

# 量子计算研究方向调研

蒋仕贤

2025 年 10 月 23 日

## 摘要

本文对量子计算的研究方向进行系统性的调研和分析。量子计算作为新兴的计算范式，在算法设计、硬件实现、纠错编码等方面展现出巨大的潜力。本文将从量子算法、量子硬件、量子纠错、量子软件等多个维度探讨当前的研究热点和未来发展趋势。

## 1 引言

量子计算利用量子力学的叠加和纠缠特性，有望在特定问题上实现指数级加速。随着量子硬件技术的不断进步，量子计算正从理论研究走向实际应用。本文旨在系统梳理量子计算的主要研究方向。

走向实际应用需要百万级别的量子比特，而目前主流的硬件超导、离子阱、中性原子等平台能实现的是几十个，几百个，一千多个（还没有实现操控）。

一个量子比特是 0 和 1 的叠加状态，即  $|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ， $|1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。除了幅值自由度还有相位自由度，所以一个量子比特就构成二维希尔伯特空间。

B 站的 sinxcosxdx 认为乐观估计落地还需要 15 年。

在国际形势上：美国领先，中欧随后

建议：

1. 热爱物理，热爱量子力学
2. 欣赏大饼
3. 清楚风险

## 2 量子算法研究

量子算法是量子计算的核心研究方向之一。主要研究内容包括：

## 2.1 量子搜索算法

时间复杂度从  $O(N)$  变为  $O(\sqrt{N})$ ，是根号级别的加速。

**Grover 搜索算法：** Grover 算法在无序数据库搜索中实现平方根加速。

## 2.2 量子傅里叶变换

时间复杂度从  $O(N)$  变为  $O(\log N)$ ，是指数级别的加速。

**Shor 算法及其变种：** Shor 算法能够在多项式时间内分解大整数，对现有密码体系构成挑战。

## 2.3 量子模拟方面的算法

偏物理，模拟量子体系。

# 3 量子硬件技术

量子硬件的实现是量子计算走向实用的关键。就当前而言超导和离子阱这两个相对成熟、且已展示出量子优越性的路线，占据了大部分的研究产出，同时随着技术的不断深入，需要解决的问题日益复杂，也面临着许多挑战。中性原子近些年来反而有一种异军突起之感，研究热度也在不断提升，其与半导体量子点路线的快速增长，反映了学术界在寻找更优、更可扩展的量子比特平台上的不懈努力，它们是未来格局的重要变量。从当前的进度来看没有一条技术路线能够“通吃天下”。正在演变为一个更多元、更分散的竞争格局。这表明量子计算领域正在向纵深和广度同时发展。近年来，尤为明显的是顶级期刊（如 Nature, Science, PRL）上关于量子计算的论文，越来越注重于量子纠错、多比特纠缠、保真度提升等更深层次的挑战，而不仅仅是比特数量的增长。这标志着该领域正从追求规模转向“提质增效”的关键阶段。

## 3.1 超导量子比特

超导量子比特是目前最成熟的量子计算平台之一。

作为最主流的通用量子计算方案，其发展脉络清晰，从量子比特设计、耦合到纠错，每个环节都有大量的研究课题。超导路线长期占据总发文量的三分之一以上，在 2021-2022 年左右达到峰值。近两年占比略有下滑，并非因为其论文数量减少，而是因为其他路线（如中性原子）的发展速度更快，稀释了其份额。这也意味着领域进入多元化发展的新阶段。

## 3.2 离子阱量子计算

离子阱系统具有长相干时间和高保真度操作的优势。

以其高保真度和长相干时间著称，是量子逻辑门、量子网络和精密测量研究的重要平台。离子阱路线早期占比很高，随后被超导超越。但其基本盘非常稳固，始终保持着稳定的高水平产出。近年来，随着模块化和量子网络研究的兴起，离子阱路线的发文量占比甚至出现小幅回升，显示了其不可替代的技术价值。

### 3.3 光量子

在专用量子计算（如玻色采样）和量子通信方面具有天然优势。光量子占比呈现缓慢下降趋势。这主要是因为光量子系统在向大规模扩展时面临挑战，技术壁垒较高，导致研究团队数量相对稳定，不像超导那样呈现爆发式增长。但其在实现“量子优越性”方面的里程碑式成果，确保了其在领域内的重要地位。

### 3.4 中性原子

利用光镊操控中性原子，具有高扩展性和高连接度的潜力。

中性原子这是过去五年中增长最快的技术路线之一。从其占比曲线可以看出，它是一条陡峭的“增长线”。随着其在多比特阵列制备和逻辑门操控上的连续突破，吸引了大量新团队进入，是当前最活跃的前沿方向之一。

### 3.5 半导体量子点

旨在利用成熟的半导体工艺制造量子比特，易于与经典集成电路集成。半导体量子点占比经历了一个“V”形曲线。早期面临材料、噪声等挑战，发展慢于超导和离子阱。近年来，随着半导体纳米加工技术的进步和在自旋量子比特操控上的突破，该路线重新焕发活力，发文占比开始稳步回升，被认为是未来规模化的重要候选者。

### 3.6 拓扑量子计算

拓扑量子计算通过拓扑性质实现容错量子计算。

拓扑量子计算理论上具有内在容错性，但实现难度极大。

拓扑、核磁等占比相对较小且稳定。这些方向多为长期、探索性的基础研究，虽然论文总量不多，但一旦有突破性进展，往往会引发全球关注，属于“颠覆性”技术的储备区。

## 4 量子纠错与容错

量子比特相对于经典比特，优点被放大，缺点也被放大，需要很高的保真度，如今 99.9%，实际需要 99.999999%。

重复进行编码，复制 3 份，如果 2 个一样，一个不一样，就对齐成一样的。

量子纠错是构建大规模量子计算机的必要条件。

## 4.1 表面码

表面码是目前最有前景的量子纠错码之一。

## 4.2 容错阈值定理

容错阈值定理为量子纠错提供了理论基础。

# 5 量子软件与编程

量子软件工具链的发展对量子计算应用至关重要。

## 5.1 量子编程语言

如 Qiskit、Cirq 等量子编程框架的发展。

## 5.2 量子编译器优化

量子编译器的优化对提高量子程序执行效率具有重要意义。

截止到 2025 年量子计算的路线及国内外的最新进展：

# 6 结论与展望

量子计算正处于快速发展阶段，各研究方向相互促进。未来需要在算法创新、硬件提升、纠错技术等方面持续投入，推动量子计算的实用化进程。

# 7 基本框架

经典计算机可以认为由重要的三部分构成：

1. 经典比特
2. 基于比特的逻辑门操作
3. CPU，能够接受外界程序，对上述部分采取操作

我们要有一台量子计算机，那么也得有上述部分的量子对应。

首先我们会有处在叠加态的量子比特

$$| \rangle = \cos\theta|0\rangle + e^{i\phi}\sin\theta|1\rangle,$$

表 1: 主要技术路线进展		
路线	进展	指标
超导	攻克 500+ 比特级处理器布线热负载难题”105 比特” 实现量子计算优越性（willow，祖冲之 3 号）	单比特门保真度 >99.9% 双比特门保真度 >98%
离子阱	完成稳定囚禁 512 个离子并冷却利用” 魔法偏振” 技术抑制斯塔克效应 实现量子范德波尔振子的模拟	钟态相干时间提升超 100 倍 观测到量子同步等非经典现象
光量子	3050 个光子的量子计算，实验中展现了 1024 个输入压缩态、8176 个输出模式 光量子芯片上实现并验证广义不定因果序	实现多维、多方、多序的因果叠加结构
中性原子	构建 6100 个原子的阵列 实现 2024 个原子的无缺陷阵列	操控数百万量子系统，验证多体物理模拟能力
硅基自旋量子	12 个量子比特的量子芯片 Tunnel Falls	实现共振交换量子比特与微波谐振腔的强耦合
拓扑量子计算	构建 125 比特超导芯片上实现有限温度拓扑边缘态	预热化机制保护拓扑边缘态，抑制热激发破坏

其次基于此构建逻辑门，能够调控量子比特状态，最后利用算法操控底层的量子比特，测量结果去解决实际问题。我经常看到量子计算机计算快是因为它具有并行性，假设我们是对两比特系统做操作

$$|\Psi\rangle = {}_1|00\rangle + {}_2|01\rangle + {}_3|10\rangle + {}_4|11\rangle,$$

一次性可以对所有经典可能的比特构型全部操作一遍。但实际上量子计算机操作完后需要读取，上述的状态  $|\Psi\rangle$  测量一次塌缩到一个态，比如  $|01\rangle$ ，还随机塌缩，想把它的系数精确测准并不容易，需要重复实验统计分析。

所以，如果你只是“跑一遍函数然后测量”，这种量子并行性是无效的。我们需要构造一些巧妙的算法，能够真正利用到这个并行性，即构造一组“干涉结构”，让不同路径上的信息通过量子叠加和相干性发生“相消”和“增强”，最终让你只测一次也能获得答案。比如 Deutsch-Jozsa algorithm，它假设的问题是，你需要去判断一个函数  $f(x)$ ，它对不同输入的量子态都给出常数，还是对一半可能输入的量子态给出 0，另一半给出 1。条件还挺严苛，范围也只限在判断这个函数到底对应哪种情况。

进阶版的量子算法，有破解 RSA 的 Shor 算法，和 Grover 算法等，更为精巧、复杂。

不是所有问题量子计算机都能利用所谓的并行性优势，实现量子加速。

## 8 量子纠错

另一个让量子计算机界头疼的问题是，我们要操控量子比特，它就一定要和外界环境耦合；它一与外界耦合，信息就会泄露，丧失独特的相干性。这意味着，量子纠错是必然的，因为系统一定有错误，最多是错误率会下降到较低水平。于是我们要给这个体系引入大量的辅助量子比特，去补充用于计算的量子比特中所丧失的相干性。于是解决实际问题，所需量子比特规模大幅度提高，调控难度也大幅度提高。大家经常听说，哪个公司哪个实验组做出了多少个量子比特，但实际上，往往指的是物理存在的比特数目，如果认定真正错误率足够低，低到我们能用来进行实际计算的逻辑比特数目，我们可达不到现在吹捧的那么高。数目上，逻辑比特 < 物理比特（目前的物理比特错误率下）

## 9 实现路径

量子计算的主要途径目前量子计算大家比较看好的是：超导/离子阱/里德堡原子三条路径，其中里德堡原子量子计算 23 年 Lukin 文章后又掀起热炒狂潮。