



“十二五”普通高等教育
本科国家级规划教材



嵌入式技术 基础与实践 (第4版)

—— ARM Cortex-M0+ KL系列微控制器

◎ 王宜怀 吴瑾 文瑾 著

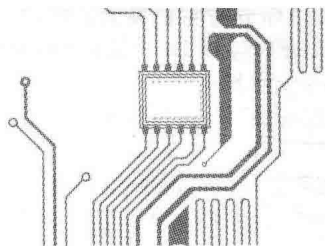
清华大学出版社





“十二五”普通高等教育
本科国家级规划教材

“十三五”江苏省高等学校重点教材
(2015—2016) (1-056)



嵌入式技术基础与实践(第4版)

—— ARM Cortex-M0+ KL系列微控制器

◎ 王宜怀 吴瑾 文瑾 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以恩智浦(NXP)的 ARM Cortex-M0+内核的 KL 系列微控制器为蓝本阐述嵌入式系统的基本知识要素及软硬件设计方法。全书共 14 章,其中第 1 章为概述,简要阐述嵌入式系统的知识体系、学习误区与学习建议。第 2 章介绍 ARM Cortex-M0+处理器。第 3 章介绍 KL25/26 存储映像、中断源与硬件最小系统。第 4 章以 GPIO 为例阐述底层驱动概念、设计与应用方法,给出规范的工程组织框架。第 5 章阐述嵌入式硬件构件与底层驱动构件基本规范。第 6 章阐述串行通信接口 UART,并给出第一个带中断的实例。1~6 章囊括学习一个新 MCU 入门环节的完整要素。7~13 章分别介绍了 SysTick、TPM、PIT、LPTMR、RTC、GPIO 的应用实例(键盘、LED 与 LCD)、Flash 在线编程、ADC、DAC、比较器、SPI、I2C、TSI、USB 及其他模块。第 14 章给出了进一步学习指导。

本书提供了网上教学资源,内含所有底层驱动构件源程序、测试实例、文档资料、教学课件及常用软件工具。网上教学资源下载地址: <http://sumcu.suda.edu.cn>。本书内容还制作了 MOOC,供读者选用。

本书适用于高等学校嵌入式系统的教学或技术培训,也可供 ARM Cortex-M0+应用工程师作为技术研发参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话: 010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

嵌入式技术基础与实践: ARM Cortex-M0+KL 系列微控制器/王宜怀,吴瑾,文瑾著. —4 版. —北京:清华大学出版社,2017

(电子设计与嵌入式开发实践丛书)

ISBN 978-7-302-46757-1

I. ①嵌… II. ①王… ②吴… ③文… III. ①微处理器—系统设计 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 048608 号

责任编辑:魏江江 薛 阳

封面设计:刘 键

责任校对:李建庄

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>,010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:28.75

字 数:700 千字

版 次:2007 年 11 月第 1 版

2017 年 5 月第 4 版

印 次:2017 年 5 月第 1 次印刷

印 数:30501~32500

定 价:59.50 元



王宜怀

男，1962年2月生，博士，苏州大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师；苏州大学嵌入式系统与物联网研究所所长；苏州市政协常委；江苏省计算机学会嵌入式系统与物联网专业委员会主任。曾获福建省“八五”期间电子信息应用先进个人、福建省南平市政协“优秀委员”、福建省科技进步三等奖、江苏省科技进步三等奖、苏州市科技进步二等奖、江苏省高等教育教学成果一等奖、全国高等学校计算机教学成果一等奖等。从1990年开始至今一直致力于嵌入式系统的研发与教学工作。主持完成中小型水轮发电机组优化控制系统、基于物联网技术的城市照明控制系统、图形构件化嵌入式与传感网开发平台、轨道交通蓄电池监测系统、教育机器人平台开发等几十个项目。撰写《嵌入式技术基础与实践》、《嵌入式实时操作系统 MQX 应用开发技术》、《车电子KEA系列微控制器》等9部著作。公开发表论文60余篇，获得发明专利9项。主要研究方向：嵌入式系统、物联网与智能控制技术。

前 言

嵌入式计算机系统简称为嵌入式系统,其概念最初源于传统测控系统对计算机的需求。随着以微处理器(MPU)为内核的微控制器(MCU)制造技术的不断进步,计算机领域在通用计算机系统与嵌入式计算机系统这两大分支分别得以发展。通用计算机已经在科学计算、通信、日常生活等各个领域产生重要影响。在后 PC 时代,嵌入式系统的广泛应用是计算机发展的重要特征。一般来说,嵌入式系统的应用范围可以粗略地分为两大类:一类是电子系统的智能化(如工业控制、汽车电子、数据采集、测控系统、家用电器、现代农业、传感网应用等),这类应用也被称为微控制器 MCU 领域。另一类是计算机应用的延伸(如平板电脑、手机、电子图书等),这类应用也被称为应用处理器 MAP 领域。在 ARM 产品系列中,ARM Cortex-M 系列与 ARM Cortex-R 系列适用于电子系统的智能化类应用,即微控制器领域;ARM Cortex-A 系列适用于计算机应用的延伸,即应用处理器领域。不论如何分类,嵌入式系统的技术基础是不变的,即要完成一个嵌入式系统产品的设计,需要有硬件、软件及行业领域相关知识。但是,随着嵌入式系统中软件规模日益增大,对嵌入式底层驱动软件的封装提出了更高的要求,可复用性与可移植性受到特别的关注,嵌入式软硬件构件化开发方法逐步被业界所重视。

2015 年 12 月 7 日,恩智浦和飞思卡尔完成合并,合并后的公司名称仍为“恩智浦半导体”,成为全球汽车和安全半导体解决方案第一大供应商以及全球第四大非存储类半导体企业。公司持续为互联汽车、物联网设备端到端安全与数据保护等领域提供更为完善的解决方案,旨在帮助人们实现“智慧生活,安全连接”。目前,恩智浦在北京、上海、深圳、苏州等设有办事处或研发中心,在大中华区员工总数超过 11 000 人。

该公司的微控制器及应用处理器系列,由不同位数、不同封装形式、不同温度范围、所含模块不同等构成了庞大的产品系列,广泛地应用于汽车电子、消费电子、工业控制、网络、无线市场及视频等嵌入式系统各个领域,为嵌入式系统各种应用提供了选择与解决方案,使得用户可以各取所需。不论是电子系统智能化还是计算机应用延伸的嵌入式应用设计,无论需要怎样的系统功能和集成度,总能从这个庞大产品系列中选取一款合适的芯片进行应用开发。这正是嵌入式系统产品设计者所期望的,也节省了嵌入式学习者的时间,可以加快开发进度,提高开发质量。

本书以该公司于 2012 年开始推出的 32 位 ARM Cortex-M0+内核的 KL 系列 MCU 为蓝本阐述嵌入式应用。本书第二版、第三版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,本版为普通高等教育“十二五”国家级规划教材、江苏省高等学校重点教材。本版是在 2013 年出版的第三版基础上重新撰写。主要变化有:在 ARM Cortex-M0+内核不变的前提下,增加了 KL26 芯片,重新梳理了通用知识要素,优化了底层构件封装;将大部分驱动的使用方法提前阐述,而驱动构件的设计方法后置,目的是先学会使用进行实际编程,后理解构件的设计方法。因构件设计方法部分有一定难度,对于不同要求的教学场景,也可不要求学生理解全部构件的设计方法,讲解一两个即可。

随着作者多年教学与开发的经验积累,本书以嵌入式硬件构件及底层软件构件设计为主线,基于嵌入式软件工程的思想,按照“通用知识—驱动构件使用方法—测试实例—芯片编程结构—构件的设计方法”的路线,逐步阐述电子系统智能化嵌入式应用的软件与硬件设计。

本书具有以下特点。

(1) 把握通用知识与芯片相关知识之间的平衡。书中对于嵌入式“通用知识”的基本原理,以应用为立足点,进行语言简洁、逻辑清晰的阐述,同时注意与芯片相关知识之间的衔接,使读者在更好地理解基本原理的基础上,理解芯片应用的设计,同时反过来,加深对通用知识的理解。

(2) 把握硬件与软件的关系。嵌入式系统是软件与硬件的综合体,嵌入式系统设计是一个软件、硬件协同设计的工程,不能像通用计算机那样,软件、硬件完全分开来看。特别是对电子系统智能化嵌入式应用来说,没有对硬件的理解就不可能写好嵌入式软件,同样没有对软件的理解也不可能设计好嵌入式硬件。因此,本书注重把握硬件知识与软件知识之间的关系。

(3) 对底层驱动进行构件化封装。书中对每个模块均给出根据嵌入式软件工程基本原则并按照构件化封装要求编制底层驱动程序,同时给出详细、规范的注释及对外接口,为实际应用提供底层构件,方便移植与复用,可以为读者进行实际项目开发节省大量时间。

(4) 设计合理的测试用例。书中所有源程序均经测试通过,并保留测试用例在本书的网上光盘中,避免了因例程的书写或固有错误给读者带来烦恼。这些测试用例,也为读者验证与理解带来方便。

(5) 网上教学资源提供了所有模块完整的底层驱动构件化封装程序与测试用例。需要使用PC的程序的测试用例,还提供了PC的C#源程序。网上教学资源中还提供了阅读资料、开发环境的简明使用方法、写入器驱动与使用方法、部分工具软件、有关硬件原理图等。网上教学资源的版本将会适时更新。

(6) 提供硬件核心板、写入调试器,方便读者进行实践与应用。同时提供了核心板与苏州大学恩智浦嵌入式中心设计的扩展板对接,以满足教学实验需要。

本书由王宜怀负责编制提纲和统稿工作,并撰写第1~6章、第14章。吴瑾撰写第7~10章、文瑾撰写第11~13章。研究生王绍丹、徐达、刘锴、陆伟国、司萧俊、白聪、胡唯唯等协助书稿整理及程序调试工作,他们卓有成效的工作,使本书更加实用。恩智浦公司的马莉女士一直关心支持苏州大学恩智浦嵌入式中心的建设,为本书的撰写提供了硬件及软件资料,并提出了许多宝贵建议。恩智浦公司的许多技术人员提供了技术支持。清华大学出版社为本书的出版给予了大力的支持,在此一并表示诚挚的谢意。

鉴于作者水平有限,书中难免存在不足和疏漏之处,恳望读者提出宝贵意见和建议,以便再版时改进。

苏州大学 王宜怀

2017年3月

网上教学资源文件夹结构

- SD-KL-CD(V2.02)-160902
 - 01-Document
 - 01-总体阅读资料
 - 02-课件 (KL25&26-BOOK-PPT)
 - 02-Software
 - KL25-program-160611
 - ch04-Light-160421
 - ch06-UART-160506
 - ch07-Timer-160606
 - ch08-KB-LED-LCD-160508
 - ch09-Flash
 - ch10-ADC-DAC-CMP(wxn)
 - ch11-KL25-SPI-I2C-TSI
 - ch12-USB(HWW)-(20160525)
 - ch13-SMC-BME-COP(lwg-LK)
 - KL25_MQXLite(20160421)
 - KL25驱动程序SD-V2.0-160901
 - 03-Tool
 - 04-Other

该教学资源可在网站 <http://sumcu.suda.edu.cn> 下载。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 嵌入式系统的定义、发展简史、分类及特点	1
1.1.1 嵌入式系统的定义.....	1
1.1.2 嵌入式系统的由来及发展简史.....	2
1.1.3 嵌入式系统的分类.....	4
1.1.4 嵌入式系统的特点.....	6
1.2 嵌入式系统的学习困惑、知识体系及学习建议.....	7
1.2.1 嵌入式系统的学习困惑.....	7
1.2.2 嵌入式系统的知识体系	10
1.2.3 基础阶段的学习建议	11
1.3 微控制器与应用处理器简介.....	12
1.3.1 微控制器简介	12
1.3.2 以 MCU 为核心的嵌入式测控产品的基本组成	14
1.3.3 应用处理器简介	15
1.4 嵌入式系统常用术语.....	16
1.4.1 与硬件相关的术语	16
1.4.2 与通信相关的术语	17
1.4.3 与功能模块相关的术语	18
1.5 嵌入式系统常用的 C 语言基本语法概要	19
1.5.1 C 语言的运算符与数据类型	19
1.5.2 程序流程控制	21
1.5.3 函数	23
1.5.4 数据存储方式	23
1.5.5 编译预处理	28
小结	29
习题	31
第 2 章 ARM Cortex-M0+ 处理器	32
2.1 ARM Cortex-M0+ 处理器简介	32
2.1.1 ARM Cortex-M0+ 处理器内部结构概要.....	33
2.1.2 ARM Cortex-M0+ 处理器存储器映像.....	34
2.1.3 ARM Cortex-M0+ 处理器的寄存器	35
2.2 ARM Cortex-M0+ 处理器的指令系统	38

2.2.1	ARM Cortex-M0+指令简表与寻址方式	38
2.2.2	数据传送类指令	40
2.2.3	数据操作类指令	42
2.2.4	跳转控制类指令	45
2.2.5	其他指令	46
2.3	ARM Cortex-M0+指令集与机器码对应表	47
2.4	GNU 汇编语言的基本语法	49
2.4.1	ARM-GNU 汇编语言格式	50
2.4.2	伪指令	52
	小结	54
	习题	55
第3章	存储映像、中断源与硬件最小系统	56
3.1	恩智浦 Kinetis 系列微控制器简介	56
3.2	KL 系列 MCU 简介与体系结构概述	57
3.2.1	KL 系列 MCU 简介	57
3.2.2	KL 系列 MCU 体系结构概述	60
3.3	KL25/26 系列存储映像与中断源	61
3.3.1	KL25/26 系列存储映像	61
3.3.2	KL25/26 中断源	63
3.4	KL25/26 的引脚功能	64
3.4.1	硬件最小系统引脚	64
3.4.2	对外提供服务的引脚	67
3.5	KL25/26 硬件最小系统原理图	67
3.5.1	电源及其滤波电路	68
3.5.2	复位电路及复位功能	68
3.5.3	晶振电路	68
3.5.4	SWD 接口电路	69
	小结	69
	习题	70
第4章	GPIO 及程序框架	71
4.1	通用 I/O 接口基本概念及连接方法	71
4.2	端口控制模块与 GPIO 模块的编程结构	73
4.2.1	端口控制模块——决定引脚复用功能	73
4.2.2	GPIO 模块——对外引脚与内部寄存器	75
4.2.3	GPIO 基本编程步骤与基本打通程序	77
4.3	GPIO 驱动构件封装方法与驱动构件封装规范	78
4.3.1	设计 GPIO 驱动构件的必要性及 GPIO 驱动构件封装要点分析	78

4.3.2	底层驱动构件封装规范概要与构件封装的前期准备	80
4.3.3	KL25 的 GPIO 驱动构件源码及解析	81
4.4	利用构件方法控制小灯闪烁	87
4.4.1	Light 构件设计	88
4.4.2	Light 构件测试工程主程序	90
4.5	工程文件组织框架与第一个 C 语言工程分析	92
4.5.1	工程框架及所含文件简介	92
4.5.2	链接文件常用语法及链接文件解析	94
4.5.3	机器码文件解析	98
4.5.4	芯片上电启动运行过程解析	100
4.6	第一个汇编语言工程：控制小灯闪烁	103
4.6.1	汇编工程文件的组织	104
4.6.2	汇编语言 GPIO 构件及使用方法	105
4.6.3	汇编语言 Light 构件及使用方法	108
4.6.4	汇编语言 Light 测试工程主程序及汇编工程运行过程	110
	小结	111
	习题	112
第 5 章	嵌入式硬件构件与底层驱动构件基本规范	113
5.1	嵌入式硬件构件	113
5.1.1	嵌入式硬件构件概念与嵌入式硬件构件分类	113
5.1.2	基于嵌入式硬件构件的电路原理图设计简明规则	114
5.2	嵌入式底层驱动构件的概念与层次模型	117
5.2.1	嵌入式底层驱动构件的概念	117
5.2.2	嵌入式硬件构件和软件构件的层次模型	117
5.3	底层驱动构件的封装规范	118
5.3.1	构件设计的基本思想与基本原则	119
5.3.2	编码风格基本规范	120
5.3.3	公共要素文件	124
5.3.4	头文件的设计规范	126
5.3.5	源程序文件的设计规范	127
5.4	硬件构件及底层软件构件的重用与移植方法	127
	小结	129
	习题	130
第 6 章	串行通信模块及第一个中断程序结构	131
6.1	异步串行通信的通用基础知识	131
6.1.1	串行通信的基本概念	131
6.1.2	RS232 总线标准	133

6.1.3	TTL电平到RS232电平转换电路	134
6.1.4	串行通信编程模型	135
6.2	KL25/26芯片UART驱动构件及使用方法	136
6.2.1	KL25/26芯片UART引脚	136
6.2.2	UART驱动构件基本要素分析与头文件	137
6.2.3	printf的设置方法与使用	140
6.3	ARM Cortex-M0+中断机制及KL25/26中断编程步骤	140
6.3.1	关于中断的通用基础知识	140
6.3.2	ARM Cortex-M0+非内核模块中断编程结构	142
6.3.3	KL25/26中断编程步骤——以串口接收中断为例	144
6.4	UART驱动构件的设计方法	146
6.4.1	UART模块编程结构	146
6.4.2	UART驱动构件源码	151
	小结	156
	习题	157
第7章	定时器相关模块	158
7.1	ARM Cortex-M0+内核定时器	158
7.1.1	SysTick模块的编程结构	159
7.1.2	SysTick构件设计及测试工程	160
7.2	脉宽调制、输入捕捉与输出比较通用基础知识	162
7.2.1	脉宽调制PWM通用基础知识	162
7.2.2	输入捕捉与输出比较通用基础知识	165
7.3	TPM模块的驱动构件及使用方法	166
7.3.1	TPM模块的脉宽调制、输入捕捉、输出比较引脚	166
7.3.2	TPM构件头文件	167
7.3.3	TPM测试工程	172
7.4	TPM模块驱动构件的设计方法	175
7.4.1	TPM模块的编程结构	175
7.4.2	TPM驱动构件的设计	180
7.5	周期中断定时器PIT模块	187
7.5.1	周期中断定时器PIT模块功能概述	187
7.5.2	PIT驱动构件及使用方法	187
7.5.3	PIT驱动构件设计	189
7.6	低功耗定时器LPTMR模块	192
7.6.1	低功耗定时器LPTMR模块功能概述	192
7.6.2	LPTMR驱动构件及使用方法	193
7.6.3	LPTMR驱动构件的设计	195
7.7	实时时钟RTC模块	199

7.7.1	RTC 模块功能概述	199
7.7.2	RTC 驱动构件及使用方法	200
7.7.3	RTC 驱动构件的设计	204
小结	.....	210
习题	.....	211
第 8 章	GPIO 应用——键盘、LED 及 LCD	212
8.1	键盘基础知识与键盘驱动构件设计	212
8.1.1	键盘模型及接口	212
8.1.2	键盘编程基本问题、扫描编程原理及键值计算	213
8.1.3	键盘驱动构件的设计	214
8.2	LED 数码管基础知识与 LED 驱动构件设计	219
8.2.1	LED 数码管基础知识	219
8.2.2	LED 驱动构件设计及使用方法	220
8.3	LCD 基础知识与 LCD 驱动构件设计	224
8.3.1	LCD 的特点和分类	225
8.3.2	点阵字符型 LCD 模块控制器 HD44780	226
8.3.3	LCD 构件设计	231
8.4	键盘、LED 及 LCD 驱动构件测试实例	235
小结	.....	236
习题	.....	237
第 9 章	Flash 在线编程	238
9.1	Flash 驱动构件及使用方法	238
9.1.1	Flash 在线编程的基本概念	238
9.1.2	KL25/26 芯片 Flash 构件头文件及使用方法	239
9.2	Flash 保护与加密	242
9.2.1	Flash 保护含义及保护函数的使用说明	242
9.2.2	Flash 加密方法与去除密码方法	243
9.3	Flash 驱动构件的设计方法	245
9.3.1	Flash 模块编程结构	245
9.3.2	Flash 驱动构件设计技术要点	248
9.3.3	Flash 驱动构件封装要点分析	251
9.3.4	Flash 驱动构件的源程序代码	252
小结	.....	257
习题	.....	258
第 10 章	ADC、DAC 与 CMP 模块	259
10.1	模拟/数字转换器 ADC	259

10.1.1	模/数转换器 ADC 的通用基础知识	259
10.1.2	ADC 驱动构件及使用方法	262
10.1.3	ADC 模块的编程结构	266
10.1.4	ADC 驱动构件的设计	272
10.2	数字/模拟转换器 DAC	277
10.2.1	数/模转换器 DAC 的通用基础知识	277
10.2.2	DAC 驱动构件及使用方法	278
10.2.3	DAC 驱动构件的编程结构	282
10.2.4	DAC 驱动构件的设计	284
10.3	比较器 CMP	286
10.3.1	比较器 CMP 的通用基础知识	286
10.3.2	CMP 驱动构件及使用方法	287
10.3.3	CMP 驱动构件的编程结构	291
10.3.4	CMP 驱动构件的设计	293
	小结	300
	习题	301
第 11 章	SPI、I2C 与 TSI 模块	302
11.1	串行外设接口 SPI 模块	302
11.1.1	串行外设接口 SPI 的通用基础知识	302
11.1.2	SPI 驱动构件头文件及使用方法	305
11.1.3	SPI 模块的编程结构	310
11.1.4	SPI 驱动构件的设计	314
11.2	集成电路互连总线 I2C 模块	320
11.2.1	集成电路互连总线 I2C 的通用基础知识	320
11.2.2	I2C 驱动构件头文件及使用方法	325
11.2.3	I2C 模块的编程结构	331
11.2.4	I2C 驱动构件的设计	334
11.3	触摸感应接口 TSI 模块	343
11.3.1	触摸感应接口 TSI 的通用基础知识	343
11.3.2	TSI 驱动构件头文件及使用方法	346
11.3.3	TSI 模块的编程结构	349
11.3.4	TSI 驱动构件的设计	351
	小结	355
	习题	355
第 12 章	USB 编程	356
12.1	USB 应用开发基础知识	356
12.1.1	USB 的物理特性	357

12.1.2	USB 主机与设备的概念与特性	358
12.1.3	USB 中断概述	360
12.2	USB 设备(从机)的应用编程方法	360
12.2.1	USB 设备(从机)驱动构件及使用方法	360
12.2.2	USB 设备(从机)方 MCU 编程实例	362
12.2.3	USB 设备(从机)PC 驱动问题	366
12.2.4	与 USB 设备(从机)通信的 PC 方程序设计	369
12.3	USB 主机的应用编程方法	370
12.3.1	USB 主机驱动构件及使用方法	370
12.3.2	USB 主机方 MCU 编程实例	373
12.4	设计微控制器的 USB 驱动构件应掌握的基础知识	376
12.4.1	USB 底层编程涉及的基本概念	376
12.4.2	USB 底层编程涉及的描述符及设备请求	384
12.4.3	USB 设备状态	391
12.4.4	USB 总线的枚举过程	392
12.5	KL25/26 芯片 USB 模块的编程结构	393
12.5.1	USB 模块寄存器	393
12.5.2	USB 模块中断详解	397
12.5.3	USB 设备(从机)编程结构	398
12.5.4	USB 主机编程结构	399
12.6	KL25/26 芯片作为 USB 设备(从机)的驱动构件设计	402
12.7	KL25/26 芯片作为 USB 主机的驱动构件设计	405
第 13 章	系统时钟与其他功能模块	410
13.1	时钟系统	410
13.1.1	时钟系统概述	410
13.1.2	时钟模块概要与编程要点	411
13.1.3	时钟模块测试实例	414
13.2	电源模块	416
13.2.1	电源模式控制	416
13.2.2	电源模式转换	417
13.3	低漏唤醒单元	418
13.4	看门狗	419
13.5	复位模块	420
13.5.1	上电复位	421
13.5.2	系统复位源	421
13.5.3	调试复位	422
13.6	位操作引擎技术及应用方法	422
13.6.1	位操作引擎概述	422

13.6.2	位操作引擎的应用机制解析	423
13.6.3	位操作引擎对 GPIO 部分的使用说明	425
13.6.4	位操作引擎使用注意点	425
13.6.5	测试实例	426
小结	.....	426
习题	.....	427
第 14 章	进一步学习指导	428
14.1	关于更为详细的技术资料	428
14.2	关于实时操作系统 RTOS	428
14.3	关于嵌入式系统稳定性问题	429
附录 A	KL25/26 芯片引脚复用功能	432
A.1	KL25 引脚复用功能	432
A.2	KL26 引脚复用功能	435
附录 B	KL25/26 硬件最小系统原理图	439
B.1	KL25 硬件最小系统原理图	439
B.2	KL26 硬件最小系统原理图	440
附录 C	printf 的常用格式	441
C.1	printf 调用的一般格式	441
C.2	格式字符串	441
C.3	输出格式举例	442
参考文献	.....	444

第1章 概述

本章导读：作为全书导引，本章阐述了嵌入式系统的基本概念、由来、发展简史、分类及特点；给出嵌入式系统的学习困惑、知识体系及学习建议；介绍了大部分嵌入式系统的核心微控制器——微控制器 MCU，以及应用处理器 MAP；简要归纳了嵌入式系统的常用术语，以便读者对嵌入式系统基本词汇有初步认识，为后续学习打好基础；简要介绍了嵌入式系统常用的 C 语言基本语法，以便读者快速了解本书所用 C 语言知识要素。

1.1 嵌入式系统的定义、发展简史、分类及特点

1.1.1 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，有多种多样的定义，但本质是相同的。这里给出美国 CMP Books 出版的 Jack Ganssle 和 Michael Barr 的著作 *Embedded System Dictionary*^① 中给出的嵌入式系统定义：**嵌入式系统是一种计算机硬件和软件的组合，也许还有机械装置，用于实现一个特定功能。在某些特定情况下，嵌入式系统是一个大系统或产品的一部分。**世界上第一个嵌入式系统是 1971 年 Busicom 公司用 Intel 单芯片 4004 微处理器完成的商用计算器系列。该词典还给出了嵌入式系统的一些示例：微波炉、手持电话、计算器、数字手表、录像机、巡航导弹、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)接收机、数码相机、传真机、跑步机、遥控器和谷物分析仪等，难以尽数。通过与通用计算机的对比可以更形象地理解嵌入式系统的定义。**该词典给出的通用计算机定义是：计算机硬件和软件的组合，用作通用计算平台。**个人计算机(Personal Computer, PC)是最流行的现代计算机。

再列举其他文献给出的定义，以便了解对嵌入式系统定义的不同表述方式，也可看作从不同角度定义嵌入式系统。

中国《国家标准 GB/T 22033—2008 信息技术—嵌入式系统术语》中给出的嵌入式系统定义：**嵌入式系统置入应用对象内部起信息处理和作用控制的专用计算机系统。**它是以应用为中心，以计算技术为基础，软件硬件可剪裁，对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格约束的专用计算机系统，其硬件至少包含一个微控制器或微处理器。

IEEE(国际电机工程师协会)给出的嵌入式系统定义：**嵌入式系统是“控制、监视或者辅助装置、机器和设备运行的装置”。**

维基百科(英文版)中给出的嵌入式系统定义：**嵌入式系统是一种用计算机控制的具有特定功能的较小的机械或电气系统，且经常有实时性的限制，在被嵌入到整个系统中时一般**

^① Jack Ganssle 等. 英汉双解嵌入式系统词典. 马广云等译. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

会包含硬件和机械部件。现如今嵌入式系统控制了人们日常生活中的许多设备,98%的微处理器被用在了嵌入式系统中。

国内对嵌入式系统定义曾进行过广泛讨论,有许多不同说法。其中,嵌入式系统定义的涵盖面问题是主要争论焦点之一。例如,有的学者认为不能把手持电话算作嵌入式系统,而只能把其中起控制作用的部分叫嵌入式系统,而手持电话可以称为嵌入式系统的应用产品。其实,这些并不妨碍人们对嵌入式系统的理解,所以不必对定义感到困惑。有些国内学者特别指出,在理解嵌入式系统定义时,不要把嵌入式系统与嵌入式系统产品相混淆。实际上,从口语或书面语言角度,并不区分“嵌入式系统”与“嵌入式系统产品”,只要不妨碍对嵌入式系统的理解就没有关系。

总的说来,可以从计算机本身角度概括表述嵌入式系统,那就是:嵌入式系统,即嵌入式计算机系统,它是不以计算机面目出现的“计算机”,这个计算机系统隐含在各类具体的产品之中,在这些产品中,计算机程序起到了重要作用。

1.1.2 嵌入式系统的由来及发展简史

1. 嵌入式系统的由来

通俗地说,计算机是因科学家需要一个高速的计算工具而产生的。直到20世纪70年代,电子计算机在数字计算、逻辑推理及信息处理等方面表现出非凡的能力。在通信、测控与数据传输等领域,人们对计算机技术给予了更大的期待。这些领域的应用与单纯的高速计算要求不同,主要表现在:直接面向控制对象;嵌入到具体的应用体中,而非以计算机的面貌出现;能在现场连续可靠地运行;体积小,应用灵活;突出控制功能,特别是对外部信息的捕捉与丰富的输入输出功能等。由此可以看出,满足这些要求的计算机与满足高速数值计算的计算机是不同的。因此,一种称为微控制器(单片机)^①的技术得以产生并发展。为了区分这两种计算机类型,通常把满足海量高速数值计算的计算机称为通用计算机系统,而把嵌入到实际应用系统中,实现嵌入式应用的计算机称为嵌入式计算机系统,简称嵌入式系统。可以说,是因为通信、测控与数据传输等领域对计算机技术的需求催生了嵌入式系统的产生。

2. 嵌入式系统的发展简史

1946年,诞生了世界上第一台电子数字计算机(The Electronic Numerical Integrator And Calculator, ENIAC),它由美国宾夕法尼亚大学莫尔电工学院制造,重达30t,总体积约90m³,占地170m²,耗电140kW,运算速度为每秒5000次加法,标志着计算机时代的开始。其中,最重要的部件是中央处理器(Central Processing Unit, CPU),它是一台计算机的运算和控制核心。CPU的主要功能是解释指令和处理数据,其内部含有运算逻辑部件即算术逻辑运算单元(Arithmetic Logic Unit, ALU)、寄存器部件和控制部件等。

1971年,Intel公司推出了单芯片4004微处理器MPU(Microprocessor Unit),它是世界上第一个商用微处理器,Busicom公司就是用它制作电子计算器,这就是嵌入式计算机的雏形。1976年,Intel公司又推出了MCS-48单片机SCM(Single Chip Microcomputer),这个内部含有1KB只读存储器(Read Only Memory, ROM),64B随机存取存储器(Random

^① 微控制器与单片机这两个术语的语义是基本一致的,本书后面除讲述历史之外,一律使用微控制器一词。