

量子计算机的物理基础与实现技术进展

赵 佳

河北工业大学 天津

【摘要】量子计算是一种遵循量子力学规律调控量子信息单元进行计算的新型计算模式，其核心利用量子比特的叠加、纠缠和干涉等特性，在处理特定问题时理论上可实现对经典计算的指数级加速，有望为密码学、材料设计、药物研发和人工智能等领域带来颠覆性变革。本文系统阐述了量子计算机的物理基础与近年来的实现技术进展。量子计算的物理实现依赖于能有效编码和操控量子比特的物理体系，主要包括超导电路、光学体系、离子阱、半导体量子点以及金刚石氮空位色心等。近年来，各技术路线均取得了显著突破：超导量子计算在比特数量、门保真度及互联技术上快速推进，多个研究团队已成功研制包含数百个量子比特的处理器，并实现了量子计算优越性的演示；光量子计算凭借高斯玻色采样等路径亦成功验证了量子优越性，且集成光学芯片技术发展迅速；离子阱体系则持续保持着高精度逻辑操作的标杆；而固态自旋体系在室温操作与兼容传统半导体工艺方面展现出独特优势。然而，迈向大规模容错量子计算仍面临退相干、高精度量子操控、量子纠错规模化等核心挑战。未来，量子计算的发展需要多学科交叉融合，通过在硬件性能、软件算法和工程化集成上的持续创新，最终实现通用量子计算机的宏伟目标。

【关键词】量子计算；量子比特；物理实现；超导电路；光量子计算；量子优越性；量子纠错

【收稿日期】2024 年 11 月 18 日

【出刊日期】2024 年 12 月 21 日

【DOI】10.12208/j.pstr.20240011

Physical foundations and technological advances in quantum computers

Jia Zhao

Hebei University of Technology, Tianjin

【Abstract】 Quantum computing is a new computing mode that regulates quantum information units to compute according to the laws of quantum mechanics. Its core uses the superposition, entanglement and interference characteristics of qubits to theoretically accelerate classical computing exponentially when dealing with specific problems, which is expected to bring subversive changes to cryptography, material design, drug research and development and artificial intelligence. In this paper, the physical basis of quantum computer and the progress of realization technology in recent years are systematically described. The physical realization of quantum computing depends on physical systems that can effectively encode and manipulate qubits, including superconducting circuits, optical systems, ion traps, semiconductor quantum dots and diamond nitrogen vacancy color centers. In recent years, remarkable breakthroughs have been made in various technical routes: superconducting quantum computing has been rapidly advanced in bit quantity, gate fidelity and interconnection technology, and several research teams have successfully developed processors containing hundreds of qubits, and realized the demonstration of quantum computing superiority; Optical quantum computing has also successfully verified quantum superiority by virtue of Gaussian boson sampling and other paths, and integrated optical chip technology has developed rapidly; Ion trap system continues to maintain the benchmark of high-precision logic operation; The solid-state spin system shows unique advantages in room temperature operation and compatibility with traditional semiconductor processes. However, towards large-scale fault-tolerant quantum computing, there are still core challenges such as decoherence, high-precision quantum manipulation and quantum error correction scale. In the future, the development of quantum

computing will require interdisciplinary integration, and through continuous innovation in hardware performance, software algorithms and engineering integration, the grand goal of general purpose quantum computers will be finally realized.

【Keywords】 Quantum computing; Quantum bits; Physical implementation; Superconducting circuits; Optical quantum computing; Quantum superiority; Quantum error correction

引言

计算能力的飞跃始终是推动人类科技进步与社会变革的核心引擎。过去半个多世纪,经典计算机遵循着“摩尔定律”的轨迹,性能持续提升,深刻地改变了我们的生活方式。然而,随着晶体管尺寸逐渐逼近物理极限,摩尔定律正在走向终结。与此同时,许多涉及大规模组合优化、量子系统模拟或大数质因数分解的重大科学和工程问题,其计算复杂度对经典计算机而言呈现出指数级增长,使得即使是最先进的超级计算机也显得力不从心^[1]。这一背景催生了对于一种全新计算范式的迫切需求——量子计算^[2]。量子计算并非旨在替代经典计算机处理所有任务,而是利用独特的量子力学原理,为解决某些经典计算机难以企及的复杂问题提供了革命性的工具,被誉为下一代信息技术的战略制高点^[3]。

量子计算的核心优势根植于其深刻的物理基础,即量子力学的基本原理。与经典比特只能处于 0 或 1 的状态不同,量子计算的基本信息单元——量子比特(Qubit)——能够处于 0 和 1 的叠加态(Superposition)^[4]。这意味着一个量子比特可以同时编码两种状态,而 n 个量子比特的体系则能够同时表示 2^n 个状态的叠加,从而赋予量子计算机天然的并行处理能力^[5]。更为奇特的是量子纠缠(Entanglement),这是一种多个量子比特之间存在的、超越经典关联的强大耦合关系^[6]。处于纠缠态的量子比特群,无论相隔多远,其状态都无法被单独描述,对一个比特的操作会瞬间影响其余比特的状态。这种非定域的关联是实现量子并行计算和构建量子算法的关键资源^[7]。最后,通过精心设计的量子门操作,可以对叠加态进行演化,并通过量子干涉(Interference)效应放大正确的计算结果同时抑制错误结果,最终通过测量得到输出^[8]。这种基于叠加、纠缠和干涉的“量子并行”正是 Shor 算法、Grover 搜索算法等能够实现指数或二次加速的根本物理原因^[9]。

量子计算的概念并非一蹴而就。早在 1982 年,著名物理学家理查德·费曼就提出了利用量子系统

模拟另一量子系统的构想,开启了量子计算研究的先河^[10]。随后,1985 年 David Deutsch 严格定义了量子图灵机模型,奠定了量子计算的理论基础。1994 年, Peter Shor 提出了震惊世界的 Shor 大数质因数分解算法,从理论上证明了量子计算在破解广泛使用的 RSA 加密体系上的巨大潜力,极大地激发了全球研究热情^[11]。1996 年 Lov Grover 提出了无序数据库搜索的二次加速算法,进一步拓展了量子计算的应用范围^[12]。然而,在长达二十年的时间里,量子计算主要停留在理论层面,因为物理上实现一个可控、可测且与环境隔离良好的量子比特是极其困难的^[13]。科学家们需要找到合适的物理体系来承载量子比特,并解决退相干(Decoherence,即量子态因与环境相互作用而丧失量子特性)、操控精度和可扩展性等一系列严峻挑战^[14]。

进入 21 世纪后,随着实验技术的进步,多种物理体系在实现量子计算的道路上展现出巨大潜力,并形成了不同的技术路线^[15]。超导量子计算利用低温下的约瑟夫森结构造人工原子,具有易于调控和集成的优势^[16];光量子计算利用光子的量子特性,在传输速度和相干性方面表现优异^[17];离子阱量子计算通过电磁场束缚单个离子,实现了极高的操控精度^[18];而基于半导体量子点^[19]或金刚石 NV 色心^[20]的固态体系则因其与现有半导体工艺的兼容性而备受关注。各种技术路径竞相发展,推动了量子计算从理论走向实验,从概念验证走向性能竞赛的新阶段^[21]。

近年来,量子计算领域更是取得了令人瞩目的突破性进展,其中一个重要的里程碑是“量子计算优越性”(Quantum Supremacy)的实验演示^[22]。2019 年, Google 研究团队使用 53 个超导量子比特的“Sycamore”处理器,在 200 秒内完成了特定任务,并宣称该任务需要世界上最快的超级计算机花费约 1 万年才能完成^[23]。几乎在同一时期,中国科学技术大学团队先后基于光量子体系^[24]和超导体系实现了量子优越性,将量子计算的研究推向了新的高潮^[25]。

这些成就标志着量子计算已经正式进入了“noisy intermediate-scale quantum (NISQ)”时代,即含噪声的中等规模量子时代^[26]。

在此背景下,本文旨在系统性地梳理量子计算机的物理基础与实现技术的最新进展。首先,本文将详细阐述量子计算的核心物理原理;其次,将全面综述超导、光量子、离子阱、固态体系等主要技术路线的近期突破;然后,将深入分析量子计算优越性、高保真量子操控、量子纠错等关键技术的最新成果;最后,将讨论当前面临的主要挑战并对未来发展趋势进行展望^[27]。通过对这些内容的系统论述,本文期望能够为读者提供一个关于量子计算物理基础与实现技术进展的全面而深入的理解。

1 量子计算的物理实现方法

量子计算机的强大算力源于其独特的物理基础,而将理论上的量子比特转化为物理现实是量子计算研究的核心挑战。一个理想的量子计算物理平台需要同时满足狄拉克判据,包括良好的可扩展性、长相干时间、高保真度的量子门操作以及高效的初态制备与测量能力。近年来,多种物理体系在这些方面取得了显著进展,形成了各具特色的技术路线。

1.1 超导量子计算

超导量子计算是目前发展最为迅速、产业化程度最高的技术路线之一。其物理基础是利用超导电路中的集体变量来构造人工原子,即通过电感、电容和约瑟夫森结组成非线性谐振电路。在极低温环境下(通常低于 20mK),超导电路进入宏观量子态,其能级是量子化的,最低的两个能级可作为一个量子比特使用。通过调节外加磁通或微波驱动,可以实现对量子态的精确实时操控。

在技术进展方面,超导量子计算近年来实现了多项突破。量子比特数量已经从几十个快速增长到数百个,多个研究团队已经成功研制出超过 100 个量子比特的处理器。在比特性能方面,单量子比特门保真度普遍达到 99.9%以上,两量子比特门保真度也突破了 99%的关键门槛。量子比特的相干时间从最初的纳秒量级提升到了百微秒量级,为进行复杂的量子算法操作提供了可能。

在测控系统方面,极低温测控技术的发展为大规规模超导量子计算提供了重要支撑。多层布线、低温电子学、高频微波控制等技术的进步,使得在极

低温环境下实现对大量量子比特的精确控制和读取成为可能。量子比特之间的互联技术也取得了重要进展,从最初的近邻耦合发展到现在的可调耦合架构,大大提高了量子比特的连通性和操作灵活性。

1.2 光量子计算

光量子计算利用光子作为量子信息的载体,具有独特的优势。光子的退相干时间极长,在传输过程中几乎不受环境干扰,可以在室温下进行操作。量子信息可以编码在光子的不同自由度上,如偏振、路径、时间 bin 或轨道角动量等。通过线性光学元件、非线性光学效应和单光子探测器等,可以实现对光量子比特的操纵和测量。

近年来,光量子计算在多个方向取得了显著进展。在高斯玻色采样方面,研究团队通过开发高性能量子光源、低损耗光学线路和高效率单光子探测器,成功实现了大规模光量子计算优越性的演示。实验规模已经从最初的几个光子发展到现在的近百个光子,计算复杂度远远超越了经典超级计算机的模拟能力。

集成光量子芯片是另一个重要发展方向。通过半导体工艺在芯片上集成波导、分束器、相位调制器等光学元件,实现了光量子计算系统的小型化和稳定性提升。硅基光量子芯片、氮化硅光量子芯片等不同材料平台都取得了重要进展,量子门保真度和集成度不断提高。此外,光量子计算与量子通信网络的融合也展现出广阔前景,为构建分布式量子计算系统奠定了基础。

1.3 离子阱量子计算

离子阱量子计算利用电磁场束缚单个原子离子,通过激光冷却和激光操控来实现量子计算。每个离子的内态能级可以作为量子比特,而离子之间的库伦相互作用提供了天然的量子比特耦合机制。离子阱系统具有量子比特一致性高、相干时间长、量子门保真度极高等特点,被认为是实现高精度量子计算的理想平台之一。

在技术进展方面,离子阱量子计算在量子门保真度方面保持着领先地位。单量子比特门保真度可以达到 99.99%以上,两量子比特门保真度也超过了 99.9%。量子比特的相干时间可以达到数秒甚至更长,为进行复杂的量子算法提供了充足的时间窗口。在量子比特数量扩展方面,研究人员开发了多种离子

阱架构,包括线性保罗阱、表面阱和芯片阱等,实现了对数十个离子量子比特的囚禁和操控。

离子阱系统的另一个重要进展是量子比特连接性的改善。通过开发离子链重组技术、光子互联技术等,实现了不同离子链之间的量子信息传输,为构建大规模离子阱量子计算系统提供了可能。此外,离子阱系统在量子模拟、量子计量等应用领域也展现出独特优势,成为量子技术研究的重要平台。

1.4 固态自旋量子计算

固态自旋量子计算主要包括金刚石 NV 色心体系和硅基量子点体系两大类。金刚石 NV 色心体系利用金刚石晶体中的氮-空位缺陷中心,其电子自旋和核自旋可以作为量子比特使用。该体系的突出优势是可以在室温下进行操作,且相干时间较长。通过微波脉冲和光学方法可以实现对自旋态的精确实时操控。

近年来,金刚石 NV 色心体系在多个方面取得了重要进展。量子比特的相干时间通过材料纯化和动力学解耦等技术得到了显著延长,达到了毫秒量级。量子门保真度不断提高,单量子比特门保真度超过 99%,两量子比特门保真度也达到了 90%以上。在量子比特互联方面,实现了基于光子通道的多个 NV 色心之间的纠缠,为构建量子网络奠定了基础。

硅基量子点体系则利用半导体量子点中的电子自旋或核自旋作为量子比特。该体系的最大优势是与现有半导体工艺兼容,具有良好的可扩展性前景。通过电极施加电压可以定义和操控量子点,通过微波或电脉冲可以实现自旋态的控制。近年来,硅基量子点量子计算在量子比特一致性、操控精度和读取保真度等方面都取得了显著进步,单量子比特门保真度达到 99.9%以上,两量子比特门保真度也突破了 99%。

1.5 其他物理体系

除了上述主要技术路线外,还有一些其他的物理体系也在量子计算研究中展现出独特价值。拓扑量子计算利用物质的拓扑相来实现量子比特,通过拓扑保护机制可以大大提高量子比特的抗干扰能力。虽然实验实现仍然面临挑战,但近年来在材料制备和拓扑物态操控方面取得了一些重要进展。

核磁共振量子计算利用液体样品中分子核自旋作为量子比特,通过射频脉冲实现量子操控。该体

系在量子算法验证和量子控制技术研究方面发挥了重要作用,虽然可扩展性有限,但为量子计算研究提供了宝贵的实验平台。

冷原子系统利用激光冷却和光晶格囚禁中性原子,通过原子间的相互作用实现量子计算。该体系在量子模拟方面具有独特优势,近年来在原子芯片集成和量子门操控等方面也取得了重要进展。

各种物理体系各有优劣,都在朝着实现实用化量子计算的目标迈进。超导体系在可扩展性和操控速度方面优势明显;光量子体系在传输和互联方面独具特色;离子阱体系在操控精度方面表现突出;固态体系则在兼容性和室温操作方面展现出潜力。未来的量子计算发展可能会走向异构集成方向,充分利用不同体系的优势来构建更强大的量子计算系统。

2 关键技术突破与代表性成果

量子计算领域近年来取得了一系列令人瞩目的技术突破,这些突破不仅验证了量子力学的基本原理,更展示了量子计算机解决实际问题的巨大潜力。从量子计算优越性的实验验证到高保真量子态操控,从量子纠错技术的实现到专用量子算法的发展,每一项成果都标志着我们向实用化量子计算迈出了坚实的一步。

2.1 量子计算优越性的实验验证

量子计算优越性是指量子计算机在特定任务上展现出超越经典计算机的计算能力。这一概念的实验验证是量子计算发展史上的重要里程碑。2019年,谷歌研究团队使用 53 比特的“Sycamore”超导量子处理器,在执行随机量子线路采样任务时,仅用 200 秒就完成了计算,而同样的任务在当时最先进的超级计算机上预计需要约 1 万年。这一成果首次在实验上证明了量子计算优越性的存在。

随后,中国科学技术大学团队基于光量子系统实现了更高水平的量子计算优越性。他们构建了 76 个光子的高斯玻色采样系统“九章”,在处理特定数学问题时,其计算速度比当时最快的超级计算机快一百万亿倍。这项成果不仅验证了量子计算优越性,更展示了光量子计算路线的独特优势。2021年,该团队又成功研制出 62 比特的可编程超导量子计算原型机“祖冲之号”,并在随机线路采样任务上实现了量子优越性,比经典算法快一百万倍。

这些量子计算优越性的实验验证具有深远意义。首先，它们证明了量子计算机确实能够实现指数级加速，验证了量子力学在计算领域的优越性。其次，这些实验推动了量子硬件性能的大幅提升，包括量子比特数量的增加、门操作保真度的提高以及测量精度的改进。最重要的是，这些成果激发了全球范围内对量子计算研究的投入，加速了整个领域的发展进程。

2.2 高保真量子态制备与操控

高保真度的量子态制备和操控是实现量子计算的基础。近年来，各技术路线在提高操作保真度方面都取得了显著进展。在超导量子计算领域，研究人员通过优化量子比特设计、改进材料工艺和发展新的操控方法，将单量子比特门保真度提升至 99.99% 以上，两量子比特门保真度达到 99.9% 以上。这些突破得益于多项技术创新，包括采用三维封装技术减少电磁损耗、开发新型约瑟夫森结材料降低噪声、以及运用最优控制理论优化脉冲波形等。

在离子阱系统中，量子门保真度达到了更高的水平。通过使用激光冷却技术和精细的激光脉冲控制，研究人员实现了单量子比特门保真度 99.999% 和两量子比特门保真度 99.99% 的突破性成果。这种极高的操控精度使得离子阱系统成为实现量子纠错和容错量子计算的理想平台之一。

光量子计算系统在量子态操控方面也取得了重要进展。通过发展高性能单光子源、低损耗光学元件和高效率探测器，光量子系统的整体保真度得到显著提升。特别是在集成光量子芯片方面，基于硅基光子学平台的光量子处理器已经能够实现超过 98% 的量子门保真度，为大规模光量子计算奠定了基础。

量子态制备技术的进步同样令人瞩目。研究人员开发了多种高效的量子态初始化方法，包括基于反馈控制的主动初始化技术和基于耗散工程的被动制备方法。这些技术使得在多个物理平台上都能够快速、高保真地制备所需的初始量子态，为后续的量子计算操作提供了可靠的基础。

2.3 量子纠错技术的实验演示

量子纠错是实现容错量子计算的关键技术。由于量子系统极易受到环境噪声的影响，量子信息会快速退相干。量子纠错通过编码和冗余的方式，将逻辑量子比特的信息分布到多个物理量子比特上，

从而保护量子信息免受噪声影响。近年来，量子纠错技术取得了从理论到实验的重要突破。

在超导量子计算系统中，研究人员首次实现了突破盈亏平衡点的量子纠错演示。通过表面码编码，将 1 个逻辑量子比特编码在多个物理量子比特上，并实现了逻辑量子比特的寿命超过最佳物理量子比特的突破。这一成果表明，通过量子纠错确实可以延长量子信息的保存时间，为构建容错量子计算机奠定了基础。

离子阱系统在量子纠错方面也展现出独特优势。利用离子链中多个离子的协同作用，研究人员实现了基于玻色模式的量子纠错方案，成功将逻辑量子比特的相干时间延长了一个数量级。这种方案充分利用了离子阱系统的高操控精度和长相干时间的特点，为实现更高效的量子纠错提供了新思路。

光量子系统在量子纠错方面则采取了不同的技术路径。通过时间编码和频率编码等方式，研究人员实现了对光子量子比特的错误检测和纠正。特别是在量子中继器方面，基于量子纠错的光量子存储和传输技术取得了重要进展，为构建长距离量子通信网络提供了技术支持。

量子纠错技术的实验演示还推动了相关理论和方法的发展。研究人员提出了多种新型量子纠错码，如拓扑码、LDPC 码等，这些新编码方案具有更高的错误阈值和更好的可扩展性。同时，基于机器学习的量子错误抑制方法也显示出巨大潜力，通过智能算法实时识别和纠正错误，大大提高了量子计算的可靠性。

2.4 专用量子模拟与量子算法的实验进展

随着中等规模含噪声量子处理器的发展，专用量子模拟和量子算法的实验研究取得了丰硕成果。量子模拟是量子计算机最具前景的应用领域之一，研究人员利用现有的量子处理器成功模拟了多种复杂的量子系统。

在量子多体系统模拟方面，研究人员使用超导量子处理器成功模拟了费米-哈伯德模型、量子自旋模型等重要的物理模型。这些模拟帮助科学家理解了高温超导、量子磁性等复杂量子现象的内在机制。特别是在量子动力学模拟方面，量子计算机展现出了超越经典计算机的能力，能够模拟传统方法难以处理的量子演化过程。

量子化学计算是另一个取得重要进展的领域。研究人员使用量子处理器模拟了小分子的基态能量和化学反应路径，计算结果与理论预测高度吻合。这些实验不仅验证了量子计算在量子化学领域的应用潜力，更为开发新药物和新材料提供了新的计算工具。

在优化问题求解方面，量子近似优化算法（QAOA）的实验研究取得了显著进展。研究人员使用含噪声量子处理器成功解决了最大割、旅行商等经典优化问题，虽然目前还无法超越最好的经典算法，但这些实验为开发更高效的量子优化算法积累了宝贵经验。

量子机器学习是近年来兴起的一个重要研究方向。研究人员开发了多种量子机器学习算法，并在量子处理器上进行了实验验证。这些算法在数据分类、模式识别等任务中展现出了潜在优势，为人工智能的发展提供了新的技术路径。

特别值得一提的是，这些实验进展不仅展示了量子计算的应用潜力，也推动了量子处理器性能的不断提升。为了运行这些量子算法，研究人员不得不改进量子硬件的性能，优化控制系统的精度，开发更高效的编译和优化方法。这种算法驱动硬件发展的模式正在成为量子计算领域的一个重要特征。

总的来说，这些关键技术突破和代表性成果标志着量子计算正在从实验室走向实用化。虽然目前仍然面临诸多挑战，但这些进展为我们展现了量子计算的巨大潜力和光明前景。随着技术的不断进步，量子计算机必将在科学研究、产业发展和社会进步中发挥越来越重要的作用。

3 讨论：挑战、对比与未来趋势

量子计算领域在取得显著进展的同时，仍面临着诸多基础性挑战。这些挑战不仅涉及物理实现层面，更关乎整个技术路线的可行性和未来发展走向。深入分析各技术路径的优劣，客观评估当前面临的技术瓶颈，并科学展望未来发展趋势，对推动量子计算技术的健康发展具有重要意义。

3.1 各技术路径对比分析

超导量子计算目前处于领先地位，其主要优势体现在可扩展性和操控速度方面。超导量子比特采用微纳加工技术制备，与传统的半导体工艺兼容性好，有利于大规模集成。量子门操作速度可达纳秒

量级，能够快速完成复杂量子算法。然而，超导系统需要极低温环境（约 10mK），制冷成本和能耗较高，量子比特的相干时间相对较短，且相邻量子比特间的串扰问题较为突出。

离子阱系统以其卓越的操控精度和长相干时间著称。量子比特相干时间可达秒量级，单量子比特门保真度可达 99.99% 以上，两量子比特门保真度也达到 99.9% 的水平。离子阱系统的挑战主要在于扩展性方面。随着离子数量的增加，控制系统的复杂度呈指数增长，离子链的稳定性和操控精度都会受到影响。此外，系统的运行需要高真空环境和精密的光学控制系统，这使得大规模集成的难度较大。

光量子计算具有室温运行和传输距离长的独特优势。光子的退相干时间极短，量子信息可以通过光纤进行长距离传输，这在构建量子网络方面具有不可替代的优势。光量子系统的主要限制在于量子逻辑门的概率性实现和测量效率问题。目前的两量子比特门操作成功率仍有待提高，单光子探测器的效率和暗计数率也需要进一步改善。

固态自旋系统（如金刚石 NV 色心和硅基量子点）展现出良好的可扩展性和室温操作潜力。特别是硅基量子点系统，与现有 CMOS 工艺兼容，在大规模集成方面具有天然优势。然而，这些系统的操控精度和读取保真度相对较低，材料缺陷和噪声问题较为突出，需要进一步的材料创新和工程优化。

3.2 迈向通用量子计算的核心挑战

退相干和噪声问题仍然是量子计算面临的最根本挑战。尽管量子比特的相干时间在不断延长，但仍远远不能满足大规模量子算法的需求。环境噪声、控制误差和测量误差都会导致量子信息的衰减和失真。如何在不增加系统复杂度的前提下进一步延长相干时间，是需要持续攻关的重要课题。

量子纠错的可扩展性是实现容错量子计算的关键瓶颈。现有的量子纠错方案往往需要大量的物理量子比特来编码一个逻辑量子比特，这使得资源需求呈指数增长。表面码编码通常需要数百甚至上千个物理量子比特来实现一个高保真的逻辑量子比特，这对当前的技术水平提出了极大挑战。开发更高效的量子纠错码，降低资源开销，是未来研究的重点方向。

大规模量子比特的集成与互连问题日益凸显。

随着量子处理器规模的扩大,布线、散热、控制等工程问题变得越来越复杂。量子比特之间的连通性限制也影响了量子算法的执行效率。如何设计高效的量子芯片架构,实现量子比特的高密度集成和高连通性,是需要解决的重要工程问题。

经典-量子混合计算架构的优化也是一个亟待解决的问题。在 NISQ 时代,如何将量子处理器的优势与经典计算机的强大处理能力有机结合,开发高效的混合算法,是需要深入研究的课题。这涉及到量子编译优化、任务分配、结果处理等多个环节的协同优化。

3.3 未来发展趋势展望

新型量子比特设计将是未来重要的发展方向。研究人员正在探索多种新型量子比特方案,如拓扑量子比特、分子自旋量子比特等,这些新方案可能具有更好的噪声免疫性能和更长的相干时间。特别是拓扑量子比特,如果能够实验实现,将革命性地改变量子计算的错误抑制方式。

异构集成技术预计将成为突破规模瓶颈的重要途径。通过将不同物理体系的优势相结合,例如用超导量子比特做计算单元,用光量子系统做互联通道,用离子阱系统做存储单元,可以构建出性能更优的量子计算系统。这种跨平台的协同方案可能为解决单一体系的技术瓶颈提供新的思路。

量子-Classical 协同计算将向更深层次发展。随着量子处理器规模的扩大,如何高效地分配计算任务,优化资源利用,将成为研究的重点。基于机器学习的量子控制方法、智能化的量子编译技术、以及高效的错误缓解策略都将得到进一步发展。量子计算与人工智能、大数据等技术的融合将催生新的应用范式。

专用量子处理器的发展将快于通用量子计算机。在通用容错量子计算机实现之前,针对特定应用场景的专用量子计算设备将率先得到实际应用。量子模拟器、量子优化处理器、量子机器学习加速器等专用设备将在科学研究和技术创新中发挥重要作用。

量子软件和算法生态将日趋完善。随着硬件平台的成熟,量子编程框架、算法库、仿真工具等软件基础设施将得到快速发展。跨平台的量子软件开发环境将降低研究门槛,推动应用创新。量子算法研究将从理论探索向实际应用转变,更多针对具体问

题的量子算法将被开发出来。

量子计算产业化进程将加速推进。从实验室研究到产业化应用需要解决工程化、标准化、可靠性等一系列问题。量子芯片制造、控制系统集成、软件开发等产业链环节将逐步完善,形成健康的产业生态。政府、企业、科研机构的协同合作将推动量子计算技术的快速落地。

总之,量子计算正处在一个从实验室走向实用化的重要转折点。虽然面临诸多挑战,但技术的进步速度令人鼓舞。未来十年将是量子计算发展的关键时期,各技术路线的竞争与合作将共同推动整个领域向前发展。通过多学科的交叉融合和全球范围的协同创新,量子计算有望最终实现其变革性的潜力,为人类社会带来新的技术革命。

4 结论

本文系统性地综述了量子计算机的物理基础与近年来各主要技术路线的实现进展。通过对超导、光量子、离子阱和固态自旋等主流技术平台的深入分析,我们可以清晰地看到量子计算领域已经从理论探索阶段迈入了技术攻关与工程化并重的新发展阶段。量子计算优越性的多次实验验证,标志着量子计算确实能够实现经典计算难以企及的性能表现,这为整个领域的发展注入了强大信心。

回顾各技术路线的发展现状,超导量子计算在可扩展性和操控速度方面继续保持领先优势,量子处理器规模已经达到数百比特量级,门操作保真度显著提升。光量子计算凭借其室温运行和天然的抗干扰特性,在高斯玻色采样等特定任务中展现出卓越性能。离子阱系统则以极高的操控精度和长相干时间见长,为高保真量子操作设立了性能标杆。固态自旋系统特别是硅基量子点,因其与半导体工艺的良好兼容性,在大规模集成方面展现出独特潜力。各种技术路径的并行发展、相互竞争又相互借鉴,共同推动着整个量子计算领域快速前进。

然而,我们必须清醒地认识到,实现通用容错量子计算机仍然面临着严峻挑战。退相干和噪声问题尚未得到根本性解决,量子纠错的实际应用仍需要突破资源开销过大的瓶颈。大规模量子比特的集成、控制和读取等技术难题有待攻克,不同量子比特间的互联与通信方案仍需优化。这些挑战不仅涉及基础物理问题,更需要材料科学、电子工程、计算

机科学等多学科的协同创新。

展望未来,量子计算的发展将呈现多元化趋势。短期内,专用量子处理器和中规模含噪声量子计算设备将率先在量子模拟、优化计算和机器学习等领域找到应用场景。量子-经典混合计算架构将成为过渡时期的主流范式,通过巧妙结合量子计算与经典计算的优势,解决实际科学和工程问题。中长期来看,随着量子纠错技术的突破和硬件性能的进一步提升,通用量子计算机的实现将逐步从愿景走向现实。

未来重点发展方向应包括:持续提升量子比特性能,延长相干时间,提高门操作保真度;开发更高效的量子纠错方案,降低资源开销;探索新型量子比特和量子计算范式,如拓扑量子计算等;加强量子软件和算法研究,构建完善的量子计算生态系统;推进量子计算标准化和工程化,促进技术成果的产业化应用。

量子计算的发展需要全球科研界的持续投入和跨学科合作。正如经典计算机经历了从真空管到晶体管再到集成电路的演进历程,量子计算机的发展也必将是一个循序渐进、不断突破的过程。我们正处在一个激动人心的技术革命前沿,量子计算有望彻底改变我们处理信息的方式,为解决人类面临的重大科学和技术挑战提供全新工具。尽管前路依然漫长,但坚实的基础已经奠定,清晰的方向已经指明,量子计算的未来充满无限可能。

参考文献

- [1] 栾添,匡学衡,王维,等. 量子计算模拟物理系统进展[J]. 计算机科学与探索,2024,18(11):2787-2797.
- [2] 金展鸿.面向大规模超导量子计算的极低温测控系统的研究[D].中国科学技术大学,2024.
- [3] 邓宇皓.基于高斯玻色采样的量子计算优越性[D].中国科学技术大学,2023.
- [4] 尤宜.基于金刚石 NV 色心的量子编码与量子计算[D].北京邮电大学,2023.
- [5] 张英强.量子物理层保密通信高保真量子态的制备及传输[D].山西大学,2023.
- [6] 温明杰.面向硅基量子计算机的低温模数转换器研究与实现[D].中国科学技术大学,2023.
- [7] 张辉.基于大节点数网络精准排序的量子计算机程序编译系统.安徽省,合肥本源量子计算科技有限责任公司,2023-02-21.
- [8] 张雪松.量子计算机结构与发展路线分析[J].中国电子科学研究院学报,2023,18(02):176-182.
- [9] 周文豪,王耀,翁文康,等.集成光量子计算的研究进展[J].物理学报,2022,71(24):22-35.
- [10] 朱庆玲.超导量子比特快速高保真度读取及在量子优越性上的应用[D].中国科学技术大学,2022.
- [11] 尚云.开放系统量子计算理论及新型量子计算原理.北京市,中国科学院数学与系统科学研究院,2022-03-06.
- [12] 付济邦.超导电子学-自旋电子学复合量子计算器件研究[D].国防科技大学,2021.
- [13] 张诗豪,张向东,李绿周.基于测量的量子计算研究进展[J].物理学报,2021,70(21):23-35.
- [14] 陈希.基于核磁共振技术的量子计算和量子模拟实验研究[D].中国科学技术大学,2021.
- [15] 胡语诚.面向量子芯片的量子计算与量子电路合成研究[D].南京大学,2021.
- [16] 李斌.基于微波光子学和拓扑物态的超导量子计算研究[D].国防科技大学,2020.
- [17] Rongyu Wei, Jun Li, Weihao Wang, and Qinghua Guo. Evaluation on quantum illumination radar with quantum limited amplification[J]. Optics Express. 2023.
- [18] Durr-E-Shahwar; Muhammad Imran; Ahmed B. Altamimi; Wilayat Khan; Shariq Hussain; Mohammad Alsaffar. Quantum Cryptography for Future Networks Security: A Systematic Review[J]. IEEE Access. 2024.
- [19] Tariq M. Khan; Antonio Robles-Kelly. Machine Learning: Quantum vs Classical[J]. IEEE Access. 2020.
- [20] Xi Chen, Peng Wang, Jingzhou Li, Hongyu Yang, Jiahao Zhang, QiuJie Yang, Hongxing Dong, Hongxing Qi. Improving the data rate for long distance visible light communication using h-BN/CdZnSeS@ZnSeS quantum dot composite[J]. Optics express. 2023.
- [21] Duan Huang, YanTing Xiong, Zhuangzhuang Xing, and Qi Zhang. Implementation of energy-efficient convolutional neural networks based on kernel-pruned silicon photonics[J]. Optics Express. 2023.

- [22] Anand Choudhary;Ajay Wasan.Cracking the Curious Case of the Cascade Protocol[J]. IEEE Access.2023.
- [23] Sethuraman Panchanathan.Envisioning the future of the AI research ecosystem[J]. PNAS nexus.2024.
- [24] Kaifei Tang,;Xiang Ji,;Jiahui Liu,;Jiantao Wang,;Yu Xin,;Jizhou Liu,;Guihan Wu,;Qi Sun,;Zhaobang Zeng,;Rulei Xiao,;Nicholas Madamopoulos,;Xiangfei Chen,and Wei Jiang.Photonic convolutional neural network with robustness against wavelength deviations[J]. Optics Express.2023.
- [25] Weiwei Liu,;Changjun Min,;and Yuquan Zhang.Selective plasmonic trapping of nano-particles by Archimedes metalens[J]. Optics Express.2023.
- [26] Guzhi Bao,;Jun Chen,;Ruiqi Wang,;L. Q. Chen,;and Weiping Zhang.SERF-like magnetometry in room-temperature environment[J]. Optics Express.2023.
- [27] Qing Wu,;Gang Zhao,;Haibin Wu,;and Meng Zhang.Open-ended exploration of ultrashort pulse lasers: an innovative design strategy for devices based on 2D materials[J]. Photonics Research.2023.

版权声明：©2024 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS