

CASA/TR

第三代半导体产业技术创新战略联盟技术报告

T/CASA/TR 001-2018

SiC 器件在 DC/DC 充电模块应用技术报告

Technical report on Application of SiC device in DC/DC charging module

版本：V01.00

2018-9-21 发布

第三代半导体产业技术创新战略联盟发布

目录

前言	I
1 概述	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 DC/DC 充电模块在智能微网中的应用	1
1.1.2 DC/DC 充电模块在移动救援中的应用	2
1.2 主要技术内容	2
2 SiC DC/DC 充电模块	2
2.1 技术参数	2
2.2 模块原理介绍	3
2.3 切换电路方案	4
2.4 H 桥双管 Buck-Boost 电路	5
2.5 LLC 电路	5
3 SiC 器件在 DC/DC 充电模块中应用的关键技术分析	6
3.1 SiC-MOSFET 器件驱动技术	6
3.1.1 SiC-MOSFET 和 Si-MOSFET 输出特性对比	6
3.1.2 驱动电路	7
3.1.3 SiC 方案效率实测数据	9
3.2 SiC-MOSFET 并联均流技术	9
3.2.1 理论分析	9
3.2.2 稳态分析	10
3.2.3 瞬态分析	10
3.2.4 实验验证	10
3.2.4.1 稳态测试分析	11
3.2.4.2 瞬态测试分析	11
3.2.4.3 结论	13
3.3 SiC-Diode 并联均流技术	13
3.3.1 理论分析	13
3.3.1.1 稳态分析	13
3.3.1.2 瞬态分析	14
3.3.2 实验结论	14
3.3.2.1 稳态分析	14
3.3.2.2 瞬态分析	14
3.3.2.3 温升测试结果	15
3.3.3 结论	15
4 总结与建议	15
4.1 SiC 器件在 DC/DC 充电模块应用总结	15
4.1.1 SiC 二极管应用	15
4.1.2 SiC-MOSFET 应用	15
4.2 对 SiC 器件厂家建议	15
参考文献	16

前言

第三代半导体碳化硅（SiC）器件更适合高频、高压和高温的工作环境，可实现系统的高效化、小型化和高可靠，在高端电源、光伏逆变器领域的应用规模进一步扩大，可靠性及成本也可达到电动汽车、轨道交通等相关应用的要求。

在 SiC 器件产业化应用逐步开启的过程中，DC/DC 充电模块是能够发挥 SiC 优势，率先开启的应用之一。本技术报告通过分析 SiC 器件在 DC/DC 充电模块中的应用，推动业界了解 SiC 器件使用的优势与问题，进一步明确 SiC 器件的应用技术要求，以引导研发方向，开启规模应用。

本技术报告由第三代半导体产业技术创新战略联盟标准化委员会（CASAS）制定发布，版权归 CASA 所有，未经 CASA 许可不得随意复制；其他机构采用本技术报告的技术内容制定标准需经 CASA 允许；任何单位或个人引用本技术报告的内容需指明本技术报告的编号。

到本技术报告正式发布为止，CASAS 未收到任何有关本文件涉及专利的报告。CSAS 不负责确认本文件的某些内容是否还存在涉及专利的可能性。

本报告主要起草单位：西安特锐德智能充电科技有限公司

本报告主要起草人：袁庆民、茹永刚、王利强、傅作超、李建华、巨阳、胡天琪、王立、钟超、李震伟、张红波

感谢三安光电股份有限公司蔡伟智、东莞市中镓半导体科技有限公司丁晓民、苏州晶品新材料股份有限公司高鞠、中兴通讯股份有限公司刘建利、英诺赛科(珠海)科技有限公司刘志斌、天津大学梅云辉、北京世纪金光半导体有限公司倪炜江、广东德豪润达电气股份有限公司苏立新、乐健科技（珠海）有限公司钟山、浙江大学姚文熙、中国电子科技集团公司第十三研究所崔波、香港应用科技研究院史训清、全球能源互联网研究院李金元等人为本技术报告提出的宝贵建议和意见。

SiC 器件在 DC/DC 充电模块应用技术报告

1 概述

1.1 研究背景

电动汽车在国家大战略的支持下，得到了快速的发展，但是随着电动汽车的数量增多，如何对电动汽车进行快速充电就成了制约电动汽车进一步快速发展的瓶颈。因此，具有高效率、大输出功率的充电模块才是解决快充问题的核心方法。

新型电力电子器件的应用是促进电动汽车充放电设备升级换代的重要手段。以碳化硅（SiC）为代表的第三代半导体以其高频、高耐压、低损耗、高热导率等优良性质，为充电设施向高效率、高功率密度和高电压等级方向发展提供了器件级基础，是未来电动汽车充电设备的核心竞争力。

充电功率变换模块主要分为 AC/DC 充电模块、DC/DC 充电模块两种。AC/DC 电模块是将交流电源变换成能为电动汽车充电的直流电源模块。DC/DC 充电模块是将一种直流电源变换成能为电动汽车充电的直流电源模块。

1.1.1 DC/DC 充电模块在智能微网中的应用

随着清洁能源发电的持续发展和电动汽车的大规模应用，电力行业面临着前所未有的严峻挑战。另一方面，电动汽车充电设施的建设与运营，目前还处在商业模式可持续探索阶段。通过技术手段在用能端以集成化的交直柔混联微电网的核心关键装备的创新设计，将工商业企业园区的变、配、用、光、储、充、放各子系统进行高度整合，实现用户侧的就地消纳分布式清洁能源发电、经济用电、平抑电网接口峰谷差、提高电网侧能效以及具有与电网系统调度的需求侧友好互动响应的作用，同时，电力电子装置柔性调节能力，还兼具调节无功和谐波抑制等电能质量调节作用。

配电、光伏、储能、电动汽车充放电等各子系统，通过交直流双母线耦合，交直流母线集中在箱变内部，其它电网、光伏、储能、电动汽车的接入是通过箱变引出电缆进行连接，即插即用。系统的电力电子设备围绕直流母线，电能转换率高。配电变压器冗余大大减少，系统的总体配电设备成本大大降低。直流母线侧与光伏、储能、电动汽车的能量交换，依赖 DC/DC 模块来实现。

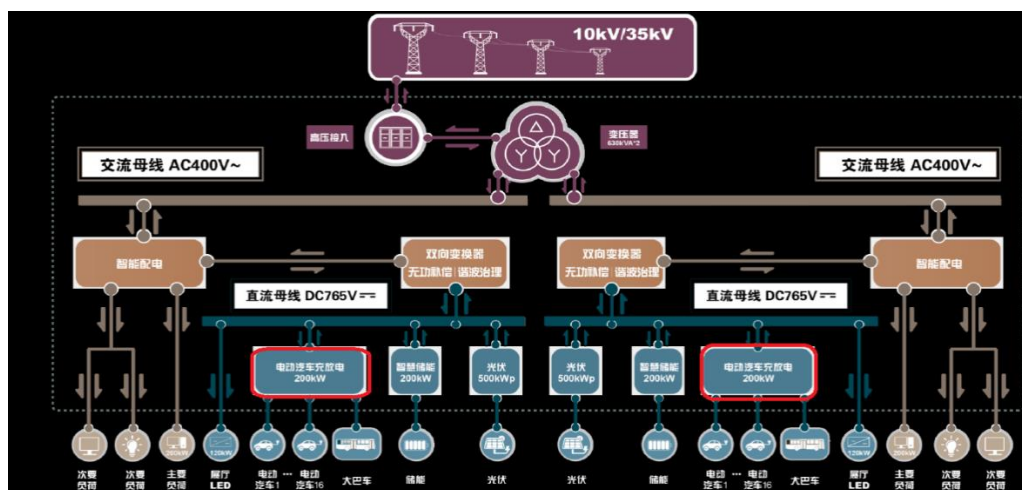


图 1 智能微网系统方案

1.1.2 DC/DC 充电模块在移动救援中的应用

移动救援：用于移动救援车，将移动救援车储能电池的能量给车充电，同时也可以满足车放电到储能电池进行储能。救援车和被救援车辆需要 DC/DC 模块来实现能量交换。



图 2 与电池厂合作开发的移动救援车

1.2 主要技术内容

本技术报告主要给出了 SiC 器件应用于 DC/DC 充电模块的应用研究结果，包括系统总体方案、关键技术研究等，分析了 SiC 器件应用于 DC/DC 充电模块的优势及问题，提出了 SiC 器件的相关技术要求，以促进 SiC 器件的应用市场发展。

2 SiC DC/DC 充电模块

2.1 技术参数

示例的 10kW DC/DC 电源模块主要技术参数如表 1 所示。

表 1 电源模块主要技术参数

产品主要技术参数		
直流输出	输出额定值	800V/12.5A
	输出额定功率	10000W
	输出电压范围	200-800Vdc
	输出电流范围	0~17.3A
	峰值效率	≥97.5%
直流输入	输入电压范围	200-800Vdc
	最大输入功率	10400W
	最大输入电流	40A
其它	隔离变压器	具备
	双向充放电功能	具备
	输出限流	具备
	过温保护	具备
	冷却方式	智能强制风冷
	噪音	≤65dB (NB/T 33008.1-2013)
	运行温度范围	-40 ~65℃
	防护等级	IP20
	相对湿度	0~95%,无凝露
	海拔高度	2000m
	通信方式	CAN
	指示灯	具备
	机械尺寸	83mm*219mm*534.5mm
重量	≤10kg	

2.2 模块原理介绍

电源模块主功率由双向切换电路、Buck-Boost 电路、LLC 电路两三部分级联组成，如图 3 所示。双向切换电路主要完成电路的功率的双向流动。Buck-Boost 电路为前级预稳压电路，其作用是根据输出电压调节母线电压，使后级 LLC 电路有一个良好的工作点。LLC 电路主要实现输入与输出之间的隔离。

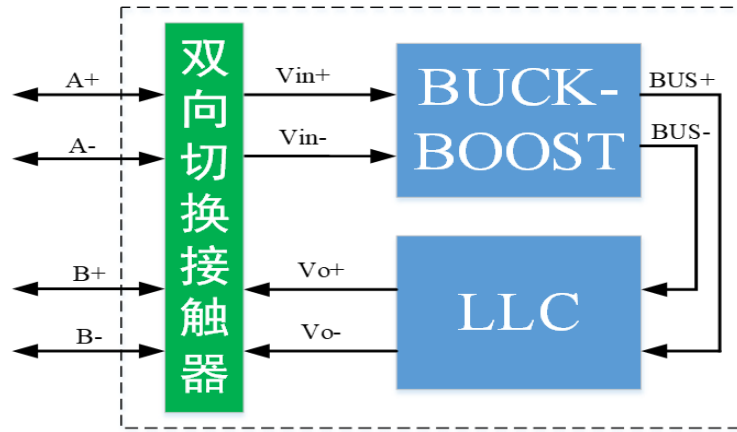


图 3 电源模块原理框图

电源模块采用 2 个 DSP 控制，其中一个 DSP 负责双向切换电路、H 桥双管 Buck-Boost 以及软启动电路的控制，另一个 DSP 负责 LLC 控制、灯板显示、CAN 通信、风扇调速，两个 DSP 之间采用 SCI 通信。

2.3 切换电路方案

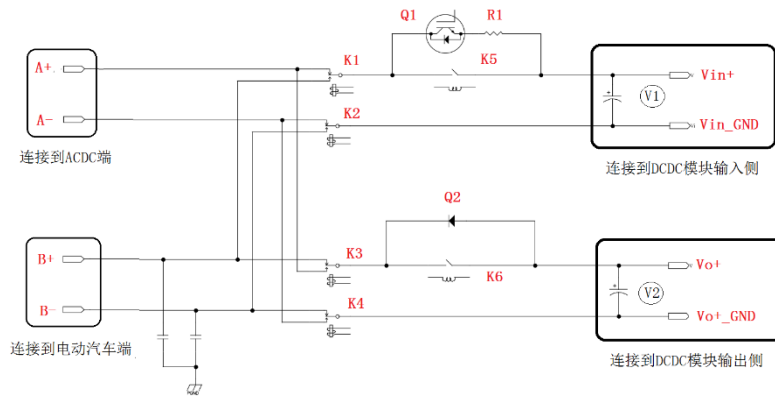


图 4 双向切换电路原理示意图

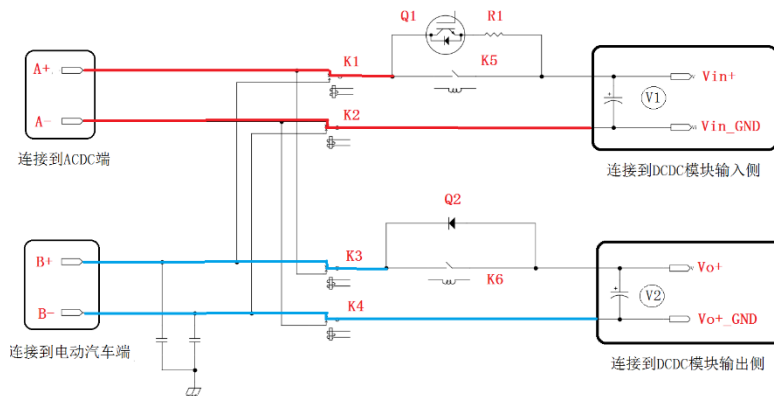


图 4-1 充电过程切换电路工作原理示意图

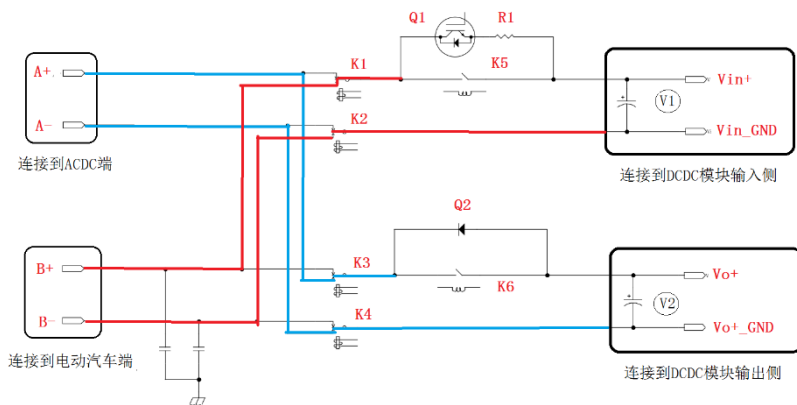


图 4-2 放电过程切换电路工作原理示意图

如图 4，双向切换电路由切换开关 K1、K2、K3、K4，软启动继电器 K5、K6，软启动电阻 R1，软启动 IGBT Q1、D2 组成。K1、K2、K3、K4 为单刀双掷继电器，默认 K1 接 V_{in+} ，K2 接 V_{in_GND} ，K3 接 V_{o+} ，K4 接 V_{o+_GND} 。

电池充电过程：K1 连通 V_{in+} 和 A+，K2 连通 V_{in_GND} 和 A-，K3 连通 V_{o+} 和 B+，K4 连通 V_{o+_GND} 和 B-，此时能量有 A 端口往 B 端口流动，即电池充电过程如图 4-1。

电池放电过程：K1 连通 V_{in+} 和 B+，K2 连通 V_{in_GND} 和 B-，K3 连通 V_{o+} 和 A+，K4 连通 V_{o+_GND} 和 A-，此时能量有 B 端口往 A 端口流动，即电池放电过程如图 4-2。

2.4 H 桥双管 Buck-Boost 电路

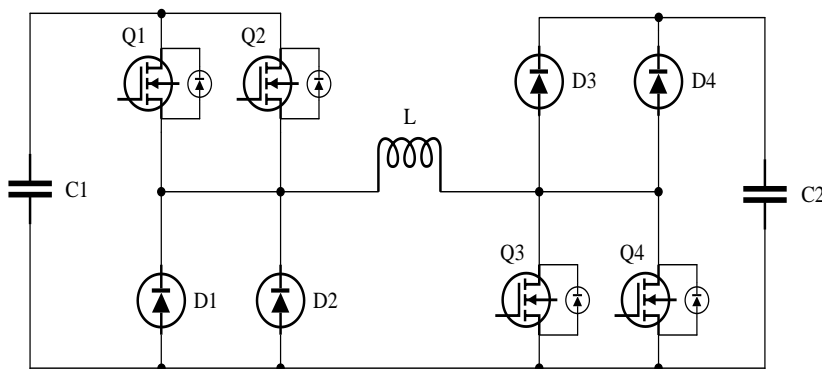


图 5 H 桥双管 Buck-Boost 电路图

模块输入和输出电压范围均为 200~800Vdc，前级电路选用 H 桥双管 Buck-Boost 拓扑调整母线 C2 电压，减小后级 LLC 的设计难度，使 LLC 工作在谐振状态。H 桥双管 Buck-Boost 拓扑输入电压范围为 200~800Vdc，输出电压为 300~800Vdc。

2.5 LLC 电路

LLC 使用 Si 和 SiC 器件的拓扑结构图如图 6、7 所示。

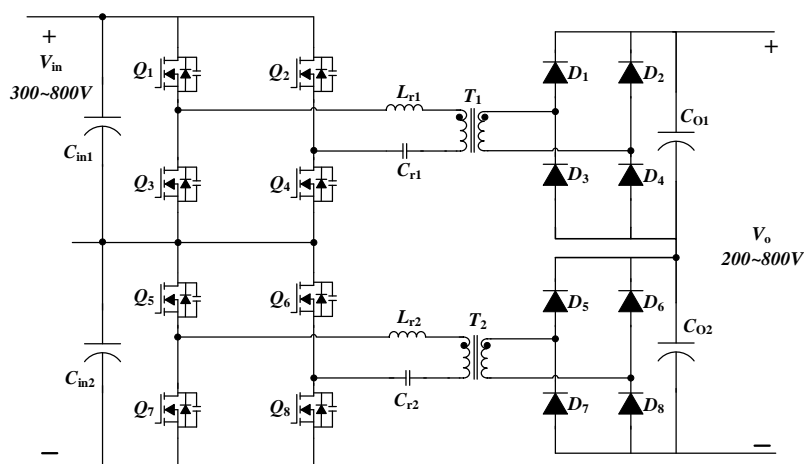


图 6 使用 Si 器件的 LLC 拓扑结构图

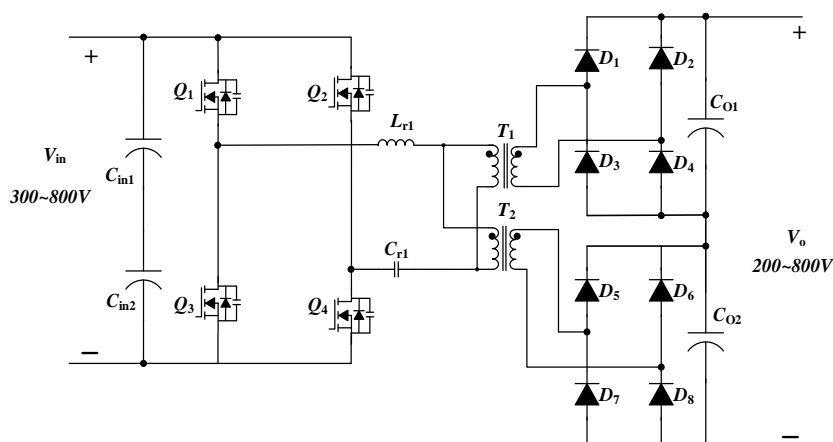


图 7 使用 SiC 器件的 LLC 拓扑结构图

图 6 图 7 拓扑对比可知，使用 Si 器件的 LLC 拓扑原边 H 桥串联，输出端全桥整流后串联。使用 SiC 器件的 LLC 拓扑输入端只需一个 H 桥，变压器初级并联，变压器次级串联。

3 SiC 器件在 DC/DC 充电模块中应用的关键技术分析

3.1 SiC-MOSFET 器件驱动技术

3.1.1 SiC-MOSFET 和 Si-MOSFET 输出特性对比

如图 8 SiC-MOSFET 和 Si-MOSFET 输出特性对比，SiC-MOSFET 比 Si-MOSFET 的跨导小，所以 SiC-MOSFET 需要较高的驱动电压。

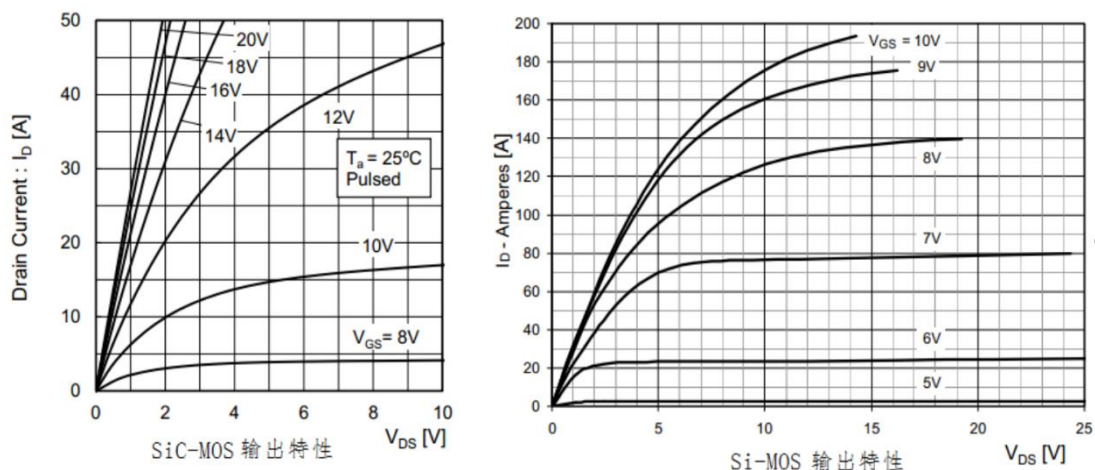


图 8 SiC-MOSFET 和 Si-MOSFET 输出特性对比

备选 SiC MOSFET 的关键参数如表 2，驱动电压最大值和最小值有差异。SCT3040KL 的 V_{gs} 最大、最小值分别为 22V 和 -4V，满足 80%降额要求，所以驱动电压小于 18V，关断电压大于 -2V（小于 0V）。

表 2 SiC-MOSFET 关键参数

厂家	型号	Vds	Vgs	Id	Rdson	Qg
Cree	C3M0065090D	900	-8/+18V	23A@Tc=100°C	90mohms@Tc=125°C	30.4nC
	C2M0080120D	1200	-10/+25V	20A@Tc=100°C	130mohms@Tc=125°C	49.2nC
	C2M0040120D	1200	-10/+25V	40A@Tc=100°C	65mohms@Tc=125°C	115 nC
Rohm	SCT3040KL	1200	-4/+22V	37A@Tc=100°C	60mohms@Tc=125°C	107 nC
	SCT2080KE	1200	-6/+22V	28A@Tc=100°C	125mohms@Tc=125°C	106 nC
ST	SCT30N120	1200	-10/+25V	34A@Tc=100°C	100mohms@Tc=125°C	105 nC
	SCT50N120	1200	-10/+25V	50A@Tc=100°C	80mohms@Tc=125°C	126 nC

3.1.2 驱动电路

一般驱动方式有两种，如图 9 变压器驱动方案和图 10 隔离驱动芯片。H 桥双管 Buck-Boost 级电路工作在 Boost 模式时，MOS 管 Q1、Q2 需保持直通状态，变压器驱动方案不能满足需求，所以选用隔离驱动芯片方案。SiC MOS 管驱动需负压关断，图 12、13 中 MOS 开通驱动电压为正压，关断时驱动电压为负压，需注意关断负压值是否满足器件降额要求。

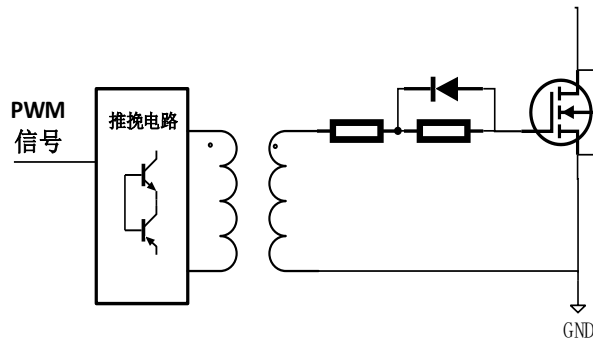


图9 变压器驱动 SiC-MOSFET 方案

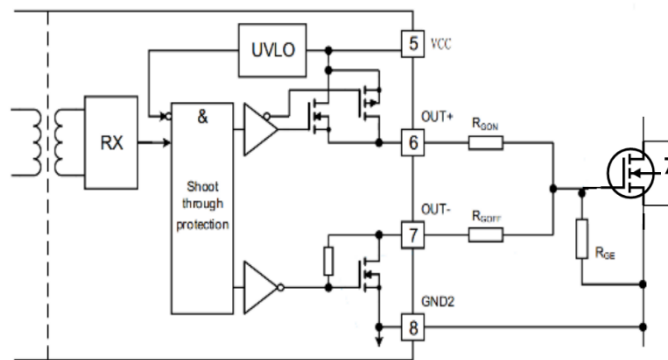
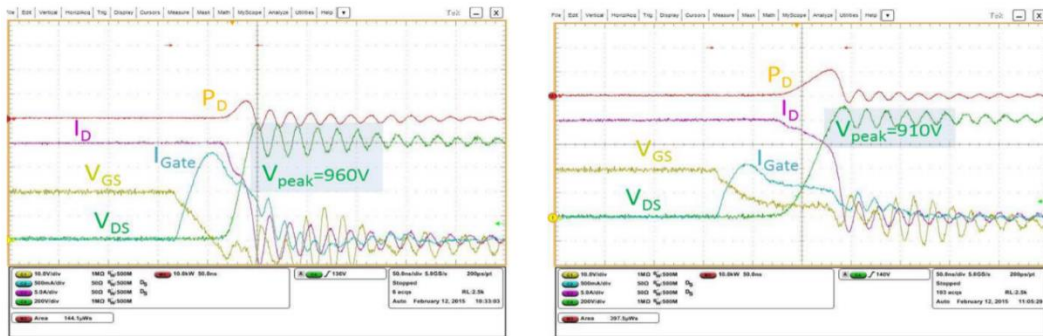


图10 隔离芯片驱动 SiC-MOSFET 方案

如图 10 隔离驱动芯片，开通电阻 R_{GON} 和关断电阻 R_{GOFF} 阻值相等，阻值分别为 1Ω 、 10Ω 测试波形如图 11。驱动电阻变大后，关断损耗变大，关断时漏极电压震荡变小。



$R_{GON} = R_{GOFF} = 1\Omega$

$R_{GON} = R_{GOFF} = 10\Omega$

图 11 不同驱动电阻对电路参数的影响

(黄色: V_{GS} , 蓝色: I_{Gate} , 绿色: V_{DS} , 红色: I_D)

输入电压 500V，输出电压 700V，输出最大功率 10kW，对比不同驱动电阻对效率的影响。对比结果如图 12 所示，驱动电阻越大，效率越低。考虑效率、EMC、MOS 管的电压应力等因素，驱动电阻阻值根据实际需求调大或调小。

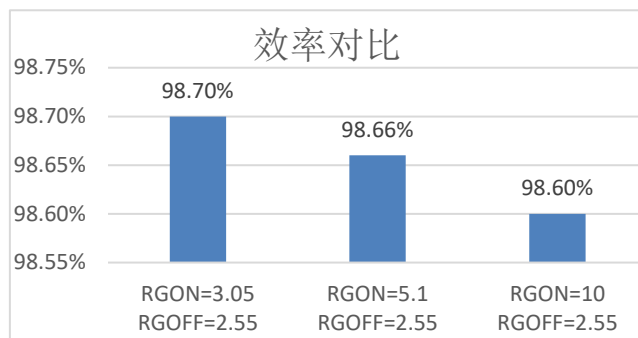


图 12 不同驱动电阻效率对比

3.1.3 SiC 方案效率实测数据

Buck-Boost 电路效率测试数据如表 3、图 13 所示，输出功率 8kW~10kW 输出效率大于 99%，最大效率为 99.02%。（备注：计算效率时输入功率未包含风扇和辅源功率）。

表 3 Buck-Boost 电路效率数据

序号	输出功率	输入电压 (V)	输入电流 (A)	输出电压 (V)	输出电流 (A)	输入功率 (W)	输出功率 (W)	效率
1	3kW	582.54	5.38	706.10	4.37	3131.56	3086.36	98.56%
2	4kW	582.54	7.18	705.50	5.83	4162.01	4111.65	98.79%
3	5kW	582.54	8.61	705.00	7.00	4992.87	4937.12	98.88%
4	6kW	582.54	10.67	704.40	8.70	6190.34	6126.17	98.96%
5	7kW	582.54	12.41	703.90	10.13	7204.67	7131.92	98.99%
6	8kW	582.54	14.17	703.30	11.58	8222.51	8140.70	99.01%
7	9kW	582.54	15.93	702.90	13.63	9250.16	9159.08	99.02%
8	10kW	582.54	16.98	702.60	13.89	9854.96	9758.41	99.02%

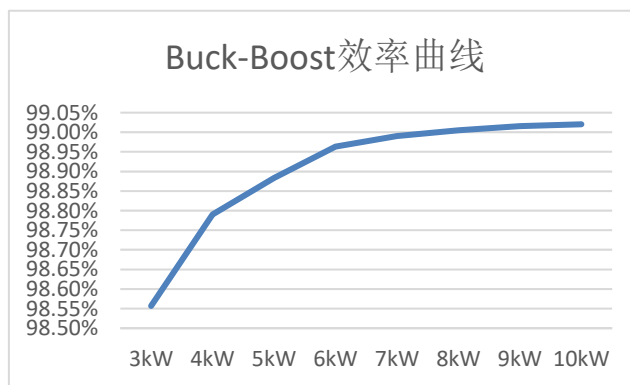


图 13 Buck-Boost SiC 方案效率曲线

3.2 SiC-MOSFET 并联均流技术

3.2.1 理论分析

功率管或任何通过电流的功率器件并联使用首要考虑的问题都是均流问题，而均流问题需从稳态和瞬态两方面考虑。

3.2.2 稳态分析

稳态分析即查看器件的温度特性，一般而言导通阻抗随温度升高而升高的器件是可以并联使用的，并且其具有一定的自动均流功能，即当某个管子上流过的电流较大时其结温上升，从而阻抗增大，阻抗的增大使流过其本体电流减小，以此实现均流调节过程。

ROHM 型号为 SCT3040KL SiC MOS 管的温度特性曲线如图 14 所示。图 14 所示 $R_{DS(on)}$ 的温度特性曲线为正温度系数且是单调的，即结温的上升会引起 $R_{DS(on)}$ 的单调上升。

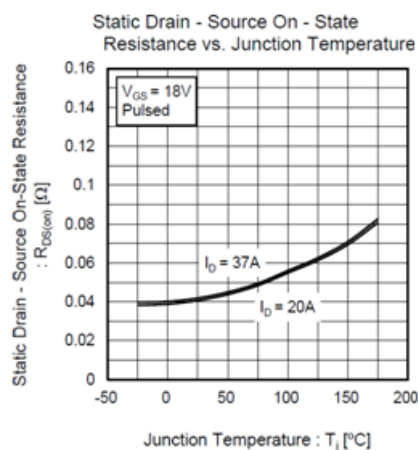


图 14 SCT3040KL $R_{DS(on)}$ VS T_j 曲线

从上分析可知 SCT3040KL 在稳态时可做并联使用。

3.2.3 瞬态分析

瞬态分析即开关状态分析。举个例子，两个开关管并联使用，由于驱动的不同时性（可能存在 ns 级别的差异）、器件的离散型，两个并联的器件是不可能同时开通关断的且其开通速度也不尽相同，这就使开通快的管子承受了开通时刻的更多电流，即产生更大的开通损耗；关断过程类似，关断慢的管子产生更多的关断损耗。另外，主回路上阻抗的差异也会对开关过程产生影响。

3.2.4 实验验证

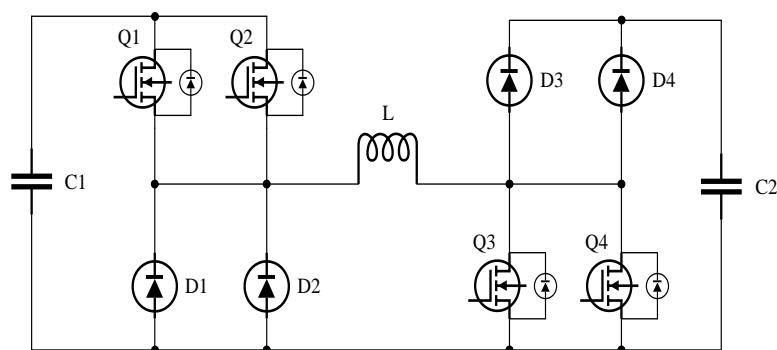


图 15 实验用拓扑

实验拓扑为单向 Buck-Boost 拓扑，开关管为两组 MOS 管并联，分别是 Buck 管 Q1/Q2

和 Boost 管 Q3/Q4，并联 MOS 管的驱动来自 DSP 的同一个 PWM 端口，但是不同的驱动芯片；续流二极管为两组二极管并联，分别是 Buck 二极管 D1/D2 和 Boost 二极管 D3/D4。

以下分 Boost 和 Buck 工况说明 SiC MOS 的均流情况。

3.2.4.1 稳态测试分析

稳态均流实测波形如图16所示。

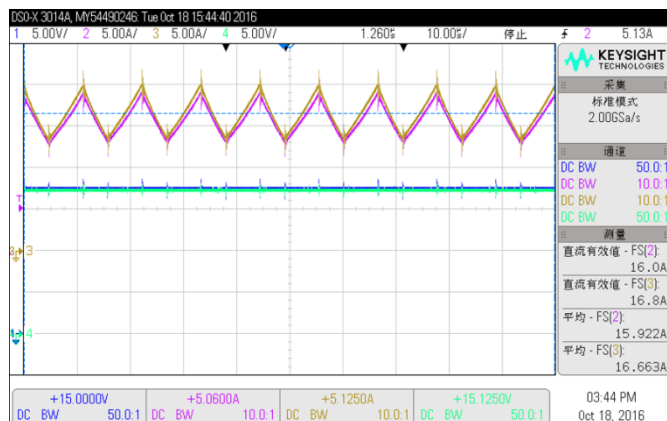


图 16 300V→700V MOS 管 Q1/Q2 电流波形

(蓝:Q1 Vgs;粉:Q1 Id;黄:Q2 Id;青:Q2 Vgs)

Boost 工况下 Q1/Q2 管保持常通状态，测试电流波形如图 16，该工况下 MOS 管 Q1 和 Q2 电流有效值分别为 16A、16.8A，电流有效值差 0.8A。实测试两支管子温升，Q2 比 Q1 的亮温高 7℃。

3.2.4.2 瞬态测试分析

(1) 开通瞬态

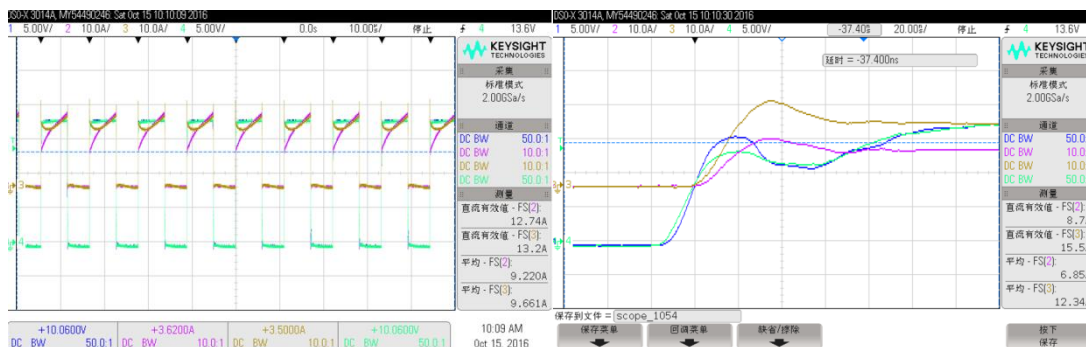


图 17 300V→700V MOS 管 Q3/Q4 电流波形

(蓝:Q3 Vgs;粉:Q3 Id;黄:Q4 Id;青:Q4 Vgs)

图 17 为 Boost 工况下 Q3/Q4 管的开通瞬间电流波形。在开通瞬间 Q3 管最大电流 14A，而 Q4 管最大电流 25A。Q4 管承受了大部分开通损耗。并且从图中可见 Q4 的驱动略早于(2ns)Q3 达到 VGS(th)。

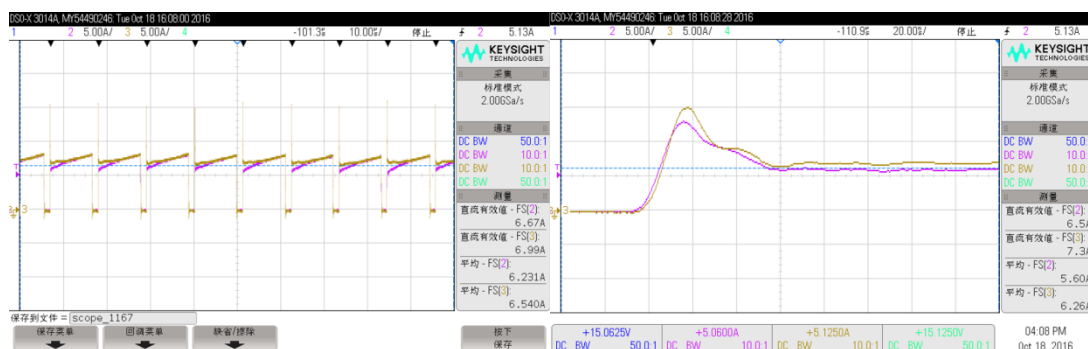


图 18 700V→580V MOS 管 Q1/Q2 电流波形 (粉:Q1 Id;黄:Q2 Id)

图 18 为 Buck 工况下 Q1/Q2 管开通瞬间电流波形，开通瞬间 Q1 管最大电流 13A，Q2 管最大电流 15A。Q2 管承受更多开通损耗。

(2) 关断瞬态

从图 19 可得出，Q4 管承受了大部分关断损耗，Q3 管更先关断。Q3 的驱动也是早于 Q4 的驱动下降。

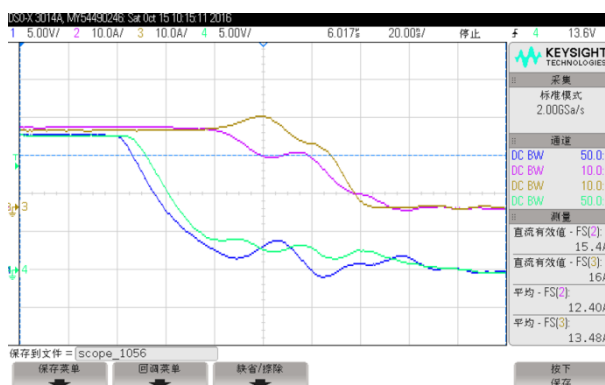


图 19 300V→700V MOS 管 Q3/Q4 电流波形
(蓝:Q3 Vgs;粉:Q3 Id;黄:Q4 Id;青:Q4 Vgs)

图 20 可知 Q2 管承受了更多的关断损耗，但是差异不大。

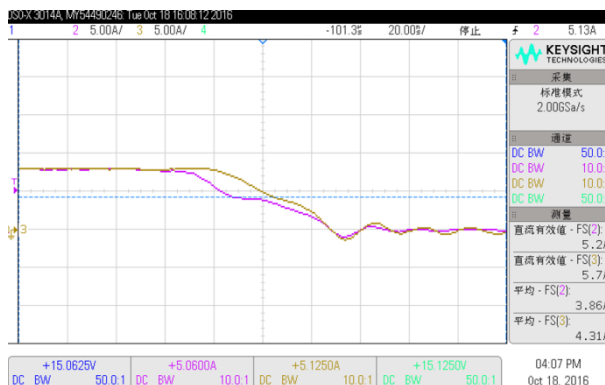


图 20 700V→580V MOS 管 Q1/Q2 电流波形 (粉:Q1 Id;黄:Q2 Id)

由以上测试数据可知，SiC MOSFET 管的开通瞬间不均流差异较大，排除示波器电流探头引起测试波形差异，对调电流探头测试结果一致。

测试 Boost 开关管差异最大，以下分析引起差异的原因。

a. 器件差异，对调 Q3/Q4 管子，依然是 Q4 位号的 MOS 管开通电流更大。管子的差异不是影响开关损耗差异的原因。

b. 功率回路差异，用不同测试方法，测试两个并联 MOS 管回路中电感感量测试数据如表 4。Q4 管的功率回路阻抗更小，理论上开通瞬间的电流是会大于 Q3 的。

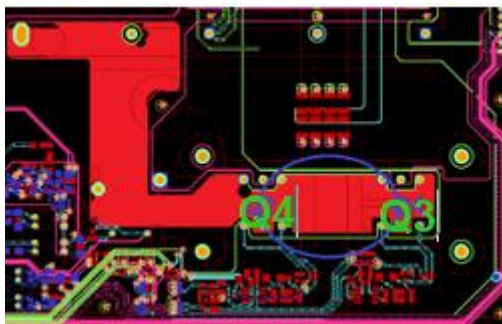


图 21 Q4/Q3 PCB 布局位置

表 4 阻抗对比

路径	手持 LCR 表测试值	Ly2810B 电桥测试值
电感→Q4	54.7mΩ	45mΩ
电感→Q3	55.1mΩ	60mΩ

c. 驱动差异，虽然 Q3/Q4 均使用同一组 PWM 口，但是由于使用了不同的驱动芯片和布局的差异，Q4 的驱动比 Q3 驱动更快达到 VGS(th)，快了约 2ns。

3.2.4.3 结论

(1) 稳态下，SiC MOSFET 管的并联使用没有问题，温升测试虽有差异，但差异可控，对并联的通流能力影响较小。

(2) 瞬态下，并联使用中驱动回路和主功率回路不能完全对称，加上开关速度比 Si MOS 更快，理论上受影响会比 Si MOS 更大，应用过程中需要重点关注。

3.3 SiC-Diode 并联均流技术

3.3.1 理论分析

3.3.1.1 稳态分析

图 22 所示为 C4D20120D 的温度特性曲线，IF≥4A 时，Tj 越高则 VF 越大，可见 IF≥4A 时该二极管适用于稳态下的并联使用。IF<4A 后，虽然 Tj 越高 VF 反而降低，但由于电流小，即使电流都由 1 个二极管承担也不会有什么问题的。

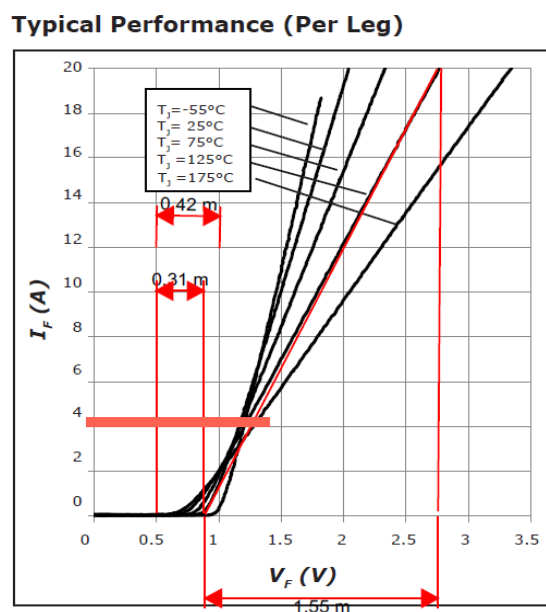


图 22 C4D20120D 的温度特性曲线

综上，C4D20120D SiC Diode 管可以稳态并联使用。

3.3.1.2 瞬态分析

瞬态所涉及的参考点依然很多，瞬态以实际反向恢复电流和温升测试结果为准。

3.3.2 实验结论

3.3.2.1 稳态分析

图 23 为 Buck 模式下二极管 D3/D4 的电流波形，均流度很好。

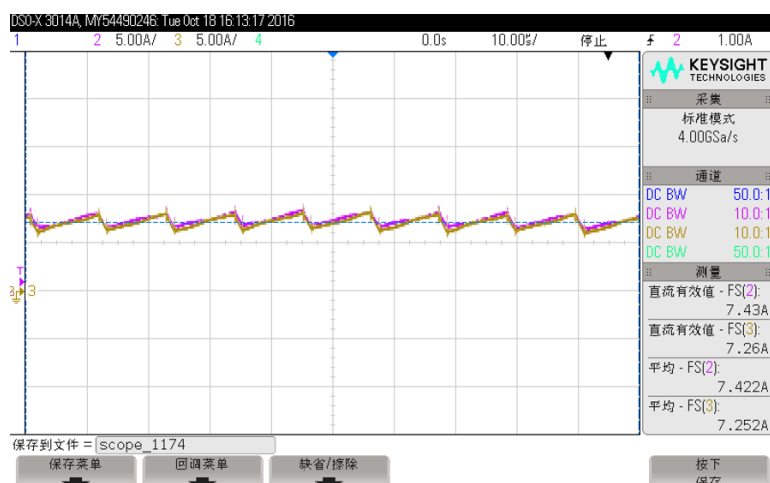


图 23 700V→580V 二极管 D3/D4 电流波形 (粉:D3 Id;黄:D4 Id)

3.3.2.2 瞬态分析

由图 24 可知，并联的二极管 D3/D4 的反向恢复基本一致，因此其瞬态的均流度也是

可以接受的。

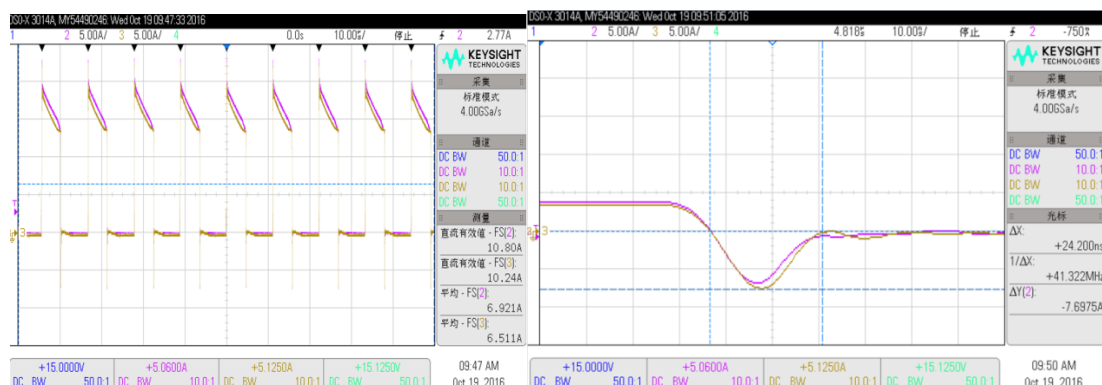


图 24 BOOST 工况 D3/D4 二极管反向恢复

3.3.2.3 温升测试结果

并联二极管温升测试差异最大的是 D3/D4 管，在 300V→700V 满载测试时两者壳温差 5.2℃。

3.3.3 结论

从以上测试结果来看，SiC 二极管并联使用，其稳态瞬态的均流性和温升差异较小。

4 总结与建议

4.1 SiC 器件在 DC/DC 充电模块应用总结

4.1.1 SiC 二极管应用

600V-1200V 的分立式 SiC 二极管器件，其产品相对成熟、使用较早，目前多个国际和国内的生产商可以供货。SiC 二极管的并联均流特性较好。

4.1.2 SiC-MOSFET 应用

SiC 器件在应用过程中，需要注意如下几个问题：

(1) 驱动电路设计：驱动电平比较特殊，特别是负压电平较低，容易出现误导通；高频驱动回路寄生参数对于高频驱动波形影响较大；

(2) SiC 器件在主功率拓扑中，其电压应力对于主电路参数比较敏感；需要对主功率器件的布局，尽量减小主回路参数；

(3) SiC 器件的开关频率比较高，会引起比较严重的 EMI 问题。这点从开关速度、主回路寄生参数、EMI 方案等方面，进行综合考虑。

4.2 对 SiC 器件厂家建议

(1) 在分立器件产品上，希望有 TO-247-4、TO-268 等寄生参数较小的封装形式；

(2) SiC-MOSFET 方面，在 1200V 等级的 SiC 器件上，需要进一步减小导通阻抗，扩大其功率应用范围。

参考文献

- [1] GB/T 18487.1-2015 电动车辆传导充电系统一般要求
- [2] GB/T 18487.2-2001 电动车辆传导充电系统电动车辆与交流 / 直流电源的连接要求
- [3] GB/T 18487.3-2001 电动车辆传导充电系统电动车辆交流 / 直流充电机(站)
- [4] GB/T 20234.1-2011 电动汽车传导充电用连接装置第 1 部分：通用要求
- [5] GB/T 20234.3-2011 电动汽车传导充电用连接装置第 3 部分：直流充电接口
- [6] GB/T 2423.1-2008 电工电子产品环境试验第 2 部分：试验方法试验 A：低温
- [7] GB/T 2423.2-2008 电工电子产品环境试验第 2 部分：试验方法试验 B：高温
- [8] GB/T 2423.3-2006 电工电子产品环境试验第 2 部分：试验方法试验 Cab：恒定湿热试验
- [9] GB/T 2423.5-2008 电工电子产品环境试验第 2 部分：试验方法试验 Ea 和导则：冲击
- [10] GB/T 2423.10-2008 电工电子产品环境试验第 2 部分：试验方法试验 Fc 和导则：震动（正弦）
- [11] GB/T 17626.2-2006 电磁兼容试验和测量技术静电放电抗扰度试验
- [12] GB/T 17626.3-2006 电磁兼容试验和测量技术射频电磁场辐射抗扰度试验
- [13] GB/T 17626.4-2008 电磁兼容试验和测量技术电快速瞬变脉冲群抗扰度试验
- [14] GB/T 17626.5-2008 电磁兼容试验和测量技术浪涌(冲击)抗扰度试验
- [15] GB/T 29317-2012 电动汽车充换电设施术语
- [16] GB/Z 17625.6-2003 电磁兼容限值对额定电流大于 16A 的设备在低压供电系统中产生的谐波电流的限制
- [17] NB/T 33001-2010 电动汽车非车载传导式充电机技术条件
- [18] NB/T 33008.1-2013 充电设备检验试验规范第一部分：电动汽车非车载充电机检验试验规范
- [19] NB/T 33008.3-2013 充电设备检验试验规范第三部分：电动汽车直流充电桩检验试验规范

