

电动汽车的 新型驱动技术

第2版

邹国棠 程明 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

电动汽车的新型驱动技术

第2版

邹国棠 程 明 著



机械工业出版社

本书总结了作者所在课题组在电动汽车技术中电机驱动系统方面 20 多年的研究成果,内容涉及多种电机驱动系统的结构、分析及控制。在深化传统电机驱动系统如直流电动机、交流感应电动机、开关磁阻电动机、永磁无刷电动机以及永磁同步电动机的基础上,本书对当今前沿电机驱动系统如双定子永磁无刷电动机、双励磁永磁无刷电动机、记忆电动机、磁性齿轮永磁无刷复合电动机以及电子无级变速传输(ECVT)系统进行了讨论。本书不仅利用数学模型和仿真对多种电机驱动系统进行了详细分析,同时还提供了大量的实验数据进行验证,供读者了解在电动汽车技术中电机驱动系统方面的最新研究成果。

本书可作为电动汽车相关领域工程技术人员、高等院校相关专业师生的参考书,也可供对电动汽车技术感兴趣的人士阅读。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车的新型驱动技术/邹国棠,程明著. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2015. 10

ISBN 978 - 7 - 111 - 51591 - 3

I. ①电… II. ①邹… ②程… III. ①电动汽车—驱动机构 IV. ①U469. 720. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 222927 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘星宁 责任编辑: 刘星宁

版式设计: 霍永明 责任校对: 丁丽丽

封面设计: 陈 沛 责任印制: 李 洋

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市胜利装订厂装订)

2015 年 11 月第 2 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 14.5 印张 · 282 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-51591-3

定价: 49.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线: 010-88361066 机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294 机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203 金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

序

电动汽车是中国能源生产和消费革命重要的主力军，是传统化石能源和可再生能源之间的纽带，是国家环境和生态的“保护神”。电动汽车的技术进步、应用和推广必将与智慧城市、智能电网、现代交通体系、市场经济发展、技术进步和经济改革紧密结合。它的健康迅速发展可以起到牵一发而动全身的作用。中国是全球最大的汽车生产和消费大国，中国也必将成为电动汽车的王国。作为电动汽车关键技术之一的电机驱动技术，其水平高低直接影响着电动汽车的整车性能。研究适合于电动汽车的车用驱动电机及其驱动技术，已成为电动汽车研究领域近年来的热点内容之一。

从1986年起，我和邹国荣教授便开始合作研究电动汽车及其驱动技术，并根据电动汽车用电机的负载要求、运行环境以及工况等特点，提出将“电动汽车电动机”作为一个独立的种类，这一概念得到国际上的广泛认同。在2001年，我们合著了《现代电动汽车技术》（Modern Electric Vehicle Technology）一书，并由英国牛津大学出版社作国际性发行，是当今对电动汽车技术较权威及具指导性的专著。

本书是作者所在课题组对电动汽车，特别是电动汽车驱动技术方面20多年来的研究成果总结，其中既有应用于电动汽车的传统电机驱动系统如直流电动机、交流感应电动机、开关磁阻电动机、永磁无刷电动机以及永磁同步电动机的介绍，又有对当今前沿电机驱动系统如双定子永磁无刷电动机、双励磁永磁无刷电动机、记忆电动机、磁性齿轮永磁无刷复合电动机以及电子无级变速传输（ECVT）系统的讨论和分析，内容丰富，创新性强。

本书中提出的新结构、新概念的永磁电动机也是目前国际上车用驱动电机研究领域热点之一，体现出作者在电动汽车驱动领域深厚的造诣和独到的、具有前瞻性的视野，这也是本书值得推荐和我写序的原因。最后，我相信，这本书一定会给广大电气工程领域本科生及研究生了解最新电动汽车驱动技术，拓宽科研视野，提供有益的帮助，同时也会为促进祖国电动汽车的快速发展和应用发挥出积极的作用。



中国工程院院士
英国皇家科学院院士
2015年8月

第2版前言

本书自2010年5月出版以来,电动汽车技术发展日新月异,国内外各大汽车厂商都推出了自己的电动汽车新产品,同时,许多非传统汽车企业也纷纷进入电动汽车领域,推出了各具特色的电动汽车产品。电动汽车技术的发展对电机驱动技术提出了新的挑战。为了更好地适应技术发展,满足广大读者的需求,故对本书进行修订。

本次修订,在保持全书体系结构和基本内容不变的前提下,吸收了电动汽车电机驱动技术的最新技术成果,特别是作者课题组近5年来所取得的研究成果。例如,第1章更新了电动汽车发展现状和发展方向等内容;第4章新增了全齿绕、半齿绕开关磁阻电动机绕组结构等;第5章新增了磁通切换永磁电动机与丰田Prius永磁无刷电动机对比分析等;第9章增加了两层气隙和一层气隙磁性齿轮永磁无刷复合电动机等;第10章新增了永磁同心双转子电动机的实物图,并更新了基于磁性齿轮的ECVT系统的相关内容等。其次,从全书的系统性和可读性考虑,对部分内容进行了增、删或调整,例如,第1章新增了电动汽车电机驱动系统的基本特点与驱动方式等;第3章新增了交流感应电动机的基本结构和工作原理等。再则,更新或新增了部分参考文献,有兴趣的读者可据此查阅到更翔实的研究成果。最后,对原书中的错误和不妥之处进行了修改,对文字进行了润色。总之,经过此次修订,本书内容更充实,技术更先进,体系更合理,文字更通顺,可读性更强。

本书所涉及的研究工作,得到了20多个科研基金和项目的支持,除第1版前言已鸣谢的项目外,还有:国家重大基础研究计划(973计划)课题“高可靠性电机系统设计与容错控制(2013CB035603)”、“电机系统性能综合协调与智能控制(2013CB035605)”,国家自然科学基金项目“电动车新型自减速永磁复合轮毂电机及其控制系统研究(51177012)”,江苏省产学研联合创新基金项目“电动车用高效永磁电机系统的关键技术研究(BY2011150)”等,在此表示衷心感谢!

近5年来,作者所在课题组在电动汽车技术方面发表了约100篇论文,为电动汽车技术的发展和进步做出了实质而有意义的贡献,其成果已被广泛地吸收在本书中。特别是於锋先生(东南大学电气工程学院博士生)为本书的修订审阅,做出了重要的贡献。借此机会向课题组各位成员表示由衷的感谢!

我们还要感谢本书第1版的使用者。读者的反馈以及许多大学使用本书作为

教科书，给我们提供了动力来修改和完善本书。

由于电动汽车驱动技术仍处于快速发展阶段，加上作者水平和精力所限，书中难免有不完善和错误之处，敬请各位专家和读者批评指正。

程 明

2015 年 9 月于南京四牌楼

第 1 版前言

汽车的出现改变了世界，有力促进了世界经济的发展，方便和改善了人们的生活。但是，汽车发展到今天，也带来了不可忽视的能源、环保和安全等问题，引起了世界各国的广泛关注。电动汽车，这个与燃油汽车历史几乎一样长的交通工具，其发展却几经沉浮，并随着科技和社会的进步跨越了不同的时代，同时也对高科技的发展、工业的兴起以及经济的发展起着推波助澜的促进作用。电动汽车，作为电力驱动的交通工具，其概念广泛，包括纯电池电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车等。由于电动汽车在减少尾气排放，能源的多元化利用以及高效、节能等方面具有明显优势，成为未来汽车技术发展的方向之一。现代电动汽车的核心是如何高效、清洁和智能化的利用电能来驱动车辆，涉及许多技术领域，其关键技术包括电机驱动技术、能源技术、能量管理技术、自动控制技术、材料技术、化学工艺技术及汽车制造技术等多个方面的融合。为此，许多国家纷纷投入大量物力、财力进行电动汽车方面的研究。目前，国内外汽车生产厂商已纷纷推出各种类型的电动汽车，电动汽车呈现出加速发展的趋势。

在 1987 年，陈清泉院士已在香港大学成立了国际电动汽车研究中心，是学术界的前沿。自 2005 年以来，我担任国际电动汽车研究中心主任，继往开来，持续发展电动汽车技术，在新型电机驱动技术上，取得了一系列研究成果。2007 年以来，又与东南大学的程明教授等合作开展电动汽车驱动控制技术研究，进一步丰富了研究成果。本书主要介绍了作者在电动汽车驱动技术方面的研究成果。书中首先介绍了电动汽车的发展历史和各国电动汽车研究水平以及现状，便于读者全面了解电动汽车的发展和研究概况；其次分章节介绍了直流电动机、交流感应电动机、开关磁阻电动机、永磁无刷电动机以及永磁同步电动机等传统电动机的结构特点及其在电动汽车驱动领域中的应用；然后，介绍了双定子永磁无刷电动机、双励磁永磁无刷电动机、记忆电动机、磁性齿轮永磁无刷复合电动机以及电子无级变速传输（ECVT）系统等新型电机驱动系统。

本书是作者所在课题组近 20 年来研究成果的总结。在这 20 年里，我们的课题组在电动汽车技术方面共发表了约 150 篇国际期刊文章及约 200 篇国际会议文章。在此，我们借着这次机会衷心感谢课题组各成员，他们在电动汽车技术方面的研究做出了实质而有意义的贡献，其研究成果被广泛地纳入本书中。特别是刘春华博士（香港大学电机电子工程学系博士）、牛双霞博士（香港大学电机电子工程学系博士）、余创先生（香港大学电机电子工程学系博士生）、蹇林旒先生

(香港大学电机电子工程学系博士生)、张晓东先生(香港大学电机电子工程学系博士生)、龚宇先生(上海大学自动化学院博士生)、李文龙先生(香港大学电机电子工程学系博士生)、李建贵女士(香港大学电机电子工程学系博士生),他们积极参与到本书的资料搜集、选材和编写过程中,承担了大量的工作,在此表示衷心的感谢。再者,朱孝勇博士(江苏大学副教授、东南大学电气工程学院博士)为本书的最后统稿,做出了重要的贡献,在此表示衷心的感谢。本书承蒙尊敬的陈清泉院士拨冗审阅,提出了许多宝贵意见,并作序,在此表示万分感谢!最后,特别感谢上海大学的电机专家江建中教授长期以来对课题组研究的大力支持和无私帮助!

本书所涉及的研究工作,得到了十余个科研基金和项目的支持,它们包括香港研究资助局项目“电动车用新型定子双馈电双凸极电机研制”、“基于超级电容的新型汽车启动发电机系统”、“基于磁齿轮的电子无级调速系统”、“开关磁阻电机速度控制的混沌现象及其应用研究”;香港大学研究及会议资助委员会项目“电力驱动用新型谐振式直流变换器研究”、“电动车电力驱动用功率变换器研究”、“混合电动车计算机仿真研究”;国家自然科学基金海外与港澳青年学者合作研究基金项目“新型电机与特种电机(50729702)”;国家自然科学基金项目“双凸极变速永磁电机及其控制系统之理论研究(59507001)”、“应用混沌理论控制开关磁阻电机驱动系统的研究(50177015)”、“电动车用新型双凸极电机驱动系统及其智能控制(50377004)”、“混合磁路发电机及电动机驱动控制技术研究(50337030)”;江苏省科技支撑计划项目“新型混合动力汽车用电子无级调速系统研发(BE2008130)”、“车用新型定子永磁电机系统产业化集成技术研究(BE2009085)”;教育部长江学者奖励计划东南大学长江学者讲座教授项目“电动汽车研究”等。在此,对香港研究资助局、国家自然科学基金委员会、教育部长江学者奖励计划、江苏省科技厅、香港大学以及东南大学等表示衷心的感谢!

由于电动汽车驱动系统目前处于快速发展的阶段,书中难免有不完善和错误之处,敬请各位专家和读者予以批评指正。

邹国棠

2009年12月于香港大学

目 录

序

第2版前言

第1版前言

第1章 电动汽车概述 1

1.1 电动汽车的历史与现状 1

1.1.1 电动汽车发展历史 1

1.1.2 国际电动汽车的现状 4

1.1.3 国内电动汽车的现状 10

1.2 电动汽车的特点和发展 方向 19

1.2.1 电动汽车的特点 19

1.2.2 电动汽车的发展方向 23

1.3 电动汽车的关键技术 23

1.4 电动汽车电动机系统的 基本特点与驱动方式 26

1.4.1 电动汽车对驱动电动机的特性 要求 26

1.4.2 电动汽车驱动电动机的主要 类型 27

1.4.3 电动汽车的主要驱动方式 27

参考文献 28

第2章 直流电动机及其驱动 技术 31

2.1 直流电动机驱动系统 31

2.2 直流电动机 32

2.2.1 他励直流电动机 32

2.2.2 串励直流电动机 33

2.2.3 并励直流电动机 34

2.2.4 复励直流电动机 34

2.3 变换器 37

2.3.1 单象限型直流斩波器 37

2.3.2 二象限型直流斩波器 38

2.3.3 四象限型直流斩波器 40

2.4 速度控制 45

2.4.1 电压控制直流斩波器驱动 系统 46

2.4.2 带电压前馈的电压控制直流 斩波器驱动系统 47

参考文献 48

第3章 交流感应电动机及其 驱动技术 50

3.1 概述 50

3.2 交流感应电动机 50

3.2.1 笼型感应电动机的基本结构与 工作原理 50

3.2.2 电动汽车用感应电动机的设计 特点 52

3.3 逆变器 52

3.4 控制策略 57

3.4.1 转速控制 57

3.4.2 变压变频控制 58

3.4.3 矢量控制 59

3.4.4 自适应控制 61

3.4.5 滑模控制 62

3.4.6 效率优化控制 64

3.4.7 变极控制 66

参考文献 67

第4章 开关磁阻电动机及其 驱动技术 69

4.1 开关磁阻电动机驱动系统 69

4.2 开关磁阻电动机 71

4.2.1 开关磁阻电动机的工作 原理 71

4.2.2 开关磁阻电动机的设计	74	限元分析	114
4.3 开关磁阻电动机的功率变换器	77	6.4 电动机状态下双闭环控制策略在有限元时步法中的实现	117
4.4 开关磁阻电动机的控制	80	6.5 双定子永磁电动机绕组连接方式	121
参考文献	83	6.6 新型双定子永磁无刷电动机与传统永磁无刷电动机的比较	124
第5章 永磁无刷电动机驱动技术	85	参考文献	127
5.1 概述	85	第7章 新型双励磁永磁无刷电动机及其驱动技术	129
5.2 永磁无刷电动机驱动系统	86	7.1 概述	129
5.3 永磁无刷电动机	87	7.2 双励磁永磁无刷电动机	130
5.3.1 永磁材料	88	7.2.1 双定子爪极型双励磁永磁无刷电动机	130
5.3.2 转子永磁型无刷电动机	89	7.2.2 6/4极双凸极型双励磁永磁无刷电动机	131
5.3.3 定子永磁型无刷电动机	90	7.2.3 12/8极双凸极型双励磁永磁无刷电动机	132
5.3.4 永磁无刷电动机比较	92	7.2.4 新型外转子型双励磁永磁无刷电动机	133
5.4 永磁无刷电动机控制技术	93	7.3 双励磁永磁无刷电动机驱动系统	136
5.4.1 无刷直流和永磁同步运行模式	93	7.4 双励磁永磁无刷电动机与双凸极永磁电动机的比较分析	138
5.4.2 恒功率运行	93	7.4.1 电动机结构分析和比较	138
5.4.3 效率最优控制	94	7.4.2 分析方法	141
5.4.4 直接转矩控制	95	7.4.3 特性比较	142
5.4.5 人工智能控制	95	7.5 应用探讨: 起动发电机	146
5.4.6 无位置传感器控制	96	参考文献	152
5.4.7 控制策略比较	96	第8章 新型记忆电动机及其驱动技术	155
5.5 永磁无刷电动机的发展方向	98	8.1 交流励磁记忆电动机	155
参考文献	99	8.2 新型直流励磁记忆电动机	157
第6章 新型双定子永磁无刷电动机及其驱动技术	103		
6.1 概述	103		
6.1.1 双定子及双转子电动机的发展	103		
6.1.2 混合动力电动汽车集成起动发电机设计	107		
6.2 双定子永磁电动机的结构与工作原理	109		
6.3 双定子永磁电动机的有			



8.2.1 铝镍钴永磁体	158	9.4.2 永磁无刷复合电动机的动态 仿真研究	197
8.2.2 直流励磁记忆电动机的结构 与原理	161	9.4.3 永磁无刷复合电动机的 实验验证	198
8.2.3 直流励磁记忆电动机的有限元 分析	165	参考文献	201
8.3 直流励磁记忆电动机的驱 动控制	171	第10章 新型电子无级变速传动 驱动技术	204
8.3.1 直流励磁记忆电动机的调速 控制	171	10.1 概述	204
8.3.2 直流励磁记忆电动机的磁 通控制	174	10.2 基于行星齿轮的 ECVT 系统	206
8.3.3 直流励磁记忆电动机的 弱磁扩速	175	10.2.1 行星齿轮	206
8.4 进一步的研究	177	10.2.2 PG-ECVT 运行模式	207
参考文献	177	10.3 基于双转子电动机 的 ECVT 系统	211
第9章 新型磁性齿轮永磁无刷复合 电动机及其驱动技术	179	10.4 基于双定子永磁无刷电动机 的 ECVT 系统	214
9.1 概述	179	10.4.1 双定子永磁无刷电动机	215
9.2 磁性齿轮	180	10.4.2 基于双定子永磁无刷电动机 的 ECVT 运行模式	216
9.2.1 平行轴磁性齿轮	180	10.5 基于磁性齿轮的 ECVT 系统	218
9.2.2 共轴磁性齿轮	181	10.5.1 可连续调速传动的共轴 磁性齿轮	218
9.3 永磁无刷复合电动机	190	10.5.2 基于磁性齿轮的 ECVT 系统	219
9.3.1 永磁无刷复合电动机的 机械结构	191	10.5.3 基于磁性齿轮的 ECVT 运行 模式	221
9.3.2 永磁无刷复合电动机的有限元 时步法分析	193	参考文献	221
9.4 永磁无刷复合电动机的 控制方法	196		
9.4.1 永磁无刷复合电动机的 数学模型	196		

第 1 章 电动汽车概述

电动汽车是一种电力驱动的道路交通工具。这个概念包含广泛,包括纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车等^[1]。在第一辆电池电动汽车问世至今的一个半世纪里,电动汽车的发展几经沉浮,并随着科技和社会的进步跨越了不同的时代。而作为一种重要的交通工具,电动汽车在人类文明史上始终占据着不可忽视的地位,同时也对高科技的发展、工业的兴起以及经济的发展起到了促进作用。

1.1 电动汽车的历史与现状

1.1.1 电动汽车发展历史

电动汽车历史悠久,它的发展史甚至比燃油汽车的历史还要长。世界上第一辆机动车就是 1834 年诞生的第一辆电动汽车,它比 1886 年问世的第一辆内燃机汽车,要早半个世纪^[2]。

1834 年,美国发明家 T. Davenport 发明了世界上第一辆真正意义上的电动汽车,这辆电动汽车采用不可充电的简单玻璃封装蓄电池驱动,只能行驶一小段距离。1881 年,法国工程师 G. Trouve 装配了以铅酸电池为动力的电动汽车,成为世界上第一辆以可充电电池为动力的电动汽车。1886 年, F. J. Sprague 设计生产出有轨电车,法国人 M. A. Darracq 提出了再生制动技术,作为那个时期电动汽车最重要的发明,这一技术较大幅度地提高了电动汽车的能量效率。1899 年 5 月,比利时人 C. Jenatzy 驾驶的子弹头式的电池电动赛车“Jamais Contente (永不满足号)”创下了 110km/h 的纪录,成为历史上第一辆时速超过 100km/h 的汽车^[3]。

从 19 世纪末到 20 世纪初,在欧美等发达国家的新兴城市里,马车和自行车等交通工具已逐步为电动汽车、内燃机车及蒸汽机车所取代。电动汽车变得流行起来,并进入了一个商业化的发展阶段。美国、英国和法国先后涌现了一批著名的电动汽车制造公司,如最早的电动汽车制造厂 Morris 和 Salom 电动客车和货车公司(其生产的电动汽车见图 1-1),以及 Pope 制造公司、Riker 电动汽车公司、BCS 公司等,甚至英国伦敦的电动出租车公司也生产了 15 辆电动汽车^[4]。到 1912 年,美国约有 34000 辆注册的电池电动汽车,几乎涵盖了各种车型。这一时期也成为早期电动汽车发展的全盛时期^[3]。



图 1-1 Morris 和 Salom 电动客车和货车公司生产的电动汽车^[4]

1886 年，也就是在 N. A. Otto 发明往复活塞式四冲程内燃机引擎之后的第 20 年，德国人 C. F. Benz 制造出了第一辆单缸发动机汽车。在电动汽车发展的初期阶段，由于当时各国的城市间道路发展尚不具规模，对电动汽车的续航里程要求相对不高。但随着各国道路建设的不断发展，同时，由于内燃机以及相关燃油汽车的发明和技术的进步，电动汽车的不足就逐渐显现出来。电动汽车由于每次行驶都要长时间充电，并且运行距离受车上电力储备的影响，因而逐渐被燃油汽车取代。1911 年，美国人 Kettering 发明的燃油汽车电起动机使燃油汽车更具吸引力，这也使电动汽车的发展遭受了一个巨大的挑战。而 H. Ford 公司大规模生产工艺的进步，使每辆福特 T 型车的价格从 1909 年的 850 美元锐减到 1925 年的 260 美元，更加速了电动汽车的消失。因此，从 20 世纪 30 ~ 60 年代，电动汽车步入了冬眠期^[5]。

至于混合动力电动汽车，其历史也与其他类型的汽车一样悠久，只是当时混合动力电动汽车设计的目的并不是要降低燃油消耗，而是要提高当时并不完善的内燃机汽车的性能，或者增加内燃机汽车的续航里程。第一辆油电混合动力电动汽车在 1897 年由美国费城电池公司首席工程师 J. B. Entz 制造，但可惜的是，在进行试验测试时，由于电火花引燃了油箱而导致整辆汽车的报废。在 1899 年的 Paris Salon 展览会上首次出现了两款混合动力电动汽车：比利时 Pieper 制造公司的并联混合动力电动汽车以及法国 Vendovelli 和 Priestly 电动汽车公司制造的串联混合动力电动汽车。在其后的十余年间，多款混合动力电动汽车被设计制造出来，但由于当时的电力驱动系统主要用于提高内燃机的性能，随着内燃机技术的快速发展，其成本、体积、效率已经逐步满足了当时驱动要求，同时随着混合动



力电动汽车技术而来的电动机、电池的硬件成本增加,以及当时不成熟的电力电子驱动技术,使得混合动力电动汽车同电池电动汽车一样失去了竞争力,在20世纪30年代后逐渐消失^[6]。

燃料电池的思想最早是 W. Grove 于 1839 年提出的^[7]。但直到 1889 年, C. Langer 和 L. Mond 才设计出第一块具有实用价值的燃料电池。1959 年,燃料电池才第一次由 H. K. Ihrig 作为一种全新的电力能源系统应用于电动汽车的驱动。随后在美国宇航局的推动下,燃料电池迅速发展,并成功应用于多个太空项目。但作为电动汽车的驱动电源,燃料电池电动汽车由于氢气生产、贮存和运输存在的巨大挑战而一直发展缓慢,至今距离市场化仍然有很长的路要走。

20 世纪 70 年代初,中东爆发的石油危机迅速蔓延至全球,一场能源革命随之到来。这场石油危机,让靠燃油生存的普通汽车第一次面临着新的挑战。对于普通汽车来说,燃油是唯一的驱动能源,没有了石油,汽车就变得“寸步难行”。于是,各国政府和科研人员不得不重新思考和寻找新的能源以及相应的载体。电动汽车因为其接近零污染,电动机比内燃机简单可靠,电动机的转速和转矩也比内燃机更易控制等因素,重新进入了各国政府和科研人员的视野。电动汽车也由此重新复苏。在 1976 年,美国颁布了关于电动汽车的研究、开发和应用的法律规范。同时,欧洲、亚洲等各国也逐渐投入大量人力物力开始重新致力于电动汽车的开发和研究。美国三大汽车制造商通用、福特和克莱斯勒都开发了相应的电动汽车,欧洲和日本的汽车制造商也不甘落后,各种类型的电动汽车重新上路。在学术界,全面研发电动汽车的时机亦已到来,各国的科研机构 and 大学纷纷投入大量人力物力,开发与电动汽车相关的技术,为电动汽车的发展铺下了坚实的基础。

但是,在电动汽车还没有全面商用化之前,20 世纪 70 年代末和 80 年代,能源危机和石油短缺问题得到缓解,政府机构更多提倡汽车制造商加大燃油的利用率和减小污染排放。相应地,电动汽车的商用化也失去了动力,电动汽车的发展又变得缓慢,再次步入低谷。

从 20 世纪 90 年代开始,在能源和环境的双重压力下,电动汽车的研究开发再次进入了一个活跃期。在这近 20 年期间,随着各种科学技术的高速发展,电动汽车的许多技术难点逐渐得到了解决。世界各大汽车制造商纷纷推出各自的电动汽车产品。目前,在欧美以及亚太的主要城市,客户都可以买到各大主要汽车厂商的电动汽车。在美国,通用、福特、克莱斯勒、特斯拉等汽车公司,在电动汽车的发展中起着非常重要的作用。在日本,几乎所有的汽车生产商,如丰田、本田、日产、马自达、三菱、铃木、大发、五十菱等汽车公司都制定了各自的商业化电动汽车发展规划。欧洲的许多国家,尤其是法国、德国、意大利和英国都纷纷进入电动汽车市场,其中较活跃的汽车公司有雪铁龙、雷诺、宝马、奔驰、



奥迪、沃尔沃、大众、欧宝、菲亚特等。这些汽车制造商都开始生产自己品牌的电动汽车或者开始涉及电动汽车领域。汽车生产商在积极涉足电动汽车领域的同时，一些电力公司和电池生产商也起着积极的推动作用，其目的都是为了促进以充电电池为动力的电动汽车的商业化，并力图也取得相关的利益。电动汽车因为具有能源利用率高、能源多样性和环保的优点，还得到了能源和环保机构的积极参与和发展推动，以助其早日商业化和普及化。另外，科研机构 and 大学也不断研究电动汽车的新技术，期望电动汽车能够逐渐媲美燃油汽车，从而可以逐步与燃油汽车相竞争。

1.1.2 国际电动汽车的现状

日本丰田汽车公司是世界汽车界的生产巨头，在世界汽车市场上具有很大的影响力。丰田公司的电动汽车研发起步于 1971 年，由于当时的石油危机，日本政府开始重视新能源在汽车上的应用，丰田公司加入了日本工业部发起的一项电动汽车研究计划，从此正式开始研发电动汽车。20 世纪 80 年代，丰田公司相继研制出 EV10 至 EV40 等一系列的电动汽车。90 年代，丰田公司几乎每年都会推出各种类型的电动汽车。1991 年，丰田公司研发出 TownAce EV；1992 年，研发出 Crown Majesta EV；1993 年，EV50 研究成功；1994 年，推出了混合动力电动汽车 Coaster；1995 年，RAV4 EV 研制取得成功，同年，研发成功混合动力电动汽车 Prius，并于 1997 年投入市场。目前，Prius 是丰田公司大规模生产的混合动力电动汽车，在世界各地均取得了较大的成功。丰田公司推出的 Prius 2005，属于节能型重度混合动力电动汽车，结构上属于混联式，能源补充上属于加油站加油，它采用四缸发动机和永磁同步电动机共同驱动，属于发动机主动型混合动力电动汽车，其蓄电池采用松下公司 202V 的镍氢电池。近年来，丰田公司又推出了 Prius 插电式混合动力车型，该车由一个 1.8L 汽油发动机（最大功率为 73kW）、一个电动机（最大功率为 60kW）和锂离子电池组成。它正成为全球特别是大都市环境友好型混合动力电动汽车的新标杆。

丰田公司推出的另一款混合动力电动汽车是 Highlander Hybrid，它属于动力型重度混合动力电动汽车。其前轮驱动原理是在 Prius 的基础上发展起来的，不同之处在于后车轮由蓄电池作为动力驱动电动机，蓄电池能量通过逆变器驱动永磁电动机，再通过齿轮减速带动后轮。由于前后车轮都通过动力驱动，因此整车功率更加强大，性能也更优越。

此外，丰田公司推向市场的主要混合动力电动汽车还有 Camry Hybrid，它采用 2.5L 四缸发动机和 650V、105kW 永磁电动机，蓄电池采用 245V 镍氢电池，属于重度混合动力电动汽车。除了丰田公司大批量商业化的这三款混合动力电动汽车以外，丰田公司也在研发其他类型的电动汽车。RAV4 EV 是丰田公司 2012



年推出的纯电动版车型，其电驱动系统可输出 115kW 的最大功率，在运动模式下 0 ~ 96km/h 加速只需 7s，而最高时速可达 137km/h，目前售价在 5 万美元左右。

丰田公司一直致力于燃料电池电动汽车的研制。2014 年最新推出的 Mirai 氢动力汽车，是一款划时代的产品，续航里程可达 700km，其氢燃料电池的电力可以直接驱动位于车辆前轴 90kW 的交流同步电动机。未来，丰田公司计划推出更多的混合动力电动汽车、燃料电池电动汽车和纯电动汽车。

作为日本另一个主要汽车制造商的本田公司，在电动汽车的研发和销售上也不甘落后。本田公司生产的电动汽车主要集中在混合动力和燃料电池电动汽车两大方向。本田公司的混合动力电动汽车产品品牌有 1999 年开始推出的 Insight、2004 年推出的 Accord Hybrid 以及最新推出的 Civic Hybrid，均属于并联式轻度混合动力电动汽车，另外本田公司在 2004 年也推出了混合动力电动摩托车 Hybrid Scooter。目前这些混合动力电动汽车均可以在市场上购买到。2006 年 8 月推出的 Civic Hybrid，是代表了本田公司最新技术的混合动力电动汽车。这款混合动力电动汽车采用四缸 67kW 发动机和 15kW 永磁电动机驱动，其合成动力为 80kW，输出转矩为 166N·m。其市区和高速公路的燃油经济性分别为 48mpg 和 47mpg（mpg 为平均燃油消耗量的简称）。

燃料电池电动汽车也是本田公司主要研发的电动汽车产品。本田 FCX Clarity 是目前少有的在实际运营中的氢燃料电池车，它的概念车最早在 2006 年公布，2008 年正式推出^[8]。其发动机为一台永磁同步电动机，可以输出 100kW 的最大功率以及 256N·m 的峰值扭矩，续航里程达 620km。

近期，本田公司还推出了飞度紧凑型汽车的纯电动版本 Fit EV 2013。该车型的电驱动充分借鉴了本田 FCX Clarity 燃料电池车的设计。它搭载了一台同 FCX Clarity 完全一致的 92kW 的永磁同步电动机，产生 256N·m 的扭矩，一次充电的续航里程可达 150km 以上。其燃油经济性为 118mpg，油耗约合 2L/100km，创下电动汽车迄今为止取得的最高燃效值评定水准。

日产公司也是研发和销售电动汽车的主要汽车制造商。面对未来电动汽车巨大的市场，日产公司也积蓄了强大的力量，以图在电动汽车市场占据一席之地。日产公司于 1947 年发布了其研发的第一款电动汽车。从 20 世纪 60 年代开始，公司更加积极地致力于电动汽车的研发，而且研制并销售了一系列电动车型。1997 年，日产公司发布了全球首辆装备锂离子电池的电动汽车 Prairie Joy。在 2005 年的东京车展上，日产公司展出了首辆安装层叠式紧凑型锂离子电池的 Pivo 电动汽车。之后，续航里程更长的 Pivo2 在 2007 年东京车展上亮相。同年，在北美市场推出 Altima Hybrid 2.5L 四缸和 3.5L 六缸，采用 650V、105kW 永磁同步电动机，属于混联式重度混合动力电动汽车。目前，日产公司主推纯电动汽车



和混合动力电动汽车, 而把燃料电池电动汽车作为长远规划。聆风 (LEAF) 作为日产公司推行的电动汽车专项产品计划, 于 2012 年 12 月在美国和日本同步上市。该车采用前置前驱结构, 装备了 80kW 三相 8 极/48 槽永磁同步电动机, 最高时速超过 140km/h。在 24kWh 层叠式锂离子电池的支持下, 一次充电可行驶约 160km。纵观 2014 全年电动汽车车型销售排名, LEAF 销售创历史记录达到 61027 辆。

目前, 日产公司的另一主力产品为混合动力电动汽车 Pathfinder Hybrid 2014。该车搭载 2.5L 四缸发动机, 配合一台电动机, 可输出功率 250kW、峰值扭矩 $329\text{N} \cdot \text{m}$, 连接无级变速器 (CVT), 电动机的动力源自锂离子电池组。Pathfinder 的油耗低至 10.8L/100km, 相比标准车型的能耗节省了 24%, 满油满电的情况下, 续航能力可达 879km。

除了日本的汽车制造商在研发和销售电动汽车外, 美国各大汽车制造商也纷纷推出了各自品牌的电动汽车。

美国通用汽车公司曾雄踞全球最大车厂地位长达 77 年, 虽然受到国际金融危机的影响, 但是同样在电动汽车领域具有雄厚的实力。通用汽车公司从 1916 年就开始从事电动汽车的研发。近几十年来, 通用汽车公司不断研发了各种类型的电动汽车, 积累了丰富的经验。1990 年通用汽车公司生产了第一辆定型电动汽车 Impact。Impact 的诞生具有重要的意义, 它证明了电力驱动技术完全可媲美于传统燃油汽车的驱动能力^[9]。

目前, 通用汽车公司主攻增程式电动汽车和纯电动汽车, 正在研发燃料电池电动汽车。通用汽车公司的混合动力电动汽车包括小轿车、卡车和公共汽车, 其最新混合动力电动轿车为雪佛兰沃蓝达 Volt, 它是首款采用增程式混合动力系统的车型。沃蓝达的动力系统包含一台最大功率为 111kW、最大扭矩为 $370\text{N} \cdot \text{m}$ 的主电动机, 一台可以产生 55kW 辅助动力的发电机/电动机, 一台最大功率为 86hp (1hp = 745.7W) 的 1.4L 自然吸气发动机以及位于驾驶舱下方的 16kWh 锂离子电池组。这套系统可以分为插电和增程两种模式: 插电模式下, 通过外接电源输入进来的电能被存储在 16kWh 锂离子电池组中, 用以满足短途代步; 当电池组电量剩余 40% 时, 就会自动进入增程模式, 此时发动机便会介入, 但是所做的功并不直接参与车辆行驶, 而是为电动机提供电力, 再由这些电力来驱动车辆行驶。该车最高车速为 160km/h, 续航里程可达 490km。另外, 通用汽车公司也在 2008 年推出了油电混合动力版大型 SUV 车型 Chevrolet Tahoe Hybrid 和 GMC Yukon Hybrid。

通用汽车公司开发的混合动力电动卡车主要有 GMC Sierra Hybrid Truck 和 Chevrolet Silverado Hybrid Truck。GMC Sierra Hybrid Truck 由发动机和电动机共同驱动, 合成输出的最大功率为 220kW, 输出扭矩可达到 $454\text{N} \cdot \text{m}$ 。通用汽车公