

CAMBRIDGE

Communicating
and mobile systems: the
 π -calculus

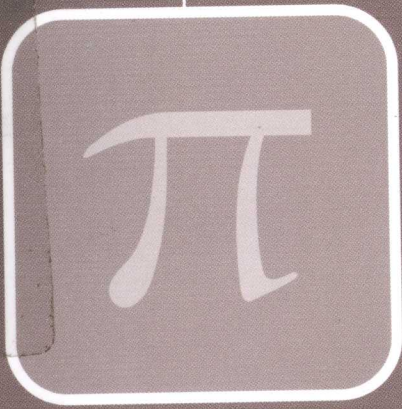
通信与移动系统



演算

Robin Milner 著

林惠民 柳欣欣 刘佳 屈楠 译



π

清华大学出版社

CAMBRIDGE

Communicating
and mobile systems: the
 π -calculus

通信与移动系统

π 演算

清华大学出版社
北京

Originally published by Cambridge University Press in 1999.
This reprint edition is published with the permission of the Syndicate of the Press of
the University of Cambridge, Cambridge, England.

THIS EDITION IS LICENSED FOR DISTRIBUTION AND SALE IN THE
PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA ONLY, EXCLUDING HONG KONG, MACAO
SAR AND TAIWAN.

本书中文翻译版由 Cambridge University Press 授权给清华大学出版社出版发行。

版权登记号: 图字 01-2009-3655 号

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签, 无标签者不得销售。

版权所有, 侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

通信与移动系统: π 演算/(英)米勒(Milner, R.)著; 林惠民等译. —北京: 清华大学出版社, 2009.10

书名原文: Communicating and mobile systems: the π -calculus

ISBN 978-7-302-20725-2

I. 通… II. ①米… ②林… III. 通信系统-系统建模 IV. TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 141389 号

责任编辑: 龙啟铭

责任校对: 徐俊伟

责任印制: 杨 艳

出版发行: 清华大学出版社 地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 148×210 印 张: 5.625 字 数: 176 千字

版 次: 2009 年 10 月第 1 版 印 次: 2009 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 1~2500

定 价: 19.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话: (010)62770177 转 3103 产品编号: 029935-01

译者序

计算机网络的出现与飞速发展, 不仅改变了我们的生活和工作的方式, 而且也改变了我们对计算现象的认识. 在网络时代之前, 人们关心的主要是顺序计算. 在这种模式下, 计算被看作是从输入到输出的函数; 永远不终止的计算被认为是没有意义的, 因为它不产生任何输出. 而在网络出现之后, 人们关心更多的是并发计算. 在并发计算中, 计算主体 (进程) 在与外界不断的交互中完成所指定的计算任务; 而在移动计算中, 进程所与之交互的外部环境也在动态地改变. 对于这类计算现象, 传统的基于“函数”的理论不再适用. 如何理解并发、移动计算, 为其建立严格的数学模型, 从而为实际并发系统的设计与分析提供坚实的理论基础, 是近 30 年来计算机科学面临的重大挑战.

由图灵奖获得者 Milner 教授与其合作者提出的 π 演算, 代表了迄今为止学术界对这一挑战的最为成功的回应. π 演算推广了通信进程演算 (CCS), 允许在通信中传递通道的名字. 这一看似简单的推广, 使得 π 演算能够描述通信拓扑结构的动态改变, 具有强大的表达能力, 同时又继承了 CCS 简洁优美的语义理论——互模拟. π 演算已经被应用到程序设计语言的设计、分布式系统的分析与验证等领域, 产生了广泛的影响.

本书是关于 π 演算的第一本专著. Milner 教授通过大量的例子, 深入浅出地介绍了 π 演算的基本概念和理论. 穿插在全书各章的讨论中, 处处闪烁着这位将其毕生精力倾注于计算机科学基础研究的大师对这门学科及其发展的精辟见解. 我们希望中译本的出版能有助于国内读者, 特别是研究生和年轻科研人员, 学习和掌握 π 演算的基本原理, 并从中受到启发.

Milner 教授慷慨提供了书中所有插图的电子文件, 并为中译本写了序, 表达了他对中国计算机科学事业的祝福和期望. 我们谨对他在本书翻

译过程中所给予的帮助表示衷心的感谢。

译 者

中国科学院软件研究所
计算机科学国家重点实验室
2009 年 7 月

Forward

The advances in computing in the past sixty years have been dramatic. The next sixty years will be even more so, as computing emerges from our offices, factories and laboratories and becomes a pervasive part of our environment. From the technology of computing as calculation, we advance to informatics as a science of communication and control.

Most technology, such as the tools of structural or electrical engineering, rests upon a previously developed physical science. For information technology (IT), we are developing the science after the technology. As the artifacts of IT pervade our lives more and more, the need for this science and its mathematical expression becomes more and more important. We already know how hard it is to understand and to maintain present-day large software systems; yet those of the future will be larger and our dependence upon them will be greater. To see this, we need only think of a future system with sensors and actuators in vehicles and on motorways, replacing human drivers, or with sensors and actuators on the human body that monitor and control our physical health.

As a country of great and increasing importance in the world, China has an opportunity to guide the scientific foundation of new technologies. The pi calculus is one step forward in seeking a sound mathematical basis for future distributed informatic systems. It has already had some influence on the design of languages in which we specify and program these systems. As the original author of this book I was therefore delighted to accept the offer of two expert scientists, Lin Huimin and Liu Xinxin, to translate it into Chinese.

Robin Milner

Professor of Computer Science

Universities of Cambridge and Edinburgh

June 2009

序

过去六十年间, 计算领域取得了巨大的进展. 今后六十年, 随着计算走出我们的办公室、实验室和工厂而成为我们环境的一部分, 这种进展将会更加令人瞩目. 计算正从一门数学运算的技术发展成为关于通信和控制的信息科学.

大多数技术, 例如结构工程或电气工程, 都是建立在已有的自然科学基础之上. 而在信息领域, 却是技术在前, 发展科学基础在后. 随着信息技术日益渗透到我们的生活中, 对于信息科学及其数学基础的需求也越来越迫切. 我们已经感受到理解和维护目前的大型软件系统是多么困难; 而今后的软件系统的规模将会更大并且我们对它们的依赖也将会更加严重. 只要想一想将来由安装在车辆和公路上的传感器及执行装置组成的自动驾驶系统, 或者由安装在人体内的传感器及执行装置组成的监视并调控我们身体健康的系统, 就不难看到这一点.

作为在世界上发挥日益重要作用的国家, 中国具有引领为新技术建立科学基础的机会. π 演算是为未来的分布式信息系统寻求一个可靠的数学基础而迈出的第一步. 它对我们用以描述和实现这些系统的语言的设计已经产生了一些影响. 因此, 作为原著者, 我欣然接受了林惠民和柳欣欣两位专家将本书翻译成中文的提议.

罗滨·米勒
计算机科学教授
剑桥大学、爱丁堡大学
2009 年 6 月

前 言

通信是计算的一个基本的、不可缺少的部分。通信可能发生在网络上不同的计算机之间,也可能发生在同一台计算机的各个部件之间。在本书中,作者 Robin Milner 介绍了一种为通信建模的新方法,其特点是将计算机及其程序都看作是由相互通信的部分所组成的,而不是将通信看成一种附加的活动。书中的所有概念都通过常见的实际例子引入,这些例子包括移动电话、调度程序、自动售货机、数据结构,以及面向对象编程中的对象等。但是本书的目的是发展一个理论—— π -演算。在这一理论中,这些应用实例都可以得到严格的处理。

π -演算与通信行为的其他模型的区别在于对移动性的处理。在 π -演算中,对计算机程序中数据的移动与互联网上的消息——甚至是计算机程序——的传送的处理是完全一样的。在 π -演算中也可以描述可自行重配置的网络。

这是一个十分简单却又具有强大的表达能力的演算。它的最基本的概念是名字。该演算具有两个重要的特色:行为(或观察)等价的概念,以及对交互行为模式分类的新的类型理论。互联网及其通信协议,与计算机程序、数据结构、算法以及编程语言一样,都在这个理论的适用范围内。

本书是关于 π -演算的第一本教科书,它的出版是该领域的专业人员和学生所期待已久的盛事。

术 语 表

下表列出了本书中使用的重要符号以及它们首次出现的章节.

实体集合	实体	描述	
$\mathcal{N}$	$a, \dots, x \dots$	名字	3.1
$\overline{\mathcal{N}}$	$\bar{a}, \dots, \bar{x} \dots$	补名字	3.1
$\mathcal{L}$	λ	标号	3.1
$\mathcal{Q}$	$p, q, \dots$	状态	3.1
	$\mathcal{R}, \mathcal{S}, \dots$	模拟, 互模拟	3.2
$\mathcal{P}^{\text{seq}}$	$P, Q, \dots$	顺序进程	3.4
Act	$\alpha, \beta, \dots$	动作	4.2
	τ	不可见动作	4.2
$\mathcal{P}$	$P, Q, \dots$	并发进程	4.3
	$\mathcal{C}$	进程上下文	4.4
$\mathcal{P}^\pi$	$P, Q, \dots$	π - 演算进程	9.1
	π	动作前缀	9.1
Σ	σ	类	11.2
Γ	C	类构造子	11.3
	$F, G \dots$	抽象	12.1
	$C, D \dots$	凝结	12.1
$\mathcal{A}^\pi$	$A, B \dots$	π - 演算代理	12.1

迁移关系

$\xrightarrow{\alpha}$	标号迁移	3.1
$\xrightarrow{\alpha}$	承诺	12.2

$\rightarrow$	反应	4.5
$\Rightarrow$	空试验	6.1
$\xRightarrow{e}$	试验	6.1

基本构造

$A(\vec{a}) \stackrel{\text{def}}{=} P_A$	进程定义	3.4
$\Sigma_{\alpha_i}.P_i$	和式	3.4
$A\langle a_1, \dots, a_n \rangle$	进程实例	3.4
$\{\vec{b}/\vec{a}\}P$	替换	3.4
$P \mid Q$	并行复合	4.3
$\text{new } a \ P$	限名	4.3
$P \frown Q$	链接	4.4

等价关系

$\equiv$	结构同余	4.4
$\sim$	强等价	3.3
$\approx$	弱等价	6.2

π - 演算构造

$x\langle y \rangle, \bar{x}\langle y \rangle$	动作前缀 (单目)	9.1
$\Sigma_{\pi_i}.P_i$	和式	9.1
$!P$	复制	9.1
$x\langle \vec{y} \rangle, \bar{x}\langle \vec{y} \rangle$	动作前缀 (多目)	9.4
$F; G$	顺序复合	9.6
$(\vec{x}).P$	抽象	12.1
$\text{new } \vec{x}\langle \vec{y} \rangle.P$	凝结	12.1
$F @ C$	作用	12.1
$\Sigma_{\alpha_i} A_i$	代理和式	12.1

序 言

在过去的三十余年中, 计算机科学所应对的重大挑战是如何像理解计算机程序的行为那样来理解通信系统的行为.

几乎没有现存的理论能对此有所帮助. 这听起来让人惊讶, 因为作为数学和逻辑的一个分支, 计算理论已经有着很长的历史, 并且影响了早期存储程序式计算机的设计. 与此相比, 作为顺序程序设计推广的关于通信的理论尚未成熟.

理论是为了解释实际而发展起来的. 近来的计算实际出现了巨大的变化. 由于技术的进步, 交互式系统正日趋普及, 我们关于计算的整个观念也随之改变. 新的技术要求我们将顺序计算的理论推广到以交互为主要特征的系统.

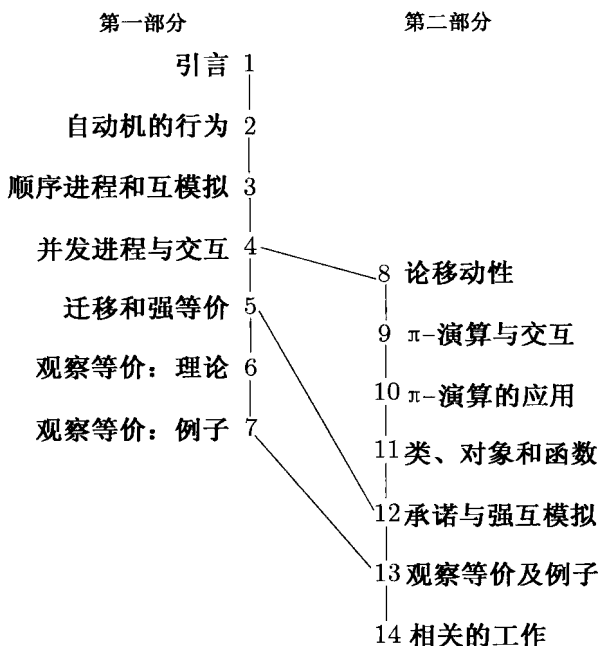
移动计算的出现, 无论从技术还是概念的角度, 都是最富于挑战性的发展之一. 现在, 人、计算机、软件都在不停地移动; 而且有些移动是物理的, 有些 (如链接的移动) 则是虚拟的. 在体验这个现象的过程中, 我们应当设法提炼出一些基本的概念, 以帮助我们开发出可靠的、按照我们的意愿工作的移动系统.

在设计阶段分析移动系统的行为比分析顺序程序要远为困难. 这部分归因于, 为了描述所要设计的系统首先需要准确地表达其行为, 而我们却缺乏表达这种行为的工具. 这正是在 20 世纪 80 年代后期提出 π - 演算的目的. 作为 π - 演算的入门书, 本书将介绍其动机和应用, 并建立它的数学基础.

谁应当读这本书 这本书是作者在剑桥大学为本科最后一年级学生讲授 π - 演算的课程讲义的基础上形成的. 在改写成书的过程中, 除了增加一些解释外, 我尽量避免加入新的材料. 书中所包含的内容对本科生来说是具有挑战性的; 本书也可以作为研究生的教材.

怎么读这本书 本书分成两个部分. 第一部分讨论非移动的交互式

系统, 主要介绍 CCS(通信系统演算)[9,10]. 第二部分讨论移动性, 其表现形式是在活动进程间动态地创建新的链接. 在开始读第二部分之前并不需要读完第一部分的全部. 下表显示了各章之间的依赖关系.



可以按各种路径阅读这本书的部分或全部:

- 第一部分是通信系统代数理论的很好的介绍. 它虽然侧重于并发现象所带来的理论问题, 但仍然在理论和实例之间保持了平衡.
- 第 1~4 章和 8~11 章介绍移动交互系统, 其侧重点是应用而不是理论. 第 7 章中的例子也可以放到这部分里; 这些例子即使没有第 5 章和第 6 章的预备知识也能大体上看懂.
- 第 1~5 章和 8~12 章组成一个完整的体系, 覆盖了除观察等价以外的所有内容. 可以在此基础上再读第 6、7 和 13 章.

这样可以根据各人的喜好按不同的方式将理论和实例穿插起来. 虽然理论十分重要, 但在没有理论知识的情况下常常也能理解实际的应用.

致谢 首先我要感谢过去三年中选修了我的课程的学生们, 特别是那些早期的学生, 他们帮助我逐步改进了本书的写作. 讲授一门新课程对于增进对课程的理解很重要, 这点一直让我很兴奋. π -演算的思想在很大程度上要归功于 Mogens Nielsen 和 Uffe Engberg, 他们在这个方向上迈出了重要的步伐; 归功于 Joachim Parrow 和 David Walker, 他们和我一起最初设计了这个演算; 也要归功于 Davide Sangiorgi, 他对随后的发展做出了重要的贡献. Alexis Donnelly、Peter Sewel 和 David Walker 仔细地阅读了本书的初稿并提出了有益的建议.

目 录

术语表

序言

第一部分 通信系统

第 1 章 引论.....3

第 2 章 自动机的行为.....8

2.1 自动机.....8

2.2 正规集.....10

2.3 自动机的语言.....11

2.4 确定性和非确定性.....12

2.5 黑盒或反应系统.....13

2.6 小结.....15

第 3 章 顺序进程和互模拟.....17

3.1 标号迁移系统.....17

3.2 强模拟.....18

3.3 强互模拟.....19

3.4 顺序进程表达式.....22

3.5 布尔缓冲区.....23

3.6 调度器.....24

3.7 计数器.....26

3.8 小结.....26

第 4 章 并发进程与交互.....28

4.1 标号和流程图.....28

4.2 观察和交互.....29

4.3 并发进程表达式.....31

4.4 结构同余.....33

4.5	反应规则	36
4.6	小结	39
第 5 章	迁移和强等价	41
5.1	标号迁移	41
5.2	强互模拟及其应用	47
5.3	强等价的代数性质	51
5.4	同余	53
5.5	小结	54
第 6 章	观察等价: 理论	55
6.1	观察	55
6.2	弱互模拟	56
6.3	方程解的唯一性	61
6.4	小结	62
第 7 章	观察等价: 例子	63
7.1	彩票机	63
7.2	加工车间	64
7.3	调度器	67
7.4	缓冲区	71
7.5	栈和计数器	73
7.6	讨论	76
第二部分	π- 演算	
第 8 章	论移动性	79
8.1	有限的移动性	81
8.2	移动电话	82
8.3	移动性的其他例子	85
8.4	小结	87
第 9 章	π- 演算与交互	88
9.1	名字、动作和进程	88
9.2	结构同余和反应	90
9.3	移动性	92
9.4	多目 π - 演算	94

9.5	递归定义	95
9.6	抽象	97
9.7	小结	99
第 10 章	π - 演算的应用	100
10.1	简单的系统	100
10.2	唯一使用	102
10.3	再论数据	105
10.4	表编程	108
10.5	持久的和可变的数据	111
第 11 章	类、对象和函数	115
11.1	通道类型的层次结构?	115
11.2	类和赋类	116
11.3	拓展类语言	118
11.4	面向对象程序设计	121
11.5	进程和抽象作为消息	125
11.6	函数式计算作为名字传递	127
第 12 章	承诺与强互模拟	131
12.1	抽象与凝结	131
12.2	承诺的规则	134
12.3	强互模拟, 强等价	136
12.4	同余	138
12.5	复制的基本同余性质	139
12.6	资源的复制	141
12.7	小结	143
第 13 章	观察等价及例子	144
13.1	试验	144
13.2	弱互模拟与同余关系	145
13.3	方程解的唯一性	146
13.4	表编程	148
13.5	命令式程序设计	149
13.6	可伸缩的缓冲区	150

13.7 λ - 演算中的归约	153
第 14 章 讨论及相关的工作	155
参考文献	159