

量子计算：信息社会的未来

向涛[†]

(1 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(2 北京量子信息科学研究院 北京 100193)

2022-11-16收到

[†] email: txiang@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20230102

近年来，量子科技，特别是量子计算的研究呈加速发展的态势。包括中国在内的四十多个国家制定了量子规划，量子科技前沿竞争在不断升温。

二十世纪初，以普朗克、爱因斯坦、玻尔为代表的一群科学先驱，共同努力，建立了量子力学这个人类迄今为止最基本、最深奥的科学理论体系。这是一项划时代的科学革命，奠定了现代信息技术发展的科学基础，也必将成为未来量子信息技术革命的科学源泉。

从二十世纪五十年代开始，以半导体、激光、磁存储为代表的量子材料和量子效应的广泛应用，推动了当代信息社会的发展，成就了造福人类的第一次量子技术革命。但这次技术革命还只是被动认识和利用量子现象来实现科学和技术的创新，对量子材料和量子效应的操控依然是经典的，没有用到量子相干性这个量子最本质的特性。

要展示量子的特性，释放量子的潜力，就必须通过主动操控量子态，在保持其相干性的前提下，实现对量子态的精确控制。一旦做到了这一点，我们将实现量子技术的第二次革命，人类也将正式步入量子信息时代。

所谓量子计算，就是按照既定的算法和程序，对量子态进行操控和测量的过程。量子态的演化过程，对应的就是一个量子计算过程。量子计算是量子信息技术的核心。没有量子计算，量子技术其他领域的发展，不足以动摇现有信息技术的根基。

我们现在用的经典计算机的算力，粗略讲与半导体芯片的集成度(也就是单位面积上芯片可容纳的晶体管或比特数)成正比。一般讲，增加一倍的算力，大约需要增加一倍的集成度。在过去的

几十年，经典计算机的集成度，或计算能力，大约每18个月增加一倍，这就是著名的摩尔定律。

与经典计算机不同，量子计算机的算力随量子比特的数目不是线性增加，而是指数增加的。也就是说，每增加一个量子比特，量子计算机的算力就可增加一倍。这就是量子计算对信息处理的指数加速作用，是经典计算机可望而不可及的神话。这种指数加速作用一旦在技术上得以实现，必将带来信息处理的革命性变革。

但是，在目前阶段，实验室能够制备的量子比特的退相干时间不够长，操控的精度也有限，还远未达到要实现量子计算指数加速的要求。

量子计算的想法，开始于解决物理和化学中出现的量子多体问题的需要，上世纪八十年代初由本尼奥夫、曼宁和费曼三位科学家独立提出。但是，量子计算不仅能解决量子科学研究中的问题，也能解决所有与信息处理相关的工程、技术及应用问题。从人工智能、破译密码、生物制药、化学合成、物流及交通控制、天气预报、数据搜索、材料基因，到金融稳定与安全，但凡需要数据处理与计算的地方，都是量子计算可以发挥作用的领域。可以预期，随着量子计算机的发展，量子信息技术的触角将会深入到信息处理的每一个角落。

量子是微观粒子，包括电子、原子、分子等，的基本运动形式。量子现象存在于比我们人眼能看到的宏观世界至少小6个量级的微观世界。主动操控量子态之所以难，是因为我们操控微观量子态的手段是宏观的。用宏观手段操控微观量子系统，还要保证其量子相干性，就像是让一头大象在细钢丝上跳舞，既不能掉下去，还不能让钢丝断掉。这是量子计算研究面临的最大困难，也是当前科学挑战的最高级。

量子计算技术发展有“四高”——高门槛、高投入、高风险、高回报，是一个国家的高层次人才队伍、科技和经济发展水平和实力的综合检验。当前，量子计算技术研究还处于起步阶段，发展路线和方式，甚至发展目标，都存在不确定性，研发投入存在风险不可避免。但是，量子计算能给人类带来的回报是巨大的：从原理上讲，如果实现了量子计算的指数加速作用，一台100个容错量子比特的量子计算机的算力，就可超越目前世界上所有计算机的算力之和。

从上世纪八十年代开始，量子计算经过了基本物理思想和初级原理的验证，现在进入了所谓的“中等规模带噪声的量子计算时代”。“中等规模”是指现在能比较可靠操控的量子比特数大约在几十到几千的水平；“带噪声”指的是对量子比特的门操作有一定的误差，量子态的读取也存在一定错误，还无法实现精确的量子计算。这是量子计算技术发展必然要经过的一个阶段，也是量子计算各种路线探索和人才积累的关键阶段。

在“中等规模带噪声的量子计算”时代，量子计算的应用与产业化已经开始，并已成为国际大企业大公司展示实力、布局未来的新战场。造成这种激烈竞争局面的背后逻辑非常简单：失去量子计算的控制权，就可能失去未来信息社会的话语权。同时，产业化也为量子计算研究注入了新的活力，加速了量子计算的发展。

生态建设是量子计算软硬件人才培养和大规模

应用的必要条件，量子云平台的建设则是生态建设的一个重要手段，其水平反映了一个国家在制备和稳定操控量子芯片、研发量子算法和软件、实现高效量子计算的综合实力。

量子计算未来的发展趋势，主要在三个方面：一是规模化，当前量子计算能比较可靠操控的量子比特数大约在100个量子比特左右，今后将逐渐达到几千、几万、几十万、几百万甚至更高的水平。二是容错化，量子计算需要很多量子比特，但更需要制备出相干时间可以任意长、错误率小于纠错阈值的所谓容错的逻辑量子比特。三是集成化，目的是实现对大量量子比特及其测控系统集成和小型化，是降低量子计算机的研发成本、实现量子计算机广泛应用的前提。

如果对未来做一个展望的话，乐观地估计，十到二十年之后，高质量制备和操控的量子比特数将达到上万个，在这个基础上，通过对大量量子比特的不断纠错，有望制备出一个能容错的逻辑量子比特；再过十到二十年，有希望实现对多个逻辑量子比特和普适逻辑门的相干操控，并且在这样的基础上，制造出普适的量子计算机。到那时，量子信息技术及应用将进入全面高速发展阶段，也将成为人类征服自然的一个新的里程碑！

致谢 感谢龙桂鲁、范桁、金贻荣对本文的细致阅读和宝贵建议。本文是在百度“量子开发者大会”演讲稿的基础上修改而成。

读者和编者

《物理》有奖征集封面素材

为充分体现物理科学的独特之美，本刊编辑部欢迎广大读者和作者踊跃投寄与物理学相关的封面素材。要求图片清晰，色泽饱满，富有较强的视觉冲击力和很好的物理科学内涵。

一经选用，均有稿酬并赠阅该年度《物理》杂志。

请将封面素材以附件形式发至：physics@iphy.ac.cn；联系电话：010-82649029。

《物理》编辑部

安捷伦科技 HGC-536 便携式真空计套装



支持多种单位,可记录压力曲线

Micro USB 和 5 号电池双电源供电

带背光 LED 显示屏

经济耐用可替换的全金属热电偶真空规管

带磁铁和支架,可吸可立,使用方便

带柔软垫层的手提箱,坚固耐用,方便运输、携带

柔软橡胶保护套,握感舒适,皮实耐摔



安捷伦科技(中国)有限公司 真空产品热线:
800 820 6778 (固定电话拨打) 400 820 6778 (手机拨打)

了解更多,请扫描左侧二维码阅读介绍文章,或登陆安捷伦官方网站:www.agilent.com
(搜索“HGC-536”)。