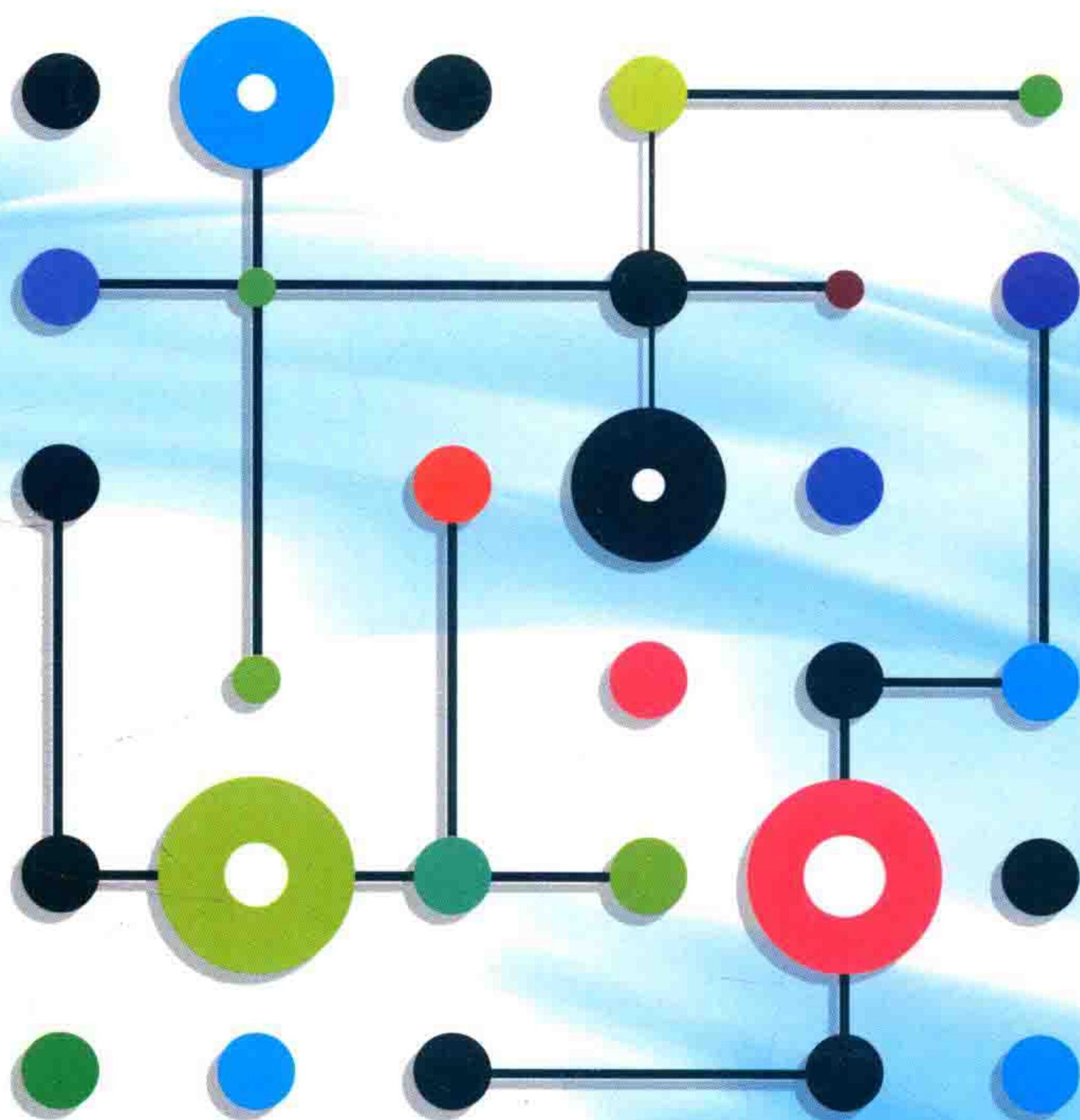


ARM Cortex-M4

微控制器深度实战

温子祺 冼安胜 林秩谦 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

ARM Cortex-M4 微控制器 深度实战

温子祺 冼安胜 林秩谦 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以新唐公司的 NuMicro M451 系列微控制器 M453VG6AE 为蓝本,结合 SmartM-M451 旗舰开发板,由浅入深、系统地介绍 ARM Cortex-M4 内核微控制器开发环境的搭建及各种功能器件的应用。

本书为《ARM Cortex-M4 微控制器原理与实践》的姊妹篇,丰富了前篇的内容,因此,当涉及 ARM Cortex-M4 体系结构时,请阅读前篇,本书着重讲解近年来常见硬件的开发。本书大部分的内容均来自作者的项目经验,因而许多 C 语言代码都能够直接应用到工程项目中,且代码风格良好。本书不是单纯的理论讲解,它还介绍了如何实现图片显示、触摸按键、FreeRTOS 移植与应用、智能家居下常用无线串口模组的使用、FM 收音机、FM 空中音频传输、MPU6050 六轴传感器姿态解算与计步器的实现、uIP 网络编程、CAN 总线、红外数据收发、USB 协议、音频编解码、摄像头编程、蓝牙通信、2.4 GHz 通信等。其中出版社官方下载专区提供的本书各章节的实例代码、硬件设计电路图及芯片资料,可使读者在短时间内迅速掌握 NuMicro M451 系列微控制器的应用技巧,同时,读者也可从作者官网(www.smartmcu.com)上了解本书对应的学习套件。

本书既可作为大学本、专科微控制器课程的教材,又可作为相关技术人员的参考与学习用书。

图书在版编目(CIP)数据

ARM Cortex-M4 微控制器深度实战 / 温子祺, 冼安胜,
林秩谦编著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社,
2017.11

ISBN 978-7-5124-2574-3

I. ①A… II. ①温… ②冼… ③林… III. ①微控制
器—研究 IV. ①TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 256104 号

版权所有,侵权必究。

ARM Cortex-M4 微控制器深度实战

温子祺 冼安胜 林秩谦 编著

责任编辑 宋淑娟

*

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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:44.25 字数:943 千字

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2574-3 定价:118.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前言

嵌入式领域的发展日新月异,你也许还没有注意到,如果你想一想 MCU 系统十年前的样子并与当今的 MCU 系统比较一下,就会发现 PCB 设计、元件封装、集成度、时钟速度和内存大小已经经历了好几代的变化。在这方面最热门的话题之一是,现在仍在使用 8 位 MCU 的用户何时才能摆脱传统架构而转向使用更先进的 32 位微控制器架构,如基于 ARM Cortex-M 的 MCU 系列。在过去几年里,嵌入式开发者向 32 位 MCU 的迁移一直呈现强劲势头,采取这一行动的最强有力的理由是市场和消费者对嵌入式产品复杂性的需求大大增加。随着嵌入式产品的彼此互联越来越多、功能越来越丰富,目前的 8 位和 16 位 MCU 已经无法满足处理要求,即使 8 位或 16 位 MCU 能够满足当前的项目需求,但也存在限制未来产品升级和代码重复使用的严重风险;第二个常见理由是嵌入式开发者开始认识到迁移到 32 位 MCU 带来的好处,且不说 32 位 MCU 能提供超过 10 倍的性能,单说这种迁移本身就能带来更低的功耗、更小的程序代码、更短的软件开发时间,以及更好的软件重用性。

随着近年来制造工艺的不断进步,ARM Cortex-M 微控制器的成本也在不断降低,已经与 8 位和 16 位微控制器处于同等水平;而且,基于 ARM 器件的选择余地、性能范围和可用性也在不断扩大或提高。如今,有越来越多的微控制器供应商提供基于 ARM 的微控制器产品,这些产品能提供选择范围更广的外设、性能、内存大小、封装和成本,等等。另外,基于 ARM Cortex-M 的微控制器还具有专门针对微控制器应用的一些特性,这些特性使 ARM 微控制器具有日益广泛的应用范围。与此同时,基于 ARM 微控制器的价格在过去 5 年里已大幅降低,并且面向开发者的低成本甚至免费开发工具也越来越多。

与其他架构相比,选择基于 ARM 的微控制器也是更好的投资。现今,针对 ARM 微控制器开发的软件代码可在未来多年内供为数众多的微控制器供应商重复使用。随着 ARM 架构的应用更加广泛,聘请具有 ARM 架构行业经验的软件工程师也比聘请其他架构的工程师更加容易,这也使得嵌入式开发者的产品和资产能够更加面向未来。

前言

本书的微控制器选型以新唐公司 ARM Cortex-M4 内核的 NuMicro M451 系列微控制器为蓝本。此前,本人已经编写了《51 单片机 C 语言创新教程》《ARM Cortex-M0 微控制器原理与实践》《ARM Cortex-M0 微控制器深度实战》《ARM Cortex-M4 微控制器原理与实践》等 4 本书籍,并在北京航空航天大学成功出版。

本书为《ARM Cortex-M4 微控制器原理与实践》的姊妹篇,丰富了前篇的内容,因此,当涉及 ARM Cortex-M4 体系结构时,读者可阅读前篇,本书着重讲解近年来常见硬件的开发。本书的主要特色是边学边做,各章节中规中矩,遵循由简到繁、循序渐进的编排方式。本书大部分的内容均来自本人的项目开发经验,因而许多 C 语言代码能够直接应用到工程项目中,且代码风格良好。本书不是单纯的理论讲解,它还介绍了如何实现图片显示、触摸按键、FreeRTOS 移植与应用、智能家居下常用无线串口模组的使用、FM 收音机、FM 空中音频传输、MPU6050 六轴传感器姿态解算与计步器的实现、uIP 网络编程、CAN 总线、红外数据收发、USB 协议、音频编解码、摄像头编程、蓝牙通信、2.4 GHz 通信等,这些内容在很多同类书籍中并不具备,而这恰恰也是踏入社会在工作中经常要接触的内容。其中配套的网上资料提供各章节的实例代码,可使读者在短时间内迅速掌握 NuMicro M451 系列微控制器的应用技巧,并有配套开发板供读者选择。

天下大事,必作于细。无论是从微控制器入门与深入的角度出发,还是从实践性与技术性的角度出发,都是本书的亮点。本书是作者多年工作经验的积累,用尽了心血编写而成。读者学习本书就是继承了作者的思路与经验,找到了学习微控制器的快捷路径,可以花最少的时间获得最佳的学习效果,节省不必要的摸爬滚打的时间。

参与本书编写工作的主要人员有温子祺、冼安胜、林秩谦、杨伟展等 4 人,最终方案的确定和本书的定稿全部由温子祺负责。感谢新唐科技股份有限公司的贾雪巍先生,他在从写书到出版的过程中提出了很多有价值的参考意见,让此书不断完善。

本书主要取材于实际的项目开发经验,对于微控制器编程的程序员来说是很好的参考资料。本书例程不但编程规范良好,而且代码具有良好的移植性,移植到不同的平台都十分方便。最后希望本书能对微控制器应用推广起到一定的作用。由于程序代码较复杂,图表较多,难免会有纰漏,恳请读者批评指正,并可通过 E-mail 地址 wenziqi@hotmail.com 进行反馈;同时欢迎大家访问作者官网 www.smartmcu.com,我们希望能够得到您的参与和帮助。

温子祺

2017 年 3 月 23 日

目 录

第 1 章 新唐 M451 系列微控制器	1
1.1 M451 系列芯片特性	1
1.2 M451 旗舰板硬件平台	9
第 2 章 环境搭建	12
2.1 安装 NuLink	12
2.2 平台的搭建	13
2.3 工程的创建与运行	14
2.4 硬件仿真	22
2.5 启动流程	25
2.6 ISP 下载程序	36
第 3 章 位图编解码及内存模块	39
3.1 简 介	39
3.2 结 构	41
3.3 实 验	44
3.3.1 位图显示	44
3.3.2 屏幕截图	53
3.4 内存模块	65
3.4.1 模块设计	65
3.4.2 位图快速显示	68
第 4 章 JPEG 解码	75
4.1 简 介	75
4.2 文件格式	78
4.3 解码过程	81
4.4 实验:显示 JPEG 图片	82

第 5 章	GIF 解码	86
5.1	简 介	86
5.2	实验:显示 GIF 图片	87
第 6 章	触摸按键	91
6.1	概 述	91
6.2	功能描述	93
6.3	实验:触摸按键识别	97
第 7 章	温湿度传感器	107
7.1	简 介	107
7.2	串行接口	108
7.3	实验:显示温湿度	110
第 8 章	红外编解码	116
8.1	简 介	116
8.1.1	红外遥控器原理	116
8.1.2	遥控距离的影响因素	118
8.1.3	红外接收头	119
8.2	实验:红外捕捉	119
8.3	NEC 协议	128
8.4	实验:NEC 协议解码	130
第 9 章	音乐播放器及录音机	139
9.1	VS1053 简介	139
9.2	实 验	140
9.2.1	简易播放器	140
9.2.2	高级播放器带歌词显示	159
9.3	WAV 文件	172
9.4	实验:录音机	176
第 10 章	FM	188
10.1	RDA5820 简介	188
10.2	实 验	190
10.2.1	FM 收音机	190

10.2.2	FM 空中音频传输	201
第 11 章 MPU6050 六轴传感器		207
11.1	MPU6050 简介	207
11.1.1	特 征	207
11.1.2	数据读取的初始化	209
11.1.3	重要寄存器简介	210
11.2	DMP 使用简介	214
11.3	实验:姿态解算	217
11.4	计步器简介	226
11.5	实验:计步器	227
第 12 章 摄像头		232
12.1	概 述	232
12.2	OV7670 简介	234
12.2.1	OV7670 的特点	234
12.2.2	OV7670 的功能模块	234
12.2.3	OV7670 的图像数据输出格式	236
12.2.4	SM-OV7670 摄像头模块	238
12.3	SCCB	240
12.3.1	概 述	240
12.3.2	引脚描述	241
12.3.3	通信过程	242
12.4	AL422 简介	245
12.4.1	特 点	246
12.4.2	系统实现	247
12.5	实验:摄像头抓拍	249
第 13 章 PS/2 接口		260
13.1	简 介	260
13.2	PS/2 键盘接口	266
13.3	实验:PS/2 键盘	271
第 14 章 RS485		281
14.1	简 介	281
14.1.1	特 性	281

目 录

14.1.2	MAX485	284
14.2	实验:简单数据传输	285
第 15 章	CAN	293
15.1	概 述	293
15.2	CAN 协议	294
15.2.1	总线物理特性	294
15.2.2	冲突检测	295
15.2.3	帧结构	295
15.2.4	错误检测	300
15.2.5	错误计数	301
15.2.6	错误抑制	301
15.2.7	波特率	302
15.3	新唐 CAN 的特点	303
15.4	实验:CAN 数据收发	304
第 16 章	蓝牙 2.0 通信	314
16.1	简 介	314
16.1.1	起 源	316
16.1.2	优 势	317
16.2	工作原理	318
16.3	版 本	320
16.4	SM-HC05 蓝牙 2.0 模块	323
16.4.1	简 介	323
16.4.2	AT 指令	323
16.5	实 验	325
16.5.1	AT 指令测试	325
16.5.2	PC 与蓝牙模块通信	331
16.5.3	手机与蓝牙模块通信	340
第 17 章	蓝牙 4.0 通信	343
17.1	简 介	343
17.2	SM-BLE 蓝牙 4.0 模块	345
17.3	AT 指令	346
17.4	实 验	348
17.4.1	AT 指令测试	348

17.4.2 苹果/安卓手机蓝牙模块通信	351
第 18 章 无线 2.4 GHz 通信	359
18.1 概 述	359
18.2 实验:数据传输	367
18.3 无线串口	377
18.4 星形组网	379
18.5 握手协议	380
18.5.1 向从机 0~5 发送数据	380
18.5.2 从从机 0~5 获取数据	381
18.5.3 设置模块角色	382
18.6 实验:一对多通信	382
第 19 章 uIP 与无线 WiFi 网络通信	397
19.1 uIP 概述	397
19.2 uIP 移植	399
19.3 uIP 层次结构	400
19.3.1 实现设备驱动与 uIP 对接的接口程序	400
19.3.2 应用层要调用的函数	404
19.3.3 主要结构体	407
19.3.4 uIP 的初始化函数与配置宏定义	411
19.4 uIP 主程序循环	413
19.5 网络芯片 ENC28J60	415
19.5.1 功能描述	417
19.5.2 SPI 指令集与命令序列	423
19.6 uIP 实验	425
19.6.1 TCP 服务器通信	425
19.6.2 TCP 客户端通信	438
19.6.3 UDP 通信	450
19.7 WiFi 概述	459
19.8 SM-ESP8266 无线模块	459
19.8.1 简 介	459
19.8.2 AT 指令	462
19.9 无线 WiFi 实验:TCP 服务器通信	465



目 录

第 20 章	USB 协议	478
20.1	概 述	478
20.2	数据流模型	481
20.3	四种传输类型	483
20.4	框 架	485
20.5	命 令	487
20.6	USB 描述符	490
20.6.1	设备描述符	492
20.6.2	配置描述符	495
20.6.3	接口描述符	496
20.6.4	端点描述符	498
20.6.5	字符串描述符	500
第 21 章	USB 设备通信	502
21.1	概 述	502
21.2	特 征	504
21.3	功能描述	505
21.4	实 验	508
21.4.1	USB 鼠标	508
21.4.2	USB 键盘	520
21.4.3	USB 闪存盘	529
21.4.4	USB 转串口	537
21.4.5	USB 数据收发	544
第 22 章	USB 主机通信	552
22.1	概 述	552
22.2	功能描述	553
22.3	实验:简易音乐播放器	554
第 23 章	FreeRTOS 嵌入式操作系统	563
23.1	FreeRTOS 特色	567
23.2	任务管理	567
23.2.1	任务函数	567
23.2.2	基本任务状态	570
23.2.3	任务创建	570

23.2.4	任务的优先级	578
23.2.5	非运行状态	581
23.2.6	空闲任务及空闲任务钩子函数	588
23.2.7	改变任务优先级	591
23.2.8	删除任务	596
23.2.9	调度算法概述	600
23.3	队列管理	602
23.3.1	概 述	602
23.3.2	使用队列	604
23.3.3	复合数据类型的数据传输	612
23.3.4	大型数据单元传输	620
23.4	中断管理	621
23.4.1	延迟中断处理	621
23.4.2	计数信号量	630
23.4.3	在中断服务程序中使用队列	636
23.4.4	中断嵌套	642
23.5	资源管理	643
23.5.1	基本概念	643
23.5.2	临界区与挂起调度器	646
23.5.3	互斥量	648
23.6	内存管理	656
23.6.1	概 述	656
23.6.2	内存分配方案范例	657
23.7	软件定时器	660
23.7.1	概 述	660
23.7.2	例 程	661
23.8	错误排查	663
23.8.1	概 述	663
23.8.2	栈溢出	663
23.8.3	其他常见错误	665
23.9	FreeRTOSConfig.h	666
23.10	Cortex-M 内核注意事项	682
23.10.1	有效优先级	682
23.10.2	与数值相反的优先级值和逻辑优先级设置	683
23.10.3	Cortex-M 内部优先级概述	684
23.10.4	临界区	686

目 录

23.11 编码标准及风格指南 686

23.11.1 编码标准 686

23.11.2 命名规则 687

23.11.3 数据类型 688

23.11.4 风格指南 688

附录 A 开发板实物照片 689

附录 B 姊妹篇 691

附录 C 单片机多功能调试助手 692

附录 D 综合实验界面 693

参考文献 694

第 1 章

新唐 M451 系列微控制器

作为一家全球微控制器领先企业,新唐提供基于 ARM Cortex-M4 内核的新一代 NuMicro 32 位的微控制器。新唐的 Cortex-M4 微控制器提供宽范围工作电压(2.5~5.5 V)、工业级温度(-40~105 °C)、高精度内部振荡器,具有强抗干扰性,如图 1.1.1 所示。

M451 系列分为 M451B 基础系列、M451U USB 系列、M451C CAN 系列和 M451A 全功能系列,适用于工业控制、工业自动化、消费类产品、网络设备、能源电力、马达控制等应用领域。



图 1.1.1 新唐 M451 系列 MCU1

M451 系列产品特性:含有浮点运算单元和 DSP 的 ARM Cortex-M4 内核,最高运行频率可至 72 MHz,内建 128 KB/256 KB Flash 存储器、32 KB SRAM,快速 USB OTG、CAN 和其他外设单元;同时还配备大量的外围设备,如 USB OTG、USB 主机/设备、定时器、看门狗定时器、RTC、PDMA、EBI、UART、智能卡接口、SPI、I²C、PWM、GPIO、12 位 ADC、12 位 DAC、触摸按键传感器、模拟比较器、温度传感器、低电压复位、欠压电压检测。

1.1 M451 系列芯片特性

M451 系列芯片特性如下:

➤ 内核:

- ARM Cortex-M4F 内核最高运行频率可达 72 MHz;
- 支持带硬件除法器的 DSP 扩展功能;
- 支持 IEEE 754 兼容浮点运算单元(FPU);
- 支持内存保护单元(MPU);
- 一个 24 位系统定时器;
- 支持通过 WFI 和 WFE 指令进入低功耗睡眠模式;
- 单周期 32 位硬件乘法器;

- 支持可编程的嵌套中断控制器(NVIC)16 级优先级;
- 支持可编程屏蔽中断。
- 内置 LDO(Low Dropout Regulator, 低压线性稳压器), 宽工作电压范围从 2.5 V 至 5.5 V。
- Flash 存储器:
 - 128 KB/256 KB Flash 内存;
 - 代码/数据空间可配置;
 - 4 KB Flash LDROM;
 - 支持通过 SWD/ICE 接口 2 线 ICP 烧录;
 - 支持在系统编程 (ISP)和在应用编程 (IAP);
 - 2 KB 的 Flash 页擦除功能;
 - 支持通过外部编程器快速并口编程。
- Mask ROM:
 - 16 KB 内置 Mask ROM;
 - 支持新唐 UART0、SPI0、I2C0、CAN 和 USB 引导码;
 - 支持 ISP/IAP 库;
 - 支持直接从 Mask ROM 启动。
- SRAM 存储器:
 - 内置 32 KB SRAM;
 - 支持 16 KB 空间硬件奇偶校验检测;
 - 支持字节、半字和字操作;
 - 支持奇偶校验检测错误发生后产生异常;
 - 支持 PDMA 模式;
 - 带两个给内存模块专用的外部片选引脚;
 - 每个 Bank 支持操作空间达 1 MB, 实际外部操作空间大小依据封装输出引脚的多少而定;
 - 支持 8/16 位数据宽度;
 - 支持 16 位数据宽度数据写入模式;
 - 支持 PDMA 模式;
 - 支持地址/数据复用模式;
 - 支持每个内存模块时序参数独立设置。
- PDMA (Peripheral DMA):
 - 在内存与外设之间建立了 12 个独立的可配置自动数据传输渠道;
 - 支持“正常”“分散-收集”(Scatter - Gather)传输模式;
 - 支持两种类型的优先级模式: 固定优先级和循环(Round-Robin)模式;
 - 支持字节、半字和字访问;

- 源地址和目的地址自动递增；
- 支持单次和突发传输模式。
- 时钟控制：
 - 内置 22.118 4 MHz 内部高速 RC 振荡器(HIRC)用于系统运行(在 $-40\sim+105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的误差小于 2%)；
 - 内置 10 kHz 内部低速 RC 振荡器(LIRC)用于看门狗及掉电唤醒等功能；
 - 外部 4~24 MHz 高速晶体(HXT)用于精准的时序操作；
 - 外部 32.768 kHz 低速晶体(LXT)用于 RTC 功能和低功耗系统运行；
 - 支持一组 PLL,高至 144 MHz,用于高性能的系统运行,时钟源可以选择 HIRC 和 HXT；
 - 支持高/低速外部时钟失效检测；
 - 支持检测到时钟失效后产生异常(NMI)；
 - 支持时钟输出。
- 电压调节接口：
 - 通过专用电源输入引脚(VDDIO)使得部分 I/O 输出电压用户可配置到 1.8~5.5 V；
 - 支持 UART1、SPI0、SPI1、I2C1 或 I2C0 接口。
- GPIO：
 - 四种 I/O 模式；
 - TTL/施密特触发输入可选；
 - I/O 口作为中断源可选择边沿/电平触发；
 - 支持强灌电流和强拉电流 I/O(5 V 时达 20 mA)；
 - 电平转换速率控制软件可选；
 - 支持 5 V-tolerance 功能；
 - 支持 LQFP100/64/48 对应多达 85/55/42 个 GPIO。
- PDMA (外设 DMA)：
 - 支持 12 个独立配置通道,用于内存和外设间的自动数据搬移；
 - 支持普通和 Scatter - Gather 传输模式；
 - 支持两种优先级:固定优先级和轮流模式；
 - 支持字节、半字和字操作；
 - 支持源地址与目的地址自动递增功能；
 - 支持单次和 Burst 传输方式。
- Timer：
 - 支持 4 个 32 位定时器,每个定时器包括一个 24 位向上计数器和一个 8 位预分频计数器；
 - 每个定时器时钟源独立可选；

第1章 新唐 M451 系列微控制器

- 有 One-shot、Periodic、Toggle 和 Continuous Counting 四种工作模式；
- 带事件计数功能,以记录外部事件引脚所发生的事件；
- 支持输入捕捉功能来捕捉或复位计数器的值。
- 看门狗定时器:
 - 支持 LIRC(默认选择)、HCLK/2048 和 LXT 多个时钟源可选；
 - 有从 1.6 ms~26.0 s(与时钟源有关)8 个可选时间溢出周期；
 - 可从 Power-down 或 Idle 模式唤醒；
 - 看门狗溢出后中断或复位可选。
- 窗口看门狗定时器:
 - 支持 HCLK/2048(默认选择)和 LIRC 多个时钟源可选；
 - 窗口范围可通过 6 位计数器和一个 11 位预分频计数器设置；
 - 可从 Power-down 或 Idle 模式唤醒；
 - 看门狗溢出后中断或复位可选。
- RTC:
 - 支持外部电源引脚 VBAT 给模块单独供电；
 - 支持通过设置频率补偿寄存器 FCR(Frequency Compensation Register)进行软件补偿；
 - 支持 RTC 计数(时,分,秒)和日历计数(年,月,日)；
 - 支持报警寄存器(年,月,日,时,分,秒)；
 - 12 小时或 24 小时两种模式可选；
 - 有自动闰年计算功能；
 - 支持 1/128、1/64、1/32、1/16、1/8、1/4、1/2 和 1 秒 8 个周期滴答中断时间可选；
 - 支持唤醒功能；
 - 带 80 B 备用寄存器；
 - 有可编程备用寄存器擦除功能；
 - 支持 32 kHz 振荡器增益控制；
 - 支持 Temperature 引脚检测功能。
- PWM:
 - 支持多达 12 个独立的 16 位分辨率的 PWM 输出；
 - 支持最高工作频率达 144 MHz；
 - 带一个 12 位的时钟预分频计数器；
 - 支持单次和自动装载两种工作模式；
 - 支持向上、向下、上-下三种计数模式；
 - 支持同步功能；
 - 支持 12 位的死区插入时间；
 - 支持外部引脚、模拟比较器和系统安全事件源刹车功能；