

IGBT 的保护

——资料收集整理：王攀峰

一. 准备知识

因为我们的电容主要是用于 IGBT 的吸收保护，所以从认识 IGBT 来导入，分析为什么要使用吸收保护电容。

绝缘栅双极型晶体管 IGBT 是由 MOSFET 和双极型晶体管复合而成的一种器件，其输入极为 MOSFET，输出极为 PNP 晶体管，因此，可以把其看作是 MOS 输入的达林顿管。它融和了这两种器件的优点，既具有 MOSFET 器件驱动简单和快速的优点，又具有双极型器件容量大的优点，因而，在现代电力电子技术中得到了越来越广泛的应用。

1 IGBT 的工作原理

IGBT 的等效电路如图 1 所示。由图 1 可知，若在 IGBT 的栅极和发射极之间加上驱动正电压，则 MOSFET 导通，这样 PNP 晶体管的集电极与基极之间成低阻状态而使得晶体管导通；若 IGBT 的栅极和发射极之间电压为 0V，则 MOSFET 截止，切断 PNP 晶体管基极电流的供给，使得晶体管截止。

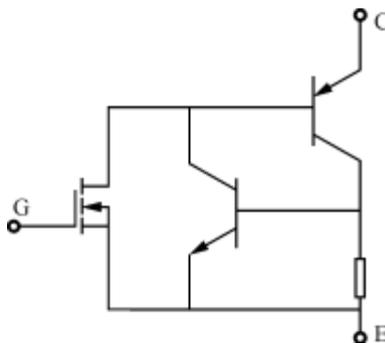


图 1 IGBT 的等效电路

由此可知，IGBT 的安全可靠与否主要由以下因素决定：

- IGBT 栅极与发射极之间的电压；
- IGBT 集电极与发射极之间的电压；
- 流过 IGBT 集电极—发射极的电流；
- IGBT 的结温。

如果 IGBT 栅极与发射极之间的电压，即驱动电压过低，则 IGBT 不能稳定正常地工作，如果过高超过栅极—发射极之间的耐压则 IGBT 可能永久性损坏；同样，如果加在 IGBT 集电极与发射极允许的电压超过集电极—发射极之间的耐压，流过 IGBT 集电极—发射极的电流超过集电极—发射极允许的最大电流，IGBT 的结温超过其结温的允许值，IGBT 都可能会永久性损坏。

地址：深圳市南山区南山软件园西塔楼 1703 室 网址：www.szkl.com

凯富利电子是一家专业的电子元器件供应商。我们一直致力于为客户提供优质的产品和贴心的服务，力求与客户形成战略性的合作伙伴。公司目前具有两大事业部，分别负责电容器和温度传感器的市场。

2 保护措施

在进行电路设计时，应针对影响 IGBT 可靠性的因素，有的放矢地采取相应的保护措施。

2.1 IGBT 栅极的保护

IGBT的栅极-发射极驱动电压 V_{GE} 的保证值为 $\pm 20V$ ，如果在它的栅极与发射极之间加上超出保证值的电压，则可能会损坏 IGBT，因此，在IGBT的驱动电路中应当设置栅压限幅电路。另外，若IGBT的栅极与发射极间开路，而在其集电极与发射极之间加上电压，则随着集电极电位的变化，由于栅极与集电极和发射极之间寄生电容的存在，使得栅极电位升高，集电极-发射极有电流流过。这时若集电极和发射极间处于高压状态时，可能会使IGBT发热甚至损坏。如果设备在运输或振动过程中使得栅极回路断开，在不被察觉的情况下给主电路加上电压，则IGBT就可能会损坏。为防止此类情况发生，应在IGBT的栅极与发射极间并接一只几十k Ω 的电阻，此电阻应尽量靠近栅极与发射极。如图 2 所示。

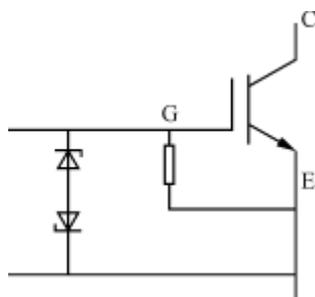


图 2 栅极保护电路

由于IGBT是功率MOSFET和PNP双极晶体管的复合体，特别是其栅极为MOS结构，因此除了上述应有的保护之外，就像其他MOS结构器件一样，IGBT对于静电也是十分敏感的，故而对IGBT进行装配焊接作业时也必须注意以下事项：

——在需要用手接触IGBT前，应先将人体上的静电放电后再进行操作，并尽量不要接触模块的驱动端子部分，必须接触时要保证此时人体上所带的静电已全部放掉；

——在焊接作业时，为了防止静电可能损坏 IGBT，焊机一定要可靠地接地。

2.2 集电极与发射极间的过压保护

过电压的产生主要有两种情况，一种是施加到 IGBT 集电极-发射极间的直流电压过高，另一种为集电极-发射极上的浪涌电压过高。

2.2.1 直流过电压

直流过电压产生的原因是由于输入交流电源或 IGBT 的前一级输入发生异常所致。解决的办法是在选取 IGBT 时，进行降额设计；另外，可在检测出这一过压时分断 IGBT 的输入，保证 IGBT 的安全。

2.2.2 浪涌电压的保护（主要）

因为电路中分布电感的存在，加之 IGBT 的开关速度较高，当 IGBT 关断时及与之并接的反向恢复二极管逆向恢复时，就会产生很大的浪涌电压 Ldi/dt ，威胁 IGBT 的安全。（两个方面）

通常 IGBT 的浪涌电压波形如图 3 所示。

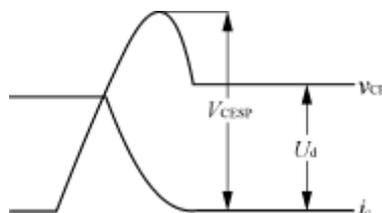


图 3 IGBT 的浪涌电压波形

图中： v_{CE} 为IGBT集电极—发射极间的电压波形；

i_c 为IGBT的集电极电流；

U_d 为输入IGBT的直流电压；

$V_{CESP}=U_d+Ldi_c/dt$,为浪涌电压峰值。

如果 V_{CESP} 超出IGBT的集电极—发射极间耐压值 V_{CES} ，就可能损坏IGBT。解决的办法主要有：

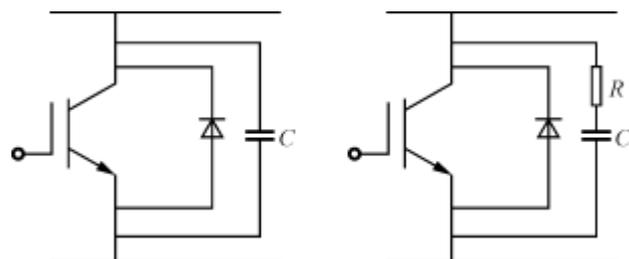
- 在选取 IGBT 时考虑设计裕量；
- 在电路设计时调整IGBT驱动电路的 R_g ，使 di/dt 尽可能小；
- 尽量将电解电容靠近 IGBT 安装，以减小分布电感；
- 根据情况加装缓冲保护电路，旁路高频浪涌电压。

由于缓冲保护电路对 IGBT 的安全工作起着很重要的作用，在此将缓冲保护电路的类型和特点作一介绍。

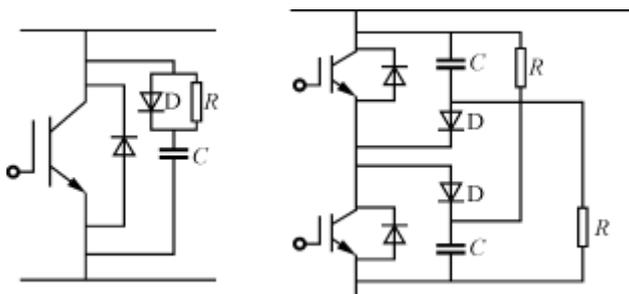
——**C 缓冲电路** 如图 4(a)所示，采用薄膜电容，靠近 IGBT 安装，其特点是电路简单，其缺点是由分布电感及缓冲电容构成 LC 谐振电路，易产生电压振荡，而且 IGBT 开通时集电极电流较大。

——**RC 缓冲电路** 如图 4(b)所示，其特点是适合于斩波电路，但在使用大容量 IGBT 时，必须使缓冲电阻值增大，否则，开通时集电极电流过大，使 IGBT 功能受到一定限制。

——**RCD 缓冲电路** 如图 4(c)所示，与 RC 缓冲电路相比其特点是，增加了缓冲二极管从而使缓冲电阻增大，避开了开通时 IGBT 功能受阻的问题。



(a) C 缓冲电路 (b) RC 缓冲电路



(c) RCD 缓冲电路 (d) 放电阻止型缓冲电路

图 4 缓冲保护电路

该缓冲电路中缓冲电阻产生的损耗为

$$P = \frac{1}{2}LI^2f + \frac{1}{2}CU_d^2f$$

式中： L 为主电路中的分布电感；

I 为 IGBT 关断时的集电极电流；

f 为 IGBT 的开关频率；

C 为缓冲电容；

U_d 为直流电压值。

——放电阻止型缓冲电路如图 4(d)所示，与 RCD 缓冲电路相比其特点是，产生的损耗小，适合于高频开关。

在该缓冲电路中缓冲电阻上产生的损耗为

$$P = \frac{1}{2}LI^2f$$

根据实际情况选取适当的缓冲保护电路，抑制关断浪涌电压。在进行装配时，要尽量降低主电路和缓冲电路的分布电感，接线越短越粗越好。

2.3 集电极电流过流保护

对 IGBT 的过流保护，主要有 3 种方法。

2.3.1 用电阻或电流互感器检测过流进行保护

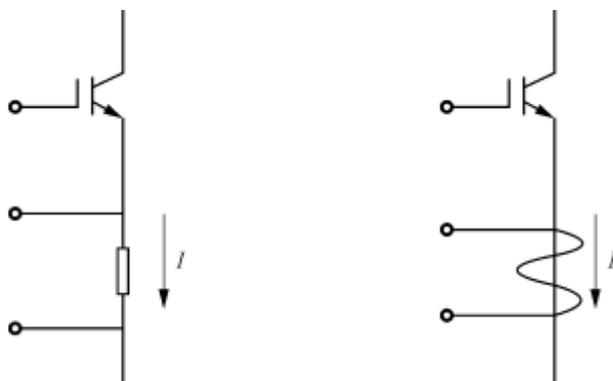
如图 5 (a) 及图 5 (b) 所示，用电阻或电流互感器与 IGBT 串联，检测流过 IGBT 集电极的电流。当有过流情况发生时，控制执行机构断开 IGBT 的输入，达到保护 IGBT 的目的。

2.3.2 由 IGBT 的 $V_{CE(sat)}$ 检测过流进行保护

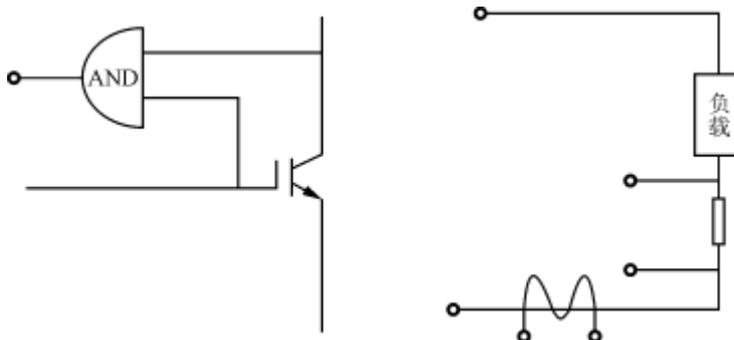
如图 5 (c) 所示，因 $V_{CE(sat)} = I_c R_{CE(sat)}$ ，当 I_c 增大时， $V_{CE(sat)}$ 也随之增大，若栅极电压为高电平，而 V_{CE} 为高，则此时就有过流情况发生，此时与门输出高电平，将过流信号输出，控制执行机构断开 IGBT 的输入，保护 IGBT。

2.3.3 检测负载电流进行保护

此方法与图 5 (a) 中的检测方法基本相同，但图 5 (a) 属直接法，此属间接法，如图 5 (d) 所示。若负载短路或负载电流加大时，也可能使前级的 IGBT 的集电极电流增大，导致 IGBT 损坏。由负载处（或 IGBT 的后一级电路）检测到异常后，控制执行机构切断 IGBT 的输入，达到保护的目的。



(a) 用电阻检测过流 (b) 用电流互感器检测过流



(c) 由 $V_{CE(sat)}$ 检测过流 (d) 通过负载电流检测过流

图 5 集电极过流保护电路

2. 4 过热保护 (温度升高时电流会急剧下降, 一般描述的是 25 度时的电流)

一般情况下流过 IGBT 的电流较大, 开关频率较高, 故而器件的损耗也比较大, 如果热量不能及时散掉, 使得器件的结温 T_j 超过 T_{jmax} , 则 IGBT 可能损坏。

IGBT 的功耗包括稳态功耗和动态功耗, 其动态功耗又包括开通功耗和关断功耗。在进行热设计时, 不仅要保证其在正常工作时能够充分散热, 而且还要保证其在发生短时过载时, IGBT 的结温也不超过 T_{jmax} 。

当然, 受设备的体积和重量等的限制以及性价比的考虑, 散热系统也不可能无限制地扩大。可在靠近 IGBT 处加装一温度继电器等, 检测 IGBT 的工作温度。控制执行机构在发生异常时切断 IGBT 的输入, 保护其安全。

除此之外, 将 IGBT 往散热器上安装固定时应注意以下事项:

——由于热阻随 IGBT 安装位置的不同而不同, 因此, 若在散热器上仅安装一个 IGBT 时, 应将其安装在正中间, 以便使得热阻最小; 当要安装几个 IGBT 时, 应根据每个 IGBT 的发热情况留出相应的空间;

——使用带纹路的散热器时, 应将 IGBT 较宽的方向顺着散热器的纹路, 以减少散热器的变形;

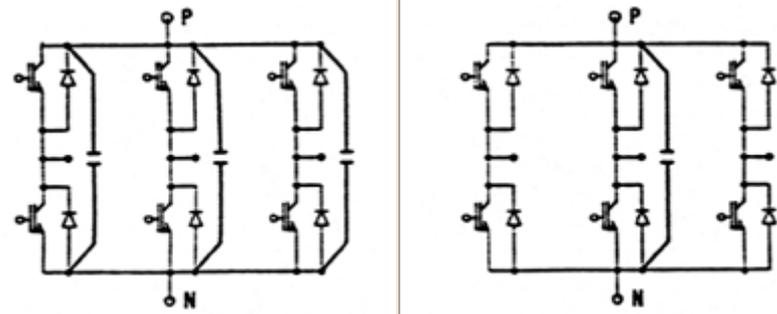
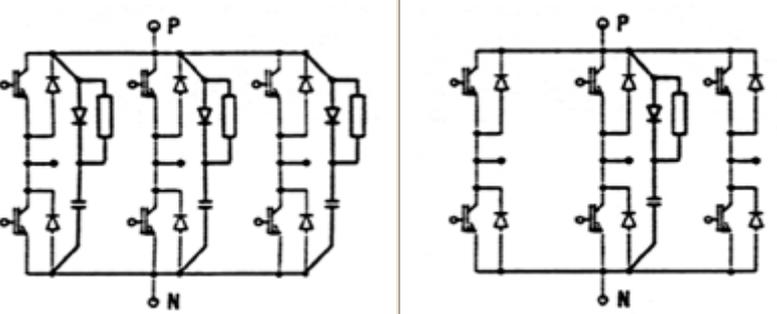
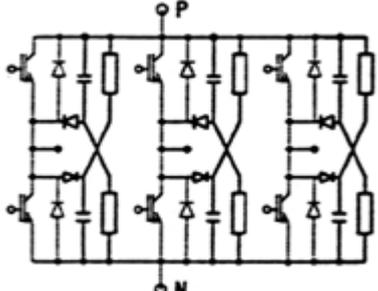
——散热器的安装表面光洁度应 $\leq 10\mu\text{m}$, 如果散热器的表面不平, 将大大增加散热器与器件的接触热阻, 甚至在 IGBT 的管芯和管壳之间的衬底上产生很大的张力, 损坏 IGBT 的绝缘层;

——为了减少接触热阻, 最好在散热器与

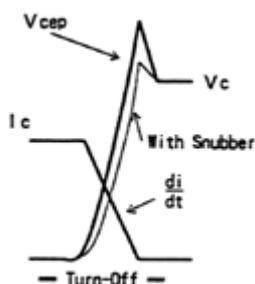
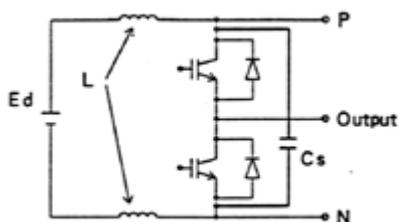
IGBT 模块间涂抹导热硅脂。

二. 电容选用问题

1. 缓冲电路类型

类型	线路图	备注
A		2-in-1 半桥：独立缓冲器 6-in-1 全桥：集中缓冲器
B		2-in-1 半桥：独立缓冲器 6-in-1 全桥：集中缓冲器
C		集中缓冲器

2. 电容缓冲器电路（集中缓冲）



缓冲电容的选择

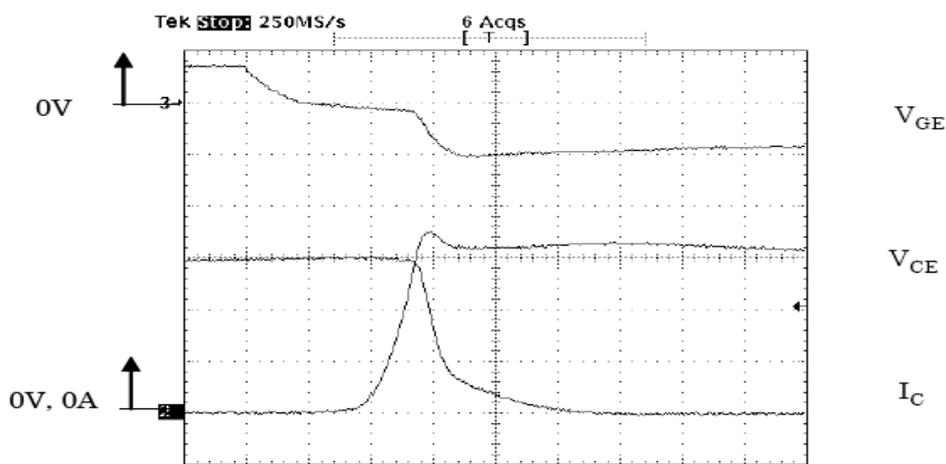
$$C_s \geq \frac{L * I_o^2}{(V_{cep} - E_d)^2}$$

- L : 分布电感
- Io : 关断时的 Ic
- Vceo: 尖峰电压
- Ed : DC 电源电压

3. 集中缓冲器电容（参考值）

元件规格		栅极驱动条件		电源电路的分布电感 (μH)	缓冲电容 (μF)
		-Vge(V)	Rg(Ω)		
600V	50A	5—15	≥51	-	0.47
	75A		≥33		
	100A		≥24		
	150A		≥16	≤0.2	1.5
	200A		≥9.1	≤0.16	2.2
	300A		≥6.8	≤0.1	3.3
	400A		≥4.7	≤0.08	4.7
1200V	50A	5—15	≥24	-	0.47
	75A		≥16		
	100A		≥9.1		
	150A		≥5.6	≤0.2	1.5
	200A		≥4.7	≤0.16	2.2
	300A		≥2.7	≤0.1	3.3

一般 600V IGBT Ed=400V, 1200V IGBT Ed=800V

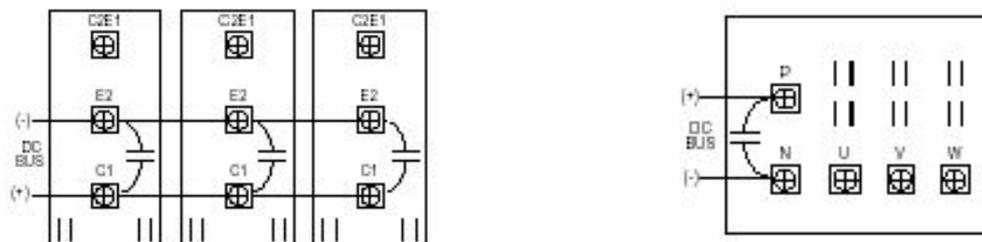


6MBI300UD-120
Ed=600V, VGE=±15V, IC=300A, RG=2.2Ω, Tj=125C, Ls=65nH
VCE : 200V/div, IC : 100A/div, VGE : 20V/div, t : 200ns/div

图 5-7 关断电流、电压波形

(采用缓冲保护措施后的波形)

因为电容量和母线电感成正比，所以降低母线电感就能减少吸收电容。



双单元模块吸收电路

六单元吸收电路

三. 应用对接 (电容外形)

1.IGBT 模块的脚距问题，主要以双单元模块为例。1200V IGBT 以 150A 电流分界，150A 电流以下的主要尺寸是 P=23 使用 M5 的内螺纹。150A 以上使用尺寸是 P=28，使用 M6 的内螺纹。代表厂家有 EUPEC(欧派克)，FUJI(富士)，SEMIKRON(西门康)西门康 145A 以下符合，145A 以上使用大尺寸。

2.通用变频器行业使用吸收电容主要以 0.47UF/1200VAC 为多，用于 100A 以下电流的 IGBT,150A 使用 1.5UF/1200V.另外部分客户使用 0.22UF,0.33UF,0.47UF 用于整流桥 PN 两端的吸收。

具体使用型号可以参照上面所列对照表和客户探讨。

3.高压变频器客户多以 1700V IGBT 多路串联的方式来达到输出功率的要求。

4.软开关技术的理解：软开关技术是应用谐振原理，是开关器件在零电压或零电流下通断，实现开关器件损耗为零。当电流自然过零时使器件关断，当电压自然过零时，使器件导通。

5.电容的一些测试方法

电容量和损耗角：LC 电桥

过电流和耐压：CGE218 型耐压过流试验机

电感量：使用谐振的原理测试。方壳一般在 20nH 以下，引线在 35nH 以下。



方壳产品：方便安装，杂散电感更小

轴向产品：目前行业考虑价格成本使用较多的一种。

组合产品：配合客户 RCD，RVCD 电路设计的一种产品。