


高等学校嵌入式系统通用教材·ARM 嵌入式系统系列教程

ARM 嵌入式系统 基础教程 (第2版)

周立功 主 编
王祖麟 陈明计 等编著
严寒亮 张 斌

- ◇ 配套多媒体教学课件
- ◇ 配套实验教程

 北京航空航天大学出版社

高等学校嵌入式系统通用教材·ARM 嵌入式系统系列教程

ARM 嵌入式系统基础教程 (第 2 版)

周立功 主编

王祖麟 陈明计 严寒亮 张 斌 等编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是《ARM 嵌入式系统系列教程》中的理论课教材。

以 NXP 公司(原 PHILIPS 公司半导体部)LPC2000 系列 ARM 微控制器为例,深入浅出地介绍嵌入式系统开发的各个方面。全书共分为 3 部分。第 1 章为理论部分,主要介绍嵌入式系统的概念。第 2~5 章为基础部分,主要介绍 ARM7 体系结构、指令系统、LPC2000 系列 ARM 微控制器的结构原理及外围接口电路的设计方法。第 6~7 章为操作系统部分,先介绍 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的程序设计基础,然后通过实例讲解如何进行系统设计。

本书可以作为高等院校电子、自动化、机电一体化、计算机等相关专业嵌入式系统课程的教材,也可作为嵌入式系统应用开发工程师的参考资料。

本书配套多媒体教学课件。

图书在版编目(CIP)数据

ARM 嵌入式系统基础教程/周立功主编. —2 版. —北京:

北京航空航天大学出版社, 2008. 9

ISBN 978-7-81124-040-5

I. A… II. 周… III. 微处理器, ARM—教材 IV. TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 115893 号

©2008, 北京航空航天大学出版社。版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制本书内容。侵权必究。

ARM 嵌入式系统基础教程(第 2 版)

周立功 主编

王祖麟 陈明计 严寒亮 张斌 等编著

责任编辑 张冀青

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16 印张:32.25 字数:722 千字

2008 年 9 月第 2 版 2008 年 9 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81124-040-5 定价:39.50 元

1. ARM 嵌入式系统的发展趋势

由于网络与通信技术的发展,嵌入式系统在经历了近 20 年的发展历程后,又进入了一个新的历史发展阶段,即从普遍的低端应用进入到一个高、低端并行发展,并且不断提升低端应用技术水平时代,其标志是近年来 32 位 MCU 的发展。

32 位 MCU 的应用不会走 8 位机百花齐放、百余种型号系列齐上阵的道路,这是因为在 8 位机的低端应用中,嵌入对象与对象专业领域十分广泛而复杂;而当前 32 位 MCU 的高端应用则多集中在网络、通信和多媒体技术领域,32 位 MCU 将会集中在少数厂家发展的少数型号系列上。

在嵌入式系统高端应用的发展中,曾经有众多的厂家参与,很早就有许多 8 位嵌入式 MCU 厂家实施了 8 位、16 位和 32 位机的发展计划。后来,8 位和 32 位机的技术扩展侵占了 16 位机的发展空间。传统电子系统智能化对 8 位机的需求使这些厂家将主要精力放在 8 位机的发展上,形成了 32 位机发展迟迟不前的局面。当网络、通信和多媒体信息家电业兴起后,出现了嵌入式系统高端应用的市场;而在嵌入式系统的高端应用中,进行多年技术准备的 ARM 公司适时地推出了 32 位 ARM 系列嵌入式微处理器,以其明显的性能优势和知识产权平台扇出的运行方式,迅速形成 32 位机高端应用的主流地位,以至于使不少传统嵌入式系统厂家放弃了自己的 32 位发展计划,转而使用 ARM 内核来发展自己的 32 位 MCU。甚至在嵌入式系统发展史上做出卓越贡献的 Intel 公司以及将单片微型计算机发展到微控制器的 PHILIPS 公司(其半导体部已改名为 NXP 公司),在发展 32 位嵌入式系统时都不另起炉灶,而是转而使用 ARM 公司的嵌入式系统内核来发展自己的 32 位 MCU。

网络、通信、多媒体和信息家电时代的到来,无疑为 32 位嵌入式系统高端应用提供了空前巨大的发展空间;同时,也为力不从心的 8 位机向高端发展起到了接力作用。一般来说,嵌入式系统的高、低端应用模糊地界定为:高端用于具有海量数据处理的网络、通信和多媒体领域,低端则用于对象系统的控制领域。然而,控制系统的网络化、智能化的发展趋势要求在这些 8 位机的应用中提升海量数据处理能力。当 8 位机无法满足这些提升要求时,便会转而求助 32 位机的解决办法。因此,32 位机的市场需求发展由两方面所致:一方面是高端新兴领域(网络、通信、多媒体和信息家电)的拓展;另一方面是低端控制领域应用在数据处理能力的提升要求。

后 PC 时代的到来以及 32 位嵌入式系统的高端应用吸引了大量计算机专业人士的介入,加之嵌入式系统软/硬件技术的发展,导致了嵌入式系统应用模式的巨大变化,即使嵌入式系统应用进入到一个基于软/硬件平台、集成开发环境的应用系统开发时代,并带动了 SoC 技术的发展。

在众多嵌入式系统厂家参与下,基于 ARM 系列处理器的应用技术会在众多领域取得突破性进展。Intel 公司将 ARM 系列向更高端的嵌入式系统发展;而 NXP 公司(原 PHILIPS 公司半导体部)则在向高端嵌入式系统发展的同时,向低端的 8 位和 16 位机的高端应用延伸。Intel 公司和 NXP 公司的发展都体现了各自的特点,并充分发挥了各自的优势。因此,在 32 位嵌入式系统的应用中,ARM 系列会形成 ARM 公司领军,众多厂家参与,计算机专业、电子技术专业以及对象专业人士共同推动的局面,形成未来 32 位嵌入式系统应用的主流趋势。这种集中分工的技术发展模式有利于嵌入式系统的快速发展。

面对这种形势,近年来,嵌入式系统业界人士掀起了广泛学习嵌入式系统理论及应用开发的热潮,相关的出版物和培训班如雨后春笋不断出现。无论是原有的嵌入式系统业界人士,还是刚进入嵌入式系统的人们,都渴望了解嵌入式系统理论,掌握嵌入式系统的应用技术。高等院校面对这种形式,也迫切需要开设相应的课程。因此,为了满足高等院校嵌入式系统教学以及社会上各种培训的需要,作者结合几年来在嵌入式系统领域教学与开发的经验和特点,编写了本套《ARM 嵌入式系统系列教程》。

2. 本套教程的组成

本套教程由理论教材、实验教材和学习指导 3 部分(共 5 册)组成,且配套的所有教学实验平台都是基于 NXP 公司的 LPC2000 系列 ARM 微控制器(基于 ARM7TDMI-S 核心)而设计。

理论教材

《ARM 嵌入式系统基础教程(第 2 版)》

——含开放式多媒体教学课件,可自行添加或删减内容

实验教材

《ARM 嵌入式系统实验教程(一)》

——含开放式多媒体实验教学课件,可自行添加或删减内容

——配套 EasyARM2200 教学实验平台

《ARM 嵌入式系统实验教程(二)》

——含开放式多媒体实验教学课件,可自行添加或删减内容

——配套 SmartARM2200 教学实验平台

《ARM 嵌入式系统实验教程(三)》

——含开放式多媒体实验教学课件,可自行添加或删减内容

——配套 MagicARM2200 教学实验平台

《ARM 嵌入式系统实验教程(三)——扩展实验》

- 含开放式多媒体实验教学课件,可自行添加或删减内容
- 配套 MagicARM2200 教学实验平台

上述 5 本图书构成了一个完整的,可根据不同教学特点及时地进行裁剪、配套的教材体系。

除此之外,还将我们近年来在 ARM 嵌入式系统领域的应用开发成果编辑成两册在北京航空航天大学出版社出版。选用本套教程作为教学或培训教材的师生以及工程技术开发人员,可选用下面两本图书作为参考资料。这两本参考资料可对 ARM 嵌入式系统的应用开发人员提供进一步的帮助。

参考资料

- 《ARM 嵌入式系统软件开发实例(一)》
- 《ARM 嵌入式系统软件开发实例(二)》

3. 本套教程的特点

本套教程可面对不同教学或培训需要,并配备有相对应的教学实验平台,配有开放式多媒体教学课件,具有完整性、实践性强及便于教学等特点。

完整性——体现在理论教材、实验教材及参考资料的完全配套性;

实践性强——体现在所提供的教学实验系统是成熟且易于上手的软/硬件应用平台;

便于教学——体现在针对不同教学要求,能方便地选择教学与实验教材的最佳组合,无论是理论教材,还是实验教材都配有多媒体教学课件。

4. 本套教程各册内容简介

《ARM 嵌入式系统基础教程(第2版)》 本套教程中的理论课教材。以 NXP 公司 LPC2000 系列 ARM 微控制器为例,深入浅出地介绍嵌入式系统开发的各个方面。全书共分为 3 部分。第 1 章为理论部分,主要介绍嵌入式系统的概念。第 2~5 章为基础部分,主要介绍 ARM7 体系结构、指令系统、LPC2000 系列 ARM 微控制器的结构原理及外围接口电路的设计方法。第 6~7 章为操作系统部分,先介绍 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的程序设计基础,然后通过实例讲解如何进行系统设计。

《ARM 嵌入式系统实验教程(一)》 本套教程中的实验课教材之一。以具有丰富硬件资源的 EasyARM2200 教学实验平台为基础,以 ADS 1.2 集成开发环境、 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统以及各种中间件为软件平台,搭建经济实用的 ARM 嵌入式系统教学实验体系。全书共分 5 章,共有 47 个实验例子。第 1 章全面介绍 EasyARM2200 教学实验平台的设计原理以及各种跳线、接口的使用说明。第 2 章重点介绍 ADS 1.2 集成开发环境的使用,包括建立工程、添加源文件、编译链接设置以及 AXD 调试操作等,并介绍 LPC2200 专用工程模板及 EasyJTAG

仿真器的安装与使用。第3章为无操作系统的基础实验。第4章为基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的实验。第5章为综合实验。

《ARM 嵌入式系统实验教程(二)》本套教程中的实验课教材之二。以 SmartARM2200 为教学实验开发硬件平台,以 ADS 1.2 集成开发环境、 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 和 μClinux 嵌入式操作系统以及各种中间件、驱动程序为软件平台,搭建 ARM 嵌入式系统教学实验体系。全书共分 6 章,第 1 章全面介绍 SmartARM2200 教学实验开发平台的设计原理,以及各种跳线、接口的使用说明;第 2 章介绍无操作系统的基础实验;第 3 章介绍基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的基础实验;第 4 章介绍基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的综合实验;第 5 章介绍 μClinux 操作系统实验;第 6 章介绍 MiniGUI 图形界面实验。

《ARM 嵌入式系统实验教程(三)》本套教程中的实验课教材之三。以 MagicARM2200 为教学实验开发硬件平台,以 ADS 1.2 集成开发环境、 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 和 μClinux 嵌入式操作系统以及各种中间件、驱动程序为软件平台,搭建 ARM 嵌入式系统教学实验体系。全书共分 6 章,第 1 章全面介绍 MagicARM2200 教学实验开发平台的设计原理以及各种跳线、接口的使用说明;第 2 章介绍无操作系统的基础实验;第 3 章介绍基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的基础实验;第 4 章介绍基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的综合实验;第 5 章介绍 μClinux 操作系统实验;第 6 章介绍 MiniGUI 图形界面实验。

《ARM 嵌入式系统实验教程(三)——扩展实验》本书是基于 MagicARM2200 教学实验开发平台。全书共分 8 章,第 1 章主要介绍 ADS 1.2 集成开发环境的使用,以及 LPC2200(for MagicARM2200)专用工程模板的使用和 EasyJTAG 仿真器的安装与使用;第 2~4 章分别介绍基础实验的扩展实验,以及基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 操作系统的扩展实验;第 5 章介绍 MiniGUI (for $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$) 在 MagicARM2200 上的移植和应用实验;第 6 章详细介绍 μClinux 开发平台的构建;第 7 章为 μClinux 的扩展实验;第 8 章重点介绍 LPC2000 系列 ARM-CAN 控制器的操作原理,CAN 网络的基本连接、测试和调试方法,以及软硬件工具的使用。

以上 4 本实验教材的实验安排都是由浅入深,相对完整,使读者更容易学习和掌握 ARM 嵌入式系统的开发应用。

两本参考资料的内容简介如下:

《ARM 嵌入式系统软件开发实例(一)》详细介绍当前几大热点 ARM 嵌入式系统软件模块的原理及其在 ARM7 上的实现。全书分为 5 章,每章介绍一种模块。第 1 章介绍 FAT 文件系统的基础知识,以及兼容 FAT12、FAT16 和 FAT32 的文件系统模块 ZLG/FS 的源码分析;第 2 章介绍 USB 从模块驱动程序的设计思想及实现过程;第 3 章详细介绍 CF 卡和 IDE 硬盘相应软件模块 ZLG/CF 的设计思想及实现过程;第 4 章详细介绍 TCP/IP 及相应软件模块 ZLG/IP 的设计思想及实现过程;第 5 章介绍 GUI 的基础知识及 GUI 模块 ZLG/GUI 的设计思想及实现过程。这些模块是在 NXP 公司通用 ARM7 微控制器 LPC2200 系列上调试通

过的,可以很容易移植到基于其他处理器核的嵌入式系统上。

《ARM 嵌入式系统软件开发实例(二)》本书继承了《ARM 嵌入式系统软件开发实例(一)》的风格,详细介绍当年几大热点嵌入式系统模块的原理与实现。全书共分7章,每章介绍一种模块。第1章基于 ISP1160A1 USB 主机控制器介绍 ZLG/Host Stack 主机协议栈的原理;第2章基于 ZLG/Host Stack 主机协议栈开发大容量类设备主机端驱动应用实例;第3章详细分析 SD/MMC 大容量卡读写软件包 ZLG/SD 的设计思想;第4章剖析 Modbus RTU/ASCII 协议,并详细介绍 ZLG/Modbus 协议栈的原理及应用;第5章介绍嵌入式系统的引用程序核心模块 ZLG/BOOT 软件包的设计思想及应用实例;第6章介绍支持多芯片的 K9F2808 驱动程序原理及应用;第7章介绍具有写平衡算法的 NAND Flash 驱动程序 ZLG/FFS 软件包原理及应用。

5. 本套教程的读者对象以及如何配套选用

本套教程适用于高等院校测控技术与仪器设计、智能化控制、电子工程、机电一体化、自动化以及计算机等专业开设嵌入式系统课程的教材,也可用作各种嵌入式系统应用开发工程技术人员的培训教材。

各高等学校及嵌入式系统应用开发工程技术人员,可以根据自己的需求及实验室的状况配套选用本套教程。作者给出了3种基本方案供参考,学校在建立实验室时也可以组合使用。

(1) 经济型方案

- ▶ 教材:《ARM 嵌入式系统基础教程(第2版)》、《ARM 嵌入式系统实验教程(一)》。
- ▶ 实验器材:计算机、EasyJTAG 仿真器、EasyARM2200 教学实验平台(包含主芯片为 PDIUSBD12 的 USB1.1 PACK)、CF 卡(选件)、硬盘(选件)、SMG240128A 液晶模块(选件)、WH153PA12 微型热敏打印机(选件)以及其他电子实验常用设备(如万用表、面包板等)。

参考资料:

- ▶ 《ARM 嵌入式系统软件开发实例(一)》。
- ▶ 软件:ADS1.2、 μ C/OS-II v2.52 和 ZLGGUI。

(2) 高性价比方案

- ▶ 教材:《ARM 嵌入式系统基础教程(第2版)》、《ARM 嵌入式系统实验教程(二)》。
- ▶ 实验器材:计算机、EasyJTAG 仿真器、SmartARM2200 教学实验平台(包含主芯片为 PDIUSBD12 的 USB1.1 PACK、2.2 英寸 TFT LCD 高清晰度彩色显示屏)、ISP1181B 的 USB1.1 PACK(选件)、ISP1160 或 ISP1161 的 USB HOST PACK(选件)、CF 卡(选件)、SD 卡(选件)、普通硬盘或 1 英寸微型硬盘(选件)、WH153PA12 微型热敏打印机(选件)以及其他电子实验常用设备(如万用表、面包板等)。

▶ 参考资料:《ARM 嵌入式系统软件开发实例(一)》、《ARM 嵌入式系统软件开发实例(二)》。

▶ 软件: ADS1.2、GCC、 μ C/OS-II v2.52、 μ Clinux 2.4 和 MiniGUI。

(3) 全功能型方案

▶ 教材:《ARM 嵌入式系统基础教程(第 2 版)》、《ARM 嵌入式系统实验教程(三)》。

▶ 实验器材: 计算机、EasyJTAG 仿真器、MagicARM2200 教学实验平台(包含主芯片为 PDIUSB D12 的 USB1.1 PACK、ISP1160 或 ISP1161 的 USB HOST PACK、双路 CAN-bus 接口、5.2 英寸 STN LCD 触摸显示屏)、ISP1181B 的 USB1.1 PACK(选件)、CF 卡(选件)、SD 卡(选件)、GPS/GPRS 模块(选件)、MODEM(选件)、普通硬盘或 1 英寸微型硬盘(选件)、WH153PA12 微型热敏打印机(选件)以及其他电子实验常用设备(如万用表、面包板等)。

▶ 参考资料:《ARM 嵌入式系统软件开发实例(一)》、《ARM 嵌入式系统软件开发实例(二)》。

▶ 软件: ADS1.2、GCC、 μ C/OS-II v2.52、 μ Clinux 2.4 和 MiniGUI。

我们相信,本套《ARM 嵌入式系统系列教程》的出版一定会对国内 32 位嵌入式系统的教学与实践起到推动作用;通过这些努力,一定会使我国嵌入式系统应用提升到一个更高的水平,并推动 32 位嵌入式系统的普及。

我们也真诚地欢迎广大读者给我们来信(zlg3@zlgmcu.com),将您对本套图书的意见及修改建议及时提供给我们,以便在本套图书再版时修订。我们真诚希望能够得到广大读者持续不断的支持。

作者

2008 年 5 月

第2版前言

本书从2005年1月第1次出版以来,已先后印刷11次,共53 000册,受到了读者的广泛好评。很多高校的电子、自动化、机电一体化计算机等相关专业嵌入式系统课程选用该书作为教材,而且也对本书提出了很多宝贵的意见和建议,在此深表谢意。

自第1次出版的3年多来,嵌入式技术在飞速发展,高校嵌入式系统的教学也在不断走向成熟规范。我们根据目前高校嵌入式系统的教学现状及嵌入式技术的发展状况,在广大读者宝贵意见和建议的基础上,对本书第1版进行了修订。事实上,从本书第1版出版不久,我们就开始酝酿对第1版的修订,第2版的编写工作前后历时3年,其间几易其稿。

与第1版相比,第2版在内容上做了适当的修改和补充,删除了第1版中“嵌入式系统工程设计”、“移植 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 到ARM7”和“嵌入式系统开发平台”三章内容。嵌入式操作系统是ARM中必不可少的部分,第2版增加了“ $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 程序设计基础”和“电脑自动打铃器设计与实现”,全面讲解 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的使用方法。除此之外,还对“ARM7体系结构”、“ARM7TDMI(-S)指令系统”、“LPC2000系列ARM硬件结构”及“硬件电路和接口设计”这四章内容进行了全面改写,尽量做到理论与实际结合,图文并茂,内容深入浅出。

第2版在易读性和实用性方面与第1版相比,也有了很大提高,书中文字、图片都是根据作者多年工程实践经验以及教学经验总结而来,而非简单照搬照抄英文手册。

作者在3年的编写过程中有不少的写作和教学体会,希望能够与大家分享。

1. 从内核到外设

人们常说读书要“由厚到薄”,那么如何才能做到?答案是可以采用“图解法”——将文字用直观、简单易懂的图和表来描述的方法。以ARM为例,通过下面几幅图来看看图解法是否可以起到画龙点睛的作用。图1所示为LPC2000系列ARM中断系统简图,CPSR寄存器的I和F位是中断禁止标志位,用来使能或禁止ARM的2种外部中断源。其实所有LPC2000的外设都会与这2条中断线相连。当I置位时,IRQ中断禁止;当F置位时,FIQ中断禁止。

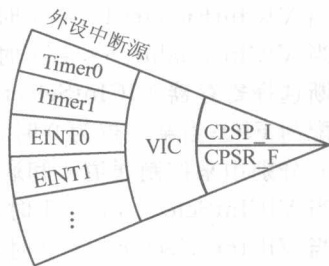


图1 LPC2000系列ARM中断系统简图

注意:当I或F位为0时,则IRQ或者FIQ中断使能,即CPU内核可以响应中断。也就是说,如果 $I = F = 1$,此时即便外设产生中断,ARM内核也不响应。那么,需要满足什么条件CPU才能响应外设中断?需要满足什么条件CPU外设才能产生中断?

如图 1 所示, LPC2000 系列 ARM 的中断系统可以分为 3 个层次。最外层是数量众多的外设部件, 它们可以产生中断信号。处于最里层的是 ARM 内核, 它通过 IRQ 和 FIQ 两根信号线接收外部的中断请求信号, 并根据 CPSR 寄存器的 I 位和 F 位来决定是否响应中断请求。处于中间层的是向量中断控制器(VIC), 它起着承前启后的作用, 管理外层各个外设部件的中断信号, 将这些中断信号分配到 ARM 内核的两根中断请求信号线上, 从而很自然得出如图 2 所示的 CPSR 与 IRQ、FIQ 中断的关系图。

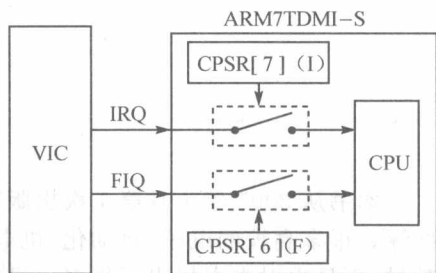


图 2 CPSR 与 IRQ、FIQ 中断的关系图

我们以定时器外设为例来看看 VIC 中断向量是如何响应(管理)外设中断的。如图 3 所示, 定时器 0 和定时器 1 分别处于 VIC 的通道 4 和通道 5, 中断使能寄存器 VICIntEnable 用来控制 VIC 通道的中断使能。

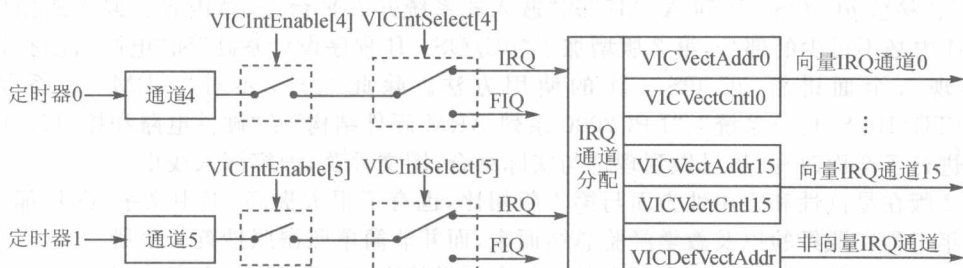


图 3 定时器与 VIC 的关系

- ▶ 当 $VICIntEnable[4] = 1$ 时, 通道 4(即定时器 0)中断使能;
- ▶ 当 $VICIntEnable[5] = 1$ 时, 通道 5(即定时器 1)中断使能。

中断选择寄存器 VICIntSelect 用来分配 VIC 通道的中断。当某一位为 1 时, 对应的通道中断分配为 FIQ; 当某一位为 0 时, 对应的通道中断分配为 IRQ。VICIntSelect[4] 和 VICIntSelect[5] 分别用来控制通道 4 和通道 5, 即:

- ▶ 当 $VICIntSelect[4] = 1$ 时, 定时器 0 中断分配为 FIQ 中断;
- ▶ 当 $VICIntSelect[4] = 0$ 时, 定时器 0 中断分配为 IRQ 中断;
- ▶ 当 $VICIntSelect[5] = 1$ 时, 定时器 1 中断分配为 FIQ 中断;
- ▶ 当 $VICIntSelect[5] = 0$ 时, 定时器 1 中断分配为 IRQ 中断。

当定时器 0/1 分配为 IRQ 时, 还需要设置对应的通道控制寄存器和地址寄存器。

LPC2000 系列 ARM 定时器计数溢出时不会产生中断, 但是匹配时可以产生中断。每个定时器都具有 4 个匹配寄存器(MR0~MR3), 可以用来存放匹配值, 当定时器的当前计数值 TC 等于匹配值 MR 时, 就可以产生中断。

寄存器 TnMCR 控制匹配中断的使能。以定时器 0 为例, 定时器匹配控制寄存器

TnMCR 用来使能定时器的匹配中断,如图 4 所示。

- ▶ 当 $T0TC = T0MR0$ 时,发生匹配事件 0,若 $T0MCR[0] = 1$,则 $T0IR[0]$ 置位;
- ▶ 当 $T0TC = T0MR1$ 时,发生匹配事件 1,若 $T0MCR[3] = 1$,则 $T0IR[1]$ 置位;
- ▶ 当 $T0TC = T0MR2$ 时,发生匹配事件 2,若 $T0MCR[6] = 1$,则 $T0IR[2]$ 置位;
- ▶ 当 $T0TC = T0MR3$ 时,发生匹配事件 3,若 $T0MCR[7] = 1$,则 $T0IR[3]$ 置位。

由此可见,中断作为主线贯穿整个 CPU,并渗透到各个功能部件,起到了极其重要的纽带作用。由内核到外设以中断为主干,以外设为枝叶,从而构成中断关联多叉树,这是学习和设计 ARM 嵌入式应用系统的关键所在。

从单片机、X86 到 ARM 半导体,能够真正明白原厂提供的很多功能部件内部结构图的人很少。事实上,无论是 8 位单片机还是 32 位 ARM,控制外设就是对外设寄存器的编程;寄存器的每一位不是 0,便是 1,据此画出寄存器逻辑开关关联图也就不难了,然后采取填鸭式的方法“按图索意”编程即可。

显而易见,只要抓住了中断关联多叉树和寄存器逻辑开关关联图,一切问题就会迎刃而解。

2. 嵌入式实时操作系统

《嵌入式实时操作系统 $\mu C/OS-II$ (第 2 版)》是一本好书,但对于初学者来说有一定的难度,且作为教材也有点不合适。那么怎样才能做到用最少的代价达到最佳的效果呢?

我们不妨猜想一下, $\mu C/OS-II$ 作者在最初开发阶段编写的第一段代码一定很短,可能只有任务的调度,暂且命名为“ $\mu C/OS-II$ 最小内核”,即 0.1 版本。

当考虑到不常用的任务在运行完毕之后,如果不将其删除,势必要占用一定的 RAM 空间,于是又不得不添加一个新的函数,即删除任务函数 $OSTaskDel()$,暂且命名为 0.2 版本,称之为“ $\mu C/OS-II$ 微小内核”。

当任务间需要传递信息时,当然还有很大的需求,比如任务间同步,ISR 与任务间同步,资源同步,于是作者又编写了 0.3 版本的代码,即增加了创建信号量、发送信号量、接收信号量等函数,直至发布 1.0 版本。

基于上述思想,我们对 $\mu C/OS-II$ v2.52 版本进行了恰当的裁剪,分别由小到大将 $\mu C/OS-II$ v2.52 版本裁剪为 4 个只具备基本功能的微小内核。

通过查看裁剪出来的 4 个微小内核的源程序,可以看到其中代码量最大的一个微小内核 SOURCE4 也不过 1100 行(指剔除文件头和函数头后的数目),而且仅移植代码和配置代码就占用了 1/4。对于初学者来说,最多只需要阅读 $\mu C/OS-II$ 微小内核中的 800 行源程序即可。然而最基本的微小内核 SOURCE1 的核心代码只有 418 行(指剔除文件头和函数头后的数

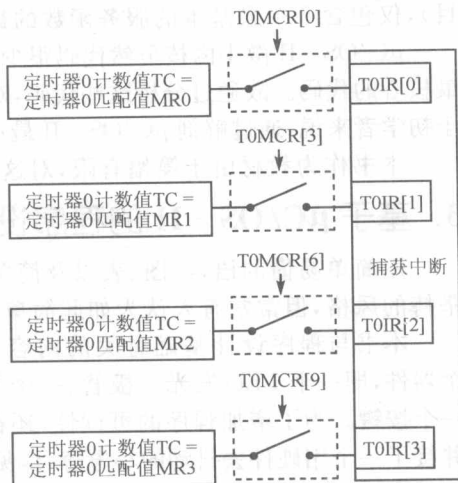


图 4 匹配中断示意图

第 2 版前言

目),仅包含 5 个最基本的服务函数的最小内核。

$\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 微小内核虽然代码很少,但已经具备了 RTOS 的基本特性,而且这是 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 最核心的代码。故通过分析这些代码,对于初学者理解和使用 RTOS 已经足够了。由此可见对于初学者来说,通过解剖 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 最小内核是学习嵌入式实时操作系统最好的入门方法。

本书作为教材由于篇幅有限,对这一部分内容就不再做介绍,请读者自行裁剪。

3. 基于 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 的程序设计

用简单易懂的语言、图、表以及简单的程序来说明复杂的理论知识,这是作者长期以来所坚持的风格,但常常有人认为如此简单,体现不出水平,殊不知这恰恰是最难的。

本书与程序设计基础有关的内容只用了 3 个器件,即一个 LED 发光二极管、一个蜂鸣器和一个按键。为了增加程序的可读性,还在按键上并接了一个用硬件去抖动的小电容,详见图 5。

为阐述互斥信号量、信号量、事件标志组、消息邮箱、消息队列与动态内存管理,选用了 28 个简单的例子,详细介绍了标志“与”、标志“或”、资源同步、ISR 与任务间同步、任务间同步、在中断中获取信号量、任务间数据通信、数据通信、多任务接收数据等系统函数的使用。

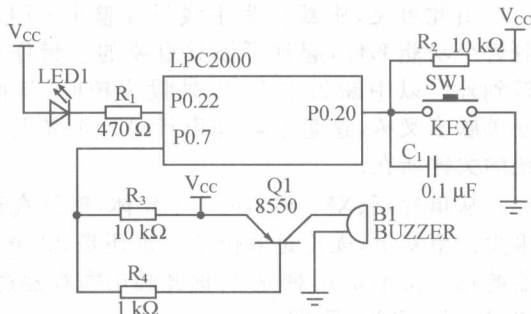


图 5 LED、蜂鸣器与按键原理图

4. 典型应用设计范例

本书以大家常见的“电脑自动打铃器”为例,全面阐述了设计要求,包括硬件电路的设计,任务的划分、数据结构设计和优先级设计,多任务之间的同步/互斥与信息传递,多任务环境下全局变量的保护与公共函数的编写,以及实时响应等相关知识。

参与本书编写的主要人员有周立功、王祖麟、陈明计、严寒亮、张斌。由周立功负责全书内容的规划设计、定稿与修改。另外,还有很多同事参与了本书内容的编写,而且还参与了本科生的教学辅导、实验指导、毕业设计,他们是黄绍斌、郑明远、周立山、陈锡炳、叶皓贲、滕欣欣、梁笑、张日进、李田甜、甘达等。

在本书编写作程中,还得到了北京航空航天大学何立民教授、清华大学邵贝贝教授、上海复旦大学陈章龙教授、东华理工学院周航慈教授的指点。与此同时,晨风也为编写本书提供了很多原始参考资料,在此一并表示感谢。与此同时,本书作为高等学校电类专业“3+1 嵌入式技术创新实验班”的教材,得到了长沙理工大学张一斌教授、宁波大学张卫强副教授、西安邮电学院刘军副教授的大力支持和教学实践,并提出了很多建设性的意见。感谢江西理工大学叶仁荪校长、罗嗣海副校长、机电学院院长刘政博士,以及自动化教研室全体同事的大力支持和帮助。

在修订过程中,尽管作者尽了很大努力,但由于作者的水平有限,书中一定还会有不妥之处,恳请广大读者批评指正。来信请发送到 zlg3@zlgmdu.com。

周立功
2008 年 5 月

前 言

本书为《ARM 嵌入式系统系列教程》中的理论课教材。

尽管一般情况下嵌入式系统对 CPU 处理能力的要求比个人计算机要低,但随着人们生活水平的提高和技术的进步,嵌入式系统对 CPU 处理能力的要求也在稳步提高,大量高速、与 MCS-51 体系结构兼容的微控制器的出现就证明了这一点。但 8 位微控制器受限于体系结构,处理能力的提高始终有限;而 16 位系统在性能上与 8 位机相比始终没有太大优势,成本上与 32 位系统相比也没有什么优势。因此,在可预见的未来,32 位系统必然在嵌入式微控制器中占据重要位置。

基于 ARM 体系结构的 32 位系统占领了 32 位嵌入式系统的大部分份额。但长期以来,基于 ARM 体系结构的 32 位系统仅在嵌入式系统的高端(如通信领域、PDA)等场合使用,要么以专用芯片的面貌出现,要么以微处理器的面貌出现,并没有出现性价比高的通用微控制器。PHILIPS 公司发现了这一空档,推出了性价比很高 LPC2000 系列微控制器,让更多的嵌入式系统具有 32 位处理能力,这也预示着 32 位系统即将成为嵌入式系统的主流。

基于 ARM 体系结构的芯片在中国推广已有数年,关于 ARM 的图书也已出版不少。有关 ARM 的图书主要有以下几类:

1. 关于 ARM 内核的图书,主要读者是芯片设计者,内容主要是介绍芯片设计。
2. 芯片应用类图书,主要读者为应用工程师。
3. 开发板类图书,主要介绍相应的 ARM 开发板,给应用开发者一些参考。

以上 3 类图书的侧重点都不是针对 ARM 应用开发教学的,用于大学本科和研究生教学不太适合。为了满足高等院校教学的要求,我们编写了本套《ARM 嵌入式系统系列教程》。本册书为本套教程中的理论课教材。

本教材各章节内容安排如下:

第 1 章——嵌入式系统概述。主要简单介绍嵌入式系统,包括对嵌入式系统的概念、嵌入式处理器和嵌入式操作系统的简要介绍。

第 2 章——嵌入式系统工程设计。介绍嵌入式系统项目开发生命周期,并针对开发团队介绍各个阶段需要完成的任务。本章还介绍一些嵌入式系统开发的方法。

第 3 章——ARM7 体系结构。主要从应用角度(而不是从芯片设计者的角度)介绍 ARM7 的体系结构。包含许多使用 ARM7 必须了解的知识。如果读者想用好 ARM7,必须

前 言

读透本章。

第4章——ARM7TDMI(-S)指令系统。ARM7TDMI和ARM7TDMI-S是基于ARM体系结构版本V4T的。本章仅介绍ARM体系结构版本V4T支持的指令,ARM体系结构版本V5及以上版本扩展的指令没有介绍。

第5章——LPC2000系列ARM硬件结构。主要介绍PHILIPS公司LPC2000系列基于ARM7TDMI-S的32位微控制器的硬件结构和功能部件。在介绍功能部件原理的同时,通过简单的程序片段加深读者对相应功能部件的理解。特别是在介绍特殊功能部件时,一并介绍启动代码的相关代码,使读者可以了解启动代码的来龙去脉。

第6章——接口技术与硬件设计。主要介绍如何围绕微控制器设计硬件电路以及微控制器的最小系统电路设计方法和多种外设的接口电路设计方法。本章介绍的是其他教科书中很少讲述且容易忽略的细节问题,要设计可靠的硬件必须了解本章内容。

第7章—— $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 到ARM7的移植。详细介绍如何将嵌入式实时操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 移植到ARM7体系结构上,以及如何将移植代码应用到具体的基于ARM7核的微控制器上。与一般公开的移植不同,本移植的任务不必在特权模式下运行(在用户和/或系统模式下运行),任务可以任意使用ARM指令和/或Thumb指令。

第8章——嵌入式系统开发平台。介绍嵌入式开发平台的概念以及使用嵌入式开发平台的必要性,并介绍建立嵌入式系统开发平台(主要为软件开发平台)的方法,以及一些组成软件开发平台的软件模块的使用方法。

参与本书编写工作的主要人员有陈明计、黄邵斌、戚军、叶皓贲、周立山、郑明远、刘英斌、岳宪臣和朱旻等,全书由周立功负责规划、内容安排、定稿与修改。

由于作者水平有限,书中难免有疏忽、不恰当甚至错误的地方,恳请各位老师及同行指正,并请您将阅读中发现的错误发送到 arm@zlgmcn.com。

感谢北京航空航天大学出版社的大力支持,使本书得以快速出版;感谢PHILIPS美国半导体公司的CK Phua先生几年来一如既往的支持和关心。

周立功

2004年11月

目 录

第 1 章 嵌入式系统概述

1.1 嵌入式系统	1
1.1.1 现实中的嵌入式系统	1
1.1.2 嵌入式系统的定义及特点	2
1.1.3 嵌入式系统的未来	3
1.2 嵌入式处理器	3
1.2.1 嵌入式处理器简介	3
1.2.2 嵌入式系统的分类	5
1.3 嵌入式操作系统	6
1.3.1 嵌入式操作系统简介	6
1.3.2 嵌入式操作系统基本概念	7
1.3.3 使用嵌入式实时操作系统的必要性	10
1.3.4 嵌入式实时操作系统的优缺点	11
1.3.5 常见的嵌入式实时操作系统	11
思考与练习	14

第 2 章 ARM7 体系结构

2.1 ARM 简介	15
2.1.1 RISC 结构特性	16
2.1.2 常用 ARM 处理器系列	16
2.2 ARM7TDMI	19
2.2.1 存储器的字与半字	20
2.2.2 3 级流水线	20
2.3 ARM 的模块、内核和功能框图	22
2.4 ARM 处理器状态	24
2.5 ARM 处理器模式	26
2.6 ARM 内部寄存器	27
2.6.1 ARM 状态下的寄存器	28
2.6.2 Thumb 状态下的寄存器	34

2.7 当前程序状态寄存器	36
2.7.1 条件代码标志	37
2.7.2 控制标志位	37
2.7.3 保留位	39
2.8 ARM 体系的异常、中断及其向量表	39
2.8.1 异常入口/出口汇总	39
2.8.2 异常向量表	40
2.8.3 异常优先级	41
2.8.4 异常中断的进入与退出	41
2.8.5 复位异常	42
2.8.6 中断请求异常 IRQ	42
2.8.7 快速中断请求异常 FIQ	44
2.8.8 未定义的指令异常	45
2.8.9 中止异常	45
2.8.10 SWI 软件中断异常	46
2.8.11 中断延迟	47
2.9 ARM 体系的存储系统	47
2.9.1 地址空间	48
2.9.2 存储器格式	48
2.9.3 非对齐的存储器访问	50
思考与练习	51
第 3 章 ARM7TDMI(-S) 指令系统	
3.1 ARM 处理器寻址方式	52
3.2 指令集介绍	57
3.2.1 ARM 指令集	58
3.2.2 Thumb 指令集	81
思考与练习	87
第 4 章 LPC2000 系列 ARM 硬件结构	
4.1 LPC2000 系列 ARM 简介	88
4.1.1 特性	89
4.1.2 器件信息	90
4.1.3 结构	90
4.2 引脚描述	92
4.3 存储器寻址	103
4.3.1 片内存储器	103
4.3.2 片外存储器	105