

## 三相 1200V/450A SiC MOSFET 电动汽车智能功率模块

越来越多的领先电动汽车制造商正在将碳化硅 (SiC MOSFET) 功率场效应管用于牵引逆变器，其中有些还采用了非传统的分立器件封装。但是，目前很难找到针对电动机驱动而优化的 SiC 功率模块来适配不同的应用。更进一步，将快速开关的 SiC 功率模块与栅极驱动器、去耦及水冷等整合为驱动总成，还要面对一些新的挑战。因此，经过完全优化和高度集成的智能功率模块解决方案，可以为客户节省大量的开发时间和工程资源。

作者: CISSOID 首席技术官, Pierre Delatte

本文介绍了一种用于电动汽车电机驱动、或电力逆变器的新型三相 1200V SiC MOSFET 智能功率模块 (IPM)。该 IPM 提供了一种多合一的解决方案，含有栅极驱动器和三相全桥 SiC MOSFET 功率电路，可用于水冷功率系统。本文简要介绍了该功率模块的关键电气和热特性，讨论了其安全操作区域；最后，说明了栅极驱动器的关键特性，及其安全可靠的驱动 SiC MOSFET 的综合能力。

水冷，结至流体的热阻为 0.15°C/W。该智能功率模块的额定结温高达 175°C，可以承受高达 3600V (50Hz, 1min) 的隔离电压。

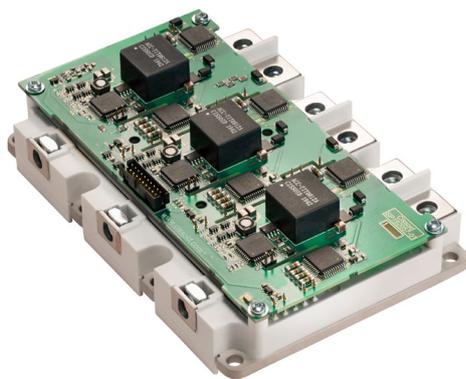


图 1: CXT-PLA3SA12450AA 三相全桥 1200V/450A SiC MOSFET 智能功率模块

### 三相全桥水冷 SiC MOSFET 智能功率模块

CXT-PLA3SA12450AA 是一个可扩展平台系列的首个产品，该三相 1200V/450A SiC MOSFET IPM 具有导通损耗低 (Ron 为 3.25mΩ)、开关损耗低 (7.8mJ 开启和 8mJ 关断) 等特点 (在 600V/300A 时，参见表 1)。相对于最新的 IGBT 电源模块，其损耗至少降低了三分之二。新模块通过轻巧的 AISiC 翅翘底板进行

参数	测试条件	额定值	最大值
Vds 漏源极间耐压			1200V
Id 漏极连续电流	V <sub>GS</sub> =15V, T <sub>c</sub> =25 T <sub>j</sub> <175°C		450A
	V <sub>GS</sub> =15V, T <sub>c</sub> =90°C, T <sub>j</sub> <175°C		330A
Rds 导通电阻	V <sub>GS</sub> =15V, Id=300A, T <sub>c</sub> =25°C	3.25mOhms	4mOhms
	V <sub>GS</sub> =15V, Id=300A, T <sub>j</sub> =175°C	5.25mOhms	
Eon 开关损耗(开启)	V <sub>DS</sub> =600V; V <sub>GS</sub> = -3/15V;	7.8mJ	
Eoff 开关损耗(关闭)	I <sub>DS</sub> = 300A; L = 50μH	8mJ	
Vbk 隔离电压	AC @50Hz (for 1mn), baseplate - power pins		3600VAC
Rth(jf) 热阻 (结-流体)	Each switch position, Flow rate: 10l/min; 50% ethylene glycol, 50% water, 75°C inflow temperature	0.15°C/W	
Rth(jc) 热阻 (结-外壳)	Each switch position	0.13°C/W	
Tj 结温			175°C
外观尺寸		103.45mm (W)	
		154.00mm (L)	
		42.56mm(H)	

表 1: CXT-PLA3SA12450AA 的主要特性

### 热稳定性和安全的工作区域

该智能功率模块是为高热环境的稳定性应用而设计的，额定的最高结温为 175°C。栅极驱动器本身具备在最高环境温度工作温度为 125°C 的情况下、长时间工作的增强的耐热能力。

如前所述，该智能功率模块通过轻巧的 AlSiC 针翅底板冷却，每相的结至流体热阻为 0.15°C/W，当流速为 10L/Min（推荐的冷却液为 50%乙二醇，50%水），允许的流体最高流入端温度可达 75°C。

最大连续漏极电流 ( $I_d$ ) 与 CXT-PLA3SA12450AA 的外壳温度之间的关系（根据最大  $T_j$  时的导通电阻，热阻和最大工作结温计算）如图 2 所示。

最大连续漏极电流 ( $I_d$ ) 被视为比较功率模块的额定功率的标准参数，而品质因数 (FoM, Figure of Merit) 则揭示了 RMS 相电流与开关频率的关系，如图 3 所示；该曲线是针对 600V 的 DC 总线电压、90°C 的外壳温度、175°C 的结温和 50% 占空比计算的。该 FoM 曲线对于了解模块的适用性更为有用。CISSOID 的智能功率模块平台具有系列可扩展性，例如，从图 3 还可推断（虚线）出未来的 1200V/600A 模块的安全工作范围。

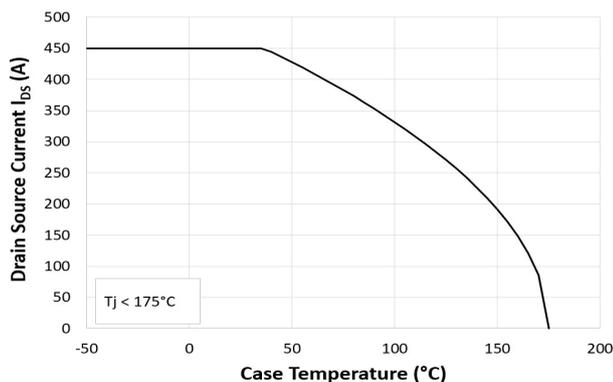


图 2: 最大连续漏极电流降额 ( $I_d$ ) 与 CXT-PLA3SA12450AA 的外壳温度之间的关系。

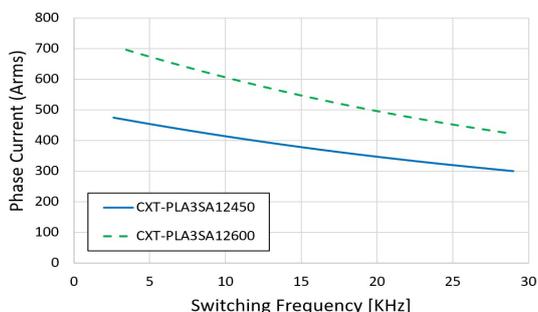


图 3: FoM 曲线，1200V/450A SiC 功率模块 (CXT-PLA3SA12450AA) 的相电流 (Arms) 与开关频率 (条件: VDC = 600V,  $T_c = 90^\circ\text{C}$ ,  $T_j < 175^\circ\text{C}$ ,  $D = 50\%$ )，和预测未来的 1200V/600A 模块 (CXT-PLA3SA12600AA, 正在开发中) 相比较

### 三相 SiC 栅极驱动器

CXT-PLA3SA12450AA 三相栅极驱动器的设计，源自自己得到充分测试验证的 CMT-TIT8243 [1, 2] 和 CMT-TIT0697 [3] 单相栅极驱动器板，分别设计用于 62mm 1200V/300A 和快速开关 XM3 1200V/450A SiC MOSFET 功率模块（请参见图 4）。三相栅极驱动器经过优化，可以直接安装在 CXT-PLA3SA12450 功率模块的顶部，这归功于更为紧凑的变压器设计或略微调整的爬电距离设定。CXT-PLA3SA12450AA 栅极驱动器还包括直流总线电压监视功能。

对于 CMT-TIT8243 和 CMT-TIT0697，栅极驱动器板的最高工作环境温度为 125°C。板上所有的元器件均经过精心选择和确认，以保证在此温度下的运行。这些设计还依靠 CISSOID 的高温栅极驱动器芯片组 [4、5] 和针对低寄生电容（典型值为 10pF）进行了优化的电源变压器模块，以最大程度地降低高  $dv/dt$  和高工作温度下的共模反射电流。



图 4: 用于快速切换 XM3 1200V/450A SiC MOSFET 功率模块的 CMT-TIT0697 栅极驱动器板

CXT-PLA3SA12450AA 栅极驱动器仍有足够的余量来支持功率模块的可扩展性。该模块的总栅极电荷为 910nC。在开关频率为 25KHz 时，平均栅极电流等于 22.75mA。这远低于板载隔离式 DC-DC 转换器的 95mA 最大电流能力。因此，无需修改栅极驱动器板，就可以直接驱动未来栅极电流容量和栅极电荷更高、驱动功率更大的功率模块。

使用并列的多栅极电阻架构，以适应实际最大  $dv/dt$  可在 10~20 KV/ $\mu\text{s}$  的范围内（负载相关）。栅极驱动器的本身的设计，足够抵抗高达 50KV/ $\mu\text{s}$  的  $dv/dt$ （感性负载），从而在  $dv/dt$  鲁棒性方面提供了足够的余量。

### 栅极驱动器保护功能

栅极驱动器保护功能对于确保功率模块的安全运行至关重要。在驱动快速开关的 SiC MOSFET 时尤其如此。CXT-PLA3SA12450 栅极驱动器提供以下保护功能：

✓, 欠压锁定保护 (UVLO) : CXT-PLA3SA12450AA 栅极驱动器监视初级和次级电压，并在低于编程要求电压时自动启动保护、报告故障。

- ✓, 防重叠保护: 避免同时开启高侧和低侧功率电路, 以防止半桥短路。
- ✓, 防止次级短路: 隔离的 DC-DC 转换器可以逐周期地进行电流限制, 从而防止栅极驱动器发生任何短路 (例如, 栅极 - 源极短路)。
- ✓, 毛刺滤波器: 抑制输入 PWM 信号上的毛刺, 这些毛刺经常是由于共模电流引起的。
- ✓, 有源米勒钳位 (AMC): 关断后实现负栅极电阻的旁路, 以保护功率 MOSFET 免受寄生反射的影响。
- ✓, 去饱和检测: 在打开时, 在消隐时间之后检查功率 MOSFET 漏源电压是否低于阈值。
- ✓, 软关断: 在出现故障的情况下, 将缓慢关闭功率晶体管, 以最大程度地降低由于高  $di/dt$  而引起的过冲。

### 结论

本文提出了一种新型的三相 1200V/450A SiC MOSFET 智能功率模块。这个新的、可扩展的平台系列, 优化了功率模块的电气、机械和散热设计及其控制驱动, 将有助于所有希望采用 SiC 功率器件以提高驱动效率、减低电机驱动尺寸和重量的电动汽车 OEM 和电机制造商, 极大地帮助其缩短产品的上市时间。

### 参考文献

- [1] CMT-TIT8243: 1200V High Temperature (125 °C ) Half-Bridge SiC MOSFET Gate Driver Datasheet : <http://www.cisoid.com/files/files/products/titan/CMT-TIT8243.pdf>
- [2] P. Delatte “A High Temperature Gate Driver for Half Bridge SiC MOSFET 62mm Power Modules” , Bodo’ s Power Systems, p54, September 2019
- [3] CMT-TIT0697: 1200V High Temperature (125 °C ) Half-Bridge SiC MOSFET Gate Driver Datasheet : <http://www.cisoid.com/files/files/products/titan/CMT-TIT0697.pdf>
- [4] High Temperature Gate Driver Primary Side IC Datasheet: DC-DC Controller & Isolated Signal Transceivers <http://www.cisoid.com/files/files/products/titan/CMT-HADES2P-High-temperature-Isolated-Gate-driver-Primary-side.pdf>
- [5] High Temperature Gate Driver -Secondary Side IC Datasheet: Driver & Protection Functions <http://www.cisoid.com/files/files/products/titan/CMT-HADES2S-High-temperature-Gate-Driver-Secondary-side.pdf>