

量子计算机研究(上)

——原理和物理实现

李承祖 陈平形 梁林梅 戴宏毅 编著



科学出版社

国防科技大学研究生教材专项经费资助出版

量子计算机研究(上)

——原理和物理实现

李承祖 陈平形 梁林梅 戴宏毅 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

量子信息学是 20 世纪 80 年代以量子物理学为基础,融入计算机科学、经典信息论形成的新兴交叉学科,主要包括量子通信和量子计算两个分支。本书是关于量子计算机研究,分上、下两册出版。上册是关于量子计算机原理和物理实现,下册是关于量子纠错和容错量子计算。

本书为上册,内容包括计算机从经典到量子、量子位和量子逻辑门、量子算法、量子计算机动力学模型、离子阱量子计算机、基于半导体量子点的量子计算机、固体超导量子计算机、绝热量子计算、簇态和簇态上的量子计算等。

本书兼有基础性和系统性特色,既包含学科主要基础理论,又系统介绍了当前该领域前沿主要研究方向和动态。全书体系清晰,逻辑严谨,分析深入,推导详尽。既可作为高等院校的研究生教材或教学参考书,又可供相关领域研究人员和科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

量子计算机研究(上):原理和物理实现/李承祖等编著. —北京:科学出版社,2011

ISBN 978-7-03-031835-0

I. ①量… II. ①李… III. ①第五代计算机-研究 IV. ①TP387

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 137929 号

责任编辑:刘宝莉 孙伯元 / 责任校对:林青梅
责任印制:赵 博 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2011 年 7 月第一次印刷 印张:22 1/4

印数:1—2 500 字数:422 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

数字电子计算机是 20 世纪最重要的科技发明,目前它已深入到现代人类生产、生活以及科学研究活动的各个方面,对人类社会文明的形式和内容都产生了深远、重大影响。20 世纪前半叶,Gödel、Turing 和 Church 创造了计算机科学的理论,而计算机的物理实现、计算机硬件技术进步则和量子物理学研究有密切的关系。创建于 20 世纪初的量子力学,不仅深刻揭示了原子、分子以及固体微观结构,而且促成了现代微电子技术、激光技术和新材料技术的出现和进步。量子物理学发展为现代电子计算机硬件技术发展奠定了物质基础。

如果仅说到量子物理为计算机硬件技术进步提供了物质基础,还只是说到了问题的一半。最近 30 年来,人们越来越清楚地认识到“信息是物理的”。信息源于物理态在时空中的变化,信息传输是编码有信息的物理态的传输,信息存储是把编码有信息的物理态固化在被称为存储器的物理系统中,信息处理则是在被称为计算机的物理系统中,编码有信息的物理态按算法要求控制的变换或演化,计算结果的提取就是对演化末态的物理测量。今天,对信息本质的这一深刻洞悉,已经产生了巍峨壮观的量子信息科学,它融合了数学、信息、计算机科学和量子物理学,正雄心勃勃地向工程技术转化,希望在新的基础上推进或变革现在的信息科学和技术。

计算机科学和物理学的联系,不仅表现在其硬件实现需要借助于物理学,还表现在计算机科学概念、原理都要受到物理规律的制约。传统的计算机科学是计算机先驱们凭直觉建立在对计算机系统做经典描写的基础上。当物理学理论从经典发展到量子,把我们对物质世界的描写从经典物理学上升到量子物理学时,用量子力学系统实现计算机,对计算机系统作量子力学描写就是非常自然的事情。量子力学系统的态(在量子计算机中用来编码数据)具有不同于经典物理态(在经典计算机中编码数据)的性质,这一方面表明不能把经典计算机理论和技术照搬到量子计算机上,另一方面也表明对以经典物理为基础的计算机科学加以重新审视是不可避免的。

以量子态编码信息、量子力学原理为基础,研究信息存储、信息传输和信息处理的信息理论就是量子信息学。**量子计算机就是以量子力学系统为计算机用量子态编码信息,并根据具体问题算法要求、按照量子力学规律执行计算任务(变换、演化编码量子态),根据量子测量理论提取计算结果的计算机。**由于量子态具有相干叠加性质,特别是具有经典物理中没有的量子纠缠特性,这就使量子计算机具有天然的“大规模并行计算”的能力。量子计算机的并行计算不是像经典计算机通过多

机并行实现,而是在同一个量子运算器硬件芯片上以一种十分自然的方式进行。由于并行规模随芯片上集成量子位数目指数增加,因此量子计算的并行规模实际上是不受限制的。目前已经知道,量子计算机至少在解决某些类问题上,如分解大数质因子、随机数据库搜索等,相对经典计算机具有加速作用。特别是对量子物理系统的计算机模拟,在经典计算机上是个难题,而这种模拟对发现微尺度物质新现象、纳米材料研究以及微机电制造技术是非常基本的。用量子计算机去模拟量子物理系统就是十分自然的事情。

虽然早在 20 世纪 70~80 年代,Bennett、Benioff 等就讨论过利用量子态演化进行 Turing 似的计算,但一般认为量子计算的概念起源于著名美国物理学家 Feynman。1982 年,Feynman 注意到,用经典计算机模拟量子力学系统,将出现指数的变慢,需要的计算资源(空间、时间)随被模拟系统包含的粒子数目、自由度指数增大。Feynman 敏锐地认识到,或许用实际的量子力学系统来模拟量子现象更为实际、自然,从而提出建造用量子力学器件组装起来的、服从量子力学规律的计算机的设想。1985 年,英国牛津大学教授 Deutsch 研究了量子 Turing 机,引进了量子计算线路模型和量子通用逻辑门组,突破了经典计算 Boole 逻辑的限制,实现了到量子幺正演化跃进。1985~1993 年的这段时间里,量子计算和量子计算机研究仍局限在少数对量子力学原理、信息物理以及算法复杂性理论感兴趣的小圈子里,研究动力基本上来自于学术上的兴趣和好奇心。情况的突然变化发生在 1994 年,这一年美国 Bell 实验室 Shor 提出了分解大数质因子的量子算法。这个算法在拟议的量子计算机上,可以以输入位数的多项式时间分解大数质因子。分解大数质因子对于经典计算机是个难解问题,广泛使用的 RSA(以三个发明者名字首字母命名)密钥,就是以这个问题的难解为基础的。Shor 算法的提出,使量子计算机研究获得了实际的应用背景和新的研究动力,激发了一批物理学家、信息专家的研究热情。量子计算机的实现意味着目前广泛使用的 RSA 密钥的破译和失效,这就使量子计算机研究从最初仅是学术上感兴趣的对象,变成对密码技术、国家安全和商业应用都有潜在重大影响的研究领域,引起了世界范围内的研究热潮。

量子计算机虽然具有经典计算机不可比拟的信息处理能力,但在物理实现上却比经典计算机更困难。首先,由于量子计算机用量子态编码信息,信息处理(计算)过程就是这些编码有信息的量子态,按具体问题算法要求幺正变换(演化),因此需要研究能够开发和应用量子并行性的具体问题的量子算法。在量子算法研究方面,继 1994 年 Shor 提出分解大数质因子量子算法之后,1996 年,Grover 提出了平方根加速的随机数据库量子搜索算法,近十几年来虽然人们对这些量子算法的本质和数学结构有了更深入的理解,但至今也没有本质上新类型的量子算法出现,表明在量子算法研究上存在极大的难度。其次,量子态本身固有的脆弱性,给量子信息的物理实现造成巨大的困难。根据量子力学理论,量子力学系统和“环境”(泛

指可以和编码态相互作用的一切)存在不可避免的相互作用,这种相互作用会迅速导致编码量子态“消相干”,使利用量子态编码信息可能带来的好处损失殆尽。这种编码量子态的消相干,一度曾被认为是量子信息物理实现不可逾越的障碍。

十多年来,量子计算机在战胜消相干研究方面不断取得新进展。1995~1996年,Shor、Steane 和 Calderbank 等提出了量子纠错码理论和方法,建立了量子计算的精确阈值定理。该定理指出,只要环境噪声造成的门出错率低于某个有限值——精确阈值(目前估计值在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ 量级),任意长的量子计算都能可靠地执行。理论上量子计算机物理实现已没有原则性的困难,但要达到这个精度对今天的技术仍是一个严峻的挑战。关于量子计算机模型,除了 Deutsch 提出的标准线路模型外,2001年,Raussendorf 还提出了在多量子位簇态上以单量子位测量为基础的量子计算模型。目前,文献中广泛讨论的还有绝热量子计算模型以及拓扑量子计算模型等。

在实验上,近年来人们已经在磁共振、离子阱、光格中的中性原子、腔量子电动力学、线性光学、固态量子点以及超导线路等几个物理系统中实现了基本量子逻辑门操作,使用核磁共振、离子阱和线性光学等系统还演示了少数量子位的简单量子计算,提出了利用强磁场作用下的 2 维电子液实现拓扑量子计算方案。但要实现规模化的、真正意义上的量子计算,因为对物理系统性质的要求常常互相矛盾,所以建造真正的、有实际应用价值的量子计算机还存在巨大的技术困难。不管如何,量子计算机理论研究和实验研究正在探索克服这些困难的途径,一步一步逼近这一最终目标。回想一下经典电子计算机发展的历程,20 世纪 40 年代时人们所面临的困难,并不亚于今天发展量子计算机所遇到的困难。经典计算机的发展和进步给我们以启示,人类有着无穷无尽的创造力,凡是自然界允许的、物理规律允许的,或许终有一天能变为现实。十几年来,量子计算机研究激发了数学、物理学以及计算机科学等各个学科专家的创造热情,从物理学基本原理出发,应用严格的数学工具,集思广益,探讨着实现量子计算机的各种可能方案和途径,克服了一个又一个困难。近年来在包括量子计算在内的量子信息学研究中实际取得的进展,不仅给予我们发展量子信息技术的信心,而且正在深化人们对量子力学基本原理的理解,丰富着人类关于物质世界的知识。这本身就具有重要的科学价值和学术意义。

本书是作者在国防科技大学为研究生讲授量子信息专题选讲讲稿的基础上,经整理、补充、改写而成的。本书的目标就是追踪这一快速发展的领域,对众多的文献资料进行初步归纳、整理,构建一个初步的系统、体系,总结出一些规律性的、有普遍意义的结果,希望对从事该领域研究的研究生、教师以及对该领域感兴趣的其他方面的专家学者起到参考和导引作用,希望借本书的出版为推动我国量子计算机研究尽一点微薄之力。

本书内容共 15 章,分上、下两册出版。上册是关于量子计算机原理和物理实现的研究。第 1 章,计算机从经典到量子,首先说明实现计算机的物理系统必须具备的基本条件,然后通过实现这些条件的物理原理和技术进步,说明计算机从经典到量子的发展过程,最后根据量子物理学的基本原理,说明量子计算机可能具有的一些特点。第 2 章,量子位和量子逻辑门,介绍量子计算机的基本单元部件和量子计算机的通用逻辑门组。第 3 章,量子算法,介绍算法的概念和经典算法复杂性理论、目前已知的几种量子算法,说明量子计算机相对经典计算机的特殊信息处理能力,最后介绍量子系统量子计算机模拟算法。第 4 章,量子计算机动力学模型,从操控量子系统就是控制系统 Hamilton 量和系统与外界作用的 Hamilton 量出发,说明实现量子计算对充当量子计算机的物理系统 Hamilton 量形式的要求,以及系统 Hamilton 量不同形式,在实现量子计算中的作用;本章还从量子物理学原理出发阐明了量子计算机消相干的物理机制。第 5~7 章,分别介绍目前研究比较多的三个有希望实现量子计算的物理系统:离子阱量子计算机、基于半导体量子点的量子计算机和固体超导体量子计算,其中主要介绍了相关的物理原理、实现方法和研究进展情况。第 8 章,绝热量子计算,介绍量子绝热定理以及它在量子计算中的应用。第 9 章,簇态和簇态上的量子计算,介绍簇态的概念、簇态上以单量子位测量为基础的量子计算的原理以及它和量子计算的线路模型的差别和联系。

下册是关于量子纠错和容错量子计算,着重介绍解决量子消相干问题的理论和方法。内容包括:第 10 章,经典线性纠错码,介绍经典纠错码的基本概念和基本理论,为后面介绍量子纠错码打下基础。第 11 章,量子纠错和 CSS 量子纠错码,介绍量子纠错的特殊性和从经典纠错码发展起来的 CSS 量子纠错码。第 12 章,稳定子量子纠错码,介绍更系统的量子纠错码——稳定子量子纠错码理论和方法。第 13 章,无消相干子空间和无消相干子系统,详细介绍处理计算机和“环境”耦合消相干的理论和方法。如果说量子纠错码是针对独立出错、一种被动的纠错方法,那么无消相干子空间、无消相干子系统则是针对集体出错的,一种防止出错主动方法;最后介绍了统一这些概念的算子量子纠错的方法。第 14 章,容错量子计算,介绍容错纠错和容错量子计算的概念。针对稳定子码讨论容错量子计算的通用逻辑门组以及量子计算的精确阈限定理和重要的 S-K 定理和算法。第 15 章,拓扑量子计算。拓扑量子计算利用 2 维多体量子系统可能存在的一类特殊物质态——拓扑态——的准粒子激发“任意子”服从辫子群非 Abel 统计,用这些任意子非局域的拓扑自由度编码量子信息,从而使信息对局域扰动引起的消相干具有天然的免疫性。拓扑量子计算提供了迄今为止理想的量子计算物理实现方案。如果说量子纠错码、无消相干子空间、无消相干子系统等是从“软件”水平上克服消相干,拓扑量子计算则试图从“硬件”水平上对付出错。这一章介绍拓扑量子计算的数学原理、物理基础以及容错性质和可能的物理实现。

书后列出的附录内容包括:本书涉及的量子力学概要、量子信息理论涉及的群论基础、群表示理论、李群和李代数等。这些材料是作者从大量教学内容和参考文献中精选出来的,和本书内容有密切的关系。这些材料作为附录列出,对有着不同知识背景的读者使用本书会带来很大的方便。

参加本书撰写的有陈平形教授(第 8 章,绝热量子计算),梁林梅教授(第 5 章,离子阱量子计算机),戴宏毅副教授(第 7 章,超导体量子计算机部分),张婷博士(14.7 节,S-K 定理和迭代算法),吴伟博士(3.7 节,量子系统动力学模拟算法),李承祖撰写了全书其余部分,并对全书进行了统稿和审定。另外,张婷、刘伟涛、欧保全、孙琳等帮助搜集了许多文献资料,美国普渡大学(Purdue University)计算机系李宁辉教授审阅了本书第 3 章部分内容,并帮助整理了全书的参考文献。

国防科技大学研究生院、理学院对本书的撰写给予了大力支持,研究生院还资助了本书的出版,在此深表感谢。

量子计算机是涉及计算机科学、经典信息论和量子物理学的典型交叉学科,它的物理实现研究几乎涉及现代物理学的所有分支,近年来发展又十分迅速,要对如此庞大的领域作一个比较完整的、系统的总结和评述,确实是超出作者的学识和能力限制,本书只能看做是作者向这一方向的一种努力和尝试,书中难免存在不足,诚恳地欢迎读者批评指正。

李承祖
2011 年 4 月

目 录

上 册

前言

| | |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 计算机从经典到量子 | 1 |
| 1.1 计算机的基本条件 | 1 |
| 1.1.1 计算 | 1 |
| 1.1.2 计算机的物理本质 | 1 |
| 1.1.3 在一个物理系统实现计算机的必要条件 | 3 |
| 1.1.4 量子计算概念的起源 | 4 |
| 1.2 早期的计算工具 | 6 |
| 1.2.1 数、原始的计算工具 | 7 |
| 1.2.2 筹算——用筹的位置、横竖、数量状态编码 | 8 |
| 1.2.3 珠算——用算珠的不同位置和数量状态编码 | 8 |
| 1.3 机械计算机和电磁计算机 | 9 |
| 1.3.1 机械计算机 | 9 |
| 1.3.2 电磁计算机 | 10 |
| 1.4 电子计算机 | 12 |
| 1.4.1 电子管计算机 | 12 |
| 1.4.2 晶体管 | 13 |
| 1.4.3 现代电子计算机 | 14 |
| 1.4.4 电子计算机的体系结构 | 15 |
| 1.4.5 电子计算机的基本逻辑电路 | 16 |
| 1.4.6 电子计算机的各种存储设备 | 17 |
| 1.4.7 经典计算机 | 19 |
| 1.5 量子态和量子计算机编码 | 20 |
| 1.5.1 量子态的描述——波函数和量子态叠加原理 | 20 |
| 1.5.2 量子态的时间演化和计算操作 | 21 |
| 1.5.3 量子计算机的输出——量子测量 | 22 |
| 1.5.4 量子测量和量子计算机编程 | 23 |
| 1.6 量子计算机编码态的非经典性质 | 24 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|-----------|
| 1.6.1 | 量子纠缠现象 | 24 |
| 1.6.2 | 量子态非克隆定理 | 25 |
| 1.6.3 | 量子计算机和经典计算机 | 26 |
| | 参考文献 | 27 |
| 第2章 | 量子位和量子逻辑门 | 29 |
| 2.1 | 量子位 | 29 |
| 2.1.1 | 量子位概念 | 29 |
| 2.1.2 | 量子位态的表示 | 30 |
| 2.1.3 | 多量子位态 | 32 |
| 2.2 | 经典通用逻辑门组和经典可逆计算 | 33 |
| 2.2.1 | 经典通用逻辑门组 | 33 |
| 2.2.2 | Landauer 原理 | 34 |
| 2.2.3 | 经典可逆计算 | 35 |
| 2.2.4 | 经典可逆计算的通用门——Toffoli 门 | 35 |
| 2.3 | 量子逻辑门 | 36 |
| 2.3.1 | 量子一位门 | 36 |
| 2.3.2 | 量子二位门 | 38 |
| 2.3.3 | 量子多位门 | 42 |
| 2.4 | 量子计算的通用逻辑门组 | 43 |
| 2.4.1 | 量子通用逻辑门组 | 43 |
| 2.4.2 | 证明量子通用逻辑门组的引理 | 44 |
| 2.4.3 | 证明两位控制非门和一位 U 门构成量子通用逻辑门组 | 47 |
| 2.5 | 量子通用逻辑门组的其他形式 | 52 |
| 2.5.1 | 包括两量子位控制相位门的通用逻辑门组 | 52 |
| 2.5.2 | 交换门的平方根和包含交换门平方根的通用量子逻辑门组 | 54 |
| 2.5.3 | 单量子位 H 门的分解 | 56 |
| 2.5.4 | 两量子位 C 门 | 57 |
| | 参考文献 | 58 |
| 第3章 | 量子算法 | 59 |
| 3.1 | 算法的概念和算法复杂性 | 59 |
| 3.1.1 | 可计算性理论、Turing 机 | 59 |
| 3.1.2 | 计算和算法的概念 | 61 |
| 3.1.3 | 算法复杂性理论、P类和 NP类算法 | 62 |
| 3.1.4 | 量子计算和经典算法复杂性 | 64 |
| 3.2 | 几个简单问题的量子算法 | 65 |

| | | |
|--------------|----------------------------------|------------|
| 3.2.1 | Deutsch 问题的量子算法 | 65 |
| 3.2.2 | Deutsch-Jozsa 问题的量子算法 | 67 |
| 3.2.3 | Bernstein-Vazirani 问题的量子算法 | 69 |
| 3.2.4 | Simon 问题的量子算法 | 70 |
| 3.3 | 随机数据库搜索的量子算法 | 71 |
| 3.3.1 | 随机数据库搜索问题 | 71 |
| 3.3.2 | 量子 Oracle | 72 |
| 3.3.3 | Grover 迭代算法的构造 | 73 |
| 3.3.4 | Grover 算法性能估计 | 75 |
| 3.3.5 | Grover 搜索算法是最优搜索算法 | 76 |
| 3.4 | Shor 分解大数质因子的量子算法 | 77 |
| 3.4.1 | 求最大公约数的 Euclid 算法 | 77 |
| 3.4.2 | 把分解大数质因子归约为求阶问题 | 78 |
| 3.4.3 | 求随机数阶的量子算法 | 79 |
| 3.4.4 | 量子离散 Fourier 变换算法 | 81 |
| 3.5 | 量子 Fourier 变换及其应用 | 83 |
| 3.5.1 | 量子 Fourier 变换 | 84 |
| 3.5.2 | 量子 Fourier 变换的有效实现 | 85 |
| 3.5.3 | 量子 Fourier 变换和相位估计 | 87 |
| 3.6 | 量子算法和隐藏子群问题 | 89 |
| 3.6.1 | 指数加速量子算法的群论描述 | 89 |
| 3.6.2 | Abel 群上函数的 Fourier 变换 | 90 |
| 3.6.3 | 指数加速量子算法和隐藏子群问题 | 92 |
| 3.6.4 | 非 Abel 群隐藏子群问题 | 94 |
| 3.7 | 量子系统的动力学模拟算法 | 95 |
| 3.7.1 | 量子系统动力学模拟原理 | 95 |
| 3.7.2 | Fermi 系统的量子模拟算法 | 96 |
| 3.7.3 | Bose 系统的量子模拟算法 | 100 |
| 3.7.4 | 从模拟结果中获得信息的测量 | 103 |
| | 参考文献 | 104 |
| 第 4 章 | 量子计算机动力学模型 | 107 |
| 4.1 | 量子计算机系统 Hamilton 量的一般形式 | 107 |
| 4.1.1 | 量子位动力学的半自旋 Fermi 子模型 | 107 |
| 4.1.2 | 两体相互作用 Hamilton 量 | 110 |
| 4.1.3 | 量子信息读出——测量 | 112 |

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 4.1.4 | 环境作用、量子计算机 Hamilton 量普遍形式 | 112 |
| 4.2 | 单量子位门操作(I) | 113 |
| 4.2.1 | 单量子位动力学方程 | 113 |
| 4.2.2 | 单量子位态绕 z 轴的任意转动 | 114 |
| 4.2.3 | 单量子位态的任意转动变换 | 115 |
| 4.2.4 | 单量子位态转动的几个特例 | 117 |
| 4.3 | 单量子位门操作(II) | 119 |
| 4.3.1 | 射频电磁场作用下单量子位 Hamilton 量 | 119 |
| 4.3.2 | 射频电磁场作用下单量子位态的时间演化 | 120 |
| 4.3.3 | 射频电磁场作用下单量子位态的共振激发 | 122 |
| 4.4 | 两量子位门操作 | 123 |
| 4.4.1 | 相互作用表象中的时间演化算子 | 123 |
| 4.4.2 | Baker-Campbell-Hausdorf 公式 | 124 |
| 4.4.3 | 利用特殊形式的两体相互作用执行两量子位门操作 | 125 |
| 4.4.4 | 相互作用势取 Ising 势时的两量子位门操作 | 127 |
| 4.5 | 辐射场和质量量子位的相互作用 | 128 |
| 4.5.1 | 辐射场的 Hamilton 量、电磁场的量子化 | 128 |
| 4.5.2 | 原子、离子系统的 Hamilton 量 | 130 |
| 4.5.3 | 辐射场和两能级原子的相互作用、旋转波近似 | 131 |
| 4.6 | 量子计算机系统消相干理论、超算子方法 | 133 |
| 4.6.1 | 子系统态的约化密度算子描述及其演化 | 133 |
| 4.6.2 | 超算子和超算子的算子和表示 | 136 |
| 4.6.3 | 量子态消相干理论 | 137 |
| 4.7 | 量子位态消相干的例子 | 139 |
| 4.7.1 | 单量子位和环境相互作用算子基 | 139 |
| 4.7.2 | 量子位去极化引起的消相干 | 141 |
| 4.7.3 | 量子位相对相位阻尼引起的消相干 | 142 |
| 4.7.4 | 量子位自发衰变引起的消相干 | 143 |
| 4.8 | 量子计算机系统消相干理论、主方程方法 | 145 |
| 4.8.1 | Markoff 近似 | 145 |
| 4.8.2 | 量子计算机非么正演化的主方程 | 146 |
| 4.8.3 | 阻尼振子 | 148 |
| 4.9 | 实现量子计算机的物理条件 | 149 |
| 4.9.1 | 实现量子计算机的基本条件 | 150 |
| 4.9.2 | 量子计算机中的通信问题 | 151 |

| | |
|---|------------|
| 4.9.3 关于量子计算机的物理实现 | 152 |
| 参考文献 | 153 |
| 第 5 章 离子阱量子计算机 | 156 |
| 5.1 线性 Paul 阱和离子晶体 | 156 |
| 5.1.1 Paul 势阱和单离子运动 | 156 |
| 5.1.2 离子在阱中的平衡位置 | 158 |
| 5.1.3 Paul 阱中离子振动模 | 159 |
| 5.2 囚禁在阱中的离子和激光场的相互作用 | 161 |
| 5.2.1 囚禁离子运动的 Hamilton 量 | 161 |
| 5.2.2 囚禁离子和激光场相互作用 | 162 |
| 5.2.3 光场和离子内部态耦合常数的计算 | 164 |
| 5.3 离子阱量子位、量子位态的初始化和读出 | 166 |
| 5.3.1 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子的能级结构 | 166 |
| 5.3.2 离子振动量子态的初始化 | 168 |
| 5.3.3 离子内态的初始化和读出 | 171 |
| 5.4 用 $^{40}\text{Ca}^+$ 离子量子计算的通用逻辑门 | 172 |
| 5.4.1 单量子位门操作 | 172 |
| 5.4.2 振动量子位的单量子位转动——复合脉冲技术 | 173 |
| 5.4.3 两量子位门操作 | 174 |
| 5.5 Deutsch-Josza 算法的离子阱验证 | 179 |
| 5.5.1 Deutsch-Josza 算法的主要步骤 | 179 |
| 5.5.2 算法在离子阱量子计算机上的实现 | 180 |
| 5.6 离子阱量子计算的简要评述 | 184 |
| 5.6.1 实验研究进展 | 185 |
| 5.6.2 离子阱量子计算中的消相干问题 | 185 |
| 5.6.3 离子阱量子计算机规模化问题 | 186 |
| 5.6.4 离子阱量子计算机研究的新思路 | 187 |
| 参考文献 | 188 |
| 第 6 章 基于半导体量子点的量子计算机 | 192 |
| 6.1 半导体量子点 | 192 |
| 6.1.1 半导体异质结构自组织生长量子点 | 192 |
| 6.1.2 2 维电子气门限量子点 | 193 |
| 6.1.3 横向门限量子点门电极设计 | 195 |
| 6.2 量子点物理 (I) | 196 |
| 6.2.1 能量量子化 | 196 |

| | | |
|------------|------------------------|------------|
| 6.2.2 | 量子点模型和常数相互作用假设 | 198 |
| 6.2.3 | 宏观量子隧道效应和库仑阻塞 | 200 |
| 6.3 | 量子点物理(II) | 201 |
| 6.3.1 | 量子点上的单电子态 | 201 |
| 6.3.2 | 量子点上双电子态 | 202 |
| 6.3.3 | 双量子点上的电子态 | 203 |
| 6.3.4 | Pauli 自旋阻塞 | 205 |
| 6.4 | 电子自旋量子位和通用逻辑门操作 | 206 |
| 6.4.1 | 电子自旋量子位 | 206 |
| 6.4.2 | 电子自旋量子位的一位门操作 | 208 |
| 6.4.3 | 电子自旋量子位的二位门操作 | 208 |
| 6.4.4 | 使用交换相互作用的通用量子计算 | 210 |
| 6.5 | 电子自旋态的制备和测量 | 212 |
| 6.5.1 | 电子自旋态制备 | 212 |
| 6.5.2 | 量子点上电荷态测量 | 214 |
| 6.5.3 | 单电子自旋态读出 | 216 |
| 6.6 | 量子点量子计算机简要评述 | 218 |
| 6.6.1 | 实验进展 | 218 |
| 6.6.2 | 消相干问题 | 220 |
| 6.6.3 | 展望 | 221 |
| | 参考文献 | 221 |
| 第7章 | 固体超导量子计算机 | 225 |
| 7.1 | 超导体物理 | 225 |
| 7.1.1 | 超导体的零电阻效应 | 226 |
| 7.1.2 | 超导体的 Meissner 效应 | 226 |
| 7.1.3 | 超导体比热 | 227 |
| 7.1.4 | 超导能隙和同位素效应 | 228 |
| 7.2 | 超导体理论 | 228 |
| 7.2.1 | 两流体模型 | 229 |
| 7.2.2 | London 方程 | 229 |
| 7.2.3 | BCS 理论:Cooper 对模型 | 230 |
| 7.2.4 | Ginzburg-Landau(G-L)理论 | 232 |
| 7.2.5 | 磁通量子化 | 232 |
| 7.3 | Josephson 效应 | 233 |
| 7.3.1 | Josephson 效应 | 234 |

| | | |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 7.3.2 | Josephson 方程 | 234 |
| 7.3.3 | Josephson 结的性质 | 236 |
| 7.3.4 | Josephson 结的伏安特性 | 238 |
| 7.4 | 超导量子干涉器 | 238 |
| 7.4.1 | A-B 效应 | 239 |
| 7.4.2 | 超导量子干涉现象 | 240 |
| 7.5 | 超导 Josephson 结电路的量子化 | 241 |
| 7.5.1 | 包含 Josephson 结电路的动力学性质 | 241 |
| 7.5.2 | 正则量子化方法 | 242 |
| 7.5.3 | 电流偏置 Josephson 结电路的动能和势能 | 243 |
| 7.5.4 | 电流偏置 Josephson 结电路的 Hamilton 量 | 244 |
| 7.5.5 | 磁通偏置 Josephson 结电路的 Hamilton 量 | 245 |
| 7.6 | 超导电荷量子位 | 246 |
| 7.6.1 | 简单电荷量子位 | 246 |
| 7.6.2 | 具有可调 Josephson 耦合的电荷量子位 | 249 |
| 7.6.3 | 电荷量子位间的耦合 | 250 |
| 7.7 | 超导磁通量子位 | 251 |
| 7.7.1 | 磁通量子位 | 251 |
| 7.7.2 | 三结磁通量子位 | 253 |
| 7.7.3 | 磁通量子位耦合 | 254 |
| 7.8 | 超导量子位态读出和态制备 | 255 |
| 7.8.1 | 超导相位量子位的直接破坏测量 | 256 |
| 7.8.2 | 电荷量子位态非破坏读出 | 257 |
| 7.8.3 | 磁通量子位态读出 | 258 |
| 7.8.4 | 超导量子位态制备 | 259 |
| 7.9 | 关于超导量子计算机的简要评述 | 259 |
| 7.9.1 | 超导量子计算机实验研究 | 260 |
| 7.9.2 | 消相干问题 | 262 |
| 7.9.3 | 超导量子计算机规模化问题 | 263 |
| | 参考文献 | 264 |
| 第 8 章 | 绝热量子计算 | 269 |
| 8.1 | 量子绝热定理及绝热近似成立的条件 | 269 |
| 8.1.1 | 量子绝热定理 | 269 |
| 8.1.2 | 量子绝热条件 | 270 |
| 8.2 | 绝热量子计算概要 | 273 |

| | | |
|------------|---------------------------------|------------|
| 8.2.1 | 绝热量子计算的基本思想 | 273 |
| 8.2.2 | 三元可满足性问题的绝热量子计算 | 273 |
| 8.2.3 | 关于绝热量子计算的几点评注 | 275 |
| 8.3 | 绝热量子算法的通用性 | 276 |
| 8.3.1 | 绝热和线路两个模型中单量子位转动的等价性 | 276 |
| 8.3.2 | 二量子位 CNOT 门的绝热量子计算模拟 | 279 |
| 8.4 | 容错绝热量子计算和时间最优绝热量子计算 | 280 |
| 8.4.1 | 容错绝热量子计算 | 280 |
| 8.4.2 | 时间最优的绝热量子计算 | 282 |
| | 参考文献 | 283 |
| 第9章 | 簇态和簇态上的量子计算 | 285 |
| 9.1 | 簇态 | 285 |
| 9.1.1 | 簇态的概念 | 285 |
| 9.1.2 | 由簇态生成给出的簇态的表达式 | 288 |
| 9.1.3 | 簇态的几个例子 | 288 |
| 9.1.4 | 簇态的计算基展开表达式 | 290 |
| 9.2 | 簇态满足的本征值方程 | 291 |
| 9.2.1 | 簇态满足的本征值方程、关联算子 | 291 |
| 9.2.2 | 用关联算子的量子数标记簇态 | 293 |
| 9.2.3 | 单量子位投影测量 | 294 |
| 9.2.4 | 测量簇态中部分量子位后态满足的本征值方程 | 295 |
| 9.3 | 簇态的性质 | 297 |
| 9.3.1 | 簇态上的 σ_z 测量 | 297 |
| 9.3.2 | 簇态上的 σ_x 、 σ_y 测量 | 298 |
| 9.3.3 | 簇态的熔接 | 299 |
| 9.3.4 | 簇态的纠缠性质 | 301 |
| 9.4 | 簇态上的基本逻辑门操作 | 302 |
| 9.4.1 | 在簇态上用单量子位测量模拟基本逻辑门操作的步骤 | 302 |
| 9.4.2 | 在簇态上用单量子位投影测量实现 H 门 | 303 |
| 9.4.3 | 簇态上以测量为基础的量子计算的简单解释 | 305 |
| 9.4.4 | 簇态上绕 x 轴的任意转动操作 | 306 |
| 9.5 | 在簇态上模拟量子逻辑门的定理 | 307 |
| 9.5.1 | 测量模式 | 307 |
| 9.5.2 | 关于在簇态上模拟基本量子逻辑门的定理 | 308 |
| 9.5.3 | 定理的证明 | 309 |

| | |
|------------------------------------|-----|
| 9.6 簇态上的通用量子计算(I) | 312 |
| 9.6.1 恒等门的实现——单量子位态的隐形传送 | 312 |
| 9.6.2 单量子位态绕 x 轴的任意转动 | 313 |
| 9.6.3 H 门 | 315 |
| 9.6.4 $\pi/2$ 相位门 | 316 |
| 9.7 簇态上的通用量子计算(II) | 316 |
| 9.7.1 绕 z 轴转动任意角度 α | 316 |
| 9.7.2 单量子位态的任意转动 | 317 |
| 9.7.3 两量子位控制非门($CNOT$) | 318 |
| 9.7.4 交换门 | 320 |
| 9.8 基本逻辑门的级联、簇态上的量子计算 | 322 |
| 9.8.1 基本逻辑门的级联 | 322 |
| 9.8.2 副产品算子的传播和计算结果的输出 | 324 |
| 9.8.3 副产品算子的解释 | 326 |
| 9.8.4 簇态上的量子计算概述 | 327 |
| 9.9 关于簇态上量子计算的简要评述 | 328 |
| 9.9.1 簇态上量子计算的非网络性质 | 328 |
| 9.9.2 簇态上量子计算的时间顺序和时间复杂度 | 329 |
| 9.9.3 信息流矢量 | 330 |
| 9.9.4 簇态量子计算研究进展 | 330 |
| 参考文献 | 333 |

下 册

| | |
|------------------------------|-----|
| 第 10 章 经典线性纠错码 | 337 |
| 第 11 章 量子纠错和 CSS 量子纠错码 | 362 |
| 第 12 章 稳定子量子纠错码 | 385 |
| 第 13 章 无消相干子空间和无消相干子系统 | 411 |
| 第 14 章 容错量子计算 | 453 |
| 第 15 章 拓扑量子计算 | 495 |
| 附录 A1 量子物理概要 | 554 |
| 附录 A2 量子信息中的群论基础 | 584 |
| 附录 A3 群表示理论 | 603 |
| 附录 A4 李群和李代数 | 618 |
| 索引 | 634 |