

高等学校计算机专业规划教材

# 计算机组成 与系统结构

胡越明 编著



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等学校计算机专业规划教材

# 计算机组成与系统结构

胡越明 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书主要介绍计算机组成和计算机系统结构方面的内容,分析了计算机各组成部分的工作原理和整体设计原理。计算机中数据的表示和数据的这算过程;介绍了存储系统、指令系统和简单的汇编程序设计、总线和输入输出系统、并行计算系统。作为计算机专业大学本科的核心课程教材,本书的编写参考了新近公布的美国 2001 计算机教程。书中收录了该课程领域中的一些新的内容,并配有大量例题和习题,可作为大学本科和专科有关专业的教材和教学参考书,也可作为工程技术人员和报考研究生的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机组成与系统结构/胡越明编著. —北京:电子工业出版社,2002.6

高等学校计算机专业规划教材

ISBN 7-5053-7704-3

I. 计… II. 胡… III. 计算机体系结构—高等学校—教材 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 038439 号

责任编辑:陈晓莉

特约编辑:李双庆

印 刷:北京牛山世兴印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:24.375 字数:621 千字

版 次:2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:32.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。  
联系电话:(010)68279077

# 《高等学校计算机专业规划教材》

## 编委会名单

主任委员	陈火旺			
副主任委员	施伯乐	钱德沛	文宏武	
委员	张吉锋	侯文永	钱乐秋	黄国兴
	孙志挥	王晓东	许满武	王宇颖
	吴朝晖	朱庆生	宁 洪	黄迪明

## 出版说明

为了适应我国 21 世纪计算机各类人才的需要,根据计算机学科技术发展的总趋势,结合我国高等学校教育工作的现状,立足培养的学生能跟上国际计算机学科技术发展水平,原“全国高校计算机专业教学指导委员会”、“中国计算机学会教育委员会”的大部分专家、教授于 2001 年 4 月在上海召开研讨会,参照 IEEE 和 ACM 计算机教程 2001 大纲组织编写与其配套的 22 种教材,现推荐给国内的院校,作为教学之用。

为了使这套教材体现现代计算机教学的特点,编出特色,来自上海交通大学、复旦大学、国防科技大学、哈尔滨工业大学、华东师范大学、东南大学、华东理工大学、上海大学、福州大学、重庆大学、东华大学等十几所大学的专家、教授成立了以陈火旺院士为主任委员的编写委员会,并多次集中开会,深入讨论了结合我国高等学校计算机本科教育的实际而推出的“93 教程”的教学情况,以及由全国高校计算机专业教学指导委员会、中国计算机学会教育委员会提出的《2000 计算机学科教学计划》征求意见稿,在研究、学习、借鉴 2000 年 6 月 ACM 和 IEEE/CS 联合专题组发表的“Computing curricula 2001”报告的基础上,结合当前计算机技术飞速发展的现实——对计算机学科的教学内容不断提出更新的要求,特别是为了全面推进素质教育,以及培养学生的创新精神和实践能力,提出了新的编写思路,使这套教材的知识点能反映当前计算机学科技术发展的前沿和趋势。

ACM 和 IEEE 2001 教程的思想是将计算机学科领域的知识分解为几个主要的核心科目(算法与数据结构、计算机体系结构、人工智能与机器人学、数据学与信息检索、人机通信、数值计算、操作系统、程序设计语言、图形学、可视化、多媒体、网络计算、软件工程)并作为学科的公共要求:对计算机学科的教学要突出理论、抽象和设计三个环节,并强调教学一定要与社会需求相结合。另外,还提出了贯穿于计算机学科中常出现的基本概念,并将这些概念在教材中予以清晰的介绍,灵活的应用,以更好地帮助学生,使之成为一个优秀的计算机工作者。

为了保证这套教材的审编和出版质量,以陈火旺院士为主任委员的教材编委会的专家教授们在 2001 年 4 月召开了全体编委、作者讨论会,制订了编写要求和编审程序。编委们对所有教材的编写提纲进行了讨论,对教材的质量做了专门的要求,并设立专门的负责人选。参加这套教材的编审者都是来自全国重点高校的在计算机领域从事教学和科研的专家和学者,他们具有丰富的教学经验,严谨的治学态度,较高的学术水平。

这套教材的出版得到电子工业出版社的积极支持。他们把这套教材列为重点图书出版,并制定了专门的编审出版规定和出版流程,组织了专门的编辑力量和协调机构。

我们希望这套教材的出版,对我国的计算机教育事业的发展做出应有的贡献。

编委会

2002 年 1 月

## 编者的话

本书根据国际国内最新的计算机教程编写。美国的 IEEE 计算机学会和 ACM 于 2001 年制订了计算机教程 CC2001。国内的计算机教育界也开展了相应的新教程制订工作。2001 年 4 月,中国计算机学会教育委员会在上海召开了新世纪计算机教育与 CC2001 教程研讨会,会上交流了国内各主要高校在计算机教育方面的经验,内容涉及到教育思想、培养方案、素质教育、创新能力培养、教学模式、教学方法、教学手段、教学质量评估等诸多方面。

为适应新世纪经济形势的超越式发展要求,计算机教育应当将传统的以知识为本、专业为本、教师为本的模式转变为以学生为本的教学模式,以促进学生个性发展;应压缩课内学时,营造宽松的自主学习环境、培养学生自主学习的能力;应从人才培养的大局出发,站在素质教育、创新教育的高度进行教育改革。应采用以学生为主体、以教师为主导的教学模式,由以“教”为主向以“学”为主的方向发展,培养模式应从单一性向多样性发展。

CC2001 对培养我国新世纪的计算机人才有很好的参考价值,中国计算机教育界根据我国国情研究并制订了适合国内院校使用的教程。新的教程中把学科所包含的教学内容归结为 14 个知识体,提炼出了更精简的核心知识单元。计算机组成与系统结构作为其中的一个知识体系,其内容包括数字逻辑与数字系统、数据的机器级表示、汇编级机器组织、存储系统的组织与体系结构、接口与通信、功能部件的组织、多处理机与新型系统结构等。本书的编写基本覆盖了上述内容,并结合国内外已有的教材内容,以保持内容上的衔接。本书的内容分为 7 章,第 1 章主要介绍数字逻辑方面的基础知识和计算机系统的概论;第 2 章介绍计算机中数据的表示和数据的运算过程;第 3 章介绍存储系统,包括高速缓存和虚拟存储器;第 4 章介绍指令系统和简单的汇编程序设计,使学生掌握汇编级指令的运用;第 5 章介绍指令的执行控制,包括 CPU 结构和各种指令流水的技术;第 6 章介绍总线和输入输出系统,即接口和通信方面的内容;第 7 章则介绍并行计算机系统,包括网络并行计算机系统。本书作为大学本科计算机专业的教材,全部内容适合于约 72 学时的教学。在内容选择上,本教材更加突出新出现的技术,而去除或者压缩比较陈旧的内容,以反映这一领域的新发展。本教材的另一个特点是更加密切地结合实际,每一章的最后一节介绍有关的背景知识和实际产品,这部分内容只要求学生一般地了解,以拓展学生的视野,可作为学生阅读内容。本教材还配备了更多的解题实例,以便于学生掌握这一学科领域的基本技能,也使本教材更便于学生自学。

本书在作者多年教学实践的基础上编写而成。尽管作者作了很多努力,但是作者的水平毕竟有限。对于本书中的缺点错误,恳请广大读者给予批评指正。

最后,感谢电子工业出版社对于本书出版提供的支持。

胡越明

2001 年 12 月

# 目 录

第 1 章 计算机系统概论	(1)
1.1 数字电路基础	(1)
1.1.1 逻辑代数的基本知识	(2)
1.1.2 常见的门电路	(5)
1.1.3 数字系统基础	(16)
1.2 计算机的基本组成	(20)
1.2.1 计算机的硬件结构	(21)
1.2.2 计算机软件	(24)
1.2.3 计算机语言及其编译	(26)
1.3 计算机系统结构概论	(29)
1.3.1 系统结构的概念	(29)
1.3.2 计算机系统的性能评价	(30)
1.3.3 计算机系统的可靠性	(37)
1.4 计算机系统的历史与发展	(39)
1.4.1 计算机的发展历史	(39)
1.4.2 计算机的分类	(42)
1.4.3 计算机的应用领域	(43)
习题一	(45)
第 2 章 数据编码和数据运算	(48)
2.1 数据编码	(48)
2.1.1 数制及其转换	(48)
2.1.2 定点数的编码	(52)
2.1.3 浮点数的编码	(58)
2.1.4 非数值数据的编码	(63)
2.1.5 检错码和纠错码	(67)
2.2 定点数的运算和运算器	(74)
2.2.1 定点数的加减法运算	(74)
2.2.2 定点数乘法除法运算	(80)
2.2.3 逻辑运算	(89)
2.3 浮点数运算和运算器	(94)
2.3.1 浮点数加法和减法	(94)
2.3.2 浮点数乘法和除法	(97)
2.4 运算器的历史与发展	(98)
习题二	(100)

<b>第 3 章 存储系统</b> .....	(104)
3.1 存储器芯片 .....	(104)
3.2 存储器的构成 .....	(109)
3.2.1 存储器的基本组织 .....	(109)
3.2.2 存储器的工作周期 .....	(116)
3.2.3 提高存储器工作速度的技术 .....	(120)
3.2.4 访存的局部性 .....	(124)
3.3 高速缓存 .....	(126)
3.3.1 cache 的功能与基本原理 .....	(126)
3.3.2 地址映像与变换 .....	(127)
3.3.3 替换策略及更新策略 .....	(135)
3.3.4 cache 的性能和类型 .....	(138)
3.4 虚拟存储器 .....	(139)
3.4.1 页式虚拟存储器 .....	(140)
3.4.2 段式虚拟存储器 .....	(143)
3.4.3 段页式虚拟存储器 .....	(144)
3.4.4 虚拟存储器的管理策略 .....	(145)
3.5 存储器的历史与发展 .....	(148)
习题三 .....	(155)
<b>第 4 章 计算机指令系统</b> .....	(160)
4.1 指令的格式和编码 .....	(160)
4.1.1 操作码 .....	(161)
4.1.2 地址码 .....	(162)
4.1.3 指令字长度 .....	(164)
4.1.4 指令助记符 .....	(164)
4.2 数据的类型及其存储方式 .....	(166)
4.2.1 操作数的类型 .....	(166)
4.2.2 操作数的存储方式 .....	(166)
4.2.3 数据对齐方式 .....	(167)
4.2.4 堆栈 .....	(167)
4.3 寻址方式 .....	(169)
4.4 指令格式的设计 .....	(175)
4.4.1 操作码的编码 .....	(175)
4.4.2 地址码的设计 .....	(176)
4.4.3 指令的访存类型 .....	(177)
4.5 指令集 .....	(178)
4.6 指令系统及汇编程序设计实例 .....	(182)
4.7 指令系统的历史与发展 .....	(191)
4.7.1 RISC 与 CISC .....	(191)
4.7.2 指令系统对多媒体信息处理的支持 .....	(193)



习题四 .....	(195)
<b>第 5 章 控制单元</b> .....	<b>(200)</b>
5.1 基本概念 .....	(200)
5.1.1 CPU 的功能与结构 .....	(200)
5.1.2 数据通路的构成 .....	(201)
5.2 指令的执行过程 .....	(207)
5.2.1 运算指令周期 .....	(207)
5.2.2 访存指令周期 .....	(210)
5.2.3 控制指令周期 .....	(212)
5.3 控制器的基本结构 .....	(213)
5.3.1 硬连线控制器 .....	(214)
5.3.2 微程序控制器 .....	(222)
5.3.3 阵列逻辑控制器 .....	(232)
5.4 指令流水技术 .....	(235)
5.4.1 流水技术的基本概念 .....	(236)
5.4.2 指令的调度 .....	(246)
5.4.3 分支预测 .....	(254)
5.4.4 多重指令启动 .....	(257)
5.4.5 多线程处理器 .....	(264)
5.5 CPU 的历史与发展 .....	(266)
5.5.1 奔腾处理器 .....	(266)
5.5.2 PowerPC 处理器 .....	(269)
5.5.3 Alpha 处理器 .....	(270)
5.5.4 MIPS R4000 的超流水线结构 .....	(271)
习题五 .....	(272)
<b>第 6 章 总线与输入输出系统</b> .....	<b>(277)</b>
6.1 总线的基本原理 .....	(277)
6.1.1 总线的信息传递方式 .....	(277)
6.1.2 总线的定时 .....	(281)
6.1.3 总线控制 .....	(284)
6.1.4 总线接口 .....	(288)
6.2 输入输出设备的类型和寻址 .....	(292)
6.2.1 输入输出设备的类型 .....	(292)
6.2.2 输入输出设备的寻址 .....	(297)
6.3 程序控制方式 .....	(299)
6.3.1 程序查询输入输出方式 .....	(299)
6.3.2 中断方式 .....	(304)
6.4 直接访存数据传输方式与输入输出通道方式 .....	(312)
6.4.1 DMA 方式的基本概念 .....	(312)
6.4.2 DMA 传送方式 .....	(313)

6.4.3 基本的 DMA 控制器 .....	(314)
6.4.4 通道方式 .....	(316)
6.5 输入输出接口与总线 .....	(319)
6.5.1 输入输出接口 .....	(319)
6.5.2 输入输出总线 .....	(320)
习题六 .....	(335)
<b>第 7 章 并行计算机系统</b> .....	<b>(339)</b>
7.1 并行计算机的分类 .....	(339)
7.2 向量流水计算机 .....	(340)
7.2.1 向量数据与向量指令 .....	(341)
7.2.2 向量流水计算机的结构 .....	(341)
7.2.3 向量流水技术 .....	(344)
7.3 阵列计算机 .....	(347)
7.3.1 阵列计算机的构成 .....	(347)
7.3.2 阵列计算机的互连网络 .....	(349)
7.3.3 阵列计算机的存储系统 .....	(352)
7.4 多处理机系统 .....	(354)
7.4.1 多处理机系统的结构 .....	(354)
7.4.2 多处理机系统的互连网络 .....	(356)
7.4.3 多处理机系统的数据通信 .....	(358)
7.4.4 多处理机的存储系统 .....	(360)
7.4.5 多处理机系统实例 .....	(365)
7.5 网络计算机系统 .....	(367)
7.5.1 概述 .....	(368)
7.5.2 系统结构 .....	(369)
7.5.3 网络协议 .....	(370)
7.5.4 网络计算 .....	(375)
习题七 .....	(376)
<b>主要参考文献</b> .....	<b>(378)</b>

# 第1章 计算机系统概论

现实世界中存在着许多物理量。这些物理量可以分为模拟量和数字量两种。模拟量具有连续变化的特点，如温度、水位、电压、物体的运动速度等；数字量是一种表示非连续数值的量，这些非连续的数字量可以是各种数字、字母、算符及符号等，如数字0, 1, 2, ..., 9是10个离散的数值。现实世界有许多数字量的例子，如人数、姓名、日期、考试分数等。使用数字量来传递和加工处理信息的实际工程系统称为数字系统。数字系统的特点是它所处理的信息都是离散的数值元素。离散数值元素按不同方式排列可以表示各种信息。连续的物理量在一定精度要求下可以表示为数字量。在数字系统中，用一定位数的数值表示物理量。数字系统在对离散的物理量进行加工处理和传输的过程中可以保持数据的精度。实际上，数字量的处理过程可以达到比模拟量处理更高的精度，能够精确地再现运算的结果而不受温度、电压等因素的影响；数字量特别适合于进行复杂的处理，数字系统的设计与实现比较容易，数字系统的设计与分析不需要高等数学的模型；而且数字量便于数据的存储和传输，数字系统具有可编程性，因此数字系统已经成为信息处理系统的主流。

数字计算机是一种完成各种数据计算和信息处理任务的数字系统。离散的数字量有无穷多个，但在计算机中只能表示有限个。计算机中表示的数字信息是一种具有有限离散数值的信息，每一个数据信息在计算机中用有限数量的离散状态的代码表示。计算机的基本功能是数据的存储和运算。为了便于数字在计算机中的表示，数字系统采用二进制代码。这种二进制代码以电压、电流等物理量表示。电压的高和低、电流的有和无可以表示二进制的0和1。信息在计算机中的二进制数值表示使得电路中只需要表示两种状态，数据的传递、存储和运算可靠性更高，结果更加精确。由于数字电路的简单性，容易用晶体管电路实现，从而发展形成数字电路技术。

在介绍计算机系统基本原理之前，本章先介绍数字逻辑以及数字系统的基本概念。

## 1.1 数字电路基础

在数字电路中，信息以二进制数据的代码形式表示。采用二进制数的系统只有两个记数符号，0和1。二进制数据中的一个记数符号称为“位”(bit)，信息通常表示为若干个位，通过这种位的组合，计算机中就可以表示各种数据和字符，如十进制数值和英文字母。这种把数据信息表示成二进制位组合的表示过程称为编码。每个二进制位组合又称为代码，它是编码的结果。1个二进制位可以有0和1两个代码，2个二进制的位可以有4个代码(00, 01, 10, 11)，3个二进制的位可以有8个代码(000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111)。一般而言， $n$ 个二进制位可构成 $2^n$ 个代码。

数字电路所表示的逻辑意义以及运算关系的抽象构成了逻辑代数。逻辑代数研究如何把复杂的逻辑关系分解为许多简单的逻辑函数的表示，使得这种逻辑函数的表示能够用数字电路实现。它是学习和理解数字电路的基础。

### 1.1.1 逻辑代数的基本知识

在数字逻辑中，把客观世界中反映“是”和“非”、“真”和“假”、“开”和“关”的现象称为逻辑现象，用数值 1 和 0 表示，这些数值称为逻辑值。逻辑值之间可以进行运算。逻辑值的基本运算有逻辑加、逻辑乘和逻辑非，把这些基本运算组合起来，可以构成各种复杂的逻辑关系的表达。关于逻辑运算的代数称为逻辑代数或布尔代数。

逻辑代数是关于逻辑变量之间数学关系的科学。它研究逻辑运算的规则和规律。与普通代数一样，逻辑代数也用字母表示变量，如 A 和 B。所不同的是，在普通代数中，变量的取值可以是任意实数，而逻辑代数是一种二值代数系统，任何变量的取值只有 0 和 1 两种可能。逻辑代数是数字系统的描述，它描述逻辑变量之间的运算关系。逻辑代数的基础是一整套定义了基本函数的逻辑运算。这些函数是由通过一个或多个输入变量并产生一位输出来实现的。

逻辑加运算又称为逻辑或，用运算符号“+”表示。它的运算规则是：在  $A + B$  中，只要 A 和 B 有一个为 1，则结果为 1，A 和 B 都为 0 时结果为 0。如果逻辑加的结果用 L 表示，那么逻辑加表示为  $L = A + B$ 。

逻辑乘运算又称为逻辑与。如果逻辑乘的结果用 L 表示，那么逻辑乘表示为  $L = A \cdot B$  或  $L = AB$ 。它的运算规则是：在  $A \cdot B$  中，只要 A 和 B 有一个为 0，则结果为 0，A 和 B 都为 1 时结果为 1。

逻辑非运算将 1 变成 0，将 0 变成 1。如果逻辑变量为 A，它的逻辑非的运算结果为 L，那么逻辑非表示为  $L = \bar{A}$ 。当 A 为 0 时，L 为 1；A 为 1 时，L 为 0。

用若干个逻辑变量和逻辑运算符组成的数学式子称为逻辑表达式。如  $L = AB + C$ 。对于参与运算的各个逻辑变量的所有取值组合可以列出逻辑表达式的运算结果表格，这种表格称为真值表。它是逻辑代数特有的一种表示方式，因为在逻辑代数中我们可以把逻辑变量的所有可能的值的组合都罗列出来。

在逻辑加运算中，当参与运算的每一项都为 0 时结果才为 0；只要有一项为 1，结果就为 1。这样的逻辑函数可以用一个真值表来表示，在真值表中可以把自变量的各种可能的状态组合都罗列出来，并给出在各种状态组合下的应变量的值。对于逻辑加的情况，如果只有两个自变量，如  $A + B$ ，那么 A 和 B 的各种取值组合只有 4 种情况，即  $A = 0$  且  $B = 0$ ； $A = 0$  且  $B = 1$ ； $A = 1$  且  $B = 0$  和  $A = 1$  且  $B = 1$ 。4 种情况下的运算结果只有第一种为 0，其余都为 1。这样，我们可以列出真值表如表 1-1 所示。

表 1-1 逻辑加的真值表

A	B	A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

用代数形式表示，逻辑加的运算规则可以表示为：

$$0 + 0 = 0$$

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 0 = 1$$

$$1 + 1 = 1$$

同样可以列出逻辑乘的真值表，如表 1-2 所示。逻辑乘的运算规则的代数表示是：

$$0 \cdot 0 = 0$$

$$0 \cdot 1 = 0$$

$$1 \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot 1 = 1$$

表 1-2 逻辑乘的真值表

A	B	A·B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

逻辑非的真值表如表 1-3 所示，它的代数表示是：

$$\bar{0} = 1$$

$$\bar{1} = 0$$

表 1-3 逻辑非的真值表

A	$\bar{A}$
0	1
1	0

逻辑运算满足交换律、结合律和配律等运算法则。即

**交换律：**  $A + B = B + A$

$$AB = BA$$

**结合律：**  $(A + B) + C = A + (B + C)$

$$(AB)C = A(BC)$$

**分配律：**  $A(B + C) = AB + AC$

$$A + (BC) = (A + B)(A + C)$$

**吸收律：**  $A + AB = A$

$$A(A + B) = A$$

$$A + \bar{A}B = A + B$$

$$A(\bar{A} + B) = AB$$

**反演律：**  $\overline{A + B} = \bar{A}\bar{B}$

$$\overline{\bar{A}\bar{B}} = A + B$$

**重叠律：**  $A \cdot A = A$

$$A + A = A$$

$$\overline{\bar{A}} = A$$

**互补律：**  $A + \bar{A} = 1$

$$A \cdot \bar{A} = 0$$

**0-1 律:**  $A + 0 = A$

$$A + 1 = 1$$

$$A \cdot 0 = 0$$

$$A \cdot 1 = A$$

证明逻辑代数的运算规则，可以根据逻辑代数的运算法则进行，也可以用列出真值表的方法进行证明。只要两个逻辑表达式的真值表完全相同，那么这两个逻辑表达式恒等。利用逻辑代数的运算规则，我们可以对逻辑表达式进行转换或者化简，从而简化它的电路实现。

**【例 1-1】** 证明  $(A + B)(A + C) = A + BC$ 。

$$\begin{aligned} \text{证: } (A + B)(A + C) &= AA + AB + AC + BC && \text{分配律} \\ &= A + AB + AC + BC && \text{重叠律} \\ &= A(1 + B) + AC + BC && \text{分配律} \\ &= A + AC + BC && \text{0-1 律} \\ &= A(1 + C) + BC && \text{分配律} \\ &= A + BC && \text{0-1 律} \end{aligned}$$

**【例 1-2】** 化简逻辑表达式  $AB + \bar{A}C + \bar{B}C$ 。

$$\begin{aligned} \text{解: } AB + \bar{A}C + \bar{B}C & \\ &= AB + (\bar{A} + \bar{B})C && \text{分配律} \\ &= AB + \overline{AB}C && \text{反演律} \\ &= AB + C && \text{吸收律} \end{aligned}$$

一个逻辑函数的真值表是惟一的，但是它的逻辑表达式可能有多种多样。对逻辑表达式的化简就是寻找一种简洁的等价的逻辑表达式。在真值表中，变量的每一种组合称为一个最小项。对于有  $n$  个变量的真值表，最小项总共有  $2^n$  个。真值表中有些最小项对应的输出为 1，有些为 0。逻辑函数的一种表达式实际上就是那些输出为 1 的最小项的和。根据真值表可以直接写出逻辑表达式，对这样写出的逻辑表达式进行化简就可以得到逻辑函数的最简表达式。逻辑电路设计中一个通常遇到的问题是如何将逻辑表达式尽可能地简化到最简单的形式，所谓最简单通常是指用最少的数目的门电路来实现其功能。

**【例 1-3】** 写出下列真值表的逻辑表达式：

输入			输出
A	B	C	f
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

**解:** 在真值表中，使得  $f$  为 1 的最小项有四个，这四个最小项中只要有 1 个的值为 1，就使得  $f$  为 1。所以  $f$  是这四个最小项的逻辑加。每个最小项有 3 个输入变量。要使得一个最小项

的值为 1，这 3 个输入变量必须同时满足一定的条件，即最小项是 3 个输入变量的逻辑乘。

考虑第一个出现的  $f=1$  的情况，它是真值表中的第二项。该项是当  $A=0$  且  $B=0$  且  $C=1$  时为 1。这样它可以表示为  $\overline{A}\overline{B}C$ 。同理，我们可以写出其他 3 个最小项的表示： $\overline{A}B\overline{C}$ 、 $A\overline{B}\overline{C}$ 、 $ABC$ 。于是，完整的表达式为：

$$f = \overline{A}\overline{B}C + \overline{A}B\overline{C} + A\overline{B}\overline{C} + ABC$$

### 1.1.2 常见的门电路

数字系统是由数字电路模块连接而成的。计算机系统是一个复杂的数字系统。一般采用模块化的设计，每个模块完成某一特定的处理任务。数字电路模块由寄存器、译码器、算术运算电路和控制逻辑等数字电路部件构成。构成这些模块的基本元件是基本的门电路。

#### 1. 基本门电路

实现逻辑运算的数字电路称为门电路。基本的门电路具有 1 个或多个输入信号，1 个输出信号，分别表示输入变量和输出逻辑变量。门电路的输入端和输出端只有高电平和低电平两种状态，一般用高电平表示逻辑 1，用低电平表示逻辑 0。

现代数字系统是由若干集成电路构成的。集成电路是在一片硅半导体芯片中制作大量的晶体管及阻容元件，构成若干具有一定特殊功能数字门电路，并能实现某些逻辑功能的部件。硅半导体晶体的制作原料是沙子。由于硅材料的导电性介于导体与绝缘体之间，因此称为半导体。通过某种特殊的化学工艺，我们可以在硅材料中加入微量元素硼和磷，将其改变为良好的导体、绝缘体或者在某种条件下导电的物体。利用这个特点，我们可以在硅材料上制作大量晶体管电路。在数字电路构成的系统中，一个晶体管的作用就像是一个开关元件，它工作在导通和断开两种状态。目前常用的晶体管是一种 MOS (metal-oxide semiconductor) 场效应晶体管。它有三个电极，分别称为源极 (S)、栅极 (G) 和漏极 (D)。用这种晶体管构成的工作电路如图 1-1 所示，源极接地，栅极接控制电压，漏极通过连接一个电阻  $R$  后接电源 ( $V_{CC}$ )。输入的控制电压为数字信号的时候，它就像一个开关元件一样。当  $V_{CC}$  为高电平， $G$  的电压为低电平时，晶体管的  $D$  端与  $S$  端不导通，这时输出信号为高电平；当  $G$  的电压为高电平时，晶体管的  $D$  端与  $S$  端导通，这时输出信号为低电平。这个电路的输入信号和输出信号的逻辑电平是相反的，是一个非门电路。

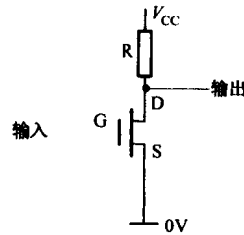


图 1-1 MOS 晶体管工作原理

上述这种工作方式的晶体管是一种 nMOS 的晶体管，它的物理结构如图 1-2 (a) 所示。在 p 型 (正极性) 半导体的基片上渗入两个 n 型 (负极性) 的半导体材料的区域，分别构成源极和漏极，在基片上还生长出一层二氧化硅绝缘体材料，覆盖在半导体材料上。在源极与漏极之间的绝缘体材料上还覆盖一个导体材料 (通常是多晶硅) 的区域，构成栅极。另一种 MOS 晶体管是 pMOS 晶体管，它采用的半导体材料的极性相反，工作电压也相反，在栅极加上低电平时晶体管导通，高电平时截止。两种 MOS 晶体管的符号表示如图 1-2 (b) 和图 1-2 (c) 所示。

在数字电路中，还有一种 CMOS (互补型 MOS) 电路，它是将 nMOS 晶体管与 pMOS 晶体管组合起来构成的门电路。在 CMOS 电路中不需要电阻，它具有比 nMOS 或 pMOS 更

好的工作特性。实现非门的 CMOS 电路如图 1-3 所示，它与图 1-1 的电路的区别在于用一个反相的晶体管代替电阻。

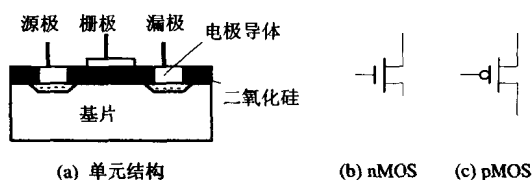


图 1-2 MOS 晶体管的物理结构及其符号表示

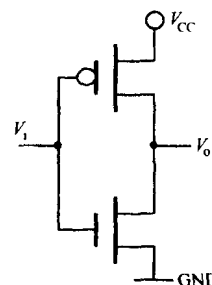


图 1-3 CMOS 非门电路

三种基本的门电路是与门、或门和非门，分别实现逻辑加、逻辑乘和逻辑非运算。这些门电路可以用电路图符号来描述，如图 1-4 所示。在这些电路符号中，与门的顶部是圆弧，底部是直线；或门的顶部是一个尖角，底部是一个圆弧；顶部的小圆圈表示逻辑非。

门电路	逻辑符号
与门	$AB$
或门	$A+B$
非门	$\bar{A}$
与非门	$\overline{AB}$
或非门	$\overline{A+B}$
异或门	$A\oplus B$
二选一电路	$A \quad B$

图 1-4 门电路的逻辑符号表示

实际使用的门电路中还有与非门、或非门、异或门和三态门等。与非门是与门和非门的组合；或非门具有或门和非门的功能。异或门的特点是：当两个输入端的值不相同输出为 1，相同时输出为 0。异或运算可以用符号  $\oplus$  表示，如  $A\oplus B$ 。与异或相对应的是同或，表示成  $\odot$ ，它是当两个输入端的值不相同输出为 0，相同时输出为 1。表 1-4 是与非门、或非门、异或门和同或门的真值表。图 1-5 所示是一个 2 输入端的 CMOS 的或非门电路，图 1-6 所示是一个 CMOS 与非门电路的例子。

表 1-4 与非门、或非门、异或门和同或门的真值表

x	y	$\overline{xy}$	$\overline{x+y}$	$x\oplus y$	$x\odot y$
0	0	1	1	0	1
0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0
1	1	0	0	0	1



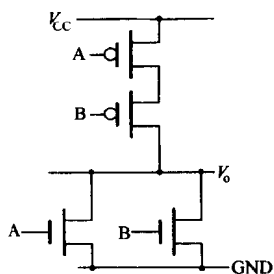


图 1-5 2 输入端的或非门 CMOS 电路

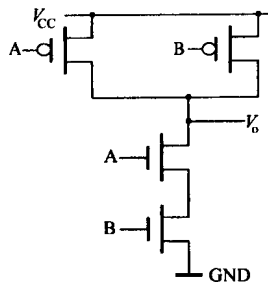


图 1-6 2 输入端的与非门 CMOS 门电路

在计算机部件中还有一种特殊的门电路——三态门。它的输出端除了 1 和 0 外还有第三种状态，即高阻状态。在这种状态下，门电路的输出端与输出信号线就像没有连接一样，不影响线路的电平。这种状态既不输出信息也不输入信息，使得输入信号与输出信号之间处于隔离状态。三态门是在一般门电路的基础上增加了输出控制功能。为了实现这第三种状态，在三态门的输入端增加了一个控制信号 EN (enable)。当 EN 有效时输出为高电平或低电平，取决于门电路的类型；当 EN 无效时，输出信号为高阻状态，不管输入信号是什么。控制 EN 信号可以是高电平有效的，也可以是低电平有效的。控制信号输入端不带小圆圈表示高电平有效，带小圆圈表示低电平有效。图 1-7 是四种三态门电路的逻辑符号。其中图 (a) 电路符号表示当控制端为高电平时，输出电平等于输入电平；当控制端为低电平时，输出为高阻状态。图 (b) 电路符号表示当控制端为低电平时，输出电平等于输入电平；当控制端为高电平时，输出为高阻状态。图 (c) 电路符号表示当控制端为高电平时，输出电平与输入电平相反；当控制端为低电平时，输出为高阻状态。图 (d) 电路符号表示当控制端为低电平时，输出电平与输入电平相反；当控制端为高电平时，输出为高阻状态。

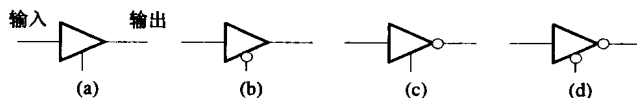


图 1-7 四种三态输出电路

三态门的这个特点使得它能够直接连接到公共信号线路（通常称为总线）上，采用三态门电路的总线 (bus) 连接方式如图 1-8 所示。图中四个驱动电路的输出端连接到一起，构成总线的一位数据线（非三态门电路不能这样连接）。控制信号决定选择哪个输入信号作为输出送到总线。在任意时刻不能有两个以上的驱动电路向总线输出，否则多个数据信号同时驱动总线将损坏门电路器件。为了保证这一点，这里的四个控制信号线 S0~S3 在任意时刻只能有一个有效。

总线是一组公共传输线，为保证总线所传输的信号的有效性，应控制总线信号的发送，连接在总线上的设备不能同时有多个设备向总线发送信息。连接在总线的多个设备中可以同时从总线接收信息。这是总线信号传输的基本特性，是总线正确传输信号的基本要点。为保证传输信息的正确性，连接在总线上的设备必须通过总线驱动电路向总线发送信号。总线驱动电路可由三态门电路组成。在连接到总线上的各个设备中，如果只有一个设备向总线输出高电平或低电平的信息，其他设备的输出处于高阻状态，则总线上的信号就是驱动信号输出的信号电平。而当所有连接总线的设备都处于高阻状态时，总线上的信号为高阻电平状态。