

# 电动车驱动电机及其控制技术综述

易将能, 韩 力  
(重庆大学, 重庆 400044)

Overview of Driving Motor and its Control Technology about Electric Vehicle

YI Jiang - neng, HAN Li  
(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**摘 要:** 简述了电动车驱动系统及特点, 在此基础上详细分析并比较了电动车主要电气驱动系统, 着重介绍了一种深埋式永磁同步电动机及其控制系统, 最后简要概述了电动车电气驱动系统的发展方向。

**关键词:** 电动车; 电气驱动系统; 电动机; 控制技术

**中图分类号:** TM341, TM346, TM352 **文献标识码:** B

**文章编号:** 1004 - 7018(2001)04 - 0036 - 03

**Abstract:** The paper describes the driving system of electric vehicle and its features. Main electric driving systems of electric vehicle are analyzed and compared in detail. Then an outstanding imbedded permanent magnetic synchronous motor and its control system are introduced emphatically. Finally, the developing future of the driving system of electric vehicle is described briefly.

**Key words:** electric vehicle; electric driving system; electric motor; control technology

## 1 概 述

电动车是一种安全、经济、清洁的绿色交通工具, 不仅在能源、环境方面有其独特的优越性和竞争力, 而且能够更方便地采用现代控制技术实现其机电一体化的目标, 因而具有广阔的发展前景。

现有电动车大致可以分为以下几个主要部分: 蓄电池、电池管理、充电系统、驱动系统、整车管理系统及车体等。驱动系统为电动车提供所需的动力, 负责将电能转换成机械能。无论何种电动车的驱动系统, 都具有基本相同的结构, 都可以分成能源供给子系统、电

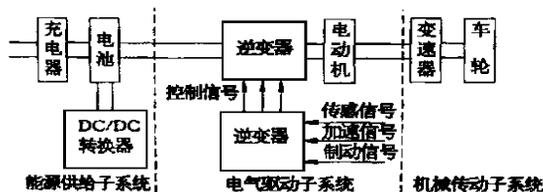


图1 电动车驱动系统基本结构

气驱动子系统、机械传动子系统三部分, 其中电气驱动子系统是电动车的心脏, 主要包括电动机、功率电子器件及控制部分。如图1所示。

其中, 电动车驱动系统均具有相同或相似的功能模块, 如图2所示<sup>[10]</sup>。

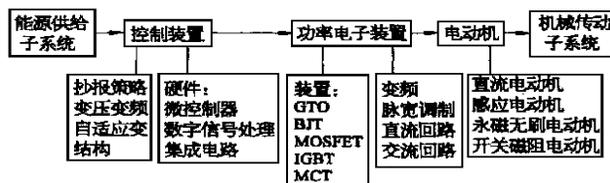


图2 电动车驱动系统的功能模块

## 2 电动车电气驱动系统比较

电动机的类型对电气驱动系统以及电动车整体性能影响非常大, 评价电动车的电气驱动系统实质上就是对不同电动机及其控制方式进行比较和分析。目前正在应用或开发的电动车电动机主要有直流电动机、感应电动机、永磁无刷电动机、开关磁阻电动机四类。由这四类电动机所组成的驱动系统, 其总体比较如下表所示。

电动车电气驱动系统用电动机比较表<sup>[3]</sup>

电动机类型 比较内容		直流电动机	感应电动机	永磁无刷 电动机	开关磁阻 电动机
		电动机	控制方式 大小、质量 高速运转能力 维修性 效率	差 差 差 差 差	一般 优(笼形转子) 优 优 一般
控制装置	尺寸、质量 控制性 功率元件数	优 一般 少	一般 优 多	一般 优 多	一般 一般 较多
综合评价		差	一般(坚固)	优(高效)	较优

下面分别对这几种电气驱动系统进行较为详细地分析和阐述。

### 2.1 直流驱动系统

直流电动机结构简单, 具有优良的电磁转矩控制特性, 所以直到20世纪80年代中期, 它仍是国内外的

主要研发对象。而且,目前国内用于电动车的绝大多数是直流驱动系统。

但普通直流电动机的机械换向结构易产生电火花,不宜在多尘、潮湿、易燃易爆环境中使用,其换向器维护困难,很难向大容量、高速度发展。此外,电火花产生的电磁干扰,对高度电子化的电动汽车来说将是致命的。此外,直流电动机价格高、体积和重量大。随着控制理论和电力电子技术的发展,直流驱动系统与其它驱动系统相比,已大大处于劣势。因此,目前国外各大公司研制的电动车电气驱动系统已逐渐淘汰了直流驱动系统<sup>[8,10]</sup>。

## 2.2 感应电动机驱动系统

### 2.2.1 感应电动机

电动车感应电动机与一般感应电动机相比较具有以下特征:

- (1) 稳定运行时,与一般感应电动机工况相似。
- (2) 驱动电动机没有一般感应电动机的起动过程,转差率小,转子上的集肤效应不明显。
- (3) 运行频率不是 50Hz,而是远远在此之上。
- (4) 采用变频调速方式时,转速与极数之间没有严格对应关系。

为此,电动车感应电动机设计方面有如下特点:

- (1) 尽力扩大恒转矩区,使电动机在高速运转时也能有较高转矩。而要提高转矩,则需尽量减小定子之间的气隙,同时减小漏抗。
- (2) 更注重电动机的电磁优化设计,使转矩、功率和效率等因素达到综合最优。
- (3) 减少重量、体积,以增加与车体的适配性。

### 2.2.2 控制技术

应用于感应电动机的变频控制技术主要有三种:V/F 控制、转差频率控制、矢量控制。20 世纪 90 年代以前主要以 PWM 方式实现 V/F 控制和转差频率控制,但这两种控制技术因转速控制范围小,转矩特性不理想,而对于需频繁起动、加减速的电动车不太适宜。近几年来,研制的电动车感应电动机几乎都采用矢量控制技术。矢量控制按其侧重点不同,主要有两种控制策略:提高驱动系统效率的最大效率控制与简化系统、降低成本的无速度传感器矢量控制<sup>[9]</sup>。

最大效率控制技术是通过使励磁电流  $I_0$  随电动机参数和负载条件而变化来实现在任何负载条件下都使电动机的损耗最小,效率最大的目标。

矢量控制离不开速度的控制,而无速度传感器是利用电动机电压、电流和电动机参数来估算出速度,从而无需一般矢量控制中的速度传感器,达到了简化系统、降低成本、提高可靠性的目的。

## 2.3 永磁无刷电动机驱动系统

### 2.3.1 永磁无刷电动机

永磁无刷电动机系统可以分为两类,一类是方波驱动的无刷直流电动机系统(BDCM),另一类是永磁同步电动机系统(PMSM),也称之为正弦波驱动的无刷直流电动机系统。BDCM 系统不需要绝对位置传感器,一般采用霍尔元件或增量式码盘,也可以通过检测反电动势波形换相。PMSM 系统一般需要绝对式码盘或旋转变压器等转子位置传感器。从磁铁所处不同位置的结构上看,永磁无刷电动机可以分成表面型、镶嵌型、深埋式等结构型式<sup>[9]</sup>,在电动汽车中也有采用盘式结构或外转子结构的。

深埋式永磁同步电动机因其有高的功率密度、有效的弱磁控制及方便的最大效率控制而在电动车应用领域倍受青睐,是当前电动车电动机研发的热点。用在电动车上的永磁同步电动机是将磁铁插入转子内部,得到可同步旋转的磁极。深埋式转子结构如图 3 所示,这种电动机在结构设计方面主要有两个特征<sup>[3]</sup>:

转子磁铁使用埋入式;采用多极化设计。这种设计具有显著的优点:

- (1) 与将永磁体贴在转子表面的情况相比,将永磁体植入转子内部,则即使高速旋转,永磁体也不会飞散,为此就使设计 10000r/min 以上的超高速电动机成为可能。
- (2) 对于要求的最大转矩而言,采用图 3 所示的转子结构,永磁电动机能做得更小。

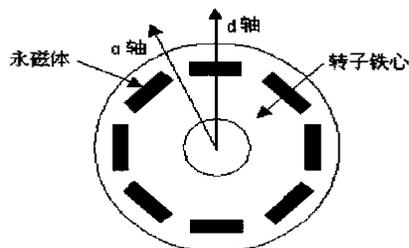


图 3 深埋式永磁同步电动机结构简图

(3) 电机多极化设计也是降低成本的有效手段。图 4 表示了电动机永久磁铁用量占电动机总重量的百分比随电动机极数增加而减少的变化曲线<sup>[4]</sup>。

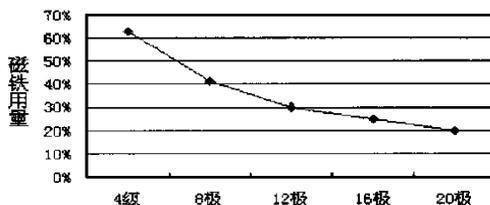


图 4 永磁同步电动机的极数和磁铁用量的关系

### 2.3.2 深埋式永磁同步电动机的控制技术

深埋式永磁同步电动机控制系统的构成如图 5 所示<sup>[3]</sup>。与一般电动机的控制系统多为速度控制系统或者位置控制系统不同,电动车是由加速器与制动器共

同决定的转矩指令来控制电机。因为转矩由电流决定,所以实际上构成了一个电流控制系统。应用转矩指令和电动机转速,通过独立增减 d 轴电流和 q 轴电流进行电流控制,就能使电动机和逆变器的综合损失最小,进而提高电动车驱动系统的效率。d 轴电流指令为负,就意味着进行弱磁调节,所以,弱磁控制也是有效的。以上设计不仅考虑了电动机的特性,还考虑了电动机的控制方法及使用方法,系统结构紧凑、性能稳定,是目前电动车的优选驱动系统。

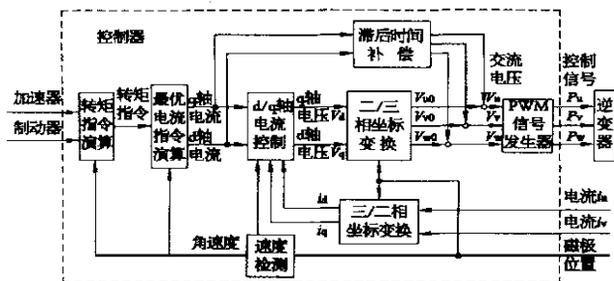


图5 永磁同步电动机控制系统框图

## 2.4 开关磁阻电动机驱动系统

### 2.4.1 开关磁阻电动机

目前,开关磁阻电动机(SRM)已投入实际使用,法国 FIAT 公司研制的电动车和中国第二汽车制造厂研制的电动客车都曾采用了开关磁阻电动机。SRM 是没有任何形式的转子导体和永久磁铁的无刷电动机,它的定子磁极和转子磁极都是凸的。由于 SRM 具有集中的定子绕组和脉冲电流,其功率变换器可以采用更可靠的电路拓扑形式。SRM 具有简单可靠、在较宽转速和转矩范围内高效运行、控制灵活、可四象限运行、响应速度快、成本较低等优点。但 SRM 有转矩波动大、噪声大、需要位置检测器、系统非线性特性等缺点,所以,目前应用还受到限制。针对传统 SRM 的缺点,研制了永磁式开关磁阻电动机驱动系统(PM-SRD),通过高性能永磁钢的引入,克服了传统 SRM 存在的换流相对较慢、能量利用率较低的缺点,增加了电机的比功率密度。

### 2.4.2 控制技术

由于 SRM 系统具有明显的非线性特性,系统难于建模,一般的线性控制方式不适于 SRM 系统。目前主要利用模糊逻辑控制、神经网络控制等。香港大学开发的模糊滑模控制具有减少控制振荡等优点,是 SRM 系统控制研究的一个新的突破<sup>[7]</sup>。

## 3 结束语

20 世纪 80 年代以来,随着电力电子技术的发展,交流电动机的控制变得比较容易了。为此,电动车的电气驱动系统从直流电动机转向了交流电动机,特别

是感应电动机具有结构紧凑、可靠性高、成本低等优点,对于电动车来说是特别可贵的。但永磁电动机除有以上优点外,还在转换效率方面又较感应电动机稍胜一畴。

开关磁阻电动机具有结构简单、控制灵活、可四象限运行、可靠性高、能在较宽的速度和转矩范围内高效运行等特点,作为最具潜力的电动车电气驱动系统日益受到重视。但其转矩脉动大,噪声大等缺点一直未得到很好解决,如何从电机设计和控制策略两方面加以改进是现在的研究热点。

永磁电动机电气驱动系统以转速更高(德国 KOVO 电技术公司已研制出转速达 50000r/min、功率达 1.5kW 的无刷电动机)、用磁更省、可以实现转子轻巧紧凑、低成本化设计而成为研究与应用的热点。但永磁电动机也有制成后难以调节磁场以控制功率因素和无功功率的缺点,这将成为今后的研究方向。

在控制器件方面,应用新一代功率电子器件,可使变频器有更高的功率密度和效率,结构也更牢固,更适于电动车所用。

在控制策略方面,变结构控制、模糊控制、神经网络控制以及专家系统等新的控制方法正逐渐应用于电动车驱动系统中,并取得越来越好的效果。

### 参考文献:

- [1] 王季秩,曲家骥. 执行电动机[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 纸屋雄史. 实用化を待つ燃料電池電気自動車[J]. 电学杂志,2000(3):165168.
- [3] 正木良三. 電気自動車用永久磁石電動機上とその制御技術[J]. 电学志,1999,119(819).
- [4] 阿部真一. ハイブリッド電気自動車をささえる要素技術[J]. 自動車技術,1999,53.2:21-26.
- [5] 松平信纪. 電気自動車 ハイブリッド車用 モータおよびモータ制御技術の紹介[J]. 自動車技術,1999,53.2:21-26.
- [6] 赤木泰文. AC モータのベクトル制御[J]. 电学论 D,1988,108.8:726.
- [7] 陈清泉. 电动车——清洁有效的城市交通工具[J]. 电工技术杂志,1999(2):58.
- [8] 宋慧,胡骅. 电动车的现状与发展 I[J]. 汽车电器,2000(1):5155.
- [9] 王颖,王婧. 电动车电子驱动系统综述[J]. 电工技术研究,1998(7):812.
- [10] 王宗元. 电动车的发展和技木支持(续一)[J]. 自动化信息,1999(4):69.
- [11] 王宗元. 电动车的发展和技木支持(续二)[J]. 自动化信息,1999(6):811.

作者简介:易将能(1972-),男,硕士,主要研究方向是电机的检测与控制。

韩力(1963-),男,硕士,主要研究方向为电机现代设计与电机电磁场。