

# 一文读懂量子计算原理

——行业深度研究

马天诣/谢致远



## 摘要

- **量子计算有望成为解决AI算力瓶颈的颠覆性力量。**与传统计算相比，量子计算能够带来更强的并行计算能力和更低的能耗，同时量子计算的运算能力根据量子比特数量指数级增长，在AI领域具有较大潜力。海外科技巨头带动量子计算产业发展，IBM、微软、谷歌等公司先后发布量子计算路线图，与此同时，国内量子计算产业与海外科技巨头差距不断缩小。
- **量子计算软硬件基础设施不断成熟，为商业化落地打下良好基础。**当前全球范围内针对量子计算机，已经形成超导、离子阱、光量子、中性原子、半导体量子等主要技术路线，以及以量子门数量、量子体积、量子比特数量等核心指标构成的性能评价体系。量子计算云平台将量子计算机硬件或量子计算模拟器与经典云计算软件工具、通信设备及IT基础设施相结合，为用户提供直观化及实例化的量子计算接入访问与算力服务。软件方面，量子算法不断发展中，在当前硬件条件下重点是综合考虑NISQ算法的容错代价与算法性能之间的平衡，量子软件体系处于开放研发和生态建设早期阶段，正在不断成熟。
- **量子计算有望赋能千行百业，开启8000亿美元蓝海市场。**据ICV数据，2023年全球量子计算市场规模约47亿美元，预计2035年有望超过8000亿美元；其中，金融、化工、生命科学领域有望更加受益量子计算产业发展。
- **投资建议：**量子计算有望颠覆经典计算架构，成为解决AI算力瓶颈的颠覆性力量，或成为发展新质生产力的重要抓手，建议关注**国盾量子、科大国创、神州信息、科华数据、中国长城、光迅科技**等量子计算相关标的，以及**电科网安、吉大正元、格尔软件、国芯科技、浙江东方、亨通光电**等量子加密通信标的。
- **风险提示：**技术落地不及预期，行业竞争加剧，市场不及预期。

01

何为量子计算？基本原理是什么？

02

如何获取量子比特？

03

详解量子计算产业链

04

量子计算有望赋能  
千行百业

05

投资建议

06

风险提示

CONTENTS

目录



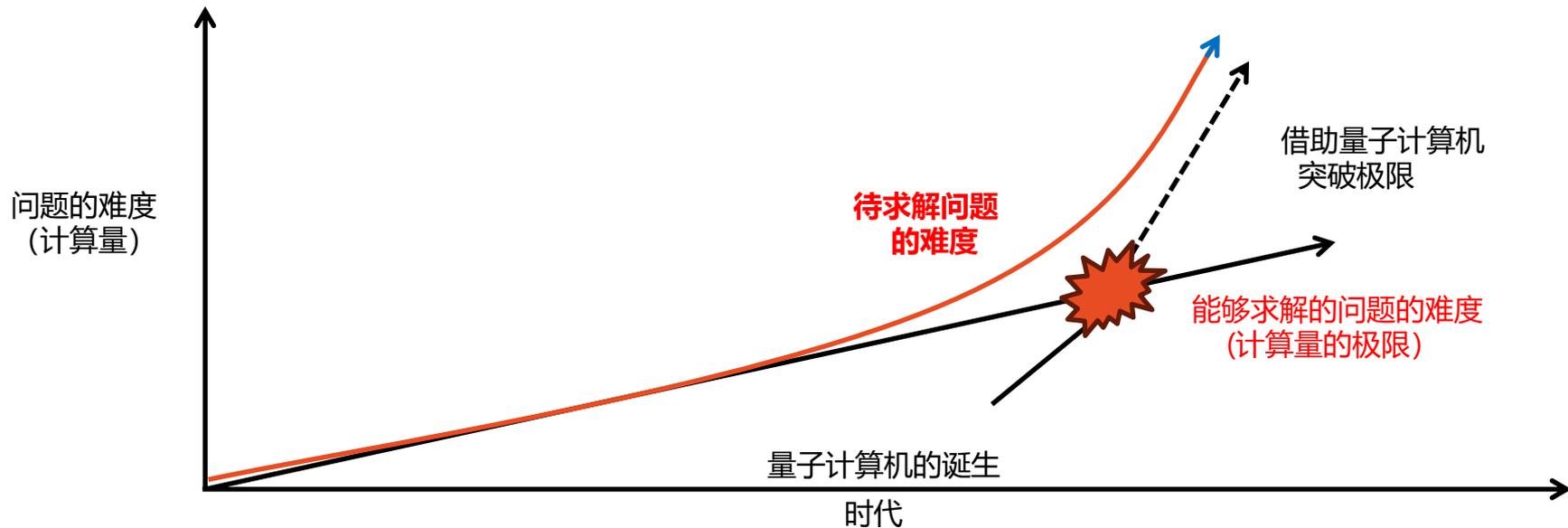


# 01 何为量子计算？基本原理是什么？

## 1.1 为什么需要量子计算机？

- ▶ **传统电能计算机能力依旧有限。**随着计算机发展，高速计算得以实现，反之，待以解决的问题也变得越来越复杂、繁琐。我们认为对于复杂的三维物体或具有量子力学行为的物质，对于当前仿真计算技术仍有较大挑战。不可否认，有时候在计算方面，计算机仍力有未逮。近年来备受关注的区块链技术、机器学习技术，均**致力于减少求解问题所花费的时间**。

图1：未来有望借助量子计算机突破极限



# 1.1 经典计算机的掣肘在哪？

- ▶ **经典计算基于比特和字节，拥有多重排列模式。**经典计算的基本单位是比特，它可以处于两种二元状态之一：off或on，在经典计算中通常被描绘为0或1。连续的8比特成为1字节，其可以储存更多数据，同时根据不同比特状态排列组合，1字节可拥有256种完整组合，而这些组合也足以使用ASCII系统对拉丁字母表中的每个字符进行编码。一种更现代的编码称为“Unicode”，使用最多四个字节的组，足以涵盖从表情符号到泰米尔字符和许多其他基于字符的语言的所有内容，而其超过 100 万个可用组合中的一小部分而已。
- ▶ **比特解决计算问题的方式可理解为迷宫游戏。**假设比特字节计算方式为一个迷宫，其目标是使用最短的路径到达迷宫中心。使用经典计算机，沿途的每个交叉点都变成与一位相对应的二元决策，其中**1/0位表示在迷宫“转弯处”的决策**。通过此种方式，可将每个比特位的组合视为穿过迷宫的一组方向。但每一次的比特字节组合并非是正确的，一些路径会重叠，而另一些路径可能会遇到死胡同，但通过尝试每种组合，最终可以找到到达中心的最短路径。然而单字节就拥有256种组合，为了检查准确性，经典计算机必须研究每种可能的组合，并且一次只能检查一个组合。

图2：比特字节组合形成ASCII码

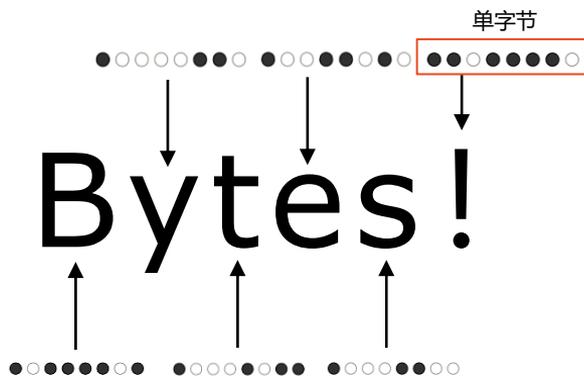
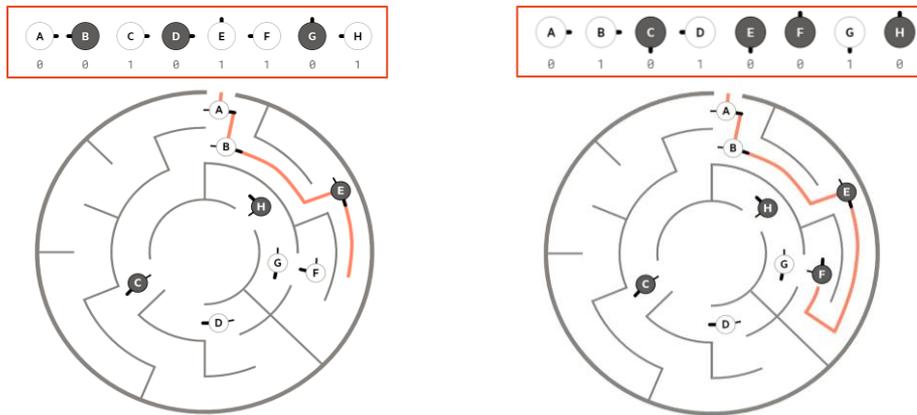


图3：不同ASCII码类似迷宫路径组合，但组合多且需要逐一排查



# 1.2 经典计算核心问题在于多项式时间内无法求解

- 可解问题就是相对于输入参数的数量，需要计算的次数没有急剧增多的问题。以“从输入的一组数字中找出最大的数字”问题为例，在输入了6个数字的情况下，程序逐一对比大小后，大约计算6次可得到解；在输入了10个数字的情况下，程序大约需要计算10次；在输入了100个数字的情况下，程序大约需要计算100次。即对于“求最大值”这类问题，若输入了N个数字，程序大约需要计算N次。
- 由果溯因反向推理问题求解难度较大，且拥有多种组合，“不可解问题”出现概率较大。对于“从输入的一组数字中，找出乘积最接近40的数字组合”问题，常规解法是列出所有输入数字组合，逐一计算各种组合的乘积，再从中找出乘积最接近40的组合。如输入了6个数字，则有 $2^6 = 64$ 种组合；当输入10个数字时，需要进行 $2^{10} = 1024$ 次乘法运算；当输入20个数字时，需要进行 $2^{20} = 1048576$ 次乘法运算；当输入30个数字时，需要进行 $2^{30} = 1073741824$ 次乘法运算，运算的次数字指数式增加。

图4：经典计算可求解问题示意图

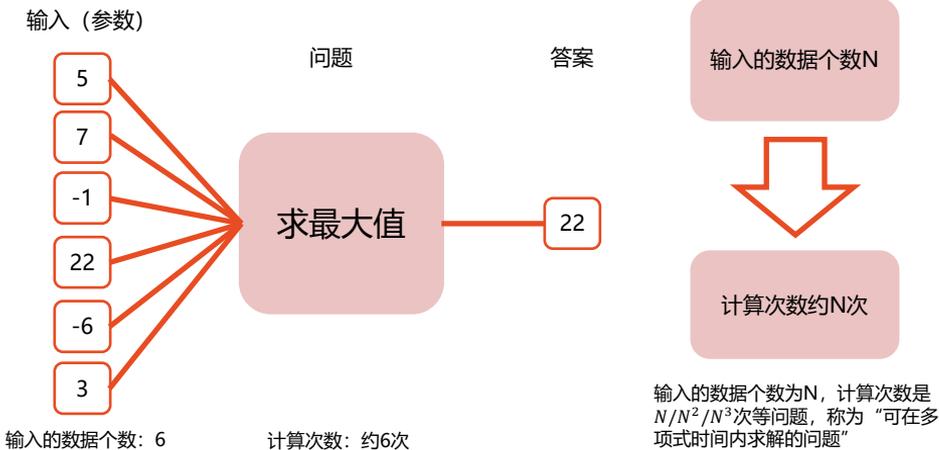
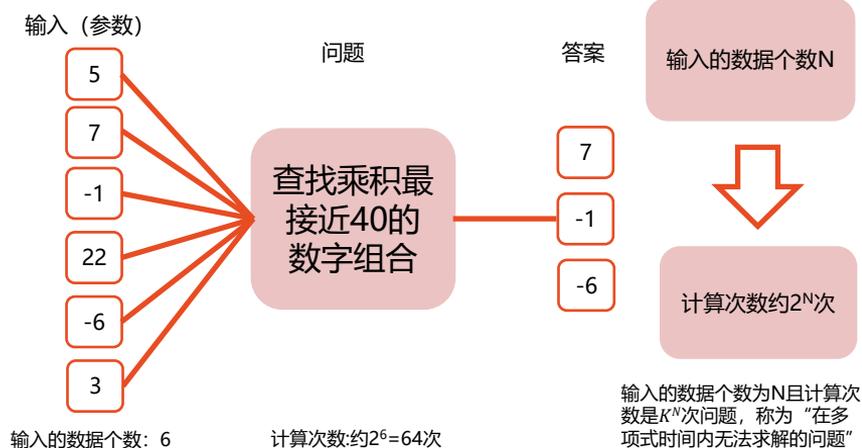


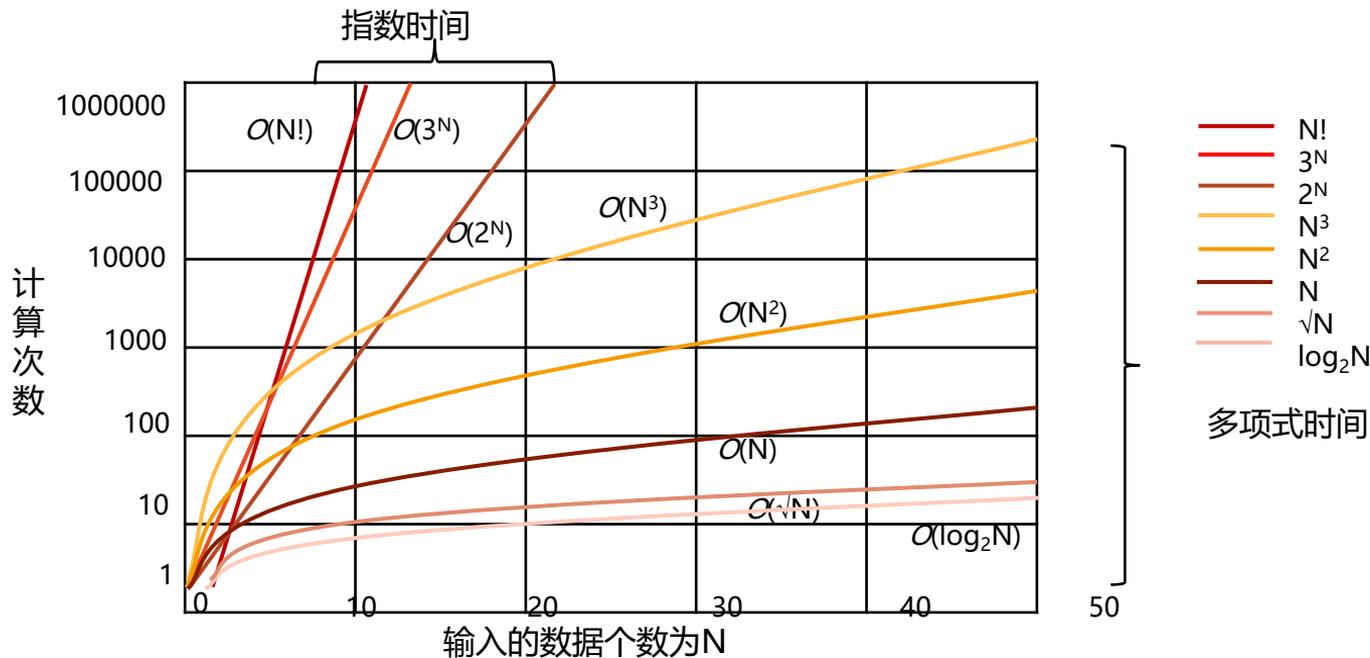
图5：经典计算不可求解问题示意图



## 1.2 经典计算核心问题在于多项式时间内无法求解

▶ 当输入的数据个数为 $N$ 时，计算次数大约为 $K^N$  ( $K$ 是整数)。即，随着 $N$ 的增加，计算次数呈指数增长（需要指数时间）。学界将具有这种可能性的问题称为在多项式时间内无法求解的问题，也就是经典计算机面临的棘手问题。

图6：当输入参数数量为 $N$ 时，可解问题的计算次数和无法求解的问题的计算次数

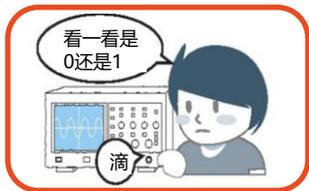


# 1.3 为什么量子计算可以解决上述问题？

图7：测量量子比特

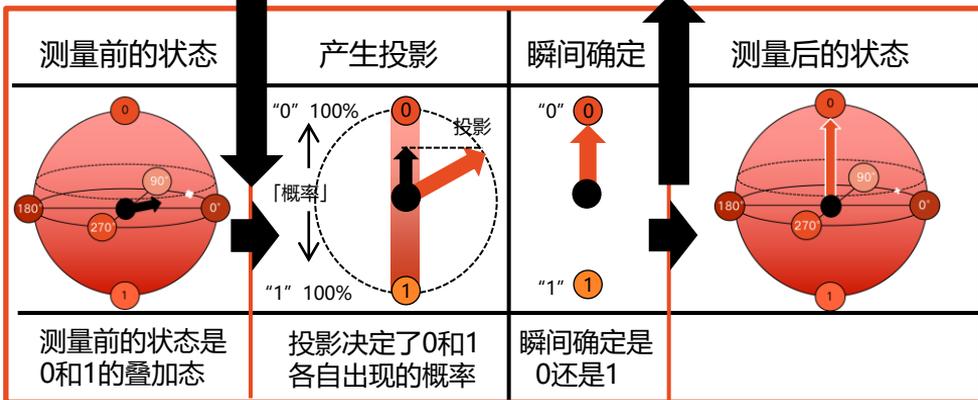
测量前，  
量子比特的状态未知

测量后，  
得到了非0即1的经典比特信息



开始测量

测量结果

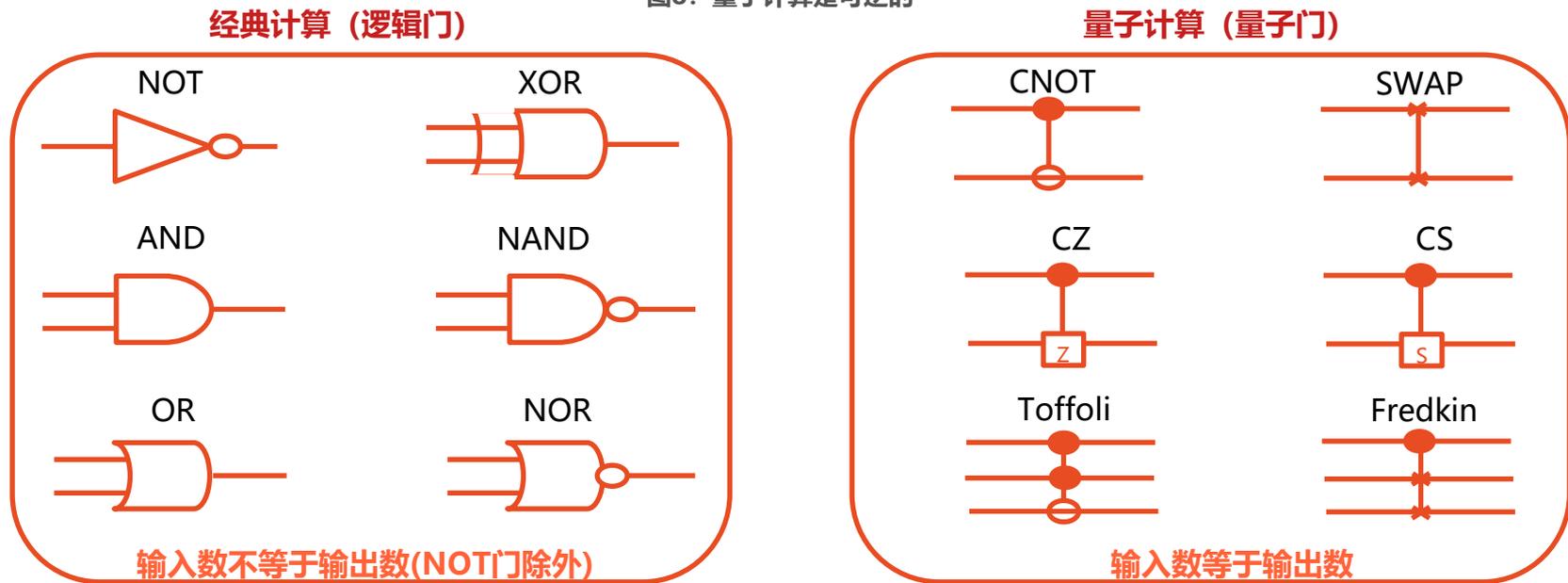


- 量子计算机和经典计算机最大的不同点在于二者使用的最小信息单位不同。不同于只拥有0/1态的经典比特，量子计算机使用的最小信息单位是量子比特。虽然量子比特也可以和经典比特一样使用0和1这两种状态来表示信息，但除此以外，量子比特还可以处于0和1的“叠加态”这一特殊状态。
- 量子比特的状态可假设为球体，量子0/1叠加态可表征为球面任意一点。量子球体分别以0和1表示上下顶点（南北两极），该球体称为布洛赫球，常用于表示量子比特的状态。布洛赫球球面上的点表示量子比特的状态。箭头指向正上方（相当于地球的北极）时状态为0，指向正下方（相当于地球的南极）时状态为1，指向球面上其他点时状态为0和1的叠加态。
- 类似于地球经纬度，布洛赫球面点常以振幅+相位物理量定坐标。量子比特一经测量，就会通过概率来决定到底是处于状态0还是状态1。二者的概率均取决于测量前指向布洛赫球球面上某一点的箭头在贯穿0和1两点的轴上的投影。箭头的投影越接近0，出现0的概率就越大；越接近1，出现1的概率就越大。经过测量后，我们就可以从量子比特中读取非0即1的经典比特信息。量子比特的状态此时也会变为与测量结果对应的状态0或状态1。

## 1.4 可逆计算是量子计算的另一大特性

- **可逆计算是量子计算的一种特殊性质。**可逆计算就是可以逆转的计算，即可以从输出状态正确推断出输入状态的计算。经典计算中的NOT门就属于可逆计算，因为我们可以从输出值正确推断出输入值——若NOT门的输出为0，则输入必为1；若输出为1，则输入必为0。而对于AND门，若输出为1，可以推断出输入必为11，但如果输出为0，那输入就有00、01或10这三种可能，因此无法确定输入到底是哪一种。由于计算不能逆转（无法根据输出计算输入），所以AND门不属于可逆计算。在量子计算中，所有量子门的输入数和输出数都是相等的，意味着量子计算是可逆计算。

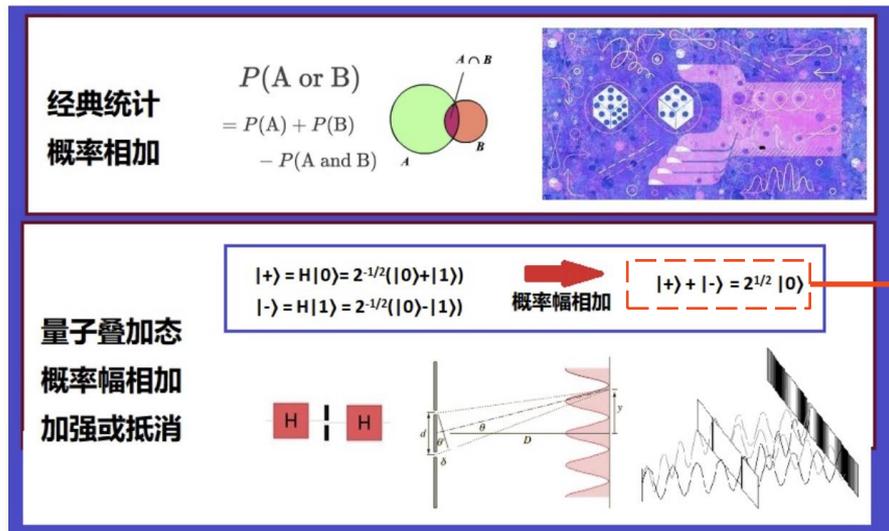
图8：量子计算是可逆的



# 1.5 量子计算是如何运作的?

- **量子计算基于量子比特 (Qubit)**。虽然基于量子比特进行计算，但量子计算输入输出仍然采用经典比特。因此学界常用**量子电路**说明量子门如何控制量子信息，从而实现量子计算。量子电路是用于量子计算的模型，是执行量子位状态的传送之路，但它不同于传统电路，例如：实线并不一定是物理电缆。量子电路的目的是定义事件的时间顺序：水平轴是时间，左边开始右边结束。左边开始的水平线是量子比特，下面的双线代表经典比特，一般与测量相连。
- 量子门的可逆性同样使得量子电路具备可逆性。因此量子计算最大特点在于：1) 只有时间顺序没有回路 (loop)；2) 输入和输出的比特数目相等。

图9：经典的概率相加不同于量子的概率幅相加

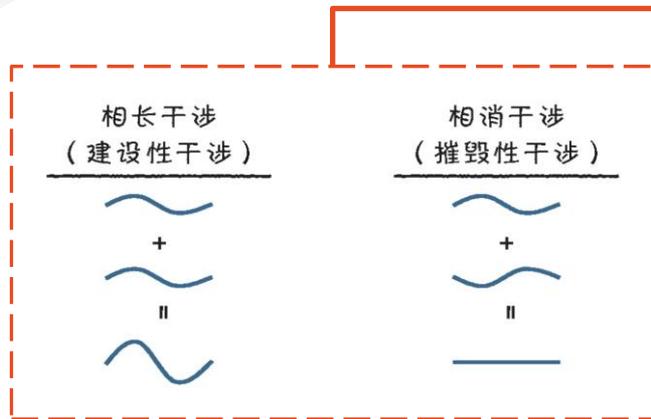


仍然是状态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 的均匀叠加但符号不同，可以视为两个实验 $H|0\rangle$ 和 $H|1\rangle$ 的总和。如果我们将这两个实验加在一起，状态 $|1\rangle$ 会因为减号而抵消，状态 $|0\rangle$ 则因加号而增强。

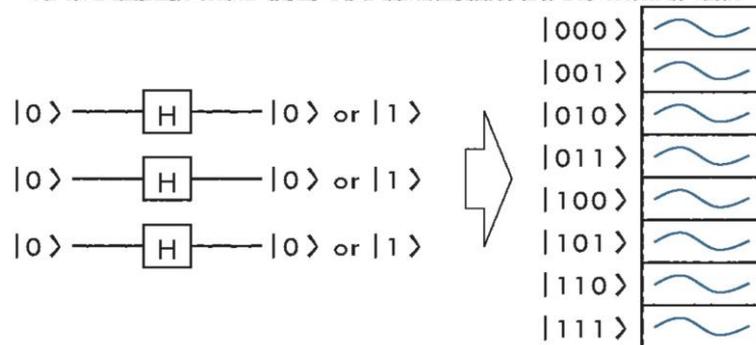
# 1.5

## 量子计算是如何运作的？

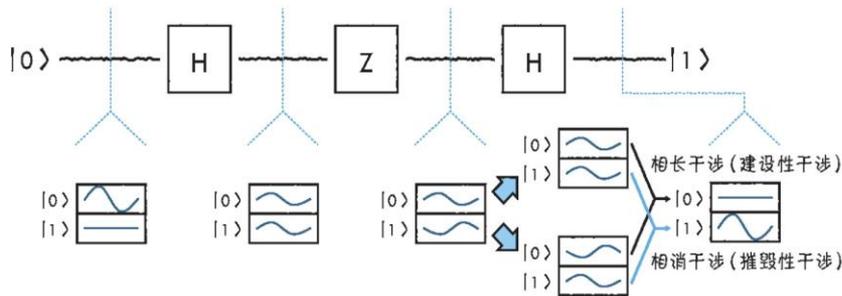
基础原理：光的干涉



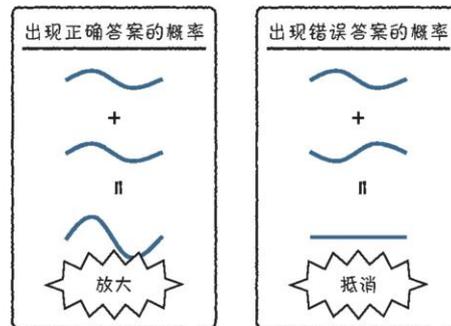
3个量子比特处于0和1的概率均等的叠加态



单量子比特电路中的量子干涉示例



量子计算机通过“概率振幅的干涉”实现高速计算



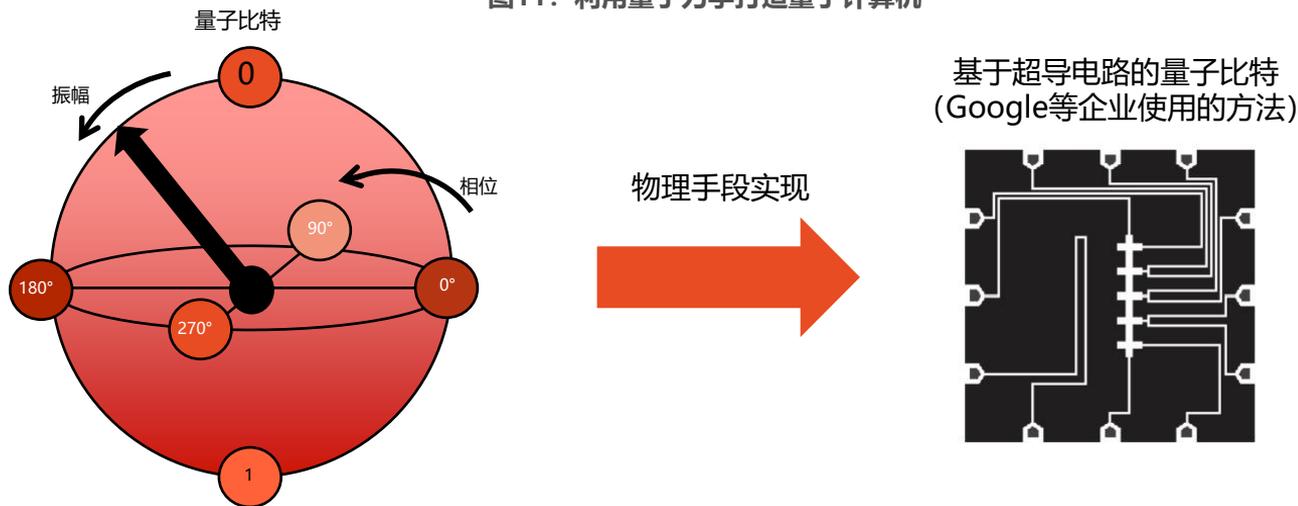


## 02 如何获取量子比特？

## 2.1 量子比特实现方式

- **经典计算机是通过电子电路运转起来的。**使用硅制半导体制成的名为晶体管的小元件发挥了开关的作用，将其与金属布线组合起来即可实现逻辑门，再将逻辑门集成起来就能制造出经典计算机。量子计算机的制造过程则要复杂许多，因为量子计算机既需要量子比特，又需要执行量子操作。
- **量子比特所具备的波动性（概率振幅和相位）。**量子比特的波动性来源于量子力学的性质。因此，必须使用量子力学的现象来制备量子比特，不能通过其他方法对其进行仿造。退一步说，即使使用量子力学现象以外的方法仿造出了量子比特，也无法利用它进行高效的量子计算，自然也就制造不出真正的量子计算机。

图11：利用量子力学打造量子计算机



## 2.1 量子比特实现方式

➢ 需要利用量子力学的状态（量子态）来制备量子比特，并通过控制量子态来实现量子化操作。量子态非常脆弱，在控制量子态时要避免使其遭破坏。

表1：实现量子比特主流方式

实现方法	概要	代表企业
超导电路	使用稀释制冷机将电子电路冷却至极低温度(约10-2K)使其进入超导状态，由此实现量子比特。电子电路中使用了约瑟夫森元件。通过微波脉冲等手段进行量子门操作。	Google、IBM、Intel、Rigetti、Alibaba、D-Wave Systems
囚禁离子/超冷原子	使用离子阱(ion trap)和激光冷却技术对离子进行排列，由此实现量子比特(囚禁离子)。通过激光照射进行量子门操作。此外，还可以用磁场和激光冷却技术囚禁中性原子来实现量子比特(超冷原子)。	IonQ
半导体量子点	使用半导体纳米结构的量子点(quantum dot)束缚电子来实现量子比特。可以应用半导体集成技术。	Intel
金刚石氮空位中心	利用金刚石中氮空位缺陷(NV色心)上的电子自旋和核自旋实现量子比特。其优势在于可以在常温下运转。	
光学量子计算	通过非经典光实现量子计算。目前正在研究使用连续变量和单光子的光学量子计算。基于测量的量子计算的应用也在研究之列。	XANADU
拓扑型	通过拓扑超导体实现马约拉纳费米子(Majorana fermion)，由此实现具有较强抗噪性的量子比特。基于数学上的辫论执行量子计算。	Microsoft

## 2.2 以光子为例，详解量子获取方式

- ▶ **光子技术获取量子比特可在室温下进行。**该方式有望通过与名为硅光子学（silicon photonics）的光波导（optical waveguide）芯片制造技术和光纤等光通信技术相结合来实现量子计算机。量子力学中，光既是波又是粒子。光子本身就是微弱的光，使用光子的量子计算机既可以在室温下运行，又与光纤通信具有良好的兼容性。
- ▶ **通过压缩光能够实现量子比特。**与普通的激光（相干光）相比，压缩光能够改变电场的涨落并维持特殊的光子数分布，可以说是一种使量子性得到增强的光的状态。压缩光可由入射在特殊晶体上的激光产生。不同于前面介绍过的线性光学法和使用共振器QED的方法，利用压缩光可以执行连续变量量子计算。

图12：光子量子计算机演示图

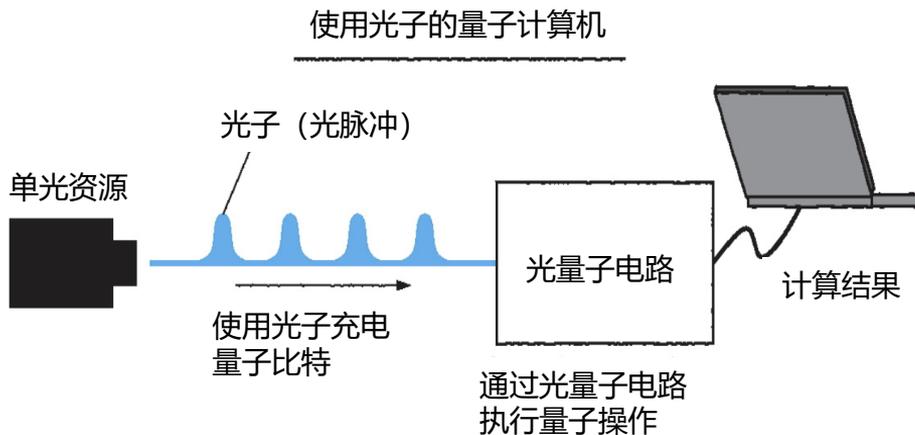
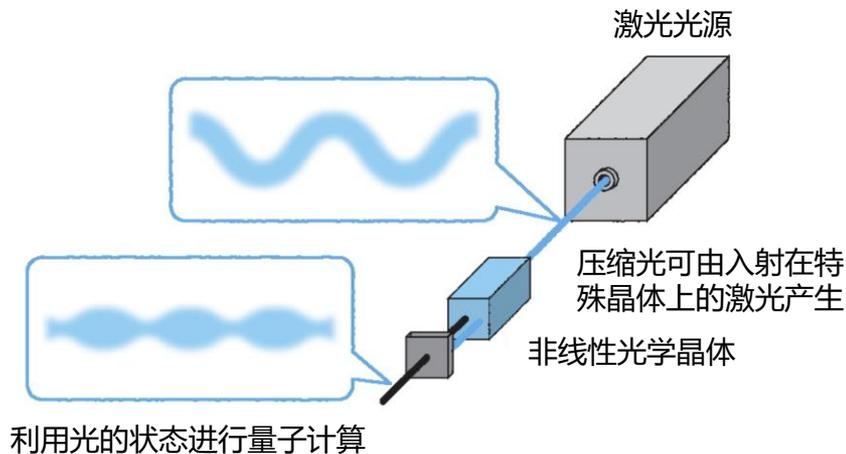


图13：使用光实现量子比特



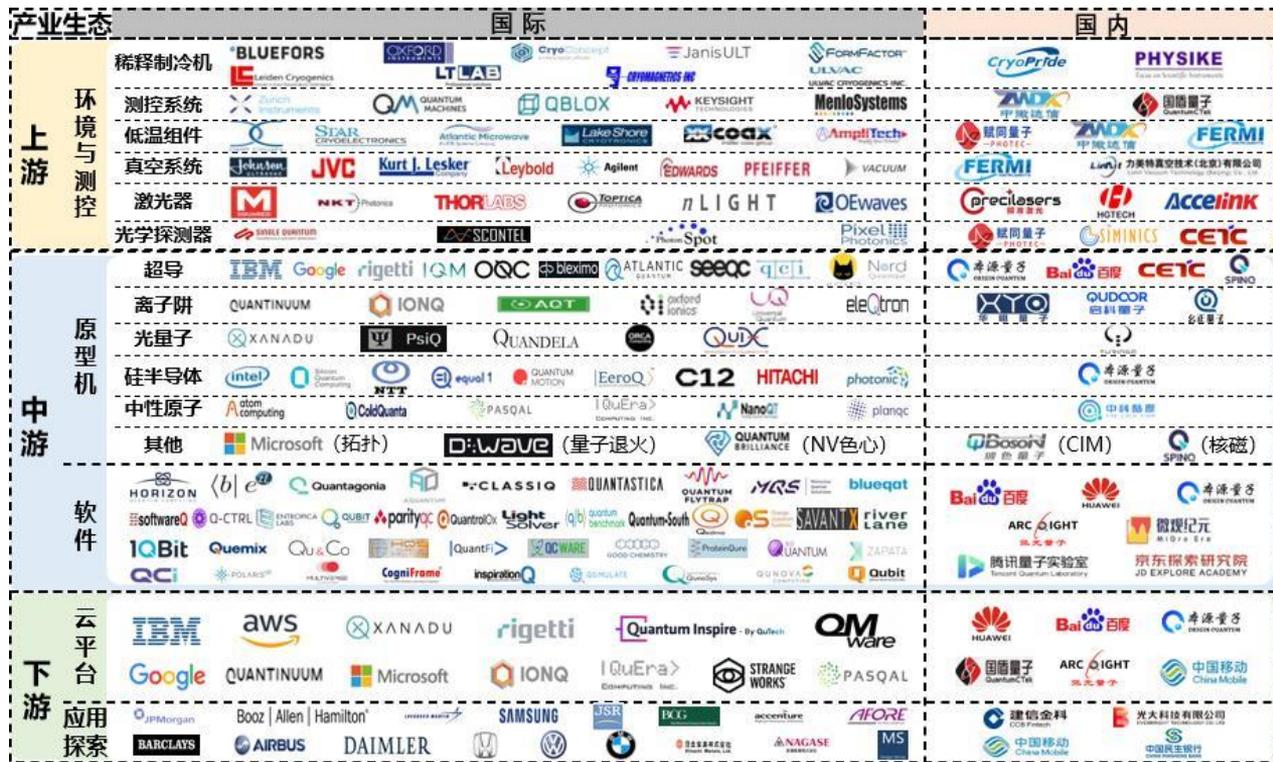


# 03 详解量子计算产业链

# 3.1 量子计算软硬件体系已经初具雏形

- 量子计算产业上游主要包含环境支撑系统、测控系统、各类关键设备组件以及元器件等，是研制量子计算原型机的必要保障，目前由于技术路线未收敛、硬件研制个性化需求多等原因，上游供应链存在碎片化问题，逐一突破攻关存在难度，一定程度上限制了上游企业的发展。
- 量子计算产业生态中游主要涉及量子计算原型机和软件，其中原型机是产业生态的核心部分，目前超导、离子阱、光量子、硅半导体和中性原子等技术路线发展较快，其中超导路线备受青睐，离子阱、光量子 and 中性原子路线获得较多初创企业关注，美国原型机研制与软件研发占据一定优势。
- 量子计算产业下游主要涵盖量子计算云平台以及行业应用，处在早期发展阶段，近年来全球已有数十家公司和科研机构推出了不同类型的量子计算云平台积极争夺产业生态地位，目前量子计算领域应用探索已在金融、化工、人工智能、医药、汽车、能源等领域广泛开展，国外量子计算云平台的优势体现在后端硬件性能、软硬件协同程度、商业服务模式等方面。

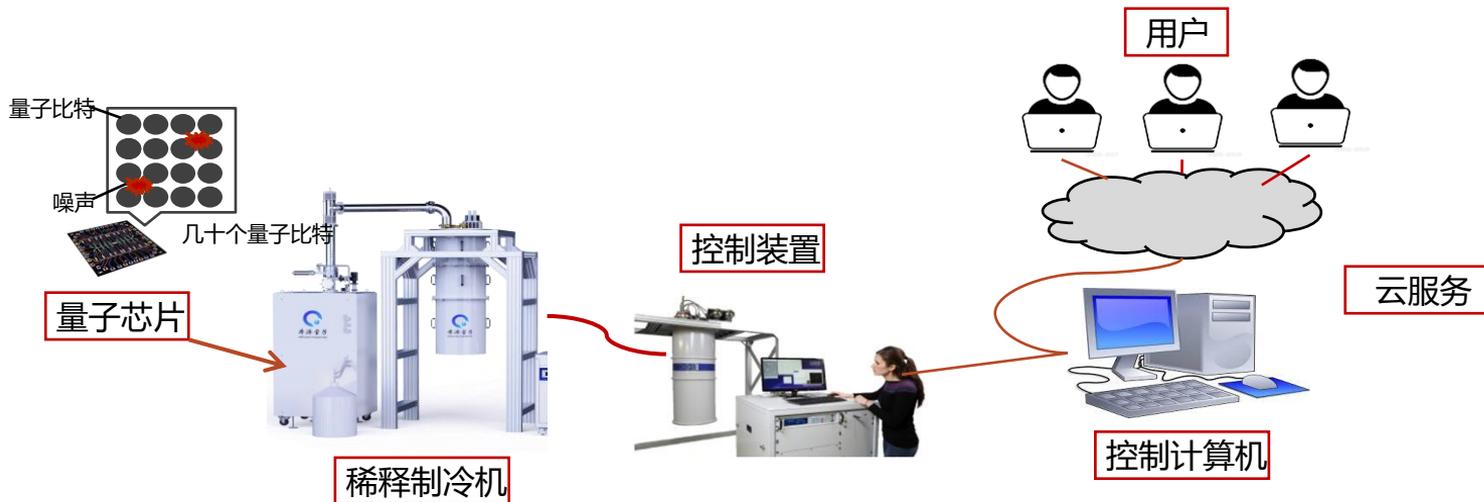
图14：量子计算产业链



## 3.2 上游：量子芯片和稀释制冷机是核心环境

- 量子芯片作为量子计算机最核心的部分，是执行量子计算和量子信息处理的硬件装置。从材料来看，传统芯片的核心材料主要是硅。硅也是量子芯片常用材料之一，在硅材料纯度上，相较于经典芯片而言，量子芯片的要求更高。从工艺来看，量子芯片的制造工艺则更为复杂，特别是在处理超导材料或特殊半导体材料时，需要更高的工艺精度和更严格的环境控制。不过，超导量子比特受材料缺陷的影响较小，利用成熟的纳米加工技术，可以实现大批量生产。英特尔在2023年6月发布了全新的量子芯片Tunnel Falls，这款芯片包含了12个硅自旋量子比特，在300毫米的硅晶圆上生产制造，每块晶圆上能够实现超过24000个量子点，从而形成可被相互隔离或同时操控的4到12个量子比特。稀释制冷机是构建超导量子计算机的关键核心设备。其可为超导量子计算芯片提供接近绝对零度的超低温环境，2023年下半年，科大国盾量子向两家科研单位交付了国产稀释制冷机产品。

图15：量子计算系统



## 3.2 上游：量子芯片和稀释制冷机是核心环境

- 当前超导量子芯片是重要分支。其核心是利用超导材料的独特性质来提高量子比特的操作性能。超导量子芯片同样可以看作量子芯片的一种演进形式，通过引入超导技术，加强了量子比特的稳定性和可控性，从而更好地适应量子计算的需求。**超导量子芯片主要由电容、电感与约瑟夫森结组成（超导状态没有电阻）**。其中，约瑟夫森结为超导量子芯片的核心单元，它是超导体—绝缘体—超导体或者超导体—正常导体—超导体的三明治结构，中间层的厚度很小，在10纳米左右。超导电流会因隧穿效应而穿过约瑟夫森结，其流过电流和两端电压并非线性关系，因此可以把约瑟夫森结简单看作一个非线性超导电感。超导量子芯片可由当前标准CMOS（互补金属氧化物半导体）工艺制备，基底一般采用蓝宝石或者硅，主要用到的超导材料是铝或者铌。
- 量子芯片的制造过程主要包括生产量子点、加工成量子芯片，再进行最后的调试。其中，量子点材料的生产是量子芯片制造的基础，它们能够在纳米尺度上控制和存储量子信息。然后，经过专门的加工工艺，将量子点转化为可以应用于芯片的结构，并与其他微观结构进行集成。最后，对芯片进行调试和测试，确保其性能和功能正常。

图16：超导量子比特电路化模型示意

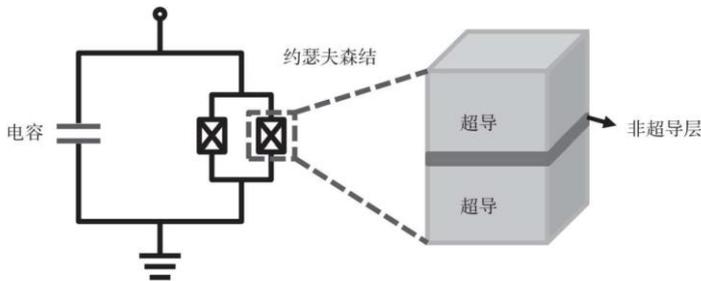
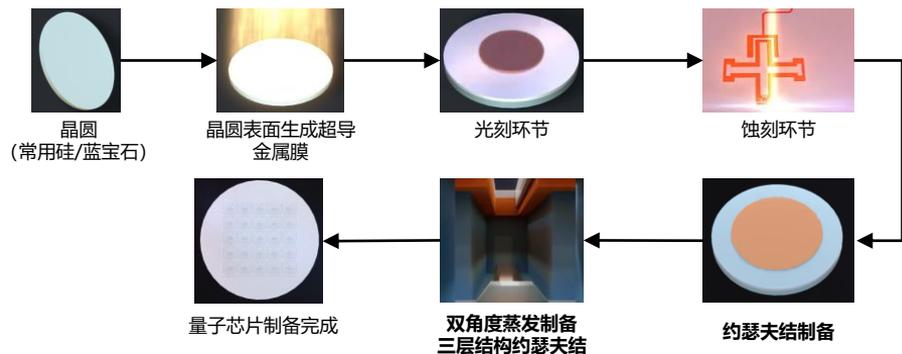


图17：超导量子芯片生产工序



# 04 量子计算有望赋能 千行百业

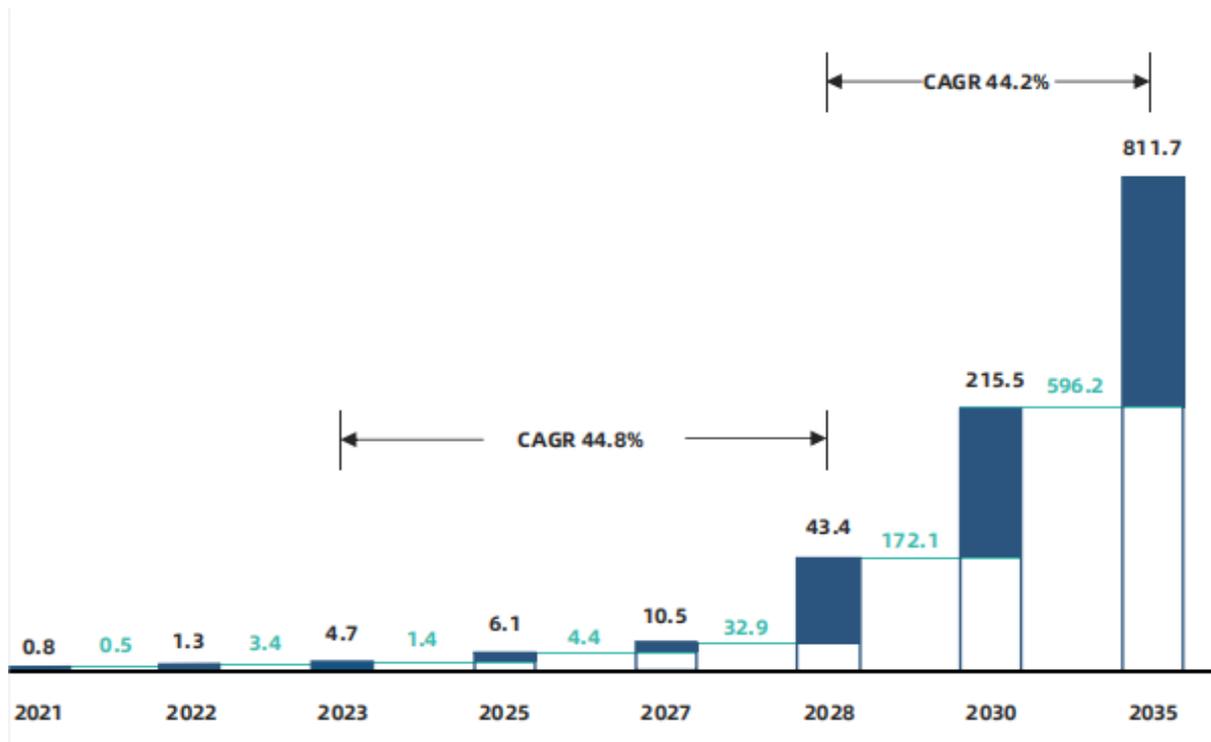
# 4.1

## 量子计算有望开启8000亿美元蓝海市场

➤ **2023年全球量子计算市场规模约47亿美元，预计2035年有望超过8000亿美元。**

据ICV，随着量子计算技术的不断演进，以及AI技术等领域的快速发展，量子计算的应用边界被不断拓展，2023年，全球量子产业规模达到47亿美元，2023至2028年的年平均增长率（CAGR）达到44.8%；2027年专用量子计算机预计将实现性能突破，带动整体市场规模达到105.4亿美元，参考IBM 2023年量子计算路线图，2028年量子门数量、以及纠错等计算技术将达到较为成熟阶段，在2028年至2035年，市场规模将继续迅速扩大，受益于通用量子计算机的技术进步和专用量子计算机在特定领域的广泛应用，到2035年总市场规模有望达到8117亿美元。

图x: 全球量子计算产业规模（2021~2035）（单位：十亿美元）



## 4.2 金融、化工、生命科学领域有望更加受益量子计算产业发展

表2：量子计算应用场景分析

行业领域	关键环节	问题原型	应用时间 (加号代表影响力)			产业估值 (亿美元)	
			3-5年	5-10年	10年以上	保守估值	乐观估值
金融	金融服务	组合优化	++	++	+++	3940	7000
		人工智能					
能源与材料	传统能源	量子模拟	+	++	++	100	200
	可持续能源	组合优化	+	++	+++	100	300
		化工	人工智能	++	++	+++	1230
	生命科学	制药	量子模拟				
组合优化	++		++	+++	740	1830	
先进工业	汽车	人工智能					
		量子模拟	++	++	+++	290	630
		组合优化					
		因式分解					
	航空航天与国防	量子模拟	+	++	+++	300	700
		组合优化					
	电子产品	因式分解					
		量子模拟	+	++	++	100	200
半导体	组合优化						
	量子模拟						
电信传媒	电信	量子模拟				100	200
	传媒	组合优化	+	+	++	100	200
出行、运输、物流	物流	组合优化	+	++	++	500	1000

# 05 投资建议



## 投资建议

- 量子计算有望颠覆经典计算架构，成为解决AI算力瓶颈的颠覆性力量，或成为发展新质生产力的重要抓手，建议关注国盾量子、科大国创、神州信息、科华数据、中国长城、光迅科技等量子计算相关标的，以及电科网安、吉大正元、格尔软件、国芯科技、浙江东方、亨通光电等量子加密通信标的。

# 06 风险提示



## 风险提示

- 1) 技术落地不及预期：尽管量子技术取得了巨大进步，但在实际应用中仍存在一些难以克服的技术障碍。量子计算技术本身非常前沿，且发展迅速，但目前仍处于研究和开发阶段。要实现量子计算技术的商业化应用，需要解决量子比特的稳定性、错误率降低、量子算法的开发等一系列复杂问题。
- 2) 行业竞争加剧：随着量子计算相关技术的普及，越来越多的企业和研究机构投入到这一领域，导致行业竞争日益激烈。量子计算是一个全球性的技术竞争领域，美国、中国、欧洲等地区都在积极推动量子计算技术的发展，这导致了激烈的国际竞争。
- 3) 市场不及预期：量子技术下游应用广泛，但在技术成熟之前可能面临市场不及预期的风险，量子产业相关公司营收受下游需求影响较大，面临一定风险。

# THANKS 致谢

## 民生通信研究团队：



**分析师 马天诣**  
执业证号：S0100521100003  
邮件：matianyi@mszq.com



**分析师 马佳伟**  
执业证号：S0100522090004  
邮件：majiawei@mszq.com



**分析师 崔若瑜**  
执业证号：S0100523050001  
邮件：cuiroyu@mszq.com



**研究助理 谢致远**  
执业证号：S0100122060027  
邮件：xiezhiyuan@mszq.com



**分析师 杨东谕**  
执业证号：S0100523080001  
邮件：yangdongyu@mszq.com



**研究助理 范宇**  
执业证号：S0100123020004  
邮件：fanyu@mszq.com

## 民生证券研究院：

上海：上海市浦东新区浦明路8号财富金融广场1幢5F； 200120  
北京：北京市东城区建国门内大街28号民生金融中心A座18层； 100005  
深圳：广东省深圳市福田区益田路6001号太平金融大厦32层05单元； 518026

## 分析师声明:

本报告署名分析师具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格并登记为注册分析师, 基于认真审慎的工作态度、专业严谨的研究方法与分析逻辑得出研究结论, 独立、客观地出具本报告, 并对本报告的内容和观点负责。本报告清晰地反映了研究人员的研究观点, 结论不受任何第三方的授意、影响, 研究人员不曾因、不因、也将不会因本报告中的具体推荐意见或观点而直接或间接收到任何形式的补偿。

## 评级说明:

投资建议评级标准	评级	说明	
以报告发布日后的12个月内公司股价(或行业指数)相对同期基准指数的涨跌幅为基准。其中:A股以沪深300指数为基准;新三板以三板成指或三板做市指数为基准;港股以恒生指数为基准;美股以纳斯达克综合指数或标普500指数为基准。	公司评级	推荐	相对基准指数涨幅15%以上
		谨慎推荐	相对基准指数涨幅5%~15%之间
		中性	相对基准指数涨幅-5%~5%之间
		回避	相对基准指数跌幅5%以上
	行业评级	推荐	相对基准指数涨幅5%以上
		中性	相对基准指数涨幅-5%~5%之间
		回避	相对基准指数跌幅5%以上

## 免责声明:

民生证券股份有限公司(以下简称“本公司”)具有中国证监会许可的证券投资咨询业务资格。

本报告仅供本公司境内客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户。本报告仅为参考之用, 并不构成对客户的投资建议, 不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要, 客户应当充分考虑自身特定状况, 不应单纯依靠本报告所载的内容而取代个人的独立判断。在任何情况下, 本公司不对任何人因使用本报告中的任何内容而导致的任何可能的损失负任何责任。

本报告是基于已公开信息撰写, 但本公司不保证该等信息的准确性或完整性。本报告所载的资料、意见及预测仅反映本公司于发布本报告当日的判断, 且预测方法及结果存在一定程度局限性。在不同时期, 本公司可发出与本报告所刊载的意见、预测不一致的报告, 但本公司没有义务和责任及时更新本报告所涉及的内容并通知客户。

在法律允许的情况下, 本公司及其附属机构可能持有报告中提及的公司所发行证券的头寸并进行交易, 也可能为这些公司提供或正在争取提供投资银行、财务顾问、咨询服务等相关服务, 本公司的员工可能担任本报告所提及的公司的董事。客户应充分考虑可能存在的利益冲突, 勿将本报告作为投资决策的唯一参考依据。

若本公司以外的金融机构发送本报告, 则由该金融机构独自为此发送行为负责。该机构的客户应联系该机构以交易本报告提及的证券或要求获悉更详细的信息。本报告不构成本公司向发送本报告金融机构之客户提供的投资建议。本公司不会因任何机构或个人从其他机构获得本报告而将其视为本公司客户。

本报告的版权归本公司所有, 未经书面许可, 任何机构或个人不得以任何形式、任何目的进行翻版、转载、发表、篡改或引用。所有在本报告中使用的商标、服务标识及标记, 除非另有说明, 均为本公司的商标、服务标识及标记。本公司版权所有并保留一切权利。