



卓越工程师系列教材

嵌入式系统应用开发实践教程

QIANRUSHI XITONG YINGYONG KAIFA SHIJIAN JIAOCHENG

杨 斌 著



科学出版社

014036975

TP360.21
76

卓越工程师系列教材

嵌入式系统应用开发实践教程

杨 斌 著



科学出版社

北 京



北航

C1725198

TP360.21
76

内 容 简 介

嵌入式系统是一门“后PC时代”的新兴学科，融汇了计算机软硬件、网络、操作系统等多门技术，因此具有信息面广、知识量大等特点。本书将理论知识与实际应用相结合，选择以嵌入式应用开发必须掌握的基本知识为主要内容，通过多类实验加以应用说明，使学习者在快速掌握基础知识的同时具有一定的操作开发经验和动手能力。

全书共14章，内容囊括嵌入式系统裸机编程和嵌入式操作系统应用编程。本书既可作为普通高校相关专业教材，也可供嵌入式开发人员，信息技术工程师参考查阅。

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式系统应用开发实践教程 / 杨斌著. —北京：科学出版社，2014.4

卓越工程师系列教材

ISBN 978-7-03-039915-1

I. ①嵌… II. ①杨… III. ①微型计算机-系统设计-高等学校-教材 IV. ①TP360.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 038585 号

责任编辑：杨 岭 于 楠 / 封面设计：墨创文化

责任校对：邓利娜 / 责任印制：余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100717

<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年4月第一版 开本：787×1092 1/16

2014年4月第一次印刷 印张：24 1/2

字数：550千字

定价：59.00元

“卓越工程师系列教材”编委会

主	编	蒋葛夫	翟婉明	
副	主	编	阎开印	
编	委	张卫华	高波	高仕斌
		彭其渊	董大伟	潘炜
		郭进	易思蓉	张锦
		金炜东		

前 言

嵌入式系统应用开发技术是一门公认的“高门槛”应用学科，其教学内容涉及信息技术的许多基础课程，并且要求学习者有一定的实际操作经验。在学习嵌入式系统过程中，困难之一是，对其中交织运用的其他学科知识无法遵循其原有的逻辑体系加以理解，而只能够通过实践环节加以领悟和掌握。

嵌入式应用系统相对桌面系统的最大区别在于其软、硬件系统构成的多样化，如千差万别的应用、多种多样的处理器和不同特色的操作系统。选择什么样的硬件和软件类型作为教学模型是构建嵌入式系统教学体系首先要考虑的问题。在分析国内国际当前应用现状及今后若干年内的发展趋势后，本教程选择目前市场主流的 ARM 嵌入式处理器及 Linux 操作系统作为课程学习对象。为兼顾高端的移动计算及智能控制双重应用需求，最终选择三星公司的以 ARM9 为内核的 S3C2440 嵌入式处理器。该处理器具有较高的性价比，在高端的手机、智能移动终端及工业控制、机器人、通信设备等诸多领域有着广泛的应用。

作为实践类教科书，本教程的内容组织有别于技术手册和原理类书籍，关键在于理论课程内容紧密配合并完全符合实践课程知识体系结构的逻辑性和完整性，并且能保证在有限的课时内学生对内容的接受性较高，以及具体操作过程的可完成性较高。本教程在使用中不断被修正完善，以期适合 64 实验学时的实践课程教学所需，其中裸机硬件实验和嵌入式 Linux 实验各占 32 学时。受课程课时数限制，本教程提取了各类嵌入式处理器都具有的最基本功能单元，以及嵌入式 Linux 编程所需的最基本知识点作为教学内容。建议安排实验时先进行嵌入式 Linux 与开发平台无关的实验，然后进行裸机实验，最后进行与实验平台有关的嵌入式 Linux 实验。

本教程力图在有限的课时内使读者掌握嵌入式系统应用开发最基本的概念、原理、工程方法及实践技能，故无法完全纳入读者感兴趣的所有嵌入式系统应用开发相关知识，学习者需要根据不同的应用需要参考更广泛的读物或网络资源。另外由于编著者水平有限再加上时间紧张，教程中难免有错误或遗漏之处，请读者发现后不吝指正。

在本教程的 4.4、5.1、5.3、5.4 节内容是根据武汉创维特公司 CVT 2440 实验教学平台用户手册内容编写的。另外，在实验内容的编排验证过程中，2011 级研究生胡志权、蒋正林、杨川、王福友、张旭等参与了部分实验内容的设计，并对实验参考程序进行了认真调试及优化。在此一并表示感谢。

作者

2014 年 1 月

导 读

嵌入式系统应用开发技术是关于计算机如何针对嵌入式系统的具体应用进行设计开发的知识体系,是随着计算机进入“后 PC 时代”而催生的新兴学科。低廉的计算机硬件价格使计算机可以大量运用到有相关需求的应用领域,如军事、工业、通信业、农业、商业、娱乐业、医疗业等,计算机正以前所未有的速度和形态“嵌入”到人类活动的方方面面。各行各业都在试图引入计算机技术来提升产品性能、自动化水平和服务质量,以期获得更高的市场占有率及盈利水平。由于嵌入式系统应用开发技术是一门融汇了计算机硬件、软件、网络、操作系统、自动检测及控制、多媒体处理技术等多门类技术的综合知识体,被业界普遍认为是“高门槛”应用技术,目前能够胜任相关应用开发工作的技术人员严重短缺。如何利用有限的课时使学习者尽快迈进嵌入式应用开发这个学科的“大门”,并初步具备进行嵌入式应用开发必备的技能,是摆在我国高校面前一个急需解决的课题。

嵌入式系统应用开发技术不仅需要具备广泛的信息类理论知识,还需要掌握基本的实践技能和一定的工程应用经验,这也使得相关实践教学环节在嵌入式系统应用开发技术的学习过程中具有举足轻重的作用。有些企业开发人员甚至建议高校将实践教学课时数提高到整个课程课时数的百分之四十。由此可见,构建一套科学高效的实践教学体系是课程建设的关键。

与嵌入式系统有关的课程内容容量大、覆盖面广,在学校有限课时内应使学习者掌握哪些知识点是构建科学高效的教学体系的首要问题。在广泛的企业需求调研及学科知识逻辑层次分析的基础上,本课程选择以嵌入式应用开发入门必须掌握的软、硬件基本知识和技能为教学目标,筛选出适合课程课时数的嵌入式硬件和软件课程教学内容,并将之组织成实验内容和实验原理。

一、实验内容部分

实验内容是实践教学环节的主体,本教程编排了侧重硬件的嵌入式系统裸机硬件编程和侧重软件的嵌入式操作系统应用编程两部分内容。

(1) 嵌入式系统裸机硬件编程。为兼顾嵌入式硬件开发和软件开发的共同需要,本教程选择了目前市场上主流的 ARM 处理器 S3C2440 嵌入式开发系统作为课程教学和实验实践平台,并根据课时数选择了各类嵌入式处理器普遍具备的最基本功能单元作为课程内容,从系统最底层裸机系统开始学习嵌入式系统硬件结构及程序设计方法,最后过渡到基于操作系统的嵌入式应用程序设计。在实验的前面部分编程语言以 ARM 汇编语言为主,目的是使读者更准确地领会硬件的工作原理及软件对硬件的具体操控过程。在已掌握汇编语言编程方法基础上,后面部分实验内容将逐步过度到采用 C 语言编程,因具体应用中大多以 C 语言为主。

(2) 嵌入式操作系统应用编程。嵌入式系统与单片机系统的最主要的区别是可运行多

任务操作系统。本教程选择了目前应用最为广泛的嵌入式 Linux 操作系统作为课程学习内容。因课时数限制，有关 Linux 操作系统的基础理论知识需要读者自行学习补充。针对大多数读者无工程应用开发的经验，本部分包括了 GCC 编程基础、嵌入式开发环境构建及嵌入式系统移植、嵌入式 Linux 操作系统编程基础及应用开发编程等循序渐进的内容。其中，与目标开发平台无关的编程内容需要读者课外在自己的 PC 机上多加练习。

二、实验原理部分

实验原理部分内容既是本课程理论课教学内容组成部分也是实践环节的编程参考，主要介绍 S3C2440 处理器与实验有关的功能单元内部结构及编程原理。由于此部分内容与实验内容紧密相关，为方便实验过程中参考查询，特将此部分与实验内容整合为一体。

目 录

第一篇 实验内容部分

第 1 章 嵌入式系统实验教学开发系统资源简介	3
1.1 实验开发系统的组成结构	3
1.1.1 教学实验系统功能电路模块	3
1.1.2 教学实验系统的实验实训功能	5
1.2 S3C2440 嵌入式处理器简介	6
1.3 嵌入式开发环境组成	7
1.4 教学实验系统的系统资源及分配	8
1.4.1 实验系统主要存储空间分配	8
1.4.2 实验系统部分外部中断分配	10
1.4.3 实验系统 A/D 端口分配	11
1.4.4 实验系统外括实验功能单元的端口地址译码及部分口地址分配	11
第 2 章 实验开发环境建立及操作	13
2.1 ARM 处理器集成开发环境 ADS 简介	13
2.1.1 ADS1.2 集成开发环境的组成	13
2.1.2 CodeWarrior IDE 简介	14
2.1.3 AXD 调试器简介	15
2.2 ADS1.2 集成开发环境的基本操作实验	15
2.2.1 建立项目	15
2.2.2 在工程中添加源文件	18
2.2.3 进行编译和链接	19
2.2.4 程序的运行与调试方式	21
2.3 基于 ADS 开发环境的汇编语言及 C 语言编程练习实验	21
2.3.1 汇编语言程序设计实验 1	21
2.3.2 汇编语言程序设计实验 2	27
2.3.3 C 语言程序设计实验	30
2.4 基于调试接口 JTAG 的目标程序烧写实验	33

2.4.1	基于 JTAG 口的 FLASH 烧写环境简介	33
2.4.2	Flash Programmer 烧写程序实验	34
第 3 章	嵌入式系统基本功能单元实验	37
3.1	嵌入式处理器基于三总线的外设扩展应用	37
3.1.1	LED 跑马灯实验	37
3.1.2	数码管显示实验	43
3.1.3	4×4 键盘实验	48
3.2	嵌入式处理器的 GPIO 口外设扩展应用 ——GPIO 口跑马灯实验	55
3.3	嵌入式处理器的中断系统——S3C2440 中断实验	60
3.4	嵌入式处理器的定时机制应用实验	71
3.5	嵌入式处理器的异步串行通信机制 ——UART 串行通信基本方式实验	80
3.5.2	UART 串行通信 FIFO 模式实验	98
3.6	嵌入式处理器的 A/D 变换及应用	104
3.6.1	A/D 变换实验	104
3.6.2	A/D 变换器应用:触摸屏控制实验	110
第 4 章	Linux 开发环境构建及 C 语言应用编程基础	122
4.1	嵌入式 Linux 开发环境构建实验	122
4.2	嵌入式 Linux 下 C 语言编程基础实验 1	123
4.3	嵌入式 Linux 下 C 语言编程基础实验 2	125
4.4	Linux 内核移植实验	126
4.5	基于目标板的 Linux 应用程序开发流程实验	132
第 5 章	嵌入式 Linux 操作系统编程基础	137
5.1	嵌入式 Linux 下的进程及多线程编程实验	137
5.2	嵌入式 Linux 进程通信编程实验	141
5.3	嵌入式 Linux 下的 SOCKET 通信编程实验	165
5.4	嵌入式 Linux 驱动程序设计实验	176
第 6 章	嵌入式 Linux 应用编程	185
6.1	嵌入式 Linux 下 web 服务器构建及应用实验	185
6.2	嵌入式 Linux 下的 QT 图形化应用编程实验	191

第二篇 实验原理部分

第 7 章	S3C2440 内部组成结构及存储空间分配	203
7.1	S3C2440 的内部组成结构及外部引脚功能	203
7.1.1	S3C2440 的内部组成结构	203

7.1.2 S3C2440 的外部引脚及类型	205
7.2 S3C2440 的存储空间结构及分配	209
7.2.1 S3C2440 的存储空间结构	209
7.2.2 各类存储器的初始化参数设置及相关寄存器	211
7.2.3 S3C2440 的特殊功能寄存器区	217
7.2.4 S3C2440 的引导程序存储区	222
习题与思考题	223
第 8 章 S3C2440 的时钟及功耗管理单元	225
8.1 S3C2440 的多时钟源产生机制及频率设置	225
8.1.1 S3C2440 的多时钟源及服务对象	225
8.1.2 锁相环外部时钟源的选择	226
8.1.3 锁相环 MPLL 和 UPLL 的组成结构及输出频率设置方法	227
8.1.4 PLL 输出频率变换过程及锁定时间	230
8.2 S3C2440 基于时钟管控的能耗管理机制	230
8.2.1 S3C2440 基于时钟管控机制的工作模式	231
8.2.2 基于时钟管控机制工作模式的转换	236
8.2.3 不同能耗工作模式转换中的注意事项	237
8.2.4 各功能单元的动态时钟管控方法	238
8.3 USB 及摄像头的时钟管理控制	239
8.3.1 USB 的时钟管理控制	239
8.3.2 摄像头的时钟管理控制	240
8.4 时钟及功耗管理单元编程	240
习题与思考题	242
第 9 章 S3C2440 的通用输入/输出 GPIO	243
9.1 S3C2440 的 GPIO 组成结构及基本功能设置寄存器	243
9.1.1 S3C2440 的 GPIO 引脚分组及功能	243
9.1.2 各 GPIO 组基本功能设置寄存器的作用	248
9.1.3 各 GPIO 组基本功能设置寄存器属性及位定义	249
9.2 与 GPIO 引脚功能设置有关的其他寄存器	258
9.3 GPIO 功能单元的所有寄存器小结	262
9.4 GPIO 应用编程实例	263
习题与思考题	269
第 10 章 S3C2440 的中断系统	270
10.1 S3C2440 中断系统的组成结构	270
10.1.1 S3C2440 的中断源及管理	270

10.1.2	S3C2440 中断系统结构	271
10.1.3	S3C2440 中断系统编程相关寄存器	272
10.2	S3C2440 中断系统工作流程	287
10.2.1	中断响应流程	287
10.2.2	中断源的判别及寻址中断处理程序的二级向量表	288
10.3	中断系统程序设计实现	290
10.3.1	中断处理相关程序组成结构	290
10.3.2	中断处理所需运行环境及初始化程序设置	290
10.3.3	中断处理程序	293
10.3.4	S3C2440 处理器中断系统应用编程例	293
	习题与思考题	300
第 11 章	S3C2440 定时器与脉宽调制器	302
11.1	定时器与脉宽调制器 PWM 的基本结构	302
11.1.1	S3C2440 定时器与 PWM 的编程结构及工作原理	302
11.1.2	PWM 定时器的编程设置过程	309
11.2	PWM 定时器的寄存器组	311
11.3	PWM 定时器应用编程例	317
11.3.1	PWM 定时器应用编程例 1	317
11.3.2	PWM 定时器应用编程例 2	318
11.4	一种特殊的定时器——看门狗定时器	320
11.4.1	S3C2440X 的看门狗定时器结构及工作原理	320
11.4.2	S3C2440X 的看门狗定时器内部寄存器	321
	习题与思考题	323
第 12 章	S3C2440 的通用异步串行通信单元 UART	324
12.1	UART 的组成结构及工作模式	324
12.1.1	S3C2440 异步串行通信单元 UART 的组成结构	324
12.1.2	S3C2440 异步串行通信单元 UART 的工作模式	325
12.2	S3C2440 UART 的寄存器	325
12.2.1	串行数据帧格式设置寄存器——线控寄存器 ULCON	326
12.2.2	控制寄存器 UCON	327
12.2.3	波特率分频寄存器 UBRDIV	331
12.2.4	收发状态寄存器 UTRSTAT 及错误状态寄存器 UERSTAT	332
12.2.5	发送缓冲寄存器 UTXH 及接收缓冲寄存器 URXH	333
12.2.6	UART FIFO 数据传输模式及专用寄存器	334
12.2.7	UART MODEM 数据传输模式及专用寄存器	336

12.3	UART 异步串行通信的应用编程	339
12.3.1	单字符数据串行通信程序实现过程	339
12.3.2	单字符数据串行通信程序设计实例	343
	习题与思考题	345
第 13 章	S3C2440 A/D 变换器及触摸屏控制器	346
13.1	A/D 变换器及触摸屏控制器组成结构	346
13.1.1	A/D 变换器的技术指标及内部结构	346
13.1.2	A/D 变换器的工作模式	347
13.2	A/D 变换器的编程寄存器	351
13.2.1	A/D 控制寄存器	351
13.2.2	ADC 变换数据寄存器 0/1	352
13.2.3	ADC 变换启动延迟寄存器	352
13.2.4	ADC 触摸屏控制寄存器	353
13.2.5	ADC 触摸屏触笔起落中断检测寄存器	354
13.3	A/D 变换器及触摸屏应用编程	354
13.3.1	常规 A/D 变换器应用编程	355
13.3.2	查询方式常规 A/D 变换编程举例	356
13.3.3	中断方式常规 A/D 变换编程例	357
13.3.4	触摸屏应用编程	359
	习题与思考题	364
第 14 章	S3C2440 的 SPI 串行通信接口及应用	365
14.1	SPI 工作原理及编程结构	365
14.1.1	SPI 工作原理及编程结构	365
14.1.2	SPI 的四种时钟有效工作模式	366
14.2	S3C2440 内嵌 SPI 结构及其编程	368
14.2.1	S3C2440 SPI 功能单元的编程结构	368
14.2.2	SPI 功能单元的编程寄存器	369
14.2.3	SPI 数据传输应用编程	372
	习题与思考题	375
	参考文献	376

第一篇

实验内容部分

第1章 嵌入式系统实验教学开发系统资源简介

CVT-2440 是一款功能强大的嵌入式系统教学实验箱，提供了目前典型的嵌入式系统应用所需的主要功能单元。它可用于构建多种不同应用层次和需求的嵌入式应用系统，进行单元类嵌入式功能部件硬件实验，进行基于汇编语言或 C 语言的裸机应用程序开发实验，也可进行包括 Linux、Vxworks、Win/CE、μC-OS/II 乃至 Android 等主要嵌入式操作系统的基础类及综合应用实验。

1.1 实验开发系统的组成结构

实验箱内部主要组成结构及实验功能单元如图 1-1 所示，实物图如图 1-2 所示。

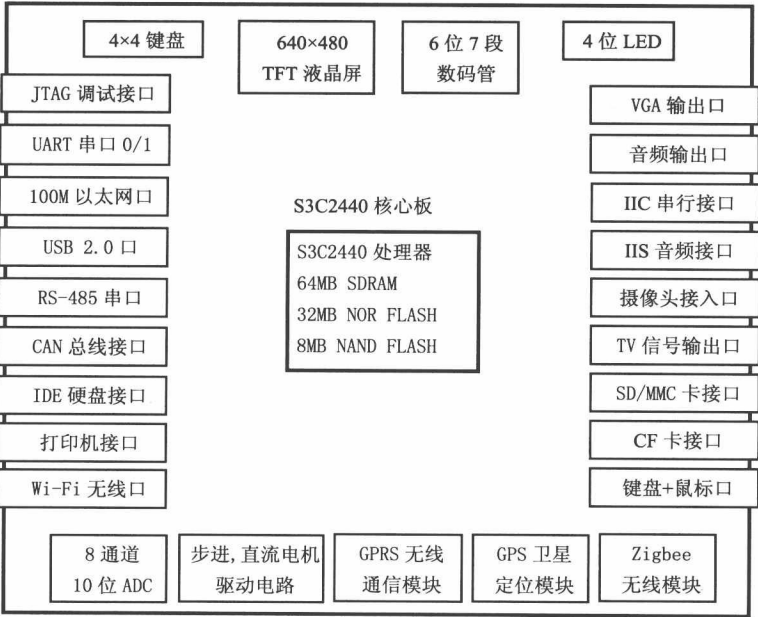


图 1-1 CVT-2440 实验箱组成及主要实验功能单元

1.1.1 教学实验系统功能电路模块

CVT-2440 实验箱采用了模块化结构形式，其硬件电路由以下可插接的三部分电路模组

构成：核心电路板模组、底板基本配置电路模组和底板扩展电路模组。各部分的电路又按照不同的实验目的构建成不同的功能模块。例如，核心电路板内的存储器功能模块，底板基本配置电路内的各种人机交互功能模块、各种接口电路模块、A/D 模块、电机驱动模块等。又如，可扩展的 GPRS 模块、GPS 模块、DSP 模块、无线传感网络模块、各种传感器及驱动模块等。图 1-2 为 CVT-2440 实验箱的实物图。

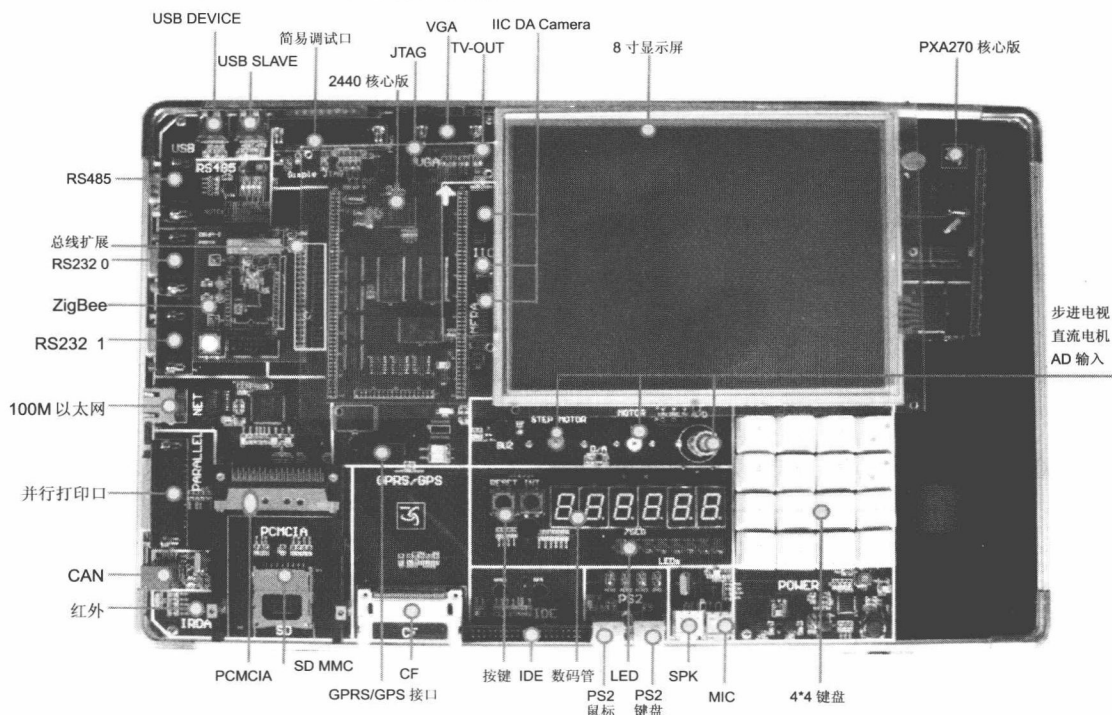


图 1-2 CVT-2440 实验箱实物图

1. 核心板电路模组

为方便系统维护及更换不同的核心电路，实验箱的核心板电路模组设计为一块面积较小的可插接式 8 层印制板电路，含有 S3C2440 处理器在内的核心器件，主要包括：64MB SDRAM 主存（由 2 片 32M×16 位的 SDRAM 存储器组成 16M×32 位存储体结构，地址为 0x30000000~0x33ffff）、32MB NOR Flash 存储器、8MB NAND Flash 存储器。

2. 底板标准配置模组

CVT-2440 实验箱除了处理器核心板之外的功能部件都定制在实验箱的底板上，包括以下内容。

(1) 多种类型的板载人机交互功能模块及接口：4 个可独立软件编程的 LED 灯。6 个七段共阳数码管、1 个可独立编程的 4×4 小键盘、1 个 8 英寸 640×480 分辨率 TFT 触摸液晶屏、1 个 PS2 键盘和一个 PS2 鼠标接口、一个标准 VGA 接口、一个摄像头接口、一个全电视信号 TV 输出口、一个麦克风音频输入接口和一个耳机音频输出口。

(2) 多种类型的串行通信接口: 2个UART异步串行接口、一个IIC总线接口(可进行IC卡、串行E²ROM读写等实验)、一个IIS音频数据接口(可基于DMA操作进行立体声录音实验)、一个10/100M以太网通讯接口、一个USB 2.0主设备接口和一个USB从设备接口、一个RS485串行接口、一个CAN总线接口、一个红外线无线通信接口。

(3) 多种类型的并行接口: 一个标准计算机打印口(并口)、一个标准IDE硬盘接口、一个标准CF卡接口、一个标准SD/MMC卡接口、一个PCMCIA接口。

(4) 多种类型的实验功能单元: 一个用于外部中断0的测试实验的按键、两通道具有外部请求引脚的DMA、可外接PWM定时器、包括8个外部中断源的71个通用GPIO口、8通道10位ADC、两相步进电机驱动。

(5) 调试接口: 一个14针标准JTAG调试接口, 该接口用于高速仿真调试; 简易JTAG调试接口, 连接标准计算机并口进行调试。

3. 底板可扩展功能模块

底板可扩展功能模块包括: GPRS无线通讯模块、GPS全球定位系统模块、DSP实验模块、Zigbee无线传感网络模块。

1.1.2 教学实验系统的实验实训功能

CVT-2440教学实验系统提供了硬件电路应用编程、驱动程序设计、嵌入式操作系统移植与应用程序设计、图形化应用开发等不同层次的实验功能和实验内容, 可满足从基于底层硬件的裸机系统应用开发到基于不同操作系统的高层图形化应用开发的实验、实训教学要求。

1. 基于底层硬件的裸机系统应用开发实验

基于底层硬件的裸机系统应用开发方法和开发过程是掌握嵌入式系统设计及应用开发最基本的知识和技能基础, 是学习嵌入式系统首先需要掌握的内容。本实验系统提供了多种多样的实验项目, 主要包括:

嵌入式系统开发环境及工具运用实验; ARM汇编语言编程实验; C语言编程及与汇编语言混合编程实验; 基于GPIO口的LED、数码管及键盘实验; 中断系统编程实验; PWM定时器及看门狗定时器实验; 实时时钟实验; UART串口通信实验; A/D变换及数据采集实验; 直流及步进电机驱动实验; DMA方式数据传输实验; 触摸屏控制实验; LCD液晶显示器实验; IIC及IC卡读写实验; 以太网数据传输及TFTP网络通信实验; 数字音频接口实验; BootLoader移植实验。

2. 基于嵌入式Linux操作系统的内核编程实验

在熟悉掌握了裸机系统应用开发方法后, 就可以进一步学习基于操作系统的应用开发方法。尽管本实验系统支持Linux、Win/CE、VxWorks、 μ C-OS/II等嵌入式操作系统, 但由于