

量子计算技术发展现状与趋势

文 / 吴根（科技部高技术研究发展中心） 资剑（复旦大学） 杨涛（复旦大学） 陈卓敏（西北大学）

以量子计算为基础的信息处理技术的发展，有望引发新的技术革命。本报告对量子计算领域中的超导量子计算、量子点量子计算、拓扑量子计算等热点的研究现状与趋势进行了分析，并对我国今后在量子计算领域的研究重点，以及如何做到点、面兼顾的发展提出了对策建议。

一、关于量子计算技术

量子计算是指利用纠缠的量子态作为信息载体，利用量子态的线性迭

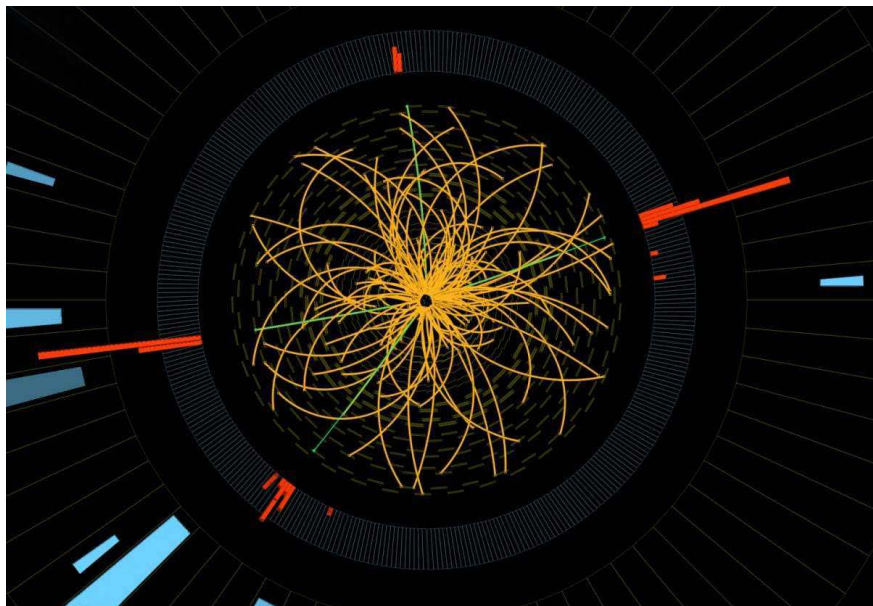
加原理进行信息并行计算的方案；量子计算对某些问题的处理能力大大超越经典计算。

量子计算机具有极高的并行计算

能力，可以将经典计算机几乎不可能完成的某些计算难题，诸如大数分解、复杂路径搜索等，在可接受的时间内予以解决。以量子计算为基础的信息处理技术的发展有望引发新的技术革命，为密码学、大数据和机器学习、人工智能、化学反应计算、材料设计、药物合成等许多领域的研究，提供前所未有的强力手段，对未来社会的科技、经济、金融，以及国防安全等产生革命性的影响。在国际上，有人甚至将量子计算提到了“量子霸权”的高度。

二、世界发展现状与趋势

1982年 Richard Feynman 提出利用量子计算机来模拟研究量子体系的想法。1985年 David Deutsch 提出了



量子图灵机的普适量子计算机模型。

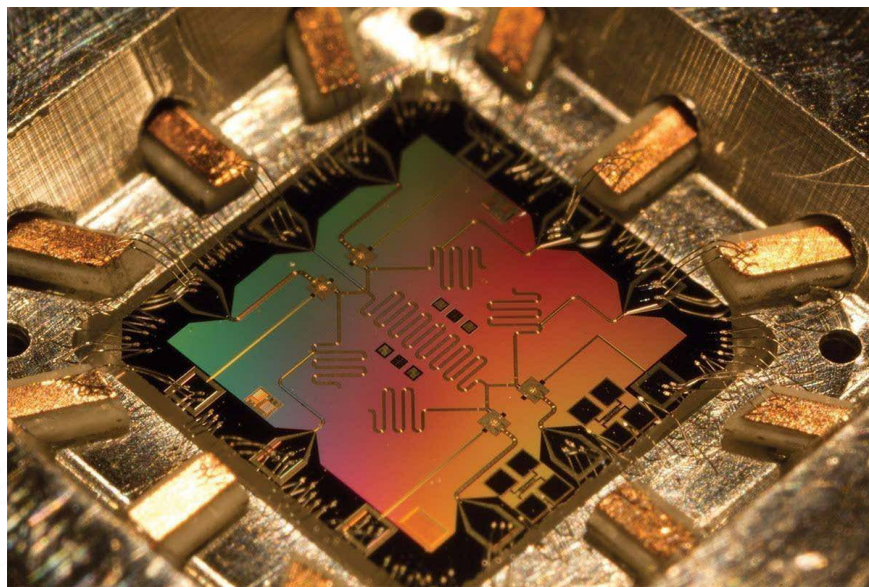
量子计算提出至今，实验方面历经了从单个量子比特到约十个量子比特（不算 D-Wave 等的量子模拟或退火装置）的发展过程。相对于最终做成实用化普适量子计算机的目标，目前仍然处于原理演示的探索性研究阶段。但近年来在超导量子计算、量子点量子计算、拓扑量子计算等方案上所取得的进展，向人们展示了量子计算时代即将来临的美好憧憬，引起了学术界、工业界和政府组织的高度重视。一些国家政府的大力推动和国际大公司的积极参与，成为了这一领域发展的风向标。

1. 超导量子计算

超导量子计算是目前最被看好的量子计算方案之一。1999 年首次在超导器件中实现了量子相干演化以来，超导量子比特和量子电路的研究取得了快速的进展，已成为实现可扩展量子计算的一个优选方案。

电路从早期的单比特电路到双比特电路，发展到现在的 10 个量级的多比特电路；单个超导量子比特的量子相干保持时间 - 退相干时间增加了 6 个数量级，可以实现 10^3 - 10^4 个操作；量子相干操控，从早期验证超导量子比特电路中的量子特性、单比特或双比特电路上量子计算所必须的各种量子操作，发展到在包含多比特的电路上，实现部分量子纠错和进行一些量子算法的演示。相信在不远的将来，专门设计的，包含几十到一百个左右量子比特的超导电路，可以在特定的算法上演示超越经典大型超级计算机的能力，实现所谓的“量子霸权（Quantum Supremacy）”。

目前，超导量子计算技术及其科学问题的研究，不仅得到各国学术界



的高度关注，某些国际大公司也已经开始实质性地支持相关研究。

最引人注目的是谷歌将目前实力最强的超导量子计算研究团队—UCSB Martinis 组纳入其超导量子计算机研制计划，以期实现量子霸权。谷歌还与哈佛大学、劳伦斯伯克利国家实验室、塔夫茨大学、伦敦大学等众多研究机构展开合作，期望在量子化学计算领域取得实质突破。

半导体巨头 Intel 公司，与荷兰 Delft 大学 Dicarlo 研究组合作，将最先进的半导体技术结合到超导量子电路中，引人注目。

IBM 公司和 NIST 合作，最近在网上推出 5 个超导量子比特的“云量子计算”平台供研究人员使用。

欧盟启动了高达 10 亿欧元量子计算研究计划，以使欧洲“在量子计算研究中处于领先地位”，提出了“第二次量子革命”的口号，超导量子计算也是其中一个重要部分。

日本 NEC 的实验室最早实现超导器件量子相干演化，Riken/NEC 和 NTT 以及东京大学的研究团队，在超

导量子比特研究中也做出过显著的成果。

加拿大的 D-wave 公司已经推出基于退火算法的，宣称是超导量子计算机的产品。虽然业界对其是否具有量子加速效应持否定的态度，但是这样一个初创小公司在十年左右的时间推出可以进行快速计算的产品，也说明了超导技术的优势。

2. 量子点量子计算

半导体量子点量子计算是另一个被看好的发展方向。这个方向上的先驱研究团队是原哈佛大学（现哥本哈根）的 Charles Marcus、荷兰代尔夫特理工大学的 Lieven Vandersypen，日本东京大学 /RIKEN 的 Seigo Tarucha 等的研究组。

相当长的一段时间内半导体量子计算的量子比特数停留在几个比特的水平上，但基于高纯硅材料和成熟半导体工艺技术，有望发展出可规模化的半导体量子芯片。英特尔公司于 2015 年宣布资助荷兰代尔夫特理工大学 QuTech 量子研究所，从事硅量子点自旋量子计算等方面的研究并取得

进展。

3. 拓扑量子计算

拓扑量子计算是目前国际上量子计算领域公认的几个主要方案之一。拓扑量子计算是在量子系统整体拓扑性质的保护下,通过非阿贝尔任意子的编织操作,实现对量子信息的存储和处理,有望从根本上解决因环境噪声导致的量子态退相干等问题。

拓扑量子计算的概念于上世纪末提出。由于拓扑量子计算基础理论的重要性和可行性,一些理论先驱者获得了狄拉克奖章、巴克利奖等多个国际学术界重要奖项。

拓扑量子计算的关键是寻找遵从非阿贝尔统计的任意子,并构建拓扑物理系统。我国以及美国、欧洲、日本等国家的顶尖研究机构,已经对此进行了大量的理论和实验研究,提出了多种可能的实现方案。这些方案包括分数量子霍尔系统、内秉拓扑超导体、半导体与超导的复合系统、量子自旋液体等。

原贝尔实验室和微软公司一直在推动拓扑量子计算的研究,后者还专门为此成立了研究机构 Station-Q。最初探索的重点是利用二维电子气的 $5/2$ 等分数量子霍尔态开展拓扑量子计算。但实验进展一直停留在验证 $5/2$ 分数量子霍尔态的准粒子激发

是否有效电荷为 $e/4$ 、是否满足非阿贝尔统计等问题上。由于从事这方面的研究门槛太高,对二维电子气材料质量和测量条件的要求太过苛刻,国际上能够开展这方面研究的实验组并不多。近年研究表明,在具有强自旋轨道耦合的半导体纳米线或薄膜、拓扑绝缘体、量子反常霍尔效应系统等体系中,通过超导近邻效应都有可能得到拓扑超导态,从而实现具备非阿贝尔统计的马约拉纳准粒子这种任意子。正是这些方案的提出大大拓展了拓扑量子计算实现的可能途径,是目前量子计算关注的焦点之一。

近年来,荷兰、丹麦、瑞典和美国等国家,在具有强自旋轨道耦合的半导体纳米线、拓扑绝缘体和铁原子链中,观察到马约拉纳零能模存在的实验证据,使得这个领域进入白热化。我国若干研究组在拓扑材料、半导体纳米线和磁通芯中观察到了马约拉纳零能模。

由于拓扑量子计算的重要性和近年来实验方面的快速进展,西方发达国家近期对相关研究给予了巨额资助。荷兰投入了超过 1 亿欧元的研究经费,美国也启动了名为“马约拉纳工厂”的巨型研究项目。微软公司自本世纪初持续资助拓扑量子计算方面的研究,从最初的分数量子霍尔态到现在

的半导体与超导的复合系统,都在大力推动。2016 年 11 月,他们宣布在拓扑量子计算上的投资加倍,联合荷兰、丹麦、瑞士、澳大利亚等国家的研究组扩展微软的研究机构 Station Q,大力推进拓扑量子计算机的研制。

从目前的发展趋势看,拓扑量子计算仍然处在初期阶段,研究基础有待成熟,有望在随后的几年内取得突破性进展。符合非阿贝尔统计马约拉纳零能模,已经在多个系统中发现,众多研究组正在寻求对其进行操控和调制,一旦成功,将实现第一个拓扑量子比特。由于其受拓扑保护的扩展性和可扩展性,其成功将大大推动拓扑量子计算机的实现。

三、我国发展现状与水平

我国研究团队在量子计算的一些领域做出了有国际影响力的工作。中国科学技术大学的研究人员利用核磁共振量子计算的 4 个量子比特,演示了至今最大的 143 的因子分解,用光学量子计算演示了 15 的分解和求解线性方程组,还成功制备了 3 个量子比特的半导体量子芯片。

随着量子比特数的增加,中国科学技术大学、中科院物理所、浙江大学等人在合作研究实现更大数字因子分解舒尔算法。在金刚石氮空位中心系统,中国科学技术大学、中科院物理所、清华大学都分别演示了简易型 Deutsch 算法,量子克隆和几何逻辑门操作等量子计算基础操作,以及基于动力学退耦的量子态保护。

在超导量子计算方面,2010 年之前由于受器件微纳加工和极低温测量等研究条件的限制,国内实验研究进展相对缓慢。近年来,随着投入的加大,特别是在科技部量子调控与量子



信息重点专项，以及高校 985 项目的支持下，已有多个研究所和高校建立了较好的研究平台。浙江大学、中大上海研究院与中科院物理研究所紧密合作，在超导多比特集成系统方面，自行设计、制备并且高精度、高相干性测控了包含五和十比特的超导量子芯片，并首次利用超导芯片进行了 HHL 量子算法的初步演示；南京大学利用超导比特及其中的 TLS 首次演示了三比特纠缠，率先在超导量子比特中实验实现了几何相的 Landau-Zener 干涉，并进行了量子相变 KZ 机制模拟；清华大学首先利用超导 cQED 系统，演示了量子 Bernoulli 工厂；北京计算科学中心、清华大学针对超导 cQED 系统开展了系统研究，实验上首先显示了量子电磁透明和 Autler-Townes 劈裂的区别和过渡，以及超强耦合系统中多光子边带的观察等；浙江大学、福州大学利用超导多比特器件，演示了量子延迟选择实验等；中科院物理所在超导比特系统中，首次演示了非（弱）耦合量子态之间利用受激拉曼通道的相干演化和量子相位扩散等物理过程。

在拓扑量子计算方面，北京大学团队是国际上最早在半导体纳米线与超导的复合系统中，观察到马约拉纳零能模的迹象的研究组之一，最早在 InAs/GaSb 二维拓扑绝缘体中开展相互作用下的边缘态研究；中科院物理所最早在三维拓扑绝缘体与超导结合的复合纳米器件中，观察到了马约拉纳束缚态迹象，率先演示了基于拓扑材料的第一个相位敏感的拓扑量子器件；清华大学在世界上首次实现了量

子反常霍尔效应，在基于量子反常霍尔效应、超导异质结构的拓扑量子计算实现方面占据了先机；上海交通大学、清华大学、南京大学在三维拓扑绝缘体、超导异质结构中，实现了超导近邻效应，获得了马约拉纳零能模存在的关键证据。这些工作在国际上被公认是推动拓扑超导量子态和马约拉纳零能模的奠基性成果之一。

四、我国进一步发展重点及对策建议

虽然在量子计算领域的个别点上，我国的科研机构已经取得了一些研究成果，具有一定的国际地位，但我们应该意识到我国与美国及欧洲主要国家之间，仍然存在差距。就超导量子计算而言，仅实验人员的体量方面，把国内各单位做超导量子计算的研究队伍都加起来，可能仅相当于 Google、UCSB 一个团队的体量。

量子计算的实验研究是典型的高门槛研究，需要用到高质量的量子材料和器件、非常精细的微纳加工条件、超净的实验环境和极其灵敏的量子测控技术。国内整体上研究基础还比较薄弱。

当前量子计算研究国际竞争激烈、大公司纷纷投入，在个别领域出现跨越式发展的趋势，但总体上仍然处于探索性研究阶段，哪一个方案是最优方案还没有尘埃落定。我们一方面要高度关注那些目前看来非常有竞争力的方案，另一方面要保持一个相对宽广的研究面，支持不同方案的自由探索和相互竞争，做到点、面兼顾。

超导量子电路是众多实现规模化

量子计算方案中，比较具有优势的一个方案。国际上的研究显示，利用超导器件，有可能在不远的将来，演示量子技术在计算方面的优势。虽然要实现通用超导量子计算机还有很长的路要走，但是针对专门问题的专用超导量子计算机或超导量子模拟机，很有可能在短时间内出现，并付诸实际应用。一旦获得突破，将使我们能对信息的计算和处理能力，进入一个目前技术所不能达到的全新领域，将会对信息技术、人工智能技术、材料设计、药物设计等方面的发展起到革命性推动作用。这将是一个很可能会产生颠覆性技术的方向，将会对国家社会经济发展和国家安全产生重要影响。

面对国际上快速发展的势头，我国应该在超导量子计算的相关领域加大投入，加强布局，应对新的挑战。研发的中长期目标是能够针对专门问题，进行计算或模拟包含数十个到 100 个超导量子比特的专用超导量子电路系统，力争早日实现“量子霸权”。

拓扑量子计算目前还处于基础研究阶段，由于其独特的优势，一旦取得突破性进展，将大大加速量子计算机的建造。我们需要加强拓扑量子器件的研制与调控、新型拓扑量子材料的探索、拓扑量子计算技术的发展和拓扑量子计算理论的构建等。

在这些重点方向中，我们的目标与任务是探索更实用的新材料。结合已有的固态系统，利用微纳加工、极低温等技术手段，制备并研究拓扑量子原型器件。利用非阿贝尔任意子的编制操作，制备拓扑量子比特，最终做到集成化并实现拓扑量子计算。**科技**

【注】本报告为科技创新战略研究专项项目“重点科技领域发展热点跟踪研究”（编号：ZLY2015072）研究成果之一。

本文特约编辑：姜念云