

单片机外设的发展使电流模式数字电源设计更为容易

作者：Keith Curtis
安防、单片机及技术开发部主任应用工程师
Microchip Technology Inc.

早期的开关电源（SMPS）设计采用的是称为“电压模式”的标准控制方法。一个锯齿波发生器驱动电压比较器的一个输入端，同时误差放大器/环路滤波器输出的误差信号驱动比较器的另一个输入端（参见图1）。这样得到的是一个仅由误差信号决定的脉宽调制（PWM）脉冲。在这种工作模式下，如果电感线圈中的电流在PWM脉冲关断期间没有充分放电，那么可能会使电感线圈磁场不归零而产生磁移现象。最终导致电感磁芯饱和，从而使电感线圈中的电流突然增大。通常，这会导致开关晶体管的灾难性故障。

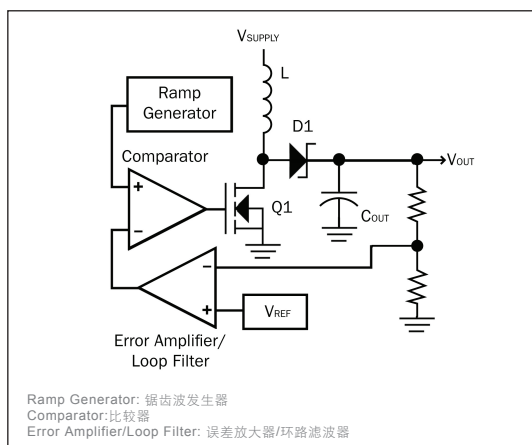


图1：电压模式升压变换器原理图

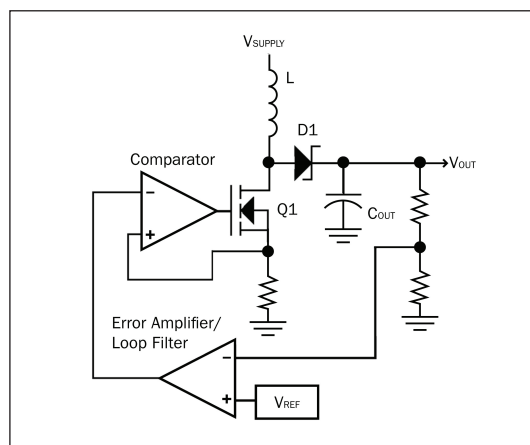


图2：电流模式升压变换器原理图

随着SMPS设计越来越成熟，人们开始使用称为“电流模式”控制方式这一更为安全的系统。在电流模式控制的电源系统中，原来驱动比较器一个输入端的锯齿波发生器被由电感电流驱动的电感反馈信号取代。在这样的系统中，电感线圈中的峰值电流直接由误差信号控制，从而避免了电感磁场的磁移现象，这延长了无数开关晶体管的使用寿命（参见图2）。

采用电流模式还带来另外一个好处：利用误差电压控制峰值电感电流，从而电感就成了一个电压控制的电流源。在控制环路的频率响应中，电感作为电流源不会再形成极点。这样，整个控制环路从绝对不稳定系统转变为有条件的稳定系统，从而使得环路滤波器的设计更为简单。

那么，既然电流模式控制有这样大的优点，为什么数字SMPS设计仍然采用电压模式控制呢？原因在于为监控电流反馈而采用的方法，以及实现有效采样速率所需的速度。

例如，让我们考虑一个8位PWM分辨率的500 kHz系统。采用电压模式配置，PWM的分辨率使我们对脉冲占空比的控制限于0.4%（100%/256）左右。此外，电压反馈要求每个脉冲至少采样一次，即每秒50万次，才能够为内部软件环路滤波器提供必需的输入。

采用电流控制模式时，根据目标PWM占空比分辨率，每个PWM脉冲要完成256次转换才能够获得同样的控制精度。如果最大占空比是50%，那么ADC采样率必须达到每秒2.56亿次 [256 / (2mS x 50%)]。此外，要采集如此大量（2.56亿每秒）的转换数据，将每个数据与误差信号进行比较，并在达到设定电流值的时候关断PWM输出，均需要足够的处理能力。因此，这需要处理器至少每秒执行10亿至20亿条指令（BIPS）。占空比为50%的情况下，就意味着至少要有一半的处理能力来完成每个周期的电流限制。这样的解决办法并非是最经济有效的！

那么，设计人员在数字SMPS设计中只能采用电压模式了？答案当然是否定的。

可行的解决方案是利用一个片上带有PWM外设的单片机或数字信号控制器（DSC），PWM外设的工作方式与电流模式PWM发生器的一样（参见图3）。

从图3的原理图中可以看到，在通用的基于定时器的PWM外设上增加了两个混合信号器件：一个电压比较器和一个数模转换器（DAC）。电压比较器提供的关断信号与占空比计数的输出经过与门后连接PWM模块。当占空比计数器到达零或比较器的输出变为零时，驱动PWM输出为零。

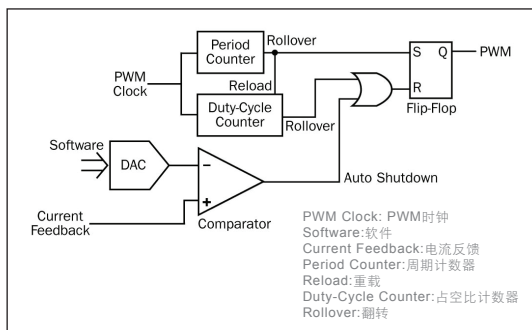


图3：带有自动关断功能的基于计数器的PWM

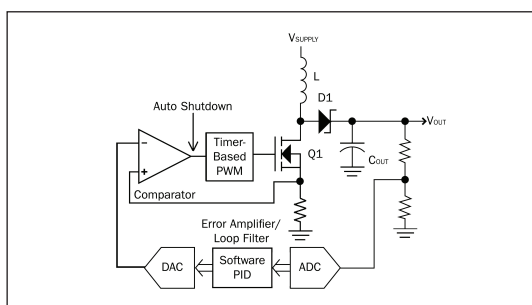


图4：数字电流模式升压变换器原理图

DAC的输入来自单片机，以生成一个参考信号。这一参考信号连接到比较器的输入端。将这一系统应用于数字开关电源设计时，PWM模块中的计数器启动一个PWM脉冲，DAC生成比较器反相输入端的输入电压（代表所希望的电感电流），而电流反馈输入到比较器的正相输入端。

随着电感电流不断增大，占空比计数器的值在递减。如果电感电流先达到设定水平，比较器的输出会终止PWM脉冲，电感开始向输出电容放电。如果占空比计数器先到零，也会关断PWM脉冲。这样就带来了两个方面的优点：一方面是快速电流模式反馈并不需要高MIPS的处理器，同时能够设定最大占空比来实现限流的目的。

这一例子还有另一个有趣的特性。在最大占空比关断时，PWM占空比的分辨率仅由计数器决定。而电压比较器关断则由DAC的分辨率决定，因此PWM的正常工作分辨率并不需要PWM外设采用高频时钟。

我们如何来使用这一系统呢？首先我们先确定设计所需要的PWM频率和最大占空比。然后，利用这些参数来配置PWM的计数器部分。接着，调节参考DAC输出使之能够满足电流反馈信号的预期最大范围。这可为控制PWM占空比提供最高的分辨率。最后，设计软件PID（比例-积分-微分）控制器，获取模数转换器（ADC）输出的电压反馈，并将其与内部数字参考进行比较，适当滤波以保证稳定性，然后再输出期望的电流设定值到DAC，以生成比较器参考（参见图4）。

请等一下——当占空比大于50%时，电流模式控制的稳定性问题如何？

由于电流水平通过PID软件设置，因此当所需要的电流水平超过DAC范围的一半时就可以很容易地对DAC值进行按比例的缩放。数字设计中实现斜坡补偿在比模拟设计中更为容易，因为数字设计通过软件实现，而模拟解决方案需要锯齿波发生器与PWM脉冲同步，同时还需要将其与电流反馈进行叠加操作。

通过上面的过程，我们就获得了一个简单的电流模式SMPS系统，其使用更便宜的MIPS较低的处理器的处理能力在1-2 BIP的处理器做起来也很勉强的工作。考虑到处理器只需要在下一个脉冲开始前计算出新的目标电流量，因此处理器有足够的时间来完成其他任务，如通信系统监控、软启动/上电时序等判断性功能，以及处理故障检测和恢复等。

这样还免除了对高频率PWM模块的需要。在电压模式控制数字SMPS设计中需要高时钟频率来提供足够的占空比分辨率。

现在有了模拟比较器自动关断系统，分辨率由为比较器提供参考的DAC分辨率决定。对于PWM时钟频率的惟一要求是必须能够保证准确设置最大电流数值。

让我们假设最大占空比为60%的500 kHz脉冲。为达到60%占空比（即周期的6/10）所需要的分辨率，只需要一个4位计数器。所需要的PWM时钟频率也仅为5 MHz，10 x 500 kHz。与全数字解决方案相比，这一时钟频率低得多，也更为合理。

这听起来真不错，但去哪儿找到相关的器件呢？实际上，这一点也不难。此类外设出现已经有几年了，主要被作为电机控制器件。最初设计比较器关断模式主要是为了在电流过大的情况下为电机提供过流保护。事实上，有些小型8和14引脚单片机中集成的PWM发生器就有这一自动关断功能。小型单片机的惟一问题是缺少硬件乘法指令来实现高效的PID功能。

幸运的是，数字信号控制器（DSC）生产商服务电机控制市场已有多年，因此目前已经有不少器件同时具有硬件乘法指令和所需要的PWM功能。此外，DSC生产商正在着手推出专门针对数字SMPS的设计。这些设计中的大多数都保留了PWM外设中的比较器关断功能，同时作为数字信号控制器，还包括了高效实现PID算法所必需的数学运算功能。

总之，数字SMPS设计现在已经可以迁移到电流模式配置，这样可以同时享有电流模式控制和数字控制所带来的好处，还不必投入高昂成本购买高MIPS处理器。

参考资料：

请访问Microchip公司网站（www.microchip.com），获得可用于文中所述应用的下列PIC® 单片机和dsPIC® 数字信号控制器（DSC）的更多信息：

1. PIC16F785混合信号单片机
2. PIC16F690通用单片机
3. PIC18F4431电机控制单片机
4. dsPIC30F010 和 dsPIC33FJxxxMCxxx系列电机控制dsPIC® DSC器件
5. 用于SMPS的dsPIC30F1010/2020/2023 DSC
6. 智能电源设计中心：www.microchip.com/power