

功率模块 IGBT、IPM、PIM 的性能及使用有关问题的综述

1 IGBT 主要用途

IGBT 是先进的第三代功率模块，工作频率 1-20KHZ，主要应用在变频器的主回路逆变器及一切逆变电路，即 DC/AC 变换中。例电动汽车、伺服控制器、UPS、开关电源、斩波电源、无轨电车等。问世迄今有十多年历史，几乎已替代一切其它功率器件，例 SCR、GTO、GTR、MOSFET，双极型达林顿管等，目今功率可高达 1MW 的低频应用中，单个元件电压可达 4.0KV（PT 结构）— 6.5KV（NPT 结构），电流可达 1.5KA，是较为理想的功率模块。

追其原因是第三代 IGBT 模块，它是电压型控制，输入阻抗大，驱动功率小，控制电路简单，开关损耗小，通断速度快，工作频率高，元件容量大等优点。实质是个复合功率器件，它集双极型功率晶体管和功率 MOSFET 的优点于一体。又因先进的加工技术使它通态饱和电压低，开关频率高（可达 20KHZ），这两点非常显著的特性，最近西门子公司又推出低饱和压降（2.2V）的 NPT—IGBT 性能更佳，相继东芝、富士、IR、摩托罗拉亦已在开发研制新品种。

IGBT 发展趋向是高耐压、大电流、高速度、低压降、高可靠、低成本为目标的，特别是发展高压变频器的应用，简化其主电路，减少使用器件，提高可靠性，降低制造成本，简化调试工作等，都与 IGBT 有密切的内在联系，所以世界各大器件公司都在奋力研究、开发，予估近 2-3 年内，会有突破性的进展。目今已有适用于高压变频器的有电压型 HV-IGBT，IGCT，电流型 SGCT 等。

2 关断浪涌电压

在关断瞬时流过 IGBT 的电流，被切断时而产生的瞬时电压。它是因带电动机感性负载(L)及电路中漏电感(Lp)，其总值 $L^*p = L + Lp$ 则 $Vp^* = Vce + Vp$ 而 $Vp = L^*p \ di/dt$ 在极端情况下将产生 $Vp^* \ Vces$ （额定电压）导致器件的损坏发生，为此要采取尽可能减小电感(L)，电路中的漏电感(Lp)一由器件制造结构而定，例合理分布，缩短到线长度，适当加宽减厚等。

3 恢复浪涌电压

续流二极管是为当 IGBT 下臂关断，电感性电流就可在上臂续流管提供通路，（这时处正向导通），它将减小 di/dt 值，防止产生过电压。但又当下臂导通时，续流二极管反向恢复，变为负值而关断，电流将要下降为零值，因 Lp 存在要产生浪涌电压，阻止电流的下降，尤其当使用硬恢复二极管时，将产生较高的反向恢复 di/dt 值，可导致很高的瞬时电压出现。

4 缓冲电路形式

用以控制关断浪涌电压和恢复浪涌电压，以减少模块的开关损耗及瞬时过电压值而采用的。虽然 IGBT 具有强大的开关安全工作区，但需控制瞬时电压值，而缓冲电路在每次开关循环中都可通过 IGBT 放电，故有一定功耗产生，但能确保使用的安全。

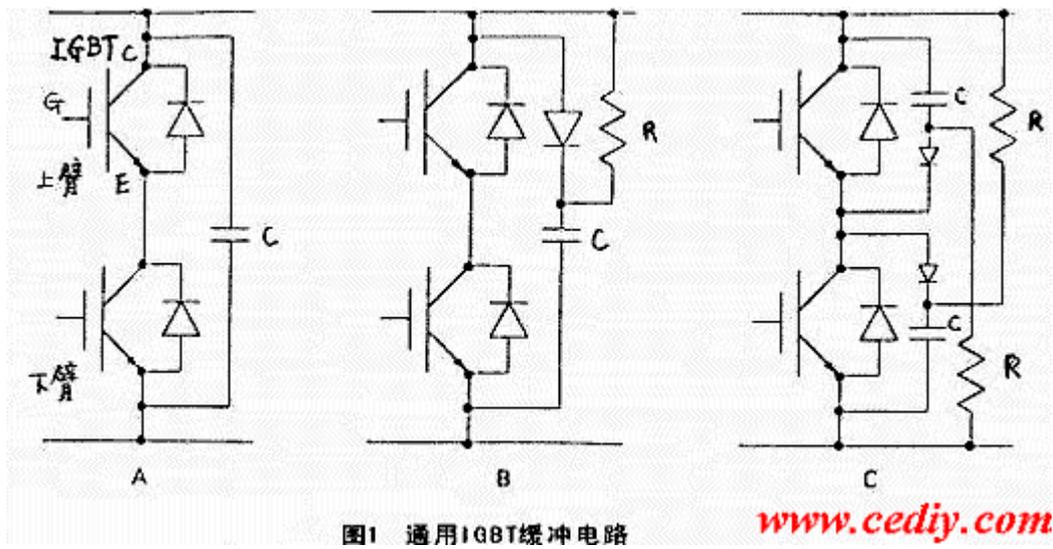


图1 通用IGBT缓冲电路

图 1-A 仅有一个低电感量的电容器组成，对小功率一单元模块，可接在 C 和 E 之间，对六合一封装模块可接 P 和 N 之间，对减小瞬变电压有效、简单、成本低、适用小功率器件。

图 1-B 使用快速二极管，它可箝住瞬变电压，从而抑制与母线寄生电感，作减幅振荡，RC 为时间常数，设为开关周期 1/3（即 $\tau = T/3 = 1/3fz$ ），适用中功率器件。

图 1-C 类似 B 图，但具有更小的回路电感，它直接于每个 IGBT 的 C 极和 E 极，并使用一个小型 RCD（阻容二极管）效果较好，能抑制缓冲电路的寄生振荡，适用大功率器件具体推荐值见表 1。

5 减小功率电路的电感

浪涌电压的能量与 $1/2LpI$ 成正比，因此减小 Lp 是主要的，可选用多层正负交*，宽偏形迭层母线，包括 IGBT 间联接，与大电容器的联接等，例大功率变频器的母排等，都采用上述方法，例罗克韦尔 A-B 公司等变频器就是这样的方法来减小功率电路的电感。

6 接地回路形式

当栅极 G 驱动或控制信号与主电流共用一个电流路径时，会导致接地回路，这可能出现本应地电位，而实际有几伏的电位值，使本来偏置截止的器件，就可能发生导通，而造成误动作。因此在大功率 IGBT 应用中，或 di/dt 很高时，就难发生上述现象的发生，故对不用容量的器件，有下述三种电路见图 2。

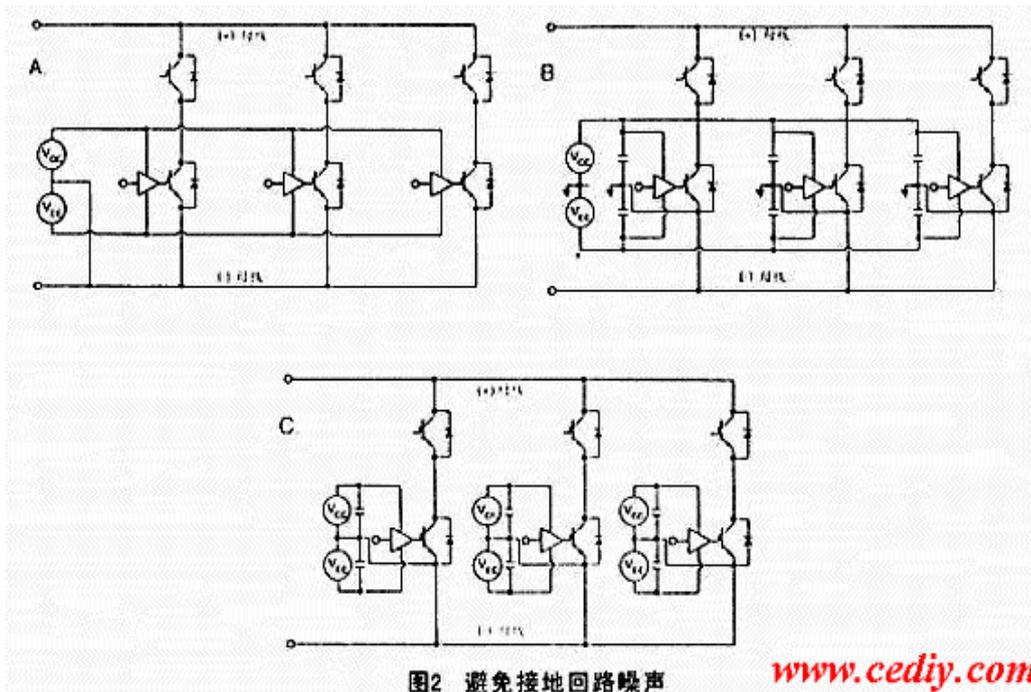


图2 避免接地回路噪声

图 2-A 存在共地回路电位问题的，它的栅极电路地线与主电路(一)母线相通，适用于<100A 六合一封装器件，但仍要高反偏置电压 5-15V。

图 2-B 对下半臂器件选用独立栅极电源供电，采用辅助发射极和就近驱动电源介耦电容的方法，能使接地回路噪声得到最好抑制，适用 200A 以下模块。

图 2-C 对下半臂每一个栅极驱动电路，都采用了分离绝缘电源，以消除接地回路的噪音问题，效果更好，适用 $\geq 300A$ 的模块。

7 IGBT 的损耗

是指 IGBT 在开通或关断过渡过程期间的功率损耗。当 PWM 信号频率 $>5KHZ$ 时开关损耗会非常显著，因此在变频器使用时，必须正确的选择载波频率值的大小，是件重要的问题。具体如何选值，请参见 2001 年七期“变频器世界”期刊。此文由张选正撰写的，题目“变频器载波频率值正确选择的依据”一文。

总之载波频率的大小与器件的开关损耗，器件的发热，电流的波形，干扰的大小，电动机噪音和振动等有关的，因此不等功率的电动机和现场条件来正确选择载波频率值大小，亦是属变频器调试中一个主要环节。

8 关于结温的大小

IGBT 模块的芯片最大额定结温是 $150^{\circ}C$ ，在任何工作条件下，都不允许超过，否则要发生热击穿而造成损坏，一般要留余地，在最恶劣条件下，结温限定在 $125^{\circ}C$ 以下，但芯片内结温监测有难度，所以变频器的 IGBT 模块，都在散热器表面装有温控开关，其值在 $80-85^{\circ}C$ 之间，当达到此温度时，即因过热保护动作，从而自动停机，以确保 IGBT 的安全。亦有用热敏电阻。

9 散热器的安装

IGBT 模块直接固定在散热器上，螺钉一定要受力均匀，先要予紧次序是图 3

①→②→③→④，最终拧紧次序是④→③→②→①可见图 3。散热器表面要平整清洁，要求平面度 $\leq 150\mu\text{m}$ ，最好用力矩把手（具体值可参见应用手册），表面光洁度 $\leq 6\mu\text{m}$ ，在界面要涂传热导电膏，涂层要均匀，厚度约 $150\mu\text{m}$ 。关于不同功率的模块散热器面积的计算，请参阅有关的设计资料。

10 参数的合理选择

参数的选择一条原则是适当留有余地，这样才能确保长期、可靠、安全地运行。工作电压 $\leq 50\%-60\%$ ，结温 $\leq 70-80^\circ\text{C}$ 在这条件下器件是最安全的。制约因素 A、在关断或过载条件下，IC 要处于安全工作区，即小于 2 倍的额定电流值；B、IGBT 峰值电流是根据 200%的过载和 120%的电流脉动率下来制定的；C、结温一定 $<150^\circ\text{C}$ 以下，指在任何情况下，包括过载时。具体选用时可查表 2。

A、开通电压 $15\text{V}\pm 10\%$ 的正栅极电压，可产生完全饱和，而且开关损耗最小，当 $<12\text{V}$ 时通态损耗加大， $>20\text{V}$ 时难以实现过流及短路保护。

B、关断偏压 -5 到 -15V 目的是出现噪声仍可有效关断，并可减小关断损耗最佳值约为 -10V 。

C、IGBT 不适用线性工作，只有极快开关工作时栅极才可加较低 $3-11\text{V}$ 电压。

D、饱和压降直接关系到通态损耗及结温大小，希望越小越好，但价格就要大。饱和压降从 $1.7\text{V}-4.05\text{V}$ 以每 $0.25-0.3\text{V}$ 为一个等级，从 C→M 十个级。

11 栅极电阻 Rg

它是串接在栅极电路中可见图 4。目的是改善控制脉冲前沿，后沿的陡度和防止振荡，减小 IGBT 集电极电压的尖脉冲值。又因 IGBT 的开通或关断是通过栅极电路的充放电来实现的，所以 Rg 的值对动态特性产生极大的影响，具体如下述：

A、Rg 值小——充放电较快，能减小开关时间和开关损耗，增强工作的耐固性，避免带来因 dv/dt 的误导通。不足的是承受噪声能力小，易产生寄生振荡，使开通时 di/dt 变大，增加逐流二极管（FWD）恢复时的浪涌电压，具体值可参见表 4。

B、Rg 值大——性能与上述相反。

栅极驱动的布线对防止潜在振荡，减慢栅极电压上升，减小噪音损耗，降低栅极电压或减小栅极保护电路的效率有较大的影响。要注意事项如下：

A、将驱动器的输出级和 IGBT 之间的寄生电感减至最低。

B、驱动板和屏蔽栅极驱动电路要正确放置，以防功率电路和控制电路之间的电感耦合。

C、采用辅助发射极端子连接栅极驱动电路。

D、当驱动 PCB 板和 IGBT 控制端子不可能作直接连接时，建议用双股绞线（2 转/CM 小于 3CM 长）或带状线，同轴线。

E、栅极箝位保护电路，必须按低电感布线，并尽量放置于 IGBT 模块的栅极，发射极控制端子附近。

F、由于 IGBT 的开关会使用相互电位改变，PCB 板的线条之间彼此不宜太近，过高的 dv/dt 会由寄生电容产生耦合噪声。若布线无法避免交*或平衡时，必须采用屏蔽层，加以保护。

G、要减少各器件之间的寄生电容，避免产生耦合噪声。

H、用光耦器来作隔离栅极驱动信号，其最小共模抑制比要在 $10.000\text{V}/\mu\text{S}$ ，栅极回路除上述外而防止栅极电路出现高压尖峰，一般在 G、E 极间并一个电阻 Rge，再并二只反串的稳压二极管，以使工作更可靠、安全、有效。Rge 值在 $1000-5000$ 欧之间，见图 4。

12 dv/dt 及短路保护

在 IGBT 关断时，栅极要加反向偏置，由于栅极的阻抗很大，该电流令 V_{ge} 增加，恶劣条件下可达阈值电压时，则 IGBT 将开通，导致上下臂同时开通使桥臂每一相短路，为防止这现象的发生要注意以下几点：

- A、在断态时要加足够的负栅极电压值至少 -5V。
- B、在关断时 R_g 为较低值（可见表 4）。
- C、栅极电路的电感 L_g 应降至最低。

当短路情况出现时，IGBT 要继续维持在短路安全工作区内，其方法有：

- A、电流传感器
- B、欠饱和式但必须能测出短路到关断 IGBT 时间在 $10\mu s$ 之内，常用有三种方法：
 - a、控制关断—减少栅极电压（有分段或斜坡减少）增加沟道内阻。
 - b、 V_{ge} 箝位— V_{ge} 在 18V 以下，对小功率器件，可在 G 极与 E 极之间用齐纳二极管箝位。
 - c、减少 t_w —缩短短路持续时间，但将使关断电流增大。

13 使用注意事项

- A、栅极与任何导电区要绝缘，以免产生静电而击穿，所以包装时将 G 极和 E 极之间要有导电泡沫塑料，将它短接。装配时切不可用手指直接接触，直到 G 极管脚进行永久性连接。
- B、主电路用螺丝拧紧，控制极 G 要用插件，尽可能不用焊接方式。
- C、装卸时应采用接地工作台，接地地面，接地腕带等防静电措施。
- D、仪器测量时，将 100Ω 电阻与 G 极串联。
- E、要在无电源时进行安装。
- F、焊接 G 极时，电烙铁要停电并接地，选用定温电烙铁最合适。当手工焊接时，温度 $260^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ，时间 (10 ± 1) 秒，松香焊剂。波峰焊接时，PCB 板要预热 $80^\circ\text{C}—105^\circ\text{C}$ ，在 245°C 时浸入焊接 3-4 秒，松香焊剂。

14 IGBT 的串并联

A、并联目的是增大使用的工作电流，但器件要匹配，每块 V_{ce} 之差 $< 0.3V$ ，还要降流使用，对 600V 的降 $10\%I_c$ ，1200-1400V 的降 $15\%I_c$ ，1700V 的降 $20\%I_c$ ，这组值指 $\geq 200A$ 的模块，并要取饱和压降相等或接近的模块才行。栅控电路要分开，除静态均流外，还有动态均流问题，并使温度相接近，以免影响电流的均衡分配，因 IGBT 是负阻特性的器件。

B、串联的目的是增高使用的工作电压，其要求比并联更高，主要是静态均压及动态均压问题，尤其是动态均压有一定难度。成都佳灵公司提出的容性母板技术（1+N）只串联动态电压箝位均压方式已处于工业实验阶段。若动态均压不佳，要造成串联臂各器件上的 V_{ce} 电压不等，造成一个过压影响同一臂一串电击穿。

C、总之 IGBT 的串并联应尽量避免，不要以低压小电流器件，通过串并联企图解决高电压大电流，这样做往往适得其反，而器件增多可靠性更差，电路亦复杂化等，在不得已的条件下，要慎重。目今单个 IGBT 的电压或电流基本能满足用户的需要，随着时代发展电路的改进，将会有更高电压，更大电流的功率器问世，这是必然的。

15 智能 IPM 模块

智能 IPM 模块问世已有十年之久，目今有 110KW 的模块，可供变频器选用。它是先进的混合集成功率器件，将 IGBT、驱动电路、保护电路集成化，因此具有高速、高效、低耗、和优化门极驱动及保护电路，

欠压锁定，用电流感功能芯片，对过流和短路保护，更为优越的，整体的可靠性大为提高。IPM 有四种电路形式：单管封装(H)，双管封装(D)，六合一封装(C)，七合一封装(R)。由于 IPM 通态损耗和开关损耗都比较低，可使散热器减小，因而整机尺寸亦可减小，又有自保护能力，减低了在开发和使用中过载情况下损坏的机率，国内外 55KW 以下的变频器多数采用 IPM 模块，亦是理所当然的。结温还是 125℃，栅控 13.5-16.5V 之间，就可安全地工作。IPM 有：短路保护(SC)，过流保护(OC)，欠压保护(UV)，过热保护(OT)，过压保护(OV)等较完全的。有表 3 可供选用参考。

16 变频专用功率集成模块 PIM

最近 5 年内问世的，专供变频器主电路使用的综合集成功率器件。例德国慕尼黑 TYCO 公司生产的 2.5-66A 1200V 系列，4-75A 600V 系列，它包含了单相/三相输入整流桥+制动单元（或 PFC 功率因数单元）+六单元 IGBT+NTC 温度监测。但不包括驱动电路。有的专业厂例富士等将整流、制动、IGBT、保护、驱动、控制全部一体化集成模块，那样使用更方便、安全、可靠。其特点是：

A、集成全部器件及电路；B、体积小，功率大，损耗低，较稳定；C、优化内部布线，减少寄生噪音；D 有完全的自保护电路，具有快速、灵敏；E、唯一不足的是当其中有一个器件坏时，将造成整体的报损，它不同于分离方式模块，只局限于损坏的更换就可。

17 对 IGBT 的 Vge 与 Vce 的加压次序

众所周知变频器内部的测量电路、保护电路、驱动电路、转换电路、隔离电路、CPU、栅极电路等，所用的电子器件，例 TTL、COMS、运放、光耦等都由开关电源提供所需的不同电压值，对 IGBT 来讲 Vge 是由开关电源提供±5-15V 电压，但 Vce 是由主电路经三相整流桥滤波后的 DC 电源(PN)提供的，为确保 IGBT 的使用安全及误导通，故对 Vge 与 Vce 加电压次序有要求。必须是先加 Vge 且待稳定后（截止偏压-15V，导通偏压+15V），再可加 Vce。切莫当 G 极悬空或未稳定时就加 Vce（几百一千伏），因为 Cgc 极间的耦合电容就可将 IGBT 误导通，以致过高的 dv/dt 造成电击穿而损坏。为避免上述现象的发生一般用延时电路方法，使 Vce 延时 Vge 约 0.2 秒，这样大大的提高了使用上安全性、可靠性，尤其是中、大功率的器件更应注意的。

18 结论

IGBT 的使用综合性能是非常优越的，决非其它功率器件所能替代的，因此成为当今逆变电路 DC/AC 中主要器件，亦是理应所在的。它的弱点是过压、过热、抗冲击、抗干扰等承受力较低，因此在使用时必须正确选择器件的容量，要有完全严格的保护电路，按产品技术性能规定来正确选定各种参数值和保护值，是件非常重要的事，切莫粗枝大叶，否则后患无穷，造成经济损失。只要精心设计，规范运行，是能确保使用中安全性和可靠性，这亦是无疑的。

<http://www.jiehuitong.com>

postmaster@jiehuitong.com