

PROTON-ELECTROTEX 公司 IGBT 使用建议书



上海齐聪电子有限公司

客户技术支持部：

一、概述	3
1.1 IGBT 历史	3
1.2 IGBT 结构	3
1.3 PROTON-ELECTROTEX 封闭式股份公司生产的 IGBT	4
1.4 装配生产技术	5
1.5 RoHS 标准合规	7
1.6 UL 认证	7
二、IGBT 参数	8
2.1 热损耗	8
2.2 测试 MIAA 和 MIFA 模块参数的模式和方法	8
2.2.1 $U_{BR(ces)}$ - 集电极-发射极击穿电压	8
2.2.2 I_{CES} - 集电极 - 发射极漏电流	9
2.2.3 $U_{CE(sat)}$ ——集电极 - 发射极饱和电压	9
2.2.4 I_{GES} —— 栅 - 发射极漏电流	9
2.2.6 二极管的接通瞬变过程的 $t_{d(on)}$, t_{ri} , t_{on} , t_{fv} , dI_{Con}/dt , dU_{CEon} , E_{on} 参数和反向恢复过程的 t_{rr} , I_{rrm} , Q_{rr} , E_{rec} 参数	10
2.2.7 $T_{d(off)}$, t_{fi} , t_{off} , t_{rv} , dI_{Coff}/dt , dU_{CEoff} , E_{off} 关闭过程参数	11
2.2.8 对短路电流的抵抗力测试	11
三、转换器设计时选择模块	12
3.1 根据特性选择模块	12
3.2 信息材料的使用	14
3.3 应注意的特性	16
3.4 IGBT 键保护	17
3.5 冷却	19
3.6 控制	20
3.7 并联连接	22
3.8 模块安装	23
3.8.1 导热膏	24
3.8.2 连结总线	24
3.8.3 机械影响和环境影响	26
附件1 IGBT 模块参数列表	27

一 概述

1.1 IGBT 历史

80年代出现的 MOSFET 晶体管具有与理想器件相近的特性，是最受欢迎的开关切换元件。可是，器件主要参数漏极电压限制 MOSFET 晶体管的使用范围。至今，特性相当好的高压 MOSFET 晶体管还未研发出来，因为开路晶体管的电阻与击穿电压的平方会成比例地增加，使得高压 MOSFET 晶体的面积会很大。因此，其价格与双极晶体管相比也会相当高。客观的说，有许多公司还在致力于创造高压场效应晶体管。也有一些公司按照 BI- MOSFET 技术生产设计了高达1600V 电压的晶体管，但是这些器件的饱和电压约为7V，这就意味着器件的耗散功率会非常高，这会对冷却系统提出了严格要求。

在上世纪80年代初期，对由 MOSFET 控制和输出双极性串联组成的组合晶体管的研发进行了成功的实验，它们被称为绝缘栅双极晶体管。再后来，又开发了许多用于制造这种晶体管的方法，最广泛使用的电路技术是绝缘栅双极型晶体管 IGBT（英语：Insulated-gate bipolar transistor），该电路技术成功的结合了以键模式工作的场效应晶体管和双极晶体管的所有特性。

1985年出现了有扁平结构（无 V- 通道）和更高工作电压的 IGBT。因此，在高电压和更高的电流下，开路状态下的损耗非常小。在这种情况下，装置具有与双极晶体管类似的开关和导通特性，并且控制通过电压执行。

目前，已开发出的晶体管能够切换高达2500A 的电流和高达10000V 的电压。

1.2 IGBT 结构

PROTON-ELECTROTEX 公司 在其 IGBT 模块 中使用 Trench- FS 技术芯片。

在这样的键中，通常的结构由 field- stop（FS）层补充，平面栅由垂直沟槽栅代替。如图1所示：基础是薄的，轻掺杂的 n 板，在集电极的反向 p + 侧涂补充的 n + 层。该 FS 层允许减少集电极区域的电场。

晶体管的这种结构具有改善的正向电压温度系数和高过载能力。可是晶体管在关闭时发生的尾电流会略高，它比具有平面结构栅的键下降速度快得多。

栅的元件设计在所谓的“p- 通道”中。由于这种结构的晶体管的硅有源面积增加，所以沟道横截面中的场控制质量提高并且其电阻降低。在芯片的每个一定的尺寸内，可以继续减小单元面积的大小，所以垂直栅结构的 IGBT 具有更高的电流密度和工作电压，更低的导通和开关损耗，以及比平面键更好的封闭耐性。

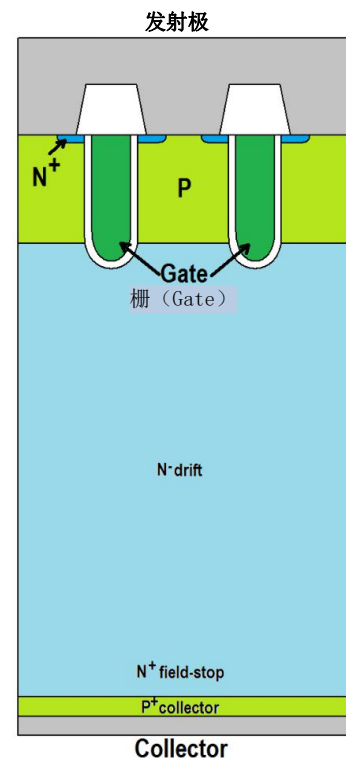
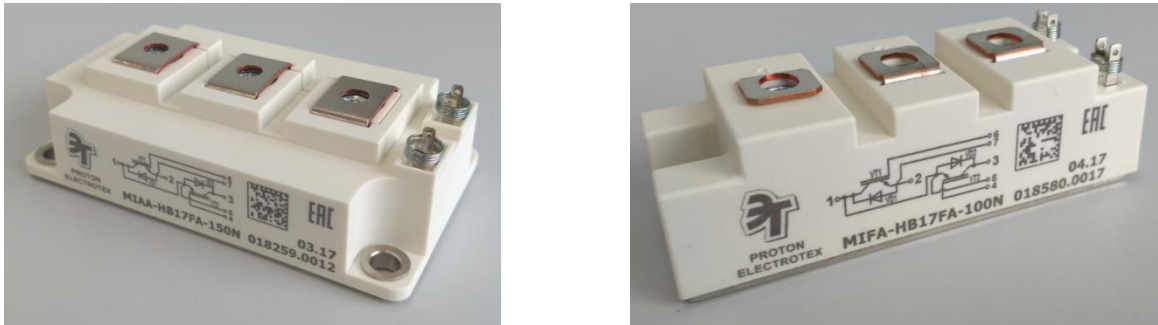


图1、Trench-FS IGBT 内部结构

1.3 PROTON-ELECTROTEX 公司生产的 IGBT :

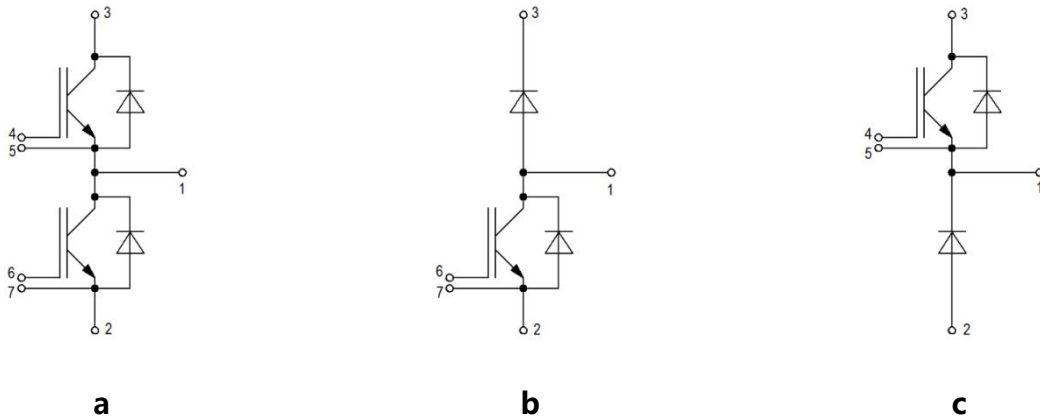
目前，PROTON-ELECTROTEX 公司开发两种类型的模块：

MIAA (典型设计的工业标准，62毫米) 和 MIFA (34毫米)。



a **b**
图2、典型设计的工业标准，62毫米 (a) 和34毫米 (b)

PROTON-ELECTROTEX 公司生产具有3种晶体管开关电路的模块：半桥、下部斩波和上部斩波电路



a **b** **c**
图3、在典型壳体内生产的 IGBT 标准开关电路：
a – 半桥电路，b – 下部斩波电路，c – 上部斩波电路。

我们生产的最新项目—有62毫米标准壳体的 IGBT 模块，电流高达600A (MIAA)，以及有半桥电路的152*62*17外形尺寸的模块 (MIDA)，电压高达1700 V，电流高达600 A，与 Econodual 和 SEMiX 等模块类似。



图4、在 MIDA 壳体内部的 IGBT 模块。

1.4 装配生产技

PROTON-ELECTROTEX 公司具有许多全球制造商使用的现代技术。

技术设备

生产 IGBT 模块的第一步是焊接。钎接缝提供模块组件的机械连接，以及所需的导电性和导热性。

PROTON-ELECTROTEX 公司生产中焊接过程通过现代方法在真空中传导加热，使用预成型件的甲酸蒸汽来实现。由于下列特性，此方法允许更好地实现仪器承诺的机械寿命和可靠性：

- 一次焊接，为元件提供较小的热应力；
- 各种材料的大量焊料，具有所需的弹性和熔点；
- 与糊膏相比，预成型件清洁度更高；
- 无需随后湿洗；
- 由于真空，高质量的钎接缝，空洞和空隙减少；
- 首先加热具有高热容量的组件 – 基础和 DBC。最后加热芯片。因此，高温对芯片的影响最小；
- 焊接热分布曲线可进行极其灵活的调整 – 对无铅技术很重要；
- 钎接不透面积的水平 < 3%；

在 PROTON-ELECTROTEX 公司真空钎焊使用 PiNK 制造的高科技炉 Vadu 200XL 进行。

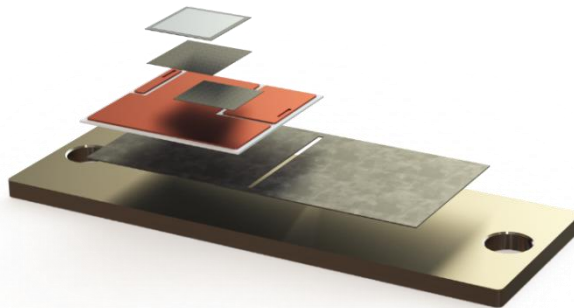


图5、IGBT 模块层的开焊。

下一步是使用铝线超声波焊接和带有连接的电源引线的焊接。

电源引线、控制引脚和芯片之间连接的超声波焊接是典型结构 IGBT 模块生产技术的全新现代方法。超声波焊接的高科技设备使 PROTON-ELECTROTEX 公司生产的高质量仪器能与半导体技术领域的世界领先者一争高下。

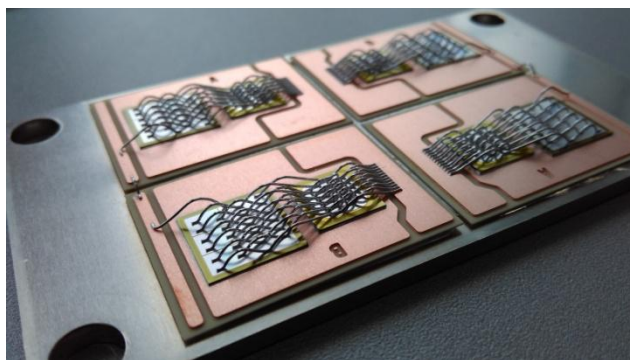


图6、用铝线焊接 IGBT 模块。

由于使用超声波未焊接的方法，模块的使用寿命不再受设备内导体接触连接可靠性的限制。

由于超声波焊接在未使用焊料的情况下进行，因此该过程更清洁、成本更低。此外，超声波焊接让避免连接处（热循环之后）的分层，这种情况在使用焊料进行焊接时会发生。

该方法的另一个优点是焊接在未达到金属熔化温度的情况下进行。这样可以减少芯片上的热负荷。

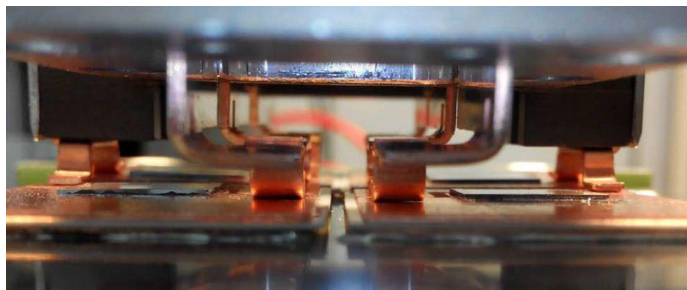


图7、电源线的焊接。

F&K Delvotec 5650 和 Delvotec G5 66000 超声波焊接装置可实现上述优点和新的现代生产方法。由于高度自动化，这些装置减少了人类对生产过程的影响。这将提高产品质量。除了所有其他优点外，Delvotec 装置还能对焊接时发生的过程进行“实时”控制、自诊断、记录焊接过程、收集和控制统计数据。

测试证明，使用厚铝线焊接的过程：

- 由于可以微调焊接参数和回路几何形状，过程可高度控制。
- 由于采用实时反馈的焊接质量监控系统，过程可高度重复。废品率低。
- 由于采用了机器视觉系统，过程为可耐原始组件性质变化。

在剪切焊接接点测试过程中获得的数据证明，PROTON-ELECTROTEX 公司生产的模块参数并不逊于竞争对手。

测试和测量设备。

为了控制钎焊和焊接接头的质量，使用了 SONIX 非破坏性扫描的声学显微镜。

声探伤具有下列优点：

- 使检测潜在缺陷和接近零厚度缺陷（无润湿）；
- 精度高；
- 内置于生产线。

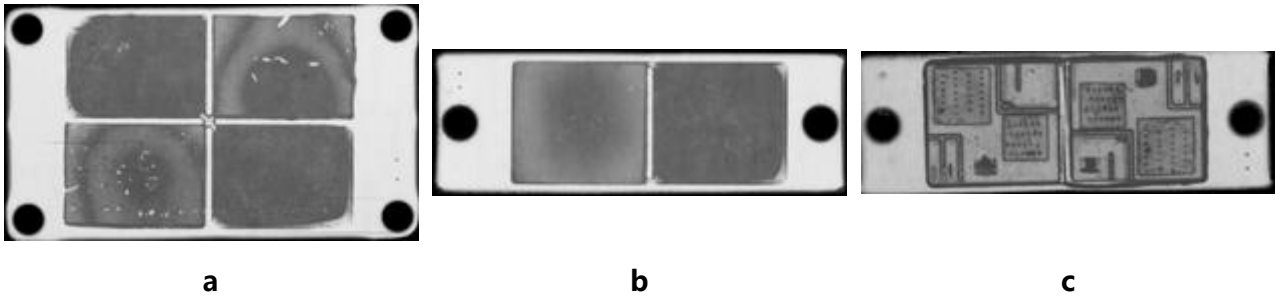


图8、使用声学显微镜拍的照片：a – MIAA 型模块的钎焊，b – MIFA 型模块的钎焊，
c – MIFA 型模块使用铝线进行的焊接

为控制电气参数使用现代测试设备。SCHUSTER 公司制造的装置允许自动测试模块技术条件规定的所有电气参数。这些测试仪由欧洲领先的制造商使用。该设备允许在 $T_{j,max}$ 和室温下测量100%静态和动态参数。

PROTON-ELECTROTEX 公司在功率半导体市场上富有多年成功经验，具有高素质的工程人员、与组件和材料供应商的可靠关系、以及满足质量管理体系高要求的组织良好的业务流程。

1.5 RoHS 标准合规

关于限制电子、电气设备中某些有害物质的欧盟2011/65/EU RoHS2指令于2011年10月21日生效。该指令扩大了先前采用的2002/95 / EC (RoHS) 指令。下列物质被限制使用：

- 铅 (Pb)；
- 汞 (Hg)；
- 六价铬 (Cr6)；
- 镉 (Cd)；
- 多溴联苯 (PBB)；
- 多溴联苯醚 (PBDE)；
- 十溴二苯醚 (decaDBE)。

我们按此指令行事，更多详情请参见我司网站 <http://www.proton-electrotex.com/ru/company/sertification.php>

1.6 UL 认证

目前，模块已完成认证测试。

二、IGBT 参数

1.7 热损耗

晶体管开关期间的热损耗包括开路状态下的静态损耗，动态开关损耗，控制损耗和由于闭合状态下的泄漏引起的损耗。

静态损耗可以使用以下简化公式进行计算： $P_{np} = U_{CE(sat)} * I_{avg}$ ，其中 I_{avg} —— 一定时段的电流平均值。

在周期性切换期间切换损耗功率可以通过以下公式确定： $P_n = \frac{1}{T} \int_0^T U_{CE}(t) * i_C(t) (dt)$ 其中 T — 切换期间， $U_{CE}(t)$ – 切换期间内的集电极-射极电压， $i_C(t)$ – 切换期间内的集电极电流。

键中的功率损耗会影响仪器的效率，因此减少它们是设计的一项主要任务。

动态损耗的分量取决于键切换频率。这会限制动力装置的工作频率的增加。应该指出的是，动态损耗具有明显的脉冲特性。由于晶体上瞬时温度值的增加，这会加剧其对键的负面影响。因此，增加键切换的操作频率不仅受到其速度降低的限制，而且还受到动态损耗增加的限制。

通过栅极电路中的电阻可以控制导通速度和导通损耗，但是应该注意，关闭晶体管时，只能控制关断速度，而不能控制剩余电流。

PROTON-ELECTROTEX 公司模块设计用于5-12kHz 的频率。

1.8 测试 MIAA 和 MIFA 模块参数的模式和方法

测试符合 IEC 60747-9和国家标准24461-80。

1.8.1 $U_{BR(ces)}$ – 集电极-发射极击穿电压

该参数表征击穿电压的下限。随着温度降低，击穿电压由于正温度系数而降低。

测试条件：

- 转变温度 – $25 \pm 10^\circ\text{C}$ ；
- 闭合电压：
 - 形状 - 梯形，线性增加的前沿；
 - 幅度 – 最大允许集电极 - 发射极击穿电压；
 - 持续时间：10毫秒；
 - 脉冲数量：一个脉冲。
- 栅极电路模式 – 晶体管的栅极-发射极电路短路。

测试计划和方法符合附录 A 中 IEC 60747-9中规定的方法。

1.8.2 I_{CES} – 集电极 - 发射极漏电流

栅极处零电压时的集电极电流。

测试条件：

- 转变温度 – $25 \pm 10^\circ\text{C}$ ；
- 闭合电压：
 - 形状 - 梯形，线性增加的前沿；
 - 幅度 – 最大允许集电极-发射极电压 (U_{CES})；
 - 持续时间：10毫秒；
 - 脉冲数量：一个脉冲。
- 栅极电路模式：晶体管的栅极-发射极电路短路；
- 集电极电流是测试程序中为特定类型的模块指定的最大值。

测试计划和方法符合 IEC 60747-9第6.3.4.项中规定的方法。

1.8.3 $U_{CE(sat)}$ —— 集电极 - 发射极饱和电压

测试条件：

- 转变温度： $25 \pm 10^\circ\text{C}$ ；
- 施加到晶体管栅极的电压相对于其发射极为15V；
- 集电极电流脉冲：
 - 对于这种类型的模块，幅度设置为等于额定集电极电流 ($I_{C_{nom}}$) 值；
 - 集电极电流脉冲持续时间300微秒；
 - 脉冲数量：一个脉冲；
- 测量电压的控制点必须位于模块的端子处，使得来自电流流动的触点和导体处的电压降不会影响测量结果。

测试计划和方法符合 IEC 60747-9第6.3.2.项中规定的方法。

1.8.4 I_{GES} —— 栅 - 发射极漏电流

测试条件：

- 转变温度： $25 \pm 10^\circ\text{C}$ ；
- 集电极电路模式 —— 晶体管的集电极-发射极电路短路；
- 施加到晶体管栅极相对于其发射极的电压首先为20 V，然后为-20V。

测试计划和方法符合 IEC 60747-9第6.3.5.项中规定的方法。

1.8.5 $U_{GE(th)}$ —— 栅 - 发射极阈值电压

集电极电流的外观电压。与 $U_{BR(ces)}$ 一样，随着温度的升高而降低。

测试条件：

- 转变温度 - $25 \pm 10^{\circ}C$ ；
- 集电极-发射极电压等于栅极-发射极电压（允许栅极和集电极互连）；

测试计划和方法符合 IEC 60747-9第6.3.3.项中规定的方法。

1.8.6 二极管的接通瞬变过程的 $t_{d(on)}$, t_{ri} , t_{on} , t_{fv} , dI_{Con}/dt , dU_{CEon} , E_{on} 参数和反向恢复过程的 t_{rr} , I_{rrm} , Q_{rr} , E_{rec} 参数

测试条件：

- 转变温度： $150^{\circ}C$ ；
- 栅极电路模式：
 - 被测晶体管栅极电压脉冲幅度相对于其发射极的电压脉冲幅度为 $\pm 15 V$ ；
 - 被测晶体管栅极处的解锁电压脉冲数为2，第一脉冲的持续时间比第二电流脉冲的持续时间，第一和第二脉冲之间的暂停持续时间长；
 - 此类模块的栅极解锁和阻断电压源的内阻应在测试程序中标明；
- 集电极电路模式；
 - 除非在测试程序中另有规定，否则处于闭合状态的集电极电压为集电极-发射极击穿电压的 0.5；
 - 集电极电路包括由反向二极管分流的电感线圈；
 - L/R 负载时间常数必须远长于模块中包含的测试晶体管的切换时间；
- 开路电流：
 - 第一电流脉冲的形状是线性增加的脉冲；
 - 集电极电流的第一个脉冲（负载电流）的幅度设置为等于这类模块的额定集电极电流值；

测试计划和方法符合 IEC 60747-9第6.3.11.项中规定的方法。

1.8.7 $T_{d(off)}$, t_{fi} , t_{off} , t_{rv} , dI_{Coff}/dt , dU_{CEoff} , E_{off} 关闭过程参数

测试条件：

- 转变温度：150°C。
- 栅极电路模式：
 - 被测晶体管栅极电压脉冲幅度相对于其发射极的电压脉冲幅度为 $\pm 15\text{ V}$ ；
 - 此类模块的栅极解锁和阻断电压源的内阻应在测试程序中标明；
- 集电极电路模式；
 - 闭合状态下集电极上的电压为集电极-发射极击穿电压的0.5；
 - 集电极电路包括由反向二极管分流的电感线圈；
 - L/R 负载时间常数必须远长于模块中包含的测试晶体管的切换时间；
- 开路电流：
 - 第一电流脉冲的形状是线性增加的脉冲；
 - 集电极电流的脉冲（负载电流）的幅度设置为等于这类模块的额定集电极电流值。

测试计划和方法符合 IEC 60747-9第6.3.12.项中规定的方法。

1.8.8 对短路电流的抵抗力测试

测量条件：

- 转变温度 —— 150°C或测试计划中指定的其他值。
- 栅极电路模式：
 - 被测晶体管栅极电压脉冲幅度相对于其发射极的电压脉冲幅度为 $\pm 15\text{ V}$ ；
 - 在测试程序中规定栅极电路中电阻器的电阻；
 - 栅极-发射极电压启通脉冲的数量为一个；
 - 栅极-发射极电压触发脉冲持续时间在最大正电压（ t_{psc} ）的50%的水平上是10 μs 。
- 集电极电路模式；
 - 关闭状态的集电极上的电压等于测试程序中指定的值；
 - 集电极电路必须具有最小的电阻和寄生电感；
 - 集电极电流脉冲的幅度应受被测晶体管内阻的限制。

测试计划和方法符合 IEC 60747-9第6.2.6.项中规定的方法。

2 转换器设计时选择模块

2.1 根据特性选择模块

转换器设计时选择 IGBT 模块是一项复杂的设计任务。选择模块时要解决的主要问题是选择“模块-冷却器”总体结构，该结构应允许在模块的半导体组件（晶体）上产生的热量与冷却器能够转移的热量之间获得热平衡。热平衡应在模块的晶体不超过最大允许温度 $T_{j,max}$ 的温度下发生。

每单位时间晶体发出的热量或损耗的功率取决于许多因素。损耗可分为两个主要部分：

- 静电损耗。它们归因于处于导通状态的模块的半导体元件的非理想导电性和处于关闭状态的漏电流；
- 动态损耗。它们由半导体元件的有限开/关时间规定。

图9、MIFA- HB17FA- 075N 模块的集电极电流对外壳温度的依从性

现代 IGBT 模块的静电损耗主要取决于流动电流的大小和形状。计算时在关闭状态下由漏电流引起的静电损耗的大小可以忽略不计。

由于 IGBT 模块通常用作键，因此在模块内部二极管与 IGBT 晶体管并联连接。所以，在计算静电损耗时应区分晶体管上的静电损耗和二极管上的静电损耗。

静电损耗的计算可以使用晶体管（二极管）上的电压降幅度对电流的依赖性来执行。使用描述半导体元件两端的电压降的线性模型可以获得良好的计算精度。同时，假设下降由依赖性 $U_{(t)} = U_0 * I_{cp} + r_d * I_{rms} * I_{rmc}$ 描述。使用此模型时，静电损耗的功率将为 $P = U_0 * I_{cp} + r_d * I_{rms} * I_{rmc}$ ，其中 I_{cp} - 通过晶体管（二极管）的平均电流， I_{rms} - 通过晶体管（二极管）的平均电流。

动态损耗计算是一项更加困难的任务。

晶体管的动态损耗可分为两个成分：开启和关闭损耗。每个成分取决于许多因素，例如集电极上的电压，开关时的电流，驱动器产生的控制电压，控制电路中电阻器的值，晶体的温度。切换时损耗的典型依赖性如图10所示。

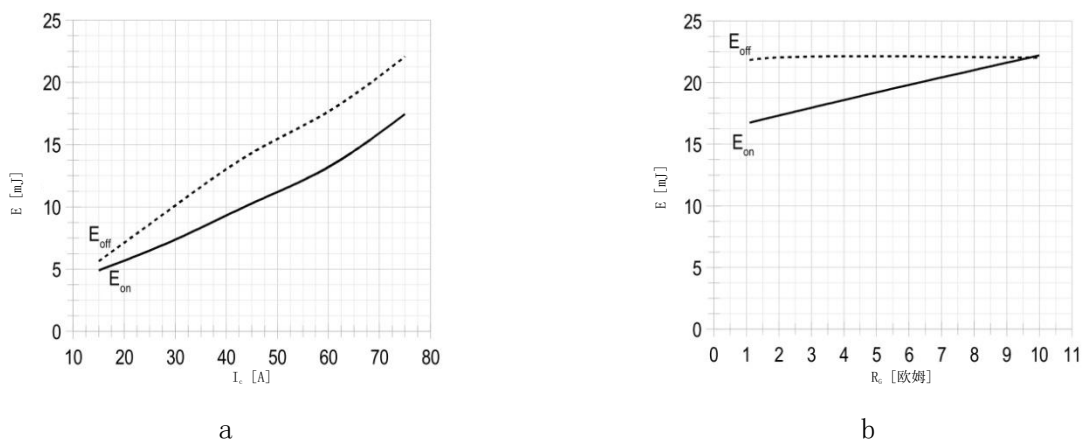


图10、晶体管的能量损耗：a —— 来自集电极电流，b —— 来自电阻，用于 MIFA- HB17FA- 075模块

二极管上的动态损耗主要通过反向恢复损耗来描述，并且取决于所施加的反向电压的大小和在二极管关断之前流过二极管的电流的大小，以及在 IGBT 模块中与二极管串联连接的 IGBT 晶体管控制信号的参数。动态损耗的大小还取决于二极管和晶体管的晶体温度。二极管恢复时典型的损耗依赖性如图11所示。

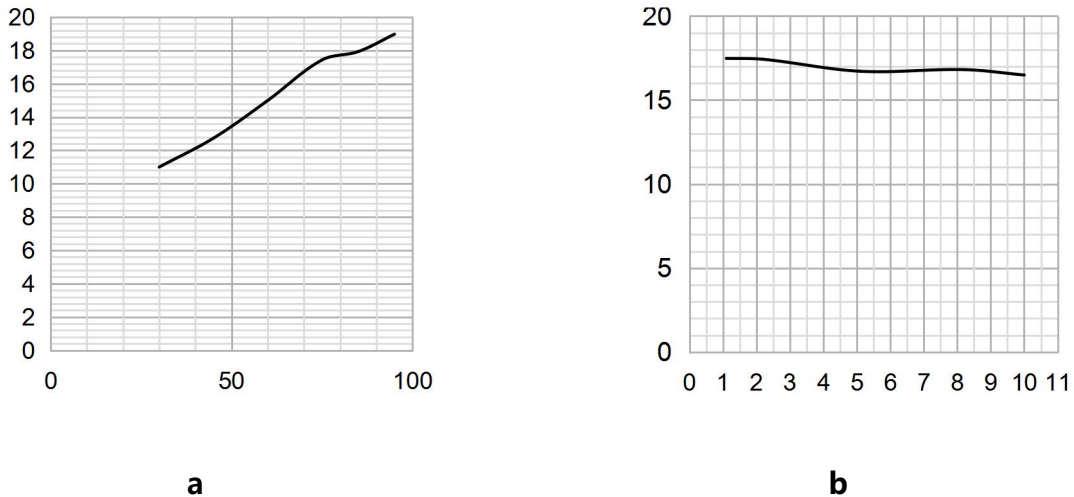


图11、能量损耗：a —— 来自集电极电流，b —— 来自电阻，用于 MIFA- HB17FA- 075N 模块

动态损耗直接取决于切换频率。计算动态损耗时，应考虑切换期间的电流方向，因为不是每次切换都会自动导致模块的每个半导体元件上的动态损耗。

为了正确地选择模块类型，建议使用以下算法：

1. 确定直流链路的标称和最大允许工作电压；
2. 使用模块的类型按照分类电压确定：

适用于标准工业网络 IGBT 的推荐电压等级			
网络电压 (RMS)	220V	380V	690V
U_{CES} IGBT	600V	1200V	1700V

3. 确定转换器的最大输出电流；
4. 对于转换器的最大输出电流选择最大允许切换频率；
5. 选择所需级别的模块，额定电流不低于转换器的最大输出电流；
6. 对于转换器的最大操作模式，计算模块的每个半导体元件的静态和动态损耗。应对模块晶体温度值接近最大允许值进行计算；
7. 考虑模块的每个部件相对于模块底座的热阻值和模块底座与冷却器之间的热阻量；计算模块安装区域内冷却器的最大允许温度；
8. 计算每个模块的总损耗。基于所设想的冷却器结构和冷却介质的最大允许温度，计算在模块安装区域内冷却器的温度；
9. 如果获得的温度未超过第7项中获得的具有足够余量的计算值，则认为模块的选择已完成；

10. 如果在模块的安装区域内冷却器温度的余量太大，则解决用减小的额定电流值更换模块的问题。在更换模块的情况下，重新进行热量计算；

11. 如果冷却器温度余量不足，应该决定用额定电流较高的模块更换模块的问题，或更换模块冷却系统。在更换模块的情况下，重新进行热量计算。

2.2 信息材料的使用

本节的目的：帮助理清 IGBT 模块的信息材料，以便正确理解其内容。以下是信息表中反映的参数定义。为了澄清，使用 MIAA-HB17FA-300 模块的数据和图表。不过，本手册适用于所有模块。

信息表的第一部分提供一般说明，壳体的外貌和接线图。

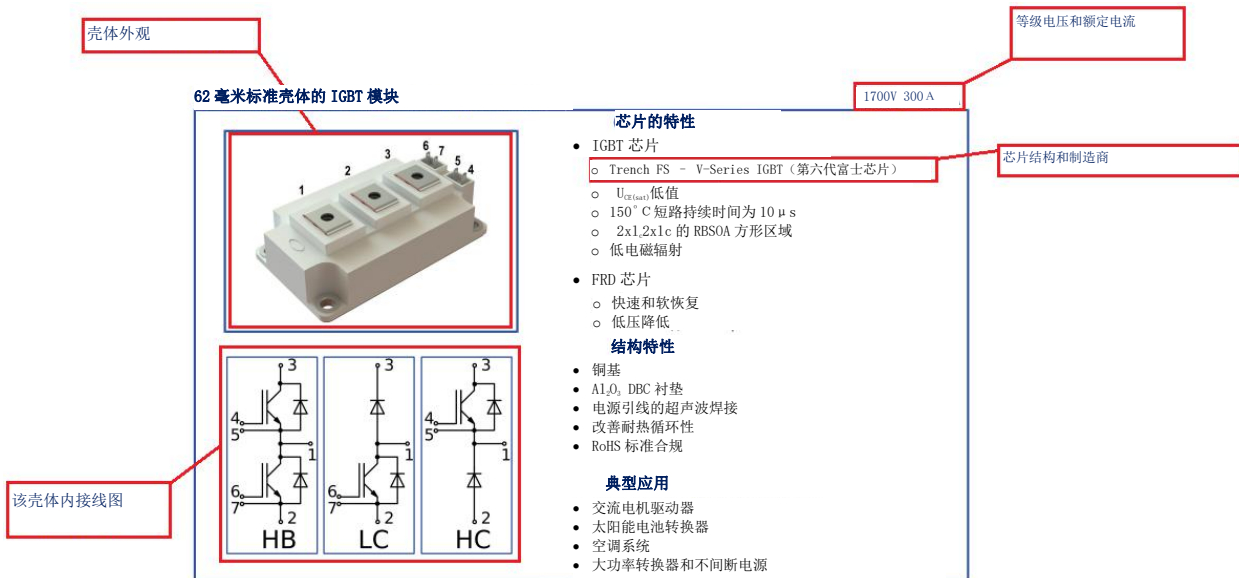


图12、模块概述

下图专门介绍模块的最大参数。

参数的最大允许值

参数	符号	条件	数值	单位
IGBT				
集电极-发射极电压	U_{CE}	$U_{CE} = 0$	1700	V
集电极的额定电流	$I_{C, nom}$		300	A
集电极的直流电流	$I_{C, DC}$	$T_{vj(max)} = 175^{\circ}C; T_c = 25^{\circ}C$	402	A
		$T_{vj(max)} = 175^{\circ}C; T_c = 80^{\circ}C$	308	A
集电极最大重复脉冲电流 ¹	I_{CM}	$I_{CM} = 3 \times I_{C, nom}; t_p = 1$ 毫秒	900	A
短路脉冲电流的持续时间	t_{psc}	$T_{vj} = 25^{\circ}C; U_{CE} = \pm 15V; U_{GE} = 980V;$ $R_{th(j-c)} = R_{th(j-amb)} = 2.2$ 欧姆; $I_{C, max} < 1900$ A.	10	微秒
		$T_{vj} = 150^{\circ}C; U_{CE} = \pm 15V; U_{GE} = 980V;$ $R_{th(j-c)} = R_{th(j-amb)} = 2.2$ 欧姆; $I_{C, max} < 1550$ A.	10	
栅极-发射极电压	U_{GE}		± 20	V
转换工作温度	$T_{vj(oper)}$		-40...+150	$^{\circ}C$
斩波二极管/后向二极管。				
重复脉冲反向电压	U_{RRM}	$U_{RRM} = 0$ V。	1700	V
额定直流电	$I_{F, nom}$		300	A
直流电	$I_{F, DC}$	$T_{vj(max)} = 175^{\circ}C; T_c = 25^{\circ}C$	291	A
		$T_{vj(max)} = 175^{\circ}C; T_c = 80^{\circ}C$	219	A
重复正向脉冲电流 ¹	I_{FRM}	$I_{FRM} = 3 \times I_{F, nom}; t_p = 1$ 毫秒。	900	A
转换工作温度	$T_{vj(oper)}$		-40...+150	$^{\circ}C$
模块				
储存温度	T_{stg}		-40...+50	$^{\circ}C$
绝缘击穿电压	U_{insul}	AC sin 50 Hz; t = 1 分钟。	4000	V

不同转变温度的集电极的计算电流

不同结温的二极管的计算正向电流

¹ 脉冲持续时间和重复频率必须使转变温度不超过 $T_{vj, max}$ 。

图13、模块的最大允许参数。

特性:

参数	符号	条件	数值			单位
			最小	典型	最大	
IGBT						
集电极-发射极饱和电压	U_{CEsat}	$U_{GE} = +15V; I_C = 300$ A; $t_r = 1000$ 微秒	$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 2.13	2.16	2.33	V
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 2.95	3.23	3.57	V
栅极-发射极阈值电压	$U_{GE(th)}$	$I_G = 6$ mA; $U_{CE} = U_{GE}; T_{vj} = 25^{\circ}C$ $t_r = 2$ 毫秒。	5.38	5.99	6.36	V
集电极-发射极漏电流	I_{CES}	$U_{CE} = 1700V;$ $t_r = 10$ 毫秒; $U_{GE} = 0$ 。	$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 3.90	4.96	150	μA
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 0.98	1.41	2.50	μA
栅极-发射极漏电流	I_{GSE}	$U_{CE} = 0; U_{GE} = \pm 20$ V; $T_{vj} = 25^{\circ}C;$ $t_r = 30$ 毫秒。	13.0	16.5	250	nA
输入电容	C_{ice}	$U_{CE} = 10$ V; $U_{GE} = 0$ V;	-	27.2	-	nF
输出电容	C_{oc}	$f = 1$ MHz; $T_{vj} = 25^{\circ}C$	-	1.40	-	nF
反向转移电容	C_{res}		-	2.80	-	nF
栅极电荷	Q_{ge}	$I_G = 300$ A; $U_{CE} = 600V;$ $U_{GE} = -8 \sim 15$ V。	-	3483	3738	C
栅极的内置电阻器	R_{gint}	$T_{vj} = 25^{\circ}C$	-	2.50	-	欧姆
接通延迟时间	$t_{d(on)}$		$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 458	491	557	ns
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 559	583	650	ns
集电极电流上升时间	t_{ri}	$U_{CE} = 850V;$ $U_{GE} = \pm 15V;$ $I_{C, min} = 300$ A; $R_{th} = 2.2$ 欧姆; $L = 300$ μH 。	$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 55.0	56.0	64.0	ns
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 60.0	62.0	70.0	ns
接通时能量损耗	E_{on}		$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 36.8	40.2	47.0	μJ
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 64.2	69.4	85.0	μJ
关闭延迟时间	$t_{d(off)}$		$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 652	682	755	ns
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 823	849	935	ns
集电极电流下降时间	t_{fi}		$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 462	473	520	ns
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 556	593	715	ns
关闭时能量损耗	E_{off}		$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 59.6	61.2	68.0	μJ
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 81.9	84.4	100	μJ
集电极-发射极阈值电压	U_{CE0}	$U_{GE} = +15V; T_{vj} = 150^{\circ}C$ $I_{CE} = 75$ A; $I_{G2} = 300$ A; $t_r = 1000$ 微秒	0.98	1.02	1.07	V
动态阻力	r_{CD}		6.36	7.26	8.25	兆欧姆
过渡外壳热阻	R_{ch}	DC; $I_{CE} = 220 \pm 10$ A; $I_{G, nom} = 1.0$ A; $U_{GE} = +15V$ 。	-	0.056	0.085	K/W
斩波二极管/后向二极管。						
直流电压	U_F	$I_F = 300$ A; $U_{RRM} = 0; t_r = 1000$ 微秒	$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 1.86	1.87	2.08	V
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 2.24	2.51	2.78	V
反向恢复时间	t_{rr}	$U_{RRM} = \pm 15V;$ $U_{CE} = 850V;$ $I_{C, min} = 300$ A; $R_{th} = 2.2$ 欧姆; $L = 300$ μH 。	$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 518	558	710	ns
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 978	1052	1230	ns
重复脉冲反向电流	I_{RRM}		$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 300	328	365	A
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 323	358	400	A
反向恢复电荷	Q_{rr}		$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 49.6	51.2	60.0	微库
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 97.1	98.9	110	微库
反向恢复期间的能量损耗	E_{rr}		$T_{vj} = 25^{\circ}C$ 31.5	32.9	38.0	μJ
			$T_{vj} = 150^{\circ}C$ 59.2	61.0	68.0	μJ
阈值电压	U_{TR}	$T_{vj} = 150^{\circ}C; U_{CE} = 0; I_{G2} = 75$ A;	0.86	0.90	0.96	V
动态阻力	r_T	$I_{CE} = 300$ A; $t_r = 1000$ 微秒	4.40	5.19	6.00	兆欧姆
过渡外壳热阻	$R_{ch(CE)}$	DC; $I_{CE} = 200 \pm 10$ A; $I_{G, nom} = 1.0$ A; $U_{GE} = +15V$ 。	-	0.127	0.190	K/W

注意!!!
栅极的电容、电荷和电阻值对一个键指出

模块动力作用

图14、IGBT 和 FRD 芯片的特性

从信息材料第4页开始，给出所有主要参数和测量条件的图表。应特别注意晶体管的动态特性图表。此外，为了正确确定驱动器的所需功率值得关注栅极电荷图表。

在信息材料的最后一页介绍标记的总体尺寸和指导。因为不同电路的参数是相同的，并且栅极的电容、电荷和电阻对一个键指出，所以信息材料可以用于所有可能的（对本壳体）开关电路。

2.3 应注意的特性

集电极最大电流– I_C 。PROTON-ELECTROTEX 公司信息材料中本参数的值在两个温度下给出：正常 – 25°C 和提高 – 80°C。为更详细的分析，请参阅“集电极电流对外壳温度的典型依赖性”信息材料中提供的图表。

设计人员应提供标称的热条件，以防止晶体过热和晶体管过早失效。

电流过载的幅度和持续时间不应超过晶体管信息表中规定的值。电流的重复幅值应不大于 I_C 的 70 ÷ 80%。负载事故引起的短路电流持续时间不应超过 10μs。

集电极-发射极电压 – U_{CE} 。 U_{CE} 确定晶体管类别。不允许 IGBT 过载电压，但晶体管可以承受 5-10 倍的非重复过流。第 3.1 节中提供标准工业网络推荐的 IGBT 等级表。应该始终保持电压余量。例如，在对 380V 的三相网络的标准电压进行整流之后，向晶体管施加 540V 的电压。在这种情况下，不建议使用 600V IGBT，因为电压余度太小而且键在操作过程中无法承受切换过电压。

集电极-发射器最大工作电压 – U_{CES} 。附录 1 给出了参数的物理意义，但需要说明的是，对于 IGBT 的正常运行工作峰值电压不应超过额定电压的 80%，正常工作电压不应超过额定电压的 60%。

栅极电荷 – Q_G 。要计算晶体管控制驱动器知道栅极电荷。

饱和电压 – U_{CEsat} 。这是晶体管完全打开时的电压。对于中频 IGBT，此参数的值在 3V 以内。

计算 IGBT 电流的公式（假设形状因子 $k = 1$ ）

$$I_C = \sqrt{\left(\frac{U_{CE0}}{2 * r_{CE0}}\right)^2 + \frac{T_j - T_C}{R_{th(j-c)} * r_{CE0}}} - \frac{U_{CE0}}{2 * r_{CE0}}$$

其中 U_{CE0} – 集电极-发射极阈值电压；

r_{CE0} – 动态阻力；

$R_{th(j-c)}$ – IGBT 的过渡外壳热阻；

T_j – 晶体的最高工作温度；

T_C – 壳体温度。

二极管的电流以相同的方式计算，仅用 r_T 代替 r_{CE0} ，用 $U_{(T0)}$ 代替 U_{CE0} ，用 $R_{th(jc-D)}$ – 二极管的热阻代替 $R_{th(j-c)}$ 。

2.4 IGBT 键保护

为了保护模块在集电极-发射极电路中避免切换过压，请使用直接安装在电源端子上的缓冲 RC 和 RCD 电路，见图15。

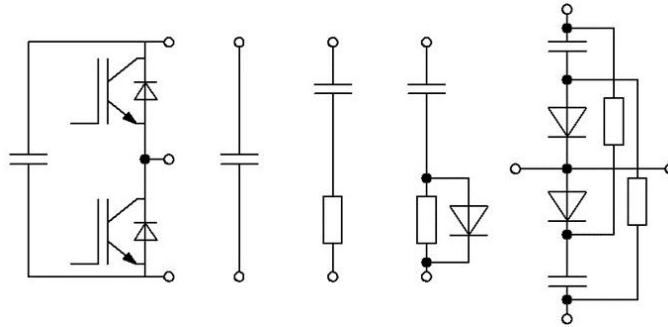


图15、开关缓冲电路的典型电路。

几个模块连接到一个驱动器时，栅极载荷总电荷的最大值 ($n * Q_G$) 应该更小，并且等效电阻器 (R_G / n) 应该大于驱动器允许的值。I_{AV} 驱动器电源的输出电流的平均值必须满足下列关系： $I_{AV} > n * Q_G * f_{SW}$ 其中 f_{SW} – 切换最大频率； n – 驱动器的数量； Q_G – 栅极电荷。

为了防止均衡电流的发生，建议在发射器信号电路中安装电阻器。选择标称值为0.5 欧姆至0.1 R_G 的电阻器，这可以限制这些电流，同时抑制寄生电路。

另外，为了消除模块的负载，如果开关延迟存在足够大的差异，建议使用平衡电感来均匀分配电流。电感计算公式：

$$L_{min} = \frac{U_{CC} * dt_{max}}{\Delta I_{out}}$$

其中 dt_{max} — 最大切换时间差；
 ΔI_{out} — 允许偏离平均电流值；
 U_{CC} — 电源总线上的电压；

为了限制短路电流，建议接通栅极和发射极之间的保护电路，图16。I_C 的急剧增加和晶体管的输出饱和时，这将防止 U_{GE} 的增加。

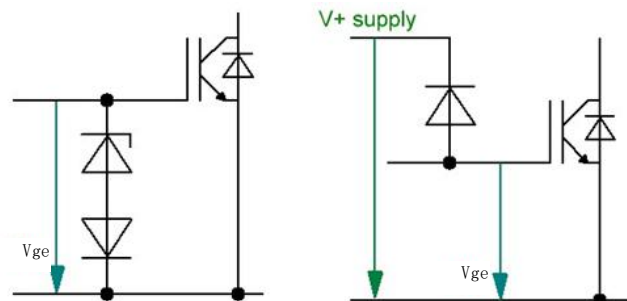


图16、限制栅极电压的典型电路。

为防止发生大的开关过电压，建议在退出短路模式时使用下列措施并防止模块故障：

- 以低于正常运行时关闭模块的速度降低驱动器输出端的电压;
- 关闭模块的两个阶段：
 1. 将驱动器输出转移到第三状态并连接到电阻器的栅极-发射极电路；
 2. 集电极电流降低到标称值后突然关闭模块。

IGBT 模块对静电放电敏感，因此在运输、安装和操作过程中应考虑以下要求：

- 为了在电路中直接保护栅极免受静电击穿，必须并联一个电阻器的栅极-发射极电路，电阻为 10 ...20k Ω ;
- 在运输模块时，栅极和控制发射极输出必须通过导电跳线短路，在模块连接到电路之前不应将其移除；
- 只有当人员通过1M Ω 的高阻电阻器（防静电手环）接地时，才需要使用 IGBT 模块进行安装工作；
- 模块可以接触的所有工具和装备必须接地；
- 测量或测试之前，请确保从仪表上除去所有静电。

2.5 冷却

有效冷却是延长设备寿命的关键。作为破坏性因素的散热能过一会显现出来，并且仪器将在标称模式下工作一段时间。为了选择确保模块可靠运行的模式，必须进行热计算。热计算可以使用图17中所示的热模型。

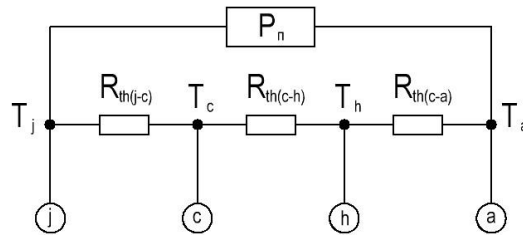


图17、热模型。

热模型是三个热阻的组合： $R_{th(j-c)}$ (junction — case), $R_{th(c-h)}$ (case — heatsink) 和 $R_{th(h-a)}$ (heatsink — ambient)。 $R_{th(c-h)}$ 值还包括 $R_{th(p)}$ 导热材料的热阻；它通常在相应信息材料中给出：

$$R_{th(p)} = \frac{\delta_p}{\lambda * S_p}$$

其中 δ_p — 传热层厚度；

λ — W/m * C°材料导热系数；

S_p — 热界面（衬垫或导热膏）一侧的区域

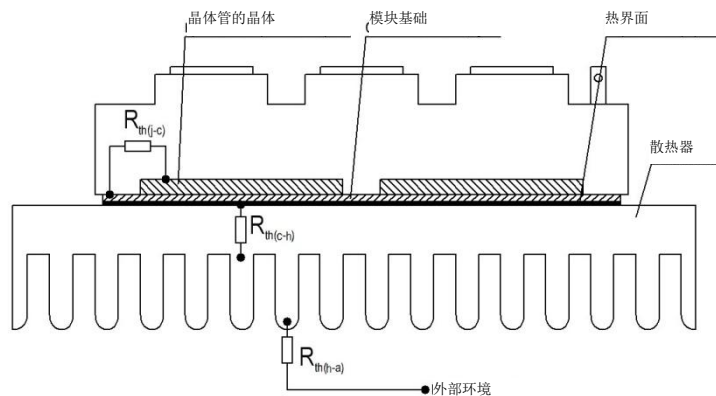


图18、散热器上的半导体元件的热模型。

从图17所示的热模型中，可以确定 T_j 。

$$T_j = T_a + (R_{th(j-c)} + R_{th(c-h)} + R_{th(h-a)}) * P_{\text{耗}}$$

其中 $P_{\text{耗}}$ — 半导体元件发出的损耗功率。

对于安装在一个散热器上的几个模块，需要稍微修改热模型。修改后的热模型如图19所示。

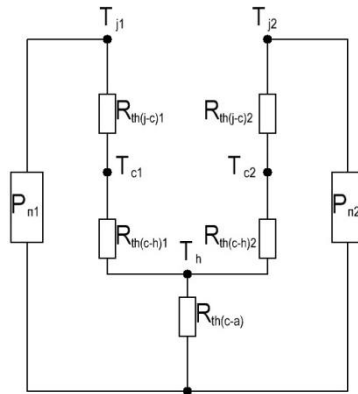


图19、多个模块的热模型。

2.6 控制

设计控制电路时，必须遵循一些简单的原则，使 IGBT 在器件的整个使用寿命期间保持工作状态：

- 控制脉冲快速上升和下降，以减少切换过程中的热量损耗
- 通过控制电流脉冲的高值确保晶体管输入电容的快速再充电；
- 驱动器输入与数字 TTL / CMOS 控制信号的兼容性；
- 在半桥电路中提供“上”键的“浮动”控制电位。

IGBT 驱动器建议的工作参数：

- 接通时 U_{GE} 值必须等于 $+ 15 \pm 10\%V$ (以确保导通状态下的最小损耗) ;
- 关断时 U_{GE} 值必须从负 7 V 到负 15 V (以减少关断时的损耗并确保晶体管对 du / dt 的高电阻) ;
- 栅极-发射极最大电压不应超过 $\pm 20 V$;
- 驱动器输出端的电压脉冲前沿的持续时间应至少比仪器的信息表中指示的开关时间小 5 到 10 倍 ;
- 控制驱动器的建议内阻应在特定模块规定值的范围内选择，同时考虑最小动态损耗并排除由电感再充电引起的过电压的发生 ;
- 锁定电压必须确保模块在所有工作条件下完全关闭 ;
- 控制电路的长度应该是最小的。建议使用双绞线或在模块控制端子上直接安装驱动板 ;
- 控制电路必须与可能的干扰源隔离 ;
- 电源电压必须符合下列顺序：
 1. 控制系统和驱动器；
 2. IGBT 模块。

由于制造控制驱动器的输出互补级联的特殊性，形成寄生晶闸管 pnpn 结构，其可以“捕捉”，这将导致输出驱动器级联的烧毁。为避免这种影响，可以将芯片的公共输出，功率晶体管的源极和平滑滤波器的阻塞变压器的负端子连接到一条总线。

安装驱动程序时的建议

MIAA 和 MIFA 版本的 IGBT 模块的控制端子设计用于根据 DIN 46244-A 2.8-0.5-Bz (FASTON) 夹紧触点连接 (图 20)。施加在控制触点上的轴向安装力不应超过 60 N，铰接和分解力分别不应超过 53 和 13 N。

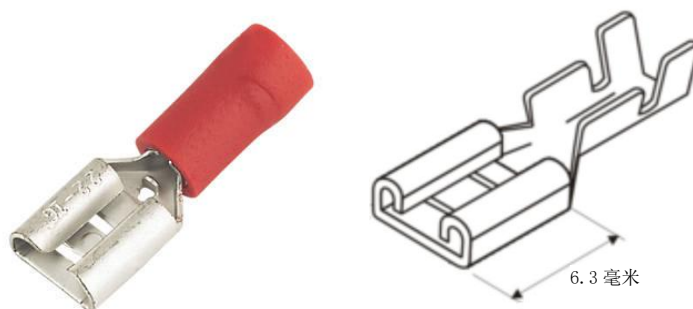


图20、Faston 接线端子。

注意，MIAA 和 MIFA 版本的 IGBT 模块的控制触点不是为焊接而设计的！但在紧急焊接的情况下，PROTON-ELECTROTEX 公司建议使用活性助焊剂去除触点表面的氧化物，如 LTI-120 和 PCDT 等助焊剂。它们是中性的，焊接后不需要清洗。可以使用无铅组合物 Sn96Ag04，其具有由基于改性松香的非腐蚀性焊剂组成的芯，不需要洗涤。焊接温度不应超过 260°C，持续时间不超过 10 秒。焊接时，烙铁必须接地。

安装驱动器时，必须遵循 ESD 建议以防止静电击穿（参见第 3.4 项的最后一段）。

2.7 并联连接

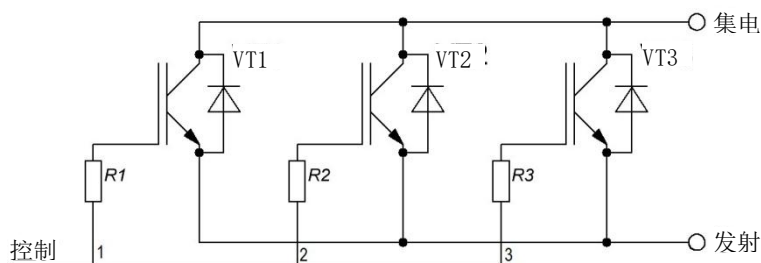


图 21、IGBT 模块并联连接示例（上桥肩）

在实践中经常存在需要切换大电流的情况，该大电流的值高于单个晶体管的电流的极限值。在这种情况下，可以并联启用几个专为较小电流设计的晶体管。

控制电路必须具有小内阻。

为了避免电路的不正确操作和随后键的烧毁，必须选择具有尽可能接近阈值电压值的 IGBT。阈值电压的任何差异都会影响并联晶体管的电流分布。理想的选择是所有并联的晶体管都来自同一批次，在相同条件下制造。

所有仪器必须放在同一个冷却器上，并尽可能彼此靠近。这将确保导热均匀。电流负载不应超过 80 ... 90%，以便为并联运行期间电流分布的不对称性提供一定的余量。

切记，并联连接的晶体管也会增加输入电容。在此基础上，并联晶体的控制电路必须确保键的必要切换时间。

为消除晶体管栅极相互影响，建议在每个栅极的控制电路中安装自己的电阻器。它应根据模块在电路中的使用从推荐值中选择。

然后需要确定驱动器提供的电流量。为此，需要将获得的 R_g 值除以并联连接的晶体管的数量。

晶体管之间的导体长度的增加可能导致安装的寄生电感增加，这又会导致危险的电压冲击和键的行为不受控制。

并联连接的晶体管的阈值电压不能同时针对所有仪器实现，因此个别键接受先前关闭的那些 IGBT 的负载电流。

由此可见，应根据开路电压选择 IGBT。当两个模块并联连接时，不需要在导通状态下进行电压分选。由于具有高过载能力，IGBT 不会担心在启动开始时发生的电流过载。

2.8 模块安装

为了确保功率模块的绝缘基板和散热器之间更高的热交换效率，它们的表面必须满足以下要求：

- 表面上不应有固体颗粒；
- 安装在冷却器上之前，必须脱脂表面；
- 表面粗糙度不应超过10微米 ($R_z : < 10$ 微米)；
- 最大距离100 mm，平坦度的偏差应小于20微米。

使用紧固螺栓安装模块时，应遵循以下建议：

- 所有紧固螺栓必须按规定的拧紧力矩均等拧紧；
- 建议使用电子控制工具或至少使用低转速的电动螺丝刀；
- 由于精度不高，不建议使用气动螺丝刀。

安装后，建议使用 CIATIM-221 国标9433润滑剂或 VNII NP-207 国标19774额外保护紧固件免受腐蚀

模块拧紧程序：

1. 用两个对角螺栓松散地（非刚性地）固定模块。用手轻轻按下模块，轻轻地分配导热膏。
1. 用 $0.5 \text{ Nm} \pm 15\%$ 的力横向拧紧螺栓。
2. 保持至少30分钟。让导热膏扩散并填充空隙
3. 按相同顺序用3 ... 5 Nm 的力拧紧螺栓。

IGBT 模块用高硬度螺钉固定在冷却器上，应该使用扁平垫圈和锁紧垫圈。紧固螺钉的顺序如图22所示。安装时使用的螺钉不应随温度升高而变形（如黄铜）。这可能导致模块内部组件的额外应力和破裂。



图22、模块拧紧程序

模块的拆卸按相反顺序执行。

2.8.1 导热膏

对导热膏的要求：

- 导热膏不应含有固体夹杂物。这样可以避免表面变形；
- 导热膏必须在整个装置运行过程中保持其特性；
- 导热膏的最高温度不应低于负载下仪器的最高温度（温度裕量至少为10%）；
- 导热膏的工作寿命不应小于模块的工作寿命。

在使用导热膏之前，必须清洁和脱脂仪器和散热器表面。清洁时，建议使用无绒布，并戴上手套进行所有工作。不应让导热膏进入冷却器，因为进入螺纹孔的导热膏可以导致紧固扭矩不足。

导热膏层厚度可以使用特殊梳状物控制（"Wet film comb"，参见图23）。导热膏的厚度定义为最大“覆盖”（或“湿”）小齿的值与最小“未涂覆”（或“干”）小齿的值之间的平均值。



图23、用于测量导热膏层厚度的梳状物

2.8.2 连结总线

为了减小载流导体的寄生电感，最简单的解决方案是将它们彼此靠近地布置，由此补偿寄生电感。

为了防止电源开关过电压，切换高频大电流时，总线必须提供：

- 所有并联电路中的拓扑识别，用于静态和动态电流平衡；
- 源电流流动电路的最小电感。建议使用由绝缘体隔开的扁平双线总线；
- 阻力的最小值；
- 足够的横截面，以确保可接受的电流密度；
- 足够的绝缘电压。

使用总线连接模块时，必须考虑总线在被电流加热时的热膨胀，或者使用柔性总线。

理想的选择是使用多层总线。在多层电源总线中，层之间的电流分布均匀，上层和下层屏蔽内部电流，确保干扰处于低水平。

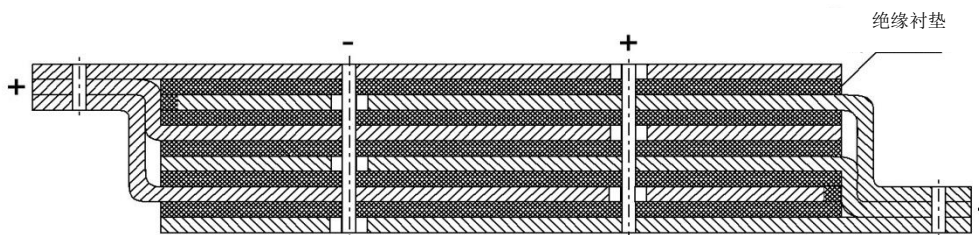


图24、多层总线。

本节中还重点提到了滤波电容，因为它们直接位于装置的电源总线上。

2.8.3 滤波电容的定位应与电源导线中的电流移动平行。这样可以减少由于“电流回路”面积减小引起的寄生电感。此外，如果用大小不足的电容器替换大电容器，这将进一步减小电流回路的面积。因此，仅由于滤波电容器的正确位置，可以将寄生电感减小大约6倍。

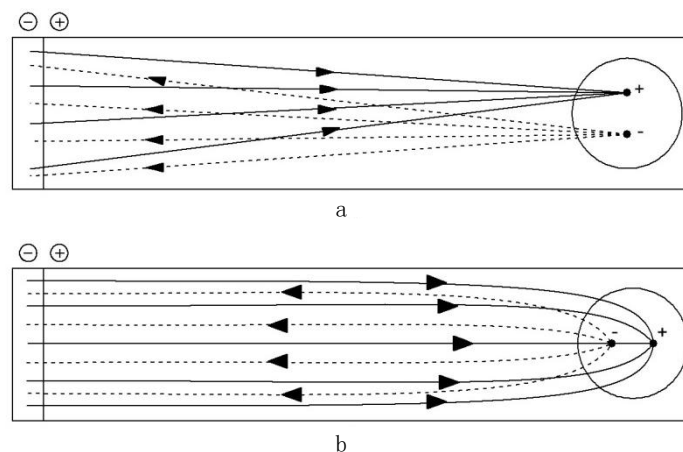


图25、电容器的位置垂直于电流的移动 - a，电容器引线的排列平行于电流的移动 - b。

2.8.4 机械影响和环境影响

模块的设计包含易碎的陶瓷部件，因此禁止执行下列操作：

- 为防止模块受到机械损坏，建议不要弯曲电源和控制端子，并对其施加大量机械负载；
- 禁止掉落模块并对其外壳和底座施加任何打击；
- 必须牢固地固定模块的引线，包括其与模块的连接点。
- 禁止在插入式连接上施加超过23 N 的力
- 禁止对电源端子施加扭矩效应：
 - 对于 MIAA 型外壳中的模块 – 2.5 ± 0.25 Nm；
 - 对于 MIFA 型外壳中的模块 – 2.0 ± 0.25 Nm。

为了模块正常操作，建议遵守以下条件（U 模块的气候修改，布置等级2，符合国标15150-69）：

- 对模块必须创造防止水分在外壳上凝结的条件；
- 必须保护模块免受直接潮湿；
- 应保护模块免受会促进引线和基体的腐蚀（酸，二氧化硫，氯气等蒸气等）的气体的影响。

附件1 IGBT 模块参数列表

符号	参数	参数说明
U_{CES}	集电极 - 发射极最大允许电压	给定集电极电流下集电极和发射极引脚之间的最大允许电压
I_C	集电极的最大允许直流电流	最大直流集电极电流
I_{CRM}	最大重复集电极脉冲电流	在脉冲模式下操作时集电极的脉冲电流值（重复脉冲）
t_{psc}	短路持续时间	IGBT 在负载中可能处于短路模式的最长时间
U_{GES}	栅极-发射极电压	栅极和发射极之间的最大电压发射极-集电极短路。
U_{RRM}	重复脉冲反向电压	最大瞬时反向电压，包括重复的，但不包括非重复冲击
I_F	正向电流	二极管的恒正向电流
I_{FRM}	重复正向脉冲电流	二极管的重复脉冲电流的最大值
RBSOA	关闭时的安全操作区域	IGBT 能够在不破坏的情况下关闭的集电极电流和集电极 - 发射极电压的区域
U_{CESat}	集电极 - 发射极饱和电压	在栅极规定的电压和 I_C 集电极规定的电流下集电极 - 发射极饱和电压（接通 IGBT 上的电压降）
$U_{GE(th)}$	栅极 - 发射极阈值电压	集电极电流达到规定的低值时的栅极 - 发射极电压（通道将开始打开，电流将流动）。
I_{CES}	集电极 - 发射极漏电流	在关闭状态下给定集电极-发射极电压下的集电极-发射极电流。
I_{GES}	栅极-发射极漏电流	栅极和发射极之间的漏电流发射极-集电极短路。
C_{ies}	输入电容	栅极和发射极之间的电容
C_{oes}	输出电容	集电极和发射极之间的电容
C_{res}	反向传输电容（米勒电容）	集电极和栅极之间的电容
Q_G	栅极电荷	为改变晶体管的状态从栅极需要提供/移除的全电荷。允许计算在一定时间内切换晶体管所需的栅极电流
R_{Gint}	栅极电阻	内部串联栅极电阻
$t_{d(on)}$	接通延迟时间	栅极 - 发射极电压达到规定的小值的时刻与 I_C 集电极电流达到规定的小值的时刻之间的时间间隔。
t_r	上升时间	I_C 集电极电流从指定的小值上升到指定的大值的时刻之间的时间间隔。
E_{on}	接通时能量损耗	瞬间耗散功率（集电极电流和集电极 - 发射极电压的乘积）的时间积分，从栅极 - 发射极电压达到最大值的10%的时刻到集电极 - 发射极电压达到规定的小值的时刻（例如，接通前的初始值的3%）
$t_{d(off)}$	关闭延迟时间	栅极 - 发射极电压（将 IGBT 保持在导通状态）下降到指定的大值，以及集电极电流下降到指定的大值时的时间间隔。
t_f	下降时间	I_C 集电极电流从指定的大值减小到指定的小值的时刻之间的时间间隔。
E_{off}	在一个循环中关闭时的能量耗散	瞬间耗散功率（集电极电流和集电极 - 发射极电压的乘积）的时间积分，从栅极 - 发射极电压达到最大值的90%的时刻到集电极电流达到规定的小值的时刻（例如，关闭前的初始值的3%）

R_{th}	过渡外壳热阻	表征从半导体晶体的最热区域到与冷却器相邻的模块基座外表面的不变热功率流时发生的温差。
U_F	二极管的恒定正向电压	在给定的恒定正向电流下正向电压的稳态值
t_{rr}	二极管反向恢复时间	从电流通过零值到反向电流（或其线性近似值）从最大脉冲值减小到达规定值的时刻，二极管从给定的正向电流到给定的反向电压的切换时间
I_{RRM}	二极管的重复脉冲反向电流	锁闭状态的二极管的脉冲反向电流的最高瞬时值，不包括二极管恢复期间的电流
Q_{rr}	反向恢复电荷	在反向恢复期间，流过二极管的阳极（阴极）的节点中的外部电路的电荷
E_{rec}	反向恢复期间的能量损耗	反向恢复瞬态过程中的二极管能量损耗
$U_{(TO)}$	二极管阈值电压	通过电流 - 电压特性的分段线性近似与电压轴的交叉获得的电压
r_T	二极管的电流 - 电压特性直线的动态阻力	二极管的电流 - 电压特性直线的分段线性近似的电阻值