

# 电动汽车稀土永磁电动机驱动系统

甄子健 王震坡 孙逢春 林逸

(北京理工大学机械与车辆工程学院 北京 100081)

**摘要:** 为满足电动汽车驱动要求, 研制出以稀土永磁电动机及其控制技术为核心的一种电动汽车动力驱动系统, 在电动汽车上应用一种全新的牵引电动机自动控制模式。与此电动机相匹配研制出一种结构简单、性能匹配优良的线控两挡行星齿轮变速器。就电动机驱动系统力矩特性对电动汽车纵向舒适性的影响进行初步分析。在自动弱磁的控制策略下, 续流增磁稀土永磁电动机系统可以满足电动汽车对驱动系统的要求。电动机与两挡变速箱匹配, 可保证驱动系统工作效率在全车速范围内稳定在较高水平。

**关键词:** 电动汽车 稀土永磁电动机 线控行星变速

**中图分类号:** U262.42

## 0 前言

能源、环境、可持续发展和跨越式发展战略赋予中国汽车工业赶超发达国家的机遇。我国电动汽车技术随十五“863”电动汽车重大专项的实施, 在近年出现重大进展。电动机驱动系统做为电动汽车的核心技术之一, 其发展水平直接关系到电动汽车总体技术的进步<sup>[1-2]</sup>。电动汽车驱动电动机应具有宽广的调速范围, 在恒转矩区, 要求低速运行时具有大转矩, 以满足起动和爬坡的要求; 在恒功率区, 要求低转矩时具有高的速度, 以满足汽车在平坦的路面能够高速行驶的要求, 同时电动机需要具有较强的过载能力以满足短时加速行驶与最大爬坡度的要求<sup>[3-4]</sup>。在满足以上使用要求的前提下, 电动机还应该具有工作效率高、成本低、可靠性高和易维护等特点。

20 世纪 90 年代前的电动汽车几乎全是直流电动机驱动的。直流电动机体积和质量大, 换向器和电刷限制了它转速的提高, 其最高转速为 6~8 kr/min。虽然近些年交流驱动已变得十分普遍, 但直流电动机容易控制确保了它们在许多应用场合得以继续使用。目前, 应用于电动汽车的驱动电动机主要有直流电动机、异步电动机和开关磁阻电动机等。由于电力电子技术的进展, 使直流电动机的功率因数、工作效率、动态性能和转矩脉动性得到明显改善, 直流电动机仍以其优越的调速性能而在各类电动机的激烈竞争中占有一席之地。

国内上海安乃达驱动技术有限公司开发了峰值功率为 7.5、12、65 kW 的永磁无刷直流电动机, 分

别用于轮毂电动机四轮驱动电动车、燃料电池轿车主牵引等。

本研究中, 在综合考虑了纯电动大客车的驾驶性能要求、车辆性能约束和电池系统性能等方面后, 决定选用稀土永磁直流电动机。北京理工大学与相关企业联合研制了在纯电动大客车上使用的高可靠性、低成本的续流增磁永磁直流电动机, 驱动电动机定子为钕铁硼永久励磁, 增加磁励磁绕组, 转子为无槽结构, 采用自通风冷却; 以续流增磁稀土永磁电动机及其控制系统为核心, 辅之以线控变速传动技术, 设计开发了一套电动汽车动力驱动系统。该驱动系统的额定效率达 93%, 累计装车 20 余辆, 装有该系统的电动客车已经在实际公交线路运行 2 年, 车辆累计行驶里程超过 30 万公里, 运行效果较好。

## 1 续流增磁稀土永磁电动机及控制原理

理想的电动汽车驱动电动机及控制系统应该既具有稀土永磁电动机系统的高效率特性, 又有直流串激系统的符合车辆驱动需求的转矩转速特性, 因此电动机应该是永磁加串激励磁的结构, 理想的电动机结构及控制系统与励磁电流曲线应该如图 1 所示。图 1 中,  $I$  为励磁电流,  $n$  为电动机的转速。这样可以保证低速强大的永磁磁场加励磁磁场, 电动机输出大转矩, 随着转速的升高, 励磁磁场逐渐减弱, 使之弱磁平衡功率运行。

在分析永磁直流电动机及其控制系统时发现, 电动机及其控制系统的续流平均电流具有理想的励磁电流的特征(图 2)。因此可将驱动电动机的增磁绕组接到电动机及控制系统的续流回路中, 利用续流

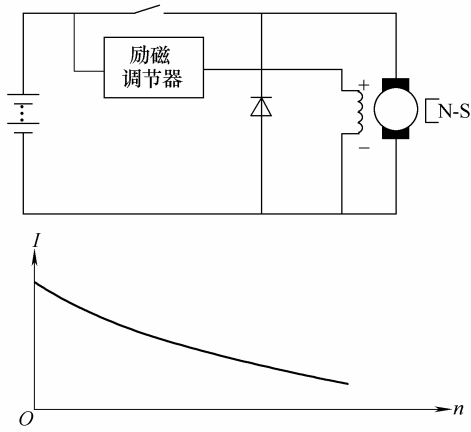


图1 理想的电动汽车驱动电动机及控制系统与励磁电流曲线

电流来对永磁电动机进行增磁和弱磁控制，此原理设计的续流增磁电动机控制系统原理如图3所示。

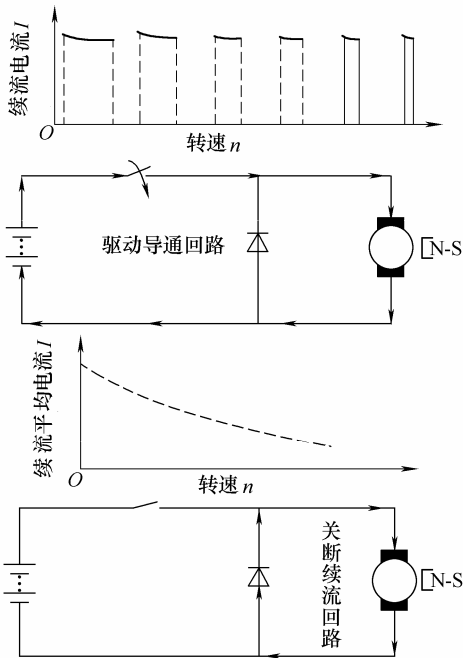


图2 永磁直流驱动电动机及控制系统原理和续流电流曲线

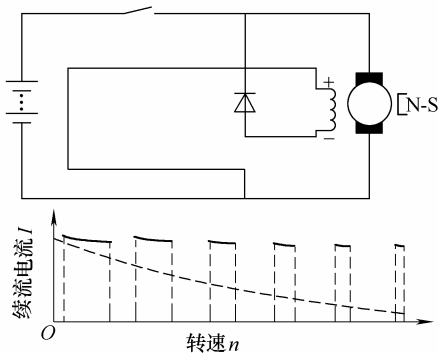


图3 续流增磁电动车辆驱动电动机及控制系统原理

图3所示续流增磁稀土永磁电动机及控制系统理论的特征方程，即控制策略如下列式(1)~(4)所示。

永磁磁场感应电动势系数为

$$C_e \Phi = \frac{U_a - I_a R_a}{n} \quad (1)$$

导通比 S 的控制策略计算式为

$$S = \frac{268 I_x R_a + 268 C_e \Phi n + 0.807 4 I_x C_e \Phi n}{268 U_E + 0.807 4 I_x C_e \Phi n} \quad (2)$$

电压平衡方程为

$$S U_E = I_x R_a + C_e \Phi n + \frac{(1-S) I_x}{268} + 0.807 4 C_e \Phi n \quad (3)$$

电动机输出总转矩

$$M = M_1 + M_2 = \frac{379 I_x}{268} + 306 \times \frac{I_x}{268} \times \frac{(1-S) I_x}{268} \quad (4)$$

式中  $C_e$  ——电动势常数，由电动机构造而定

$\Phi$  ——电动机永磁励磁磁通

$U_a$  ——电动机额定电压

$I_a$  ——电动机电枢额定工况电流

$R_a$  ——电动机电枢电阻

$n$  ——电动机转速

$I_x$  ——电动机电枢电流

$U_E$  ——电池组端电压

$M_1$  ——永磁作用下的电磁转矩

$M_2$  ——续流增磁作用下的电磁转矩

该控制系统利用了磁场矢量叠加原理，基于软开关脉宽调制方法，采用控制占空比进行自动增磁或弱磁控制的策略，根据所配电动汽车的纵向动力学响应特性、驾驶员意图和路面状况对动力需求进行模糊控制。在电动汽车启动和加速过程需要电动机输出大转矩时，增磁绕组中励磁电流较大，保证了电动机的大转矩平滑输出，而随着电动汽车速度的提高，增磁绕组中的电流逐渐减小，实现弱磁调速，使电动机的控制特性很好地满足了电动汽车的特性要求。

此种控制策略下，永磁直流电动机系统转速转矩关系与其他种类电动机的比较关系如图4所示。可以看出，电动机转矩特性明显优于其他类型电动机。永磁直流电动机系统具有以下两个特点。

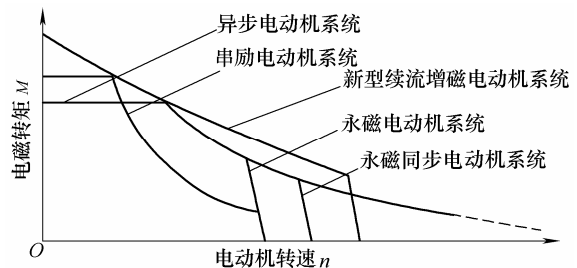


图4 不同类型电动机转矩转速关系比较

(1) 系统保持了稀土永磁电动机高效和高功率密度的优点，又具备串激牵引电动机低速大转矩的

特性,并具有比串激直流电动机更优良的高速自动弱磁调速性能,基本符合电动汽车对动力需求的理想特性。

(2) 该电动机及其控制系统的效率高,额定效率达到 92% 以上,已在 BJD6100、BFC6110EV、HFF6110GK50 等多种车型上采用的 100 kW 系统电动机效率测试如图 5 所示。

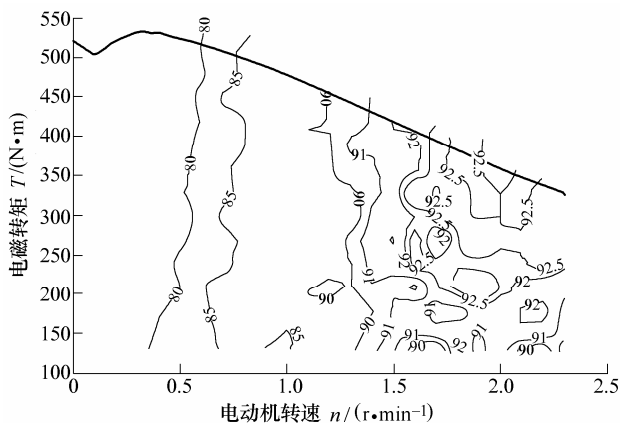


图 5 续流增磁电动机系统效率测试曲线

该驱动系统在使用中,还具有以下几个优点:

① 高可靠性,100 kW 大功率系统已累计装车 20 余辆,车辆累计行驶里程超过 30 万公里,未发现系统不可修复性故障。② 低成本,类似功能的电动机系统控制模式采用 6、7 只功率管,而采用该控制模式设计的电动机控制器只有 2 只功率管,可以明显降低系统制造成本。③ 电动机启动和低速运转电流小,有效地保护了电动汽车电池组并延长了电池组使用寿命,同时大幅提高了低速工况下驱动系统效率。

## 2 线控行星变速传动技术

车辆动力系统既有高速行驶工况要求,在车辆加速或爬坡工况又需要减速增加转矩。固定速比的减速器无法同时满足上述要求且不能使动力系统具有较高的平均工作效率。采用多挡变速器的传统车辆,为保证发动机平稳启动和在车辆行驶过程中顺利实现换挡,少不了离合器、离合器踏板、换挡机构和换挡操纵杆等装置,系统复杂。上述续流增磁电动机及其控制系统具有低转速大转矩和高效工作区宽广的优点,为取消换挡离合器,简化换挡操作奠定了基础,也为采用无离合器线控行星变速技术提供了理论依据。

据此设计的线控行星变速箱,采用行星传动和带同步器自动换挡等技术,既保证电动汽车驾驶操作的简便性,又克服了采用固定速比减速器和多挡

变速器的弊端,保证了车辆在低速大转矩工况下,电动机仍然能工作在高效区,并能有效地减少电动机力矩波动,保证了整车的纵向驱动舒适性。

具体系统由一个行星排、一个换挡同步器和其他辅助装置组成(图 6)。该变速箱的挡位切换采用电控气动方式,结构上采用了同步器、挡位指示、电控气动电磁阀以及其他辅助系统,取消了主离合器和离合器踏板,简化了变速箱的换挡操作,操作可通过按键或开关采用线控方式实现,降低了系统成本,并同时充分发挥了动力系统中电动机的动力特性。

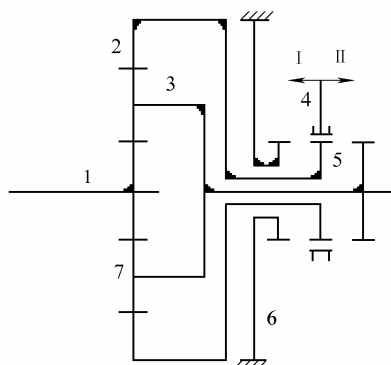


图 6 线控行星变速箱原理图

1. 太阳轮 2. 齿圈 3. 行星架 4. 滑接齿套  
5. 固接齿套 6. 变速箱壳体 7. 行星轮

该线控行星变速箱具有如下技术特征:实现了电动汽车行驶特性和电动机工作特性的合理匹配,扩展了电动机控制系统的高效工作区,图 7 显示了采用两挡行星变速器后电动机系统的效率曲线,可以明显发现,整个系统工作区域内,系统效率高于 80%。

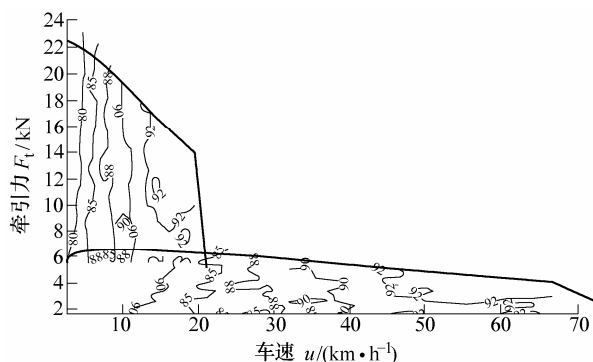


图 7 线控行星变速箱与续流增磁稀土电动机系统匹配

## 3 系统技术实施效果

在过去的几十年里电动汽车普遍采用直流电动机驱动。现今,由于电力电子技术的进展,使得直流电动机的功率因数、工作效率、动态性能和转矩

脉动性得到明显改善。直流电动机仍以其优越的调速性能而在各类电动机的激烈竞争中占有一席之地。

续流增磁永磁电动机及其控制技术在电动客车、轿车、牵引车等车型上已经得到广泛应用。装配此系统的 HFF6112GK50EV 和 HFF6850GK60EV 两种型号的电动公交车顺利通过了客车型式认证试验, 并获得了国家发改委《车辆生产企业及产品公告》, 成为国内首批可以上路运营的电动汽车。两种车型现阶段分别在北京市 121 路电动汽车示范线和密云电动汽车示范区进行载客运行。20 辆装有该系统的电动客车已安全运行 2 年, 驱动系统工作可靠, 驱动特性良好, 车辆性能稳定。

## 4 结论

(1) 在自动弱磁的控制策略下, 续流增磁稀土永磁电动机系统可以满足电动汽车对驱动系统的要求, 适合于电动汽车应用。

(2) 电动机与两挡变速箱匹配, 保证了驱动系统工作效率在全车速范围内稳定在较高水平(大于 80%)。

(3) 驱动系统变速采用线控气动换挡, 结构简单, 在车辆上布置方便。

(4) 直流电动机控制器具有优良的电磁转矩控制特性, 易于控制, 具有起步加速牵引力大, 控制系统较简单的优点。采用永磁无刷直流电动机将克服有刷电动机重量大、需要维护等缺点, 扩大直流电动机在电动汽车上的应用。

## 参 考 文 献

- [1] 张承宁. 电动大客车驱动电机控制及能量管理系统[D]. 北京: 北京理工大学, 2001.
- [2] 陈清泉, 孙逢春, 祝嘉光. 现代电动汽车技术[M]. 北

京: 北京理工大学出版社, 2002.

- [3] 承宁, 谭建, 孙逢春. 电动公交大客车驱动系统控制特性分析[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 69-74.
- [4] 马宪民, 陈全世. 电动汽车高频交流功率驱动系统[J]. 吉林工业大学自然科学学报, 2001, 31(3): 61-65.

## RARE-EARTH PERMANENT MAGNET MACHINE SYSTEM OF ELECTRIC VEHICLE

ZHEN Zijian WANG Zhenpo SUN Fengchun  
LIN Yi

(School of Mechanical and Vehicular Engineering,  
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**Abstract:** In order to reach the driving request of electric vehicle(EV), the EV power-driven system is researched, which takes rare-earth permanent magnet machine as key technology. A bran-new automatic control mode of traction motor is researched and applied in the EVs. At the same time a kind of planetary gear transmission case is designed, which has simple structure and excellent characteristics. Otherwise it is controlled by wire. And the influences on EV longitudinal amenity are analyzed, which are from the moment characteristics of the motor driving system. By the strategy of automatic weak-magnetism control, the motor system can fit all the need for driven system of EV. Matching the motor with double shifts, guarantee the drive system work efficiency on a high level when the EV is in the max speed.

**Key words:** Electric vehicle

Rare-earth permanent magnet machine

Planetary transmission controlled by wire

**作者简介:** 甄子健, 男, 1962 年出生, 博士研究生。主要研究方向为电动车辆动力学及动力系统匹配。

E-mail: ev863zzj@vip.sina.com