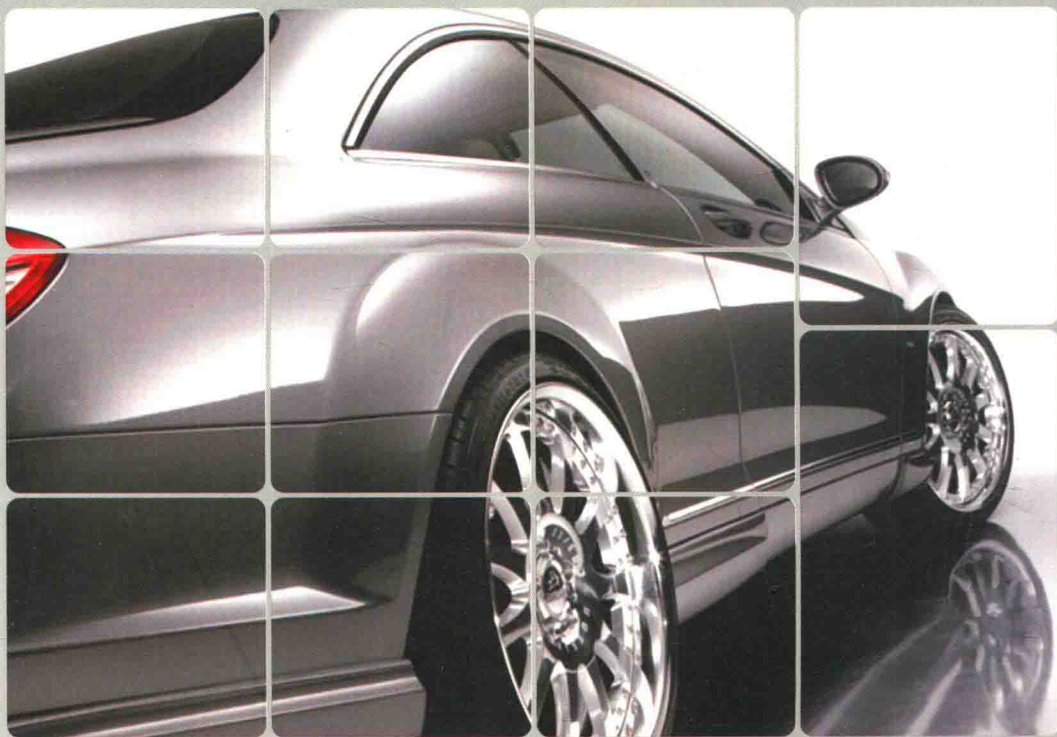


国家新能源汽车“十三五”重点规划 • 电动汽车系列教材



电动汽车电力电子技术应用



主 编 刘 杰 宗长富
副主编 张立伟 琚 龙 郭 渊
主 审 王志福



北京交通大学出版社
<http://www.bjtup.com.cn>

电动汽车系列教材

- ▶ 电动汽车概论
- ▶ 电动汽车的政策、商业模式及市场
- ▶ 电动汽车动力电池应用技术
- ▶ 电动汽车电机及驱动系统
- ▶ 电动汽车充电设施运行与维护技术
- ▶ 电动汽车充电技术及系统
- ▶ 电动汽车相关标准
- ▶ **电动汽车电力电子技术应用**

电动汽车电力电子技术应用

DIANDONG QICHE DIANLI DIANZI JISHU YINGYONG



责任编辑 贾慧娟
封面设计 忆唐文化

ISBN 978-7-5121-3522-2



9 787512 135222 >

定价：40.00元

国家新能源汽车“十三五”
电动汽车系列教材

电动汽车电力电子技术应用

主 编 刘 杰 宗长富
副主编 张立伟 琚 龙 郭 渊
主 审 王志福

北京交通大学出版社

• 北京 •

内 容 简 介

本书从电动汽车的发展背景及发展过程出发,结合电气专业的相关知识,对电动汽车电驱动基础理论、电动汽车的整车控制器、交流异步电机及其控制、永磁同步电机及其控制、直流无刷电机及其控制、DC/DC 电源技术及应用、DC/AC 与 AC/DC 变换技术及应用,以及电动汽车电控系统的电磁兼容进行了详细的介绍。希望学生通过对本书的学习能够对电动汽车电力电子技术应用有更加清晰的认识。本书也可以作为从事相关研究和开发工作的专业人员的参考用书。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车电力电子技术应用 / 刘杰,宗长富主编. —北京:北京交通大学出版社,2018.3
(国家新能源汽车“十三五”重点规划·电动汽车系列教材)

ISBN 978-7-5121-3522-2

I. ① 电… II. ① 刘… ② 宗… III. ① 电动汽车-电力电子技术 IV. ① U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 052829 号

电动汽车电力电子技术应用

DIANDONG QICHE DIANLI DIANZI JISHU YINGYONG

责任编辑:贾慧娟

出版发行:北京交通大学出版社

电话:010-51686414

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

地 址:北京市海淀区高粱桥斜街 44 号

邮编:100044

印 刷 者:北京时代华都印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185 mm×260 mm 印张:13 字数:320 千字

版 次:2018 年 3 月第 1 版 2018 年 3 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-3522-2/U·300

印 数:1~2 000 册 定价:40.00 元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

电动汽车系列教材

编 委 会

顾 问：孙逢春

主 任：姜久春

副主任：鄢治国 朱天军

委 员：琚 龙 刘 钧 周 虎 张泽星

李剑英 李贵远 张福东 苏建中

郭希铮

前言

汽车产业历经百年的发展，极大地方便了人们的生活并促进了社会生产，是现代工业文明的标志，在如今的社会生活中起着越来越重要的作用。进入 21 世纪以来，汽车产业也紧随时代发展的步伐，步入了新的发展阶段，呈现出电气化、智能化、网络化和共享化的趋势，汽车工程作为一门应用型学科也在经历着日新月异的发展，出现了大量的新理论、新技术和新材料，并得到应用，推动着整个行业的发展和进步。但与此同时，也应该看到，汽车在带给我们巨大便利的同时，也伴随着一系列的负面效应，如能源短缺、空气污染、温室效应等，并且随着汽车保有量的增加这些问题日益凸显，为此，控制汽车的污染物排放，发展新的能源结构体系和新能源汽车具有重要的意义和现实的需要。电动汽车以其卓越的环保特性及多样化的能源获取方式受到了世界各国的关注和重视。全球各主要汽车生产厂商都投入了大量的资金和人力用于电动汽车的开发。大力发展和推广电动汽车已成为替代传统燃油汽车的最佳解决方案。

电动汽车涉及电气工程、车辆工程、电池技术、计算机控制、电子工程、热学、电磁学等多个学科和专业，其核心技术主要包括电池、电机和电控三大领域，这与传统内燃机汽车有着显著的区别。本书在编写过程中结合作者常年在一線从事电动汽车电子控制技术的研究和开发经验，主要着眼于对电动汽车电子控制相对成熟的技术进行了介绍，希望能够为相关专业本科、专科的教学和从事相关领域的专业人员提供一些有益的帮助。

本书内容主要包括电动汽车的分类、电动汽车的动力学基础、电动汽车整车控制系统的功能及软硬件、电动汽车常用电机的基本控制策略等，并对电动汽车控制系统中常用的电力电子器件做了简明扼要的介绍；书中对于常见的电源模块（如 DC/DC 变换单元，DC/AC 变换单元及 AC/DC 车载充电模块等）的基本功能、控制策略和设计过程等也进行了必要的阐述。

本书作为肇庆学院重点资助的学科教材，为满足该校车辆工程专业学科的教学需求，考虑到车辆专业学生在电子、电气相关专业学科的基础知识有限，所以在内容的选取上以对基本原理和基本电路的介绍为主，并辅以一些基础性

的计算但为了能够更好地理解和掌握书中内容和知识点，车辆专业的学生仍需要对一些电气专业的基础知识进行必要的学习和积累。

在成书过程中，我的导师宗长富教授不厌其烦地对书中内容进行斧正，深感先生对教育事业的执着及严谨。同时北京理工大学国家电动汽车实验中心主任王志福教授在为本书主审的过程中也提出了许多宝贵的意见，为本书的成稿奠定了坚实的基础。

与此同时，研究生周虎、张福东、郑丽娜、李行也积极参与了相关章节的编写和校对，在部分章节的编写过程中，也引用了已经毕业的研究生王慧斌、杨艳男等同学的相关论文。内蒙古工业大学的研究生任德华、吴成柯也编写了相关章节。这本书凝集了这些研究生的辛勤劳动。

书稿在交付过程中，北京交通大学出版社的贾慧娟老师对本书的编辑与出版进行了专业、细致的指导。

在成书过程中，东方电气的鄢治国博士、长江汽车研究院的龚群英先生、北京福田欧辉研究院的王雷和魏长河博士、中兴通信动力产品研发中心的马广积主任和刘辉工程师也都给予了耐心、细致的专业指导，在此一并表示衷心的感谢。

同时感谢肇庆学院车辆工程专业的张福东老师对本书出版付出的辛勤劳动。

鉴于编者学识有限，对于电动汽车的认识和实践尚有不足和欠缺，加之在编写和成书期间，不断有新的技术涌现及获得突破，因此书中内容也有一定程度的滞后，难免会出现一些谬误及不当之处，因此我们几个编者诚惶诚恐，欢迎广大读者提出宝贵意见及批评指正，我们将在日后对本书进行修订。

刘 杰

2017年12月3日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电动汽车概述	1
1.1.1 现代交通运输对环境的影响	1
1.1.2 电动汽车的种类及技术特点	3
1.1.3 电动汽车发展的关键技术	8
1.2 电动汽车用电机驱动系统	9
1.2.1 电机驱动系统的作用及要求	9
1.2.2 电机驱动系统发展现状与趋势	10
1.3 电动汽车驱动电机的要求	16
第 2 章 电动汽车电驱动基础理论	18
2.1 电动汽车的构造与工作原理	18
2.2 电动汽车的动力学	21
2.2.1 电动汽车受力的分析	21
2.2.2 动力学方程	27
2.2.3 汽车行驶的附着条件与附着率	28
2.2.4 电动汽车的性能	30
2.3 电动汽车电驱动系统的动力需求特性	36
2.3.1 电驱动系统的特性	36
2.3.2 传动装置的特性	38
2.3.3 电动汽车动力性能的分析	38
2.4 电动汽车电驱动系统参数的匹配准则	40
2.4.1 电机参数的匹配	40
2.4.2 传动装置的参数匹配	41
第 3 章 电动汽车的整车控制器	43
3.1 控制器硬件的基本构成	43
3.1.1 微控制单元模块 (MCU)	45
3.1.2 电源模块	45

3.1.3	CAN 通信电路	45
3.1.4	开关器件的驱动电路及保护	46
3.1.5	其他功能电路	58
3.2	控制器底层软件的设计	59
3.2.1	底层软件运行	60
3.2.2	基础软件	60
3.3	控制器控制软件的设计方案	61
3.3.1	软件调度模块	61
3.3.2	整车控制器 (VMS) 及其他控制器的初始化	61
3.3.3	高压系统自检及自检仲裁	62
3.3.4	安全管理	62
3.3.5	行驶控制	62
3.3.6	动力电池的管理策略	64
第 4 章	交流异步电机及其控制	65
4.1	交流异步电机的基本结构和工作原理	65
4.1.1	异步电机的结构	65
4.1.2	异步电机的基本工作原理	67
4.2	异步电机的矢量控制	68
4.2.1	控制对象	68
4.2.2	矢量控制原理	70
4.2.3	坐标变换理论	71
4.2.4	异步电机的数学模型	73
第 5 章	永磁同步电机及其控制	78
5.1	永磁同步电机的特点	79
5.2	永磁同步电机的结构与运行原理	80
5.2.1	永磁同步电机的结构与分类	80
5.2.2	永磁同步电机的运行原理	81
5.2.3	永磁同步电机的功角特性	82
5.2.4	永磁同步电机的数学模型与矢量控制原理	84
5.2.5	永磁同步电机的控制策略及仿真模型的建立	87
第 6 章	直流无刷电机及其控制	94
6.1	直流无刷电机的组成结构和数学模型	95
6.1.1	直流无刷电机的基本组成结构	95
6.1.2	直流无刷电机与永磁同步电机的结构比较	96
6.1.3	直流无刷电机的数学模型	98
6.1.4	直流无刷电机的驱动原理	99
6.2	直流无刷电机的驱动控制	100
6.2.1	直流无刷电机的方波电流控制	101
6.2.2	直流无刷电机的混合矢量控制	114

第7章 DC/DC 电源技术及应用	122
7.1 移相控制全桥变换器的主电路	123
7.1.1 移相控制全桥变换器的工作原理	124
7.1.2 移相控制全桥变换器主要参数的计算	127
7.2 双主动全桥变换器的主电路	129
7.2.1 双主动全桥变换器的工作原理	130
7.2.2 双主动桥式变换器主要参数的计算	134
7.3 DC/DC 变换器的其他模块	137
7.3.1 EMI 滤波电路	137
7.3.2 辅助电源	138
第8章 DC/AC 与 AC/DC 变换技术及应用	140
8.1 DC/AC 逆变器的设计与电磁干扰分析	140
8.1.1 DC/AC 逆变器概述	140
8.1.2 Z 源网络的设计	144
8.1.3 DC/AC 逆变器的电磁干扰	146
8.2 DC/AC 逆变器电磁干扰的抑制措施	147
8.2.1 接地技术和瞬态抑制	148
8.2.2 滤波技术	151
8.2.3 屏蔽技术	154
8.3 车载充电技术	156
8.4 电动汽车车载充电机的设计	157
8.4.1 设计的基本参数	157
8.4.2 车载充电机整体结构	158
8.4.3 车载充电机的功率变换系统	159
8.4.4 APFC 的拓扑结构	160
8.4.5 DC/DC 变换器的拓扑结构	162
8.4.6 软开关技术	165
8.5 AC/DC 变换器的工作原理及硬件电路的设计	167
8.5.1 AC/DC 变换器的工作原理	167
8.5.2 电动汽车车载充电机硬件电路的设计实例	169
第9章 电动汽车电控系统的电磁兼容	173
9.1 电磁兼容的基本概念与术语	173
9.2 电动汽车电控系统的电磁骚扰源	174
9.2.1 电磁骚扰的分类	174
9.2.2 车外骚扰源	174
9.2.3 车载骚扰源	175
9.3 电控系统电磁骚扰的发生机理	177
9.3.1 放电噪声	177
9.3.2 感性负载的瞬变	178

9.3.3 功率电子器件的瞬变	178
9.4 电动汽车的车载电磁骚扰源	180
9.4.1 车用电机驱动系统	180
9.4.2 总线系统	182
9.4.3 DC/DC 变换系统	183
9.5 电控系统控制电路的电磁兼容	185
9.5.1 PCB 控制电路的电磁兼容设计	185
9.5.2 印制电路板的布局与布线原则	186
9.6 电磁屏蔽	187
9.6.1 电磁屏蔽的概念与分类	187
9.6.2 静电屏蔽、电磁屏蔽、磁场屏蔽的原理	189
9.6.3 屏蔽体的材料选取和设计	191
9.7 控制算法优化	192
9.7.1 SVPWM 的原理简述	192
9.7.2 电机中性共模电压的抑制策略	193
9.7.3 几种无零矢量调制方法	195
参考文献	197

第 1 章

绪 论

汽车产业是人类工业文明的产物，极大地改变了人类的生活和生活方式并加速着人类文明的发展。汽车已经成为了人们生活中必不可少的交通工具，但随着汽车工业的不断发展，全球汽车保有量的不断攀升，汽车对世界经济和能源环境的负面影响也不断加剧，环境污染及交通事故问题日益突出。为此汽车产业需要在新能源化、智能化及无人化等方面做出更长远的探索。电动汽车将会得到进一步推广，并逐步走入人们的日常生活。



1.1 电动汽车概述

1.1.1 现代交通运输对环境的影响

2010 年以来中国汽车市场井喷式增长，截至 2016 年 12 月底，中国机动车保有量达到 2.9 亿辆。其中汽车保有量 1.94 亿辆。仅次于美国的 3.1 亿辆，位居世界第二。如此迅猛的汽车发展趋势，已经对全球人类的生活环境形成巨大负面影响，主要影响表现在如下几个方面。

1. 全球变暖

大量数据和现象表明，未来 50~100 年，人类将完全进入一个变暖的世界。由于人类活动的影响，导致大气中温室气体和硫化物的浓度增加过快，有科学家预测，未来 100 年内全球平均地表温度将上升 1.4~5.8℃，到 2050 年，我国的平均气温可能上升 2.2℃。

全球变暖是温室效应的结果，而温室效应是由二氧化碳和其他温室气体（如大气中的甲烷）所引发的。这些气体截获了由地面反射的阳光，相当于在大气中截留了能量，并使之升温。温度升高会对地球生态系统造成破坏，并引发影响人类生存的许多自然灾害，进而使气候变化的风险加剧。

近几十年的观测表明，人类活动是造成气候变暖的主要原因。特别是近年来，人类社会对能源的大量消耗带来了越来越严重的温室气体排放问题。二氧化碳是碳氢化合物和煤等化

石燃料燃烧的生成物，是全球最主要的温室气体，是造成气候变化的主要因素。虽然二氧化碳可被植物吸收，并由海洋以合成碳酸盐的方式收集，但这些自然同化过程的能力是有限的，不可能消除所有排放到大气中的二氧化碳，其结果就是在大气中形成了二氧化碳的累积。

据国际能源机构（International Energy Agency, IEA）估计，全球汽车二氧化碳总排放量将从 1990 年的 29 亿 t 增加到 2020 年的 60 亿 t。由此可见汽车对地球环境造成的巨大影响。

控制能源消费和节约能源是减少二氧化碳排放量的重要途径。在工业发达国家，人均能源消费指数为 1~3 不等，这表明能源节约的余地是很大的。与此同时，还可以在保持适当的能源消费水平的前提下，用那些不会产生温室效应的替代能源来取代会造成污染的能源。

为了减少汽车对全球气候变暖的影响，削减二氧化碳等温室气体的排放，汽车应尽量采用小排量发动机和带有稀薄燃烧技术的发动机，以最大限度地提高能源利用效率。为了减少汽车的二氧化碳排放量，各国开始制定并实施汽车二氧化碳排放法规。2008 年，欧盟要求轿车二氧化碳排放量低于 140 g/km（汽油车对应的油耗要在 6L/100 km 以下）；在 2012 年，这一限值为低于 120 g/km；至 2020 年，则应低于 100 g/km。我国也在大力发展一系列先进技术，包括电动汽车、混合动力汽车和以天然气为燃料的内燃机车辆。预计到 2030 年，我国的汽车二氧化碳排放总量有望降低 45%。

2. 空气污染

空气污染是指一些危害人体健康及周边环境的气体、固体或液体悬浮物对大气层所造成的污染。汽车释放出的一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化合物、二氧化碳、固体悬浮颗粒、铅及硫氧化合物等都会对空气造成污染。在很多大都市的空气污染物和烟雾混合物中，燃油车的排放物所占的比重已经超过 50.7%。尽管车用内燃机在不断改进以降低排放，但燃油车数量增加所带来的影响远远大于单台车辆降低排放所取得的效果。因此，由燃油车所造成的空气污染物的总量仍在以令人担忧的速度持续增加。

根据有关专家的研究，北京市的 $PM_{2.5}$ 污染物中大多是直径小于 1 微米（也称为 PM_1 ）的粒子。 PM_1 的最大组分为有机碳气溶胶，约占 40%；第二大组分是硫酸盐气溶胶，占 16%，主要来自燃煤；而第三大组分为硝酸盐气溶胶，约占 13%，这一部分物质既有机动车燃油的影响，也有燃煤的影响。主要来自城市居民活动和城郊农业生产等排放的氨气也很容易形成更多的硫酸盐和硝酸盐。在北京市的 PM_1 中，机动车尾气排放的贡献率约为 23%。

3. 酸雨

酸雨是由空气中的二氧化硫（ SO_2 ）和氮氧化物（ NO_2 ）等酸性污染物所引起的 pH 值小于 5.6 的雨水、冻雨、雪、雹、露等酸性降水。

从 1990 起至 2016 年止，我国二氧化碳累年排放量约为 80 亿 t，超过美国，跃居世界首位。酸雨污染已成为我国非常严重的一个环境问题。目前，我国长江以南的四川、贵州、广东、广西、江西、江苏、浙江等省份已经成为世界三大酸雨区之一，酸雨区已占我国国土面积的约 40%。

4. 资源、能源短缺

由于人类无计划、不合理地大规模开采，资源和能源短缺问题已经在世界上大多数国家

甚至全球范围内出现。为了尽可能解决传统汽车工业带来的种种问题,增强世界汽车工业的可持续发展能力,适应全球经济发展趋势,世界各国政府、学术界、工业界都在加大对电动汽车开发和投入的力度,加快电动汽车发展的步伐。

电动汽车可以部分或者全部地利用电能驱动。由于电能可以通过其他形式的能量转换获得,如水能(水力发电)、内能(俗称热能、火力发电)、原子能、风能(风力发电)、化学能(电池)及光能(光电池、太阳能电池等)等,因此可以减少石油资源的使用量,而且这些新能源不会产生有害的排放和温室气体。电动汽车还可以充分利用晚间用电低谷时电网中富余的电力充电,使发电设备在夜间也得到充分利用,大大提高了其经济效益。有研究表明,同样的原油经过粗炼,然后送至电厂发电,再充入电池,最后由电池驱动汽车,其能量利用效率比传统的经过精炼变为汽油,再由汽油机驱动汽车高。

电动汽车的有害排放物很少甚至可以实现零排放,减小了对环境的污染。在全球范围内,由电动汽车产生的有害排放物比燃油车少得多。另外,电动汽车的使用还为通过集中处理进一步减少空气污染物的排放提供了一种可能。在发电过程中会产生相应的排放物,通过集中处理的方法,这些污染物很容易被收集起来并采取相应的过滤或无害化措施。但燃油车就无法采用这种集中处理的方法。

此外,电动汽车还有一个明显的优势,就是基本不会产生噪声污染。燃油车的发动机和复杂的机械传动装置会对环境产生严重的噪声污染,而电动汽车由于采用电动机驱动,电动机工作时的噪声很小,在此基础上若进一步通过有效的控制手段甚至可以使电动车辆实现无声运行,从而大大减轻对环境的噪声污染。

1.1.2 电动汽车的种类及技术特点

现代电动汽车(electric vehicles, EV)是在现代控制理论、电力电子技术、现代化学基础理论等基础上发展起来的,它是以化学电池、燃料电池、飞轮储能装置或超级电容等为动力源,全部或部分由电动机驱动,集中了机、电、化等各个学科领域中的高新技术,是汽车、电力拖动、功率电子、自动控制、化学能源、计算机、新能源、新材料等工程技术中最新成果的集成产物。

目前,按照技术状态和车辆驱动原理的不同,电动汽车可划分为纯电动汽车,燃料电池电动汽车和混合动力电动汽车三种类型。

1. 纯电动汽车

纯电动汽车是一种仅由车载能源(包括动力蓄电池、超级电容、飞轮电池等)作为储能动力源的汽车,图1-1所示为纯电动汽车的典型结构。

由于纯电动汽车电驱动特性的多样性,纯电动汽车可以有多种动力系统架构,图1-2为纯电动汽车几种常见的结构形式。

(1)图1-2(a)中,电动机、固定速比的变速器和差速器一起构成了纯电动汽车的动力系统。该动力系统结构利用电动机低速阶段恒扭矩和在大范围转速变化中所具有的恒功率特性,采用固定速比的减速器替换传统内燃机汽车多速比的减速器。基于这一替换,动力系统对离合器的要求也相应降低,从而可以取消离合器,该结构的优点是可以减小机械传动装置的体积和质量,简化驱动系统的控制,但该系统结构的缺点是无法对变工况下电动机工作点的效率

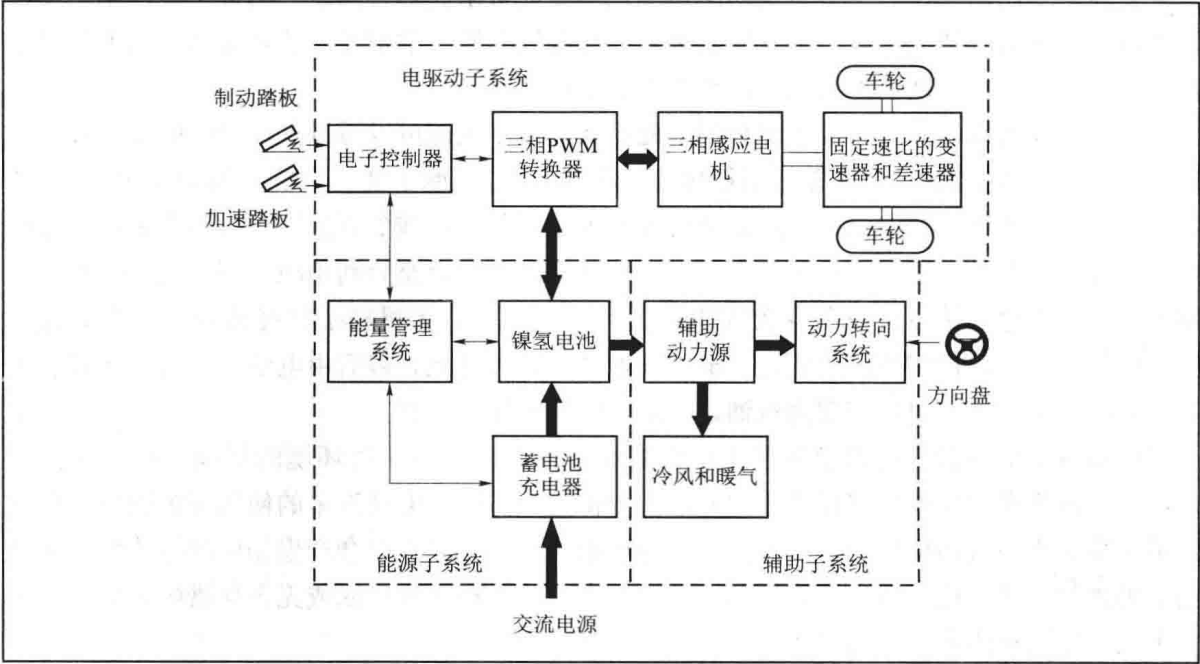


图 1-1 纯电动汽车的典型结构

进行优化，同时为满足车辆加速/爬坡和高速工况要求，通常选择较大功率的电机。

(2) 图 1-2 (b) 中，电动机替代了传统汽车中的内燃机，并与离合器、变速器及差速器一起构成了类似传统内燃机汽车的动力驱动系统。电动机输出驱动力，通过离合器可以实现电动机与驱动轮的断开或连接，变速器提供不同的传动比，以变更转速-功率曲线，匹配载荷需求，差速器用于实现车辆转弯时两侧车轮以不同的转速驱动。

(3) 图 1-2 (c) 中，电动机、固定速比的减速器和差速器进一步集成，组合成一体化的单一部件，并与车轮的驱动半轴直接相连，驱动系统进一步简化和小型化。该结构是目前纯电动汽车中较为常见的一种驱动形式。

(4) 图 1-2 (d) 中，机械差速器被取消，由两个电动机分别通过固定速比的减速器驱动各自侧的车轮，在车辆转弯时，靠电子差速器控制电动机以不同的转速运转，从而实现车辆的正常转弯。

(5) 图 1-2 (e) 中，驱动电机和固定速比的减速器（行星齿轮）被安装在车轮中，这种驱动系统也称为轮毂式驱动系统，这样可以进一步简化驱动系统，创造出更大的车内空间。该驱动系统中固定速比的减速器的主要作用是降低电动机的转速并增大驱动转矩。

(6) 图 1-2 (f) 所示的结构完全舍弃了电动机和驱动轮之间的机械连接装置，由电动机直接驱动车轮，电动机的转速控制等价于轮速控制。这样的驱动结构对电动机提出了特殊要求，如车辆在加速或减速时要具有高转矩特性，因此一般选用低速外转子型电动机。

此外，还有一种特殊的纯电动汽车动力驱动结构——双电动机四轮驱动系统，其结构如图 1-3 所示。车辆的前轮和后轮都是由电动机通过差速器来驱动，在不同的工况下可以使用不同的电动机来驱动车辆，或按照一定的扭矩分配比例联合使用两个电动机共同驱动车辆，从而使驱动系统的效率达到最大。

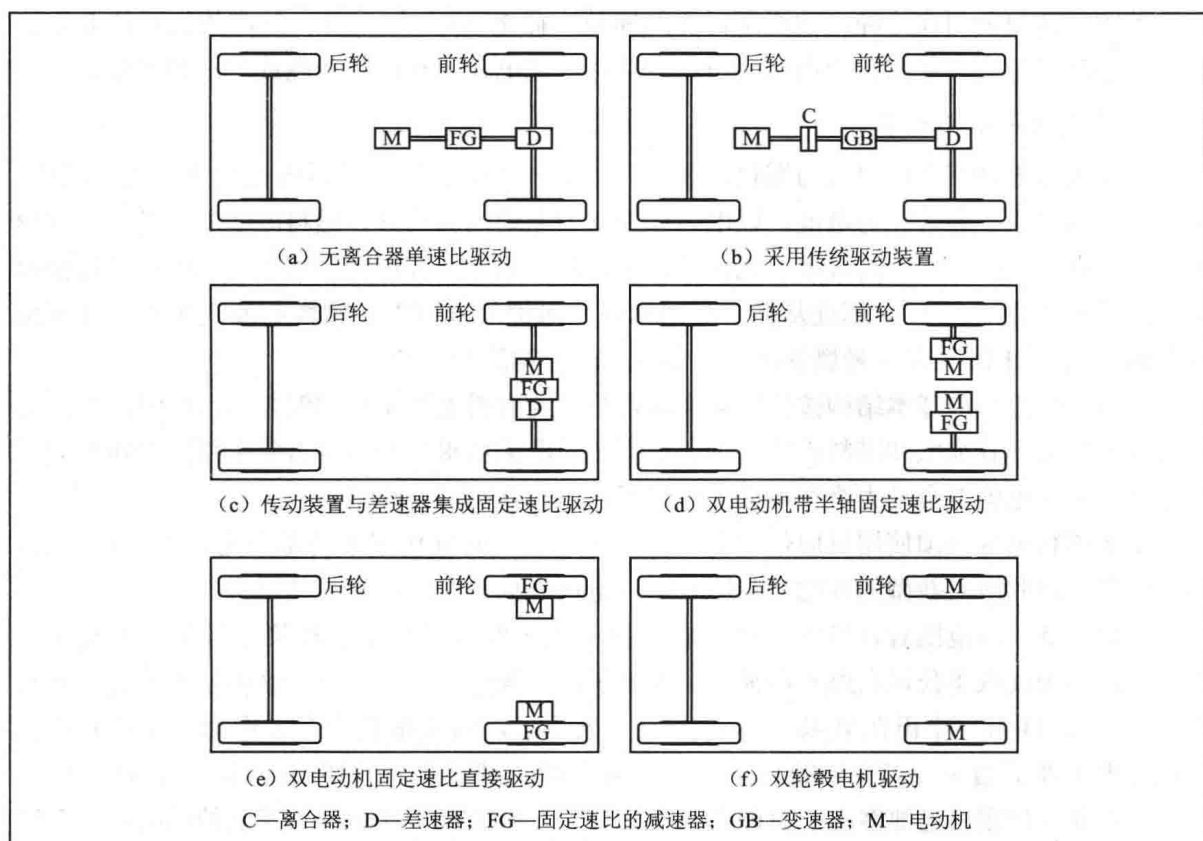


图 1-2 纯电动汽车几种常见的结构形式

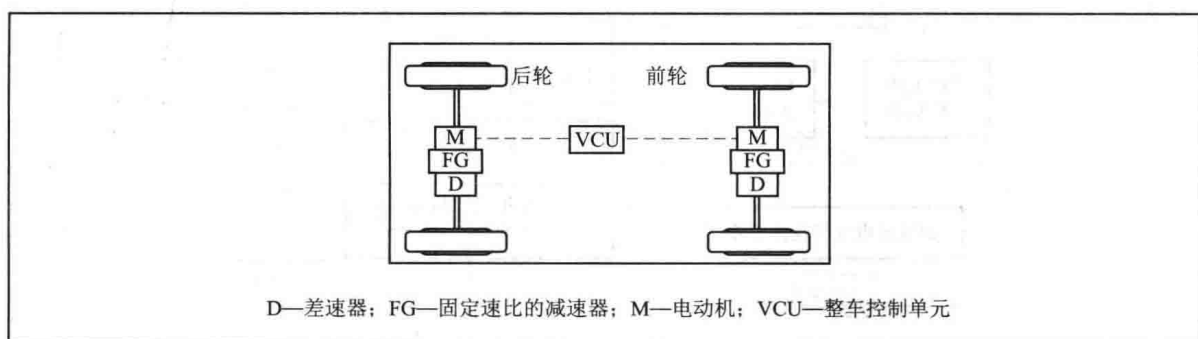


图 1-3 双电动机四轮驱动系统的结构

纯电动汽车主要由车载能源、能源管理系统、驱动电动机和驱动系统、车身和底盘，以及安全保护系统等构成。车载能源通过功率变换装置向电动机提供电能并驱动其运转，电动机经传动装置带动车轮旋转从而驱动汽车运动。车载能源目前主要采用动力蓄电池，主要有铅酸电池、镍氢电池、镍镉电池、钠硫电池、锂离子电池和锌空气电池等。

纯电动汽车是电动汽车研发的技术基础，其具有零排放、低噪声、结构简单、技术成熟等优点，只要有电力供应的地方就能够充电运营。但由于目前蓄电池单位重量储存的能量太少，又没形成规模经济，故购买价格较贵。蓄电池的优势在于应用成本较低，甚至可以达到

传统汽车的 1/3，具体应用成本取决于电池的寿命及当地的油、电价格等因素。

美国特斯拉公司作为纯电动汽车行业的翘楚，截至 2017 年 4 月，其市值已经达 500 亿美元，超过了绝大多数的传统汽车公司，这意味着纯电动汽车已越来越成为业界主流。

2. 燃料电池电动汽车

燃料电池电动汽车以氢气为燃料，由氢气与大气中的氧气在燃料电池中发生化学反应，并通过电极将化学能转化为电能，以电能作为动力驱动汽车前进。燃料电池的化学反应过程不会产生有害产物，具有高效率、无污染、零排放、无噪声等优势。燃料电池的能量转换效率比内燃机要高 2~3 倍，因此从能源利用和环境保护等方面看，燃料电池汽车是一种理想的车辆类型。图 1-4 是一种燃料电池电动汽车的结构简图。

燃料电池汽车的基本结构按照驱动形式可分为纯燃料电池驱动和混合驱动两种；按照能量来源可分为车载纯氢和燃料重整两种；根据燃料电池所提供的功率占整车总需求功率比例的不同，燃料电池混合动力汽车可分为能量混合型和功率混合型两种。

由于燃料电池必须使用反应催化剂才能产生电能，而催化剂中的稀有金属铂价格昂贵，储量稀少，因此研发新型的催化剂是影响燃料电池电动汽车发展的关键因素。

目前，从全球范围看，日本和韩国的燃料电池研发水平处于全球领先地位，尤其是丰田、日产和现代汽车公司在燃料电池汽车的耐久性，寿命和成本等方面逐步超越了美国和欧洲。2013 年 11 月，丰田在第 43 届东京车展上展出了燃料电池概念车，作为技术核心的燃料电池组实现了当时 3 kW/L 的功率密度，为当时全球最高。2016 年，丰田与日野合作，开拓生产新一代燃料电池客车。目前丰田汽车公司在扩大混合动力汽车产能的同时，重点针对燃料电池汽车的产业化进行准备。

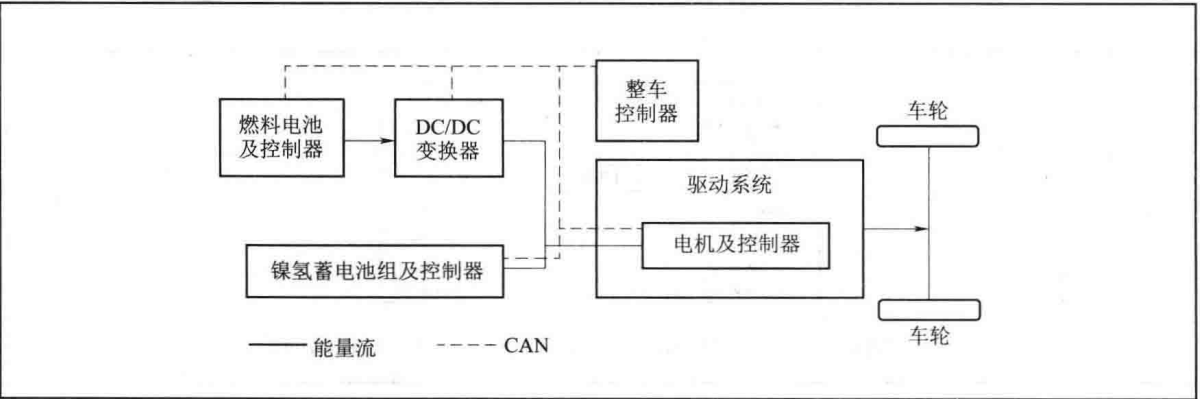


图 1-4 一种燃料电池电动汽车的结构简图

3. 混合动力电动汽车

从狭义上讲，混合动力电动汽车是指同时装备两种动力源——热动力源（由传统的汽油机或者柴油机产生）与电动力源（电池与电动机）的汽车。通过在混合动力电动汽车上使用电机，可以使动力系统按照整车的实际运行工况要求灵活调控，而发动机保持在综合性能最佳的区域内工作，从而降低油耗与排放。混合动力电动汽车也可以被认为是既有蓄电池提供电力驱动，又装有一台相对小型的内燃机的汽车。混合动力汽车是在纯电动汽车由于技术及成本等原因尚无法大规模推广时而开发的一种折中车辆类型。