

# 电动汽车电机驱动系统动力特性分析

何洪文, 余晓江, 孙逢春, 张承宁

(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京市 海淀区 100081)

## Study on Power Performance of Traction Motor System for Electric Vehicle

HE Hong-wen, YU Xiao-jiang, SUN Feng-chun, ZHANG Cheng-ning

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

**ABSTRACT:** To get well known on the power performance of traction motor system is very important and meaningful for the parameter matching design of electric vehicle power train. The ideal power characteristic for traction motor system is put forward from the vehicle driving point with constant torque drive below base speed and constant power drive above base speed. The characteristics of peak power working condition, continuous working condition provides the main basement for the electric vehicle power train design. The base speed and maximum speed of traction motor determine the acceleration performance of electric vehicle. The corresponding description parameters are put forward. One example was given based on the experiment data.

**KEY WORDS:** electric vehicle; traction motor system; peak working characteristic; continuous working characteristic; analysis

**摘要:** 分析电机驱动系统的动力特性对完成电动汽车动力传动系的参数匹配具有重要的理论意义。从整车驱动角度分析提出了电动汽车电机驱动系统的理想动力特性: 低于额定转速恒转矩, 高于额定转速恒功率。电机驱动系统的峰值工作特性、额定工作特性是电动汽车动力传动系参数匹配计算的主要依据。电机基速和最高转速的选择对整车的加速性能起着决定作用。提出了特性描述参数。结合某电机驱动系统动力特性的实测数据给出了分析实例。

**关键词:** 电动汽车; 电机驱动系统; 峰值工作特性; 连续工作特性; 分析

## 0 引言

为保障我国能源安全、治理大气污染、实现汽

车工业的跨越式发展, 科技部设立“十五”863 电动汽车重大专项, 重点进行纯电动汽车的产业化、混合动力汽车的先期产业化、燃料电池汽车样车研制及相关关键零部件的技术攻关<sup>[1]</sup>。电动汽车已引起国、内外汽车界的足够重视, 正逐渐成为 21 世纪的重要交通工具<sup>[2]</sup>。解决困扰电动汽车发展和推广应用的技术瓶颈问题, 研制适用于电动汽车的高性能电机驱动系统十分必要<sup>[3-5]</sup>。为了给电动汽车动力传动系的合理匹配设计及电机驱动系统的技术改进和性能提高提供理论依据, 从整车角度对电动汽车电机驱动系统动力特性进行分析和特性描述十分必要。

## 1 理想电动汽车电机驱动系统动力特性

在各种可能工况下, 汽车行驶所需的功率、转矩或驱动力与行驶车速围成的平面构成汽车的驱动特性场, 受路面条件和动力输出约束, 理想的汽车驱动特性场如图 1 所示<sup>[6]</sup>。其中  $F_t$  为驱动力,  $N$ ;  $v$  为车速, km/h。

从汽车动力性要求来看, 最佳的汽车动力传动系设计应在驱动轮处获得图 1 所示的理想驱动特性场, 评价和对比汽车动力性能的指标可选为汽车在驱动轮处实际的输出驱动特性场占理想驱

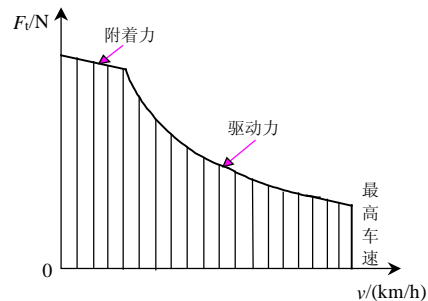


图 1 理想的汽车驱动特性场

Fig. 1 Vehicle's ideal driving characteristic field

基金项目: 国家 863 高技术基金项目(2004AA501971)。

Project supported by National High Technology Research and Development of China(863 Programme)(2004AA501971).

动特性场的百分比, 百分比越大, 动力性能越佳<sup>[7]</sup>。对电动汽车, 为获得最佳的动力性能, 使电机驱动系统的动力特性尽可能地接近理想汽车驱动场十分必要, 即低于额定工作转速为恒转矩输出、高于额定转速为恒功率输出<sup>[8-9]</sup>。图 2 所示为 1994 年美国通用汽车公司向重庆电机厂订购电动汽车用 50kW 交流感应电机时, 提出的电机必须满足的转矩特性图<sup>[2]</sup>。

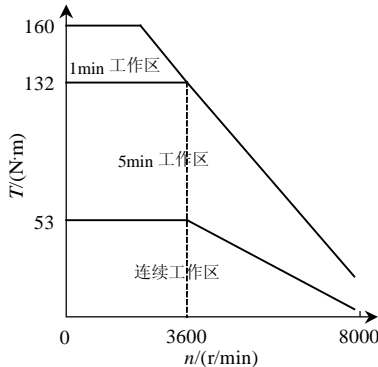


图 2 50kW 电动汽车感应电机转矩特性  
Fig. 2 Torque curves of 50kW induction motor

## 2 电机驱动系统动力特性分析

### 2.1 峰值工作特性分析

电机驱动系统输出动力特性应满足电动汽车动力性设计指标需求: 加速、爬坡、最高车速行驶。电机驱动系统区别于传统内燃机具有一定的过载能力, 借用内燃机的相关概念, 采用峰值工作特性进行描述, 它表征了电动汽车行驶的后备功率, 与整车的加速、爬坡性能密切相关; 而整车的巡航行驶性能与电机驱动系统的连续输出特性(也称为额定工作特性)相关。

电机驱动系统的峰值工作特性与设定的电机工作制密切相关。由于混合动力电动汽车与纯电动汽车中电机驱动系统的工作模式有很大差别<sup>[7]</sup>, 因此对电机驱动系统峰值工作特性(短时工作特性)的定义很难采用统一的指标, 这里, 对纯电动汽车电机驱动系统, 采用 5min 工作制峰值工作动力特性, 对混合动力电动汽车电机驱动系统, 采用 1min 工作制峰值工作动力特性。

假设电机驱动系统具有理想的峰值工作特性, 则对应的电动汽车整车驱动力-车速曲线如图 3 所示。图中,  $v_b$  为与电机基速(额定转速) $n_n$ 对应的车速, km/h;  $v_{max}$  为与电机最高工作转速  $n_m$ 对应的车速, km/h;  $v_a$  为电动汽车起步加速达到的某一车速, km/h;  $P_p$  为电机峰值输出功率, kW。

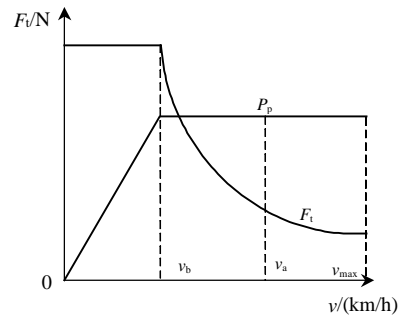


图 3 电动汽车驱动力-车速曲线  
Fig. 3 EV driving force  $F_t$ - speed  $v$  curve

则电动汽车起步加速到  $v_a$  的加速时间  $t$  为<sup>[6]</sup>

$$t = \frac{1}{3.6} \int_0^{v_a} \frac{dm}{F_t - [mgf + (C_D A v^2) / 21.15]} dv \quad (1)$$

式中:  $t$  为加速时间, s;  $d$  为汽车旋转质量换算系数;  $m$  为整车满载质量, kg;  $f$  为水平良好路面滚动阻力系数;  $C_D$  为汽车风阻系数;  $A$  为汽车行驶迎风面积,  $m^2$ 。

驱动力  $F_t$  为

$$F_t = \begin{cases} 3600 \frac{P_p \cdot h_T}{v_b} & v \leq v_b \\ 3600 \frac{P_p \cdot h_T}{v} & v > v_b \end{cases} \quad (2)$$

式中  $h_T$  为电机输出到驱动轮的传动效率, %。

对于参数如表 1 所示的电动汽车, 不同的  $v_b$  取得到的满足整车加速性能设计指标(0~100 km/h 加速时间 10s)要求的电机功率需求如图 4 所示。可见, 电机最高工作转速与基速的比值对电机峰值功率的取值起决定作用, 灵敏度系数高达 134.29%。

表 1 某电动汽车整车参数  
Tab. 1 Electric vehicle parameters

$m/kg$	$f$	$C_D$	$A/m^2$	$v_{max}/(km/h)$	$v_a/(km/h)$	$t/s$
1500	0.012	0.2	2.0	160	100	10

电动汽车的爬坡性能决定于电机的峰值输出转矩, 爬坡度为

$$i = \text{tg}[\arcsin(\frac{F_t - (C_D A v^2) / 21.15}{mg\sqrt{1+f^2}}) - \arctg(f)] \times 100\% \quad (3)$$

式中  $i$  为爬坡度, %。

对表 1 所示整车参数, 利用图 4 得到的满足加速性能设计要求的电机功率计算得出的整车爬坡性能指标如图 5 所示。

图 5 中整车最大爬坡度均在 30% 以上, 可见, 满足加速性能指标要求的电机功率通常也可以满足汽车爬坡性能指标要求。

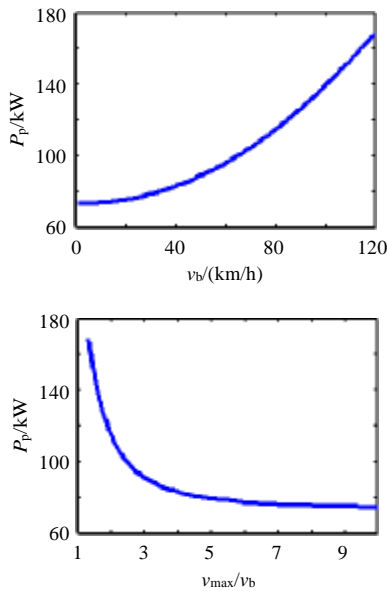


图4 满足加速性能要求的电机峰值功率特性  
Fig. 4 The motor peak power requirement to meet the EV acceleration performance

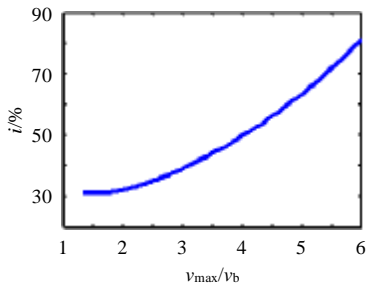


图5 整车爬坡度计算曲线  
Fig. 5 The grade ability performance curve

纵上分析, 电动汽车电机驱动系统的峰值特性可以选用峰值工作制时间  $t_p$ 、峰值功率  $P_p$  及影响汽车加速性能的电机转速因子  $x$  来描述。转速因子  $x$  为

$$x = \frac{n_m}{n_n} = \frac{v_{max}}{v_b} \quad (4)$$

式中:  $n_n$  为电机基速, r/min;  $n_m$  为电机最高工作转速, r/min;

另外, 为描述电机驱动系统的综合性能, 采用功率密度和转矩密度, 电机驱动系统转矩密度为

$$r_T = \frac{T_p}{m_m} \quad (5)$$

式中:  $r_T$  为电机驱动系统转矩密度, N·m/kg;  $m_m$  为电机驱动系统总质量, kg;  $T_p$  为峰值转矩, N·m。

电机驱动系统功率密度为

$$r_p = \frac{P_p}{m_m} \quad (6)$$

式中  $r_p$  为电机驱动系统功率密度, kW/kg。

## 2.2 额定工作特性分析

电机驱动系统额定工作特性是指电机在温升允许范围内达到热平衡并能够长时间连续稳定输出转矩的工作特性。电机额定工作特性的设计应能够覆盖汽车行驶特性场中时间分布最密集的区域。为便于计算, 电动汽车通常以最高设计车速的 90% 或我国高速公路最高限速 120km/h 匀速巡航行驶的功率作为电机额定功率取值的下限为

$$P_n = (mgf + \frac{C_D A v^2}{21.15}) \frac{v}{3600 \cdot h_T} \quad (7)$$

对表 1 所示整车参数, 计算得到的不同车速巡航行驶的功率需求如图 6 所示。电机额定输出功率的下限为 25.27kW, 可见电机额定输出功率值远远低于峰值功率值。受电机自身特性的限制, 峰值扭矩和额定转矩的比值即转矩过载系数一般在 2~4 之间, 且转矩过载系数越大, 电机设计的难度越大。因此, 通常情况下, 满足加速性能要求的电机峰值功率的一半均大于电机额定输出功率的下限值。

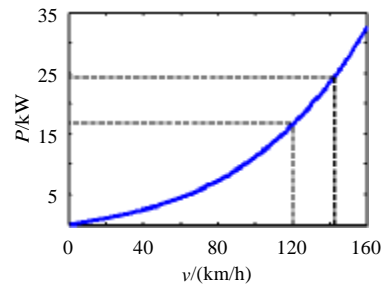


图6 整车匀速行驶功率需求  
Fig. 6 Power requirement at different cruising speed

对电机额定特性的描述具体采用额定转速  $n_n$ 、额定转矩  $T_n$  及最高转速  $n_m$  等指标, 为表征电机驱动系统的过载能力, 采用峰值过载转矩系数和峰值过载功率系数指标, 定义如下:

$$x_T = T_p / T_n \quad (8)$$

式中:  $x_T$  为电机驱动系统峰值过载转矩系数;  $T_n$  为电机驱动系统额定转矩, N·m。

$$x_p = P_p / P_n \quad (9)$$

式中:  $x_p$  为电机驱动系统峰值过载功率系数;  $P_n$  为电机驱动系统额定功率, kW。

## 3 电机驱动系统动力特性分析实例

电动汽车电机驱动系统的性能测试方法多样<sup>[10-13]</sup>, 从整车驱动特性和匹配标定角度考虑, 搭建的试验台架系统如图 7 所示。利用该台架对某电机驱动系统进行了动力特性测试。测试结果如图 8 所示。

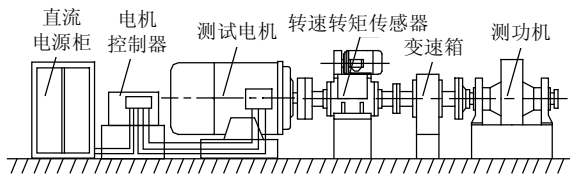
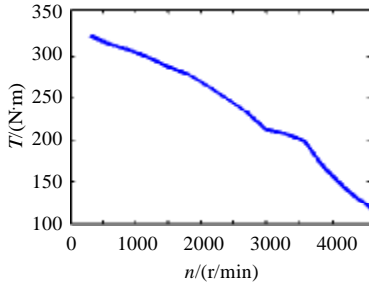
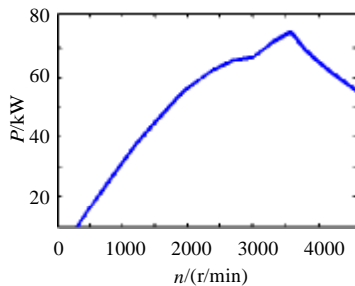


图 7 电机及其控制器测试台架示意图

Fig. 7 Test bench for EV traction motor system



(a)峰值转矩特性



(b)峰值功率特性

图 8 某电机驱动系统峰值工作特性

Fig. 8 Peak power curves for one motor system

由图 8 可知，电机驱动系统的实际输出峰值工作特性与理想的峰值工作特性有一定差距，具体对比如图 9 所示。电机峰值特性差异对整车性能的影响如图 10 所示，可见电机峰值工作特性的差异影

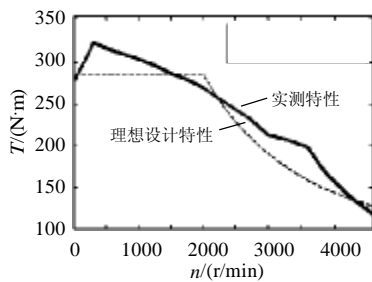


图 9 某电机峰值特性实测值与设计值比较

Fig. 9 Comparison on test results and design values of an EV traction motor

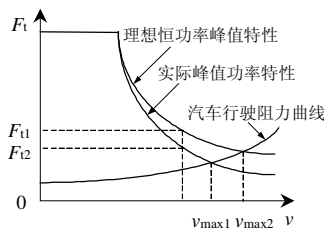


图 10 电机峰值特性差异对整车性能的影响

Fig. 10 Influence on EV performance of the difference of motor peak power characteristic

响电动汽车的后备功率( $F_{t2} < F_{t1}$ )，从而直接影响到电动汽车系统的加速性能，电机在高速区的峰值工作特性差异还影响整车的最高车速( $v_{max1} < v_{max2}$ )。

为描述这种差距，采用实测转矩  $T$  与理想转矩  $T_0$  的负偏差百分比  $f_T$  来表示。

$$f_T = \frac{|T - T_0|}{T_0} \times 100\% \quad (T < T_0) \quad (10)$$

按照上述分析结论，则该电机驱动系统的动力特性如表 2 所示。

表 2 某电动汽车电机驱动系统动力特性测试结果  
Tab.2 Test results for an EV traction motor system

峰值特性		额定特性	
$T_p/\text{min}$	5	$n_n(\text{r}/\text{min})$	2000
$P_p/\text{W}$	74.80	$T_p(\text{N}\cdot\text{m})$	167
$x$	2.25	$n_m(\text{r}/\text{min})$	4500
$r_T$	2.05	$x_M$	1.93
$r_P$	0.47	$x_P$	2.14
$T_p(\text{N}\cdot\text{m})$	323.6		
$f_T/\%$	7		

#### 4 结论

(1) 理想的牵引电机驱动系统动力特性应接近于理想的汽车驱动场要求。

(2) 电动汽车电机驱动系统动力特性分析具体包括峰值工作特性、额定工作特性，在满足相同加速性能的前提下，电机最高工作转速与基速的比值对电机峰值功率取值起决定作用，灵敏度系数高达 134.29%。

(3) 从满足整车动力性能的角度提出采用  $t_p$ 、 $P_p$ 、 $x$ 、 $r_T$ 、 $r_P$ 、 $T_n$ 、 $n_n$ 、 $n_m$ 、 $x_T$ 、 $x_P$  等指标体系进行动力特性描述，鉴于电机驱动系统的实际控制特性与理想控制特性存在差异，采用实测转矩  $T$  与理想转矩  $T_0$  的负偏差百分比  $f_T$  来进行描述。

(4) 对某电机驱动系统进行了动力特性测试，给出了具体的分析结果。

#### 参考文献

- [1] 科技部 863 计划联合办公室. 国家高技术研究发展计划(863 计划)(能源技术领域电动汽车专项)指南[EB/OL]. <http://www.863.org.cn>, 2001-10-22/2005-08-16.
- [2] 孙逢春, 张承宁, 祝嘉光. 电动汽车 - 21 世纪的重要交通工具[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- [3] 裴锋, 黄向东, 罗玉涛, 等. 电动汽车动力电池交流放电特性与荷电状态实时估计[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(9), 164-168. Pei Feng, Huang Xiangdong, Luo Yutao, et al. Variable current discharge characteristics and SOC estimation of EV/HEV battery

- [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(9): 164-168(in Chinese).
- [4] 程夕明, 欧阳明高, 孙逢春. 基于铅酸动力电池组供电的电压源型逆变器-牵引感应电机传动系统的稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 136-141.
- Chen Ximing, Ouyang Minggao, Sun Fengchun. Stability study of the voltage source inverter traction induction machine drive system feeding on a lead-acid traction battery package[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 136-141(in Chinese).
- [5] 张承宁, 李红林, 孙逢春, 等. 电动公交大客车用新型电机驱动控制系统特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 23(8), 110-114; Zhang chengning, Li honglin, Sun fengchun, et al. Analysis of a newly motor drive control system for electric transit bus [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(8): 110-114(in Chinese).
- [6] M.米奇克. 汽车动力学(C卷)[M]. 陈荫三, 译. 北京: 北京人民交通出版社, 1997.
- [7] 何洪文. 混合动力车辆驱动系研究和控制策略分析[D]. 北京: 北京理工大学机械与车辆工程学院, 2003.
- He Hongwen. Study on hybrid electric vehicle power train and analysis of its control strategy [D]. Beijing: School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, 2003(in Chinese).
- [8] Du Ju, SUN Fengchun, HE Hongwen. Study on the design of electric vehicle [C]. Proceedings of First Circular of China-Japan Electric Vehicle Joint Conference, Beijing, 2001.
- [9] Mehrdad E, Yimin G, Sebastien G. Characterization of electric motor drives for traction applications[C]. The 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Roanoke, VA, United States, 2003.
- [10] Sung Chul Oh. Evaluation of motor characteristics for hybrid electric vehicles using the hardware-in-the-loop concept[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(3): 817-824.
- [11] Schupbach R M, Balda J C. A versatile laboratory test bench for developing powertrains of electric vehicles[C]. IEEE 56th Vehicular Technology Conference, Vancouver, BC, Canada, 2002.
- [12] Eiji Yamada, Yasutomo Kawabata. Development of Test system for motor of hybrid electrical vehicle[J]. JSAE Review, 1997, 18(4): 393-399.
- [13] 卢子广, 柴建云, 王祥珩, 等. 电力驱动系统实时控制虚拟实验平台[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4), 119-123.
- Lu Ziguang, Chai Jianyun, Wang Xiangheng, et al. Virtual test platform for real-time control of electrical drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 119-123(in Chinese).

收稿日期: 2005-12-28。

作者简介:

何洪文(1975—), 男, 讲师, 从事车辆电传动技术和电动汽车电机驱动系统测试研究, [hwhebit@bit.edu.cn](mailto:hwhebit@bit.edu.cn);

余晓江(1968—), 男, 博士研究生, 从事混合动力汽车系统控制研究;

孙逢春(1958—), 男, 教授, 从事车辆电传动技术研究;

张承宁(1962—), 男, 教授, 从事电机驱动技术与电动汽车电控系统总体控制技术研究。

(编辑 王剑乔)