

“十二五”
国家重点图书出版规划项目

嵌入式 Linux

C语言应用程序设计 (修订版)

华清远见嵌入式培训中心 孙琼 编著

- 全面涵盖开发细节，实例详尽丰富
- 开发流程清晰易懂，注重实际应用
- 嵌入式Linux C初学者的首选教程

014036044

TP316.81

362-2

“十二五”

国家重点图书出版规划项目

嵌入式 Linux C语言应用程序设计

华清远见嵌入式培训中心 孙琼 编著 (修订版)



北航

C1715654

人民邮电出版社
北京

10080010

图书在版编目 (CIP) 数据

嵌入式 Linux C语言应用程序设计 / 孙琼编著. --
修订本. -- 北京: 人民邮电出版社, 2014. 4
ISBN 978-7-115-34279-9

I. ①嵌… II. ①孙… III. ①Linux操作系统—程序
设计②C语言—程序设计 IV. ①TP316.89②TP312

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第315092号

内 容 提 要

嵌入式系统是现在最热门的计算机应用领域之一, 嵌入式 Linux 是应用最广泛的嵌入式操作系统之一, 嵌入式 C 语言在其中起着至关重要的作用。

本书共分 13 章, 全面讲解了嵌入式系统基础, 嵌入式 Linux C 语言开发工具、语言基础, 文件 I/O 相关实例, ARM Linux 进程线程开发实例, ARM Linux 网络开发实例, 嵌入式 Linux 设备驱动开发以及视频监控实例。

本书可作为大中专院校嵌入式相关专业本科生、研究生的教材, 也可供广大希望转入嵌入式领域的科研和工程技术人员使用。

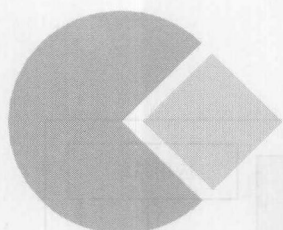
-
- ◆ 编 著 华清远见嵌入式培训中心 孙 琼
责任编辑 傅道坤
责任印制 程彦红 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 25
字数: 607 千字 2014 年 4 月第 2 版
印数: 7 001-10 000 册 2014 年 4 月北京第 1 次印刷
-

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010)81055410 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京崇工商广字第 0021 号



嵌入式行业背景

进入后 PC 时代后，嵌入式系统在我们的生活中无处不在，我们每天都会接触很多的嵌入式产品，嵌入式产品方便了人们的生活，同时也给厂家带来巨大的利润。

嵌入式开发是当今计算机应用最热门的领域之一，广泛应用于汽车电子、无线通信、智能手机、便携式产品、数码相机、数字电视、数字机顶盒等领域，一时间，嵌入式开发人才非常紧缺。

嵌入式软件开发如何入门

嵌入式系统入门需要掌握嵌入式操作系统的原理并学会嵌入式应用程序的开发。

嵌入式 Linux 是源代码开放的嵌入式操作系统，是当今最优秀的嵌入式操作系统之一，得到众厂商的青睐，在工程实践中应用十分广泛，各高等院校的嵌入式系统课程也多采用嵌入式 Linux 进行教学工作。

嵌入式应用程序一般是在嵌入式操作系统之上进行开发的，在实际开发中应用广泛，是初学者入门的很好的选择。

嵌入式 C 语言至关重要

嵌入式 Linux 内核的大部分代码是由 C 语言编写的，嵌入式 Linux 应用程序也多由 C 语言编写，因此掌握嵌入式 C 语言对于嵌入式学习非常重要。

嵌入式 Linux C 语言代码编辑器、代码编译器以及代码调试器的使用对于初学者来说非常关键，本书对其进行了详细讲解，并配以实例加以说明，帮助读者尽快上手。

嵌入式 C 语言的语法是编写嵌入式应用程序的基础和规则，是读者必须掌握的内容，本书第 4 章至第 8 章对嵌入式 Linux C 语言的语法进行了详细讲解，并配合嵌入式 Linux 内核源代码进行分析、说明，使读者在嵌入式开发的实际环境中深刻理解嵌入式 C 语言的语法。

嵌入式系统结构

嵌入式系统由嵌入式硬件系统和嵌入式软件系统组成。

嵌入式硬件系统由嵌入式处理器和嵌入式系统外围器件组成。

嵌入式软件系统由嵌入式操作系统和嵌入式应用程序组成。

嵌入式系统的软硬件结构如图 1 所示。

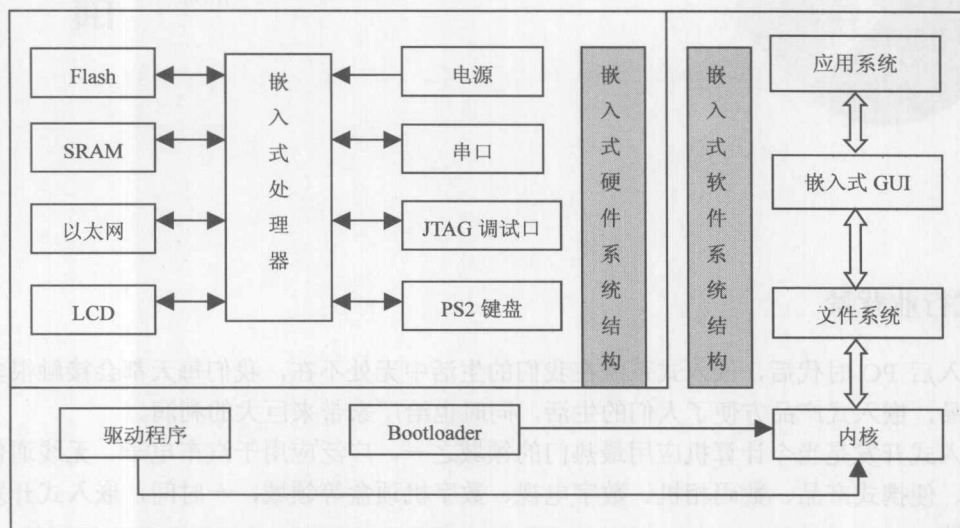


图 1 嵌入式系统软硬件结构

本书的主要内容

本书共 13 章，第 1 章主要讲解嵌入式系统的概念，通过这一章的学习，读者可以掌握什么是嵌入式系统、嵌入式系统与 PC 机的区别以及嵌入式应用软件开发过程等。

第 2 章和第 3 章主要讲解如何构建嵌入式 Linux 的开发环境以及常见开发工具的使用方法。希望读者能够跟随本书中的实例实际动手操作，切实掌握这些开发工具的使用方法。

第 4 章至第 8 章讲解的是嵌入式 Linux C 语言的语法及常见数据结构。在这里，结合 Linux 内核源码进行讲解，读者可以看到 Linux 内核是如何规范、高效地使用 C 语言的。

本书的第 9 章至第 12 章详细讲解了嵌入式 Linux 中的文件 I/O 开发、进程线程开发、网络开发和驱动开发等，每一章都配有相应的实例进行讲解。

本书的第 13 章视频监控系统是一个综合性的实例，该实例综合运用了前面各章的内容，读者可以通过该实例综合掌握前面各章的内容。

本书适合的读者

- Linux 爱好者；
- 嵌入式系统初学者；

- 大专院校嵌入式相关专业师生;
- 嵌入式系统工程师。

本书之外的内容

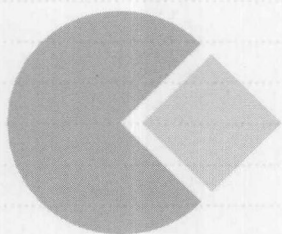
本书内容来源于北京华清远见科技信息有限公司 (<http://www.farsight.com.cn>) 的培训课程资料, 书中嵌入式 Linux 系统开发、嵌入式 Linux 应用开发、嵌入式 Linux 驱动开发、嵌入式系统硬件设计的相关资料, 请见 <http://www.farsight.com.cn/download>。

本书由孙琼执笔, 孙天泽、孙纪坤审定写作提纲, 另外感谢以下人员为本书所做的工作: 刘忠欧、孙颂武、汪荷君、林雪梅、孙明、魏小康、杨玉林、任震宇、杨林、黄昕、张全、田彦、王辉、张强、陈曦等。

由于时间仓促, 加之水平有限, 书中不足之处在所难免, 敬请读者批评指正。

编 者

2013 年 11 月



目 录

第 1 章 嵌入式系统基础知识	1
1.1 嵌入式系统概述	1
1.1.1 嵌入式系统的发展史	2
1.1.2 嵌入式系统的定义与特点	3
1.1.3 嵌入式系统的特点	4
1.2 嵌入式系统的组成	5
1.2.1 嵌入式系统的硬件架构	5
1.2.2 嵌入式操作系统	8
1.2.3 嵌入式应用软件	10
1.3 ARM 处理器平台介绍	11
1.3.1 ARM 处理器简介	11
1.3.2 ARM 处理器系列	12
1.3.3 ARM 体系结构简介	16
1.3.4 S3C2410 处理器简介	17
1.4 嵌入式系统硬件平台选型	21
1.4.1 硬件平台的选择	21
1.4.2 ARM 处理器选型	22
1.5 嵌入式系统开发概述	25
1.5.1 嵌入式系统开发流程	25
1.5.2 嵌入式软件开发流程	25
本章小结	29
动手练练	30
第 2 章 嵌入式 Linux C 语言开发工具	31
2.1 嵌入式 Linux 下 C 语言概述	31
2.1.1 C 语言简史	31

2.1.2	C 语言特点	32
2.1.3	嵌入式 Linux C 语言编程环境	33
2.2	嵌入式 Linux 编辑器 vi 的使用	33
2.2.1	vi 的基本模式	34
2.2.2	vi 的基本操作	34
2.2.3	vi 的使用实例分析	38
2.3	嵌入式 Linux 编译器 GCC 的使用	40
2.3.1	GCC 概述	40
2.3.2	GCC 编译流程分析	40
2.3.3	GCC 警告提示	43
2.3.4	GCC 使用库函数	45
2.3.5	GCC 代码优化	46
2.4	嵌入式 Linux 调试器 GDB 的使用	47
2.4.1	GDB 使用实例	47
2.4.2	设置/删除断点	50
2.4.3	数据相关命令	51
2.4.4	调试运行环境相关命令	52
2.4.5	堆栈相关命令	52
2.5	make 工程管理器	53
2.5.1	Makefile 基本结构	53
2.5.2	Makefile 变量	55
2.5.3	Makefile 规则	58
2.5.4	make 使用	59
2.6	Emacs 综合编辑器	59
2.6.1	Emacs 的启动与退出	60
2.6.2	Emacs 的基本编辑	61
2.6.3	Emacs 的 C 模式	63
2.6.4	Emacs 的 Shell 模式	66
	本章小结	67
	动手练练	67
第 3 章	构建嵌入式 Linux 系统	68
3.1	嵌入式系统开发环境的构建	68
3.1.1	嵌入式交叉编译环境搭建	68
3.1.2	minicom 和超级终端配置及使用	72
3.1.3	宿主机服务配置	79
3.2	Bootloader	83
3.2.1	Bootloader 的概念	84
3.2.2	Bootloader 启动流程分析	84

3.2.3	U-Boot 概述	85
3.2.4	U-Boot 源码导读	86
3.3	编译嵌入式 Linux 内核	86
3.4	Linux 内核目录结构	90
3.5	制作文件系统	91
	本章小结	92
	动手练练	92
第 4 章	嵌入式 Linux C 语言基础——数据、表达式	93
4.1	嵌入式 Linux C 语言概述	93
4.2	基本数据类型	94
4.2.1	整型家族	94
4.2.2	实型家族	96
4.2.3	字符型家族	98
4.2.4	枚举家族	99
4.2.5	指针家族	100
4.3	变量与常量	101
4.3.1	变量的定义	101
4.3.2	typedef	107
4.3.3	常量定义	108
4.3.4	ARM-Linux 基本数据类型综合应用实例	109
4.4	运算符与表达式	111
4.4.1	算术运算符和表达式	112
4.4.2	赋值运算符和表达式	114
4.4.3	逗号运算符和表达式	116
4.4.4	位运算符和表达式	116
4.4.5	关系运算符和表达式	118
4.4.6	逻辑运算符和表达式	119
4.4.7	sizeof 操作符	121
4.4.8	条件 (?) 运算符	122
4.4.9	运算符优先级总结	123
4.4.10	ARM-Linux 运算符综合实例	125
	本章小结	129
	动手练练	129
第 5 章	嵌入式 Linux C 语言基础——控制语句及函数	130
5.1	嵌入式 Linux C 语言程序结构概述	130
5.1.1	嵌入式 Linux C 语言 3 种程序结构	130
5.1.2	嵌入式 Linux C 语言基本语句	131

5.2	选择语句	134
5.2.1	if 语句	134
5.2.2	switch 语句	136
5.2.3	ARM-Linux 选择语句应用实例	138
5.3	循环语句	139
5.3.1	while 和 do-while 语句	139
5.3.2	for 循环语句	140
5.3.3	break 和 continue 语句	141
5.3.4	ARM-Linux 循环语句应用实例	143
5.4	goto 语句	144
5.4.1	goto 语句语法	144
5.4.2	ARM-Linux 中 goto 语句应用实例	145
5.5	函数的定义与声明	146
5.5.1	C 语言函数概述	146
5.5.2	函数定义	147
5.5.3	函数声明	148
5.5.4	ARM-Linux 函数定义与声明实例	149
5.6	函数的参数、值和基本调用	150
5.6.1	函数的参数	150
5.6.2	函数的值	151
5.6.3	函数的基本调用	151
5.7	函数的嵌套、递归调用	152
5.7.1	函数的嵌套调用	152
5.7.2	函数的递归调用	152
5.7.3	ARM-Linux 函数调用应用实例	155
	本章小结	156
	动手练练	156
第 6 章	嵌入式 Linux C 语言基础——数组、指针与结构	158
6.1	数组	158
6.1.1	一维数组	158
6.1.2	字符串	161
6.1.3	二维数组	163
6.2	指针	164
6.2.1	指针的概念	164
6.2.2	指针变量的操作	166
6.2.3	指针和数组	173
6.2.4	指针高级议题	178
6.3	结构体与联合	182

6.3.1	结构体	182
6.3.2	联合	186
6.3.3	ARM-Linux 指针、结构体使用实例	187
	本章小结	189
	动手练练	189
第 7 章 嵌入式 Linux C 语言基础——高级议题		190
7.1	预处理	190
7.1.1	预处理的概念	190
7.1.2	预定义	191
7.1.3	文件包含	196
7.1.4	条件编译	197
7.2	C 语言中的内存分配	199
7.2.1	C 语言程序所占内存分类	199
7.2.2	堆和栈的区别	200
7.3	嵌入式 Linux 可移植性考虑	201
7.3.1	字长和数据类型	201
7.3.2	数据对齐	203
7.3.3	字节顺序	203
7.4	C 和汇编的接口	203
7.4.1	内嵌汇编的语法	204
7.4.2	编译器优化介绍	206
7.4.3	C 语言关键字 volatile	207
7.4.4	memory 描述符	207
7.4.5	gcc 对内嵌汇编语言的处理方式	207
	本章小结	209
	动手练练	209
第 8 章 嵌入式 Linux C 语言基础——ARM Linux 内核常见数据结构		210
8.1	链表	210
8.1.1	链表概述	210
8.1.2	单向链表	211
8.1.3	双向链表	217
8.1.4	循环链表	219
8.1.5	ARM Linux 中链表使用实例	219
8.2	树、二叉树、平衡树	221
8.2.1	树	221
8.2.2	二叉树	222
8.2.3	平衡树	229

8.2.4	ARM Linux 中红黑树使用实例	230
8.3	哈希表	232
8.3.1	哈希表的概念及作用	232
8.3.2	哈希表的构造方法	234
8.3.3	哈希表的处理冲突方法	235
8.3.4	ARM Linux 中哈希表使用实例	236
	本章小结	238
	动手练练	239
第 9 章	文件 I/O 相关实例	240
9.1	Linux 系统调用及用户编程接口 (API)	240
9.1.1	系统调用	241
9.1.2	用户编程接口 (API)	241
9.1.3	系统命令	241
9.2	ARM Linux 文件 I/O 系统概述	242
9.2.1	虚拟文件系统 (VFS)	242
9.2.2	通用文件模型	243
9.2.3	ARM Linux 的设备文件	248
9.3	文件 I/O 操作	248
9.3.1	不带缓存的文件 I/O 操作	248
9.3.2	标准 I/O 开发	258
9.4	嵌入式 Linux 串口应用开发	261
9.4.1	串口概述	261
9.4.2	串口设置详解	262
9.4.3	串口使用详解	266
	本章小结	269
	动手练练	269
第 10 章	ARM Linux 进程线程开发实例	270
10.1	ARM Linux 进程线程管理	270
10.1.1	进程描述符及任务结构	270
10.1.2	进程的调度	273
10.1.3	Linux 中的线程	274
10.1.4	Linux 中进程间通信	275
10.2	ARM Linux 进程控制相关 API	276
10.3	ARM Linux 进程间通信 API	282
10.3.1	管道通信	282
10.3.2	信号通信	284
10.3.3	共享内存	289

10.3.4 消息队列	290
10.4 ARM Linux 线程相关 API	293
10.5 Linux 守护进程	298
10.5.1 守护进程概述	298
10.5.2 编写规则	298
10.5.3 守护进程实例	300
本章小结	301
动手练练	302
第 11 章 ARM Linux 网络开发实例	303
11.1 TCP/IP 协议简介	303
11.1.1 TCP/IP 的分层模型	303
11.1.2 TCP/IP 分层模型特点	304
11.1.3 TCP/IP 核心协议	305
11.2 网络基础编程	308
11.2.1 socket 概述	308
11.2.2 地址及顺序处理	309
11.2.3 socket 基础编程	313
11.3 Web 服务器	319
11.3.1 Web 服务器功能	319
11.3.2 Web 服务器协议	320
11.3.3 Web 服务器协议	321
11.3.4 运行 Web 服务器	326
11.4 traceroute 程序实例	326
11.4.1 traceroute 原理简介	326
11.4.2 traceroute 实例与分析	327
11.4.3 traceroute 实例运行结果	332
本章小结	332
动手练练	333
第 12 章 嵌入式 Linux 设备驱动开发	334
12.1 设备驱动概述	334
12.1.1 设备驱动简介	334
12.1.2 设备驱动程序的特点	335
12.2 模块编程	336
12.2.1 模块编程简介	336
12.2.2 模块相关命令	336
12.2.3 模块编程流程	337
12.3 字符设备驱动编写	338

12.4	块设备驱动编写	347
12.4.1	块设备驱动程序描述符	347
12.4.2	块设备驱动编写流程	348
12.5	简单的 skull 驱动实例	354
12.5.1	驱动简介	354
12.5.2	驱动编写流程	354
12.5.3	结果分析	357
12.6	LCD 驱动编写实例	358
12.6.1	LCD 工作原理	358
12.6.2	LCD 驱动实例	360
	本章小结	367
	动手练练	367
第 13 章	视频监控系统	368
13.1	视频监控系统概述	368
13.1.1	系统组成	368
13.1.2	音视频服务器	369
13.1.3	音视频客户端	370
13.1.4	通信传输控制协议	370
13.2	基本数据结构	373
13.3	功能实现	375
13.3.1	传输控制	375
13.3.2	用户检验	379
13.3.3	控制命令处理	380
13.3.4	云台转动控制	381
13.3.5	线程相关	385
	本章小结	386
	动手练练	386

第 1 章 嵌入式系统基础知识

本章目标

嵌入式系统产业作为朝阳产业正在蓬勃发展，优秀的操作系统 Linux 也凭借其高效、开放等优势在嵌入式领域占据了一席之地。

本章首先带领读者走近嵌入式系统，从整体上把握什么是嵌入式系统以及如何开发嵌入式系统的应用程序。通过本章的学习，读者将会掌握如下内容：

- 嵌入式系统的概念
- 嵌入式系统的特点以及和 PC 的区别
- 嵌入式系统的现状与发展前景
- 嵌入式系统的硬件架构
- 常用的嵌入式操作系统
- 嵌入式系统应用程序的特点
- 常见嵌入式处理器的特点及其选型要点
- 嵌入式系统开发的整体过程
- 嵌入式系统软件的开发流程

1.1 嵌入式系统概述

正如尼葛洛庞帝在 2001 年预言的一样，如今，嵌入式系统已成为最为热门的领域之一。从市场观点来看，PC 已经从高速增长时期进入平稳发展时期，其年增长率由 20 世纪 90 年代中期的 35% 逐年下降，单纯由 PC 机带领电子产业蒸蒸日上的时代已经成为历史。为此，美国 *Business Week* 杂志提出了“后 PC 时代”概念，即嵌入式系统所带领的时代。

进入 21 世纪以来，嵌入式系统已经广泛地渗透到科学研究、工程设计、军事技术、各类产业以及人们日常生活的方方面面中。随着国内外各种嵌入式产品的进一步开发和推广，嵌入式技术将越来越与人们的生活紧密结合。

图 1.1 所示为人们日常生活中常见的嵌入式产品。

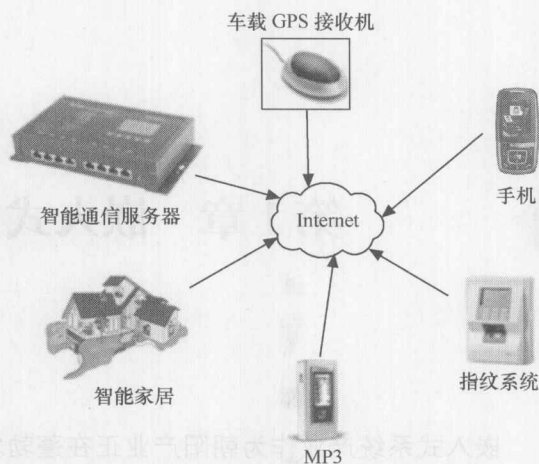


图 1.1 常见的嵌入式产品

1.1.1 嵌入式系统的发展史

本节从现代计算机发展历史的角度来讲解嵌入式系统的由来，从而使读者能够更加深刻地理解嵌入式的定义、特点以及与通用计算机的区别等。

1. 始于微型机时代的嵌入式应用

电子计算机诞生于 1946 年，在其后漫长的历史进程中，计算机始终是供养在特殊的机房中、实现数值计算的大型昂贵设备。直到 20 世纪 70 年代微处理器出现后，计算机发生了历史性的变革。以微处理器为核心的微型计算机凭借其体积小、价格低、可靠性高的优势，迅速走出机房。

微型机表现出的智能化特性引起了控制专业人士的关注，他们将微型机嵌入到一个对象体系中，实现了对对象体系的智能化控制。例如，将微型计算机经电气加固、机械加固，并配置各种外围接口电路，安装到大型舰船中构成自动驾驶仪或轮机状态监测系统。

这样一来，此类计算机便失去了原来的形态和通用的计算机功能。为了区别于原有的通用计算机系统，把嵌入到对象体系中、实现对象体系智能化控制的计算机称做嵌入式计算机系统。因此，嵌入式系统诞生于微型机时代，嵌入式系统的本质是将一个计算机嵌入到一个对象体系中去，这是理解嵌入式系统的基本出发点。

2. 现代计算机技术的两大分支

由于嵌入式计算机系统要嵌入到对象体系中，实现的是对象的智能化控制，因此，它有着与通用计算机系统完全不同的技术要求与技术发展方向。通用计算机系统的技术要求是高速、海量的数值计算，其技术发展方向是总线速度的无限提升、存储容量的无限扩大；而嵌入式计算机系统的技术要求则是智能化控制，技术发展方向是与对象系统密切相关的嵌入性能、控制能力与控制的可靠性不断提高。

在早期,人们可以勉强地将通用计算机系统进行改装,在大型设备中实现嵌入式应用。然而,对于众多的对象系统(如家用电器、仪器仪表、工控单元)中无法嵌入通用计算机系统,而且嵌入式系统与通用计算机系统的技术发展方向完全不同,因此,必须独立地发展通用计算机系统与嵌入式计算机系统,这就形成了现代计算机技术发展的两大分支。

如果说微型机的出现使计算机进入到现代计算机发展阶段,那么嵌入式计算机系统的诞生则标志了计算机进入了通用计算机系统与嵌入式计算机系统两大分支并行发展的时代,从而使计算机行业进入了20世纪末的高速发展时期。

3. 两大分支发展的里程碑事件

通用计算机系统与嵌入式计算机系统的专业化分工发展,使20世纪末、21世纪初,计算机技术飞速发展。计算机专业领域集中精力发展通用计算机系统的软、硬件技术,不必兼顾嵌入式应用要求,通用微处理器迅速从286、386、486发展到奔腾系列;操作系统则迅速扩张计算机基于高速海量数据的文件处理能力,使通用计算机系统进入更加完善的阶段。

嵌入式计算机系统则走上了一条完全不同的道路,这条独立发展的道路就是单芯片化道路。它动员了传统电子系统领域的厂家与专业人士,承担起发展与普及嵌入式系统的历史任务,迅速从传统电子系统发展到智能化的现代电子系统时代。

因此,现代计算机技术发展的两大分支的里程碑意义在于:它不仅形成了计算机发展的专业化分工,而且将发展计算机技术的任务扩展到传统的电子系统领域,使计算机成为进入人类社会全面智能化时代的有力工具。

4. 互联网的发展繁荣了嵌入式系统的发展

嵌入式系统的发展经历了以单芯片为核心的可编程控制器形式的第一代嵌入式系统、以嵌入式CPU为基础和简单操作系统为核心的第二代嵌入式系统、以嵌入式操作系统为标志的第三代嵌入式系统以及今天的以Internet为标志的第四代嵌入式系统。

1.1.2 嵌入式系统的定义与特点

1. 什么是嵌入式系统

按照电器工程协会的定义,嵌入式系统是用来控制或者监视机器、装置、工厂等大规模系统的设备。这个定义主要是从嵌入式系统的用途方面来进行定义的,可以看到,单个嵌入式系统的功能较为单一,是专为某一具体的用途而设定的。这与通用计算机功能的“大而全”形成了鲜明的对比。

嵌入式系统更加常用的定义为:嵌入式系统是指以应用为中心,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。

它主要由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户应用软件等部分组成。它具有“嵌入性”、“专用性”和“计算机系统”3个基本要素。

这个定义较为具体地指明了嵌入式系统的3大基本要素。