

Microchip公司大学计划用书

32位单片机 原理及应用

——基于PIC32MX1XX/2XX系列便携式实验开发板

刘和平 编著
谢辉 胡刚 周鹏



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

Microchip 公司大学计划用书

32 位单片机原理及应用

——基于 PIC32MX1XX/2XX 系列便携式实验开发板

刘和平 编著
谢 辉 胡 刚 周 鹏

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书介绍微芯公司推出的 32 位 PIC32MX 系列中 PIC32MX1XX/2XX 的原理及工程应用;介绍高效的 C 语言编程、训练初学者的系统调试能力;利用便携式实验开发板进行自主交互学习,利用网络的“学习云”中得到大量的用户程序例程、应用信息和单片机基础以及控制算法。本书将探索改革单片机课程的教学-实践的教学模式,创建基于“便携式实验室”和“云技术”的互联网学习系统的 4D 开放(人、时间、空间、互联网开放)交互式学习方式,实现广义的全开放实验室。

本书可作为单片机开发人员在岗自学的实用参考书,也可作为专科生、本科生和研究生教学的教材和课外学习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

32 位单片机原理及应用 : 基于 PIC32MX1XX/2XX 系列
便携式实验开发板 / 刘和平等编著. -- 北京 : 北京航空
航天大学出版社, 2014. 1

ISBN 978-7-5124-1415-0

I. ①3… II. ①刘… III. ①单片微型计算机 IV.
①TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 004555 号

版权所有,侵权必究。

32 位单片机原理及应用——基于 PIC32MX1XX/2XX 系列的便携式实验开发板

刘和平 编著

谢 辉 胡 刚 周 鹏

责任编辑 卫晓娜

*

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@gmail.com 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:19.25 字数:410 千字

2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-5124-1415-0 定价:45.00 元(含光盘 1 张)

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

单片机技术发展非常迅速,从 30 多年前的 51 系列开始已经不知发展了多少代了,显然,采用 51 系列的教学体系已经不能满足技术发展和工程技术的需要。目前,32 位单片机的价格已经与 8 位单片机接近,其中许多新技术的采用使得性能又得到了极大的提高。因此,32 位单片机将占据大部分单片机市场,逐步淘汰 8 位、16 位单片机是必然趋势。32 位单片机由于其低廉的价格和高性能必将作为主流芯片得到大力推广和广泛应用。

单片机作为一种智能化的载体和应用工具,掌握单片机的开发应用是从事相关工作者的必备条件。学习 32 位单片机原理及应用重点是各种寄存器的理解和设置,掌握了使用 C 语言设置寄存器就基本具备了应用 32 位单片机的能力。对这些寄存器的设置,即各种功能模块和外设模块的初始化有许多的样例程序可以参考或使用集成开发环境自动生成。因此,单片机的应用技术越来越简单,越来越好用,教学方法更新和模式也与过去的单片机的教学方式完全不同,更多的精力将放在各种应用系统的控制算法和系统调试。

本书介绍微芯公司推出的 32 位 PIC32MX 系列中 PIC32MX1XX/2XX 的原理及工程应用,包括 PIC32 系列的内核功能、总线、协处理器、中断、外设等硬件结构基础;介绍高效的 C 语言编程、训练初学者的系统调试能力;利用便携式实验开发板进行自主交互学习,提升初学者从互联网上获取知识的途径和交互能力,从而在网络的“学习云”中将得到大量的用户程序例程、应用信息和单片机基础以及控制算法。本书将探索改革单片机课程的教学-实践的教学模式,创建基于“便携式实验室”和“学习云”的互联网学习系统的 4D 开放(人、时间、空间、互联网开放)交互式学习方式,实现广义的全开放实验室。

本书在介绍单片机原理的基础上给出了相关应用例子的电路原理图和源程序清单,其他更多的资料均放在“学习云”上,包括应用实例和工程范例、大量的软件积木块(软件子例程)和硬件积木块(硬件单元电路),以方便初学者学习和搭建实现各种创意,达到低成本学习的目的。本书上的应用示例均在便携式实验开发板调试通过。本书的目的和重点在于让初学者更快捷、更方便、更有效、低成本地掌握单片机开发过程和提高工程开发能力,因此,本书力求通俗易懂、简单实用、精炼简短。

前 言

“32 位单片机原理及应用”是一门理论与工程实际紧密联系的课程,具有很强的工程性、实践性、应用性和综合性,本书可作为单片机开发人员在岗自学的实用参考书,也可作为专科生、本科生和研究生教学的选用教材和课外学习参考书。

本书的成书过程中得到了重庆大学电气工程学院的余传祥、邓力、郑群英、刘翔宇、江渝老师的大力帮助和支持,在此对老师们表示衷心的感谢。成书过程中还得到了重庆大学—美国微芯公司单片机实验室研究生肖英、薛鹏飞、周驰、杨依路、李金龙、汤梦阳、周金飞等同学的帮助,他们为本书做了大量的文字工作,在此一并表示感谢。重庆百转电动汽车电控系统有限责任公司的董海成、符光策、曾凡晴、谢为贵等几位工程师为本书的出版提供制作了便携式实验开发板产品、外设模块样例程序、出厂测试程序等,保证了便携式实验开发板的质量和批量生产能力,在此再一次表示十分的感谢。

在这里也要感谢美国微芯公司大学计划项目所提供的大力支持,因为他们提供了授权和在线调试器的软件代码以及大量的样片。

本书的成书过程中还得到了重庆市教委的大力支持,作为重庆市教委立项的两个重点教学改革项目的主要研究部分之一,使本书得到资金的支持和各个学校的认可,在此表示衷心的感谢。

限于作者的水平,书中难免存在不当之处,恳请读者批评指正。

刘和平

邮箱:engineer@cqu.edu.cn

2014 年 1 月于重庆大学电气工程学院

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 MCU 架构	1
1.2 指令流水线	4
1.3 CPU 架构	7
1.4 编程语言	12
1.5 CP0 寄存器	14
1.6 CPU 指令	16
第 2 章 振荡器	20
2.1 振荡器工作原理	20
2.2 中 断	30
2.3 节能模式下的振荡器操作	31
思考题	31
第 3 章 存储器构成	33
3.1 存储器布局	34
3.2 地址映射	36
3.3 总线矩阵	37
思考题	38
第 4 章 闪存程序存储器	40
4.1 运行时自编程 RTSP 工作原理	40
4.2 锁定特性	41
4.3 节能和调试模式下的操作	42
4.4 中 断	43

第 5 章	预取高速缓存模块	44
5.1	高速缓存配置	46
5.2	节能模式下的操作	49
第 6 章	直接存储器访问	50
6.1	DMA 工作原理	51
6.2	中 断	59
6.3	节能和调试模式下的操作	61
第 7 章	复位、看门狗定时器、上电延时定时器	62
7.1	复位工作原理	63
7.2	看门狗定时器和上电延时定时器	65
7.3	WDT 工作原理	66
7.4	中断和复位产生	67
7.5	调试和节能模式下的操作	68
	思考题	69
第 8 章	集成开发环境和便携式实验开发板介绍	70
8.1	开发支持	70
8.2	软件平台语言环境	71
8.3	芯片引脚引出插座网络标号及调试器接口图	72
8.4	电 源	73
8.5	便携式实验开发板原理图	74
第 9 章	中断控制器	76
9.1	中断工作原理	76
9.2	中断优先级	78
9.3	中断和寄存器集	79
9.4	中断处理	79
9.5	节能和调试模式下的操作	81
9.6	中断程序编程示例	81
	思考题	83
第 10 章	通用 I/O 端口与外设引脚选择	84
10.1	通用 I/O 端口控制寄存器	86

10.2	工作模式	89
10.3	中 断	91
10.4	节能和调试模式下的操作	92
10.5	外设引脚选择	92
10.6	开关量输入按键例程	98
10.7	开关量输出 LED 灯显示例程	105
	思考题	110
第 11 章	定时器	111
11.1	定时器工作模式	114
11.2	中 断	120
11.3	节能和调试模式下的定时器操作	121
11.4	使用定时器模块的外设	122
11.5	定时器定时应用例程	122
	思考题	127
第 12 章	输入捕捉	128
12.1	输入捕捉模式	129
12.2	捕捉缓冲区	131
12.3	输入捕捉中断	131
12.4	节能模式下的输入捕捉操作	132
	思考题	133
第 13 章	输出比较	134
13.1	工作原理	136
13.2	单比较匹配模式	136
13.3	双比较匹配模式	137
13.4	脉宽调制模式	140
13.5	中 断	141
13.6	节能和调试模式下的操作	142
13.7	PWM 输出方波的例程	143
13.8	由 PWM 输出构成 D/A 模拟量输出和将其采样的 A/D 例程	147
	思考题	151
第 14 章	串行外设接口	152
14.1	SPI 工作模式	153

14.2	音频协议接口模式	158
14.3	SPI 中断	161
14.4	节能和调试模式下 SPI 的操作	162
14.5	SPI 例程	163
第 15 章	I2C 总线接口	167
15.1	I2C 总线特性	167
15.2	总线协议	169
15.3	报文协议	170
15.4	I2C 使能操作	170
15.5	在单主机系统中作为主器件进行通信	172
15.6	在多主机系统中作为主器件进行通信	174
15.7	作为从器件进行通信	176
15.8	I2C 总线的连接注意事项	180
15.9	节能模式和调试模式下的 I2C 操作	181
	思考题	182
第 16 章	通用异步收发器	183
16.1	UART 波特率发生器	184
16.2	UART 配置	184
16.3	UART 发送器	185
16.6	UART 接收器	187
16.7	使用 UART 进行 9 位通信	189
16.8	UART 的其他特性	190
16.9	红外支持	192
16.10	节能和调试模式下的 UART 操作	194
16.11	RS-232 例程	195
	思考题	203
第 17 章	并行主端口	204
17.1	主模式	205
17.2	从模式	210
17.3	PMP 中断	213
17.4	节能和调试模式下的操作	214
	思考题	214

第 18 章 实时时钟和日历	215
18.1 工作模式	216
18.2 闹 钟	218
18.3 中 断	220
18.4 节能和调试模式下的 RTCC 操作	220
18.5 日历时钟电路与例程	221
思考题	224
第 19 章 10 位模数转换器	227
19.1 ADC 工作原理和转换序列	228
19.2 ADC 模块配置	229
19.3 其他 ADC 功能	234
19.4 中 断	236
19.5 休眠和空闲模式下的操作	236
19.6 设计技巧	237
19.7 A/D 例程	239
思考题	243
第 20 章 比较器	245
20.1 比较器工作原理	246
20.2 比较器中断	248
20.3 I/O 引脚控制	248
20.4 节能和调试模式下的操作	249
20.5 比较器参考电压(CVREF)	249
20.6 工作原理	250
20.7 节能和调试模式下工作	251
第 21 章 USB(OTG)	252
21.1 USB 工作原理	254
21.2 主机模式的操作	260
21.3 USB 中断	264
21.4 调试和节能模式下的操作	264
21.5 USB 电路连接图和编程示例	266

目 录

第 22 章 充电时间测量单元	271
22.1 CTMU 工作原理	272
22.2 CTMU 模块初始化	273
22.3 校准 CTMU 模块	274
22.4 使用 CTMU 测量电容	276
22.5 使用 CTMU 模块测量时间	277
22.6 使用 CTMU 测量湿度	277
22.7 使用 CTMU 测量片上温度	277
第 23 章 节能模式	279
23.1 节能模式下的操作	280
23.2 中 断	283
23.3 节能特性	284
思考题	287
第 24 章 硬件设计注意事项	288
24.1 振荡器设计	288
24.2 振荡器电路参数调节	289
24.3 电源引脚处理	291
24.4 主复位(MCLR)引脚的处理	292
24.5 外部振荡器引脚的处理	293
符号约定	295
参考文献	296

第 1 章

概 述

32 位单片机设计用于满足客户对于基于 MCU 应用的更多特性和性能的要求,具有音频和图形、USB 接口等功能,具有高达 128 KB 闪存和 32 KB SRAM,采用基于 MIPS 技术的 M4K 内核的复杂片上系统。PIC32MX 系列的所有 CPU 中都包含了高性能 32 位低功耗 RISC CPU 内核,可以使用 32 位、16 位模式,乃至混合模式进行编程;采用了增强型 MIPS32 Release2 指令集架构,使用通用开发工具。

MCU 架构可以分为:MCU 内核(CPU)、系统存储器、系统集成、外设等功能模块。MCU 的主要特性如下:

- 最高可达到 1.5 DMIPS/MHz 的性能;
- 可编程预取高速缓存存储器,以增强闪存中的执行效率;
- 16 位指令模式(MIPS16e),用于紧凑型代码,可使程序代码压缩多达 40%;
- 带有 63 个优先级的中断向量控制器;
- 可编程的用户模式和内核工作模式;
- 可在单周期内对外设寄存器执行位操作;
- 乘法/除法单元,最高指令速率为每个时钟一条 32×16 乘法指令;
- 高速 ICD 端口,具有基于硬件的非侵入式数据监视和用户数据流功能;
- EJTAG 调试端口,支持广泛的第三方调试、编程和测试工具;
- 指令控制的功耗管理模式;
- 5 级流水线指令执行;
- 内部代码保护,以帮助保护知识产权。

1.1 MCU 架构

MCU 包含了高性能中断控制器、DMA 控制器、USB 控制器、在线调试器、用于对外设进行高速数据访问的高性能总线矩阵以及保存数据、程序的片上数据 RAM 存储器。对于闪存,采用了独立的预取高速缓存和预取缓冲区,无需闪存访问延时,提供相当于 0 个等待状态的访问性能。

芯片中有两条内部总线,用于连接所有外设。主外设总线通过外设桥将大部分外设单元与总线矩阵 BMX 进行连接。此外,还有连接中断控制器、DMA 控制器、在

第1章 概述

线调试器和 USB 外设的高速外设桥。

MCU 上有两条独立的总线。一条总线负责为 CPU 取指令,另一条总线是装载和存储指令的数据路径。指令总线(或 I 侧总线)和数据总线(或 D 侧总线)连接到总线矩阵。总线矩阵是一个开关矩阵,支持在系统中同时进行多个访问。通过总线矩阵,不访问同一目标设备的多个不同总线主设备可以同时进行访问。多个不同主设备访问同一目标设备时,总线矩阵可以通过仲裁算法将这些访问串行。

由于 CPU 到总线矩阵有两条不同的数据路径,所以对于系统来说,CPU 实际上是两个不同的总线主设备。从闪存中运行代码时,对 SRAM 和内部外设的装载和存储操作将与对闪存的取指令操作并行进行。除了 CPU 之外,MCU 中还有 3 个其他总线主设备——DMA 控制器、在线调试器单元和 USB 控制器。

工作条件

- 2.3~3.6 V、-40~+105 °C、DC 至 40 MHz。

内核:40 MHz MIPS32 M4K

- MIPS16e 模式可使代码压缩最多 40%;
- 性能为 1.56 DMIPS/MHz (Dhrystone 2.1);
- 高效代码(C 语言和汇编语言)架构;
- 单周期(MAC) 32×16 和双周期 32×32 乘法。

时钟管理

- 精度为 0.9% 的内部振荡器;
- 可编程 PLL 和振荡器时钟源;
- 故障保护时钟监视器(Fail-Safe Clock Monitor ,FSCM);
- 独立的看门狗定时器;
- 快速唤醒和启动。

功耗管理

- 低功耗管理模式(休眠和空闲);
- 集成上电复位和欠压复位;
- 0.5 mA/MHz 动态电流(典型值);
- 20 A IPD 电流(典型值)。

音频接口特性

- 数据通信:I2S、LJ、RJ 和 DSP 模式;
- 控制接口:SPI 和 I2C;
- 主时钟:
 - 可生成小数时钟频率;
 - 可与 USB 时钟同步;
 - 可在运行时调整。

高级模拟特性

- ADC 模块：
 - 10 位,转换速度为 1.1 Msps,具有一个采样保持放大器;
 - 28 引脚器件上最多有 10 个模拟输入,44 引脚器件上最多有 13 个模拟输入;
- 灵活独立的 ADC 触发源;
- 充电时间测量单元(Charge Time Measurement Unit,CTMU):
 - 支持 mTouch 电容触摸传感;
 - 提供高分辨率(1 ns)的时间测量;
 - 片上温度测量功能;
- 比较器:
 - 多达 3 个模拟比较器模块;
 - 具有 32 个电压点的可编程参考电压。

定时器/ 输出比较/ 输入捕捉

- 5 个通用定时器:
 - 5 个 16 位和最多两个 32 位定时器/ 计数器;
- 5 个输出比较(Output Compare, OC)模块;
- 5 个输入捕捉(Input Capture, IC)模块;
- 支持功能重映射的外设引脚选择(Peripheral Pin Select, PPS);
- 实时时钟和日历(Real-Time Clock and Calendar,RTCC)模块。

通信接口

- 符合 USB 2.0 规范的全速 OTG 控制器;
- 两个 UART 模块(10 Mbps);
 - 支持 LIN 2.0 协议和 IrDA;
- 两个 4 线 SPI 模块(20 Mbps);
- 两个支持 SMBus 的 I2C 模块(最高 1 Mbaud);
- 支持功能重映射的外设引脚选择(PPS);
- 并行主端口(Parallel Master Port, PMP)。

直接存储器访问(DMA)

- 4 通道具有自动数据大小检测功能的硬件 DMA;
- 两个专用于 USB 的附加通道;
- 可编程循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check,CRC)。

输入/ 输出

- 所有 I/O 引脚上的拉/ 灌电流均为 15 mA;
- 引脚可承受 5 V 电压;
- 可选择的漏极开路、上拉和下拉功能;

第1章 概述

- 所有 I/O 引脚均可外部中断。

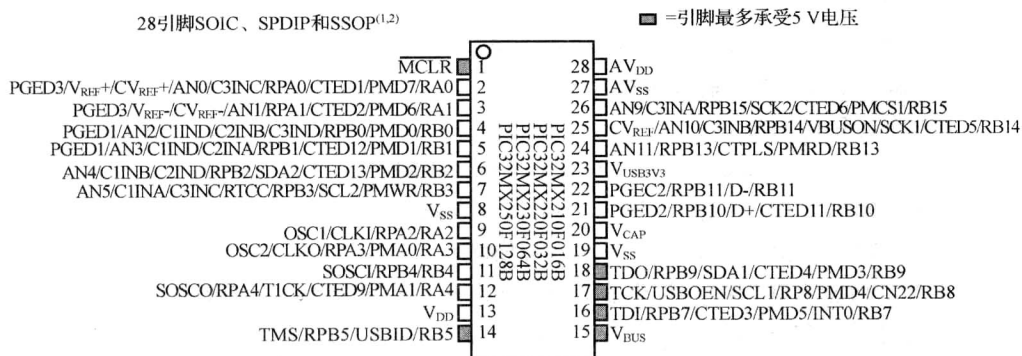
规格和 B 类支持

- 计划通过 AEC-Q100 REVG 标准(2 级, $-40 \sim 105^{\circ}\text{C}$);
- IEC 60730 B 类安全库。

调试器开发支持

- 在线编程;
- 4 线 MIPS 增强型 JTAG 接口;
- 不受限编程和 6 个复杂数据断点;
- 支持 IEEE 标准 1149.2 (JTAG)边界扫描。

图 1-1 给出了 PIC32MX1XX/2XX 系列的引脚图。系统集成包含了一组模块和功能,它们将 MCU 内核和外设模块紧密结合为单个工作单元。



注 1. RPN引脚具有“外设引脚选择”功能。

2. 每个I/O端口引脚(RAx-Rcx)都可用作电平变化中断引脚(CNAX-CNCx)

图 1-1 PIC32MX1XX/2XX 系列的引脚图之一

1.2 指令流水线

PIC32MX 系列内核中使用指令流水线实现了快速的单周期指令执行,流水线包含 5 级:指令级 I、执行级 E、存储级 M、对齐级 A 和回写级 W。由于器件内部架构的不同,单片机的流水线结构也不相同,其他架构的单片机有采用 2 级或 4 级以及更多级的流水线结构。

I 级——取指令级,在 I 级期间:

- 从指令 SRAM 取指令。
- MIPS16e 指令转换为类似于 MIPS32 的指令。

E 级——执行级,在 E 级期间:

- 从寄存器中取操作数。

- M级和A级的操作数旁路传递到此级。

● 对于寄存器-寄存器指令,算术逻辑单元(Arithmetic Logic Unit, ALU)开始执行算术或逻辑运算。

● 对于装载和存储指令,算术逻辑单元 ALU 会计算数据虚拟地址,MMU 执行虚拟地址到物理地址的固定转换。

● 算术逻辑单元 ALU 确定跳转条件是否为真,并计算跳转指令的虚拟跳转目标地址。

- 指令逻辑选择指令地址,并且 MMU 执行虚拟地址到物理地址的固定转换。

- 所有乘法/除法运算都在此级开始。

M级——从存储器取数据级,在M级期间:

- 算术或逻辑 ALU 运算完成。

- 对于装载和存储指令,将执行数据 SRAM 访问。

● 阵列中的 16×16 或 32×16 乘法运算完成,并在M级停留一个时钟,以在M级中完成进位传送加法。

● 32×32 乘法运算会在M级停留两个时钟,以在M级中完成阵列第二个周期和进位传送加法。

● 乘法和除法计算在乘法/除法单元 MDU 中进行。如果计算在整数处理单元 IU 将指令推移到M级之前完成,那么乘法/除法单元 MDU 将结果保存在临时寄存器中,直到整数处理单元 IU 将指令推移到A级。

A级——对齐级,在A级期间:

- 独立的对齐器将装载数据与其字边界对齐。

- 乘法运算产生可供回写的结果。实际的寄存器回写在W级执行。

● 从此级开始,装载数据或来自乘法/除法单元 MDU 的结果可旁路传递到E级。

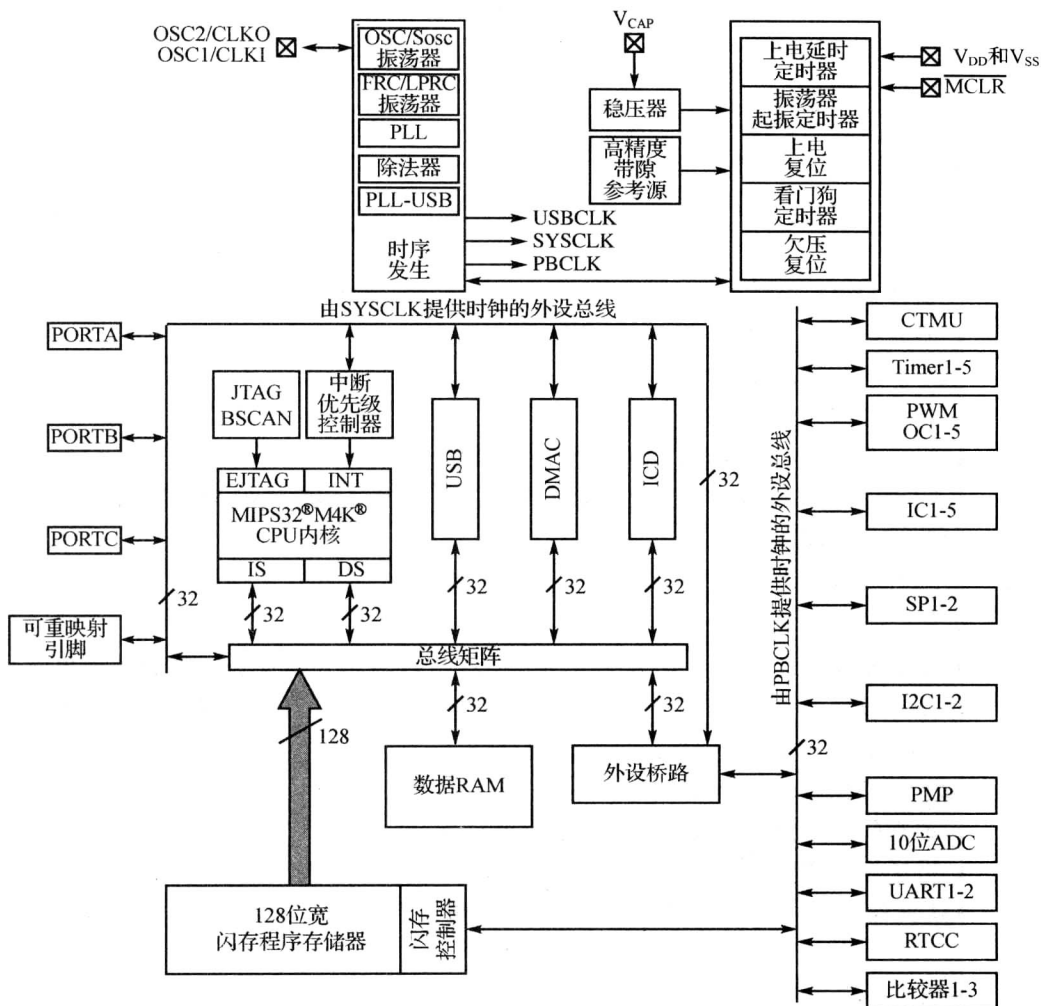
W级——回写级,在W级期间:

- 对于寄存器-寄存器指令或装载指令,结果回写到寄存器中。

M4K 内核实现了“旁路”机制,该机制将运算结果直接送到需要它的指令处,而无需先将结果写入寄存器,然后再进行回读。PIC32MX1XX/2XX 系列的内核和外设模块框图如图 1-2 所示。

影子寄存器集: PIC32MX 系列的 CPU 实现了通用寄存器 GPR 的一个副本,供高优先级中断使用。这个额外的寄存器存储区称为影子寄存器集。当发生高优先级中断时,CPU 可以无需用户程序干预而自动切换到影子寄存器集。这可以降低中断处理程序中的开销,并降低实际响应延时。

影子寄存器集由位于系统 CP0(协处理器 0)中的寄存器和位于 CPU 内核之外的中断控制器硬件控制。



注1: 有些特性不是在所有器件类型上都能实现。

图 1-2 PIC32MX1XX/2XX 系列的内核和外设模块框图

流水线互锁处理:当某个流水线级中的指令由于数据相依性或类似外部条件而无法前移时,流畅的流水线流程会中断。流水线中断完全在硬件中进行处理,这些相依性称为互锁。在每个周期,都会为所有执行中的指令检查互锁条件。互锁条件的一个示例就是一条指令依赖于前一条指令的结果。通常,MIPS CPU 支持两种类型的硬件互锁:

- 停顿 Stal:通过暂停整个流水线实现停顿。正在每个流水线级中执行的所有指令都会受到停顿的影响。
- 滑移 Slip:滑移使流水线中的一部分前移,而流水线的其他部分保持静态。