

将光耦与 IGBT 模块一起使用

参考手册 1.0 版

1 引言

评估板 EB1200-339J 具有博通 (Broadcom) 用于驱动 *EconoDUAL™* IGBT 模块的双输出隔离栅极驱动光 (电) 耦 (合器) ACPL-339J, 以及用于直流总线电压和 IGBT 温度测量的精密光电隔离放大器 ACPL-C87B。EB1200-339J 还可与 ACPL-736J Σ - Δ (Sigma Delta) 电流感测模块组合使用, 以测量 IGBT 输出电流。如图 1 所示, EB1200-339J 的开发目的是为博通客户在使用 ACPL-339J 驱动器设计逆变器应用的第一阶段提供帮助。

图 1: 栅极驱动器评估板 EB1200-339J 和 ACPL-736J Σ - Δ 电流感测模块



EB1200-339J 最初设计为与富士电机 (Fuji Electric) 的 *EconoDUAL™* IGBT 模块 2MBI600XNE120-50 一起使用。通过对 DESAT 保护和栅极电阻进行适当的调整, EB1200-339J 可以通过相同的引脚分配支持额定功率从 1200V/225A 至 1200V/1000A 的其它 *EconoDUAL™* XT 模块。

1.1 设计特点

EB1200-339J 包括以下主要特性：

- 两个隔离的 ACPL-339J 栅极驱动光耦，具有以下功能：
 - DESAT (短路保护)
 - UVLO (欠压锁定保护)
 - 双输出驱动，用于外部 NMOS 和 PMOS 缓冲器
 - 主动防范贯通
 - 故障时的软关机
 - 隔离的 DESAT 和 UVLO 故障反馈。
- 两个 ACPL-C87B 光电隔离放大器，用于 DC 总线电压和温度测量：
 - 0 至 2V 标称输入范围
 - 100 kHz 带宽
 - 输出侧 3V 至 5.5V 宽电源范围
 - 15 kV/ μ s 共模瞬变抗扰度。

电气和机械上均适用于富士电机的 EconoDUAL™ 模块 2MBI600XNE120-50。

- 通过调整 DESAT 保护和栅极电阻，评估板支持以下富士电机的 EconoDUAL™ 模块：
 - 2MBI225XNA120-50 (1200V/225A)
 - 2MBI300XNA120-50 (1200V/300A)
 - 2MBI450XNA120-50 (1200V/450A)
 - 2MBI600XNG120-50 (1200V/600A)
 - 2MBI800XNE120-50 (1200V/800A)
 - 2MBI1000XRNE120-50 (1200V/1000A)
 -
- 具有限流保护和热关断功能的 DC/DC 电源。
- 用于栅极驱动器的隔离 SMPS (开关电源)。
- 可访问 FAULT 输出信号以进行保护和控制开发。
- 可访问 PWM 输入信号。

- 通过 ACPL-736J Σ - Δ 电流感测模块访问电流测量值：
 - $\pm 50\text{mV}$ 线性范围 ($\pm 80\text{mV}$ 满量程)
 - 10 至 20MHz 的外部时钟输入范围
 - 1 位二阶 Σ - Δ 调制器
 - 16 位分辨率, 无丢失码
 - 80dB 的典型 SNR; 78dB 的典型 SNDR
 - $0.05\text{m}\Omega$ 的分流器, 感测范围高达 1000A

1.2 目标应用

博通的 ACPL-339J 栅极驱动光耦、ACPL-C87B 电压传感器和 ACPL-736J 电流传感器针对以下应用:

- 隔离的 IGBT/功率 MOSFET 栅极驱动器。
- 交流电机驱动器。
- 可再生能源逆变器。
- 工业逆变器。
- 开关电源。

2 系统说明

2.1 关键规范

表 1 列出了 EB1200-339J 评估板的绝对最大额定值。请注意: 该表仅包含关键参数。使用该评估版时, 必须考虑 ACPL-339J、ACPL-C87B 和 ACPL-736J 数据手册的其它约束以及其它关键组件的使用规范。

■表一：绝对最大额定值。

参数	值			单位	注释
	Min.	Typ.	Max.		
V _{CC} 输入电压	13	15	18	V	数字电路的外部直流输入电源。
PWM 逻辑输入电平	0	3.3	5	V	栅极驱动器专用外部 PWM 输入。
故障逻辑输出电平	0	-	5	V	逻辑输出信号，参考 ACPL-339J 数据表。
UVLO 输出逻辑电平	0	-	5	V	逻辑输出信号，参考 ACPL-339J 数据表。
MCLK 和 MDAT 输入逻辑电平	0	-	5	V	用于电流测量的时钟和数据逻辑输入信号，请参考 ACPL-736J 数据表。
缓冲 MCLK 和 MDAT 输出逻辑电平	0	-	5	V	用于电流测量的缓冲时钟和数据逻辑输入信号，请参考 ACPL-736J 数据表。
电压测量	0	-	5	V	单端模拟输出信号。
温度测量	0	-	5	V	单端模拟输出信号。

2.2 功能框图

EB1200-339J 栅极驱动器评估板的功能框图和功能块的配置如图 3 和图 4 所示。功能框图显示了几个不同的功能块：

- 电源管理：
 - +15V/+5V DC/DC 稳压器
 - +5V/+5V 隔离的 DC/DC 稳压器和
 - +5V 降至+3.3V 的 LDO
- + 16V/-11V 隔离的 SMPS，具有两个输出（一个用于上位驱动器，一个用于下位驱动器）
- 带电路的上位和下位 ACPL-339J 栅极驱动器
- 使用两个 ACPL-C87B 进行电压和温度测量
- 接口电流测量的缓冲时钟和数据信号
- 用户接口连接器
- + 15V V_{CC} 电源连接器和
- ACPL-736J 电流感测模块接口连接器。

图 3： EB1200-339J 的功能框图。

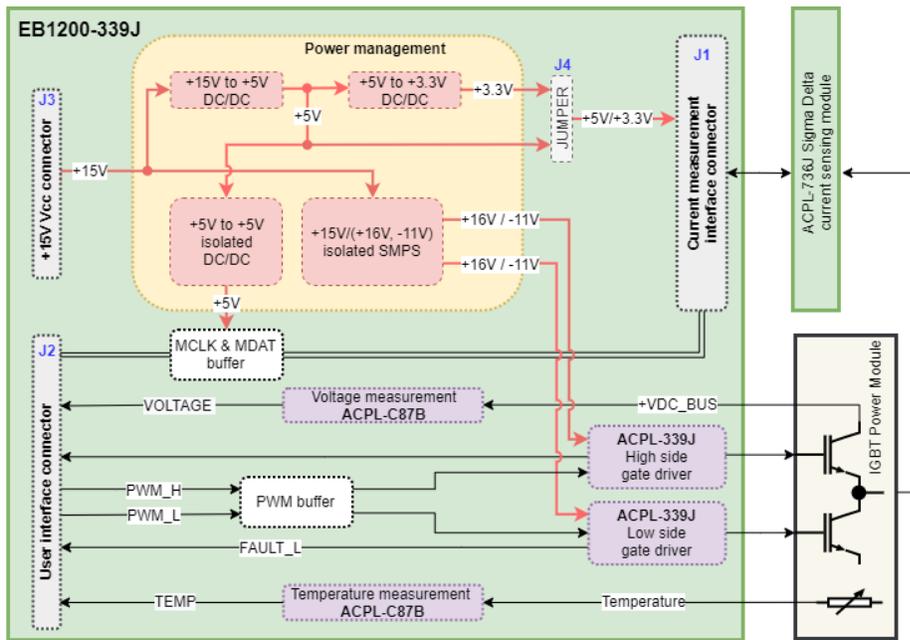
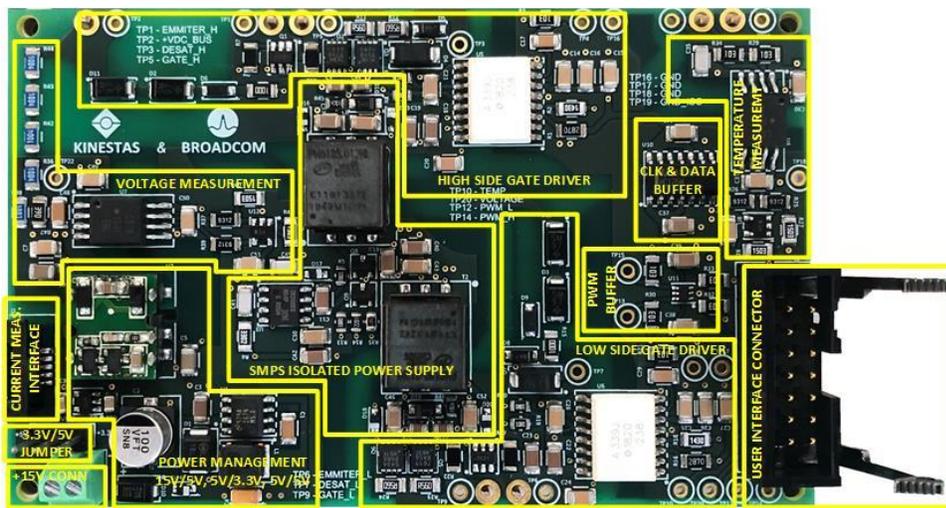


图 4: EB1200-339J 的功能块配置。



2.3 引脚分配

表 2-5 中显示了 EB1200-339J 上所有连接器的引脚分配。

引脚	标签	功能	方向
1	+5V	+5V 电源直接接电至电流测量。	输出
2	+5V/+3V3	在 J4 连接器上设置跳线，选择+5V 或+3.3V。	输出
3	MCLK_CSB	用于电流测量的时钟信号。	输入
4	MDAT_CSB	用于电流测量的数据信号。	输入
5	GND	地面。	双向

表 3: 连接器 J2(用户接口连接器)的引脚分配。

引脚	标签	功能	方向
1	GND	地面。	双向
2	MCLK	用于电流测量的缓冲时钟信号。	输出
3	GND	地面。	双向
4	MDAT	用于电流测量的缓冲数据信号。	输出
5	GND	地面。	双向
6	TEMP	单端测温信号。	输出
7	VOLTAGE	单端直流母线电压测量信号。	输出
8	GND	地面。	双向
9	FAULT_L	来自下位驱动器的 DESAT 或 UVLO 故障信号。	输出
10	FAULT_H	来自上位驱动器的 DESAT 或 UVLO 故障信号。	输出
11	GND	地面。	双向
12	PWM_L	下位驱动器 PWM 信号。	输入
13	PWM_H	上位驱动器 PWM 信号。	输入
14	GND	地面。	双向

表 4: 连接器 J3 (电源连接器) 的引脚分配。

引脚	标签	功能	方向
1	GND	地面	双向
2	+V_SUPPLY	电源	输入

表 5: 插头连接器 J4 (电流测量板的电源选择跳线) 的引脚分配。

引脚	标签	功能
1	+5V	跳线位置 1; +5V 用于 ACPL-736J 电流感测模块。
2	+5V/+3V3	电流测量电源的跳线公共点。
3	+3V3	跳线位置 2; +3.3V 用于 ACPL-736J 电流感测模块。

3 电路说明

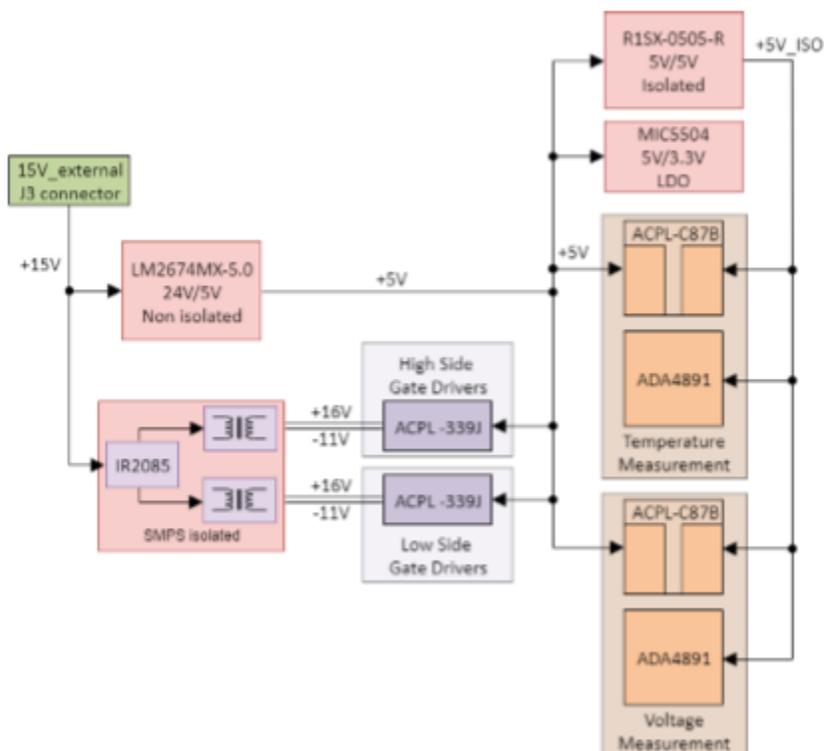
本章深入介绍了 EB1200-339J 栅极驱动器评估板和 ACPL-736J 电流感测模块的功能。

3.1 电源管理

EB1200-339J 的辅助电源管理框图如图 5 所示。评估板由外部+15V 电源供电。

EB1200-339J 配备有开关电源，该电源为驱动高压侧的每个栅极驱动器分别提供+16V 和-11V 的两路隔离双输出。该电路如图 6 所示。SMPS 基于 IR2085 自激半桥栅极驱动器和两个比例为 1: 2 的变压器。

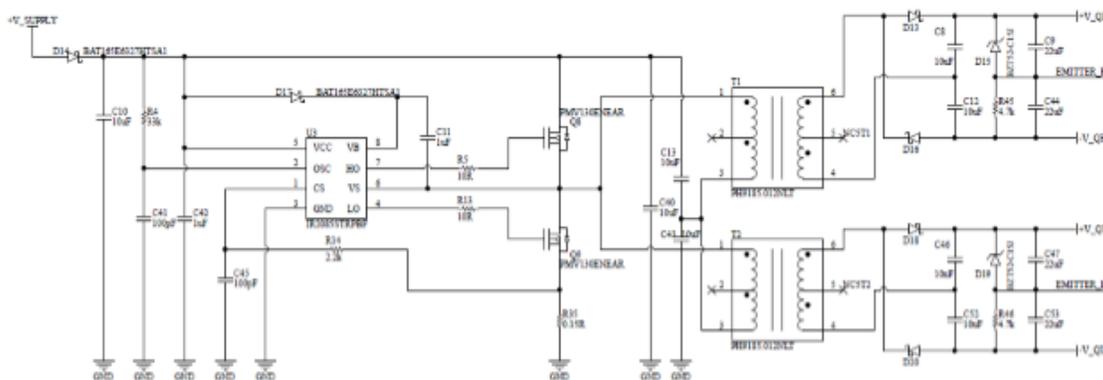
图 5:电源管理框图



主电源 15V/5V，采用 LM2674 DC-DC 开关稳压器实现，如图 7 所示。+5V 输出为 ACPL-339J 栅极驱动器和两个 ACPL-C87B 电压传感器低压侧供电。LM2674 是一种输出固定电压为 5V 的高性能降压稳压器，可驱动 500mA 负载，同时保持良好的线路和负载调节性能。由 LM2674 产生的+5V 电压基准源为电路板上的所有集成电路供电，可通过跳线选择将该基准电压作为 ACPL-736J 电流检测模块的电源。

隔离式 5V/5V 稳压器 R1SX-0505-R 为 ACPL-C87B 电压传感器高压侧提供隔离 5V 电压，如图 8 所示

图 6 用于栅级驱动器输出级的隔离开关电源。



EB1200-339J 通过 FPC 5 引脚 J1 连接器连接到 ACPL-736J 电流检测模块(图 3 为电流测量接口)。可以借助 Broadcom 的隔离式 sigma delta 调制器 ACPL-736J 在 IGBT 电源模块输出端子上使用 0.05mΩ分流器来测量电流。由于 ACPL-736J 低压侧支持 5V 或 3.3V 供电，EB1200-339J 可通过跳线选择电压电平。为此，EB1200-339J 需使用 5V/3.3V 的高性能 LDO，如图 9 所示，该 LDO 能够以 3.3V 电压为 ACPL-736J 电流检测模块提供备用电源。

图 7 +15V/+5V 直流/直流切换稳压电路。

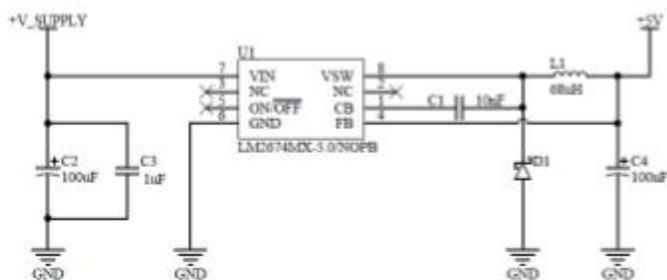


图 8 +5V 至+5V_ISO 非调节隔离 DC/DC 转换器。

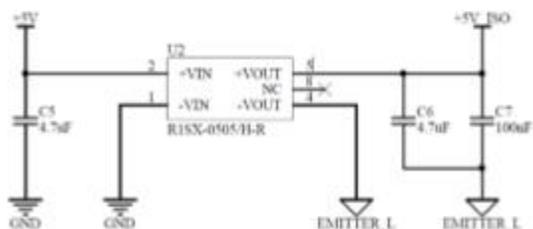
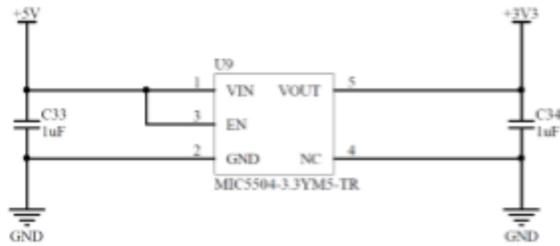


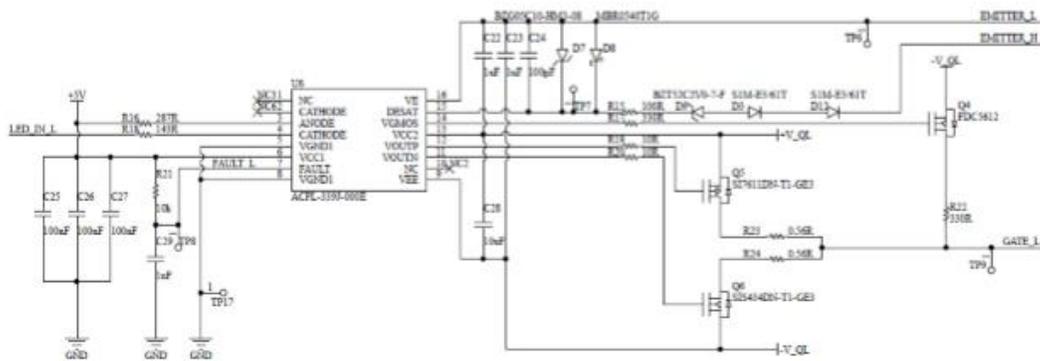
图 9 5V/3.3V LDO



3.2 栅极驱动器电路

本节介绍 EB1200-339J 上的栅极驱动器电路。在以下段落将介绍相关的特征和功能。栅极驱动电路如图 10 所示。

图 10 ACPL-339J IGBT 栅级驱动器电路



3.2.1 栅极驱动器电路：低压侧

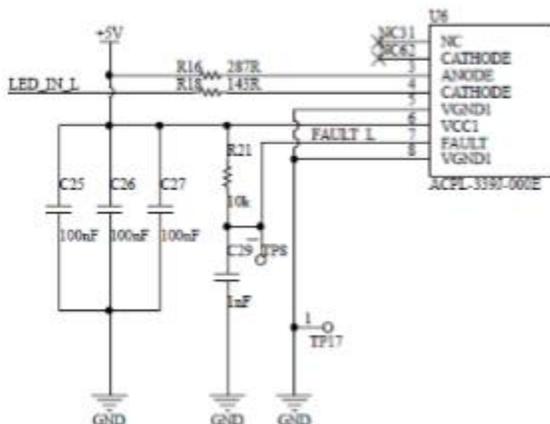
图 11 所示的栅极驱动电路的低压侧包含用于驱动 ACPL-339J 的电源、LED 输入和输出以及故障信号。

在引脚 3 和 4 上放置了两个电流设置电阻，以平衡 LED 阳极和阴极的共模阻抗。这有助于均衡阳极和阴极处的共模电压变化。其阻值选择，是根据该栅极驱动器数据手册实现的。

当输入 LED 直接极化 (polarized) 且没有故障时，ACPL-339J 的 VOUTP 引脚将设置为高电平，从而打开缓冲 MOSFET、将+16V 馈入 IGBT 的栅极。ANODE 引脚通过电阻

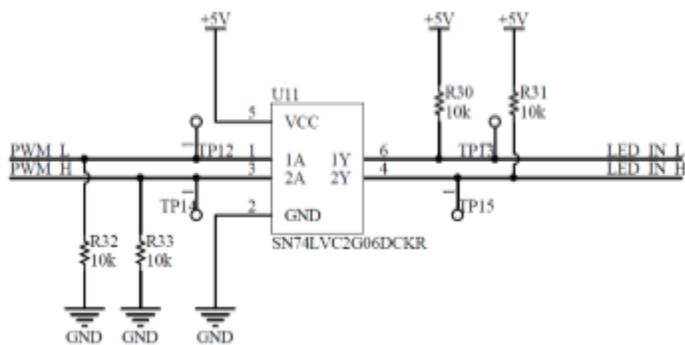
R16 拉高。输入信号 LED_IN_L 连接到 CATHODE 引脚之一（在此例为引脚 3）。当输入的 LED_IN_L 信号为低电平时，LED 直接极化、IGBT 导通。如果输入信号 LED_IN_L 为高，则 LED 和两个电阻之间的电压为低，因此 LED 不导通且 IGBT 处于截止状态。

图 11 栅极驱动器电路:低压侧



如图 12 所示，对通过用户接口连接器传送的外部 PWM 信号进行缓冲。由于缓冲器具有开漏输出，因此缓冲器的输入被下拉（低），而缓冲器的输出被上拉（高），以确保当输入 PWM 信号为高阻态时，IGBT 模块是关闭的。

图 12:脉冲宽度调制缓冲器。



如果满足 DESAT 或 UVLO 条件，则 FAULT 输出为高电平，驱动器不允许 IGBT 导通。

3.2.2 栅极驱动器电路：高压侧

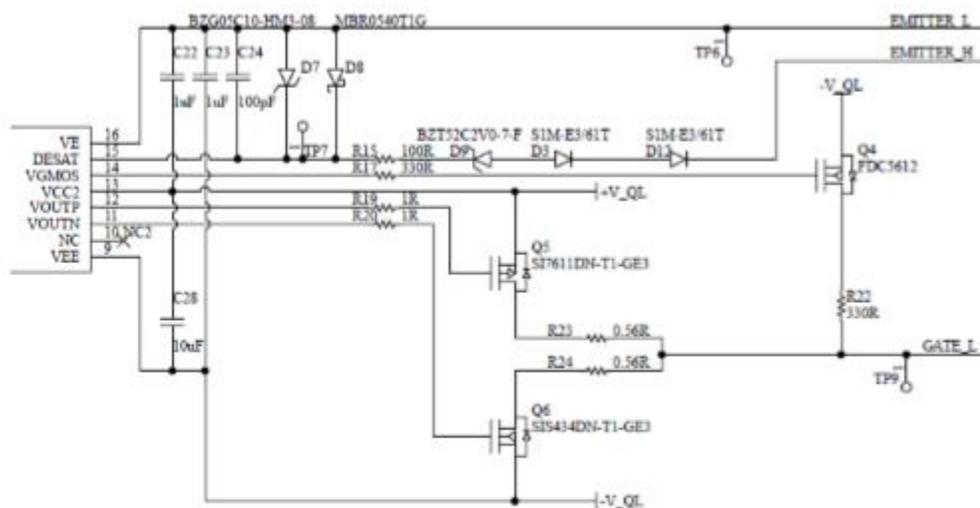
栅极驱动电路的次级侧如图 13 所示。它包括与 DESAT 和 UVLO 保护相关的电路、MOSFET 缓冲器和发生故障时的软关断。

MOSFET 缓冲器通过 1Ω电阻连接到 VOUTP 和 VOUTN 引脚。当 VOUTP 为高电平时，+16V 通过 0.56Ω电阻连接至 IGBT 栅极。当 VOUTN 为高电平时，IGBT 栅极通过相同阻值的电阻连接到-11V。这些电压以各 IGBT 的发射极为参考。

IGBT 的开关时间由栅极充电和放电决定。较高的峰值栅极电流会缩短导通和关断时间，从而减少开关损耗。栅极电流由栅极电阻控制。为了选择合适的栅极电阻，必须满足几个条件。

首先是栅极峰值电流的限制。该峰值必须保持在缓冲 MOSFET 的最大允许值以下。计算栅极电阻的理想值时，必须考虑缓冲 MOSFET 内部的 RDSON。ACPL-339J 的数据手册中给出了栅极电阻计算公式。

图 13 栅极驱动器电路:高压侧



$$R_G \geq \frac{V_{CC} - V_{EE}}{I_{O(PEAK)}} - R_{DSON}$$

注意：上位和下位功率开关的 RDSON 可能不同，因此必须分别对两者进行计算。根据 ACPL-339J 数据表选择了缓冲功率 MOSFET。

选择合适的栅极电阻的下一步是检查 ACPL-339J 栅极驱动器的功耗。如果功耗过高，则应加大栅极电阻的阻值。有关选择栅极电阻的详细说明，应参考 ACPL-339J 数据表。

关断栅极电阻选择的最后一步是确保在关断瞬态期间，在最大允许集电极电流下，IGBT 集电极-发射极电压不会超过 IGBT 器件的闭锁电压。导通栅极电阻器的最终标准是最大

集电极电流峰值，这与反向续流二极管的反向恢复有关。该峰值不得超过集电极标称电流的两倍。

为确保满足上述约束，EB1200-339J 采用用于正栅控和负栅控的 0.56Ω 栅极电阻。此外，评估板旨在使博通客户能够通过更改或组合开/关电阻来评估半导体的开关特性。

表 7:富士电气 EconoDUAL™ 模块不同额定值的推荐 R_G :

推荐 R _G (R23 / R24)	推荐 R _G (R23 / R24)
2MBI225XNA120-50 (1200V/225A)	0.82 Ω
2MBI300XNA120-50 (1200V/300A)	1 Ω
2MBI450XNA120-50 (1200V/450A)	0.68 Ω
2MBI600XNG120-50 (1200V/600A)	0.56 Ω
2MBI800XNE120-50 (1200V/800A)	0.5 Ω
2MBI1000XRNE120-50 (1200V/1000A)	0.5 Ω

3.2.3 保护功能

在激活 DESAT 或 UVLO 保护功能之前，VOUTP 和 VOUTN 将保持功能。

DESAT:

DESAT 引脚监视 IGBT 的集电极-发射极电压。IGBT 导通后，DESAT 故障检测电路必须在短时间内保持禁用状态，以使集电极电压稳定下来并降至 DESAT 阈值以下。该时长称为 DESAT 消隐时间 (blanking time)，由内部 DESAT 电流源、DESAT 电压阈值和外部 DESAT 电容器控制。标称消隐时间使用以下公式计算：

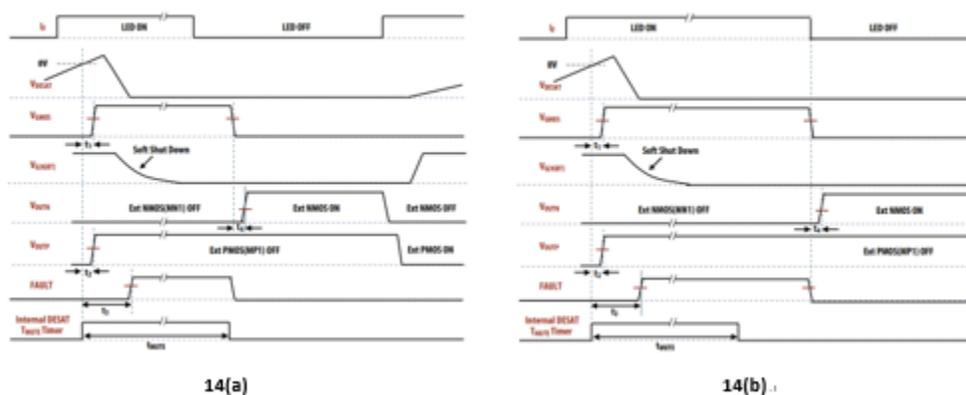
$$T_{BLANK} = \frac{C_{BLANK} \cdot V_{DESAT}}{I_{CHG}}$$

其中：C_{BLANK} 是外部容抗；V_{DESAT} 是故障阈值电压；I_{CHG DESAT} 是充电电流。标称消隐时间也代表驱动器响应 DESAT 故障情况所需的最长时间。一旦检测到 DESAT 故障并且消隐时间过去，VOUTP 和 VOUTN 都将关闭其各自的缓冲 MOSFET，而 VGMOS 将打开一个外部下拉晶体管，以启动 IGBT 的软关断。软关断可防止集电极电流快速变化（这种变化会因引线和导线的电感导致电压尖峰），从而防止器件损坏。衰减率对应于外部电阻和 IGBT 栅极电容的 RC 常数。

满足 DESAT 条件时，将激活内部反馈通道，该通道将 FAULT 输出从低电平变为高电平。一旦检测到故障，VOUTP 和 VOUTN 将“静默”TMUTE 时长。在此期间，所有输入 LED 信号将被忽略，以使驱动器完全软关断 IGBT。静默时长通常持续 1ms，之后故障自动复位。

为正确调整 DESAT 阈值电压，应仔细考虑 (各) DESAT 二极管。该二极管的功能是传导正向电流，以便在 IGBT 导通时允许 IGBT 饱和的集电极-发射极电压感测，而在 IGBT 关断时阻止高电压。其标称阈值为 $8V - V_F$ ，其中 V_F 为 DESAT 二极管的正向压降。如果需要，可通过添加多个 DESAT 二极管或齐纳二极管进一步降低该阈值电压。增加更多串联二极管的好处是可使用较低额定电压的二极管。如果使用齐纳二极管，则标称阈值电压值为 $8V - V_F - V_D$ 。

图 14. LED 关闭时 DESAT 故障状态：静音超时前 14 (a)，静音超时后 (b)。



在当前设计中，阈值电压设置为 3.8V。这意味着，对于选定的 IGBT，在 IGBT 集电极电流达到约 2400A 之后，DESAT 保护将起作用。

连接在 IGBT 上的反并联二极管的续流可能具有较大的瞬时正向瞬态电压。如果不使用保护，这可能会导致 DESAT 引脚上出现较大的负电压尖峰，从而从驱动器吸收大量电流。借助与 DESAT 二极管串联的 100Ω电阻来限制该电流。

通常由感性负载产生的负电压尖峰或 IGBT/MOSFET 续流二极管的反向恢复尖峰会导致 DESAT 引脚电压超过阈值，从而产生错误的故障信号。为防止这种情况，将齐纳二极管和肖特基二极管跨接在 DESAT 和 VE 引脚间。齐纳二极管可保护 DESAT 引脚免受正高瞬态电压的影响，肖特基二极管可防止栅极驱动器光耦的衬底二极管发生正向偏置。

UVLO:

在导通期间，IGB 上的栅极电压不够高会增加 IGBT 上的压降。这会导致高功耗、随之的高散热量会损坏 IGBT。ACPL-339J 持续监控输出功率。如果电源电压低于 UVLO 阈值，

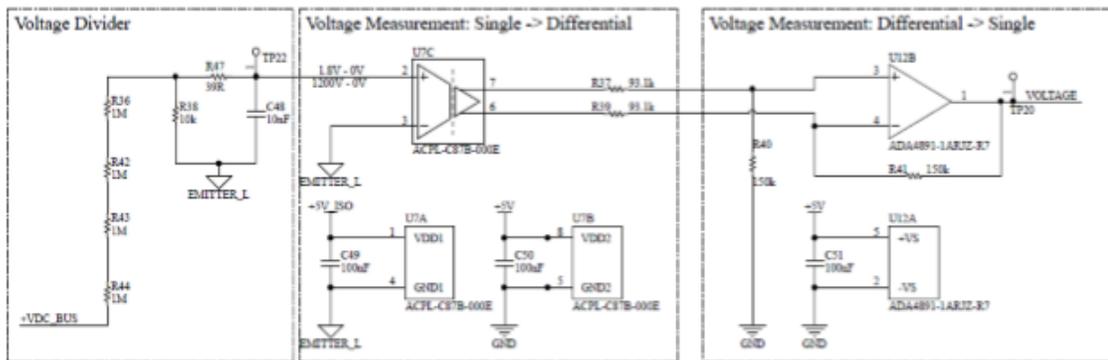
则驱动器输出将关闭，以保护 IGBT 免受低电压偏置的影响。UVLO 保护先于 DESAT 保护。

3.3 测量

3.3.1 隔离的直流总线电压测量

隔离的 DC 总线电压测量是使用 ACPL-C87B 光学隔离的高精度电压传感器实现的。图 15 显示了电压测量电路。

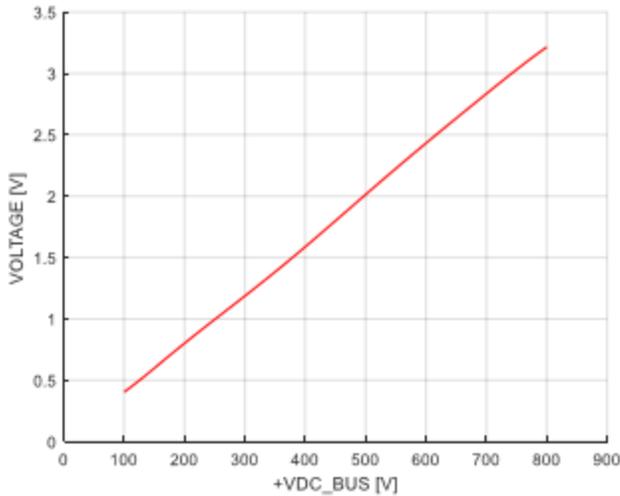
图 15: 隔离直流母线电压测量。



直流总线电压被送到分压器，分压器将 1200V 降匹至 1.8V。在本设计中，使用四个 1MΩ电阻和一个 10kΩ电阻来构成分压器。请注意：由于要求的精度，这些电阻器必须具有较窄的容差。增加了电阻 R47 和电容器 C48 进行抗混叠。

然后将获得的信号转换为 ACPL-C87B 次级侧的差分信号。差分信号通过 ADA4891 转换回单端信号。电路的输出是 0V 至 5V 模拟信号，它是 DC 总线电压在 0V 至 1200V 范围内的线性表度。测量电路的典型 DC 总线电压响应如图 16 所示。

图 16: 典型电压测量特性



如果将建议的单端配置用于最终应用设计，则强烈建议在运放上添加额外的滤波器，以衰减高频尖峰。

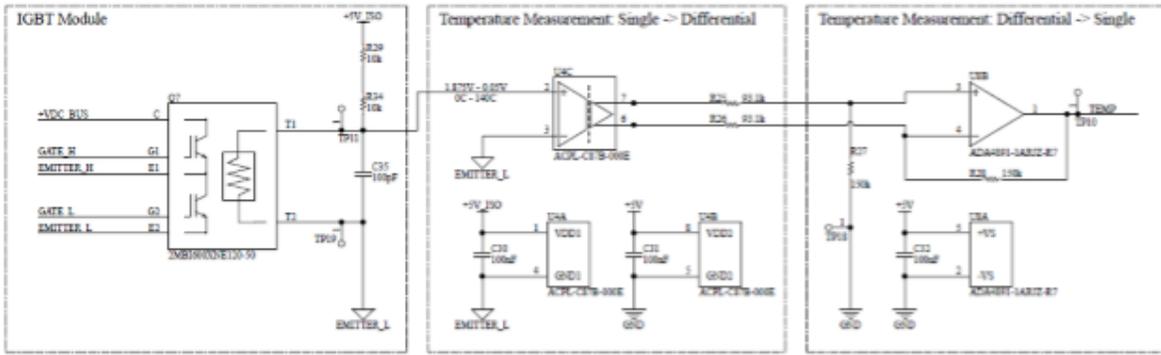
3.3.2 隔离的温度测量

隔离的温度测量是使用相同的隔离电压传感器 ACPL-C87B 设计的。从图 17 中可以看出，类似的配置既用于直流链路电压测量，也用于温度测量。

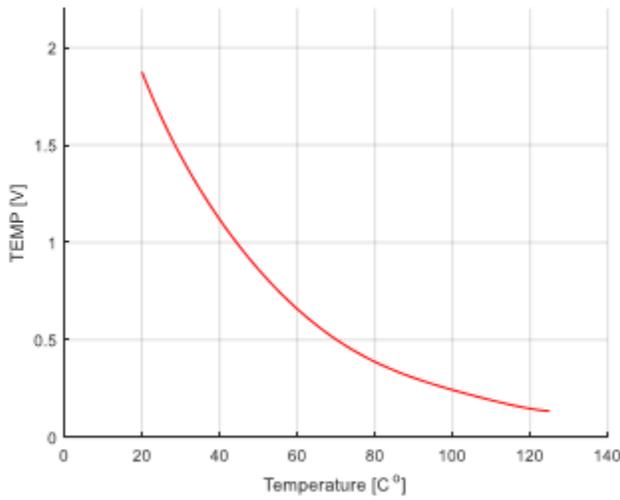
EconoDUAL™ IGBT 模块 2MBI600XNE120-50 具有内部 NTC 热敏电阻，其对应的温度-阻值范围为：0°C 时的 15kΩ 到 140°C 时的 200Ω。隔离的 5V 电压通过串联的 20kΩ 电阻馈入该热敏电阻。这形成了一个分压器，因此，1.875V 至 0.05V 就表示 0°C 到 140°C。

其余的温度测量电路与直流总线电压测量的相同。在 0°C 到 140°C 输出温度范围内，将其调适至 5V 至 0.1V。

图 17: 隔离温度测量。



测量电路的典型温度响应如图 18 所示。注意：可通过改变反馈电阻 R28 以及放大器电路中电阻 R25 和 R26 的值来调节输出电压范围。



3.3.3 IGBT 输出电流测量

IGBT 输出电流测量使用 ACPL-736J 电流感测模块完成。使用 0.05mΩ分流电阻 (KOA HS-50U-2) 测量来自 IGBT OUT 端子的 IGBT 电流。根据 IGBT 模块的额定值，输出电流范围为 225A 至 1000A。这将提供 11.25mV 至 50mV 的感测电压，该电压在 ACPL-736J 的±50mV 线性范围内。分流电阻器使用 M3 螺钉通过 S1 和 S2 端子连接到板上。

电流感测模块的 H1 连接器使用 5 极 (pole) FPC 电缆连接到 EB1200-339J 的 J1 连接器。EB1200-339J 将提供 5VCC 和 VDD2，以分别为评估板和 ACPL-736J 供电。U2 (pSemi PE33100) 变压器驱动器将切换变压器 T1 (Würth 750344162)，以提供隔

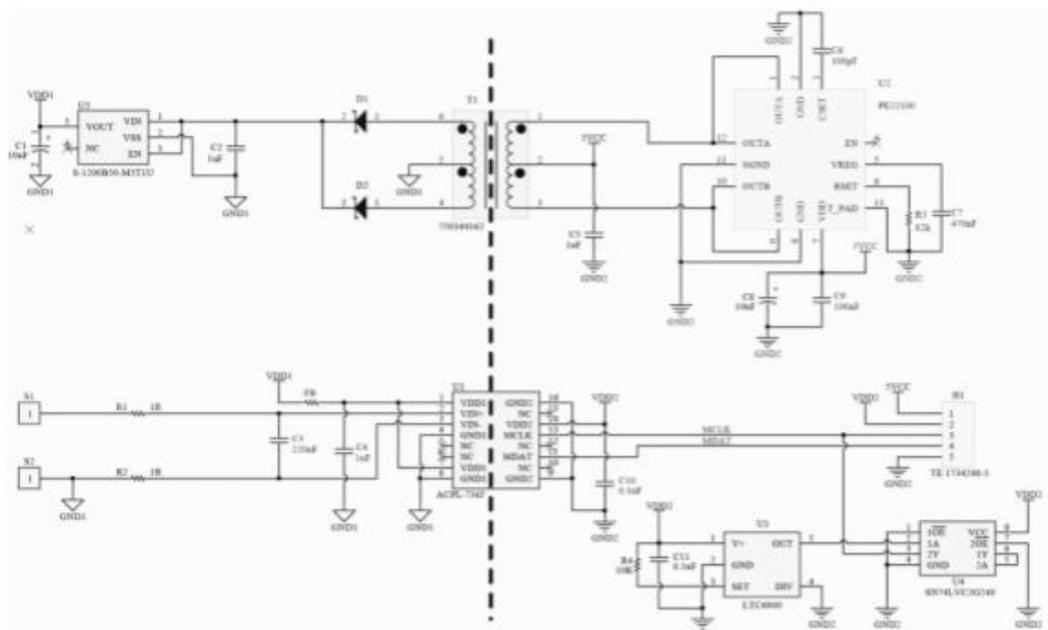
离电源 VDD1 至 ACPL-736J 的次级侧。U3 为 ACPL-736J 提供 20MHz 的外部 CLK，可通过电阻 R4 调节 CLK 频率。

图 18 ACPL-736J 电流传感模块的功能块配置。

current sensing module.



图 19: ACPL-736J 电流检测模块原理图。



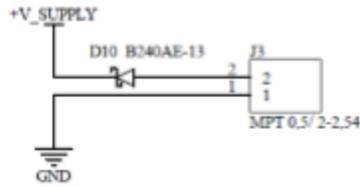
3.4 连接器

以下各节介绍了 EB1200-339J 的连接器。

3.4.1 Vcc +15V 连接器

电源连接器+15V 是标准的双位 PCB 接线端子。图 20 显示了连接器示意图。

图 20:+15V 电源连接器。

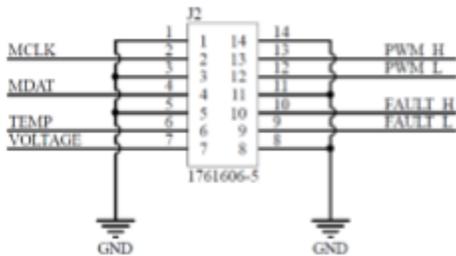


肖特基二极管与主电源串联放置，用于反向电压保护。

3.4.2 用户接口连接器

用户接口牛角连接器 (header connector【译注：请根据照片确定该译法是否准确】) 用作微控制器或 PWM 信号源与 EB1200-339J 评估板之间的接口。图 21 显示了经此连接器的信号布置。

图 21:用户接口连接器。



用户接口连接器 J2 除了为 PWM 信号提供输入外，还为故障信号、电压和温度测量以及来自 ACPL-736J 电流感测模块的缓冲 MCLK 和 MDAT 信号提供输出。

3.4.3 电流测量接口连接器

EB1200-339J 评估板集成了双缓冲 MCLK 和 MDATA 输入，用作与外部电流测量板的接口。使用 FPC 连接器将来自 ACPL-736J 电流感测模块的两个信号传送到 EB1200-339J。然后将它们路由到缓冲器，再通过用户接口连接器路由到用户。注意：这些信号路径必须

具有相同的长度，因此必须在布局中实施长度匹配。图 22 显示了缓冲器配置，图 23 显示了电流测量接口连接器。

图 22:MCLK &MDAT 缓冲区配置。

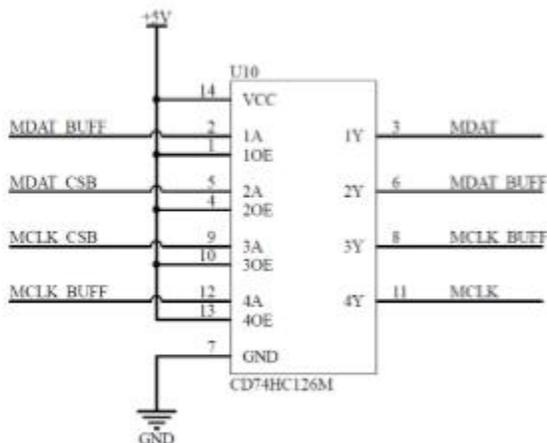


图 23:电流测量接口连接器。

EB1200-339J 使用户可以选择用于为外部电流测量板供电的参考电压。可用的电压为 5V 和 3.3V，可通过正确调整跳线 J4 来选择。

4 使用中的设置

警告!

EB1200-339J 栅极驱动器评估板设计为可在最高 800V 的电压下工作，因此要求遵守所有安全预防措施和相关的国家事故防范法规。评估版的安装和使用应由熟练的技术人员操作。如果未正确使用或安装该评估版，则有造成严重人身伤害和财产损失的危险。强烈建议为评估板供电的系统应配备满足安全标准的控制和保护装置。

注意:

专用于上位驱动器和下位驱动器的信号必须具有适当的死区时间 (dead time)。评估板本身不提供死区时间生成。推荐的最小死区时间值为 5 μ s。

4.1 EB1200-339J 的评估

EB1200-339J 使用户可以评估以下各项：

- ACPL-339J 驱动器特性
- ACPL-C87B 精密电压传感器特性
- ACPL-736J 电流传感器特性
- EconoDUAL™ IGBT 模块中半导体的开关特性
- 半桥逆变器的基本特性

为使用 EB1200-339J 评估半导体开关特性，建议执行双脉冲测试并测量与半导体和 ACPL-339J 栅极驱动器电路相关的瞬变。

5 典型的开关和 DESAT 保护特性

5.1 典型的开关损耗

EB1200-339J 没有集成的 DC 总线电容器组，因此换相电感（从开关到 DC 总线的最长路径）确实取决于用于表征开关特性的设置。例如，图 24 和图 25 显示了 2MBI600XNE120-50，在 25°C 下具有的导通和关断损耗。

图 24: 800V 直流电源总线时的导通切换能量损失

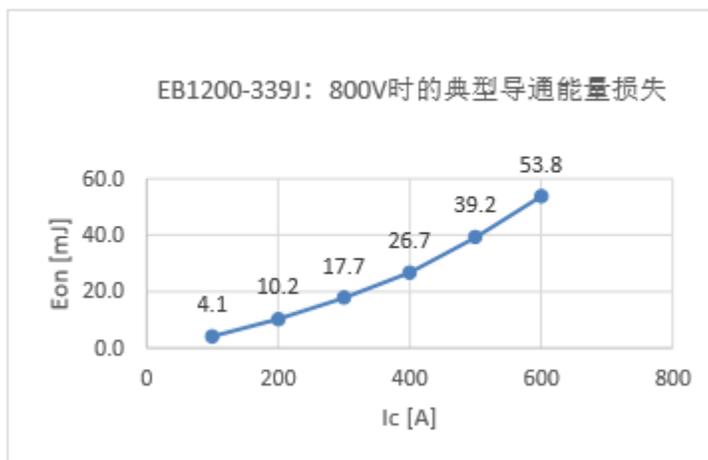
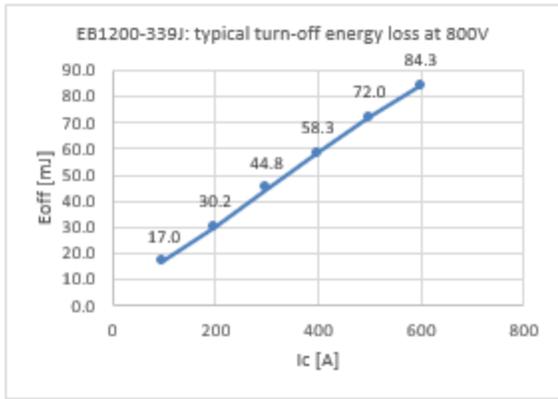


图 25: 800V 直流电源总线时的导通切换能量损失。



5.2 典型的开关波形

使用标准双脉冲测试程序，通过示波器测量半导体硬切换期间的切换波形。图 26 显示了导通开关瞬变；图 27 描述了关断开关瞬变。

图 26:导通瞬态示波器截图,Vdc = 800V, Ic=600A; CH2(红色)Ic, CH1(绿色)Vce, CH3(蓝色)Vge

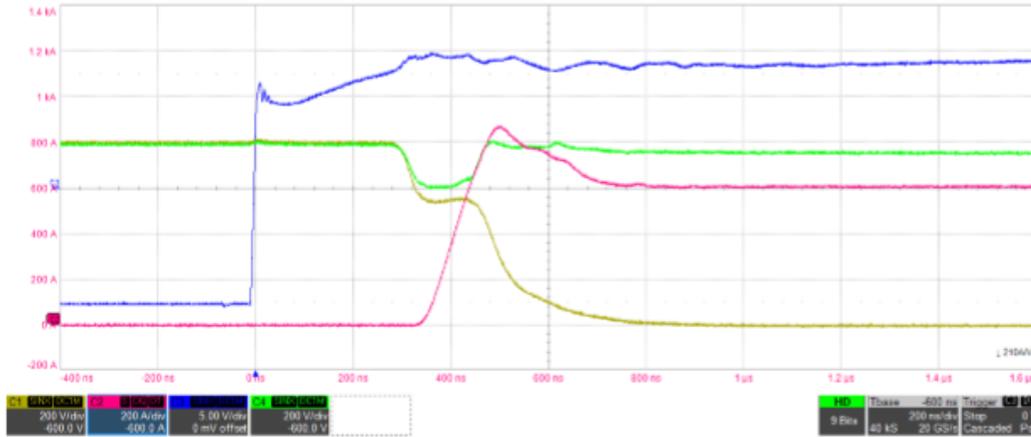
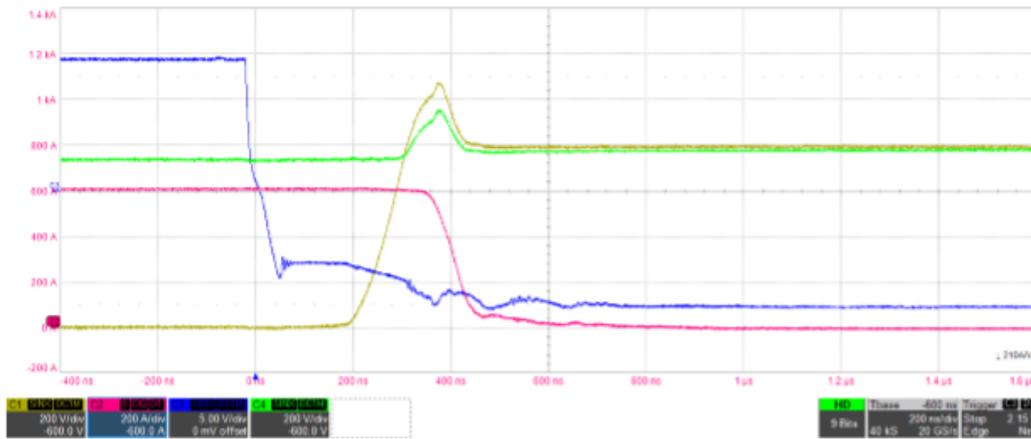


图 27:关断瞬态示波器截图,Vdc = 800V, Ic = 600A; CH2(红色)Ic, CH1(绿色)Vce, CH3(蓝色)Vge。



5.3 典型的 DESAT 保护性能

通过对 EconoDUAL™ 功率模块 2MBI600XNE120-50 的输出实施直接短路来获得 DESAT 保护功能。测量结果如图 28 所示。

注意：出于评估目的，使用调整后 $V_Z=5.1V$ 的 DSAT 齐纳二极管获得图 28 的结果。通过此调整，可以看出，DSAT 功能在 1.5 倍标称电流时起作用。在 EB1200-339J 的原初设计中， $V_Z=2.7V$ 的 DSAT 齐纳二极管用于调节 IGBT 在 4 倍标称电流下的短路条件下的保护，这是最终用户应用的标准配置。

图 28 DESAT 检测结果, $V_{dc} = 800\text{ V}$ 时直接短路, CH1(黄色) V_{desat} , CH2(红色) I_c , CH3(蓝色) V_{ge} , CH4(绿色) V_{ce} 。

