



## IGBT 驱动器的计算

引言.....	2
栅极电荷曲线.....	2
测量栅极电荷.....	5
确定栅极电荷.....	6
驱动器输出功率.....	9
栅极电流.....	9
栅极峰值电流.....	11
选择合适的 IGBT 驱动器.....	12
DriverSel – 简便的 IGBT 驱动器计算方法.....	13
符号和术语.....	14



本应用指南提供了关于确定用于开关 IGBT 的驱动器输出性能的信息。所提供的信息仅包括提示并不包含完整的设计规则。信息并不全面，设计是否合适取决于用户自己。

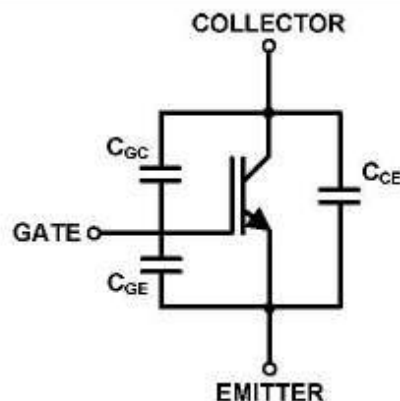
## 引言

除功率模块自身外，电力电子系统的一个关键器件是 IGBT 驱动器，它在功率晶体管 and 控制器之间形成了一个极为重要的接口。基于这个原因，驱动器的选择和驱动器输出功率的正确计算与转换器方案的可靠性紧密相连。驱动力的不足或驱动器选择错误可能会导致模块和驱动器故障。

## 栅极电荷曲线

IGBT 模块的开关行为（导通和关断）取决于它的结构、内部电容（电荷）以及内部和外部阻抗。当需要计算 IGBT 驱动器电路的输出功率时，关键的参数是栅极电荷。栅极电荷由等效输入电容  $C_{GC}$  和  $C_{GE}$  决定。

### IGBT 电容

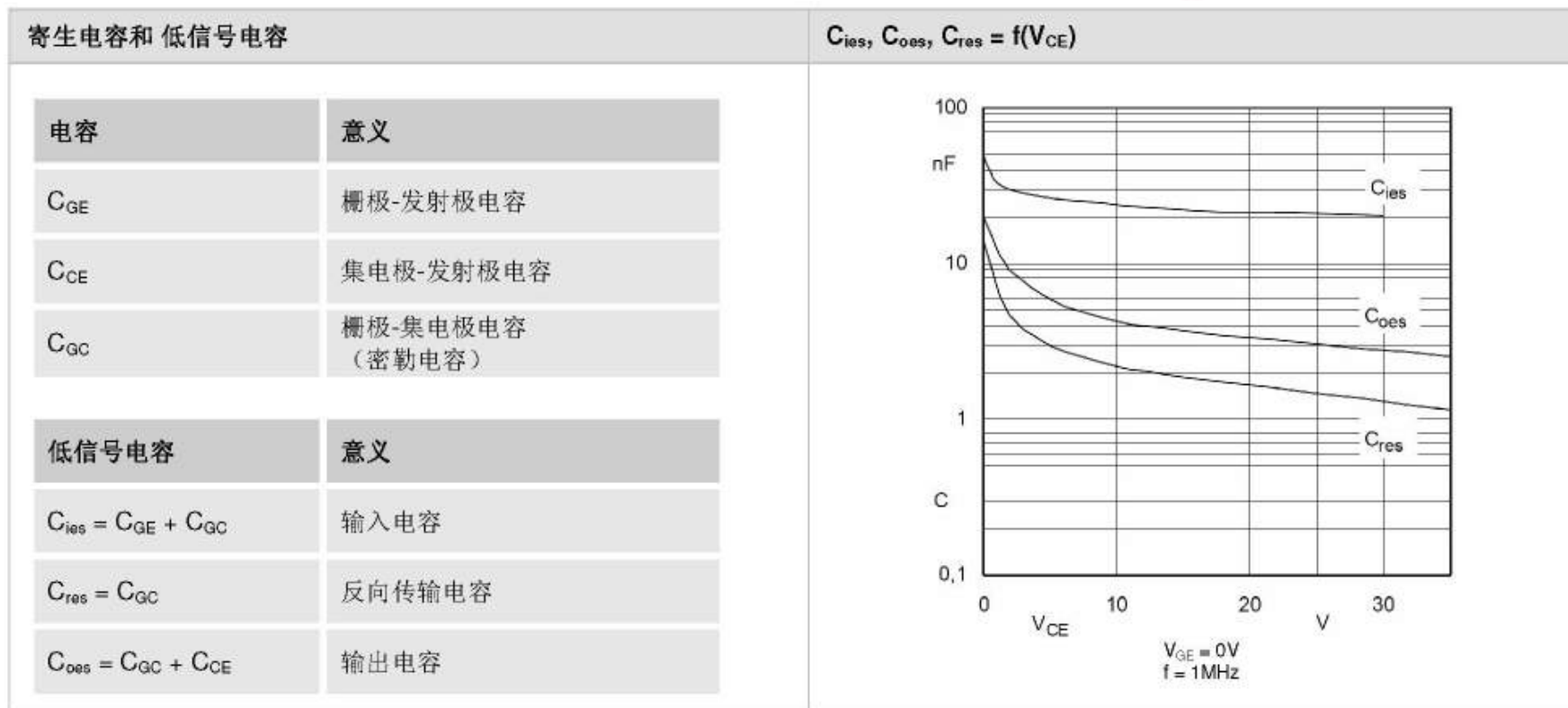


COLLECTOR: 集电极

EMITTER: 发射极

GATE: 栅极

下表说明了电容的命名。在 IGBT 数据表中，这些电容被指定为在“关断”状态下 IGBT 的受电压影响的低信号电容。这些电容是不受温度影响，但是受集电极-发射极电压影响，如下面的曲线所示。当集电极-发射极电压非常低时，这种依赖性将大幅度提高。



下表给出了 IGBT 导通期间简化的栅极电荷波形  $V_{GE}=f(t)$ 、 $I_G=f(t)$ 、 $V_{CE}=f(t)$ 和  $I_C=f(t)$ 。导通过程可分为三个阶段，分别为栅极-发射极电容充电阶段、栅极-集电极电容充电阶段和栅极-发射极电容充电直到 IGBT 完全饱和阶段。

对于开关特性和驱动器的计算，输入电容可能只具有一定程度的影响。确定驱动器输出功率更实际的方法是采用

IGBT 数据表中给出的栅极电荷特性。该特性给出了栅极-发射极电压  $V_{GE}$  和栅极电荷  $Q_G$  之间的关系。在 IGBT 模块的额定电流下，栅极电荷线性增长。栅极电荷也依赖于直流环节电压，尽管程度较轻。在更高的运行电压下，由于密勒电容的巨大影响，栅极电荷增大。在大多数应用中，该影响可忽略不计。



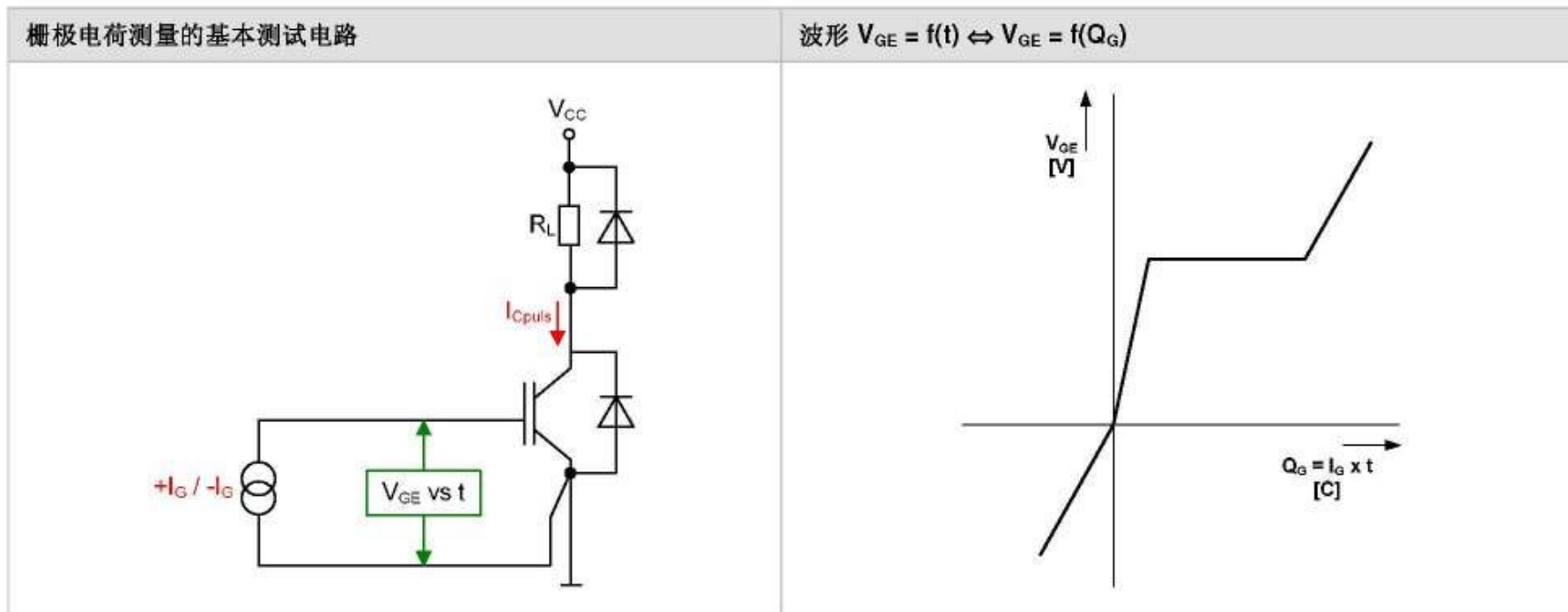
- t1 开关时间段:** 一旦  $V_{GE}$  超过  $V_{GE(th)}$ , IGBT 的导通过程开始。  $I_C$  开始增大并达到全负载电流  $I_{C(load)}$ , 该电流对于理想的续流二极管 (如简化的波形图所示) 有效。对于实际的续流二极管,  $I_C$  超过  $I_{C(load)}$ 。这是因为在相反的方向上流有反向恢复电流, 该电流加到了  $I_{C(load)}$  上。由于续流二极管在 t2 部分的开始阶段仍传导电流, 集电极-发射极电压将不会下降。  $V_{GE}$  达到平台电压  $V_{GE(pl)}$ 。
- t2 开关时间段:**  $V_{GE}$  维持为  $V_{GE(pl)}$ 。当续流二极管关断,  $V_{CE}$  开始快速下降, 此时  $dv_{CE}/dt$  大。
- t3 开关时间段:** 当  $V_{CE}$  降至导通态电压  $V_{CEsat}$ , 当电压下降时, 密勒电容  $C_{GC}$  增大并由  $I_G$  充电。  $V_{GE}$  仍旧维持在  $V_{GE(pl)}$  水平。
- t4 开关时间段:** 在 t4 部分的开始阶段, IGBT 完全导通。传导至  $C_{GE}$  的电荷使  $V_{GE}$  指数级增大至栅极控制电压  $V_{GE(on)}$ 。  $I_G$  按指数形式衰减到 0, 而  $V_{CE}$  达到  $V_{CEsat}$ 。

关断过程是按上述过程的反向运行。电荷必须从栅极移除。

## 测量栅极电荷

下表中给出了一个可以测量栅极电荷的简化测试电路。栅极由恒流源供电。此外, 集电极上施加了一个脉冲恒流。由于  $Q_G = I_G \times t$ , 恒定的栅极电流使得被测波形  $V_{GE} = f(t)$  与  $V_{GE} = f(Q_G)$  相等。

文档 IEC 60747-9, Ed.2: Semiconductor Devices – Discrete Devices – Part 9: Insulated-Gate Bipolar Transistors (IGBTs) 描述了栅极电荷的测试方法。



## 确定栅极电荷

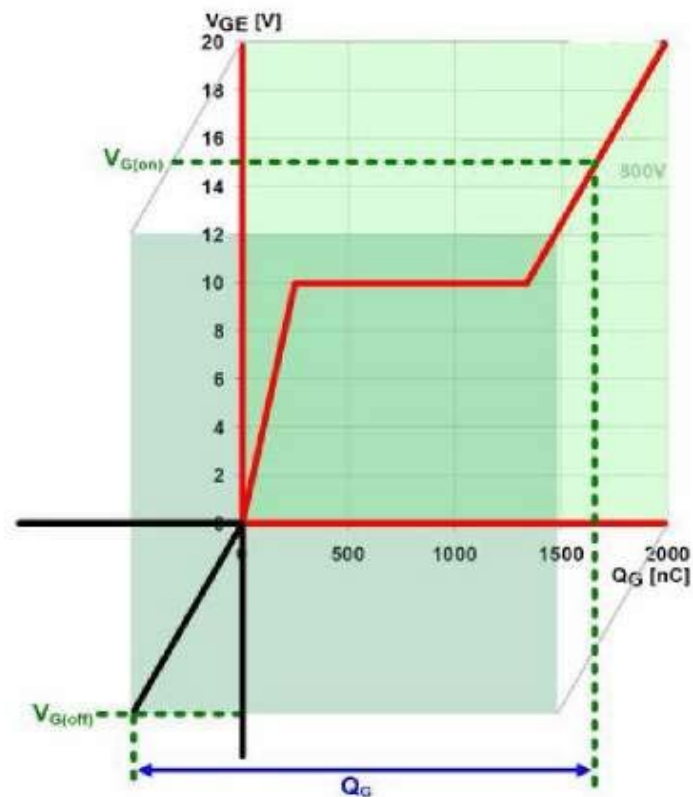
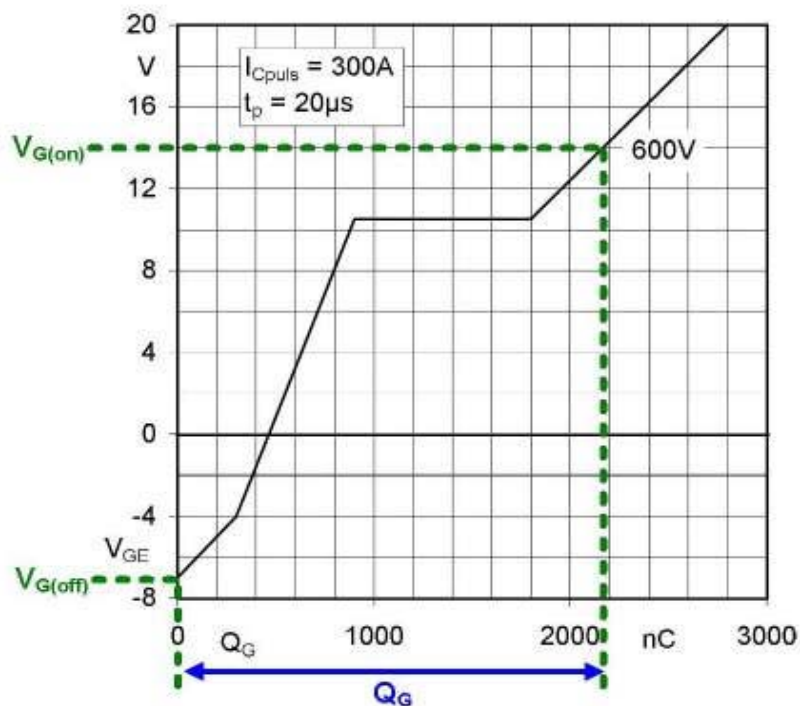
用于驱动 IGB 所需的每脉冲栅极电荷可由栅极电荷特性图确定，该图给出了栅极-发射极和栅极电荷之间的关系。总栅极电荷可通过考虑所施加的栅极电压的幅值读出，即从导通栅极电压  $V_{G(on)}$  到关断栅极电压  $V_{G(off)}$ 。赛米控的 IGBT 数据表给出了正负象限的栅极电荷曲线。

如果只给出了正象限的栅极电荷曲线，栅极电荷幅值可通过外推法读出，如下表所示。亮绿色表示 IGBT 数据表中所给的图表区域。沿栅极电荷曲线平行移动亮绿色区域到负象限并达到  $V_{G(off)}$ ，可以确定栅极电荷的幅值。



栅极电荷特征 (以 SKM400GB126D 为例)

外推法



确定栅极电荷的另一个方法是使用输入电容  $C_{ies}$  和一个特别因子，而不是栅极电荷曲线。IGBT 数据表给出了  $C_{ies}$  的值。

在适当的时间，必须具备必要的栅极电荷或每脉冲充电能量。这只能通过驱动器输出级使用低阻抗、低电感输出电容来获得。电容的大小由计算出的  $Q_G$  表示。栅极电荷是确定驱动器输出功率和栅极电流的基本参数。



### 带 $C_{ies}$ 的栅极电荷计算方法

栅极电荷可表示为:

$$Q_G = C_G \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})$$

其中  $C_G = k_C \times C_{ies}$

栅极电容因子  $k_C$  可近似计算为

$$k_C = \frac{Q_{G(ds)}}{C_{ies} \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})}$$

其中  $Q_{G(ds)}$  在IGBT数据表中指定,  $V_{G(on)}$ 和 $V_{G(off)}$  是施加在 $Q_{G(ds)}$ 上的栅极电压。

因此, 另一种栅极电荷的计算方法如下:

$$Q_G = k_C \times C_{ies} \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})$$

#### 请注意:

本方法并不完全精确, 只能应用在无栅极电荷波形的情况下。



## 驱动器输出功率

可以看出，驱动 IGBT 所需的各个内部供给的功率可以看作是预期开关频率和用于对 IGB 进行充放电的能量的函数。

### 每通道驱动器输出功率的计算

功率可表示为

$$P_{GD(out)} = E \times f_{sw}$$

替换  $E = Q_G \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})$ ,

则每通道驱动器输出功率为:

$$P_{GD(out)} = Q_G \times (V_{G(on)} - V_{G(off)}) \times f_{sw}$$

使用  $C_{ies}$  方法近似计算驱动器功率:

$$P_{GD(out)} = k_C \times C_{ies} \times (V_{G(on)} - V_{G(off)})^2 \times f_{sw}$$

## 栅极电流

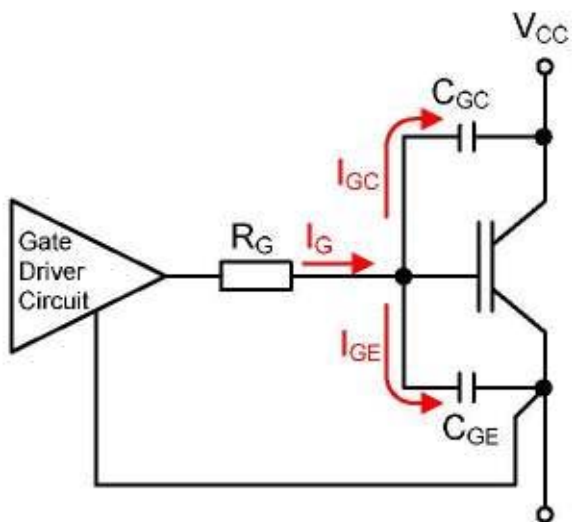
IGBT 驱动电路的一个关键要求是提供足够的电流对 IGBT 的输入电容进行充放电，从而可以导通和关断 IGBT。栅极电流可以使用计算 IGBT 输入电容充电的公式计算得

到。计算得到的栅极电流是驱动器每通道输出级的最小平均输出电流  $I_{outAVG}$ 。



IGBT 电容

栅极电流的计算



电荷可计算如下:

$$Q_G = \int i dt$$

由于

$$Q_{GE} = i_{GE} \times t_{sw}, \quad Q_{GC} = i_{GC} \times t_{sw}$$

因此总栅极电荷为:

$$Q_G = Q_{GE} + Q_{GC} = (i_{GE} + i_{GC}) \times t_{sw}$$

替换

$$t = \frac{1}{f_{sw}}$$

平均栅极电流为:

$$I_G = I_{GE} + I_{GC} = Q_G \times f_{sw}$$

使用 $C_{ies}$ 方法近似计算平均栅极电流:

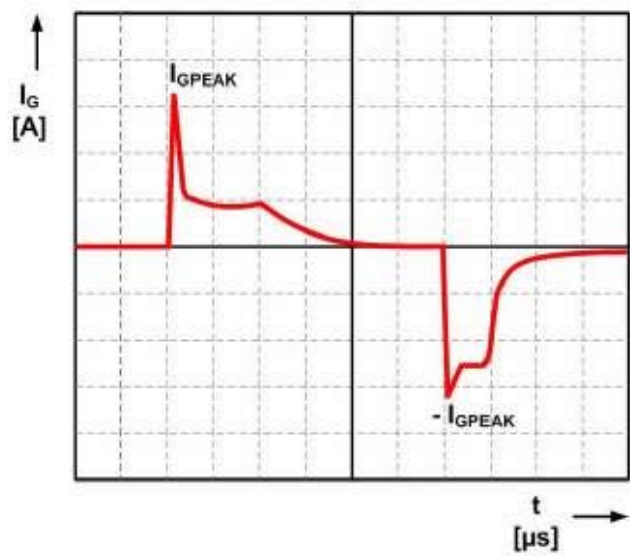
$$I_G = k_C \times C_{ies} \times (V_{G(on)} - V_{G(off)}) \times f_{sw}$$



## 栅极峰值电流

IGBT 开关时间受 IGBT 栅极的充放电控制。如果栅极峰值电流增大，导通和关断时间缩短，开关损耗也减小。这显然对其他开关参数有影响，例如过压极限，该参数是必须被关注的。栅极电荷电流可由栅极电阻  $R_{G(on)}$  和  $R_{G(off)}$  控

制。理论峰值电流值  $I_{GPEAK}$  可由下面的公式计算。在计算峰值栅极电流时必须考虑 IGBT 模块的内部栅极电阻  $R_{G(int)}$ 。在实际中，杂散电容的存在使得实际峰值电流小于理论值。

栅极峰值电流	计算
 <p>The graph shows the gate current <math>I_G</math> in Amperes [A] on the vertical axis and time <math>t</math> in microseconds [<math>\mu s</math>] on the horizontal axis. The current waveform consists of a positive peak labeled <math>I_{GPEAK}</math> and a negative peak labeled <math>-I_{GPEAK}</math>. The positive peak occurs during the turn-on phase, and the negative peak occurs during the turn-off phase. The current rises sharply to the peak and then decays exponentially towards zero.</p>	<p>栅极峰值电流的计算如下：</p> $I_{GPEAK} = \frac{V_{G(on)} - V_{G(off)}}{R_G + R_{G(int)}}$

IGBT 驱动器的数据表中会给出最大峰值电流和栅极电阻的最小值。如果超过这个范围，驱动器的输出可能会被损坏。



## 选择合适的 IGBT 驱动器

当为各个应用选择合适的 IGBT 驱动器时，必须考虑下列细节：

- 驱动器必须能够提供所需的栅极电流（输出电流/输出功率）。驱动器的最大平均输出电流必须高于计算值。
- 驱动器的最大峰值栅极电流必须等于或大于计算得到的最大峰值栅极电流。
- 驱动器的输出电容必须能够产生所需的栅极电荷以对 IGBT 的栅极充放电。在赛米控驱动器的数据表中，给出了每脉冲的最大电荷。在选择合适的驱动器时，必须 **duly** 考虑该值。

其他在 IGBT 驱动器选择中还值得提及的参数包括绝缘电压和  $dv/dt$  能力。

## DriverSel – 简便的 IGBT 驱动器计算方法

使用 DriverSel，可以在不考虑应用的类型的情况下方便地进行 IGBT 驱动器计算和选择合适的驱动器。该软件工具考虑到了上述的特点和公式，并以所选择的 IGBT 模块、并联模块的数量、栅极电阻、开关频率和集电极-发射极电压为基础计算合适的 IGBT 驱动器。该工具可为任何品牌和封装的 IGBT 进行驱动器的计算和选择，并且也计算所需的栅极电荷和平均电流。

**链接：** DriverSel 是一款免费软件工具，可从赛米控的网页 <http://semisel.semikron.com/DriverSelectTool.asp> 获得。



### DriverSel 的截屏

#### Driver Select Tool

Preselect

Product

Device

Number of IGBT Modules

Switching Frequency fsw  kHz

Applied Gate Resistor  Ohm

Update

#### Result

Driver Channels 2  
Collector Emitter Voltage 1200 V  
Required Average Current 28,4 mA  
Gate Charge 2,84  $\mu\text{C}$  (2 Modules in parallel)

#### Driver

Driver	$I_{out(av)}$ /mA	$I_{out}$ /A	$V_{isol}$ /kV	$V_{ce\ max}$ /V	$R_{gmin}$ / $\Omega$	Channels
1x SKYPER 32 or SKYPER 32PRO <sup>1)</sup>	50	15	4	1200	1,5	2
1x SKHI24	80	15	4	1200	1,5	2
1x SKHI23/12	50	8	2,5	1200	2,7	2

\*1) :SKYPER 32 with external boost capacitors



## 符号和术语

字母符号	术语
$C_{CE}$	集电极-发射极电容
$C_G$	栅极有效电容
$C_{GC}$	栅极-集电极电容
$C_{GE}$	栅极-发射极电容
$C_{ies}$	IGBT 输入电容
$C_{oes}$	IGBT 输出电容
$C_{res}$	IGBT 反向传输电容
$dv_{CE}/dt$	集电极-发射极电压的上升和下降速率
$E$	电气能量
$f_{sw}$	开关频率
$I_C$	集电极电流
$I_{Cpuls}$	集电极电流脉冲常数
$I_G$	栅极电流
$I_{GM}$	栅极峰值电流
$I_{outAVG}$	驱动器平均输出电流
$k_C$	栅极电容因数
$P_{GD(out)}$	驱动器输出功率
$Q_G$	栅极电荷
$Q_{GC}$	栅极-集电极电荷
$Q_{GE}$	栅极-发射极电荷
$R_G$	栅极电阻
$R_{G(int)}$	IGBT 模块内部电阻



$R_{G(off)}$	关断栅极电阻
$R_{G(on)}$	导通栅极电阻
$t$	时间
$t_{sw}$	开关时间
$V_{CC}$	集电极-发射极电源
$V_{CE}$	集电极-发射极电压
$V_{CEsat}$	集电极-发射极饱和电压
$V_G$	栅极电压（输出驱动器）
$V_{G(off)}$	关断栅极电压（输出驱动器）
$V_{G(on)}$	导通栅极电压（输出驱动器）
$V_{GE}$	栅极-发射极电压
$V_{GE(pl)}$	开关期间的栅极-发射极电压坪
$V_{GE(th)}$	栅极-发射极门槛电压