

清华大学汽车工程系列教材

汽车电力电子学

Automotive Power
Electronics

高大威 编著

Gao Dawei

清华大学出版社

Automotive Power
Electronics

清华大学汽车工程系列教材

汽车电力电子学

Automotive Power Electronics

高大威 编著

Gao Dawei

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地介绍了汽车电力电子器件的结构、原理、特性、使用方法以及汽车电力电子系统或部件的组成、工作原理、控制方法等。内容包括：汽车电力电子技术的特点和发展趋势；汽车电力电子器件的结构、原理和特性；汽车电力电子器件的失效机理与使用方法；传统汽车中的电力电子技术；电动汽车直流-直流变换器、电动汽车驱动电机系统以及电动汽车充电系统的组成、工作原理和控制方法；汽车电力电子系统或部件的电磁兼容问题。

本书可作为高等院校车辆工程、机械工程、交通运输等专业本科生和研究生的教材或参考书，也可作为相关科研机构和汽车行业技术人员的参考书。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

汽车电力电子学/高大威编著. —北京：清华大学出版社，2018
(清华大学汽车工程系列教材)
ISBN 978-7-302-51302-5

I. ①汽… II. ①高… III. ①汽车—电力电子学—高等学校—教材 IV. ①U463.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 223825 号

责任编辑：许 龙 赵从棉

封面设计：常雪影

责任校对：刘玉霞

责任印制：刘海龙

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>，<http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社 总 机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市吉祥印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：21.25

字 数：514 千字

版 次：2018 年 11 月第 1 版

印 次：2018 年 11 月第 1 次印刷

定 价：55.00 元

产品编号：044947-01

前言



汽车电力电子学是以汽车构造与原理、现代电力电子学、计算机科学、电工学、电子学、控制理论等学科为理论基础,研究电力电子器件、电力电子电路及电力电子装置在汽车上应用的多学科交叉的综合性学科,可以简单概括为关于电力电子技术在汽车领域应用的相关知识或理论。

汽车电力电子系统(或部件)已经成为汽车的重要组成部分,其自身的性能对汽车的动力性、经济性、可靠性、安全性、稳定性和舒适性等具有直接而重要的影响。汽车电力电子技术已经成为现代汽车领域关注和研究的热点。

目前,在以内燃机为动力的传统汽车上,电力电子技术应用非常广泛,从发电机到起动机,从照明系统到发动机控制系统,处处都存在电力电子技术。传统汽车正在发展中的一些前沿技术,如智能电气系统、底盘电气化系统以及各类线控技术等,更是离不开电力电子技术。

进入 21 世纪以来,随着人们对能源严重短缺和环境污染等问题的重视,新能源汽车开始成为汽车厂商和研发机构的研究热点。无论是纯电动汽车还是混合动力汽车或被人们视为更加绿色环保的燃料电池汽车,电力电子技术都在其中扮演着重要角色。

近年来受到普遍关注的智能汽车,由于采用了更多的电气执行部件,电力电子相关技术得到了更广泛的应用。

汽车的工作环境具有高温、高寒、高湿、高振动、高海拔等特点,对电力电子器件、电力电子电路、电力电子控制等方面提出了非常高的要求,因此汽车技术自身的发展也推动了电力电子技术进步。

汽车电力电子学相关知识的普及以及对相关理论的进一步深入研究具有非常重要的意义。

为了适应汽车技术快速发展和人才培养的需求,清华大学开设了“汽车电力电子学”课程。借鉴该课程讲义和多年教学经验,同时吸收了近年来国内外最新的汽车电力电子技术成果,编者编写了本书。

本书共分 8 章。第 1 章为绪论,介绍汽车电力电子学的发展历程、应用领域以及汽车电力电子技术的特点和发展趋势;第 2 章介绍汽车常用电力电子器件的结构、原理和特性;第 3 章分析汽车电力电子系统的可靠性以及汽车电力电子器件的使用方法;第 4 章阐述传统汽车中的电力电子技术;第 5 章介绍电动汽车的直流-直流变换器;第 6 章介绍电动汽车的

驱动电机系统；第7章介绍电动汽车的充电系统；第8章介绍汽车电力电子系统的电磁兼容。

本书得到了国家重点研发计划项目(编号：2016YFE0102200、2018YFB0105502)和北京市自然科学基金项目(编号：3172019)的支持，并引用了项目的部分研究成果。

在本书的编写过程中，编者得到了清华大学汽车工程系众多同事的支持以及新能源汽车研究团队的大力帮助，编者所在汽车电力电子与电机驱动课题组的研究生参与了本书部分文字和图形的校对工作，在此向他们表示衷心的感谢。

书后列出了主要的参考文献。在此，对所有参考文献的作者表示诚挚的谢意。

本书可作为高等院校车辆工程、机械工程、交通运输等专业本科生和研究生的教材或参考书，也可作为相关科研机构和技术人员的参考书。

由于编写时间较短、相关资料不足和编者水平有限，本书难免存在许多不足之处，恳请广大读者批评指正，并将意见和建议反馈，以便进一步修订和完善。

编者

2018年8月于清华园

目录



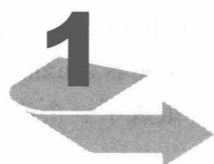
1	绪论	1
1.1	概述	1
1.2	汽车电力电子学的发展历程	4
1.3	汽车电力电子学的应用领域	4
1.3.1	传统汽车上的应用	4
1.3.2	新能源汽车上的应用	5
1.4	汽车电力电子技术的特点和发展趋势	5
1.4.1	汽车电力电子技术的特点	5
1.4.2	汽车电力电子技术的发展趋势	6
2	汽车电力电子器件	8
2.1	汽车电力电子器件概述	8
2.2	半导体物理基础	10
2.2.1	半导体中的电子状态和能带	10
2.2.2	禁带宽度与宽禁带半导体材料	11
2.2.3	本征浓度	13
2.2.4	掺杂与杂质半导体	15
2.2.5	载流子的漂移与扩散	17
2.2.6	载流子的激发与复合	21
2.2.7	PN 结理论	21
2.2.8	金属和半导体接触理论	29
2.3	功率二极管	32
2.3.1	功率 PIN 二极管	32
2.3.2	功率肖特基势垒二极管	36
2.3.3	功率混合 PIN-Schottky 二极管	38
2.4	晶闸管	39
2.4.1	晶闸管的结构和工作原理	39
2.4.2	晶闸管的静态特性	41

2.4.3	晶闸管的开关特性	42
2.5	功率 MOSFET	43
2.5.1	功率 MOSFET 的结构和工作原理	44
2.5.2	功率 MOSFET 的静态特性	47
2.5.3	功率 MOSFET 的开关特性	49
2.6	绝缘栅双极晶体管	56
2.6.1	IGBT 的结构和工作原理	56
2.6.2	IGBT 的静态特性	59
2.6.3	IGBT 的开关特性	60
3	汽车电力电子系统的可靠性	64
3.1	汽车电力电子系统可靠性基础	64
3.1.1	可靠性的基本概念	64
3.1.2	可靠性主要术语与特征量	65
3.1.3	汽车电力电子系统的失效	67
3.1.4	汽车电力电子系统的可靠性工作流程	70
3.2	汽车电力电子器件的安全工作区与失效分析	72
3.2.1	功率二极管的安全工作区与失效分析	72
3.2.2	晶闸管的安全工作区与失效分析	73
3.2.3	功率 MOSFET 的安全工作区与失效分析	73
3.2.4	IGBT 的安全工作区与失效分析	74
3.3	无源元件的失效分析	77
3.3.1	电阻器的失效	77
3.3.2	电感器的失效	80
3.3.3	电容器的失效	83
3.4	汽车电力电子系统的安全工作区	86
3.5	汽车电力电子器件的驱动和保护	87
3.5.1	汽车电力电子器件的驱动	87
3.5.2	汽车电力电子器件的保护	92
3.6	汽车电力电子器件的热管理	97
3.6.1	汽车电力电子器件热管理的作用	97
3.6.2	汽车电力电子器件的封装	98
3.6.3	汽车电力电子器件的基本传热方式	104
4	传统汽车中的电力电子技术	110
4.1	传统汽车中的电力电子电路结构	110
4.2	汽车电源系统与三相全桥整流电路	114
4.3	发动机电控系统 中的电力电子技术	117
4.3.1	汽油机电子点火系统	117
4.3.2	发动机燃油喷射控制	119

4.4	有刷直流电机的驱动控制	123
4.4.1	有刷直流电机的结构和工作原理	123
4.4.2	永磁直流电动机的数学模型与工作特性	125
4.4.3	PWM 控制基本原理	126
4.4.4	永磁直流电动机的控制	127
4.5	无刷直流电机的驱动控制	130
4.5.1	无刷直流电机的结构和工作原理	130
4.5.2	无刷直流电机的数学模型和工作特性	133
4.5.3	电流滞环跟踪 PWM 控制	135
4.5.4	无刷直流电机的控制	136
5	电动汽车直流-直流变换器	141
5.1	直流-直流变换器的作用与分类	141
5.1.1	直流-直流变换器的作用	141
5.1.2	直流-直流变换器的分类	143
5.2	燃料电池汽车单向直流-直流变换器	143
5.2.1	燃料电池汽车动力系统构型	143
5.2.2	降压型直流-直流变换器	145
5.2.3	升压型直流-直流变换器	152
5.2.4	升降压型直流-直流变换器	159
5.2.5	高电压增益直流-直流变换器	163
5.2.6	单向直流-直流变换器的控制	166
5.2.7	单向直流-直流变换器的损耗	175
5.3	双向非隔离型直流-直流变换器	179
5.3.1	双向非隔离型直流-直流变换器的电路结构	179
5.3.2	双向非隔离型直流-直流变换器的控制	180
5.4	交错式直流-直流变换器的电路结构与控制	182
5.4.1	交错式直流-直流变换器的电路结构	182
5.4.2	交错式直流-直流变换器的控制	186
5.5	隔离型直流-直流变换器	187
5.5.1	电动汽车隔离型直流-直流变换器的特点	187
5.5.2	全桥式直流-直流变换器	188
5.5.3	半桥式直流-直流变换器	190
5.6	直流-直流变换器的软开关技术	191
5.6.1	软开关的基本概念	191
5.6.2	LLC 谐振直流-直流变换器	192
5.6.3	有源钳位正反激直流-直流变换器	197
6	电动汽车驱动电机系统	200
6.1	电动汽车驱动电机系统概述	200

6.1.1	驱动电机系统的作用与驱动形式	200
6.1.2	驱动电机的类型	202
6.1.3	整车对驱动电机系统的技术要求	203
6.2	永磁同步电机的结构、原理与控制	205
6.2.1	永磁同步电机的结构与工作原理	205
6.2.2	永磁同步电机的数学模型	207
6.2.3	永磁同步电机的矢量控制	212
6.3	交流感应电机的结构、原理与控制	217
6.3.1	交流感应电机的结构与工作原理	217
6.3.2	交流感应电机的数学模型	218
6.3.3	交流感应电机的矢量控制	223
6.3.4	交流感应电机的弱磁控制	228
6.4	电压型逆变电路与脉宽调制技术	233
6.4.1	电压型逆变器主电路结构	233
6.4.2	三相电压型逆变电路的正弦脉宽调制	235
6.4.3	三相电压型逆变电路的空间矢量脉宽调制	238
7	电动汽车充电系统	242
7.1	电动汽车充电系统概述	242
7.1.1	电动汽车充电系统的分类	242
7.1.2	电动汽车充电系统的构成	243
7.1.3	电动汽车充电系统的要求	245
7.2	充电系统中的整流电路	245
7.2.1	单相桥式不控整流电路	245
7.2.2	单相桥式全控整流电路	247
7.2.3	三相桥式全控整流电路	248
7.2.4	充电系统中的同步整流技术	249
7.3	功率因数校正电路	252
7.3.1	谐波和功率因数	252
7.3.2	单相功率因数校正电路	254
7.3.3	三相功率因数校正电路	259
7.4	感应式无线电能传输	263
7.4.1	耦合线圈的数学模型与等效电路	263
7.4.2	耦合线圈的补偿与谐振电路	266
7.4.3	耦合线圈的电能传输特性	275
7.4.4	无线充电系统的电磁安全性	276
7.5	充电系统的控制	279
7.5.1	车载储能部件的充电模式	279
7.5.2	传导式充电系统的控制	283

7.5.3 无线充电系统的控制	283
7.6 充电系统与电机驱动系统的集成	286
8 汽车电力电子系统的电磁兼容	290
8.1 电磁兼容基本概念与术语	290
8.1.1 电磁兼容的基本概念	290
8.1.2 主要的电磁兼容术语	291
8.2 汽车电力电子系统的电磁噪声	293
8.2.1 汽车电磁噪声的类型	293
8.2.2 汽车电力电子系统电磁噪声的产生原因	295
8.2.3 静电放电对汽车电力电子系统的影响	299
8.2.4 汽车电磁噪声的耦合途径	299
8.3 汽车电力电子系统电磁兼容性测试	302
8.3.1 电磁兼容性测试中的单位及换算	302
8.3.2 汽车电力电子系统电磁兼容性测试内容	303
8.4 汽车电力电子系统电磁干扰的抑制	305
8.4.1 屏蔽	305
8.4.2 接地	309
8.4.3 滤波	311
8.4.4 隔离	313
附录 主要术语索引	314
参考文献	328



绪 论

1.1 概 述

电力电子学(power electronics)这一术语出现在 20 世纪 60 年代,目前国内外普遍接受的定义是:电力电子学是关于“利用电力电子器件组成不同拓扑结构的电路,并以此完成电能控制和不同形式电能之间转换”的理论。电力电子相关技术拓宽了传统电子学的应用领域,为现代通信、计算机、工业自动化、电力工业、航天、汽车等高新技术领域提供高性能、高精度和高效率的电能转换和控制设备,成为发展高新技术的基础和关键。

汽车电力电子学(automotive power electronics)是一门多学科交叉的综合性学科,其以汽车构造与原理、现代电力电子学、计算机科学、电工学、电子学、控制理论等学科为基础,研究电力电子器件、电力电子电路及电力电子装置在汽车上的应用。汽车电力电子学可以简单概括为电力电子技术应用于汽车领域时的相关知识或理论。

电力电子器件是电力电子学应用的物质基础,传统电子学领域的电子器件与电力电子器件存在许多联系和区别,前者更多地用于进行模拟或数字类电信号的处理,体现出低电压、小电流和小功率的特点;而后者往往工作在高电压、大电流和大功率条件下。虽然有些文献将额定电流大于 1A 的电子器件归类为电力电子器件^[1],但两者的界限并不是非常清晰。与此相关,“汽车电子”与“汽车电力电子”这两个术语之间也具有一定的关联和区别。例如,发动机控制系统中的点火系统以及燃油喷射系统,由于采用了功率金属-氧化物-半导体场效应晶体管(功率 MOSFET)作为执行器件,可以看作是汽车电力电子技术的应用,但在现有的技术体系中,往往将其归为汽车电子领域。表 1-1 给出了“汽车电力电子”和“汽车电子”各自具有的技术特征。

表 1-1 “汽车电力电子”与“汽车电子”的技术特征

类 别	汽车电力电子	汽车电子
电压	12~1200 V	3.3/5 V
电流	1A 至数百安	数百毫安
功率	数十瓦至数百千瓦	数瓦至数十瓦
目的	电能转换或控制	模拟或数字信号处理
器件	电力电子器件	模拟或数字电子器件

汽车电力电子系统可定义为：为执行不同形式车载电能之间转换任务所必需的所有元件的完整集合。汽车电力电子部件的定义为：组成汽车各个部分的具有不同形式电能之间转换技术特征的基本单元。因此，汽车电力电子系统可以指单一的汽车电力电子部件，也可以是多个汽车电力电子部件的集成或组合。图 1-1 给出了一个乘用车的燃料电池汽车动力系统结构示意图，图中与燃料电池输出侧连接的直流-直流变换器（也称为主 DC-DC 变换器，main DC-DC converter）、辅助直流-直流变换器（也称为辅助 DC-DC 变换器，auxiliary DC-DC converter）、电机控制器（motor controller）三个汽车电力电子部件组成了一个汽车电力电子系统。

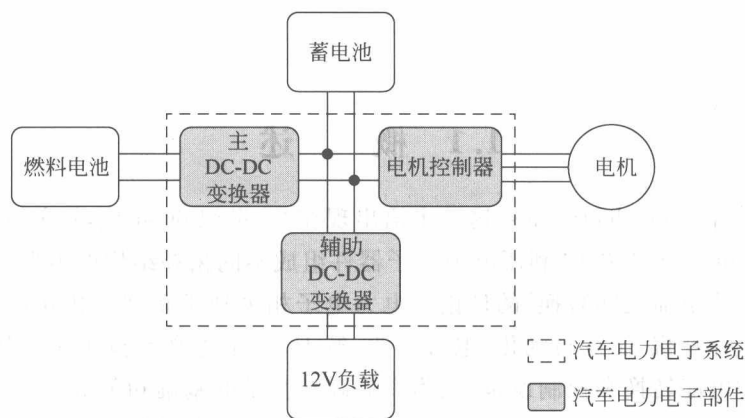


图 1-1 燃料电池汽车动力系统结构示意图

一个汽车电力电子部件应具有下列特征。

(1) 功能上：完成一种形式电能到另一种形式电能的变换。
 (2) 电气结构上：包括电力电子电路及维持其正常工作所需的辅助电路，如驱动电路 (driving circuit)、保护电路 (protection circuit)、微控制单元 (micro controller unit, MCU)、数据采集电路 (DAQ circuit)、通信电路 (communication circuit)、电源电路 (supply circuit) 等。一般把电力电子电路称为主电路 (main circuit)，而把所有的辅助电路统称为控制电路 (control circuit)。

(3) 机械结构上：包括导电母排、机械安装接口、各类连接器、散热子系统、防护外壳等。

(4) 满足车用条件：具有较高的功率密度和效率；具有一定的防护等级和电气绝缘性能；具有较强的环境适应性和电磁兼容性 (electromagnetic compatibility, EMC)。

图 1-2 所示为典型的电动汽车永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 驱动系统的构成，包括作为电源的动力蓄电池、实现直流-交流电能变换的驱动电机控制器以及实现电能-机械能变换的永磁同步电机。在图 1-2 所示系统中，电机控制器是一个汽车电力电子部件，其内部主要包括主电路和控制电路两大部分。主电路主要由电力电子器件构成，用来完成直流-交流之间的电能变换，如图 1-3 所示。三相电机控制器的主回路普遍采用三相桥式电路结构，每相桥臂由上下两组电力电子器件构成，图中的 V_1 与 V_4 、 V_3 与 V_6 、 V_5 与 V_2 分别构成 A、B、C 三相桥臂。同时，直流侧连接有电容 C_{DC} 。控制电路由数字信号处理器 (digital signal processor, DSP)、驱动电路、保护电路等组成。

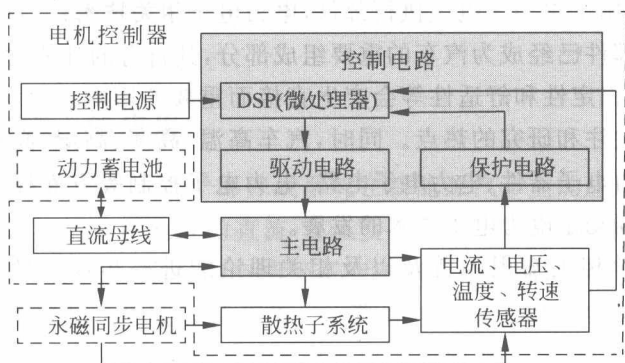


图 1-2 电动汽车永磁同步电机驱动系统的组成

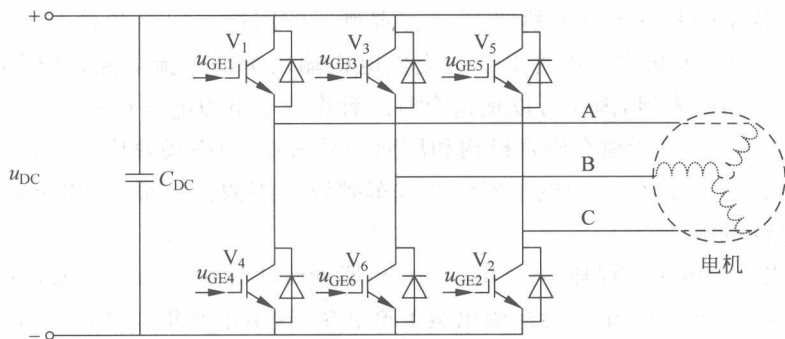


图 1-3 三相电机控制器主电路

当电机驱动车辆行驶时,电机工作在电动(motoring)状态,电能从蓄电池经电机控制器流向电机,电机控制器将直流形式的电能逆变为交流形式的电能;当车辆制动时,电机工作在发电(generating)状态,电能从电机经电机控制器流向蓄电池,电机控制器将交流形式的电能整流为直流形式的电能。电机控制器中的控制电路根据电机实际工作状态,并基于驾驶员意图,对主电路中电力电子器件(图 1-3 中 $V_1 \sim V_6$)的通断进行控制,从而实现对电机转矩或转速的控制。换言之,在电机控制器中,大功率电能的转换是通过对主电路中电力电子器件工作状态的控制来实现的。而如何让电力电子器件按正常工作时序通断,则是控制电路的功能。除具有主电路和控制电路外,电机控制器还有各类传感器、散热子系统、连接母排、控制电源以及图 1-2 中没有画出的连接器、防护壳体等构件或子系统。

电力电子技术在汽车上的应用越来越多,作用也越来越明显,这一点已获得汽车厂商和研发机构的广泛认同。在以内燃机为动力的传统汽车上,从发电机到起动机,从照明系统到发动机控制系统,处处都存在电力电子技术。传统汽车正在发展中的一些前沿技术,如智能电气系统、底盘电气化以及各类线控(x-by-wire)技术等,更是离不开电力电子技术。进入 21 世纪以来,随着人们对能源严重短缺和环境污染等问题的重视,新能源汽车开始成为汽车厂商和研发机构的研究热点,部分产品如丰田公司的混合动力汽车普锐斯(Prius)等已经产业化较长时间。从目前来看,无论是纯电动汽车还是混合动力汽车乃至被人们视为更加绿色环保的燃料电池汽车,电力电子技术都在其中扮演着重要角色。近年来受到普遍关注

的智能汽车,由于采用了更多的电气执行部件,电力电子相关技术将会得到更广泛的应用。

汽车电力电子部件已经成为汽车的重要组成部分,其自身的性能对汽车的动力性、经济性、可靠性、安全性、稳定性和舒适性等会产生直接而重要的影响。汽车电力电子技术已经成为现代汽车领域关注和研究的热点。同时,汽车高温、高寒、高湿、高振动、高海拔等特殊的工作环境也对电力电子器件、电力电子电路、电力电子控制等方面提出了非常高的要求。汽车技术的进步也推动了电力电子技术的发展。

汽车电力电子学相关知识的普及以及相关理论的进一步深入研究具有非常重要的意义。

1.2 汽车电力电子学的发展历程

电力电子技术的起源可以追溯到 1957 年晶闸管的问世。1963 年汽车部件生产商德国 BOSCH 公司开始将大功率二极管用于交流发电机输出侧的整流电路,开创了电力电子技术在汽车领域应用的先河,因此可以把这个时间看作汽车电力电子技术发展的起点。

20 世纪 70 年代,不断地有研发机构和厂商将晶闸管、功率场效应晶体管用于整车电气系统或发动机控制系统,但电力电子器件在汽车领域应用的范围很小,相应地,汽车电力电子技术发展比较缓慢。

1989 年,电气与电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers,IEEE)以 Automotive Power Electronics 为标题出版了论文集,这本论文集收录论文的内容以电力电子技术在汽车电气系统上的应用为主^[2]。

20 世纪 90 年代,不断地有学者发表以 Automotive Power Electronics 为主要内容的论文,阐述电力电子技术在汽车领域应用方面取得的新研究成果。

进入 21 世纪后,随着新能源汽车尤其是电动汽车相关技术的发展,电力电子技术在汽车领域的应用范围得到了极大的拓展。一方面,电力电子技术的进步对车辆的相关技术产生了非常大的推动作用;另一方面,汽车技术的不断发展,也对电力电子技术提出了更高的要求。

1.3 汽车电力电子学的应用领域

1.3.1 传统汽车上的应用

在以内燃机为动力的传统汽车上,汽车电力电子技术的应用主要集中在整车电气系统、发动机控制系统、制动系统、转向系统、底盘系统、车身电气设备等,具体为

- (1) 整车电气系统:发电机控制、起动机控制、多电压电气系统等;
- (2) 发动机控制系统:点火系统、燃油喷射系统、节气门控制等;
- (3) 制动系统:气制动阀、液压制动阀控制等;
- (4) 转向系统:电动助力电机控制、电动液压泵电机控制等;
- (5) 底盘系统:主动悬挂控制等;
- (6) 车身电气设备:照明系统、车窗控制、车门控制、冷却风扇控制等。

除以上应用领域外,传统汽车上先进车辆控制技术的使用也往往对汽车电力电子技术具有很强的依赖性。

1.3.2 新能源汽车上的应用

与传统汽车相比,汽车电力电子部件或系统在新能源汽车上的应用更为明显和重要,其中不仅包括处于动力系统重要地位的直流-直流变换器、驱动电机控制器等核心部件,也包括充电系统、电动助力转向系统、电动空调等新能源汽车所需辅助部件或系统。

(1) 直流-直流变换器。主要包括两类:一类为电动汽车用小功率辅助直流-直流变换器,其主要功能是将动力蓄电池提供的高压直流电能变换为 12 V 或 24 V 低压直流电能,供整车控制系统、车身电气系统等使用。这类直流-直流变换器,对于乘用车,功率为 1~3 kW;对于商用车,功率为 3~5 kW。另一类为用于燃料电池和动力蓄电池两个动力源电压匹配和功率分配的大功率直流-直流变换器,这类直流-直流变换器的功率可达几十至近百千瓦。

(2) 电机控制器。电动汽车普遍采用交流异步电机或永磁同步电机来驱动车辆,电机控制器将动力蓄电池的直流电能变换为驱动电机所需的交流电能,是电动汽车的核心部件。对于部分新能源汽车,在电机控制器与动力蓄电池之间还会配有双向直流-直流变换器,用于提高电机控制器输入电压,进而提升驱动系统的综合性能。从功能角度看,这种复合电力电子装置仍可以看作电机控制器。车用电机控制器的功率范围通常为几十至数百千瓦。

(3) 充电系统。充电系统集成了整流、逆变、直流-直流等多个电能变换环节,具有非常复杂的电力电子拓扑结构。它反映了电力电子器件、电力电子控制、电力电子电路等电力电子学核心理论体系在汽车领域的综合应用,可以说是汽车电力电子学应用方面的典型代表。充电系统的功率范围一般为几千瓦至数十千瓦。

对于新能源汽车,除上述应用领域外,电力电子技术还在锂离子电池管理与均衡、燃料电池空气压缩机驱动与控制、电动空调、电动转向、电动制动等领域有所应用。

1.4 汽车电力电子技术的特点和发展趋势

1.4.1 汽车电力电子技术的特点

现代汽车电力电子技术的主要特点表现在以下几个方面。

1) 高效率

高效率体现在汽车电力电子器件和汽车电力电子部件两个层次。对于器件来说,由于导通损耗和开关损耗不断降低,尤其是一些宽禁带(wide band gap, WBG)材料功率器件(如碳化硅器件)的出现和使用,大大提高了器件的工作效率;对于部件来说,采用一些先进控制技术或进行电路拓扑结构优化,可以有效提高汽车电力电子部件的工作效率。

2) 高频率

高频工作是汽车电力电子器件的一个典型特征。大功率直流-直流变换器、电机控制器等电力电子器件的开关频率普遍不低于 20 kHz;在无线充电系统中,开关器件工作频率往往接近 100 kHz。较高的频率可以减轻因器件通断引起的部件工作噪声对车辆司乘人员产生的影响,但同时也会增加设备的开关损耗,并且可能带来突出的汽车电磁兼容问题。

3) 高密度

由于汽车空间有限,同时各部件之间有机械、电气之间的连接和耦合,因此汽车部件的结构设计非常关键。汽车电力电子部件应在满足整车的电气、机械、冷却的需求以及整车安装空间的要求前提下,尽可能提高质量功率密度(功率与质量的比值,单位 kW/kg)以及体积功率密度(功率与体积的比值,单位 kW/L)。汽车电力电子器件越来越高度集成化,分立器件的使用越来越少。多器件模块化以及采用先进工艺可使汽车电力电子器件以及汽车电力电子部件的功率密度越来越高。

4) 智能化

传统汽车上的电力电子器件往往作为电子控制单元(electronic control unit, ECU)的执行器件出现,在一定程度上可将信息处理和功率处理合二为一,这样使电力电子器件的工作呈现智能化的特点。而对于新能源汽车,大功率电力电子部件多采用控制类数字信号处理芯片或高性能微控制单元,从而具有较好的控制精度和数据处理的实时性。虽然目前汽车电力电子电路和智能化控制技术的结合程度已经很高,但还有很大的发展空间。

5) 高性能电力电子器件的应用

与汽车电子领域类似,许多半导体厂商针对汽车应用领域陆续推出了汽车级电力电子器件(automotive qualified power electronic devices),这类器件为适应汽车恶劣的工作环境以及满足安全性、可靠性和耐久性的要求,普遍具有高结温、高效、高可靠性和长寿命的特点。这类器件成本往往也较高。

6) 复杂的工况和频繁的变载

和一些工业用电力电子设备不同,汽车电力电子部件工作在较复杂的工况下,其电气载荷经常会发生剧烈变化。以纯电动汽车为例,驱动车辆所需的能量几乎全部经过电机控制器,而车辆自身质量的变化、驾驶员的操作习惯、实际道路条件等都对电机的输出功率产生较大的影响。相应地,电机控制器输出的电流、电压随之发生剧烈的波动。同样,对于一些车载直流-直流变换器来说,工况仍然比较复杂,只是相对电机控制器,负载变化相对平缓。频繁的变载对汽车电力电子部件的自身控制提出了很大的挑战,同时对电力电子器件的选择以及系统热管理提出了更严格的要求。

7) 突出的电磁兼容问题

汽车电力电子部件工作在高频开关状态,汽车电力电子部件主电路总是在两个或几个不同的电路结构之间不断切换,电路中的电压和电流会含有丰富的高次谐波成分。高电压、大电流是汽车电力电子电路的普遍特点,较高的 di/dt 和 du/dt 除对电力电子器件本身产生较大的电气应力外,还会引起对外的电磁干扰(electromagnetic interference, EMI)。

1.4.2 汽车电力电子技术的发展趋势

现代汽车电力电子技术的发展与汽车自身特点密切相关,汽车电力电子技术的发展趋势主要体现在五个方面。

1) 节能高效

节能高效是汽车电力电子技术持续追求的目标。低效的汽车部件不仅会降低整车动力系统的性能,而且可能增加车辆散热系统成本和重量,进而增加整车整备质量,降低整车经济性和续航里程。汽车电力电子部件的工作效率与电力电子器件的损耗、电路中无源元件

(电感、电容等)的损耗密切相关,也与控制方法、电路工作模式具有很大的关联性。

2) 电磁环境友好

电磁兼容性是电力电子技术应用中的一个难点,如何抑制和降低汽车电力电子部件对汽车其他电气部件或系统产生的电磁干扰,进而改善整车的电磁环境是汽车电力电子学研究的热点问题。

3) 安全可靠

安全可靠是汽车上任何新技术被采用的一个前提,汽车电力电子技术也不例外。如何保证电力电子部件安全、可靠地工作,并不对车辆其他部件产生不良影响,是摆在研发人员面前的一个重要课题。

4) 器件的定制化和模块化

由于受车辆空间和部件布置的限制,不同厂家、不同类型的车辆对汽车电力电子部件的外形、体积和重量提出了不同的要求。作为汽车电力电子部件核心的电力电子器件的需求也会呈现差异化的特点,按不同整车或部件厂家提出的要求,实现电力电子器件定制化和模块化生产,是汽车电力电子器件的一个发展趋势。

5) 先进控制理论和控制方法的应用

电力电子系统是一种非线性、变结构、电压电流经常突变的离散系统,特别是与一些负载(如电机)构成的系统更是具有强耦合、多变量、非线性的特征。经典的电路理论和控制方法有时无法直接处理电力电子系统的控制问题,也不能满足汽车对电力电子部件的安全、可靠、动态响应快等方面的要求。此外,汽车多采用分层控制,如分为整车控制、动力系统控制以及部件控制,汽车电力电子部件除了要满足整车对自身的性能要求外,还要满足其他层次的控制要求。高性能 DSP 或 MCU 在电力电子控制领域得到了普遍的应用,为一些复杂的控制算法提供了较好的实现手段。现代控制理论与控制方法由于具有自适应、自学习等特点,在电力电子控制领域具有较好的发展前景。