

新技术及半导体在新能源汽车系统中的构建与应用

Construction and application of new technology and semiconductor in new energy vehicle system

吴康

摘要: 本文以轻度混合动力汽车 (MHEV) 为例, 对其在 48V MHEV 系统应用特征, 包括对如何在 48V MHEV 中使用标准硅降压转换器 MOSFET 电路, 包括汽车电力电子需要低 EMI、并联 MOSFET、辅助 48V 系统与 48V 电池、48V 前端降压转换器等应用问题与新能源电动车热控制的电力驱动器与功率器件设计选择二大问题作研讨分析。

关键词: 新能源, 功率器件, 宽禁带, 电力电子, 热控制

Abstract: In this paper, a mild hybrid electric vehicle (MHEV) is taken as an example to analyze its application characteristics in a 48V MHEV system, including how to use a standard silicon step-down converter MOSFET circuit in a 48V MHEV. The application problems of low EMI, parallel MOSFET, auxiliary 48V system and 48V battery, 48V front-end step-down converter and the design choice of electric drivers and power devices for thermal control of new energy electric vehicles are discussed and analyzed.

Keywords: new energy, power devices, wide band gap, power electronics, thermal control

前言

由于当今新能源电动汽车面临的挑战不少, 由此在新能源电动汽车系统构建设计中引入新理念与新技术应运而生。尤其是随着器件设计技术和制造工艺的不断进步, 宽禁带半导体器件必将逐步取代传统的半导体器件, 从而在新能源汽车电力电子系统中获得广泛应用并成为新趋势。在值此仅以下述二个热门话题作研讨说明。

* 如今面向电动汽车 (EV)、混合动力汽车和汽油车的电力电子市场持续增长。例典型的混合动力汽车 (HEV) 电源系统的电压要求从 12V 到 800V 不等, 电流更是达到数百安培。由此硅 (Si) 和宽禁带半导体器件, 如氮化镓 (GaN) 和碳化硅 (SiC) 器件, 正在吸引着人们的极大兴趣。

而宽禁带半导体主要是指禁带宽度 (导带最低点与价带最高点之间的能量差) 大于 2.2 电子伏特的半导体材料。以 GaN、SiC 为代表的宽禁带半导体材料具有高击穿电场强度、高截止频率、高热传导率、高结温和良好的热稳定性、强抗辐射能力等特点。与硅 (Si) 和砷化镓 (GaAs) 工艺相比, 宽禁带 SiC 或 GaN 器件带来了更高的效率、开关频率、工作温度和工作电压, 从而解决了功率转换问题。这是为

什么宽禁带半导体器件必将逐步取代传统的半导体器件成为必然。

而当前, 电动车的呈现通常就是全混合动力汽车 (FHEV)、插电式混合动力汽车 (PHEV) 和轻度混合动力汽车 (MHEV) 这几种。

纵贯比较, 普通汽车有 600 个 MOSFET, 高端汽车有 100 个 MOSFET, 而 48V 轻混汽车有 400 个 MOSFET。而硅 MOSFET 器件解决了高电压和成本问题。在解决了过电压不平衡问题后, 串联配置的低电压功率半导体器件打造出了有效的功率转换系统解决方案, 又解决了成本和效率问题。特别是 48V 的电池系统能够承受高输入电压的负载突降瞬变, 同时以低电磁干扰 (EMI)、低占空比和高效率运行。

* 从节能与能效的角度, 则新能源电动车的热管理又是一个热门话题。这是因电池能量密度没有汽油高, 对工作环境温度有要求, 需要系统尽量优化。而新能源车的热相关部件可分成三个部位, 分别是电机与功率电子器件、动力电池以及座舱, 这些部件既有发热需求, 又有制冷需求。如果以每 100 公里需要 24 度电计算, 大概将近 20%

的热量用在热耗散上。以每年跑 16000 公里预估, 10 年将近 7680 度电用在热消耗上, 换算下来浪费将近一万五到两万元人民币。因此, 应从热系统管理在整个系统层面上去找到成本平衡为出发点, 来思考系统方案设计以及未来策略的定义。

据此, 本文将以轻度混合动力汽车 (MHEV) 为例, 对其在 48V MHEV 系统应用特征, 包括对如何在 48V MHEV 中使用标准硅降压转换器 MOSFET 电路, 包括汽车电力电子需要低 EMI、并联 MOSFET、辅助 48V 系统与 48V 电池、48V 前端降压转换器等应用问题与新能源电动车热控制的电力驱动器与功率器件设计选择二大问题作研讨分析。

1 48V MHEV 系统中的 MOSFET 电路应用与技术特征

* 关于并联 MOSFET

电动助力转向、泵、风扇和车身应用, 通过 48V MOSFET 车辆系统驱动应用。其图 1 为 48V MOSFET 车辆系统驱动应用示意图。



图 1 为 48V MOSFET 车辆系统驱动应用示意图

在这些系统中, MOSFET 在运行过程中会承受大量的机械应力, 因为随时都会发生很多的膨胀和收缩。汽车使用的材料包括铜、铝和 FR4。所有这些材料都有不同的热膨胀系数。主要的 MOSFET 器件必须从电池向系统传导大电流。如果这些 MOSFET 采用并联配置。见图 2 (A) 所示, 那么系统就要努力使电流和温度的不平衡得到控制, 见图 2 (B) 所示。

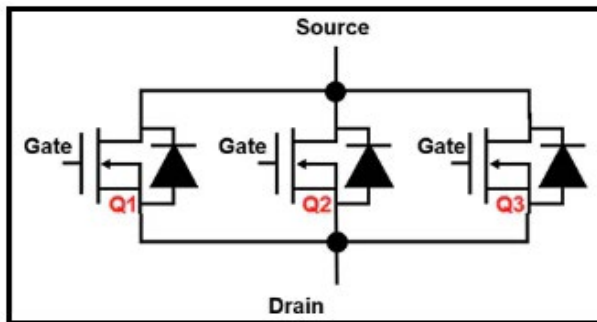


图 2 (A) 所示 MOSFET 采用并联配置

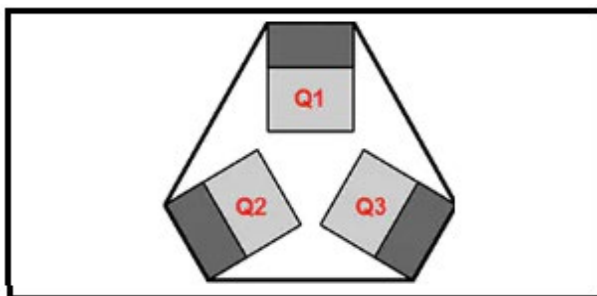


图 2 (B) 所示电流和温度的不平衡得到控制

从图 2 可知, MHEV 48V 系统, 其中三个并联的 MOSFET 在 PCB 面上形成一个对称的回路。

图 2 (B) 所示显示了三个环形配置的 MOSFET。在图 2 (A) 这个配置中, MOSFET 的源极 (source) 连接到一个星点。与漏极 (drain) 回路的对称连接用于连接 MOSFET 之间的电气和热路径。MOSFET 必须能够耗散尽可能多的热量, 以优化其性能, 并使最热 MOSFET 的结温保持在 175°C 的最高安全温度以下。为此, 就需要让每个 MOSFET 的安装基座与所有其他 MOSFET 的安装基座都匹配, 并且尽量减小基座间的热阻。每个 MOSFET 对称安装, 并且尽可能靠近导热表面。低热阻路径使 MOSFET 之间的热量容易流动。热流与电流类似, 因此, MOSFET 的热粘点或漏极片应在主要热环路上。当组内所有 MOSFET 之间的热量容易流动时, MOSFET 的安装基座温度就会非常稳定。这种安排可以实现更好的芯片温度匹配, 而不是平等的电流均流。

* 辅助 48V 系统解析

制动动作使能量从内燃机流向 48V 电池，发动机扭矩传递给作为发电机的皮带传动启动 / 发电一体化电机 (BSG)。通过硅绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 或 MOSFET 本征二极管的三相逆变器对 BSG 电波形整流，用直流电为 48V 电池充电，见图 3 所示为辅助 48V 系统。

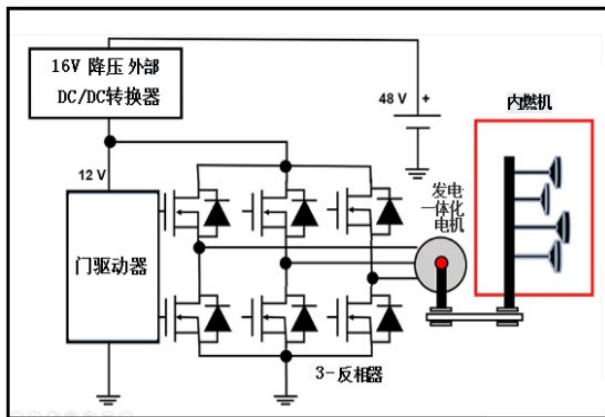


图 3 为辅助 48V 系统

在启 - 停期间，能量从 48V 电池流向 BSG，充当电机。在此期间，48V 电池为 BSG 提供电能，并通过三相硅功率晶体管逆变器汲取电能。一个 DC-DC 降压转换器将 48V 电压降低到 16V，为 3 相逆变器栅极驱动器供电。这将为 BSG 提供正确的运动顺序。

BSG 将完成三项任务：在启 - 停期间启动发动机，通过提高扭矩改善加速性能，以及通过制动动作作为电池充电。48V 电池还为泵、风扇、压缩机、电动助力转向架以及辅助启 - 停系统供电。一个 48V 电池可以用四分之一的电流提供与 12V 电池同样的功率。

*MHEV 48V 系统约 48V 电池应用与 DC-DC 降压转换器的可靠性

MHEV 48V 系统电池规格可以是锂离子 1kWh、48V 或 21Ah。建议电池的工作电压范围在 36V 和 52V 之间。该规范允许 20V 和 60V 之间的限制电压模式以及高达 70V 的动态过压。60V 的最大工作电压是人类操作者允许的最大安全接触电压。同时 DC-DC 降压转换器的可靠性在上述图 3 中的 48V 降压转换器可承受高达 70V 的尖峰电压和高达 40ms 的电应力。超过这个限制会导致永久性的设备损坏。因此，降压转换器的绝对最大额定输入电压需要有超过 70V 的裕量。

* 新能源汽车电力电子如何实现低 EMI

EMI 是一种源于外部的干扰。这种耦合干扰通过电磁感应、静电耦合或传导来影响电路。新能源汽车电源管理电子设备必须有 EMI 保护。在汽车环境中，48V 降压转换器必须符合 EMI 的 CISPR25 Class 5 规范。固定频率转换器通常在传导和辐射测试中衰减尖峰。可调节的 DC-DC 频率允许工程师在通过 EMI 测试时过滤特定频率。区别在于，恒定导通时间架构表现出的那些可变频率很少有好的 EMI 性能。

* 关于 48V 前端降压转换器应用

汽车的许多电子控制单元 (ECU)，具有良好的 EMI 性能。稳健的前端 48V 降压转换器接口能够承受电池的静态和动态电压条件。此外，该接口支持各种 16V 至 20V 的输出电压、电机控制栅极驱动器，并且在 12V 电池断开时提供 MCU 备用电源。48V 降压转换器与 12V 降压转换器相比，往往具有更高的开关损耗 (公式 1)。

$$PSW = 1/2 \times C \times V^2 \times f$$

其中 C 是寄生电容，V 是降压转换器的输出，f 是作业频率。

通过降低作业频率 (f)，可以减少开关损耗。此外，采用具有更小最低限值的先进工艺，也可以降低寄生电容 (C)。控制技术可以帮助实现低占空比运行。例如，16V 的输出和 48V 的输入会形成 (公式 2)。

$$D = BUCK_1 / BUCK_2$$

而 BUCK₁ 和 BUCK₂ 是额定输出电压，D 是占空比其 D = 16 / 48 或 D = 0.33。

根据这个计算，降压转换器的高压侧晶体管的导通时间占 33%，而低压侧晶体管的导通时间占 67%。可以按照这个计算结果来设计功率晶体管的尺寸，以获得最佳性能。

* 小结

硅 MOSFET 器件解决了高电压和成本问题。在解决了过电压不平衡问题后，串联配置的低电压功率半导体器件打造出了有效的功率转换系统解决方案，又解决了成本和效率问题。

对于汽车市场，较低额定电压的功率半导体器件因提供高效、低成本的功率转换解决方案而受益。物美价廉的低电压系列硅设计比较符合汽车环境的性价比要求。

2 新能源电动车热控制的电力驱动器与功率器件设计

应该说对新能源电动车热控制的电力驱动器与功率器件设计而言有多个方面,值此仅以新能源汽车空调压缩机驱动器与功率器件设计选择为例作重点分析。

2.1 从新能源热管理架构的分析为例作重点研讨

*** 新问题** 在新能源汽车里面我们把热管理做了一些归类,首先是一个冷源或者是热源的压缩器件,另外就是各种阀门的控制。如今可用三通、四通甚至五通的阀,把冷热进行交换,得到最终需要的温度。实际上从传统的车里面可以看到,在进行冷热交换的时候,它需要相应的控制逻辑与算法,执行机构是靠阀门来控制的,核心算法会涉及热管理架构问题。

* 热管理系统电气平台简述及所需关键零部件

从图 4 电动车热控制的电力图可知,把新能源车里的电气平台分为三个部分,第一个是高压 400 伏以上的,中间的是指燃油车做一些 48 伏的,12 伏平台是所有车都需要配备的。这台车里面有什么功率器件或者动力器件需要从功率角度来考虑呢?首先是风扇,大概 250-600 瓦,小电机与阀门控制在 200 瓦。水循环路径长需要用到高压水泵,可能要用 1000 到 2000 的水泵去控制水路循环。

下图 5 概括新能源车的功率部件需求,主逆变器从 30 千瓦可能上升到 400 千瓦。充电机从 3.3 千瓦到 22 千瓦,OBC 功率提升已经有很明显的需求了,很多用户

都在做 11 千瓦的,DC-DC 没有太大变化。涉及到热管理的 PTC 加热器大概 2-5 千瓦,水泵 1 千瓦,油泵 1 千瓦。这些功率标称是给大家一个比较直观的概念。

类别 Category	器件 Component	功率等级 Power [kW]
主逆变器 Main Inverter	IGBT SiC	30 - 400
车载充电机 OBC	CoolMOS IGBT SiC	3.3 - 22
高压-高压 DC-DC	CoolMOS SiC	1.5 - 3.0
PTC加热器 PTC Heater	IGBT	2 - 5
压缩机 Compressor	IGBT SiC	1.5 - 5
水泵 Water Pump	IGBT	0.2 - 1
油泵 Oil Pump	IGBT	0.2 - 1

图 5 概括新能源车的功率部件需求

2.2 新能源车空调压缩机控制器功率器件关键技术详解

* 热管理核心部件压缩机及 PTC 分析

其 PTC 泛指温度系数很大的半导体材料或元器件。

整个电动车技术的发展趋势,从传统燃油车应用发动机的余热管理加上机械式空调压缩机到混动车型来看,中国是偏向高压混动的(欧洲的很多车型是用 48 伏混动),所以需要不一样的电子压缩机。传统机械压缩机不会做智

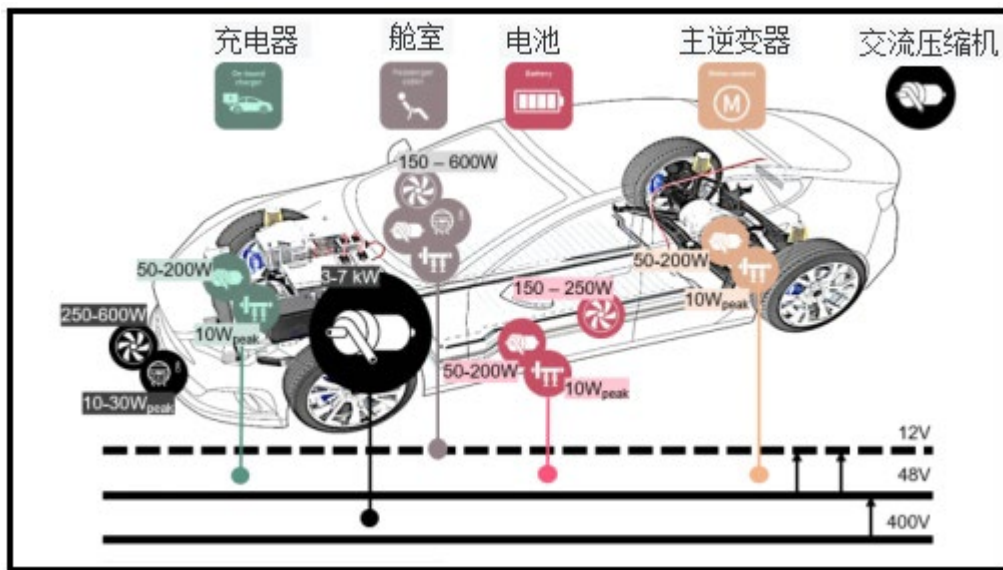


图 4 为电动车热控制的电力图

能管理, 动力来自传统汽油发动机。对于纯电动车型, 电子压缩机 (E-compressor) 功能需求越来越高, PTC 会进行辅助加热。如果用 PTC 的话, 在冬天会有较严重电池能量损耗, 所以现在大家都在研究高效的压缩机, 逐步降低 PTC 的功能, 通过热泵空调来实现热量管理, 从而满足整车的管理需求。

从压缩机和 PTC 的结构上来看, 电子压缩机其实就是一个三相逆变器, 控制逻辑和算法一致, 只是工作环境不一样, 需要不同的算法来控制 IGBT, 开关频率约 5-20kHz, 为什么频率范围这么大? 首先, 二氧化碳需要的压强更大, 传统压缩机 4Mp 左右压强, CO₂ 热泵空调需要增加一倍甚至更高的压强, 压缩机需要更高的转速控制来实现更大压强。其次, 氢燃料电池里面的压缩机, 这个需要更高速压缩机, 把空气用很大压力吹到转换机里面去, 这个压缩机驱动器需要用碳化硅这样的高速开关器件。PTC 也会分两种, 一种水冷式的, 一种空气的, 基本上都是用单个 IGBT 做控制, 会有高边和低边两种架构。

***MCU 选型原则**

今年, 行业内都将控制器移到 ECU/VCU。其 ECU 为电子控制单元, 又称“行车电脑”、“车载电脑”等。功能它和普通的电脑一样, 由微处理器 (MCU)、存储器 (ROM、RAM)、输入 / 输出接口 (I/O)、模数转换器 (A/D) 以及整形、驱动等大规模集成电路组成; 其 VCU 是实现整车控制决策的核心电子控制单元。

而控制器件里面有一个 MCU, 它相当于是一个分离

式的系统, 每个部件的控制器会和 ECU 进行通讯。现在更多的是这种 MCU 集成式方案, 用的 MCU 数量变少。以前 MCU 核数没有那么多, 算力没有那么高的要求, 发展到现在有 4 核、6 核 MCU。现在设计的紧凑性要求也越来越高, 物理空间要求缩减时可以把一切可以压缩的尽量节省, 可以把 MCU 做集成设计, 升级到域控制器。传统的做法是一个主控的 MCU 域控制器, 子系统功能集成。热管理系统可是一个单独的领域, PTC、电子压缩机、水泵基本上属于一个控制体系。BMS 和热管理系统有非常强的物理连接, 热管理与电池管理系统 (BMS) 可以有一些混合型的域控制概念。这种方式会大量减少 MCU 数量, 成本上会有比较大改善。

2.3 功率器件选型原则

前面讲的是电子电气上的控制架构, 这里面有两大核心器件, 一个 MCU 控制器, 另一个就是功率器件执行部分。在执行部分, 功率器件选择以开关频率和功率来判断。图 6 为何选择更适合于 HV 电子压缩机的功率器件方案示意框图。横轴是以开关频率来选择功率器件, 纵轴是它能够支持的功率范围, 四分之一圆的灰色部分是以传统硅器件所能达到的功率与频率适用范围, 蓝色和紫色的部分是最新第三代半导体的 SiC 和 GaN 器件的适用区域, GaN 适用非常高频场合, 但是目前的技术没有办法做到功率超过 10 个千瓦。碳化硅适用范围就很广, 功率也可以做到从 10 千瓦到 10 个兆瓦。OBC 上三种器件都会有应用, 电子压缩机和 PTC 目前基本上会用碳化硅和硅的器件做控制。

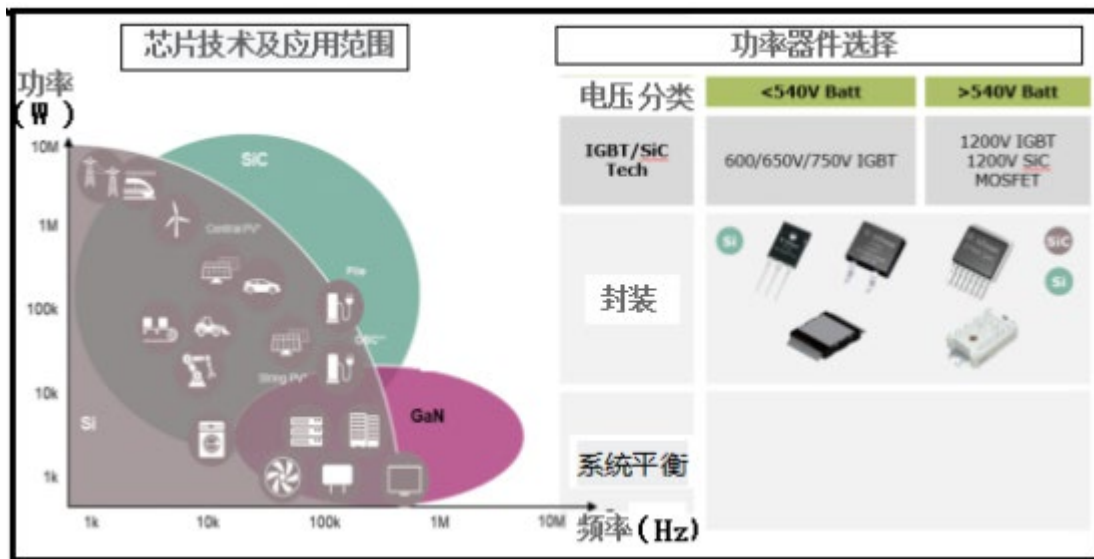


图 6 为何选择更适合于 HV 电子压缩机的功率器件方案示意框图

从器件选型来看,基本特性是开关频率和功率来决定器件的选型。除此之外还有一个最重要因素就是器件的封装,这个会直接影响到产品的设计。功率器件电压等级可分成两部分,工作电压小于540伏和电压大于540伏。对于小于540V的母线电压提供650~750伏的功率器件,大都会用Si器件;对于电压大于540V的环境,Si和SiC都可以选择。Si IGBT用在低开关频率应用上会比较有优势,但是如果开关频率比较高的场合,SiC MOSFET表现会更好。

不管是从电压规格选择,还是从不同封装选择,最终都要回归到成本和效率。首先需要考虑多大功率需求、什么样的系统效率,其次就是系统设计方案,最后生产成本、系统效率和售后成本上,得到一个最优化的方案。

回归到器件本身特性来讲,在辅助驱动里面目前可以提供三代IGBT方案,第一代是600V IGBT3技术,目前市面上用的很多方案都是600伏的器件,第二种650V TRENCHSTOP5 IGBT,第三种是最新的750V EDT2芯片。晶圆从6 inch升级到8 inch,成本和性能都大幅优化。还有就是芯片耐压值的提升,通过系统优化和最大化利用功率器件可以承受的耐压值,电流不变的情况下可以提供功率,功率密度提升会给系统带来非常大的成本优化。

前面讲的是硅的器件发展,接下来看看碳化硅,目前碳化硅将有不同规格的产品推出。从原材料到系统,一般从四个层面考虑碳化硅产业链:首先是基片材料,车规级碳化硅基片目前已经认证了三家供应商;其次是芯片技术,市场上有两种工艺,分别是平面工艺和沟槽工艺,采用的是非对称式沟槽工艺,希望可以兼容Si IGBT的驱动设计理念让SiC的使用与IGBT一样简单可靠;第三是将芯片封装成不

同的器件,有分立与模块等;最后是考虑系统设计与优化。

碳化硅器件可以显著的提升系统效率。在选用功率器件时,哪些参数是我们首要考虑的:首先,要根据开关频率来决定功率器件类型,以及技术选择,Si IGBT还是SiC MOSFET,这些都会影响系统设计;其次,功率器件耐压值600伏、650伏等依据系统工作电压与应力要求来确定;第三,根据系统功率要求来确定电流等级。这些是比较基本的参数选择,这里列举了一些关键参数,比较开关损耗、结至壳的热阻等都会影响功率器件选型。这几年和一些业内客户交流,因为热管理方面的经验不足,他们尽量选用的规格很大,以保证系统有充足的裕量设计。这样会带来一个问题,成本不会有太多的优化空间。系统成本应该是选择最合适的器件来满足系统要求,从而带来更好的成本优化。

3 后话

上述新技术及半导体在新能源汽车系统中的构建与应用二大问题可归纳为:

* 硅 MOSFET 器件解决了高电压和成本问题。在解决了过电压不平衡问题后,串联配置的低电压功率半导体器件打造出了有效的功率转换系统解决方案,又解决了成本和效率问题。对于汽车市场,较低额定电压的功率半导体器件因提供高效、低成本的功率转换解决方案而受益。物美价廉的低电压系列硅设计比较符合汽车环境的性价比要求。

* 当今国内外宽禁带半导体器件有不少著名厂商(例英飞凌公司就是一典例),它们在功率系统中,除了功率器件外,系统级的支持必不可少。可以提供完整的解决方案,包括感知、控制、执行与电源管理与通信器件。

上接190页

参考文献

- [1] 陈明森. 电感中的新秀《一体成型电感》. <https://wenku.baidu.com/view/fale7c04770bf78a6429543c.html>
- [2] 陶龙旭, 何俊彦, 张怀武, 钟智勇. 一体化成型电感铁粉心软磁复合材料研究进展. 磁性材料及器件, Vol 43 No1, 2012年2月, 1~5

- [3] 李银传, 杨代权, 李巍, 顾立波. FeNiCr 一体成型电感材料的特点. 磁性元件与电源, 2018年12月, 137~138, 142页
- [4] 一体化成型电感工艺流程的七大优势. www.gujingcoil.com/202011717851031.html
- [5] 王上衡. 金属软磁粉末在电感器中的应用. <https://wenku.baidu.com/view/9127bd82a2b925c52dc5bf9d.html>