下载日志已记录，仅供内部参考

2026 年 09 月 08 日

中小盘研究团队

量子科技系列报告（二）：多技术路线并行演进，量子计算长期成长空间广阔

——中小盘主题

周佳（分析师）

zhoujia@kysec.cn

证书编号：S0790523070004

● 可实现指数级计算加速，量子计算长期发展空间广阔

算机是一种基于量子力学原理构建的计算设备，因其指数级的计算加速能力被公认为下一代计算架构，具有广阔的长期发展空间。具体而言，量子计算机利用量子并行性和量子态演化，在特定问题（如大数分解、量子化学模拟）上可实现对经典计算机的显著超越。目前，量子计算正处于从 NISQ（含噪声中等规模量子）向容错计算过渡的关键节点，伴随摩尔定律逼近物理极限催生的算力刚需、全球各国政策持续加码赋能，以及金融、医药、材料等下游应用场景加速渗透，产业增长确定性持续凸显。根据 ICV TA&K 统计，全球产业规模预计将从 2025 年的 61 亿美元快速扩容至 2035 年的 8,117 亿美元。

● 技术路线“百花齐放”，收敛时点尚未到来

当前，量子计算仍处于多技术路线并行演进的阶段，技术收敛时点尚未到来。超导路线成熟度最高，率先迈入早期容错阶段，但对环境温度敏感、比特数增加后系统复杂度高；离子阱路线逻辑门保真度拔尖，已完成容错运算闭环，但可扩展性较弱、操作速度偏慢；中性原子路线全同性禀赋优异，规模化扩展潜力突出，是超导路线最有力的挑战者，但逻辑门操控能力和保真度有待提升；光量子路线相干时间长、可室温运行，且与现有光纤通信基础设施天然适配，算通融合价值独特，但光子间相互作用弱，制约大规模通用计算拓展；硅基路线兼容传统半导体制造工艺，规模化潜力大，拓扑路线天然具备硬件容错特性，但二者当前工程化进度仍相对滞后。

● 本周板块行情：平均涨跌幅为-6.41%，A 股标的中罗普特领涨

8 月 31 日-9 月 4 日 Wind 量子技术指数（884208.WI）-0.54%，若以 2025 年 12 月 31 日为基准，指数累计+7.53%，同期沪深 300 指数-2.22%。统计范围内的量子科技 A 股相关标的本周平均涨跌幅为-6.41%，涨幅前五标的分别为罗普特（+8.3%）、神州信息（+3.7%）、格尔软件（+3.3%）、吉大正元（+2.9%）、科大国创（+1.7%）；涨跌幅排名后五标的分别为频准激光（-14.3%）、国仪公司（-13.4%）、纬德信息（-10.7%）、华立股份（-3.8%）、国盾量子（-3.3%）。美股方面，ARQIT QUANTUM（+6.6%）、IQM QUANTUM（+2.0%）、IONQ（+0.8%）、INFLEQTION（+0.4%）、QUANTINUUM（-0.54%）。港股方面，国富量子（+8.33%）。

● 风险提示：技术研发与迭代不及预期、产业落地进度不及预期、下游应用场景需求不及预期。

相关研究报告

《并购精选（2026 年第 6 期）：本批新锐股份、欧科亿、民爆光电值得重点跟踪—中小盘并购精选》-2026.9.7

《次新股说（2026 年第 8 期）：本批嘉立创、展芯股份、超纯应材值得重点跟踪—中小盘次新股说》-2026.9.4

《碳市场月报：《碳排放权交易管理暂行条例》迎来首次修订，市场量价齐升态势延续—中小盘主题》-2026.9.3

下载日志已记录，仅供内部参考

目 录

1、 本周主题：多技术路线并行演进，量子计算长期成长空间广阔 4
1.1、 量子计算：基于不确定性与非局域性的算力飞越 4
1.1.1、 量子计算的实现：通过逻辑门实现量子态操纵 4
1.1.2、 超越经典计算的底层逻辑：不确定性与非局域性 6
1.1.3、 量子计算的发展历程：从思想实验到价值落地的跨越 8
1.2、 量子计算的现状：多路线并行演进，技术收敛时点尚未到来 9
1.2.1、 超导路线：工程化成熟度领跑，率先迈入早期容错阶段 11
1.2.2、 离子阱路线：逻辑保真度拔尖，已完成容错运算闭环 13
1.2.3、 中性原子路线：全同性禀赋优异，规模化扩展潜力突出 16
1.2.4、 光量子路线：量子比特的理想载体，算通融合价值独特 18
1.2.5、 硅基与拓扑路线：实现工艺兼容与硬件容错，工程化进度仍待突破 20
1.3、 未来展望：增长确定性凸显，量子计算步入加速发展期 24
1.3.1、 摩尔定律的“失效”：量子计算需求具备刚性支撑 25
1.3.2、 全球政策协同加码：量子计算发展制度保障坚实 26
1.3.3、 下游应用加速渗透：量子计算商业价值逐步兑现 27
2、 本周板块回顾：板块平均涨跌幅为-6.41%，A 股罗普特领涨 28
3、 行业动态：IBM 发布 Nighthawk r2，“本源悟空”破解量子随机存储器扩展难题 30
3.1、 IBM 发布 Nighthawk r2，每秒可执行超 10 万个电路 30
3.2、 美国国会议员提出《美国量子竞争力法案》，推动量子技术发展 31
3.3、 “本源悟空”破解量子随机存储器扩展难题 31
3.4、 本源量子计算关键核心部件氧化钌温度传感器获合肥某科技公司采购 31
3.5、 熵函数近日成功完成数千万元天使轮融资，金沙江创投领投 31
3.6、 Diraq 将在 Equinix 数据中心内部署量子计算机，加速硅基量子计算商用 31
4、 个股动态：华立股份量子智算中心落地郑州，IonQ 推进离子阱计算机导入化学领域工作流 32
4.1、 华立股份与图灵量子共建的中原首个量子智算中心落地 32
4.2、 IonQ 与 QC Ware、qBraid 等公司合作，推进离子阱计算机在化学领域的应用 32
4.3、 Xanadu 更新技术路线图，计划 2031 年实现超 1000 个逻辑量子比特 32
4.4、 Pasqal 与 KACST 及 True Nexus 合作，扩大在沙特阿拉伯的业务 32
4.5、 Quantinuum 与阿美签署非约束性谅解备忘录，探索工业量子计算 33
5、 风险提示 33

图表目录

图 1： 量子比特的布洛赫球面（Bloch sphere）表示：$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$ 4
图 2： 量子计算的运算结果一般不是确定值，而是概率分布 6
图 3： 主流量子算法包括量子傅里叶变换及量子搜索算法 7
图 4： 量子计算发展可被分为四个阶段 8
图 5： 3 种量子比特的电路模型和势能与能级图 12
图 6： 稳定“囚禁”在势阱中的离子：白点代表离子，黄箭头代表直流电场，绿箭头代表交流电场 14
图 7： Quantinuum 第三代 QCCD 离子阱量子计算机 Helios 的几何形状类似于玫瑰花结 15
图 8： 中性单原子量子计算的概念架构：原子冷却—原子排列—激光操控—荧光采集 17

下载日志已记录，仅供内部参考

图 9： “九章四号”可编程光量子处理器为容错光量子计算与大规模量子信息处理开辟全新路径 19
图 10： 在硅晶格中放置单个磷原子作为量子比特，用电学手段操控翻转 21
图 11： 非阿贝尔任意子可编织“世界线” 23
图 12： Microsoft Majorana 2 包含 12 个量子比特，量子态平均寿命达 20 秒 23
图 13： 行业正从 NISQ 走向容错计算，将进入更快发展阶段 24
图 14： 全球量子计算产业规模将于 2035 年达到 8,117 亿美元 25
图 15： 晶体管数量不断增长，密度正逼近物理极限 26
图 16： Wind 量子技术指数（884208.WI）本周-0.54% 29
图 17： 罗普特、神州信息、格尔软件表现出色 29
图 18： 频准激光、国仪公司、纬德信息跌幅居前 29
图 19： 美股 ARQIT QUANTUM、IQM QUANTUM 等涨跌幅位居板块前列 30
图 20： A 股相关标的平均涨跌幅为-6.41% 30

表 1： 常用的量子逻辑门有 Pauli-X 门、Pauli-Y 门、Pauli-Z 门、Hadamard 门等 5
表 2： 多种量子计算路线“百花齐放”，尚未收敛 9
表 3： 主流技术路径各有优劣，路线选择本质是在不同指标间的权衡取舍 10
表 4： 不同类型的量子比特各有优劣 12
表 5： 离子阱系统通常使用离子的一对内部能级表示量子比特的|0⟩和|1⟩状态，根据二能级选择标准不同，离子量子比特通常可分为 3 种类型 14
表 6： 全球各主要经济体密集发布政策以强化量子计算技术主权 27
表 7： 量子计算公司密集上市，营收逐渐形成规模（单位：亿美元） 28

下载日志已记录，仅供内部参考

1、 本周主题：多技术路线并行演进，量子计算长期成长空间广阔

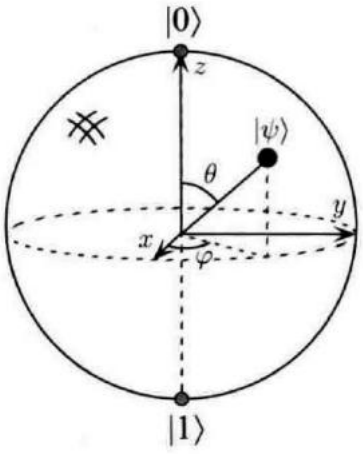
1.1、 量子计算：基于不确定性与非局域性的算力飞越

量子计算机是一种基于量子力学原理构建的计算设备，是以量子比特为基本单元，利用干涉、叠加、纠缠等量子特性，通过量子门操作对量子态进行演化，最终通过测量获取计算结果的物理系统。与经典计算机不同，量子计算机利用量子并行性和量子态演化，在特定问题（如大数分解、量子化学模拟）上可实现对经典计算机的指数级加速，具有重大战略意义和科学价值，被认为是实现未来算力飞跃的重要手段之一。

1.1.1、 量子计算的实现：通过逻辑门实现量子态操纵

与经典计算机相同，量子计算也是通过逻辑门和连线构造线路实现对比特的操纵。具体而言，量子计算机由量子比特（quantum bits）或量子位（qubits）构成，一个量子比特对应一个状态(state)。有两种特殊的量子态对应于经典比特的“0”和“1”，即计算基态（computational basis state）——“|0⟩”与“|1⟩”。更一般地而言，多数量子态为叠加态（superposition state），即|0⟩和|1⟩的线性组合。而逻辑门负责通过幺正变换操控单个或多个量子比特的量子态（叠加、相位、纠缠等）。量子计算中，常用的量子逻辑门有 Pauli-X 门、Pauli-Y 门、Pauli-Z 门、Hadamard 门等。

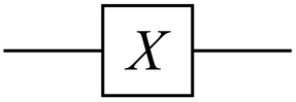
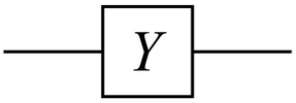
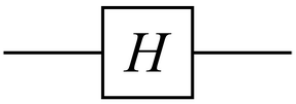
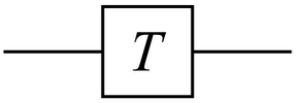
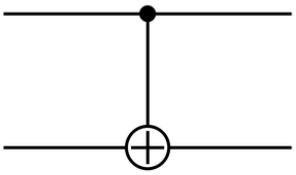
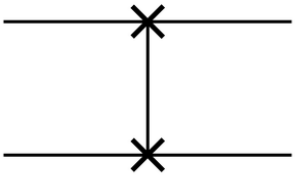
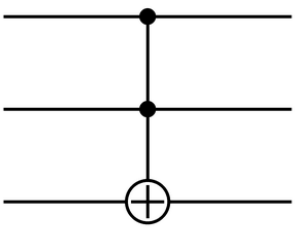
图1：量子比特的布洛赫球面（Bloch sphere）表示：$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$



资料来源：量子计算与量子信息：10 周年版 /（美）迈克尔 A. 尼尔森（Michael A. Nielsen），（美）艾萨克 L. 庄（Isaac L. Chuang）著；孙晓明等译

下载日志已记录，仅供内部参考

表1：常用的量子逻辑门有 Pauli-X 门、Pauli-Y 门、Pauli-Z 门、Hadamard 门等

量子逻辑门	图示	作用
Pauli-X 门（非门）		经典非门的推广，|0⟩状态变为|1⟩，反之亦然。
Pauli-Y 门		若把量子态 $\alpha\|0\rangle+\beta\|1\rangle$写成向量形式$\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\end{bmatrix}$，则 Pauli-Y 门的输出为$Y\begin{bmatrix}\alpha\\ \beta\end{bmatrix}=i\begin{bmatrix}\alpha\\ -\beta\end{bmatrix}$
Pauli-Z 门		保留基本状态|0⟩不变，并且将|1⟩换成|-1⟩。从二维坐标平面来看，Z 门的结果是将量子比特绕其中一个坐标轴进行 180°旋转。
哈达玛（Hadamard）门		把基态变成叠加态，即将以|0⟩和|1⟩为基矢的空间转化为以|+⟩和|−⟩为基矢的空间。
T 门（π/8 门）		在 Bloch 球面上绕水平面旋转 45°。
受控非（CNOT）门		当第一个量子比特（称为控制量子比特）为|1⟩时，对第二个比特（称为目标量子比特）执行非操作，否则维持不变。
交换（SWAP）门		实现两个输入量子比特的互换。
Toffoli 门		前两个量子比特均为|1⟩时，对第三个量子比特执行 Pauli-X 门操作；其余情况下保持不变。

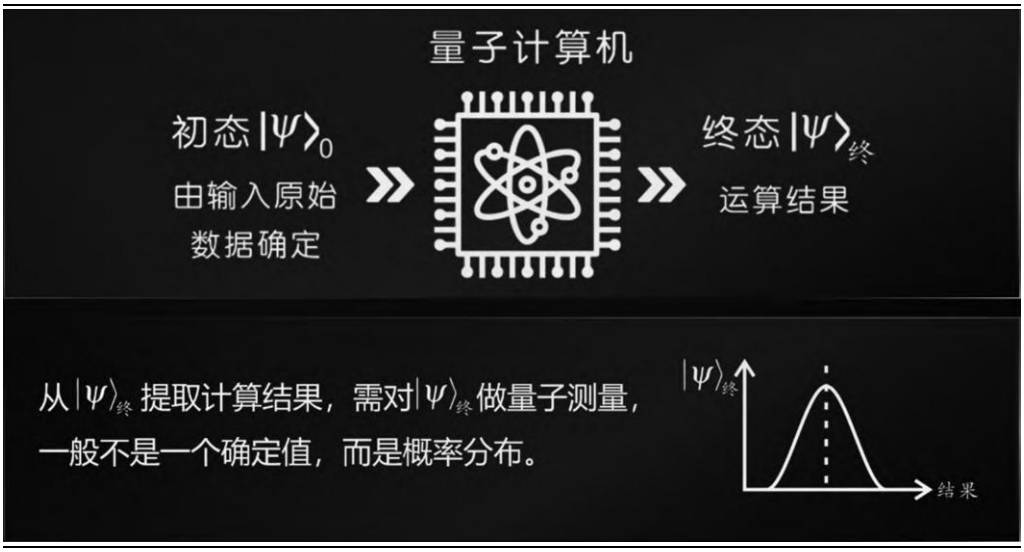
资料来源：张登玉,谭咏康.经典逻辑门与量子逻辑门[J]、FUTURE 远见、开源证券研究所

值得注意的是，**任何系统的量子态（包括量子比特及其他系统）均无法直接观**

下载日志已记录，仅供内部参考

察（因为测量前不存在一个确定的状态），因此在一系列量子门操纵量子态的计算过程结束后，（通常）需要进行测量才能得到计算结果。常规的从量子计算机中提取信息的方式为**计算基中的测量（Measurement in the Computational Basis）**：假设一个量子比特处于 $\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$状态，当在计算基中测量这个量子比特时，它会以概率$|\alpha|^2$给出结果 0，以概率$|\beta|^2$给出结果 1。这就是玻恩定则（Born rule）在单量子比特上的表现形式，其历史来源可追溯到马克斯·玻恩 1926 年关于散射过程的论文。随后，波函数坍缩会使得系统自己的状态也改变为测量结果。换言之，**量子测量不是把一个早已存在的经典答案读出来，而是按照概率幅的结构抽取结果，并把量子态改写成与这个结果相容的状态。**

图2：量子计算的运算结果一般不是确定值，而是概率分布



资料来源：郭光灿.量子计算发展现状——2025 年全国高等物理基础课程教育学术研讨会大会报告[J]

1.1.2、 超越经典计算的底层逻辑：不确定性与非局域性

相较于经典世界，**量子特性有两个重要方面：不确定性和非局域性，二者共同构成量子计算超越经典计算的基础。**

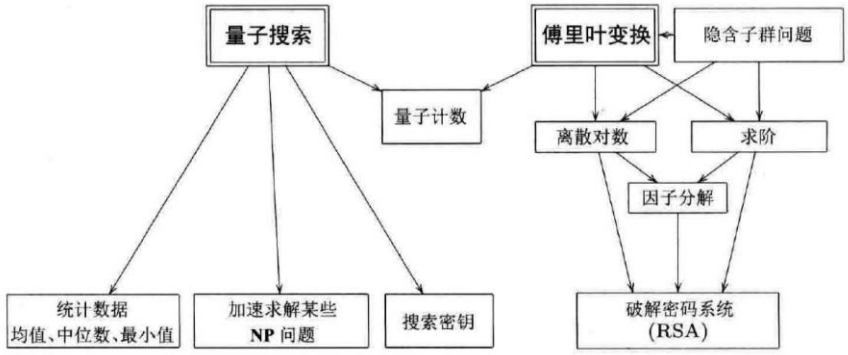
不确定性方面，量子世界与宏观世界不同，微观粒子的物理量并不总是在任意时刻都拥有固定数值。当粒子处在某些状态下，对同一物理量进行重复测量，并不会始终得到相同结果，而是会出现多种可能的测量值，每种结果对应一定的出现概率。如根据海森堡不确定性原理，如果精确定位粒子的位置，此时它的运动快慢（动量）就会变得模糊；反之，如果确定粒子的动量，其空间位置就会变得模糊。但这并不意味着位置或动量单独无法具有确定取值。通过描述微观粒子状态的波函数，可知在某一位置找到该粒子的概率大小；当粒子处在某些特殊状态（如本征态）时，其能量也可具有确定不变的数值。**因量子信息的不确定，量子比特为“0”和“1”按一定权重的叠加（即前文所述的叠加态：$|\psi\rangle=\alpha|0\rangle+\beta|1\rangle$）。**也就是说，$N$个量子比特可用来同时储存 2^n 个信息数字（information digits）或 2^n 个量子经典状态（$|\psi\rangle=c_0|00\cdots0\rangle+c_1|00\cdots1\rangle+\cdots+c_{2^n-1}|11\cdots1\rangle$）。与之相对的是，经典计算机使用 N个比特来同时储存 N个信息数字或一个经典状态。假设有一个用于 N个经典比特（一个经典状态）的函数 f，运算需要 T(1)=s 个时间单位，当将 f 应用于 N个量子比特（2^n 经典状态）时，运算所需时间同样是 T(2^n)=s 个时间单位，即在同一时段内，一个量子计算机能够同时处理 2^n 个值，而一个经典计算机只能处理 N个值

下载日志已记录，仅供内部参考

（一个经典状态）。这种内在并行性表示出使用量子系统计算问题比使用经典系统计算问题具有时间上的优势。

目前，已知有两大类量子算法实现了相对于最优秀经典算法的平方量级加速，第一类算法基于 Shor 提出的量子傅里叶变换，包括求解因子分解和离散对数问题的著名算法；**第二类算法是基于 Grover 提出的量子搜索算法。**这些算法有许多潜在应用，如量子搜索算法可以比经典计算机更快地从无序数据集中提取统计数据，例如最小元素；对于 NP 类中直接搜索解是已知最佳算法的问题，它可以进行加速；它也可以用来加速搜索密码系统的密钥，例如广泛使用的数据加密标准（DES）。量子傅里叶变换可用于求解离散对数和素因子分解问题。而这些结果可用来破解许多目前使用的最流行的密码系统，包括 RSA 密码体制。傅里叶变换也与一个数学中的重要问题——寻找隐含子群（求周期函数周期的推广）密切相关。

图3：主流量子算法包括量子傅里叶变换及量子搜索算法



资料来源：量子计算与量子信息：10 周年版 /（美）迈克尔 A. 尼尔森（Michael A. Nielsen），（美）艾萨克 L. 庄（Isaac L. Chuang）著；孙晓明等译

非局域性（量子纠缠）方面，这一特性的本质是两个或更多客体间某个物理量的关联。例如，两个无纠缠粒子，其自旋取向是随机且独立的。但若通过量子门等操作使它们的自旋总保持相反，即建立了关联，形成了纠缠。由于纠缠的存在，每个粒子的自旋状态不再完全自由，会受到另一个粒子状态的制约。作一直观类比，若将这两个纠缠粒子分别置于地球和月球，在地球上测量得到粒子自旋向下，则可立即知月球上的粒子自旋必向上。此变化是瞬时的，无需传递信号。因为关联早已存在，地球上粒子的测量结果决定了月球粒子状态。此过程并未传递信息。受时代局限，爱因斯坦曾据此质疑量子力学的完备性，认为需要超光速信号，这与相对论矛盾，他称之为“幽灵般的超距作用”。

纠缠具有重要应用：例如，芯片中 N 个量子比特若部分相互纠缠，则操作其中一个比特，所有与之纠缠的比特状态都会瞬时关联变化，为计算带来巨大优势。如前文所述，量子计算机具有并行运算能力，但并行运算结果的提取是一大挑战。因为运算结果是一个量子态，需要通过测量才能得到经典数据，而测量结果具有概率性。20 世纪 80 年代，物理学界面临如何有效提取结果的问题。后来数学家 Peter Shor 作出了重大贡献，他提出将量子纠缠性质应用于量子计算，从而最大限度地提取信息。具体而言，Shor 算法通过量子操作，使代表正确答案的量子态振幅相干相长（概率趋近于 1），而不需要的结果相干相消（概率趋近于 0），从而以极高概率提取出最终所需的经典结果。这一量子算法构建了能够利用并行运算能力的程序，使量子计算机的算力得以超越电子计算机。

下载日志已记录，仅供内部参考

1.1.3、 量子计算的发展历程：从思想实验到价值落地的跨越

总体而言，量子计算的发展可划分为**四个阶段。**目前，在理论与实验的相互驱动及科学与工程的协同并进下，**量子计算已从思想实验演变为全球科技竞争的战略制高点，正处于从实现科学演示到创造实用价值的关键转折期。**

图4：量子计算发展可被分为四个阶段



资料来源：王正安,时运豪,范桁.量子计算机的现状与发展[J]

第一阶段，理论奠基与思想萌芽（20 世纪初——80 年代）。量子计算的根基深植于 20 世纪初诞生的量子力学。普朗克、爱因斯坦、玻尔和海森堡等物理学家的革命性发现，揭示了微观世界遵循着与经典物理截然不同的奇特规律，为一种全新的计算范式埋下了伏笔。然而，将量子力学与计算真正联系起来的思想火花出现在 20 世纪 80 年代，物理学家 Benioff 在 1980 年首次描述了计算机的量子力学模型，提出了"量子图灵机"的概念，从理论上证明了计算机可以在量子力学定律下运行。1 年后，物理学家 Feynman 在一场著名演讲中指出，由于世界本质上是量子的，要精确模拟物理世界，就需要一台遵循量子规则的计算机。他提出了"量子模拟器"的构想，这极大激发了学界对量子计算的兴趣。1985 年，牛津大学的物理学家 Deutsch 发表了一篇里程碑式的论文，定义了一种能够模拟任何物理过程的"通用量子计算机"。这不仅为量子计算提供了坚实的理论框架，也开启了量子算法的研究。

第二阶段，算法突破时代（20 世纪 90 年代）。这是量子算法的黄金时代，一系列"杀手级应用"的出现，向世界展示了量子计算的惊人潜力。1994 年，数学家 Shor 提出了 Shor 算法。该算法能够以指数级速度分解大整数，对现代基于大数分解难题的公钥密码体系（如 RSA 算法）构成了根本性威胁。1996 年，贝尔实验室的计算机科学家 Grover 提出了 Grover 算法，该算法能够以二次方加速在无结构数据库中进行搜索。1995 年，为了应对量子比特固有的脆弱性，Shor、Steane 等开创了量子纠错理论，证明了从原理上可以保护量子信息免受噪声干扰，这让人们相信可扩展的量子计算是可能实现的。

第三阶段，实验探索与硬件起步（20 世纪 90 年代末——21 世纪 10 年代）。理论的突破推动了实验的进展，科学家们开始尝试将抽象的量子比特和量子门在物理世界中实现。1998 年，首个量子算法（Deutsch 问题）被成功实验演示。当时的研究人员利用一个 2 量子比特的核磁共振（Nuclear Magnetic Resonance，NMR）量子计

下载日志已记录，仅供内部参考

算机完成了这一壮举，标志着量子计算从“纸上谈兵”走向了“物理实现”。1999年，第一个超导量子比特被成功制造出来，为后来成为主流技术路线之一的超导量子计算奠定了基础。在这一时期，IBM 公司、Google 公司等科技巨头开始投入研发，逐步构建出可供外界访问的早期量子原型机。

第四阶段，NISQ 时代与产业化浪潮（2018 年至今）。近年来，量子计算的发展进入快车道，当前正处于一个被物理学家 Preskill 在 2018 年定义的“含噪声的中等规模量子”（NISQ）时代。2019 年，Google 公司宣布其 53 量子比特的“悬铃木”处理器在特定计算任务上超越了当时最强的超级计算机。其后，各大技术路线的量子比特数量和质量都在快速提升。IBM 公司、Google 公司、IonQ 公司、Quantinuum 公司等，以及中国的研究机构不断刷新量子处理器的规模和性能纪录。如今，量子计算不再是少数顶尖实验室的专属。通过 IBM Quantum、Microsoft Azure Quantum、Amazon Braket 等云平台，全球的研究人员、开发者和企业都可以远程访问真实的量子计算机，极大地推动了应用探索和生态系统的繁荣。

1.2、 量子计算的现状：多路线并行演进，技术收敛时点尚未到来

当前，**量子计算机仍处于多技术路线并行演进的“百花齐放”阶段，超导、离子阱、中性原子、光量子、硅基等主流技术路径各有优劣，尚未收敛统一。**每一种技术路线的选择，本质是在计算速度、可扩展性、操控精度、物理环境要求以及工程化复杂度之间的权衡取舍。

表2：多种量子计算路线“百花齐放”，尚未收敛

路线	机构	型号	发布日期	量子比特数/模式数
超导	IBM	Nighthawk	2025.11	120
	Google	Willow	2024.12	105
	Rigetti Computing	Cepheus-1-108Q	2026.04	108
	QuantWare	Tenor	2023.02	64
	IQM	Crystal 150	2025.11	150
	OQC	OQC Toshiko Gen 1	2023.11	32
	Alice & Bob	Helium 2	2025.09	12
	日本理化学研究所	-	2025.04	256
	中国科大、中电信量子集团、国盾量子	祖冲之三号	2024.12	105
		天衍 287	2025.11	287
	北京量子院	Yunmeng	2024.04	156
	本源量子	本源悟空-180	2026.05	180
	物理所、北京量子院	庄子号	2023.08	43
	量旋科技	少微	2025.11	103
离子阱	Quantinuum	Helios	2025.11	98
	IonQ	Tempo	2025.09	100
	AQT	PINE	2023.02	30
	华翊量子	HYQ-B100	2024	100
	幺正量子	UQM1	2024.09	30
中性原子	QuEra Computing	Gemini	2025.12	260
	Atom Computing	AC1000	2023.01	1200+
	Pasqal	Orion Gamma	2025	140+

下载日志已记录，仅供内部参考

路线	机构	型号	发布日期	量子比特数/模式数
	中科酷原	汉原 2 号	2026.05	200
光量子	中国科大	九章四号	2026.05	3050（专用）
	Xanadu	Aurora	2025.01	12
	QCi	Dirac-3	2024.03	949（变量数）
	QC82	-	2021	40
	硅臻	-	2024.02	32
	PsiQuantum	Omega	2025.02	-
	ORCA Computing	ORCA PT 2	2024.10	90
半导体	Quantum Motion	-	2025.09	-
	Intel	Tunnel Falls	2023.06	12
	Equal1	UnityQ	2025	6
	Silicon Quantum Computing	-	2025.12	11
拓扑	Microsoft	Majorana 2	2026.06	12

资料来源：ICV TA&K、新华社、中国日报网、央视网、智量研究所公众号、界面新闻、开源证券研究所

表3：主流技术路径各有优劣，路线选择本质是在不同指标间的权衡取舍

指标	超导	离子阱	中性原子	光量子	硅基	拓扑
量子比特规模	千比特级	数十比特	数千原子	3000+光子（专用）	约十比特	约十比特
单比特门保真度	99.9000%	99.9999%	99.9800%	-	99.99%	-
双比特门保真度	99.6200%	99.99%（2025.10）	待提升	较低	99%	-
相干时间	百微秒	秒~数十分钟	秒级	长	十秒级	数十秒级
工作温度	10mK	室温/低温（真空）	室温（真空）	室温	低温	低温
可扩展性	高	低	高	中等（专用）	低	极低
工程成熟度	最高	中等	中等	中等	较低	极低
总结						
优势	易扩展、操控性好，是目前最主流也最为成熟的技术路线	相干时间长、保真度极其优秀	全同性、可扩展性强、相干时间长，超导路线最有力的挑战者	相干时间长、速度快、易操控、室温运行，且和现有光纤通信基础设施天然适配	兼容半导体制造工艺，规模化潜力大；相干时间长；全电学操控，不依赖昂贵的激光系统	相干时间长，硬件容错
劣势	超导量子芯片敏感度高，易受温度、宇宙射线干扰，量子比特增加后机器系统复杂	可扩展性差、操作慢、对激光需求高	逻辑门操控能力和保真度有待提升	光子之间很难有相互作用，不利于大规模扩展	电子自旋易受电磁环境影响	工程化速度慢

资料来源：九思行研、智研咨询、开源证券研究所

下载日志已记录，仅供内部参考

1.2.1、 超导路线：工程化成熟度领跑，率先迈入早期容错阶段

在多种量子计算物理实现方案中，超导量子计算以其良好的可扩展性、高速量子门操作和与成熟微纳加工工艺的兼容性脱颖而出，成为最有希望实现实用化量子计算的路径之一。近年来，得益于材料界面优化、器件结构改进、环境噪声抑制以及新型量子比特设计，超导量子计算的比特相干时间从最初的纳秒量级提升至毫秒量级。同时，随着微波控制技术优化、量子门序列设计和动态解耦技术的不断优化，量子门操作保真度持续提高，单量子比特门保真度超过 99.9%，双量子比特门保真度达到 99%以上。在集成封装上，随着倒装焊、TSV 等多层布线等 3D 封装工艺的不断发展，以及低串扰设计等关键技术的突破，单个芯片上量子比特集成数量已从个位数发展到超过 1000 个量子比特的量级。

（一）技术原理

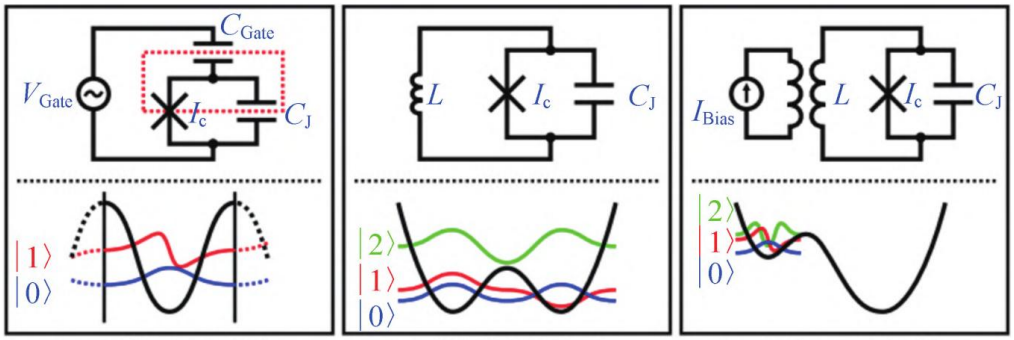
超导量子比特是一种基于超导电路构建的人工量子二能级的宏观量子系统（一个超导电路可被看作一个“人工粒子”）。其核心物理原理在于**利用约瑟夫森结（Josephson Junction）等非线性元件，使电路系统产生非等间距的量子化能级，从而允许将最低的两个能级选择性地作为计算基态|0⟩和|1⟩进行相干操控。**具体来看，超导量子比特的工作主要利用两种物理现象：超导电性和约瑟夫森效应（通常由约瑟夫森结实现）。在**低温下（需要稀释制冷机）**，超导金属电路材料如铝、铌和钽等进入超导态，电子形成库珀对进行无损耗传导（零电阻）。这极大地抑制了能量耗散，是维持量子比特的相干态（即获得较长的能量弛豫时间和相位退相干时间）进行计算的关键前提。

约瑟夫森结在超导电路中扮演着非线性电感的角色，具体表现为约瑟夫森结能量与结两侧超导体波函数的相位差呈现余弦关系，导致了量子化电路的能谱具有非谐性（Anharmonicity）。这意味着**能级间隔是不均匀的**，如基态|0⟩到第 1 激发态|1⟩的能量差（对应跃迁频率 ω_1）不同于第 1 激发态|1⟩到第 2 激发态|2⟩的能量差（对应跃迁频率 ω_2），即$\omega_1 \neq \omega_2$。能级的非谐性使量子比特能级具备了可寻址性。由于不同跃迁（如$|0\rangle \leftrightarrow |1\rangle$和$|1\rangle \leftrightarrow |2\rangle$）对应不同的频率$\omega_1 \neq \omega_2$，因此**可以通过施加特定频率的控制信号（如微波脉冲）来选择性地驱动量子比特能级间的跃迁，而不会显著影响其他能级。**

此外，根据自由度的不同，超导量子比特可大致分为 3 种基本类型：电荷量子比特（如 Cooper-pair box）、磁通量子比特和相位量子比特。其中，电荷量子比特通过控制库珀对隧穿实现量子态操控；磁通量子比特利用超导量子干涉仪（Superconducting Quantum Interference Device，SQUID）中的磁通量子化效应；相位量子比特则基于约瑟夫森结的相位自由度。这些不同类型的量子比特各有优劣，如电荷量子比特操作速度快但相干时间短，磁通量子比特相干时间长但控制较复杂，而相位量子比特则具有较好的综合性能。

下载日志已记录，仅供内部参考

图5：3 种量子比特的电路模型和势能与能级图



资料来源：穆清,查治国,李敏.超导量子计算芯片综述[J]

表4：不同类型的量子比特各有优劣

特性	量子化自由度	典型结构	能量关系	控制参数	相干时间	优势	劣势
电荷量子比特	岛上的库珀对数量	小岛+单个约瑟夫森结+栅极	$E_c \gg E_J$	栅极电压（电荷偏置）	短（ns~μs 量级）	快速操控，设计简单	相干时间短，噪声敏感
磁通量子比特	环路中的磁通	超导环路+多个约瑟夫森结	$E_J \gg E_C$ $E_L \sim E_J$	外加磁场（磁通偏置）	长（可达 ms 量级）	长相干时间，大非谐性	控制复杂，制造难度高
相位量子比特	约瑟夫森结的相位	电流偏置大型约瑟夫森结	$E_J \gg E_C$	偏置电流	中等（μs 量级）	易于制备和读出	泄漏错误率高

资料来源：穆清,查治国,李敏.超导量子计算芯片综述[J]、开源证券研究所

（二）商业化进展与行业格局

目前，超导量子计算率先进入早期容错阶段。IBM、Google 与国盾量子等巨头通过工程化迭代，确立了该路线在通用计算领域的标准地位，使得中美两国团队在量子纠错赛道上形成双寨头领跑格局。

IBM 是全球混合云与 AI 领域的领军者。在量子计算方面，其战略重点已转向提升电路深度与容错能力，发布了 120 比特的 Nighthawk 处理器以在 2026 年实现量子优势，并推出了验证容错关键技术的 Loon 处理器。结合 Qiskit 新增的 C-API 接口以深度融合高性能计算（HPC），以及新的 300 毫米晶圆制造工艺，IBM 更新了技术路线图，计划于 2029 年上线首台大规模容错量子计算机。

Google 是全球科技与量子计算领军企业。2025 年，Google Quantum AI 取得重大突破：利用 Willow 超导量子处理器，通过量子回波算法实现了可验证的量子优势，其复杂物理模拟速度比超级计算机快 1.3 万倍。在纠错方面，团队实验演示了动态表面码，实现了领先的错误抑制因子。战略布局上，Google 入选 DARPA 量子基准测试计划（QBI），并收购了 Atlantic Quantum 以加速容错量子计算机研发。子公司 Sandbox AQ 持续深化量子安全与模拟布局。

Rigetti Computing 由前 IBM 研究人员 Chad Rigetti 创办，是全栈量子计算先驱。公司曾推出业界最大的多芯片模块化量子计算机 Cepheus-1-36Q，实现了 99.5%的中位双量子比特门保真度，较此前 Ankaa-3 系统的错误率降低两倍。其 9 比特 Novera 系统也获得多份商业订单。公司更新路线图，计划于 2026 年底部署保真度达 99.7%的 150+比特系统。

下载日志已记录，仅供内部参考

国盾量子长期深耕量子信息领域，是中国量子信息产业化的核心企业。公司联合中国科学技术大学、中科院上海技术物理研究所等合作完成了超导量子计算原型机祖冲之 1 号、祖冲之 2 号、祖冲之 3 号、骁鸿的研发与测试。2025 年，公司推出 ez-Q Engine 2.0 测控系统最高支持 128 个量子比特、256 个耦合比特，可通过多机箱扩展到千比特规模，并支持并行读出与低时延反馈。ezQ-Fridge500/1000/1500 等稀释制冷机可提供≤10mK 环境并已实现多套交付，用于多比特系统搭建。2025 年，公司参与了祖冲之 3.2 号表面码（码距 7）量子纠错相关工程工作，多名同事署名论文，并承担部分芯片标定筛选、室温电子学软硬件与整机搭建运维支持。

本源量子成立于 2017 年，是中国首家量子计算独角兽企业，也是中国目前唯一同时具备超导及半导体量子计算机整机交付能力的公司。公司业务涵盖芯片设计与制造、核心硬件及软件体系。公司创造了数项全球及中国全国第一，包括：全球首个硅基半导体量子计算云平台、中国首款量子计算编程框架 Qpanda、首个量子计算学习工具本源量子学习机、全球首个量子化学应用系统 ChemiQ、中国首个量子计算全球开发者平台、中国首个专用于量子芯片生产的激光退火仪、中国首个量子芯片高真空存储箱、中国首款量子计算超低温温度传感器、中国首条量子 AI 芯片产线、中国首款量子计算机操作系统、中国首个量子芯片设计工业软件、中国首个“量超协同学习”量子算法开发工具。

量旋科技已构建涵盖超导量子芯片、芯片设计 EDA、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的全栈自主研发体系。2025 年，公司产品销售网络覆盖全球 40 多个国家和地区，全球化布局持续推进。产品方面，推出百比特级 S100、S25 Pro 超导量子计算机，发布量旋三角座II、上线 AI 量子智学系统，实现教学产品向基础科研领域延伸。软件算法上，研发出可处理 1000+比特规模的新一代分布式量子优化算法，药物反应模拟量子算法取得业界领先高精度突破，双向解析量子机器学习模型成果入选顶刊。

1.2.2、 离子阱路线：逻辑保真度拔尖，已完成容错运算闭环

离子阱量子计算机采用射频电场和静电场结合，将离子约束在真空中，使其在库仑力作用下排列成稳定的阵列。离子量子比特编码在各个离子的稳态或亚稳态能级上，利用激光或微波可控制不同能级之间的跃迁，实现任意的单比特量子逻辑门。此外，**利用合适频率的激光还可以将离子的内部能级和离子在空间中的振动耦合在一起，产生一个自旋相关力（spin-dependent force）。不同离子的振动通过离子之间长程的库仑力耦合在一起，进而将不同离子的内部能级耦合起来，由此可以实现两个离子之间的双比特量子纠缠逻辑门。**当前，离子阱系统已实现**单比特量子逻辑门保真度 99.999%**，以及 **2 离子系统中单比特量子逻辑门保真度 99.99%、双比特量子逻辑门保真度 99.9%**。

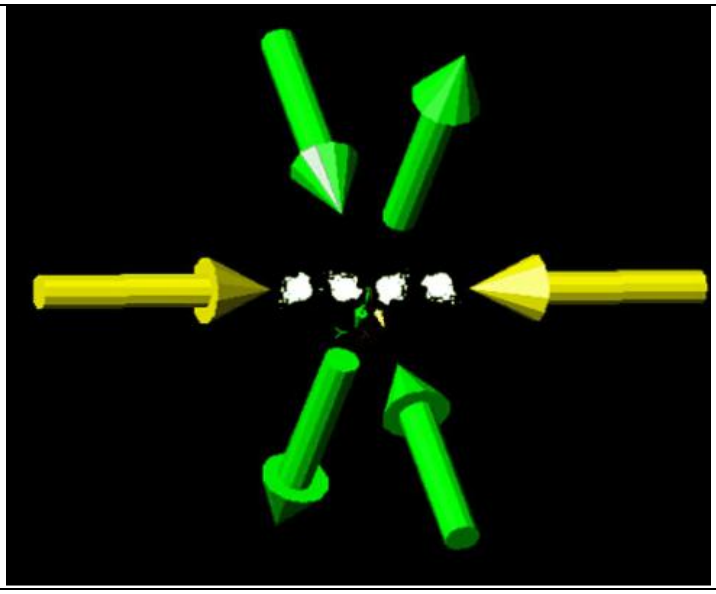
（一）技术原理

主流的离子阱量子计算实验通常设计合适的约束电场，让离子沿着离子阱的轴线方向排列成间距几微米的一维阵列，从而可以利用聚焦的激光束对各个离子进行单独寻址操控。利用该方法，国际上已实现了对 13 个离子的单比特量子逻辑门平均保真度 99.98%，以及全连通的双比特量子逻辑门保真度 98.5%—99.3%，并在 53 离子和 61 离子的一维阵列上演示了量子模拟实验。然而，一维构型所能提供的离子数并不能满足离子阱量子计算机的规模化需求。受限于离子阱所能提供的最大径向约束电场强度，为了将更多的离子维持在一维构型，需要降低轴向的约束电场，而这

下载日志已记录，仅供内部参考

将使离子的轴向运动更易受到环境电磁噪声的影响，最终限制所能稳定约束的离子数。目前，室温离子阱系统通常只能稳定约束数十个离子的一维阵列，而进一步降低环境温度、提高系统真空度的低温离子阱系统，通常也只能稳定约束 100—200 个离子的一维阵列。这远低于未来的大规模通用量子计算机所需的数百万量子比特的规模。

图6：稳定“囚禁”在势阱中的离子：白点代表离子，黄箭头代表直流电场，绿箭头代表交流电场



资料来源：科普中国

表5：离子阱系统通常使用离子的一对内部能级表示量子比特的|0⟩和|1⟩状态，根据二能级选择标准不同，离子量子比特通常可分为 3 种类型

离子量子比特种类	释义
塞曼量子比特（Zeeman Qubit）	两个能级选取为基态能级的两个塞曼子能级，二能级频率差在兆赫兹量级，其优点为量子比特寿命接近无穷长，缺点为容易受外界磁场噪声影响，导致相干时间较短。
超精细量子比特（Hyperfine Qubit）	两个能级选取为超精细能级上跃迁频率对磁场一阶不敏感的两个子能级，二能级频率差在吉赫兹量级，其优点为量子比特寿命和相干时间长，缺点为只适用于特定种类的离子。
光频量子比特（Optical Qubit）	一个能级位于基态能级，另一个能级位于亚稳态能级，二能级频率差在光学波段，其优点为操作激光处于可见光或红外光波段，易于获得且对实验设备的损伤小，缺点是量子比特寿命与相干时间相对较短。

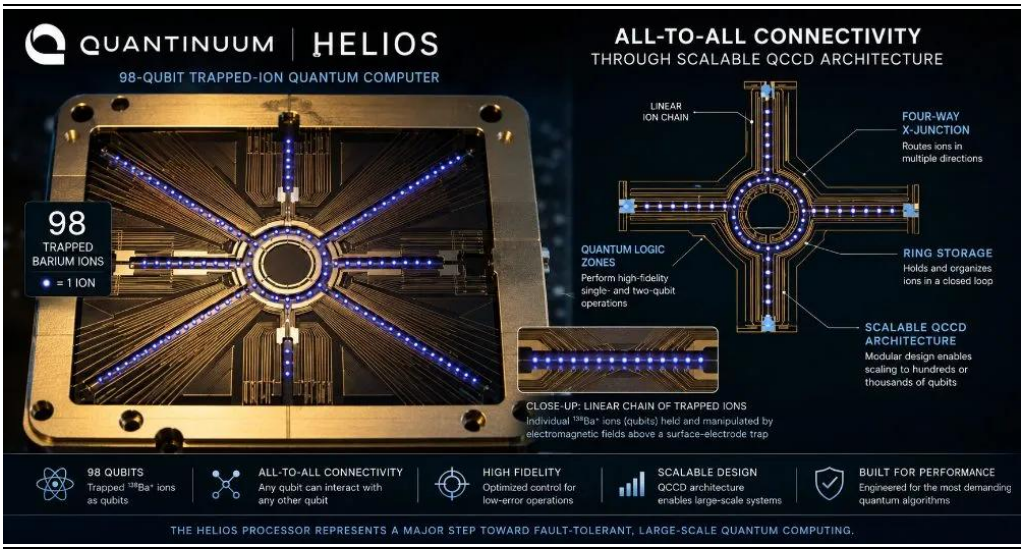
资料来源：前瞻科技杂志、开源证券研究所

为了进一步扩展离子量子比特的数量，国际上目前有两种主流的研究思路。一种是**离子输运方案**，也称为 **QCCD（quantum charge-coupled device，量子电荷耦合器件）方案，设置多个空间区域分别用于进行逻辑门、量子比特存储、量子态测量等操作，通过精密调控约束电场来实现离子在这些空间区域之间的输运**，例如将来自不同存储区域的两个离子移动到同一个逻辑门区域进行量子纠缠，再将一个移回存储区域用作后续操作，而将另一个移动到探测区域进行测量，通过这些操作的组合可实现大规模通用量子计算。该方案的优势在于，每个逻辑门或探测区域内只容纳少量离子，而不同区域之间的间距较大，从而有效抑制了不同区域间离子的串扰误差，使得每个基本量子操作的保真度不随总离子数的增加而降低。不过，该方案中，**离子输运和协同冷却均需消耗大量时间，且为独立控制各个量子操作区域并**

下载日志已记录，仅供内部参考

降低离子间的串扰误差，不同区域之间的距离需要在数十到数百微米以上，限制了相同空间内所能容纳的离子量子比特数。

图7：Quantinuum 第三代 QCCD 离子阱量子计算机 Helios 的几何形状类似于玫瑰花结



资料来源：光子盒

另一种主流的离子阱量子计算规模化方案是**离子—光子量子网络方案，将多个离子阱作为独立的量子计算模块，在各个离子阱中让一部分离子量子比特与光子纠缠，再对来自不同离子阱的光子进行纠缠交换（entanglement swapping），从而把不同离子阱中的离子量子比特纠缠在一起。**方案中通常也需要两种不同种类的离子，一种“计算离子”编码量子比特信息，用于模块内的量子计算；另一种“通信离子”用于产生与光子的纠缠，从而进行与其他离子阱的连接。该方案的优点在于，单个离子阱的结构设计较为简单，且不同离子阱的操控相对独立。当前，实验上已实现了不同离子阱中的两个离子通过光子产生量子纠缠，保真度达到 78%和 94%。

（二）商业化进展与行业格局

目前，**离子阱路线继续保持其在逻辑保真度上的优势，成为首个完成容错运算闭环的体系。**呈现出两极分化的强劲态势。IonQ 与 Quantinuum 及幺正量子、华翊量子作为生态内核心企业稳扎稳打，持续提升保真度；而 Oxford Ionics 与 Quantum Art 等作为业内新星，通过电子控制与多核架构创新，正在解决该路线难以扩展的传统痛点，展现出极高的成长性。

Quantinuum 由霍尼韦尔量子解决方案部门与英国 Cambridge Quantum 合并而来。2025 年，Quantinuum 推出通用商用量子计算机 Helios，集成 98 个全连接物理量子比特，并深化与 NVIDIA 的合作。在 H2-1 系统上，其量子体积（Quantum Volume）达到 2^{23}，刷新行业纪录。更关键的是，团队利用 8 量子比特纠错码，使逻辑非克利福德门的错误率（≤2.3×10−4）首次低于物理门基准，成功跨越纠错盈亏平衡点。此外，计划于 2029 年交付全容错量子计算机 Apollo。

IonQ 是首家上市的量子计算公司。2025 年，IonQ 通过收购 Oxford Ionics、Vector Atomic 及 Capella Space 等企业，加速构建涵盖计算、网络与传感的全生态布局。技术上，其 Tempo 系统提前达成算法量子比特#AQ 64 里程碑，并利用电子量子比特控制技术实现了 99.99%的双量子比特门保真度。商业化方面，IonQ 与韩国 KISTI 签署

下载日志已记录，仅供内部参考

协议交付 100 比特量子系统，并与 Toyota Tsusho、芝加哥大学等机构建立战略合作，持续引领全球量子商业化进程。

AQT 是囚禁离子量子计算领域的奥地利领军企业。继 2021 年推出首台机架式系统 PINE 及后续的激光控制系统 ROWAN 和光学基准 BEECH 后，2025 年 AQT 的 IBEX Q1 系统正式上线 Amazon Braket，成为首个通过主要云服务商提供的欧盟托管囚禁离子系统。在技术突破上，AQT 展示了量子弹簧阵列（QSA）架构，通过线性离子串组成的矩形二维晶格实现了关键的二维连接性，并成功演示了径向分离区域间量子比特的纠缠门操作。此外，AQT 还利用其处理器实现了可验证的基于测量的量子随机采样，从随机簇态中进行采样并有效估计保真度，验证了该技术证明量子优势的潜力。

华翊量子依托清华大学量子信息中心段路明院士领衔的顶尖人才团队与深厚科研积淀，在离子阱量子计算领域持续领跑，已研发出全球首个基于二维离子量子比特阵列的通用技术架构。目前，公司取得了突破性技术进展与商业化成果，不仅于 2025 中关村论坛发布了百比特离子阱量子计算原型机，还联合发布了无极一号离子阱装置。

幺正量子由中国科学院量子信息重点实验室郭光灿院士团队孵化，是中国唯一一家专注于 QCCD 技术路线的离子阱量子计算企业。公司以离子阱系统为核心，以实现分布式量子计算为长远目标，致力于提供模块化、标准化、规模化的量子计算系统及高端光电测控仪器。2025 年，幺正量子在核心硬件与服务生态上取得了里程碑式突破。在硬件方面，公司成功完成中国首台 4K 低温 QCCD 芯片型离子阱量子计算系统的组装调试。在服务方面，幺正量子面向全球正式开放 12 比特（全连通）离子阱量子计算云服务；同时推出了多光子纠缠源系统平台开放服务方案，为高校与科研机构提供定制化的实验验证支持。

1.2.3、 中性原子路线：全同性禀赋优异，规模化扩展潜力突出

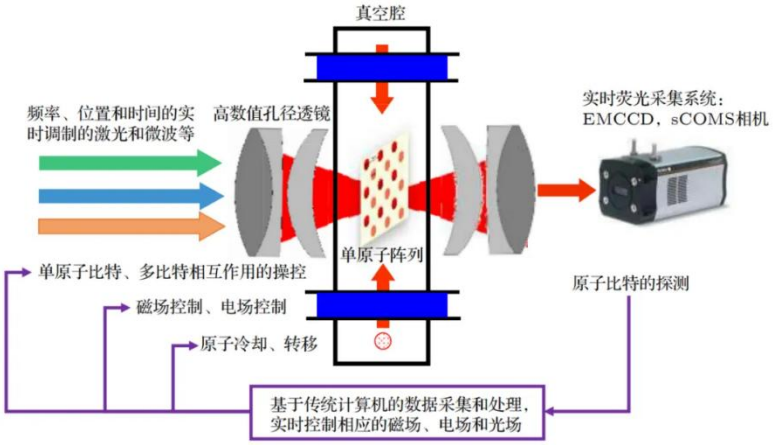
中性原子被认为是实现大规模、可扩展量子计算最有前景的平台之一，凭借其诸多天然优势而备受关注。中性原子通常被视为高度孤立的量子系统，具有**极高的相干性和较长的寿命**。其基态相干时间可达 s 量级，里德堡态寿命通常在百 μs 量级，这为量子信息的长时间存储和高保真量子门操作奠定了坚实基础。

（一）技术原理

中性原子量子计算基于超高真空腔，**利用光晶格/光镊从磁光阱或玻色-爱因斯坦凝聚体中捕获并囚禁超冷原子**（如铷原子）**形成单原子阵列。**通过**将原子基态超精细能级的两个磁子能级编码为一个量子比特的|0⟩和|1⟩，**透镜**将所需光聚焦到单个原子上**，实现对量子比特的操控（每个单一原子充当一个量子比特）。同时，透镜**收集原子的荧光传输到电子倍增型相机上**实现量子态的**探测**。通过实时控制原子的冷却、转移以及相应的磁场、电场和光场，完成量子算法的执行。中性原子体系将根据不同的量子算法采用优化后所需逻辑操作数最少的原子阵列构型，执行一系列高保真的单比特门和两比特受控非门。

下载日志已记录，仅供内部参考

图8：中性单原子量子计算的概念架构：原子冷却—原子排列—激光操控—荧光采集



资料来源：光子盒

中性原子是指核外电子等于核内质子数的原子，具有**全同性**且处于**低能态**的特点。量子信息被编码成非常稳定的低能原子态，因此中性原子作为量子比特具备长的相干时间。全同性使得中性原子量子比特不像超导电路或硅自旋量子比特那样存在异质性。尽管这种稳定性也使得量子比特很难相互作用，从而更难产生纠缠。然而，通过发射**激光脉冲**，这些中性原子可以进入一种**高激发态（即里德堡态）**，从而实现它们之间的相互纠缠。里德堡原子指的是外层电子被激发到主量子数 n 很大的高激发态原子。由于里德堡原子的主量子数 n 很大，因此它们之间的相互作用很强。**长寿命的里德堡态特别适合储存量子信息，可以显著减少原子的自发辐射对量子信息的影响。**强大的里德堡原子间相互作用可以直接耦合两个原子，有利于实现双比特门或原子间的纠缠。

总体上看，相比于其他量子计算候选体系，基于里德堡态相互作用的中性原子量子计算具备以下三个显著特点：**1）相干时间较长**：中性原子体系采用原子基态超精细能级的磁子能级编码量子比特，目前中性原子体系中单比特相干时间已经超过 12.6 秒，这一指标超过了目前大多数量子计算的候选体系。**2）可控的相互作用**：基于里德堡态原子的偶极-偶极相互作用是一个长程的、强度比基态相互作用大 12 个量级的相互作用，可有效控制两比特逻辑门的操控时间，并通过多种方式进行调整。**3）良好的扩展性和构型灵活性**：中性原子体系可以实现上千个原子，并且其构型灵活可变，结合里德堡态原子的多比特逻辑门，可优化并提高算法的适应性。

（二）商业化进展与行业格局

目前，中性原子路线凭借在大规模纠缠与长相干时间上的天然优势，正在全面向实用化迈进，成为挑战超导地位的最强竞争者。领域内的主要玩家包括 **QuEra**、**Atom Computing**、**Pasqal**、**中科酷原**等。

QuEra 由哈佛大学与 MIT 联合创立，是中性原子量子计算领军企业。2025 年，公司完成 2.3 亿美元 B 轮融资。技术上，QuEra 利用 448 个原子的可重构阵列展示了通用容错架构的关键要素，实现了逻辑魔态蒸馏及 2.14 倍的错误抑制增益。商业化方面，QuEra 向日本 AIST 交付了首台本地部署的量子计算机，并与 Dell 及 Deloitte 达成战略合作。此外，公司入选 DARPA 量子基准测试计划（QBI），加速构建实用级容错量子计算机。

中科酷原依托中国科学院精密测量科学与技术创新研究院的顶尖人才团队、深

下载日志已记录，仅供内部参考

厚的中性原子科研积淀与卓越的工程化能力，在量子计算与量子精密测量双赛道中强势领跑。目前，公司已取得一系列突破性技术进展与商业化成果，包括发布中国首台百比特原子量子计算机“汉原 1 号”，并成功斩获超 4000 万元订单及首个海外出口订单，在云端服务方面，公司上线了首个原子量子计算云平台并实现真机互联，由武汉大学、武汉量子技术研究院与中科酷原共同开发，提供在线中性原子量子计算真机任务提交，并集成量子线路模拟、量子动力学模拟与量子材料模拟等功能，形成面向科研与开发者的一站式入口。

Pasqal 是中性原子量子计算领域的领军企业。继 2023 年推出 Orion Alpha 及 2024 年实现千原子装载突破后，2025 年 Pasqal 在商业落地与混合计算集成方面取得重大进展。公司正式推出了名为 Jade 和 Ruby 的量子处理器，并将其集成到高性能计算（HPC）环境中，以支持复杂的混合工作流。在全球布局上，Pasqal 与 Aramco 合作部署了沙特首台 200 量子比特工业级量子计算机，并将 Orion Beta 处理器接入 Scaleway 和 OVHcloud 云平台，提供广泛的云端访问。此外，公司获得 LG 电子战略投资，并宣布在伊利诺伊州建立美国总部，加速推动中性原子技术在材料科学与多物理场仿真中的工业应用。

Atom Computing 成立于 2018 年，专注于中性原子量子计算路线，致力于建造全球第一台可容错的通用量子计算机。今年 6 月 3 日，Atom Computing 宣布完成了业界首个用“托里克码”（Toric code）演示的完整量子纠错。这使得 Atom Computing 成为全球仅有的两家成功实现多次演示持续量子纠错的公司之一，同时也是首次在中性原子平台上达成这一成就。此次纠错技术的重大突破，使得 Atom Computing 正式入选 DARPA（美国国防高级研究计划局）“量子基准测试计划”B 阶段。商业化方面，Atom Computing 在 2025 年将第一台商业本地量子计算机出售给 QuNorth。QuNorth 为由丹麦出口投资基金（EIFO）和诺和诺德基金（Novo Nordisk Foundation）重金资助的北欧顶级量子计划；此外，Atom Computing 近期与美国商务部签了一份出资 1 亿美元的资金备忘录。

1.2.4、 光量子路线：量子比特的理想载体，算通融合价值独特

量子计算的重点之一在于对量子比特的选取和编码，在多种可用于编码量子比特的系统中，**光子由于不易退相干、速度快、易于操控等特性被认为是编码量子比特的理想载体。**不过，尽管光子不易与环境耦合的特性保证了其鲁棒性，但也导致了**光子之间很难有相互作用，这对于大规模通用量子计算来说是一大瓶颈问题。**但我们仍应意识到，以光子作为载体的模拟量子计算为量子计算打开了另一扇窗。

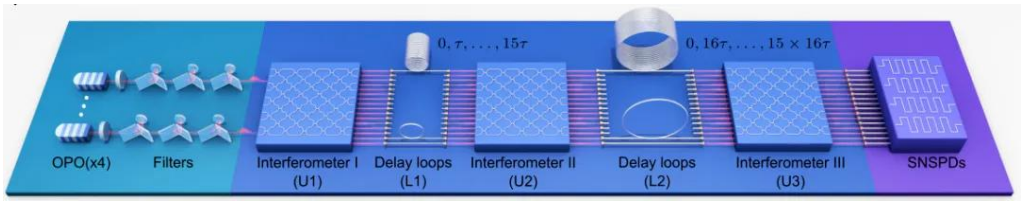
（一）技术原理

光量子计算机大致可分为**离散变量型**和**连续变量型（CV：Continuous Variable）**两种。前者**利用光子的偏振方向和路径来表示“0”和“1”，并将其重叠态作为“量子模式”进行处理；**与之相比，后者则**基于光的强度、相位等“连续量”（即模拟信息），通过量子纠缠将大量光子连接起来，并通过测量来执行计算**（CV 光量子计算机）。

在 **CV 光量子计算机**中，利用光的振幅和相位等连续量作为量子模式，并结合量子纠缠测量来执行计算。其核心包括：**生成压缩光、构建量子纠缠、执行测量型量子计算**以及**利用非高斯态**。

下载日志已记录，仅供内部参考

图9：“九章四号”可编程光量子处理器为容错光量子计算与大规模量子信息处理开辟全新路径



资料来源：中国科学院

生成压缩光指产生一种被称为“压缩光”的量子光。这种光在不违反量子力学基本规则的前提下，允许**将光振幅和相位波动的某一方减小，同时使另一方的波动相应地增大**。具体实现方式是将光纤激光器产生的光脉冲输入非线性光学晶体中进行生成。这种压缩光构成了整个系统的基石。**构建量子纠缠**则是通过使用分束器的半透镜，**让一束压缩光脉冲与另一束压缩光脉冲发生干涉，即可生成量子纠缠。**处于量子纠缠状态的光脉冲之间会产生强烈的关联，具有以下性质：**（1）**无论二者相距多远，一旦测量其中一束，由于测量结果高度相关，即可确定另一束的状态。**（2）**两束光的振幅和相位之间存在特殊的关联，在某些组合下，其波动幅度甚至可以低于普通光不可避免的噪声水平。利用这些性质，通过“测量”其中一个纠缠光子，即可在量子力学层面“控制”另一个光子，这正是光量子计算机的基本计算方法。量子隐形传态在这种“控制”中发挥了本质作用。其后，需要**通过由大量量子纠缠构成的初始态，并基于量子隐形传态原理进行测量计算。**具体而言，当多个光脉冲在不同时间被注入由光纤构成的环路中时，**环路内部会形成一个由量子纠缠连接而成的网状多体量子态。从这个多体量子态中选取一对保持纠缠的光脉冲，使其中一束与输入的量子态发生干涉，进行贝尔测量。**贝尔测量是一种同时测量两个量子态并判断它们是否处于特定纠缠态的方法。通过该测量，**未参与贝尔测量的纠缠光子的量子态便可通过量子隐形传态实现实质性的控制。**这是 CV 光量子计算机的一大特点。由于量子态是通过“测量”操作实现控制的，因此这种计算方式被称为“测量型量子计算”。最后，需要**利用“非高斯态”。**此前所述的压缩态、量子纠缠、量子隐形传态等量子操作，可实现基于连续变量（CV）的模拟量子计算机，然而这些量子操作均属于被称为“高斯态”的框架范畴。若是进一步利用“非高斯态”，则可实现以下能力：**（1）**不仅限于线性计算，还能进行包含非线性运算的通用量子计算；**（2）**促进实现具备容错性的数字型量子计算机。

（二）商业化进展与行业格局

光量子计算**借助光子作为量子信息的载体**，能**在室温下运行**，还**和现有光纤通信基础设施天然适配**，拥有很大发展潜力，在量子通信与量子计算的融合方向，具备独有的战略优势。然而，光量子路线要走向实用容错仍面临最高的工程难度：**光学损耗、器件一致性和逻辑资源开销成为决定性瓶颈。**目前，该领域内主要玩家包括 **PsiQuantum**、**Xanadu**、**玻色量子**、**图灵量子**等。

PsiQuantum 是全球光量子研发方向的头部企业，该企业和格芯合作改造了 300 毫米硅光产线，目前已经做到单光子源保真度 99.98%、双光子干涉可见度 99.5%的优秀成果。PsiQuantum 计划在 2027 年底交付第一台百万量子比特级的商用量子计算

下载日志已记录，仅供内部参考

机，且已经拿到了英伟达的战略合作支持，共同开发量子算法。

Xanadu 专注于压缩态与硅光子器件的技术路径。2025 年，公司取得里程碑式突破，正式发布Aurora，这是全球首台公开的模块化、可联网光量子计算机。该系统由 35 个光子芯片通过光纤互连构成，在 864 亿种模式上成功实现了簇态纠缠。在底层硬件层面，Xanadu 通过与 HyperLight 合作，成功验证了损耗低于 2dB/m 的薄膜铌酸锂（TFLN）光子芯片，投建千万美元级先进封装产线。在应用端，公司联合罗尔斯·罗伊斯与 Riverlane，利用量子-经典混合工作流将喷气发动机的气流模拟时间从数周大幅缩短至一小时内；此外，针对光动力癌症治疗的药物研发，公司也已开发出专门的容错量子计算框架。

玻色量子成立于 2020 年底，依托来自斯坦福、清华等顶尖学府的人才团队，在实用化专用光量子计算领域处于领军地位，技术居于国际领先水平。公司致力于打造实用化量子计算机，核心产品包括相干光量子计算机、相干光量子计算云平台及中国首个量子玻尔兹曼机（QBM）及开源编程套件 KPP，相干光量子计算机具备室温稳定运行、设备体积小、全连接架构及高能效比等独特优势。2025 年，玻色量子迎来了技术与产业化的爆发。公司正式发布了 1000 量子比特的相干光量子计算机，并于深圳落地了中国首个规模化专用光量子计算机制造工厂。在商业落地方面，其 1000 量子比特相干光量子计算机真机已成功交付北京电子城（南京）有限公司，550 量子比特相干光量子计算机真机部署于国家超级计算成都中心，实现了量超融合的实质性应用。

图灵量子成立于 2021 年，技术源于上海交通大学集成量子信息技术研究中心，由上海交通大学金贤敏教授创办，是国内光量子计算领域的代表性企业。公司聚焦量子计算产业生态建设，以光子芯片和量子计算为底层技术，构建覆盖芯片、算法、整机、计算集群的全栈自主能力，打通光量子计算整机、系统研发、集成与交付链条，形成从底层芯片到整机系统、从量子算法到量子-经典混合计算部署的完整工程化路径。公司 TuringQGen2 大规模混合集成光量子计算系统规模达到 56 光子量子优越性级别，搭载 32x32 薄膜铌酸锂超快可编程光量子芯片，具备超 10 万变元求解能力和超 100 量子比特张量网络模拟能力。

ORCA Computing 致力于开发室温下运行的光纤模块化量子处理器。继 2023 年推出 PT 系列光量子计算机后，2025 年 ORCA 在量子 AI 数据中心与混合计算集成方面取得突破。公司利用 NVIDIA CUDA-Q 平台及 NVQLink 互连架构，提供了构建量子 AI 集成数据中心的蓝图，并将两台 PT-1 光量子处理器与 NVIDIA GPU 协同部署于波兰 PCSS 数据中心，实现了室温下的无缝混合运算。商业落地方面，ORCA 已在蒙大拿州立大学正式运行其光子系统，并与丰田通商达成合作以拓展日本及亚太市场。此外，公司联合 ST Engineering 开发基于量子机器学习的网络异常检测技术，积极推动光子计算在网络安全等领域的实际应用。

1.2.5、 硅基与拓扑路线：实现工艺兼容与硬件容错，工程化进度仍待突破

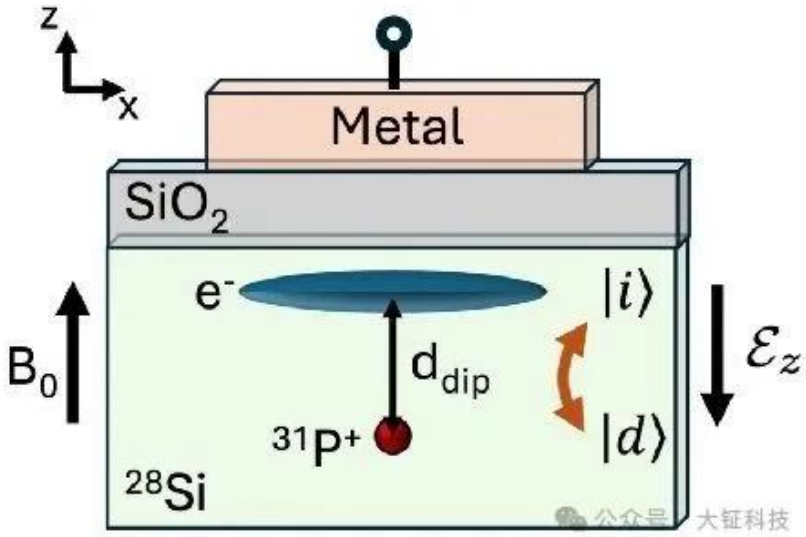
（一）硅基量子计算

硅基量子计算是一种利用硅材料中的量子点或掺杂原子来囚禁单电子（或空穴），并将其自旋状态编码为量子比特，从而通过电学手段进行操控的固态量子计算技术路线。该技术的物理根基在于单个电荷载流子（电子或空穴）所拥有的自旋属性，一种类似微小磁矩的内禀量子数。

下载日志已记录，仅供内部参考

选择硅作为物理平台，源于其得天独厚的材料优势。天然硅由多种同位素组成，其中硅-29 具有核自旋，会通过超精细相互作用干扰电子自旋的相干性。因此，**高纯度同位素硅-28（无核自旋）成为理想基底。**硅基量子计算的实现途径之一是**栅控量子点。**在硅/硅锗异质结或硅金属-氧化物-半导体结构表面制备纳米级金属栅极，施加电压在二维电子气中形成**电势阱**，即**量子点，因禁单个电子形成“人造原子”。**量子比特之间的耦合则通过**相邻量子点间的交换相互作用**实现：当两个量子点中的电子波函数发生重叠，其自旋态便通过泡利不相容原理产生耦合，形成纠缠门操作。**另一个实现途径是掺杂原子。**1998 年，Kane 提出一项具有远见的方案：利用扫描隧道显微镜在硅晶格中精确放置**单个磷原子作为量子比特。**磷原子提供电子和核两套自旋自由度，电子自旋作为“控制单元”和通信总线，核自旋作为超长寿命的“存储单元”。这一路线在 2025 年底取得里程碑式突破。澳大利亚 SQC 团队利用 STM 氢掩膜直写技术，在硅-28 基底上以原子精度（<1nm）构建了一个包含 11 个量子比特（2 个电子自旋加 9 个核自旋）的原子处理器。该原子处理器单比特门保真度达 99.99%，双比特门保真度达 99.5%，均显著超过容错阈值，且未因规模扩展出现性能衰减。这一工作标志着硅基“天然原子”路线首次在多量子比特规模上同时实现了高保真度和全连接操控。

图10：在硅晶格中放置单个磷原子作为量子比特，用电学手段操控翻转



资料来源：大钰科技

硅基量子计算具有三大优势。其一是**工艺兼容性与规模化潜力**，硅基量子芯片可直接在现有 300 毫米晶圆制造设施上生产，显著降低制造成本。其**二**是**超长相干时间**，硅基自旋量子比特（尤其是使用高纯度 28Si 同位素材料）的相干时间远超超导体系，为执行复杂量子算法提供了充足的时间窗口。其三是**全电学操控的潜力**，硅基空穴量子比特因具有强自旋轨道耦合效应，可通过电偶极自旋共振机制实现全电学的高速操控，无需依赖微波或激光系统。不过，**硅基量子计算也存在两种明显的劣势。**硅基路线最突出的问题是**技术成熟度相对较低，**与超导和离子阱相比，硅基在多比特纠缠、算法演示和系统集成方面仍有明显差距。另一劣势是**操控速度的固有限制**，虽然空穴自旋比特已实现纳秒级操控，但传统电子自旋比特的操控速度仍较慢（微秒级），而门操作速度直接影响量子纠错循环的效率。此外，硅基量子芯片需要稀释制冷机维持极低温环境，散热与功耗问题显著。

近年来，硅基路线在降低运行温区、提高读出效率、验证 CMOS 兼容制造等方

下载日志已记录，仅供内部参考

面取得重大进展，表明**半导体量子比特正从实验室迈向工程实用**。不过，目前**整体仍处于架构重塑阶段**：为了实现大规模扩展，半导体路线需要重新设计比特连接和控制方案，其**通往容错计算的蓝图尚未完全闭环**。目前，硅基路线的主要厂商为美国及澳大利亚公司，包括 **Intel**、**SQC**、**Diraq** 等。

作为全球半导体领军企业，**Intel** 依托大规模制造优势深耕硅自旋量子比特。2025 年，Intel 在 6 个量子点组成的线性阵列中实现了两个仅交换（exchange-only）量子比特的并行操作，单比特门保真度超 99.9%，并首次演示了此类量子比特的 iSWAP 门及电荷锁定读取技术。此外，Intel 与学术界合作，深入研究了 Si/SiGe 量子阱中的能谷劈裂关联，并开发了基于势垒栅脉冲的单次锁存读取技术。这些进展进一步验证了利用工业级 300mm 半导体工艺构建可扩展、高保真量子处理器的潜力。

Silicon Quantum Computing（SQC）致力于硅基量子计算，曾创下相干时间与保真度的多项世界纪录。继 2023 年布局零自旋硅材料、2024 年制造四量子比特设备后，2025 年 SQC 取得了重大技术突破，构建了由多核自旋寄存器组成的 11 量子比特原子处理器。该处理器在 3.5K 温度下实现了 99.99%高保真单次电子自旋读出，大幅降低了制冷要求。产品与商业化方面，SQC 利用其量子储备系统 Watermelon 协助 Telstra 进行网络预测，并与 SkyWater 合作推进混合计算芯片制造，同时获澳大利亚国防部合同开发量子机器学习处理器。

Diraq 专注于利用硅量子点技术研发量子处理器。依托新南威尔士大学（UNSW）二十余年的技术积淀，公司致力于通过兼容 CMOS 的硅制造工艺实现低成本、大规模的商业化落地。2025 年，Diraq 迎来技术爆发：其在工业级 300 毫米代工厂生产的器件，成功实现了超过 99%的单/双量子比特门保真度，并刷新了长达 9.5 秒的自旋寿命纪录。商业层面，Diraq 成功入选美国国防高级研究计划署（DARPA）的量子基准测试计划（QBI），并正式加入伊利诺伊州量子园区。通过这一系列战略布局，公司正加速迈向量子比特规模化量产的新阶段。

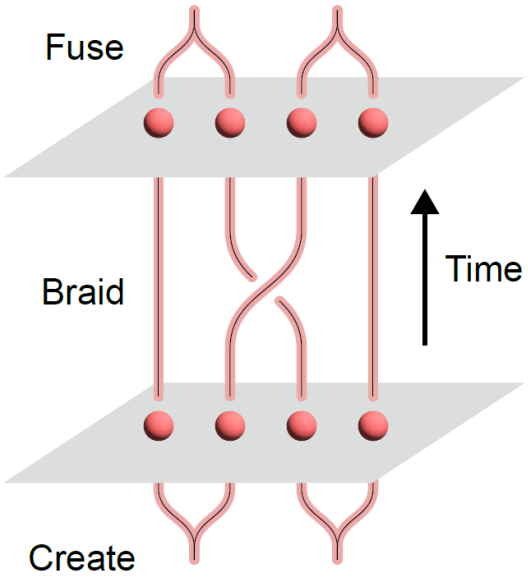
（二）拓扑量子计算

拓扑量子计算是利用非阿贝尔任意子（Non-Abelian Anyon，如 Majorana 零模或 ν =5/2 分数量子霍尔态）的拓扑简并态存储量子信息，通过编织这些任意子（即交换它们的位置），可以实现量子比特的操作。

具体而言，**非阿贝尔任意子是一类在二维平面中“跳舞”的粒子。**譬如，如果在三维世界中交换两个一模一样的小球两次，系统会回到原先的状态；而在二维世界中，交换两个非阿贝尔任意子两次，系统的状态会发生改变，并可被实验探测到，**就像对操作产生了“记忆”一样。**如果垂直于它们活动的平面画一条时间轴，它们的“舞步”会留下一条连续向上的轨迹（即“世界线”）；两个非阿贝尔任意子交换位置时，两条世界线会交叠出一个“纽结”。无论是“世界线”或“纽结”，均可为信息存储提供拓扑保护，使之不容易受到外界的干扰。正因如此，非阿贝尔任意子的长程纠缠序能对环境的局域扰动产生“免疫”，使得**拓扑量子计算可以在硬件层面具有容错特性，并且能有效地抵挡环境的退相干效应。**

下载日志已记录，仅供内部参考

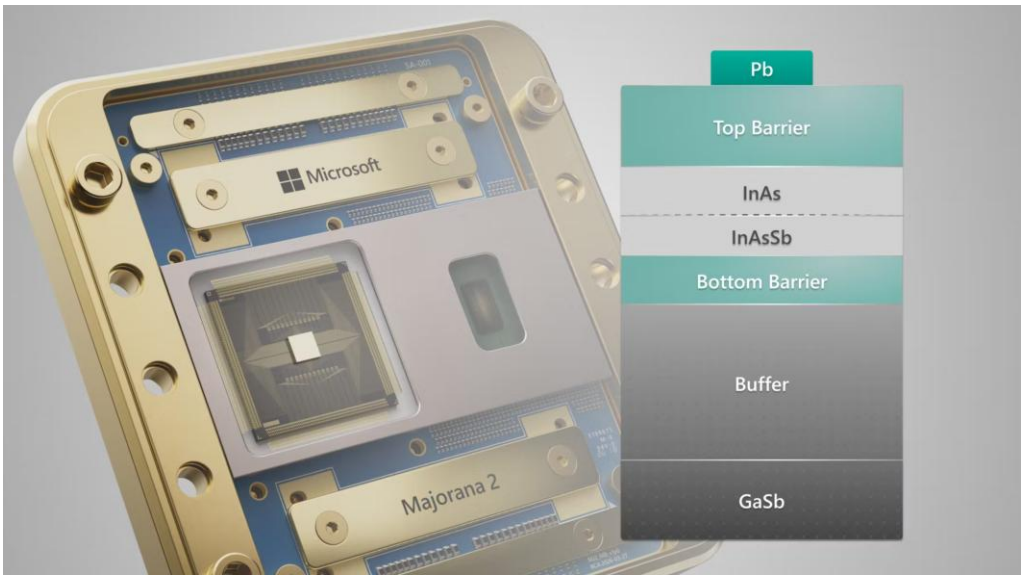
图11：非阿贝尔任意子可编织“世界线”



资料来源：浙江大学物理学院

2025 年 2 月，Microsoft 宣布其“Majorana 1”硬件设备成功创建了拓扑量子比特。Majorana 1 是微软的首个量子计算芯片，由砷化铟-铝混合材料制成，能在极低温度下展现超导性。微软声称该设备显示出存在边界 Majorana 零模的信号，设计可容纳八个量子比特。2026 年 6 月，微软发布 Majorana 2，量子比特数量提升至 12 个，其门操作处于微秒量级，量子态平均寿命达 20 秒，部分单元寿命可突破 1 分钟。然而，Majorana 的发布在学界引发了“一定程度的怀疑”。这种怀疑主要源于微软缺乏明确的公开证据来证实其设备明确展现了真正的马约拉纳零模。总体来看，**拓扑路线在硬件演示和理论稳定性上仍有明显的工程断层，目前在各量子计算技术路线中属于最初级的阶段。**

图12：Microsoft Majorana 2 包含 12 个量子比特，量子态平均寿命达 20 秒



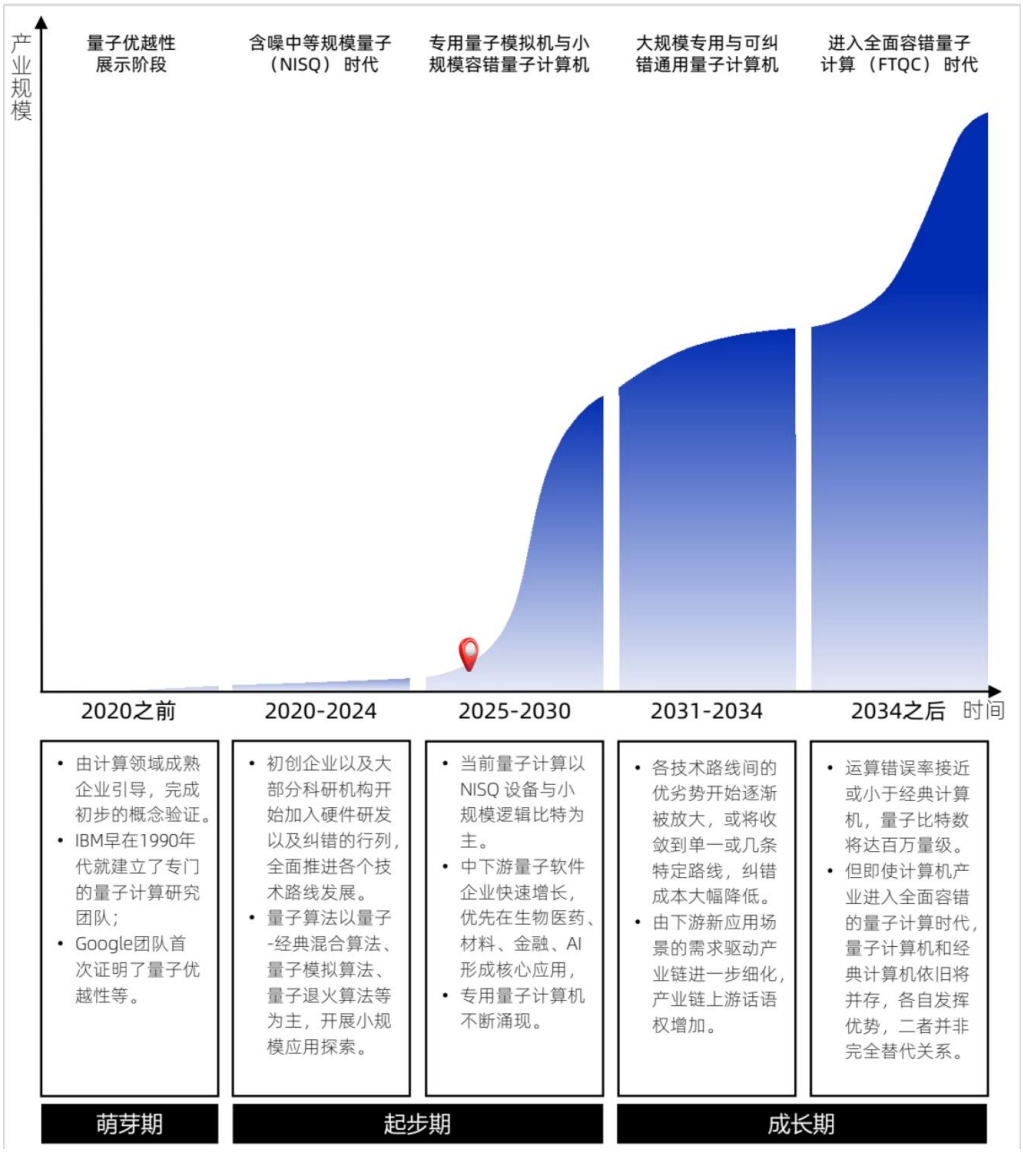
资料来源：Microsoft 官网

下载日志已记录，仅供内部参考

1.3、 未来展望：增长确定性凸显，量子计算步入加速发展期

现阶段，**量子计算正处在从 NISQ（含噪声中等规模量子）走向容错量子计算的过渡阶段**，各条技术路线开始围绕纠错闭环和系统可靠性逐步收敛。随着**“摩尔定律”日益逼近极限**，量子计算在这一轮平台期的发展似乎已接近关键节点：无论是**各国扶持政策的推进**，还是**市场对各厂商的反馈**，都在暗示**行业可能进入更快的发展阶段**。从产业规模来看，**预计到 2035 年全球量子计算产业规模将达到 8,117 亿美元。**

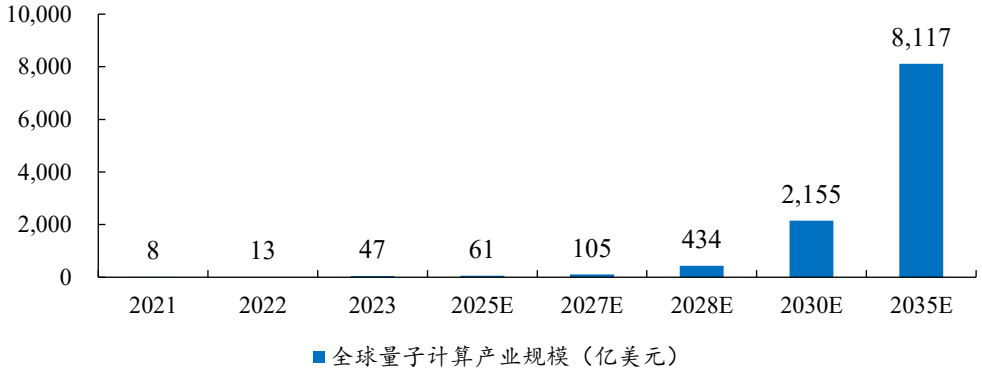
图13：行业正从 NISQ 走向容错计算，将进入更快发展阶段



资料来源：ICV TA&K

下载日志已记录，仅供内部参考

图14：全球量子计算产业规模将于 2035 年达到 8,117 亿美元



资料来源：ICV TA&K、开源证券研究所

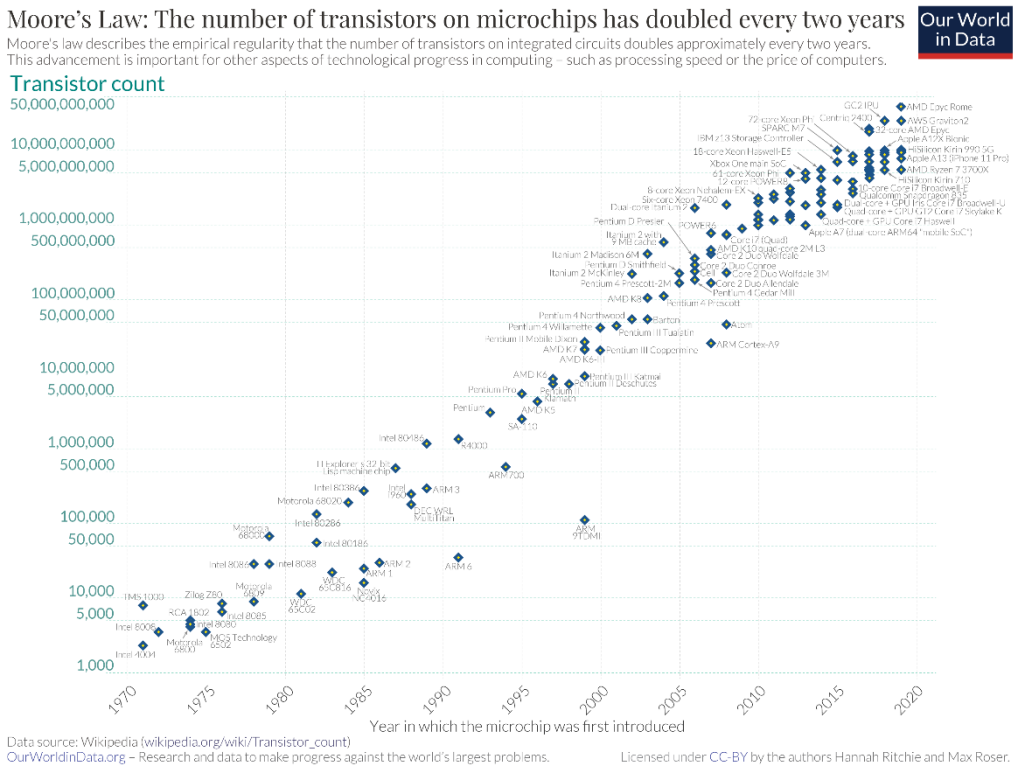
1.3.1、摩尔定律的“失效”：量子计算需求具备刚性支撑

尽管距离大规模通用容错量子计算的产业化落地仍有较长路径，但**经典算力的增长天花板已清晰可见。**届时，**量子计算将成为突破传统计算上限、构建下一代算力体系不可或缺的重要支撑。**

就经典计算的硬件限制而言，1965 年，Intel 的 Gordon Moore 估计，因电子器件的体积逐渐变小，集成电路上的晶体管数量将每年增加一倍。晶体管的特性是管件越小其计算能力就越强，因为与大型晶体管相比，小型晶体管可以以更小的功率和更快的速度操作开关，这意味着使用更多、更快的晶体管无需更大功率或产生更多的余热。Moore 对这种计算能力的指数式增长进行了预测，即“摩尔定律”。其后，Moore 在 1975 年对摩尔定律进行了修改，认为晶体管数量将每两年增加一倍，显示出芯片的微型化在过去 10 年内已明显减速。然而，2000 年初，高端芯片的运行速度已进入坪曲线，但生产芯片的成本一直上升。具体而言，电子组件正逐渐接近原子尺度，因此使储存与操作比特变得越来越难；同时，当电子器件的尺度变得与原子一样小时，其功能将受到量子物理效应的干扰，从而导致经典计算机无法正常运算。在此基础上，对经典系统计算能力的指数式增长的预期将在未来 10-20 年内完全失效，由此催生出对下一代计算架构——量子计算的刚性需求。

下载日志已记录，仅供内部参考

图15：晶体管数量不断增长，密度正逼近物理极限



资料来源：Our World in Data（OWID）

1.3.2、 全球政策协同加码：量子计算发展制度保障坚实

全球量子技术正式迈入从基础科研向产业化落地与战略博弈转型的关键阶段，各主要经济体密集发布政策以强化技术主权、供应链安全及基础设施建设。相关扶持政策呈现出**三个明显特征：（1）**工程化优先，围绕容错架构、系统集成与可扩展能力展开布局；**（2）**算力融合，将量子计算纳入国家计算基础设施体系，而非孤立发展；**（3）**生态竞争加剧，通过资金支持、平台建设与产业协同，加快形成可持续的技术与产业能力。

美国作为行业领跑者，依托《国家量子倡议法案》与《芯片与科学法案》持续深化布局，通过 NIST 发布首批后量子密码学标准确立技术基准，并由《2026 财年国防授权法案》等立法推动联邦系统向抗量子网络安全标准迁移，在构建公私合作典范的同时吸引了全球密集的私人资本。

中国在十五五规划的顶层设计下，通过设立首期 510 亿元的中央企业战略性新兴产业发展专项基金注入资本动能，并由工信部、市场监管总局等多部门协同，密集推进量子信息标准化技术委员会筹建、未来产业创新任务揭榜挂帅以及计量支撑产业发展行动方案（2025-2030 年），全面部署量子计算、通信与精密测量的标准研制、核心技术攻关与产业应用生态构建，共同折射出全球量子赛道正加速向工程突破与生态竞争演进的宏大图景。

与此同时，欧盟通过《量子欧洲战略：变化世界中的量子欧洲》及 2025 年军民两用物项出口管制清单的更新，旨在解决当前技术短板，推动量子芯片试点产线建设以提升工业竞争力和科技自主权；英国、西班牙、芬兰等国纷纷出台国家级战略或算力路线图，如西班牙计划投资超 8 亿欧元、芬兰布局 2025-2035 长远目标，确立

下载日志已记录，仅供内部参考

了向混合计算架构演进、实现千位纠错逻辑量子比特的具体工程化路径；G7 发布的《卡纳纳斯基斯量子技术未来共同愿景》与全球行业组织（ITI）发布的《量子技术政策指南》，则共同致力于构建可信的供应链、人才体系及治理框架。

表6：全球各主要经济体密集发布政策以强化量子计算技术主权

时间	政策文件	核心内容	资金规模
美国			
2018.12	《国家量子倡议法案》	建立联邦量子研发协调框架，设立 10 年国家量子行动计划	5 年超 12 亿美元
2022	《芯片与科学法案》	强化量子网络基础设施、标准制定与能源部算力竞争机制	-
2024.12	《国家量子倡议重新授权法案》（提出）	将 NQI 计划延长，新建量子中心	5 年 27 亿美元（参院版）
2025.12	《2026 财年国防授权法案》	COINS Act 将量子投资审查永久化、扩大化	-
2026.1	《国家量子倡议重新授权法案》（再次提出）	延长至 2034 年，NIST 每年 8500 万美元，NASA 每年 2500 万美元	5 年 18-27 亿美元
中国			
2016	《“十三五”国家科技创新规划》	量子通信与量子计算机列为“科技创新 2030-重大项目”	-
2023-2025	政府工作报告	连续三年提及量子科技	-
2025.12	工信部量子信息标准化技术委员会筹建方案公示	覆盖量子计算、通信、精密测量三大方向	-
2026.3	“十五五”规划	量子科技列为六大未来产业之首	-
2026.6	工信部量子信息标准化技术委员会正式成立	第一届 62 名委员	-
欧盟及欧洲主要国家			
2018	量子旗舰计划	10 年量子研发计划	10 亿欧元
2023	《欧洲量子技术宣言》	25 国签署政治共识	—
2025.7	《欧洲量子战略》	2030 年成为全球量子领导者	2020-2025 年，超 110 亿欧元（含成员国）
2026.5	“高科技议程”路线图（德国）	2030 年建成两台纠错量子计算机	—
2021.1	国家量子技术加速战略（法国）	成为“首个拥有通用量子计算机完整原型机的国家”	18 亿欧元
2026.3	“量子飞跃”计划（英国）	2030 年代初实现量子计算机规模化制造与部署	20 亿英镑

资料来源：九思行研、开源证券研究所

1.3.3、 下游应用加速渗透：量子计算商业价值逐步兑现

量子计算尚不能完全取代经典计算机，目前主要在特定问题上发挥指数级的计算优势。**从市场反馈来看，量子计算正快速导入密码学、药物研发、材料科学、金融建模、优化问题以及人工智能等领域。在此背景下，不同技术路线的量子计算公司接连上市，营收逐渐形成规模，体现出其商业价值的逐步兑现。**

下载日志已记录，仅供内部参考

具体来看，**（1）**全球所有行业里，**金融行业**对量子计算的接受程度排在前列。量子增强的蒙特卡罗风险模拟、投资组合优化、欺诈检测和期权定价这类应用场景，已经有多家国际金融机构开始试点或者早期商业部署，D-Wave 先后和土耳其 Yapi Kredi 银行等国际金融机构签下合作协议，合作覆盖商业应用和研究两大方向。量子计算公司 QCi 还拿到了美国前五大银行之一的安全解决方案采购订单，这也是该公司量子网络安全方案拿到的第一份美国商业订单。**（2）医药研发与材料科学**方面，Google Willow 芯片上展示的量子回声算法，核心用途之一就是模拟分子相互作用，给药物发现和新型材料识别给出算力支撑，Quantinuum 和新加坡国家量子办公室展开合作，会在当地部署 Helios 量子计算机，用来加快计算生物学和生物信息学领域的商业应用落地。日本烟草旗下的制药部门也和 D-Wave 达成量子计算合作，探索这项技术在药物研发里的应用。国内领域，玻色量子已经和广州国家实验室合作，用量子模型优化 mRNA 疫苗序列的设计过程。**（3）物流与供应链优化**方面，DHL、马士基这类国际物流龙头企业，正在尝试将量子算法和 AI 预测系统相结合，优化路径规划、调度以及库存管理。D-Wave 在 2025 年第三季度和美国一家大型国际航空公司签下协议，把量子计算引入航空运营优化场景。法国电力公司等电力运营商，也在尝试把量子 AI 混合优化用在电网规模的能源管理中。国内来看，纬德信息已经和玻色量子达成合作，共同围绕光量子计算打造电力能源领域的实用落地场景方案。**（4）人工智能与量子机器学习方面**，Rigetti 已经加入英伟达的 NVQLink 开放平台，将量子处理单元和 AI 超算环境无缝衔接，为下一代混合工作负载打下基础。在中国，玻色量子的量子模型在脑机接口神经解码中，已经做到视觉识别静态准确率 96.2%的实际成果。**随着场景导入不断加深，市场对其价值的回应也愈发积极。**如下表所示，2021 年至今，已有约 10 家不同技术路线的量子计算公司完成美股上市，其营收也呈现出规模化趋势。

表7：量子计算公司密集上市，营收逐渐形成规模（单位：亿美元）

代码	公司	技术路线	总市值	营业收入（2026H1）	营业收入（2025）	上市日期
IONQ.N	IONQ	离子阱	151	1.45	1.30	2021-01-04
QNT.O	QUANTINUUM	离子阱	131	0.13	0.31	2026-06-04
QBTS.O	D-WAVE QUANTUM	量子退火机、超导	61	0.06	0.25	2020-12-11
RGTI.O	RIGETTI COMPUTING	超导	51	0.10	0.07	2021-04-22
XNDU.O	XANADU QUANTUM TECHNOLOGIES	光量子	30	0.04	0.05	2025-05-19
INFQ.N	INFLEQTION	中性原子	28	-	-	2025-07-07
IQMX.O	IQM QUANTUM	超导	20	0.09	-	2025-06-02
QUBT.O	QUANTUM COMPUTING	光量子	18	0.09	0.01	2021-07-15
PSQL.O	PASQAL	中性原子	17	-	-	2026-01-28
LAES.O	SEALSQ	硅基	5	-	0.18	2023-05-22

数据来源：Wind、开源证券研究所；数据截至 9 月 7 日

2、 本周板块回顾：板块平均涨跌幅为-6.41%，A 股罗普特领涨

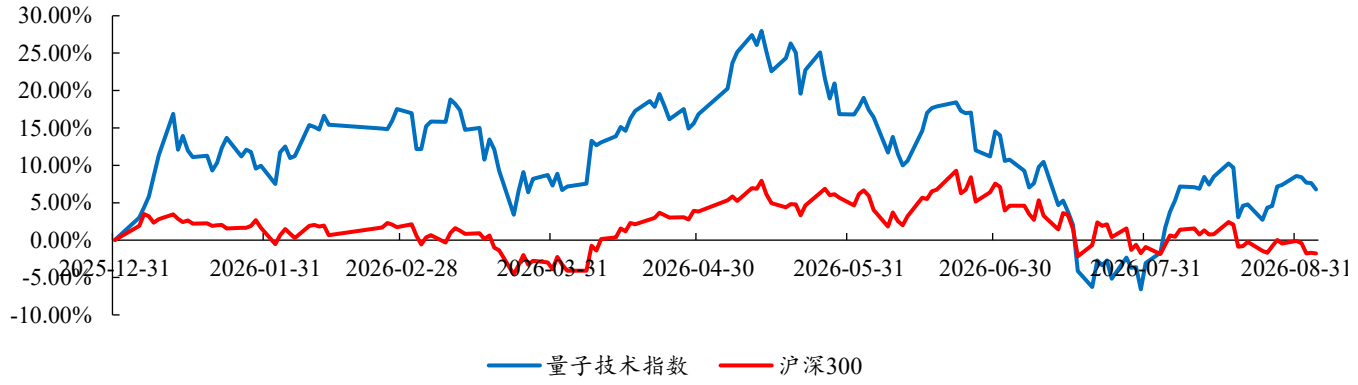
近七日股价复盘：

指数方面，8 月 31 日-9 月 4 日 Wind 量子技术指数（884208.WI）-0.54%，若以

下载日志已记录，仅供内部参考

2025 年 12 月 31 日为基准，指数累计+7.53%，同期沪深 300 指数-2.22%。

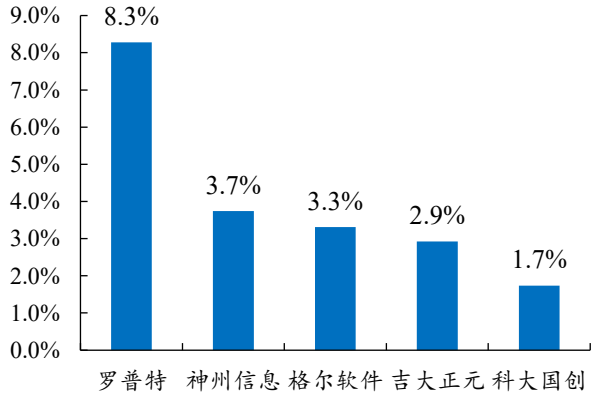
图16：Wind 量子技术指数（884208.WI）本周-0.54%



数据来源：Wind、开源证券研究所

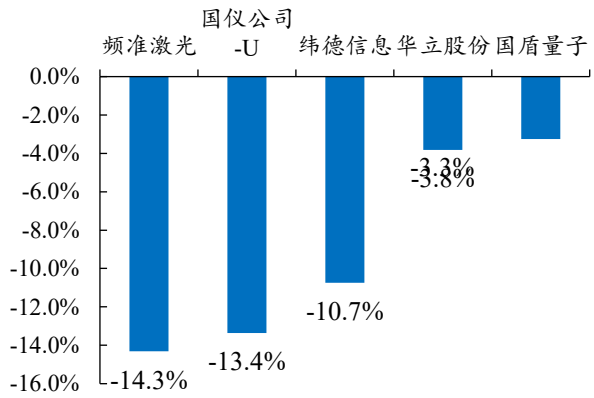
个股方面，8 月 31 日-9 月 4 日量子科技 A 股相关标的平均涨跌幅为-6.41%，涨幅前五标的分别为罗普特（+8.3%）、神州信息（+3.7%）、格尔软件（+3.3%）、吉大正元（+2.9%）、科大国创（+1.7%）；涨跌幅排名后五标的分别为频准激光（-14.3%）、国仪公司（-13.4%）、纬德信息（-10.7%）、华立股份（-3.8%）、国盾量子（-3.3%）。

图17：罗普特、神州信息、格尔软件表现出色



资料来源：开源证券研究所

图18：频准激光、国仪公司、纬德信息跌幅居前

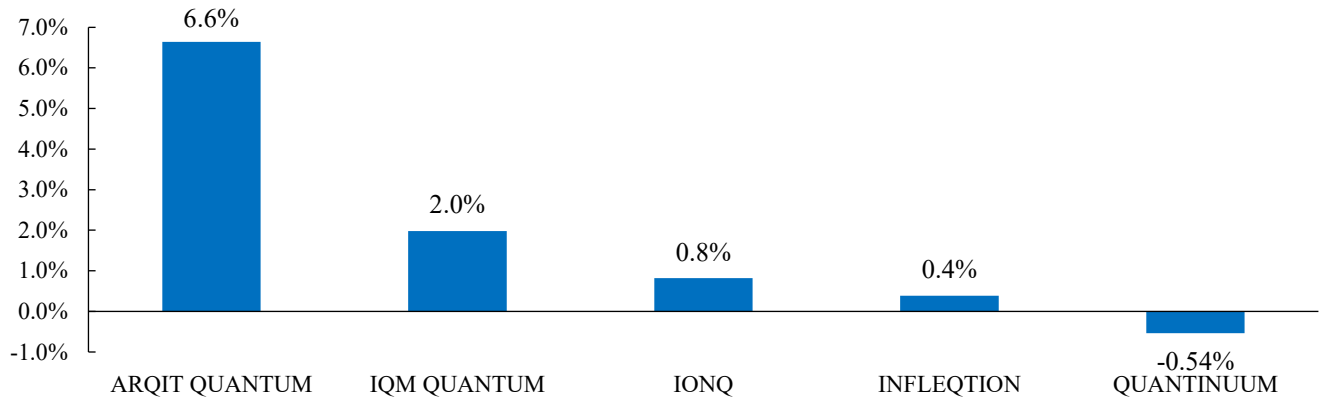


资料来源：开源证券研究所

美股方面，本周涨跌幅排名靠前的标的分别为 ARQIT QUANTUM（+6.6%）、IQM QUANTUM（+2.0%）、IONQ（+0.8%）、INFLEQTION（+0.4%）、QUANTINUUM（-0.54%）。**港股方面，**国富量子（+8.33%）。

下载日志已记录，仅供内部参考

图19：美股 ARQIT QUANTUM、IQM QUANTUM 等涨跌幅位居板块前列



数据来源：Wind、开源证券研究所

图20：A 股相关标的平均涨跌幅为-6.41%

代码	标的	量子布局介绍	市值（亿元）	涨跌幅		
				本周	本月	本年
688027.SH	国盾量子	超导量子计算机、量子通信网络设备、冷原子重力仪等	384	-3.26%	-3.13%	-26.46%
688828.SH	国仪公司-U	阱量子计算机、电子顺磁/核磁共振波谱仪、金刚石NV色心技术显微镜和磁共振谱仪、微弱信号测量产	384	-13.86%	-11.22%	-17.45%
688826.SH	炬光科技	激光器	321	-14.52%	-9.10%	-32.99%
002268.SZ	电科网安	抗量子软、硬件设备	119	0.64%	1.43%	-30.56%
000555.SZ	神州信息	通信网络承建	108	3.74%	2.21%	-32.38%
688262.SH	国芯科技	抗量子软、硬件设备	94	-1.99%	-4.21%	-9.29%
300520.SZ	科大国创	量子-经典混合算力云平台	70	1.74%	0.00%	-31.10%
603038.SH	华立股份	量子科技+水务	46	-3.82%	-10.14%	0.44%
603232.SH	格尔软件	抗量子软、硬件设备	36	3.31%	3.78%	-30.54%
003029.SZ	吉大正元	抗量子软、硬件设备	34	2.92%	2.92%	-32.77%
688171.SH	纬德信息	量子算力云平台、抗量子软、硬件设备	30	-10.74%	-8.74%	-25.91%
688619.SH	罗普特	硅基量子计算	28	8.28%	0.59%	12.50%
美股（亿美元）						
IONQ.N	IONQ	离子阱量子计算机	147	0.82%	0.53%	-11.92%
QNT.O	QUANTINUUM	离子阱量子计算机	129	-0.54%	-0.90%	-17.77%
QBTS.O	D-WAVE QUANTUM	量子退火机、超导量子计算机	62	-2.41%	-3.60%	-36.60%
RGTI.O	RIGETTI COMPUTING	超导量子计算机	51	-2.50%	-2.94%	-31.88%
XNDU.O	XANADU QUANTUM TECHNOLOGIES	光量子计算	31	-7.52%	-9.67%	-9.75%
PSQL.O	PASQAL	中性原子量子计算机	29	-58.85%	-53.99%	-23.31%
INFQ.N	INFLEQTION	中性原子量子计算机、原子钟等	27	0.39%	-1.68%	-17.53%
IQMX.O	IQM QUANTUM	超导量子计算机	20	1.98%	2.96%	5.68%
QUBT.O	QUANTUM COMPUTING	光量子计算	18	-1.72%	-2.67%	-21.93%
LAES.O	SEALSQ	硅基量子计算、抗量子软、硬件设备	5	-2.42%	-2.81%	-35.98%
ARQQ.O	ARQIT QUANTUM	抗量子软件	3	6.64%	7.49%	-2.33%
QXL.O	QUANTUM X LABS	光学原子钟、量子磁力计等	1	-6.38%	-5.99%	192.48%
港股（亿港元）						
0290.HK	国富量子	战略投资量子科技领域	177	8.33%	6.36%	-34.27%

资料来源：Wind、开源证券研究所；数据截至 9 月 4 日

3、 行业动态：IBM 发布 Nighthawk r2，“本源悟空”破解量子随机存储器扩展难题

3.1、 IBM 发布 Nighthawk r2，每秒可执行超 10 万个电路

8 月 31 日，**IBM 发布 Nighthawk r2。**这款 **120 量子比特**处理器号称**迄今为止最快的量子处理器**，其采用新的量子比特复位系统，旨在通过大幅加速的量子比特重置实现更有价值的计算。该处理器每秒可执行超过 10 万个电路，吞吐量是 IBM 的 Heron 系统的 25 倍，同时保持相当的门极精度。Nighthawk r2 已在包含超过 7500 个

下载日志已记录，仅供内部参考

门的电路上实现了准确估计，并支持量子纠错研究的电路内复位。

3.2、 美国国会议员提出《美国量子竞争力法案》，推动量子技术发展

8 月 31 日，美国国会议员尼克·兰沃西（Nick Langworthy）提出**《美国量子竞争力法案》，以加强美国量子商业化、制造和国内供应链。**该法案将指定商务部为联邦商业量子技术的负责机构，并要求制定国家竞争力战略。该法案强调减少对外国对手的依赖，支持纽约 I-90 技术走廊沿线的先进制造业。

3.3、 “本源悟空”破解量子随机存储器扩展难题

9 月 3 日消息，**本源量子联合中国科学技术大学、合肥综合性国家科学中心人工智能研究院等科研团队，在“本源悟空”自主超导量子计算机上成功研发出面向桶式量子随机存储器（QRAM）的“相干量子路由系统”，**有效解决了 QRAM 扩展的行业难题。相关论文日前发表于国际期刊《物理评论 X》。据悉，QRAM 是实现量子搜索、量子机器学习等算法的重要功能模块，其核心是量子路由器——负责根据地址指令将数据准确送达目标位置。研究团队在“本源悟空”自主超导量子计算机上实际搭建了 3 个独立量子路由器和一套两层量子路由网络进行测试。结果显示，单个量子路由器的信息传输效率高达 98%，两层路由网络整体传输效率也能达到 93%。在随机访问测试中，单个量子路由器的平均保真度达到 94.8%，两层路由网络的平均保真度达到 82.4%。

3.4、 本源量子计算关键核心部件氧化钌温度传感器获合肥某科技公司采购

9 月 1 日消息，**合肥某科技公司已正式采购本源量子自主研发的量子计算关键核心部件——氧化钌温度传感器，**用于企业研发与产品创新。氧化钌温度传感器由本源量子完全自主研发，是一款应用在极低温领域的温度测量传感器。量子芯片是量子计算机的核心器件，其运行对温度环境要求极为苛刻——量子芯片需在接近绝对零度的极低温环境下运行，温度发生微小波动便可能导致量子比特相干性丧失。氧化钌温度传感器就像是“量子芯片温度计”，可实时监测量子芯片运行的温度环境，保证量子芯片在合适的温区运行。该传感器测温范围为 10mK-100K，并且在 10mK 左右的温度下，具备±1.5mK 的测量精度。

3.5、 熵函数近日成功完成数千万元天使轮融资，金沙江创投领投

9 月 1 日消息，**熵函数（深圳）科技有限公司（简称“熵函数”）近日成功完成数千万元天使轮融资。本轮融资由金沙江创投领投，**水木、海纳无限、零以创投等机构跟投。融资资金将主要用于量子算力运营平台核心能力建设、人才引进，加速落地工业级量子算力，提升对科研机构与产业用户的服务能力。公开信息显示，熵函数创立于 2023 年，专注于向科研及产业客户提供大规模体系下的量子计算和量子模拟解决方案。公司由马国强和顾正澄联合创立，马国强为南京大学物理博士，曾获国家科技进步二等奖，有三次创业经历；顾正澄为香港中文大学教授，研究方向为量子多体物理，发表论文 70 余篇。

3.6、 Diraq 将在 Equinix 数据中心内部署量子计算机，加速硅基量子计算商用

9 月 1 日，**Diraq 和 Equinix 计划于 2026 年 10 月在悉尼的共享商业数据中心安装首台硅自旋量子计算机。**此次部署的 8 量子比特系统可与传统服务器兼容，功耗

下载日志已记录，仅供内部参考

低于 20 千瓦，并支持通过芯片更换进行升级，无需变动其他部分的基础设施。两家公司将在向潜在合作伙伴和客户展示前，测试该系统与传统计算和人工智能基础设施的集成效果。

4、 个股动态：华立股份量子智算中心落地郑州，IonQ 推进离子阱计算机导入化学领域工作流

4.1、 华立股份与图灵量子共建的中原首个量子智算中心落地

9 月 2 日，**华立股份与上海图灵量子共建的华立股份量子智算中心在郑州正式启动。**活动现场，图灵量子自研的光量子计算机完成交付，量子智慧水务联合实验室同步揭牌。据介绍，作为中原首个量子智算中心，双方将围绕多类水务场景深度探索量子计算、量子安全技术融合，打造“量子+水务”行业应用标杆。中心首批将聚焦智慧水务实际需求，未来中心还将逐步向生物医药、新材料、能源化工、金融等领域开放量子算力服务。

4.2、 IonQ 与 QC Ware、qBraid 等公司合作，推进离子阱计算机在化学领域的应用

9 月 1 日，**QC Ware 和 IonQ 展示了一种使用量子-经典混合计算的化学领域工作流，**对细胞色素 P450nor 的血红素活性位点进行了建模。该工作流结合了 Promethium 平台的 GPU 集群，以及 Amazon Braket 上的 IonQ Forte 离子阱系统，旨在评估混合计算在化学领域的工作流中如何支持药物发现及其他分子研究。

同日，**由 IonQ、qBraid 和 NVIDIA 联合发表最新研究。**研究证实，在离子阱系统上，结合通用超快编码（GSE）与克利福德噪声抑制（CliNR），并辅以电路中段测量（MCM），能够有效降低噪声、缓解误差，从而**显著提升复杂化学模拟的性能。**经与 NVIDIA 加速软件协同验证，这种应用原生的误差缓解方法使错误率较直接物理 Trotter 分解运行降低了 54%。

4.3、 Xanadu 更新技术路线图，计划 2031 年实现超 1000 个逻辑量子比特

8 月 31 日，**Xanadu 更新了技术路线图，目标是在 2028-2029 年实现容错量子计算，并在 2031 年前实现超过 1000 个逻辑量子比特。**该路线图目标是将公司光子损失指标从 2026 年的 24.1 倍降至 2030 年的 1.0 倍，同时将逻辑错误率降低至 10^{-16}。

Xanadu 还计划在 2029 年至 2030 年间建设一个量子数据中心，并将 PennyLane 软件平台扩展到量子硬件和仿真环境。

4.4、 Pasqal 与 KACST 及 True Nexus 合作，扩大在沙特阿拉伯的业务

8 月 31 日，**KACST 与 Pasqal 签署了一项研究协议，推动量子技术研究并开发沙特阿拉伯的量子安全密码解决方案。**此次合作将 Pasqal 的中性原子量子计算技术和云服务与 KACST 国家量子技术中心相结合，主要聚焦量子密码学领域。该合作**进一步扩大了 Pasqal 在沙特阿拉伯的业务。**

9 月 2 日，**Pasqal 和 True Nexus 利用 Pasqal 的中性原子量子技术编码了与蛋白质胶化分子机制相关的特定蛋白质结构。**该合作结合了人工智能驱动的蛋白质分析与量子计算，旨在研究蛋白质结构与功能之间的关系。双方表示，该工作有望支持量子技术在食品和生物技术领域的应用，同时**该项目也与沙特阿拉伯更广泛的量子**

下载日志已记录，仅供内部参考

技术应用计划相关联。

4.5、 Quantinuum 与阿美签署非约束性谅解备忘录，探索工业量子计算

8 月 31 日，**Quantinuum 与阿美签署了一份非约束性谅解备忘录，旨在探索容错量子计算的工业应用及潜在的研究合作。**两家公司计划识别适合量子计算研究的能源和数字化转型挑战，并对不同的量子计算模式进行基准测试。

5、 风险提示

技术研发与迭代不及预期、产业落地进度不及预期、下游应用场景需求不及预期。

下载日志已记录，仅供内部参考

特别声明

《证券期货投资者适当性管理办法》、《证券经营机构投资者适当性管理实施指引（试行）》已正式实施。根据上述规定，开源证券评定此研报的风险等级为R3（中风险），因此通过公共平台推送的研报其适用的投资者类别仅限定为专业投资者及风险承受能力为C3、C4、C5的普通投资者。若您并非专业投资者及风险承受能力为C3、C4、C5的普通投资者，请取消阅读，请勿收藏、接收或使用本研报中的任何信息。

因此受限于访问权限的设置，若给您造成不便，烦请见谅！感谢您给予的理解与配合。

分析师声明

本研究报告的署名人员具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，以勤勉的职业态度，独立、客观地出具本报告，并对内容和观点负责。本报告清晰准确地反映了署名人员的研究观点，所包含的分析基于各种假设，不同假设可能导致分析结果出现重大不同。本报告采用的各种估值方法及模型均有其局限性，估值结果不保证所涉及证券能够在该价格交易。本报告署名人员保证他们报酬的任何一部分不曾与，不与，也将不会与本报告中具体的推荐意见或观点有直接或间接的联系。

股票投资评级说明

	评级	说明
证券评级	买入（Buy）	预计相对强于市场表现 20%以上；
	增持（Outperform）	预计相对强于市场表现 5%～20%；
	中性（Neutral）	预计相对市场表现在－5%～＋5%之间波动；
	减持（Underperform）	预计相对弱于市场表现 5%以下。
行业评级	看好（Overweight）	预计行业超越整体市场表现；
	中性（Neutral）	预计行业与整体市场表现基本持平；
	看淡（Underperform）	预计行业弱于整体市场表现。
备注：评级标准为以报告日后的 6~12 个月内，证券相对于市场基准指数的涨跌幅表现，其中 A 股基准指数为沪深 300 指数（北交所基准指数为北证 50 指数）、港股基准指数为恒生指数、新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的）、美股基准指数为标普 500 或纳斯达克综合指数。我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议；投资者买入或者卖出证券的决定取决于个人的实际情况，比如当前的持仓结构以及其他需要考虑的因素。投资者应阅读整篇报告，以获取比较完整的观点与信息，不应仅仅依靠投资评级来推断结论。		

下载日志已记录，仅供内部参考

法律声明

开源证券股份有限公司是经中国证监会批准设立的证券经营机构，已具备证券投资咨询业务资格。

本报告仅供开源证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告是发送给开源证券客户的，属于商业秘密材料，只有开源证券客户才能参考或使用。

本报告是基于本公司认为可靠的已公开信息，但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、工具、意见及推测只提供给客户作参考之用，并非作为或被视为出售或购买证券或其他金融工具的邀请或向人做出邀请。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可能会波动，过往的业绩表现不应作为其日后表现的预示。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。客户应当考虑到本公司可能存在可能影响本报告客观性的利益冲突，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。本公司未确保本报告充分考虑到个别客户特殊的投资目标、财务状况或需要。本公司建议客户应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。若本报告的接收人非本公司的客户，应在基于本报告做出任何投资决定或就本报告要求任何解释前咨询独立投资顾问。投资者应自主作出投资决策并自行承担投资风险，任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

开源证券在法律允许的情况下可参与、投资或持有本报告涉及的证券或进行证券交易，或向本报告涉及的公司提供或争取提供包括投资银行业务在内的服务或业务支持。开源证券可能与本报告涉及的公司之间存在业务关系，并无需事先或在获得业务关系后通知客户。

本报告的版权归本公司所有。本公司对本报告保留一切权利。未经本公司事先书面授权，本报告的任何部分均不得以任何方式制作任何形式的拷贝、复印件或复制品，或再次分发给任何其他人，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。所有本报告中使用的商标、服务标记及标记均为本公司的商标、服务标记及标记。

开源证券研究所

上海

地址：上海市浦东新区世纪大道1788号陆家嘴金控广场1号楼3层

邮编：200120

邮箱：research@kysec.cn

深圳

地址：深圳市福田区金田路2030号卓越世纪中心1号楼45层

邮编：518000

邮箱：research@kysec.cn

北京

地址：北京市西城区西直门外大街18号金贸大厦C2座9层

邮编：100044

邮箱：research@kysec.cn

西安

地址：西安市高新区锦业路1号都市之门B座5层

邮编：710065

邮箱：research@kysec.cn