



教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材

车辆工程、汽车服务工程

# 现代电动汽车原理与设计

邓 涛 主 编  
尹燕莉 副主编



清华大学出版社



教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材

# 现代电动汽车原理与设计

邓涛 主编  
尹燕莉 副主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书主要分析了纯电动汽车、混合动力电动汽车、插电式混合动力电动汽车、增程式电动汽车、燃料电池电动汽车等电动汽车的技术与研究概况,通过列举市场上应用最为广泛的典型实例,对不同类别电动汽车的结构形式和种类加以介绍,并探讨了具有不同特点的电驱动系统和储能装置形式。为进一步细化各类电动汽车的设计过程,从工作模式分析、控制策略研究、设计目标与要求、参数设计过程以及设计实例列举与仿真分析等五个方面加以详细讲述。本书可作为普通高等院校车辆工程专业电动汽车和新能源汽车方向的专业基础课和专业选修课教材,也可供从事新能源汽车、电动汽车研发的技术人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

现代电动汽车原理与设计/邓涛主编. —北京:清华大学出版社,2019

(教育部高等学校机械类专业教学指导委员会规划教材)

ISBN 978-7-302-52846-3

I. ①现… II. ①邓… III. ①电动汽车—基础理论—高等学校—教材 ②电动汽车—设计—高等学校—教材 IV. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 082683 号

责任编辑:许 龙

封面设计:常雪影

责任校对:赵丽敏

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 装 者:三河市宏图印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:13

字 数:312千字

版 次:2019年6月第1版

印 次:2019年6月第1次印刷

定 价:38.00元

产品编号:080553-01

# 前 言

## FOREWORD

能源紧缺、交通拥堵、环境污染使汽车产业可持续发展面临诸多制约因素。节能减排、动力升级推动汽车技术不断创新,以电动汽车为特色的新能源汽车技术的推广成为必然。作为当前汽车产业发展的重要方向,电动汽车包括了纯电动汽车、混合动力电动汽车、插电式混合动力电动汽车、增程式电动汽车、燃料电池电动汽车等多种类型。电动汽车的技术核心是要实现其动力性、经济性、安全性等多个方面的平衡。因此,了解各种类型电动汽车的结构形式、工作原理、设计方法、控制策略及其储能装置的特点对于设计制造出满足多种性能的电动汽车尤为重要。

本书基于目前电动汽车的发展,从构型、原理与设计三个方面阐述了电动汽车的技术与发展。全书分为9章。第1章简要介绍了发展电动汽车的必要性以及电动汽车的定义、分类、关键技术、发展现状与趋势。第2章首先分析了各种类型电动汽车的基本结构和工作原理,然后探讨了具有不同特点的电驱动系统和储能装置形式,为更好地说明不同种类电动汽车的结构形式和应用,在每一节后列举了几个市场应用最为广泛的典型实例。第3~9章从工作模式分析、控制策略研究、设计目标与要求、参数设计过程以及设计实例列举与仿真分析等五个方面详细分析了从纯电动汽车到燃料电池汽车等多种电动汽车的设计过程。本书可作为普通高等院校车辆工程专业电动汽车和新能源汽车理论与技术等研究方向的专业基础课和专业选修课教材,也可供从事电动汽车技术研发的专业技术人员阅读。

本书由重庆交通大学机电与车辆工程学院邓涛教授、尹燕莉博士等编著,参加编写的还有研究生唐鹏、李鑫、冉艳、罗远平、苏振华、邓彪、张国栋、谭海鑫,同时实验室的赵柯、许辉、张露、邓淞也为本书提供了相关资料并进行了部分编写工作。在本书完稿之际,对书中所引参考文献的作者,以及由于编者疏漏而未注明参考文献的作者致以衷心的感谢!

电动汽车技术覆盖知识面广,涉及机械、电子、电力、微机控制等多方面技术。由于编者学识有限,书中不妥或错误之处在所难免,恳请读者提出宝贵建议,以便修订时予以纠正。

编者

2019年1月

# 目 录

## CONTENTS

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 发展电动汽车的必要性 .....	1
1.2 电动汽车的定义和分类 .....	2
1.2.1 电动汽车的定义 .....	2
1.2.2 电动汽车的分类 .....	2
1.3 电动汽车的关键技术 .....	4
1.3.1 电池与电池管理系统技术 .....	4
1.3.2 驱动电机技术 .....	5
1.3.3 电机控制技术 .....	5
1.3.4 系统集成化技术 .....	6
1.3.5 材料工艺技术 .....	7
1.3.6 汽车轻量化技术 .....	8
1.4 电动汽车的发展现状和趋势 .....	8
1.4.1 发展现状 .....	8
1.4.2 发展趋势 .....	14
思考题 .....	19
参考文献 .....	19
<b>第 2 章 现代电动汽车构型和原理</b> .....	20
2.1 纯电动汽车 .....	20
2.1.1 基本结构与工作原理 .....	20
2.1.2 电驱动系统 .....	21
2.1.3 储能装置形式 .....	26
2.1.4 典型实例 .....	31
2.2 混合动力电动汽车 .....	35
2.2.1 串联式混合动力电动汽车 .....	37
2.2.2 并联式混合动力汽车 .....	42
2.2.3 混联式混合动力汽车 .....	52
2.3 插电式混合动力电动汽车 .....	64
2.3.1 基本结构与工作原理 .....	64

2.3.2	电驱动系统与储能装置 .....	66
2.3.3	典型实例 .....	67
2.4	增程式混合动力电动汽车 .....	73
2.4.1	基本结构与工作原理 .....	73
2.4.2	电驱动系统 .....	74
2.4.3	储能装置 .....	75
2.4.4	典型实例 .....	76
2.5	燃料电池电动汽车 .....	78
2.5.1	基本结构与工作原理 .....	79
2.5.2	电驱动系统 .....	82
2.5.3	储能装置 .....	86
2.5.4	典型实例 .....	87
	思考题 .....	90
	参考文献 .....	90
<b>第3章</b>	<b>纯电动汽车设计</b> .....	<b>92</b>
3.1	工作模式和控制策略 .....	92
3.2	设计目标和要求 .....	93
3.3	参数设计 .....	94
3.3.1	电动机参数设计 .....	94
3.3.2	传动系统传动比 .....	96
3.3.3	电池组参数匹配 .....	97
3.3.4	续航里程 .....	98
3.4	设计实例和仿真分析 .....	99
	思考题 .....	104
	参考文献 .....	104
<b>第4章</b>	<b>串联式混合动力电动汽车设计</b> .....	<b>105</b>
4.1	工作模式 .....	105
4.2	控制策略 .....	107
4.2.1	恒温器式控制策略 .....	107
4.2.2	功率跟随式控制策略 .....	108
4.3	设计目标和要求 .....	109
4.4	参数设计 .....	109
4.4.1	发动机-发电机额定功率 .....	109
4.4.2	电动机功率 .....	112
4.4.3	储能装置 .....	115
4.4.4	耦合装置 .....	115
4.5	设计实例和仿真分析 .....	119

4.5.1	电动机设计	120
4.5.2	齿轮传动比的设计	120
4.5.3	爬坡能力检验	120
4.5.4	加速性能检验	121
4.5.5	发动机-发电机设计	122
4.5.6	峰值电源功率容量的设计	124
4.5.7	峰值电源能量容量的设计	124
4.5.8	耗油量	125
	思考题	126
	参考文献	126
<b>第5章</b>	<b>并联式混合动力电动汽车设计</b>	<b>127</b>
5.1	工作模式	127
5.2	控制策略	128
5.2.1	基于规则的逻辑门限控制策略	129
5.2.2	瞬时优化控制策略	129
5.2.3	全局优化控制策略	130
5.2.4	智能控制策略	131
5.3	设计目标和要求	132
5.4	参数设计	132
5.4.1	发动机	133
5.4.2	电动机	134
5.4.3	电池组	136
5.4.4	动力耦合装置	137
5.5	设计实例及仿真分析	137
5.5.1	发动机基本参数	138
5.5.2	驱动电动机参数	139
5.5.3	电池参数设计	142
5.5.4	动力耦合装置参数设计	144
	思考题	144
	参考文献	145
<b>第6章</b>	<b>混联式混合动力电动汽车设计</b>	<b>146</b>
6.1	工作模式	146
6.2	控制策略	149
6.2.1	发动机恒定工作点控制策略	149
6.2.2	发动机最优工作曲线控制策略	149
6.3	设计目标与要求	149
6.4	参数设计	150

6.4.1	发动机功率设计	150
6.4.2	电动机驱动功率设计	150
6.4.3	峰值电源设计	151
6.4.4	电动机/发电机转矩和功率容量的设计	152
6.5	设计实例及仿真分析	152
	思考题	155
	参考文献	155
<b>第7章</b>	<b>插电式混合动力电动汽车设计</b>	<b>156</b>
7.1	工作模式	156
7.2	控制策略	159
7.3	设计目标与要求	159
7.4	参数设计	160
7.4.1	电动机	161
7.4.2	发动机	162
7.4.3	储能装置	162
7.5	设计实例及仿真分析	164
7.5.1	整车动力传动系统参数选择	164
7.5.2	整车性能仿真分析	165
7.5.3	仿真结果分析	167
	思考题	168
	参考文献	168
<b>第8章</b>	<b>增程式混合动力电动汽车设计</b>	<b>169</b>
8.1	工作模式	169
8.2	控制策略	171
8.3	设计目标与要求	173
8.4	参数设计	173
8.4.1	发动机	173
8.4.2	电动机	174
8.4.3	动力电池	174
8.4.4	传动系统	175
8.5	设计实例	176
8.6	仿真分析	178
	思考题	182
	参考文献	182
<b>第9章</b>	<b>燃料电池电动汽车设计</b>	<b>183</b>
9.1	工作模式和控制策略	183

9.2 参数设计 .....	186
9.2.1 驱动电动机 .....	186
9.2.2 传动系统传动比 .....	189
9.2.3 燃料电池 .....	189
9.2.4 辅助动力源 .....	191
9.3 设计实例及仿真分析 .....	193
思考题 .....	195
参考文献 .....	196

## 第 1 章 发展电动汽车的必要性

我国汽车工业在改革开放以后得到了迅速发展，汽车产量逐年增加，汽车保有量迅速增长，汽车已成为我国国民经济的重要组成部分。随着汽车工业的快速发展，汽车对能源的需求也越来越大，传统的石油能源已经难以满足我国汽车工业发展的需要。

电动汽车作为一种新型的交通工具，具有节能、环保、安全等优点，被认为是解决我国能源短缺和环境污染问题的有效途径。随着国家对新能源汽车的大力扶持，电动汽车产业得到了快速发展，越来越多的消费者开始接受并购买电动汽车。

然而，电动汽车的发展也面临着一些挑战，如续航里程短、充电时间长、充电设施不完善等。因此，如何克服这些困难，推动电动汽车的普及应用，是当前汽车工业面临的重要课题。

本章主要介绍发展电动汽车的必要性，包括能源短缺、环境污染、石油资源紧张等方面。同时，也介绍了电动汽车的优势和我国政府对新能源汽车的政策支持。通过本章的学习，读者可以了解电动汽车的发展现状和未来趋势，为从事电动汽车设计工作打下基础。

（1）克服电动汽车的缺点，使电动汽车成为理想的交通工具。电动汽车具有体积小、重量轻、结构简单、操作方便等优点，但同时也存在续航里程短、充电时间长、充电设施不完善等缺点。因此，在设计和制造电动汽车时，必须充分考虑这些缺点，并采取相应的措施进行改进。

首先，要提高电动汽车的续航里程。这可以通过优化电池管理系统、提高电机效率、降低整车能耗等方式来实现。其次，要缩短电动汽车的充电时间。这可以通过采用快充技术、优化充电设施等方式来实现。最后，要完善电动汽车的充电设施。这可以通过建设充电桩网络、推广换电模式等方式来实现。只有克服这些缺点，电动汽车才能真正成为理想的交通工具。

（2）电动汽车的优点。电动汽车具有体积小、重量轻、结构简单、操作方便等优点。首先，电动汽车的体积小，便于停放和行驶。其次，电动汽车的重量轻，可以降低能耗，提高续航里程。再次，电动汽车的结构简单，可以降低制造成本，提高维修便利性。最后，电动汽车的操作方便，可以降低驾驶难度，提高驾驶舒适性。这些优点是电动汽车相对于传统燃油汽车的重要优势。

（3）我国政府对新能源汽车的政策支持。我国政府高度重视新能源汽车的发展，出台了一系列扶持政策。首先，在财政补贴方面，政府对购买新能源汽车的消费者给予一定的补贴，降低了购车成本。其次，在税收优惠方面，政府对新能源汽车的生产、销售环节给予一定的税收减免。最后，在基础设施建设方面，政府加大了对充电桩、换电站等设施的投入，完善了新能源汽车的配套设施。这些政策支持有力地推动了我国新能源汽车产业的快速发展。

总之，发展电动汽车是我国实现能源结构优化、改善生态环境、保障能源安全的必然选择。通过克服电动汽车的缺点，发挥其优点，并得到政府的政策支持，电动汽车必将迎来更加广阔的发展前景。

## 绪 论

### 1.1 发展电动汽车的必要性

我国汽车产销规模在过去 15 年间飞速增长,已连续 10 年稳居全球第一,成为汽车制造大国和最大的汽车市场。截至 2018 年年底,我国汽车产销量进一步增加,而汽车保有量也达到了 2.35 亿辆,居世界第二。汽车产业已成为国民经济重要的支柱产业,汽车也成为国民消费的重要领域。然而,汽车石油消耗占国内石油总需求的 70%,对外石油依存度达 65.4%,汽车尾气排放在我国城市大气污染中的分担率达 80% 以上。因此,汽车产业的持续健康发展必须突破石油资源短缺、环境污染、影响气候变化的瓶颈。在这一背景下,电动汽车成为当前国际公认的主要发展方向,也是我国从汽车大国到汽车强国的必由之路。

近 10 年来,以纯电动汽车和插电式混合动力汽车为代表的电动汽车已成为实现大规模生产、替代传统汽车能源动力系统的关注焦点。此外,电动汽车与智能电网、可再生能源的紧密结合,对促进我国电力产业的转型升级具有重要的意义。因此,发展电动汽车是我国高新技术创新的重要方向和汽车产业可持续发展的必然选择,其必要性可总结为以下几点:

(1) 发展电动汽车对调节、优化道路交通领域能源结构,缓解我国对进口石油的高度依赖,保障国家能源安全,具有非常重要的战略意义,同时也是汽车产业持续较快增长的根本保障。

(2) 我国经济发展已经并将长期受到来自环境污染、气候变化带来的严重制约,不少中心城市的空气污染、PM2.5 排放已经超出环境容量极限,一些城市已开始实施限制汽车消费和限制汽车使用的限购、限行政策,我国汽车产业发展遇到了环境的瓶颈。电动汽车中的纯电动汽车具有零排放,混合动力汽车和插电式混合动力汽车等具有日常出行零排放和长距离出行低排放的卓越的环境友好特性。因此,大力发展电动汽车符合绿色发展的理念,是国际公认的汽车产业发展的战略选择。

(3) 电动汽车既是交通工具,又是分布式电能储备装置,它与智能电网的有机融合,具有实现“削峰填谷”的重要作用,有利于提升发电设备的利用效率,在重大灾害期间还可作为电力供给的重要补充。更重要的是,大力发展电动汽车,能够更加有效地利用风能、太阳能等可再生能源,有助于我国电力能源结构的清洁化和加强智能电网建设。

(4) 充电技术和充电基础设施是支撑电动汽车产业发展的必要条件。突破充电装备关键核心技术、多能源融合的电网智能控制技术,建设基于互联网的智能化服务体系,对实现汽车强国战略目标具有重要的支撑作用。

因此,电动汽车的发展不仅可以缓解石油资源短缺压力,也承载着解决日益突出的环境污染问题,实现我国汽车产业结构调整和转型升级,汽车产业做大做强的历史使命。

# 章 介 绍

## 1.2 电动汽车的定义和分类

### 1.2.1 电动汽车的定义

电动汽车是指汽车行驶的动力全部或部分来自电机驱动系统的汽车,它主要以动力电池组为车载能源,是涉及机械、电子、电力、微机控制等多学科的高科技产品。按照汽车行驶动力来源的不同,一般将电动汽车划分为纯电动汽车、混合动力电动汽车、插电式混合动力电动汽车、增程式混合动力电动汽车和燃料电池电动汽车。

### 1.2.2 电动汽车的分类

#### 1. 纯电动汽车

纯电动汽车是指车辆的驱动力全部由电机供给,电机的驱动电能来源于车载可充电蓄电池或其他电能储存装置的汽车。图 1.1 所示是蔚来 ES8 纯电动汽车。



图 1.1 蔚来 ES8 纯电动汽车

#### 2. 混合动力电动汽车

混合动力电动汽车是指驱动系统由两个或多个能同时运转的单个驱动系联合组成的车辆,车辆的行驶动力依据实际的车辆行驶状态由单个驱动系单独或多个驱动系共同提供。因各个组成部件、布置方式和控制策略的不同,混合动力汽车有多种形式。图 1.2 所示是 Polestar 1 混合动力汽车。

#### 3. 插电式混合动力电动汽车

插电式混合动力汽车是指车辆的驱动力由驱动电机及发动机同时或单独供给,并且可由外部提供电能进行充电,纯电动模式下续航里程符合我国相关标准规定的汽车。图 1.3 所示为丰田 Prius 插电式混合动力电动汽车。



图 1.2 Polestar 1 混合动力汽车



图 1.3 丰田 Prius 插电式混合动力电动汽车

#### 4. 增程式混合动力电动汽车

增程式电动汽车是一种配有地面充电和车载供电功能的纯电驱动的电动汽车,其运行模式可以根据需要处于纯电动模式、增程模式或混合动力模式,是介于纯电动汽车和混合动力汽车之间的一种过渡车型,具有纯电动和混合动力汽车的特征。图 1.4 所示为理想智造 ONE 增程式混合动力电动汽车。



图 1.4 理想智造 ONE 增程式混合动力电动汽车

## 5. 燃料电池电动汽车

燃料电池电动汽车(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)是利用氢气和空气中的氧在催化剂的作用下,以燃料电池中经电化学反应产生的电能作为主要动力源驱动的汽车。燃料电池电动汽车实质上是纯电动汽车的一种。图 1.5 所示为现代 NEXO 燃料电池电动汽车。



图 1.5 现代 NEXO 燃料电池电动汽车

## 1.3 电动汽车的关键技术

电动汽车的关键技术包括车身技术、底盘技术、电池技术、电机控制技术、能量管理系统技术和安全防护技术。电动汽车所特有的技术包括电池与电池能量管理系统技术、电机技术及其控制技术。而系统集成化技术、材料工艺技术、汽车轻量化技术作为进一步降低生产制造难度、提高汽车质量、降低汽车能量消耗的核心技术也是目前电动汽车发展中不可或缺的一部分。因此,在分析其主要技术后,对所有目前与之相关的技术进行整合,研发出成本最优、各项技术指标相对最优的通用技术是未来电动汽车进一步产业化的关键。

### 1.3.1 电池与电池管理系统技术

基于新材料、新结构的高比能动力电池技术已经成为各国竞争的焦点。在美国、日本、德国、韩国及欧盟其他成员国等国家的科技规划以及重点企业战略规划中,高性能电池材料、高性能锂离子动力电池、高性能电池包、电池管理系统、热管理技术、电池标准体系、下一代锂离子动力电池、电池梯级利用及回收技术、电池生产制造技术及装备等都是重点关注的内容。国外电池生产企业采用高效、全自动、人员非接触式生产方式,行业合作模式也发生了变化,在制浆技术及装备、涂布技术、组装生产线、制造过程在线检测技术等单项技术方面,单元自动化、流程自动化、集成一体化、非接触生产方面,以及制造控制及管理系统一体化、制造执行系统(MES)制造全过程管理等方面均处于领先地位。

我国已具备主流动力电池的大规模产业化基础。国内磷酸铁锂电池单体比能量已达到

140W·h/kg,接近国际先进水平,其产业成熟度和规模国际领先。锂离子电池产业链已基本完备,镍-钴-锰三元材料锂离子动力电池单体比能量在130~220W·h/kg。

但是,我国电池关键材料的总体技术水平与国外还存在一定差距,尤其是高性能动力电池正极材料及高端隔膜方面;缺乏动力电池制造相关的自动化生产技术、高精度制造装备及品质保证技术,导致电池产品的安全性、一致性、制造成本较国外还有一定差距;在电池管理系统开发及系统集成方面投入较少,系统级别的可靠性、安全性还有待进一步提高;动力电池测试评价及标准体系方面以法规测试验证为主,缺少机理层面的测试分析标准等。

当然,动力电池的发展仍以保证电池可靠性和安全性,提高电池比能量、比功率,降低成本为主要目标。为此,我国确定了以下三点发展目标:

(1) 2020年之前,为动力电池技术提升阶段。新型锂离子电池实现产业化。能量型锂离子电池单体比能量达到350W·h/kg,能量功率兼顾型动力电池单体比能量达到200W·h/kg。动力电池实现智能化制造,产品性能、品质大幅提升,成本显著降低。

(2) 2020—2025年,为动力电池产业发展阶段。能量型电池单体比能量达到400W·h/kg以上,动力电池产业发展与国际先进水平接轨。

(3) 2025—2030年,为动力电池产业成熟阶段。新体系电池实现实用化,电池单体比能量达到500W·h/kg以上,成本进一步下降,动力电池技术及产业发展处于国际领先水平。

### 1.3.2 驱动电机技术

当前,国际上电动汽车驱动电机仍然是永磁电机和非永磁电机并存。由于永磁电机具有效率高、比功率高、功率因数大等优点,越来越多的电动汽车趋向于采用永磁电机驱动系统,但仍然有不少车型采用感应电机。

大陆集团研制出了用于电动汽车的电励磁同步电机,其峰值功率70kW,最高转矩226N·m,最高转速12000r/min。美国特斯拉汽车公司的Model S纯电动汽车采用了异步电机,最大功率接近300kW,最高转矩370N·m。通用Volt、丰田Prius、奥迪e-tron和宝马e系列为代表的国际主流整车企业采用的电机峰值比功率可达3.8kW/kg,连续比功率可达2.8kW/kg。从电机转速来看,国外车用电机最高转速可达16000r/min。

在用于分布驱动的轮毂/轮边电机方面,米其林开发出集成悬浮驱动电机及减速机构的电动轮,比功率达到4.0kW/kg以上;英国Protean轮毂电机采用一体化结构,电机输出能力也达到了80kW/800N·m;德国Fraunhofer将轮载电机与电力电子控制器实施一体化集成,其功率和转矩分别达到55kW和700N·m。但是,至今全球搭载轮边/轮毂电机的量产车仍为数不多,大规模产业化仍面临诸多挑战。

### 1.3.3 电机控制技术

电机驱动汽车前行,而电机控制器控制电机工作。电机控制器由逆变器和控制器两部分组成。逆变器接收电池输送过来的直流电电能,逆变成三相交流电给汽车电机提供电源。控制器接收电机转速等信号反馈到仪表,当发生制动或者加速行为时,控制器控制变频器频率的升降,从而达到加速或者减速的目的。由于国内电力电子技术起步较晚,使得电机控制

器的比功率水平和国外量产的产品比较存在差距。随着近年来技术不断进步,电机控制技术呈现出以下发展趋势:

- (1) 高安全性。这是基本要求,集成功能越来越多,对安全性的要求也越高。
- (2) 高比功率。电机控制器的外形、体积不断向小型化发展。
- (3) 高压化。这是电机控制器发展的基本趋势,GB/T(推荐性国家标准)的方向是650V绝缘栅双极型晶质管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)的设计不断向更高的750V以及1200V发展。
- (4) 电磁兼容性(Electro Magnetic Compatibility, EMC)等级越来越高。接下来要做到class5水平。

应用于异步电机控制的技术主要有电压和频率(Voltage and Frequency, V/F)控制、转差频率控制、矢量控制和直接转矩控制(DTC)。

20世纪90年代以前,电机控制方式主要是V/F控制和转差频率控制,但这两种控制技术转速控制范围小,转矩特性不理想,对于需频繁启动、加/减速的电动车不太适宜。矢量控制也称磁场定向控制,实现了异步电机的转矩和磁场的解耦控制,使异步电机的控制运行既能保持稳态精度,又具有很好的动态性能。近年来,国内矢量控制技术正逐渐推广。下面着重介绍几种近年来比较受关注的矢量控制方法和直接转矩控制方法。

### 1. 矢量控制方法

矢量控制分为有传感器矢量控制和无传感器矢量控制。有传感器矢量控制成本比较高,对安装精度要求也很高,与电机本身参数关系密切,有些问题难以解决。在高温高湿的情况下,传感器的输出精度容易受到电磁干扰,电动汽车使用中速度传感器的速度反馈成为不可靠环节。而无速度传感器的优点主要是增加可靠性、降低硬件成本、减少接线。矢量控制方案比较复杂,要使用高级核心控制芯片来实现矢量控制算法。目前,随着各种高级核心芯片性价比的不断提高,矢量控制的应用也将越来越广泛。

### 2. 直接转矩控制方法

近年来,继矢量控制变频调速技术之后,直接转矩控制也慢慢发展成为一种新型的高性能交流变频调速技术。它的控制方式主要有使定子磁链依照正六边形轨迹运动和定子磁链运动轨迹近似为圆形两种控制方案。

目前,我国已基本掌握了先进驱动电机设计及开发关键技术,自主开发的电机产品已经实现了与整车的产业化配套,比功率、效率、电机控制器等关键技术与国际水平基本相当,电机峰值比功率达到 $2.8\sim 3.0\text{kW/kg}$ ,系列化产品可覆盖大多数车用电机需求,规格化驱动电机及其控制系统产品已具备量产能力,并有个别产品实现出口。

## 1.3.4 系统集成化技术

为了提高电动汽车的整体性能和功能模块化的应用,系统的高度集成化就显得尤为重要。系统集成化技术是指在功能和场景的约束下,实现紧凑和轻量化的设计,目前主要体现在电驱动系统集成以及其他主要部件的集成上。

在电驱动系统集成方面,目前行业内都在做“三合一”,就是把驱动电机、减速器和电控

部分集成为一体,可以实现轻量化、高效、小型化,同时降低成本,在一定程度上解放了空间,利于整车布置。将驱动电机与逆变器集成一体,逆变器配置在驱动电机旁,连接电机与逆变器的线束就可以缩短或者置换,不仅减小了机构的尺寸和重量,还降低了线束产生的能量损耗。如博世、GKN Driveline、三菱电机和舍弗勒,不仅实现了逆变器与电机之间的连接配线缩短,尺寸更小,还降低了连接部位的电力损耗,提升了驱动系统效率。再如,将驱动电机与减速箱集成为一体,减速器齿轮的润滑油和电机的冷却油就可以共用,精简了冷却机构,从而可以实现小型化。

综合来看,目前大多数企业只能做到“二合一”(电机集成减速器)的电驱动总成方案,但预计未来几年内,“三合一”电驱动总成方案将成为主流。而从长远来看,电机、减速器、电机控制器、高压分线盒、DC/DC、DC/AC、充电机等零部件都会集成为一个大的动力总成,即“多合一”,代表车型是宝马 i3。

### 1.3.5 材料工艺技术

电机功率、转矩、效率和寿命与所用硅钢片有很大关系,尤其是电机转子所用的无取向电工钢片,其磁性能决定了电机的转矩和效率,铁损越低电机效率越高,磁感增大电机转矩才能增加,硅钢片的力学性能决定了定子和转子的加工精度、承载强度和最大转速。

电工钢片技术要求:①电机需要提供高扭矩用于起动,必须提高电流和电工钢片的磁感;②一般电机效率为85%~93%,要提高能源转换效率,要求电机所用电工钢片具有优秀的磁性能,即中低磁场下的高磁感和高频下的低铁损;③电机转速6000~15000r/min,要求电工钢片具有足够高的强度抵抗离心力,这就要求使用高强度电工钢片,特别是永磁驱动电机,磁极镶嵌于转子之中;④缩小转子和定子之间的间隙可有效提高磁通密度,这就要求电工钢薄片具有良好的冲片性;⑤更长的疲劳寿命。

目前电机技术的发展还包括绕组方式的合理选择和电机小型化。

(1) 合理选择电机绕组方式。合理选择电机绕组方式可以降低定子磁势的谐波含量,减少电机铁耗和定子绕组引起的电机纹波转矩,提高电机效率,降低电机振动和噪声;可以提高电机凸度和磁阻转矩,减小绕组电流,降低电机铜耗。

总体上,定子中绕线的量是决定电机功率大小的重要因素,而决定绕线量的则主要是在有限空间内铜线可以绕机芯的圈数。

(2) 实现电机小型化。本田通过使用大截面的方形导线作为线圈,使得绕线的占积率(空间中铜的比例)达到了60%,使定子体积变小。在传统电机中,使用薄的圆形线圈,占积率一般只能达到48%。由于方形线圈较圆形线圈更粗,导体(铜)中的过电流损失会增大。一般通过增大定子的槽宽度或减小每个线圈的厚度来减小过电流损耗。

为了实现小型化,本田还采用了新的绕线结构方法来缩短了从定子突出的线圈部分(线圈末端):

① 将矩形线圈塑形成U形,以形成“并列分割线圈”。

② 将该分割线圈从定子铁芯的轴方向插入。

③ 将插入侧以及对侧伸出的线圈前端焊接在一起而形成线圈。

新工艺不需要绳子捆绑,也不需要线圈末端压扁,从而更易于自动化。由此实现高效率大批量生产,成本也能降低。

### 1.3.6 汽车轻量化技术

汽车减重(轻量化)是节能减排的重要举措。一般来说,汽车每降重 10%,可节油 6%~8%。按欧洲和我国的汽车油耗评价方法,对于乘用车,车重每降低 100kg,最多可节油 0.39L/100km。综合考虑汽车的尺寸和主要性能,用整车轻量化指数来比较,我国自主品牌乘用车与日系车相差 11.8%,与韩系车相差 7.9%,与美系车相差 3.3%。与合资品牌相比,自主品牌乘用车有 4.9%的轻量化空间;自主品牌商用重型自卸车比国外偏重约 15%,载质量利用系数偏小 13%;牵引车的整备质量降低和挂牵比提升都有较大潜力。

因此我国汽车轻量化技术的发展目标是通过轻质材料的广泛应用、轻量化结构设计的深入和轻量化制造的研究与推广,提高汽车用先进高强度钢(AHSS)、超高强度钢和轻质材料的使用量。同时做出了以下具体规划:

(1) 到 2020 年,强度在 600MPa 以上的 AHSS 钢应用达到 50%,铝合金单车用量达到 190kg,镁合金单车用量达到 15kg,碳纤维有一定使用量。

(2) 到 2025 年,第三代汽车钢应用比例达到白车身重量的 30%,铝合金单车用量达到 250kg,镁合金单车用量达到 25kg,碳纤维使用量占车重 2%。

(3) 到 2030 年,强度在 2000MPa 及以上钢材有一定比例应用,铝合金单车用量达到 350kg,镁合金单车用量达到 45kg,碳纤维使用量占车重 5%。

## 1.4 电动汽车的发展现状和趋势

### 1.4.1 发展现状

自 1881 年法国电气工程师 Gustave Trouve 制造出首辆电动汽车开始,电动汽车经历了曲折起伏的几个发展阶段,其中的决定因素就是动力电池技术和人们对环境、能源的关注程度。电动汽车自身具有显著的优点:可以实现低排放,甚至零排放行驶;采用电能作为驱动能源,能源来源途径广;行驶噪声小;容易实现 Drive-by-Wire(电传线控);实现了制动能量回收,降低了摩擦制动器的使用强度和维护费用等。上述优点决定了电动汽车技术发展的重要方向。

#### 1. 国外电动汽车发展现状

##### 1) 美国

美国政府将较为成熟的混合动力汽车技术作为目前电动汽车市场的主流技术大力推广,美国能源部(Department of Energy, DOE)制定了到 2015 年投放市场的插电式混合动力汽车达到 100 万辆的目标。2013 年美国能源部宣布难以实现既定目标并发布《电动汽车普及大挑战蓝图》,明确重点支持纯电动汽车、插电式混合动力汽车和增程式电动汽车,计划用 10 年时间通过技术创新提高插电式电动汽车的性价比和市场竞争能力。

美国本土企业特斯拉、通用和福特的电动汽车发展强劲,同时日产 Leaf 在美国的市场