含噪中等规模量子计算机

Bin Cheng,[1,2,3] *Xiu-Hao Deng,*[1,2,3] *Xiu Gu,*[1,2,3] *Yu He,*[1,2,3] *Guangchong Hu,*[1,2,3] *Peihao Huang,*[1,2,3] *Jun Li,*[1,2,3] *Ben-Chuan Lin,*[1,2,3] *Dawei Lu,*[1,2,3,4] *Yao Lu,*[1,2,3] *Chudan Qiu,*[1,2,3,4] *Hui Wang,*[5,6,7] *Tao Xin,*[1,2,3] *Shi Yu,*[1,2,3] *Man-Hong Yung,*[1,2,3] *Junkai Zeng,*[1,2,3] *Song Zhang,*[1,2,3] *Youpeng Zhong,*[1,2,3] *Xinhua Peng,*[6,7,8] *Franco Nori,*[9,10] 和 *Dapeng Yu*[1,2,3,4,*]

[1]深圳量子科学与工程研究院，南方科技大学，中国深圳 *518055*。[2]国际量子研究院，中国深圳 *518048*。[3]广东省量子科学与工程重点实验室，南方科技大学，中国深圳 *518055*。[4]南方科技大学物理系，中国深圳 *518055*[5]中国科学技术大学微尺度物质科学国家研究中心和物理科学学院，中国合肥 *230026*[6]中国科学技术大学中国科学院量子信息与量子科技创新研究院，中国合肥 *230026*[7]中国科学技术大学合肥国家实验室，中国合肥 *230088*[8]中国科学技术大学中国科学院微尺度磁共振重点实验室和物理科学学院，中国合肥 *230026*[9]理化学研究所量子计算中心和开创性研究集群，日本埼玉县和光市 *351-0198*

n

[10]密歇根大学物理系，美国密歇根州安娜堡 *48109-1040*

过去十年间，量子计算机取得了非凡进展，在迈向通用容错量子计算机的道路上实现了多个重要里程碑。量子优势——预示量子时代到来的转折点——已然实现，并伴随着数轮突破。与初创时期相比，量子硬件的集成度更高，架构也更加成熟。各种物理系统的控制精度已突破容错阈值。与此同时，量子计算研究拥抱产业化与商业化，确立了新的常态。政府、私人投资者和科技公司的合力，塑造了一个充满活力的新环境，显著加速了这一领域的发展；如今，我们正步入含噪中等规模量子时代的开端。本文首先回顾最重要的算法和最有前景技术路线上的进展，探讨量子计算领域取得的成果，随后总结下一阶段面临的挑战。此外，我们阐述了对容错量子计算机已奠定坚实基础的信心，并对未来将出现关乎人类社会的量子颠覆性应用抱有乐观态度。

目录

I. 引言 1

II. 量子算法 4

III. 超导量子比特 7

IV. 囚禁离子量子比特 11

V. 半导体自旋量子比特 15

VI. NV中心 18

VII. 核磁共振系统 21

VIII. 中性原子阵列 24

IX. 光子量子计算 27

X. 展望与结论 30 致谢 31 XI. 参考文献 31 参考文献 31

I. 引言

量子计算利用叠加、干涉和纠缠等量子特性现象，提供超越经典计算的计算资源。其最终目标是构建一种量子计算机，在解决某些任务时，其能力显著强于经典计算机。从历史上看，量子计算可追溯至 20 世纪 80 年代初期，当时 Benioff 建立了图灵机的量子力学模型 [1], , 而 Feynman [2] 和 Manin [3] 则提出利用量子力学定律模拟经典计算机无法切实完成的现象。1994 年，Shor 提出了一种高效的量子算法，用于求出某个整数的

* yudp@sustech.edu.cn

质因数。这是一个非常具体且重要的问题，目前尚无已知的高效经典算法 [4]。Shor算法以及其他一些量子算法 [5], 巩固了量子计算的基础，激发了量子物理学界，并推动了对量子计算实际实现方案的研究。首个实现方案于 1995 年提出，当时 Cirac 和 Zoller 提出了利用囚禁离子实现量子逻辑门的方案 [6]。随后几年，人们提出了其他实现量子计算的物理途径，例如核磁共振（NMR） [7–9], 自旋量子比特 [10, 11] 和超导量子比特 [12], , 此后该领域的实验研究取得了长足进展。本世纪初以来，包括腔量子电动力学系统、离子阱和 NMR 在内的多个硬件平台，已在实验中成功实现了多个量子比特。在接下来的十年里，各种平台在由数个量子比特组成的小规模量子系统上实现了量子信息处理。近年来，该领域不断发展，研究团队已能展示规模约为 40 个量子比特、甚至超过 40 个量子比特的量子设备，尤其是在囚禁离子和超导电路领域。

在迈向容错量子计算的道路上，已取得显著进展。起初，如图1所示，各类物理量子比特系统均已实现通用量子门和精确读出，并证明符合DiVincenzo标准。硬件层面的发展和制造工艺的进步进一步推动了量子比特的集成。这些成果使人们得以开展大量原型演示试验，涵盖模拟/数字量子模拟、量子纠错（QEC）、容错量子操作、量子算法等。Google使用其53量子比特Sycamore处理器进行随机电路采样，实现了量子霸权 [13] 。此后，包括超导系统 [14, 15]和光子 [16–18] 在内的多项“量子优势”实验相继实现，量子计算机与其经典对应物之间的计算能力差距大幅扩大。另一个里程碑是，商业化量子机器实现量子退火，推动了量子计算的产业化。人们一直致力于开发针对特定任务的专用量子计算机，例如D-Wave退火机 [19] 以及前述的光子玻色子采样电路 [16–18]。此外，人们还在多种物理系统中探索实用量子纠错，例如超导电路 [20–24], 、离子阱、半导体 [25, 26], 以及金刚石中的氮-空位（NV）中心 [27–29]。鉴于其不断加快的进展，通用容错量子计算的突破已近在眼前。另一个值得关注的成就是功能性量子模拟器 [30, 31], , 通过数字或模拟方式，面向量子化学 [32] 和凝聚态物理 [33]中的实际问题。

随着人们精确操控量子力学系统的能力不断增强，量子计算界的关注重点已从实验室里的奇闻转向技术现实，从研究基础物理转向解决构建可扩展系统所面临的工程问题，也从寻找性能良好的量子比特转向认真思考如何让近期的量子硬件在实践中发挥作用。21世纪的第一个十年里，作为构建可扩展量子计算机的主要候选方案，超导量子比特被用于演示原型算法，而在大多数情况下，可编程量子比特不超过两个。人们为各种硬件模块开展了大量原理验证测试。2014年，双量子比特门保真度首次在多量子比特超导电路中达到99%以上；这一指标用于评估量子处理器的控制精度，并超过了纠错阈值 [34]。此后，系统规模不断扩大的趋势日益显著，最先进的处理器已集成了50至100个量子比特。值得注意的是，这些处理器的平均保真度也在不断提升；Google的53量子比特处理器在芯片上同时操作时，实现了平均99.4%的双量子比特门保真度 [13]。这种可重复性的提升表明，人们在实验的各个方面都投入了巨大的工程努力，包括设计、制造、布线、电子设备和软件。

顺应这一宏大趋势，我们已经进入量子计算的第二阶段——嘈杂中等规模量子（NISQ） [35] 和量子计算机云服务阶段，如图1左图所示。量子计算的 NISQ 阶段类似于经典量子计算机发展的早期阶段：当时，模拟信号与数字信号并存，人们正在探索信息处理的极限，而计算任务的应用仅局限于少数几个领域。在这一阶段，通过在中等规模的集成系统中对数量有限但足够的含噪量子比特进行编码，逻辑量子比特及其操作或可达到盈亏平衡点。因此，可以用少量逻辑量子比特演示量子算法。利用量子计算算法或量子模拟实现进一步的量子优势，也有望通过量子化学、变分量子计算机、量子机器学习或量子优化等应用加以展示。最终，人们普遍认为，容错通用量子计算机将在大规模集成量子系统中实现。

除了硬件方面的进步，具有商业价值的算法和应用也开始蓬勃发展 [36]。一个典型例子是变分量子本征求解器（VQE）算法 [37], , 事实证明，该算法最终有望从双原子分子计算扩展到更大的量子系统

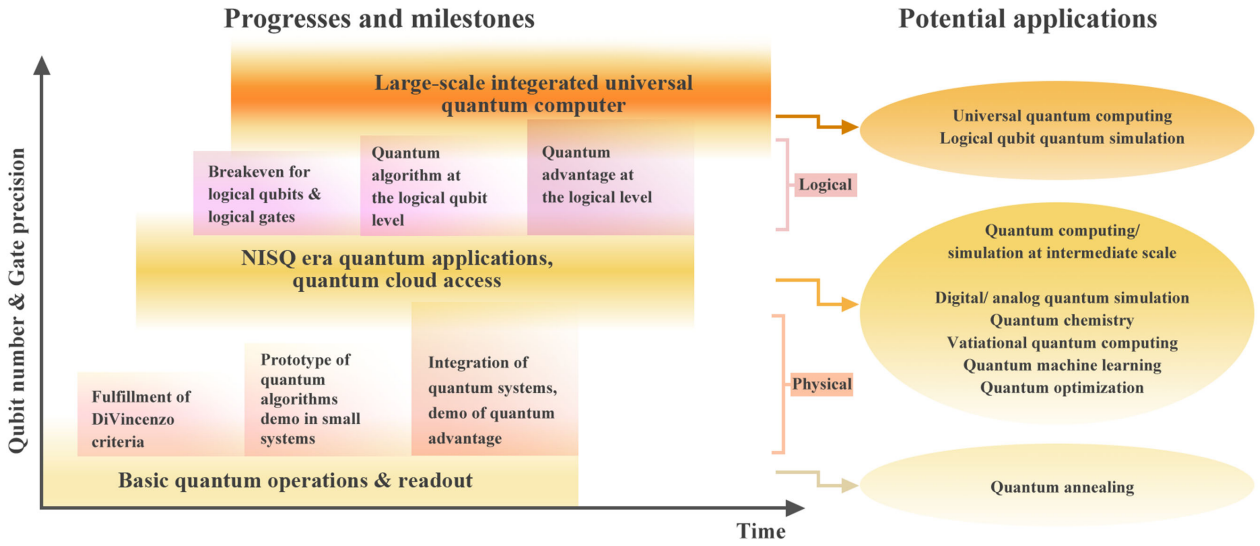


图1. 量子计算的发展阶段。左侧面板展示了量子计算的三个发展阶段 ，并将若干标志性进展归为物理层级和逻辑层级。右侧面板列出了一些与不同阶段相对应的潜在应用 。关于此图的详细讨论，请参阅第 I 节。

。近期开发出了一些通用算法，其理念与早期教科书中的算法——Shor算法和 Grover 算法 [5], 相似 [38], , 例如 Harrow-Hassidim-Lloyd（HHL）算法 [39]和量子奇异值变换（QSVT）算法

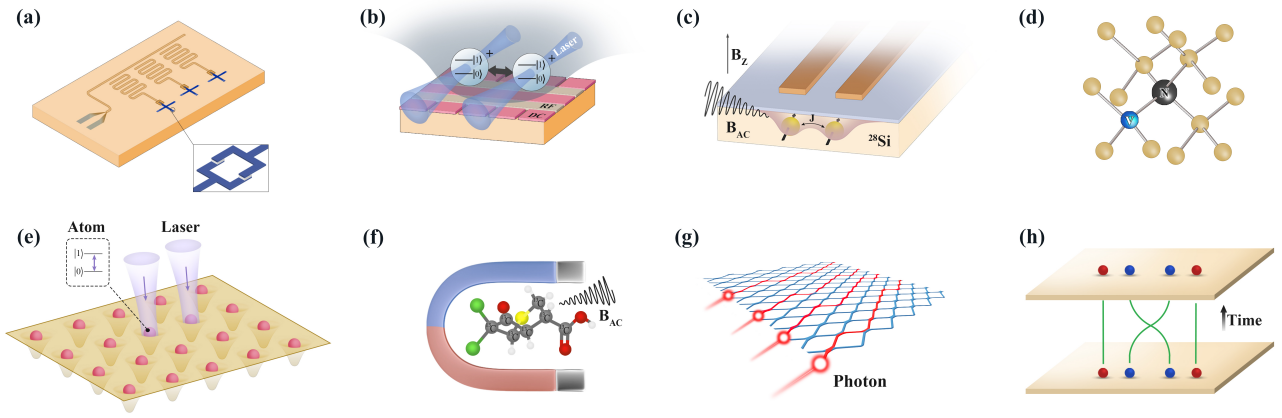
法 [40]。

多年来，量子计算研究范式发生了深刻变革，研究不再局限于学术领域。如今，推动这一领域发展的巨大动力不仅源于其内在的科学吸引力，也来自企业和社会 [41]。随着前述的巨大进展，迈向全栈量子计算 [41–43] 的路径令人鼓舞。随着商业化成为一种趋势，许多大型企业和初创公司正与科学界携手推动这一领域的发展。我们将看到，商业化进一步推动并激励这一领域的发展，正如经典计算机、基因技术和人工智能领域已经出现的情况。从更广泛的社会层面来看，云量子计算（例如 IBM量子网络）使全球用户无需拥有自己的硬件设备，也能探索新的量子算法。随着量子计算课程和实践逐渐成为学校及大学的常规内容，越来越多受过良好教育的工程师和科学家投身这一领域，并具备了量子科学方面的见解与知识。因此，社会的积极反馈正在为量子计算研究创造一种新常态，与其早期发展阶段截然不同。

本文将重点介绍有望实现终极大规模量子计算机的硬件平台，包括超导电路、囚禁离子、半导体、中性原子、核磁共振、NV中心

和光子学。具体而言，我们将着重介绍过去十年这些平台取得的重要进展。我们将遵循DiVincenzo判据 [44], , 介绍如何在各个物理系统中实现量子计算的关键要素，以及它们的典型特征和优势。本文还将讨论各个平台的可扩展性，以及近期发展中面临的关键挑战。此外，本文也将提及量子算法的最新进展。通过结合快速发展的硬件平台与潜在应用，我们希望展望量子计算在可预见的未来能够带来的创新。

拓扑量子计算通过使计算态保持为所需的纯量子态，避免产生错误结果，从而提供了应对量子误差的另一种方法。一种典型的拓扑量子比特由马约拉纳零能模构成，它们不受环境噪声影响，因此可通过马约拉纳非局域性和编织操作，在硬件层面克服不可避免的退相干。然而，非拓扑带隙内态或平庸零能态也能模拟典型的马约拉纳行为，这使得马约拉纳零能模的探测和其他操作变得困难。迄今为止，在实现拓扑量子比特之前，仍有待证明非局域性和编织操作能够展现非阿贝尔统计。对拓扑量子计算的完整讨论超出了本综述的范围。感兴趣的读者可参阅相关文献，了解更多详情 [45–47]。



(a) 超导量子处理器：
由约瑟夫森结构成的人工原子阵列
和电容器，采用光刻工艺制造，
通过微波
电子设备
可独立控制的量子比特数量：
~100
门保真度：
拥有 53 个量子比特的系统：$F_1 > 99\%$；$F_2 > 99\%$
优点：
量子门速度快、采用定制量子比特、具有高
可控性和可扩展性
缺点：
量子比特之间的串扰、低温，
用于扩展规模的支撑技术

（e）中性原子阵列量子计算：利用光镊囚禁中性原子阵列，并基于里德堡相互作用实现可控相互作用**数字量子处理器中的量子比特数量：**24**模拟量子模拟器中的量子比特数量：**289**优点：**数字和模拟量子模拟兼备 在可编程几何结构中扩展至超过 100 个量子比特**缺点：**提高双量子比特门的保真度

（b）囚禁离子量子计算：
由射频
电场囚禁在超高真空
环境
可独立控制的量子比特数量：
20-30
门保真度：
含有数十个离子的系统
$F_1 > 99.9\%$；$F_2 > 99\%$
优点：
极长的相干时间和出色的
少数离子上的量子门操作；
离子量子比特之间的可重构连接性
量子比特
缺点：
在集成方面技术难度较高

（f）核磁共振量子计算：
分子中的核自旋
可独立控制的量子比特数量：
12
门保真度：
$F_1 \sim 99.98\%$；$F_2 \sim 99.3\%$
优点：
在室温下工作
长相干时间
数字量子模拟器
缺点：
难以扩展

(c) 半导体自旋量子
计算：
半导体中的电子或空穴自旋
（硅）量子点
可独立控制的量子比特数：6
门保真度：
施主自旋量子比特：$F_1 \sim 99.99\%$；$F_2 \sim 99.5\%$
栅极定义量子比特：$F_1 \sim 99.9\%$；$F_2 \sim 99.51\%$
优点：
半导体制造
长相干时间和快速高保真度量子门
在 > 1 K 温度下工作
占地面积小
缺点：
纳米尺度制造面临挑战

（g）光子量子计算：
相干操控大量
单光子或正则共轭对
电磁模式变量，用于处理
量子信息
可独立控制的量子比特数量：
18
可相干控制的光子数量：
255（九章3.0（即将发表））
门保真度：
$F_1 \sim 99.84\%$；$F_2 \sim 99.69\%$
优点：抗退相干能力强，可在
室温下工作，兼容 CMOS
制造，是分布式
量子计算的天然接口
缺点： 实现确定性
光子-光子门

(d) NV中心量子计算：
金刚石中的点缺陷；电子和核自旋
具有较长的相干时间；类原子
性质与固态宿主环境
可独立控制的量子比特数量：
10（一个电子 + 九个 ^{13}C 核自旋）
门保真度：
$F_1 \sim 99.995\%$；$F_2 \sim 99.2\%$
优点：
在室温下工作
出色的量子传感器
在量子网络中很实用
缺点：
难以扩展

(h) 拓扑量子计算：
基于容错量子计算的
任意子的非阿贝尔编织的容错量子计算
可独立控制的量子比特数量：
N/A
门保真度：
N/A
优点：
内禀拓扑保护
构建一个逻辑量子比特所需的物理量子比特较少
有望实现大规模、经过纠错的
计算
缺点：
尚未找到理想材料或系统。
迄今为止还没有拓扑量子比特

图2. 不同类型量子比特（上半部分）及其相应优点和缺点（下半部分）的示意图。 F_1 (F_2)分别表示单量子比特（双量子比特）门的保真度。

II. 量子算法

引言。— 预计，利用奇异量子特性的量子计算机能够比经典计算机更高效地解决计算问题。例如，在查询模型中，给定对函数 $f\colon \{0,1\}^n \to \{0,1\}$ 的预言机访问权限，经典计算机一次只能查询一个输入，而量子计算机可以查询一次预言机，并同时获得所有 2^n 数值，这种现象被称为量子并行性。形式化地，

$$\sum_x |x\rangle |0\rangle \mapsto \sum_x |x\rangle |f(x)\rangle \tag{1}$$

可以在量子计算机上实现。然而，量子并行性本身并无实际用途，因为进行测量时，量子态会坍缩，并且只能获得一比特信息。要设计量子算法，需要将量子并行性与干涉和纠缠等其他特性结合起来。

1985年，Deutsch 将量子并行性与干涉结合起来，设计出第一个能够以少于经典计算机所需查询次数解决黑盒问题的量子算法 [48]。具体而言，在 Deutsch 问题中，给定一个函数 $f\colon \{0,1\} \to \{0,1\}$，要求判断该函数是否为常数函数，即 $f(0) = f(1)$，还是不是。经典情况下，解决这个问题需要查询两次；而使用量子计算机，只需查询一次。后来，这一问题被推广到多量子比特

版本，称为 Deutsch-Jozsa算法，它相较于任何经典确定性算法都能实现指数级加速 [49]。然而，存在少量错误概率时，这种量子加速便会消失。1993年，Berstein 和 Vazirani 提出了另一个问题，并为其设计了一种量子算法；即使与经典随机算法相比，该算法也能实现多项式级加速 [50]。一年后，Simon 通过提出 Simon问题并设计相应的量子算法，进一步强化了这一结果，实现了指数级加速 [51]。

这些早期探索主要着眼于寻找量子计算机能够比经典计算机更高效地解决的问题，而非关注现实世界中的应用。但有趣的是，后来事实证明，Simon算法启发 Shor设计了量子算法，用于解决离散对数和整数分解问题 [4], ，而这些问题在密码学中得到了广泛应用。

量子傅里叶变换。— 在量子算法发展的下一个阶段，出现了若干量子算法基本组件，它们似乎被广泛用于设计新的量子算法。其中一种基本组件是量子傅里叶变换（ QFT），它通过量子计算机上的多项式规模量子电路实现傅里叶变换矩阵

$$(F_N)_{jk} := \omega_N^{jk}/\sqrt{N} \tag{2}$$

其中， $N := 2^n$ ， $\omega_N := e^{2\pi i/N}$ 是 N次单位根。Simon算法使用了QFT的一种特殊形式，即 Hadamard变换，它对应于 $N = 2$ 和 $\omega_N = -1$的情形。从群论的角度来看， F_N 是$\mathbb{Z}_N$上的傅里叶变换，其中 $\mathbb{Z}_N$是模 N整数的加法群，由元素 $\{0, 1, \cdots, N-1\}$组成；Simon的Hadamard变换则是 $\mathbb{Z}_2^n$ [52]上的傅里叶变换。

Shor因式分解算法分为两个步骤：首先将整数因式分解通过经典多项式时间归约转化为周期查找，然后使用高效的量子算法求解周期查找问题 [4]，该算法使用了 $\mathbb{Z}_N$上的 QFT。结合这两个步骤，Shor 得到了一个用于求解整数因式分解的多项式时间量子算法，其速度超越最佳经典算法达到超多项式级别。Kitaev 提出了任意有限阿贝尔群上的广义 QFT，并据此设计了一种多项式时间量子算法，用于寻找阿贝尔群的稳定子；阿贝尔稳定子问题将整数因式分解和离散对数作为其特例 [53]。值得一提的是，Kitaev 还在同一篇论文中提出了相位估计算法，该算法估计 $U|\psi\rangle = e^{i2\pi\phi}|\psi\rangle$ 中的相位ϕ ，可用于求解周期查找问题 [53]。从统一的视角来看，这些问题都属于隐藏子群问题 [52, 54]。

量子搜索——第二个基本原语源自 Grover 算法 [55, 56], ，该算法用于在无序数据库中搜索目标。形式上，给定函数 $f: \{0,1\}^n \to \{0,1\}$ ，并作出如下承诺：恰好存在一个 x_0 ，使得 $f(x_0) = 1$，搜索问题就是找出目标 x_0。由于该问题不存在任何结构，经典算法需要进行 $\Omega(2^n)$ 次查询，才能以较大的概率找到目标 x_0 。Grover 算法使量子计算机能够通过 $O(\sqrt{2^n})$ 次数据库查询找到目标，从而实现相对于经典计算的二次加速。Grover 算法反复应用 Grover 迭代算子

$$G = (2|u\rangle\langle u| - I)(I - 2|x_0\rangle\langle x_0|) , \tag{3}$$

它是两个反射的乘积；其中， $|u\rangle := \frac{1}{\sqrt{N}}\sum_y |y\rangle$ 是均匀叠加态， $I - 2|x_0\rangle\langle x_0|$是量子查询算子。Grover 算法是最优的，因为任何能够解决该问题的量子算法都至少需要进行 $\Omega(\sqrt{2^n})$ 次查询 [57]。Grover 算法可以扩展为振幅放大，从而处理存在多个目标的情况 [58–60]。更具体地说，给定一个应用于 $|0^n\rangle$ 的量子（或经典）算法 $\mathcal{A}$ ，若测量时输出正确目标的概率为 p，则需要运行该算法 $1/p$ 次才能得到目标结果。然而，振幅放大可以在 $O(1/\sqrt{p})$ 时间内获得目标，这同样带来了二次加速。Grover 算法或振幅放大的定点版本甚至可以处理目标数量未知的情况 [61–63]。与 Shor 算法相比，Grover 算法启发了更多应用，因为它可以加速搜索子程序，从而解决许多优化问题 [64–68]。

人们也可以在另一种范式下考虑搜索问题，即马尔可夫链或随机游走。随机游走的量子版本包括连续时间量子游走 [69–71] 和离散时间量子游走；本文聚焦于后者。离散时间量子游走的框架是在多项研究中逐步发展起来的 [72–78]。随后，这一框架被用于提出 Grover 搜索算法的一种不同表述 [79]。在一项突破性研究中，Ambainis 设计了一种用于元素互异性问题的量子游走算法 [80] ，其查询复杂度优于直接应用 Grover 算法，并达到了理论下界 [81]。随后，Ambainis 的结果得到了推广 [82, 83], ；具体而言，Szegedy 提出了经典马尔可夫链量子化的一般框架 [83], ，并在 [84] 中进一步改进。基于量子游走的搜索算法有许多应用 [85, 86], ，包括三角形查找 [87]、群交换性测试 [88],等。

哈密顿量模拟。— 本综述将讨论的第三个基本要素是哈密顿量模拟，它在量子计算机上近似实现哈密顿量 H 的时间演化算子e^{-iHt} 。事实上，哈密顿量模拟是推动量子计算 [2]发展的最初动机之一。第一个用于实现时间演化算子的量子算法由 Lloyd [89], 提出，其基于 Lie-Trotter 公式。例如，假设我们有

一个局域哈密顿量 $H = H_1 + H_2$，使得局域项 H_1 和 H_2 的时间演化能够在量子计算机上高效实现。Lie-Trotter 公式给出

$$e^{-iHt} = (e^{-iH_1 t/s} e^{-iH_2 t/s})^s + O(t^2/s) , \qquad (4)$$

这意味着 e^{-iHt} 可以通过在增量时间 t/s内交替应用 H_1 和 H_2 来实现。还可以使用高阶公式 [90, 91] 来近似 H 的时间演化。这种通用方案称为乘积公式方法，或特罗特化，后来被用于模拟稀疏哈密顿量 [92–94]。此后，有人提出了一种基于量子游走 [95, 96] 的哈密顿量模拟方法，其门复杂度和查询复杂度随演化时间 t呈线性增长，达到了无快速前推定理 [93]所规定的下界。

另一种模拟哈密顿量动力学的重要方法是使用酉算子的线性组合（LCU） [97], ，研究表明，该方法对模拟精度的依赖关系达到了最优 [98, 99]。将酉算子的线性组合方法与量子游走方法结合，可以得到一种算法，使其对所有相关参数（如精度、哈密顿量的稀疏度、演化时间等）的依赖关系均达到最优 [100]。此外，酉算子的线性组合方法中使用的一个子程序后来被称为块编码，事实证明，它为设计量子算法提供了一套灵活多用的工具。在一系列研究中，Low 等人基于块编码和量子信号处理提出了改进的哈密顿量模拟算法 [101–104]。其思路是将哈密顿量编码为一个幺正算子的一个块，然后利用量子信号处理技术对哈密顿量施加多项式变换 [101]。这一方法后来进一步推广为称作 QSVT 的框架 [105], ，该框架涵盖了大多数现有量子算法的特殊情形，实现了量子算法的宏大统一 [106]。然而，最近对特罗特误差的深入分析表明，与其他方法相比，乘积公式方法的门复杂度标度也颇具竞争力 [107]。

量子线性代数与量子机器学习——前述基本操作可以组合起来，设计新的量子算法。本文讨论用于线性代数和机器学习的量子算法。量子线性代数始于 HHL 算法，该算法以 Harrow、Hassidim 和 Lloyd [39] 的名字命名。他们考虑的问题是求解线性方程组；也就是说，给定矩阵 A 和向量$\mathbf{b}$，求解$A\mathbf{x} = \mathbf{b}$，其中$\mathbf{x}$为未知量。给定一个在振幅中编码向量$\mathbf{b}$ 的量子态 $|b\rangle$，HHL 利用哈密顿量演化和相位估计，近似制备量子态 $|x\rangle = A^{-1}|b\rangle$。只要无需获取解$\mathbf{x}$ 的完整描述，并且能够制备量子态 $|b\rangle$，HHL 算法就能比任何经典算法实现指数级加速 [39]。HHL 被应用于许多量子机器学习算法，以实现指数级量子加速，包括量子 k-均值聚类 [108], 量子主成分分析 [109], 量子支持向量机 [110],量子数据拟合 [111], 等；这些算法的综述参见文献 [112]。

然而，这种指数级量子加速究竟是人为构造的，还是确实存在，目前尚不清楚。具体而言，这些量子机器学习算法通常作出了较强的输入假设，例如具备访问经典数据的量子随机存取存储器（QRAM） [113]。在类似的设定下，或许可以推导出高效的经典算法。2018年，Tang [114]的突破性工作提出了一种经典算法，将此前被认为具有指数级加速的推荐系统 [115], 量子算法去量子化，同时仅带来多项式级的速度下降。Tang 的研究成果推动了后续一系列对各种量子机器学习算法进行去量子化的工作，例如用于主成分分析 [116], 、求解低秩线性系统 [117, 118], 、求解低秩半定规划 [119], 等问题的算法。这些工作假设采用样本与查询访问模型 [116]访问输入数据，该模型是许多量子机器学习算法输入假设的经典类比。由于 QSVT 为统一量子算法，尤其是量子线性代数，提供了一种基本工具，这些去量子化结果后来通过对 QSVT 进行去量子化 [40]而扩展为一个统一框架。因此，机器学习中能否实现指数级量子加速，仍存在争议。

变分量子算法。——除了利用 HHL 对机器学习算法进行量子化之外，另一种探索受到神经网络的启发，这类算法即变分量子算法。变分量子算法是混合量子算法：它们在量子计算机上制备参数化量子态，并利用经典计算机优化参数。第一个变分量子算法是 VQE [37]„ 旨在解决量子化学问题。其目标是求出局域哈密顿量的基态和基态能量。在 VQE 出现之前，一种常见方法是使用量子相位估计 [120, 121]。然而，与其他量子算法一样，这种方法对量子设备的相干性要求极为严格，在当前含噪声中等规模量子时代颇具挑战性 [35]。

自 VQE 以来，沿着这一方向开展了更多研究。受量子绝热算法 [122],的启发，Farhi 等人提出了量子近似优化算法（QAOA），用于求解组合优化问题，例如最大割问题 [123]。第三类变分量子算法是量子神经网络，旨在解决分类 [124, 125] 和生成式建模 [126, 127] 等机器学习问题。

在当前含噪声中等规模量子时代，尽管我们已在各种模型中展示了量子计算优越性 [13, 15, 128, 129], ，但这些问题并非为实际应用而设计。变分量

子算法被视为在量子计算机上实现“杀手级应用”的有前景方法。这类应用可能出现在多个领域，包括量子化学、材料科学和生物科学。例如，在量子化学中，变分量子本征求解器可用于计算电子哈密顿量的低能本征态，从而帮助理解化学反应并设计新型催化剂 [130]。在生物科学领域，许多方向都涉及优化，例如序列分析和功能基因组学 [131]。这为利用量子神经网络和量子变分自编码器 [132], 等方法实现潜在的量子加速带来了机遇。然而，沿这条路径仍有很长的路要走，我们应持续投入变分量子算法的研究。此外，要使其适用于近期的量子设备，或许还需要误差缓解技术 [133–137]。

III. 超导量子比特

引言.— 超导量子比特是基于约瑟夫森结的非线性超导电路，其量子化电磁场处于微波频段（通常为 0.1–12 赫兹）。它们在稀释制冷机提供的低温下工作（~ 10 毫开尔文；相当于$k_{\mathrm{B}}T/h \sim 0.2$ 赫兹），以抑制热涨落。近年来，超导量子比特已成为可扩展量子信息处理的领先平台。一些近期里程碑包括：利用 53 量子比特超导量子处理器实现量子霸权 [13]„ 并由一台 66 量子比特处理器进一步巩固这一成果 [128]。凭借可扩展的高保真控制和可配置的相互作用，超导电路已成为开展量子计算任务 [125, 128, 138–141], 、量子模拟 [142–150]„、量子退火 [19, 151], 、量子化学 [152–155], 、奇异多体物理 [156–161], 、光与物质相互作用新机制 [162–165], 、量子传感[166, 167]以及生物过程研究 [168]的多功能平台。

图2(a)总结了关于超导量子比特的一些事实，文献 [169, 173–190]中列出了一系列关于超导量子比特的优秀综述。超导体中的载流子称为库珀对，它们能够无耗散地流动，这一特性有助于保持宏观系统的量子相干性。更重要的是，通过集成一种特殊的超导电路元件——约瑟夫森结，可以呈现出非平凡的量子特性。约瑟夫森结通常呈夹层结构，由两块超导电极和中间一层纳米厚的绝缘层构成（图3a）；库珀对能够隧穿绝缘势垒，产生的超电流不超过结的临界电流 I_{c} ，而临界电流取决于材料、厚度和尺寸 [191, 192]。从电路角度来看，约瑟夫森结可以建模为一个固有电容 C_{J} 与一个非线性电感 $L_{\mathrm{J}} = \Phi_0/2\pi I_{\mathrm{c}} \cos\phi$并联的结构，其中 $\Phi_0 = h/2e$是超导磁通量子， ϕ 是结两端的超导相位差。约瑟夫森结的两个特征参数是约瑟夫森能 $E_{\mathrm{J}} = \Phi_0 I_{\mathrm{c}}/2\pi$ 和充电能 $E_{\mathrm{C}} = e^2/2C_{\mathrm{J}}$。

量子比特的构造——人们对如何利用约瑟夫森结构造超导量子比特进行了大量探索。传统上，超导量子比特设计分为电荷 [193],通量 [194, 195]和相位量子比特 [196]；它们都在早期的许多实验中取得了成功 [12, 197–208]。近年来，跨量子比特 [209] 以及为实现可扩展性而改进的版本，即 Xmon量子比特 [171] ，已广受欢迎。这些改进型电荷量子比特设计使用一个大电容器C_{S} 对约瑟夫森结进行分流，从而大幅降低其对电荷涨落的灵敏度 [210]。通常，这个分流电容器会将有效充电能 $E_{\mathrm{C}} = e^2/2$（$C_{\mathrm{S}} + C_{\mathrm{J}}$）降低至 $E_{\mathrm{J}}/E_{\mathrm{C}} > 50$ 的范围（图 3b）；因此，对电荷涨落的灵敏度会大幅降低。transmon设计采用尽可能简单的电路几何结构，因此对制造偏差的容忍度更高，且具有出色的可重复性。transmon量子比特的哈密顿量与电荷量子比特的相同，可表示为

$$H = 4E_{\mathrm{C}}n^2 - E_{\mathrm{J}}\cos\phi, \tag{5}$$

其中， n 是穿过结的库珀对数量； n 和 ϕ 满足对易关系 $[\phi, n] = i$。请注意，该哈密顿量与描述一维势阱中量子粒子的哈密顿量相同（图 3c）。在 $C_S \gg C_J$ 极限下，低能本征态近似为局域在势阱中的态，超导相位 ϕ 很小。因此，我们可以将势能项展开为幂级数：

$$-E_{\mathrm{J}}\cos\phi = \frac{1}{2}E_{\mathrm{J}}\phi^2 - \frac{1}{24}E_{\mathrm{J}}\phi^4 + \mathcal{O}(\phi^6). \tag{6}$$

第一个二次势能项对应于一个具有等间距能级 $\hbar\omega_{10}$的量子谐振子，而由约瑟夫森非线性产生的第二个四次势能项则为能级结构引入非简谐性，使得第一激发态 $|1\rangle$ 与第二激发态 $|2\rangle$之间的跃迁能量 $\hbar\omega_{21}$ 不同于基态 $|0\rangle$与第一激发态 $|1\rangle$之间的跃迁能量。该非线性使得我们能够仅用最低的两个能级 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 构成的计算子空间来定义量子比特。通过将单个结替换为一对结，还可以进一步修改这一设计，从而能够通过调节穿过双结环路的磁通来调节有效约瑟夫森能以及量子比特频率。

跨量子比特设计可通过将量子比特电路嵌入三维腔中来实现（图3d）

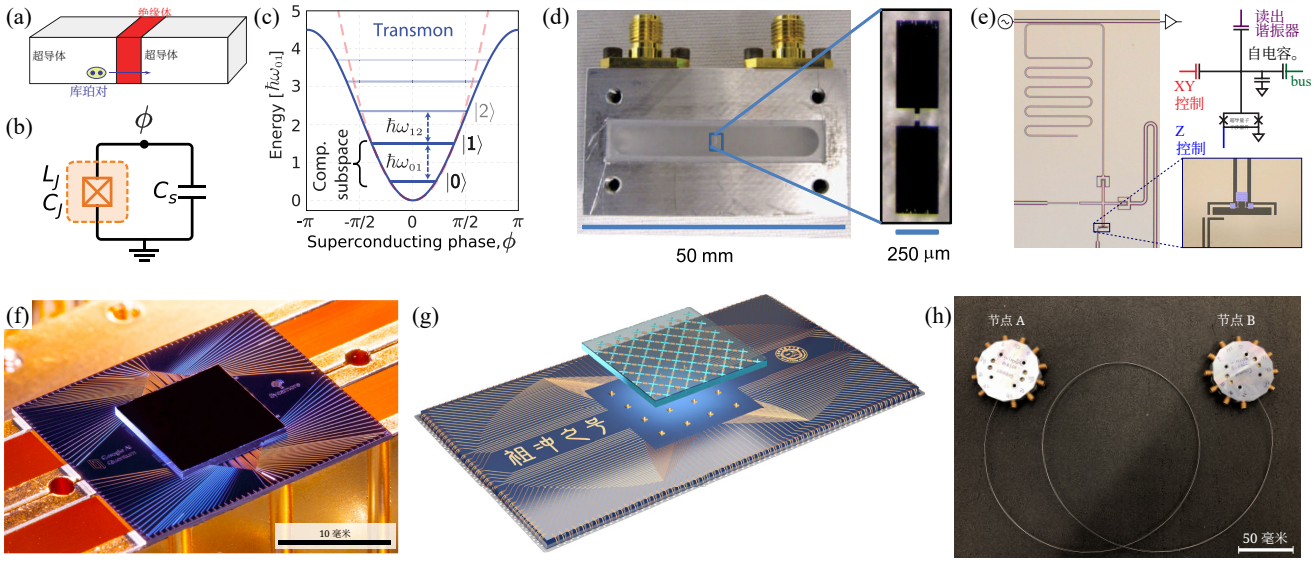


图 3。（a）约瑟夫森结示意图：两个超导体由一层薄绝缘层隔开，库珀对可隧穿通过该绝缘层。改编自参考文献 [169], Springer Nature Limited。（b）transmon量子比特的电路图，由一个约瑟夫森结（约瑟夫森电感 L_{J}、自电容 C_{J}）和一个分流电容器 C_{S}（$C_{\mathrm{S}} \gg C_{\mathrm{J}}$）组成。（c）跨量子比特这一量子非谐振子的势能分布和能级图。（d）嵌入三维腔中的跨量子比特图像。改编自参考文献 [170]。（e）平面跨蒙特量子比特图像。改编自参考文献 [171]。（f）Sycamore量子处理器的照片。改编自参考文献 [13], Springer Nature Limited。（g）*Zuchongzhi* 量子处理器的器件示意图。改编自参考文献 [128]。（h）由两个节点组成的模块化量子处理器照片。改编自参考文献 [172], Springer Nature Limited。

也可采用基于铝、铌等超导材料的光刻定义电路形式（图3e），以及许多其他变体 [170, 171, 211–213]。具有替代拓扑结构的量子比特设计，例如电容分流磁通量子比特 [210, 214–217], Fluxonium量子比特[218–221], 和 0-π 量子比特 [222]，也一直在积极开发中，并展现出良好的前景。通过调控能级谱和耦合矩阵元，这些设计中的一些能够实现定义更明确的二能级系统，并具备抵御外部扰动的内在保护机制，代价是电路复杂度增加。配置哈密顿量时展现出的非凡灵活性，提供了丰富的参数空间，可用于寻找所需的量子比特特性，因此超导量子比特也被称为“人工原子”。

读出与初始化。拥有定义明确的二能级系统还不足以实现量子计算；忠实地测量并初始化量子比特也必不可少。当前辨别量子比特态的主流技术是色散读出方案。采用腔或电路量子电动力学（cQED）架构时，量子比特与读出谐振器 [223, 224]强耦合，同时保持足够大的失谐；量子比特会使谐振器频率发生依赖于量子比特态的偏移，通过探测谐振器即可推断量子比特态。cQED方案在实现快速、高保真度的非破坏性读出方面取得了成功，这得益于围绕该方案开发的一系列技术。为避免读出谐振器引入额外的退相干，可以在谐振器与外部电路之间放置Purcell滤波器，以重塑量子比特和谐振器所感知的环境模态密度 [225–228]；这样既能提高读出速度，又能抑制量子比特弛豫。此外，在读出信号放大的初始阶段使用约瑟夫森参量放大器（JPA） [229–237]，也能立即提升测量保真度。值得注意的是，多路复用读出 [238], 、多能级编码 [239], 和光子计数法 [240] 等其他技术，也有助于提高测量效率和可扩展性。在连续两次测量之间，超导量子比特通常只需等待其弛豫至基态即可完成初始化。人们已为超导量子比特开发了多种有条件和无条件的复位技术，以加快这一过程 [241–245]。

量子门——超导量子比特的控制颇具挑战，因为执行量子逻辑或幺正操作本质上是一个由薛定谔方程支配的模拟过程，而实际哈密顿量往往远非理想。单量子比特XY操作，即在布洛赫球的XY平面内绕某一轴旋转，通常通过施加共振微波脉冲来驱动量子比特实现。对于跨量子比特这类弱非谐量子比特，共振驱动可能导致不必要的泄漏至高激发态，并引入额外的相位误差；绝热导数移除——

绝热导数移除门（DRAG）方案通过在脉冲中添加额外的正交分量，已成为脉冲校准中的常规方法，可在不增加硬件成本的情况下抑制这些相干误差 [246, 247]。单量子比特相位门或Z门，即绕Z轴旋转，可通过组合XY旋转实现，也可在量子比特频率可调的情况下施加物理Z脉冲来实现；还可通过改变XY旋转的相位来执行效率更高的虚拟Z门 [248]。在需要扩展至大量量子比特的低温实验中，热耗散也是一项重要考量；近期已有研究展示了一种利用单磁通量子（SFQ）电路实现单量子比特操作的、更节能的方法 [249]。

纠缠操作目前是现有量子处理器的性能瓶颈。在众多纠缠门方案中，大多数涉及两个量子比特，通常可归为两类。一种通用方法是将相关能级调至共振，以启动相互作用；相关演示包括实现 iSWAP 或√iSWAP门 [250, 251] 以及受控Z门 [252–257]。另一种方法是在某些非局域跃迁处施加微波脉冲；例如，交叉共振门 [258, 259], 、谐振器诱导相位门 [260]和参数驱动门 [261, 262]。要实现高保真度双量子比特门，关键是设计出有效的相互作用强度，使其在门操作期间足够强，从而缩短门控时间；而在门操作窗口之外则尽可能弱，以避免不必要的相互作用，换言之，就是获得较高的开关比。在固定耦合架构中，量子比特间的耦合强度 g 几乎恒定，开启或关闭相互作用的一种直接方法是将量子比特频率调至共振或调离共振。然而，随着量子比特间连通性的增加，每个量子比特周围可见的跃迁也更多；要以干净利落的方式操控整个系统变得愈发困难。这就是所谓的频率拥挤问题，也是扩展量子处理器规模所面临的主要挑战之一。采用其他耦合方案时也存在这一问题，例如通过总线谐振器实现全连接 [263]。采用可调耦合方案或可解决这一问题，因为这类方案能够在较大的动态范围[264内独立控制耦合强度 g 。近年来，基于原生电容耦合和干涉效应 [272]的可调耦合架构已成为一种热门方案；许多研究团队在门保真度方面取得了巨大进展，部分结果已接近 99.9% [273–280]。表 I 总结了超导处理器的典型性能。

退相干——退相干会迅速破坏量子信息。坏消息是，超导量子比特具有宏观特性，因此极易受到外部涨落的影响。当然，一个直接的解决办法是延长量子比特寿命。自首次观测到超导量子比特的量子相干性以来， [12], 量子比特寿命已提高了六个数量级，从纳秒延长至毫秒， [282–284] 这一进展在约20年间实现。这一显著进步得益于设计、材料、制造质量和测试环境等方面的共同改进。目前普遍认为，位于量子比特附近的寄生二能级系统（TLS）是退相干 [285]以及相干性和量子比特频率不可预测涨落的主要来源；在大规模实现中，这些问题可能造成麻烦。 [286–290]

除了从硬件层面提升相干性之外，另一种应对噪声和退相干的方法是采用量子控制方法。一种特别有用的技术是动态解耦（DD） [291] ，它通过量身设计的脉冲序列来纠正相干噪声，尤其是这些固态器件中无处不在、臭名昭著的 $1/f$ 噪声 [292] 。设计最优序列需要详细了解噪声，例如其谱特性；这些特性可以通过不同频段的各种技术提取 [251, 293–298]。

鉴于相干时间有限，还可以通过优化量子编译来提升量子处理器的性能，即将高层操作转换为更短的原生门序列 [299]。由于平面几何结构和连接性有限，在超导量子处理器上进行编译极具挑战性；最终需要执行的序列往往耗时过长。有效的策略是充分利用硬件能力，并扩充可用的门字母表，以优化编译。近期在连续门集、多量子比特门和量子位操作方面的进展，在这方面展现出巨大潜力 [275, 300–304]。

量子纠错。由于当前最先进的门错误率（10^{-3}）比逻辑量子比特所需的错误率（10^{-12}–10^{-15}）高出许多数量级，要构建通用量子计算机就必须进行量子纠错。表面码 [305, 306], 将逻辑量子比特编码到由物理量子比特构成的方格晶格中，因此适用于平面架构。近期，我们观察到这一领域涌现出大量令人振奋的实验进展 [21, 22, 24, 307–309]。在其中一些实验中，性能已接近甚至部分超越量子纠错阈值。不过，要实现显著的纠错增益，尤其是要在更大规模下获得可重复的性能，仍然充满挑战。近未来，人们十分期待实现由数百至一千个物理量子比特构成的逻辑量子比特；未来五到十年内，我们或许就能判断容错量子计算机是否可行，以及它能有多强大。另一个日益受到关注的问题是宇宙射线的存在，它们可能导致芯片级故障，对表面码造成灾难性影响 [310–312]。

量子纠错的另一种有前景的途径是玻色子编码，它将逻辑量子比特编码在微波光子

表 I. 超导量子比特中报告的典型性能。

量子比特数	T_1 (μs)	T_2^* (μs)	t_{1q} (纳秒)	误差$_{1q}$(10^{-3})	t_{2q} (纳秒)	误差$_{2q}$(10^{-3})	t_r (μs)	误差$_r$ (10^{-2})	制冷机	Size
53，66 [13, 128]	$16-30.6$	~ 5.3	~ 25	~ 1.4	~ 12	~ 5	~ 1 [281]	~ 3.1 [281]	~ 20 毫开尔文	~ 1 毫米^2
$<$10 [273–280]	$15-76$	$12-105$	~ 30	~ 1	$10-200$	~ 1.5				

t_{1q} (t_{2q}) 是单量子比特（双量子比特）门的持续时间。t_r （Err$_r$）分别表示读出的持续时间（错误率）。

之中，即编码在三维超导腔的谐振子态里。根据逻辑量子比特编码到谐振子态的方式不同，玻色子编码有多种类型[313–315]。猫态编码及其相关变体将两个宇称相同的光子猫态叠加，用作逻辑量子比特 [316–320]；而二项式编码则使用具有确定光子数宇称的码字 [321, 322]；Gottesman-Kitaev-Preskill（GKP）编码则在相空间中实现相干态晶格 [323–327]，其优势在于，误差、测量和量子门都只是对谐振子的简单位移操作。迄今为止，只有玻色子编码在量子纠错实验中达到了盈亏平衡点，这意味着纠错量子比特的寿命比未经纠错的量子比特更长。这是因为微波光子具有较少的错误综合征，而且三维腔通常具有更高的品质因数。

可扩展性——最后，我们想谈谈最令人关注的问题：如何提高超导量子处理器的可扩展性。随着平面电路设计与制造的不断改进，以及倒装芯片封装的发展，目前已有数十个超导量子比特集成在单个处理器上，从而实现了量子霸权 [13] （图 3f）或量子计算优势 [128] （图 3g）。值得强调的是，单纯印制数千个量子比特并不困难，真正的挑战在于同时实现所有量子比特的高保真操作。为此，许多现有架构可能都需要重新设计。首先，要在有限空间内容纳更多量子比特，就必须减小量子比特占用面积。近期研究表明，利用二维材料可将分流电容器缩小 100 倍甚至更多，同时保持相干性 [328–330]。即使能在芯片上密集排列量子比特（尺寸： $L \times L$），由于尺度规律不匹配，要将所有控制线从外围（长度 $\propto L$）布设至各个量子比特（密度 $\propto L^2$）仍极其困难，更不用说避免线路之间的串扰。近年来，人们已投入大量精力，借助从半导体芯片封装领域引入的各种技术，例如倒装芯片键合和硅通孔[331–338]，利用第三维空间来缓解这一难题。除了扩展布线空间，另一种方法是让一条线路服务多个目标。信号复用和控制线共享方案能够缓解未来大规模器件面临的问题 [304, 339, 340]，也有助于降低稀释制冷机内外的电缆密度。

未来，我们可能会面临难以克服的工程挑战，包括可用晶圆尺寸、器件良率和串扰；这些因素都会限制单片量子处理器设计的可扩展性。这表明有必要开发替代性的模块化方法：分别构建并校准较小规模的量子模块，再利用高质量的量子相干互连将它们组装成更大的架构 [341–345]。近期有多项实验展示了两个超导量子模块之间的确定性量子态传输（QST），互连采用商用铌钛（NbTi）超导同轴电缆 [346–348], 、铜同轴电缆 [349], 和铝波导 [350], ，实现的保真度最高达 $\sim 80\%$，主要受连接器、环行器和印刷电路板走线等有损组件的限制。较新的研究采用线键合 [172] 或夹持式 [351]连接量子模块与超导电缆，消除了对普通金属组件的需求，将电缆品质因数提高至$\sim 5 \times 10^4$，并将模块间量子态传输保真度提高至 $\sim 90\%$（图 3h）。人们也在探索倒装芯片模块化方法 [352], ，让不同芯片上的量子比特彼此靠近并直接耦合，在实现高保真度的同时保留模块化架构的诸多优点。

除了量子处理器的架构设计之外，支撑技术对于规模化实现同样至关重要。由于非理想的制造条件，约瑟夫森结的临界电流通常会发生几个百分点的变化，这相当于量子比特频率发生几百兆赫兹的变化；这种不可预测的变化会严重影响量子比特操作的质量。在制造过程中及制造完成后提高结均匀性的技术，可能为硬件和软件设计开辟新的可能性 [353–356]。此外，稀释制冷机的容量最终将受到其制冷功率的限制。有前景的解决方案包括周密的布线方案 [357]以及节能型低温电子设备 [358–360]。同时进行高保真操作需要低串扰。串扰缓解是必须解决的问题。除了通过设计和封装进行优化 [216, 272, 361–365], 之外，人们还开发了各种控制技术，以减少不同类型的串扰，例如微波信号串扰 [279, 366], 旁观者效应 [367–369], 以及残余 ZZ 相互作用 [370, 371]。未来，通过在大型系统中整合各种技术，可以实现更强大的量子处理器

基于超导量子比特的方案值得期待。

IV. 囚禁离子量子比特

引言—囚禁离子系统是实现容错量子计算的领先物理平台。处于超高真空环境中的激光冷却的原子离子与噪声高度隔离，能够将高质量量子比特编码到每个离子中一对稳定的电子能级上，如图2(b)所示。离子量子比特拥有超越其他任何系统的最长相干时间 [372–374], ，并且能够以极高的保真度完成初始化和测量 [372, 375, 376]。量子逻辑操作通常通过定制的激光或微波—离子相互作用来执行，而在少数量子比特上通过实验实现的门保真度已经远超容错阈值 [372, 377–379]。基于离子的量子处理器已经能够初步操控数十个量子比特[380, 381], ，并且Shor算法和Grover搜索算法等量子算法已在小规模系统中得到验证 [382, 383]。与此同时，人们已经展示了最多包含53个量子比特的量子模拟器，用于研究由量子自旋模型表征的复杂多体系统的各种新颖特征 [384–392]。上述进展展现了利用大规模囚禁离子系统实现终极量子计算的巨大潜力。

离子量子比特。— 尽管自然界中存在数百种原子种类，但由于类氢离子的原子结构相对简单，它们在囚禁离子量子计算中更受青睐。碱土离子，如 Be^+[377], Mg^+ [393]、Ca^+ [378, 379, 381, 394]、锶$^+$ [395]、Ba^+ [396, 397]，以及稀土离子，如镱$^+$ [380, 398–400] ，是当前研究中最常用的离子。单个离子的一对能级可用于编码量子比特；一种具有代表性的编码方案结合了基态流形$^2S_{1/2}$ 中的能级与长寿命亚稳态流形 $^2D_{5/2}$中的能级。对于偶质量同位素，例如$^{40}Ca^+$ [381] 和 ^{88}锶$^+$ [395]，这种方案是首选；这些量子比特的能隙处于光学频率量级，因此称为光学量子比特。尽管亚稳态能级的典型寿命可达数秒左右，但它们最终会限制光学量子比特的相干时间。

对于奇质量同位素，编码方案是利用非零核自旋所导致的基态流形$^2S_{1/2}$ 超精细分裂。基态超精细能级的寿命可接近宇宙的年龄，因此与光学量子比特相比，其弛豫时间（T_1）极长。同时，在适当的外部磁场下，一对特定的超精细能级可形成所谓的“钟态”，其能隙对静磁场的一阶变化不敏感，因此具有相对较长的相干时间（T_2）。实验观测发现，T_2 单个 $^{43}Ca^+$ 离子的相干时间可达 50 秒 [372]。随后，借助 DD 脉冲以及由 $^{138}Ba^+$ 离子辅助的伴随冷却， $^{171}Yb^+$ 离子量子比特的这一纪录延长至 10 分钟 [373]。最近，通过进一步降低外部磁场引起的势噪声以及微波源造成的泄漏，相干时间甚至接近了一小时 [374]。如此长的相干时间使系统在丧失量子特性之前能够执行数百万次量子门操作。

$^2S_{1/2} \leftrightarrow {}^2P_{1/2}$ 的循环跃迁有助于在离子量子比特上实现极低的态制备与测量（SPAM）误差。量子比特态初始化通过光抽运技术实现。通过选择合适的抽运激光偏振和频率，量子比特的某个能级可以成为暗态，随后离子态便会以较高的概率和速度被抽运至该能级。典型的初始化过程只需数微秒，非保真度可降至接近 10^{-4} [372]。

态测量通过使一个量子比特能级与短寿命流形共振，并同时收集相应的荧光光子来实现。通过判断收集到的光子数是否达到某个阈值，可以在单次测量中区分投影后的量子比特态。根据光子收集率的不同，测量持续时间可从数微秒到数毫秒不等，而误差可低于 10^{-3} [372, 375, 376]。对于具有长寿命能级、可用于态搁置的离子，这一误差可降至约 10^{-4} [401]。其他一些方法，例如自适应分析或对到达光子进行时间戳标记 [375, 401, 402], ，可用于进一步降低测量非保真度或提高探测速度；同时，还可利用机器学习方法进行多量子比特探测，以减少串扰误差 [403, 404]。

量子门——离子量子比特的量子门通常通过离子与外部激光场或微波场相互作用来实现，具体取决于量子比特的编码方案。例如，光学量子比特的单量子比特旋转可通过窄线宽激光器诱导的光学四极跃迁实现，而超精细量子比特的单量子比特旋转则可通过微波或受激双光子拉曼跃迁实现。对于光学量子比特的四极跃迁或超精细量子比特的拉曼跃迁，错误率均已达到低于 10^{-4} 的水平 [377, 378]。微波驱动的超精细量子比特甚至实现了 10^{-6} 的错误率 [372]。

尽管实验上很容易实现高保真度的单量子比特旋转，但当前量子处理器的性能主要受纠缠操作表现的限制。离子量子比特双量子比特门的首个方案 Cirac-Zoller 门 [6], 由于对基态冷却要求严格，且对运动模中的热激发灵敏，因此难以扩展。然而，该方案启发了利用离子链的集体运动模来构造有效量子比特间耦

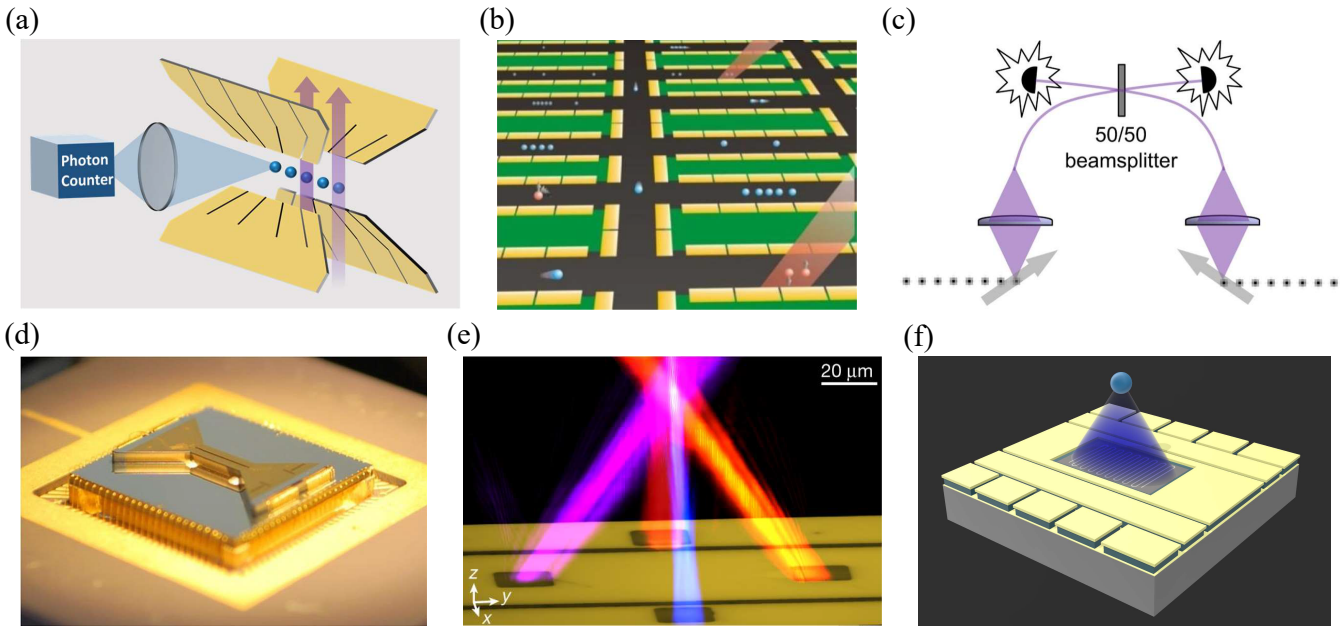


图4。（a）三维保罗阱及其中囚禁的长离子链。与传统四杆阱相比，此处所示的电极改为刀片形，以增强光学可及性。离子的一维链沿射频场的零线囚禁，紧密聚焦的激光束阵列可分别控制各个离子量子比特。（b）QCCD架构，改编自参考文献 [405]。大量离子分布在具有多个囚禁区的大型芯片型离子阱中。离子可在不同功能区内独立操控，以实现逻辑运算、存储或读出。通过在各区之间传输离子，可以交换量子信息。（c）远程离子纠缠，改编自参考文献 [405]。不同离子阱中的离子可通过产生离子-光子纠缠，再对光子进行贝尔测量，实现预告式纠缠。这为构建大规模分布式系统铺平了道路。（d）由桑迪亚国家实验室制造的表面阱，改编自参考文献 [405]。（e）用于将激光束传送至离子所在位置的集成光子系统。此处展示的是麻省理工学院团队完成多波长集成的表面阱，经许可改编自参考文献 [406], Springer Nature Limited。（f）离子量子比特的片上探测。多个研究团队已成功在制造出的表面阱上实现集成式单光子探测器 [407–409]。

表II. 离子量子比特的部分最先进性能 [a]。

量子比特类型		超精细量子比特	光学量子比特
T_2		50 秒 [372] 5500 秒 [374][b]	0.2 秒 [410]
SPAM误差		6.9×10^{-4} [376]	8.7×10^{-5} [401]
单量子比特门	持续时间	通常为 1-10 μ 秒	通常为 1-10 μ 秒
	保真度	0.99996 [377]	0.99995 [410]
双量子比特门	持续时间	典型值为 10-100 μs，	典型值为 10-100 μs
	保真度[c]	0.9991 [377] 0.999 [378]	0.9994 [379]
最大纠缠量子比特		24 [381]	
环境		超高真空 $< 10^{-11}$ 托	

[a] 此处仅纳入同行评议出版物中的数据。[b]采用动态解耦。[c] 双量子比特门保真度根据制备的贝尔态保真度进行估算。

合的想法。如今使用的纠缠方案可分为 Mølmer-Sørensen门 [411, 412] 和光移门 [413, 414]，，二者都依赖于态依赖力的概念。这些方案在实验演示中表现出色。Mølmer-Sørensen 门的错误率低于 8×10^{-4}，通过两个 $^{9}Be^{+}$ 离子 [377], 实现，而下方的光移位门 9×10^{-4} 则在两个 $^{43}Ca^{+}$ 离子[378]上实现。最近，研究人员从理论上研究了光学量子比特上的光移位门，并随后在一个由两个 $^{40}Ca^{+}$ 离子组成的系统 [379, 415]中进行了实验演示。门不保真度低至 6×10^{-4}，接近

迄今实现的最佳纠缠门。

由于激光场具有较大的电场空间梯度，可实现高效的离子-运动耦合，因此主要用于驱动离子量子比特上的纠缠门。然而，由于长波长微波极其稳定，人们也在探索微波驱动的纠缠门 [416, 417]。微波场诱导的离子-运动耦合可通过两种方式实现：将对磁场敏感的量子比特置于具有大空间梯度的静磁场中，或利用近场振荡微波。前一种方案会因磁场波动而导致相干时间较短，但可通过采用微波缀饰量子比特[418, 419], 来克服；后一种方案则要求微波源靠近离子，因此必须注意串扰。实验已分别证明，这两种方案的门保真度约为 98.5% [398] 和 99.7% [420, 421]。此外，近期一项实验研究表明，利用微波驱动的无激光门，生成了近乎完美的对称贝尔态 [393]。这些进展为通过全微波控制实现可扩展的离子量子计算带来了希望 [422]。

然而，迄今大多数实验实现的纠缠操作都相对缓慢，通常持续数十至数百微秒，因此限制了基于离子的量子处理器的核心速度。因此，在近期研究中，实现快速量子门已成为一个重要课题。加快纠缠门速度的直接方法是提高激光功率，以增强激光-离子耦合强度。沿着这一思路，研究人员实现了持续时间为 1.6 μs 的纠缠门，同时仍保持 99.8%[423] 的保真度。然而，当量子门持续时间进一步缩短至 480 ns 时，由于朗道-迪克（L-D）近似失效，量子门保真度急剧下降至约 60%。通过考虑高阶量子比特-运动耦合 [424]，或许可以解决这一问题。实现快速量子门的另一种方法是使用一系列超快激光脉冲，对离子量子比特施加超快的态依赖踢 [425–427], ，这种方法不要求离子始终处于朗道-迪克区间。近期一项实验演示在 1.96 μs 内制备出了保真度为 76% 的贝尔态；主要的保真度损失源于踢控制不完善，以及与非目标能级的非共振耦合 [428]。高重复频率脉冲激光器有助于进一步提高量子门速度[429]。尽管近期快速量子门的实现仍存在保真度有限的问题，但这些方案都展现出了良好的可扩展性。

可扩展性——扩展基于离子的量子处理器，一种直接的方法是将多个离子囚禁在线性阵列中，如图4(a)所示。通过利用整个离子链的集体运动模，可以将纠缠量子门施加于任意两个离子量子比特，方法是耦合到一个或多个运动模。对于后一种情况，需要采用随时间调制的态依赖力，使多个运动模与离子量子比特同时解耦，从而保证高保真操作。沿着这一路径，研究人员最初利用多达14个$_{40}Ca^{+}$ 离子量子比特制备了Greenberger–Horne–Zeilinger（GHZ）态 [437], ，随后在近期的一项报告中将量子比特数量增加到了24个 [381]。与此同时， 2016 [438], 实现了一种可编程囚禁离子量子处理器，其中包含5个可单独控制的 $^{171}Yb^{+}$ 离子量子比特，之后该系统在 2019 [380]中扩展至11个量子比特。迄今为止，世界各地的多个研究团队都已利用长离子链实现了量子处理器 [395, 399]。

使用离子链的一个显著优势是所谓的全连接性 [439], ，正如前文所述，它使得被囚禁在同一势阱中的离子量子比特即使彼此不相邻，也能直接实现纠缠。这一特性使量子电路的分解更加高效，并使实现多量子比特纠缠门成为可能。多项理论研究指出，多量子比特门或许能让量子任务的运行获得多项式级甚至指数级加速 [440–443]。因此，近年来研究人员一直积极探索实现多量子比特门的可扩展方法 [399, 444, 445]。然而，这种线性链架构也存在若干缺点，难以扩展至大规模。例如，随着离子链尺寸增大，使链中的离子量子比特实现纠缠所需的激光功率也会随之提高。长链的冷却效果也会变差，而量子门操作则会对外部噪声更加敏感。

为了进一步扩展到更多量子比特，我们可以在多个独立势阱中囚禁多条离子链，并构建一些连接通道以实现互连。一种具有代表性的架构是文献 2002 [445]中提出的量子电荷耦合器件（QCCD）（见图4(b)）。链间连接通过调节局部电势，在不同阱区之间实际转移离子来实现。为实现这一目标，除了局部离子链中的量子门外，还必须将线性输运、分裂、离子链合并和位置交换等穿梭操作 [446]纳入量子处理器的基本操作。这些操作必须足够快，才能避免成为处理速度瓶颈。人们已对多种快速穿梭方法进行了全面研究和验证，它们能够同时满足这两项要求[447, 448], ，有望构建一条可靠的离子量子比特高速通道，从而实现大规模QCCD架构。

然而，与用于单条线性链的离子阱相比，这种离子阱的复杂度显著增加。要实现多个阱区并精确控制离子穿梭，需要配备大量独立控制电极的离子阱。微加工芯片离子阱是解决这些复杂问题的有效方案 [449, 450]。近期，人们提出了一系列一维芯片离子阱和带有 X 型 [451], 、Y 型 [452], 或 T 型[453]结点的二维离子阱。利用这些控制良好的离子阱，研究人员以基于穿梭的方式制备了含 4 个量子比特的 GHZ态 [394], ，并展示了量子门传

输 [454]。此外，基于 QCCD架构的高品质量子处理器在量子体积测量 [455]中表现出色。然而，要实现大规模表面阱，仍有若干亟待解决的难题。其中一个关键问题是离子链[456–458]运动模上的反常加热。这会使离子链不稳定，并成为量子门和离子穿梭的主要误差来源之一。尽管人们已付出诸多努力来揭示这种加热效应的成因，但问题仍未得到妥善解决。其他问题，例如结点传输中的射频（RF）势垒 [459] 以及相对较低的阱深，也会阻碍可扩展 QCCD 量子处理器的发展。尽管如此，QCCD架构仍是实现大规模囚禁离子量子计算的卓越方案。

连接不同区域离子量子比特的另一种自然方式是利用光子 [460]。将离子量子比特激发至寿命较短的辅助原子能级后，自发发射光子的偏振将与衰变离子态发生纠缠。对来自不同离子的光子对进行贝尔测量后，可根据测量结果在离子量子比特之间生成预示纠缠态，如图4 (c) 所示。这种远程离子纠缠方法使得即使离子量子比特位于相距甚远的不同真空系统中，也能够实现纠缠，从而催生了分布式量子计算这一范式。远程纠缠的生成率从根本上取决于辅助能级的散射率。然而在实际中，该生成率主要受发射光子的收集率限制。在近期的实验演示中，研究人员首先实现了 4.5 赫兹的生成率 [461]，随后将其提升至 182 赫兹 [462], ；预示量子比特纠缠态的最佳保真度为 94%。这一速度远低于在同一离子阱中直接纠缠量子比特的量子门速度。为进一步提高生成率，人们提出了多种方法，例如增大光子收集系统的数值孔径，以及提高单光子计数器的量子效率。若将离子量子比特置于高精细度微腔中，利用珀塞尔效应增强自发发射，或许能取得显著改进 [463]。此外，近期已实现将单个光子从可见光波段转换至电信波长[464], ，尽管转换效率仍然很低，但这使构建具有超低光学损耗的分布式量子系统成为可能。实用的远程离子纠缠将有助于构建大规模量子计算平台和量子网络。

这里简要介绍混合离子系统。当我们生成两个离子阱之间的远程纠缠，或对属于某个离子寄存器的特定离子量子比特进行电路中途测量时，我们希望只激发目标离子量子比特，而不共振地干扰其他量子比特。一种解决方案是让被测离子与其他离子属于不同物种，从而使共振频率有很大差异，显著抑制串扰。因此，混合离子系统需要对不同物种的离子量子比特施加纠缠门。不同物种离子量子比特的高保真度纠缠操作已在诸如 $^{9}+^{25}+$ [454] $^{40}+^{43}+$ [465] $^{43}+^{88}+$ [466] $^{171}+^{138}+$ [467, 468] Be – Mg 、 Ca – Ca 、 Ca – Sr 、 Yb – Ba 以及甚至长链 $^{9}Be^{+}$–$^{9}Be^{+}$–$^{40}Ca^{+}$ [469] 等系统中得到充分展示。与此同时，混合物种系统使得伴随冷却成为可能，从而能在不破坏存储的量子信息的情况下冷却离子寄存器 [470–472]。这有助于抑制QCCD架构中离子穿梭期间的运动激发。与此同时，近期已有研究提出混合编码方案，利用单个离子的多个能级编码不同的量子比特类型，以构建仅含单一离子物种的混合系统 [473]。单个离子上不同量子比特编码之间的转换已通过实验得到验证 [474]。这或许能为可扩展的囚禁离子量子计算开辟一条新途径。

系统集成。—构建可扩展的大规模囚禁离子量子计算机，离不开系统集成。一个典型例子就是上文提到的微加工表面阱。过去十年间，研究人员开展了多项重要工作，进一步推动囚禁离子系统的集成，其中之一便是片上集成光学。通过在表面阱下方嵌入光波导，并在每条波导末端制作经过合理设计的光栅耦合器，便可将激光束传送至离子所在位置并精确聚焦。单波长到多波长的光学集成已得到充分验证[406, 475]。研究人员利用波导传送的激光束实现了单量子比特旋转和双量子比特纠缠门 [475, 476], ，并证明这种方案对振动噪声具有极强的鲁棒性。此外，近期已成功展示了在芯片离子阱上集成单光子探测器 [407–409], ，这为在大规模量子处理器上高保真读出多个离子量子比特提供了可扩展的方案。传统模拟电压源也已集成到芯片上 [477]„ 使控制大量离子阱电极的方案能够扩展，并为大规模QCCD架构中的电路集成奠定了技术基础。

展望——本节简要回顾了过去几十年囚禁离子量子计算取得的重大进展，从对多个离子量子比特的出色控制，到可扩展架构的演示。借助完全可控的囚禁离子处理器，近年来量子纠错领域取得了多项重大进展 [410, 469, 478–481]。然而，我们仍在努力探索具体的可扩展方案，以实现真正容错的逻辑量子比特编码，并最终构建实用的基于离子的量子处理器。其中一项基本要求是，在系统尺寸增大的同时，不牺牲控制质量 [482–484]。因此，开发系统集成相关技术对于扩大离子量子处理器的规模至关重要，这将成为

未来几十年的重要方向。与此同时，通过整合为囚禁离子量子计算开发的技术，我们或许也能提升基于离子的精密测量性能。随着技术不断发展，囚禁离子系统仍将是未来量子信息应用的重要平台和工具。

V. 半导体自旋量子比特

引言——过去几十年来，半导体中的自旋量子比特取得了巨大进展。尽管大多数工具箱都是基于砷化镓量子点构建的 [491], , 但随着宿主材料转向硅，这一领域重新焕发活力。近期一些重要突破进一步推动了该领域的发展，例如容错量子门 [492–494], 、射频反射测量自旋读出 [495–498], 、自旋-光子强耦合 [499–503], 、热量子比特 [504–506], 以及低温CMOS控制芯片 [507, 508]。凭借半导体产业赋予的固有可扩展性和小巧的占用空间，自旋量子比特如今已为实现以下里程碑做好了充分准备：相对于经典超级计算机取得量子优势、构建容错量子计算和量子纠错的原型机器，以及实现经典与量子电子设备的混合。

量子比特构造—— 半导体量子比特定义在受困于量子点或掺杂原子中的载流子的电荷和自旋自由度上。量子比特有多种类型，例如自旋量子比特 [10,11, 509, 510], 、电荷量子比特 [511, 512], 、交换耦合量子比特 [44, 513, 514], 、混合量子比特 [515], 以及单重态-三重态量子比特 [516, 517]。自旋量子比特通常由受困于半导体量子点中的单个电子或空穴，或硅中掺杂原子的自旋态定义（见图5） [10, 11], , 即 $|0\rangle = |\downarrow\rangle$ 和 $|1\rangle = |\uparrow\rangle$，其中 $|\downarrow\rangle$ 和$|\uparrow\rangle$ 分别表示自旋向下和自旋向上。相互作用多自旋系统中选定的态也可定义为量子比特，例如单重态-三重态量子比特（即两个交换耦合自旋的单重态$|S\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$ 和非极化三重态 $|T_0\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$ ）。本综述将重点讨论自旋量子比特，因为近年来它们正成为该领域的核心主题。我们也将简要介绍其他类型的量子比特。感兴趣的读者可在相关参考文献 [491, 509, 510, 518–520]中查阅更多信息。

退相干。——半导体基体材料及相关制造技术的发展，推动了这一领域的进步。GaAs/AlGaAs 异质结构量子阱一直是栅极定义量子点的关键衬底 [529], ；这一领域的许多基础组成部分都在此积累，例如单电荷探测、单次自旋读出、量子比特操作与相互作用等。尽管如此，GaAs 宿主材料中的原子核会形成波动的磁场，即奥弗豪瑟场，从而将 GaAs 中的自旋退相干时间 T_2^* 限制在数十纳秒左右 [491, 510, 529]。尽管 GaAs 量子点仍然是开展量子模拟 [530, 531] 和量子物理研究 [532, 533], 的出色演示平台，但有限的自旋退相干时间阻碍了面向量子计算的高保真度量子门的发展。

要实现较长的退相干时间，宿主材料必须由核自旋为零的同位素构成。20年前，Bruce Kane在其开创性论文中强调，第四族材料是理想选择，因为它们含有天然丰度较高且稳定的零核自旋同位素 [10]。例如，通过提纯天然硅，可以获得无核自旋同位素 ^{28}Si。硅衬底的另一项优势是其较长的自旋 T_1 时间，这源于它与III-V族材料相比具有不同的自旋弛豫行为 [510]。由于 T_1 通过关系式 $2T_1 \geq T_2$为自旋系统的 T_2 设定了上限，因此较长的 T_1 是实现较长 T_2的先决条件。因此，硅自旋量子比特已成为该领域的主力技术，主要研究平台包括硅金属氧化物半导体（MOS） [489, 523, 525],绝缘体上硅（SOI） [488, 534], 硅中的掺杂原子 [490, 525, 535], 基于硅锗异质结构的Si/SiGe [492, 524, 536, 537], 和Ge/SiGe [538–541]。经过广泛研究，硅自旋量子比特已展现出与其他主要量子计算平台相比具有竞争力的 T_2 和 T_2^*。迄今为止，在硅掺杂原子器件、Si/SiGe栅极定义系统和Si-MOS系统中，观测到的 T_1 值范围为160毫秒 [522]至30秒 [542] ，而 T_2^{Hahn}值范围为99微秒 [524] 至 ∼1 秒 [489] （详细比较请参见表 III）。其他硅自旋系统也表现出典型的长相干时间，例如SOI中的空穴自旋 [488]和Ge/SiGe栅极定义量子点 [539]。在MOS [504, 505]和SOI器件 [506]中，即使温度达到1.1 K∼42 K，仍可保持较长的相干时间。

量子门——过去数年中，半导体量子比特的量子门保真度取得了显著进展。对于不同的量子比特，可以利用几种不同的机制来实现单量子比特操作。对于单重态-三重态量子比特 [517, 543], 仅交换型量子比特 [44, 513, 514], 以及混合量子比特 [515], , 交换耦合发挥着关键作用。相比之下，电子自旋共振（ESR） [525, 544, 545] 和电偶极自旋共振（EDSR） [524, 538, 546, 547]是自旋量子比特的主要驱动机制。它们通过振荡的磁场或电场控制自旋旋转。经过多年对容错操作的不懈探索，施主杂质 [489],Si-MOS [485], 和Si/SiGe [486, 514, 524, 548]中均已实现远超 99% 的单量子比特门保真度（见表 III）。

与单量子比特门操作相比，双量子比特门更具挑战性。可以利用交换耦合、电容耦合或超精细耦合来实现双量子比特门。研究已表明，单重态-三重态量子比特中可以实现电容耦合双量子比特门 [549, 550]。

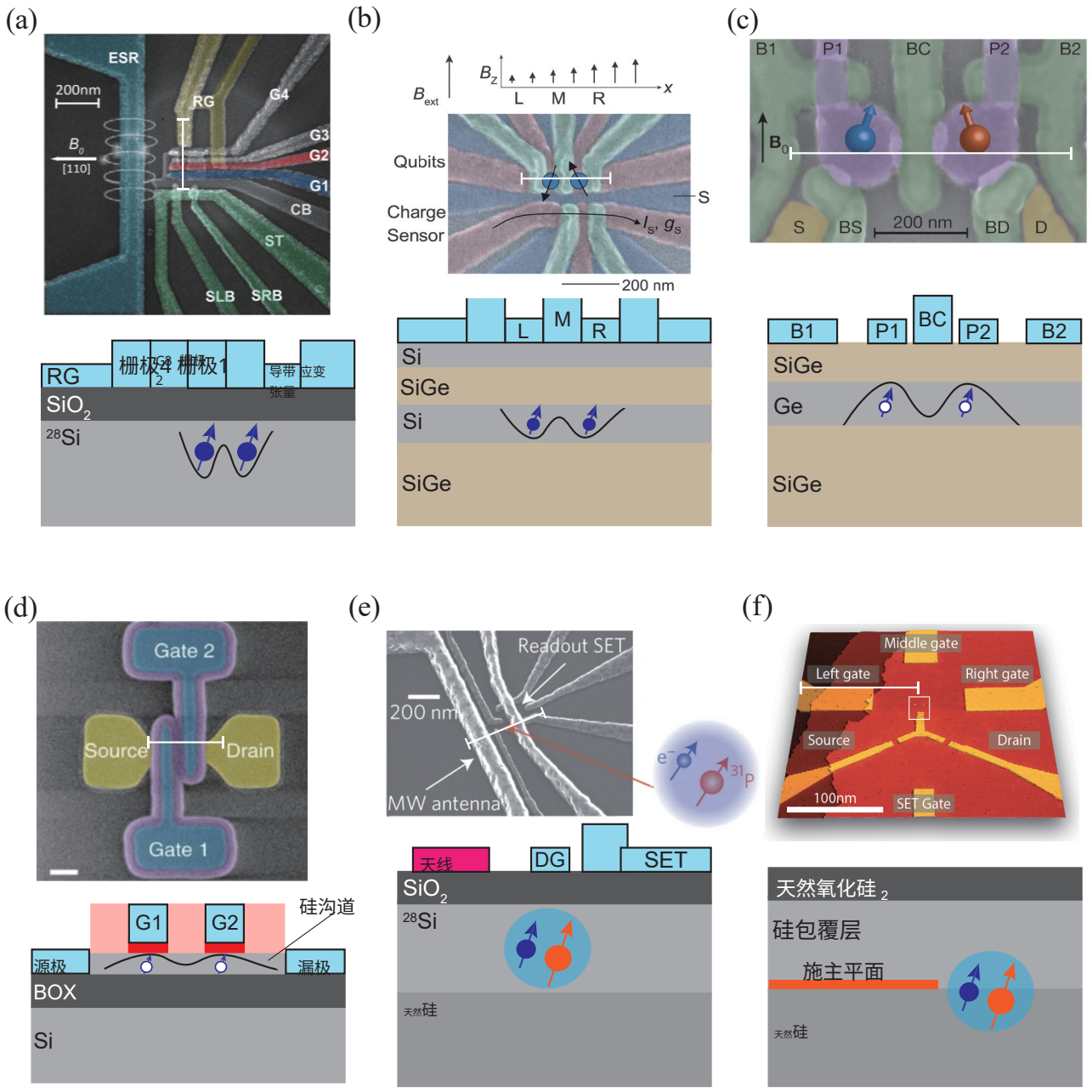


图 5. 具有代表性的半导体量子比特系统。所有器件均由两个面板展示：上方面板为器件的俯视图，下方面板为沿上方面板中有源区白线截取位置对应的横向结构。异质结构量子点包括 (a) Si-MOS [485], 、(b) Si/SiGe [486], 和 (c) Ge/SiGe [487] 系统，其中 Si-MOS 和 Si/SiGe 主要用于电子量子比特，而 Ge/SiGe 是一种空穴量子比特平台。系统 (a-c) 属于栅极定义量子点类别。在 (a) Si-MOS 中，量子点形成于硅氧化物界面附近，制作的顶部栅极提供横向库仑限制势。该器件还集成了用于驱动电子自旋的电子自旋共振天线，以及用于自旋读出的单电子晶体管。(b) Si/SiGe量子点形成于中间的硅量子阱层中，并夹在两侧的硅锗层之间。(c) Ge/SiGe 是一种空穴自旋平台，利用锗量子阱形成二维空穴气，并结合顶部栅极形成空穴量子点。(d) CMOS纳米线场效应晶体管 [488], ，量子点形成于埋置硅氧化层（BOX）上的硅纳米线中，周围的栅极采用工业微电子技术制造。这是一种空穴自旋系统，其量子点势阱形成于价带顶端。(e) 和 (f) 是硅中的施主量子比特。这些是电子自旋系统，其中施主宿主原子的核自旋也是编码量子比特的重要资源。(e) 表示金属氧化物半导体 [489] 系统中的施主：将磷原子注入制作好的 MOS 器件中，该器件具有一层 ^{28}硅层，可延长电子自旋相干时间。(f) 是采用扫描隧道显微镜光刻技术 [490], 制作的施主器件，其中施主原子可按原子级精度放置，并通过光刻方式由密集排列的导电磷原子形成面内栅极。(a) 的上方面板经许可改编自参考文献 [485], Springer Nature Limited。(b) 的上方面板经许可改编自参考文献 [486], 美国科学促进会。(c) 的上方面板经许可改编自参考文献 [487], Springer Nature Limited。(e) 的上方面板经许可改编自参考文献 [489], Springer Nature Limited。

表 III. 硅中不同量子比特已报道数值的比较。

量子比特类型	Si-MOS	硅-硅锗	磷施主 n 磷施主 e	
T_1	2。6 秒 [521]	160 毫秒 [522]	39 分钟 [489]	30 秒 [489]
T_2^*	120 μ秒 [523]	20 μ秒 [524]	600 毫秒 [489]	268 μ秒 [489]
$T_{\text{哈恩2}}$	1.2 毫秒 [523]	100 μ秒 [524]	1.75 秒 [489]	0.95 毫秒[489]
T_{single}	2.4 μ秒 [523]	20 纳秒 [524]	24 μ秒 [493]	150 纳秒 [525]
T_{two}	1.4 μ秒 [485]	103 纳秒 [492]	1.89 μ秒 [493]	0.8 纳秒 [490]
F_{1RB} (%)	99.957(4) [526]	99.861(5) [524]	99.99 [527]	99.95 [527]
F_{2RB} (%)	98.0(3) [485]	99。51(2) [492]	99.37(11)[a][493]	86.7(2)[b][490]
Q_1[c]	50	1000	25000	1800
Q_2[c]	86	194	302[d]	3.4×10^5
N_{Q}[e]	2 [485]	6 [528]	2 [493]	2 [490]
N_{E}[f]	2 [485]	3 [528]	2 [493]	2 [490]
Env	$B \sim 1.4$ T $T < 1.5$ K	$B \sim 0.5$ T $T < 1.5$ K	$B \sim 1$ T $T < 1.5$ K	$B \sim 1$ T $T < 1.5$ K
飞行量子比特占用面积	N/A ~ 100 纳米	N/A ~ 100 纳米	N/A ~ 3 纳米	N/A ~ 100 纳米

[a] CZ门。 [b]√SWAP门。 [c]$Q_1 \equiv T_2^*/T_{\text{single}}$和 $Q_2 \equiv T_2^*/T_{\text{two}}$，其中 T_{single} 和 T_{two}分别是单量子比特和双量子比特操作所需的时间。 [d]T_2^*=570 μs [489]用于具有束缚电子的磷核自旋。 [e]N_Q 是已实现独立控制的量子比特数。 [f]N_E 是纠缠量子比特的数量。

电容耦合双量子比特门也已在电荷量子比特中实现 [512]。在自旋量子比特中，成熟的双量子比特门方案（例如 SWAP [490, 516], 、C-Phase [523], 和 C-ROT [486], ）都需要交换耦合。由于电容耦合或交换耦合都取决于电荷自由度，电荷噪声会耦合进系统，给实现高保真度量子门操作带来挑战。人们已尝试采用不同方法实现高保真度双量子比特门。在 Si/SiGe量子点中使用了固定的交换耦合 [492], ，通过仔细匹配拉比频率 f_R 与交换耦合 J 的关系，消除了失谐态的不必要旋转，并实现了保真度为 99.8% 的双量子比特门。另两个团队都利用交换耦合的可调性，在 Si/SiGe 平台上实现了 CZ门。经过详细校准和脉冲优化，分别实现了保真度为 $F_{\text{CZ}} = 99.65\%$ [494] 和$F_{\text{CZ}} = 99.81\%$ [551] 的双量子比特门。在硅施主体系中，利用几何量子门和超精细耦合，在共享一个电子的两个施主核上实现了保真度为 $F_{\text{CZ}} = 99.37\%$ 的双量子比特 CZ门 [493]。

尽管容错量子门方面取得了里程碑式的突破，半导体量子比特的操作保真度仍有很大的提升空间。尤其是针对电荷噪声问题， [524, 526, 552, 553],量子比特宿主材料工程对于获得更纯净的环境至关重要，例如减少核自旋、电荷陷阱和缺陷。此外，还可以结合更复杂的控制方法或编码方式，例如缀饰量子比特 [554], 全局控制 [555], 和轮廓优化脉冲 [556]。此外，量子比特能量中的甜点

能量 [552, 557] 和复合脉冲序列 [558]也有助于抑制电荷噪声。我们对通过优化器件制造和控制层面工程进一步提升门保真度保持乐观。

读出和初始化——降低SPAM误差对于推动容错量子计算，与提高门保真度同等重要。单次自旋读出至关重要，因为某些态初始化协议只需执行一次读出即可完成。关键在于找到合适的态到电荷转换过程，目前已探索泡利自旋阻塞 [534, 559], 以及相关的锁存机制 [560], 和Elzerman型自旋依赖隧穿过程 [561] 。在掺杂剂系统中，超精细耦合是核自旋读出的关键锚点，态信息可转换为自旋电子自旋共振信号 [562]。接下来，应将相应的电荷信号与电容差相关联，该信号由单电子晶体管（ SET）或量子点接触（QPC）拾取，并进一步放大 [563]。对于单重态-三重态量子比特 [559], , 据报道读出保真度为98.4%。对于单个自旋，读出保真度提升至 $F_{\text{M}} = 99.8$ %，超过容错水平 [542]。

单引线射频反射测量自旋读出 [564]是降低自旋读出所需栅极密度的一项关键技术，并且与解决扇出问题的可扩展表面码架构兼容。四个研究团队几乎同时展示了这项技术 [495–498]。采用该技术，研究人员实现了高于 98% 的读出保真度 [497, 498]„ 并证明读出时间为 6 μs [498], , 与门操作速度相当。为解决高温（1 K–4 K）下费米面展宽以及 Elzerman协议面临的相关障碍，泡利自旋

阻塞、锁存机制 [539, 560], 和双单电子晶体管读出 [565] 都是有效的方法。此外，为提高信噪比（SNR），研究人员将量子噪声极限约瑟夫森参量放大器 [566] 与其他放大方法结合使用。研究人员已在单电子盒中展示多自旋读出 [567] ，并通过频分复用实现了该技术 [568]。多个团队已通过非破坏性方法 [569, 570], ，展示了单重态-三重态量子比特和自旋量子比特读出保真度的提升。这些进展将在容错计算以及研究基础量子力学中的自旋态坍缩问题方面发挥重要作用。此外，研究人员还展示了级联读出 [571], 、色散自旋读出 [499, 534], 、三量子点腔色散读出 [572], 和斜坡式自旋测量 [573] 。总体而言，自旋读出技术已较为成熟，能够支持未来的扩展阶段。进一步的进展将聚焦于高阶复用，以及以可扩展的方式与量子比特设计集成。潜在的读出信号串扰也有待进一步研究，并通过工程设计加以解决。为促进自旋初始化，除常用的读出辅助态初始化外，谷混合 [521, 574] 和自旋轨道耦合导致的能级热点，也可用于提高 T_1 弛豫速率。

可扩展性。硅量子比特的一个独特优势在于其产业基础——超大规模集成（VLSI）技术。随着集成式低温互补金属氧化物半导体和热量子比特技术的出现，这一优势愈发显著。配备经典控制单元和量子处理单元、达到工业级水平且兼容CMOS的混合量子计算芯片正逐渐成为现实。秉持这一理念，近年来已取得一些进展，例如英特尔的 Horse Ridge 低温互补金属氧化物半导体芯片所展示的量子比特控制保真度，可与室温下大型控制仪器相媲美 [507]。一项概念验证实验展示了与量子单元键合的低温经典控制单元 [508]。此外，在量子技术方面，兼容CMOS、在较高温度（$T > 1.5$ K）下运行的“热”量子比特已几乎同时在电子自旋 [504, 505]和空穴自旋系统 [506] 中实现。在产业方面，先进制造技术正借助工业代工厂的大规模生产工艺，逐步应用于量子比特物理领域 [575]。CEA-Leti [576], 、Imec [577], 和英特尔都采用300毫米技术 [578], 加工了硅量子比特，而英特尔已展示出良好的量子点均匀性和基础自旋量子比特操作。

在实现容错计算的过程中，扩展规模将是必须克服的技术难关 [579]。人们已为磷施主量子比特 [557, 580], 、硅/硅锗栅定义量子点 [581], 和MOS量子点 [582,583]设计了多种扩展架构。此外，研究团队还实现了多量子比特器件和少量子比特算法，例如在Si/SiGe系统中实现了三量子比特 [584]和六量子比特系统 [528], ，并展示了纠缠态。类似地，锗/硅锗空穴自旋系统中的四量子比特系统也首次亮相，并演示了四量子比特GHZ态 [539]。

与此同时，人们开发了使用虚拟门 [585]和自动机器学习来调控多个量子点的方法 [586, 587]，并实现了量子点多路复用读出 [568, 588]。在量子纠错方面，两个研究团队完成了三量子比特相位错误纠正算法 [25, 26]。此外，量子比特网络或可解决高密度封装问题，并降低扇出开销 [579]。因此，实现远距离自旋量子比特之间的耦合是必要的。利用微波腔 [502, 503], 介导的大型量子点 [589], 自旋阵列态传输 [532], 以及表面声波 [590]，可以实现有效的自旋-自旋耦合。对于腔方案，研究人员已展示强耦合 [591] 和光子介导的自旋-自旋相互作用 [502, 503]。下一步是实现远距离自旋之间的腔介导双量子比特门，进而以分布式方式构建自旋网络。

结论。—高质量材料和先进制造技术是半导体量子比特的基石。要实现更高的量子门保真度，低电荷噪声界面至关重要；这可以通过引入集成电路的工业技术，并推动从实验室级工程向代工厂级制造的转变来实现。对于可扩展量子计算而言，串扰、量子门加热和频率拥挤等典型额外开销也应得到仔细考虑。随后，半导体自旋量子比特将加入其他先进的量子计算平台，应用于下一阶段的任务，例如在中等规模多量子比特器件上实现容错操作和量子模拟。总之，半导体量子比特，尤其是硅自旋量子比特，凭借上述突破和技术改进，已做好扩展规模的充分准备。我们相信，通过发挥其工业优势，硅自旋系统将迅速扩大其量子比特数量，并与超导和离子阱平台携手，共同投身下一阶段的量子计算事业。

VI. NV中心

引言.— NV中心是金刚石中的一种点缺陷，其中一个空位和一个氮原子沿量子化轴（假设为 $\hat{z}$ 轴）取代两个碳原子，如图 6 (a) 所示。负电荷态 NV^- 最受关注，其中有五个未配对电子分别来自氮原子和三个碳原子，此外还有一个从环境中捕获的电子。这个六电子系统等效于一个自旋投影为 $S = 1$ 的电子，因此其自旋态可用作三能级量子比特；若仅考虑 $|m_s = 0\rangle$ 和 $|m_s = -1\rangle$ 能级，则可用作量子比特。凭借以下优点，NV 中心是量子计算机的一个极具前景的候选者。首先，单个 NV 中心

可以通过光学方式分辨和定位，并且可通过激光脉冲实现极化和测量。其次，NV中心即使在室温下也具有出色的相干性。在低温下，可对其进行共振激发，从而实现高效的单次读出。第三，NV中心附近的核自旋可作为丰富且易于获取的存储量子比特，适用于固态量子信息处理器。

量子比特与相干性——即使在环境条件下，NV电子自旋仍具有异常长的寿命，这在实验上有利于量子计算。^{13}C自旋浴引起的非均匀磁涨落，是导致NV电子自旋退相干的主要噪声源。然而，采用广泛使用的动态解耦技术，退相干时间可从微秒量级（T_2^*）延长至毫秒量级（T_2），从而大幅抑制准静态噪声。

除中心电子自旋外，附近的核自旋也是存储量子比特的丰富资源。核自旋的旋磁比相对较低（比电子自旋的旋磁比低约三个数量级），这使其相干时间极长，在室温下可达 $T_2 = 2$ s [592]。除 ^{14}N和 ^{13}C核自旋 [593]（如今最多可达27个自旋 [594]）外，研究人员也一直致力于探索金刚石中更多可用的量子比特，包括P1中心 [595–597] 以及长寿命的碳核自旋对 [598]（在4 K下分别为$T_2 = 1$ min和 $T_1 > 6$ min[599]）。研究人员希望进一步延长NV电子自旋的相干时间，使其超越这些存储量子比特的时间尺度。由于室温下的 $T_2 \sim$ ms受自旋弛豫时间 T_1限制，一个直接的解决方案是降低温度，此时 T_2 在77 K下已延长至0.6 s [600]。然而，在4 K下，通过精心设计的序列解耦不需要的相互作用， T_2已达到1.5 s，且 T_1 已超过1 h[598]。

初始化和读出。— NV中心可通过自旋依赖的系间窜越（ISC）进行光学初始化和读出 [601, 602]（见图6（a），灰色虚线所示）。因此，在连续光泵浦下，电子自旋可被初始化为 $|m_\mathrm{s} = 0\rangle$ 。另一方面，ISC会导致经由单重态的非辐射跃迁，从而能够根据荧光差异区分不同自旋态。此外，在低温下，共振光学激发可实现对NV电子自旋的高保真单次读出 [603]。初始化和读出的保真度分别达到99。9% [604] 和98% [605],。

核自旋的初始化方法不那么直接，并且因耦合强度不同而异。具体而言，对于 ^{14}N和一些强耦合的 ^{13}C核自旋（$\geq 1/T_2^* \sim 10^2$ kHz）， [606, 607],施加一个方向精确对准的磁场 ~ 500 高斯，可触发激发态能级反交叉（esLAC），使核自旋发生偏振 [608]。然而，如果量子化轴在激发态下的超精细相互作用与基态下的不同，或者核-电子量子化轴与NV中心本身的量子化轴不同 [607]，那么esLAC就无法实现有效偏振。另一方面，强耦合核自旋比弱耦合核自旋少得多，因此研究人员更关注弱耦合的 ^{13}C核自旋。弱耦合 ^{13}C核自旋的初始化采用由动态解耦序列构成的类交换门（见下文） [28]。

除了上述方法外，还有一些针对不同目的的策略。例如，动态核自旋极化（DNP）旨在通过施加Hartmann-Hahn双共振 [609], ，使整个 ^{13}C自旋浴实现偏振 [610]，且该方法已得到改进，变得更加稳健。基于投影测量的初始化也备受青睐，尤其适用于同时进行多量子比特或多自由度的高保真初始化[597, 611]。与投影测量相关的单次读出不仅提供了一种有效的核自旋偏振方法，还能直接检验非经典关联，并在量子纠错协议中实现主动反馈。对 ^{14}N [612], 弱耦合核自旋 [613], 核自旋对 [599], 和P1中心 [597] 的单次读出均已实现。

量子门。— 利用量子优化算法，人们已充分发展出控制技术，可高精度地实现量子逻辑门，同时采用较窄的脉冲宽度。将复合脉冲与改进的梯度上升脉冲工程（GRAPE）算法相结合，单量子比特门和双量子比特门的保真度分别创下了 0.99995 和 0.992 [617] 的纪录，几乎达到量子纠错所要求的阈值。值得注意的是，这种高精度双量子比特门的持续时间为 700 ns，比相干时间短三个数量级。与此同时，典型的单量子比特门持续时间约为 ~ 10 ns，通过适当的设计还可实现吉赫兹级的拉比振荡 [618, 619]。此外，利用截断随机基（CRAB）量子优化算法，人们还实现了超越旋转波近似的优化超快单量子比特门； $\pi/2$ 和 π 脉冲的保真度分别为 0.95 ± 0.01 和 0.99 ± 0.016[620]。

在保持相干性的同时操控多个量子比特，是量子计算的一项关键任务。尤其是在混合系统中，各组成部分的时间尺度可能不同，因此最好能在任何组成部分发生退相干之前完成所有控制序列。除了依赖同位素纯化样品 [621], ，延长相干时间的一种主动方法是广为人知的动态解耦技术：该技术会翻转并抵消准静态噪声，因此也可视为一种频率滤波器 [622]。从这个意义上说，施加于 NV电子自旋的动态解耦序列能够探测与周围相互作用相对应的共振频率 [623–625]。因此，

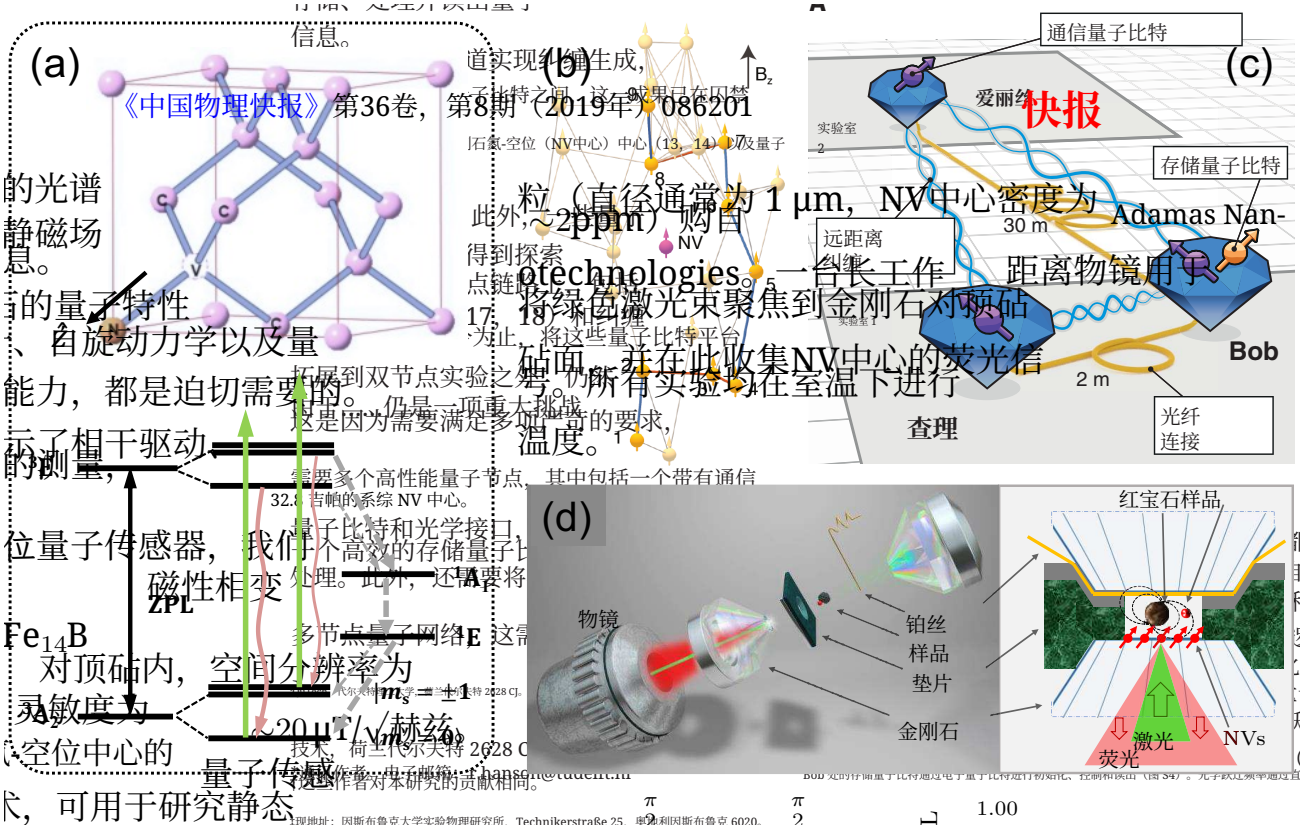


图 6. (a) NV中心的物理系统和能级结构。(b) NV中心及其附近的核自旋构成一个多量子比特量子信息处理器 [614]。(c) NV中心与作为存储量子比特的核自旋构成量子网络中的一个节点 [615]。(d) NV中心作为量子传感器 [616]。

条件双量子比特门是基于动态解耦序列设计的，用于控制 ^{14}N [626], , 其中射频脉冲等效于横向超精细耦合，可根据电子自旋的状态驱动核自旋翻转。随后，人们实现了作用于弱耦合核自旋的通用动态解耦门 [28, 627], , 通过类交换门可对核自旋进行初始化和测量。最近，一种名为DDrf的主动相位补偿方案摆脱了脉冲间延迟对超精细参数的依赖，并能优化脉冲间延迟以保护电子相干性，最终在一个十量子比特寄存器中实现了多达七个核自旋的纠缠 [628]。

另一种选择是利用受退相干保护的子空间，其中量子态的演化纯粹是幺正的 [629, 630]。此外，几何门本质上也具有抗噪声能力，其动力学相位为零。非绝热 [631–633]和绝热[634] 通用（非阿贝尔） [633]几何门均已得到演示。然而，面向大规模量子技术，就将遭受来自环境有害噪声的物理量子比特编码为可靠的逻辑量子比特而言，量子纠错预计将是一项更为关键的策略。借助最先进的多量子比特控制技术，量子纠错协议[27, 28]以及一项采用稳健相干反馈控制 [635] 的相关工作已经实现。最近，在一台七量子比特NV量子处理器上已实现逻辑量子比特层面的容错操作，这标志着向容错量子信息处理迈出了重要一步 [636]。

量子模拟与量子算法。—对金刚石中自旋的精密控制，在众多领域展现出丰富的应用前景。研究人员已模拟多种奇异物理现象，例如张量单极子 [638] 和量子热机 [639], 的模拟，为探索基础物理开辟了新途径。NV中心量子模拟器也拓展了量子拓扑相 [640, 641]的实验研究范围。文献 [642]提出了一种可行且通用的方法，用于研究厄米量子系统中的非厄米哈密顿量，并在NV量子模拟器中观测到了宇称-时间对称性破缺 [637, 643]。此外，对开放系统非马尔可夫动力学 [644], 、多体局域化离散时间晶体 [614] 以及涌现流体动力学 [645] 的模拟，也因其真实的量子特性而有别于其他人工平台，并为凝聚态物理研究提供了启示。

另一方面，人们也展示了许多量子算法，包括 Deutsch-Jozsa算法 [646], 绝热量子因式分解 [647],

属性	参数	量子比特	数值	条件	参考文献
相干性	$T_2^\star$	e	36 μ秒	506高斯，300开尔文	参考文献 [637]
		N	25.1毫秒	403高斯，3.7开尔文	参考文献 [628]
		^{13}C	17.2 毫秒		
		^{13}C-^{13}C 对	1.9 分钟		参考文献 [599]
	T_2 （回波）	e	1.8 毫秒	690G，300K	参考文献 [621]
		N	2.3秒	403高斯，3.7开尔文	参考文献 [628]
		^{13}C	770毫秒		
	T_1	e	>1 小时	403高斯，3.7开尔文	参考文献 [598]
		^{13}C	>6 分钟		参考文献 [628]
门控时间	单量子比特	e	<10 ns	850 G，300 K	参考文献 [618]
	双量子比特	e-N	700ns	513G, 300K	参考文献 [617]
量子门保真度	单量子比特	e	99.995%	513 G，300 K	参考文献 [617]
	双量子比特	e-N	99.2%		

表 IV. NV中心量子平台上报告的数值。

高效的 Grover 搜索算法 [648],量子增强机器学习 [649], 以及共振量子主成分分析 [650]。

量子网络——借助飞行光子，两个拥有存储量子比特的远程NV节点（$>$ 1 km）可以实现纠缠 [605, 651, 652]。结合纠缠蒸馏 [653]以及更有利于实验实现的单光子方案所实现的确定性纠缠传递 [654], ，研究人员已实现包含多个长寿命存储量子比特的三节点量子网络 [615, 655]。

量子传感—— 得益于金刚石的稳健性以及微米或纳米尺度特性，NV中心展现出在凝聚态物理 [656–661] 和生物物理学 [662–664]中实现高灵敏度磁传感的潜力。此外，NV传感器还能够探测电场 [665–668], 、温度 [669, 670]和压力 [671]。近年来，NV量子传感的应用边界已拓展至一些特殊或极端条件领域，例如零或低磁场下 [619, 672, 673], 、高压下 [616, 674–678], 以及高温下 [679]。与此同时，量子优化算法 [680] 和量子纠错 [681–683]也已应用于量子计量学，以提高存在噪声时的灵敏度。

展望。— 可扩展性是每一种量子计算候选物理系统都必须回答的不可回避的问题。基于NV中心的量子计算面临两项主要挑战，即器件制造和多量子比特控制技术。一方面，需要能够以令人满意的精度确定性地产生NV中心的方案，以制造大规模功能器件 [684, 685]。与此同时，由于植入引起的底层破坏和噪声可能会影响自旋量子比特的相干性 ，因此需要开发一种在保留相干时间的同时实现NV可控生成的折中方案。相应地，对纳米结构制造阵列的要求也十分严格，例如纳米柱[687]和抛物面反射器 [688], ，它们能够显著提高收集效率。此外，探索基于光电流的NV信号电学读出方式 [689, 690]也令人鼓舞。另一方面，随着量子比特数量的增加，系统中的噪声机制变得越来越复杂。因此，需要将高精度多量子比特控制技术与能够抑制多个量子比特之间误差和串扰的解耦技术相结合。

VII. 核磁共振系统

引言——核磁共振波谱学是用于表征各种有机物结构的强大且广泛使用的分析工具。近八十年来，它在物理学、化学和生命科学等多个领域催生了众多科学与技术应用。二十世纪末，出于对量子信息科学的浓厚兴趣，人们萌生了利用液态核磁共振构建量子计算机的想法 [7–9]。研究发现，核磁共振能够模拟量子计算机的许多功能，包括幺正演化和相干叠加。事实上，核磁共振量子计算很快就成为实现量子计算最成熟的技术之一 [691, 692]。例如，早在2001年，IBM的研究人员便报告了首次在七量子比特液态核磁共振量子计算机上成功实现Shor算法

[693]。依托成熟的实验技术，核磁共振如今已实现对多达12个量子比特的通用控制 [694–696], ，并可用于研究广泛的量子信息处理任务，例如量子模拟、量子控制、量子层析和量子机器学习。下文将简要介绍核磁共振量子计算的基础知识及其令人瞩目的成就。

基本原理。— 为了在物理上实现量子信息，必须找到表示、操控和耦合量子比特的方法，以实现非平凡的量子门、制备有用的初始态，并读出答案。

量子比特。— 核磁共振量子计算利用分子中的自旋1/2原子核来编码量子比特。由于塞曼效应，置于外部磁场中的自旋1/2原子核有两种可能的取向：自旋向上 $|\uparrow\rangle$ 和自旋向下 $|\downarrow\rangle$，这自然构成了二能级系统，也就是量子比特。选择样品作为量子寄存器时，必须满足一项属性：各个自旋的频率应能彼此区分，从而可以单独寻址每个量子比特。对于异核分子，由于不同类型的原子核具有不同的旋磁比，因此很容易将它们区分开来。对于同核分子，尽管原子核具有相同的塞曼分裂，但它们可能处于不同的电子环境中，由此产生的核屏蔽效应可能导致不同程度的频移。实际上，核自旋的进动频率可能有很大差异，因此最好选择这类原子核构成量子寄存器。图7展示了核磁共振波谱仪的示意图，以及常用于编码量子比特的分子。

初始化——传统上，量子计算从一个所有量子比特均初始化为计算基矢量 $|0\rangle$ 的纯态开始。然而，由于室温下核磁共振自旋系综的偏振度较低，实际上很难获得真正的纯态。另一种方法是使用赝纯态（PPS）的概念作为替代 [7]。PPS 是最大混合态与纯态的混合，因此在量子门和量子测量作用下，其行为与该纯态相似。若要从热平衡态制备 PPS，就需要进行非幺正操作，这可以通过施加梯度场脉冲或利用弛豫效应来实现。目前已有多种制备 PPS 的方法，例如空间平均 [698], 线选择 [699], 和标记赝纯态 [694, 700], 等。文献 [701]基于量子信道下态转移的最优界理论，分析并比较了这些方法的效率。总体而言，PPS 已被证明是小规模核磁共振量子计算中一种方便且有用的工具，但随着量子比特数量增加，可扩展性将面临显著挑战，即 PPS 可达到的纯度随规模增长而急剧恶化。试图解决可扩展性问题的方法包括算法冷却 [702] 和仲氢诱导偏振化 [703], ，这些方法已显示出能够制备纯度甚至超过纠缠阈值的核磁共振自旋系统。

操作。单量子比特门就是布洛赫球上的旋转，可以通过软射频脉冲在核磁共振中轻松实现。软脉冲通常采用预先设定的波形，例如高斯波形[704]。其能量仅分布在有限的频率范围内，因此可以选择性地激发位于该范围内的自旋。因此，实现单量子比特门的一种自然方式，是使用具有足够选择性的共振旋转高斯脉冲。但需要注意，返回实验室参考系时可能会产生相位误差，必须对其进行补偿，才能得到真正的目标门 [705]。在核磁共振中，双量子比特门通过利用原子核之间的自然 J耦合来实现。对于多量子比特门，由于自旋之间所有的 J耦合都在演化，因此必须设计由一系列 π 脉冲组成的重聚焦方案，以有效关闭不需要的 J耦合项 [706]。通常使用随机化基准测试协议来量化相干控制水平。使用随机化基准测试，有研究报告了三量子比特系统上单量子比特门和双量子比特门的平均错误率为 $4.7 \pm 0.3 \times 10^{-3}$ [707]。另一项研究使用酉2-设计和随机化协议，估算了七量子比特核磁共振处理器上克利福德门的平均保真度，发现平均实验保真度为55.1% [708]。核磁共振还探索了其他类型的量子门实现方式，例如几何量子计算 [709, 710]。最后，我们指出，核磁共振还提供了非幺正控制手段，例如梯度场脉冲和相位循环；这些手段可建模为随机酉通道，并可用于破坏不需要的相干性。

测量。—核磁共振测量通过检测线圈观测自旋的横向磁化强度自由感应衰减（FID）来实现，检测线圈绕在样品周围。记录的时域 FID 信号经傅里叶变换后得到频域谱，再通过拟合频域谱获取有关自旋态的信息。与其他量子系统中的投影测量不同，核磁共振是一种系综系统，我们可以直接测量单个相干泡利可观测量的期望值。要测量除可直接观测的单量子相干之外的泡利算符，必须在采集 FID 信号之前，对自旋态施加适当的读出脉冲。要估计未知量子态，即执行量子态层析，需要测量一组完备的基算符。然而，这通常是一项艰巨的任务，因为待确定的自由度数量会随系统规模呈指数增长。

核磁共振量子控制.—经过 50 多年的发展，研究人员在核磁共振自旋系统中开发了大量脉冲控制技术，例如频率选择性脉冲、复合脉冲、重聚焦方案，

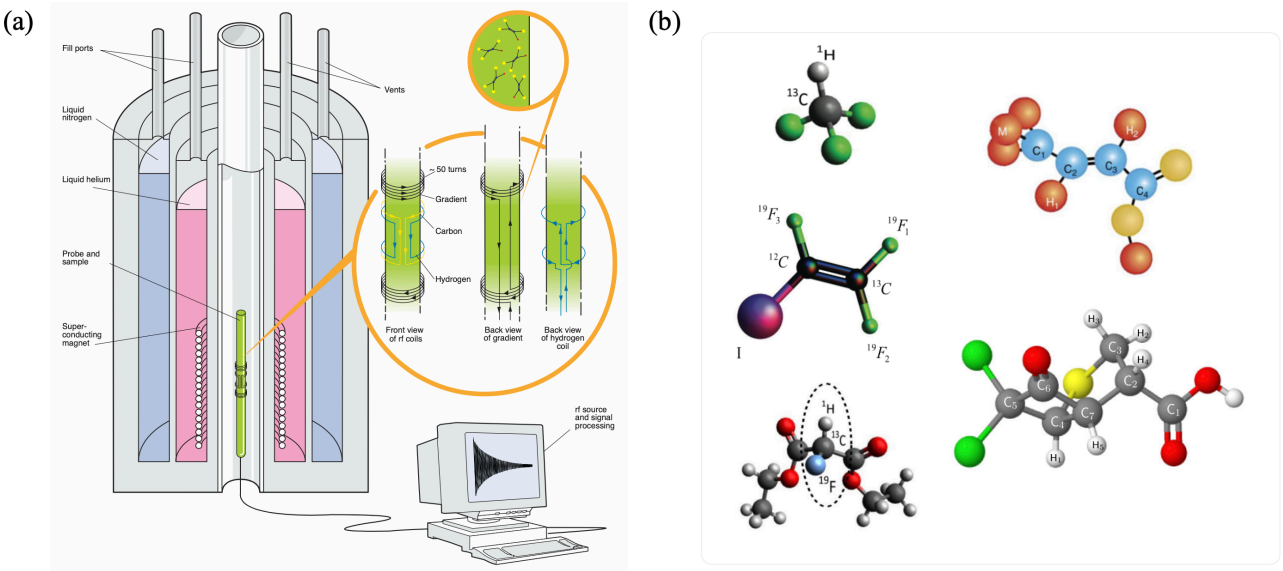


图 7. (a) 可用于量子计算的高场液态核磁共振谱仪示意图 [697], 。(b) 一些常用于核自旋量子寄存器的分子列表，涵盖从双量子比特到十二量子比特的样品。标签表示被选作量子比特候选者的原子核： ^{13}C、 ^{1}H 或 ^{19}F（自旋量子数均为 1/2）。

以及多种脉冲序列，等等。这些脉冲技术源于对复杂分子进行精密光谱分析的需求，并持续应用于核磁共振量子信息处理实验 [706]。尽管如此，为了实现满足容错量子计算要求的足够高保真度量子门，仍有必要进一步改进核磁共振控制技术。因此，核磁共振与量子控制理论这一跨学科领域应运而生，推动了新颖且更高效的脉冲设计与优化技术的发展。对于尺寸较小的系统，可以采用时间最优控制理论来缩短门控时间，从而减轻退相干效应[711, 712]。对于尺寸相对较大的系统，通常难以推导出解析控制解，因此需要借助数值方法。其中最成功的方法之一是文献 [713], 提出的 GRAPE技术，它灵活、易用，能够生成平滑、最优且稳健的整形脉冲。GRAPE及其众多变体不仅广泛应用于核磁共振领域，也应用于其他实验平台。然而，这些数值方法本质上无法扩展。即使对于拥有数十个以上量子比特的系统，使用经典计算机模拟受控量子演化也会消耗大量资源。一种可能的解决方案是采用基于子系统的量子最优控制 [705]。另一种有前景的策略是 GRAPE 的混合经典版本，它利用量子模拟器高效模拟受控演化[714]。这本质上是一种闭环策略，并已首先在一个七自旋系统上进行了实验验证 [714]以及后来用于产生多重关联自旋态的十二自旋系统 [696]。除了可扩展性，噪声也是实现高保真度量子控制的另一项主要障碍，可通过鲁棒控制或开放量子系统控制加以应对。例如，针对固态核磁共振提出了更先进的动态解耦序列，在保持良好解耦效率的同时，显著提高了对不同类型实验误差的鲁棒性 [715, 716]。值得一提的是，上述控制方法，如复合脉冲、GRAPE、自旋回波和动态解耦，虽然最初是在核磁共振领域发展起来的，但并非仅限于核磁共振。事实上，其中许多方法已成功应用于其他物理系统。因此，可以说核磁共振是开发量子控制方法的出色平台和试验平台 [705]。

核磁共振量子处理器——核磁共振领域拥有成熟的量子控制方法和实验技术，推动了量子计算、量子模拟、量子克隆 [717–719], 量子纠错[720, 721], 量子热力学 [722–725], 量子情境性 [726], 等领域一系列具有影响力的基础性或应用性研究。下面为简便起见，我们仅回顾量子算法、量子模拟和量子学习领域的若干进展。

量子算法。—自核磁共振量子计算发展初期以来，已有报道称，一些著名量子算法已通过实验实现，例如在双量子比特碳-13标记氯仿分子上实现Deutsch-Jozsa算法 [727], 在另一种双量子比特样品——部分氘代胞嘧啶上实现Grover搜索算法 [728], 以及在

三量子比特样品 [729], 上实现量子傅里叶变换算法，并在七量子比特系统上实现Shor量子因数分解算法 [693]。

量子模拟——核磁共振已被用作量子模拟器，探索从量子多体物理、量子化学、生物学乃至宇宙学等领域的各种有趣量子现象。模拟量子多体系统的平衡与非平衡动力学，是量子模拟领域最引人入胜的课题之一，而核磁共振似乎非常适合这项任务。例如，研究人员利用核磁共振模拟了一个三自旋受挫磁体，并探索了系统的相随磁场和温度的变化规律 [730]。研究人员还模拟了具有三体相互作用的哈密顿量的基态相图 [731] ，并通过监测李-杨零点，首次观测到长程耦合模型的相变 [732]。另一项研究中，作者使用四量子比特核磁共振模拟器，探索利用非时间序关联函数探测混沌伊辛链模型中的量子信息搅乱 [733]，以及平衡态或动力学量子相变[734] 。核磁共振还应用于各种化学问题，通过直接模拟分子或化学反应，例如计算氢分子的基态能量[735], 、获取水分子的能谱[736], ，以及探索原型激光驱动异构化化学反应动力学[737]。此外，核磁共振量子模拟器还可通过模拟拓扑哈密顿量的基态来研究拓扑序 [738–741]。

量子机器学习——核磁共振是可以展示量子机器学习算法的实验平台之一，目前正处于探索如何利用量子机器学习直接处理经典图像信息的初期阶段。例如，通过在四量子比特核磁共振处理器上实现量子支持向量机，完成了区分数字 9 和 6 的手写图像识别任务 [742]。通过实现量子图像处理算法，实验检测出了图像中不同区域之间的边界[743]。量子主成分分析是机器学习数据预处理的重要工具，研究人员也首次在核磁共振平台上对其进行了实验实现，用于小规模人脸识别任务[744]。

展望——液态核磁共振量子计算面临的主要挑战包括：缺乏适合作为量子寄存器的分子，无法获得高纯度量子态和纠缠等量子资源，以及难以在大型自旋系统中实现可扩展的高保真控制。克服其中一些局限的一种途径是转向固态核磁共振。固态核磁共振已被用于展示量子热机 [745], 探索多体局域化 [746, 747], 以及观测预热化 [748, 749]。其他一些有前景的途径与核磁共振密切相关的途径包括基于硅的核自旋量子计算机，它是量子点与核磁共振的混合体 [10], ，以及近期出现的核电共振技术 [750]。最后，尽管核磁共振在成为实现大规模量子计算的可扩展途径方面存在固有困难，但过去数十年研究中积累的诸多经验很可能有助于推动其他量子技术的发展。

VIII. 中性原子阵列

过去二十年来，确定性制备的中性原子阵列已成为量子计算和量子模拟的一个有前景的平台[751–755]。原子量子比特之间的受控相互作用由里德堡态介导，通过长程偶极-偶极相互作用实现。这些长程里德堡相互作用能够构建特定的量子哈密顿量，并轻松实现模拟量子模拟。它们也是构建数字门和实现各种物理模型的核心手段。迄今为止，大多数实验都聚焦于碱金属原子铷和铯，它们只有一个价电子，能够通过激光简单地冷却和操控。近年来，具有两个价电子的碱土（类）元素锶和镱凭借其吸引人的特性，例如狭窄和超狭窄的光学跃迁，以及用于里德堡态的魔幻波长光学阱，日益受到关注 [756–759]。原子量子比特的示意图及其优缺点总结于图2(e)中。

可扩展性.—中性原子量子计算机以光镊中囚禁的单个原子阵列为基础，如图 8 所示。量子信息编码在碱金属原子的电子自旋态中，或编码在碱土（类）原子的核自旋态中。中性原子平台在可扩展性方面具有显著优势。扩大原子量子比特的数量相对容易。在微观光镊中，由于光辅助碰撞，每个光镊中囚禁一个原子或零个原子的概率约为 50% [760, 761]。通过在蓝失谐激光下精确调节参数并采用巧妙的冷却技术，碱金属原子的随机装载效率已提高至 80%–90%，碱土（金属类）原子的随机装载效率则提高至 96% [762–766]。在光镊中完成概率性装载后，可借助实时控制系统和动态移动的光镊，将单个原子重新排列成无缺陷的任意图案 [767–769]。迄今为止，已构建出由 100 多个中性原子组成的大规模平台，例如平均含有 110 个^{133}Cs原子的阵列 [770], 、由 196 个和 147 个$_{87}$Rb原子构成的无缺陷正方形和三角形阵列 [771], ，以及最多含有 256 个$_{87}$Rb原子的无缺陷可编程阵列 [772]。重新排列过程总共需要数百毫秒，填充率最高可达 99% [771, 772]。在重新排列更大的阵列时，

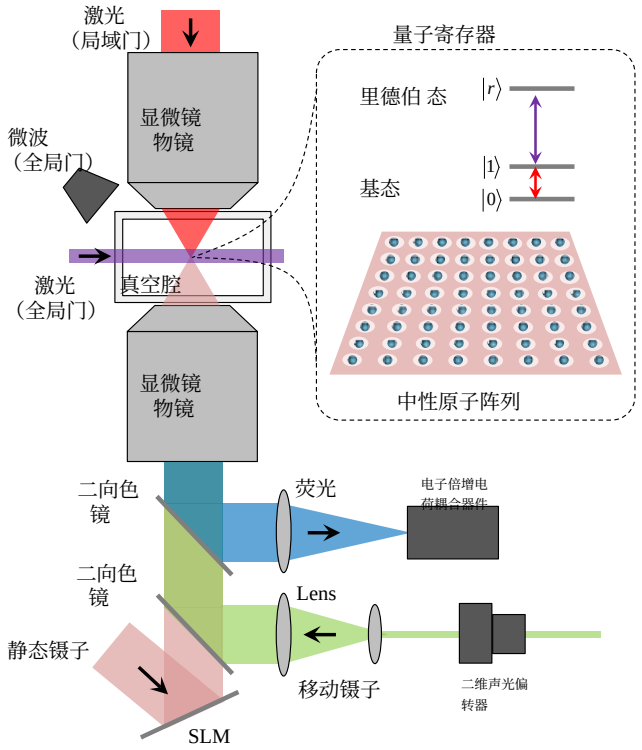


图 8. 中性原子量子计算机示意图。在微观光镊阵列中，单个原子被重新排列成无缺陷任意图案。原子量子比特可编码在电子自旋态或核自旋态中。单量子比特操作通过微波或光学光谱学实现。双量子比特门和纠缠基于长程里德堡相互作用实现。电子倍增电荷耦合器件，电子倍增电荷耦合器件。空间光调制器，空间光调制器。二维声光偏转器，二维声光偏转器。

光镊中的原子损失会限制填充率，因为重新排列所需时间会随系统规模增大而延长。由于与真空腔内背景气体发生碰撞，典型的囚禁寿命约为几十秒。为降低残余气体压力，可将光镊置于温度为数开尔文的低温环境中。研究人员已在低温光镊阵列中实现单个铷原子的囚禁，测得寿命最长可达 6000 秒，相较于室温实验装置提升了 300 倍[773]。在这一低温实验装置中，已实现由 300 多个$_{87}$Rb原子组成的大型阵列，并以空前的 $\sim 37\%$ 概率制备出无缺陷阵列 [774]。我们预计，中性原子处理器中的原子量子比特数量将从数百个增加到数千个。此外，还将通过原子—光子互连将多个独立处理器耦合在一起。

初始化和读出。——编码在原子内部态中的量子比特可以使用光学抽运技术进行初始化。单个碱金属原子的估计制备保真度为 $F > 99.5\%$ [775]。一种广泛使用的量子比特读出技术依赖于对中性原子进行态选择性弹射。用共振激光脉冲照射时，处于一种状态的原子会被推出光镊，而处于另一种状态的原子不受影响，仍被囚禁。随后，通过收集激光诱导的荧光来探测囚禁原子，这种探测不具有态选择性。典型的测量保真度为 $F > 98\%$ [775]。这种技术中的原子损失使得无法在量子电路执行过程中测量量子比特。作为替代方案，为了实现无损荧光态探测，应仅散射少量光子，以尽量减少原子加热。该方法已在光镊中的单个量子比特和多个量子比特上得到演示 [776–779]。未来，加热导致的原子损失将降至足以实现量子计算中重复量子纠错的水平。

量子门.—我们在表V中总结了已实现的最先进量子门。单量子比特操作通过微波或光学光谱学实现。在大型原子阵列中，单站点寻址的一种通用方法是扫描聚焦激光束，或施加静态场梯度。门操作时间为 $t_1 = 0.1 - 10$ μ秒。单量子比特门误差由脉冲振幅和失谐的波动引起 [775, 780]。在 ^{133}铯实验中，利用随机基准测试测得的平均保真度为 $F_1 = 99.83\%$ [781]。最近，通过使用复合脉冲序列，^{87}Rb原子的门保真度得到提升；这种序列使门误差对脉冲误差高度不敏感 [782]。估计的门误差约为3×10^{-4}。在碱土（类）原子平台中，已提取出 5.2×10^{-3} 的平均单量子比特门误差 [766]。

中性原子之间的可控相互作用是实现粒子纠缠的基本要求。一种策略是通过超冷自旋交换相互作用实现局域纠缠操作，这一方法已在可移动光镊中的两个单个原子之间得到验证 [783]。然而，在中性原子阵列中使原子波函数重叠是一项巨大挑战。另一种策略则利用里德伯原子之间强而远程的偶极-偶极相互作用。当两个原子彼此靠近时，已通过里德伯阻塞效应实现双量子比特门和纠缠 [784, 785]。由于后一种方法切实可行，大多数研究人员都将注意力放在它上面。相应的门控时间为 $t_2 = 0.4$–2 μs。对于通过里德伯相互作用实现的双量子比特门，门误差的主要来源包括基态-里德伯态多普勒退相干、双光子激发过程中来自中间态的自发辐射，以及激发激光相位噪声 [775]。在 ^{87}Rb 原子阵列中，通过参考腔抑制里德伯激光相位噪声后，双量子比特纠缠操作的保真度被测得为 $F_2 \geq 97.4\%$，通过

过参考腔抑制里德伯激光相位噪声[786, 787]。在一个由 ^{171}Yb 原子组成的阵列中， [788]首次展示了保真度为 $F_2 = 83\%$ 的双量子比特门。在这项实验中，门误差归因于门光束引起的拉曼散射，以及少量里德伯态布居导致的自电离。对于两个分别受囚禁的 ^{88}Sr 原子，研究人员制备出保真度高达 $> 99.5\%$ 的贝尔态，其中量子比特编码在亚稳态和里德伯态中[789]。

在里德堡激发过程中，我们必须考虑基态和里德堡能级的不同囚禁势所产生的影响。在单个 ^{87}铷或 ^{133}铯原子的实验中，会短暂关闭光镊，以减轻里德堡态受到的反囚禁效应。原子损失和加热限制了里德堡激发时间和激发循环次数。每次双量子比特门采用 0.5 μs 的间隔时，在原子损失变得显著之前可以进行数百次激发[782]。值得注意的是，碱土（金属类）原子的离子实极化率可用于在常规红失谐光镊中囚禁里德堡态。单个 ^{174}镱原子的里德堡态已被同一红失谐光镊稳定囚禁，该光镊也同时囚禁其基态 [790]。因此，碱土（金属类）原子的里德堡态相互作用时间可以延长。

相干性——中性原子与环境隔离良好，并表现出较长的相干时间。对于铷和铯原子 [782, 791], , 超精细量子比特的弛豫时间约为 $T_1 \sim 4$s，受囚禁激光中光子的自发拉曼散射所限制。非均匀退相干源于囚禁原子的能量分布。典型退相干时间为 $T_2^* \sim 4$ ms。对于均匀退相干，常见机制包括囚禁激光的强度涨落、磁场涨落以及原子加热。使用XY8和XY16动态解耦序列 [716, 792], 已观测到 $T_2' \sim 1$ s的均匀退相干时间。通过分析这些机制，我们发现量子比特态的差分光移是退相干的根源。魔强度囚禁技术能够减轻差分光移的影响。相干时间已提升至225 ms，其中提取出的非均匀退相干时间为 $T_2^* \sim 1.5$ s [793]。与电子自旋量子比特相比，碱土（金属类）原子中的核自旋量子比特对光镊造成的扰动具有鲁棒性。自旋回波过程中，单个 ^{87}锶原子的估计相干时间分别为 $T_1 \gg 10$ s、 $T_2^* = 21$ s和 $T_2' = 40$ s [794]。此外，单个^{171}镱原子的相干性质也已测量 [766, 788], , 如表V所列。

数字量子操作——基于可编程中性原子处理器的数字量子门电路已由两个实验小组实现。在文献 [791],中，威斯康星的研究人员采用了一种架构，通过紧聚焦光束对单个原子进行单独寻址。量子电路被分解为全局微波旋转、局部相位旋转和局部双量子比特 CZ 门。扫描式里德堡激发光束能够对成对原子进行相干且同步的寻址。在这一平台上，研究人员实现了最多包含 6 个量子比特的 GHZ 态制备、用于化学问题的量子相位估计算法，以及针对最大割图问题的量子近似优化算法。在文献 [782], 中，哈佛大学的研究人员采用了另一种基于纠缠中性原子相干输运的架构。通过两束全局里德堡激光束并行实现双量子比特 CZ 门。随后，纠缠量子比特经过相干输运以改变连接关系，并执行下一层量子操作。该架构被用于生成 12 量子比特簇态、7 量子比特 Steane 编码态、拓扑表面态和环面码态。最后，研究人员实现了混合模拟—数字演化，并测量了纠缠熵。这些成果代表着实现中性原子量子计算机的重要一步。

模拟量子操作——结合阵列几何结构的高度可调性，里德堡原子阵列适用于实现各种哈密顿量 [753–755]。当自旋态编码在基态能级和里德堡能级上时，可实现类似量子伊辛模型。在最多含有 30 个原子的一维链和一个 7×7 原子阵列中，人们在突然开启里德堡激发脉冲后，研究了量子伊辛模型的激发动力学和对关联函数 [796, 797]。线性链和锯齿链中的类似淬火动力学也得到了研究 [798]。对于三维里德堡原子排布，人们利用数十个自旋构建了映射到各种连通图上的量子伊辛哈密顿量 [799, 800]。扫描里德堡激发失谐量，可以探测更丰富的多体动力学。在具有可调相互作用的一维链中，人们展示了进入 $\mathbb{Z}_n$ 有序相的量子相变及其临界动力学 [801, 802]。此外，人们还在含有数百个原子的二维阵列中研究了反铁磁有序态 [771, 772, 803]。虽然里德堡相互作用通常会导致多体系统热化，但研究发现，当二维原子阵列制备在反铁磁初始态时，量子多体疤痕可避免快速热化 [804]。除了上述类伊辛模型，近期研究还包括观测量子二聚体模型和 Su-Schrieffer-Heeger 模型中的拓扑相 [805, 806], 、利用周期性外部微波场构建 XXZ 自旋模型 [807], , 以及研究用于求解最大独立集问题的量子优化算法[795]。

展望——近期里德堡原子阵列的突破展现了研究多体物理并实现高度可编程、可扩展量子计算的能力。

表V. 中性原子量子比特的最先进性能报告。 T_1 为自旋弛豫时间。 T_2^* 和 T_2' 分别指非均匀退相干时间和均匀退相干时间。 F_1（F_2）和 t_1（t_2）分别为单（双）量子比特操控的量子门保真度和操作时间。 N_d 和 N_a 分别指数字量子处理器和模拟量子模拟器中的量子比特数量。

属性		碱金属原子	碱土（类）原子	
		电子自旋	核自旋	
		^{85,87}铷/^{133}铯	^{87}Sr	^{171}镱
相干性	T_1	4 秒 [782, 791]	$\gg$ 10 秒 [794]	$10-100$ 秒 [766]
	T_2^*	4 毫秒 [782, 791]	21 秒 [794]	3.7 秒 [766]
	T_2'	~ 1 秒[a][782, 791]	40 秒[b][794]	7.9 秒[b][766]
门控时间	t_1	$0.1-10$ μ秒		0.7 μ秒 [766]
	t_2	$0.4-2$ μ秒		0.9 μ秒 [788]
量子门保真度	F_1	$\sim 99.97\%$[c][782]		99。48%[d][766]
	F_2	97.4%[e][787]		83%[e][788]
量子比特数量	N_d	6[f][791], 24[g][782]		
	N_a	289 [795]		
环境		超高真空 $P\sim 10^{-11}$ Torr，磁场 $B\sim 10$ G		

[a] XY8 和 XY16 动态解耦序列。 [b]自旋回波过程。 [c] 该值根据散射极限估算，与累积误差相符。未来将采用随机基准测试。 [d]随机基准测试。 [e] 贝尔态保真度。 [f] 基于单个原子单独寻址的 GHZ 态。 [g] 基于纠缠原子相干输运的环面码态。

该平台面临的主要挑战包括提升双量子比特门的保真度、实现量子无破坏测量，以及降低大型阵列中各个量子比特之间的串扰。通过进一步采用拉曼边带冷却来冷却碱金属原子 [808, 809] ，或使用已展现出优异门性能的碱土（金属类）元素，可以提高双量子比特门保真度。结合无损荧光态探测，引入第二种原子元素后，便可通过与辅助量子比特的量子无破坏耦合来监测量子处理器 [810]。此外，随着系统规模扩大，双元素平台能够对同核和异核相互作用进行低串扰操控 [811]。

IX. 光量子计算

引言.—在所有量子计算平台中，光子具有几项无可比拟的优势：i）由于其与周围环境的耦合很弱，因此是室温量子计算的最佳候选方案之一；ii）它是分布式量子计算的天然接口，可作为飞行量子比特连接多个量子节点；iii）它与 CMOS 技术兼容，使光量子计算迈入了一个崭新的前沿阶段。

光量子计算可以追溯到2001年，Knill、Laflamme 和 Milburn（KLM）指出，仅使用线性光学元件就可以实现通用量子计算 [812]。这项里程碑式的工作为线性光学量子计算开辟了道路。然而，巨大的资源开销使 KLM方案极难实现。2010年，Aaronson 和 Arkhipov 提出并分析了一种可行得多的中间模型——玻色子采样 [813]。与 KLM方案相比，玻色子采样是一种简单得多的线性光学量子计算模型，仅需 50–100 个光子便可超越所有经典计算机，但代价是它不再具有通用性。2017年，Hamilton 等人提出了一种名为高斯玻色采样（GBS）的变体，其输入由单光子替换为单模压缩态 [814]。这一新范式不仅能为大规模实现提供高效途径，还可能应用于基于图的问题和量子化学领域。

过去二十年间，我们见证了线性光学量子计算领域取得的巨大进展 [815, 816]，，尤其是在单光子源、线性光学网络和单光子探测器方面。这些成就促成了一系列重要实验成果，包括制备大规模纠缠态 [817–819]，，以及通过玻色子采样实现量子计算优势 [16, 18, 820]。

光子量子比特——光子拥有最丰富的自由度，可用于编码量子比特。

接下来，我们总结几种光子量子比特常用的基。

- 偏振：量子比特可以编码在电磁场的两种相互正交的几何取向上。这种编码方式广泛用于线性光学量子计算。
- 路径：单光子的两条传输路径可以构成一个量子比特。通常，自由空间中的路径相位不稳定，而这种编码方式非常适合集成光子学。
- 时间箱：将单光子较早和较晚的到达时间编码为一个量子比特。
- 频率箱：频率箱量子比特指光子处于两种不同频率（颜色）的叠加态。
- 光子数：真空态和单光子态分别编码量子比特的 0 和 1。
- 轨道角动量（*OAM*）：OAM 描述光的空间分布。在量子理论中，光子的轨道角动量具有数值 $L_z = m\hbar$。任意两个具有不同 m 数值的 OAM 态均可构成光子量子比特。

量子光源。单光子源是一种量子光源，能在特定时刻发射且仅发射一个光子，并具有确定的偏振和时空模式。具体而言，为了实现高可见度的 Hong-Ou-Mandel 型量子干涉，单光子应具有相同的偏振、时空模式和变换极限光谱轮廓 [821]。

自发参量下转换（SPDC）源 [822, 823] 在许多基础量子光学实验中发挥着重要作用。值得注意的是，今年的诺贝尔物理学奖部分授予“因纠缠光子实验”。然而，SPDC 本质上具有概率性，且不可避免地伴有多光子成分。为抑制不需要的双光子发射，单光子效率通常低至 ∼1%。克服这一问题的一种替代方法是将多个 SPDC 源进行复用，以提高单光子源的效率 [824]。另一种方法是直接从二能级系统中产生高质量单光子。在所有平台中 [825–832], ，半导体量子点 [833] 可提供最先进的单光子源，整体效率达到 57% [834]。这主要得益于 Wang 等人 [835], 研发的偏振微腔，它能对单光子发射产生偏振依赖的 Purcell增强，使整体效率超过 50%。在不久的将来，通过改进样品生长并提高收集效率，单光子效率可提升至 70% 以上，从而超过通用量子计算 [836]所需的效率。

在量子光学中，另一种量子光源是压缩态，指的是一种量子态：在某些相位下，其电场强度的不确定性小于相干态的电场强度不确定性。这种状态通常通过强烈泵浦非线性介质产生 [837]。研究表明，可以构建连续变量（CV）量子计算 [838] ，方法是使用压缩态和简单的线性光学元件，例如分束器和移相器。随后，Gottesman、Kitaev 和 Preskill（GKP）提出了一种适用于连续变量的稳健量子纠错码，以抵御扩散误差 [839]。迄今为止，I 型光学参量放大器实现的压缩记录为 15 dB [840], ，并且人们开展了许多量子实验，以推进大规模连续变量量子计算 [841–843]。与离散变量（DV）量子计算相比，连续变量有一项重要优势：只需用简单的分束器混合两个压缩态，就能确定性地产生纠缠；而在离散变量情形下，纠缠难以获得，因为这种非线性相互作用非常微弱，因此必须通过条件方式产生纠缠，即采用后选择。尽管如此，连续变量量子信息处理仍不可能完美，因为纠缠质量强烈依赖于压缩程度，而压缩对损耗极其敏感。

线性光学网络——干涉仪对单光子福克态或单模压缩态施加幺正变换。1994年，Reck 等人展示了如何通过按三角形构型排列的分束器和移相器实现通用幺正变换 [844]。在这种方案中，光学深度为 $2(n-1)-1$，分束器数量为 $n_{(n-1)\ 2}$ ，其中 n是模式数。2016年，Clements 等人 证明，矩形构型的干涉仪与三角形构型的干涉仪等效 [845]。此外，光学深度降至 $n-1$，分束器数量也降至n^2-2n+2_2 。这种设计更加紧凑、稳健，并采用对称构型。

对于玻色子采样，线性光学网络应同时具备高传输率、Haar 随机性以及高度的空间和时间重叠。有多种不同的实现方法，例如微光学 [16, 820, 846, 847], 时间箱环路 [18, 848],和集成光子电路 [849–851]。对于通用量子计算，还应具备可编程性。微光学的传输效率最高，但尚未展示其可编程性。时间箱环路和片上集成电路虽然可编程，却面临严重损耗。如何在实现可编程性的同时降低损耗，是未来长期追求的目标。

玻色子采样。——2011年，Aaronson 和 Arkihpov 指出，具有单光子态输入的被动线性光学干涉仪无法被高效模拟[813]。这种模型称为玻色子采样，是一种非通用量子计算模型，构建起来比通用量子计算容易得多。在玻色子采样中，n 相同玻色子被送入一个 m 模式（$m \gg n$）的 Haar 随机干涉仪，并在光子数基中对输出分布进行采样。由于玻色统计，最终态的概率振幅与子矩阵的永久式相关，而该问题已知属于 #P 完全复杂性类。人们普遍认为，中等尺寸的玻色子采样

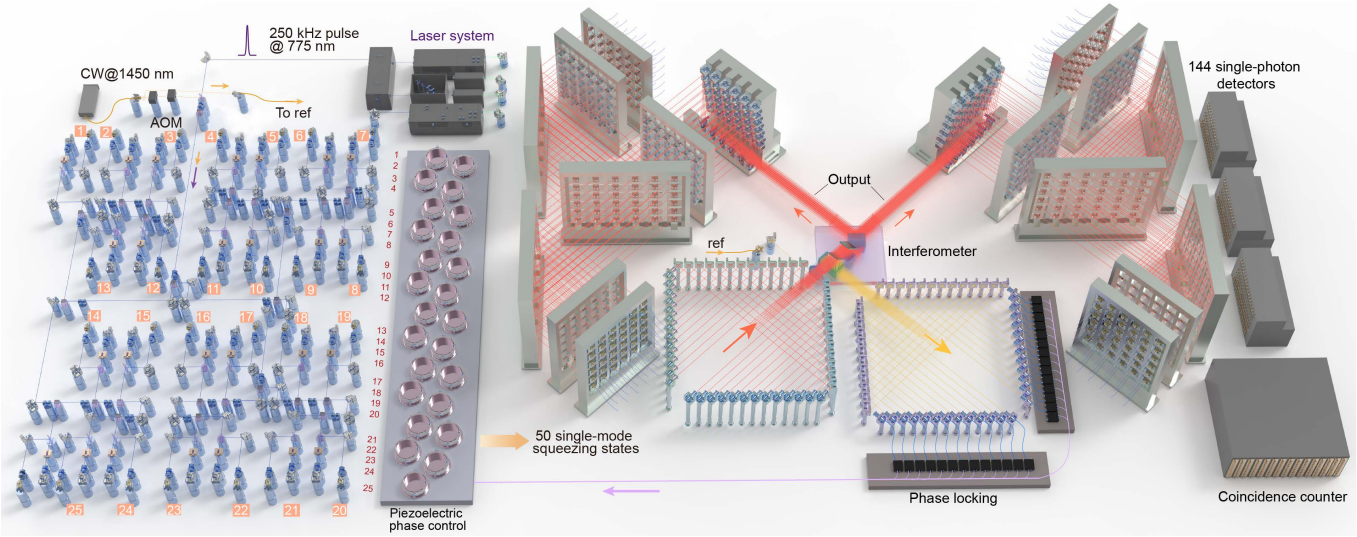


图 9。九章的实验装置。该装置主要由五个部分组成。在左上区域，制备波长为 775 nm 的高强度变换极限脉冲激光，用于泵浦 25 个双模压缩态（TMSS）源（位于左侧区域，以橙色标示）。与此同时，连续波 1450 nm 激光被引导并与 25 个双模压缩态源共同传播。1550 nm 双模压缩光被收集到不受温度影响的单模光纤中，其中 5 m 长的裸光纤缠绕在压电圆筒上，以控制光源相位（位于中央区域）。在中右区域，利用光学准直器和反射镜，将 25 个双模压缩态注入光子网络，并收集 25 束对应的光束（以黄色标示），其波长为 1450 nm、功率约为 0.5 μW，用于相位锁定。利用可调潜望镜阵列和反射镜，将 144 个输出模式分配到四个部分。最后，通过 144 个超导纳米线单光子探测器对输出模式进行探测，并由 144 通道超快电子符合计数单元进行记录。

机器，即使是具有乘法误差的近似模拟，也无法用最先进的经典计算机高效模拟 [813]。更重要的是，玻色子采样是展示量子计算优势的有力候选方案 [852], ，也是量子计算领域的一项重要里程碑。

2013年，四个研究团队同时报告了小规模的玻色子采样原理验证实验 [849–851, 853]。事实上，最终的光子分布与永久式模的平方成正比。然而，所有这些实验都基于自发参量下转换源，而这类源本质上具有概率性，并混有多光子成分。为了解决自发参量下转换固有的概率性问题，Lund 等人于 2014年提出了散射式玻色子采样 等人。 [854]，Bentivegna等人[855]于 2015年首次对其进行了演示。随后，Zhong 等人。 将光子数提高到了五个 [817]。尽管散射式玻色子采样在理论上十分优美，但由于超高预示效率、快速光开关以及所需大量自发参量下转换源带来的诸多挑战，实验上很难实现量子优势。

解决自发参量下转换问题的一种直接方法，是使用基于相干驱动量子二能级系统的按需单光子源。2017年，Wang 等人 使用主动解复用的量子点单光子源和超低损耗光子线路，成功完成了首次五光子玻色子采样实验，并展示了很高的采样

速率，比此前所有实验快24,000倍，超越了早期经典计算机 ENIAC 和 TRADIC [846]。2019年，Wang 等人展示了采用20个输入光子和60模式干涉仪的玻色子采样 [847]。最终，输出端最多检测到14个光子，输出态希尔伯特空间达到3.7×10^{14} 维，比此前的研究大10多个数量级。

借助单模压缩态输入，GBS 是一种更高效地展示量子计算优势的方式。单模压缩态输入允许存在多于一个光子的成分，同时其计算复杂性与原始玻色子采样一样高。2020年，Zhong 等人。 [16] 完成了一项里程碑式实验，成功展示了量子计算优势。随后，GBS 采用 50 个单模压缩态输入和一个 144 模干涉仪得到了改进，并检测到多达 113 次点击符合[820] （见图 9）。这些初步的光子量子计算机以中国古代数学经典《九章算术》命名为 九章，其输出态空间维度为 10^{43} ，采样速率比采用最先进的模拟策略和超级计算机 10^{10} 快。

从技术上说，九章 通过精确控制双模压缩态输入的相位，实现了部分可编程。要使玻色子采样完全可编程，一种值得关注的方法是将光子模式编码到时间分箱中 [856]。在

这种方法中，每个时间箱的分裂比和相位都可以根据需要实时改变。2017年，He 等人报道了首个结合按需量子点单光子源的时间箱编码玻色子采样实验[848]。值得注意的是，该时间箱多模网络完全可通过电信号编程，且完全连通（没有零元素）。最近，Madsen 等人 结合上述高斯玻色采样方法，报道了通过构建一台采用时间箱环路的高斯玻色采样机器实现量子优势；该机器使用了216个单模压缩态输入和16个光子数分辨探测器，最终探测到多达219个光子 [18]。值得注意的是，这台机器只能部分编程，且其矩阵元素大多为零，也就是说，它只是部分连通。

由于高斯玻色采样的输出概率与哈夫尼安有关，而哈夫尼安对应于图的完美匹配数量，因此它与若干潜在的实际应用相关 [857–860]。接下来，高斯玻色采样自然会发展成为一种专用光子平台，用于研究这些现实应用，并以此迈向含噪声中等规模量子处理 [861]。

可扩展性.—在大规模量子信息处理中，现阶段光子平台面临两大主要障碍——损耗以及独立光子之间极其微弱的相互作用。原则上，损耗既可定位也可检测，因此比计算错误（如 X、Z 错误）更容易解决。对于离散变量量子计算，理论分析 [862, 863] 表明，可扩展量子计算最多允许 50% 的损耗，这一限制远不如表面码处理计算错误所需的 ∼1% 阈值严格。在单向量子计算中，一些研究指出，对于 m 光子簇态，要实现通用量子计算 [864], ，融合成功概率至少需要达到 $1/(m-1)$；而其上限仍有待未来进一步研究。例如，3 光子簇态的渗流阈值上限为 0.5898 [864]。对于连续变量量子计算，损耗会使压缩态更接近真空态，同时使其失去量子特性。令人振奋的是，采用 GKP 量子比特的容错量子计算只要求压缩度达到 ∼ 10dB [865], ，这使可扩展量子计算能够容忍较高的损耗阈值。总之，离散变量和连续变量光子量子计算中的损耗都可以在相对较高的阈值下得到处理。

单光子级别的光子-光子相互作用，是光子量子计算和量子光学中的一个基本问题。人们普遍认为，确定性地产生光子间纠缠需要非线性相互作用 [866]。过去二十年间，人们提出了多种解决这一问题的方法，例如电磁诱导透明 [867], 、原子-腔相互作用 [868], 、原子-原子相互作用 [869] 以及手性波导中的原子[870], 等。2016年，Hacker等人报道了一种光子门，其效率为4.8%，保真度为76.2% [871], 。该方法在整个过程中存在光子存储与读取效率低下的问题，且门保真度受自旋表征精度的限制。近期几项采用里德堡阻塞的实验 [872–874]也存在相同问题。通过将单光子存储在长寿命的里德堡态中，单光子存储与读取的效率已提高至 39% [873]。未来，借助 $\chi^{(2)}$ 介质和腔量子电动力学系统中的强非线性，可以实现兼具高保真度和高效率的光子门，达到容错量子计算所需的阈值。在这种情况下，光子平台将为容错量子计算提供理想的舞台，并有望成为一种可在室温下运行的领先平台。

X. 展望与结论

本文回顾了过去十年取得显著进展的主要量子计算平台。目前，这些量子平台处于不同的成熟阶段，各系统各有优势与局限。要提升各种量子平台的控制保真度和可扩展性，必须克服相应挑战，以满足不同平台实现大规模量子计算的要求。对于固态量子系统，高质量材料和先进制造技术对量子比特的性能至关重要。例如，低电荷噪声界面对于半导体量子比特至关重要。引入集成电路的工业技术，并推动从实验室级工程制造向代工厂级制造转变，有望改善这一问题。对于光子-原子量子比特系统，可以进一步发展精确控制单个原子以及在多个处理器之间建立原子-光子互连器的基础理论和先进技术。对于核磁共振系统，在液态核磁共振量子计算中，要实现对大型自旋系统的可扩展、高保真控制颇具挑战；一种可能的解决方案是转向固态核磁共振。至于基于NV中心的量子比特，还需进一步发展确定且可控的NV中心制备方法，同时保持其相干时间。

对于所有量子计算平台，还应仔细考虑可扩展量子计算通常面临的开销，例如串扰、量子门加热和频率拥挤。随着量子比特数量不断增加，要实现高保真度的多量子比特控制，就必须采用整合高保真度控制技术的方法，例如能够抑制误差以及多量子比特间串扰的动态解耦方案；同时，系统规模应不断扩大，而不损害控制质量。通过融合为量子计算开发的技术，我们或许还能提升量子计量和量子模拟的性能。除了技术层面的

进步以应对这些挑战外，整合多个量子平台的努力也可能至关重要，从而能够利用不同平台的优势服务于未来应用。例如，计算、通信和存储任务可以分配给不同单元。此外，混合量子-经典算法的发展对于开发近程量子计算机的“杀手级应用”也至关重要。恰当地整合不同的量子平台以及经典与量子计算，或许能在实际应用中带来显著优势。

未来，中等规模量子系统有望取得重大突破，例如实现容错量子操作和量子算法。量子化学、量子机器学习等领域的应用也有望实现量子优势。未来的发展还可能包括专用量子机器、量子云，以及量子计算系统在量子传感和模拟中的应用。最后，随着量子平台朝着完全可扩展的容错量子计算方向发展，我们期待量子计算将在现实世界中涌现出广泛的应用。

致谢

感谢 Fei Yan 对超导量子比特部分所作的贡献，并感谢与 Xiaodong He 进行的宝贵讨论；感谢 Chao-Yang Lu、Andrea Morello 和 Lieven M. K. Vandersypen 提供宝贵意见，也感谢 Jiasheng Mai 对图表进行润色。本工作得到中国国家自然科学基金（项目编号：U1801661、12174178、11905098、12204228、12004165、11875159、12075110、92065111、12275117、11905099、11975117、12004164、62174076、92165210、11904157、11661161018、11927811、12004371）、国家重点研发计划（项目编号：2019YFA0308100 和 2018YFA0306600）、广东省重点领域研发计划（2018B030326001）、广东省创新创业研究团队计划（2016ZT06D348、2019ZT08C044）、广东省重点实验室（2019B121203002）、广东省基础与应用基础研究基金（项目编号：2021B1515020070 和 2022B1515020074）、广东省自然科学基金（2017B030308003）、深圳市科技创新委员会（项目编号：KYT-DPT20181011104202253、KQTD20210811090049034、K21547502、ZDSYS20190902092905285、KQTD20190929173815000、KQTD20200820113010023、JCYJ20200109140803865、JCYJ20170412152620376）、深圳市科技计划（RCBS20200714114820298、RCYX20200714114522109）、深港科技创新合作区（HZQB-KCZYB-2020050）、安徽省量子信息技术专项（项目编号：AHY050000）、量子科学与技术创新计划（项目编号：2021ZD0303205）、香港研究资助局（GRF 编号：14308019）、香港中文大学研究战略基金计划（编号：3133234）的支持。F.N. 部分获得以下资助：日本电信电话株式会社（NTT）Research、日本科学技术振兴机构（JST） [通过量子飞跃旗舰计划（Q-LEAP）以及登月研发计划资助编号 JPMJMS2061], 日本学术振兴会（JSPS） [通过科学研究费补助金（KAKENHI）项目编号 JP20H00134], 亚洲航空航天研究与发展办公室（AOARD）（项目编号 FA2386-20-1-4069），以及基础问题研究所基金（FQXi）（项目编号 FQXi-IAF19-06）。

作者贡献M.-H.Y.、Y.H.、X.-H.D.、J.L.、D.L.、B.-C.L.、P.H. 和 Y.L. 撰写了摘要和引言。M.-H.Y. 和 B.C. 撰写了量子算法部分。X.G.、Y.Z. 和 F.N. 撰写了超导量子比特部分。Y.L. 撰写了囚禁离子量子比特部分。Y.H.、P. H. 和 G.H. 撰写了半导体自旋量子比特部分。D.L. 和 C.Q. 撰写了NV中心部分。J.L.、T.X. 和 X.-H.P. 撰写了核磁共振系统部分。S.Y. 撰写了中性原子阵列部分。H.W. 撰写了光子量子计算部分。X.-H.D.、P.H.、Y.H. 和 M.-H.Y. 撰写了展望和结论。X.-H.D.、P.H.、J.Z.、S.Z.、F.N. 和 D.Y. 根据其他所有作者的意见修订了稿件。D.Y. 负责监督本综述项目。

XI. 参考文献

[1] P. Benioff，J. Stat. Phys. **22**，563（1980）。[2] R. P. Feynman，Int. J. Theor. Phys. **21**，467（1982）。[3] Y. I. Manin，Sov.Radio.，13（1980）。[4] P. Shor，载于第*35*届计算机科学基础年度研讨会论文集（IEEE计算机学会出版社，圣菲，NM，美国，1994），第124–134页。[5]M. A. Nielsen 和 I. L. Chuang，量子计算与量子信息（剑桥大学出版社，2000年）。[6] J. I. Cirac 和 P. Zoller，《物理评论快报》**74**，4091（1995）。[7] D. G. Cory、A. F. Fahmy 和 T. F. Havel，Proc. Natl.

Acad. Sci. U. S. A. 94，1634（1997）。[8] N. A. Gershenfeld 和 I. L. Chuang，《科学》275，350（1997）。[9] D. G. Cory、M. D. Price 和 T. F. Havel，Phys. D: Non-linear Phenom. 120，82（1998）。[10] B. E. Kane，《自然》393，133（1998）。[11] D. Loss 和 D. P. DiVincenzo，《物理评论A》57，120（1998）。[12] Y. Nakamura、Y. A. Pashkin 和 J. S. Tsai，《自然》398，786（1999）。[13] F. Arute、K. Arya、R. Babbush、D. Bacon、J. C. Bardin、R. Barends、R. Biswas、S. Boixo、F. G. S. L. Brandao 等，《自然》574，505（2019）。[14] Y. Wu、W.-S. Bao、S. Cao、F. Chen、M.-C. Chen、X. Chen、T.-H. Chung、H. Deng、Y. Du 等，《物理评论快报》127，180501（2021）。[15] Q. Zhu、S. Cao、F. Chen、M.-C. Chen、X. Chen、T.-H. Chung、H. Deng、Y. Du、D. Fan 等，《科学通报》67，240 2022( )。[16] H.-S. Zhong、H. Wang、Y.-H. Deng、M.-C. Chen、L.-C. Peng、Y.-H. Luo、J. Qin、D. Wu、X. Ding 等，《科学》370，1460（2020）。[17] H.-S. Zhong、Y.-H. Deng、J. Qin、H. Wang、M.-C. Chen、L.-C. Peng、Y.-H. Luo、D. Wu、S.-Q. Gong 等，《物理评论快报》127，180502（2021）。[18] L. S. Madsen、F. Laudenbach、M. F. Askarani、F. Rortais、T. Vincent、J. F. Bulmer、F. M. Miatto、L. Neuhaus、L. G. Helt 等，《自然》606，75（2022）。[19] M. W. Johnson、M. H. Amin、S. Gildert、T. Lanting、F. Hamze、N. Dickson、R. Harris、A. J. Berkley、J. Johansson 等，《自然》473，194（2011）。[20] S. Krinner、N. Lacroix、A. Remm、A. Di Paolo、E. Genois、C. Leroux、C. Hellings、S. Lazar、F. Swiadek 等，《自然》605，669（2022）。[21] Z. Chen、K. J. Satzinger、J. Atalaya、A. N. Korotkov、A. Dunsworth、D. Sank、C. Quintana、M. McEwen、R. Barends 等，《自然》595，383（2021）。[22] C. K. Andersen、A. Remm、S. Lazar、S. Krinner、N. Lacroix、G. J. Norris、M. Gabureac、C. Eichler 和 A. Wallraff，《自然·物理》16，875（2020）。[23] Y. Zhao、Y. Ye、H.-L. Huang、Y. Zhang、D. Wu、H. Guan、Q. Zhu、Z. Wei、T. He 等，《物理评论快报》129，030501（2022）。[24] J. F. Marques、B. M. Varbanov、M. S. Moreira、H. Ali、N. Muthusubramanian、C. Zachariadis、F. Battistel、M. Beekman、N. Haider 等，《自然·物理》18，80（2022）。[25] F. van Riggelen、W. I. L. Lawrie、M. Russ、N. W. Hendrickx、A. Sammak、M. Rispler、B. M. Terhal、G. Scappucci 和 M. Veldhorst，“半导体自旋量子比特的相位翻转码”，arXiv: 2202.11530（2022）。[26] K. Takeda、A. Noiri、T. Nakajima、T. Kobayashi 和 S. Tarucha，《自然》608，682（2022）。[27] G. Waldherr、Y. Wang、S. Zaiser、M. Jamali、T. Schulte-Herbrüggen、H. Abe、T. Ohshima、J. Isoya、J. F. Du 等，《自然》506，204（2014）。[28] T. H. Taminiau、J. Cramer、T. van der Sar、V. V. Dobrovitski 和 R. Hanson，《自然·纳米技术》9，171（2014）。[29] M. Abobeih、Y. Wang、J. Randall、S. Loenen、C. Bradley、M. Markham、D. Twitchen、B. Terhal 和 T. Taminiau，《自然》606，884（2022）。[30] I. Buluta 和 F. Nori，《科学》326，108（2009）。[31] I. M. Georgescu、S. Ashhab 和 F. Nori，《现代物理评论》86，153（2014）。[32] J. Argüello-Luengo、A. González-Tudela、T. Shi、P. Zoller 和 J. I. Cirac，《自然》574，215（2019年）。[33] W. Hofstetter 和 T. Qin，《物理学杂志B：原子、分子与光学物理》51，082001（2018年）。[34] R. Barends、J. Kelly、A. Megrant、A. Veitia、D. Sank、E. Jeffrey、T. C. White、J. Mutus、A. G. Fowler 等，《自然》508，500（2014年）。[35] J. Preskill，《Quantum》2，79（2018年）。[36] K. Bharti、A. Cervera-Lierta、T. H. Kyaw、T. Haug、S. Alperin-Lea、A. Anand、M. Degroote、H. Heimonen、J. S. Kottmann、T. Menke、W.-K. Mok、S. Sim、L.- C. Kwek 和 A. Aspuru-Guzik，《现代物理评论》94，015004 2022( )。[37] A. Peruzzo、J. McClean、P. Shadbolt、M.-H. Yung、X.- Q. Zhou、P. J. Love、A. Aspuru-Guzik 和 J. L. O’Brien，《自然·通讯》5，4213（2014年）。[38] K. Bharti、A. Cervera-Lierta、T. H. Kyaw、T. Haug、S. Alperin-Lea、A. Anand、M. Degroote、H. Heimonen、J. S. Kottmann、T. Menke、W.-K. Mok、S. Sim、L.- C. Kwek 和 A. Aspuru-Guzik，《现代物理评论》94，015004 2022( )。[39] A. W. Harrow、A. Hassidim 和 S. Lloyd，《物理评论快报》103，150502（2009年）。[40] N.-H. Chia、A. Gilyén、T. Li、H.-H. Lin、E. Tang 和 C. Wang，载于《第52届ACM SIGACT计算理论年会论文集》，STOC 2020（美国计算机协会，纽约，纽约州，美国，2020年），第387–400页。[41] E. R. MacQuarrie、C. Simon、S. Simmons 和 E. Maine，《自然·物理评论》2，596（2020年）。[42] G. Donati，《自然·物理评论》3，226（2021年）。[43] Y. Alexeev、D. Bacon、K. R. Brown、R. Calderbank、L. D. Carr、F. T. Chong、B. DeMarco、D. Englund、E. Farhi 等，PRX Quantum 2，017001（2021年）。[44] D. P. DiVincenzo、D. Bacon、J. Kempe、G. Burkard 和 K. B. Whaley，《自然》408，339（2000年）。[45] A. Das 和 B. K. Chakrabarti，《现代物理评论》80，1061 2008( )。[46] S. R. Elliott 和 M. Franz，《现代物理评论》87，137（2015年）。[47] E. Prada、P. San-Jose、M. W. A. de Moor、A. Geresdi、E. J. H. Lee、J. Klinovaja、D. Loss、J. Nygård、R. Aguado 和 L. P. Kouwenhoven，《自然·物理评论》2，575（2020年）。[48] D. Deutsch，《伦敦皇家学会会刊A辑》400，97（1985年）。[49] D. Deutsch 和 R. Jozsa，《伦敦皇家学会会刊A辑》439，553 1992( )。[50] E. Bernstein 和 U. Vazirani，载于《第25届ACM计算理论年会论文集》，STOC ’93（计算机协会，纽约，纽约州，美国，1993年），第11–20页。[51] D. Simon，载于《第35届计算机科学基础年度研讨会论文集》（IEEE计算机学会出版社，圣菲，新墨西哥州，美国，1994年），第116–123页。[52] R. Cleve、A. Ekert、C. Macchiavello 和 M. Mosca，《伦敦皇家学会会刊A辑》454，339（1998年）。[53] A. Y. Kitaev，“量子测量与阿贝尔稳定子问题”，arXiv: quant-ph/9511026（1995）。[54] R. Jozsa，《伦敦皇家学会会刊A辑》454，323（1998年）。[55] L. K. Grover，载于《第28届ACM计算理论年会论文集》（1996年），第212–219页。[56] L. K. Grover，《物理评论快报》79，325（1997年）。[57] C. H. Bennett、E. Bernstein、G. Brassard 和 U. Vazi-

rani，《SIAM计算杂志》26，1510（1997年）。[58] G. Brassard 和 P. Hoyer，载于《第五届以色列计算理论与系统研讨会论文集》（IEEE计算机学会，拉马特甘，以色列，1997年），第12– 23页。[59] M. Boyer、G. Brassard、P. Hoeyer 和 A. Tapp，Fortschr. Phys. 46，493（1998年）。[60] G. Brassard、P. Høyer、M. Mosca 和 A. Tapp，载于《当代数学》第305卷，由 S. J. Lomonaco 和 H. E. Brandt 编（美国数学学会，普罗维登斯，罗得岛州，2002年），第53–74页。[61] L. K. Grover，《物理评论快报》95，150501（2005年）。[62] L. K. Grover、A. Patel 和 T. Tulsi，“带固定点的量子算法：数据库搜索问题”，arXiv: quant-ph/0603132（2006年）。[63] T. J. Yoder、G. H. Low 和 I. L. Chuang，《物理评论快报》113，210501（2014年）。[64] C. Durr 和 P. Hoyer，“寻找最小值的量子算法”，arXiv: quant-ph/9607014（1996年）。[65] E. Novak，《复杂性杂志》17，2（2001年）。[66] G. Brassard、P. Høyer 和 A. Tapp，载于《国际自动机、语言与程序设计专题讨论会》（施普林格，1998年），第820–831页。[67] C. Dürr、M. Heiligman、P. HOyer 和 M. Mhalla，《SIAM计算杂志》35，1310（2006年）。[68] A. Ambainis 和 R. Špalek，载于《计算机科学理论方面年度研讨会》（施普林格，2006年），第172–183页。[69] E. Farhi 和 S. Gutmann，《物理评论A》58，915（1998年）。[70] A. M. Childs、E. Farhi 和 S. Gutmann，《量子信息处理》1，35（2002年）。[71] A. M. Childs、R. Cleve、E. Deotto、E. Farhi、S. Gut- mann 和 D. A. Spielman，载于《第三十五届ACM计算理论研讨会论文集 - STOC ’03》（ACM 出版社，圣迭戈，加利福尼亚州，美国，2003年），第59页。[72] Y. Aharonov、L. Davidovich 和 N. Zagury，《物理评论A》48，1687（1993年）。[73] D. A. Meyer，《J. Stat. Phys.》85，551（1996年）。[74] D. A. Meyer，《物理快报 A》223，337（1996年）。[75] J. Watrous，载于《第十四届 IEEE 计算复杂性年度会议论文集》（前身为：复杂性理论中的结构会议）（编号：Cat.No.99CB36317）（IEEE计算机学会，亚特兰大，佐治亚州，美国，1999年），第180–187页。[76] N. Ashwin 和 V. Ashvin，“直线上的量子游走”，arXiv: quant-ph/0010117（2000年）。[77] A. Ambainis、E. Bach、A. Nayak、A. Vishwanath 和 J. Watrous，载于《第三十三届ACM年度计算理论研讨会论文集 - STOC ’01》（ACM 出版社，赫索尼索斯，希腊，2001年），第37–49页。[78] D. Aharonov、A. Ambainis、J. Kempe 和 U. Vazirani，载于《第三十三届ACM年度计算理论研讨会论文集 - STOC ’01》（ACM 出版社，赫索尼索斯，希腊，2001年），第50–59页。[79] N. Shenvi、J. Kempe 和 K. B. Whaley，《物理评论A辑》第67卷，052307（2003年）。[80] A. Ambainis，载于《第45届 IEEE 计算机科学基础年会》（IEEE，罗马，意大利，2004年），第22–31页。[81] S. Yaoyun，载于《第43届IEEE计算机科学基础年度研讨会》，2002年。论文集。（IEEE计算机学会，温哥华，不列颠哥伦比亚省，加拿大，2002年），第513–519页。[82] A. Ambainis、J. Kempe 和 A. Rivosh，载于《论文集

载于第十六届 ACM-SIAM 离散算法研讨会论文集，SODA ’05（工业与应用数学学会，温哥华，不列颠哥伦比亚省，2005年），第 1099–1108 页。[83] M. Szegedy，载于第45届 IEEE 计算机科学基础研讨会论文集（IEEE，罗马，意大利，2004年），第 32–41 页。[84] F. Magniez、A. Nayak、J. Roland 和 M. Santha，载于第39届 ACM 计算理论年会论文集——STOC ’07（ACM 出版社，圣迭戈，加利福尼亚州，美国，2007），第 575 页。[85] A. Ambainis，《国际量子信息杂志》1，507（2003年）。[86] M. Santha，载于第5届计算模型理论与应用国际会议论文集，TAMC’08（施普林格出版社，柏林、海德堡，2008），第 31–46 页。[87] F. Magniez、M. Santha 和 M. Szegedy，载于第十六届 ACM-SIAM 离散算法研讨会论文集，SODA ’05（工业与应用数学学会，美国，2005），第 1109–1117 页。[88] F. Magniez 和 A. Nayak，载于第32届自动机、语言与程序设计国际会议论文集，ICALP’05（施普林格出版社，柏林、海德堡，2005），第 1312–1324 页。[89] S. Lloyd，《科学》273，1073（1996年）。[90] M. Suzuki，《物理快报 A》146，319（1990年）。[91] M. Suzuki，《数学物理杂志》32，400（1991年）。[92] D. Aharonov 和 A. Ta-Shma，载于第三十五届ACM计算理论研讨会论文集——STOC ’03（ACM 出版社，圣迭戈，加利福尼亚州，美国，2003），第 20 页。[93] D. W. Berry、G. Ahokas、R. Cleve 和 B. C. Sanders，《数学物理通讯》270，359（2007）。[94] A. M. Childs 和 R. Kothari，载于《量子计算、通信与密码学理论》第 6519 卷（施普林格，柏林、海德堡，2011年），第 94–103 页。[95] A. M. Childs，《数学物理通讯》294，581（2010年）。[96] A. M. Childs 和 D. W. Berry，《量子信息与计算》12，29（2012年）。[97] A. M. Childs 和 N. Wiebe，《量子信息与计算》12，901 2012( )。[98] D. W. Berry、A. M. Childs、R. Cleve、R. Kothari 和 R. D. Somma，载于第46届 ACM 计算理论年会论文集——STOC ’14（ACM 出版社，2014），第 283–292 页。[99] D. W. Berry、A. M. Childs、R. Cleve、R. Kothari 和 R. D. Somma，《物理评论快报》114（2015年）。[100] D. W. Berry、A. M. Childs 和 R. Kothari，载于2015年 IEEE 第56届计算机科学基础年会论文集（IEEE，伯克利，加利福尼亚州，美国，2015），第 792–809 页。[101] G. H. Low、T. J. Yoder 和 I. L. Chuang，《物理评论X》6，041067（2016年）。[102] G. H. Low 和 I. L. Chuang，《物理评论快报》118，010501 2017( )。[103] G. H. Low 和 I. L. Chuang，《Quantum》3，163（2019年）。[104] G. H. Low 和 I. L. Chuang，《通过均匀谱放大进行哈密顿量模拟》，arXiv: 1707.05391（2017）。[105] A. Gilyén、Y. Su、G. H. Low 和 N. Wiebe，载于第 51 届 ACM SIGACT 计算理论年会论文集（2019），第 193–204 页。[106] J. M. Martyn、Z. M. Rossi、A. K. Tan 和 I. L. Chuang，PRX Quantum 2，040203（2021年）。

[107] A. M. Childs、Y. Su、M. C. Tran、N. Wiebe 和 S. Zhu，《物理评论X》11，011020（2021年）。[108] S. Lloyd、M. Mohseni 和 P. Rebentrost，《用于监督式和无监督式机器学习的量子算法》，arXiv: 1307.0411（2013年）。[109] S. Lloyd、M. Mohseni 和 P. Rebentrost，《自然·物理》10，631（2014年）。[110] P. Rebentrost、M. Mohseni 和 S. Lloyd，《物理评论快报》113，130503（2014年）。[111] N. Wiebe、D. Braun 和 S. Lloyd，《物理评论快报》109，050505（2012年）。[112] J. Biamonte、P. Wittek、N. Pancotti、P. Rebentrost、N. Wiebe 和 S. Lloyd，《自然》549，195（2017年）。[113] S. Aaronson，《自然·物理》11，291（2015年）。[114] E. Tang，载于第51届 ACM SIGACT 计算理论年会论文集（美国计算机协会，菲尼克斯，亚利桑那州，美国，2019），第 217–228 页。[115] I. Kerenidis 和 A. Prakash，载于第8届理论计算机科学创新会议（ITCS 2017）（Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik，2017）。[116] E. Tang，《物理评论快报》127，060503（2021年）。[117] A. Gilyén、S. Lloyd 和 E. Tang，《维度对数依赖的量子启发式低秩随机回归》，arXiv: 1811.04909（2018年）。[118] N.-H. Chia、H.-H. Lin 和 C. Wang，《用于求解低秩线性系统的量子启发式次线性经典算法》，arXiv: 1811.04852（2018年）。[119] N.-H. Chia、T. Li、H.-H. Lin 和 C. Wang，《通过采样方法求解低秩半定规划的量子启发式经典次线性时间算法》，arXiv: 1901.03254（2019年）。[120] D. S. Abrams 和 S. Lloyd，《物理评论快报》79，2586（1997年）。[121] D. S. Abrams 和 S. Lloyd，《物理评论快报》83，5162（1999年）。[122] E. Farhi、J. Goldstone、S. Gutmann 和 M. Sipser，《通过绝热演化实现量子计算》，arXiv: quant-ph/0001106（2000年）。[123] E. Farhi、J. Goldstone 和 S. Gutmann，《一种量子近似优化算法》，arXiv: 1411.4028（2014年）。[124] E. Farhi 和 H. Neven，《近期处理器上的量子神经网络分类》，arXiv: 1802.06002（2018年）。[125] V. Havlíček、A. D. Córcoles、K. Temme、A. W. Harrow、A. Kandala、J. M. Chow 和 J. M. Gambetta，《自然》567，209（2019年）。[126] S. Lloyd 和 C. Weedbrook，《物理评论快报》121，040502 2018( )。[127] P.-L. Dallaire-Demers 和 N. Killoran，《物理评论A》98，012324 2018( )。[128] Y. Wu、W.-S. Bao、S. Cao、F. Chen、M.-C. Chen、X. Chen、T.-H. Chung、H. Deng、Y. Du 等，《物理评论快报》127，180501（2021年）。[129] H.-S. Zhong、H. Wang、Y.-H. Deng、M.-C. Chen、L.-C. Peng、Y.-H. Luo、J. Qin、D. Wu、X. Ding 等，《科学》370，1460（2020年）。[130] B. Bauer、S. Bravyi、M. Motta 和 G. K.-L. Chan，《化学评论》120，12685（2020年）。[131] P. S. Emani、J. Warrell、A. Anticevic、S. Bekiranov、M. Gandal、M. J. McConnell、G. Sapiro、A. Aspuru-Guzik、J. T. Baker 等，《自然·方法》18，701（2021年）。[132] A. Khoshaman、W. Vinci、B. Denis、E. Andriyash、H. Sadeghi 和 M. H. Amin，《量子科学与技术》4，014001（2018）。[133] K. Temme、S. Bravyi 和 J. M. Gambetta，《物理评论快报》119，180509（2017）。[134] Y. Li 和 S. C. Benjamin，《物理评论X》7，021050（2017）。[135] S. Endo、Z. Cai、S. C. Benjamin 和 X. Yuan，《日本物理学会杂志》90，032001（2021）。[136] S. Endo、S. C. Benjamin 和 Y. Li，《物理评论X》8，031027 2018( )。[137] A. Strikis、D. Qin、Y. Chen、S. C. Benjamin 和 Y. Li，PRX Quantum 2，040330（2021）。[138] I. Buluta、S. Ashhab 和 F. Nori，《物理学进展报告》74，104401（2011）。[139] L. Hu、S.-H. Wu、W. Cai、Y. Ma、X. Mu、Y. Xu、H. Wang、Y. Song、D.-L. Deng 等，《科学进展》5，2761（2019）。[140] M. P. Harrigan、K. J. Sung、M. Neeley、K. J. Satzinger、F. Arute、K. Arya、J. Atalaya、J. C. Bardin、R. Barends 等，《自然·物理》17，332（2021）。[141] B. Yan、Z. Tan、S. Wei、H. Jiang、W. Wang、H. Wang、L. Luo、Q. Duan、Y. Liu、W. Shi、Y. Fei、X. Meng、Y. Han、Z. Shan、J. Chen、X. Zhu、C. Zhang、F. Jin、H. Li、C. Song、Z. Wang、Z. Ma、H. Wang 和 G.-L. Long，arXiv: 2212.12372（2022），2212.12372。[142] A. A. Houck、H. E. Türeci 和 J. Koch，《自然·物理》8，292 2012( )。[143] P. D. Nation、J. R. Johansson、M. P. Blencowe 和 F. Nori，《现代物理评论》84，1（2012）。[144] R. Barends、L. Lamata、J. Kelly、L. García-Álvarez、A. G. Fowler、A. Megrant、E. Jeffrey、T. C. White、D. Sank 等，《自然·通讯》6，7654（2015）。[145] Y. Salathé、M. Mondal、M. Oppliger、J. Heinsoo、P. Kurpiers、A. Potočnik、A. Mezzacapo、U. Las Heras、L. Lamata 等，《物理评论X》5，021027（2015）。[146] N. K. Langford、R. Sagastizabal、M. Kounalakis、C. Dickel、A. Bruno、F. Luthi、D. J. Thoen、A. Endo 和 L. DiCarlo，《自然·通讯》8，1715（2017）。[147] D. W. Wang、C. Song、W. Feng、H. Cai、D. Xu、H. Deng、H. Li、D. Zheng、X. Zhu 等，《自然·物理》15，382（2019）。[148] A. J. Kollár、M. Fitzpatrick 和 A. A. Houck，《自然》571，45（2019）。[149] C. S. Wang、J. C. Curtis、B. J. Lester、Y. Zhang、Y. Y. Gao、J. Freeze、V. S. Batista、P. H. Vaccaro、I. L. Chuang 等，《物理评论X》10，021060（2020）。[150] M. Gong、S. Wang、C. Zha、M.-C. Chen、H.-L. Huang、Y. Wu、Q. Zhu、Y. Zhao、S. Li 等，《科学》372，948（2021）。[151] A. D. King、S. Suzuki、J. Raymond、A. Zucca、T. Lant- ing、F. Altomare、A. J. Berkley、S. Ejtemaee、E. Hoskin- son、S. Huang、E. Ladizinsky、A. J. R. MacDonald、G. Marsden、T. Oh、G. Poulin-Lamarre、M. Reis、C. Rich、Y. Sato、J. D. Whittaker、J. Yao、R. Harris、D. A. Lidar、H. Nishimori 和 M. H. Amin，《自然·物理》18，1324（2022）。[152] P. J. J. O’Malley、R. Babbush、I. D. Kivlichan、J. Romero、J. R. McClean、R. Barends、J. Kelly、P. Roushan、A. Tranter 等，《物理评论X》6，031007（2016）。[153] A. Kandala、A. Mezzacapo、K. Temme、M. Takita、M. Brink、J. M. Chow 和 J. M. Gambetta，《自然》549，242（2017）。[154] J. I. Colless、V. V. Ramasesh、D. Dahlen、M. S. Blok、

M. E. Kimchi-Schwartz、J. R. McClean、J. Carter、W. A. De Jong 和 I. Siddiqi，《物理评论X》8，11021（2018）。[155] AI Quantum Google，《科学》369，1084（2020）。[156] P. Roushan、C. Neill、J. Tangpanitanon、V. M. Bastidas、A. Megrant、R. Barends、Y. Chen、Z. Chen、B. Chiaro 等，《科学》358，1175（2017）。[157] R. Ma、B. Saxberg、C. Owens、N. Leung、Y. Lu、J. Si- mon 和 D. I. Schuster，《自然》566，51（2019）。[158] K. Xu、Z.-H. Sun、W. Liu、Y.-R. Zhang、H. Li、H. Dong、W. Ren、P. Zhang、F. Nori 等，《科学进展》6，eaba4935（2020）。[159] Q. Guo、C. Cheng、Z.-H. Sun、Z. Song、H. Li、Z. Wang、W. Ren、H. Dong、D. Zheng 等，《自然·物理》17，234（2021）。[160] X. Mi、M. Ippoliti、C. Quintana、A. Greene、Z. Chen、J. Gross、F. Arute、K. Arya、J. Atalaya 等，《自然》601，531（2022）。[161] X. Zhang、W. Jiang、J. Deng、K. Wang、J. Chen、P. Zhang、W. Ren、H. Dong、S. Xu 等，《自然》607，468 2022( )。[162] P. Forn-Díaz、J. J. García-Ripoll、B. Peropadre、J. L. Orgiazzi、M. A. Yurtalan、R. Belyansky、C. M. Wilson 和 A. Lupascu，《自然·物理》13，39（2017）。[163] F. Yoshihara、T. Fuse、S. Ashhab、K. Kakuyanagi、S. Saito 和 K. Semba，《自然·物理》13，44（2017）。[164] S. J. Bosman、M. F. Gely、V. Singh、A. Bruno、D. Both- ner 和 G. A. Steele，《npj量子信息》3，46（2017）。[165] A. Frisk Kockum、A. Miranowicz、S. De Liberato、S. Savasta 和 F. Nori，《自然·物理评论》1，19（2019）。[166] W. Wang、Y. Wu、Y. Ma、W. Cai、L. Hu、X. Mu、Y. Xu、Z.-J. Chen、H. Wang 等，《自然·通讯》10，4382（2019）。[167] K. Xu、Y.-R. Zhang、Z.-H. Sun、H. Li、P. Song、Z. Xi- ang、K. Huang、H. Li、Y.-H. Shi、C.-T. Chen、X. Song、D. Zheng、F. Nori、H. Wang 和 H. Fan，《物理评论快报》128，150501（2022）。[168] A. Potočnik、A. Bargerbos、F. A. Y. N. Schröder、S. A. Khan、M. C. Collodo、S. Gasparinetti、Y. Salathé、C. Creatore、C. Eichler 等，《自然·通讯》9，904（2018）。[169] J. Q. You 和 F. Nori，《自然》474，589（2011）。[170] H. Paik、D. I. Schuster、L. S. Bishop、G. Kirchmair、G. Catelani、A. P. Sears、B. R. Johnson、M. J. Reagor、L. Frunzio 等，《物理评论快报》107，240501（2011）。[171] R. Barends、J. Kelly、A. Megrant、D. Sank、E. Jeffrey、Y. Chen、Y. Yin、B. Chiaro、J. Mutus 等，《物理评论快报》111，080502（2013）。[172] Y. Zhong、H.-S. Chang、A. Bienfait、É. Dumur、M.-H. Chou、C. R. Conner、J. Grebel、R. G. Povey、H. Yan 等，《自然》590，571（2021）。[173] M. H. devoret 和 J. M. Martinis，《Quantum Inf. Pro- cess.》3，163（2004）。[174] J. Q. You 和 F. Nori，《今日物理》58，42（2005）。[175] J. Clarke 和 F. K. Wilhelm，《自然》453，1031（2008）。[176] R. J. Schoelkopf 和 S. M. Girvin，《自然》451，664（2008）。[177] Z.-L. Xiang、S. Ashhab、J. Q. You 和 F. Nori，《现代物理评论》85，623（2012），arXiv:1204.2137。[178] S. M. Girvin，《电路量子电动力学：与微波光子耦合的超导量子比特》（牛津大学出版社，2014）。[179] U. Vool 和 M. Devoret，《Int. J. Circuit Theory Appl.》45，897（2017）。[180] X. Gu、A. F. Kockum、A. Miranowicz、Y.-x. Liu 和 F. Nori，《物理报告》718-719，1（2017年）。[181] J. M. Gambetta、J. M. Chow 和 M. Steffen，《npj量子信息》3，2（2017年）。[182] G. Wendin，《物理学报告》80，106001（2017年）。[183] P. Krantz、M. Kjaergaard、F. Yan、T. P. Orlando、S. Gustavsson 和 W. D. Oliver，《应用物理评论》6，021318（2019年）。[184] A. F. Kockum 和 F. Nori，“基于约瑟夫森结的量子比特”，载于《约瑟夫森效应的基础与前沿》（施普林格国际出版公司，尚，2019年），第703–741页。[185] M. Kjaergaard、M. E. Schwartz、J. Braumüller、P. Krantz、J. I.-J. Wang、S. Gustavsson 和 W. D. Oliver，《凝聚态物理年度评论》11，369（2020年）。[186] H.-L. Huang、D. Wu、D. Fan 和 X. Zhu，《中国科学：信息科学》63，180501（2020年）。[187] A. Blais、A. L. Grimsmo、S. Girvin 和 A. Wallraff，《现代物理评论》93，025005（2021年）。[188] S. Rasmussen、K. Christensen、S. Pedersen、L. Kris- tensen、T. Bækkegaard、N. Loft 和 N. Zinner，PRX Quantum 2，040204（2021年），arXiv:2103.01225。[189] N. P. de Leon、K. M. Itoh、D. Kim、K. K. Mehta、T. E. Northup、H. Paik、B. S. Palmer、N. Samarth、S. Sangtawesin 和 D. W. Steuerman，《科学》372，eabb2823（2021年）。[190] S. Kwon、A. Tomonaga、G. Lakshmi Bhai、S. J. Devitt 和 J.-S. Tsai，《应用物理学杂志》129，041102（2021年）。[191] M. H. Devoret，《电路中的量子涨落》，莱乌什第63届会议（牛津大学出版社，1997年）。[192] M. Tinkham，《超导概论》（Courier Corporation，2004年）。[193] V. Bouchiat、D. Vion、P. Joyez、D. Esteve 和 M. H. Devoret，《物理学文摘》1998，165（1998年）。[194] T. P. Orlando、J. E. Mooij、L. Tian、C. H. van der Wal、L. S. Levitov、S. Lloyd 和 J. J. Mazo，《物理评论B》60，15398（1999年）。[195] J. E. Mooij、T. P. Orlando、L. Levitov、L. Tian、C. H. van der Wal 和 S. Lloyd，《科学》285，1036（1999年）。[196] J. M. Martinis，《量子信息处理》8，81（2009年）。[197] C. H. van der Wal、A. C. J. ter Haar、F. K. Wilhelm、R. N. Schouten、C. J. P. M. Harmans、T. P. Orlando、S. Lloyd 和 J. E. Mooij，《科学》290，773（2000年）。[198] J. R. Friedman、V. Patel、W. Chen、S. K. Tolpygo 和 J. E. Lukens，《自然》406，43（2000年）。[199] J. M. Martinis、S. Nam、J. Aumentado 和 C. Urbina，《物理评论快报》89，117901（2002年）。[200] Y. Yu、S. Han、X. Chu、S.-I. Chu 和 Z. Wang，《科学》296，889（2002年）。[201] T. Yamamoto、Y. A. Pashkin、O. Astafiev、Y. Naka- mura 和 J. S. Tsai，《自然》425，941（2003年）。[202] I. Chiorescu、Y. Nakamura、C. J. P. M. Harmans 和 J. E. Mooij，《科学》299，1869（2003年）。[203] A. J. Berkley、H. Xu、R. C. Ramos、M. A. Gubrud、F. W. Strauch、P. R. Johnson、J. R. Anderson、A. J. Dragt、C. J. Lobb 等，《科学》300，1548（2003年）。[204] A. Wallraff、D. I. Schuster、A. Blais、L. Frunzio、R.-S. Huang、J. Majer、S. Kumar、S. M. Girvin 和 R. J. Schoelkopf，《自然》431，162（2004年）。[205] W. D. Oliver、Y. Yu、J. C. Lee、K. K. Berggren、L. S. Levitov 和 T. P. Orlando，《科学》310，1653（2005年）。[206] M. Steffen、M. Ansmann、R. C. Bialczak、N. Katz、E. Lucero

，R. McDermott ，M. Neeley ，E. M. Weig ，A. N.

Cleland，和 J. M. Martinis，《科学》313，1423（2006年）。[207] D. I. Schuster，A. A. Houck，J. A. Schreier，A. Wall- raff，J. M. Gambetta，A. Blais，L. Frunzio，J. Majer，B. Johnson 等，《自然》445，515（2007）。[208] M. A. Sillanpää，J. I. Park 和 R. W. Simmonds，《自- 然》449，438（2007）。[209] J. Koch，T. M. Yu，J. Gambetta，A. A. Houck，D. I. Schuster，J. Majer，A. Blais，M. H. Devoret，S. M. Girvin 等，《物理评论A》76，042319（2007）。[210] J. Q. You，X. Hu，S. Ashhab 和 F. Nori，《物理评论B》75，140515（2007）。[211] J. A. Schreier，A. A. Houck，J. Koch，D. I. Schuster，B. R. Johnson，J. M. Chow，J. M. Gambetta，J. Majer，L. Frunzio 等，《物理评论B》77，180502（2008）。[212] J. Braumüller，M. Sandberg，M. R. Vissers，A. Schnei- der，S. Schlör，L. Grünhaupt，H. Rotzinger，M. Marthaler，A. Lukashenko 等，《应用物理快报》108，032601（2016年）。[213] M. Hutchings，J. Hertzberg，Y. Liu，N. Bronn，G. Keefe，M. Brink，J. M. Chow 和 B. Plourde，《物理评论应用》8，044003（2017年）。[214] M. Steffen，S. Kumar，D. P. DiVincenzo，J. R. Rozen，G. A. Keefe，M. B. Rothwell 和 M. B. Ketchen，《物理评论快报》105，100502（2010年）。[215] F. Yan，S. Gustavsson，A. Kamal，J. Birenbaum，A. P. Sears，D. Hover，T. J. Gudmundsen，D. Rosenberg，G. Samach 等，《自然·通讯》7，12964（2016年）。[216] J. Ku，X. Xu，M. Brink，D. C. McKay，J. B. Hertzberg，M. H. Ansari 和 B. Plourde，《物理评论快报》125，200504 2020( )。[217] F. Yan，Y. Sung，P. Krantz，A. Kamal，D. K. Kim，J. L. Yoder，T. P. Orlando，S. Gustavsson 和 W. D. Oliver，“优化超导量子比特设计的工程框架”，arXiv：2006.04130（2020年）。[218] V. E. Manucharyan，J. Koch，L. I. Glazman 和 M. H. Devoret，《科学》326，113（2009年）。[219] L. B. Nguyen，Y.-H. Lin，A. Somoroff，R. Mencia，N. Grabon 和 V. E. Manucharyan，《物理评论X》9，041041 2019( )。[220] H. Zhang，S. Chakram，T. Roy，N. Earnest，Y. Lu，Z. Huang，D. Weiss，J. Koch 和 D. I. Schuster，《物理评论X》11，011010（2021年）。[221] F. Bao，H. Deng，D. Ding，R. Gao，X. Gao，C. Huang，X. Jiang，H.-S. Ku，Z. Li 等，《物理评论快报》129，010502 2022( )。[222] A. Gyenis，P. S. Mundada，A. Di Paolo，T. M. Hazard，X. You，D. I. Schuster，J. Koch，A. Blais 和 A. A. Houck，PRX Quantum 2，010339（2021年）。[223] J. Q. You 和 F. Nori，《物理评论B》68，064509（2003年），arXiv：0306207 [凝聚态物理]。[224] A. Blais，R.-S. Huang，A. Wallraff，S. M. Girvin 和 R. J. Schoelkopf，《物理评论A》69，062320（2004年）。[225] M. D. Reed，B. R. Johnson，A. A. Houck，L. DiCarlo，J. M. Chow，D. I. Schuster，L. Frunzio 和 R. J. Schoelkopf，《应用物理快报》96，203110（2010年）。[226] E. Jeffrey，D. Sank，J. Mutus，T. White，J. Kelly，R. Barends，Y. Chen，Z. Chen，B. Chiaro 等，《物理评论快报》112，190504（2014年）。[227] N. T. Bronn，Y. Liu，J. B. Hertzberg，A. D. Córcoles，A. A. Houck，J. M. Gambetta 和 J. M. Chow，《应用物理快报》107，172601（2015年）。[228] T. Walter，P. Kurpiers，S. Gasparinetti，P. Mag- nard，A. Potočnik，Y. Salathé，M. Pechal，M. Mondal，M. Oppliger，C. Eichler 和 A. Wallraff，《物理评论应用》7，054020（2017年）。[229] B. Yurke、L. R. Corruccini、P. G. Kaminsky、L. W. Rupp、A. D. Smith、A. H. Silver、R. W. Simon 和 E. A. Whittaker，《物理评论A》39，2519（1989年）。[230] R. Vijay、M. H. Devoret 和 I. Siddiqi，《科学仪器评论》80，111101（2009年）。[231] A. Roy 和 M. Devoret，《物理报告》17，740（2016年）。[232] I. Siddiqi、R. Vijay、F. Pierre、C. M. Wilson、M. Metcalfe、C. Rigetti、L. Frunzio 和 M. H. Devoret，《物理评论快报》93，207002（2004年）。[233] M. A. Castellanos-Beltran、K. D. Irwin、G. C. Hilton、L. R. Vale 和 K. W. Lehnert，《自然·物理》4，929（2008年）。[234] T. Yamamoto、K. Inomata、M. Watanabe、K. Matsuba、T. Miyazaki、W. D. Oliver、Y. Nakamura 和 J. S. Tsai，《应用物理快报》93，042510（2008年）。[235] J. R. Johansson、G. Johansson、C. M. Wilson 和 F. Nori，《物理评论快报》103，147003（2009年）。[236] N. Bergeal、F. Schackert、M. Metcalfe、R. Vijay、V. E. Manucharyan、L. Frunzio、D. E. Prober、R. J. Schoelkopf、S. M. Girvin 和 M. H. Devoret，《自然》465，64（2010年）。[237] C. Macklin、K. O’Brien、D. Hover、M. E. Schwartz、V. Bolkhovsky、X. Zhang、W. D. Oliver 和 I. Siddiqi，《科学》350，307（2015年）。[238] Y. Chen、D. Sank、P. O’Malley、T. White、R. Barends、B. Chiaro、J. Kelly、E. Lucero、M. Mariantoni 等，《应用物理快报》101，182601（2012年）。[239] S. S. Elder、C. S. Wang、P. Reinhold、C. T. Hann、K. S. Chou、B. J. Lester、S. Rosenblum、L. Frunzio 等，《物理评论X》10，011001（2020年）。[240] A. Opremcak、I. V. Pechenezhskiy、C. Howington、B. G. Christensen、M. A. Beck、E. Leonard、J. Suttle、C. Wilen、K. N. Nesterov 等，《科学》361，1239（2018年）。[241] D. Ristè、J. G. van Leeuwen、H.-S. Ku、K. W. Lehnert 和 L. DiCarlo，《物理评论快报》109，050507（2012年）。[242] K. Geerlings、Z. Leghtas、I. M. Pop、S. Shankar、L. Frunzio、R. J. Schoelkopf、M. Mirrahimi 和 M. H. Devoret，《物理评论快报》110，120501（2013年）。[243] P. Magnard、P. Kurpiers、B. Royer、T. Walter、J.-C. Besse、S. Gasparinetti、M. Pechal、J. Heinsoo、S. Storz 等，《物理评论快报》121，060502（2018年）。[244] M. McEwen、D. Kafri、Z. Chen、J. Atalaya、K. Satzinger、C. Quintana、P. V. Klimov、D. Sank、C. Gidney、A. Fowler 等，《自然·通讯》12，1（2021年）。[245] Y. Zhou、Z. Zhang、Z. Yin、S. Huai、X. Gu、X. Xu、J. Allcock、F. Liu、G. Xi 等，《自然·通讯》12，5924（2021年）。[246] F. Motzoi、J. M. Gambetta、P. Rebentrost 和 F. K. Wilhelm，《物理评论快报》103，110501（2009年）。[247] J. M. Gambetta、F. Motzoi、S. T. Merkel 和 F. K. Wilhelm，《物理评论A》83，012308（2011年）。[248] D. C. McKay、C. J. Wood、S. Sheldon、J. M. Chow 和 J. M. Gambetta，《物理评论A》96，022330（2017年）。[249] E. Leonard、M. A. Beck、J. Nelson、B. Christensen、T. Thorbeck、C. Howington、A. Opremcak、I. Pechenezhskiy、K. Dodge 等，《物理评论应用》11，014009（2019年）。[250] J. Majer、J. M. Chow、J. M. Gambetta、J. Koch、B. R. Johnson、J. A. Schreier、L. Frunzio、D. I. Schuster、A. A. Houck 等，《自然》449，443（2007）。[251] R. C. Bialczak、M. Ansmann、M. Hofheinz、E. Lucero、

M. Neeley、A. D. O’Connell、D. Sank、H. Wang、J. Wenner 等，《自然·物理》6，409（2010年）。[252] F. W. Strauch、P. R. Johnson、A. J. Dragt、C. J. Lobb、J. R. Anderson 和 F. C. Wellstood，《物理评论快报》91，167005（2003年）。[253] L. DiCarlo、J. M. Chow、J. M. Gambetta、L. S. Bishop、B. R. Johnson、D. I. Schuster、J. Majer、A. Blais、L. Frunzio 等，《自然》460，240（2009年）。[254] J. M. Martinis 和 M. R. Geller，《物理评论A》90，022307（2014年）。[255] R. Barends、C. Quintana、A. Petukhov、Y. Chen、D. Kafri、K. Kechedzhi、R. Collins、O. Naaman、S. Boixo 等，《物理评论快报》123，210501（2019年）。[256] S. Li、A. D. Castellano、S. Wang、Y. Wu、M. Gong、Z. Yan、H. Rong、H. Deng 等，《npj量子信息》5，1（2019年）。[257] M. Rol、F. Battistel、F. Malinowski、C. Bultink、B. Tarasinski、R. Vollmer、N. Haider、N. Muthusubramanian、A. Bruno 等，《物理评论快报》123，120502（2019年）。[258] J. M. Chow、A. D. Córcoles、J. M. Gambetta、C. Rigetti、B. R. Johnson、J. A. Smolin、J. R. Rozen、G. A. Keefe、M. B. Rothwell 等，《物理评论快报》107，080502（2011年）。[259] S. Sheldon、E. Magesan、J. M. Chow 和 J. M. Gambetta，《物理评论A》93，060302（2016年）。[260] H. Paik、A. Mezzacapo、M. Sandberg、D. McClure、B. Abdo、A. Córcoles、O. Dial、D. Bogorin、B. Plourde 等，《物理评论快报》117，250502（2016年）。[261] D. C. McKay、S. Filipp、A. Mezzacapo、E. Magesan、J. M. Chow 和 J. M. Gambetta，《物理评论应用》6，064007（2016年）。[262] S. A. Caldwell、N. Didier、C. A. Ryan、E. A. Sete、A. Hudson、P. Karalekas、R. Manenti、M. P. da Silva、R. Sinclair 等，《物理评论应用》10，034050（2018年）。[263] C. Song、K. Xu、H. Li、Y.-R. Zhang、X. Zhang、W. Liu、Q. Guo、Z. Wang、W. Ren 等，《科学》365，574（2019年）。[264] T. Hime、P. A. Reichardt、B. L. T. Plourde、T. L. Robertson、C.-E. Wu、A. V. Ustinov 和 J. Clarke，《科学》314，1427（2006年）。[265] A. O. Niskanen、K. Harrabi、F. Yoshihara、Y. Nakamura、S. Lloyd 和 J. S. Tsai，《科学》316，723（2007）。[266] S. H. W. van der Ploeg、A. Izmalkov、A. M. van den Brink、U. Hübner、M. Grajcar、E. Il’ichev、H.-G. Meyer 和 A. M. Zagoskin，《物理评论快报》98，057004（2007）。[267] R. Harris、A. J. Berkley、M. W. Johnson、P. Bunyk、S. Govorkov、M. C. Thom、S. Uchaikin、A. B. Wilson、J. Chung 等，《物理评论快报》98，177001（2007）。[268] T. Yamamoto、M. Watanabe、J. Q. You、Y. A. Pashkin、O. Astafiev、Y. Nakamura、F. Nori 和 J. S. Tsai，《物理评论B》77，64505（2008年），arXiv:0802.0353。[269] Y. Chen、C. Neill、P. Roushan、N. Leung、M. Fang、R. Barends、J. Kelly、B. Campbell、Z. Chen 等，《物理评论快报》113，220502（2014年）。[270] S. J. Weber、G. O. Samach、D. Hover、S. Gustavsson、D. K. Kim、A. Melville、D. Rosenberg、A. P. Sears、F. Yan 等，《物理评论应用》8，014004（2017年）。[271] Y. Lu、S. Chakram、N. Leung、N. Earnest、R. Naik、Z. Huang、P. Groszkowski、E. Kapit、J. Koch 和 D. I. Schuster，《物理评论快报》119，150502（2017年）。[272] F. Yan、P. Krantz、Y. Sung、M. Kjaergaard、D. L. Campbell、T. P. Orlando、S. Gustavsson 和 W. D. Oliver，《物理评论应用》**10**，054062（2018年）。[273] P. Mundada、G. Zhang、T. Hazard 和 A. Houck，《物理评论应用》12，054023（2019年）。[274] V. Negîrneac、H. Ali、N. Muthusubramanian、F. Battis- tel、R. Sagastizabal、M. S. Moreira、J. F. Marques、W. J. Vlothuizen、M. Beekman、C. Zachariadis、N. Haider、A. Bruno 和 L. DiCarlo，《物理评论快报》126，220502（2021年）。[275] B. Foxen、C. Neill、A. Dunsworth、P. Roushan、B. Chiaro、A. Megrant、J. Kelly、Z. Chen、K. Satzinger 等，《物理评论快报》125，120504（2020年）。[276] X. Li、T. Cai、H. Yan、Z. Wang、X. Pan、Y. Ma、W. Cai、J. Han、Z. Hua 等，《物理评论应用》14，024070（2020年）。[277] M. C. Collodo、J. Herrmann、N. Lacroix、C. K. An- dersen、A. Remm、S. Lazar、J.-C. Besse、T. Walter、A. Wallraff 和 C. Eichler，《物理评论快报》125，240502（2020年）。[278] Y. Xu、J. Chu、J. Yuan、J. Qiu、Y. Zhou、L. Zhang、X. Tan、Y. Yu、S. Liu 等，《物理评论快报》125，240503（2020年）。[279] Y. Sung、L. Ding、J. Braumüller、A. Vepsäläinen、B. Kannan、M. Kjaergaard、A. Greene、G. O. Samach、C. McNally 等，《物理评论X》11，021058（2021年）。[280] J. Stehlik、D. Zajac、D. Underwood、T. Phung、J. Blair、S. Carnevale、D. Klaus、G. Keefe、A. Carniol 等，《物理评论快报》127，080505（2021年）。[281] C. C. Bultink、B. Tarasinski、N. Haandbæk、S. Poletto、N. Haider、D. J. Michalak、A. Bruno 和 L. DiCarlo，《应用物理快报》112，092601（2018年）。[282] A. P. M. Place、L. V. H. Rodgers、P. Mundada、B. M. Smitham、M. Fitzpatrick、Z. Leng、A. Premkumar、J. Bryon、A. Vrajitoarea 等，《自然·通讯》12，1779（2021年）。[283] A. Somoroff、Q. Ficheux、R. A. Mencia、H. Xiong、R. V. Kuzmin 和 V. E. Manucharyan，arXiv：2103.08578（2021年）。[284] C. Wang、X. Li、H. Xu、Z. Li、J. Wang、Z. Yang、Z. Mi、X. Liang、T. Su 等，《npj量子信息》8，1（2022年）。[285] C. Müller、J. H. Cole 和 J. Lisenfeld，《物理学报告》82，124501（2019年）。[286] P. Klimov、J. Kelly、Z. Chen、M. Neeley、A. Megrant、B. Burkett、R. Barends、K. Arya、B. Chiaro 等，《物理评论快报》121，090502（2018年）。[287] S. Schlör、J. Lisenfeld、C. Müller、A. Bilmes、A. Schnei- der、D. P. Pappas、A. V. Ustinov 和 M. Weides，《物理评论快报》123，190502（2019年）。[288] J. J. Burnett、A. Bengtsson、M. Scigliuzzo、D. Niepce、M. Kudra、P. Delsing 和 J. Bylander，《npj量子信息》5，1（2019年）。[289] T. Proctor、M. Revelle、E. Nielsen、K. Rudinger、D. Lob- ser、P. Maunz、R. Blume-Kohout 和 K. Young，《自然·通讯》11，5396（2020年）。[290] S. E. de Graaf、L. Faoro、L. B. Ioffe、S. Mahashabde、J. J. Burnett、T. Lindström、S. E. Kubatkin、A. V. Danilov 和 A. Y. Tzalenchuk，《科学进展》6，eabc5055（2020年）。[291] D. Suter 和 G. A. Álvarez，《现代物理评论》88，041001（2016年）。[292] E. Paladino、Y. Galperin、G. Falci 和 B. Altshuler，《现代物理评论》86，361（2014年）。[293] J. Bylander、S. Gustavsson、F. Yan、F. Yoshihara、K. Harrabi、G. Fitch、D. G. Cory、Y. Nakamura、J.-S. Tsai 和 W. D. Oliver，《自然·物理》7，565（2011年）。[294] F. Yan，J. Bylander，S. Gustavsson，F. Yoshihara，

K. Harrabi, D. G. Cory, T. P. Orlando, Y. Nakamura, J.-S. Tsai 和 W. D. Oliver, 《物理评论B》 85, 174521 (2012年). [295] F. Yan, S. Gustavsson, J. Bylander, X. Jin, F. Yoshi- hara, D. G. Cory, Y. Nakamura, T. P. Orlando 和 W. D. Oliver, 《自然·通讯》 4, 2337 (2013年). [296] F. Yoshihara, Y. Nakamura, F. Yan, S. Gustavsson, J. Bylander, W. D. Oliver 和 J.-S. Tsai, 《物理评论B》 89, 020503 (2014年). [297] C. Quintana, Y. Chen, D. Sank, A. Petukhov, T. White, D. Kafri, B. Chiaro, A. Megrant, R. Barends 等, 《物理评论快报》 118, 057702 (2017年). [298] Y. Sung, F. Beaudoin, L. M. Norris, F. Yan, D. K. Kim, J. Y. Qiu, U. von Lüpke, J. L. Yoder, T. P. Orlando 等, 《自然·通讯》 10, 3715 (2019年). [299] F. T. Chong, D. Franklin 和 M. Martonosi, 《自然》 549, 180 (2017年). [300] D. M. Abrams, N. Didier, B. R. Johnson, M. P. d. Silva 和 C. A. Ryan, 《自然·电子学》 3, 744 (2020年). [301] X. Gu, J. Fernández-Pendás, P. Vikstål, T. Abad, C. Warren, A. Bengtsson, G. Tancredi, V. Shumeiko, J. Bylander 等, PRX Quantum 2, 040348 (2021年). [302] C. Song, S.-B. Zheng, P. Zhang, K. Xu, L. Zhang, Q. Guo, W. Liu, D. Xu, H. Deng 等, 《自然·通讯》 8, 1061 (2017年). [303] Y. Kim, A. Morvan, L. B. Nguyen, R. K. Naik, C. Jünger, L. Chen, J. M. Kreikebaum, D. I. Santiago 和 I. Siddiqi, 《自然·物理》 18, 783 (2022年). [304] J. Chu, X. He, Y. Zhou, J. Yuan, L. Zhang, Q. Guo, Y. Hai, Z. Han, C.-K. Hu 等, arXiv: 2112.14922 (2021年). [305] A. G. Fowler, M. Mariantoni, J. M. Martinis 和 A. N. Cleland, 《物理评论A》 86, 032324 (2012年). [306] A. Cleland, SciPost Physics Lecture Notes 49, 49 (2022年). [307] S. Krinner, N. Lacroix, A. Remm, A. Di Paolo, E. Genois, C. Leroux, C. Hellings, S. Lazar, F. Swiadek 等, 《自然》 605, 669 (2022年). [308] Y. Zhao, Y. Ye, H.-L. Huang, Y. Zhang, D. Wu, H. Guan, Q. Zhu, Z. Wei, T. He 等, 《物理评论快报》 129, 030501 (2022年). [309] R. Acharya, I. Aleiner, R. Allen, T. I. Andersen, M. Ans- mann, F. Arute, K. Arya, A. Asfaw, J. Atalaya, R. Bab- bush 等, arXiv: 2207.06431 (2022年). [310] A. P. Vepsäläinen, A. H. Karamlou, J. L. Orrell, A. S. Dogra, B. Loer, F. Vasconcelos, D. K. Kim, A. J. Melville, B. M. Niedzielski, J. L. Yoder 等, 《自然》 584, 551 (2020年). [311] M. McEwen, L. Faoro, K. Arya, A. Dunsworth, T. Huang, S. Kim, B. Burkett, A. Fowler, F. Arute 等, 《自然·物理》 18, 107 (2022年). [312] C. D. Wilen, S. Abdullah, N. A. Kurinsky, C. Stanford, L. Cardani, G. D'Imperio, C. Tomei, L. Faoro, L. B. Ioffe, C. H. Liu 等, 《自然》 594, 369 (2021年). [313] B. M. Terhal, J. Conrad 和 C. Vuillot, 《量子科学与技术》 5, 043001 (2020年). [314] A. Joshi, K. Noh 和 Y. Y. Gao, 《量子科学与技术》 6, 033001 (2021年). [315] W. Cai, Y. Ma, W. Wang, C.-L. Zou 和 L. Sun, 《基础研究》 1, 50 (2021年). [316] C. Wang, Y. Y. Gao, P. Reinhold, R. W. Heeres, N. Ofek, K. Chou, C. Axline, M. Reagor, J. Blumoff 等, 《科学》 352, 1087 (2016年). [317] N. Ofek, A. Petrenko, R. Heeres, P. Reinhold, Z. Legh- tas

，B. Vlastakis ，Y. Liu ，L. Frunzio ，S. M. Girvin ，等人。

《自然》536, 441 (2016)。[318] S. Puri, L. St-Jean, J. A. Gross, A. Grimm, N. E. Frat- tini, P. S. Iyer, A. Krishna, S. Touzard, L. Jiang 等, 《科学进展》6, 1 (2020)。[319] A. Grimm, N. E. Frattini, S. Puri, S. O. Mundhada, S. Touzard, M. Mirrahimi, S. M. Girvin, S. Shankar 和 M. H. Devoret, 《自然》584, 205 (2020)。[320] J. M. Gertler, B. Baker, J. Li, S. Shirol, J. Koch 和 C. Wang, 《自然》590, 243 (2021)。[321] M. H. Michael, M. Silveri, R. T. Brierley, V. V. Albert, J. Salmilehto, L. Jiang 和 S. M. Girvin, 《物理评论X》6, 031006 (2016)。[322] L. Hu, Y. Ma, W. Cai, X. Mu, Y. Xu, W. Wang, Y. Wu, H. Wang, Y. P. Song 等, 《自然·物理》15, 503 (2019)。[323] D. Gottesman, A. Kitaev 和 J. Preskill, 《物理评论A》64, 12310 (2001)。[324] A. L. Grimsmo 和 S. Puri, PRX Quantum 2, 1 (2021)。[325] P. Campagne-Ibarcq, A. Eickbusch, S. Touzard, E. Zalys-Geller, N. E. Frattini, V. V. Sivak, P. Reinhold, S. Puri, S. Shankar 等, 《自然》584, 368 (2020)。[326] B. de Neeve, T.-L. Nguyen, T. Behrle 和 J. P. Home, 《自然 · 物理》 18, 296 (2022)。[327] B. Royer, S. Singh 和 S. M. Girvin, 《物理评论快报》125, 260509 (2020)。[328] J. I.-J. Wang, M. A. Yamoah, Q. Li, A. H. Karam- lou, T. Dinh, B. Kannan, J. Braumüller, D. Kim, A. J. Melville 等, 《自然·材料》21, 398 (2022)。[329] H. Mamin, E. Huang, S. Carnevale, C. Rettner, N. Arel- lano, M. Sherwood, C. Kurter, B. Trimm, M. Sandberg 等, 《物理评论应用》16, 024023 (2021)。[330] R. Zhao, S. Park, T. Zhao, M. Bal, C. McRae, J. Long 和 D. Pappas, 《物理评论应用》14, 064006 (2020)。[331] D. Rosenberg, D. Ki m, R. Das, D. Yost, S. Gustavsson, D. Hover, P. Krantz, A. Melville, L. Racz 等, 《npj量子信息》3, 1 (2017)。[332] B. Foxe n, J. Y. Mutus, E. Lucero, R. Graff, A. Megrant, Y. Chen, C. Quintana, B. Burkett, J. Kelly 等, 《量子科学与技术》3, 014005 (2017)。[333] J. Rahamim, T. Behrle, M. J. Peterer, A. Patterson, P. A. Spring, T. Tsunoda, R. Manenti, G. Tancredi 和 P. J. Leek, 《应用物理快报》110, 222602 (2017)。[334] C. R. Conner, A. Bienfait, H.-S. Chang, M.-H. Chou, É. Dumur, J. Grebel, G. A. Peairs, R. G. Povey, H. Yan 等, 《应用物理快报》118, 232602 (2021)。[335] S. Kosen, H.-X. Li, M. Rommel, D. Shiri, C. Warren, L. Grönberg, J. Salonen, T. Abad, J. Biznárová 等, 《量子科学与技术》7, 035018 (2022)。[336] M. Vahidpour, W. O' Brien, J. T. Whyland, J. Ange- les, J. Marshall, D. Scarabelli, G. Crossman, K. Yadav, Y. Mohan, C. Bui 等, arXiv: 1708.02226 (2017)。[337] D. R. W. Yost, M. E. Schwartz, J. Mallek, D. Rosenberg, C. Stull, J. L. Yoder, G. Calusine, M. Cook, R. Das 等, 《npj量子信息》6, 1 (2020)。[338] K. Grigoras, N. Yurttagül, J.-P. Kaikkonen, E. Mannila, P. Eskelinen, D. Lozano, H.-X. Li, M. Rommel, D. Shiri, N. Tiencken 等, arXiv: 2201.10425 (2022)。[339] S. Asaad, C. Dickel, N. K. Langford, S. Poletto, A. Bruno, M. A. Rol, D. Deurloo 和 L. DiCarlo, 《npj量子信息》2, 1 (2016)。[340] R. Manenti, E. A. Sete, A. Q. Chen, S. Kulshreshtha, J.-H. Yeh, F. Oruc, A. Bestwick, M. Field, K. Jackson 和 S. Poletto, 《应用物理快报》119, 144001 (2021)。[341] D. Awschalom, K. K. Berggren, H. Bernien, S. Bhave, L. D. Carr

，P. Davids ，S. E. Economou ，D. Englund ，

A. Faraon 等，PRX Quantum 2, 017002 (2021年)。[342] L. Jiang, J. M. Taylor, A. S. Sørensen 和 M. D. Lukin，《物理评论A》76, 062323 (2007)。[343] H. J. Kimble，《自然》453, 1023 (2008)。[344] K. S. Chou, J. Z. Blumoff, C. S. Wang, P. C. Reinhold, C. J. Axline, Y. Y. Gao, L. Frunzio, M. H. Devoret, L. Jiang 和 R. J. Schoelkopf，《自然》561, 368 (2018年)。[345] N. LaRacuente, K. N. Smith, P. Imany, K. L. Silverman 和 F. T. Chong，arXiv: 2201.08825 (2022年)。[346] P. Kurpiers, P. Magnard, T. Walter, B. Royer, M. Pechal, J. Heinsoo, Y. Salathé, A. Akin, S. Storz 等，《自然》558, 264 (2018年)。[347] C. J. Axline, L. D. Burkhart, W. Pfaff, M. Zhang, K. Chou, P. Campagne-Ibarcq, P. Reinhold, L. Frun- zio, S. M. Girvin 等，《自然·物理》14, 705 (2018年)。[348] P. Campagne-Ibarcq, E. Zalys-Geller, A. Narla, S. Shankar, P. Reinhold, L. Burkhart, C. Axline, W. Pfaff, L. Frunzio 等，《物理评论快报》120, 200501 (2018年)。[349] N. Leung, Y. Lu, S. Chakram, R. K. Naik, N. Earnest, R. Ma, K. Jacobs, A. N. Cleland 和 D. I. Schuster，《npj量子信息》5, 1 (2019年)。[350] P. Magnard, S. Storz, P. Kurpiers, J. Schär, F. Marxer, J. Lütolf, T. Walter, J.-C. Besse, M. Gabureac 等，《物理评论快报》125, 260502 (2020年)。[351] L. D. Burkhart, J. D. Teoh, Y. Zhang, C. J. Axline, L. Frunzio, M. Devoret, L. Jiang, S. Girvin 和 R. Schoelkopf，PRX Quantum 2, 030321 (2021年)。[352] A. Gold, J. P. Paquette, A. Stockklauser, M. J. Reagor, M. S. Alam, A. Bestwick, N. Didier, A. Nersisyan, F. Oruc 等，《npj量子信息》7, 1 (2021年)。[353] J. M. Kreikebaum, K. P. O'Brien, A. Morvan 和 I. Siddiqi，Supercond. Sci. Technol. 33, 06LT02 (2020 年)。[354] J. B. Hertzberg, E. J. Zhang, S. Rosenblatt, E. Magesan, J. A. Smolin, J.-B. Yau, V. P. Adiga, M. Sandberg, M. Brink 等，《npj量子信息》7, 1 (2021年)。[355] E. J. Zhang, S. Srinivasan, N. Sundaresan, D. F. Bo- gorin, Y. Martin, J. B. Hertzberg, J. Timmerwilke, E. J. Pritchett, J.-B. Yau 等，《科学进展》8, eabi6690 (2022年)。[356] H. Kim, C. Jünger, A. Morvan, E. S. Barnard, W. P. Livingston, M. Altoé, Y. Kim, C. Song, L. Chen, J. M. Kreikebaum 等，arXiv: 2206.03099 (2022年)。[357] S. Krinner, S. Storz, P. Kurpiers, P. Magnard, J. Hein- soo, R. Keller, J. Lütolf, C. Eichler 和 A. Wallraff，EPJ Quantum Technol. 6, 1 (2019年)。[358] J. C. Bardin, E. Jeffrey, E. Lucero, T. Huang, S. Das, D. T. Sank, O. Naaman, A. E. Megrant, R. Barends 等，IEEE J. Solid-State Circuits 54, 3043 (2019年)。[359] B. Patra, J. P. G. van Dijk, S. Subramanian, A. Corna, X. Xue, C. Jeon, F. Sheikh, E. Juarez-Hernandez, B. P. Esparza 等，载于 IEEE 国际固态电路会议 (2020年)，第304–306页。[360] S. J. Pa uka, K. Das, R. Kalra, A. Moini, Y. Yang, M. Trainer, A. Bousquet, C. Cantaloube, N. Dick 等，《自然·电子学》4, 64 (2021年)。[361] E. A. Sete, A. Q. Chen, R. Manenti, S. Kulshreshtha 和 S. Poletto，《物理评论应用》15, 064063 (2021年)。[362] A. Dunsworth, R. Barends, Y. Chen, Z. Chen, B. Chiaro, A. Fowler, B. Foxen, E. Jeffrey, J. Kelly 等，《应用物理快报》112, 063502 (2018年)。[363] P. Zhao, P. Xu, D. Lan, J. Chu, X. Tan, H. Yu 和 Y. Yu，《物理评论快报》125, 200503 (2020年)。[364] A. Kandala, K. Wei, S. Srinivasan, E. Magesan, S. Carnevale, G. Keefe, D. Klaus, O. Dial 和

D. McKay，《物理评论快报》127，130501（2021年）。[365] S. Huang，B. Lienhard，G. Calusine，A. Vepsäläinen，J. Braumüller，D. K. Kim，A. J. Melville，B. M. Niedziel- ski，J. L. Yoder 等，PRX Quantum 2，020306（2021年）。[366] W. Nuerbolati，Z. Han，J. Chu，Y. Zhou，X. Tan，Y. Yu，S. Liu 和 F. Yan，《应用物理快报》120，174001（2022年）。[367] B. K. Mitchell，R. K. Naik，A. Morvan，A. Hashim，J. M. Kreikebaum，B. Marinelli，W. Lavrijsen，K. Nowrouzi，D. I. Santiago 和 I. Siddiqi，《物理评论快报》127，200502 2021（）。[368] T.-Q. Cai，X.-Y. Han，Y.-K. Wu，Y.-L. Ma，J.-H. Wang，Z.-L. Wang，H.-Y. Zhang，H.-Y. Wang，Y.-P. Song 和 L.-M. Duan，《物理评论快报》127，060505（2021年）。[369] D. Zajac，J. Stehlik，D. Underwood，T. Phung，J. Blair，S. Carnevale，D. Klaus，G. Keefe，A. Carniol，M. Kumph 等，arXiv：2108.11221（2021年）。[370] K. Wei，E. Magesan，I. Lauer，S. Srinivasan，D. Bogorin，S. Carnevale，G. Keefe，Y. Kim，D. Klaus 等，《物理评论快报》129，060501（2022年）。[371] Z. Ni，S. Li，L. Zhang，J. Chu，J. Niu，T. Yan，X. Deng，L. Hu，J. Li 等，《物理评论快报》129，040502（2022年）。[372] T. Harty，D. Allcock，C. J. Ballance，L. Guidoni，H. Janacek，N. Linke，D. Stacey 和 D. Lucas，《物理评论快报》113，220501（2014年）。[373] Y. Wang，M. Um，J. Zhang，S. An，M. Lyu，J.-N. Zhang，L.-M. Duan，D. Yum 和 K. Kim，《自然·光子学》11，646（2017年）。[374] P. Wang，C.-Y. Luan，M. Qiao，M. Um，J. Zhang，Y. Wang，X. Yuan，M. Gu，J. Zhang 和 K. Kim，《自然·通讯》12，1（2021年）。[375] R. Noek，G. Vrijsen，D. Gaultney，E. Mount，T. Kim，P. Maunz 和 J. Kim，《光学快报》38，4735（2013年）。[376] S. Crain，C. Cahall，G. Vrijsen，E. E. Wollman，M. D. Shaw，V. B. Verma，S. W. Nam 和 J. Kim，《通讯物理》2，1（2019年）。[377] J. P. Gaebler，T. R. Tan，Y. Lin，Y. Wan，R. Bowler，A. C. Keith，S. Glancy，K. Coakley，E. Knill，D. Leibfried 等，《物理评论快报》117，060505（2016年）。[378] C. Ballance，T. Harty，N. Linke，M. Sepiol 和 D. Lu- cas，《物理评论快报》117，060504（2016年）。[379] C. R. Clark，H. N. Tinkey，B. C. Sawyer，A. M. Meier，K. A. Burkhardt，C. M. Seck，C. M. Shappert，N. D. Guise，C. E. Volin，S. D. Fallek 等，《物理评论快报》127，130505（2021年）。[380] K. Wright，K. M. Beck，S. Debnath，J. Amini，Y. Nam，N. Grzesiak，J.-S. Chen，N. Pisenti，M. Chmielewski，C. Collins 等，《自然·通讯》10，1（2019年）。[381] I. Pogorelov，T. Feldker，C. D. Marciniak，L. Postler，G. Jacob，O. Krieglsteiner，V. Podlesnic，M. Meth，V. Negnevitsky，M. Stadler 等，PRX Quantum 2，020343 2021（）。[382] T. Monz，D. Nigg，E. A. Martinez，M. F. Brandl，P. Schindler，R. Rines，S. X. Wang，I. L. Chuang 和 R. Blatt，《科学》351，1068（2016年）。[383] C. Figgatt，D. Maslov，K. A. Landsman，N. M. Linke，S. Debnath 和 C. Monroe，《自然·通讯》8，1（2017年）。[384] K. Kim，M.-S. Chang，S. Korenblit，R. Islam，E. E. Edwards，J. K. Freericks，G.-D. Lin，L.-M. Duan 和 C. Monroe，《自然》465，590（2010年）。[385] P. Jurcevic，B. P. Lanyon，P. Hauke，C. Hempel，P. Zoller，R. Blatt 和 C. F. Roos，《自然》511，202（2014年）。[386] P. Richerme

M. Foss-Feig, S. Michalakis, A. V. Gorshkov 和 C. Monroe, 《自然》511, 198 (2014年)。[387] C. Senko, J. Smith, P. Richerme, A. Lee, W. Campbell 和 C. Monroe, 《科学》345, 430 (2014年)。[388] M. Gärttner, J. G. Bohnet, A. Safavi-Naini, M. L. Wall, J. J. Bollinger 和 A. M. Rey, 《自然·物理》13, 781 (2017年)。[389] J. Zhang, P. W. Hess, A. Kyprianidis, P. Becker, A. Lee, J. Smith, G. Pagano, I.-D. Potirniche, A. C. Potter, A. Vishwanath 等, 《自然》543, 217 (2017年)。[390] T. Brydges, A. Elben, P. Jurcevic, B. Vermersch, C. Maier, B. P. Lanyon, P. Zoller, R. Blatt 和 C. F. Roos, 《科学》364, 260 (2019年)。[391] C. Maier, T. Brydges, P. Jurcevic, N. Trautmann, C. Hempel, B. P. Lanyon, P. Hauke, R. Blatt 和 C. F. Roos, 《物理评论快报》122, 050501 (2019年)。[392] C. Monroe, W. C. Campbell, L.-M. Duan, Z.-X. Gong, A. V. Gorshkov, P. Hess, R. Islam, K. Kim, N. M. Linke, G. Pagano 等, 《现代物理评论》93, 025001 (2021年)。[393] R. Srinivas, S. Burd, H. Knaack, R. Sutherland, A. Kwiatkowski, S. Glancy, E. Knill, D. Wineland, D. Leibfried, A. C. Wilson 等, 《自然》597, 209 (2021年)。[394] H. Kaufmann, T. Ruster, C. T. Schmiegelow, M. A. Luda, V. Kaushal, J. Schulz, D. Von Lindenfels, F. Schmidt-Kaler 和 U. Poschinger, 《物理评论快报》119, 150503 (2017年)。[395] T. Manovitz, Y. Shapira, L. Gazit, N. Akerman 和 R. Ozeri, PRX Quantum 3, 010347 (2022年)。[396] M. Dietrich, N. Kurz, T. Noel, G. Shu 和 B. Blinov, 《物理评论A》81, 052328 (2010年)。[397] D. Hucul, J. E. Christensen, E. R. Hudson 和 W. C. Campbell, 《物理评论快报》119, 100501 (2017年)。[398] S. Weidt, J. Randall, S. Webster, K. Lake, A. Webb, I. Cohen, T. Navickas, B. Lekitsch, A. Retzker 和 W. Hensinger, 《物理评论快报》117, 220501 (2016年)。[399] Y. Lu, S. Zhang, K. Zhang, W. Chen, Y. Shen, J. Zhang, J.-N. Zhang 和 K. Kim, 《自然》572, 363 (2019年)。[400] Y. Wang, S. Crain, C. Fang, B. Zhang, S. Huang, Q. Liang, P. H. Leung, K. R. Brown 和 J. Kim, 《物理评论快报》125, 150505 (2020年)。[401] A. Myerson, D. Szwer, S. Webster, D. Allcock, M. Cur- tis, G. Imreh, J. Sherman, D. Stacey, A. Steane 和 D. Lucas, 《物理评论快报》100, 200502 (2008)。[402] S. Wölk, C. Piltz, T. Sriarunothai 和 C. Wunderlich, 《物理学杂志B：原子、分子与光学物理》48, 075101 (2015年)。[403] A. Seif, K. A. Landsman, N. M. Linke, C. Figgatt, C. Monroe 和 M. Hafezi, 《物理学杂志B：原子、分子与光学物理》51, 174006 (2018年)。[404] Z.-H. Ding, J.-M. Cui, Y.-F. Huang, C.-F. Li, T. Tu 和 G.-C. Guo, 《物理评论应用》12, 014038 (2019年)。[405] K. R. Brown, J. Kim 和 C. Monroe, 《npj量子信息》2, 1 (2016年)。[406] R. J. Niffenegger, J. Stuart, C. Sorace-Agaskar, D. Kha- ras, S. Bramhavar, C. D. Bruzewicz, W. Loh, R. T. Maxson, R. McConnell, D. Reens 等, 《自然》586, 538 2020( )。[407] S. L. Todaro, V. Verma, K. C. McCormick, D. Allcock, R. Mirin, D. J. Wineland, S. W. Nam, A. C. Wilson, D. Leibfried 和 D. Slichter, 《物理评论快报》126, 010501 2021( )。[408] W. Setzer, M. Ivory, O. Slobodyan, J. Van Der Wall, L. Parazzoli, D. Stick, M. Gehl, M. Blain, R. Kay 等, 《应用物理快报》119, 154002 (2021年)。

[409] D. Reens, M. Collins, J. Ciampi, D. Kharas, B. F. Aull, K. Donlon, C. D. Bruzewicz, B. Felton, J. Stuart, 等, 《物理评论快报》129, 100502（2022年）。[410] A. Bermudez, X. Xu, R. Nigmatullin, J. O'Gorman, V. Negnevitsky, P. Schindler, T. Monz, U. Poschinger, C. Hempel, J. Home, 等, 《物理评论X》7, 041061（2017年）。[411] A. Sørensen 和 K. Mølmer, 《物理评论快报》82, 1971（1999年）。[412] A. Sørensen 和 K. Mølmer, 《物理评论A》62, 022311（2000年）。[413] D. Jonathan 和 M. B. Plenio, 《物理评论快报》87, 127901（2001年）。[414] D. Leibfried, B. DeMarco, V. Meyer, D. Lucas, M. Bar- rett, J. Britton, W. M. Itano, B. Jelenković, C. Langer, T. Rosenband, 等, 《自然》422, 412（2003年）。[415] B. C. Sawyer 和 K. R. Brown, 《物理评论A》103, 022427（2021年）。[416] F. Mintert 和 C. Wunderlich, 《物理评论快报》87, 257904（2001年）。[417] C. Ospelkaus, C. E. Langer, J. M. Amini, K. R. Brown, D. Leibfried 和 D. J. Wineland, 《物理评论快报》101, 090502（2008）。[418] N. Timoney, I. Baumgart, M. Johanning, A. Varón, M. B. Plenio, A. Retzker 和 C. Wunderlich, 《自然》476, 185（2011年）。[419] S. Webster, S. Weidt, K. Lake, J. McLoughlin 和 W. Hensinger, 《物理评论快报》111, 140501（2013年）。[420] T. Harty, M. Sepiol, D. Allcock, C. Ballance, J. Tarlton 和 D. Lucas, 《物理评论快报》117, 140501（2016年）。[421] G. Zarantonello, H. Hahn, J. Morgner, M. Schulte, A. Bautista-Salvador, R. Werner, K. Hammerer 和 C. Ospelkaus, 《物理评论快报》123, 260503（2019年）。[422] B. Lekitsch, S. Weidt, A. G. Fowler, K. Mølmer, S. J. Devitt, C. Wunderlich 和 W. K. Hensinger, 《科学进展》3, e1601540（2017年）。[423] V. Schäfer, C. Ballance, K. Thirumalai, L. Stephenson, T. Ballance, A. Steane 和 D. Lucas, 《自然》555, 75（2018年）。[424] M. Sameti, J. Lishman 和 F. Mintert, 《物理评论A》103, 052603（2021年）。[425] J. J. García-Ripoll, P. Zoller 和 J. I. Cirac, 《物理评论快报》91, 157901（2003年）。[426] L.-M. Duan, 《物理评论快报》93, 100502（2004年）。[427] J. Mizrahi, C. Senko, B. Neyenhuis, K. Johnson, W. Campbell, C. Conover 和 C. Monroe, 《物理评论快报》110, 203001（2013年）。[428] J. Wong-Campos, S. Moses, K. Johnson 和 C. Mon- roe, 《物理评论快报》119, 230501（2017年）。[429] M. I. Hussain, D. Heinrich, M. Guevara-Bertsch, E. Tor- rontegui, J. J. García-Ripoll, C. F. Roos 和 R. Blatt, 《物理评论应用》15, 024054（2021年）。[430] S.-L. Zhu, C. Monroe 和 L.-M. Duan, 《欧洲物理快报》73, 485（2006年）。[431] S.-L. Zhu, C. Monroe 和 L.-M. Duan, 《物理评论快报》97, 050505（2006年）。[432] T. Choi, S. Debnath, T. Manning, C. Figgatt, Z.-X. Gong, L.-M. Duan 和 C. Monroe, 《物理评论快报》112, 190502（2014年）。[433] P. H. Leung, K. A. Landsman, C. Figgatt, N. M. Linke, C. Monroe 和 K. R. Brown, 《物理评论快报》120, 020501（2018年）。[434] T. J. Green 和 M. J. Biercuk, 《物理评论快报》114, 120502（2015年）。

[435] K. A. Landsman, Y. Wu, P. H. Leung, D. Zhu, N. M. Linke, K. R. Brown, L. Duan 和 C. Monroe, 《物理评论A》100, 022332（2019年）。[436] A. R. Milne, C. L. Edmunds, C. Hempel, F. Roy, S. Mavadia 和 M. J. Biercuk, 《物理评论应用》13, 024022（2020年）。[437] T. Monz, P. Schindler, J. T. Barreiro, M. Chwalla, D. Nigg, W. A. Coish, M. Harlander, W. Hänsel, M. Hennrich 和 R. Blatt, 《物理评论快报》106, 130506（2011年）。[438] S. Debnath, N. M. Linke, C. Figgatt, K. A. Landsman, K. Wright 和 C. Monroe, 《自然》536, 63（2016年）。[439] N. M. Linke, D. Maslov, M. Roetteler, S. Debnath, C. Figgatt, K. A. Landsman, K. Wright 和 C. Mon- roe, 《美国国家科学院院刊》114, 3305（2017年）。[440] S. S. Ivanov, P. A. Ivanov 和 N. V. Vitanov, 《物理评论A》91, 032311（2015年）。[441] E. A. Martinez, T. Monz, D. Nigg, P. Schindler 和 R. Blatt, 《新物理学杂志》18, 063029（2016年）。[442] D. Maslov 和 Y. Nam, 《新物理学杂志》20, 033018（2018年）。[443] D. Schwerdt, Y. Shapira, T. Manovitz 和 R. Ozeri, 《物理评论A》105, 022612（2022年）。[444] C. Figgatt, A. Ostrander, N. M. Linke, K. A. Landsman, D. Zhu, D. Maslov 和 C. Monroe, 《自然》572, 368（2019年）。[445] D. Kielpinski, C. Monroe 和 D. J. Wineland, 《自然》417, 709（2002年）。[446] V. Kaushal, B. Lekitsch, A. Stahl, J. Hilder, D. Pijn, C. Schmiegelow, A. Bermudez, M. Müller, F. Schmidt-Kaler 和 U. Poschinger, 《AVS量子科学》2, 014101（2020年）。[447] R. Bowler, J. Gaebler, Y. Lin, T. R. Tan, D. Hanneke, J. D. Jost, J. Home, D. Leibfried 和 D. J. Wineland, 《物理评论快报》109, 080502（2012年）。[448] A. Walther, F. Ziesel, T. Ruster, S. T. Dawkins, K. Ott, M. Hettrich, K. Singer, F. Schmidt-Kaler 和 U. Poschinger, 《物理评论快报》109, 080501（2012年）。[449] D. Stick, W. Hensinger, S. Olmschenk, M. Madsen, K. Schwab 和 C. Monroe, 《自然·物理》2, 36（2006年）。[450] S. Seidelin, J. Chiaverini, R. Reichle, J. J. Bollinger, D. Leibfried, J. Britton, J. Wesenberg, R. Blakestad, R. Epstein, 等, 《物理评论快报》96, 253003（2006年）。[451] K. Wright, J. M. Amini, D. L. Faircloth, C. Volin, S. C. Doret, H. Hayden, C. Pai, D. W. Landgren, D. Denison, 等, 《新物理学杂志》15, 033004（2013年）。[452] J. M. Amini, H. Uys, J. H. Wesenberg, S. Seidelin, J. Britton, J. J. Bollinger, D. Leibfried, C. Ospelkaus, A. P. VanDevender, 等, 《新物理学杂志》12, 033031（2010年）。[453] W. Hensinger, S. Olmschenk, D. Stick, D. Hucul, M. Yeo, M. Acton, L. Deslauriers, C. Monroe 和 J. Rabchuk, 《应用物理快报》88, 034101（2006年）。[454] Y. Wan, D. Kienzler, S. D. Erickson, K. H. Mayer, T. R. Tan, J. J. Wu, H. M. Vasconcelos, S. Glancy, E. Knill, D. J. Wineland, A. C. Wilson 和 D. Leibfried, 《科学》364, 875（2019年）。[455] J. M. Pino, J. M. Dreiling, C. Figgatt, J. P. Gaebler, S. A. Moses, M. Allman, C. Baldwin, M. Foss-Feig, D. Hayes, 等, 《自然》592, 209（2021年）。[456] Q. A. Turchette, D. Kielpinski, B. King, D. Leibfried, D. Meekhof, C. Myatt, M. Rowe, C. Sackett, C. Wood, W. Itano, 等, 《物理评论A》61, 063418（2000年）。[457] L. Deslauriers, S. Olmschenk, D. Stick, W. Hensinger, J. Sterk 和 C. Monroe, 《物理评论快报》97, 103007（2006年）。[458] I. A. Boldin, A. Kraft, and C. Wunderlich, 《物理评论快报》120, 023201 (2018年)。[459] J. H. Wesenberg, 《物理评论A》78, 063410 (2008)。[460] C. Monroe, R. Raussendorf, A. Ruthven, K. Brown, P. Maunz, L.-M. Duan, and J. Kim, 《物理评论A》89, 022317 2014( )。[461] D. Hucul, I. V. Inlek, G. Vittorini, C. Crocker, S. Deb- nath, S. M. Clark, and C. Monroe, 《自然·物理》11, 37 (2015年)。[462] L. Stephenson, D. Nadlinger, B. Nichol, S. An, P. Dr- mota, T. Ballance, K. Thirumalai, J. Goodwin, D. Lucas, et al., 《物理评论快报》124, 110501 (2020年)。[463] T. Kim, P. Maunz, and J. Kim, 《物理评论A》84, 063423 2011( )。[464] J. Hannegan, U. Saha, J. D. Siverns, J. Cassell, E. Waks, and Q. Quraishi, 《应用物理快报》119, 084001 (2021年)。[465] C. Ballance, V. Schäfer, J. P. Home, D. Szwer, S. C. Webster, D. Allcock, N. M. Linke, T. Harty, D. Aude Craik, et al., 《自然》528, 384 (2015年)。[466] A. Hughes, V. Schäfer, K. Thirumalai, D. Nadlinger, S. Woodrow, D. Lucas, and C. Ballance, 《物理评论快报》125, 080504 (2020年)。[467] I. V. Inlek, C. Crocker, M. Lichtman, K. Sosnova, and C. Monroe, 《物理评论快报》118, 250502 (2017年)。[468] P. Wang, J. Zhang, C.-Y. Luan, M. Um, Y. Wang, M. Qiao, T. Xie, J.-N. Zhang, A. Cabello, et al., 《科学进展》8, eabk1660 (2022年)。[469] V. Negnevitsky, M. Marinelli, K. K. Mehta, H.-Y. Lo, C. Flühmann, and J. P. Home, 《自然》563, 527 (2018年)。[470] D. Kielpinski, B. King, C. Myatt, C. A. Sackett, Q. Turchette, W. M. Itano, C. Monroe, D. J. Wineland, and W. H. Zurek, 《物理评论A》61, 032310 (2000年)。[471] M. D. Barrett, B. DeMarco, T. Schaetz, V. Meyer, D. Leibfried, J. Britton, J. Chiaverini, W. Itano, B. Je- lenković, et al., 《物理评论A》68, 042302 (2003年)。[472] Z.-C. Mao, Y.-Z. Xu, Q.-X. Mei, W.-D. Zhao, Y. Jiang, Y. Wang, X.-Y. Chang, L. He, L. Yao, et al., 《物理评论快报》127, 143201 (2021年)。[473] D. Allcock, W. Campbell, J. Chiaverini, I. Chuang, E. Hudson, I. Moore, A. Ransford, C. Roman, J. Sage, et al., 《应用物理快报》119, 214002 (2021年)。[474] H.-X. Yang, J.-Y. Ma, Y.-K. Wu, Y. Wang, M.-M. Cao, W.-X. Guo, Y.-Y. Huang, L. Feng, Z.-C. Zhou, et al., 《自然·物理》18, 1058 (2022年)。[475] K. K. Mehta, C. D. Bruzewicz, R. McConnell, R. J. Ram, J. M. Sage, and J. Chiaverini, 《自然·纳米技术》11, 1066 (2016年)。[476] K. K. Mehta, C. Zhang, M. Malinowski, T.-L. Nguyen, M. Stadler, and J. P. Home, 《自然》586, 533 (2020年)。[477] J. Stuart, R. Panock, C. Bruzewicz, J. Sedlacek, R. Mc- Connell, I. Chuang, J. Sage, and J. Chiaverini, 《物理评论应用》11, 024010 (2019年)。[478] C. Flühmann, T. L. Nguyen, M. Marinelli, V. Negnevit- sky, K. Mehta, and J. Home, 《自然》566, 513 (2019年)。[479] A. Erhard, H. Poulsen Nautrup, M. Meth, L. Postler, R. Stricker, M. Stadler, V. Negnevitsky, M. Ringbauer, P. Schindler, et al., 《自然》589, 220 (2021年)。[480] L. Egan, D. M. Debroy, C. Noel, A. Risinger, D. Zhu, D. Biswas, M. Newman, M. Li, K. R. Brown, et al., 《自然》598, 281 (2021年)。[481] L. Postler, S. Heuβen, I. Pogorelov, M. Rispler, T. Feld- ker, M. Meth, C. D. Marciniak, R. Stricker, M. Ring- bauer, et al., 《自然》605, 675 (2022年)。

[482] C. D. Bruzewicz, J. Chiaverini, R. McConnell, and J. M. Sage, 《应用物理快报》6, 021314 (2019年)。[483] Z. D. Romaszko, S. Hong, M. Siegele, R. K. Puddy, F. R. Lebrun-Gallagher, S. Weidt, and W. K. Hensinger, 《自然·物理评论》2, 285 (2020年)。[484] K. R. Brown, J. Chiaverini, J. M. Sage, and H. Häffner, 《自然·物理评论》6, 892 (2021年)。[485] W. Huang, C. H. Yang, K. W. Chan, T. Tanttu, B. Hensen, R. C. C. Leon, M. A. Fogarty, J. C. C. Hwang, F. E. Hudson, et al., 《自然》569, 532 (2019年)。[486] D. M. Zajac, A. J. Sigillito, M. Russ, F. Borjans, J. M. Taylor, G. Burkard, and J. R. Petta, 《科学》359, 439 (2018年)。[487] N. W. Hendrickx, D. P. Franke, A. Sammak, G. Scap- pucci, and M. Veldhorst, 《自然》577, 487 (2020年)。[488] R. Maurand, X. Jehl, D. Kotekar-Patil, A. Corna, H. Bohuslavskyi, R. Laviéville, L. Hutin, S. Barraud, M. Vinet, et al., 《自然·通讯》7, 13575 (2016年)。[489] J. T. Muhonen, J. P. Dehollain, A. Laucht, F. E. Hud- son, R. Kalra, T. Sekiguchi, K. M. Itoh, D. N. Jamieson, J. C. McCallum, et al., 《自然·纳米技术》9, 986 (2014年)。[490] Y. He, S. K. Gorman, D. Keith, L. Kranz, J. G. Keizer, and M. Y. Simmons, 《自然》571, 371 (2019年)。[491] L. M. K. Vandersypen and M. A. Eriksson, 《今日物理》72, 38 (2019年)。[492] A. Noiri, K. Takeda, T. Nakajima, T. Kobayashi, A. Sammak, G. Scappucci, and S. Tarucha, 《自然》601, 338 (2022年)。[493] M. T. Madzik, S. Asaad, A. Youssry, B. Joecker, K. M. Rudinger, E. Nielsen, K. C. Young, T. J. Proctor, A. D. Baczewski, et al., 《自然》601, 348 (2022年)。[494] X. Xue, M. Russ, N. Samkharadze, B. Undseth, A. Sam- mak, G. Scappucci, and L. M. K. Vandersypen, 《自然》601, 343 (2022年)。[495] A. West, B. Hensen, A. Jouan, T. Tanttu, C.-H. Yang, A. Rossi, M. F. Gonzalez-Zalba, F. Hudson, A. Morello, et al., 《自然·纳米技术》14, 437 (2019年)。[496] P. Pakkiam, A. V. Timofeev, M. G. House, M. R. Hogg, T. Kobayashi, M. Koch, S. Rogge, and M. Y. Simmons, 《物理评论X》8, 041032 (2018年)。[497] M. Urdampilleta, D. J. Niegemann, E. Chanrion, B. Jadot, C. S pence, P.-A. Mortemousque, C. Bäuerle, L. Hutin, B. Bertrand, et al., 《自然·纳米技术》14, 737 (2019年)。[498] G. Zheng, N. Samkharadze, M. L. Noordam, N. Kalhor, D. Brousse, A. Sammak, G. Scappucci, and L. M. K. Vandersypen, 《自然·纳米技术》14, 742 (2019年)。[499] X. Mi, M. Benito, S. Putz, D. M. Zajac, J. M. Taylor, G. Burkard, and J. R. Petta, 《自然》555, 599 (2018年)。[500] N. Samkharadze, G. Zheng, N. Kalhor, D. Brousse, A. Sammak, U. C. Mendes, A. Blais, G. Scappucci, and L. M. K. Vandersypen, 《科学》359, 1123 (2018年)。[501] A. J. Landig, J. V. Koski, P. Scarlino, U. C. Mendes, A. Blais, C. Reichl, W. Wegscheider, A. Wallraff, K. En- sslin, et al., 《自然》560, 179 (2018年)。[502] F. Borjans, X. G. Croot, X. Mi, M. J. Gullans, and J. R. Petta, 《自然》577, 195 (2020年)。[503] P. Harvey-Collard, J. Dijkema, G. Zheng, A. Sammak, G. Scappucci, and L. M. K. Vandersypen, 《物理评论X》12, 021026 (2022年)。[504] L. Petit, H. G. J. Eenink, M. Russ, W. I. L. Lawrie, N. W. Hendrickx, S. G. J. Philips, J. S. Clarke, L. M. K. Vandersypen, and M. Veldhorst, 《自然》580, 355 (2020年)。[505] C. H. Yang, R. C. C. Leon, J. C. C. Hwang, A. Saraiva, T. Tanttu, W. Huang, J. Camirand Lemyre, K. W. Chan, K. Y. Tan 等, 《自然》580, 350（2020年）。[506] L. C. Camenzind, S. Geyer, A. Fuhrer, R. J. Warburton, D. M. Zumbühl 和 A. V. Kuhlmann, 《自然·电子学》5, 178（2022年）。[507] X. Xue, B. Patra, J. P. G. van Dijk, N. Samkharadze, S. Subramanian, A. Corna, B. Paquelet Wuetz, C. Jeon, F. Sheikh 等, 《自然》593, 205（2021年）。[508] S. J. Pauka, K. Das, R. Kalra, A. Moini, Y. Yang, M. Trainer, A. Bousquet, C. Cantaloube, N. Dick 等, 《自然·电子学》4, 64（2021年）。[509] G. Burkard, T. T. Ladd, J. M. Nichol, A. Pan 和 J. R. Petta, “半导体自旋量子比特”, arXiv: 2112.08863v1（2022年）。[510] F. A. Zwanenburg, A. S. Dzurak, A. Morello, M. Y. Simmons, L. C. L. Hollenberg, G. Klimeck, S. Rogge, S. N. Coppersmith 和 M. A. Eriksson, 《现代物理评论》85, 961（2013年）。[511] D. Kim, D. R. Ward, C. B. Simmons, J. K. Gamble, R. Blume-Kohout, E. Nielsen, D. E. Savage, M. G. Lagally, M. Friesen 等, 《自然·纳米技术》10, 243（2015年）。[512] E. R. MacQuarrie, S. F. Neyens, J. P. Dodson, J. Cor- rigan, B. Thorgrimsson, N. Holman, M. Palma, L. F. Edge, M. Friesen 等, 《npj量子信息》6, 81（2020年）。[513] J. Medford, J. Beil, J. M. Taylor, S. D. Bartlett, A. C. Doherty, E. I. Rashba, D. P. DiVincenzo, H. Lu, A. C. Gossard 等, 《自然·纳米技术》8, 654（2013年）。[514] A. J. Weinstein, M. D. Reed, A. M. Jones, R. W. An- drews, D. Barnes, J. Z. Blumoff, L. E. Euliss, K. Eng, B. Fong 等, “硅中编码自旋量子比特的通用逻辑”, arXiv: 2202.03605（2022年）。[515] D. Kim, Z. Shi, C. B. Simmons, D. R. Ward, J. R. Prance, T. S. Koh, J. K. Gamble, D. E. Savage, M. G. Lagally 等, 《自然》511, 70（2014年）。[516] J. R. Petta, A. C. Johnson, J. M. Taylor, E. A. Laird, A. Yacoby, M. D. Lukin, C. M. Marcus, M. P. Hanson 和 A. C. Gossard, 《科学》309, 2180（2005年）。[517] X. Wu, D. Ward, J. Prance, D. Kim, J. K. Gamble, R. Mohr, Z. Shi, D. Savage, M. Lagally 等, 《美国国家科学院院刊》111, 11938（2014年）。[518] A. Chatterjee, P. Stevenson, S. De Franceschi, A. Morello, N. P. de Leon 和 F. Kuemmeth, 《自然·物理评论》3, 157（2021年）。[519] A. J. Heinrich, W. D. Oliver, L. M. K. Vander- sypen, A. Ardavan, R. Sessoli, D. Loss, A. B. Jayich, J. Fernandez-Rossier, A. Laucht 等, 《自然·纳米技术》16, 1318（2021年）。[520] X. Zhang, H.-O. Li, G. Cao, M. Xiao, G.-C. Guo 和 G.-P. Guo, 《国家科学评论》6, 32（2018年）。[521] C. H. Yang, A. Rossi, R. Ruskov, N. S. Lai, F. A. Mo- hiyaddin, S. Lee, C. Tahan, G. Klimeck, A. Morello 等, 《自然·通讯》4, 2069（2013年）。[522] F. Borjans, D. Zajac, T. Hazard 和 J. Petta, 《物理评论应用》11, 044063（2019年）。[523] M. Veldhorst, C. H. Yang, J. C. C. Hwang, W. Huang, J. P. Dehollain, J. T. Muhonen, S. Simmons, A. Laucht, F. E. Hudson 等, 《自然》526, 410（2015年）。[524] J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, M. R. Delbecq, G. Allison, T. Honda, T. Kodera, S. Oda 等, 《自然·纳米技术》13, 102（2018年）。[525] J. J. Pla, K. Y. Tan, J. P. Dehollain, W. H. Lim, J. J. L. Morton

，D. N. Jamieson ，A. S. Dzurak ，以及 A. Morello ，

《自然》489, 541 (2012). [526] C. H. Yang, K. W. Chan, R. Harper, W. Huang, T. Evans, J. C. C. Hwang, B. Hensen, A. Laucht, T. Tanttu 等, 《自然·电子学》2, 151 (2019). [527] J. T. Muhonen, A. Laucht, S. Simmons, J. P. Dehollain, R. Kalra, F. E. Hudson, S. Freer, K. M. Itoh, D. N. Jamieson 等, J. Phys. Condens. Matter 27, 154205 (2015). [528] S. G. J. Philips, M. T. Mądzik, S. V. Amitonov, S. L. de Snoo, M. Russ, N. Kalhor, C. Volk, W. I. L. Lawrie, D. Brousse 等, 《自然》609, 919 (2022). [529] R. Hanson, L. P. Kouwenhoven, J. R. Petta, S. Tarucha 和 L. M. K. Vandersypen, 《现代物理评论》79, 1217 (2007). [530] T. Hensgens, T. Fujita, L. Janssen, X. Li, C. J. Van Diepen, C. Reichl, W. Wegscheider, S. Das Sarma 和 L. M. K. Vandersypen, 《自然》548, 70 (2017). [531] J. P. Dehollain, U. Mukhopadhyay, V. P. Michal, Y. Wang, B. Wunsch, C. Reichl, W. Wegscheider, M. S. Rudner, E. Demler 等, 《自然》579, 528 (2020). [532] Y. P. Kandel, H. Qiao, S. Fallahi, G. C. Gardner, M. J. Manfra 和 J. M. Nichol, 《自然》573, 553 (2019). [533] H. Qiao, Y. P. Kandel, K. Deng, S. Fallahi, G. C. Gard- ner, M. J. Manfra, E. Barnes 和 J. M. Nichol, 《物理评论X》10, 031006 (2020). [534] A. Crippa, R. Ezzouch, A. Aprá, A. Amisse, R. Lav- iéville, L. Hutin, B. Bertrand, M. Vinet, M. Urdampil- leta 等, 《自然·通讯》10, 2776 (2019). [535] L. Fricke, S. J. Hile, L. Kranz, Y. Chung, Y. He, P. Pakkiam, M. G. House, J. G. Keizer 和 M. Y. Simmons, 《自然·通讯》12, 3323 (2021). [536] T. F. Watson, S. G. J. Philips, E. Kawakami, D. R. Ward, P. Scarlino, M. Veldhorst, D. E. Savage, M. G. Lagally, M. Friesen 等, 《自然》555, 633 (2018). [537] X. Zhang, R.-Z. Hu, H.-O. Li, F.-M. Jing, Y. Zhou, R.- L. Ma, M. Ni, G. Luo, G. Cao 等, 《物理评论快报》124, 257701 (2020). [538] N. W. Hendrickx, W. I. L. Lawrie, L. Petit, A. Sammak, G. Scappucci 和 M. Veldhorst, 《自然·通讯》11, 3478 2020( ). [539] N. W. Hendrickx, W. I. L. Lawrie, M. Russ, F. van Riggelen, S. L. de Snoo, R. N. Schouten, A. Sammak, G. Scappucci 和 M. Veldhorst, 《自然》591, 580 (2021). [540] K. Wang, G. Xu, F. Gao, H. Liu, R.-L. Ma, X. Zhang, Z. Wang, G. Cao, T. Wang 等, 《自然·通讯》13, 206 2022( ). [541] D. Jirovec, P. M. Mutter, A. Hofmann, A. Crippa, M. Rychetsky, D. L. Craig, J. Kukucka, F. Martins, A. Ballabio 等, 《物理评论快报》128, 126803 (2022). [542] T. F. Watson, B. Weber, Y. L. Hsueh, L. L. C. Hollen- berg, R. Rahman 和 M. Y. Simmons, 《科学进展》3, e1602811 (2017). [543] K. Takeda, A. Noiri, J. Yoneda, T. Nakajima 和 S. Tarucha, 《物理评论快报》124, 117701 (2020). [544] F. H. L. Koppens, C. Buizert, K. J. Tielrooij, I. T. Vink, K. C. Nowack, T. Meunier, L. P. Kouwenhoven 和 L. M. K. Vandersypen, 《自然》442, 766 (2006). [545] M. Veldhorst, J. C. C. Hwang, C. H. Yang, A. W. Leen- stra, B. de Ronde, J. P. Dehollain, J. T. Muhonen, F. E. Hudson, K. M. Itoh 等, 《自然·纳米技术》9, 981 (2014). [546] K. C. Nowack, F. H. Koppens, Y. V. Nazarov 和 L. M. Vandersypen, 《科学》318, 1430 (2007). [547] Y. Tokura, W. G. van der Wiel, T. Obata, and S. Tarucha, 《物理评论快报》96, 047202 (2006年). [548] X. Xue, T. F. Watson, J. Helsen, D. R. Ward, D. E. Sav- age, M. G. Lagally, S. N. Coppersmith, M. A. Eriksson, S. Wehner, et al., 《物理评论X》9, 021011 (2019年). [549] M. D. Shulman, O. E. Dial, S. P. Harvey, H. Bluhm, V. Umansky, and A. Yacoby, 《科学》336, 202 (2012年). [550] J. M. Nichol, L. A. Orona, S. P. Harvey, S. Fallahi, G. C. Gardner, M. J. Manfra, and A. Yacoby, 《npj量子信息》3, 3 (2017年). [551] A. R. Mills, C. R. Guinn, M. J. Gullans, A. J. Sigillito, M. M. Feldman, E. Nielsen, and J. R. Petta, 《科学进展》8, eabn5130 (2022年). [552] X. Hu and S. Das Sarma, 《物理评论快报》96, 100501 (2006年). [553] L. Kranz, S. K. Gorman, B. Thorgrimsson, Y. He, D. Keith, J. G. Keizer, and M. Y. Simmons, 《先进材料》32, e2003361 (2020年). [554] A. Laucht, R. Kalra, S. Si mmons, J. P. Dehollain, J. T. Muhonen, F. A. Mohiyaddin, S. Freer, F. E. Hudson, K. M. Itoh, et al., 《自然·纳米技术》12, 61 (2017年). [555] A. E. Seedhouse, I. Hansen, A. Laucht, C. H. Yang, A. S. Dzurak, and A. Saraiva, 《物理评论B》104, 235411 (2021年). [556] I. Hansen, A. E. Seedhouse, A. Saraiva, A. Laucht, A. S. Dzurak, and C. H. Yang, 《物理评论A》104, 062415 (2021年). [557] G. Tosi, F. A. Mohiyaddin, V. Schmitt, S. Tenberg, R. Rahman, G. Klimeck, and A. Morello, 《自然·通讯》8, 450 (2017年). [558] X. Wang, L. S. Bishop, J. P. Kestner, E. Barnes, K. Sun, and S. Das Sarma, 《自然·通讯》3, 997 (2012年). [559] M. A. Broome, T. F. Watson, D. Keith, S. K. Gorman, M. G. House, J. G. Keizer, S. J. Hile, W. Baker, and M. Y. Simmons, 《物理评论快报》119, 046802 (2017年). [560] P. Harvey-Collard, B. D'Anjou, M. Rudolph, N. T. Ja- cobson, J. Dominguez, G. A. Ten Eyck, J. R. Wendt, T. Pluym, M. P. Lilly, et al., 《物理评论X》8, 021046 (2018年). [561] J. M. Elzerman, R. Hanson, L. H. Willems van Bev- eren, B. Witkamp, L. M. K. Vandersypen, and L. P. Kouwenhoven, 《自然》430, 431 (2004年). [562] J. J. Pla, K. Y. Tan, J. P. Dehollain, W. H. Lim, J. J. L. Morton, F. A. Zwanenburg, D. N. Jamieson, A. S. Dzu- rak, and A. Morello, 《自然》496, 334 (2013年). [563] D. Keith, S. K. Gorman, L. Kranz, Y. He, J. G. Keizer, M. A. Broome, and M. Y. Simmons, 《新物理学杂志》21, 063011 2019( ). [564] F. Vigneau, F. Fedele, A. Chatterjee, D. Reilly, F. Kuemmeth, F. Gonzalez-Zalba, E. Laird, and N. Ares, "用射频反射测量探测量子设备", arXiv: 2202.10516 (2022年). [565] J. Y. Huang, W. H. Lim, R. C. C. Leon, C. H. Yang, F. E. Hudson, C. C. Escott, A. Saraiva, A. S. Dzurak, a nd A. Laucht, 《纳米快报》21, 6328 (2021年). [566] S. Schaal, I. Ahmed, J. A. Haigh, L. Hutin, B. Bertrand, S. Barraud, M. Vinet, C.-M. Lee, N. Stelmashenko, et al., 《物理评论快报》124, 067701 (2020年). [567] M. R. Hogg, P. Pakkiam, S. K. Gorman, A. V. Timo- feev, Y. Chung, G. K. Gulati, M. G. House, and M. Y. Simmons, "使用栅极传感器对多个施主杂质电子自旋进行单次读出", arXiv: 2203.09248 (2022年). [568] A. Ruffino, T.-Y. Yang, J. Michniewicz, Y. Peng,

E. Charbon, and M. F. Gonzalez-Zalba, 《自然·电子学》5, 53 (2022年). [569] X. Xue, B. D'Anjou, T. F. Watson, D. R. Ward, D. E. Savage, M. G. Lagally, M. Friesen, S. N. Coppersmith, M. A. Eriksson, et al., 《物理评论X》10, 021006 (2020年). [570] T. Nakajima, A. Noiri, J. Yoneda, M. R. Delbecq, P. Stano, T. Otsuka, K. Takeda, S. Amaha, G. Allison, et al., 《自然·纳米技术》14, 555 (2019年). [571] C. J. van Diepen, T.-K. Hsiao, U. Mukhopadhyay, C. Reichl, W. Wegscheider, and L. M. K. Vandersypen, 《自然·通讯》12, 77 (2021年). [572] F. Borjans, X. Mi, and J. Petta, 《物理评论应用》15, 044052 2021( ). [573] D. Keith, Y. Chung, L. Kranz, B. Thorgrimsson, S. K. Gorman, and M. Y. Simmons, 《科学进展》8, eabq0455 (2022年). [574] P. Huang and X. Hu, 《物理评论B》90, 235315 (2014年). [575] M. F. Gonzalez-Zalba, S. de Franceschi, E. Charbon, T. Meunier, M. Vinet, and A. S. Dzurak, 《自然·电子学》4, 872 (2021年). [576] F. Ansaloni, A. Chatterjee, H. Bohuslavskyi, B. Bertrand, L. Hutin, M. Vinet, and F. Kuem- meth, 《自然·通讯》11, 6399 (2020年). [577] R. Li, N. I. D. Stuyck, S. Kubicek, J. Jussot, B. T. Chan, F. A. Mohiyaddin, A. Elsayed, M. Shehata, G. Simion, et al., 收录于 IEEE 国际电子器件会议论文集（IEDM）（2020年）, 第38.3.1 页。 [578] A. M. J. Zwerver, T. Krähenmann, T. F. Watson, L. Lampert, H. C. George, R. Pillarisetty, S. A. Bo- jarski, P. Amin, S. V. Amitonov, et al., 《自然·电子学》5, 184 (2022年). [579] L. M. K. Vandersypen, H. Bluhm, J. S. Clarke, A. S. Dzurak, R. Ishihara, A. Morello, D. J. Reilly, L. R. Schreiber, and M. Veldhorst, 《npj量子信息》3, 34 (2017年). [580] C. D. Hill, E. Peretz, S. J. Hile, M. G. House, M. Fuech- sle, S. Rogge, M. Y. Simmons, and L. C. L. Hollenberg, 《科学进展》1, e1500707 (2015年). [581] J. M. Boter, J. P. Dehollain, J. P. G. van Dijk, Y. Xu, T. Hensgens, R. Versluis, H. W. L. Naus, J. S. Clarke, M. Veldhorst, et al., "蜘蛛网阵列——稀疏自旋量子比特阵列", arXiv: 2110.00189 (2021年). [582] M. Veldhorst, H. G. J. Eenink, C. H. Yang, and A. S. Dzurak, 《自然·通讯》8, 1766 (2017年). [583] R. Li, L. Petit, D. P. Franke, J. P. Dehollain, J. Helsen, M. Steudtner, N. K. Thomas, Z. R. Yoscovits, K. J. Singh, et al., 《科学进展》4, eaar3960 (2018年). [584] K. Takeda, A. Noiri, T. Nakajima, J. Yoneda, T. Kobayashi, and S. Tarucha, 《自然·纳米技术》16, 965 2021( ). [585] A. R. Mills, D. M. Zajac, M. J. Gullans, F. J. Schupp, T. M. Hazard, and J. R. Petta, 《自然·通讯》10, 1063 (2019年). [586] J. P. Zwolak and J. M. Taylor, "量子点器件控制自动化的进展综述", arXiv: 2112.09362 (2021年). [587] J. P. Zwolak, T. McJunkin, S. S. Kalantre, J. Dodson, E. MacQuarrie, D. Savage, M. Lagally, S. Coppersmith, M. A. Eriksson, et al., 《物理评论应用》13, 034075 (2020年). [588] S. Schaal, A. Rossi, V. N. Ciriano-Tejel, T.-Y. Yang, S. Barraud, J. J. L. Morton, and M. F. Gonzalez-Zalba, 《自然·电子学》2, 236 (2019年). [589] F. K. Malinowski, F. Martins, T. B. Smith, S. D. Bartlett, A. C. Doherty, P. D. Nissen, S. Fallahi, G. C. Gardner, M. J. Manfra, 等, 《自然·通讯》10, 1196（2019年）。[590] B. Bertrand, S. Hermelin, S. Takada, M. Yamamoto, S. Tarucha, A. Ludwig, A. D. Wieck, C. Bäuerle, 和 T. Meunier, 《自然·纳米技术》11, 672（2016年）。[591] X. Mi, J. V. Cady, D. M. Zajac, P. W. Deelman, 和 J. R. Petta, 《科学》355, 156（2017年）。[592] P. C. Maurer, G. Kucsko, C. Latta, L. Jiang, N. Y. Yao, S. D. Bennett, F. Pastawski, D. Hunger, N. Chisholm, 等, 《科学》336, 1283（2012年）。[593] K. S. Cujia, K. Herb, J. Zopes, J. M. Abendroth, 和 C. L. Degen, 《自然·通讯》13, 1260（2022年）。[594] M. H. Abobeih, J. Randall, C. E. Bradley, H. P. Bartling, M. A. Bakker, M. J. Degen, M. Markham, D. J. Twitchen, 等, 《自然》576, 411（2019年）。[595] G. de Lange, T. van der Sar, M. Blok, Z.-H. Wang, V. Dobrovitski, 和 R. Hanson, 《科学报告》2, 382（2012年）。[596] H. S. Knowles, D. M. Kara, 和 M. Atatüre, 《物理评论快报》117, 100802（2016年）。[597] M. J. Degen, S. J. H. Loenen, H. P. Bartling, C. E. Bradley, A. L. Meinsma, M. Markham, D. J. Twitchen, 和 T. H. Taminiau, 《自然·通讯》12, 3470（2021年）。[598] M. H. Abobeih, J. Cramer, M. A. Bakker, N. Kalb, M. Markham, D. J. Twitchen, 和 T. H. Taminiau, 《自然·通讯》9, 2552（2018年）。[599] H. P. Bartling, M. H. Abobeih, B. Pingault, M. J. Degen, S. J. H. Loenen, C. E. Bradley, J. Randall, M. Markham, D. J. Twitchen, 等, 《物理评论X》12, 011048 2022( )。[600] N. Bar-Gill, L. M. Pham, A. Jarmola, D. Budker, 和 R. L. Walsworth, 《自然·通讯》4, 1743（2013年）。[601] M. L. Goldman, A. Sipahigil, M. W. Doherty, N. Y. Yao, S. D. Bennett, M. Markham, D. J. Twitchen, N. B. Man- son, A. Kubanek, 等, 《物理评论快报》114, 145502（2015年）。[602] G. Thiering 和 A. Gali, 《物理评论B》98, 085207（2018年）。[603] L. Robledo, L. Childress, H. Bernien, B. Hensen, P. F. A. Alkemade, 和 R. Hanson, 《自然》477, 574（2011年）。[604] N. Kalb, P. C. Humphreys, J. J. Slim, 和 R. Hanson, 《物理评论A》97, 062330（2018年）。[605] B. Hensen, H. Bernien, A. E. Dréau, A. Reiserer, N. Kalb, M. S. Blok, J. Ruitenberg, R. F. L. Vermeulen, R. N. Schouten, 等, 《自然》526, 682（2015年）。[606] B. Smeltzer, L. Childress, 和 A. Gali, 《新物理学杂志》13, 025021（2011年）。[607] A. Dréau, J.-R. Maze, M. Lesik, J.-F. Roch, 和 V. Jacques, 《物理评论B》85, 134107（2012年）。[608] V. Jacques, P. Neumann, J. Beck, M. Markham, D. Twitchen, J. Meijer, F. Kaiser, G. Balasubramanian, F. Jelezko, 等, 《物理评论快报》102, 057403（2009年）。[609] P. London, J. Scheuer, J.-M. Cai, I. Schwarz, A. Ret- zker, M. B. Plenio, M. Katagiri, T. Teraji, S. Koizumi, 等, 《物理评论快报》111, 067601（2013年）。[610] I. Schwartz, J. Scheuer, B. Tratzmiller, S. Müller, Q. Chen, I. Dhand, Z.-Y. Wang, C. Müller, B. Nay- denov, 等, 《科学进展》4, eaat8978（2018年）。[611] T. Xie, Z. Zhao, X. Kong, W. Ma, M. Wang, X. Ye, P. Yu, Z. Yang, S. Xu, 等, 《科学进展》7, eabg9204（2021年）。[612] P. Neumann, J. Beck, M. Steiner, F. Rempp, H. Fedder, P. R. Hemmer

329, 542（2010年）。[613] G.-Q. Liu, J. Xing, W.-L. Ma, P. Wang, C.-H. Li, H. C. Po, Y.-R. Zhang, H. Fan, R.-B. Liu等, 《物理评论快报》118, 150504（2017年）。[614] J. Randall, C. E. Bradley, F. V. van der Gron- den, A. Galicia, M. H. Abobeih, M. Markham, D. J. Twitchen, F. Machado, N. Y. Yao等, 《科学》374, 1474（2021年）。[615] M. Pompili, S. L. N. Hermans, S. Baier, H. K. C. Beuk- ers, P. C. Humphreys, R. N. Schouten, R. F. L. Ver- meulen, M. J. Tiggelman, L. d. S. Martins等, 《科学》372, 259（2021年）。[616] Y.-X. Shang, F. Hong, J.-H. Dai, Hui-Yu, Y.-N. Lu, E.-K. Liu, X.-H. Yu, G.-Q. Liu和X.-Y. Pan, 《中国物理快报》36, 086201（2019年）。[617] X. Rong, J. Geng, F. Shi, Y. Liu, K. Xu, W. Ma, F. Kong, Z. Jiang, Y. Wu等, 《自然·通讯》6, 8748（2015年）。[618] G. D. Fuchs, V. V. Dobrovitski, D. M. Toyli, F. J. Here- remans和D. D. Awschalom, 《科学》326, 1520（2009年）。[619] F. Kong, P. Zhao, X. Ye, Z. Wang, Z. Qin, P. Yu, J. Su, F. Shi和J. Du, 《自然·通讯》9, 1563（2018年）。[620] J. Scheuer, X. Kong, R. S. Said, J. Chen, A. Kurz, L. Marseglia, J. Du, P. R. Hemmer, S. Montangero等, 《新物理学杂志》16, 093022（2014年）。[621] G. Balasubramanian, P. Neumann, D. Twitchen, M. Markham, R. Kolesov, N. Mizuochi, J. Isoya, J. Achard, J. Beck等, 《自然·材料》8, 383（2009年）。[622] N. Zhao, S.-W. Ho和R.-B. Liu, 《物理评论B》85, 115303（2012年）。[623] S. Kolkowitz, Q. P. Unterreithmeier, S. D. Bennett和M. D. Lukin, 《物理评论快报》109, 137601（2012年）。[624] T. H. Taminiau, J. J. T. Wagenaar, T. van der Sar, F. Jelezko, V. V. Dobrovitski和R. Hanson, 《物理评论快报》109, 137602（2012年）。[625] N. Zhao, J. Honert, B. Schmid, M. Klas, J. Isoya, M. Markham, D. Twitchen, F. Jelezko, R.-B. Liu等, 《自然·纳米技术》7, 657（2012年）。[626] T. van der Sar, Z. H. Wang, M. S. Blok, H. Bernien, T. H. Taminiau, D. M. Toyli, D. A. Lidar, D. D. Awschalom, R. Hanson等, 《自然》484, 82（2012年）。[627] G.-Q. Liu, H. C. Po, J. Du, R.-B. Liu和X.-Y. Pan, 《自然·通讯》4, 2254（2013年）。[628] C. E. Bradley, J. Randall, M. H. Abobeih, R. C. Berrevoets, M. J. Degen, M. A. Bakker, M. Markham, D. J. Twitchen和T. H. Taminiau, 《物理评论X》9, 031045（2019年）。[629] A. Reiserer, N. Kalb, M. S. Blok, K. J. M. van Bemme- len, T. H. Taminiau, R. Hanson, D. J. Twitchen和M. Markham, 《物理评论X》6, 021040（2016年）。[630] F. Wang, Y.-Y. Huang, Z.-Y. Zhang, C. Zu, P.-Y. Hou, X.-X. Yuan, W.-B. Wang, W.-G. Zhang, L. He等, 《物理评论B》96, 134314（2017年）。[631] C. Zu, W.-B. Wang, L. He, W.-G. Zhang, C.-Y. Dai, F. Wang和L.-M. Duan, 《自然》514, 72（2014年）。[632] S. Arroyo-Camejo, A. Lazariev, S. W. Hell和G. Bal- asubramanian, 《自然·通讯》5, 4870（2014年）。[633] K. Arai, J. Lee, C. Belthangady, D. R. Glenn, H. Zhang和R. L. Walsworth, 《自然·通讯》9, 4996（2018年）。[634] Y.-Y. Huang, Y.-K. Wu, F. Wang, P.-Y. Hou, W.-B. Wang, W.-G. Zhang, W.-Q. Lian, Y.-Q. Liu, H.-Y. Wang等, 《物理评论快报》122, 010503（2019年）。[635] M. Hirose和P. Cappellaro, 《自然》532, 77（2016年）。[636] I. Rojkov, D. Layden, P. Cappellaro, J. Home和F. Reiter, 《物理评论快报》128，140503（2022年）。[637] W. Liu、Y. Wu、C.-K. Duan、X. Rong 和 J. Du, 《物理评论快报》126，170506（2021年）。[638] M. Chen、C. Li、G. Palumbo、Y.-Q. Zhu、N. Goldman 和 P. Cappellaro, 《科学》375，1017（2022年）。[639] W. Ji、Z. Chai、M. Wang、Y. Guo、X. Rong、F. Shi、C. Ren、Y. Wang 和 J. Du, 《物理评论快报》128，090602（2022年）。[640] F. Kong、C. Ju、Y. Liu、C. Lei、M. Wang、X. Kong、P. Wang、P. Huang、Z. Li 等, 《物理评论快报》117，060503（2016年）。[641] W. Ji、L. Zhang、M. Wang、L. Zhang、Y. Guo、Z. Chai、X. Rong、F. Shi、X.-J. Liu 等, 《物理评论快报》125，020504（2020年）。[642] Y. Wu、W. Liu、J. Geng、X. Song、X. Ye、C.-K. Duan、X. Rong 和 J. Du, 《科学》364，878（2019年）。[643] W. Zhang、X. Ouyang、X. Huang、X. Wang、H. Zhang、Y. Yu、X. Chang、Y. Liu、D.-L. Deng 等, 《物理评论快报》127，090501（2021年）。[644] Y.-N. Lu、Y.-R. Zhang、G.-Q. Liu、F. Nori、H. Fan 和 X.-Y. Pan, 《物理评论快报》124，210502（2020年）。[645] C. Zu、F. Machado、B. Ye、S. Choi、B. Kobrin、T. Mittiga、S. Hsieh、P. Bhattacharyya、M. Markham 等, 《自然》597，45（2021年）。[646] F. Shi、X. Rong、N. Xu、Y. Wang、J. Wu、B. Chong、X. Peng、J. Kniepert、R.-S. Schoenfeld 等, 《物理评论快报》105，040504（2010年）。[647] K. Xu、T. Xie、Z. Li、X. Xu、M. Wang、X. Ye、F. Kong、J. Geng、C. Duan 等, 《物理评论快报》118，130504（2017年）。[648] J. Zhang、S. S. Hegde 和 D. Suter, 《物理评论快报》125，030501（2020年）。[649] X.-L. Ouyang、X.-Z. Huang、Y.-K. Wu、W.-G. Zhang、X. Wang、H.-L. Zhang、L. He、X.-Y. Chang 和 L.-M. Duan, 《物理评论A》101，012307（2020年）。[650] Z. Li、Z. Chai、Y. Guo、W. Ji、M. Wang、F. Shi、Y. Wang、S. Lloyd 和 J. Du, 《科学进展》7，eabg2589（2021年）。[651] H. Bernien、B. Hensen、W. Pfaff、G. Koolstra、M. S. Blok、L. Robledo、T. H. Taminiau、M. Markham、D. J. Twitchen 等, 《自然》497，86（2013年）。[652] W. Pfaff、B. J. Hensen、H. Bernien、S. B. van Dam、M. S. Blok、T. H. Taminiau、M. J. Tiggelman、R. N. Schouten、M. Markham 等, 《科学》345，532（2014年）。[653] N. Kalb、A. A. Reiserer、P. C. Humphreys、J. J. W. Bakermans、S. J. Kamerling、N. H. Nickerson、S. C. Benjamin、D. J. Twitchen、M. Markham 等, 《科学》356，928（2017年）。[654] P. C. Humphreys、N. Kalb、J. P. J. Morits、R. N. Schouten、R. F. L. Vermeulen、D. J. Twitchen、M. Markham 和 R. Hanson, 《自然》558，268（2018年）。[655] S. L. N. Hermans、M. Pompili、H. K. C. Beukers、S. Baier、J. Borregaard 和 R. Hanson, 《自然》605，663（2022年）。[656] F. Shi、X. Kong、P. Wang、F. Kong、N. Zhao、R.-B. Liu 和 J. Du, 《自然·物理》10，21（2014年）。[657] K. Arai、C. Belthangady、H. Zhang、N. Bar-Gill、S. J. DeVience、P. Cappellaro、A. Yacoby 和 R. L. Walsworth, 《自然·纳米技术》10，859（2015年）。[658] S. Schmitt、T. Gefen、F. M. Stürner、T. Unden、G. Wolff、C. Müller、J. Scheuer、B. Naydenov、M. Markham 等, 《科学》356，832（2017年）。[659] I. Lovchinsky、J. D. Sanchez-Yamagishi、E. K. Ur-bach、S. Choi、S. Fang、T. I. Andersen、K. Watan-

abe、T. Taniguchi、A. Bylinskii 等，《科学》355，503（2017年）。[660] F. Casola、T. van der Sar 和 A. Yacoby，《自然·材料评论》3，1（2018年）。[661] Q. Jin、Z. Wang、Q. Zhang、Y. Yu、S. Lin、S. Chen、M. Qi、H. Bai、A. Huon 等，《物理评论快报》128，017202（2022年）。[662] L. P. McGuinness、Y. Yan、A. Stacey、D. A. Simpson、L. T. Hall、D. Maclaurin、S. Prawer、P. Mulvaney、J. Wrachtrup 等，《自然·纳米技术》6，358（2011年）。[663] F. Shi、Q. Zhang、P. Wang、H. Sun、J. Wang、X. Rong、M. Chen、C. Ju、F. Reinhard 等，《科学》347，1135（2015年）。[664] Y. Wu、F. Jelezko、M. B. Plenio 和 T. Weil，《应用化学国际版》55，6586（2016年）。[665] F. Dolde、H. Fedder、M. W. Doherty、T. Nöbauer、F. Rempp、G. Balasubramanian、T. Wolf、F. Reinhard、L. C. L. Hollenberg 等，《自然·物理》7，459（2011年）。[666] F. Dolde、M. W. Doherty、J. Michl、I. Jakobi、B. Naydenov、S. Pezzagna、J. Meijer、P. Neumann、F. Jelezko、N. B. Manson 和 J. Wrachtrup，《物理评论快报》112，097603（2014年）。[667] T. Mittiga、S. Hsieh、C. Zu、B. Kobrin、F. Machado、P. Bhattacharyya、N. Z. Rui、A. Jarmola、S. Choi 等，《物理评论快报》121，246402（2018年）。[668] R. Li、F. Kong、P. Zhao、Z. Cheng、Z. Qin、M. Wang、Q. Zhang、P. Wang、Y. Wang 等，《物理评论快报》124，247701（2020年）。[669] G. Kucsko、P. C. Maurer、N. Y. Yao、M. Kubo、H. J. Noh、P. K. Lo、H. Park 和 M. D. Lukin，《自然》500，54（2013年）。[670] P. Neumann、I. Jakobi、F. Dolde、C. Burk、R. Reuter、G. Waldherr、J. Honert、T. Wolf、A. Brunner 等，《纳米快报》13，2738（2013年）。[671] M. W. Doherty、V. V. Struzhkin、D. A. Simpson、L. P. McGuinness、Y. Meng、A. Stacey、T. J. Karle、R. J. Hemley、N. B. Manson 等，《物理评论快报》112，047601（2014年）。[672] H. Zheng、J. Xu、G. Z. Iwata、T. Lenz、J. Michl、B. Yavkin、K. Nakamura、H. Sumiya、T. Ohshima 等，《物理评论应用》11，064068（2019年）。[673] P. J. Vetter、A. Marshall、G. T. Genov、T. F. Weiss、N. Striegler、E. F. Großmann、S. Oviedo-Casado、J. Cer-rillo、J. Prior 等，《物理评论应用》17，044028（2022年）。[674] S. Hsieh、P. Bhattacharyya、C. Zu、T. Mittiga、T. J. Smart、F. Machado、B. Kobrin、T. O. Höhn、N. Z. Rui 等，《科学》366，1349（2019年）。[675] M. Lesik、T. Plisson、L. Toraille、J. Renaud、F. Occelli、M. Schmidt、O. Salord、A. Delobbe、T. Debuisschert 等，《科学》366，1359（2019年）。[676] K. Y. Yip、K. O. Ho、K. Y. Yu、Y. Chen、W. Zhang、S. Kasahara、Y. Mizukami、T. Shibauchi、Y. Matsuda 等，《科学》366，1355（2019年）。[677] Z. Wang、C. McPherson、R. Kadado、N. Brandt、S. Edwards、W. Casey 和 N. Curro，《物理评论应用》16，054014（2021年）。[678] J.-H. Dai、Y.-X. Shang、Y.-H. Yu、Y. Xu、H. Yu、F. Hong、X.-H. Yu、X.-Y. Pan 和 G.-Q. Liu，arXiv: 2204.05064（2022年）。[679] G.-Q. Liu、X. Feng、N. Wang、Q. Li 和 R.-B. Liu，《自然·通讯》10，1344（2019年）。[680] Y. Chen、S. Stearn、S. Vella、A. Horsley 和 M. W. Doherty，《新物理学杂志》22，093068（2020年）。[681] E. M. Kessler、I. Lovchinsky、A. O. Sushkov 和 M. D. Lukin，《物理评论快报》112，150802（2014年）。[682] D. Layden、S. Zhou、P. Cappellaro 和 L. Jiang，《物理评论快报》122，040502（2019年）。[683] J. F. Barry、J. M. Schloss、E. Bauch、M. J. Turner、C. A. Hart、L. M. Pham 和 R. L. Walsworth，《现代物理评论》92，015004（2020年）。[684] K. Groot-Berning、T. Kornher、G. Jacob、F. Stopp、S. T. Dawkins、R. Kolesov、J. Wrachtrup、K. Singer 和 F. Schmidt-Kaler，《物理评论快报》123，106802（2019年）。[685] T. Lühmann、R. John、R. Wunderlich、J. Meijer 和 S. Pezzagna，《自然·通讯》10，4956（2019年）。[686] Y. Chu、N. de Leon、B. Shields、B. Hausmann、R. Evans、E. Togan、M. J. Burek、M. Markham、A. Stacey 等，《纳米快报》14，1982（2014年）。[687] M. Wang、H. Sun、X. Ye、P. Yu、H. Liu、J. Zhou、P. Wang、F. Shi、Y. Wang 等，arXiv：2203.09320（2022年）。[688] N. H. Wan、B. J. Shields、D. Kim、S. Mouradian、B. Lienhard、M. Walsh、H. Bakhru、T. Schröder 和 D. Englund，《纳米快报》18，2787（2018年）。[689] F. M. Hrubesch、G. Braunbeck、M. Stutzmann、F. Reinhard 和 M. S. Brandt，《物理评论快报》118，037601（2017年）。[690] P. Siyushev、M. Nesladek、E. Bourgeois、M. Gulka、J. Hruby、T. Yamamoto、M. Trupke、T. Teraji、J. Isoya 等，《科学》363，728（2019年）。[691] R. Laflamme、E. Knill、D. G. Cory、E. M. Fortunato、T. F. Havel、C. Miquel、R. Martinez、C. J. Negrevergne、G. Ortiz 等，《洛斯阿拉莫斯科学》27，344（2002年）。[692] D. G. Cory、M. D. Price 和 T. F. Havel，《核磁共振波谱进展》59，91（2011年）。[693] L. M. K. Vandersypen、M. Steffen、G. Breyta、C. S. Yannoni、M. H. Sherwood 和 I. L. Chuang，《自然》414，883（2001年）。[694] C. Negrevergne、T. S. Mahesh、C. A. Ryan、M. Ditty、F. Cyr-Racine、W. Power、N. Boulant、T. Havel、D. G. Cory 等，《物理评论快报》96，170501（2006年）。[695] J. Li、Z. Luo、T. Xin、H. Wang、D. Kribs、D. Lu、B. Zeng 和 R. Laflamme，《物理评论快报》123，030502（2019年）。[696] D. Lu、K. Li、J. Li、H. Katiyar、A. J. Park、G. Feng、T. Xin、H. Li、G. Long 等，《npj量子信息》3，45（2017年）。[697] R. Laflamme、E. Knill、D. Cory、E. Fortunato、T. Havel、C. Miquel、R. Martinez、C. Negrevergne、G. Ortiz、M. Pravia 等，arXiv预印本 quant-ph/0207172（2002年）。[698] M. Pravia、E. Fortunato、Y. Weinstein、M. D. Price、G. Teklemariam、R. J. Nelson、Y. Sharf、S. Somaroo、C. H. Tseng 等，《概念磁共振》11，225（1999年）。[699] X. Peng、X. Zhu、X. Fang、M. Feng、K. Gao、X. Yang 和 M. Liu，《化学物理快报》340，509（2001年）。[700] E. Knill、R. Laflamme、R. Martinez 和 C.-H. Tseng，《自然》404，368（2000年）。[701] W. Zheng、H. Wang、T. Xin、X. Nie、D. Lu 和 J. Li，《物理评论A》100，022313（2019年）。[702] P. O. Boykin、T. Mor、V. Roychowdhury、F. Vatan 和 R. Vrijen，《美国国家科学院院刊》99，3388（2002年）。[703] M. S. Anwar、D. Blazina、H. A. Carteret、S. B. Duckett、T. K. Halstead、J. A. Jones、C. M. Kozak 和 R. J. K. Taylor，《物理评论快报》93，040501（2004年）。[704] R. Freeman，《化学评论》91，1397（1991年）。[705] C. A. Ryan、C. Negrevergne、M. Laforest、E. Knill 和 R. Laflamme，《物理评论A》78，012328（2008年）。

[706] L. M. K. Vandersypen 和 I. L. Chuang, 《现代物理评论》76，1037（2005年）。[707] C. A. Ryan、M. Laforest 和 R. Laflamme, 《新物理学杂志》11，013034（2009年）。[708] D. Lu、H. Li、D.-A. Trottier、J. Li、A. Brodutch、A. P. Krismanich、A. Ghavami、G. I. Dmitrienko、G. Long 等, 《物理评论快报》114，140505（2015年）。[709] J. A. Jones、V. Vedral、A. Ekert 和 G. Castagnoli, 《自然》403，869（2000年）。[710] G. Feng、G. Xu 和 G. Long, 《物理评论快报》110，190501（2013年）。[711] N. Khaneja、R. Brockett 和 S. J. Glaser, 《物理评论A》63，032308（2001年）。[712] D. D'Alessandro, 《量子控制与动力学导论》（CRC出版社，2021年）。[713] N. Khaneja、T. Reiss、C. Kehlet、T. Schulte-Herbrüggen 和 S. J. Glaser, 《磁共振杂志》172，296（2005年）。[714] J. Li、X. Yang、X. Peng 和 C.-P. Sun, 《物理评论快报》118，150503（2017年）。[715] A. M. Souza、G. A. Alvarez 和 D. Suter, 《物理评论快报》106，240501（2011年）。[716] A. M. Souza、G. A. Álvarez 和 D. Suter，英国皇家学会哲学汇刊A辑370，4748（2012年）。[717] H. K. Cummins、C. Jones、A. Furze、N. F. Soffe、M. Mosca、J. M. Peach 和 J. A. Jones, 《物理评论快报》88，187901（2002年）。[718] J. Du、T. Durt、P. Zou、H. Li、L. C. Kwek、C. H. Lai、C. H. Oh 和 A. Ekert, 《物理评论快报》94，040505（2005年）。[719] H. Chen、D. Lu、B. Chong、G. Qin、X. Zhou、X. Peng 和 J. Du, 《物理评论快报》106，180404（2011年）。[720] D. G. Cory、M. D. Price、W. Maas、E. Knill、R. Laflamme、W. H. Zurek、T. F. Havel 和 S. S. Somaroo, 《物理评论快报》81，2152（1998年）。[721] J. Zhang、R. Laflamme 和 D. Suter, 《物理评论快报》109，100503（2012年）。[722] T. B. Batalhão、A. M. Souza、L. Mazzola、R. Auccaise、R. S. Sarthour、I. S. Oliveira、J. Goold、G. De Chiara、M. Paternostro 等, 《物理评论快报》113，140601（2014年）。[723] P. A. Camati、J. P. Peterson、T. B. Batalhão、K. Micadei、A. M. Souza、R. S. Sarthour、I. S. Oliveira 和 R. M. Serra, 《物理评论快报》117，240502（2016年）。[724] K. Micadei、J. P. Peterson、A. M. Souza、R. S. Sarthour、I. S. Oliveira、G. T. Landi、T. B. Batalhão、R. M. Serra 和 E. Lutz, 《自然·通讯》10，1（2019年）。[725] X. Nie、X. Zhu、K. Huang、K. Tang、X. Long、Z. Lin、Y. Tian、C. Qiu、C. Xi 等, 《物理评论快报》129，100603（2022年）。[726] O. Moussa、C. A. Ryan、D. G. Cory 和 R. Laflamme, 《物理评论快报》104，160501（2010年）。[727] I. L. Chuang、L. M. K. Vandersypen、X. Zhou、D. W. Leung 和 S. Lloyd, 《自然》393，143（1998年）。[728] J. A. Jones、M. Mosca 和 R. H. Hansen, 《自然》393，344（1998年）。[729] Y. S. Weinstein、M. A. Pravia、E. M. Fortunato、S. Lloyd 和 D. G. Cory, 《物理评论快报》86，1889（2001年）。[730] J. Zhang、M.-H. Yung、R. Laflamme、A. Aspuru-Guzik 和 J. Baugh, 《自然·通讯》3，1（2012年）。[731] X. Peng、J. Zhang、J. Du 和 D. Suter, 《物理评论快报》103，140501（2009年）。[732] X. Peng、H. Zhou、B.-B. Wei、J. Cui、J. Du 和 R.-B. Liu, 《物理评论快报》114，010601（2015年）。[733] J. Li、R. Fan、H. Wang、B. Ye、B. Zeng、H. Zhai、X. Peng 和 J. Du, 《物理评论X》7，031011（2017年）。[734] X. Nie、B.-B. Wei、X. Chen、Z. Zhang、X. Zhao、C. Qiu、Y. Tian、Y. Ji、T. Xin 等, 《物理评论快报》124，250601（2020年）。[735] J. Du、N. Xu、X. Peng、P. Wang、S. Wu 和 D. Lu, 《物理评论快报》104，030502（2010年）。[736] Z. Li、X. Liu、H. Wang、S. Ashhab、J. Cui、H. Chen、X. Peng 和 J. Du, 《物理评论快报》122，090504（2019年）。[737] D. Lu、N. Xu、R. Xu、H. Chen、J. Gong、X. Peng 和 J. Du, 《物理评论快报》107，020501（2011年）。[738] Z. Luo、J. Li、Z. Li、L.-Y. Hung、Y. Wan、X. Peng 和 J. Du, 《自然·物理》14，160（2018年）。[739] K. Li、Y. Wan、L.-Y. Hung、T. Lan、G. Long、D. Lu、B. Zeng 和 R. Laflamme, 《物理评论快报》118，080502（2017年）。[740] Z. Lin、L. Zhang、X. Long、Y.-a. Fan、Y. Li、K. Tang、J. Li、X. Nie、T. Xin 等, 《npj量子信息》8，1（2022年）。[741] Z. Zhang、X. Long、X. Zhao、Z. Lin、K. Tang、H. Liu、X. Yang、X. Nie、J. Wu 等, 《物理评论A》105，L030402（2022年）。[742] Z. Li、X. Liu、N. Xu 和 J. Du, 《物理评论快报》114，140504（2015年）。[743] X.-W. Yao、H. Wang、Z. Liao、M.-C. Chen、J. Pan、J. Li、K. Zhang、X. Lin、Z. Wang 等, 《物理评论X》7，031041（2017年）。[744] T. Xin、L. Che、C. Xi、A. Singh、X. Nie、J. Li、Y. Dong 和 D. Lu, 《物理评论快报》126，110502（2021年）。[745] C. A. Ryan、O. Moussa、J. Baugh 和 R. Laflamme, 《物理评论快报》100，140501（2008）。[746] G. A. Álvarez、D. Suter 和 R. Kaiser, 《科学》349，846（2015年）。[747] K. X. Wei、C. Ramanathan 和 P. Cappellaro, 《物理评论快报》120，070501（2018年）。[748] K. X. Wei、P. Peng、O. Shtanko、I. Marvian、S. Lloyd、C. Ramanathan 和 P. Cappellaro, 《物理评论快报》123，090605（2019年）。[749] P. Peng、C. Yin、X. Huang、C. Ramanathan 和 P. Cappellaro, 《自然·物理》17，444（2021年）。[750] S. Asaad、V. Mourik、B. Joecker、M. A. I. Johnson、A. D. Baczewski、H. R. Firgau、M. T. Madzik、V. Schmitt、J. J. Pla 等, 《自然》579，205（2020年）。[751] M. Saffman、T. G. Walker 和 K. Mølmer, 《现代物理评论》82，2313（2010年）。[752] M. Saffman, 《物理学杂志B：原子、分子与光学物理》49，202001（2016年）。[753] A. Browaeys 和 T. Lahaye, 《自然·物理》16，132（2020年）。[754] L. Henriet、L. Beguin、A. Signoles、T. Lahaye、A. Browaeys、G.-O. Reymond 和 C. Jurczak, 《Quantum》4，327（2020年）。[755] M. Morgado 和 S. Whitlock, 《AVS量子科学》3，023501（2021年）。[756] A. Cooper、J. P. Covey、I. S. Madjarov、S. G. Porsev、M. S. Safronova 和 M. Endres, 《物理评论X》8，041055（2018年）。[757] M. A. Norcia、A. W. Young 和 A. M. Kaufman, 《物理评论X》8，041054（2018年）。[758] S. Saskin、J. T. Wilson、B. Grinkemeyer 和 J. D. Thompson, 《物理评论快报》122，143002（2019年）。[759] A. M. Kaufman 和 K.-K. Ni, 《自然·物理》17，1324（2021年）。

[760] N. Schlosser、G. Reymond、I. Protsenko 和 P. Grangier，《自然》411，1024（2001年）。[761] N. Schlosser、G. Reymond 和 P. Grangier，《物理评论快报》89，023005（2002年）。[762] T. Grünzweig、A. Hilliard、M. McGovern 和 M. F. Andersen，《自然·物理》6，951（2010年）。[763] B. J. Lester、N. Luick、A. M. Kaufman、C. M. Reynolds 和 C. A. Regal，《物理评论快报》115，073003（2015年）。[764] M. O. Brown、T. Thiele、C. Kiehl、T.-W. Hsu 和 C. A. Regal，《物理评论X》9，011057（2019年）。[765] M. M. Aliyu、L. Zhao、X. Q. Quek、K. C. Yellapragada 和 H. Loh，《物理评论研究》3，043059（2021年）。[766] A. Jenkins、J. W. Lis、A. Senoo、W. F. McGrew 和 A. M. Kaufman，《物理评论X》12，021027（2022年）。[767] D. Barredo、S. de Léséleuc、V. Lienhard、T. Lahaye 和 A. Browaeys，《科学》354，1021（2016年）。[768] M. Endres、H. Bernien、A. Keesling、H. Levine、E. R. Anschuetz、A. Krajenbrink、C. Senko、V. Vuletic、M. Greiner 等，《科学》354，1024（2016年）。[769] D. Barredo、V. Lienhard、S. De Leseleuc、T. Lahaye 和 A. Browaeys，《自然》561，79（2018年）。[770] T. M. Graham、M. Kwon、B. Grinkemeyer、Z. Marra、X. Jiang、M. T. Lichtman、Y. Sun、M. Ebert 和 M. Saffman，《物理评论快报》123，230501（2019年）。[771] P. Scholl、M. Schuler、H. J. Williams、A. A. Eberharter、D. Barredo、K.-N. Schymik、V. Lienhard、L.-P. Henry、T. C. Lang 等，《自然》595，233（2021年）。[772] S. Ebadi、T. T. Wang、H. Levine、A. Keesling、G. Semeghini、A. Omran、D. Bluvstein、R. Samajdar、H. Pichler 等，《自然》595，227（2021年）。[773] K.-N. Schymik、S. Pancaldi、F. Nogrette、D. Barredo、J. Paris、A. Browaeys 和 T. Lahaye，《物理评论应用》16，034013（2021年）。[774] K.-N. Schymik、B. Ximenez、E. Bloch、D. Dreon、A. Signoles、F. Nogrette、D. Barredo、A. Browaeys 和 T. Lahaye，《物理评论A》106，022611（2022年）。[775] S. De Léséleuc、D. Barredo、V. Lienhard、A. Browaeys 和 T. Lahaye，《物理评论A》97，053803（2018年）。[776] M. J. Gibbons、C. D. Hamley、C.-Y. Shih 和 M. S. Chapman，《物理评论快报》106，133002（2011年）。[777] A. Fuhrmanek、R. Bourgain、Y. R. P. Sortais 和 A. Browaeys，《物理评论快报》106，133003（2011年）。[778] Y.-Y. Jau、A. M. Hankin、T. Keating、I. H. Deutsch 和 G. W. Biedermann，《自然·物理》12，71（2016年）。[779] M. Kwon、M. F. Ebert、T. G. Walker 和 M. Saffman，《物理评论快报》119，180504（2017年）。[780] S. Yu、P. Xu、M. Liu、X. He、J. Wang 和 M. Zhan，《物理评论A》90，062335（2014年）。[781] T. Xia、M. Lichtman、K. Maller、A. W. Carr、M. J. Piotrowicz、L. Isenhower 和 M. Saffman，《物理评论快报》114，100503（2015年）。[782] D. Bluvstein、H. Levine、G. Semeghini、T. T. Wang、S. Ebadi、M. Kalinowski、A. Keesling、N. Maskara、H. Pichler 等，《自然》604，451（2022年）。[783] A. M. Kaufman、B. J. Lester、M. Foss-Feig、M. L. Wall、A. M. Rey 和 C. A. Regal，《自然》527，208（2015年）。[784] T. Wilk、A. Gaëtan、C. Evellin、J. Wolters、Y. Miroshnychenko、P. Grangier 和 A. Browaeys，《物理评论快报》104，010502（2010年）。[785] L. Isenhower、E. Urban、X. L. Zhang、A. T. Gill、T. Henage、T. A. Johnson、T. G. Walker 和 M. Saffman，《物理评论快报》104，010503（2010年）。[786] H. Levine、A. Keesling、A. Omran、H. Bernien、S. Schwartz、A. S. Zibrov、M. Endres、M. Greiner、V. Vuletić 等，《物理评论快报》121，123603（2018年）。[787] H. Levine、A. Keesling、G. Semeghini、A. Omran、T. T. Wang、S. Ebadi、H. Bernien、M. Greiner、V. Vuletić 等，《物理评论快报》123，170503（2019年）。[788] S. Ma、A. P. Burgers、G. Liu、J. Wilson、B. Zhang 和 J. D. Thompson，《物理评论X》12，021028（2022年）。[789] I. S. Madjarov、J. P. Covey、A. L. Shaw、J. Choi、A. Kale、A. Cooper、H. Pichler、V. Schkolnik、J. R. Williams 等，《自然·物理》16，857（2020年）。[790] J. T. Wilson、S. Saskin、Y. Meng、S. Ma、R. Dilip、A. P. Burgers 和 J. D. Thompson，《物理评论快报》128，033201（2022年）。[791] T. M. Graham、Y. Song、J. Scott、C. Poole、L. Phutti- tarn、K. Jooya、P. Eichler、X. Jiang、A. Marra 等，《自然》604，457（2022年）。[792] T. Gullion、D. B. Baker 和 M. S. Conradi，《磁共振杂志》89，479（1990）。[793] J. Yang、X. He、R. Guo、P. Xu、K. Wang、C. Sheng、M. Liu、J. Wang、A. Derevianko 等，《物理评论快报》117，123201（2016年）。[794] K. Barnes、P. Battaglino、B. J. Bloom、K. Cassella、R. Coxe、N. Crisosto、J. P. King、S. S. Kondov、K. Kotru 等，《自然·通讯》13，1（2022年）。[795] S. Ebadi、A. Keesling、M. Cain、T. T. Wang、H. Levine、D. Bluvstein、G. Semeghini、A. Omran、J.-G. Liu 等，《科学》376，1209（2022年）。[796] H. Labuhn、D. Barredo、S. Ravets、S. De Léséleuc、T. Macrì、T. Lahaye 和 A. Browaeys，《自然》534，667（2016年）。[797] S. De Léséleuc、S. Weber、V. Lienhard、D. Barredo、H. P. Büchler、T. Lahaye 和 A. Browaeys，《物理评论快报》120，113602（2018年）。[798] H. Kim、Y. Park、K. Kim、H.-S. Sim 和 J. Ahn，《物理评论快报》120，180502（2018年）。[799] M. Kim、Y. Song、J. Kim 和 J. Ahn，PRX Quantum 1，020323（2020年）。[800] Y. Song、M. Kim、H. Hwang、W. Lee 和 J. Ahn，《物理评论研究》3，013286（2021年）。[801] H. Bernien、S. Schwartz、A. Keesling、H. Levine、A. Om- ran、H. Pichler、S. Choi、A. S. Zibrov、M. Endres 等，《自然》551，579（2017年）。[802] A. Keesling、A. Omran、H. Levine、H. Bernien、H. Pich- ler、S. Choi、R. Samajdar、S. Schwartz、P. Silvi 等，《自然》568，207（2019年）。[803] V. Lienhard、S. de Léséleuc、D. Barredo、T. Lahaye、A. Browaeys、M. Schuler、L.-P. Henry 和 A. M. Läuchli，《物理评论X》8，021070（2018年）。[804] D. Bluvstein、A. Omran、H. Levine、A. Keesling、G. Semeghini、S. Ebadi、T. T. Wang、A. A. Michailidis、N. Maskara 等，《科学》371，1355（2021年）。[805] G. Semeghini、H. Levine、A. Keesling、S. Ebadi、T. T. Wang、D. Bluvstein、R. Verresen、H. Pichler、M. Kali- nowski 等，《科学》374，1242（2021年）。[806] S. de Léséleuc、V. Lienhard、P. Scholl、D. Barredo、S. Weber、N. Lang、H. P. Büchler、T. Lahaye 和 A. Browaeys，《科学》365，775（2019年）。[807] P. Scholl、H. J. Williams、G. Bornet、F. Wallner、D. Barredo、L. Henriet、A. Signoles、C. Hainaut、T. Franz 等，PRX Quantum 3，020303（2022年）。[808] A. M. Kaufman、B. J. Lester 和 C. A. Regal，《物理评论X》2，041014（2012年）。[809] J. D. Thompson、T. G. Tiecke、A. S. Zibrov、V. Vuletić 和 M. D. Lukin，《物理评论快报》110，133001（2013年）。[810] D. V. Vasilyev、A. Grankin、M. A. Baranov、L. M.

Sieberer 和 P. Zoller，PRX Quantum 1，020302（2020年）。[811] K. Singh、S. Anand、A. Pocklington、J. T. Kemp 和 H. Bernien，《物理评论X》12，011040（2022年）。[812] E. Knill、R. Laflamme 和 G. J. Milburn，《自然》409，46（2001年）。[813] S. Aaronson 和 A. Arkhipov，载于第四十三届美国计算机协会计算理论研讨会论文集（2011年），第333–342页。[814] C. S. Hamilton、R. Kruse、L. Sansoni、S. Barkhofen、C. Silberhorn 和 I. Jex，《物理评论快报》119，170501（2017年）。[815] P. Kok、W. J. Munro、K. Nemoto、T. C. Ralph、J. P. Dowling 和 G. J. Milburn，《现代物理评论》79，135（2007）。[816] 潘建伟、陈增兵、陆朝阳、H. Weinfurter、A. Zeilinger 和 M. Żukowski，《现代物理评论》84，777（2012年）。[817] H.-S. Zhong、Y. Li、W. Li、L.-C. Peng、Z.-E. Su、Y. Hu、Y.-M. He、X. Ding、W. Zhang 等，《物理评论快报》121，250505（2018年）。[818] X.-L. Wang、Y.-H. Luo、H.-L. Huang、M.-C. Chen、Z.- E. Su、C. Liu、C. Chen、W. Li、Y.-Q. Fang 等，《物理评论快报》120，260502（2018年）。[819] P. Thomas、L. Ruscio、O. Morin 和 G. Rempe，《自然》608，677（2022年）。[820] H.-S. Zhong、Y.-H. Deng、J. Qin、H. Wang、M.-C. Chen、L.-C. Peng、Y.-H. Luo、D. Wu、S.-Q. Gong 等，《物理评论快报》127，180502（2021年）。[821] C. K. Hong、Z. Y. Ou 和 L. Mandel，《物理评论快报》59，2044（1987年）。[822] R. Ghosh 和 L. Mandel，《物理评论快报》59，1903（1987年）。[823] P. G. Kwiat、K. Mattle、H. Weinfurter、A. Zeilinger、A. V. Sergienko 和 Y. Shih，《物理评论快报》75，4337（1995年）。[824] F. Kaneda、B. G. Christensen、J. J. Wong、H. S. Park、K. T. McCusker 和 P. G. Kwiat，Optica 2，1010（2015年）。[825] J. F. Clauser，《物理评论 D》9，853（1974年）。[826] H. J. Kimble、M. Dagenais 和 L. Mandel，《物理评论快报》39，691（1977年）。[827] F. Diedrich 和 H. Walther，《物理评论快报》58，203（1987年）。[828] W. E. Moerner 和 L. Kador，《物理评论快报》62，2535（1989年）。[829] P. Michler、A. Kiraz、C. Becher、W. V. Schoenfeld、P. Petroff、L. Zhang、E. L. Hu 和 A. Imamoglu，《科学》290，2282（2000年）。[830] C. Kurtsiefer、S. Mayer、P. Zarda 和 H. Weinfurter，《物理评论快报》85，290（2000年）。[831] S. Castelletto、B. C. Johnson、V. Ivady、N. Stavrias、T. Umeda、A. Gali 和 T. Ohshima，《自然·材料》13，151（2013年）。[832] T. T. Tran、K. Bray、M. J. Ford、M. Toth 和 I. Aharonovich，《自然·纳米技术》11，37（2016年）。[833] P. Senellart、G. Solomon 和 A. White，《自然·纳米技术》12，1026（2017年）。[834] N. Tomm、A. Javadi、N. O. Antoniadis、D. Najer、M. C. Löbl、A. R. Korsch、R. Schott、S. R. Valentin、A. D. Wieck 等，《自然·纳米技术》16，399（2021年）。[835] H. Wang、Y.-M. He、T.-H. Chung、H. Hu、Y. Yu、S. Chen、X. Ding、M.-C. Chen、J. Qin 等，《自然·光子学》13

，770（2019年）。

[836] M. Varnava、D. E. Browne 和 T. Rudolph，《物理评论快报》100，060502（2008）。[837] S. L. Braunstein 和 P. Van Loock，《现代物理评论》77，513（2005）。[838] S. Lloyd 和 S. L. Braunstein，载于《连续变量量子信息》（施普林格，1999年），第9–17页。[839] D. Gottesman、A. Kitaev 和 J. Preskill，《物理评论A》64，012310（2001）。[840] H. Vahlbruch、M. Mehmet、K. Danzmann 和 R. Schn- abel，《物理评论快报》117，110801（2016）。[841] A. Furusawa、J. L. Sørensen、S. L. Braunstein、C. A. Fuchs、H. J. Kimble 和 E. S. Polzik，《科学》 282，706 （1998 ）。[842] M. V. Larsen、X. Guo、C. R. Breum、J. S. Neergaard- Nielsen 和 U. L. Andersen，《科学》366，369（2019）。[843] W. Asavanant、Y. Shiozawa、S. Yokoyama、B. Charoen-sombutamon、H. Emura、R. N. Alexander、S. Takeda、J.-i. Yoshikawa、N. C. Menicucci 等，《科学》366，373（2019）。[844] M. Reck、A. Zeilinger、H. J. Bernstein 和 P. Bertani，《物理评论快报》73，58（1994）。[845] W. R. Clements、P. C. Humphreys、B. J. Metcalf、W. S. Kolthammer 和 I. A. Walmsley，Optica 3，1460（2016）。[846] H. Wang、Y. He、Y.-H. Li、Z.-E. Su、B. Li、H.-L. Huang、X. Ding、M.-C. Chen、C. Liu、J. Qin 等，《自然·光子学》11，361（2017）。[847] H. Wang、J. Qin、X. Ding、M. Chen、S. Chen、X. You、Y. He、L. You、Z. M. Wang 等，《物理评论快报》123，250503（2019）。[848] Y. He、X. Ding、Z.-E. Su、H.-L. Huang、J. Qin、C. Wang、S. Unsleber、C. Chen、H. Wang 等，《物理评论快报》118，190501（2017）。[849] J. B. Spring、B. J. Metcalf、P. C. Humphreys、W. S. Kolthammer、X. Jin、M. Barbieri、A. Datta、N. Thomaspeter、N. K. Langford 等，《科学》339，798（2013）。[850] M. Tillmann、B. Dakic、R. Heilmann、S. Nolte、A. Sza- meit 和 P. Walther，《自然·光子学》7，540（2013）。[851] A. Crespi、R. Osellame、R. Ramponi、D. J. Brod、E. F. Galvao、N. Spagnolo、C. Vitelli、E. Maiorino、P. Mat- aloni 等，《自然·光子学》7，545（2013）。[852] J. Preskill，arXiv: 1203.5813（2012）。[853] M. A. Broome、A. Fedrizzi、S. Rahimikeshari、J. Dove、S. Aaronson、T. C. Ralph 和 A. White，《科学》339，794（2013）。[854] A. P. Lund、A. Laing、S. Rahimikeshari、T. Rudolph、J. L. Obrien 和 T. C. Ralph，《物理评论快报》113，100502（2014）。[855] M. Bentivegna、N. Spagnolo、C. Vitelli、F. Flamini、N. Viggianiello、L. Latmiral、P. Mataloni、D. J. Brod、E. F. Galvao 等，《科学进展》1，e1400255（2015）。[856] K. R. Motes、A. Gilchrist、J. P. Dowling 和 P. P. Rohde，《物理评论快报》113，120501（2014）。[857] J. Huh、G. G. Guerreschi、B. Peropadre、J. R. McClean 和 A. Aspuru-Guzik，《自然·光子学》9，615（2015）。[858] J. M. Arrazola 和 T. R. Bromley，《物理评论快报》121，030503（2018）。[859] C. Sparrow、E. Martín-López、N. Maraviglia、A. Neville、C. Harrold、J. Carolan、Y. N. Joglekar、T. Hashimoto、N. Matsuda 等，《自然》557，660（2018）。[860] L. Banchi、M. Fingerhuth、T. Babej、C. Ing 和 J. M. Arrazola，《科学进展》6，eaax1950（2020）。[861] J. Preskill，《Quantum》2，79（2018）。

[862] T. M. Stace、S. D. Barrett 和 A. C. Doherty，《物理评论快报》**102**，200501（2009）。[863] B. M. Terhal，《现代物理评论》**87**，307（2015）。[864] M. Pant、D. Towsley、D. Englund 和 S. Guha，《自然·通讯》**10**，1（2019）。[865] K. Fukui、A. Tomita、A. Okamoto 和 K. Fujii，《物理评论X》**8**，021054（2018）。[866] D. E. Chang、V. Vuletić 和 M. D. Lukin，《自然·光子学》**8**，685（2014）。[867] M. Fleischhauer、A. Imamoglu 和 J. P. Marangos，《现代物理评论》**77**，633（2005）。[868] L.-M. Duan 和 H. Kimble，《物理评论快报》**92**，127902（2004）。[869] A. V. Gorshkov, J. Otterbach, M. Fleischhauer, T. Pohl 和 M. D. Lukin，《物理评论快报》**107**, 133602（2011年）。[870] Z. Chen, Y. Zhou, J.-T. Shen, P.-C. Ku 和 D. Steel，Phy. Rev. A **103**, 052610（2021年）。[871] B. Hacker, S. Welte, G. Rempe 和 S. Ritter，《自然》**536**, 193（2016年）。[872] D. Tiarks, S. Schmidt-Eberle, T. Stolz, G. Rempe 和 S. Dürr，《自然·物理》**15**, 124（2019年）。[873] T. Stolz, H. Hegels, M. Winter, B. Röhr, Y.-F. Hsiao, L. Husel, G. Rempe 和 S. Dürr，《物理评论X》**12**, 021035（2022年）。[874] J. Vaneecloo, S. Garcia 和 A. Ourjoumtsev，《物理评论X》**12**, 021034（2022年）。