

新世纪计算机及相关专业系列教材

嵌入式系统原理 设计与应用

徐安 陈耀 张铮 编著
白英彩 主审

 科学出版社
www.sciencep.com

中国美术学院美术考级教材

素描头像

设计与应用

中国美术学院美术考级教材
素描头像

中国美术学院美术考级教材
素描头像

新世纪计算机及相关专业系列教材

嵌入式系统原理 设计与应用

徐安 陈耀 张铮 编著

白英彩 主审

(新世纪计算机及相关专业系列教材)

ISBN 978-7-03-023193-5

计算机专业教材

I. 嵌... II. 徐... III. 张... IV. 白...

TP311.1

中国版本图书馆

2008年10月第1版

2008年10月第1次印刷

印数: 1-1000 字数: 208 000

定价: 50.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

科学出版社

北京

举报电话: 010-64022910 010-64022911 13501151308

内 容 简 介

嵌入式微控制器是嵌入式系统的核心,是专为嵌入式控制而设计、制造和应用的。本书从这一共性出发,选择了以 80C51 为内核,在抗干扰、降低电磁辐射和功耗等多方面做了重大改进的 STC89C51/52 系列嵌入式微控制器为典型,讲述了嵌入式微控制器的组成、指令、汇编语言程序设计、资源与应用、数据传送与转换和 C 语言程序设计;较详细地介绍了嵌入式系统的原理、设计和应用。

本书可作为普通高等院校电子信息、自动化、电气工程、机电一体化等专业本科生的教材,也可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统原理 设计与应用/徐安,陈耀,张铮编著. —北京:科学出版社, 2008

(新世纪计算机及相关专业系列教材)

ISBN 978-7-03-023163-5

I. 嵌… II. ①徐…②陈…③张… III. 程序设计-高等学校-教材
IV. TP311.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 156326 号

责任编辑:陈晓萍/责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉/封面设计:王浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 10 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2008 年 10 月第一次印刷 印张:12 1/2

印数:1—4 000 字数:293 000

定价:20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8003

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

林卷民余业寺关脉及脉算析55世德

嵌入式系统设计师 培训指导委员会

委 员 会

主 任

陈章龙 教授

复旦大学

顾 问

白英彩 教授

上海交通大学

委 员

徐 安 教授

同济大学

吴方中 教授

苏州科技学院

夏雨人 教授

上海交通大学

新世纪计算机及相关专业系列教材

教材编委会

顾问编委

施伯乐 教授 复旦大学
何积丰 教授 华东师范大学

主 任

白英彩 教授 上海交通大学

秘 书 长

张昆藏 教授 青岛大学

编 委

刘 璟 教授 南开大学
宋方敏 教授 南京大学
何炎祥 教授 武汉大学
余雪丽 教授 太原理工大学
阮家栋 教授 上海工程技术大学
顾训穰 教授 上海大学
徐汀荣 教授 苏州大学
曾 明 教授 西安交通大学
曹元大 教授 北京理工大学
曹文君 教授 复旦大学
陶树平 教授 同济大学
缪淮扣 教授 上海大学
谢康林 教授 上海交通大学

序

电子计算机(又称电脑)自20世纪中叶诞生以来,经历了一个只能由极少数人参与研制、应用的神秘阶段,长达30多年,直到80年代才逐渐进入普遍应用与普适教育阶段。这时的计算机应用已渗透到国民经济的各部门,进而又用于人们的工作、生活和娱乐等方面,这是计算机与通信技术、自动化技术和微电子技术密切结合的结果,并以网络形态迅速普及发展开来。与此同时,掀起了以信息技术(IT)为基础的信息经济时代。大致说来,IT经历了三次浪潮,即以1981年个人计算机(PC)的推出乃至广泛应用的阶段为第一次浪潮;20世纪90年代初期,Internet被推向社会进入商用阶段,从而掀起了第二次IT浪潮;本世纪之初又掀起了以发展存储为中心的存储区域网(SAN)和网络附加存储系统(NAS),用以存储和保护海量昂贵数据为目标的第三次IT浪潮。这三次浪潮期间也恰逢我国改革开放时期,计算机是IT的重要子集,全国的计算机教育也得到蓬勃的发展,止于1995年,全国已有137所高校设有计算机系或专业,而到2005年,我国已发展到有505所高校具有计算机本科以上的计算机科学技术专业,其中部分高校还招收相应的硕士、博士研究生,说明最近的10年我国IT技术处于加速发展时期。针对这种情况,我国以往在计算机教育方面多沿用美国的IEEE/ACM组织的CC1991/CC2001计算机学科的课程计划,恐难以适应目前的发展状况。

新世纪以来,更多的专家、学者认为,计算机科学技术的教学任务目标,以划分为培养“研究型”、“工程型”和“应用型”三个方面的人才为宜。这三方面不是上、中、下的层次关系,而是处于同一层面。只是培养各类型人才在数量上不同而已。“研究型”人才可能占极少数,“应用型”人才是大多数,而培养“应用型”人才的任务还可以根据各高校的自身情况而细化为是为哪一行业背景而培养相应的应用型人才。这种定位很重要,既涉及各高校的教学设施、教学队伍和生源情况,又涉及当下的人才市场需求情况。我们在科学出版社支持下成立的“新世纪计算机及相关专业系列教材”编委会,其宗旨就是以满足新形势下的计算机教育为己任。

我们认为,针对“研究型”人才的计算机教育,其课程设置应以程序设计基础、离散结构、数据结构、算法分析、计算机组成基础、计算机体系结构、操作系统、数据库原理、编译原理、软件工程、计算机网络等为核心课程。而培养“应用型”人才的计算机专业的课程设置,只选上述大部分的核心课程即可,代之以更靠近行业应用和更侧重实训性的课程,例如嵌入式系统、计算机网络通信、微机原理与接口、数字逻辑、人工智能、计算机图形学和信息系统工程等,也可以为面向某行业应用背景,开设相应的组合式的课程,其中包括一些对口的选修课和实训性课程。培养“工程型”人才则介于上述两者之间,在此不再赘述。

由于信息技术发展迅猛,其教育内容也日益增多,为使学生打好基础,并培养其实践能力以适应市场需要,精心设计课程设置计划是各院校一项首要任务。本编委会以组织业内的知名教授、专家和学者精心编审出一批相应的教材为己任。

本套教材的出版工作于2000年正式启动,由上海交通大学左孝凌教授负责协调、组织工作。几年来,一批优秀教材陆续出版,在读者中反映良好。2004年8月,左教授因病去世。编委会于2005年1月聘上海交通大学白英彩教授接任编委会主任,并增补青岛大学张昆藏教授为编委会秘书长,协助继续完善这套教材。我们诚恳希望各兄弟院校的教师能够参与、协助、承担和分享编委会的任务。

编委会
(白英彩执笔)
2006年5月

前 言

面向检测控制对象，嵌入到应用系统中的计算机系统称为嵌入式系统，由于在实时性、可靠性、物理尺寸、重启动和故障恢复方面的特殊要求，相对于通常的计算机应用，其涉及面更为广泛，设计也更为复杂。随着被嵌入对象的体系结构、应用环境要求的不同，嵌入式系统也有各种类型。

嵌入式微控制器应嵌入式应用的要求而生，并以嵌入式应用为唯一目的，从体系结构到指令系统都是按照嵌入式应用特点专门设计的；在其基本体系结构上，衍生出了能满足各种应用要求的兼容系统，能最好地满足面对控制对象、应用系统的嵌入、现场的可靠运行及控制品质的各种要求，成为发展最快、品种最多、数量最大的嵌入式系统核心。

MCS-51 系列微控制器自 1980 年由 Intel 公司推出以来，以其为核心派生了多家公司、多种型号的微控制器，在我国得到了广泛的学习和应用，长盛近 30 年而不衰，堪称是缤纷的 MCU 世界中一枝奇葩，也证明了它易学易用，容易上手的过人之处。

近年来，在抗干扰、降低电磁辐射和功耗等多方面对嵌入式系统提出了更高的要求，本书选择在这些方面进行了重大改进的 STC89C51/52 系列为典型，从共性出发，较详细地介绍了嵌入式系统的原理、设计和应用，希望达到举一反三的效果。

多年来，白英彩、陈章龙、张友德、涂时亮、何立民、胡汉才、邵贝贝、马忠梅、周航慈、阮家栋、周立功、陈明计、谢瑞和、刘慧银、金炯泰、李学海、白中英等教授在微控制器教学的园地里辛勤耕耘，本书多处引用了他们的研究成果，谨在此表示衷心的感谢。

担任本书主审的上海交通大学白英彩教授认真审阅了全书，提出了指导性的建议和中肯的意见；陈耀和张铮老师根据多年教学经验，对全书各章提出了重要的修改意见。研究生郁海华、丁才云、张振富、吴丽蓉、郭凯杰、陆圣轩、张齐、吴霄、朱臣一、戴云等为图文制作输入和程序校核付出了辛勤劳动，在此谨致以深切的谢意。

限于编者水平，书中错误和不妥之处在所难免，热切期待着读者的批评指正。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 嵌入式微控制器概述	1
1.2 微处理器和嵌入式微控制器	1
1.3 嵌入式微控制器和嵌入式系统	2
1.4 嵌入式微控制器的应用开发	2
1.4.1 硬件和软件的协同设计	2
1.4.2 嵌入式控制系统的设计方法	3
1.5 嵌入式微控制器的历史与发展	4
习题与思考题	5
第 2 章 嵌入式微控制器的基本组成	6
2.1 嵌入式微控制器结构	6
2.1.1 嵌入式微控制器的体系结构	6
2.1.2 嵌入式微控制器的组成	7
2.1.3 嵌入式微控制器的时序	10
2.2 嵌入式微控制器的工作模式	13
2.2.1 复位模式	13
2.2.2 程序执行模式	14
2.2.3 节电模式	14
2.2.4 程序的写入、校验和擦除模式	15
2.3 STC89C51/52 系列嵌入式微控制器	17
2.3.1 STC89C51/52 系列嵌入式微控制器的封装和引脚	17
2.3.2 STC89C51/52 系列嵌入式微控制器的功能	18
习题与思考题	19
第 3 章 嵌入式微控制器的指令系统	21
3.1 嵌入式微控制器的指令	21
3.1.1 指令表示形式	21
3.1.2 指令的字节	21
3.1.3 指令的寻址方式	21
3.1.4 指令的功能	27
3.2 MCS-51 指令系统	28
3.2.1 数据传送指令	29
3.2.2 算术运算指令	34
3.2.3 逻辑运算指令	38
3.2.4 移位指令	40

3.2.5	控制转移指令	41
3.2.6	位操作指令	45
3.2.7	空操作指令	47
3.3	汇编语言及程序设计方法	48
3.3.1	汇编语言的格式	48
3.3.2	伪指令和源程序的汇编	49
3.3.3	汇编语言程序设计方法	51
习题与思考题		55
第4章	嵌入式微控制器的内部资源与应用	56
4.1	嵌入式微控制器的存储组织与管理	56
4.1.1	半导体存储器的种类和特点	56
4.1.2	嵌入式微控制器内部的 E ² PROM 和 Flash 存储器	57
4.1.3	ICP、ISP、IAP 和监控 ROM	59
4.1.4	STC89C51 系列的存储器组织与管理	61
4.2	嵌入式微控制器的时钟、定时与计数控制	66
4.2.1	时钟、定时与计数控制模块	66
4.2.2	STC89C51 系列的时钟、定时与计数控制	68
4.3	嵌入式微控制器的复位与中断	79
4.3.1	复位的作用、效果和复位源	79
4.3.2	STC89C51 系列的复位功能	80
4.3.3	中断源、中断功能和中断过程	80
4.3.4	STC89C51 系列的中断系统	82
4.4	嵌入式微控制器的监控与电源管理	86
4.4.1	监控与电源管理	86
4.4.2	STC89C51 系列的监控、节能与抗干扰	88
习题与思考题		90
第5章	嵌入式微控制器的数据传送与转换	91
5.1	I/O 口与数据传送	91
5.1.1	几种 I/O 数据传送方式	91
5.1.2	I/O 端口编址与类型	93
5.1.3	并行 I/O 端口	94
5.2	串行通信与异步串行通信接口 SCI 口	97
5.2.1	串行通信基础	97
5.2.2	RS-232C 标准	102
5.2.3	STC89C51 系列的内部串行口与应用	104
5.3	数/模转换与模/数转换	121
5.3.1	D/A、A/D 原理与技术性能	122
5.3.2	并行 D/A 和 A/D 转换	130
5.3.3	串行 A/D 转换	138

习题与思考题	142
第 6 章 嵌入式微控制器的 C 语言程序设计	144
6.1 C 语言与微控制器	144
6.1.1 微控制器的编程语言	144
6.1.2 C 语言编译器与程序开发过程	145
6.1.3 微控制器 C 语言程序结构	146
6.2 C51 数据与运算	146
6.2.1 数据类型	146
6.2.2 数据的存储	148
6.2.3 MCS-51 结构的 C51 定义	149
6.2.4 C51 的指针类型	151
6.3 C51 程序设计	152
6.3.1 模块化开发	152
6.3.2 覆盖、共享和连接	152
6.3.3 混合编程	155
6.3.4 程序优化	158
6.4 51 系列微控制器 C 语言程序设计基础	159
6.4.1 KEIL 编译器	159
6.4.2 51 内部资源的 C 编程	160
6.4.3 51 扩展资源的 C 编程	162
习题与思考题	167
第 7 章 嵌入式控制系统的研制	168
7.1 嵌入式控制系统的开发	168
7.1.1 嵌入式控制系统的开发工具	168
7.1.2 嵌入式控制开发系统功能	169
7.2 嵌入式控制系统研制过程	171
7.2.1 总体设计	172
7.2.2 硬件设计	172
7.2.3 软件设计	172
7.2.4 可靠性设计	175
习题与思考题	176
附录 MCS-51 指令表	178
主要参考文献	185



概 论

1.1 嵌入式微控制器概述

嵌入式微控制器 (embedded microcontroller) 是完全作嵌入式应用, 专为控制和检测而设计制造的微型计算机, 也称为微控制器 (microcontroller unit, MCU); 又因为它在一片集成电路芯片上集成了计算机的 3 大部分: 中央处理器 (CPU)、存储器 (RAM 和 ROM) 和输入/输出端口 (I/O Ports), 在我国又被广泛称为单片机 (single chip microcomputer)。嵌入式控制技术的飞速发展, 功能越来越强大, 而成本却越来越低, 使经典电子系统迅速进化为全盘智能化的现代电子系统。嵌入式微控制器作为最典型、最广泛、最普及的现代电子系统的基本核心, 已成为电气工程师和各行各业的技术人员实现检测和控制目的的有力工具。

从家用电器到航天飞机, 一切现代化技术都离不开嵌入式微控制器, 可以毫不夸张地说, 嵌入式微控制器已经广泛渗透到国民经济各个领域, 无时无刻不在影响每个现代人的生活。

1.2 微处理器和嵌入式微控制器

微计算机技术的发展, 形成了两大分支: 微处理器和嵌入式微控制器。

微处理器 (microprocessor unit, MPU) 是计算机的核心部件, 计算机系统的主要用途是科学计算、数据处理、图像分析、数据库管理、人工智能、数字模拟和仿真等。

嵌入式微控制器主要用于控制目的, 要求构成的检测控制系统有实时、快速的外部响应, 能迅速采集到大量数据, 做出逻辑判断与推理后实现对被控制对象的参数调整与控制。

随着计算机科学与微电子技术的高速发展, 这两大分支都得到了突飞猛进的发展。

由于人类对海量数值运算的无限需求, 8 位、16 位的 MPU 都已经被淘汰, 32 位机也以每两三年换代一次的速度发展。计算机系统的速度越来越快, 功能越来越强, 而用户的操作则越来越简单。

嵌入式微控制器的发展直接利用了 MPU 的成果, 也发展了 16 位、32 位及 64 位机型, 目标是高性能、高可靠性、低电压、低功耗、低噪声和低成本。但在以 ARM 为代表的 32 位微处理器日益发展的同时, 现阶段世界年产量数十亿计的 8 位微控制器仍占据着重要地位。

为了满足多种多样检测控制对象的要求, 构成各种专用控制器与多机控制系统, 微

控制器的发展还表现在接口及其性能上。例如,各种传感器接口、工业对象的电气接口、伺服驱动的功率接口、人机对话接口、通信网络接口等;接口的高速互用、中断处理;模/数、数/模转换的速度和精度,位操作和功率驱动,程序运行监控和信号实时处理等性能。

1.3 嵌入式微控制器和嵌入式系统

近代电子计算机进入了微型机时代后,微型计算机在信息处理、逻辑分析、决策判断和输入/输出管理等自动控制领域表现出无与伦比的优势,并以其可接受的小型体积和现场可靠性嵌入到各种对象体系如机车、舰船、生产线、大型机床、微型机器人等中去,构成了形形色色的自动化系统。

面向检测控制对象,嵌入到应用系统中的计算机系统称为嵌入式系统。实时性是其主要特征,在可靠性、物理尺寸、重启动和故障恢复方面也有特殊要求,因而相对于通常的计算机应用设计更为复杂,涉及面也更为广泛。被嵌入对象的体系结构、应用环境要求各不相同,嵌入式系统也有各种类型。

嵌入式微控制器是典型的嵌入式系统。它应嵌入式计算机系统应用的要求而生,并以嵌入式应用为唯一目的。微控制器从体系结构到指令系统都是按照嵌入式应用特点专门设计的,在其基本体系结构上,衍生出能满足各种应用要求的兼容系统,能最好地满足面向控制对象、嵌入应用系统、现场可靠运行及控制品质的各种要求。因此,微控制器是发展最快、品种最多、数量最大的嵌入式系统。

从形式上可将嵌入式系统分为系统级、板级和器件级。

① 系统级为各种类型的工控机,包括通用机改装的工控机、各种总线方式的工控机或模块组成的工控机,如 PC104 等。

② 板级有各种类型的带 CPU 的主板及 OEM 产品。

③ 器件级则以嵌入式微控制器最为经典。其 IC 器件的体积和现场运行环境的可靠性满足了许多小型对象的嵌入式应用要求。不少半导体厂商还以嵌入式应用为目标,将通用 CPU 改造成嵌入式微处理器 (embedded microprocessor unit, EMPU),形成了有良好的开发环境与操作系统支持的器件级嵌入式系统,如由 80386 改造成的 386EX。

1.4 嵌入式微控制器的应用开发

1.4.1 硬件和软件的协同设计

硬件和软件的协同设计在微控制器的应用开发中占有重要地位。

嵌入式微控制器将硬件和软件结合起来,构成一个专门的计算装置,完成特定的功能或任务。它是一个大系统或大的电子设备中的一部分,工作在一个与外界发生交互并受到时间约束的环境中,在没有人工干预的情况下进行实时控制。其中,软件用以实现有关功能并使系统具有适应性和灵活性;硬件(处理器、ASIC、存储器等)用以满足性能乃至安全的需要。

嵌入式微控制器的设计与硬件提供的支持（包括开发手段）及软件技术的发展紧密相关。应用先进的硬件设计和开发技术，不但可以获得所需的性能（如速度、电源、低成本和可靠性等），而且还能取代部分软件，完成特定的功能。软件的设计也离不开硬件的支持（如处理器、高级缓冲和并行能力等），高性能、多功能的硬件可以提高软件开发和设计效率，保证了软件质量。而软件设计技术和开发手段，也可以充分发挥硬件的作用，提高系统的性能。在保证系统性能的前提下，微控制器系统的设计要综合考虑硬件和软件的任务分工（包括考虑用硬件代替软件，或用软件置换硬件）；硬件设计和软件设计的并行、交替和协同；以及硬件和软件的合成。

1.4.2 嵌入式控制系统的设计方法

通常，设计嵌入式控制系统的方法有以下3种。

1. 以印制板计算机辅助设计软件和在线仿真器为主要工具

根据嵌入式控制系统的功能要求，划分功能模块后，再对模块进行硬件和软件功能实现的分配。

硬件设计主要是根据性能参数要求对各功能模块所需要使用的元器件进行选择 and 组合，选择的基本原则就是选购性价比最高的通用元器件。从模块到系统找到相对优化的方案，画出电路原理图。硬件设计的关键是利用印制板（PCB）计算机辅助设计（CAD）软件对系统的元器件进行布局和布线，然后加工印制板，装配和硬件调试。

软件设计贯穿整个系统的设计过程，主要包括任务分析、资源分配、模块划分、流程设计和细化、编码调试等。软件设计的工作量主要集中在程序调试，在线仿真器（in-circuit emulator, ICE）对软件调试的作用非常重要。

2. 以嵌入式操作系统和电子设计自动化综合开发平台为主要工具

嵌入式操作系统（embedded operating system, EOS）和高性能的电子设计自动化（EDA）综合开发平台的推出，为开发复杂的嵌入式控制系统应用软件提供了底层支持和高效率开发平台。EOS是一种功能强大、应用广泛的实时多任务系统软件，与通用系统机中的OS相比，内核短小精悍、开销小、实时性强和可靠性高，还提供各种设备的驱动程序和TCP/IP协议支持。用户可以通过应用程序接口（API）调用函数形式来实现各种资源管理，用户程序可以在EOS的基础上开发并运行。

随着微电子工艺技术的发展，硬件设计师可以利用各种通用的可编程半定制逻辑器件逐步把原先要通过印制板线路互连的若干标准逻辑器件设计制作成专用集成电路（ASIC），把印制板布局和布线的复杂性转换成半定制器件内配置的复杂性，增加了可编程应用的灵活性；大大减少了印制板的面积和接插件的数量，使印制板上互连器件的线路、装配和调试费用越来越少，降低了系统综合成本；更重要的是降低了系统功耗，提高了系统工作速度，大大提高了系统的可靠性和安全性。

设计人员从过去选择和使用标准通用集成电路器件，逐步转向利用各种EDA工具和标准的半定制逻辑器件，如复杂可编程逻辑器件（CPLD）和现场可编程门阵列（FPGA）等，自己设计和制作部分专用的集成电路器件，然后把用户定义的集成电路

(customer specified integrated circuit, CSIC)、可编程外围器件、所选择的 ASIC 与嵌入式微控制器在印制板上布局、布线构成系统。

3. 以 IP (intellectual property) 内核库为设计基础, 软硬件协同设计单片系统

目前, 集成设计已进入单片系统 (system on a chip, SoC) 设计阶段, 并开始实用。嵌入式控制系统设计从整个系统性能要求出发, 把微处理器、模型算法、芯片结构、外围器件各层次电路直至器件的设计紧密结合起来, 并通过建立在全新理念上的系统软件和硬件的协同设计, 在单个芯片上完成整个系统的功能, 达到高密度、高速度、高性能、小体积和低电压等指标, 特别是低功耗要求。

Philips、Atmel 和 TI 等厂商就是利用 Intel MCS-51 的 IP 内核模块, 开发出了各具特色的与 Intel MCS-51 兼容的微控制器。

常用的 IP 内核模块有各种不同的 CPU (32/64 位 CPU 或 8/16 位微控制器)、32/64 位 DSP、DRAM、RAM、E²PROM、Flash Memory、A/D、D/A、MPEG/JPEG、LJSB、PCI、标准接口、网络单元、编译器、编码/解码器和模拟器件模块等。丰富的 IP 内核模块库是快速地设计 ASIC 和 SoC 从而尽快占领市场的基本保证。

上述 3 种嵌入式控制系统设计方法将会长期并存, 各有各的应用范围。

大多数应用开发人员在相当长的一段时间内, 都会采用前两种方法。第一种设计方法目前仍为电子系统设计人员广泛采用, 并且比较适合于初级应用设计人员和小规模应用, 可以根据需要, 逐步向第二种方法过渡和发展。

第三种设计方法实现的 SoC 是具有一定规模、广泛使用的应用系统。复杂的 SoC 需要大的半导体厂商才能设计和实现, 对应用人员来说主要是选用问题。

1.5 嵌入式微控制器的历史与发展

20 世纪 70 年代后期, 4 位逻辑控制器件发展到 8 位。第一代微控制器的代表产品是 Intel 8048, 它将 CPU、串并行口、定时器和 128B RAM 集成在一个芯片内, 使用的是 NMOS 工艺。

第二代微控制器中, Intel MCS-51 系列微控制器进入中国市场最早, 过渡到 CMOS 工艺的 80C51 相对晚些。1982 年以后, NMOS 工艺逐渐被高速低功耗的 HCMOS (高速互补型金属氧化膜半导体) 工艺代替。不少公司开始生产与 80C51 兼容的微控制器, 并扩展了其功能。Motorola (Freescale) 公司是世界上最大的微控制器类集成电路供应商, 1999 年推出了引入 Flash 及锁相环等技术的 8 位 MC68HC08 系列微控制器, 以其功能强、成本低、功耗低、开发容易等优点将逐步取代 MC68HC05。在我国 MCU 市场上影响较大的还有 Microchip 公司的 PIC 系列微控制器, 它的最大特色是采用精简指令集、哈佛总线结构、流水作业取指方式, 容易被用户掌握, 抗干扰能力强, 价格低廉。

近 10 年来, 出现了具有许多新特点, 可称之为第三代的微控制器。

纯单片型微控制器由于内存容量已做得相当大, I/O 功能已足够丰富, 不需要外加扩展芯片, 因而取消了传统的地址/数据扩展总线, 使整机成本降低又可以防伪。目前

绝大多数嵌入式微控制器系列都提供可由用户一次性编程的 OTPROM 形式，其价格逐渐逼近掩膜 ROM；掩膜产品可接受的价格起点也已经大大降低；Flash ROM 的可靠性虽然目前稍差，但可以在系统编程和多次编程，在系统开发阶段和小批量应用系统中已广泛使用。

随着微控制器程序空间的扩大，在空余空间可嵌入实时操作系统（RTOS）等软件，使得用户二次开发的环境发生了根本性的变化，将大大提高产品开发效率，提高微控制器性能。

微控制器扩展方式从并行总线型发展出各种串行总线，连线很少，接口简易，并且被工业界接受，形成一些工业标准，如 I²C 总线、USB 接口；甚至在芯片内部集成了网络的底层协议，如控制器局域网总线（controller area network, CAN），使得众多的 MCU 能轻松组网。

不少微控制器集成了多个 CPU，如将 3 个 CPU 集成到一个芯片中，分别用于 I/O 控制、通信和总体协调。随着超大规模集成电路技术（VLSI）的快速发展，将数字信号处理器（DSP）、精简指令计算机（RISC）等集成到微控制器中的产品不断出现。

为了满足越来越多的被控制对象的要求，适应各种复杂环境，构成各种智能的专用控制器与多机控制系统。微控制器的接口不断发展，性能不断提高；在实现全面功耗管理、提高可靠性、降低工作电压、抗噪声和抗干扰等各方面，新技术也不断涌现。MCU 的工作电压已普遍降至 3.3V，更低工作电压的 MCU 还在不断出现。

许多原来是微控制器用户的电气厂商也结合产品形成自己的微控制器体系，不断推出自己的微控制器产品。由于用户的介入，微控制器世界百花齐放，竞争日趋激烈。

嵌入式微控制器功能的飞速发展，已经远远超出了计算机科学的领域。小到信用卡、玩具，大到航天器、机器人，实现数据采集、过程控制、模糊控制等智能系统，几乎是无限的应用领域中，都有着嵌入式微控制器的用武之地。

习题与思考题

1. 微处理器和嵌入式微控制器有什么不同？为什么说嵌入式微控制器是典型的嵌入式系统？
2. 简述嵌入式微控制器的发展历史和主要技术发展方向。
3. 嵌入式控制系统的应用开发有什么特点？
4. 为什么在未来较长一段时期内，8 位嵌入式微控制器仍将是主流机型？
5. 你的身边有哪些设施应用了嵌入式控制技术？分析嵌入式微控制器在其中的作用。
6. 你认为嵌入式微控制器的应用将在哪个领域中得到较大发展？简述该领域的现状和技术发展趋势。