

# 新型计算机体系——量子计算机

## 一、量子计算的介绍

量子计算是一个多学科领域，涵盖计算机科学、物理学和数学的各个方面，它利用量子力学，可以比传统计算机更快地解决复杂问题。量子计算领域包括硬件研究和应用程序开发。通过利用量子力学效应，例如叠加和量子干涉，量子计算机能够比传统计算机更快地解决某些类型的问题。

## 二、量子计算的原理

量子计算机使用量子原理工作。量子原理需要一个新的术语词典才能被完全理解，这些术语包括叠加[1]、纠缠[2]和退相干[3]。

### 2.1 叠加

叠加态很像经典物理学中的波，可以添加两个或多个量子态，结果将是另一个有效的量子态[4]。相反，也可以将每个量子态表示为两个或多个其他不同状态的总和。这种量子位的叠加赋予了量子计算机固有的并行性，使它们能够同时处理数百万个操作。

### 2.2 纠缠

当两个系统紧密联系在一起时，量子纠缠就会发生，可以通过一个系统的相关知识立即了解另一个系统，无论它们相距多远。量子处理器[5]可以通过测量一个粒子得出关于另一个粒子的结论。例如，它们可以确定如果一个量子位向上旋转，则另一个将始终向下旋转，反之亦然。量子纠缠使量子计算机能够更快地解决复杂问题。

当测量量子态时，波函数会坍缩，可以将状态测量为 0 或 1。在这种已知或确定的状态下，量子位将充当经典位。纠缠是量子位将其状态与其他量子位相关联的能力。

## 2.3 退相干

退相干是量子位中量子态的损失。辐射等环境因素会导致量子位的量子态崩溃。构建量子计算机的一项重大工程挑战是设计各种试图延迟状态退相干的功能，例如构建保护量子位免受外部场影响的特殊结构。

## 三、量子计算机的架构

量子计算机和经典的计算机类似，也包括硬件和软件。但是量子计算机的硬件采用量子电路，软件采用量子算法。

### 3.1 量子门和量子电路

传统计算机的硬件由逻辑电路组成，逻辑电路的基础单元为逻辑门。然而量子计算机的硬件由量子电路组成，量子电路的基础单元是量子门[6]，量子门操作的对象是量子比特。量子门也分为很多种类，可以通过真值表来理解量子门的作用。

通过组合基本的量子门构造复杂的量子门电路，这些复杂的量子门电路可以实现某种特殊的量子控制功能。我们将一些由简单的基本的量子门组合成更复杂量子门称为一个量子网络/量子电路

众多的量子电路组成一起，可以构成量子计算机处理器，量子处理器是量子计算机的核心组成部分。

### 3.2 量子算法

量子计算机运行量子算法时的计算效率远远大于传统计算机。但是传统计算机能够执行的计算依然充分利用传统计算机来执行，尽可能让量子计算机执行的量子算法相关的计算部分。

用于模拟物质的量子化行为[7]的量子化学计算是量子计算机典型的应用领域，如果使用经典计算机上执行量子化学计算，即对遵循量子力学规律的物质的行为进行模拟和计算，会产生庞大的计算量。

### 3.3 量子比特

传统计算机是通过电子数字电路运作起来的，而量子计算机的制造过程要复杂得多，量子计算机既需要量子比特，又需要执行量子操作。要利用量子力学的状态来制备量子比特[8]，并通过控制量子态来实现量子化操作，量子态非常脆弱，实现量子比特非常复杂。目前主流的量子比特的实现方法有：超导电路，囚禁离子，光学量子等。

#### 3.3.1 超导电路

实现量子比特的超导电路主要由铝和铌等金属组成。为了让电路进入超导状态，需要将集成了超导量子比特电路和控制电路的芯片（量子芯片）冷却至极低温度（几毫开的低温），因此需要将量子芯片放入特殊的制冷机中使其正常运行。

#### 3.3.2 囚禁离子

以超高真空中囚禁的原子离子[9]为量子比特的载体，极大程度隔离了外部环境干扰，离子量子比特具有极高的稳定性，可实现超过 1 小时的相干时间。利用具有高度可控性的光与离子相互作用，离子量子比特上的量子逻辑操作也具有极高的保真度，同时，离子量子比特间耦合的高连接密度也使得其可以更加高效的运行量子任务。

#### 3.3.3 光学量子

光子[10]计算是通过光学逻辑门进行操作，主要通过光学偏振片实现，光学量子计算主要以光子的偏振自由度、角动量等作为量子比特的变化量测对象。于囚禁离子、超导电路等类型的量子计算机相比，光学量子计算机的最大的优势是：可在室温下、空气中运行，能克服量子噪声极限，结构亦相对比较简单。

## 四、量子计算机的应用

量子计算机的优势，在于它能够解决传统计算机实际上无法解决的问题。随着越来越多的研究人员深入到这个行业，量子计算将会在各个行业中有越来越多的应用。

医疗方面，量子计算机可以帮助加快比较不同药物对一系列疾病的相互作用和影响的过程，以确定最佳药物。此外，量子计算还可以带来真正的个性化医疗，利用基因组学的先进技术为每个病人量身定制治疗计划。

金融方面，量子计算影响金融服务行业的方式是解决复杂的优化问题，如投资组合风险优化和欺诈检测。量子计算可以用来更好地确定有吸引力的投资组合，因为有成千上万的资产具有相互关联的依赖性，并且可以更有效地识别关键的欺诈模式。

农业方面，量子计算机可以帮助我们更有效地制造肥料。几乎所有有助于养活我们的肥料都是由氨制成的。更有效地生产氨(或替代物)的能力意味着更便宜、更低能耗的肥料。更容易获得更好的肥料将有利于环境，并有助于养活地球上不断增长的人口。

人工智能方面，量子机器学习可以帮助人工智能以类似人类的方式更有效地执行复杂的任务。例如，使人形机器人能够在不可预知的情况下实时做出优化决策。在量子计算机上训练人工智能可以提高计算机视觉、模式识别、语音识别、机器翻译的性能等等。

## 五、总结与体会

量子计算机作为新兴技术的前沿，带给我深深的震撼与期待。它利用量子力学的奇特性质，有望解决经典计算机无法处理的复杂问题，推动科学、金融、材料、医药等领域的革命性突破。尽管目前技术尚在起步阶段，面临诸多挑战，但它的潜力无疑是巨大的。每一次技术进步，都让我更加相信量子计算机将改变未来，开辟一个全新的计算时代。

## 六、参考文献

- [1] Arute, F., Arya, K., Babbush, R., et al. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505-510. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
- [2] Montanaro, A. (2016). Quantum algorithms: an overview. *NPJ Quantum Information*, 2, 15023. <https://doi.org/10.1038/npjqi.2015.23>
- [3] Childs, A. M., & van Dam, W. (2008). Quantum algorithms for algebraic problems. *Reviews of Modern Physics*, 82(1), 1-52. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.1>

- [4] 朱晓芳, 王兴安 (2016). 量子计算及其应用. 北京大学出版社.
- [5] 周志华 (2020). 量子计算与人工智能. 电子工业出版社.
- [6] Shor, P. W. (1994). Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring. In Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (pp. 124-134). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SFCS.1994.365700>
- [7] Zhang, J., Pagano, G., Hess, P. W., et al. (2017). Observation of a many-body dynamical phase transition with a 53-qubit quantum simulator. Nature, 551(7682), 601-604. <https://doi.org/10.1038/nature24654>
- [8] 胡俊伟, 李德仁 (2019). 量子纠缠与量子计算. 科学出版社.
- [9] Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition. Cambridge University Press.
- [10] Preskill, J. (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond. Quantum, 2, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>