

计算机系统结构

与

应用方案设计

毕庶本 编著
刘崇尧 审阅



山东科学技术出版社

3
2/1

TP303
BSB/1

计算机系统结构 与应用方案设计

毕庶本 编著
刘崇尧 审阅

山东科学技术出版社

0028134

鲁新登字 05 号

JS19/33

计算机系统结构与应用方案设计

毕庶本 编著

刘崇尧 审阅

*

山东科学技术出版社出版

(济南市玉函路 邮政编码250002)

山东省新华书店发行

山东新华印刷厂潍坊厂印刷

*

787×1092 毫米 16 开本 14.5 印张 320 千字

1994 年 7 月第 1 版 1994 年 7 月第 1 次印刷

印数: 1-2500

ISBN 7-5331-1410-8

TP·18 定价 13.60 元

前 言

作者多年从事计算机系统结构的教学和科研工作，本书是在作者本人实践成果的基础上，参阅吸取了国内外大量相关资料编著而成。书中深入浅出地阐述了计算机系统结构与应用方案设计的基本概念、基本原理、基本结构、基本分析方法及其设计技术，并系统介绍了近年来出现的一些较成熟的新概念、新技术和设计方案，力图充分反映近十几年来在计算机系统结构与应用方案设计上的重要进展，以及今后的发展趋向。

全书共包括 20 章，划归为下列六大部分：计算机系统结构设计概论、计算机系统软件与硬件界面的确定、计算机存储体系和 I/O 系统结构设计、计算机控制结构与处理机连接模式、兼容性宏观结构与 RASIS 特性、应用问题解决方案。每一部分后面都附有一定数量的习题。

本书内容丰富，取材新颖，层次清晰，理论概念清楚，设计方案具体，既便于教师因材施教，也便于读者自学。本书可作为计算机应用专业和软件专业本科生及有关专业研究生的教材，也适合广大计算机科技人员阅读和参考。

编审者

1994 年 3 月

目 录

第一部分 计算机系统结构设计概论

第1章 计算机系统分类	(1)
§1 按计算机采用的基本器件分类	(1)
§2 按计算机系统成本分类	(1)
§3 按计算机系统信息处理特征分类	(1)
§4 其它分类方法	(2)
§5 工作站产品的分类	(3)
第2章 计算机系统结构的含义及其演变	(5)
§1 计算机系统结构的含义	(5)
§2 计算机系统结构的演变过程	(5)
第3章 计算机系统的垂直多层次结构	(8)
§1 垂直多层次机器结构	(8)
§2 计算机系统的透明性.....	(12)
§3 计算机系统的设计方法.....	(13)
§4 体系结构的描述.....	(17)
习题一	(20)

第二部分 计算机系统软件与硬件界面的确定

第4章 计算机系统中数据描述的确定	(22)
§1 数据表示的含义及内容.....	(22)
§2 计算机系统语义差距与软硬件取舍.....	(23)
§3 自定义数据表示.....	(26)
§4 向量数据表示和向量指令格式描述.....	(28)
§5 现代微机系统中的数据表示举例.....	(32)
第5章 计算机系统指令字的优化设计	(37)
§1 Huffman 码制的编码方法	(37)
§2 Huffman 压缩	(39)
§3 指令集中操作码的优化表示.....	(41)
§4 指令格式的优化设计.....	(45)
§5 指令使用频度的统计.....	(47)
§6 RISC 指令设计思想与技术	(50)

第 6 章 系统设计对数据结构的支持	(54)
§ 1 指令类型设置与数据表示的对应	(54)
§ 2 字符串数据表示支持指令的设计	(55)
§ 3 描述符对多维数据结构的支持	(56)
习题二	(58)

第三部分 计算机存储体系和 I/O 系统结构设计

第 7 章 存储体系结构设计	(60)
§ 1 存储器阶层结构概念	(60)
§ 2 存储体系的基本要求和性能评价	(62)
§ 3 现代存储体系结构举例	(65)
第 8 章 并行主存系统的设计技术	(72)
§ 1 并行访问多字方式	(72)
§ 2 多模体并行交叉存取方式	(74)
§ 3 模体数和转移概率与吞吐量的关系	(77)
第 9 章 相联存储器的设计技术	(80)
§ 1 相联存储基本概念	(80)
§ 2 相联存储器的硬件结构设计	(82)
§ 3 相联存储器的逻辑功能设计	(84)
§ 4 相联存储器的应用	(86)
第 10 章 虚拟存储器的结构设计	(89)
§ 1 虚拟存储器的基本结构设计	(89)
§ 2 虚拟存储器的实现方式	(92)
第 11 章 地址的映像与变换	(97)
§ 1 地址映像与变换的基本概念	(97)
§ 2 全相联映像及其地址变换	(98)
§ 3 直接映像及其地址变换	(101)
§ 4 组相联映像及其地址变换	(103)
§ 5 段相联映像	(105)
第 12 章 输入输出系统和总线结构设计	(107)
§ 1 总线和总线标准的设计	(107)
§ 2 Multi Bus—Ⅱ 和 VME System 总线结构	(115)
§ 3 MBus 多处理机总线	(119)
§ 4 Future Bus+ 标准	(121)
习题三	(123)

第四部分 计算机控制结构与处理机连接模式

第 13 章 流水线和超流水线机系统结构设计	(126)
§ 1 计算机结构设计中并行性概念的引入	(126)
§ 2 流水线处理方式	(130)
§ 3 新一代流水线处理机的流水线结构	(136)
第 14 章 多处理机系统结构设计	(143)
§ 1 多处理机系统的结构模式	(143)
§ 2 多微处理机 Cache 总线设计	(148)
§ 3 紧耦合多处理机的 Cache 一致性	(151)
第 15 章 并行计算机系统结构设计	(157)
§ 1 并行机体系结构定义及其分类	(157)
§ 2 SIMD 类并行处理机的结构	(159)
§ 3 并行处理机和多处理机互连网络	(162)
§ 4 并行计算机体系结构的新进展	(169)
习题四	(171)

第五部分 兼容性宏观结构与 RASIS 特性

第 16 章 计算机系统的兼容性结构	(173)
§ 1 兼容性结构设计	(173)
§ 2 模拟与仿真——程序移植方法	(177)
第 17 章 RASIS 技术	(181)
§ 1 容错计算与 RASIS 技术概念	(181)
§ 2 可靠性模型与分析	(184)
§ 3 纠错码	(188)
第 18 章 计算机系统性能评价技术与方法	(193)
§ 1 计算机系统性能评价技术	(193)
§ 2 计算机系统性能评价方法	(196)
习题五	(202)

第六部分 应用问题解决方案

第 19 章 C/S 方式解决方案与图形图像系统	(206)
§ 1 OA 系统的 C/S 方式的解决方案	(206)
§ 2 C/S 方式的图形图像系统方案	(209)
第 20 章 制造业计算机集成制造系统及其方案	(216)

§ 1 计算机集成制造系统的组成	(216)
§ 2 面向集成平台的 CIMS 体系结构方案	(218)
§ 3 CIM 技术的发展前景	(219)
习题六	(222)
主要参考文献	(223)

第一部分 计算机系统结构设计概论

第 1 章 计算机系统分类

迄今为止，已问世的计算机种类繁多。就如同在万花丛中那样，如果不从植物分类学观点研究它们，便很难掌握它们的属性。

计算机系统的分类方法有多种。本章中，将对这些分类方法做一概括的介绍。

§ 1 按计算机采用的基本器件分类

根据计算机采用的基本器件，将计算机划分为第一代、第二代……这种分类方法，也反映了计算机发展的时间顺序，这是最普遍采用的分类方法。

众所周知，器件的发展经历了真空管（电子管）、晶体管、集成电路和大规模集成电路这四代。目前，已步入了超大规模和甚大规模集成电路时代。电子计算机系统的以“代”分类，就是与基本器件的“代”相对应的。

§ 2 按计算机系统成本分类

通常，人们按计算机系统成本的高低，将某一时期的计算机划分成为巨型计算机或超级计算机（Super Computers）、大型计算机（Main frame）、中型计算机（Mid range）、小型计算机（Mini Computer）和微型计算机等。随着技术突飞猛进的发展，各种类型计算机的性能不断地提高，成本不断下降。

§ 3 按计算机系统信息处理特征分类

根据计算机中信息流的特征来对计算机系统进行分类，是反映系统组织特点的方法，也是更深入地剖析计算机系统属性的方法。M. J. Flynn 经过多年研究，按照计算机系统中指令流和数据流之间的相互关系，他提出将系统划分为下列四类：SISD、SIMD、MIMD 和 MISD 系统。

一、SISD 系统

SISD（单指令流单数据流）系统如图 1-1 所示，它是一种基本的单处理机系统，例如 IBM/370 系列单处理机系统。

二、SIMD 系统

The diagram illustrates the interaction between three main components of a computer system: the storage unit (存储器), the control unit (控制器), and the processing unit (处理部件). The storage unit is represented by a large rectangle on the left. The control unit and processing unit are represented by smaller rectangles on the right, stacked vertically. A horizontal double-headed arrow labeled '指令流' (Instruction Flow) connects the storage unit to the control unit. Another horizontal double-headed arrow labeled '数据流' (Data Flow) connects the storage unit to the processing unit.

```

graph LR
    Memory[存储器] -- 指令流 --> Controller[控制器]
    Memory -- 数据流 --> PU1[处理部件 1]
    Memory -- 数据流 --> PU2[处理部件 2]
    Memory -- 数据流 --> PUn[处理部件 n]
    PU1 -- 数据流 --> Controller
    PU2 -- 数据流 --> Controller
    PUn -- 数据流 --> Controller
    Controller -- 公共控制信号 --> PU1
    Controller -- 公共控制信号 --> PU2
    Controller -- 公共控制信号 --> PUn
  
```

三、MIMD 系统

四、MISD 系统

但是，从严格的意义上看，并不存在 MISD 这一类系统。

§ 4 其它分类方法

一、按主要部件的排列与互连方式分类

根据组成计算机系统的主要部件的排列与互连方式的不同,可将计算机系统分类为:

1. 单机系统
2. 多机系统
3. 多处理机系统
4. 流水线系统
5. 阵列处理机系统

6. 计算机网络

二、基于并行度特性分类

基于并行度特性来分类，可划分为：

1. 通用网络计算机系统

- (1) 具有集中的公共控制的通用网络；
- (2) 具有相同的处理机构成，但指令执行的动作是独立的通用网络。

2. 具有全局性并行度的专用网络

- (1) 模式处理机或图像处理机；
- (2) 相联处理机。

3. 具有局部并行度的非全局性、半独立的网络

这种系统包括不属于上述两类的所有其它机器。

这种基于并行度特性分类方法的目的，是要区分多处理机和高度并行的系统结构。

三、从单处理机描述推导出一般机器描述的分类法

这里，我们举例阐明此种分类方法。例如：

1. 机器 I

一个单处理机。

2. 机器 II

一个位片 (bit-slice) 相联处理机。它是在机器 I 中加上位片处理功能和存取功能而构成的，例如 STARAN 机就属此类。

3. 机器 III

一个正交计算机。它是在机器 II 中加上并行的字处理功能和存取功能而构成的，如 OMEN 机。

4. 机器 IV

通过重复配置处理部件，由机器 I 推导得出的一种机器，如 PEPE 机。

5. 机器 V

由机器 IV 的各处理机间加上互连接而得到的一种机器，如 ILLIAC-IV 机。

6. 机器 VI

在机器 I 的各个存储单元中，加上处理逻辑而得到的一种机器，如 Kantz 的逻辑做入存储器计算机。

§ 5 工作站产品的分类

在 70 年代初期，美国 Xerox 公司为研究人员在研究开发工作上的需要，而制造了一种专用计算机。这种专用计算机就是所谓的“工作站”(Work station)。

现今世界市场上的工作站产品，按其应用的性质，大致可划分为工程工作站（或称技术工作站）和事务工作站两大类。工程工作站（EWS: Engineering Work-Station）面向工程技术人员；事务工作站（BWS: Business Work Station）面向非工程专业人员。这两类工作站，为各自的服务对象提供友好、高效的工作环境。

在某些场合下，有时也按工作站本身所采用的某种特定技术而对工作站产品进行分类，例如，RISC 工作站、CISC（传统指令集计算机）工作站。也有按工作站所使用的操作系统来分类的，如 Unix 工作站，非 Unix 工作站。此外，有时也按工作站产品的“可移动性程度”来分类的，如台式工作站、便携式工作站、膝上型工作站、笔记本型工作站。总之，具体的分类方法很多，不胜枚举。

实际上，如果按工作站系统的市场购买价格的高低进行分类，工作站的类别与通用计算机系统的类别就自然而然地存在着——对应的内在联系。这种对应关系如表 1-1 中所示。由表 1-1 可以推知：工作站产品与其相对应档次的通用计算机，两者在应用范围上是彼此“交融”的；但前者强调某方面的专用性，而后者则强调通用性，二者在市场上的相互渗透与竞争，要受“上帝”（用户）的支配。

表 1-1 工作站与通用计算机类别的对应关系

档 次	工 作 站 类 别	通用计算机类别
高档系统	巨型工作站（超级工作站）	巨型计算机（超级计算机）
	大型工作站	大型计算机
中档系统	超级小型工作站	超级小型计算机
	小型工作站	小型计算机
	超级微型工作站	超级微型计算机
低档系统	微型工作站	微型计算机
	个人微型工作站	个人微型计算机
	膝上型工作站	膝上型 PC 机
	笔记本型工作站	笔记本型 PC 机

第2章 计算机系统结构的含义及其演变

§1 计算机系统结构的含义

体系结构是英文 Architecture 一词翻译过来的。这个词本来用在建筑方面，它被译为“设计术、建筑学、建筑、建筑样式、构思、结构”等。

1964 年，IBM/360 系列计算机的总体设计工程师 G. M. Amdahl, G. A. Blaauw, F. P. Brooks 等人，正式提出了“Computer Architecture”一词，即“计算机系统结构”或“计算机体系结构”。他们作出了下述定义：计算机系统结构是从程序员角度所看的系统的属性。也就是说，是概念上的结构和功能上的行为，它不同于数据流程和控制的组织，不同于逻辑设计以及物理实现方法。

对于 G. M. Amdahl 等人关于 Computer Architecture 的定义，我们可以从两个不同的角度来理解：

1. 从计算机系统设计者的角度来看

从计算机系统设计者的角度看，计算机系统结构是指在系统一级把功能逻辑部件（例如运算器、存储器、各种各样的外部设备等等），通过技术手段组成一个完整的计算机系统。这就说，系统结构是计算机的基本设计思想和由此而产生的逻辑上的构造，至于使用何种逻辑元件以及工程上如何加以实现，则不加过问。

2. 从程序设计者的角度来看

从程序设计者的角度看，计算机系统结构是指对系统的功能描述，如指令集系统、存储器的编址方式、I/O 控制方式、程序中中断的能力等，或者是指概念性的结构，而不同于数据流程的组织、控制和实际的执行情况。

§2 计算机系统结构的演变过程

计算机系统结构（即 Computer Architecture）一词，从第三代计算机开始使用。当然，第一代和第二代计算机中也是有“系统结构”的。但是在第三代计算机系统中，特别重视系统结构。在生产制造第四代计算机系统和探讨新一代计算机——智能计算机的今天，人们不但特别重视计算机的系统结构，而且认为计算机的特征，主要是由其系统结构决定的。

电子计算机自 1946 年问世以来，至今大致经历了四个发展阶段，即“四代”。计算机系统结构也随着换代而不断地改变着。在各个发展阶段中，系统结构具有着不同的特点。

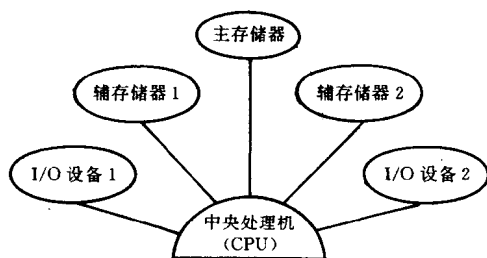


图 2—1 第一代计算机系统结构简图

一、第一阶段

电子数字计算机的第一发展阶段，大致从1946至1956年，它所使用的元件为真空电子管，基本的逻辑部件都是由真空电子管组成。如图2—1所示，它采用的是所谓的“针荷包”式的系统结构，即它以中央处理机（CPU）为中心来进行组织的，系统中各种部件的信息流动都必须经过中央处理机。各部件串行操作，当

中央处理机工作时，外部设备不能进行操作；外部设备进行操作时，中央处理机则处于等待状态。人与机器的关系非常直接，使用者必须充分了解机器语言之后，才能够使用机器。显然，这样的系统结构使其系统资源的利用效率非常低。

二、第二阶段

电子数字计算机的第二发展阶段，大致上从1957年至1964年。逻辑元件由晶体管代替了真空电子管，应用范围有了较大的扩展，其系统结构也显著地起了变化，出现了以存储器为树根的所谓的“树型”系统结构。如图2—2所示，它以存储器为中心，并且引进了对外部设备实施控制的控制部件——通道。通道的引进，就使中央处理机摆脱了对较慢速外部设备的直接控制，而集中精力于执行运算处理操作。

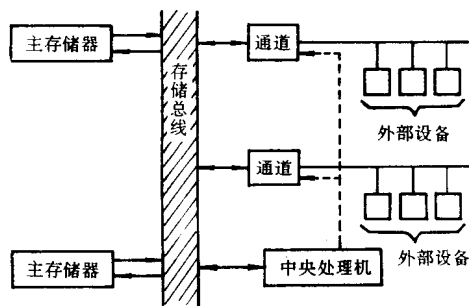


图 2—2 第二代计算机系统结构简图

这样以来，中央处理机可以同外部设备进行并行操作，大大地提高了对系统资源的利用效率。由于通道技术的使用，又提出了程序中断功能，从而可以实现多道程序设计技术。同时，还产生了对系统资源进行管理的小型操作系统，改善了人一机之间的关系。

三、第三阶段

电子数字计算机的第三发展阶段，发展成为人们所谓的集成电路计算机。它使用集成电路之后，运算速度和功能都得到了改善，体积变小，功率消耗降低。在这一阶段中，系统结构仍然以存储器为中心来进行组织，它与第二发展阶段（第二代计算机）的不同之处，是出现了远程终端设备；它通过通信线路与计算机联接起来，使得远离计算机的若干用户可以通过终端设备来使用计算机。这样，就改变了人一机关系。另一方面，出现了管理全部资源（包括程序、外部设备、存储器等等）的大型操作系统。在图2—3中，给出了第三代

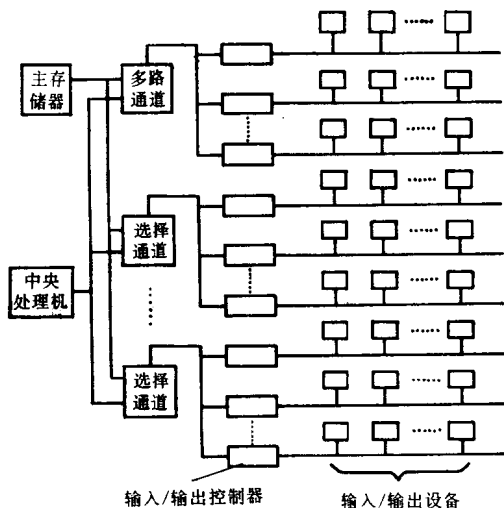


图 2—3 第三代计算机系统结构简图

计算机系统结构的简图。

第三代计算机的典型代表，是美国 IBM 公司研制的 IBM/360 系列机和 IBM/370 系列机。其中，前者是于 60 年代中期开始推向世界市场的产品，而后者是于 70 年代初开始推向世界市场的产品。这两个系统是相互兼容的，而 IBM/370 是 IBM/360 的换代产品，它们有着相同的概念性结构（图 2—4）。

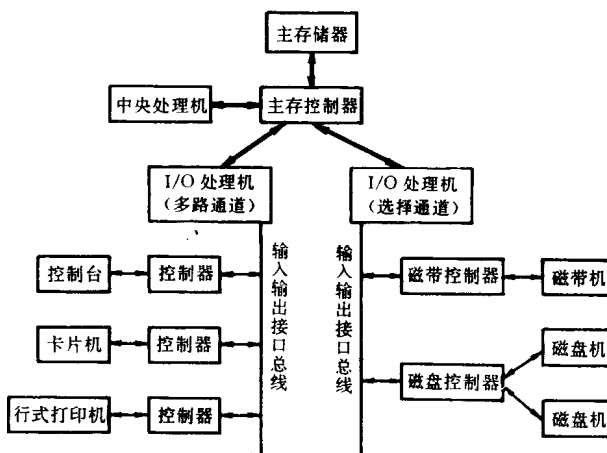


图 2—4 IBM/360 和 370 系列机的概念性结构

四、第四阶段

目前，电子数字计算机正处在第四发展阶段。它所使用的逻辑元件为大规模或超大规模集成电路（LSIC、VLSIC 或 ULSIC），其系统结构有了较显著地改变。它不再是那种中央处理机—存储器—通道式的体系结构，而出现了外围处理机。它除了完成对外部设备的操作控制外，同时也分担运算处理工作，让中央处理机有更多时间去处理运算量大的任务。这种计算机的系统结构，称为分布式计算机系统结构。图 2—5 中，给出了它的简化框图。分布式系统结构适于进行分布式处理。

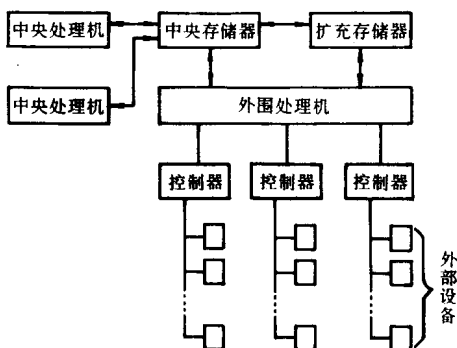


图 2—5 第四代计算机系统结构简图

理。

第 3 章 计算机系统的垂直多层次结构

§ 1 垂直多层次机器结构

一、垂直多层次机概念

基于 Von Neumann 型结构的计算机系统,是采用众所周知的“存储程序控制”方式。因此,在程序员看来,计算机是他所使用的一种特殊的“工具”。这种工具具有着存储(即记忆)和计算处理能力。因而,我们可以把机器(Machine)定义为:能够存储、执行程序算法和数据结构的集合体。这种集合体可以采用字母 M 表示之。

在机器 M 上存储和执行的程序,是采用某种特定语言 L (Language) 编写的。程序员们可以使用各种不同的语言 L 与机器 M 对话。实际上, M 与 L 之间应当有着一一对应的关系:

$$\begin{aligned} M_1 &\sim L_1, \\ M_2 &\sim L_2, \\ &\vdots \\ &\vdots \\ M_n &\sim L_n. \end{aligned}$$

这种一一对应的关系,如果采用图 3-1 所示的结构模型表达,便形成了所谓的计算机系统的垂直多层次结构。显然,这种垂直多层次结构是按照程序员与计算机系统对话中所采用的语言结构来划分的。

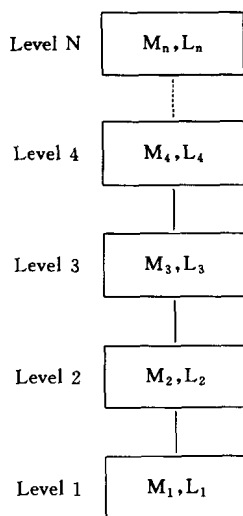


图 3-1 垂直多层次机概念结构

二、现代计算机系统的多级层次结构

如上所述,计算机语言 L 可以分成一系列的层次或级 (Level)。最低层次语言的功能最简单,最高层次语言的功能最强。对于使用某一层语言编写程序的程序员而言,他一般是不过问其程序在机器中是如何执行的,只要他的程序正确,他终能够获得预期的运算或处理结果。这样,对于这层次语言的程序员来说,他婉如有了一种新的机器——这层次的语言就是这种机器的“机器语言”,该机器能够执行采用该层次语言所编写的全部程序。显然,这就是计算机系统可以按语言 L 的功能划分成上述的(见图 3-1)多级层次结构的依据。

在计算机系统的垂直多级层次结构中,每一层以一种不同的语言为特征。尽管在各层内部还可以再细分成子层,又可能构成局部的层次结构,但只要它们是属于同一种语言描述的,它们就构成单独的层和级。这样,就可以把现代计算机系统画成图 3-2 所示的层次结构。在该图中,我们称由软件实现的机器为虚拟机器 (Virtual Machine),籍以区别由硬件或固件实现的实际机器。

下面,我们将仔细地分析一下图 3-2 所示的现代计算机系统的多级层次结构。

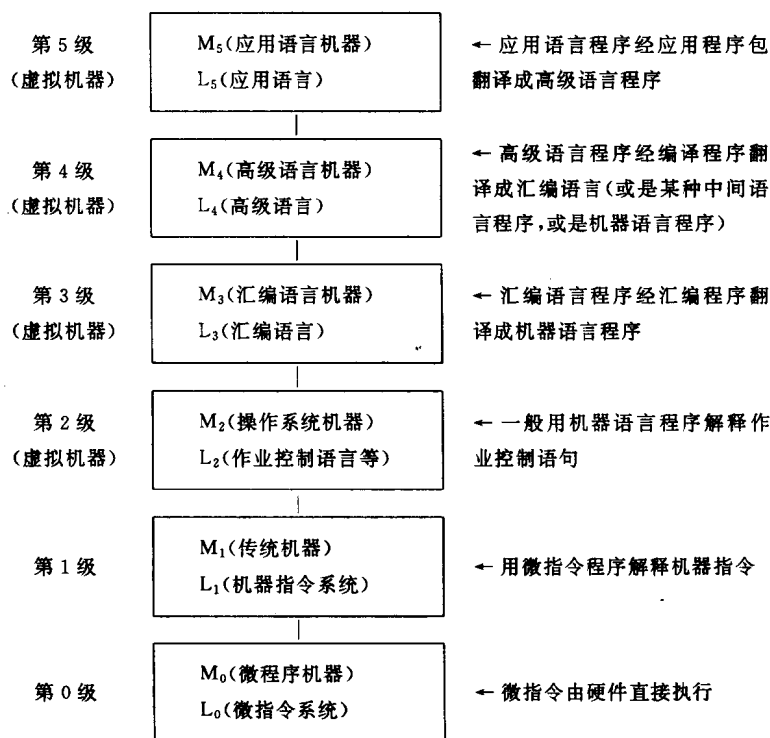


图 3-2 现代计算机系统的多级层次结构

第 0 级是微程序机器级 (M_0, L_0)。这级的机器语言 L_0 是微指令系统,程序员用微指令编写的微程序一般是由硬件解释实现的。这里需要指出两点应注意的问题。其一,在某些计算机制造厂商(如 CRAy 公司)开发生产的大型计算机系统中,并没有设置微程序机器级;在这些计算机系统中,是由硬件直接实现传统机器 (M_1, L_1) 的指令系统,而不必由任何解释程序 (Interpreter) 进行干预。其二,多层结构还可以从微程序机器级向