

第 9 章

评价、测定方法

目 录

1. 适用范围	9-1
2. 评价、测定方法.....	9-1

本章中对 IGBT 模块的特性评价方法和电压、电流的测定方法进行说明。

1 适用范围

本章中，对适用于交换频率：几 kHz~100kHz，装置容量：几百 VA 以上的功率电子产品的 IGBT 模块的特性评价方法和电压、电流等的测定方法进行说明。

2 评价、测定方法

2.1 评价、测定方法的概要

在功率电子应用装置的开发或试验阶段中，有必要在实际安装于装置上的状态，进行电力用半导体元件的特性评价以及元件负荷的测定等。

评价项目和测定方法的概要用表 9-1 表示。

表 9-1 评价项目和测定方法的概要

No.	评价项目	测定量	测定方法	测定器械实例
1	绝缘耐压	电压	先将元件的电极部短路，在导电部和装置的构架间外加电压。	耐压试验器
2	元件的耐压		将门极-发射极间短路，集电极-发射极间外加电压。 ※如果外加电压有可能超出电路上所连接的机器的额定值，请先将其开放后再进行电压外加。	波形记录器 (576 型 Sony Tektronix)
3	饱和电压		对工作时的饱和电压的测定是在集电极-发射极间接入电压钳制电路，使示波器内置放大器不饱和，从而进行测定。 ※静态特性通过波形记录器或脉冲 hFE 测试仪进行测试。	示波器
4	关断时的跳跃电压	电压	直接测定门极、发射极各自与元件的端子间的电压。	示波器
5	交换时间	电压 电流	分别按照交换时间的定义，测试所需要的电流、电压波形。	示波器 电流探测器
6	电流分配 (并联使用时)	电流	用工具和计测用变流器测定各个元件的电流。	示波器 电流探测器
7	交换损耗	电压 电流	将交换动作时元件中所流过的电流与元件的端子间外加的电压的瞬间值的乘积得出电功率，并对此以所定的时间进行积分，求出每次交换时发生的损耗。 (1) 以电压、电流波形为基础进行计算。 (2) 也有使用具有演算机能的测定器的方法。	示波器 同上 { 7854型 2430A型
8	动作轨迹		通过在电流-电压图表上标出交换动作时元件中流过的电流和元件的端子间外加的电压得出。	有 X-Y 表示机能的示波器
9	外壳温度	温度	测定 IGBT 下的铜基板的温度。 ※一般的铜基板温度为第 3 章中所提到的要点值。	热电偶温度计
10	结温		利用 IGBT (比如说饱和电压) 所具有的温度依存性，先制作结温和元件特性的校正曲线，再测定实际动作中的元件特性，从而推定结温。 ※还有直接使用红外热摄像机直接测定结温的方法。	红外热摄像机

2.2 电压的测定

IGBT 工作时的电压测定，很容易受到由大幅度的高速交换引起的杂波的影响，请特别注意。

1) 测定器与校正

与作为测定对象的电压值一样，它的波形也很重要。通常，测定器使用示波器，测定电压使用电压探测器。一旦改变示波器和探测器的组合，探测器/示波器的电压分割元件 RC 的时间常数就发生变化。因此，在使用探测器之前，必须利用示波器的校正输出、电压，在全频率区域内进行探测补偿，使其衰减程度一致。进行适当的灵敏度设定（一般在显示屏上 3~4div 振幅），将输入耦合设定为 DC 后进行测定。此时，如果探测器的调整用电容和示波器的输入电容不相适应，将无法进行调整，因此请在选择探测器时注意。另外，关于示波器和探测器的选定方法请参考 2.5、2.6 项。

2) 饱和电压的测定

与一般使用 IGBT 的电路电压在较高的数百 V 左右相比，饱和电压为数 V 左右的低值。另一方面，示波器的显像管大小有限，为了使饱和电压能够精确读出而一旦提高电压灵敏度，则由于示波器内部的增幅器饱和等影响，可能显示与实际不同的波形。

因此，交换动作中的 IGBT 饱和电压，不能通过直接用示波器测定元件的集电极—发射极间的电压的方法得出。

在此，要测定饱和电压，可以如图 9-1 中所示的外加电压钳制电路的方法。

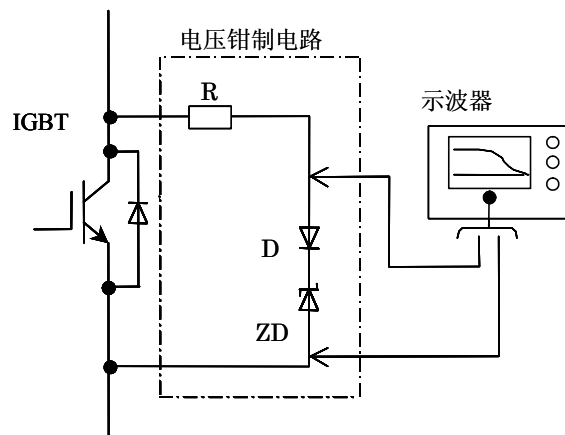


图 9-1 动作时的饱和电压的测定方法。

图 9-1 中，稳压二极管 ZD 是用来限制 IGBT 断开时的高电压的，通常使用 10V 以下的齐纳电压的二极管。R 为用于限制电流的电阻，IGBT 关断时，电路中的电压几乎全部加在该电阻上，因此需要比较大容量的电阻器。

二极管 D 为了防止稳压二极管 ZD 的结电容中积聚的电荷放电，并防止因结电容和电流限制电阻形成滤波器。

3) 浪涌电压的测定（集电极-发射极间电压的测定）

IGBT 虽然有交换速度快的优点，但是另一方面，关断时电流变化率 di/dt 很大，诱发应用装置主电路配线电感 L_s 的电压值也变大，该电压加上直流电路的电压，形成尖峰状的电压外加在元件上。需要确认该电压对于

元件的最大额定值有充分余量。

浪涌电压虽然是通过示波器测定出元件的端子间的电压，然后直接读出显像管上的数值而得到的，但是测定时仍需注意以下几点。

- i) 使用有充分频率的频带的探测器和示波器。
- ii) 事先调整示波器的灵敏度，调整探测器的频率修正。
- iii) 测量用探测器与元件的端子直接连接。

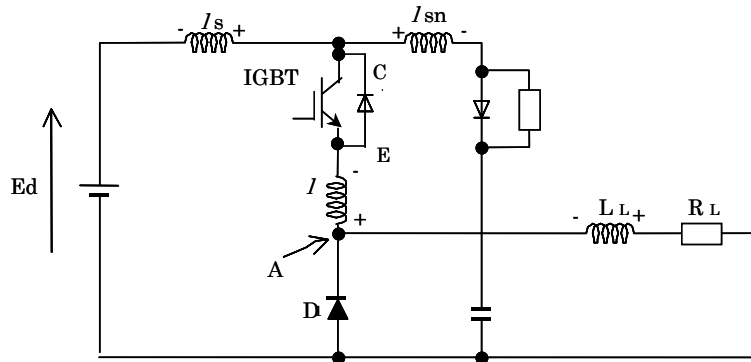


图 9-2 浪涌电压测定电路（例）

用图 9-2 中所示电路测定 IGBT 关断时的浪涌电压时，在电路各部分电感中引发如图所示的极性的电压。现在，要测定浪涌电压，在用 V_{CA} 代替 V_{CE} 测定时，则与实际的 V_{CE} 相比会低下 $-I \cdot di/dt$ ，所测定的电压是错误的。因此，测定 IGBT 的浪涌电压时，就模块端子来说，需要将端子直接与电压探测器相连接等，对已极度缩小了配线电感 I 的部分进行测量。

- iv) 探测器的测定用导线设为最短。
- v) 注意不要混入杂波。

电压探测器与被测定电路连接时，示波器的基准电位与交换电路的电位相同。一旦交换电路的对地电位变动很大，经由示波器的电源线流过共模的电流，有可能造成示波器内部电路的误动作。

确认是否有杂波混入有以下几种方法。

- ① 讨论所测定的波形是否可以物理学角度予以说明。
- ② 与用难以受杂波影响的蓄电池电源型示波器所测定的波形作比较。

4) 门极电压的测定（门极-发射极间电压的测定）

门极-发射极间的电压与浪涌电压相同，能够通过示波器直接测定。但是，IGBT 的门极为电容性的负荷，并且电压探测器中也存在电容性的阻抗，因此，动作中请不要拆装电压探测器进行测定。

另外，测定门极电压时的注意事项与测定浪涌电压时相同。

2.3 电流的测定

虽然电流的测定也需要使用电流探测器，但是在实际的装置上为了达到降低配线电感和装置构造简略化的目的，装置的主电路已被紧凑化，因此要对元件的电流进行测定，必须将配线延长。为了尽量减少这种影响，就使用变流器尽量使延长配线最短化。另外，也由于电流探测器的测定能力有限，因此必须使用变流器。电流探测器虽然可以通过保持导电部绝缘对电流进行测定，但是由于信号级别较低，检测器又是利用了电磁感应原理因而非常容易受感应而产生的杂波影响等，请务必注意不要混入杂波。

1) 测定器

电流检测器实例如表 9-2 所示。

表 9-2 电流检测器实例

No.	品名	型号	生产厂商	备注
1	DC 电流探测器 需要专用增幅器、电源	A6302 型	Sony Tektronix	电路电压最大值：500V DC~50MHz 状态下 20A 为止 峰值脉冲电流 50A 为止
2		A6303 型		电路电压最大值：700V DC~15MHz 状态下 100A 为止 峰值脉冲电流 500A 为止
3	AC 电流探测器	P6021 型		电路电压最大值：600V 120Hz~60MHz 15Ap-p 峰值脉冲电流 250A
4		P6022 型		电路电压最大值：600V 935Hz~120MHz 6Ap-p 峰值脉冲电流 100A
5	ACCT	多种型号	Pearson	~35MHz

2) 电流探测器的灵敏度确认

在检测前，必须要确认探测器的灵敏度。

电流探测器的校正有采用示波器的校正输出、或是采用如图 9-3 所示的振荡器这两种方法。图 9-3 的方法是使用已知电阻 R （使用无感应电阻），测 R 两端的电压 e 来求出 i 。该电流与电流探测器的波形比较，从而校正电流探测器。 i 偏小时，增加电流探测器的初级绕组即可提高灵敏度。

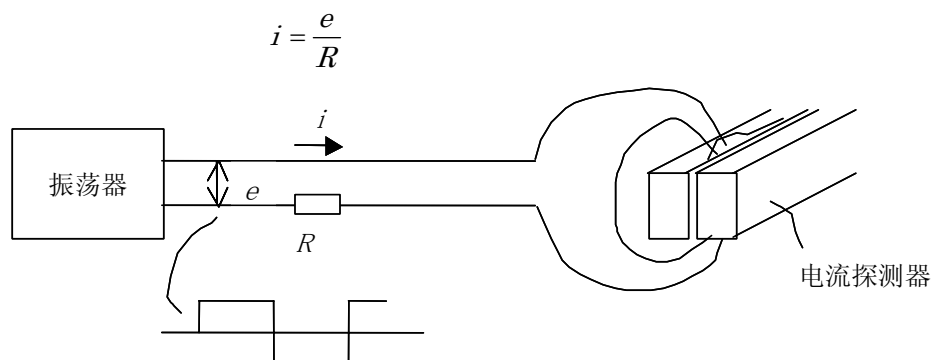


图 9-3 电流探测器的校正方法

3) 电流的测定方法

图 9-4 说明测定元件电流时变流器 CT 的插入位置和 2 个元件并列使用时电流的测定方法。测定正极的 T_{11} 的电流时，用电流探测器测定 CT_1 的次级侧电流。另外，测 T_{12} 的电流时，也以同上方法用电流探测器测定 CT_2 的次级侧电流。正极侧支路的电流（ T_{11} 的电流和 T_{12} 的电流之和），可以将 CT_1 和 CT_2 的次级侧电流调整成同向后一起测定，因此可以使用同一个电流探测器。

关于电流探测器和变流器的应用，请参考 2.6 和 2.7 项。

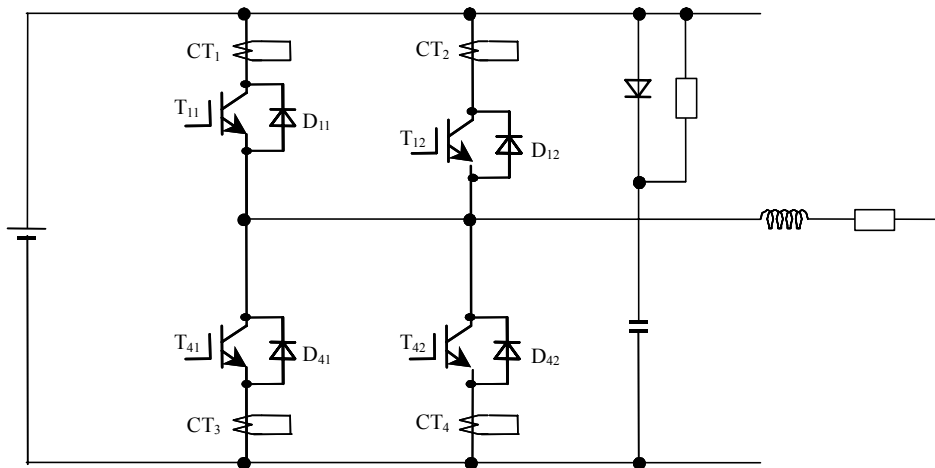


图 9-4 CT 的插入位置和电流的测定方法

2.4 交换损耗的测定

交换损耗表示了从交换开始时到交换动作完成回复稳定状态为止所发生的损耗。比如说，开通损耗指门极-发射极间被正偏压开始，到集电极-发射极间达到饱和电压为止的时间内发生的损耗。

交换损耗通常用每交换 1 次的发生能量来表示。

图 9-5 为交换动作波形和交换损耗的实例。要测定交换损耗，首先必须正确地测定出电流、电压的波形。测定方法分别如前面所述，如果同时测定电流和电压，那么受电压探测器侧流入的共模电流影响，电流的波形可能产生变形，请充分注意。是否有影响，只要比较有、无电压探测器两种状态下电流的波形便可知道。发生电流波形变形的时候，只需如图 9-6 所示在电压探测器和示波器的电源电缆中插入共模扼流圈（在具有优越的高频特性的铁芯上绕上电线）便可使变形情况减轻。

另外，设定基准 0V 和 0A 也非常重要。特别是使用 AC 电流探测器时，受测定电流值和导通率影响，0A 的位置将发生变化，请充分注意。

下面介绍一种具有波形演算功能、并可以比较良好的精度测定交换损耗的仪器。

数据处理型示波器（Processing oscilloscope）7854 型（Sony Tektronix）

数字内存型示波器（Digital memory scope）2430A 型（Sony Tektronix）

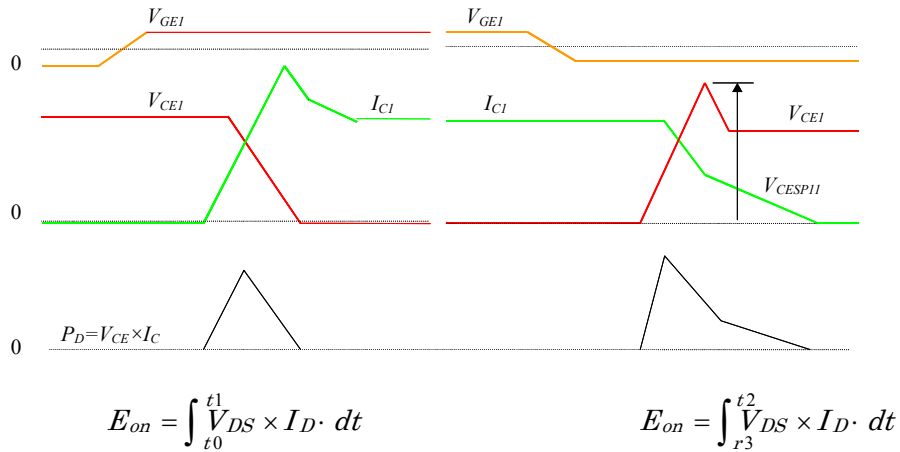


图 9-5 交换损耗

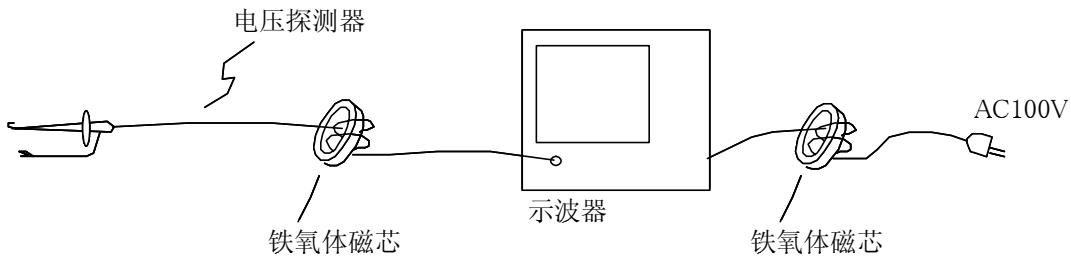


图 9-6 共模扼流圈的插入方法

2.5 示波器的选择

示波器有各种功能和性能，必须根据测定项目和作为测定对象的信号变化快慢，做适当的选择。本项中对信号源启动时间和使用的示波器所需要的频率频带进行概略说明。

1) 脉冲波形的启动时间和频率频带的关系

脉冲波形的启动时间如图 9-7 所示，根据电压从 10%到 90%的变化所需要的时间进行定义。

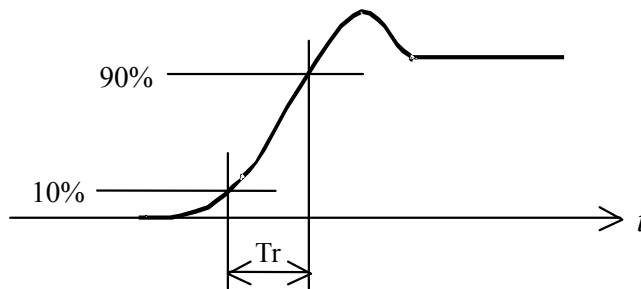


图 9-7 脉冲波形的启动时间的定义

设启动时间为 T_r 、达到-3dB 时的频率为 F_{-3dB} ，则它们之间有下列关系。

$$T_r \times F_{-3dB} \cong 0.35 \dots\dots\dots(1)$$

(1) 信号源的启动时间 T_{r1} 和示波器的选择

在实际测定系中各部的启动时间如图 9-8 所示。

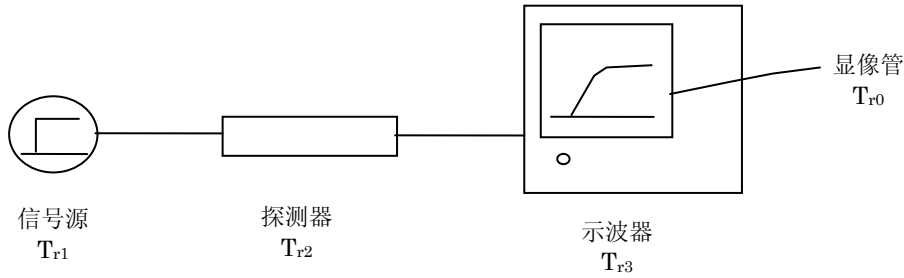


图 9-8 测定系和各部分的启动时间

示波器的显像管上显示的波形启动时间 T_{r0} 由各部分的启动时间决定，可以下列算式表示。

$$T_{r0} = \sqrt{T_{r1}^2 + T_{r2}^2 + T_{r3}^2} \dots\dots\dots(2)$$

要正确再现信号源的波形，将 $T_{r0} = T_{r1}$ 即可，

$$\varepsilon = \frac{T_{r0} - T_{r1}}{T_{r1}} \times 100(\%)、k = \frac{T_{r2} + T_{r3}}{T_{r1}} \dots\dots\dots(3)$$

应用算式 (2) 求出的 ε 与 k 的关系如表 9-3 所示。

表 9-3 波形的测定误差和信号源以及测定器的启动时间比率

ε (%)	1	2	3
k	7	5	4

参考该表，比如说，要以 3% 的精度来测定启动时间为 3.5nsec 的信号，则探测器和示波器的启动时间合计必须在信号源启动时间的 1/4 ($3.5/4=0.87\text{nsec}$) 以下。

忽略探测器的启动时间的情况下，从(1)式得出示波器所要的频率频带为 $0.35/0.87 \times 10^9 \approx 4 \times 10^8$ 即 400MHz。因此，必须使用频率频带在 400MHz 以上的示波器。

由上所述可知，必须根据信号的启动时间的长短来选择示波器。

2.6 探测器的选择

探测器如前文所述分为电压探测器和电流探测器两种。

本项对选择这些探测器的基本事项以及使用中的注意点进行说明。

2.6.1 电压探测器

1) 启动时间

如 2.5 项中所记载的，必须根据信号启动时间的长短考虑所使用的探测器的频率频带。其思路与示波器完全相同，在此省略。

2) 对信号源阻抗与探测器电容的启动时间的影响

测定系的电气等效电路如图 9-9 所示。 R_1 、 C_1 为信号源的输出阻抗与电容， R_2 、 C_2 为探测器和示波器的输入阻抗与输入电容。

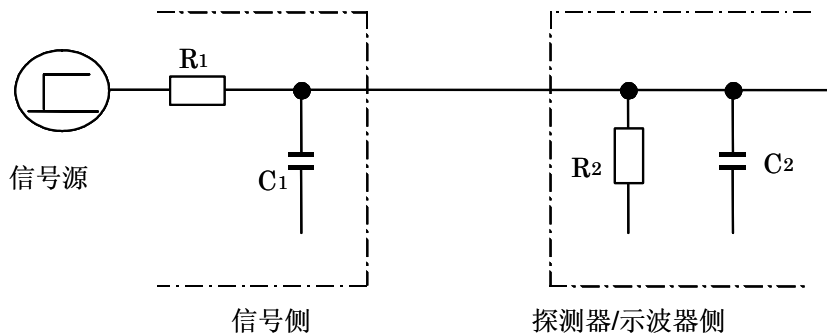


图 9-9 测定系的电气等效电路

C-R 滤波器的启动时间 (T_r) 为

$$T_r = 2.2 \times R \times C$$

图 9-9 中， R 、 C 分别如下式：

$$R = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad C = C_1 + C_2$$

通过上述算式就能明确下述内容：

- ① 当信号源的输出阻抗大时，启动时间变长。
- ② 当探测器和示波器的电容大时，同样启动时间变长。

例如，用通常使用的被动型 10: 1 探测器 ($C_2=9.5\text{pF}$, $R_2=10\text{M}\Omega$) 来测试信号源 ($R_1=500\Omega$, $C_1=2\text{pF}$) 的信号时，相对于不连接探测器的情况下启动时间 2.2nsec 而言，连接探测器后的启动时间变成 12nsec，产生了很大的误差。

3) 探测器的选择

根据测定目标的不同，探测器的选择条件和测定时的注意事项如表 9-4 所示。

表 9-4 根据测定目标选择探测器的大致标准

测定目标 项目	振幅的测定	启动时间 etc.	相位 (差)
使用探测器的 必要条件	<ul style="list-style-type: none"> · 在所使用频率频带中输入阻抗应该较高。 	<ul style="list-style-type: none"> · 对信号源启动时间而言应有充分的频率频带。 	<ul style="list-style-type: none"> · 输入电容应该较小。 · 电缆长度、其特性均应一致。
测定时注意点	<ul style="list-style-type: none"> · 脉冲宽度应为探测器、示波器的时间常数的 5 倍以上。 · 尽量选择低阻抗的信号源作测定点。 	<ul style="list-style-type: none"> · 对信号源启动时间而言，有充分的频率频带。 	<ul style="list-style-type: none"> · 预先测定探测器之间的时间差。 <p style="text-align: center;">※3.5 英尺的探测器的延迟时间为 5nsec</p>

4) 使用中的注意事项

为准确测试信号，必须了解探测器的特性，选择合适的探测器。探测器实际使用中的注意事项如下所述。

- ① 是否选择了适应测定目标的探测器
- ② 探测器的频率修正是否合理
- ③ 最大输入电压（耐压）是否足够
- ④ 探测器的负荷效果是否没有影响
（选择最适合的测定点）
- ⑤ 接地线（地线）是否恰当
- ⑥ 机械上、物理上是否没有问题

特别是进行交换速度的高速脉冲测定时，需要注意接地的方法。在这种情况下，有可能由于接地导线的电感和探测器电容而引发谐振。特别在宽频带的示波器等中这种谐振更明显发生。处理这种谐振，可以采用缩短接地导线，或在探测器的前端接地线等方法。为此，配置了必要的适配器作为通常的附属品。

另外，为防止由于感应而产生杂波，如图 9-10 所示，可在多个探测器上分别接地线。但此时必须使地线连接点的电位保持相等。

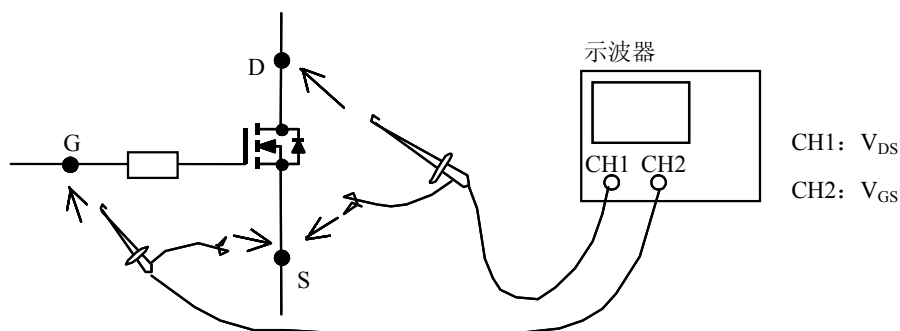


图 9-10 电压探测器的连接

2.6.2 电流探测器

电流探测器的种类和概要如 9.3 项所示。在此着重说明实际使用中的注意事项。

1) 电流探测器的选择

电流探测器如前所述，分直流电流探测器和交流电流探测器两种。推荐使用在高速交换动作过程中测定电流波形时有着良好抗杂波性能的后两者。

交流电流探测器中如果流过直流电流或者低频率的交流电流，则探测器内的铁芯饱和，无法输出。因此，在测定用于直流或低频率的交流电路的 IGBT 的交换动作时，需要在制作并使用模拟实际动作的定时控制电路等方面下些功夫。

2) 使用中的注意事项

- ① 由于电流探测器的前端装有铁氧体磁芯，对于冲击的承受能力极弱，请注意不要跌落。
- ② 请注意不得超出额定值。
 - 耐电压 …………… 电路电压高时测定部要套上耐压管。
 - A-S（电流×时间） …………… 表示脉冲电流额定量。如果流过大电流，可能损坏探测器。
 - 最大 RMS 电流 …………… 受到探测器中的变压器次级侧的功率电容的制约。因此，一旦超出，探测器将被烧坏。
- ③ 使用夹子形时，请在切实夹住的基础上进行测试。
- ④ 将电流探测器在电路中夹住的状态下，不得开放次级侧。
(特别是在无终端负载的情况下，次级侧中会产生高电压。)
- ⑤ 插入阻抗

由于插入探测器，初级侧即电路中发生插入阻抗。重要的是使测定对象不受插入阻抗的影响。假设探测器是个理想型变压器，则插入阻抗如图 9-11 所示。

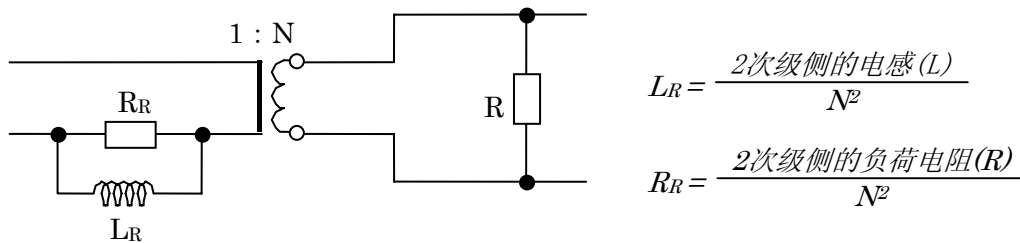


图 9-11 探测器的插入阻抗

2.7 变流器的使用

由于电流探测器的适用范围有限，而且要使以测定为目的而进行的部分变更对电路动作的影响最小化，有时使用变流器。变流器的插入位置和电流的测定方法参考 2.3 项。

设变流器的绕组比为 N ，初级侧的电流为 I_1 ，次级侧的电流为 I_2 ，则理想型变压器表示为 $I_1 = I_2 / N$ 。设励磁电流为 I_0 ，则

$$I_0 = I_1 - N \times I_2$$

励磁电流 I_0 会造成测定误差，要使它足够小。关于变流器，有必要确认 N ，测定 I_1 和 I_2 ，然后由上式计算出 I_0 ，确认测定精度没有问题。另外，变流器所使用的铁氧体磁芯的机械强度低，请注意不要跌落。

警 告

1. 本目录包含截止至 2004 年 2 月的产品规格、特性、数据、材质以及结构。
因规格改变或其它原因而使本内容变更，恕不另行通知。在使用本目录中所列的产品时，请务必获取最新版本的规格说明。
2. 本目录中所述的所有应用乃举例说明富士电机电子设备技术株式会社产品的使用，仅供参考。并不授予（或被视为授予）富士电机电子设备技术株式会社所拥有的任何专利、版权、商业机密或其它知识产权的任何授权或许可，无论是明示的或暗示的。对于可能因使用此处所述的应用而造成侵犯或涉嫌侵犯他人知识产权的，富士电机电子设备技术株式会社不予作出任何明示或暗示的声明或保证。
3. 尽管富士电机电子设备技术株式会社不断加强产品质量和可靠性，但仍可能会有一小部分的半导体产品出现故障。当在您的设备中使用富士电机电子半导体产品时，您应采取足够的安全措施以防止当任何产品出现故障时，导致该设备造成人身伤害、火灾或其它问题。我们建议，您的设计应能够自动防故障、阻燃并且无故障。
4. 本目录中介绍的产品用于以下具有普通可靠性要求的电子和电气设备。
 - 计算机 · OA 设备 · 通信设备（终端设备）· 测量设备 · 机床
 - 视听设备 · 家用电气设备 · 个人设备 · 工业机器人等
5. 如果您要将本目录中的产品用于具有比普通要求更高可靠性要求的设备，例如以下所列设备，则必须联系富士电机电子设备技术株式会社，得到事先同意方可使用。在将这些产品用于下述设备时，您应采取足够措施（如建立备份系统），使得即使用于该设备的富士电机电子设备技术株式会社产品出现故障，也不会导致该设备发生故障。
 - 运输设备（安装在汽车和船上） · 干线通信设备 · 交通信号控制设备
 - 具有自动关闭功能的漏气检测装置 · 防灾 / 防盗装置 · 安全装置
6. 请勿将本目录中的产品用于具有严格可靠性要求的设备，例如（但不限于以下设备）
 - 航天设备 · 航空设备 · 核反制设备 · 海底中继器 · 医疗设备
7. 版权 (c) 1996-2004 富士电机电子设备技术株式会社。版权所有。
未经富士电机电子设备技术株式会社明确许可，本目录的任何部分不能以任何形式或任何方式进行复制。
8. 如果您对本目录中的内容存有疑问，请在使用该产品前咨询富士电机电子设备技术株式会社或其销售代理商。
富士电机电子设备技术株式会社和其销售代理商对未遵守此处所做说明使用本产品而造成的任何伤害不予负责。