

新能源汽车关键技术丛书

WILEY  IEEE

世界顶尖专家20多年研究成果总结
覆盖纯电驱动、混合驱动和燃料电池电动汽车



电动汽车

E 电机及驱动

设计、分析和应用

Electric Vehicle Machines and Drives
Design, Analysis and Application

邹国棠 (K.T. CHAU) 著

樊英 王政 王伟 张淦 花为 译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

新能源汽车关键技术丛书

电动汽车电机及驱动： 设计、分析和应用

邹国棠 (K. T. Chau) 著

樊英 王政 王伟 张淦 花为 译



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及驱动系统方面 20 多年的研究成果,内容涉及多种电机及驱动系统的结构、设计、分析、控制及应用。在深化传统电机驱动系统如直流电机、交流感应电机、开关磁阻电机、永磁无刷直流电机系统的基础上,本书对当今前沿电机及驱动系统如定子永磁电机、磁齿轮复合电机、永磁游标电机、新型无永磁体电机、ISG 以及电子无级变速系统等进行了讨论和分析。本书不仅对多种电机及驱动系统进行了详细的理论和仿真分析,同时还提供了大量的实验数据和应用案例,供读者了解在电动汽车电机及驱动系统研究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。

Copyright © 2015 John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application, ISBN 978 - 1 - 118 - 75252 - 4, by K. T. Chau, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2016-4312 号。

图书在版编目 (CIP) 数据

电动汽车电机及驱动:设计、分析和应用/邹国棠著;樊英等译. —北京:机械工业出版社,2018.4

(新能源汽车关键技术丛书)

书名原文:Electric Vehicle Machines and Drives: Design, Analysis and Application

ISBN 978-7-111-60044-2

I. ①电… II. ①邹…②樊… III. ①电动汽车-驱动机构-控制系统-研究 IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 100218 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:闫洪庆

责任校对:张晓蓉 封面设计:马精明

责任印制:张博

河北鑫兆源印刷有限公司印刷

2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 22.75 印张 · 492 千字

0 001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-60044-2

定价:99.00 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

封面无防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

随着全球石油资源面临枯竭，以及日趋紧迫的全球大气环境污染和温室效应，以节能、环保为目标的电动汽车近20年来得到迅猛发展与应用。国务院正式发布的《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》，再一次明确了新能源汽车产业的战略地位。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。

本书作者 K. T. Chau 为香港大学电机电子工程学系教授及国际电动车研究中心主任，同时还担任了东南大学客座教授、教育部“长江学者奖励计划”讲座教授。他从事电动汽车电机及驱动的研发已超过了20年，在该领域有着非常丰富的经验。

K. T. Chau 在电动汽车电机及驱动领域拥有非常高的知名度。他治学严谨，科研成果丰富。本书是作者所在课题组对电动汽车，特别是电动汽车电机及驱动方面20多年来研究成果的总结，其中既有应用于电动汽车的传统电机驱动系统如直流电机、交流感应电机、开关磁阻电机、永磁无刷电机的介绍，又有对当今前沿电机及驱动如定子永磁电机、磁齿轮复合电机、永磁游标电机、新型无永磁体电机、ISG系统以及电子无级变速系统等的讨论和分析，内容丰富，创新性强。本书引用大量高水平参考文献，能够最大限度地反映近20年来国内外电动汽车电机及驱动的发展和最新成果，非常值得深入研究和体会。

本书的主要翻译工作由东南大学樊英教授负责统稿，樊英教授负责第1、2章和第7~9章的翻译工作，王伟老师负责第3、4章的翻译工作，张淦老师负责第5、6章的翻译工作，花为教授负责第10、11章的翻译工作，王政教授负责第12、13章的翻译工作。

译者所在的科研团队从事电动汽车电机及驱动的设计、分析及相关研究多年，对国内外电动汽车电机及驱动的发展及最新动态均保持着密切关注。非常感谢机械工业出版社给予的这次翻译机会，让我们能够在翻译本书的同时，也对电动汽车电机及驱动最新技术有了更深刻的认知。希望能够通过我们的努力，为国内相关从业者、科研机构带来方便，为我国电动汽车行业发展贡献出一份绵薄之力。

由于译者学识和能力有限，书中翻译内容难免会出现不能准确反映作者思想之处，敬请有关专家和读者给予批评指正。

译者

原书前言

我出生在一个国际化的大都市里，在过去的几十年中，目睹了周围环境的不断恶化。为了使我们的环境重新恢复生机，从我 1987 年本科毕业设计——电动汽车电池监控开始，一直到 2014 年最新的研究项目——电动汽车轮毂电机驱动，在过去的 20 年里，我一直全身心投入到电动汽车事业当中。现如今，电动汽车已成为全球最为环保、绿色的交通运输方式，在不久的将来，电动汽车定将成为治理环境的最为实际的方式。

多年来，行业内已经出现许多关于电动汽车技术方面的参考书籍，涵盖了纯电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车等相关技术，但由于电动汽车技术的多样性和学科交叉性，要在一本书之内囊括最新的研究进展或者进行深度的讨论是非常困难的。近几年，已有讨论具体的电动汽车技术比如电力驱动、混合动力驱动、电池和燃料电池等技术的参考书籍，尽管已有大量学术论文对电动汽车相关技术进行了研究，但仍需要一本对其进行全面讨论的参考书籍，即从纯电驱动、混合驱动和燃料电池三个方面来分析电动汽车的优势以及电动汽车行业今后的发展方向。

本书主要从电力驱动和混合驱动两个角度对纯电力驱动、混合驱动和燃料电池电动汽车进行讨论。对于电力驱动的电动汽车而言，其涉及的电机类型有交、直流的永磁无刷电机和开关磁阻电机。更为细化则可分为定子永磁、磁齿轮、永磁游标和新型无永磁电机等。对于混合驱动的电动汽车而言，则包含了如集成起动发电系统、行星齿轮电动无级变速系统。更为细化则可分为双转子电动无级变速和磁齿轮电动无级变速系统。同时，本书重点介绍了各种电机驱动系统的设计准则、性能分析、实际应用和前景展望。由于不同类型的电动汽车会采用完全不同的驱动系统，因而本书可以为研究员和设计师提供非常重要的参考。

电动汽车无疑是改善环境的最大助力，而我的家庭也是我从事电动汽车研究的最大动力。在这里我尤其要感谢我的儿子 Aten Man - Ho 和我的妻子 Joan Wai - Yi，感谢他们一路上的全力支持。

K. T. Chau

本书结构

本书为电动汽车电机及驱动方面的知识提供了全面的介绍，包括目前最新的研究动态与深入讨论。本书撰写内容所涵盖的读者范围广泛，包括学生、研究人员、工程师、管理人员以及一般读者。本书内容分为两个主题：

- 第一个主题介绍了用于电动汽车的各种电机驱动的知识，包括纯电动汽车和燃料电池汽车。该部分内容由8章组成，其中第2~5章介绍了现有电动汽车的电机驱动系统，第6~9章讨论了未来电动汽车的新型电机驱动系统。

- 第二个主题介绍了用于混合动力电动汽车的各种电机系统的知识，该部分内容由4章组成，其中第10章和第11章介绍了用于现有混合动力电动汽车的电机系统，第12章和第13章阐述了未来混合动力电动汽车的新型电机系统。

全书共分为13章，每章又包含不同数目的节和子节。为便于读者能够有选择性地阅读本书，对全书内容概述如下：

- 第1章对电动汽车进行了简要介绍，分别对电动汽车的分类，电动汽车发展面临的挑战，以及研发的各种电动汽车技术进行了概述。

- 第2章主要讨论电动汽车用直流电机驱动系统，包括其驱动系统结构、直流电机、DC-DC变换器、控制策略。此外，对其相应的设计准则、设计案例与应用案例做出简要介绍。

- 第3章主要讨论电动汽车用感应电机驱动系统，包括其驱动系统结构、感应电机、功率变换器与控制策略。同时，对其相应的设计准则、设计案例与应用案例进行了讨论。

- 第4章主要讨论电动汽车用永磁无刷电机驱动系统，涵盖了永磁同步电机和永磁无刷直流电机两种类型。对两种电机所使用的永磁材料、系统结构、永磁无刷电机、功率变换器与控制策略进行了说明。同时，对其相应的设计准则、设计案例与应用案例进行了讨论。

- 第5章主要讨论电动汽车用开关磁阻电机驱动系统，包括其驱动系统结构、开关磁阻电机、开关磁阻变换器与控制策略。同时，对其相应的设计准则、设计案例与应用案例进行了讨论。

- 第6章讨论了电动汽车用各种定子永磁电机驱动系统，涉及的电机类型包括双凸极永磁电机、磁通反向永磁电机、磁通切换永磁电机、混合励磁永磁电机与磁通记忆永磁电机。同时，也给出了其相应的设计准则、设计案例与应用案例。

- 第7章讨论了电动汽车用磁齿轮复合电机驱动系统，包括其系统结构、磁性齿轮、磁齿轮复合电机、功率变换器与控制策略。同时，也给出了其相应的设计准则、设计案例与应用案例。

- 第8章讨论了电动汽车用永磁游标电机驱动系统，包括其系统结构、永磁游标电机、功率变换器与控制策略。同时，也给出了其相应的设计准则、设计案例与

应用案例。

- 第9章讨论了电动汽车用新型无永磁型电机驱动系统，涉及电机类型包括同步磁阻电机、双凸极直流电机、磁通切换直流电机、游标磁阻电机、双馈游标磁阻电机与轴向磁通无永磁型电机。同时，对其相应的设计准则、设计案例与潜在应用进行了介绍。

- 第10章对混合动力电动汽车用起动发电一体机系统进行了介绍，包括其系统结构、电机和运行模式。同时，对其相应的设计准则、设计案例与应用案例也进行了讨论。

- 第11章介绍了混合动力电动汽车用行星齿轮电动变速器系统，包括其系统结构、行星齿轮、输入分配型和复合分配型两种行星齿轮电动变速器系统。同时，对其相应的设计准则、设计案例与应用案例做出简要介绍。

- 第12章对混合动力电动汽车用双转子电动变速器系统进行了介绍，包括其系统结构、双转子电机、传统的和新型的两种双转子结构类型。同时，对其相应的设计准则、设计案例与潜在应用做出简要介绍。

- 第13章对混合动力电动汽车用磁齿轮电动变速器系统进行了介绍，包括系统结构、多端口磁齿轮、磁性行星齿轮与磁性同心齿轮两种传动类型。同时，对其相应的设计准则、设计案例与潜在应用做出简要介绍。

读者可以灵活地阅读感兴趣的章节。为方便不同的读者阅读本书，提出如下建议：

- 选修电动汽车技术的本科生，可能会对本书的第1~5章，以及第10、11章特别感兴趣。

- 选修新型电动汽车技术的研究生，可能会对本书的全部章节感兴趣。

- 从事电动汽车用电机及驱动系统研究的研究人员，可能会对本书的全部章节感兴趣。此外，此类读者可能会对本书第6~9章涉及的电动汽车新探索类研究课题，以及第12、13章更有兴趣。

- 从事产品设计和研发的工程师可能会对本书的第6~9章，以及第12、13章更感兴趣，通过阅读这些章节可引发新的想法，并促使商业产品的衍生。

- 管理人员和其他读者可能会对本书的所有章节感兴趣。建议这类读者从头到尾阅读，这是最令人愉悦的。

致 谢

本书所涉及的数据参考内容均来自于作者所供职的香港大学国际电动车研究中心和电机电子工程学系。

非常感谢作者电动汽车技术团队的成员们，尤其是李文龙博士、Christopher Ho - Tin Lee 先生、陈牧先生、林菲女士、张镇先生、邱纯先生、王玉彬博士、刘春华博士、李富华先生、李祥林先生、於锋先生，感谢他们对本书的倾力付出。同时，我也要向我的博士毕业生和博士后们，尤其是对 Herman Tsz - Wood Ching 先生、程明教授、樊英博士、朱孝勇博士、赵文祥博士、牛双霞博士、蹇林旒博士、余创博士、李建贵博士、张晓东博士、高爽博士、伍迪芸博士表示最诚挚的谢意，正是他们的科研成果才能够使得本书的内容更为丰富和详实。

非常感谢作者世界各地的同事和朋友们多年来不断的支持和鼓励，感谢他们对本书的意见和建议，感谢出版商 John Wiley 对本书的大力支持。

最后，再次感谢作者家人对作者创作本书时的大力支持和理解。

作者简介

K. T. Chau (邹国棠) 男, 分别于 1988 年、1991 年和 1993 年在香港大学获荣誉学士学位、硕士学位和博士学位, 于 1995 年加入香港大学, 现任香港大学电机电子工程学系教授及国际电动车研究中心主任、电气工程学士学位委员会主任。主要致力于纯电动和混合电动汽车驱动系统研究, 美国电气电子工程师学会资深会员 (IEEE Fellow), 英国工程技术学会资深会员 (IET Fellow), 中国香港工程师学会资深会员 (HKIE Fellow)。曾担任电动汽车领域的多种国际期刊编辑和编委以及多个国际会议的主席和组委会委员, 同时也是电动汽车技术领域的资深国际顾问。

主要教学和研究方向为纯电动和混合电动汽车、电机及驱动、清洁和可再生能源技术, 在相关领域共发表超过 400 篇学术论文和大量工业报告。邹国棠教授在教学和科研方面遵循《礼记》中“教学相长”的教育哲学。

邹国棠教授是教育部“长江学者奖励计划”讲座教授, 获“卓越创新教学科研奖”以表彰其在教学及科技方面的突出贡献, 获“卓越环保运输奖”以表彰其在教育、培训和环保意识等方面的卓越贡献。此外, 邹国棠教授还获得过香港大学“杰出青年研究学者奖”等奖项。

目 录

译者序
原书前言
本书结构
致谢
作者简介

第1章 绪论	1
1.1 什么是电动汽车	1
1.2 电动汽车面临的挑战概述	3
1.2.1 纯电动汽车	4
1.2.2 混合动力电动汽车	4
1.2.3 可并网混合动力电动汽车	5
1.2.4 燃料电池电动汽车	6
1.3 电动汽车关键技术概述	6
1.3.1 电机驱动技术	7
1.3.2 能源技术	9
1.3.3 电池充电技术	12
1.3.4 车辆到电网技术	14
参考文献	17
第2章 直流电机驱动系统	19
2.1 系统结构	19
2.2 直流电机	20
2.2.1 直流电机结构	20
2.2.2 直流电机工作原理	21
2.2.3 直流电机数学模型	22
2.3 DC-DC 变换器	24
2.3.1 DC-DC 变换器的拓扑结构	24
2.3.2 DC-DC 变换器的软开关拓扑结构	26
2.4 直流电机控制	28
2.4.1 转速控制	28
2.4.2 再生制动	30
2.5 设计准则	32
2.6 设计案例	33
2.7 应用案例	36
2.8 直流电机在电动汽车中的应用是否衰退	37
参考文献	37

第3章 感应电机驱动系统	38
3.1 系统结构	38
3.2 感应电机	39
3.2.1 感应电机结构	39
3.2.2 感应电机原理	40
3.2.3 感应电机建模	41
3.3 感应电机用逆变器	43
3.3.1 PWM 逆变器	44
3.3.2 软开关逆变器	47
3.4 感应电机控制	48
3.4.1 变压变频控制	48
3.4.2 磁场定向控制	49
3.4.3 直接转矩控制	53
3.5 设计准则	56
3.6 设计案例	58
3.7 应用案例	60
3.8 是否是电动汽车的成熟技术	61
参考文献	62
第4章 永磁无刷电机驱动系统	63
4.1 永磁材料	63
4.2 系统结构	65
4.3 永磁无刷电机	65
4.3.1 永磁无刷电机结构	66
4.3.2 永磁无刷电机工作原理	68
4.3.3 永磁无刷电机建模	71
4.4 永磁无刷电机用逆变器	75
4.4.1 逆变器要求	75
4.4.2 无刷交流运行的开关策略	76
4.4.3 无刷直流电机的开关策略	76
4.5 永磁无刷电机控制	79
4.5.1 永磁同步电机控制	79
4.5.2 永磁无刷直流电机控制	83
4.6 设计准则	85
4.7 设计案例	88
4.7.1 行星齿轮永磁同步电机驱动	88
4.7.2 外转子永磁无刷直流电机驱动	91
4.8 应用案例	95
4.9 是否是电动汽车的优选技术	96
参考文献	96

第 5 章 开关磁阻电机驱动系统	98
5.1 系统结构	98
5.2 开关磁阻电机	99
5.2.1 开关磁阻电机结构	99
5.2.2 开关磁阻电机工作原理	100
5.2.3 开关磁阻电机模型	102
5.3 开关磁阻功率变换器	105
5.3.1 开关磁阻功率变换器拓扑	105
5.3.2 软开关开关磁阻功率变换器拓扑	107
5.3.3 电动汽车用开关磁阻功率变换器对比	111
5.4 开关磁阻电机控制	111
5.4.1 转速控制	111
5.4.2 转矩脉动最小化控制	112
5.4.3 无位置传感器控制	116
5.5 设计准则	118
5.5.1 电机初始化设计	118
5.5.2 噪声抑制	122
5.6 设计案例	123
5.6.1 行星齿轮开关磁阻电机驱动	123
5.6.2 外转子开关磁阻轮毂电机驱动	126
5.7 应用案例	128
5.8 是否成熟应用于电动汽车驱动	128
参考文献	129
第 6 章 定子永磁电机驱动系统	130
6.1 定子永磁和转子永磁	130
6.2 系统结构	131
6.3 双凸极永磁电机驱动技术	132
6.4 磁通反向永磁电机驱动技术	139
6.5 磁通切换永磁电机驱动技术	141
6.6 混合励磁永磁电机驱动技术	143
6.7 磁通记忆永磁电机驱动技术	145
6.8 设计准则	153
6.9 设计案例	156
6.9.1 外转子混合励磁双凸极永磁电机驱动系统	156
6.9.2 外转子磁通记忆双凸极永磁电机驱动系统	159
6.10 应用前景	170
参考文献	171
第 7 章 磁齿轮复合电机驱动系统	173
7.1 系统结构	173

XII 电动汽车电机及驱动：设计、分析和应用

7.2	磁齿轮	174
7.2.1	变换型磁齿轮	175
7.2.2	磁场调制型磁齿轮	177
7.3	磁齿轮复合电机	180
7.3.1	磁齿轮复合电机工作原理	180
7.3.2	磁齿轮复合电机模型	185
7.4	磁齿轮复合电机驱动用逆变器	185
7.5	磁齿轮复合电机控制	186
7.6	设计准则	189
7.7	设计案例	189
7.7.1	磁齿轮永磁无刷直流轮毂电机驱动	190
7.7.2	磁齿轮永磁无刷交流轮毂电机驱动	191
7.8	应用前景	197
	参考文献	197
第8章	永磁游标电机驱动系统	199
8.1	系统结构	199
8.2	永磁游标电机	200
8.2.1	永磁游标电机与磁齿轮电机的比较	200
8.2.2	永磁游标电机的结构	201
8.2.3	永磁游标电机的运行原理	204
8.2.4	永磁游标电机的建模	206
8.3	永磁游标电机的逆变器选型	207
8.4	永磁游标电机的控制	209
8.5	设计准则	209
8.6	设计案例	211
8.6.1	外转子永磁游标电机驱动	211
8.6.2	磁通可控外转子永磁游标电机驱动	212
8.7	应用前景	219
	参考文献	220
第9章	新型无永磁型电机驱动系统	221
9.1	什么是新型无永磁型电机	221
9.2	系统结构	222
9.3	同步磁阻 (SynR) 电机	223
9.4	双凸极直流 (DSDC) 电机	225
9.5	磁通切换直流 (FSDC) 电机	227
9.6	游标磁阻 (VR) 电机	230
9.7	双馈游标磁阻 (DFVR) 电机	232
9.8	轴向磁通无永磁型电机	235
9.9	设计准则	237
9.10	设计案例	237

9.10.1	多齿双凸极直流电机	237
9.10.2	多齿磁通切换直流电机	240
9.10.3	轴向双凸极直流电机	242
9.10.4	轴向磁通切换直流电机	247
9.11	应用前景	251
	参考文献	252
第 10 章	起动发电一体机系统	254
10.1	混合动力汽车分类	254
10.2	ISG 系统结构	258
10.3	ISG 电机	259
10.4	ISG 运行模式	261
10.4.1	起动模式	261
10.4.2	发电模式	261
10.4.3	怠速停止 - 起动模式	261
10.4.4	再生制动模式	262
10.4.5	辅助动力模式	263
10.5	设计准则	263
10.6	设计案例	264
10.6.1	基于双定子永磁同步电机的 ISG 系统	264
10.6.2	基于混合励磁双凸极永磁电机的 ISG 系统	268
10.7	应用案例	274
10.8	ISG 系统技术是否已经成熟	275
	参考文献	275
第 11 章	行星齿轮电动变速器系统	277
11.1	系统结构	277
11.2	行星齿轮	278
11.3	输入分配型 PG EVT 系统	281
11.3.1	丰田混合动力系统	281
11.3.2	福特混合动力系统	286
11.4	复合分配型 PG EVT 系统	288
11.4.1	通用双模式混合动力系统	288
11.4.2	雷诺混合动力系统	293
11.4.3	铁姆肯混合动力系统	293
11.5	设计准则	294
11.6	设计案例	295
11.6.1	基于永磁同步电机的 PG EVT 系统结构	295
11.6.2	永磁同步电机设计	296
11.6.3	永磁同步电机性能分析	298
11.7	应用案例	300
11.8	PG EVT 系统技术是否成熟	302

参考文献	303
第 12 章 双转子电动变速器系统	304
12.1 系统结构	304
12.2 双转子电机	306
12.2.1 多端口电机的概念	306
12.2.2 双转子电机结构	307
12.3 基本的 DR EVT 系统	308
12.3.1 DR EVT 系统结构	308
12.3.2 DR EVT 系统模型	309
12.3.3 DR EVT 系统运行原理	311
12.4 新型 DR EVT 系统	313
12.4.1 永磁型 DR EVT 系统	313
12.4.2 开关磁阻型 DR EVT 系统	314
12.4.3 轴向磁场型 DR EVT 系统	316
12.4.4 新型无永磁型 DR EVT 系统	316
12.5 设计准则	319
12.6 设计案例	319
12.6.1 DSDC DR EVT 系统结构	320
12.6.2 DSDC 双转子电机设计	320
12.6.3 DSDC 双转子电机分析	320
12.7 应用前景	325
参考文献	325
第 13 章 磁齿轮电动变速器系统	327
13.1 系统结构	327
13.2 多端口磁齿轮	329
13.2.1 磁性行星齿轮	329
13.2.2 磁性同轴齿轮	331
13.3 MPG EVT 系统	332
13.4 MCG EVT 系统	334
13.5 设计准则	339
13.6 设计案例	340
13.6.1 MCG EVT 系统结构	340
13.6.2 集成 MCG 电机设计	342
13.6.3 集成 MCG 电机分析	345
13.7 应用前景	350
参考文献	350

第 1 章 绪 论

随着对能源多元化、能源效率和环境保护的日益关注，电动汽车（EV）正成为具有吸引力的道路交通运输工具，包括纯电动汽车（PEV）、混合动力电动汽车（HEV）和燃料电池电动汽车（FEV）。尽管一些电动汽车在市场上已有销售，但是电动汽车（EV）的研发仍具有许多的挑战和机遇。

本章首先讨论了电动汽车的分类；然后，对电动汽车所面临的挑战进行了概述；最后，对电动汽车所研发的各种关键技术进行了综述。

1.1 什么是电动汽车

电动汽车并不是新鲜事物，早在 178 年前就已有发明，但是在发展过程中失去了对内燃机汽车（ICEV）的竞争优势。实际上，第一辆电动汽车是 1834 年由 Thomas Davenport (Wakefield, 1994) 研制的电池提供动力的电动三轮车。美国在 1900 年销售的 4200 辆汽车中，电动汽车占 38%，内燃机汽车占 22%，蒸汽动力汽车占 40%。电动汽车在当时是美国精英阶层首选的交通工具，它们的成本相当于今天的劳斯莱斯。然而福特公司彻底结束了电动汽车抢占汽车市场的趋势，福特公司大规模生产的福特 T 型汽车可以提供电动汽车两倍或三倍的行程，但成本仅占电动汽车的一部分。到 20 世纪 30 年代，电动汽车几乎从市场消失。20 世纪 70 年代由于能源危机和石油缺乏，使得电动汽车的发展再度兴起。20 世纪 80 年代，由于空气质量和温室效应对环境造成的影响越来越受到人们的关注，进而加快了电动汽车发展的步伐。

通常情况下，电动汽车根据其能源来源和动力装置的不同，可以分为纯电动汽车（PEV）、混合动力电动汽车（HEV）和燃料电池电动汽车（FEV）三种基本类型 (Chan and Chau, 2001; Chau, 2010, 2014)。在本质上，纯电动汽车是完全通过电力供给能源，同时仅由电动机驱动提供推进力；混合动力电动汽车是电力和汽油/柴油供给能源，同时由电动机和发动机驱动提供推进力；燃料电池电动汽车直接或间接地利用氢获得能源，同时仅由电动机驱动提供推进力。此外，为了区分加油方式，混合动力电动汽车可以进一步分为传统混合动力电动汽车和可并网混合动力电动汽车。传统混合动力电动汽车仅可以在加油站添加柴油/汽油，而可并网混合动力电动汽车可以通过充电端口进行充电。传统混合动力电动汽车根据电动机和发动机的混合程度和运行特征，可以进一步细分为微混型、轻混型和全混型。同时，根据电动机和发动机之间的协调性，可并网混合动力电动汽车可以进一步分为插电式混合动力电动汽车（PHEV）和增程式电动汽车（REV）。电动汽车的分类如图 1.1 所示。

从原油衍生的汽油和柴油是内燃机汽车（ICEV）的主要液体燃料。电动汽车是解



图 1.1 电动汽车的分类

决传统汽车对燃油依赖的良好方案，因为电力几乎可以通过各种能源产生。图 1.2 说明了电动汽车能源多元化的优点，其中，电能可以通过热能（石油、天然气、煤炭）、核能、水能、风能、太阳能、海洋能、地热能和生物质能提供。为了比较电动汽车和内燃机汽车的整体能源效率，它们各自从原油到道路行驶的能源转换过程如图 1.3 所示，图 1.3 表明电动汽车比内燃机汽车更加节能。此外，电动汽车可以回收制动过程中的动能，并利用其为电池充电，而内燃机汽车在制动过程中产生的动能则以制动盘上发热的方式消耗掉；利用这种再生制动技术，电动汽车的能源效率可进一步提高 10%。

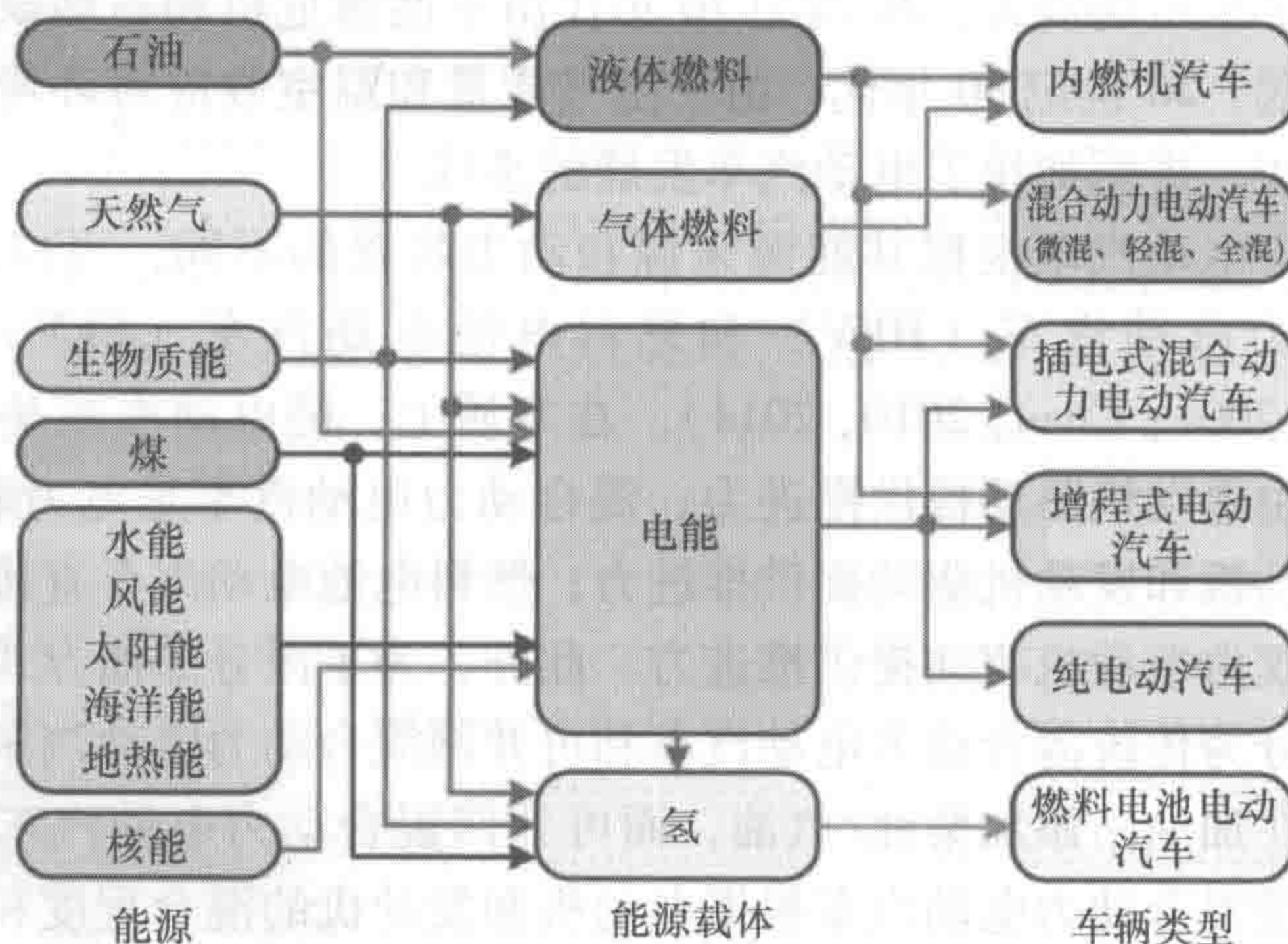


图 1.2 电动汽车能源多元化

在很多大城市，内燃机汽车产生的有害空气污染物和烟雾形成的化合物超过 50%。为减少道路交通产生的空气污染，使用电动汽车是最可行的选择。大部分电动汽车零尾