

# SiC在EV快速充电电机市场满足 V2G 要求

作者：Dr. Paul Kierstead & Jianwen Shao

## 摘要

近年来汽车产业逐渐回暖，消费者对绿色科技的兴趣蓬勃，加上越来越多法规的支持，也使得对于电动汽车 (EV) 市场的预期不断攀升。

习惯驾驶内燃机引擎车辆跑上 400 英里的客户，免不了对 EV 存在“里程焦虑”。但 EV 越来越接近于解决这项难题。最新的 EV 可达到 200 英里左右的续航里程，预计 300 英里很快也将普及。处于领先地位的特斯拉 S model 刚已超过了 400 英里的续航里程，而引领豪华 EV 潮流的新品牌 Lucid Motors 则推出了超过 500 英里续航里程的车型。

本文将探讨碳化硅 (SiC) 技术如何在快速成长的快速充电电机市场，持续满足功率以及车网互联 (V2G) 的需求。

## 迈向 15 分钟充电解决方案

电动汽车市场可持续的成长，需要更短充电时间的充电器基础设施，要在 12 到 15 分钟内就能充满 80% 的容量。增加电压可以安全地实现此类快速充电机所需的更高功率输出。高电压带来较低的电流，从而减少了线缆中的功率损耗以及电池过热问题，能更好地保持功率。它还能减轻重量，因为减小的线缆尺寸仅需更少的铜，从而减少了所需的空间和重量。较小的线缆尺寸也有助于降低由昂贵的铜线缆和连接器带来的成本。

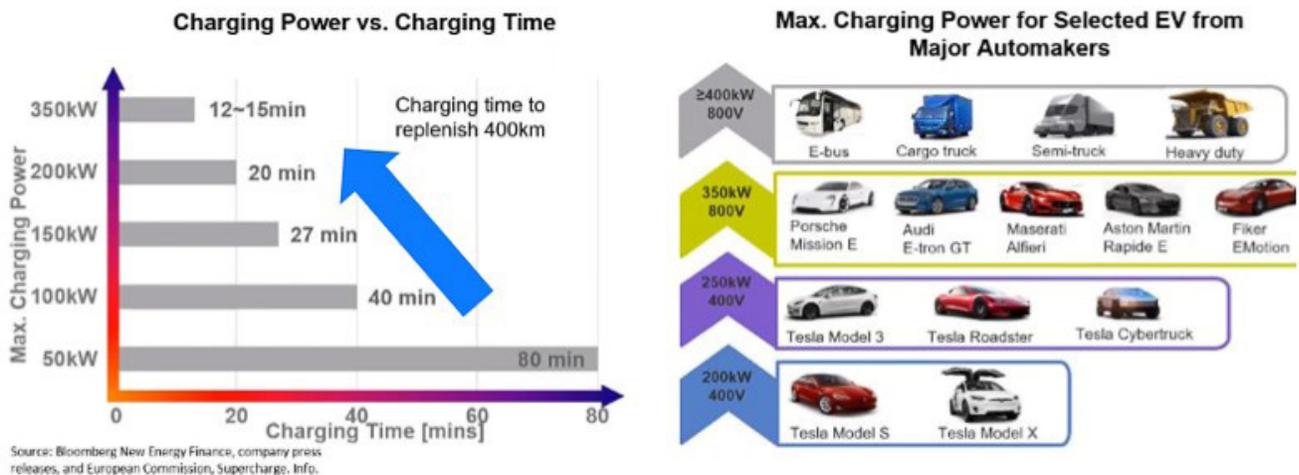


图1. 缩短充电时间的需求，带动直流快速充电电机功率性能的提升。  
(来源：Yole Développement, Power SiC Materials, Devices and Applications 2020)

保时捷的 Taycan、现代汽车的 Kia EV6、通用汽车的 Hummer EV 等几种新车型均已开始采用 800 V 直流快速充电技术，Lucid Motors 更是采用了更高电压等级的 900 V 架构。

如此一来，EV 公司就需要对每项装置进行重大修改，包括增加马达的绕组匝数、增强导体的绝缘性，一直到重新设计功率主回路以使用耐压高于 800 V 的最新功率器件。

## V2G 的双向性

充电机还必须支持的另一个重要趋势是 V2G。随着各家公司纷纷为强大的车载储能系统 (ESS) 开创出重要的商业模式，V2G 也紧随着在逐步发展之中。尽管太阳能和固定式 ESS 在电气化的未来中肯定会占有重要地位，V2G 功能在处理用电负载高峰时被寄予厚望。

考虑到大型的商业和工业能源消费者必须为所需的峰值功率以及较高的平均功率因子付出更多的成本，而双向直流快速充电机可以在峰值负载时将原本要为 EV 充电的功能切换至为企业场地或电网供电，则为安装该系统提供了一个很吸引人的商业场景。

例如，Fermata Energy 公司正在美国北卡罗莱纳州 Ahoskie 市进行装置的测试。这些装置最终将有助于将 EV 与建筑物及电网的整合。其目标是将 EV 转变为高价值的 ESS 资产，不仅可以提高能源韧性和降低能源成本，而且最终还可以提供诸如频率调节之类的服务。

从小范围来看，这些 ESS 资产可以在断电期间为消费者提供备用支援，还可以供露营者和商业承包商 (包括支持远程电视/电影拍摄等) 用作便携式电源，或者在公用设施发生故障时提供临时电源。而从大范围来看，V2G 可以与国家的电网相连接，以缓解风能和太阳能等可再生能源供应的波动。

## SiC 赋能 800 V 架构

碳化硅 (SiC) 是实现高电压快速充电机的关键技术。相较于硅 (Si) 器件，SiC 器件提供了多项优势：

- SiC 的击穿场强是 Si 的十倍，从而在更小的裸芯片面积上的阻断电压比 Si 更高。(目前的 SiC 可支持高达 1700 V 的 MOSFET 阻断电压，而 Si 基超级结 MOSFET 通常在 900 V 以下。)
- 与 Si 相比，SiC 有着更低的导通电阻和断态漏电流，因此有助于提高效率。
- SiC 只有极低甚至没有反向恢复电流，并且能够以比 Si 高三到五倍的频率进行开关，从而减小了电容器和磁性元件的尺寸和重量。
- SiC 具备三倍高的导热率，并且能够承受更高的芯片温度，从而降低了散热要求。

这些特性使得 1200 V SiC 器件比 Si 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 具备显著的成本及性能优势 (图2)，提供了实现 800 V 至 900 V 电动汽车架构所需的更高效率、散热管理和功率密度。这样就不难理解为何 Yole Développement 预估充电桩采用的 SiC 将从目前约 1000 万美元，成长到 2025 年将近 2.25 亿美元的规模。

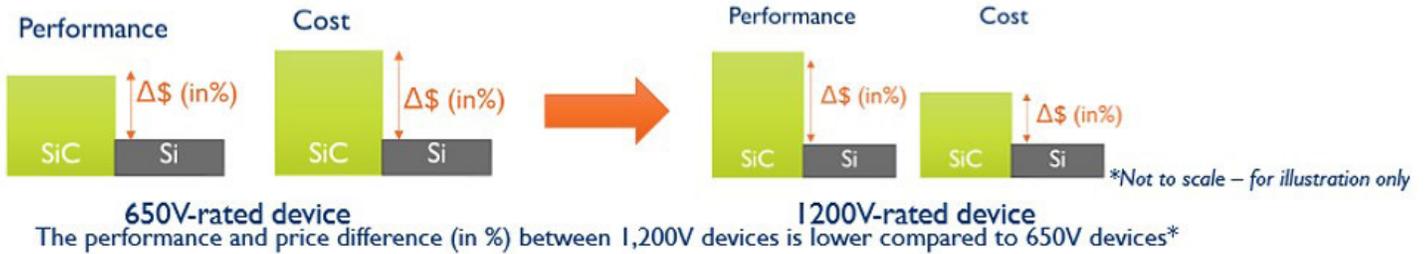
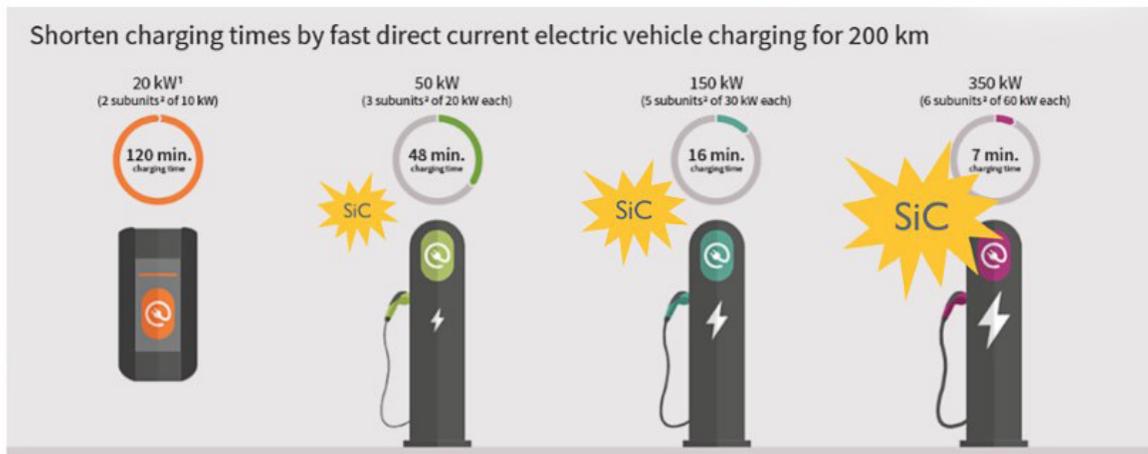


图2. 新的 800 V 架构需要将器件额定电压从 650 V 转变成 1200 V, 这会进一步拉大 Si 和 SiC 之间的性能差距, 同时降低两者之间的成本差异。(来源: Yole Développement)

这些特性使得 1200 V SiC 器件比 Si 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 具备显著的成本及性能优势 (图2), 提供了实现 800 V 至 900 V 电动汽车架构所需的更高效率、散热管理和功率密度。这样就不难理解为何 Yole Développement 预估充电桩采用的 SiC 将从目前约 1000 万美元, 成长到 2025 年将近 2.25 亿美元的规模。

## CHARGING INFRASTRUCTURE: SiC Implementation



The higher the electric charging power, the higher the interest in SiC deployment in the charger business.

Source: Infineon

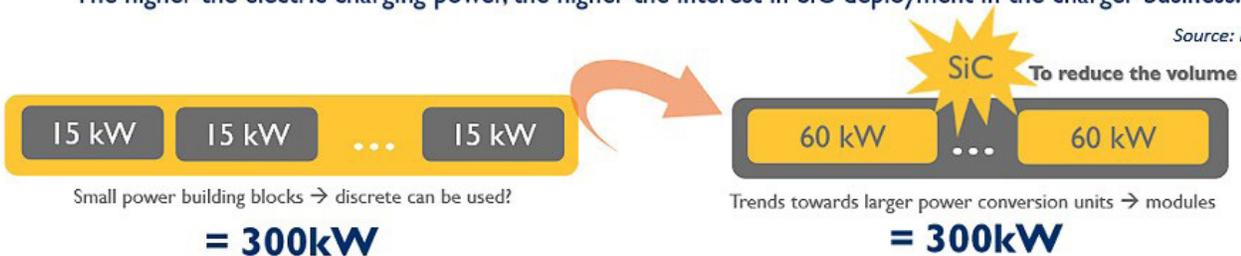


图3. SiC 赋能实现高电压、大功率、更简单的充电机设计。  
(来源: Yole Développement, Power SiC Materials, Devices and Applications 2020)

## 堆叠组合技术

车载充电机和充电桩都包含了两个主要模块：用于 AC/DC 转换的主动式前端 (AFE)，以及 DC/DC 转换器。AFE 从电网获取单相或三相电力，然后输出到直流母线，再通过 DC/DC 模块将其转换为电动汽车电池快速充电所需的电压。

车载充电机 (OBC) 通常采用单个 3 kW 至 22 kW 的模块。充电桩则是采用 15 kW 至 30 kW 的模块，堆叠组合实现目前的 150 kW，及最新目标的 350 kW。最新的 SiC 器件、封装和电路拓扑结构，则可在不久的将来以数量更少的 60 kW 模块来实现这一目标 (图3)。

## 核心器件

Wolfspeed 提供了核心器件，支持 EV 市场中的这些趋势 - 1200 V MOSFET 和肖特基二极管的丰富产品组合。Wolfspeed 的 1200 V 阻断电压第三代 (C3M) MOSFET 系列，其额定电流范围为 7.2 A 至 115 A，导通电阻 (RDS(ON)) 为 350 mΩ 至 16 mΩ，最高结温为 150°C 或 175 °C。

这些器件采用了标准 TO-247-3 以及优化的 TO-247-4 与 TO263-7 封装，其开尔文源极引脚连接可助力优化这些超快 SiC 器件的性能。

## 新设计的参考方案

Wolfspeed 还提供参考设计，可简化设计工作并缩短产品面市时间。为了应对最新的 EV 充电机趋势，公司开发了一个 22 kW 解决方案，其中包括了一个 AFE 和一个灵活的 DC/DC 转换器，既可以用于车载充电机，又可以用作 DC 快速充电机的电源模块 (图4)。

两个参考设计板的结合非常独特，可支持双向单相和三相操作，满足车载充电机中固定电池电压的需求，以及适用于 DC 快速充电机的 200 V 至 800 V 可变电压，以同时服务前代 EV 和 800 V EV。AFE 和 DC/DC 设计的灵活性为工程师们开启了新的机会，使他们还可以将目标瞄准 EV 以外的应用，例如 ESS、UPS 和其他工业电源转换系统等。

描述	3 相 AC 输入充电	1 相 AC 输入充电	放电模式
输入电压	304Vac~456Vac	90Vac~277Vac	300Vdc-800Vdc
输出电压	200-800Vdc	200-800Vdc	220Vac
额定功率	22kW 36A max	6.6kW	6.6kW
OBC 峰值效率	>96%	>96%	>96%
DCDC 峰值效率	>98.5%	>98.5%	>98.5%
DC 母线电压	650V-900V	380V-900V	360V-760V

图4. 22 kw双向充电机规格

## 1200 V SiC 提升性能并简化设计

在 45 kHz 频率下工作的 CRD-22AD12N AFE (图5, 右) 采用了一种简单的六开关拓扑。尽管开关能支持更高的频率, 但需要权衡感应磁芯损耗和开关效率。这个拓扑可直接替代类似的6-IGBT (six-IGBT) 电路。IGBT 方案简单又不贵, 但由于 IGBT 尾电流的存在开关损耗高效率低, 其频率低至 20 kHz 以下。

为了实现高开关频率所带来的好处, 当增加额外的 650 V Si 或 SiC 器件时, 可采用 T-型 AFE 拓扑。但需要注意的是, 这样一来便要有所取舍, 代价是需要更多数量的部件、复杂的控制以及更高的系统成本。

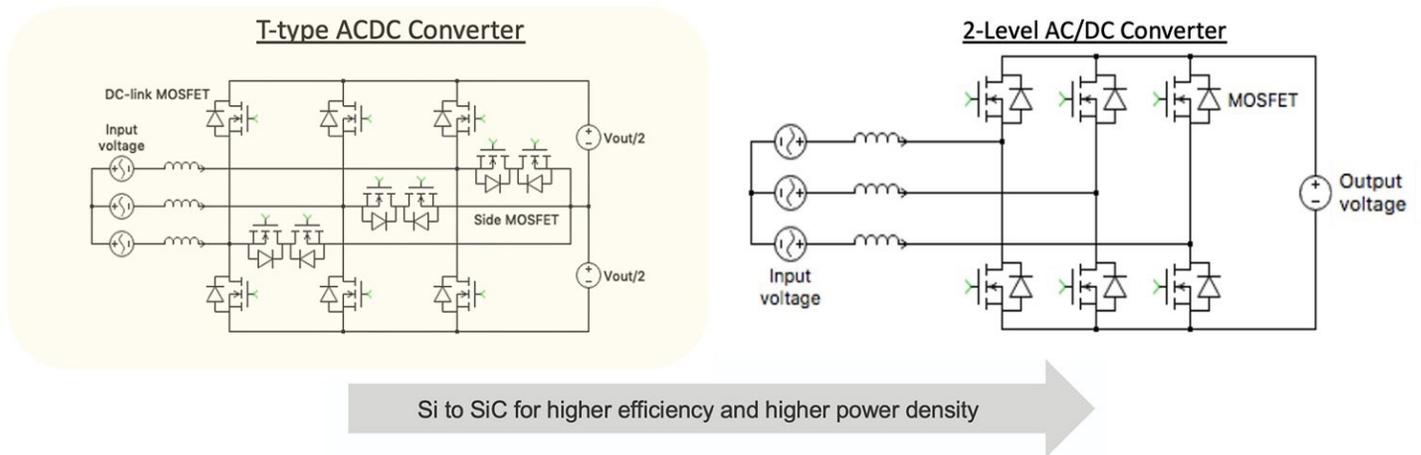


图5. 22 kw双向充电机规格

CRD-22AD12N 采用了 TO-247-4 封装的 1200 V、32 mΩ C3M0032120K SiC MOSFET, 以及基于 KAM 材料的 PFC 电感, 提供相对低的200 kW/m<sup>3</sup> 功率损耗密度(P<sub>v</sub>)、68% 的出色 DC 偏置以及高达 300 kHz 的高频率范围, 从而实现了优异的组合效果。

C3M MOSFET 与灵活的控制方案, 使得该板超越 Si 性能, 并提供以下:

- 高功率密度4.6 kW/L
- 充电和放电模式均实现 >98.5% 的高效率
- 双向工作
- 可支持来自三相 AC 和单相 AC 输入的直流链路
- 可支持 200 V 至 800 V DC 电池电压范围, 以兼容旧型和未来的 EV 架构

在单相应用中, AFE 评估板输出功率为 6.6 kW; 三相应用的情况则是 22 kW。

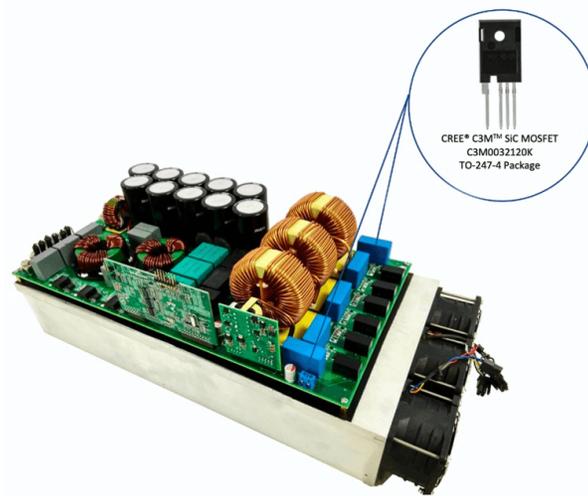


图6. CRD-22AD12N 提供超过 98.5% 效率

为了使充电机的 DC/DC 达到所需的性能水平，需要将复杂的多电平拓扑与 650 V Si 或 SiC 器件一起使用。例如图7所示的级联变换器。Si 650 V 器件解决方案将提供 80 kHz 至 120 kHz 的开关频率范围，需要更多数量的开关和驱动器、更高的系统成本以及复杂的均流控制，还要承受更高的导通损耗。

采用 Wolfspeed C3M0032120K 则可以实现更好的性能以及 140 - 250 kHz 的开关频率范围内，从而带来更小型、更轻量的磁性元件。

CRD-22DD12N DC/DC 板搭载了具有灵活控制方案的全桥 CLLC 谐振转换器，实现了频率调变、移相控制、自适应同步整流和电桥重配置技术。其拓扑实现了零电压导通、低电流关断，从而带来更低的开关损耗和更低的电磁干扰 EMI。所有这些的实现都是伴随着更少数量的功率器件和更低的系统成本。

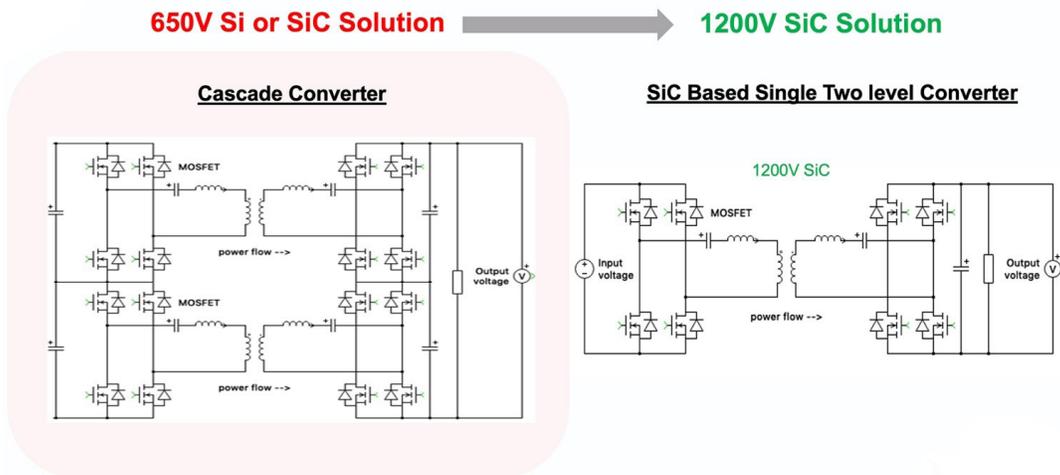


图7. 级联变换器 (左) 的开关频率范围为 80 - 120 kHz，并且需要更多数量的开关和栅极驱动器。1200 V SiC 拓扑 (右) 则更为精简，开关频率范围为 140 - 250 kHz，且仅需更少数量的部件。

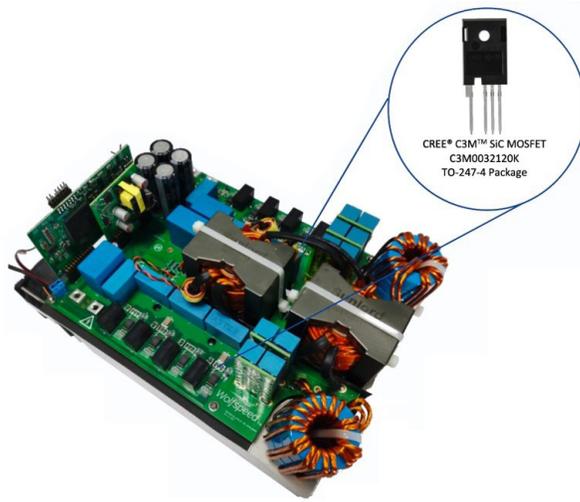


图8. CRD-22DD12N 与 AFE 效率水平相匹配

它可兼容 380 - 900 V 的直流母线输入电压范围，以及 200 - 800 V 的直流输出电压范围，从而可与单相和三相 AFE 集成在一起。

就如同 AFE，该板支持充电和放电双向模式。并提供 8 kW/L 的高功率密度，以及 > 98.5% 的高效率。

## 总结 SiC 优势

将 AFE 和 DC/DC 板组合在一起，带来了明显高于 Si 基方案的显著优势 (图9)。

### 22kW Bi-directional Charger | SiC vs. Si Summary Performance

**System Benefits Breakdown**

	SiC System	Si System
System cost comparison <sup>[1]</sup>	1.00x	1.18x
Peak system efficiency	97%	95%
Power density	~3kW/L	~2kW/L

[1] for power stage components only (power switches, passives, thermal management, etc.) Other components such as controllers, sensors, etc. can also contribute to cost disparity

**System Cost Breakdown**

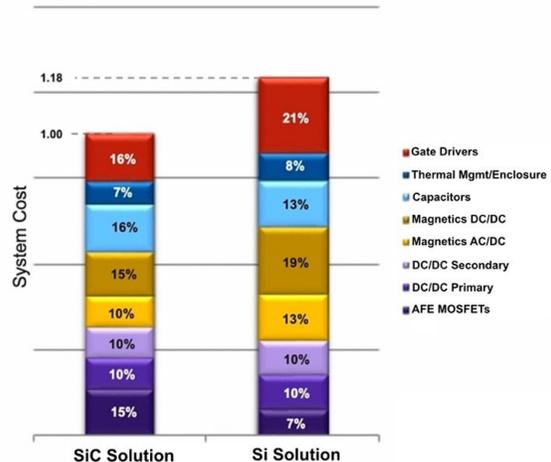


图9. 将 CRD-22AD12N AFE 与 CRD-22DD12N DC/DC 结合使用，可降低 15% 以上系统成本，提高 2% 系统效率，提高 50% 功率密度。



## 小结

随着 EV 电池电压朝向 800 V 迈进，1200 V SiC 开关不仅可实现 15 分钟目标充电时间的新型 EV 架构，同时也为双向充电机在车网互联 V2G 应用开启了新的机遇。

Wolfspeed 为工程师们提供 CRD-22DD12N DC/DC 参考板用于 CRD-22AD12N AFE 的设计，展现了采用 SiC 器件比之 Si 器件的诸多优势，包括降低整体系统成本、减轻重量和减小尺寸、提高系统效率、简化散热设计和成本负担等等，而且还可以简化电源系统设计以缩短产品面市时间。

更多信息，敬请访问 WolfSpeed 汽车技术相关页面：

<https://www.wolfspeed.com/applications/automotive>