

SoC 处理器的电源管理系统设计

何允灵, 秦娟, 王佳, 倪明, 柴小丽

(华东计算技术研究所, 上海 200233)

摘要: 从软硬件角度探讨 SoC 处理器电源管理系统的设计, 分析 SoC 处理器 PMU 的特征, 根据其应用需求讨论有关 PMIC 的设计问题, 包括: 电源 IC 内部结构及选型原则, 数字 PMIC 与传统电源 IC 相比所做的改进, 一种新的电源管理总线——PMBus 和一种高度整合的 PMIC 应用。从嵌入式操作系统的角度分析了动态电源管理系统的设计。

关键词: 片上系统; 电源管理单元; 电源管理芯片; 低压差线性稳压器; 开关电源; 数字电源管理

Power Management System Design for SoC Processor

HE Yun-ling, QIN Juan, WANG Jia, NI Ming, CHAI Xiao-li

(East-China Institute of Computer Technology, Shanghai 200233)

【Abstract】 This paper studies the power management system design for the System-on-Chip(SoC) processor technology. The characteristic of the processor's Power Management Unit(PMU) is analyzed. According to its application demands, it discusses the design problems of Power Management IC(PMIC), which includes: the interior architecture of the power IC and its selection principle, the improvement of the digital PMIC in contrast with the traditional power IC, the application of a new power management bus called PMBus and a highly integrated PMIC. It analyzes the design of Dynamic Power Management(DPM), which is a module in the embedded operating system.

【Key words】 System-on-Chip(SoC); Power Management Unit(PMU); Power Management IC(PMIC); Low Dropout Regulator(LDO); switching regulator; digital power management

随着微电子技术和半导体工艺的迅速发展, 一个复杂的系统能被集成在一个硅片上, 片上系统(System-on-Chip, SoC)的时代已经来临。采用 SoC 解决方案, 重新利用已有设计, 并在此基础上增加新功能的做法, 可以分摊设计费用, 在保持系统成本的情况下提高性能。SoC 处理器实现了在单芯片上整合多种功能, 如中央处理器、模拟与数字基带处理器、音频和图形处理器等。多种功能带来多档电源的需求, 随着这些功能的添加, 对处理器处理能力的要求也越来越高, 迫使处理器主频不断提高。由于以上原因, SoC 处理器的功耗一直居高不下, 因此在实际应用中必须设法降低其功耗。

1 SoC 处理器的电源管理

在运行不同的任务时, SoC 处理器对电源的需求不同。如运行在线互动游戏时要求处理器全速运行, 必须增加供电; 播放音乐时可降低处理器频率, 以减少供电; 而在系统不使用时, 可关闭核心供电, 使处理器进入睡眠状态。由此可见, 如果供电系统能根据运行任务实时调整供电状态, 就可减少不必要的能耗, 提高系统能源利用率。

可以利用 SoC 自身先进性和高集成度的优点, 结合应用需求, 为其量身定做一套完善的电源管理系统, 解决功耗问题。其内部需要一个专门的电源管理单元(Power Management Unit, PMU)。SoC 处理器的 PMU 一般具备以下特性:

(1)需要外部电源芯片提供多档电源, 或在某档电源上施加较高的电流。原因在于 SoC 处理器通常要求其核心、I/O 设备和存储单元等独立供电, 而这些单元对电压、电流、频率等的要求通常各不相同。

(2)应能为外部供电系统提供专用控制信号, 通过 PMU 控制寄存器设定这些控制信号的状态, 实现实时软件控制机

制, 最终实现动态电源管理。这些控制信号有: 打开或关闭供电系统的使能信号, 控制供电系统输出电压大小的数字接口信号等。

(3)PMU 的一些基本接口信号如系统复位、电源状态指示信号等发生变化后, SoC 处理器状态将随之改变。

由此可见, PMU 作为外部供电系统和内部功能单元之间的供电桥梁, 在系统节电中起着非常重要的作用。

SoC 处理器电源管理系统框图如图 1 所示。

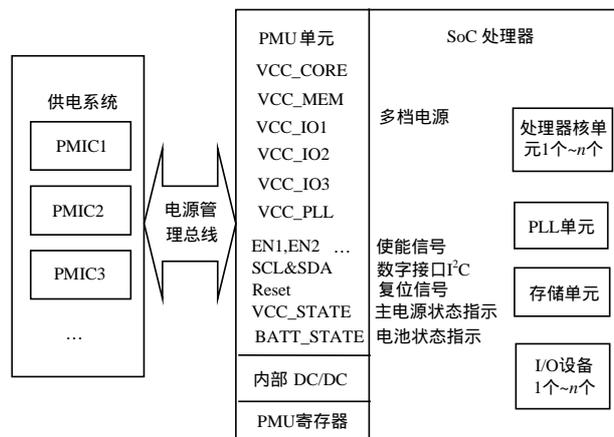


图 1 SoC 处理器电源管理系统

作者简介: 何允灵(1980 -), 女, 工程师、硕士研究生, 主研方向: 嵌入式计算机; 秦娟、王佳, 助理工程师; 倪明, 研究员; 柴小丽, 高级工程师

收稿日期: 2007-09-30 **E-mail:** heyl@ecict.com.cn

PMU 由内部 DC/DC 和 PMU 寄存器等构成,此外,SoC 处理器中还集成了处理器核、PLL、存储、I/O 等,PMU 为这些单元供电,并利用控制信号控制外部供电系统。供电系统由若干个电源管理芯片(Power Management IC, PMIC)组成。

由此可见,传统的电源芯片已不能满足 SoC 处理器的要求,需进一步改进,而 PMU 和 PMIC 之间也需要一种规范的电源管理总线。在电源系统设计的整个过程中,从硬件设计的角度考虑,为满足处理器多档电源的需求,实现高效率 DC/DC 转换,应仔细做好 PMIC 的选型、电源管理总线及 PCB 设计等工作;从软件设计的角度考虑,为达到优化电源管理的目的,在嵌入式操作系统中加入电源管理模块,根据应用的需求,由软件实时设定 PMU 寄存器,继而控制相应的 PMU 接口信号,改变外部 PMIC 的供电状态。

2 电源管理芯片

2.1 内部结构

电源管理系统设计的第一步就是电源 IC 的选型。针对 SoC 产品采用的电源 IC,根据内部结构的不同,分为 2 大类:线性稳压器和开关电源^[1]。

线性稳压器通过一个电压控制电流源来控制输出电压,如图 2 所示,其中控制电路监控输出电压,在保持其大小固定的情况下,调整相应的电流大小。因此,电流源的设计规范决定了该线性稳压器在保持输出电压正常时的最大负载电流。

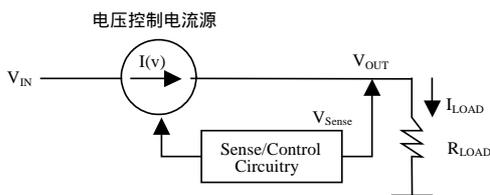


图 2 线性稳压器内部结构

常用的低压差线性稳压器(Low Dropout Regulator, LDO),压差只有 1.3 V~0.2 V,可实现 5 V 转 3.3 V/2.5 V、3.3 V 转 2.5 V/1.8 V/1.3 V/1.1 V 等各类要求。其所需的外围器件数目少、使用方便、成本低、纹波小、无电磁干扰,但这种芯片通常效率不高,而且功耗比较大。

大多数开关电源内部采用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM),它需要外部电感和电容形成 L-C 网络,由 PWM 产生的一系列方波经滤波后控制 DC 输出,方波宽度决定输出大小。由于采用了 PWM,因此开关电源的转换效率要比 LDO 高。为进一步减少电源消耗,高级开关电源还具有自动脉冲频率调制(Pulse Frequency Modulation, PFM)/ PWM 模式转换功能,以尽量提高宽负载范围内的转换效率:在轻负载情况下,工作于 PFM 模式;而当负载电流大于一定毫安时,则采用 PWM 控制。

常用的开关电源有 3 类:降压型 BUCK,升压型 BOOST 以及反相型 BUCK-BOOST。开关电源与 LDO 相比,其转换效率高、散热少,缺点是成本高、体积大、噪音大,电感器频率外泄干扰较难避免,设计时需考虑其 EMI 辐射。

采用何种电源设计方案,应结合上述 2 类电源 IC 的特点,取决于具体的应用需求。通常,小功率或对电源效率要求较低的时候,可采用 LDO 供电,如锁相环模块的供电;但是在大功率或对电源效率要求较高的场合,应采用开关电源,如

处理器核供电要求高效和大电流驱动,通常采用开关电源。有时也采用两者结合的方式,为系统供电提供一种平衡的方案。

2.2 传统电源芯片

传统电源芯片完全采用模拟方案,如输出电压、工作频率、过电流保护门槛等参数,通过外部阻容设定,而过电压保护门槛,用户可能不作改动或根本无法改动,应用时即使采用同样的电源芯片,不同电源用户的硬件电路也可能不同,而且外部固定的无源元件参数一旦确定,就不可更改。因此,若在 SoC 应用系统中使用这类电源芯片,不可能做到动态调节其供电状态。

2.3 数字电源管理芯片

2.3.1 使能端

SoC 处理器各部分电源常采用互相隔离的不同电压,必须由多片电源 IC 供电。为节省供电量,通常某功能单元不工作时,都希望为其供电的电源 IC 进入睡眠状态。因此,要求该电源 IC 具有使能控制端:当使能端信号无效时,片子无输出电压,进入睡眠状态。利用使能端关闭电源 IC 可动态降低静态电流的消耗,如 LDO 的典型关断电流在纳安量级。

2.3.2 数字接口 I²C

有了数字接口,PMU 就可精确控制 PMIC 的供电状态。如 I²C 控制型降压器 LTC3447:处理器将控制信息通过 I²C 接口发送给 LTC3447,由其内部一个 n 位 DAC 根据 I²C 数据把输出电压设定在某一范围之内。初始启动电压通过外部反馈电阻器来设定,一旦通过 I²C 对内部 DAC 进行更新,则该电源 IC 将从外部反馈电阻器切换至内部 DAC 控制输出^[2]。

采用通用串行标准 I²C,只需 2 根线即可达到精确控制,接口简单。通过将软件工具、处理器控制功能与 I²C 相结合,设计师可动态、精确调整电源 IC 的输出电压,数字单元与模拟电源管理 IC 之间实现了高性能信息交换,电压、电流以及功率的实时调整成为现实,因此,在 SoC 处理器和电源 IC 之间接入数字接口,在现有的满负载到系统待机模式之间存在多种省电模式,可大大降低功耗。

2.3.3 数字电源开放标准协议

电源管理总线(PMBus)是一种开放标准的数字电源管理协议,用来控制功率转换和管理器件,可用于主系统与电源子系统之间的通信。目前不少厂商已有基于 PMBus 的产品问世,如美信的 MAX8688。PMBus 的出台对数字电源设计形成了有力的推动作用^[3]。图 3 为 PMBus 的基本结构。

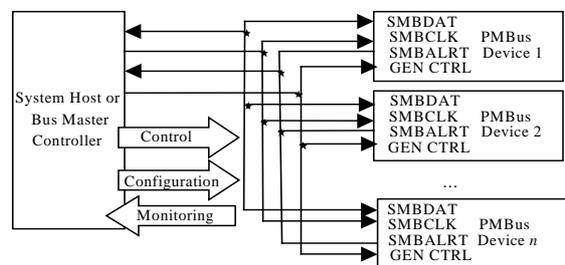


图 3 PMBus 的基本结构

SMBDAT、SMBCLK 及 SMBALRT 信号均为电源管理总线标准的一部分,而 GEN CTRL 信号可用作任何控制信号,如接通或切断信号。类似于 I²C, PMBus 的通信是按照 1 个简单的命令集进行的,每个包包含 1 个地址字节、1 个命令字节、若干个数据字节以及 1 个可选的包错误码字节。使用

PMBus, 可使用命令集实现对数字电源产品的全面配置。

2.4 高度整合的 PMIC

SoC 处理器高集成度的特性决定了其电源系统需要多片电源 IC, 且特性各异, 如不同的输出电压、负载电流, 不同的内部结构和外部接口。而采用多片电源 IC 的设计方式必然导致 PCB 面积和干扰等其他因素的增加, 使得一片 SoC 处理器周边围绕着体积大于其数倍的电源 IC, 降低了 SoC 在实际应用中的种种优越性。因此, 主要的处理器电源管理方案厂商如国半、美信等都推出了解决方案, 即高度整合的电源管理芯片。采用一片高度整合的电源 IC, 集合上述各类 PMIC 的内部结构和外部接口于一片 IC 中, 可在最小的 PCB 面积中满足系统设计对电源的要求, 包括数档电源、省电运行模式、高效的能量转换、电池充/放电周期的精确控制等。

图 4 为国半推出的一款电源管理芯片 LP3971, 内建 3 个高频降压转换器BUCK和 6 个LDO, 提供多个电源电压, 可满足大部分处理器的要求, 并可根据核心电源管理器和系统架构的要求进行优化。 I^2C 可以动态地调整并测量通常为处理器内核供电的主电压转换器的输出电压, 另外的电压转换器可用于 I/O、存储器或其他外设。LP3971 与 PMU 的接口更加简化, 各个电源块的(所有LDO和BUCK)开关不是通过各自独立的使能端, 而是通过 I^2C 实现不同的电源块在开关之间切换^[4]。

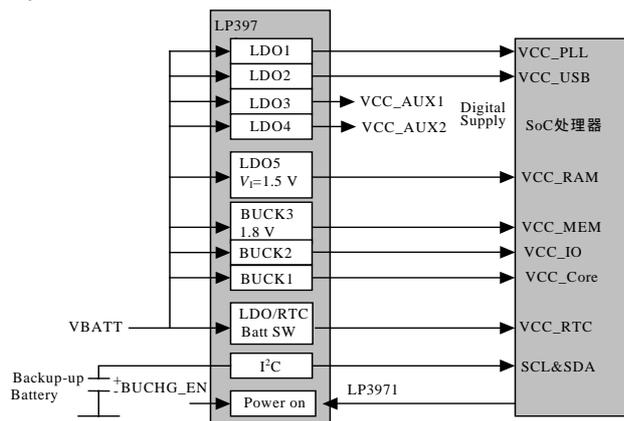


图 4 电源管理芯片 LP3971

单芯片电源解决方案整体体积小, 装配成本低。但相应的高集成度降低了成品率, 设计周期长, 提高了价格, 又由于其输出管脚多, 难以靠近负载, 因此设计时不应拘泥于单片解决方案。

3 软件实现

硬件提供的电源管理机制, 需要软件来发挥它的功效。SoC 的复杂性决定了其软件不可能采用简单的前后台方式, 它需要操作系统对资源和任务进行合理配置。实时嵌入式操作系统是软件上能实现电源管理的理想方式, 原因在于: (1)它决策不同任务的运行, 可实时收集相关任务的限制信息和性能需求信息; (2)它可以直接控制底层硬件。

在操作系统级别的电源管理中, 传统的技术是当系统不使用时简单地进入静态模式: 睡眠或挂起。动态电源管理(Dynamic Power Management, DPM)突破传统, 由 IBM 的 Austin 研究实验室和 MontaVista 软件公司提出, 最初在 IBM 405LP 处理器平台的 Linux 系统中实现。在 DPM 中, 不仅采用了传统的节电技术, 即某功能单元不使用时, 关闭其供电设备, 进入低功耗模式待机, 还采用了一种更高效的方法: 动态可变电压 DVS 和动态可变频率 DFS, 即在系统运行时动

态调节 CPU 频率/电压, 例如播放 MP3 和运行游戏时的 CPU 频率/电压不同。甚至在播放 MPEG4 视频过程中, 一帧播放完, 先降低供电电压, 然后提高电压以播放下一帧, 可见在每个视频帧播放的瞬时间隔内 DPM 都实现了节电。当然, DVS/DFS 技术是通过电源芯片的数字接口编程实现的。通过这些例子可以看出: DPM 实现了在满足瞬时性能的前提下系统有效能量供给率最大化。

DPM 是一个操作系统模块, 其架构可对设备和设备驱动进行管理, 策略管理者和应用程序通过简单的 API 和该模块交互, 适合对 SoC 处理器进行有效的电源管理。DPM 是以策略框架为中心的软件结构。其中包含几个重要的概念: 操作点(operation point), 操作状态(operation state), 策略(policy) 和约束(constraint)^[5]。

(1)操作点: 由系统的设计者定义, 操作点封装了最小的、相互关联的、物理的离散参数集合。一般来说, 参数主要是 CPU 的频率、电压、电源管理模式、总线频率以及各外设的状态等。在给定时间点上, 系统总是运行在某个特定操作点上, 与之关联的能耗等级也是确定的。

(2)操作状态: 工作负荷是一个连续值, 而操作点却是离散的, 因此, 需要对工作负荷的范围进行划分。一般可以把操作系统看作一个状态机, 通过事件的触发, 操作系统在各个状态之间切换。把操作系统的状态与操作状态一一对应, 对应不同的工作负荷范围, 再映射到不同的操作点上。当操作系统任务上下文调度切换的时候, 根据任务状态, 直接调用 DPM 的相关例程, 应用新的操作状态。

(3)策略: 定义一个策略就是定义每个操作状态所映射的操作点, 策略是 DPM 中最高级的抽象对象。在 DPM 架构中, 策略管理者不会直接对设备的状态进行管理, 而是通过底层的驱动来管理设备的功耗。

(4)约束: 在某个操作状态下, 当某个睡眠的设备需要被唤醒时, 通过设备驱动对 DPM 声明约束, 接着 DPM 选择一个操作点, 使得在该操作点下, 该设备能够正常工作, 选择的机制可以在策略中定义。

DPM 技术通过内核模块的方式实现任务级别电源管理, 实现了有效的设备电源管理, 补充了基于桌面系统 APM 和 APCI 电源管理技术的不足。实践证明, DPM 对嵌入式系统, 尤其是 SoC 处理器在移动便携式设备中的应用, 能够起到很好的节能效果。

4 结束语

集成电路的发展带来了高度整合的 SoC 处理器和先进的电源 IC, 使得系统的硬件设计更加简洁、容易和高效。同时, 在电源管理方面, 硬件功能的扩展为软件提供了交互的平台, 操作系统的电源管理功能增强, 极大降低了系统功耗, 使得系统在较长时间内能实现更多功能, 满足人们的多种需求。但无论是从硬件还是软件方面来看, 在 SoC 处理器的电源管理方面, 今后还有很多值得研究和改进之处。

参考文献

- [1] Powering CoolRunner-II CPLDs[Z]. Xilinx Inc.. 2003-05-19.
- [2] LTC3447 芯片手册[Z]. Linear Inc.. 2005.
- [3] White B. PMBus——数字电源开放标准协议[J]. 今日电子, 2005, (9): 49-51.
- [4] LP3971 芯片手册[Z]. National Semiconductor Inc.. 2006-03.
- [5] Dynamic Power Management for Embedded Systems(Ver1.1)[Z]. IBM, MontaVista Inc.. 2002-11-09.