

第10章 IGBT 模块并联应用

1. 稳态时的电流不均衡	10-2
2. 动态时的电流不均衡	10-6
3. 门极驱动电路	10-7
4. 并联时接线案例	10-8
5. 散热器	10-8

本章中对IGBT并联连接时的注意事项进行说明。

IGBT模块作为逆变电路使用时，会有为了增大通电流能力而对IGBT模块进行并列连接使用的情况。这种情况下，虽然对IGBT模块的并联数并没有特别的限制，随着设备体积的变大，需要考虑配线变长而导致风险增加（噪音以及浪涌电压的增加）。

IGBT并列连接的情况的基本注意点分为以下4点。

- (1) 稳态时的电流不均衡抑制
- (2) 动态时的电流不均衡抑制
- (3) 门极驱动电路
- (4) 严格遵守各水套内的水温，流量，压力的规格

1. 稳态时的电流不均衡

IGBT在导通状态下电流不均衡的原因主要有以下2种。

- (1) $V_{CE(sat)}$ 的不均性
- (2) 主电路配线电阻的不均性

1.1 $V_{CE(sat)}$ 的不均性造成电流的不均衡

因并列连接的IGBT的 $V_{CE(sat)}$ 的不均，造成输出特性的差异。由此在导通的稳态状态下会产生电流不均衡。如图10-1展示了不同的 $V_{CE(sat)}$ 的IGBT的输出特性。另外，图10-1是模块并联数为2时的图示。

图10-1中的 Q_1 和 Q_2 的输出特性可近似成以下公式。

$$V_{CEQ1} = V_{01} + r_1 \times I_{C1}$$

$$r_1 = V_1 / (I_{C1} - I_{C2})$$

$$V_{CEQ2} = V_{02} + r_2 \times I_{C2}$$

$$r_2 = V_2 / (I_{C1} - I_{C2})$$

因此， Q_1+Q_2 的并联连接电路中流过 $I_{ctotal}(=I_{C1}+I_{C2})$ 的集电极电流时 Q_1 和 Q_2 的电压必须一样，其中流过各IGBT的集电极电流可以通过以下公式求出。

$$I_{C1} = (V_{02} - V_{01} + r_2 \times I_{Ctotal}) / (r_1 + r_2)$$

$$I_{C2} = (V_{01} - V_{02} + r_1 \times I_{Ctotal}) / (r_1 + r_2)$$

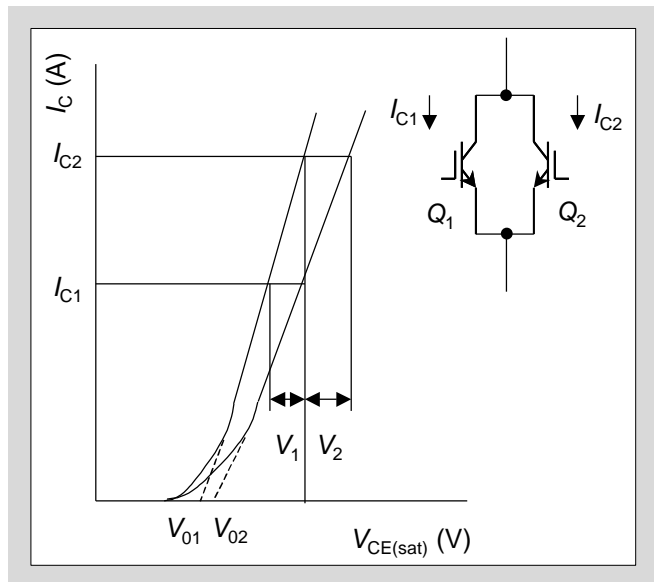


Fig. 10-1 $V_{CE(sat)}$ 的组合实例

假设上式中 $V_{01} = V_{02}$ ，对 Q_1 来说流过的电流是 Q_2 流过的电流的 r_2/r_1 倍。从图10-1可以知道，当 $r_2 > r_1$ 的时， Q_1 的分担到的电流会变大。像这样如果存在 $V_{CE(sat)}$ 的不均， $V_{CE(sat)}$ 低的IGBT分担到的电流会变大。

因此，为了得到良好的电流分配，需要将 $V_{CE(sat)}$ 不均性小的元件组合起来。另外，使用同一个产品批次号的IGBT模块的组合会使 $V_{CE(sat)}$ 的不均性最小。这是为了使由于工艺原因产生的影响最小化。因此进行并列连接时，推荐使用相同产品批次号的模块。

1.2 因主电路配线的阻抗不均衡导致的电流不均衡发生

图10-2中展现了2并联时的主电路配线电阻部分的等效电路图。与集电极侧的电阻部分比较，发射极侧的电阻部分上的这种影响更大。因此，图10-2对集电极侧的电阻部分予以省略后考虑。

如图10-2所示，发射极侧的主电路配线有电阻时，由于IGBT的输出特性斜率变得等效性平缓，在相同的 V_{CE} 下与无电阻的情况相比较，集电极电流减少。同时该电阻越大，输出特性的倾向趋势越平缓，集电极电流越小。

图10-2中假设 $R_{E1} > R_{E2}$ ，则 $I_{C1} < I_{C2}$ ，电流不均衡会发生。

同时该部分（ R_{E1} 、 R_{E2} ）由于有集电极电流流过，产生电位差，实际的门极-发射极间的电压变小（ $V_{GE} = V_G - V_E$ ），IGBT的输出特性产生变化，集电极电流减少。

像这样发射极的阻抗的不均会导致IGBT上施加的门极-发射极间电压变小以及电流不均衡等情况的发生。因此，为了降低这种的影响，发射极侧的配线要尽可能的短，并且分别均等化。

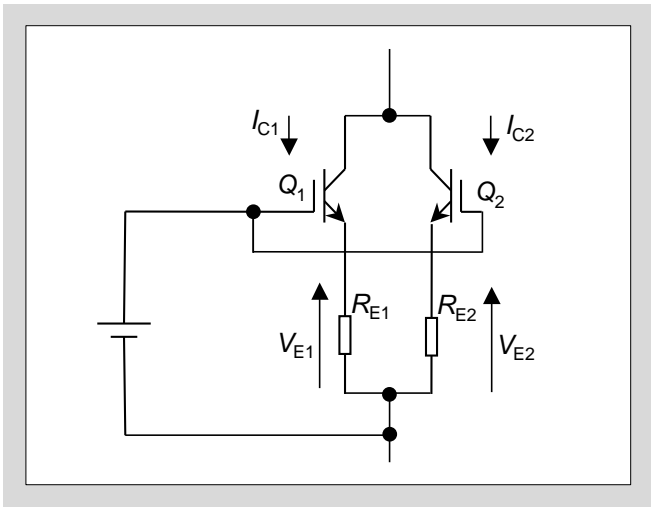


Fig. 10-2 主电路配线电阻部分等效电路图

1.3 输出特性的结温特性和电流不均衡

输出特性的温度特性会随着其变化对电流不均衡有很大的影响。这里把 $V_{CE(sat)}$ 随着结温的上升而变高定义为正温度特性，反之变低则定义为负温度特性。图10-3中表示正负温度特性的100A产品的输出特性。输出特性的温度特性是正的情况下，结温如果上升相同 V_{CE} 下集电极电流会减小。

正如本章节1.1所说的并列连接时 $V_{CE(sat)}$ 小的IGBT会分担到更大的电流。因此，稳态损耗是 $V_{CE(sat)}$ 小的较大，结温也比另一方上升更多。由此正温度特性的IGBT会因为温度的上升导致与另一方 $V_{CE(sat)}$ 大的IGBT取得平衡。负温度特性的IGBT的电流不均衡性则会向相反的方向变化，因此并联运行时对电流分担必须做好充分的设计。

像这样输出特性是正温度特性的IGBT相比负温度特性更加适合并联运行，因此推荐并列连接时选用温度特性是正的IGBT。关于输出特性的温度关系的详情，请参考IGBT模块的规格书。

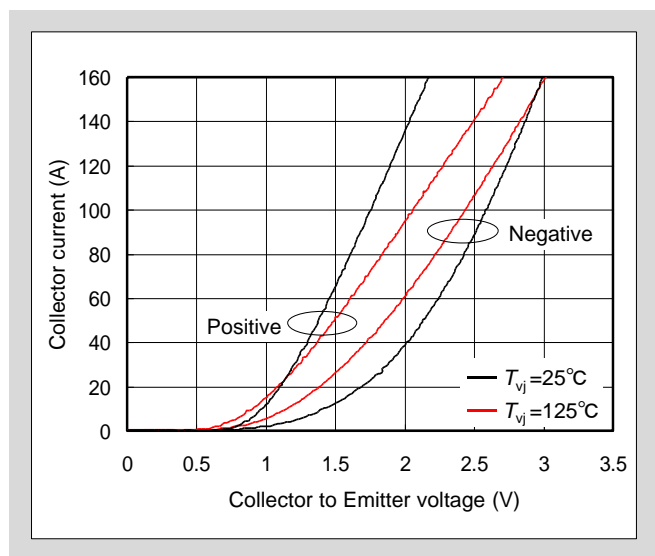


Fig. 10-3 输出特性比较

1.4 $V_{CE(sat)}$ 的差异和电流的不均率

IGBT的并联时产生电流分配的比例称之为电流不均率，这是由IGBT自身的 $V_{CE(sat)}$ 的差异以及输出特性的结温关系来决定的。

图10-4展示了典型的 $V_{CE(sat)}$ 的差异和电流不均率的关系，以及相同IGBT系列在2并联中的电流不均率。从图10-4可以看出， $V_{CE(sat)}$ 的差异越大，电流不均率也越大，因此并联使用时，需要将 $V_{CE(sat)}$ 差异小的元件组合起来使用。

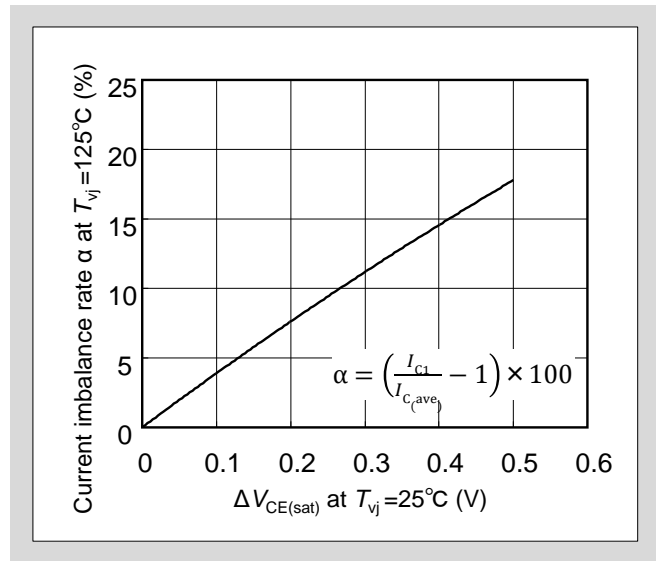


Fig. 10-4 $V_{CE(sat)}$ 的差异和电流不均率

*图10-4是某一IGBT系列的范例。实际计算并列连接的最大电流(ΣI)时，请参考各IGBT系列的技术资料。

1.5 多个IGBT并列连接时的降额

使用IGBT元件并联时需要考虑到电流不均率，需要降低并联连接时的通电能力总和。

当n个的元件进行并联时，假设电流集中流过一个 $V_{CE(sat)}$ 最小模块时的情况为最坏工作情况。

即：

- 一个模块的 $V_{CE(sat)}$ 是最小值
- 剩余模块的 $V_{CE(sat)}$ 都是最大值

那么：

$$\sum I = I_{C(max)} \left[1 + (n - 1) \frac{\left(1 - \frac{\alpha}{100}\right)}{\left(1 + \frac{\alpha}{100}\right)} \right] \quad \alpha = \left(\frac{I_{C1}}{I_{C(ave)}} - 1 \right) \times 100$$

上式中电流不均率 α 是根据图10-1中2并联时电流值 I_{C1} 和平均电流值 $I_{C(ave)} = (I_{C1} + I_{C2})/2$ 中求出的。

另外 $I_{C(max)}$ 是一个元件的额定电流， ΣI 表示并联时的最大电流。可是在 ΣI 情况下并联的每个元件必须满足规格书中记载的RBSOA，发生损耗而上升的结温必须要在 T_{vjmax} 以下。特别需要注意的是发生损耗而导致结温的上升根据使用条件（开关频率，驱动条件，散热条件，缓冲条件等）的不同而有差异。

例如， $\alpha=15\%$ 、 $I_{C(max)}=200\text{A}$ 、 $n=4$ 时，可以计算出 $\Sigma I=643.4$ ，降额率19.6%。设计时，并联连接的全电流不要超过该 ΣI 。请注意即使 $n=4$ ，也不是单纯的 $\Sigma I=200 \times 4=800\text{A}$ 。像这样并联时对于的全电流 ΣI 为电流总和（ $n \times I_{C(max)}$ ）时需要进行降额。

图10-5时IGBT的电流不均率 $\alpha=15\%$ 时的降额率，从该图可以知道，随着并联数的增加，降额率也会增大。因此，进行并列连接时对于其并联数需进行其相对应的降额。另外请注意，降额率会因电流不均率而产生差异。

本例展现的降额率为上述的电流不均率求出的参考值，请根据实际运行来验证电流不均率后再决定降额率。

如果有因故障或者保养需要进行替换并联IGBT模块的情况，建议将所有的并联模块全部进行替换。替换时，如之前所述建议使用相同产品序列号的模块进行并联。

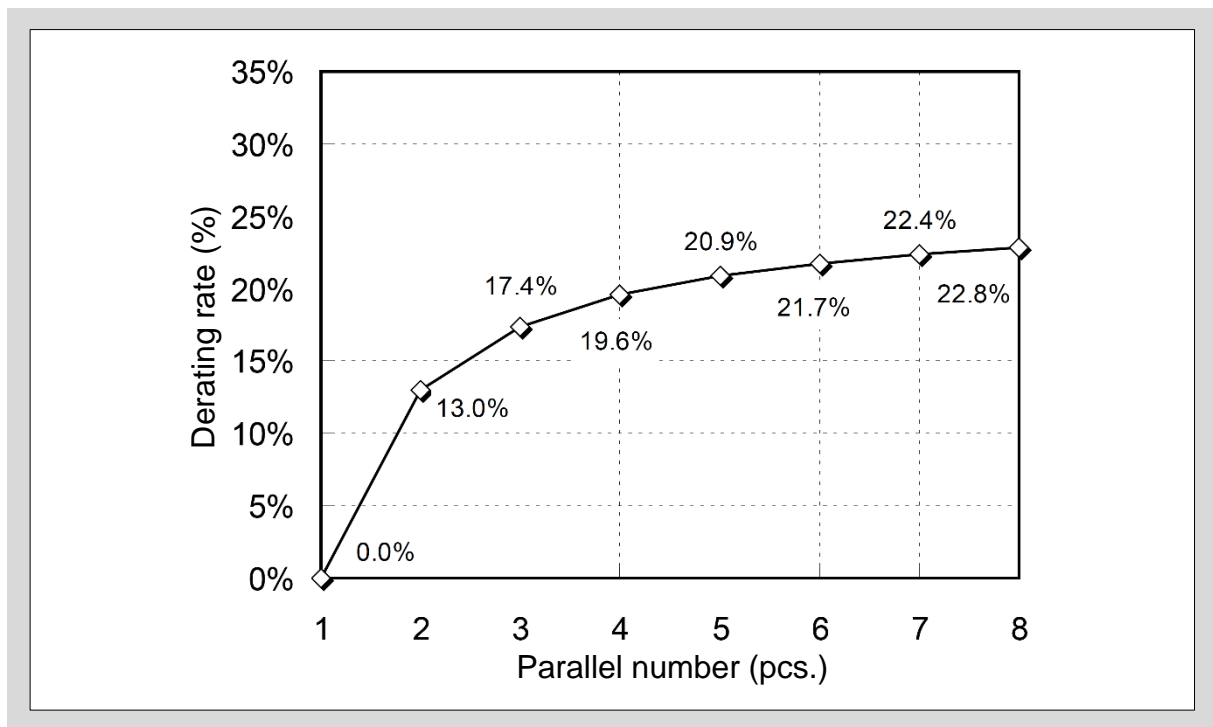


Fig. 10-5 并联连接数以及降额率关系

2. 动态时的电流不均衡

动态时产生电流不均衡的原因，主要分为以下2个。

- (1) 元件特性的差异
- (2) 主电路配线电感的差异

2.1 元件特性的差异

IGBT在开关动作时，特别是关断之前的电流不均衡基本由导通状态的电流不均衡来决定。由此如之前所述，通过抑制导通状态时的电流不均衡，同时也能抑制动态时的电流不均衡。

2.2 主电路配线电感的差异

如有主电路配线的电感存在不均衡的情况，会产生并列连接的原件动态时的电流分配不均衡。

图10-6展示了考虑主电路连线电感的等价电路。流过IGBT₁和IGBT₂的导通电流为 I_{C1} 、 I_{C2} 时，这些电流分配会被各个IGBT的配线电感 $L_{C1}+L_{E1}$ 和 $L_{C2}+L_{E2}$ 的差所影响，基本上以电感比来确定。因此，为了缓和动态时的电流不均衡，确保连线构造的对称性时非常重要的。

然而，即使实现了 $L_{C1}+L_{E1}=L_{C2}+L_{E2}$ 这样理想的配线电感，如果 L_{E1} 和 L_{E2} 的配线电感不均衡，开通时电流变化率(di/dt)导致的感应电压差，使外加到并联的各个IGBT的门极电压收到该电压差的影响，加剧电流不均衡。因此，并联时应尽可能按照 $L_{C1}=L_{C2}$ 、 $L_{E1}=L_{E2}$ 的标准进行连线，确保结构对称。

另外，主电路配线的电感大会使IGBT关断时的尖峰电压变大，配线电感要尽可能的减小。

因此并联的IGBT模块的安置要尽可能的紧靠，配线也要尽可能的均等。IGBT模块如果有辅助发射极的情况，为了减小发射极侧主电路电感的影响，推荐使用辅助发射极来进行门极驱动。

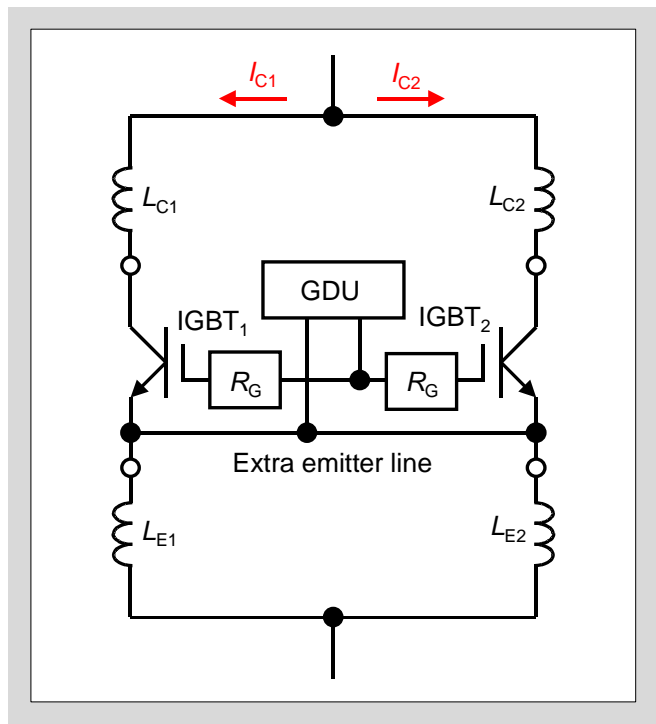


Fig. 10-6 考虑主电路配线电感的并联等价电路

3. 门极驱动电路

各IGBT使用不同的门极驱动电路(GDU)驱动时,各电路的延迟时间的差异而导致开关动作的时间存在着差异。因此,IGBT模块并联使用时,推荐使用一个IGBT的门极驱动电路(GDU)进行驱动。这样的构造可以降低因门极驱动电路导致的开关差异,减少IGBT并联动作时的不良影响,但是使用同一驱动电路来驱动并联模块时存在着因驱动能力不足而导致的开关速度降低,以及门极控制失效等情况发生,因此门极驱动电路请根据并联数选择合适的驱动功率。

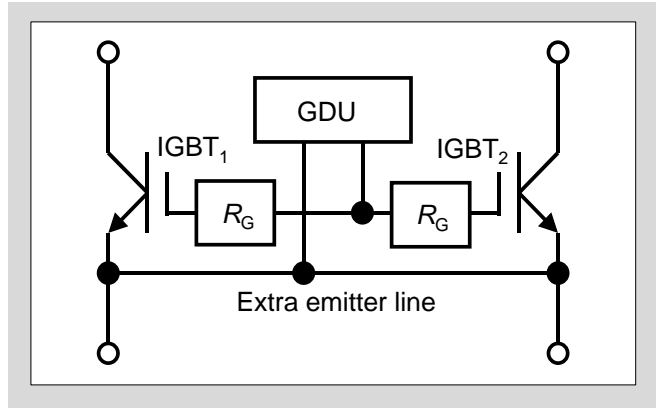


Fig. 10-7 门极驱动电路连接

另外,用1个门极驱动电路来驱动时,其配线电感与IGBT的输入能力可能会使门极电压在上升时产生寄生振荡的情况,因此IGBT的门极电阻要分别连接在各IGBT门极上(参考图10-7)。还有,为了抑制这种振荡,可以在发射极上增加电阻,但是因这个电阻而产生的电压下降可能会引起元件的误动作,所以请在充分验证后再使用。

门极驱动电路的发射极配线不是在相同位置连接时,会存在图10-6所示 L_{E1} 和 L_{E2} 不均衡的情况发生,并联元件的过渡电流不均衡发生,通常,IGBT模块会配有门极驱动电路用的辅助发射极端子,元件内部的驱动配线是均等的。因此使用该端子进行门极驱动的话,可以抑制元件内部的过渡电流不均衡。如果IGBT模块配有辅助发射极端子时,推荐使用该端子进行门极驱动。

然而使用辅助发射极端子进行门极驱动时,门极驱动电路至各模块的发射极配线过长或者不均等,也会引起电流不均衡。因此并联各模块的门极驱动电路的配线应尽可能的短以及均等化。保证门极配线双绞成一体,尽可能远离主电路配线,避免和主电路配线平行而引起的互感效应(特别是集电极电流)。

4. 并列连接时的配线例

如之前所提到的，IGBT模块的并联需要做好充分的注意。图10-8展示了大容量2in1元件构成的并联等效电路图。从图10-8可以看到，并联的IGBT（IGBT₁和IGBT₂）的各种连线都是对称的。像这样的连线，可以实现很好的电流分配。

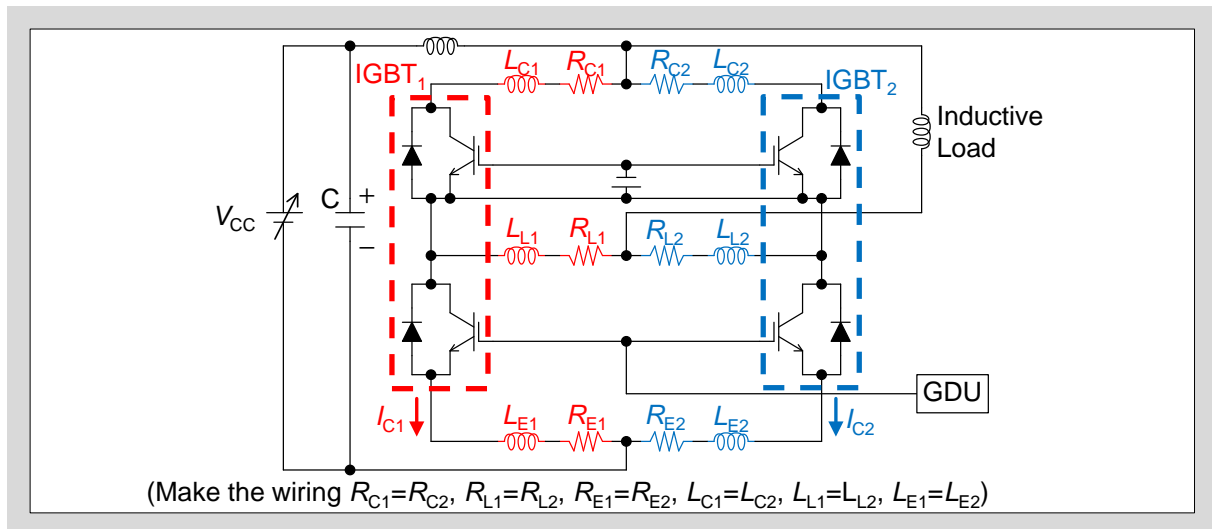


Fig. 10-8 2in1 元件构成并联时的等效电路

5. 散热器

本IGBT模块是附带水套的散热器一体化模块。因此，IGBT模块并联使用时，需要严格遵守各个水套内的水温，流量，压力的规格，确认各IGBT模块的结温没有问题后再进行使用。