

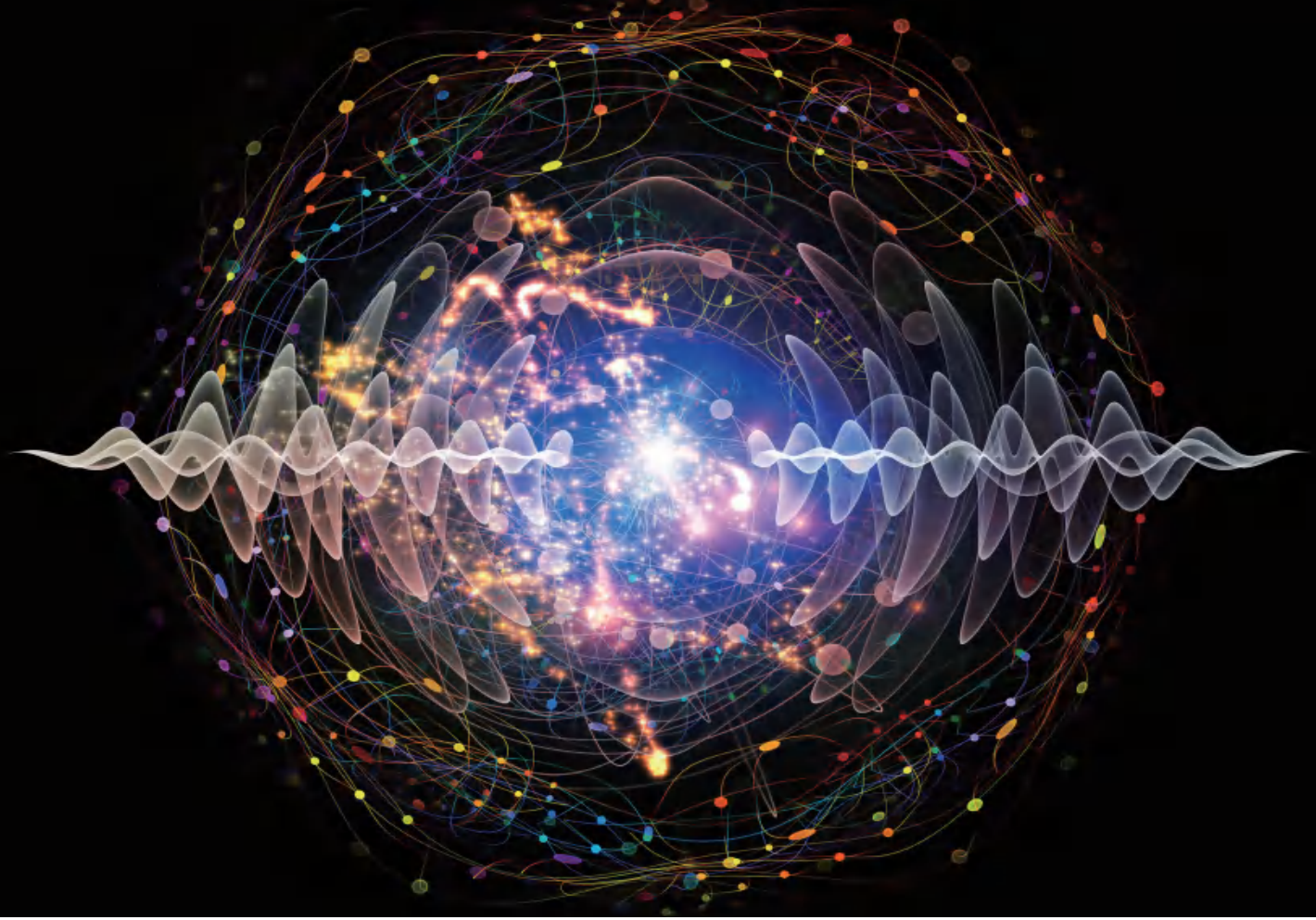
2021量子计算

技术创新与趋势展望



赛迪顾问·人工智能产业研究中心

2021年5月



前言

量子计算是利用诸如叠加和纠缠等量子现象进行计算的一种革命性计算技术，能够实现经典计算技术无法比拟的巨大信息携带量和超强并行计算处理能力。随着量子比特位数的增加，其存储能力与计算能力还将呈指数级规模拓展。量子计算的优越性为解决大量新的议题和项目对计算能力更加强大的计算机设备的需求提供了革命性的解决路径，受到世界主要国家和科技企业广泛的关注。

尽管在短期内，量子计算将作为一项基础研究，尚未能呈现切实的落地应用，但其正在不断向人工智能、生物医药、金融安全、交通运输等领域渗透。更重要的是，量子计算作为一种前所未有的计算微观世界的强大工具，将给现有的计算理论带来深刻变革，极大加深人类对物质与信息的理解。

量子计算试图在量子水平上构造、控制物质系统，其研究过程是人类物质科学质的进步。作为当前最重要的科技领域之一，量子计算承载着人类对科技的想象和探索的勇气，我们应当对量子计算报以热忱。量子计算所能带来的改变和应用的领域还有待持续地发掘，站在拓展人类物质科学实践的风口上，量子计算将不再是科学家的遥远梦想，人类在量子计算领域的不懈探索使其未来不再遥不可及。

目录

前言

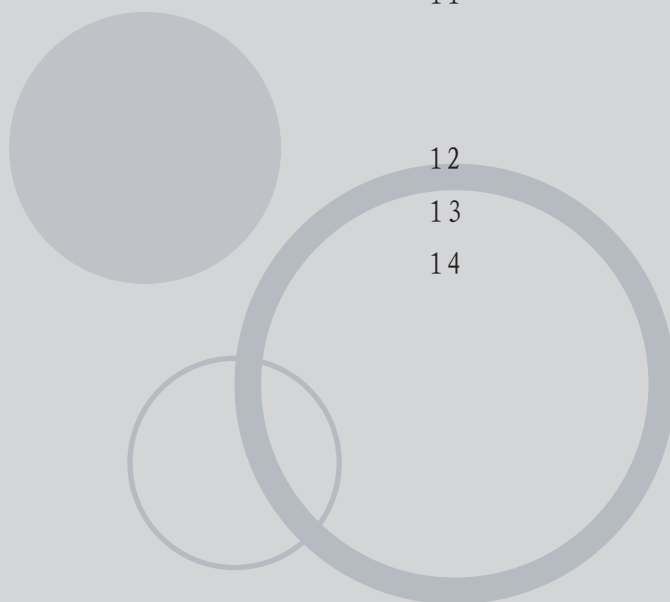
主要观点 01

▶ 01	
概念界定及发展演进	02
概念定义	03
发展历程	04

▶ 02	
政策资源分布	06
全球政策及中国政策	07

▶ 03	
技术发展情况	09
技术成果	10
技术瓶颈	11

▶ 04	
赛迪预判	12
商业前景	13
发展趋势	14



► 图 目 录

图1 经典计算机与量子计算机运算能力影响因素	4
图2 量子计算发展历程	5
图3 量子计算商用市场规模预测	13

► 表 目 录

表1 全球量子科技相关政策梳理	7
表2 中国量子科技相关政策梳理	8



主要观点



量子计算为提升算力和降低能耗提供了颠覆性的处理思路，对量子计算的研究是突破经典计算的算力极限的革命性科学尝试。从概念构想到实验室成果再到商业价值初探，探索物理实现粒子和提高量子比特位数是全球研究机构及科技企业追逐的关键。



世界主要国家高度重视量子科技发展，我国充分认识推动以量子计算为代表之一的量子科技发展的重要性和紧迫性。在各国顶层政策催化下，量子计算在前沿科技领域受到广泛关注，科研探索和技术创新保持活跃，发展态势良好。

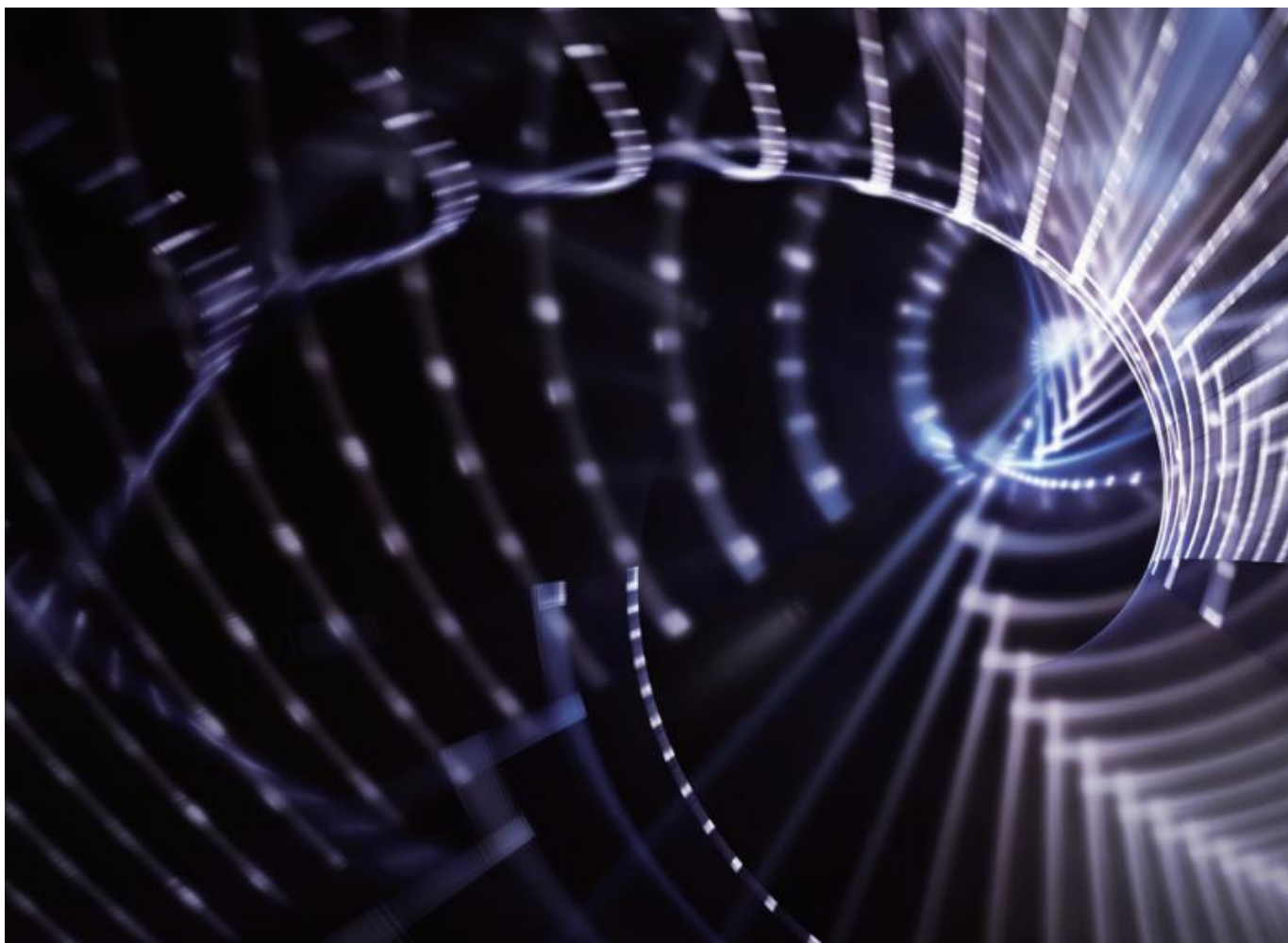


量子计算存在多种技术路线以制作出纠缠态的最基本物理实现粒子，但尚无任何一种路线能够完全满足实用化条件要求从而推动技术方案等融合收敛。量子计算目前还处于原型机研发阶段，对粒子状态的控制是亟需突破的难点。距离实现对规模化多体量子体系的精确制备、操控与探测还需至少十年的探索周期。



若实现量子纠错机制的应用，量子计算有望在10-15年内实现商用，市场规模将实现爆发性增长，预计量子计算的商用元年在2030年左右，量子计算商用元年的市场规模将达到140.1亿美元。





01

概念界定及发展演进

- 概念定义
- 发展历程



量子计算为提升算力和降低能耗提供了颠覆性的处理思路，对量子计算的研究是突破经典计算算力极限的革命性科学尝试。从概念构想到实验室成果再到商业价值初探，探索物理实现粒子和提高量子比特位数是全球研究机构及科技企业追逐的关键。

（一）概念定义：

1. 量子计算概念：量子计算是利用诸如叠加和纠缠等量子现象进行计算的一种革命性计算技术。这些量子现象遵循量子力学规律通过调控量子信息单元实现。

以量子比特为基本单位，通过量子态的受控演化实现并行计算，在某些计算困难问题上提供指数级加速。

发展
定位

实现大规模可编程容错量子计算机及其应用；将与经典计算长期共存，相辅相成。

原理
特性

为计算困难问题提供高效解决方案，实现突破经典计算极限的算力飞跃。

应用
前景

2. 量子计算机与经典计算机的区别：

量子计算机基于量子力学原理构建，用于处理和计算量子信息，运行量子算法。量子计算机与经典计算机在基本单位、运算模式和计算能力上存在明显区别。

基本单位

经典计算机信息的基本单元是比特，比特是一种有两个状态的物理系统，用0与1表示。
在量子计算机中，基本信息单位是量子比特（qubit），用两个量子态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 代替经典比特状态0和1，每个量子比特的状态是0或1的线性组合（通常称为叠加态）。

运算模式

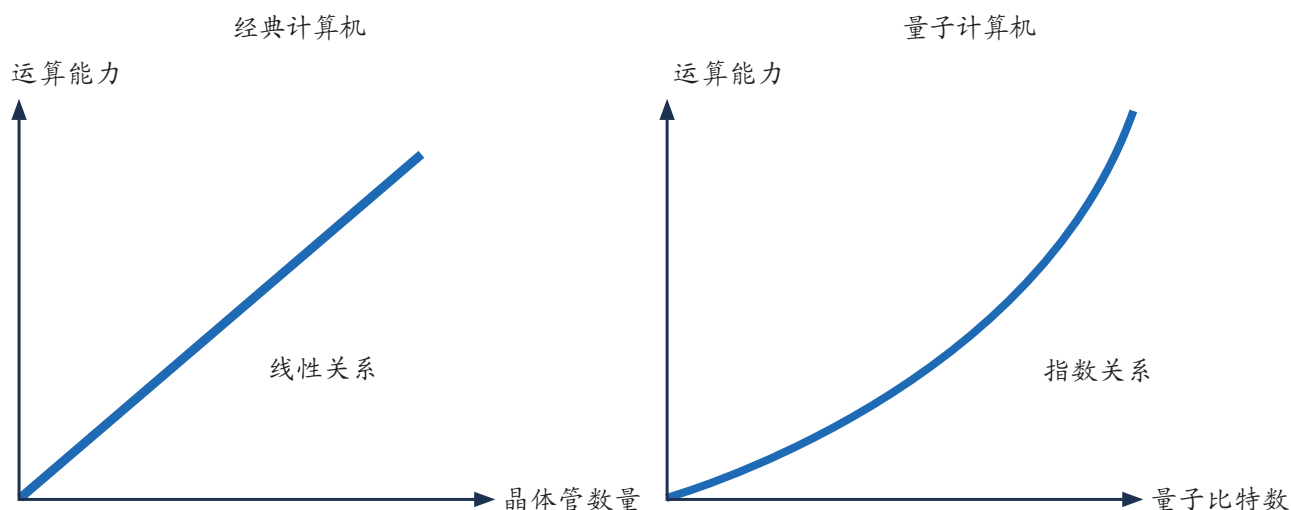
经典计算机的运算模式为逐步计算，一次运算只能处理一次计算任务。量子计算为并行计算，因此量子计算机可以同时处理 2^n 个数进行数学运算，相当于经典计算机重复实施 2^n 次操作。

计算能力

在经典计算中，计算能力与晶体管数量成正比例线性关系；量子计算机中算力将以量子比特的指数级规模拓展和爆发式增长。

图1

经典计算机与量子计算机运算能力影响因素



资料来源：赛迪顾问，2021，05

基于上述优势，量子态叠加原理使得1台 n 位的量子计算机算力在理论上等同于 2^n 台 n 位的经典计算机算力。因此，相较经典计算机，量子计算机具备“量子优越性”。一旦量子计算机强大到可以完成经典计算机无法执行的计算时，“量子霸权”由此实现。

（二）发展历程：

从20世纪80年代量子计算概念的最初构想到20世纪90年代划时代的量子算法编制，再到21世纪以来商用量子计算机实现路径的孵化成型，经历了近半个世纪的积淀与培育，提高量子比特数和探索物理实现粒子是科学界与企业界追逐的关键。未来，向实验室外拓展量子计算，实现通用量子计算机，面向广泛商业化应用场景是科技浪潮即将奔赴的海岸。

图2

量子计算发展历程

1982-1993 理论概念构想期

- 1982年, Richard Feynman提出利用量子体系实现通用计算的想法, 即量子计算的早期概念构想。
- 1985年, David Deutsch提出了量子图灵机模型, 使得通用量子计算机的构建更加清晰。
- 1992年, Deutsch Jozsa提出了D-J量子算法, 这是量子并行计算理论的基石。

1994-2006 实践成果初探期

- 1994年, Peter Shor提出Shor算法, 对RSA等在内的加密算法和系统造成了威胁, 成为量子计算的核心突破。
- 1995年, Benjamin Schumacher第一次提出了量子比特信息学上的概念, 并创造了“量子比特”(qubit)的说法。
- 1996年, Lov Grover提出了Grover量子搜索算法, 该算法被公认为继shor算法后的第二大算法。
- 1998年, Bernhard Omer提出量子计算编程语言, 拉开了量子计算机可编程的序章。

2007-2013 研究开发活跃期

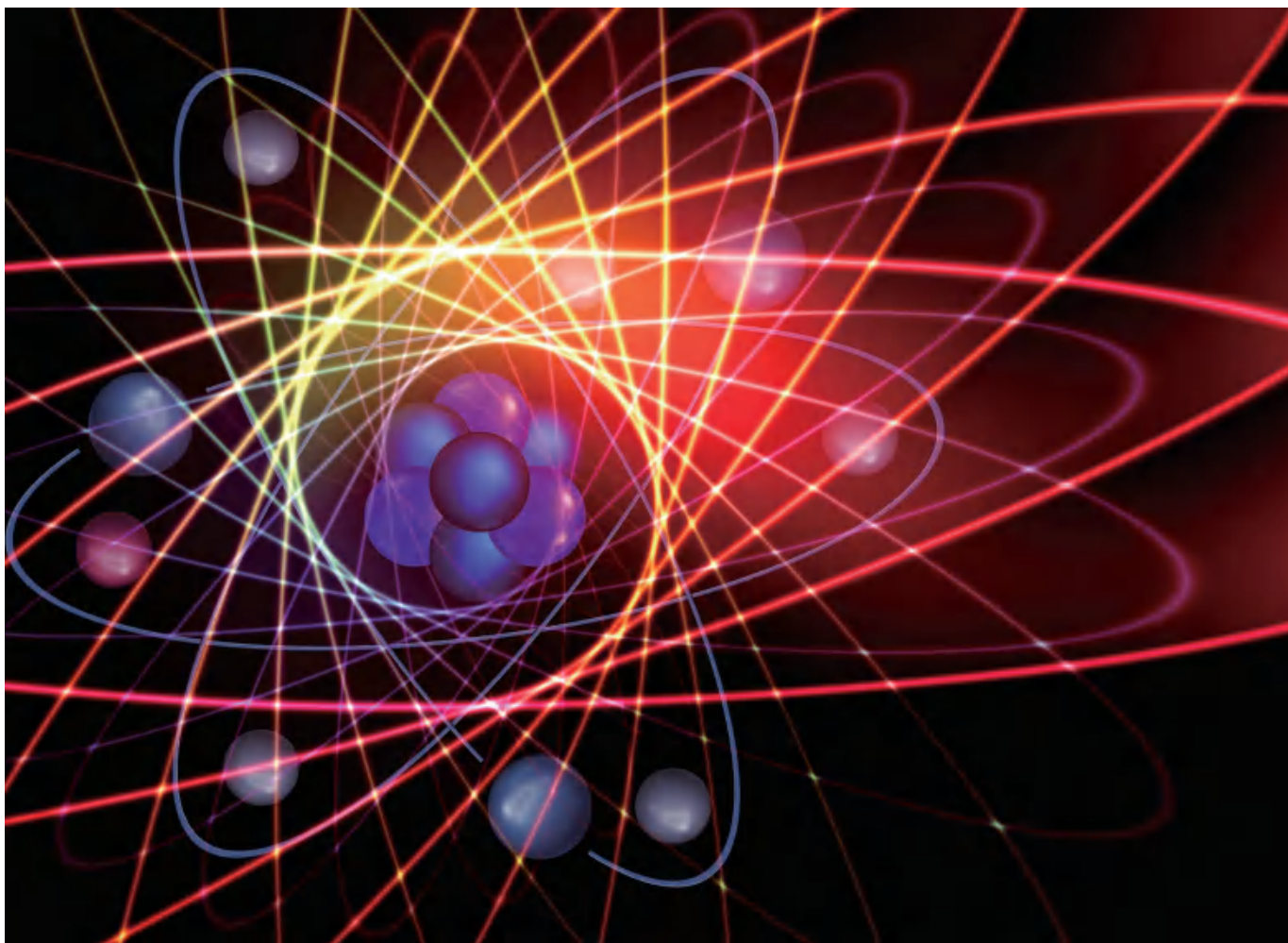
- 2007年, D-wave Systems实现了历史上第一台商用量子计算机。宣布研制成功 16 量子比特的量子计算机——“猎户座”(Orion)。
- 2009年, Harrow、Hassidim、Lloyd提出HHL量子算法。该算法在特定条件下实现了相较于经典算法的指数加速效果, 将在机器学习、数值计算等场景有优势体现。

2014-2019 商业价值孵化期

- 2014年, Google建设“Google量子人工智能实验室”, 自此专营量子计算的创业公司开始出现。
- 2016年8月16号, 墨子号量子科学实验卫星成功发射升空。
- 2019年1月, IBM公司发布世界上首个商用集成量子计算系统: IBM Q System One, 这一新系统对于在实验室外扩展量子计算至关重要。
- 2019年, 谷歌发布论文称已经利用一台53量子比特的量子计算机, 证实了量子计算机性能超越经典计算机, 成为量子计算领域发展的标志性事件, 刺激了全球科技巨头和初创企业的进一步投入与竞争。

2020-以后 技术应用跃升期

- 未来, 随着量子物理比特数量和质量的提升, 预计到2030年, 基于百位量级量子物理比特, 在含有噪声, 即未实现量子纠错的条件下, 探索开发相关应用和解决特定计算困难问题。到2050年, 有望实现通用量子计算机, 提高量子比特的操纵精度使之达到能超越量子计算苛刻的容错阈值(>99.999%), 并进一步面向更广泛的应用场景。



02

政策资源分布

- 全球政策与中国政策



全球主要国家高度重视量子科技发展，我国充分认识推动以量子计算为代表之一的量子科技发展的重要性和紧迫性。在各国顶层政策催化下，量子计算在前沿科技领域受到广泛关注，科研探索和技术创新保持活跃，发展态势良好。

（一）全球政策及中国政策：

量子科技是新一轮科技革命和产业变革的必争领域之一。近年来，美国、欧盟、英国、日本等主要国家和地区高度重视量子科技发展，通过出台政策文件、成立研究机构、支持量子科技研究等方式加大对量子科技的规划布局和支持力度。

年份	国别	主要政策
2002	美国	《量子信息科学和技术发展规划》
2009		《量子信息科学的联邦愿景》
2015		《2015-2019年技术实施计划》
2016		《推进量子信息科学发展: 美国的挑战与机遇》
2016		《与基础科学、量子信息科学和计算交汇的量子传感器》
2018		《国家量子倡议法案》
2018		《量子信息科学国家战略概述》
2018		《国家量子倡议法案》
2020		《美国量子网络战略构想》
2015	英国	《量子技术国家战略——英国的一个新时代》
2015		《英国量子技术路线图》
2016		《量子技术：时代机会》
2018		《量子技术》报告
2020		《量子信息处理技术布局2020：英国防务与安全前景》
2016	欧盟	《量子宣言(草案)》
2020		《战略研究议程（SRA）》
2020	澳大利亚	《量子技术路线图》
2017	日本	《关于量子科学技术的最新推动方向》

资料来源：赛迪顾问整理，2021，05

在我国，量子科技产业获政策持续支持，已上升为国家战略。早在2006年发布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020年）》中，就已经提出“重点研究量子通信的载体和调控原理及方法，量子计算，电荷-自旋-相位-轨道等关联规律以及新的量子调控方法”。2016年，在国务院《国家创新驱动发展战略纲要》中提出了促进“量子信息技术”发展的战略规划。2020年，中共中央政治局就量子科技研究和应用前景进行第二十四次集体学习，习近平总书记提出“要充分认识推动量子科技发展的重要性和紧迫性，加强量子科技发展战略谋划和系统布局，把握大趋势，下好先手棋”。

表2

中国量子科技相关政策梳理

时间	发布机构	政策名称	具体内容
2006/02	国务院	《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020年)》	重点研究量子通信的载体和调控原理及方法, 量子计算 , 电荷-自旋-相位-轨道等关联规律以及新的量子调控方法, 受限小量子体系的新量子效应, 人工带隙材料的宏观量子效应。
2011/07	科技部	《国家“十二五”科学和技术发展规划》	突破光子信息处理、量子通信、 量子计算 、太赫兹通信、新型计算系统体系、网构软件、量数据处理、智能感知与交互等重点技术, 攻克普适服务、人机物交互等核心关键技术。
2015/05	国务院	《中国制造2025》	全面突破第五代移动通信(5G)技术、核心路由交换技术、超高速大容量智能光传输技术、“未来网络”核心技术和体系架构, 积极推动 量子计算 、神经网络等发展。
2016/03	全国人大	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》	将量子通信和 量子计算机 列为科技创新2030——重大科技项目之一。
2016/05	国务院	《国家创新驱动发展战略纲要》	前瞻布局新兴产业前沿技术研发, 力争实现“弯道超车”。开发移动互联技术、 量子信息技术 、空天技术, 推动增材制造装备、智能机器人、无人驾驶汽车等发展。
2017/05	科技部、教育部、中科院、国家自然科学基金委员会	《“十三五”国家基础研究专项规划	量子计算机 研究解决大尺度量子系统的效率问题, 研发量子系统、量子芯片材料、结构与工艺、 量子计算机 整体构架以及操作和应用系统, 实现量子信息的调制、存储、传输和计算, 最终实现实用化的 量子计算机 原型机。
2017/08	科技部、军委科技委	《“十三五”科技军民融合发展专项规划》	积极推动天地一体化信息网络、量子通信与 量子计算机 、脑科学与类脑研究等新一轮军民融合重大科技项目论证与实施。
2018/01	国务院	《国务院关于全面加强基础科学研究的若干意见》	优化国家科技计划基础研究支持体系, 拓展实施国家重大科技项目, 加快实施量子通信与 量子计算机 、脑科学与类脑研究等“科技创新2030-重大项目”。
2018/07	中央办公厅、国务院办公厅	《金融和重要领域密码应用与创新发展规划(2018-2022年)》	大力推动密码科技创新, 加强密码基础理论、关键技术和应用研究, 促进密码与 量子技术 、云计算、大数据、物联同、人工智能、区块链等新兴技术融合创新。
2020/10	中央政治局	第二十四次集体学习	量子科技 发展具有重大科学意义和战略价值, 是一项对传统技术体系产生冲击、进行重构的重大颠覆性技术创新, 将引领新一轮科技革命和产业变革方向。

资料来源: 赛迪顾问整理, 2021, 05



03

技术发展情况

- 技术成果
- 技术瓶颈



量子计算存在多种技术路线以制作出纠缠态的最基本物理实现粒子，但尚无任何一种路线能够完全满足实用化条件要求从而推动技术方案的融合收敛。量子计算目前还处于原型机研发阶段，对粒子状态的控制是亟需突破的难点。距离实现对规模化多体量子体系的精确制备、操控与探测还需至少十年的探索周期。

（一）技术成果

量子计算存在多种技术路线以制作出最基本的物理实现粒子。主流技术路径包括超导、离子阱、半导体量子点、量子光学以及拓扑量子等。技术路径的研发目的都是为了制作出纠缠态的最基本粒子。超导和离子阱技术路线当前处于领先地位，受到关注程度最高，半导体量子点和光量子路线发展提速，上述四种路径均已制作出物理原型机，但拓扑量子尚无物理层面的实现。目前，仍无任何一种路线能够完全满足实用化条件要求从而推动技术方案等融合收敛。

超导量子计算路线

超导量子计算路线利用超低温“冻结”粒子的运动进而实现粒子状态的控制。由于超导量子电路的能级结构可通过外加电磁信号进行调控，电路的设计定制的可控性强。得益于基于现有的成熟集成电路工艺，超导量子电路具有多数量子物理体系难以比拟的可扩展性。

谷歌、IBM、英特尔等企业均在积极开展超导量子比特实验研究，我国中科大、南方科大、中电科、阿里巴巴、本源量子等公司和研究机构开展了超导线路的研究和布局。量子比特数近年来稳步提升。

但超导路线在逻辑门保真度和相干时间方面存在一定短板，比特间连接的物理布线工艺难度要求将随着比特数增加而加大。

离子阱量子计算路线

离子阱量子计算路线在物理比特质量和逻辑门保真度等方面具有一定优势，同时具备室温条件工作的优点。

2020年Honeywell发布了6量子比特离子阱计算机，先后实现了64和128量子体积，平均单量子比特门保真度为99.97%，双量子比特门保真度为99.54%；IonQ宣布在32量子比特离子阱量子计算机上，实现预期超过400万量子体积；我国清华大学、中山大学和启科量子等公司和研究机构开展了离子阱线路的研究和布局。

离子阱路线在真空工作环境要求，门操作时间指标和激光读写操控复杂度等方面存在短板，单平台实现物理比特数量的大规模扩展也存在瓶颈。

半导体量子计算路线

半导体量子计算路线与现代半导体集成电路工艺兼容，在可拓展性和可集成性等方面具备优势。

2020年英特尔与代尔夫特QuTech共同在Nature上发表论文，证明了在高于1开氏度下能够成功控制“高温”量子比特；澳大利亚硅量子计算公司（SQC）刷新了有史以来的半导体量子比特的最低噪声水平，通过将研究成果与在1微秒内读出量子比特信息的能力相结合，实现了双量子比特门保真度99.99%；我国中科大和本源量子等公司和研究机构开展了半导体线路的研究和布局。

但半导体路线物理比特易受环境噪声影响且物理机制复杂近年来在物理比特数量等指标方面暂无突破性成果。

量子光学路线

量子光学路线在相干时间、室温工作、高维纠缠操纵、实现量子信息系统互联等方面具有优势。

我国中科大在光量子计算研究方面处于领先地位，2020年9月完成了对50个光子的玻色取样，12月构建了76个光子的量子计算原型机“九章”。

但基于离散器件平台等光量子计算探索在比特数量大规模方面将面临困难，上海交大在基于光子集成的光量子芯片领域开展了研究。

拓扑量子计算路线

拓扑量子计算路线无需纠错算法，相干时间长，保真度强。但拓扑量子位硬件构建难度大，目前尚无物理层面的实现。

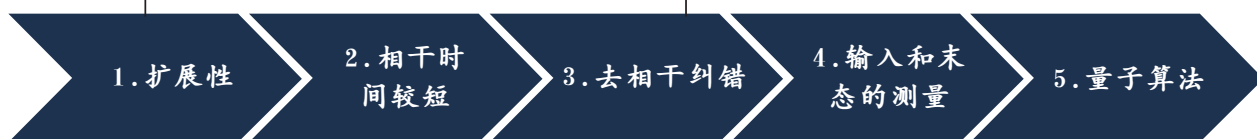
微软为该实现路径的主要研发企业，2020年微软宣布与哥本哈根大学合作成功实现了一种重要的、有希望用于拓扑量子计算机的材料。这种新材料有可能在没有磁场的情况下实现拓扑状态，可用于实现真正的拓扑量子计算机。

（二）技术瓶颈

量子计算目前还处于原型机研发阶段，在技术上仍面临多项挑战，主要包括以下五方面的困难。对粒子状态的控制是亟需突破的难点，距离达到超越量子计算苛刻的容错阈值（>99.999%），实现对规模化多体量子体系的精确制备、操控与探测还有至少十年的探索周期。

外界环境对于量子的相干叠加态及量子计算计算结果稳定性的干扰性较为明显。因此量子计算机需通过使用超导材料对抗外界干扰，而这些超导材料一般需要在约为 0.1 开尔文（即零下 273.05 摄氏度）的环境下工作，该温度低于宇宙星际空间的平均温度 2.73 开尔文。此外，在进行量子计算的时候，随着量子比特数量增加，保持量子比特相干态的难度也在不断加大。

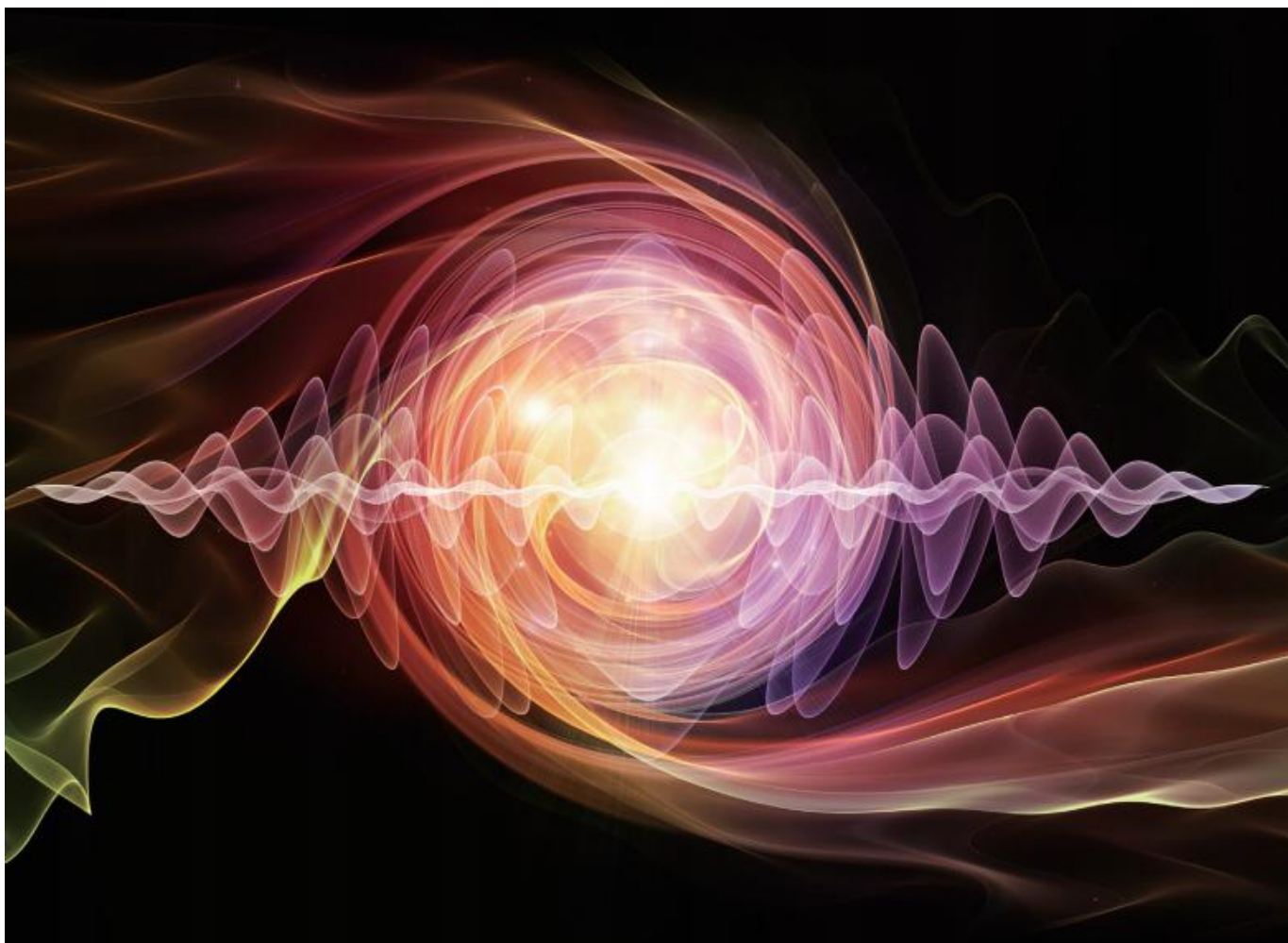
由于量子计算机通常难以避免量子比特退相干出错，引入了纠错机制，而退相干的纠错机制，目前还无法实现1个真正的能够容错的满足量子计算的逻辑比特。



由于量子计算机容易受外界环境的影响而导致退相干，因此为保持运算结果的可靠性，量子计算必须在其发生退相干之前全部完成。而由于目前相干时间的上限一般为100微秒，在这极其短暂的时间段内，量子计算机必须完成一定逻辑操作，这对于量子逻辑门之间的切换速度要求非常高。

要量子计算机运作时需把量子比特初始化为一个标准态，即要求量子计算的输入态是已知的，同时具备对量子计算末态进行测量的能力。该能力目前还不成熟。

目前的QPU需要依赖经典芯片（CPU或专门设计的量子比特控制芯片）对其进行操作，目前，量子计算只能执行用于分解质因数的Shor量子算法、用于无序数据库搜索的Grover量子算法等有限的量子算法。



04

赛迪预判

- 商业前景
- 发展趋势



若实现量子纠错机制的应用，量子计算有望在10-15年内实现商用，市场规模将实现爆发性增长，预计量子计算的商用元年在2030年左右，量子计算商用元年的市场规模将达到140.1亿美元。

（一）商业前景

当前，量子计算市场主要集中于研发环节。若实现量子比特质量、量子纠错算法、量子比特控制等核心挑战的突破，未来市场规模将实现爆发性增长。量子比特位数、量子体积、量子相干时间等参数对于预测量子计算商业化元年具有较高的参考价值：

1

当量子比特位数达到100-1000位后，量子计算机有望能够执行一些具有实际意义和应用价值的算法；

2

当错误率由0.1%减少到0.01%后，将带来“量子体积”的明显增长，预示量子计算机得以商用；

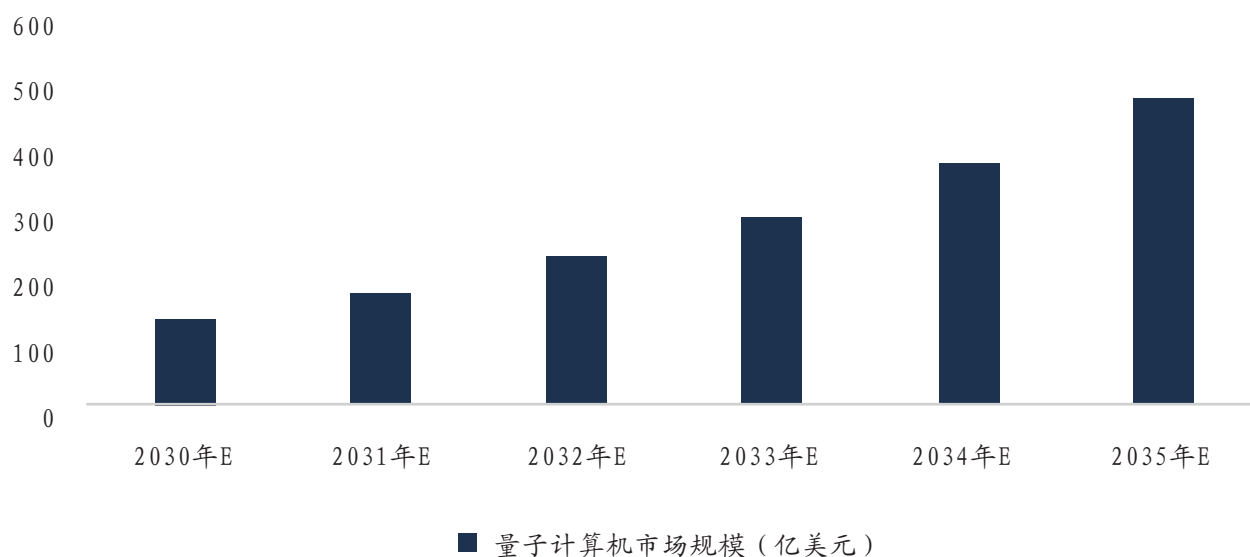
3

若量子相干时间提升至高于1ms，量子计算机将有进入商用的可能。

综上，并结合量子计算所需的物理学基础与算法基础，量子计算有望在10-15年内实现商用，预计量子计算的商用元年在2030年左右。以2030年为量子计算商用元年，预计2030年全球量子计算市场规模将达到140.1亿美元，并以30%左右的增速平缓上涨，至2035年预计会达到489.7亿美元的量子计算市场规模。

图3

全球量子计算商用市场规模预测



数据来源：赛迪顾问，2021，05

（二）发展趋势



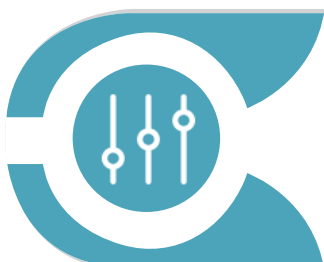
量子计算作为量子科技的重要应用之一，在面向“十四五”乃至更长远的未来，有望成为中国在全球科技产业中“换道超车”、掌握尖端技术话语权的重要核心技术。

01



量子计算尚无专利壁垒，当前抢占技术入口将获得至关重要的议价权。在经典计算机体系内，计算芯片设计与制造的核心技术掌握在科技巨头公司手中，并处于垄断地位；而在量子计算领域尚未形成垄断性巨头公司或者较高的技术专利壁垒。

02



相较于量子通信，量子计算的技术突破难度较高，由于量子计算极易被环境热量或波动干扰致使计算结果出错，因此量子纠错算法对结果的准确性极其重要，而提升量子比特的测控精度是量子计算机实用化的关键问题。

03



量子计算当前还处于原型机研发阶段，商业化前景仍然存在不确定性，但气象、金融、石油化工、材料、生物医药、汽车交通等众多行业已开始关注和重视到“量子计算”的巨大发展潜力，并开始与量子计算科技企业和初创企业进行合作探索。量子计算企业在量子计算技术的研究及落地应用中的地位不可或缺，应当进一步与科研院所合作交流，破除技术交流壁垒。

04



量子计算与经典计算并非竞争关系，量子领域的发展应加深和传统技术领域的合作，利用现有技术成果加速自身发展。未来，量子计算机和经典计算机将相辅相成、并行存在，分别面对不同的市场需求，从中找到适合的商业模式和应用模式，占据相应市场份额。

05

关于赛迪

赛迪顾问股份有限公司

赛迪顾问股份有限公司（简称“赛迪顾问”）直属于中华人民共和国工业和信息化部中国电子信息产业发展研究院，是中国首家上市的咨询企业（股票代码：HK.02176）。凭借强大的部委渠道支持、丰富的行业数据资源、独特的研究方法体系等竞争优势，面向国家部委、城市园区、行业企业、投融资机构等，提供区域发展、城市战略、工业信息化融合、产业规划、园区运营、行业研究、企业战略、管理创新、投资策略、上市服务、投资并购、基金运作、智慧城市建设、信息化规划等现代咨询服务。研究领域涵盖电子信息、软件和信息服务业、人工智能、大数据、数字经济、信息通信、集成电路、物联网、智能制造、智能装备/高端装备、新材料、汽车、节能环保、医药健康、旅游体育、产业地产等多个行业领域。赛迪顾问致力成为中国本土的城市经济第一智库、企业战略第一顾问、资本运作第一专家、智慧城市第一品牌。

赛迪顾问人工智能产业研究中心

人工智能产业研究中心是赛迪顾问专业从事人工智能领域产业化、市场化和区域化等综合型咨询服务研究部门。该中心致力于成为国内人工智能专业型第一智库。业务涵盖：AI芯片、AI服务器、量子计算、计算机视觉、数据标注、知识图谱、自然语言处理、智能语音等核心技术领域，另外还包括：智能经济、智慧医疗、智慧零售、数字治理、智慧金融等相关产业等领域，并提供基于人工智能领域的产业规划、市场研究、企业战略、投资可研、产品战略和品牌运营等全价值链研究咨询服务，并整合信息与资源，持续跟踪人工智能领域基础器件、核心技术和行业应用等全产业链等热点领域咨询服务工作。

注：以上为报告部分内容

赛迪顾问股份有限公司

联系人：于凯迪

电 话：+86 10-17611519716

传 真：+86 10-88559009

官 网：www.ccidconsulting.com

满天星：www.mtx.cn

邮 件：service@ccidconsulting.com

邮 编：100048

地 址：北京市海淀区紫竹院路66号赛迪大厦10层



赛迪顾问官方微信