

嵌入式系统课程教学实施方案项目规划教材  
高等学校计算机专业特色教材

# 嵌入式 硬件设计

*Embedded Hardware  
Design*

马维华 编著



高等教育出版社

嵌入式系统课程教学实施方案项目规划教材  
高等学校计算机专业特色教材

# 嵌入式硬件设计

Qianrushi Yingjian Sheji

马维华 编著

高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书是按照教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会组织制订的《高等学校嵌入式系统专业方向核心课程教学实施方案》的要求组织编写的。全书共11章,分别介绍嵌入式硬件系统设计基本知识、嵌入式硬件设计基础、嵌入式处理器片上组件、电源设计、最小系统设计、数字通道和模拟通道设计、电机及其控制、互连通信接口设计、可靠性与抗干扰设计,最后以一个完整的实例详细讨论嵌入式硬件综合设计。

本书将通识性知识和个性化知识有机结合,在介绍硬件组件原理及外部接口原理时,不针对任何一款特定嵌入式处理器,只是在具体编程应用时才涉及具体引脚。这样做的目的是因为任何一款处理器都不可能一直使用下去,但只要掌握其本质,以后使用新的处理器时就可以很方便地用特定的引脚代替共性的标识来移植。

全书结构合理、系统、全面、实用,每章后面都有一定数量的习题。本书可作为高等学校计算机专业、电类专业、自动化以及机电一体化专业本科生嵌入式技术相关课程的教材和参考书,也可作为嵌入式硬件开发人员的参考书和工具书。

## 图书在版编目(CIP)数据

嵌入式硬件设计 / 马维华编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-04-047895-2

I. ①嵌… II. ①马… III. ①硬件-设计-高等学校-教材 IV. ①TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 259451 号

策划编辑 时 阳      责任编辑 时 阳      封面设计 杨立新      版式设计 王艳红  
插图绘制 杜晓丹      责任印制 田 甜

出版发行 高等教育出版社  
社 址 北京市西城区德外大街 4 号  
邮政编码 100120  
印 刷 北京宏伟双华印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 31.25  
字 数 710 千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2018 年 12 月第 1 版  
印 次 2018 年 12 月第 1 次印刷  
定 价 58.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物 料 号 47895-00

# 出版说明

为推动嵌入式系统专业方向建设和课堂教学,建设嵌入式系统优质教学资源,解决嵌入式系统课程建设和教学中存在的问题,教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会、中国计算机学会教育专业委员会和高等教育出版社组织来自电子科技大学、浙江大学、国防科学技术大学、南京航空航天大学、上海交通大学、杭州电子科技大学、深圳大学、电子科技大学中山学院等在嵌入式系统专业方向建设和相关课程建设方面具有一定基础的高校的专家,开展了“嵌入式系统课程教学实施方案”项目研究。

项目研究工作自2010—2012年,历时两年,正式出版了《高等学校嵌入式系统专业方向核心课程教学实施方案》。通过将嵌入式系统人才培养目标,特别是能力培养目标分解、细化到不同课程,同时考虑到课程之间的前后衔接、课程与培养目标实现的支撑,《高等学校嵌入式系统专业方向核心课程教学实施方案》确定了该专业方向的5门核心课程:嵌入式系统概论、嵌入式微控制器及其应用、嵌入式操作系统、嵌入式硬件设计和嵌入式软件开发,并编写相应教材。这套教材旨在反映项目最新的研究成果,体现教学实施方案对于相应课程的定位和要求,以循序渐进的方式安排教学内容,讲解嵌入式系统平台设计的基本原理和基本方法,并给出典型性的示例。为保证教材质量,项目组确定由具有相应课程丰富教学和开发经验,并参与了课程教学实施方案研究的专家担任主编,同时邀请相关领域的权威专家对书稿进行了认真审读,数次修改,才最终交付出版。

这套教材具有如下特点:

- 内容全面,结构新颖。在内容上,理论与实践并重,涵盖课程教学实施方案中涉及的重点内容,并提供大量实例;在结构安排上,从基础知识入手,循序渐进;在叙述上,力求简明扼要,由浅入深。

- 原理部分通用性好。将教材的理论部分与实验部分分开,尽量减少理论内容对实验平台的依赖,以方便实际教学。

- 实验内容丰富、翔实。针对理论部分设计相应的实验,这些实验均系作者亲自设计、验证,力求展现细节,让读者易于上手,可以边干边学,具有较大的参考价值。

- 在拓展性上有突破。教材每章后都有相应的实验思考题和进一步探索的题目,供读者进一步深入研究。

- 面向实践,适用面广。教材兼顾教学、科研和工程开发的需要,对于广大高校本科生和研究生而言,是学习嵌入式系统的教科书;对于从事嵌入式系统开发的工程人员来说,则是实用的参考书。

我们希望这套教材的出版能够为国内高校嵌入式系统相关课程教学的开展提供有益的参考和帮助，提升高校嵌入式系统的教学水平和开发水平，培养更多适应社会需求的嵌入式技术人才。我们将为此不懈努力，也希望得到各位读者的热情帮助，使这套教材能够不断完善和提高。

教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会

中国计算机学会教育专业委员会

高等教育出版社

2015年1月

# 前 言

在教育部高等学校计算机类专业教学指导委员会组织制订的《高等学校嵌入式系统专业方向核心课程教学实施方案》（简称《实施方案》）中，嵌入式硬件设计是其中的核心课程之一。嵌入式硬件设计是计算机科学与技术及相关学科嵌入式专业或方向的必修课程，主要讲授嵌入式系统硬件基础知识、典型接口电路设计、硬件开发工具、开发流程和调试方法，培养学生嵌入式系统硬件设计和开发能力。

本书就是按照实施方案的具体要求组织编写的，内容涉及嵌入式系统体系结构，嵌入式处理器，嵌入式硬件系统设计原则、方法及步骤，嵌入式硬件设计常用开发工具、调试手段和方法等，嵌入式硬件基础，嵌入式电源设计，嵌入式最小硬件系统设计，嵌入式数字通道与模块通道设计，电机及其控制，嵌入式互连通信接口设计，嵌入式硬件系统可靠性与抗干扰设计以及硬件综合设计等。本书包括了硬件设计的方方面面，涉及内容全面且广泛，从嵌入式处理器及其外围电路的功能设计要求出发，旨在培养学生掌握嵌入式硬件的基本设计方法，逐步引入和过渡到嵌入式硬件高性能、高可靠性、低功耗、低成本等非功能性设计方法上，由浅入深、从简到难，有序培养学生的能力，使学生掌握嵌入式硬件设计的基本方法。

尽管市面上关于嵌入式系统方面的书已经很多，但全面、系统地介绍嵌入式硬件设计的参考书却非常稀少。鉴于此，借《实施方案》推出的东风，在吸收国内外有关嵌入式硬件系统相关大量资料，并结合作者科研任务及多年教学经验的基础上，组织编写了本书。

本书在介绍必备的基础知识后，从实际应用系统的视角，以嵌入式硬件系统的组织为主线，逐步展开对嵌入式硬件设计的介绍。在介绍具体硬件设计的过程中，始终把共性的通识内容与个性的特色知识有机结合起来。因此在具体介绍共性的通识知识（如片上硬件组件）时，不限于特定的嵌入式处理器，在介绍典型具体应用时，设计方法也不限于特定的嵌入式处理器，只有在具体实现和编写代码时才具体化到特定的嵌入式处理器。本书介绍的大部分知识是基于 ARM Cortex-M 处理器的，但也不限于这个系列的处理器。

在讲解具体内容时，本书特别注重实用性，尽量列举实例，有些接口电路可直接用于实际硬件系统中。在叙述上，则力求深入浅出，通俗易懂。

全书分成 11 章，第 1 章嵌入式硬件系统设计概论，第 2 章嵌入式硬件基础，第 3 章嵌入式处理器片上典型外设组件，第 4 章嵌入式系统电源设计，第 5 章嵌入式最小系统设计，第 6 章数字输入输出系统设计，第 7 章模拟输入输出系统设计，第 8 章电机及其控制，第 9 章互连通信接口设计，第 10 章嵌入式硬件可靠性与抗干扰设计，第 11 章嵌入式硬件综合设计。

本书由马维华编著，在编写过程中得到“嵌入式系统课程教学实施方案”项目组全体成

员在教学和教材大纲及教材内容取舍等方面的大力支持和帮助；对本书做出贡献的有谭白磊、白延敏、朱琳、孙萍、马远、韩语韬，他们在本书编写过程中提出了许多修改意见；本书还得到了院系领导及高等教育出版社的大力支持，在此一并向他们表示衷心感谢！

由于嵌入式硬件技术发展飞速，新技术不断涌现，加上作者水平有限，书中难免有疏漏之处，恳请同行专家及读者提出批评意见。

编者于南航西苑

2018年6月

# 目 录

第 1 章 嵌入式硬件系统设计概论 .....	1	2.2.4 集成电路 .....	65
1.1 嵌入式系统体系结构 .....	2	2.3 数字逻辑电路 .....	67
1.1.1 嵌入式系统的概念 .....	2	2.3.1 组合逻辑电路 .....	67
1.1.2 嵌入式系统组成 .....	3	2.3.2 时序逻辑电路 .....	69
1.1.3 嵌入式系统硬件组成 .....	4	2.4 常用模拟集成电路 .....	72
1.2 嵌入式处理器 .....	5	2.4.1 模拟比较器 .....	72
1.2.1 嵌入式处理器概述 .....	5	2.4.2 运算放大器 .....	73
1.2.2 CISC 与 RISC 结构 .....	7	2.4.3 模拟开关 .....	75
1.2.3 冯·诺依曼结构与哈佛结构 .....	8	2.5 常用数字集成电路 .....	77
1.2.4 ARM 处理器 .....	8	2.5.1 TTL 集成电路 .....	78
1.2.5 ARM 处理器存储器格式及数据类型 .....	13	2.5.2 CMOS 电路 .....	80
1.2.6 ARM 处理器中的 MMU 和 MPU .....	14	2.5.3 常用缓冲器 .....	82
1.2.7 典型 ARM 微控制器 .....	15	2.5.4 常用锁存器 .....	83
1.3 嵌入式硬件系统设计 .....	25	2.5.5 常用移位寄存器 .....	85
1.3.1 嵌入式硬件设计的主要内容 .....	25	2.5.6 常用译码器 .....	87
1.3.2 嵌入式应用系统设计步骤及原则 .....	26	2.5.7 常用数据选择器 .....	89
1.3.3 嵌入式系统的设计方法 .....	30	2.6 可编程逻辑器件 .....	89
1.4 嵌入式应用系统调试与测试技术 .....	32	2.6.1 PLD 的一般结构 .....	89
1.4.1 硬件调试连接 .....	32	2.6.2 PLD 的种类 .....	90
1.4.2 调试工具及硬件调试 .....	34	2.6.3 基于 PLD 的数字系统设计 .....	91
本章习题 .....	35	2.6.4 常用 EDA 开发工具 .....	92
第 2 章 嵌入式硬件基础 .....	36	2.7 IC 资料查找及阅读 .....	93
2.1 嵌入式工程识图 .....	37	2.7.1 常用 IC 资料下载网站 .....	93
2.1.1 框图 .....	37	2.7.2 IC 资料的阅读 .....	94
2.1.2 原理图 .....	38	本章习题 .....	95
2.1.3 印刷线路图 .....	38	第 3 章 嵌入式处理器片上典型外设	
2.1.4 接线图 .....	39	组件 .....	97
2.1.5 时序图 .....	39	3.1 嵌入式处理器组成 .....	98
2.2 电路与电路元件 .....	41	3.1.1 ARM 的 AMBA 总线体系结构	
2.2.1 直流电路和交流电路 .....	41	及标准 .....	98
2.2.2 模拟电路与数字电路 .....	43	3.1.2 基于 AMBA 总线的嵌入式	
2.2.3 电路元件 .....	44	处理器 .....	100
		3.1.3 典型 ARM 芯片简介 .....	102



3.2 GPIO 通用 I/O 端口组件 .....	104	4.5.2 电池供电的升压式电源设计 .....	165
3.2.1 GPIO 概述 .....	104	本章习题 .....	167
3.2.2 GPIO 基本工作模式 .....	104	<b>第 5 章 嵌入式最小系统设计</b> .....	169
3.2.3 GPIO 端口保护措施 .....	108	5.1 典型嵌入式硬件系统及嵌入式最小 系统组成 .....	170
3.2.4 GPIO 端口的中断 .....	109	5.1.1 典型嵌入式硬件系统组成 .....	170
3.2.5 引脚的多功能 .....	110	5.1.2 嵌入式最小系统组成 .....	170
3.3 定时计数组件 .....	110	5.2 嵌入式处理器选型 .....	171
3.3.1 通用定时计数器 .....	111	5.2.1 功能参数选择原则 .....	171
3.3.2 看门狗定时器 .....	114	5.2.2 非功能性参数选择原则 .....	173
3.3.3 实时钟定时器 .....	115	5.3 供电模块设计 .....	175
3.3.4 脉宽调制定时器 .....	117	5.4 时钟与复位电路设计 .....	177
3.3.5 电机控制 PWM 定时器 .....	120	5.4.1 时钟电路设计 .....	177
3.4 互连通信组件 .....	126	5.4.2 复位模块设计 .....	178
3.4.1 串行异步收发器 UART .....	126	5.5 调试接口设计 .....	182
3.4.2 I <sup>2</sup> C 总线接口 .....	129	5.5.1 JTAG 调试接口设计 .....	182
3.4.3 SPI 串行外设接口 .....	132	5.5.2 SWD 调试接口设计 .....	184
3.4.4 CAN 总线接口 .....	135	5.6 存储器接口设计 .....	185
3.4.5 Ethernet 以太网控制器接口 .....	137	5.6.1 存储器层次结构 .....	185
3.5 模拟通道组件 .....	140	5.6.2 存储器分类 .....	185
3.5.1 模数转换器 ADC .....	140	5.6.3 存储器主要性能指标 .....	188
3.5.2 数模转换器 DAC .....	143	5.6.4 片内存储器 .....	190
3.5.3 比较器 COMP .....	143	5.6.5 片外存储器 .....	191
本章习题 .....	144	5.6.6 辅助存储器 .....	191
<b>第 4 章 嵌入式系统电源设计</b> .....	146	5.6.7 外部存储器扩展 .....	193
4.1 嵌入式系统电源设计概述 .....	147	本章习题 .....	197
4.1.1 嵌入式系统的电源需求 .....	147	<b>第 6 章 数字输入输出系统设计</b> .....	198
4.1.2 嵌入式系统电源主要类别 .....	148	6.1 数字信号的逻辑电平及其转换 .....	199
4.1.3 嵌入式系统的电源变换 .....	150	6.1.1 数字信号的逻辑电平 .....	199
4.2 线性直流稳压电源的设计 .....	150	6.1.2 数字信号的逻辑电平转换 .....	201
4.2.1 电源变压器的定制 .....	151	6.2 数字信号的隔离与保护 .....	207
4.2.2 整流与滤波电路设计 .....	153	6.2.1 数字接口的保护 .....	207
4.2.3 稳压电路设计 .....	156	6.2.2 数字信号的隔离 .....	211
4.3 开关电源的设计 .....	160	6.3 数字输入接口的扩展 .....	221
4.4 DC-DC 和 LDO 的典型应用 .....	161	6.3.1 使用缓冲器扩展并行输入接口 .....	221
4.4.1 利用 LDO 器件进行电源变换 .....	162	6.3.2 使用串行移位寄存器扩展 并行输入接口 .....	222
4.4.2 利用 DC-DC 器件进行 电源变换 .....	163	6.4 数字输出接口的扩展 .....	222
4.5 基于电池供电的便携式电源设计 .....	164	6.4.1 使用锁存器扩展并行输出接口 .....	222
4.5.1 电池供电的降压式电源设计 .....	165		

6.4.2 使用串行移位寄存器扩展 并行输出接口 .....	223	8.2 直流电机及其控制 .....	300
6.5 数字输入输出接口的一般结构 .....	224	8.2.1 直流电机及类别 .....	300
6.5.1 数字输入接口的一般结构 .....	224	8.2.2 直流电机励磁方式及其连接 .....	301
6.5.2 数字输出接口的一般结构 .....	227	8.2.3 直流电机的控制 .....	302
6.6 人机交互通道设计 .....	228	8.2.4 采用 H 桥驱动芯片的直流电机 控制实例 .....	305
6.6.1 键盘接口设计 .....	228	8.3 步进电机及其控制 .....	310
6.6.2 显示接口设计 .....	234	8.3.1 步进电机 .....	310
本章习题 .....	244	8.3.2 步进电机的控制系统构成 .....	313
<b>第 7 章 模拟输入输出系统设计</b> .....	245	8.3.3 采用由分离元件构成的步进 电机控制接口 .....	314
7.1 模拟输入输出系统概述 .....	246	8.3.4 采用由专用芯片构成的步进 电机控制接口 .....	316
7.2 传感器及变送器 .....	247	8.4 单相交流电机及其控制 .....	319
7.2.1 传感器 .....	247	8.4.1 单相交流电机 .....	319
7.2.2 变送器 .....	254	8.4.2 单相交流电机的控制 .....	320
7.3 信号调整的电路设计 .....	255	8.5 三相异步电机及其控制 .....	323
7.3.1 信号调理电路的功能及任务 .....	256	8.5.1 三相异步电机的结构与 工作原理 .....	323
7.3.2 信号滤波 .....	258	8.5.2 异步电机的启动与调速 .....	324
7.3.3 信号放大 .....	260	8.5.3 三相异步电机的运行控制 .....	326
7.3.4 激励与变换 .....	262	8.5.4 三相异步电机控制系统实例 .....	329
7.3.5 模拟信号隔离 .....	264	8.6 电机的保护 .....	334
7.4 模数转换器及其接口设计 .....	269	8.6.1 电机故障及异常状态 .....	334
7.4.1 片内 ADC 及其应用 .....	269	8.6.2 电机的相间短路保护 .....	335
7.4.2 片外 ADC 及其应用 .....	270	8.6.3 电机的单相接地保护 .....	335
7.5 数模转换器 .....	279	8.6.4 电机的低电压保护 .....	336
7.5.1 片内 DAC 及其应用 .....	279	8.6.5 电机的过载保护 .....	336
7.5.2 片外 DAC 及其应用 .....	280	8.6.6 基于嵌入式技术的电机 保护系统 .....	337
7.6 模拟比较器及其应用 .....	284	本章习题 .....	339
7.6.1 片上比较器及其应用 .....	284	<b>第 9 章 互连通信接口设计</b> .....	341
7.6.2 片外比较器及其应用 .....	286	9.1 串行异步收发器 UART .....	342
7.7 典型模拟输入输出系统实例 .....	288	9.2 RS-232 接口及其应用 .....	343
7.7.1 温度变送器设计要求 .....	288	9.2.1 RS-232 接口 .....	343
7.7.2 温度变送器硬件系统设计 .....	289	9.2.2 基于 RS-232 的双机通信 .....	346
本章习题 .....	292	9.2.3 基于 RS-232 的多机通信 .....	347
<b>第 8 章 电机及其控制</b> .....	294	9.3 RS-485 接口及其应用 .....	348
8.1 电机及其种类 .....	295	9.3.1 RS-485 接口 .....	348
8.1.1 电机的定义 .....	295		
8.1.2 电机的种类 .....	295		
8.1.3 电机的一般控制系统 .....	296		
8.1.4 电机控制系统中的常用部件 .....	296		

9.3.2	RS-485 隔离应用	352
9.3.3	RS-485 主从式多机通信的应用	353
9.3.4	基于 RS-485 的 ModBus RTU 协议	355
9.4	4~20 mA 电流环接口及其应用	359
9.5	I <sup>2</sup> C 总线接口	361
9.5.1	I <sup>2</sup> C 总线模块相关寄存器	361
9.5.2	I <sup>2</sup> C 总线接口的应用	363
9.6	SPI 串行外设接口	364
9.6.1	SPI 寄存器结构	364
9.6.2	SPI 接口的应用	365
9.7	CAN 总线接口	367
9.7.1	典型片上 CAN 控制器组成及相关寄存器	367
9.7.2	CAN 总线接口的应用	369
9.8	Ethernet 以太网控制器接口应用	370
9.8.1	基于片上以太网控制器的以太网接口连接	370
9.8.2	片外以太网控制器的以太网接口连接	372
9.9	USB 接口	373
9.9.1	USB 的主要特点	373
9.9.2	USB 硬软件构成及接口信号	374
9.9.3	USB 的传输方式	377
9.9.4	USB 接口连接	377
9.9.5	USB 与 UART 及 RS-232 之间的相互转换接口	379
9.10	无线通信模块及其接口	381
9.10.1	GPS 模块	381
9.10.2	GSM 模块	382
9.10.3	GPRS 模块	383
9.10.4	北斗模块	384
9.10.5	Wi-Fi 模块	385
9.10.6	蓝牙模块	387
9.10.7	ZigBee 模块	387
9.10.8	RFID 通信接口设计	388
9.10.9	其他无线模块	390
	本章习题	391

<b>第 10 章 嵌入式硬件系统可靠性与抗干扰设计</b>		392
10.1	嵌入式系统可靠性概述	393
10.1.1	嵌入式系统可靠性及其特点	393
10.1.2	嵌入式系统可靠性设计内容	393
10.1.3	嵌入式系统可靠性设计原则	394
10.2	嵌入式硬件系统可靠性设计	395
10.2.1	影响嵌入式硬件系统可靠性的主要因素	396
10.2.2	提高嵌入式硬件系统可靠性的主要措施	397
10.2.3	嵌入式硬件系统总体方案可靠性设计	401
10.3	嵌入式硬件系统的干扰	402
10.3.1	干扰的来源	402
10.3.2	干扰的传播途径	403
10.3.3	干扰对嵌入式系统的影响	404
10.3.4	干扰的抑制原则及措施	405
10.4	供电系统抗干扰与最小系统可靠性设计	407
10.4.1	供电系统的抗干扰措施	407
10.4.2	嵌入式最小系统的可靠性设计	409
10.5	接地系统抗干扰措施	410
10.5.1	接地的种类	411
10.5.2	接地的方式	412
10.6	过程通道的抗干扰设计	414
10.6.1	差模干扰及其抑制	415
10.6.2	共模干扰及其抑制	416
10.6.3	长线传输干扰及其抑制	418
10.7	印制电路板抗干扰设计	419
10.7.1	印制电路板的电磁干扰	420
10.7.2	印制电路板的电磁兼容设计	421
10.8	嵌入式系统的能量控制与低功耗设计	426
10.8.1	能量控制与低功耗设计及其意义	426
10.8.2	低功耗设计的内容及步骤	426
10.8.3	低功耗器件的选择	427

10.8.4	低功耗电源设计	428	11.4.1	通道模块元器件选型	449
10.8.5	嵌入式处理器的功率控制	431	11.4.2	模拟通道硬件设计	451
10.8.6	对外围电路的功耗管理	434	11.4.3	数字通道硬件设计	453
	本章习题	438	11.4.4	互连通信接口设计	461
<b>第 11 章</b>	<b>嵌入式硬件综合设计</b>	<b>439</b>	11.5	嵌入式硬件综合	462
11.1	系统设计要求	440	11.5.1	硬件原理图综合	463
11.1.1	系统总体设计要求	440	11.5.2	硬件 PCB 设计	466
11.1.2	主要功能要求与技术指标	441	11.6	系统调试	467
11.2	硬件需求分析与体系结构设计	442	11.6.1	硬件调试概述	467
11.2.1	嵌入式硬件需求分析	442	11.6.2	电源模块的调试	469
11.2.2	嵌入式阀门控制器体系结构 设计	444	11.6.3	最小系统调试	470
11.3	最小系统设计	446	11.6.4	标度变换	471
11.3.1	嵌入式处理器的选型	446	11.6.5	通道调试	473
11.3.2	供电模块的设计	447	11.6.6	系统综合调试	478
11.3.3	最小系统设计	449		本章习题	480
11.4	通道设计	449	<b>附录</b>	<b>部分习题参考答案</b>	<b>481</b>
			<b>参考文献</b>		<b>487</b>

# 第 1 章 嵌入式硬件系统设计概论

## 【本章提要】

本章介绍嵌入式系统体系结构、嵌入式处理器、嵌入式硬件系统设计等相关基本知识，最后概述嵌入式应用系统调试与测试技术。

## 【学习目标】

- 从熟悉嵌入式系统的概念、嵌入式系统的组成以及嵌入式系统硬件构成开始，了解嵌入式系统体系结构。
- 了解嵌入式处理器作为嵌入式硬件系统的核心，知晓嵌入式处理器的种类，了解 CISC 和 RISC，冯·诺依曼结构与哈佛结构，了解 ARM 处理器及其分类，了解 ARM 处理器内核典型代表，了解嵌入式处理器存储器格式及数据类型，了解嵌入式处理器内部 MMU 和 MPU 的概念，了解典型 ARM 微控制器生产厂家及典型芯片系列。
- 了解嵌入式硬件设计的主要内容，嵌入式应用系统设计的步骤、原则及方法。
- 了解嵌入式系统硬件调试连接，熟悉硬件调试工具及硬件调试的主要内容。

## 1.1 嵌入式系统体系结构

### 1.1.1 嵌入式系统的概念

#### 1. 嵌入式系统的定义

嵌入式系统 (embedded system) 是嵌入式计算机系统的简称, 它有以下几种定义。

##### (1) IEEE (国际电气和电子工程师协会) 的定义

嵌入式系统是 “Devices used to control, monitor or assist the operation of equipment, machinery or plants”, 即为控制、监视或辅助设备、机器或者工厂运作的装置。它通常执行特定功能, 以微处理器与周边构成核心, 具有严格的时序与稳定度要求, 可以全自动操作循环。

##### (2) 国内公认的较全面的定义

嵌入式系统是指以应用为中心, 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、功耗严格要求的专用计算机系统。

##### (3) 简单定义

嵌入式系统是指嵌入到对象体系中的专用计算机系统。

上述定义中比较全面准确, 并广泛被业界接受的是第二种定义, 比较简洁的是第三种定义, 而第一种定义则侧重控制领域的嵌入式设备。

#### 2. 嵌入式系统的三个要素

嵌入性、专用性与计算机系统是嵌入式系统的三个基本要素。

嵌入式系统是把计算机直接嵌入到应用系统中, 它融和了计算机软硬件技术、通信技术和微电子技术, 是集成电路发展过程中的一个标志性成果。

#### 3. 嵌入式技术

嵌入式技术是将计算机作为一个信息处理部件, 嵌入到应用系统中的一种技术, 它将软件固化集成到硬件系统中, 将硬件系统与软件系统一体化。因此可以说, 嵌入式技术是嵌入式系统设计技术和应用的一门综合技术。

#### 4. 嵌入式产品或嵌入式设备

嵌入式产品或嵌入式设备是指应用嵌入式技术, 内含嵌入式系统的产品或设备。嵌入式产品或设备强调内部有嵌入式系统。例如, 内含微控制器的家用电器、仪器仪表、工控单元、机器人、手机、个人数字助理 (PDA) 等都是嵌入式设备或称为嵌入式产品。

#### 5. 嵌入式

嵌入式是嵌入式系统、嵌入式技术以及嵌入式产品的简称。

#### 6. 嵌入式产业

基于嵌入式系统的应用和开发, 并形成嵌入式产品的产业称为嵌入式产业。目前国内已有许多省市开始着手进行嵌入式产业的规划和实施。

嵌入式技术的快速发展不仅使其成为当今计算机技术和电子技术的一个重要分支, 同时也

使计算机的分类从以前的巨型机、大型机、小型机、微型机变为通用计算机和嵌入式计算机。可以预见，嵌入式系统将成为后 PC 时代的主宰。

### 7. 嵌入式系统开发工具

嵌入式系统开发工具是指可以用于嵌入式系统开发的工具，主要指嵌入式软件开发工具。嵌入式系统开发工具一般具有集成开发环境，可以在集成开发环境下进行编辑、编译、链接、下载程序、运行和调试等各项嵌入式软件开发工作。

### 8. 嵌入式系统开发平台

可以进行嵌入式系统开发的软硬件套件称为嵌入式系统开发平台，包括含嵌入式处理器的硬件开发板、嵌入式操作系统和一套软件开发工具。借助于开发平台，开发人员可以集中精力于编写、调试和固化应用程序，而不必把心思浪费在应用程序如何使用开发板的各种硬件设备上。

## 1.1.2 嵌入式系统组成

嵌入式系统体系结构如图 1.1 所示。嵌入式系统由硬件、软件和执行机构等组成。

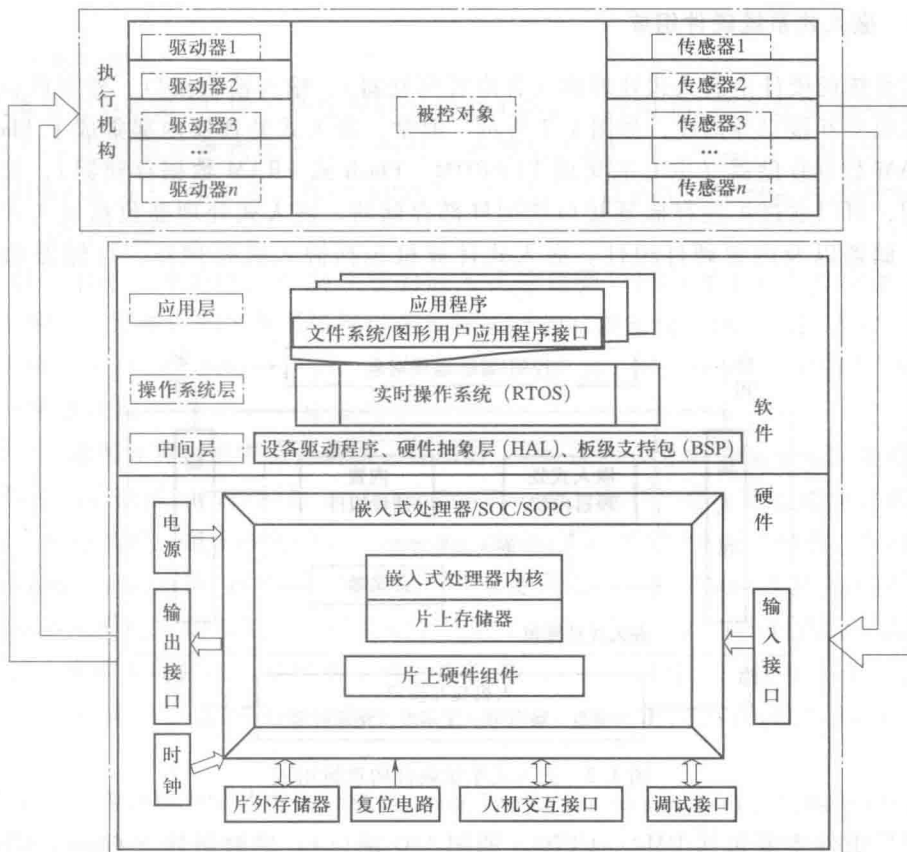


图 1.1 嵌入式系统体系结构

嵌入式系统的硬件包括电源、时钟、嵌入式处理器、复位电路、调试接口、人机交互接口、输入输出接口等。嵌入式系统的核心部件是嵌入式处理器，嵌入式处理器内部包括处理器内核、片上存储器以及片上硬件组件等。

嵌入式系统的软件包括中间层、操作系统（Operating System, OS）层和应用层。中间层直接跟硬件打交道，包括设备驱动程序、硬件抽象层（HAL）以及板级支持包（BSP）等。中间层的软件由嵌入式处理器生产厂商提供。操作系统层通常由第三方提供，也有生产芯片厂商提供的简易操作系统，通常具有实时操作系统（RTOS）。应用层软件是由用户自行开发的软件，包括文件系统、图形用户应用程序接口以及具体应用程序。

执行机构是嵌入式系统专用性很重要的组成部分，涉及被控对象的传感器和驱动器等。传感器将感知的信息送入硬件中模拟组件 ADC，硬件中模拟组件 DAC 根据控制策略输出控制信号，通过驱动器控制被控对象完成具体应用。

当今世界，嵌入式系统无处不在，其应用已越来越广泛。嵌入式微控制器作为嵌入式系统的硬件核心——嵌入式处理器的一种形式，在传感器网络、物联网以及工业控制等领域得到广泛应用。

### 1.1.3 嵌入式系统硬件组成

嵌入式系统的硬件由嵌入式处理器（含内置存储器）、输入输出接口、外部设备以及被测控对象及人机交互接口等构成，如图 1.2 所示。通常，嵌入式处理器内部集成了 Flash 程序存储器和 SRAM 数据存储器（也有的集成 EEPROM、Flash 或 FRAM 数据存储器），如果内部存储器不够用，可以通过扩展存储器接口增加外部存储器。嵌入式处理器包括嵌入式处理器内核、内部存储器以及内置硬件组件。嵌入式计算机包括嵌入式处理器、存储器和输入输出接口。



图 1.2 嵌入式系统硬件的逻辑组成

内置硬件组件主要包括 DMA、GPIO（通用 I/O 端口）、定时组件（Timer、RTC、WDT、PWM）、互连通信组件（UART、IrDA、I<sup>2</sup>C、I<sup>2</sup>S、USB、CAN 以及以太网）、模拟组件（ADC、



DAC) 以及协处理器和可编程逻辑器件等。不同厂家不同内核的嵌入式处理器片上硬件组件各具特色, 有一定差异。

## 1.2 嵌入式处理器

嵌入式处理器的体系结构按照指令集架构可分为两种类型: 复杂指令集结构 (CISC) 及精简指令集结构 (RISC); 按照存储机制又可分为冯·诺依曼 (Von Neumann) 结构及哈佛结构 (Harvard); 按字长分为 8 位、16 位、32 位和 64 位结构; 按内核结构又可分为 51、AVR、PIC、MSP430、MC68HC、X86、MIPS、PowerPC 以及 ARM 等。

### 1.2.1 嵌入式处理器概述

嵌入式处理器是嵌入式系统的硬件核心, 它主要有 4 类: 嵌入式微处理器 (embedded microprocessor unit, EMPU)、嵌入式微控制器 (embedded microcontroller unit, EMCU)、嵌入式数字信号处理器 (embedded digital signal processor, EDSP) 以及片上系统 (system on chip, SoC)。

#### 1. 嵌入式微处理器

嵌入式微处理器是由 PC 中的微处理器演变而来的, 与通用 PC 的微处理器不同的是, 它只保留了与嵌入式应用紧密相关的功能硬件。典型的 EMPU 有 PowerPC、MIPS、MC68000、i386EX、AMDK62E 以及 ARM 等, 其中 ARM 是应用最广、最具代表性的嵌入式微处理器。

#### 2. 嵌入式微控制器

嵌入式微控制器主要是面向控制领域的嵌入式处理器, 其内部集成了存储器、定时器、I/O 接口以及便于互连通信的多种通信接口等各种必要的功能部件。典型的嵌入式微控制器如 8 位的 51 系列, 16 位的 MSP430 系列, 8 位/16 位/32 位的 PIC, 32 位的 ARM7、ARM9 以及 ARM Cortex-M 系列和 ARM Cortex-R 系列等。

众所周知, 微型计算机由中央处理器、存储器、I/O 接口及总线等基于超大规模集成电路 (VLSI) 的器件组合而成。微控制器 (microcontroller unit, MCU) 是将上述微型计算机部件集成在单个芯片上构成的专用于控制的微型计算机。即微控制器是把中央处理器、存储器、定时器/计数器 (timer/counter)、各种输入输出接口等都集成在一块集成电路芯片上的微型计算机。嵌入式微控制器是面向控制领域, 以微处理器为核心的微型控制器。换句话说, 微控制器将 CPU、存储器、常用 I/O 接口、专用单元和总线集成于一个芯片中, 并主要应用于控制领域。由于微控制器主要应用于以控制为目的的嵌入式系统, 因此把嵌入式微控制器简称为微控制器。

早期的微控制器被称为单片微型计算机 (single chip microcomputer), 简称单片机。也有厂家称之为面向控制的微型计算机 (control-oriented microcomputer), 或面向控制的微控制器 (control-oriented microcontroller), 而后又出现了单片微控制器 (single chip microcontroller) 这