

JIYU VXWORKS DE QIANRUSHI XITONG JI SHIYAN

基于 VxWorks 的 嵌入式系统及实验

徐惠民 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

基于 VxWorks 的嵌入式系统及实验

徐惠民 主编

北京邮电大学出版社
· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍了基于 VxWorks 实时操作系统的嵌入式系统原理和应用。全书分为理论基础和实验两个部分。理论基础部分包括:嵌入式系统概述、实时系统的基本理论、嵌入式系统硬件基础、VxWorks 操作系统和嵌入式系统开发环境,共 5 章。实验部分则包括:内核基本功能实验、基础应用性实验和高级扩展性实验,共包含实验 20 多个。希望读者通过理论和实践的结合,能较快地掌握嵌入式开发的基本理论和方法。本书可以作为大学相关课程的教材,也可作为技术培训的资料。

图书在版编目(CIP)数据

基于 VxWorks 的嵌入式系统及实验/徐惠民主编. —北京:北京邮电大学出版社,2006

ISBN 7-5635-1331-0

I. 基... II. 徐... III. 实时操作系统, VxWorks IV. TP316.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 096279 号

书 名: 基于 VxWorks 的嵌入式系统及实验

主 编: 徐惠民

责任编辑: 张珊珊

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)

北方营销中心: 电话 010-62282185 传真 010-62283578

南方营销中心: 电话 010-62282902 传真 010-62282735

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×960 mm 1/16

印 张: 22

字 数: 480 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-1331-0/TP·258

定 价: 35.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 •

前 言

进入 21 世纪后,计算机技术发展的一个重要方面就是嵌入式计算机系统的迅速发展。嵌入式计算机的应用领域已经从传统的控制功能发展到通信、网络等各个方面,嵌入式计算机的核心也从简单的单片机发展到专用的嵌入式计算机芯片,系统软件也从简单的监控系统发展到实时多任务操作系统。

在这样的形势下,各个高等院校纷纷开出了关于嵌入式系统的课程。关于嵌入式系统设计的实验竞赛也举行了几次。

本书是我们从 2001 年开始开设的一门课程“嵌入式系统和实验”的总结。

这门课程的技术基础是 ARM 嵌入式芯片和 VxWorks 操作系统。鉴于 ARM 芯片在嵌入式领域中的地位,选择 ARM 芯片作为硬件基础应该不需要做什么说明;而嵌入式课程选择 VxWorks 操作系统作为软件基础的还不是很多。但是在通信和信息技术的一些高级应用中,出于对系统可靠性等性能的考虑,使用 VxWorks 系统还是很多的。正是考虑到学校和学生的这种信息技术背景,本书选择了 VxWorks 操作系统。

本书从内容上讲可以分为两大部分:第 1 章到第 5 章是关于嵌入式系统的基本知识和基本理论;第 6 章到第 9 章是关于嵌入式系统的实验;还有一个附录,包含了一些相关的补充知识和补充材料。

理论基础部分包含了“嵌入式系统概述”、“实时系统的基本理论”、“嵌入式系统硬件基础”、“VxWorks 操作系统”和“嵌入式系统开发环境”。其中“实时系统的基本理论”介绍了关于实时系统的基本概念,特别是关于任务调度方面的一些算法。这些理论在 VxWorks 等操作系统中实际上已经在应用,所以,我们觉得做一些介绍还是很有必要的。

实验部分的目标板是我们自行开发的基于 S3C4510B 芯片的嵌入式实验

开发板 IRDCv3。实验分为内核基本功能实验、基础应用性实验和高级扩展性实验 3 部分。每个实验都有详细说明,也给出了详细的源代码框架。只要在指定部分加入相应的语句,就可以构成完整的源程序。

本书的基本理论部分是实验部分的基础,而实验部分又是对理论部分的实践和应用。通过理论和实践的结合以及两者的互相贯通,读者能比较迅速地掌握嵌入式开发的基本理论和方法。

本书由徐惠民主编,参加教材编写的还有王立磊、赵红强、许馨元。参加相关工作的还有郭洪文、陈萍、周虚、徐雅静等。特别感谢郭洪文在开发实验板过程中所做的贡献,没有他的努力,实验板的开发不可能如期完成。

本书在内容上和叙述上一定还有许多不足之处,希望读者不吝指正。

徐惠民

目 录

第 1 章 嵌入式系统概述

1.1 嵌入式系统的定义	1
1.2 嵌入式系统的特点	1
1.3 嵌入式系统的应用领域	3
1.4 嵌入式系统的发展趋势	5
1.5 嵌入式系统设计面临的挑战——优化设计度量	5
1.6 3 种关键的嵌入式系统技术	7
1.6.1 处理器技术	7
1.6.2 IC 技术	8
1.6.3 设计技术	8

第 2 章 实时系统的基本理论

2.1 实时系统的历史	11
2.2 实时系统的基本概念及其性能衡量指标	12
2.2.1 实时系统的基本概念	12
2.2.2 实时系统的性能衡量指标	14
2.3 实时系统的任务调度	14
2.3.1 任务调度的功能	14
2.3.2 任务调度的性能准则	14
2.3.3 任务调度方式	15
2.3.4 任务调度算法	15
2.4 实时系统任务的互斥与同步	23
2.4.1 任务的互斥	23

2.4.2 任务的同步·····	24
2.4.3 优先级倒置现象·····	25
2.4.4 优先级继承算法·····	27
2.4.5 优先级上限算法·····	28
2.5 死锁现象·····	30
2.5.1 死锁的概念·····	30
2.5.2 死锁的起因·····	31
2.5.3 解决死锁的策略·····	31
2.6 实时系统任务的通信机制·····	32

第 3 章 嵌入式系统硬件基础

3.1 ARM 体系结构 ·····	34
3.1.1 ARM 的概念 ·····	34
3.1.2 ARM 处理器的架构特点 ·····	34
3.1.3 主流 ARM 处理器及使用场合 ·····	35
3.1.4 ARM 微处理器的寄存器结构 ·····	38
3.1.5 ARM 微处理器的两种指令集比较 ·····	39
3.2 S3C4510B 芯片 ·····	40
3.2.1 工作特性·····	40
3.2.2 芯片引脚介绍·····	44
3.3 ARM/THUMB 指令集及汇编 ·····	50
3.3.1 总体介绍·····	50
3.3.2 ARM 的寻址方式 ·····	51
3.3.3 ARM 指令集 ·····	54
3.3.4 THUMB 指令及应用 ·····	70
3.3.5 ARM 汇编程序设计 ·····	70

第 4 章 VxWorks 操作系统

4.1 系统概述 ·····	88
4.2 多任务介绍·····	89
4.2.1 任务概述·····	89

4.2.2	任务的创建	91
4.2.3	任务名和任务标识	94
4.2.4	任务的删除和保护	95
4.2.5	任务的信息	96
4.2.6	任务的控制	98
4.2.7	任务的错误状态	99
4.3	任务间的通信	100
4.3.1	概述	100
4.3.2	信号量	100
4.3.3	消息队列	109
4.3.4	管道	112
4.3.5	信号	115
4.3.6	事件	117
4.3.7	共享内存	119
4.4	内存管理	120
4.4.1	概述	120
4.4.2	VxWorks 中的内存布局	122
4.4.3	系统函数介绍	123
4.4.4	虚拟内存	124
4.4.5	高速缓存 Cache	125
4.4.6	常用的内存分析工具	125
4.5	中断和异常	126
4.5.1	VxWorks 的中断机制	126
4.5.2	VxWorks 的异常机制	128
4.6	时钟和定时机制	129
4.6.1	VxWorks 操作系统的时钟	129
4.6.2	VxWorks 操作系统的定时机制	131
4.7	I/O 系统	133
4.7.1	I/O 系统概述	133
4.7.2	3 种 I/O 接口介绍	134
4.7.3	I/O 系统的工作机制	139

4.8 文件系统	141
4.8.1 文件系统概述	141
4.8.2 VxWorks 文件系统介绍	141

第 5 章 嵌入式系统开发环境

5.1 Tornado 开发环境介绍	143
5.1.1 Tornado 核心工具	144
5.1.2 Tornado 的工程类型	156
5.1.3 开发环境的使用	156
5.2 IRDC05v3 嵌入式实验箱介绍	162
5.2.1 硬件方案说明	162
5.2.2 系统软件方案说明	164

第 6 章 内核基本功能实验

6.1 实验 1 Hello world	167
6.2 实验 2 信号量	169
6.3 实验 3 消息队列	174
6.4 实验 4 看门狗	178
6.5 实验 5 wind 内核功能	181
6.6 实验 6 中断处理	185
6.7 实验 7 Socket 通信	188
6.8 实验 8 虚拟内存设备驱动	198
6.9 实验 9 任务软调度	208
6.10 实验 10 任务软调度的改进	214

第 7 章 基础应用性实验

7.1 实验 1 LED 灯实验	229
7.2 实验 2 ARM 的串行口实验	238
7.3 实验 3 ARM 的交通灯实验	251
7.4 实验 4 ARM 的键盘接口实验原理实验	257
7.5 实验 5 ARM 的液晶接口实验原理实验	264

7.6 实验 6 液晶键盘实验	275
-----------------------	-----

第 8 章 高级扩展性实验

8.1 实验 1 VxWorks BSP 移植	279
8.2 实验 2 理发师问题实验	286
8.3 实验 3 哲学家吃饭问题实验	296
8.4 实验 4 路由器问题实验	308
8.5 实验 5 构架 WebServer 服务器	321

附 录

附录 A 参考文献	325
附录 B 参考电路图	326
附录 C 标准 C 库函数	335
附录 D WindShell 常用命令	339
附录 E 串口调试助手使用说明	341

第 1 章 嵌入式系统概述

1.1 嵌入式系统的定义

根据 IEEE(国际电气和电子工程师协会)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(原文为 devices used to control, monitor, or assist the operation of equipment machinery or plants),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软件和硬件的结合体,是具有一定应用功能的系统。

目前国内一个普遍被认同的定义是:以应用为中心,以计算机技术为基础,软件硬件可裁减,适用于应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。

1.2 嵌入式系统的特点

1. 针对性强

嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的,不可能独立发展。嵌入式处理器的功耗、体积、成本、可靠性、速度、处理能力、电磁兼容性等方面均受到应用要求的制约。针对用户的具体需求,嵌入式系统的软硬件均可以裁减和添加,面向的用户是不一样的,处处体现了其针对性强的特点。

2. 实时性强

实时性是嵌入式系统的一个基本要求,很难想象嵌入式系统没有实时性会是什么样的情况。当然,单纯靠提高嵌入式处理器的计算性能和工作频率来提高嵌入式系统的实

时性是不科学的,而应该主要靠优化嵌入式软件,保证合理的任务调度等手段来实现。嵌入式系统的实时性分为硬实时和软实时,硬实时规定了任务完成的截止时间,不能有丝毫的延时,软实时则可以将条件放宽一些。

3. 高可靠性

如果嵌入式系统经常出现故障,其众多应用场所将会发生许多灾难性的事故,也会带来非常多的不便。“勇气号”等嵌入式机器人之所以取得很大的成功,一个很重要的原因就在于它们具有克服了各种复杂恶劣环境的高可靠性。嵌入式的软件要求固化存储,这样可以提高软件执行的可靠性和速度。

4. 系统精简

嵌入式系统的操作系统内核容量非常的精简,目的是更可靠、更快速地执行任务程序,并且节省存储空间,使系统的复杂程度降低。外围器件也要求精简可靠,以最大性价比的代价满足客户的需要。

5. 嵌入式系统需要开发工具和环境

由于嵌入式系统本身不具备自主开发能力,即使设计完成以后,用户通常也是不能对其中的程序功能进行修改,因此必须有一套开发工具和环境才能进行开发。这些工具和环境一般是基于通用计算机上的软硬件设备以及各种逻辑分析仪、混合信号示波器等。开发时往往有主机和目标机的概念,主机用于程序的开发、调试,目标机作为最后的执行机构。开发时需要主机和目标机不断交互,所以还要有相应的通信机制。

一个典型的开发模型如图 1-1 所示。

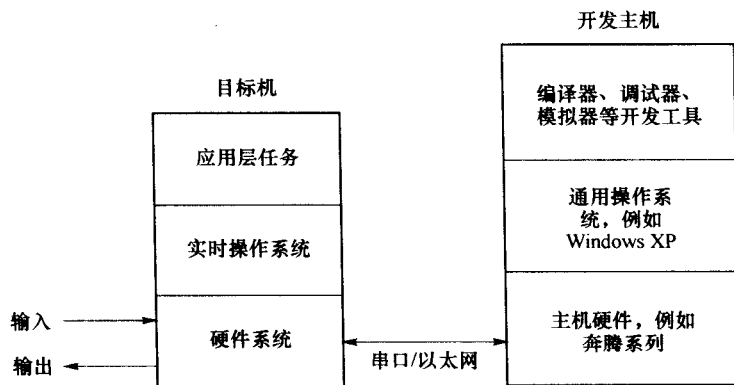


图 1-1 嵌入式开发模型

其中目标机由 3 个层次构成:最底层是硬件系统,中间层是实时操作系统,最高层是应用层任务。实时操作系统起承上启下的作用,调度多任务良好地工作,并且管理系统的所有资源。

开发主机也由3部分构成:最底层是硬件系统,如我们常用的PC;中间层为桌面操作系统,常见的有Windows系列、Linux等;最高层则是集成开发环境,如本书所介绍的针对VxWorks操作系统应用开发的Tornado集成软件,包括编辑器、编译器、调试工具、模拟工具等。

开发主机和目标机通过串口或者网口等方式进行通信,并且具有一定的协议。

1.3 嵌入式系统的应用领域

如今,嵌入式系统的应用非常广泛,如制造工业、过程控制、通信、仪器、仪表、汽车、船舶、航空、航天、军事装备、消费类产品等等,可以说已经融入到了人类生活的方方面面。下面结合图表具体举一些例子,可以使读者更方便地了解。

1. 电子通信方面

嵌入式在电子通信方面应用的一个很典型的例子就是如图1-2所示的手机,手机可以说已经在我们国家非常普及,关于手机的嵌入式软、硬件技术也非常的多。



图 1-2 手机

2. 信息家电方面

嵌入式系统在信息家电方面应用的种类也是非常多,如表1-1所示,但这也只是其中很少的一部分。

表 1-1 信息家电举例

信息家电	代表性产品
网络电视	Microsoft WebTV
网络可视电话	Info Gear IPPhone
网络游戏机	Sega Dreamcast
网络智能手持器件	3Com Palm AT&T PocketNet Phone
	Nokia 9000,9000I,9110,7110
NC终端(clients)	IBM NetStation
PC-中间器件	DIAMON Multimedia Rio Player
	Nuvomedia Rocket e-Book
	Audible Mobile Player

3. 航天航空领域

在航天航空领域,嵌入式系统的应用也是如火如荼,如大家熟悉的“勇气号”(如图1-3所示)就是一个典型的嵌入式应用,其可靠稳定的性能使嵌入式的特点得到了淋漓尽致的

体现。我们国家发射的卫星,包括各种飞机上,均运用了大量的嵌入式技术,如电子雷达、电子通信、各种信号的传感探测等。



图 1-3 “勇气号”火星探索机器人

4. 军事装备

嵌入式在军事方面(如导弹系统、雷达系统、卫星通信系统、红外线探测等方面)得到了很广泛的应用,现代化的战争如果没有嵌入式的应用,很难想象会变成什么样子。各个国家均大力加强嵌入式技术的发展,争取在国家军事装备和国防技术上有重大突破。如图 1-4 所示的“赫耳墨斯”,参加了阿富汗反恐作战,价值 4 万美元,可携带 2 架摄像机,它克服了许多恶劣的环境将前方的实时信息传送回来,在战争中发挥了很好的监视、探测作用。

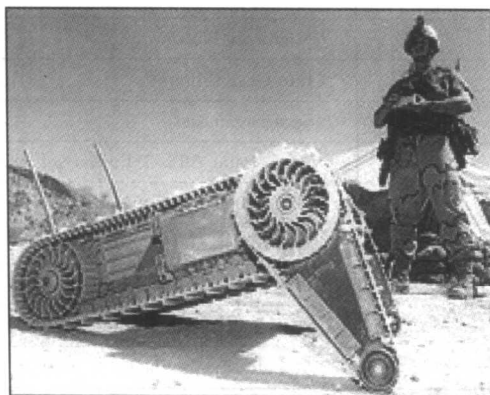


图 1-4 赫耳墨斯

1.4 嵌入式系统的发展趋势

1. 计算能力不断提高

随着半导体工业的大力发展,摩尔定律仍然发挥着自己的效用。嵌入式系统的计算能力在不断发展提高,而市场的需求也要求必须这么做。多媒体等技术的发展对嵌入式系统的计算性能要求越来越高,有更多的复杂算法需要嵌入式系统去计算和处理。

2. 网络功能不断发展

由于网络的普及,越来越多的场合实现了网络化和远程访问,越来越多的客户需要远程监控、远程访问,这就需要嵌入式系统支持网络功能。

3. 软件模块化技术得到广泛发展

基于模块化的嵌入式系统软件开发的优点有很多:可以选用商业成熟的软件组件;可以重用以往经过测试的高可靠性软件模块;能够提高软件质量、缩短产品面市时间;能够降低成本、减少费用等。

4. 集成度越来越高

由于稳定性、可靠性等许多指标的要求,片上 SOC 技术也得到了极大的需求和发展,越来越多的系统集成商和嵌入式产品开发商也选择了 SOC 片上系统作为自己产品的核心模块,由选择单一的器件变为选择更集成的系统模块。

5. 软件方法设计硬件

可编程芯片在嵌入式系统设计中的应用促进了用软件方法设计硬件的发展。硬件设计人员通过 Verilog 语言或者 VHDL 语言可以实现复杂的硬件功能,并且通过软件模拟来确定功能实现是否正确,最后才用硬件来实现。

6. 适应能力增强

切入到市场的时机关系到投资的效益问题,所以要求开发周期尽可能地缩短,这就需要嵌入式系统灵活多变,有很强的适应性,一旦出现新的功能需求,可以在很短的时间内完成系统的设计,开发出产品,投入到市场中。

1.5 嵌入式系统设计面临的挑战——优化设计度量

嵌入式系统设计面临的挑战用一句话来概括就是:必须优化设计度量(Design Metrics)。优化设计度量的目标是构建一个最理想的系统。那么,哪些因素可以称之为设计度量呢?下面我们来讨论这个问题。

设计度量有:

单元成本——生产每个嵌入式系统复制品的费用;

NRE 成本(非重复性工程成本)——设计系统的一次费用;

容量大小——系统所需的物理容量；

性能——系统的执行时间；

功耗——系统消耗的总功率；

可扩展性——系统不增加投资而改变功能的能力；

设计出样品的工期——设计出一个样品所需花费的时间；

投入到市场的工期——开发出产品，并且可以投入到市场的时间；

可维护性——发行第一版产品后，维护产品的能力；

正确性、安全性等等。

但是需要注意的是，优化设计度量中的某一项可能会引起其他项变差。例如开发某个产品，要降低功耗，则需要投入更多的费用，可能系统的性能也会下降。优化度量参数不能仅仅由某一方面的专家进行，而应该综合考虑，从整体性能考虑，选出最优化的方案进行设计。下面以投入市场的开发工期为例说明优化设计度量的重要性。

图 1-5 就是苛刻的投入市场的开发周期因子与收入的分析比较图。可以看出，收入值在某一时间点之前慢慢上升，过了这个时间点后就开始下降。这也就说明，投入市场的开发周期是具有严格的时间限制的，不能太早，也不能太晚，太早则时机还不成熟，太晚则过了收入的高峰值，并且延迟时间越长，收入下降得越厉害。一般来说，投入市场的开发周期大约为 8 个月。

在图 1-6 中，坐标原点表示及时切入市场、投放产品的时间， D 表示延期将产品投入市场的时间， W 表示出现最大收益值的时间， $2W$ 为产品的市场生命周期结束的时间。如果用曲线面积表示整个收益的话，则及时切入市场的收益为 $1/2 \times 2W \times W$ ，延期切入市场的收益为 $1/2 \times (W - D + W) \times (W - D)$ ，损失率为 $[D(3W - D)/2W^2] \times 100\%$ 。例如：

市场生命周期 $2W = 52$ 周，延迟 $D = 4$ 周，则

$$\text{损失} = [4 \times (3 \times 26 - 4) / 2 \times 26^2] = 22\%$$

市场生命周期 $2W = 52$ 周，延迟 $D = 10$ 周，则

$$\text{损失} = [10 \times (3 \times 26 - 10) / 2 \times 26^2] = 50\%$$

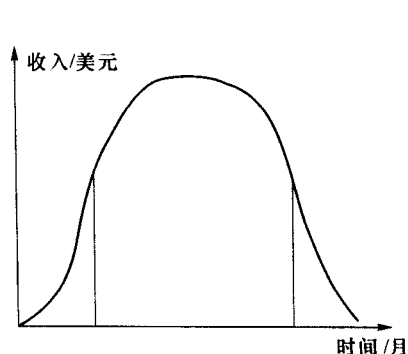


图 1-5 开发周期和收入的关系分析曲线

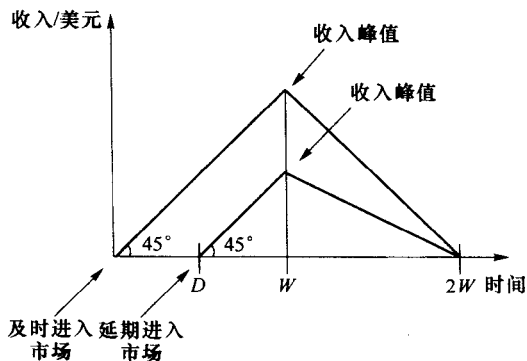


图 1-6 两种不同的切入市场时间引起的效益分析图

由以上例子可以看出延迟的时间越长,损失越严重,延迟 10 周将产品投入市场的损失甚至达到了 50%。

单元设备成本(Cost1)和开发样品成本(Cost2)构成了开发产品的总成本(Cost)。正如前面提到的,单元设备成本为复制样品的成本,相对比较便宜,而且数量(n)越多成本越低,而开发样品的成本一般是比较昂贵的。例如,开发嵌入式产品的总成本

$$\text{Cost} = \text{Cost1} \times n + \text{Cost2} \quad (1.1)$$

平均每个产品的投资(Cost3)

$$\text{Cost3} = \text{Cost} / n \quad (1.2)$$

从式(1.1)可以看出来:假设 n 比较大,总投资成本 Cost 主要和 Cost1、 n 有关系(大到一定程度 Cost2 可以忽略不计),Cost1 和 n 越大,则总投资 Cost 越多。从式(1.2)可以看出,在总投资 Cost 不变的情况下,产品的平均投资 Cost3 也主要由数量 n 决定, n 越大,则平均投资成本越低。

1.6 3 种关键的嵌入式系统技术

1.6.1 处理器技术

作为嵌入式系统中最关键的技术之一,处理器技术的发展对于整个嵌入式系统的发展起着至关重要的作用,对于提高整个嵌入式系统的性能也起着非常重要的作用。

处理器从结构和功能上一般分为 3 种:通用处理器(General Processor)、特定应用场合的处理器(Application-specific Processor)和单一功能的处理器(Single-purpose Processor)。图 1-7 可以帮助读者更好地理解 3 种处理器的区别。

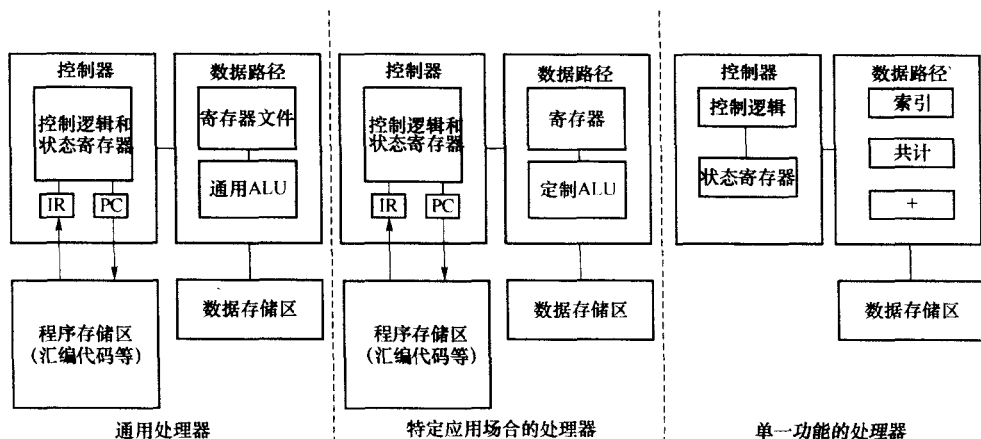


图 1-7 3 种不同的处理器结构