

# MOSFET 模块使用指南

装载 Trench (沟槽) MOSFET 硅片

07A/2A/3A 系列

**三菱电机功率MOSFET模块**  
·大容量 ·低电压 ·低损耗 ·高可靠性



Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor



性能特点	应用领域
<ul style="list-style-type: none"><li>• 超低损耗：采用沟槽型MOSFET硅片，具有低通态压降</li><li>• 方便安装：栅极、源极信号接线端子采用接插件型</li><li>• 电路拓扑：全桥逆变，可灵活使用实现大容量化、斩波电路等。</li><li>• 电流等级：100A/200A/300A</li><li>• 电压等级：75V/100V/150V</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• 电动叉车等低压变频领域</li></ul>

**三菱电机 (上海) 有限公司**  
地址：上海市长宁区兴文路8号上海万都中心29楼  
电话：021-52082030 传真：021-52081502  
Email: lgblpm@mesh.china.mesp.com

**三菱电机 (香港) 有限公司**  
地址：香港北角电气道169号安利保险中心33字楼  
电话：852-25100555 传真：852-25109803  
http://www.mehk.com



**三菱电机**  
MITSUBISHI ELECTRIC  
Changes for the Better

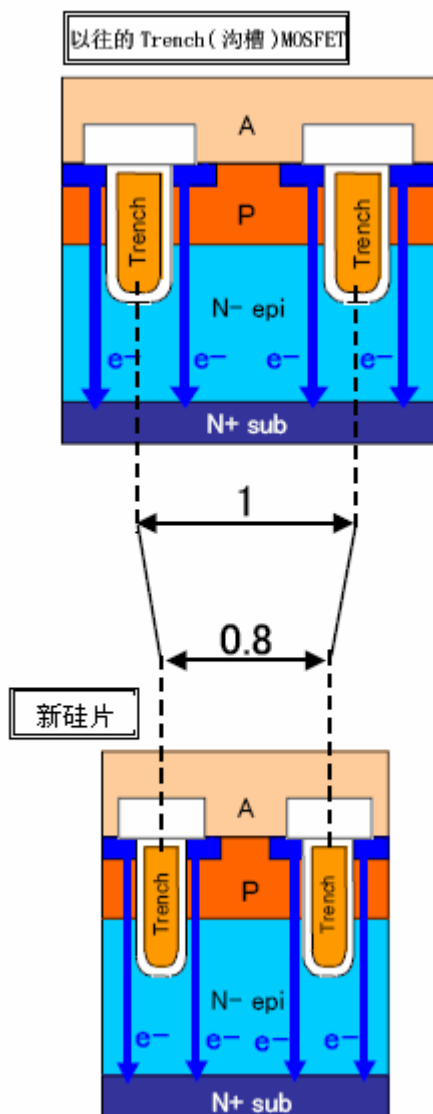
[www.MitsubishiElectric-mesh.com](http://www.MitsubishiElectric-mesh.com)  
[www.mitsubishichips.com](http://www.mitsubishichips.com)

## 目 录

MOSFET 模块的特点	3
品种一览表	4
术语说明	5
型号的命名方法	7
构造	8
关于安全规格 (UL)	9
如何正确并安全使用功率模块	11
功率模块的安裝配置	13
1. 电容器的安裝配置	
2. 安裝上的注意事项	
3. 热阻考虑	14
4. 导热硅脂的涂抹方法 (例)	16
测试电路和波形	17
功率模块的可靠性	18
1. 前言	
2. 半导体器件的可靠性概论	
2.2 电力用半导体功率模块的失效原因	19
2.3 电力用半导体功率模块的热疲劳现象	20
3. 关于品质保证活动	23
4. 可靠性测试	25
5. 失效分析	26
6. 降额及可靠性的预测	
7. 结论	
MOSFET 模块的使用方法	27
1. MOSFET 模块的特性	
2. 防静电破坏的注意事项	
3. 关于降额	
4. 实际使用中的注意事项	28
5. 开关损耗	35
6. 并联	37
7. 功率损耗和结温	39
平均功耗简易计算式	43
安全设计注意事项	45
使用此手册时的注意事项	

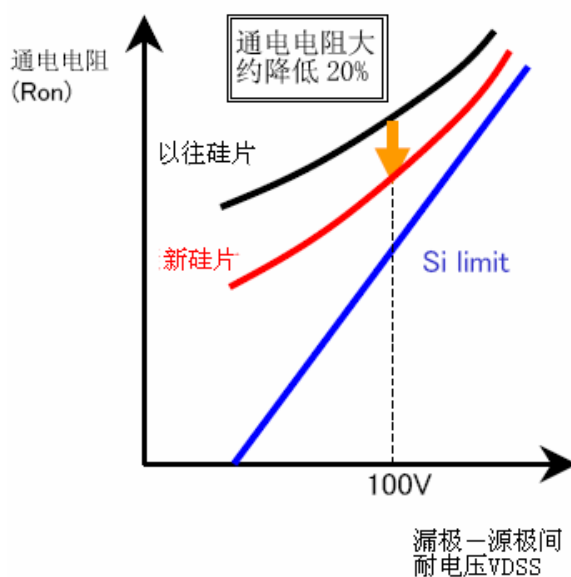
## MOSFET 模块的优点

## 1. 装载新的 Trench (沟槽) MOSFET 硅片



- 与以往的功率 MOSFET 相比，导通电阻大约降低了 20%
- 采用  $0.35\mu\text{m}$  细微化技术。
- 外延层的最优化伴随着元胞的狭窄化，提高了  $V_{\text{DSS}}$ ，降低了与  $V_{\text{DSS}}$  呈相反关系的导电电阻。
- MOS 沟道的浅化  
通过 MOS 沟道的浅化降低了沟道电阻。

注：以前没有装载 Trench (沟槽) MOSFET 硅片的模块产品。



## 品种一览表

### ■MOSFET 模块

FM200TU-07A

FM200TU-2A

FM200TU-3A

FM400TU-07A

FM400TU-2A

FM400TU-3A

FM600TU-07A

FM600TU-2A

FM600TU-3A

### 关联产品

■混合集成电路（谏早电子株式会社制造，咨询网址：<http://www.idc-com.co.jp/>）

VLA513-01

术语说明  
一般 1

项目	说明
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor FET
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
FWDi	Free Wheeling Diode
IPM	Intelligent Power Module
t <sub>dead</sub>	死区时间
IPM (电动机)	Interior Permanent Magnet Motor
PC	Programable Controller
PLC	Programable Logic Controller
PC	Opto-coupler
CMR	Common Mode Noise Reduction
CM <sub>H</sub>	可以维持既定的高电平, 输入输出之间共模电压的最大上升率。
CM <sub>L</sub>	可以维持既定的低电平, 输入输出之间共模电压的最大上升率。
DBC®	Direct Bond Copper
HIC	Hybrid Integrated Circuit
UL	Underwriters Laboratories
RoHS	Rstriction of Hazardous Substances

## 一般 2

符号	项目	定义或说明
T <sub>a</sub>	环境温度	以自冷或风冷的方式使用的情况下不受发热体的影响的点的空气温度。
T <sub>c</sub>	外壳温度	模块的外壳 (底板) 上规定点的温度。
T <sub>f</sub>	散热器温度	散热器 (散热器或散热片)。
T <sub>c</sub> '	外壳温度	与 T <sub>c</sub> 规定点不同的点定义的温度。

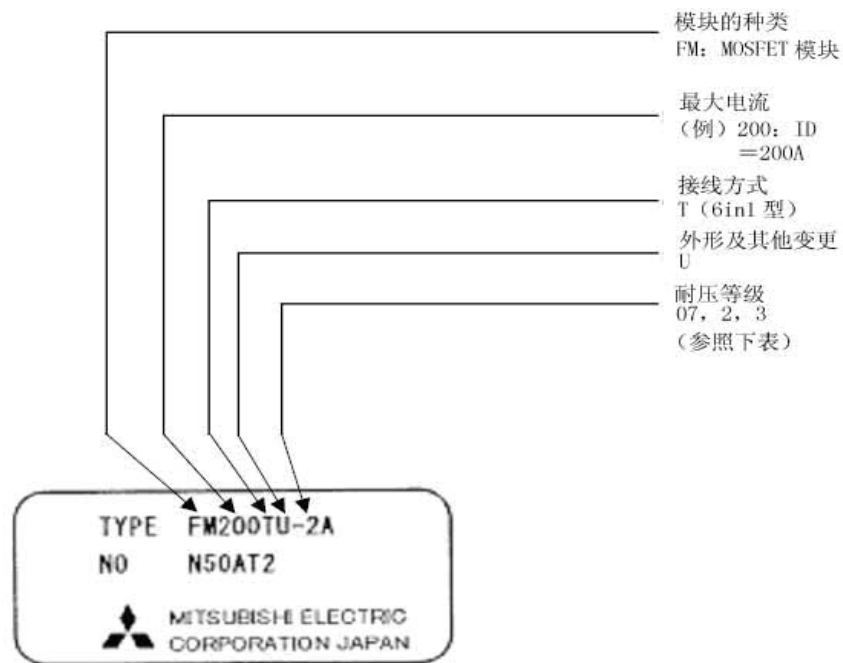
## 绝对最大额定

符号	项目	定义或说明
V <sub>DSS</sub>	漏极源极间电压	在额定结温范围内在栅源极短路的状态下, 漏源极间允许短时间施加的最高电压。
V <sub>GSS</sub>	栅源极间电压	在额定结温范围内在漏源极短路的状态下, 栅源极间允许短时间施加的最高电压。
I <sub>D</sub>	漏极电流	在额定结温范围内, 漏源极间允许连续流过的最大电流。
I <sub>DM</sub>	漏极电流	在指定的外壳温度下, 漏源极间允许短时间流过的最大电流。
I <sub>S</sub>	源极电流	在内置的反向续流二极管的额定结温范围内, 允许从源极流向漏极的最大电流。
I <sub>SM</sub>	源极电流	在指定的外壳温度下, 允许内置的反向续流二极管短时间从源极流向漏极的最大电流。
P <sub>D</sub>	漏极损耗	在指定的外壳温度下, 模块允许的最大功耗。
T <sub>ch</sub>	沟道温度	硅片能够允许的温度范围。
T <sub>stg</sub>	存放温度	在不通电进行存放的情况下允许的环境最高温度与最低温度。
V <sub>iso</sub>	绝缘耐压	在主端子全部短路的状态下, 在端子与底板之间允许施加的最高电压。
-	安装扭矩	端子螺钉、安装螺钉的最大允许扭矩。

## 电气特性

符号	项目	定义或说明
$I_{DSS}$	漏极漏电流	在栅源极短路的状态下,在漏极源极间输入了规定的电压之后流动的漏极电流。
$V_{GS(th)}$	栅极阈值电压	在规定的条件下,通过规定的漏极电流所必需的栅源极间电压。
$I_{GSS}$	栅极漏电流	在漏源极短路的状态下,在栅源极间输入了规定的电压之后流过的栅极电流。
$V_{DS(ON)}$	漏极-源极饱和电压	按照规定的条件通过规定的漏极电流之后的漏极源极间的电压。
$C_{iss}$	小信号输入电容	按照规定的条件将漏极源极间进行了交流短路的情况下从栅源极间测得的模块内部的电容。
$C_{oss}$	小信号输出电容	按照规定的条件将栅源极间进行了交流短路的情况下从漏极源极间测得的模块内部的电容。
$C_{rss}$	小信号反馈电容	按照规定的条件将漏极源极间进行了交流短路的情况下从漏极源极端子间测得的模块内部的电容。
$t_{d(on)}$	开通延迟时间	开通时,从栅极电压的 0%到漏极电流上升到最终值的 10%所需要的时间。
$t_r$	开通上升时间	开通时,漏极电流从最终值的 10%上升到 90%所需要的时间。
$t_{d(off)}$	关断延迟时间	关断时,从栅极电压下降到 90%到漏极电流下降到 90%所需要的时间。
$t_f$	关断下降时间	关断时,从初始的漏极电流下降到 90%到下降到 10%所需要的时间。
$E_{on}$	开通损耗	开通时,从漏极电流上升到最终值的 10%起,至漏极-源极电压下降到关断时的 10%止,漏极电流与漏极-源极电压的积的时间积分值。
$E_{off}$	关断损耗	关断时,从漏极-源极电压上升到最终值的 10%起,至漏极电流下降到导通时的 2%止,漏极电流与漏极-源极电压的积的时间积分值。
$t_{rr}$	反向恢复时间	在规定的条件下,内置的反向续流二极管的电流从正向切换到反向时,反向恢复电流流动的时间。
$Q_{rr}$	反向恢复电荷	在规定的条件下,内置的反向续流二极管的电流从正向切换到反向时,被蓄积在模块内部的电荷。即反向恢复电流的时间积分。
$E_{rr}$	反向恢复损耗	内置的反向续流二极管恢复时的反向恢复电流与漏极-源极电压的积的时间积分值。
$V_{SD}$	源极-漏极电压	内置的反向续流二极管流过规定电流产生的后降。
$R_{th}$	热阻	硅片消耗功率并达到热平衡状态时,消耗单位功率导致结温相对于外部指定点的温度上升的值
$R_{th(ch-c)}$	热阻	从硅片到底板表面之间的热阻。
$R_{th(c-f)}$	热阻	从模块底板表面到散热器之间的热阻。
$R_G$	外接栅极电阻	连接在模块与驱动电路之间的栅极电阻的允许范围。
$T_a$	环境温度	使用自冷或风冷的情况下不受发热体的影响的环境温度。
$T_c$	外壳温度	模块的外壳(底板)上规定点的温度。
$T_c'$	外壳温度	与 $T_c$ 规定点不同的点定义的温度。

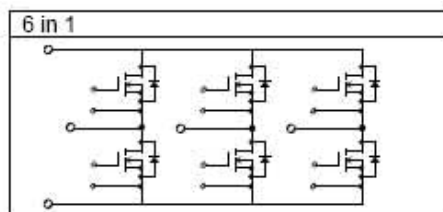
## 型号的命名方法



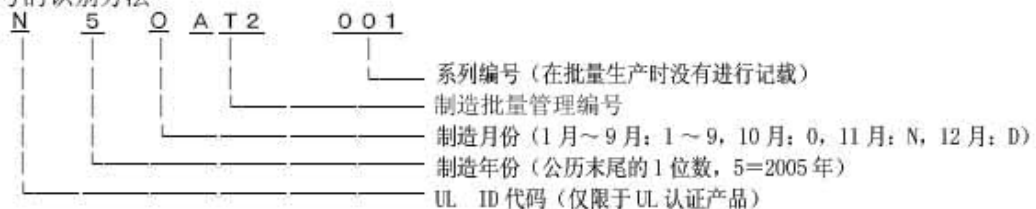
## 耐压等级

耐压等级	VDSS (V)	推荐电源 (V)
07	75	~48
2	100	~48
3	150	~96

接线: 6in1 没有在铭牌上面标注

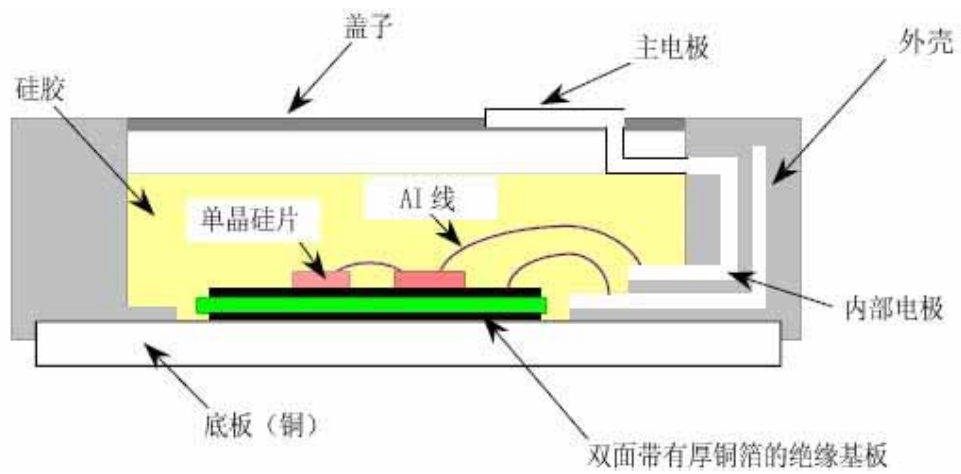


## 批号的识别方法

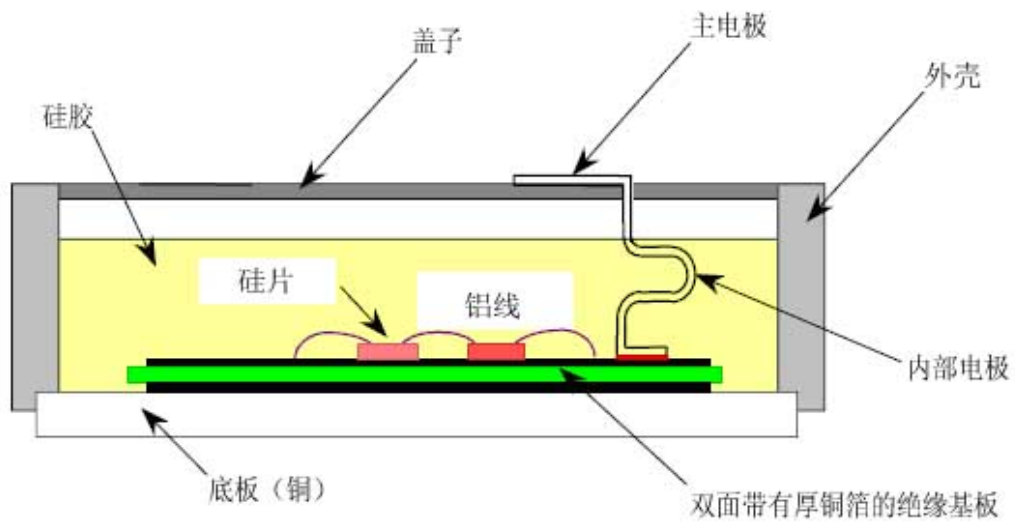


## 构造

## MOSFET



## 旧产品



## 关于安全规格（UL）

三菱功率模块通过 UL1557 认证。（文件号 E80276）

认证的型号名称，请在 UL 的主页上面进行确认。

（黄卡 E80276 目前尚未发行）

1. 点击下面的认证产品检索页面（2004.9.21 至今）的 **UL File Number**，在 UL File No 栏中输入卡片编号 E80276，然后点击 **SEARCH** 按钮。

<http://database.ul.com/cgi-bin/XYV/template/LISEXT/1FRAME/index.htm>

2. 由于显示下面的检索结果画面，所以如果点击 Link to File 栏中的 QQQX2.E80276，认证产品的一览表（参照次页）就会显示出来。

Company Name	Category Name	Link to File
MITSUBISHI ELECTRIC CORP SEMICONDUCTOR DIV	Power Switching Semiconductors - Component	<a href="#">QQQX2.E80276</a>

## 3. 认证产品一览表（部分）

Power Switching Semiconductors - Component	
Guide Information	
MITSUBISHI ELECTRIC CORP SEMICONDUCTOR DIV MITSUBISHI DENKI BLDG MARUNOUCHI TOKYO 100-8310, JAPAN	E80276
Diodes, Type RM or SR followed by 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400 or 500, followed by C, C1A, C1F, C1Z, C2Z, CA, CF, CZ, D2F, DA, DF, DZ, HA, HC, TA, TB, TC, TPM or UZ, followed by 2H, 5H, 6S, 10F, 12, 12F, 12S, 16, 16F, 20, 20F, 20S, 24, 24F, 24S, 40, H or M.	
Types RM10TB-H, -TB-M, RM15TB-H, -TB-M, -TPM-2H, RM20TPM-2H, -TPM-24, -TPM-H, -TPM-M, RM30TB-H, -TB-M, -TPM-H, -TPM-M.	
Power switching semi-conductors, Cat. Nos. BCR30GM; Types A, B, C.	
Type CM followed by 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, or 1000, followed by AD00 thru AD63, DY, E3Y, HA, LD, LDL, MD, MDL, MD1, MD1L, MD3 or MDC, followed by -12H, -24H, -28H or -28K.	
Type CM followed by 15, 20, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, or 1000, 1200, followed by DK, DY, DY1, E3Y, HA, HA1, HB, HK, TF or TX, followed by -12, -12E, -12G, -12H, -12HE, -20, -24, -24E, -24G, -24H, -24J, -28 or -28H.	


## 4. 型号名称的读取方法

FM200TU-3A 的情况下，从四角的方框中的 Type FM Followed by 200, 400, ...-07A, 2A 或 3A 中出现 FM, 200, TU, -3A 的组合。


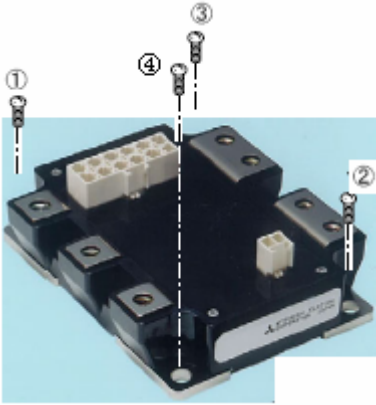
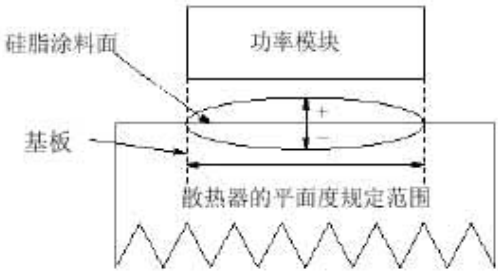
Power-switching Semiconductors - Component	
See General Information for Power-switching Semiconductors - Component	
MITSUBISHI ELECTRIC CORP SEMICONDUCTOR DIV MITSUBISHI DENKI BLDG MARUNOUCHI TOKYO, 100-8310 JAPAN	E80276
Diodes, Type RM or SR followed by 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400 or 500, followed by C, C1A, C1F, C1Z, C2Z, CA, CF, CZ, D2F, DA, DF, DZ, HA, HC, TA, TB, TC, TPM or UZ, followed by 2H, 5H, 6S, 10F, 12, 12F, 12S, 16, 16F, 20, 20F, 20S, 24, 24F, 24S, 40, H or M.	
Types RM10TB-H, -TB-M, RM15TB-H, -TB-M, -TPM-2H, RM20TPM-2H, -TPM-24, -TPM-H, -TPM-M, RM30TB-H, -TB-M, -TPM-H, -TPM-M.	
Power switching semi-conductors, Cat. Nos. BCR30GM; Types A, B, C.	
Type CM followed by 10, 15, 20, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, or 1000, followed by AD00 thru AD63, DY, E3Y, HA, LD, LDL, MD, MDL, MD1, MD1L, MD3 or MDC, followed by -12H, -24H, -28H or -28K.	
Type CM followed by 15, 20, 25, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, or 1000, 1200, followed by DK, DY, DY1, E3Y, HA, HA1, HB, HK, TF or TX, followed by -12, -12E, -12G, -12H, -12HE, -20, -24, -24E, -24G, -24H, -24J, -28 or -28H.	
Type CM followed by -10, 15, 25, 40, 50, 75, 100, 110, 150, 165, 200, 300, 400, 450, 600, 800, 900 or 1400, followed by BU, BU1, DU, DUM, DUR, DUS, DY, E2U, EU2A, EC2U, E3U, E3UA, ECSU, HU, HUA, HUE, HUS, RU, TJ, TJA, TU, YE4, YE2N, YE2P, YE4 or YE13, followed by -5F, -12, -12F, -12H, -12NF, -12NFA, -12NFH, -24, -24A, -24F, -24NF, -24NFH or -24H.	
Type FM followed by 15, 20 or 30, followed by BF or TF, followed by -5, -6, -9, -9S, -10 or -10S.	
Type FM followed by 30, 50, 75 or 100, followed by DW, DY, E2Y, E3Y, HA or HY, followed by -1, -9, -9S, -10 or -10S.	
Type CM followed by 40, 50, 75, 100, 150 or 200, followed by RL, TL or VE13, followed by -12F, -12H, -12NF, -12NFB or -24NF.	
Type FM followed by 200, 400 or 600, followed by TU, followed by -07A, -2A or -3A.	

如何正确并安全使用功率模块

根据不同的使用条件（电气、机械性的应力、使用方法等），功率模块有时会受到损坏。为了保证您能够安全地使用本公司的功率模块，请您遵守下列注意事项，正确使用。

	 注意
运输及搬运方法	<p>(1) 在运输中请按照正确的方向放置包装箱。如果施加不自然的外力，如倒放、竖放，就会造成电极端子的变形或树脂盒的损坏。</p> <p>(2) 如果抛掷或坠落，就会造成模块的损坏。</p> <p>(3) 如果潮湿，在使用时就会发生故障。在雨雪天气中进行运输的时候请采取措施防止潮湿。</p>
存放方法	<p>存放本产品的场所的温度及湿度比较理想的是 5-35℃，45-75% 的常温常湿范围内，如果在过于偏离这样的温度和湿度的环境下，那么模块的性能和可靠性就会降低。</p>
长期存放	<p>如果长期（超过 1 年）存放本产品，请采取除湿措施。另外，在经过长期存放之后，在使用的时候请确认外观无损伤、污损及生锈等变化。</p>
使用环境	<p>在直接附着水或者有机溶剂的场所、产生腐蚀性气体的场所或者有爆炸性气体、粉尘的等的场所使用可能引发重大事故，因此请务必避开。</p>
阻燃性能说明	<p>虽然在填充环氧树脂及外壳材料中使用的是 UL 标准的 94-V0 认证产品，但并非绝对不会燃烧。</p>
防静电措施	<p>在功率模块产品中，对于具有 MOS 栅构造的产品请务必遵守下列要求，以防止静电所造成的破坏。</p> <p>(1) 对于静电平衡的注意事项</p> <p>如果在人体或包装材料上面带有的静电或栅源极之间输入过高的电压（超过±20V），那么模块就有可能损坏。预防静电的基本措施中比较重要的是，只要存在产生静电的可能性就要进行控制，以及迅速放掉带电的电荷。</p> <p>① 搬运和存放时请勿使用容易带静电的容器。</p> <p>② 绝对不要用手在端子之间触摸。</p> <p>③ 进行安装的时候，请将使用的设备或人体接地之后再进行作业。另外，我们推荐作业台的表面及作业台周围的地板要铺上具有导电性能的垫子，进行接地处理。</p> <p>④ 如果安装了模块的印刷电路板上栅源极间处于开路状态，那么印刷电路板上带有的静电就会造成破坏，所以必须注意。</p> <p>⑤ 在使用焊烙铁的情况下，请将焊头接地。</p> <p>(2) 栅源极间开路时的注意事项</p> <p>① 在栅源极间开路的状态下，请勿向漏极源极间输入电压。</p> <p>② 如果要拆卸模块，拆卸之前请将栅源极短路。</p>

A

	 注意
安装方法	<p>将模块往散热器等上面安装的时候，如果一边安装过紧，那么应力就会施加在模块内用于绝缘的陶瓷基板或硅片上面，从而造成模块的损坏或性能降低。图 1 中对紧固的顺序进行举例说明。</p> <p>(a) 4 点紧固模块</p> <p>预拧紧 ①→②→③→④</p> <p>最后拧紧 ④→③→②→①</p>  <p>图 1 安装螺钉的紧固顺序</p> <p>*: 请将预拧紧的紧固力矩设定为最大额定的 20-30%。</p> <p>为了最大限度地获得散热效果，需要最大限度地扩大接触面积，并且将热阻设置到最低值。</p> <p>在模块的安装面（参照图 2）请将散热器的平整度（翘曲、凹凸）设置为 <math>-100\mu\text{m}</math>~<math>+100\mu\text{m}</math>。另外，请将表面精加工设置在 <math>Rz12</math> 以内。</p> <p>请在模块与散热器的接触面上面均匀地涂抹一层 <math>100\mu\text{m}</math>~<math>200\mu\text{m}</math> 左右的热传导性能比较好的导热硅脂。</p> <p>如果在模块与散热器的接触面上面涂抹导热硅脂，还可以对于防止接触部位的腐蚀起到作用。但是涂抹的导热硅脂要选用在使用工作温度范围内不变质、质量方面没有时效变化的产品。</p> <p>紧固的时候要使用力矩扳手紧固到规定的力矩。如果紧固力矩过大，就会和前述一样引起模块的损坏或性能的降低。</p>  <p>图 2 散热器的平面度</p>

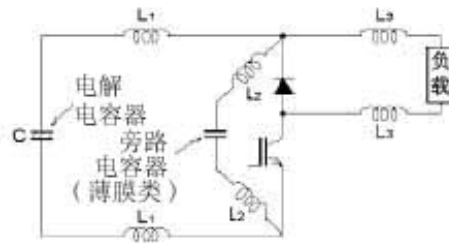
## 功率模块的安裝配置

### 1. 电容器的安裝配置

在进行开关的时候，高频电流从电容器通过开关模块再返回到电容器的闭路中通过，发生高  $di/dt$ 。在该电路的配线比较长的情况下，配线电感所造成的  $L \cdot di/dt$  电压就会作为关断浪涌电压被施加到模块上面，如果它超过耐压值，就会达到雪崩电压，生成钳位电压。如果在这种状态下工作，关断开关损耗就会增加。减少这种损耗的方法有以下几种：

- (1) 使电解电容器与模块尽量靠近，以减少配线电感。
- (2) 在模块的附近连接薄膜类的电容器，使高频电流形成旁路。
- (3) 选择低阻抗型电解电容器。
- (4) 使用模块吸收电路，对浪涌电压进行吸收。
- (5) 降低模块的开关速度，使  $di/dt$  降低。

在上述方法中，对 MOSFET 模块最为有效的是(1)和(5)。这是因为，采用 MOSFET 模块的场合一般是高速运转，为了构成复杂的电路，不可无视吸收电路自身的配线所产生的电感。另外，(1)尽管非常有效，但是由于目前的安装技术水平有限，只能尽量把配线缩短，不能完全抑制住的浪涌电压则采用(2)、(4)、(5)的方法。但是，在采用方法(2)产生振荡的时候，有时将(2)中的电容器设置为 RC，RCDi 吸收电路比较有效。



$L_1$ ：连接电解电容器与 MOSFET 模块的配线电感。因为它是往返线路，所以配线越短，间隔越窄，配线断面的周长越长，则配线电感越小。

$L_2$ ：旁路电容器的引线电感。如果该电感比较大，电容的吸收效果就消失了。

$L_3$ ：连接负载的配线电感。

### 2. 安装上的注意事项

在将模块安装到散热器上时，如果进行极端的单边紧固，那么就会在模块内用于绝缘的陶瓷基板和硅片上面施加应力，会造成模块的损坏或性能的降低。

另外，为了最大限度地获得散热效果，有必要尽可能扩大其接触面积，将热阻降为最小。请使用表面精加工 Rz6-Rz12、翘曲小于  $100\mu\text{m}$ （表面粗糙度低于  $10\mu\text{m}$ 、相对于  $100\text{mm}$  长度的翘曲低于  $20\mu\text{m}$ ）的散热器。

如果在模块与散热器的接触面上面涂抹导热硅脂，还可以对于防止接触部位的腐蚀起到作用。但是涂抹的导热硅脂要选用在使用工作温度范围内不变质、质量方面没有时效变化的产品(表 1)。

请在底板上面薄薄地全面涂抹一层导热硅脂。考虑到底板及散热器的精度，涂抹的厚度  $50\text{-}100\mu\text{m}$  比较合适。

紧固的时候要使用力矩扳手紧固到规定的力矩。如果紧固力矩过大，就会和前述一样引起模块的损坏或性能的降低。请尽量使用手工紧固。如果使用电动螺丝刀进行安装，有时会造成模块的变形或损坏。

※关于螺紧的顺序等的详细说明请参照“如何正确并安全使用功率模块”中的“安装方法”。

备注：数据表中记载的热阻为参考值。因为该值会随着导热硅脂的种类和涂抹的量而变化，所以请根据实际使用的导热硅脂及散热器进行确认。目录中记载的热阻标准值是使用信越化学工业株式会社的 G-746 时的数值。(G-746 虽然没有在信越化学工业株式会社发行的目录“散热用硅”中刊登，但是在使用同目录中刊登的 G-747 的情况下对标准值也没有影响)

表 1 半导体用导热硅脂（例）

厂商	产品名称	备注
信越化学工业株式会社（信越 Silicon）	G-746, G-747 等	

详细情况请向厂商咨询。

### 3. 热阻考虑

模块规定的是硅片与外壳（底板）之间的热阻  $R_{th(ch-c)}$  及外壳与散热片（散热器或散热片）之间的接触热阻  $R_{th(c-f)}$ 。

热阻的基准点（外壳温度）一直以来定为底板的侧面，但现参照欧洲标准将其变更为硅片的正下方。

各种产品的硅片的基准点请参照表 2。将热传导率为  $0.92\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$  的散热用导热硅脂在模块与散热器的接触面上面均匀地涂抹  $50\text{-}100\mu\text{m}$  左右，然后按照规定的力矩强度用规定的螺钉进行紧固。接着在途中标示的位置安装热电偶，对底板及散热器的温度进行测量。（开一个  $0.8\phi$  深度  $3\text{mm}$  左右的孔，插入  $0.3\phi$  的热电偶，用冲头从两侧开始打孔。）

#### ● 注意事项

- ※ 热阻有时会由于使用的散热器的材料、面积和厚度的不同而有所变化。同一材料的散热器面积越小、厚度越薄热阻就越大。
- ※ 热阻有时会由于导热硅脂的种类及涂抹量的不同而有所变化。

表 2 外壳温度测量基准点

FM200TU-07A, FM200TU-2A, FM200TU-3A (+: MOSFET)

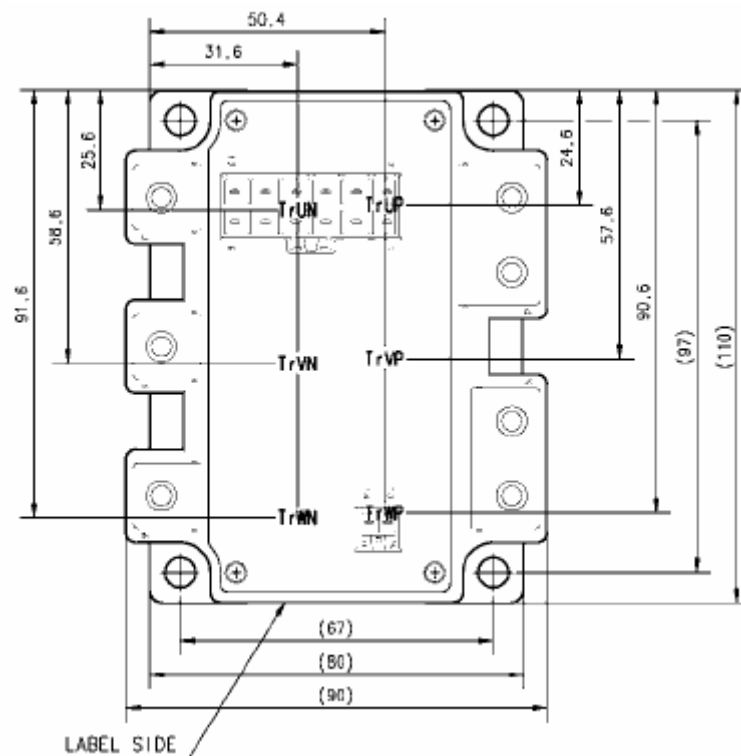
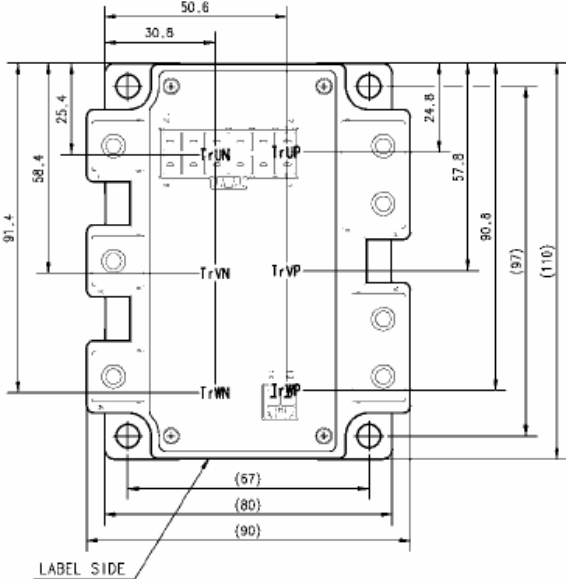
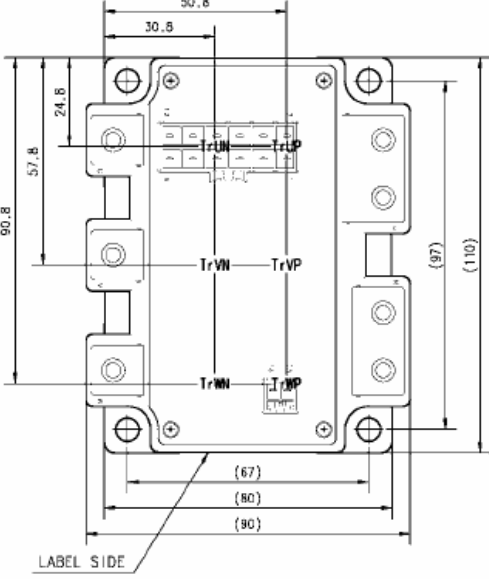


表 2（续）

FM400TU-07A, FM400TU-2A, FM400TU-3A（+：MOSFET）	
	
FM600TU-07A, FM600TU-2A, FM600TU-3A（+：MOSFET）	
	

注意：以前的安装螺钉是由客户自备的，主端子螺钉也由于种种原因中止了随带，这一点请您了解。

表 3

螺钉尺寸	种类	咨询地址（例）	（2004/09/30 至今）
M6 x 12	带有垫圈和十字孔的六角螺栓	FC 技术株式会社	052-991-7311
M6 x 14			

六角螺栓：符合 JIS B 1187 的产品。

#### 4. 导热硅脂的涂抹方法（例）

下面对本公司的功率模块关于导热硅脂的涂抹方法进行说明。

(1) 需要准备物品：功率模块、导热硅脂、小刀或辊子、电子秤、手套。

(2) 涂抹的导热硅脂的量和厚度的关系如下：

导热硅脂的厚度=导热硅脂的量[g]/模块的基板的面积[cm<sup>2</sup>] $\times$ 导热硅脂的密度[g/cm<sup>3</sup>]

本公司推荐的导热硅脂的厚度为 100 $\mu$ m-200 $\mu$ m。

计算准备的模块所需的导热硅脂的量。

计算例：基板规格为 110 $\times$ 80，导热硅脂为信越化学工业株式会社硅质导热硅脂 G-746 的情况下：

$$100\mu\text{m}-200\mu\text{m}=\text{导热硅脂的量}[\text{g}]/88[\text{cm}^2]\times 2.66[\text{g}/\text{cm}^3]$$

所以，导热硅脂的量 $\approx$ 2.34-4.68[g]。

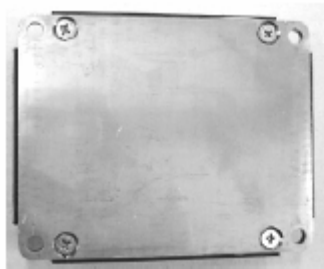
(3) 用电子秤计量准备用于功率模块的硅脂质量。

(4) 将依据（2）算出的导热硅脂的量涂抹在功率模块的底板上面。

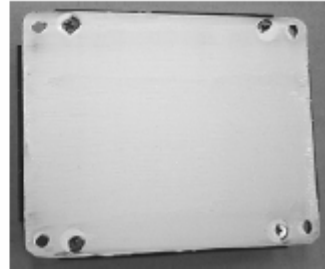
向功率模块涂抹导热硅脂的方法没有进行特别的规定。

(5) 用滚轮均匀地把涂抹过的导热硅脂在整个底板上面摊开。

（涂抹导热硅脂前的照片）



（涂抹导热硅脂后的照片）

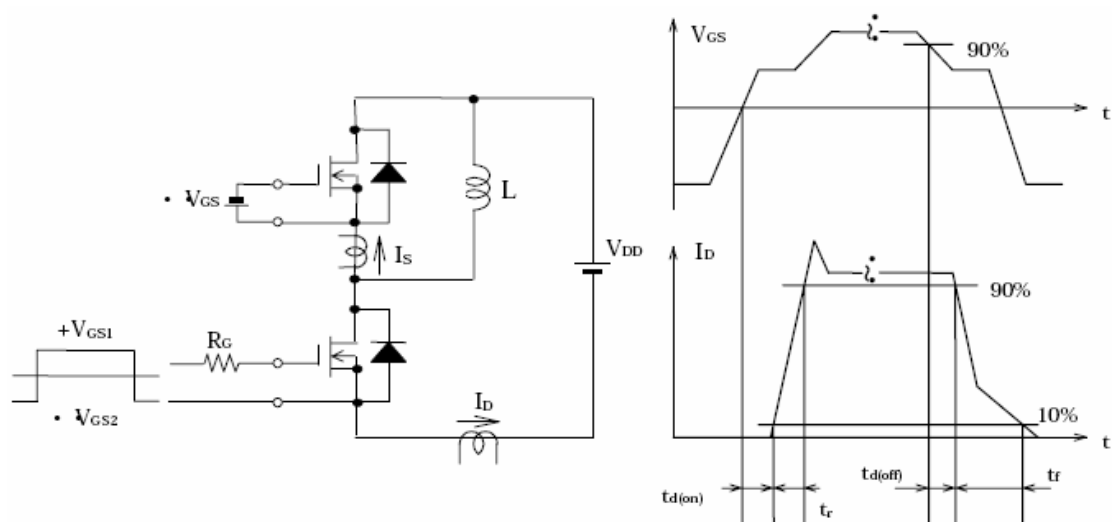


(6) 另外还可以用丝网印刷的方法涂抹导热硅脂。

总的来看，不管采用什么方法，只要能够在功率模块的底板上面大致把导热硅脂涂抹均匀，达到标准的厚度即可。

## 测试电路和波形

图 半桥开关测试电路



## 功率模块的可靠性

### 1. 前言

功率模块是电力用半导体器件，1970 年下半年，配置有双极型半导体硅片的 Bip 型模块（晶体管模块、可控硅模块等）投放市场，1980 年上半年，配置有 MOS 型半导体硅片的 MOS 型模块（IGBT 模块等）正式投放市场，目前，它已经被广泛应用于以空调、冰箱、洗衣机为代表的家电产品以及产业用机器设备，例如各种变频器、伺服系统、UPS、电力及电气化铁路的周边机器等等。

另一方面，可靠性也随着这些半导体器件技术水平的进步而迅速提高。

一般地讲，对可靠性要求较高的设备上面的半导体器件的故障率必须控制在 10-100FIT（1FIT=1×10<sup>9</sup>/小时）之间，要实现这样的可靠性，除了要提高半导体本身的可靠性外，在设备设计中还要充分考虑半导体特性及可靠性，使用条件和条件的协调也是相当重要的。

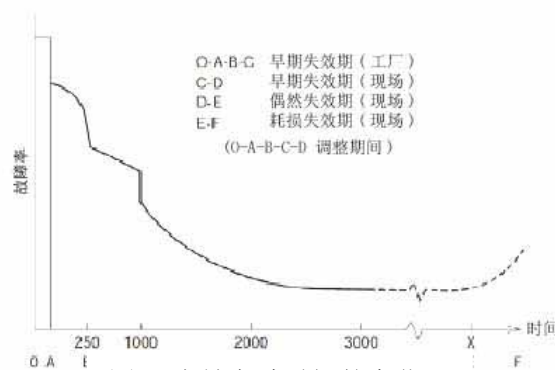


图 1 失效率随时间的变化

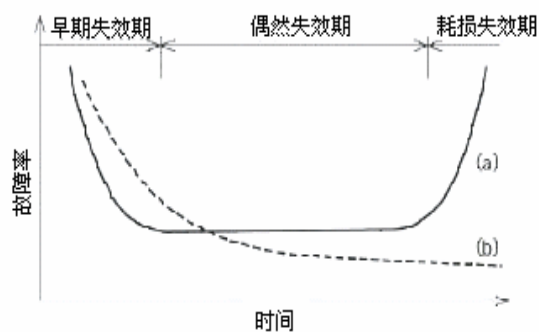


图 2 半导体器件的失效率随时间的变化

实际上，使用上的不同会导致那些即使用同样方法制造的模块在实际工作中失效率相差 10 倍或更多。

这里就有关半导体器件可靠性普遍存在的问题进行讨论，包括通常的设备设计，使用中必须考虑的问题、实际工作中失效的主要原因举例以及本公司产品质量保证活动和功率模块可靠性测试数据样例等相关介绍。

## 2 半导体器件的可靠性概论

### 2.1 半导体器件故障率随时间的变化

一般来讲，电子设备和元器件的失效率是按图 1 (a) 所示变化的，包含早期失效期、偶然失效期和耗损失效期，即常说的浴盆曲线。

选用半导体设备时，根据设备的用途、半导体器件失效发生时造成的影响波及性，预防保全体制等，需要考虑早期失效期、偶然失效期以及完全耗损掉之前的可使用寿命。

另外，半导体器件在失效上显示出如图 1 (b) 所示随时间逐渐下降变化的关系。也就是说，即使当它们进入到低失效率的偶然失效期时，失效分布指出它只不过处于早期失效期的延长期内。图 2 示出一个实际的半导体器件失效率随时间变化的样例，曲线表明，制造之后马上就有高失效率，然而，如果半导体器件经过老化和筛选后，失效率就逐渐降低。因此高可靠性等级的半导体器件需要采用有效并恰当的高温老化和电气老化筛选。

如前所述，考虑到半导体器件失效曲线呈渐次减少的分布，对可靠性要求较高的设备，有必要使用早期失效率低的器件（特别针对断线、短路等严重缺陷）。

下个阶段是在设备制造场里进行组装，调试和老化。在这一阶段失效率进一步下降，通常这个阶段中的主缺陷失效率浮动范围应 $\leq 0.1\%$ 。如果超出这个值过多，那么该应用电路设计、安装工序、试验工序或设备自身就有问题，所以必须尽快查明原因。

如果搁置这个问题就可能会导致实际应用中的频繁故障。这种安装调整及运行期间的严重缺陷失效率与市场故障率相关的情况比较多，需要对此加以关注。

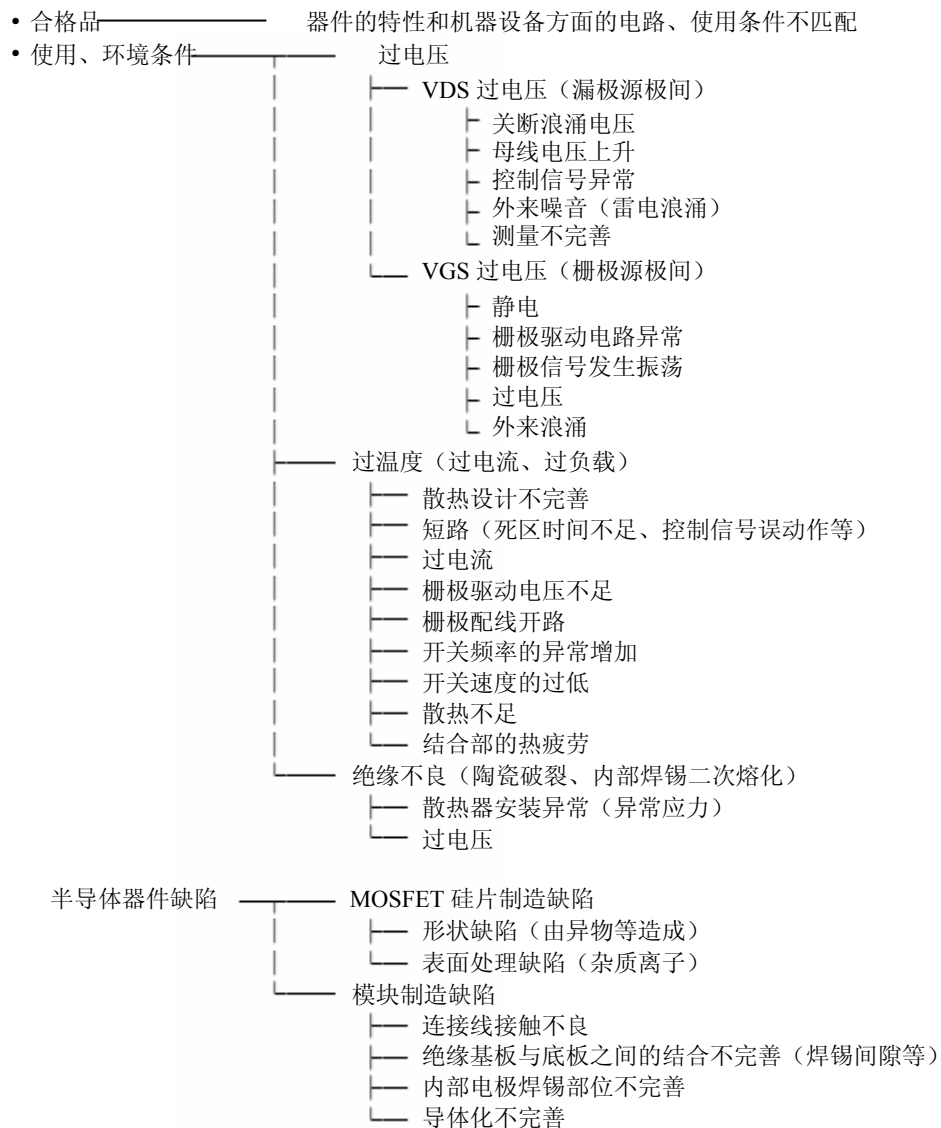
在实际应用中设备承受较低的压力，因而器件失效率会进一步下降，通常情况下为几个 Fit~几个 Fit。

同样，在所考虑的应用设计中，应带有裕量的选用半导体器件，一般使用条件设定为：电压为最大额定值的 50-60% 或以下，结温为额定结温的 70-80% 或以下。为了提高可靠性，所使用的半导体器件和使用电路、环境条件（各种压力等）的综合考虑是必不可少的。

综上所述成本与可靠性的问题在高可靠性设备的器件选择中必须加以考虑，同时获得高性能，高可靠性和经济实惠并不简单。因此，为了在实际应用中做出最有价值的设计，应使这些因素得到平衡，选择一个按设备性能和可靠性目标而定的器件对用户来说，是个需要考虑的重要问题。

## 2.2 电力用半导体功率模块的失效原因

如果对从机器设备的安装调整阶段或市场返修的模块进行解析，可以分成在特性方面合格的情况、在使用条件或环境方面有问题的情况以及模块存在缺陷的情况。拿 MOSFET 模块来说，可以列举出下面的主要故障原因。



在上述原因中，作为决定有效寿命期的因素，有模块内部的接线与硅片间的线键合的结合部及绝缘基板与底板的结合部（焊锡结合）的热疲劳故障。

关于这种热疲劳现象及其故障的例子在次页之后进行说明。

## 2.3 电力用半导体模块的热疲劳现象

### 2.3.1 模块工作时的热应力模型

功率模块工作情况下的热应力模型如图 3 所示，划分为 2 个工作模式，进行模块的选定和设备的设计之前必须考虑其有效寿命。

#### ■工作模式 1

外壳温度（底板温度）的变化虽小，但结温变化频繁所形成的工作模式下的寿命。（功率循环寿命：称作“P/C 寿命”）

#### ■工作模式 2

从整个系统启动到停止等比较平稳的温度变化生成的工作模式下的寿命。（称作“热循环寿命”）

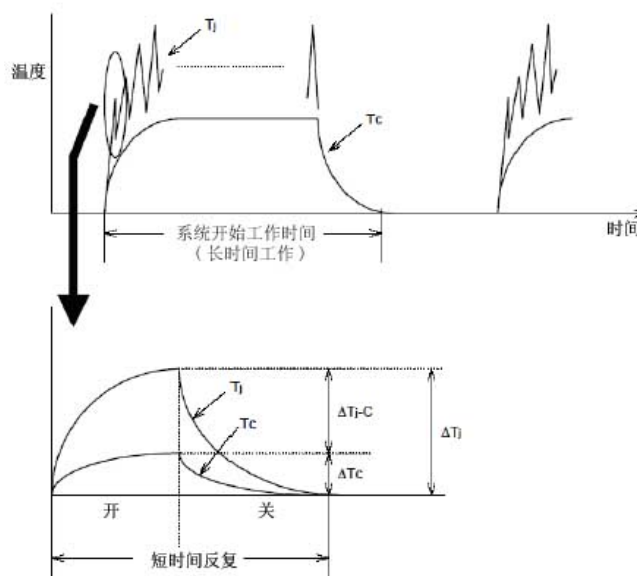


图 3 工作模式和模块的温度变化

### 2.3.2 功率循环寿命的失效原理

在图 4 的一般的功率模块的构造中，模块工作产生结温的变化，由于铝线与硅片的热膨胀系数之差而生成的应力的作用，在这个结合面上产生龟裂，这种龟裂不断发展，最终演化到剥离。变频器工作时，模块的外壳温度比较稳定，结温变化频繁，有必要在机器设备的设计阶段就要考虑这种功率循环破坏。在图 5 中例示了由功率循环造成的结合部的剥离的事例的照片。

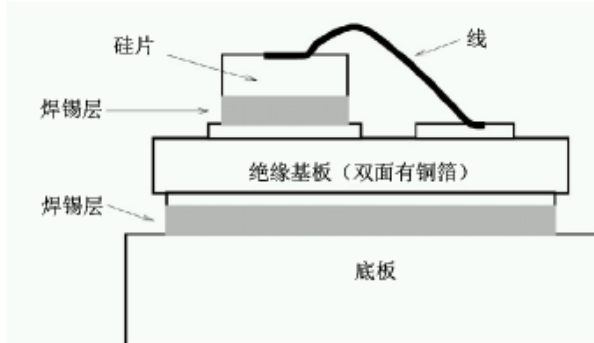


图 4. 模块构造断面图（模式图）

在图 6 中例示本公司实施的模块产品的功率循环寿命的试验结果（功率循环寿命曲线）。

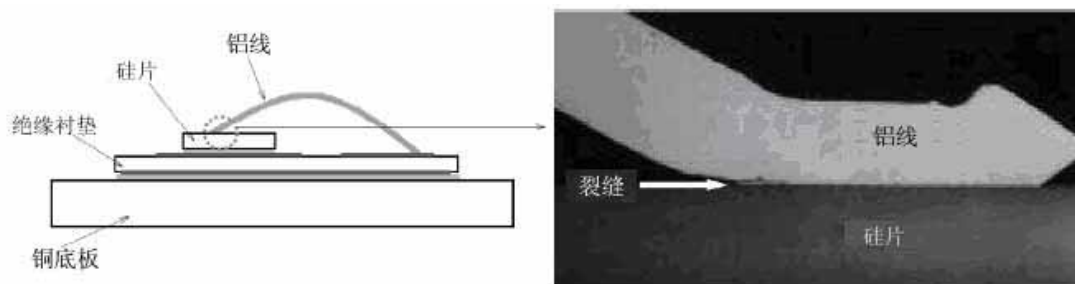


图 5 功率循环试验所产生的结合部的疲劳状态

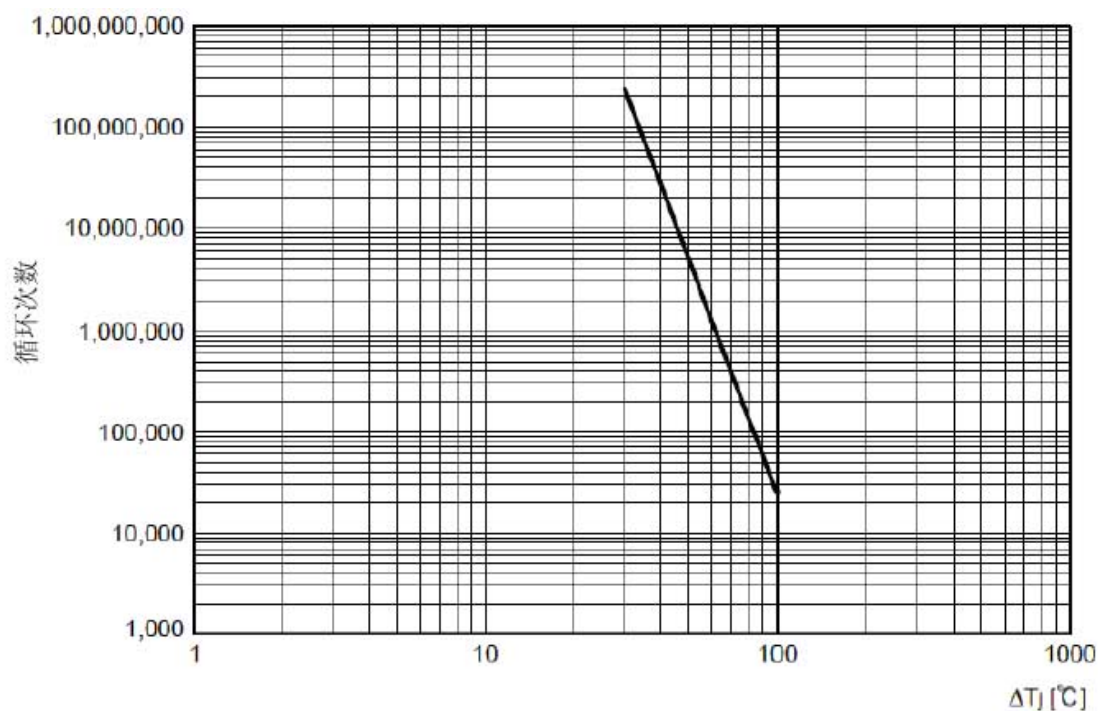


图 6 功率循环寿命曲线

### 2.3.3 热循环的失效原理

由于系统的起动、停止，功率模块的外壳温度（ $T_c$ ）产生比较平稳的、大幅度的变化，在这样的模式中，如图 4 的模块构造图中所示，由于绝缘衬垫与底板的热膨胀系数的差异，会导致他们之间的焊锡层产生应力偏移。

如果这种应力反复出现，焊锡上面就会产生龟裂，这种龟裂如果延伸到硅片的下方，就会导致热阻的增加，最终导致热击穿。由于热阻的增加，结温变化增加，功率循环的耐量降低，最终导致与功率循环寿命相同的线剥离。图 7 例示了由热循环造成的绝缘衬垫与底板之间的焊锡层龟裂的照片。图 8 例示了本公司实施的模块产品的热循环寿命的试验结果

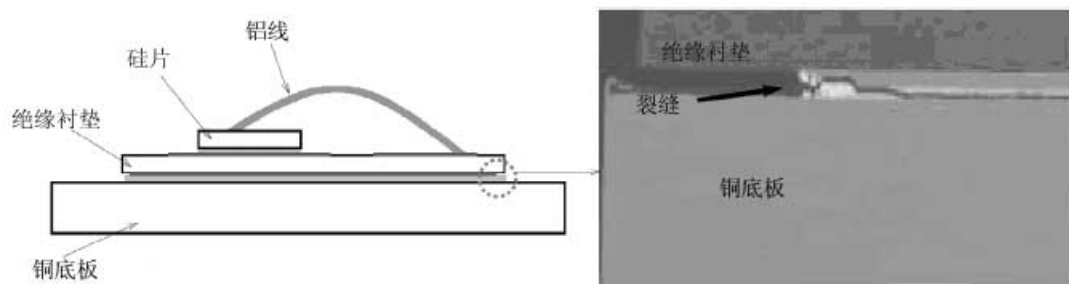


图 7 热循环试验产生的焊锡的疲劳状态

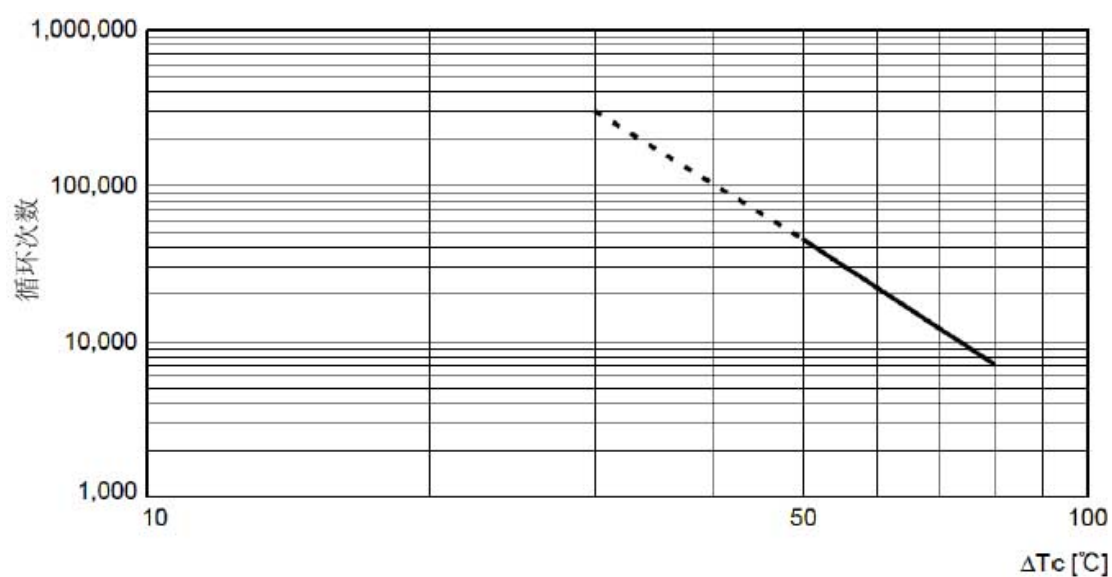


图 8 热循环寿命曲线

### 3. 关于质量保证活动

产品的质量、价格、交货期和服务是产品的全部基本要素。这些要求中的每一项都需要人们付出极大的努力。在这些要素中，产品质量是至关重要的，并且只要器件存在，质量就一直伴随着客户。

在半导体工业中产品所需的质量水平很高，生产它们包括在“晶片加工”中可以看到的高精细加工控制能力和在“封装加工”中可以看到为解决微结构的工作。这是个需要精巧的高技术和高水平质量控制的大批量生产系统。

以下是对产品质量保证活动的简述。

#### 3.1 批量生产规程

从开发阶段的样品定型，经过为批量生产进行的设计定型，最后到批量生产的生产定型中，每一个阶段对产品实施一系列的认可测试以检验其性能和可靠性，各种图纸和标准也经由检验。从开发到量产的质量保证体系如图 9 所示。有关可靠性测试的问题在下一节中介绍。

#### 3.2 环境控制

在半导体工业中，环境条件对产品质量的影响非常大，建立标准并执行严格的控制以保持防尘、防潮和恒温条件，在工厂中对水和气体也运用类似的检测。

#### 3.3 生产设备和检测仪器的阶段检验和维修

半导体工业也被称为设备走向的工业，保养生产设备和测量仪器对于半导体器件的生产是一个重要因素。为防止设备的故障和精度降级等，需要实施定期检验和维修。

#### 3.4 原料购买的控制

根据检查标准，使用光谱分析仪等仪器，实施严格的分析和检验。订货时，从质量上检验其关键点，并对样品进行全面考核，解决所有问题后才授权发货，另外对于供应商的生产过程的质量控制也给予关注。

#### 3.5 生产过程控制

纯水的纯度、环境、与炉温以及流量等条件对产品的质量有着至关重要的影响。安装各种测量仪器并通过检查由人工或自动记录填写数据，对上述各种状态进行检测。诸如对半导体器件特性影响特别大的扩散的操作还要记录扩散深度、表面浓度等，它们被用来作为后面工作条件的控制数据。在封装过程中，导线连接影响质量，所以连接负载和连接强度的数据也被收集用以控制工作并达到稳定的质量。

#### 3.6 中期及后期检验

实施中期检验及后期检验要评价产品的质量和特性，即外观、尺寸、结构、机械及电气特性是否符合判定标准，与此同时将获取到的质量信息反馈到前一个加工过程中，从而保持和改进质量并降低分散性。

中期检验包括晶片测试和抽样检验，两者都以双重检查的方式实施-责任部门的自我检验和质管部门的检验两者结合实施-都以“在生产过程中发展质量”为基本出发点。自我检验着重于那些对最终产品来说不易辨识的项目，还着重于有关质量的纠正补救。后期检验针对最终产品进行全部的电气特性和视觉条件的测试。质保部门从用户使用的观点出发对产品做综合性能的质量检验，在产品入库前，以检验并保证全面的性能和质量为目标，通过抽样检查产品外观、电气特性以及可靠性，完成质量保证检验。产品的分批也经过严格考核才决定是否入库。

以上所述质量保证活动系统的图解如图 9 所示。

#### 3.7 质量信息

各种质量信息，诸如检验结果、客户供应的信息主要由质量保证部门搜集汇总。这些信息被迅速反馈到包括生产部门在内的有关部门，使质量得到保持与改善。

为实现现代化信息管理，采用以计算机为基础的整体化高效质量控制系统。

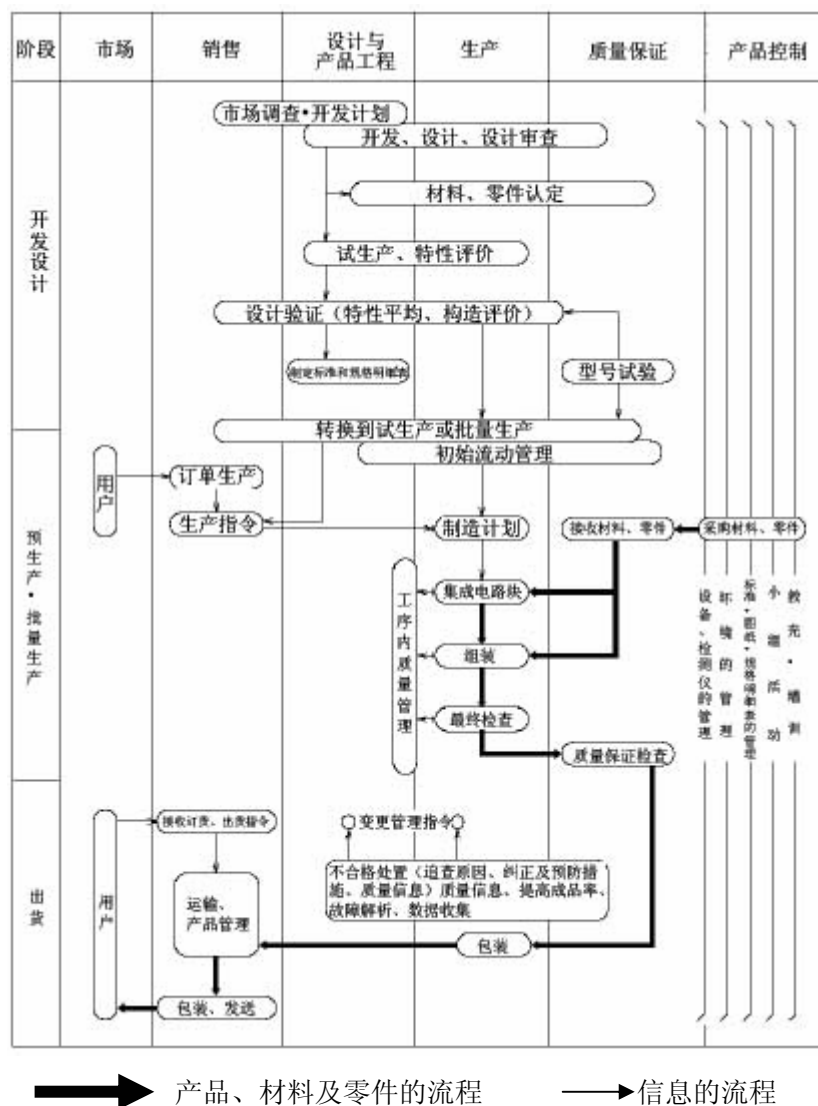


图9 质量保证系统图

## 4. 可靠性测试

### 4.1 可靠性测试的方法

三菱半导体器件采用保证高可靠性的设计，在制造过程中使用严格质量保证管理，对每个生产批次进行质量保证检验，充分达到了令客户满意的可靠性水平。为检验这种可靠性水平，进行了各种可靠性测试。

在本节介绍功率模块的代表品种有关的测试，这些测试的内容在表1中进行说明。三菱半导体器件的可靠性测试符合日本电子信息技术产业标准（JEITA）。（相关标准：《国际电气标准会议标准（IEC）》）

### 4.2 IGBT 模块可靠性测试的结果

以额定电流 300A 的树脂密封型 IGBT 模块 CM300DY-24NF 为典型实例，其可靠性测试的结果和测试用的失效判据在表3中进行说明。

表 1 三菱功率模块的可靠性测试

	测试项目	测试方法		测试条件
环境测试	热冲击	ED-4701	B-141	[条件 A]100℃: 5 分钟, 0℃: 5 分钟, 10 次循环
	热循环	"	B-131	最低贮存温度 60 分钟~最高贮存温度 60 分钟, 10 次循环
	振动	"	A-121	[条件 B]10-500Hz/15 分钟, 98.1m/s <sup>2</sup> , 6 小时
	端子强度 (拉伸试验)	"	A-111-	9.8-40N, 10±1 秒
	焊锡耐热	"	A-132	[条件 A]260±5℃, 10±1 秒, 使用助焊剂
	焊锡附着性	"	A-131	[条件 A]235±5℃, 5±0.5 秒, 使用助焊剂
耐久性测试	安装扭矩强度	"	A-112-	M8: 8.83-10.8N·m, 10±1 秒 M6: 2.94-4.5N·m, 10±1 秒 M5: 1.96-3.5N·m, 10±1 秒 M4: 1.47-1.7N·m, 10±1 秒 M3: 0.98N·m, 10±1 秒
	高温贮存	"	B-111	Ta=Tstg max, 1000 小时
	低温贮存	"	B-112	Ta=Tstg min, 1000 小时
	防潮	"	B-121	[条件 B]Ta=60℃, RH=90%, 1000 小时
	周期通断试验	"	-	△Tc=50℃ (△Tc=100℃), 5000 次循环
	高温下反向偏压	"	-	Ta=Tstg max, VCE=VCES 的 85%, VGE=0V, 1000 小时
	高温下栅极偏压	"	-	Ta=Tstg max, VCE=20V, VGE=0V, 1000 小时

\*: 日本信息技术产业协会 (JEITA) 标准-ED-4701 半导体器件的环境及以耐久性测试方法

表 2 CM300DY-24NF 可靠性测试的结果

	测试项目	测试方法		测试条件	样品数	失效数
环境测试	热冲击	ED-4701	B-141	[条件 A]100℃: 5 分钟, 0℃: 5 分钟, 10 次循环	5	0
	热循环		B-131	-40℃ (60 分钟) -125℃ (60 分钟), 10 次循环	5	0
	振动		A-121	[条件 B]10-500Hz/15 分钟, 98.1m/s <sup>2</sup> , 6 小时	5	0
	端子强度 (拉伸试验)		A-111-	40N, 10±1 秒	5	0
	焊锡耐热		A-132	[条件 A]260±5℃, 10±1 秒, 使用助焊剂	5	0
	安装扭矩强度		A-112-	安装螺钉: M6, 4.5N·m, 10±1 秒 主端子螺钉: M6, 4.5N·m, 10±1 秒	5	0
耐久性测试	高温贮存		B-111	Ta=125℃, 1000 小时	5	0
	低温贮存		B-112	Ta=40℃, 1000 小时	5	0
	防潮		B-121	Ta=60℃, RH=90%, 1000 小时	5	0
	高温下反向偏压	-		Ta=125℃, VCES=1020V, VGE=0V, 1000 小时	5	0
	高温下栅极偏压	-		Ta=125℃, VCE=20V, VGE=0V, 1000 小时	5	0
	周期通断试验	-		Tc=50℃-100℃, 5000 次循环	5	0

表 3 CM300DY-24NF 失效判据

测量项目	测量条件	失效判据		备注
		下限	上限	
ICES	VCE=1200V, VGE=0V	-	U. S. L×2.0	
ICES	VGE=±20V, VCE=0V	-	U. S. L×2.0	
VGE(th)	IC=30mA, VCE=10V	L. S. L×0.8	U. S. L×1.2	
VCE(sat)	IC=300A, VGE=15V	-	U. S. L×1.2	
VEC	IE=300A, VGE=0V	-	U. S. L×1.2	
绝缘耐力	AC2500V 1 分钟	绝缘破坏		

注: U.S.L.标准上限 L.S.L.标准下限

## 5. 失效分析

失效分析是获得用来维护并提高质量与可靠性水平信息的手段之一，对开发和生产阶段的半成品实施失效分析，对失效产品实施失效分析，也对那些在可靠性测试以及在用户的测试或运行中发生失效的项目实施失效分析。

失效分析大致分为外观检查、电气检查、内部检查及硅片分析。失效分析流程图如图 10，下表 4 中对失效分析的内容进行的描述。

可靠性测试和失效分析的结果清楚的指出失效模式和失效机理。它们被反馈到加工工程部门和制造部门从而改善产品的可靠性。

## 6. 降额及可靠性的预测

半导体器件的可靠度依赖于工作条件和环境条件，即使对相同型号的器件也会引起实质性的不同。而且，半导体器件的设计标准、制造方法以及生产控制水平对内在可靠性影响很大，因此，半导体器件降额与可靠性之间的关系非常复杂。详情请参照三菱半导体可靠性手册。

<http://www.mitubishichips.com/Japan/reliability/index.html>

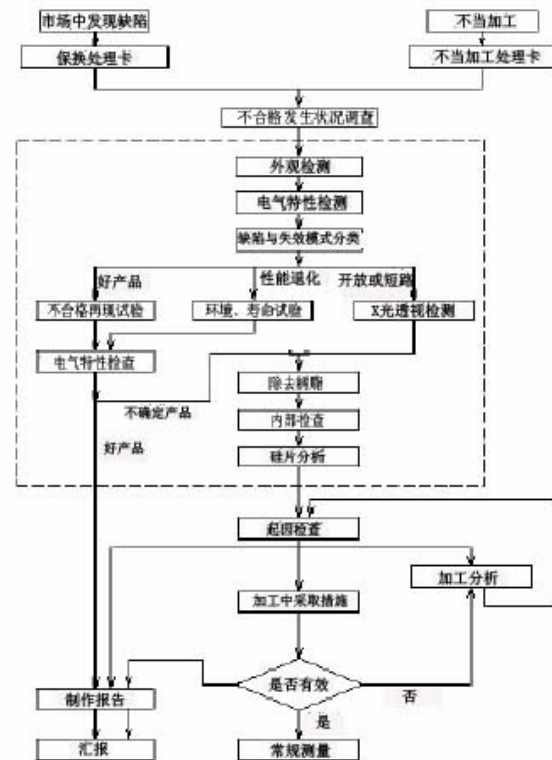


图 10 失效分析流程

表 4 失效分析内容与所用仪器

检验项目	检验内容	仪器
外观检查	○引线、镀层、焊料敷合及焊接部分的状态 ○封装缺陷 ○可焊接性	立体显微镜 金相显微镜
电气特性检查	○通过检测电气静特性，电压裕量、温度范围和对工作特性来调查开路、短路以及性能退化问题 ○内部配线	同步示波仪 波形跟踪仪 特性测试仪 X 线透视装置
内部检查	○拆除器件封装，目测硅片内部构造以及硅片表面 ○微型探头检测电气特性 ○热斑、异常等	金相显微镜 微型探头 扫描电子显微镜
硅片分析	○补充性的内部目测硅片检查 ○硅片剖面分析以进行氧化膜、扩散层及金属化分析	X 线微型分析仪（EPMA） 红外线微型扫描仪 光谱分析仪

## 7. 结论

以上对电力用半导体器件中的功率模块的可靠性、可靠性测试、可靠性降额以及预测等做了简单介绍。如上所述，理解半导体器件的特点、正确选择合适于特定装置和设备的器件，留有裕度的设计半导体器件以改善其可靠性，同时依据工作及环境条件全面考虑器件的降额使用。这些对于半导体器件在实际应用中的高可靠性至关重要。另外，筛选装置和设备，分析从制造过程和实际应用过程中得到的数据并反馈到设计和制造阶段也是重要的因素。通过功率模块的设计来提高可靠性需要对上述许多问题进行考虑。

对质量、可靠性及经济性必须做综合考虑，才能成功的选用半导体器件。

## MOSFET 模块的使用方法

### 1. MOSFET 模块的特性

为了正确使用 MOSFET 模块，必须对其特性进行充分的了解。以下对其重要的特性进行说明。

#### (1) MOSFET 是电压驱动型器件

虽然 MOSFET 是电压驱动型器件，但是如图 1 所示，因为各端子之间有容量，所以要开通或关断，就需要对输入容量（Ciss）的充放电电流。

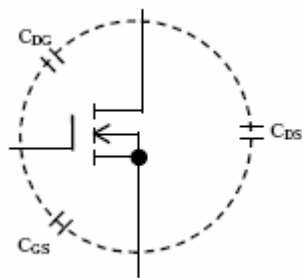


图 1

#### (2) MOSFET 是高速开关器件

MOSFET 为了让高电压、大电流高速地进行开关的动作，开通时及关断时会产生非常高的  $di/dt$  较高的浪涌电压。

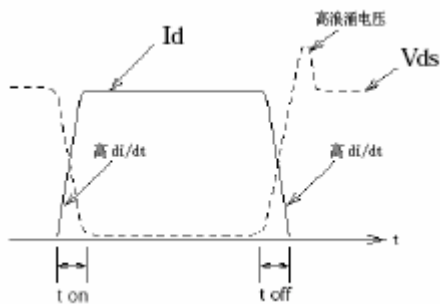


图 2

#### (3) 栅极是绝缘构造

因为有绝缘栅，所以 MOSFET 必须采取防止静电的措施。请注意不要向栅源极间输入过大的电压（ $\pm 20V$  以上）。另外，在栅开路的状态下，不得在漏极源极间施加电压。

### 2. 防静电破坏的注意事项

#### (1) 在运输途中，请务必用导电海绵等将栅

源极端子间短接。另外，绝对不可用手在栅源极端子间触摸。

#### (2) 组装的时候，请将使用机器和人体接地。请参照三菱半导体主页上面登载的可靠性信息“VII. 半导体器件使用注意事项”中的“4. 防静电注意事项”。

<http://www.mitsubishichips.com/Japan/reliability/indix.html>

### 3. 关于降额

#### (1) 电压额定值

作为母线电压，按照模块额定电压的 80% 以下使用比较理想。内置的反向续流二极管使用的是 MOSFET 的寄生二极管。

表 1

	电池电压 (V)		
	-48	-96	
模块额定电压 (V)	75	100	150
母线电压 (V)	~65	~65	110

#### (2) 电流额定值

在正常的通电状况下，通电电流的峰值如果在器件电流额定值以内并且结温也在额定值之内，就应该没有问题。

一般情况下，由于变频器的过负载率被设定成 150-200%，如果在这种过负载的时候输入最大额定电流，那么稳态电流设置为最大额定值的 50-60%。

另外，规格书中记载的电流峰值请考虑为如图 3 例示的包括反向续流二极管的反向恢复时的恢复电流（ $1\mu s$  以下）的电流峰值。

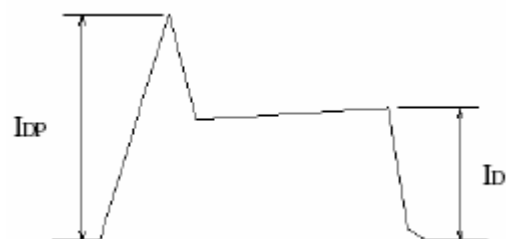


图 3

## (3) 结温

我们认为，在结温方面，考虑长期的可靠性以及电动机在过负载时达到最大结温，一般情况下按照最大额定的 70-80% 左右使用是比较理想的。

## 4. 实际使用中的注意事项

## (1) 使用环境温度

在 -40-55℃ 的条件下，因为为了保护模块的硅片连线而填充的硅胶会硬化结晶，所以存在着硅片连线断线的危险。注意，即使瞬时也不要低于 -40℃。另外，剧烈的温度变化可能会造成模块的绝缘损坏。

环境温度不能达到结露的程度。因为模块不是密闭构造，所以如果结露水分就会进入内部，可能会引起模块的损坏。

(2) 为了抑制浪涌电压，请注意配线的长度和吸收措施。（因为是高速开关，所以容易产生浪涌电压。）采用 MOSFET 模块的场合，请按图 4-1 的斜线标注的闭路面积最小化的原则来安装栅极驱动电路的输出部。

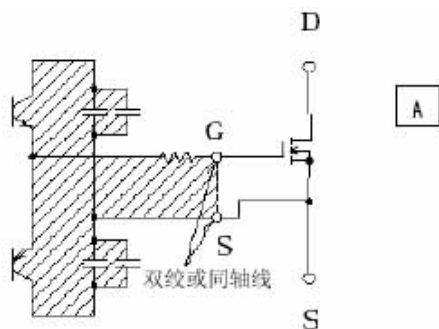


图 4-1

在进行高速开关的情况下，要注意主电路侧的配线。例如，按照图 4-2 进行配线。

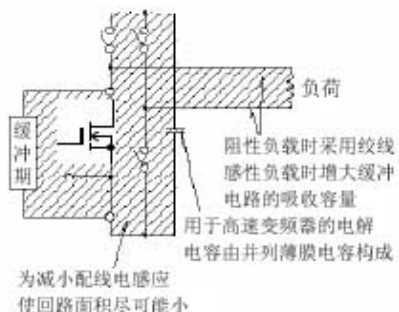


图 4-2

(3) 在栅源极开路时，请不要在漏极源极间施加电压。

(4) 吸收电路举例

MOSFET 模块中的吸收回路如图 4-3 所示，主配线电感的推荐设计值在下页进行说明。

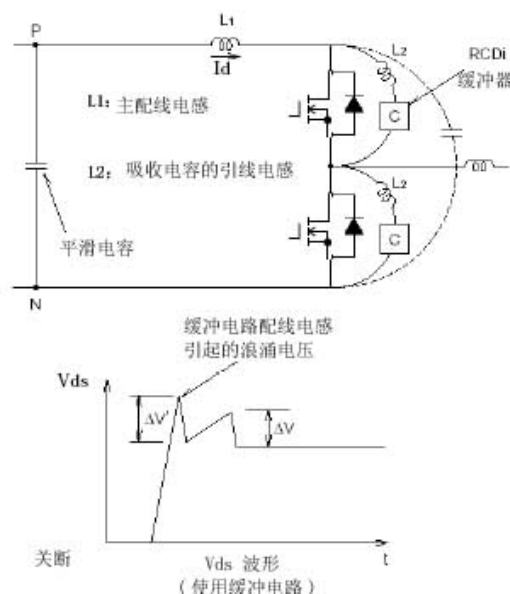
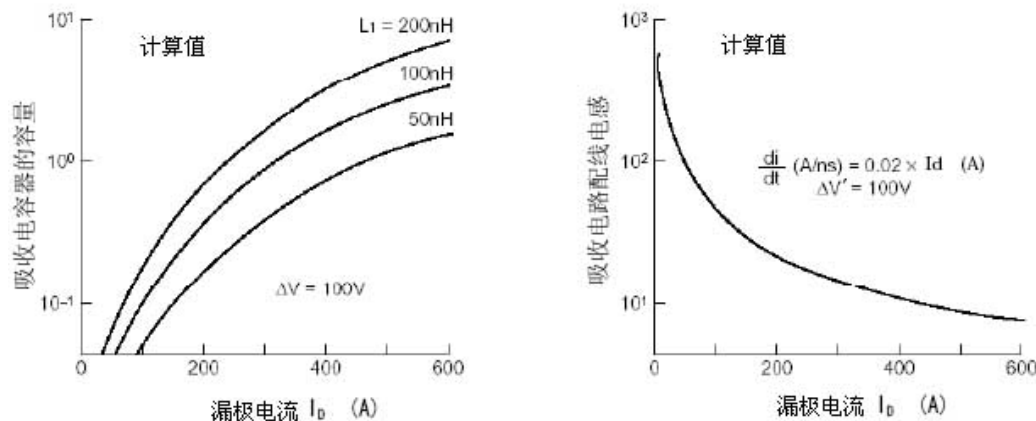


图 4-3

## (5) 其他

在本公司的 MOSFET 模块中，虽然配置了依据 UL 标准的绝缘距离，但是，一般情况下，由于高度上升气压就会下降，所以对相同空间距离的电压下降，绝缘能力也会降低，有可能难以确保空间距离。

另外，如果高度升高，一般情况下宇宙射线就会急剧增加。当宇宙射线照射到半导体上的时候，一般情况下都会造成损坏，形成突然死机的可能性增高。不过还没有这个概率方面的数据。作为一般工业用途，电压相对较低，所以可能还不会出现这个问题。



图

推荐计算值

额定漏极电流	吸收电容值 “C”	主配线电感 “L1”	吸收电路配线电感 “L2”
15A-75A	$0.2\mu\text{F} \leq$	$<200\text{nH}$	$<70\text{nH}$
100A-200A	$0.8\mu\text{F} \leq$	$<100\text{nH}$	$<20\text{nH}$
300A-400A	$1.6\mu\text{F} \leq$	$<50\text{nH}$	$<10\text{nH}$
600A-	$3.6\mu\text{F} \leq$	$<50\text{nH}$	$<7\text{nH}$

#### 4.1 吸收电路

##### (1) 吸收电路常数

$\Delta V'$  是吸收电路的电感  $L2$  引起的不能吸收的电压 (浪涌电压)。换言之, 就是关断的时候在  $di/dt \times L2$  发生的关断浪涌电压。

CS 依据下面的公式进行设定:

$$\frac{1}{2} \cdot L1 \cdot (IOFF)^2 = \frac{1}{2} \cdot CS \cdot (\Delta V)^2$$

$$CS = \frac{L1 \cdot (IOFF)^2}{(\Delta V)^2}$$

在并联的情况下, 我们推荐每个模块都要配置吸收回路。我们认为, 在由并联实现大容量化的情况下, 各个部件分别连接吸收电路的方法比统一吸收的方法在降低吸收配线电感 ( $L2$ ) 及电流容量方面是比较好的方法。

如果 P-N 之间产生过大的浪涌电压, 就需要在 P-N 之间设置电容器。特别是在大容量模块的情况下, 通常的做法是在 P-N 之间并用电容器和图 5 的吸收电路。

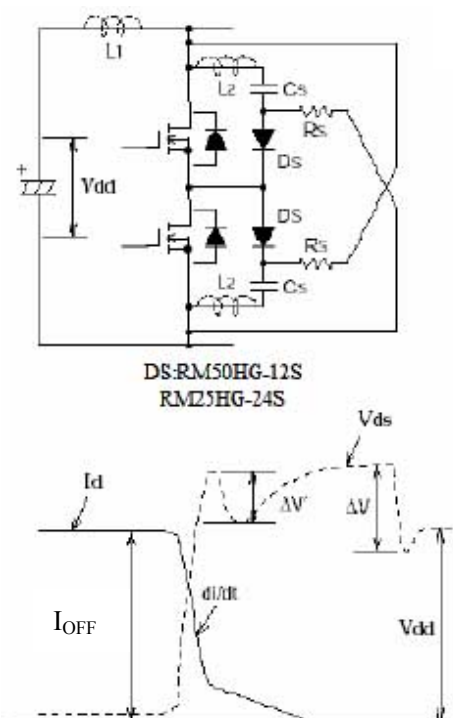


图 5

## (2) 降低浪涌电压的方法

## ① 降低主电路配线电感 (L1, L2)

- 10-200A (6 单元模块): 印刷电路板安装
- 100A-600A (2 单元模块): 母线排配线或平行板配线
- ② 吸收电路
- 10-150A (6 单元模块): 吸收电路 a 或 b
- 200A-600A (2 单元模块): 吸收电路 c 或 a (在各相)
- 400A 以上 (1 单元模块): 吸收电路 a 及 c (在各相)

各种吸收电路

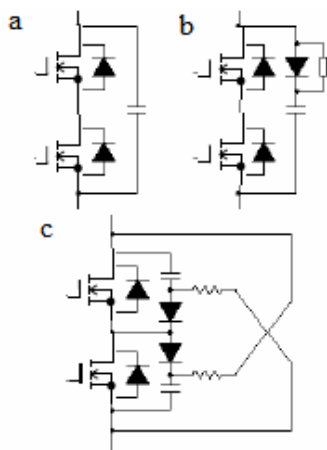


图 6

## (3) 低电感电力配线举例 (1 单元模块)

使用 2 片直流母线用导体和 1 片夹着绝缘板使模块间接线用导体结合在一起的配线。重叠的顺序对配线电感没有影响。

采用这种多层板与模块的接线方法，可以考虑以下的方法：

## ① 在衬垫上利用导体的方法 (二层连接的例子)

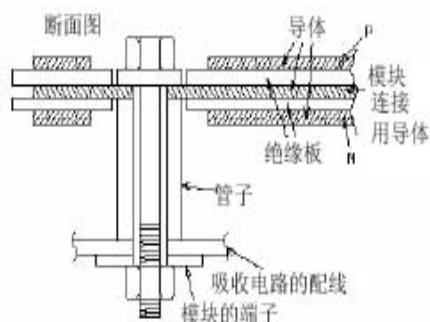


图 7

(将三相全桥作为一个单元的情况下的配置图)

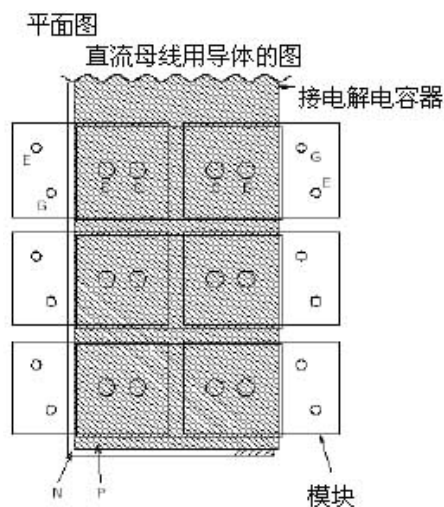


图 8 模块间接线用导体图

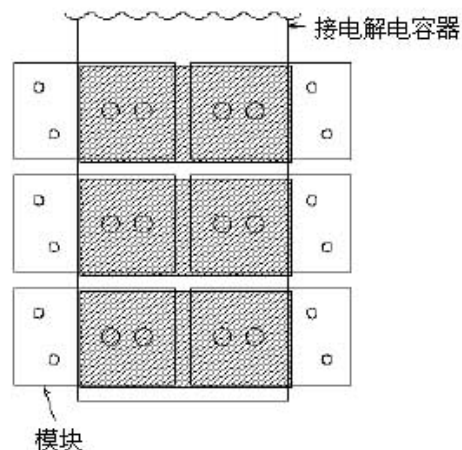


图 9

导体的重叠宽度根据经验判断为 40mm 到 300mm 左右。

输出线从模块端子走线，或在导体的侧端设一个突出部分，从那里走线。(输出线的电感通常不存在问题。)

- ② 使导体的端部突起，弯曲呈 L 状，吸收导体厚度部分的方法  
(以两层连接为例)

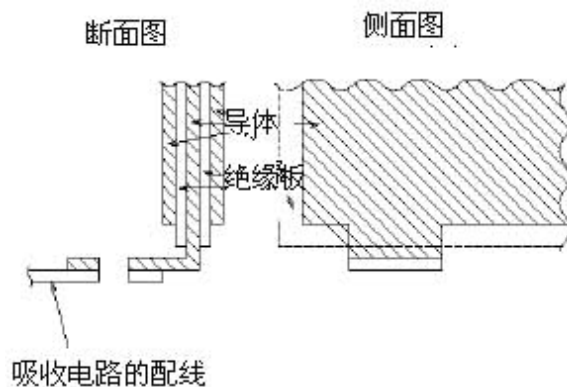


图 10

- ③ 使导体的端部突起，弯曲呈曲柄状，吸收导体厚度的方法  
(以两层连接为例)

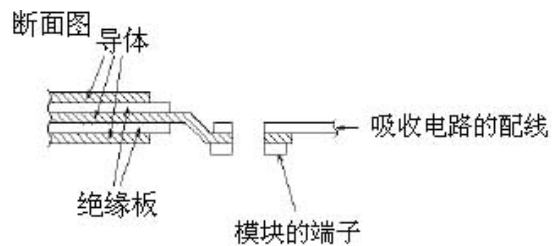


图 11

(横向接线的举例) 吸收电路的配线

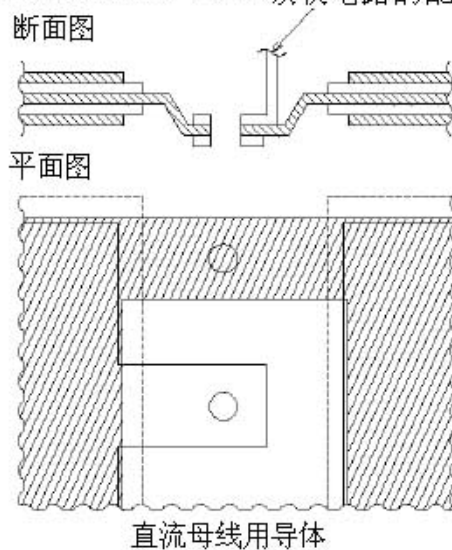


图 12

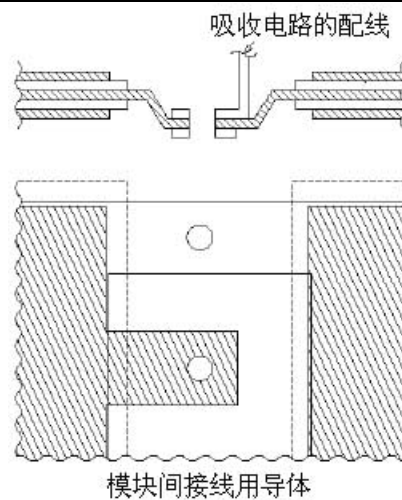


图 13

(并用薄导体多层板的例子)



图 14

参考：DS 间吸收电路的配线举例（以 N 侧为例）。

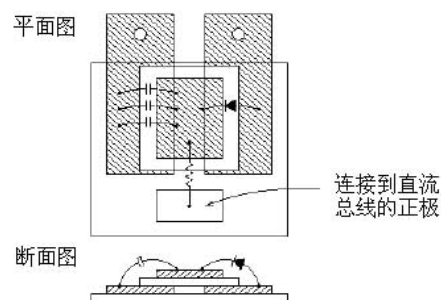


图 15

## 4.2 推荐的驱动条件

### (1) 关于驱动电路设计的说明

栅源极的开通电压为 12V~15V,关断电压为-2V~负额定电压的范围内,所以施加反向偏置电压以模块不因外部噪音的作用而开通为限度。在驱动电路与模块的栅极之间插入限制通向栅极的充电电流的栅极电阻。

栅极电阻越大,

- 开关损耗（时间）就会增加；
- 活性动作时间延长，栅极电压就变得容易振荡。

(这与减小  $R_G$  之后变得明显的振铃是有区别的。)

由于上述原因,一般情况下规定最高为标准栅极电阻的 10 倍左右。

MOSFET 模块的栅极驱动电路设计的关键是栅极电压、栅极电阻及配线。栅极电路的基本形式如下图所示。

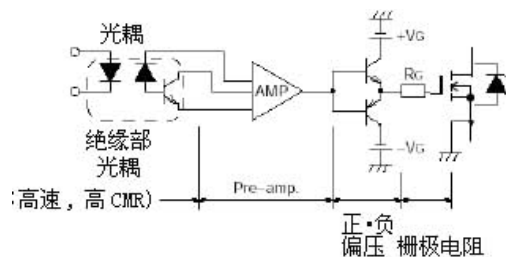
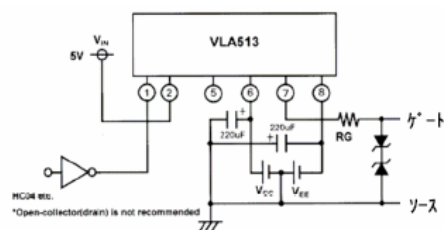


图 16

### 驱动电路设计方面的注意事项

(MOSFET 模块的驱动)



内部框图 (VLA513-01)

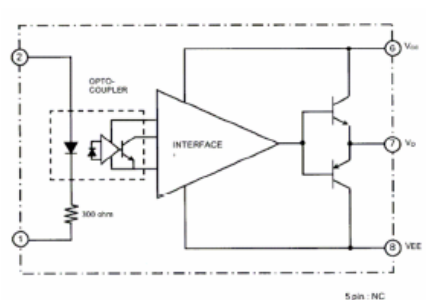


图 17

## M57962AL 应用的例子

如果应用于并联，就需要类似于下面的电路例子的吸收电路。

应用方面的注意事项:

- a. C1 及 C2 中请使用 220 $\mu$ F 以上的低阻抗（开关电源）铝电解电容器。
- b. 功率放大用晶体管请使用 TO-220 包装的峰值大于 5A 的吸收电路。  
(电流峰值根据实测或计算求出)

电流峰值的算式:

 $R_G$ : 栅极电阻。

$R_G'$ : 并联时防止振荡的电阻

- c. 请将过电流检测端子①连接到并联的 MOSFET 的漏极端子的中点。

备注：由于 MOSFET 模块的情况下电源电压（电池）较低，所以在过电流时达不到动作电压的情况就会增加。

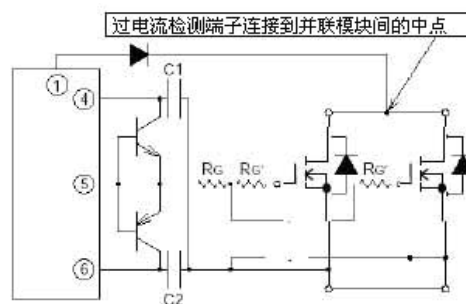


图 18 并联采用的连接举例

### 〈设计的关键点〉

- ① 根据 MOSFET 的短路能力与功耗的折衷, 栅极电压在  $+V_{GS}=12V-15V$ ,  $-V_{GS}=2V-10V$  的范围内选择。
- ② 因为输入栅极电容与额定电流成比例, 所以如果是大容量 MOSFET, 充放电电流的峰值就必须为数 A。
- ③  $R_G$  根据浪涌电压 ( $\propto di/dt$ ) 与开关损耗) 折衷选择最佳值。 $R_G$  对  $V_{DS(ON)}$  没有任何影响。
- ④ 请使用高 CMR (高  $dV/dt$  耐量) 的光耦。另外, 请消除一、二次侧间配线所产生的寄生电容。
- ⑤ 尽可能减小栅极电路的封闭回路面积, 以避免受到噪音的影响。

## (2) 关于栅极电压的说明

建议开通时栅极驱动电压值为 11~16.5V。另外,无论在任何情况下,开通时的栅极驱动电压必须在 11~20V 之间。但是,如果超过 16.5V 发生短路,就可能达不到应有的短路能力,如果持续低于 11V,由于  $V_{DS(ON)}$  的增加,就可能形成热损坏。在栅极电压下降之后的状态下,请采取措施防止开关持续。一般情况下,由于伴随着其他的 MOSFET 的开关发生的  $dv/dt$  的作用, MOSFET 就会开通,为了防止这种情况的发生,在关断的时候就必须设置反向偏置驱动。但是,由于沟槽 MOSFET 与一般用途的平面构造的 IGBT 相比,输入电容与反馈电容比较小,所以  $V_{GS}$  难以升高,可以在较少的反向偏置电压下进行设定。如果是 MOSFET,反向偏置电压最小可以降低到 -2V。如果设置成较小的反向偏置,那么就会使驱动功率降低和开关驱动反应加快。但是,由于较小的反向偏置电压可以加速开通、延迟关断,所以对死区的要求比较严格。

① 正的栅极电压 (+ $V_{GS}$ )

如图 19-1 将输出特性在曲线所表示的那样,正的栅极电压对饱和电压产生影响。

如果  $V_{GS}$  比较高,  $V_{DS(ON)}$  及开通损耗虽然会降低,但是为了使短路保护容易实现, +12V~-15V 是最佳值。

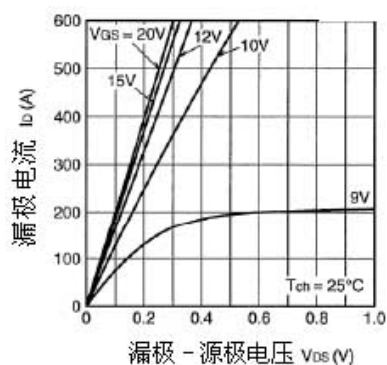


图 19-1 输出特性

② 负的栅极电压 (- $V_{GS}$ )

由于负的栅极电压对各种特性的影响比较小,所以最低限度- $V_{GS}=5V$  比较合适。

一方面,由于栅极上面被重叠了浪涌电压,所以如果输入过高的负栅极电压,就有可能超过- $V_{GS}$  的耐受电压,因此- $V_{GS}$  的最佳

值在 5~10V 之间比较合适。

如图 19-2 和图 19-3 所示,  $R_G$  对开关时间和开关损耗有比较大的影响。换言之,  $R_G$  越小开关时间就越短,开关损耗就越低。而如果  $R_G$  越小,  $t_r$  和  $t_f$  就越快,因此开关时的  $di/dt$  就越高,浪涌电压就越高。所以,必须从开关损耗和浪涌电压两个方面来选定  $R_G$  的最佳值,而这个值因使用者(使用条件)的不同而不同。

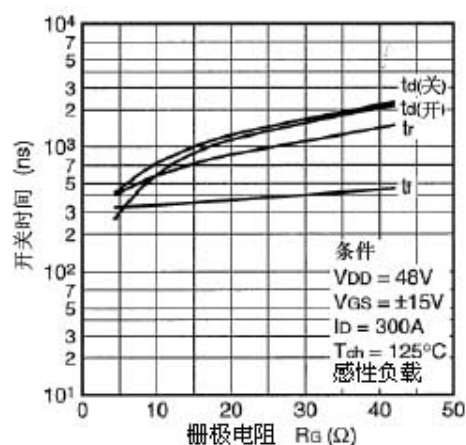
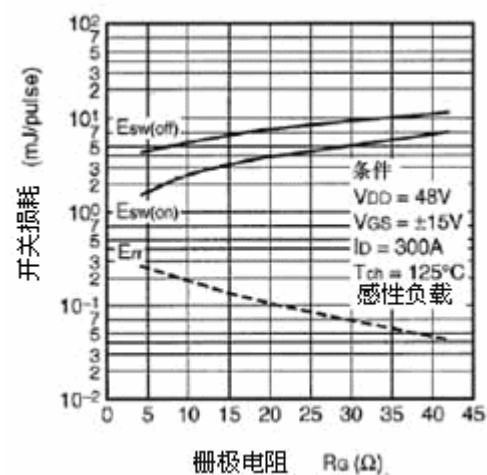


图 19-2 开关时间与栅极电阻的关系



19-3 开关损耗与栅极电阻的关系

## (1) 栅极驱动电路设计实例

一旦 $\pm V_{GS}$ 及 $R_G$ 被确定下来,驱动电路的栅极电流峰值及必要的驱动功率可按照下面的方法进行计算:

## ① 平均电流 (驱动电路消耗的部分除外)

平均驱动电流

$$(Typ.) = Q_G(-10V \rightarrow +15V) \times fc \approx 1.3 \times Q_G \times fc$$

$Q_G$ : 全栅极电荷 ( $V_{GS}=0 \rightarrow 15V$ )

$fc$ : 开关载波频率

注: MOSFET 的  $V_{DS}=0V$  的时候,  $Q_G$  比平常工作时约上升 15%。

## ② 输出电流峰值

$$I_{G_{peak}} = (+V_{GS}) + (+V_{GS}) / (外置 R_G) + (模块内置 R_G)$$

注: 实际上, 由于驱动电路的迟滞 和 驱动线的电感等产生的上升迟滞, 该值约为计算值的 60-80%。

MOSFET 的开通速度虽然较好地反应在了栅极电阻上, 但是关断速度没有什么变化。另外, 特别是在想降低 EMI 的情况下, 可能考虑延迟开通的情况比较多。这样, 在栅极电阻的调整中, 经常出现开通与关断时的最佳值不同的现象。由于这种情况的存在, 所以用类似于图 19-4 的电路将开通和关断的栅极电阻设置为可以独立调整, 这种做法有时是有效的。表 1 的内容是从栅极电阻的利用范围中选取出来的。规格书的开关特性基本上是按照最低的栅极电阻条件进行规定的。另外, 关断 SOA 也仅在这个范围内进行保证。

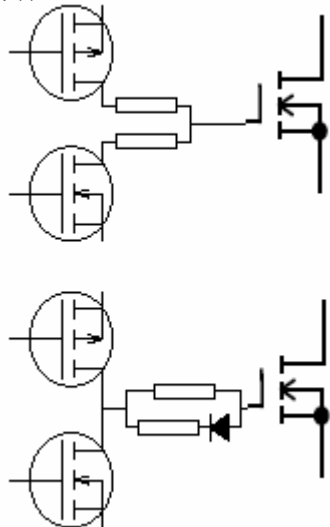


图 19-4 分别转换开通与关断的速度的情况下的栅极电阻的连接

## ③ 驱动功率

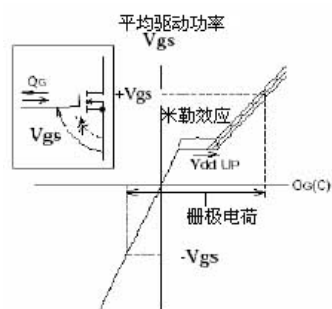
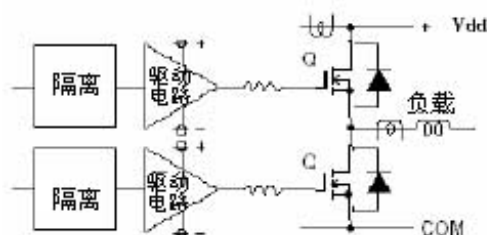


图 20

平均驱动功率

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{T} \int V \cdot i dt \\ &= (+V_{GS}) \frac{1}{T_1} \int i dt + (-V_{GS}) \frac{1}{T_2} \int i dt \\ &= (+V_{GS}) \cdot Q_G \cdot fc + (-V_{GS}) \cdot Q_G \cdot fc \\ &= ((+V_{GS}) + (-V_{GS})) \cdot Q_G \cdot fc \end{aligned}$$

## (4) 桥式电路



(a) 为了防止噪音导致误动作, 在关断的时候请施加反向偏压。

(b) 在主电路的工作速度范围 ( $dV_{DS}/dt=DC-10V/ns$  左右) 内, 为了防止发生电路的误动作, 桥式电路的 MOSFET 与驱动电路的绝缘需要注意以下几点:

- 为避免一次侧的控制电路与二次侧的主电路的分布电容相互感应, 应尽量缩短配线。(在不可能缩短配线的情况下, 可以采用屏蔽, 并使用一点接地)
- 如果是光耦隔离方式, 则使用输入输出之间的耦合电容量较小的光耦。(推荐使用  $dV/dt$  耐量  $15kV/\mu s$  以上的光耦)
- 为了防止感应噪音导致的控制电源电压的波动, 在距离控制 IC 尽可能近的部位安装滤波电容器。

(例) 防止误动作的栅极驱动电路的配线实例

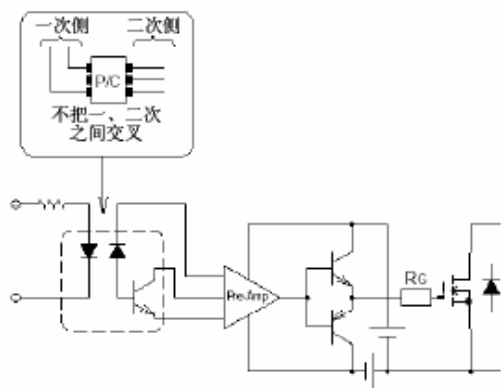


图 21

栅极电路配线方面须注意的问题

- 防止栅极信号发生振荡
  - 尽可能清除感应噪音干扰
  - 输出引线尽可能短
  - 使用双绞线
  - 无线化（直接连接到基板上面）
  - 有时需采用不共用源极的配线
- (c) 为了防止上下臂短路，请在驱动信号中设置上下臂同时关断时间（死区）（约  $5\mu\text{s}$ ）左右。
- (d) 在过电流保护功能方面，请在通常动作的恢复电流中设置  $5\mu\text{s}$  左右的延迟电路，以防止误动作。
- (e) 如果是  $100\text{A}$  以上的大电流，为了防下下臂的驱动源极线的环境电流造成的模块损坏，请在 N 侧（共用侧）为各模块配置隔离的驱动电源。

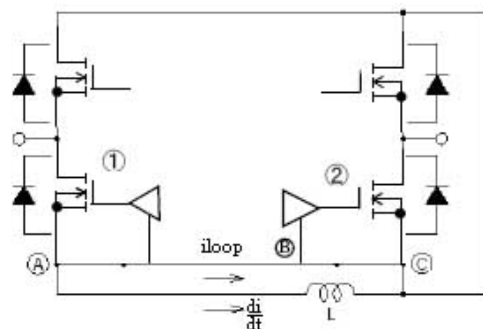


图 22 驱动电源的 N 侧共用问题

由于 MOSFET①开通时的  $di/dt$  与直流母线的下臂分散电感的作用，产生了  $-L \cdot di/dt$  的电压，因此，如果把 (A)，(B)，(C) 的电位分别设置为 A，B，C，则  $A > B > C$ 。

将栅极驱动以 B 为基准之后，则会出现以下的影响：

由于  $A > B$ ，所以①的开通延迟；

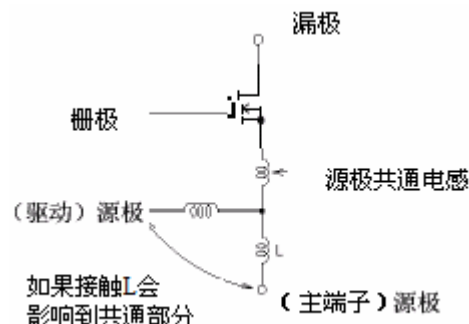
由于  $C < B$ ，所以②的  $V_{GS}$  上升；

由于  $A > C$ ，所以环流电流  $i_{loop}$  从驱动源极线上面通过。漏极电流和 L 越大这种影响就越大。

#### (5) 主电路（电路）安装方面的注意事项

如果源极共用电感（主电流与驱动电流共同通过的配线电感）比较大，会引起开关发生迟滞。

请尽量避免模块附近（驱动源极端子相连的内部器件等）以外区域的主电路与驱动电路的接触和近接。



#### 5. 开关损耗

开关损耗之所以最大化，是在高温条件下进行感应负载的半桥动作、并且配线电感非常小的情况下，但是这种情况下的开关损耗有代表性的例子如图 23 所示。

条件 半桥开关模式

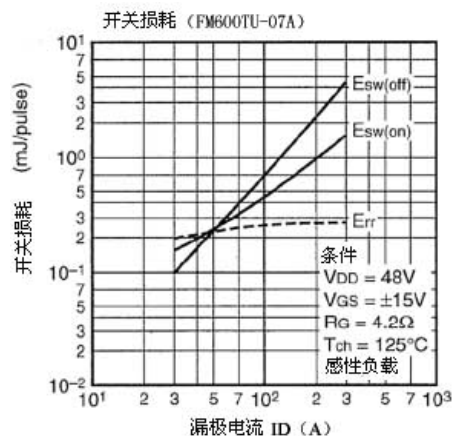


图 23 半桥感性负载开关损耗

表 1 外接栅极电阻的标准值、下限值及开关损耗的测定条件 (R<sub>LOSS</sub>)

型号名称	外接 R <sub>G</sub> (Ω)	R <sub>LOSS</sub> (Ω)	型号名称	外接 R <sub>G</sub> (Ω)	R <sub>LOSS</sub> (Ω)	型号名称	外接 R <sub>G</sub> (Ω)	R <sub>LOSS</sub> (Ω)
FM200TU-07A	13-130	13	FM400TU-07A	6.3-63	6.3	FM600TU-07A	4.2-42	4.2
FM200TU-2A	13-130	13	FM400TU-2A	6.3-63	6.3	FM600TU-2A	4.2-42	4.2
FM200TU-3A	13-130	13	FM400TU-3A	6.3-63	6.3	FM600TU-3A	4.2-42	4.2

## (1) 热敏电阻特性

零负荷电阻值: 100kΩ±3% (25℃ [=298K])

B 常数: 4000K±2% (25℃/50℃ [298K/323K])

再者, 热敏电阻的温度: T<sub>1</sub> 条件下的电阻值 R<sub>1</sub> 用表示, 通过将零负荷电阻值代入 R<sub>0</sub>, 将 298K 代入 T<sub>0</sub>, 将常数 B 分别代入 B 而求出。

$$R_1 = R_0 \times \exp \left\{ B \times \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right) \right\}$$

R<sub>1</sub>: T<sub>1</sub> (K) 时的电阻值R<sub>0</sub>: T<sub>0</sub> (K) 时的电阻值

B: B 常数

## (2) 连接器

	连接器 (模块) 一侧	插头一侧
信号端子	917353-1	2-917354-
热敏电阻端子	179838-1	177898-

插座连接器 (共用): 177914- , 177915-

生产厂商主页: <http://www.amp.com/>(目录型号名称检索: <http://catalog.tycoelectronics.com/TE/bin/TE.Menu?M=Part&LG=1&I=13>)

## 6. 并联

### (1) 并联方式

以下的并联方式适用于额定电流 200A 以上的模块。

MOSFET 模块进行并联使用的情况是有限的。

- 在订购时指定并联数量的情况下，我们对每个并联模块集中在下面的同一  $V_{GS(th)}$  等级中进行交货。

(请勿指定等级)

- $V_{GS(th)}$  等级 (M, N, P 等) 在模块的标签中进行标识。

表 2 并联规格的  $V_{GS(th)}$  等级分类

等级 标记	$V_{GS(th)}$ (V)	等级 标记	$V_{GS(th)}$ (V)
M	4.70-4.95	T	6.05-6.45
N	4.80-5.20	U	6.30-6.70
P	5.05-5.45	V	6.55-6.95
Q	5.30-5.70	W	6.80-7.20
R	5.55-5.95	Y	7.05-7.30
S	5.80-6.20		

@ $I_D$ =额定电流/10000 (A)  $V_{DS}$ =10V,  $T_{ch}$ =25°C

### (2) 并联使用的注意事项

并联使用的每一个模块请采用同一  $V_{GS(th)}$  等级的模块。 $V_{GS(th)}$  等级是为减小开关时刻的瞬时不平衡而进行的规定。

由于高速开关瞬时电流不平衡受模块外部配线电感的影响，所以请注意电路的对称性和低电感

即使在同一装置内部同时存在有多个等级，在每次进行并联的时候如果为同一等级也没有问题。

没有对静态的  $V_{DS(ON)}$  进行区分。同一型号等级的模块进行并联时，模块间的漏极电流的不平衡率为 $\pm 10\%$ 。

不平衡率是根据 2 个模块的并联进行定义的。随着并联数量的增加，漏极电流容易集中流过某个元件，必须根据并联数量的不同设定降额率。

如果把并联了  $n$  个之后的降额率设定为不平衡率 $\pm X\%$ ，则该降额率为：

$$(1 - ((n-1) \times (1-x) / (1+x) + 1) / n) \times 100\%$$

例如：如果 4 个 MOSFET 模块并联，则该降额率为：

$$(1 - ((4-1) \times (1-0.1) / (1+0.1) + 1) / 4) \times 100\%$$

=14%

所以，假定每个模块的额定电流为 300A，那么在 4 个并联时的额定电流为：  
 $300 \times (1-0.14) \times 4 = 1032A$ 。

### (3) 电流分流不平衡的主要原因和注意事项

#### ① 模块特性

##### a) $V_{DS(ON)}$ 的差别

$V_{DS(ON)}$  的不同引起稳态时 ( $di/dt=0$ ) 电流的不平衡。(参照图 32 和图 28)

##### b) 温度的差别

稳态时 ( $di/dt=0$ )  $V_{DS(ON)}$  不同，进而产生不平衡。(参照图 32 和图 28)

开通、关断时的开关速度不同，会产生不平衡。(参照图 33 和图 29)

注) 瞬时电流不平衡，引起的损耗不平衡很小。

- 请使用同一  $V_{GS(th)}$  等级的模块。
- 请注意消除热不平衡的外部原因 (散热性的不同)。

#### ② 配线

##### a) 主电路配线

###### a-1) 电源模块间电感的差别

电源模块间电感的差别可引起开通和关断时电流不平衡。(参照图 33 和图 29)

###### a-2) 包括负载在内的总电路的差别导致稳态时 ( $di/dt \neq 0$ ) 产生不平衡。(参照图 34 和图 30)

- 开关关断时， $di/dt \neq 0$  的不平衡由于受到配线电感的影响，所以请注意保持电路的对称和低电感。

##### b) 驱动器配线

###### b-1) 驱动器与模块间配线的差异导致驱动速度不同，进而产生不平衡。(参照图 32, 图 33 和图 29)

###### b-2) 驱动器输出阻抗的差异导致开通、关断时的驱动速度不同，进而产生不平衡。包括 $R_G$ 和配线电感的阻抗如果过大，则不平衡也会越大。(参照图 31 和图 33)

- 进行配线的时候请采用长度相同尽可能短的绞合线，以避免产生阻抗差异。
- 请注意  $R_G$  不可过大。( $R_G \leq \text{推荐 } R_G \times 10$ )
- 请注意驱动配线与主电路配线不能平行。



图 28

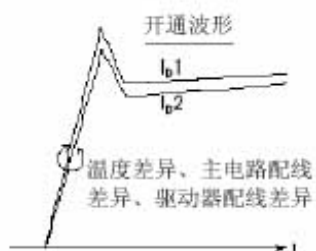


图 29



图 30

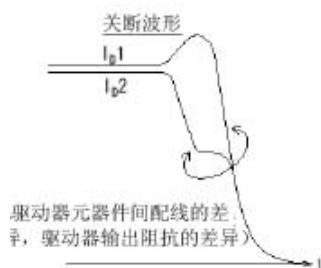


图 31

阻性负载开关电路实例

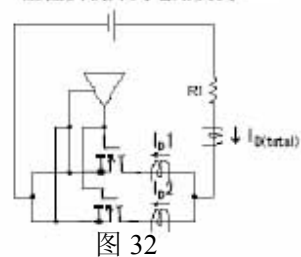


图 32

感性负载开关电路实例

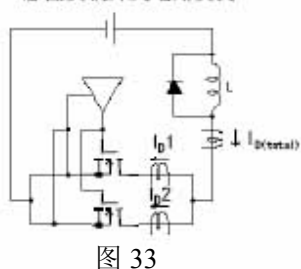


图 33

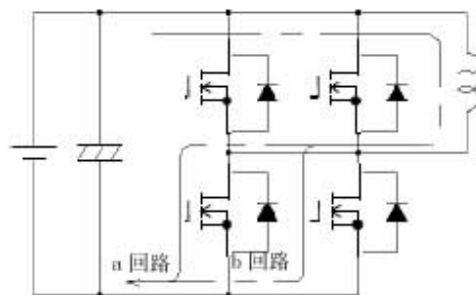


图 34

- 只更换发生了故障的模块导致延烧等类似故障的可能性比较大，所以我们建议更换并联部分的全部模块。另外，为了改善不平衡率，我们推荐使用同一批号的模块进行并联。

## 7. 功率损耗和结温

在使用 MOSFET 模块时通过结温可以判断是否存在问题。下面以图 43 的波形为例说明如何计算结温。不仅要使得结温不超过最大允许值，还要注意结温的变化对功率循环寿命的影响。



图 43

### a. 功率损耗

为了计算结温，就必须知道 MOSFET 模块的功率损耗。首先计算每个脉冲的损耗。每个脉冲的损耗包含导通损耗和开关损耗。（图 44）

#### (1) 导通损耗

用  $V_{DS(ON)}$  VS.  $I_D$  特性曲线计算导通损耗。

$$E_{(DC)} = \frac{I_{D1} \times V_{DS(ON)1} + I_{D2} \times V_{DS(ON)2}}{2} \times t_{w1} \quad (J)$$

注)：上式是简化了的公式，本来的公式是：

$$E_{(DC)} = \int_0^{t_{w1}} I_D(t) \cdot V_{DS}(t) dt$$

另外，此时使用  $T_{ch}=125^{\circ}C$  时的  $V_{DS(ON)}$  VS.  $I_D$  特性曲线。

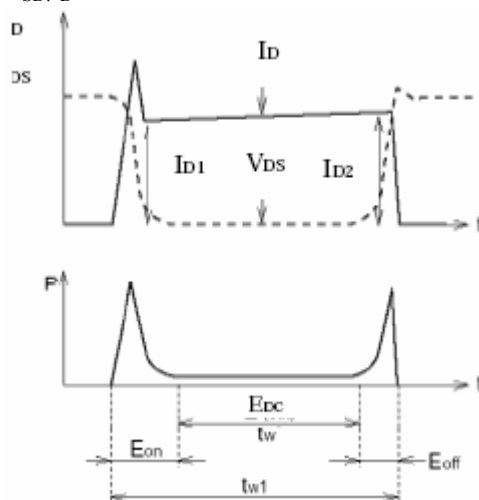


图 44

#### (2) 开关损耗

开关损耗可用实际波形的积分计算。

$$E_{on} = \int_{ta}^{tb} I_D(t) \cdot V_{DS}(t) dt = \frac{1}{n} \sum_{n=1}^n P_n \times (tb - ta)$$

N: 分割数

(把  $ta-tb$  的区间进行  $n$  等分，计算各区间的平均功耗)  $E_{off}$  也采用同样的计算方法

根据 (1)、(2)，得到每个脉冲的损耗

$$E_1 = E_{(DC)} + E_{on} + E_{off}$$

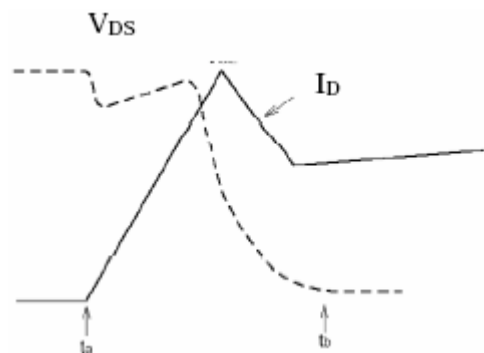


图 45

#### (3) 平均功耗计算。

每个脉冲内的平均功率损耗表示为  $P_1 = E_1/t_{w1}$  (W)。用矩形波近似图 43 的波形得到如图 46 所示的波形。



图 46

计算  $tw2$  期间的平均功耗。(参照图 47)

$$P_{av} = (E_1/tw2) \times N \text{ (W)}$$

N:  $tw2$  期间的脉冲数



图 47

计算整体的平均功耗。(参照图 48)

$$P_{AV} = P_{av} \times (tw2/T2) \text{ (W)}$$

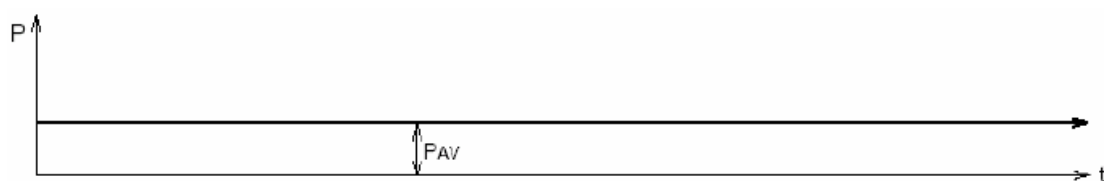


图 48

#### b. 结温的计算

使用已经得出的  $P_1$ 、 $P_{av}$  及  $P_{AV}$  计算结温。根据脉冲宽度可以分为以下 3 种情况进行考虑:

- (1)  $tw1$  短的情况 ( $tw1 \ll 1\text{ms}$ )
- (2)  $tw1$ ,  $tw2$  比较长的情况 ( $1\text{ms} < tw1 < tw2 < 1\text{sec}$ )
- (3)  $tw2$  长的情况 ( $tw2 > 1\text{s}$ )

##### (1) $tw1 \ll 1\text{ms}$

对于图 47 的近似图形, 外壳温度 (或散热器温度) 稳定不变时, 在  $tw2$  关断时结温达到最高。(参照图 49)

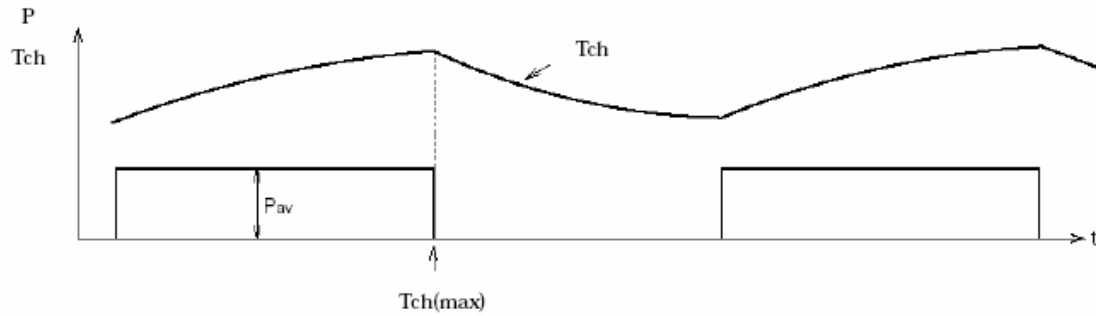


图 49

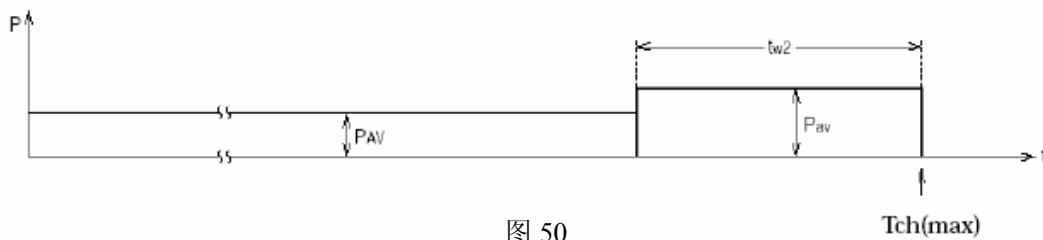


图 50

如果结和外壳间的温度差表示为 $\Delta T$  (ch-c)，则：

$$\begin{aligned}\Delta T(\text{ch-c}) &= R_{\text{th}}(\text{ch-c}) \times P_{\text{AV}} - Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}2}) \times P_{\text{AV}} + Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}2}) \times P_{\text{av}} \\ &= R_{\text{th}}(\text{ch-c}) \times P_{\text{AV}} + (P_{\text{av}} - P_{\text{AV}}) \times Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}2})\end{aligned}$$

$R_{\text{th}}(\text{ch-c})$  ..... 结和外壳间的热阻

$Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}2})$  ..... 结和外壳间在  $t_{\text{w}2}$  时的瞬时热阻

所以， $T_{\text{ch}} = T_{\text{c}} + \Delta T(\text{ch-c})$  ( $T_{\text{c}}$  用热电偶实际测得)

假定  $T_{\text{ch}}(\text{max}) = 150^\circ\text{C}$ ，因此允许外壳温度  $T_{\text{c}}(\text{max}) = 150 - \Delta T(\text{ch-c})$ 。

(2)  $1\text{ms} < t_{\text{w}1} < t_{\text{w}2} < 1\text{sec}$

在这种情况下，计算平均功耗  $P_1$  时需要考虑纹波。

与 (1) 中类似近似法得到如图 51 所示的矩形波。

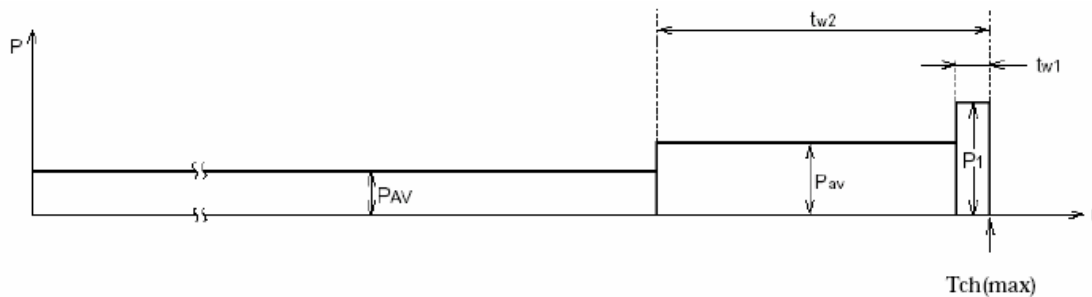


图 51

$\Delta T(\text{ch-c})$

$$\begin{aligned}&= R_{\text{th}}(\text{ch-c}) \times P_{\text{AV}} - Z_{\text{th}}(t_{\text{w}2}) \times P_{\text{AV}} + Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}2}) \times P_{\text{av}} - Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}1}) \times P_{\text{av}} + Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}1}) \times P_1 \\ &= R_{\text{th}}(\text{ch-c}) \times P_{\text{AV}} + (P_{\text{av}} - P_{\text{AV}}) \times Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}2}) + (P_1 - P_{\text{av}}) \times Z_{\text{th}}(\text{ch-c})t_{\text{w}1}\end{aligned}$$

$R_{\text{th}}(\text{ch-c})$  ..... 结和外壳间的热阻

$Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}2})$  ..... 结和外壳间在  $t_{\text{w}2}$  时的瞬时热阻

$Z_{\text{th}}(\text{ch-c})(t_{\text{w}1})$  ..... 结和外壳间在  $t_{\text{w}1}$  时的瞬时热阻

所以， $T_{\text{ch}} = T_{\text{c}} + \Delta T(\text{ch-c})$  ( $T_{\text{c}}$  用热电偶实际测得)

$$T_{\text{c}}(\text{max}) = 150 - \Delta T(\text{ch-c})$$

(3)  $tw_2 > 1\text{sec}$ 

虽然思路与 (2) 基本相同, 但是在这种情况下, 需要考虑散热器的温度变化。因此需要知道散热器的瞬时热阻。(图 52)

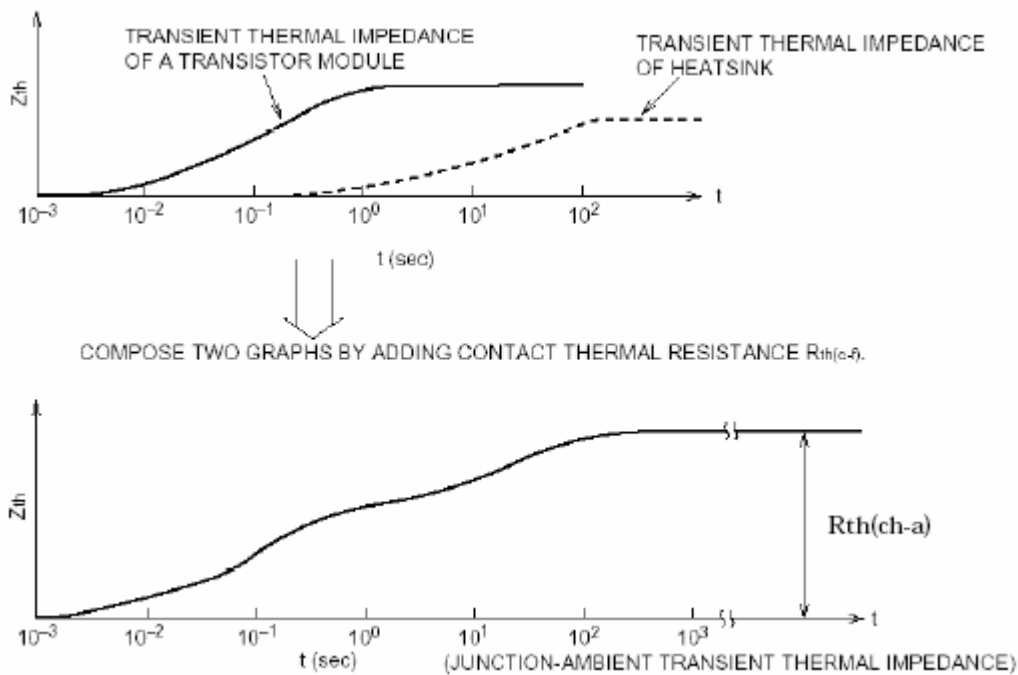


图 52

同 (2) 的计算类似, 根据新作成的曲线图可以计算结和周围环境的温度差。

$\Delta T(ch-a)$

$$= R_{th(ch-a)} \times P_{AV} - Z_{th(ch-a)}(tw_2) \times P_{AV} + Z_{th(ch-a)}(tw_2) \times P_{av} - Z_{th(ch-a)}(tw_1) \times P_{av} + Z_{th(ch-a)}(tw_1) \times P_1$$

$$= R_{th(ch-a)} \times P_{AV} + (P_{av} - P_{AV}) \times Z_{th(ch-c)}(tw_2) + (P_1 - P_{av}) \times Z_{th(ch-c)}(tw_1)$$

所以,  $T_{ch} = T_a + \Delta T(ch-a)$  ( $T_a$  用温度计进行测得)

## c. 散热器的选定方法

图 53 是多个模块共用一个散热器的热等效电阻

对于该等效回路, 散热器的温度为

$$T_f = T_a + (PQ(AV) + PR(AV) \times N \times R_{th(f-a)})$$

$T_a$ : 环境温度

$PQ(AV)$ : MOSFET 的平均功耗

$PR(AV)$ : 二极管的平均功耗

$N$ : 臂数

$R_{th(f-a)}$ : 散热器与周围环境间的热阻

外壳温度  $T_c$  为

$$T_c = T_f + (PQ(AV) + PR(AV) \times R_{th(c-f)})$$

$R_{th(c-f)}$ : 外壳与散热器之间的接触热阻

将通过 b 求得的  $T_{c(max)}$  代入上式, 则得

$$T_{c(max)} = T_a + (PQ(AV) + PR(AV) \times N \times R_{th(f-a)}) + (PQ(AV) + PR(AV)) \times R_{th(c-f)}$$

从而散热器的热阻计算公式为:  $R_{th(f-a)} = \frac{T_{c(max)} - T_a - (PQ(AV) + PR(AV)) \times R_{th(c-f)}}{(PQ(AV) + PR(AV)) \times N}$

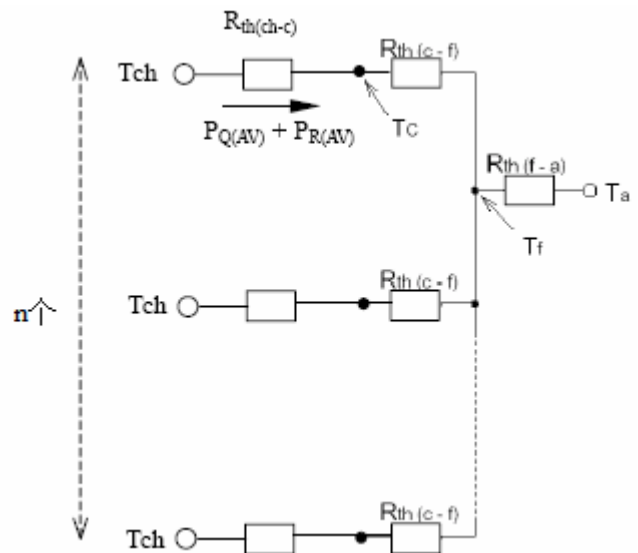


图 53

平均功耗简易计算式

### (1) VVVV 变频器

#### ■适用范围

VVVV 变频器用功率器件选定（比较时），需要计算一般开关工作时总的损耗。但是该计算式不适用于设备的热设计（极限设计）。

#### ■假定条件

- ① 正弦波电流输出 PWM 控制 VVVV 变频器
- ② 通过正弦波与三角波的比较产生 PWM 信号
- ③ PWM 信号的占空比在 $(1-D)/2 \sim (1+D)/2$  (%/100)之间变化 D: 调制率
- ④ 输出电流中没有纹波，按  $I_{DP} \cdot \sin x$  变化
- ⑤ 输出电流对应的功率因数为  $\cos\theta$ ，开关对应的负载为纯感性负载

#### ■计算式

PWM 信号的占空比变化与时间  $x$  的对应关系是 $(1+D \times \sin x)/2$ ，这跟它电压变化相当，所以，输出电流与电压的关系用功率因数  $\cos\theta$  表示的输出电流在任意相位  $x$  时，输出电流和 PWM 信号的占空比为，

$$\begin{aligned} \text{Output current} &= I_{DP} \times \sin x \\ \text{PWM Duty} &= \frac{1 + D \times \sin(x + \theta)}{2} \end{aligned}$$

相位  $x$  时的  $V_{DS(ON)}$  与  $V_{SD}$  为：

$$\begin{aligned} V_{ds(on)} &= V_{ds(on)} (@ I_{DP} \times \sin x) \\ V_{sd} &= V_{sd} @ (-1) \times I_{SDP} (= I_{DP}) \times \sin x \end{aligned}$$

根据以上可以计算 MOSFET 的静态损耗为：

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (I_{DP} \times \sin x) \times V_{ds(on)} (@ I_{DP} \times \sin x) \times \frac{1 + D \sin(x + \theta)}{2} \cdot dx$$

同样，续流二极管的静态损耗为：

$$\frac{1}{2\pi} \int_\pi^{2\pi} ((-1) \times I_{DP} \times \sin x) \times (V_{sd} @ (-1) I_{DP} \times \sin x) \times \frac{1 + D \sin(x + \theta)}{2} \cdot dx$$

另外，MOSFET 的动态损耗与 PWM 信号的占空比没有关系：

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi (P_{sw(on)} (@ I_{DP} \times \sin x) + P_{sw(off)} (@ I_{DP} \times \sin x)) \times f_c \cdot dx$$

以图 52 的理想续流二极管为例，则有：

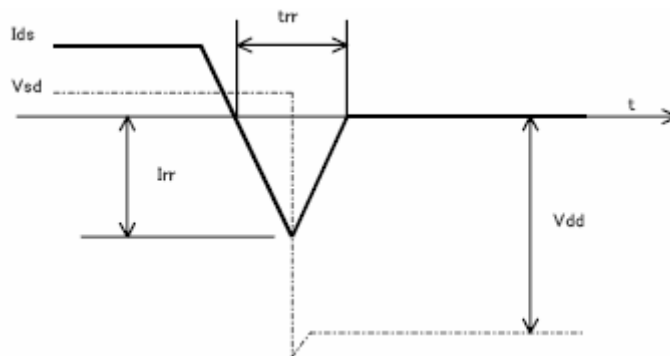


图 52 FWDi 的动态损耗

$$P_{SW} = \frac{I_{rr} \times V_{dd} \times t_{rr}}{4}$$

续流二极管反向恢复时，输出电流在半个周期内的动态损耗为：

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_{\pi}^{2\pi} \frac{I_{rr}(@I_{dp} \times \sin x) \times V_{dd} \times t_{rr}(@I_{dp} \times \sin x)}{4} \times f_c \cdot dx \\ &= \frac{1}{8} \int_{\pi}^{2\pi} I_{rr}(@I_{dp} \times \sin x) \times V_{dd} \times t_{rr}(@I_{dp} \times \sin x) \times f_c \cdot dx \end{aligned}$$

#### ■变频器应用时的一般注意事项

- 将输出电流的 1 个周期分成多个部分，然后计算各个部分实际的“PWM 占空比”，“输出电流”及“该电流对应的  $V_{DS(ON)}$ 、 $V_{SD}$ 、 $P_{SW}$ ”，对各个部分的这些值求和来计算一个周期的值。
- PWM 占空比与信号的发生方法有关。
- 输出电流波形、输出电流同 PWM 占空比的关系均与信号发生的方法、负载以及其它各种因素有关，所以计算应以实际波形为准。
- 计算中  $V_{DS(ON)}$  采用  $T_{ch}=125^{\circ}\text{C}$  的值。
- $P_{SW}$  采用  $T_{ch}=125^{\circ}\text{C}$  的半桥工作时的值。

#### ■热设计方面的注意事项

- ① 必须损耗最恶劣的开关工作条件。
- ② 应考虑输出电流的周期导致的温度变化。

(60Hz 为 20%。数 Hz 的输出电流持续数秒与峰值电流的直流连续开关工作产生的温度变化大致相同)。

- ③ 要考虑开关引起的温度波动。(特别是  $f_c \ll 10\text{kHz}$  时尤为重要)。

修订 副号	页	修订记录	修 订 人 签 名	修订时间
A	5 11 28 29 30 32 34 35 42 43	<ul style="list-style-type: none"> <li>追加了 MOSFET 的项目和说明。对错误记录 <math>I_{EM}</math> 进行了变更。</li> <li>对错误记录“发射记录”进行了变更。</li> <li>把 C→D E→S VCE→Vds Ic→Id Vcc→Vdd IGBT 的记号变更到了 MOSEFT 记号。</li> <li>同上</li> <li>同上</li> <li>同上</li> <li>同上</li> <li>对图 53 和错误记录 <math>T_j</math>, <math>R_{th(j-c)}</math> 进行了变更。 将 PD (AV) 和 PT (AV) 变更成 PQ (AV) + PR (AV)。</li> <li>对错误记录 <math>I_{cp}</math>, <math>V_{CE(sat)}</math> 进行了变更。</li> </ul>	高 良	2006. 7. 27.

### 安全设计注意事项

- 本公司尽最大努力来提高产品的质量和可靠性。然而，半导体产品仍有可能被破损或者发生故障。所以应该重视安全性，采用冗余的防火和防故障的设计，使得即使这些产品被击穿或出现故障，也不会导致包括人身事故、火灾和社会问题的事故。

### 使用此手册时的注意事项

- 本手册仅作为客户应用三菱电机半导体产品时的参考资料，所以本公司不承诺允许使用与本手册中描述的产品信息有关的知识产权和其他专利权。
- 对于本手册中描述的产品数据、图形、表格以及应用电路举例而造成的任何损坏事故和任何侵害第三者的行为，本公司不承担任何责任。
- 本手册中描述的产品数据、图形和表格在其发表时均为正确的，它们将来可能发生变化，恕不另行通知。在购买相关产品前，请与三菱电机或代理商取得联系，以及登陆三菱电机半导体主页  
(<http://www.MitsubishiElectric.co.jp/semiconductors/>) 来确认产品的最新信息。
- 本手册中记载的产品并非用来设计与那些可能直接危害人的生命的设备或系统一起使用。如果您需要将这些产品应用于如运输设备、医疗仪器、航空器械、核反应控制器、燃料控制器或者海底传输装置等，请与三菱电机或其代理商联系。
- 对于本手册的传播和复制，要事先取得三菱电机的书面许可。
- 如果您对本手册有任何疑问，请与三菱电机或其代理商联系。

2005 年 7 月 15 日编纂

三菱电机株式会社功率器件制作所  
应用技术统辖 应用技术第 1 部



三菱电机株式会社