

电动汽车驱动系统牵引电机及其控制技术

翟 丽¹, 张壮志², 郑兴伟²

(1.北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081; 2.山东巨菱集团, 山东 泰安 271000)

摘要: 介绍电动汽车驱动系统的4种牵引电机——直流电机、感应交流电机、永磁电机、开关磁阻电机的机械特性及控制技术。

关键词: 电动汽车; 直流电机; 交流电机; 永磁电机; 开关磁阻电机

中图分类号: U469.72 文献标识码: A 文章编号: 1003-8639(2003)03-0009-04

Driving System Tractive Motor on Electric Vehicle and Its Control Technology

ZHAI Li¹, ZHANG Zhuang-zhi², ZHENG Xing-wei²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Shandong Juling Group, Tai'an 271000, China)

Abstract: This paper introduces the mechanical characteristics and the control technology of the following four tractive motors of the drive system on electric vehicles: DC motor, AC motor, permanent magnet motor and switch magnetic resistance motor.

Key words: electric vehicle; DC motor; AC motor; permanent magnet motor; switch magnetic resistance motor

1 引言

目前, 汽车工业已成为世界经济和各国经济发展的支柱产业, 但同时汽车也给人们带来许多难题, 如汽车的有限能源问题、排放与噪声等。电动汽车因有清洁、无污染、能量效率高及能源的多样化、结构简单以及维修使用方便等优点, 作为替代燃油汽车的21世纪绿色交通工具, 有很大的发展前景。它集机、电、液、光、化为一体, 是关于车辆、电力拖动、功率电子、控制、化学电源、计算机、系统能源、新材料的交叉学科。

电动汽车是用电力驱动的车辆, 由蓄电池供电, 通过电机控制器驱动电机, 电机将电能转换为机械能来驱动汽车。电动汽车与普通燃油汽车的真正差别在于动力驱动控制系统。

驱动控制系统按所使用电机类型的不同分为4种: ①直流电机驱动系统, ②三相交流感应电机交流驱动系统, ③永磁电机驱动系统, ④开关磁阻电机驱动控制系统。

驱动电机是电动汽车的关键部件之一, 要使电动汽车有较好的动力特性, 驱动电机应具有宽的调速范围及高的转速, 足够大的起动转矩, 体积小, 质量轻, 效率高且具有动态制动能力强和能量反馈的性能。

下面介绍4种电机驱动系统及其控制特性。

2 直流电机

20世纪90年代前开发的电动汽车通常采用直

修改稿收稿日期: 2003-03-07

作者简介: 翟 丽 (1973-), 女, 北京理工大学机械与车辆工程学院电动车辆工程中心博士, 研究方向为车辆电传动。

流电机驱动系统, 如无轨电车、蓄电池叉车等。直流驱动系统有成本低、易于平滑调速、控制器简单、控制相对成熟等优点。但由于直流电机在运行过程中需要电刷和机械换向器换向, 效率和转速均低于交流感应电机。直流电机可以用作电动机, 也可以用作发电机。当电动汽车在起动、加速和恒速运行时, 电机处于电动状态, 实现电能到机械能的变换, 驱动车辆前进。当电动汽车减速或制动时, 要求直流电机处在发电制动状态, 即处于再生制动状态, 给蓄电池充电, 实现机械能到电能的转换。

2.1 直流电机的运行特性

电动汽车直流电机驱动系统中的直流电机通常采用串励电机和他励电机。电动汽车牵引电机在很多情况下使用的转速转矩特性如图1所示。基本转

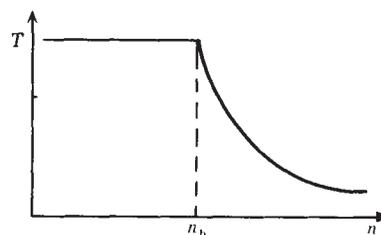


图1 直流电机转速转矩特性

速 n_b 以下为恒转矩区, 基本转速以上为恒功率区。在恒转矩区, 励磁电流保持不变, 改变电枢电压来控制转矩。在高速恒功率区, 电枢电压不变, 改变励磁电流或弱磁来控制转矩。

直流电机转速表达式

$$\omega_m = \frac{U \pm I_a R_a}{K_a \Phi_F} \quad (1)$$

式中： U ——电枢电压； R_a ——电枢电路电阻； I_a ——电枢电流； K_a ——电磁系数； Φ_F ——磁通。

直流电机带负载情况时的动力学表达式

$$T_d - T_l = D \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (2)$$

式中： D ——阻尼衰减系数； J ——总旋转系统的转动惯量。

电机起动时，只有当电磁转矩 T_d 大于负载转矩 T_l 才有可能，在起动时角速度 $\omega_m=0$ ， $T_d - T_l$ 决定了电机最初的加速度。 $T_d - T_l > D \omega_m$ 时，电机将不断加速； $T_d - T_l = D \omega_m$ 时，达到平衡状态，加速度为 0，电机恒速运行。

2.2 直流电机的再生制动特性

当电动汽车制动和减速时，一般采用再生制动。再生制动是利用直流电机可以从电动机运行状态平滑地转换到发电机运行状态这一特性。此时，电机转矩方向与转速方向相反，电机吸收机械能，把机械能转化为电能储存起来，可节省能量。

2.3 直流电机的控制器

直流电机的控制器采用的是斩波控制器（又称电压斩波器），它是直流电源和负载电机之间的一个周期性通断的开关控制装置，它的作用是通过改变供给直流电机的电压，来控制电机的转速和转矩，见公式（1）、（2）。

3 三相感应交流电机

20 世纪 90 年代后，交流电机驱动系统的研制和开发有了新的突破。相比直流电机，交流电机体积小、质量轻、效率高、调速范围宽、可靠性高、价格便宜、维修简单方便，在电动汽车上得到了广泛应用。

感应交流电机在电动汽车上应用时，完成车辆的起动、加速和恒速运行，当电动汽车减速或制动时，电机处在发电制动状态，给电池充电，实现机械能到电能的转换。

3.1 三相感应交流电机的电动特性

三相感应交流电机机械特性参数表达式

$$T = \frac{m_1}{\Omega_0} \cdot \frac{U_x^2 r_2}{(r_1 + \frac{r_2}{s})^2 + (x_1 + x_2)^2} \quad (3)$$

$$n = n_0 (1 - s)$$

$$\Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$$

式中： m_1 ——定子相数； Ω_0 ——转子同步机械角速度； U_x ——定子相电压； r_1, r_2, x_1, x_2 ——电机

参数； s ——转差率。

图 2 为三相感应交流电机机械特性。当电机工作点在第 I 象限时，例如 A 点，电机为正向电动运行状态（如驱动电动汽车前进）；当工作点在第 III 象限时，例如 B 点，电机为反向电动运行状态（如电动汽车倒车）。电动运行状态下，电磁转矩为驱动转矩。

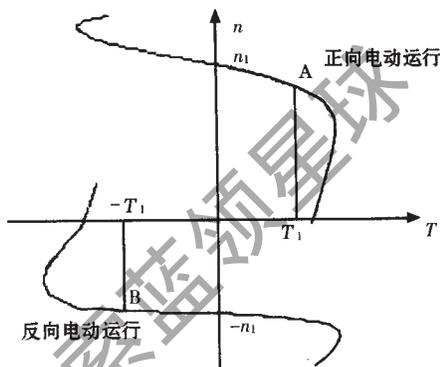


图 2 三相感应交流电机电动运行

3.2 再生制动状态（图 3）

当电动汽车下坡时，电机运行速度不断增大，最后超过同步转速 n_1 而稳定运行于 B 点，此时， $n_B > n_1$ ，系统处于再生制动状态。

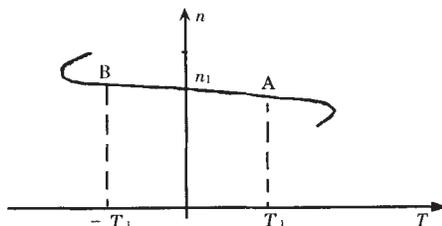


图 3 三相感应交流电机电动再生制动

3.3 三相感应电机逆变器

在电动汽车上，由功率半导体器件构成的 PWM 功率逆变器把蓄电池电源提供的直流电变换为频率和幅值都可以调节的交流电。三相感应电机逆变器的控制方法主要有 V/f 控制法、转差频率控制法、矢量控制法和直接转矩控制法。

电动汽车的三相感应电机逆变器目前大多数采用矢量控制，通过坐标变换和计算，将电机的电流解耦为转矩和励磁分量进行分别控制，从理论上讲实现了线性的控制特性，能够明显改善交流电机的转矩输出特性。

4 永磁电机

永磁电机是一种高性能的电机。具有高的“功

率/质量”比,比其它类型的电机有更高的效率和转矩,而且极限转速和制动性能优于其它类型的电机,更加适合作为电动汽车的驱动电机。但是永磁材料受温度影响大,在大电流负载时可导致材料磁性下降,恒功率控制困难。

电动汽车用永磁电机主要有永磁无刷直流电机和永磁交流同步电机两大类。

4.1 永磁无刷直流电机工作特性及控制技术

永磁无刷直流电机是在直流电机的转子上装置永久磁铁,不再用电刷和换向器为转子输入励磁电流,工作时,直接将方波电流输入无刷直流电机的定子中,控制其运转。永磁无刷直流电机起动转矩大、过载能力强、体积小、效率高、控制方便,非常适合电动车的运行特性。机械特性和调节特性如图4、图5所示。

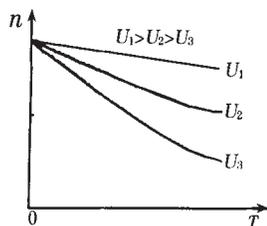


图4 机械特性

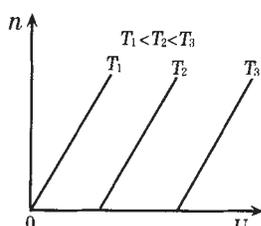


图5 调节特性

机械特性参数表达式

$$n = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{2r_a}{C_e \Phi_\delta} I_a = \frac{U - 2\Delta U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{2r_a}{C_e C_T \Phi_\delta} T \quad (4)$$

式中： r_a ——每相绕组电阻； ΔU ——开关管的饱和管压降； C_e ——电势常数； C_T ——转矩常数。

永磁无刷直流电机不采用机械式换向器和电刷,而是由固态逆变器和轴位置检测器组成电子换向器。位置传感器用来检测转子在运动过程中的位置,并将位置信号转换为电信号,保证各相绕组的正确换流。永磁无刷直流电机常采用电流斩波控制,控制系统由桥式变换器、PWM控制电路、电机转轴位置检测器和方波永磁直流电机等几部分组成。

4.2 永磁同步电机及其控制技术

永磁同步电机是指正弦波永磁电机,转子上装有永久磁体,一方面可形成很强的气隙磁场,另一方面转子部分没有热源,不需要冷却装置。此电机有较高的能量密度,惯性低,响应快,适应于电动车驱动系统,有极好的应用前景。丰田RAV4—EV公司生产的体育用车,雷诺Next轿车均采用永磁同步电机。

永磁同步电机机械特性参数表达式

$$T = \frac{m_1 U^2}{2f_1^2} \left(\frac{1}{L_q} - \frac{1}{L_d} \right) \sin 2\theta \quad (5)$$

式中： m_1 ——定子相数； U ——电源电压；

f_1 ——电源频率； θ ——功率角； L_q 、 L_d ——直轴和横轴的电感量。

永磁同步电机低速时常采用矢量控制,包括气隙磁场定向、转子磁链定向、定子磁链定向。其中电动车用中小容量电机常用转子磁链定向控制,高速时用弱磁控制。

a. 转子磁链定向的矢量控制 转子磁链定向的矢量控制是感应电机转子磁链定向控制的推广。根据控制目标的不同,矢量控制又可以有零直轴电流控制、功率因数为1的控制、恒磁链控制、最大扭矩电流比控制、最大输出功率控制等。

b. 弱磁控制 永磁同步电机转子为永磁体,无法调节,必须通过调节定子电流,增加定子电流直轴去磁分量来削弱磁场,提高转速。采用弱磁控制调速可以使电机保持较宽的恒功率范围,满足电动车负载要求。

5 开关磁阻电机

开关磁阻电机(SRM)是英国于1983年首次正式推出的,经过十几年的研制开发,现已成为现代电动汽车交流驱动的又一个新支,它是由磁阻电机和开关电路控制器组成的机电一体化新型牵引电机。它具有可控相数多、实现四象限控制方便、成本低、效率高等优点。开关磁阻电机转子上无绕组,适合用于频繁正反转及冲击的负载。功率电路采用的功率开关元件较少,电路较简单。功率元件与电机绕组串联,不易发生短路,因此成本较低,工作可靠,控制电路较简单,能够实现宽调速、低速大转矩和制动能量回馈等特性。整个系统效率高,起动转矩大,电流小。

5.1 开关磁阻电机的运行特性

开关磁阻电机的典型机械特性如图6所示。由于存在着 n_1 、 n_2 2个临界运行点,采用不同的可控条件匹配可以得到2个临界点的不同配置,从而得到各种各样所需的机械特性。

起动运行状态:有足够大的起动转矩,起动电流小,起动时间短。开关磁阻电机起动时,不需其它起动设备。起动方式分一相起动和两相起动。

稳态运行状态:为了保证开关磁阻电机的可靠运行,一般在低速 $n < n_1$ 时,采用电流斩波控制的运行方式(CCC方式);在高速 $n > n_1$ 时,采用角度位置控制的运行方式(APC方式)。

制动运行状态:为再生制动方式,转矩是负值。此时从开关磁阻电机转子轴输入的机械能转换为电能,并反馈给蓄电池。

5.2 开关磁阻电机的控制系统

由于开关磁阻电机具有高度的非线性,因此它的驱动系统较复杂。它的控制系统包括功率变换

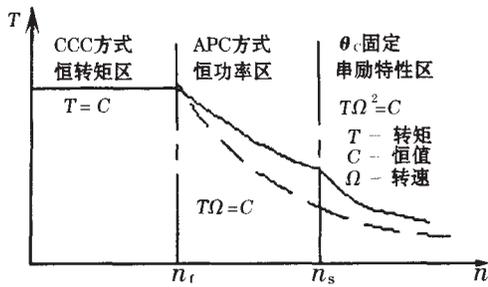


图6 开关磁阻电机的典型机械特性

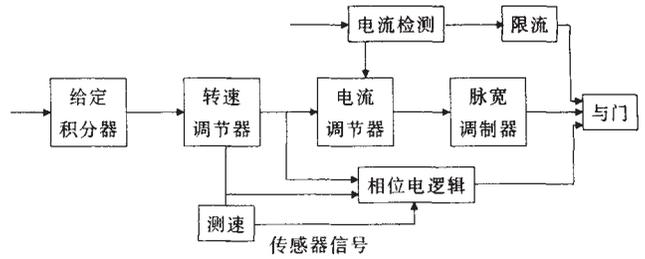


图7 开关磁阻电机控制电路框图

器、控制器和位置检测器等。图7是开关磁阻电机控制电路框图。

参考文献：

[1] 廖权来. 电动汽车学 [M] 广州: 华南理工大学出版社, 1997.

[2] 万沛霖. 电动汽车的关键技术 [M] 北京: 北京理工大学出版社, 1998.

[3] 顾绳谷. 电机及拖动基础 [M] 北京: 机械工业出版社, 1993.

[4] 唐任远. 特种电机 [M] 北京: 机械工业出版社, 1997.

(责任编辑 常成)

(上接第8页)

4.5 电路的蒙特卡罗分析

蒙特卡罗 (Monte Carlo) 分析是一种统计模拟方法，它是在给定电路元器件参数容差的统计分布规律的情况下，用一组组伪随机数求得元器件参数的随机抽样序列，对这些随机抽样的电路进行分析，并通过多次分析结果估算出电路的性能。应用蒙特卡罗分析可以得到元件误差对电路特性的影响程度。图10所示是 R_s 在 $\pm 20\%$ 范围内随机变化时蒙特卡罗分析结果。图10中表明图3所示电路选用的元器件误差应控制在更小的范围之内。

5 结束语

应用PSPICE工具对轮速信号处理电路进行深入研究，得到了一个性能比较优良的波形变换电路。电路的带宽为10 Hz~2 kHz，信噪比为150 dB，输入信号幅度变化范围大(50 mV~50 V)，完全满足了ABS控制系统的需要。随着对汽车防抱死制动研究

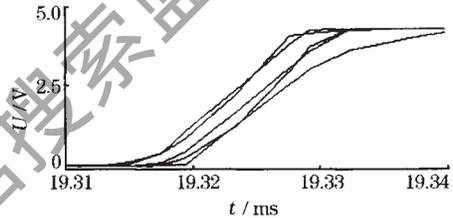


图10 R_s 随机变化对T6脉冲上升沿影响的蒙特卡罗分析结果

的深入，对车轮角速度动态测取精度的要求必然越来越高，PSPICE仿真程序也必将得到广泛的应用。

参考文献：

[1] 司利增. 汽车防滑控制系统——ABS与ASR [M] 北京: 人民交通出版社, 1996.

[2] 高文焕, 汪 蕙. 模拟电路的计算机分析与设计——PSPICE程序设计 [M] 北京: 清华大学出版社, 1999.

(责任编辑 常成)