

第2讲

第2讲：量子世界的奇妙规则

牛温佳 教授

北京交通大学·网络空间安全学院

本讲内容

1

2.1 从经典比特到量子比特

2

2.2 量子世界的奇特现象

3

2.3 量子计算的潜力与局限

4

思考题与小结

🎯 学习目标

理解经典比特与量子比特的本质区别

了解量子叠加态和测量的概念

建立对量子力学基本原理的直观认识

2.1 从经典比特到量子比特

Section 2.1 从经典比特到量子比特

2.1 从经典比特到量子比特

2.1.1 经典比特的世界

在经典计算机中，信息的基本单位是比特（bit），它只能处于两种状态之一：要么是0，要么是1。这就像一个开关——要么打开，要么关闭，没有中间状态。所有的经典计算，无论是文字处理、视频播放还是科学计算，都是通过大量的比特组合和逻辑门操作来实现的。

如果我们有 n 个经典比特，它们可以表示 2^n 种不同的状态，但在任意时刻，这些比特只能处于其中一种确定的状态。

2.1.2 量子比特的神奇之处

量子比特（qubit）与经典比特有本质的不同。一个量子比特不仅可以处于 $|0\rangle$ 或 $|1\rangle$ 状态，还可以同时处于两者的**叠加状态**。也就是说，在测量之前，量子比特“既是0又是1”，只是各自有一定的概率。

数学上，一个量子比特的状态可以表示为：

2.1 从经典比特到量子比特（续）

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

其中 α 和 β 是复数（称为振幅），满足 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。当我们测量这个量子比特时，得到 $|0\rangle$ 的概率是 $|\alpha|^2$ ，得到 $|1\rangle$ 的概率是 $|\beta|^2$ 。

直观理解：想象一枚硬币在空中旋转。在落地之前，它既是正面朝上又是反面朝上（叠加态）。只有当它落地（测量）的那一刻，才确定了是正面还是反面。

2.1.3 布洛赫球面——量子比特的可视化

单个量子比特的状态可以用布洛赫球面（Bloch Sphere）形象地表示——一个球体，北极对应 $|0\rangle$ ，南极对应 $|1\rangle$ ，球面上的其它点对应不同的叠加态。任何对单量子比特的操作，都可以看作是在这个球面上的旋转。

2.2 量子世界的奇特现象

Section 2.2 量子世界的奇特现象

2.2 量子世界的奇特现象

2.2.1 量子纠缠——"鬼魅般的远距作用"

当两个或多个量子比特处于纠缠态时，它们的状态会彼此紧密关联。即使它们相隔数公里，对其中一个量子比特的测量会瞬间影响另一个量子比特的状态。爱因斯坦称这种现象为"鬼魅般的远距作用"。

简单理解：想象一副手套，左只和右只分别装在两个盒子里运到不同城市。你打开一个盒子，发现是左手套，你立刻就知道另一个盒子里是右手套。量子的纠缠比这更神奇——两个纠缠的量子比特在没有测量前都没有确定的状态，但一旦你测量了一个，另一个的状态也瞬间确定了。

量子纠缠在量子计算中至关重要，它提供了量子计算机在某些计算上超越经典计算机的能力基础。

2.2.2 量子退相干——量子性的"敌人"

量子比特有一个"致命弱点"：它们非常脆弱。当量子比特与周围环境（空气分子、电磁场等）发生相互作用时，量子特性（叠加态、纠缠态）会逐渐丧失，表现得像经典比特一样。这个过程称为**量子退相干**。

2.2 量子世界的奇特现象（续）

这就是为什么量子计算机需要在极低温环境下运行——尽可能地减少环境干扰，保持量子特性。退相干也是量子计算机目前仍难以大规模实用化的主要原因之一。

2.2.3 量子纠错——保护量子信息

既然退相干不可避免，那如何保护量子信息呢？答案是**量子纠错**。

量子纠错的基本思想是通过冗余编码——将一个逻辑量子比特的信息分散到多个物理量子比特上——来检测和纠正由环境干扰导致的错误。就像一个重要信息被反复说了三遍，即使其中一处传输中被干扰，我们仍然可以根据“多数投票”恢复出正确信息。

2.3 量子计算的潜力与局限

Section 2.3 量子计算的潜力与局限

2.3 量子计算的潜力与局限

量子计算的优势

- **并行性**: 量子叠加允许同时探索多种计算路径
- **速度提升**: 在某些问题上（如大数分解、搜索），量子算法可以指数级提升速度
- **模拟量子系统**: 量子计算机天然适合模拟分子、材料等量子系统

当前局限

- **量子比特数量有限**: 目前最先进的量子计算机也只有几百个量子比特

2.3 量子计算的潜力与局限 (续)

- **错误率较高**: 量子门操作的精度还不足以进行大规模计算
- **环境要求苛刻**: 需要接近绝对零度的运行环境

📖 延伸阅读

📖 Nielsen, M. A. & Chuang, I. L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press.

📖 姜楠. 量子机器学习: 基于Python的理论和实现. 清华大学出版社, 2024.

1. 经典计算机用晶体管实现比特，你认为量子比特可能用什么物理系统来实现？
2. 量子退相干是量子计算的最大障碍之一，你能想到什么可能的解决方案？
3. 量子计算可能在哪些领域率先实现实用化？

本讲小结

- ✓ 2.1 从经典比特到量子比特
- ✓ 2.2 量子世界的奇特现象
- ✓ 2.3 量子计算的潜力与局限
- ✓ 思考与讨论

感谢聆听

第2讲 · 量子世界的奇妙规则