

通用量子计算机的研究和制造

李 伟

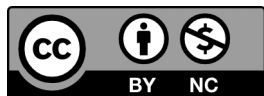
华中师范大学计算机学院，武汉

摘 要 | 通用量子计算机是指可以在不改变量子计算机物理组成和基本体系结构的条件下针对所有可计算问题进行量子计算及其它量子信息处理的设备。通用量子计算机的研究和制造具有重要的理论和实际意义。要达成制造通用量子计算机的目标，需要在底层量子物理设备、量子计算机体系结构、量子资源调度和上层量子程序设计语言、量子算法及量子应用软件等多方面进行努力。文中结合国内外在上述各方面研究的最新进展以及作者自身的研究成果，从计算机系统的角度为通用量子计算机的研究和制造绘制一幅蓝图，并详细阐述了其中的困难与努力方向。

关键词 | 量子计算；量子计算机；体系结构；量子信息；量子程序设计语言；量子算法；物理实现

Copyright © 2021 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 引言

引言翻开 20 世纪的物理学史册，正如仰望深邃浩渺的夜空，群星璀璨，其中最闪亮的几颗新星之一当属量子力学的提出与发展；而同在 20 世纪，电子计算机的诞生也深刻地改变了世界。量子力学和计算机科学与技术 在 20 世纪 80

年代开始结合并诞生了一个多学科交叉与融合的新学科方向量子计算。它在备受关注中快速发展,并有可能产生足以改变传统计算模式从而对人类文明产生巨大推动的计算工具——量子计算机。研究和制造量子计算机的主要动因是经典计算与电子计算机的局限性。电子计算机是一种以超大规模集成电路为物理基础的计算设备。从数学角度看,电子计算机所进行的是依赖于布尔代数逻辑的通用计算。计算的通用性在电子计算机诞生之前的1930年代由Turing等人研究,其中最著名的结论之一当属Church-Turing论题。

论题1:一切直觉可计算的问题均可由图灵机模拟。所谓“直觉可计算”在当时有许多描述方式,如递归函数或者可计算函数等,随着后来计算机科学的发展,这个提法逐渐被计算理论中的“算法”所取代,即图灵机是可以实现任何算法的通用“计算机”。有了Church-Turing所绘制的蓝图,在1940年代,随着布尔逻辑和数字逻辑电路的发展,可以实现任何算法的通用电子计算机诞生了。计算机的研究与发展逐渐成为现代科学、技术和工业的重要目标,并无所不在地改变着社会面貌和人类生活。然而,在经历了电子计算机沿着“摩尔定律”的轨迹快速发展的近40年后,人们逐渐认识到电子计算机的发展终究无法突破物理极限,这包括集成电路的密度、电子的量子效应、元器件的热效应等;另一方面,一些现有算法的时间复杂度过高,使得某些问题在输入规模较大时很难在可被接受的时间范围内解出。为解决上述两个问题的探索直接导致了一种新的计算模式——量子计算和一种新的计算设备——量子计算机的提出。1980年,身模拟另一个量子系统,甚至可以用量子系统模拟其它复杂的物理系统——因为量子力学被认为是当前支配宇宙中所有物理现象的最基本的力学系统——这首次提出了用量子设备处理信息的想法。1985年,证明用量子计算机有效模拟在经典计算机尚不能有效模拟的系统是可能的。

2 量子计算的通用性

对比基于经典图灵机和布尔逻辑系统的经典计算,量子计算具有一些前者难以比拟的优势。这可归纳为以下2个方面:(1)信息的表示与存储。在经典计算中,信息和数据是以二进制数值的形式表示和储存的,比特是经典信息的

基本度量单位，它可视为一个取值为 $\{0, 1\}$ 的随机变量，这便意味着一个比特在任一确定的时刻必为“0”或“1”，且不可得兼。不论在数值的表示还是存储方面，布尔逻辑的表示空间都是实线性空间，该空间中的1个比特可视为模的表示和存储能力时，带来的效果只能是线性增长。与之不同，由于量子态的叠加性，这带来表示和储存方面的优势，随着量子位的增加，量子信息的表示空间和存储空间以指数规模拓展。

(2) 信息的处理。在计算理论中，信息处理的能力涉及两方面：一是数据的表示能力，二是问题的求解空间。上文已提及，基于图灵机的经典计算是通用的，任何经典算法都可看作一个接受不同规模参数输入的可计算函数，函数的输出就是该算法对应的问题的解。由于数据的表示空间是线性的，所以当求解问题的代价与输入数据的规模呈指数关系时，用确定性函数计算就需要指数规模的代价（时间或空间）。而在 Hilbert 空间中由于量子态的叠加性，量子算法处理的问题表示和求解空间均为输入的指数规模，所以某些特定的函数便可以在多项式时间内处理原本指数复杂度的问题，这种特性现已被诸多量子算法应用。另外，量子计算作为量子信息的一种基本处理方式，在量子通信、量子网络等领域也起到了重要作用。虽然量子计算最初是为了解决物理问题而由物理学家提出的，但随着量子计算的理论和实验技术的发展，量子计算和量子计算机受到了计算机科学与技术领域的广泛关注。根据目前人们的认识，量子计算是一种基于量子力学基本原理的计算。从计算机科学的研究任何计算都需探讨两个要素：一是“算什么”，即计算的对象；二是“如何算”，即计算的规则。对于量子计算而言，计算的对象是服从量子力学基本原理的，由量子态表示的量子信息；计算的规则是封闭物理环境下的酉变换和测量。量子计算的步骤一般可归纳为以下3步：(1) 初化（“入”）。信息“进入”量子计算的过程，指将经典信息通过某种形式的编码转化相应的量子态，即初态制备的过程；(2) 演化（“算”）。量子信息以量子态的形式在量子力学基本原理的框架下进行酉演化的过程。在此过程中，初化后的信息依照量子算法的步骤转化为计算结果；(3) 测量（“出”）。将上述演化结束后的计算结果通过测量转化为经典结果的过程。

3 通用量子计算设备

量子计算的通用性与经典计算一样，量子计算也有不同的计算模型，常用的量子计算模型有：量子图灵机模型（即量子门电路模型，1989年）、量子线路模型（1993年）、量子随机访问机模型（1996年）、绝热量子计算模型（2000年）、拓扑量子计算模型（2003年）等。这些模型彼此在计算能力上的等价性已得到证明。量子计算的通用性研究始于对量子图灵机模型和量子线路模型的通用性研究。通用量子计算设备通用量子计算设备是通用量子计算机系统的“硬件”部分。从目前的发展趋势分析，通用量子计算设备面临的主要问题为：（1）逻辑层面，如：如何调度平衡用于计算和用于存储的量子资源，如何有效进行容错与纠错等；（2）物理层面，如：量子位的规模化储存和操控技术等。一般而言，通用量子计算设备具备以下基本要素：（1）结构化的量子存储设备。与经典计算机的硬件体系结构类似，目前认为量子存储设备是通用量子计算设备必须具备的。而同经典计算机的层次化存储部件相比，量子存储设备还需要一种特殊的容错和纠错结构：这是因为经典信息中的错误仅为比特翻转，即“0”与“1”的互置，而量子信息中除比特翻转外还存在相位翻转和偏移，后者导致量子信息的容错和纠错过程远比经典信息复杂和低效。故需要在量子存储设备中设计专门的硬件容错和纠错单元和逻辑结构以便进行存储设备中的容错与纠错。具体内容将在第6节中阐述。（2）混成式运算器及运算控制设备。通用量子计算设备的核心任务是要进行通用量子计算和其它相关的量子信息处理，由于量子算法不可缺少地要有经典的预处理（将经典数据转换为量子数据）和后处理（将测量后的量子计算结果进行正确性判断和后续处理）的过程，因此应在量子计算设备中引入经典计算能力。虽然已证明量子计算模式也能进行经典计算，但考虑到量子计算的代价和量子位资源的限制，目前较好的方式是在量子计算设备中同时引入量子运算部件与经典运算部件以构成混成式运算器。在理论上，Qiu等人曾提出半量子自动机计算模型（单向量子有穷自动机）和半量子密钥分配协议，刻画了混成式通用量子计算和量子通信中量子部分与经典部分的交互作用。要引入运算控制设备以控制两种运算各自的过程及计算中的协同，在量

子运算部件中也需要加入容错与纠错机制。为了提高容错所用资源的复用度,可考虑将量子运算操作直接置于量子存储设备中并通过量子隐形传态与量子运算部件(含量子寄存器)进行通信。此时量子运算部件只需负责隐形传态过程中以及量子寄存器内的容错与纠错。混成式运算器的主要功能在第6节中详述。

(3) 经典信息与量子信息的转换设备。由于人与量子计算设备的交互是通过经典信息完成的,所有量子程序接受的输入和给出的输出也都是经典信息的形式,因此需要引入经典信息与量子信息的转换设备。在目前技术条件下,经典信息向量子信息的转换(初化)一般通过初态制备方式完成,即将经典形式的输入信息转换为量子编码并在量子设备中制备成相应的量子初态;在量子计算完成后,通过量子测量设备将量子计算的结果投影到系统的基向量中并将其转换为经典变量的值。在理论设计阶段,一般假设系统的演化在封闭环境中完成,因此测量一般采取正交投影测量;在实际应用中,由于系统一般处于混态,也可采用其它合适的测量方式。(4) 量子资源调度设备。量子资源调度系统在量子计算设备中以硬件形式存在,同时也参与软件层面的工作。具体见第7节。上述各设备的级联方式以及组成与结构均会影响量子计算设备的性能和容错度,因此必须在设计阶段审慎地考虑量子计算设备的组成与结构,并采用模拟方式进行性能分析与测试。

参考文献

- [1] 吴楠. 可靠量子计算机模型及体系结构的研究[D]. 南京大学, 2009.
- [2] 焦阳, 吴楠, 宋方敏. Java 语言处理系统量子汇编及解释程序[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2008, 44(2): 107-115.
- [3] 徐家福, 宋方敏, 钱士钧, 等. 量子程序设计语言 NDQ Java[J]. 软件学报, 2008, 19(1): 1-8.

Research and Manufacture of Universal Quantum Computers

Li Wei

School of Computer Science, Central China Normal University, Wuhan

Abstract: General quantum computer refers to the equipment that can conduct quantum computation and other quantum information processing for all computable problems without changing the physical composition and basic architecture of quantum computer. The research and manufacture of universal quantum computers have important theoretical and practical significance. In order to achieve the goal of making universal quantum computer, efforts should be made in many aspects, such as the underlying quantum physics equipment, the quantum computer architecture, the quantum resource scheduling and the upper quantum programming language, the quantum algorithm and the quantum application software. In this paper, the author draws a blueprint for the research and manufacture of universal quantum computer from the point of view of computer system, and elaborates the difficulties and the direction of efforts.

Key words: Quantum computing; Quantum computer; Architecture; Quantum information; Quantum programming language; Quantum algorithm; Physical implementation