

话题主持

本报记者 易蓉

在概念上令人遐想、在技术上艰深晦涩的量子计算,正以前所未有的速度从实验室走向台前。它被视作未来产业的战略高地,每一次“量子霸权”的突破,都牵动着科技界与产业界

的神经。

它已经很近——每一次技术突破都可能重塑算力格局,资本与政策正争夺秒地落子布局;它仍有距离——真正实现可用的通用量

子计算,还有工程与科学的诸多关卡待突破。多条技术路线中的中国量子计算,究竟离我们有多近,又有多远?本期特邀拥有科学家和企业家双重身份的量子计算领军者解答。

# 量子计算没那么『神』也没那么『远』

复旦大学物理系教授李晓鹏详解:它的价值在关键领域

**问** “量子”和“量子计算”,到底是什么?

**李晓鹏:**“量子”不是某一种粒子,而是描述微观世界离散性的基本概念。在原子、电子、光子等微观尺度上,一些物理量不是连续变化的,而是以一份一份的形式存在。比如原子的能量通常只能取若干分立数值,而不能任意变化。

“量子计算”则是利用量子力学规律来处理信息的一种计算方式。在某些特定问题上,量子计算有望比经典计算更高效。需要强调的是,量子计算并不是把不可计算的问题变成可计算,而是在部分问题上可能带来更高的求解效率。

**问** 量子计算机和我们常见的计算机,有哪些区别?量子计算机为什么对我们很重要?

**李晓鹏:**两者的核心区别在于信息表示方式不同。经典计算机使用的是比特,每一位只能是0或1。它可以通过多核、集群等方式实现并行计算。

量子计算机使用的是量子比特。量子比特可以处于叠加态,并通过量子纠缠和干涉等机制影响计算结果的概率分布。它的优势并不是简单意义上的“并行计算”,而是通过量子物理规律改变某些问题的求解方式。总体来看,量子计算更像是面向特定问题的高端计算工具,而不是日常电脑的替代品。

量子计算的重要性在于,它可能为一些长期以来计算难度极高的问题提供新的解决路径。

例如,在新材料设计、分子模拟、药物研发、复杂优化问题以及部分密码分析领域,经典计算在规模扩大时往往面临指数级增长的复杂度。量子计算提供了一种不同的信息处理方式,有望在其中某些问题上带来加速。

因此,它不仅具有科学研究意义,也可能对未来产业和信息安全产生深远影响。

**问** “量子体积”越大,量子计算机就越厉害吗?

**李晓鹏:**“量子体积”是一个综合指标,用来衡量量子计算机的整体性能。它不仅考虑量子比特数量,还包括门保真度、连通性、电路深度等因素。

相比单纯比较“量子比特数量”,量子体积更能反映真实能力。但它也不是唯一标准。量子计算机的实际表现还取决于误差率、是否实现量子纠错、算法适配程度以及系统稳定性等多方面因素。因此,量子体积越大通常意味着硬件能力提升,但不能简单等同于“越大越强”。

任何计算模型都有理论边界,量子计算机也不是无所不能的。例如,计算理论中的停机问题是不可计算的,这一点不会因为采用量子计算而改变。此外,虽然量子算法在某些搜索类问题上可以带来平方级加速,但这通常不足以把大多数NP难问题变成多项式时间可解。

因此,量子计算不应被神化。它的价值在于在少数关键问题上可能取得实质性突破,而不是解决所有难题。“全知全能”的计算机并不存在。更现实的目标是构建大规模、可扩展、可纠错的量子计算系统。这需要多个方面取得突破,包括更稳定的量子比特、更低的误差率、更成熟的量子纠错方案,以及更强的系统工程能力。

目前量子计算已在若干特定问题上展示出“量子算力优势”的实验结果,但多数集中在为量子系统设计的基准任务上。在具有明确科学或产业价值的问题上,仍处于探索和验证阶段。部分方向已经出现积极迹象,但距离大规模、稳定、可复制的商业应用,还有一定距离。更准确地说,量子计算正在从理论研究逐步走向工程实验。

**问** 量子计算更适合做模拟仿真吗?

**李晓鹏:**量子系统模拟被普遍认为是量子计算最有希望率先体现优势的方向之一。

由于自然界中的分子和材料本身遵循量子力学规律,用量子系统去模拟量子系统,在理论上更加匹配。因此,在材料科学、量子化学等领域,量子计算具有较高潜力。此外,在部分搜索、优化和密码相关任务上,量子算法也在理论上展现出加速能力。但这些能力通常依赖未来大规模、容错量子计算机的实现。

**问** 中国的量子计算发展处于什么样的水平?

**李晓鹏:**总体来看,中国在量子计算领域处于国际第一梯队。无论是在超导、中性原子还是在光量子等多条技术路线方面,都有具有国际竞争力的研究团队。

同时,美国在产业生态、长期投入、人才储备和系统工程经验方面仍然处于领先地位。欧洲、日本等国家和地区也在积极布局,国际竞争十分激烈。可以说,中国已经进入全球竞争前列,但在若干关键环节上仍需持续努力。

**问** 最新的量子计算成果是什么?复旦大学在这方面有什么突破?

**李晓鹏:**近两年,国际上量子计算的发展趋势主要体现在三个方面:硬件规模持续扩大、误差控制不断改进,以及对容错量子计算资源的重新评估。

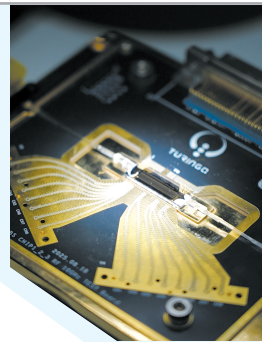
复旦大学在大规模量子系统集成、量子算法优化和量子智能计算等方向取得了一系列阶段性成果。例如,在量子储层计算与复杂时序预测方面,团队在特定任务上验证了小规模量子系统的应用潜力;在量子算法和指令集设计方面,也通过编码与电路优化方法降低了部分算法的实现复杂度,提升了其在真实硬件上验证的可行性。

本报记者 张炯强

## 跨越之路

# 从“实验室”到“实用化”

上海交通大学教授、图灵量子创始人 金贤敏



大规模可编程光子芯片 作者供图

在全球人工智能浪潮的推动下,人类社会正进入一个由算力深度定义的时代。作为“未来算力心脏”的量子计算,凭借颠覆性的指数级并行能力成为破局关键,也是全球主要科技强国战略竞争的焦点。当前,一场围绕技术路线主导权、供应链自主性以及产业生态话语权的全球竞赛,已进入白热化阶段。

### 一场分阶段的“耐力跑”

量子计算技术是以量子计算系统为核心,涵盖硬件(材料、芯片、测控)、软件(算法、编程语言、操作系统)、应用(化工、医药、金融等垂直行业解决方案)及支撑服务(云平台、标准、安全)的复杂创新体系。其生态发展一方面将牵引量子计算研究方向的实用化,推动其产业化落地,带动产业链上下游的纵横向高速增长;另一方面也能加速量子计算赋能众多新兴高科技产业的发展,实现“应用牵引—技术供给—资本支持”的正向循环。

量子计算战略发展有清晰的核心任务与商业逻辑:首先是在含噪声中等规模量子计算(NISQ)时代,针对药物分子模拟、金融组合优化等特定领域,利用专用量子计算系统解决经典计算机难以应对的实际问题,以证明其初步的商业价值;其次,随着专用处理器成熟,量子计算单元(QPU)将作为加速模块,与经典CPU、GPU算力深度融合,形成“量超融合”异构计算架构,成为高性能计算中心可便捷调用的基础资源,最大化释放量子算力的实用价值;最终远景,依赖于量子纠错等根本性突破,实现百万比特级通用容错量子计算机,开启全面颠覆性创新的新时代。目前,全球产业界正集体处于从第一阶段向第二阶段跨越。

### 光量子计算的工程化优势

从技术路径上,超导、光量子、离子阱、中性原子等多条技术路线并行的格局,其中超导与光量子两条主流路线已实现“量子计算优越性”里程碑,展现出不同的工程化特征与商业化潜力:其关键部件、模块乃至整机都已逐步实现工程化、产品化,产业链从芯片制造到软件、算法全环节自主可控,应用场景在生物医药、新材料、金融等领域验证商业价值。

但两者呈现出不同的工程化特征。超导路线在比特操控精度上进展迅速,但极低温度要求带来了极高的系统复杂性与成本;光量子路线则在可扩展性、运行环境友好度及与经典基础设施融合方面,展现出独特的产业化潜力。

光量子计算的核心优势源于光子具有天然的高速可控性,是天然的并行计算载体,可轻松实现多路干涉、多维度并行。凭借其室温运行的天然工程化红利,极大降低了系统复杂性、能耗和运维成本。其二,以薄膜铌酸锂为代表的光量子芯片,其制造工艺与现有半导体集成电路产线高度兼容。这意味着,它可以直接利用全球极为成熟、先进的半导体制造供应链,实现从“实验室工

品”到“晶圆厂产品”的跨越,为低成本规模化制造提供了切实可行的路径。其三,光速传播与天然并行性,使其在应对高带宽、高并行度计算任务时具有先天架构优势,并与以光互联为主流的数据中心体系无缝契合。

### 将技术优势转化到生态胜势

量子计算产业化已超越单纯的硬件竞赛,进入以芯片级集成与全栈工程能力为核心突破口的新阶段。这场竞争的本质,是一场围绕“制造标准—软件生态—融合架构”的全球生态主导权之争。以美国为例,正通过国家战略与科技巨头协同,加速构建产业壁垒:一方面,支持PsiQuantum等企业押注“晶圆级制造”,锁定未来硬件标准;另一方面,依托英伟达等企业推动量子—经典算力在芯片接口与云平台的深度融合,旨在固化下一代算力范式。

在这一全球背景下,中国在光量子计算领域已出现具有国际竞争力的工程化探索,正加速形成从核心器件到整机系统到融合架构的全链条自主产业体系。以图灵量子实践为例,在核心技术与原型机研发上实现了全栈自主的工程化能力上取得了关键突破——通过联合上海交通大学、无锡市等各方力量,建成国内首条光子芯片中试线,实现晶圆级薄膜铌酸锂光子芯片的规模化制造能力,在“设计—制造—系统集成”层面打通了完整链条,成功将核心芯片的研发迭代周期从“年”缩短至“周”量级,建立了以快速工程迭代为核心的新型竞争力,并推出TuringQ Gen2新一代大规模混合集成光量子计算机,支持标准化机房部署和室温运行。这在全球范围内属于较早实现工程闭环的探索,推动量子计算由实验室验证迈向工程化与产业化阶段。

同时,在量子软件“根技术”与行业深度融合的“杀手级应用”上,图灵量子以光量子计算整机为载体,通过推出面向光量子计算的高速互联CPO技术结合“量子—经典”混合计算平台与DeepQuantum量子计算框架以及量擎云平台等云服务和相关接口,推动量子算力(QPU)可直接接入GPU主导的高性能经典计算体系,使其从“科研专用设备”向“云端算力模块”转变,在金融科技、生物医药、人工智能等领域展开场景探索。

然而,要将我国在科研与工程化上的先发优势,转化为稳固的产业胜势,仍需系统性破局。这要求在发展范式上实现根本转变,除了把握产业化的关键窗口期,更需要以系统工程思维推动“生态体系构建”:在国家层面将量子计算明确定位为可牵引多产业发展的战略支点;以金融、医药等领域的真实场景需求倒逼技术成熟与商业模式形成;加快建设“量超融合”的算力基础设施,降低全社会使用门槛;同步夯实自主开发的量子软件,培养跨学科实战人才;通过“耐心资本”的引入,支撑技术的长期攻坚与生态建立。