

电源系统

<http://www.powersystems.eetchina.com/>

开关调节器设计中的频率补偿

第一部分：正向通道补偿

对于经验尚不丰富的工程师而言，在所有与开关调节器电路设计有关的方面当中，最令人沮丧的一方面当属频率补偿问题了。不过，无需大量的数学计算仍然可以实现稳定的运行和卓越的性能。本系列文章（共两部分）的第一部分对正向通道进行了探讨。

作者：Nigel Smith，德州仪器 (TI) 便携式电源业务开发经理

无论何种电路拓扑结构，所有进行频率补偿的负反馈开关调节器都可用图 1 中的控制环路结构图来表示。从 V_{IN} 到 V_{OUT} 的正向通道中，根据对控制信号 V_C 的响应，输入电压被转换成输出电压。然后，这一输出电压将与参考电压 V_{REF} 进行比较，并根据需要调整 V_C 以校正误差。这就是反馈通道。

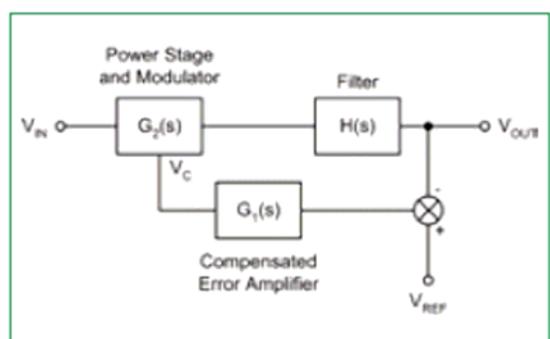


图 1 控制环路结构图

在实际应用中，正向通道的增益和相位随频率的变化而不同，因此可能在某一频率（或某些频率）时，输出电压响应太慢，从而导致性能不佳；或响应太快，从而导致振荡或振铃。

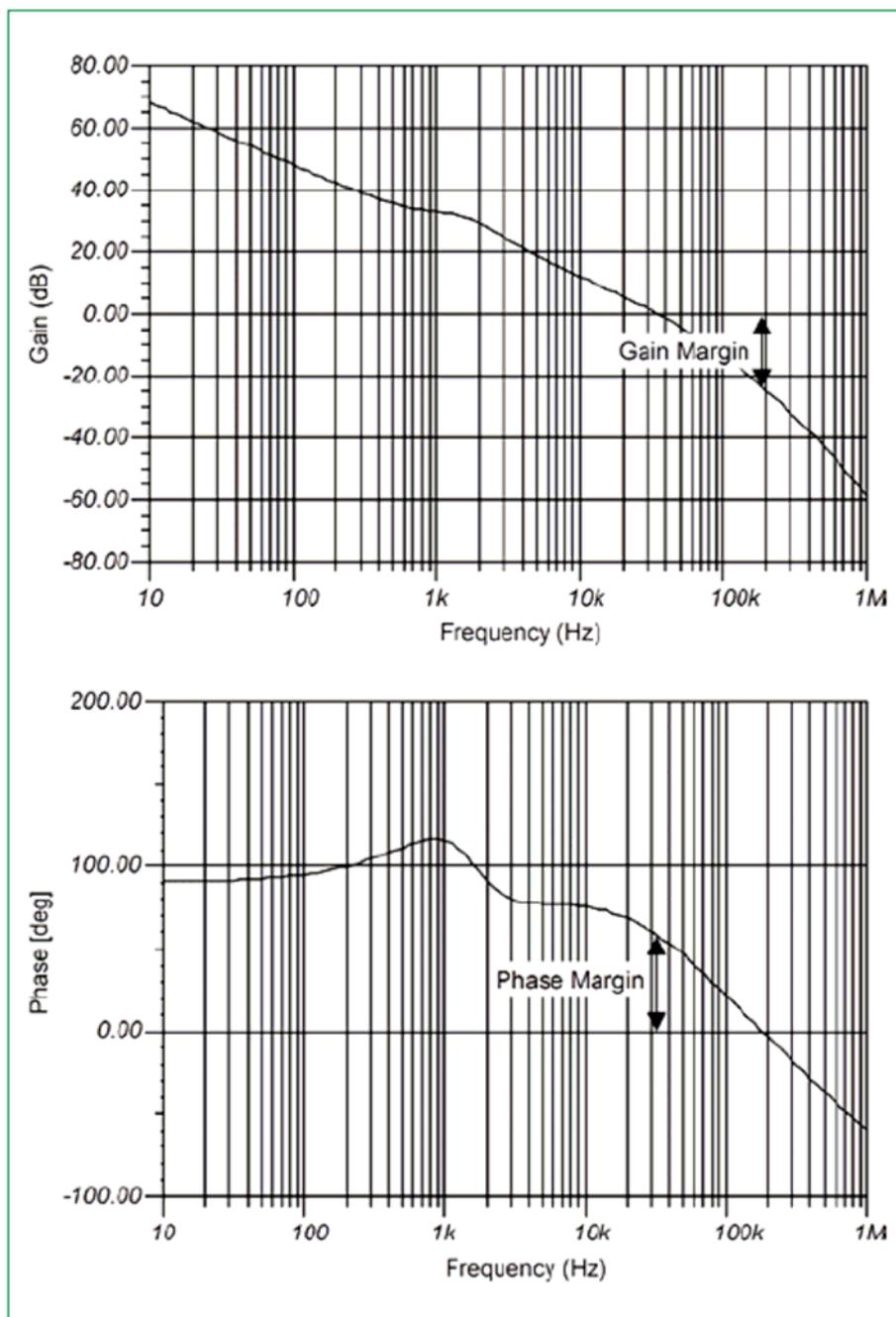
频率补偿对充分考虑了正向通道频率响应的反馈路径进行了描述，并确保反馈信号补偿的方式能使系统提供良好性能并保持稳定。

负反馈系统稳定的基本要求是当环路的相位变化为 360° 时，环路增益必须小于

电源系统

<http://www.powersystems.eetchina.com/>

0dB。实际应用中若太接近理论限值，即使系统稳定，也可能造成振铃过大。因此，在实际应用中经常有意使反馈系统设计存在一定的内置裕度。相位裕度是指环路增益为 0dB 的频率处的环路相位，增益裕度则是指环路相位为 360° 的频率处的环路增益（见图 2）。图 1 和图 2 均描述了负反馈系统的性能优点。一般来说，增益和相位裕度越大，系统就越稳定。实际应用中，能最好平衡性能和稳定性的最小增益和相位裕度分别为 10dB 和 45° 。



电源系统

<http://www.powersystems.eetchina.com/>

图 2 增益和相位裕度

对开关转换器进行补偿的第一步是计算出正向通道（通常包含一个功率级和一个输出滤波器）的增益和相位响应。

功率级根据拓扑结构，通过控制开关占空比 D 将输入电压转化到期望的输出电压。最常见的三种拓扑结构（降压、升压和反相）的理想传输函数是：

$$V_{OUT} = V_{IN} \times D$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \times 1/(1-D)$$

$$V_{OUT} = -V_{IN} \times D/(1-D)$$

可以不同方式控制占空比以获得期望的输出电压。

在直接占空比控制中，开关的占空比通过将控制电压 V_C 与一个固定振幅的锯齿波电压 V_{RAMP} （见图 3）进行比较得出。得出的 PWM 信号占空比如下：

$$D = V_C / V_{RAMP}$$

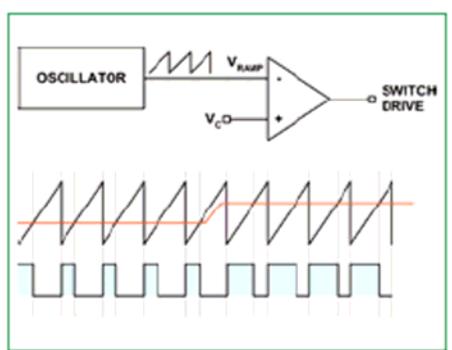


图 3 脉宽调制方案

知道这一数值以后，现在就可以计算出从输入到输出的增益。对于一款简单的降压转换器而言，该增益为：

$$G_2(S) = V_{IN}(S) / V_{RAMP}(S)$$

电源系统

<http://www.powersystems.eetchina.com/>

在此种情况下，增益随着电压变化而变化，对环路进行补偿时必须考虑到这一点。采用直接占空比控制的开关转换器对线路变化的响应相对较慢，因为只有在 V_{OUT} 处出现误差后，反馈环路才能进行相应校正。

一种更出色的控制方法（亦即电压前馈）克服了这一问题。该方法生成了一个斜坡波形，其振幅与输入电压成比例，使 $V_{RAMP} = KXV_{IN}$ 。 $G_2(S)$ 的计算结果独立于 V_{IN} ，可由下式得出：

$$G_2(S) = 1/K$$

功率级增益现在是一个恒定值，这简化了环路补偿。使用电压前馈的开关转换器对输入电压的变化可以进行更快地响应，因为占空比自动调整适应了 V_{IN} 的变化，而无需等待输出端误差的出现（因为正向通道中有低通输出滤波器，所以等待会消耗一定的时间）。

另一个自动校正线路变化的控制方法是电流模式控制。使用这一方法时正向通道中某处的电流由一个内部控制环路进行控制，并由一个外部控制环路对输出电压进行调整。因此，自动完成了对 V_{IN} 变化的补偿，而无需等待输出端误差的出现。

上述的每一个控制方法都可在同样的转换器拓扑结构中使用，但会产生不同的功率级增益，因此必须针对具体的转换器进行具体考虑。此外，在电流模式控制方案中，内部电流环路的的存在意味着输出电感从输出滤波器特征（因为它是由电流源进行有效驱动的）中排除了。因此，电压模式降压转换器中的输出滤波器是由一个电感和电容组成的，而同一转换器（基于频率补偿考虑）的电流模式控制的输出滤波器则仅由一个电容组成。

上述的传输函数基于一个重要的假设，即转换器是以持续导电模式 (CCM) 方式

电源系统

<http://www.powersystems.eetchina.com/>

工作的。这意味着电流持续流过电感。相反，非连续导电模式 (DCM) 意味着电感电流在一些开关周期内为零。转换器是否在 CCM 或 DCM 模式下工作是非常重要的，因为传输函数在不同模式下是不一样的，频率补偿方案必须考虑到这一点。一般来说，绝大多数的转换器的设计旨在 DCM 或 CCM 模式下工作（正常工作条件下），但有时却并非如此。非同步转换器根据工作条件的不同，在 CCM 和 DCM 模式之间转换。不过，同步转换器总是工作于 CCM 模式下，这可以简化补偿。

通常是在正向通道设计过程中根据实际应用的输出电压纹波要求对输出滤波器组件进行选择，其所产生的增益和相位响应对频率补偿的设计来说也是非常重要的。

在绝大多数开关转换器中，输出滤波器要么是双极型的（具有输出电容和电感），以 40dB/decade 的速度衰减；要么是单极型的（仅具有输出电容），以 20dB/decade 的速度衰减。在两种情况下，输出电容器中的任何 ESR（等值串联电阻）将在高频时增加一个零点，必须对此进行考虑，因为它通过提高增益和相位改变了滤波器响应的斜率。

一旦得出了功率级和输出滤波器的数学表达式或等效电路可用，则可以确定正向通道的增益和相位响应。图 4 显示了德州仪器 (TI) TPS40200 降压转换器的 Bode 曲线（摘自 TPS40200 产品说明书的图 47）。这一曲线提供了开始补偿设计的所有必要信息。

电源系统

<http://www.powersystems.eetchina.com/>

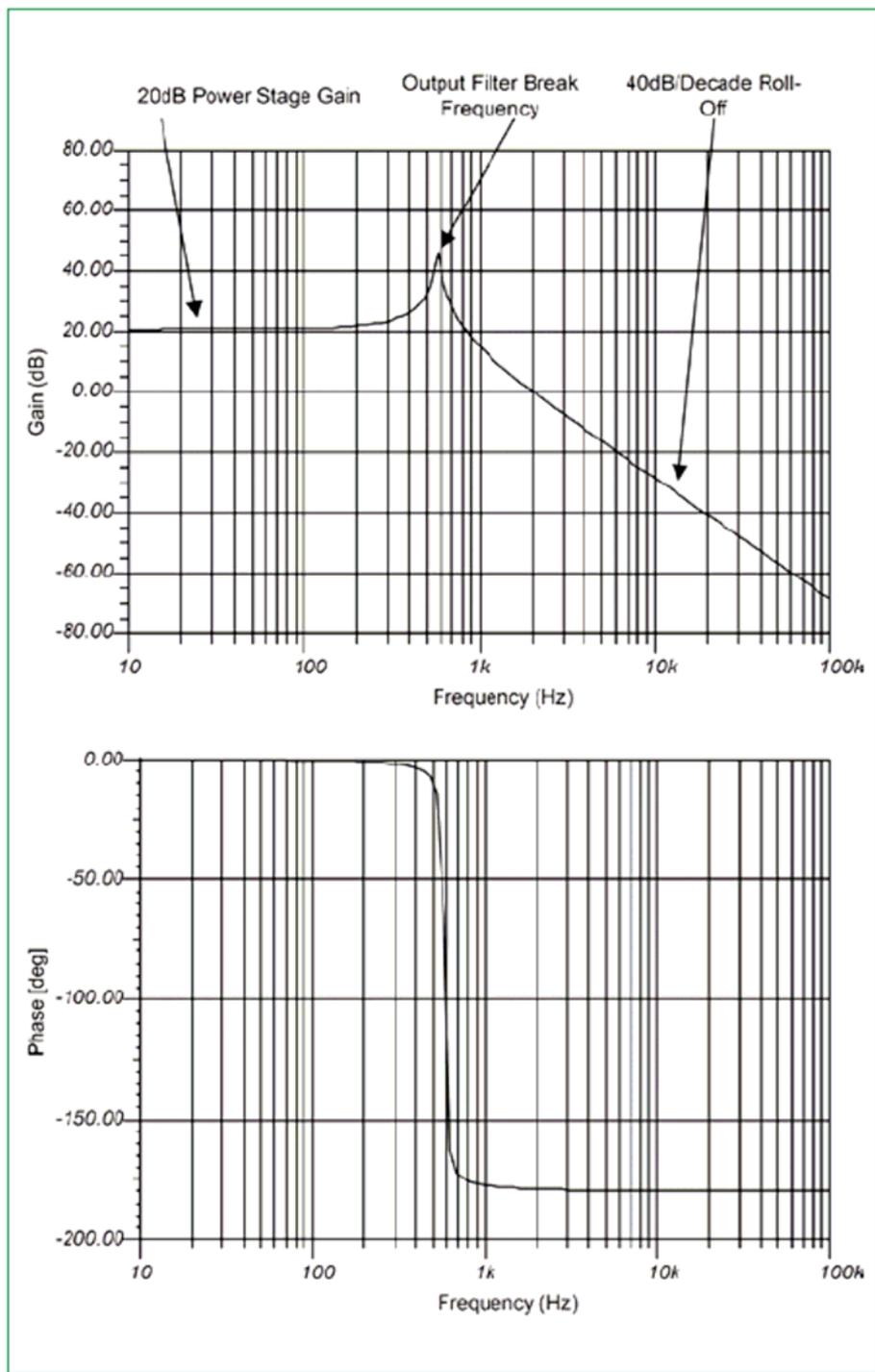


图 4 典型的 TPS40200 正向通道 Bode 曲线

本文的第二（最后）部分请见下月的《电源系统设计欧洲版》，可将反馈通道视为闭环电路，并对整个电路都进行了补偿。