



嵌入式实时操作系统 **VxWorks** 及其开发环境 Tornado

孔祥营 柏桂枝 编著



中国电力出版社

www.infopower.com.cn



嵌入式实时操作系统

VxWorks

及其开发环境 Tornado

孔祥营 柏桂枝 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书主要介绍了嵌入式开发的基本概念、Tornado II 开发环境的使用和 VxWorks 操作系统程序设计核心技术等内容。作者为国内 VxWorks 首批用户,多年来一直从事嵌入式实时系统的开发与设计,本书根据有关文献,结合作者工程开发经验编写而成,有很强的实用和参考价值。

本书适合嵌入式系统开发人员阅读,也可供其他爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式实时操作系统 VxWorks 及其开发环境 Tornado/孔祥营、柏桂枝 编著.-北京:中国电力出版社,2001.11

ISBN 7-5083-0806-9

I.嵌… II.①孔… ②柏… III.①实时操作系统 VxWorks
IV.TP316.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 074041 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.infopower.com.cn>)

三河市实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 22 印张 492 千字

定价 32.00 元

版 权 所 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



在计算机技术和信息技术高速发展的今天，计算机和计算机技术，大量应用在人们的日常生活中。现代的计算机早已超出早期计算机的概念，广泛应用的嵌入式计算机（Embedded Computer）便是其中一种。嵌入式计算机（嵌入式系统），很难给其下确切定义，多指深藏于工业系统、武器系统或一些机电仪表设备、消费电子类产品内部，完成一种或多种特定功能的计算机系统，是软硬件的紧密结合体。具有软件代码小，高度自动化，响应速度快等特点。特别适合于要求实时的和多任务的应用体系。嵌入式实时系统是目前蓬勃发展的行业之一，专家预言嵌入式产品的明天如同 PC 机的今天。

但是，实时嵌入式系统的特点使得其软件受到时间和空间的严格限制，加上运行环境复杂，使得嵌入式系统软件的开发变得异常困难。为了设计一个满足功能、性能和 deadline 要求的代码并实现产品化，是非常困难的，它需要特别了解专门设计方法的人员，也需要在专门的开发平台上使用专门的嵌入式实时操作系统，进行交叉开发。嵌入式实时操作系统及其软件交叉开发环境对开发安全可靠的高性能复杂的嵌入式系统起着非常重要的作用。

VxWorks 操作系统是美国 Wind River 公司推出的一种嵌入式强实时操作系统，自 20 世纪 80 年代问世以来，以其不断推出的升级版本、高性能内核以及友好的用户开发环境，在嵌入式实时操作系统领域逐渐占据一席之地，在国内外拥有较多的用户。尤其以成功应用于火星探测车和爱国者导弹等高科技产品而声名鹊起。

Tornado 是与 VxWorks 相配套的集成开发环境，以其提供完善而实用的编辑、编译、链接、源代码级调试等诸多调试工具和调试手段而闻名。

VxWorks 操作系统自 1996 年登陆中国，短短几年来，逐渐进入了国内通信、国防、工业控制、医疗设备等嵌入式实时应用领域，在国内拥有了较多的用户。特别是最近两年，VxWorks 操作系统越来越多地占据了国内嵌入式实时应用市场。

本书主要介绍了嵌入式开发的基本概念、Tornado II 开发环境的使用和 VxWorks 操作系统程序设计核心技术等内容。

全书分为三部分。

第一部分是基础部分，由第一章组成。介绍了嵌入式实时系统软件设计有关的基础知

识，帮助读者建立嵌入式软件设计的基本概念。主要包括嵌入式系统、实时系统的定义及特点；嵌入式实时软件开发的步骤过程；嵌入式实时操作系统的选择标准；本书的章节组织等内容。

第二部分包括第二、三章。主要介绍实时应用的基本需求与 VxWorks 操作系统及其开发环境 Tornado 的特点与能力是如何满足这些要求的。Tornado II 开发环境的安装、主机及目标机开发环境的建立；主要开发工具的使用，包括：编辑器、工程管理、Target Server、Browser、Shell、Debug、WindView 等工具；Tornado 1.0 工程文件建立等内容。

第三部分是本书的核心，包括第四章到第十一章，系统讲解了 VxWorks 操作系统程序设计中多任务设计、任务间通信、中断处理、设备驱动和网络编程、操作系统配置等几方面的内容。

本书语言通俗易懂、难度深浅适中、内容组织循序渐进、示例丰富、便于自学。

本书编写者是国内 VxWorks 的首批用户，多年来一直从事嵌入式实时系统的开发设计。本书是作者根据 WRS 提供的有关文档，结合工程开发的经验与体会编写的一份实用性很强的参考资料，希望能对国内从事嵌入式实时系统开发的同行有所帮助。

感谢彭思鹏研究员对笔者的悉心指导。感谢七一六所嵌入式专家吴传利、周建忠、刘昌禄先生，他们对本书的编写提供了积极支持与帮助。感谢 Wind River 中国办事处首席代表韩青先生对本书出版的大力支持。本书的一些资料来源于网友的文章，在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促，加之嵌入式技术更新很快，本书中错误和疏漏之处在所难免，敬请广大读者批评、指正。

笔 者

2001 年 10 月



前 言

第 1 章 嵌入式实时系统软件设计	1
1.1 嵌入式实时系统	1
1.2 嵌入式实时系统软件开发设计	8
1.3 嵌入式实时操作系统	13
1.4 如何选择实时操作系统	19
1.5 本书的组织	21
第 2 章 VxWorks 操作系统与实时应用	23
2.1 实时应用的基本需求	23
2.2 VxWorks 简介	25
2.3 Tornado 集成开发环境简介	31
第 3 章 Tornado 使用初步	37
3.1 TornadoII 的新特征	37
3.2 TornadoII 安装	38
3.3 Tornado 简单教程	48
3.4 Tornado1.0.1 下的工程开发	67
第 4 章 VxWorks 任务与任务编程接口	85
4.1 VxWorks 任务	85
4.2 VxWorks 任务编程接口	98
4.3 POSIX 调度接口	105
第 5 章 任务间通信	111
5.1 VxWorks 任务间通信机制	111

5.2	共享数据结构.....	111
5.3	互斥	113
5.4	信号量	115
5.5	消息队列	152
5.6	管道	171
第 6 章	信号、中断处理与定时机制.....	177
6.1	信号 (Signals)	177
6.2	中断服务程序.....	180
6.3	看门狗	187
6.4	POSIX 时钟和计时器	196
6.5	POSIX 内存上锁接口	203
第 7 章	建立调试环境与实例分析.....	205
7.1	建立调试环境.....	205
7.2	实例分析	211
第 8 章	网络编程	219
8.1	VxWorks 网络组件	219
8.2	TCP/IP 协议	221
8.3	套接字基础	227
8.4	Socket 编程接口.....	232
8.5	Socket 的原始方式.....	246
第 9 章	客户 / 服务器编程.....	263
9.1	客户 / 服务器.....	263
9.2	客户端程序设计.....	264
9.3	服务器端程序设计.....	270
9.4	服务端程序结构.....	272
9.5	多协议 (TCP、UDP) 服务端.....	274
9.6	编程实例	274
第 10 章	VxWorks 操作系统配置	289
10.1	VxWorks 的目录与文件.....	289
10.2	VxWorks 的板级支持包 BSP.....	292
10.3	VxWorks 的配置文件与配置项.....	294
10.4	VxWorks 的初始化	298

10.5	可选的 VxWorks 配置.....	305
第 11 章	编程实战	311
11.1	程序执行时间.....	311
11.2	多任务.....	313
11.3	信号量.....	315
11.4	消息队列	318
11.5	轮转调度算法.....	321
11.6	基于优先级的抢占式调度	324
11.7	优先级转置.....	327
11.8	信号	332
11.9	中断服务程序.....	335
附录	参考文献	339

本章主要介绍嵌入式实时系统软件设计有关的基础知识,帮助读者建立嵌入式软件设计的基本概念。

主要包括嵌入式系统、实时系统的定义和特点;嵌入式实时软件开发的步骤;嵌入式实时操作系统的概念,选择准则;本书的章节组织等内容。

1.1 嵌入式实时系统

1.1.1 嵌入式系统

在计算机技术和信息技术高速发展的今天,计算机和计算机技术大量应用在我们的日常生活中。现代的计算机早已超出早期计算机的概念,广泛应用的嵌入式计算机(Embedded Computer)便是其中一种。嵌入式计算机或者叫嵌入式系统,源于20世纪60年代,是一种不被用户所觉察的专用计算机。

嵌入式系统,很难给其写出确切定义,多指深藏于工业系统、武器系统或一些机电仪表设备、消费电子类产品内部,完成一种或多种特定功能的计算机系统,是软硬件的紧密结合体。类似与BIOS的工作方式。具有软件代码小,高度自动化,响应速度快等特点。特别适合于要求实时的和多任务的应用体系。

这些专用计算机系统是以嵌入式计算机为技术核心,围绕应用系统的功能、可靠性、成本、体积、功耗等严格要求来开发设计的。它一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及特定的应用程序等四个部分组成,用于实现对其他设备的控制(Control)、监视(Monitor)或管理(Management)等功能。

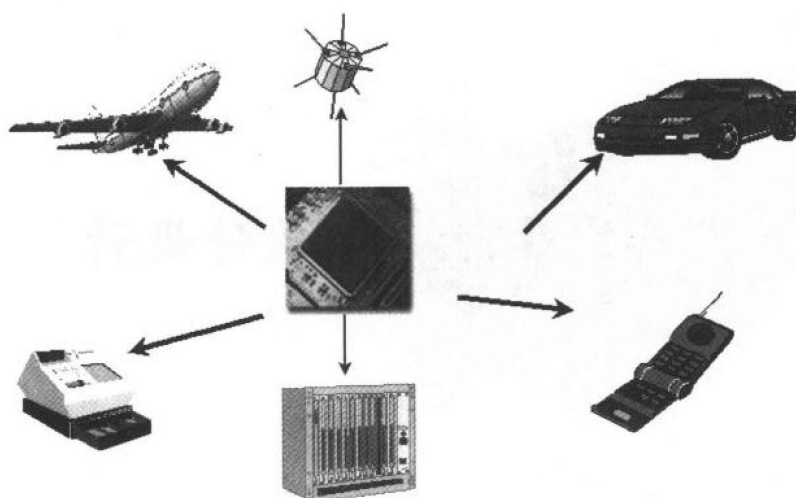


图 1.1 嵌入式计算机技术无处不在

其实，最早在 20 世纪 60 年代嵌入式计算机技术已用于国防系统中，是一种所谓的专用机。二十世纪 70~80 年代嵌入式微处理器逐渐应用于工业控制等领域。目前，从航天飞机到家用微波炉，嵌入式计算机系统广泛应用于工业、交通、能源、通信、科研、医疗卫生、国防以及日常生活（消费电子、CE）等领域，并发挥着极其重要的作用。

随着应用对智能控制需求的不断增长，同时也对嵌入式微处理器的运算速度、可扩充能力、系统可靠性、功耗和集成度等方面提出了更高的要求。

为了适应各方面的需求，嵌入式微处理器体系结构也经历了一个从 CISC 到 RISC 和 Compact RISC；位数从 4 位、8 位、16 位、32 位到 64 位；寻址空间从 64kB 到 16MB 甚至更大；处理速度从 0.1 MIPS 到 2000 MIPS；常用封装从 8 个引脚到 144 个引脚的过程。处理器的功耗也有了明显降低；集成度进一步提高。近闻，美国国家半导体公司又推出了一款高度集成的微处理器 SC1400（片上系统 System-On-A-Chip），它代表了目前嵌入式微处理器技术的最高集成度。

目前国外许多大处理器生产厂商（Motorola、Intel、AMD、日立、NEC 等）纷纷推出各种嵌入式微处理器。最具有代表性的是：Motorola 的 PowerPC 系列；Intel 的 StrongArm 系列和 National Semiconductor 的 x86 系列。其中最具影响力的当数 Motorola 的 PowerPC 系列，由于 PowerPC 系列微处理器种类繁多，而且性能优越，系统集成度高，扩展能力强，可以广泛应用于各类嵌入式系统中。因此，Motorola 已成为当今全球最大的嵌入式微处理器生产商，PowerPC 系列微处理器成为当今嵌入式系统应用的主流。

另一种嵌入式微处理器的热点就是越来越多的人在磁盘控制器、数码相机、手持电话、调制解调器等方面使用 DSP。采用 DSP 的好处是可以大大减少系统内 CPU 的数目，提高效率，并使编程简单化，但是毕竟 DSP 不能完全替代 CPU 的功能。目前已经有公司宣布推出

复合型的微处理器，如 Motorola 的 M.Core（一种新一代的 16/32 位微处理器），它将跨越 CPU 与 DSP。据悉，TI、Siemens 也在开发相似的产品。

1.1.2 实时系统

工业控制、舰船武器系统控制、航空航天等领域的多数嵌入式系统他们有一个共同的特性：对系统的响应时间有严格要求，这些系统也被称为实时系统。

虽然实时系统（Real-Time Systems）的发展已有四十多年的历史，但至今尚无一个能被人们广泛接受的定义。牛津计算机辞典对实时系统的定义为：“实时系统是指那些产生系统输出的时间对于系统是至关重要的系统。这通常是因为输入对应于物理世界的某些运动，同时输出也与一些运动相关。从输入到输出的滞后时间必须足够小到一个可以接受的时限（timeline）内。因此实时系统逻辑正确性不仅依赖于计算结果的正确性，还取决于输出结果的时间”。

注意这里的时限指系统执行时间的限制，而系统功能的实现一般要通过软硬件的相互配合来完成，因此这些组成系统的软硬件的执行也就有了相应的时间限制。相对软件而言，这种时间限制体现到组成软件系统的任务的时间限制，也称之为时限（deadline，亦称死线）。

系统时限的大小和具体系统有关。例如，在一个导弹制导系统中，要求在几个毫秒内产生输出，而在一个计算机控制的汽车生产线中，系统的反应可以放松在一秒内。任务（将会在第四章中介绍）的时限是由软件划分所决定。

近半个世纪以来，随着计算机技术的发展，实时计算机系统在工业过程控制、航空航天、交通管理、作战指挥控制系统以及科学实验和日常生活等领域中得到迅猛发展。

这些实时系统可根据时限对其性能（或效益）影响程度的不同，分为软实时系统（soft real-time systems）和硬实时系统（hard real-time systems）。这是说如果任务在时限到来之前未能完成，前者只可能使系统性能降低（如图 1.2），而后者的后果无法预测且多是灾难性的（如图 1.3）。

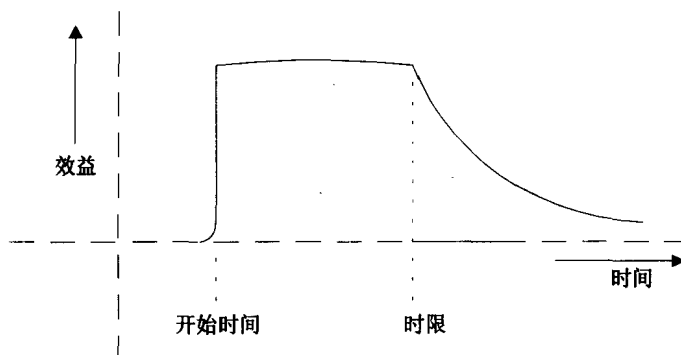


图 1.2 一个软时限事件示意图

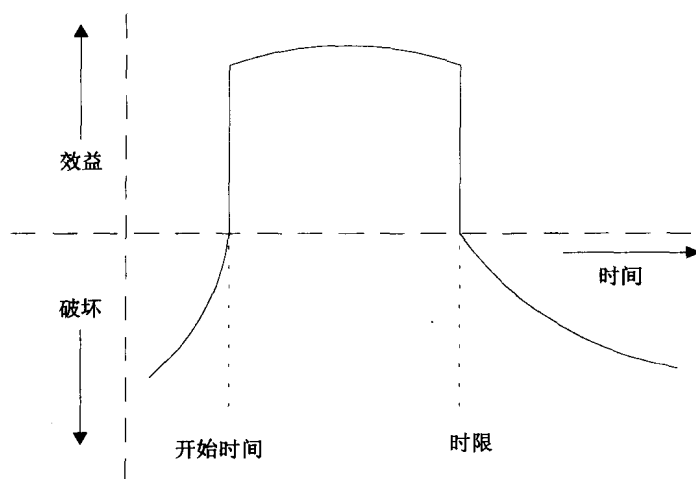


图 1.3 一个硬时限事件示意图

在一些较大实时系统中，并不是所有的计算时间都是硬实时的或关键的。一些事件没有时限，另一些可能仅仅只有软时限，软时限是指时限的错过不会损坏系统的完整性。

另外还可以根据应用领域的不同，将实时系统分为实时信息数据处理系统和实时控制系统。

实时信息数据处理系统和批处理系统的本质区别是，用户通过终端设备向系统提出信息处理请求，系统“实时”响应用户请求，完成处理后通过终端回答用户。这里的“实时”是相对用户反应而言，一般为软实时系统。这类系统的设计和一般计算机系统没有太大的区别，一般不需要用嵌入式系统实现。

实时控制系统，在这类系统中计算机通过特定的设备（器件）与被控对象联系，实时接收（采集）系统对象的信息。经处理后产生控制指令，实现对被控对象的控制。有时，人作为系统中的一个环节，从系统的显示或其他设备获得系统信息，并通过人机接口设备实现人工干预，改变系统的运行，（有的系统可能没有用户界面，完全是个黑匣子）。这类系统一般属于硬实时系统。

大部分硬实时系统是嵌入式系统（embedded system）。

1.1.3 嵌入式实时系统的特点

■ 嵌入式计算机系统特征

嵌入式计算机系统具有区别于通用计算机系统的一些特征，主要有：



➤ 专用的嵌入式 CPU

嵌入式 CPU 与通用型的最大不同就是嵌入式 CPU 大多工作在为特定用户群设计的系统中, 它通常都具有低功耗、体积小、集成度高等特点, 能够把通用 CPU 中许多由板卡完成的任务集成在芯片内部, 从而有利于嵌入式系统设计趋于小型化, 移动能力大大增强, 与网络的耦合也越来越紧密。

➤ 专用性和算法的唯一性

它总是被设计成为完成某一特定任务, 一旦设计完成就不再改变。嵌入式系统和具体应用有机地结合在一起, 它的升级换代也和具体产品同步进行, 因此嵌入式系统产品一旦进入市场, 具有较长的生命周期。

➤ 多种技术的结合体

嵌入式系统是将先进的计算机技术、半导体技术和电子技术和各个行业的具体应用相结合后的产物。这一点就决定了它必然是一个技术密集、资金密集、高度分散、不断创新的知识集成系统。

➤ 硬件与软件的互相依赖性

由于它的专用性决定了它的设计目标是单一的, 硬件与软件的依赖性强, 因而一般软件要进行共同设计 (Co-design), 以求达到共同完成预定的功能, 并满足性能、成本和可靠性目标。嵌入式系统的硬件和软件都必须高效率地设计, 量体裁衣、去除冗余, 力争在同样的硅片面积上实现更高的性能, 这样才能在具体应用对处理器的选择面前更具有竞争力。

➤ 系统对用户是透明的

用户在使用这种设备时只是按照预定的方式使用它, 既不需要用户进行编程, 也不需要用户知道设备内计算机系统的设计细节, 用户也不能改变它。

➤ 嵌入式计算机系统大多数是实时控制系统

例如工业仪器、控制装置、数控系统、信息家电、军用设备和控制系统等。

➤ 系统配置专一, 结构紧凑, 坚固可靠, 一般说来计算机资源 (存储容量和速度) 有限

这是由专用性、嵌入式 (空间约束) 以及适用环境所决定。

➤ 许多嵌入式计算机系统采用分布式系统实现

在各处理机之间存在通信链接, 因为分布式系统更易于保证硬实时性要求、更便宜、更易于实现。



■ 嵌入式计算机系统软件特征

正由于嵌入式计算机系统具有上述特点,嵌入式计算机系统的软件则是更具有特色的软件。对于嵌入式实时系统来说,它具有如下特点:

➤ 响应时间快,并且有确定的硬实时性要求

一般说来,嵌入式系统软件对外部事件的反应是快速的、确定的、可重复实现或周期性的,不管系统当时的内部状态如何都是可以预测的。同时对于事件的处理往往要求在死线到来之前完成,否则将可能引起系统的崩溃。

➤ 具有处理异步并发事件的能力

在实际环境中,嵌入式系统大多数是事件驱动的系统,而且处理的外部事件是多发的而且是并发的随机事件,也就是异步事件。嵌入式应用软件应能有效地处理这些并发事件。所以往往采用多进程(多任务)运行机制,以适应这种复杂的并发环境。还采用线程(thread)和轻进程(lightweight process),以获得更快的切换速度。嵌入式实时操作系统一般提供多任务或多处理机制来管理资源和任务切换。

➤ 具有快速启动、出错处理和自动复位功能

要求快速启动是对嵌入式实时系统的普遍要求,因而也不允许控制程序在运行前从磁盘上加载。所以,嵌入式系统程序大都放置在快速只读存储器中并可直接执行,因而程序是绝对定位、可再入的。并且应用程序应采用特殊的容错和出错处理措施,具有故障诊断和修复能力,在运行死机之前自动恢复先前的运行状态。

➤ 嵌入式系统软件的应用软件与操作系统之间的界线模糊,往往是一体化设计的程序

在通用计算机系统中,像操作系统等系统软件与应用软件之间的界线分明,应用软件是独立设计、独立运行的。但是,嵌入式系统中,操作系统与应用软件是一体化设计的,也就是说应用软件与操作系统是为特定的应用而设计的。嵌入式系统的配置不同,其操作系统和应用软件的配置也不同。所以嵌入式系统的设计往往是硬件与软件一起进行设计。

➤ 软件开发困难,要使用交叉开发环境

嵌入式系统的特点使得其软件受到时间和空间的严格限制,加上运行环境复杂,使得嵌入式系统软件的开发变得异常困难。为了设计一个满足功能、性能和死线要求的代码并把它写进给定数量、位置的ROM中是困难的。它需要特别了解专门设计方法的人员,也需要在专门的开发平台上进行交叉开发,开发环境与运行环境不同。开发平台叫宿主系统,而嵌入式系统的运行系统叫目标系统。嵌入式系统的软件交叉开发环境对开发安全可靠、高性能和



复杂的嵌入式系统起着非常重要的作用。

1.1.4 嵌入方式

从20世纪60年代已经开始应用嵌入式系统,随着计算机技术的发展而迅速发展,嵌入方式有以下三种:

➤ 整机式嵌入

一个带有专用接口的计算机系统嵌入到一个控制系统中,成为控制系统的核心部分。一般这种计算机系统功能完整而强大,完成系统中的核心的关键的工作,也具有较完善的人机界面和外部设备。如指火控系统中多属于这一类。

➤ 部件式嵌入

以部件式嵌入到一个控制设备中,完成某一处理功能,与设备的其他硬件耦合更紧,功能更专一。如雷达的数字信号处理部件,一般选用专用CPU或DSP。

➤ 芯片式嵌入

一个芯片是一个完整的专用计算机,具有完整的输入/输出接口,完成专一的功能。如显示处理机、微波炉控制器等。一般为专门设计的芯片,随着微电子技术的发展,芯片式嵌入应用将越来越广泛。

1.1.5 嵌入式系统的分类及应用

根据不同的分类标准,嵌入式系统有不同的分类方法,这里根据嵌入式系统的复杂程度,可以将嵌入式系统分为以下四类:

➤ 单个微处理器

这类系统可以在小型设备中(如温度传感器、烟雾和气体探测器及断路器)找到,是供应商根据设备的用途来设计的,受Y2K影响的可能性不大。

➤ 不带计时功能的微处理器装置

这类系统可在过程控制器、信号放大器、位置传感器及阀门传动器等中找到。这类设备也不太可能受到Y2K的影响。但是,如果它依赖于一个内部操作时钟,那么这个时钟可能受Y2K问题的影响。

➤ 带计时功能的组件

这类系统可见于开关装置、控制器、电话交换机、电梯、数据采集系统、医药监视系统、



诊断及实时控制系统等。它们是一个大系统的局部组件，由它们的传感器收集数据并传递给该系统。这种组件可同 PC 机一起操作，并可包括某种数据库（如事件数据库）。

► 分布式嵌入式系统

在许多嵌入式应用系统中，往往包含许多设备，这时分布式系统就是实现这种系统最方便、最现实的方法。因为：

- (1) 时间关键的任务放在不同 CPU 中可以更容易保证满足它的 deadline 要求。
- (2) 把微处理器放在设备级上更便于实现设备之间的接口。
- (3) 如果系统中包含从供应商购买的几个设备或系统，它们也包含有自己的 CPU，或者还包含有通信接口，通常不可能把系统的任务放到这些设备中，或者相反把设备的任务放到系统中。
- (4) 使用几个小 CPU 比使用一个大 CPU 更便宜。

所以，许多嵌入式系统用分布式系统实现，在分布的处理机之间用通信链路连接起来。通信链路可以是高速并行数据总线（紧耦合型）也可以是串行数据链路。

制造或过程控制中使用的计算机系统多属于这类系统。对于这类系统，计算机与仪器、机械及设备相连来控制这些装置的工作。这类系统包括自动仓储系统和自动发货系统。在这些系统中，计算机用于总体控制和监视，而不是对单个设备直接控制。过程控制系统可与业务系统连接（如根据销售额和库存量来决定定单或产品量）。在许多情况下，两个功能独立的子系统可在一个主系统操作下一同运行。如控制系统和安全系统，控制子系统控制处理过程以使系统中的不同设备能正确的操作和相互作用以生产产品；而安全子系统则用来降低那些会影响人身安全或危害环境的误操作风险。

1.2 嵌入式实时系统软件开发设计

1.2.1 嵌入式实时系统开发过程

嵌入式实时系统开发的过程一般如图 1.4 所示。

从图 1.4 中可看出，嵌入式实时系统的开发实际上是软硬件交叉并行设计的过程。但是一旦系统的体系结构设计完成，软硬件设计就可独立并行地进行了。等待两者的设计完成，再集成一体进行集成测试。

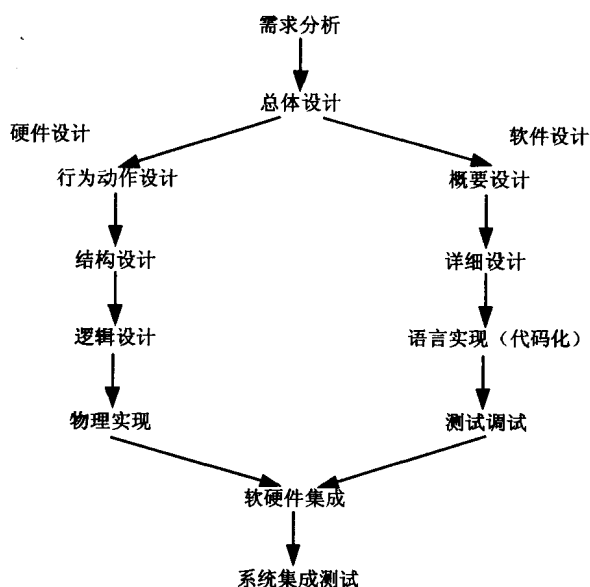


图 1.4 嵌入式系统的从顶向下的开发流程

1.2.2 嵌入式实时软件开发过程

嵌入式实时软件的开发过程如图 1.5 所示。

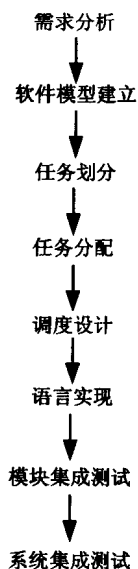


图 1.5 嵌入式实时软件开发流程