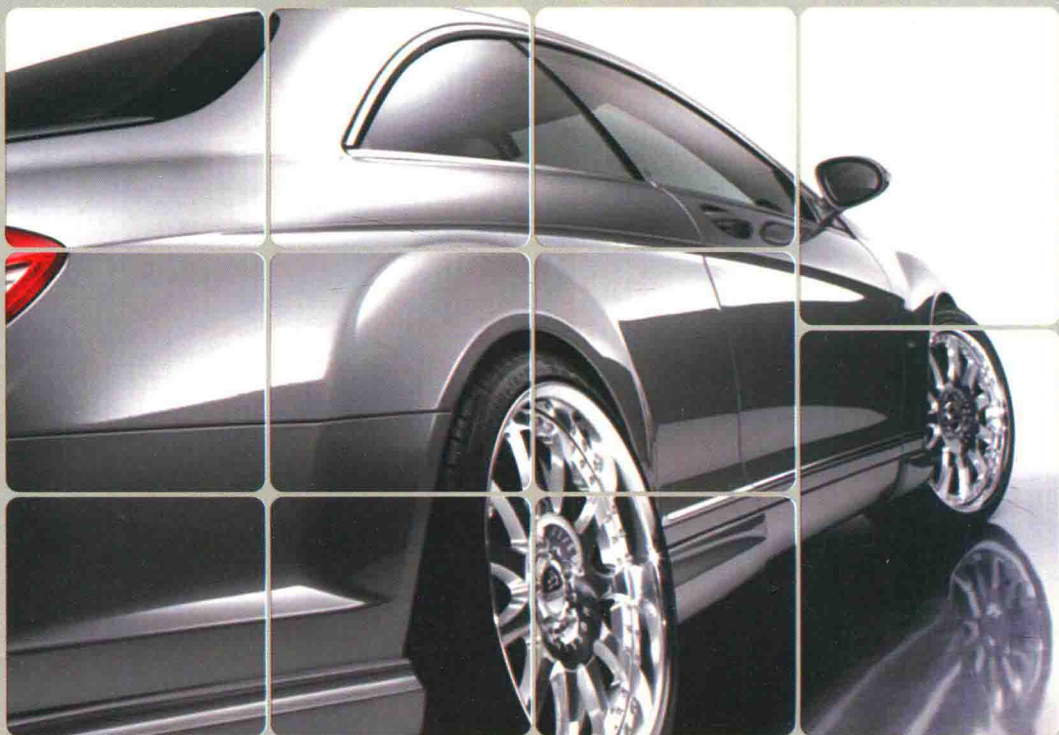


国家新能源汽车“十三五”重点规划 • 电动汽车系列教材



电动汽车电机及 驱动系统



主 编 姜久春
副主编 郭希铮 刘慧娟



北京交通大学出版社
<http://www.bjtu.com.cn>

国家新能源汽车“十三
电动汽车系列教材

电动汽车电机及驱动系统

主 编 姜久春
副主编 郭希铮 刘慧娟

北京交通大学出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要介绍电动汽车用驱动电机及电机驱动系统的基本知识。本书主要内容包括电动汽车电机驱动系统的分类、组成及技术特点,电动汽车电机驱动系统变流器及控制技术,电动汽车用驱动电机的分类及各种驱动电机的控制特点等。本书内容新颖、系统性强、条理清晰。读者通过阅读本书,可以对电动汽车的电机驱动系统及其技术有全面、系统的了解。本书适合车辆工程、电气工程、机械工程和计算机等相关专业的高校师生在进行车辆控制开关、优化设计的研究和学习时作为教材或参考书,也适合汽车工程技术人员、电动汽车从业人员,以及对电动汽车感兴趣的读者阅读。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车电机及驱动系统 / 姜久春主编. —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 978-7-5121-3491-1

I. ①电… II. ①姜… III. ①电动汽车-电机 ②电动汽车-驱动机构 IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第021637号

电动汽车电机及驱动系统

DIANDONG QICHE DIANJI JI QUDONG XITONG

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.bjtu.com.cn>

地 址:北京市海淀区高粱桥斜街44号

邮编:100044

印 刷 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185 mm×260 mm 印张:13.75 字数:340千字

版 次:2018年3月第1版 2018年3月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-5121-3491-1/U·299

印 数:1~2 000册 定价:42.00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：张维戈 龚敏明

委员：吴健 王占国 孙丙香 时玮
杜欣 桂峻峰 张彩萍 王昕
黄彧 郭希铮 张威 牛利勇
陈洛忠 李景新 刘平竹 聂晓波
沈茂盛 赵雪梅 刘慧娟

前言

随着工业的快速发展，全球在能源的供应和需求上面临严峻挑战，气候变化也成为人类面临最大环境危机，这些因素使电动汽车越来越受到人们的青睐。电动汽车成为汽车工业发展的趋势和方向，新能源汽车被确立为我国七大战略性新兴产业之一，“十二五”规划中对新能源汽车产业提出“以纯电驱动为新能源汽车发展和汽车工业转型的主要战略取向，当前重点推进纯电动汽车和插电式混合动力汽车产业化，推进新能源汽车及零部件研究试验基地建设，研究开发新能源汽车专用平台，构建产业技术创新联盟，推进相关基础设施建设。重点突破高性能动力电池、电机、电控等关键零部件和材料核心技术，大幅度提高动力电池和电机安全性与可靠性，降低成本；加强电制动等电动功能部件的研发，提高车身结构和材料轻量化技术水平；推进燃料电池汽车的研究开发和示范应用；初步形成较为完善的产业化体系。建立完整的新能源汽车政策框架体系，强化财税、技术、管理、金融政策的引导和支持力度，促进新能源汽车产业快速发展。”规划明确指出了全面实施电动汽车转型战略，重点支持电动汽车的技术研发。2008年北京奥运会、2010年上海世博会、2010年广州亚运会期间的成功示范，彰显出我国在电动汽车领域正从技术研发向产业化应用大步前进。

电动汽车涉及机械、电子、电化学及控制等众多领域，为了配合和推动我国新能源汽车技术的深入研究和人才队伍建设，迫切需要一系列新能源汽车相关的参考资料和教材。为此，北京交通大学电气学院携手北京交通大学出版社推出了本套电动汽车系列教材。希望这套丛书能为国内电动汽车领域的研发技术人员提供理论和实践上的帮助。《电动汽车电机及驱动系统》作为该教材其中一本，首先以由浅入深的方式介绍了电动汽车用驱动电机及电机驱动系统的基本知识；随后重点介绍了电动汽车电机驱动系统的分类、组成及技术特点，电动汽车电机驱动系统变流器及其控制技术；最后详细讲解了电动汽车用驱动电机的分类、工作原理、运行特性及各种驱动电机的控制特点等。

本书由姜久春教授担任主编，郭希铮、刘慧娟老师担任副主编。在编写期间，得到北京交通大学电气学院新能源所和电机所的大力支持，博士生张振洋协助完成了书稿资料的整理和部分内容的编写工作，在此表示衷心的感谢。

姜久春
2017年12

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 电动汽车的分类及其发展趋势	2
1.1.1 电动汽车的分类	2
1.1.2 电动汽车发展的关键技术	5
1.2 电动汽车的动力特性	6
1.2.1 电动汽车动力装置的特性	6
1.2.2 车辆性能与电机参数的匹配关系	8
1.3 电动汽车的电机驱动系统	10
1.3.1 电动汽车电机驱动系统的组成	10
1.3.2 电动汽车对电机驱动系统的要求	11
1.3.3 电动汽车驱动电机的类型	12
1.4 电动汽车驱动电机及电机驱动系统发展现状	13
1.5 电动汽车电机驱动系统的发展趋势和面临的问题	17
第 2 章 电动汽车变流器	20
2.1 电动汽车变流器的构成	20
2.2 电力电子器件	22
2.2.1 电力电子器件的工作状态和性能特点	22
2.2.2 功率二极管	23
2.2.3 功率场效应管	24
2.2.4 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT)	28
2.2.5 碳化硅 (SiC) 器件	31
2.3 电力电子器件的驱动及保护电路	36
2.3.1 电力半导体器件的驱动电路	36
2.3.2 电力电子器件的保护	41
第 3 章 电动汽车变流器的控制技术	45
3.1 直流电机的驱动电路	45
3.1.1 直流电机驱动控制系统的构成	45

3.1.2	直流电机电枢电压与励磁控制	46
3.1.3	直流斩波电源	46
3.1.4	多象限直流-直流变换器	49
3.2	电压型 PWM 变频电源及其控制方法	51
3.2.1	用于直-交变换的电压源型和电流源型变换器	51
3.2.2	直-交变换电源脉宽调制方法	52
3.3	母排	58
3.3.1	母排与叠层母排简介	58
3.3.2	车载叠层母排与传统母排的比较	58
3.3.3	层叠母排的结构及材料的选择	59
3.3.4	层叠母排对于杂散电感的抑制原理及性能特点	60
3.4	电流传感器	61
3.4.1	电流互感器的主要技术名词和技术规范	62
3.4.2	传统的电流传感器	63
3.4.3	新型电流传感器	64
3.5	速度传感器	70
3.5.1	速度的测量	70
3.5.2	磁电式速度传感器	71
3.5.3	光电式速度传感器	72
3.5.4	霍尔式速度传感器	76
第 4 章	电动汽车用电动机概述及直流驱动电机	80
4.1	概述	80
4.1.1	电动汽车用驱动电机的分类	80
4.1.2	电动汽车对驱动电机的要求	80
4.1.3	电动汽车驱动系统的构成	81
4.2	直流电动机	82
4.2.1	直流电动机的基本结构	82
4.2.2	直流电动机的工作原理	84
4.2.3	直流电动机的励磁方式	86
4.2.4	直流电动机的铭牌数据	88
4.2.5	直流电动机的数学模型	89
4.2.6	直流电动机的基本特性	92
4.2.7	直流电动机的起动和制动	100
4.2.8	直流电动机的调速	109
4.2.9	直流电动机的特点	111
第 5 章	电动汽车用异步驱动电机	113
5.1	异步电动机的基本结构	113
5.2	三相异步电动机的旋转磁场	116
5.3	三相异步电动机的工作原理	118

5.4	三相异步电动机的铭牌数据	119
5.5	三相异步电动机的电压方程、等效电路和功率、转矩方程	120
5.5.1	三相异步电动机的电压方程	120
5.5.2	三相异步电动机的等效电路	122
5.5.3	三相异步电动机的功率方程和电磁转矩	123
5.6	三相异步电动机的运行特性	126
5.6.1	三相异步电动机的工作特性	126
5.6.2	三相异步电动机的机械特性	127
5.7	三相异步电动机的起动和制动	131
5.7.1	三相异步电动机的起动	131
5.7.2	三相异步电动机的制动	134
5.8	三相异步电动机的调速	140
5.8.1	三相异步电动机的变频调速	140
5.8.2	三相异步电动机的变极调速	142
5.8.3	三相异步电动机的变转差率调速	143
5.9	三相异步电动机的特点	144
第6章	电动汽车用永磁同步驱动电机	146
6.1	永磁同步电动机的基本结构	147
6.1.1	定子	147
6.1.2	转子	148
6.2	永磁同步电动机的基本工作原理	151
6.3	永磁同步电动机的铭牌数据	152
6.4	永磁同步电动机的模型	153
6.4.1	永磁同步电动机的物理模型	153
6.4.2	坐标变换	154
6.4.3	永磁同步电动机的动态数学模型	156
6.5	永磁同步电动机的稳态性能	157
6.5.1	稳态电压方程和相量图	157
6.5.2	稳态运行的性能分析	158
6.6	永磁同步电动机的起动	162
6.6.1	辅助电动机拖动起动法	162
6.6.2	异步起动法	163
6.6.3	变频起动法	164
6.7	永磁同步电动机的调速	165
第7章	电动汽车用开关磁阻驱动电机	166
7.1	开关磁阻电动机的基本结构	166
7.2	开关磁阻电动机的基本原理	167
7.3	开关磁阻电动机的基本方程和性能分析	168
7.3.1	SR 电动机的基本方程式	169

7.3.2	SR 电动机的电磁转矩	169
7.3.3	SR 电动机在线性模型下的性能分析	171
7.4	开关磁阻电动机的特点	174
7.4.1	开关磁阻电动机的优点	174
7.4.2	开关磁阻电动机的缺点	174
第 8 章	电动汽车驱动电机的控制系统	175
8.1	电机模型中的坐标变换	175
8.2	异步电动机的数学模型	177
8.2.1	三相异步电动机在三相静止坐标系上的数学模型	177
8.2.2	三相异步电动机在两相静止坐标系 (α - β 坐标系) 上的数学模型	182
8.2.3	三相异步电动机在二相旋转坐标系上的数学模型	183
8.2.4	异步电动机在两相同步旋转坐标系上的数学模型	184
8.3	异步电动机按转子磁链定向的矢量控制系统	185
8.3.1	矢量控制系统的基本原理	185
8.3.2	转子磁链定向控制条件下的电机模型	186
8.3.3	间接矢量控制系统	188
8.4	永磁同步电动机的矢量控制系统	190
8.4.1	永磁同步电动机的 d - q 轴数学模型	190
8.4.2	永磁同步电动机的矢量控制原理	193
8.4.3	永磁同步电动机矢量控制的电流控制方法	204
参考文献		206

第1章

绪论

汽车工业是全球现代工业技术最重大的成就之一，为现代社会的发展做出了重大贡献。在满足工业生产、物流运输及人们每天的生活流动性需求等方面具有无可替代的巨大作用。同时，汽车工业对于世界经济的推动作用也非常巨大。随着汽车工业的发展和全球汽车保有量的不断增加，汽车对于世界能源和环境的影响也是逐渐体现。

据美国汽车行业权威杂志 *Wardsauto* 公布，截至 2011 年 8 月，全球处于使用状态的各类汽车总保有量已超过 10 亿辆，其中我国的增速位列世界第一。20 世纪 50 年代至 70 年代，全球汽车保有量每 10 年翻一番，在 1970 年达到 2.5 亿辆；自 1970 年以来，全球汽车保有量几乎每 15 年翻一番，至 1986 年，全球汽车保有量达到 5 亿辆；据估计，到 2050 年，这一数字将上升至 25 亿辆。

近年来，我国汽车工业发展迅猛。2009 年，国内汽车产销量突破 1 300 万辆，标志着我国成为世界第一大汽车生产和消费国。2030 年，我国汽车的普及率可能接近发达国家的水平，总保有量将达到 4.5 亿辆。

二氧化碳的过度排放、能源的短缺、空气的污染已成为 21 世纪全球面临的三大问题。随着世界经济的发展，碳排放量也在迅速地增加，而一氧化碳、碳氢化合物、氮氧化合物、二氧化硫、PM_{2.5} 等大气污染物主要来自于汽车尾气。根据世界各国的统计数据，在发达国家，汽车的尾气排放占污染气体总量的 60% 左右，其中美国为 65%，发展中国家的大城市，这个数据也在 60%~65%。这些污染物是造成光化学污染、酸雨、全球变暖等问题的主要原因。

节能、环保、减碳已成为我国的基本国策。减少煤炭和石油消耗，发展新能源是减碳排放的重要手段。我国的石油储备量仅占全球总储量的 3%，但用油量却占到全球总消费量的 11%，且在逐年增加。2009 年，我国进口的石油为 20 400 万吨，对外依存度达到了 52%。而世界能源组织警示：如果一个国家每年进口的石油超过 5 000 万吨，它就必须考虑进口石油对国家经济、政治的影响；如果一个国家每年进口石油超过 1 亿吨，则这个国家就必须动用政治、经济、军事、外交等一切力量，来确保能源的安全。

基于上述情况，大力发展电动汽车是应对石油短缺、环境污染及全球变暖等能源环境问题的最佳途径之一。因此，电动汽车是汽车工业发展的必然趋势。



1.1 电动汽车的分类及其发展趋势

1.1.1 电动汽车的分类

电动汽车的历史可以追溯到 19 世纪 80 年代，苏格兰人罗伯特·安德森，1839 年给四轮马车装上了电池和电动机，这比卡尔·本茨的世界上第一辆内燃机汽车，早了近 30 年。英国人罗伯特·戴维森于 1873 年制造了世界上第一辆实用的以蓄电池为动力的电动汽车。19 世纪末 20 世纪初是电动汽车最繁荣的时代，1890 年全球汽车保有量为 4 200 辆，其中的 38% 为电动汽车；1911 年，电动出租汽车分别在巴黎和伦敦投入运营；1912 年，美国至少有 3.4 万辆电动汽车运行。随着内燃机技术的发展和石油加工技术的进步，各类石油产品的应用得到快速普及，内燃机驱动的汽车逐渐成为主流，电动汽车在 1920 年之后渐渐失去了优势。直到 20 世纪 70 年代石油危机的爆发，电动汽车再次提上各国政府和跨国汽车巨头的议事日程，得到了越来越多的重视。至 2000 年左右，全球共销售电动汽车 6 万辆，但这一时期的电动汽车由于电池重量与成本问题而难以大规模商业化生产和推广应用。2003 年，通用公司和丰田公司分别转向氢燃料电池与混合动力技术的研发。通用的氢燃料电池技术由于氢能无法大规模廉价获取而无法实现商业化，丰田的混合动力技术的商业化则取得了成功。

电动汽车主要包括纯电动汽车（electric vehicle, EV）、混合动力汽车（hybrid electric vehicle, HEV）及燃料电池汽车（fuel cell electric vehicle, FCEV），三种主要类型电动汽车的动力系统结构示意图如图 1-1 所示。

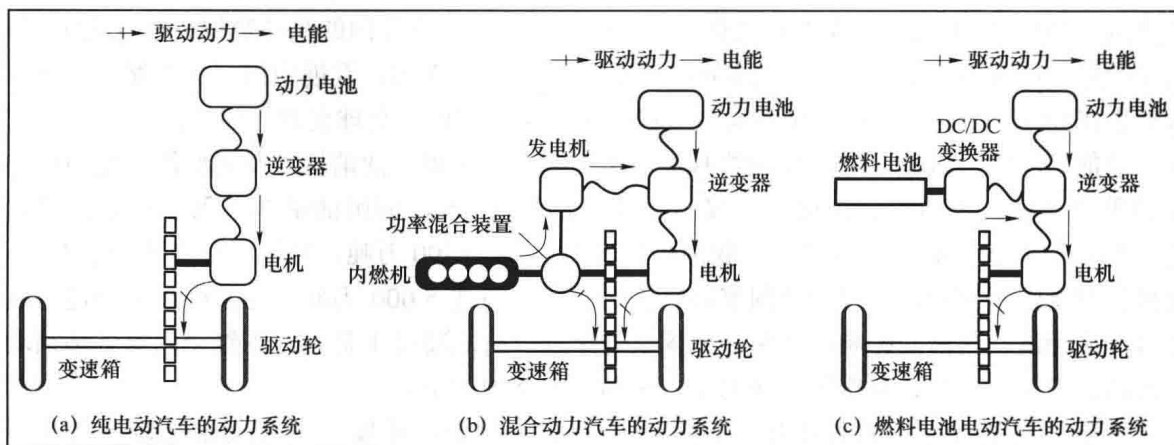


图 1-1 三种主要类型电动汽车的动力系统结构示意图

1. 纯电动汽车

纯电动汽车由车载蓄电池提供电能，车载电机驱动系统的变流器将来自于蓄电池的直流

电通过脉宽调制技术转变为频率和幅值可控的交流电提供给电机，电机产生电磁转矩，并通过变速箱驱动车轮运动，纯电动汽车的动力系统如图 1-1 (a) 所示。纯电动汽车的技术瓶颈在于车载动力蓄电池的能量密度和功率密度比汽油或柴油低很多，而且电池寿命有限，成本较高，因此纯电动汽车的续航能力也受到了限制。当前纯电动汽车的车载动力蓄电池多采用磷酸铁锂电池，其优点是安全性较好，能量密度可达 $80\sim 120\text{ Wh/kg}$ ，循环使用寿命可达 2 000 次，但它在低温 (0°C 以下) 时，即使有超级电容辅助启动电源，电动汽车的预热时间仍比较长。到目前为止，日产 Leaf 纯电动汽车 (见图 1-2) 全球销量已突破 10 万辆，在全球电动汽车市场中的占有率高达 45%。日产 Leaf 纯电动汽车采用层叠式紧凑型锂离子电池驱动，电池组的最大输出功率可以达到 90 kW ，驱动电机输出功率为 80 kW ，输出转矩的峰值可以达到 $280\text{ N}\cdot\text{m}$ ，最高车速为 140 km/h ，在电池完全充电的情况下，可以实现 160 km 以上的续驶里程。



图 1-2 日产 Leaf 纯电动汽车

我国政府和汽车厂商也十分重视纯电动汽车的发展，包括一汽、北汽、奇瑞、比亚迪等在内的我国主要汽车制造厂商在 2010 年以来都推出了纯电动车型。2014 年上市的北汽 EV200 电动汽车 (见图 1-3)，在经济模式下，该车的最大续驶里程可达 245 km ， $0\sim 50\text{ km/h}$ 加速时间仅需 5.3 s ，动力性能好，最高车速为 125 km/h 。北汽 EV200 电动汽车的车载电池采用三元锂电池，电池容量为 $30.4\text{ kW}\cdot\text{h}$ ，充放电次数 $\geq 2\ 000$ 次，可累计使用 40 万 km ；车载电机采用永磁同步电机驱动系统，峰值功率为 53 kW 。北汽 EV200 电动汽车的充电方式分为快充、慢充和 220 V 电源充电三种，快速充电桩的充电电压为 330 V ，充电电流为 80 A ；可以在 30 min 内将电池电量充至 80%；慢速充电桩的电压为 230 V ，电池充满电约需 8 h ；该车也可以采用家用 220 V 交流电源进行充电，充电时间需要 10 h 。



图 1-3 北汽 EV200 纯电动汽车

2. 混合动力电动汽车

混合动力电动汽车是指同时装备两种动力源——即热动力源（传统的汽油机或柴油机）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，可使动力系统按照整车的实际运行工况要求灵活调控，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和电机，可提供电力驱动，又装有一个相对小型发动机的汽车。混合动力汽车的内燃机通常在排量上小于普通内燃机汽车，并且由于其工作在最优效率区内，其能耗可以降低 5%~15%。以丰田第 2 代 Pruis 混合动力汽车（见图 1-4）为例，其汽油发动机的排量为 1.5 L，但是整车的综合动力性能与 2 L 排量的普通汽油发动机汽车相当，整车的效率也由单一内燃机动力的 16%~18% 提高至 32%，到目前为止，丰田混合动力汽车的累积销量已经超过 200 万台，实现了大规模的市场化。



图 1-4 丰田第 2 代 Pruis 混合动力汽车

3. 燃料电池汽车

燃料电池电动汽车采用质子交换膜燃料电池系统作为动力源，车载的氢燃料和空气中的氧气，通过在燃料电池组中发生化学反应产生电能和水，因此燃料电池电动汽车也是一种零排放汽车。但是由于燃料电池的输出电压变化范围较大，动态响应较差，在燃料电池电动汽车中，通常需要增加一级直流-直流变换器（DC/DC）和动力蓄电池，共同为电机驱动系统进行供电。

自二十世纪六七十年代以来，燃料电池技术逐渐由原来的军事和航天领域转向汽车领域，世界各汽车厂商相继开展了燃料电池电动汽车的开发研究。2002 年 6 月，在加拿大召开的第 14 届世界氢能大会提出了以燃料电池为主导产品的氢能源社会的概念。2002 年，美国宣布出台“Freedomcar”计划，确定将燃料电池作为主要能源在汽车产品中推广应用。福特公司计划在 25 年内在 75% 的轻型汽车上采用燃料电池混合动力装置。

日本丰田公司于 2015 年 7 月推出了 FCV 氢燃料电池轿车的量产版本——丰田 Mirai 氢燃料电池电动汽车（见图 1-5），并于 2015 年 10 月在美国加利福尼亚州率先上市。Mirai 是丰田首款大批量生产的燃料电池汽车，电能由产生氢氧化反应的燃料电池组提供，交流电机可提供 114 kW 的最大功率。与传统内燃机相比，氢燃料电池组的能源效率更为优越，并且具备卓越的环保特性，车辆行驶时的排放物只有水，完全实现了二氧化碳等污染物的零排放。该车从 0~100 km/h 的加速时间仅需 9 s，在 3.6 s 内即可从 48 km/h 加速至 80 km/h，燃料电池组的功率为 155 kW，可连续行驶里程达 483 km，并可在 -22℃ 的低温下正常行驶。

此外, 该车的燃料补充时间仅需 3 min 左右。



图 1-5 丰田 Mirai 氢燃料电池电动汽车

燃料电池电动汽车在推广中存在的主要制约因素为电池成本高、储氢技术和加氢站基础设施建设等问题, 燃料电池电动汽车距离大规模市场化应用还需一定的时间。

1.1.2 电动汽车发展的关键技术

电动汽车要得到进一步发展, 必须处理好以下四个方面的关键性技术节点。

1. 电池技术

电池是电动汽车的动力源, 也是一直制约电动汽车发展的关键因素。车用电池的主要性能指标包括比能量、能量密度、比功率、循环寿命和成本等。要使电动汽车能与燃油汽车更有力地竞争, 关键是要开发出比能量高、比功率大、使用寿命长的高效电池。

到目前为止, 电动汽车用电池历经了三个代际的发展, 已取得了不少突破性的进展。第一代以铅酸电池为主, 第二代以碱性电池为主, 第三代以锂离子电池为主。此外, 燃料电池技术也得到了更多的重视和投入。燃料电池能够直接将燃料的化学能转变为电能, 能量转变效率高, 是普通内燃机热效率的 2~3 倍, 比能量和比功率都很高, 并且可以控制反应过程, 能量转化过程可以连续进行, 是理想的车用电池, 但受到成本和材料等因素的限制, 燃料电池在目前更多地处于研制、试验和试运行阶段。

2. 电机驱动技术

电机及其驱动系统是电动汽车的关键组成部分。要使电动汽车具有良好的使用性能, 驱动电机应具有调速范围宽、转速高、起动转矩大、体积小、质量轻、效率高、动态制动能力强和能量回馈等特性。早期的电动汽车都采用直流电机驱动系统, 但由于直流电机的换向器与电刷需要定期维护, 因此带来了可靠性与保养维修的问题, 随着技术的发展, 交流电机展现出优于直流电机的性能, 在效率、功率密度、再生能量回馈, 可靠性等方面具有明显的优势。随着控制系统趋于智能化和数字化, 各种先进的控制技术应用于电动汽车交流电机控制系统, 大幅提高了电机驱动系统的综合性能。

3. 整车技术

电动汽车需要全新的整车设计技术, 而绝不是仅由电动驱动系统代替内燃机这么简单,

需要从影响整车整体性能（如续驶里程、爬坡能力、加速能力及最高车速等）的参数着手进行改进。对于电动汽车而言，轻质结构具有重大的意义，因为除了电池的重量外，车辆自重也是行驶距离的一个重要限制性因素。车辆越轻，允许装备的电池也就越多，行驶距离也就越远。除可增加行驶距离外，更轻的整车重量可以使车辆的性能得到明显增强。较轻的车辆加速更快，在弯道中更敏捷，制动时间也更短。如宝马电动汽车的车身部分几乎都是由碳纤维制成，只有承担碰撞吸能和承载动力系统的底部结构才使用铝合金材料。碳纤维比铝轻 30%，比钢轻 50%，这样的车身结构不仅强度较高，更重要的是能够大幅度减重。

4. 能量管理技术

能量管理系统是电动汽车的智能核心，它的作用是检测单体电池或电池组的荷电状态，并根据各种传感信息（包括动力要求、加减速命令、行驶路况、蓄电池工况和环境温度等）合理地调配和使用有限的车载能量。能量管理系统还能够根据电池组的使用情况和充放电历史选择最优充电方式，以尽可能延长电池的寿命。电池当前的储能状态是电动汽车行驶中必须反馈给驾驶员的重要参数，也是电动汽车能量管理系统应完成的重要功能。电动汽车能量管理的难点在于如何根据所采集的每块电池的电压、温度和充放电电流等历史数据来建立一个确定每块电池剩余能量的较精确的数学模型。



1.2 电动汽车的动力特性

1.2.1 电动汽车动力装置的特性

对于车辆的最大牵引力，存在两个限制因素：① 轮胎与地面接触所能提供的最大牵引力；② 动力装置按给定传动比所能提供的最大转矩下所对应的牵引力。这两个限制因素中数值较小的一个将决定车辆的动力性能。在正常工况下，通常由第 2 个因素决定车辆的动力性能。

1. 车辆动力装置的理想运行特性

应用于车辆的动力装置，其理想的运行特性应该是在全车速范围内的恒功率输出，因此，如图 1-6 所示，动力装置的输出转矩应随车速呈双曲线形变化。根据理想运行特性曲线，动力装置将在任何车速下提供最大功率，为此给出了车辆的最佳运行特性。但考虑到在低车速时，通常要限制动力装置的转矩输出，使其不会超出轮胎与地面间接触的最大黏着力。这一恒功率特性将在车辆低速时提高牵引力，满足车辆在加速、爬坡等场合中所需要的动力。

2. 内燃机的运行特性

内燃机（包括汽油机、柴油机）是目前应用在汽车中最常见的一种动力装置，当汽油机

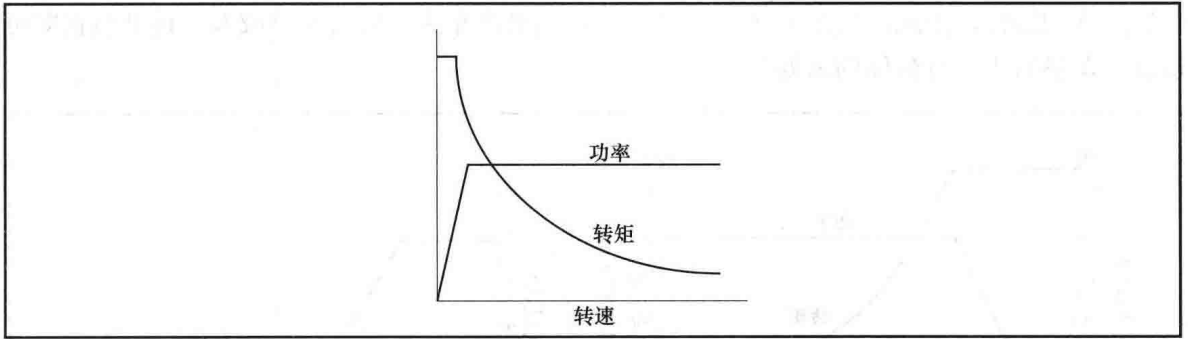


图 1-6 用于车辆牵引的动力装置的理想运行特性

的节气门全部打开时，内燃机的运行特性如图 1-7 (a) 所示，其转矩-转速特性远非牵引所要求的理想运行特性，其在低速时可以平稳地运行在怠速状态；在中间速度时呈现出良好的燃油经济性及输出最大转矩；而当需要进一步增加转速时，由于进气管内的损耗增加、机械摩擦及液压装置的黏滞性导致其输出功率明显损失，从而使进入气缸的空气量减小，输出转矩也相应降低。内燃机的功率输出在某一转速下增至最大值，当超过该转速时，则其功率则开始下降。在车辆中应用时，内燃机的最大容许转速通常设定为稍大于最大功率输出所对应的转速。内燃机具有相对平滑的转矩-转速曲线（与理想的动力装置相比），因此，在应用于汽车时，需采用多挡传动装置改善其特性，采用多挡传动装置的内燃机汽车的牵引力特性如图 1-7 (b) 所示。

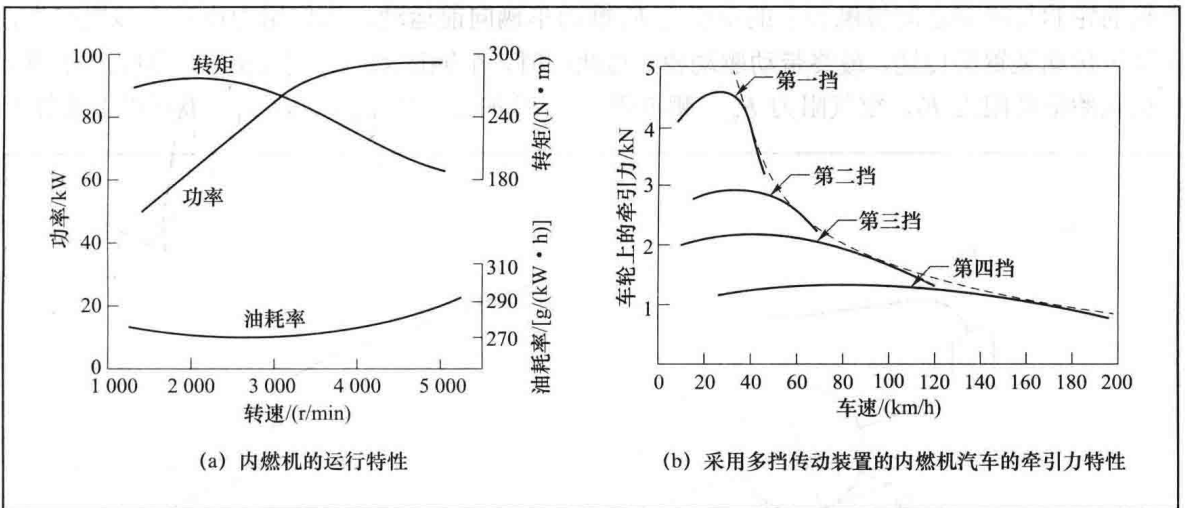


图 1-7 汽车内燃机的典型运行特性及配置多挡传动装置的内燃机汽车的牵引力特性

3. 电动机的运行特性

电动机是车辆动力装置的另外一个选择，随着电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车技术的迅速发展，其适应性日趋凸显。如图 1-8 (a) 所示，具有良好的转速调节控制特性的电动机通常具有很接近理想运行特性的转速-转矩特性。电动机一般以零转速起动，当转速增加至基速时，电压增至额定值，而磁通则保持为常值。在零转速至基速的转速范围内，电动机产生恒定转矩。当转速超过基速后，通过弱磁控制使电压保持不变，从而使电机输出功率保持恒定，而转矩随转速呈现出双曲线形变化。由于电动机的转速-转矩特性接近于车辆动力