

量子计算,未来不可限“量”

量子计算机,这一曾被视为科幻的技术奇迹,如今正逐步从理论走向现实,并在不断迭代中展现其颠覆性的计算潜力。

>> 一个量子比特可以同时存储0和1两个数

量子力学是20世纪以来最重要的科学进展之一。随着第一次量子科技革命的推进,量子信息科学迎来了新一轮的快速发展。进入21世纪,量子科技革命的第二次浪潮来临,催生了量子计算、量子通信、量子测量等一批新兴技术,极大地改变和提高了人类获取、传输和处理信息的方式和能力。

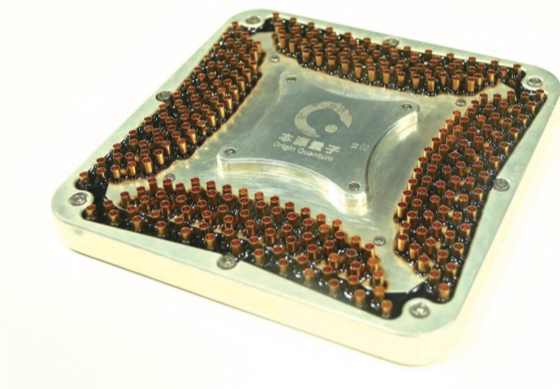
如果把量子科技比作一架“飞机”,那么量子计算就相当于飞机的“发动机”,量子通信就相当于飞机的“无线电”,量子测量就相当于飞机的“雷达”。量子计算是利用量子技术获取更强算力,量子通信是利用量子技术获得更安全通信,量子测量是利用量子技术获得更精准测量。

相比于经典计算机,量子计算机具备一些独有的特性。首先,一个经典比特具有0

和1两种可能的状态,在同一时间只能处于其中的某一个状态;而一个两能级量子比特可以处于0态和1态的叠加态,也就是说一个量子比特可以同时存储0和1两个数。

其次,多个经典比特之间是独立的,而量子比特之间组成的是一个复合系统。这些特性共同导致量子计算机与经典计算机相比具有两个显著优势:一是

量子计算机信息存储量随比特数的增多呈指数级增长,理论上当比特数足够大(例如比特数达到250个)时,量子计算机能够存储的数据量比宇宙中所有原子的数目还要多;二是量子计算机是对量子比特构成的整个复合系统进行操作,可以将其理解为一种原理上的“并行计算”,这是经典计算机无法实现的。



量子芯片封装盒 图源《人民日报》

>> 从概念走向实践的量子计算机

当前,量子计算新技术研究路径尚未收敛,主要包括超导、离子阱、光子量子、量子点、冷原子等。从技术研发上看,超导路线拥有最多的技术追随者。

基于超导量子位的量子计算是一种最早被提出和研究的量子计算实现方法。它基于超导性能的材料,使用电荷量子比特、磁通量子比特和相位量子比特这3种方式来形成量子比特。超导量子比特在操控、耦合、测量、扩展等方面具有显著优势。过去几十年里,超导量子计算有一定的发展,实现了与量子态所需精度相当的高精度控制、微波单光子状态的制备等主要技术。超导技术路线的缺点是易受环境噪声影响使得退相

干时间变短,进而增加量子比特的操作难度。当前国际商业机器公司(IBM)开发的超导量子芯片比特数量已进入千位时代,在全球已部署了70余台量子计算机。拥有72个计算量子比特的中国第三代自主超导量子计算机“本源悟空”已完成137个国家用户的30万个量子计算任务。其他研究路径上,各有所长,各自推进。

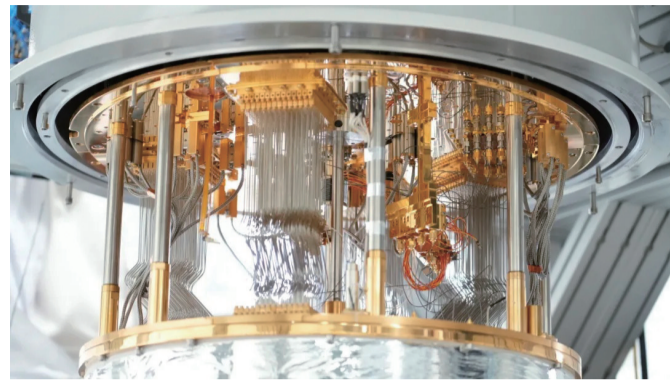
量子计算机的研发是一项复杂的任务。以超导量子计算机为例,量子计算机主要包含量子芯片、量子计算测控系统、低温制冷系统、量子计算机操作系统、应用软件等多个方面。

量子芯片作为量子计算机的“心脏”,负责执行关键的运算

加速过程,而这一过程需要将问题转化为量子算法,并通过特殊的调制脉冲信号输入量子芯片,最终采集并分析量子芯片输出的信号以获得问题的解答。然而,量子芯片的高效运行并非孤立存在,它还需要一个完善的硬件系统来支持,包括量子芯片封装技术、量子芯片测试平台以及量子测控系统、相关元器件等。其中,量子芯片测试平台由极低温稀释制冷机及配套设施构成,为量子芯片提供接近绝对零度的极低温环境、红外辐射噪声屏蔽、磁场噪声屏蔽和极低的机械振动等高度隔离的运行条件,同时还需要高效率的导热组件来及时带走量子芯片运行时产生的热量。

量子计算测控系统负责量子芯片所需信号的生成、采集、控制与处理,是实现量子芯片编程的关键工具。它如同一名精通量子语言的“翻译官”,将人类世界的复杂问题转化为量子芯片能够理解的“语言”,并引导量子芯片进行高效的计算。

在软件技术方面,量子计算机同样需要一套完整的软件系统来支持其运行,包括量子计算机操作系统、量子语言编译器、量子应用软件以及量子计算机集成开发环境等。这些软件系统不仅为用户提供量子程序的编程和操作界面,还需要对接硬件,将程序转换为硬件所需的指令信号,确保量子计算机能够高效、准确地执行各种计算任务。



中国第三代自主超导量子计算机“本源悟空”

孙超 摄

>> 全球主要国家加快布局量子计算

从全球布局来看,美国和欧洲是量子产业生态的活跃地区,欧美国家的量子企业聚集度较高,全球占比超过60%。国际商业机器公司(IBM)作为全球量子计算领跑者,于2023年12月发布1121比特量子处理器Condor,并推出首款模块化量子计算机IBM Quantum System Two。近期,美国谷歌公司开发的一款量子芯片Willow,首次实现了“低于阈值”的量子计算——即在扩展量子比特数量时,能够降低误差率,这是量子计算领域一个重要里程碑。加拿大、日本、中国的量子计算团队也在迅速向几百、上千比特迭代。本源量子于2024年1月上线“本源悟空”超导量子计算机,搭载由72个计算比特和126个耦合比特构成的量子芯片。

量子计算与超级计算、智能计算的融合发展正成为现实。全球主要国家正在加快布局建立量子经典协同计算平台。2023年,国际商业机器公司(IBM)在加拿大、西班牙的超算中心部署127比特量子计算机。欧盟将6台高性能量子计算机集成到捷克、法国、德国、意大利、波兰和西班牙的各个超算中心,组成欧洲的量子计算网络。日本理化研究所(RIKEN)在日本产的64比特超导量子计算机和超级计算机“富岳”之间建立通信链路。2024年,“本源悟空”成功接入上海超算中心、国家超算郑州中心、长三角枢纽芜湖集群,软件层面实现不同算力的弱耦合。

各国积极发展应用生态,“量子实用”随时可能爆发。全球有超过100个企业案例活跃在能源、医疗保健、金融、汽车、航空航天、物流等行业。国际商业机器公司(IBM)的研究证明,量子计算机可以探索化学、材料领域的实用级问题,并与化工、汽车、能源、航空等领域的众多合作者迅速

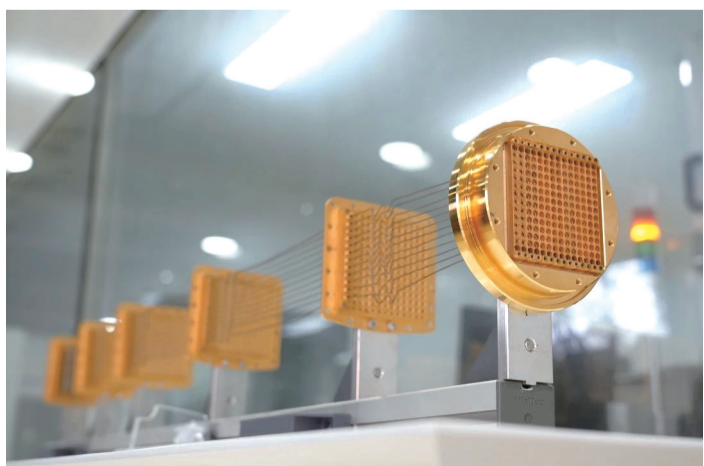
推进应用,行业内预测量子计算产生商业价值的时间大大提前。

实用化量子计算机发展可分为3个阶段。第一阶段,实现量子计算优越性的实验室阶段。当前的超级计算机已经无法顺利求解某些特定的海量数据、高复杂度问题,若研制出50到100个逻辑量子比特的高精度专用量子计算机,就可在此类问题上充分展示其“量子优越性”,实现高效率求解。第二阶段,寻求在某些特定领域实用价值的展现。这一阶段意味着量子计算机已经开始走出实验室开启应用探索,尽管量子逻辑比特数只有100左右,但其运算能力已经超过任何超级计算机,量子计算机正进入早期工业阶段。第三阶段,研制可编程的通用量子计算机。可编程的量子计算机在多场景下应用,量子比特的操纵精度、集成数量和容错能力都将大幅提升。

现阶段发展最快的超导量子计算机正处于第二阶段,已经在金融、材料科学、药物设计等领域展现广泛的应用前景。超导量子计算机“本源悟空”已在特定领域上线多款应用,包括金融领域投资组合优化应用、生物医药领域分子对接应用等。

量子计算当前正处于“含噪声的中等规模量子”阶段,如何在较高“噪声”环境下运行,成为量子计算机所面临的难题。能够适应通用场景下的容错量子计算机尚未研制成功。

未来5年,全球将进入“量、超、智”三算融合时代。量子计算、超级计算和智能计算协同完成运算任务就是“量、超、智”融合。如果把普通计算机比喻成“自行车”,那么带有人工智能的智能算力就是一列“高铁”,而量子计算机就像是一架“飞机”,三者协同将是未来算力的终极形态。



国产自主量子计算机核心部件——高密度微波互连模组 孙超 摄

文图来源:《人民日报》(2025年1月11日),内容有删减
本文作者为中国科学院院士、中国科学技术大学教授郭光灿,
徐靖 整理