

用于高性能电力电子装置的新型数字控制器

New Digital Controller for High-performance Power Electronic Equipments

清华大学 自动化系 周宏林 张光新 李东钰 杨 耕

摘要:本文首先概述了高性能电力电子装置的新型数字控制器的技术动向,然后分析了目前两款具有代表性的新型数字控制器:瑞萨的SH7201和TI的TMS320F28335中用于高性能电力电子系统控制时所需的各个具体功能,如浮点运算单元、PWM、AD、DMA等。

关键词:电力电子系统 数字控制器 SH7201 TMS320F28335

Abstract: This paper introduces recent trends of high-performance digital controllers applied to power electronic (PE) equipments. The specific features of two latest controllers for PE equipments: Renesas' SH7201 and TI's TMS320F28335, are analyzed, such as the floating point unit, pulse width modulation unit, AD converter, DMA functions.

Key words: Power electronic system Digital controllers SH7201 TMS320F28335

1 引言

现阶段在大部分电力电子系统中,高速、定点的MCU(Micro-Control Unit)和DSP(Digital Signal Processor)正在得到广泛的应用。随着一些应用技术如高性能伺服系统、有源电力滤波器等的发展,对高速、复杂的数字实现提出了更为苛刻的要求。这些要求主要体现为:控制器需要具有实时高精度的浮点数处理能力,需要有硬件功率驱动保护性中断的支持,需要有丰富的外设模块如PWM(Pulse Width Modulation)、DAC(Digital-to-Analog Converter)来完成相应的控制功能以及需要有完善的通信能力。因此,具有浮点处理器运算能力与数字控制器优点的高性能数字控制器应运而生(有公司将其称为DSC(Digital Signal Controller^[1]))。本文将先叙述这种新型控制器的技术特征,然后对目前两款具有代表性的控制器:瑞萨的SH7201和TI的TMS320F28335的主要功能作简要介绍。

2 新型控制器的主要特点

(1) 浮点运算单元(FPU, Floating Point Unit)现有的电力电子系统的控制器多为定点运算MCU或DSP,而

在某些高性能的应用,例如有源电力滤波器^[2]、基于磁链观测器的无速度传感器矢量控制装置^[3]中会大量涉及浮点运算。为实现浮点数运算,现有解决方案主要有两种:一是在定点控制器上采用Q格式法^[4]处理浮点数,其基本思想是通过假定小数点的位置,用定点数表示出浮点数,将浮点运算转化为定点运算。其本质是将浮点数据放大至2的若干次方后再进行定点运算。这种处理方式一方面将带来程序指令的增加,另一方面对于浮点数据动态范围较大的应用场合,放缩尺度选择不当常常会导致意外溢出,会大大增加程序设计难度。另一种方案是使用一片专用浮点运算处理器作计算,再使用一片具有PWM以及A/D等功能的普通DSP作电力电子电路的相应信号处理器,二者通过双口RAM完成异步的数据交互,如图1所示。这种方式虽然可以直接完成浮点运算,但由于数据交互在片外完成,而控制器的外总线速度一般低于内总线速度,因此数据通信的时间开销较大,无法充分地利用浮点运算单元的运算能力。

新型控制器的一大特点就是将浮点运算单元FPU(Float point unit)集成到了控制器中,这样CPU内核和FPU通过内总线就可以实现高速的同步数据交互,大大提高了控

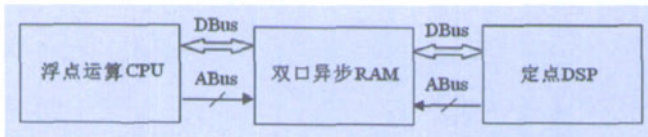


图1 浮点运算的双处理器解决方案

制器的数据处理能力。图2显示了瑞萨SH7201中CPU内核(SH-2A)与FPU模块在CPU总线上交互^[5]。FPU的主要指标是其浮点数精度,分单精度与双精度两种。通常浮点数采用IEEE-754标准格式,单精度为32位,双精度64位。

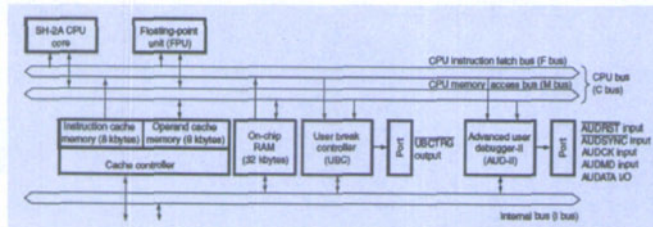


图2 集成了FPU的新型控制器

(2) 中断控制单元与功率单元保护中断在电力电子装置的控制中,要求其实现众多的功能如AD采样,PWM输出,即时通信,与人机界面交互等等。上述每个任务都会对应一个中断源,因此在芯片中设计了中断控制单元管理这些外设中断。中断控制单元的主要指标是它能管理的中断总数、中断优先级组数和中断优先级设置的灵活性。

面向电力电子装置必须具有功率单元的保护中断(Power Drive Protection Interrupt),这种中断通常与PWM发生模块联系在一起。当电力电子系统在运行过程中出现某些故障如过压、短路时,为了保护功率器件和系统的安全,希望紧急封锁PWM脉冲。新型控制器的功率单元保护中断功能可以很好地支持该要求,一旦外部电路发出故障信号送至功率单元保护中断引脚,控制器在硬件上就会自动封锁PWM输出,同时产生内部高优先级中断,从而保证了系统的安全性。

(3) DMA (Direct Memory Access)

随着控制器与PLC、上位机、人机接口等外设之间数据交互的不断增强,为了提高数据传输效率,新型控制器还设置了DMA(Direct Memory Access 存储器直接访问)功能。在DMA控制器的作用下,外部设备和存储器之间可实现直接传输数据而无需CPU干预。DMA控制器实质就是一个专用数据交互处理器,充分发挥该协处理器的功能无疑将使整个系统的效率大大提高。具体应用中DMA控制器可与多种外设相结合完成相应功能。例如,将其与多路高速AD相结合,将采样数据直接放入内存即可大幅提高数据吞吐量,将其与串行通信口结合完

成收发操作可以减少通信开销等等。再如,使用称之为内存覆盖(Overlay)技术,将DMA与片外总线控制器结合,实时地将片外存储器中的程序和数据移动到片内高速内存中,从而大大提高程序的运行速度,这一功能特别适合于对实时性要求非常苛刻的场合。

(4) 多通道PWM

脉宽调制(PWM)现已经成为电力电子设备中必不可少的内容。新型控制器能够提供多种PWM波形和多组PWM通道。同时还带有硬件死区时间设置功能,有的芯片还有基于软件的死区补偿功能,进一步提高了控制的性能。

(5) 片上ADC

与16位高性能MCU和定点DSP类似,新型控制器一般也会集成片上AD,一般片上AD具有多通道、串行采样、流水线转换的特点。在高性能应用中,通常需要考虑AD的有效分辨率,AD误差主要来源包括量化误差(quantization error),零点偏置误差(offset error),非线性误差(nonlinearity error)以及满量程误差(full-scale error)。例如SH7044中集成的一个10位的AD,其量化误差 ± 0.5 位,零点偏置误差 ± 3 位,非线性误差 ± 3 位,满量程误差 ± 3 位,总体绝对误差即达 ± 4 位^[6];TMS320F2407中集成的10位AD其零点偏置误差 ± 2 位,非线性误差 ± 3 位,总体绝对误差也达 ± 4 位^[7]。此外,这些误差还可能随AD时钟频率的升高而增大。因此在高性能应用中,通常需要选用12位或更高位的AD,同时还应合理配置其时钟频率。

(6) 通信模块

通信模块有的用于与控制器板上外设通信,例如SPI、I2C模块常用于读写板上EEPROM(Electrically Erasable Programmable ROM)、串行接口的AD等;还有的用于完成人机界面交互,多机通信功能。除了具有通常控制器有的SPI,SCI,I2C通信控制器外,新型控制器还集成有CAN(Controller Area Network)控制器模块。CAN为现场总线的一种,在数据通信方面具有通信速率高、可靠性好、连接方便和性价比高优点,因此从20世纪80年代以来,CAN总线已经被广泛应用于汽车、轮船、机器人、智能楼宇、机械制造、交通管理等领域。新型控制器集成CAN控制模块后,可以将不同厂商的不同设备组建成系统,如将有源电力滤波器、无功补偿装置、变频器等组建成一个系统,实现整个系统的综合自动化。

(7) 片上DA、WDT等

在使用硬件比较法获得SPWM的应用中,片上DA可用于产生参考正弦波或三角波。看门狗定时器可以应对工业环境下意外干扰,它通过超时复位机制将控制器带回正常状态,能够提高系统的可靠性。

3 两种新型数字信号控制器及其应用

下面介绍两种目前较有代表性32位数字信号控制器:瑞萨的SH7201^[6]和TI的TMS320F28335^[1],限于篇幅,主要介绍其用于电力电子系统的相关特性。

3.1 SH7201的特点

CPU:以精简指令集(RISC)微处理器SH-2A为内核CPU,具有5级流水线,带有硬件乘法器,最高时钟频率可达120MHz,平均指令速度达288MIPS。CPU采用哈佛结构,内总线32位,支持总线扩展,寻址空间高达4G字节。

FPU:支持单精度(32位)和双精度(64位)浮点数运算,数据格式和异常处理均符合IEEE-754标准。单精度指令周期仅需1个CPU时钟,双精度需6个CPU时钟。具有四舍五入或截尾方式两种舍入模式可供选择。

存储器:具有32K字节的片内高速RAM,经过CPU总线与CPU内核相连(如图2)。SH7201还具有强大的总线控制功能,不仅提供了SRAM和SDRAM两种片外存储访问接口,而且片内还集成了DMA控制器,从而允许对高速外部数据进行直接内存存取。

中断:CPU内核有一个中断引脚,SH7201通过中断管理单元复用该中断。它的中断源包括特殊17种中断(NMI,IRQ1~7,PINT1~7),以及来自片上12个外设模块的中断。中断优先级分16级,上述每个外设模块以及IRQ1~7中断源的优先级均可单独设置,而NMI则享有最高优先级不可更改,功率驱动保护中断PINT1~7共用同一优先级。

DMA:具有8通道DMA控制器,支持多种传输启动模式包括软件启动、片上外设启动和外设启动。最大数据传输量高达64M字节,单个数据传输宽度最大为32位。支持流水线传输方式和cycle-stealing方式。传输类型有单个数据传输、连续数据传输和持续传输三种。DMA控制器除有挂起、继续、停止功能,此外还支持强制停止功能。

多功能定时器:具有6通道独立16位定时器,最多可实现16路脉冲输出。具有多种输出模式:单脉冲,翻转,PWM,互补PWM以及同步复位PWM。支持3通道

6路互补PWM输出,占空比在0~100%范围内完全可调,具有死区自动设置与死区补偿功能。此外,多功能定时器还有2相脉冲编码计数功能与外部事件捕获功能。

片上AD:SH7201片上集成了8通道10位精度的AD,每通道最小转换时间3.9us,支持单通道单次、多通道单次转换以及多通道连续转换三种工作模式。具有软件启动,定时器启动和外部启动三种触发模式。

此外,SH7201片上还集成有2通道CAN2.0B总线接口,2通道8位DA,1个看门狗定时器,8通道带有16级FIFO的全双工异步串口,3通道I2C总线接口,2通道串行音频数据接口等等,能够满足不同应用场合的需要。

3.2 TMS320F28335的特点:

CPU:F28335以精简指令集(RISC)微处理器C28x为内核32位CPU,具有8级流水线,系统最高频率达150MHz,指令执行可在单周期内完成。CPU采用改进型哈佛总线结构(可工作于冯·诺依曼模式),支持总线扩展,寻址空间高达4G字。

FPU:支持IEEE-754单精度(32位)浮点运算。

存储器:片上集成有256K×16的FLASH,34K×16的高速静态RAM,1K×16的OTP ROM,以及8K×16带有数学运算表的Boot ROM。此外,通过外部总线控制接口XINTF,还能进行片外存储器扩展,能支持2M×16以上的寻址空间。

中断:使用中断控制器,支持所有片上外设共计58个中断。CPU内核有INT1~14以及NMI共15个中断源,F28335通过中断管理单元PIE复用这些中断。PIE最多支持96个片上外设中断源的管理,96个中断源被分为12组,每组8个,组间和组内均有硬件优先级区别,同时通过软件也可以调整优先级。F28335片上外设用到了96个中断源中的58个,包括功率驱动保护中断TZ1~TZ6。

DMA:包含6通道DMA控制器。启动触发源可以选择为ADC排序器、McBSP(Multichannel

Buffered Serial Port)传输接收逻辑,外部中断,CPU定时器和软件。DMA数据传输源/目的存储器

可以是片内高速SARAM,所有外部存储空间、ADC转换结果寄存器,以及McBSP的收发缓存。DMA平均传输速度为4时钟/字。增强型PWM单元:包含6个16位定时器,可实现6对共12路PWM输出。每对PWM都有多种输出模式:独立单沿输出,独立双沿对称输出和非独立双沿非对称输出;支持6通道12路互补PWM输

(下转第31页)

Munich, Germany, 1987.

[2] Krzemi ski Z.: Nonlinear feedback and control strategy of the induction motor, Proceedings of the IFAC Nonlinear Control System Design Symposium, Bordeaux, France, 1992.

[3] Abu-Rub, H, Guzinski, J., Krzeminski, K. and Toliyat, H.: Advanced Control of Induction Motor Based on Load Angle Estimation. IEEE Trans. on Industrial Electronics, USA, Vol. 51, No. 1, February 2004, pp. 5-14.

[4] Abu-Rub, H, Guzinski, J., Krzeminski, K. and Toliyat, H.: Speed Observer System for Advanced Sensorless Control of Induction Motor, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.18, No.2, June 2003, pp.219-224, USA.

[5] Wlas, M., Krzeminski, Z., Guzinski, J., Abu-Rub, H. And Toliyat, H.: Artificial Neural Network-Based Sensorless Nonlinear Control of Induction Motors, Accepted to the IEEE Trans. on Energy Conversion, USA.

[6] J. Holtz and J. Quan, "Drift and Parameter Compensated Flux Estimator for Persistent Zero Stator Frequency Operation of Sensorless Controlled Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No.4, July/Aug. 2003, pp.1052-1060.

[7] Wlas, M., Lewicki, A.: Dynamic performance of sensorless induction motor drives with two control systems based on multiscalar models, EPE 2005

[8] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae: Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits. Tokyo/Japan: IPEC '83, 1983, pp.1375-1385.

[9] Abu-Rub, H., Schmirgel, H., Holtz, J., "Sensorless control of induction motors for maximum steady-state torque and fast dynamics at field weakening", IEEE/IAS 41st Annual Meeting, Tampa Florida, USA, 2006.



原文于“2007年德国纽伦堡PCIM欧洲会议”上发表和汇编出版。

(上接第13页)

出,具有死区设置功能;最多支持6路高分辨率PWM输出、6路外部事件捕获以及2通道正交编码接口。

片上AD:集成有16通道的12位AD,16通道采用两组8通道的多路复用方式,每组通道具有1个采样保持器,支持单组采样和两组同步采样的工作模式。AD最高转换速率达12.5MSPS。可采用软件触发,PWM产生单元触发和外部触发等多种方式启动转换。

除此之外,F28335片上还集成了2通道CAN2.0B总线接口,3路带有16级FIFO的全双工异步串口,3通道I2C总线接口,1通道SPI接口,2通道McBSP接口以及1个看门狗定时器。

4 结语

由以上两种新型的数字控制器的介绍可以看出,它们结合了浮点处理器强大运算能力与专用数字控制器的优点,特别适合有高精度高实时性要求的电力电子应用场合。随着半导体技术的进一步发展,必将出现更多性能更加优秀的数字控制器,关注控制器的发展,并合理地选择功能与应用场合相适应的控制器产品将有助于提高系统性能,缩短开发周期和降低开发成本。

参考文献

[1] TMS320F28335, TMS320F28334, TMS320F28332. Digital Signal Controllers (DSCs) Data Manual (Rev A). Texas Instruments. <http://www.ti.com>

[2] 郭希铮, 韩强, 杨耕. 可选择谐波型有源电力滤波器的闭环控制和实现, 中国电工技术学报, Vol.21, No.9, pp51-56, 2006

[3] 杨耕, 王新华, 用于交流感应电机控制的状态观测器理论——概念、方法和问题, 台达电力电子技术研讨会论文集, 2006年, 南京

[4] 王潞钢, 陈林康等. DSP C2000 程序员高手进阶 [M]. 机械工业出版社. 2005: 33-38.

[5] SH7201 Group Data Manual. Renesas Technology Corp. <http://www.renesas.com>

[6] SH7040, SH7041, SH7042, SH7043, SH7044, SH7045 Group Hardware Manual. Renesas Technology Corp.

[7] TMS320LF2407A, TMS320LF2406A, DSP CONTROLLERS Data Manual (Rev K). Texas Instruments.