

车用大功率电力电子器件研究进展

温旭辉¹, 宁圃奇¹, 孟金磊², 张瑾¹, 刘钧¹, 孔亮³

1. 中国科学院电力电子与电气驱动重点实验室; 北京电动车辆协同创新中心, 北京 100190
2. ABB(中国)有限公司中国研究院, 北京 100015
3. 大洋电机新动力科技有限公司, 北京 100094

摘要 车用电机驱动变流器是电动汽车电机驱动的关键部件, 大功率电力电子器件是其核心。对比分析了国内外电动车辆用电机驱动变流器的拓扑结构、变流器控制特点及体积功率密度等关键指标, 指出车用电机驱动变流器的技术创新重点在于硅基绝缘栅双极性晶体管(IGBT)芯片及封装技术持续改进碳化硅(SiC)器件的应用。综述了硅基IGBT芯片的演进和IGBT模块封装技术的创新, 介绍了碳化硅器件的技术特点。

关键词 电动汽车; 变流器; 绝缘栅双极性晶体管; 碳化硅器件

电动汽车分为由动力电池供能的纯电动汽车、由燃料电池供能的燃料电池电动汽车和由动力电池与燃油联合供能的混合动力电动汽车。受使用环境、运行工况和经济性的约束, 电动汽车车用电机驱动系统要求更高的动态性能、更高的体积/重量密度、更高的极端环境适应性和更低的成本。因此, 具有效率高、功率密度高、功率因数高等显著优点的永磁电机及其控制技术, 以及基于低损耗大功率IGBT模块的高功率密度电力电子集成技术被车用电机驱动系统广泛采用^[1,2]。

在电动汽车中, 车用电机驱动系统由一个及以上的车用变流器与电机构成。其中, 车用变流器又分为功率主回路和控制电路, 功率主回路的体积和重量约占变流器的85%。在影响车用变流器体积与重量的各部件中, 大功率电力电子器件所占的比重超过65%。表1对国内外不同类型、不同整备质量的电动汽车所采用的电机驱动系统特点、变流器特点以及其大功率电力电子器件特点进行了对比分析, 从中可看出:

1) 电动汽车多采用永磁电机驱动系统, 车用变流器多采用两电平全桥逆变或者前置双向DC/DC的两电平全桥逆变拓扑, 采用SVPWM调制的硬开关将直流电转换为幅值可变、频率可变的交流电驱动交流电机(包括永磁电机及交流异步电机), 从而灵活地控制整车的动力和速度;

2) 由于整车整备质量的不同、电力驱动的占比不同, 直流供电电压从72 V到接近400 V, 近期有进一步升高到600 V以上的趋势, 但按照大功率电力电子器件的电压定额分级仍然属于中低压;

3) 车用变流器主要采用液体冷却, 国内变流器的重量功率密度、体积功率密度在5~8(kW/kg, kW/L), 以丰田等为代表的国际一流汽车制造商最新的车用变流器重量功率密度、体积功率密度约为中国相应产品的1倍;

4) 中国车用电机驱动制造商主要选用600、1200 V的标准封装IGBT, 而丰田等跨国大公司开发定制化IGBT芯片和模块, 是其车用变流器功率密度大的主要因素之一。

因此, 围绕硅基IGBT以及碳化硅场效应晶体管(metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, MOSFET)进一步提高车用变流器功率密度, 是世界各国降低电机驱动系统重量及成本的研发重点。

1 高功率密度车用IGBT模块及其寿命预测

1.1 IGBT芯片技术演进

包括通态损耗和开关损耗在内的IGBT损耗是影响IGBT模块运行效率和可靠性的重要因素。为降低IGBT通态损耗和开关损耗, IGBT芯片技术的演进过程主要经历了低掺杂/高掺杂工艺、集电极透明技术(缓冲层、穿通型IGBT)、平面栅/沟槽栅结构和场终止结构(field stop)技术, 由第1代发展到了第6代(表2)^[4]。为满足高功率密度和高可靠性的应用要求, IGBT正向着低功耗、改善温度特性、扩展安全工作区、低成本等方向发展。

1.2 高功率密度的IGBT模块封装技术

IGBT模块封装是一个由不同材料构成的多层结构(图1)。

收稿日期: 2016-02-03; 修回日期: 2016-02-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAG02B01)

作者简介: 温旭辉, 教授, 研究方向为电力电子与电气传动, 电子邮箱: wxh@mail.iee.ac.cn

引用格式: 温旭辉, 宁圃奇, 孟金磊, 等. 车用大功率电力电子器件研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(6): 69-73; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.06.007

表 1 用于电动车辆的电机驱动系统及其功率器件

整车形式	制造商	车辆整备质量/kg	电机类型	电机功率/kW	逆变器拓扑	驱动及控制	驱动逆变器重量功率密度/(kW·kg ⁻¹)	变流器体积功率密度/(kW·L ⁻¹)	直流电压/V	直流电流/A	交流电压/V	交流电流/A	功率器件类型	功率器件电压/V	功率器件电流/A	功率器件封装形式	环境适应性
纯电动微型车	新大洋	720	永磁	9/18	DC/AC		2.0(自然冷却)	2.0(自然冷却)	72	320	48	470	MOSFET	150	80A 并联	分立器件	-
纯电动轿车	长安	1610	永磁	45/90	DC/AC		6.9	8	315	320	235	450	IGBT	650	800		
纯电动客车	宇通	11500	永磁	100/200	DC/AC		6	6.8	537	410	370	560	IGBT	1200	1400	标准模块	
燃料电池轿车	上海	1800	永磁	42/90	DC/AC		6.4	7.8	375	280	260	380	IGBT	650	800		
燃料电池客车	清华	1800	永磁	100/150	DC/AC	SVPWM, 硬开关	6	6.6	384	425	270	700	IGBT	1200	1400		-40~105°C
混合动力轿车	丰田	1550	永磁	105	DC/DC +DC/AC*2		-	19	650	161	约260	134	IGBT	约900	约200	定制模块	
混合动力轿车	现代	1568	永磁	30	DC/AC*2		-	7.3	270	111	约110	90	IGBT	650	100/150		
混合动力客车	福田	10900	永磁	40/65	DC/AC		6.3	约4.5	336	210	250	280	IGBT	650	800	标准模块	
混合动力客车	宇通	11000	永磁	60/148	DC/AC*2		6	6.6	380	430	270	450	IGBT	1200	900		

表 2 IGBT 技术演进及特点

代别	技术特点	芯片面积(相对值)	工艺尺寸/μm	导通压降/V	关断时间/μs	功率损耗(相对值)	出现年份
1	平面栅穿通型	100	5.0	3.0	0.50	100	1988
2	改进的平面栅穿通型	56	5.0	2.8	0.30	74	1990
3	沟槽栅	40	3.0	2.0	0.25	51	1992
4	非穿通型	31	1.0	1.5	0.25	39	1997
5	场终止型	27	0.5	1.3	0.19	33	2001
6	沟槽栅场终止型	24	0.3	1.0	0.15	29	2003

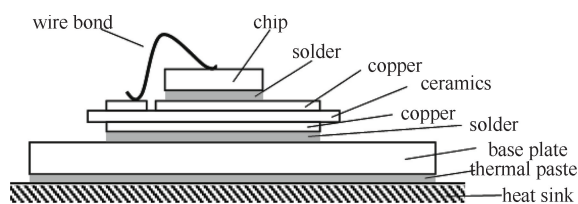


图 1 IGBT 多层结构示意图

由于电动汽车等应用对 IGBT 环境温度和可靠性提出更高的要求,IGBT 封装的技术创新主要集中在以下 3 个方面。

1) 芯片互联技术:使用新型引线互联方法或者无引线连接,提高寿命和可靠性。为提高 IGBT 模块的导热导电性能、耐受功率循环的能力,IGBT 模块内部引线技术经历了粗铝线键合、铝带键合再到铜线键合的过程,提高了载流密度。Semikron 公司使用柔性板芯片互联技术^[5],将功率循环寿命提高 70 倍。

2) 芯片焊接技术:传统焊料为锡铅合金,成本低廉、工艺简单,但存在环境污染问题,且车用功率模块的芯片温度已经接近锡铅焊料熔点(220℃)。解决该问题的新技术主要有:低温银烧结技术和瞬态液相扩散焊接。与传统工艺相比,银烧结技术的导热性、耐热性更好,具有更高的可靠性,Semikron的SkiN技术已采用了银烧结工艺^[6]。瞬态液相扩散焊接通过特殊工艺形成金属合金层,熔点比传统焊料高,机械性能更好,Infineon已经将其应用在衬板焊接工艺中。

3) DBC 和模块底板改进的目标在于降低散热热阻,提高热可靠性,减小体积,降低成本等。以 AlN 和 AlSiC 等材料取代 DBC 中的 Al₂O₃ 和 Si₃N₄ 等常规陶瓷,热导率更高,与 Si 材料的热膨胀系数匹配更好。此外,新型的散热结构,如 Pin Fin 结构^[7]和 Shower Power 结构,能够显著降低模块的整体热阻,提高散热效率。

随着技术的发展,车用 IGBT 模块的散热效率已远高于标准工业模块(图2)。

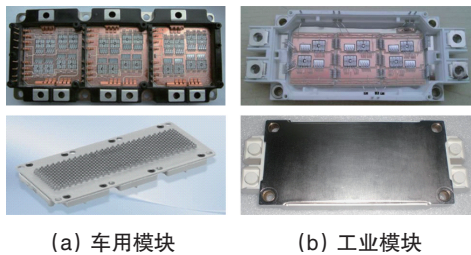


图2 车用 IGBT 模块与标准工业 IGBT 模块的对比

1.3 车用 IGBT 模块的可靠性及预测

在电动汽车严酷的环境温度(-40~105℃)和强振动条件下,高可靠性是车用 IGBT 模块的重要特征。

相对于工业级 IGBT 模块,车用 IGBT 模块对可靠性和耐久性的要求更高。IGBT 可靠性通常用功率循环能力和温度循环能力衡量:1) 功率循环用以衡量小时间尺度下(典型循环周期小于 5 s)幅值较小的温度变化对电力电子模块的影响,这类温度变化由电流快速变化引起,会加速焊点接触电阻增大直至键合点脱落;2) 温度循环用以衡量较长时间尺度下(典型循环周期大于 120 s)幅值较大的温度变化对电力电子模块的影响,这类温度变化由环境温度的变化引起,会造成焊料产生较大的机械应力,导致焊料产生裂纹乃至分层,IGBT 模块的失效循环数由下式计算^[8]:

$$N_f = A(\Delta T_j)^{-\alpha} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT_m}\right) \quad (1)$$

式中, N_f 为 IGBT 模块的失效循环数; ΔT_j 为结温温差; T_m 为平均结温,单位为 K; k 为波尔兹曼常数, $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K; A, α 为与模块本身相关的常数; E_a 为激活能。

IGBT 模块的可靠性与其热性能、机械性能紧密相关。在车用电机驱动系统中,IGBT 模块承受着更高的工作温度,冲击、振动等恶劣的工作环境,如图 3 所示的 IGBT 寿命预测技术,通过计算 IGBT 模块在车载工况下所承受的温度应力来预测其使用寿命,定量化评估 IGBT 模块的可靠性。

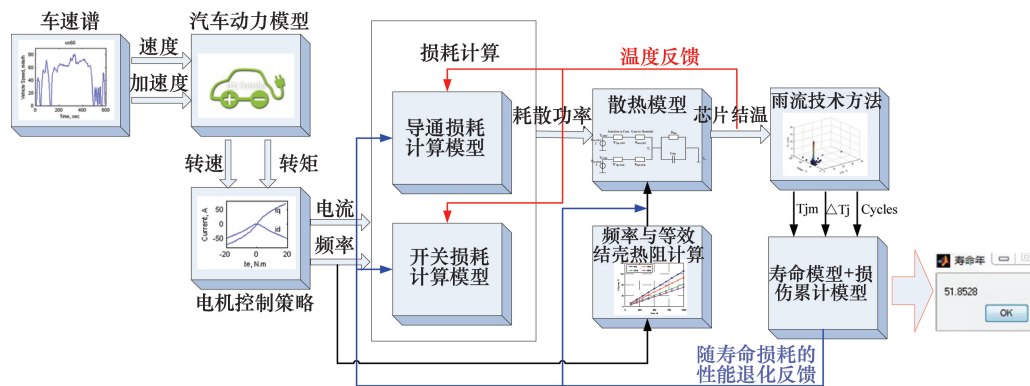


图3 电动汽车工况下的 IGBT 模块寿命预测流程

2 碳化硅技术及车用碳化硅控制器

碳化硅材料与常规的硅材料相比,在关键属性上有以下优势:

1) 碳化硅材料具有 2 倍于硅的电子饱和速度,使得碳化硅器件具有极低的导通电阻(理论极限是硅器件的 1/100);碳化硅材料具有 3 倍于硅的禁带宽度,因而漏电流比硅器件减少 1~2 个数量级,可减少功率器件的功率损耗,亦即碳化硅芯片单位面积载流能力强,同等功率的控制器所需芯片面积至少小 50%,能有效减少功率模块和配件;

2) 现有硅芯片的常规运行温度是 125℃,碳化硅芯片可稳定运行在 250℃以上(理论工作温度极限是 600℃),碳化硅功率模块的耐热能力比硅器件提高 1 倍,可以减小现有冷却系统^[9];

3) 受硅芯片运行特性限制,现有车用电机驱动开关频率在 10 kHz 左右,而碳化硅芯片能运行在 50 kHz 以上,可以减小控制器运行过程中所需要的能量存储,从而降低储能单元的体积和重量。

世界各国都在努力开发碳化硅芯片,并希望能够尽快应

用到车用电机控制器中。根据美国 Lux 研究公司预测^[10], 2024 年功率器件市场规模将达 230 亿美元, 其中碳化硅的年均增长率会达到 30%, 将占功率器件市场总额的 13%, 新能源汽车所使用的碳化硅将占碳化硅市场总份额的 65%。在美国能源部部署的新能源车开发项目中, 60% 的项目与碳化硅器件应用相关^[11]。欧洲也制定了碳化硅技术应用的 ES-CAPEE 计划和 E3Car 计划, 希望突破碳化硅单晶材料生长技术、器件设计、器件制作以及应用技术。日本以三菱、电装、富士为首的各大汽车部件供货商均已开发出各自的碳化硅芯片及高效碳化硅控制器。中国碳化硅芯片相关研究尚处于起步阶段, 需要迎头赶上。

应用碳化硅芯片提升新能源车性能并降低成本的主要途径如图 4 所示: 1) 通过新型拓扑结构, 提高开关频率和母线电压, 降低系统对无源器件的要求, 降低车用电机驱动变流器成本; 2) 提高母线电压和器件开关频率, 允许电机转速增大, 减小电机额定转矩, 降低电机成本; 3) 提高功率器件的节温, 便于利用高温冷却液, 或者应用风冷散热方法, 降低整车散热系统成本。同时改进芯片特性使之接近理论极限并提高成品率, 可以减小碳化硅芯片成本。

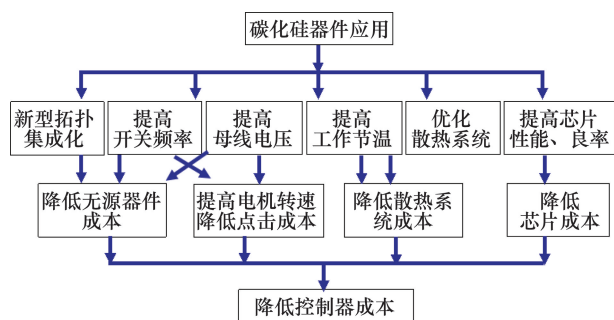


图 4 碳化硅芯片降低控制器价格的主要途径

为探索并实现以上的几种途径, 车用碳化硅控制器的主要技术发展方向有:

1) 电力电子拓扑和电子电机的发展。新一代半导体器件的出现会促使新一代拓扑结构的诞生, 而高度集成的电子电机将进一步减小系统的重量和体积。相关研究可能集中在: 面向碳化硅器件的新型拓扑设计、高效控制理论探索、变频器与电机的可靠连接、基于硬件的载波移相方法、隔离干扰等方面。

2) 功率模块封装技术的发展。除芯片外, 功率模块的零件还包括基板、焊锡、绝缘凝胶等部分, 现阶段这些材料和零件仅适用于硅芯片 125~150°C 运行, 不能支持碳化硅芯片高温运行与大温度梯度循环。相关研究集中在: 高温(200~250°C)高可靠性模块封装、模块寿命预测方法、高温驱动电路、高温传感器、温度实时在线监测与控制、高温智能功率模块开发等方面。

3) 高频驱动与保护电路的发展。碳化硅芯片高频开关

时电流变化率大于 10^9 A/s, 电压变化率大于 10^{10} V/s, 其驱动电路容易受到外界干扰, 易导致碳化硅芯片误动作, 需要在实现高速开关的同时保证安全性、稳定性。相关研究可能集中在: 高速开关电路设计、抑制瞬态尖峰的主动性驱动控制方法、防震荡无缘器件匹配设计、防误动高速高效保护电路设计、系统最佳开关频率优化等方面。

4) 高效散热方法的发展。系统散热是提高控制器功率密度的重要方向之一, 为实现冷却液入水口温度达到 105~120°C, 或设计纯风冷散热系统, 必须集成应用多种新型散热方法并配合优化理论。相关研究可能集中在: 微热管集成式封装、液态金属冷却、Peltier 电子冷却、多相散热系统设计等方面。

5) 电磁兼容设计的发展。电力电子装置是电动汽车最主要的电磁干扰源, 也是重要的传播途径, 碳化硅器件的高频开关会加剧电动汽车的电磁干扰。相关研究可能集中在: 碳化硅器件开关瞬态精确建模、电子电机 MHz 级高频传播模型、器件和线路杂散参数快速测试、滤波器设计与优化、利用结构和壳体抑制干扰等方面。

3 结论

对不同整备质量的电动车辆及其电机驱动变流器的对比表明, 技术创新的重点在功率半导体芯片及其封装; 围绕适应电动汽车应用特点, 综述了 IGBT 芯片技术的演进、IGBT 模块封装技术的创新、IGBT 寿命预测方法, 将功率半导体技术与电动汽车应用连接在一起; 介绍了碳化硅器件的技术特点, 提出了围绕碳化硅器件应用有待开展的科研工作。

致谢 本文写作过程中得到上海电驱动股份有限公司张舟云博士、庄兴明博士, 以及株洲南车时代电气股份有限公司伍理勋高工等的帮助。

参考文献(References)

- [1] Kamiya M. Development of traction drive motors for the Toyota Hybrid System [J]. 电气学会论文志(日本), 2006, 126(4): 473-479.
- [2] 孟金磊. IGBT 与功率二极管建模研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [3] Khalid Hussein. New compact, high performance 7th generation IGBT module with direct liquid cooling for EV/HEV inverters[C]. 30th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Charlotte, USA, March 15-19, 2015.
- [4] 袁立强, 赵争鸣, 宋高升, 等. 电力半导体器件原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [5] Stockmeier T, Beckedahl P, Malzer T. SKiN: Double side sintering technology for new packages[C]. 23rd International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's, San Diego, CA, May 23-26, 2011.
- [6] Göbl C, Faltenbacher J. Low temperature sinter technology die attachment for power electronic applications[C]. Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2010 6th International Conference on, Nürnberg, Germany, March 16-18, 2010.

- [7] Moores K A, Joshi Y K, Schiroky G. Numerical and experimental thermal characterization of a liquid cooled AlSiC power electronics base plate with integral pin fins[C]. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, Istanbul, Turkey, June 5-9, 2000.
- [8] Held M, Jacob P, Nicoletti G, et al. Fast power cycling test for IGBT modules in traction application[C]//Proceedings Power Electronics and Drive Systems. Singapore: IEEE Service Center in New York, Piscataway NJ, 1997: 425-430.
- [9] Pefitsis R D, Nee H P. Silicon Carbide power transistors: A new era in power electronics is initiated[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2012, 6(2): 17-26.
- [10] Lux Research. Automotive battery tracker[R]. Boston: Lux Research, 2014.
- [11] Hamada K, Nagao M, Ajioka M, et al. SiC-emerging power device technology for next generation electrically powered environmentally friendly vehicles[J]. IEEE Transactions on Electron Devices. Accepted.

Power semiconductor devices used in electric vehicle drive systems

WEN Xuhui¹, NING Puqi¹, MENG Jinlei², ZHANG Jin¹, LIU Jun¹, KONG Liang³

1. Key Laboratory of Power Electronics and Electric Drive, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences; Collaborative Innovation Center of Electric Vehicles in Beijing, Beijing 100190, China
2. Corporate Research Center, ABB (China) Ltd., Beijing 100015, China
3. Broad-ocean Motor EV Co., Ltd., Beijing 100094, China

Abstract On-board motor drive converter is the most important part of electric vehicle (EV) drive while the power semiconductor devices are its core. Comparison and analysis of EV drive converters, from mini car to big bus, are presented in terms of topology, control scheme and various key indexes such as power density etc. It is concluded that power semiconductor chip and its packaging are the highlight of innovation. The development of IGBT chip and its packaging technologies are described. The characteristics of silicon carbide are introduced. Further SiC device and its application research area are also discussed.

Keywords electric vehicle; convertor; insulated gate bipolar transistor; silicon carbide device

(责任编辑 王媛媛)