

## 量子计算现状：构建量子经济

**【译者按】**今年9月，世界经济论坛发布《量子计算现状：构建量子经济》。报告认为，近年来量子技术发展迅速，应用潜能逐步落地，但当前技术发展尚未成熟，网络安全问题和过高业务预期也影响着技术的开发应用。报告通过统计量子技术公共和私人投资，整理各国政府和企业参与情况，分析技术现状和评估标准，展望了量子技术在先进材料、复杂系统和新兴技术等领域的应用前景，进而提出从人才、法规和标准等方面入手加速量子技术成熟，释放应用潜力。赛迪智库信息化与软件产业研究所和科技与标准研究所对该报告进行了编译，期望对我国发展量子计算有所启迪。

**【关键词】**量子计算 量子经济 应用领域

量子计算作为一种全新的计算方式，不仅可以增强计算机功能，更有可能重塑应对气候变化、饥饿和疾病的能力，破解和更新常见的加密技术，带来巨大经济效益，对全球数字经济产生影响，并形成地缘政治战略意义。因此，量子计算也被全球主要经济体视为一项战略技术。

本报告从四方面解读量子计算：量子技术的国家规划、发展情况和投资水平，量子计算的发展潜能，构建量子计算机的现有方法，以及量子产业生态支持创新的必要条件。

## 一、飞速增长的量子计算经济

如今，各国政府和企业都在积极开创新式量子计算解决方案。拥有领先量子技术研发团队的国家已经着手进行战略投资，力求占领未来量子计算供应链的一环。

根据最新研究，量子技术公共投资已经超过 300 亿美元，该领域的私人投资仅在 2021 年就增加了 32 亿美元，在过去 10 年间更是增加了 55 亿美元以上<sup>1</sup>。

在公共投资和私人投资的推动下，致力于研发量子计算机或其关键组件的各类企业应运而生。标志量子技术发展的里程碑事件在全球各地上演：2016 年第一台量子处理器通过

---

<sup>1</sup> 来源：麦肯锡咨询公司，《量子技术监测报告》，2022 年，<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20computing%20funding%20remains%20strong%20but%20talent%20gap%20raises%20concern/quantum-technology-monitor.pdf>。

云访问向所有人开放<sup>2</sup>；2019年谷歌宣布实现量子霸权<sup>3</sup>，研发的量子处理器可在几分钟内完成当时全球性能最强的计算机需要两天才能完成的复杂计算量，实现里程碑式的突破。

### （一）全球计划和公共投资

亚洲、北美、欧洲和澳洲采取不同策略推动量子计算发展。美国于2019年制定《国家量子计划法案》<sup>4</sup>，成立了量子经济发展联盟，全面支持量子技术发展。加拿大及其地方政府出台了量子技术发展战略规划。

在欧洲，英国、荷兰、德国和法国都制定了国家量子技术发展计划和战略，公共投资总额超过70亿美元<sup>5</sup>。欧盟委员会启动了总经费高达11亿美元的“欧盟量子技术旗舰计划”，致力于量子技术开发和商业化。

亚洲各国也已经深耕量子技术多年。新加坡在21世纪初就开始关注量子信息发展。中国在“十三五”规划中将量子计算作为国家技术发展的重要任务，过去十年间，中国在量子技术领域投资超过10亿美元，规划的长期公共投资将高达150亿美元<sup>6</sup>。日本和韩国从2019年起开始正式制定量子

<sup>2</sup> 来源：IBM，《IBM 云计算中心提供量子计算技术，以加速创新》（新闻稿），2016年5月4日，<https://uk.newsroom.ibm.com/2016-May-04-IBM-Makes-Quantum-Computing-Available-on-IBM-Cloud-to-Accelerate-Innovation>。

<sup>3</sup> 来源：Elizabeth Gibney，“你好，量子世界！谷歌发布里程碑式量子霸权声明”，《Nature》，2019年10月23日，<https://www.nature.com/articles/d41586-019-03213-z>。

<sup>4</sup> 来源：《国家量子计划法案》，美国国会，2018年6月26日，<https://www.congress.gov/bill/115th-congress/house-bill/6227/text>。

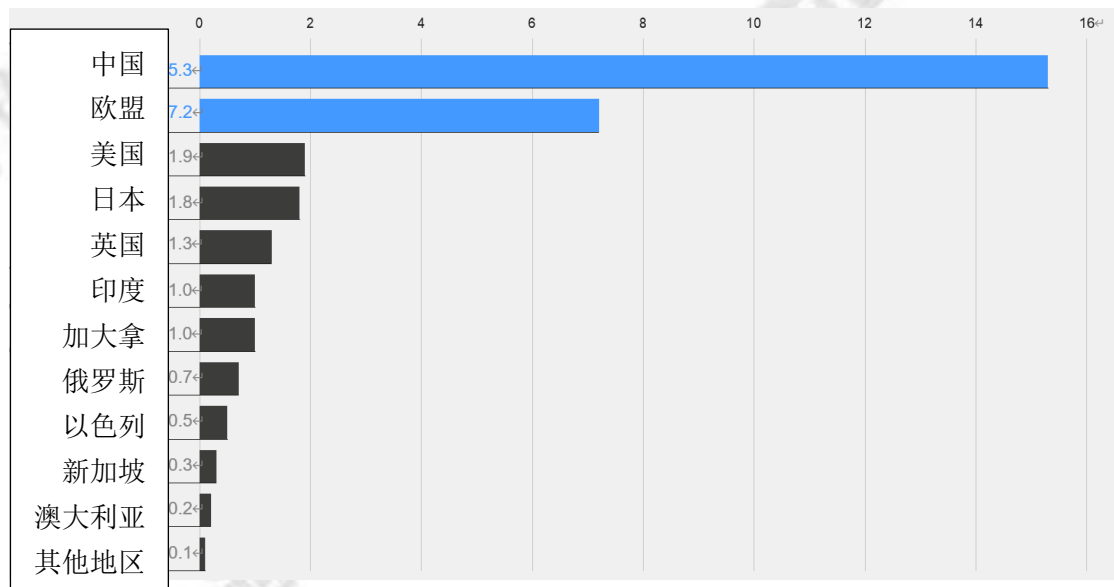
<sup>5</sup> 来源：麦肯锡咨询公司，《量子技术监测报告》，2022年，<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20computing%20funding%20remains%20strong%20but%20talent%20gap%20raises%20concern/quantum-technology-monitor.pdf>。

<sup>6</sup> 来源：“中国准备建设千亿级国家实验室作为量子计算产业化初步试点”，《First Financial》，2018年9月6日，<https://www.sciping.com/18028.html>。

战略。印度于 2022 年初宣布将在未来五年投入逾 10 亿美元，用于发展量子技术。

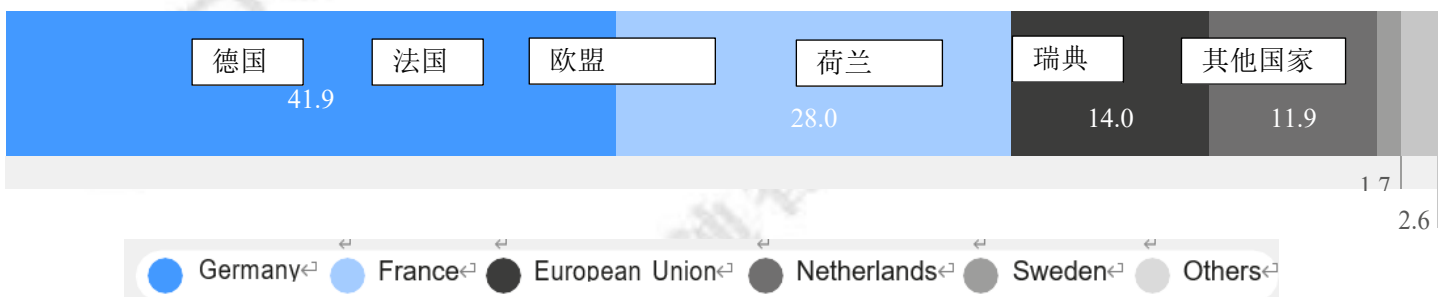
澳大利亚在 2020 年公布国家量子技术产业路线图，并在 2021 年宣布成立新的量子技术商业化中心。世界其他地区的量子技术发展活动还包括 One Quantum、非洲的量子技术飞跃计划以及 QWorld 等，总体来说，中国和欧盟在量子技术投资额方面遥遥领先（见图 1）。

图 1：中国和欧盟在量子计算公共投资方面遥遥领先



政府宣布的计划投资额（单位：十亿美元）

欧盟公共投资来源 (%)

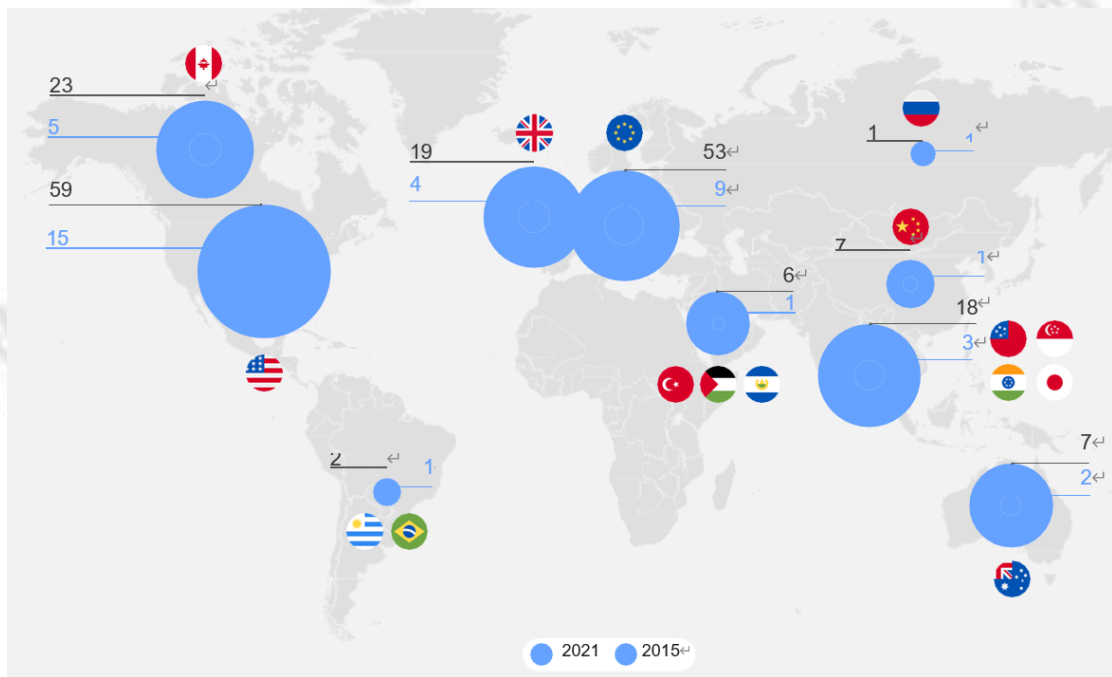


来源：麦肯锡咨询公司

## （二）私人投资

私人投资金额和量子计算初创企业数量同步快速增长。1999 年第一家量子计算商业公司成立，13 年后，第一家量子计算软件公司成立<sup>7</sup>。目前为止，全球已成立 196 家量子计算相关的初创企业<sup>8</sup>。

图 2：量子计算初创企业分布概览



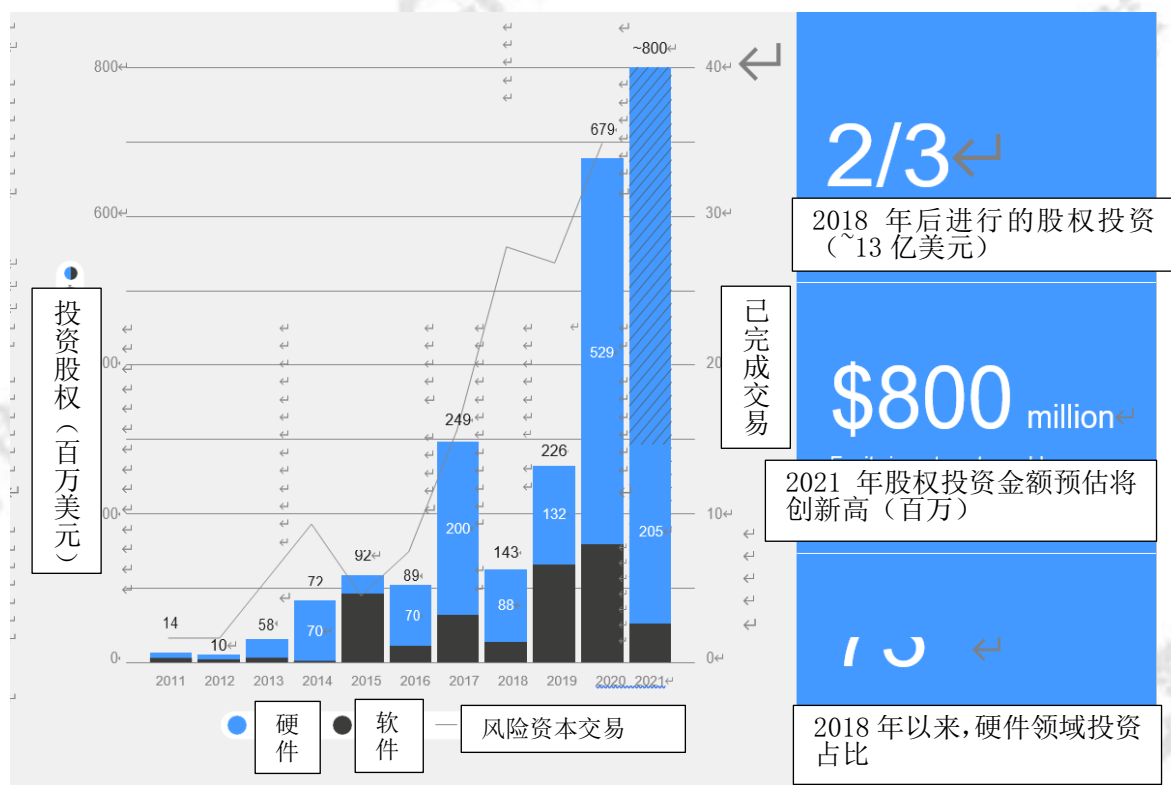
注：并非详尽分布状况

来源：麦肯锡咨询公司

<sup>7</sup> 来源：麦肯锡咨询公司，《量子技术监测报告》，2022 年，<https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/mckinsey%20digital/our%20insights/quantum%20computing%20funding%20remains%20strong%20but%20talent%20gap%20raises%20concern/quantum-technology-monitor.pdf>。

<sup>8</sup> 来源：“量子计算的崛起”，麦肯锡，2021 年 12 月 14 日，<https://www.mckinsey.com/featured-insights/the-rise-of-quantum-computing>。

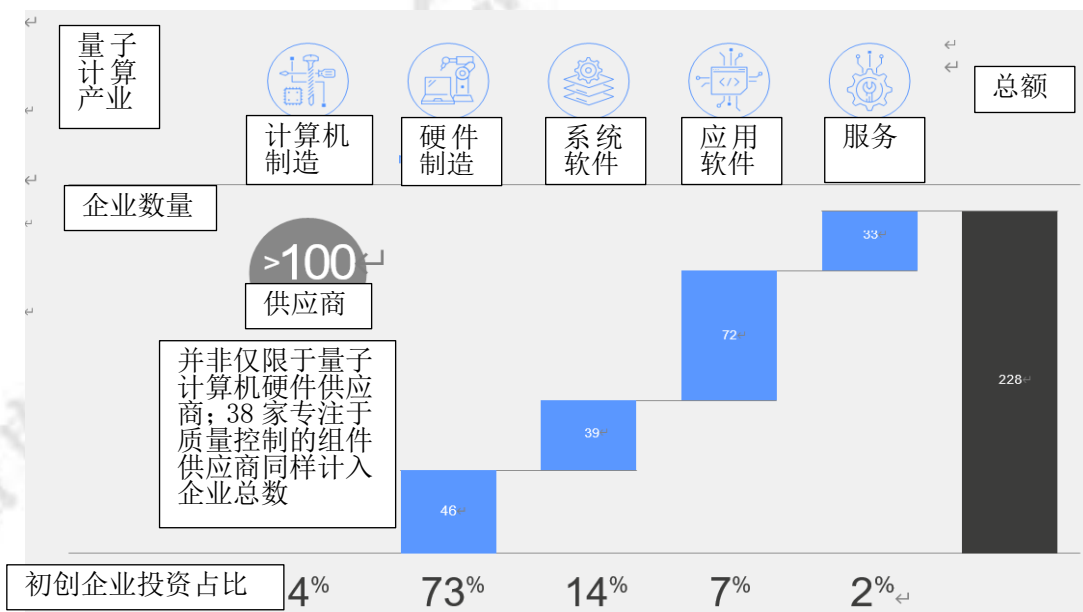
图 3：超三分之二的量子计算股权投资发生在 2018 年以后



来源：波士顿咨询公司

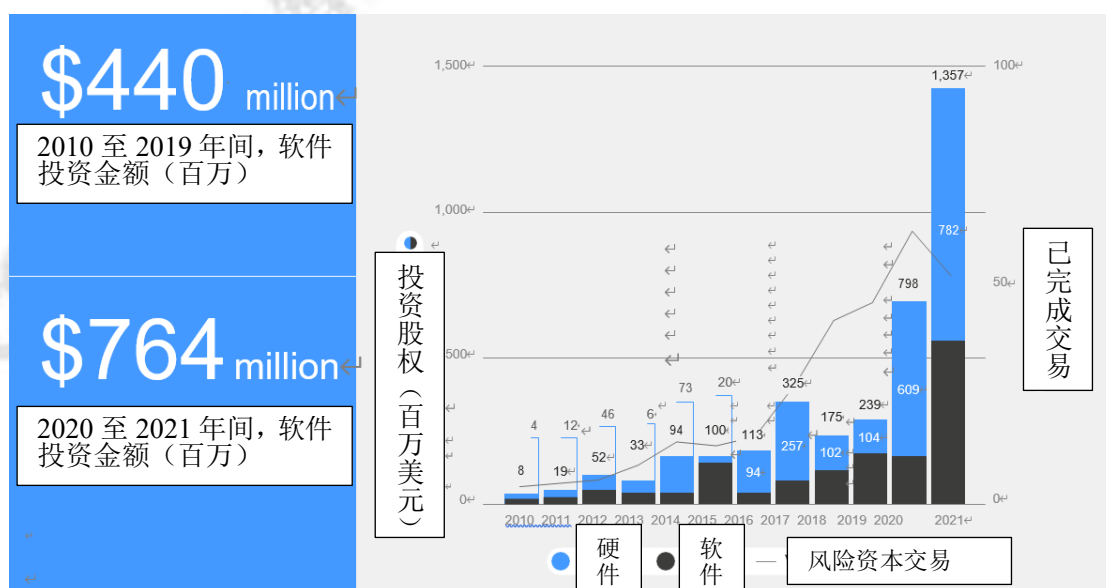
到 2020 年，超过 90% 的私人投资流向硬件开发商，但软件和算法初创企业的增长速度却超过硬件初创企业。这是由于硬件开发需要大量投资，但多数人相信应用程序能够创造巨大价值。

图 4：初创企业投资分配



来源：麦肯锡咨询公司

图 5：随投资增多，资金更多集中于软件领域



企业从私人投资转向 IPO、兼并收购以及新初创企业。

多家量子计算公司通过特殊目的收购公司（SPAC）完成首次公开募股（IPO）。

表 1：量子计算 SPAC 交易

公司	交易所	SPAC	宣布日期	进款
IonQ	纽约证券交易所	SPAC dMY Technology Group, Inc III	2021 年 3 月 8 日	6.36 亿美元
Rigetti <sup>9</sup>	NASDAQ	SPAC Supernova Partners Acquisition Company II	2021 年 10 月 6 日	2.6175 亿美元
Arqit <sup>10</sup>	NASDAQ	Centricus Acquisition Corp.	2021 年 5 月 12 日	7000 万美元
D-Wave <sup>11</sup>	纽约证券交易所	DPCM Capital	2022 年 2 月 8 日	900 万美元（偿还后）

IonQ 是第一家公开上市的量子计算专营公司<sup>12</sup>，紧随其后，Rigetti、Arqit 和 D-Wave 也相继完成 IPO。

合并收购也同样在欧洲上演，2021 年，德国 Rohde & Schwarz 技术公司收购瑞士 Zurich Instruments 公司<sup>13</sup>；2022 年 1 月，荷兰 Qu & Co 公司与法国 Pasqal 公司合并<sup>14</sup>；几个月后，丹麦 QDevil 公司并入以色列 Quantum Machines 公司<sup>15</sup>。

<sup>9</sup> 来源：“Rigetti 宣布进行 SPAC 交易”，Rigetti Computing，2021 年 10 月 6 日，<https://www.rigetti.com/merger-announcement>。

<sup>10</sup> 来源：Manfredi Lefebvre，“Centricus Acquisition Corp.将与量子加密技术领域领导者 Arqit Limited 合并”，美通社，2021 年 5 月 12 日，<https://www.prnewswire.com/news-releases/centricus-acquisition-corp-to-combine-with-arqit-limited-a-leader-in-quantum-encryption-technology-301289698.html>。

<sup>11</sup> 来源：Mehnaz Yasmin 等人，“量子计算公司 D-Wave 将通过 16 亿美元的 SPAC 交易上市”，路透社，2022 年 2 月 8 日，<https://www.reuters.com/technology/quantum-computing-company-d-wave-go-public-via-16-blnc-spac-deal-2022-02-08/>。

<sup>12</sup> 来源：“IonQ 成为第一家上市的专营量子计算公司；完成与 dMY Technology Group III 的业务合并”，IonQ，2021 年 10 月 1 日，<https://ionq.com/news/october-01-2021-ionq-listed-on-nyse>。

<sup>13</sup> 来源：Zurich Instruments 公司，《Zurich Instruments 并入 Rohde & Schwarz 公司》（新闻稿），2021 年 7 月 5 日，<https://www.zhinst.com/ch/en/news/zurich-instruments-now-rohde-schwarz-company>。

<sup>14</sup> 来源：Pasqal 公司，《量子初创企业 Pasqal 和 Qu & Co 公司宣布合并，以此实现全球市场互补解决方案》（新闻稿），2022 年 1 月 11 日，<https://pasqal.io/2022/01/11/quantum-startups-pasqal-and-quco-announce-merger-to-leverage-complementary-solutions-for-global-market/>。

<sup>15</sup> 来源：Frederic Lardinois，“Quantum Machines 收购 QDevil，构建全栈量子编排平台”，TechCrunch，



## 二、量子计算的当前和未来功能

量子计算作为一种补充技术，有助于推动材料科学、生物学和复杂系统转型，并对安全、区块链和人工智能领域产生重大影响。

### （一）新的计算可能

普遍认为，拥有更快计算速度的量子计算机将取代传统计算机，但事实并非如此，由于两者各有优势，将实现共存。

#### 栏目 1：传统计算机将继续执行大部分功能

传统计算机将与量子计算机共存，负责支持混合数据中心的量子计算处理 workflow，例如运行量子线路，并继续处理量子计算机不适合完成的日常任务，例如复制数据，或量子计算机不能提供任何有改进意义的任务，例如浏览网站、阅读电子邮件等。

量子计算机有望解决量子模拟、优化、量子线性代数和质因数分解等关键数学和物理问题，而解决这些抽象问题将在三个领域创造广泛价值（见表 2）。

表 2：量子计算应用领域

应用领域	材料科学与生物学	复杂系统	现有科技与研究
具体行业	能源、粮农、制造	金融、运输与物流、	大量使用 AI、区块

	业、化工、医药。	涉及复杂产品的行业（航空、汽车等）。	链或高性能计算（HPC）的行业、能源和材料行业、数字通信、国防安全。
<b>量子计算应用</b>	开发、设计新分子和新材料。	管理和优化存在大量变量或未知数的复杂系统。	对 AI、区块链等现有技术和科研进展产生影响。
<b>环境与社会影响</b>	减少能源消耗；增强碳捕获；提高材料和工艺效率；开发更强健和环境友好的作物品种；加快发现疾病；实现个性化医疗。	减少全球网络能源消耗和排放；构建循环商业模式。	颠覆当前密码学，建立隐私安全性更强的密码学；加快基础科学研究探索与发现。
<b>例证</b>	培植更加适应自然的谷物，提高粮食产量，避免单一种植。	优化集装箱空箱空间，实现环境效益和经济效益。	加速机器学习算法训练。
<b>潜在量子问题</b>	量子模拟、优化、量子线性代数和质因数分解。		

来源：世界经济论坛—全球量子计算未来委员会

## （二）有重大影响的关键应用领域

### 1、材料科学—走进新发现时代

分子、化学反应、固体中原子核或电子等系统或反应过程都属于量子力学，而理解这些过程的行为和特性是物理学、化学和生物学的核心挑战，是制药、能源、农业和材料科学进步的基础。由于原子和分子的性质及其相互作用由量子力学决定，量子计算机天然适合建模，可以极大地加速这些领

域的发现进程。

## (1) 先进材料

新的量子计算能力有可能在分子、聚合物和固体等不同精度水平上建立量子力学模型系统。

对于化学工业而言，在实验室合成单个分子之前<sup>16</sup>，可以确定完成特定任务和达到所需效果的最有效分子设计或结构。对于制造业和建筑业，可以更快地设计出具备所需重量、耐久性和柔韧性的新合金、织物和涂料等。

TotalEnergies 和 Quantinuum 公司正在使用量子算法，通过模拟金属-有机框架的行为来开发部署新型碳捕获材料。

## (2) 能源生产存储

材料科学在能源工业最直接的量子计算应用，在于实现发电和电力存储能源系统部件及能源过程的建模研究，并且一些用例有望显著提高能源效率。

模拟钙钛矿来制造更高效的太阳能电池，其中包括采用量子计算机模仿和学习植物的自然光合作用<sup>17</sup>。发现能够加速特定化学反应的高效催化剂，从而降低能源成本，提高碳封存的可行性和效率。模拟气相过程(热裂解、热解、燃烧)，在各种过程和产品中提高能源生产和使用效率。

<sup>16</sup> 来源: Florian Budde 与 Daniel Volz, “下一大事件——量子计算对化学品的潜在影响”, 麦肯锡咨询公司, 2019 年 7 月 12 日, <https://www.mckinsey.com/industries/chemicals/our-insights/the-next-big-thing-quantum-computings-potential-impact-on-chemicals>。

<sup>17</sup> 来源: Amit Katwala, “量子计算机已经破解了自然界奥秘”, 《Wired》, 2021 年 6 月 17 日, <https://www.wired.co.uk/article/quantum-computing>。

梅赛德斯-奔驰和 PsiQuantum 最近分享的研究成果表明，电动汽车电池设计中使用量子计算，运行速度可以提高一个数量级<sup>18</sup>。

### (3) 粮食生产

根据材料科学逻辑，一切事物都具备分子结构，因此量子计算可以成为加速现有粮食生产过程，解决以往难解（化学）问题的必要工具。

提高化肥(氮)生产(占全球二氧化碳排放量的 1%-2%)的能源效率<sup>19</sup>。量子模拟和优化工具可用于设计作物特需型保护化学品，显著减少碳足迹以及对植物生长的副作用。

苏黎世联邦理工学院和微软的理论概念验证已经探讨了量子计算机在模拟固氮过程中的适用性。

### (4) 医疗健康

量子计算有助于我们更好地了解 and 照顾自己的身体。

更有效的药物设计将大大减少评估比较新化合物及其“体外”特性的计算障碍。大大缩短基因组测序时间，为下一步药物设计、个性化医疗铺平道路，解决特定患者生物标记问题，在理论上能提高治疗效率。

Biogen、Boehringer Ingelheim、Roche、Pfizer、Merck 和 Janssen 等领先制药公司已经开始和量子计算公司建立合作

<sup>18</sup> 来源: Isaac H. Kim、Ye-Hua Liu、Sam Pallister、William Pol、Sam Roberts 及 Eunseok Lee, “评估量子化学模拟的容错资源: 以锂离子电池电解质分子为例”, 《Physical Review Research》, 2022 年 4 月 7 日, <https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/PhysRevResearch.4.023019>。

<sup>19</sup> 来源: 麻省理工学院, “化肥与气候变化”, <https://climate.mit.edu/explainers/fertilizer-and-climate-change>。

伙伴关系，研究量子计算及其相关应用。

## 2、复杂系统建模—优化实时决策

量子计算机天然适合于处理包含固有结构<sup>20</sup>和多重变量数据的复杂系统。随着众多行业部门在计划和操作中愈加依赖数据，量子计算机将有助于各行业优化机器学习过程，发现新思路，从而制定更加有效和精确的决策。

### (1) 金融、投资和保险产品

上述概念最直接的应用在于金融行业，银行、信用合作社和贸易公司在决策时都需要处理大量数据。

通过分析处理数十亿甚至数万亿的金融交易及其地点、时间、商家历史、支付习惯等相应数据，银行可以识别异常活动并标记潜在欺诈行为。通过提高评分模型的速度和复杂性，增加社交媒体或其它多样化信用指标，丰富信用评分体系，进而提升贷款盈利能力，覆盖没有银行账户的客户。优化证券和衍生品估值，在风险定价中融入接近实时的多种市场因素，最终应用到投资组合风险评估、分析和优化。

### (2) 运输、物流和供应链

根据实时道路状况和需求，调整优化公共交通路线。优化国际运输和配送路线，强化预期和服务中断管理。管理和协调涉及数千业务伙伴的全球供应链，降低影响交付的国家

---

<sup>20</sup> 来源：Liu Yunchao、Srinivasan Arunachalam 和 Kristan Temme，“监督的机器学习中严密而稳健的量子加速”，《自然物理》第 17 卷 1013-1017 号刊，2021 年 7 月 12 日，<https://doi.org/10.1038/s41567-021-01287-z>。

和宏观风险因素。

德国联邦铁路公司已经开始探索将量子计算机用于定期列车调度，以及在降低成本的同时，增加铁路系统容量和频次<sup>21</sup>。

### （3）新产品设计

量子计算机可以通过模拟材料或先进系统，以及通过比较选项来优化产品组件，完成多变量的复杂设计任务。

在航空航天领域，为了完美协调最终产品功能，需要在材料、结构、重量分布、灵活性和成本等多方面进行大量工程设计，新型号开发往往需要几年到几十年时间，而量子计算有望大大提速这一过程，并彻底改进装备质量。这一逻辑也适用于制造业领域，量子技术可以改进最终产品性能，整体提高新产品质量、加快开发速度和缩短上市时间。

2019年，空客发起量子计算挑战赛<sup>22</sup>，世界各地的竞赛团队使用量子计算方法，解决新型飞机开发的五项关键设计问题。获奖团队的开发算法证明量子计算可以优化飞机的有效载荷能力，从而实现效益最大化、优化燃烧率和降低整体运营成本<sup>23</sup>。

---

<sup>21</sup> 来源：剑桥量子公司，《剑桥量子公司与德国铁路公司达成合作伙伴关系》（新闻稿），2021年11月11日，<https://cambridgequantum.com/cambridge-quantum-deutsche-bahn-partnership/>。

<sup>22</sup> 来源：“空客量子计算挑战赛-引领飞行物理学走入量子时代”，空客公司，<https://www.airbus.com/en/innovation/disruptive-concepts/quantum-technologies/airbus-quantum-computing-challenge>。

<sup>23</sup> 来源：空客公司，《空客量子计算挑战将推进可持续飞行》（新闻稿），2020年12月10日，<https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2020-12-airbus-quantum-computing-challenge-helps-advance-sustainable-flight>。

### 3、对现有技术、数字基础设施和研究的影响

一方面，量子计算有望优化机器学习算法，并为物理、化学、生物学和先进材料等基础科学提供新发展机遇；另一方面，量子计算有可能对数字通信安全，乃至国家安全产生颠覆性影响。

#### (1) 网络安全

现代数字系统、产品服务依靠特定数学问题加密来保障数据采集、存储和交换安全。传统计算机无法解开这些加密问题，但量子计算可在几分钟或几天内迅速解决<sup>24</sup>，使得密码破解成为可能。例如，如果在通用可扩展量子计算机（目前尚未出现）上使用肖尔算法（1994年开发的一种量子算法），可以破解目前所有数字通信密码，危及现有的公钥加密算法。

量子计算还将在数字加密领域带来诸多风险，比如数据泄露，特别是敏感的健康或财务数据；解密私人商业数字通信，包括电网等关键基础设施；破坏数字文件完整性；以及破解区块链和加密货币等。

值得庆幸的是，部分企业已经掌握可行方法，开始准备或已全面过渡到能抵御量子计算机攻击的安全基础设施上。首先，采用后量子密码学—量子计算机无法破解的新加密算法。其次，使用量子随机数发生器（QRNG）来保护通信安全，放弃当前技术生成的伪随机数。最后，采用量子密钥分

---

<sup>24</sup> 来源：Craig Gidney 和 Martin Eker， “如何利用 2000 万量子比特在 8 小时内分解 2048 位 RSA 整数”，《Quantum》第 5 卷第 433 页，2021 年 4 月 15 日，<https://doi.org/10.22331/q-2021-04-15-433>。

配技术（QKD），利用量子通信来交换加密密钥。

## （2）人工智能

量子计算的一项主要应用场景是更高效地解决机器学习算法问题，改进人工智能应用，例如量子辅助模型生成的数据可提高天气预报准确性<sup>25</sup>。

通过加速机器学习训练进程，构建超强计算性能的突破性模型，量子计算有机会促成人工智能民主化的整体转变。在理论上，量子计算无需访问超大规模数据中心，就能够以短时间和低成本训练复杂模型，从而为小企业创造发展机会。通过提高训练速度，企业可以过渡升级到处理实时数据流，并不断改进人工智能应用程序，开创新的用例和业务模式。

## （3）国防安全

量子计算机可应用于各类国防领域，包括开发军事装备和武器材料，访问敌方安全通信线路和开展模拟战斗，但关键用例仍然是破解 RSA 加密。2022 年 5 月 4 日，美国总统办公室发布备忘录，要求存有漏洞的国家系统过渡到能够抵御量子计算威胁的加密模式，标志着美国成为首个在国家层面针对潜在量子计算威胁，采取安全行动的国家。

认识到量子技术潜力后，北约启动全球首支 10 亿美元级的多国新兴技术创新基金<sup>26</sup>，投资量子计算等两用技术开

---

<sup>25</sup> 来源：Graham R.Enos 等人，“采用混合量子经典机器学习的综合气象雷达”，arXiv 网站，2021 年 11 月 30 日，<http://arxiv.org/abs/2111.15605>。

<sup>26</sup> 来源：北大西洋公约组织，《北约成立创新基金》（新闻稿），2022 年 6 月 30 日，[https://www.nato.int/cps/en/natohq/news\\_197494.htm](https://www.nato.int/cps/en/natohq/news_197494.htm)。



发的早期企业。中国人民解放军通过军事科学院<sup>27</sup>和合作学术机构资助量子研究。

#### **(4) 技术突破**

量子计算模拟优化和机器学习有助于促进对原子核、粒子、高分子物理、流体和天体物理学、等离子体科学、化学、材料和生物学等各科学领域的基本理解，这也是许多科学家研究量子计算机的深层次动机。

### **三、技术现状**

随着多项技术途径同步发展，量子技术实现稳步提升。构建量子计算机的两种方法——超导量子比特和捕获离子——目前已经超越其它方法，达到更加先进的发展水平，多种硬件平台也将在未来迎头赶上并发挥作用。

#### **1、量子计算机运行的关键部件**

量子计算依赖于组件的层次结构或“堆栈”，以确保其使用方便性、互操作性、可扩展性和可再现性。虽然量子计算堆栈的所有组件，在影响计算的质量和速度方面均具有重要作用，但最关键的组件应当是量子硬件（实际运行量子线路的地方，例如量子比特处理器或 QPU）和将要运行的量子线路（应用于多个量子比特的量子操作序列）。

当前的量子机器并不完美，只能运行部分量子算法（以及应用程序）；最有优势和前途的量子应用（如肖尔算法）将

---

<sup>27</sup> 来源：Elsa B. Kania, “中国追求量子优势——战略和国防创新的新前沿”，《战略研究期刊》第 44 卷 6 号 922-952 页，2021 年 12 月 27 日，<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01402390.2021.1973658>。

需要更先进的可扩展量子硬件。

## 2、量子计算机发展水平

目前，处于竞相开发状态的量子计算系统依赖于各种量子物理相互作用来定义量子比特。创建和控制量子比特所需的硬件和条件，根据被控制的量子活动差异而各不相同。

虽然方法有所不同，但量子计算系统发展却具备相同的里程碑基本特征：1、系统必须能够创建具有良好特性<sup>28</sup>的量子比特；2、系统必须能够实现量子比特的初始化、普遍控制和可测量计算；3、系统必须能够纠正量子比特物理硬件实现过程中的固有错误；4、系统必须能够大规模实现上述所有特征。

基于以上特征，所有硬件平台可以根据到 2022 年中期实现的里程碑特征进行分类（参见表 3，其中一级为早期阶段，三级为最先进技术，高级别系统可以满足低级别系统的所有需求）。

虽然超导量子比特和捕获离子硬件平台发展势头领先，但其他平台和方法也将迎头赶上。从长远来看，多种硬件方法很可能共存，并基于各自的固有优势，在新的量子计算生态系统中找到自己的定位。

值得注意的是，目前还没有系统能够达到第四级别，实现大规模运行。简而言之，“大规模”可以理解为在一次计算

---

<sup>28</sup> 来源：“DiVincenzo 的标准”，加州大学戴维斯分校，2022 年，<https://qc-at-davis.github.io/QCC/How-Quantum-Computing-Works/DiVincenzo's-Criteria/DiVincenzo's-Criteria.html>。

中能够控制 100 万个量子比特，理论上就是能够创建足够数量的纠错量子比特，以在现实应用中展示量子优势。

表 3：量子计算硬件平台发展成为通用量子计算机的成熟等级划分

成熟等级	一级	二级	三级	四级
里程碑特征	平台具备相关性（创建量子比特）	平台具备通用门集（控制量子比特）	平台具备量子纠错和/或误差抑制功能	平台具备大规模的 1-3 级特征
硬件平台（非详尽）	T-cell 优点：芯片集成潜力、可扩展。	中性原子 优点：量子比特稳定、错误率低、模块化、量子比特相同。 光子模拟器 优点：全连接、可扩展、量子比特抗干扰。 自旋系统 优点：芯片集成潜力、运行速度、稳定性。 NV 中心 优点：芯片集成潜力、稳定性、模块化。	超级量子比特 优点：运行速度快、可集成、相对容易制造。 捕获离子 优点：全连接、模块化、量子比特相同。	尚无

来源：世界经济论坛-全球量子计算未来委员会

### 3、最优量子计算机

截至 2022 年，构建具备现实应用能力的量子优势计算机需要应对三项主要挑战：规模、质量和速度。

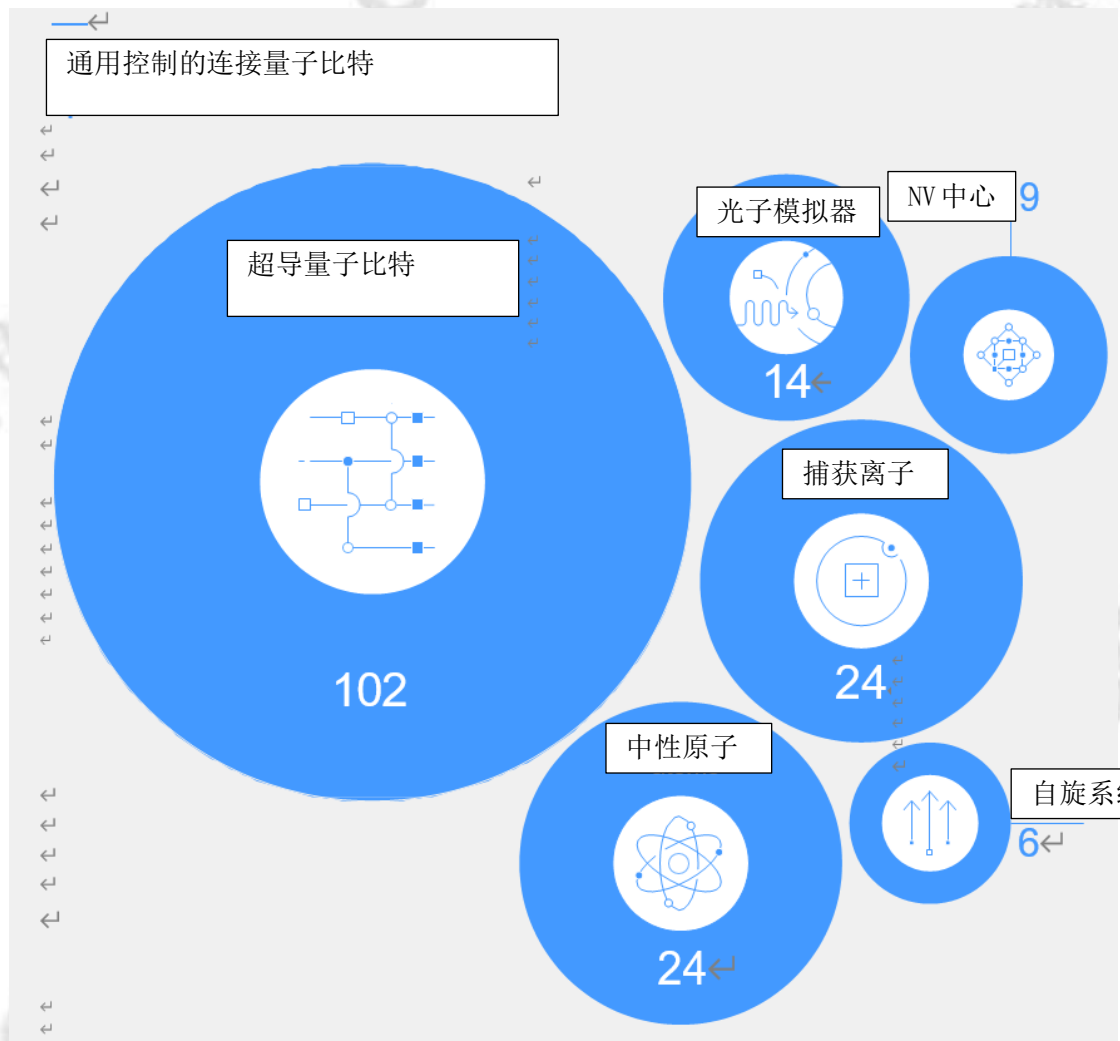
#### (1) 规模

量子比特的数量可以表征硬件的可扩展性，但不能解释量子比特和量子操作的质量或速度。根据所考虑的量子比特的不同，数量可能出现大幅波动。

一种观测平台规模的方法（参见图 6）是计算通用控制

连接量子比特的最大数量。需要再次强调的是，各项指标都有其局限性，不应将其作为评估平台的独立指标。

图 6：量子计算平台规模比较：通用控制的连接量子比特的最大数量



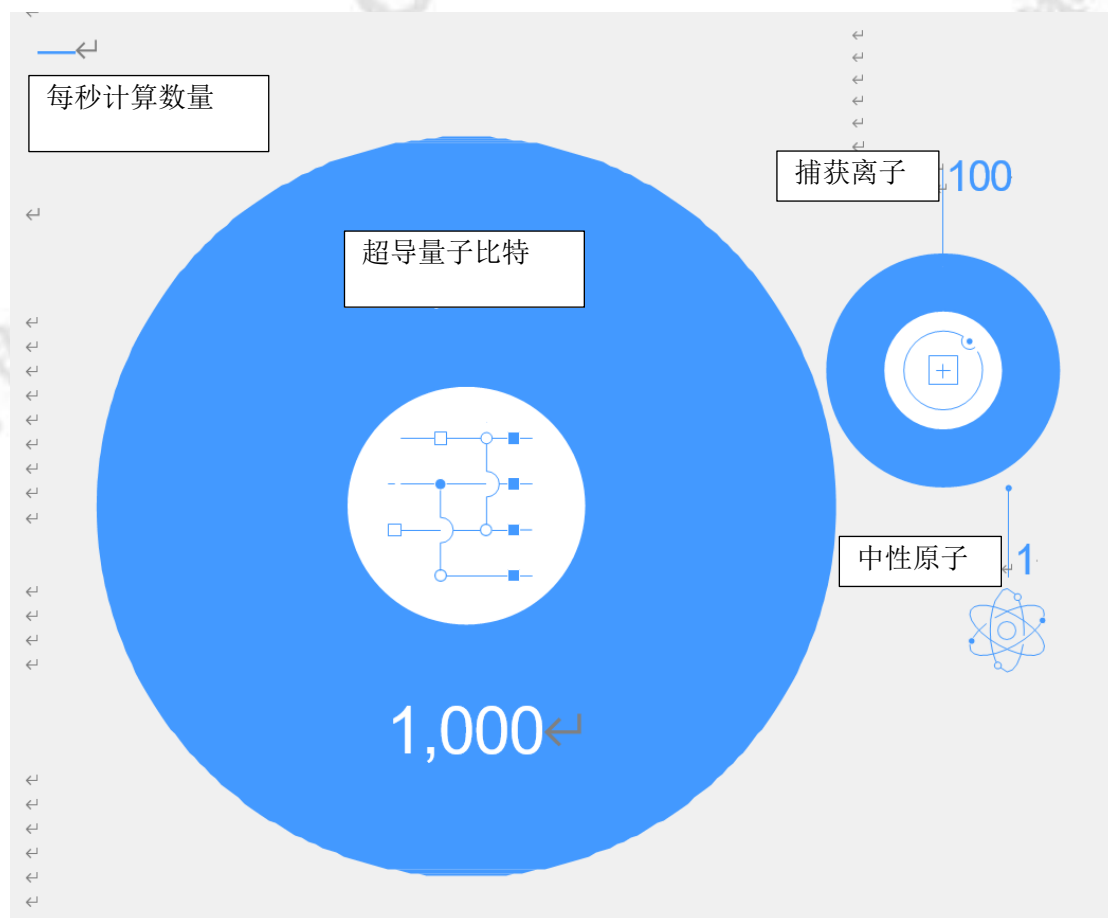
来源：世界经济论坛—全球量子计算未来委员会

## (2) 速度

量子计算机的计算速度是通过在给定时间内运行线路（或算法）数量来衡量的。因此，量子计算机的“每秒计算次数”不能与传统计算机的类似基准进行比较。在实际计算

中，量子计算机很可能需要运行大量线路来提高精度。

图 7：量子计算平台速度比较：给定时间内运行的线路数量

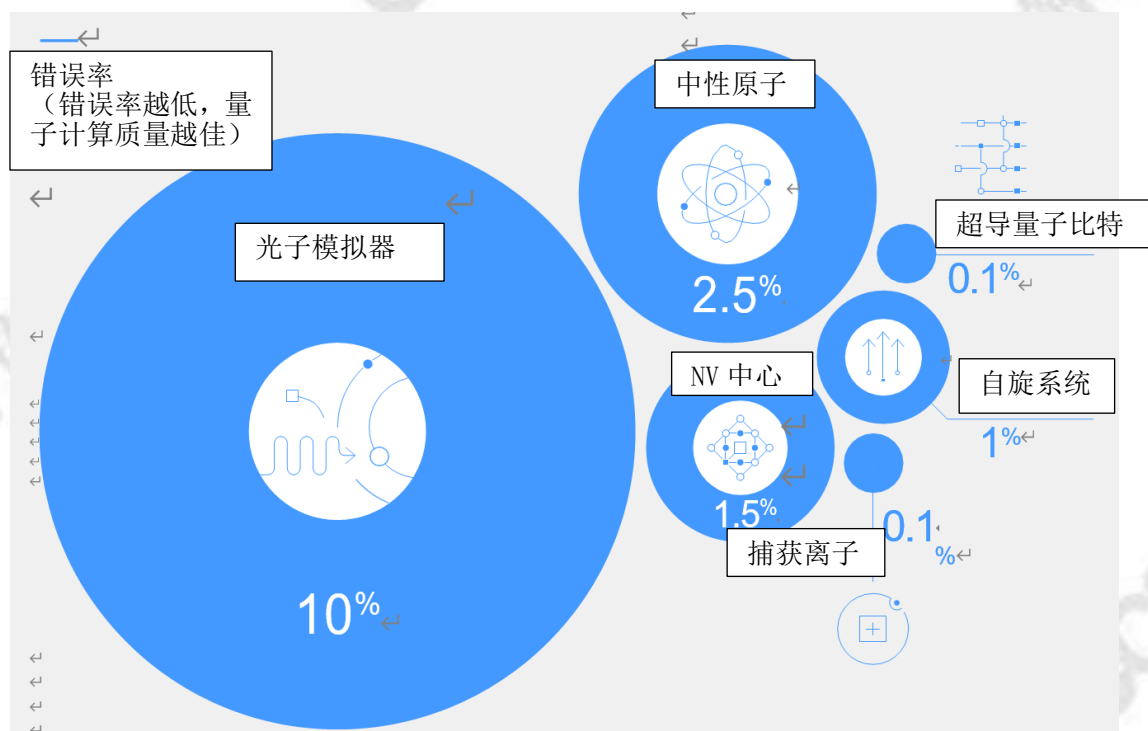


来源：世界经济论坛—全球量子计算未来委员会

### (3) 质量

量子计算的质量是通过量子线路运行结果的准确性（即错误率）来衡量的。不同复杂程度的量子线路将表现出显著的误差特性差异（参见图 8）。

图 8：量子计算平台质量比较：双量子比特门错误率



来源：世界经济论坛—全球量子计算未来委员会

上述整体测量方法试图在排除硬件偏差的基础上，考虑基础硬件的若干特征，从门和测量误差、连接性、串扰和其他随机噪声等方面，更全面地了解量子计算机的应用。

系统性能基准测试的其他方法还包括“应用导向”方法：结合速度和质量，观察特定算法的执行情况，跟踪有效量子优势的进展。

#### 4、应用程序运行的硬件要求

根据量子计算硬件要求，目前所有的量子应用可以分为两种类型：容错应用（要求硬件级别高于三级）和短期应用（可以在二级和三级硬件上运行）。

容错应用与现有计算方法相比具有相对优势，但是需要借助具备量子纠错功能的先进量子计算机才能实现。

短期应用可以在现有量子计算机上运行，但尚不清楚这类应用程序是否或何时具备超越传统计算机运行的应用程序优势。

总之，对于非容错量子计算机能否实现量子优势，目前尚无定论，但可以肯定的是，目前存在噪声的量子计算机误差抑制技术已经可以运行少量应用程序，足以满足查询需求。

#### 四、解锁量子技术潜能

量子计算技术若要应用于实际问题，需要在劳动力供给和发展，政策法规以及标准化等“赋能”领域取得进展。

**劳动力供给和发展：**学术界、政府、公共和私营企业都需要量子劳动力。除现有劳动力外，还需要对未来劳动力发展与培训予以重视，包括大学学位、高中课程和其他教育内容，如书籍、演讲和在线课程。此外，量子劳动力发展必须建立在产业界、政府和学术界合作的基础上。

**政策法规：**政策有助于规范员工和其他利益相关者的技术开发和应用行为。目前，政策和法规覆盖范围涵盖量子硬件的获取、技术伦理以及国际合作。鉴于量子技术的战略重

要性，世界各地纷纷采取了政策干预措施，包括出口管制、投资审查和战略伙伴关系。

**标准化：**标准化有助于促进量子产业之间各方面的协作和交流，包括量子硬件、工具、软件以及算法中的标准。技术开发标准能够提高研究人员和工程师的开发速度和基准测试水平。量子产业术语标准化可以制定通用语言，促进产业内部和外部利益相关者之间的沟通。值得注意的是，标准化制定应当十分谨慎，一旦使用不当，将严重阻碍技术发展。

## 五、结论

疫情期间，特别是在过去一年，量子技术开发及其云访问方面取得较大进展，并推动了企业早期的应用测试。

私人投资成为了除公共投资外，发挥决定性作用的因素，标志着量子技术开始从实验室走向现实世界。

促使政府和企业采取行动的因素包括：首先，当量子计算机超越传统计算机性能时，可能出现供应短缺；其次，量子计算开发者需要商业合作伙伴来引导技术发展；最后，即使量子技术前景不能说服相关组织采取行动，或者量子计算技术对这些组织影响较小，但其仍然会面临网络安全问题。

政府和企业需要采取的进一步行动包括：开展广泛的公私合作和竞争前合作，扩大现有劳动力发展和研究计划规模，并就通用语言和绩效标准达成共识，同时结合新的政策和法规，确保符合道德和可靠性要求的技术开发和应用。



随着用户在量子技术上开展创造合作的规模不断扩大，人类可以更快地进入创新、增长和繁荣的黄金时代，并有机会通过量子技术实现脱碳来应对气候变化。

译自： *State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy*,  
*September 2022 by The World Economic Forum*

译文作者： 赛迪工业和信息化研究院      杨辰凌 杨磊  
联系方式： 17611541661  
电子邮件： [yangchenling@ccidthinktank.com](mailto:yangchenling@ccidthinktank.com)

**赛迪智库**

面向政府 服务决策

# 咨询翘楚在这里汇聚

规划研究所

工业经济研究所

电子信息研究所

集成电路研究所

产业政策研究所

科技与标准研究所

知识产权研究所

世界工业研究所

无线电管理研究所

信息化与软件产业研究所

军民融合研究所

政策法规研究所

安全产业研究所

网络安全研究所

中小企业研究所

节能与环保研究所

材料工业研究所

消费品工业研究所

编辑部：工业和信息化部赛迪研究院

通讯地址：北京市海淀区万寿路27号院8号楼12层

邮政编码：100846

联系人：王乐

联系电话：010-68200552 13701083941

传真：010-68209616

网址：[www.ccidwise.com](http://www.ccidwise.com)

电子邮件：[wangle@ccidgroup.com](mailto:wangle@ccidgroup.com)

报：部领导

送：部机关各司局，各地方工业和信息化主管部门，  
相关部门及研究单位，相关行业协会

编辑部：赛迪工业和信息化研究院

通讯地址：北京市海淀区紫竹院路 66 号赛迪大厦 8 层国际合作处

邮政编码：100048

联系人：黎非凡

联系电话：(010) 88559658 15117933026

传真：(010) 88558833

网址：[www.ccidgroup.com](http://www.ccidgroup.com)

电子邮件：[lifeifan@ccidthinktank.com](mailto:lifeifan@ccidthinktank.com)

