



Power MOSFET 驱动技术

廖鸿飞(fly)

alex.liao@hotmail.com

POWER MOSFET 驱动技术

1

POWER MOSFET 直接驱动

2

POWER MOSFET 自举驱动

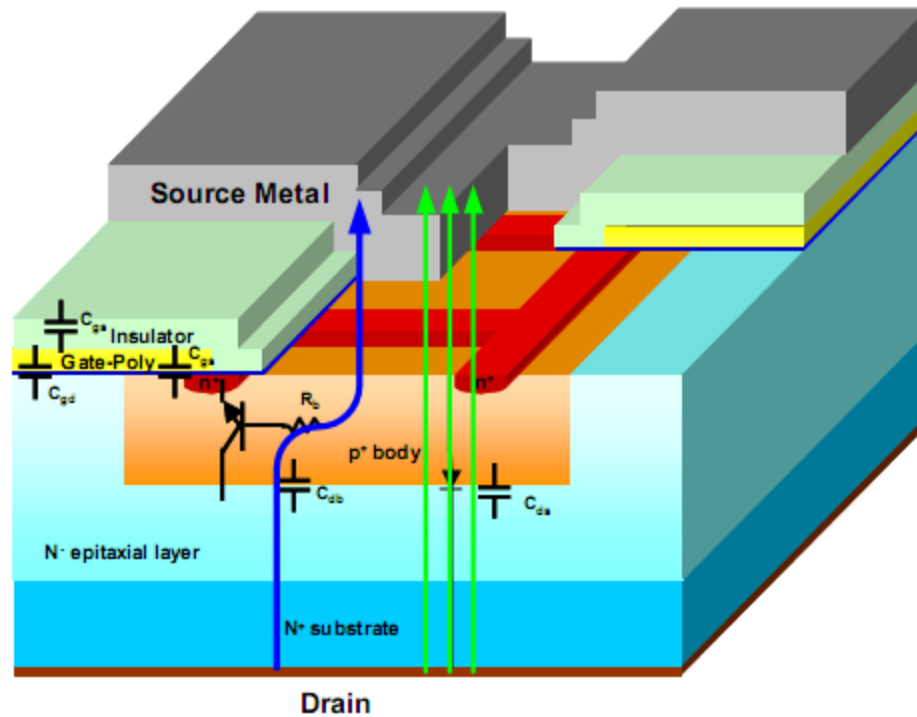
3

POWER MOSFET 隔离驱动

4

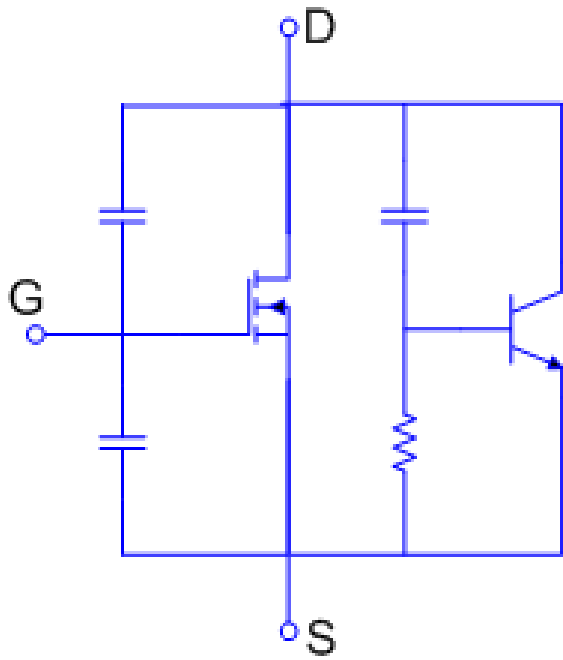
POWER MOSFET 并联驱动

POWER MOSFET 的结构

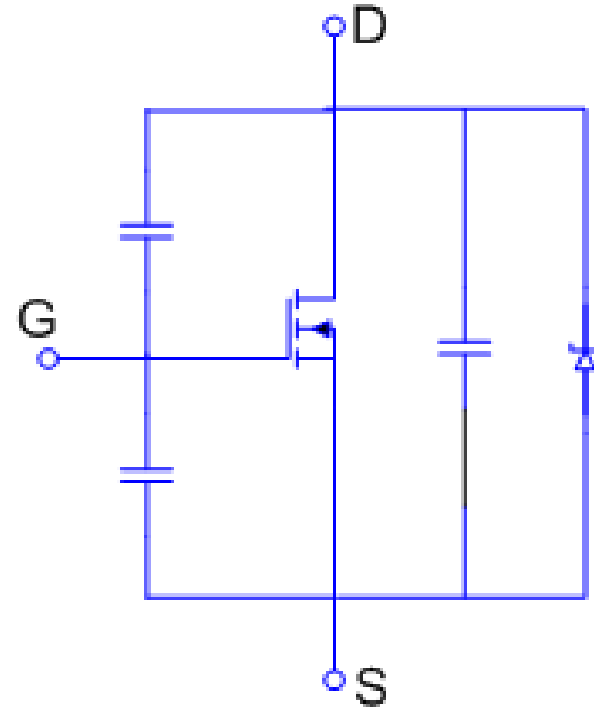


N-MOSFET 结构示意图

POWER MOSFET 等效模型

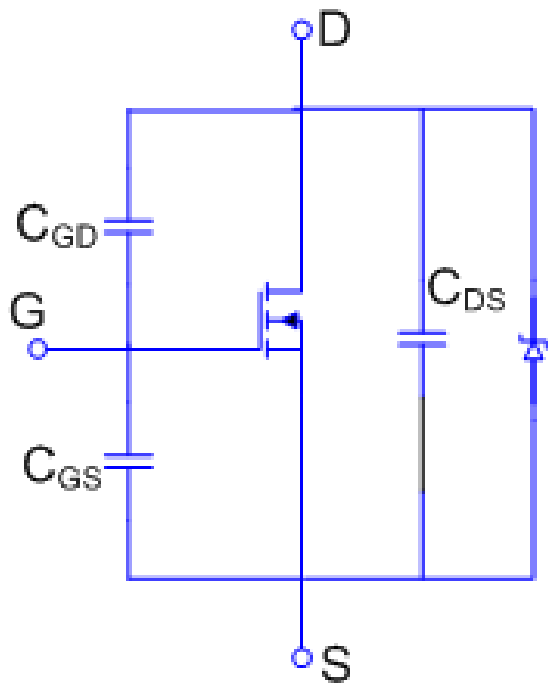


动态模型：
描述了 dV/dt 的影响



开关模型：
描述了MOSFET的重要寄生参数

POWER MOSFET 寄生参数



$$C_{RSS,ave} = 2 \cdot C_{RSS,spec} \cdot \sqrt{\frac{V_{DS,spec}}{V_{DS,off}}}$$

$$C_{OSS,ave} = 2 \cdot C_{OSS,spec} \cdot \sqrt{\frac{V_{DS,spec}}{V_{DS,off}}}$$

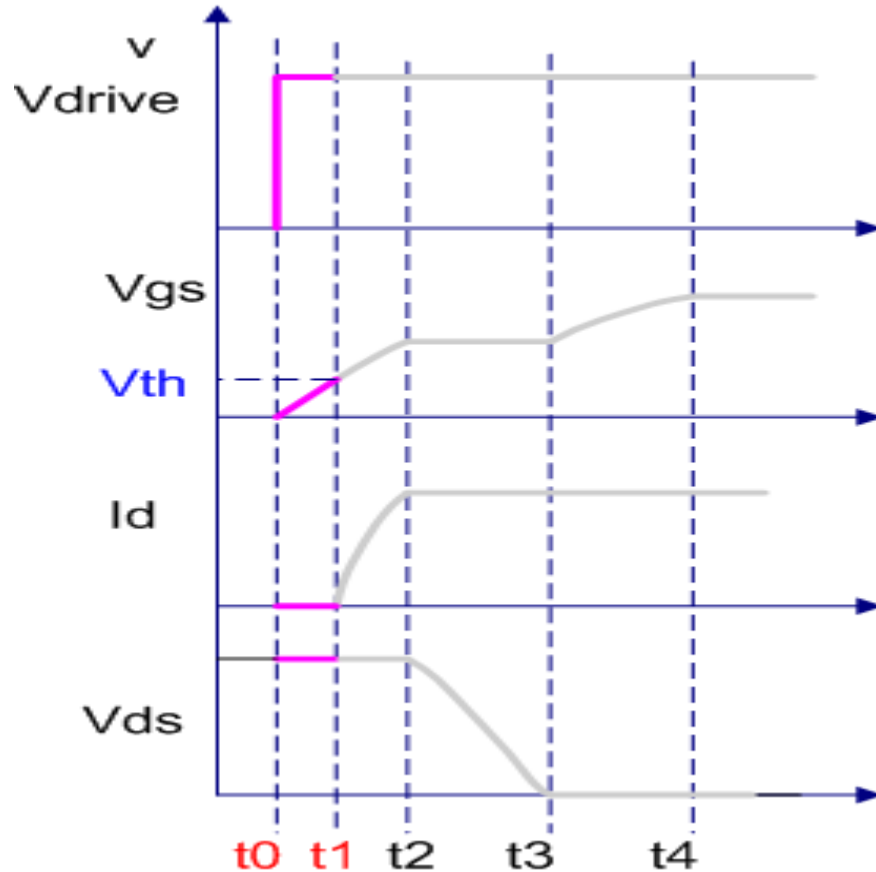
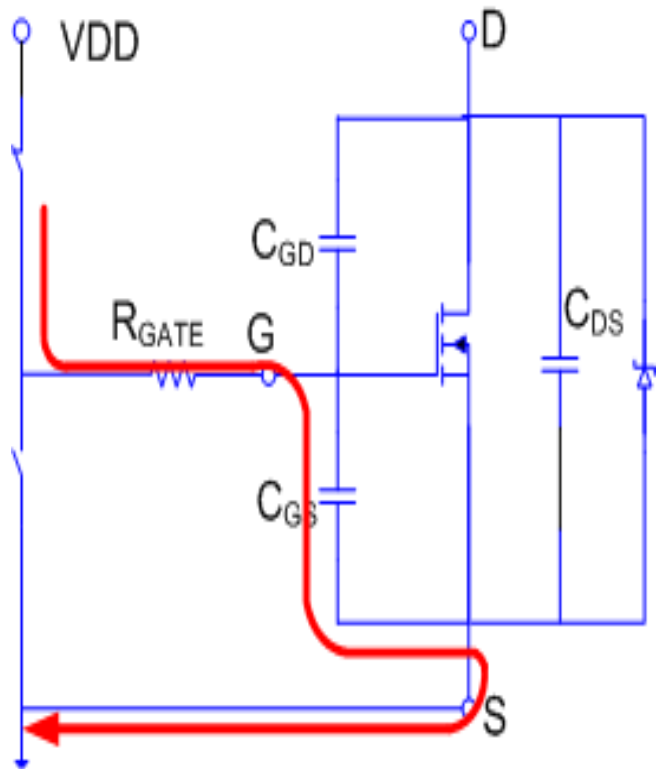
$$C_{GD} = C_{RSS,ave}$$

$$C_{GS} = C_{ISS} - C_{RSS}$$

$$C_{DS} = C_{OSS,ave} - C_{RSS,ave}$$

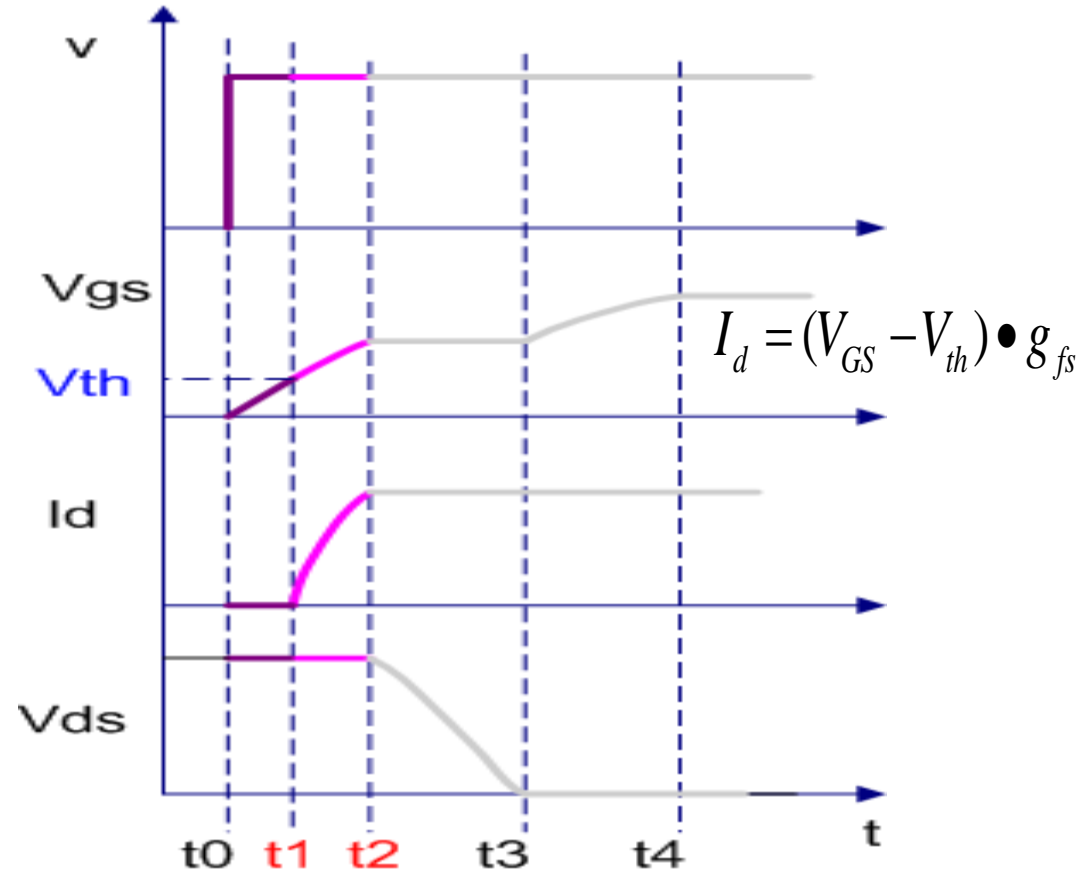
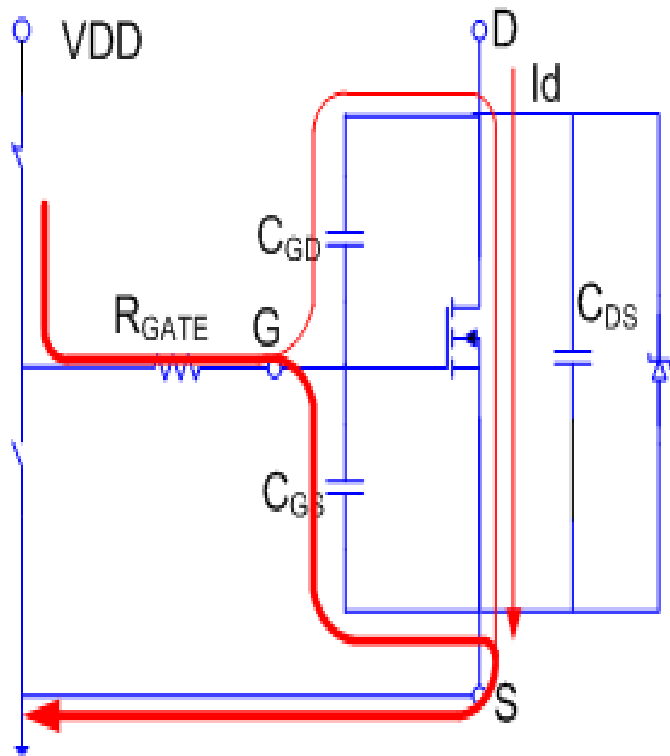
Input capacitance	C_{iss}	$V_{GS}=0\text{ V}, V_{DS}=25\text{ V},$ $f=1\text{ MHz}$	-	4500	-	pF
Output capacitance	C_{oss}		-	1500	-	
Reverse transfer capacitance	C_{rss}		-	100	-	

POWER MOSFET 开通过程



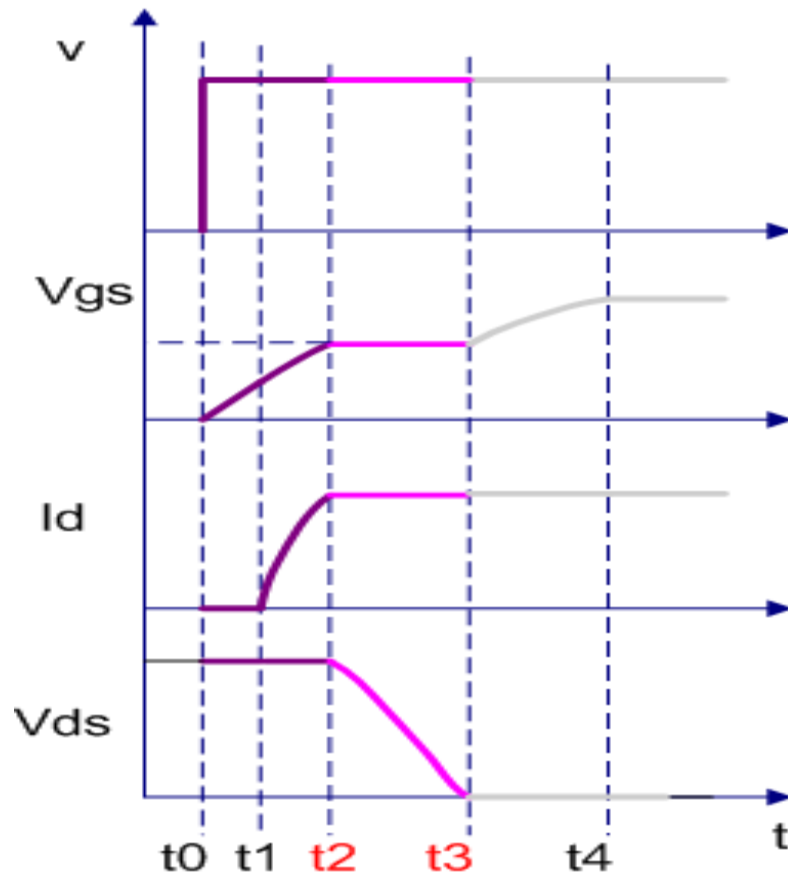
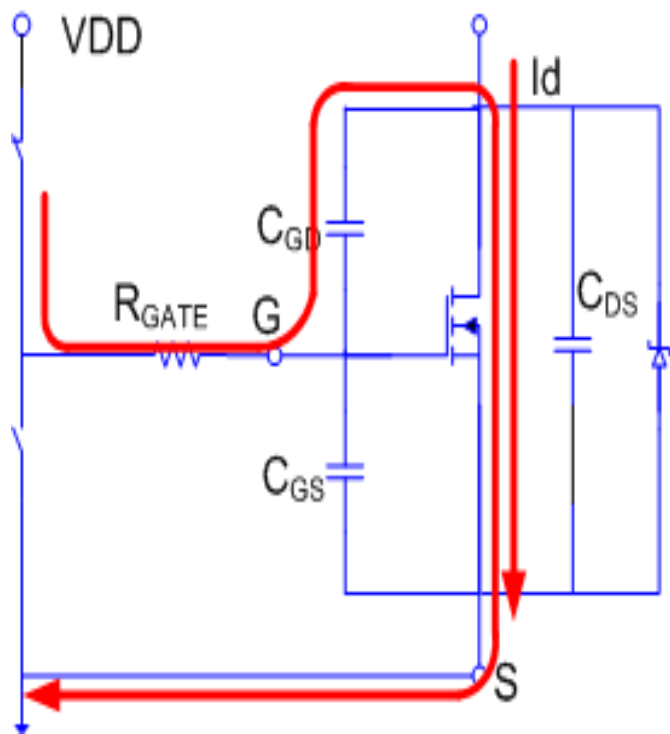
t_0 - t_1 : 驱动通过 R_{gate} 对 C_{gs} 充电,
 V_{gs} 电压以指数形式上升

POWER MOSFET 开通过程



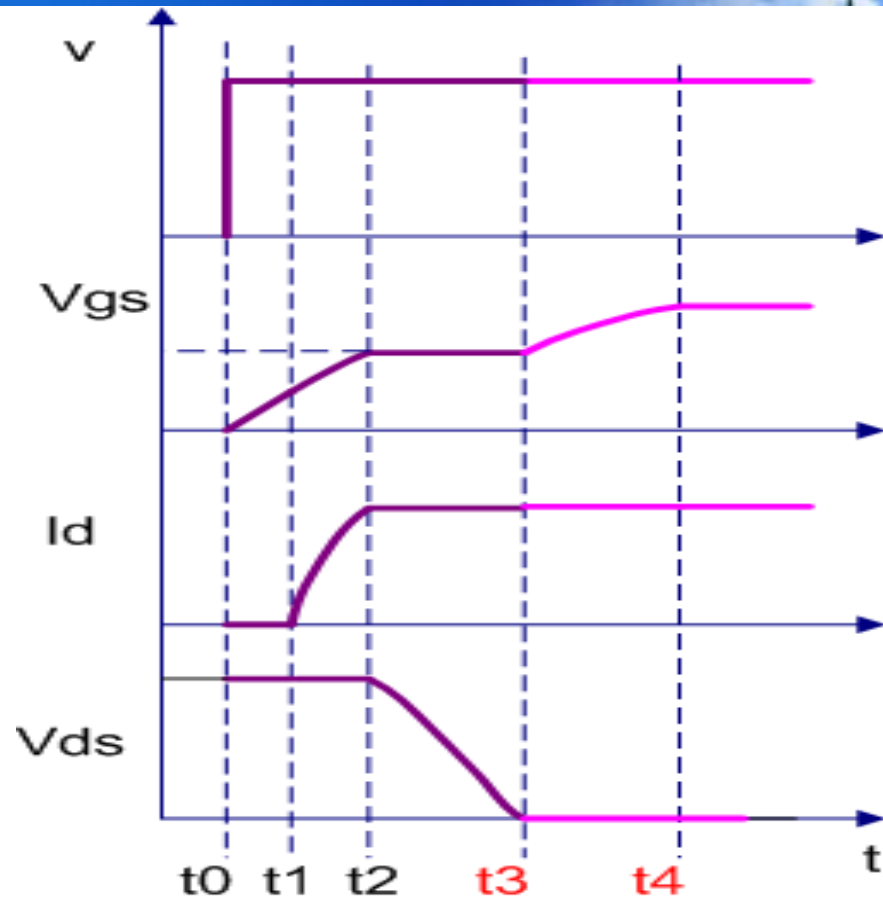
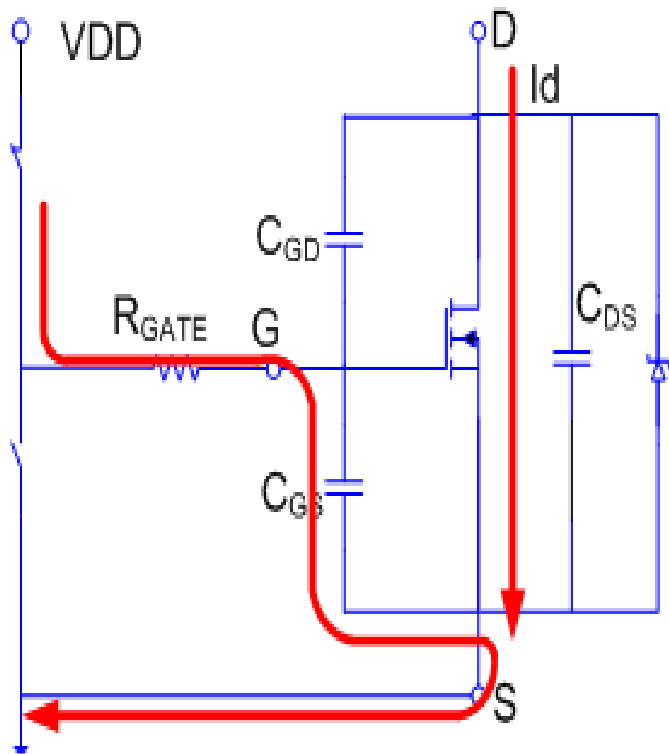
t_1-t_2 : V_{gs} 达到MOSFET开启门槛电压，MOSFET 进入线性区， I_d 缓慢上升

POWER MOSFET 开通过程



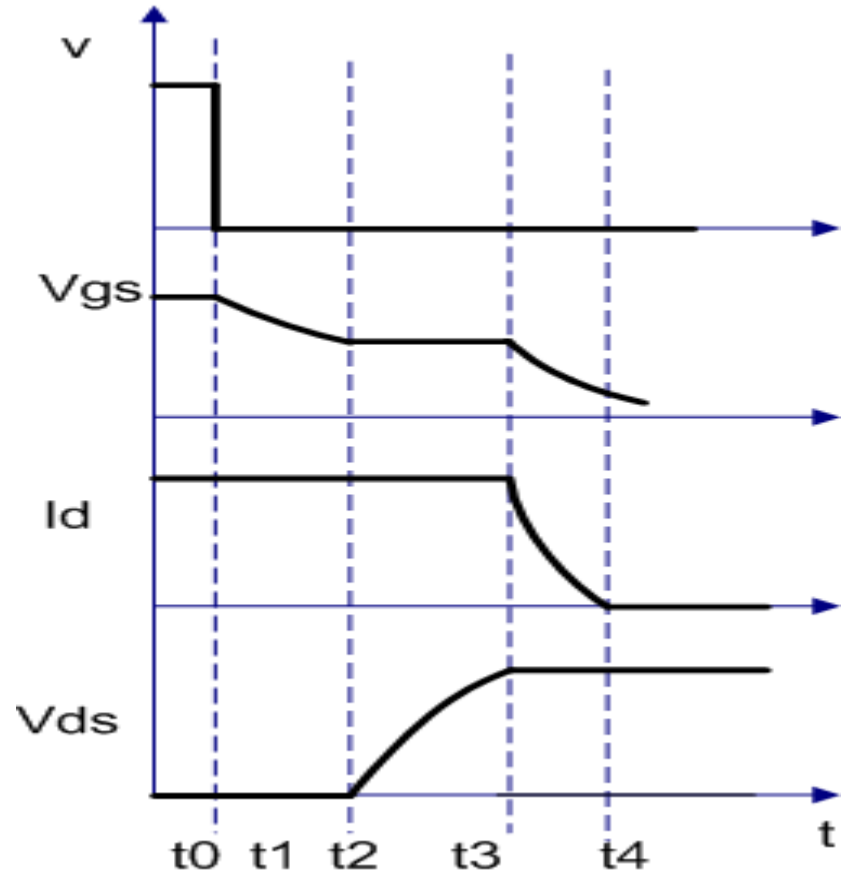
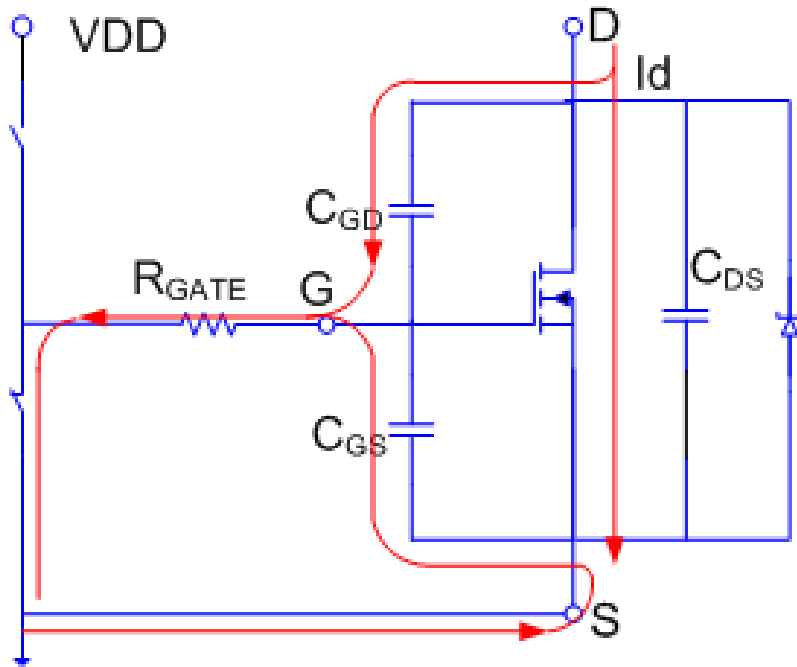
t_2-t_3 : I_d 达到稳定值, V_{gs} 固定不变, V_{ds} 电压开始下降, VDD给 C_{gd} 提供放电电流。 (米勒效应)

POWER MOSFET 开通过程



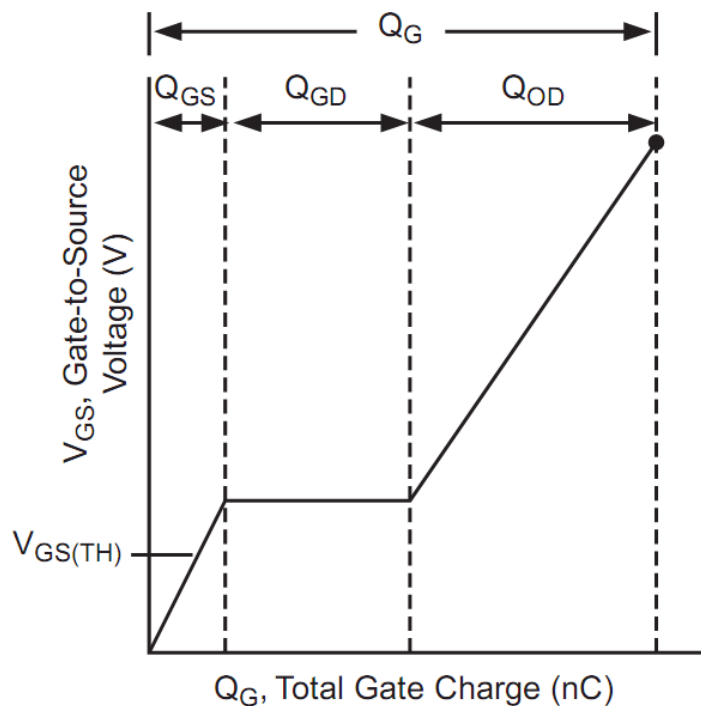
t_3 - t_4 : V_{ds} 下降到 0V, MOSFET 完全导通, VDD 继续给 C_{gs} 充电, 直至 $V_{gs}=V_{dd}$, MOSFET 完成开通过程。

POWER MOSFET 关断过程



MOSFET的关断过程是开通过程的反过程。

POWER MOSFET 驱动电流

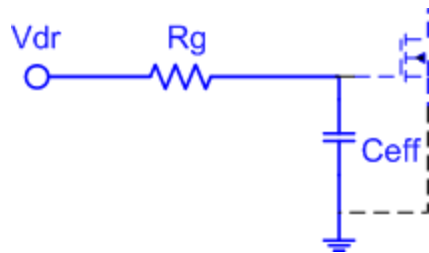


$$Q_g = Q_{gs} + Q_{gd} + Q_{od}$$

$$Q_g = \int_0^{t_s} i_g dt \Rightarrow Q_g = I_g \cdot t_s \Rightarrow I_g = \frac{Q_g}{t_s}$$

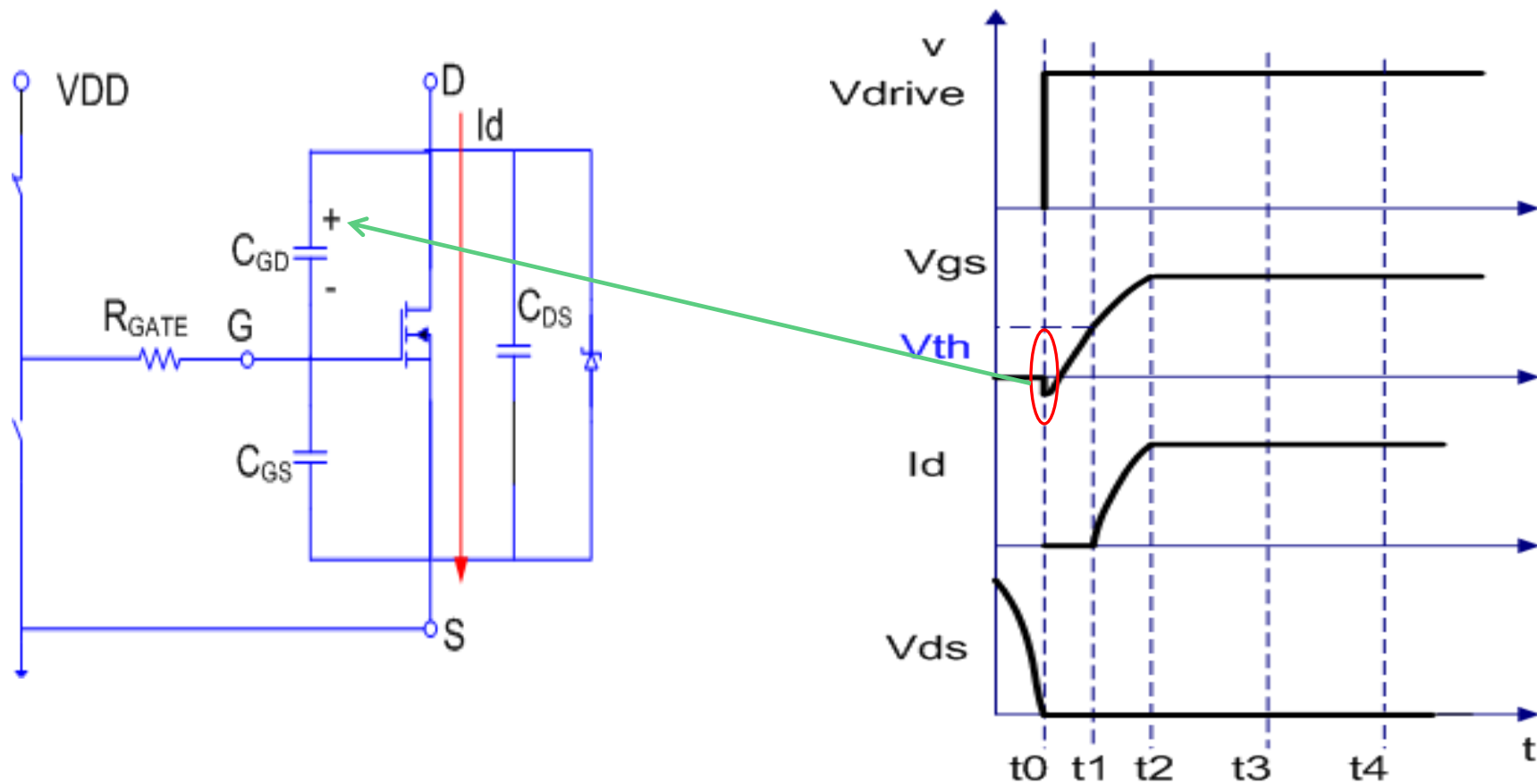
$$i_g = \frac{V_{dr}}{R_g} \cdot e^{-\frac{t}{R_g C_{eff}}}$$

$$i_{gpk} = \frac{V_{dr}}{R_g}$$



等效电路中的 C_{eff} 为等效输入电容，并不等于 C_{iss}

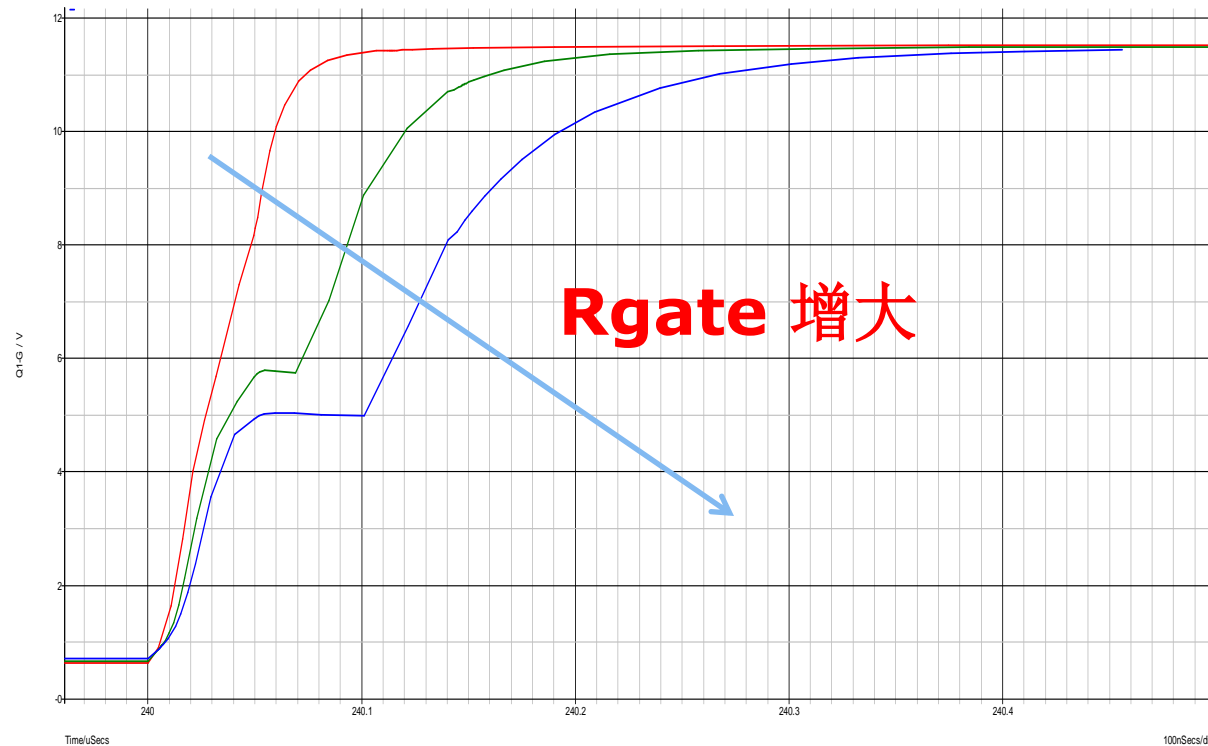
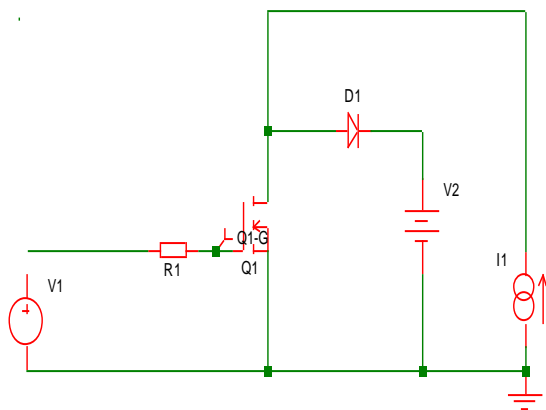
ZVS 电路中 POWER MOSFET 开通过程



在ZVS电路或同步整流电路中，MOSFET驱动没有米勒平台。

POWER MOSFET 驱动电阻的影响

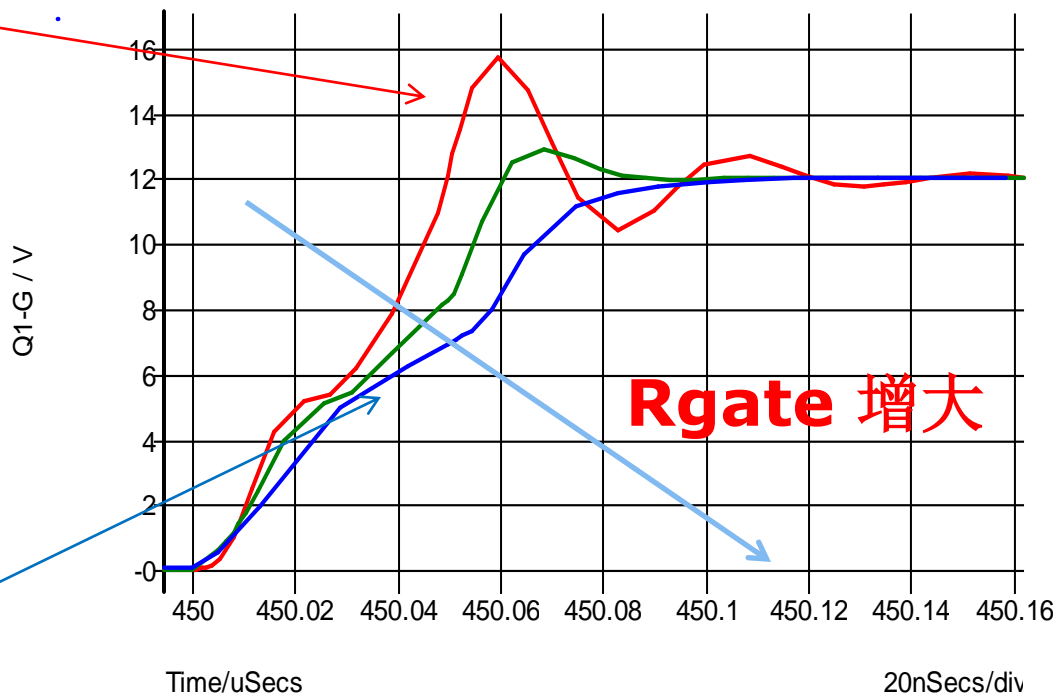
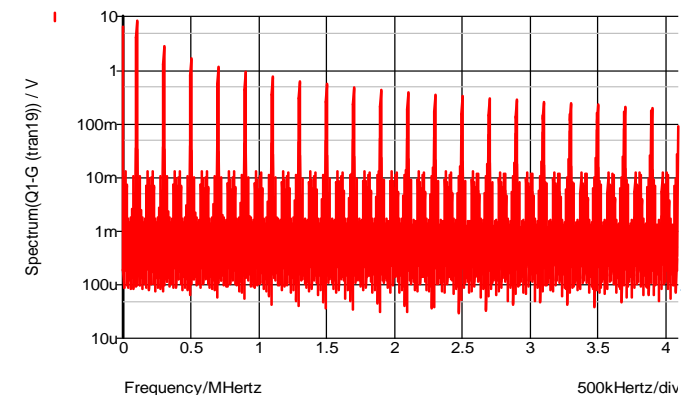
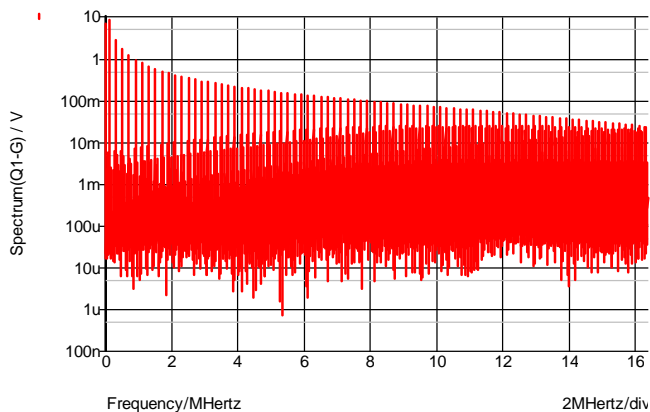
增大驱动电阻的影响



驱动上升变慢，开关过程延长，开关损耗增大。

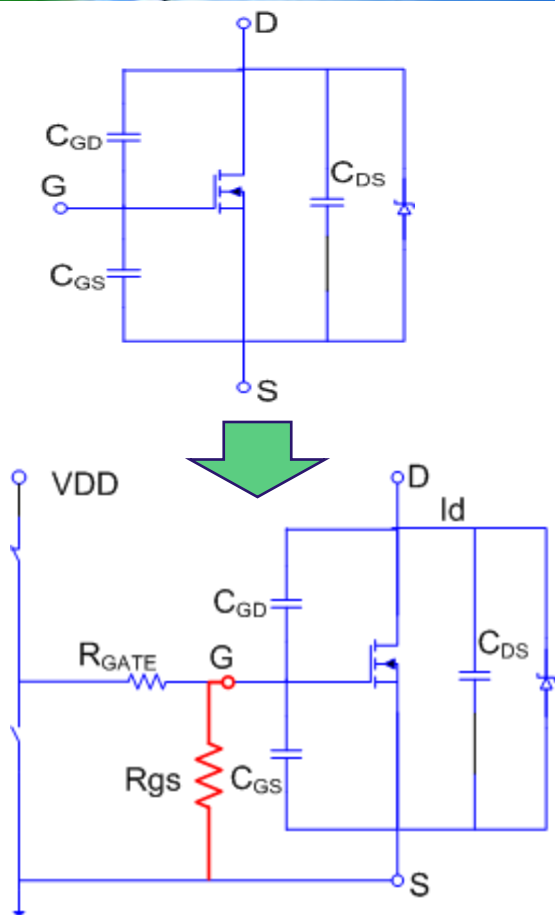
POWER MOSFET 驱动电阻的影响

减小驱动电阻的影响

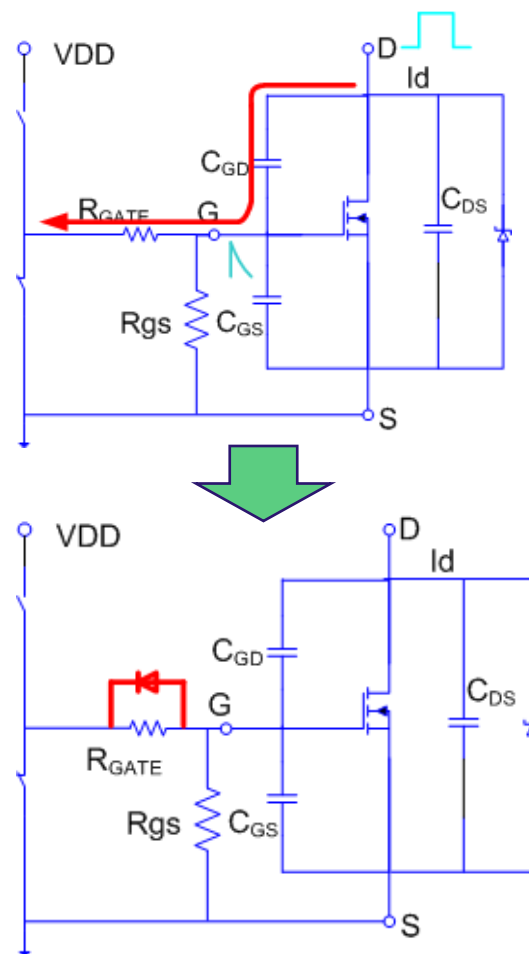


驱动上升变快，驱动电压过冲增加，EMI变差

POWER MOSFET 驱动保护



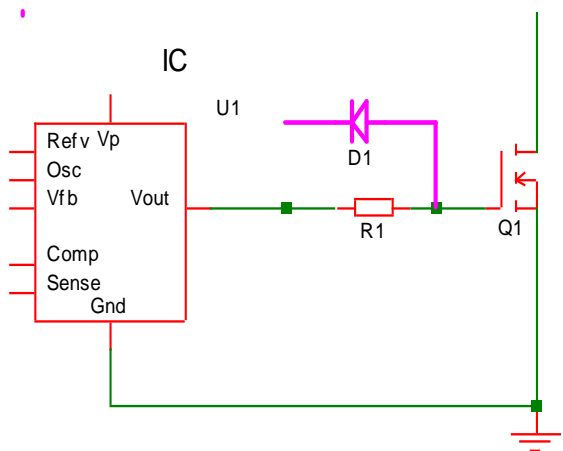
为防止误导通，G-S间应
并一个电阻。通常为10K



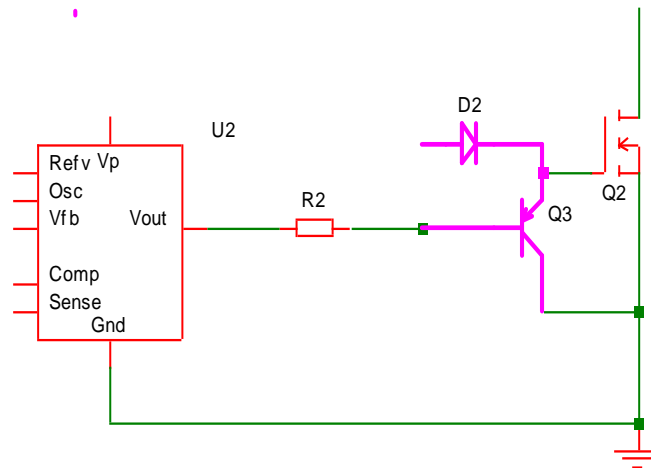
为防止关断时误导通，关断时G-S
之间应提供一个低阻抗回路

POWER MOSFET 驱动保护

常用的加速关断电路



- 电路简单
- 关断电流将流过芯片

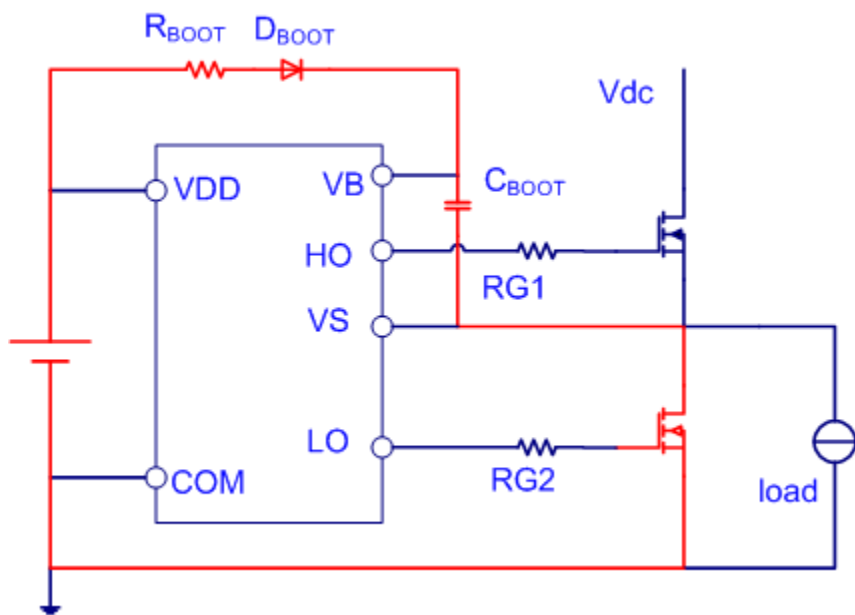


- 关断电流通过Q3构成回路，关断电流环路小
- 开关G极电位不能到0

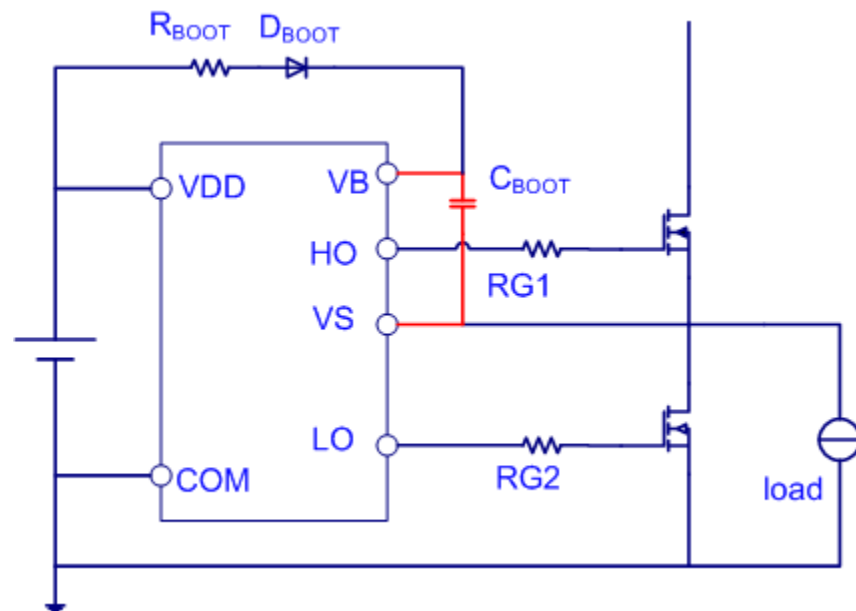
加速关断电路可以加快关断速度，减小关断损耗，同时在关断时给开关管提供低阻抗回路，防止误动作。

POWER MOSFET 自举驱动

自举电路工作原理



自举电路充电回路



自举电路放电回路

POWER MOSFET 自举驱动

自举电路元件参数计算

1) 由于上管所需的驱动能量来自于自举电容，因此自举电容的容量应足够大。

$$C_{BOOT} \geq \frac{Q_{TOTAL}}{\Delta V_{BOOT}} = \frac{Q_G + (I_{LK,D} + I_{Q,LS} + I_{Q,DRV} + I_{GS}) \cdot t_{off\ max}}{\Delta V_{BOOT}}$$

其中： Q_G -----栅极电荷

$I_{LK, D}$ -----自举二极管漏电流

$I_{Q, LS}$ -----内部电平转换静态电流

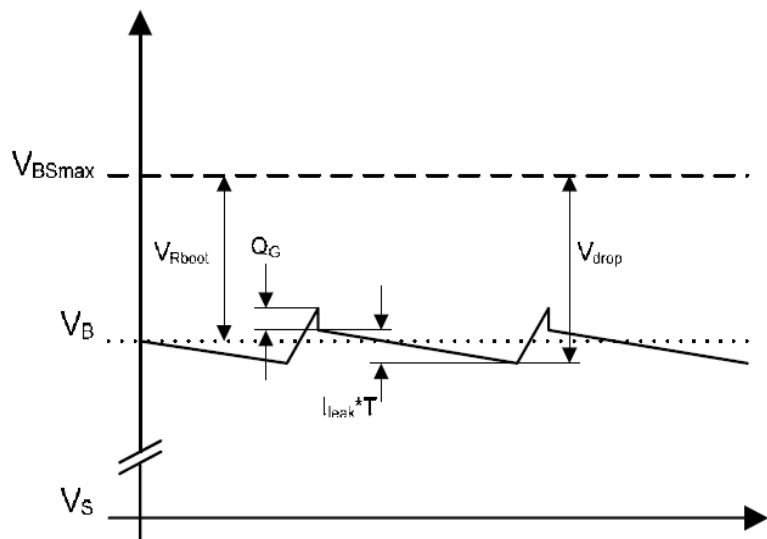
$I_{Q, DRV}$ -----自举电路静态电流

I_{GS} -----G-S间漏电流

2) 由于自举二极管工作在高频开关状态，因此需选用高压快恢复二极管

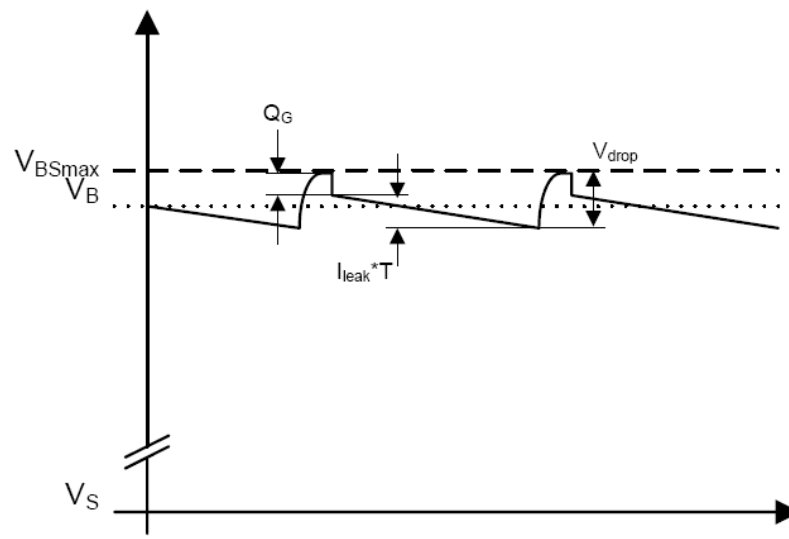
POWER MOSFET 自举驱动

占空比对自举电压的影响



$$D < \frac{4 \cdot R_{boot} \cdot C_{boot}}{T_S}$$

$$V_{drop} = V_{Rboot} + \Delta V_{BS} / 2^3$$

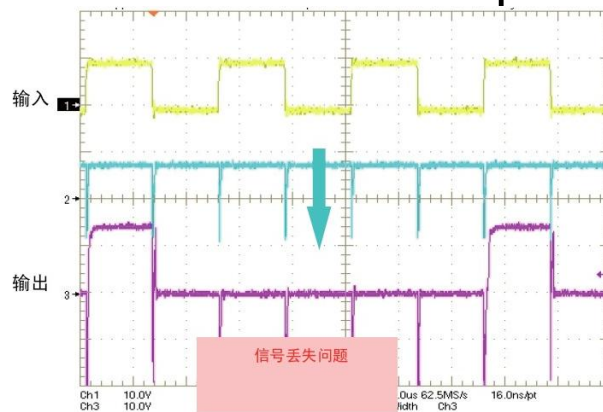
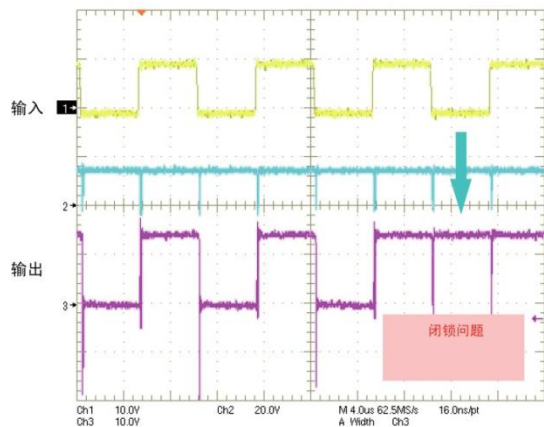
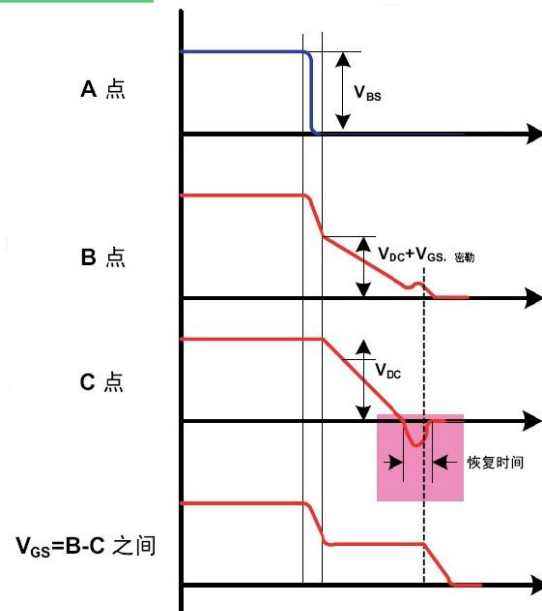
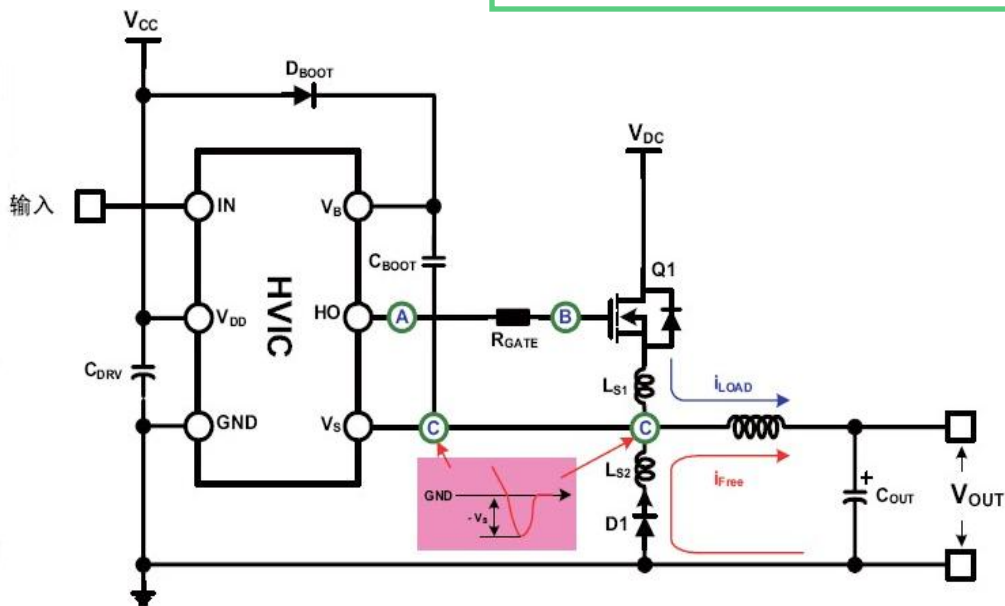


$$D \gg \frac{4 \cdot R_{boot} \cdot C_{boot}}{T_S}$$

$$V_{drop} = \Delta V_{BS}$$

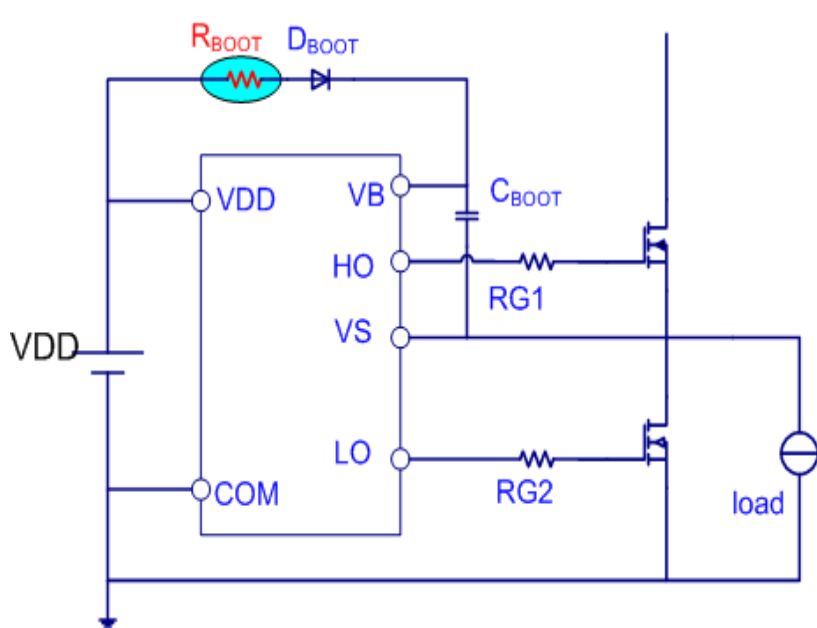
POWER MOSFET 自举驱动

源极负压对于电路的影响

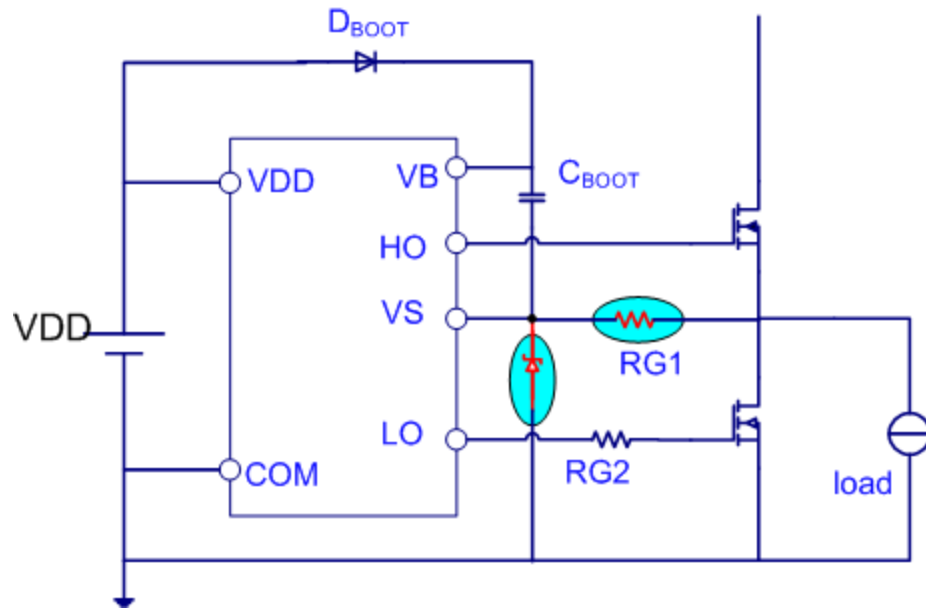


POWER MOSFET 自举驱动

减小源极负压对电路影响的方法



能一定程度缓解源极负压对电路的影响，但是会使得自举电容充电时间常数变长



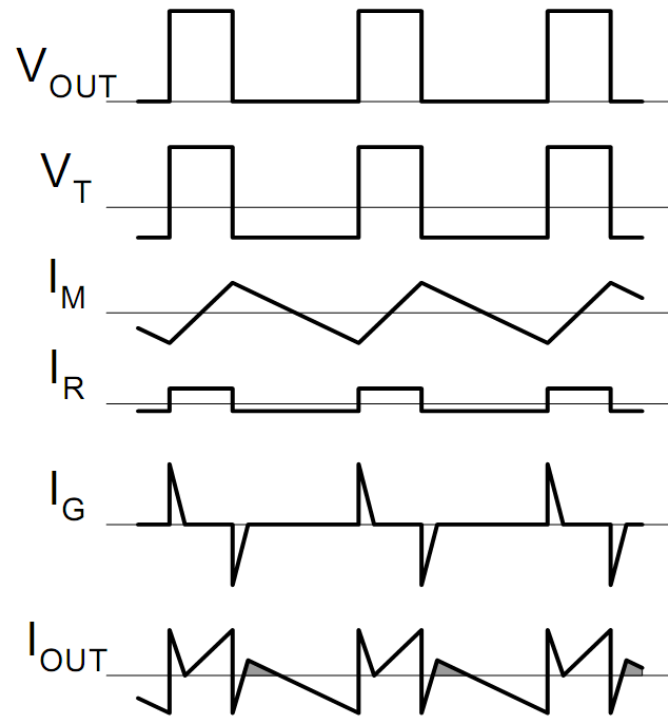
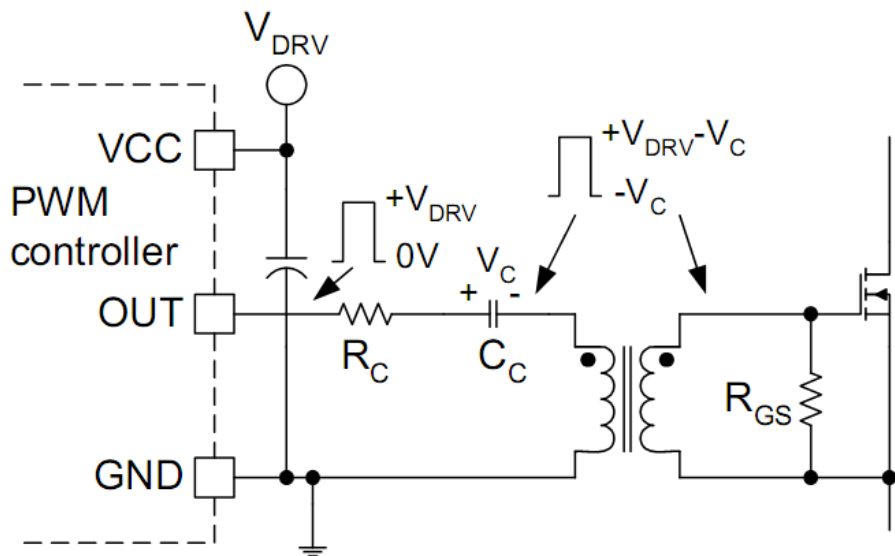
能有效减小源极负压的影响，但是同样使得自举电容充电时间变长

POWER MOSFET 自举驱动

减小寄生电感的方法

- 开关之间的走线不形成回路
 - 减小开关管的走线长度
 - 自举二极管应尽可能靠近自举电容
 - 去耦电容和栅极驱动电阻应尽可能靠近栅极驱动集成电路。
-

POWER MOSFET 隔离驱动



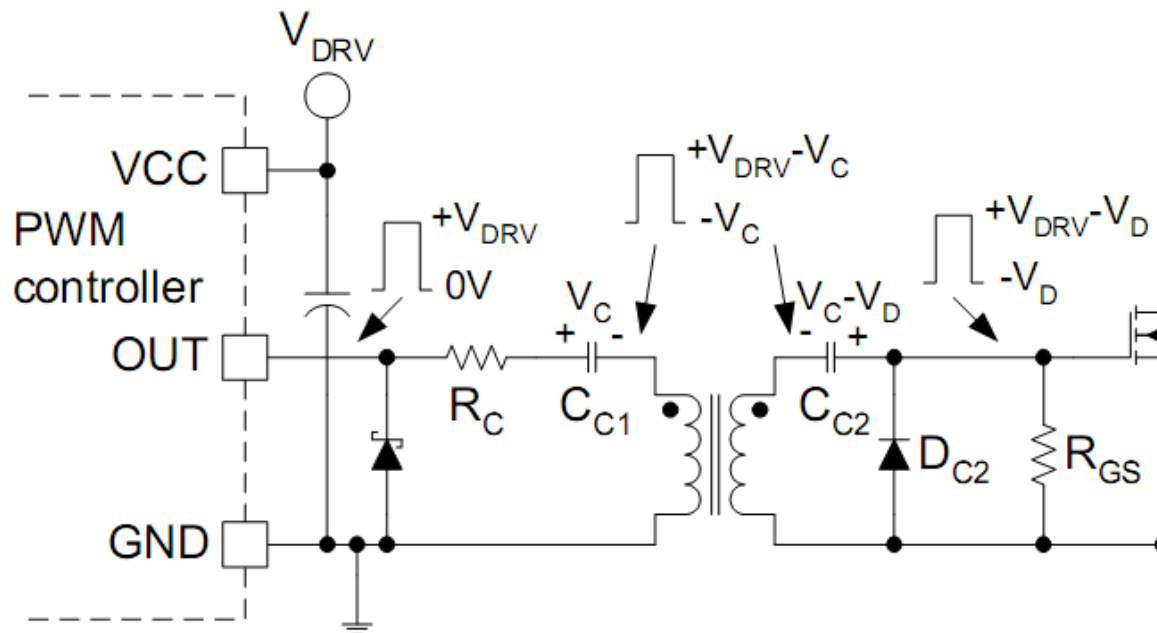
$$V_C = D \cdot V_{DRV}$$

$$R_C \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L_M}{C_C}}$$

MOSFET的驱动电压与占空比有关，应确保在最大占空比时有足够的驱动电压。

$$V_{GS} = \frac{V_{DRV} - V_C}{n} = \frac{V_{DRV} - D \cdot V_{DRV}}{n} = V_{DRV} \cdot \frac{1-D}{n}$$

POWER MOSFET 隔离驱动



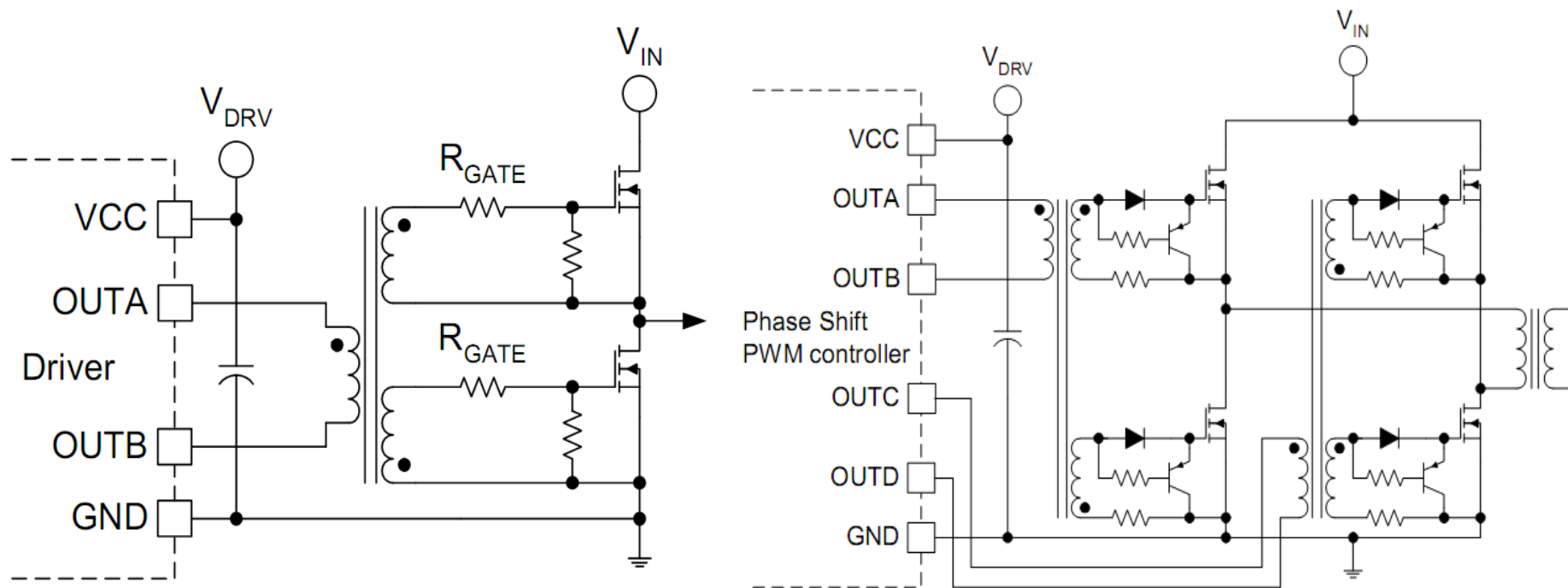
$$C_{C1} = \frac{Q_G}{\Delta V_{C1}} + \frac{(V_{DRV} - V_{DC2,FW}) \cdot D}{\Delta V_{C1} \cdot R_{GS} \cdot f_{DRV}} + \frac{V_{DRV} \cdot (D^2 - D^3)}{\Delta V_{C1} \cdot 4 \cdot L_M \cdot f_{DRV}^2}$$

$$C_{C2} = \frac{Q_G}{\Delta V_{C2}} + \frac{(V_{DRV} - V_{DC2,FW}) \cdot D_{MAX}}{\Delta V_{C2} \cdot R_{GS} \cdot f_{DRV}}$$

变压器匝比为1，MOSFET的G-S间电压与占空比无关。

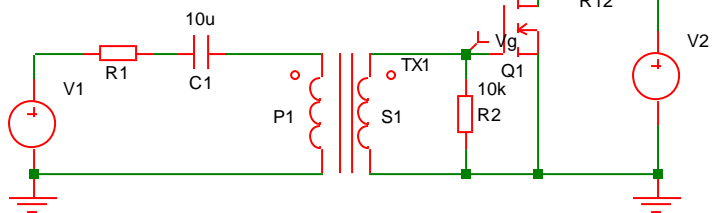
$$V_{GS} = \frac{V_{DRV} - V_C}{n} + V_C - V_D \xrightarrow{n=1} V_{GS} = V_{DRV} - V_D$$

POWER MOSFET 隔离驱动

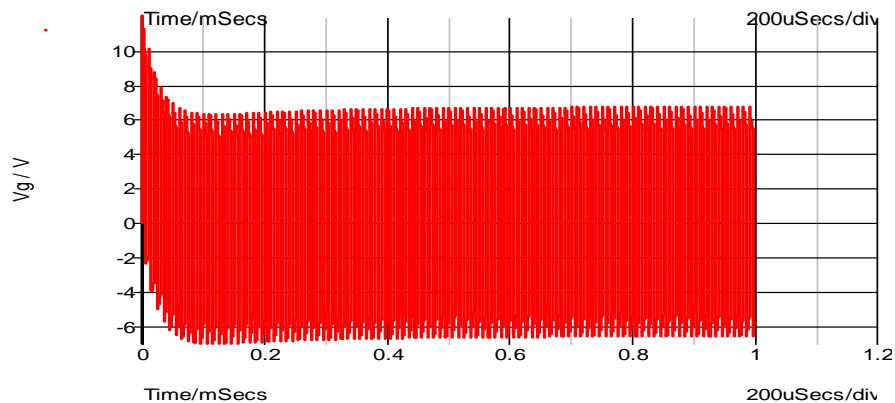
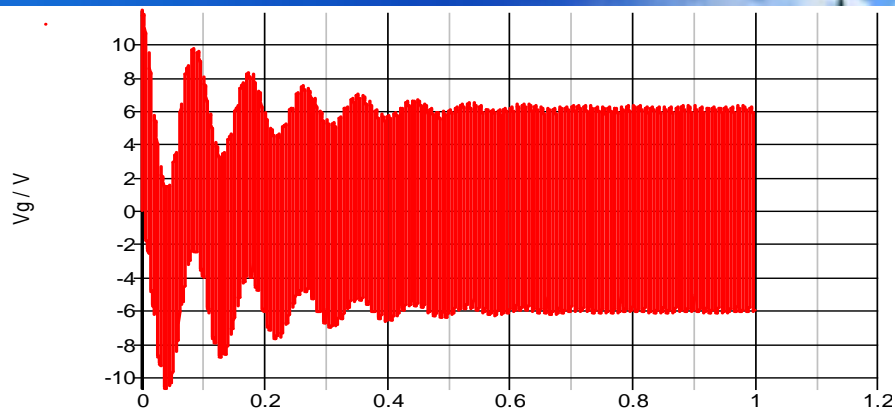


对于上下管占空比相等的隔离驱动，可以不需要隔直电容，但必须保证在任何情况下，驱动变压器不饱和。

POWER MOSFET 隔离驱动



由于R1, C1, 驱动变压器励磁电感构成RLC串联电路, 因此在起机或大动态时容易产生震荡。



由于 $Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{1}{R}$, 因此减小驱动变压器的励磁电感, 增大隔直电容和驱动电阻可以抑制此震荡

POWER MOSFET 隔离驱动

隔离驱动变压器的要求

- 信号延迟小，寄生电容小
 - 漏感小，波形失真小
 - 高低压侧可靠绝缘
-

POWER MOSFET 隔离驱动

隔离驱动变压器的设计

1. 选择合适的磁芯

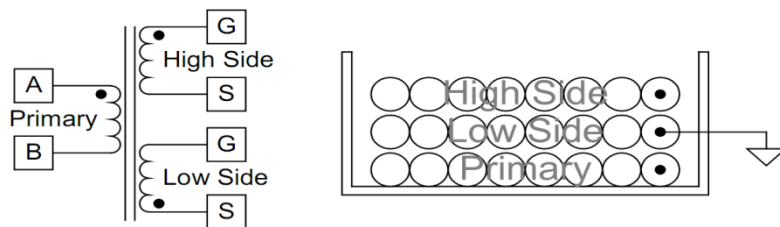
2. 计算原边匝数

$$N_p = \frac{V_{TR} \cdot t}{\Delta B \cdot A_e}$$

3. 选择线径，通常情况下，最好是能一层绕完一个绕组。

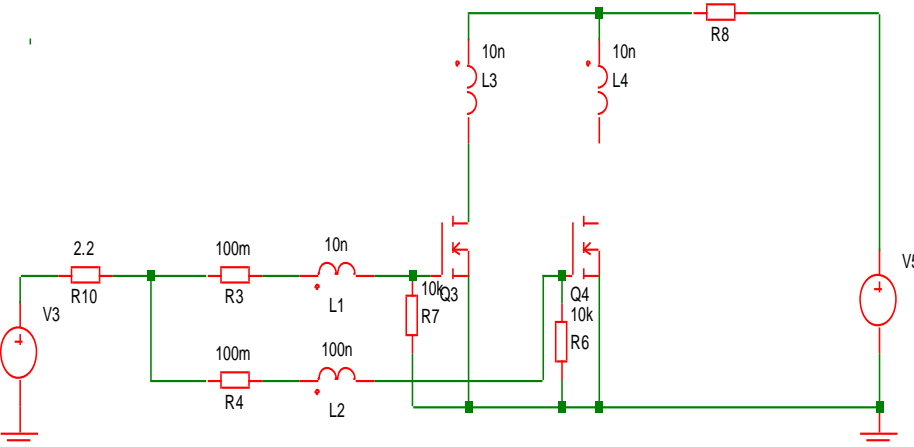
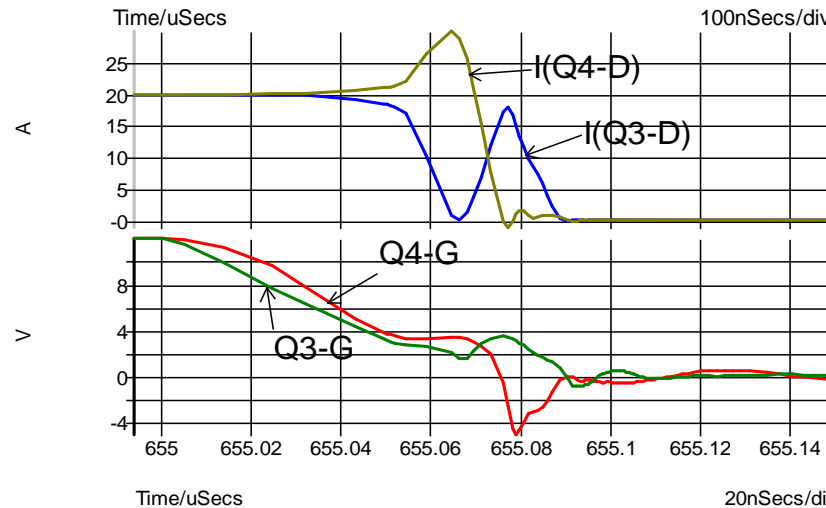
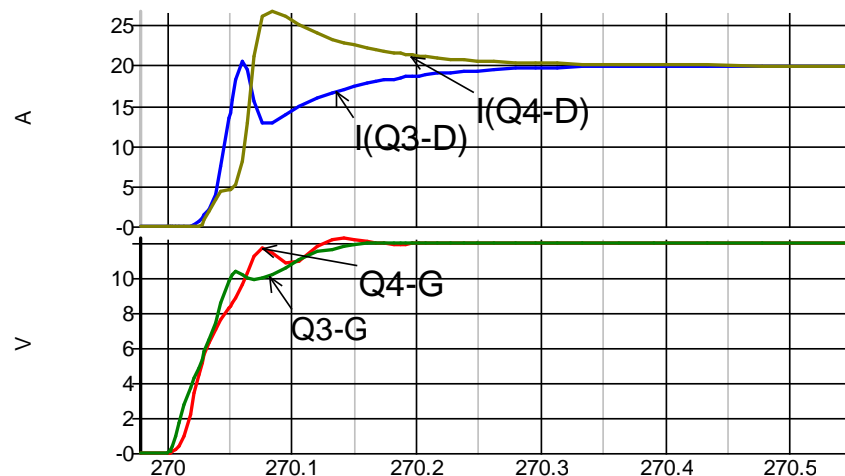
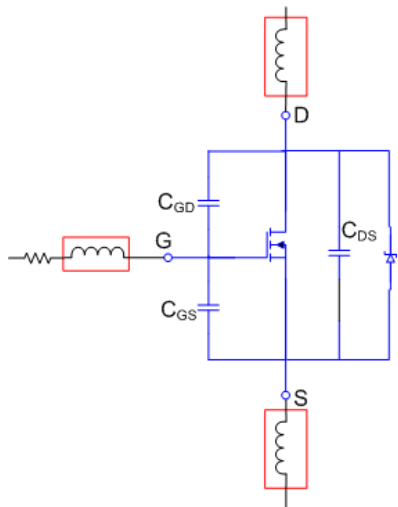
$$d_w = \frac{W_w}{N_p + 1}$$

4. 确定绕组排布



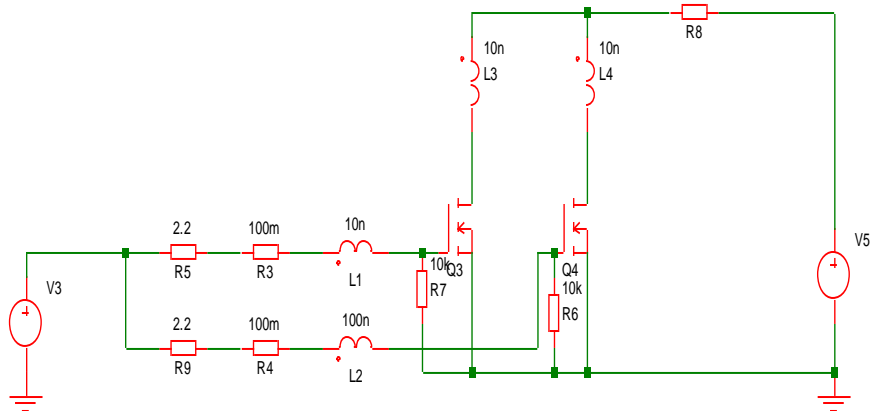
POWER MOSFET 并联驱动

寄生参数对并联驱动的影响

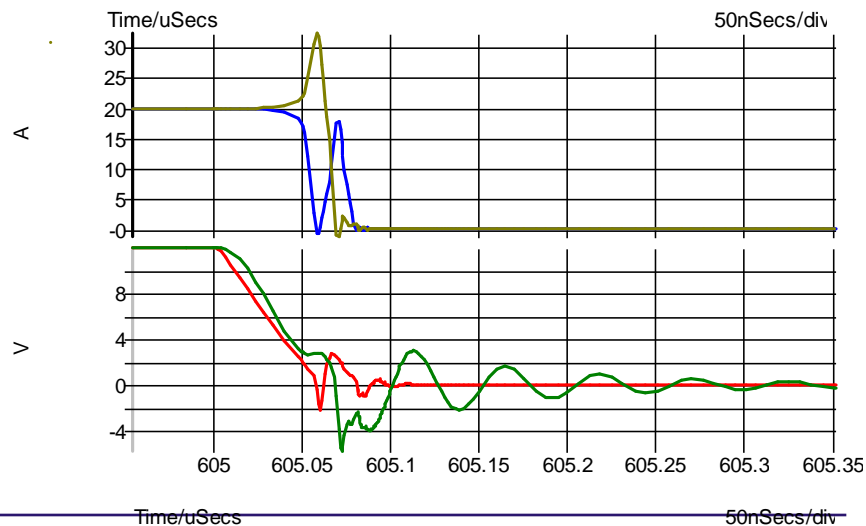
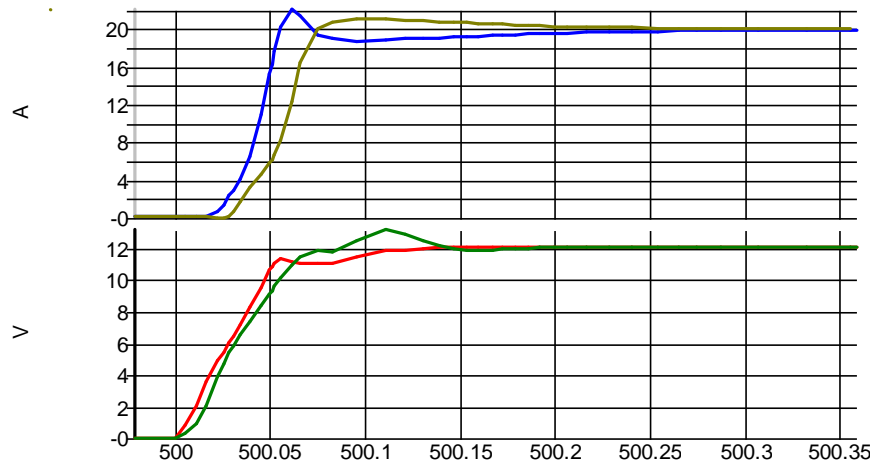


POWER MOSFET 并联驱动

寄生参数对并联驱动的影响

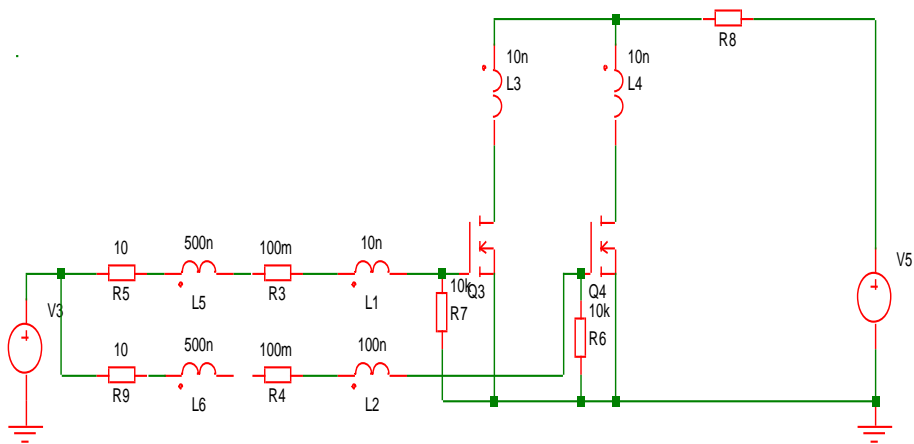


并联MOSFET使用单独的驱动电阻可以改善并联均流问题

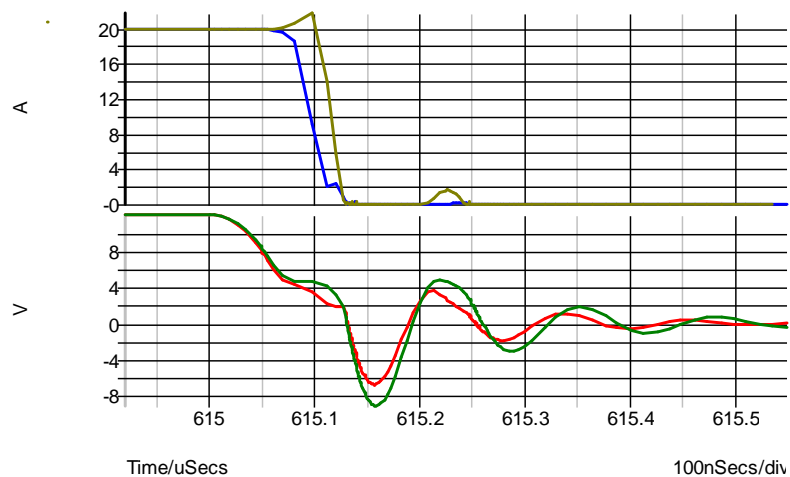
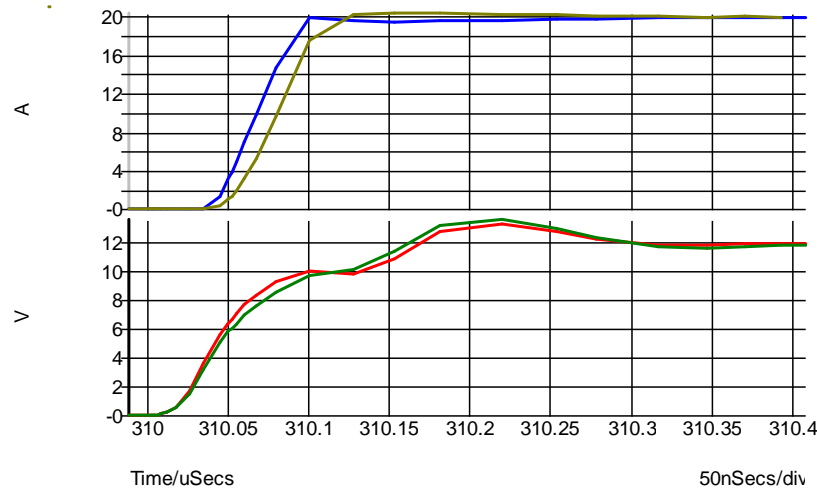


POWER MOSFET 并联驱动

寄生参数对并联驱动的影响



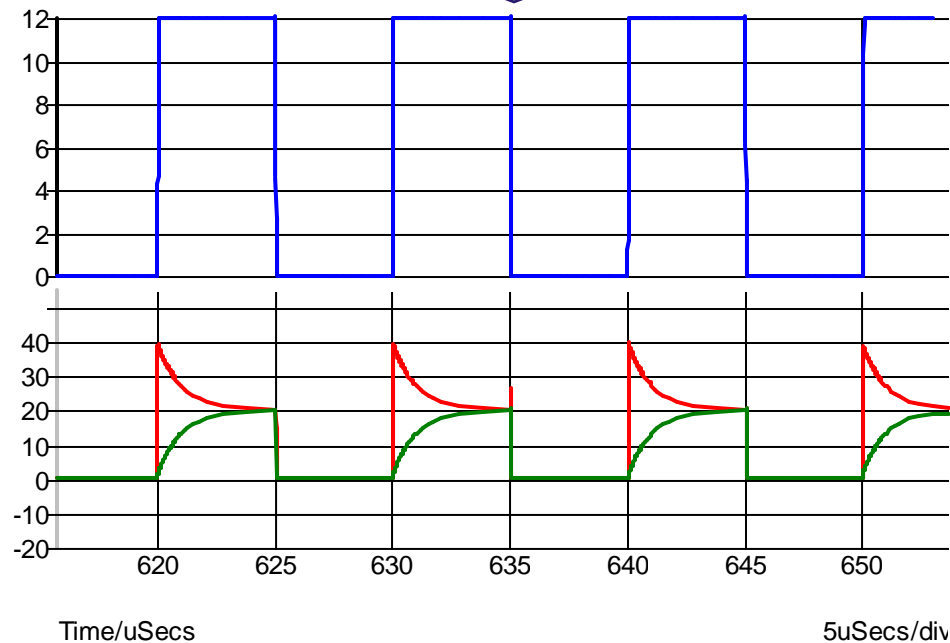
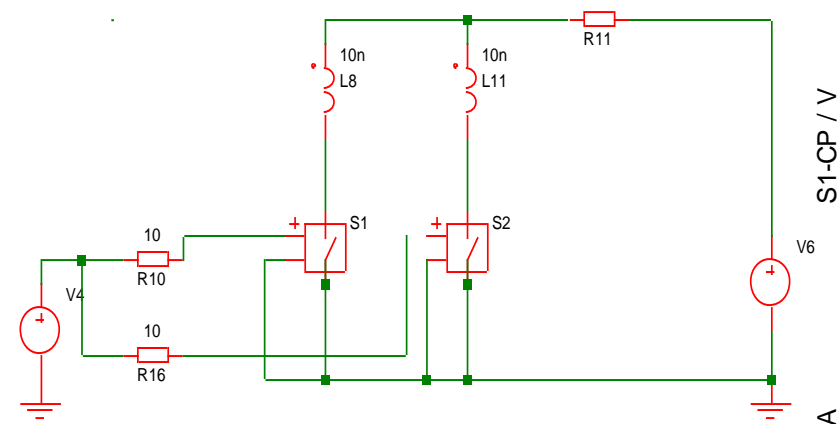
在MOSFET的栅极串联一个磁珠并增大驱动电阻可以很好的改善MOSFET的并联效果。



POWER MOSFET 并联驱动

Vth对并联驱动的影响

如果 $V_{th1} < V_{th2}$



MOSFET并联驱动时，应尽可能保证MOSFET的 V_{th} 一致：

- MOSFET 特性完全一致
- MOSFET的温度一致

POWER MOSFET 并联驱动

MOSFET 并联驱动的注意事项

- 并联MOSFET的特性应完全一致。
- 并联MOSFET的驱动布线应尽量对称。
- 并联MOSFET应有独立的驱动电阻或图腾柱，并尽量靠近

MOSFET栅极

- 如果并联MOSFET驱动发生震荡，可在MOSFET的栅极套磁珠，并适当增大驱动电阻。
-



Thank You !