

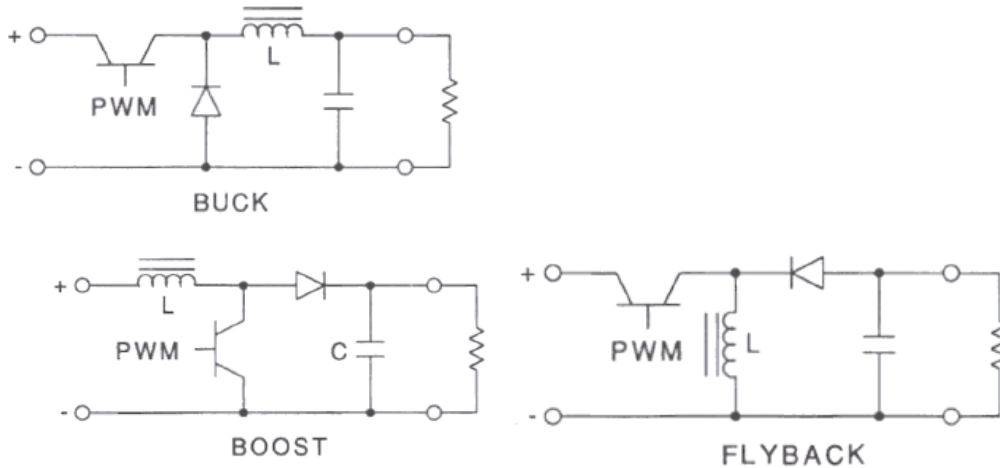
## 解析——右半平面零点的物理实质

By LDQ

trojandq@163.com

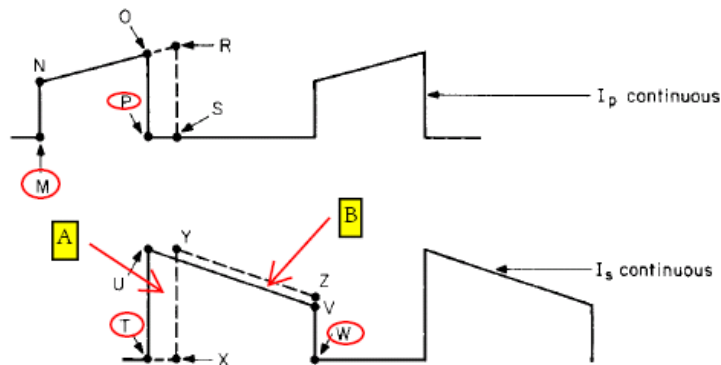
## 1. RHPZ (right half plane zero) 存在于 Boost 和 Flyback 电路中

此两种拓扑结构中，在 offtime 时间，只有储能电感向负载供电，而在 ontime 时间内，VCC 只向电感储能，不提供负载能量。这点与 buck 拓扑不同，buck 拓扑在 ontime 期间，VCC 向储能电感储能的同时，还向负载提供能量。

2. RHPZ 的物理表现，由于电感电流连续，整个  $\text{ontime} + \text{offtime} = 1 \text{ cycle}$ 。如果负载电流增加，反馈环节会使占空比增大，这样 ontime 会增加，相应的 offtime 时间会减小，由于负载电流完全有 offtime 的电流平均值提供，这样输出的平均电流会减小，负载电压会降低。在电流图形上表现为面积  $A > B$ 。

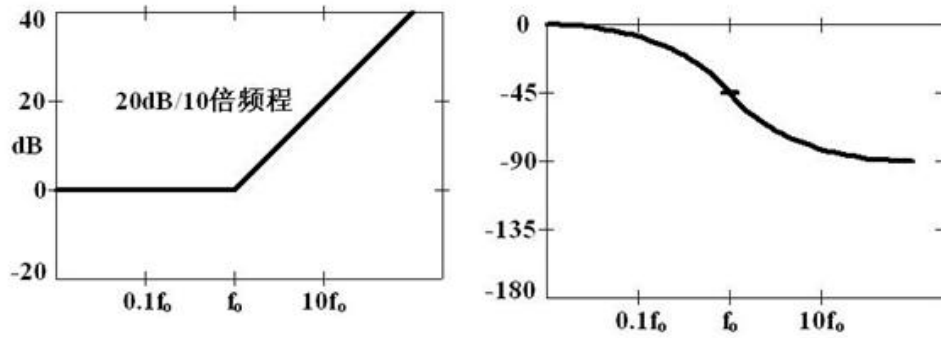
(面积 A 为由于 offtime 时间减小而减小的电流面积，B 为 ontime 增加，电流峰值增大，导致次级电流增大的电流面积。)

所以 RHPZ 在物理上的表现为：随着负载电流的增加，输出电压首先会下降的比较多，然后几个开关周期才能恢复过来

3. 在小信号模型传递函数上，flyback 的 CCM 模式为二阶系统，DCM 模式为一阶系统，这是因为 DCM 模式在 offtime 期间，电感向负载释放能量，其电流斜率为  $di/dt=V/L$ ，与外界负载无关，这样就表现为内阻非常大，相当于一个电流源，所以为一阶系统。而 CCM 模式下，电流波形为一个梯形，其直流部分值是与负载紧密相关的，所以为二阶系统。

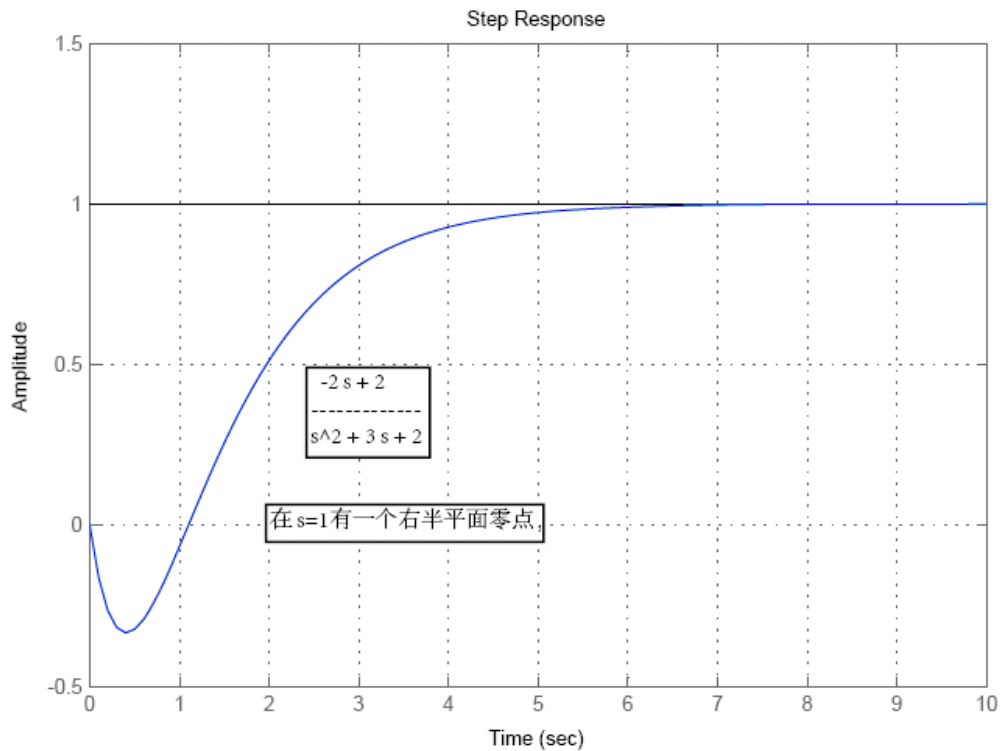
## 4. 为什么 RHPZ 无法补偿：RHPZ 在 GAIN 坐标上贡献+1 的斜率，但在 PHASE 坐标上为 90 度滞后。如果用极点补偿 (gain 为-1, phase 为 90 度滞后)，则总的 gain 为一直线，(0 斜率)，但 phase 已经滞后了 180 度，已经不满足稳定条件，同样即便使用左半平面零点也是一样 (gain 为+1, phase 为超前 90 度)

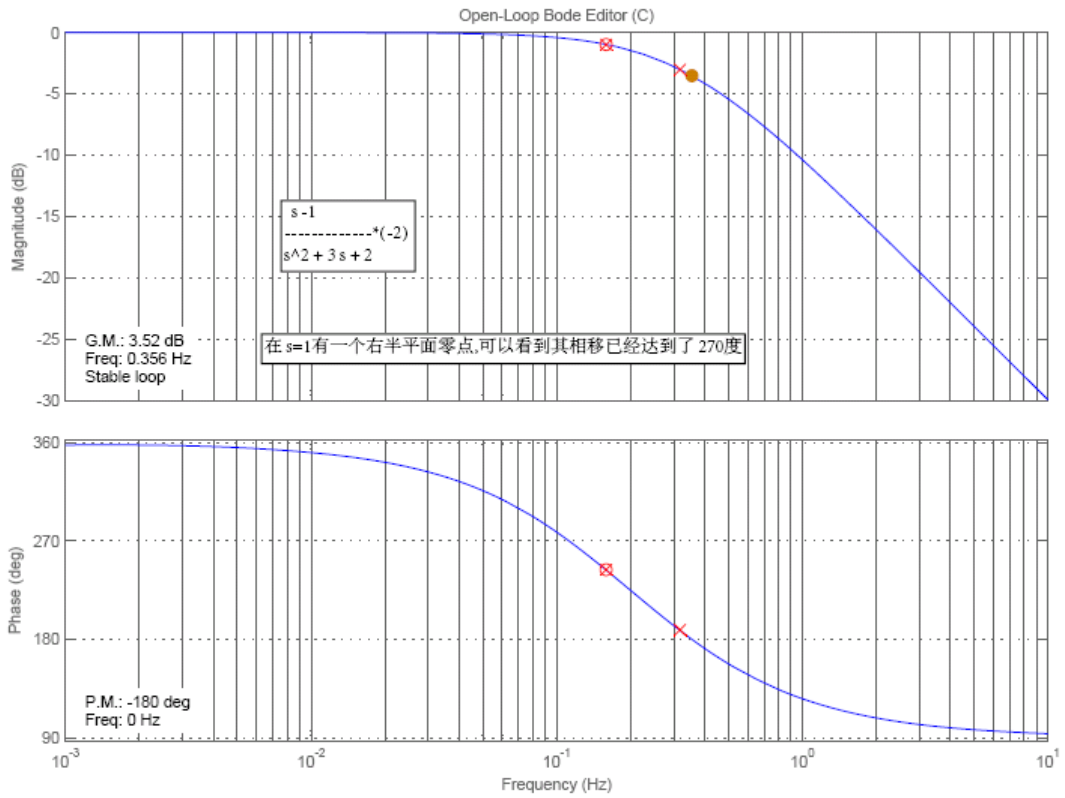
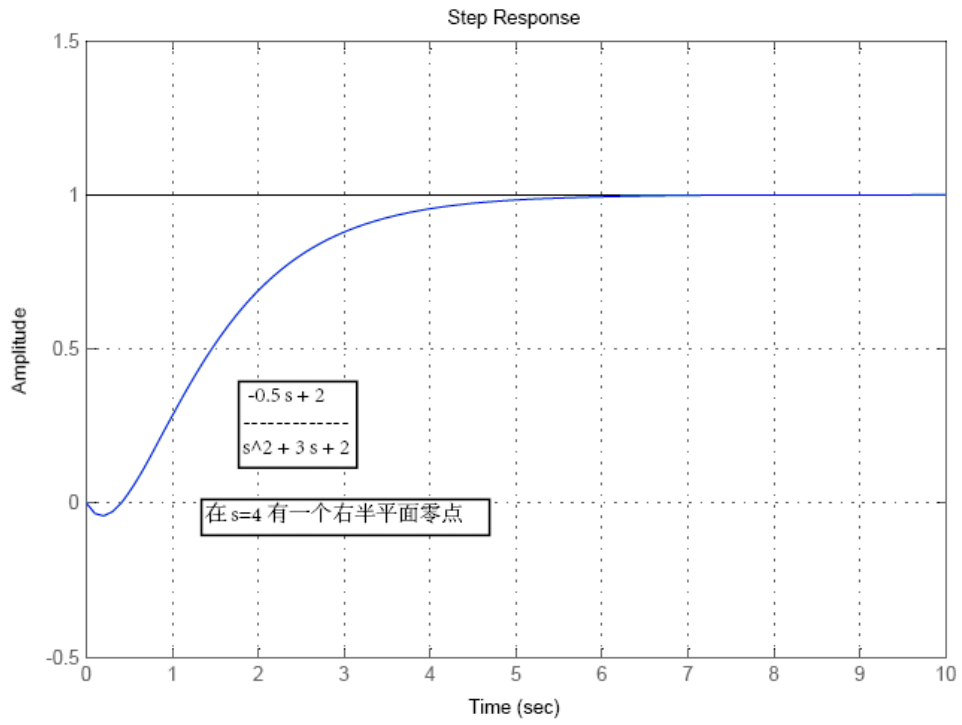
右半平面零点：

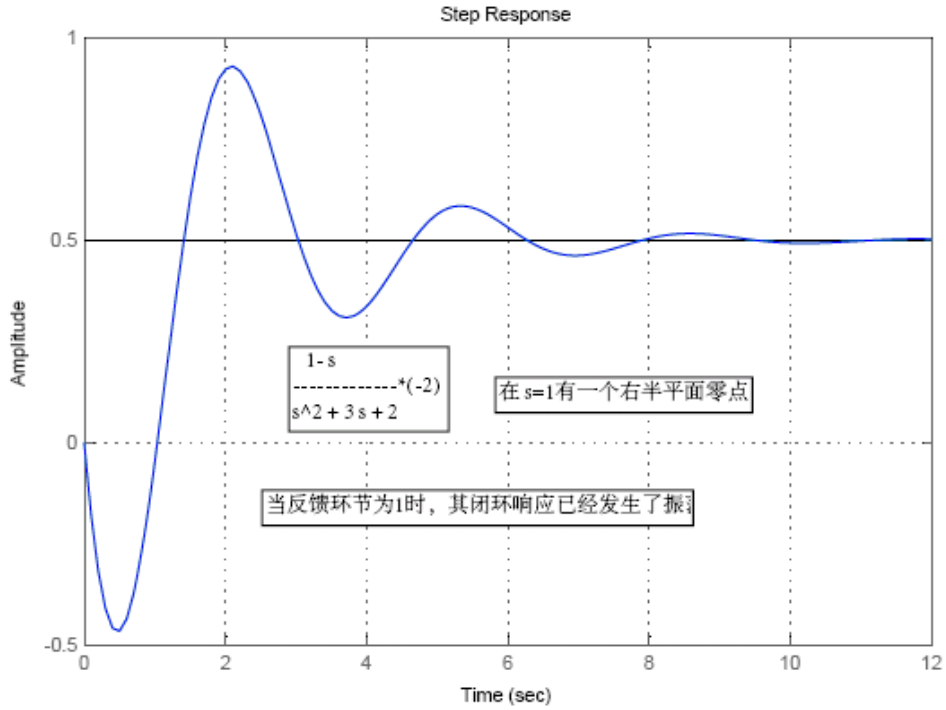


$$\frac{V_o}{V_i} = 1 - \frac{s}{2\pi f_0}$$

5. Matlab 分析 RHPZ 在时域的表现，为什么要使反馈带宽远小于 RHPZ  
靠近原点的 RHPZ 产生 undershoot，也就是上面分析的次级电压会先下降再随后上升，但在 RHPZ 的频率离原点比较远，（在反馈环路中离 0dB 频率比较远时），其影响相对来说已经比较小。







以上零极点的取值为  $-1 -2 +2$  只是为了说明的方便，实际系统中可能是好几百 K，但效果是一样的。

参考：

1. control loop cookbook by Lloyd H.Dixon
2. switch power supply design by Abraham I. Pressman
3. TOPSWITCH 控制环路分析 by cmg