

## IGBT 发射极电感对开通延迟时间的影响

撰写：F.A.E.Team 审阅：Norman Day

### 简介：

IGBT 在开通过程中有一个开通延迟时间 (turn on delay)，在理想模型下该时间的长短主要由门极电阻和 IGBT 的输入电容决定。但是实际功率模块中不管是键合铝线还是端子引出部分都有一定的接线距离，因此回路中寄生电感是必然存在的。引入发射极电感的模型和理想的不含发射极电感的模型会有一定的差距，但大多数文献都仅止与定性的分析，本文对发射极电感在开通延迟时间的影响做进一步量化的讨论。

### 引言：

在物理意义上所谓的开通延迟时间是指门极在加上开通信号之后，直到门极电压  $V_g = V_{TH}$  (开启电压) 为止的这一段的时间，但在一般文献或规格中所定义的开通延时是门极—发射极间电压上升至 10% 时开始至集电极电流上升到 10% 为止的时间，如图 1 中的  $t_{d(on)}$  所示。为了简化计算的复杂度，在此文中讨论的开通延时过程是指物理意义上的定义。

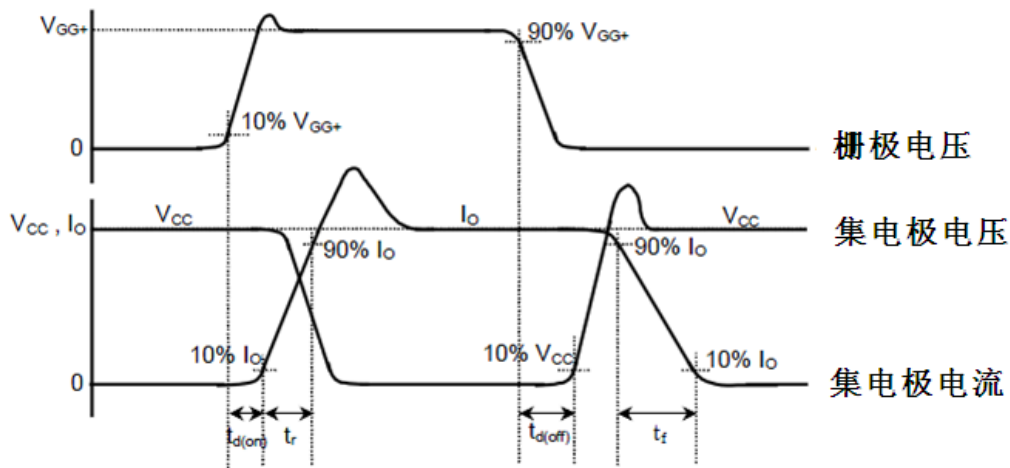


图 1

图 2 为 IGBT 开通过程理想模型，图 3 为 IGBT 开通过程中考虑发射极寄生电感的电路模型。



本文在计算开通延迟时间时做了以下几点假设：

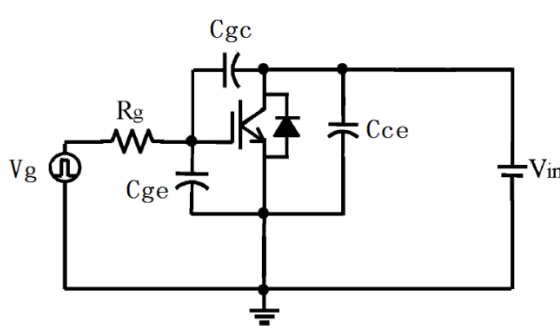


图 2

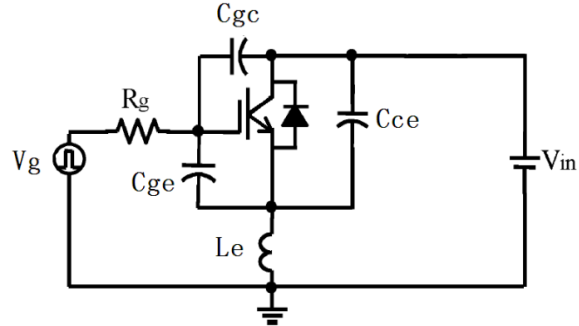


图 3

1.忽略 IGBT 的集电极寄生电感，只考虑发射极寄生电感。在开通延迟这段时间内，功率回路内没有电流流过，因此集电极寄生电感对开通延迟时间并无影响。此假设完全成立。

2.驱动电压  $V_G$  在 IGBT 开通过程中从 0V 瞬间跳变为 15V。此假设需求驱动电源要有极低的输出阻抗。

3.忽略  $C_{gc}$ ，只考虑  $C_{ge}$  的影响。在 IGBT 开通前输入电容两端跨了高压，输入电容  $C_{iss}=C_{ge}+C_{gc}$ ，此时  $C_{ge}$  比  $C_{gc}$  大 1 到 2 个数量级即  $C_{ge} \ll C_{gc}$ 。此假设合理成立。

4.忽略驱动端的寄生电感。需要注意此假设成立的条件较困难。

## 理论计算：

按照理想模型，如图 2 所示，基于上述的假设，在没有发射极 (emitter) 电感时导出 15V 的驱动电压对  $C_{ge}$  的充电常数。

$$V_{ge}(t) = V_g - V_g e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\tau = R_g C_{ies} = R_g C_{ge}$$

令  $V_{ge}(t) = V_{TH}$ ，可得到导通延迟时间如下式：

$$td = \tau \ln \frac{V_g}{V_g - V_{TH}} = R_g C_{ge} \ln \frac{V_g}{V_g - V_{TH}}$$

$$td = R_g C_{ge} \ln \left( 1 + \frac{V_{TH}}{V_g - V_{TH}} \right)$$

可见在理想模型下，当  $C_{ge}$ 、 $V_{TH}$  为定值（芯片已选定）， $R_g$  和开通延迟在时间之间存在线性变化的关系。 $V_g$  一般使用的范围在 10~20V 之间， $V_{TH}$  一般在 3~5V 中变化，但两个参数在导出的公式中，位于  $\ln$  的函数，所以影响较小， $V_g$  约为 20%。 $V_{TH}$  约为 10%。亦即在理想模型下，开通延迟时间主要受门极电阻  $R_g$  影响。

如果将发射极电感的影响考虑进来，如图 3，则数学式相对会复杂一些，必须由进一步推导才能看出其量化的程度，依据 KVL 可列得方程式如下：

$$V_g = i_g(t) * R_g + V_{ge}(t) + \tau \frac{di_g(t)}{dt}$$

因初始值皆为零，经拉布拉斯转换后可得：

$$\frac{15}{S} = R_g I(S) + \frac{1}{SC_{ge}} I(S) + SLe$$

$$I(s) = \frac{15C_{ge}}{S^2 Le C_{ge} + SR_g C_{ge} + 1} = \frac{15C_{ge}}{AS^2 + BS + 1}$$

计  $A = C_{ge}Le$ ， $B = R_g C_{ge}$ ，

当  $B^2 - 4A > 0$  时，

$$i_g(t) = 15C_{ge} - 15C_{ge} \left( \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{\tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \right)$$

$$V_{ge}(t) = V_g - R_g i_g - Le \frac{di_g}{dt}$$

$$V_{ge}(t) = 15 - 15R_g C_{ge} - 15C_{ge} \frac{Le - R_g \tau_1}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - 15R_g C_{ge} \frac{Le R_g \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad \text{错误！未找到引用源。}$$

到引用源。

其中  $\tau_1 = \frac{2A}{B + (B^2 - 4A)^{0.5}}$  错误！未找到引用源。 ，  $\tau_2 = \frac{2A}{B - (B^2 - 4A)^{0.5}}$  错误！未找到引用源。

到引用源。

当  $B^2 - 4A < 0$  时

$$I(t) = 15C_{ge} - 15C_{ge} \frac{1}{\tau^3} \left( \cos \omega t + \frac{1}{\omega \tau} \sin \omega t \right)$$

$$V_{ge} = V_g - R_g i_g - Le \frac{di_g}{dt}$$

$$V_g(t) = 15 - 15R_g C_{ge} + 15R_g C_{ge} e^{-\frac{t}{\tau^3}} \cos(\omega t) - 15R_g C_{ge} e^{-\frac{t}{\tau^3}} \left( \frac{R_g \tau^3 - Le}{\omega \tau^3} - Le \omega \right) \sin(\omega t)$$



$$\text{其中 } \tau = \frac{2A}{B}, \quad \omega l = \sqrt{\frac{1}{A} + \left(\frac{B}{2A}\right)^2}$$

在这个过程中，出现了一个  $B^2 - 4A$  的条件，如果  $B^2 - 4A > 0$ ，那么  $V_g$  的形式随时间而衰减，此条件也是一般应用手册选择  $R_g$  的一个准则，但由推导的过程中可发现在这段时间 IGBT 完全处于关闭状态，所以利用此条件作为  $R_g$  的设计并没有特别的意义。

因为上述方程式较为复杂，不容易由数学式来判断，所以以下籍由模拟软件在特定条件下来说明个参数的影响。

### 软件模拟:

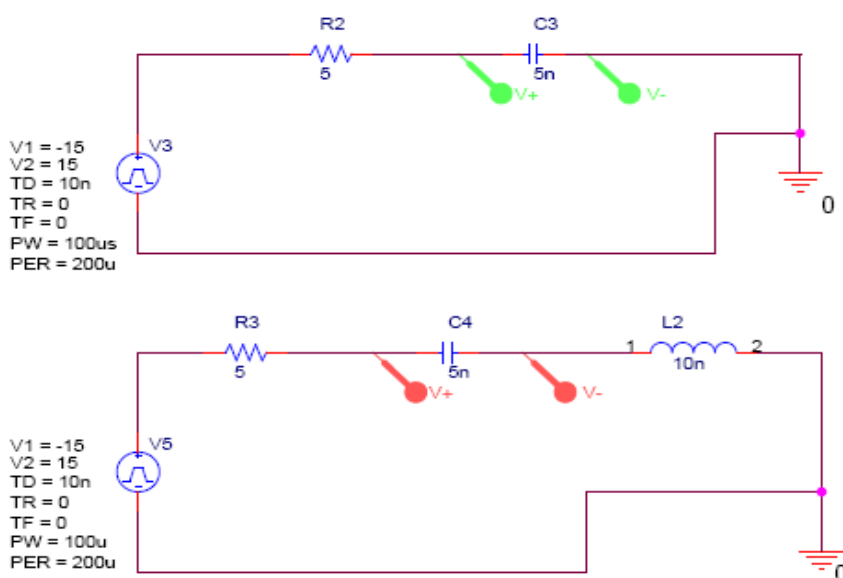


图 4

先给定驱动电阻与 IGBT 的输入电容，利用 pspice 对 IGBT 的门极充电回路进行一个仿真。在  $t_0$  时刻门极信号从 -15V 跳变为 +15V。在第一次仿真固定们极电阻  $R_g$  发射极寄生电感  $L_e$  的值分别取 10nH、30nH、60nH、100nH，如图 5 所示。之后仿真中固定发射极寄生电感  $L_e$ ，门极电阻  $R_g$  的值分别为 5Ω、8Ω、12Ω、20Ω，如图 6 所示。当输入电容固定时，线路可由简单的 RLC 网路所代表，如图 4 所示。

假设某 IGBT 的  $V_{TH}$  为 4V 在  $R_g$  为 5Ω， $C_{GE}$  为 5nF， $L_e$  分别为 10nH、30nH、60nH、100nH 的情况下  $t_d$  分别为 36ns、37.5ns、42ns、47ns。从



仿真的结果可见，在这种假设下，发射极寄生电感的变化对开通延迟时间有一定的影响，但是影响程度不会很大。

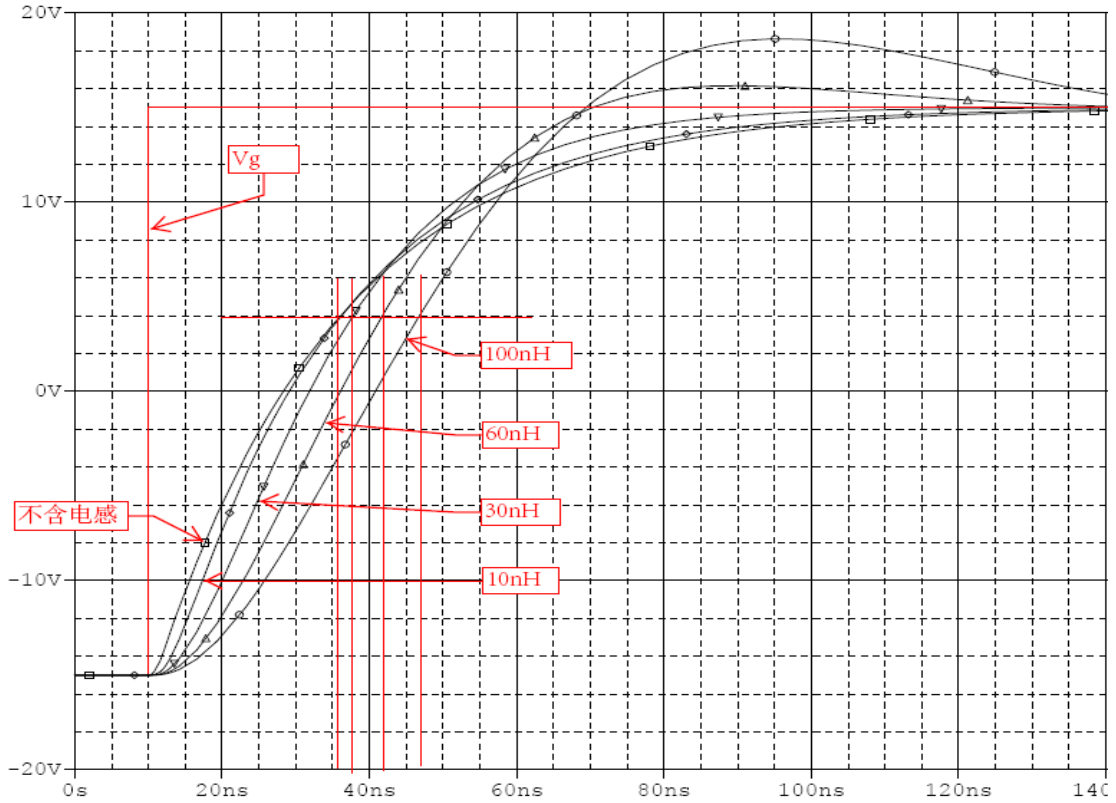


图 5

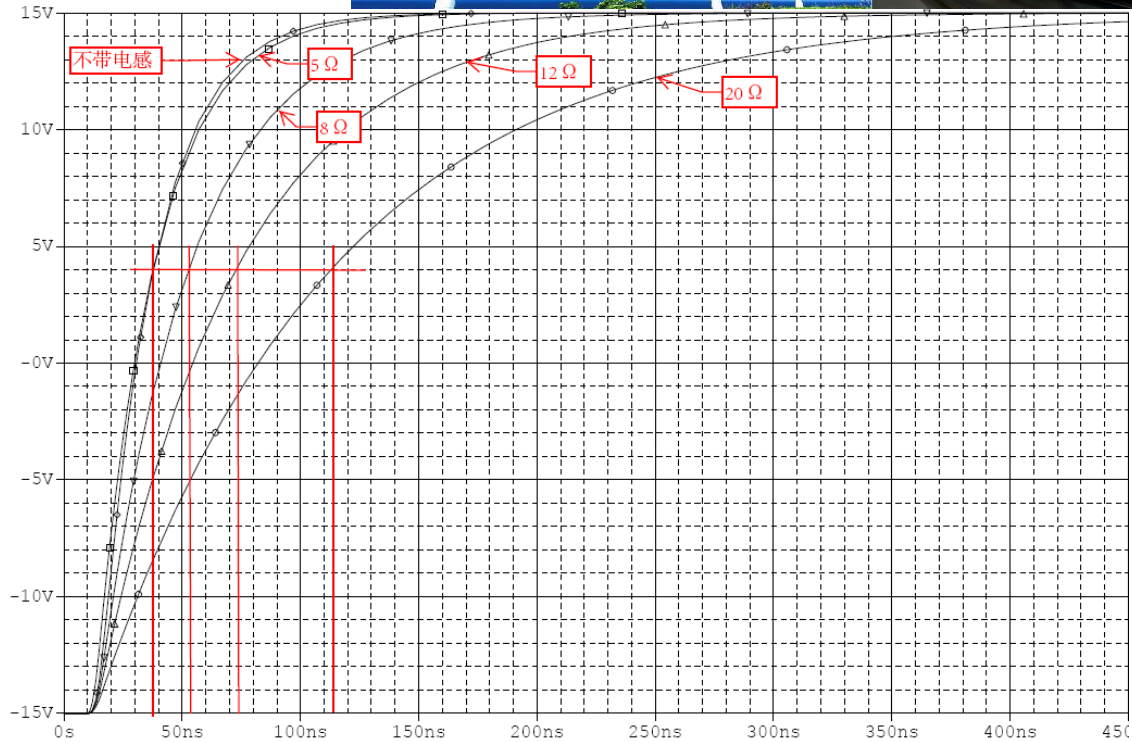


图 6

给定条件 IGBT  $V_{TH}=4V$  ,  $C_{ge}=5nF$  , 变化  $R_g$  分别为  $5\Omega$ 、 $8\Omega$ 、 $12\Omega$ 、 $20\Omega$  的情况下  $t_d$  分别为  $36ns$ 、 $53ns$ 、 $73ns$ 、 $113ns$ 。相比较  $L_e$  变化对开通延迟的影响, 可得  $R_g$  的变化对开通延迟时间的影响要大得多。

透过不同条件的模拟, 在  $C_{ge}$  小于  $1nF$  时, 若输入电容固定, 且  $R_g$  为  $5\Omega$ ,  $L_e$  的增大对开通延迟时间的影响较大,  $L_e$  从  $10nH$  到  $100nH$  之间的变化, 则可以导致  $t_d$  有大于  $100\%$  的变化量;  $C_{ge}$  小于  $1nF$ ,  $L_e$  为  $10nH$ , 此时  $R_g$  从  $5\Omega$  变化至  $20\Omega$ ,  $t_d$  的变化量小于  $100\%$ 。  $C_{ge}$  在  $10nF$ ,  $R_g$  为  $5\Omega$ ,  $L_e$  从  $10nH$  变化到  $100nH$ ,  $t_d$  的变化量约为  $10\%$ ;  $C_{ge}$  为  $10nF$ ,  $L_e$  为  $10nH$ ,  $R_g$  从  $5\Omega$  变化为  $20\Omega$ ,  $t_d$  的变化量达到  $300\%$ 。

### 总结:

本文通过引入封装杂散电感的模型来探讨  $L_e$  对开通延时的影响, 在 IGBT 输入电容小于  $1nF$  时,  $L_e$  的变化对开通延迟时间的影响, 需要引起足够的注意; 但在输入电容大于  $10nF$  时,  $L_e$  的变化对开通延迟时间的影响很小, 基本可以忽略。