



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书  
出版规划项目



*Technology and Application of New Energy Vehicle Motor*



《新能源出版工程》丛书共 23 分册，分别论述太阳能、风能、生物质能、海洋能、核能、新能源汽车、智能电网和煤制油等新能源相关领域的理论研究和关键技术

# 新能源汽车 电机技术与应用

张舟云 贡俊 主编

上海科学技术出版社



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书  
出版规划项目



# 新能源汽车电机技术与应用

Technology and Application of  
New Energy Vehicle Motor

张舟云 贡俊 主编

上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

新能源汽车电机技术与应用/张舟云,贡俊主编.

—上海:上海科学技术出版社,2013.1

(新能源出版工程)

ISBN 978-7-5478-1518-2

I. ①新… II. ①贡… III. ①新能源—汽车—电机  
IV. ①U469.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 253452 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行  
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 21.75 插页 4

字数:488 千字

2013 年 1 月第 1 版 2013 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5478-1518-2/U·15

定价:120.00 元

---

本书如有缺页、错装或损坏等严重质量问题,  
请向工厂联系调换

# 内容提要

---

当前新能源汽车技术发展迅速,驱动电机系统是电动汽车动力系统核心关键部件。与其他应用领域相比较,驱动电机系统在电动汽车应用工况极为严苛。随着技术进步和产业发展,急需这方面专业书籍来培训相关技术人员,用于指导科研和生产实践。

本书结合编者多年来车用电机及其控制系统的开发和应用经验,针对不同类型电动汽车对电机及其控制系统的技术需求,系统分析和总结了各种电机及其控制系统的理论基础、技术关键与设计方法;同时,本书突出车用电机及其控制系统在新能源汽车中的应用,对不同应用需求提出了不同的解决方案。

本书可作为从事新能源汽车整车开发、电机及控制系统开发与制造的工程技术人员、生产管理人员和高校相关专业师生的参考用书,同时对于新能源汽车关键材料、关键器件开发应用的工程技术人员也有较高的参考价值。

《新能源出版工程》

## 学术顾问(以姓氏笔画为序)

---

阮可强	中国工程院院士
严陆光	中国科学院院士
杨裕生	中国工程院院士
林宗虎	中国工程院院士
倪维斗	中国工程院院士
徐大懋	中国工程院院士
翁史烈	中国工程院院士
黄其励	中国工程院院士
潘 垣	中国工程院院士

《新能源出版工程》

## 编委会

---

### 主任

倪维斗

### 委员(以姓氏笔画为序)

毛宗强 朱 军 贡 俊 李 春

张家倍 张德祥 周凤翔 徐洪杰

殷承良 阎耀保 喜文华 董长青

董亲翔 鲍 杰 戴松元

# 本书编委会

---

主 编 张舟云 贡 俊  
编 委 黄苏融 张 琪  
康劲松 袁登科

# 前 言

---

节能环保是当今汽车工业发展的主题,发展电动汽车已成为各国政府和汽车行业的共识,被各国普遍确立为保障能源安全和转型低碳经济的重要途径,国际上各大汽车集团也都致力于发展这项综合技术并开展产业化研究。当前,我国的汽车工业正处于从投资驱动向创新驱动、汽车制造从大国向强国的战略转型期,电动汽车自主创新是我国汽车工业打好技术“翻身仗”、实现技术跨越的重大决战。

无论是燃料电池汽车、纯电动汽车,还是混合动力汽车,驱动电机系统既是关键技术,又是共性技术。与其他领域用驱动电机系统不同,车用驱动电机系统工作环境恶劣、性能要求高而成本要求低,技术开发与生产难度更高。我国有较好的电机工业基础和丰富的稀土资源,开发车用驱动电机系统在全球资源限制条件下具有明显的比较优势,是易于形成中国特色的优势产业。

经过国家“十五”、“十一五”的科技攻关,我国已掌握了车用驱动电机系统的研发与工程化等关键技术,并初步建立了中小批量生产的能力。“十二五”科技专项进一步以电驱动总成技术作为电动汽车发展的重点,在车用驱动电机系统产业化方面加大投入与支持力度,集中开展技术攻关,实现从核心技术到大规模产业化技术的跨越式发展。

随着电动汽车用电机技术的不断发展,急需专业书籍来培训相关技术人员,并用于指导科研和生产实践,本书正是基于此目的而编写。本书的特点在于结合编者多年来车用电机及其控制系统的开发和应用经验总结,在写作思路上有如下特点:

第一,突出车用电机及其控制系统技术关键。针对不同类型电动汽车对车用电机及其控制系统技术需求,系统性分析和总结各种电机及其控制系统的技术关键。

第二,注重理论研究与试验验证相结合。对于不同电机及其控制系统的典型样机与产品,从理论分析、方案设计、仿真分析到试验验证,全面系统地研究探讨不同类型电机的适用性。

第三,以电动汽车为应用目标。本书突出各类车用电机及其控制系统在各种已经示范或小批量生产电动车辆中的应用,对不同应用需求提出不同的



解决方案。

全书共 10 章:第 1 章详细介绍了新能源汽车分类及其特点、国内外新能源汽车发展历史与现状以及车用电机及其控制系统的发展现状和趋势;第 2 章介绍了不同类型的电机的结构、基本原理与基本控制方法;第 3 章介绍了新型车用电机技术;第 4 章介绍了现代电机产品化设计方法;第 5 章介绍了电力电子与变流器原理;第 6 章介绍了车用变流器应用技术,特别对电力电子器件驱动与保护技术、电容器、功率母排、散热技术等重点展开;第 7 章分析不同类型电机控制技术等;第 8 章简单介绍了电机的智能控制技术;第 9 章介绍了电动汽车电机及其控制系统参数设计;第 10 章针对微型电动汽车、混合动力轿车、燃料电池/纯电动轿车以及电动客车等应用领域的电机及其控制系统的应用举例论证。

本书作者编写分工如下:第 1 章由张舟云和贡俊共同编写,第 2~4 章由黄苏融、张琪和贡俊共同编写,第 5 章由康劲松编写,第 6 章由张舟云和康劲松共同编写,第 7 章和第 8 章由袁登科编写,第 9 章和第 10 章由张舟云和贡俊共同编写。全书由张舟云和贡俊负责统稿,担任主编。本书部分资料参考节能与新能源汽车、新能源汽车网、中国客车网、零排放汽车网、汽车之家、新华汽车网、21 世纪汽车网、中国重卡网、腾讯汽车网、中华汽车网、第一电动车网、日本技术在线、工程机械中国网等网站内容。本书在编写与修改过程中,曲家骥、徐延东、应红亮、李秀涛、贾爱萍等对个别章节的部分内容提出了许多宝贵建议,在此一并表示感谢。

本书内容为“十二五”国家 863 电动汽车重大专项、上海市地方政府课题基金资助项目;本书为“十二五”国家重点图书出版规划项目,由国家出版基金、上海科技专著出版资金资助出版。

限于编者水平,本书内容难免存在疏漏与缺点,不妥之处,敬请广大读者评批指正。

编者

# 目 录

---

## 第 1 章 绪论 / 1

### 1.1 概述 / 1

### 1.2 新能源汽车分类与特点 / 2

#### 1.2.1 纯电动汽车 / 2

#### 1.2.2 混合动力汽车 / 3

#### 1.2.3 燃料电池汽车 / 5

### 1.3 国内外新能源汽车发展 / 6

#### 1.3.1 国外新能源汽车的发展 / 6

#### 1.3.2 我国新能源汽车的发展 / 9

### 1.4 新能源汽车对电机及其控制系统的要求 / 12

#### 1.4.1 典型的新能源汽车用牵引电机驱动系统性能比较 / 12

#### 1.4.2 新能源汽车用电机及其控制系统的约束 / 15

### 1.5 车用电机及其控制系统的发展现状与趋势 / 16

#### 1.5.1 国外车用电机及其控制系统发展历程及现状 / 16

#### 1.5.2 我国车用电机及其控制系统发展历程及现状 / 18

#### 1.5.3 车用电机及其控制系统技术发展趋势 / 19

### 参考文献 / 21

## 第 2 章 新能源汽车用电机的结构、原理与基本特性 / 22

### 2.1 概述 / 22

### 2.2 直流电动机的结构、原理与基本特性 / 22

#### 2.2.1 直流电动机的结构 / 22

#### 2.2.2 直流电动机的工作原理 / 23

#### 2.2.3 直流电动机的基本特性 / 24

#### 2.2.4 直流电动机的机械特性 / 28

### 2.3 交流异步电动机的结构、原理与基本特性 / 31

#### 2.3.1 交流异步电动机的结构 / 31

- 2.3.2 交流异步电动机的工作原理 / 32
- 2.3.3 交流异步电动机的基本特性 / 33
- 2.4 交流永磁电动机的结构、原理与基本特性 / 39
  - 2.4.1 交流永磁电动机的分类与基本结构 / 39
  - 2.4.2 无刷直流电动机的结构、原理与基本特性 / 41
  - 2.4.3 永磁同步电动机的结构、原理与基本特性 / 44
- 2.5 开关磁阻电动机的工作原理与基本特性 / 52
  - 2.5.1 开关磁阻电动机的结构 / 52
  - 2.5.2 开关磁阻电动机的工作原理 / 54
  - 2.5.3 开关磁阻电动机的运行特性 / 55
- 参考文献 / 57

### 第3章 新型电机工作原理与基本特性 / 58

- 3.1 概述 / 58
- 3.2 双机械端口能量变换器 / 59
  - 3.2.1 双机械端口能量变换器的结构 / 59
  - 3.2.2 双机械端口能量变换器的工作原理 / 60
  - 3.2.3 双机械端口能量变换器的工作特性 / 61
- 3.3 混合励磁电机 / 63
  - 3.3.1 混合励磁电机的结构 / 63
  - 3.3.2 混合励磁电动机的工作原理 / 65
  - 3.3.3 混合励磁电机的调速特性 / 66
- 3.4 多相电机 / 69
  - 3.4.1 多相电机的电路结构 / 69
  - 3.4.2 多相电机谐波磁场分析 / 71
  - 3.4.3 多相电机变频调速系统的特点 / 73
- 3.5 轮毂/轮边电机 / 73
  - 3.5.1 轮毂/轮边电机的驱动方式 / 73
  - 3.5.2 轮毂/轮边电动机的工作原理 / 74
  - 3.5.3 轮毂/轮边电机驱动系统的转矩分配 / 76
- 3.6 新型磁性材料在电机中的应用 / 78
  - 3.6.1 新型磁性材料研究的意义 / 78
  - 3.6.2 非晶合金材料在电机中的应用 / 79
  - 3.6.3 软磁复合材料在电机中的应用 / 80
- 参考文献 / 83

## 第 4 章 新能源汽车电机产品化设计方法 / 85

- 4.1 概述 / 85
  - 4.2 新能源汽车电机产品化设计理念及设计准则 / 86
  - 4.3 多领域协同仿真、多层面集成优化的新能源汽车电机产品化设计验证技术 / 87
    - 4.3.1 车用电机产品化设计的主要步骤 / 87
    - 4.3.2 车用电机的概念设计与结构仿真 / 87
    - 4.3.3 车用电机多物理场分析计算与设计方案的验证 / 92
    - 4.3.4 车用电机系统多层面协同仿真测试验证 / 96
  - 4.4 车用牵引电机设计验证实例 / 100
    - 4.4.1 车用牵引电机的概念设计 / 100
    - 4.4.2 车用牵引电机的仿真分析与验证 / 102
    - 4.4.3 车用牵引电机的性能测试验证 / 104
- 参考文献 / 106

## 第 5 章 电力电子技术与变流器原理 / 108

- 5.1 概述 / 108
  - 5.2 电力电子器件 / 109
    - 5.2.1 功率二极管 / 110
    - 5.2.2 功率场效应晶体管(MOSFET) / 112
    - 5.2.3 绝缘栅双极晶体管(IGBT) / 115
    - 5.2.4 MOS 门极关断晶闸管(MCT) / 120
  - 5.3 变流器技术 / 122
    - 5.3.1 整流电路 / 122
    - 5.3.2 直流斩波器 / 129
    - 5.3.3 逆变电路 / 142
- 参考文献 / 163

## 第 6 章 车用变流器应用技术 / 164

- 6.1 概述 / 164
- 6.2 功率电路 / 164
  - 6.2.1 功率模块应用技术 / 164
  - 6.2.2 电容器应用技术 / 167
  - 6.2.3 功率母排技术 / 173
  - 6.2.4 冷却技术 / 175
  - 6.2.5 电力电子模块集成技术 / 183

- 6.3 IGBT 驱动与保护电路 / 186
    - 6.3.1 IGBT 的损坏机理及保护方式 / 186
    - 6.3.2 IGBT 驱动与保护电路的基本要求 / 189
    - 6.3.3 典型 IGBT 驱动与保护电路 / 190
  - 6.4 控制器芯片(MCU) / 200
    - 6.4.1 德州仪器控制器芯片 TMS320F28335 / 200
    - 6.4.2 英飞凌控制器芯片 TC 1797 / 202
    - 6.4.3 飞思卡尔控制器芯片 MPC5675K / 207
  - 6.5 变流器在新能源汽车上的应用举例 / 213
    - 6.5.1 太阳能新能源汽车功率变换器 / 213
    - 6.5.2 普锐斯混合动力车辆变换器 / 214
    - 6.5.3 燃料电池汽车变换器 / 216
- 参考文献 / 220

## 第 7 章 车用电机控制技术 / 221

- 7.1 概述 / 221
  - 7.2 直流电动机控制技术 / 222
    - 7.2.1 典型直流电动机调速系统 / 223
    - 7.2.2 应用举例 / 224
  - 7.3 交流异步电动机控制技术 / 225
    - 7.3.1 基于转子磁链定向的异步电动机矢量控制技术 / 226
    - 7.3.2 基于定子磁链定向的异步电动机直接转矩控制技术 / 239
    - 7.3.3 异步电动机无速度传感器控制技术 / 248
    - 7.3.4 应用举例 / 251
  - 7.4 交流永磁电动机控制技术 / 251
    - 7.4.1 无刷直流电动机控制技术 / 252
    - 7.4.2 永磁同步电动机控制技术 / 259
    - 7.4.3 应用举例 / 278
  - 7.5 开关磁阻电动机控制技术 / 279
    - 7.5.1 开关磁阻电动机控制原理 / 279
    - 7.5.2 典型开关磁阻电动机调速系统 / 281
    - 7.5.3 应用举例 / 283
- 参考文献 / 283

## 第 8 章 车用电机智能控制技术 / 285

- 8.1 概述 / 285

- 8.2 模糊控制技术及其应用 / 286
- 8.3 神经网络控制技术及其应用 / 289
- 8.4 专家系统控制技术及其应用 / 293
- 参考文献 / 295

## 第 9 章 新能源汽车电机及其控制系统参数设计 / 296

- 9.1 概述 / 296
- 9.2 车用电机及其驱动系统性能匹配 / 296
  - 9.2.1 电动汽车典型运行工况 / 296
  - 9.2.2 车用电机及其控制系统性能匹配计算 / 298
- 9.3 纯电驱动电动汽车用电机及传动系统典型方案 / 301
  - 9.3.1 牵引电机与减速器集成方案 / 301
  - 9.3.2 牵引电机与变速器集成方案 / 302
  - 9.3.3 牵引电机与电力电子集成方案 / 304
  - 9.3.4 三种动力总成系统对比 / 305
- 参考文献 / 306

## 第 10 章 新能源汽车电机及其控制系统应用 / 307

- 10.1 概述 / 307
- 10.2 混合动力轿用电机及其驱动系统应用 / 308
  - 10.2.1 微混/弱混合动力轿车 / 308
  - 10.2.2 中度混合动力轿车 / 311
  - 10.2.3 深度混合动力轿车 / 314
- 10.3 混合动力客用电机及其驱动系统应用 / 317
  - 10.3.1 中度混合动力客车 / 317
  - 10.3.2 深度混合动力客车 / 321
- 10.4 纯电驱动电动轿用电机及其驱动系统应用 / 323
  - 10.4.1 微型纯电动轿车 / 323
  - 10.4.2 纯电动轿车 / 324
  - 10.4.3 燃料电池轿车 / 326

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 概述

我国《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》中明确了节能与新能源汽车的定义:节能汽车是指以内燃机为主要动力系统,综合工况燃料消耗量提前达到下一阶段目标值标准的汽车。新能源汽车是指采用新型动力系统,完全或主要依靠新型能源驱动的汽车。《规划》所指新能源汽车主要包括纯电动汽车、插电式混合动力汽车及燃料电池汽车。无论是节能汽车还是新能源汽车,车用电机及其控制系统既是关键核心部件,又是共性部件。本书从车用电机及其控制系统应用角度出发,所涉及的新能源汽车应用涵盖了纯电动汽车、燃料电池汽车和混合动力汽车三大类,这类新能源汽车以电池为动力源,全部或部分由电机驱动,又称为电动汽车。

按照国际电工委员会电力机车技术委员会对电动汽车的定义,电动汽车指以电能为动力的汽车,一般采用高效率动力电池或燃料电池为动力源,以电驱动系统作为主要或辅助的能量变换和动力传输的途径。由于电能是二次能源,可来源于风能、水能、核能、热能、太阳能等多种方式,因此电动汽车排放相对于传统燃油汽车大大降低,其中纯电动汽车和燃料电池汽车更是零排放汽车。

新能源汽车是集机械、电气、化学等领域中的高新技术于一体,是汽车、电力拖动、功率电子、自动控制、化学电源、计算机、新能源、新材料等工程技术中最新成果的产物。车用电机及其控制系统是电动汽车动力传动部件的核心关键部件之一,对于电动汽车的发展和产业化进程至关重要。与传统电机相比,新能源汽车用电机工作环境复杂、要求高,需要先进的设计与制造技术的支撑,这对传统电机行业提出了挑战,也提供了机遇。应用于汽车的电机工作状态与工作环境都更加复杂,要求一个电机既作为发电机,又作为电动机工作,而且工作在整个速度与转矩平面上;要求电机系统具有高的功率密度、宽的高效工作区;并且还须抗振、低噪声、可靠性好、价格低。

本章将介绍三大类新能源汽车特点及其在国内外的发展历史与现状,归纳出新能源汽车运行工况对电机及其控制系统的特点和要求;通过对比分析国内外车用电机及其控

制系统的发展现状,归纳出车用电机及其控制系统的发展趋势。

## 1.2 新能源汽车分类与特点

按照动力源的不同,新能源汽车主要分为纯电动汽车、混合动力汽车、燃料电池汽车三大类车型。纯电动汽车与传统燃油汽车的最大区别是动力系统的差别,纯电动汽车的动力系统装有蓄电池、牵引电机及其控制系统和能量管理系统等,且能够实现车辆减速制动时的能量回收。混合动力汽车主要指利用汽油机、柴油机或燃气轮机等技术与电机的组合作为动力能源的汽车,其突出的优点是发动机工作在经济工况区,排放低,燃油消耗量少;同时可以回收车辆制动减速时的能量。混合动力汽车被认为是当代汽车工业为保护大气环境及资源利用而采取的重大举措,近年来在国外得到了长足的发展,是当前最具产业化前景的电动汽车。燃料电池汽车的动力系统主要由燃料系统、空气供给系统、燃料电池组、整车动力总成控制系统、牵引电机及其控制系统、DC/DC 变换器和蓄电池等组成。由于采用燃料电池作为动力源,可实现完全零排放,被认为是最具发展前景的新能源汽车。

### 1.2.1 纯电动汽车

纯电动汽车,又称蓄电池电动汽车、二次电池电动汽车,是以蓄电池作为主要驱动能源,或者附加一种储能器的电动汽车,其结构形式如图 1-1 所示。

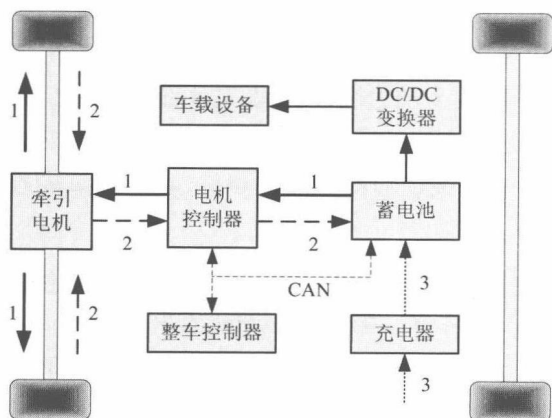


图 1-1 纯电动汽车结构形式

图 1-1 中,模式 1 为电动运行模式,由动力蓄电池输出电能,通过电机控制器进行电能变换,控制牵引电机运行,牵引电机驱动通过减速或变速装置将动力传输至车轮,驱动车轮运行;模式 2 为制动运行模式,当车辆减速或停车时,由电机控制器控制牵引电机运行于发电状态,将机械能转化为电能并存储于动力蓄电池;模式 3 为外接充电模式,由车载充电装置接入外部电源向动力蓄电池充电。在纯电动汽车控制方面,由整车控制器通过 CAN 总线,协调动力蓄电池和电机控制器的能量分配和车辆的安全控制,整车控制器的指令来源于驾驶员的加速踏板和挡位等信号。

纯电动汽车的优点有:

- ① 零排放、无污染、低噪声。



- ② 结构简单,使用维修方便。
- ③ 直接采用电机驱动,能量转换效率高;同时可回收制动能量,提高了能量的利用效率。
- ④ 动力电池可利用夜间进行充电,对电网起到“削峰填谷”的作用。

### 1.2.2 混合动力汽车

混合动力汽车,又称复合动力汽车,是由传统燃油与一种或一种以上的储能器作驱动源,且至少有一种储能器能够提供电能的车辆。

按照动力系统能量流和功率流的配置结构关系,混合动力汽车分为串联、并联、混联三种主要结构形式。按照两种不同能量的搭配比例不同,混合动力汽车又可分为轻度混合动力、中度混合动力、重度混合动力和插电式混合动力四种类型。其中,重度混合动力的代表车型有丰田普锐斯(Prius)等,插电式混合动力的代表车型有雪佛兰沃蓝达(Volt)等。

混合动力汽车的主要特点在于:

- ① 可采用小排量的发动机,降低了燃油消耗。
- ② 通过控制策略优化,使发动机经常工作在高效低排放区,提高了能量转换效率,降低了排放。
- ③ 将制动能量回收到蓄电池中再次利用,降低了燃油消耗。
- ④ 某些混合动力汽车在市区可关停内燃机,由电机单独驱动,实现“零”排放。
- ⑤ 电机和内燃机联合驱动,提高了车辆动力性。
- ⑥ 利用现有的加油设施,具有与传统燃油汽车相同的续驶里程。

以下分别对串联、并联和混联三种主要的混合动力结构形式进行简要描述。

#### 1.2.2.1 串联式混合动力汽车

发动机驱动发电机,电动机使用发电机发出的电能来驱动车轮,因为功率是以串联的方式流向驱动车轮的,所以称为串联式混合动力系统,如图1-2所示。由于发动机的功率和电动机的功率是串联而成的,发动机不直接将动力传输至车轮,而是通过驱动发电机以电能耦合的形式提供动力。串联式混合动力系统可以使用小功率输出的发动机,并且使其在相对稳定的高效率工作区间内工作,从而产生和提供电能给电动机,给蓄电池充电,因此串联式混合动力汽车又称为里程延长式混合动力汽车。

图1-2中,模式1为发动机发电机组通过发电机控制器向动力蓄电池充电,同时可直接供给牵引电机控制器,控制牵引电机驱动车辆运行;模式2为制动运行模式;模式3为停车充电模式,均与纯电动汽车发电模式相同。

#### 1.2.2.2 并联式混合动力汽车

在并联式混合动力系统中,发动机和电动机都可用于驱动车轮,车辆根据当时工况来选择这两种功率输出,如图1-3所示。因为功率是并联输送到车轮的,所以称为并联式