

新能源汽车电机驱动系统关键技术展望

丁荣军^{1,2}, 刘侃¹

(1. 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082; 2. 中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南株洲 412000)

摘要: 本文探讨了新能源汽车电机驱动系统的关键技术及发展趋势, 包括驱动控制器中的功率半导体器件及封装、智能门极驱动、基于器件的系统集成设计, 以及驱动电机中的扁铜线、多相永磁电机、永磁同步磁阻电机等关键技术。其中, 着重介绍了当前车用电机驱动技术的发展趋势, 并指出永磁同步电机在未来 10 年内将依然是新能源汽车市场的主流驱动电机。同时, 通过横向比较指出当前我国在驱动电机发展道路上所面临的关键问题, 可以为我国未来新能源汽车技术发展提供一定参考。

关键词: 新能源汽车; 电机驱动系统; 永磁同步电机

中图分类号: TM32 **文献标识码:** A

Future Perspective for Key Technologies of Motor Drive System of New Energy Vehicles

Ding Rongjun^{1,2}, Liu Kan¹

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou 412000, Hunan, China)

Abstract: This study investigates key technologies and development trends for the motor drive system of new energy vehicles, including power semiconductor devices and their packaging, smart gate drivers, and the device-based system integration design, for the drive controllers; it also explores new motor technologies related to the hair-pin winding, multiphase permanent motor, and permanent magnet synchronous reluctance motor. The study emphatically presents the development trends of the motor drive technologies for vehicles, and points out that permanent magnet synchronous motors will remain the main-stream drive motors in the new energy vehicle market within the next 10 years. Meanwhile, this study reveals several key issues existing in drive motor development, which could offer a reference for the technology development of new energy vehicles in China.

Keywords: new energy vehicle; motor drive system; permanent magnet synchronous motor

一、前言

我国地大物博, 但是人均资源较匮乏、石化能源大量依赖进口、单位 GDP 能耗高, 因此发展

高效率的、基于电驱动技术的新能源汽车对我国能源安全具有重要的战略意义。同时, 我国车用内燃机技术和西方发达国家一线厂商仍存在较大的差距, 在未来 10 年内将难以实现赶超。考虑到

收稿日期: 2019-05-07; 修回日期: 2019-05-30

通讯作者: 丁荣军, 湖南大学机械与运载工程学院教授, 主要研究方向为交流传动系统、列车控制网络技术和特大功率半导体器件技术;

E-mail: dingrj@csrzc.com

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

我国当前电驱动技术和西方发达国家整体差距不大,因而大力发展基于电驱动技术的新能源汽车将是我国车企赶超西方一线车企、实现弯道超车的重要机遇。

对新能源汽车而言,电池技术、电机技术、电机控制器技术被称为新能源汽车关键三电技术。在当前电池技术未能取得突破的前提下,提高电机驱动系统的效率、功率密度、安全性与可靠性成为新能源汽车电机驱动系统的主要研究方向,也是我国政府和企业进行政策制定和未来发展规划的重点对象。

二、驱动控制器关键技术

电机驱动控制器作为新能源汽车中连接电池与电机的电能转换单元,是电机驱动及控制系统的核心。其中高性能功率半导体器件、智能门极驱动技术以及器件级集成设计方法的应用,将有助于实现高功率密度、低损耗、高效率电机控制器设计;同时,高性能、高可靠电机控制器产品,还要求具有高标准电磁兼容性(EMC)、功能安全和可靠性设计。

(一) 功率半导体器件技术

电机控制器的发展以功率半导体器件为主线,正从硅基绝缘栅双极型晶体管(IGBT)、传统单面冷却封装技术,向宽禁带半导体(如SiC、GaN等)、定制化模块封装、双面冷却集成等方向发展。同时,得益于成熟的技术迭代,以及相比于宽禁带半导体器件更低的成本,硅基IGBT仍然是当前与未来较长时间内电机控制器产品的主要选择。

在硅基IGBT芯片技术上,英飞凌科技公司针对新能源汽车市场高功率密度需求,已研发出EDT2芯片技术,实现了750V/270A IGBT芯片量产,富士集团等日本厂商也都相继研发出了高功率密度IGBT芯片技术,并已批量应用于汽车IGBT模块产品。此外,与硅基器件(如IGBT、MOSFET等)相比,SiC器件属于第三代半导体材料功率器件,具有高热导率、耐高温、禁带宽度大、击穿场强高、饱和电子漂移速率大等优势,结温耐受可以达到225℃甚至更高,远高于当前硅基IGBT 175℃的最高应用结温。SiC器件开关速度更快,可应用于更高的开关频率,更适用于高速电机的控制。同时,相比

硅基IGBT,SiC器件的开关损耗和导通损耗均大幅降低,有助于降低整车百千米耗电量,提升整车续航里程[1]。但是当前SiC器件成本仍远高于硅基IGBT,这成为阻碍SiC器件推广的重要因素。

同时,铜线键合、芯片倒装、银烧结、瞬态液相焊接等新型封装技术可以提高IGBT功率模块的载流密度与寿命,因此也成为当前的研究热点。目前,电装、德尔福、英飞凌、株洲中车时代电气股份有限公司等已研制出基于双面冷却的IGBT模块与电机控制器产品,部分已随整车产品获得批量应用。基于硅基IGBT的电机控制器设计在未来相当长一段时间内仍将为市场的主流选择,硅基IGBT器件芯片与功率模块封装技术将在不断的优化迭代中获得提升。

(二) 智能门极驱动技术

门极驱动技术是电机控制器中高压功率半导体器件和低压控制电路的纽带,是驱动功率半导体器件的关键。IGBT门极驱动除具有基本的隔离、驱动和保护功能外,还需结合IGBT自身特性,精确地控制开通和关断过程,使IGBT在损耗和电磁干扰(EMI)之间取得最佳的折衷[2]。

智能门极驱动的两大大主要特点分别为:主动门极控制和监控诊断功能。主动门极控制是根据工作运行环境和工况,对IGBT开关过程进行主动精细化最优控制的一种方法。主动门极控制技术是当前IGBT应用领域的研究热点,其基本思路是把IGBT开通过程和关断过程分别划分为几个不同的阶段,针对某一问题只需对相应的阶段进行独立的门极调控,对其他参数产生很小的(甚至不产生)负面影响[3]。

综上所述,智能门极驱动的应用,将有助于充分发挥功率半导体器件性能,如降低损耗、提升电压利用率等,并实现功率半导体器件的健康状态在线评估,满足电机控制器高安全性、高可靠性设计的目标。

(三) 功率组件的集成设计

国际上典型的电机控制器产品为适应新能源汽车高功率密度、长寿命与高可靠性的要求,大多数的功率半导体模块封装均为定向设计[4],功率半导体器件与其他电子部件之间的界限日趋融合,基于器件的集成设计已成为新能源汽车电机控制器发

展的新趋势。

器件级集成设计技术主要分为物理集成与需求集成设计。物理集成设计是通过研究电机各个器件之间物理结构的集成设计方法，实现寄生参数、散热、机械强度等的平衡优化，实现机、电、热、磁等的最优设计，最终达到电机控制器高功率密度、高可靠性的设计目标。需求集成设计技术是指将整车和电驱动系统需求向前延伸至 IGBT 芯片设计、功率模块封装领域，根据整车设计与性能需求，建立以整车需求为导向，由系统向核心零部件自上而下的优化设计方法。其所带来的优势将是整车续航里程的增加或电池容量需求的降低。

（四）其他关键技术

除上文所述三大关键技术以外，还有下述几个关键技术需要在未来的新能源汽车产业引起重视。

（1）EMC 与可靠性设计也是实现新能源汽车电机控制器产业化的关键技术。EMC 与可靠性设计是评价电力电子产品的关键指标。进行更有效的 EMC 设计是业内一直在追寻的目标。其中，基于有限元分析的方法建立“元件-部件-控制器”的 EMC 高频仿真模型，研究失效机理，并结合试验验证，最终实现电磁兼容的正向设计，将逐渐成为主流的技术路线。

（2）汽车功能安全设计可以消除或显著降低由电子与电气系统的功能异常而引起的各类整车安全风险。当前电机控制器功能安全需求多为 ASIL C 等级，但在未来，电机控制器功能安全需求或将提升为 ASIL D 级，这需要复杂度更高、冗余性更强、可靠性指标更高的电机控制器产品设计 [5]。

（3）电机控制器产品的可靠性设计。电机控制器作为新能源汽车的核心驱动单元，其可靠性指标直接影响着整车的驾乘体验与市场口碑。德国和美国汽车电子厂商联合提出了鲁棒性验证（RV）方法 [6]，该方法已经被英飞凌科技公司、博世集团广泛应用于半导体分立器件的可靠性设计分析，对于诸如电机控制器等的复杂系统，其适用性与有效性还在进一步探索中。

三、驱动电机关键技术

新能源汽车采用电动机取代传统的内燃机作为

动力输出部件。随着新能源汽车对驱动电机宽调速范围、高功率密度、高效率等性能要求的提高，稀土永磁体励磁的永磁同步电机技术逐渐取代传统直流电机、感应电机驱动技术作为新能源汽车的主流驱动电机解决方案。但是，随着驱动电机功率密度和效率的不断提高，传统结构和传统工艺制造的永磁同步电机也逐渐难以满足当前市场的竞争需求，各大传统主机厂和新兴造车势力迫切需要寻找新的技术解决方案。

（一）扁铜线技术

发卡式（也称为扁铜线）定子绕组如图 1 所示。采用发卡式定子绕组可以提高电机定子的槽满率，从而提高电机的功率密度。此外，发卡式定子绕组的端部尺寸较短，因而拥有更低的铜损以及更好的散热性能。当前该类电机的生产技术、设备和专利，主要由日本、意大利和德国等传统汽车强国所引领。从 2018 年开始，国内的深圳市汇川技术有限公司、松正电动汽车技术股份有限公司等电动汽车零部件供应商也陆续发力，推出了自己的扁铜线电机产品。

然而，相对于传统圆铜线绕组而言，扁铜线绕组的高频趋肤效应显著。对于大功率驱动电机，发卡式定子绕组带来的环流损耗也更加突出 [7,8]。发卡式绕组的生产工艺复杂，扁铜线弯折后绝缘层容易损坏产生缺口或破面。降低发卡式定子绕组的趋肤效应和涡流损耗是当前研究的热点。提高发卡式定子绕组的材料加工技术和制造精度将有利于该项技术国产化的推广。

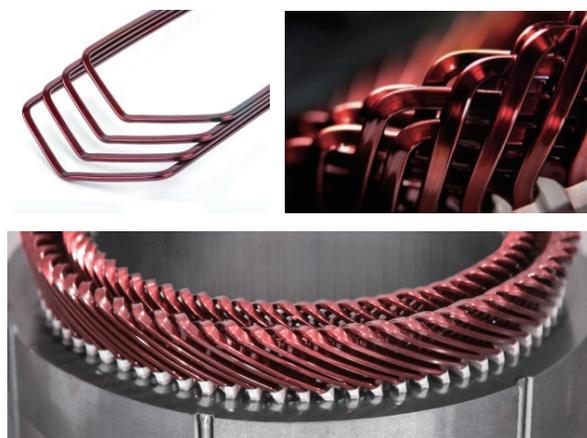


图 1 发卡式（扁铜线）定子绕组

（二）多相永磁电机技术

多相电机在输出相同功率时的母线电压低于传统的三相电机，且具有更小的转矩脉动和更强的容错能力 [9]，因此适用于对噪声、振动、声振粗糙度（NVH）要求高的新能源汽车电驱系统 [10]。以双三相永磁同步电机为例，电机的两套绕组在空间上相距 30° 电角度，消除了 5 次与 7 次谐波磁势，大大减少了电机的转矩脉动 [11,12]。同时，双三相永磁同步电机两套绕组采用隔离中线设计，相比 4 相与 5 相电机，降低了系统的阶次，便于分析与控制，在电机与控制器发生故障时，控制算法不需要大的更改即可实现电机系统的容错运行控制，因此双三相永磁同步电机也成为了新能源汽车电机驱动系统研究的热点。

（三）永磁同步磁阻电机技术

永磁同步磁阻电机是“永磁同步电机 + 磁阻电机”的融合，与传统永磁同步电机相比，其永磁体磁链较小、磁阻转矩较大，是一种少稀土 / 无稀土永磁电机方案。同时，其不但拥有很高的扭矩电流比、很高的功率密度、较低的磁饱和问题，还具有更宽广的高效率调速范围。因此，该技术路线已经被应用于宝马公司的 i3 和 i8 系列车型（见图 2）。

永磁同步磁阻电机是当前行业普遍看好的技术路线。但是其也面临着转子结构设计复杂、制造工艺复杂、制造设备成本高、最优电流角度变化大等问题，是当前研究的重点和难点。因此，该技术的发展对于一些严重依赖廉价稀土永磁体、研发能力和制造加工能力差的企业将是不小的冲击。

（四）轮毂电机技术

轮毂电机的形式多样，但国内外的研究多集中在外转子轮毂电机 [13~16]。轮毂电机的应用能

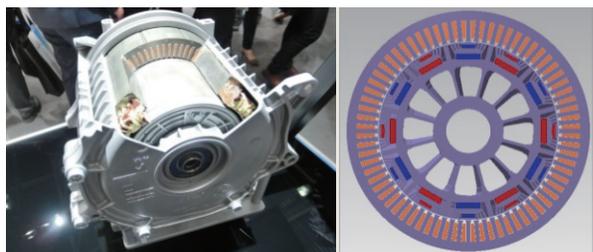


图 2 宝马 i3 车用永磁同步磁阻电机

够给新能源汽车带来一系列明显优势：省掉了变速器、传动轴、差速器等机械传动部分，可以实现四轮分布式驱动，且留下更多的底盘空间给电池包。但是，驱动电机的轮毂化目前还面临着一系列新的挑战，比如：大大增加了簧下质量和车轮的转动惯量、较难处理电机的防水和防尘问题、散热问题和较复杂的驱动控制算法等 [16]。当前，Protean、Elaphe 等国外企业推出了一系列产品样机（见图 3），并和国内亚太机电股份有限公司、万安科技股份有限公司等企业进行了国产化合作。而国内以湖北泰特机电有限公司为首的企业也紧随其后推出了一系列针对大型商用车辆和特种车辆的轮毂电机方案。

（五）永磁体散热技术

永磁体性能的稳定对于车用驱动电机的输出性能具有至关重要的作用。而工作温度的升高往往会让永磁体产生退磁，从而降低驱动电机的转矩输出能力。过高的永磁体工作温度还会导致驱动电机的高效率运行区域缩小、功率因数减小 [17]。针对该问题，国内外学者在永磁电机的永磁体温度监测技术方面做了较多理论研究 [18]。但是在新能源汽车驱动电机中，使用性能稳定的低成本温度传感器来提供必需的温度监测功能依然是当前唯一的可靠选择。

目前针对电机散热方式的研究，往往都是基于定子和端部绕组的分析，若能从电机转子的角度来研究电机的散热结构和散热方式，对于提高新能源汽车的动力稳定性有重要意义。此外，研制应用于高功率密度电机的耐高温永磁体则能从根本上解决永磁体高负荷、高温工况下的磁性能退化问题。



图 3 Elaphe 设计制造的 110 kW 液冷轮毂电机

（六）其他技术

在新能源汽车领域，我国还处于跟跑和起步阶段，未来还需要具体关注的领域有：超级铜线技术，串并联绕组切换电机技术，高耐压绝缘材料技术，局部去磁化技术。

此外，我国在高速轴承技术、无刷电励磁同步电机技术、电机电控深度集成等多个方面和西方发达国家仍然有着较大的差距，需要我国在未来产业布局和科研项目中进行重点攻关。如果一味依赖稀土永磁资源的优势，我国的新能源汽车产业在未来竞争中迟早会面临西方国家在环保问题上的技术壁垒。

四、结语

未来的5至10年，新能源汽车将进入黄金发展期，我国作为世界上最大的汽车市场，将面临新一轮产业界洗牌。基于传统硅基IGBT的电机控制器在未来相当长一段时间内仍将是市场主力，但是随着SiC器件生产成本的降低，高可靠性的800V高压SiC驱动系统将是下一代乘用车驱动控制器发展的方向。我国需警惕对“稀土永磁红利”的依赖，提前布局前沿的电机设计技术、材料技术、先进制造加工技术和高精度加工设备，以应对未来西方发达国家利用其先进的少稀土/无稀土永磁电机技术路线来建立针对稀土永磁电机的技术壁垒。

参考文献

- [1] 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.
Wen X H, Ning P Q, Meng J L, et al. Research progress of high power electronic devices for vehicles [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(6): 69-73.
- [2] 焦明亮, 李云, 朱世武, 等. IGBT 门极驱动技术现状和发展趋势 [J]. 大功率变流技术, 2015 (2): 18-23.
Jiao M L, Li Y, Zhu S W, et al. Status and trend of IGBT gate drive technology [J]. High Power Converter Technology, 2015 (2): 18-23.
- [3] Jiao M L, Li Y, Yu J, et al. Intelligent power module featuring optimised active gate driver and IGBT module integration for electric vehicle application [R]. Dresden: The 7th Electronic System-Integration Technology Conference (ESTC), 2018.
- [4] 李云, 朱世武, 吴春冬, 等. 电动汽车电机控制器的发展 [J]. 大功率变流技术, 2015 (2): 12-17.
Li Y, Zhu S W, Wu C D, et al. The development of motor controller for electric vehicles [J]. High Power Converter Technology, 2015 (2): 12-17.
- [5] International Organization for Standardization, ISO 26262: Road vehicles—functional safety [S]. 2018.
- [6] ZVEI. Handbook for robustness validation of automotive electrical/electronic modules [R]. Frankfurt: ZVEI, 2013.
- [7] Fujita M, Kabata Y, Tokumasu T, et al. Circulating currents in stator coils of large turbine generators and loss reduction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 685-693.
- [8] Liang Y, Wu L, Bian X, et al. Influence of void transposition structure on the leakage magnetic field and circulating current loss of stator bars in water-cooled turbo-generators [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3389-3396.
- [9] Levi E, Bojoi R, Profumo F, et al. Multiphase induction motor drives—A technology status review [J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(4): 489-516.
- [10] 张军, 肖倩, 孟庆阔. 新能源汽车驱动电机发展现状及趋势分析 [J]. 汽车工业研究, 2018 (6): 43-47.
Zhang J, Xiao Q, Meng Q K. Development status and trend analysis of new energy vehicle drive motors [J]. Automotive Industry Research, 2018 (6): 43-47.
- [11] 杨金波, 杨贵杰, 李铁才. 双三相永磁同步电机的建模与矢量控制 [J]. 电机与控制学报, 2010, 14(6): 1-7.
Yang J B, Yang G J, Li T C. Modeling and vector control for dual three-phase PMSM [J]. Journal of Electric Machines and Control, 2010, 14(6): 1-7.
- [12] Ren Y, Zhu Z Q. Enhancement of steady-state performance in direct torque controlled dual-three phase permanent magnet synchronous machine drives with modified switching table [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3338-3350.
- [13] Bonthu S S R, Choi S, Baek J. Design optimization with multi-physics analysis on external rotor permanent magnet-assisted synchronous reluctance motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(1): 290-298.
- [14] Pei Y, Wang Q, Bi Y, et al. A novel structure of axial flux permanent magnet synchronous machine with high torque density for electrical vehicle applications [R]. Beijing: IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017.
- [15] Pop C V, Fodorean D. In-wheel motor with integrated magnetic gear for extended speed applications [R]. Anacapri: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), 2016.
- [16] Zhu Y Y, Yang C T, Yue Y, et al. Design and optimisation of an in-wheel switched reluctance motor for electric vehicles [J]. IET Intelligent Transport Systems, 2019, 13(1): 175-182.
- [17] Zhang Z, Li G, Qian Z, et al. Research on effect of temperature on performance and temperature compensation of interior permanent magnet motor [R]. Hefei: IEEE 11th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2016.
- [18] Cho S, Shin W, Park J, et al. A torque compensation control scheme of PMSM considering wide variation of permanent magnet temperature [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(2): 1-5.