

# 开关调节器设计中的频率补偿（二）

作者: Nigel Smith  
便携式电源业务开发经理  
德州仪器公司

在该系列文章的第一部分中，我们探讨了开关转换器的正向通道。在该第二部分（即最后一部分）中，我们将要探讨的是在环路处于关闭状态且全部电路被补偿时的反馈通道。

## 第二部分：反馈通道补偿

一旦正向通道的增益和相位响应为已知，那么就可以设计出误差放大器的响应。频率补偿的主要目的是为了确保: (a) 足够的相位裕度（通常大于  $45^\circ$ ）；及 (b) 一个足够的增益裕度（通常大于  $10 \text{ dB}$ ）。除此以外，环路增益还应该通过单位增益 (unity)，斜率为  $-20\text{dB/decade}$ 。

在将频率补偿设计出来以前，必须选择一个合适的交叉频率  $f_c$ 。高交叉频率的开关转换器可以对运行状态的变化迅速地做出响应，因此一般为较好的选择；但是，采样原理限制了可以使用的最大交叉频率。在实践中， $f_c$  一般位于  $1/10$  和  $1/6 f_{sw}$  之间，但是，如果该频率上误差放大器的开环路增益不足，那么则可能要进一步减小  $f_c$ 。

可以从其 Bode 曲线中选择理想的交叉频率、增益、相位和  $f_c$  处正向通道的斜率。通过对两者进行比较，现在可以很容易地获得所要求的增益、相位和  $f_c$  处补偿误差放大器的斜率。

通常使用的三种补偿方案为类型 I、类型 II 和类型 III（见图 1）。类型 I 通常不用于开关调节器电路，这里将不作讨论。

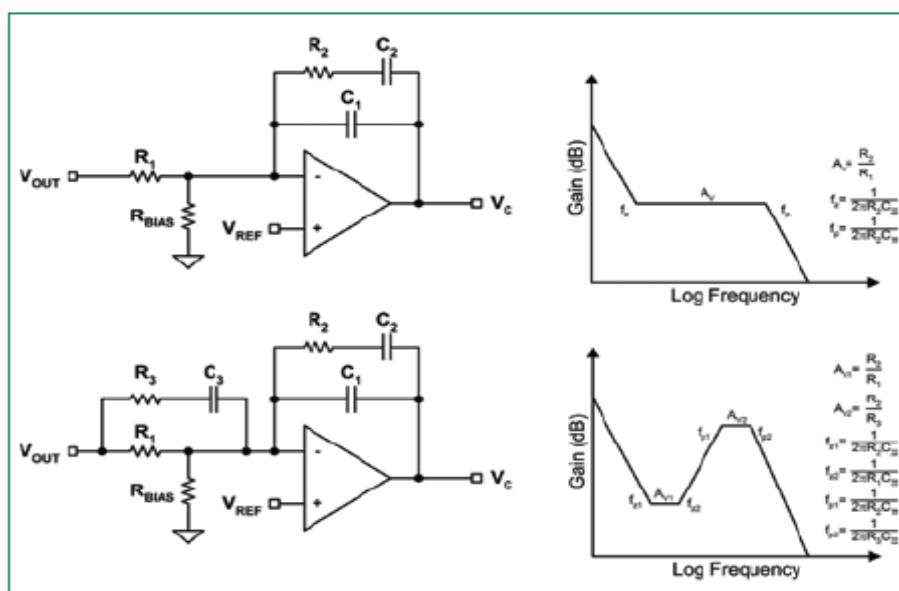


图 1、常用的补偿电路及其响应

类型 II 补偿在源端 (origin) 具有一个极点 (以获得高 DC 增益), 以及一个额外的零点和极点。其产生的频率响应包含一个介于零点和极点的偏平区域。类型 II 补偿一般被用于那些在交叉频率上输出滤波器具有一个单极点衰减的应用中。通过确保交叉频率出现在误差放大器响应偏平部分的区域, 可以获得  $f_c$  上理想的 -20dB/decade 衰减。

表 1、一个类型 II 补偿电路的相位变化

		K <sub>1</sub>									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
K <sub>2</sub>	1.2	-225.5°	-222.7°	-221.7°	-221.2°	-221.0°	-220.8°	-220.6°	-220.5°	-220.4°	-220.4°
	1.4	-221.2°	-218.4°	-217.4°	-217.0°	-216.7°	-216.5°	-216.4°	-216.3°	-216.2°	-216.1°
	1.6	-217.7°	-214.9°	-213.9°	-213.4°	-213.2°	-213.0°	-212.8°	-212.7°	-212.6°	-212.6°
	1.8	-214.8°	-211.9°	-211.0°	-210.5°	-210.2°	-210.0°	-209.9°	-209.8°	-209.7°	-209.6°
	2	-212.3°	-209.4°	-208.5°	-208.0°	-207.7°	-207.5°	-207.4°	-207.3°	-207.2°	-207.1°
	3	-204.1°	-201.3°	-200.3°	-199.9°	-199.6°	-199.4°	-199.3°	-199.2°	-199.1°	-199.0°
	4	-199.7°	-196.9°	-195.9°	-195.5°	-195.2°	-195.0°	-194.9°	-194.8°	-194.7°	-194.6°
	5	-197.0°	-194.2°	-193.2°	-192.7°	-192.5°	-192.3°	-192.1°	-192.0°	-191.9°	-191.9°
	6	-195.2°	-192.3°	-191.4°	-190.9°	-190.6°	-190.4°	-190.3°	-190.2°	-190.1°	-190.0°
	7	-193.8°	-191.0°	-190.0°	-189.6°	-189.3°	-189.1°	-188.9°	-188.8°	-188.8°	-188.7°
	8	-192.8°	-190.0°	-189.0°	-188.6°	-188.3°	-188.1°	-187.9°	-187.8°	-187.8°	-187.7°
	9	-192.1°	-189.2°	-188.2°	-187.8°	-187.5°	-187.3°	-187.2°	-187.1°	-187.0°	-186.9°
	10	-191.4°	-188.6°	-187.6°	-187.1°	-186.9°	-186.7°	-186.5°	-186.4°	-186.3°	-186.3°

表 2、一个类型 III 补偿电路的相位变化

		K <sub>1</sub>									
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
K <sub>2</sub>	1.2	-181.0°	-175.3°	-173.4°	-172.5°	-171.9°	-171.5°	-171.2°	-171.0°	-170.9°	-170.8°
	1.4	-172.5°	-166.8°	-164.9°	-163.9°	-163.4°	-163.0°	-162.7°	-162.5°	-162.3°	-162.2°
	1.6	-165.4°	-159.7°	-157.8°	-156.9°	-156.3°	-155.9°	-155.6°	-155.4°	-155.3°	-155.2°
	1.8	-159.5°	-153.8°	-151.9°	-151.0°	-150.4°	-150.0°	-149.7°	-149.5°	-149.4°	-149.3°
	2	-154.6°	-148.9°	-146.9°	-146.0°	-145.4°	-145.0°	-144.8°	-144.6°	-144.4°	-144.3°
	3	-138.3°	-132.6°	-130.7°	-129.7°	-129.2°	-128.8°	-128.5°	-128.3°	-128.1°	-128.0°
	4	-129.5°	-123.8°	-121.9°	-120.9°	-120.4°	-120.0°	-119.7°	-119.5°	-119.3°	-119.2°
	5	-124.0°	-118.3°	-116.4°	-115.5°	-114.9°	-114.5°	-114.3°	-114.1°	-113.9°	-113.8°
	6	-120.3°	-114.6°	-112.7°	-111.8°	-111.2°	-110.8°	-110.6°	-110.4°	-110.2°	-110.1°
	7	-117.7°	-112.0°	-110.1°	-109.1°	-108.6°	-108.2°	-107.9°	-107.7°	-107.5°	-107.4°
	8	-115.7°	-110.0°	-108.1°	-107.1°	-106.5°	-106.2°	-105.9°	-105.7°	-105.5°	-105.4°
	9	-114.1°	-108.4°	-106.5°	-105.5°	-105.0°	-104.6°	-104.3°	-104.1°	-104.0°	-103.8°
	10	-112.8°	-107.1°	-105.2°	-104.3°	-103.7°	-103.3°	-103.1°	-102.9°	-102.7°	-102.6°

除了一个源端极点以外，类型 III 补偿还包含了两个零点和两个极点。其产生的响应包括一个高频率时增加的增益区域和一个相关中间频率范围的 +20dB/decade 斜率。类型 III 补偿通常用于对那些交叉频率上输出滤波器具有一个双极点的电路进行补偿。这样做就需要确保交叉频率出现在误差放大器 +20dB/decade 斜率以上的中间区域；误差放大器和输出滤波器斜率的综合作用就可以得到理想的 -20dB/decade 响应。

补偿电路中极点和零点的相对位置决定了发生在  $f_c$  处的整体相位升压。因此，通过将极点和零点放置在合适的位置，即可以获得理想的相位裕度。有许多方法可以达到这种效果。方法之一是使用两个因数  $K_1$  和  $K_2$  来考虑低频率零点和高频率极点位置，如下所示：

$$K_1 = \frac{f_c}{f_z}$$

$$K_2 = \frac{f_p}{f_c}$$

通过计算  $K_1$  和  $K_2$  的相关值，可以很容易地由表 1 和表 2 确定  $f_c$  处的相位升压。

$f_c$  处类型 II 补偿电路的增益相当于零点上的增益  $AV$ 。类型 III 补偿在  $f_c$  处具有一个以 dB 为单位的增益，其可由以下方程式计算得出：

$$G = A_{V1} + 20\log(K_v)$$

其中， $AV_1$  为第二个零点处的增益，单位为分贝。

对一个开关转换器进行补偿的一般程序现在可以被简化为：

- 生成正向通道 **Bode** 曲线
- 选取合适的交叉频率。根据经验， $f_c$  应该位于  $1/10$  和  $1/6$  开关频率之间，但是，如果在该频率上误差放大器的开环路增益不足，则可能需要将其减少。确定交叉频率上的正向通道增益和相位。
- 根据  $f_c$  上正向通道增益的斜率，确定需要类型 II 还是类型 III 补偿。如果  $f_c$  上的正向通道斜率为  $-20\text{dB/decade}$ ，那么就应该使用类型 II 补偿；如果斜率为  $-40\text{dB/decade}$ ，则必须使用类型 III。
- 将补偿电路的零点放置在输出滤波器转折频率 (**break frequency**) 以下大约一个八度，并且计算出  $K_1$  的值。这种方法相对保守，但通过确保相位保持在  $0^\circ$  以上  $f_c$  以下，可以避免条件稳定性的可能性。
- 确定  $f_c$  上必需的误差放大器增益，并计算出零点上必需的误差放大器增益。
- 计算出通过补偿电路的最大相位滞后，并使用表 2 或表 3，计算出达到该相位滞后的  $K_2$  的最小值。计算出补偿电路极点使用的频率。
- 在需要达到这种响应的补偿电路中，计算出单个组件的值。

图 2 显示了正向通道、误差放大器和使用类型 III 补偿的开关转换器整体响应的典型 **Bode** 曲线。

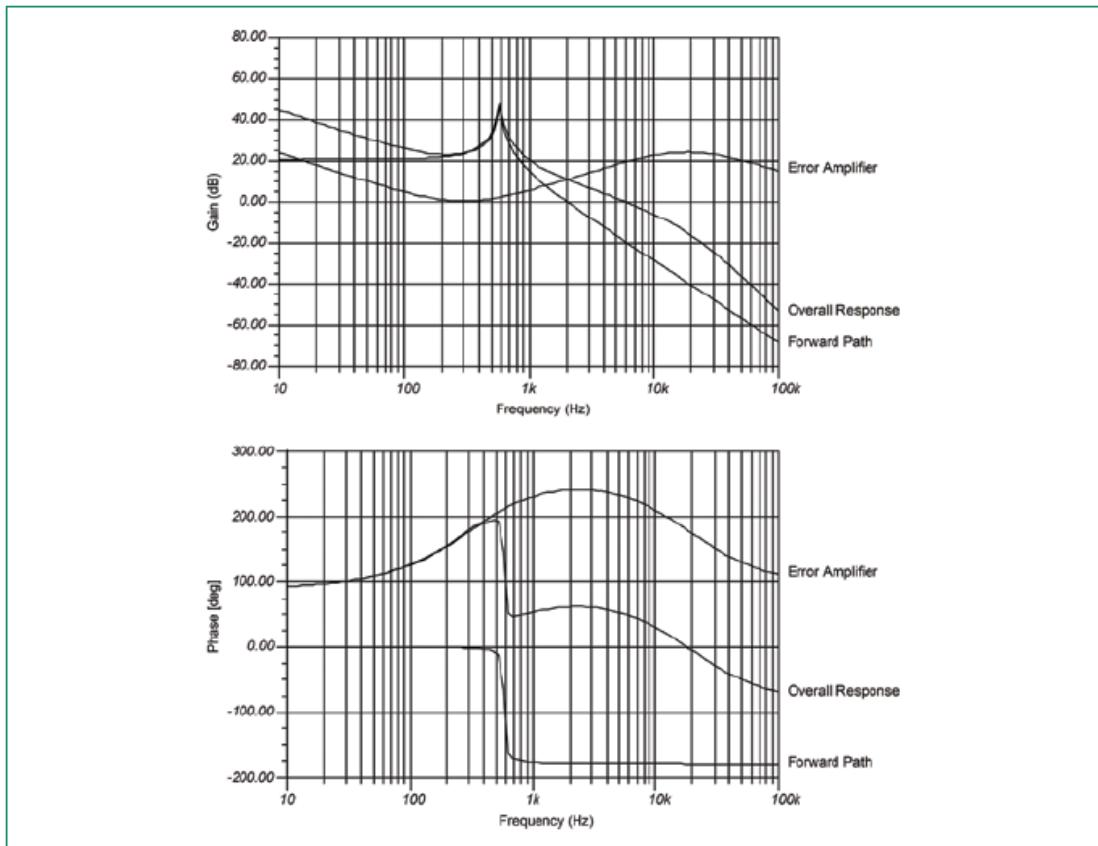


图 2、系统 *Bode* 曲线

每一位工程师都有自己喜好的频率补偿方法，而且在实践中使用一些迭代方法通常是必需的，但是，本文中的上述方法为那些缺乏经验的工程师们提供了一个较好的切入点，以构建一款具有足够高性能的稳定电路。