

C2000™ 32-位 MCU 家族



高性能控制器的实时控制在成本敏感的应用

MCU Day 2009

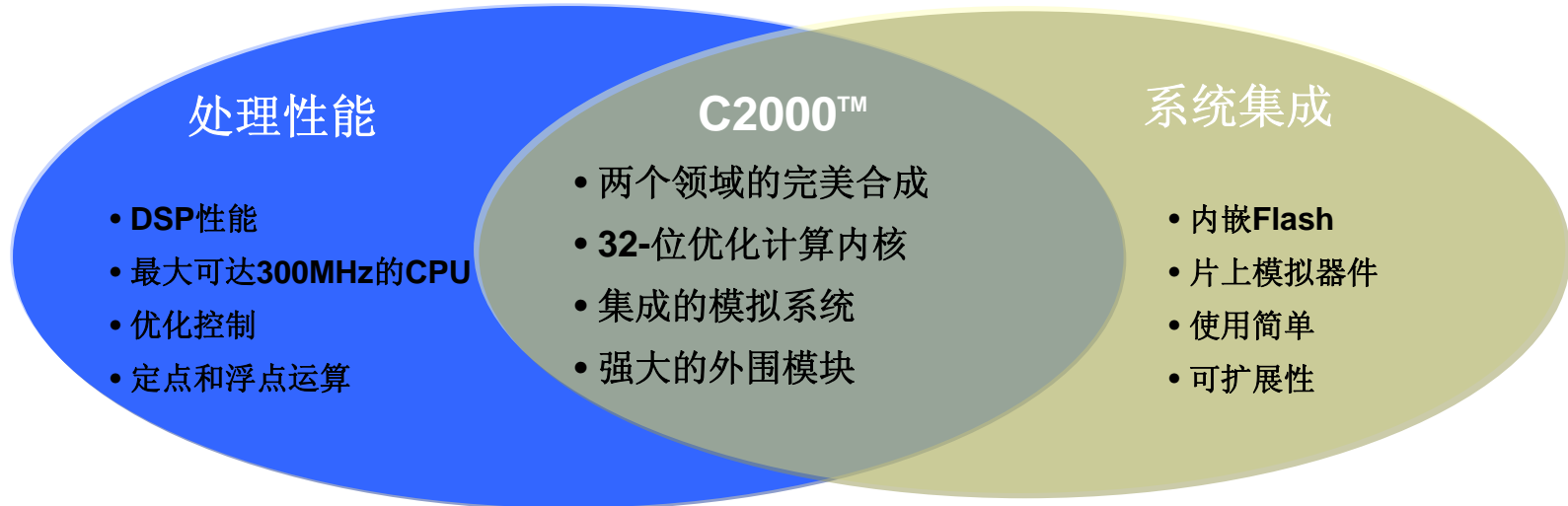


议程: C2000

- **C2000 概要**
 - 价值体现
 - 目标应用
 - 结构 & 关键特性
 - 产品
 - Piccolo™
 - Delfino™
- **如何开始学习**
 - controlCARD 概念
 - 应用开发套件
 - Piccolo controlSTICK
 - 软件库 & 例程
 - 第三方应用解决方案 & 资源

什么是 C2000?

The 32-bit real-time microcontroller family



• DSP 微控制器架构方面的性能

- 40-300MHz C28x CPU
 - 建立在 DSP 功能
 - 单时钟周期的32x32-位乘加器
- 控制率加速度器
- 浮点运算单元
- 内嵌Flash

• 为实时控制的微调

- 更加优化的内核
- 快速中断
- 灵活的中断控制
- 在线实时调试

• 全面的外设集

- 一流的ADC性能
- 灵活的高分辨率 PWMs
- 高级的捕获模块, 正交编码接口
- CAN, LIN, SPI, I2C, SCI/UART, McBSP

• 丰富的配置

- 40-300 MHz
- 定点和浮点运算器
- 32-512KB Flash
- 从\$2到\$20价格
- 软件兼容所有C2000系列

C2000 应用举例

可再生能源



Solar Power Inverters

Wind Power Inverters



数字电机控制



White Goods



Industrial Drives & Motion Control



Power Tools



E-bike

数字电源



Telecom / Server AC/DC Rectifiers



Uninterruptible Power Supplies



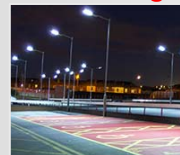
DC/DC Converters

C2000



照明

LED Street Lighting



Auto HID



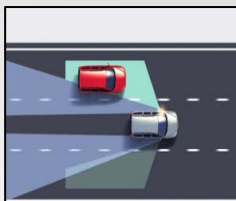
LED TV Backlighting

Hybrid Electric Vehicles



Electric Power Steering

Radar / Collision Avoidance



Power Line Communication



RFID Readers

Laser Ranging



Medical Oxygen Concentrators



Optical Networking



发动机

精密检测与控制

C2000 结构 & 外设

28x 内核

浮点运算单元

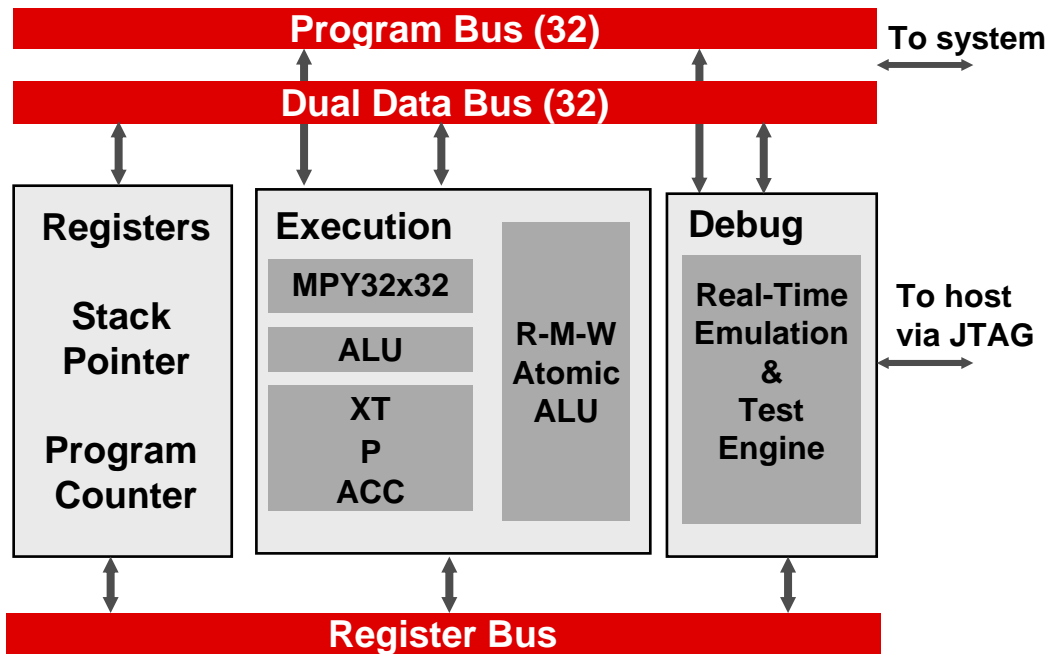
控制率加速器 (CLA)

外设 控制

– PWM, ADC, 比较, 捕获, 正交编码

C28x 内核

32-位C28x内核是 C2000 28x 微控制器的核心。提供DSP的处理性能，核心是优化的快速基本数学运算，并能处理通用意图的代码。



C28x CPU

- 32-位定点处理器
- RISC 指令集
- 8-级保护流水线
- 32x32位定点硬件乘加器可执行单周期32-位乘法运算
- 双16x16定点硬件乘加器
- 单周期执行指令

改进型哈佛总线结构

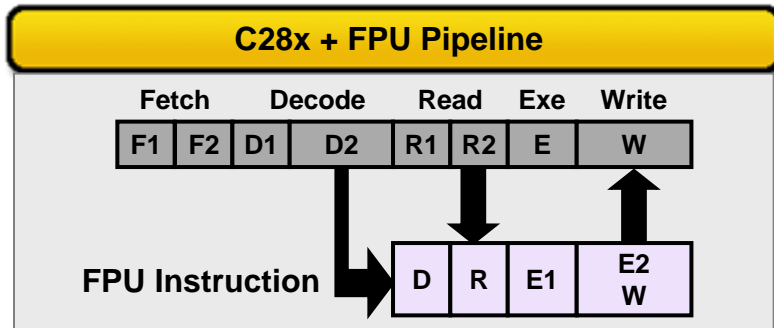
- 单独的数据和指令总线
- 读和写数据总线
- 可在一个周期内执行取、读、写指令

仿真逻辑

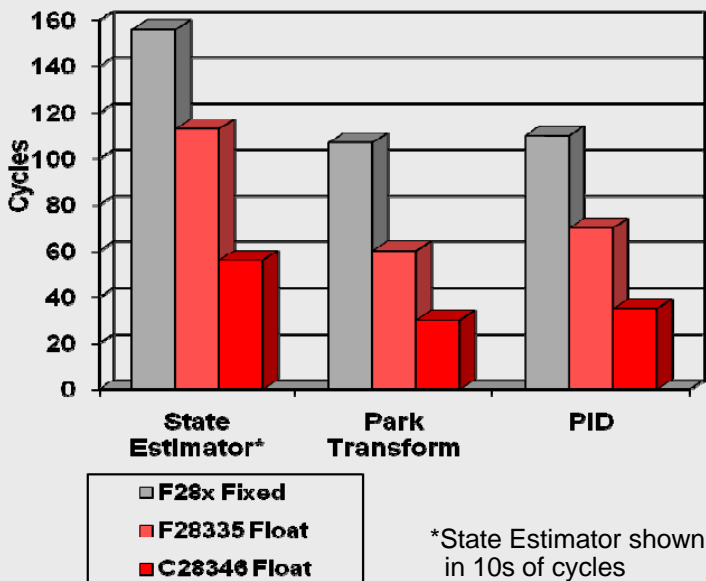
- 即使是停止主程序，实时仿真允许中断服务
- 调试主机可直接仿真寄存器和存储器
- 可记录主机调试数据
- 多个硬件调试事件和断点

浮点运算单元

FPU是Delfino器件的一个逻辑单元，它扩展到包括C28X核心浮点指令。完全支持单精度IEEE754标准(最广泛使用的格式)。



Up to 64% reduction in cycles



C28x + FPU

- 完全支持浮点或定点运算
- FPU 指令和定点指令前半部分流水线执行过程一样,但是后半部分流水线执行过程不一样
- 浮点
 - 功能非常强大
 - 消除缩放比例和饱和的负担
 - 降低产品上市时间
- 使用浮点可减少循环计算数学函数所需时钟数的52%. 此外, C2834x 器件减少了存储器读取的时间,从而比其他C28X系列减少了64%的时钟周期。

FPU 编译和执行

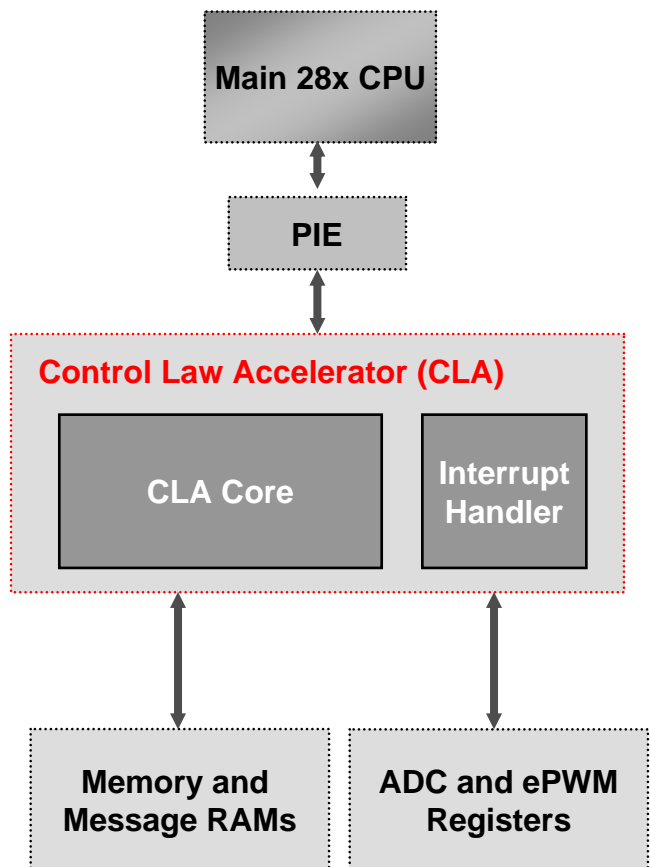
- 定点C2000处理器使用库文件支持模拟浮点运算, 变量保存在堆栈中
- 浮点C2000处理器本身支持单精度浮点运算, 变量存储在浮点寄存器
- 使用简单的编译器开关编译选择使用FP指令汇编代码
- 独立的浮点运算版本包括 IQMath, Flash API,等。

文档和软件

- [TMS320C28x Floating Point Unit Instruction Set Reference Guide](#)
- [C28x FPU Primer App Note](#)
- [C28x FPU Library](#) and [C28x FPU FastRTS Library](#)

控制率加速器 (CLA)

F2803x器件上的控制率加速器是一个独立的数学加速器，可以和C28X CPU并行执行命令



控制率加速器 (CLA)

- 独立的32位浮点数学加速器
 - 完整的总线架构和8级流水线
 - FP-优化执行单元和寄存器
- 允许更快的系统响应速度以及更高频率的回路控制
 - 简单的中断处理程序减小了程序切换的时间
 - 没有嵌套中断
 - 直接存取ADC和PWMs寄存器
- 降低CPU负载, 允许更多的系统功能

存储空间和信息交换RAM

- CPU为CLA指定程序存储区和数据存储区.
- 专门的信息RAM传递CPU和CLA之间数据.
- 如果CLA不使用, CLA 程序和数据空间可以被CPU作为通用存储器

ADC和ePWM寄存器

- CLA可直接连接ADC和ePWM, 可进行循环存储数据而不需要任何主CPU干预.
- 还能够使用ADC's "just-in-time"中断

主CPU和PIE

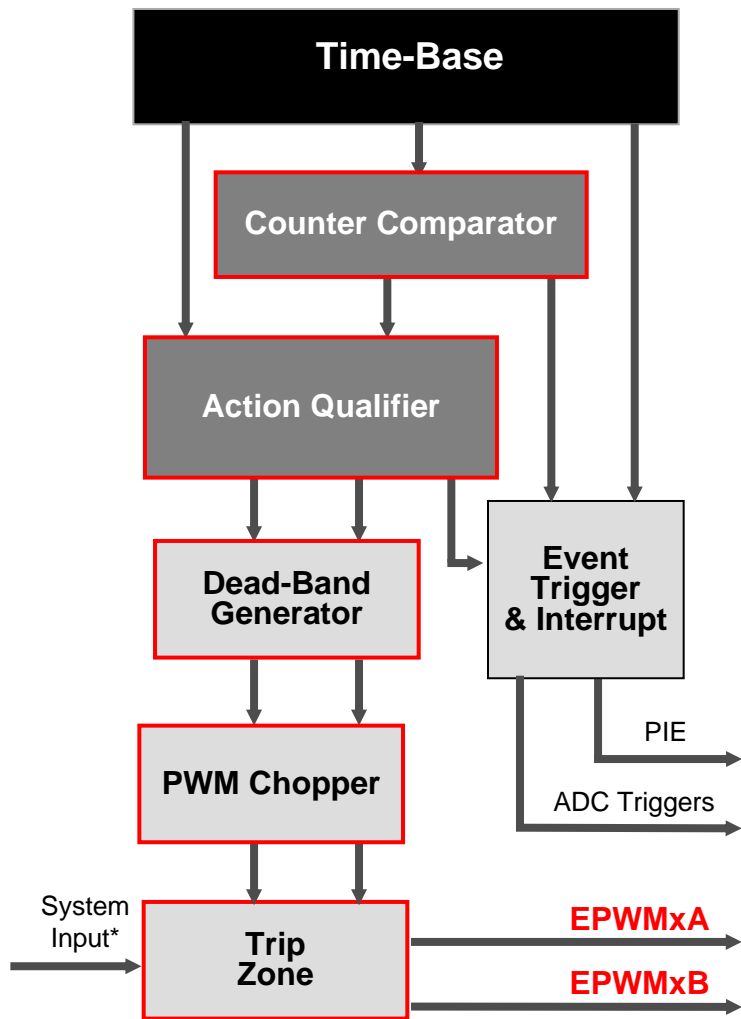
- CLA 能中断 CPU

CLA 和 浮点运算单元 比较

控制率加速器	浮点运算单元
独立8级流水线	F1-D2 共享C28x流水线
单周期数学计算和转换	2个周期的数学计算和转换
没有数据页指针. 仅使用具有后增量的直接和间接寻址	使用C28x寻址模式
4 结果寄存器 2 独立辅助寄存器 无堆栈指针或嵌套中断	8 结果寄存器 共享C28x辅助寄存器 支持堆栈指针和嵌套中断
自带延时跳转指令,调用和返回时可利用延时间隙执行额外的工作 无重复指令	使用C28x跳转指令,调用和返回 与FPU STF和C28x ST0共用状态标志位 重复MACF32与重复块
自成一体的指令集 数据通过信息RAM区存取	通过C28x之上的指令集扩展在FPU和C28x寄存器之间交换数据
自带的整数操作指令: AND, OR, XOR, ADD/SUB, 移位	C28x 整数操作指令
汇编语言编程	C/C++或汇编语言编程
单步执行流水线一个周期	单步执行一个流水线

增强型PWM (ePWM)

每个EPWM模块都可以配置为两个各独立的输出模式，EPWMxA和EPWMxB，如下面结构图所示：



专门16-位时基计数器

- 利用CPU系统分频时钟.
- 使用其他的ePWM模块来进行相移和频率的同步

计数比较器 (CC)

- 寄存器和比较器在产生PWM是不需要中断CPU的工作
- 能作为16-位输入捕获使用 (仅上升沿)

有效做法

- CC和计数器能够产生具有信息的PWM信号。

可编程的死区发生器

- 可编程的上升沿和下降沿延时

PWM 斩波

- 使用高频载波信号调制PWM波形
- 可编程的载波频率、占空比、第一个脉冲宽度

可编程TZ触发器

- 快速覆盖PWM信号进入可编程状态.
- 单次触发或循环触发
- 能产生事件、滤波事件，或者触发事件

事件触发和中断

- 可触发两个ADC转换和PIE中断

高分辨率PWM

C2834x HRPWM Effective Resolution (at 300MHz)

PWM (kHz)	Standard PWM		HR-PWM	
	bits	%	bits	%
50	12.6	0.02	18.3	0.000
100	11.6	0.03	17.3	0.001
250	10.2	0.09	16.0	0.002
500	9.2	0.17	15.0	0.003
1000	8.2	0.34	14.0	0.006
2000	7.2	0.68	13.0	0.012

Piccolo HRPWM Effective Resolution (at 60MHz)

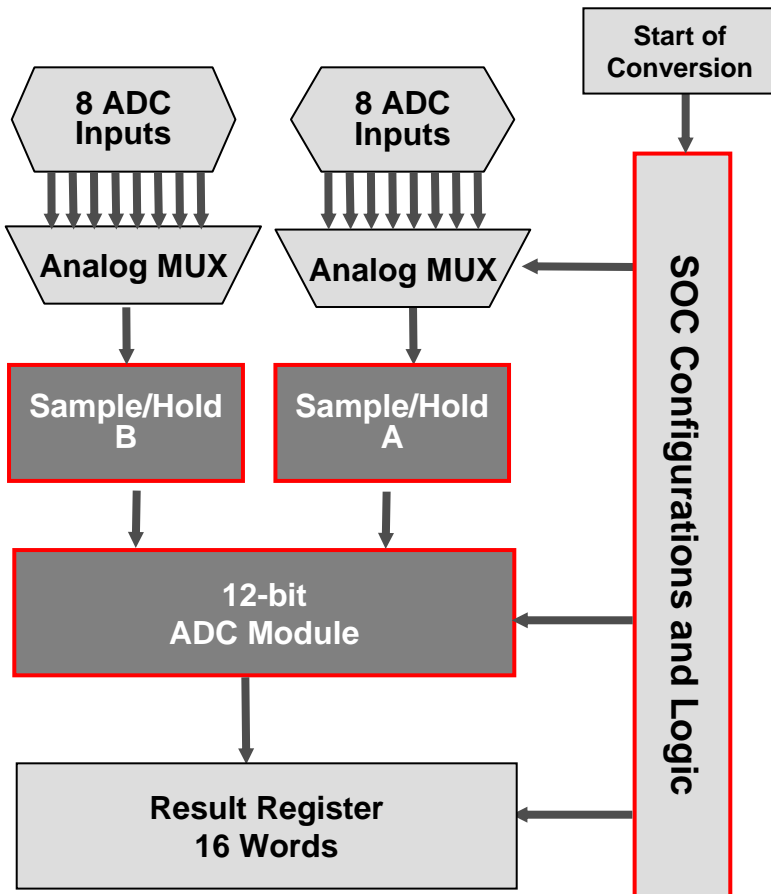
PWM (kHz)	Standard PWM		HR-PWM	
	bits	%	bits	%
50	11.0	0.05	16.8	0.001
100	10.0	0.10	15.8	0.002
250	8.6	0.25	14.4	0.005
500	7.6	0.50	13.4	0.009
1000	7.1	0.75	12.4	0.018
2000	6.6	1.00	11.4	0.036

高分辨率PWM输出

- 基于微边缘控制(MEP) 技术, 更好的细分PWM 时钟
- 允许相位和占空比的高分辨率控制
- Piccolo增加了周期高分辨率控制
- 精细的边缘定位控制
- 自我诊断检查
- Delfino C2834x最小可分辨到65ps
- 在高频PWM电源转换领域非常有用如:
 - 单相降压、升压或反激式
 - 多相降压、升压或反激式
 - 移向全桥
 - 可直接调制的D类功率放大器

12-位 流水线/SAR混合ADC

Piccolo的混合ADC允许更加灵活的创造转换序列.



开始转换 (SOC)配置和逻辑块

- 软件、CPU定时器、EPWM和GPIO触发16个通道SOC转换
- 更加简单的创造转换序列
- 多次转换可以使用轮询或优先级方式处理
- 9个可灵活分配的中断

最多16模拟通道输入

- 16路模拟通道输入.
- 支持0-3.3V的固定范围和一定比率的输入范围

Analog Mux

- 使用 SOC 输入选择哪一些通道被处理

两个采样和保持器

- 两个采样/保持可用于连续采样或同时采样
- 可调采样窗，确保适当的采样

12位模数转换

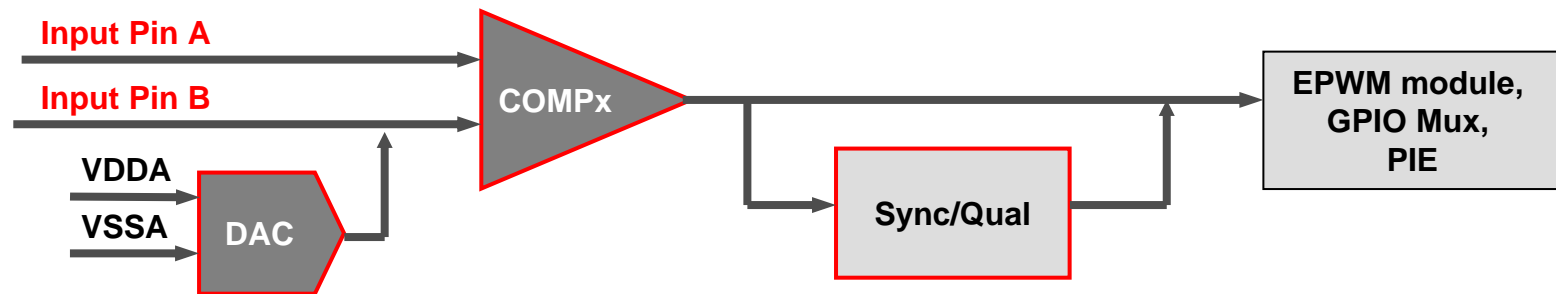
- 快速转换率:最大80ns, 4.6 MSPS
- 及时中断，防止在读取转换结果前，由于程序的转变造成结果改变

结果寄存器

- 16个结果寄存器（独立地址）保存转换数据

比较器

PICCOLO器件上模拟比较器用于实现即时保护



10位DAC

- 模拟DAC可以为比较器的一个输入

模拟比较器

- 真正实现在VDDA范围内的模拟电压比较
- 为PWM TZ模块提供信号需要有30ns响应时间

同步/控制逻辑

- 比较器的可以直接输出也可以通过系统时钟同步后输出
- 条件控制逻辑可以推迟多个系统时钟后输出

EPWM 和 GPIO 混合输出

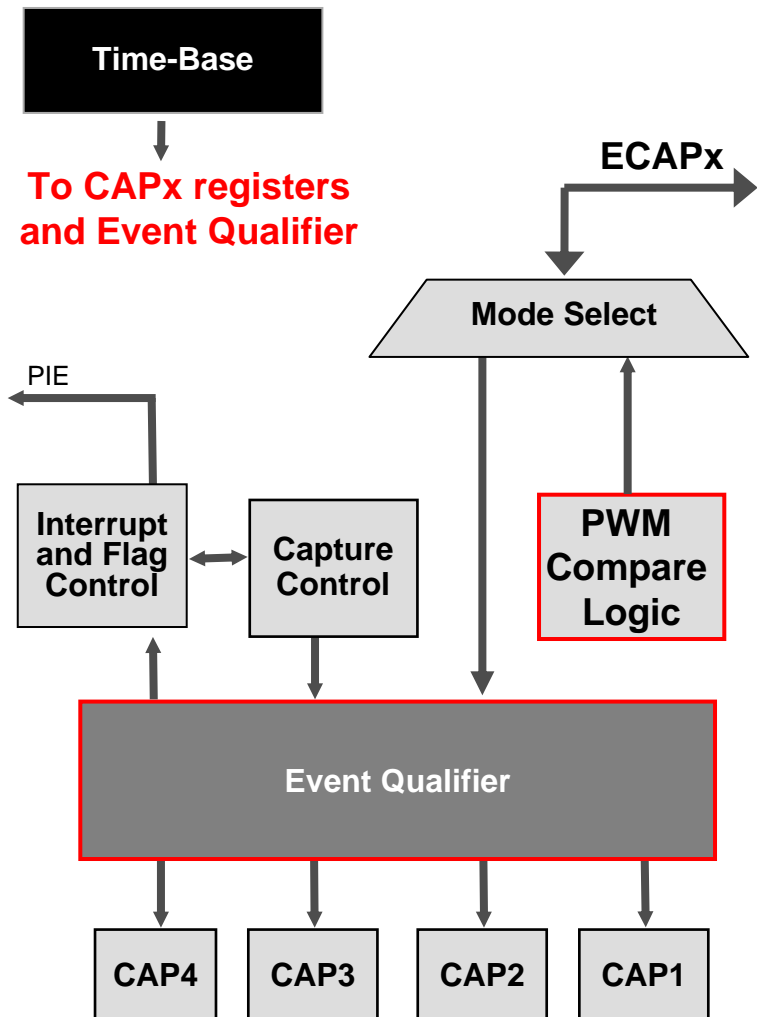
- 比较器输出到EPWM TZ模块也可以直接通过GPIO端口输出

Comparator Reference Guide

Piccolo: F2802x, F2803x – [spruge5](#)

输入捕获 (eCAP)

高级的捕获模块可以记录多达四个不同的事件（在远程控制信号捕获中非常有用），也可以作为**PWM**输出



专有的32位时基信号

- 使用系统分频时钟.
- 相位寄存器用于和其他计数器同步
- 事件条件控制器在记录到任何事件脉冲后计数值都可以被复位

模式选择

- 使能ECAPX管脚作为EPWM输出或捕获输入

事件条件控制

- 记录事件绝对时间或相对时间差

捕获控制

- 告诉事件条件控制器保存哪一个CAPX寄存器的值
- 控制输入捕获为单次捕获或连续捕获模式

32位CAP1-4寄存器

- 四个独立寄存器，每个事件用一个
- 在PWM模式,两个寄存器作为影子寄存器使用

中断和标志控制

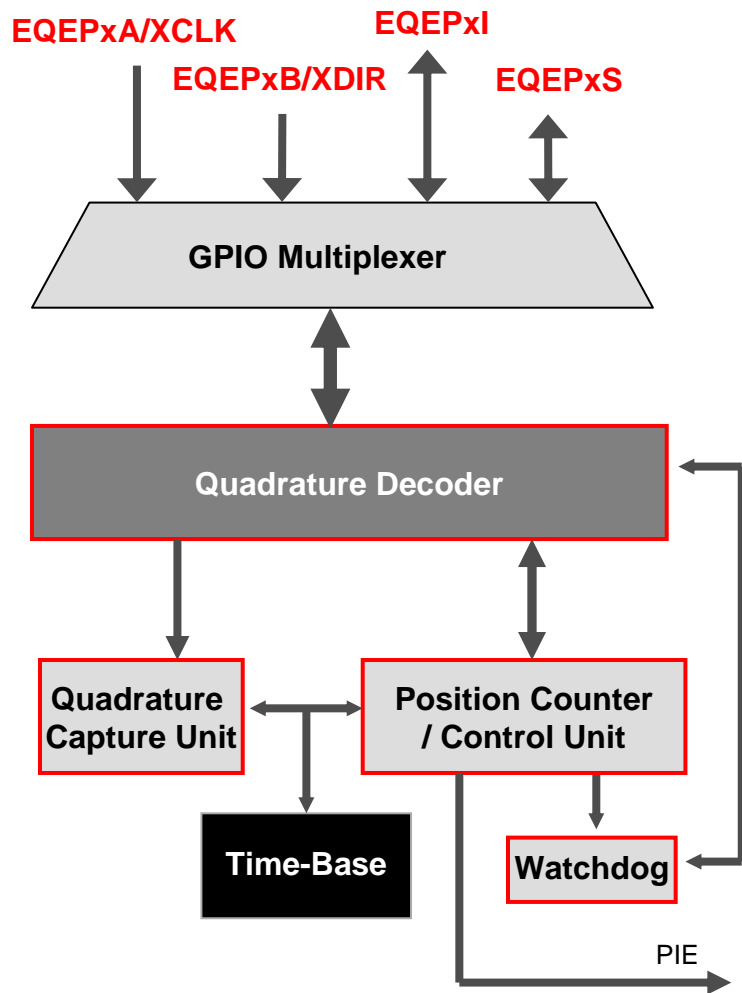
- 可配置为7种不同的事件来触发中断

PWM 输出

- 基于定时器的PWM输出选项
- 用装载影子寄存器来调节PWM

正交脉冲编码模块 (eQEP)

QEP模块从一个电机得到反馈信号，来决定位置和/或者速度



四个QEP输入信号

- eQEPA/B 信号通常来源于方向和正交时钟，当他们不被提供的时候
- 指示信号显示一个整个的旋转
- 选通信号能够连接到一个外部传感器，来接收位置的信息(例如在一个打字机上，行的尾部信息)

正交解码单元

- 为位置计数器提供方向和时钟
- 四种针对不同的输入和测量的模式

位置计数器 / 控制单元

- 有4种不同的方法保持电机位置的轨迹
- 以绝对和相对的方式记录事件的时间戳
- 脉冲展宽器增加事件脉冲宽度以确保适当的时序

正交捕获单元

- 用于低速测量的综合边沿捕获单元

单元定时器时基

- 32-位定时器为速度计算产生周期性中断

QEP 看门狗

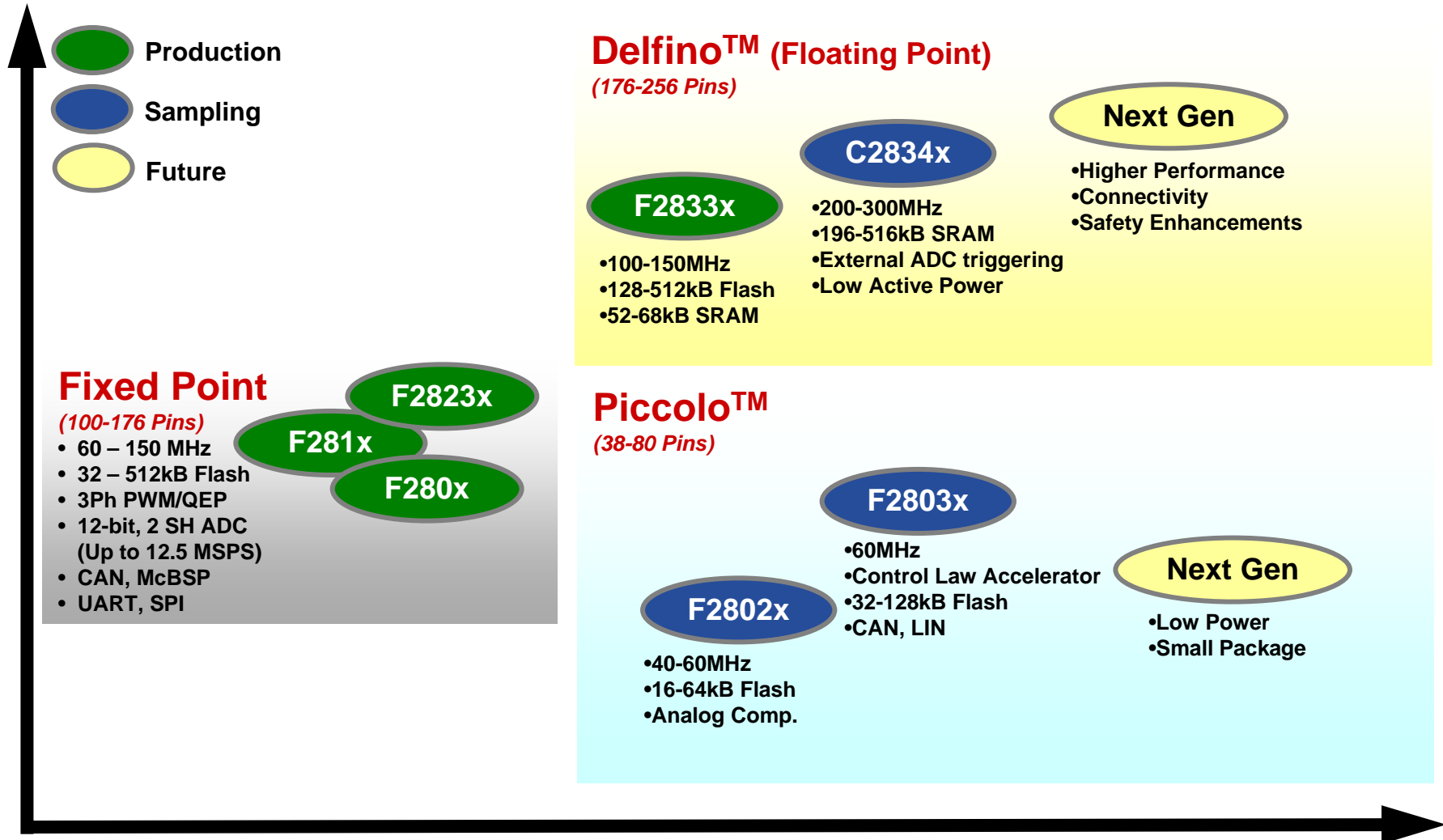
- 监控正交时钟，来指示运动控制系统的适当操作

C2000 产品目录

Piccolo™ MCU 系列

Delfino™ MCU 系列

C2000 32位实时控制器目录



超过80种器件
整个系列代码兼容

Piccolo MCU 系列

实时控制MCU的封装和价格

领先的32位实时控制器

- 高性能C28x CPU
- 智能外设优化控制应用
- 控制率加速器

降低系统成本和易用性

- 控制外设的最佳组合
- 强大的软件库
- 程序代码兼容从40MHZ到300MHZ的C2000 平台
- 增加了模拟片上外设的集成

MCU 封装和价格

- 起始价格低于\$2 (按照数量)
- 封装从38到80脚
- 实现实时控制器在成本敏感地方的应用

Piccolo

C28x 32-bit CPU

Up to 60 MHz
32x32-bit
Multiplier
RMW Atomic ALU

Control Law Accelerator (CLA)

Memory

16-128 KB
Flash

6-20 KB RAM

Boot ROM

Debug

Real-Time
JTAG

Power & Clocking

- Dual Osc 10 MHz
- On-Chip Osc
- Dynamic PLL Ratio Changes

Power-on Reset
Brown Out Reset

Peripherals

3x Comparator

Missing Clock Detection Circuitry

128-Bit Security Key/Lock

Converter

16 ch, 12-bit A/D Converter

Serial Interfaces

2x SPI

1x SCI

1x I²C

1x LIN

1x CAN

Timer Modules

7x ePWM Modules:

14x PWM outputs
(7x 150ps high-res)

1 x 32-bit eCAP

1 x 32-bit eQEP

Watchdog Timer

3x 32-bit CPU Timers

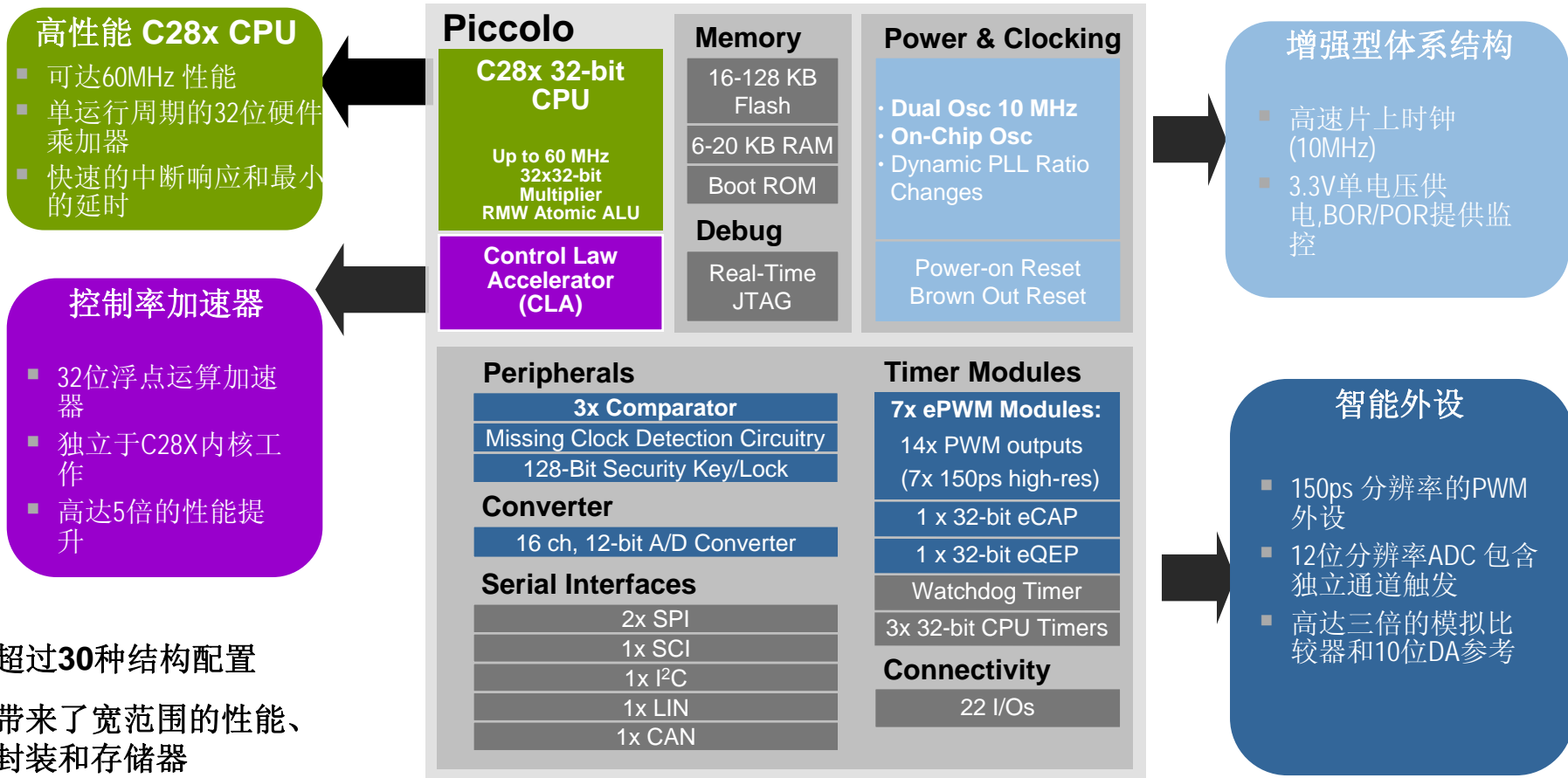
Connectivity

22 I/Os

38 to 80 pins, 105C/125C and Q100

Piccolo MCU 结构

用于成本敏感的实时控制MCU



*此图适用于“Piccolo” F2803x系列

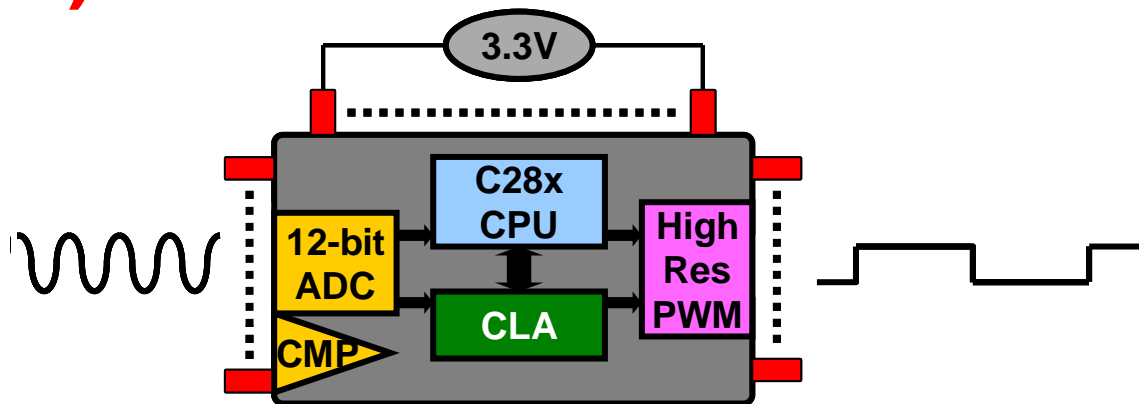
注意: 查看详细的结构框图, 注意结构变化

[点击这里获得更加详细的模块信息](#)

控制率加速器 (CLA)

涡轮增压控制系统

独立的C28x CPU
数字加速器



独立操作，不依赖于C28x CPU

- 独立的寄存器设置、存储器总线结构以及处理单元
- 低中断响应时间

直接访问片上外设

- 与C28x CPU执行并行算法

完全可编程：IEEE 32位浮点

- 无需比例缩放

减少了从采样到输出的延时

响应速度快，高达MHz的控制环路

支持多个通道（相位/频率）

提高系统的稳定性

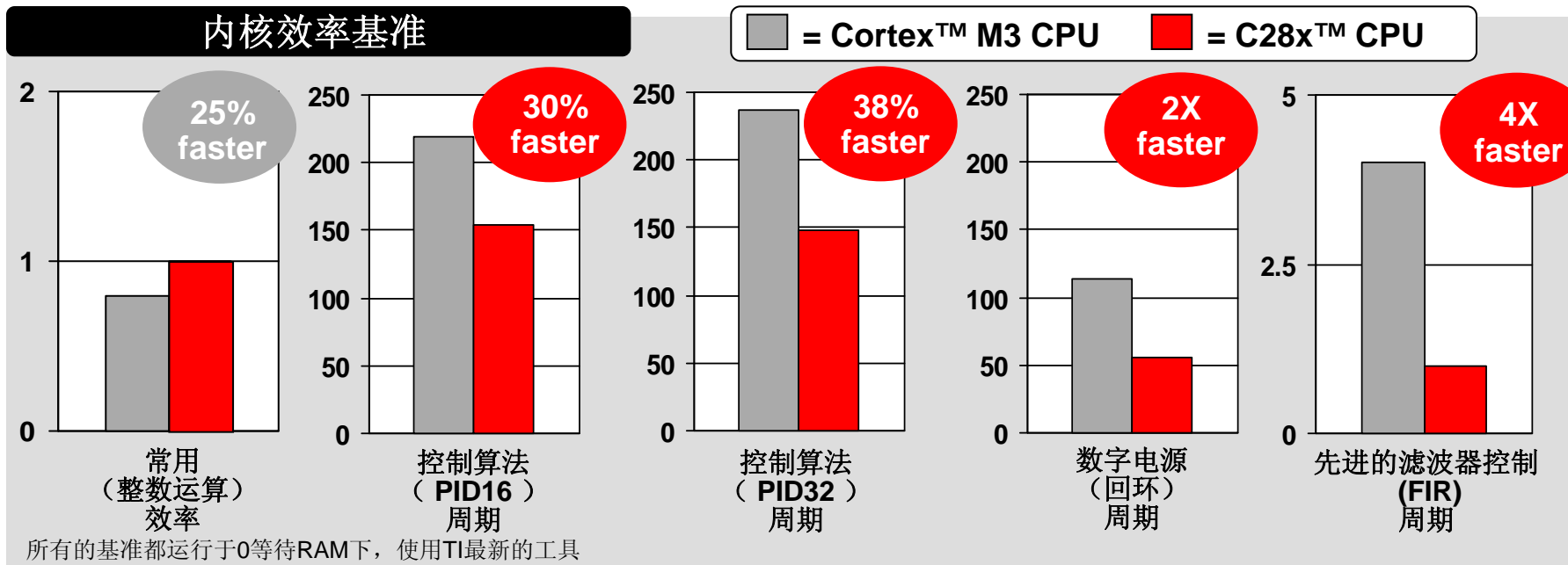
腾出C28x CPU空间用于其他任务（通信，诊断）

数字电源应用

自动大型家电

通用MCU应用

Piccolo™ 为实时控制提供了解决方案



控制应用性能基准

操作	Cortex-M3 (72 MHz)	28x (60MHz)	28x+CLA (60MHz)
前馈控制周期	786	482	482 / 0
反馈控制周期	1762	1081	0 / 550
总控制规律周期	2548	1563	482 / 550
MHz 占用 (20 kHz 循环)	~51MHz	~32MHz	~10MHz (28x) + 11MHz (CLA)

整数运算基准只是一个工业标准，并不代表处理器的运算性能

30% headroom

20% faster, lower frequency, 50% headroom

5X faster, lower frequency 80% headroom

Piccolo 应用领域

太阳能微型逆变器



- 布线简单，成本降低
- 供电更加可靠
- 更容易监测
- 容易组成网络

LED照明



- 发热量减小，效率提高
- 寿命长，少维护
- 比传统照明亮度更高
- 节约成本
- 远程控制

混合动力&电动汽车



- 减少排放
- 提高燃油经济性
- 电源转换效率提高
- 高效的电池管理

白色家电



- 有效提高能效
- 支持IEC60730标准
- 能够满足一些复杂的算法和控制需求

Delfino 微控制器系列

浮点实时控制器

高性能32位实时控制器

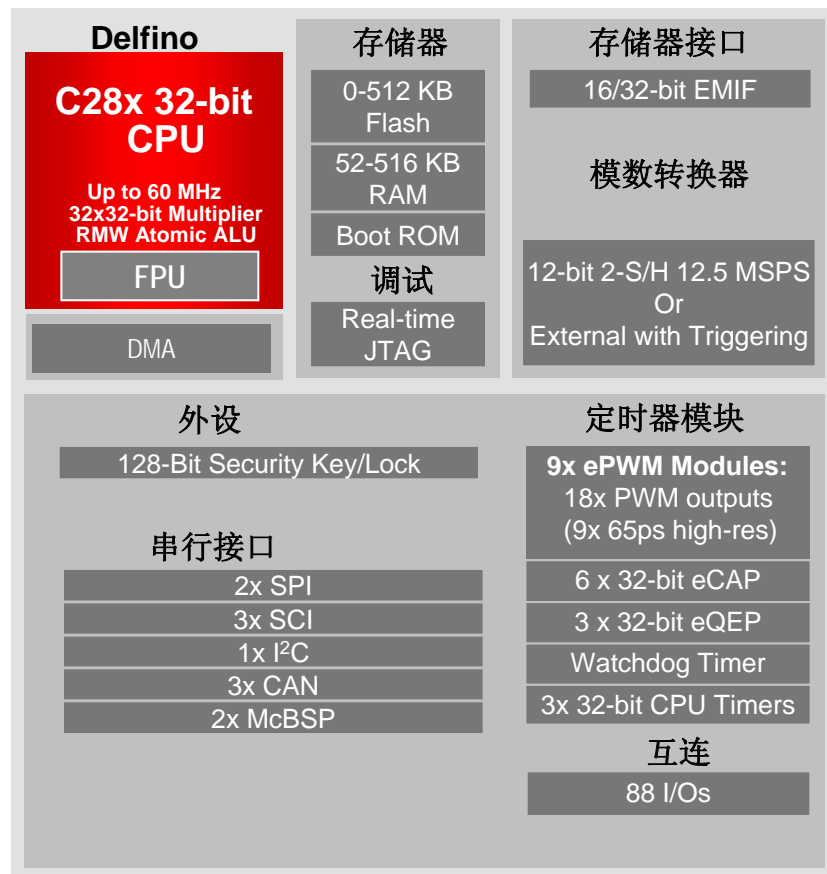
- 频率高达**300 MHz**
- **32位**单精度浮点单元
- 浮点运算代码量精简**50%**
- **100%+** 的吞吐量
- 高性能**0**等待RAM

优化控制外设

- 支持三项电机控制
- 高精度**PWM**模块高达**65ps**的精度，带上升沿和下降沿死区，以及硬件故障检测
- **12位12.5 MSPS ADC** 或 带事件同步触发的外部**ADC** 接口

平台的可升级性

- **100 ~ 300 MHz**
- 与浮点系列管脚兼容
- **IQMath**和用于浮点运算的单一源代码
- 代码兼容**40MHz**至**300MHz**的**C2000**平台



176 ~ 256 引脚, 85C/105C/125C 和 Q100

Delfino 微控制器系列

浮点实时控制器

高性能C28x CPU

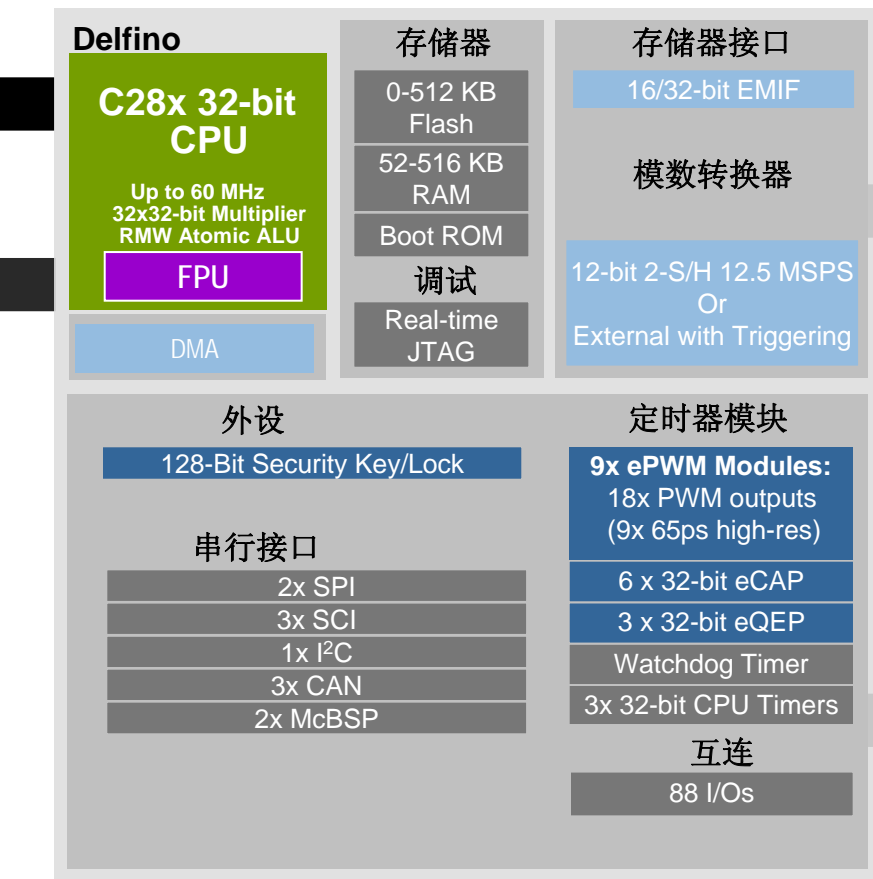
- Up to 300MHz performance
- Single cycle 32-bit MAC
- Fast interrupt response and minimal latency

32位浮点

- IEEE 32-bit single precision
- Eliminates scaling & saturation burden
- Magnitude calculations (division & square root)
- Park & Clark type algorithms (sin and cos)
- FFT and IIR performance improvements

管脚兼容的定点F2833x系列微控制器可供选择的

[点击这里产看详细框图](#)



注: F2833x系列微控制器的相关变换请查看详细框图

- 仅片上Flash
- 片上ADC
- 150 MHz C28x CPU
- C2834x 系列
- 仅片上SRAM
- 外部ADC
- 300 MHz C28x CPU

以控制为导向的架构

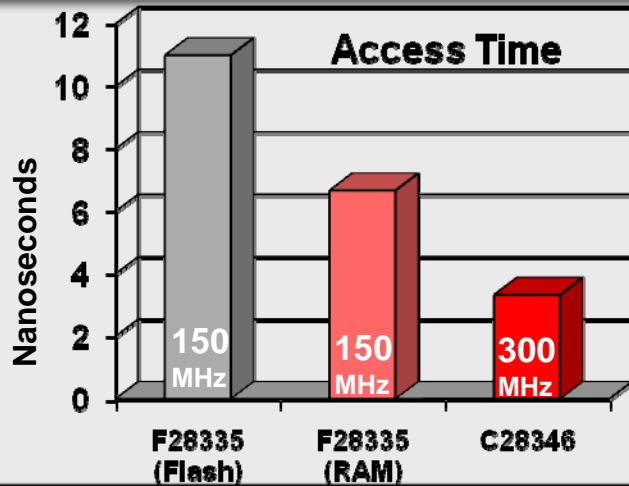
- Asynchronous external memory interface
- External ADC interface
- DMA controller

智能外设

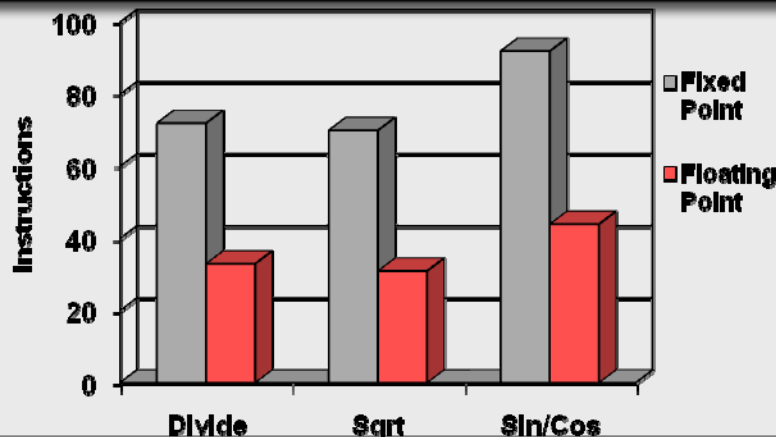
- Flexible PWM modules
 - Programmable period, frequency and phase control
 - Dead-band generation
 - Programmable trip zone allocation
- Hi-Res PWM modules with up to 65ps resolution
- 32-bit OEP modules for hardware decoding
- 32-bit capture modules

复杂应用下的浮点性能

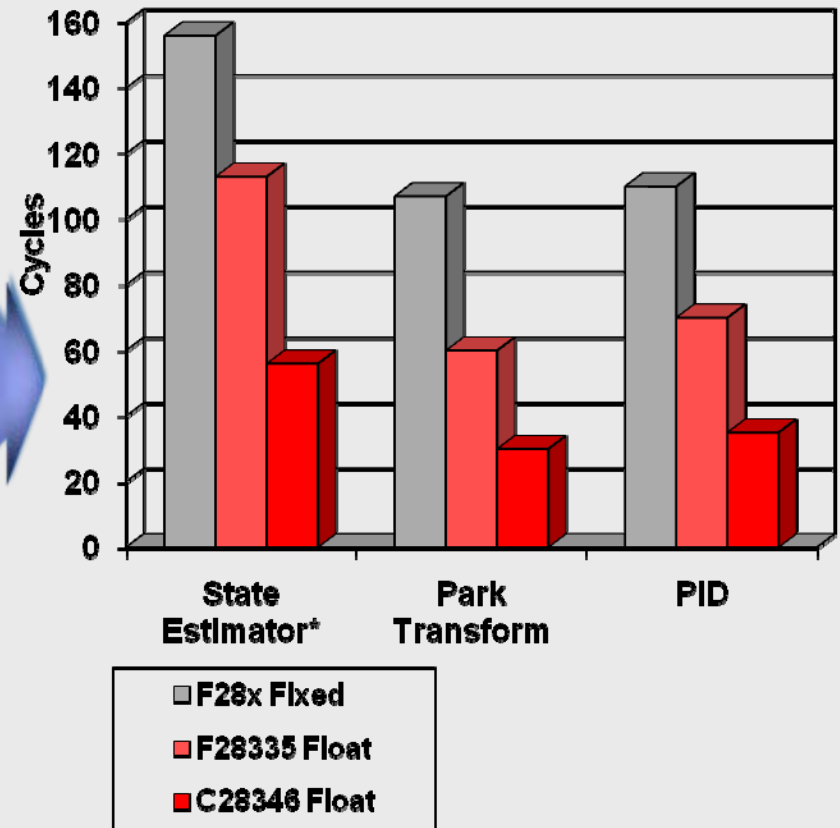
存储器访问时间减少高达 70%



代码量减少高达 52%



周期减少高达 64%



*State Estimator shown in 10s of cycles

Delfino 应用领域

伺服驱动器 & 运动控制



- 微动协调装置
- 实时诊断和故障预测
- 良好的动态和瞬态控制
- 优化整个系统性能

高级电力线监控



- 监测电力传输系统，以检测峰值和失效
- 复杂的，实时的数据分析
- 一致的频率和电压

可再生能源



- 在不同负载条件下最大限度地提高功率输出
- 提高效率降低成本
- 灵活控制不同类型的涡轮

驾驶辅助



- 精密高速外部传感器
- 实时数据分析
- 高可靠性
- 其它汽车系统接口

使用入门

控制卡概念

应用开发工具包

Piccolo controlSTICK

软件库与实例

第三方解决方案与其他资源

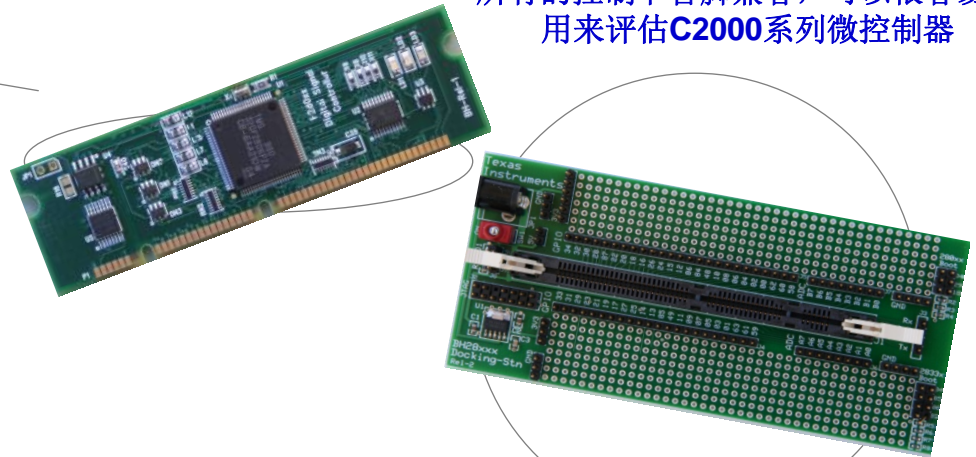
C2000 开发工具 - 加快设计进程

控制卡

- 低成本
- 标准100脚DIMM接口
 - 包含28x 模拟I/O, 数字I/O, 以及JTAG 接口
- 健全的设计
 - ADC输入引脚噪声滤波
 - 铺地
 - 单独的UART 接口
 - 支持引脚退偶
- 所有的运行支持电路 (clock, LDO, 等)
- 多个版本可用
 - Piccolo F28027
 - Piccolo F28035
 - Delfino F28335
 - Delfino C28436
 - F2808
 - F28044

为初步开发和小批量系统构建

所有的控制卡管脚兼容, 可以很容易地用来评估C2000系列微控制器



对接板

- 访问控制卡的所有信号
- 功能实验区用于快速建立实验雏形
- UART通信接口
- 板上自带USB仿真器, 也可使用外仿真器
- USB供电或外部供电
- 启动模式跳冒用于选择所有启动模式

开发工具发行

评估板



Experimenter's Kit

TMDXDOCK28027
TMDXDOCK28035
TMDSDOCK2808
TMDSDOCK28335
TMDXDOCK28343
\$79-\$159



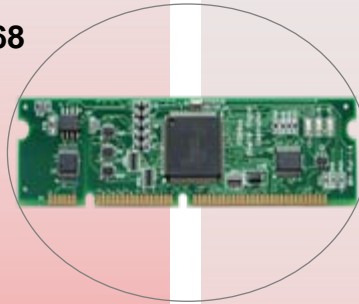
Experimenter's Kit - 168

TMDXDOCK28346-168
\$189



Peripheral Explorer

TMDSPREX28335
\$179



Piccolo ControlSTICK

TMDX28027USB
\$39

应用开发

Digital Power Experimenter's Kit

TMDSDCDC2KIT
\$229



Digital Power Developer's Kit

TMDSDCDC8KIT
\$325



AC/DC Developer's Kit

TMDSACDCKIT
\$695



Resonant DC/DC Developer's Kit

TMDSRESDCKIT
\$229



Renewable Energy Developer's Kit

TMDSENRGYKIT
\$349



Dual Motor Control and PFC Developer's Kit

TMDS1MTRPFCKIT/
TMDS2MTRPFC Kit
\$369/\$399



LSD-MiniStick

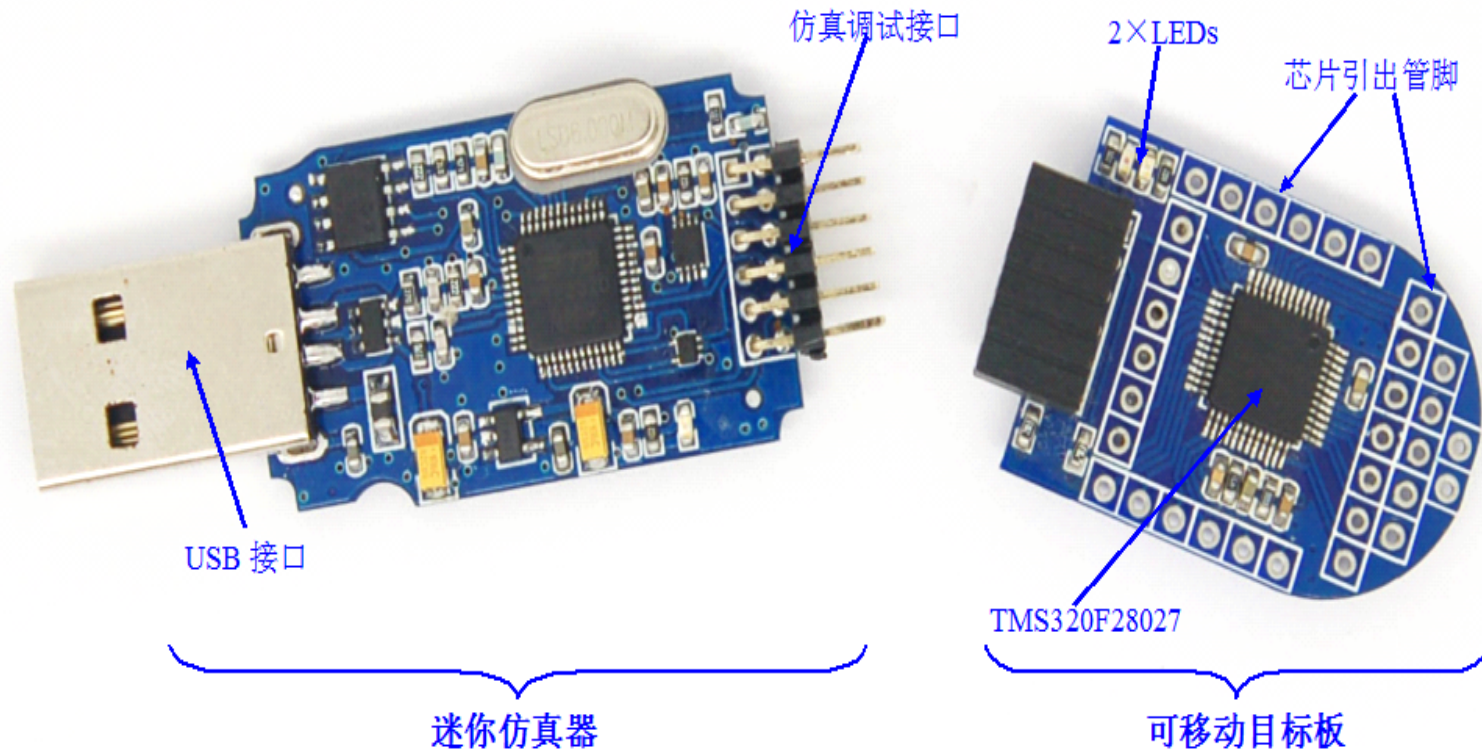


- 结构精巧类似于SD卡读卡器
- 包括一个精简的XDS100USB仿真器
- 具有一个完整的最小系统目标板
- 目标板可以根据用户评估不同型号的PICCOLO芯片进行更换
- 引出了所有的IO管脚，方便用户做扩展实验
- 独立的USB转串口通道方便同PC机进行串口通信

本套件是TI PICCOLO系列MCU新手入门的好帮手！

LSD-MiniStick

LSD-MiniStick 可拆卸为两部分



开源开发平台

套件内容

- 控制卡
- 对接板
- CCS 3.3 32K限制版
- 实验例程
- 快速入门指南
- 电源、线缆
- 开发工具包



开发工具包

- 原理图(原始文件及PDF文件)
- 器件清单 (BOM)
- Gerber文件, 自由使用或修改
- 输出引脚表格
- DIMM100 引脚/插座机械细节
- PCB文件支持的流行软件工具, 以便于修改 (仅接口板)
- 开始一个新的原型设计的建议

C2000 综合软件生态系统

系统实例

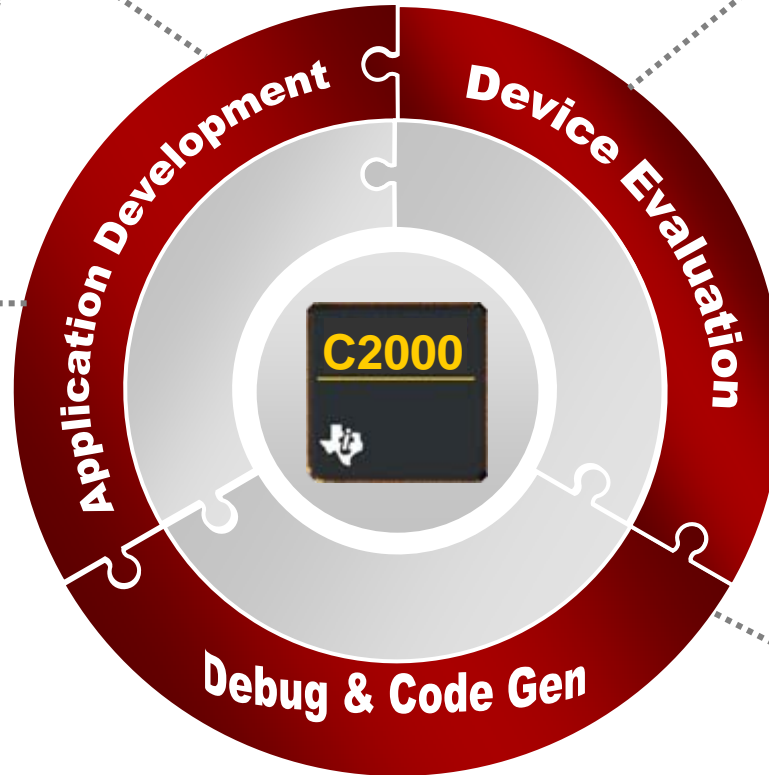
Robust Framework to Enable
Rapid Development of
Complete Systems
AC/DC Rectifier
Solar Inverter
Power Line Communication
And More...

应用库

Modular Software
Quickly Build or Customize
Own System
Fully Documented Usage
and Theory
Optimized C Callable
Digital Motor Control
Digital Power

第三方库文件及仿真

Code Generation
Debug
Software Libraries



基本库

IQ Math
Signal Processing
Math Primitives
Floating Point
Control Law Accelerator
Flash API

头文件及工程实例

Initialize Device
Utilize Peripherals
Pre-Defined Functions
Easy User Modification

CCS开发环境

Code Editor
Debugger
Compiler
Real-Time Analysis

现在就行动吧

<http://www.ti.com/C2000tools>

C2000 公共资源

第三方工具

- JTAG 仿真器和转接头
- Flash 编程器
- 开发板和实验板
- 软件仿真、代码生成器

[More Information](#)

专题讨论及培训

- 数字电源多天专题讨论
- Piccolo 一天专题讨论
- 28x 多天专题讨论
- 在线培训 & 视频
- 更多...

[More Information](#)

学校教学

- 教学光盘
- 实验文档
- 例程代码
- 开发板

[More Information](#)

技术支持

- 设计服务
- 系统集成/参考设计
- 软件库
- 量产编程器

[More Information](#)



实时控制解决方案

性能

- 40-300MHz 32位28x CPU
- 控制规律加速器用于高速控制
- 浮点单元
- 最高效的控制技术
- 高精度PWM, **150ps**
- 12位ADC, 高达12.5 MSPS

一体化

- 两个片上高精度晶振
- 片上电压调节器
- 带DAC接口的模拟比较器
- 增强型PWM, CAP, QEP
- 高达512kB 的片上Flash
- 高达516KB 的片上SRAM
- I2C, SPI, UART/LIN, CAN, 带缓冲串行接口
- 更多...

C2000



发展趋势

- 40 MHz Piccolo 到 300MHz Delfino 控制器
- 从 **\$2** 起
- 片上Flash, 片上SRAM, 小封装, 多I/O
- 浮点或定点内核
- 未来的衍生工具将提供更高的性能, 更多的连接, 封装尺寸更小, 安全要求逐渐增强

易用

- 低成本, 模块开发工具
- 开源开发工具包
- 灵活的软件库和架构
- 一流效率的编译器
- 健全的头文件和软件例程
- 统一存储器架构
- **16 位和32位指令**