

中国博士后科学基金项目 (2015M581883)

江苏省自然科学基金青年基金项目 (BK20160269)

电动车开关

DIANDONGCHE KAIGUAN CIZU DIANJI QUDONG XITONG YANJIU

磁阻电机驱动系统研究

DIANDONGCHE KAIGUAN CIZU DIANJI QUDONG XITONG YANJIU

程 鹤 著

DIANDONGCHE KAIGUAN CIZU DIANJI QUDONG XITONG YANJIU

中国矿业大学出版社

金项目(2015M581883)

金青年基金项目(BK20160269)

电动车开关磁阻电机 驱动系统研究

程 鹤 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书在简述新能源电动车的发展历史、类型、现状,以及开关磁阻电机系统组成、工作原理、数学模型和相关理论的基础上,根据电动车电机驱动系统需求特性,对电动车用开关磁阻电机设计指标、新型功率变换器驱动拓扑、电动车开关磁阻电机驱动控制策略和四象限无位置传感器控制进行了研究。

图书在版编目(CIP)数据

电动车开关磁阻电机驱动系统研究/程鹤著. —徐

州:中国矿业大学出版社, 2017. 5

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3533 - 6

I. ①电… II. ①程… III. ①电动汽车—开关磁阻
电动机—研究 IV. ①U469.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 092363 号

书 名 电动车开关磁阻电机驱动系统研究
著 者 程 鹤
责任编辑 何 戈
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)
营销热线 (0516)83885307 83884995
出版服务 (0516)83885767 83884920
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
开 本 787×960 1/16 印张 9.75 字数 186 千字
版次印次 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷
定 价 24.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

面对资源紧缺和环境污染两大问题,世界各国都在大力发展和推广新能源电动车。电机驱动系统是电动车发展的关键技术之一,开关磁阻电机因启动转矩大、调速范围宽、驱动效率高、容错能力强和成本低等特性,非常适用于电动车应用场合。然而,较大的转矩脉动、特殊的功率变换器结构和脆弱的位置传感器同样也限制了开关磁阻电机在电动车中的应用。为此本书根据电动车电机驱动系统需求特性,对电动车用开关磁阻电机设计指标、新型功率变换器驱动拓扑、电动车开关磁阻电机驱动控制策略和四象限无位置传感器控制进行了研究。

本书共分为6章,第1章介绍了撰写本书的背景和意义,讲述了新能源电动车的发展历史和现状。接着介绍了电动车驱动电机的性能需求,以及驱动电机的类型和不同类型驱动电机的优缺点。

第2章介绍了开关磁阻电机在电动车中应用的优缺点和应用现状,开关磁阻电机的系统组成和运行原理,以及开关磁阻电机在电动车应用中的主要发展现状和研究方向。

第3章介绍了车用开关磁阻电机的设计指标和设计流程。根据电动车电机驱动系统需求特性和开关磁阻电机固有特性,总结了车用开关磁阻电机六个设计指标。基于所提的设计指标,采用多目标优化函数方法设计了车用开关磁阻电机,并总结了电动车用电机的设计流程。

第4章介绍了电动车开关磁阻电机集成化功率变换器拓扑。功率变换器是开关磁阻电机驱动系统重要组成部分之一,本章将双向DC/DC变换器和不对称半桥功率变换器级联,构成了能实现电动车不同工作模式的新型驱动拓扑。详细分析了功率变换器电动状态的六种等效工作电路,制动状态的五种等效工作电路和充电状态的四种等效电路。

第5章介绍了电动车开关磁阻电机的控制策略。根据电动车电动和制动两种工作状态,提出了电动状态采用转速闭环控制、制动状态采用制动转矩闭环控制等策略。在电动状态,采用三段式控制策略和混合交叉控制策略。在制动过程中,采用制动转矩闭环控制策略;采用遗传算法优化开通和关断角,减小转矩脉动,提高制动能量回馈效率。

第6章介绍了电动车开关磁阻电机无位置控制方法。位置传感器的安装降低了开关磁阻电机驱动系统在电动车中应用的可靠性,为此本章提出了能实现自启动、四象限和宽调速范围的无位置传感器控制。所提方法仅需要存储四条磁链-电流特性曲线,无须额外的硬件或存储器,运算量小,且能实现自启动、四象限、全速段,非常适用于电动车应用场合。

本书引用了国内外许多专家、学者的著作、论文等文献,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳切希望读者批评指正。

著 者

2017年1月

<h1>目 录</h1>	
第 1 章 绪论	1
1.1 新能源汽车发展概况	1
1.2 电动车电机驱动系统研究现状	3
第 2 章 开关磁阻电机驱动系统研究现状	9
2.1 开关磁阻电机系统组成和基本原理	9
2.2 开关磁阻电机设计指标和方法研究现状.....	10
2.3 功率变换器设计研究现状.....	13
2.4 控制策略研究现状.....	14
2.5 无位置传感器控制研究现状.....	19
第 3 章 电动车开关磁阻电机设计指标和结构优化	24
3.1 电动车理想驱动特性与驱动电机需求特性.....	25
3.2 开关磁阻电机驱动系统动态仿真模型.....	28
3.3 电动车用开关磁阻电机设计指标.....	35
3.4 电动车用开关磁阻电机多目标优化.....	47
3.5 仿真和实验验证.....	55
3.6 本章小结.....	59
第 4 章 电动车开关磁阻电机集成化功率变换器拓扑设计与控制	60
4.1 电动车开关磁阻电机集成化功率变换器拓扑.....	61
4.2 电动工作模式与控制策略.....	63
4.3 制动工作模式和控制策略.....	67
4.4 充电工作模式和控制策略.....	71
4.5 仿真和实验验证.....	75
4.6 本章小结.....	83

第 5 章 电动车开关磁阻电机驱动系统控制策略	84
5.1 电动状态转速闭环控制	85
5.2 制动状态转矩闭环控制	90
5.3 仿真和实验验证	96
5.4 本章小结	105
第 6 章 电动车开关磁阻电机四象限无位置传感器控制	107
6.1 特殊位置磁链特性检测	108
6.2 启动与低速四象限无位置传感器控制	112
6.3 中高速四象限无位置传感器控制	118
6.4 实验验证	123
6.5 本章小结	131
参考文献	133

第1章 绪 论

1.1 新能源汽车发展概况

1834年,美国发明家托马斯·达文波特研制成了第一辆直流电机驱动的电动车,与当时的蒸汽机汽车相比具有安静、清洁、高效等优点,因而更受欢迎。1865年,法国人噶斯顿·布朗特发明了可充电的铅酸电池,极大地促进了电动车的发展。在20世纪20年代,随着内燃机技术的发展、石油价格的降低以及因电池技术瓶颈所导致的电动车续航里程短等原因,内燃机汽车逐渐占据了市场,到1930年,电动车基本从欧美市场上消失^[1]。

近年来,汽车工业飞速发展,根据美国汽车行业杂志 *Wards Auto World* 的数据,到2011年8月,世界汽车保有量约有8亿辆,预计到2030年全球汽车保有量将突破20亿辆^[2]。国际汽车制造协会数据显示,2009年中国的汽车产量较上年增加了48%,达到了1300余万辆;2010年较上年增长了32%,达到了1800余万辆。据预测,中国的汽车普及率将由2010年的5.9%上升到2030年的26.7%,将成为汽车保有量最高的国家^[3]。汽车工业的发展将带来两大问题:石油资源消耗和环境污染。交通运输业占到了石油总消耗量的61%,国际能源署2009年预测,交通运输业的能源消耗到2020年将增长50%,到2030年将增长80%,这将使得石油资源紧缺。内燃机燃烧会排放出大量污染物,有80%以上的一氧化碳、40%以上的氮氧化物和20%~30%的颗粒污染物来自汽车尾气排放。其中,二氧化碳会造成温室效应;氮氧化物和二氧化硫是导致酸雨的罪魁祸首;一氧化碳和碳氢化合物会引起一系列健康问题。在能源紧缺和环境污染的双重压力下,新能源电动车因清洁、高效、低噪声等特点受到世界各国的广泛关注。为了推进新能源汽车的发展,世界各国都积极制定鼓励政策和发展规划,表1-1给出了美国、日本、欧盟和我国近年来制定的相关政策^[4]。从表中可以看出各国都在大力发展新能源汽车产业,我国也抓住了这次发展机遇,提升自主创新能力,实现交通可持续化跨越式发展。

表 1-1 各国新能源电动车政策

国家	政策	
美国	2011 年,奥巴马:2015 年美国将只采购新能源汽车	
	2009 年,奥巴马新能源政策,未来 10 年投入 1 500 亿美元发展新能源技术	
	2009 年,美国下一代电动汽车动议:宣布用 24 亿美元资助美国制造商生产下一代插电式电动汽车及零部件	
	2008 年,《HR6323 法案》:为美国能源部提供补贴,用于混合动力重型卡车的研发、生产和销售	
	2005 年,《能源政策法案》:推进混合动力和燃料电池车辆的研究,并制定相关税收政策	
日本	2012 年,日本内阁批准了《关于重振日本的综合策略》,以期占领全球下一代汽车市场	
	2009 年,实施绿色税制,购买新能源汽车者将享受多种税赋的优惠	
	2007 年,对燃料电池汽车及其燃料电池设备开发的企业给予政府支持和税收优惠	
	2006 年,出台《新国家能源战略》,决定发展各类新能源	
欧盟	清洁能源合作伙伴项目(2002—2016 年),实现氢燃料电池汽车的商业化	
	德国	2009 年,《国家电动汽车发展计划》,提出在 2020 年、2030 年分别普及 100 万辆和 500 万辆新能源汽车
	法国	2009 年,法国生态、交通、可持续发展部公布了 14 项开发绿色汽车的国家计划
		2008 年,清洁汽车购买奖励体系
	英国	英国政府发布购买新能源汽车补贴细则(2011~2014),总共补贴 2.3 亿英镑
		道路交通二氧化碳减排 5 年计划
中国	2012 年,国务院发布《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020 年)》,到 2020 年纯电动车和插电式混合动力汽车生产能力达 200 万辆,累计销量超过 500 万辆	
	2012 年,《电动汽车科技发展“十二五”专项规划》	
	2012 年,国家税务总局、交通运输部《关于城市公交企业购置公共汽电车辆免征车辆购置税有关问题的通知》	
	2012 年,《关于组织开展新能源汽车产业技术创新工程的通知》	
	2012 年,《关于扩大混合动力城市公交客车示范推广范围有关工作的通知》	

无论是混合动力汽车、纯电动汽车,还是燃料电池汽车,电机驱动系统既是核心技术,也是共性技术。在我国新能源汽车“三纵三横”的研发布局中,电机驱动系统作为“三横”之一,是推进电驱动总成技术的研究重点^[5]。电动车驱动电机相比于普通工业电机有着以下特性需求:高的功率和转矩密度;在较宽的工作区域内保持高效率;具有宽的调速范围,即包含恒转矩区和宽的恒功率区;在启

动或爬坡时能提供大转矩输出,即短时过载能力强;有高的可靠性和鲁棒性,容错能力强;可实现四象限运行和制动能量回馈;转矩脉动小,噪声低;成本低^[6]。SRM 的特性满足上述多项要求,同时相比于其他类型电机,其结构简单牢固、启动转矩大、调速范围宽、过载能力强、容错性能强、在较宽的工作区域有高的效率等优点使其非常适用于电动车驱动系统^[7]。

在目前电动车电机驱动系统中,与感应电机和永磁电机相比,SRM 的应用较少,这与 SRM 本身存在的一些问题不无关系。由于固有的双凸极结构和脉冲励磁,SRM 有较大的转矩脉动和噪声,尤其在低速段,转矩脉动与机械传动装置产生共振,将严重影响驱动性能^[8]。功率变换器是 SRM 驱动系统重要组成部分之一,SRM 本体固然成本低,但需要特殊的驱动拓扑结构,增大了功率变换器成本,从而使得整个驱动系统成本增加。对于电动车来说,存在电动和制动工作状态,功率变换器还应能实现电动车不同的工作状态以及不同工作状态之间的平滑切换。SRM 是自同步电机,必须根据转子位置信息实现换相,产生连续的转矩。常用的位置传感器有光电传感器、霍尔传感器、旋转变压器和光电编码器。位置传感器的存在增加了驱动系统的成本和体积,同时降低了 SRM 相对于其他类型电机本体简单牢固和容错能力强的优势。在电动车这种高温、多粉尘、强振动的恶劣环境下,SRM 驱动系统的无位置传感器控制则显得尤为重要。与传统工业用电机不同,电动车驱动电机有着特殊的需求,因此有必要确定电动车用驱动电机的设计指标和设计方法,从而可以设计出满足电动车驱动性能需求的电机。因此,针对 SRM 驱动系统存在的以上问题,本书从电动车 SRM 设计指标、电动车 SRM 功率变换器驱动拓扑设计、电动车 SRM 驱动系统控制策略和无位置传感器控制四个方面进行研究,旨在提升 SRM 在电动车应用中的竞争力。

1.2 电动车电机驱动系统研究现状

电动车驱动电机种类繁多,按不同的方式有着不同的分类方法,其中一种分类方法如图 1-1 所示。下面分别介绍四种常用的电机——直流电机、感应电机、永磁电机和开关磁阻电机在电动车中应用的发展现状^[9-11]。

直流电机转矩-转速特性与电动车驱动需求特性匹配较好,转速、转矩调节简单,电机结构成熟,因此在电动车领域也有一定的应用^[12]。但滑环与碳刷的存在使电机运行时会产生火花,并附带产生电磁干扰,这对电气化的新能源电动车有着严重的影响;同时也增大了直流电机的体积,降低了系统可靠性和效率,限制了电机高速运行能力,需要定期维护。随着功率器件价格的降低和电机设

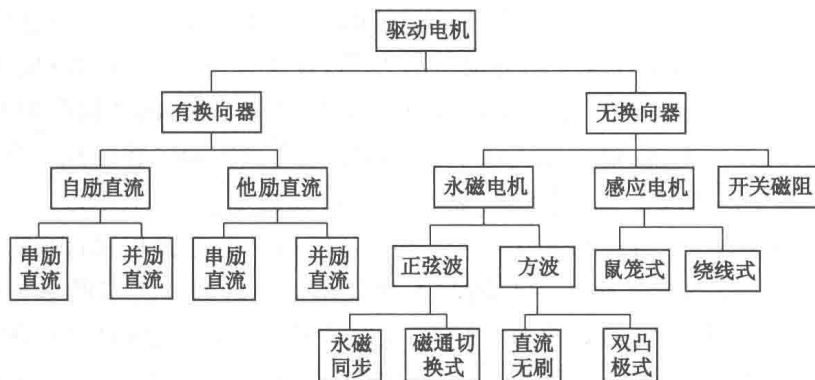


图 1-1 驱动电机分类

计与控制技术的发展,直流电机在电动车中的应用逐渐减少。

感应电机具有结构简单、坚固耐用、成本低、运行可靠、低转矩脉动、技术成熟等特点,在欧美国家设计的电动车上有着广泛的应用。同时,矢量控制与直接转矩控制技术的出现,使得感应电机的动静态性能超过了直流电机。但是,感应电机相对于永磁电机而言,效率低、重量大、功率因数小,同时有着启动转矩低、启动电流大和存在着临界转矩等缺点,因此限制了感应电机在电动车领域中的应用。为了提高感应电机在电动车中的应用,可以从感应电机结构设计入手加以改进^[13,14]。浅、宽的转子槽有利于提高感应电机的启动性能;定子绕组采用多匝并联涂漆线和浅的转子槽可以减弱趋肤效应;定子采用磁性槽楔来约束谐波的影响;采用较多的定、转子槽,且转子槽少于定子槽,来减小谐波的影响。为了提高异步电机的驱动效率,控制方面则可以通过自适应调节电机磁链幅值和直接测量输入的驱动功率来达到最大的驱动效率^[15];为了得到动态转矩情况下的最小损耗控制,通过优化的指数磁链与预测控制方案,来减少感应电机在动态控制过程中的损耗^[16]。

由于永磁体的存在,永磁电机有着其他电机无可比拟的高效率、高转矩密度、高功率因数的特性,这些特性在电动车应用中十分重要,因此永磁电机在国内外新能源电动车中有着广泛的应用。永磁电机根据电机反电动势的波形可以分为无刷永磁直流电机和无刷永磁交流电机;根据磁路方向可以分为径向永磁电机与轴向永磁电机;根据永磁体布置位置可以分为转子永磁拓扑电机与定子永磁拓扑电机;根据励磁方式可以分为永磁体励磁电机与混合励磁电机^[17]。不同的永磁电机结构有着不同的特性,根据电动车驱动需求可以选择不同的电机结构。但是,由于永磁体的存在,无刷永磁电机也有固有的缺点:永磁体增加了电机弱磁控制的难度,限制了电机恒功率调速范围;永磁体存在着不可逆去磁风

险,限制了永磁电机在恶劣环境中的应用;随着时间的推移,永磁体存在退磁现象,将导致电机效率和性能下降。目前对永磁电机在电动车中应用的研究主要集中在提高电机效率、功率密度,降低齿槽转矩,增强电机弱磁能力和降低永磁体的去磁风险等几个方面。对应用于车辆自重较大场合的低速大转矩永磁轮毂电机,转子应为多极结构;采用分数槽集中绕组结构可以削弱谐波电动势的影响,提高端部空间利用率和降低齿槽转矩;优化转子气隙长度与电气角度的关系可以得到优化的空载气隙磁链密度,从而减小三次谐波、增加基波幅值;通过改变电机绕组,优化空载电磁力波形,提高电机的效率;通过优化磁桥的长和宽来减少漏磁,增加永磁体的利用率^[18,19]。

SRM 采用双凸极结构,集中绕组,结构简单牢固;定、转子由硅钢片叠压而成,转子上既无绕组也无永磁体,有高的转矩/惯性比和大的启动转矩,因此适合于频繁启动的场合;电机转子无冷却需求,定子散热容易,因此过载能力强;简单的转子结构可使其工作在高转速,通过调节开关角可以实现宽的恒功率调速范围;电机各相绕组相互独立,同时采用独特的驱动拓扑,无须考虑开关器件短路现象,容错能力强;通过改变开通和关断角,可方便实现四象限运行,因此 SRM 很适合电动车应用场合。但是 SRM 转矩脉动大,相对于永磁电机功率密度、功率因数和效率偏低。国内外学者从电机本体设计和控制两方面对 SRM 进行大量的研究,以期降低电机的转矩脉动、增大电机的效率和功率密度。在设计方面,开关磁阻电机的优化主要从电机极数选择、极弧宽度优化、绕组匝数优化、软磁材料选择等方面入手;同时,以高转矩密度、高效率、强过载能力、宽调速范围、低转矩脉动、低噪声为目标综合优化设计。控制方面则采用转矩分配、直接瞬时转矩控制、智能控制来减小转矩脉动与噪声。综合电动车各种需求特性,对四种电机进行了综合比较,见表 1-2。

表 1-2 驱动电机性能参数比较

性能参数	直流电机	感应电机	永磁电机	开关磁阻电机
功率密度	差	中	优	良
效率	低	较高	高	较高
调速范围	较宽	较宽	较宽	宽
过载能力	优	良	中	优
可靠性	差	良	中	优
启动性能	优	差	良	优
转矩脉动	小	小	较大	大
成本	低	较低	高	低

从表 1-2 中可以看出,四种电机中,直流电机由于电刷的存在,无法满足高性能新能源电动车对电机驱动系统的需求,逐渐被淘汰。感应电机、永磁电机和开关磁阻电机是目前各类新能源汽车的主要应用类型。感应异步电机与开关磁阻电机功率密度相对较低,可以应用在对体积和质量要求不高的领域,如电动客车中;开关磁阻电机过载能力强、可靠性好,可以应用在特种车辆与军用车辆中;无刷永磁电机功率密度大、效率高,是目前应用最为普遍的车用电机类型。

国外生产电动车电机驱动系统的公司主要有美国 Eaton 公司、Enova 公司、Arzue 公司、AC Propulsion 公司、UQM 公司、Remy 公司;德国 Continental AG 公司、Bosch 公司、磁电(MM)公司、Siemens 公司;日本东京电机公司、日本安川电机公司;瑞士 Brusa 公司;加拿大 TM4 公司。Enova 公司主要为混合动力商用卡车和公共汽车设计电机控制单元、电机驱动系统和能量管理单元,产品主要针对的是感应电机驱动系统。AC Propulsion 公司和 Brusa 公司是世界知名的感应电机设计公司,其设计的感应电机系统广泛应用于世界各国生产的电动汽车驱动系统中。UQM 公司主要为军工和商用车制造混合动力推进系统,生产配套的电动机和发电机控制系统,其产品以永磁电机为主,功率等级和种类全面,并应用到了电动轿车和电动客车中。Remy 公司设计的 HVH 系列永磁电机有着优异的性能,在世界上处于领先地位,其公司客户包括戴姆勒、通用和北美一些商用汽车公司以及中国的部分汽车企业。TM4 公司和 Bosch 公司从事高性能电机设计和系统开发,产品应用在风力发电、新能源汽车等领域。Continental AG 公司生产的电力电子集成控制器集成了电机控制器、整车控制器、DC/DC 变换器,结构紧凑,功率质量比高于 5 kW/kg,功率体积比高于 8 kW/L。日本以丰田公司为代表,在混合动力技术方面最为先进,其采用了日本富士电子研究所设计的永磁电机驱动系统。表 1-3 给出了国外各个公司的车型及其选择的驱动电机类型。

表 1-3 国外车型和驱动电机类型

国家	车型	电机类型
美国	雪弗兰/Silverado	感应电机
美国/德国	戴姆勒-克莱斯勒/Durango	感应电机
美国	福特/Ranger	感应电机
法国	标志雪铁龙/Berlingo、SAXO	直流电机
法国	雷诺/Kangoo、Clio Electric	感应电机
德国	奔驰/A-Class-EV	感应电机

续表 1-3

国家	车型	电机类型
德国	宝马/BMW-E-I	感应电机
澳大利亚	霍顿/ECOMmodore	开关磁阻电机
意大利	菲亚特/ZIC	永磁电机
韩国	现代/Santa Fe	感应电机
日本	日产/FEV	感应电机
日本	日产/Tino、Altra	永磁电机
日本	本田/Insight、CIVIC	永磁电机
日本	丰田/Prius、E-com	永磁电机

由表 1-3 可以看出,由于感应电机制造和控制技术成熟,欧美各国开发的新能源电动车多采用感应电机,为了降低电机质量,电机壳体采用铸铝材料,电机的恒功率调速范围较宽。日本生产的混合动力汽车则大多采用永磁电机,电机效率和功率密度高,同时,在电机驱动系统集成度方面也有较大的优势。

我国在科技部的支持下,中科院电工所、清华大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、东南大学、香港大学等科研单位在新能源电动车电机驱动系统方面开展了研究。国内生产电动车驱动电机的公司主要有东方电气东风电机、大连电机、南车襄阳电机、上海安乃达、湘潭电机、株洲电机机车研究所、精进电动、上海电驱动、中纺锐力、上海御能等公司。通过攻关,各个科研单位和电机生产企业都开发出满足不同新能源汽车车型的电机驱动系统,提升了我国自主研发设计车用电机的能力。中科院电工所为东风 EQ7200HEV 混合动力轿车设计了全数字矢量控制的永磁同步电机驱动系统,同时为北理工的纯电动客车设计了交流异步电机驱动系统;哈尔滨工业大学为解放牌混合动力客车和红旗牌混合动力轿车设计了永磁同步电机驱动系统;株洲电机机车研究所研制的感应电机及其驱动系统应用在了清华大学的燃料电池客车中;天津大学为天津清源电动车设计了永磁同步和感应电机驱动系统;华中科技大学和北京中纺锐力研制的开关磁阻电机驱动系统成功应用在了东风混合动力客车中;东方电气东风电机研制的感应电机功率等级全面,其研发的产品已应用在了郑州日产、陆地方舟、安凯汽车等多家电动车公司的电动车辆上;上海电驱动主要设计永磁同步电机驱动系统,产品涵盖公交车、轿车、观光车等,主要客户包括奇瑞、华晨、长安、一汽等知名汽车企业;精进电动科技有限公司为新能源电动车设计和制造永磁电机,其产品大多出口国外。表 1-4 给出了国内各个公司的车型及其选择的驱动电机类型。

表 1-4 国内车型和驱动电机类型

生产厂家	车型	电机类型
一汽客车有限公司	解放牌 CA600HEV 混合动力城市公交车	永磁同步电机
一汽轿车股份有限公司	红旗 CA7180AE 混合动力轿车	永磁同步电机
	奔腾 B70 混合动力轿车	永磁同步电机
东风电动车辆股份有限公司	EQ7200HEV 混合动力轿车	永磁同步电机
	EQ61100HEV 混合动力客车	开关磁阻电机
上汽集团乘用车公司	SWB6127HE2 型混合动力城市客车	感应电机
	荣威 750 混合动力轿车	电励磁同步电机
北汽福田股份有限公司	BJ6123C6N4D 型燃料电池混合动力城市客车	感应电机
	BJ6113C7M4D-1 型混合动力城市客车	永磁同步电机
重庆长安汽车股份有限公司	杰勋混合动力轿车	永磁同步电机
	混合动力版长安志翔	永磁同步电机
奇瑞汽车股份有限公司	奇瑞 A5BSG	永磁同步电机
	奇瑞 A5ISG	永磁同步电机
	风云 2BSG	永磁同步电机
比亚迪股份有限公司	F3DM 双模电动车	永磁同步电机
	F6DM 双模电动车	永磁同步电机
	北汽 070GB 电动版	永磁同步电机
厦门金龙联合汽车工业有限公司	XM6127GH1 型混合动力城市客车	永磁同步电机
	XM6127GH3 型混合动力城市客车	感应电机
	XM6125GH1 型混合动力城市客车	开关磁阻电机
郑州宇通客车股份有限公司	ZK6118MGA9 型混合动力城市客车	感应电机
	ZK6140MGQA9 型混合动力城市客车	永磁同步电机
深圳明华环保汽车有限公司	电动环保汽车 MH6720	感应电机

从表 1-4 可以看出,在国内生产的新能源电动车中,永磁同步电机、感应电机和开关磁阻电机都有应用。其中在小型的混合动力轿车中,由于对电机驱动系统体积要求严格,大都选择了效率和功率密度较高的永磁同步电机;在大、中型的混合动力城市客车中,对电机驱动系统体积约束小,三种类型的电机都有广泛的应用。

第2章 开关磁阻电机驱动系统研究现状

2.1 开关磁阻电机系统组成和基本原理

在1970年和1973年,英国利兹大学和诺丁汉大学分别对SRM进行了研究。1975年,两个大学的联合研究小组成功研制了一套50 kW的SRM驱动系统用于电动车,测试结果表明,研制的SRM驱动系统的功率密度和效率都高于同功率水平的感应电机驱动系统^[20-22]。1980年,英国利兹大学的SRM研究小组发表了论文 *Variable speed switched reluctance motor*^[23],同年,在英国成立了SRM驱动公司SRD Ltd.,标志着SRM驱动系统得到了学术界和工业界的认可和关注。1983年,英国TRSC公司推出了名为OULTON的SRM传动装置,其结构简单、调速性能好、效率高等特点,引起了世界各国电气传动界的重视。我国于1984年开展了对SRM调速系统的研究,并取得了一系列研究成果。国内一批科研高校,如华中科技大学、南京航空航天大学、浙江大学、中国矿业大学、哈尔滨工业大学、合肥工业大学等,在SRM结构优化设计、减振降噪、无轴承控制、无位置传感器控制、容错控制、损耗计算等方面进行了全面研究。同时,国内一些企业如北京中纺锐力、南京瑞鹏、北京通大华泉、山东德森等研发出不同规格的电动车SRM驱动系统。

SRM驱动系统作为一种典型的机电一体化调速系统,主要由四部分组成:SRM、功率变换器、控制电路和检测电路。图2-1给出了SRM驱动系统组成示意图。SRM为双凸极结构,其定、转子均由硅钢片叠压而成。转子上既无绕组也无永磁体,而定子上绕有集中绕组,径向相对的绕组串联或并联在一起构成“一相”。SRM可以设计成单相、两相、三相、四相或更多相结构,且定、转子的极数有多种不同的搭配。为避免单边磁拉力,电机径向力必须对称,故定、转子极数应为偶数。相数越多,转矩脉动越小,运行更平稳,但这将导致电机结构复杂、主开关器件增多、成本变高。

功率变换器是实现SRM驱动系统能量传输的关键执行机构,它的作用是在电动时将电源提供的能量经适当转换后提供给电机绕组,制动时将电机储能回

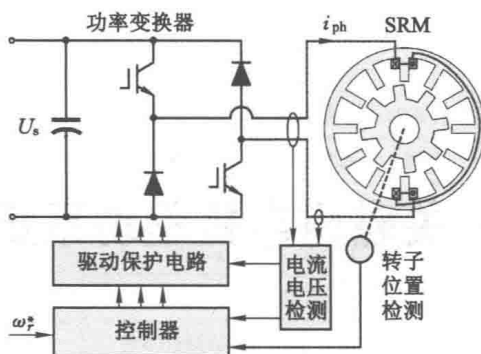


图 2-1 SRM 驱动系统组成示意图

馈给电源。由于 SRM 相电流是单向的，因此可以采用单极性的功率变换器主电路，结构较简单，而且相绕组与主开关器件是串联的，可以避免直通短路危险。控制电路是 SRM 驱动系统的核心部分，其主要功能是综合处理位置反馈信号、电流(电压)检测信号、给定目标等信息，控制功率变换器上主开关功率器件的工作状态，实现对 SRM 的控制。检测电路包括位置检测和电流/电压检测等，一方面为控制器提供转子位置信息，保证 SRM 工作于自同步状态，另一方面提供电流、电压等状态信息，实现系统高性能控制以及自保护功能。

SRM 独特的双凸极结构以及定子集中绕组分布使得它不能像传统电机那样依靠定、转子上各自磁场间相互作用形成电磁力，而是遵循“磁阻最小原理”，即磁通总是沿着磁阻最小的路径闭合。当某相定子极通电后，所产生的磁场将拉动相近的转子极旋转到其轴线与该定子极轴线对齐的位置，即磁阻最小位置。控制器按照定子绕组空间分布位置，以一个方向顺序励磁，就能让转子按给定方向转动。所以 SRM 转向仅取决于相绕组通电的顺序，而与相绕组电流方向无关。

目前围绕电动车用 SRM 的研究主要在四个方面，即开关磁阻电机本体优化设计、功率变换器拓扑设计、车用 SRM 控制策略和 SRM 无位置传感器控制。下面分别从这四个方面介绍相应的研究现状。

2.2 开关磁阻电机设计指标和方法研究现状

优化了的电机结构是实现高性能控制的基础。SRM 为双凸极结构，定子上采用集中绕组，转子上无绕组和永磁体；特殊的几何结构使其有较大的转矩脉动和噪声；由于是单边励磁电机，存在励磁惩罚，相比于永磁电机，功率密度稍低。为了弥补以上缺点，可从电机的定/转子极数、定/转子极弧宽度、定/转子极形