

# 650 V CoolMOS™ CFD7A for on-board chargers and DC-DC converters

## High performance Superjunction MOSFETs for HEV and EVs

### 关于本文档

#### 范围和目的

本文档旨在作为英飞凌汽车应用功率器件用于高压 (HV) 车载充电器和车载 DC-DC 系统的指南。本文档将重点介绍超结 (SJ) 功率 MOSFET 系列的最新成员 CoolMOS™ CFD7A 在电动汽车（如插电式混合动力汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车和纯电动汽车）的功率因数校正 (PFC) 和 DC-DC 级中的应用。

此外，本文档还概要介绍了 CoolMOS™ CFD7A 技术，并特别强调了其在典型应用中相较于次优竞品所具备的优势。

#### 目标受众

负责为车载电子设备选择最合适的高压功率器件的设计工程师。目前正在从事车载充电器和车载 HV-LV DC-DC 转换器或主动放电应用的概念阶段或设计阶段工作的工程师。

### 目录

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 关于本文档 .....                        | 1         |
| 目录 1 .....                         |           |
| <b>1 简介 .....</b>                  | <b>3</b>  |
| 1.1 有关拓扑和功率半导体的建议概览 .....          | 5         |
| <b>2 车载充电器系统 .....</b>             | <b>7</b>  |
| 2.1 功率因数校正 (PFC) 级 .....           | 8         |
| 2.1.1 典型升压 PFC .....               | 8         |
| 2.1.2 双升压 PFC .....                | 10        |
| 2.1.3 图腾柱 PFC .....                | 11        |
| 2.2 DC-DC 转换器级 .....               | 12        |
| 2.2.1 移相全桥 (PSFB) .....            | 12        |
| 2.2.2 LLC 拓扑 .....                 | 14        |
| 2.2.3 CLLC 拓扑 .....                | 15        |
| 2.3 具有三相交流输入的车载充电器 .....           | 15        |
| 2.3.1 三相 PFC .....                 | 15        |
| 2.3.1.1 单级模块堆叠 .....               | 15        |
| 2.3.1.2 三相全桥 PFC .....             | 17        |
| 2.3.1.3 Vienna 整流器 .....           | 18        |
| <b>3 HV-LV DC-DC 转换器 .....</b>     | <b>20</b> |
| <b>4 CoolMOS™ CFD7A 产品性能 .....</b> | <b>22</b> |
| 4.1 $C_{oss}$ 和 $E_{oss}$ 降低 ..... | 23        |
| 4.2 栅极电荷减少 .....                   | 26        |
| 4.3 CoolMOS™ CFD7A 的快速体二极管特点 ..... | 27        |
| 4.4 具有宽爬电距离的 SMD 封装 .....          | 27        |

简介

|          |                          |           |
|----------|--------------------------|-----------|
| 4.5      | ESD 鲁棒性 .....            | 28        |
| 4.6      | PFC 和 DC-DC 级的效率性能 ..... | 28        |
| 4.6.1    | CCM PFC 的效率结果 .....      | 28        |
| 4.6.2    | 软开关 LLC 的效率结果 .....      | 31        |
| 4.7      | 一般设计和布局建议 .....          | 33        |
| <b>5</b> | <b>参考文献 .....</b>        | <b>34</b> |
|          | <b>修订历史 .....</b>        | <b>36</b> |

## 简介

# 1 简介

交通行业即将风云再起，迎来变革。一个多世纪以来，内燃机一直是最先进的交通解决方案，但现在电动交通 (eMobility) 正在彻底改变我们未来的出行方式。

尽管汽车行业的一些大公司对电动交通持怀疑态度，但大部分人仍认为实现各政府组织设定的二氧化碳排放目标很有必要。

电动汽车的一大优势是其传动系统的概念非常简单。与传统动力传动系统配备大量机械部件不同，电动传动系统可以仅由一个电力引擎（电机）、一个逆变器和一个能量源（通常是混合动力传动系统中的动力蓄电池、燃料电池组或混动系统的内燃机）组成。

半导体在电动汽车的功率传输管理中发挥着重要作用。功率半导体在电动汽车中无处不在，例如：用于控制引擎的牵引逆变器系统中；为蓄电池充满合适电量所需的车载充电器中；维持车内高压区和低压区之间功率传输的车载 DC-DC 转换器中。

英飞凌科技公司为整体解决方案提供最先进的半导体产品。CoolMOS™ CFD7A 是最新的车规 650 V SJ MOSFET 技术，使车载充电器和车载 DC-DC 系统在质量、可靠性和性能方面均有了新的飞跃。

**图 1** 概述了“电动汽车”系统和英飞凌功率半导体技术的使用。

**Note:** 有关更多设计支持材料，请参考应用说明“使用英飞凌超结 MOSFET 器件进行设计时的一般注意事项”和“650 V CoolMOS™ CFD7A for on-board chargers and DC-DC converters”，另可考虑通过技术协助中心联系我们的专家：<https://www.infineon.com/cms/en/about/infineon/company/contacts/product-support-form/>。

简介

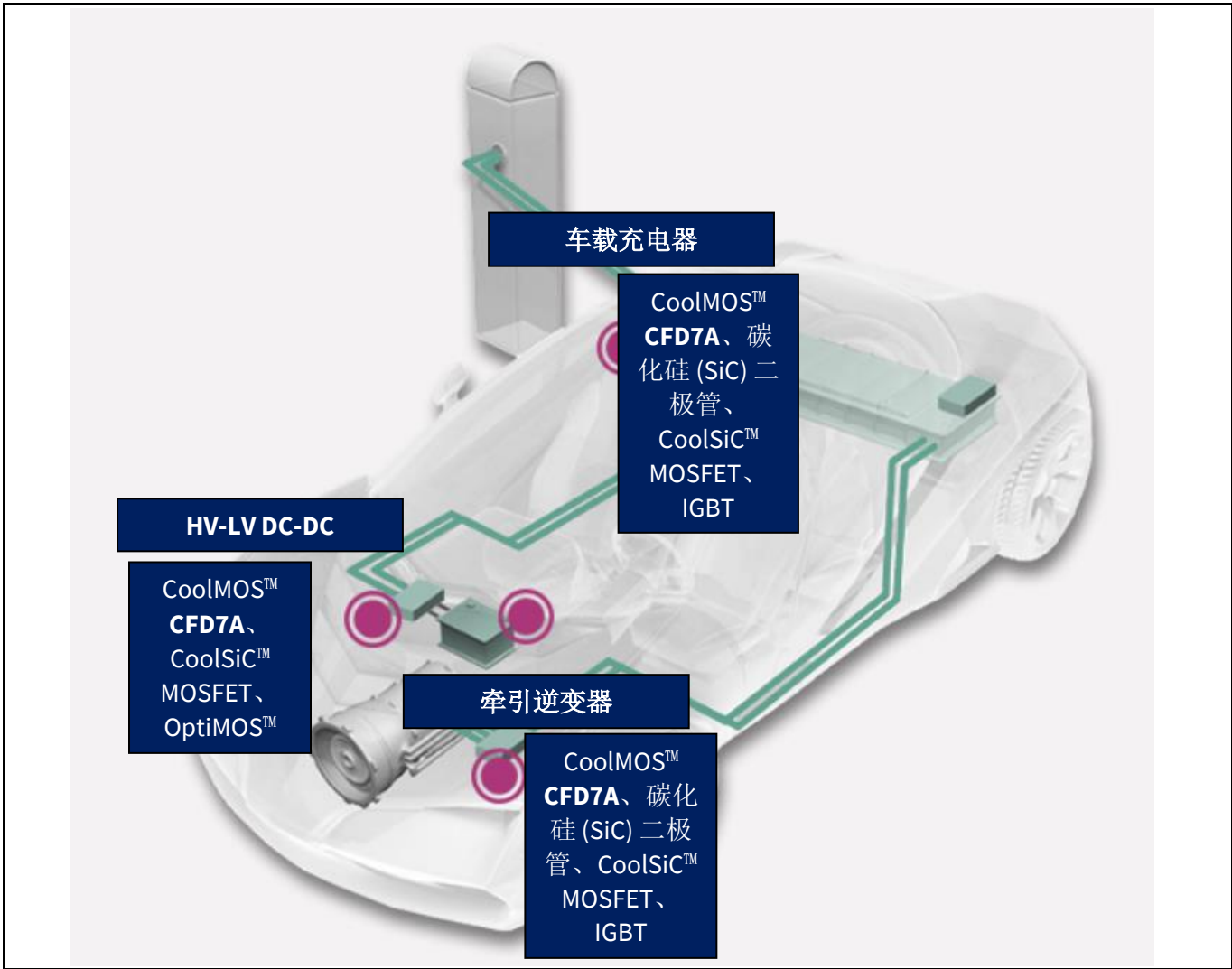


Figure 1 配备不同子系统的纯电动汽车 (BEV) 展示了英飞凌各具特色的功率解决方案

图 2 介绍了电动汽车中最重要的高压子系统的基本框图。

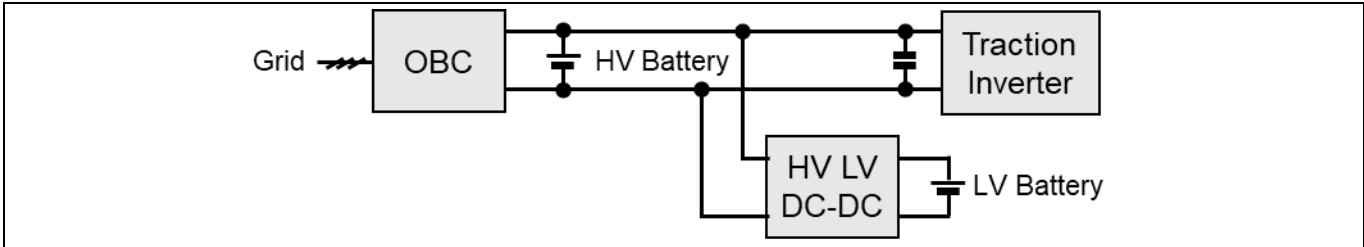


Figure 2 电动汽车中最重要子系统的基本框图。通常，高压区的最高电压可达约 500 V，低压区的电压通常为标称 12 V。

本文档将进一步重点介绍用于插电式混合动力汽车和 BEV 的车载充电器 (OBC) 和车载 DC-DC 转换器：  
表 1 简要概述了在不同拓扑中正确使用的半导体。第 1 章详细介绍了不同应用和器件的使用情况。

## 简介

第 2 章概要介绍 CoolMOS™ CFD7A 技术的特性和优势，并提供了如何正确使用的提示。

有关适用于其他子系统的英飞凌解决方案（例如牵引逆变器、辅助电源、ProFET 及其他汽车解决方案）的信息，请访问 <https://www.infineon.com/automotive/> 获取。

## 1.1 有关拓扑和功率半导体的建议概览

**Table 1** 拓扑概述

| 系统                                 | 拓扑 PFC  | 拓扑 DC-DC   |
|------------------------------------|---|--|
| 单相 OBC（单向）500 V 系统                 | <p>经典升压，采用 650 V 英飞凌 H5、650 V CoolMOS™ CFD7A 和 650 V 第五代碳化硅 (SiC) 二极管</p> <p>双升压 PFC，采用 650 V 英飞凌 H5、650 V CoolMOS™ CFD7A 和 650 V 第五代碳化硅 (SiC) 二极管</p> <p>图腾柱 PFC，采用 650 V 英飞凌 H5</p>   | <p>移相全桥 (PSFB)，初级侧采用 650 V CoolMOS™ CFD7A，次级侧采用高压二极管或 650 V CoolMOS™ CFD7A</p> <p>LLC，初级侧采用 650 V CoolMOS™ CFD7A，次级侧采用高压二极管或 650 V CoolMOS™ CFD7A</p>  |
| 单相 OBC（双向）系统电压高达 500 V             | <p>图腾柱 PFC，采用 650 V 英飞凌 H5</p>  | <p>PSFB，初级侧和次级侧均采用 650 V CoolMOS™ CFD7A</p> <p>CLLC，初级侧和次级侧均采用 650 V CoolMOS™ CFD7A</p>  |
| 三相 OBC（单向）电池电压高达 500 V，通过中性线提供单相支持 | <p>叠加方案：<br/>经典升压，采用 650 V 英飞凌 H5、650 V CoolMOS™ CFD7A 和 650 V 第五代碳化硅 (SiC) 二极管</p> <p>双升压 PFC，采用 650 V 英飞凌 H5、650 V CoolMOS™ CFD7A 和 650 V 第五代碳化硅 (SiC) 二极管</p> <p>图腾柱 PFC，采用 650 V 英飞凌 H5</p> <p>专用方案：<br/>B8，采用 1200 V CoolSiC™ MOSFET</p> | <p>叠加方案：<br/>PSFB，初级侧采用 650 V CoolMOS™ CFD7A，次级侧采用高压二极管或 650 V CoolMOS™ CFD7A</p> <p>LLC，初级侧采用 650 V CoolMOS™ CFD7A，次级侧采用高压二极管或 650 V CoolMOS™ CFD7A</p> <p>专用方案：<br/>PSFB，初级侧采用 1200 V CoolSiC™ MOSFET，次级侧采用高压二极管或 650 V CoolMOS™ CFD7A</p> |

简介

| 系统                                 | 拓扑 PFC   | 拓扑 DC-DC   |
|------------------------------------|--|--|
|                                    |  | LLC，初级侧采用 1200 V CoolSiC™ MOSFET，次级侧采用高压二极管或 650 V CoolMOS™ CFD7A  |
| 三相 OBC（双向）电池电压高达 500 V，通过中性线提供单相支持 | 叠加方案：<br>图腾柱 PFC，<br>慢切换段采用 650 V 英飞凌 H5 和 CoolMOS™ CFD7A<br><br>专用方案：<br>B8，采用 1200 V CoolSiC™ MOSFET | 叠加方案：<br>PSFB，初级侧和次级侧均采用 650 V CoolMOS™ CFD7A<br><br>CLLC，初级侧和次级侧均采用 650 V CoolMOS™ CFD7A<br><br>专用方案：<br>PSFB，初级侧采用 1200 V CoolSiC™ MOSFET，次级侧采用 650 V CoolMOS™ CFD7A<br><br>CLLC，初级侧采用 1200 V CoolSiC™ MOSFET，次级侧采用 650 V CoolMOS™ CFD7A |
| 电压高于 500 V 的蓄电池                    | 参见上文   | 参见上文，且修改如下：次级侧采用 1200 V 二极管或 1200 V CoolSiC™ MOSFET  |

**Note:**      本文档中的拓扑图侧重于更佳的可读性。这意味着，显示拓扑结构的图片省略了实际系统所需的某些组件（例如浪涌电流管理）或满足严格的 EMI 要求所需的输入和输出滤波器，以便更好地理解各个功率转换拓扑的核心概念。

## 2 车载充电器系统

车载充电器系统是所有插电式混合动力汽车和纯电动汽车 (BEV) 中一个必不可少的子系统。顾名思义，其任务是利用交流电网提供的电能为高压动力蓄电池充电。

图 3 展示了一个车载充电器拓扑，这是一个基本的 AC-DC 转换器。它由 PFC 级和 DC-DC 模块组成。

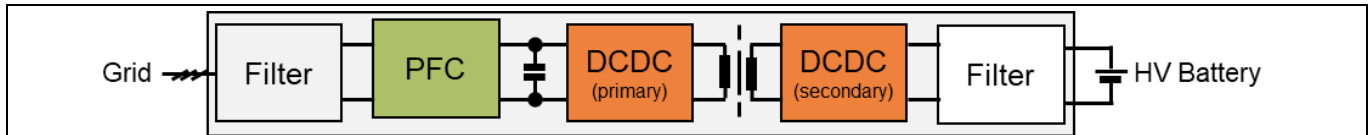


Figure 3 由 PFC 和 DC-DC 级组成的典型车载充电器系统

当今大多数车载充电器都是电气隔离 AC-DC 转换器，可以提供不同的功率等级，以及兼容世界各地的交流电网。因此，在市场上可以看到各种不同的拓扑和概念。

对于车载充电器系统的一项重要要求，即是通过最大程度地降低功率损耗，实现高效率转换。它具有两大优点：首先，高能效将为电池提供更多电量，因而它的充电速度比效率较低的充电器系统更快。其次，高能效还意味着功率损耗更低。这更有益于最终客户，也有益于车载充电器制造商，因为其系统可以构建得更紧凑，功率密度也会随之提高。

转换效率对双向车载充电器系统尤为重要。在此情况下，除了为动力蓄电池充电外，充电器还用于为外部负载或交流电网供电。因此，电能将在蓄电池和交流电网之间多次传输，这就需要车载充电器系统在两个传输方向均具有更高的转换效率。

另一关键要求是高功率密度。车载充电器应小巧紧凑，但又能够处理高功率。最新的行业趋势表明，对于既定功率级别，充电器变得更小，或者对于具有相同机械尺寸的充电器，功率级别变得更高。

使用英飞凌最新一代 CoolMOS™ CFD7A，可实现高转换性能和高功率密度。CoolMOS™ CFD7A 系列是一项专为满足汽车行业需求而定制的灵活技术，可用于车载充电器系统和 DC-DC 转换器的 PFC 级和 DC-DC 级。

CoolMOS™ CFD7A 完全兼容高达 470 V DC 的系统电压（符合“LV123：道路车辆中高压组件的电气特性与电气安全”标准的电压等级“HV\_2b”）。








|                                      |  |  |  |  |  |
|--------------------------------------|---|---|---|---|---|
| R <sub>ds(on)</sub> , max<br>at 25°C | TO-263<br>D <sup>2</sup> PAK  | TO-263-7<br>D <sup>2</sup> PAK 7 pin  | TO-220  | TO-247  | TO-247 short<br>leads   |
| 230                                  | IPB65R230CFD7A  | IPBE65R230CFD7A   |   |   |   |
| 190                                  | IPB65R190CFD7A  | IPBE65R190CFD7A   | IPP65R190CFD7A  | IPW65R190CFD7A  |   |
| 140                                  |   | IPBE65R145CFD7A   |   | IPW65R145CFD7A  |   |
| 115                                  | IPB65R115CFD7A  | IPBE65R115CFD7A   | IPP65R0115CFD7A   | IPW65R115CFD7A  |   |
| 99                                   | IPB65R099CFD7A  | IPBE65R099CFD7A   | IPP65R099CFD7A  | IPW65R099CFD7A  |   |
| 75                                   |   | IPBE65R075CFD7A   |   | IPW65R075CFD7A  | IPWS65R075CFD7A   |
| 50                                   | IPB65R050CFD7A  | IPBE65R050CFD7A   | IPP65R050CFD7A  | IPW65R050CFD7A  | IPWS65R050CFD7A   |
| 35                                   |   |   |   | IPW65R035CFD7A  | IPWS65R035CFD7A   |
| 22                                   |   |   |   | IPW65R022CFD7A  | IPWS65R022CFD7A   |

Figure 4 用于汽车的 CoolMOS™ CFD7A R<sub>ds(on)</sub> 和封装产品组合

## 2.1 功率因数校正 (PFC) 级

由于各种互操作性要求，汽车行业中使用着很多不同的 PFC 拓扑。

OBC 中的绝大多数 PFC 级都是在连续电流模式 (CCM) 下运行。这就需要所用半导体的体二极管具有硬换相（强制换流）鲁棒性。SJ 器件（如 CoolMOS™ CFD7A 系列）可完美用于以碳化硅二极管作为整流元件的 CCM PFC 级（参见图 6c）。替代方案是在 CCM PFC 中使用用于汽车的 F5 IGBT 或 CoolSiC™ 宽禁带 (WBG) MOSFET，因为这些技术本质上都具有出色的硬换相（强制换流）鲁棒性。在此情况下，两个开关都可用于半桥配置中，而 SJ MOSFET 则只能和碳化硅 (SiC) 二极管配合使用。

本文档简要介绍了最常用的 PFC 拓扑、其关键性能参数，以及用于车载充电器系统各种封装的高压功率开关的最佳技术选择。

### 2.1.1 典型升压 PFC

实现 PFC 功能的最简单拓扑是使用升压转换器拓扑，如图 5 所示。此拓扑也称为“典型 PFC”或“典型升压 PFC”。



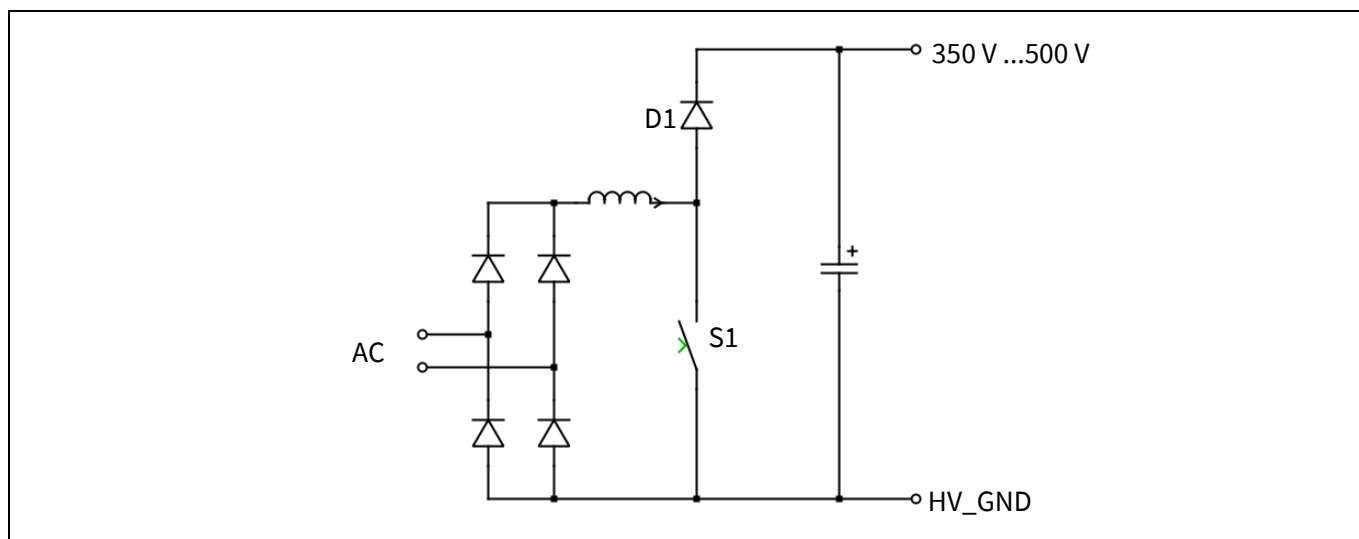


Figure 5 升压 PFC 的工作原理（为了更便于理解，指明但省略了跨 S1 的二极管）

这个简单的电路包括一个由开关和二极管制成的半桥配置、一个电感器，以及 AC 输入侧的一个二极管桥式整流器。在 DC 输出侧，通常使用缓冲电容器来稳定输出电压。CCM 是实现高功率因数的最常见运行模式，可通过开关和二极管之间的电流硬换相（强制换流）来实现。

此拓扑提供从 AC 输入至 DC 输出的单向功率传输。有关如何设计升压 PFC 级的详细信息，请参考 [1]。

如上所述，半桥内会发生硬换相（强制换流）。因此，所用的半导体必须能够承受连续换相。

在位置“D1”使用第五代车规 SiC 二极管就成为一种合理的选择。英飞凌 650 V 第五代车规 SiC 二极管概览可从 [2] 获取。

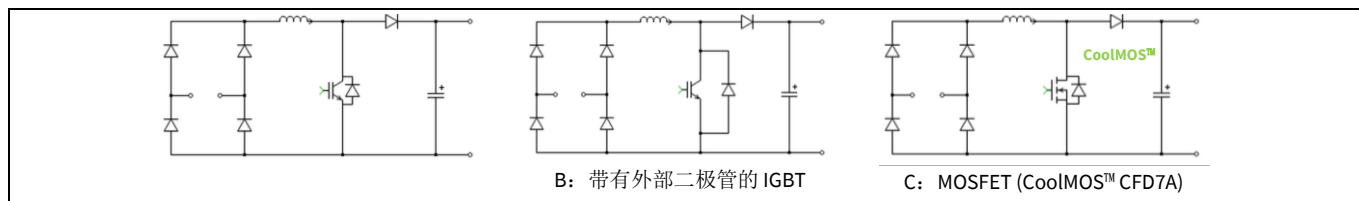
多种不同的半导体开关可用作 PFC 级的功率开关。图 6 简要介绍了不同的解决方案。

英飞凌的汽车级认证 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 具备高速开关能力，击穿电压高达 650 V。获得 AEC Q101 认证的 IGBT 的概览可从 [3] 获取。IGBT 可作为单个 IGBT 提供，也可以配备集成式硅或碳化硅 (SiC) 二极管。如果使用单个 IGBT，我们建议在集电极和发射极节点之间使用一个小型反并联 PN 二极管，以避免 IGBT 上出现负向尖峰电压。

要在简单的 PFC 拓扑中实现最高效能，我们建议使用 MOSFET 而非 IGBT。如果使用碳化硅 (SiC) 二极管作为对应元件，则英飞凌最新一代车规 CoolMOS™ (CoolMOS™ CFD7A) 完美适用于此拓扑。MOSFET 在通道中具有电阻特性的优点，不受拖尾电流影响，并可在超温状态下提供比 IGBT 更低的开关损耗。所有这些优点转化为更低的功率损耗，从而实现更高的转换效率。

**Note:** 在硬开关 (CCM) PFC 中，不得将升压二极管“D1”更换为其他 SJ MOSFET。

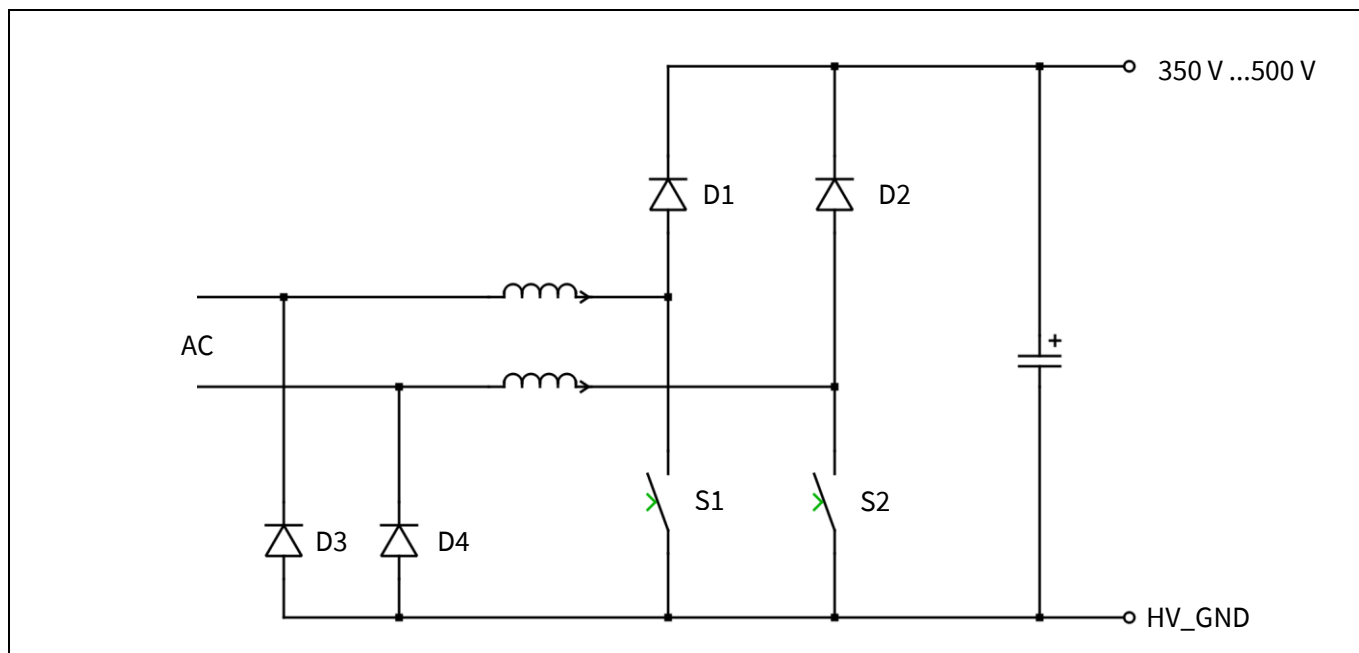
另一方案是在典型升压 PFC 中使用 WBG MOSFET。不过，由于在此拓扑中 WBG MOSFET 无法充分发挥其 WBG 材料的优点，因此无法提高效率。英飞凌的车规 WBG 器件概览可从 [4] 获取。



**Figure 6** 用于单相车载充电器的 PFC 级示例：a) 具有集成式碳化硅 (SiC) 二极管的 IGBT；b) 具有外部保护二极管的单个 IGBT；c) MOSFET CFD7A（具有本征体二极管）

### 2.1.2 双升压 PFC

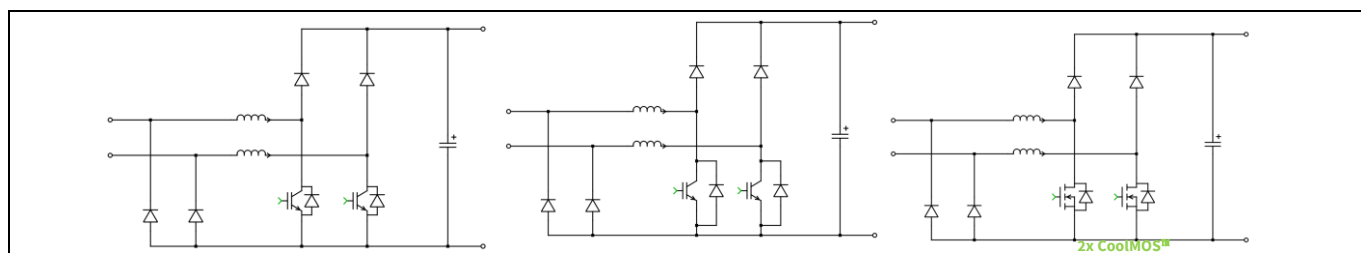
一种能够充分发挥性能且富吸引力的方式是利用所谓的“无桥”PFC 拓扑。顾名思义，这些拓扑不会在 AC 输入侧使用二极管整流桥，但会利用半导体开关以提高效率。图 6 展示了“双升压 PFC”拓扑，它是无桥 PFC 整流器的一个典型示例。



**Figure 7** 作为“无桥”PFC 拓扑代表的双升压拓扑

双升压拓扑的工作原理与典型升压 PFC 非常相似。因此，在选择半导体组件方面，也类似于典型升压 PFC。在拓扑层次的明显差异是，每个 AC 半周期都将由一个专用半桥来处理，而不是通过以前的 AC 整流方式来处理。这增加了有源开关的数量，但也提高了转换效率，因为输入侧没有二极管整流器。

英飞凌的高速 5 IGBT 或 CoolMOS™ CFD7A 将是 S1 和 S2 的理想选择。D1 和 D2 建议使用第五代碳化硅 (SiC) 二极管，D3 和 D4 可以选用 PN 整流二极管。另一提高效率的方法是使用与 D3 和 D4 并联的有源开关进行相整流。有关此概念的更多信息可从 [5] 获取。

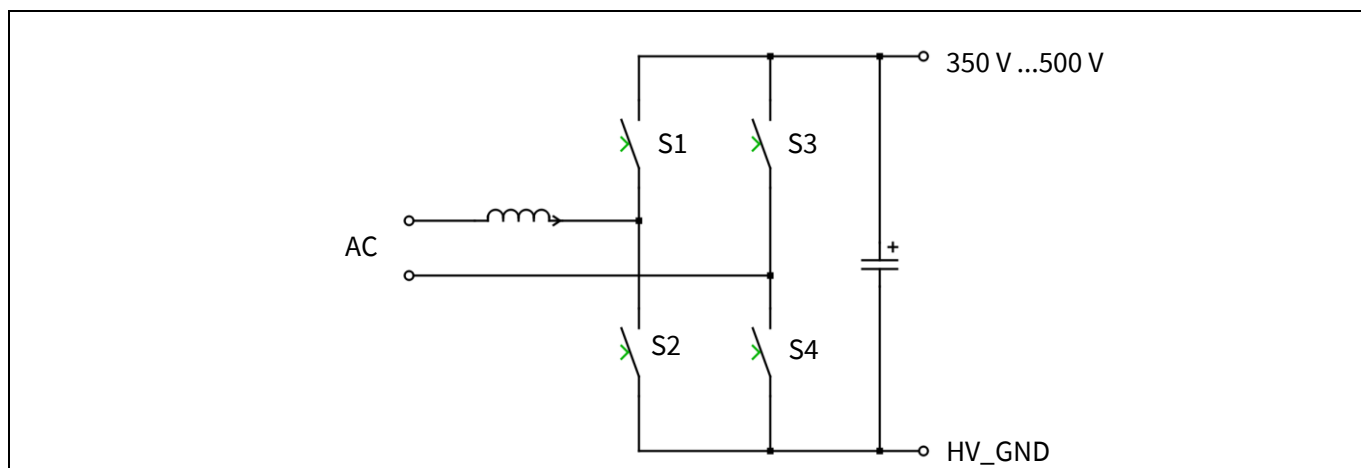


**Figure 8** 双升压拓扑，具有：a) 带集成式碳化硅 (SiC) D 的 IGBT；b) 带外部 PN 二极管的 IGBT H5；以及 c) CoolMOS™ CFD7A

### 2.1.3 图腾柱 PFC

双向车载充电器常用拓扑是所谓的“图腾柱”PFC 拓扑。此拓扑概念是将所有二极管更换为有源功率开关，以实现双向功率传输功能。图 9 展示了此拓扑概念。

提高效率是使用有源开关（而非二极管）的另一优点。不过，这种改动也会增加复杂性，因为必须在电路中控制更多的功率半导体。



**Figure 9** 图腾柱 PFC 拓扑

**Note:** 图腾柱 PFC 也称为全桥 PFC。

图腾柱 PFC 由一个快切换桥臂（S1 和 S2）和一个慢切换桥臂（S3 和 S4）组成。S1 和 S2 要求半导体能够承受高频率时两个有源开关之间的负荷电流硬换相（强制换流）。因此，S1 和 S2 的最佳选择是使用英飞凌 IGBT H5 或英飞凌 CoolSiC™ MOSFET。

**Note:** SJ MOSFET 不适用于图腾柱 PFC 中的快切换桥臂（S1 和 S2），因为体二极管的  $Q_{rr}$  相对较大，但它们特别适合慢切换桥臂（S3 和 S4）。

慢切换段（S3 和 S4）中的开关具备相整流功能。因此，它们会在交流输入过零（零电压开关，ZVS）期间随着交流频率而打开和关闭。

位置 S1、S2、S3 和 S4 使用 IGBT 开关是实现图腾柱 PFC 的一个常用方法。英飞凌的高速 5 IGBT 是车载充电器系统 IGBT 的最佳选择。

建议慢切换半桥（S3 和 S4）使用 CoolMOS™ CFD7A，以进一步提升效率。鉴于交流频率的软开关特性，可选用 SJ MOSFET。

## 车载充电器系统

英飞凌的碳化硅 (SiC) MOSFET 是具有超低反向恢复电荷的 WBG 器件。因此，这些器件可用于实现由四个碳化硅 MOSFET 组成的硬开关图腾柱 PFC。英飞凌碳化硅 (SiC) MOSFET 的另一优点是其击穿电压高达 1200 V。这样可以支持更高的直流母线电压（650 V 以上）。

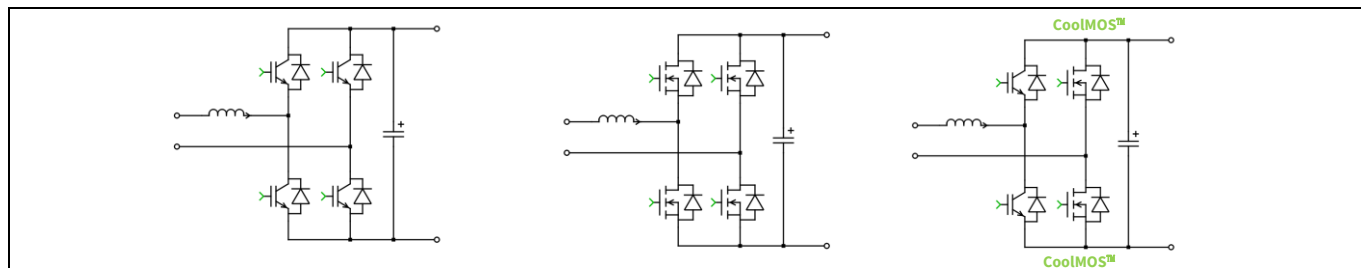


Figure 10 图腾柱 PFC: a) 使用 IGBT; b) 碳化硅 (SiC) MOSFET; c) 使用 IGBT 和 CoolMOS™ CFD7A（作为相整流器）

利用软开关技术可实现转换效率的提升。软开关还将允许在全桥拓扑中使用 CoolMOS™ 功率半导体（如图 10b 所示）。这些 PFC 级通常称为“三角波电流模式（TCM）”PFC。此方法的缺点是需要利用可变频率来控制各级，并且与 CCM PFC 相比，功率因数会降低。这可通过插入多个软开关 PFC 级来补偿。有关软开关 PFC 级的更多信息，可从相关文献（如 [6]）中获取。

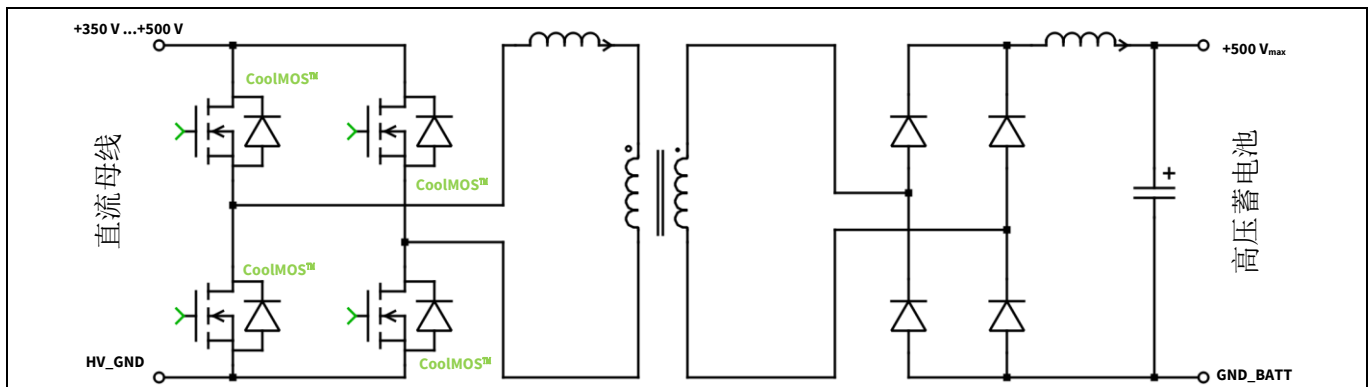
## 2.2 DC-DC 转换器级

如图 2 所示，典型车载充电器系统包括一个隔离型 DC-DC 模块，以满足隔离与安全方面的要求。此外，此级还具有根据高压动力电池的状态调节其实际输出电压的作用。

最常用的拓扑是软开关 PSFB 转换器和 LLC 转换器。由于出色的开关速度，MOSFET 在现代 DC-DC 转换器中发挥着突出作用。英飞凌最新一代车规 CoolMOS™（CoolMOS™ CFD7A 系列）经过全面优化，可用于软开关 DC-DC 转换器级。

### 2.2.1 移相全桥 (PSFB)

市场上常见的 DC-DC 拓扑是所谓的“移相全桥”拓扑，如图 11 所示。其由一个初级侧的全桥，一个谐振电感，一个隔离变压器和一个次级侧的整流器构成。



**Figure 11** 次级侧由二极管组成的 PSFB 拓扑

此拓扑的一大优点是效率高，因为它可以在宽负荷范围内以软开关模式运行。这意味着在 MOSFET 的寄生电容内存储的能量可循环使用，从而降低功率损耗、减少散热以及提高转换效率。初级的电感 ( $L_r$ ) 用于与控制器共同确保 MOSFET 的软开关。尽管如此，由于此拓扑的固有特性，并非所有的 MOSFET 都可在全输出范围内实现完全的零电压开关 (ZVS)。通常，不同 MOSFET 的硬开关都发生于低负荷条件下（当谐振能量不足以维持 ZVS 时）。正因为此硬开关现象，英飞凌推荐使用具有快速二极管属性的硅 MOSFET，例如 CoolMOS™ CFD7A，以确保长期可靠运行，或者使用 WBG MOSFET，例如英飞凌的车规 CoolSiC™ 系列。

此拓扑的另一优点是，相较于 LLC 转换器，其控制工作相对较少。功率传输调节通过控制两个半桥段之间的相移来实现，无需修改频率或占空比。此外，PSFB 拓扑可实现比 LLC 转换器更宽的转换率。

次级侧的任务是对来自初级侧的传输能量进行整流。有多种方法可实现此目的。方法之一是使用全桥整流（如图 11 所示）或中心抽头变压器。对于这两种变体，通常使用二极管或有源 MOSFET 开关。

有关 PSFB DC-DC 转换器设计的更多信息，可从 [7] 获取。

最新型车载充电器均是利用基于硅或碳化硅的 MOSFET。由于紧凑型 DC-DC 转换器对开关频率要求很高，因此通常不会使用 IGBT。

英飞凌提供具有快速体二极管的 CoolMOS™ CFD7A，在此拓扑上有出色的性能表现。如果选用 WBG 器件，则英飞凌 CoolSiC™ 系列的 MOSFET 是不二之选。

如果 DC-DC “次级”侧利用有源开关并采用适当的控制策略，则 PSFB 拓扑还可用于双向车载充电器。图 12 展示了双向 PSFB 的概念。如图所示，无需对硬件组件做进一步改动，即可支持双向功率传输。

在双向 PSFB 中使用 CoolMOS™ 的全面运行评估板可从 [8] 获取。

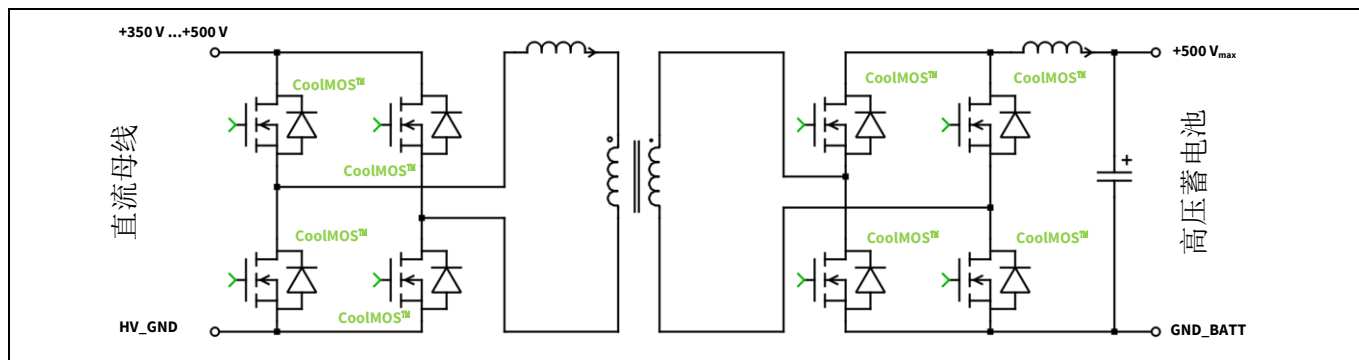


Figure 12 双向使用的 PSFB 拓扑

## 2.2.2 LLC 拓扑

LLC 拓扑是实现最高效率的理想拓扑。与 PSFB 相比，此拓扑可以实现更高效率，从而降低运行期间的损耗。因此，我们可制造出更高功率密度的转换器。

车载充电器中使用的 LLC 大多是全桥 LLC 转换器。初级侧的全桥配置有助于减少通过功率开关的电流，因为与半桥 LLC 转换器相比，变压器初级侧绕组将承受更高的电压（增加一倍）。由于电压加倍，因此对于给定的变压器规格，它可传输的功率也加倍。此原理适用于所有半桥/全桥转换器，并非 LLC 转换器的独有特点。不过，功率较低的应用更多得使用半桥 LLC 转换器。

设计良好的 LLC 拓扑的另一优点是在全负荷范围内可实现零电压开关 (ZVS)。不过，MOSFET 硬开关仅在启动时和一些临界条件下（例如，工作在容性区）容易发生。因此，我们建议使用具有快速体二极管的 MOSFET，以确保长期可靠性。英飞凌的车规 CoolMOS™ CFD7A 是此拓扑的不二之选，因为此技术可提供出色的硬换相（强制换流）鲁棒性。

LLC 拓扑的一个缺点是功率传输通过变频（而非可变占空比）控制。由于所需的频率范围宽，EMI 滤波器的设计可能更具挑战性。此外，LLC 转换器的并联同步问题会变得复杂，因为很难控制均流。此外，LLC 拓扑的转换率也相当有限。

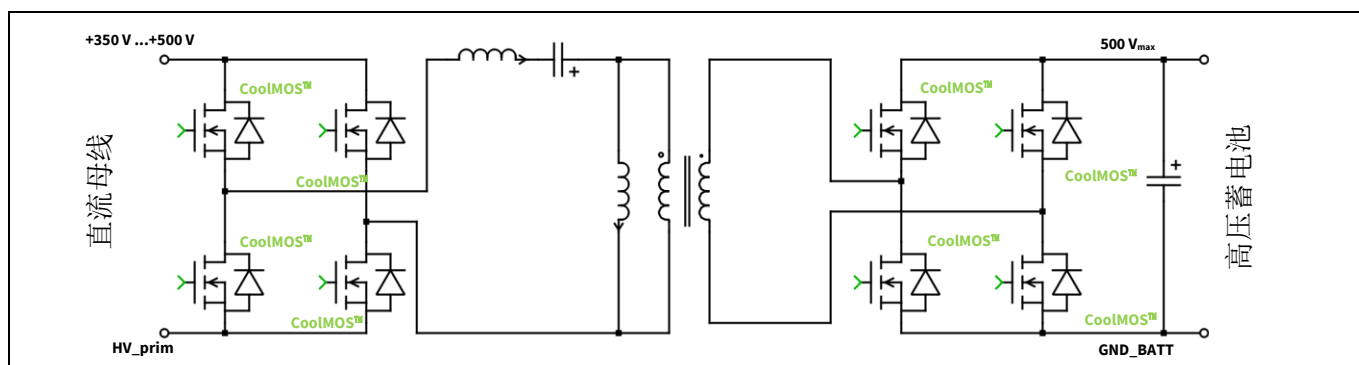


Figure 13 用于单向运行的全桥 LLC 转换器（次级侧具有有源同步整流）

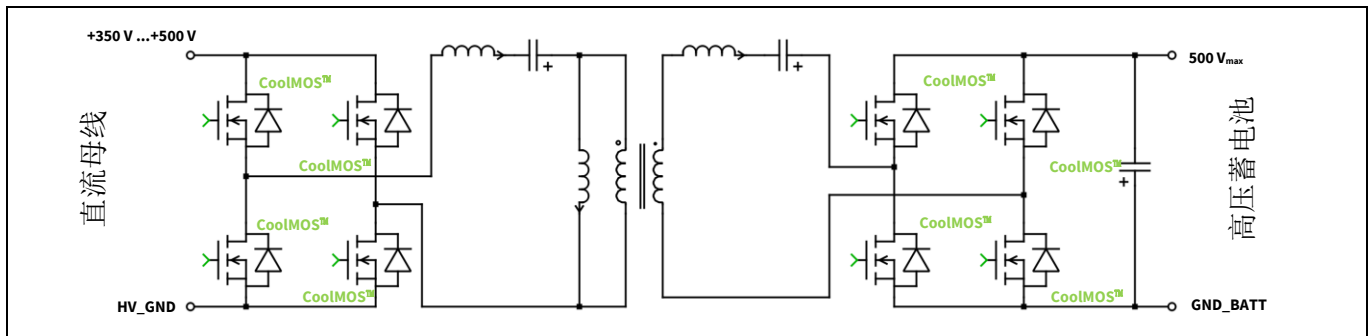


## 车载充电器系统

**图 13** 展示车载充电器中使用的典型全桥 LLC 转换器。转换器次级侧也设计为全桥。为实现最佳性能，次级侧应选用 CoolMOS™ CFD7A MOSFET 取代二极管。

### 2.2.3 CLLC 拓扑

如果车载充电器需要支持双向功率传输，则需要对谐振回路稍作改动：在次级侧增加一个谐振电容使谐振腔对称化。



**Figure 14** 用于双向运行的全桥 CLLC 转换器

## 2.3 具有三相交流输入的车载充电器

如前文所述，全球各地不同的交流基础设施要求 OBC 能够灵活处理不同的交流电压和可用的相数。原则上，只要在选择适当的半导体时考虑可能更高的系统压电，上文所述的所有拓扑即都可用于单相以及三相交流输入。

### 2.3.1 三相 PFC

三相 PFC 系统用于具有更高功率等级的车载充电器。对三相交流输入实施 PFC 的方法有很多。后续章节将简要介绍最常用的方法。

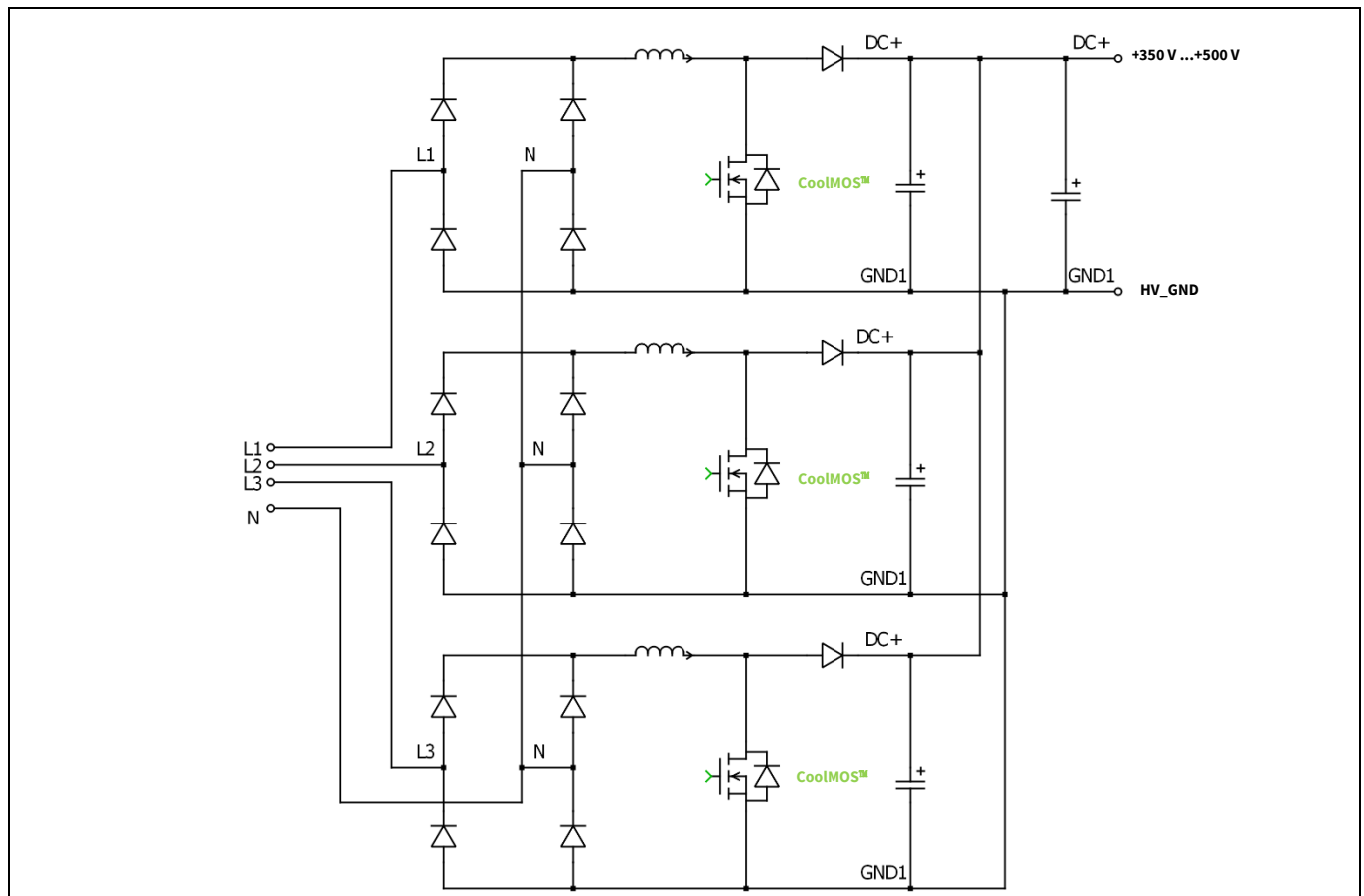
#### 2.3.1.1 单级模块堆叠

实现三相支持的一个常用方法就是“堆叠”各单相模块。这需要通过将交流相位指向输入侧的中性线来实现。

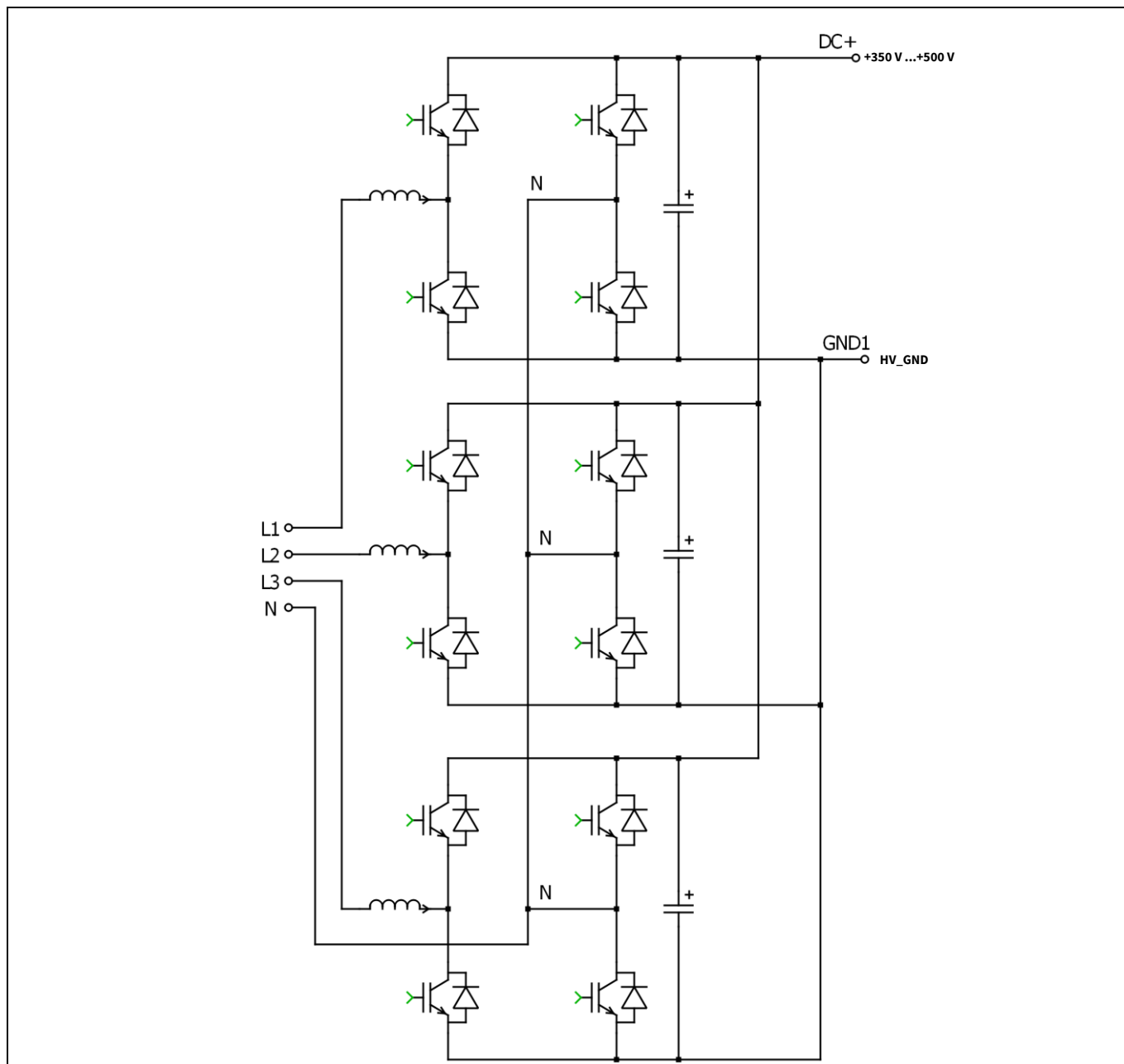
**图 15** 展示了一个堆叠示例。它由三个单相经典升压 PFC 级构成一个可扩展的三相 PFC。不过，此概念也适用于其他单相 PFC 拓扑，例如双升压 PFC 或图腾柱 PFC，如**图 16**所示。

此概念的一大优点是它可以支持单相和三相运行：交流输入侧的相位开关可以选择是以单相并联配置还是三相配置运行模块，如下所示。此外，直流母线电压将保持在 400 V 范围内，这样随后即可使用配备 650 V 器件的单级 DC-DC。





**Figure 15** 通过堆叠三个单相 PFC 级实现的三相 PFC 级。单级是由 CoolMOS™ CFD7A 组成的经典升压 PFC



**Figure 16** 通过堆叠三个图腾柱级实现的三相 PFC

### 2.3.1.2 三相全桥 PFC

三相交流电网的一个公认拓扑是三相全桥 PFC。此拓扑也称为 B6 或“三段桥”。图 17 显示此拓扑仅使用三相交流输入运行。如果需要单相工作模式，可以轻松地通过增加中性线实现。图 18 展示了此扩展。

通常工作在 CCM 模式下一因此需要像 Sic MOSFET 这样可以承受连续电流硬切换能力的半导体器件。

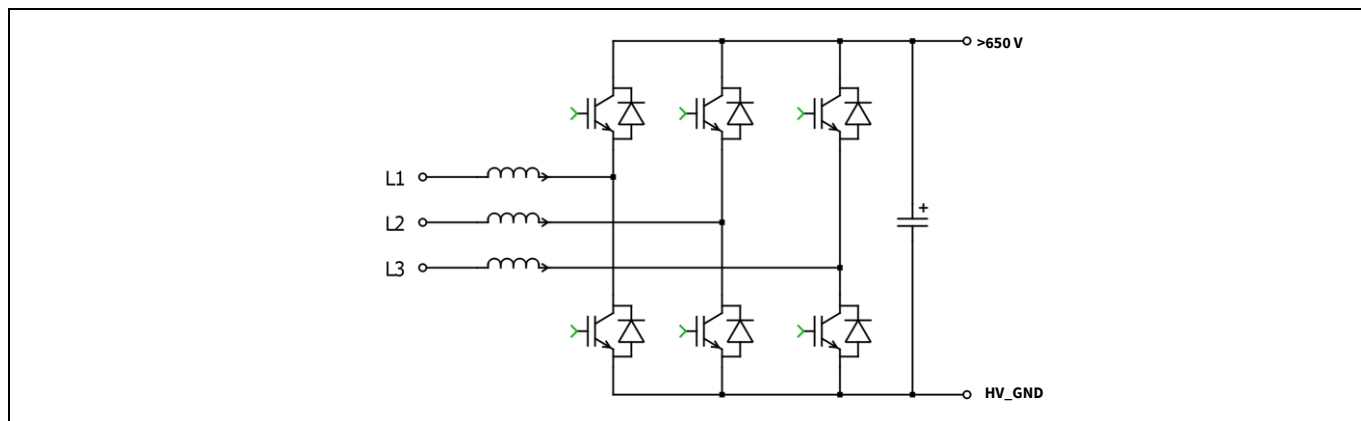


Figure 17 三相 PFC 拓扑（未使用中性线）

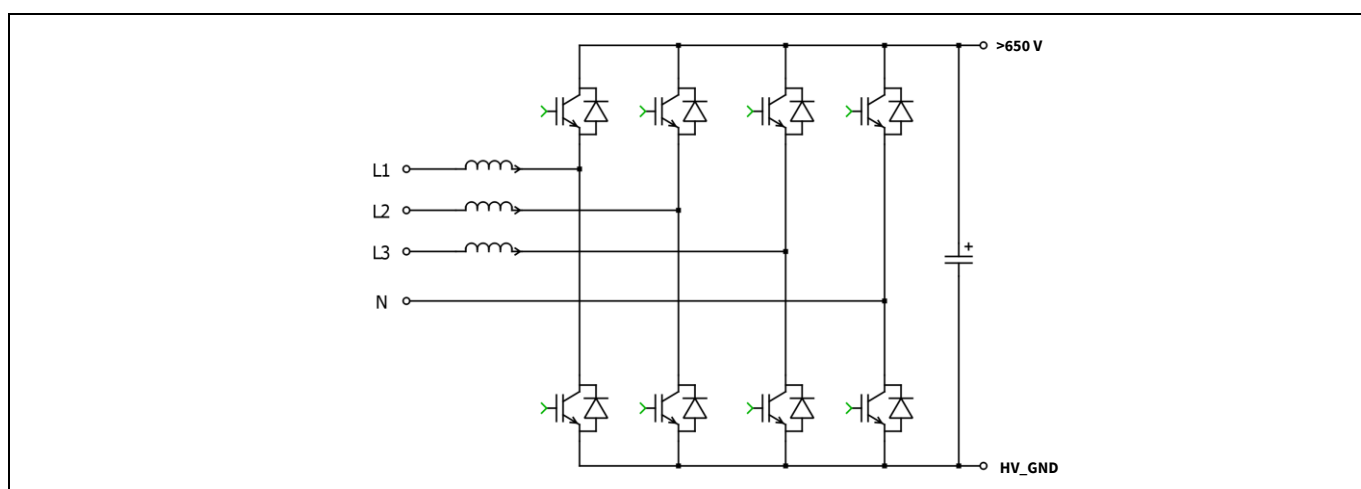


Figure 18 支持单相运行的三相 PFC 拓扑（包含中性线）

与堆叠式拓扑的最大差异是这些拓扑的直流母线电压会更高。这是因为交流相位之间的输入电压更高。典型的直流母线电压约为 650 V，这也提高了对半导体的电压要求。英飞凌建议这些 PFC 级使用 1200 V CoolSiC™ 系列产品。

### 2.3.1.3 Vienna 整流器

除了这些拓扑外，还可以使用三相交流系统专用拓扑。Vienna 整流器拓扑是“三相”拓扑的典型示例。

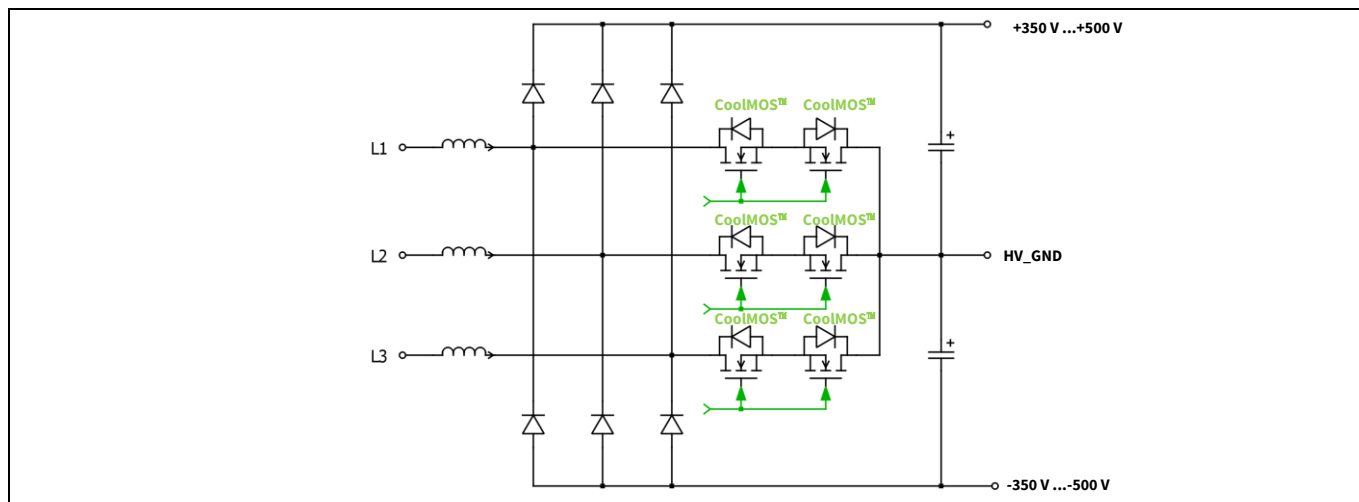


Figure 19 Vienna 整流器拓扑 — “三相” PFC 拓扑的代表

目前，由于充电站所在地三相交流基础设施全面可用，Vienna 整流器拓扑可用作电动汽车充电站的 PFC，不过它也可用于车载充电器。

此拓扑在背靠背配置中使用 650 V 半导体开关，并使用具有 650 V 以上隔离能力的碳化硅 (SiC) 二极管。英飞凌建议使用 F5 系列 IGBT 或车规 CoolMOS™ CFD7A 作为功率开关，并使用 CoolSiC™ 系列的 1200 V 第五代碳化硅 (SiC) 二极管，以较低的半导体成本实现最佳性能。

Vienna 整流器的另一优点是它可以提供一个额外的终端，将直流侧的直流母线电压分成两部分。此中心连接使得 DC-DC 级还可使用 650 V CoolMOS™ CFD7A 器件。图 20 展示了此配置。

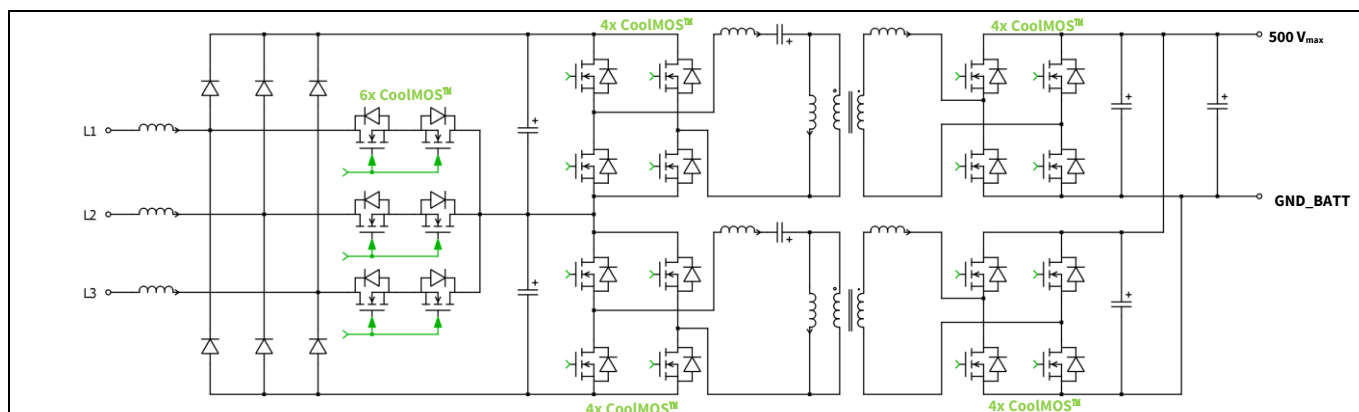
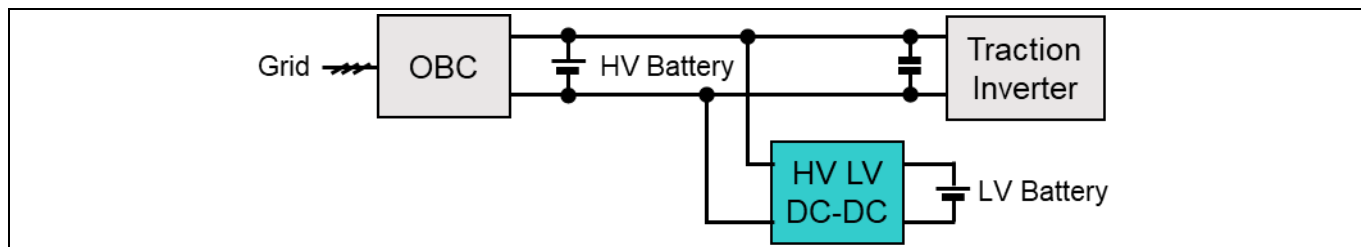


Figure 20 三相车载充电器：具有后级 LLC 级的 Vienna 整流器 PFC

### 3 HV-LV DC-DC 转换器

即使是使用高压动力蓄电池的纯电动汽车 (BEV)，也需要使用传统的铅酸蓄电池。汽车行业中的大量器件用于这一电压等级。此外，由于额外的安全要求，再使用另一个独立电源（如低压蓄电池）可能更好。此蓄电池的标称电压通常为 12 V。



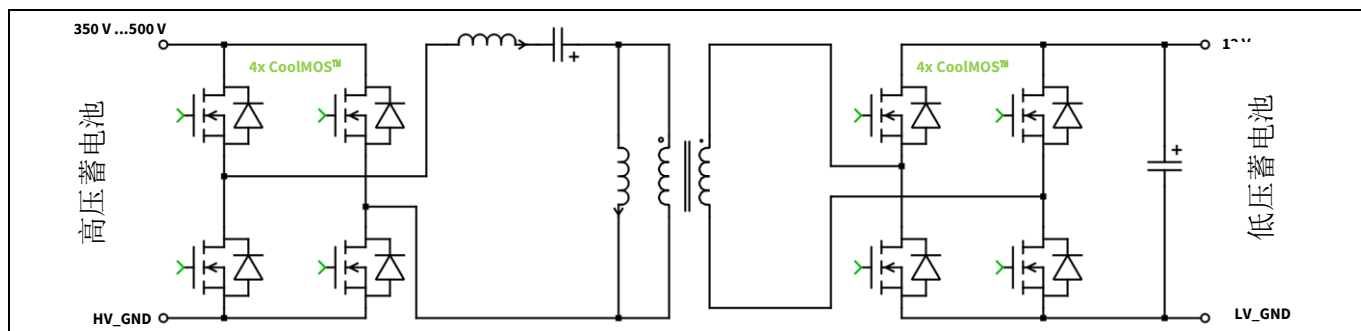
**Figure 21** HV-LV DC-DC 转换器将高压蓄电池连接至低压蓄电池

高压至低压 DC-DC 转换器在现代电动汽车中用于将高压区和低压区连接在一起。顾名思义，高压（初级侧）将转换为低压（次级侧）。其要求与车载充电器的 DC-DC 级非常相似。因此，整个行业构建的拓扑都非常相似。

初级侧 MOSFET 的要求也相差无几。与 OBC 中一样，先进的 HV-LV DC-DC 转换器使用软开关技术，以最大程度降低损耗，提高性能。CoolMOS™ CFD7A 是电压高达 500 V 左右的蓄电池初级侧的不二之选。CoolSiC™ 系列可用于更高电压的蓄电池的初级侧。

在次级侧，低压 MOSFET 需要执行同步整流。由于输出电流很高，不建议使用二极管进行整流。建议使用英飞凌的车规 OptiMOS™ 5 系列作为有源整流器。

现代 HV-LV DC-DC 转换器可用作单向或双向转换器。



**Figure 22** LLC 拓扑中使用 CoolMOS™ CFD7A 的典型车载 HV-LV DC-DC 转换器

**Note:** 同步整流级（次级侧）也可通过不同方式来实现（例如，中心抽头变压器；例如，供单向解决方案使用的二极管）。

## HV-LV DC-DC 转换器

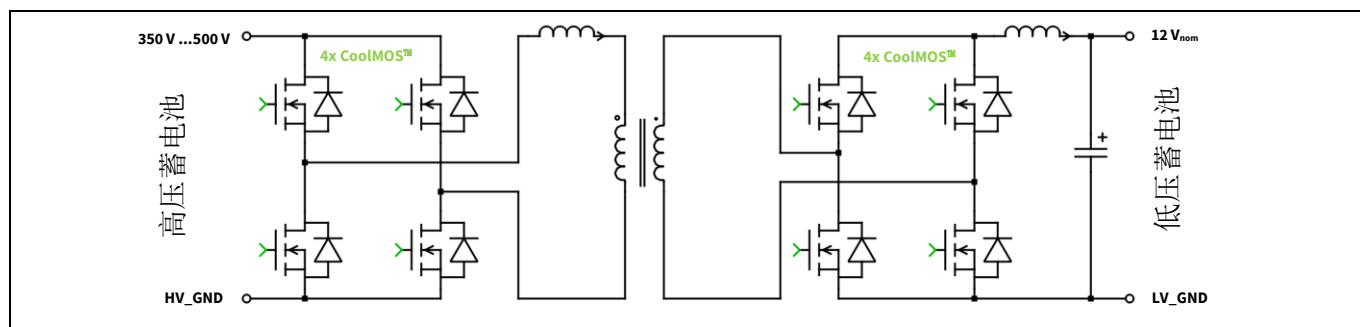


Figure 23 用于单向或双向 HV-LV DC-DC 转换器的 PSFB 拓扑

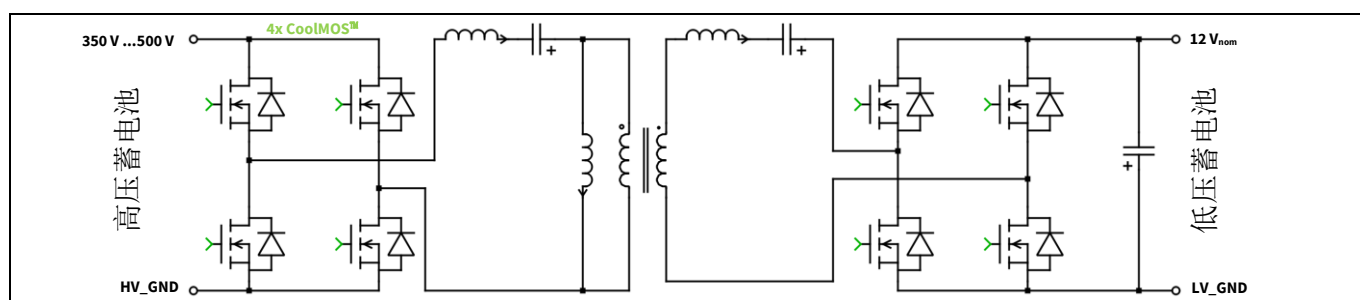


Figure 24 用于双向 HV-LV DC-DC 转换器的全桥 CLLC 转换器

## 4 CoolMOS™ CFD7A 产品性能

CoolMOS™ CFD7A 技术是一项硅基 SJ MOSFET 技术，专为满足高效高压车载电力系统的需求而设计。

CoolMOS™ CFD7A 利用两个重要原理：作为一个 SJ 晶体管，主电流通路比传统 MOSFET 掺杂更重。这使得通道内的导电性能更好，从而降低了导通电阻。

不过，仅作此修改并不能实现对高电场的隔离能力。因此，需要利用第二个原理：所谓的“p 柱”为电场创建一个竖向补偿结构。这就形成了一个具有出色跨导属性和高压隔离能力的重掺杂电流通路。CoolMOS™ CFD7A 系列因其高压隔离能力而闻名。有关 SJ MOSFET 原理的更多详细信息，可从 [9] 获取。

车规 CoolMOS™ CFD7A 系列除了具备卓越性能之外，还具有较高的鲁棒性，并提供硅半导体技术的成本优势。

产品参数的比较基于下列 AECQ101 器件的最新数据表。数据表中未显示的参数是通过英飞凌科技公司内部进行的标准特性测量获得的。

1. IPB65R115CFD7A: 英飞凌科技公司提供、具有集成式快速体二极管的 650 V SJ MOSFET [10]
2. IPB65R110CFDA: 源自英飞凌科技公司先前的 SJ MOSFET 技术的 650 V MOSFET [11]
3. STB37N60DM2AG: 意法半导体公司提供的 600 V MOSFET [12]
4. NVHL110N65S3F: 安森美半导体公司提供的 650 V MOSFET [13]
5. FCH104N60F\_F085: 安森美半导体公司提供的 600 V MOSFET [14]

图 25 展示了获得 AEC Q101 认证、可比 HV SJ MOSFET 的最重要品质因数 (FoM) 参数。通常，值越低，器件性能越好。这些比较结果基于相应数据表中指定的参数得出。

“栅极电荷品质因数”如 图 25a 所示且定义如下：

$$FoM_{Qg} = Q_{g,typ} \frac{R_{dson,max}}{V_{(BR)dss}}$$

… 其中： $Q_{g,typ}$  是总栅极电荷 (gate charge total) 参数的典型值， $R_{dson(max)}$  是 25° C 时的最大导通电阻， $V_{(BR)dss}$  是相应数据表中定义的击穿电压。FoM<sub>Qg</sub> 的单位是 nC\*m Ω/V。

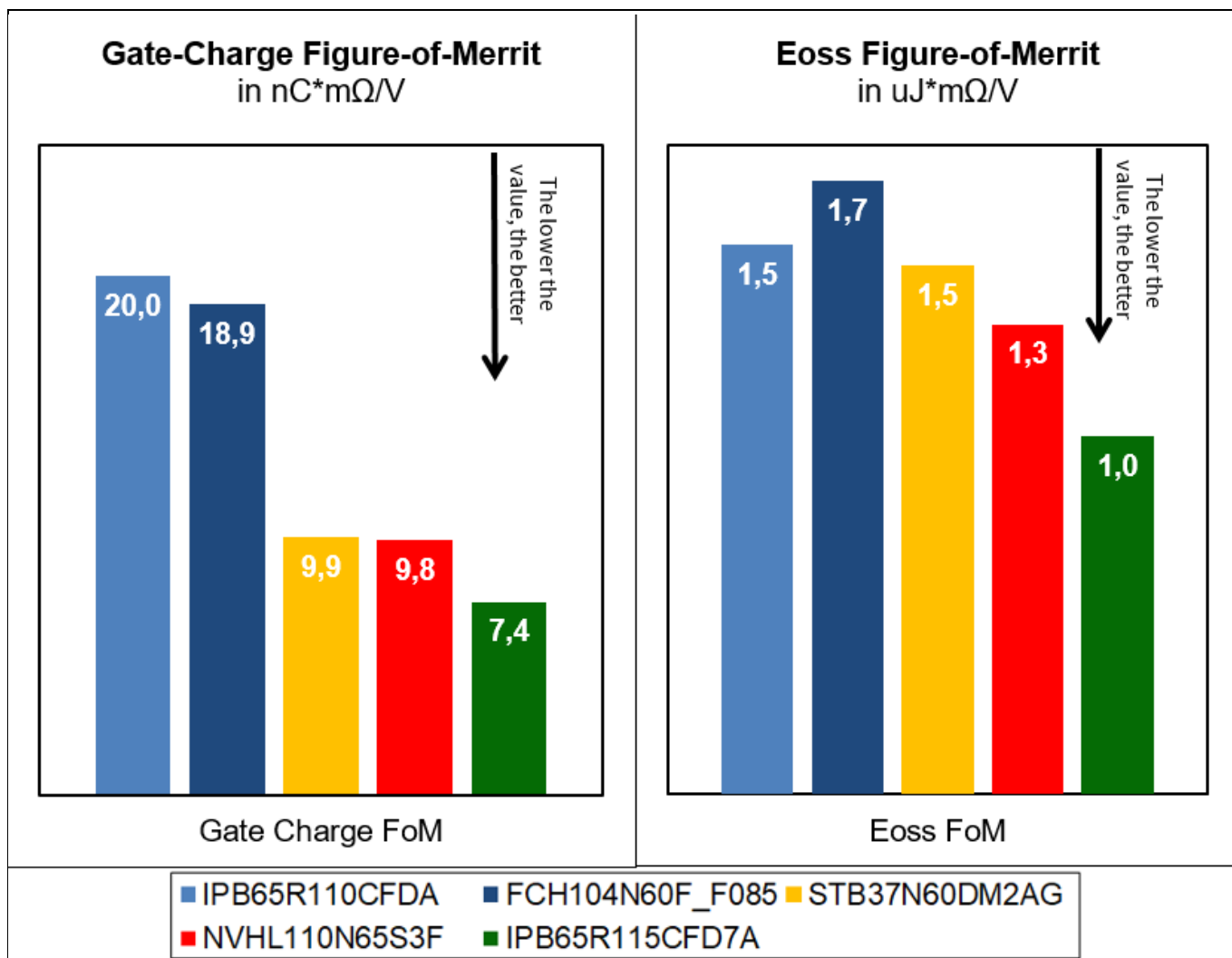
图 25b 显示“输出能量品质因数”。其定义为：

$$FoM_{Eoss} = E_{oss@400V} \frac{R_{dson,max}}{V_{(BR)dss}}$$

$E_{oss}$  是储存在漏源电压为 400 V 的输出寄生电容中的能量（单位：微焦耳）。此  $E_{oss}$  值是相应数据表中规定的典型值。该值是根据各个 MOSFET 的  $C_{oss}$  曲线计算得出。

FoM<sub>Eoss</sub> 的单位是 uJ\*m Ω/V。





**Figure 25** CoolMOS™ CFD7A 115 mΩ 与获得汽车级认证和具有快速体二极管属性的次优竞品的最重要电气参数比较概览

#### 4.1 C<sub>oss</sub> 和 E<sub>oss</sub> 降低

高压 MOSFET 中的主要寄生电容是输出电容 (C<sub>oss</sub>)。C<sub>oss</sub> 是非线性电容。在 CCM PFC 拓扑（如图 6 所示）等硬开关应用中，C<sub>oss</sub> 值是损耗的重要原因。



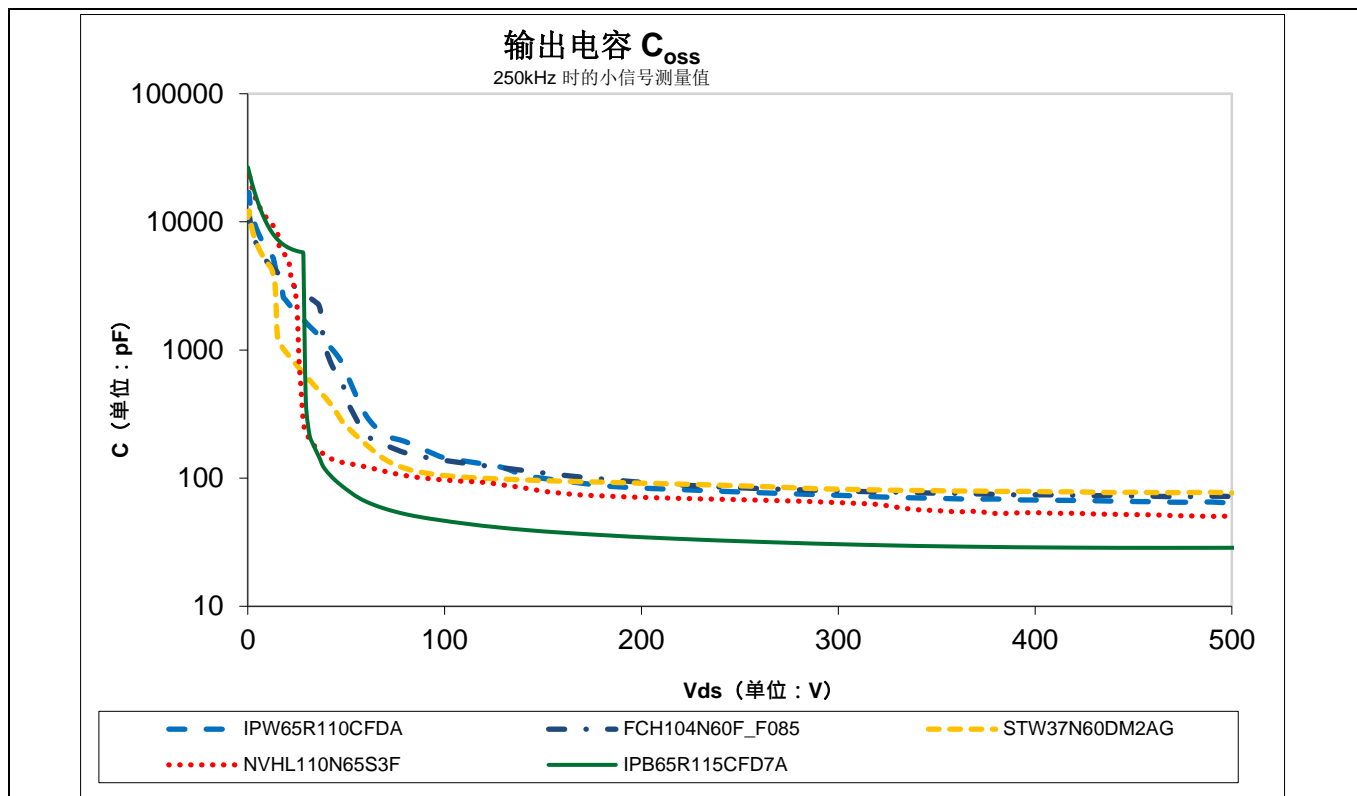


Figure 27 与竞品 MOSFET 相比, CoolMOS™ CFD7A 的  $C_{oss}$  特性 (绿色曲线)

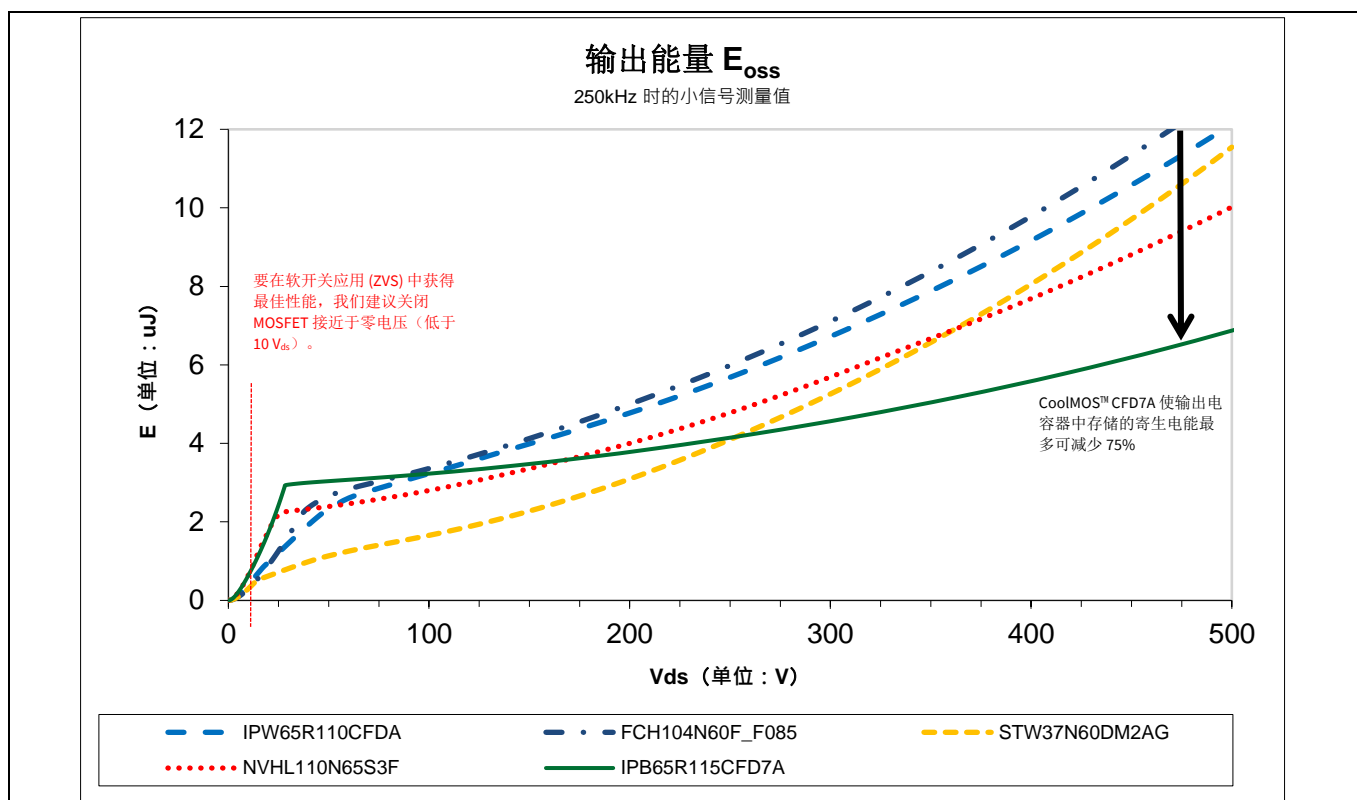


Figure 28 CoolMOS™ CFD7A 中存储的寄生电能 (绿色曲线) 在高直流母线电压下明显低于其他器件

## 4.2 栅极电荷减少

最新 CoolMOS™ CFD7A 技术的另一突出特点是总栅极电荷 ( $Q_g$ ) 远低于 CoolMOS™ CFDA。

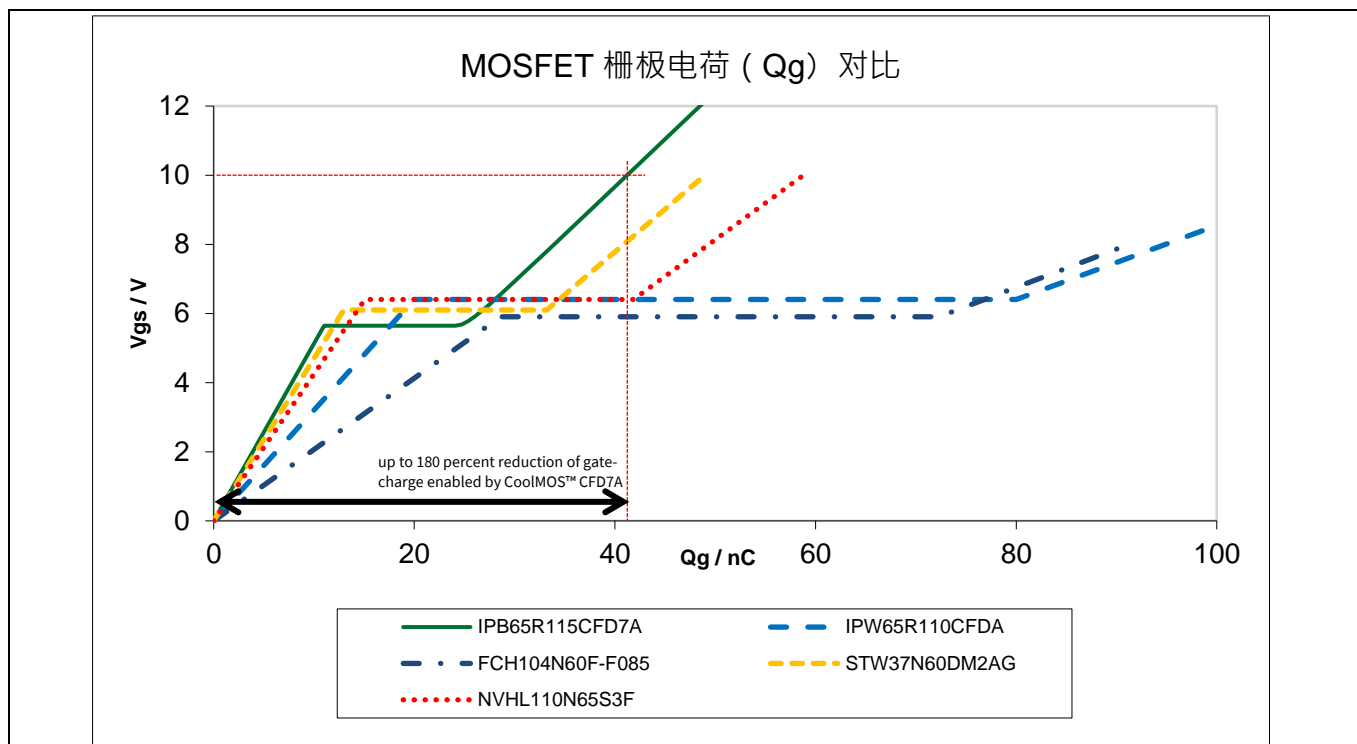


Figure 29 CoolMOS™ CFD7A 提供所有类似器件中最低的栅极电荷

栅极电荷减少具有多个优点：

第一，它允许器件更快速地开关，因为使用相同的栅极驱动器，可以更快速地为开启器件提供栅极电荷，或者更快速地为关闭器件去除栅极电荷。相反，在使开关时间保持在相同水平时，可以使用电流能力更低的栅极驱动器。下一个公式描述了此依赖关系：

$$I_{GDRV} = \frac{Q_G}{t_{g,sw}}$$

第二，驱动栅极所需的总功耗也因为  $Q_g$  的降低而降低：

$$P_{GDRV} = Q_G \times V_G \times f_{sw}$$

由于  $Q_g$  较低，CoolMOS™ CFD7A 成为在快速开关车载充电器系统中实现更高效率的不二之选。

### 4.3 CoolMOS™ CFD7A 的快速体二极管特点

尽管与标准 MOSFET 相比，SJ 功率 MOSFET 可提供出色的功能，但 SJ 原理也有一个缺点：体二极管的强制换流所需的电荷 ( $Q_{rr}$ ) 相对较高。鉴于这一事实，不建议在高电流下对 SJ MOSFET 的体二极管进行连续高速换相，因为这会大幅增加整个功率 MOSFET 的应力条件。描述此数量的参数称为反向恢复电荷  $Q_{rr}$ 。

最新的车规 CoolMOS™ CFD7A 产品配备一个快速体二极管。这意味着， $Q_{rr}$  比传统 SJ MOSFET 小得多，且 MOSFET 在体二极管上进行散杂硬换相（强制换流）时更具鲁棒性。

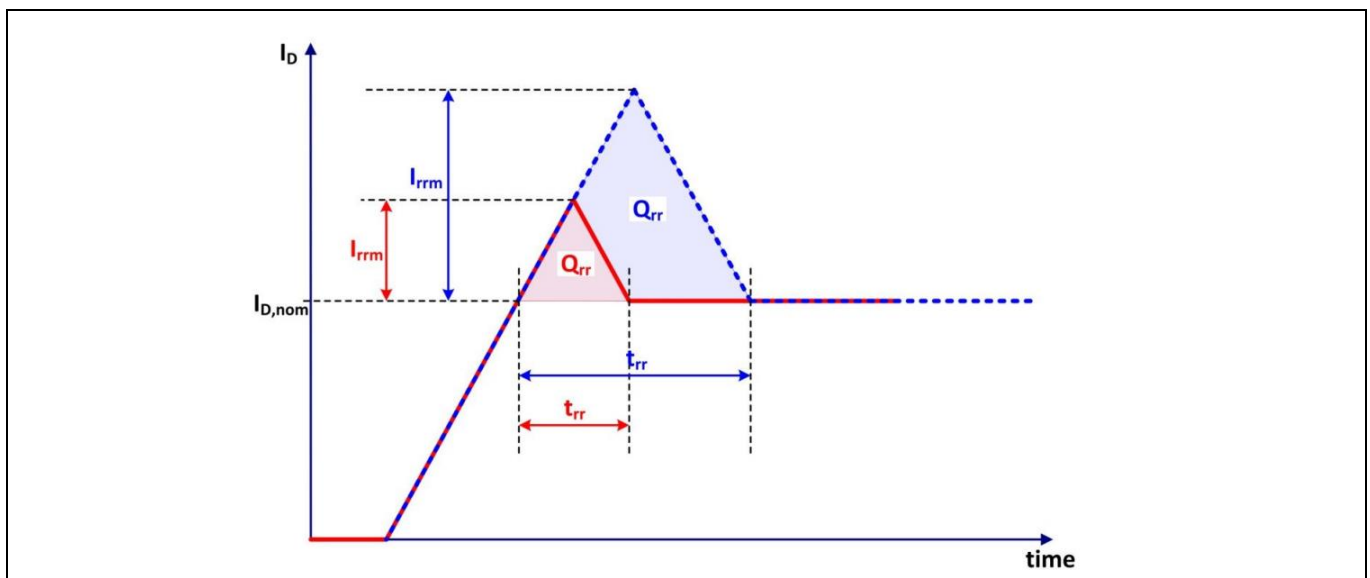
不过，对于每个开关周期都会发生连续硬换相（强制换流）以及电流很高的应用（例如 CCM PFC），我们建议将车规第五代碳化硅 (SiC) 二极管作为 CoolMOS™ CFD7A 的整流元件。

另外，对于硬换相（强制换流）应用（如图腾柱 PFC）和逆变器应用，我们建议使用车规高速 TRENCHSTOP™ 5 IGBT 或 CoolSiC™ MOSFET。

如果使用软开关，则可忽略体二极管的  $Q_{rr}$ ，因为在零电压条件下 MOSFET 将开通。因此，SJ MOSFET 可完美适用于具有软开关的半桥和全桥配置。软开关已成为设计现代 DC-DC 转换器的标准方法，因为它可以在增加开关频率的同时降低损耗。

不过，对于 DC-DC 转换器中存在寄生硬换相（强制换流）的应用，我们建议使用具有快速二极管属性的 CoolMOS™ (CoolMOS™ CFD7A)，以增强鲁棒性。CoolMOS™ CFD7A 的  $Q_{rr}$  值显著低于前代产品。反向恢复时间由此 ( $t_{rr}$ ) 缩短，反向恢复电流 ( $I_{rrm}$ ) 减小，从而提高了体二极管的硬换相（强制换流）裕度。因此，系统的可靠性也随之提升。快速体二极管所具备的优点的原理如图 30 所示。配备快速体二极管的 CoolMOS™ 系列的特性以红色曲线表示： $Q_{rr}$ 、 $t_{rr}$  和  $I_{rrm}$  显著低于传统 SJ MOSFET（蓝色曲线）。

有关 CoolMOS™ SJ MOSFET 的快速体二极管优点的更多信息，请参考 [15]。



**Figure 30** 配备快速体二极管的 CoolMOS™ (CFD7A; 红色曲线) 与未配备快速二极管的传统 SJ 技术 (蓝色曲线) 的优点比较

### 4.4 具有宽爬电距离的 SMD 封装

CoolMOS™ CFD7A 有各种标准封装和  $R_{ds(on)}$  等级可供选择。此外，英飞凌提供新型宽爬电距离 SMT 封装：7 引脚 D2PAK (To263-7-11)，它可在更高系统电压下提供更高的可靠性——这在汽车行业中较为新颖。

图 31 展示了此 7 引脚 D2PAK 封装。除了 4.3 mm 爬电距离外，此封装还提供额外引脚，以实现功率 MOSFET 的高级驱动，这是通过提供额外的驱动器参考引脚（即所谓的“Sense-source”触点）实现的。如

## CoolMOS™ CFD7A 产品性能

果将感测源引脚用作 MOSFET 驱动器的参考引脚，则可显著缩短开关时间。英飞凌建议尽可能地使用 Sense-source 触点。

此原理如图 32 所示。更多详细信息可从 [16] 获取。

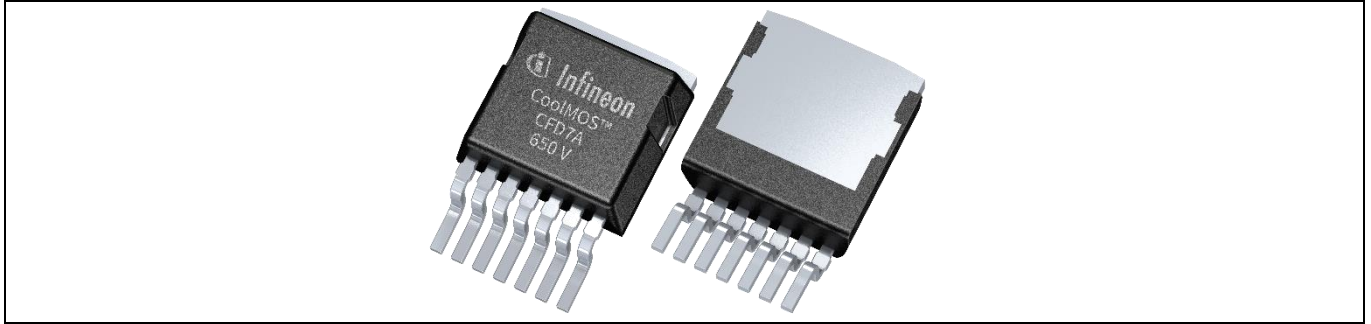


Figure 31 TO263-7-11 封装的 CoolMOS™ CFD7A，用于更高的系统电压和高级栅极驱动

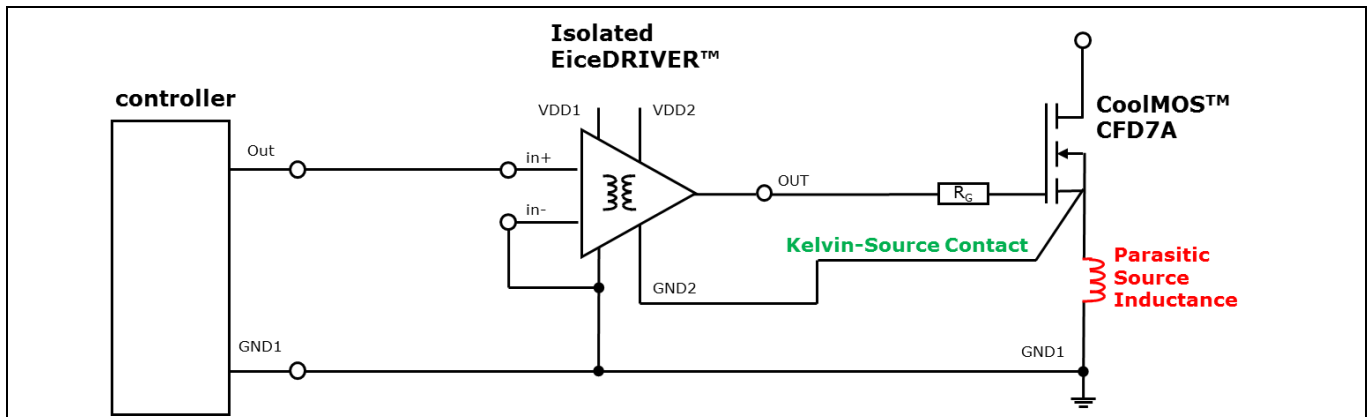


Figure 32 使用 CoolMOS™ CFD7A 和 TO263-7-11 封装提供的开尔文源极触点实现高级栅极驱动

## 4.5 ESD 鲁棒性

所有 CFD7A 器件都能承受栅极上的  $\pm 2000$  V ESD 脉冲（符合 IEC 61000-4-2 标准的 2 级 HBM）。这是通过集成式 ESD 保护和芯片设计的固有抗干扰力来实现的。

这样做的好处是，CoolMOS™ CFD7A 在制造、搬运过程中更具鲁棒性。

## 4.6 PFC 和 DC-DC 级的效率性能

如上所述，CoolMOS™ CFD7A 器件可用于 PFC 和 DC-DC 级。本章介绍通过实验测量所获得的一些实验结果。

### 4.6.1 CCM PFC 的效率结果

图 33 突出强调了 CoolMOS™ CFD7A 在硬开关 PFC 级中的性能。效率结果通过对英飞凌演示板进行的实验测量获得。演示板如图 33 所示。SJ MOSFET 与英飞凌第五代碳化硅二极管结合使用，构成在 CCM 模式的典型升压 PFC 拓扑。此拓扑如图 6c 所示。有关 PFC 演示板的更多详细信息，可从 [17] 获取。演示板可通过 [www.infineon.com](http://www.infineon.com) [18] 订购。

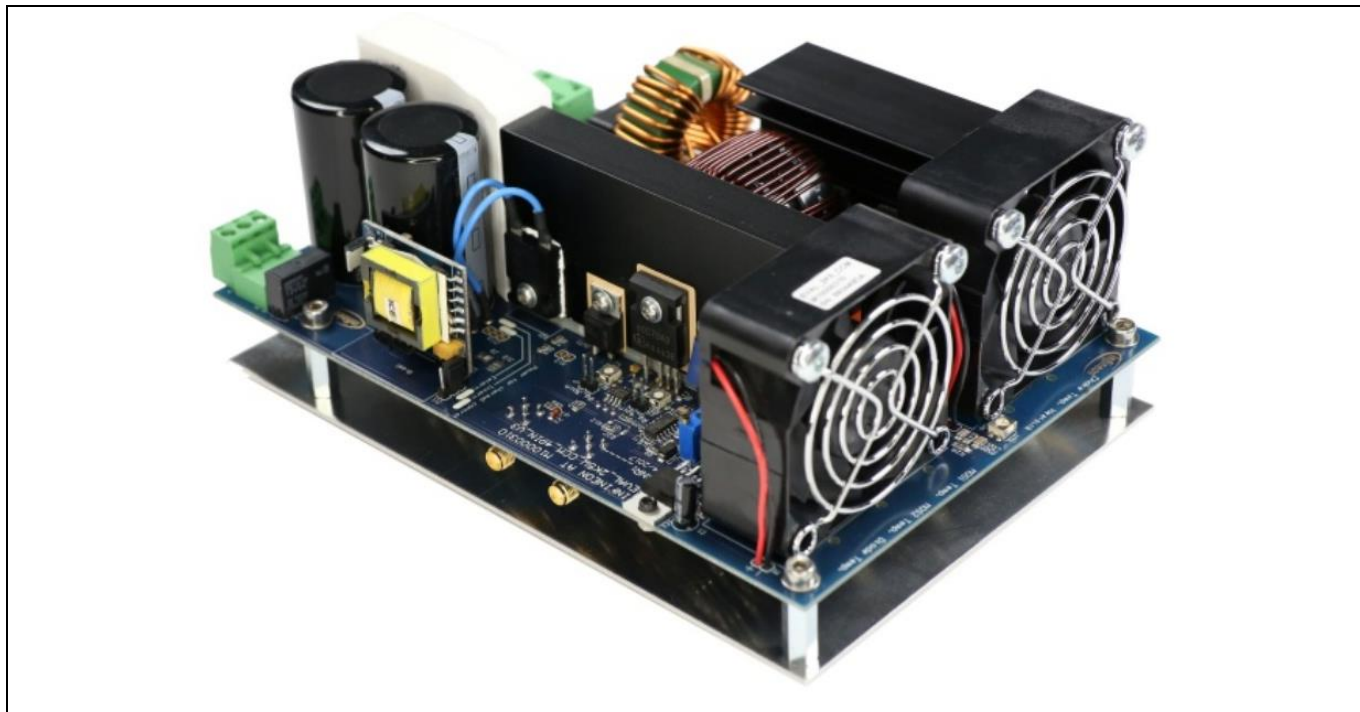
## 650 V CoolMOS™ CFD7A for on-board chargers and DC-DC converters

### High performance Superjunction MOSFETs for HEV and EVs



#### CoolMOS™ CFD7A 产品性能

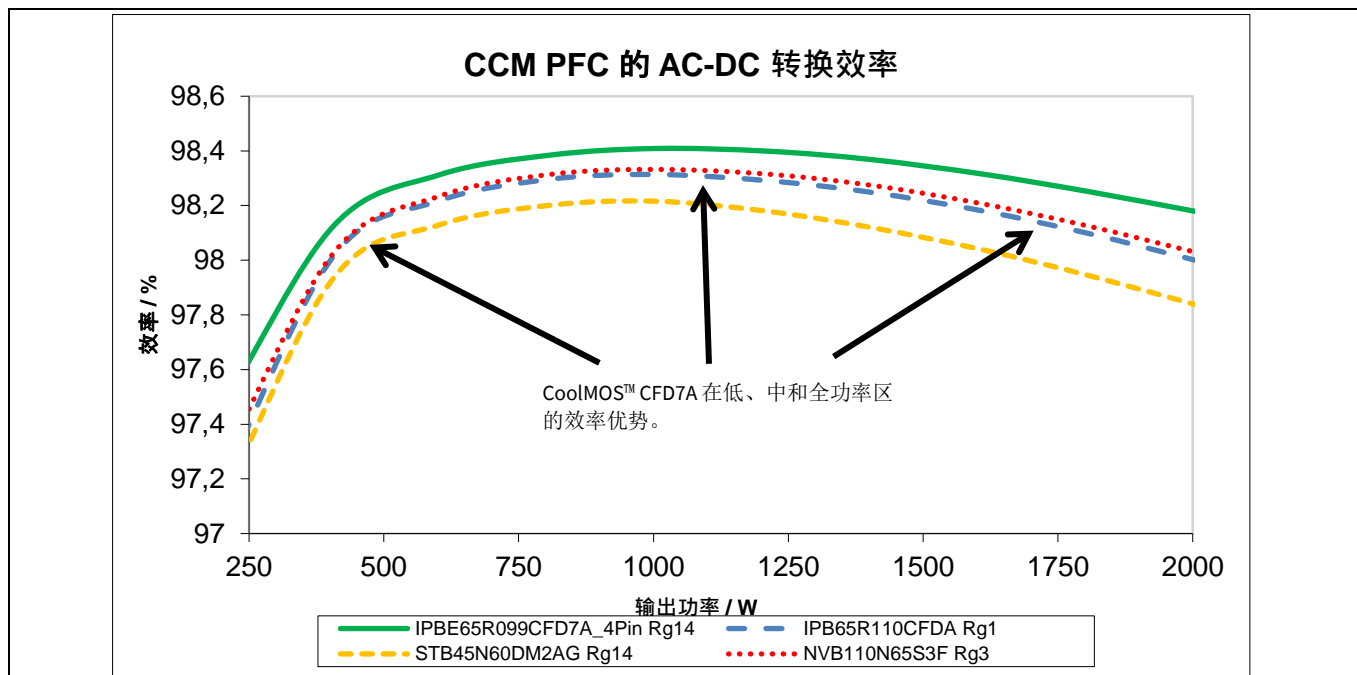
演示板在 230 V<sub>rms</sub> 的输入电压下工作。开关频率设置为 100 kHz。此效率是指通过高精度功率分析仪获得的 AC-DC 总效率。栅极电阻（决定器件的开关速度）的选择完全符合相应器件的数据表，以在系统应用级中获得公平的对比。此外，仅选择采用 TO263 (D2PAK) 封装的器件，以消除不同封装属性的影响。这些器件被焊接到一个子 PCB 上，以适应 PCB 的 TO247 封装。



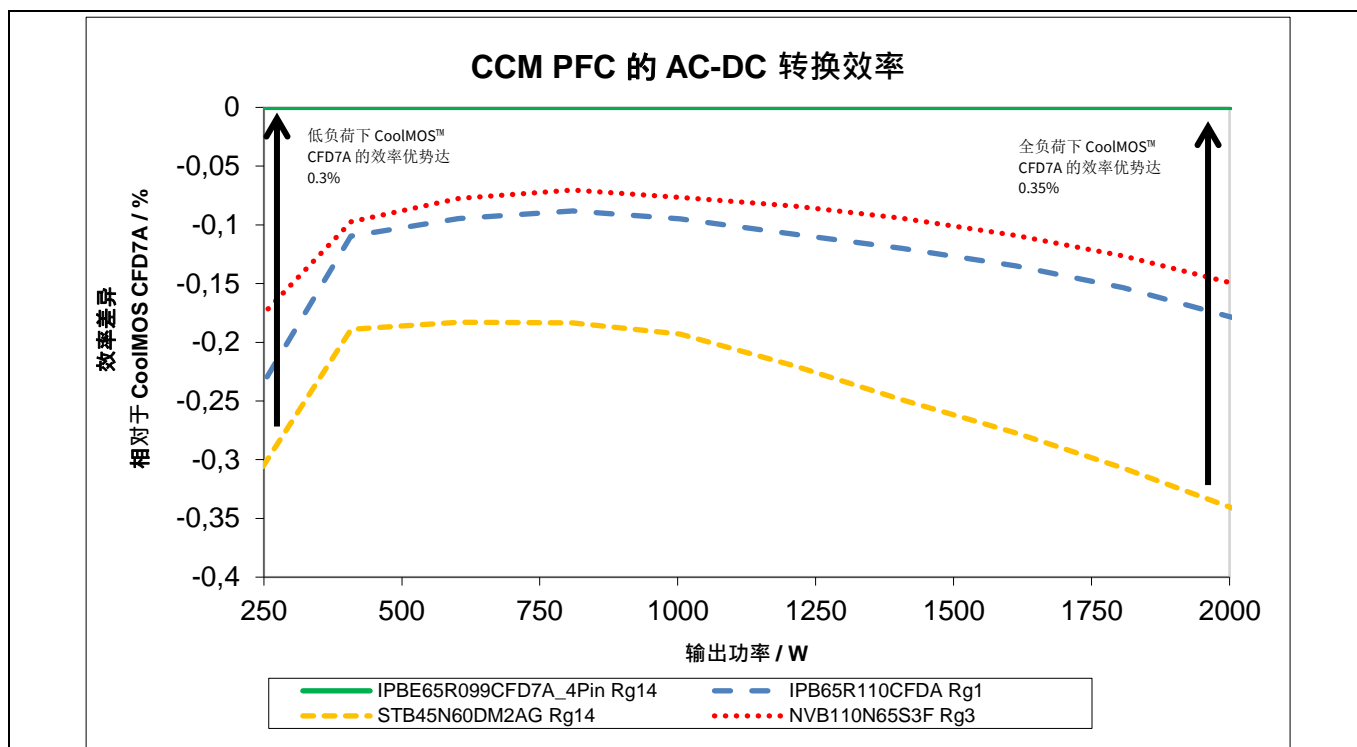
**Figure 33** PFC 评估板（用于确定所示效率测量值）照片。此演示板可在 [www.infineon.com](http://www.infineon.com) [18] 的 “EVAL\_2k5W\_CCM\_4P\_V3” 下订购。

**图 34** 显示测量的效率结果。CoolMOS™ CFD7A 器件在整个负荷范围内均可提供最佳性能。此效率通过高精度功率分析仪获得，分析仪使用标准化设置，以实现再现性。有关效率结果的估计测量误差低于 0.1%（最坏情况）。





**Figure 34** 230 V AC、 $f_{\text{pwm}} = 100 \text{ kHz}$  时典型 PFC 级的总效率: CoolMOS™ CFD7A 在整个负荷范围内均可达到最高转换效率



**Figure 35** PFC 级的相对效率（与使用相同测试条件[如图 34 所示]的 CoolMOS™ CFD7A 相比）

图 36 显示 PFC 级发生的功率损耗。功率损耗是因组件的寄生元件所致。功率损耗越低，冷却电力系统所需的工作越少。CoolMOS™ CFD7A 器件在整个负荷范围内均具有最低功率损耗。

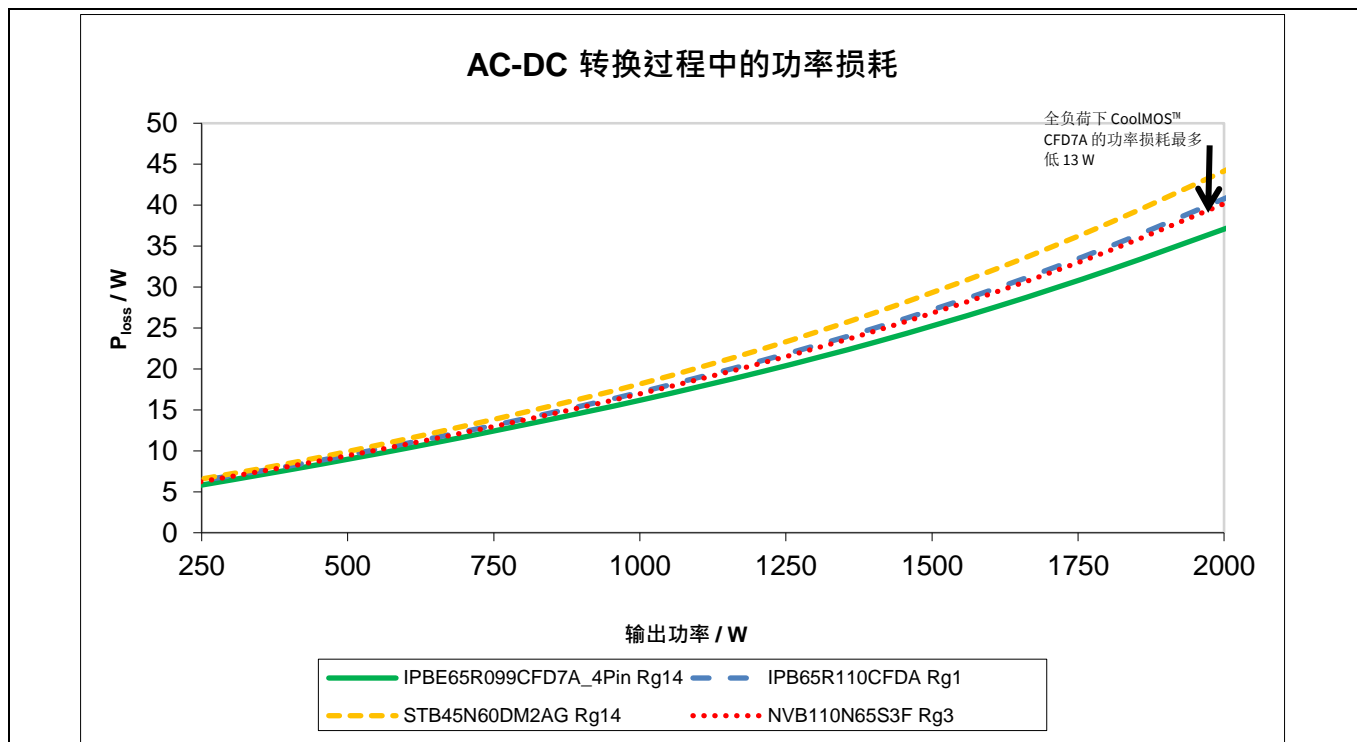


Figure 36 转换过程中的功率损耗；CoolMOS™ CFD7A 在整个负荷范围内均具有最低损耗

图 37 显示 PFC 级 MOSFET 的温度。CoolMOS™ CFD7A 器件在全负荷下达到最高温度 71° C，这是所有选定功率 MOSFET 中最低的器件温度。温度最高的器件是 STB45N60DM2AG，其最高温度达到 79° C 左右——这大约比 CoolMOS™ CFD7A 器件温度高 10%。

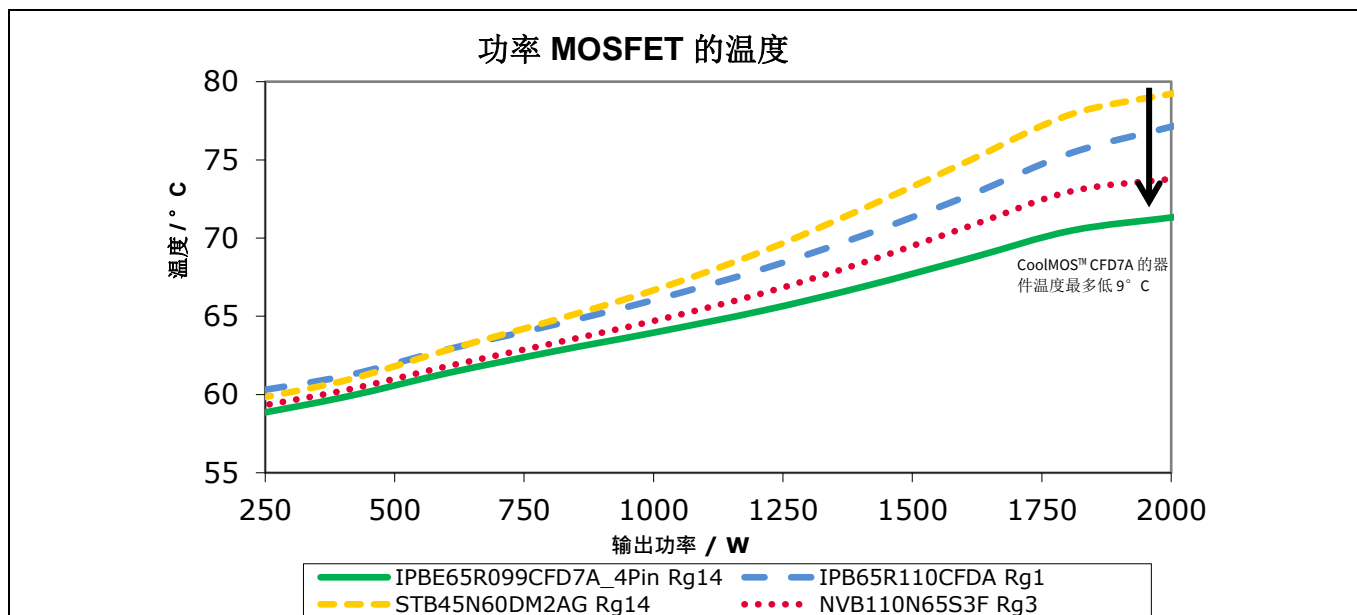


Figure 37 PFC 运行期间的功率器件温度：CoolMOS™ CFD7A 是温度最低的器件

#### 4.6.2 软开关 LLC 的效率结果

与第 4.6.1 章节中的测量相似，LLC 中的性能被视为软开关 DC-DC 转换器拓扑的代表。

### CoolMOS™ CFD7A 产品性能

图 37 显示了此测量的结果。以安森美半导体公司的 NVHK110N65S3F 器件的效率作为比较基准。所有其他器件均达到更高效率 — 它们的效率曲线都在此基准线之上。CoolMOS™ CFD7A 在整个负荷范围内均优于所有其他器件，且在低负荷和全负荷下均具有优势。对死区时间设置进行了相应调整，以使每个器件实现 ZVS（无可见米勒平台）。栅极驱动电阻设置为确保启动时的电压峰值不超过相应器件数据表中的值。在此比较过程中，其余硬件（谐振回路、磁性元件等）均未做改动。

此演示板是谐振频率为 130 kHz 的两相 LLC 转换器。其如图 38 所示。此演示板可在 [www.infineon.com](http://www.infineon.com) [19] 的 “EVAL\_3KW\_2LLC\_CFD7” 下订购。

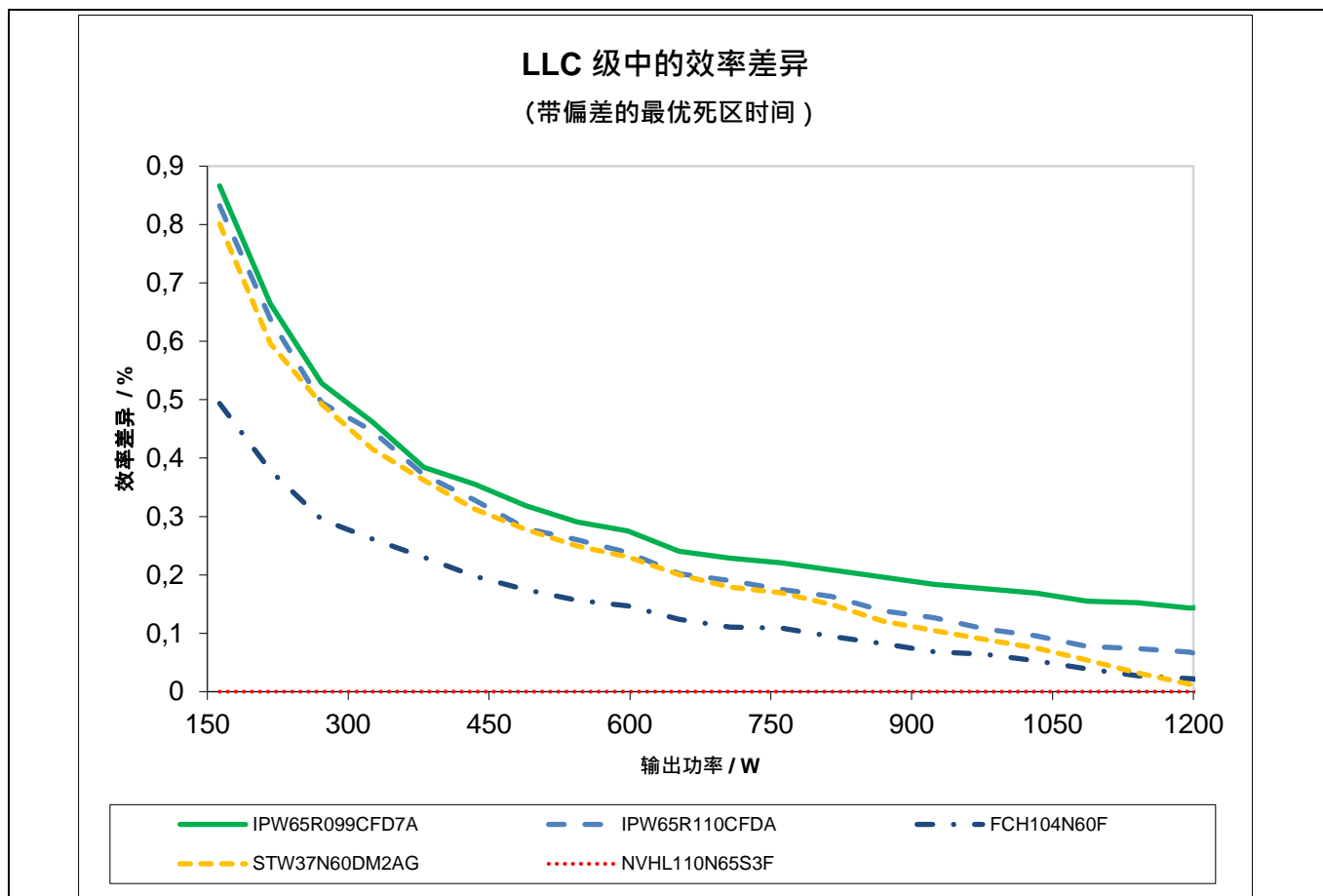
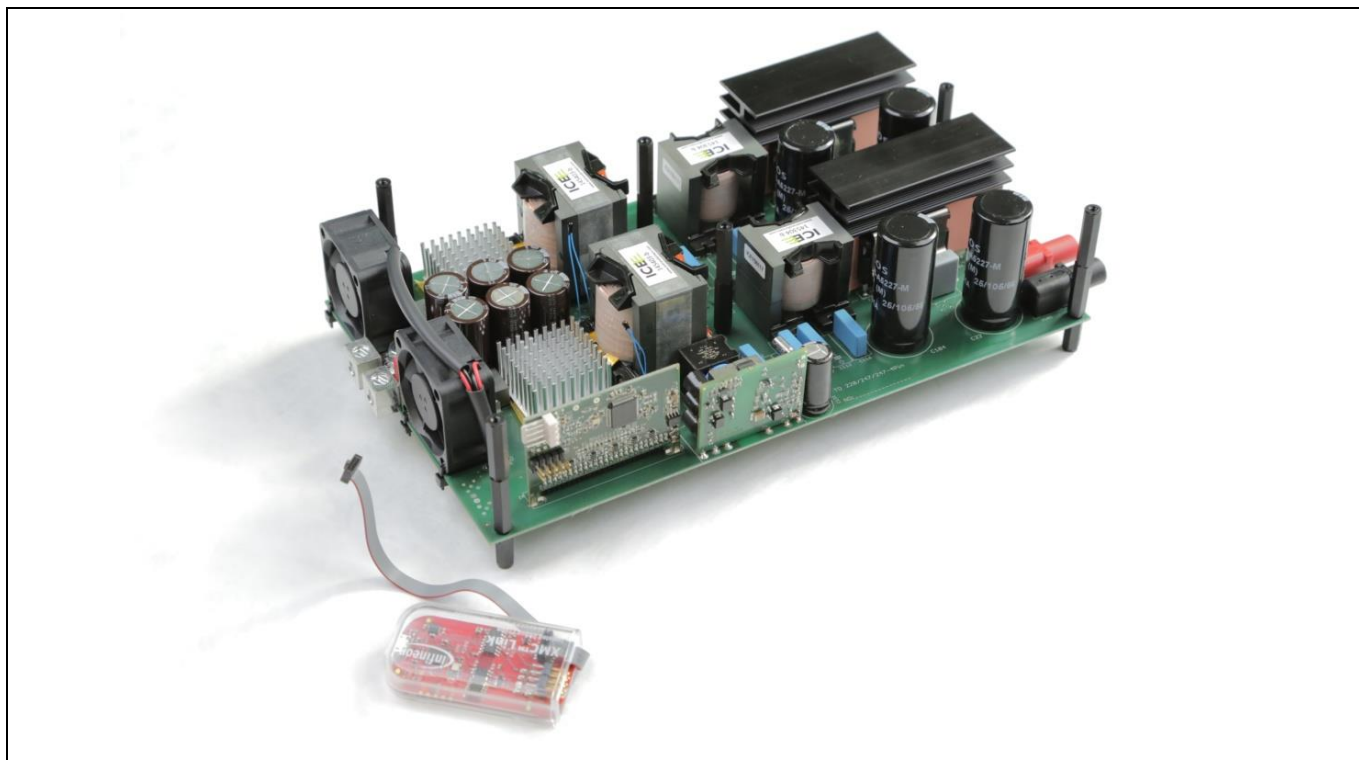


Figure 38 软开关 LLC 转换器中类似功率 MOSFET 器件的效率



**Figure 39** 用于收集图 38 中效率图的 3 kW 两相 LLC 转换器演示板

## 4.7 一般设计和布局建议

CoolMOS™ CFD7A 是一款开关非常快的器件，可在车载充电器中发挥最佳性能。英飞凌建议您考虑一般设计和布局建议，特别是针对 CoolMOS™ CFD7A 的建议。

英飞凌应用说明提供有关如何在栅极驱动器、PCB 布局和 MOSFET 并联方面最高效地使用 CoolMOS™ 的有用信息。应用说明“使用英飞凌超结 MOSFET 器件进行设计时的一般注意事项”和“650 V CoolMOS™ CFD7A for on-board chargers and DC-DC converters”特别提供了有关如何最佳使用 CoolMOS™ 的提示。

此外，[9] 和 [20] 提供了通常适用于高速 MOSFET 的提示，因此可直接用于 CoolMOS™ CFD7A 系列。

**Note:** 英飞凌为您的应用提供技术协助。请通过技术协助中心与我们联系：  
<https://www.infineon.com/cms/en/about-infineon/company/contacts/product-support-form/>。

## 5 参考文献

- [1] 英飞凌应用说明“PFC 升压斩波电路设计指南”：[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_PFCCMBoostConverterDesignGuide-AN-v02\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4624a56eed8014a62c75a923b05](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_PFCCMBoostConverterDesignGuide-AN-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d4624a56eed8014a62c75a923b05)
- [2] 英飞凌“CoolSiC™ 肖特基二极管”登录页面：<https://www.infineon.com/cms/en/product/power/wide-band-gap-semiconductors-sic-gan/silicon-carbide-sic/cool-sic-schottky-diode/>
- [3] 英飞凌“汽车认证 IGBT”登录页面：<https://www.infineon.com/cms/en/product/power/igbt/automotive-qualified-igbts/>
- [4] 英飞凌“碳化硅 MOSFET 单管”登录页面：<https://www.infineon.com/cms/en/product/power/mosfet/silicon-carbide/discretes/>
- [5] 英飞凌应用说明“3 kW 高效无桥双升压 PFC 演示板”：[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-EVAL\\_3KW\\_DB\\_PFC\\_C7-AN-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4625e37f35a015e579000a65d7d](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-EVAL_3KW_DB_PFC_C7-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4625e37f35a015e579000a65d7d)
- [6] IEEE Transactions on Power Electronics, 第 29 卷, 第 2 期, 第 873 – 882 页, 2014 年 2 月: “超平坦交错三角波电流模式 (TCM) 单相 PFC 整流器” (Ultraflat Interleaved Triangular Current Mode (TCM) Single-Phase PFC Rectifier): [https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/02\\_Ultraflat\\_Interleaved\\_Triangular\\_Marxgut\\_01.pdf](https://www.pes-publications.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/02_Ultraflat_Interleaved_Triangular_Marxgut_01.pdf)
- [7] 英飞凌应用说明“ZVS 移相全桥”：[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_EvaluationBoard\\_EVAL\\_2KW\\_ZVS\\_FB\\_CFD2%20ZVS-AN-v01\\_00-EN.pdf?fileId=db3a30433f9a93b7013f9f582ddb1fd9](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_EvaluationBoard_EVAL_2KW_ZVS_FB_CFD2%20ZVS-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433f9a93b7013f9f582ddb1fd9)
- [8] 英飞凌应用说明“使用 600 V CoolMOS™ CFD7 和 XMC™ 的 3300 W 54 V 双向移相全桥”：[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Application%20Note%20EVAL\\_3K3W\\_BIDI\\_PSFB%20AN\\_1809\\_PL52\\_1809\\_081412\\_Bidirectional\\_PSFB\\_3k3W\\_10-AN-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d46267354aa00167404c69bb7b8c](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Application%20Note%20EVAL_3K3W_BIDI_PSFB%20AN_1809_PL52_1809_081412_Bidirectional_PSFB_3k3W_10-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d46267354aa00167404c69bb7b8c)
- [9] 英飞凌应用说明“CoolMOS™ C7: 掌握快速设计的技巧”：[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_650V\\_CoolMOS\\_C7\\_Mastering\\_the\\_Art\\_of\\_Quickness-AN-v01\\_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a966779640b](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_650V_CoolMOS_C7_Mastering_the_Art_of_Quickness-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a966779640b)
- [10] 英飞凌功率 MOSFET “IPB65R115CFD7A” 数据表, 版本 2.0, 2018 年 12 月 17 日:  
<https://www.infineon.com/cfd7a>
- [11] 英飞凌功率 MOSFET “IPB65R110CFDA” 数据表, 版本 2.0, 2012 年 3 月 28 日:  
[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPX65R110CFDA-DS-v02\\_00-en.pdf?fileId=db3a304336797ff90136ba7c820925a5https://www.infineon.com/cfd7a](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPX65R110CFDA-DS-v02_00-en.pdf?fileId=db3a304336797ff90136ba7c820925a5https://www.infineon.com/cfd7a)
- [12] 功率 MOSFET “STB37N60DM2AG” 数据表:  
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stb37n60dm2ag.pdf>
- [13] 功率 MOSFET “NVHL110N65S3F” 数据表: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/NVHL110N65S3F-D.PDF>
- [14] 功率 MOSFET “FCH104N60F\_F085” 数据表:  
[https://www.mouser.com/datasheet/2/149/FCH104N60F\\_F085-748720.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/149/FCH104N60F_F085-748720.pdf)

参考文献

- [15] 英飞凌应用说明“600 V CoolMOS™ P7”：[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_MOSFET\\_CoolMOS\\_P7\\_600V-AN-v02\\_01-EN.pdf?fileId=5546d4625b10283a015b14659d2d0e39](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_MOSFET_CoolMOS_P7_600V-AN-v02_01-EN.pdf?fileId=5546d4625b10283a015b14659d2d0e39)
- [16] 英飞凌应用说明“开尔文源配置中的 CoolMOS™ C7 650 V 开关”：  
[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_MOSFET\\_CoolMOS\\_C7\\_650V in TO-247\\_4pin-AN-v01\\_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a9908a26410](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_MOSFET_CoolMOS_C7_650V_in_TO-247_4pin-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a9908a26410)
- [17] 英飞凌应用说明“带 CCM PFC 控制器 ICE3PCS01G 的 2.5 kW PFC 评估板”：  
[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_EVAL\\_2.5KW\\_CCM\\_4PIN-ApplicationNotes-v01\\_00-EN.pdf?fileId=5546d4624fb7fef2014fd65081616257](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_EVAL_2.5KW_CCM_4PIN-ApplicationNotes-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4624fb7fef2014fd65081616257)
- [18] 英飞凌评估板“带 CCM PFC 控制器 ICE3PCS01G 的 2.5 kW PFC 评估板”：  
[https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval\\_2k5w\\_ccm\\_4p\\_v3/](https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval_2k5w_ccm_4p_v3/)
- [19] 英飞凌评估板“带 600 V CoolMOS™ CFD7 SJ MOSFET 的 3kW 两相 LLC 评估板”：  
[https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval\\_3kw\\_2llc\\_cfd7/](https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval_3kw_2llc_cfd7/)
- [20] 英飞凌应用说明“CoolMOS™ CFDA”：[https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_650V\\_CoolMOS\\_CFDA-AN-v05\\_00-EN.pdf?fileId=db3a304340155f3d014034da2d844b41https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote\\_MOSFET\\_CoolMOS\\_C7\\_650V in TO-247\\_4pin-AN-v01\\_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a9908a26410](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_650V_CoolMOS_CFDA-AN-v05_00-EN.pdf?fileId=db3a304340155f3d014034da2d844b41https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ApplicationNote_MOSFET_CoolMOS_C7_650V_in_TO-247_4pin-AN-v01_00-EN.pdf?fileId=db3a30433e5a5024013e6a9908a26410)

修订历史

修订历史

| 文件版本  | 发布日期           | 变更说明 |
|-------|----------------|------|
| V 1.0 | 2020 年 4 月 2 日 | 第一版  |
|       |                |      |
|       |                |      |



#### Trademarks

All referenced product or service names and trademarks are the property of their respective owners.

版次 2020-04-02

发布方

英飞凌科技股份有限公司

81726 Munich, 德国

© 2020 Infineon Technologies AG.

保留所有权利。

您对本文档有疑问吗？

邮箱: [erratum@infineon.com](mailto:erratum@infineon.com)

文档参考

AN\_1811\_PL52\_1902\_075315

#### IMPORTANT NOTICE

The information contained in this application note is given as a hint for the implementation of the product only and shall in no event be regarded as a description or warranty of a certain functionality, condition or quality of the product. Before implementation of the product, the recipient of this application note must verify any function and other technical information given herein in the real application. Infineon Technologies hereby disclaims any and all warranties and liabilities of any kind (including without limitation warranties of non-infringement of intellectual property rights of any third party) with respect to any and all information given in this application note.

The data contained in this document is exclusively intended for technically trained staff. It is the responsibility of customer's technical departments to evaluate the suitability of the product for the intended application and the completeness of the product information given in this document with respect to such application.

For further information on the product, technology, delivery terms and conditions and prices please contact your nearest Infineon Technologies office ([www.infineon.com](http://www.infineon.com)).

#### WARNINGS

Due to technical requirements products may contain dangerous substances. For information on the types in question please contact your nearest Infineon Technologies office.

Except as otherwise explicitly approved by Infineon Technologies in a written document signed by authorized representatives of Infineon Technologies, Infineon Technologies' products may not be used in any applications where a failure of the product or any consequences of the use thereof can reasonably be expected to result in personal injury.