

# DSP原理及应用

人工智能与自动化学院  
自动控制系  
沈安文

[sawyi@hust.edu.cn](mailto:sawyi@hust.edu.cn)

课程QQ群：735186161



群名称: DSP\_23

群 号: 735186161

# 为什么要学习DSP?

微处理器：MCU，DSP，ARM

微处理器是控制系统实现中的重要工具

数学、电路、电子；自控原理；

微机原理、微处理器；自动控制系统；

微处理器的功能越来越强大

微处理器的应用越来越广泛

**作为自动化类的学生**，应该能够驾驭“高大上”的  
微处理器，如DSP、ARM

# 怎样学习DSP?

Theory ? Principle or User' s Manual ?

Principle指导我们:

读懂这本说明书 → 读懂这类说明书

会用这本说明书 → 会用这类说明书

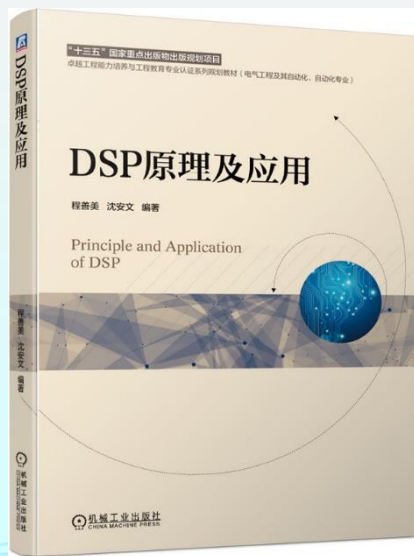
实践，在动手中学习

联想，在比较中学习

掌握(结构+中断+C语言+功能模块)

# 教材和参考书目

- ✓ 程善美, 沈安文. DSP原理及应用. 北京: 机械工业出版社, 2019
- ✓ 程善美等. DSP在电气传动系统中的应用. 北京: 机械工业出版社, 2010
- ✓ **TMS320F2802x+Piccolo系列DSC原理及应用指南**
- ✓ **TI官网: [www.ti.com.cn](http://www.ti.com.cn)**



# 学时安排 24+8

✓ 第1章	概述	2学时
✓ 第2章	系统结构	1学时
✓ 第3章	存储空间	1学时
✓ 第4章	系统设计入门	4学时
✓ 第5章	时钟与系统控制	3学时
✓ 第6章	中断与中断控制	4学时
✓ 第7章	通用输入输出口	1学时
✓ 第8章	捕获单元eCAP	2学时
✓ 第9章	互补型ePWM	3学时
✓ 第10章	模数转换单元 (ADC)	3学时
✓ 实验环节:		8学时
✓	Pocket实验室	
✓	二人一套实验装置, 单独实验	
✓	结合授课进行	

**成绩计算: 平时+实验 占30%, 考试占70% 考试形式为开卷**



## 授课团队



### 沈安文教授

华中科技大学人工智能与自动化学院教授

社会兼职

湖北省自动化学会理事长、中国自动化学会理事、湖北省自然科学学会工作研究会副理事长

中国自动化学会电气自动化专业委员会、中国电工技术学会电控装置委员会委员

《电机与控制应用》等杂志编委《电气自动化新技术》系列丛书编委，TIE、TPE、TEC等多个期刊审稿人

主要研究方向：交流电机驱动控制、电力电子与新能源技术、嵌入式控制、智能装备与机器人等。





## 授课团队

- 罗欣博士、副教授

主持和参与的科研项目包括高效无位置传感器永磁同步电机控制技术研究、高性能伺服驱动器研究、交流交流电机变频器研究等等。多项科研成果成功转化为生产力，形成产品并批量生产，带来极大的社会效益和经济效益。在国内外权威刊物发表论文10余篇，获发明和实用新型专利授权多项。**2022年获批国家自然科学基金面上项目。**

- 叶杰博士、副教授

主持和参与的科研项目包括直流电网阻抗特性与小信号稳定性分析、高压大容量柔性直流电网关键技术研究与示范。发表SCI学术论文多篇。同时是TIE、TPE等多个期刊审稿人。**2021年获批国家自然科学基金面上项目。**

- 唐其鹏博士、讲师

主持和参与的科研项目包括交流电气传动系统数字化控制技术、交-直流变换器、数字集成化控制技术、高速电机无位置传感器控制技术以及相电流重构技术等。2019年获批国家自然科学基金青年科学基金项目1项，发表SCI学术论文10余篇，获发明和实用新型专利若干项。**2022年获批国家自然科学基金面上项目。**

# 第一章 概述

1.1 DSP概述

1.2 DSP芯片

1.3 TMS320系列DSP

1.4 TMS320F28027



# 1.1 DSP概念

DSP有两个含义

- ① 是Digital Signal Processing的简称，是指数字信号处理技术，它不仅涉及许多学科，还广泛应用于多种领域。特别是在20世纪60年代，随着计算机和信息技术的迅猛发展，进一步推动了数字信号处理技术的理论和应用领域的发展
- ② 是Digital Signal Processor的简称，即数字信号处理器(也称DSP芯片)，它不仅具有可编程性，而且其实时运行速度远远超过通用的微处理器。它是一种适合于数字信号处理的高性能微处理器

数字信号处理系统一般是利用计算机或专用处理设备对信号进行滤波、采集、变换、存储和处理，得到需要的信号形式。

采用DSP芯片的信号处理系统的一般框图如图所示



**低通滤波** 是将连续信号 $X(t)$ 中的一些次要成分滤除，比如，滤去幅度较小的高频成分及一些杂散信号，以满足采样定理等数字信号预处理要求

**ADC** 一般系统中待处理的信号往往是模拟信号，那么在数字信号处理之前，首先需要将模拟信号经过模数转换器（ADC）转换为数字信号。对模拟信号的采样必须满足采样定理，即采样频率必须大于或等于模拟信号最大频率分量的2倍，这样才能由采样信号无失真地恢复原模拟信号

**DAC与平滑滤波** 数字信号经过处理后，要经过DAC转换为模拟信号，DAC输出是一个零阶保持器输出，即输出是台阶形的。所以一般DAC之后加一平滑低通滤波器，滤除多余的高频分量，对产生时间域模拟信号波形起平滑作用

**数字信号处理器（DSP）** 用于实时完成上述数字信号处理的微处理器

# 1.2 DSP芯片发展

## 1. DSP的发展

- 第一片DSP器件是1978年AMI公司推出的S2811
- 1979年Intel公司推出的Intel2920是第一片脱离了通用微处理器的商用DSP芯片
- 1980年日本的NEC公司推出的uPD7720是第一个具有硬件乘法器的DSP芯片
- 1982年美国**德州仪器公司** (**Texas Instrument**, 简称TI) 的TMS320系列DSP芯片问世

# TI DSP的发展

- 第一代DSP：TMS32010、TMS32011、TMS32C10/C14/C15/C16/C17等
- 第二代DSP：TMS32020、TMS320C25/C26/C28
- 第三代DSP：TMS32C30/C31/C32等
- 第四代DSP：TMS32C40/C44
- 第五代DSP TMS32C50/C51/C52/C53以及集多个DSP于一体的高性能DSP芯片TMS32C80/C82
- 第六代DSP：TMS320C64X/C67X和DSP控制器C28X等

- Motorola 公司 1986 年推出了 **定点** DSP 芯片 MC56001, 1990年推出了与IEEE浮点格式兼容的 **浮点** DSP芯片MC96002。Motorola的DSP芯片上设置了一个OnCE(On-Chip Emulation)功能模块, 用特定的电路和引脚使用户可以检查片内的寄存器、存储器及外设, 用单步、断点和跟踪等方式控制和调试程序, 目前在DSP市场仍有一定的影响
- 美国模拟器件公司(Analog Devices, 简称AD) 也相继推出了一系列具有自己特点的DSP芯片, 在DSP市场上也占有一定的份额
- 国产DSP代表: 中电科38所、进芯 (Advancechip)



## 2.当前DSP芯片的分类

DSP芯片型号多种多样，分类也有多种方法，但主要有以下两种：

- 按DSP芯片处理的数据格式来分，可以分为**定点DSP芯片**和**浮点DSP芯片**
- 按DSP芯片的用途来分，可分为**通用型DSP芯片**和**专用型的DSP芯片**

## 1.3 DSP芯片特征

- 为了适应快速数字信号处理运算的要求，DSP芯片普遍采用了**特殊的硬件和软件结构**，以提高其数字信号处理的运算速度
- DSP芯片的主要结构特征有:采用了**哈佛结构**、流水线技术、硬件乘法器和特殊DSP指令等

# 1.哈佛结构

- 哈佛结构是一种并行体系结构，主要特点是将程序和数据存储在不同的存储器空间，对程序和数据独立编址，独立访问。
- 而且在DSP中设置了数据和程序两套总线，使得取指令和执行能完全重叠运行，提高数据吞吐量

# 哈佛结构—改进

- 为了进一步提高速度和灵活性，TMS320系列产品中，在哈佛结构上作了改进：
- 一是允许程序存储在高速缓存中，提高指令读取速度；
- 二是允许数据存放在程序存储器中，并被算术运算指令直接使用，增强芯片的灵活性。
- 另外DSP中的双口RAM(DARAM)及独立读写总线使数据存取速度提高

## 2.流水线技术

DSP芯片广泛采用流水线技术，增强了处理器的处理能力。

TI公司的TMS320系列产品：

第一代TMS320处理器采用二级流水线操作；

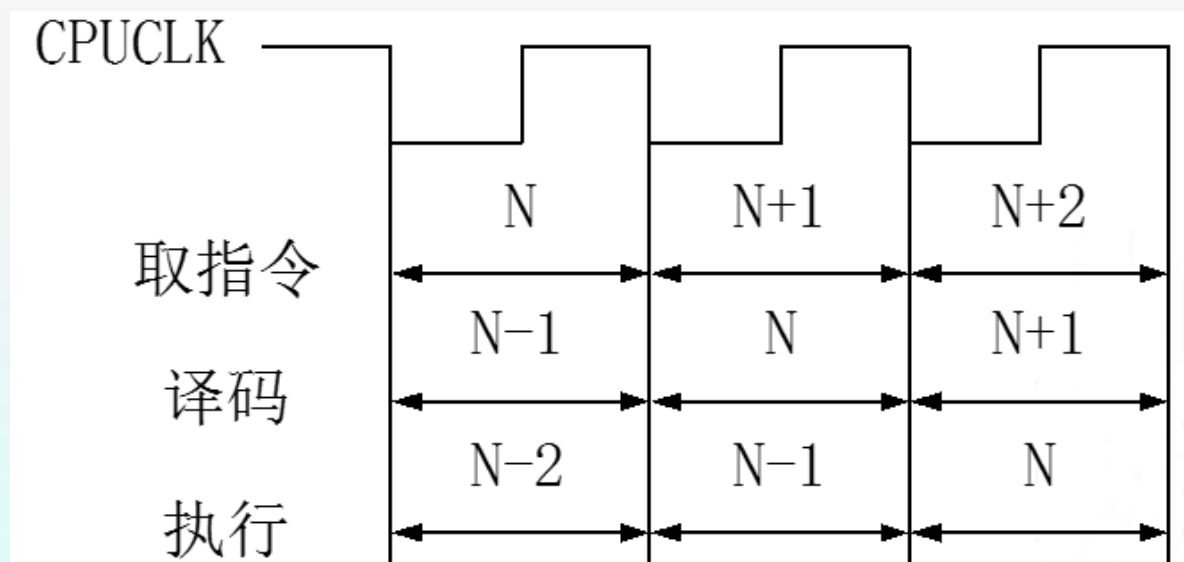
第二代产品采用三级流水线操作；

第三代DSP芯片采用四级流水线操作。

目前TMS320系列流水线深度为2~6级不等，也就是说，处理器在一个时钟周期可并行处理2~6条指令，每条指令处于流水线的不同阶段。

## 2.流水线技术

下图为三级流水线操作的例子。在三级流水线操作中，取指令、指令译码和执行可以独立地处理，这样DSP可以同时处理多条指令，只是每条指令处于不同处理阶段





## 2.流水线技术

下图为四级流水线操作的例子。在四级流水线操作中，取指令、指令译码、取操作数和执行可以独立地处理，这样DSP可以同时处理多条指令，只是每条指令处于不同处理阶段

			指令1	指令2	指令3	指令4	执行
		指令1	指令2	指令3	指令4	指令5	取操作数
	指令1	指令2	指令3	指令4	指令5	指令6	指令译码
指令1	指令2	指令3	指令4	指令5	指令6	指令7	取指令
T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	

### 3.硬件乘法器

在数字信号处理的许多算法中，需要做大量的乘法和加法。DSP芯片一般都有一个硬件乘法器，在TMS320系列中，一次乘累加最少可在一个时钟周期完成

### 4.特殊DSP指令

DSP芯片的另一个特点就是采用了特殊的寻址方式和指令。比如，TMS320系列的位反转寻址方式，LTD、MPY、RPTK等特殊指令。采用这些适合于数字信号处理的寻址方式和指令，进一步减少了数字信号处理的时间

## 1.4 DSP芯片发展趋势及应用

### 1.4.1.当前DSP芯片发展的主要特点

- **多** 型号越来越多，集成的片内外设越来越多
- **MCU化，ARM化**
- **快** DSP芯片频率越来越高，速度越来越快
- **好** 性能价格比越来越高
- **省** 功耗相对越来越低

## 1.4.2 DSP芯片的应用

1. **汽车**：自适应行驶控制、防滑自动控制、蜂窝电话、数字收音机、引擎控制、全球定位、导航、振动分析、语音命令
2. **消费类产品**：数字收音机/TV、教育类玩具、音乐合成器、动力工具、雷达检测器、固态应答器、传呼机
3. **控制**：磁盘驱动控制、引擎控制、激光打印机控制、电机控制、机器人控制、伺服控制

4. **通用场合**：自适应滤波、卷积、相关、数字滤波、快速傅立叶变换、希尔伯特变换、波形产生、加窗
5. **图形/图象**：三维旋转、动画/数字地图、同态处理、图象压缩/传输、图象增强、模式识别、机器眼、工作站
6. **工业**：数字化控制、电力线监控、安全检修
7. **仪器**：数字滤波、函数发生、模式匹配、锁相环、地震信号处理、谱分析、瞬态分析

8. **医学**：诊断设备、胎儿监护、助听器、病人监护、整形术、超声设备
9. **军事**：图象处理、导弹控制、导航、雷达信号处理、射频调制解调器、安全通讯、声纳信号处理
10. **电信**：1200~5600bps Modem、自适应均衡、ADPCM码变化器、基站、蜂窝电话、信道复用、数据加密等
11. **话音/语音**：说话人检验、语音增强身份、语音识别、语音合成、语音声码器技术、文本/语音转换、语音邮箱。



## 1.4.3 DSP芯片的选择

一般来说，选择DSP芯片时考虑如下诸多因素：

- DSP芯片的运算速度。运算速度是DSP芯片的一个最重要的性能指标，也是选择DSP芯片时所需要考虑的一个重要因素
- DSP芯片的硬件资源及性价比
- DSP芯片的开发工具是否易学易用
- 其他的因素，如封装的形式、质量标准、**生命周期**等
- 应用系统对功耗的要求

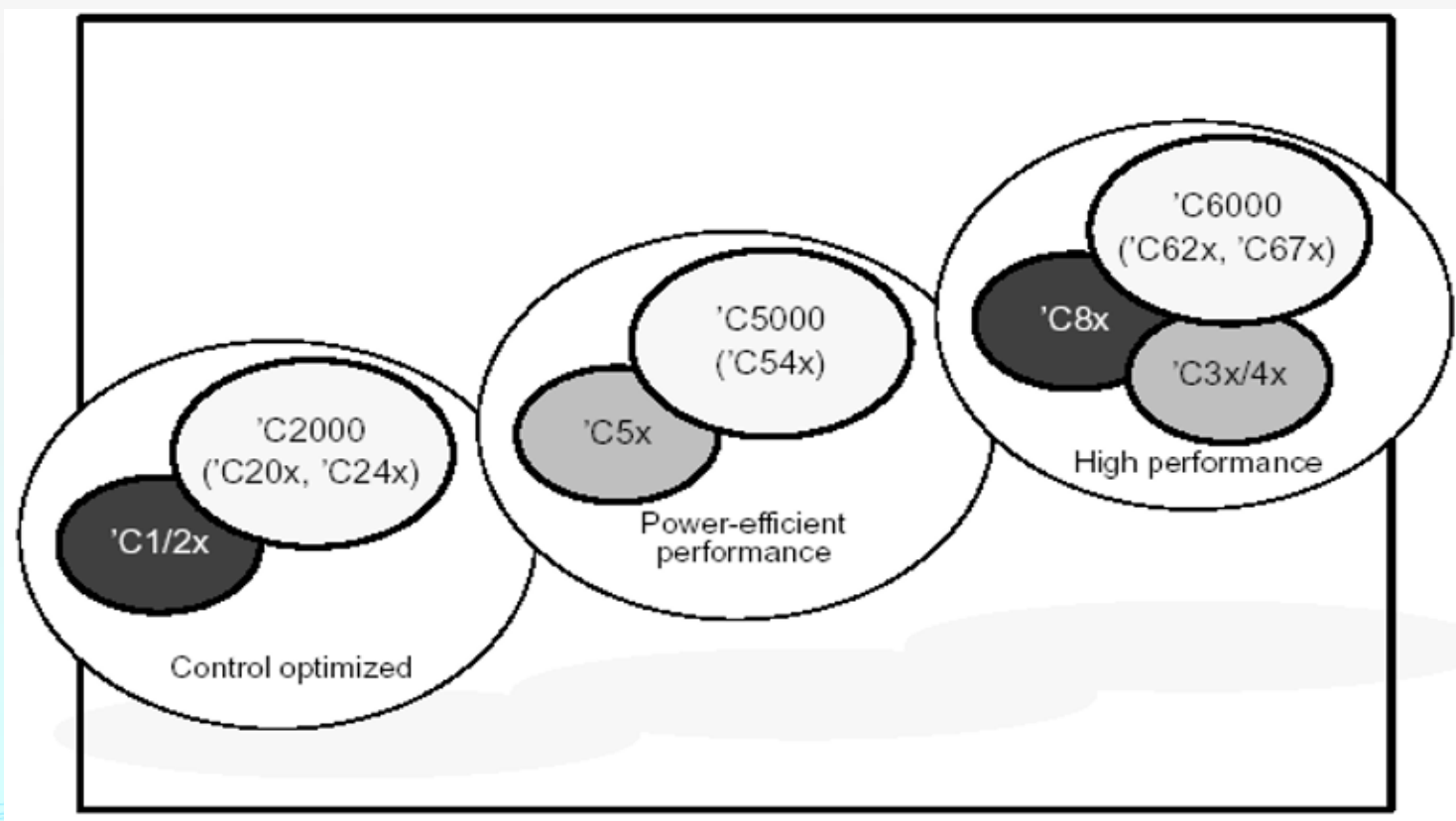
如果应用系系统对功耗的要求很高时，要考虑以下几个方面：

- 选择低功耗的DSP器件
- 合理设计软件降低功耗
- 合适的DSP运行速度
- 正确处理外围电路

# 1.5 TMS320系列DSP

## 1.5.1 TMS320系列概况

TMS320系列包括了定点、浮点和多处理器数字信号处理芯片，其体系结构适合于实时数字信号处理。TMS320主要DSP系列产品如图所示



# TI的DSP产品可以分为三种不同指令集的三大系列

- **TMS320C2000** 作为优化控制的最佳DSP，该系列提供了业界成本最低，应用最广的数字化控制解决方案，自然成为家电、空调系统、自动化系统、电机控制和电力电子控制系统的首选控制器件---→ **DSC or MCU**
- **TMS320C5000** 是最节能的DSP，16位定点，速度40~200MIPS。主要用途是有线和无线通讯、IP、便携式信息系统、寻呼机、助听器等
- **TMS320C6000** 最高性能的、最快的DSP，产品包括不同的性能级别，最高的可达1.1GHz。这样杰出的性能，使得在诸如有线/无线宽带网络、组合Modem、GPS导航、基站数字波束形成、医学图像处理、语音识别、3-D图形、ADSL Modem、网络系统、中心局交换机、数字音频广播设备等应用领域游刃有余

## TMS320系列DSP具有以下特点:

- 灵活的指令系统
- 灵活的操作性能
- 高速的运算能力
- 改进的并行结构
- 很高的性能价格比
- 符合IEEE1149的标准的JTAG标准测试接口

TMS320系列中的同一系列产品具有相同的CPU结构，只是片内存储器和（或）片内的外设配置不同，派生的器件集成了新的片内存储器和（或）外设，以满足不同应用场所的不同的需要。将存储器和外设集成到DSP芯片内，降低了系统的成本，节省了电路板空间，提高了系统的可靠性符合IEEE1149的标准的JTAG标准测试接口

## 1.5.3 28x系列DSP概述

28x系列也称C2000系列

具有32位的内核以及更加丰富的外设，所具有的优异的运算与控制性能。

目前C28x DSP控制器系列有C28x定点系列、Piccolo精简系列以及Delfino浮点系列。

**专注于控制：DSC or MCU**



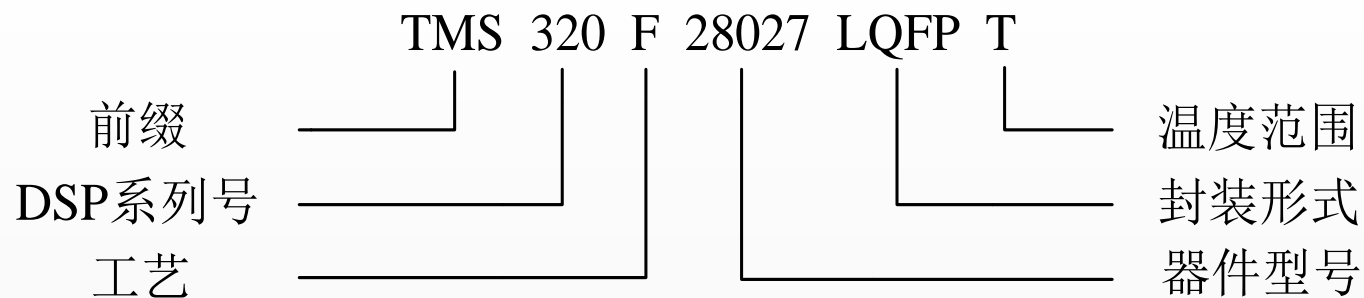


图1.5 C28x系列DSP产品命名方法

内容	说明
器件系列	TMS320=TMS320系列合格器件 TMX320=TMS320系列实验器件 TMP320=TMS320系列原型器件
工艺	F=Flash C=ROM
器件型号	2802x/2803x/2805x/2806x/28004x/2807x = Piccolo MCU 2833x/2834x/2837xS/2837xD = Delfino MCU 280x/281x/2823x = 定点 MCU
封装形式	LQFP、TSSOP、ZJZ、PTP、GHH、PBK
温度范围	A = -40°C 至 85°C T = -40°C 至 105°C S = -40°C 至 125°C Q = -40°C 至 125°C (AEC-Q100)

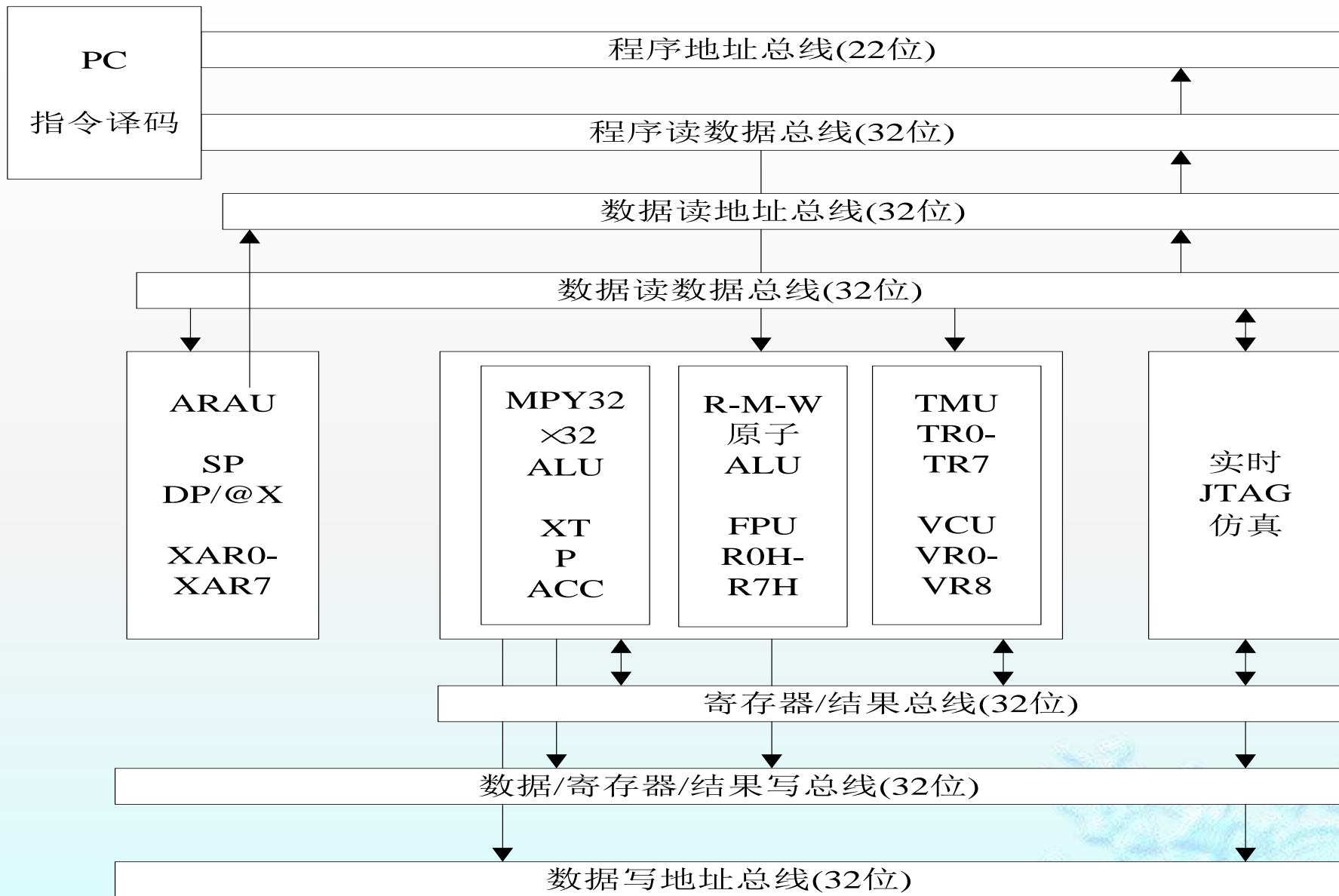


图1.6 C28x CPU的基本结构

随着现代电机系统、电力电子、智能电网技术、机器人等应用的不断复杂化，CPU需要不断提高同时处理大量任务的能力。

TMS320C28x系列DSP通过片上集成硬件加速器来解决这些挑战，极大提高了单片DSP在许多实时应用中的性能。

C28x系列DSP集成的加速器主要有：

**浮点单元 (FPU)**

**控制率加速器 (CLA)**

三角函数单元 (TMU)

Viterbi、复杂数学及**CRC**单元 (VCU)

# TMS320C2000系列产品

## C2000 微控制器产品

### C2000 Delfino MCU



高性能闭环应用。

### C2000 Piccolo MCU



广泛的闭环应用。

### InstaSPIN MCU



片上高级电机控制技术。

### C2000 F28x MCU



可靠的工业闭环控制。

**专注于控制：DSC or MCU**

# C28x 32 位实时控制 MCU

- C28x Piccolo MCU
- C28x Delfino 浮点 MCU
- C28x + ARM Cortex-M3 MCU
- C28x 定点 MCU

TMS320C28X是目前为止用于数字控制领域性能最好的DSP芯片，最高速度可达300MIPS，可在单个指令周期完成32\*32位的乘累加计算，具有增强的电机控制外设、高性能的模/数转换能力和改进的通讯接口，具有8GB的线性地址空间，采用低电压供电（3.3V外设/1.8V核），与TMS320C24X源代码兼容

# C28x 32 位实时控制 MCU

## Piccolo 产品系列



TMS320F2807x  
MCU



新品!  
TMS320F28004x  
MCU



TMS320F2806x  
MCU



TMS320F2805x  
MCU



TMS320F2803x  
MCU



TMS320F2802x  
MCU

处理						
内核	CPU + 协处理器	CPU + 协处理器	CPU + 协处理器	CPU + 协处理器	CPU + 协处理器	CPU
内核频率	120 - 240 MIPS	100 - 200 MIPS	90 - 180 MIPS	60 - 120 MIPS	60 - 120 MIPS	高达 60 MIPS
存储器						
闪存	高达 512KB	高达 256KB	高达 256KB	高达 128KB	高达 128KB	高达 64KB
SRAM	100KB	100KB	100KB	20KB	20KB	12KB
封装						
引脚数	100-176	56-100	80-100	80	56-80	38-48
最低售价:						
	10.06 美元 (1ku)	4.85 美元 (1ku)	4.85 美元 (1ku)	3.25 美元 (1ku)	3.05 美元 (1ku)	1.99 美元 (1ku)

# C28x 32 位实时控制 MCU

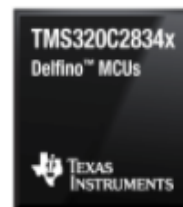
## Delfino 产品系列



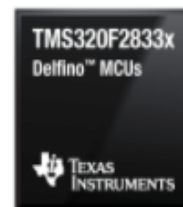
TMS320F2837xD MCU



TMS320F2837xS MCU



TMS320C2834x MCU



TMS320F2833x MCU

处理				
内核	800MIPS	400MIPS	200 - 300 MIPS	100 - 150 MIPS
内核频率	2 个 CPU + 2 个协处理器	CPU + 协处理器	CPU	CPU
存储器				
闪存	高达 1MB 闪存	高达 1MB 闪存		高达 512KB 闪存
SRAM	高达 204KB SRAM	高达 164KB SRAM	高达 516KB SRAM	高达 68KB SRAM
封装				
引脚数	100-337	100-337	179-256	176-179
最低售价:				
	14.33 美元 (1ku)	11.32 美元 (1ku)	8.95 美元 (1ku)	13.20 美元 (1ku)



## 1.6 F28027的封装及引脚说明

TMS320F2802x/3x Piccolo系列DSP微控制器是TI公司最新的一款基于TMS320C28xTM内核的定点处理器。

它通过整合DSP和MCU功能，弥补了传统意义上的DSP与MCU的不足，通过DSP与MCU的优势互补，实现了计算与控制的完美结合。

所以我们又可把 Piccolo DSP 微控制器称为 **DSC(Digital Signal Controller)**，即数字信号控制器

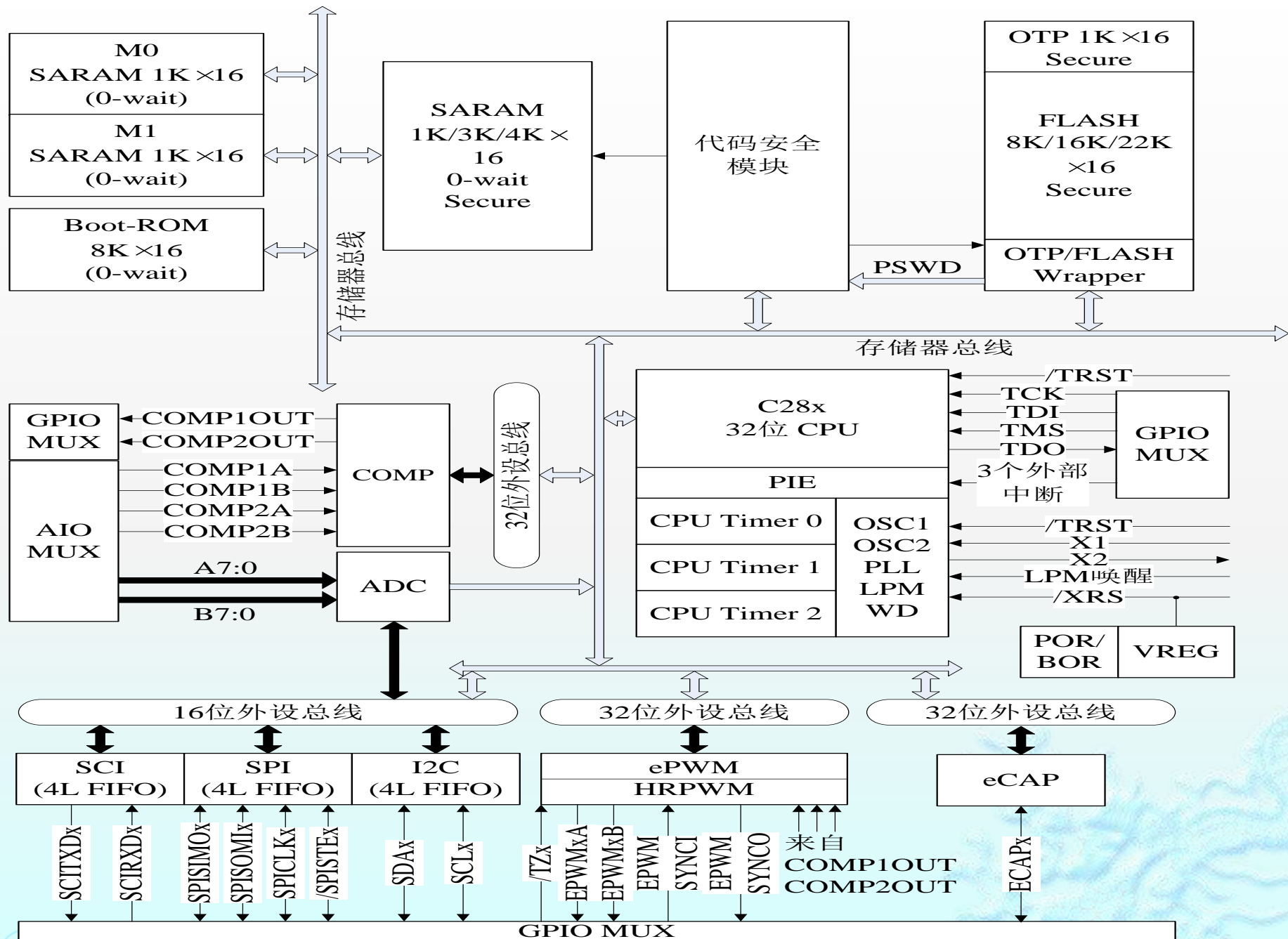


图1.8 F2802x的结构框图

代码加密

Flash

RAM

Boot  
ROM

存储器总线

中断管理

C28x™ 32-Bit DSC  
CPU

Osc1

Osc2

带上电和掉电复  
位的电压调节器

Piccolo

PWM

Capture

Comparators

ADC

GPIO

SPI

SCI

I<sup>2</sup>C

外设总线

## 1.6.1 F2802x的特征

**F2802x系列处理器的特性如下：**

### **1. 高效率32位CPU(TMS320C28x™内核)**

- 具有40MHz/60MHz主频
- 单周期执行一次 $32 \times 32$ 或两次 $16 \times 16$ 乘加(MAC)
- 改进型哈佛总线结构
- **原子操作？**
- 快速中断响应与处理
- 统一的存储器设计模式
- 高效率C/C++代码

## **2. 仅需少量外围器件，将系统成本减少到最低**

- **内置1.8V电压调整器，实现3.3V单电源供电**
- **内部集成上电复位和掉电复位功能**
- **PQFP-48小型封装**
- **功耗低**

## **3. 时钟与定时器**

- **2个内部集成振荡器，精度高达1%**
- **支持动态PLL调节，进一步降低功耗**
- **时钟丢失检测电路:若当前时钟异常则自动启用备用时钟，提高可靠性**
- **32位内部看门狗定时器**
- **3个32位CPU定时器，带16位预分频器**

4. 外设中断扩展(PIE)模块支持所有的外设中断
5. 丰富的片内存储器：FLASH、SARAM、OTP、BOOTROM
6. 128位安全加密：免除代码被破解的担忧
7. 先进的仿真特性
  - 分析和断点功能
  - 硬件实时调试
8. 具有22个GPIO(数字)和6个AIO(模拟)
  - GPIO带输入滤波功能
  - 支持5种IO操作：读/写/置位/清零/反转



## 9. 串行端口外设

- 串行通信接口(**SCI**)模块，兼容传统的**UART**
- 串行外围接口(**SPI**)模块
- 互联**IC**总线(**I2C**)，支持**10**位扩展地址模式

## 10. 增强型控制外设

- 增强型脉宽调制器(**epwm**)，精度高达**150ps**
- 高精度**PWM(HRPWM)**
- 增强型捕获功能(**ecap**)

## 11. 模拟功能

- **2**个模拟比较器(**COMP**)
- **2**组多通道**12**位高速**ADC**，支持内部和外部基准源



# 1. 6. 2 F28027的封装

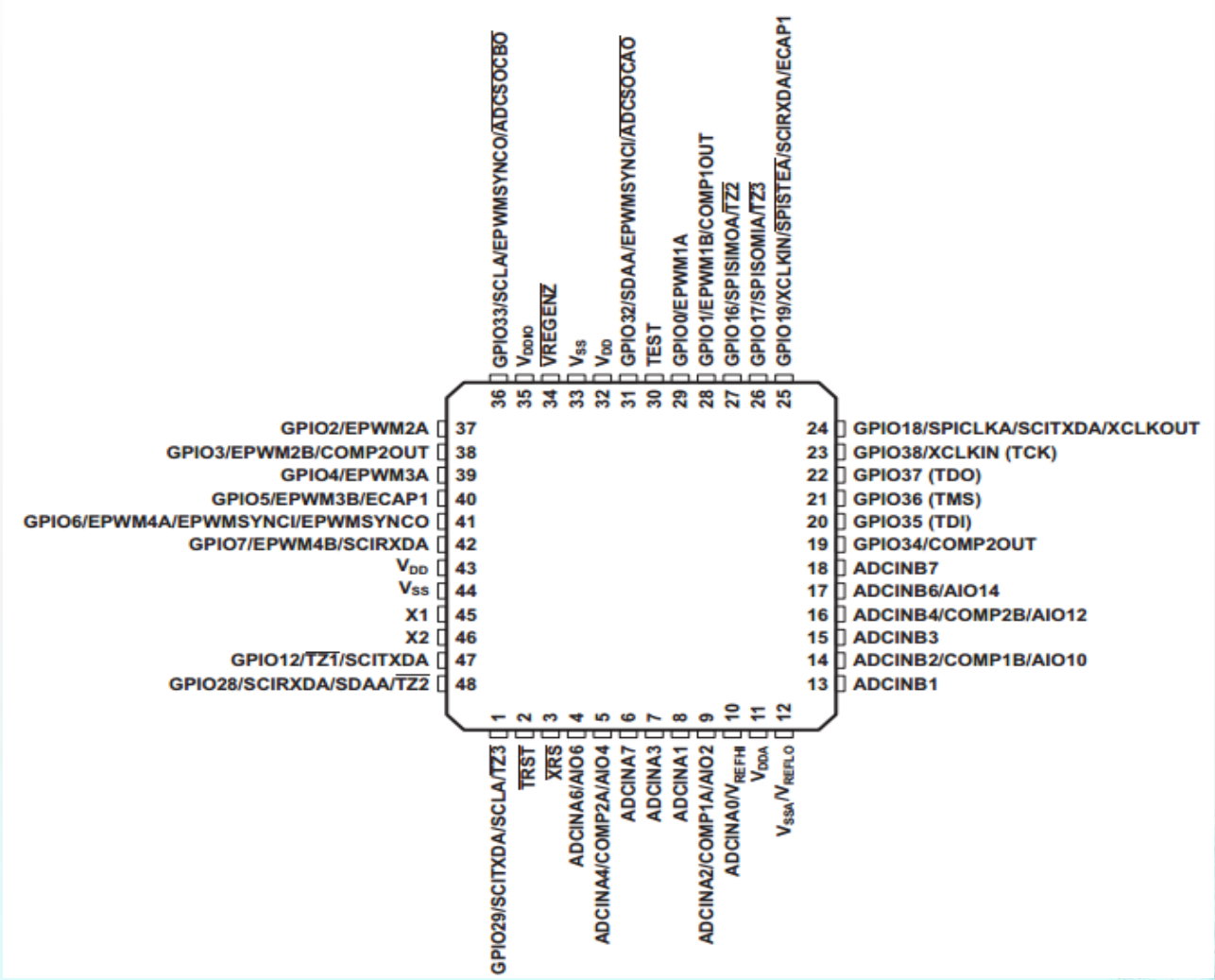


图1.9 F28207芯片48脚LQFP封装顶视图

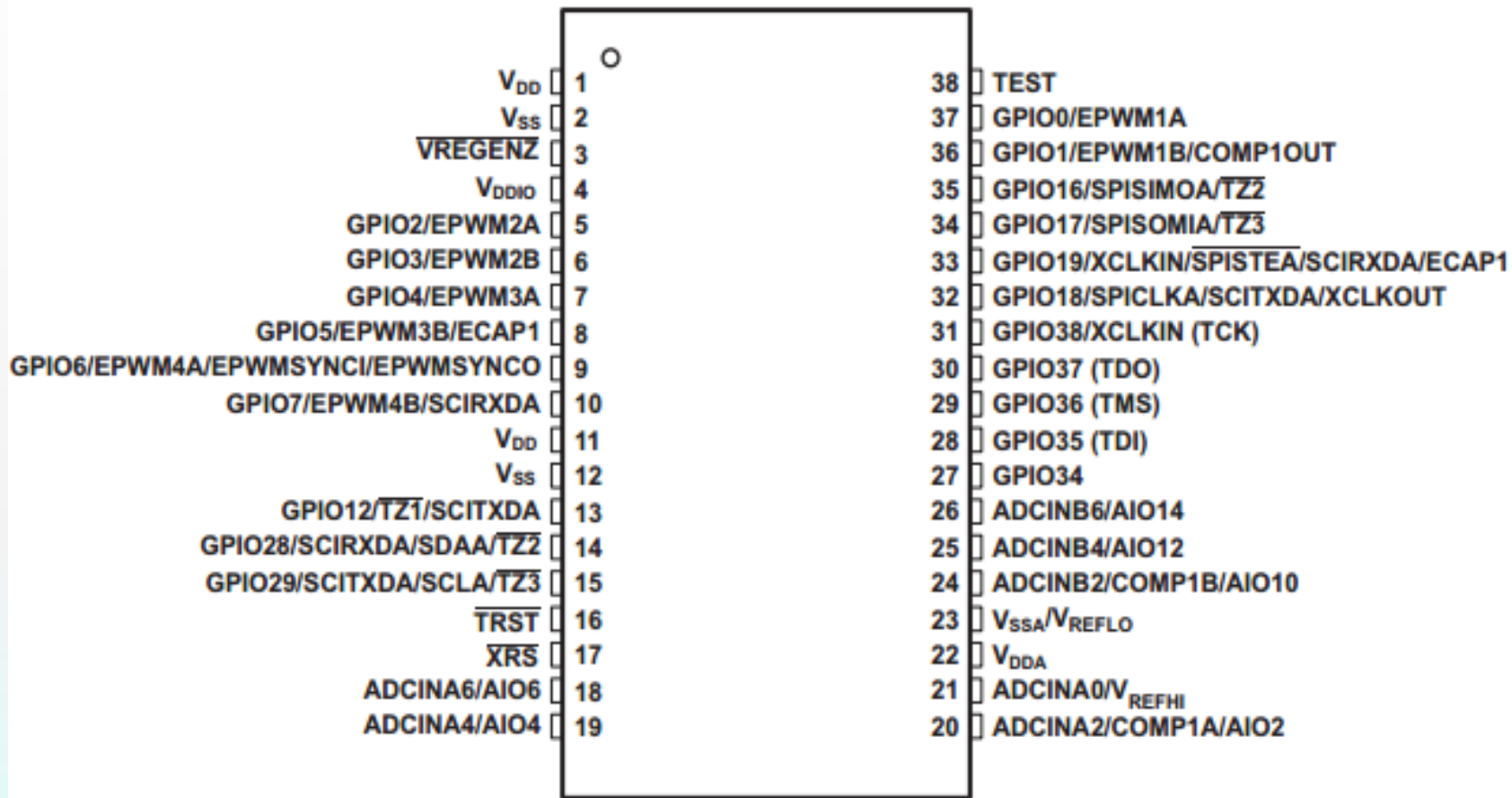


图1.10 F28207芯片38脚TSSOP封装顶视图

## 1. 6. 3 F28027的引脚说明

F28207的引脚主要分为：

JTAG引脚

时钟引脚

ADC与比较器引脚

GPIO与外设引脚

电源引脚

其中大部分引脚是复用的

## 本章小结：

- 1: 什么是DSP? DSP是如何区别于别的芯片的?
- 2: 总线结构有哪几种? 各有何特点?
- 3: TI的Piccolo系列DSP有何特点? 有何外设?