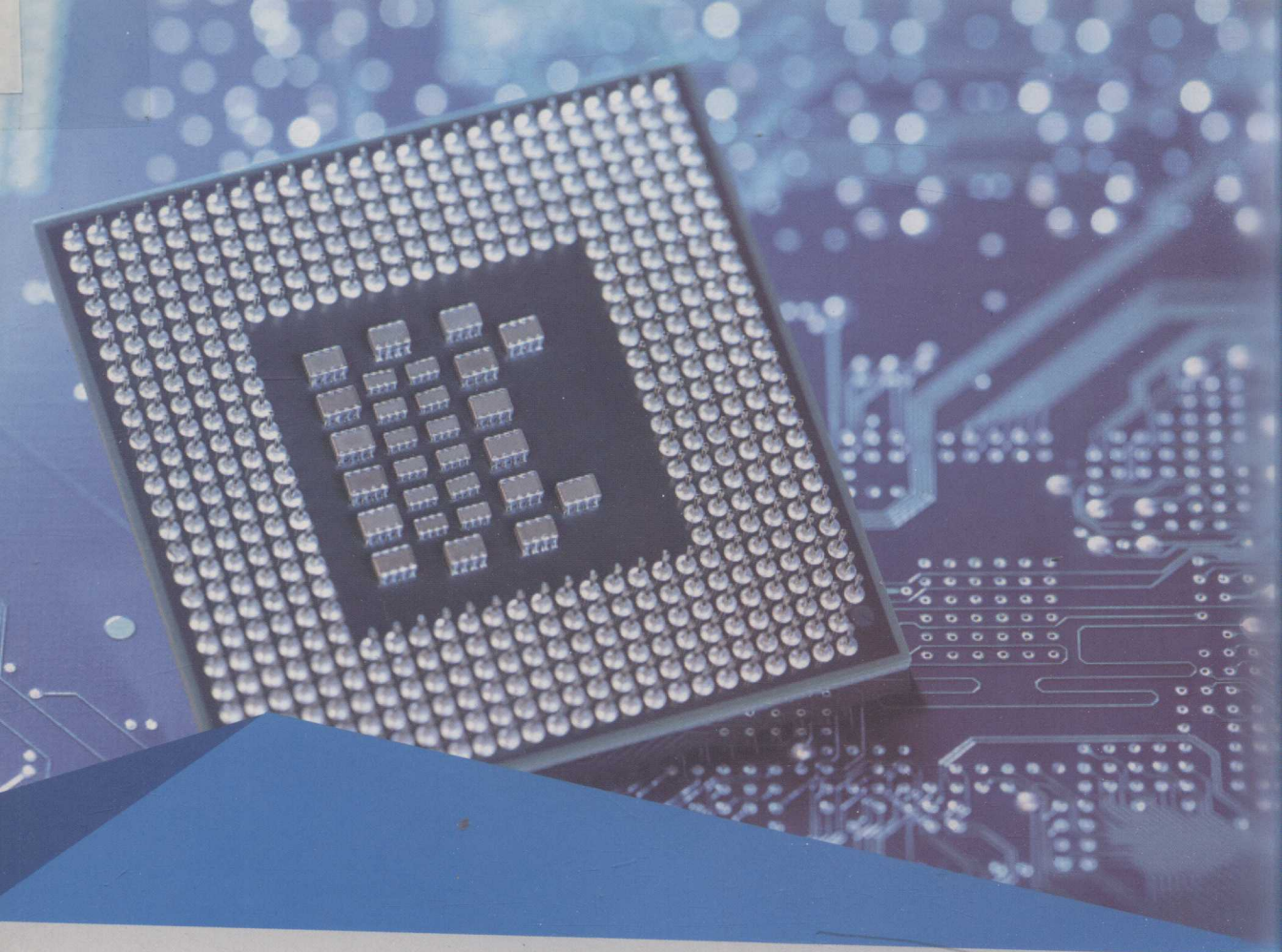




Q IANRUSHI XITONG YINGYONG SHIJIAN KAIFA
JIYU STM32 XILIE CHULIQI

嵌入式系统应用实践开发 ——基于 STM32 系列处理器

邢传玺 主编



NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS
WWW.NNUP.COM

东北师范大学出版社

嵌入式系统应用实践开发

——基于 STM32 系列处理器

主 编：邢传玺

副主编：谢李祥 吴耀文


NORTHEAST NORMAL UNIVERSITY PRESS
WWW.NBNUP.COM
东北师范大学出版社

图书在版编目 (CIP)数据

嵌入式系统应用实践开发：基于 STM32 系列处理器 /
邢传玺主编. -- 长春：东北师范大学出版社，2019.4
ISBN 978-7-5681-5749-0

I. ①嵌… II. ①邢… III. ①微处理器—系统开发
IV. ① TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 082294 号

邢传玺，云南民族大学电气信息
工程学院教授，副教授，IEEE 会员，
IEEE 通信会员，中国计算机学会 (CCF)
会员，中国声学学会会员，云南省高
校科技创新团队负责人，云南省高校无
线传感器网络重点实验室成员，主讲
课程为嵌入式系统开发、单片机应用
及应用数学。

参与国家自然科学基金及国防、973 项目
共计 13 项；发表论文 20 余篇，其中
SCI 15 篇，EI/ISTP 检索 6 篇，
期刊 9 篇；申请专利 4 项。

策划编辑：王春彦
文獻吳 科李博：副主編

- | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| ☐ 责任编辑：卢永康 | ☐ 封面设计：优盛文化 |
| ☐ 责任校对：李倩 | ☐ 责任印制：张允豪 |

东北师范大学出版社出版发行
长春市净月经济开发区金宝街 118 号 (邮政编码：130117)

销售热线：0431-84568036

传真：0431-84568036

网址：<http://www.nenup.com>

电子函件：sdcbs@mail.jl.cn

定州启航印刷有限公司印装

2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

幅画尺寸：185mm×260mm 印张：16.25 字数：363 千

定价：69.00 元

邢传玺，云南民族大学电气信息工程学院教师，副教授，IEEE 会员，ASM 通讯会员，中国计算机学会 (CCF) 会员，中国声学学会会员。云南省高校科技创新团队成员，云南省高校无线传感器网络重点实验室成员。主讲课程为嵌入式系统开发、单片机原理及应用等。目前主持国家自然科学基金 1 项、省级项目 2 项，校级 2 项；参与国家自然科学基金及国防、973 项目共计 13 项；发表论文 20 余篇，其中第一作者 15 篇，SCI/EI 检索 6 篇，中文核心期刊 9 篇；申请专利 4 项。

前 言

随着嵌入式系统在各行各业的广泛使用,使得各种各样的嵌入式系统设备在运用数量上已经远远超过通用计算机,任何一个普通人都可能接触到大大小小的使用嵌入式技术的产品,我们日常生活的不断融合,系统本身的不断发展,新的应用环境和产业化对嵌入式人才也提出了新的更为严格的要求。需求推动革新,新时代下的嵌入式操作系统要求内核具备高实时性、微型化,还将向高可信新、自适应、构件组件化方向发展,系统软件对无线通信和能源管理的功能支持将日益重要。正因如此,社会对嵌入式技术人才的需求量也日益上升,使具有一定开发经验的嵌入式工程师成为了职场上的紧缺人才。

本书根据目前情况进行编写,较为系统地介绍了嵌入式系统的基本概念和一般原理,又将嵌入式系统理论知识和基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F103 微控制器的实际开发相结合,这能更好的指导初学者在实际软件开发环境中更好的学习和理解该书籍。

本书从结构上分为三大模块:第一个模块为第一章到第三章,这三章介绍了嵌入式系统、ARM 技术概述和 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F103 系列的处理器;第二个模块为第四章,这一章将介绍在实际的软件开发各种中所需要的软硬件平台和软硬件平台的一些基本配置;第三个模块为第五章到第十二章,这八章介绍的是 STM32F103 微控制器的基本外设,包括通用输入/输出端口(GPIO)、中断、定时器(TIM)、直接内存访问(DMA)、串口通信(USART)、I2C、SPI 和模数转换器(ADC)等,并且为了便于读者更好的理解,本书在每一个外设章节都将讲述一个开发实例。

阅读本书需要一定的 C 语言、单片机以及硬件设计的基础,适合从事嵌入式开发的技术人员、STM32 的初学者以及本、专院校电子类专业是学生,也适合从 8 位、16 位跨越到 32 位 MCU 开发平台的开发人员。本书也可作为本、专院校课程设计、毕业设计或者电子竞赛的培训和指导教材。

本书编写过程中参考了大量的文献资料,一些资料来源于互联网和开源社区,书中未能一一列举,再次对原作者和开源社区表示诚挚的谢意。

云南民族大学教师邢传玺负责对本书的编写思路与大纲进行总体策划,指导全书的编写及对全书统稿。谢李祥、吴耀文进行了书中的例程验证,并参与了全书内容的统稿和编写,实验选择的硬件开发平台为正点原子的精英板开发板。在此对他们的辛勤付出表示诚挚的谢意。

本书的出版得到了云南民族大学电气信息工程学院的转型发展教材建设项目的支持，并得到了国家自然科学基金项目（61761048）和云南省高校科技创新团队支持计划资助项目的联合资助。在此一并感谢。

由于作者水平有限，加之编写时间仓促，书中难免存在不足和疏漏之处，敬请读者批评指正。

作者简介：邢传玺，云南民族大学副教授，IEEE 会员，ASM 通讯会员，中国计算机学会（CCF）会员，中国声学学会会员。主讲课程为嵌入式系统开发、单片机原理及应用等。

目录

第 1 章 嵌入式系统简介 / 001

- 1.1 嵌入式系统概述 / 001
- 1.2 嵌入式系统的发展历史 / 004
- 1.3 嵌入式系统组成 / 006
- 1.4 嵌入式操作系统 / 011
- 1.5 嵌入式系统的应用 / 017

第 2 章 ARM 技术概述 / 019

- 2.1 ARM 公司简介 / 019
- 2.2 ARM 体系结构 / 020
- 2.3 ARM 指令集 / 022
- 2.4 ARM Cortex-M3 内核 / 025

第 3 章 基于 ARM Cortex-M3 内核的 STM32F103 系列处理器 / 026

- 3.1 STM32 系列芯片概述 / 026
- 3.2 STM32F103 系列芯片架构 / 026
- 3.3 STM32F103 微处理器的时钟系统 / 033
- 3.4 STM32F103 系列芯片低功耗特性 / 035

第 4 章 软硬件开发平台 / 038

- 4.1 STM32F103 的最小系统 / 038
- 4.2 STM32F103 的硬件模块电路 / 042
- 4.3 软件平台搭建 / 048

第 5 章 通用输入/输出端口 (GPIO) / 052

- 5.1 GPIO 概述 / 052
- 5.2 STM32F103 的 GPIO 工作原理 / 052
- 5.3 STM32F103 的 GPIO 相关库函数 / 057
- 5.4 STM32F103 的 GPIO 开发实例 / 065

第6章 中 断 / 072

- 6.1 STM32 中断和异常 / 072
- 6.2 中断的基本概念 / 075
- 6.3 STM32F103 嵌套向量中断控制器 NVIC / 079
- 6.4 STM32F103 外部中断 / 事件控制器 EXIT / 088
- 6.5 STM32F103 的中断开发实例 / 094

第7章 定时器 / 100

- 7.1 定时器概述 / 100
- 7.2 STM32F103 的定时器分类 / 102
- 7.3 STM32F10x 定时器相关库函数 / 105
- 7.4 STM32F10x 定时器开发实例（一） / 115
- 7.5 STM32F10x 定时器开发实例（二） / 119

第8章 直接内存访问（DMA） / 123

- 8.1 DMA 概述 / 123
- 8.2 STM32 的 DMA 工作原理 / 125
- 8.3 STM32F10x 的 DMA 相关库函数 / 130
- 8.4 STM32F103 的 DMA 实例应用 / 139

第9章 USART / 146

- 9.1 USART 概述 / 146
- 9.2 数据通信的基本概念 / 151
- 9.3 STM32F10x 的 USART 相关库函数 / 152
- 9.4 STM32F10x 的 USART 开发实例 / 161

第10章 I2C / 170

- 10.1 I2C 概述 / 170
- 10.2 I2C 工作原理 / 170
- 10.3 I2C 通信原理 / 177
- 10.4 STM32F10x 的 I2C 相关库函数 / 180
- 10.5 STM32F10x 的 I2C 开发实例 / 189

第 11 章 串行外围设备接口（SPI） / 201

- 11.1 SPI 概述 / 201
- 11.2 STM32F103 的 SPI 工作原理 / 202
- 11.3 STM32F103 的 SPI 通信原理 / 206
- 11.4 STM32F10x 的 SPI 相关库函数 / 210
- 11.5 STM32F10x 的 SPI 开发实例 / 217

第 12 章 模数转换器（ADC） / 224

- 12.1 ADC 概述 / 224
- 12.2 STM32F103 的 ADC 工作原理 / 227
- 12.3 STM32F10x 的 ADC 相关库函数 / 234
- 12.4 STM32F10x 的 ADC 开发实例 / 248

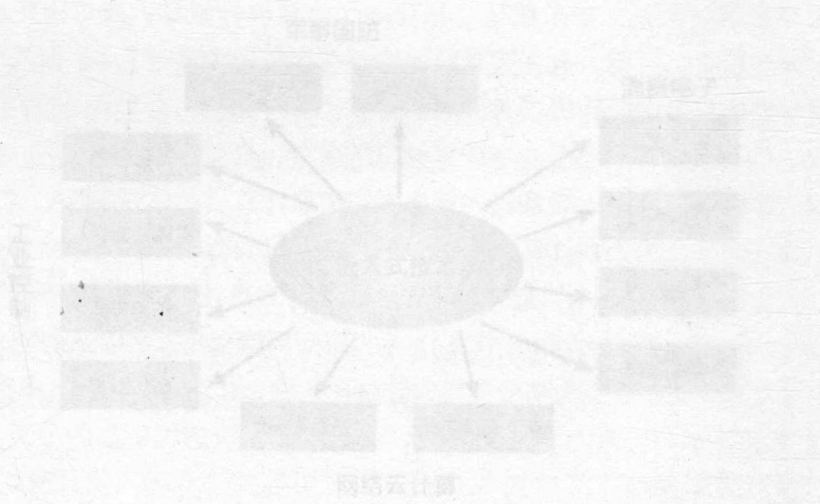


图 1.1 嵌入式技术在各领域的应用

本章主要从嵌入式系统的概念、特点、应用、组成等方面介绍嵌入式系统的基本知识，以便读者对嵌入式系统建立一个完整的概念。

1.1 嵌入式系统概述

嵌入式系统本身是一个相对模糊的定义。由图 1.1 我们可以发现，目前嵌入式系统已

第1章 嵌入式系统简介

本章学习目标

近年来，随着计算机技术、微电子技术及通信技术的飞速发展，基于32位微处理器的嵌入式系统在各个领域的应用不断得到扩大和深入，嵌入式产品已成为信息产业的主流。嵌入式系统在日常生活中无处不在，如手机、路由器、平板电脑等这些常见的设备均为嵌入式系统。图1.1为目前嵌入式技术在各领域的应用情况。

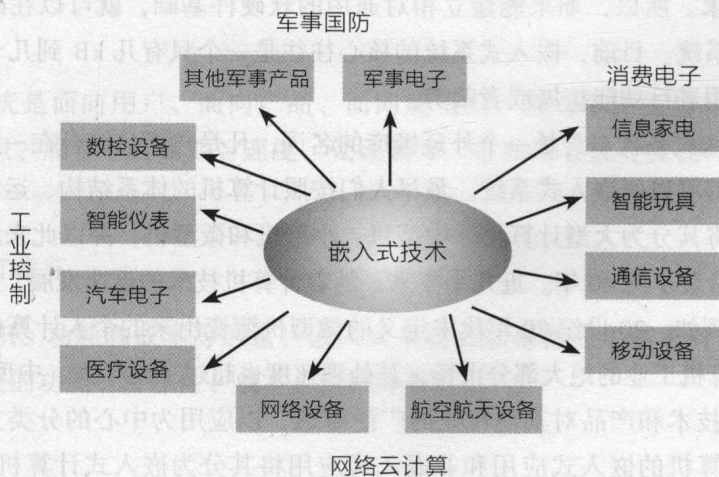


图 1.1 嵌入式技术在各领域的应用

本章主要从嵌入式系统的概念、特点、应用、组成等几个方面介绍嵌入式系统的基本知识，以便读者对嵌入式系统建立一个完整的概念。

1.1 嵌入式系统概述

嵌入式系统本身是一个相对模糊的定义。由图1.1我们可以发现，目前嵌入式系统已

经渗透到人们生活的每个角落，如工业、服务业、消费电子等，而这种范围的扩大使“嵌入式系统”更加难以明确定义。

“嵌入式系统”的概念难以明确，是由于其应用领域非常广泛。例如，工业控制领域的 PC104 微型工业控制计算机属于嵌入式系统，而数码电子类的平板电脑也可以叫作嵌入式系统。然而比较两者，你不难发现两者除了其中都有微处理器并由其控制外几乎完全不同。那是否可以说包含微处理器的设备就是嵌入式系统？一些台灯、LED 灯组也是由单片机来控制的，也可以称为嵌入式系统吗？到底什么是嵌入式系统？一些初学者往往会理解成一个难以定义的抽象概念。

一般来说，可从以下几个方面来理解嵌入式系统。

(1) 嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的，它必须与具体应用相结合才会具有生命力，才更具有优势。即嵌入式系统是与应用紧密结合的，它具有很强的专用性，必须结合实际系统需求进行合理的裁剪利用。

(2) 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与各个行业的具体应用相结合的产物，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。所以，介入嵌入式系统行业必须有一个正确的定位。

(3) 嵌入式系统必须根据应用需求对软硬件进行裁剪，满足应用系统的功能、可靠性、成本、体积等要求。所以，如果能建立相对通用的软硬件基础，就可以在此基础上开发出适应各种需要的系统。目前，嵌入式系统的核心往往是一个只有几 kB 到几十 kB 的微内核，需要根据实际使用进行功能扩展或者裁剪。

实际上，嵌入式系统本身是一个外延极广的名词，凡是与产品结合在一起的具有嵌入式特点的系统都可以叫嵌入式系统。最早人们按照计算机的体系结构、运算速度、结构规模、适用领域，将其分为大型计算机、中型机、小型机和微型机，并以此来组织学科和产业分工，这种分类沿袭了约 40 年。近几十年来，随着计算机技术的迅速发展，实际情况产生了根本性的变化。例如，20 世纪 70 年代末定义的微型机演变出来的个人计算机（PC）如今已经占据了全球计算机工业的绝大部分市场，其处理速度也超过了当年大、中型计算机。

随着计算机技术和产品对其他行业的广泛渗透，以应用为中心的分类方法变得更为切合实际，即按计算机的嵌入式应用和非嵌入式应用将其分为嵌入式计算机和通用计算机。通用计算机具有计算机的标准形态，通过装配不同的应用软件，以相似形式出现并应用在社会各个方面，其典型产品为 PC；而嵌入式计算机则是以嵌入式系统的形式隐藏在各种装置、产品和系统中。

1.1.1 嵌入式系统的定义

根据 IEEE 对嵌入式系统的定义，嵌入式系统是“用于控制、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”）。这主要是从应用对象上加以定义，涵盖了软硬件及辅助机械设备。

目前,国内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,软硬件可裁剪,适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等严格要求的专用计算机系统。

维基百科的定义:嵌入式系统是一种完全嵌入受控器件内部,为特定应用设计的专用计算机系统。与个人计算机这样的通用计算机系统不同,嵌入式系统通常执行的是带有特定要求的预先定义的任务。由于嵌入式系统只针对一项特殊的任务,设计人员能够对它进行优化,减小尺寸,降低成本。嵌入式系统通常进行大量生产,所以单个的成本较低,能够随着产量的增大而不断减小。

从系统的角度来说,嵌入式系统是设计完成复杂功能的硬件和软件,并紧密耦合在一起的计算机系统,是更大系统的一个完整的子系统。与传统的PC类似,嵌入式系统也是软件和硬件的综合体。

1.1.2 嵌入式系统的特点

嵌入式系统的本质包含以下两点:计算机系统;特定应用。

嵌入式系统本质上就是一个计算机系统,但与通用计算机系统相比,它具有以下一些特点。

1. 专用性

嵌入式系统是面向用户、面向产品、面向应用的,其与应用密切相关。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。

2. 软硬件可裁剪

受限于体积、功耗和成本等因素,嵌入式系统必须根据应用需求对软硬件进行裁剪,以满足应用系统的功能、可靠性、成本、体积等要求。

3. 实时性

嵌入式系统具有实时约束性。嵌入式系统很多是实时系统。在多任务嵌入式系统中,对重要性各不相同的任务进行统筹兼顾的合理调度是保证每个任务及时执行的关键,单纯通过提高处理器速度是无法完成的,这种任务调度只能由优化编写的系统软件来完成,因此系统软件的高实时性是基本要求。

目前,嵌入式系统广泛应用于生产过程控制、数据采集、传输通信等场合,主要用来对宿主对象进行控制,所以都对嵌入式系统有或多或少的实时性要求。例如,对嵌入在武器装备中的嵌入式系统、在航空中的嵌入式系统、一些工业控制装置中的控制系统等应用中的实时性要求就极高。当然,随着嵌入式系统应用的扩展,有些系统对实时性要求也并不是很高,如近年来发展速度比较快的手持式计算机、手机、掌上电脑等。但总体来说,

实时性是对嵌入式系统的普遍要求，也是设计者和用户重点考虑的一个重要指标。

4. 需要交叉开发环境和调试工具

嵌入式系统本身不具备自主开发能力，即使设计完成后，用户通常也不能对其中的程序功能进行修改，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。

一般而言，嵌入式系统的构架可以分成四个部分：处理器、存储器、输入/输出（I/O）和软件（由于多数嵌入式设备的应用软件和操作系统都是紧密结合的，在这里对其不加区分，这也是嵌入式系统和 Windows 系统的最大区别）。

5. 可靠性

由于有些嵌入式系统所承担的计算任务涉及产品质量、人身设备安全、国家机密等重大事务，加之有些嵌入式系统的宿主对象要工作在无人值守的场合，如危险性高的工业环境中、内嵌有嵌入式系统的仪器仪表中、人迹罕至的气象检测系统中、侦察敌方行动的小型智能装置中等。所以，对嵌入式系统可靠性的要求极高。

1.2 嵌入式系统的发展历史

虽然嵌入式系统是近几年才开始风靡起来的，但事实上嵌入式这个概念很早就已经存在了。嵌入式系统诞生于微型机时代，经历了漫长的独立发展的单片机道路，从 20 世纪 70 年代单片机的出现到今天各种嵌入式微处理器、微控制器的广泛应用，嵌入式系统拥有四十多年的历史，大致经历了以下四个阶段。

1. 无操作系统阶段

嵌入式系统最初的应用是基于单片机的。单片机是集成了 CPU、ROM、RAM 和 I/O 接口的微型计算机，它有很强的接口性能，非常适合于工业控制。与通用处理器不同，它是从工业测控对象、环境、接口等特点出发，向着增强控制功能，提高工业环境下的可靠性等方向发展。

20 世纪 70 年代，微处理器的出现使早期的大型计算机发生了历史性的变化。以微处理器为核心的微型计算机以其小型、价廉、高可靠性等特点，迅速走出机房，进入工业控制领域。将微型机放在一个芯片上嵌入一个对象体系中，实现对对象体系的智能化控制，从而开创了嵌入式系统独立发展的单片机时代。

单片机大多以可编程控制器的形式出现，具有监测、伺服、设备指示等功能，通常应用于各类工业控制和飞机、导弹等武器装备中，一般没有操作系统的支持，只能通过汇编语言对系统进行直接控制，运行结束后再清除内存。这些装置虽然已经初步具备了嵌入式

的应用特点,但只是使用8位的CPU芯片来执行一些单线程的程序,因此严格地说还谈不上“系统”的概念。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是系统结构和功能相对单一,处理效率较低,存储容量较小,几乎没有用户接口。这种嵌入式系统使用简便、价格低廉,因此曾经在工业控制领域中得到了非常广泛的应用,但无法满足现今对执行效率、存储容量都有较高要求的信息家电等的需要。

2. 简单操作系统阶段

20世纪80年代,随着微电子工艺水平的提高,芯片(IC)制造商开始把嵌入式应用中所需要的微处理器、I/O接口、串行接口以及RAM、ROM等部件统统集成到一片超大规模集成电路(VLSI)中,制造出面向I/O设计的微控制器,并一举成为嵌入式系统领域中异军突起的新秀。与此同时,嵌入式系统的程序员开始基于一些简单的操作系统开发嵌入式应用软件,大大缩短了开发周期,提高了开发效率。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是出现了大量高可靠、低功耗的嵌入式CPU(如PowerPC等),各种简单的嵌入式操作系统开始出现并得到迅速发展。此时的嵌入式操作系统虽然还比较简单,但已经初步具有了一定的兼容性和扩展性,内核精巧且效率高,主要用来控制系统负载以及监控应用程序的运行。

3. 实时操作系统阶段

20世纪90年代,在分步控制、柔性制造、数字化通信和信息家电等巨大需求的牵引下,嵌入式系统进一步飞速发展,面向实时信号处理算法的DSP(Digital Signal Processor)产品也向着高速度、高精度、低功耗的方向发展。

随着硬件实时性要求的提高,嵌入式系统的软件规模也不断扩大,逐渐形成了实时多任务操作系统,并开始成为嵌入式系统的主流。

这一阶段嵌入式系统的主要特点是操作系统的实时性得到了很大改善,已经能够运行在各种不同类型的微处理器上,具有高度的模块化和扩展性。此时的嵌入式操作系统已经具备了文件和目录管理、设备管理、多任务、网络、图形用户界面(GUI)等功能,并提供了大量的应用程序接口(API),从而使应用软件的开发变得更加简单。

4. 面向Internet阶段

21世纪无疑是一个网络的时代,将嵌入式系统应用到各种网络环境的呼声越来越高。随着Internet的进一步发展,Internet技术与信息家电、工业控制技术等的结合日益紧密,嵌入式设备与Internet的结合成为嵌入式技术的真正未来。

针对外部联网要求,嵌入设备必须配有通信接口,相应需要TCP/IP协议簇软件支持;新一代嵌入式设备还需具备IEEE1394、USB、CAN、Bluetooth或IrDA通信接口,也需要提供相应的通信组网协议软件和物理层驱动软件。为了支持应用软件的特定编程模式,如

Web 或无线 Web 编程模式，还需要相应的浏览器，如 HTML、WML 等。

随着移动互联网、物联网、云计算等热门技术的逐步应用和日益普及，这些以实现智能化为核心目标的典型技术已经成为整个信息产业毋庸置疑的主旋律，为嵌入式系统的发展带来了巨大的机遇，也对嵌入式系统厂商提出了新的挑战。

目前，嵌入式系统与 Internet 技术的结合正在推动着嵌入式技术的飞速发展，嵌入式系统的研究和应用产生了如下显著变化：

(1) 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的微处理器。

(2) 嵌入式系统的开发成了一项系统工程，开发厂商不仅要提供嵌入式软硬件系统，还要提供强大的硬件开发工具和软件支持包。

(3) 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，如嵌入式数据库、移动代理、实时 CORBA 等，进一步完善了嵌入式软件平台。

(4) 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。

(5) 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、微波炉等的功能不再单一，结构变得更加复杂，网络互联成为必然趋势。

(6) 精简系统内核，优化关键算法，降低功耗和软硬件成本。

(7) 提供更加友好的多媒体人机交互界面。

1.3 嵌入式系统组成

一个嵌入式系统装置一般由嵌入式计算机系统和执行装置组成，通常包括嵌入式硬件平台、嵌入式处理器及外设、嵌入式应用软件和操作系统等，如图 1.2 所示。嵌入式计算机系统是整个嵌入式系统的核心，由硬件层、中间层、系统软件层和应用软件层组成。

嵌入式应用软件	
嵌入式操作系统	
嵌入式处理器	嵌入式外设
嵌入式硬件平台	

图 1.2 嵌入式系统装置

执行装置也称为被控对象，可以接收嵌入式计算机系统发出的控制命令，执行所规定

的操作或任务。执行装置可以很简单,如手机上的一个微小型的电机,当手机处于震动接收状态时打开;它也可以很复杂,如智能机器人,上面集成了多个微小型控制电机和多种传感器,从而可以执行各种复杂的动作,感受各种状态信息。

嵌入式系统通常由嵌入式硬件和嵌入式软件两部分组成。由于嵌入式系统的应用相关性特点,不同嵌入式系统的具体硬件和软件构成具有一定的差异性,但一般嵌入式系统的软硬件组成具备一定的共性。嵌入式系统是“量身定做”的“专用计算机应用系统”,不同于普通计算机组成。在实际应用中的嵌入式系统硬件配置非常精简,除了微处理器和基本的外围电路以外,其余的电路都可以根据需求和成本进行“裁剪”“定制化”,非常经济、可靠。

1.3.1 嵌入式系统的硬件

嵌入式硬件中主要包含嵌入式处理器、存储器(SDRAM、ROM、Flash等)、通用设备接口和I/O接口(A/D、D/A、I/O等)。在一片嵌入式处理器基础上添加电源电路、时钟电路和存储器电路,就构成了一个嵌入式核心控制模块,其中操作系统和应用程序都可以固化在ROM中。

1. 嵌入式处理器

嵌入式系统硬件的核心是嵌入式处理器,嵌入式处理器与通用CPU最大的不同在于嵌入式处理器大多工作在为特定用户群所专门设计的系统中,它将通用CPU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在设计时趋于小型化,还具有很高的效率和可靠性。

目前,世界上具有嵌入式功能特点的处理器已经超过1 000种,流行体系结构包括MCU、MPU等30多个系列。鉴于嵌入式系统广阔的发展前景,很多半导体制造商都大规模生产嵌入式处理器,并且公司自主设计处理器也已经成为未来嵌入式领域的一大趋势,其中从单片机、DSP到FPGA,品种越来越多,速度越来越快,性能越来越强,价格也越低。目前,嵌入式处理器的寻址空间可以从64 kB到16 MB,处理速度最快可以达到2 000 MIPS,封装从8个引脚到144个引脚不等。

根据其现状,嵌入式处理器可以分成下面几类。

(1) 嵌入式微处理器(Embedded Microprocessor Unit, EMPU)。嵌入式微处理器是由通用计算机中的CPU演变而来的。在应用中,将微处理器装配在专门设计的电路板上,只保留和嵌入式应用有关的母板功能,可以大幅度减小系统体积和功耗。为了满足嵌入式应用的特殊要求,嵌入式微处理器虽然在功能上和标准微处理器基本是一样的,但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面一般都做了各种增强。嵌入式微处理器的体系结构可以采用冯·诺依曼体系或哈佛体系结构;指令系统可以选用精简指令系统和复杂指令系统。精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC)在通道中只包含最有用的指令,确保数据通道快速执行每一条指令,从而提高了执行效率并使CPU硬件结构设计变得更为简单。

和工业控制计算机相比,嵌入式微处理器具有体积小、重量轻、成本低、可靠性高的优点,但是在电路板上必须包括 ROM、RAM、总线接口、各种外设等器件,从而降低了系统的可靠性,技术保密性也较差。嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等安装在一块电路板上,称为单板计算机,如 STD-BUS、PC104 等。近年来,德国、日本的一些公司又开发出了类似“火柴盒”式名片大小的嵌入式计算机系列 OEM 产品。

嵌入式处理器目前主要有 Am186/188、386EX、SC-400、Power PC、68000、MIPS、ARM 系列等。

(2) 嵌入式微控制器 (Micro Controller Unit, MCU)。嵌入式微控制器的典型代表是单片机,从 20 世纪 70 年代末单片机出现到今天,虽然已经经过了几十年的历史,但这种 8 位的电子器件目前在嵌入式设备中仍然有着极其广泛的应用。芯片内部集成 ROM/EPROM、RAM、总线、总线逻辑、定时/计数器、看门狗、I/O、串行口、脉宽调制输出、A/D、D/A、Flash RAM、EEPROM 等各种必要功能和外设。

和嵌入式微处理器相比,微控制器的最大特点是单片化,体积大大减小,从而使功耗和成本下降、可靠性提高。微控制器是目前嵌入式系统工业的主流。

嵌入式微控制器目前的品种和数量最多,比较有代表性的通用系列包括 8051、P51XA、MCS-251、MCS-96/196/296、C166/167、MC68HC05/11/12/16、68300 等。另外,还有许多半通用系列,如支持 USB 接口的 MCU 8XC930/931、C540、C541,支持 I2C、CAN-Bus、LCD 及众多专用 MCU 和兼容系列。目前,MCU 占嵌入式系统约 70% 的市场份额。

特别值得注意的是,近年来提供 X86 微处理器的著名厂商 AMD 公司,将 Am186CC/CH/CU 等嵌入式处理器称为 Microcontroller, MOTOROLA 公司把以 Power PC 为基础的 PPC505 和 PPC555 亦列入单片机行列。TI 公司亦将其 TMS320C2XXX 系列 DSP 作为 MCU 进行推广。近来 Atmel 公司出产的 AVR 单片机集成了 FPGA 等器件,所以具有很高的性价比,势必将推动单片机获得更大的发展。

(3) 嵌入式 DSP 处理器 (Embedded Digital Signal Processor, EDSP)。嵌入式 DSP 处理器对系统结构和指令进行了特殊设计,使其适合执行 DSP 算法,编译效率较高,指令执行速度也较高。在数字滤波、FFT、谱分析等方面,DSP 算法正在大量进入嵌入式领域,DSP 应用正从在通用单片机中以普通指令实现 DSP 功能过渡到采用嵌入式 DSP 处理器。嵌入式 DSP 处理器有两个发展来源:一是 DSP 处理器经过单片化、EMC 改造、增加片上外设成为嵌入式 DSP 处理器,TI 的 TMS320C2000 /C5000 等属于此范畴;二是在通用单片机或 SOC 中增加 DSP 协处理器,如 Intel 的 MCS-296 和 Infineon (Siemens) 的 TriCore。

嵌入式 DSP 处理器比较有代表性的产品是 Texas Instruments 的 TMS320 系列和 Motorola 的 DSP56000 系列。TMS320 系列处理器包括用于控制的 C2000 系列、移动通信的 C5000 系列以及性能更高的 C6000 和 C8000 系列。DSP56000 目前已经发展为 DSP56000、DSP56100、DSP56200 和 DSP56300 等几个不同系列的处理器。另外,Philips 公司也推出了基于可重置嵌入式 DSP 结构,采用低成本、低功耗技术制造的 R. E. A. L DSP 处理器,特点是具备双 Harvard 结构和双乘/累加单元,应用目标是大批量消费类产品。