

NDANEV | 微课堂 第25期

SiC车用电机控制器 研发进展

04月08日 19:30-20:30

课程提纲

- 一、新能源汽车与车用电机驱动系统
- 二、SiC器件及其在新能源汽车的应用
- 三、37.1kW/L全SiC电机驱动控制器研究进展

中国科学院电工研究所研究部主任

温旭辉



扫码回看第25期视频



查看全部微课堂课程



关注联盟微信公众号



车用SiC电机驱动控制器研发

温旭辉

中国科学院电工研究所

2021年4月8日



报告内容

1

新能源汽车与车用电机系统的发展

2

SiC器件及其在车用电机系统的应用

3

中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

4

小结



报告内容

1

新能源汽车与车用电机系统的发展

2

SiC器件及其在车用电机系统的应用

3

中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

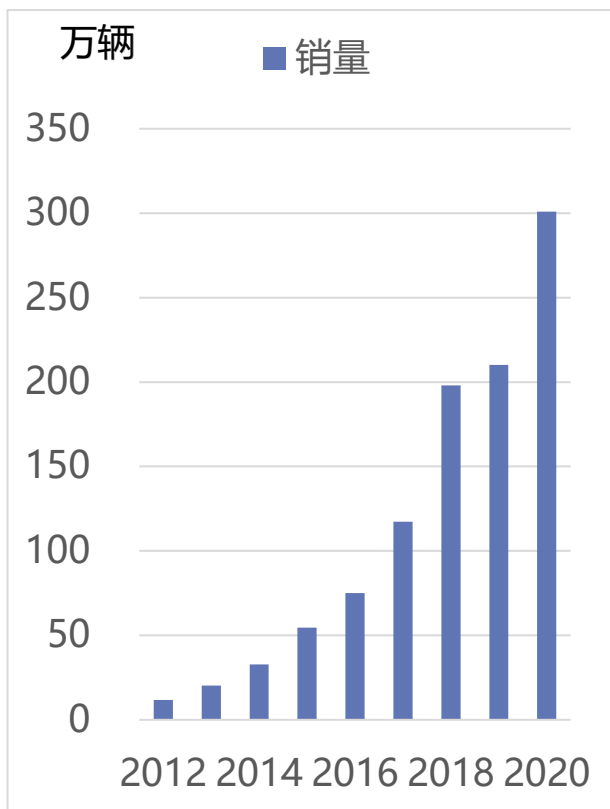
4

小结

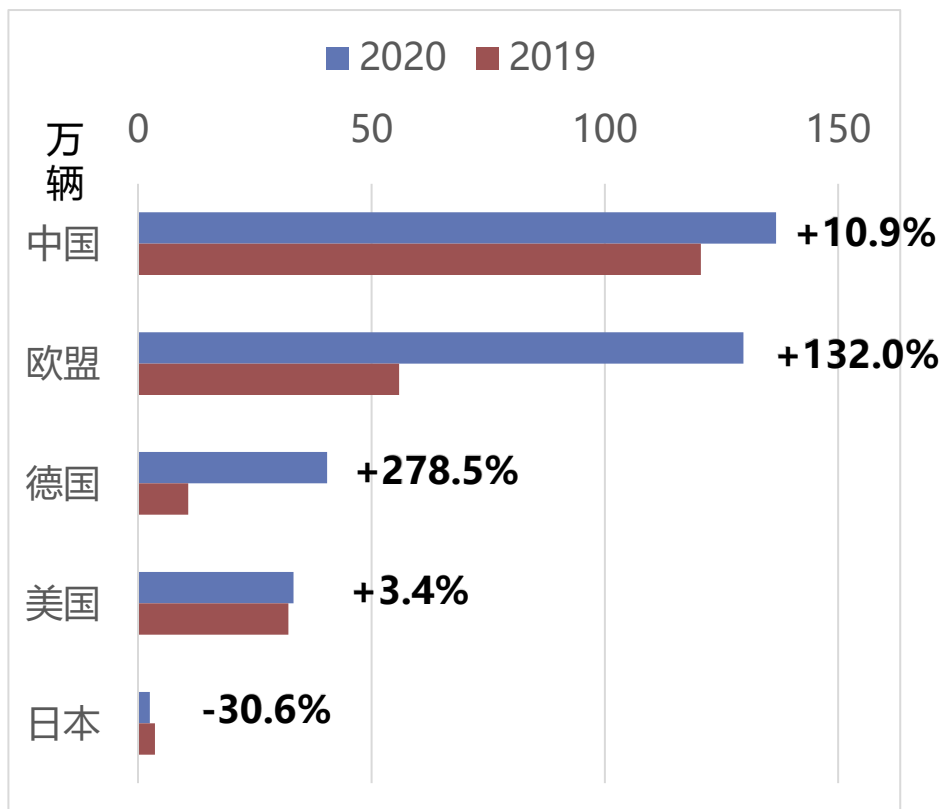


全球新能源汽车加速发展、电动化转型进程加快

- 全球新能源汽车市场加速发展。2020年全球汽车市场销量整体下滑，新能源汽车销量逆势增长43%，以德国为代表的欧盟国家和大众、丰田、沃尔沃等车企加速转型。
- 根据预测，2030年，全球新能源汽车保有量最高将达到2.45亿辆。



2012-2020全球新能源汽车销量态势

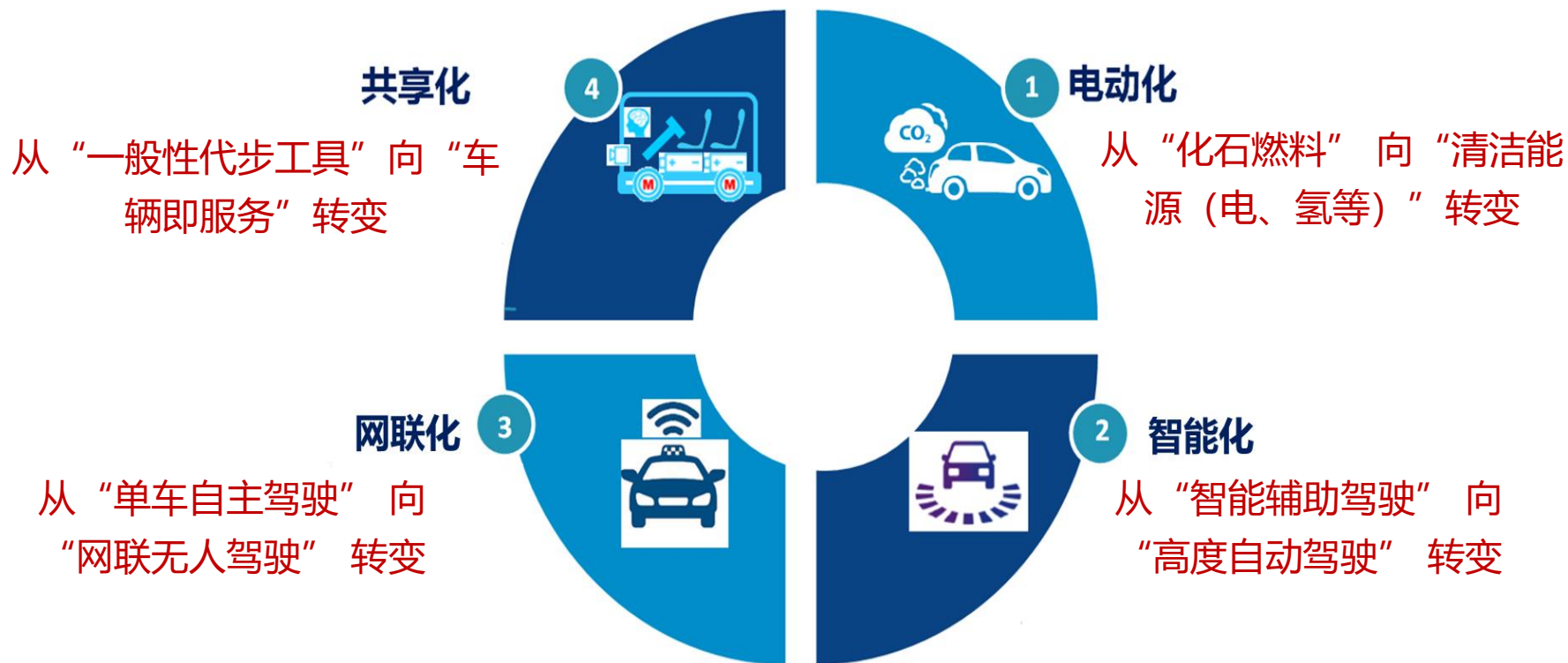


全球主要新能源汽车市场销量对比



新能源汽车电动化、智能化、网联化、共享化趋势

新一轮科技革命和产业变革汹涌而至，汽车产业出现了“电动化、智能化、网联化、共享化”相互赋能、系统变革的大潮，全球汽车产业正进入百年未遇的大变革时代。





报告内容

1

新能源汽车与车用电机系统的发展

2

SiC器件及其在车用电机系统的应用

3

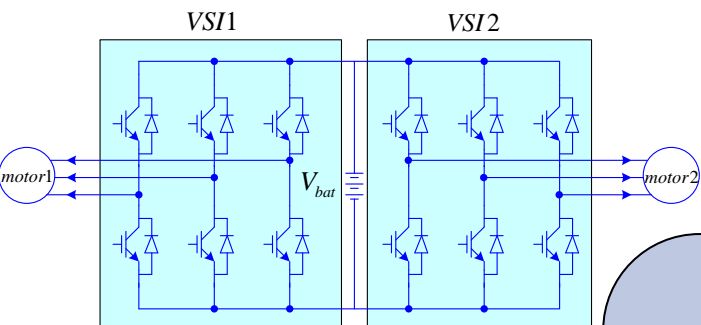
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

4

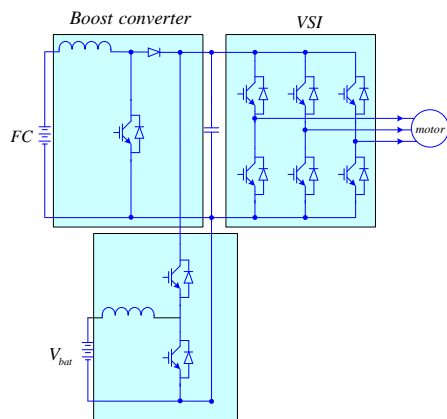
小结



SiC器件及其在车用电机系统的应用

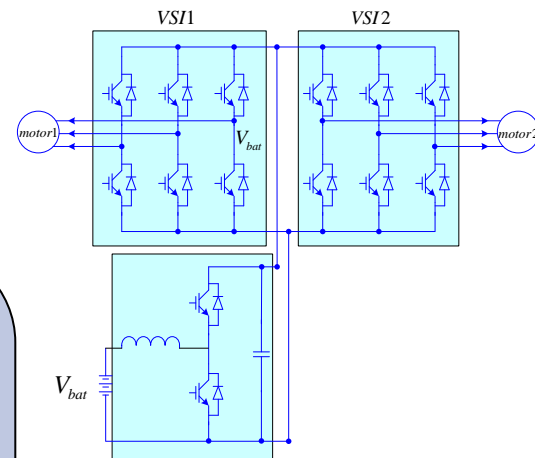
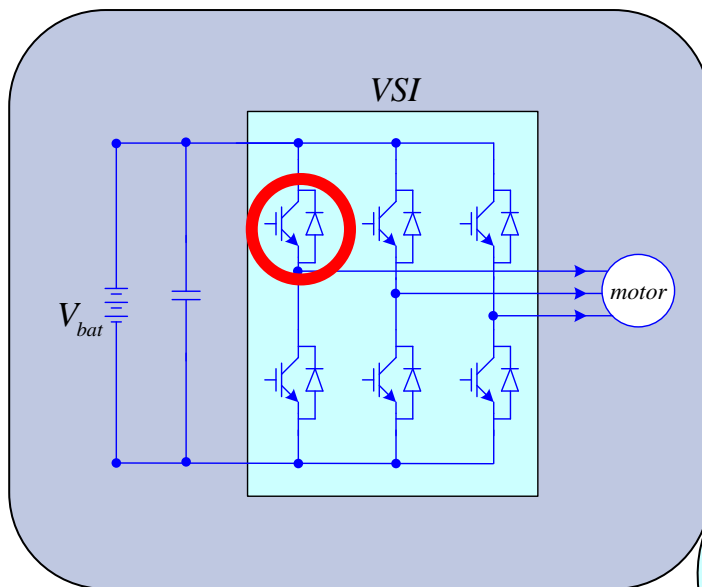


Two motor drive system

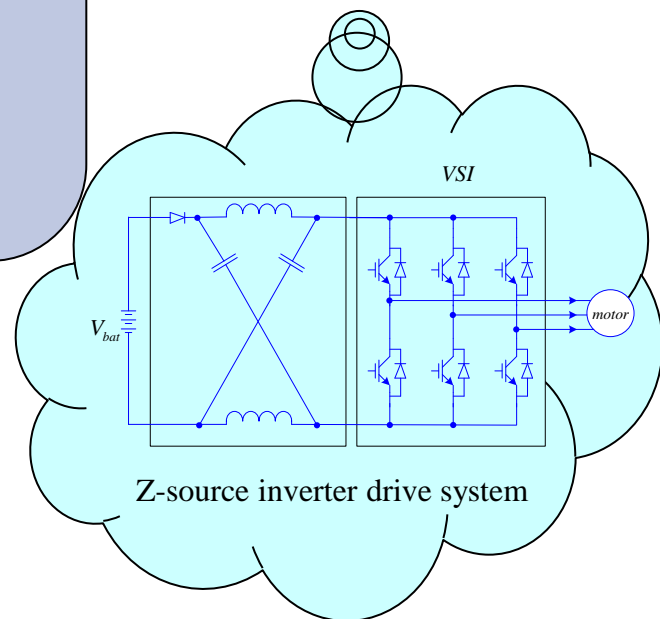


Bi-directional converter

fuel cell drive system



Two motor drive system with bi-directional converter

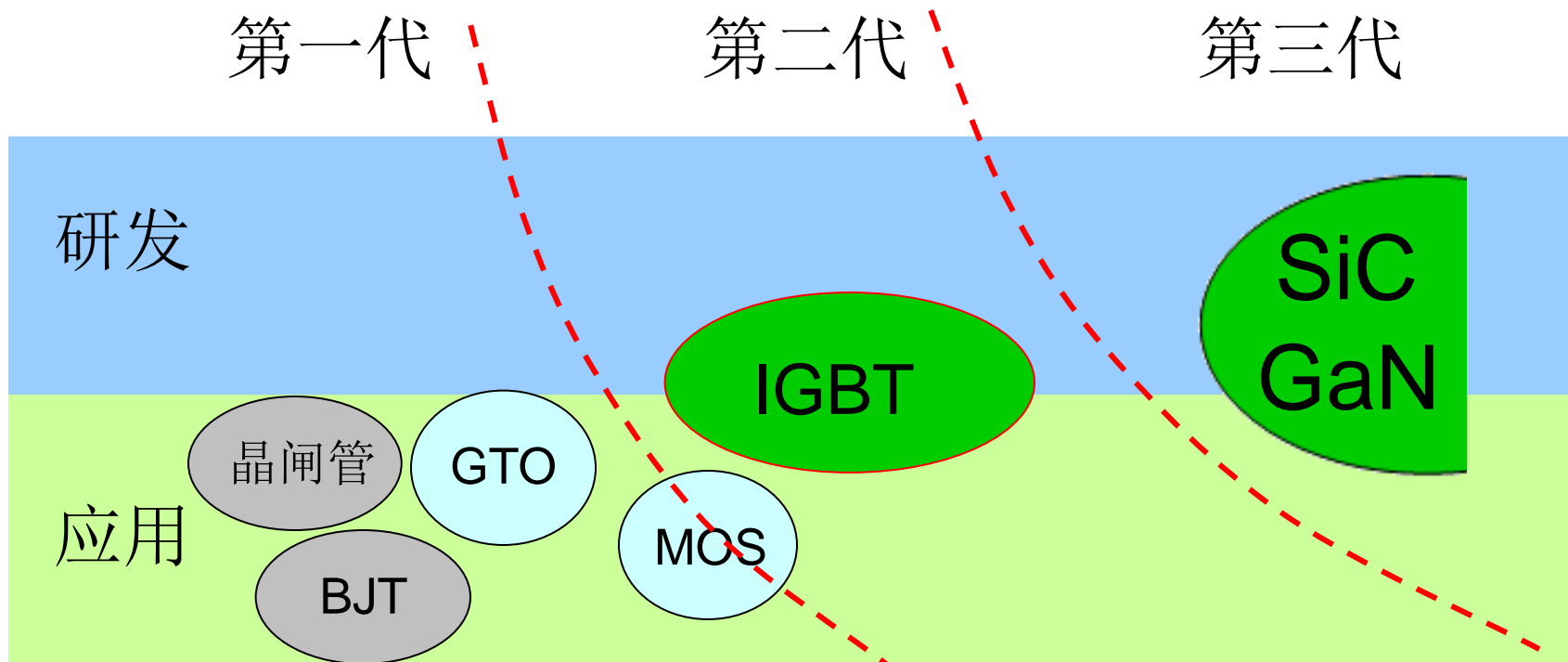


Z-source inverter drive system

车用逆变器拓扑



SiC器件及其在车用电机系统的应用



1950

1970

1990

2000

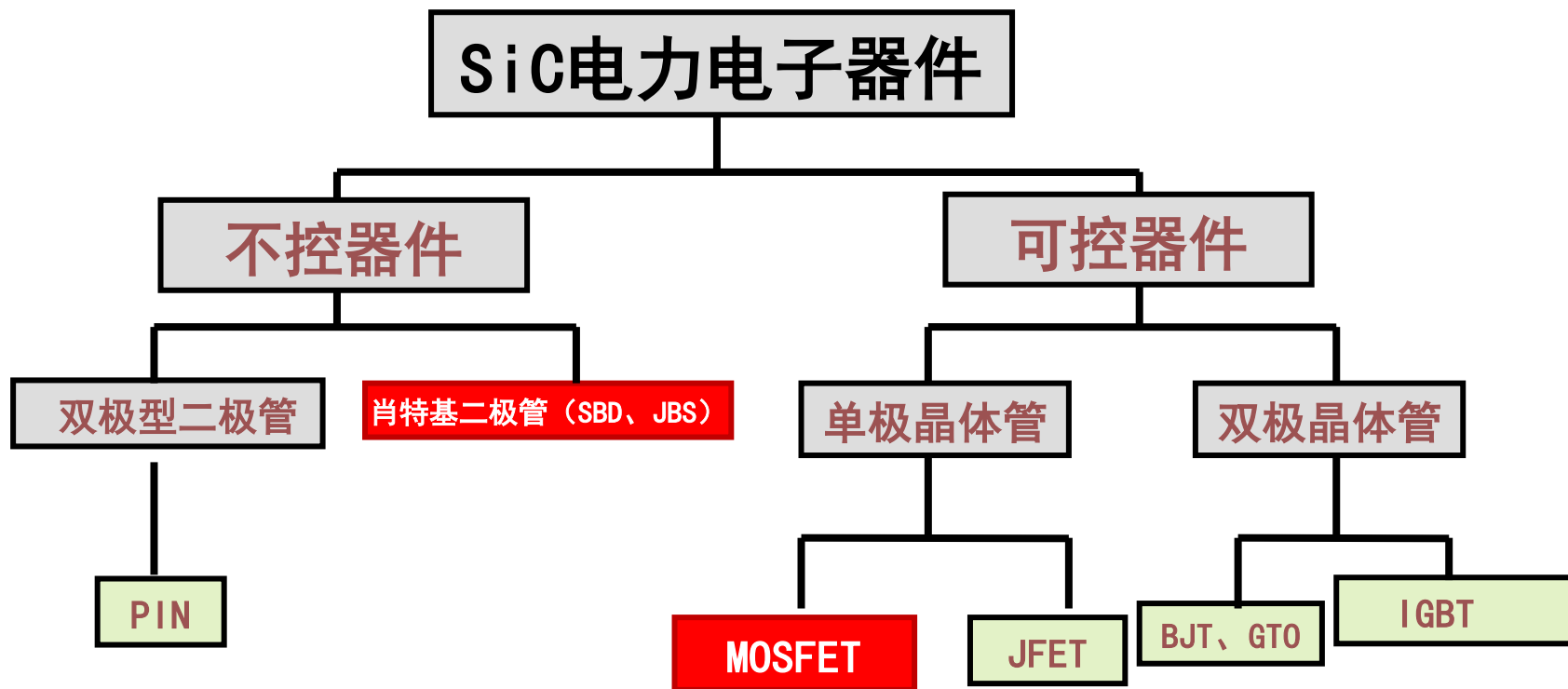
2010

2020

电力电子器件的发展



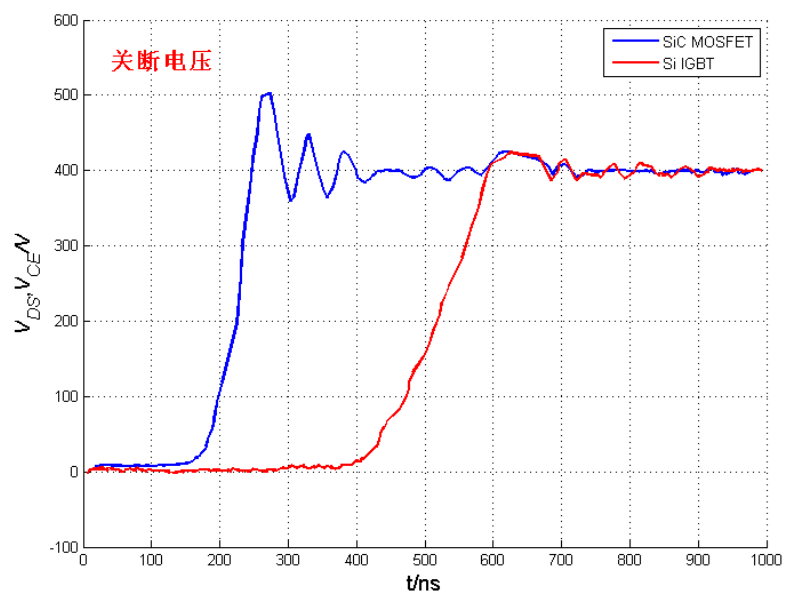
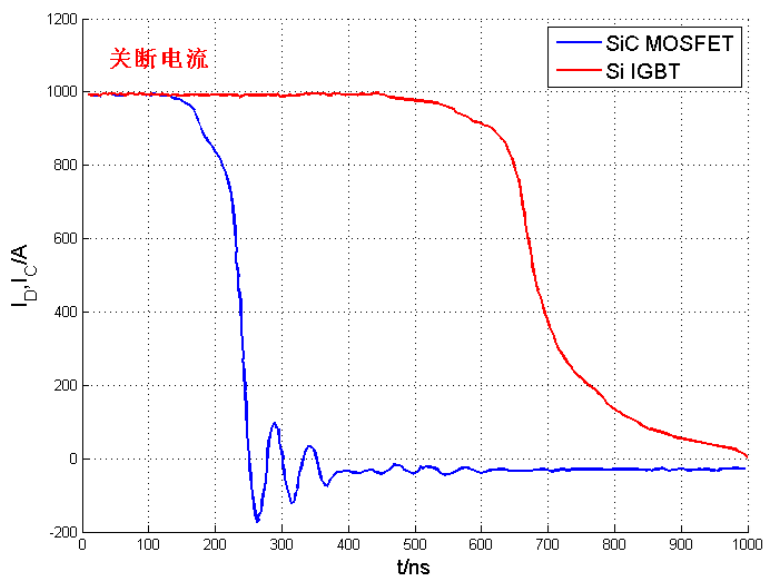
SiC器件及其在车用电机系统的应用





SiC器件及其在车用电机系统的应用

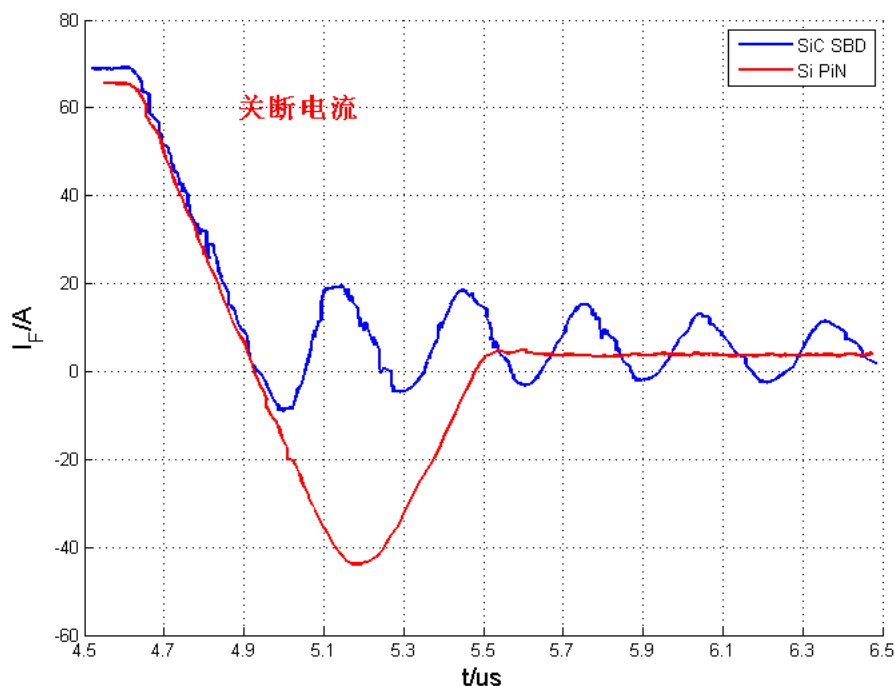
- SiC MOSFET是单极性器件，Si IGBT是双极性器件
- SiC MOSFET关断没有载流子复合过程，没有拖尾电流
- SiC MOSFET关断时间 < 100 ns，优于Si IGBT





SiC器件及其在车用电机系统的应用

- SiC SBD是单极性器件，Si FRD是双极性器件
- SiC SBD关断没有载流子复合过程，没有反向恢复电流

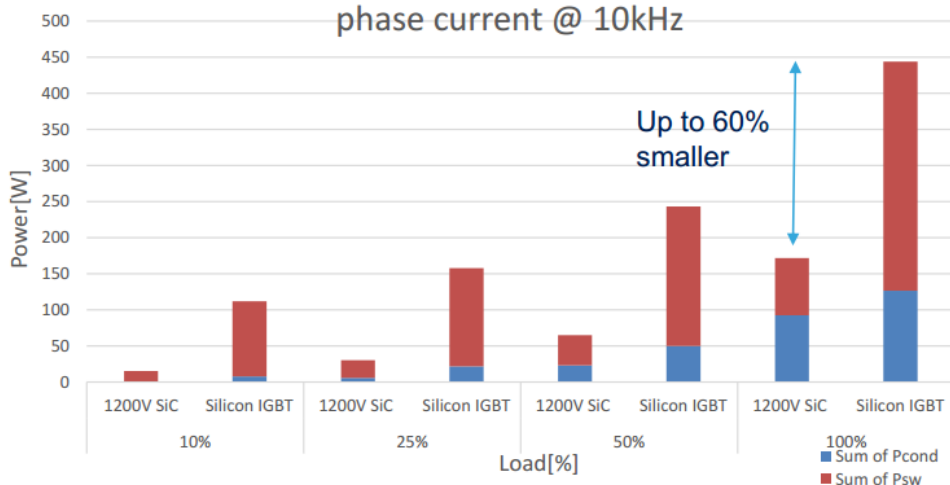




SiC器件及其在车用电机系统的应用

SiC MOSFET System Benefits Reducing Die-size

Power Losses Comparison at nominal continuous phase current @ 10kHz



- 200 A_{rms} continuous
- DC-link voltage: 750V_{dc}
- Switching frequency: 10 kHz
- T_{fluid} = 65°C

Silicon Solution: Silicon + Diode
4x100 mm² + 4x50 mm²



5x smaller semiconductor area

SiC MOSFET GEN 3
Solution: 6x20 mm²



Power Transistor
Division

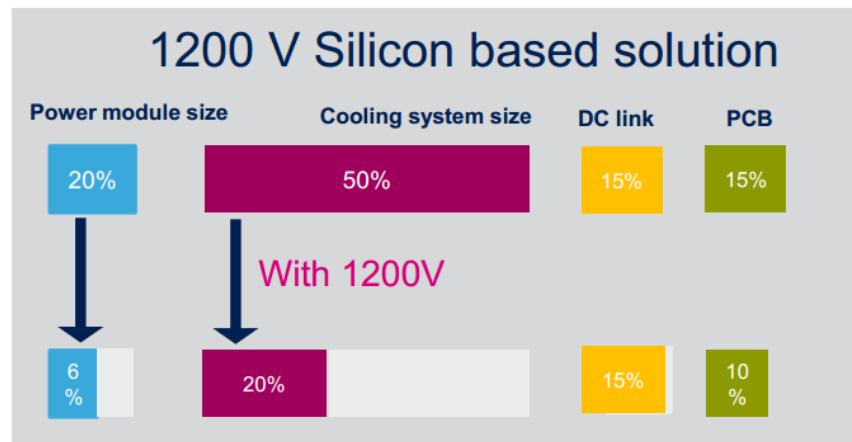
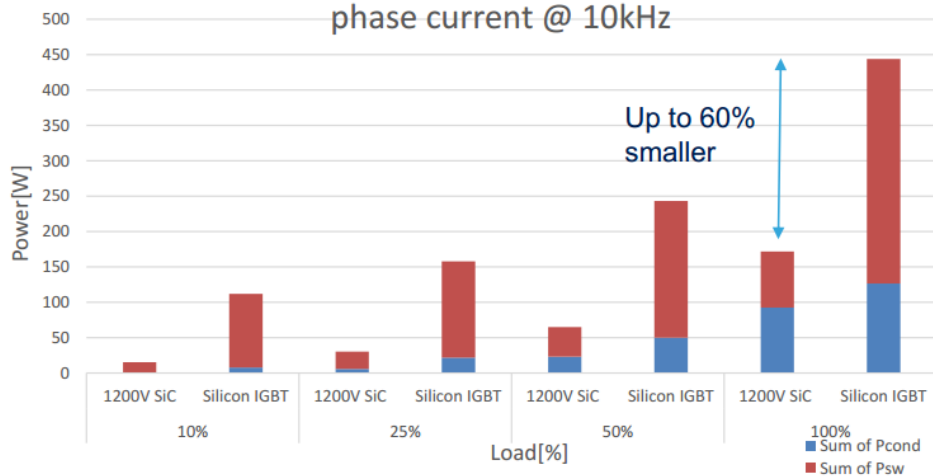
Source: *Silicon Carbide Enabling Car Electrification*,
Vittorio Giuffrida, STMicroelectronics, APEC2019



SiC器件及其在车用电机系统的应用

SiC MOSFET System Benefits Reducing PCU Size

Power Losses Comparison at nominal continuous phase current @ 10kHz



- $200A_{rms}$ continuous
- DC-link voltage: $750V_{dc}$
- Switching frequency: 10 kHz
- $T_{fluid} = 65^{\circ}C$



Up to 50% smaller PCU



Power Transistor
Division

Source: *Silicon Carbide Enabling Car Electrification*,
Vittorio Giuffrida, STMicroelectronics, APEC2019

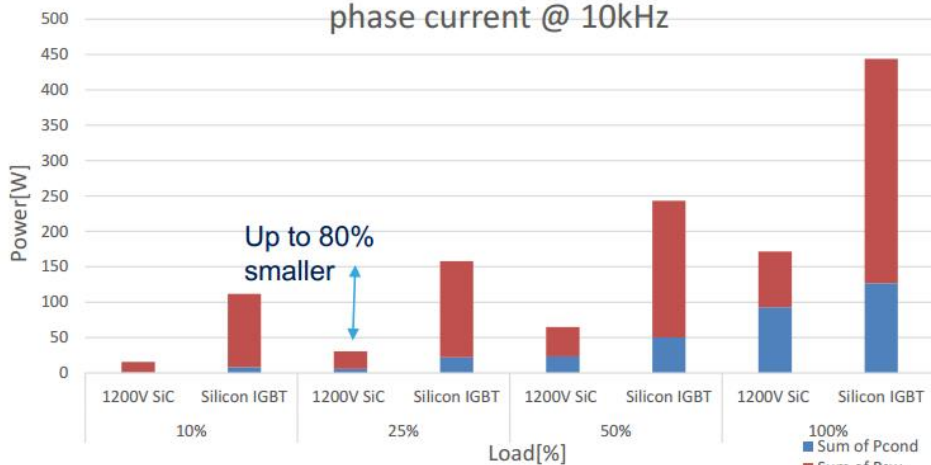


SiC器件及其在车用电机系统的应用

SiC MOSFET System Benefits Increased Mileage

- $200A_{rms}$ continuous
- DC-link voltage: $750V_{dc}$
- Switching frequency: 10 kHz
- $T_{fluid} = 65^{\circ}C$

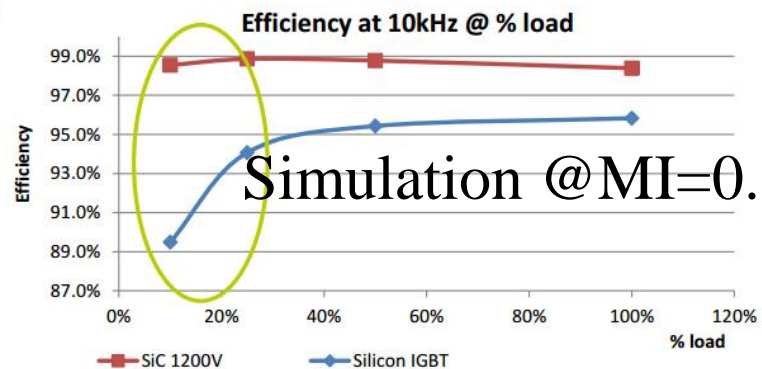
Power Losses Comparison at nominal continuous phase current @ 10kHz



Silicon → SiC MOSFET

From 2% to 9% higher efficiency

Total of Psw
Total of Pcond



Power Transistor
Division

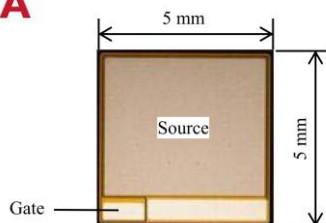
Source: *Silicon Carbide Enabling Car Electrification*,
Vittorio Giuffrida, STMicroelectronics, APEC2019



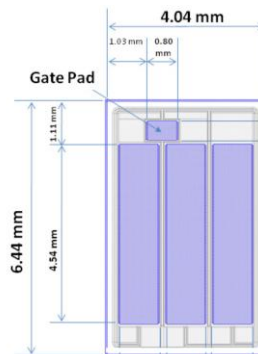
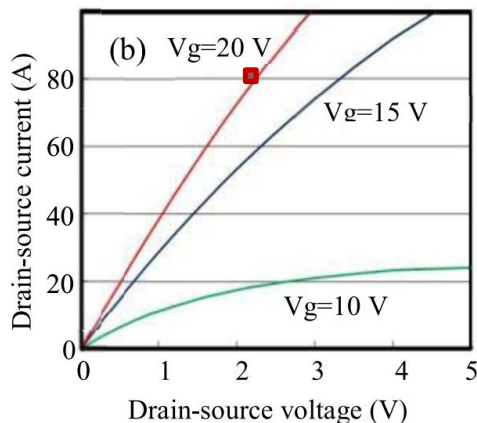
SiC器件及其在车用电机系统的应用



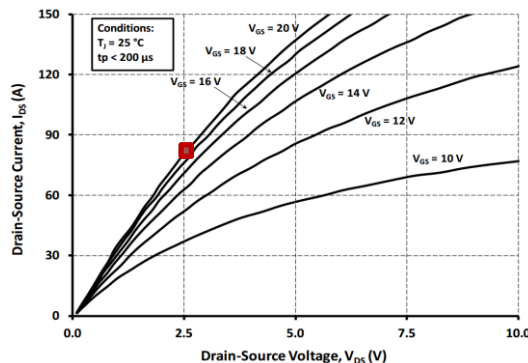
DENSO



所研发的SiC MOSFET
 $R_{ds(on)}=27\text{m}\Omega$ (25°C)



Cree公司CPM2-1200-0025B
 $R_{ds(on)}=25\text{m}\Omega$ (25°C)



输出特性对比

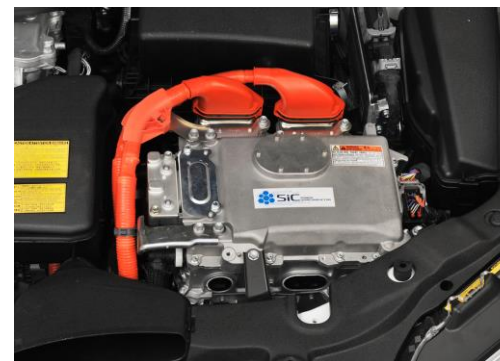
Source: Kimimori Hamada, etc., "SiC—Emerging Power Device Technology for Next-Generation Electrically Powered Environmentally Friendly Vehicles," *IEEE Trans. Elec. Devi.*, 2015



SiC试验车 (Prius) 2014年



SiC试验车 (Camry) 2015年



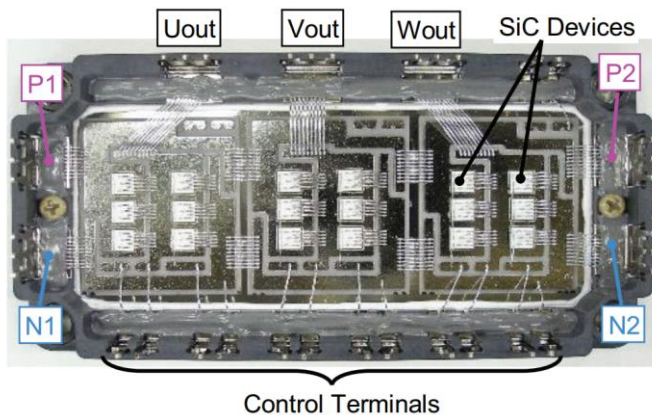
SiC MCU

Source: <https://newsroom.toyota.co.jp/en/detail/5692153>,
Toyota to Trial New SiC Power Semiconductor Technology, Jan. 29, 2015

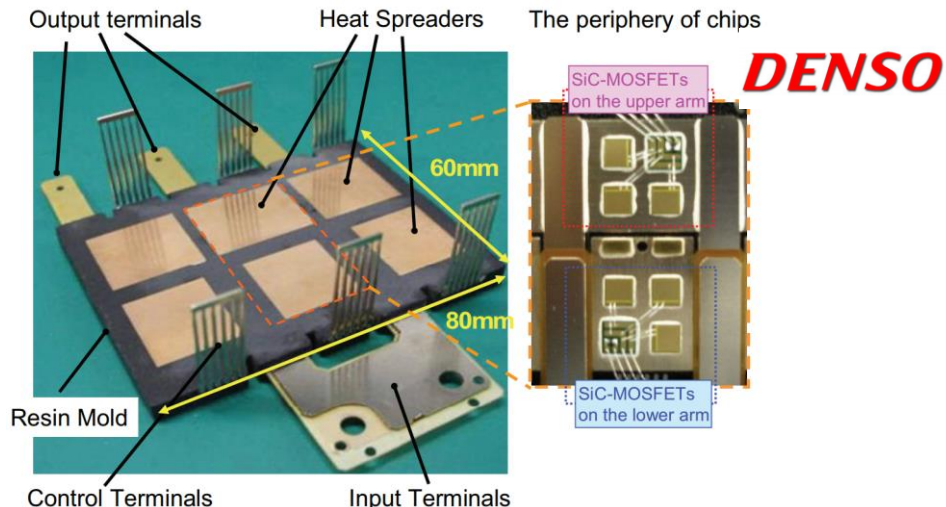


SiC器件及其在车用电机系统的应用

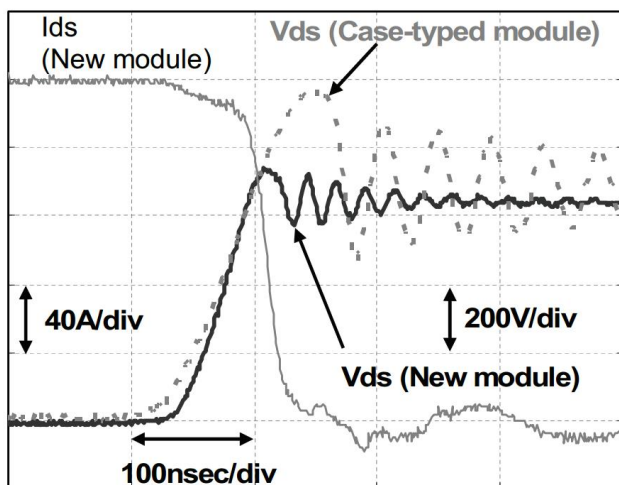
Source: Hiroshi Ishino, etc., "6-in-1 Silicon Carbide Power Module for High Performance of Power Electronics Systems," *IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 2014*



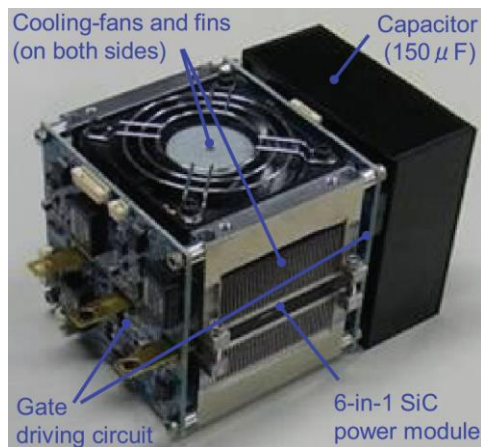
6 in 1 键合式SiC模块 (2 SiC MOSs/1 SBD per switch)



6 in 1 平面封装SiC模块 (3 SiC MOS/ no SBD per switch)



两种模块关断过程对比, $L_{stray}=7.5nH$, **80% lower**

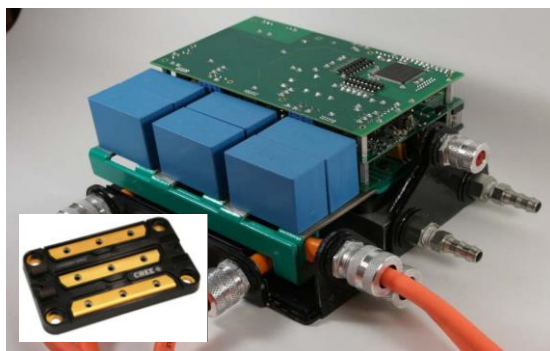


指标	数值
输入电压	650Vdc
体积	0.75L
输出电流	130Arms
输出功率	75kW
冷却方式	风冷
功率因数	0.85
功率密度	100kW/L
效率	99%
开关频率	10kHz

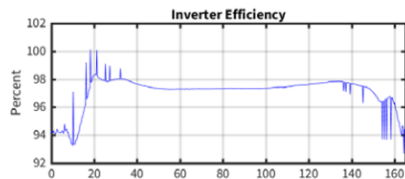
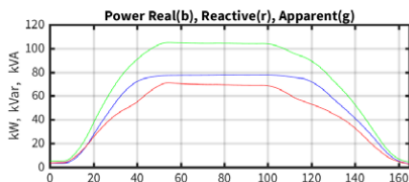


SiC器件及其在车用电机系统的应用

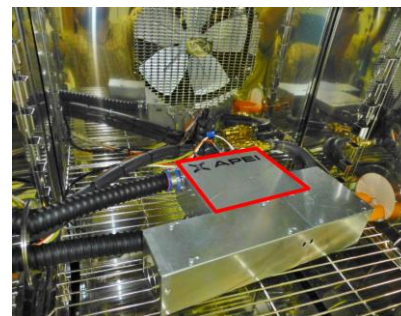
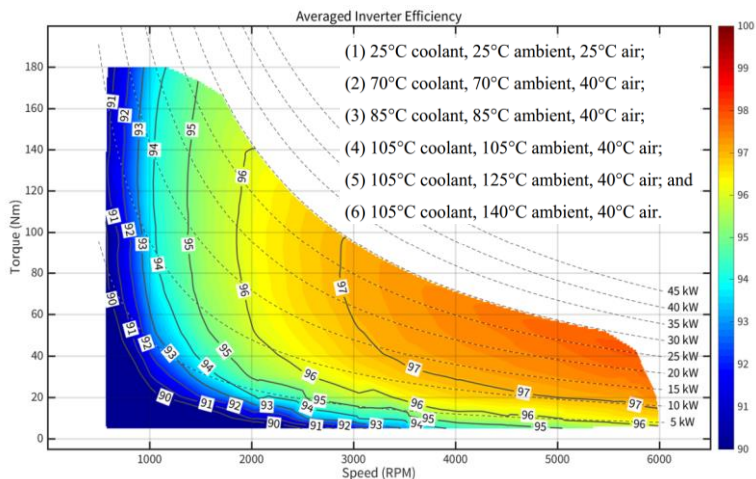
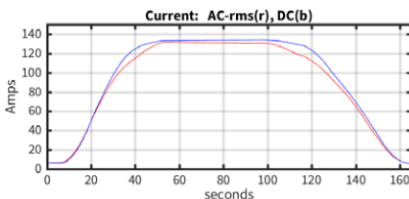
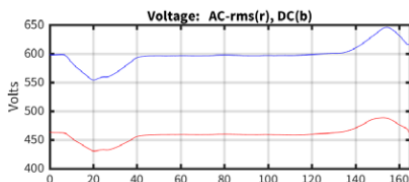
Source: K. Olejniczak, etc., "A Compact 110 kVA, 140° C Ambient, 105° C Liquid Cooled, All-SiC Inverter for Electric Vehicle Traction Drives," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2017*



指标	数值
SiC MOS	25mOhm
SBD	50A
每开关芯片数	7/6
模块Vds	1200V
模块Rds	3.6mOhm
拓扑	单相半桥
质量	6.6kg
体积	4.8L
峰值电流	135Arms
供电电压	600Vdc
效率	97.4%
功率因数	0.75
功率	77.9kW
功率密度	16.2kW/L

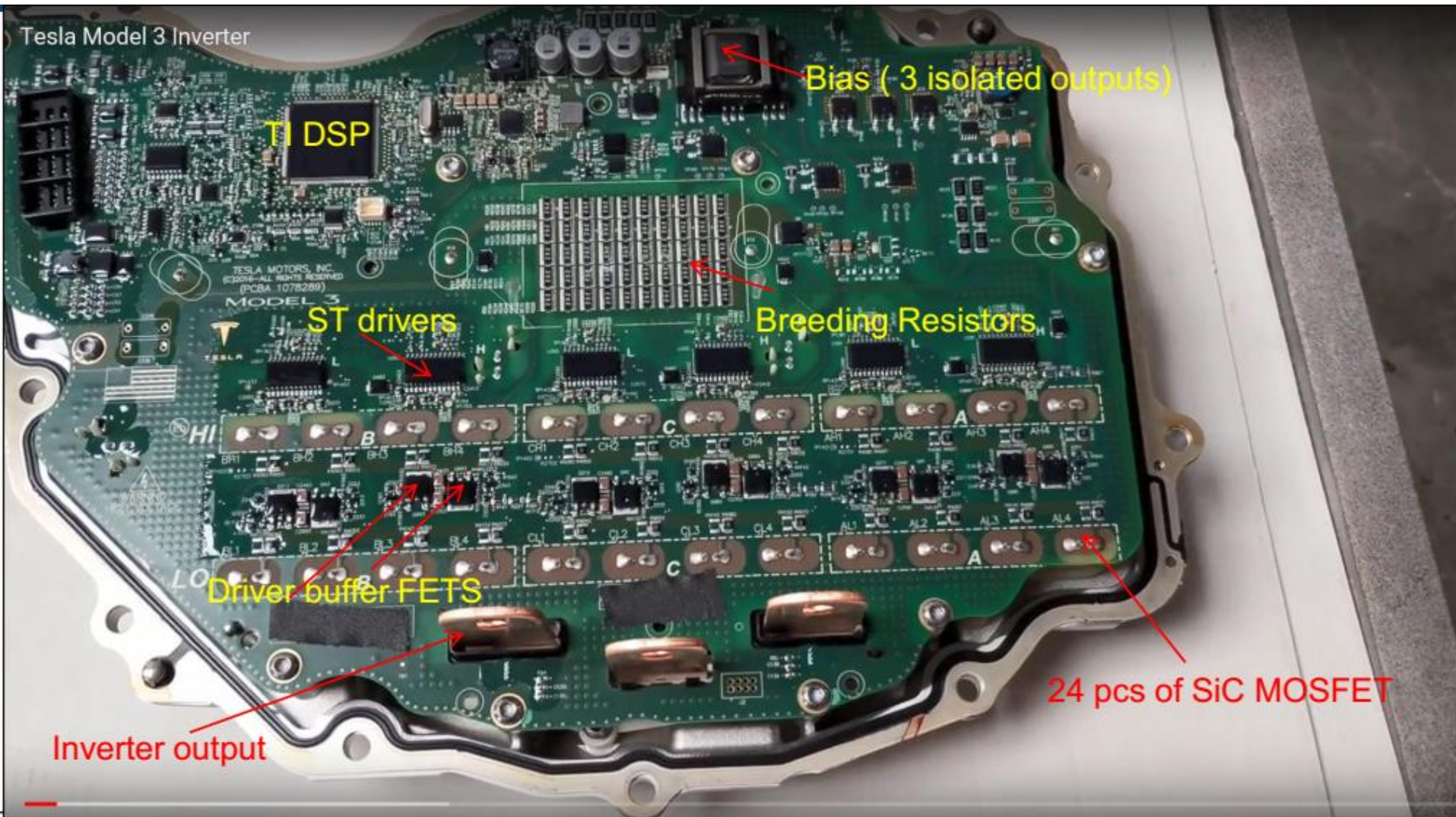


CREE ⇄





SiC器件及其在车用电机系统的应用





SiC器件及其在车用电机系统的应用



<http://www.inventchip.com.cn/pages/tesla%20model.html>



SiC器件及其在车用电机系统的应用



<http://www.inventchip.com.cn/pages/tesla%20model.html>



报告内容

1

新能源汽车与车用电机系统的发展

2

SiC器件及其在车用电机系统的应用

3

中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

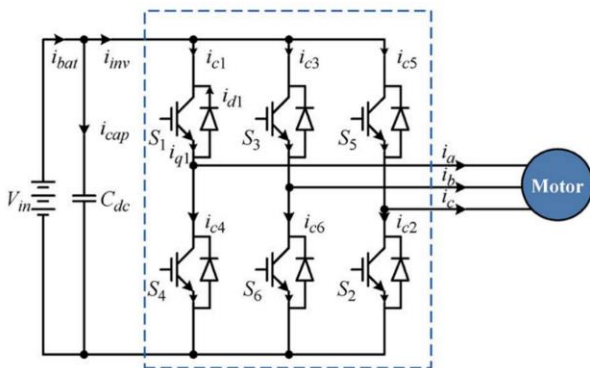
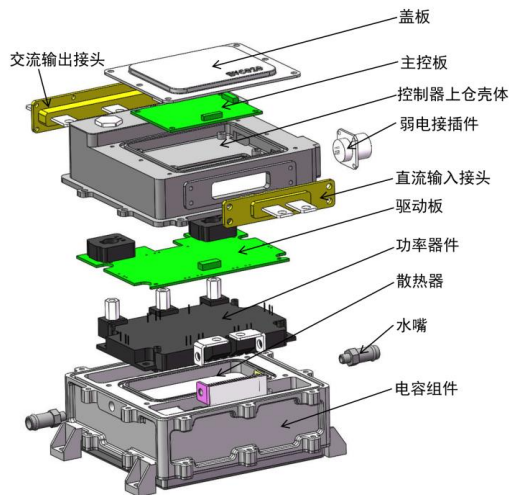
4

小结



中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

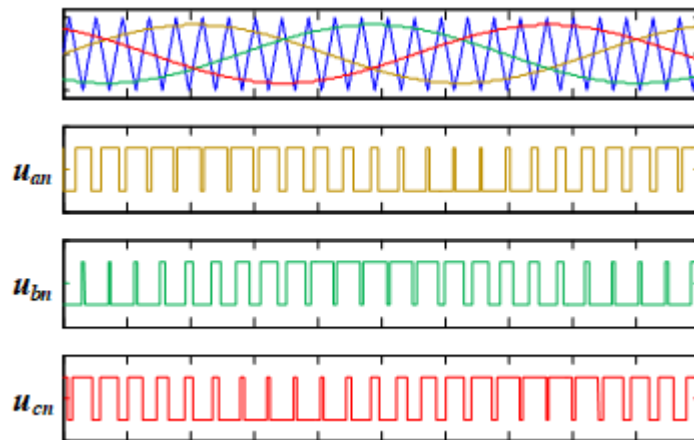
问题：实现高密度集成和高效控制



□ 利用SiC器件高温特性

□ 利用SiC器件高频特性

□ 利用SiC器件高效特性

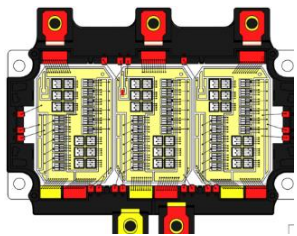




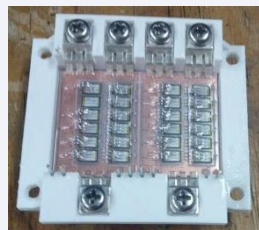
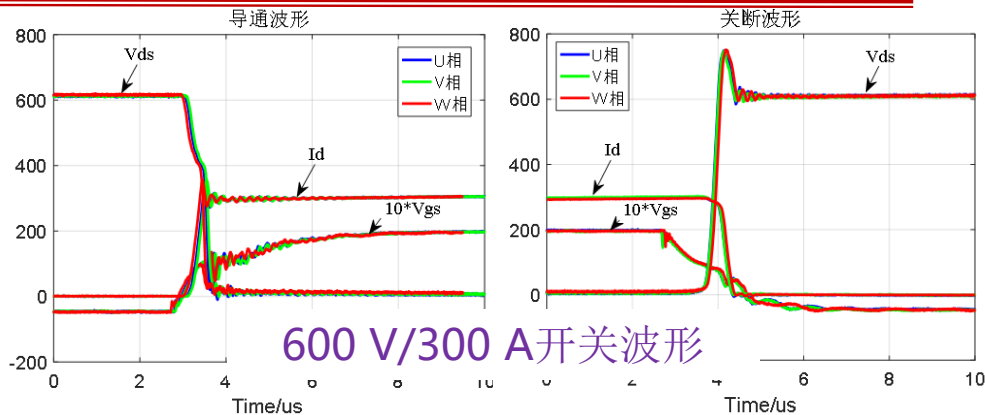
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

利用SiC器件高温特性

72个SiC芯片
是已发表文献中芯片
数量最多的SiC模块



开通96 ns, 关断98 ns, 热阻 0.27°C/W , 热流密度 165 W/cm^2



首轮1200 V/600 A SiC模块

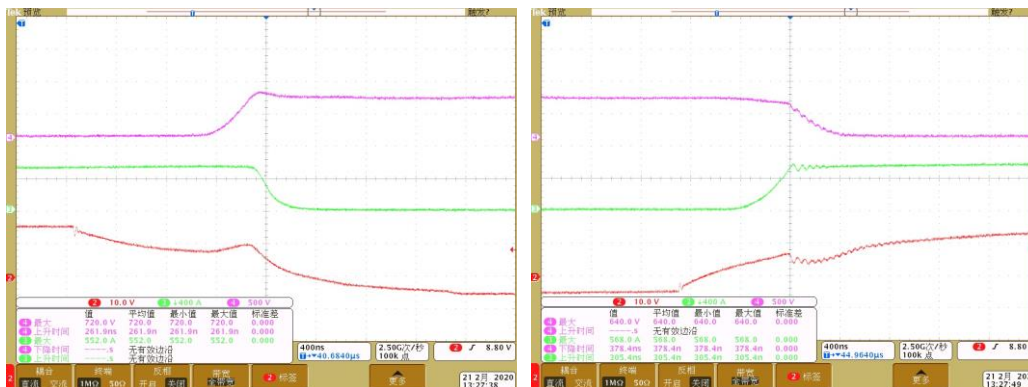
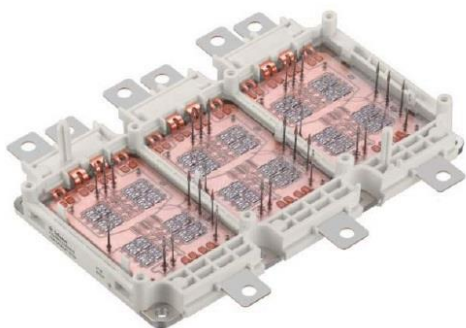
热流密度达到 153 W/cm^2
正在进行电气测试

机构	电气性能	尺寸规格 mm^3	功率密度	散热	耐温	相数
CREE CAS300M12BM2	1200 V/300 A	$106.4 \times 61.4 \times 29$	1.9	无Pinfin	150	单相
CREE CAS325M12HM2	1200 V/325 A	$110 \times 65 \times 10$	5.45	无Pinfin	150	单相
Rohm BSM400D12P2G003	1200 V/400 A	$152 \times 62 \times 17$	3	无Pinfin	150	单相
本课题模块首轮300A模块	1200 V/300 A	$140 \times 110 \times 12$	5.84	有Pinfin	200	三相
本课题首轮600A模块	1200 V/600 A	$76 \times 74 \times 9.5$	13.5	有Pinfin	200	单相



中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

利用SiC器件高温特性



1200 V, 600 A SiC键合型模块

600 V/600 A开关波形

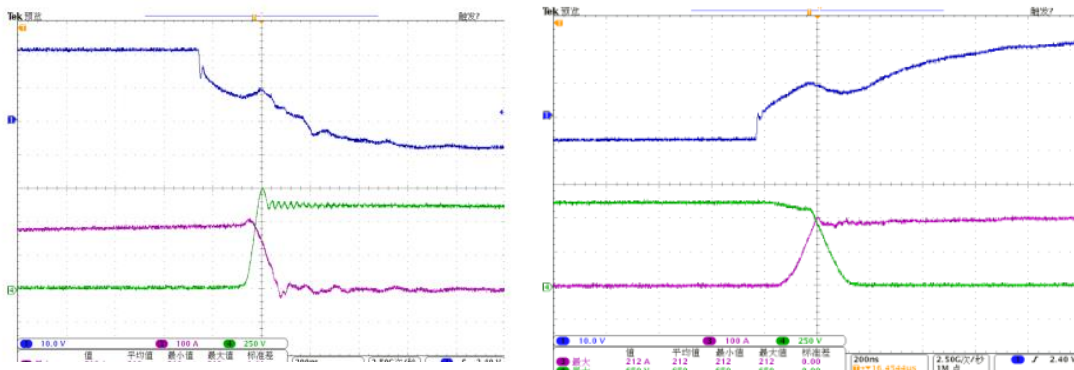
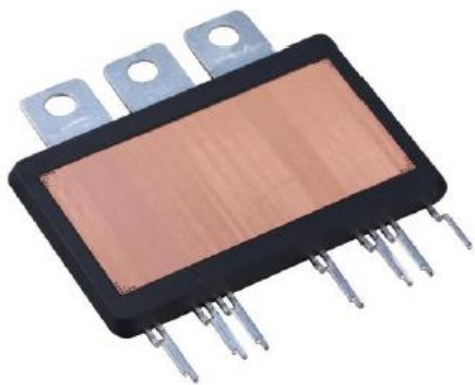
热阻 0.143°C/W , 热流密度 200 W/cm^2

机构	电气性能	尺寸规格 mm^3	功率密度	耐温	相数
CREE CAS300M12BM2	1200 V/300 A	$106.4 \times 61.4 \times 29$	1.9	150	单相
CREE CAS325M12HM2	1200 V/325 A	$110 \times 65 \times 18$	3	150	单相
Rohm BSM400D12P2G003	1200 V/400 A	$152 \times 62 \times 25$	2	150	单相
本课题	1200 V/600 A	$154 \times 126.5 \times 23$	4.8	200	三相



中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

利用SiC器件高温特性



600 V/600 A 开关波形

1200 V, 600 A SiC平面型模块

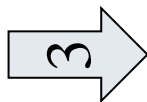
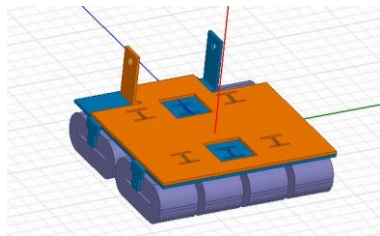
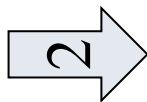
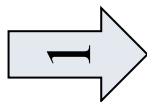
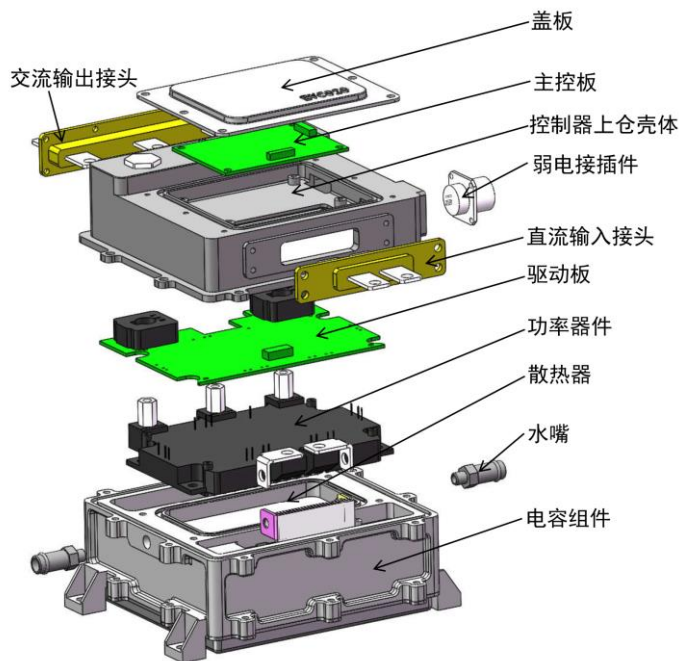
热阻 0.092°C/W 热流密度 150 W/cm^2

机构	电气性能	尺寸规格 mm^3	功率密度	耐温	材料
英飞凌FF400R07A01E3	700 V/400 A	42.5 x 42 x 10	15.7	150	Si
Oak Ridge团队	1200 V/200 A	62 x 30 x 10	12.9	150	Si
Texas Austin团队	1200 V/40 A	35 x 15 x 7	13.1	150	SiC
本课题	1200 V/600 A	70 x 42 x 10	24.5	200	SiC



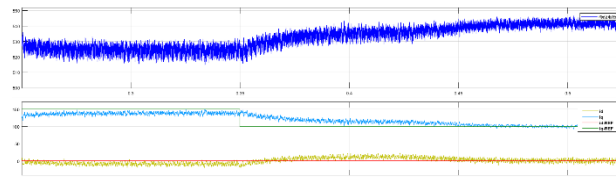
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

利用SiC器件高频特性



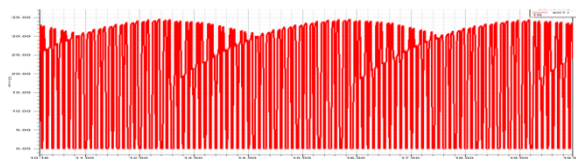
平抑母线电压波动

$$C \geq \frac{\sqrt{3}(1-M)MI_{LPK}}{2\Delta V_{pp_max}f_s}$$



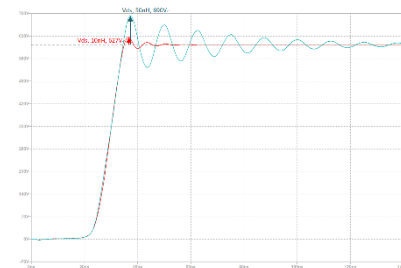
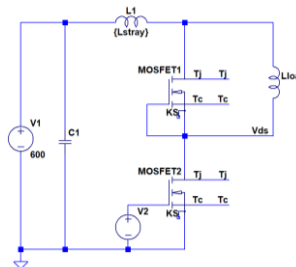
提供/吸收逆变器开关谐波电流

$$I_{cap_rms} \geq I_{inv_ripple_rms} = \frac{I_{LPK}}{\sqrt{2}} \sqrt{M \left[\frac{1}{\pi} + \cos^2 \phi \left(\frac{4}{\pi} - \frac{3}{2}M \right) \right]}$$



抑制开关管电压过冲

$$L_{stray} \leq \frac{V_{CE} - V_{dc_max}}{\left[\frac{di}{dt} \right]_{max}}$$

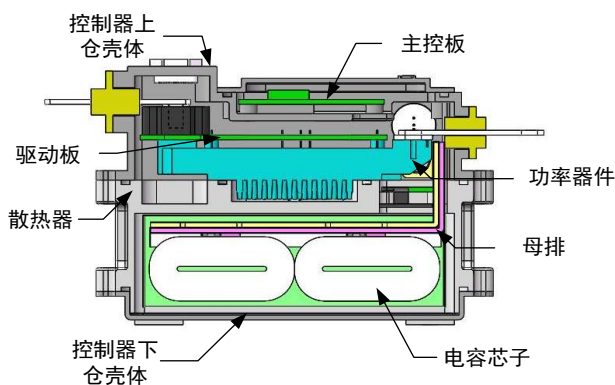




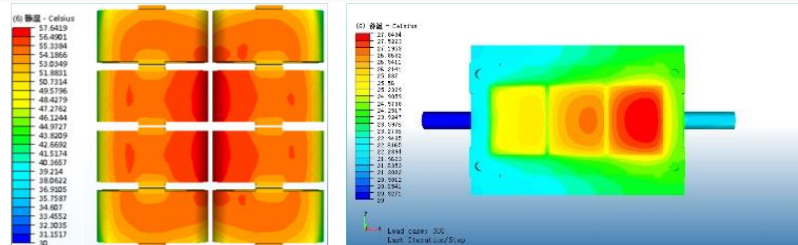
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

利用SiC器件高频特性

- 以兼具电气互连功能、散热功能、结构和防护功能的复合功能薄膜电容器为中枢，设计电机驱动控制器。



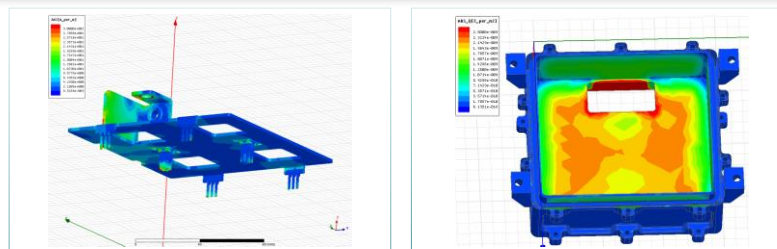
高密度集成的同步散热优化



电容散热65%
体积35%

模块散热15%
体积13%

高密度集成的同步电磁优化



杂散阻抗17%
电压应力15%

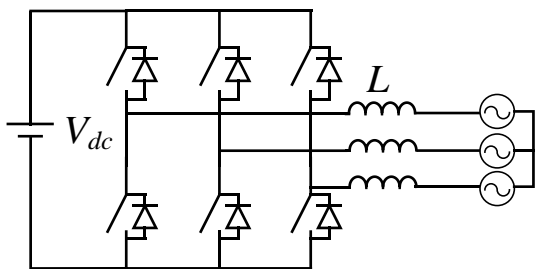
共模电容7%
高频噪声抑制30%



中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

利用SiC器件高效特性 面向功率器件损耗抑制的脉宽调制策略研究

三相逆变器驱动电机等效电路

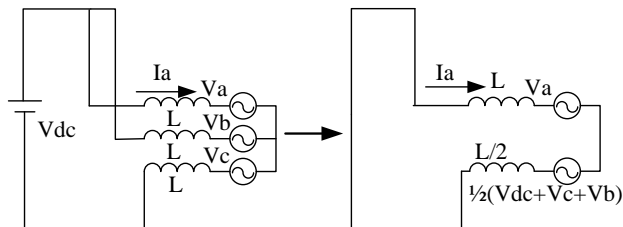


问题：进一步降低开关损耗

思路：控制开关周期电流纹波峰值，实现开关频率降低，从而降低损耗、抑制EMI。

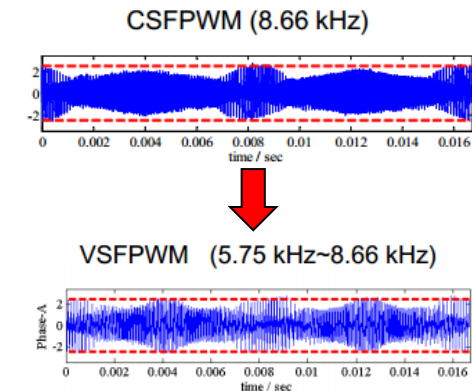
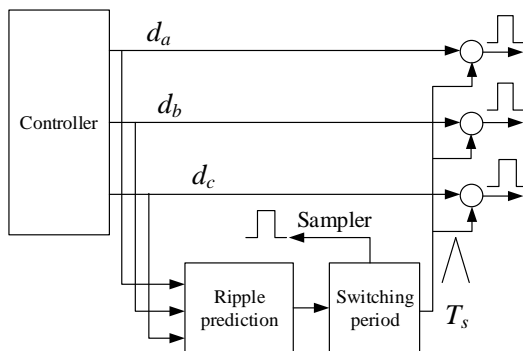
难点：电流纹波实时预测是关键。

实时电流纹波预测机理：在一个开关周期中，纹波电流是由实时电压与周期内平均电压的差造成的。

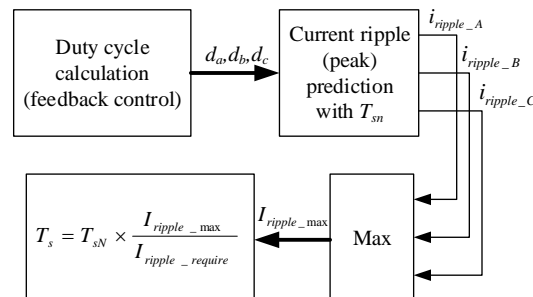


$$\frac{dI_a}{dt} = \frac{2V_{dc}}{3L} \left(1 + \frac{d_b' + d_c'}{4} - \frac{d_a'}{2} \right)$$

基于电流纹波实时预测的变开关频率PWM方法



案例：将开关频率控制在5.75~8.66kHz，通过降低开关频率来降低损耗并控制EMI





中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

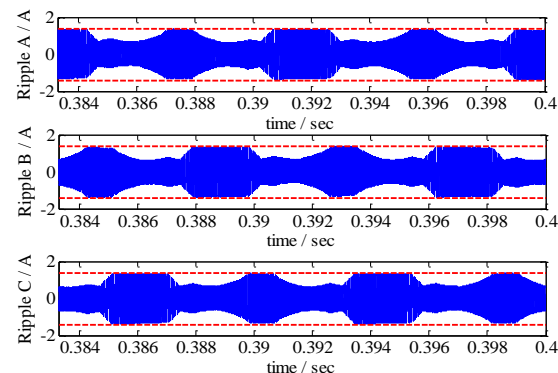
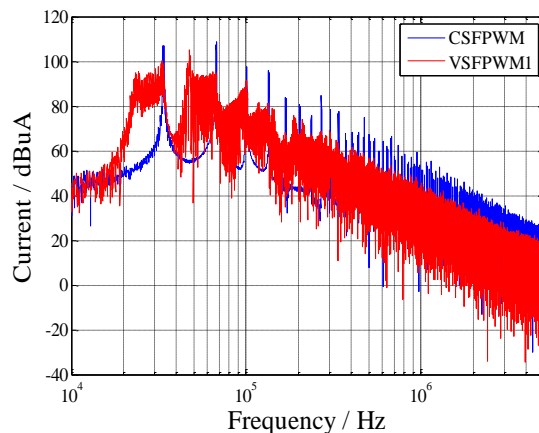
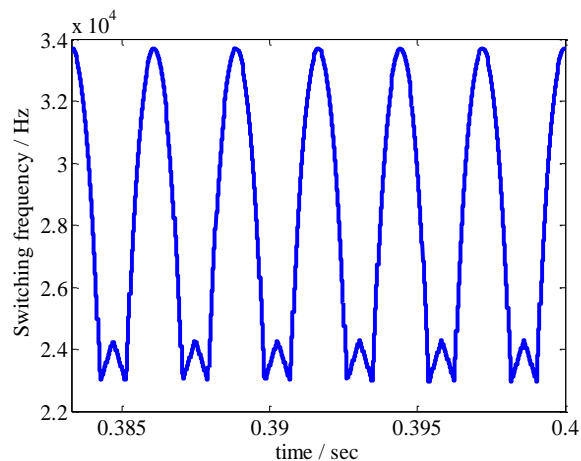
利用SiC器件高效特性 面向功率器件损耗抑制的脉宽调制策略研究

以实时电流纹波抑制为目标的变开关频率PWM

固定开关频率SVPWM: $f_s=34\text{kHz}$
变开关频率PWM: 开关频率34~23kHz
之间变化, 等效开关损耗降低15%

开关频率的实时变化实现了
EMI能量的均匀化分布, EMI
峰值降低了约10dB

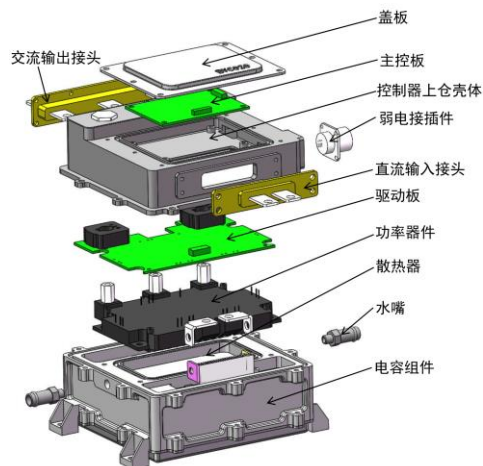
采用基于纹波预测的变开关频率
PWM, 仍然能够保证三相电流纹
波峰值在之前的要求范围之内



相关工作可推广到PWM整流器直流电压纹波控制等其他应用。



中科院电工所全SiC车用电机控制器研发进展



峰值功率密度37.1kW/L
峰值容量密度46.3kVA/L
最高效率98.6%
85°C入水口水温



全SiC功率模块

- 1200V/300A
- 集成PINFIN
- 140 × 113 × 25mm



复合功能电容器

- 集成直流母排
- 集成散热器
- 158 × 148 × 59mm



高密度主控板

- 信用卡大小
- 适配50kHz的控制频率
- 85 × 60 × 6mm



中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

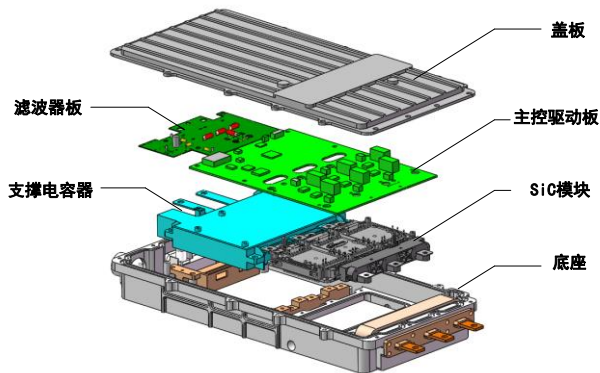
高功率密度车用SiC电机驱动控制器

采用“以系统集成指导元器件封装”的设计理念指导开发SiC功率模块、复合功能薄膜电容器、高密度SiC控制器主控板等器件和组件，全SiC电机驱动控制器峰值功率密度37.1kW/L、峰值容量密度46.3kVA/L、最高效率98.6%，通过了85°C入口水温条件下的峰值满载功率试验。

对比项目	美国 特斯拉 Model3 碳化硅控制器 ^a	美国 Cree碳化硅控制器 ^b	本项目碳化硅控制器
峰值功率(kW)	165	77.9	85
开关频率(kHz)	15	20	20
功率体密度 (kW/L)	32.4	16.4	37.1
额定直流电压(V)	370	600	600

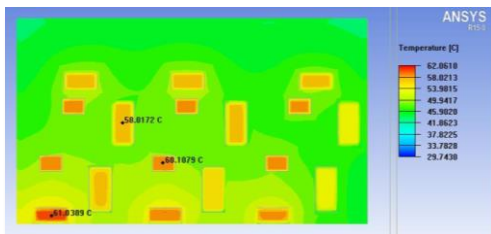


中科院电工所全SiC车用电机控制器研发进展

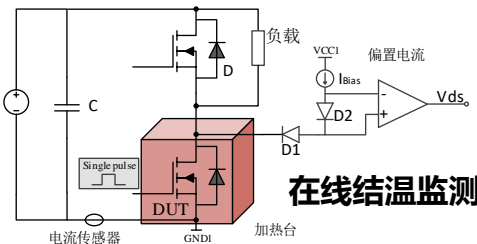


指标	数值
体积	3.43L
供电电压	600Vdc
最大输出功率	164kW ($\eta = 0.8$)
电容量	250uF
入口水温	25°C
开关频率	20kHz~30kHz
功率密度	47.8kW/L

热管理



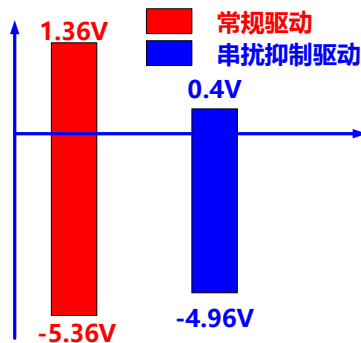
电路板布局优化降低热点温度6%~9%



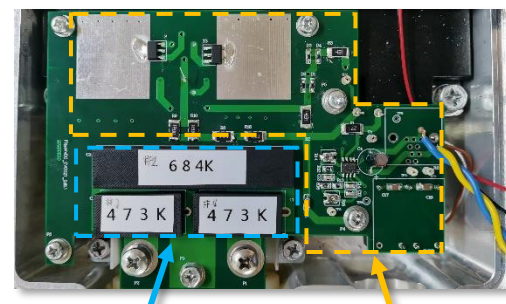
在线结温监测

I_{DS}	在线监测	离线验证	误差
200A	71.18°C	65.35°C	8.70%
250A	102.4°C	97.45°C	5%
300A	155.73°C	150.22°C	3.7%

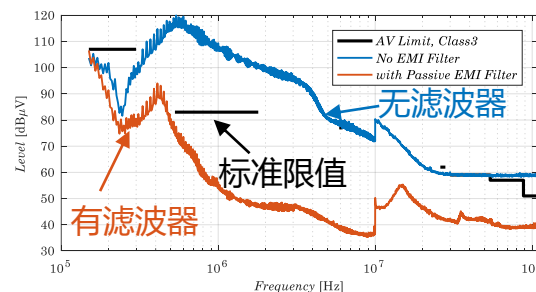
串扰抑制



EMC



无源滤波器 (电容) 有源滤波器

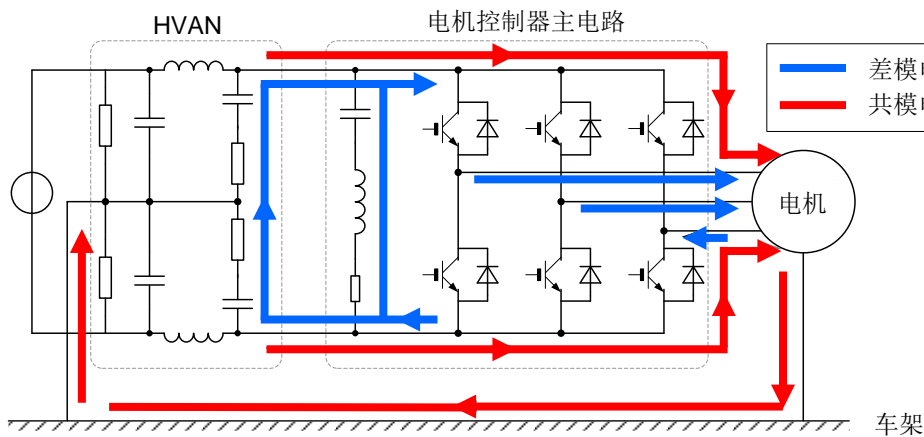


传导干扰符合CISPR25 Class3



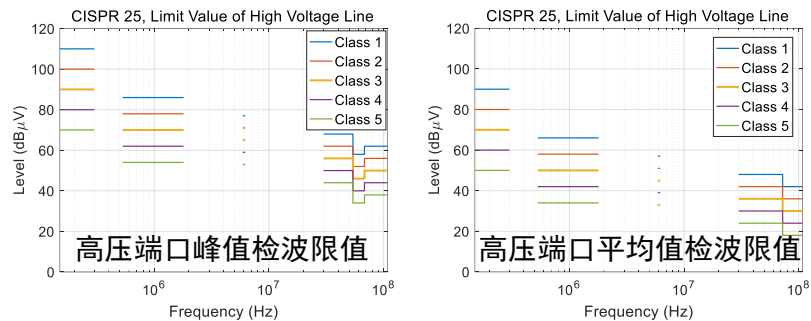
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

SiC电机驱动系统的电磁干扰产生机理及抑制研究

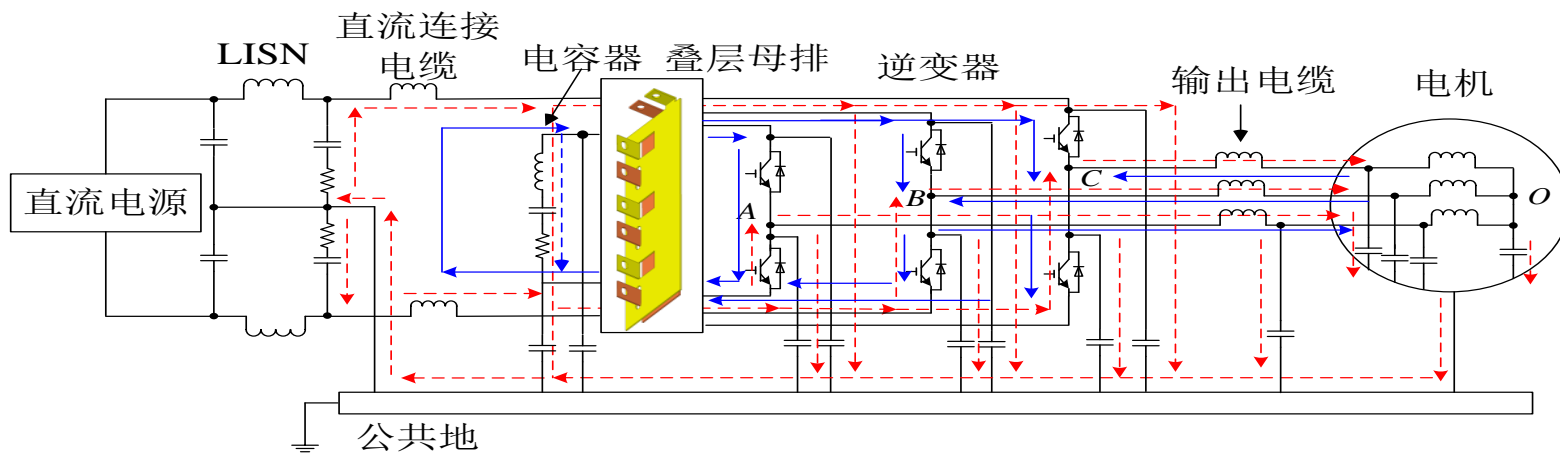


差模干扰电流和共模干扰电流

输入端口干扰电压限值



电磁兼容标准规定了高压端口和低压端口的传导干扰限值，限值分为5个等级，每个等级又都规定了峰值检波、平均值检波和准峰值检波的限值，只有在三种检波方式均符合限值要求，才达到标准要求。

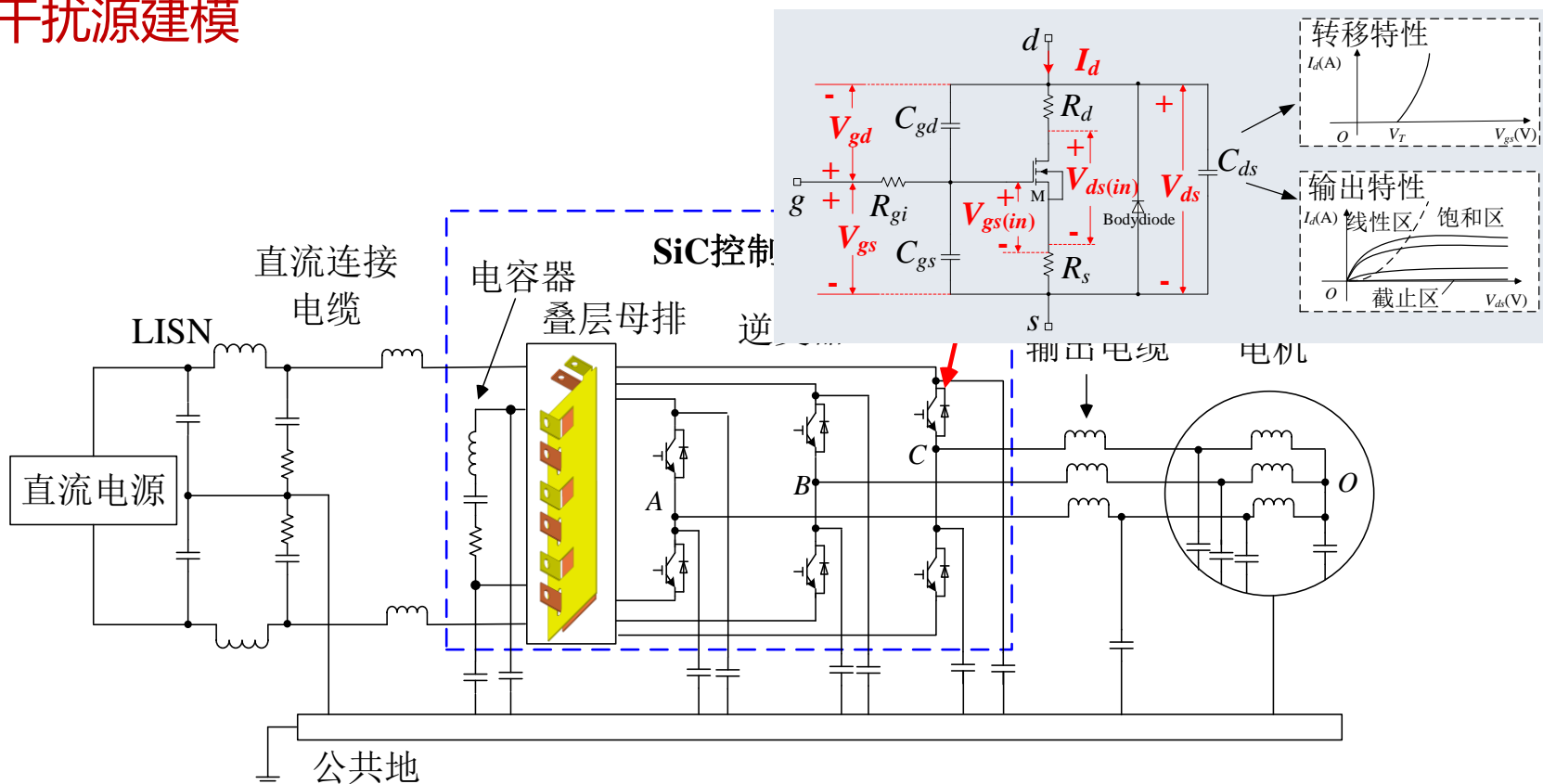




中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

SiC电机驱动系统的电磁干扰产生机理及抑制研究

干扰源建模

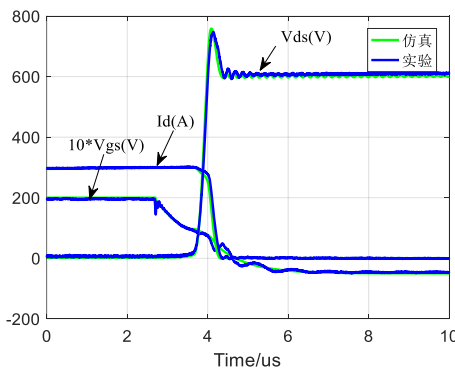
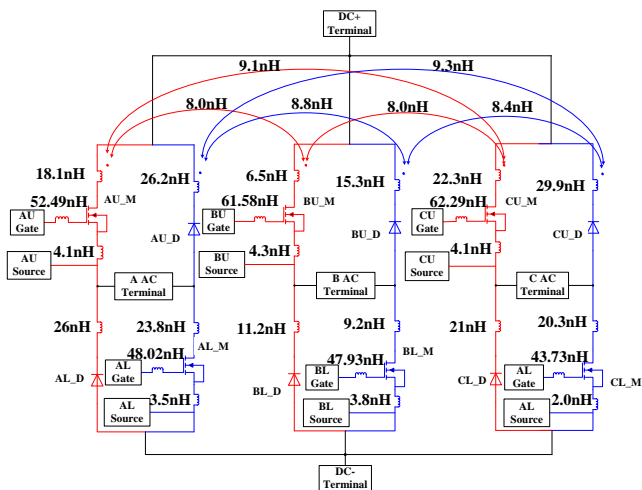
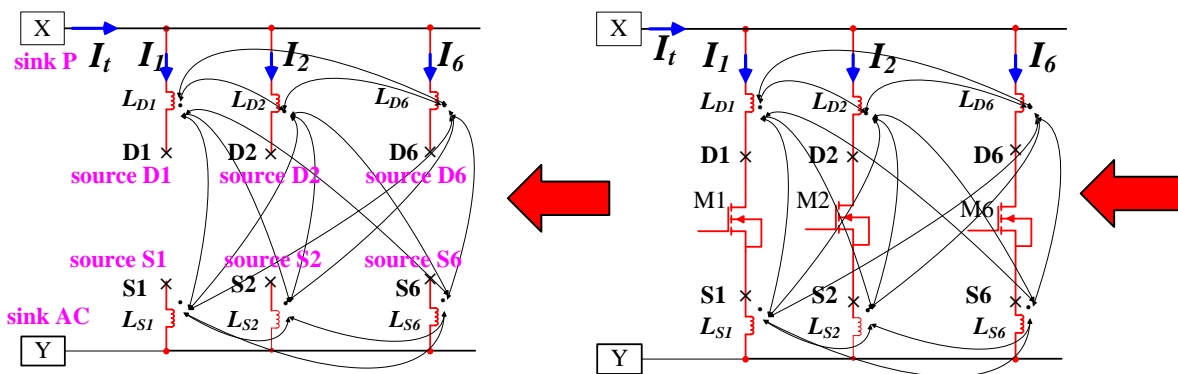




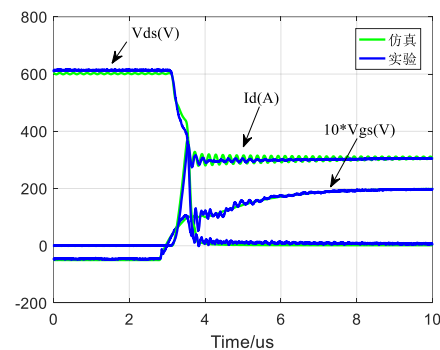
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

SiC电机驱动系统的电磁干扰产生机理及抑制研究

干扰源建模



C_{gs} 为非线性模型的关断波形



C_{gs} 为非线性模型的开通波形

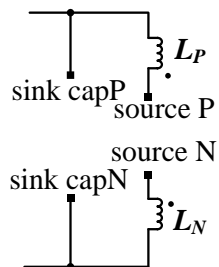
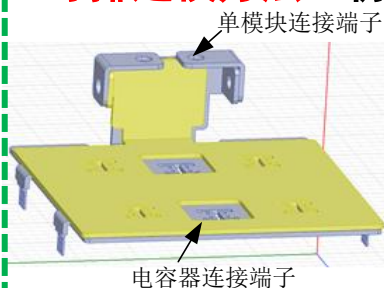


中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

SiC电机驱动系统的电磁干扰产生机理及抑制研究

传播途径建模：电容组件建模

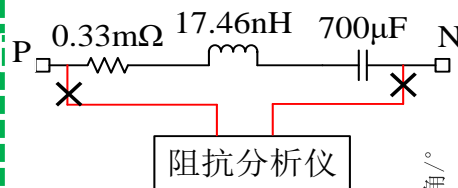
母排建模方法：仿真软件抽取法



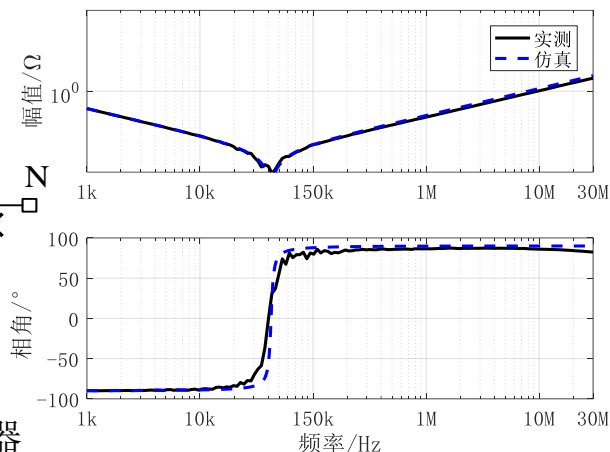
高功率密度全SiC控制器 母排结构 杂散参数等效电路

杂散参数简化等效公式 $L_t = L_p + L_n - 2L_{PN}$

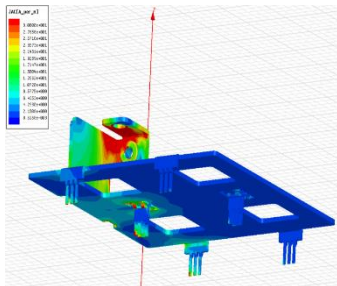
模型验证



高功率密度全SiC控制器 电容器组件差模阻抗测试原理图

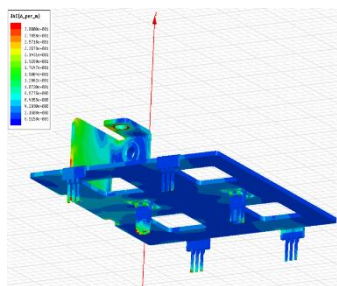


阻抗仿真值与实测值对比

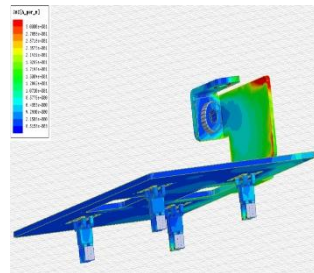


正母排加激励

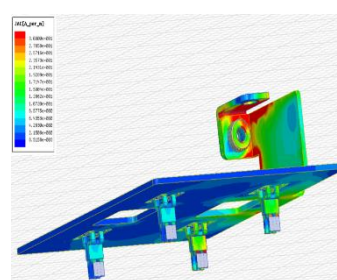
正母排上的电流分布



负母排加激励



正母排加激励



负母排加激励

负母排上的电流分布



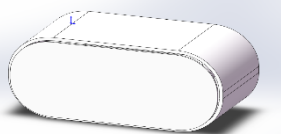
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

SiC电机驱动系统的电磁干扰产生机理及抑制研究

传播途径建模：电容组件建模

根据静电屏蔽原理，提出电容芯子等效结构

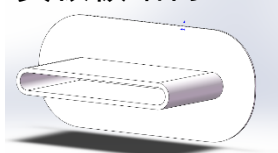
整体结构



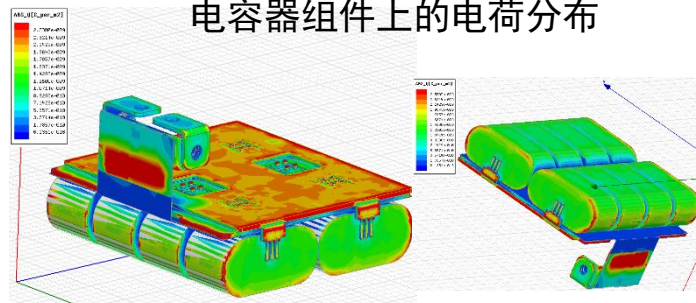
正极板结构



负极板结构

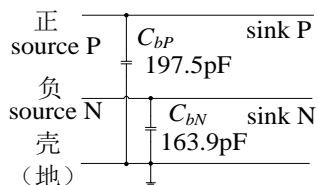


电容器组件上的电荷分布



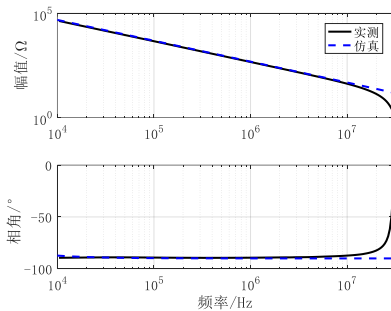
模型及验证

电容器组件对地电容等效电路



电容器组件总的对地电容

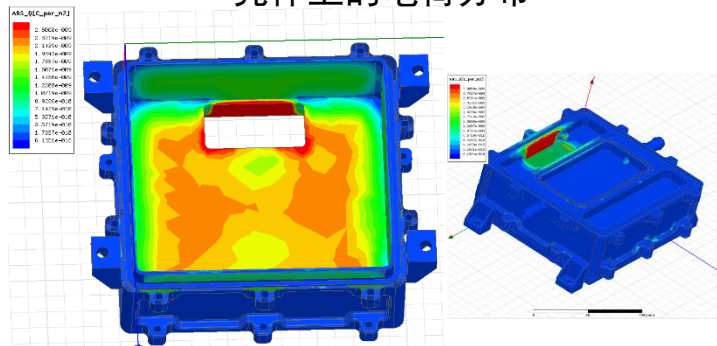
$$C_b = C_{bP} + C_{bN}$$



阻抗仿真值与实测值对比

C_b 仿真值为361.4pF，实测值为350pF，误差约3.3%

壳体上的电荷分布



可通过优化布局来改变电容器组件对地电容参数值。



中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

SiC电机驱动系统的电磁干扰产生机理及抑制研究

EMI预测

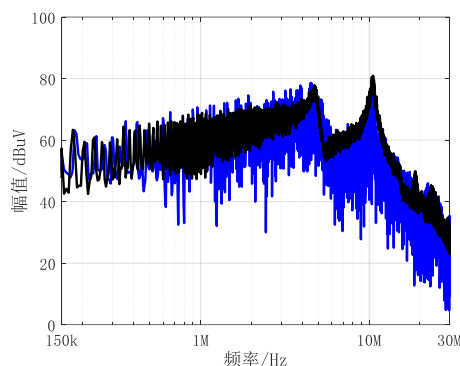
—— 蓝色：仿真
—— 黑色：实测

被测系统：高功率密度全SiC电机驱动系统

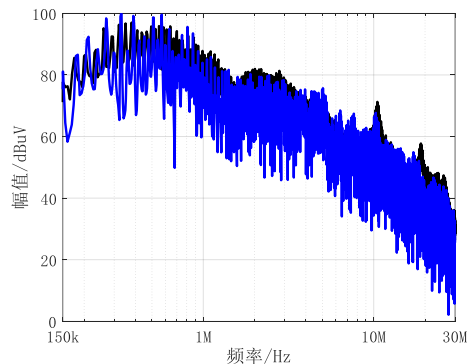
@260V100A30kHz

系统运行工况

运行条件	参数值
开关频率(f_c)	30kHz
电机转速(6对极)	1000rpm
基波频率(f_f)	100Hz
直流电压(V_{dc})	260V
负载电流幅值(I_m)	100A
门极驱动电阻(R_g)	15 Ω

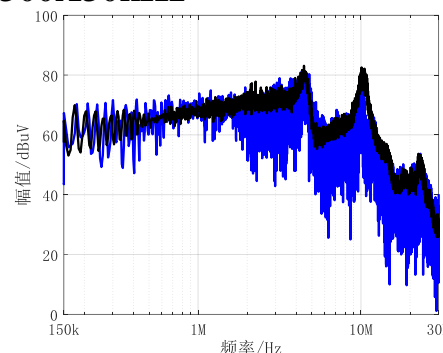


差模干扰频谱对比

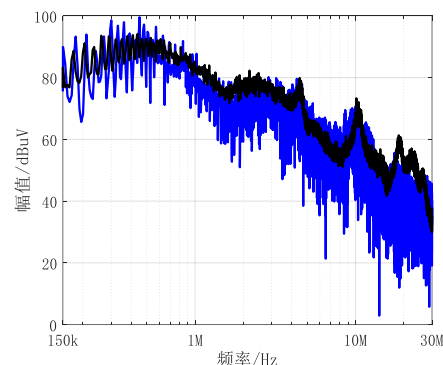


共模干扰频谱对比

@260V300A30kHz



差模干扰频谱对比



共模干扰频谱对比

结论：系统差、共模干扰频谱仿真值与实测值在第2个及以上谐振频率附近误差在10dB范围内，其余误差在6dB范围内，验证了模型进行干扰预测的有效性。



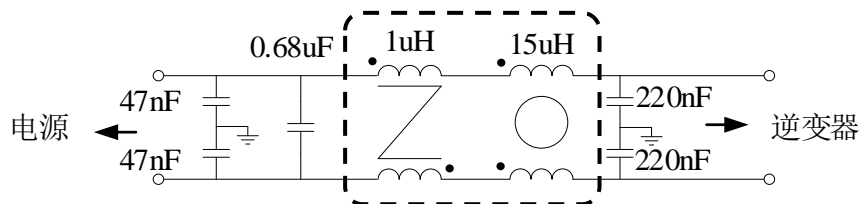
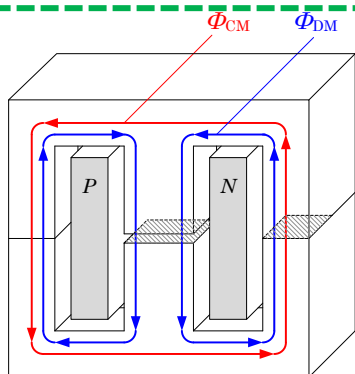
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

抑制对外传导干扰 —— 无源 EMI 滤波器

挑战：紧凑空间约束下，滤波器抑制效果与滤波器体积间存在矛盾

将差共模电感合二为一，开发差共模电感集成无源 EMI 滤波器

设计



结构上集成，设计上解耦

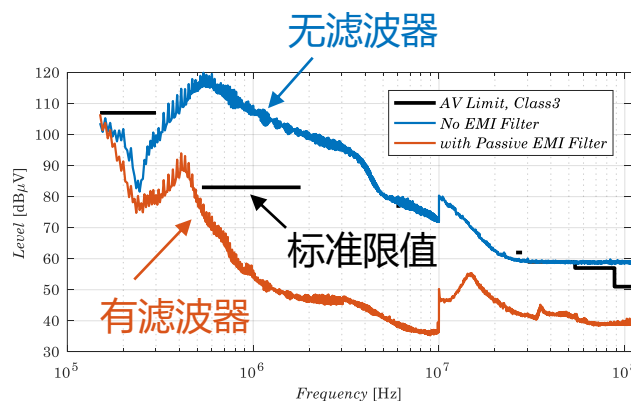
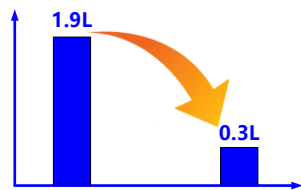
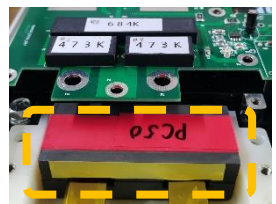
共模电感量 —— 磁芯外周长度、磁路截面积

差模电感量 —— 中心柱气隙长度

试验



分立的共模和差模电感器



干扰抑制效果，符合CISPR25 Class3

系统运行工况

运行条件	参数值
开关频率(f_c)	10kHz
输出基波频率(f_f)	100Hz
直流电压(V_{dc})	300V
负载电流($I_{l,RMS}$)	210A

电感集成EMI滤波器 滤波器体积显著减小

低频 (150kHz) 裕度较小

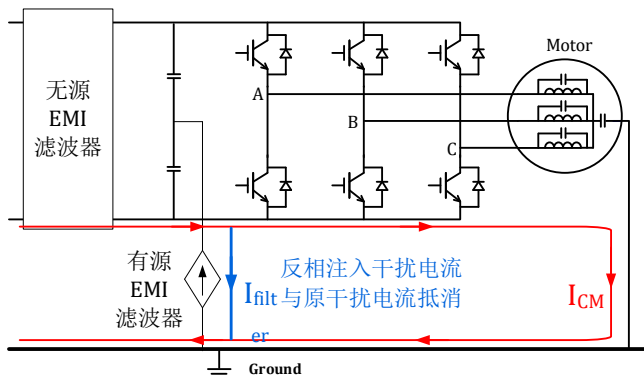


中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

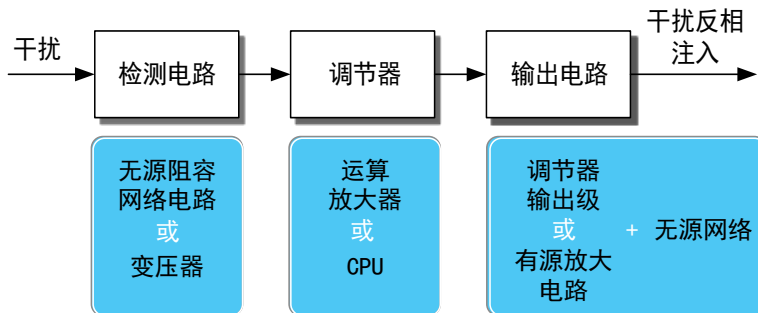
抑制对外传导干扰 —— 有源 EMI 滤波器提升低频干扰抑制能力

- 有源 EMI 滤波器，具有体积重量优势，抑制低频共模干扰
 - 无源 EMI 滤波器，具有带宽优势，抑制差模干扰及中高频段共模干扰
- 为解决低频干扰裕度较小的问题，在保留无源滤波器的基础上，增加有源滤波器。

• 有源滤波器构成

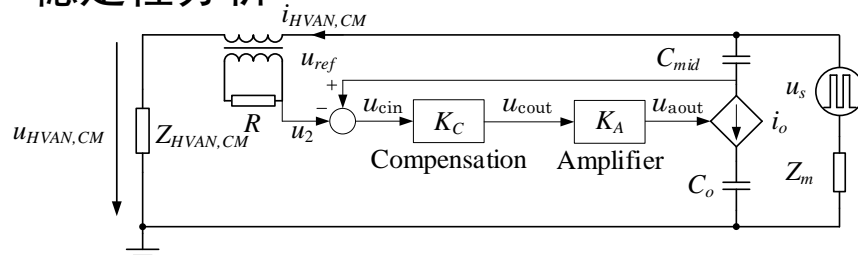


无源+有源EMI滤波器安装在逆变器直流端口

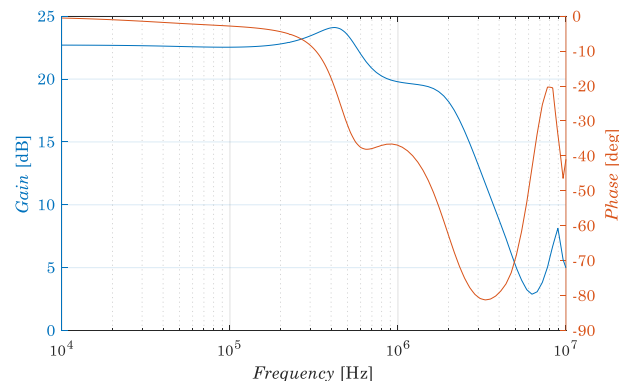


有源EMI滤波器构成

• 稳定性分析



包含有源滤波器的驱动系统共模干扰等效电路



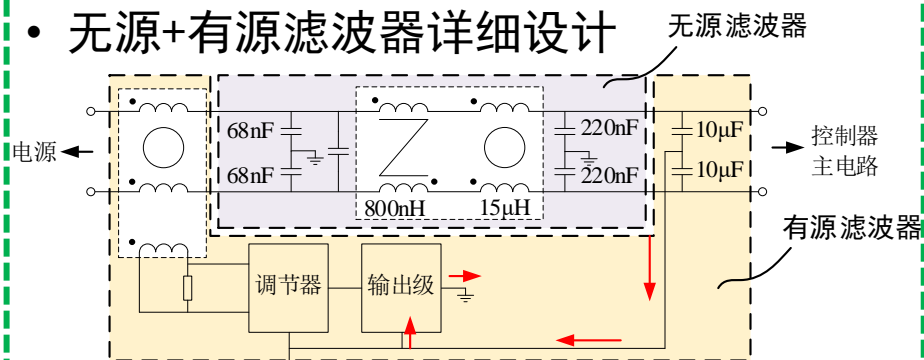
有源滤波电路开环传递函数（设计），系统稳定，低频开环增益大于20dB。



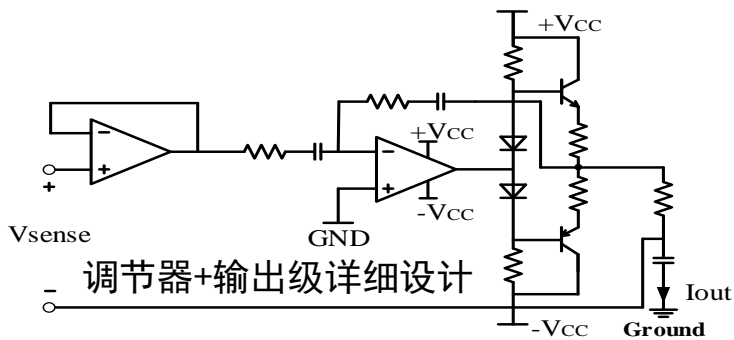
中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

抑制对外传导干扰 —— 有源 EMI 滤波器提升低频干扰抑制能力

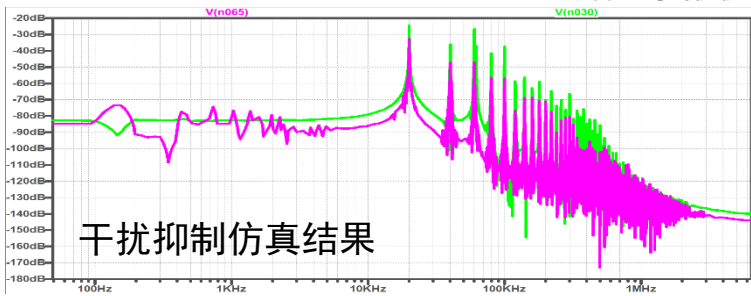
无源+有源滤波器详细设计



无源+有源EMI滤波器电路原理

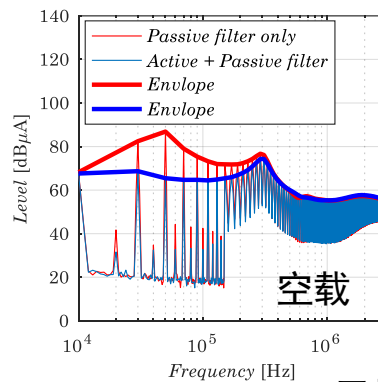
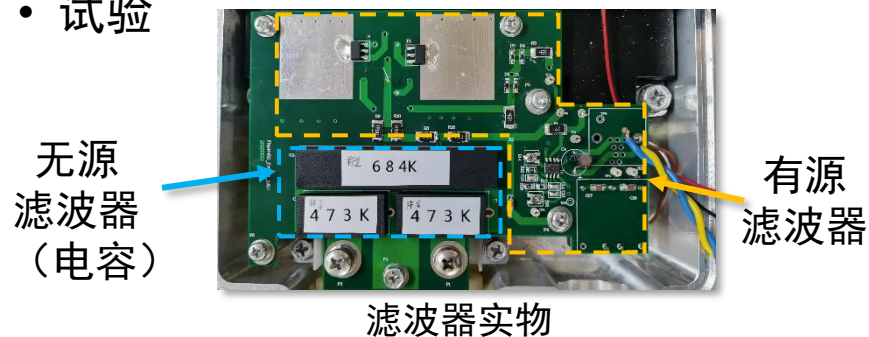


调节器+输出级详细设计

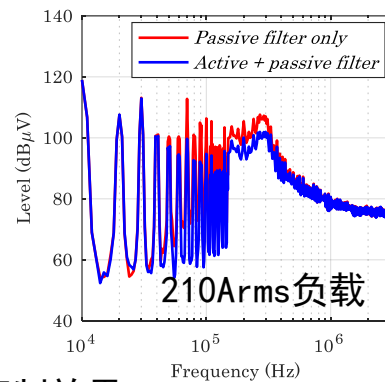


干扰抑制仿真结果

试验



空载



210Arms负载

干扰抑制效果

在10kHz-300kHz，有源滤波器提供了最大20dB的衰减。在300kHz以上，由于多级放大带来的相位滞后，干扰抑制效果下降。目前，300kHz以上频段的抑制效果的提高工作正在进行。



报告内容

1

新能源汽车与车用电机系统的发展

2

SiC器件及其在车用电机系统的应用

3

中科院电工所全SiC车用电机控制器研发

4

小结



小 结

- 1、综述国内外车用SiC电机驱动控制器研发近况；
- 2、车用SiC控制器功率密度大幅提升、损耗明显下降；
由于SiC器件快速开关特性和高频运行，EMI问题突出，
高密度EMI滤波器设计及研制是重点之一。



谢谢!