



全国计算机技术与软件专业技术资格（水平）考试指定用书

嵌入式系统设计师教程

崔西宁 主编 / 张 亮 张淑平 副主编

全国计算机专业技术资格考试办公室 组编

清华大学出版社

第2版

全国计算机技术与软件专业技术资格（水平）考试指定用书

嵌入式系统设计师教程

（第2版）

崔西宁 主编 / 张 亮 张淑平 副主编



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是全国计算机专业技术资格考试办公室组织编写的考试指定用书，内容紧扣《嵌入式系统设计师考试大纲》（2019年审定通过），对嵌入式系统设计师资格所要求的主要知识及应用技术进行了阐述。

全书共 11 章，主要内容包括计算机系统基础知识，嵌入式系统硬件基础知识，嵌入式硬件设计，嵌入式系统软件基础知识，嵌入式系统设计与开发，嵌入式程序设计，嵌入式系统的项目开发与维护知识，嵌入式系统软件测试，嵌入式系统安全性基础知识，标准化、信息化与知识产权基础知识，嵌入式系统设计案例分析。

本书内容涉及知识广泛，结构清晰、合理，既可作为全国计算机技术与软件专业技术资格（水平）考试中的嵌入式系统设计师级别的考试用书，也可作为高等院校嵌入式系统相关课程的教材。

本书扉页为防伪页，封面贴有清华大学出版社防伪标签，无上述标识者不得销售。
版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目（CIP）数据

嵌入式系统设计师教程 / 崔西宁主编. —2 版. —北京：清华大学出版社，2019
全国计算机技术与软件专业技术资格（水平）考试指定用书
ISBN 978-7-302-53697-0

I. ①嵌… II. ①崔… III. ①微型计算机—系统设计—资格考试—教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 178368 号

责任编辑：杨如林
封面设计：何凤霞
责任校对：徐俊伟
责任印制：杨 艳

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：清华大学印刷厂

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×230mm 印 张：37.75 防伪页：1 字 数：828 千字

版 次：2006 年 8 月第 1 版 2019 年 12 月第 2 版 印 次：2019 年 12 月第 1 次印刷

定 价：118.00 元

产品编号：084060-01

前 言

全国计算机技术与软件专业技术资格（水平）考试实施至今已经历了二十多年，在社会上产生了很大的影响，对我国软件产业的形成和发展做出了重要的贡献。为了适应我国计算机信息技术发展的需求，人力资源和社会保障部、工业和信息化部决定将考试的级别拓展到计算机信息技术行业的各个方面，以满足社会上对各种计算机信息技术人才的需要。

编者受全国计算机专业技术资格考试办公室的委托，对《嵌入式系统设计师教程》进行改写，以适应新的考试大纲要求。在考试大纲中，要求考生掌握的知识面很广，每个章节的内容都能构成相关领域的一门甚至多门课程，因此编写的难度很高。考虑参加考试的人员已有一定的基础，所以本书中只对考试大纲中所涉及的知识领域的要点加以阐述，但限于篇幅，不能详细地展开，请读者谅解。

全书共 11 章，各章内容安排如下。

第 1 章 计算机系统基础知识，概要介绍嵌入式系统，对计算机系统常用进位计数制、数据的表示和运算、计算机系统硬件基本组成和体系结构以及可靠性与系统性能评测等基础知识进行了简要介绍。

第 2 章 嵌入式系统硬件基础知识，主要介绍嵌入式系统所涉及的硬件知识，重点介绍嵌入式微处理器、嵌入式存储体系、嵌入式系统的输入输出接口、嵌入式系统通信接口等方面的硬件接口基础知识。

第 3 章 嵌入式硬件设计，主要介绍嵌入式硬件设计过程中所涉及的基础知识，包括嵌入式系统电源分类、电源管理和电子电路设计中的 PCB 设计、电子电路测试基础知识。

第 4 章 嵌入式系统软件基础知识，主要介绍嵌入式系统软件相关基础知识，包括嵌入式软件基础知识、嵌入式操作系统、嵌入式文件系统、嵌入式数据库等。

第 5 章 嵌入式系统设计与开发，主要介绍嵌入式软件开发基础知识、嵌入式软件开发环境、嵌入式软件开发过程、嵌入式软件移植等。

第 6 章 嵌入式程序设计，主要介绍程序语言及其翻译基础知识以及汇编语言、C 和 C++ 编程基础知识。

第 7 章 嵌入式系统的项目开发与维护知识，主要介绍嵌入式系统开发与维护的相关基础知识，主要包括系统开发过程与过程模型、项目管理、系统质量、开发工具与开

发环境、系统分析、系统设计、系统实施、系统运行与维护等相关知识。

第8章 嵌入式系统软件测试，主要介绍嵌入式软件测试的相关内容，包括软件测试概述、测试过程、测试方法、测试类型、测试工具、测试环境、软件测试实践等。

第9章 嵌入式系统安全性基础知识，主要介绍安全性基础知识，包括计算机信息系统安全概述、信息安全基础、安全威胁防范、嵌入式系统安全方案等内容。

第10章 标准化、信息化与知识产权基础知识，主要介绍标准化基础知识、信息化基础知识和知识产权基础知识。

第11章 嵌入式系统设计案例分析，主要通过案例分析介绍嵌入式系统的整体设计方法和典型嵌入式硬件设计中所涉及的软硬件协同设计、程序设计等内容。

本书第1章由张淑平和朱光明编写，第2章、第3章由张亮和朱光明编写，第4章、第5章由崔西宁、谌卫军和韩炜编写，第6章由张淑平和刘伟编写，第7章由霍秋艳编写，第8章由周敏刚编写，第9章由严体华编写，第10章由刘强和王亚平编写，第11章由崔西宁、张亮和戴小氏编写，最后由崔西宁、张淑平、张亮统稿。

在本书的编写过程中，参考了许多相关的书籍和资料，编者在此对这些参考文献的作者表示感谢。同时感谢清华大学出版社在本书出版过程中所给予的支持和帮助。

因水平有限，书中难免存在错漏和不妥之处，望读者指正，以利改进和提高。

编者

2019年10月

目 录

第 1 章 计算机系统基础知识	1
1.1 嵌入式计算机系统概述	1
1.2 数据表示	4
1.2.1 进位计数制及转换	4
1.2.2 数值型数据的表示	6
1.2.3 其他数据的表示	10
1.2.4 校验码	13
1.3 算术运算和逻辑运算	17
1.3.1 算术运算	17
1.3.2 逻辑运算	20
1.4 计算机硬件组成及主要部件功能	22
1.4.1 中央处理单元	22
1.4.2 存储器	25
1.4.3 总线	35
1.4.4 输入/输出控制	38
1.5 计算机体系结构	42
1.6 可靠性与系统性能评测基础知识	49
1.6.1 计算机可靠性	49
1.6.2 计算机系统的性能评价	52
第 2 章 嵌入式系统硬件基础知识	56
2.1 数字电路基础	56
2.1.1 信号特征	56
2.1.2 组合逻辑电路和时序逻辑电路	56
2.1.3 信号转换	60
2.1.4 可编程逻辑器件	62
2.2 嵌入式微处理器基础	63

2.2.1 嵌入式微处理器的结构和类型	65
2.2.2 嵌入式微处理器的异常与中断	71
2.3 嵌入式系统的存储体系	74
2.3.1 存储系统的层次结构	74
2.3.2 内存管理单元	74
2.3.3 RAM 和 ROM 的种类与选型	75
2.3.4 高速缓存 (Cache)	78
2.3.5 其他存储设备	80
2.4 嵌入式系统 I/O	83
2.4.1 通用输入/输出接口	83
2.4.2 模数/数模接口	84
2.4.3 键盘、显示、触摸屏等接口基本原理与结构	85
2.4.4 嵌入式系统音频、视频接口	87
2.4.5 输入/输出控制	89
2.5 定时器和计数器	89
2.5.1 硬件定时器	89
2.5.2 软件定时器	90
2.5.3 可编程间隔定时器	90
2.6 嵌入式系统总线及通信接口	91
2.6.1 PCI、PCI-E 等接口基本原理与结构	91
2.6.2 USB、串口等基本原理与结构	94
2.6.3 以太网、WLAN 等基本原理与结构	99

2.6.4	Rapid IO 等基本原理与结构	105
2.7	嵌入式 SoC	106
2.7.1	Virtex 系列	106
2.7.2	Spartan 系列	107
第 3 章	嵌入式硬件设计	108
3.1	嵌入式系统电源管理	108
3.2	电子电路设计	111
3.2.1	电子电路设计基础知识	111
3.2.2	PCB 设计基础知识	116
3.2.3	电子电路测试基础知识	129
3.3	Cadence PCB 系统设计	130
3.3.1	原理图设计输入工具	131
3.3.2	PCB 设计系统	133
3.3.3	自动和交互布线工具	134
3.3.4	库管理	134
3.3.5	约束管理器	135
第 4 章	嵌入式系统软件基础知识	136
4.1	嵌入式软件基础	136
4.1.1	嵌入式系统	136
4.1.2	嵌入式软件	139
4.1.3	嵌入式软件分类	141
4.1.4	嵌入式软件体系结构	141
4.1.5	设备驱动层	144
4.1.6	嵌入式中间件	146
4.2	嵌入式操作系统概述	146
4.2.1	嵌入式操作系统的分类	149
4.2.2	常见的嵌入式操作系统	152
4.3	任务管理	155
4.3.1	多道程序技术	156
4.3.2	进程、线程和任务	157
4.3.3	任务的实现	159
4.3.4	任务的调度	162
4.3.5	实时系统调度	167
4.3.6	任务间的同步与互斥	169
4.3.7	任务间通信	176
4.4	存储管理	178
4.4.1	存储管理概述	178
4.4.2	实模式与保护模式	179
4.4.3	分区存储管理	179
4.4.4	地址映射	184
4.4.5	页式存储管理	188
4.4.6	虚拟存储管理	193
4.5	设备管理	197
4.5.1	设备管理基础	197
4.5.2	I/O 控制方式	198
4.5.3	I/O 软件	201
4.6	文件系统	203
4.6.1	嵌入式文件系统概述	204
4.6.2	文件和目录	205
4.6.3	文件系统的实现	207
4.6.4	典型嵌入式文件系统介绍	210
4.7	嵌入式数据库	212
4.7.1	嵌入式系统对数据库的特殊要求	212
4.7.2	典型嵌入式数据库介绍	213
第 5 章	嵌入式系统设计与开发	215
5.1	嵌入式软件开发概述	215
5.1.1	嵌入式应用开发的过程	215
5.1.2	嵌入式软件开发的特点	216
5.1.3	嵌入式软件开发的挑战	217
5.2	嵌入式软件开发环境	218
5.2.1	宿主机和目标机	219
5.2.2	嵌入式软件开发工具	221
5.2.3	集成开发环境	227
5.3	嵌入式软件开发	232
5.3.1	嵌入式平台选型	232
5.3.2	软件设计	233
5.3.3	特性设计技术	238

5.3.4	嵌入式软件的设计约束	241	7.1.1	系统生存周期	334
5.3.5	编码	244	7.1.2	过程模型	336
5.3.6	下载和运行	247	7.1.3	过程评估	342
5.4	嵌入式软件移植	247	7.1.4	工具与环境	344
5.4.1	无操作系统的软件移植	248	7.1.5	项目管理	347
5.4.2	有操作系统的软件移植	249	7.1.6	质量保证	351
5.4.3	应用软件的移植	250	7.2	系统分析知识	354
第 6 章	嵌入式程序设计	252	7.2.1	系统需求的定义	355
6.1	程序设计语言基础	252	7.2.2	需求分析的基本任务	355
6.1.1	程序设计语言概述	252	7.2.3	需求建模	355
6.1.2	程序设计语言的分类和 特点	253	7.3	系统设计知识	356
6.1.3	程序设计语言的基本成分	256	7.3.1	系统概要设计	357
6.1.4	程序设计语言的翻译基础	260	7.3.2	系统详细设计	357
6.2	汇编语言程序设计	271	7.3.3	系统设计原则	358
6.2.1	汇编语言概述	271	7.3.4	软硬件协同设计方法	360
6.2.2	汇编语言程序	271	7.4	结构化分析与设计方法	362
6.3	C 程序设计基础	276	7.4.1	结构化分析方法	363
6.3.1	C 程序基础	276	7.4.2	结构化设计方法	366
6.3.2	函数	291	7.4.3	结构化程序设计方法	370
6.3.3	存储管理	294	7.5	面向对象分析与设计方法	370
6.3.4	指针	297	7.5.1	面向对象分析与设计	370
6.3.5	栈与队列	306	7.5.2	UML 构造块	372
6.3.6	C 程序内嵌汇编	312	7.5.3	设计模式	377
6.4	C++程序设计基础	313	7.6	系统实施知识	385
6.4.1	面向对象基本概念	313	7.6.1	软硬件平台搭建	386
6.4.2	C++程序基础	316	7.6.2	系统测试	386
6.4.3	类与对象	319	7.6.3	系统调试	388
6.4.4	继承与多态	326	7.7	系统运行与维护	389
6.4.5	异常处理	330	7.7.1	系统运行管理	389
6.4.6	类库	332	7.7.2	系统维护概述	390
第 7 章	嵌入式系统的项目开发与 维护知识	334	7.7.3	系统评价	393
7.1	系统开发过程和项目管理	334	第 8 章	嵌入式系统软件测试	395
			8.1	软件测试概述	395
			8.1.1	软件测试的定义	395
			8.1.2	软件测试的发展	396

8.1.3	软件测试与软件开发的 关系	398
8.2	嵌入式软件测试技术	398
8.2.1	测试过程	399
8.2.2	测试方法	403
8.2.3	测试类型	410
8.2.4	测试工具	416
8.2.5	测试环境	417
8.3	软件测试实践	419
8.3.1	面向对象的软件测试	419
8.3.2	基于模型的软件测试	420
8.3.3	基于模型开发软件的测试	421
8.3.4	分布式软件测试	421
8.3.5	测试实例	422
第9章 嵌入式系统安全性基础		
	知识	434
9.1	计算机信息系统安全概述	434
9.1.1	信息系统安全	434
9.1.2	网络安全	435
9.1.3	风险管理	437
9.2	信息安全基础	439
9.2.1	数据加密原理	439
9.2.2	数据加密算法	439
9.2.3	认证算法	442
9.3	安全威胁防范	444
9.3.1	防治计算机病毒	444
9.3.2	认证	447
9.3.3	数字签名	448
9.3.4	报文摘要	449
9.3.5	数字证书	450
9.4	嵌入式系统安全方案	452
9.4.1	智能卡安全技术	452
9.4.2	USB-Key 技术	452
9.4.3	智能终端的安全技术	453
9.4.4	行业工控系统安全	454

第10章 标准化、信息化与知识 产权基础知识		
10.1	标准化基础知识	456
10.1.1	概述	456
10.1.2	信息技术标准化	462
10.1.3	标准化组织	464
10.1.4	ISO 9000 标准简介	466
10.1.5	ISO/IEC 15504 过程评估 标准简介	468
10.1.6	嵌入式系统相关标准 简介	469
10.2	信息化基础知识	470
10.2.1	概述	470
10.2.2	信息化发展趋势	471
10.2.3	信息化应用	474
10.3	知识产权基础知识	475
10.3.1	概述	476
10.3.2	计算机软件著作权	478
10.3.3	计算机软件的商业 秘密权	490
10.3.4	专利权概述	492
10.3.5	企业知识产权的保护	496
第11章 嵌入式系统设计案例分析		
11.1	嵌入式系统总体设计	498
11.1.1	嵌入式系统设计概述	499
11.1.2	案例分析	504
11.2	嵌入式系统硬件设计	536
11.2.1	嵌入式系统硬件设计 概述	536
11.2.2	嵌入式系统软硬件协同 设计	537
11.2.3	案例分析	537
11.3	嵌入式系统应用设计案例	569

第 1 章 计算机系统基础知识

本章首先概要介绍嵌入式系统，然后对计算机系统常用进位计数制、数据的表示和运算、计算机系统硬件基本组成和体系结构以及可靠性与系统性能评测等基础知识进行简要介绍。

1.1 嵌入式计算机系统概述

嵌入式系统的应用范围非常广泛，可以说除了桌面计算机和服务器外，所有计算设备都属于嵌入式系统，例如从便携式音乐播放器到航天飞机上的实时系统控制。

大多数商用的嵌入式系统都设计成专用任务的低成本产品，同时大多数的嵌入式系统都具有实时性的要求。有些功能需要非常快的主频，但大多数功能并不需要高速的处理能力。这些系统通过特定的器件和软件来满足实时性的要求。

简单地通过速度和成本来定义嵌入式系统是困难的，但对于大批量的产品而言，成本常常对系统设计起决定作用。通常，一个嵌入式系统的很多部分相对系统主要功能来说需要较低的性能，因此与通用 PC 相比，嵌入式系统能够使用一个满足辅助功能的合适的 CPU，从而可以简化系统设计，并降低成本。例如，数字电视的机顶盒需要处理每秒百万兆位的连续数据，但这些数据处理大部分是由定制的硬件来实现的，如解析、管理和编解码多个频道的数字影像。

对于大批量生产的嵌入式系统，如便携式音乐播放器或手机等，降低成本就成为最主要的问题。这些系统通常只有以下几个芯片：一个高度集成的 CPU，一个定制的芯片用于控制其他所有的功能，还有一个存储芯片。在这种设计中，每部分都设计成使用最小的系统功耗。

对于小批量的嵌入式应用，为了降低开发成本，常常使用 PC 体系结构，通过限制程序的执行时间或用实时操作系统来替换原先的操作系统。在这种情况下，可以使用一个或多个高性能的 CPU 来替换特殊用途的硬件。

嵌入式系统的软件通常运行在有限的硬件资源上：没有硬盘、操作系统、键盘或屏幕。软件一般也没有文件系统，如果有的话，也会采用 Flash 驱动器。如果有人机交互接口，也是一个小键盘或液晶显示器。

嵌入到机械设备中的嵌入式系统需要长期无故障连续运行，因此它的软件需要比 PC 中的软件更加仔细地开发及更加严格的测试。

根据 IEEE（国际电气电子工程师协会）的定义，嵌入式系统是“控制、监视或者辅

助设备、机器和车间运行的装置”。这主要是从应用上加以定义的，从中可以看出嵌入式系统是硬件和软件的综合体，还可以涵盖机械等附属装置。

目前国内一个普遍认同的嵌入式系统定义是：以应用为中心、以计算机技术为基础，软件硬件可裁剪，适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗严格要求的专用计算机系统。

可以这样认为，嵌入式系统是一种专用的计算机系统，作为装置或设备的一部分。通常，嵌入式系统是一个控制程序存储在 ROM 中的嵌入式处理器控制板。事实上，所有带有数字接口的设备，如手表、微波炉、录像机、汽车等，都使用嵌入式系统，有些嵌入式系统还包含操作系统，但大多数嵌入式系统都是单个程序实现整个控制逻辑。

信息时代和数字时代的到来，为嵌入式系统的发展带来了巨大的机遇，同时也向嵌入式系统厂商提出了新的挑战。目前，嵌入式技术与互联网（Internet）技术的结合正在推动着嵌入式系统的飞速发展，嵌入式系统的研究和应用产生了如下新的显著变化：

- 新的微处理器层出不穷，嵌入式操作系统自身结构的设计更加便于移植，能够在短时间内支持更多微处理器。
- 嵌入式系统的开发是一项系统工程，开发厂商不仅要提供嵌入式软硬件系统本身，同时还要提供强大的硬件开发工具和软件支持包。
- 通用计算机上使用的新技术、新观念开始逐步移植到嵌入式系统中，嵌入式软件平台得到进一步完善。
- 各类嵌入式 Linux 操作系统迅速发展，由于具有源代码开放、系统内核小、执行效率高、网络结构完整等特点，很适合信息家电等嵌入式系统的需要，目前已经形成了能与 Windows CE、Palm OS 等嵌入式操作系统进行有力竞争的局面。
- 网络化、信息化的要求随着 Internet 技术的成熟和带宽的提高而日益突出，以往功能单一的设备，如电话、手机、冰箱、微波炉等，其功能不再单一，结构变得更加复杂，网络互联成为必然趋势。
- 精简系统内核，优化关键算法，降低功耗和软硬件成本。
- 提供更加友好的多媒体人机交互界面。

嵌入式系统是为特定应用而设计的专用计算机系统，是由硬件子系统和软件子系统组成的，通过运行程序来协同工作。硬件是物理装置，软件则是程序、数据和相关文档的集合。

1. 计算机硬件

基本的计算机硬件系统由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备 5 大部件组成，随着网络技术的发展和应用，通信部件也成为计算机系统的基本组件。运算器和控制器及其相关部件已被集成在一起，统称为中央处理单元（Central Processing Unit, CPU）。CPU 是硬件系统的核心，用于数据的加工处理，能完成各种算术、逻辑运算及控制功能。

运算器是对数据进行加工处理的部件，它主要完成算术和逻辑运算。控制器的主要功能是从主存中取出指令并进行分析，以控制计算机的各个部件有条不紊地完成指令的功能。

存储器是计算机系统记忆设备，分为内部存储器（Main Memory，MM，简称内存、主存）和外部存储器（简称外存或辅存）。相对而言，内存速度快、容量小，一般用来临时存储计算机运行时所需的程序、数据及运算结果。外存容量大、速度慢，可用于长期保存信息。寄存器是CPU中的存储器件，用来临时存放少量的数据、运算结果和正在执行的指令。与内存储器相比，寄存器的速度要快得多。

习惯上将CPU和主存储器的有机组合称为主机。输入/输出（I/O）设备位于主机之外，是计算机系统与外界交换信息的装置。所谓输入和输出，都是相对于主机而言的。输入设备的作用是将信息输入到计算机中，输出设备则将运算结果按照人们所要求的形式输出到外部设备或存储介质上。

2. 计算机软件

计算机软件是指为管理、运行、维护及应用计算机系统所开发的程序和相关文档的集合。如果计算机系统中仅有硬件系统，则只具备了计算的基础，并不能真正计算，只有将解决问题的步骤编制成机器可识别的程序并加载到计算机内存开始运行，才能完成计算。

软件是计算机系统中的重要组成部分，通常可将软件分为系统软件、中间件和应用软件等类型。系统软件的主要功能是管理系统的硬件和软件资源，应用软件则用于解决应用领域的具体问题，中间件是一类独立的系统软件或服务程序，常用来管理计算资源和网络通信，提供通信处理、数据存取、事务处理、Web服务、安全、跨平台等服务。

3. 计算机分类

从不同角度可对计算机进行不同的分类，个人移动设备、桌面计算机、服务器、集群计算机、超级计算机和嵌入式计算机是其中的一种分类方式。

（1）个人移动设备（Personal Mobile Device，PMD）。指一类带有多媒体用户界面的无线设备，如智能手机、平板电脑等。

（2）桌面计算机。桌面计算机的产品范围非常广泛，包括低端的上网本、台式计算机、笔记本计算机以及高配置的工作站，核心部件是基于超大规模集成电路技术的CPU。台式计算机和笔记本计算机属于微型计算机，常用于一般性的办公事务处理和应用，工作站则是一种高档的微型计算机，通常配有高分辨率的大屏幕显示器及容量很大的内存储器和外部存储器，具备强大的数据运算与图形、图像处理能力，主要面向工程设计、动画制作、科学研究、软件开发、金融管理、信息服务、模拟仿真等专业应用领域。

（3）服务器。不同于桌面计算机，服务器代替了传统的大型机，主要提供大规模和可靠的文件及计算服务，强调可用性、可扩展性和很高的吞吐率。

（4）集群/仓库级计算机。集群机是将一组桌面计算机或服务器用网络连接在一起，

运行方式类似于一个大型的计算机。将数万个服务器连接在一起形成的大规模集群称为仓库级计算机。

(5) 超级计算机。超级计算机的基本组成在概念上与个人计算机无太大差异，但规格高，性能要强大许多，具有很强的计算能力，但是能耗巨大。我国的超级计算机主要有银河、天河、曙光、神威四个系列。例如，神威·太湖之光由40个运算机柜和8个网络机柜组成，共有40960块处理器，每一块处理器相当于20余台常规笔记本电脑的计算能力。

(6) 嵌入式计算机。嵌入式计算机是专用的，是针对某个特定的应用，如针对网络、通信、音频、视频或针对工业控制，对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的计算机系统。常见的微波炉、洗衣机、数码产品、网络交换机和汽车中都采用嵌入式计算机技术。

1.2 数据表示

二进制是计算机系统广泛采用的一种数制。在计算机内部，数值、文字、声音、图形图像等各种信息都必须经过数字化编码后才能被传送、存储和处理。

1.2.1 进位计数制及转换

在采用进位计数的数字系统中，如果只用 r 个基本符号表示数值，则称其为 r 进制(Radix- r Number System)， r 称为该数制的基数(Radix)。不同数制的共同特点如下。

(1) 每一种数制都有固定的符号集。例如，二进制数制的基本符号为0和1，而十进制数制的基本符号为0, 1, 2, ..., 9。

(2) 每一种数制都使用位置表示法。即处于不同位置的数符所代表的值不同，与它所在位置的权值有关。例如，十进制数1234.55可表示为：

$$1234.55 = 1 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 4 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2}$$

计算机中常用的进位数制有二进制、八进制、十进制和十六进制，如表1-1所示。

表 1-1 常用计数制

进位制	二进制	八进制	十进制	十六进制
规则	逢二进一	逢八进一	逢十进一	逢十六进一
基数	$r=2$	$r=8$	$r=10$	$r=16$
数符	0, 1	0, 1, 2, ..., 7	0, 1, 2, ..., 9	0, 1, 2, ..., 9, A, B, ..., F
权	2^i	8^i	10^i	16^i
形式表示符	B	O	D	H

对任何一种进位计数制，其表示的数都可以写成按权展开的多项式，在此基础上实现不同计数制的相互转换。

1) 十进制计数法与二进制计数法的相互转换

在二进制计数制中， $r=2$ ，基本符号为 0 和 1。二进制数中的一个 0 或 1 称为 1 位(bit)。

将十进制数转换成二进制数时，整数部分和小数部分分别转换，然后再合并。十进制整数转换为二进制整数的方法是“除 2 取余”；十进制小数转换为二进制小数的方法是“乘 2 取整”。

【例 1-1】把十进制数 175.71875 转换为相应的二进制数。

算式	商	余数	算式	乘积
175 / 2	87	1	0.71875×2	1.43750
87 / 2	43	1	0.4375×2	0.8750
43 / 2	21	1	0.875×2	1.750
21 / 2	10	1	0.75×2	1.50
10 / 2	5	0	0.5×2	1.0
5 / 2	2	1	$0.71875_{10} = 0.10111_2$	
2 / 2	1	0		
1 / 2	0	1		

$$175_{10} = 10101111_2$$

因此， $175.71875_{10} = 10101111.10111_2$

将十进制数写成按二进制数权的大小展开的多项式，按权值从高到低依次取各项的系数就可得到相应的二进制数。

$$\begin{aligned} 175.71875_{10} &= 2^7 + 2^5 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 + 2^{-1} + 2^{-3} + 2^{-4} + 2^{-5} \\ &= 10101111.10111_2 \end{aligned}$$

二进制数转换成十进制数的方法是：将二进制数的每一位数乘以它的权再相加，即可求得对应的十进制数值。

【例 1-2】把二进制数 100110.101 转换成相应的十进制数。

$$\begin{aligned} 100110.101_2 &= 1 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 32 + 0 + 0 + 4 + 2 + 0 + 0.5 + 0 + 0.125 \\ &= 38.625 \end{aligned}$$

2) 八进制计数法与十进制、二进制计数法的相互转换

八进制计数制的基本符号为 0, 1, 2, ..., 7。

十进制数转换为八进制数的方法是：对于十进制整数采用“除 8 取余”的方法转换为八进制整数；对于十进制小数则采用“乘 8 取整”的方法转换为八进制小数。

二进制数转换成八进制数的方法是：从小数点起，每三位二进制位分成一组（不足 3 位时，在小数点左边时左边补 0，在小数点右边时右边补 0），然后写出每一组的等值八进制数，顺序排列起来就得到所要求的八进制数。

依照同样的思想，将一位八进制数用三位二进制数表示，就可以直接将八进制数转换成二进制数。

二进制与八进制数、十六进制数之间的对应关系如表 1-2 所示。

表 1-2 二进制、八进制和十六进制数之间的对应关系

二进制	八进制	二进制	十六进制	二进制	十六进制
000	0	0000	0	1000	8
001	1	0001	1	1001	9
010	2	0010	2	1010	A
011	3	0011	3	1011	B
100	4	0100	4	1100	C
101	5	0101	5	1101	D
110	6	0110	6	1110	E
111	7	0111	7	1111	F

3) 十六进制计数法与十进制、二进制计数法的相互转换

在十六进制计数制中， $r=16$ ，基本符号为 0, 1, 2, ..., 9, A, B, ..., F。

十进制数转换为十六进制数的方法是：十进制数的整数部分“除 16 取余”，十进制数的小数部分“乘 16 取整”。

由于一位十六进制数可以用 4 位二进制数来表示，因此二进制数与十六进制数的相互转换就比较简单。二进制数转换成十六进制数的方法是：从小数点开始，每 4 位二进制数为一组（不足 4 位时，在小数点左边时左边补 0，在小数点右边时右边补 0），将每一组用相应的十六进制数符来表示，即可得到正确的十六进制数。如表 1.2 所示。

【例 1-3】将二进制数 10101111.10111 转换为相应的八进制数和十六进制数。

$$10101111.10111_2 = 010\ 101\ 111.101\ 110_2 = 257.56_8$$

$$10101111.10111 = 1010\ 1111.1011\ 1000 = \text{AFB8}_{16}$$

1.2.2 数值型数据的表示

数据在计算机中表示的形式称为机器数，其特点是采用二进制计数制，数的符号用 0、1 表示，小数点隐含表示而不占位置。机器数对应的实际数值称为数的真值。

无符号数是指全部二进制位均代表数值，没有符号位。对于有符号数，其机器数的最高位是表示正、负的符号位，其余位则表示数值。若约定小数点的位置在机器数的最低数值位之后，则是纯整数；若约定小数点的位置在机器数的最高数值位之前（符号位之后），则是纯小数。

为了便于运算，带符号的机器数可采用原码、反码、补码和移码等不同的编码方法。

1. 原码、反码、补码和移码

1) 原码表示

数值 X 的原码记为 $[X]_{\text{原}}$ ，如果机器字长为 n （即采用 n 个二进制位表示数据），则最高位是符号位，0 表示正号，1 表示负号，其余的 $n-1$ 位表示数值的绝对值。数值零的原码表示有两种形式： $[+0]_{\text{原}}=00000000$ ， $[-0]_{\text{原}}=10000000$ 。

【例 1-4】若机器字长 n 等于 8，则

$$[+1]_{\text{原}}=00000001$$

$$[-1]_{\text{原}}=10000001$$

$$[+127]_{\text{原}}=01111111$$

$$[-127]_{\text{原}}=11111111$$

$$[+45]_{\text{原}}=00101101$$

$$[-45]_{\text{原}}=10101101$$

$$[+0.5]_{\text{原}}=0 \diamond 1000000$$

$$[-0.5]_{\text{原}}=1 \diamond 1000000 \quad (\text{其中 } \diamond \text{ 表示小数点所在位置})$$

2) 反码表示

数值 X 的反码记作 $[X]_{\text{反}}$ ，如果机器字长为 n ，则最高位是符号位，0 表示正号，1 表示负号，其余的 $n-1$ 位表示数值。正数的反码与原码相同，负数的反码则是其绝对值按位求反。数值 0 的反码表示有两种形式： $[+0]_{\text{反}}=00000000$ ， $[-0]_{\text{反}}=11111111$ 。

【例 1-5】若机器字长 n 等于 8，则

$$[+1]_{\text{反}}=00000001$$

$$[-1]_{\text{反}}=11111110$$

$$[+127]_{\text{反}}=01111111$$

$$[-127]_{\text{反}}=10000000$$

$$[+45]_{\text{反}}=00101101$$

$$[-45]_{\text{反}}=11010010$$

$$[+0.5]_{\text{反}}=0 \diamond 1000000$$

$$[-0.5]_{\text{反}}=1 \diamond 0111111 \quad (\text{其中 } \diamond \text{ 表示小数点所在位置})$$

3) 补码表示

数值 X 的补码记作 $[X]_{\text{补}}$ ，如果机器字长为 n ，则最高位为符号位，0 表示正号，1 表示负号，其余的 $n-1$ 位表示数值。正数的补码与其原码和反码相同，负数的补码则等于其反码的末尾加 1。在补码表示中，0 有唯一的编码： $[+0]_{\text{补}}=[-0]_{\text{补}}=00000000$ 。

【例 1-6】若机器字长 n 等于 8，则

$$[+1]_{\text{补}}=00000001$$

$$[-1]_{\text{补}}=11111111$$

$$[+127]_{\text{补}}=01111111$$

$$[-127]_{\text{补}}=10000001$$

$$[+45]_{\text{补}}=00101101$$

$$[-45]_{\text{补}}=11010011$$

$$[+0.5]_{\text{补}}=0 \diamond 1000000$$

$$[-0.5]_{\text{补}}=1 \diamond 1000000 \quad (\text{其中 } \diamond \text{ 是小数点的位置})$$

相对于原码和反码表示， n 位补码表示法有一个例外，当符号位为 1 而数值位全部为 0 时，它表示整数 -2^{n-1} ，即此时符号位的 1 既表示负数又表示数值。

设计补码时，有意识地引用了模运算在数理上对符号位的处理，即利用模的自动丢弃实现了符号位的自然处理。

4) 移码表示

移码表示法是在数 X 上增加一个偏移量来定义的，常用于表示浮点数中的阶码。如果机器字长为 n ，在偏移量为 2^{n-1} 时，只要将补码的符号位取反便可获得相应的移码表示。

偏移量也可以是其他值。采用移码表示时，码值大者对应的真值就大。

【例 1-7】若机器字长 n 等于 8，偏移量为 2^7 ，则

$[+1]_{\text{移}}=10000001$

$[-1]_{\text{移}}=01111111$

$[+127]_{\text{移}}=11111111$

$[-127]_{\text{移}}=00000001$

$[+45]_{\text{移}}=10101101$

$[-45]_{\text{移}}=01010011$

$[+0]_{\text{移}}=10000000$

$[-0]_{\text{移}}=10000000$

2. 定点数和浮点数

1) 定点数

所谓定点数，就是表示数据时小数点的位置固定不变。小数点的位置通常有两种约定方式：定点整数（纯整数，小数点在最低有效数值位之后）和定点小数（纯小数，小数点在最高有效数值位之前）。

设机器字长为 n ，各种码制表示下的带符号数的范围如表 1-3 所示。当机器字长为 n 时，定点数的补码和移码可表示 2^n 个数，而其原码和反码只能表示 $2^n - 1$ 个数（0 表示占用了两个编码），因此，定点数所能表示的数值范围比较小，运算中很容易因结果超出范围而溢出。

表 1-3 机器字长为 n 时各种码制表示的带符号数的范围

码 制	定 点 整 数	定 点 小 数
原码	$-(2^{n-1} - 1) \sim +(2^{n-1} - 1)$	$-(1 - 2^{-(n-1)}) \sim +(1 - 2^{-(n-1)})$
反码	$-(2^{n-1} - 1) \sim +(2^{n-1} - 1)$	$-(1 - 2^{-(n-1)}) \sim +(1 - 2^{-(n-1)})$
补码	$-2^{n-1} \sim +(2^{n-1} - 1)$	$-1 \sim +(1 - 2^{-(n-1)})$
移码	$-2^{n-1} \sim +(2^{n-1} - 1)$	$-1 \sim +(1 - 2^{-(n-1)})$

2) 浮点数

浮点数是指小数点位置不固定的数，浮点表示法能表示更大范围的数。

在十进制中，一个实数可以写成多种表示形式。例如，83.125 可写成 $10^3 \times 0.083125$ 或 $10^4 \times 0.0083125$ 等。同理，一个二进制数也可以写成多种表示形式。例如，二进制数 1011.10101 可以写成 $2^4 \times 0.101110101$ 、 $2^5 \times 0.0101110101$ 或 $2^6 \times 0.00101110101$ 等。

一个含小数点的二进制数 N 可以表示为更一般的形式：

$$N = 2^E \times F$$

其中， E 称为阶码， F 为尾数，这种表示数的方法称为浮点表示法。

在浮点表示法中，阶码通常为带符号的纯整数，尾数为带符号的纯小数。浮点数的表示格式一般如下：

阶符	阶码	数符	尾数
----	----	----	----