

量子计算 —基础篇

Quantum Computer

网址: www.qubits.top

作者: Calvin Tang

邮箱: 179209347@qq.com

介绍

教程简介：

- 面向对象：量子计算初学者
- 依赖课程：线性代数，解析几何，量子力学（非必需）

知乎专栏：

https://www.zhihu.com/column/c_1501138176371011584

Github & Gitee 地址：

<https://github.com/mymagicpower/qubits>

<https://gitee.com/mymagicpower/qubits>

* 版权声明：

- 仅限用于个人学习，或者大学授课使用
（大学授课如需ppt原件，请用学校邮箱联系我获取）
- 禁止用于任何商业用途

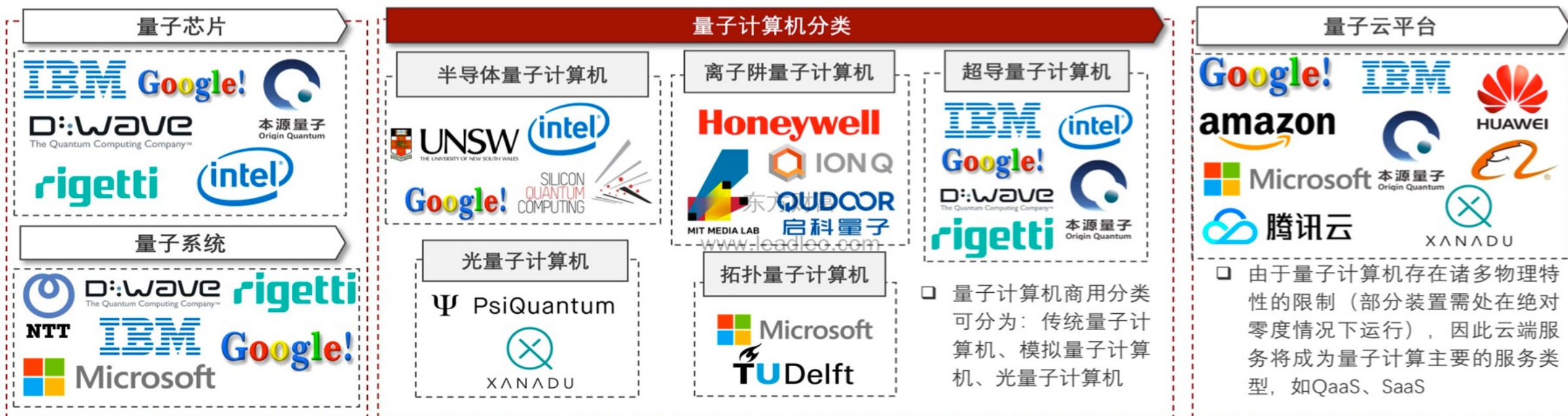
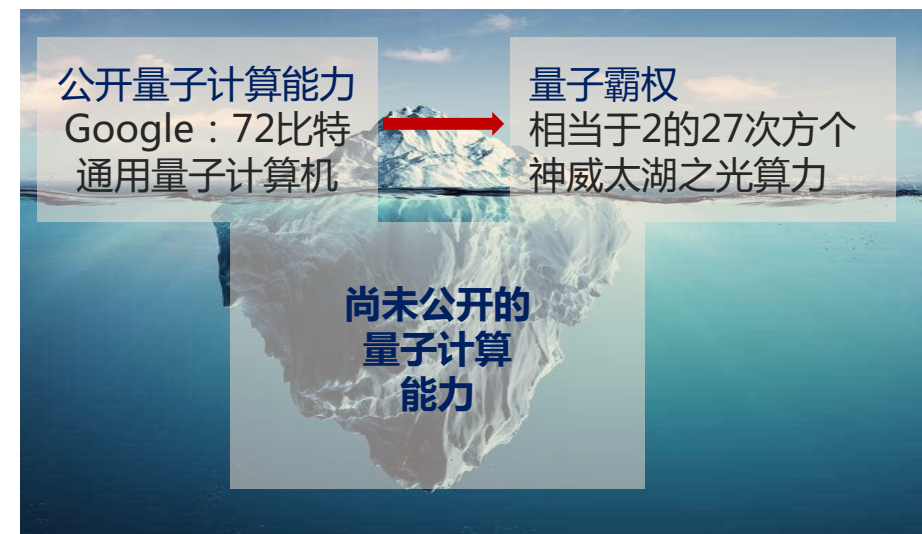
量子计算相关产业背景

解决大规模计算难题：

密码破译、气象预报、药物设计、金融分析、石油勘探.....

揭示新能源、新材料机制：

高温超导、量子霍尔效应、人工固氮.....



量子计算主要应用领域

量子计算主要领域的未来用例：

- 金融：交易策略、投资组合优化、资产定价和风险分析
- 化学和制药：更快速的药物发现、基因组学、催化剂和酶设计以及改进的诊断能力（例如 MRI）
- 工业制造：例包括物流调度、产品配送、自动驾驶、交通规划、半导体芯片布局优化、航空航天故障分析和材料科学应用
- 能源：包括能源分配、网络设计和油井优化

计算场景

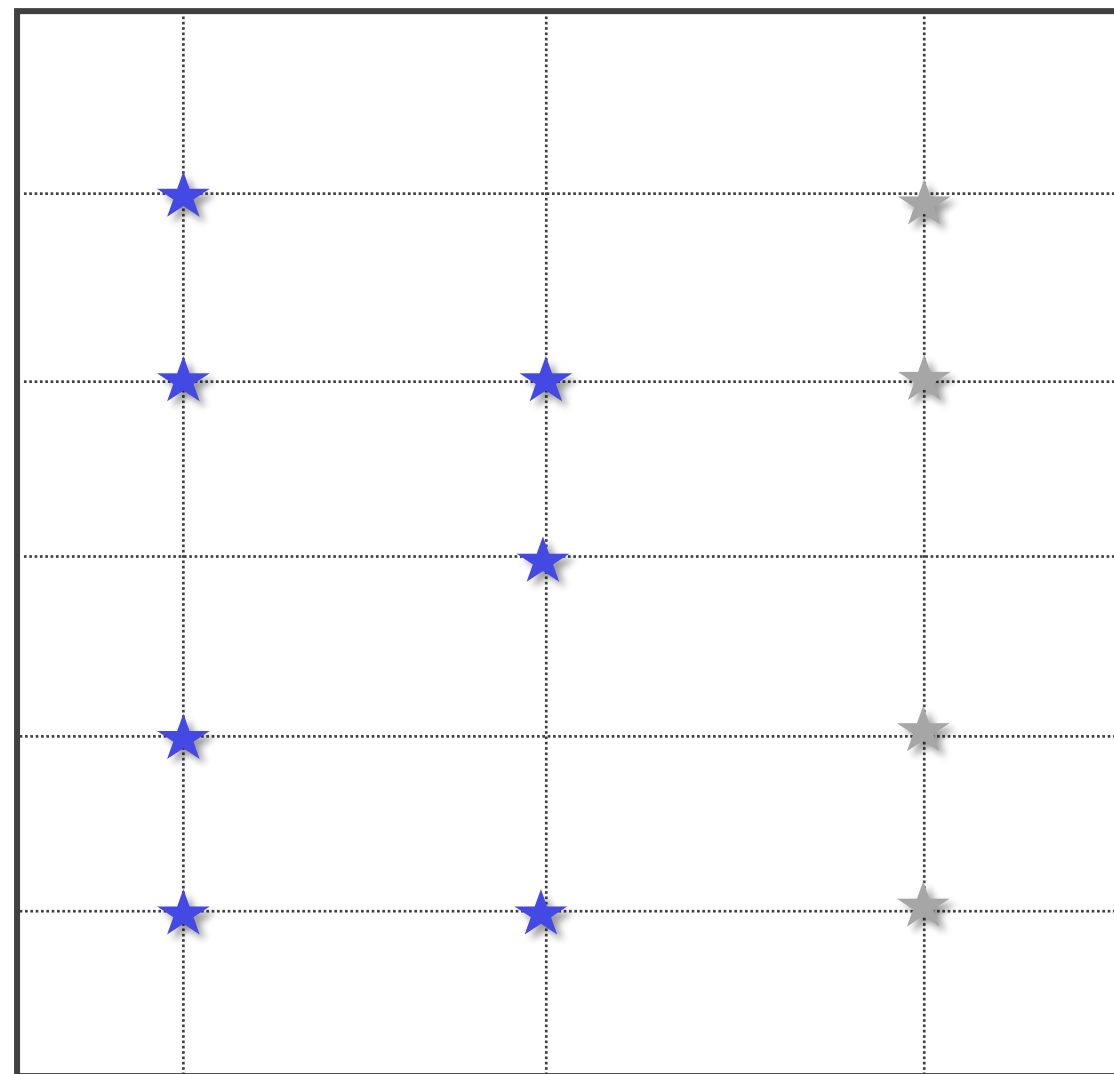
优化

仿真

传感测量

密码学

人工智能



金融

化工、材料、制药

其它

垂直行业

量子计算目前的局限性

控制难

操控单量子，实现单个原子、光子的非破坏测量与控制，是很大的难点。商业化必须提高量子比特的数量，但量子纠缠的特性使量子数目提高后的操控难度加大，出错概率上升。

01

量子计算
局限性

02

测量难

观察和操作量子，必然会使之与环境互动。量子在与环境互动过程中会失去量子的纯正特性，发生“退相干”。量子退相干的时间就是“相干时间”(coherence time)，目前所以最好的超导体造原子相干时间只能维持10到100微秒，所以量子计算机最多只能连续工作万分之一秒。

03

纠错难

量子纠错是目前最大的瓶颈。为了克服量子退相干丢失信息的问题，我们会想到纠错。纠错在经典信息技术中就很常见，对信息复制多个副本来防止个别副本的错误。量子具有不可复制的特性(no-cloning principle)，因为复制之前需要量子观测，这会改变量子的特性。于是人们发明了量子纠错技术(quantum error correction)，把一量子比特信息分散存储在几个高度纠缠的量子比特里。因为一个逻辑量子比特需要多个物理量子比特以及逻辑操作时的门电路，所以尽量降低资源消耗和错误概率成为量子纠错算法领域的重要研究问题，但仍然比较困难。

量子计算简史 – 量子力学主要人物

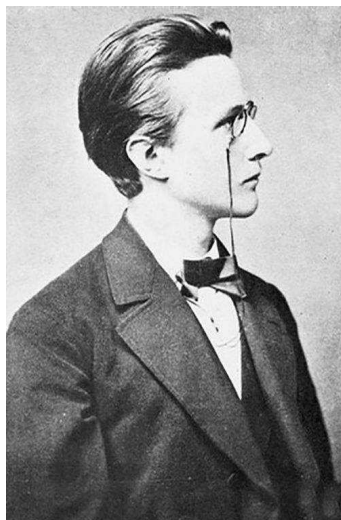
Start



1900

能量量子化

物体通过分立的跳跃非连续地改变它们的能量，能量值只能取某个最小能量元的整数倍。



普朗克
(1858—1947年)

为了从理论上得出正确的辐射公式，必须假定物质辐射（或吸收）的能量不是连续地、而是一份一份地进行的，只能取某个最小数值的整数倍。这个最小数值就叫能量子，辐射频率是 ν 的能量的最小数值 $\epsilon = h\nu$ 。其中 h ，普朗克当时把它叫做基本作用量子，后来被命名为普朗克常数。

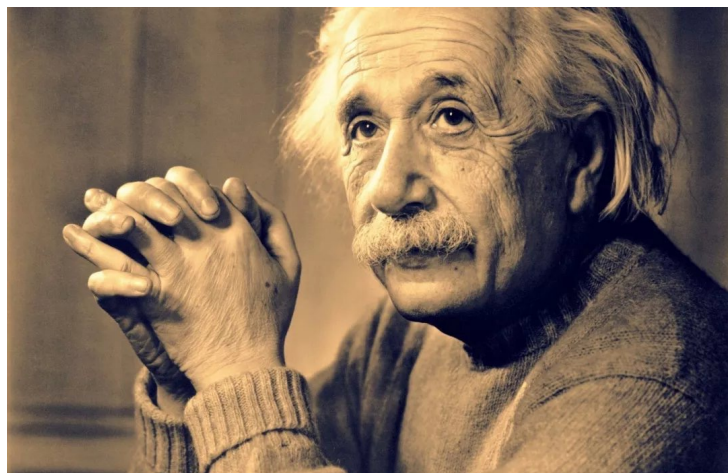
量子计算简史 – 量子力学主要人物



1905

光电效应 $E=h\nu$

金属表面在光辐照作用下发射电子的效应，发射出来的电子叫做光电子。



爱因斯坦
(1879—1955年)

1905年，爱因斯坦发表论文《关于光的产生和转化的一个试探性观点》，对于光电效应给出另外一种解释。

他将光束描述为一群离散的量子，现称为光子，而不是连续性波动。对于马克斯·普朗克先前在研究黑体辐射中所发现的普朗克关系式，爱因斯坦给出另一种诠释：频率为 f 的光子拥有的能量为 $E=hf$ ；其中， h 因子是普朗克常数。

爱因斯坦认为，组成光束的每一个量子所拥有的能量等于频率乘以普朗克常数。

量子计算简史 – 量子力学主要人物



1913

玻尔模型

提出了量子不连续性，成功地解释了氢原子和类氢原子的结构和性质。提出了原子结构的玻尔模型。



玻尔

(1885—1962年)

1913年初，通过对光谱学资料的考察，写出了《论原子构造和分子构造》的长篇论著，提出了量子不连续性，成功地解释了氢原子和类氢原子的结构和性质。提出了原子结构的玻尔模型。按照这一模型电子环绕原子核作轨道运动，外层轨道比内层轨道可以容纳更多的电子；较外层轨道的电子数决定了元素的化学性质。如果外层轨道的电子落入内层轨道，将释放出一个带固定能量的光子。

玻尔通过引入量子化条件，提出了玻尔模型来解释氢原子光谱；提出互补原理和哥本哈根诠释来解释量子力学，他还是哥本哈根学派的创始人，对二十世纪物理学的发展有深远的影响。

量子计算简史 – 量子力学主要人物



1923

德布罗意波 (物质波)

实物粒子也有波粒二象性，认为与运动粒子相应的还有一正弦波，两者总保持相同的位相。



德布罗意
(1892—1987年)

1923年9月至10月间，路易·维克多·德布罗意连续在《法国科学院通报》上发表了三篇有关波和量子的论文。第一篇题目是“辐射——波与量子”，提出实物粒子也有波粒二象性，认为与运动粒子相应的还有一正弦波，两者总保持相同的位相。后来他把这种假想的非物质波称为相波。

德布罗意在这里并没有明确提出物质波这一概念，他只是用位相波或相波的概念，认为可以假想有一种非物质波。

物质波是在薛定谔方程建立以后，诠释波函数的物理意义时才由薛定谔提出的。

量子计算简史 – 量子力学主要人物

5


1923

薛定谔方程

实物粒子也有波粒二象性，认为与运动粒子相应的还有一正弦波，两者总保持相同的位相。



薛定谔
(1887—1961年)

在德布罗意物质波理论的基础上，建立了波动力学。由他所建立的薛定谔方程是量子力学中描述微观粒子运动状态的基本定律，它在量子力学中的地位大致类似于牛顿运动定律在经典力学中的地位。提出薛定谔猫思想实验，试图证明量子力学在宏观条件下的不完备性。

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi\rangle = \hat{H} |\psi\rangle$$

量子计算简史 – 量子力学主要人物

5



1923

矩阵力学

像位置、速度等力学量，需要用线性代数中的“矩阵”这种抽象的数学体系来表示，而不应该用一般的数来表示。



海森堡

(1901—1976年)

海森堡是继爱因斯坦之后最有作为的科学家之一。与爱因斯坦受普朗克的量子理论的启发而提出了光量子假设一样，海森堡也是得益于爱因斯坦的相对论的思路而于1925年创立起了矩阵力学，并提出不确定性原理及矩阵理论。

量子计算简史 – 量子力学主要人物



1925

正则量子化

正则量子化是多种对经典理论进行量子化的数学方法中的一种。



狄拉克
(1902—1984年)

1925年，维尔纳·海森堡提出了着眼于可观察的物理量的理论，当中牵涉到矩阵相乘的不可交换性。他意识到当中的不可交换性带有重要的意义，并且发现了经典力学中泊松括号与海森堡提出的矩阵力学规则的相似之处。基于这项发现，他得出更明确的量子化规则（即正则量子化）。这份名为《量子力学》的论文发表于1926年，狄拉克也凭借这项工作获得博士学位。狄拉克持续量子力学的研究，发展出了涵盖波动力学与矩阵力学的广义理论。

量子计算简史 – 量子力学主要人物



1949

费曼图和费曼规则

费曼图、费曼规则和重正化的计算方法，这是研究量子电动力学和粒子物理学不可缺少的工具。



理查德·费曼
(1918—1988年)

*The world is strange. The whole universe is very strange, but you see when you look at the details that **the rules of the game are very simple** – the mechanical rules by which you can figure out exactly what is going to happen when the situation is simple.*

*But **it is not complicated. It is just a lot of it.***

看似复杂的世界是由众多的简单规则构建而成。

量子信息技术 & 量子计算

量子信息技术

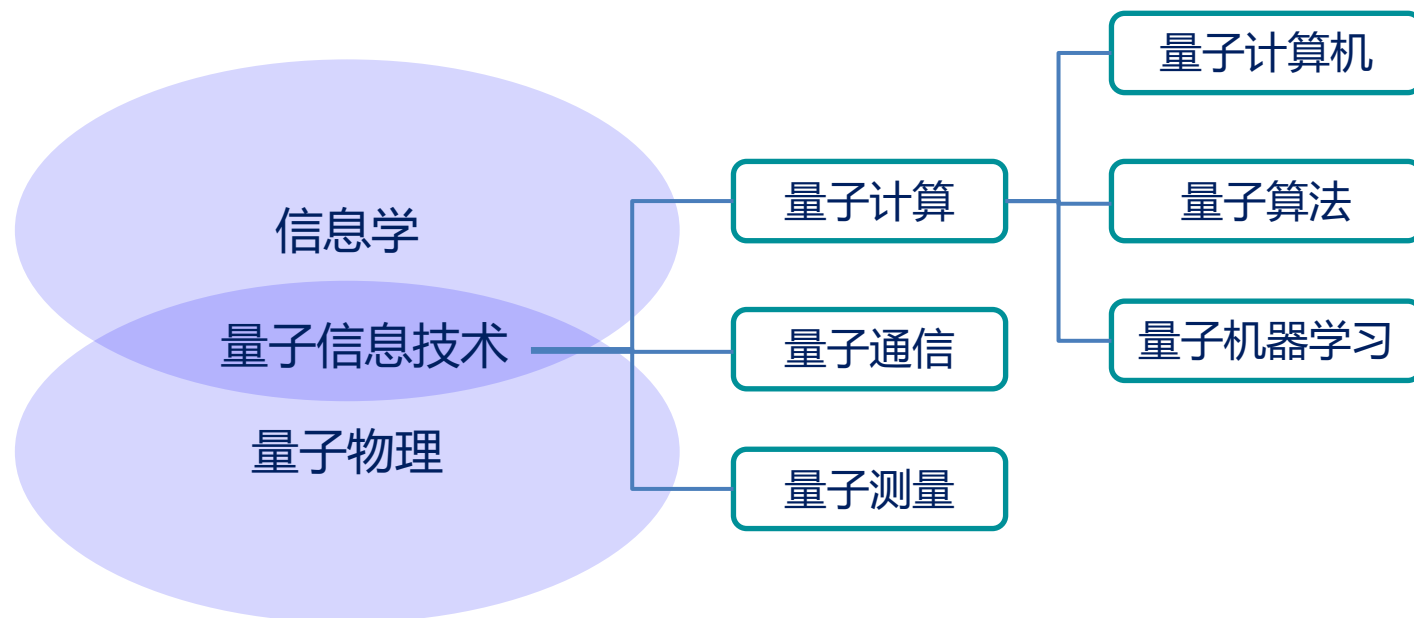
量子信息技术是量子物理与信息科学交叉的新生学科，其物理基础是量子力学。

量子信息技术是基于量子力学，通过对光子、电子等微观粒子系统及其量子态进行人工观测和调控，借助量子叠加和量子纠缠等独特物理现象，以经典理论无法实现的方式获取、传输和处理信息的一类技术。

量子信息技术主要包括量子计算、量子通信和量子测量等三个技术领域。

量子计算

量子计算主要包括量子计算机、量子算法和量子机器学习三个技术领域。



量子系统的两个特性

量子行为的两个特性，也就是叠加和纠缠，使量子计算机有能力解决目前的常规或传统机器无能为力的问题：

- **叠加**：传统计算机使用的是只包含“1”或“0”的二进制位。而量子计算机则使用量子位，可以描述“1”、“0”或者量子位的可能状态的任意组合（称为“叠加”）。因此，具有 n 个量子位的量子计算机通过这些量子位彼此叠加，形成了 2^n 种可能性。这使量子计算机具有指数级数量的状态，因此能够比传统计算机更有效地解决一些特定类型的问题。
- **纠缠**：在量子世界，甚至相距光年的两个量子位仍能以强相关的方式发挥作用。量子计算正是借助这种纠缠特性，利用量子位之间的相互依赖性破解问题。

概述

量子的叠加和纠缠特性使量子计算机能够快速研究一系列可能性，以确定有助于推动业务价值的最佳答案。

量子叠加

▪ **量子叠加(superposition)**: 一个量子处于不同状态的非常模糊、概率性的叠加态上，可以同时处于多个状态上，测不准其状态。

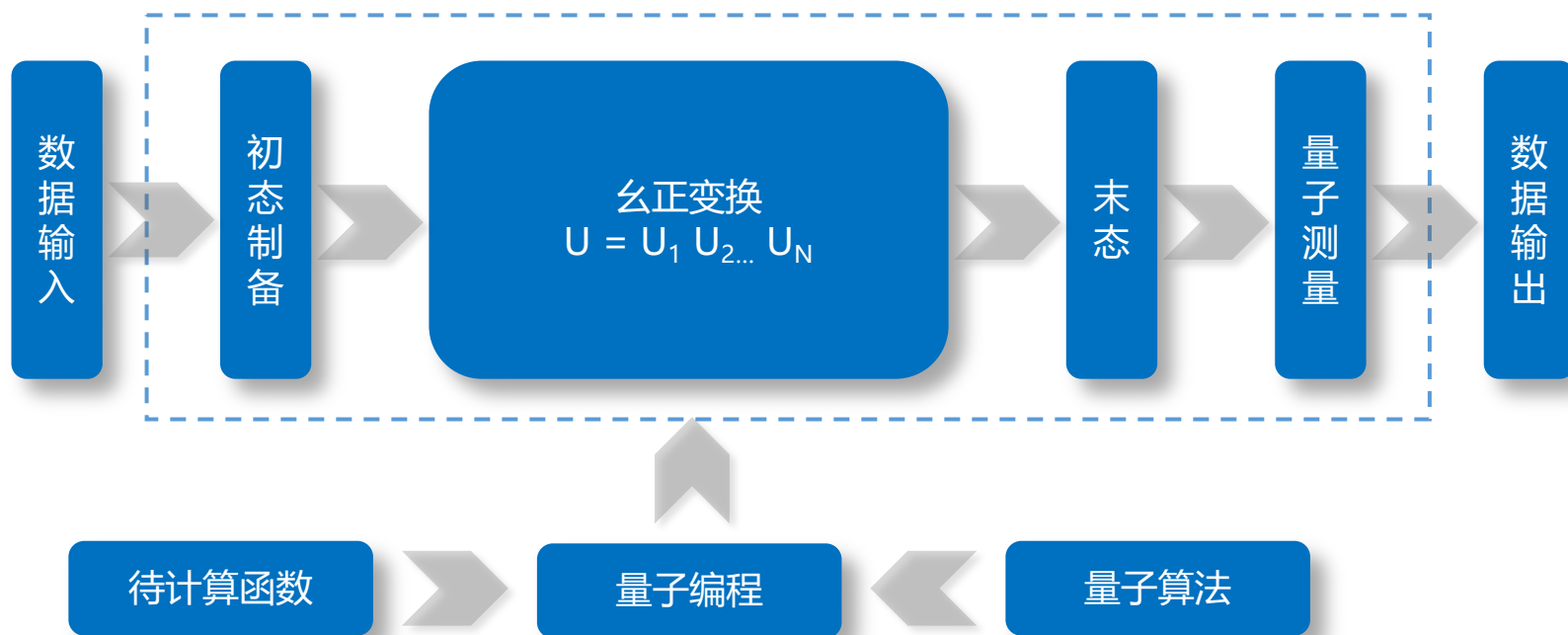
量子纠缠

▪ **量子纠缠(entanglement)**: 量子世界中不同粒子之间有无法用经典规律理解的整体关联性，不能分开来描述个别粒子，一旦改变某个粒子，会影响到其他粒子。

量子计算机的计算过程

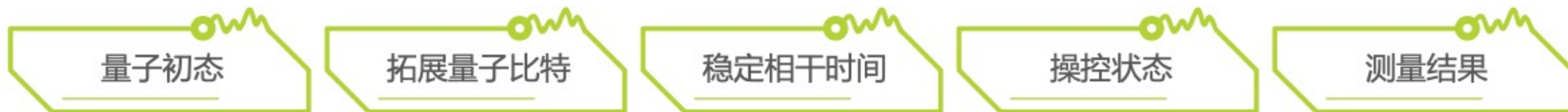
一般而言，量子计算机的计算过程可以分为：
 数据输入、初态制备、量子逻辑门操作、量子测算和数据输出等步骤。

其中，量子逻辑门操作是一个幺正变换，这是一个可以人为控制的量子物理演化过程。
 对量子计算机的可用性而言，需要从量子比特数、长相干时间保护、高保真度量量子操作等多个维度进行综合衡量。



资料来源:《量子信息技术发展概况》，郭光灿，2019年7月

四种典型量子计算实现模式



四种实现量子计算的模式所需的工程难题

| | 基础原理解读 | 基础物理条件 | 核心物理条件 |
|--------|---|----------------------------|---|
| 光子比特编码 | 利用单光子状态的改变实现量子计算 | 为了保证稳定性和观测，量子计算有一些统一的环境要求： | 黑暗环境 |
| 半导体量子点 | 只囚禁一个电子，并通过其状态改变，实现量子计算 | ✓ 超净无杂质 | 低温环境 以目前人类对科学的认知，在绝对零度时，电子处于静止状态，也就是说微粒被“冻结”了 |
| 离子阱 | 打掉一个原子的一个电子，使之变成带正电荷的离子，并利用该离子余下电子的两个能级作为计算载体 | ✓ 无电磁干扰 | |
| 超导量子比特 | 利用超低温“冻结”粒子的运动进而实现粒子状态的控制 | ✓ 高信噪比 ✓ 屏蔽高能宇宙射线 | |

资料来源: 艾瑞-观星者—2019年量子计算及商业应用方向研究报告



Thank

You