



TM4C123

微处理器原理与实践

叶朝辉 编著

清华大学出版社



叶朝辉 编著

A decorative graphic consisting of two horizontal dashed lines. The top line has a large arrow pointing to the right. The bottom line has a large arrow pointing to the left. The text 'TM4C123' is centered between these lines.

TM4C123

微处理器原理与实践

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面介绍了基于 ARM Cortex-M4F 内核的 TM4C123 系列微处理器的特点、结构、外设、开发环境、开发方法以及实验样例及源程序解析。本书可作为嵌入式、电子技术、电子系统设计等相关课程的大学教师的教学用书,同时也可作为该领域工程技术人员的参考书。

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

TM4C123 微处理器原理与实践/叶朝辉编著.--北京:清华大学出版社,2014

ISBN 978-7-302-34371-4

I. ①T… II. ①叶… III. ①微处理器 IV. ①TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 257300 号

责任编辑:王一玲

封面设计:常雪影

责任校对:焦丽丽

责任印制:刘海龙

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:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13.5 字 数:331 千字

(附光盘 1 张)

版 次:2014 年 1 月第 1 版 印 次:2014 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:29.00 元

前 言

德州仪器公司(Texas Instruments, TI)2011年推出的 Tiva C 系列 TM4C123 系列 32 位微处理器,是基于 ARM 公司推出的最新的 Cortex-M4F 架构设计的 SoC(System on Chip)器件,具有较强的信号运算能力,如具有扩展的单周期乘法累加指令、优化的单指令多数据运算和单精度浮点运算指令,另外,支持用于高级运动控制的 PWM(Pulse Width Modulation)和 QEI(Quadrature Encoder Interface)功能,支持 USB OTG 及 CAN 2.0 等通信功能,同时集成了精密的模拟信号处理功能,如模拟比较器和 12 位模数转换器。TM4C123 系列微处理器可用于测试和测量、工业监控、运动控制、汽车监控、医疗仪器、音频及游戏设备、安防及能源管理等领域。需要说明的是,Tiva C 系列的 TM4C123 系列微处理器最初命名为 Stellaris LM4F 系列微处理器,新名称从 2013 年 4 月开始使用。

本书以教学和实践经验为基础而编写,全面介绍 TM4C123 系列微处理器的特点、结构、外设、开发环境和开发方法,并配有大量的实验样例及源程序解析。本书可作为嵌入式、电子技术、电子系统设计等相关课程的大学教师的教学参考书,同时也可作为该领域工程技术人员的参考书。

本书包括原理与实验训练两部分,原理部分包括第 1~8 章,实验训练部分包括第 9~11 章。

原理部分:首先介绍 ARM 体系结构、ARM Cortex-M4F 微处理器结构以及 TM4C123 系列微处理器等,使读者初步了解 TM4C123 微处理器的特点、结构和功能。在此基础上,以 TM4C123GH6PGE 微处理器为例,详细叙述其系统控制功能,系统外设、模拟外设、通信外设和运动控制外设的功能与特点、内部结构、工作原理和使用方法,方便读者深入学习和研究。阅读时,不需要深入理解 TM4C123 系列微处理器工作原理的读者可以先略过第 3~8 章,而需要深入学习和研究的读者可以参考。

实验训练部分:首先介绍 TM4C123 系列微处理器的开发环境 CCS、软件库 TivaWare 以及实验套件,使读者了解开发流程和方法。然后通过 3 个层次的实验设计即基本实验、提高实验和综合实验,使读者能够逐步掌握 TM4C123 系列微处理器软硬件特点及开发方法。

本书对 TM4C123 微处理器的特点及外设进行了详细描述,使读者阅读后能够深入理解 TM4C123 微处理器的开发方法。3 个层次的实验设计循序渐进,由易到难,不仅使读者全面了解 TM4C123 微处理器的功能特点,而且使读者易于掌握其开发和应用。

本书由叶朝辉编著,第1、2、4章由叶朝辉编写,第3章及第5~10章由研究生林博提供初稿,第11章实验分别由研究生周永明、林博以及本科生张成晖、孟繁庆、徐洁提供初稿和源程序解析。

本书编写过程中得到了德州仪器公司上海办事处的黄争先生和崔萌女士的支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于我们的能力和水平所限,书中定有疏漏、欠妥和错误之处,恳请读者多加指正。

作 者

2013年6月于清华园

名词术语

- ADC: Analog to Digital Converter 模数转换器
- AES: Advanced Encryption Standard 高级加密标准
- AHB-Lite: Advanced High-Performance Bus-Lite 精简高级高性能总线
- APB: Advanced Peripheral Bus 高级外设总线
- ARM: Advanced RISC Machine 高级精简指令集计算机机器
- BDR: Baud-Rate Divisor 波特率除数
- CAN: Controller Area Network 控制器局域网
- CCP: Capture/Compare/PWM 捕获/比较/脉冲宽度调制
- CCS: Code Composer Studio 代码集成开发环境
- CISC: Complex Instruction Set Computer 复杂指令集计算机
- CRC: Cyclic Redundancy Check 循环冗余校验
- DAC: Digital to Analog Converter 数模转换器
- DSP: Digital Signal Processor 数字信号处理器
- DWT: Data Watchpoint and Trace 数据观察点和跟踪
- ETM: Embedded Trace Macrocell 嵌入式跟踪宏单元
- FIFO: First In First Out 先进先出
- FPB: Flash Patch and Breakpoint Flash 修补和断点
- FPU: Floating-Point Unit 浮点单元
- GPIO: General Purpose Input Output 通用输入输出
- GPTM: General Purpose Timer Module 通用定时器模块
- GSM/GPRS: Global System of Mobile communication / General Packet Radio Service
全球移动通信系统/通用分组无线业务
- Jazelle: Java Bytecode Execution Java 字节码执行
- I²C: Inter-Integrated Circuit 内部集成电路
- ICDI: In-Circuit Debug Interface 在线调试接口
- IrDA: Infrared Data Association 红外数据协会
- ISR: Interrupt Service Routine 中断服务程序
- ITM: Instrumentation Trace Macrocell 仪表跟踪宏单元
- LGPL: Lesser General Public License 宽通用公共许可证
- LIN: Local Interconnect Network 本地互连网络
- MAC: Multiply-with-Accumulate 乘累加
- MCU: Microcontroller Unit 微控制器单元

MMU: Memory Management Unit 存储器管理单元

MPU: Memory Protection Unit 存储器保护单元

MSP: Main Stack Pointer 主堆栈指针

NMI: Non Maskable Interrupt 非屏蔽中断

NVIC: Nested Vectored Interrupt Controller 嵌套向量中断控制器

OLED: Organic Light-Emitting Diode 有机发光二极管

OTG: On-The-Go 正在进行中。USB OTG 是 USB 的一个补充标准,主要应用于各种不同设备的连接和数据交换

PMSA: Protected Memory System Architecture 保护存储系统架构

PPB: Private Peripheral Bus 私有外设总线

PSP: Process Stack Pointer 处理堆栈指针

PWM: Pulse Width Modulation 脉冲宽度调制

QEI: Quadrature Encoder Interface 正交编码器接口

RISC: Reduced Instruction Set Computer 精简指令集计算机

RTC: Real-Time Clock 实时时钟

RTOS: Real Time Operating System 实时操作系统

SCB: System Control Block 系统控制模块

SCS: System Control Space 系统控制空间

SIMD: Single Instruction Multiple Data 单指令多数据

SoC: System-on-Chip 片上系统

SSI: Synchronous Serial Interface 同步串行接口

SW-DP: Serial Wire Debug Port 串行线调试端口

SWJ-DP: Serial Wire JTAG Debug Port 串行线 JTAG 调试端口

SWO: Single Wire Output 单线输出

TPA: Trace Port Analyzer 跟踪端口分析仪

TPIU: Trace Point Interface Unit 跟踪点接口单元

μ DMA: Micro Direct Memory Access 微型直接内存访问

UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter 通用异步接收器/发送器

USB: Universal Serial BUS 通用串行总线

VMSA: Virtual Memory System Architecture 虚拟内存系统架构

WDT: Watchdog Timer 看门狗定时器

目 录

第 1 章 ARM Cortex-M4F 微处理器	1
1.1 ARM 体系结构及微处理器	1
1.1.1 ARM 的商业模式	1
1.1.2 ARM 体系结构	1
1.1.3 ARM 微处理器	3
1.2 ARM Cortex-M4F 微处理器	4
1.2.1 ARM Cortex-M4F 微处理器特点	4
1.2.2 Cortex-M4F 微处理器结构	5
1.2.3 Cortex-M4F 微处理器的编程模型	8
1.2.4 Cortex-M4F 内核寄存器	8
1.2.5 Cortex-M4F 存储器映射	9
1.2.6 Cortex-M4F 指令集	10
1.2.7 Cortex-M4F 的异常处理	11
第 2 章 TM4C123 微处理器简介	14
2.1 TM4C123 微处理器特点	14
2.2 TM4C123 微处理器结构	14
2.3 TM4C123 微处理器选型	15
2.4 TM4C123 系列微处理器的应用领域	16
2.5 开发工具与技术支持	16
2.6 开发方法	16
第 3 章 TM4C123GH6PGE 微处理器简介	18
3.1 TM4C123GH6PGE 微处理器简介	18
3.1.1 TM4C123GH6PGE 微处理器的电气特性与封装	18
3.1.2 TM4C123GH6PGE 微处理器的内部结构特点	18
3.2 TM4C123GH6PGE 微处理器的结构	20
3.3 TM4C123GH6PGE 微处理器的内部存储器及映射	22
3.3.1 存储器映射	22
3.3.2 内部存储器	23

第 4 章	TM4C123GH6PGE 的系统控制	28
4.1	系统控制功能概述	28
4.2	器件标识信息	28
4.3	复位控制	28
4.3.1	上电复位 POR	29
4.3.2	外部复位引脚 $\overline{\text{RST}}$ 低电平复位	29
4.3.3	内部掉电复位	29
4.3.4	软件复位	29
4.3.5	看门狗定时器复位	29
4.3.6	MOSC 失效复位	30
4.4	电源控制	30
4.5	时钟控制	30
4.6	NMI 控制	31
4.7	工作模式控制	31
第 5 章	TM4C123GH6PGE 的系统外设	32
5.1	通用输入输出端口 GPIO	32
5.1.1	功能与特点	32
5.1.2	模拟与数字功能	33
5.1.3	数据控制	34
5.1.4	中断控制	35
5.1.5	其他控制	36
5.1.6	初始化和配置	37
5.2	通用定时器 GPTM	39
5.2.1	功能与特点	39
5.2.2	内部结构	39
5.2.3	运行模式	40
5.2.4	中断控制	43
5.2.5	其他控制	44
5.2.6	初始化和配置	44
5.3	看门狗定时器 WDT	46
5.3.1	功能与特点	46
5.3.2	内部结构	46
5.3.3	工作流程	47
5.3.4	中断控制	47
5.3.5	初始化和配置	47
5.4	微型直接存储器访问 μ DMA	48
5.4.1	功能与特点	48

5.4.2	内部结构	48
5.4.3	数据传输过程	50
5.4.4	中断控制	53
5.4.5	初始化及配置	53
第 6 章	TM4C123GH6PGE 的模拟外设	55
6.1	模拟比较器	55
6.1.1	功能与特点	55
6.1.2	内部结构	55
6.1.3	比较方式	56
6.1.4	内部参考电压生成装置	56
6.1.5	中断和 ADC 触发控制	56
6.1.6	初始化和配置	57
6.2	模拟数字转换器 ADC	57
6.2.1	功能与特点	57
6.2.2	内部结构	58
6.2.3	采样过程控制	58
6.2.4	中断控制	59
6.2.5	其他控制	59
6.2.6	初始化和配置	60
第 7 章	TM4C123GH6PGE 的串行通信外设	61
7.1	UART	61
7.1.1	功能与特点	61
7.1.2	内部结构	62
7.1.3	数据帧	62
7.1.4	数据收发	63
7.1.5	中断控制	65
7.1.6	其他控制	65
7.1.7	初始化和配置	66
7.2	SSI	66
7.2.1	功能与特点	66
7.2.2	内部结构	67
7.2.3	数据帧与数据收发	67
7.2.4	位速率的配置及 FIFO 操作	68
7.2.5	中断控制	69
7.2.6	初始化和配置	69
7.3	I ² C	71

7.3.1	功能与特点	71
7.3.2	内部结构	72
7.3.3	数据帧	73
7.3.4	数据收发	74
7.3.5	传输速率控制	79
7.3.6	中断控制	79
7.3.7	其他控制	80
7.3.8	初始化和配置	80
7.4	CAN	81
7.4.1	功能与特点	81
7.4.2	内部结构	82
7.4.3	数据帧	82
7.4.4	数据收发	83
7.4.5	位速率的控制	85
7.4.6	中断控制	85
7.4.7	回环模式(Loopback)控制	86
7.4.8	初始化和配置	86
7.5	USB	86
7.5.1	功能与特点	86
7.5.2	内部结构	87
7.5.3	端点	88
7.5.4	运行模式	88
7.5.5	USB的 μ DMA传输	91
7.5.6	初始化和配置	92
第8章	TM4C123GH6PGE的运动控制外设	93
8.1	PWM	93
8.1.1	功能与特点	93
8.1.2	内部结构	94
8.1.3	PWM信号的产生	95
8.1.4	中断和故障状态	98
8.1.5	初始化和配置	98
8.2	QEI	99
8.2.1	功能与特点	99
8.2.2	内部结构	99
8.2.3	工作过程	100
8.2.4	中断控制	101

8.2.5 初始化和配置	102
第 9 章 TM4C123 的开发环境	103
9.1 集成开发环境 CCS	103
9.1.1 CCS 功能及特点	103
9.1.2 CCSv5 的安装	104
9.1.3 启动 CCSv5	107
9.1.4 新建 CCS 工程	108
9.1.5 调试 CCS 工程	111
9.1.6 CCS 编程简介	114
9.2 TivaWare 软件	115
9.2.1 TivaWare 功能及特点	115
9.2.2 TivaWare 主要模块介绍	115
9.2.3 TivaWare 的安装	118
9.2.4 TivaWare 工程样例的使用	119
9.2.5 TivaWare 函数库调用说明	124
9.2.6 TivaWare 样例程序分析	124
9.2.7 TivaWare 语句解析	127
第 10 章 TM4C123 开发套件	129
10.1 TM4C123G 实验套件	129
10.1.1 评估板简介	129
10.1.2 扩展实验板介绍	135
10.2 TM4C123GXL 实验套件	140
10.2.1 TM4C123GXL LaunchPad	140
10.2.2 BoosterPack 实验模块	143
第 11 章 TM4C123 实验指导	145
11.1 基本实验	145
11.1.1 LED	145
11.1.2 按键	145
11.1.3 模拟比较器	146
11.1.4 模数转换器 ADC	146
11.1.5 PWM	146
11.1.6 UART	147
11.1.7 SSI 与 DAC	147
11.1.8 I ² C	148
11.1.9 CAN	148
11.1.10 USB device	149

11.2	提高实验	149
11.2.1	uC/OS II 实时操作系统移植	149
11.2.2	直流电机速率控制与测量	155
11.2.3	SD 卡文件操作及 WAV 音频播放	158
11.2.4	Wi-Fi 无线网络数据获取	163
11.2.5	数据采集与记录	167
11.3	综合实验	170
11.3.1	迷你车载冰箱温控系统	170
11.3.2	安防短信报警系统	172
11.3.3	语音存储回放系统	173
11.3.4	超声波测距	175
11.3.5	无线控制电机	175
附录 A	ARM Cortex-M4F 指令集——Thumb-2 指令集(按照指令字母顺序排列)	177
附录 B	Cortex-M4F 的 96 种中断	184
附录 C	TM4C123 系列微处理器各型号内部资源及封装	187
附录 D	TM4C123GH6PGE 微处理器的引脚(按引脚序号排列)	188
附录 E	TM4C123GH6PGE 微处理器的 GPIO 引脚及其对应的模拟和数字 可选功能	200
参考文献	203

第 1 章 ARM Cortex-M4F 微处理器

本章首先介绍 ARM 体系结构及其微处理器,在此基础上详细介绍 ARM Cortex-M4F 微处理器,包括其特点、结构、编程模型、内核寄存器、存储器映射、指令集和异常处理。

1.1 ARM 体系结构及微处理器

1.1.1 ARM 的商业模式

ARM(Advanced RISC Machine)公司自身并不制造处理器硬件,而是专注于设计微处理器,并将其设计授权给商业合作伙伴,使他们能够将其用于制作自己的片上系统芯片 SoC(System-on-Chip)。

为了保证 ARM 处理器具有互操作性和统一的编程模式,ARM 公司定义了其体系结构,授权制造商可以依据其制造自己的 ARM 处理器,同时也可以将该处理器用于其他的器件中。因此形成了 ARM 体系结构、ARM 处理器、ARM 器件的三级层次化的定义,ARM 公司提供体系结构定义文件,授权制造商则提供处理器或器件的定义文件。

1.1.2 ARM 体系结构

1. ARM 体系结构的特点

ARM 是高级 RISC(Reduced Instruction Set Computer)处理器,RISC 是指精简指令的计算机。所谓精简指令,是相对于普通复杂指令计算机 CISC(Complex Instruction Set Computer)而言,只保留基本的、使用频度较高的指令,使得指令结构比较简单。RISC 具有如下特点:

- (1) 大部分为单周期指令,效率高;
- (2) 具有多参数指令,例如一条 ARM 指令可以同时实现移位和算术运算,大大提高了效率;
- (3) 自动增减地址模式以优化循环;
- (4) 多达 32 个寄存器,算术和逻辑运算均采用寄存器处理,无须访问存储器,提高了效率;
- (5) ARM 的 RISC 结构使得其体系结构具有简单、易实现的特点,因而使得 ARM 处理器成本低、功耗低、集成度高、性能高。

2. ARM 体系结构版本

ARM 体系结构定义了编程模式、指令集、存储器模式、系统配置、意外事件处理等。随着设计技术的发展,ARM 体系结构不断更新,具有不同的版本。ARM 体系结构版本根据

ARM 指令集的不同分为 8 种: ARMv1 至 ARMv8,新版本通常向下兼容旧版本。同一版本在发展过程中如果添加了新指令或者去除了的一部分指令,则在版本号后面添加不同字母表示不同的版本变种,例如,ARMv4 加入 Thumb-1 指令集后就变为了 ARMv4T。在实际应用中,一些旧的版本失去了使用价值,如 ARMv1 至 ARMv3 的所有版本以及 ARMv4 和 ARMv5 的一部分变种版本。

ARMv7 之前的版本中,每一版本都采用了相同的架构,只是处理器有不同的实现选择。例如,处理器可能是基于存储器管理模块 MMU(Memory Management Unit)实现虚拟存储系统结构 VMSA (Virtual Memory System Architecture),或者是基于存储保护单元 MPU (Memory Protection Unit) 实现保护存储系统结构 PMSA (Protected Memory System Architecture)。而 ARMv7 则不同,它为不同的市场应用定义了不同的处理器架构,包括以下三种。

A: 定义了支持 VMSA 的多模式、高性能微处理器架构,支持 ARM 和 Thumb-2 的变种 ThumbEE 指令集。

R: 定义了支持 PMSA 的多模式实时微处理器架构,用于要求时间确定性和低中断延迟的系统,支持 ARM 和 Thumb-2 指令集。

M: 定义了低中断延迟的微处理器架构,可由高级编程语言直接访问中断处理器。实现了变种的 PMSA,具有不同的例外事件处理模式,只支持 Thumb-2 指令集。

3. 指令集

ARM 体系结构采用了两种指令集: ARM 指令集和 Thumb 指令集。Thumb 指令集是 ARM 指令集的一个子集,所不同的是,ARM 指令集采用 32 位指令,而 Thumb 指令集则采用 16 位,因此 Thumb 指令占用的存储空间小。但是,Thumb 指令的效率比 ARM 指令的低,实现同一功能有时只需要一条 ARM 指令,却需要多条 Thumb 指令。另外,Thumb 指令与 ARM 指令分别工作在各自的处理器状态下,它们之间的切换需要时间。

Thumb 指令集包括 Thumb-1 和 Thumb-2 两种版本,分别在 ARMv4T 和 ARMv5T 中开始采用。与 Thumb-1 指令集相比,Thumb-2 指令集的功能进行了扩展,除了原有的 16 位指令集,又扩充了 32 位指令集,与 ARM 指令集的功能基本相同了。采用 16 位和 32 位指令并存的 Thumb-2 指令集,就无须将处理器状态在 Thumb 和 ARM 之间来回切换了。因此,在基于 ARMv7-M 体系结构的 Cortex-M3F 和 Cortex-M4F 处理器中,仅使用了 Thumb-2 指令集,而没有采用 ARM 指令集,因而不需要在两种指令之间切换,提高了效率。

4. 存储模式

ARM 存储器采用单一的地址空间,范围为 2^{32} (4G) 字节 (8-bit),或者 2^{30} 字 (32-bit),或者 2^{31} 半字 (16-bit)。

存储器访问模式有如下特点:

- (1) 非对齐的内存访问;
- (2) 可限制访问指定的存储器空间;
- (3) 可将指令的虚拟地址映射为物理地址;
- (4) 可进行字和半字之间的转换;

- (5) 可选择防止无序的存储器访问；
- (6) 可以控制内存；
- (7) 多个处理器可同步访问共享存储器。

5. 调试

从 ARMv6 开始,ARM 体系结构对调试有了规定。有两种调试方式:

侵入式调试。允许修改处理器状态,此时处理器处于停止工作状态,主要用于运行控制调试;

非侵入式调试。在不修改处理器状态和不中断执行流程的情况下,允许观察数据和程序流程。

ARM 体系结构提供以下调试功能:

- (1) 指令集数据跟踪;
- (2) 程序计数器采样;
- (3) 性能观测。

1.1.3 ARM 微处理器

ARM 微处理器是根据相应的体系结构实现的微处理器,例如 Cortex-M4F 微处理器实现了 ARMv7-M 体系结构,而 Cortex-A9 微处理器则实现了具有多处理扩展的 ARMv7-A 体系结构。通常,同一体系结构具有多种处理器实现,例如 Cortex-M3F 和 Cortex-M4F 两种微处理器都采用了 ARMv7-M 体系结构,而 ARM7TDMI 和 ARM920T 都采用了 ARMv4T 体系结构。表 1-1 列举了目前常用的有效版本号以及对应的指令集和处理器。

表 1-1 ARM 体系结构常用的有效版本号以及对应的指令集和处理器

ARM 体系结构版本	指令集及特点	对应的处理器
ARMv4	只有 ARM 指令集	SA-110、SA-1110
ARMv4T	加入 Thumb-1 指令集	ARM7 系列: ARM7TDMI, ARM7TDMI-S, ARM7EJ-S, ARM720T; ARM9 系列: ARM920T, ARM922T, ARM940T; StrongARM 系列: SA-110, SA-1100, SA-1110
ARMv5T	开始采用 Thumb-2 指令集,提高了 ARM 指令集与 Thumb 指令集之间的交互; 增加了计算二进制从最高位开始连续出现的零的个数(count leading zeros)的 CLZ 指令和软件断点设置的 BKPT 指令	ARM10 系列: ARM1020T
ARMv5TE	提高了对数字信号处理运算的支持; 增加了预加载数据 PLD、双字数据加载和存储; LDRD/STRD 以及 64 位协处理器寄存器传输 MCRR 和 MRRC 等指令	ARM9E 系列: ARM9E-S, ARM966E-S; ARM10E 系列: ARM1020E, ARM1022E; XScale 系列: PXA255, PXA270, PXA271, PXA272, PXA300, PXA310, PXA320

续表

ARM 体系结构版本	指令集及特点	对应的处理器
ARMv5TEJ	支持 Jazelle (Java bytecode execution) 扩展,通过硬件加速 Java 代码的执行,可获得比基于软件 Java 虚拟机执行高得多的性能;增加了跳转到 Jazelle 状态的 BXJ 指令	ARM9E 系列: ARM9EJ-S,ARM926EJ-S; ARM10E 系列: ARM1026EJ-S
ARMv6	增加了许多新的指令,包括一套用于多媒体和数字信号处理的单指令多数据流 SIMD(Single Instruction Multiple Data)指令;修改了存储器模式,要求提供基于 VMSA 或 PMSA 的存储器管理,并增强了它们的功能;修改了调试结构等	ARM11 系列: ARM1136J(F)-S
ARMv6K	增加了多处理(multiprocessing)指令	ARM11 系列: ARM11MPCore
ARMv6T2	采用 TrustZone 技术,增加专属的安全核心实现安全扩展功能,方便安全应用开发	ARM11 系列: ARM1156T2(F)-S
ARMv7-A	采用 Thumb-2 指令集的变种 ThumbEE 指令集	Cortex-A8,Cortex-A9,Cortex-A15
ARMv7-R	采用 Thumb-2 指令集	Cortex-R4
ARMv7-M	采用 Thumb-2 指令集	Cortex-M0,Cortex-M1,Cortex-M3,Cortex-M4
ARMv8	首款支持 64 位指令集的 ARM 处理器架构	Cortex-A50 系列: Cortex-A53,Cortex-A57

1.2 ARM Cortex-M4F 微处理器

1.2.1 ARM Cortex-M4F 微处理器特点

ARM Cortex-M4F 微处理器,简称 Cortex-M4F 微处理器,是由 ARM 公司最新推出的 Cortex-M 系列 32 位处理器,基于 ARMv7-M 架构,用于满足简单高效的控制和信号处理功能混合的应用市场。Cortex-M4F 微处理器是面向微控制器应用而设计的低功耗 32 位嵌入式处理器,提供出色的计算性能和优越的系统中断响应能力,具有如下特点:

(1) 为满足封装管脚少、存储容量小、功耗低等要求,提供了一个高性能、低成本的内核;

(2) 采用混合 16 位/32 位的 Thumb-2 指令集,没有 ARM 指令集,避免了两种指令之间的切换开销;

(3) 通过硬件实现多种高效的信号处理功能,包括遵循 IEEE 754 协议的单精度浮点运算单元 FPU(Floating-Point Unit),单周期 16 位和 32 位乘法累加 MAC(Multiply-with-Accumulate)指令以及除法指令,16 位单指令多数据流 SIMD 向量运算单元,饱和运算指令等;

(4) 采用三级流水线的哈佛结构,地址与数据总线分离,提高了处理速度;