类公司如量旋科技**，公司商业化较早，有自己成熟的产品。例如量旋科技，该公司发布了全球首台便携式核磁共振量子计算机，并且不断更新自己的云平台寻找与下游应用企业的合作。同时该公司对超导路线的研究也在如火如荼地进行，虽然整体技术上与头部企业IBM相比有较大差距，但是也具备一定程度上的后发优势。
- **第二类如玻色量子、启科量子、中科酷原、微观纪元**等，这些公司虽然商业化程度仍有欠缺，但也填补了当前市场的空缺，缓解了供需关系，相关的产品也为公司带来了一部分可观的收益。在技术方面，各公司在其技术路线上均小有成就，但整体来说距离第一、二梯队仍有一定差距。

Fan4—  
Chance-seeker

- **典型的公司如 Bleximo、Qilimanjaro Quantum Tech、Nord Quantique、微观纪元**等，这些公司的创始团队都有其擅长的领域与技术，单点就在于如何平稳度过起步阶段，尽早有产品或者原型机产出，找到合适的市场定位，积极参加各种量子产业峰会以及与第三方咨询企业合作宣传展示，以逐步增加企业的曝光率。

典型企业分析



超导  
全栈



起步最早，有超过20年的研究经验；在量子计算机数量和量子比特数量方面有优势；建设了世界领先的量子生态，量子联盟拥有140多个成员；硬件、软件、算法、云平台全栈式布局；IBM是量子教育的领先公司。于2022年年底推出了拥有433个量子比特Osprey芯片，将芯片上之前的量子比特最高数量记录增加三倍。

离子阱



起步晚但发展快，2022年年中Quantinuum的System Model H1-2量子计算系统的性能翻了一番，经4096量子体积（QV）的商用量子计算机之后又扩展到20个全连接的量子比特；目前人才储备充足，团队成员超过100人。与三星、宝马、摩根大通等世界500强公司达成战略合作。

拓扑  
云平台



起步早，2005年开始全力攻关拓扑量子计算；布局了多条技术路线，与代尔夫特理工大学共建量子实验室，大手笔投资光量子计算公司PsiQ，云平台还接入了离子阱和超导量子计算机；软件方面有着无与伦比的地位，推出量子开发工具，包括Q#量子编程语言。2022年，微软提出的“拓扑间隙协议”（TGP）消除了产生拓扑量子比特的最大障碍。

超导  
半导体



世界领先的半导体公司，在集成技术方面有优势，已经将硅量子比特的运行温度提升至1K。为二进行硬件纠错的拓扑量子计算路线选择的企业。22年年底，其硅自旋（半导体）量子比特芯片良率高达95%，并刷新了硅自旋量子比特数量的新纪录——12个

超导  
云平台



全球最大的云计算服务商，四种类型（退火、超导、离子阱、光量子）的硬件都能在其云平台上访问。在容错量子计算研究方面已取得一定的成果。2022年，亚马逊使用AWS Parallel Cluster（并行集群）和QuEST（量子精确模拟工具包）执行了大规模量子电路模拟，演示了一个最多4096个计算实例的计算资源部署。

超导  
全栈



人类历史上第一次量子优越性展示；完成了量子化学模拟；有着强大的人工智能能力，是量子计算+AI研究的领导者；资金实力雄厚。2022年，Google首次实现了“越纠越对”突破了量子纠错的盈亏平衡点。

离子阱



创始人是离子阱量子计算领域的先驱，研究经验很丰富；首家上市的量子计算初创公司，融资数亿美元。正在努力开发分布式量子计算。2022年，IONQ的新型钒基量子计算机的读出保真度，即状态制备和测量（SPAM）保真度，从99.5%提高到99.96%，且在今年年中发布了其最新一代的包含32个量子比特的量子系统IonQ Forte。

超导  
全栈



全栈式量子计算上市公司，覆盖从量子处理器到控制系统、云平台再到量子编程、应用程序的全过程。实现了可扩展的量子芯片技术。2022年，该公司在Microsoft的Azure Quantum平台上以公共预览版推出Rigetti QCS™，Azure Quantum用户可以按需访问Rigetti的Aspen-M-2 80量子比特和Aspen-11 40量子比特超导量子处理器，以开发和运行量子应用程序。

中性  
原子



全球最大中性原子路线的量子计算公司，有着1.79亿美元的融资。该公司一直致力于加速基于中性原子的量子计算技术的商业化，且在开发基于激光冷却中性铯原子的量子计算机。得益于中性原子技术在本年度的爆发，在2022年中，该公司收购了总部位于芝加哥的量子计算软件公司Super.tech，并推出了世界上第一台基于门的商业冷原子量子计算机Hilbert测试版。



超导  
云平台



中国唯一上市量子企业，推出了优化版本的室温超导量子计算操控系统“ez-Q Engine” 2021版，公司今年开始向低温信号传输系统（如低温电子器件、低温线缆）等相关组件类产品延伸。联合中国科学技术大学、中科院上海技术物理研究所等联合研究团队完成了超导量子计算原型机“祖冲之1号”和“祖冲之2号”的研发并实现了“量子计算优越性”。2022年该公司与中科院量子信息与量子科技创新研究院升级了其“量子计算云平台”合作，部署了“QCIS” “isQ-Core” “青果（Quingo）”等编译语言，实现在线运行量子算法。

超导  
模拟  
云平台



推出了中国首个量子化学模拟平台；算法方面处于领先地位；注重量子人才的挖掘，举办多次全国量子计算大赛。今年年底，其设计的“超导量子芯片”专利获得国家知识产权局批准（CN115271077A），降低了量子比特之间的串扰。

超导  
半导体



布局多条技术路线，已分别推出超导和半导体量子芯片，同样是全栈公司，拥有中国领先的量子计算云平台和算法团队，其算法在金融、化学、航空等方面均有应用。2022年年初，由本源量子与合肥市大数据公司共同打造的量子计算全球开发者平台正式上线。该平台前身为中国首个以“量子计算”为主要特色的双创平台。除此之外，该公司还发布中国首个量子计算机和超级计算机协同计算系统解决方案以及实现了硅基半导体自旋量子比特超快操控。（自旋比特操控速率可达542MHz）

光量子  
伊辛机



2022年，玻色量子凭借“量子AI分子对接模拟平台”与“天工经世量子金融策略平台”成为率先实现光量子计算场景应用商业化的企业之一，其在光量子计算领域搭建完成数十项核心自主技术专利基础矩阵，体系覆盖各类型光量子计算机的量子神经元芯片方案，以及“3+1”通用光量子系统架构拓扑等。同年，玻色量子的第一代天工光量子计算验证平台，在国内实现25节点任意相连可编程的MAX-CUT问题相干量子计算优化求解验证，并可实现50微秒内在30,000,000多种可能性中筛选出4个最优解之一，初步验证了量子的“实用优越性”，具有深刻的应用意义和广泛的应用价值。

超导  
核磁共振



全球首款可编程桌面型核磁共振量子计算机；目前已经完成集成超导量子芯片、射频测控系统、稀释制冷机、量子云平台、量子操作系统及应用软件在内的实用型超导芯片量子计算机。公司在2022年推出了便携式的量子计算教学机“双子座mini”，新机型更加适用于量子计算教育和普及。

中性原子  
云平台



中国第一家同时具备量子计算研发和精密测量能力的产业化公司；原子单比特门保真度、相干时间、双比特门保真度较高；上线国内首个原子量子计算云平台——“酷睿量子云”；2022年，该公司完成了量子计算研究与制造中心的建设；光学系统中的激光器、光放大器以及EOM等实现了公司自主化研制；为目前中性原子量子计算路线中的头部企业。

全栈  
分布式  
离子阱



启科量子拥有具有自主知识产权的ARTIQ架构量子计算测控系统—QuSoil，于2022年年底正式发布工程化离子阱低温真空系统（Aba|Qu|Cryovac），并于2023年正式发布了工程机<Aba|Qu>1.0（中文简称“天算1号”）。

NV色心  
离子阱



中国唯一金刚石NV色心量子计算机企业。该公司发布了全球首款金刚石量子计算教学机，该仪器在室温大气条件下运行，无需低温真空环境，使得设备有着较低的运行成本，桌面型的设计让它能适应各种不同的教学环境，同时配套有相关软件与云平台。此外该公司还发布了全球首台离子阱多比特量子计算原型机。

超导  
模拟  
云平台



中国最早投资量子计算的公司之一，与中科院共建实验室，已合作推出基于超导量子计算机的云平台；自研量子计算模拟器“太章”，及“太章2.0”；中国最大、世界领先的云计算服务商。该公司于2022年年初，设计并制造出两比特fluxonium量子芯片，实现了单比特操控精度99.97%，两比特iSWAP门操控精度最高达99.72%，在此类比特中达到全球最佳水平。



光量子  
全域



已实现光量子计算机的编程，推出光量子计算芯片以及首个光量子计算云平台，并拥有全栈式量子软件平台。2022年中，该公司使用最新发布的216光量子比特可编程光量子计算机Borealis（北极光）完成高斯玻色采样实验，展示了量子计算优越性。

超导  
退火



已实现光量子计算机的编程，推出光量子计算芯片以及首个光量子计算云平台，并拥有全栈式量子软件平台。2022年中，该公司使用最新发布的216光量子比特可编程光量子计算机Borealis（北极光）完成高斯玻色采样实验，展示了量子计算优越性。



半导体



为硅量子计算机的先驱，利用CQC2T一直在研究的基于硅的量子比特技术。公司在该路线中融资较多，得益于与超导量子计算机硬件设备共性，以及成熟的CMOS工艺。在2022年中，该公司推出了世界首个原子级量子集成电路。并于今年年底新创造出常温、抗干扰自旋量子比特读出技术。

NV色心



用合成钻石生产午餐盒大小的量子加速器，正在引领在室温下运行的金刚石量子加速器的开发，从而实现量子技术的简化和极端微型化。利用这项新技术的特性可以生产硬件和软件，产生任何室温量子态的最长相干时间。这意味着这种形式的量子计算可以在传统计算机可以使用的任何地方使用。



中性原子



2022年年初，成为首个在该平台上线的基于中性原子的量子计算机服务，为终端用户提供一系列量子计算的数字与模拟能力。7月，在光镊中实现了最多361个原子的大型组装阵列，证实了扩展中性原子量子比特的能力，9月推出324个原子（量子比特）的量子处理器。



| 08

产业分析与预测

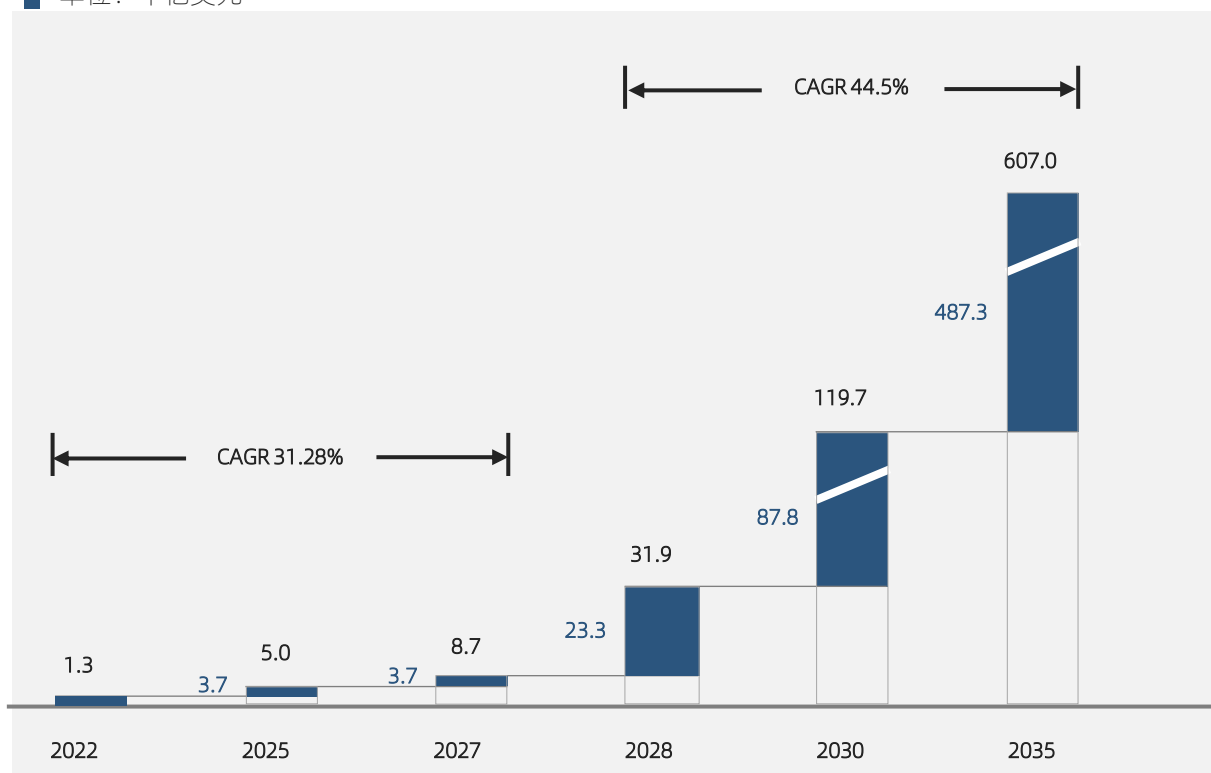
ICV仍然认为**2027年会是全行业一个重要的时间点**，在这之前的五年，我们仍处于NISQ时代的关键阶段，一方面各大公司将较大概率完成各自的技术路线图目标，通用量子计算机将在比特数与保真度等方面将实现技术突破，但通用量子计算机仍只能用来满足科研实验室以及极少部分云平台的商业需求，缓慢而稳定地增长；另一方面，专用量子计算机既有可能实现部分应用，即相干操纵数百个量子比特，应用于组合优化、量子化学、机器学习等特定问题，指导材料设计、药物开发等。

## 产业规模在五年时间将增至319亿美元

2022年，全球量子产业规模达到**12.9亿美元**，较2021年增长了**61.25%**，增长率有所减缓，但基本符合行业发展规律。产业规模的增长一方面来自行业参与者的增加，无论是整机公司，多技术路线的公司，软件公司与行业用户，产业链各个环节都增加了很多参与者；另一方面是来自投资的带动，带来了人才与设备的增加，无论是一级市场还是美国的SPAC上市，都给行业带来了不少资金。

2022年，全球各主要量子计算机公司营收规模都非常凄惨，以政府和各国军方为主要采购方的模式仍然要持续数年，产业投资在无法获得预期回报的背景下，企业将压缩技术和人才的投资，更多的产业推动将来自政府和科研院所。2022年是全球量子产业低迷周期的起点，还是获得强大动能的新起点？这个仍然需要观察。

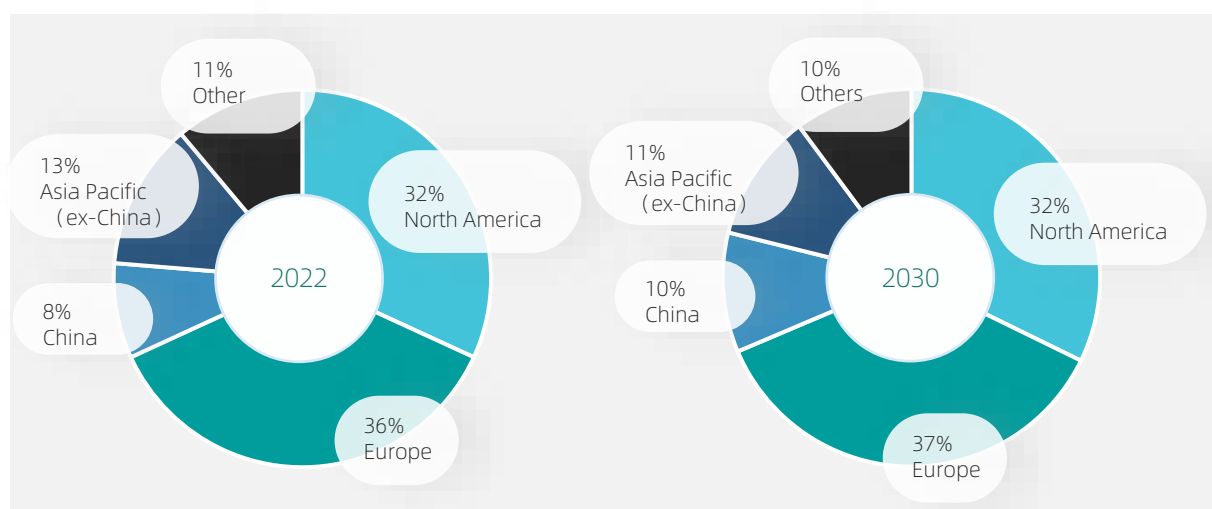
图表 8-1 全球量子计算产业规模（2022~2035）  
单位：十亿美元



我们对2021年的报告预测数进行了修订，我们预计，到**2027年**，全球量子计算行业的产业规模将达到**87亿美元**；而到了**2028年**将快速增长到**319亿美元**，行业进入爆发增长期，到**2030年**整体产业规模预计将达到**1197亿美元**，行业应用实现较大规模的推广，整机采购、云服务与应用解决方案将获得庞大的采购量；在随后的5到10年内，该产业规模将增长到**2035年的6070亿美元**。全球量子计算产业复合年均增长率（CAGR）自**2022至2027年为31.28%**，而**2027至2035年增长为44.5%**，向万亿级产业规模迈进。

## 各地区产业规模预测

图表 8-2 全球量子计算各地区产业规模（2022&2030）



ICV TANK | Version Feb 2023

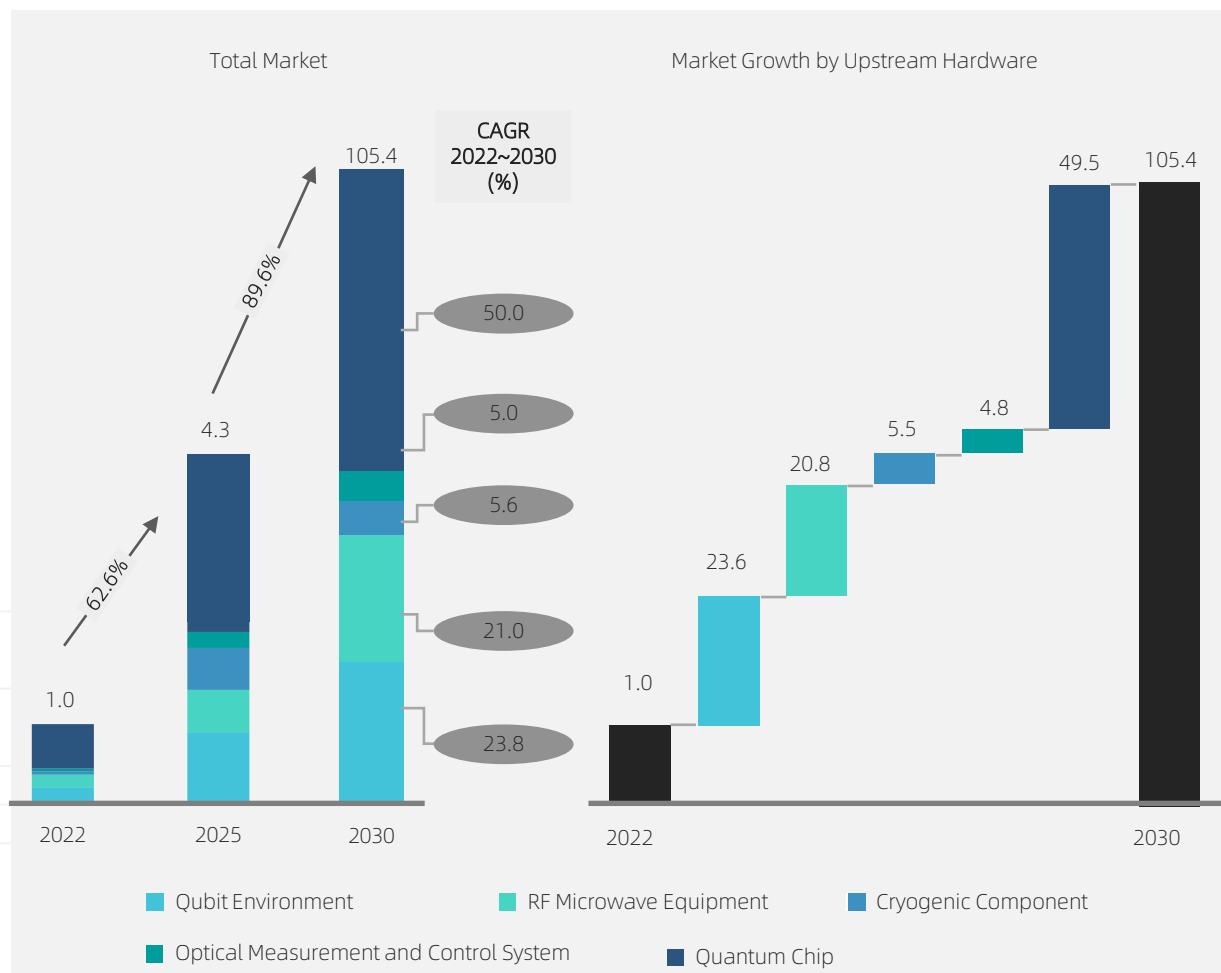
**2022年**各地区产业规模分别为，北美为**4.3亿美元**，欧洲**4.9亿美元**，中国为**1.1亿美元**，亚太地区（除中国）为**1.7亿美元**以及其他地区合计**1.5亿美元**，分别占比**32%、36%、8%、13%以及11%**。

到**2030年**，各地区产业规模分别增长为北美**385.9亿美元**，欧洲**435.6亿美元**，中国为**122.7亿美元**，亚太地区（除中国）为**131.5亿美元**以及其他地区合计**121.6亿美元**，分别占比**32%、37%、10%以及10%**。

从增长率变化来看，各地区基本上在同步在发展，值得注意的是，其他地区的市场规模虽伴随着各个技术爆发的节点因整体市场规模放大而水涨船高，但就增长率而言，其余各地区增长率在**2028年之后**，逐年下降。其原因为各主要科技国均具备一定程度上的先发优势，因此在技术爆发之后，无论是硬件还是软件都迅速占领市场，并且在庞大的资本加持下不断扩张，从而挤压了其他地区（如非洲地区）的量子计算发展。

## 上游硬件细分市场规模预测

图表 8-3 全球量子计算上游产业规模（2022&2030）  
单位：十亿美元



ICV Tank | Version Feb 2023

就2022年上游硬件的市场规模来说，最高为量子芯片的**5.45亿美元**；其次是稀释制冷机（与超高真空系统共同构成量子比特环境），为**1.93亿美元**；第三位则是射频微波设备（量子计算测控系统）**1.6亿美元**。除此之外，超高真空系统的市场规模为**0.33亿美元**及低温电子器件**0.34亿美元**也占据了一小部分市场份额。而量子芯片占最高市场份额的原因是一方面前期研发投入高，芯片研发与生产的成本都很高，芯片出货量低，导致单价居高不下；另一方面是稀缺市场供给带来的高溢价。

到2030年量子芯片的市场规模将达到**500亿美元**；其次是量子计算测控系统，市场规模将达到**210亿美元**；第三则是稀释制冷机，市场规模为**206亿美元**。除此之外，超高真空系统的市场规模增长到**32亿美元**及光学系统由0.3亿美元（2022年）增长到**50亿美元**。

2030年后，量子芯片的市场规模占比较2022年将有所下降。这主要是由于2028年之后，量子计算机将开始大规模地商业化，由此带来的量子芯片流片规模的上升使得其生产成本有所降低。

**超高真空腔的市场规模较2022年则有所提高。**其原因主要为当前离子阱尤其是中性原子路线在迈向专用量子模拟计算机的过程中起到了相当关键的作用，并且对于中性原子路线来说，最近两年的技术持续突破，未来或将占据很多的市场份额，由此带来的对于真空腔的需求也逐年增加。

对于超导、半导体路线发展来说，既有针对稀释制冷机本身发展起促进作用的，即持续扩大制冷功率以及针对量子计算机进行一定程度的适配优化。因为当前市售商用稀释制冷机大多保留了几十年前的架构模型，并未专门针对量子计算打造专属的稀释制冷机。未来随着量子比特数量的几何式增长，以及成倍增加的测控线路，这一发展趋势将体现得更为明显。

除此之外也有相反的对于稀释制冷机市场起抑制作用的，即对于整机的发展趋势，也就是向高温超导以及室温下半量子计算机的发展趋势。由于长期维持接近绝对零度的量子比特运算环境需要消耗大量的能源，因此高温乃至室温超导一直是科学家们致力于解决的重要难题。因此在以上两种原因共同作用（对冲）的影响下，**稀释制冷机的市场份额将会相对趋于稳定或逐渐降低。**

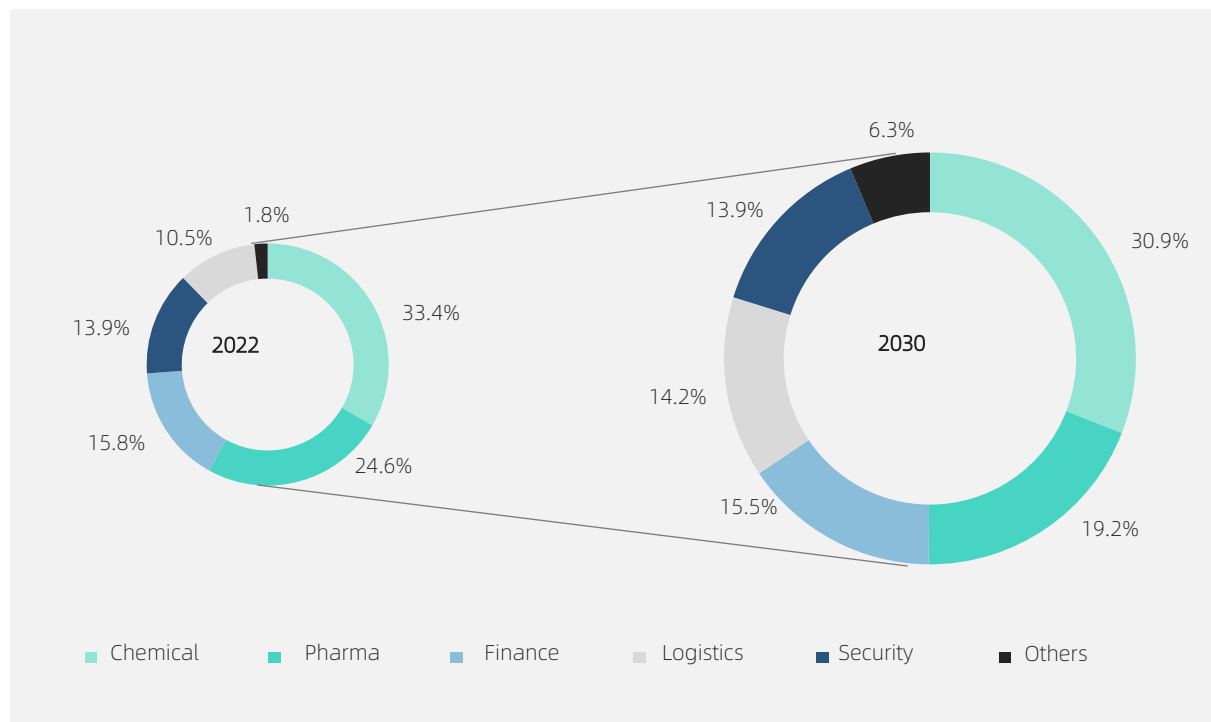
相对地，**射频微波线缆、低温电子器件尤其是射频微波设备（量子计算测控系统）的市场份额占比，在未来将持续提高。**其中一方面原因是随着量子比特数量几何程度的增加，对于测控系统的要求也越来越高，随着整体系统复杂度的增加，芯片化或者分布式等解决方案将对量子计算机最后的性能指标产生决定性的影响。另一方面考虑到量子纠错的主趋势，以及未来能够实际应用的容错量子计算机，这就对于测控系统提出了更为严苛的要求，既要解决大规模量子比特的信号串扰问题，又要同时降低系统延迟，这些因素将会不断地提升研发以及使用成本。

**激光器、单光子探测器以及其他光学组件的市场份额占比，较2022年也将会有较大幅度的提高。**其中一方面得益于光量子、离子阱以及中性原子等路线相对于超导路线量子计算的技术就绪程度的提高；另一方面则是随着未来5—10年的量子计算发展方向（即向着专用量子模拟计算的方向发展），需要光学测控系统的量子计算机的市场规模会有望有较大幅度的增长，从而使得激光器、单光子探测器以及其他光学组件的市场份额在2030年之后逐步提高。

## 下游应用市场规模预测

当下量子计算的下游应用以其在**化工领域、金融领域、药物研发领域、物流领域以及安防领域**为主。

图表 8-4 全球量子计算下游应用规模（2022~2030）



ICV Tank | Version Feb 2023

2022年，化工领域市场份额为**33.4%**，医药研发领域**24.6%**，金融领域占比达到**15.8%**，安防领域占比**13.9%**，物流领域占比为**10.5%**及其他领域占比**1.8%**。

自2027年以后整个量子计算赛道迎来高速增长，截至2030年，化工领域市场份额将变为**30.9%**，医药研发领域为**19.2%**，金融领域为**15.5%**，物流领域占比将达到**14.2%**，安防领域**13.9%**以及其他领域占比**6.3%**。



109

产业展望

## 未来量子计算的发展将集中在三个方面：

- **持续提升量子计算性能。**为了实现容错量子计算，首要考虑的就是**如何高精度地扩展量子计算系统规模**。在实现量子比特扩展的时候，比特的数量和质量都极其重要，需要每个环节（量子态的制备、操控和测量）都要保持高精度、低噪声，并且随着量子比特数目的增加，噪声和串扰等因素带来的错误也随之增加，这对量子体系的设计、加工和调控带来了巨大的挑战，仍需大量科学和工程的协同努力。
- **实现专用量子模拟机并继续探索量子计算应用。**即相干操纵数百个量子比特，应用于组合优化、量子化学、机器学习等特定问题，指导材料设计、药物开发等。从当前到2030年，全球的主要研究任务应当集中于此。
- **实现可编程通用量子计算机**，即相干操纵至少数百万个量子比特，能在经典密码破解、大数据搜索、人工智能等方面发挥巨大作用。由于量子比特容易受到环境噪声的影响而出错，对于规模化的量子比特系统，通过量子纠错来保证整个系统的正确运行是必然要求，也是一段时间内面临的主要挑战。由于技术上的难度，何时实现通用量子计算机尚不明确，国际学术界一般认为还需要15年甚至更长时间。

## 技术趋势

### 量子纠错在未来将长时间都是发展的主旋律

在各个国家争相实现量子优越性之后，量子计算正式进入含噪中等规模时代，如何理解和克服噪声成为量子计算迈向实用化的研究重点。目前处理这些计算中的错误有几种不同的方法，即将错误处理分为三个核心部分，**错误抑制、错误缓解和纠错**。

#### 错误抑制

首先错误抑制是最基本的错误处理水平。大多数情况下，它都代表在最接近硬件的水平上处理错误。这些技术是在用户不知道的情况下进行的，通常包括改变或增加控制信号，以确保处理器返回期望的结果。

错误抑制技术可以追溯到几十年前，并在一些最早的可控量子系统中得到发展，如核磁共振装置，它是磁共振成像的核心。量子计算机已经采用了其中的一些技术，例如自旋回波，这是一个脉冲序列，可以帮助重新聚焦一个量子比特，使其保持更长时间的量子状态。此外通过绝热门（DRAG）的衍生去除在标准脉冲形状中增加的一个成分，以减少进入高于计算的0和1状态的量子比特。例如IBM的Qiskit Pulse就允许用户生成自定义脉冲，以便自己探索错误抑制。

错误缓解

而错误缓解则是使用电路集成的输出来减少或消除噪声在估计期望值时的影响。

概率错误消除模拟噪声反转通道以抵消噪声，使我们能够计算无噪声（无偏）的期望值。目前IBM的团队正在探索和开发一个不同的错误缓解技术组合。例如，概率误差消除，从一个电路集合中取样，平均而言，模仿一个噪音倒置通道来消除噪声。这个过程有点像降噪耳机的工作方式，但它的工作方式是平均的，而不是逐次取消噪声。

纠错

量子纠错则是希望实现的最终目标。容错量子计算，即建立系统冗余度，这样即使有几个量子比特出现错误，系统仍然会返回准确的答案。

纠错本是经典计算中的一项标准技术，信息用冗余进行编码，可以检查是否发生了错误。量子纠错也是同样的想法，但要注意的是，必须考虑到量子计算一些新的错误类型。在量子纠错中，将单个量子比特的值（称为逻辑量子比特）在多个物理量子比特之间进行编码实施门运算，并将物理量子比特的结构视为基本上没有错误的逻辑量子比特。通过执行一组特定的操作和测量（被称为纠错代码），以检测和纠正错误。而根据阈值定理，在应用纠错之前，所用的硬件必须达到最小错误率。

回顾过去的几年，各技术路线对量子纠错的重视程度逐年升高。

2020

9月

Google计划使用通过表面代码进行纠错；

2021

10月

马里兰大学和IonQ在量子纠错方面取得了重大突破，使用多个保真度较低的物理量子比特创建了一个保真度更高的逻辑量子比特。同年12月，Quantinuum首次在业界实现量子计算机的实时检测和纠正错误。

到了2022年，各国的量子研究团队在纠错上都有了更新的进展与突破，使得纠错这一未来量子计算的主要发展方向变得愈发明朗。

ETH zürich

2月

苏黎世联邦理工学院（ETH Zurich）改进了基于Gottesman-Kitaev-Preskill (GKP) 码的量子纠错方案，从而将量子态的寿命延长了三倍。



ETH zürich

7月

中国科学技术大学与苏黎世瑞士联邦理工学院（ETH）合作首次实现了表面码的重复纠错。



8月

日本RIKEN新兴物质科学中心通过在三量子比特硅基量子计算系统中演示纠错，为实现实用的量子计算机铺平道路。



9月

瑞典查尔姆斯理工大学成功的开发了一种在三维空腔中控制光量子态的高保真生成技术。

从以上量子计算赛道纠错的发展历程上来看，预计未来5—10年，量子纠错都将是整个赛道发展的主旋律。随着量子比特数量屡创新高，人们逐渐看到了量子计算在未来各个领域应用的无限可能性。

从整个2022年的技术进展以及行业总的发展趋势来看，虽然量子比特数量目前仍旧没有达到数千、数万的级别，也就是说其实际的应用领域依然有限，对于纠错的要求还没有到很高的程度，（即当前对量子比特数量的要求以及重要程度仍高于量子纠错），但可以清楚地看到，很多企业与研究机构都在未雨绸缪，积极的提前参与到对量子纠错预先的布局中来。

### 组合、优化与量子材料工具箱

伴随着纠错的主趋势，测控系统的模块化及芯片集成化等也都在同步发展中。从量子芯片的发展历程上来看，集成与模块化的发展趋势更为明显。

- 以IBM的超导量子芯片Osprey为例，它的多级布线架构，即把量子比特、谐振腔以及控制线装在不同层的芯片上。这样做好处是可以提供更多空间来放置比特，支撑芯片的大面积扩展。当量子比特数量特别少的时候，量子比特、谐振腔以及射频线是可以在同一层的，但量子比特达到一定数量之后，这会严重影响量子比特的排列。量子比特本身很脆弱，特别容易受到干扰，如量子芯片自身的一些缺陷，环境温度的噪声，更重要的还包括射频线、控制线的射频信号串扰。所以从这一点来说，如果能把射频线和量子比特分层，加之屏蔽技术，就能大大减少射频信号对量子比特的串扰。
- 同为超导线路的Rigetti对于芯片的集成模块化则给出了另一种解决方案。它们认为单芯片的处理器其每一代都要重新设计，而且组件的需求量也随着量子比特数的增加而呈指数级增长，这样的芯片模式它扩展是非常缓慢而且昂贵的。因此它们设计出了模块化的量子芯片，它的大规模处理器由相同的芯片构成，这样的一种模块化、可量产、可扩展的多芯片处理器就可以很好地降本增效，也可以从根本上解决量子比特成规模之后，将其都坐在一张芯片上所带来的串扰问题。

量子材料工具箱也是最近一个热议的话题。

在过去的几年里，科学家们一直致力于找到超导量子计算的噪声来源。在超导量子计算中，硅常被用作衬底，或者作为芯片的基础。然而，美国能源部费米国家加速器实验室超导量子材料和系统中心（SQMS）的研究人员已经证明，硅衬底可能对量子处理器的性能有损。超导量子比特退相干时间较短，对外界的干扰十分敏感，其产生的量子比特很容易受外界环境影响而退相干。在2022年9月终于确定了用蓝宝石做衬底可以减小这种噪声，延长量子比特的相干时间。虽然从目前来看，任何的衬底材料都避免不了噪声，但就像人们始终在探寻高温超导材料一样，哪怕只是让超导的临界温度再往上提升零点几度，对于整个行业来说都是有重要意义的。

当然其他路线也同样有模块化、集成化以及设备优化等一系列进展例。如光量子路线中的硅基光量子芯片目前就在力求把单光子探测器集成到芯片中，提高效率的同时也减少了能量损耗，在此因篇幅有限就不过多赘述了。

综上所述，一切的模块化、包括对于芯片结构的设计与优化、新的超低噪声的芯片材料等等，都将服务于未来的主旋律——量子纠错。无论是解决量子比特串扰问题，还是解决微纳加工工艺或是材料本身所导致的噪声问题，本质上都是降低计算错误率，为规模化的容错量子计算机做铺垫。

### 关于专用量子计算机

量子模拟器将比通用量子计算机开发得更早，因此更需要立即进行相应规划；战略投资和政府监督与控制对于量子模拟来说都至关重要。ICV认为，到2030年之前，全球量子模拟器的发展目标如下：

2023—2027年，在一系列任务的模拟中展示“量子优势”——这被视为一个重要的里程碑，但不是实际应用。提高控制和可扩展性水平，进一步降低各种平台的熵。开发量子经典混合架构，允许量子模拟器处理工业和研究创新相关的应用。扩大和加强供应链以及关键使能技术的开发。启动最有前途的量子模拟器的认证和基准测试。开发软件解决方案，以配合量子模拟器的发展及其特定的应用重点。

2028—2030年，与最终用户建立紧密联系，开发更多实际应用。设计适合量子模拟器的错误纠正和缓解技术。开发量子模拟器，提供更高程度的控制和可编程性。在工业和量子模拟研究之间建立一座桥梁，用模拟范例的语言来翻译工业的问题。为量子模拟器的认证和基准测试提供一般方法。

## 与HPC相融合

在NISQ时代，混合量子 - 经典方法被认为是解决实际问题的重要途径。而在2022年，行业进一步明确量子计算与高性能计算中心（HPC）的结合。

在这方面，欧洲开了全球之先河，芬兰公司IQM开发的5量子比特QPU已经被部署在HPC中心，德国莱布尼茨超级计算中心正在评估百亿亿级超级计算机以及由量子 and AI系统提供的加速计算。这种量子+HPC的结合可以很好地利用当前的变分算法。芯片巨头英伟达也在今年推出了量子优化设备架构QODA，被誉为量子领域的CUDA架构，可以将量子计算与经典计算结合在一起。

预计2023年，这一趋势将进一步凸显，例如中国的超算团队开始参与量子计算研究，特别是获得2021年度戈登贝尔奖的国家超级计算无锡中心，在新一代神威超级计算机中实现了超大规模量子随机电路实时模拟。因此，量子计算机走进国家超算中心将指日可待。

## 量子硬件辅助

纵观整个量子计算的硬件系统，可以预见在不久的将来，随着量子比特数目成倍递增，硬件辅助或将迎来一轮爆发式的增长。就目前来看，虽然有不少科研机构乃至量子公司布局了各式各样的辅助系统，但从结果来看，ICV预计量子存储器的发展将最为迅猛。

在冯诺依曼架构的经典计算机中，存储器扮演了一个重要的角色，即用来保存处理器的中间计算结果。量子存储器技术难度太大，目前大多量子计算实验研究都没有引入量子存储器。直到2021年底，法国国家科学中心证明使用配备量子存储器的量子计算机，可以大幅度地降低量子计算机对物理量子比特数目的需求。

此前，有关量子存储器的研究主要聚焦于量子通信领域的应用，比如基于多模式量子存储建立量子中继，从而构建远程的量子互联网，或是基于超长寿命量子存储实现可移动的量子U盘。而法国团队的这一成果则定量地展现了量子存储器在量子计算机中的价值，成功推广了量子存储器的应用范围。

从宏观产业链角度上来看，量子存储器虽然只占很小的一个部分，但却十分重要，2023年IBM计划推出1000个量子比特以上的超导量子芯片，在这个数量级之上，分布式的量子计算以及大规模的量子互联，量子存储器都将是一个重要的组成部分。

目前，美国在这个领域处于全球领先地位，代表企业有Qunnect等，其次是以法国WeLinQ所代表的欧洲。2022年底，Qunnect实现了美国第一个商业量子网络，也是第一个仅使用小型室温存储器的网络。在未来，随着量子技术的不断发展，其他量子硬件辅助设备如量子网络设备、量子接口、高维量子计算，分子气体的新型冷却设备等也会受益于对各个技术路线的探索，得到很好的发展，这也是未来上游硬件市场除传统核心部件外的又一强有力增长点。

## 政策趋势

作为前沿科技和未来产业的重要领域，量子信息科技需要得到各个国家政府的大力支持，才有可能越过死亡陷阱。

当前及未来，可以肯定的是，中国、美国和欧洲将全力推动量子信息相关的政策支持，其中，中国和美国处于两强对抗长周期内，两个国家的政策将更具体，更有针对性和执行力。



- 美国公开发布的政策最多，也最为全面。美国政府多个部门及相关组织频发发布报告，旨在提升对量子科技的认识和重视，这些政府部门及组织包括，国家人工智能安全委员会（NSCAI）、政府问责局（GAO）、国家反情报与安全中心（NCSC）、国家科学技术委员会（NSTC）等。从各类政策中可以看出，量子技术已被美国认定为中美博弈下，需要重点发展的技术之一。



- 中国在《国务院政府工作报告》《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》《国家标准化发展纲要》《“十四五”软件和信息技术服务业发展规划》《“十四五”国家信息化规划》政策中都有提及量子政策，其中有20多个省市将量子科技写进地方的“十四五”规划。

总的来说，对于美国、中国和欧盟等国家，量子科技政策将从国家层面进一步落实到分管国防、工业、科技等部门，由这些下一级部门发布更为针对性的政策。对于尚未发布量子科技政策的国家，以及尚未将量子科技上升到国家层面的国家和地区，随着其技术能力和意识的提升，也将有望将量子科技升至更高的关注层面。

## 融资趋势

受限于全球经济复苏的速度与规模，2023年将对量子信息特别是量子计算产业带来较大的程度的不确定性，这主要体现在两个方面。

### 2023年融资将变得更难

在本报告之前的章节中已说明，量子计算目前仍处于很早期阶段，市场化资本机构无法给予长期的支持，美国通过SPAC方式上市的几家公司在2022年严重打击投资者信心，美国拥有全球最为完善的资本市场退出体系，如美国无法给全球做出良好的投资标杆，那其他国家投资机构也将很难跟进。

因此，ICV预测2022年各个国家的量子计算企业都需要采取更为保守的策略来应对资金不足，2023年他们很难再获得如2021年那般的市场追捧了。

## 裁员、倒闭或引发的收并购将发生

目前及可预见的未来3年，量子计算行业的企业都无法形成正向的现金流，企业经营需要外部资金的注入，那些受到政府青睐的龙头企业将有希望存活下来，他们也可以通过集团公司的大力支持来获得进一步扩展（比如IBM、Google和HUAWEI等），但创业型公司会变得很难，裁员会成为2023年的关键词，更悲观的是部分企业将有可能因为现金流断裂而倒闭，或者被迫寻求行业并购。

自2021年1月霍尼韦尔量子计算部门与剑桥量子公司合并以来，2022年掀起了量子企业合并的一个小高潮，创新药物研发商Odyssey收购了英国量子计算初创公司Rahko的多数股权，Pasqal收购了Qu&Co，ColdQuanta收购了Super.tech，量子计算软件公司QCI收购了光量子系统公司QPhoton……再往前数，SK电讯收购了量子通信公司IDQ，iXblue收购了量子重力仪公司Muquans，是德科技收购了Quantum Benchmark，等等。有合并也有分拆，例如SandboxAQ从Alphabet独立出来，当然目前量子行业更多的分拆公司还是从科研机构中独立出来。

总之，全行业需要在2023年做好紧衣缩食的准备，资金的使用要更加谨慎，团队不宜扩张，变现能力要加强。随着企业合并加剧、新公司不断涌现、更多公司面临资金危机，2023年量子行业可能迎来大洗牌。

## 商业趋势

### 有意思的量子教育市场

目前全球量子计算人才短缺，亟须培养更多的人才以加速推进量子计算的发展。目前已有研究机构、科技巨头和初创企业布局量子教育业务。量子教育产品可以人以学生及广泛的大众通过更为直观的方式对量子计算有进一步了解。丰富校园物理实验课程，激发学生对量子计算学科的兴趣，带动更多人未来从事这一领域工作，有助于人才培养。



- **IBM**的Qiskit中开辟了教育模块及暑期学校，通过多样化的形式鼓励开发者使用Qiskit。
- **微软**在GitHub创建Quantum Katas，包含一系列使用Q#语言的编程练习，与微软量子开发工具包一起使用。
- **MIT**开设Quantum Practitioner Curriculum，拥有量子计算基础视频课程，以及量子计算应用程序课程，通过所有课程的学员将获得MIT的证书。



- **本源量子**推出在线教育平台“本源溯知”，出版量子计算与编程教材《量子计算与编程入门》，搭建科普馆。
- **量旋科技**推出2比特桌面型核磁共振量子计算机“双子座”及2比特便携型核磁共振量子计算机“双子座mini”。
- **启科量子**推出离子阱量子教学机产品。中科酷原推出桌面磁光阱教学仪器。这些设备已在中国的多所学校使用，甚至销往挪威、澳大利亚等国家。



- 荷兰量子研究机构QuTech开设QuTech Academy，依托代尔夫特理工大学的教育资源，提供学士、硕士、博士阶段的量子教育，以及与在线课程网站合作，向公众开放4门课程。

从地域来看，美国、中国、欧洲等国都已开展K12量子计算教育。从实施方式来看，美国在开发层面拥有较为深厚的积累，以这种增加使用者的方式，甚至未来可以形成开发人员的使用习惯；中国主要以教育机的方式推广；欧洲一些国家以开辟专门的课程推广通道或人才培养计划，增加受量子教育的人群。

未来较长时间内，量子劳动力都是缺乏的，量子教育市场也将推出更多样的教育产品形式，以补充量子劳动力。

## 量子芯片制备的半导体模式

在量子芯片设计与制造方面，未来是否会出现，目前成熟的半导体行业所有的IDM和Fabless模式呢？答案是肯定的。

目前在芯片制造方面，其制造过程主要是在实验室完成的，但有一些领先的量子计算团队已经在工厂制造量子芯片，例如，Google“悬铃木”量子芯片就是在加州大学圣芭芭拉分校（UCSB）的一家工厂制造的。也有一些公司开始搭建自己的专用芯片生产线，比如中国的本源量子公司自主建设的两大实验室——量子芯片制造封装实验室和量子计算组装测试实验室正式启用。

这些有自己全套量子芯片流片工艺生产线的公司来说，由于目前下游市场尚未完全打开，产能并未全负荷运转，因此量子芯片的代加工，即为更多没有自己独立芯片生产线的量子初创公司提供各种量子芯片的流片服务，也是一个整机企业未来的发展趋势。

除此之外，还有像荷兰量子初创公司QuantWare的模式，他们是世界上第一家对外销售量子处理器（QPU）的公司，相当于传统计算行业中英特尔扮演的角色，这将带来量子计算商业模式变革。

### 国际竞争趋势

令人欣喜的是，在过去的一年，已经看到有越来越多不同国家的大学、科研机构以及公司企业间亲密合作，共同完成对于量子计算行业某一前沿课题的研究。两国、三国，甚至更多国家之间的科研合作比比皆是。

但是从众多相互合作的国家中，看不到中美两国间互相合作的身影。目前中美之间的最大竞争就在科技领域，尤其是如量子计算这样的前沿科技领域。例如在2021年美国国家反情报与安全中心（NCSC）发布的报告《战略竞争对手的挑战和威胁》中，就明确提到“包括人工智能、量子信息科技、生物技术、半导体和自主系统在内的5个关键领域将决定中国是否超越美国成为超级大国。” NCSC在报告中称，中国的目标是到2030年在各个新兴技术领域取得领导地位。中国已经成为美国的主要战略竞争对手，因为中国拥有充足的资源和全面的战略来推动技术进步。

2022年10月，美国政府一份可能受到出口管制的关键和新兴技术清单显示，除芯片外，第二轮限制很可能包括量子设备的材料、同位素和制造技术，后量子密码，以及涉及量子传感和网络的技术。如果这些出口管制得到批准，这标志着中美科技战的升级，以及对量子计算竞争更积极的信号。而早在5月，白宫就发布了一份备忘录，指示美国联邦机构确保该国在量子信息科学领域保持全球领先地位。该备忘录概述了对手国家在量子计算方面获得优势的安全影响，特别是关于“与密码分析有关的量子计算机（CRQC）”将如何能够破解美国数字系统的公钥密码。

而这些与量子有关的新出口管制将代表美国和中国之间的“真正深化的分歧”。目前来看，美中两国两个在广泛的问题上属于对彼此几乎没有信任的国家，而量子计算的潜在力量可以给美国带来非常多的霸权优势。

不过，量子信息科技对于中美来说是公平的，美国没有太多先发优势，至少目前中国企业没有被落下太多。但客观来说，中国最大的问题来自生态心理，中国需要在内部建立一个互相信任和充分合作的系统，而不是现在所谓的全栈式量子计算机公司，不断抢食上游供应商的市场，完全是资源浪费和目标错位。

在ICV，我们对新技术充满好奇，我们努力提供最强大的市场数据和洞察力，以帮助我们的客户做出正确的战略决策。

我们在最广泛的资本密集型行业 and 市场中汇集了最深入的情报。通过连接不同变量的数据，我们的分析师和行业专家为我们的客户提供了一个更丰富、高度整合的世界观。



光子盒创立于2020年2月，作为一家量子产业服务平台，光子盒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。

光子盒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。

未来，光子盒将继续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。

| 时间      | 国家    | 机构/企业                          | 主要进展                                                                                    |
|---------|-------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.03 | 中国    | 阿里巴巴达摩院                        | 设计并制造出两比特fluxonium量子处理器芯片，实现单比特操控精度99.97%，两比特iSWAP门操控精度最高达99.72%，在此类比特中在当时达到全球最佳水平      |
| 2022.04 | 美国    | IBM                            | Falconr10量子处理器Prague的量子体积（QV）拓展到256，提升了量子计算机的整体能力和性能                                    |
| 2022.05 | 美国    | IBM                            | 进一步优化并实现更高数量的QV—Falcon r10量子处理器Prague实现了512QV                                           |
| 2022.05 | 美国    | 劳伦斯伯克利国家实验室                    | 在超导量子信息处理器中进行三量子比特高保真iToffoli本机门的首次实验演示                                                 |
| 2022.06 | 美国    | 科罗拉多大学、NIST                    | 使用一片极薄的氮化硅将超导量子比特发出的信号转换为可见光——这种光已经通过光纤电缆在城市之间传输数字信号，同时不会在此过程中破坏量子比特，为量子比特互联网铺平道路       |
| 2022.07 | 中国    | 南方科技大学量子科学与工程研究院               | 提出并实现一种可扩展的消除比特间残余ZZ相互作用的方法，该方法具有明显的扩展性优势，有望在未来大规模超导量子处理器中发挥重要的作用                       |
| 2022.09 | 美国    | 能源部费米国家加速器实验室超导量子材料和系统中心（SQMS） | 证明硅衬底可能对量子处理器的性能有损，使用的蓝宝石是一种比硅更好的衬底                                                     |
| 2022.09 | 美国    | IBM                            | 开发出一种新型超导量子比特——“弱可调谐量子比特”（WTQ），有可能在下一代超导量子处理器中取代transmon量子比特                            |
| 2022.10 | 美国、中国 | 亚利桑那州立大学、浙江大学                  | 首次证明在可编程的固态超导处理器中，大量的量子比特可以被调整为相互作用状态，同时在长时间内保持相干性                                      |
| 2022.11 | 中国    | 华为                             | 设计的“超导量子芯片”专利获得国家知识产权局批准（CN115271077A），其降低了量子比特之间的串扰                                    |
| 2022.11 | 美国    | IBM                            | 推出拥有433个量子比特Osprey芯片，是其之前在超导芯片上保持的最高量子比特数量记录的三倍                                         |
| 2022.11 | 美国    | 苏黎世联邦理工学院                      | 证明扭曲的石墨烯可用于制造约瑟夫森结（一种超导器件的基本组成部分）                                                       |
| 2022.11 | 中国    | 中国科学院物理研究所                     | 展示拥有43量子比特的“庄子”超导量子处理器                                                                  |
| 2022.11 | 芬兰    | 阿尔托大学、IQM、国家技术研究中心（VTT）        | 发现一种新的unimon超导量子比特，实现第一个具有99.9%保真度的unimon量子逻辑门，是量子计算机的重一个里程碑                            |
| 2022.11 | 中国    | 清华大学、浙江大学                      | 展示一款121比特超导量子处理器，并展示了非阿贝尔交换统计，刷新了中国超导量子比特数目的纪录                                          |
| 2022.11 | 俄罗斯   | 国家研究型技术大学、莫斯科物理技术学院            | 俄罗斯首次实现了保真度高于97%的Controlled-Z门的四量子比特处理器                                                 |
| 2022.11 | 美国    | IBM T.J.Watson Research Center | 利用全微波技术，揭示先进的基于超导量子比特的系统中的动力学和相关性                                                       |
| 2022.11 | 中国    | 北京量子信息科学研究院、清华大学               | 设计出目前具有最低功耗水平的双通道量子比特控制芯片，是首个公开报道的集成化量子比特控制芯片                                           |
| 2022.11 | 中国    | 成都中微达信科技有限公司                   | 推出全新芯片化低温低噪声放大器（ZW-LNA2.4-9A）。该产品可在4K环境温度下工作，具有低功耗、高增益和低噪声等主要技术性能特征                     |
| 2022.11 | 中国    | 中国电科电科院                        | 在珠海航展首次展出20比特超导量子计算机。该机能够演示验证小规模典型量子算法，且支持图形界面的人机交互编程，为量子计算在生物医药、密码安全等领域的科学研究与应用探索奠定了基础 |

| 时间      | 国家  | 机构/企业      | 主要进展                                                                              |
|---------|-----|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.03 | 美国  | Quantinuum | 离子阱系统采用钡离子量子比特将SPAM保真度提高到99.9904%                                                 |
| 2022.03 | 美国  | IonQ       | 公布其新型钡基量子计算机的读出保真度，即状态制备和测量（SPAM）保真度，从99.5%提高到99.96%                              |
| 2022.03 | 以色列 | 魏茨曼科学研究所   | 推出该国第一台5量子比特的离子阱量子计算机                                                             |
| 2022.04 | 美国  | Quantinuum | 推出System Model H1-2的量子计算系统的性能翻了一番，发布4096量子体积（QV）的商用量子计算机                          |
| 2022.05 | 美国  | IonQ       | 发布最新一代的包含32个量子比特的量子系统IonQ Forte                                                   |
| 2022.06 | 美国  | Quantinuum | 对量子计算机系统System Model H1技术进行重大升级，其中包括扩展到20个全连接的量子比特，并增加了可以并行完成的量子操作的数量，达到了8192量子体积 |
| 2022.09 | 中国  | 清华大学交叉信息院  | 借助离子量子比特首次实现了大规模杰恩斯-卡明斯-哈伯德（Jaynes-Cummings-Hubbard）模型的量子模拟，以研究非马尔可夫量子多体动力学过程     |
| 2022.10 | 美国  | Quantinuum | 找到优化和自动化量子比特重用的新方法，可以最大限度地提高在具有有限数量量子比特的量子计算机上运行的程序的大小                            |

| 时间      | 国家          | 机构/企业                       | 主要进展                                                                                      |
|---------|-------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.03 | 中国          | 北京大学、人工微结构和介观物理国家重点实验室等     | 实现了基于光量子的多维量子计算芯片，并证明高维量子计算具有比二进制量子比特编码的量子计算更大的计算容量、更高的计算精度和更快的计算速度等显著优势，有望加速构建大尺度光子量子计算机 |
| 2022.03 | 荷兰          | QuiX Quantum                | 推出20量子模式（qumode）处理器，在规模和质量方面都优于上一代12模式光子量子处理器                                             |
| 2022.05 | 德国          | 马克斯普朗克量子光学研究所               | 首次成功实现了平均效率超过40%的光学双量子比特门                                                                 |
| 2022.06 | 加拿大         | Xanadu                      | 使用最新可编程光子量子计算机Borealis（北极星）完成高斯玻色采样实验，展示量子计算优越性                                           |
| 2022.06 | 德国、澳大利亚、新加坡 | 帕德博恩大学、国立大学和科技与设计大学         | 开发一种操纵光线的新技术，可作为未来光子量子计算机的基础                                                              |
| 2022.07 | 中国          | 中国科学技术大学                    | 揭示了集成光子器件中单光子阻塞新原理                                                                        |
| 2022.08 | 德国          | 马克斯普朗克量子光学研究所               | 实现了有效地纠缠14个光子的新纪录                                                                         |
| 2022.09 | 法国、意大利      | 国家科学研究中心、纳米科学与纳米技术中心、米兰理工大学 | 开发一种新的光学设备（本质上是互连波导的排列，可以作为量子光学实验室的诊断工具），首次量化多个光子的不可区分性                                   |
| 2022.11 | 法国          | Quadela                     | 推出欧洲第一台在线访问的光量子计算机                                                                        |

|         |         |                       |                                                            |
|---------|---------|-----------------------|------------------------------------------------------------|
| 2022.03 | 美国      | 芝加哥大学                 | 使用512个光镊捕获铷原子和铯原子各256个，观察到两个元素之间的串扰可以忽略不计                  |
| 2022.05 | 美国      | 哈佛大学、QuEra Computing等 | 利用289量子比特展示了优化问题中的量子加速                                     |
| 2022.05 | 美国      | 普林斯顿大学                | 展示一种用于中性原子量子计算机的新型量子比特（镱171原子），其特性能够稳健地存储和操纵量子信息           |
| 2022.05 | 美国      | Atom Computing        | 打破中性原子量子计算机Phoenix的相干时间记录，T2为40±7秒——在当时是商业平台上有史以来最长的相干时间   |
| 2022.07 | 中国、意大利等 | 中国科大与意大利特伦托大学等        | 首次在实验上证实规范对称性约束下量子多体热化导致的初态信息“丢失”，取得了利用量子模拟方法求解复杂物理问题的重要进展 |
| 2022.07 | 法国      | Pasqal、查尔斯·法布里实验室等    | 在光镊中实现了最多361个原子的大型组装阵列，证实了扩展中性原子量子比特的能力                    |
| 2022.08 | 日本      | 日本国立自然科学研究所           | 实现6.5纳秒超快双量子比特门，打破了世界纪录                                    |
| 2022.09 | 法国      | Pasqal                | 推出324个原子（量子比特）的量子处理器                                       |
| 2022.11 | 美国      | QuEra                 | QuEra在AWS上推出256量子比特模拟量子处理器，这是可通过公共云供应商获得的首批基于中性原子的处理器之一    |
| 2022.11 | 英国      | M Squared             | 公布了英国第一台商用中性原子量子计算机的原型——Maxwell系统，这代表英国在商业可行的量子硬件方面的关键里程碑  |

| 时间      | 国家   | 机构/企业                     | 主要进展                                                                                                                               |
|---------|------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 中国   | 中国科学技术大学                  | 实现半导体量子比特的超快操控                                                                                                                     |
| 2022.04 | 美国   | 普林斯顿大学                    | 首次实现99.9%以上的半导体双量子比特门保真度                                                                                                           |
| 2022.07 | 英国   | 谢菲尔德大学                    | 研究了InGaAs半导体量子点，证明即使在与电子中心自旋不均匀耦合的情况下，也有毫秒长的集体核自旋相干性                                                                               |
| 2022.09 | 澳大利亚 | Silicon Quantum Computing | 新创常温、抗干扰自旋量子比特读出技术SQC团队提出并展示了一种用于半导体自旋量子比特的读出技术，该技术可以在低场/高温环境中实现高读出保真度，并且对电噪声具有鲁棒性。读出协议是能量选择自旋读出和时间相关自旋读出的组合，并提供了优于ESM和TSM的许多实用优势。 |
| 2022.09 | 德国   | 利希研究中心、亚琛工业大学             | 成功将电子（量子信息的载体）在一个半导体量子芯片上传输了几微米，这种“量子总线”（quantum bus）可能是扩展到数百万量子比特的关键部件                                                            |
| 2022.09 | 澳大利亚 | 新南威尔士大学                   | 将量子计算处理器保存信息的时间（相干时间）延长了100倍以上                                                                                                     |
| 2022.10 | 澳大利亚 | Archer Materials          | 首次使用互补金属氧化物半导体（CMOS）技术来检测量子信息                                                                                                      |
| 2022.10 | 美国   | 英特尔                       | 硅自旋（半导体）量子比特芯片良率高达95%，并刷新了硅自旋量子比特数量的新纪录——12个                                                                                       |
| 2022.12 | 中国   | 中科院大连化物所                  | 实现室温下对低成本溶液法制备的胶体量子点的自旋相干操控，这一成果在量子信息科学、超快光学相干操控等领域具有重要意义                                                                          |

| 时间      | 国家 | 机构/企业                    | 主要进展                                                                                      |
|---------|----|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 瑞士 | 保罗谢勒研究所 (PSI)            | 证明锑化铟适合用作拓扑量子比特的载体材料                                                                      |
| 2022.02 | 瑞士 | 保罗谢勒研究所 (PSI)            | 证明了锑化铟具有在纳米线中形成所需拓扑马约拉纳费米子所需的特性                                                           |
| 2022.03 | 美国 | 微量量子材料实验室                | 通过马约拉纳零模和可测量的拓扑间隙创建和维持量子相位的能力，消除了产生拓扑量子比特的最大障碍                                            |
| 2022.06 | 中国 | 中国科学院物理研究所、北京凝聚态物理国家研究中心 | 证实大面积有序可调的马约拉纳零能模阵列可以在LiFeAs中稳定存在，为实现拓扑量子计算提供了重要的高质量研究平台                                  |
| 2022.06 | 美国 | 微软                       | 介绍一种新的适合拓扑量子比特的量子Floquet纠错码，与以前的技术水平相比，新方法将拓扑量子比特纠错所需的开销减少了10倍或更多，为扩展到一百万或更多量子比特开辟了一条可行道路 |
| 2022.11 | 美国 | 芝加哥大学                    | 发现一种用于拓扑量子计算机的新材料MnBi6Te10，可用于创建电子可以沿其移动的量子高速通道                                           |
| 2022.11 | 荷兰 | QuTech、埃因霍温科技大学          | 实验通过证明破坏库珀对可以导致两个具有相同自旋极化的电子来证明配对，是对拓扑量子比特的应用中一种很有前途的方法                                   |

| 时间      | 国家            | 机构                                          | 进展                                                                         |
|---------|---------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 中国            | 本源量子                                        | 利用量子线路加速无监督的One-ClassSVM异常检测算法，该量子异常检测算法基于量子计算的并行性原理，可快速分析识别金融风控领域企业债务违约行为 |
| 2022.04 | 奥地利           | 因斯布鲁克大学                                     | 提出使用里德堡原子实现量子近似优化算法（QAOA）的新方案。这是一种实现四量子比特门的新方法，只需几个激光脉冲完成工作                |
| 2022.02 | 中国            | 香港大学                                        | 开发了一种新的、更有效的蒙特卡罗技术量子算法，用这种算法来测量物体的Rényi纠缠熵（量子纠缠的强弱程度常利用纠缠熵来定量分析）           |
| 2022.02 | 中国            | 上海交通大学                                      | 建立了该理论方案在三维光子芯片体系中的映射，首次实验实现基于量子随机行走的哈尔随机酉矩阵，可应用于玻色采样等一系列量子信息处理模块中         |
| 2022.03 | 澳大利亚          | Q-CTRL                                      | 宣布了硬件基准测试实验的结果证明其自动纠错技术将量子计算算法在真实硬件上成功的可能性提高9000倍，超过了Q-CTRL在去年11月报告的25倍    |
| 2022.06 | 中国            | 本源量子                                        | 开发出量子mRMR算法（QmRMR），加速分析识别金融风控领域企业债务违约行为                                    |
| 2022.07 | 美国            | Zapata Computing、IonQ                       | 展示了首个量子-经典生成算法的实际和实验实现，该算法能够使用最先进的基于门的量子计算机生成手写数字的高分辨率图像                   |
| 2022.07 | 中国            | 本源量子                                        | 推出量子金融工程化阶段性成果——量子金融衍生品定价库，它是中国首个面向程序开发者和金融专业人士的专业量子金融算法库                  |
| 2022.07 | 美国            | 纽约市立大学城市学院                                  | 通过开发一种在IBM量子计算机上运行的量子算法，该团队在使用量子计算机研究和预测大量相互作用的量子粒子的状态如何随时间演变方面取得了重大进展     |
| 2022.08 | 美国            | 劳伦斯伯克利国家实验室                                 | 展示了如何优化ZZ耦合的SWAP门的网络协议执行，引入了一种用于减少量子错误的新技术，将改进网络协议在量子处理器中的实施               |
| 2022.08 | 美国            | Quantinuum                                  | 设计了一种模拟算法，使量子计算机能够用很少的量子比特模拟一个无限长的相互作用的类电子粒子链                              |
| 2022.08 | 中国            | 本源量子                                        | 宣布在高频量化交易领域提出首个量子算法——基于协整性检验的高频统计套利量子算法                                    |
| 2022.08 | 美国            | 芝加哥大学                                       | 提出了一种利用降低密度矩阵的几何结构的量子相变的通用量子计算方法是观察量子相变的一种潜在强大的方法，可用于传统计算机或量子计算机           |
| 2022.08 | 加拿大           | 1QBit                                       | 开发了神经误差缓解，这是一种基于机器学习算法的可以改善使用量子模拟获得基态估计的新策略                                |
| 2022.08 | 中国            | 清华大学、信息工程大学                                 | 通过引入阻尼，提出了一种定点遗忘的量子振幅放大算法，在对偶量子计算的框架下构建了量子电路来实现该算法                         |
| 2022.09 | 日本            | 国家信息通信技术研究<br>所、庆应义塾大学、东<br>京理科大学、东京大学      | 首次成功开发出一种系统地寻找量子计算机最优量子运算序列的方法，为提高量子计算机的性能和减少对环境的影响做出贡献                    |
| 2022.09 | 美国            | 布鲁克海文国家实验室（BNL）                             | 设计了一种新的量子算法，用于计算化学反应过程中特定构型的分子的最低能量，与现有的类似算法相比，新算法将显著提高计算反应分子中势能面的能力       |
| 2022.10 | 西班牙、美国        | Multivers Computing、Protiviti、AllyFinancial | 展示了在量子退火系统（一种寻找最佳解决方案的技术）上运行的新算法如何自动优化投资组合，并获得与传统投资组合相匹配的回报                |
| 2022.10 | 美国            | NIST、摩根大通等                                  | 精炼总结了约束优化问题，并展示了迄今为止最大的量子优化算法执行，该算法基本保留了对量子硬件的约束                           |
| 2022.10 | 英国、美国         | 布里斯托大学、Phasecraft、谷歌QuantumAI               | 研究电子系统的特性，将特性用于开发更高效的能源和太阳能电池（开发了第一个真正可扩展的算法，是研究材料电子和磁性特性的重要方法）            |
| 2022.10 | 伊朗、波兰、加拿大、西班牙 | 马什哈德费尔多西大学、克拉科夫理工大学等                        | 提出了不同的量子算法来执行不同的机器学习程序。在某些特殊情况下，量子算法的执行时间与经典算法相比将呈指数级减少                    |
| 2022.10 | 英国            | 曼彻斯特大学                                      | 该团队首次为分子（必须包含可单独寻址、相互作用的量子比特中心）的多量子比特系统开发量子信息处理（QIP）算法。                    |
| 2022.10 | 以色列           | Classiq                                     | 与航空发动机制造商罗尔斯·罗伊斯（罗罗公司）合作开发量子算法，以加快其工程工作中模拟的计算流体力学                          |
| 2022.11 | 中国            | 深圳量子科学与工程研究院                                | 提出并在实验上实现了一种易扩展的量子版本的逻辑“与”（AND）门，大幅降低了在量子系统里实现与逻辑的硬件代价，为一系列关键量子算法的实现奠定了基础  |
| 2022.11 | 英国            | Riverlane                                   | 验证算法的改进可以将量子计算的成成本降低几个数量级，并且可以改变量子计算机的潜在能力                                 |
| 2022.11 | 日本            | Quemix                                      | 日本量子计算公司Quemix宣布，使用量子计算机的随机虚时间演化算法（PITE）可以比当前方法的计算机更快地进行量子化学计算             |
| 2022.11 | 日本            | 大阪市立大学                                      | 成功扩展了量子相位差估计算法，这是一种用于直接计算能隙的通用量子算法，能够直接计算两种不同分子几何形状之间的能量差异                 |

| 时间      | 国家  | 机构                              | 进展                                                                                                                                                             |
|---------|-----|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 中国  | 本源量子                            | 公司自主研发的量子计算化学软件—ChemiQV2.2版更新上线，新增了“分子动力学模拟”、“二面角扫描”等全新功能                                                                                                      |
| 2022.01 | 加拿大 | Agnostiq                        | 发布Covalent——专门为量子计算和HPC技术设计的开源工作流编排平台                                                                                                                          |
| 2022.01 | 印度  | BosonQPsi                       | 推出由量子驱动的计算机辅助工程（CAE）软件套件——BQPhy™的首款概念设计，主要用旗下混合量子经典算法的新型工程求解器来加速量子模拟                                                                                           |
| 2022.01 | 美国  | Strangeworks、Entangled Networks | 开发完整的硬件和软件解决方案以支持多量子处理器（QPU）计算                                                                                                                                 |
| 2022.02 | 中国  | 国防科技大学、华东师范大学软件学院               | 在中国科学院量子信息与量子科技创新研究院量子计算云平台上新增“青果（Quingo）”量子编程语言                                                                                                               |
| 2022.02 | 中国  | 中科院软件研究所                        | 发布全新量子计算编程软件——isQ-Core，目前isq-core支持中科院量子信息与量子科技创新研究院的12比特量子硬件平台，标志国产量子计算软硬件结合迈出重要一步                                                                            |
| 2022.05 | 中国  | 腾讯量子实验室                         | TensorCircuit是腾讯量子实验室发布的一款量子计算领域的开源软件产品，它是面向有噪声中等规模量子计算（NISQ）的下一代量子计算软件                                                                                        |
| 2022.05 | 美国  | Quantinuum                      | 软件团队帮助计算化学家利用量子计算机的强大功能来解决他们的一些难题，软件包含更高级别的例程，为复杂的分子和材料模拟提供了许多关键算法                                                                                             |
| 2022.03 | 美国  | IBM、AWS                         | 客户可在Amazon Braket上所有基于门的设备上运行OpenQASM程序，客户可以从一系列开源最终用户库中进行选择                                                                                                   |
| 2022.07 | 美国  | 英伟达                             | 推出QODA（量子优化设备架构）的新平台，该平台支持为混合环境开发和编译量子经典程序，包括连接在一起的经典中央处理器（CPU）、图形处理器（GPU）和量子处理器（QPU）                                                                          |
| 2022.07 | 美国  | QuEra Computing                 | 发布了公开测试版的Brocade程序，它是一个开源的Julia语言包，用于基于中性原子架构的量子计算和量子动力学，允许用户在模拟模式下模拟量子处理器                                                                                     |
| 2022.07 | 美国  | 谷歌QuantumAI                     | 发布开源量子编程框架Cirq的第一个完整版本，它是为近期的量子计算机设计的一个用于编写、运行和分析程序结果的Python框架                                                                                                 |
| 2022.08 | 西班牙 | Multiverse Computing            | 推出最新版Singularity组合优化SDK（v1.2），它结合了经典计算和量子计算的优势，特别适用于投资组合优化问题                                                                                                   |
| 2022.08 | 美国  | 亚马逊                             | 研究人员使用AWSParallelCluster（并行集群）和QuEST（量子精确模拟工具包）执行大规模量子电路模拟，演示了一个简单快速的计算资源部署，最多4096个计算实例                                                                        |
| 2022.09 | 中国  | 本源量子                            | 推出量子芯片设计工业软件（Q-EDA）本源坤元，为用户提供更为全面的，能够同时支持超导及半导体量子芯片版图自动化设计使用的平台                                                                                                |
| 2022.09 | 美国  | 英特尔                             | 加入IBM、谷歌的行列，成为一家全栈量子计算公司，现可通过英特尔开发者云平台DevCloud使用量子SDK测试版                                                                                                       |
| 2022.09 | 美国  | Quantinuum                      | 在IEEE量子周活动上发表《量子计算的测量方法》，宣布了三项重大成就。<br>H系列硬件上新的任意角度门（arbitrary angle gate）功能；<br>System model H1硬件的新QV记录；<br>Quantinuum开源的TKET——世界领先的量子软件开发工具包（SDK）的下载量超过50万次。 |
| 2022.11 | 美国  | Quantum Computing Inc.（QCI）     | QCI发布一款免费软件，使D-Wave的客户能够快速将他们的二次无约束二元优化（QUBO）问题转化为哈密顿方程，然后可以通过QCI行业领先的Dirac 1嫡量子计算（EQC）系统来解决                                                                   |

| 时间      | 国家    | 机构                      | 进展                                                                                                       |
|---------|-------|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.02 | 德国    | 苏黎世联邦理工学院               | 改进了基于Gottesman-Kitaev-Preskill（GKP）码的量子纠错方案，从而将量子态的寿命延长了三倍                                               |
| 2022.07 | 中国、瑞士 | 中国科学技术大学                | 首次实现了表面码的重复纠错，使我们离实现实用的量子计算机更近了一步                                                                        |
| 2022.08 | 美国    | Quantinuum              | 表明逻辑量子比特可以胜过物理量子比特，首次展示了在两个逻辑量子比特之间的纠缠门，并以完全容错的方式使用实时纠错                                                  |
| 2022.08 | 中国    | 清华大学交叉信息研究院             | 近期利用同种离子首次实现了可以相干转换的双重量子比特编码，以克服量子计算过程中多比特之间串扰的影响，该实验验证了在各种量子操控过程中系统的串扰误差均显著低于量子纠错所要求的阈值                 |
| 2022.08 | 美国    | 耶鲁大学、威斯康星大学麦迪逊分校和普林斯顿大学 | 提出了一种在里德堡原子阵列中进行容错量子计算的方法，该方法基于将大部分自然发生的错误转换为纠错（不仅具备识别错码和纠正错码的功能，而且当错码超过纠正范围时，还可把无法纠错的信息删除）              |
| 2022.08 | 日本    | RIKEN新兴物质科学中心           | 通过在三量子比特硅基量子计算系统中演示纠错，为实现实用的量子计算机铺平道路                                                                    |
| 2022.09 | 日本    | Toppan印刷株式会社            | 开发出改进光学量子计算机纠错的技术，并且该团队专注于材料和智能卡，一直在开发量子技术以确保智能卡安全并提升医疗诊断技术                                              |
| 2022.09 | 荷兰    | QuTech量子计算研究中心          | 已经在一个完全可操作的阵列中设计出了创纪录数量的六个硅基自旋量子比特，通过新的芯片设计、自动校准程序以及量子比特初始化和读出的新方法使得这些量子比特可以实现低错误率的运行                    |
| 2022.09 | 瑞典    | 查尔姆斯理工大学                | 成功地开发了一种在三维空腔中控制光量子态的高保真生成技术，这些量子态包括薛定谔猫态、二项式态、Gottesman-Kitaev-Preskill态，以及立方相态，这一突破是向量子计算机的高效纠错迈出的重要一步 |

| 时间      | 国家  | 机构                  | 进展                                                                                                                              |
|---------|-----|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 瑞士  | 苏黎世仪器               | 推出了新一代8.5 GHz量子测控一体机SHFQC。SHFQC拥有6个控制通道、1个读取通道，可测控qubit、qutrit和ququad。仪器内即可完成反馈测控，延时300ns。配套控制软件LabOne®、LabOne QCCS和Python APIs |
| 2022.06 | 美国  | 哈佛大学约翰·保尔森工程与应用科学学院 | 首次展示了利用片上电场控制和调制声波。研究团队利用铌酸锂的独特特性构建了一个片上电声调制器，以控制在片上波导中传播的声波。通过施加电场，调制器可以控制芯片上声波的相位、幅度和频率。                                      |
| 2022.07 | 加拿大 | 西蒙菲莎大学              | 新研究表明，硅中的某些缺陷被称为T中心，它可以作为量子比特之间的光子链接。为构建硅集成的电信波段量子信息网络提供了直接机会。                                                                  |
| 2022.07 | 奥地利 | ParityQC和因斯布鲁克大学    | 开发了一种创新方法，将优化问题映射到量子设备的单个量子比特上，以实现更模块化的布局，从而实现了性能和算法运行时间之间的有效权衡，实现更大的可扩展性。                                                      |

| 时间      | 国家              | 机构                                              | 进展                                                                                                                                                  |
|---------|-----------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.06 | 瑞士              | 巴塞尔大学                                           | Philipp Treutlein教授小组的研究人员现已开发出一种基于玻璃气室内的原子气体的量子存储器。为室温系统中高带宽的量子网络实验开辟了许多进一步的可能性                                                                    |
| 2022.06 | 荷兰              | 代尔夫特理工大学（TU Delft）                              | Kavli纳米科学研究所的研究人员提出了一种策略，可用于实现对声子波导的高水平控制。研究人员表明，他们的波导可用于实现声子先进先出（FIFO）量子存储器。将来，这种量子存储器可能在电信和量子声学中具有有价值的应用                                          |
| 2022.07 | 美国              | 芝加哥大学                                           | 发明了一种“量子长笛”，就像吹笛者一样，它可以强制光子以前所未有的方式一起移动。这一突破可能为在量子计算机中实现量子存储器或新形式的纠错以及观察自然界中看不到的量子现象指明了方向                                                           |
| 2022.07 | 西班牙、意大利、英国      | 光子科学研究所（ICFO）国家研究委员会光电子与纳米技术研究院（IFN-CNR）、赫瑞瓦特大学 | 证明了光纤集成量子存储器和电信波长光子之间的纠缠。通过这种新装置，他们能够存储2μs到28μs的光子，并在存储后保持光子对的纠缠。                                                                                   |
| 2022.07 | 中国              | 中国科学技术大学和济南量子技术研究院                              | 在物理上直接相隔12.5公里的两个原子量子存储器之间建立后选择纠缠。这是迄今为止实现的最长物理分离。通过检索光子，最终存储器之间的纠缠被验证具有90%的保真度。                                                                    |
| 2022.07 | 美国              | 橡树岭国家实验室                                        | 使用中子散射来确定特定材料的原子结构是否可以承载一种称为螺旋自旋液体的新物质状态。为量子计算中被证明有前途的分子或集体量化振动，以及可以推进高密度数据存储的新型磁自旋纹理提供试验台。                                                         |
| 2022.07 | 德国              | 马克斯-普朗克量子光学研究所                                  | 开发了一种用于分子气体的新型冷却技术。它可以将极性分子冷却到几纳开尔文，它可能对量子技术有用。例如，在量子计算机中，数据可能由超冷分子存储。                                                                              |
| 2022.08 | 美国              | 麻省理工学院、哈佛大学斯坦福大学                                | 揭示了海森堡量子磁体中存在独特的螺旋自旋态，研究人员表示可以在他们的实验平台上使用超冷原子在一维中实现海森堡自旋模型的简单教科书模型捕获。这个项目的一系列研究主要目标是研究量子磁动力学，量子磁性是我们今天使用的许多技术的基础，包括内存存储设备。                          |
| 2022.08 | 丹麦              | 哥本哈根大学                                          | 报告了波长间隔超过200nm的光模态之间的高纯度爱因斯坦-波多尔斯基-罗森（EPR）状态。研究团队的方法可用于产生具有截然不同和可调波长的模态之间的纠缠，因此使其成为将长距离传播与量子存储器相结合的量子网络的宝贵工具。                                       |
| 2022.09 | 荷兰              | Qphox                                           | 正在开发一种用于超导量子处理器的光子接口，以实现量子计算机的远程扩展。未来的将被集成到一台HPC超级计算机中，为科学研究创建一个量子加速器。                                                                              |
| 2022.09 | 英国、爱尔兰、美国、日本和德国 | 牛津大学、科克大学等                                      | 研究团队创建了两种新的显微镜技术来研究室温下起作用的超导体。最终，这些研究成果可用于各种应用，例如超高效能量存储和传输、量子计算机、核聚变反应堆和高能粒子加速器。                                                                   |
| 2022.09 | 中国              | 华中科技大学、浙江大学                                     | 物理学院陈学文教授带领的量子纳米光子学团队与浙江大学光电学院时尧成教授合作，在微纳集成固态量子系统方面取得重要进展，实现硅基光子结构和单分子固态量子系统的可控微纳集成，                                                                |
| 2022.09 | 澳大利亚            | Archer Materials                                | 在开发12CQ量子芯片技术方面取得了进一步进展，在室温下实现了量子比特组件的片上电子传输。Archer一直高度关注其12CQ芯片的开发，它认为这是一项“世界首创”的技术，旨在开发面向未来的量子计算移动设备（QPMD）。                                       |
| 2022.10 | 美国              | Qunnect                                         | Qunnect将一个小量子网络试验台将位于美国布鲁克林海军造船厂的两个地点连接起来，构造出一个为革命性安全和计算而诞生的微型网络。该实验成果是美国第一个商业量子网络，也是第一个仅使用小型室温存储器的网络。该公司还将使用该网络来测试一组量子网络硬件，这些硬件可以安装在现有电信大楼的服务器机架中。 |

| 公司名称                               | 开发国家 | 主要功能简介                                                                                                                                                                                          |
|------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ProjectQ                           | 瑞士   | 由苏黎世联邦理工学院开发，ProjectQ是一个用Python实现的开源量子计算软件框架。它允许用户使用强大而直观的语法在Python中实现其量子程序。在ProjectQ工具中可以找到所有代码和文档的链接，以及一个叫做FermiLib的库来分析费米子量子模拟问题。                                                            |
| Cirq                               | 美国   | 以GitHub仓库的形式提供，是一个用于创建、编辑和调用噪声中尺度量子电路的python框架。由谷歌AI量子团队推广，虽然它不是谷歌的官方产品，但目前处于alpha发布状态。Cirq量子计算工具还可以与Open Fermion-Cirq一起使用（开发化学问题量子算法的平台）。                                                      |
| Q-CTRL Python Open Controls        | 澳大利亚 | 是由量子初创公司Q-CTRL开发的开源量子计算工具包，它使创建和部署来自公开文献的既定误差稳健的量子控制协议变得容易。该软件包的目的是成为社区开发的最全面的已发表和已测试的量子控制技术库，具有易于使用的导出功能，允许用户在自定义量子硬件、公开可用的云量子计算机和Q-CTRL产品套件上部署这些控制。                                           |
| Quantify                           | 荷兰   | Quantify是一个开源的BSD4许可平台，由荷兰的初创公司Qblox和Orange Quantum Systems发起。其中Quantify-Core是一个用于执行物理实验的数据采集平台，Quantify-Scheduler是一个开源的混合调度器，结合了脉冲级和门级的量子比特控制。Quantify工具与API一起提供，可以在SCPI、python或QCoDeS层面上进行接口。 |
| INTEL QUANTUM SIMULATOR            | 美国   | 英特尔量子模拟器，之前叫qHiPSTER，是一个开源的单节点或分布式高性能的量子模拟器，可以模拟控制一般的单量子门和双量子门。英特尔模拟器已被用于模拟40多个量子比特的算法，其目标是希望在模拟中测试其量子计算软件的算法开发者。                                                                               |
| Perceval                           | 法国   | Perceval由Quandela提供技术支持，是一个用于光子量子计算机编程的开源框架。Perceval提供了强大的后端来模拟光子电路上的量子算法，以数值和符号的方式进行，它被优化为在本地桌面上运行，并为HPC集群做了一些扩展。它还允许用户通过大量预定义的组件集合来设计算法和复杂的线性光学电路。                                            |
| MITAQ TOOL                         | 美国   | Mitiq是一个Python工具包，用于在量子计算机上实现错误缓解技术，该工具包由Unitary Fund 提供。Mitiq兼容为IBM Q的Qiskit、Google的Cirq、Rigetti的PyQuil编写的量子程序。                                                                                |
| BERKELEY QUANTUM SYNTHESIS TOOLKIT | 美国   | 伯克利量子合成工具包是一个超级优化的量子编译器和研究载体，它将LBNL的几个项目的想法结合起来，成为一个易于使用和快速扩展的量子计算软件套件。他们有几个免费的量子开发工具可用于合成和优化。                                                                                                  |
| Qcircuits                          | 美国   | 可作为GitHub存储库使用，是一款Python量子软件，用于基于量子电路模型的量子计算机的模拟和研究。Qcircuits允许用户准备算子和状态，将算子应用于状态，测量状态等，以实现量子算法。                                                                                                |
| Yao                                | 中国   | Yao被制定为“人类的可扩展，高效的量子算法设计”，是一个Julia语言包和中间表示，用于构建和操作量子电路。它的分层架构允许扩展框架以支持和共享新算法和硬件。                                                                                                                |

| 公司                           | 国家   | 产品/应用                                  |
|------------------------------|------|----------------------------------------|
| Entropica labs               | 新加坡  | 量子优化工具、算法和软件                           |
| Qubit Engineering            | 美国   | 为风力涡轮机的微选址开发新优化方法                      |
| SavantX                      | 美国   | 利用量子计算系统解决优化问题                         |
| Quantum-South                | 乌拉圭  | 为航运、货运和金融的优化提供算法                       |
| SoftwareQ                    | 加拿大  | 算法、逻辑优化、编译模拟-量子编译器、优化器、模拟器             |
| LightSolver                  | 以色列  | 算法、逻辑优化、编译模拟-利用光的自然特性解决复杂优化问题          |
| 京东探索研究院                      | 中国   | 量子并行处理框架 QUDIO                         |
| 腾讯量子实验室                      | 中国   | 量子线路和量子算法模拟开源软件平台TensorCircuit、量子参量放大器 |
| 百度量子计算研究所                    | 中国   | 算法、逻辑优化、编译模拟、量子计算云平台                   |
| Entangled Networks           | 加拿大  | 多QPU编译器MultiQopt                       |
| 1QBit                        | 加拿大  | 跨行业综合应用-机器智能和优化科学                      |
| Q-CTRL                       | 澳大利亚 | 量子控制技术                                 |
| ParityQC                     | 奥地利  | 量子计算操作系统ParityOS                       |
| Riverlane                    | 英国   | 量子计算操作系统Deltaflow.OS                   |
| QuantrolOx                   | 英国   | 为量子控制构建基于机器学习的软件                       |
| Orange Quantum Systems       | 荷兰   | 量子诊断库，用于高级量子器件测量和控制的软件库产品线             |
| Quantum Machines             | 以色列  | 量子计算机的操作和控制系统                          |
| QEDma Quantum Computing      | 以色列  | 自动门优化器                                 |
| Quantum Benchmark            | 加拿大  | 优化量子硬件性能工具True-Q                       |
| Sandbox AQ                   | 美国   | 量子模拟与优化                                |
| Zapata Computing             | 美国   | 量子 workflow 平台Orquestra                |
| Quantum Computing Inc. (QCI) | 美国   | Qatalyst应用加速器                          |
| Terra Quantum                | 瑞士   | 量子即服务、量子算法                             |
| Kipu Quantum                 | 德国   | 量子算法                                   |
| PhaseCraft                   | 英国   | 量子计算应用程序、量子算法                          |
| JJ                           | 日本   | 量子退火和数学优化                              |

| 时间      | 国家   | 机构                              | 进展                                                                                                                    |
|---------|------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 美国   | IBM                             | IBM团队展示了“entanglement forging”技术——可以精确地模拟水分子的基态能量。该方法可使量子计算机上只用一半的量子比特来模拟给定的量子系统。                                     |
| 2022.01 | 美国   | 华盛顿大学                           | 开发出用于人工智能和机器学习的光学计算硬件；同时还降低了光学计算中固有的“噪声”干扰。                                                                           |
| 2022.03 | 美国   | 谷歌                              | 在“悬铃木”量子计算机上已经完成了16个量子比特的化学模拟。这是当时在量子计算机上进行的最大规模的化学模拟。                                                                |
| 2022.06 | 澳大利亚 | Silicon Quantum Computing (SQC) | 创建了一个集成的量子处理器，以准确模拟有机化合物聚乙炔分子的量子态。这一科学突破将使SQC帮助行业为一系列新产品构建量子模型，例如药品、电池材料和催化剂。                                         |
| 2022.07 | 中国   | 图灵量子                            | 基于以远期收益期限结构为基础的重要利率市场模型——LIBOR市场模型，实现对于利率上限期权（caps）这一重要的利率衍生品的定价。                                                     |
| 2022.07 | 中国   | 本源量子 and 复旦大学                   | 利用量子叠加态的并行计算能力设计出新的分子晶体结构预测算法，证明了量子计算可以帮助化学家们用比传统建模方法更精准的方式，来预测晶体的分子结构。                                               |
| 2022.09 | 美国   | 莱斯大学                            | 量子模拟器在模拟量子磁体方面超越经典计算机。使用镱原子制造了一个基于类自旋特性的磁体，该磁体由仅比绝对零度温度高十亿分之一度的原子组成，有六个状态，每个状态都标有颜色。                                  |
| 2022.09 | 美国   | Quantum Computing Inc.          | 宣布推出订阅服务，为企业提供对其行业领先的Dirac 1量子计算（EQC）系统的访问权限。Dirac 1是QCI的第一个商用光子EQC系统，它采用与现有量子计算提供商不同的计算方法，可以解决超过5000个变量的业务问题。        |
| 2022.10 | 英国   | 萨里大学                            | 使用量子计算发现了二维材料的新阶段，可用于开发下一代燃料电池设备。同时量子计算也帮助格拉茨理工大学研究了作为二维材料极有前途的六方氮化硼（h-BN）的发展，这种材料具有与著名的二维材料石墨烯相似的蜂窝晶体结构，通常被称为“奇迹材料”。 |
| 2022.10 | 加拿大  | Xanadu与大众汽车                     | 启动了一项多年研究计划，以提高用于模拟电池材料的量子算法的性能，目标是降低计算成本并加速大众汽车采用量子计算机来开发更轻、更安全、更低成本的电池材料。                                           |
| 2022.12 | 法国   | Qubit Pharmaceuticals           | 通过使用混合量子计算加速药物分子模拟和建模，显著减少了在肿瘤学、炎症性疾病和抗病毒药物方面有前景的治疗方法所需的时间和投资。                                                        |

| 时间      | 国家      | 机构                                        | 进展（底稿）                                                                                                                                        |
|---------|---------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 美国      | SavantX、Fenix Marine Services与洛杉矶港        | 旗下的量子+AI驱动的HONE优化引擎由Fenix Marine Services和SavantX共同开发，其部署策略优化了码头、货运公司及其客户的调度、预约和码头内集装箱的处理。因此，使货物装卸设备的效率翻了一番，并产生了更可预测的货物流。                     |
| 2022.01 | 美国、英国   | Polaris Quantum Biotech与PhoreMost Limited | 借助POLARISq <b>b</b> Tachyon量子计算平台扫描来自大型化学空间的数十亿个分子，根据从PhoreMost的SITESEEKER表型筛选平台获得的信息合力寻找新的分子药物。                                              |
| 2022.03 | 西班牙、加拿大 | CaixaBank、D-Wave Systems                  | 共同发布投资组合优化和投资对冲计算。由于它们的协作，量子混合应用程序显着减少了解决复杂金融问题的计算时间，改进了投资组合优化，提高了债券组合内部收益率（IRR），并最大限度地减少了对冲操作所需的资本。                                          |
| 2022.03 | 美国      | OpenEye Scientific、Gaussian               | 宣布，OpenEye的Orion <sup>®</sup> 分子设计平台现在支持Gaussian及其具有自动化科学工作流的电子结构建模软件，以促进更快速和全面的量子化学计算。                                                       |
| 2022.07 | 芬兰、美国   | Algorithmiq与布莱根妇女医院的波士顿研究团队               | 开创量子网络医学新领域。他们共同致力于为疾病机制、预防和治疗的新时代奠定基础。其中一个目标是降低大型制药公司将新药推向市场所需的10亿美元成本和缩短通常长达十年的过程。                                                          |
| 2022.08 | 西班牙     | Multiverse Computing与IKERLAN              | 量子计算视觉检测首次用于汽车制造业，并优于经典方法.发布了一项联合研究的结果，通过量子人工视觉系统的图像分类检测制造的汽车部件中的缺陷。                                                                          |
| 2022.08 | 美国      | IonQ                                      | 宣布与空中客车公司合作，探索量子计算在航空航天服务和乘客体验方面的潜在应用和优势。量子飞机装载优化和量子机器学习项目将是一个为期12个月的项目，最终将开发原型飞机装载量子应用程序，为空客开发人员和工程师提供动手协作和辅导课程，以及探索未来的集成为空中客车公司及其客户提供量子计算机。 |
| 2022.09 | 西班牙     | Multiverse Computing                      | 将加入由雷诺领导的西班牙行业联盟项目，其目标是推广电动、自动驾驶和联网汽车。该项目名为“西班牙电动和联网汽车的创新工业生态系统”，已获得西班牙政府的批准，旨在使该国成为欧洲可持续交通领域的领导者。                                            |
| 2022.09 | 美国      | Zapata Computing                          | 它在让赫尔大学为未来太空探索做好量子准备的使命方面取得了重大进展。合作一年后，两个团队都看到了足够的进展，可以扩展他们扩大太空生命指标搜索的计划。                                                                     |
| 2022.10 | 美国      | QCI、弗吉尼亚创新合伙企业（VIPC）                      | 利用QCI的Path to Quantum咨询、Qatalyst™软件和量子光子系统硬件确定无人机的最佳飞行轨迹。                                                                                     |
| 2022.10 | 西班牙     | Multiverse Computing与Mila                 | 将使用量子和量子启发式技术推进人工智能和机器学习的方法。该合作伙伴关系还将专注于在量子计算和机器学习等高科技领域培养新的领导者。                                                                              |
| 2022.11 | 美国      | IBM、博世（Bosch）                             | 博世将加入IBM量子网络，使用二十多台IBM量子计算机来帮助确定目前用于发动机和燃料电池的金属、稀土元素的替代品。                                                                                     |
| 2022.11 | 美国      | IBM与Euro-Information                      | 宣布已开始进入量子计算就绪发现阶段，包括探索量子计算在银行和保险用例中的适用性以及开发概念验证并开始了劳动力发展。                                                                                     |
| 2022.12 | 芬兰、美国   | Algorithmiq、IBM                           | 探索大幅减少药物发现和开发时间和成本的方法；这项工作还将为Qiskit产生的成果做出贡献，以促进和发展这个新生的生态系统。                                                                                 |
| 2022.12 | 乌拉圭、英国  | Quantum-South与IAG Cargo                   | 通过使用量子退火机的混合方法来优化客机的货运，从而改进货物装载计划。该企业使用了混合技术，包括从D-Wave到亚马逊Braket的量子退火机。而国际航空集团（IAG）的货运处理部门IAG Cargo试用了Quantum-South的新服务，用于探索使用量子算法优化航空货运。     |

| 时间      | 国家  | 机构/企业             | 主要进展                                                                                                                            |
|---------|-----|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.05 | 法国  | PASQAL            | PASQAL Cloud Services上线，可以通过在OVHcloud的私有云访问中性原子量子计算机，当前仅对特定客户开放访问权限                                                             |
| 2022.05 | 加拿大 | D-Wave            | 推出可通过位于美国的Leap™量子云服务访问的第一台Advantage™量子计算机，提供5000量子比特                                                                            |
| 2022.06 | 美国  | Amazon Braket     | 宣布支持IBM的一款量子软件开发工具包 Qiskit，且在Qiskit上编写的程序可以在Braket的任何门机器上运行                                                                     |
| 2022.06 | 日本  | Fixstars Amplify  | 处理量子计算云的Fixstars Amplify已宣布对其云服务“Fixstars Amplify”进行更新，用户可使用IBM提供的量子计算机服务“IBM Quantum” 计算组合优化问题                                 |
| 2022.07 | 中国  | 中科酷原              | 推出中国首个原子量子计算云平台——“酷原量子云”，目前提供中性原子量子计算模拟器及qiskit量子计算模拟器                                                                          |
| 2022.08 | 美国  | IonQ              | 宣布在Azure Quantum平台上推出IonQ Aria，IonQAria是继2019年底推出IonQ Harmony后，加入Azure Quantum平台的第二个IonQ系统                                      |
| 2022.09 | 美国  | Rigetti Computing | 在Microsoft的Azure Quantum平台上以公共预览版推出Rigetti QCS™，Azure Quantum用户按需访问Rigetti的Aspen-M-2 80量子比特和Aspen-11 40量子比特超导量子处理器，以开发和运行量子应用程序 |
| 2022.11 | 加拿大 | Agnostiq          | 推出其开源工作流编排平台Covalent的新版本，支持AWS，促进云端高性能计算发展                                                                                      |
| 2022.12 | 英国  | Arqit             | 将其Quantum Cloud平台部署在亚马逊网络服务AWS产品上                                                                                               |

| 量子云平台                          | 发布方                                    | 首次发布时间  | 硬件技术 | 量子比特数             |
|--------------------------------|----------------------------------------|---------|------|-------------------|
| 太元一号                           | 浙江大学计算机科学与技术学院                         | 2022.07 | 超导   | 26                |
| 酷原量子云                          | 中科酷原                                   | 2022    | 中性原子 | 即将上线（100+）        |
| 量子计算云平台                        | 中科院量子信息与量子科技创新研究院、阿里云                  | 2017.10 | 超导   | 12                |
| Quafu量子计算云平台                   | 北京量子信息科学研究院、中国科学院物理研究所、清华大学            | 2022    | 超导   | 10、18、50          |
| 本源量子云                          | 本源量子                                   | 2017.10 | 超导   | 6                 |
| 华为HiQ                          | 华为                                     | 2018.10 | 模拟器  | -                 |
| 百度量易伏                          | 百度                                     | 2020.09 | 超导   | 10                |
|                                |                                        |         | 离子阱  | 1                 |
| SpinQ量子计算云平台                   | 量旋科技                                   | 2020.10 | 核磁共振 | 2、4、6             |
|                                |                                        |         | 超导   | 8                 |
| 弧光量子云平台                        | 弧光量子                                   | 2022.9  | 超导   | 12                |
|                                |                                        |         | 离子阱  | 11                |
| IBM Q Experience               | IBM                                    | 2016.05 | 超导   | 127、65、27、16、7、5、 |
| Cirq                           | Google                                 | 2018.07 | 超导   | 53、80、40          |
|                                |                                        |         | 离子阱  | 20（AQT）、          |
|                                |                                        |         | 中性原子 | 100+              |
| QCS                            | Rigetti                                | 2018.09 | 超导   | 40、80             |
| Braket                         | Amazon                                 | 2019.12 | 超导   | 40、80、8           |
|                                |                                        |         | 离子阱  | 11                |
|                                |                                        |         | 光量子  | 216               |
| Azure Quantum                  | Microsoft                              | 2019.11 | 离子阱  | 20、12、11          |
|                                |                                        |         | 超导   | 40、80、8           |
|                                |                                        |         | 中性原子 | 100+              |
| D-Wave Leap                    | D-Wave                                 | 2018.10 | 量子退火 | 5000+、2000+       |
| Strangeworks QC                | Strangeworks                           | 2021.02 | 超导   | -                 |
|                                |                                        |         | 离子阱  | -                 |
| Xanadu Cloud                   | Xanadu                                 | 2020.09 | 光量子  | 216               |
|                                |                                        |         | 光量子  | 8                 |
| Quantum Inspire                | Qutech                                 | 2018.10 | 硅自旋  | 2                 |
|                                |                                        |         | 超导   | 5                 |
| Alpha                          | QM Ware                                | 2022.01 | -    | -                 |
| SCCE                           | AQT                                    | 2020.04 | 离子阱  | 20                |
| QSCOUT                         | Quantum - Sandia National Laboratories | 2021.03 | 离子阱  | 3                 |
| Quantum Computing-as-a-Service | Oxford Quantum Circuits                | 2021.07 | 超导   | 8                 |
| InQuanto                       | Quantinuum                             | 2022.05 | 离子阱  | 12、20             |
| Quandela Cloud                 | Quandela                               | 2022.11 | 光量子  | 5                 |

| 时间      | 国家/组织 | 产业类型        | 政策摘要                                                                                |
|---------|-------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 法国    | 经典与量子混合计算平台 | 法国投资1.7亿欧元启动国家量子计算平台，用于创建将经典系统和量子计算机互连的混合计算平台                                       |
| 2022.01 | 瑞士    | 室温下量子技术     | 维尔纳西门子基金会（WSS）捐赠1500万瑞士法郎赞助CarboQuant项目，研究室温下运行的新型量子技术                              |
| 2022.02 | 德国    | 光量子处理器      | 德国联邦教育和研究部（BMBF）出资1600万欧元资助PhotonQ项目，用于开发光量子处理器                                     |
| 2022.02 | 欧盟    | 量子芯片        | 欧盟公布430亿欧元芯片法案，支持开发量子芯片                                                             |
| 2022.02 | 美国    | 量子计算机自动化    | Q-CTRL与桑迪亚国家实验室获得美国能源部23万美元赠款，用于量子计算机自动化                                            |
| 2022.02 | 以色列   | 量子计算机       | 以色列拨款6200万美元建造该国第一台量子计算机                                                            |
| 2022.02 | 英国    | 量子计算实用接口    | 格拉斯哥大学获得英国工程和物理科学研究委员会（EPSRC）提供的300万英镑资助，用于开发增强型量子计算实用接口                            |
| 2022.03 | 美国    | 量子生物        | 亚利桑那州立大学获得Keck基金会三年100万美元的资助，探索生物系统中的基本量子效应                                         |
| 2022.03 | 美国    | 量子软件        | DARPA为Zapata Computing提供数百万美元资助，创建软件工具，以便为量子计算机进行特定于硬件的资源估算                         |
| 2022.03 | 美国    | 量子计算        | 纽约大学获美国国防部多学科大学研究计划（MURI）750万美元资助，增强量子计算                                            |
| 2022.04 | 美国    | 光量子计算       | 美国政府拨款2500万美元支持芯片代工厂格芯（GlobalFoundries）和量子计算公司PsiQuantum开发下一代光量子计算机                 |
| 2022.04 | 卡塔尔   | 量子计算        | 卡塔尔拨款1000万美元启动国家量子计算计划，资助卡塔尔量子计算中心（QC2）的建立，进行与量子计算、量子密码学和量子人工智能（AI）的相关领域的创新研究       |
| 2022.04 | 美国    | 量子计算        | 麻省大学波士顿分校和西英格兰大学获得100万美元国家拨款，支持量子计算                                                 |
| 2022.04 | 荷兰    | 量子计算        | 莱顿大学获得荷兰国家研究议程（NWA）200万欧元资助，致力于将量子计算机带出实验室                                          |
| 2022.04 | 欧洲    | 量子计算        | 四所大学5个团队获得ERC资助，合计1270万欧元，用于开发新的量子比特、量子材料领域、量子实验模型等方面研究                             |
| 2022.04 | 德国    | 量子计算        | 德国政府批准DESY量子研究基金，开发用于验证量子组件的诊断工具。                                                   |
| 2022.04 | 荷兰    | 量子计算        | 荷兰代夫特量子生态系统的成员获得价值55万欧元的两笔研发资助                                                      |
| 2022.04 | 美国    | 量子计算        | 佐治亚理工大学获得920万美元资助，用于开发混合量子-经典系统                                                     |
| 2022.04 | 日本    | 量子计算        | 战略提出将在2022年内建成第一台国产量子计算机，此外该战略提出到2030年量子技术使用者达到1000万人目标                             |
| 2022.05 | 荷兰    | 量子材料        | 荷兰研究委员会为量子材料研究提供2150万欧元资金                                                           |
| 2022.05 | 美国    | 量子人才        | 由乔治梅森大学量子科学与工程中心运营的K12量子人才发展项目获得了3.5亿美元的众议院拨款法案中的65万美元                              |
| 2022.05 | 澳大利亚  | 量子人才        | 澳大利亚工党承诺提供400万澳元支持量子研究人才发展                                                          |
| 2022.05 | 美国    | 量子技术路线      | 美国NIST拨款30万美元支持量子技术                                                                 |
| 2022.06 | 美国    | 量子云平台       | 美国NSF提供补充资金，支持使用量子计算云平台                                                             |
| 2022.06 | 荷兰    | 超导量子处理器     | QuantWare获得欧洲创新委员会资助750万欧元，用于快速扩展超导量子处理器                                            |
| 2022.06 | 美国    | 量子计算        | 美国佐治亚理工学院量子计算项目获得DARPA920万美元资助                                                      |
| 2022.06 | 美国    | 量子计算        | 量子计算公司SEEQ获得美国能源部的40万美元资助，研究和开发为特定问题的应用提供具有成本效益和商业可扩展性的有用、节能的量子计算系统                 |
| 2022.07 | 美国    | 量子计算        | 美国陆军签署了一份6.99亿美元的高性能计算采购合同，用于国防超级计算资源中心的运营、维护和管理服务                                  |
| 2022.07 | 以色列   | 量子计算        | 以色列宣布斥资2900万美元成立量子计算研发中心                                                            |
| 2022.07 | 美国    | 量子人才        | 美国政府投资300万美元，用于量子科学研究生培训计划                                                          |
| 2022.07 | 美国    | 量子计算        | 美国参议院通过2800亿美元《芯片法案》，法案除了对半导体行业进行补贴外，还有一大笔资金将用于量子计算等前沿科技领域的研发                       |
| 2022.08 | 美国    | 量子教育        | 怀俄明大学拓扑量子计算研究获得NSF的500万美元资助                                                         |
| 2022.08 | 美国    | 量子计算        | 加州大学洛杉矶分校（UCLA）获180万美元资助，开发用于量子计算的分子量子比特                                            |
| 2022.09 | 荷兰    | 量子技术        | 荷兰复苏计划将为量子技术投资2.7亿欧元                                                                |
| 2022.09 | 美国    | 量子材料        | 美国能源部为量子材料研究提供1260万美元资金                                                             |
| 2022.09 | 美国    | 量子计算        | 纽约大学石溪分校获得美国能源部40万美元资助，用于研究量子计算优势                                                   |
| 2022.10 | 美国    | 稀释制冷机       | 美国国防部拨款升级用于量子物理研究的稀释制冷机                                                             |
| 2022.10 | 美国    | 量子计算        | 美国空军研究实验室（AFRL）开出2250万美元订单，用于建造实用规模量子计算机                                            |
| 2022.10 | 德国    | 量子计算        | 德国汉堡市政府向量子计算投资3410万欧元                                                               |
| 2022.10 | 德国    | 离子阱量子计算     | 德国投资2亿欧元开发基于离子阱的量子计算机                                                               |
| 2022.12 | 德国    | 量子计算        | 德国航空航天研究中心（DLR）授予两家开发金刚石量子计算机的公司SaxonQ和XeedQ总价值5700万欧元的合同                           |
| 2022.12 | 美国    | 量子计算        | 美国国防高级研究计划局（DARPA）与罗切斯特大学签订一份价值160万美元的合同，用于量子启发经典计算（QuiCC）项目。QuiCC计划为期五年，总投资5800万美元 |

| 时间      | 合作方      | 文件名称                   | 主要内容                                                                     |
|---------|----------|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 2022.04 | 美国、芬兰    | 《量子信息科学技术（QIST）合作联合声明》 | 美国和芬兰签署关于量子信息科技合作的联合声明，强调两国加强该领域合作的意愿                                    |
| 2022.04 | 美国、瑞典    | 量子信息科学技术（QIST）合作联合声明   | 使两国利用各自在QIST中的优势，建立全球市场和供应链、创建科学研究社区、培养未来一代的技能和潜在人才                      |
| 2022.04 | 印度、芬兰    | -                      | 讨论量子计算可能的合作领域，以及计划建立的“协作虚拟卓越中心”（CoE）路线图                                  |
| 2022.04 | 印度、美国    | -                      | 印度和美国已决定推进通信、人工智能、量子科学、半导体和生物技术领域新兴技术的合作，并敦促两国私营企业共同开发和生产国防设备            |
| 2022.06 | 美国、丹麦    | 量子信息科技合作的联合声明          | 利用两国在QIST的优势，这份合作声明将加强供应链，发展产业基础，并培养下一代量子人才                              |
| 2022.10 | 美国、瑞士    | -                      | 将与美国签署一项协议，以便在量子计算领域开展更密切的合作                                             |
| 2022.12 | 法国、美国    | -                      | 该合作声明建立在2018年10月在巴黎签署的协议和2021年科技合作联合声明的基础上，该声明明确将量子信息科学列为双方认可继续开展研究合作的领域 |
| 2022.11 | 印度、欧盟    | -                      | 启动的贸易和技术委员会的基础上签署气候建模和量子技术等领域的合作协议                                       |
| 2022.11 | 芬兰、印度    | -                      | 两国将率先探索量子计算和超级计算之间的复杂融合，并将其作为解决基于高效硬件的未来工业解决方案的突破口                       |
| 2022.12 | 法国、美国、德国 | 《量子技术合作联合声明》           | 为了应对欧洲在量子技术领域所面临的战略自主性挑战，并为未来的欧洲量子领导者奠定基础                                |

| 时间      | 合作方  | 合作文件                                                                  | 主要内容                                                                                                                                                                                                |
|---------|------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2022.01 | 中国   | 《计量发展规划（2021—2035年）》                                                  | 提出在2035年建成以量子计量为核心、科技水平一流、符合时代发展需求和国际化发展潮流的国家现代先进测量体系                                                                                                                                               |
| 2022.02 | 欧盟   | 《欧洲芯片法案》                                                              | 公布430亿欧元芯片法案，支持开发量子芯片。法案称，到2030年欧盟计划投入超过430亿欧元（约490亿美元）                                                                                                                                             |
| 2022.02 | 英国   | 《2022年春季声明》                                                           | 支持人工智能、量子计算和机器人技术                                                                                                                                                                                   |
| 2022.04 | 澳大利亚 | 《2021年国家研究基础设施（NRI）路线图》                                               | 将量子作为新路线图中的优先研究领域                                                                                                                                                                                   |
| 2022.04 | 美国   | 《量子计算网络安全防范法案》                                                        | 希望联邦政府能保护联邦IT系统和资产免受量子计算机未来黑客攻击                                                                                                                                                                     |
| 2022.04 | 美国   | 《关于加强国家量子计划咨询委员会的行政命令》<br>《关于促进美国在量子计算方面的领导地位同时减少对脆弱的密码系统的风险的国家安全备忘录》 | 拜登签署两项总统政令，加快推动量子信息科学。第一项政令旨在加强国家量子倡议咨询委员会的行政命令。该委员会是政府量子信息科学与技术的独立专家咨询机构。该命令把咨询委员会直接置于白宫的权力之下，帮助确保总统和其他关键决策者能够获得最新信息。第二项政令以推动美国量子信息技术的发展，并制定了应对量子计算机对美国的网络安全构成的风险的计划。                              |
| 2022.06 | 英国   | 《SparQ量子应用发现计划》                                                       | 帮助英国公司和研究人员早期探索量子计算的应用，加速英国在使用量子计算方面的创新。该计划提供了四个关键要素：获得量子计算机、技术支持和应用专业知识、研讨会和交流机会以及学习资源。旨在让潜在用户获得使用量子硬件和算法的早期实践经验，以应对与行业相关的挑战                                                                       |
| 2022.06 | 德国   | 《量子系统研究计划》                                                            | 其任务是在未来十年将德国带入欧洲量子计算和量子传感器领域的领先地位，并提高德国在量子系统方面的竞争力                                                                                                                                                  |
| 2022.07 | 美国   | 《芯片法案》                                                                | 该法案除了对半导体行业进行补贴外，还有一大笔资金将用于量子计算等前沿科技领域的研发。其中包括为布鲁克海文国家实验室等能源部国家实验室注入新资金，该项资金将推动研发，包括量子计算、人工智能等关键技术领域。                                                                                               |
| 2022.08 | 美国   | 《芯片和科学法案》                                                             | 法案的第二部分“研究与创新”中，有四个项目将使量子领域受益。第一个是开展量子网络设备和方法的研究，开发量子网络技术的供应链的“量子网络基础设施”计划，该计划将获得5亿美元。第二个是为美国境内研究人员提供访问美国量子计算资源的途径的“科学和技术的量子用户扩展”计划，资金定为1.65亿美元。最后一个是将教育下一代学生和教师量子力学基本原理的“下一代量子领导者试点计划”，资金为3200万美元。 |
| 2022.05 | 美国   | 《关于促进美国在量子计算领域的领导地位，同时降低易受攻击的密码系统风险的国家安全备忘录》                          | 备忘录概述了本届政府与量子计算有关的政策和举措。它确定了保持国家在量子信息科学（QIS）方面的竞争优势所需的关键步骤，同时减轻量子计算机对国家网络，经济和国家的风险                                                                                                                  |
| 2022.07 | 美国   | 《量子计算网络安全防范法案》                                                        | 法案的通过正值美国联邦政府开始更加积极地支持和应对量子计算机带来的网络安全威胁之际，量子技术领域的专家预计这些威胁将在未来几年成为全球政府和企业日益频繁的风险因素                                                                                                                   |
| 2022.12 | 美国   | 《量子计算网络安全防范法案》                                                        | 使其正式成为法律，鼓励联邦政府机构采用不受量子计算影响的加密技术。该法案于今年7月在众议院通过，并于12月9日在参议院获得通过。                                                                                                                                    |

CTF模型是一个未来产业参与者的评价分析模型。ICVTAnK的CTF模型是帮助公众了解前沿技术领域及对应公司的发展情况，前沿科技具有技术路线未收敛、技术发展存在高度不确定性、商业化推进处于早期等诸多特点，随着技术的不断发展，对公司的评价需要一套合理的模型，对特定时期前沿技术供应商的综合评估形成“共识”。

CTF模型由4层不同大小的扇形区域纵深呈现，以及3维坐标共同构成。横向坐标Maturity of Technology（技术层面，即供应商的技术、研发、团队等）、侧向坐标Commercialization of Technology（商业层面，即供应商的营收、客户、用例等）以及隐含变量Implicit Variable（底蕴层面，即供应商长期经营所积淀的能够助推企业发展的要素）。CTF模型根据供应商在不同维度的综合表现，将其划分入如下四个扇面中：Pilot（领航员）、Overtaker（超越者）、Explorer（探索者）和Chance-seeker（寻机者）。

由于新兴技术处在高速成长期，也存在高度不确定性，因此，各细分领域的CTF图需要不定期进行更新。

Fan1—Pilot：这一板块的公司特点是企业规模较大，在前一次技术发展周期中积累了诸多经验，为它们进入新的前沿技术领域打下坚实基础。这些公司有能力和资源成为新一轮前沿技术的领航者，并有可能对行业未来的发展方向产生深远的影响。

Fan2—Overtaker：这一板块的公司经过一段时间的发展已经初具规模，它们一大优势是强大的新技术研发实力。基于它们在特定技术领域已取得的积累，这些公司将来有望“超车”成为行业领军者。

Fan3—Explorer：这一板块的公司体量较小，但是它们较早地走上了新兴技术发展轨道。特定技术的开发仍处于早期阶段，与Pilot和Overtaker相比，它们通常在整体技术实力方面有所差距。

Fan4—Chance-seeker：这一板块的公司商业嗅觉敏锐，是新进入行业的新兴公司，它们的规模不大，但创始团队成员拥有一定的资源，能够让公司在新的赛道上获得发展机会。这些公司目前少有产品的工程原型，市场展现机会较少。

使用CTF模型，可以帮助前沿科技领域的客户评估对于某个技术供应商的采购与投资。特别需要留意的是，处于领航员扇面的供应商并不一定总是最佳选择，在企业的实际需求情况下，处于超越者或探索者扇面的企业可能是更好的选择。

<https://www.prnewswire.com/news-releases/colorados-maybell-quantum-exits-stealth-breakthrough-quantum-hardware-to-be-made-in-usa-301501386.html>  
<https://www.sciencealert.com/physicists-find-the-missing-link-that-could-provide-quantum-internet-technology>  
<https://parityqc.com/a-new-modular-layout-for-quantum-chips>  
<https://www.unibas.ch/en/News-Events/News/Uni-Research/Quantum-network-nodes-with-warm-atoms.html>  
<https://phys.org/news/2022-06-non-classical-mechanical-states-phononic-waveguide.html>  
<https://news.uchicago.edu/story/uchicago-scientists-invent-quantum-flute-can-make-particles-light-move-together>  
<https://optics.org/news/13/7/9>  
<https://physics.aps.org/articles/v15/s101> <https://phys.org/news/2022-07-magnetic-quantum-material-broadens-platform.html>  
<https://www.mpg.de/en>  
<https://phys.org/news/2022-08-experimental-long-lived-phantom-helix-states.html>  
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-32495-7>  
<https://www.eenewseurope.com/en/photonic-interface-for-superconducting-quantum-processors/>  
<https://www.azoquantum.com/News.aspx?newsID=9179>  
<http://phys.hust.edu.cn/info/1211/8006.htm>  
<https://smallcaps.com.au/archer-materials-integrates-qubit-material-step-towards-practical-quantum-chips/>  
<https://www.fastcompany.com/90793603/a-new-quantum-network-in-brooklyn-opens-the-door-to-an-untappable-internet>  
<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.3.010309>  
[https://www.photonics.com/Articles/Quantum\\_Computing\\_Technique\\_Harnesses\\_Noise/a67709](https://www.photonics.com/Articles/Quantum_Computing_Technique_Harnesses_Noise/a67709)  
<https://www.nature.com/articles/s41586-021-04351-z>  
<http://sqc.com.au/2022/06/23/silicon-quantum-computing-announces-worlds-first-integrated-circuit-at-atomic-scale/>  
<https://www.quantumchina.com/newsinfo/3066589.html?templateId=520429>  
<https://www.newscientist.com/article/2336247-quantum-magnet-is-billions-of-times-colder-than-interstellar-space/>  
<https://www.quantumcomputinginc.com/press-releases/qci-launches-subscription-service-for-its-dirac-1-entropy-quantum-computer-eqc/>  
<https://www.innovationnewsnetwork.com/quantum-calculations-reveal-new-way-to-build-2d-materials/26094/>  
<https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-group-and-xanadu-establish-quantum-simulation-program-for-battery-materials-15253>  
<https://blogs.nvidia.com/blog/2022/11/30/qubit-pharmaceuticals-accelerates-drug-discovery-quantum-computing/>  
<https://www.prnewswire.com/news-releases/quantum-computing-application-sees-real-world-success-at-pier-300-at-the-port-of-los-angeles-301455106.html>  
<https://www.insidequantumtechnology.com/news-archive/polarisqb-phoremot-team-on-quantum-drug-discovery-for-better-cancer-therapies/>  
<https://financialpost.com/pmn/press-releases-pmn/business-wire-news-releases-pmn/caixabank-group-d-wave-collaborate-on-innovative-new-quantum-applications-for-finance-industry>  
<https://www.prnewswire.com/news-releases/openeye-scientific-and-gaussian-collaboration-expands-quantum-chemistry-calculations-301496761.html>  
<https://thequantuminsider.com/2022/07/14/algorithmiq-collaborates-with-boston-research-team-to-launch-new-field-of-quantum-network-medicine/>  
<https://multiversecomputing.com/resources/multiverse-computing-and-ikerlan-detect-defects-in-manufacturing-with-quantum-computing-vision>  
<https://ionq.com/news/august-18-2022-ionq-2022-airbus>  
<https://multiversecomputing.com/resources/multiverse-computing-joins-electric-vehicle-alliance-led-by-renault-to-advance-auto-industry-in>  
<https://www.zapatacomputing.com/news/zapata-and-university-of-hull-get-quantum-ready-for-search-for-life-in-space/>  
<https://www.quantumcomputinginc.com/press-releases/vipc-selects-qci-for-risk-based-flight-trajectories/>  
<https://www.hpcwire.com/off-the-wire/multiverse-computing-and-mila-partner-to-advance-ai-with-quantum-computing/>  
<https://newsroom.ibm.com/2022-11-08-Credit-Mutuel-Alliance-Federale-Launches-Quantum-Computing-Readiness-Discovery-Phase-with-IBM-to-Establish-Quantum-Capability-in-France>  
<https://thequantuminsider.com/2022/11/16/ibm-and-algorithmiq-partner-on-useful-quantum-advantage-for-quantum-chemistry/>  
<https://www.openpr.com/news/2827282/quantum-south-explores-quantum-algorithms-for-air-cargo>  
<https://www.pasqal.com/services/access>  
<https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/introducing-the-qiskit-provider-for-amazon-braket/>  
[https://www.quantumchina.com/newsinfo/3178740.html?templateId=520429#/news\\_detail?contentType=5&contentId=1015841&cid=0&tencentShare=1](https://www.quantumchina.com/newsinfo/3178740.html?templateId=520429#/news_detail?contentType=5&contentId=1015841&cid=0&tencentShare=1)  
<https://www.businesswire.com/news/home/20220816005315/en/IonQ-Aria-Available-Today-on-Azure-Quantum-Platform>  
<https://www.globenewswire.com/news-release/2022/09/14/2515944/0/en/Rigetti-Expands-QCS-Availability-to-Microsoft-s-Azure-Quantum-Platform.html>  
<https://thequantuminsider.com/2022/11/12/agnostiq-announces-covalent-support-for-aws-to-facilitate-hpc-in-the-cloud/>  
<https://blog.executivebiz.com/2022/12/arqit-deploys-cloud-based-quantum-encryption-tech-on-aws-storage-service/>

[https://quantum.tencent.com/news/2022/0114\\_1542](https://quantum.tencent.com/news/2022/0114_1542)  
<https://research.ibm.com/blog/quantum-volume-256>  
<https://quantumcomputingreport.com/ibm-further-improves-their-quantum-volume-to-512/>  
<https://www.colorado.edu/today/2022/06/15/how-handle-quantum-information-without-destroying-it>  
<https://siqse.sustech.edu.cn/Zh/Index/view/mid/18/id/1240>  
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.18.034013>  
<https://journals.aps.org/prapplied/abstract/10.1103/PhysRevApplied.18.034057>  
<https://list23.com/1095746-quantum-computing-breakthrough-qubits-for-a-programmable-solid-state-supe>  
<http://epub.cnipa.gov.cn/Dxb/IndexQuery>  
<https://spectrum.ieee.org/ibm-quantum-computer-osprey>  
<https://phys.org/news/2022-11-quantum-component-graphene.html>  
<https://arxiv.org/abs/2211.05341>  
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-34614-w>  
<https://arxiv.org/abs/2211.09802>  
<https://sciencex.com/wire-news/430556578/four-qubit-quantum-processor-is-first-demonstrated-in-russia.html>  
<https://www.azoquantum.com/News.aspx?newsID=9305>  
<http://www.das-zone.com/view/chip/chip.html>  
<http://www.chinanews.com.cn/gn/2022/11-11/9892427.shtml>  
[https://assets.website-files.com/617730fbcf7b7c387194556a/62211b26eec38769e5954732\\_SPAM%20Results.pdf](https://assets.website-files.com/617730fbcf7b7c387194556a/62211b26eec38769e5954732_SPAM%20Results.pdf)  
<https://ionq.com/news/march-03-2022-barium-demonstrates-leading-readout>  
<https://journals.aps.org/prxquantum/abstract/10.1103/PRXQuantum.3.010347>  
<https://www.quantinuum.com/pressrelease/quantinuum-announces-quantum-volume-4096-achievement>  
<https://ionq.com/news/may-17-2022-introducing-ionq-forte> <https://www.quantinuum.com/pressrelease/quantinuum-completes-hardware-upgrade-achieves-20-fully-connected-qubits>  
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.129.140501>  
<https://medium.com/quantinuum/quantinuum-scientists-find-new-approach-for-optimizing-and-automating-qubit-reuse-133f13532713>  
<https://www.phy.pku.edu.cn/info/1031/7304.htm>  
<https://advance-studio.nl/quixquantumwebinar/>  
<https://phys.org/news/2022-05-efficient-optical-quantum-gates.html>  
<https://pennylane.xanadu.ai/>  
<https://phys.org/news/2022-06-world-ultra-fast-photonics-processor-polarization.html>  
<https://techxplore.com/news/2022-06-nanostructured-surfaces-future-quantum-chips.html>  
<http://news.ustc.edu.cn/info/1055/79882.htm>  
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-32083-9>  
<https://phys.org/news/2022-08-physicists-entangle-dozen-photons-efficiently.html>  
<https://journals.aps.org/prx/abstract/10.1103/PhysRevX.12.031033>  
<https://phys.org/news/2022-11-low-loss-chip-scale-programmable-silicon-photonics.html> <https://phys.org/news/2022-11-individual-quantum-high.html>  
<https://www.quandela.com/wp-content/uploads/2022/11/Quandela-The-first-European-quantum-computer-on-the-cloud-developed-by-Quandela.pdf>  
[https://www.photonics.com/Articles/Sound\\_Waves\\_Enable\\_Individual\\_Photon\\_Control\\_at/a68544](https://www.photonics.com/Articles/Sound_Waves_Enable_Individual_Photon_Control_at/a68544)  
<https://www.hpcwire.com/off-the-wire/harvard-and-quera-collaborators-observe-quantum-speed-up-in-optimization-problems/>  
<https://physics.aps.org/articles/v15/s55>  
<http://news.ustc.edu.cn/info/1001/79826.htm>  
<https://arxiv.org/abs/2207.06500>  
<https://www.sciencealert.com/we-have-a-new-record-for-the-fastest-two-qubit-quantum-gate-between-atoms>  
<https://pasqal.io/2022/09/14/pasqal-unveils-a-new-quantum-processor-architecture-with-a-record-324-atoms/>  
<https://quantumcomputingreport.com/quera-launches-their-256-qubit-analog-quantum-processor-on-aws/>  
<https://thequantuminsider.com/2022/11/12/m-squared-demonstrates-neutral-atom-quantum-computer/>  
<https://doi.org/10.1038/s41467-021-27880-7>  
<https://phys.org/news/2022-04-quantum-hardware-silicon.html>  
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-31618-4>  
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abq0455>  
<https://www.nature.com/articles/s41534-022-00615-2>  
<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0096467>  
<https://smallcaps.com.au/archer-materials-uses-cmos-technology-detect-quantum-information>  
<https://www.intel.com/content/www/us/en/newsroom/news/intel-hits-key-milestone-quantum-chip-research.html#gs.euc37d>  
[http://www.dicp.ac.cn/xwdt/twx/202212/t20221220\\_6585880.html](http://www.dicp.ac.cn/xwdt/twx/202212/t20221220_6585880.html) <https://www.eurekalert.org/news-releases/940698>  
<https://news.sjtu.edu.cn/jdzh/20220104/166429.html>  
<https://www.phy.pku.edu.cn/info/1031/7249.htm>  
<https://www.advancedsciencenews.com/stable-qubits-for-more-compact-quantum-computers/>  
<https://news.microsoft.com/innovation-stories/azure-quantum-majorana-topological-qubit/>  
[http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/202206/t20220608\\_6458801.html](http://www.iop.cas.cn/xwzx/kydt/202206/t20220608_6458801.html)  
<https://phys.org/news/2022-06-intricacies-superconductors-quantum.html>  
<https://phys.org/news/2022-07-characterizing-materials-next-generation-quantum-nonlinear.h>  
<https://www.microsoft.com/en-us/research/blog/azure-quantum-innovation-efficient-error-correction-of-topological-qubits-with-floquet-codes/>

<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.129.096601>  
<https://www.nanowerk.com/nanotechnology-news2/newsid=61820.php>  
<https://qutech.nl/2022/11/23/electron-pairing-quantum-dots-new-approach-qubit-research/>  
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.128.050503?ft=1>  
<https://q-ctrl.com/blog/q-ctrl-achieves-9000x-improvement-in-quantum-algorithmic-success>  
<https://physics.aps.org/articles/v15/106>  
<https://www.sciencedaily.com/releases/2022/07/220727110714.htm>  
<https://www.hpcwire.com/2022/08/04/aqt-reports-optimizing-swap-networks-for-quantum-computing-optimizing/>  
<https://www.newscientist.com/article/2332201-quantum-computer-can-simulate-infinitely-many-chaotic-particles/>  
<https://news.uchicago.edu/story/new-shortcut-quantum-simulations-could-unlock-new-doors-technology>  
<https://techxplore.com/news/2022-08-neural-networkbased-strategy-near-term-quantum.html>  
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-32550-3#Sec2>  
<https://www.nature.com/articles/s41598-022-15093-x>  
<https://phys.org/news/2022-09-method-systematically-optimal-quantum-sequences.html>  
<https://www.bnl.gov/newsroom/news.php?a=220699>  
<https://multiversecomputing.com/resources/quantum-algorithm-developed-for-financial-services-sector-successfully-builds-high-return-low>  
<https://www.nature.com/articles/s41598-022-20853-w#Sec5>  
<https://newsupdate.uk/important-breakthrough-in-quantum-computing-could-lead-to-more-efficient-batteries-and-solar-cells/>  
<https://www.nature.com/articles/s41598-022-20375-5>  
<https://phys.org/news/2022-10-molecular-multi-qubit-quantum.html>  
[https://www.theregister.com/2022/10/18/classiq\\_rollsroyce\\_hpc\\_simulation/](https://www.theregister.com/2022/10/18/classiq_rollsroyce_hpc_simulation/)  
<https://doi.org/10.1038/s41567-022-01813-7>  
<https://www.riverlane.com/press-release/riverlane-research-shows-potential-to-cut-quantum-drug-simulation-time-from-over-1-000-years-to-a-few>  
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/07433/>  
<https://www.hpcwire.com/off-the-wire/agnostiq-releases-covalent/>  
<https://www.bosonqpsi.com/post/bqphy-press-release>  
<https://strangeworks.com/newsroom/strangeworks-and-entangled-networks-partner-to-enable-multi-qpu-computers>  
<https://quantumcomputer.ac.cn/>  
<https://www.quantinuum.com/news/quantinuum-introduces-inquanto-to-explore-industrially-relevant-chemistry-problems-on-todays-quantum-computers>  
<https://aws.amazon.com/cn/blogs/quantum-computing/amazon-braket-launches-openqasm-support/>  
<https://nvidianews.nvidia.com/news/nvidia-announces-hybrid-quantum-classical-computing-platform>  
<https://queracomputing.github.io/Bloqade.jl/dev/>  
<https://opensource.googleblog.com/2022/07/Cirq-Turns-1.0.html>  
[https://world.einnews.com/pr\\_news/587791676/multiverse-computing-releases-new-version-of-singularity-sdk-for-portfolio-optimization-with-quantum-computing](https://world.einnews.com/pr_news/587791676/multiverse-computing-releases-new-version-of-singularity-sdk-for-portfolio-optimization-with-quantum-computing)  
[https://aws.amazon.com/cn/blogs/hpc/simulating-44-qubit-quantum-circuits-using-aws-parallelcluster/?trk=9c659ff1-495d-4870-ab96-cc87d9e3f237&sc\\_channel=el](https://aws.amazon.com/cn/blogs/hpc/simulating-44-qubit-quantum-circuits-using-aws-parallelcluster/?trk=9c659ff1-495d-4870-ab96-cc87d9e3f237&sc_channel=el)  
<https://www.quantinuum.com/pressrelease/quantinuum-sets-new-record-with-highest-ever-quantum-volume>  
<https://www.quantumcomputinginc.com/press-releases/qci-launches-free-software-that-enables-quantum-computing-annealing-customers-to-easily-and-rapidly-run-10000-variable-quantum-computing-problems/>  
<https://techxplore.com/news/2022-01-language-quantum.amp>  
<https://phys.org/news/2022-02-quantum-errors-tolerable.html>  
<https://wraltechwire.com/2022/06/10/quantum-computing-researchers-at-duke-observe-tipping-point/>  
<https://phys.org/news/2022-07-optical-quantum-fault-tolerant-threshold.html>  
<https://physics.aps.org/articles/v15/103>  
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-31679-5>  
<https://www.nature.com/articles/s41586-022-04853-4>  
<https://thequantuminsider.com/2022/07/22/quantinuum-scientists-show-how-bayesian-approach-leads-to-more-robust-circuits/>  
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.129.050602>  
<https://www.quantinuum.com/pressrelease/logical-qubits-start-outperforming-physical-qubits>  
<https://iiis.tsinghua.edu.cn/show-9696-1.html>  
<https://www.nature.com/articles/s41467-022-32094-6>  
<https://phys.org/news/2022-08-error-silicon-qubit.html>  
<https://www.eenewseurope.com/en/>  
<https://www.nature.com/articles/s41586-022-05117-x>  
<https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2022/9/486884.shtm>  
<https://phys.org/news/2022-09-quantum-technology-unprecedented-captured.html>  
<https://www.swissquantumhub.com>  
</zurich-instruments-introduces-labone-q-an-intuitive-software-framework-for-scalable-quantum-computing/>  
<https://www.riverlane.com/press-release/riverlane-unveils-breakthrough-in-quantum-error-detection>  
<http://www.cetc.com.cn/zgdk/1592960/1592965/1757991/index.html>  
<https://www.zhinst.cn/china/cn/products/shfqc-qubit-controller#specifications>

# Contact



5250 Fairwind Dr. Mississauga, Ontario, L5R 3H4, Canada



(+1) 929 530 5901



[infer@icvtank.com](mailto:infer@icvtank.com)



<https://www.icvtank.com/>



北京市东城区朝阳门SOHO 1507



(+86) 10 6517 5590



[zhangxinyu@quantumchina.com](mailto:zhangxinyu@quantumchina.com)



<https://www.quantumchina.com/>

