

新能源汽车驱动电机 与控制技术

● 主编 张之超 邹德伟

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

新能源汽车驱动电机与控制技术

主 编 张之超 邹德伟
副主编 周华英 郭三华 王艳超
参 编 徐加爽 徐 蕾 焦安霞

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源汽车驱动电机与控制技术 / 张之超, 邹德伟主编. —北京: 北京理工大学出版社,
2016.8

ISBN 978-7-5682-2960-9

I. ①新… II. ①张… ②邹… III. ①电动汽车-驱动机构-控制系统-高等学校-教材
IV. ①U469.720.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 201843 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京泽宇印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 8.5

字 数 / 197 千字

版 次 / 2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价 / 35.00 元

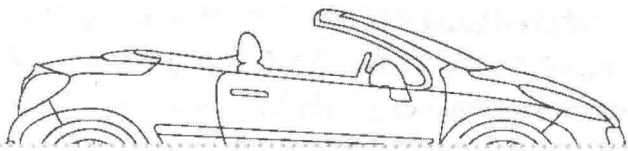
责任编辑 / 赵 岩

文案编辑 / 刘 佳

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 马振武

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换



前言

P R E F A C E

为了应对能源危机、环境污染与气候变暖等日益严重的问题，新能源汽车已经成为当前汽车产业发展的一大趋势；目前国家大力发展新能源汽车产业，各大汽车企业逐步加快新能源汽车的研发、生产和销售。随着新能源汽车走向市场，其对专业技能人才的需求也将不断增加，培养新能源汽车专业技能人才成为高等院校义不容辞的责任。

根据动力源的不同，新能源汽车包括电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车，虽然这三种类型的汽车不尽相同，但都有一项必不可少的关键技术：驱动电机及其控制技术，这也是新能源汽车在制造、生产、维修保养等方面的重要环节，同时也是高等院校新能源汽车专业人才培养目标的重要方向之一。

通过查阅书籍资料以及专业课程调研，了解到目前尚缺少较适合高等院校新能源汽车专业驱动电机与控制技术课程教学的理论教材，基于此，在总结了该课程一定教学经验的前提下，作者编写了本书，以期能对高等院校新能源汽车专业课程提供一定的理论支持，对驱动电机与控制技术课程的教学工作有所促进。

本书共 6 章。第 1 章对新能源汽车做了简要概述，着重介绍了新能源汽车用驱动电机的分类、电机驱动系统的结构组成及关键技术，并对其发展现状及趋势作了分析；第 2 章对新能源汽车常用的四种驱动电机，即直流电动机、交流感应电动机、交流永磁电动机和开关磁阻电动机进行了详细的阐述，主要包括结构认知、工作原理分析、性能特点比较及应用等几个方面，并介绍了驱动电机选型的相关依据与参数；第 3 章介绍了功率二极管、MOSFET、IGBT 三类功率变换器件及在新能源汽车上应用广泛的电能变换技术（直流斩波、整流和逆变），主要有电路结构、工作原理及应用分析等方面；第 4 章阐述了功率电路的功率模块、滤波电容等重要器件模块，分析了驱动电机及其控制器冷却系统的功能要求及设计方案，并对 IGBT 的损坏形式进行了分析，对驱动与保护电路的要求进行了总结；第 5 章详细分析阐述了常用驱动电机（直流电动机、感应电动机、永磁电动机和开关磁阻电动机）的控制技术，包括控制系统结构组成、调试方式、机械特性及典型应用等几个方面；第 6 章介绍了四种新型电动机——双机械端口能量变换器、混合励磁电动机、多相电机和轮毂/轮边电机，在与传统交直流电动机对比的基础上，对其结构、工作原理、特性等方面作了分析阐述。

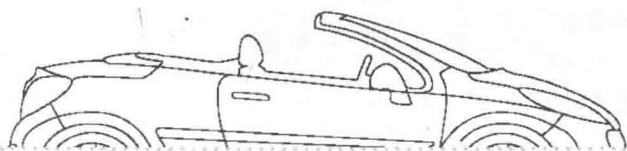
本书由张之超、邹德伟担任主编，周华英、郭三华、王艳超担任副主编，参与编写的还有徐加爽、徐蕾、焦安霞。具体分工如下：第 1 章由邹德伟编写，第 2、5 章由张之超编写，第 3 章由郭三华编写，第 4 章由王艳超编写，第 6 章由周华英编写。全书由张之超、

邹德伟统稿。

在本书的编写过程中，查阅引用了参考资料及网络上的相关内容，在此对所引用资料的作者表示感谢；本书第2章有18幅涉及电动机结构组成及原理分析的图片为鹏芑科技网站授权使用，在此对鹏芑科技网站和曹连芑教授表达诚挚的谢意，请各位读者尊重原创，勿将图片以任何形式用于他处，可登录网站 <http://www.pengky.cn/> 查询相关详细资料。

由于编者水平有限，书中不免有遗漏和不足之处，敬请各位读者批评指正。

编 者



目 录

C O N T E N T S

第 1 章 绪 论

1.1 新能源汽车的分类与特点	1
1.1.1 纯电动汽车	2
1.1.2 混合动力汽车	2
1.1.3 燃料电池汽车	4
1.2 驱动电机概述	5
1.2.1 新能源汽车对驱动电机的性能要求	5
1.2.2 驱动电机的分类	6
1.2.3 电机学基本定律	8
1.2.4 电机的基本性能参数	8
1.3 电机驱动系统的结构及关键技术	9
1.3.1 电机驱动系统结构组成	9
1.3.2 电机驱动系统关键技术	11
1.4 驱动电机系统的发展现状与未来趋势	14
1.4.1 驱动电机的发展现状及未来趋势	14
1.4.2 电机控制系统现状及未来趋势	16

第 2 章 常用驱动电机

2.1 直流电动机	18
2.1.1 直流电动机的结构	18
2.1.2 直流电动机的工作原理	20
2.1.3 直流电动机的励磁方式	21
2.1.4 直流电动机的特点及应用	22
2.2 交流感应电动机	24

2.2.1	感应电动机结构	24
2.2.2	感应电动机工作原理	26
2.2.3	交流感应电动机的性能特点	27
2.3	交流永磁电动机	28
2.3.1	交流永磁电动机概述	28
2.3.2	永磁同步电动机	31
2.3.3	无刷直流电动机	33
2.4	开关磁阻电动机	36
2.4.1	开关磁阻电动机结构分析	37
2.4.2	开关磁阻电动机的工作原理	37
2.4.3	开关磁阻电动机的性能特点	39
2.4.4	开关磁阻电动机的设计原则	40
2.5	驱动电机的选择	41
2.5.1	电动机类型的选择	41
2.5.2	额定电压的选择	43
2.5.3	额定转速的选择	43
2.5.4	额定功率和转矩的计算	44

第 3 章 功率变换器

3.1	功率半导体器件	46
3.1.1	功率二极管	46
3.1.2	功率场效应晶体管	49
3.1.3	绝缘栅双极型晶体管	52
3.2	DC/DC 变换器	54
3.2.1	工作原理与控制方式	54
3.2.2	降压斩波电路	55
3.2.3	升压斩波电路	55
3.2.4	升降压斩波电路	56
3.2.5	DC/DC 变换器的应用	57
3.3	AC/DC 变换器	58
3.3.1	不可控整流电路	58
3.3.2	PWM 整流电路	60
3.4	DC/AC 变换器	62
3.4.1	电压型 DC/AC 变换器	62
3.4.2	电流型 DC/AC 变换器	66

第4章 功率变换器应用技术

4.1 功率电路	67
4.1.1 功率模块应用技术	67
4.1.2 电容器应用技术	69
4.1.3 功率母排技术	73
4.1.4 电力电子模块集成技术	74
4.2 冷却技术	76
4.2.1 冷却方式的分析与选择	76
4.2.2 冷却要求	77
4.2.3 电动机和控制器损耗分析	78
4.2.4 冷却系统的设计	80
4.3 IGBT 驱动与保护电路	82
4.3.1 IGBT 的损坏机理与保护形式	82
4.3.2 IGBT 驱动与保护电路的基本要求	84

第5章 驱动电机控制技术

5.1 直流电动机控制技术	86
5.1.1 直流电动机机械特性参数	86
5.1.2 直流电动机控制方式	87
5.1.3 典型直流电动机控制系统	88
5.2 交流感应电动机控制技术	89
5.2.1 感应电动机调速原理	89
5.2.2 变压变频控制	90
5.2.3 矢量控制技术	91
5.2.4 直接转矩控制	95
5.3 交流永磁电动机控制技术	98
5.3.1 永磁同步电动机控制技术	98
5.3.2 无刷直流电动机控制技术	100
5.4 开关磁阻电动机控制技术	102
5.4.1 控制系统的结构组成	102
5.4.2 开关磁阻电动机的控制方式	103
5.4.3 开关磁阻电动机的机械特性	105
5.4.4 开关磁阻电动机调速系统的特点	106

5.4.5 典型开关磁阻电动机调速系统	106
---------------------------	-----

第 6 章 新型驱动电机

6.1 双机械端口能量变换器	108
6.1.1 双机械端口能量变换器结构	108
6.1.2 双机械端口能量变换器工作原理	109
6.1.3 双机械端口能量变换器控制策略分析	111
6.2 混合励磁电机	112
6.2.1 混合励磁电机的结构	112
6.2.2 混合励磁电机工作原理	115
6.2.3 混合励磁电机调速特性	116
6.3 多相电机	117
6.3.1 多相电机的结构	117
6.3.2 多相电机谐波磁场分析	119
6.3.3 多相电机变频调速系统的特点	120
6.4 轮毂/轮边电机	121
6.4.1 轮毂/轮边电机的驱动形式	121
6.4.2 轮毂/轮边电机工作原理	122
6.4.3 轮毂/轮边电机的特点及选择	123

参考文献

第 1 章

绪 论

随着人口的增加及生活质量的不断提高,汽车保有量也随之不断增长,而且从目前的发展趋势来看,汽车需求量会不断增加。传统燃油汽车是以汽油、柴油为主要能源,但从世界范围看,以石油为典型代表的能源危机日益凸显,在 20 世纪 20 年代有人预测全世界的石油能源还能利用 100 年,而到 1970 年石油可开采年数减少到 40 年。因此,开发出可以代替石油且能够满足需要的新能源以减少对石油的依赖,并增加燃油消耗少的节能车数量,成为各国当前迫在眉睫的任务。大气污染以及二氧化碳排放问题日益严重,而导致这些问题的主要原因——汽车尾气排放则越来越受到人民的关注,并成为亟须解决的问题。但目前传统汽车技术还无法改变这一现状,若要摆脱对石油能源的依赖,减轻大气污染,并改变传统汽车的不足,发展新能源汽车是必由之路。与传统汽车相比,新能源汽车是采用非常规的车用燃料作为动力来源(或使用常规的车用燃料,但采用新型车载动力装置),综合车辆的动力控制和驱动等方面的先进技术,形成的技术原理先进,具有新技术、新结构的汽车。

1.1 新能源汽车的分类与特点

按照动力源的不同,新能源汽车主要分为纯电动汽车、混合动力汽车和燃料电池汽车三大类。纯电动汽车与传统内燃机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主要由动力电池组、驱动电机及其控制系统等组成,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发动机与电动机的组合作为动力能源的汽车,其突出优点是发动机工作在经济工况区,排放量及燃油消耗量少,同时可以回收车辆减速制动时的能量;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。近年来在国外取得了长足的发展,是当前最具产业化的新能源汽车。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、驱动电机及其控制系统、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,可以实现完全的零污染、零排放,被认为是最具发展前景的新能源汽车。

1.1.1 纯电动汽车

纯电动汽车，又称为蓄电池电动汽车、二次电池电动汽车，是以蓄电池作为主要能量来源或附加一种储能器的电动汽车，其结构形式如图 1-1 所示。

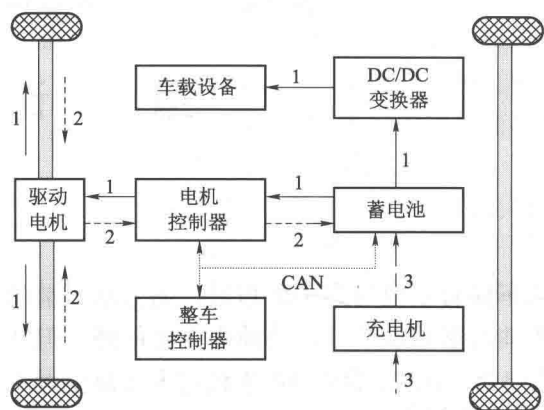


图 1-1 纯电动汽车结构形式

图 1-1 中，模式 1 为电动运行，由蓄电池输出电能，通过电机控制器进行电能变换，控制驱动电机运行，通过减速或变速装置将动力传输给车轮，驱动车辆运行；模式 2 为制动运行，当车辆减速或制动时，由电机控制器控制驱动电机运行于发电状态，将车轮动能转换为电能存储于蓄电池；模式 3 为外接充电模式，由车载充电机接入外部电源向蓄电池充电。对于电动汽车的控制，由整车控制器通过 CAN 总线，协调蓄电池和电机控制器的能量分配和车辆的运行控制，控制指令来自于加速踏板、制动踏板、方向盘和挡位等信号。

纯电动汽车的优点主要包括以下几个方面：

- 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；同时可以回收制动能量，提高了能量的利用效率。
- ④ 动力电池可以利用夜间进行充电，对电网能起到“削峰填谷”的作用。

1.1.2 混合动力汽车

混合动力汽车，又称为复合动力汽车，是指由传统发动机与一种或一种以上的储能器作为动力源，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、并联和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，混合动力汽车又可以分为轻度混合动力、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（Vlot）等。

混合动力汽车的主要特点包括：

- 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发动机，由电动机单独驱动，实现零排放。

- ⑤ 电动机和发动机联合驱动，提高了车辆的动力性能。
- 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。

1. 串联式混合动力汽车

对于串联式混合动力汽车，发动机驱动发电机，电动机使用发电机的电能驱动车轮，因为功率是以串联的方式流向驱动车轮，故称为串联式混合动力汽车，如图 1-2 所示。由于发动机的功率和电动机的功率是串联结构，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，同时给蓄电池充电，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 为发动机发电机总成通过发电机控制器向蓄电池充电，同时可以直接供给电机控制器，控制电动机驱动车辆运行；模式 2 为制动运行；模式 3 为停车充电。

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以驱动车轮，车辆根据行驶工况来选择功率输出方式，如图 1-3 所示。因为功率是并联输出到车轮，因此称为并联式混合动力系统。在这种系统中，蓄电池充电是通过转换电动机为发电机来实现的，利用蓄电池的电能来驱动车轮。虽然该系统结构简单，但是由于只有一台电机，所以该电机不能同时驱动车轮和向蓄电池充电。

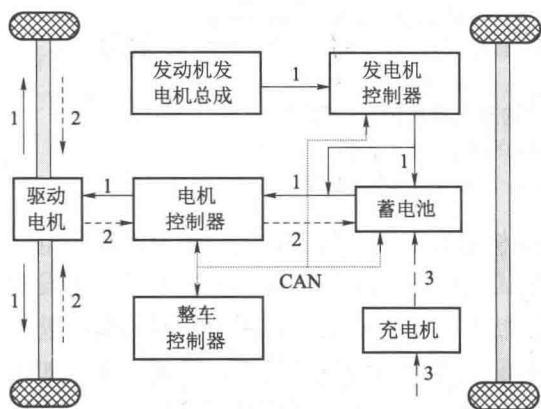


图 1-2 串联式混合动力汽车结构形式

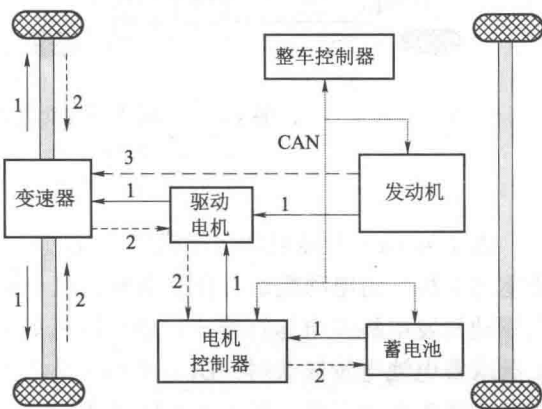


图 1-3 并联式混合动力汽车结构形式

图 1-3 中，模式 1 为并联驱动运行，发动机与电动机同时输出动力，传递给变速器驱动车辆运行；模式 2 为制动运行，使驱动电机运行于发电状态，向蓄电池回收能量；模式 3 为发动机单独驱动，由整车控制器根据蓄电池不同电量状态和车辆运行工况控制实现。

3. 混联式混合动力汽车

混联式混合动力汽车采用动力分配单元，结合了串联式混合动力系统和并联式混合动力系统，这是为了最大化地利用这两种系统的优势，其混合动力结构具有多种形式，典型的混联式混合动力结构如图 1-4 所示。混联式混合动力汽车有两个电动机，根据运行工况的要求，通过动力分配单元，可以选择电动机单独驱动或电动机和发动机联合驱动以达到最高效率水

平。并且在必要的情况下，系统在驱动车轮的同时还可以通过发电机发电，丰田 Prius 和 Estima 混合动力汽车都是采用这种系统。

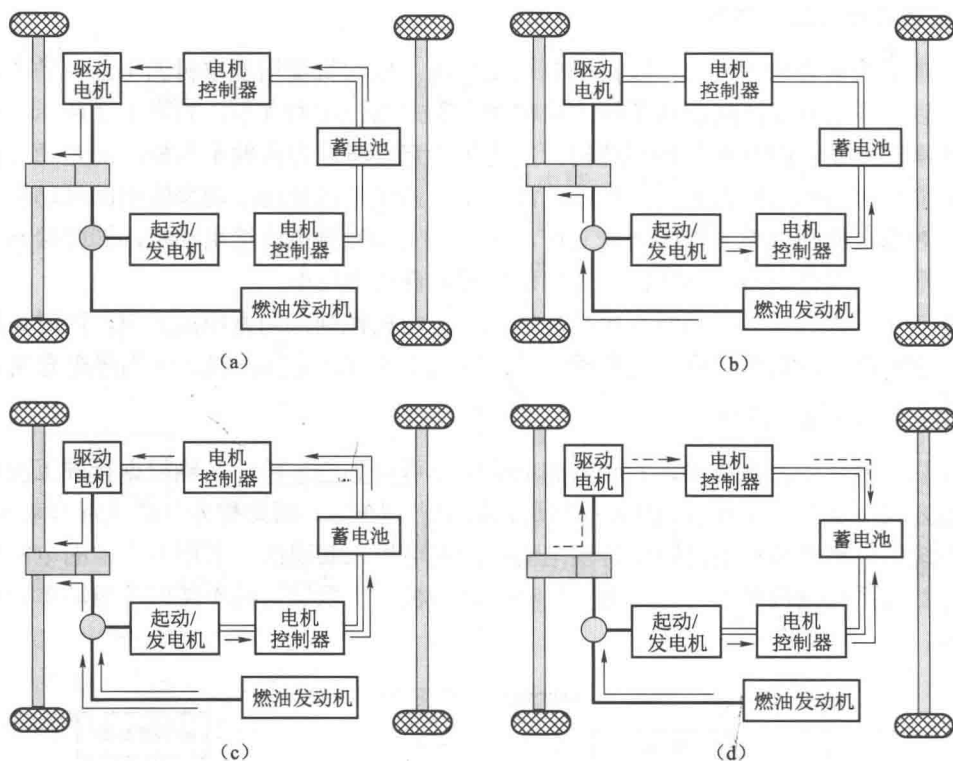


图 1-4 混联式混合动力汽车结构形式及典型运行模式

- (a) 纯电动运行；(b) 发动机驱动与发电机发电运行；
(c) 发动机与驱动电机同时驱动运行；(d) 制动与发电运行

图 1-4 (a) 为纯电动运行模式，发动机和发电机组处于停止状态，仅由蓄电池输出电能给驱动电机，由电动机运行驱动车辆，这一运行模式与纯电动汽车相同；图 1-4 (b) 为发动机驱动与发电机发电运行模式，驱动电机处于停止状态，这种模式常应用于车辆高速行驶的工况或蓄电池电量较低时；图 1-4 (c) 为发动机和驱动电机同时驱动模式，常用于车辆加速或高速超车运行工况；图 1-4 (d) 为制动与发电运行模式，当车辆需要减速或停车时，驱动电机运行于发电工况，进行能量回收，同时也可以根据蓄电池电量，由发电机进行充电。

混联式混合动力汽车运行工况涵盖了串联式混合动力汽车、并联式混合动力汽车和纯电动汽车的各种运行工况，控制灵活，节油率较高。

1.1.3 燃料电池汽车

燃料电池是主要以氢燃料为能源，辅助于蓄电池、超级电容等储能器的电动汽车，是一种电—电混合动力汽车，如图 1-5 所示。燃料电池汽车是利用氢气与空气中的氧气在催化剂的作用下在燃料电池中经电化学反应产生电能，并作为主要动力源驱动的汽车。

图 1-5 中, 模式 1 为车辆运行, 由燃料电池发电, 经过高压 DC/DC 变换器将电能直接提供给电机控制器, 同时蓄电池也输出电能给电机控制器, 由电机控制器控制驱动电机向车轮输出动能; 模式 2 为车辆制动, 此时驱动电机运行于发电状态, 将车辆动能转换为电能存储于蓄电池, 这一模式与纯电动汽车类似; 模式 3 为蓄电池充电, 当蓄电池电量不足时, 燃料电池发电, 经高压 DC/DC 变换器向蓄电池充电。

燃料电池汽车的优点主要包括:

- ① 能量转换效率高。燃料电池的能量转换效率可高达 60%~80%, 为内燃机的 2~3 倍。
- ② 零排放, 不污染环境。燃料电池的原料是氢和氧, 生成物是水。
- ③ 氢燃料来源广泛, 可以从可再生能源获得, 不需要依赖石油燃料。

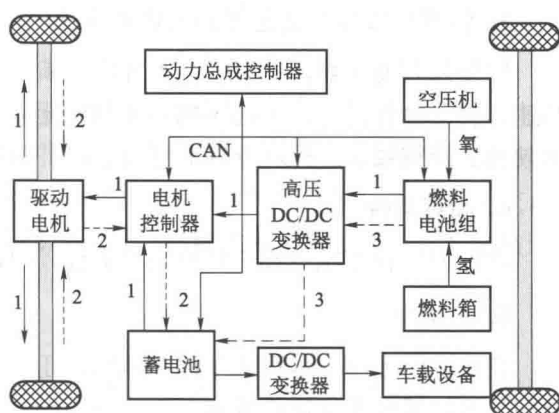


图 1-5 燃料电池汽车结构形式

1.2 驱动电机概述

在新能源汽车中, 一般情况下是驱动电机取代发动机并在电机控制器的控制下, 将电能转换为动能来驱动车辆行驶。其中, 在纯电动汽车和燃料电池汽车中, 驱动电机是唯一的动力装置; 在串联式混合动力汽车中, 驱动电机作为主要的动力装置; 在并联式混合动力汽车中, 电动机作为辅助动力装置。新能源汽车与传统燃油汽车最重要的区别就在于新能源汽车全部以驱动电机为动力装置。

1.2.1 新能源汽车对驱动电机的性能要求

新能源汽车驱动电机在需要充分满足汽车运行功能的同时, 还应满足行驶的舒适性、环境适应性等性能以及对车辆一次充电续驶里程的要求。新能源汽车驱动电机具有比普通工业电机更为严格的技术规范和标准要求, 其主要性能要求如下。

1. 体积小、质量轻

为了充分利用有限的车载空间, 减小车辆质量, 降低运行中的能量消耗, 应尽量减小驱动电机的体积和质量。电机可以采用铝合金外壳, 各种控制装置和冷却系统等也要求尽可能轻量化和小型化。

2. 全速段高效运行

一次充电续驶里程长, 特别是在车辆频繁起停或变速运行的情况下, 驱动电机应具有较高的效率。

3. 低速大转矩及宽范围的恒功率特性

即使没有变速器，驱动电机本身应能满足所需的转矩特性，以获得在起动、加速、行驶、减速、制动等各种运行工况下的功率和转矩要求。驱动电机应具有自动调速功能，可以减轻驾驶员的操纵强度，提高驾驶的舒适度，并且能够达到与传统内燃机汽车同样的控制响应。

4. 高可靠性

在任何运行工况下都应具有高可靠性，以确保车辆的行驶安全。

5. 高电压

在允许的范围内尽可能采用高电压，可以减小电机的尺寸和控制器、导线等设备的尺寸，特别是可以降低逆变器的成本。

6. 安全性能

动力电池组、驱动电机等强电部件的工作电压能达到 300 V 以上，对电气系统的安全性和控制系统的安全性提出了更高的要求，新能源汽车驱动电机必须符合相关车辆电气控制的安全性能标准和规定。

7. 高转速

与低转速电机相比，高转速电机的体积和质量较小，有利于降低整车装备的质量。

8. 使用寿命长

为降低新能源汽车的使用成本，驱动电机的使用寿命应和车辆保持一致，真正实现节能环保的目标。

同时，驱动电机还要求具有耐温和耐潮性能好、运行噪声低、结构简单、成本低、适合批量生产、使用维护方便等特点。



1.2.2 驱动电机的分类

电动机的种类很多，用途广泛，功率覆盖面非常大。而新能源汽车出于对功率容量、体积、质量、散热等条件的考虑，采用的电动机种类较少。迄今为止，新能源汽车采用的驱动电机主要包括直流电动机、交流感应电动机、永磁电动机、开关磁阻电动机等。

1. 直流电动机

直流电动机是在电动汽车上应用最早也是最广泛的一种驱动电机，对于由动力电池提供电能的新能源汽车，可以通过电池组直接获得直流电。

直流电动机由定子、转子、换向器和电刷组成，定子上有磁极，转子有绕组，通电后，转子上也形成磁极，定子和转子的磁场之间有一个夹角，在定、转子磁场的相互吸引下，使电动机旋转。直流电动机商品化历史最长，控制简单且具有优良的电磁转矩控制特性，串励直流电动机、他励直流电动机、永磁（有刷）直流电动机至今仍在电动车辆中有广泛的应用，缺点是电动机本身结构复杂，机械换向，有电刷的维护问题，换向的电火花会产生严重的电磁干扰，高速时有环火，不适宜高速运行，体积偏大且防护差。鉴于以上缺点以及交流电机

驱动系统的迅速发展，可以预见，直流电动机将逐步被淘汰。

2. 交流感应电动机

交流感应电动机的定子及转子为独立绕组，两者基于电磁感应原理实现力矩的传递，其转子以低于气隙旋转磁场转速旋转的交流电动机，也称为交流异步电动机。其简单坚固，成本相对低廉，但控制系统复杂，存在调速范围小、转矩特性不理想的问题。近年来交流电动机之所以得到普遍推广，主要得益于电力电子技术、微处理器技术和交流电动机控制技术的发展。

3. 永磁电动机

永磁电动机是利用永磁体建立励磁磁场的同步电动机，其定子产生旋转磁场，转子采用永磁材料制成，磁场相互作用使转子转动。永磁同步电动机具有效率高、转矩和功率密度大、功率因数高、可靠性高和便于维护等优点。

4. 开关磁阻电动机

开关磁阻电动机的定子和转子铁芯均由硅钢片叠压而成，定、转子冲片均有一齿槽，构成双凸极结构，根据定子和转子片上齿槽的多少，形成不同的极数。开关磁阻电动机的工作原理遵循“磁阻最小原理”——磁通总是沿磁阻最小的路径闭合，因此，由磁场扭曲而产生磁阻性质的电磁转矩。

各种驱动电机的基本性能比较如表 1-1 所示。

表 1-1 各种驱动电机的基本性能比较

项目	直流电动机	感应电动机	永磁电动机	开关磁阻电动机
转速 / ($r \cdot \min^{-1}$)	4 000~6 000	12 000~15 000	4 000~10 000	>15 000
功率密度	低	中	高	较高
功率因数 / %	—	82~85	90~93	60~65
峰值效率 / %	85~89	94~95	95~97	90
负载效率 / %	80~87	90~92	85~97	78~86
恒功率区	—	1:5	1:2.25	1:3
过载系数	2	3~5	3	3~5
体积	大	中	小	小
质量	大	中	小	小
结构坚固性	差	好	一般	优
运行可靠性	一般	好	优	好
调速控制性能	最好	好	好	好
控制器成本	低	高	高	一般

1.2.3 电机学基本定律

安培环路定律、电磁感应定律和电磁力定律是进行电机原理分析的基本定律，可逆性原理是电机的普遍规律。

1. 安培环路定律

在磁场中，磁场强度矢量沿任一闭合路径的线积分等于该闭合路径所包围的电路的代数和，即

$$\int_l Hdl = \sum i \quad (1-1)$$

式中， $\sum i$ 为全电流（传导电流和位移电流）的代数和。

当电流的方向与闭合路径上的磁场强度的方向满足右手螺旋定则时，电流取正值，否则取负值。

2. 电磁感应定律

假设有一匝数为 N 的线圈位于磁场中，当与线圈交链的磁链 $\Psi = N\Phi$ 发生变化时，线圈中将产生感应电动势。感应电动势的数值与线圈所交链的磁场的变化率成正比。如果感应电动势的正方向与磁通的正方向符合右手螺旋关系，则感应电动势为

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -N\frac{d\Phi}{dt} \quad (1-2)$$

式中，负号表示线圈中感应电动势倾向于阻止线圈内磁链的变化。

3. 电磁力定律

位于磁场中的载流导体受到磁场力的作用，该力称为电磁力，如果磁场与载流导体相互垂直，则作用于载流导体的电磁力为

$$f = BIl \quad (1-3)$$

4. 电机的可逆性原理

电机的可逆性原理表明，发电机和电动机只是一种电机具有的两种不同运行方式（发电运行和电动运行）。实际上，某些电机通常被称为发电机（或电动机），这说明该类电机作为发电机（或电动机）运行时性能较好，而不是说只能用作发电机（或电动机）。

1.2.4 电机的基本性能参数

GB/T 19596—2004《电动汽车术语》对电机的基本性能参数进行了规定，常用的性能参数及其定义如下。

额定功率（rated power）——在额定条件下的输出功率。

峰值功率（peak power）——在规定的持续时间内，电机允许的最大输出功率。

额定转速（rated speed）——额定功率下电机的最低转速。

最高工作转速（maximum work speed）——相应于车辆的最高设计车速的电机转速。