



中创软件丛书

量子程序设计语言

Quantum Programming Languages

徐家福 宋方敏 著



科学出版社

014009503

TP312
948

中创软件丛书

量子程序设计语言

徐家福 宋方敏 著



科学出版社
北京



北航

C1698125

TP312
948

内 容 简 介

本书是一部量子程序设计语言专著.全书共十章,第一章为引言,着重阐明何谓量子程序设计语言,为何要研究量子程序设计语言,如何研究量子程序设计语言三个基本问题,并兼及本书之结构;第二章至第四章分别陈述研习量子程序设计语言所需之基础知识,即数学基础、计算机科学基础、量子力学基础;第五章为语言风范;第六章为量子程序设计语言举例,简要介绍了量子伪码、Qgol、QCL、qGCL、QML 五种量子程序设计语言;第七章至第九章介绍作者主持设计并实现之三种量子程序设计语言——NDQJava、NDQFP 以及 NDQJava2 及其处理系统;第十章为发展展望.

本书可作为高等院校计算机、电子、通信有关专业高年级学生与研究生课程的参考用书,对有志于研究量子程序设计语言的人员亦具有重要参考价值.

图书在版编目(CIP)数据

量子程序设计语言/徐家福,宋方敏著. —北京:科学出版社,2013

(中创软件丛书)

ISBN 978-7-03-038734-9

I. ①量… II. ①徐…②宋… III. ①程序语言-研究 IV. ①TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 230654 号

责任编辑:鞠丽娜/责任校对:王万红

责任印制:吕春珉/封面设计:三函设计

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 11 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 11 月第一次印刷 印张:11 3/4

字数:202 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(双青))

销售部门电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135763-2032

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

序

1985年 Deutsch 首先提出:“设计为量子计算机而用之程序设计语言乃一有趣难题”。此后,少数计算机科学家开始进行尝试,1996年6月,出现第一个量子程序设计语言“量子伪码”,时至今日,量子程序设计语言已蔚然成为量子计算之一重要领域。

量子计算机按量子力学基本原理构建,具有“存储容量大,运算速度快,安全性能好”三大优点,有人认为,一旦实用之通用量子计算机问世,而斯时尚无复杂度为多项式级之“大数质因子分解”经典算法,则将导致所有经典计算机面临严重危机,此乃当今世界对量子计算机研究的极大重视之原因所在,亦为世界重视研究量子程序设计语言之原因所在。

南京大学计算机软件研究所自2004年起,致力于量子程序设计语言之学习与探索,先后设计并实现三种量子程序设计语言 NDQJava、NDQFP 以及 NDQJava2,为总结经验,启迪来兹,吸引更多有识之士进入此新兴领域,决定撰写《量子程序设计语言》一书,内容共分十章,第一章着重阐明何谓量子程序设计语言,为何要研究量子程序设计语言,如何研究量子程序设计语言三问题,并兼及本书之结构;第二章至第四章陈述基础知识,即数学基础、计算机科学基础以及量子力学基础;第五章讲述语言风范;第六章概述五种量子程序设计语言;第七章至第九章介绍作者等进行之三次实验,即三种量子程序设计语言 NDQJava、NDQFP、NDQJava2 及其处理系统;第十章为发展展望。这里必须指出的是:第一,第七章至第九章所述只是初步心得,其中不少问题有待深入探讨,将之载入此书纯属抛砖引玉;第二,本书虽为本人和宋方敏教授署名,内容实乃集体创作,基础三章除取自本人读书笔记外,大都取自莫绍揆、张永德、黄文奇、宋方敏四位先生之著作,至于 NDQJava 等三种语言及其处理系统之参加人员除笔者外,还有钱士钧、胡海星、吴楠、戴静安、刘吉、张云洁、徐明君、钱辰、吴庆曦、焦阳、董青、朱晓瑞、颜仙乐、刘玲、金惠益、朱正文、程振伟、蔡希辉、冯豪、曹婉琼等人。

本书得以问世,多承山东中创软件股份有限公司鼎力襄助,董韫美、陆汝铃两位老友精心审校,提出有益建议;宋方敏教授、吴楠博士共同讨论、修改、定稿,出力良多;科学出版社资深编审鞠丽娜仔细核审,南京大学、北京大学、国防科技大学、苏州大学等校大力支持,在此对前述单位及个人均致谢忱。

限于作者水平,书中欠妥之处,敬请读者不吝赐正。

徐家福

2013年9月

于金陵不阿斋

目 录

第一章 引言	1
1.1 何谓量子程序设计语言	1
1.1.1 何谓语言	1
1.1.2 自然语言与人工语言	1
1.1.3 经典程序设计语言	2
1.1.4 量子程序设计语言	2
1.2 为何要研究量子程序设计语言	3
1.2.1 适应量子计算机之需	3
1.2.2 Shor 算法及 Grover 算法的出现	4
1.2.3 南京大学之工作	4
1.3 如何研究量子程序设计语言	4
1.3.1 学习研讨	4
1.3.2 进行实验	5
1.4 本书之结构	6
第二章 数学基础	7
2.1 集	7
2.1.1 表述	7
2.1.2 子集	7
2.1.3 运算	7
2.2 群	9
2.2.1 代数系	9
2.2.2 群的定义	9
2.2.3 半群	10
2.2.4 群的阶	10
2.2.5 群元素的阶	10
2.2.6 子群	10
2.2.7 不变子群(正规子群)	10
2.2.8 陪集	10
2.2.9 群的同态	10
2.2.10 群的同构	11

2.3	环	11
2.3.1	环的定义	11
2.3.2	非结合环	11
2.3.3	交换环(可换环)	11
2.3.4	零环	11
2.3.5	数环	11
2.3.6	子环	12
2.4	域	12
2.4.1	域的定义	12
2.4.2	源流	12
2.4.3	子域	12
2.4.4	扩域	12
2.4.5	素域	12
2.5	向量空间(线性空间)	13
2.5.1	向量(矢量)	13
2.5.2	向量空间(线性空间)	15
2.5.3	矩阵	20
2.5.4	特征值和特征向量(本征值和本征向量)	24
第三章	计算机科学基础	26
3.1	计算模型	26
3.1.1	线路	26
3.1.2	图灵机(Turing 机)	30
3.1.3	递归函数	34
3.1.4	λ 演算	39
3.2	不可计算性	44
3.2.1	沿革	44
3.2.2	胜弈机之不存在性	45
3.2.3	不可计算函数的存在性	45
3.3	计算复杂性	45
3.3.1	缘起	46
3.3.2	理解	46
3.3.3	复杂性类	46
第四章	量子力学基础	49
4.1	基本问题	49
4.1.1	量子	49
4.1.2	量子化	50

4.1.3	波粒二象性	50
4.1.4	不确定性关系(测不准原理)	50
4.1.5	波粒二象性和不确定性关系二者之关系	50
4.1.6	量子力学的数学基础	51
4.2	叠加原理	51
4.2.1	叠加	51
4.2.2	原理	52
4.3	量子测量	53
4.3.1	力学量的测量	53
4.3.2	塌缩	53
4.4	量子纠缠	54
4.4.1	量子纠缠的数学表述	54
4.4.2	量子纠缠的物理表现	55
4.4.3	纠缠和关联的区别和联系	56
4.4.4	量子纠缠的本质和空间非定域性	56
4.4.5	量子纠缠在量子信息和量子计算中的作用	59
第五章	语言风范	61
5.1	何谓语言风范	61
5.1.1	语言风范反映了语言所基以的计算机的结构	61
5.1.2	语言风范反映了语言之刻画重点	61
5.1.3	语言风范影响了语言所书写的程序之程序结构	62
5.2	命令式语言风范	62
5.2.1	利弊分析	62
5.2.2	语言举例:XCY 语言	62
5.3	申述式语言风范	64
5.3.1	利弊分析	64
5.3.2	语言举例:FP 语言	65
第六章	量子程序设计语言举例	68
6.1	量子伪码	68
6.1.1	量子计算	68
6.1.2	硬件平台	68
6.1.3	伪码约定	69
6.2	Qgol	71
6.2.1	量子计算机体系结构	72
6.2.2	量子计算机的形式描述	72
6.2.3	通用量子计算机的不存在性	73

6.2.4	Qgol 模拟系统	73
6.2.5	量子电报	76
6.3	QCL	77
6.3.1	混成式结构	77
6.3.2	语言主要成分	78
6.4	qGCL	83
6.4.1	qGCL 程序	84
6.4.2	程序示例	85
6.5	QML	86
6.5.1	设计要点	86
6.5.2	量子数据和控制	87
6.5.3	QML 的语法和定型规则	87
6.5.4	QML 的操作语义	91
6.5.5	QML 的指称语义	92
第七章	量子程序设计语言 NDQJava	93
7.1	工作动因	93
7.1.1	有感于量子计算与量子计算机的诱人潜力	93
7.1.2	有感于一旦实用的通用量子计算机问世,对人类文明与社会进步的巨大推动	93
7.2	设计准则	93
7.2.1	实用性	93
7.2.2	简明性	94
7.2.3	严谨性	94
7.3	语言概貌	94
7.3.1	语言风范	94
7.3.2	硬件平台	95
7.3.3	语言结构	95
7.3.4	量子成分	95
7.4	实现途径	98
7.4.1	途径	98
7.4.2	难点	99
7.5	处理系统	99
7.5.1	词法分析程序	99
7.5.2	语法分析程序与代码转换程序	107
7.5.3	量子汇编程序与解释程序	112
7.6	示例	119

第八章 量子程序设计语言 NDQFP	121
8.1 研究动因	121
8.2 设计准则	121
8.2.1 实用性	121
8.2.2 简练性	121
8.2.3 功效性	122
8.3 语言概貌	122
8.3.1 要点	122
8.3.2 成分定义	125
8.4 处理系统	128
8.4.1 设计思路	128
8.4.2 组成	129
8.5 示例	130
8.5.1 随机整数生成	130
8.5.2 无序数据库搜索 Grover 算法	131
第九章 量子程序设计语言 NDQJava2	134
9.1 工作动因	134
9.2 设计准则	134
9.3 语言概貌	134
9.3.1 量子条件语句	134
9.3.2 量子循环语句	136
9.3.3 量子子程序	136
9.3.4 量子模块	138
9.3.5 量子程序	139
9.3.6 量子异常处理	139
9.3.7 量子表达式	140
9.4 处理系统	141
9.4.1 设计思路	141
9.4.2 系统概述	141
9.5 示例:大数质因子分解的 Shor 算法	155
9.5.1 算法描述	155
9.5.2 NDQJava2 程序	157
9.5.3 汇编指令列	159
9.5.4 机器指令列	160
9.5.5 输出	162

第十章 发展展望	163
10.1 量子计算机结构	163
10.2 量子程序设计语言风范	164
10.3 量子程序设计语言成分之分析与选定	164
10.4 发展前景	165
主要参考文献	167
索引	170

第一章 引言

本章内容包括何谓量子程序设计语言,为何要研究量子程序设计语言,如何研究量子程序设计语言以及本书之结构.

1.1 何谓量子程序设计语言

为了理解何谓量子程序设计语言,首先必须理解何谓语言,这是因为语言分自然语言与人工语言两类,程序设计语言是一种人工语言,量子程序设计语言又是一种程序设计语言的缘故.

1.1.1 何谓语言

语言是人们赖以交流信息的工具.严格说来,语言的基础是一组符号与一组规则,根据规则由符号构成之符号串的总体就是语言.

任何语言都有语法、语义、语用、语音四个方面.

语法指明语言的结构,亦即,语言的结构规则.符合结构规则的符号串才是语言的组成部分,不符合结构规则的符号串就不是语言的组成部分.

语义表示语言和使用情景无关的含义,使用情景包括发信人、收信人、语境、目标等.语义的基本特征是:第一,固有性,语义反映的含义是语言成分所固有的,和使用情景无关;第二,静态性,语言成分的语义一般可在编译时刻确定;第三,一元性,语义可看作语言成分的一元函数.

语用表示语言和使用情景有关的含义,或者说,语用表示在实际情景下使用时语言的含义,其基本特征是:第一,相对性,语用是相对使用情景的含义,不是固有的含义;第二,动态性,语用可看作语言成分固有含义的实例,它是动态生成的;第三,多元性,语用是语言成分与使用情景的二元函数.

语音表示语言各个成分的发音.

1.1.2 自然语言与人工语言

语言分自然语言和人工语言两类.

自然语言是随人类社会的发展自然演化而成的语言.质言之,由于人的智力而产生天赋语言能力,其结果按照非预谋的方式而形成的语言,即自然语言,如汉语、英语、法语等均为自然语言.值得注意的是,自然语言的形成与发展,也不必完全自然,其中也会伴随一些人为的带有某些预谋性质的因素.如日语的形成即如此,不过,自然语言的形成与发展主要是自然演化而成的,亦

即,按照一种非预谋的方式而形成的。

人工语言恰恰相反,它是由人们根据一定的意图,按照一种预谋的方式设计而成的语言,语言的一组符号与一组规则都是由人们自行设计的,如世界语,各种程序设计语言均为人工语言。

当然“理想的”程序设计语言是自然语言,但是,这里有两个问题:第一,程序设计人员如果用本国语言书写程序,虽然本国人容易理解,外国读者就不一定能看懂;第二,迄今各种自然语言语法形式化的工作尚未成熟,更谈不上语义形式化,因此,往往存在歧义,以致难以写出含义唯一的正确程序。

1.1.3 经典程序设计语言

用于书写经典计算机程序的语言为经典程序设计语言。它是伴随经典计算机的诞生而出现的语言。按语言级别分,有低级语言与高级语言。低级语言包括机器语言和汇编语言。它们在一定程度上和具体机器有关,因而,用低级语言书写程序繁琐、费时,且易出差错,高级语言是较为宜于表述算法的语言,或谓较为接近数学语言的语言,它摆脱了低级语言的机器相关性,以及由此带来的繁琐,从而更便于人们书写程序。按语言的使用范围分,有专用语言与通用语言之别,专用语言只适用于特定领域,通用语言则可适用于多种领域。当然,经典程序设计语言尚有其他分法,如交互式语言与非交互式语言;串行语言,并发语言,并行语言;命令式语言与申述式语言等。高级语言思想源于 1951 年瑞士学者 H. Rutishauser 的设想,由于使用低级语言书写程序繁琐、费时、易出差错,而且低级语言和数学语言的差距较大,因此,他设想能否设计出一种介于低级语言与数学语言之间的语言,人们使用该语言书写程序就要比使用低级语言方便得多,但是,机器并不能直接认识使用这种语言书写的程序,因此,要搭建一座桥,其作用是将任何一个用该语言书写的程序翻译成用机器语言书写的功能等价的程序,这样,问题便可解决,这座桥后来便称作编译程序,不过,由于种种原因,H. Rutishauser 本人未能实现。国际上第一个可用的高级语言乃是 1956 年 IBM 的 J. Backus 所领导的小组在 IBM704 机器上实现的 Fortran。其他著称的高级语言有 Algol, Cobol, Pascal, C, C++, Java, Ada 等。

值得指出的是,“高级语言与机器无关”一语应作如下理解。高级语言的机器无关性意指它和具体机器类型无关,但是,却和机器大类有关,如和 von Neumann 结构机器类或非 von Neumann 结构机器类有关(参见第五章)。

1.1.4 量子程序设计语言

量子程序设计语言是用于书写量子计算机程序的语言。亦即,用于书写量子算法与量子数据的语言,由于量子算法中也会包含经典计算,因而,业界设

想,最早出现的通用量子计算机将是一种混成式结构的机器,它包含两大部分,一部分是经典计算机,负责执行经典计算与控制(指两大部分之间的控制);另一部分是量子设备,负责执行量子计算,即执行酉运算(酉变换)、张量积运算以及测量运算,酉运算是可逆运算,用于改变量子态,张量积运算用于由多个量子系统构成复合量子系统,测量运算则不可逆,用于获取量子计算的结果.量子设备基于量子力学基本原理构建,它是一种纯封闭式的装置,其最基本的信息存储单位是量子比特(亦称量子位)qubit.和经典比特不同,量子比特在一定时刻,可以同时(概率意义)取0与1为值,这是由于量子态为一叠加态的缘故.和经典计算类似,量子计算过程亦分为三步,即入(初态制备),算(执行一系列酉运算和张量积运算),出(执行测量运算).

1985年,Deutsch首先提出:“设计为量子计算机而用的程序设计语言乃一有趣难题”.此后,有少数计算机科学家开始进行尝试.虽然人们相信量子信息处理设备应该和经典计算机一样,使用高级语言来书写程序,但基于这种目标而设计的语言在1996年6月才出现,即Knill提出的“量子伪码”(伪码可看作是一种强调书写紧凑与清晰、而又不涉及诸如类型抽象、模块性,以及异常处理等和软件工程有关之成分的高级语言).十多年来,量子程序设计语言已发展成量子计算的一个重要分支,著称者有量子伪码、Qgol、QCL、qGCL、QML等,其中量子伪码、Qgol、QCL、qGCL是命令式语言,QML是陈述式语言.

1.2 为何要研究量子程序设计语言

1.2.1 适应量子计算机之需

1982年Feynman提出基于量子力学基本原理构建计算机的设想,引起国际业界普遍重视,其理由是:作为经典计算机之物质基础的集成电路,其集成度之增加超过某一界限时,集成电路各部分之间出现的量子现象会互相干扰,致使集成电路不能正常工作,因而,其集成度存在某一极限值,不能无止境地增加,从而Feynman的设想促使人们循不同途径展开研究,如核磁共振途径、离子阱途径、光学途径、超导途径等.从硬件角度看,研究工作已有相当进展,但难度很大.从软件角度看,困难有三.第一,如何巧妙利用纠缠的正面效果,并遏制其负面效果;第二,当前可用的量子算法为数不多,即使硬件困难解决,可用之通用量子计算机造出,由于缺少合适可用的量子算法,量子计算机的优越性亦难以发挥,而发现新的量子算法并非易事;第三,由于量子程序刻画的是量子算法与量子数据,而量子算法一般为概率算法,因此,执行一次之结果不一定是用户所需之结果.一般说来,一个量子程序需反复执行多次,才有可能以较高概率得到用户满

意之结果. 尽管如此, 业界依然认为, 量子计算机具有存储容量大(基于一个量子比特可以在概率意义下同时取 0 和 1 为值, 而一个经典比特的取值是 0 或 1, 二者不可兼得), 运算速度快(基于存在量子并行性), 以及安全性能好(基于出现了复杂度为多项式级的“大数质因子分解的量子算法”)三大优点. 量子计算机的研究受到国际业界的高度重视, 前景十分看好. 有人认为, 可用之通用量子计算机可望在 2030 年左右出现. 因此, 我们理应“未雨绸缪”, 及早开展量子软件、特别是量子程序设计语言的研究, 以应量子计算机工作之需.

1.2.2 Shor 算法及 Grover 算法的出现

1994 年美国数学家 D. W. Shor 发表了大数质因子分解量子算法(即所谓 Shor 算法), 其中运用了量子快速傅里叶变换与量子并行性, 将其复杂度由迄今已知的经典算法之指数级降低为多项式级, 这一成果引起国际业界轰动. 由于大数质因子分解算法是计算机系统中安全子系统的理论基础, 有了这一算法, 量子计算机系统之安全子系统在一定时间内就可以对经典计算机的安全子系统识密、破密, 而后者却不能对量子计算机系统之安全子系统识密、破密, 从而大大提高了量子计算机的安全性能. 1996 年 L. K. Grover 又发表了数据库的量子搜索算法(通称 Grover 算法), 将其复杂度由迄今经典算法的 $O(n)$ 降至 $O(\sqrt{n})$, 其下降幅度虽逊于 Shor 算法, 但这一结果亦同样令人震惊, 这是因为数据库搜索是计算中频繁出现之问题的缘故. 这两项成果从软件角度证实了量子计算、量子计算机的优越性, 因此, 不仅在国际上促进了量子计算、量子计算机的研究与发展, 而且也促使我们坚定信心进行量子软件、特别是量子程序设计语言的研究.

1.2.3 南京大学之工作

南京大学计算机软件研究所研究经典软件语言(包括程序设计语言以及设计级、功能级、需求级规约语言)五十余年, 曾经设计并实现了多种软件语言及其处理系统, 特别是对软件语言进行了系统研究, 相应开发出多个软件自动化系统, 虽然所涉及的语言均为经典语言, 与量子程序设计语言有别, 但二者亦有共性, 因此, 多年的研究经验与教训对于我们研究量子程序设计语言而言, 亦将有所借鉴.

1.3 如何研究量子程序设计语言

1.3.1 学习研讨

由于量子计算是基于量子力学基本原理的计算, 为了研究量子计算、研究

量子程序设计语言,必须学习量子力学,掌握其基本概念与原理. 我们的办法是读书、拜师,先后读过曾谨言著《量子力学导论》(第二版,北京大学出版社,1998),王正行著《量子力学原理》(北京大学出版社,2003),张永德著《量子力学》(科学出版社,2002);拜南京大学李正中、柯善哲、王国荣、杨应弼、余洋、中国科技大学张永德、清华大学龙桂鲁等教授为师,多承指点,颇受教益. 但是,由于量子力学是一门难度颇大的学科,其中有些道理有悖常规,不易理解,而且有些颇为基本的问题,尚未见底,迄无定论. 难怪 Feynman 曾说:“迄今无人理解量子力学”(这句话的正确理解是,量子力学有些基本问题迄无定论). 另一方面,我们小组成员大都是数学出身,物理水平不高,经过一年重点学习,只是一知半解,我们重点学习了量子、量子化、波粒二象性、不确定性关系以及量子叠加态,量子测量、量子纠缠等问题,根据每个人的不同分工写出了学习小结.

其次,共同学习讨论了量子程序设计语言的基本文献,主要阅读了 E. Knill 的“Conventions for quantum pseudocode”,C. D. Baker 的“Qgol: A System for simulating quantum computations: Theory, Implementation and Insights”,B. Ömer 的“Structured Quantum Programming”,J. W. Sanders and P. Zuliani 的“Quantum Programming”以及 T. Altenkirch and J. Gratage 的“QML: Quantum Data and Control”等论文,并依次在讨论班上进行研讨.

1.3.2 进行实验

在前述学习研讨的基础上,着手进行实验,首先要决定的问题是:实现何种风范的语言. 如所熟知,语言风范有二,一为命令式风范,一为申述式风范,前者以 von Neumann 结构机器为背景,后者则以非 von Neumann 结构之机器为背景(详见第五章),二者各有利弊. 由于量子算法具有申述性,因此,对于主要用于书写量子程序的量子程序设计语言来说,理应选用申述式风范语言. 然而,当前可用的通用量子计算机并不存在,我们的实验工作只能在经典计算机上模拟进行,而当前可用的经典计算机又多为 von Neumann 结构的机器,这样,似乎又应选用命令式风范的量子程序设计语言. 因此,决定两种风范的语言都进行实验,命令式风范语言先行,待基本实现后,再着手设计申述式风范的量子程序设计语言. 接下来,要解决的问题是,由于设想的量子计算机是混成式的机器,相应的语言当然也应该是混成式的,这就是说,语言应该既有描述经典计算的成分,又有描述量子计算的成分. 考虑到 Java 语言是一种面向网络的流行语言,故而决定,在 Java 语言的基础上,适当增添量子成分,使之成为一种混成式的量子程序设计语言,我们增添的量子成分不多,计有量子类型、量子变量、量子表达式、量子语句以及量子分程序(详见第七章),取名为 NDQJava. 该语言于 2007 年 6 月基本实现,调试出其处理系统,并通过了示

例. 同年 9 月, 开始进行第二次实验, 即设计、实现申述式风范的量子程序设计语言, 考虑到 Haskell 是一种功能相对完备而又较为流行的函数式语言(函数式语言、逻辑式语言均为申述式风范语言), 故而决定, 在 Haskell 的基础上增添量子成分, 使之成为一种混成式的量子程序设计语言, 工作进行月余, 发现难度颇大, 小组成员一般并不熟悉 Haskell, 手中又缺少可用的 Haskell 编译程序(当然可以设法弄到), 即使有, 熟悉亦需时日, 因而, 当机立断, 改为以函数式语言 FP 为基础, 虽然 FP 的功能逊于 Haskell, 但我们早在 1978 年就开始熟悉, 并先后进行过两项工作, 因此, 决定在 FP 语言的基础上, 增添量子成分, 对 FP 改动幅度较大, 增添了类型、模块、异常处理等成分, 在原始函数集与组合型集中增添了相应的量子成分, 使之成为一种申述式的混成量子程序设计语言, 名为 NDQFP. 该语言于 2008 年 6 月底初步调试完毕. 2010 年起, 考虑到 NDQJava 语言中的量子成分偏弱, 书写量子程序欠便, 因此, 决定更新, 增添了量子条件语句、量子循环语句、量子子程序、量子模块以及量子异常处理等量子成分, 使之成为一种功能相对完备的命令式混成量子程序设计语言, 名曰 NDQJava2. 2011 年 9 月开始设计处理系统, 2012 年 12 月基本调试完毕, 书写量子程序的经验表明, 程序的易读性与易写性均有提高.

1.4 本书之结构

本书是一部量子程序设计语言专著, 冀图引导读者进入量子程序设计语言这一新兴领域. 全书共分十章, 第一章为引言, 其中回答了“何谓量子程序设计语言”、“为何要研究量子程序设计语言”以及“如何研究量子程序设计语言”这三个基本问题, 并给出本书之结构; 第二章至第四章为基础知识, 简要陈述了数学、计算机科学以及量子力学的基础知识, 亦即, 数学基础、计算机科学基础以及量子力学基础; 第五章为语言风范; 第六章为量子程序设计语言举例, 简要介绍了五种有代表性的量子程序设计语言; 第七章至第九章概述了我们先后进行的三次实验, 即设计并实现了三种量子程序设计语言: NDQJava、NDQFP 以及 NDQJava2(其中 NDQJava 和 NDQJava2 是命令式的, NDQFP 是申述式的)及其处理系统; 第十章为发展展望.