



普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

电动汽车电机系统 原理与测试技术

◎ 宋强 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

电动汽车电机系统原理与测试技术

宋 强 等编著



机械工业出版社

本书对国内外日益发展的电动汽车电机系统的原理、结构和测试技术进行了基本阐述,分析了测量误差理论,介绍了试验系统的设计方法和试验信号测试与处理技术,并在此基础上,详细阐述了专用实验设备的工作原理和应用方法;介绍了电机关键参数,如转速、转矩、电压、电流、温升、电感、惯量动静态测试方法,并对涉及电机系统产业化发展的温湿度、防水防尘、振动噪声、电磁兼容等方面的试验参数和试验方法进行了分析。书中最后介绍了现代试验新技术及其在电机测试中的应用。

本书可作为高等院校机械工程、车辆工程、交通运输等专业本科生和研究生的教材及技术参考书,也适合相关科研机构和汽车行业的技术人员,以及对电动汽车驱动电机系统感兴趣的读者参考。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车电机系统原理与测试技术 / 宋强等编著.

—北京:机械工业出版社, 2016. 4

普通高等教育“十三五”汽车类规划教材

ISBN 978-7-111-53311-

I. ①电… II. ①宋… III. ①电动汽车—
电机—高等学校—教材 IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 061503 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:何士娟 责任编辑:何士娟 张利萍

责任校对:张晓蓉 封面设计:张 静

责任印制:乔 宇

北京铭成印刷有限公司印刷

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20.5 印张 499 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-53311-5

定价:49.80 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:010-88379833 机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649 机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

发展电动汽车技术有利于汽车行业发展和社会进步,十几年来,电动汽车技术获得了各个国家的大力支持,国内外所有汽车厂商都为此倾注了大量的时间、人力、物力和财力、作为电动汽车三大核心部件之一的驱动电机系统,是电动汽车的心脏,对于电动汽车整车行驶的动力性、经济性、安全性、操纵稳定性等性能具有重大影响。至今,我国已自主开发了永磁同步电机、交流异步电机和开关磁阻电机等满足各类电动汽车需求的驱动电机系统产品,基本形成了具有核心竞争力的批量生产和配套能力。

电动汽车用驱动电机系统的控制方式、性能评价体系和试验方法完全不同于传统工业用电机系统,传统工业用电机系统的性能试验测试方法也无法照搬应用于电动汽车驱动电机系统的测试。虽然新修订的国家标准 GB/T 18488.1—2015《电动汽车用驱动电机系统第1部分:技术条件》和 GB/T 18488.2—2015《电动汽车用驱动电机系统第2部分:试验方法》为车用驱动电机系统提出了数十项专用的性能指标和试验方法,但是在试验测试理论和试验设备工作原理及应用方面还需要做出必要的技术补充,因此,需要总结国内外的行业知识,编著专门著作论述电动汽车用驱动电机系统的试验测试技术,以便于为读者提供一个具有较高理论基础、系统的车用驱动电机系统性能试验测试体系。

在结构上,本书分为上下两篇。

上篇为基础篇,专注于试验设计和测试技术基本理论知识。第一章和第二章主要介绍电动汽车电传动系统的结构特点、工作特性和控制技术,使读者可以对电动汽车电传动系统有一个全面的认识。第三章介绍试验误差理论,涉及误差基本概念、不确定度误差分析和数值修约方法。第四章介绍了试验系统的动态特性、静态特性和负载耦合特性,分析了系统特性的参数指标和表达形式。第五章介绍了多因子试验、正交试验和均匀试验的试验设计方法。第六章介绍了试验信号的滤波、调理、传输、采集和试验数据的处理技术。

下篇为测试篇,专注于车用驱动电机系统试验设备及关键参数的测试方法。第七章介绍了测量仪表、转速转矩测量仪、电功率分析仪、测功机、直流电源、高低温和盐雾试验设备、振动试验设备等主要试验设备的工作原理。第八章介绍电机本体参数的测量方法。第九~十一章分别介绍了车用驱动电机系统电量参数(如电压、电流、电功率、绝缘、耐压等)、非电量参数(如转速、转矩、机械功率、温升、磁场、振动、噪声等)的测量,以及基于台架的输入输出特性试验方法。第十二章介绍了车用电机驱动系统的最新试验测试和仿真技术。

本书专门针对电动汽车驱动电机系统的工作特点和性能要求,从试验测试理论分析逐渐引导至试验设备及测试方法的应用,使读者在理论上和实际中能够受益。书中采用了大量的图表和曲线,便于读者对知识的理解和对试验测试技术的掌握。书中介绍的相关试验和数据分析方法,在技术实施上具有可行性和先进性,可以有效指导试验设计,便于读者使用。本书注重国内外新技术的应用,书中所介绍的内容均为国内外现阶段的技术,与实际结合紧密,并充分体现了国内外的技术发展趋势,为读者对相关知识的进一步学习奠定了基础,便于读者进一步的综合应用。



本书在编写过程中得到了北京理工大学电动车辆国家工程实验室以及北京市电动车辆协同创新中心的支持，并获得了“国家国际科技合作专项(2014DFG70840)”和“国家自然科学基金(51575041)”的资助。其中，宋强编写了本书上篇的第一章、第二章、第三章、第四章、第六章，以及下篇的第七章、第八章、第九章、第十一章、第十二章，河北师范大学王再宙编写了本书上篇的第五章，北京理工大学王志福编写了本书下篇的第十章。北京理工大学翟丽、郭汾、李军求、董玉刚、王红、曾普、罗淋、吴小同、史渊芳、杨凯丽、翟继亮、靳建波、王文俊、吕晨光、高朋、叶山顶、贾超、赵凭、隋平阳、万海桐、李松等人员也参与了该书的编写和文字整理工作，对以上人员的辛勤工作表示感谢。同时，也感谢孙逢春教授和张承宁教授对此书编著工作的指导和帮助。

书后列出了主要的参考文献，限于篇幅，难免著录不全，在此，对本书涉及内容的参考文献作者表示诚挚的谢意。

本书可作为高等院校机械工程、车辆工程、交通运输等专业本科生和研究生的教材及参考书，也适合相关科研机构和技术人员以及对电动汽车驱动电机系统感兴趣的读者参考。

由于编者水平有限，书中不当之处在所难免，殷切希望使用本书的师生和广大读者对其中的疏漏之处予以批评指正，并将意见和建议反馈给我们，以便及时修订完善。

编 者

目 录

前 言

上篇 基 础 篇

第一章 概述	3
第一节 电动汽车发展特点、分类及基本特征	3
一、电动汽车特点	3
二、电动汽车分类及基本特征	3
第二节 电动汽车电传动系统典型结构	5
一、电动汽车的系统结构	5
二、电动汽车电机传动系统典型结构	6
三、新型机电耦合结构	7
第三节 电动汽车用驱动电机系统工作特性	9
一、电机系统的工作特性要求	9
二、电机系统的主要技术特性	11
第二章 车用驱动电机类型和控制	12
第一节 车用驱动电机类型及特点	12
一、直流驱动电机	13
二、异步驱动电机	13
三、永磁同步驱动电机	14
四、开关磁阻驱动电机	14
第二节 电力电子功率器件	15
一、常用电力电子功率器件	15
二、IGBT 的原理及物理模型	15
三、软开关变换技术(Soft-Switching Conversion)	18
第三节 车用电机控制技术简介	18
一、VVVF 控制技术	18
二、矢量控制技术	18
三、直接转矩控制技术	19
第三章 测量误差理论	20
第一节 概述	20
一、测量的定义	20
二、测量方法的分类	21
第二节 测量误差的概念和分类	23
一、测量误差概念	23
二、测量误差分类	24
第三节 测量不确定度分析	25
第四节 测量误差分析处理	27



第五节 数值修约及容差	29
一、数值修约规则及其在电机试验计算中的应用	29
二、电机性能指标考核标准容差的一般性规定	32
第四章 试验测试系统特性分析	35
第一节 基本概念	35
第二节 试验测试系统的静态特性	36
第三节 试验测试系统的动态特性	38
第四节 试验测试系统的动态响应	39
第五节 试验测试系统特性的测量	41
一、测试系统静态特性的测定	41
二、测试系统动态特性的测定	42
第六节 试验测试系统的负载耦合特性	44
第七节 不失真测量	49
第五章 试验设计理论	51
第一节 基本概念	51
一、试验研究的基本要求	51
二、与试验有关的术语	52
第二节 多因子试验设计	52
一、因子设计的概念	52
二、 2^k 因子设计	54
第三节 正交试验设计	57
一、正交表	57
二、正交设计的基本方法	59
三、混合水平正交设计	62
第四节 均匀试验设计	65
第六章 信号测试与处理技术	70
第一节 基本概念	70
一、信号的分类与描述	70
二、采样定理及频率混叠	74
第二节 信号分析	75
一、信号的时域分析	75
二、信号的频域分析	82
第三节 信号调理与传输	88
一、信号调理	88
二、信号传输	93
第四节 滤波技术	97
一、概述	97
二、滤波器的一般特性	98
三、滤波器应用类型	100
第五节 数据采集系统设计	102
一、系统设计的基本原则	102
二、数据采集系统的基本结构	102
三、数据采集系统的主要性能指标	104

四、数据采集系统标定的概念	106
第六节 试验数据的插值及图形表示	107
一、试验数据的插值表示	107
二、试验数据的图形表示	109
第七节 试验数据的回归处理	111
一、线性回归处理	111
二、非线性回归处理	117
第八节 异常数据的处理	117
一、拉依达 (Layard) 准则	118
二、肖维纳 (Chauvenet) 准则	118
三、格拉布斯 (Grubbs) 准则	119
四、三种取舍准则的讨论	119

下篇 测试篇

第七章 主要试验仪器和设备	123
第一节 概述	123
一、测试用仪器仪表	123
二、仪器仪表的主要性能指标	124
三、仪器仪表板面标记说明	125
四、仪器仪表的选用	126
五、测量准确度和精密度	126
第二节 指示式仪表	127
第三节 数字式仪表	128
一、数字化测量技术的发展	128
二、数字式仪表的结构	129
三、数字式仪表的特点	129
四、数字式仪表的分类	130
第四节 转速转矩测量仪	130
一、相位差式转速转矩仪	130
二、应变片式转速转矩仪	132
第五节 电功率分析仪	133
第六节 测功机	135
一、磁粉测功机	135
二、水力测功机	136
三、电涡流测功机	137
四、直流电力测功机	139
五、交流电力测功机	139
第七节 直流电源	141
第八节 环境适应性试验设备	143
一、环境适应性设备的选择原则	143
二、高低温试验设备	144
三、盐雾试验设备	145
四、防水试验设备	147



五、防尘试验设备	149
第九节 振动噪声试验设备	151
一、振动试验设备	151
二、噪声测量设备	156
第八章 电机参数的测试方法	161
第一节 电机的转动惯量和时间常数	161
一、电机转子转动惯量的测定	161
二、电机时间常数的测量	165
第二节 电机系统杂散损耗测试方法	166
一、测功机法	167
二、回馈法	167
三、反转法	168
第三节 直流电机参数的测试方法	170
一、电刷中性线位置的测定	170
二、无火花换向区域的测定	170
三、整流电源供电时电机的电压、电流纹波因数及电流波形因数的测定	171
四、电枢绕组电感的测量	172
五、主磁路时间常数的测定	174
六、励磁绕组电感的测定	175
七、电机的轴电压测定	176
第四节 异步电机参数的测试方法	176
一、空载试验	177
二、短路(堵转)试验	178
第五节 永磁同步电机参数的测试方法	180
一、直接负载法——稳态参数的测定	180
二、电压积分法——稳态参数的测定	181
三、直流衰减法——稳态和瞬态参数的测定	183
第九章 车用电机系统电量的测量	185
第一节 电量测量传感器及其特性	185
一、霍尔式电压电流传感器	185
二、霍尔传感器的工作原理	185
三、霍尔传感器/变换器的连接方式	186
第二节 电压与电流的测量	188
一、指示式仪表	188
二、示波器	188
三、电压、电流变换器	190
第三节 电功率的测量	190
一、直流电机电功率的测量	190
二、单相交流电机电功率测量	191
三、三相交流电机电功率的测量	192
第四节 频率和相位的测量	194
一、频率测量	194
二、相位的测量	196

第五节 电阻的测量	199
一、电阻的测量方法	199
二、提高测量范围和精度的方法	204
第六节 非正弦电量的测量	204
一、谐波分析	204
二、非正弦电压与电流的测量	206
三、功率与功率因数的测量	209
四、谐波的测量	210
第七节 耐电压试验方法	212
一、耐电压试验设备	212
二、工频耐电压试验	213
三、冲击耐电压试验	215
第八节 绝缘电阻的测量	216
第十章 车用电机系统非电量的测量	219
第一节 转速测量原理及实现	219
一、转速表测速	219
二、光电数字测速	221
三、闪频法测速	222
四、基于霍尔传感器的速度测量	224
五、转差率的测量	224
六、瞬时转速的测量	225
第二节 转矩测量原理及实现	226
一、测量转矩的方法	226
二、常用转矩测量装置的类型和工作原理	228
第三节 电机温度及工作温升的测量方法	237
一、电阻法	237
二、检温计法	238
三、温度计法	239
四、叠加法	240
第四节 电机磁场的测量方法	241
一、探测线圈法	242
二、霍尔效应法	243
三、磁通计法	245
第五节 电机振动试验	247
一、电机振动的测定方法及限值	247
二、车用电机系统的扫频振动和随机振动试验方法	248
第六节 电机噪声的测量方法	248
一、电机噪声的物理量度	249
二、电机噪声的测定方法及限值	251
第十一章 车用电机系统台架试验	255
第一节 试验台架结构	255
第二节 关键参数的台架试验方法	258
一、驱动电机及控制器效率的测量	258



二、转速/转矩工作测试点的选取	259
三、测量参数的选择	260
四、参数测量过程中的注意事项	260
五、关键参数的台架试验和验证	261
六、电机系统的馈电性能测试	264
第三节 基于整车行驶工况的测试技术	264
第四节 可靠性耐久性试验简介	266
一、可靠性数量特征	266
二、常见的寿命分布类型	267
三、电机系统的失效模式	268
四、电机系统的可靠性串联模型	270
五、电机系统的可靠性影响因素	270
六、加速寿命试验基本理论	271
第十二章 车用电机系统的现代试验测试技术	276
第一节 多通道数字信号测试技术	276
一、与单片 DSP 构成的时分多通道模式	277
二、与多片 DSP 构成的时分多通道模式	277
三、多片 A-D 与单片 DSP 构成的时分多通道模式	277
四、多片 A-D 与多片 DSP 构成的时分多通道模式	278
第二节 智能仪表	278
一、定义	279
二、组成	279
三、功能特点	279
四、常用的智能仪表	280
五、智能仪表的设计	282
六、智能仪表的发展	283
第三节 接口技术及现场总线发展简介	283
一、接口技术	283
二、总线技术发展简介	286
第四节 PLC 及其在电机测试中的应用	288
一、PLC 概述	288
二、PLC 工作原理	290
三、PLC 在电机测试中的应用	291
第五节 自动测试技术	293
一、自动测试系统硬件拓扑结构	293
二、自动测试系统中的数据采集系统	294
三、电机运行状态与自动控制	297
四、计算机控制输出通道	298
五、电机自动测试系统软件	299
第六节 硬件在环仿真试验技术	302
一、硬件在环仿真概述	302
二、硬件在环仿真的关键技术	304
三、常用硬件在环仿真系统简介	305

第七节 虚拟仪器技术	309
一、虚拟仪器定义	309
二、虚拟仪器的特点	310
三、虚拟仪器的构成方式	310
四、虚拟仪器的软件结构	311
五、虚拟仪器未来的发展	311
参考文献	313

上 篇

基 础 篇

第一章 概 述

自世界上第一辆汽车于 1886 年诞生于德国至今已有百余年的历史。如今,汽车已经与人们的日常生活和工作密不可分。然而,在汽车保有量不断上升的今天,汽车尾气在大气污染中的分担率也越来越高。如果仍然采用传统的内燃机技术发展汽车工业,将会给燃油的需求和环境保护造成巨大压力。据有关资料显示,城市大气中 CO 的 82%、NO_x 的 48%、HC 的 58% 和微粒的 8% 均来自汽车排放物,严格限制汽车排放备受世界各国政府与人民的关注。研制开发更节能、更环保、使用替代能源的新型汽车,成为各大汽车公司的当务之急,电动汽车就是其中的一种类型。

第一节 电动汽车发展特点、分类及基本特征

一、电动汽车特点

电动汽车可以部分或者全部地利用电能。电能可以通过其他形式的能量转换获得,包括水能、内能、原子能、风能、化学能及光能等,可以减少石油资源的使用量,而且这些新能源不会产生直接有害的排放和温室气体。电动汽车还可以充分利用晚间电网用电低谷时富余的电力充电,使发电设备的效能在夜间也能充分利用,大大提高其经济效益。有研究表明,同样的原油经过粗炼,送至电厂发电,经充入电池,再由电池驱动汽车,其能量利用效率比经过精炼变为汽油,再经汽油机驱动汽车高,因此发展电动汽车有利于节约能源。

电动汽车直接排放物中的有害物质很少,甚至可以实现零排放,减小对环境的污染。在全球范围内,由电动汽车产生的有害排放物比燃油汽车少得多,同时,电动汽车的使用也为能源全生命周期中污染物的排放提供了集中处理的可能。在发电过程中产生的排放物,通过集中处理的方法,可以较为容易地被收集起来。

电动汽车的另外一个明显优势是低噪声污染,电动汽车(尤其是纯电动汽车)采用了工作噪声低的电机系统,从而避免了燃油车发动机和复杂机械传动装置工作时所产生的噪声污染。

二、电动汽车分类及基本特征

按照目前技术状态和车辆驱动原理,电动汽车划分为纯电动汽车、燃料电池电动汽车和混合动力电动汽车三种类型。

1. 纯电动汽车

纯电动汽车又称为蓄电池电动汽车,是一种仅采用蓄电池作为储能动力源的汽车。电池通过功率变换装置向电机提供电能,电机经传动装置带动车轮旋转从而推动汽车运动(图 1-1)。纯电

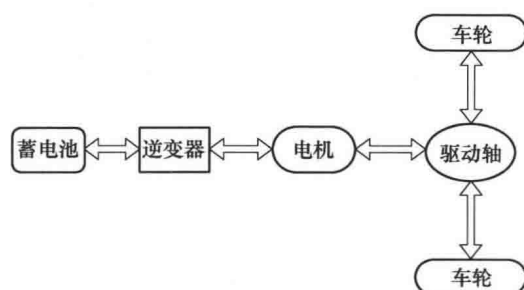


图 1-1 纯电动汽车



动汽车主要由蓄电池、电池管理系统、驱动电机和传动系统、车身和底盘、安全保护系统等构成。电动汽车用蓄电池主要有磷酸铁锂电池、三元材料电池、钛酸锂电池、铅酸电池、锌空气电池、镍氢电池、镍镉电池、钠硫电池等。

2. 燃料电池电动汽车

燃料电池电动汽车是以氢为燃料，氢气与大气中的氧气发生化学反应，通过电极将化学能转化为电能，以电能作为能源驱动汽车前进。燃料电池在化学反应过程中不会产生有害排放物，具有高效率、无污染、零排放、无噪声等优势。燃料电池的能量转换效率比内燃机要高2~3倍，因此，从能源利用和环境保护方面看，燃料电池汽车是一种理想的车辆。

燃料电池汽车的基本结构按照驱动形式可分为纯燃料电池驱动和混合驱动两种；按照能量来源可分为车载纯氢和燃料重整两种；根据燃料电池所提供的功率占整车总需求功率比例的不同，燃料电池混合动力汽车可分为能量混合型 and 功率混合型两种。

3. 混合动力电动汽车

目前还找不到理想的高质量比能量和高质量比功率的车载电源，电动汽车的发展暂时受到限制。在此条件下，混合动力电动汽车获得快速发展，混合动力电动汽车既是一种过渡车型，也是一种独立车型。根据国际机电委员会下属的电力机动车委员会的建议，混合动力电动汽车是指有两种和两种以上的储能器、能源或转换器做驱动能源，其中至少有一种能提供电能的车辆。根据这个通用定义，混合动力电动汽车可以是汽油机和蓄电池混合、柴油机和蓄电池混合、柴油机和燃料电池混合、蓄电池和超级电容器混合、蓄电池和飞轮混合，以及不同的蓄电池混合等。但是一般认为混合动力电动汽车是既有内燃机又有电机驱动的车辆。

混合动力电动汽车能够把电动汽车的续驶里程延长，而且能够快速添加汽油和柴油，并且内燃机稳定的工况使得对其排放气体的成分易于控制，不过混合动力电动汽车结构相对复杂(图1-2)，也不是完全零排放。与燃油车相比，在相同行驶里程条件下，它的燃油消耗和排放要小得多，也可以工作在零排放区域。

混合动力电动车按照能量合成的形式主要分为串联式、并联式、混联式和复合式。

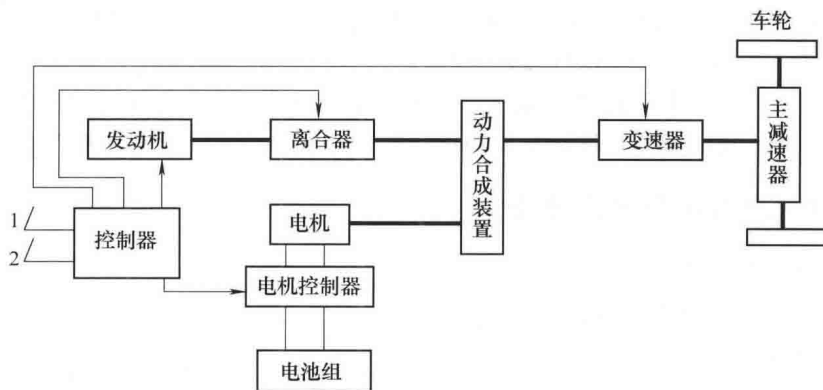


图 1-2 混合动力电动汽车

1—加速踏板 2—制动踏板 — 机械连接 - 电气连接

除了这三种主要类型的电动汽车，还有几种运行模式介于这三者之间的电动汽车类型，包括增程式电动汽车、插电式电动汽车和双模电动汽车等。增程式电动汽车通常

运行在纯电池电动汽车模式，而当在连续行驶里程不足时，发动机和发电机集成的动力推进系统会以汽油、生物柴油或乙醇等为媒介使车辆运行在串联式混合动力电动汽车模式；插电式电动汽车在短途行驶时消耗存储电能，而在行驶里程较长时运行在以内燃机为主的混合动力电动汽车模式，车辆通常采用并联式或者混联式，而且多为重度混合型；双模电动汽车允许驾驶人采取更加自主的决策，在储蓄电量允许的条件下，驾驶人可以根据实际路况和动力性要求在纯电动和混合动力模式之间切换，以求满足排放标准、动力能和驾驶体验的不同要求。

第二节 电动汽车电传动系统典型结构

一、电动汽车的系统结构

一般地，如果把纯电动汽车看成是一个大系统，则该系统主要由电力驱动子系统、电源子系统和辅助子系统组成。图 1-3 所示为一种典型的电动汽车系统组成。图中双线表示机械连接，粗线表示电气连接，细线表示控制信号连接，线上的箭头表示电功率或控制信号的传输方向。

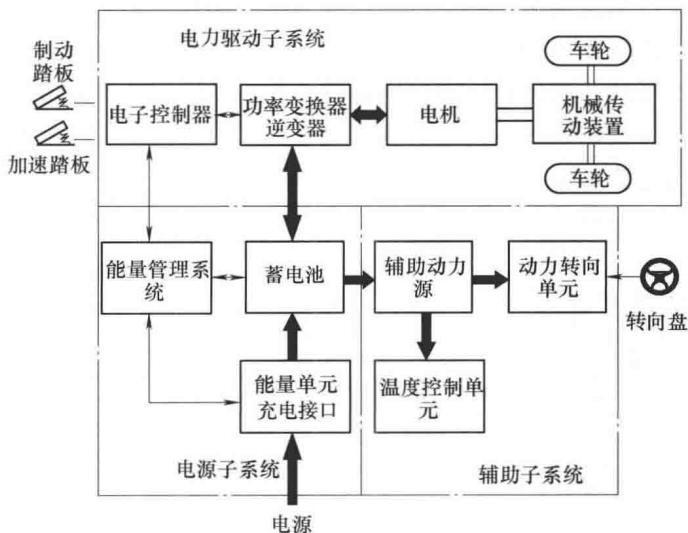


图 1-3 纯电动汽车系统简图

来自加速踏板的信号输入电子控制器并通过控制功率变换器（逆变器）来调节电机输出的转矩或转速，电机输出的转矩通过汽车传动系统驱动车轮转动。在汽车行驶时，蓄电池经功率变换器向电机供电。当电动汽车采用电制动时，驱动电机运行在发电状态，将汽车的部分动能转化为电能并回馈给蓄电池以对其充电，延长电动汽车的续驶里程。

电力驱动子系统（以后简称驱动系统）是电动汽车的核心，也是区别于内燃机汽车的最大不同点所在。一般地，驱动系统由电子控制器、功率变换器、驱动电机、机械传动装置及车轮等部分构成。驱动系统的功用是将存储在蓄电池中的电能高效地转化为车轮的动能进而推进汽车行驶，并能够在汽车减速制动或者下坡时，实现再生制动。电子控制器即电机调速