



新能源汽车专业规划教材

电动汽车 电机控制与驱动技术

严朝勇 主编



新能源汽车专业规划教材



电动汽车电机控制与驱动技术

主 编 严朝勇
副主编 蒋 波 郭海龙
参 编 黄 剑 张胜宾 张永栋



机械工业出版社

本书全面介绍了电动汽车电机控制与驱动技术。

本书分为12章,讲述了电动汽车电机类型、结构和工作原理,并重点论述了电动汽车控制技术、CAN总线通信网络和控制策略;讲述了电动汽车变频调速技术和再生制动控制技术结构与工作原理;对电动汽车驱动电机系统的环境适应性试验进行了探讨;介绍了电动汽车电机控制和驱动系统试验仪器设备、试验方法和电机及控制器检验项目,并论述了电动汽车测试评价现状及标准等。

本书可供高等职业院校新能源汽车专业学生使用,也可供电动汽车相关科技人员和电动汽车使用者阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

电动汽车电机控制与驱动技术/严朝勇主编. —北京:机械工业出版社,2017.2

新能源汽车专业规划教材

ISBN 978-7-111-59156-6

I. ①电… II. ①严… III. ①电动汽车-控制系统-教材
②电动汽车-驱动机构-教材 IV. ①U469.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第028023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:赵海青 责任编辑:赵海青 谢元

责任校对:郑婕 封面设计:马精明

责任印制:常天培

北京京丰印刷厂印刷

2018年6月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·388千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-59156-6

定价:45.00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:010-88379833

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

当前,我国促使汽车产业节能减排的发展方向是推广和使用电动汽车,包括混合动力电动汽车、纯电动汽车和燃料电池电动汽车等类型。我国具有大量的稀土资源,这为电机业的发展提供了很好的环境,较易进入全球分工体系,如果引导得力,驱动电机完全可以发展成为优势产业。电动汽车电机控制与驱动技术的不断发展和创新,为不同类型电动汽车的推广应用奠定了坚实的技术基础。本书基于目前最新的电动汽车电机控制与驱动技术,力求突出工学相结合的原则,以面向工作任务为培养目标,可满足高职学生和电动汽车行业从业人员的需要。

本书在理论知识内容的深度上遵循“管用、够用、实用”的原则,充分体现职业性、技术性和应用性的高职教育特色;在实践教学内容的安排上以面向“工学结合”的教学模式为参照目标,努力构建一门具有高职特色的注重岗位职业能力培养的专业技术课程。

本书共分为12章:第一章简单介绍了电动汽车电机控制和驱动技术的作用及其发展;第二章针对直流电机的结构和工作原理,阐述了直流电机控制技术;第三章结合交流电机的结构和工作原理,阐述了交流电机的控制技术;第四章论述永磁同步电机的结构和工作原理,阐述了永磁同步电机控制技术;第五章结合开关磁阻电机结构及工作原理,论述了开关磁阻电机的控制技术及应用;第六章介绍续流增磁混合励磁电机结构和工作原理,阐述了续流增磁混合励磁电机的控制技术及应用;第七章介绍了DC/DC变换器的种类和原理、AC/DC的结构和工作原理、DC/AC的结构和工作原理,论述了电力变换装置在电动汽车上的应用;第八章介绍了轮毂电机的结构和工作原理,阐述了轮毂电机在电动汽车中的应用;第九章介绍了电动汽车控制系统的组成、分类及电动汽车的控制策略、电动汽车CAN总线通信网络、电动汽车电气系统控制策略,并阐述了电动汽车电气控制系统的应用;第十章介绍了电动汽车再生制动的结构、电动汽车变频调速技术和电动汽车再生制动控制技术结构与工作原理,并阐述了电动汽车再生制动控制技术的应用;第十一章介绍了电动汽车电机控制和驱动系统试验仪器设备、电动汽车电机控制和驱动系统试验方法,并对电动汽车驱动电机系统的环境适应性试验进行探讨;第十二章介绍了电机及控制器检验项目及电动汽车测试评价等。

本书由严朝勇担任主编,并负责统稿。其中,第一、十一、十二章由严朝勇编写;第二、三章由郭海龙编写;第四、五章由黄剑编写;第六章由张永栋编写;第七、八章由张胜宾编写;第九、十章由蒋波编写。本书由广东交通职业技术学院汽车与工程机械学院刘越琪教授担任主审。

本书在编写过程中得到了广东交通职业技术学院的大力支持,在此表示感谢。

由于本书涉及知识面较广、编者水平有限,难免会有疏漏与不足之处,诚望读者给以指正,以便再版时修改。

读者沟通卡

一、申请课件

本书附赠教学课件供任课教师采用，可在机械工业出版社教育服务网（www.cmpedu.com）注册后免费下载；也可扫描二维码关注“机工汽车”微信订阅号获取课件。



机工汽车

免费下载 教学课件、学习视频、海量学习资料

➤ 扫描二维码，关注“机工汽车”

➤ 点击“粉丝互动”→“视频课件”

二、机工汽车教师群

任课教师可加入“机工汽车教师群”，与教材主编、编辑直接沟通交流。“机工汽车教师群”提供最新教材信息、教材特色介绍、专业教材推荐、样书申请、出版合作等服务。

QQ 群号码：7348129，本群实行实名制，请以“院校名称+姓名”的方式申请加入。

三、微信购书



车界瞭望

关注汽车分社微信订阅号“车界瞭望”，可直达机工社旗下网络购书平台“汽车书院”，第一时间购买新书，获取车界前沿资讯

四、意见反馈和编写合作

联系人：赵海青 齐福江 母云红

电话：010-88379353、88379160、88379439

电子信箱：13744491@qq.com、502135950@qq.com、2455675943@qq.com

地址：北京市西城区百万庄大街22号汽车分社

邮编：100037



目 录

前 言

第一章 电动汽车电机控制和驱动技术	1
第一节 电动汽车电机技术趋势与挑战	2
一、电动汽车电机技术发展趋势	2
二、电动汽车电机控制技术面临的挑战	3
第二节 电动汽车电机分类、结构与工作原理	4
一、电动汽车电机分类	4
二、电动汽车电机结构	4
三、电动汽车电机工作原理	6
第三节 电动汽车电机特性与要求	7
一、电动汽车电机特性	7
二、电动汽车电机要求	8
三、电动汽车电机命名标准	11
第四节 国内驱动电机技术的发展	12
一、国内驱动电机技术的研发和产业化现状及进展	12
二、电动汽车驱动系统的分类	14
第五节 电机驱动系统的组成与控制技术	18
一、电机驱动系统的基本组成	18
二、车用电机驱动系统的控制技术	19
三、电机驱动系统控制方式	20
复习思考题	24
第二章 直流电机类型及其控制技术	26
第一节 直流电机的类型	26
第二节 直流电机的构造及工作原理	30
第三节 直流电机的特性及特点	33
第四节 直流电机的控制技术	35
复习思考题	40
第三章 交流电机类型及其控制技术	41
第一节 交流电机类型	41
第二节 三相异步电机的构造及工作原理	42
第三节 异步电机工作特性分析	48
第四节 三相异步感应电机的转矩与功率的关系	49
第五节 三相异步电机变频调速的机械特性	49
第六节 再生制动	50
第七节 交流异步电机起动方式	51
第八节 交流异步电机交流调速控制	51
第九节 交流异步电机控制技术	52
复习思考题	56
第四章 永磁同步电机类型及其控制技术	57
第一节 永磁电机类型	57
第二节 永磁同步电机的结构和工作原理	58
第三节 永磁同步电机的性能特点	59
第四节 永磁同步电机控制技术	61
复习思考题	62
第五章 开关磁阻电机类型及其控制技术	63
第一节 开关磁阻电机类型	63
第二节 开关磁阻电机结构及工作原理	64
第三节 开关磁阻电机运行特性	66



第四节	开关磁阻电机控制技术	69	第三节	电动汽车的控制策略	117
第五节	开关磁阻电机功率变换器技术	72	第四节	电动汽车 CAN 总线通信网络	122
复习思考题		74	第五节	电动汽车电气系统控制策略	124
第六章	续流增磁电机类型及其控制技术	75	第六节	电动汽车电气控制系统的应用	127
第一节	混合励磁电机的分类及磁路特性	75	复习思考题		143
第二节	续流增磁混合励磁电机的结构和工作原理	78	第十章	电动汽车再生制动控制技术	145
第三节	续流增磁混合励磁电机的应用	80	第一节	电动汽车再生制动控制系统概述	145
复习思考题		82	第二节	电动汽车再生制动系统的结构	150
第七章	电动汽车能量系统的电源变换装置	83	第三节	电动汽车变频调速技术	160
第一节	DC/DC 功率变换器	83	第四节	电动汽车再生制动控制技术结构与工作原理	163
第二节	DC/DC 变换器的种类与比较	86	第五节	电动汽车再生制动控制技术的应用	168
第三节	DC/AC 功率变换器	87	复习思考题		173
第四节	AC/DC 功率变换器结构和工作原理	88	第十一章	电动汽车电机控制和驱动系统的测试	174
第五节	电力变换装置在电动汽车上的应用	89	第一节	电动汽车驱动电机系统的环境适应性试验	174
复习思考题		90	第二节	电动汽车电机控制和驱动系统试验仪器设备	178
第八章	轮毂电机类型及其控制技术	91	第三节	电动汽车电机控制和驱动系统试验方法	182
第一节	轮毂电机类型	92	复习思考题		230
第二节	轮毂电机的结构和工作原理	95	第十二章	电动汽车电机控制和驱动系统试验标准	231
第三节	轮毂电机驱动系统的特点	96	第一节	电机及控制器检验	236
第四节	轮毂电机控制技术	97	第二节	电动汽车测试评价	239
第五节	轮毂电机在电动汽车中的应用	102	复习思考题		244
复习思考题		105	参考文献		246
第九章	电动汽车控制系统	106			
第一节	电动汽车控制系统的组成	108			
第二节	电动汽车控制系统的分类	111			

学习目标

- 了解电动汽车电机控制和驱动技术发展现状
- 掌握电动汽车电机控制和驱动技术总体组成
- 掌握电动汽车电机控制和驱动技术基本原理
- 掌握电动汽车电机控制和驱动技术性能指标

电动汽车的电机控制和驱动系统是车辆行驶过程中的主要执行机构，电机的驱动特性决定了电动汽车的主要性能指标，因此，它是电动汽车的重要部件，并且电动汽车中的燃料电池汽车（FCEV）、混合动力汽车（HEV）和纯电动汽车（BEV）都要用电机来驱动车辆。选择合适的电机是提高各类电动汽车性价比的重要因素，因此研发或完善能同时满足车辆行驶过程中的各项性能要求，并具有坚固耐用、造价低、效能高等特点的电机驱动方式显得极其重要。这也是提高电动汽车性价比，使其尽快普及应用的有效途径。

电动汽车的电机驱动系统主要由电气系统和机械系统组成，其中，电气系统由电机、功率转换器和电机控制器等组成，机械系统则由机械传动部分和车轮等组成。

在电气系统和机械系统的连接过程中，机械系统是可选的，有些电动汽车的电机装在轮毂上直接驱动车轮。

一般情况下，电机取代发动机并在电机控制器的控制下，将电能转换为机械能以驱动汽车行驶。电动汽车由电机驱动，电机是电动汽车的关键部件。

要使电动汽车具有良好的使用性能，驱动电机应具有较宽的调速范围及较高的转速、足够的起动转矩，还应具有体积小、质量轻、效率高等特点，且应具有动态制动性强和能量回馈等性能。

由于电动汽车采用动力电池作为车载能源，其容量受到限制，为尽可能地延长续航里程，大多数驱动系统都采用了能量回馈技术，即在汽车制动时，通过控制器将车轮损耗的动能反馈到电池中，并使电机处于发电状态，将发出的电输送到电池中。因此，电动汽车的驱动电机应该称为“电机”，不能称为“电动机”，例如，中大青山采用的双定子磁悬浮复合转子电机既能将电能转化为机械能，又能将机械能转化为电能。

经过“九五”“十五”“十一五”“十二五”期间国家对电动汽车用电机系统的集中研发和应用，我国已自主开发了满足各类电动汽车需求的驱动电机系统产品，获得了一大批电机系统的相关知识产权，形成批量生产具有核心竞争能力的车用驱动电机系统的能力。

目前，我国自主开发的永磁同步电机、交流异步电机和开关磁阻电机已经实现了与国内整车产业化技术配套，电机重量、比功率显著提高，电机系统最高效率达到93%，系列化产品的功率范围覆盖了200kW以下电动汽车用电机的动力需求，各类电机系统的核心指标



均达到相同功率等级的国际先进水平。

我国以高密度永磁电机为代表的各类车用电机取得了明显进步。这些电机结构复杂，工作条件恶劣，特别是对于混合动力工况，需与内燃机或变速器进行一体化设计，研制难度大。“十五”期间这些电机曾一度成为混合动力系统实现功能的难点，目前基本已经实现功能，性能与可靠性也有明显改善。

我国电动客车以交流异步电机系统为主，混合动力客车用大功率电机的可靠性与噪声水平已有明显改进，初步具备产业化条件，电动客车电机领域也正在开展永磁电机的应用。

电机设计采用现代车用电机系统设计理念，初步解决多目标高性能车用电机的极限设计、多领域精确分析以及结合应用控制策略系统集成仿真的技术难题，采用结构集成设计技术，实现了电机与变速器高度一体化设计与应用。在新型电机技术方面，国内部分企业、研究单位和高校对一些新原理的电机系统，例如基于双机械端口能量变换器电机（EVT）、混合励磁电机系统等，进行了研究探索，有些已经开发出样机系统，部分进行了台架试验并装车。

我国还对车用电机制造工艺进行了有益的研究探索，如拼块式铁心、高密度的绕线技术和整体充磁工艺等已开始用于产品实践。

另外，车用驱动电机系统检测试验手段有了一定的改善，在电机测试基地建立了电机及控制器专用性能检测试验台架，具备了较齐备的性能检测和初步环境试验检测条件；部分企业单位重视试验能力的建设，建成或正在建设一批试验台架。少数电机研制单位与整车单位共同开展测试规范的研究与制订工作，同时进行典型工况下的动力总成台架可靠性试验考核。

在电机及其控制系统的关键材料与关键零部件方面，如转速位置传感器的研制、高性能低成本绝缘材料开发、车用电机专用电工钢开发、电机磁性材料的稳定性研究方面，也获得了初步成果。

第一节 电动汽车电机技术趋势与挑战

一、电动汽车电机技术发展趋势

(1) 电机功率密度不断提高 电机作为混合动力系统中重要的动力输出源之一，其自身的性能直接影响到电动汽车的整体性能。一方面，汽车所要求的电机输出和回收功率不断提高，以满足不同工况不同车型的需求；另一方面，这种新型机电一体化的传动系统尺寸受到车内空间的限制。这就需要混合动力车用电机向高性能和小尺寸发展。不断提高电机本身的功率密度，用相对小巧的电机发挥出大的功率成为各汽车及电机厂商的发展方向。

(2) 回馈制动的高效区域不断拓宽 回馈制动是混合动力机电一体化技术的一个基本特点。伴随着对混合度要求的提升，扩大回馈制动范围的需求也会越来越大。采用回馈高效的电机、适当的变速系统和控制策略，可以使回馈制动的允许范围适应更多工况，使整车节能效果更好，行车里程更长。这是混合动力汽车向真正实用性必须迈出的



一步。

(3) 电机驱动系统的集成化和一体化趋势更加明显 车用电机及其控制系统的集成化主要体现在电机与发动机、电机与变速器、电机与底盘的集成度不断提高。对于混合动力发动机与起动发电一体机 (ISG), 其发展从结构集成到控制集成和系统集成, 电机与变速器的一体化愈加明显, 汽车动力的电气化成分越来越高, 不同耦合深度的机电耦合动力总成系统使得电机与变速器两者之间的联系变得越来越紧密。在高性能电动汽车领域, 全新设计开发的转向系统、制动系统、行驶系统将电机和传动系统进行一体化集成, 融合程度越来越深。

(4) 电机驱动系统的混合度与电功率比不断增加 虽然目前市场上分布了轻混、中混、强混等各种混合程度的混合动力车型, 但从各种混合度车型的节能减排效果来看, 混合程度越高, 汽车的节能效果越好。电功率占整车功率的比例正在混合动力汽车领域逐渐提高, 电机已不再是发动机的附属设备。各车厂正在逐渐将小排量发动机和大功率电机运用在汽车驱动上。

(5) 电机驱动控制系统的集成化和数字化程度不断加大 电机控制系统集成化程度也在不断加大, 将电机控制器、低压 DC/DC 变换器, 以及发动机控制器、变速器控制器、整车控制器等进行不同方式的集成正在成为发展趋势。同时, 高速高性能微处理器使电机驱动控制系统进入一个全数字化时代。在高性能高速的数字控制芯片基础上, 高性能的控制算法、复杂的控制理论得以实现。同时, 面向用户的可视化编程, 通过代码转化和下载直接进入微处理器, 不断地提高编程效率和可调试性。

二、电动汽车电机控制技术面临的挑战

1. 技术方面

在电动汽车关键零部件方面, 电机技术进步明显, 但与国际先进的水平相比, 在产品集成度、可靠性和系统应用技术方面, 仍存在较大的差距, 主要表现在以下 2 个方面:

由于整车开发经验积累有限, 导致对电机和控制器的可靠性与使用寿命考核办法不明确, 可靠性和环境适应性的研究考核不足; 控制器和 DC/DC 变换器的体积、质量普遍偏大, 模块化设计不足, 插接件标准不统一, 需要提高工程化程度, 关键电力电子元器件需要进口, 成本占到控制器的一半左右。

除了需要缩短以上差距, 为了进一步增强综合竞争力, 还应进行新产品技术和关键共性技术研究: 新型电机一体化动力总成; 低噪声高效一体化发电机组; 耐恶劣环境稀土永磁材料; 低成本高性能绝缘材料; 高集成度、低成本轴角位置模数转换器等。

2. 资金和人才

该领域项目由于整车开发的周期长、工作量大, 各种研发认证的相关费用投入非常多, 产业化扩大投资规模时, 固定资产投资较大, 汽车零部件供应链的回款周期较长, 一般需要 6~9 个月, 流动资金需求较大, 资金周转难度较大。因此新产品研制及产业化费用高, 投入回报周期长。同时由于该领域是属于边缘和交叉学科, 需要有较强的理论知识、较强的实践能力和经验, 人才培养周期也较长。

3. 标准建设和知识产权

电机行业标准自身尚不完善, 作为一个新兴行业, 产品的技术标准尚未得到有效检验,



同时也有待进一步完善，现有的电机和控制器标准工作相对滞后，目前有关部门已高度重视此项工作。

第二节 电动汽车电机分类、结构与工作原理

一、电动汽车电机分类

除了发电功能外，电动汽车电机主要还是电动机，所以我们以电动机为例来分类（只作简单分类）：

(1) 按工作电源种类划分 可分为直流电机和交流电机。

1) 直流电机按结构及工作原理可分为无刷直流电机和有刷直流电机，又可分为永磁直流电机和电磁直流电机。永磁直流电机按材料不同又分为稀土、铁氧体、铝镍钴永磁直流电机。电磁直流电机按励磁方式又分为串励、并励、他励和复励直流电机。

2) 交流电机可分为单相电机和三相电机。

(2) 按结构和工作原理划分 可分为异步电机、同步电机。异步电机的转子转速总是略低于旋转磁场的同步转速。同步电机的转子转速与负载大小无关且始终保持在同步转速。

(3) 按用途划分 可分为驱动电机和控制用电机。

(4) 按运转速度划分 可分为高速电机、低速电机、恒速电机和调速电机。低速电机又分为齿轮减速电机、电磁减速电机、力矩电机和爪极同步电机等。

二、电动汽车电机结构

1. 永磁直流电机

永磁直流电机由定子磁极、转子、电刷和外壳等组成。

定子磁极采用永磁体（永久磁钢），目前应用的有铁氧体、铝镍钴、钕铁硼等材料。按其结构形式可分为圆筒型和瓦块型等类型。

转子一般采用硅钢片叠压而成，漆包线绕在转子铁心的两槽之间（三槽即有三个绕组），其各接头分别焊在换向器的金属片上。

电刷是连接电源与转子绕组的导电部件，具备导电与耐磨两种性能。永磁直流电机的电刷使用弹性金属片或金属石墨电刷、电化石墨电刷。

2. 无刷直流电机

无刷直流电机由永磁体转子、多极绕组定子、位置传感器等组成。

无刷直流电机的特点是无电刷，采用半导体开关器件（如霍尔元件）来实现电子换向，即用电子开关器件代替传统的接触式换向器和电刷。它具有可靠性高、无换向火花、机械噪声低等优点。

位置传感器按转子位置的变化，沿着一定的次序对定子绕组的电流进行换流（即检测转子磁极相对定子绕组的位置，并在确定的位置处产生位置传感信号，经信号转换电路处理后去控制功率开关电路，按一定的逻辑关系进行绕组电流切换）。

位置传感器有磁敏式、光电式和电磁式三种类型。



采用磁敏式位置传感器的无刷直流电机，其磁敏传感器件（例如霍尔元件、磁敏二极管、磁敏三极管、磁敏电阻器或专用集成电路等）装在定子组件上，用来检测永磁体、转子旋转时产生的磁场变化。

采用光电式位置传感器的无刷直流电机，在定子组件上按一定位置配置了光电传感器，转子上装有遮光板，光源为发光二极管或小灯泡。转子旋转时，由于遮光板的作用，定子上的光敏元件将会按一定频率间歇产生脉冲信号。

采用电磁式位置传感器的无刷直流电机，在定子组件上安装了电磁传感器部件（例如耦合变压器、接近开关、LC 振荡电路等），当永磁体转子位置发生变化时，电磁效应将使电磁传感器产生高频调制信号（其幅值随转子位置而变化）。

定子绕组的工作电压由位置传感器输出控制的电子开关电路提供。

3. 三相异步电机

三相异步电机的结构分为定子和转子两部分，定子和转子之间有气隙。

定子由定子铁心、定子绕组和机座组成。定子铁心是磁路的一部分，同时用来嵌放定子绕组；定子绕组通电时能产生磁场；机座用来固定与支撑定子铁心。

转子由转子铁心和转子绕组组成。转子铁心也是磁路的一部分，同时用来嵌放转子绕组；转子绕组的作用是产生感应电动势并产生电磁转矩。

4. 永磁同步交流电机

永磁同步交流电机的磁场由永磁铁产生，转子线圈通过电刷供电，转速与交流电频率为整倍数关系（视转子线圈绕组数而定），故称同步电机。

转子线圈通过电刷供电，定子通过线圈绕组产生旋转磁场的电机，按转子线圈与定子线圈的串、并联关系分别称为串励磁、并励磁电机。

5. 开关磁阻电机

开关磁阻电机（Switched Reluctance Motor, SRM）根据磁阻差产生反转磁矩的原理而制成。

开关磁阻电机是一种新型调速电机，其调速系统兼具直流、交流两类调速系统的优点，是继变频调速系统、无刷直流电机调速系统之后发展起来的最新一代无级调速系统。它的结构简单坚固，调速范围宽，调速性能优异，且在整个调速范围内都具有较高效率，系统可靠性高。它主要由开关磁阻电机、功率变换器、控制器与位置检测器组成。控制器内包含功率变换器和控制电路，位置检测器则安装在电机的一端。这种电动机定子除绕组独立接线之外，其他与交流异步电机的定子结构一样，而转子只是由硅钢片叠成，具有不同数量的凸极而已，没有滑环绕组和永久磁铁。

6. 续流增磁电机

续流增磁电机是一种复合励磁的特殊直流电机，兼顾了串励直流电机和他励直流电机的优点。该电机采用稀土永磁和增磁绕组复合励磁方式，转子采用无槽结构。该系统很好地满足了电动汽车低速增磁增矩、高速弱磁增速的特性需求而且能在双象限范围内运行，实现电动汽车再生制动；采用高频脉冲调宽（Pulse Width Modulation, PWM）斩波控制，运行时噪声低。

各种电机技术指标汇总见表 1-1。



表 1-1 各种电机技术指标汇总

电性机能	直流串励电机	直流并励电机	永磁直流电机	交流异步电机	开关磁阻电机	永磁同步电机	无刷直流电机
起动性能	5	4	4	2	4	3	5
低速性能	5	4	4	3	4	3	5
低速时效率	3	3	4	3	4	5	5
平均效率	3	3	4	4	3	5	5
能量密度	2	2	3	4	4	4	5
过载能力	4	4	4	4	4	4	5
再生能力	3	5	4	3	2	5	5
可靠性	2	2	2	5	5	4	4
制造成本	4	4	4	5	5	4	4
控制器成本	5	5	5	4	4	4	4
合计	36	36	38	37	39	41	47

三、电动汽车电机工作原理

1. 交流电机

单相异步电机通过电容移相作用，将单相交流电分离出另一相相位差 90° 的交流电，将这两相交流电分别送入两组或四组电机线圈，就在电机内形成旋转的磁场，旋转磁场在电机转子内产生感应电流，感应电流产生的磁场与旋转磁场方向相反，被旋转磁场推拉进入旋转状态，由于转子必须切割磁力线才能产生感应电流，因此转子转速必须低于旋转磁场的转速，故称异步电机。

三相异步电机不必通过电容移相，本身就有相差 120° 的三相交流电，故产生的旋转磁场更均匀，效率更高。

2. 直流电机

直流电机有定子和转子两部分组成，定子上有磁极（绕组式或永磁式），转子有绕组，通电后，转子上形成磁场（磁极），定子和转子的磁极之间有一个夹角，在定转子磁场（N极和S极之间）的相互吸引下，使电机旋转。改变电刷的位置，就可以改变定转子磁极夹角（假设以定子磁极为夹角起始边，转子磁极为另一边，由转子磁极指向定子磁极的方向就是电机的旋转方向）的方向，从而改变电机的旋转方向。

3. 永磁同步交流电机

永磁同步交流电机的磁场由永磁铁产生，转子线圈通过电刷供电，转速与交流电频率为整倍数关系（视转子线圈绕组数而定），故称之为同步电机。

转子线圈通过电刷供电，定子通过线圈绕组产生旋转磁场的电机，按转子线圈与定子线圈的串联、并联关系分别称为串励、并励电机。

永磁同步电机转子采用径向永磁铁做成磁极。定子与绕线式电机定子绕组一样，接入交流电源即产生旋转磁场。转子具有恒定磁场，由于旋转磁场的作用而跟随旋转磁场同步旋转，旋转磁场速度取决于电源频率。与三相交流电动机的同步电机类似，永磁同步电机可以产生理想的恒转矩。



三相正弦波电压在定子三相绕组中产生对称三相正弦波电流，并在气隙中产生旋转磁场。这个旋转磁场与永磁体转子作用，带动转子与旋转磁场同步旋转，并力图使定子、转子磁场轴线对齐。当外加负载转矩以后，转子磁场轴线落后定子磁场轴线一个功率角，功率角与负载成正比，负载越大，功率角就越大，当功率角大到足以使转子停止不转动为止。

4. 开关磁阻电机

开关磁阻电动机是一种双凸极可变磁阻电机，其定子、转子的凸极均由普通硅钢片叠压而成。转子既无绕组也无永磁体，定子极上绕有集中绕组，径向相对的两个绕组连接起来，称为“一相”。SRM电机可以设计成多种不同相数结构，且定子、转子的极数有多种不同的搭配。相数多、步距角小有利于减少转矩脉动，但结构复杂、主开关器件多、成本高，现在应用较多的是四相（8/6）结构和三相（12/8）结构。

5. 续流增磁电机

新型续流增磁电机控制器能够消除传统直流电机驱动控制系统在电动汽车应用时存在的缺陷。与传统型串励直流电机相比，该系统在控制策略、控制结构和再生制动性能方面具有极大的优越性。装车后，该系统表现出了抗干扰能力强，调节速度快，平稳性好，且低速增磁增矩和高速弱磁增速的性能都很好，能够很好地满足大型电动公交车的动力特性要求。

这种续流增磁电机及控制系统由于其独特的优越性，可以作为节能环保的驱动系统很好地运用于大型交通工具中，目前国内许多大型公交车都已使用此类电动汽车电机。

第三节 电动汽车电机特性与要求

一、电动汽车电机特性

用于电动汽车的驱动电机与常规的工业电机不同。电动汽车的驱动电机通常要求频繁地起动/停车、加速/减速，低速或爬坡时要求高转矩，高速行驶时要求低转矩，并要求变速范围大。而工业电机通常优化在额定的工作点。因此，电动汽车驱动电机比较独特，应单独归为一类。

随着汽车行驶速度的不同，要求其驱动系统也有相应的调速范围，为便于对各类电机的调速性能进行讨论分析，在此有必要对各有关调速性能指标先统一阐明如下：

1. 机械特性与负载转矩

机械特性是表示电机转矩 T 与其转速 n 的关系 $n = f(T)$ 曲线，曲线的斜率即表示机械特性的硬度，斜率大表示机械特性软，反之表示机械特性硬，即转矩随转速的变化小。机械特性是电动机的主要调速性能指标，也是电力拖动研究的重要内容；负载转矩特性曲线是指负载转矩 T_L 与其转速 n 的关系曲线。

2. 调速范围

调速范围表示机械运行中最大转速 n_{\max} 与最小转速 n_{\min} 之比。按其定义要扩大调速范围，必须设法尽可能地提高 n_{\max} 并降低 n_{\min} 。提高 n_{\max} 对于机械装置来说，受其机械结构和要求的限制，对于电机来说主要受其结构和驱动电路的限制。而降低 n_{\min} 受低速运行时的相对稳定性限制，要求低速时其机械特性较硬，即负载转矩变化时转速变化小。



3. 静差率

静差率也称相对稳定性，其定义为电机由理想空载（ $T=0$ ）加到额定负载（ $T=T_e$ ）时，所出现的转速降 Δn_e （对应的理想空载转速 n_k 与额定转速 n_e 之差）与理想空载转速 n_k 之比，用百分数静差率 δ 来表示即

$$\delta = \frac{\Delta n_e}{n_k} \times 100\% = \frac{n_k - n_e}{n_k} \times 100\% \quad (1-1)$$

静差率也在一定程度上反映了电机的调速机械特性，即机械特性愈硬，则静差率愈小，相对稳定性就愈高。

4. 调速效率

调速效率 η 即为输出轴上的功率 P_2 与输入功率 P_1 之比，它也反映了调速时的损耗功率 ΔP ，即

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} \quad (1-2)$$

5. 平滑性

平滑性反映了调速级数的多少，在一定的调速范围内，调速级数越多则调速平滑性越好。这主要针对机械齿轮有级调速。

由于调速方法包括通过机械、电气或机电配合等方法。通常通过机械齿轮减速换档，可使转矩得到放大，一般为有级调速，由于存在一定的机械摩擦，降低了效率，增加了维护要求，并且其动态响应指标要有较大的下降，特别是对快速响应性要求较高的伺服系统存在一定的局限性。电气调速即为电机调速，一般为无级调速，响应性好，调速效率也高，但关键是电机的机械调速特性与负载转矩特性要求的配合较难。

二、电动汽车电机要求

车辆行驶对驱动控制的要求有不少类似于数控机床对其伺服驱动的要求，实际上通过观察电动汽车所用驱动电机的发展历程，并与数控伺服电机的发展改进过程比较，即可发现其相类似的经历。数控机床对其伺服系统的要求概括为“稳、准、快、宽、足”，即表示为稳定性、准确性、快速响应性、宽调速范围和足够的驱动转矩，这也反映了伺服系统的五项主要性能指标。而对于电动汽车电机驱动系统的要求，则可用“稳、省、快、宽、足”来表述，因汽车没有像数控伺服那样的准确定位精度要求，但因车载能源受限，特别要求有相应的节省能源措施，主要包括能方便有效地实现制动能量回收，即要求电机同时具有动能回馈发电功能，因此用“省”来替代了“准”字。当然除这五个要求外，与其他控制系统类似，同样有要求温升高、噪声小、效率高、体积小、价格低、控制方便、线性度好（如输出速度与输入电压成线性）、可靠性高，维修保养方便，对温度、湿度等环境要求宽等。这“稳、省、快、宽、足”五个要求与提高电动汽车行驶性能指标直接紧密相连。特别是足够的驱动转矩是车辆行驶的必要条件。

按车辆动力学来说，汽车的行驶总阻力 $F_{\text{总}}$ 等于滚动阻力 F_f 、空气阻力 F_w 、坡度阻力 F_i 和加速阻力 F_j 之和。要求车辆行驶的必要条件是车轮的驱动力 F_t 必须大于等于行驶阻力，即 $F_t \geq F_{\text{总}}$ 。车轮的驱动力 F_t 等于传递到车轮的转矩 T_t 除以车轮半径 r ，即 $F_t = T_t/r$ 。也就是说对于电动汽车最终反映在驱动电机的输出转矩 T ，为此有必要进一步来分析其驱动



电动机的负载转矩特性。为了便于比较分析,先把几种典型的生产机械负载转矩特性曲线集中绘于图 1-1。现分别简要说明如下:

1. 恒功率负载特性

即转速 n 变化时,负载功率 P_2 基本为一恒定值。由于负载功率 P_2 等于转矩 T_L 与角速度 ω 的乘积,因此有:

$$T_L = \frac{P_2}{\omega} = \frac{P_2}{2\pi n/60} = \frac{K}{n} \quad (1-3)$$

当 P_2 恒定时,式 (1-3) 中 K 即为常数,因此其负载转矩 T_L 与转速 n 成反比关系,即负载转矩特性曲线为双曲线形,如图 1-1 所示,位于第一象限中的实线曲线。

2. 通风机负载特性

是指水泵、油泵、通风机和螺旋桨等一类机械的负载特性。

其特点是负载转矩 T_L 与转速 n 的二次方近似成正比关系,即 $T_L = Kn^2$, 所以其负载转矩特性曲线为抛物线形,如图 1-1 所示,位于第一象限中的小圆点虚线曲线。

3. 反抗性恒转矩负载特性

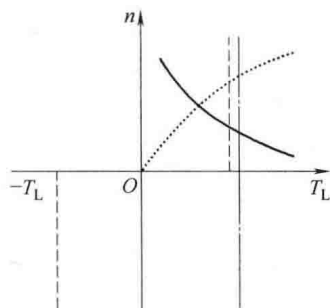
此类负载也称为摩擦转矩负载,其特点是负载转矩作用的方向总是与运动方向相反,即总是阻碍运动的制动性转矩。当转速方向改变时,负载转矩大小不变,但作用方向也随之改变。

按电机拖动理论规定:电机拖动转矩 T 与转速 n 同向时取正号,反向时取负号;而负载转矩 T_L 与转速 n 同向时取负号,反向时取正号。因此对于反抗性恒转矩负载,当 n 为正向时, T_L 与 n 的正向相反, T_L 应为正,即负载特性曲线位于第一象限;当 n 为反向时, n 为负, T_L 应为负,而负载特性曲线位于第三象限,如图 1-1 所示,分别位于第一、三象限的两条虚线,即反抗性负载 T_L 与 n 同正负。

4. 位能性恒转矩负载特性

该类负载的特点是负载转矩 T_L 与转速 n 的方向无关,并保持大小恒定不变。提升机带重物体的升降运动是最典型的例子,重物不论是提升 (n 为正) 或下降 (n 为负),重物的重力总是向下,即负载转矩的方向不变,提升时重物产生的 T_L 与 n 方向相反,则 T_L 为正,负载特性曲线位于第一象限;下降时 n 为负,而 T_L 的方向不变仍为正,即负载特性曲线位于第四象限。如图 1-1 所示,同时位于第一、四象限为一条点画线。

在此还需说明调速电机的四个象限运行特性:第一象限为正转电动状态;第二象限为正转制动(发电)状态;第三象限为反转电动状态;第四象限为反转制动(发电)状态。目前的调速电机一般都具备四象限运行功能。而对于电动汽车驱动电机来说,除了要求在前进、倒退(无须通过齿轮切换来实现倒档)时实现正、反转,还需要在降速制动和下坡时能进行发电回馈,因此其驱动电机在前进、倒退、制动和下坡四种行驶工况中会分别运行于第一、三、二三个象限中(注意,汽车下坡实现发电回馈时,其电机仍运行于正转状态,



— 恒功率负载特性
····· 通风机负载特性
--- 反抗性恒转矩负载特性
- · - 位能性恒转矩负载特性

图 1-1 典型生产机械的负载转矩特性



因此其发电回馈是在第二象限中进行的)。对汽车行驶驱动转矩来说,它还是一个多变的负载特性,该多变即表现在需适应各种不同行驶工况中的特性。如车辆在起步、加速时表现为反抗性恒转矩负载特性,在高速行驶时却主要表现为恒功率负载特性,而在上下坡时又有点类似于势能恒转矩特性。可以说汽车行驶中的负载特性是一个复杂多变的过程,需考虑各个工况行驶时的需求,决不能顾此失彼,即需要对车辆在起步、加速、上坡、下坡、高速、低速、滑行、降速、制动和停车等每一种行驶工况中的特性要求进行全面分析、比较、归类、总结。

最后可得到电动汽车对其驱动电机的各项性能要求:

- 1) 汽车在起步、加速和上坡时,要求有较大的起动转矩和一定的短时过载能力。
- 2) 应限制电机有过大的峰值电流。由于电动汽车电机通常由蓄电池供电,而过大的峰值电流极易损坏蓄电池。普通电机的起动电流往往都较大,需尽可能改善电机的起动特性。
- 3) 为满足汽车能在各种高、低速工况下运行,要求电机有较宽的调速范围和理想的调速特性,以尽可能省去或简化机械变速机构与其传动链,从而减少机械摩擦损失和车载重量,还能腾出空间供蓄电池安放和布局,并也可降低成本。所以一般可通过低速恒转矩调速和高速恒功率调速相结合的方式来满足。如目前的数控机床都已采用电机直接拖动丝杠,来实现低速强力切削和高速轻载往返拖板,并有较高的定位精度,其调速范围也远高于汽车在各种高低速行驶时的不同要求。
- 4) 要求电机能正反转运行,以达到汽车倒退时不必通过齿轮切换来实现倒档。
- 5) 要求电机能有效地实现发电回馈,使得汽车在降速制动和下坡运行时能通过电机发电回馈,把动能自动回馈给蓄电池,以节能并延长其续航里程。
- 6) 设法使电机同时具有电磁制动功能,即利用电磁吸力来使电机的定、转子相互吸住,以达到一定的制动效果。由于汽车频繁运行于起/停状态,较好的电磁制动能减少机械制动的运行频率,避免机械制动固有的热衰退和水衰退现象,提高汽车的制动效能及其恒定性,即提高车辆行驶安全性,同时也提高了机械制动器的使用寿命。另外,也希望能通过对电机结构的进一步改进,使电机运行于电磁制动方式时能有足够的制动力矩,力争能去掉机械制动器或仅在紧急制动时使用。

它们在负载要求、技术性能和工作环境等方面有着特殊的要求:

- 1) 电动汽车驱动电机需要有四五倍的过载以满足短时加速或爬坡的要求,而工业电机只要求有两倍的过载即可。
- 2) 电动汽车的最高转速要求达到在公路上巡航时基本速度的四五倍,而工业电机只需要达到恒功率是基本速度的两倍即可。
- 3) 电动汽车驱动电机需要根据车型和驾驶人的驾驶习惯设计,而工业电机只需根据典型的工作模式设计。
- 4) 电动汽车驱动电机要求有高功率密度(一般要求达到 1kW/kg 以内)和好的效率图(在较宽的转速范围和转矩范围内都有较高的效率),从而能够降低车重,延长续航里程,而工业电机通常对功率密度、效率和成本进行综合考虑,在额定工作点附近对效率进行优化。
- 5) 电动汽车驱动电机要求工作可控性高、稳态精度高、动态性能好,而工业电机只有某一种特定的性能要求。
- 6) 电动汽车驱动电机装在电动车上,空间小,工作在高温、坏天气及频繁振动等恶劣