



电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

微处理器系统结构 与嵌入式系统设计

李广军 阎波 等编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程

微处理器系统结构 与嵌入式系统设计

李广军 阎波 林水生 编著
蔡荣海 郭志勇 周亮 庞晓凤

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了计算机系统各主要功能部件的组成原理及结构,通过具体性能分析,了解其基本设计方法。为了适应不同专业背景的读者对嵌入式计算机和微处理器系统设计的需求,本书以 ARM 微处理器为例,从数字逻辑设计出发,深入分析了计算机各主要功能部件、数据通道、微处理器及嵌入式系统的原理和结构,使读者掌握其基本原理和核心技术。本书涵盖了微处理器系统原理、嵌入式系统软硬件开发的主要内容,深入探讨了微处理器系统体系结构的特征。本书剖析了指令集和硬件之间的接口关系,讲解了如何写出能直接与底层硬件交互的高效代码,最后讨论了嵌入式系统及 SoC 设计技术。

本书可作为高校通信工程、电子工程、自动控制、集成电路等相关专业本科生的微机原理、嵌入式系统、计算机系统设计等课程的教材,对相关研发人员也颇有裨益。

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

微处理器系统结构与嵌入式系统设计/李广军等编著.-北京:电子工业出版社,2009.9
电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础课程
ISBN 978-7-121-09483-5

I. 微… II. 李… III. ①微处理器-系统结构-高等学校-教材 ②微处理器-系统设计-高等学校-教材
IV. TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 158331 号

策划编辑:马 岚

责任编辑:马 岚

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编:100036

开 本:787 × 1092 印张:23.25 字数:595 千字

印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:39.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

随着微电子技术、计算机技术和通信技术的日新月异，计算机领域早已进入后 PC 时代，嵌入式系统已成为以 IC 设计技术与软件设计技术为代表的软硬件协同设计的芯片级嵌入式设计技术，并已广泛应用于各行各业及人们的日常生活中；而以应用为中心、软硬件可剪裁的嵌入式系统产品的发展更是十分迅猛。嵌入式计算机系统的产品市场已成为我国信息产业新的市场增长点，其带动的相关工业产值估计每年超过数万亿元。

在 IEEE 计算机协会和 ACM 共同制定的 2004 版计算机类课程体系中，微处理器和嵌入式系统等已被列入核心课程。嵌入式计算机系统设计技术已成为通信、雷达、计算机、自动控制和微电子等研究应用领域的工程师应掌握的基本技术和必备技能。与巨大的市场潜力和产业需求相比，我国的嵌入式系统人才的工程与系统设计培养却有明显不足。

近几年国内的 CPU/MCU 芯片设计水平与 20 世纪相比已有本质的改变与提高，IT 业的发展对大学生的微处理器和嵌入式系统的设计能力提出了更高的要求。直至 20 世纪末，国内 CPU 及嵌入式系统硬件的核心芯片均依赖国外，虽然国内工科电工电子类专业开设的微机原理、单片机或嵌入式技术等专业基础课程大多面向实际需求，但大多数仍局限于某种特定 CPU 型号芯片的应用，且课程本身偏重应用软件设计，忽视了对计算机组成原理、系统架构尤其是微处理器系统体系结构的深入剖析和理解，缺乏对微处理器系统的软硬件协同设计、底层驱动程序设计等工程能力的培养，显然以往的微型计算机原理等课程的教学大纲已无法满足相关产业的发展现状及需求。

电子科技大学“微型计算机系统原理及嵌入式系统”课程组于上世纪 70 年代末、80 年代初就在国内率先开设了以 6502，6800，Z80 和 80x86 CPU 为核心的嵌入式计算机系统原理及应用等相关系列课程。从 1985 年起，本书作者之一李广军教授一直从事基于上述各类微处理器系统与接口技术、嵌入式通信系统设计的教学和科研工作。然而，随着 ARM 和 8051 等 CPU 内核的广泛应用，随着国内 IC 与嵌入式系统产品设计技术飞速发展的研发现状，现有的微机系统原理及应用等系列课程的课程教学体系已不能满足 IT 业的技术需求，微机原理等系列课程的改革势在必行。

为改善目前工科电工电子类非计算机专业开设的微机原理、嵌入式系统系列课程在知识体系架构、基础原理、工程设计和教学内容等方面的不足，高校教师和学生也对课程教学内容的更新与改革寄予期待和迫切的要求；但由于该系列课程改革难度大，牵涉面广，在电子科技大学各级领导、广大师生的鼓励和支持下，电子科技大学“微型计算机系统原理及嵌入式系统”课程组对本课程的教学改革做了大量的探索和改革，其根本目的是为了进一步提高学生的嵌入式计算机系统的系统设计能力和工程素质。本课程于 2005 年被评为四川省精品课程。

目前，各种嵌入式微处理器系统设计竞赛已被越来越多的企业和学校认可和重视，其知名度和影响力已逐渐提升。国家也针对在校大学生开展了各式各样的与嵌入式系统技术相

关的电子设计竞赛，如全国大学生电子设计竞赛、“挑战杯”电子设计竞赛、中国机器人大赛和“飞思卡尔”杯全国大学生智能车竞赛。

本教材在保留原“微机系统原理和接口技术”课程主要知识结构的基础上，强调计算机基础原理与先进设计技术相结合，以提高学生的工程素质和设计能力，其主要特点如下所示。

(1) 加强计算机组成原理和系统结构等基础理论

计算机系统结构与组织理论是设计实现计算机系统的基石。无论是通用计算机系统还是嵌入式计算机系统，无论采用哪种 CPU 芯片，其组成原理与系统结构本质上都是非常类似的。只有具备了这些基础知识，才能够真正理解计算机的行为原理，真正做到举一反三。

(2) 对微处理器体系结构及关键技术进行了较深入的论述与研究

从逻辑设计和硬件电路的角度，对微处理器的体系结构、指令系统及其特性进行较深入的研究和讨论，并深入探讨了微处理器系统的硬件与软件两者之间的相互影响。

(3) 选用 ARM 微处理器内核系列芯片替代 80x86 系列芯片

目前嵌入式微处理器芯片市场主要流行的是基于 ARM 处理器内核的嵌入式芯片，Freemove(飞思卡尔)、Intel(英特尔)、Philips(飞利浦)和 Samsung(三星)等国际著名企业也都采用了 ARM CPU 内核。ARM 处理器为 32 位 RISC 芯片，体系结构的设计比传统 CPU 有了很大的改进。通过对 ARM 处理器的学习，学生们可以了解更先进的计算机体系结构，理解和掌握当前的主流硬件设计原理，切合实际的程序设计模式与技术。

(4) 加强嵌入式操作系统的基本原理及移植技术

随着硬件平台性能的大幅度提高，计算机的工作任务日益繁重，操作系统在嵌入式系统中的应用也变得越来越广泛。适当地引入与操作系统的基本概念及嵌入式操作系统的移植技术相关的内容，有助于建立完整的计算机系统架构，透彻地理解计算机系统的工作原理。

(5) 引入基于 ARM IP 内核的 ASIC/SoC 设计技术

基于 ARM 内核的 ASIC/SoC 设计已成为电子系统设计工程师必须掌握的一项关键技术，EDA/ASIC 设计技术也已成为现代电子信息系统设计工程师的必备技能。因此，我们在本课程的教学实验中引入了 ASIC/SoC 等 EDA 设计技术，使学生在学会使用现成集成电路芯片搭建应用系统的基础上，了解如何使用已有 IP 内核或自行设计 IP 内核构建片上系统。通过实验课这一平台，为学生进一步掌握 SoC 系统设计技术提供了基本的知识体系结构。

为方便教师和读者，本教材有配套的教学课件与教学实验装置，感兴趣的教师可与 m11101@uestc.edu.cn 联系。[登录华信教育资源网](http://www.hxedu.com.cn) (<http://www.hxedu.com.cn>)，注册之后可免费[下载](#)本书教学课件；或将[咨询邮件](#)发至 malan@phei.com.cn。

本书作者都是长期从事微机系统原理、嵌入式系统、ASIC/SoC 设计及通信系统设计的教学和科研的教师，在教学和科研实践中积累了丰富的工程设计经验，完成了大量国家及国

际合作的嵌入式系统、ASIC/SoC 等研发项目，取得了很好的社会和经济效益。本书中的技术专题，都力争与实际应用有机结合，所举的例子大多数是完整的，可操作的，甚至有的直接来自科研实践。

全书共 9 章和 7 个附录。李广军教授拟定了编写大纲，编写了第 1 章、第 3 章和第 9 章，并对全书进行了统稿；阎波副教授参加了大纲的拟定，编写了第 2 章和第 4 章；庞晓凤副教授编写了第 5 章；周亮博士编写了第 6 章；郭志勇博士编写了第 7 章；蔡荣海副教授、林水生教授和周亮博士编写了第 8 章；林水生教授编写了附录 A 至附录 G。

本书第 1 章讲述了计算机/微处理器/嵌入式系统的发展概况；第 2 章论述计算机系统组成与工作原理；第 3 章介绍了微处理器体系结构及关键技术；第 4 章介绍了计算机总线接口技术；第 5 章讲述了 ARM 体系结构及指令系统；第 6 章介绍了 ARM 微处理器的混合程序设计技术；第 7 章简要介绍了基于 ARM 内核的微处理器系列芯片；第 8 章简要介绍了嵌入式系统的基本原理及应用设计；第 9 章介绍了基于 ARM 微处理器内核的 SoC 设计技术及应用前景。附录介绍了配套的实验系统、ARM 处理器和指令集以及 Linux 常用命令。

作者得到了电子科技大学教务处、ARM 公司、飞思卡尔等公司和电子工业出版社马岚编辑的大力支持。本书参考了国内外著名大学的专家和教授的大量著作及设计，并得到了国内和校内著名专家的支持和帮助，在此表示衷心感谢。作者希望本书能对我国、我校的微型计算机系统原理、嵌入式系统的教学和科研尽些微薄之力。作者深知本书还有许多不尽如人意的地方，繁忙的教学和科研使我们深感时间的匮乏，为此我们为不能对本书做进一步的精雕细琢而不安。我们盼望着使用本书的教师和读者提出宝贵的意见，也热切地盼望着得到同行的建议和指教。

作者
电子科技大学

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396; (010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail : dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 计算机发展	(1)
1.1.1 机械式计算机的启蒙时代	(1)
1.1.2 电子技术和半导体技术的诞生	(2)
1.2 现代计算机系统	(5)
1.2.1 冯·诺依曼结构和哈佛结构	(5)
1.2.2 计算机组织的模型	(7)
1.2.3 CISC 与 RISC 结构	(12)
1.2.4 流水线结构	(14)
1.2.5 存储器层次结构、高速缓存和虚拟存储器	(17)
1.2.6 多核处理器并行结构	(20)
1.3 嵌入式系统	(23)
1.3.1 嵌入式系统的概念	(24)
1.3.2 嵌入式系统的特点	(24)
1.3.3 嵌入式系统的组成	(25)
1.3.4 嵌入式系统的发展趋势	(26)
1.4 习题	(27)
第 2 章 计算机系统组成与工作原理	(28)
2.1 计算机体系结构	(28)
2.1.1 冯·诺依曼体系结构	(28)
2.1.2 对冯·诺依曼体系结构的改进	(29)
2.2 计算机组成原理	(37)
2.2.1 总线与接口	(37)
2.2.2 CPU 组织	(38)
2.2.3 存储器组织	(42)
2.2.4 输入/输出组织	(47)
2.3 计算机互连结构	(48)
2.3.1 总线要素	(48)
2.3.2 总线组织	(48)
2.3.3 总线仲裁	(50)
2.3.4 总线带宽	(52)

2.3.5	总线时序	(53)
2.3.6	串行总线	(55)
2.4	模型机工作流程	(60)
2.5	习题	(62)
第3章	微处理器体系结构及关键技术	(65)
3.1	微处理器体系结构简介	(65)
3.1.1	CPU 的功能和构成	(65)
3.1.2	微处理器体系结构简介	(66)
3.2	指令系统设计	(69)
3.2.1	机器指令要素	(69)
3.2.2	指令格式	(70)
3.2.3	指令类型	(72)
3.2.4	寻址方式	(72)
3.2.5	指令系统设计	(78)
3.3	随机逻辑体系结构	(80)
3.3.1	随机逻辑体系结构的特点	(80)
3.3.2	随机逻辑体系结构的操作	(81)
3.3.3	随机逻辑体系结构指令集的设计	(83)
3.4	微码体系结构	(83)
3.4.1	微码体系结构的特点	(83)
3.4.2	微码机器操作	(84)
3.4.3	微码结构与随机逻辑结构的比较	(85)
3.5	流水线体系结构	(86)
3.5.1	流水线体系结构的特点及性能	(86)
3.5.2	流水线结构的操作	(89)
3.5.3	流水线结构与微码结构的比较	(90)
3.6	超标量体系结构	(93)
3.6.1	基本概念	(94)
3.6.2	超标量处理机的概念性结构	(94)
3.6.3	超标量结构的操作	(96)
3.6.4	超标量技术的应用	(97)
3.7	习题	(98)
第4章	计算机总线接口技术	(99)
4.1	接口设计基础	(99)
4.1.1	地址映射	(99)
4.1.2	地址译码	(102)
4.1.3	总线隔离	(106)
4.2	主存储器接口设计技术	(107)

4.2.1	确定存储模块结构	(107)
4.2.2	分配地址空间	(109)
4.2.3	接口信号与时序设计	(110)
4.3	外部设备接口设计技术	(111)
4.3.1	并行接口设计	(111)
4.3.2	串行接口设计	(124)
4.3.3	其他常用接口功能	(125)
4.4	习题	(131)
第5章	ARM 体系结构及指令系统	(135)
5.1	ARM 体系结构	(135)
5.1.1	ARM 概述	(135)
5.1.2	ARM 体系结构版本	(136)
5.1.3	ARM 处理器系列	(137)
5.2	ARM 编程模型	(145)
5.2.1	数据类型	(145)
5.2.2	处理器运行模式	(145)
5.2.3	处理器工作状态	(146)
5.2.4	寄存器组织	(146)
5.2.5	异常	(150)
5.2.6	存储器格式和存储器映射 I/O	(155)
5.2.7	中断延迟	(155)
5.2.8	复位	(156)
5.3	ARM 指令系统	(156)
5.3.1	ARM 基本寻址方式	(156)
5.3.2	ARM 指令集概述	(160)
5.3.3	指令的第二源操作数	(161)
5.4	ARM 指令集	(163)
5.4.1	数据处理指令	(163)
5.4.2	跳转指令	(172)
5.4.3	程序状态寄存器访问指令	(174)
5.4.4	加载/存储指令	(175)
5.4.5	异常产生指令	(182)
5.5	Thumb 指令集与 ARM 指令集的区别	(183)
5.6	习题	(184)
第6章	ARM 程序设计	(185)
6.1	汇编器与汇编语言	(185)
6.2	ARM 汇编器支持的伪指令	(186)
6.2.1	符号定义伪指令	(186)

6.2.2	数据定义伪指令	(187)
6.2.3	汇编控制伪指令	(191)
6.2.4	其他常用的伪指令	(192)
6.2.5	宏和宏指令	(196)
6.3	汇编语言的语句格式	(198)
6.3.1	在汇编语言程序中常用的符号	(198)
6.3.2	汇编语言程序中的表达式和运算符	(199)
6.4	ARM 汇编语言程序设计	(202)
6.4.1	汇编语言的程序结构	(202)
6.4.2	汇编语言的子程序及其调用	(203)
6.4.3	汇编语言程序实例	(204)
6.5	ARM 汇编语言与 C/C++ 的混合编程	(206)
6.5.1	ARM 工程	(206)
6.5.2	ARM 程序框架	(207)
6.5.3	C 与汇编之间的函数调用	(209)
6.5.4	C/C++ 语言和汇编语言的混合编程	(214)
6.6	习题	(220)
第 7 章	基于 ARM 内核的微处理器芯片简介	(223)
7.1	ARM926EJ-S 处理器内核	(223)
7.1.1	ARM926EJ-S 编程模型	(226)
7.1.2	存储器管理单元 MMU	(228)
7.1.3	cache 和写缓冲器	(229)
7.1.4	紧耦合存储器接口	(230)
7.1.5	总线接口单元	(231)
7.1.6	非高速缓存取指	(231)
7.1.7	指令存储器屏障	(232)
7.1.8	嵌入式跟踪宏单元	(233)
7.1.9	电源管理	(233)
7.2	ARM9 微处理器	(235)
7.2.1	飞思卡尔公司的 MC9328MX21 微处理器	(235)
7.2.2	Atmel 公司的 AT91SAM9263 微处理器	(238)
7.2.3	三星公司 S3C2440A 微处理器	(242)
7.2.4	意法半导体公司的 STR91x 微处理器	(246)
7.3	构造 ARM 微处理器最小硬件系统	(248)
7.3.1	电源模块	(249)
7.3.2	时钟模块	(250)
7.3.3	复位模块	(252)
7.3.4	存储器模块	(252)

7.3.5	JTAG 调试接口	(255)
7.4	习题	(255)
第 8 章	嵌入式系统设计	(256)
8.1	嵌入式系统简介	(256)
8.2	设计方法及设计流程	(258)
8.2.1	嵌入式系统设计的基本指导思想	(258)
8.2.2	嵌入式系统开发的基本流程	(260)
8.3	嵌入式处理器	(264)
8.3.1	嵌入式处理器种类	(264)
8.3.2	嵌入式处理器的选择	(269)
8.4	嵌入式软件系统	(270)
8.4.1	嵌入式软件系统结构	(271)
8.4.2	嵌入式软件工作流程	(272)
8.4.3	嵌入式操作系统概述	(273)
8.4.4	嵌入式操作系统的任务	(275)
8.4.5	嵌入式 RTOS 的关键技术指标	(279)
8.4.6	常用的嵌入式 RTOS	(281)
8.5	嵌入式操作系统的移植	(293)
8.5.1	嵌入式 Linux 操作系统简介	(294)
8.5.2	嵌入式 Linux 的移植过程	(298)
8.6	嵌入式系统的测试	(311)
8.7	习题	(314)
第 9 章	基于 ARM 微处理器核的 SoC 设计	(316)
9.1	概述	(316)
9.2	SoC 设计	(317)
9.2.1	SoC 的典型结构	(317)
9.2.2	SoC 设计中的关键技术	(318)
9.2.3	SoC 技术的优势	(319)
9.3	SoC 的片上总线	(320)
9.3.1	片上总线的特点	(320)
9.3.2	片上总线的接口标准	(321)
9.3.3	AMBA 总线	(322)
9.4	基于 ARM 内核的 SoC 系统设计	(327)
9.4.1	基于 ARM 的 SoC 结构	(327)
9.4.2	一种基于 ARM 内核的 USB 2.0 接口 IP 核的设计	(334)
9.5	习题	(337)

附录 A	ASCII 码表	(338)
附录 B	ARM 实验系统简介	(339)
附录 C	AT91SAM9263 引脚排列及信号名称表	(340)
附录 D	S3C2440 引脚排列及信号名称表	(342)
附录 E	MX21 引脚排列及信号名称表	(344)
附录 F	ARM 指令速查表及符号含义	(345)
附录 G	Linux 常用命令表	(355)
参考文献	(359)

第1章 概述

信息的生成、获取、存储、传输、处理及其应用是现代信息科学的六大组成部分，其中信息的获取和处理是信息技术产业链上重要的环节之一，没有它就没有信息的传输、处理和应用。

近半个世纪以来，数字半导体技术的发展成为科学与技术各个方面进步的巨大动力，并且影响到了人类活动的各个方面。其中，数字信号采集及处理技术已应用于科学研究、设备设计和制造的各个方面，计算分析、数字控制平台和半导体技术成了各学科领域发展的催化器和加速器。

值得注意的是，计算机的发展一直和数字系统设计的发展相辅相成，互相促进。每一次计算机性能的提高都离不开数字系统设计进步的推动，而计算机性能的提高又促进了数字系统设计的快速发展，同时向数字系统设计提出了更高的要求，并给数字系统设计提供了产品方向。

Gordon Moore (Intel的创始人之一)观察到，通过缩减晶体管的物理尺寸，可以使一块芯片上的晶体管的数目差不多以每18个月翻一番的速度增长，于是他在1964年提出了著名的论点：每18个月，芯片的晶体管密度将提高一倍，运算性能提高一倍。也有人把它注解为“每18个月，CPU的运算速度将提高一倍”。该论点自从Moore首次提出以来一直相当准确，并被公认为摩尔定律。

对于微处理器，这种趋势接近于每两年翻一番，而令人惊异的是，这个指数增长一直持续了30年至今，而看起来这种趋势还将继续下去直到可以预见的将来。

Bell定律指出：如果保持计算能力不变，则微处理器的价格每18个月减少一半，即每10年会有一类新的计算设备诞生。经历了从巨型机、小型机、工作站、PC、PDA以及PDA与移动通信设备的融合与演变之后，新一代计算设备将在不远的将来诞生，它会是什么呢？虽然现在依旧很难准确预见，但分析演化历史不难看出，计算设备整体上朝着体积小型化、应用多样化、功能强大等方向发展，而人均占有量却在不断增高。未来，如果生物芯片技术有了突破性进展，那么功能更强大的新型计算设备替代目前的硅片系统也是完全可能的，目前我们正处于PDA向下一代计算设备过渡的时期。

1.1 计算机发展

按是否由电子技术和半导体技术为计算机硬件提供硬件基础来划分，计算机的发展历史可初步分为机械式计算机的启蒙时代和电子计算机时代。

1.1.1 机械式计算机的启蒙时代

计算机自出现已经历了漫长的几百年的时光。在电子元器件发明之前，人们就开始寻求用机器代替人进行计算的可行性。最初出现的计算器就是中国人发明的算盘，此后欧

洲陆续发明了计算尺和手摇式计算器,实现了超越函数^①的计算和一些开方运算。早期人们创造了运算表方法来辅助数字运算,此方法持续使用到20世纪计算器和计算机的普及。

法国数学家帕斯卡(Pascal)发明的钟表式齿轮计算机,是机械式计算机的初级阶段。它的外壳用黄铜制成,精致美观。但这台计算机的功能还很差,做乘法时必须用连加的方法,做除法时也只能用连减的方法。而且,这台机器需要一个小钥匙拨动一下方能计算,每次计算结束时都必须复原到零位,然后才能重新计算,很不方便。在计算过程中它又常常发生故障。但是,帕斯卡计算机的发明是人类在计算工具上的新突破,它发明的意义远远超出了这台计算机本身的使用价值,它告诉人们机器可以代替人的思维和记忆。

1703年,德国数学家莱布尼茨(Leibniz)在中国《易经》的启发下,写出了论文“*Explication de L'Arithmétique Binaire*”(谈二进制算术),发表在“*Me'moires de L'Acade'mie Royale des Sciences(Annee MDCCIII)*”(皇家科学院论文集)上,这就是划时代的电子计算机问世的基础,也是数字设计的基础。

到了19世纪,英国数学家布尔(Boor)运用代数方法研究逻辑学,1844年,他发表了著名的论文“*on a General Method in Analysis*”(关于分析中的一个普遍方法),进一步完善了数字设计的数学理论。这些数学理论为日后的数字设计奠定了坚实的科学基础。此后莱布尼茨乘法器和巴贝奇微分器也相继问世。

1.1.2 电子技术和半导体技术的诞生

20世纪40年代至70年代,电子技术和半导体工艺技术的突飞猛进为数字设计的发展提供了新的舞台,数字设计随着电子半导体技术的发展而壮大,并飞速发展。

计算机硬件是以代来区分的。每一代新计算机的诞生都是由数字逻辑技术上的进步而促成的。每一代新计算机都会在性能上有大幅提高,而在体积与成本上则大大降低。

1. 电子管(vacuum tube)时代

美国发明家佛斯特(Lee de Forest)于1906年发明了电子管,随即用它来放大无线电信号和声音信号。1909年,美国贝尔电话公司[即AT&T(美国电话电报公司)的前身]购买了他的专利,经改进后用于长距离电线电信号的放大,之后该公司以电子管为核心器件陆续发明了许多产品,如电子管收音机、电子管录放机、电子管电视机、唱片机和无线电发报机等。至今,电子管产品已逐步被半导体产品取代,但是在音频和显示领域,它在需要大功率的电子产品中依然广泛运用。

以布尔代数为基础,科学家已经在电子管技术和产品的基础上实践了数字设计,当时发明的电子计算机能够进行多种运算,并把输入的信息存储到磁性材料中。

1946年2月,由美国宾夕法尼亚大学莫尔学院的物理学博士莫希利(Mauchley)和电气工程师埃克特(Eckert)领导的小组,研制成功世界上第一台数字式电子计算机ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Calculator,电子数字积分计算机)。这台计算机使用了约18 000个电子管、1500个继电器,耗电量约140 kW,占地面积约167 m²,重量约30吨,每秒能执

^① 超越函数是指那些不满足任何以多项式作为系数的多项式方程的函数。即,单变量函数若为代数独立于其变量,即称此函数为超越函数。对数、指数函数和三角函数均为超越函数。

行 5000 次加法, 采用字长为 10 位的十进制计数方式, 编程通过接插线进行。1944 年, 著名的美籍匈牙利数学家冯·诺依曼(Von Neumann)获知 ENIAC 的研制后, 参加了为改进 ENIAC 而举行的一系列专家会议, 研究了新型计算机的体系结构。在由他执笔的报告里, 提出了采用二进制数表示、存储程序(stored program)并在程序控制下自动执行的思想。按照这一思想, 新机器将由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备这五大部件构成。报告还描述了各部件的职能和相互之间的联系。1949 年, 英国剑桥大学的威尔克斯等人在 EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator, 电子延迟存储自动计算器)上实现了第一台基于冯·诺依曼模型的存储程序计算机。

但是, 第一台基于冯·诺依曼模型的存储程序计算机其实是 1949 年研制的 EDSAC (Electronic Discrete Sequential Automatic Computer)计算机。在最初 10 年(1945 年至 1955 年)造出的计算机利用真空管作为算术逻辑运算元件, 都被归类为第一代计算机。它们与 1945 年以前开发的机械式和机电式机器相比, 加速比提高了 100~1000 倍。作为存储器的元件则是汞(水银)或镍制的延迟线及阴极射线管, 因而第一代计算机存储器的容量很小, 不超过 4096 字。用于输入/输出的设备是穿孔卡片、穿孔带和打字机。

2. 晶体管(transistor)时代

电子管的缺陷是体积大, 功耗过高, 价格昂贵, 易破碎。三极管的使用效率非常低, 加上灯丝过热, 使用时间短, 特别是处理高频信号的效果不理想, 人们开始寻找电子管的替代元件。

1945 年秋天, 美国贝尔实验室成立了半导体研究小组, 这一小组由 1936 年进入贝尔实验室的肖克莱(William Schottly, 理论物理学家)负责, 成员有布拉顿(Walter Brattain)和巴丁(John Bardeen)等科学家。1946 年, 半导体组把注意力集中到两种最简单的半导体材料(锗和硅)上, 经过反复实验, 巴丁和布拉顿制成了固体器件。他们利用两个靠得很近, 间距仅为 0.05 mm 的触须接点来代替金箔接点, 制成了“点接触型晶体管”(point-contact transistor)。这一实验发现晶体管具有放大电流的作用。1947 年 2 月 6 日, 世界上最早的实用半导体晶体管问世了。这个晶体管在首次实验时能把音频信号放大 100 倍, 其外形比火柴棍短粗一些。1948 年 2 月, 肖克莱发明了面接触式晶体管(junction transistor), 这就是今天仍在使用的晶体管结构。在晶体管的研究过程中, 肖克莱等还发现了结型场效应管的工作原理, 为后来的 MOS 管集成电路奠定了基础。从此人类进入了硅飞速发展的黄金时代。

第二代计算机的特征是使用晶体三极管, 并在 1955 年至 1965 年间造出。用于算术逻辑运算的真空管被晶体三极管所取代。尺寸极小的磁心用在随机存储器中, 磁鼓则用于辅助存储。这些元件将计算机的速度又增加了另外一个 100~1000 倍。关于软件, 开发出了如 FORTRAN 和 Algol 这样的高级语言, 从而结束了在第一代计算机中用手工写机器代码程序的历史。

3. 从分立到集成

数字设计在晶体管设计平台上得到更多实践机会, 也得到了更快的发展。最好的实践又是在计算机上得到体现的, 更多的个人和商业团体投入计算机的研发当中, 更高速的晶体管计算机被研制出来, 计算机慢慢地从研究室走向市场, 同时数字设计也有了更广阔的发展空间。

以分立晶体管为主开发的产品, 主要是以模拟电路设计为主, 即便是到了后来, 也仅仅是以取代电子管为目标。一直到 20 世纪 80 年代, 很多电器和其他产品的结构都保留着电

子管的痕迹，这些系统的电路复杂且成本较高。数字设计并不能在其中发挥很大的作用，直到近些年，数字设计才有了巨大优势，这些产品慢慢走向模数结合的设计。

电子管的很多缺点延续到分立晶体管身上，复杂的连线导致电路系统设计复杂，而且体积、功耗比较大，电子产品的电路成本和使用成本都比较高。设法克服晶体管的缺陷，成为半导体工艺工程师后来追逐的主要目标。

在 1957 年，德州仪器(Texas Instruments, TI)公司发明了平面晶体管，该公司的工程师基尔比在此基础上制造出第一块 IC(Integrated Circuit)，集成了 1 个晶体管、1 个电容和 1 个电阻。之后，基尔比在 IRE(美国无线电工程师学会)的一次会议上宣布了“固体电路”(solid circuit)的出现，这就是以后的“集成电路”的代名词。1959 年，仙童(Fairchild)半导体公司的科学家诺伊斯发明了可制造性更强的 IC 设计。最初的电路集成度只有几十个管子到一百个管子，之后集成电路的发展可以用“爆炸”来描述。例如，在 Intel 公司 45 nm 工艺的 Penryn 双核处理器芯片上集成了约 4.1 亿个晶体管。

最初的数字集成电路是以晶体管为主的 TTL 电路，第一块数字集成芯片就是 1962 年 TRW 推出的 TTL(Transistor-Transistor Logic，晶体管逻辑电路)集成电路；1966 年，ECL(Emitter Coupled Logic)IC 由 Motorola 设计推出。

TTL 和 ECL 都是由晶体管组成的数字逻辑结构电路，而 CMOS 则是由场效应管(PMOS 和 NMOS)组成的数字逻辑结构电路，晶体管和场效应管又代表两种不同的制造工艺，后来证明 CMOS 电路才是数字设计的首选，主要原因是 CMOS 工艺可以缩小线宽，提高集成度，而双极型工艺(晶体管)在线宽上受到了限制，所以我们现在主要使用 CMOS 来设计数字电路。晶体管在数字电路的设计上还有一席之地，原因在于其驱动能力较强，而且频率响应相对较快，所以在一些要求大驱动、高速度的接口部件或模数接口部件中，都有它的适用场所，而且现在的分立元器件市场，也还常常看到小规模集成度的 TTL IC 的身影，它们常常在电路产品系统中起信号中继增强的作用。

1969 年，在日本计算器公司的委托下，Intel 公司开始了四位总线的、具有简单指令的集成微控制器 4004 的研制，历经两年的艰苦努力，终于在 1971 年研制成功，这就是现在 CPU(Center Processor Unit)的原始模型。实际上，4004 由 3 块芯片封装而成，一块是 320 bit 的 RAM(随机存储器)，一块是 2 Kbit 的 ROM(只读存储器)和一块 4 位总线的处理器。4004 的处理器使用了大约 2300 个 MOS 管，采用 10 μm 线宽的 PMOS 硅栅工艺，工作时钟为 108 kHz，整个芯片面积约为 13.5 mm^2 。1972 年，Intel 研制成功 8 位微控制器 8008，这款芯片很快进入市场并在商业上获得了巨大成功。

在计算机中使用集成电路芯片标志着计算机历史从 1965 年开始过渡到第三代，历时 15 年，直到 1980 年。半导体存储器芯片逐渐代替了磁心用于主存储器，而磁盘代替磁鼓用于辅助存储。商用计算机大批量生产，例如 1964 年推出的第一个主机系列服务器 IBM System 360 和 20 世纪 70 年代推出的 DEC PDP-11 小型计算机。在这一时期有许多新技术被开发出来。微程序、流水线和并行性都引进到计算机设计当中。存储器系统引入了高速缓存和虚拟存储器。这些技术成就使超级巨型计算机的发展成为可能。第一台科学巨型计算机是 CDC 6600(Control Data Corporation)，于 1964 年推出。第一台向量巨型计算机是 CRAY-1，于 1974 年推出。