

AN2007-04

如何正确计算并最大限度减小 IGBT 的死区时间

功率管理和驱动

**euppec**  
An Infineon brand

infineon

版本 2008-05-07

英飞凌科技股份公司印制

81726 München, Germany

© 英飞凌科技股份公司版权所有, 2008.

保留所有权利。

#### 免责声明

本应用文档中给出的信息仅作为关于使用英飞凌科技组件的建议, 不得被视为就英飞凌科技组件的任何特定功能、条件或质量作出的任何说明或保证。本应用文档的使用者必须在实际应用中验证本文档描述的任何功能。英飞凌科技在此声明, 未就本应用文档中给出的任何及所有信息作出任何性质的保证, 也不承担任何性质的责任, 包括但不限于没有侵犯任何第三方的知识产权的保证。

为方便客户浏览, 英飞凌以下所提供的将是有关英飞凌产品及服务资料的中文翻译版本。该中文翻译版本仅供参考, 并不可作为任何论点之依据。虽然我们尽力提供与英文版本含义一样清楚的中文翻译版本, 但因语言翻译和转换过程中的差异, 可能存在不尽相同之处。因此, 我们同时提供该中文翻译版本的英文版本供您阅读, 请参见【[Deadtime calculation for IGBT Modules](#)】。并且, 我们在此提醒客户, 针对同样的英飞凌产品及服务, 我们提供更加丰富和详细的英文资料可供客户参考使用。请详见【[IGBT-Modules](#)】

客户理解并且同意, 英飞凌毋须为任何人士由于其在翻译原来的英文版本成为该等中文翻译版本的过程中可能存在的任何不完整或者不准确而产生的全部或者部分、任何直接或者间接损失或损害负责。英飞凌对于中文翻译版本之完整与正确性不担负任何责任。英文版本与中文翻译版本之间若有任何歧异, 以英文版本为准, 且仅认可英文版本为正式文件。

您如果使用以下提供的资料, 则说明您同意并将遵循上述说明。如果您不同意上述说明, 请不要使用本资料。

#### 信息垂询

若需获得关于技术、交付条款和价格的更多信息, 敬请联系距离您最近的英飞凌办事处  
([www.infineon.com](http://www.infineon.com))

#### 警告

由于技术要求, 组件可能包含有害物质。若需了解相关物质的类型, 请联系距离您最近的英飞凌办事处。如果可以合理地预计英飞凌的某个组件失效可能会导致生命支持设备或系统失效, 或者影响该等设备或系统的安全性或有效性, 那么在将这些组件用于生命支持设备或系统之前, 必须获得英飞凌的明确书面同意。生命支持设备或系统意指用于植入人体内部, 或者支持和/或维持、维系和/或保护人类生命的设备或系统。如果这些设备或系统失效, 可以合理推定其用户或其他人的健康将受到威胁。

AP99007

修订记录:

2007-08

V1.0

先前版本:

无

页	主题: (major changes since last revision) 首次发布

作者: Zhang Xi IFAG AIM PMD ID AE

欢迎提出意见和建议

您是否认为本文档中的任何信息存在错误、含糊不清或遗漏？您的宝贵意见和建议将帮助我们持续不断地改进本文档的质量。请将您的意见和建议（请注明本文档的索引号），发送电子邮件至：

[IGBT.application@infineon.com](mailto:IGBT.application@infineon.com)



## 目录

<b>1</b>	<b>引言 .....</b>	<b>5</b>
1.1	IGBT 桥臂直通的原因 .....	5
1.2	死区时间对逆变器工作的影响 .....	5
<b>2</b>	<b>计算合适的死区时间 .....</b>	<b>6</b>
2.1	计算死区时间的基础 .....	6
2.2	开关和延迟时间的定义 .....	7
2.3	门极驱动电阻/驱动器输出阻抗的影响 .....	8
2.4	影响延迟时间的其它因素 .....	9
2.4.1	开通延迟时间 .....	9
2.4.2	关断延迟时间 .....	10
2.4.3	死区时间计算值的验算 .....	12
<b>3</b>	<b>如何减小死区时间 .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>结论 .....</b>	<b>14</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>15</b>

## 1 引言

在现代工业中，采用IGBT器件的电压源逆变器应用越来越多。为了保证可靠地运行，应当避免桥臂直通。桥臂直通将产生不必要的额外损耗，甚至引起发热失控。结果将可能导致IGBT器件和整个逆变器的损坏。

### 1.1 IGBT桥臂直通的原因

下图画出了一个IGBT桥臂的典型结构。在正常运行时，两个IGBT将依次开通和关断。如果两个器件同时导通将导致电流上升，此时的电流将仅仅由直流环的杂散电感限制。

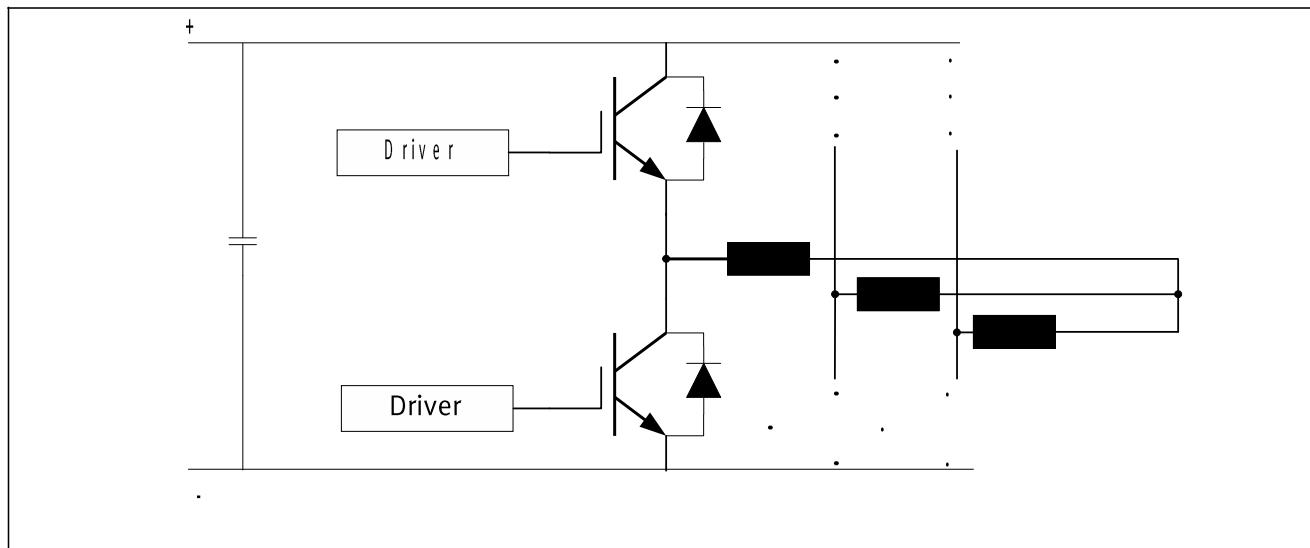


图1 电压源型逆变器的典型结构

当然，没有谁故意使两个IGBT同时开通，但是由于IGBT并不是理想开关器件，其开通时间和关断时间不是严格一致的。为了避免IGBT桥臂直通，通常建议在控制策略中加入所谓的“互锁延时时间”或者更普遍的“死区时间”。有了这个额外的时区，其中一个IGBT要首先关断，然后在死区时间结束时开通另外一个IGBT，这样，就能够避免由开通时间和关断时间不对称造成的直通现象。

### 1.2 死区时间对逆变器工作的影响

通常情况下，有两种类型的死区时间，第一种是控制死区时间，而第二种是有效的死区时间。控制死区时间指加入在控制算法中以使得器件获得足够有效的死区时间。设置控制死区时间的目的是为了确保有效死区时间总是足够的。由于计算控制死区时间总是基于最坏的情况考虑，所以有效死区时间占控制死区时间很大的比例。

死区时间一方面可以避免IGBT桥臂直通，但另一方面，它也存在着不利的影响。为了说明死区时间的影响，我们考虑电压源型逆变器的一个桥臂如图2所示。首先假设输出电流按图示方向流动，而IGBT T1由开通到关断，IGBT T2经过一小段死区时间后由关断到开通。在有效死区时间内，两个开关管都是关断的，且续流二极管D2流过输出电流。此时负的直流电压加在输出侧，此时电压极性符合设计的要求。考虑另一种情况，T1由关断到开通，而T2由开通到关断，此时，由于电流还是沿着同一个方向，这一电流在死区时间依然流过D2，因此输出电压还是为负值，此时电压极性不是设计希望得到的。结论可以总结如下：在有效死区时间里，输出电压由输出电流决定，而非控制信号。

如果我们假设输出电流的方向与图2所示相反，那么当T1由开通到关断，而T2由关断到开通时，也同样类似会出现上述情况的电压。因此一般情况下，输出电压与输出电流会随着死区时间的加入而失真。如果我们选择过大的死区时间，对于感应电机的情况，系统将会变得不稳定而且可能会引起一系统崩溃的严重后果[1]。因此，死区时间的选择是十分重要的且应当仔细计算。

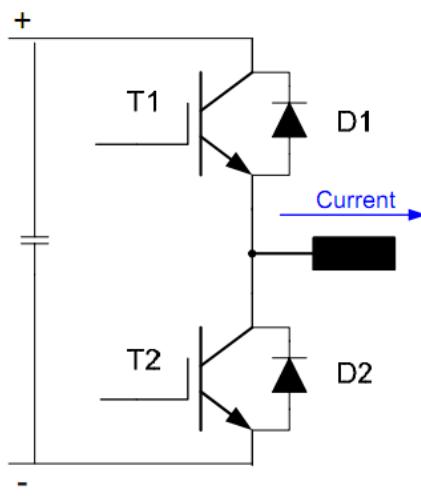


图2 电压源型逆变器的一个桥臂

这份应用手册将要说明在实际中如何去测量IGBT的延迟时间，并如何根据测量值去计算控制死区时间。

## 2 计算合适的死区时间

如前所述，死区时间的选择一方面要满足避免IGBT桥臂直通的要求，另一方面应当要尽可能小以确保电压源型逆变器的正确运行。因此这里的一个很大的挑战就是如何为一个专用IGBT和驱动电路找出合适的死区时间。

### 2.1 计算死区时间的基础

我们使用如下等式计算控制死区时间：

$$t_{dead} = \left[ \left( t_{D\_OFF\_MAX} - t_{D\_ON\_MIN} \right) + \left( t_{PDD\_MAX} - t_{PDD\_MIN} \right) \right] \times 1.2 \quad (1)$$

Where

$t_{D\_OFF\_MAX}$	: 最大的关断延迟时间
$t_{D\_ON\_MIN}$	: 最小的开通延迟时间
$t_{PDD\_MAX}$	: 最大的驱动信号传递延迟时间
$t_{PDD\_MIN}$	: 最小的驱动信号传递延迟时间
1.2	: 安全裕量

在这个公式中，第一项 $t_{D\_OFF\_MAX} - t_{D\_ON\_MIN}$ 是最大的关断延迟时间与最小的开通延迟时间的差值。这一项描述的是IGBT与所用的门极驱动电阻的特性。由于下降和上升时间通常比延迟时间小很多，这里不考虑它们。另一项 $t_{PDD\_MAX} - t_{PDD\_MIN}$ 是由驱动电路决定的信号传递时间的差值（延迟时间不匹配）。这个参数正常情况下可以在驱动器厂商的驱动器数据手册中得到。一般对于光耦合驱动器，这个值会比较高。

有时死区时间可以由数据手册提供的典型值计算得到，简单按经验乘以一个安全系数。这个方法在一些场合有用但一般不够精确。因此，此处采用测量值给出一个更加精确的估计方法。

因为IGBT数据手册仅仅给出标准工作情况下的典型值，获得专用驱动场合的最大值是必要的。出于这个目的，为了获得合适的延迟时间并以此计算出死区时间，需要完成一系列的测量。

## 2.2 开关和延迟时间的定义

由于我们将经常谈到开关和延迟时间，有必要在这里给出一个明确的定义。Infineon公司定义IGBT的开关时间如下：

$t_{d\_on}$  : 由 $V_{GE}$ 的10%到 $I_C$ 的10%

$t_r$  : 由 $I_C$ 的10%到 $I_C$ 的90% :

$t_{d\_off}$  : 由 $V_{GE}$ 的90%到 $I_C$ 的90%

$t_f$  : 由 $I_C$ 的90%到 $I_C$ 的10%

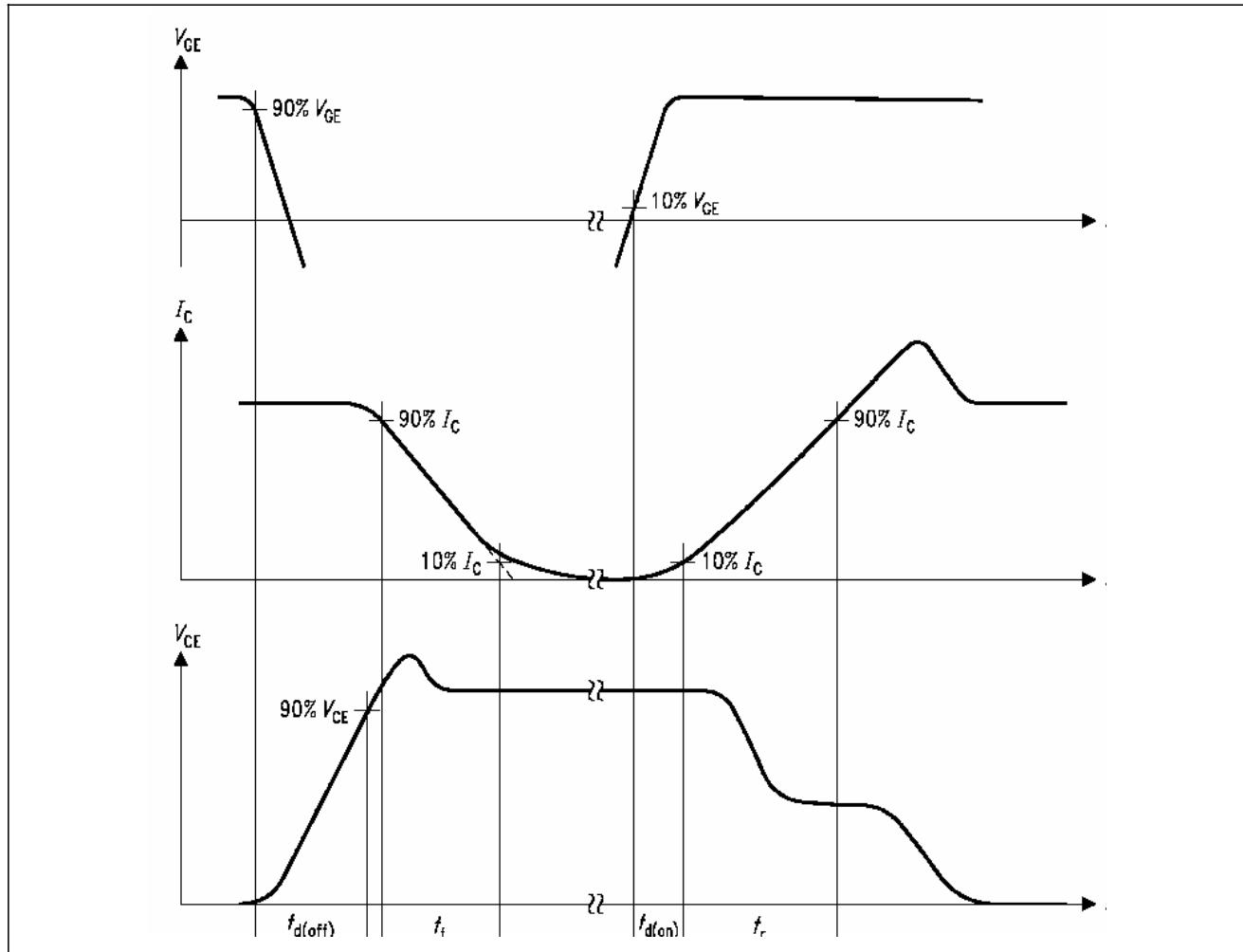


图3 开关时间的定义

## 2.3 门极驱动电阻/驱动器输出阻抗的影响

门极驱动电阻的选择将对开关延迟时间产生明显的影响。一般来讲，电阻越大，延迟时间越长。建议在应用中对专用的门极驱动电阻的延迟时间进行测量。一个典型的开关时间vs.门极驱动电阻的图形如图所示：

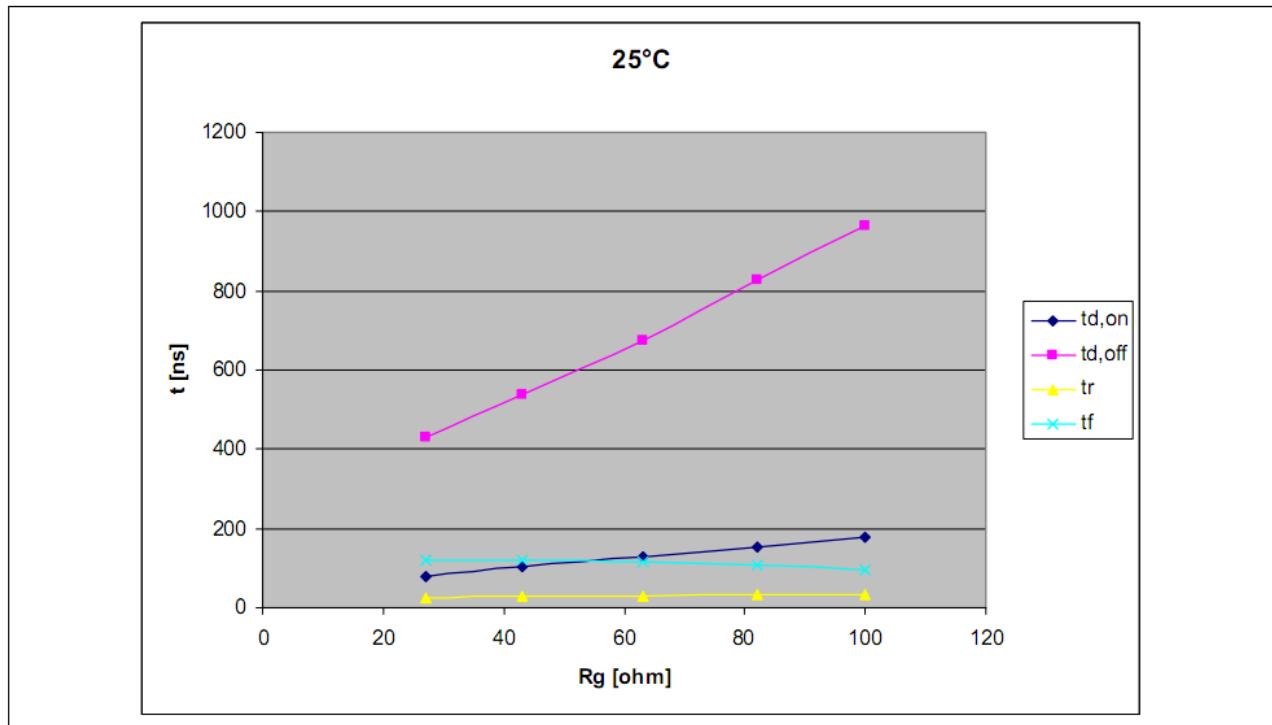


图 4 开关时间 vs. Rg @25°C

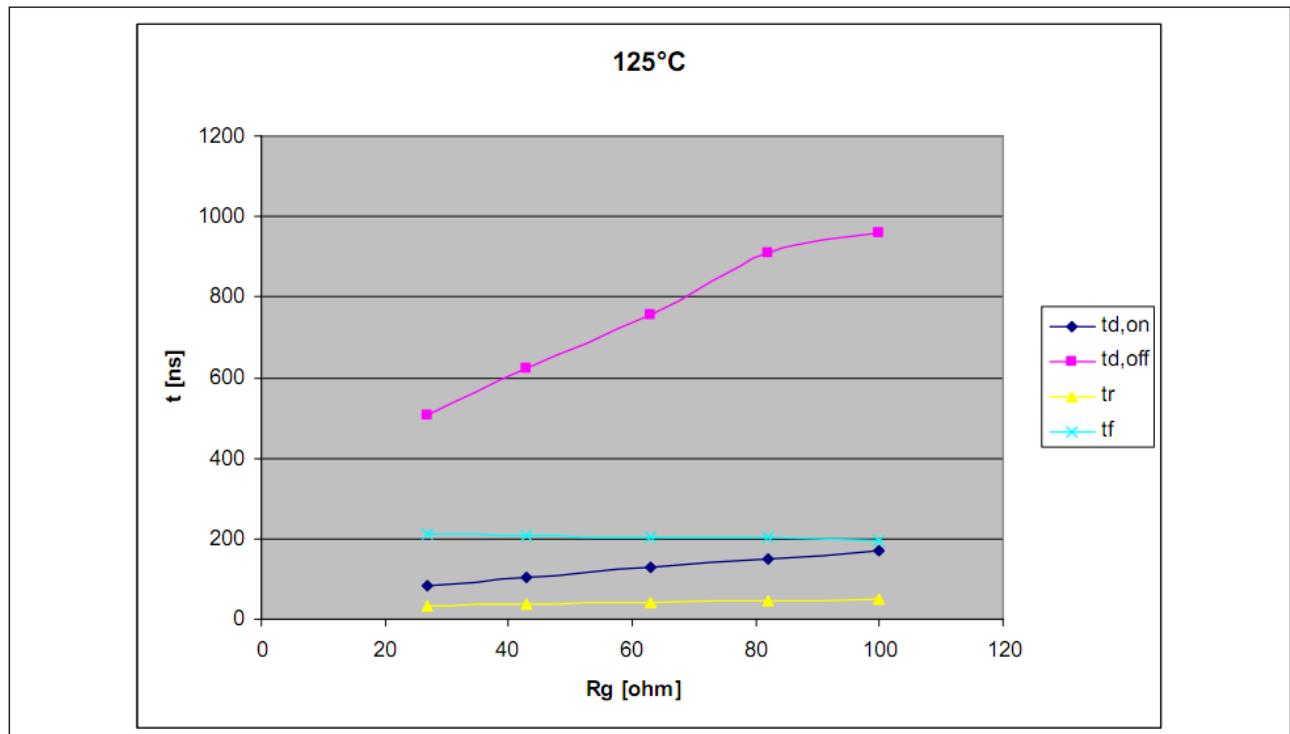


图 5 开关时间 vs. Rg @125°C

这里所有的测试均使用FP40R12KT3模块，门极驱动电压为-15V/+15V，直流侧电压为600V，开关电流为额定电流40A。

## 2.4 影响延迟时间的其它因素

除了门极驱动电阻，还有其它因素对延迟时间有显著的影响：

- 集电极电流
- 门极驱动电压

### 2.4.1 开通延迟时间

为了估计这个关系，要进行一系列的测量。首先对开通延迟时间与集电极电流的关系进行了测试。结果显示如下：

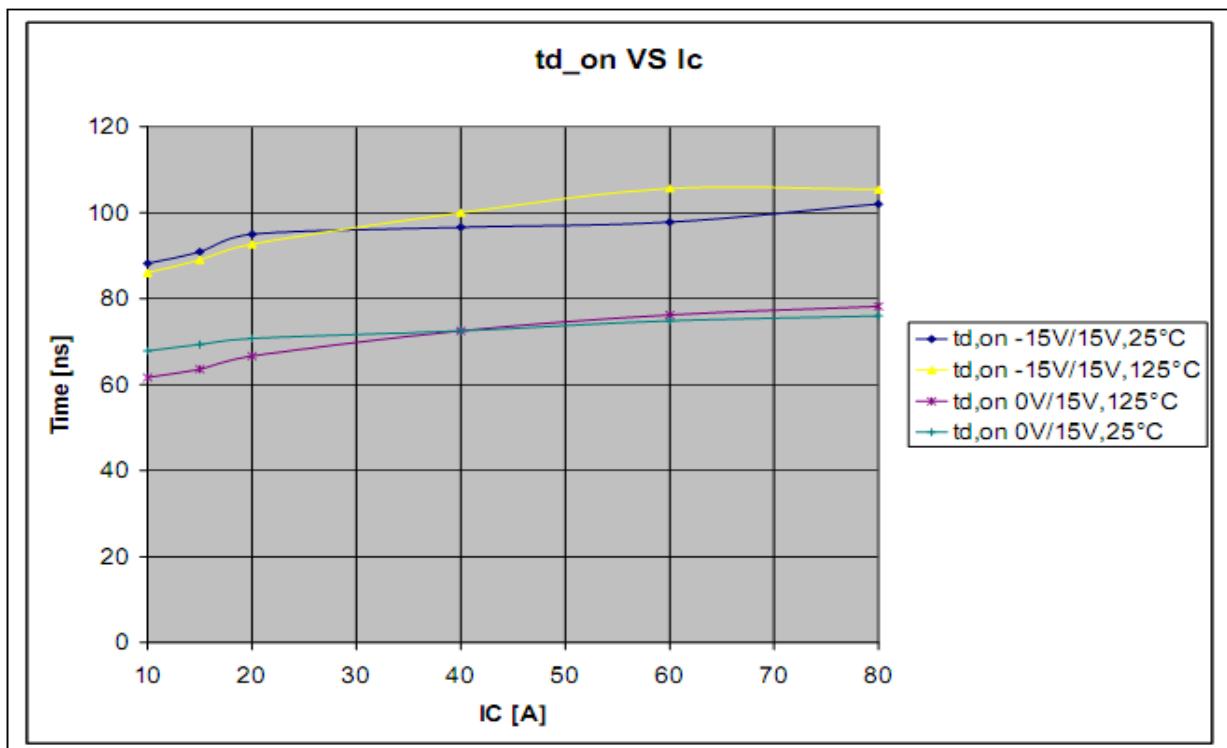


图 6 开通延迟时间 vs. 开关电流 Ic

所有的测试均使用FP40R12KT3模块，直流侧电压为600V，门极驱动电阻根据数据手册选择。

从上面的测试结果可知，随着集电极电流Ic的变化，开通延迟时间几乎为固定值。使用-15V/+15V的门极驱动电压，开通延迟时间比使用0V/+15V的驱动电压来得长[2]。进一步计算控制死区时间时，由于这个影响很小甚至它还可以提供一定裕量，因此集电极电流对延迟时间的影响可以忽略不计。

## 2.4.2 关断延迟时间

在死区时间的计算当中，最重要的因素是最大关断延迟时间。因为这个数值几乎决定最终计算出来的死区时间的长度。所有我们将对这一延迟时间进行详细分析。

为了获得最大的关断延迟时间，要进行以下分析：

### 1. 由IGBT本身引起的开通延迟时间是多长、会引起什么？

为了回答这个问题，在实验室使用一块测试IGBT特性用的电路驱动板进行了以下测试。将这个电路驱动板看做一个理想的驱动器，这意味着这个驱动器并不产生延迟（这对于一个带载能力足够大的驱动板，是完全可能的），因此所有的延迟时间可以看做是由IGBT本身引起的。以下电路图显示了测试结构：

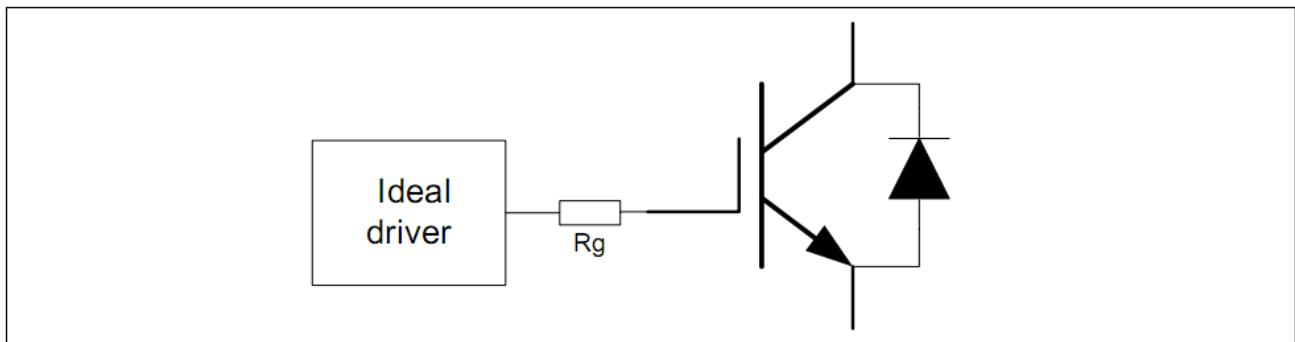


图7 使用理想驱动器的测试电路图

### 2. 如果IGBT的阈值电压为数据手册中的最小值，那么最大关断延迟时间指的是什么？（这个值反映了模块间Vth允许的误差）

为了解答这个问题，接入一个额外的二极管来减小Vth的值。二极管的电压降约为0.7~0.8V，这与FP40R12KT3模块的Vth变化十分相似。下列电路图显示了测试原理：

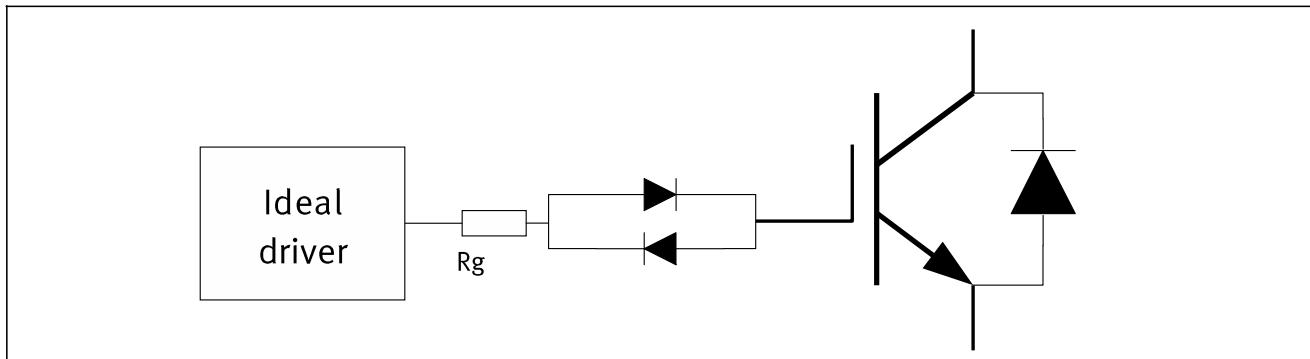


图8 模拟最坏情况下Vth变化的电路图

### 3. 驱动器输出电平对开关时间有何影响？

为了回答这个问题，我们将市面上的驱动器分成两种，一种是为MOSFET输出电平，另一种为双极晶体管输出电平。我们对每一种分别进行了测量。

为了模拟MOSFET输出电平的驱动器，接入另一个额外的电阻，并将其当成MOSFET的导通电阻Rds(on)。保留模拟Vth变化的二极管。下列电路图显示了测试原理：

计算合适的死区时间

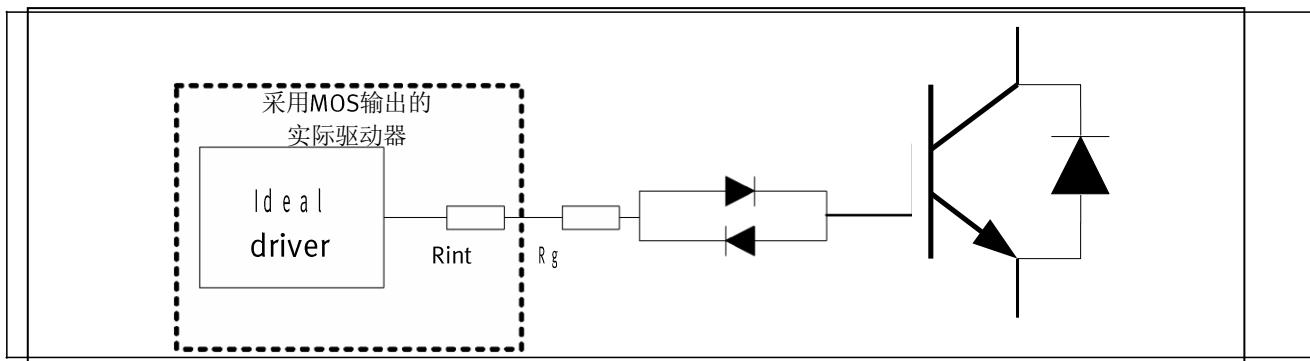


图 9 模拟V<sub>th</sub>变化及MOSFET输出驱动器的测试电路图

#### 4. 双极晶体管输出电平的驱动器有何影响？

为了解答这个问题，接入一个额外的二极管，以模拟双极晶体管的电压降。下列电路图显示出测试原理：

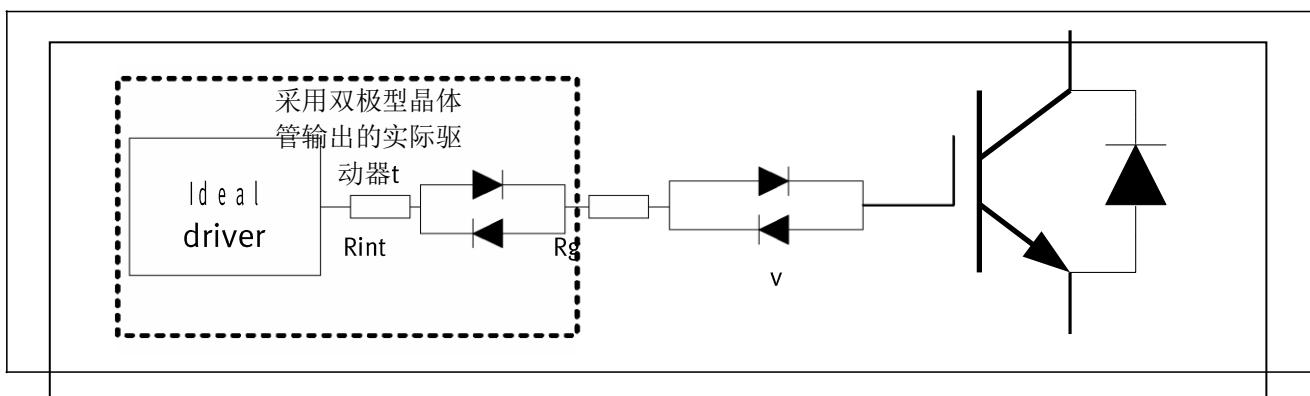


图 10 模拟V<sub>th</sub>变化及双极晶体管输出驱动器的测试电路图

通过采用以上电路，我们使用FP40R12KT3和视为理想的驱动器在实验室对关断延迟时间进行了测试。测试条件为V<sub>dc</sub>=600V, R<sub>g</sub>=27Ω。测试结果显示在以下两张图中：

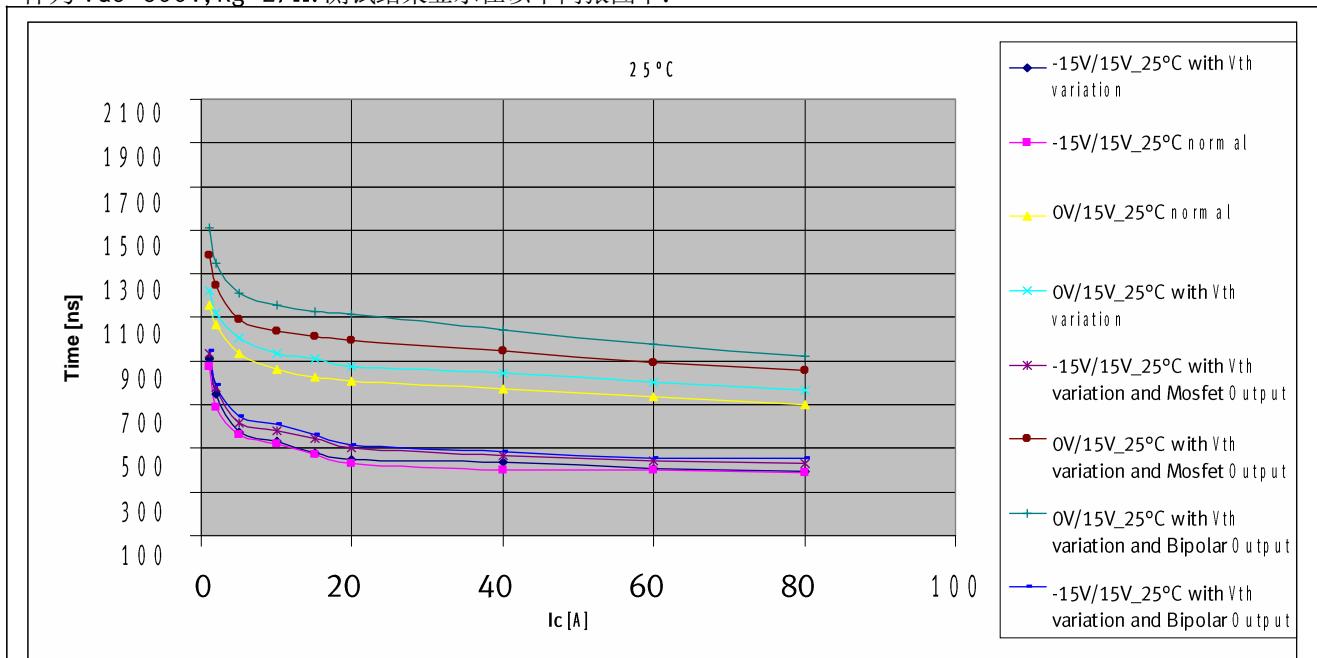
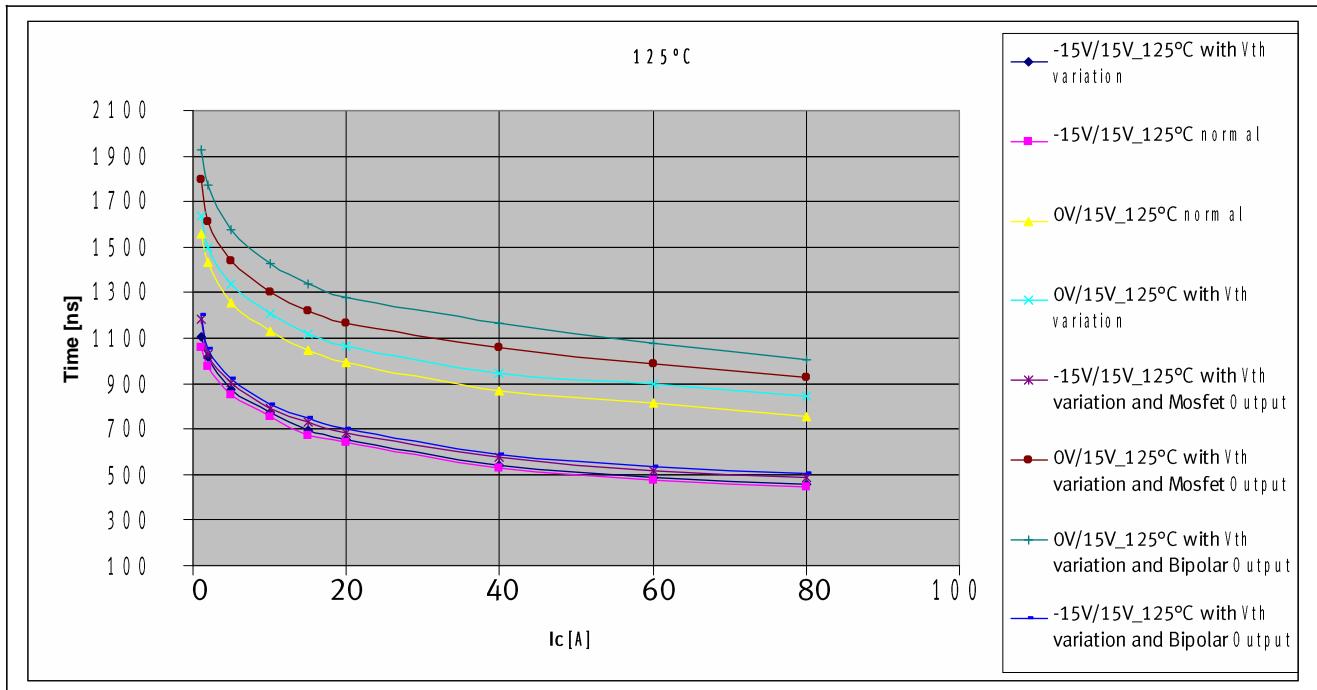


图 11 关断延迟时间 vs. Ic @25°C

计算合适的死区时间


 图 12 关断延迟时间 vs.  $I_c$  @125°C

从测试结果可知，随着开关电流  $I_c$  的减小，关断延迟时间显著增加。因此仅仅通过选定门极驱动电阻来简单地计算死区时间是不够精确的。在特定的驱动条件下测量延迟时间，然后再根据测量值来计算死区时间是一个更好且更精确的方法。通常情况下，测量到1%的额定电流时就足够对所需的死区时间的计算有充分的估算。

这里要考虑的另一点是，采用0V/+15V的驱动电压时关断延迟时间会增加，而且采用0V/+15V驱动电压时对开关时间的影响会更大。这意味着使用0V/+15V驱动电压时，需要特别注意对驱动器的选择。另外，集电极电流  $I_c$  较小时导致  $td_{off}$  的增加也需要考虑。

例：此处考虑HCPL-3120驱动IC。这个驱动IC输出MOSFET电平来关断IGBT。由上面的图表我们可以看到在0V/+15V的开关条件下， $td_{off}$  大约为1500ns。这一情况下， $td_{on}$  约为100ns。根据数据手册，这个驱动IC的  $tpdd_{max}$ - $tpdd_{min}$  为700ns。将这些数值代入方程（1），得到死区时间约为2.5μs。

#### 2.4.3 死区时间计算值的验算

通过以上讨论及2.1节给出的方程（1），现在可以根据以上的测量值来计算所需的死区时间。使用计算出的死区时间，需要进行最坏情况下的测量来验算死区时间的计算值是否足够。

从测量中可以发现，关断延迟时间随着温度的增加而增加。基于这个原因，分别在低温和高温条件下进行测试是比较好的。

测试例子的原理图如下图所示：

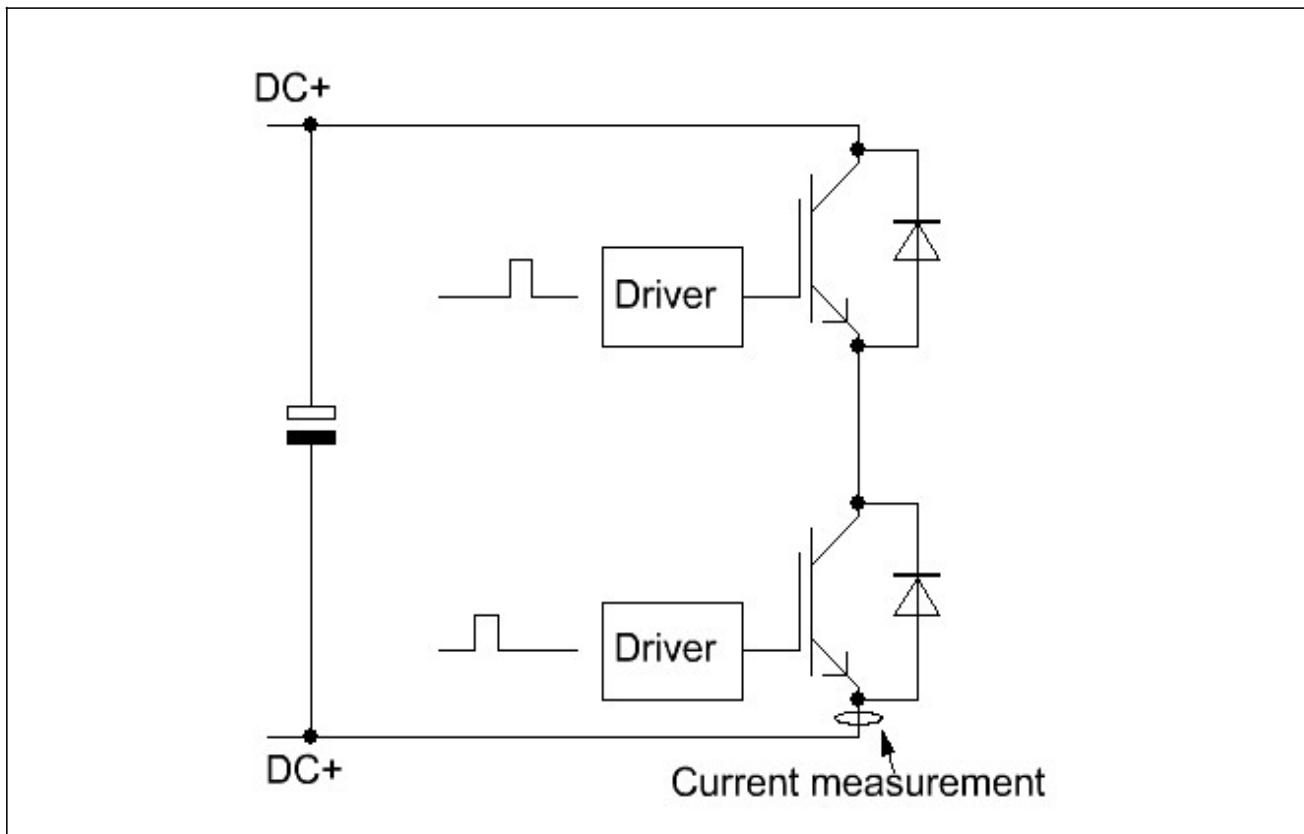


图 13 检验死区时间计算值的测试原理图

下管的IGBT需要开通和关断，上管的IGBT也一样。两个驱动脉冲之间的时间间隔需要根据实际情况调整到死区时间的计算值。这样就能够测量出的直流环的负电流，且如果死区时间足够，就应该观察不到直通电流。

由于没有电流同时通过两个IGBT，上面给出的测试代表了死区时间计算所需的最恶劣情况。由关断延迟时间的讨论可知，死区时间会随着集电极电流的减小而增加，因此在没有电流流通的情况下，关断延迟时间要为最大值，这导致需要最大的死区时间。如果在零集电极电流下没有直通电流，那么选择的死区时间就是充足的。

### 3 如何减小死区时间

为了正确计算控制死区时间，应当考虑以下驱动条件：

- 加到IGBT的门极驱动电压是多少？
- 门极驱动电阻阻值是多少？
- 驱动器的输出电平是什么类型？

基于这些条件，可以进行测试，然后通过测试结果，使用公式（1）计算控制死区时间。

由于死区时间对逆变器的性能有着负面影响，死区时间需要减小到最小值。可以采用下列几种方法：

- 采用足够大的驱动器来给IGBT门极的提供峰值灌拉电流。
- 使用负电压来加速关断。
- 最好选择快速传递信号的驱动器，比如使用基于无磁芯变压器技术的驱动器会好于使用传统光耦技术的驱动器。

- 如果选用0V/15V的驱动电压, 那么应该考虑使用独立的R<sub>gon</sub>/R<sub>goff</sub>电阻。如下所述:

从2.3节可知, T<sub>d\_off</sub>和门极电阻之间有强烈的关联关系。如果R<sub>goff</sub>减小, 那么t<sub>d\_off</sub>及死区时间也将减小。Infineon建议在使用0V/15V驱动电压时, R<sub>goff</sub>减小到R<sub>gon</sub>的1/3。一种使用独立的R<sub>gon</sub>和R<sub>goff</sub>的电路如下所示:

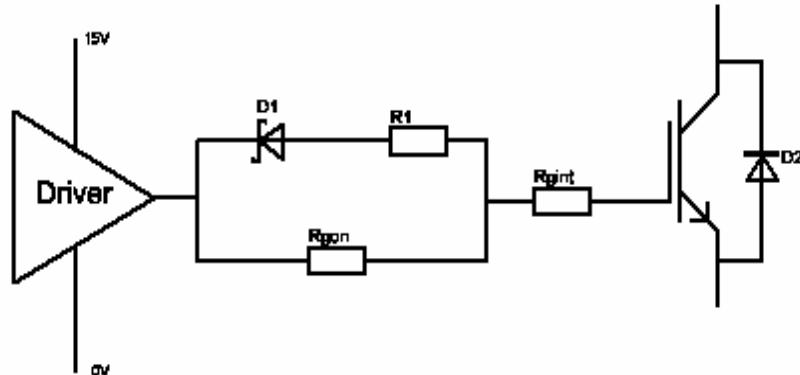


图 14 0V/15V驱动电压时建议使用的电路

R<sub>1</sub>的值应当满足以下关系:

$$\frac{R_1 \cdot R_{gon}}{R_1 + R_{gon}} + R_{gint} = \frac{1}{3} \cdot (R_{gon} + R_{gint}) \quad (2)$$

$$\Rightarrow R_1 = \frac{1}{2} \cdot R_{gon} \cdot \frac{R_{gon} - 2R_{gint}}{R_{gon} + R_{gint}} \quad (3)$$

由等式(3)可得, R<sub>gon</sub>要大于2R<sub>gint</sub>, 以得到正的R<sub>1</sub>。不过, 在一些模块中, 这个要求并不可能满足。这种情况下, R<sub>1</sub>可以完全忽略。

二极管应该选用肖特基二极管。

使用0V/15V驱动电压时, 另一个非常重要的一点是寄生开通效应。如果使用我们推荐的电路, 这个问题也可以得到解决。更多寄生开通效应的细节, 请参照AN2006-01[2]。

## 4 结论

在这个应用手册中, 介绍了IGBT开关时间的测量方法, 并以此计算出控制死区时间。首先介绍了开关时间于门极驱动电阻的关系, 然后讨论了驱动器和集电极电流对开关时间的影响。最后介绍了减小死区时间的方法。

## 参考文献

- [1] D.Grahame Holmes, Thomas A. Lipo: „Pulse width modulation for power converters: principles and practice“, *IEEE Press*, 2003. ISBN 0-471-20814-0
- [2] Driving IGBTs with unipolar gate voltage.  
[http://www.infineon.com/dgdl/an-2006-01\\_Driving\\_IGBTs\\_with\\_unipolar\\_gate\\_voltage.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b40ed1711291](http://www.infineon.com/dgdl/an-2006-01_Driving_IGBTs_with_unipolar_gate_voltage.pdf?folderId=db3a304412b407950112b408e8c90004&fileId=db3a304412b407950112b40ed1711291)

<http://www.infineon.com>