

基于 FRA-开关电源的测量

随着电子，自控，航天，通讯，医疗器械等技术不断向深度和广度的发展，势必要求其供电的电源要有更高的稳定性，即不仅要有好的线性调节率、负载调节率还要有快速的动态负载响应。而这些因素都和控制环路有关，控制环路一般工作在负反馈状态，称之为电压负反馈。如果变换器中没有用到反馈控制

环路（即下图 1 中 H 部分），其传递函数一般为 $\frac{y}{u} = G$ 其中 G 为输入滤波、功率变换、整流滤波部分等因数的乘积（因为其为级联的形式，所以本文中以总的乘积因子 G 来表示），可以看出输出随着输入的变化而成线性的变化，但是由于整流、滤波网络在整个时域的非线性，实际上这种变化应该是近似于线性，所以当输入电压改变的时候并不能很好的起到稳压的作用；如果反馈环路设计的不好，对于负载的瞬态改变，环路不能做出及时恰当的调整，那么输出电压瞬间会偏高或者偏低，甚至有可能造成电源系统的振荡，对下一级构成损坏。此时能够对环路测量就显得很重要了，那么环路部分又是怎样影响整个回路的呢？参考金升阳公司宽压或者 AC-DC 系列产品，此时下图表示的是反馈

环路控制部分中的运放的环增益模型，其传递函数为 $\frac{y}{u} = \frac{G}{1+GH}$

其中 G: 开环增益, H: 反馈系数, GH: 环增益（可以通过图 1 中推导看出）

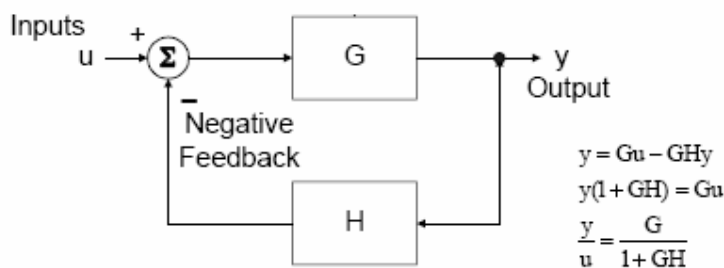


图 1.Feed back

一、环增益稳定的标准:

由传递函数 $\frac{y}{u} = \frac{G}{1+GH}$ 有，因为放大器的开环增益 G 是频率的函数，会随着频率的增加而减小，同时也和放大器的相位有关，当 $GH = -1$ ，则其传递函数的值为 ∞ ，即增益是无穷大的，可以认为任意小的输入扰动都能引起输出的无穷大，如果这种输出无穷大的信号再反馈到功率变换环节，势必会造成最后输出的振荡，整个系统因而不再稳压。所以说可以通过分析 GH 的增益和相位来判断系统的稳定性。

又因为当 $GH = -1$ 时是振荡的，所以有相移 $\angle GH$ 是 180° （因为负反馈本身就有 180° 的相移），回路增益 $|GH| = 1$ (0dB)。

所以要使运放稳定需要满足以下条件：1.相位条件就是要其相移要小于 180° ，即要有 45 度以上的裕量；2.还要满足增益条件即要有 12dB 以上的裕量；3.穿越频率按 20dB/Dec 闭合。相关解释下文给出。

二、Bode 图的基础:

由上文知我们可以通过环增益 GH 的频率特性来判断系统的稳定性, 而回路增益 $|GH|$ 以及回路相位差 $\angle GH$ 的频率特性可以用 Bode 图(见图 2)来表示, 并且系统的稳定性可以通过 Bode 图中的相位裕量(phase margin), 增益裕量(gain margin), 穿越频率(crossover frequency)来衡量。其中

相位裕量(phase margin)是指: 在频率-相位曲线上, 当环路增益为单位增益时实际相位延迟与 360deg 间的差值, 以度(deg)为单位表示, 见图 2。

增益裕量(gain margin)是指: 在频率-增益曲线上, 当总相位延迟为 360deg 时, 增益低于单位增益的量, 以分贝(dB)为单位来表示, 见图 2。

穿越频率(crossover frequency)也有资料称之为频带宽度等是指: 在频率-增益曲线上, 增益为零时所对应的频率值, 见图 2。

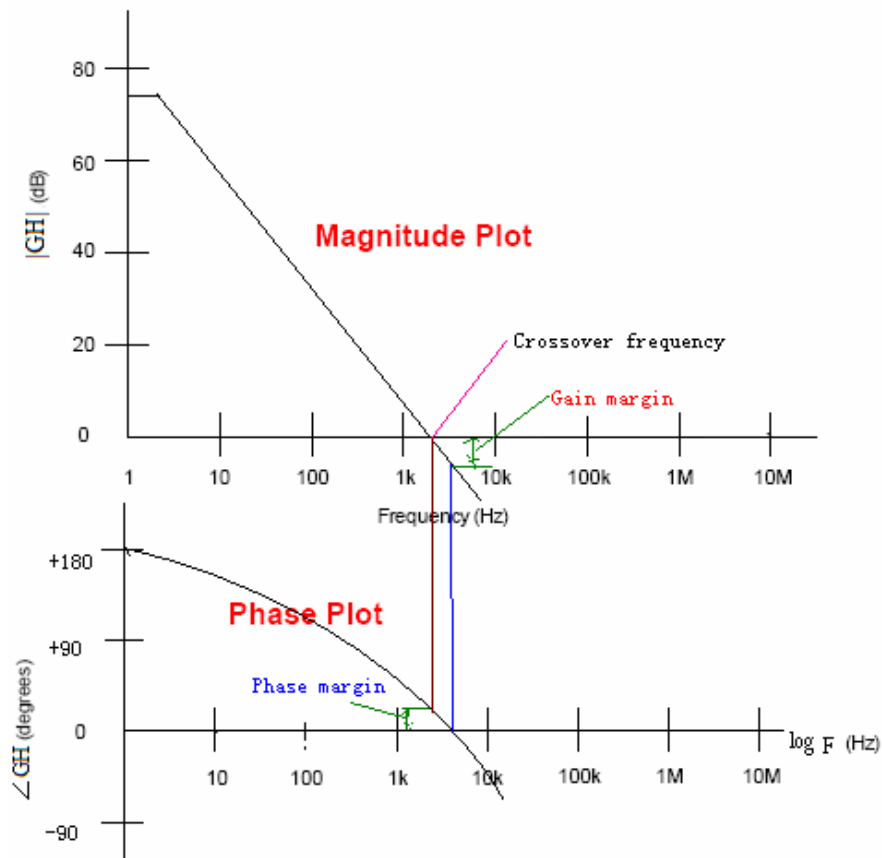


图 2 Bode plot • Gain margin • Phase margin

相位裕量(phase margin)的作用,是确保在一定的条件下(包括元器件的误差、输入电压变化、负载变化、温升等)系统都能够稳定,使用在标称输入额定负载室温下,要有 45 度的裕量; 如果输入电压、负载、温度变化范围非常大, 相位裕量不应小于 30 度。

增益裕量(gain margin)为了不接近不稳定点, 一般认为 12dB 以上是必要的。

穿越频率(crossover frequency)频带宽度的大小可以反映控制环路响应的快慢。一般认为带宽越宽, 其对负载动态响应的抑制能力就越好, 过冲、欠冲越小, 恢

复时间也就越快，系统从而可以更稳定。但是由于受到右半平面零点的影响，以及原材料、运放的带宽不可能无穷大等综合因素的限制，电源的带宽也不能无限制提高，一般取开关频率的 $1/20 \sim 1/6$ 。

三、环路的测试

对环路的增益和相位的测量，我们可以通常可利用频率响应分析仪(FRA)或增益-相位分析仪进行测量。这些仪器是通过采样获得的模拟信号进行预处理，然后通过 A/D 转换，再利用 DFT（离散傅里叶变换）运算求得增益和相位，最后用曲线（Bode plot）表示出来。

本文将以株式会社 NF 公司的频率响应分析仪(FRA5087)来做分析，主要按照下边的接线图来进行，注意环节是注入电阻的位置，以及大小，为了减小测量误差，实验一般选取 $50 \sim 100\Omega$ 的电阻；有关扰动信号的大小我们可以在测试的过程中通过示波器来读出，也可以利用 FRA 的振幅压缩（Amplitude compression）功能来设置，不过要求扰动的幅度不能超过输出电压的 5%。否则测出来的结果是不准确的。

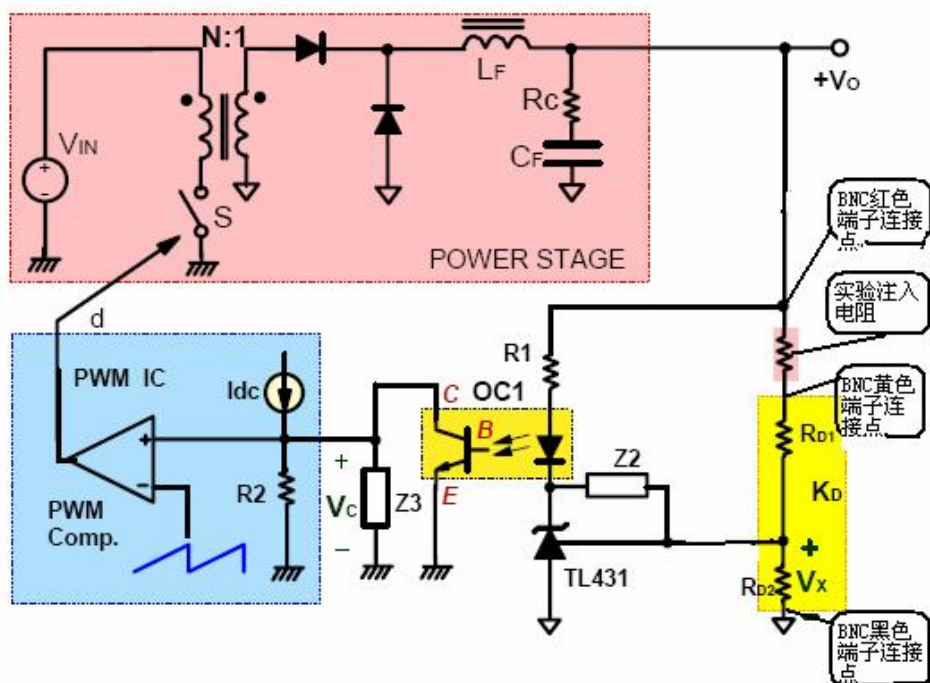


图 3 FRA 测量时注入电阻的位置及接线

四、开关电源稳定性测试举例：

在了解影响产品稳定性的因素和判定准则以及怎样来检测产品后，就可以对所测的产品的结果进行分析了，下面就以金升阳公司宽压系列的一款产品来做实验，实际接线部分见图 3，测试结果如图 4。

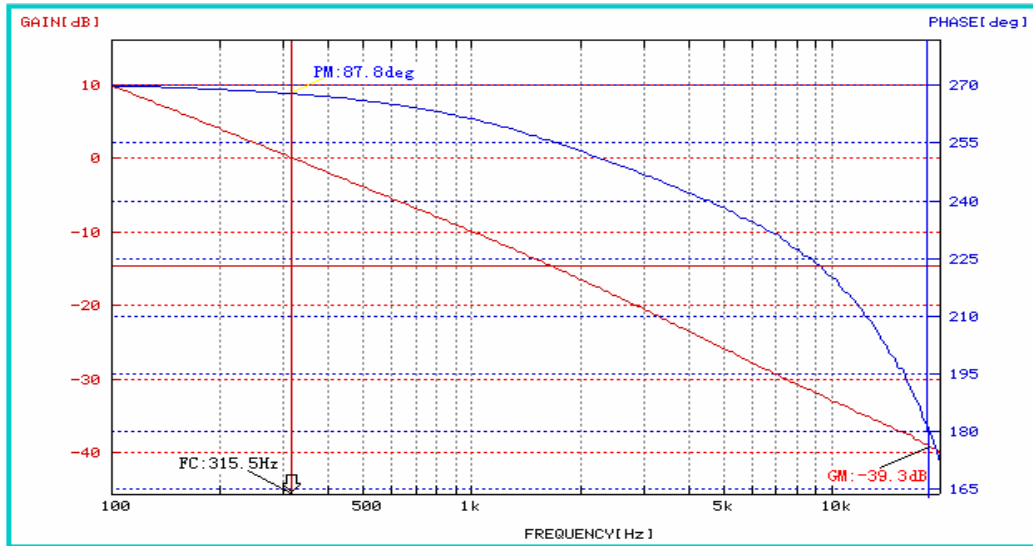


图 4 Magnitude and phase of loop gain for nominal input voltage at full rated power and 25°C

在这一例子中，从上图可以看出其增益裕量是-39.3dB，相位裕量是 87.8deg，带宽是 315.5Hz，并且在 0dB 以上增益是按-20dB/decade 衰减，对照上面的标准初步判断系统是稳定的，但是 87.8deg 的相位裕量其动态响应是欠阻尼的，其实可以通过对误差放大器补偿网络在稍低的频率下滑落（roll off）来实现。在保证相位裕量的前提下，在 0dB 以下增益是按-40dB/decade 衰减，从而更有利于抑制高频干扰，使其达到最佳响应；

0dB 交点对应的频率为 315.5Hz，从理论的角度上来说，对于 300KHz 的开关频率，实测的带宽可能导致控制环的响应有些慢，不利于系统的暂态稳定。更高的带宽，可以使更小的输出滤波电容便可以产生较小的纹波电压，这样也可以减少原材料的使用和模块电源的体积，从而使模块电源变得更节能。考虑到非常保守的增益和相位裕量，当然也可以对误差放大器的补偿环节进行一些小的改动，合理的提升带宽，使系统达到更快的响应，提高稳定性。

五、总结：

本文从反馈环路注入扰动信号的角度来反映开关电源稳定性，给出稳定性的标准，Bode 图的认识，FRA 的使用包括扰动信号的注入、环路特性的测量，以及实验结果的简单分析，最后提出需要更改的地方。当然系统的稳定性也可以由时域的方式来定性的分析，但是通过频率响应分析仪却可以在频率域上定量的求出，从而对系统的性能做出更直观的判断。

参考文献：

- [1]: 《运算放大器的稳定性》Tim Green 德州仪器公司.
- [2]: 《测量开关电源闭环反馈响应》Ken Salz Clarke-Hess 通信研究公司.
- [3]: 《Frequency response analyzer》instruction NF Corporation.
- [4]: 《Small-signal analysis and control design of isolated power supplies with opt coupler feedback》Yuri Panov and Milan Jovanovich . Power electronic laboratory Delta corporation.