



普通高等教育“十二五”规划教材
电气工程、机械工程类专业规划教材

程夕明 编著

功率电子学原理及其应用



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电气工程、机械工程类专业规划教材

功率电子学原理及其应用

程夕明 编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书用图和表帮助读者理解功率电子学的基本概念、电路拓扑及其工作原理,采用 PSIM 软件仿真功率电子电路波形,针对电动汽车,阐述汽车控制的功率电子电路结构和工作原理。主要内容包括功率电子学基本概念、器件工作原理、整流技术、直流转换技术、逆变技术和功率电子技术在电动汽车中的应用。

本书可作为普通高校电气工程、机械工程(车辆工程)及相关专业的本科生与研究生教材,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容
版权所有·侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

功率电子学原理及其应用/程夕明编著. —北京:电子工业出版社, 2011.11

电气工程、机械工程类专业规划教材

ISBN 978-7-121-14935-1

I. ①功… II. ①程… III. ①电力电子学—高等学校—教材 IV. ①TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 221965 号

策划编辑:余 义

责任编辑:贾晓峰

印 刷:

北京市李史山胶印厂

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:12.75 字数:326 千字

印 次:2011 年 11 月第 1 次印刷

印 数:3000 册 定价:29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

传统汽车的电子技术应用普遍,涉及发动机控制与管理、变速箱自动换挡控制、车轮 ASR/ABS、底盘稳定程序控制、电动车窗、助力转向、安全气囊控制、空调采暖系统和车载音响等,提高了汽车的动力性、经济性、舒适性和安全性。为顺应节能环保的时代潮流,汽车的电气化技术发展十分迅速,出现了 LED 车灯、电动助力转向、电动空调和启/停系统等,汽车的低压电源系统也趋向统一的 42V 电压体系标准。区别于传统汽车,电动汽车的车轮驱动力部分或全部来自电动机,不仅继承了传统汽车低于安全电压的低压电路系统,而且应用了基于动力蓄电池串/并联的高电压直流电路系统。

在一个与路面相对封闭而运动的汽车系统中,小到一个几十瓦的车灯,大到上百千瓦的驱动电动机及其控制器,相关电路的功率比信息电子电路的功率大。在各自不同的母线电压下,其负载电流较大,从几安培到几百安培,器件的电应力增大,控制的复杂性提高。各个电子电气部件的控制方法对汽车的动力性、经济性、舒适性和安全性有显著的影响,比如电动机及其控制器的逆变技术、高低压 DC/DC 转换器的直流转换技术、动力蓄电池组的车载充电技术等,本书涉及的这些功率电路内容弥补了汽车电子学书籍中的缺口。

功率电子学和电力电子学在研究内容上没有本质差别,都是研究电源之间电能转换的功率半导体器件、电路拓扑、控制理论与方法,都源于国外译文“Power Electronics”,它们的研究基础是功率半导体器件(Power Semiconductor)。电力电子学起源于功率半导体器件在电力系统中的应用,两者的关系密切。众所周知,汽车在一个工业大国中的地位举足轻重,现有的电力电子学或电力电子技术书籍都是面向电气工程学科的读者,内容涉及基于电网的工业应用对象,对汽车的直流电源系统几乎没有阐述。本书面向从事汽车(特别是电动汽车)技术学习的人员,着重阐述功率电子学在汽车电源系统中的应用,尤其是电动汽车的驱动电动机及其控制器、电动助力转向、电动空调、DC/DC 转换器和蓄电池单体均衡电路等。

本书结构

- 绪论 介绍汽车电子化和电动化的发展进程,描述电动汽车的动力系统结构,阐述功率电子学的作用和地位及其研究内容。
- 第 1 章 基本概念。阐述功率电路的常用波形、半导体基础、开关过程、续流、换流、硬开关、软开关、脉宽调制、直流开关、电路的平均状态,将功率电子学的常用概念和基本方法集中介绍。
- 第 2 章 器件工作原理。阐述功率半导体器件的基本原理、工作特性和应用技术;器件包括功率二极管、双极结型功率晶体管、晶闸管、功率金属氧化物场效应管和绝缘栅双极晶体管。
- 第 3 章 整流技术。阐述不控整流电路、直流滤波电路和相控整流电路;功率二极管和晶闸管是应用的主要功率半导体器件,是车载动力蓄电池充电技术的基础。
- 第 4 章 直流转换技术。阐述 DC/DC 降压、升压和升/降压电路,它们是电动汽车中两根高压母线之间的电能转换的技术基础;同时对 DC/DC 隔离电路和同步整流

技术的电路的原理和方法做了详细阐述，为设计电动汽车高压母线和低压母线之间的 DC/DC 转换器奠定了技术基础。

第 5 章 逆变技术。阐述了单相和三相电压源逆变器的电路工作原理及 SVPWM 产生方法，是目前流行的 SVPWM 电动机控制器技术的电路及控制基础。

第 6 章 功率电子技术在电动汽车中的应用。阐述汽车电源系统、电动助力转向系统、电动空调采暖系统和再生协调制动控制系统的工作原理。对于驱动电动机控制系统，总结了纯电动汽车对驱动电动机及其控制器的机械特性要求，阐述了笼式感应电动机和永磁无刷电动机的矢量控制方法，介绍了非隔离 DC/DC 转换器在电动汽车动力系统中的作用。另外还介绍了用于电动汽车低压电源系统的双管正激式高低压 DC/DC 的工作原理。对于动力锂电池的管理系统，指出电池单体均衡对电池成组技术的重要性，着重阐述电感式主动均衡的电路工作原理。

本书特色

用图和表帮助读者理解功率电子学的基本概念、电路拓扑及其工作原理，采用 PSIM 软件仿真功率电子电路波形；集中一章阐述功率电子学中的一些基本概念，帮助初学者理解其研究性文献；针对电动汽车阐述汽车控制的功率电子电路结构和工作原理。

致谢

在本书完稿之际，对书末所附参考文献的作者致以衷心的感谢！书中的引用不当之处，恳请读者提出宝贵建议。

由于编著者学识有限，本书编写时间又紧张，书中难免有疏漏和错误，殷切希望研读本书的教师、学生、学者和其他工程技术人员批评指正。

本书编著者邮箱：CXM2004@bit.edu.cn。

编著者
2011.9

目 录

绪论	1
习题	6
第 1 章 基本概念	7
1.1 电路的波形及其参数	7
1.1.1 参数	8
1.1.2 直流	8
1.1.3 正弦波	9
1.1.4 矩形波	13
1.1.5 三角波	15
1.1.6 谐波	17
1.2 半导体基础	20
1.2.1 N 型半导体和 P 型半导体	20
1.2.2 PN 结	21
1.2.3 二极管	23
1.3 理想开关的开关过程	26
1.3.1 理想开关	26
1.3.2 电感负载的理想开关过程	27
1.3.3 电容负载的理想开关过程	28
1.4 续流和换流	30
1.4.1 功率二极管的续流	30
1.4.2 功率半导体器件的换流	30
1.5 硬开关的开关过程	32
1.5.1 硬开关	32
1.5.2 硬开关的开通过程	32
1.5.3 硬开关的关断过程	33
1.6 软开关的开关过程	34
1.6.1 软开关	34
1.6.2 零电流开关 (ZCS) 的开关过程	34
1.6.3 零电压开关 (ZVS) 的开关过程	35
1.7 脉冲宽度调制 (PWM) 原理	36
1.7.1 PWM 信号的类型	36
1.7.2 PWM 信号的占空比	37
1.7.3 PWM 数字信号的发生	37
1.7.4 直流 PWM 斩波	38
1.7.5 正弦波 PWM (SPWM) 发生原理	39

1.8	直流开关	42
1.8.1	低端开关	42
1.8.2	高端开关	42
1.9	电路的状态平均	43
1.9.1	状态平均	43
1.9.2	状态平均的欧姆定律	43
1.9.3	状态平均的电感和电容特性	44
1.9.4	状态平均的基尔霍夫定律	45
	习题 1	45
第 2 章	器件工作原理	47
2.1	功率二极管	47
2.1.1	结构	47
2.1.2	动态特性	48
2.1.3	功率二极管的模型	49
2.1.4	功率二极管的主要参数	50
2.2	双极结型功率晶体管	50
2.2.1	功率晶体管的结构	50
2.2.2	双极结型晶体管的基本工作原理	51
2.2.3	功率晶体管的工作区	52
2.2.4	功率晶体管的击穿与安全工作区	52
2.3	晶闸管	53
2.3.1	晶闸管的结构	53
2.3.2	晶闸管的工作原理	53
2.3.3	晶闸管的静态特性	55
2.3.4	晶闸管的动态特性	56
2.3.5	晶闸管的参数	57
2.4	功率金属氧化物场效应管	57
2.4.1	MOS 电容的工作原理	58
2.4.2	MOSFET 的结构与类型	58
2.4.3	MOSFET 的压控原理	59
2.4.4	MOSFET 的漏极、源极输出特性	59
2.4.5	MOSFET 的沟道夹断和转移特性	60
2.4.6	功率 MOSFET 的结构	60
2.4.7	功率 MOSFET 的通态电阻	61
2.4.8	功率 MOSFET 的寄生器件	61
2.4.9	功率 MOSFET 的等效电路	62
2.4.10	功率 MOSFET 的开关特性	62
2.4.11	功率 MOSFET 的安全工作区	64
2.4.12	功率 MOSFET 的主要参数	64

2.5	绝缘栅双极晶体管	64
2.5.1	IGBT 的结构和类型	65
2.5.2	IGBT 的基本工作原理	65
2.5.3	IGBT 的输出特性	66
2.5.4	IGBT 的寄生器件	67
2.5.5	IGBT 的擎住效应	67
2.5.6	IGBT 的开关特性	68
2.5.7	IGBT 的安全工作区	70
2.5.8	IGBT 的主要技术指标	70
	习题 2	71
第 3 章	整流技术	72
3.1	不控整流电路	72
3.1.1	单相桥式二极管整流器电路	72
3.1.2	三相桥式二极管整流器电路	74
3.2	直流滤波电路	76
3.2.1	容性输入直流滤波器	76
3.2.2	感性输入直流滤波器	80
3.3	相控整流电路	83
3.3.1	单相桥式晶闸管半控整流电路	83
3.3.2	单相桥式晶闸管全控整流电路	87
3.3.3	三相桥式晶闸管全控整流电路	89
	习题 3	94
第 4 章	直流转换技术	96
4.1	DC/DC 降压电路	96
4.1.1	电路结构	96
4.1.2	工作原理	96
4.1.3	CCM 电路的输出电压	98
4.1.4	CCM 和 DCM 的边界	99
4.1.5	DCM 电路的输出电压	100
4.1.6	输出电压的纹波	101
4.1.7	状态平均模型	102
4.1.8	计算与仿真分析	103
4.2	DC/DC 升压电路	109
4.2.1	电路结构	109
4.2.2	工作原理	109
4.2.3	CCM 电路的输出电压	110
4.2.4	CCM 和 DCM 的边界	111
4.2.5	DCM 电路的输出电压	111
4.2.6	输出电压的纹波	112

4.2.7	状态平均模型	113
4.2.8	计算与仿真分析	114
4.3	DC/DC 升/降压转换器电路	119
4.3.1	电路结构	119
4.3.2	工作原理	119
4.3.3	CCM 和 DCM 的边界	120
4.3.4	Cuk 转换电路	121
4.4	DC/DC 组合电路	124
4.4.1	半桥 DC/DC 电路	124
4.4.2	全桥 DC/DC 电路 (Full-bridge DC/DC Converter)	124
4.4.3	DC/DC 的多相多重电路 (Parallel DC/DC Converter)	125
4.5	DC/DC 隔离电路	126
4.5.1	单端正激式转换器	126
4.5.2	推挽式转换器	128
4.5.3	单端反激式转换器 (Flyback 转换器)	130
4.5.4	半桥式转换器	132
4.5.5	全桥式转换器	134
4.6	同步整流	137
4.6.1	整流电路	138
4.6.2	同步整流	138
	习题 4	140
第 5 章	逆变技术	142
5.1	单相电压源逆变器	142
5.1.1	中心抽头变压器式单相电压源逆变器	142
5.1.2	半桥式单相电压源逆变器	143
5.1.3	全桥式单相电压源逆变器	143
5.1.4	全桥式单相电压源逆变器的脉宽调制技术	144
5.2	三相电压源逆变器	147
5.2.1	三相电压源逆变器的电路工作原理	147
5.2.2	三相 SPWM 技术	148
5.2.3	三相电压空间矢量 PWM 技术	149
	习题 5	154
第 6 章	功率电子技术在电动汽车中的应用	155
6.1	汽车电源系统	155
6.1.1	交流发电机及其整流器	155
6.1.2	电压调节电路	157
6.1.3	42V 汽车电源系统	158
6.2	电动助力转向	159
6.2.1	结构与原理	159

6.2.2	助力电动机的工作模式	160
6.2.3	系统匹配	161
6.3	电动空调	163
6.3.1	结构与原理	164
6.3.2	电动压缩机控制	166
6.4	再生协调制动器	167
6.5	驱动电动机及其控制器	169
6.5.1	电动汽车驱动技术要求	169
6.5.2	电动机驱动装置电路结构	170
6.5.3	感应电动机驱动系统	171
6.5.4	永磁无刷电动机驱动装置	179
6.6	直流功率转换器	186
6.6.1	驱动控制中的双向 DC/DC 转换器	186
6.6.2	高、低压转换中的隔离 DC/DC 转换器	187
6.6.3	锂电池组单体均衡的 DC/DC 转换器	188
习题 6		191
参考文献		193

绪 论

电子技术的进步不断推动汽车向高效节能和安全可靠的技术方向发展，电气化技术的发展则使汽车产生能源革命性的转变，由一次能源化石燃料向二次能源电转型，从传统汽车向电动汽车转型，使环保节能和可持续发展成为汽车能源变革中的主旋律。基于电路理论和电子学基础的功率电子学，旨在阐述与汽车相关的基本功率电子电路及其工作原理和设计方法。

1. 汽车电子技术的发展历程

1886年，德国人哥德利普·戴姆勒发明了世界首辆汽油四轮汽车。1908年，美国人福特用生产线的方式推出了惠及大众的T型福特汽车。汽车是工业发展历史上的技术集大成者，促使汽车产业发生由外燃机向内燃机转型的能源革命。从T型福特汽车推出至19世纪60年代，机械技术及其制造技术支撑汽车的技术进步，汽车产业通过机械加工及内燃机技术，实现了发动机性能的提升，实现了汽车的基本功能，即“行驶、转弯和停车”。

1947年，美国贝尔实验室的肖克利等发明了晶体管，开创了电子技术的新纪元。从晶体管到集成电路IC，再经过微处理器，最终促进了软件技术的发展。电子技术的应用遍及所有产业，它在汽车车载技术领域的推广应用也毫不逊色于其他领域。为了降低汽车尾气的排放，19世纪70年代发动机燃料电子喷射装置开始了实用化，它的性能大大超越了机械式燃料喷射装置，不但能够净化发动机排放的气体，而且还可提高相同排量的发动机的功率和燃油经济性。汽车电子技术促进了机械技术的新发展，汽车借助电子技术与机械技术的相乘效应，实现了跨越式发展，电子技术不仅限于发动机控制和传动控制，而是向车身系统、行驶安全系统及信息系统等领域不断扩展，汽车的低排放、动力性、经济性、安全性和舒适性越来越好。

汽车的电子控制单元（Electronic Control Unit, ECU），如1973年的发动机控制ECU，由采用分立元件实现的模拟电路而后发展为由模拟IC构成的ECU。1978年，实现了以微控制器为主体构成的数字ECU的发动机控制开始了程序决定汽车功能的年代。从此，ECU规模、定制IC、封装形状及软件编写语言等都在与电子技术同步发展。其中微控制器及输入/输出（Input & Output, I/O）、传感器、执行器和软件等是汽车ECU的基本组成部分，EMI抑制/EMC能力、散热震动性、控制算法、高速实时通信和评测方法是汽车ECU的关键技术。

2. 电动汽车

1997年，日本丰田推出了“普锐斯（Prius）”混合动力轿车，象征着汽车跨入了电气化时代，表现了传统汽车难以企及的环保性和经济性。无论是标准工况还是实车路况运行，Prius的燃油经济性比同等级的传统汽车提高两倍以上，达到（3.0~4.0）L/100km，尾气的CO₂排放下降45%之多。

丰田Prius混合动力系统THS II的结构框图如图1所示，THS II系统由发动机、驱动电动机、发电机、高压DC/DC转换器、动力分配机构、动力电池、混合动力电控单元和低压DC/DC转换器共同组成。动力分配机构是电子控制的行星齿轮机械变速装置，连接发动机、发电机和驱动电动机，并通过CVT（无极变速器）与驱动轴连接。通过动力分配机构，发动

机输出的动力分解为发电机的驱动力和车轮的驱动力，发电机产生的电能分别传输给驱动电动机和动力蓄电池组。动力蓄电池组的直流电通过电动机控制器逆变为交流电，输送给驱动电动机驱动车轮，这样形成发动机-发电机和电池组并联给驱动电动机供电并驱动车轮的工作模式，具有串联混合动力汽车工作方式的特点。同时，动力蓄电池组直接供电给驱动电动机产生的车轮驱动力，与发动机输出的车轮驱动力形成合力，驱动汽车行驶，具有并联混合动力汽车工作方式的特点。因此，THS II 是一种典型的串/并联（混联）混合动力系统（Series Parallel Hybrid Drive System）。THS II 混合动力系统有 5 种工作模式，即① 启动、低速；② 普通行驶；③ 全力加速；④ 减速、制动；⑤ 停止。汽车启动或以极低的速度行驶或缓下坡时，THS II 系统采用纯电动模式工作；汽车普通行驶时，发动机和电动机共同驱动车轮，动力来自发动机；汽车全力加速时，发动机和动力蓄电池同时输出功率，发动机和电动机共同驱动车轮；汽车减速或制动时，车轮驱动电动机能量再生回馈给动力蓄电池组，发动机停止空转；汽车停止时，发动机、驱动电动机和发电机均停止工作。

1999 年，本田推出了一种双座双门的 Insight 混合电动轿车，百公里油耗为 3.0~4.0L。Insight 的整备质量为 893kg，采用一台 1.0L 十二气阀三缸汽油发动机和一台 10kW 永磁交流同步电动机同轴混合驱动方式，采用 6.5Ah 镍氢动力电池，额定电压为 144V。本田 IMA（Integrated Motor & Alternator）混合动力系统，由一台汽油发动机、一台永磁电动机、CVT、动力蓄电池组、低压 DC/DC 和混合动力电控单元组成，如图 2 所示。汽车低速行驶时，以纯电动方式驱动，发动机完全停止工作。汽车缓加速和高速行驶时，仅以发动机工作驱动车辆行驶。汽车急加速时，电动机和发动机共同为车轮提供驱动力，改善车辆加速性能。汽车减速或制动时，发动机停止工作，发电机发电运行，将车辆的机械能再生为电能存储在动力蓄电池组内。汽车停车时，发动机和电动机自动关闭。IMA 混合动力系统是典型的并联式混合动力系统（Parallel Hybrid Drive System），具有发动机即时启/停功能。在汽车启动开始时，电动机带动发动机旋转，在发动机达到某一设定转速时开始喷油，以此通过延迟点火降低发动机的启动振动冲击，降低发动机的油耗和排放。

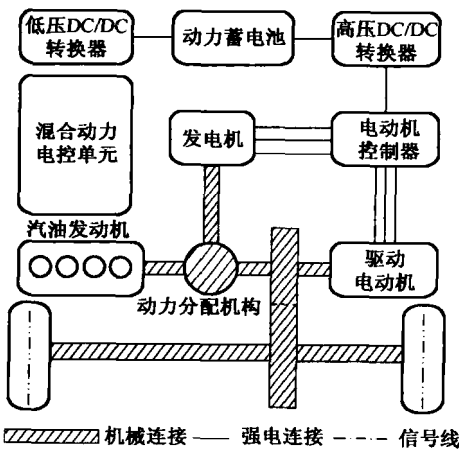


图 1 丰田 Prius 的 THS II 混合动力系统结构

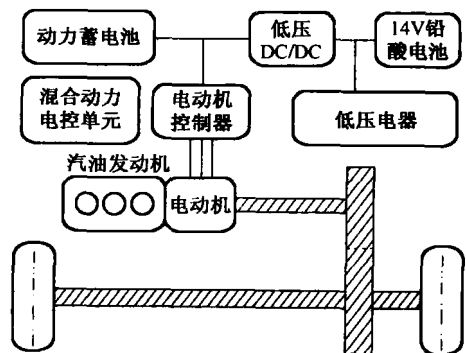


图 2 本田 Insight 的 IMA 混合动力系统结构

1998 年美国能源部和纽约公交公司在纽约市马哈顿区启动 10 辆 12 米 Orion 混合电动公交车试验运行计划，在效率、排放、维护成本和使用费用等方面，与 7 辆 NovaBUS RTS 普通柴油车比较，以评估混合动力公交车批量使用的可行性。Orion 混合电动公交车的整备质量约

为 14.5 吨，载客 64 人，最高行驶速度为 105km/h，续驶里程为 640km。采用 550V 母线电压，它包括一台连续功率为 187kW 的交流感应牵引电动机、一台 170kW @2000r/min 的车载发电机组（柴油发动机和永磁发电机）和两组 64Ah 铅酸动力电池组，如图 3 所示。柴油发动机带动三相永磁同步发电机发电，经功率转换装置转换成直流电，既可向动力蓄电池组充电，又可向驱动电动机及其控制器供电，驱动车轮，这是典型的串联式混合动力系统（Series Hybrid Drive System）。串联混合动力系统结构简单，发动机与驱动轴机械解耦，发动机排放容易控制，很适合在需要经常启/停的城市工况的公共交通车辆上使用。对比运行测试表明，Orion 混合串联混合动力公交车的油耗降低 10%，尾气排放的 PM 减少 99%，NO_x 减少 44%，HC 减少 28%，CO 减少 98%，CO₂ 减少 33%。

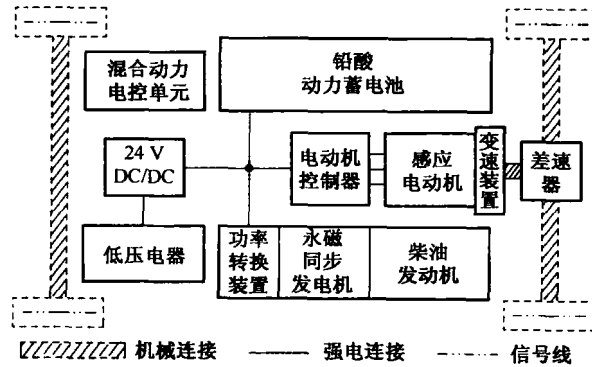


图 3 Orion 串联混合动力系统结构

对汽车的动力系统结构而言，燃料电池汽车（Fuel Cell Vehicles）与串联混合动力汽车本质上没有区别，都采用纯电驱动模式，驱动电动机及其控制器的电能来自于车载发电系统和动力蓄电池。燃料电池汽车用基于氢氧反应发电原理的燃料电池作为车载发电系统，而串联混合动力汽车则用化石燃料（如汽油、柴油、CNG 等）内燃发动机驱动的发发电机组实现车载发电，提高汽车的续航里程。

为了提高混合动力汽车的燃油效率和降低排放，在混合动力汽车行驶中，多使用电力驱动，增加电动机的驱动功率，减少发动机排量。通过公用电网夜间给车载动力蓄电池组充电，一方面可提高混合动力汽车效率，另一方面可为夜间电网蓄能，而且车载动力蓄电池组还可为电网供电，形成了 V2G（Vehicle to Grid）的智能电网系统。在 V2G 模式的智能电网中，电动汽车必须具有与公用电网双向传输电能的功能。纯电动汽车自然需要动力蓄电池组的电网充电功能，而混合动力汽车的动力蓄电池组也需要与电网连接，也就出现了插电式混合动力汽车。2010 上市的通用汽车雪佛兰 Volt 采用插电式混合动力系统，当行驶里程小于 60km 时，它能够完全依靠一个车载的 16kW·h 锂离子动力蓄电池组所储备的电能来驱动车辆，实现“零油耗、零排放”。当车载锂离子动力蓄电池组电量消耗至最低值时，车载发电机将自动启动并为驱动电动机继续提供电能，使整车具有高达 500km 以上的续航里程。

无论混合动力汽车 HEV（Hybrid Electric Vehicles），还是插电式混合动力汽车 PHEV（Plug-in Hybrid Electric Vehicles），它们都集成了传统汽车和纯电动汽车的驱动技术要素，是传统汽车向纯电动汽车或燃料电池汽车过渡的一种电动汽车类型。纯电动汽车是基于动力蓄电池和驱动电动机行驶的一种汽车，相对于传统汽车的能源供应发生了革命性的变革，其等效燃油经济性是传统汽车的 3 倍之多，没有尾气排放。纯电动汽车的动力系统结构如图 4 所

示，主要由驱动电动机及其控制器、动力蓄电池组及其管理、变速装置、低压 DC/DC 和整车控制器等组成。驾驶员的油门踏板和刹车踏板等经整车控制器处理后，输出相应的控制信号，通过整车网络（如 CAN 总线），传输给电动机控制器、电池管理等电控单元，控制驱动电动机，实现动力蓄电池组的直流电能与汽车的机械能之间双向流动，满足驾驶员的即时行驶需求，提供驾驶乐趣。纯电动汽车没有发动机，因而取消了发动机专用的启动机和发电机，低压 DC/DC 转换器代替了发动机随带的低压发电机及其电压调节器。汽车的辅助动力系统，如转向系统、制动系统和空调系统等都需要由电能驱动来完成其功能。

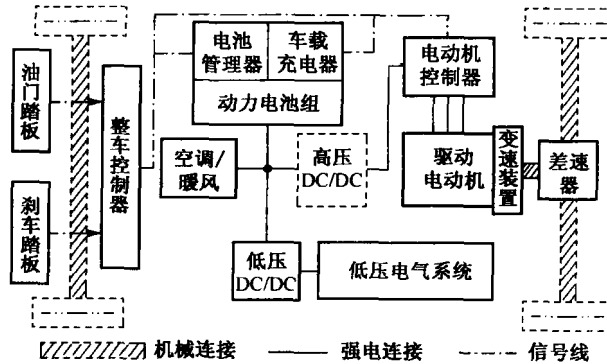


图 4 纯电动汽车动力系统结构

2010 年 12 月，日产在美国和日本上市了 C 级 Leaf 纯电动轿车，前轮驱动，配备最大功率为 80kW 的三相交流永磁同步电动机，最大扭矩为 280N·m，最大转速为 9800r/min，最高车速为 145km/h。Leaf 的电能源自层叠式紧凑型的锂离子动力电池组，24kW·h@360V，最大输出功率为 90kW，一次充电的最大行驶里程可达 160km。锂离子电池能够通过专用的快速充电器在 30min 以内充电 80%，8h 内可用 220V 交流电充满。Leaf 具有超过同级别发动机汽车的行驶性能。

- 优秀的加速性能。在小型车上实现了与排量为 3L 的发动机汽车相当的加速性能。
- 出色的操纵稳定性。锂离子动力电池组配置在车体中央的地板下方，车辆质心低，且位于车辆中心附近，提高了转弯时的操纵稳定性。
- 可靠的电安全性。为了防止触电，高电压部件采用封闭性的保护壳进行绝缘处理。Leaf 发生碰撞时，高电压切断。将高电压部件的保护壳与车身电连接起来，确保乘客安全。锂离子动力电池组不仅被密封，而且通过加深在模块上设计的凹坑形状来稳稳按住电池单元，用树脂部件将层压型电池单元固定，保证汽车行驶过程中电池电极及隔膜不发生移动，电池性能稳定，耐久性提高，更加安全可靠。在积水 0.7m 深的路面上行驶时，Leaf 没有任何问题。
- 宽大的内部空间。驱动电动机及其控制器、DC/DC 转换器、车载充电器及加热器等众多部件位于“发动机”前舱内，尽可能扩大车内空间和后备厢容量。
- 良好的舒适性。在车身骨架上增加了电池支架和逆变器固定支架，提高发动机汽车的车身刚性，车身的振动抑制性好。
- 其他性能。Leaf 配备了可在驾驶中显示当前的电池余量能够行驶多远距离的导航系统，可通过个人计算机、智能电话及手机查看电池的状态，在家中及办公室进行开始或停止充电的控制。另外，Leaf 还配备有可在任意时间充电的定时充电功能，可利用便宜的深夜电网电力为锂离子电池组充电。

在不使用空调且基本不堵车的情况下，在 70km/h 匀速行驶状态下，Leaf 的续驶里程可延长至 220km。如果使用空调（冷气或暖气），在拥堵的道路上，Leaf 的续驶里程可能达不到 100km。为此，Leaf 配备了可远程操纵空调的功能，在充电时事先于出发前将车内温度调整到最佳程度，以便在开始行驶后降低空调的负荷，延长可行驶距离。

受限于动力蓄电池组的高成本、低能量密度、长充电时间和安全性问题，纯电动汽车的推广应用困难重重。

3. 功率电子学与电动汽车技术的关系

对混合动力汽车、插电式混合动力汽车、燃料电池汽车和纯电动汽车的动力系统而言，它们与传统汽车有本质上的差别，驱动电动机和动力蓄电池组则是其中产生技术变革的两个部件，对电动汽车具有的卓越的整车性能（如动力性、经济性、安全性、环保性和舒适性等）起到了极其重要的作用。例如，相对于传统汽车，上市 10 年来畅销百万辆的 Prius 混合动力汽车的动力性、安全性和舒适性毫不逊色，而且其经济性和环保性两方面都极其优秀，它们源自 THS II 动力系统的镍氢蓄电池和稀土永磁同步电动机。在各种工况下，发动机效率、发动机停止和电制动能量回收三部分对 Prius 燃油经济性提高所作的贡献比例不同，如表 1 所示。Prius 只有在永磁同步电动机单独驱动下，才能实现纯电动功能；只有永磁同步电动机参与整车的制动过程，才能实现 Prius 的电制动能量回收；只有永磁电动机参与驱动过程，实现发动机的即时启/停功能，才能保证阿特金森循环发动机在混动动力模式下高效工作。

表 1 三种工况下 Prius 的燃油经济性作的贡献比例分析

效率贡献比例/工况	美国城市工况	欧洲 ECE 城市工况	日本 10~15 工况
发动机效率提高	59%	56%	53%
发动机停止	13%	20%	27%
电制动能量回收	28%	24%	20%

功率电子学研究电路中功率半导体器件的开关过程，尽量降低器件的功率损耗，减小 EMI，提高 EMC 能力。运用电子电路理论和计算机控制理论，将一种电能高效率转换成另一种满足系统需要的电能，是功率电子技术的基本要求。

电动机是一种机械能、电磁能、电能相互转换的机电装置，无论是直流电动机还是交流电动机，电动机调速是一种普遍需求，其技术的关键在于实现电能转换的功率转换装置的功率电路拓扑和电流电压控制。三相笼式感应电动机和永磁同步电动机被广泛用于电动汽车的动力驱动装置中，电动机控制器是实现车载动力蓄电池组直流电与电动机所需的电流矢量相位幅值可调的三相交流电双向转换的功率转换装置。交流电动机四象限运行，纯电动汽车前行时驱动电动机处于电动状态，需要将直流电转换为交流电，该方法称为逆变技术。纯电动汽车制动时驱动电动机可处于发电状态，需要将汽车的机械能转换为电能存储在动力蓄电池组中。交流电机再生制动，需要将交流电转换为直流电，该方法称为整流技术。

电动汽车停车充电时，车载充电器将公用电网的单相或三相 50Hz/60Hz 交流电转换为电流/电压幅值可控的直流电，对动力蓄电池组充电，这也是整流技术。其中，谐波控制、功率因数调节等控制技术对改善电能的质量起到了重要的作用。

电动汽车至少有两种直流母线电压，一种是继承了传统汽车的低压电气系统的直流电压 14V/28V，另一种是动力蓄电池组形成的上百伏的直流母线电压。两种直流母线电压之间需

要转换，往往需要一种直流-直流转换器将动力蓄电池的高电压转换为诸如车灯、雨刷、音响等低压电器使用的低电压 14V/28V，这是一种直流转换技术，常称为 DC/DC 转换技术。

整流技术、逆变技术和直流转换技术是功率电子学的三大电源转换方法，已经完全集成在电动汽车技术中，如图 5 所示。与其相关的电子电路、开关控制策略、EMI/EMC、绝缘技术和热管理技术，旨在实现高效率、高功率、可靠安全和经久耐用的符合汽车复杂环境要求的功率转换装置。对学科而言，电动汽车是机械工程、电气工程、信息工程和化学工程的集成，电动汽车技术与功率电子学密不可分，目标是优化车载能源的分配。

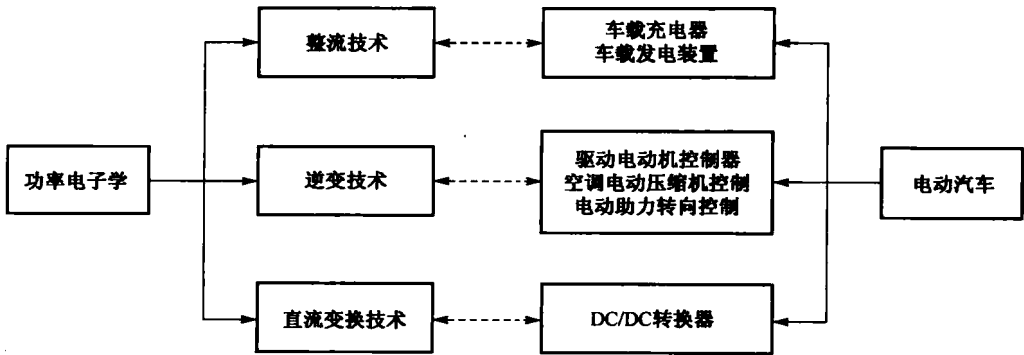


图 5 电动汽车技术与功率电子学的密切关系

习 题

- (1) 举例说明电子技术对汽车技术发展的促进作用。
- (2) 简单叙述电动汽车的动力系统结构型式及其基本工作原理。
- (3) 试描述功率电子学与电动汽车技术的关系。

第1章 基本概念

1.1 电路的波形及其参数

简单的电路由电源、负载、导线和开关等元器件组成。电源可分为电压源和电流源，电压源最常用，如干电池、汽车蓄电池和公用电网电源。导线以线径截面积（单位： mm^2 ）区分为常用，有 0.5mm^2 、 0.75mm^2 、 1mm^2 、 1.5mm^2 、 2.5mm^2 、 4mm^2 、 6mm^2 、 10mm^2 、 16mm^2 、 25mm^2 等规格。负载是电能转换成其他形式的能的装置，常用的负载有电灯泡、电炉、扬声器、电动机等。开关担负通、断电路电流的功能，日常生活的照明电路开关通常采用手动机械式开关，而汽车的照明电路开关常用继电器，它是一种应用电磁原理控制的机械式开关。

例 1-1 家居生活电路

一个电灯的照明电路如图 1.1 所示，火线 L 和零线 N 提供正弦交流电源，电压为 220V（有效值），电灯 EL 将电能转化为热能和光能，开关 S1 手动控制电灯 EL 的点亮和熄灭。这样一个电灯的电路如图 1.2 所示，A 端与火线 L 连接，B 端与零线 N 连接，A1 和 B1 分别与电灯 E1 的两端连接。显然，AB 两端的正弦交流电压的有效值为 220V，频率为 50Hz。如果已知电灯 E1 的电阻，很容易计算出开关 S1 闭合后电灯 E1 的功率。

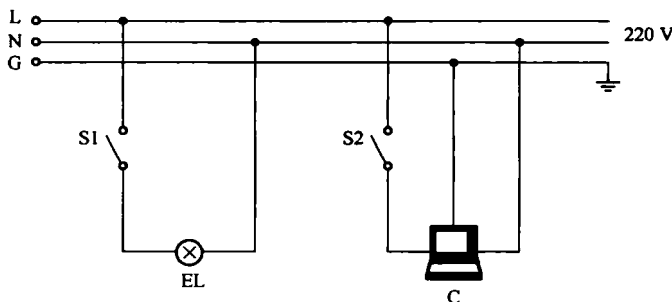


图 1.1 照明和计算机的电路图

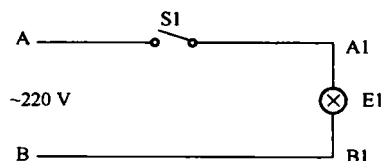


图 1.2 家居生活的电灯电路

例 1-2 汽车照明电路

汽车远光灯的照明电路如图 1.3 所示，B+ 与 12V 蓄电池的正极连接，车身与蓄电池的负极连接，俗称“搭铁”，继电器 R 控制左右两侧的远光灯 LL 和 LR 的点亮和熄灭。汽车远光灯的电路如图 1.4 所示，A 端与蓄电池正极连接，B 端搭铁，开关 SR 表示电控的继电器开关，A1 和 B1 分别与远光灯 LL 和 LR 的两端连接。电路中，AB 两端施加的电压为直流 12V。如果已知 AB 两端的电流波形及其参数，那么就可计算开关 SR 闭合后远光灯 LL 和 LR 的总功率。

常见电路的波形有直流、正弦波、矩形波和三角波，后三者具有交流波形。而电路波形的参数有周期、频率、幅值、峰-峰值、平均值、有效值，这些参数在示波器上很常用。