

普通高等院校数据科学与大数据技术专业“十三五”规划教材

高性能并行计算

——技术、算法与编程

HIGH PERFORMANCE PARALLEL COMPUTING

雷向东 雷振阳 龙军◎ 编著



```
CODESEG
Begin:
MOV AX, @data
MOV DS:AX
MOV DX, OFFSET HW
MOV AH, 09H
INT 21H
MOV AX, 4C00H
INT 21H
END Begin
MOV AX, 53h
MOV SI, DI
MOV A, 77.0000 B8790F
MOV DS, 0000 3ED8
MOV AH, 0E77.0000 5409
MOV AX, 1234H
PUSH AX
MOV AH, 09
INT 21H
POP AX
```



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

```
asm ("int %0x%0n"
    "=a" (sys)
    "0" (sys), "b" (parm) );
return sys;
```

普通高等院校数据科学与大数据技术专业“十三五”规划教材

高性能并行计算

——技术、算法与编程

HIGH PERFORMANCE PARALLEL COMPUTING

雷向东 雷振阳 龙军 ⊙ 编著



中南大学出版社
www.csupress.com.cn

长沙 (sys) (parm) return sys;

model small
stack

图书在版编目 (CIP) 数据

高性能并行计算——技术、算法与编程 / 雷向东, 雷振阳, 龙军编著. —长沙: 中南大学出版社, 2019.7

ISBN 978 - 7 - 5487 - 3584 - 7

I. ①并… II. ①雷… ②雷… ③龙… III. ①并行算法—高等学校—教材②并行程序—程序设计—高等学校—教材 IV. ①TP301.6②TP311.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 042259 号

高性能并行计算——技术、算法与编程

GAOXINGNENG BINGXING JISUAN——JISHU、SUANFA YU BIANCHENG

雷向东 雷振阳 龙 军 编著

责任编辑 韩 雪

责任印制 易建国

出版发行 中南大学出版社

社址: 长沙市麓山南路

邮编: 410083

发行科电话: 0731 - 88876770

传真: 0731 - 88710482

印 装 长沙市宏发印刷有限公司

开 本 787 × 1092 1/16 印张 28.25 字数 718 千字

版 次 2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5487 - 3584 - 7

定 价 78.00 元

图书出现印装问题, 请与经销商调换

内容简介

本书在全面介绍并行计算原理、技术和方法的基础上，着重介绍并行计算机结构、并行算法和并行编程，力图反映本学科的最新成就和发展趋势。

全书分为并行计算机体系结构、并行算法和并行编程三部分，共 15 章。并行计算机体系结构部分介绍了高性能并行计算机的概念和系统组成、静态互连网络和动态互连网络、并行计算机访存模型、Amdahl 定律、并行系统的可扩展性和基准测试程序、基于监听总线高速缓存一致性协议和基于目录的高速缓存一致性协议、消息传递系统中的交换机制、机群、多核技术和多核中的并行性以及并行计算模型。并行算法部分介绍了数组求和、排序、矩阵运算、线性方程组求解、快速傅里叶变换和图算法等并行算法。并行编程部分介绍了 MPI、POSIX、OpenMP、Java 多线程和 Windows 多线程并行程序设计思想、方法和技术。全书提供了大量应用实例，每章后均附有习题。

本书适合作为高等院校计算机科学与技术、数据科学与大数据技术、软件工程、信息安全等相关专业高年级本科生、研究生的教材，同时可供对并行计算比较熟悉，并且对并行程序设计有所了解的开发人员、广大科技工作者和研究人员参考。

普通高等院校数据科学与大数据技术专业“十三五”规划教材

编委会

主 任 桂卫华

副 主 任 邹北骥 吴湘华

执行主编 郭克华 张祖平

委 员 (按姓氏笔画排序)

龙 军 刘丽敏 余腊生 周 韵

高 琰 桂劲松 高建良 章成源

鲁鸣鸣 雷向东 廖志芳



总序

Preface

随着移动互联网的兴起,全球数据呈爆炸式增长,目前90%以上的数据是近年产生的,数据规模大约每两年翻一番,而随着人工智能下物联网生态圈的形成,数据的采集、存储及分析处理、融合共享等技术需求都能得到响应,各行各业都在体验大数据带来的革命,“大数据时代”真正来临。这是一个产生大数据的时代,更是需要大数据力量的时代。

大数据具有体量巨大、速度极快、类型众多、价值巨大的特点,对数据从产生、分析到利用提出了前所未有的新要求。高等教育只有转变观念,更新方法与手段,寻求变革与突破,才能在大数据与人工智能的信息大潮面前立于不败之地。据预测,中国近年来大数据相关人才缺口达200万人,全世界相关人才缺口更超过1000万人之多。我国教育部门为了适应社会发展需要,率先于2016年开始正式开设“数据科学与大数据技术”本科专业及“大数据技术与应用”专科专业,近几年,全国形成了申报与建设大数据相关专业的热潮。随着专业建设的深入,大家发现了一个共同的难题:没有成系列的大数据相关教材。

中南大学作为首批申报大数据专业的学校,2015年在我校计算机科学与技术专业设立大数据方向时,信息科学与工程学院领导便意识到系列教材缺失的严重问题,因此院领导规划由课程团队在教学的同时积累素材,形成面向大数据专业知识体系与能力体系、老师自己愿意用、同学觉得买得值、关联性强的系列教材。经过两年的准备,针对2017年《教育部办公厅关于推荐新工科研究与实践项目的通知》的精神,中南大学出版社组织对系列教材文稿进行相应的打磨,最终于2018年底出版“普通高等院校数据科学与大数据技术专业‘十三五’规划教材”。

该套系列教材具有如下特点:

1. 本套教材主要参照“数据科学与大数据技术”本科专业的培养方案,综合考虑专业的来源,如从计算机类专业、数学统计类专业以及经济类专业发展而来,同时适当兼顾了专科类偏向实际应用的特点。

2. 注重理论联系实际,注重能力培养。该系列教材中既有理论教材也有配套的实践教程,力图通过理论或原理教学、案例教学、课堂讨论、课程实验与实训实习等多个环节,训练学生掌握知识、运用知识分析并解决实际问题的能力,以满足学生今后就业或科研的需求,同时兼顾“全国工程教育专业认证”对学生基本能力的培养要求与复杂问题求解能力的要求。

3. 在规范教材编写体例的同时,注重写作风格的灵活性。本套系列教材中每本书的内容都由教学目的、本章小结、思考题或练习题、实验要求等组成。每本教材都配有 PPT 电子教案及相关的电子资源,如实验要求及 DEMO、配套的实验资源管理与服务平台等。本套系列教材的文本层次分明、逻辑性强、概念清晰、图文并茂、表达准确、可读性强,同时相关配套电子资源与教材的相关性强,形成了新媒体式的立体型系列教材。

4. 响应了教育部“新工科”研究与实践项目的要求。本套教材从专业导论课开始设立相关的实验环节,作为知识主线与技术主线把相关课程串接起来,力争让学生尽早具有培养自己动手能力的意识、综合利用各种技术与平台的能力。同时为了避免新技术发展太快、教材纸质文字内容容易过时的问题,在相关技术及平台的叙述与实践中,融合了网络电子资源容易更新的特点,使新技术保持时效性。

5. 本套丛书配有丰富的多媒体教学资源,将扩展知识、习题解析思路等内容做成二维码放在书中,丰富了教材内容,增强了教学互动,有利于提高学生的学习积极性与主动性。

本套丛书吸纳了数据科学与大数据技术教育工作者多年的教学与科研成果,凝聚了作者的辛勤劳动,同时也得到了中南大学等院校领导和专家的大力支持。我相信本套教材的出版,对我国数据科学与大数据技术专业本科、专科教学质量的提高将有很好的促进作用。

桂卫华

2018年11月



前言

Foreword

一、为什么要写本书

并行计算机上所做的计算又称高性能计算或超级计算,广泛应用于计算物理、计算化学、计算生物、气象预报、油藏模拟、核武器数值模拟、航天器设计、基因测序等。并行处理是实现高性能、高可用计算机系统的主要途径。

并行计算是一门实践性很强的学科,同时也具有坚实的理论基础。但以往关于并行计算的书籍往往存在两种倾向:一种是过于偏重并行计算原理,难以引起读者(特别是初学者)的兴趣;另一种基本上是并程序序设计,读者难以理解各种并行程序设计背后的理论知识和算法,从而无法对并行计算技术进行全面深入的了解和学习。

本书同时包含并行计算机结构、并行算法和并行编程三部分内容,紧扣读者需求,采用循序渐进的叙述方式,深入浅出地论述了并行计算的原理、并行算法和并程序序设计,以及并行计算的新技术和发展前沿。此外,本书还给出了大量的 MPI、POSIX 多线程、OpenMP、Java 多线程和 Windows 多线程程序源代码,并有详细的讲解,有助于加深读者对并行程序设计的理解。

二、内容特色

与同类书籍相比,本书有如下特色:

1. 例程丰富,解释翔实

本书根据编者多年从事并行计算教学、科研的经验,列举了近 200 个关于并行程序设计 MPI、POSIX 多线程、OpenMP、Java 多线程和 Windows 多线程程序,并进行了详细解释。通过对源代码的解析,不但可以加深读者对相关理论的理解,而且可以有效地提高读者的并行程序编程能力。本书所提供的并行程序的编程思想、经验技巧,也可为读者从事并行程序开发提供借鉴。

2. 原理透彻,注重应用

将理论和实践有机地结合是进行并行处理研究和应用成功的关键。本书将并行计算体系结构、并行算法和并程序序设计层层递进地进行了详细的叙述和透彻的分析,强调融并行计算机结构、并行算法和并行编程为一体,着重讨论并行算法的设计及其实现,并力图反映本学科的最新成就和发展趋势,体现并行计算机硬件和软件相结合以及并行算法和并行编程相

结合。本书真正体现了理论联系实际的理念，使读者能够体会到“学以致用”的乐趣。

3. 传承经典，突出前沿

本书详细探讨了现代并行计算的最新进展，对多核技术和多核中的并行性，以及多核处理器关键技术进行了详细论述，全面介绍并行计算的各个方面，包括体系结构、编程范例、算法与应用和标准等，涉及并行计算的新技术，便于读者了解现代并行处理领域的研究热点和最新研究动向。

4. 图文并茂，语言生动

为了更加生动地诠释知识要点，本书配备了大量新颖的图表，以便提升读者的兴趣，加深对相关理论的理解，尽可能采用与底层平台无关的体系结构并且针对抽象模型来设计。书中选择 MPI、POSIX 多线程、OpenMP、Java 多线程和 Windows 多线程作为编程模型，并在不同例子中反映了并行计算的不断变化的应用组合。

三、结构安排

本书主要介绍并行计算的相关知识，分为并行计算机体系结构、并行算法和并行程序设计三大部分，共 14 章，内容包括并行计算机体系结构、多处理器互连网络、多处理器体系结构的性能分析、共享存储器系统、消息传递系统、机群、多核构架、并行计算模型、并行算法、并行程序设计方法、MPI、POSIX、OpenMP、Java 多线程和 Windows 多线程并行程序设计。全书提供了大量应用实例，每章后均附有习题，教师根据教学进度和学时，合理选择书上习题，以进一步加深理解课堂所讲授的内容。

四、读者对象

- 对并行计算技术感兴趣的读者；
- 计算机科学与技术、数据科学与大数据技术、软件工程、信息安全等相关专业的本科生、研究生；
- 相关工程技术人员。

五、致谢

感谢我的家人对我的支持和鼓励。

限于编者的水平和经验，加之时间比较仓促，疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者
2019 年 3 月



目录

Contents

第1章 并行计算机体系结构	(1)
1.1 并行计算	(1)
1.2 计算机体系结构的弗林分类方法	(2)
1.3 SIMD 体系结构	(3)
1.4 MIMD 体系结构	(4)
1.5 并行计算机类型	(6)
1.6 并行计算机系统结构	(7)
1.7 并行计算机访存模型	(12)
1.8 本章小结	(16)
习 题	(16)
第2章 并行计算机互连网络	(18)
2.1 系统互连	(18)
2.2 互连网络的分类	(19)
2.3 动态互连网络	(21)
2.4 多级互连网络	(23)
2.5 静态互连网络	(33)
2.6 标准互连网络	(38)
2.7 本章小结	(42)
习 题	(43)
第3章 并行计算机体系结构性能	(44)
3.1 并行计算机系统性能指标	(44)
3.2 Amdahl 定律	(46)
3.3 Gustafson 定律	(48)
3.4 Sun - Ni 定律	(49)
3.5 并行体系结构的可扩展性	(49)

3.6	基准测试程序	(50)
3.7	本章小结	(52)
	习 题	(52)
第4章	共享存储器系统	(53)
4.1	共享存储器系统分类	(53)
4.2	减少存储器访问冲突方法	(55)
4.3	基于总线的对称多处理机系统	(58)
4.4	共享存储器系统高速缓存一致性	(59)
4.5	基于监听总线一致性协议	(64)
4.6	基于目录的一致性协议	(79)
4.7	基于 Token 的一致性协议	(86)
4.8	共享存储器的编程模型	(87)
4.9	本章小结	(87)
	习 题	(87)
第5章	消息传递系统	(90)
5.1	消息传递系统结构	(90)
5.2	路由器模型	(91)
5.3	交换机制	(92)
5.4	消息传递系统中路由	(96)
5.5	消息传递系统编程模型	(100)
5.6	本章小结	(100)
	习 题	(100)
第6章	机群	(101)
6.1	机群的体系结构	(101)
6.2	机群的互联结构	(103)
6.3	IBM SP 系统	(105)
6.4	本章小结	(109)
	习 题	(109)
第7章	多核构架	(110)
7.1	多核技术	(110)
7.2	多核芯片	(111)
7.3	多核中的并行性	(113)
7.4	多核处理器的 Cache 结构	(116)

7.5	多核处理器核间通信技术	(120)
7.6	多核处理器总线设计	(121)
7.7	多核处理器操作系统设计	(121)
7.8	多核处理器低功耗设计	(122)
7.9	多核处理器存储器墙	(123)
7.10	本章小结	(124)
	习 题	(124)
第 8 章	并行计算模型与并行算法设计方法	(126)
8.1	并行计算模型	(126)
8.2	PRAM 模型	(127)
8.3	APRAM 模型	(128)
8.4	BSP 模型	(129)
8.5	$\log P$ 模型	(132)
8.6	Brent 定理	(133)
8.7	并行算法设计方法	(133)
8.8	本章小结	(134)
	习 题	(135)
第 9 章	并行算法	(136)
9.1	并行算法设计	(136)
9.2	数组求和	(138)
9.3	排序	(139)
9.4	矩阵运算	(146)
9.5	线性方程组求解	(153)
9.6	快速傅里叶变换	(161)
9.7	图算法	(166)
9.8	本章小结	(176)
	习 题	(176)
第 10 章	并行程序设计方法	(178)
10.1	并行程序设计基本概念	(178)
10.2	并行度	(179)
10.3	交互/通信	(181)
10.4	并行编程风范	(184)
10.5	并行编程模型与并行语言	(185)
10.6	共享存储器编程	(188)

10.7	消息传递编程	(190)
10.8	数据并行编程	(191)
10.9	本章小结	(192)
	习 题	(192)
第 11 章	MPI 并行程序设计	(193)
11.1	MPI 基本编程	(193)
11.2	点对点通信	(195)
11.3	MPI 预定义数据类型	(198)
11.4	通信模式	(199)
11.5	集合通信	(201)
11.6	对等模式和主从模式	(215)
11.7	非阻塞通信	(216)
11.8	重复非阻塞通信	(222)
11.9	进程组的管理	(225)
11.10	通信组的管理	(227)
11.11	虚拟进程拓扑	(228)
11.12	本章小结	(232)
	习 题	(232)
第 12 章	POSIX 线程并行程序设计	(235)
12.1	进程、线程和 Pthreads	(235)
12.2	创建线程	(237)
12.3	线程同步	(240)
12.4	生产者-消费者问题	(268)
12.5	本章小结	(273)
	习 题	(274)
第 13 章	OpenMP 并行程序设计	(276)
13.1	OpenMP 编程基础	(276)
13.2	并行域	(282)
13.3	数据处理环境	(295)
13.4	线程同步	(307)
13.5	任务调度	(318)
13.6	本章小结	(323)
	习 题	(324)

第 14 章 Java 并行程序设计	(327)
14.1 线程	(327)
14.2 线程间通信	(338)
14.3 Java 线程同步	(343)
14.4 fork/join	(357)
14.5 本章小结	(361)
习 题	(361)
第 15 章 Windows 多线程并行程序设计	(364)
15.1 创建线程	(364)
15.2 Windows 线程同步	(371)
15.3 管道机制	(406)
15.4 变量的原子更新	(408)
15.5 线程优先级	(409)
15.6 本章小结	(411)
习 题	(411)
附录 A MPI 函数调用	(414)
附录 B OpenMP 指令和库函数	(421)
附录 C POSIX 线程库函数	(425)
附录 D Java 多线程常用方法	(428)
附录 E Windows 多线程常用方法	(431)
参考文献	(436)

第1章 并行计算机体系结构

在快速解决计算量大、数据密集型问题时，人们越来越认识到并行处理是唯一节省成本的方法。价格低廉的并行计算机(如商用桌面多处理机和工作站机群)的出现，使得这种并行方法的适用范围越来越广。现在已经为可移植的并行程序设计制定了专门的软件标准，为其发展打好了基础。

事务处理、信息检索、数据挖掘和分析以及多媒体服务等数据密集型应用为当代的并行平台提供了新的挑战。计算生物学和纳米技术等新兴领域对并行计算的算法和系统开发提供了前瞻性的启示，而体系结构、编程模型和应用中的变化对如何使用户以网格服务形式得到并行平台也提供了一些启发。

1.1 并行计算

并行计算机上所作的计算称为并行计算，又称高性能计算或超级计算。并行计算的目的是提高计算速度，通过扩大问题求解规模，解决大型而复杂的计算问题。并行可分为时间上的并行和空间上的并行，时间上的并行就是指流水线技术，而空间上的并行则是指用多个处理器并发地执行计算，即通过网络将两个以上的处理机连接起来，同时计算同一个任务的不同部分。并行计算主要用于科学与工程计算、气象预报、油藏模拟、核武器数值模拟、航天器设计、基因测序等。

并行计算机就是由多个处理单元组成的计算机系统，这些处理单元相互通信和协作，能快速高效求解大型的复杂的问题。

在工作站机群(cluster of workstation, COW)环境下进行的计算称为网络计算，其主要特点是网络计算结合了客户机/服务器结构的健壮性、互联网面向全球的简易通用的数据访问方式和分布式对象的灵活性，提供了统一的跨平台开发环境，基于开放的和事实上的标准，把应用和数据的复杂性从桌面转移到智能化的网络和基于网络的服务器，为用户提供了对应用和信息的通用、快速的访问方式。

分布式计算是一门计算机科学，它研究如何把一个需要非常巨大的计算能力才能解决的问题分成许多小的部分，然后把这些部分分配给许多计算机进行处理，最后把这些计算结果综合起来得到最终的结果。

集群计算是使用多个计算机(如典型的个人计算机或UNIX工作站)、多个存储设备冗余互联，组成一个对用户来说单一的高可用性的系统。

网络计算与分布式计算和集群计算都属于计算密集型、数据密集型和网络密集型应用。

从 20 世纪 70 年代产生第一代高性能计算机开始,经过几十年的发展,高性能计算机经历了并行向量机、大规模并行处理机(massively parallel processor, MPP)、集群等几个发展阶段。1974 年, CDC 公司推出了 CDC STAR-100, 首先使用向量处理器。1982 年, Cray 公司生产的 Cray X-MP 是世界上第一台并行向量计算机。在 20 世纪 70 年代和 80 年代,并行向量计算处理充分利用了流水线和多功能部件,极大地提高了计算机运算速度。

但由于时钟周期已接近物理极限,进一步提高并行向量计算机的速度非常困难。在这样的背景下,一个全新的概念被提出来了,那就是大规模并行处理机 MPP。1992 年, Intel 公司推出 Paragon 超级计算机,它成为历史上第一台突破万亿次浮点计算屏障的超级计算机。紧接着, IBM 公司的 SP2、日立公司的 SR2201 和 SGI 公司的 Origin2000 超级计算机先后面世,超级计算机也开始走上了真正的商用化道路。MPP 逐渐成为高性能计算机的主流。

20 世纪 90 代中期,随着局域网技术的快速发展,在带宽和延迟上与传统高性能计算机所采用的专有网络的差距也日渐缩小,集群系统(cluster)出现。集群系统是使用高速通信网络将多台 PC 机、工作站或对称多处理机(symmetrical multi processing, SMP)连接在一起,构成一个统一的整体系统。与 SMP 和 MPP 相比,集群具有更高的可扩展性、可用性和易维护性,而且价格低、性价比高。但是,在最高端并行计算机中大多数还是采用 MPP 架构。

1.2 计算机体系结构的弗林分类方法

最流行的计算机体系结构分类方法是由弗林(M. J. Flynn)在 1976 年定义的。弗林的分类方法基于信息流的概念,处理器中存在两种类型的信息流:指令流和数据流。指令流被定义为由处理部件所完成的指令序列。数据流被定义为在存储器和处理部件间的数据通信。按照弗林分类,指令流或数据流可以是单个的也可以是多个的。由此,计算机体系结构可分成如下四种不同的类型:

①单指令单数据流(single instruction stream single data stream, SISD)。

②单指令多数据流(single instruction stream multiple data stream, SIMD)。

③多指令单数据流(multiple instruction stream single data stream, MISD)。

④多指令多数据流(multiple instruction stream multiple data stream, MIMD)。

传统的单处理器冯·诺依曼结构被归为 SISD 系统。并行计算机可以归为 SIMD 或 MIMD 系统。当并行计算机中只有一个控制部件且所有处理器以同步方式执行相同指令时,就被归类为 SIMD。在 MIMD 机器中,每个处理器有自己的控制部件且能在不同的数据上执行不同的指令。在 MISD 类型中,相同的数据流流过执行不同指令的一个线性处理器阵列。实际中没有可靠的 MISD 机。

并行计算就是在并行计算机或分布式计算机等高性能计算系统上所做的超级计算。计算极大地增强了人们从事科学研究的能力,大大地加速了把科技转化为生产力的过程,深刻地改变着人类认识世界和改造世界的方法和途径。计算科学的理论和方法,作为新的研究手段和新的设计与创造技术的理论基础,正推动着当代科学与技术向纵深发展。并行计算的系统结构分为两大类:单指令多数据流和多指令多数据流。其中,多指令多数据流包括并行向量处理机(PVP)、对称多处理机(SMP)、大规模并行处理机(MPP)、工作站机群(COW)和分布

式共享存储多处理机(DSM)。

1.3 SIMD 体系结构

并行计算的 SIMD 模型由两部分组成：一个具有常见的冯·诺依曼风格的前端计算机和一个处理器阵列。处理器阵列是一组相同的同步处理单元，它们能够在不同的数据上同时完成相同的操作。阵列中每个处理器有一个小容量的局部存储器，分散的数据驻留在其上，它们将被并行处理。处理器阵列连接到前端机的存储器总线，这样前端机就能随机地访问处理器阵列中每个处理器的局部存储器，就好像这些局部存储器是它的另一个存储器一样。因此前端机能发出特定命令，以使部分存储器同时操作或使数据在存储器中移动。可以用传统的顺序编程语言来开发程序，并在前端机上执行。前端机通常按串行方式执行应用程序，但前端机可向处理器阵列发出命令让它并行 SIMD 操作。这种串行和数据并行编程之间的类似性是数据并行性的优点之一。独立同步采用处理器间的锁步(lock step)来同步实现，处理器要么什么都不做，要么同时做相同的操作。在 SIMD 体系结构中，借助在巨大数据集上同时进行操作来开发并行性。这一模式在求解需要大规模更新许多数据的问题时最为有用。在许多规则的数值计算中，这种模式特别有效。

SIMD 机器有两种结构：分布式存储器 SIMD 结构和共享存储器 SIMD 结构，如图 1.1 和图 1.2 所示。在分布式存储器 SIMD 结构中，每个处理器都有自己的局部存储器。处理器可以通过互连网络相互进行通信。如果互连网络在一对给定的处理器间没有提供直接的连接，则这对处理器可通过一个中间处理器进行数据交换。采用分布式存储器 SIMD 结构的有 ILLIAC IV。ILLIAC IV 是采用 8×8 个处理单元在统一控制下进行处理的阵列机。ILLIAC IV 中的互连网络允许每个处理器在 8×8 个处理单元中直接与 4 个相邻的处理器通信。在共享存储器 SIMD 结构中，处理器与存储器模块间的通信是通过互连网络进行的。两个处理器可通过存储器模块，也可以通过中间处理器进行相互通信。采用共享存储器 SIMD 结构的机器有 BSP(burroughs scientific processor)。

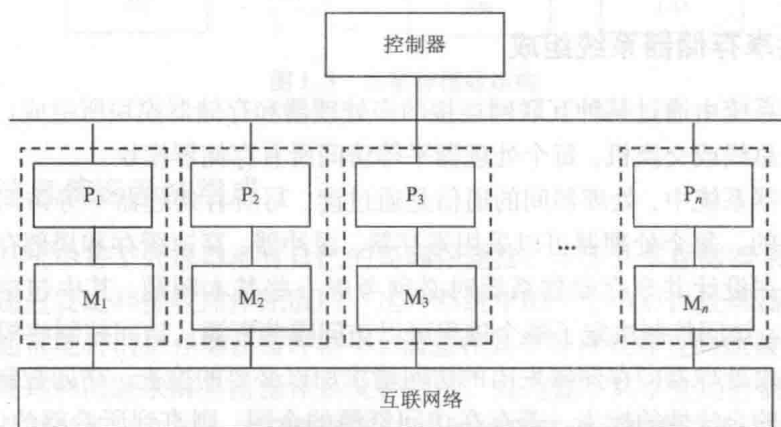


图 1.1 分布式存储器 SIMD 结构