多处理机及智能多机系统

童颋　程代杰编著

MULTI-PROCESSOR AND INTELLIGENT MULTI-COMPUTER SYSTEMS

重庆大学出版社

多处理机及智能多机系统

童 颖 程代杰 编著

重 庆 大 学 出 版 社

多处理机及智能多机系统
童 濒 程代杰 编著
责任编辑 王孝祥
*
重庆大学出版社出版发行
新 华 书 店 经 销
重庆新华印刷厂印刷
*
开本：787×1092 1/16 印张：18.5 字数：467千
1988年2月第1版 1988年2月第1次印刷
印数：1—4500
标准书号：ISBN 7-5624-0041-5/TP·2 定 价：3.10元

前　言

微电子技术和计算技术的迅速发展，特别是半导体超大规模集成电路和微处理器的进步，使得计算机的面貌发生了巨大变化，性能价格比有了很大的提高，从而促进了计算机应用的普及。但是，随着计算机的广泛应用，面临大量复杂的科学/工程计算、数据处理、知识处理等对高性能计算机的需求，传统的计算机系统结构已经暴露出其不适应性。主要表现为有增无已的软件复杂性及其开发代价，以及计算机系统实际效能的下降，以致无法满足要求。其根本原因在于传统计算机系统的核心组成部分是只能顺序执行指令的单一中央处理器(CPU)，因此，不能实现真正的并行处理。

早在计算机发展的初期，人们已经认识到并行处理对提高整个计算机系统效能的重要性，并且在整个计算机的发展过程中，都力图在系统的各个层次上开发并行性。然而，限于当时的技术条件，规模较大的多处理机系统不是在技术上难以实现，就是需要付出高昂的经济代价。只有在大规模与超大规模集成电路，特别是微处理器技术发展到成熟阶段以后，才为构造包含大量处理器的多处理器/多计算机系统(在不致引起误解的场合，本书将采用多机系统这一术语)提供了技术-物质基础。

国际上对多机系统的开发研究，大体上始于七十年代前期。当时典型的代表是美国卡内基·梅隆大学研制的C·mmp。到八十年代初期，开始了以微计算机或微理器为基础的多机系统研究。1984年美国Intel公司推出了iSPC多微计算机产品。日本的所谓"五代机"十年研究计划，其总目标是要在九十年代初开发出一种崭新的智能计算机，其系统结构也是一种多处理机系统。

我国在多机系统方面的研究，可以说始于八十年代初。当时仅有少数几所大学和研究所进行这方面的研究工作。

1985年12月，重庆大学邀请美国南加州大学计算机研究所黄铠教授讲学。黄教授在并行处理与多机系统研究领域里所作的贡献，早为国际上公认。1984年他撰写出版的《计算机结构及并行处理》(Computer Architecture and Parallel Processing)一书，在美国被广泛用作研究生的主要参考教材。考虑到并行处理与多机系统的研究和新一代智能计算机系统结构的研究密切相关，代表着计算机发展的新方向，近年来也已受到国内计算机界的普遍重视。不少大学的研究生选择了这一方向的研究课题，或者把有关内容作为研究生或本科高年级学生的学位课或选修课。在黄铠教授的鼓励和帮助下，我们着手编写此书。其内容除参考黄铠教授讲学内容和他所提供的许多最新文献外，也包括作者近年来在这一领域内的研究心得。由于并行处理与多机系统涉及的面很广，关于流水线与阵列结构的大型和巨型计算机系统结构，国内已有相应的参考教材。因此，本书将主要介绍基于诺依曼程序设计风格的多处理机系统及有关技术，以及基于非诺依曼程序设计风格的多机系统的设计思想、实现方法和一些实例。

全书分三篇，共十章。

引论主要论述无论是从计算机本身及其应用的发展，还是从现代科学技术对高性能计算

机的需求，研究开发多机系统都是必然的发展方向。

第一章介绍并行处理与多机系统。围绕平行性的开发这一主题，综述各种并行处理技术和多机系统的主要类型及其基本开发途径。

第一篇内容为基于诺依曼程序设计风格的并行处理与多机系统，由第二章至第五章组成。全面介绍多处理系统涉及的主要技术问题：并行性开发，并行处理语言及算法，多处理机调度，同步以及系统硬件结构等。

第二章内容是多处理机系统结构。主要介绍处理机之间(或系统模块之间)的互连方式。同时，说明了多处理机操作系统的类型和特殊要求。

第三章内容是多处理机系统控制。介绍多处理机系统的并发控制技术，其中包括多处理机调度方法，进程之间的通讯方式，以及如何解决系统的死锁问题。这些都是多处理机操作系统的重要内容。

第四章内容是并行处理语言及算法。主要介绍并行程序设计语言，编译程序对程序并行性的自动识别和转换，以及同步和异步并行算法。

第五章内容是向量化与多任务处理。主要介绍开发系统各个层次并行性的方法。向量化用于开发系统低层的并行性；多任务处理则用于开发系统高层的并行性；两者组合能同时开发系统高层和低层的并行性。

第二篇内容是非诺依曼程序设计风格与多处理机系统，共包含第六章至第九章。着重论述四类不同风格的、本身蕴含并行性的程序设计语言的基本特点及相应的多机系统结构举例。

第六章主要论述面向客体的程序设计风格与传统的结构程序设计风格相比较的特点。扼要介绍了一种典型的、面向客体风格的程序设计语言——Smalltalk-80的基本特点。结合介绍面向客体程序设计风格的一种多处理器微计算机iAPX432，也介绍了ADA语言的包块(Package)结构。同时还阐述了客体概念与框架知识表达和语义网络知识表达模式之间的联系。

第七章、函数程序设计风格与多处理机。主要围绕两类不同的作用式语言，即Backus的纯FP语言和LISP语言，论述函数程序设计风格的基本特点，同时也指出其存在的问题。还介绍了若干种支持纯FP或LISP一类作用式程序设计语言的多机系统实例。

第八章、单赋值语言与数据流机。在数据流驱动概念的基础上，介绍了单赋值语言程序设计风格。结合几个知名的数据流机实验样机实例，如MIT的两种不同结构的数据流机、英国曼彻斯特大学研制的数据流机、日本电子综合研究所研制的EM-3、SIMGA-1等，论述了数据流机体系结构的特点。同时也指出了数据流机潜在的问题。

第九章、逻辑程序设计风格与推理机。主要是在论述一阶谓词逻辑的表达能力和推理机制的基础上，论述AI问题求解的控制方式。以带有过程性的逻辑程序设计语言PROLOG为例，分析其蕴涵的逻辑并行性。举例介绍几种并行推理机的实验样机实例，如美国哥伦比亚大学研制的DADO；日本ICOT的PIM等。

第三篇内容是智能信息处理系统。第十章介绍了基于知识的智能多机系统。在分析了传统诺依曼机的基本设计思想及其结构上的局限之后，论述新一代计算机(即智能计算机)在设计思想上的发展和改变。指出当前存在着两种主要的开发策略，即以改进诺依曼结构为基础的多机系统和非诺依曼结构的多机系统。但都将以知识库为核心来组织系统，而在知识表达模式、描述语言、与各类不同控制机制和体系结构的多机系统之间，存在着多对多的映射关系。

扼要地介绍了日本的"五代机"研究计划的基本目标和主要内容，还扼要地介绍了数据库机与知识机，以及面向知识表达模式的一些新型多机系统实例，例如连接机等。

本书的引论、第一章及第六章至第十章，由童颖执笔；第二章至第五章，由程代杰执笔。

最后，我们借此机会谨向在此书的整个编写过程中，从商定编写纲要到提供参考资料都给予我们许多帮助的黄铠教授表示真心的感谢。

内 容 简 介

本书在综合当前研究成果的基础上，系统地论述多处理机平行处理的基本问题，如多任务调度、负载平衡、多进程通讯及同步、并行处理算法等，并结合实例，阐明与诸依曼程序设计风格相适应的多机系统和面向人工智能的新一代计算机体系结构。

本书可作为计算机专业研究生或大学本科高年级学生的教材，亦可供有关专业科技人员自学参考用。

目　录

第一篇 多处理机系统

第二篇 非诺依曼程序设计风格与多处理机系统

第三篇 智能多机系统

引　论

0-1　计算机及其应用的发展

0-1-1　电子技术、通讯技术与计算机的发展

从世界上第一台用电子管线路构造的通用电子数字计算机ENIAC(Electronic Numeric Integrator And Computer的缩写)于1946年问世以来，直到今日以LSI/VLSI为技术基础的电子计算机(以下简称计算机)，已经经历了四十余年。而计算机的发展，从一开始就和电子技术，特别是半导体微电子技术和通讯技术密切相关。按照构成计算机所采用的电子器件及其线路的变革，把计算机划分为若干"代"来标志计算机的发展，已经成为一种常识。

通常把以电子管及其线路为技术基础而构造的计算机叫做第一代计算机。晶体管计算机则属于第二代。第三代计算机则采用了中、小规模集成电路。自从七十年代前期出现了大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)以后，就把计算机的发展推进到了第四代。

从第一代计算机到第四代计算机，每一代计算机的性能都呈数量级地提高，而计算机硬件的价格却急剧下降。图0-1大体上反映了这种总的发展趋势。其中价格是指平均每执行一百万条指令需要支付的美元数；性能则主要是指平均每秒钟执行指令的数目。实际上这仅仅是反映了计算机性能的一个方面，即计算速度。如果考虑到计算机硬件的体积、重量、能量

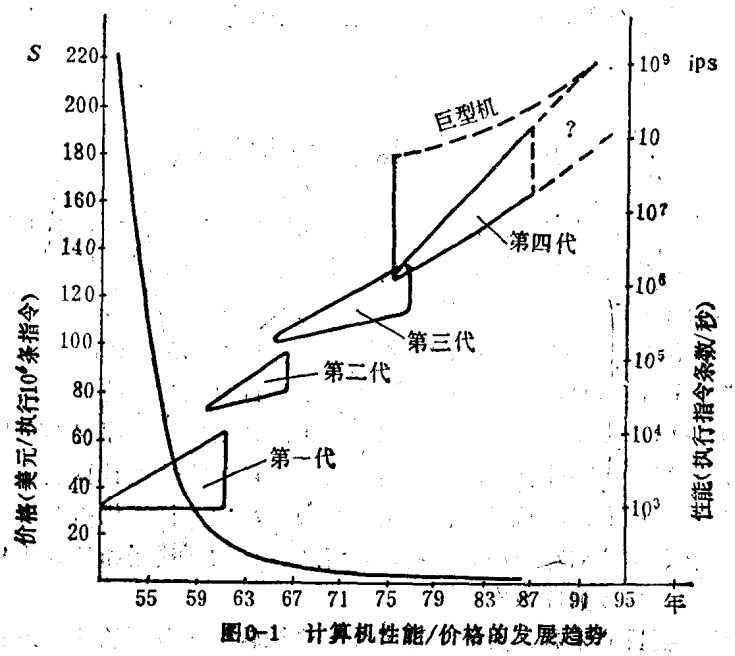

图0-1　计算机性能/价格的发展趋势

消耗、稳定性、可靠性、维护使用的方便性、功能的多样性等等方面的性能，则当代计算机的优越性和它的祖先——第一代计算机相比，可以说更有天渊之别。

尽管计算机的更新换代如此神速。但从计算机的体系结构这一角度来看，从第一代到第四代，还没有实质性的改变。

数学家冯·诺依曼(J·Von Neumann)在1946年发表的论文中首次提出了"存储程序概念"。后来，人们把在这一概念指导下设计的、在一个程序计数器控制下顺序执行指令的计算机，叫做诺依曼计算机，或简称诺依曼机。值得一提的是，世界上第一台电子计算机ENIAC的解题程序是通过外部开关接线板排定的，因此它不属于"存储程序"(stored program)控制的诺依曼机类型。第一台"存储程序"控制的实验室计算机是1949年在英国剑桥大学完成的EDSAC(Electronic Delay Storage Automatic Calculator的缩写)。而第一台"存储程序"控制的商品化计算机则是1951年问世的UNIVAC1(Universal Automatic Computer的缩写)。从那时起，直到目前的微处理器，不论其外观和性能有多么巨大的差异，就其系统结构来说，基本上都是属于诺依曼机一类。但应当说还是有了许多改进。主要表现在以下两方面：

·现代计算机系统，包括微计算机系统，已普遍采用了多处理器的系统结构；

·计算机已从"单机"孤立地运行，发展到通过通讯设施把许多在地理位置上分散的、不同的计算机连成计算机网络。在这样的连接方式中，通讯技术已经和计算机技术结合为一个不可分割的整体。

现在，人们已经在着手开发智能计算机。日本从1982年开始实施的"第五代计算系统研究计划"(Fifth Generation Computing System Project)，其主要研究目标是要从根本上改变传统的计算机体系结构，使其适应于智能信息处理的需求。从这一层意义上说，所谓"第五代"计算机将从本质上区别于前四代计算机。实际上也可以说，"五代机"是"智能信息处理系统"或简称"智能计算机"的同义语。

计算机从第一代发展到第四代，乃至第五代的各个发展阶段的基本特征，可以大体上概括如表0-1所示。

0-1-2 计算机软件的发展

通过程序来控制计算机自动进行计算的思想和实践由来已久，可以追溯到十九世纪中叶前期。1883年，诗人拜伦之女Ada Augusta建议用一组卡片表示重复执行的指令组，以此作为程序来控制巴贝奇发明的机械式解析机器(analytical engine)，并帮助他实现数学表的计算。Ada因此而被认为是世界上第一位程序员。ADA语言正是以她的名字来命名的。然而，只有在有了"存储程序"控制的电子计算机后，才为现代计算机软件的发展提供了物质基础。

程序是软件的主体。计算机正是在程序的控制下起作用的。程序的编制将受三项因素的制约。首先是要求计算机解决什么问题，要研究问题的可计算性和计算复杂性；其次是目标机，即将要运行这一程序的计算机所提供的运行环境，也就是计算机的系统结构及其可利用资源；第三是用什么语言来编写程序。因此，计算机软件的发展是和计算机的应用、计算机系统结构和计算机语言的发展联系在一起的。

从开发软件的主要目的来看，大体上可区分为系统软件和应用软件。系统软件是为开发

表0-1　　计算机发展阶段简表

	第一代	第二代	第三代	第四代	第五代
年　代	1946—56	1957—63	1964—81	1982—89	1990—
硬　件	电子管线路 磁　鼓 阴极射线管	晶体管线路 磁芯存储器	集成电路 半导体存储器 磁　盘	LSI，VLSI 微处理器 光盘 分布式系统	WSI，3D-VLSI GaAs， 光集成电路 约瑟夫器件 多微处理器
软　件	机器代码的存储程序	高层次语言 FORTRAN ALGOL COBOL	结构化程序设计 操作系统 PASCAL LISP 计算机图形数据库系统	面向客体的程序设计 ADA Smaltalk PROLOG 软件开发环境与工具 专家系统	符号处理 并发语言 函数式语言 逻辑语言 自然语言理解 知识库系统
通讯技术	电话、电报 电传打字	数字传输 脉码调制	卫星通讯 微波网 光纤通讯 包交换技术	集成系统 数字网络	多媒质集成信息系统
机型举例	ENIAC EDVAC UNIVAC IBM650	NCR501 IBM7094 CDC6600	IBM360，370 PDP-11，VAX Honeywell 200 IlliacIV Cray-1 Cyber-205	IBM308 Cray-X-MP Amdahl580	日本的"五代机" Connection-machine 超大型计算机
性能指标	2K内存 10KIPS	32K内存 200KIPS	2M内存 5MIPS	8M+内存 30MIPS	xG内存 10亿～1000亿IPS

和运行应用软件服务的软件。系统软件的发展更是与计算机系统结构的发展紧密地联系在一起。其中对运行应用程序和对计算机系统资源起调度、管理、监督作用的那些程序的整体，通常称为操作系统，更是计算机系统不可缺少的组成部分。

起初，计算机的确是作为一种自动计算工具而研制的。那时计算机的硬件实际上只能识别和执行一组由设计者事先规定的二进制编码指令，在这些指令的控制下，实现最基本的算术运算和逻辑运算。这样的代码指令组，就构成了最原始的机器语言。显然，这种机器语言与人类自然语言之间存在着巨大的鸿沟。为填补这一鸿沟而迈出的第一步，是汇编语言(assembly language)的提出和汇编程序(assembler)的实现。早在五十年代初期，就已在EDSAC计算机上实现了初期的汇编语言。巴克思(J.Backus)早在1954年就着手研究如何开发一种比汇编语言更容易为一般计算机用户掌握使用的高层次语言(high-level language)，终于在

1957年宣告了FORTRAN(FORmula TRANSlator)的成功。这一成就可以说开创了软件、特别是应用软件发展的新纪元。继FORTRAN之后，在1958年，J·麦卡锡(J.Mc Carthy)发明了面向符号处理的语言LISP。直到现在，LISP仍然被广泛用于人工智能程序设计。从六十年代起，计算机高层次语言的开发至今方兴未艾。据统计，各种通用和专用高层次计算机语言已有四、五百种之多。也有人把计算机语言按其接近于人类自然语言的程度划分为"代"。而有所谓第几代语言之说。

计算机中断功能和通道技术的实现，为发展多道程序运行和随后发展分时操作系统创造了必要的条件。现代计算机操作系统的功能日益完善而复杂，经过长期使用和选择，存在着明显的标准化趋势。在微计算机中，MS-DOS、CP/M、或MP/M、UNIX、等已成为主流操作系统。

应用软件的发展，也促进了计算机应用的发展；而计算机应用的发展，又对应用软件的开发提出了更高更复杂的要求。

前面已经指出，计算机硬件发展的总趋势是，性能日益提高而价格日益下降(参阅图0-1)。而软件发展的总趋势则恰恰相反，即由于程序系统的日益复杂化，不但使计算机系统的总效率下降，而且软件开发的代价日益上升。有人把这种现象概括为"软件危机"(software crisis)。

随着软件开发技术的成熟和市场需求的增长，已经形成了"软件产业"这个新的行业。

0-1-3 计算机应用的发展

计算机的应用，大体上可以区分为数值计算和非数值或符号处理两大方面。每一方面又可再分为若干应用领域，如图0-2所示。当然，每一个子领域又可分为若干不同的子领域。如此下去，图0-2所示分类树将引伸到几乎一切人们能够想象得到的应用领域。

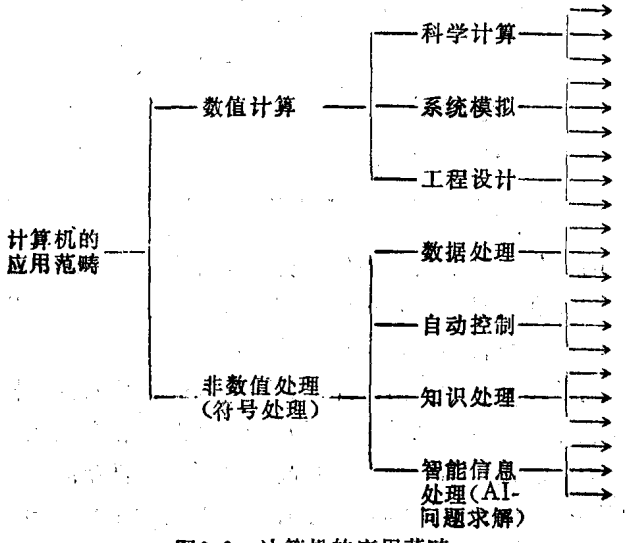

图0-2 计算机的应用范畴

研制计算机的最初目的，显然是为了使人们从大量繁琐而枯燥的计算工作中解脱出来。同时也力求最大限度地提高计算速度，以便解决一些由于实时过程的高速性而靠人工难以解

决或不可能解决的计算问题。例如，第一台电子计算机ENIAC就是用来实时地计算大炮射击的激发表(firing table)。这种面向数值计算的设计思想，产生了适应于数值计算的计算机系统结构。尽管在电子技术和半导体微电子技术飞速发展的推动下，就构成计算机的电子器件和线路而言，已经经历了四代的更新，但就计算机的基本结构和工作方式而言，却一直沿袭到今天。这种面向数值计算的结构，未必能很好地适应非数值处理的需求。关于这个问题，将在下一节中论述。

计算机应用的发展，不象计算机本身随电子器件和线路的进步而更新那样，可以比较明确地标志出从老一代到新一代的发展。事实上，美国人口调查局就是第一台商品化的第一代计算机UNIVAC I(1951年)的用户。这标志着计算机非数值处理应用——用于人口调查统计的开始。另一方面，早在1950年，图灵(Alan Turing)在他的一篇论文("Computing Machinery and Intelligence") 里就提出了机器智能问题，后来成为著名的"图灵试验"；香农(Claude Shannon)则提出了计算机下棋的MINI-MAX搜索法。五十年代后期已经出现了计算机下棋程序，这标志着计算机应用于人工智能领域的开始。但就计算机应用领域的重点转移来说，大体上可以认为计算机发展的初期，主要用于数值计算；到六十年代，特别是1960年第一个面向企事业应用的可移植高层语言COBOL(COmmon Business Oriented Language)问世以后，计算机应用的重点转向数据处理；七十年代中期，先后出现了以MYCIN为代表的一批著名的专家系统，标志着计算机的应用重点将转向知识处理；八十年代初期，日本的所谓"第五代计算机研究计划"，把智能信息处理系统的开发提到了日程上来。

但是，计算机应用的发展，不象计算机硬件的发展那样，新一代计算机的出现将完全取代老一代计算机，老一代计算机就被淘汰，而是一个不断开拓和深化的过程。计算机在数值计算和非数值处理方面的种种应用，始终是并驾齐驱地向前发展的。

计算机性能的提高，促进了计算机的应用广泛而深入地发展；而计算机应用的发展，又反过来对计算机的性能提出了更高的要求。

0-2 现代科学技术对高性能计算机的需求

0-2-1 科学/工程计算方面

现代科学技术的发展，常常要求理论科学家、实验科学家、计算机科学家及工程师合作，把理论、实验、计算机三个方面紧密结合，利用现代计算机的强大推算(computation)能力，通过计算机模拟(computer simulation)来解决许多复杂而难以用物理模拟实验在有限时间内获得满意结果的问题。图0-3是上述三方面如何配合的示意图。用计算机模拟的方法解决问题，有以下一些优点：

(1) 计算机模拟比进行具体的实验更便宜，而且能更快地获得结果；

(2) 计算机模拟所能解决问题的范围比任何特定实验设备的作用范围宽得多；

(3) 计算机模拟仅受计算机速度和存储空间的限制。而具体的实验模拟总是要受到许多实际因素的限制；

(4) 在自然界或人类社会中，有些问题根本无法通过做实验来解决。例如，天体演化，社会经济分析等。计算机模拟却可以用作研究解决这类问题的有效手段。