

文章编号: 1001-0645(2007)10-0869-05

# 电动轿车机电传动系统的匹配计算与仿真

翟丽, 孙逢春

(北京理工大学 机械与车辆工程学院, 北京 100081)

**摘要:** 研究电动轿车机电传动系统匹配计算方法. 根据整车动力性能指标要求, 对电动轿车机电传动系统, 包括交流感应电机、减速器、电机控制器、动力电池进行匹配计算, 主要是电机及其减速器传动比的综合匹配计算, 并在 Matlab/Simulink 下进行了系统仿真. 仿真结果表明, 机电传动系统具有良好的动态转矩特性和转速特性; 系统动力特性仿真结果满足整车的动力性能设计要求; 电动轿车机电传动系统匹配计算方法具有可行性和有效性.

**关键词:** 匹配; 电动轿车; 机电传动

**中图分类号:** U 462.3      **文献标识码:** A

## Matching and Design of Electromechanical Transmission System for Electric Cars

ZHAI Li, SUN Fengchun

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

**Abstract:** Investigates the matching calculation of electromechanical transmission system for electric cars. The matching calculation of electromechanical transmission system for electric cars including AC induction motor, reducer, motor controller, and power battery, is put forward according to the power performance index of the vehicle, especially for the motor and reducer. Simulation of electric car electromechanical transmission system based on Matlab/Simulink is performed. Results of simulation of the basic cycle condition about electric vehicle verify that the electromechanical transmission system has good dynamic torque and speed characteristics, and the results of simulation of the system power performance satisfy the demand of design. The matching calculation method of the electromechanical transmission system for electric car proved itself to be effective and feasible.

**Key words:** matching; electric car; electromechanical transmission

电动汽车是 21 世纪重要的新型绿色环保交通工具, 机电传动系统是电动汽车的核心. 传统电动汽车机电传动系统的设计采用改装方法, 缺点是重心位置较高、质量分配不合理、传动效率低、整车动力性能差. 现代电动汽车对机电传动系统进行匹配设计, 可以降低系统损耗、延长电动汽车的续驶里程, 对提高整车的动力性能指标和经济性能指标具

有重要的现实意义.

作者以采用交流电机驱动的 HS2000 电动轿车机电传动系统为例, 根据整车动力性能要求, 对机电传动系统进行匹配计算, 使系统输出特性满足整车动力特性要求; 并在电动汽车城市基本循环工况下对系统进行性能仿真, 以验证系统匹配计算方法的合理性.

收稿日期: 2007-03-15

基金项目: 国家“八六三”计划项目(2002AA50188)

作者简介: 翟丽(1973—), 女, 博士, 讲师, E-mail: zhaili26@bit.edu.cn.

# 1 电动轿车的动力性能要求

采用交流感应电机驱动的电动轿车的整车的动力性能指标为:

最高车速  $v_{am}$  100 km/h;

续驶里程  $s$  100 km;

最大爬坡度  $i_m$  30 %;

起步换挡由静止全力加速到 80 km/h 的加速时间  $t_f$  10 s.

# 2 电动轿车传动系统匹配设计

## 2.1 车身选型

从车身改动、电池布置和续驶里程综合考虑,选择由中华轿车进行改装的 HS2000 电动轿车,整车参数如表 1 所示.

表 1 电动轿车主要参数

Tab.1 Electric car parameters

外形尺寸/ mm ×mm ×mm	整备质量 ( $m$ )/ kg	汽车总质量 ( $m_a$ )/kg	迎风面积 ( $A$ )/ $m^2$
4 220 ×1 620 ×1 580	1 250	1 600	2. 339
车轮半径 ( $r$ )/ m	滚动阻力系数 ( $f_r$ )	空气阻力系数 ( $C_D$ )	传动效率 ( $\eta$ )
0. 297	0. 015	0. 40	0. 92

## 2.2 电机参数和减速器传动比的选择

城市电动汽车机电传动系统常工作在起步、停车、加减速、爬坡等瞬变过程中,电机经常处于过载非额定工作状态.因此,城市电动汽车电机既要满足持续功率的要求,又要满足最大过载转矩和瞬时功率的要求.

### 2.2.1 电机的功率

电动汽车驱动电机一般具有两种功率,即瞬时功率和持续功率.

可根据电动汽车所要求的持续功率下的最高车速初步确定持续功率<sup>[1]</sup>,原因一是车辆消耗的功率随车速增大而增加;二是车辆经常行驶的速度一般低于最高车速,故可有适当的后备功率,以用于加速和爬坡.

持续功率  $P_e$  满足车辆以最高车速匀速行驶的条件为

$$P_e = \frac{1}{\eta} \left[ \frac{m g f_r}{3\ 600} v_{am} + \frac{C_D A}{76\ 140} v_{am}^3 \right] \quad (1)$$

当最高车速  $v_{am}$  100 km/h 时,根据式(1),得

到  $P_e$  20.5 kW.

电机的瞬时功率  $P_{em}$  满足车辆爬坡性能要求为

$$P_{em} = \frac{1}{\eta} \left[ \frac{m g f_r \cos \alpha}{3\ 600} v_a + \frac{m g i_m}{3\ 600} v_a + \frac{C_D A}{76\ 140} v_a^3 \right] \quad (2)$$

当车辆以车速  $v_a$  40 km/h,坡度  $i_m$  30 % 爬坡时,由式(2)得瞬时功率  $P_{em}$  55.7 kW.

根据以上电机持续功率和瞬时功率的计算结果,选择专门为电动汽车设计的 30 kW 三相交流笼型感应电机,其主要技术参数:持续功率为 30 kW (3 600 r/min);电机极对数为 2,瞬时最大功率为 100 kW (3 600 r/min);基准转速为 3 600 r/min;最高转速为 10 000 r/min;最大转矩为 265 N·m;额定转矩为 80 N·m.这种 30 kW 交流感应电机能够平滑调速,低速输出恒转矩,高速输出恒功率,以满足车辆行驶性能要求<sup>[24]</sup>.

当传动比  $i_t = 8.9$ ,输出转矩  $T_e$  取 4 种不同值时,得到电动汽车爬坡坡度曲线和加速曲线分别如图 1 和图 2 所示.

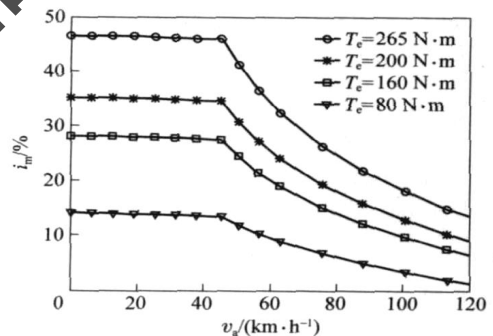


图 1 不同电机输出转矩时的爬坡度

Fig.1 Climbing angle with different torques

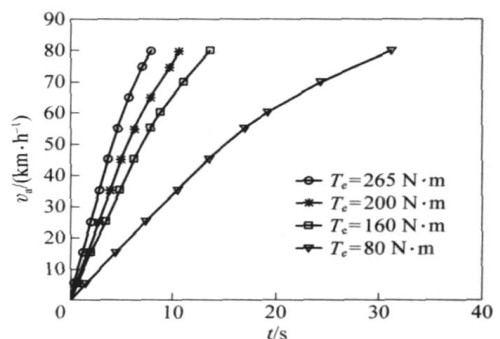


图 2 不同电机输出转矩时的加速曲线

Fig.2 Acceleration curves with different torques

选择的电机是否满足车辆加速性能的要求,在确定车辆的机械总传动比之后再验证.

### 2.2.2 传动比的选择

车辆传动比  $i_t$  为

$$i_t = i_0 i_g. \quad (3)$$

式中： $i_g$  为变速器传动比； $i_0$  为主减速器传动比。

电动汽车在最高车速行驶时，以最小传动比的挡位行驶，在最大爬坡度时以最大传动比的挡位行驶。电动汽车可以选择两挡变速器来满足高速行驶和爬坡的要求。最小传动比挡位为直接挡， $i_g = 1$ ，因此  $i_0$  可由最高车速求取<sup>[2]</sup>为

$$i_0 = 0.377 n_m r / v_{am}. \quad (4)$$

式中  $n_m$  为电机最高转速。

$i_g$  由最大爬坡度确定，即

$$i_g = \frac{mg(f_r \cos \alpha_m + \sin \alpha_m) r}{T_{am} i_0}. \quad (5)$$

式中： $T_{am}$  为电机输出的最大转矩； $\alpha_m$  为最大坡道角。

如果主减速器传动比满足整车动力性能指标要求，可使用直接挡固定速比主减速器<sup>[3]</sup>。下面判断是否可以只用直接挡。

由  $v_{am}$  和  $n_m$  确定主减速器传动比的上限，即

$$i_0 = 0.377 n_m r / v_{am} = 0.377 \times 0.297 \times 10\,000 / 100 = 11.2. \quad (6)$$

由电动机最高转速对应的最大输出转矩  $T_{nm}$  和最高车速对应的行驶阻力  $F_{vm}$  确定速比  $i_0$  的下限，即

$$i_0 = F_{vm} r / (T_{nm}) = 7.7. \quad (7)$$

式中：

$$\begin{cases} F_{vm} = mgf_r + \frac{C_D A}{21.15} v_{am}^2, \\ T_{nm} = 9\,549 \frac{P_e}{n_m} = 9\,549 \times \frac{30}{10\,000} = 28.65, \text{N} \cdot \text{m}. \end{cases} \quad (8)$$

由  $T_{am}$  和  $\alpha_m$  对应的行驶阻力  $F_{am}$  确定速比  $i_0$  的下限，即

$$i_0 = F_{am} r / (T_{am}) = 5.9. \quad (9)$$

式中：

$$\begin{cases} F_{am} = mg(f_r \cos \alpha_m + \sin \alpha_m) + \frac{C_D A}{21.15} v_a^2, \\ T_{am} = 265, \text{N} \cdot \text{m}, \\ v_a = 40, \text{km/h}. \end{cases} \quad (10)$$

由以上结果可见， $i_0$  在 7.7~11.2 范围内可满足

足动力性能的要求，采用直接挡固定速比减速器是可行的。当  $i_0$  分别为 7.7, 8.9, 10.0 时，电机的阻力矩随电机转速变化的曲线如图 3 所示。

从图 3 中看出在电机阻力矩曲线与电机恒功率区转矩曲线的交点，汽车可获得最高车速。当  $i_0 = 7.7$  和  $i_0 = 8.9$ ，电机未达到最高转速时，汽车便获得最高车速；当  $i_0 = 10.0$ ，电机达到最高转速时，汽车获得最高车速。由于减速比越大，减速器体积越大，电机转速越高，对减速器输入轴轴承的要求越高，因此选择单挡速比  $i_0 = 8.9$  的减速器，并将减速器与电机安装在一起<sup>[4]</sup>。

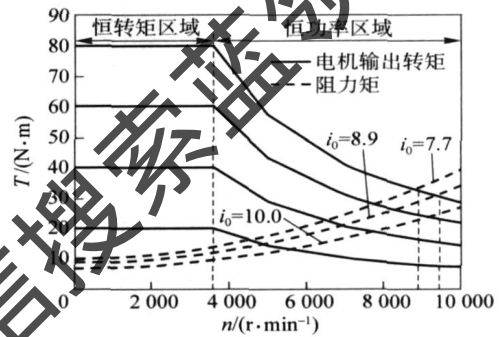


图 3 电机的输出转矩与阻力矩曲线

Fig. 3 Driving torque and resistance torque of motor

### 2.2.3 匹配结果

最高车速。

由式(7)~式(9)有

$$\begin{cases} T_{am} = F_{am} r / (i_0), \\ F_{vm} = mgf_r + \frac{C_D A}{21.15} v_{am}^2, \\ T_{nm} = 9\,549 \frac{P_e}{n_m}, \\ n_{am} = \frac{v_{am} i_0}{0.377 r}. \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)，经计算最高车速  $v_{am} = 117 \text{ km/h}$ 。

最大爬坡度。

由式(9)(10)有

$$T_{am} = \frac{r}{i_0} (mgf_r \cos \alpha_m + mg \sin \alpha_m + \frac{C_D A}{21.15} v_{am}^2). \quad (12)$$

当  $v_{am} = 40 \text{ km/h}$  时，最大坡度角  $\alpha_m = 26.7^\circ$  (坡度为 50%)。

加速时间。

车辆从静止起步全力加速到最大车速的加速时间  $t_f$  的计算式<sup>[2]</sup>为

$$\begin{cases}
 t_f = \frac{1}{3.6} \frac{v_{rm}}{F_t - mgf_r - C_D A v_a^2 / 21.15} d v_a + \\
 \frac{1}{3.6} \frac{v_{am}}{v_{rm} F_t - mgf_r - C_D A v_a^2 / 21.15} d v_a, \\
 v_{rm} = 0.377 n_e r / i_0, \\
 F_t = \begin{cases} T_{am} i_0 / r & v_a < v_{rm} \\ T_v i_0 / r & v_a > v_{rm} \end{cases}, \\
 T_v = 9549 P_{em} / n, \\
 n = v_a i_0 / (0.377 r).
 \end{cases}
 \tag{13}$$

式中： $\gamma$ 为汽车旋转质量换算系数，取 $\gamma = 1.3$ ； $n_e$ 为电机额定转速， $n_e = 3600 \text{ r/min}$ ；电机的瞬时最大输出功率  $P_{em} = 100 \text{ kW}$ ； $F_t$ 为车轮驱动力； $T_v$ 为电机输出最大恒功率时的输出转矩； $v_{rm}$ 为电机额定转速下的车速。

由式(13)计算  $t_f = 3.72 + 4.14 = 7.86 \text{ s}$ ，其中  $3.72 \text{ s}$ 和  $4.14 \text{ s}$ 分别是恒转矩区和恒功率区的加速时间，因此电机的机械特性满足轿车加速性能要求。通过以上匹配结果计算，电机的输出机械特性满足整车动力性能指标要求。

### 2.3 电机控制器及其控制特性

电动轿车  $30 \text{ kW}$  感应电机控制器包括基于双 CPU-DSP TMS320F240 和单片机 80C196KC 的电子控制单元和  $50 \text{ kW}$  逆变器。控制器中单片机作为主机，负责数据的采集处理(驾驶员命令信号和状态反馈信号)，实现外部系统执行机构的控制。DSP 作为从机，实现电机控制算法。电机控制算法采用转子磁场定向矢量控制，通过控制电机定子电流的转矩分量和励磁分量，实现对电机转矩和功率的控制<sup>[5]</sup>，使电机在基速以下输出恒转矩，基速以上输出恒功率。逆变器将直流电变为脉宽调制的交流电，并输入电机。电机控制器根据驾驶员的命令和实时电机的信息，对电机进行无级调速以及对各个机械特性范围的转矩和功率的控制，实时满足车辆动力性能的需求。

### 2.4 动力电池的匹配

车载动力电池的总能量为<sup>[6]</sup>

$$E = S e. \tag{14}$$

式中： $E$ 为动力电池组充满电的总能量， $\text{kW} \cdot \text{h}$ ； $e$ 为单位里程能耗； $S$ 为续航里程，参考相同功率的电动轿车取  $e = 0.2 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{km}$ <sup>[6]</sup>，要求  $S > 100 \text{ km}$ ，则动力电池的总能量  $E > 20 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。若动力电池的额定

放电电流为  $100 \text{ A}$ ，则动力电池串联后的额定电压大于  $200 \text{ V}$ 。从功率平衡考虑，电机的额定功率输出为  $30 \text{ kW}$ ，额定输入功率为  $30 / 0.93 = 32.258 \text{ kW}$ 。由以上综合考虑，选择 27 块动力电池串连，动力电池总电压为  $27 \times 12 = 324 \text{ V}$ 。

## 3 机电传动系统性能仿真

在 Matlab/ Simulink 下分别对机电传动系统进行了建模仿真<sup>[7-8]</sup>。在中国电动汽车城市市区十五循环工况下的仿真结果如图 4 所示。从图 4 可以看出，实际车速  $v_a$  与驾驶员操纵的给定车速  $v_{af}$  基本一致；实际车速  $v_a$  随电机的实际转速  $n$  而变化；电机的实际转矩  $T_e$  随负载转矩  $T_r$  动态变化；电机的实际输出功率  $P_e$  随负载转矩  $T_r$  而动态变化，最大值为  $50 \text{ kW}$ ，因此电机的最大功率满足实际的功率需求。

以上结果表明，机电传动系统具有良好的动态转矩特性和转速特性，能够满足城市市区电动轿车的驾驶性能要求。

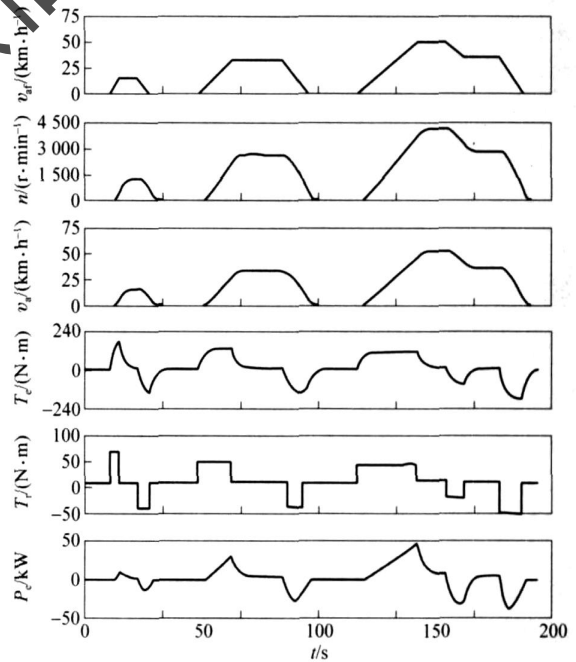


图 4 电动汽车循环工况电动轿车机电传动系统性能仿真结果  
Fig.4 Simulation results of electromechanical transmission system performance in the basic cycle condition for electric car

从图 5 可以看出，在最大车速  $117 \text{ km/h}$  高于  $100 \text{ km/h}$ ， $0 \sim 80 \text{ km/h}$  的加速时间小于  $10 \text{ s}$ ，满足整车的动力性能设计要求，表明机电传动系统的匹配计算是可行的。

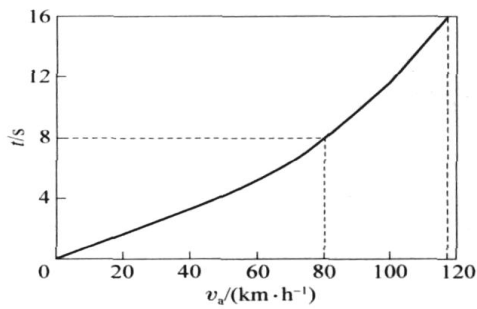


图 5 加速时间与车速的关系

Fig. 5 Relation of acceleration time and vehicle speed

## 4 结论

以 HS2000 电动轿车交流机电传动系统为例, 根据整车动力性能要求, 通过理论分析, 对机电传动系统进行匹配计算, 使电机输出特性与整车动力特性得到匹配。电动汽车机电传动系统的合理匹配, 可提高整车的动力性能指标和经济性能指标, 因此机电传动系统匹配方法对系统工程实现具有理论指导意义。

### 参考文献:

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 1990: 64 - 66.  
Yu Zhisheng. Automobile theory[M]. Beijing: China Machine Press, 1990: 64 - 66. (in Chinese)
- [2] 翟丽. 电动汽车交流感应电机驱动控制系统及其特性研究[D]. 北京:北京理工大学机械与车辆工程学院, 2004.  
Zhai Li. Study on AC induction motor propulsion control system and characteristics of electric vehicle[D]. Beijing: School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, 2004. (in Chinese)
- [3] 邱阿瑞, 尹雁, 王光辉, 等. 基于 DSP 的无速度传感器异步电机矢量控制系统[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(3): 21 - 24.

- Qiu Arui, Yin Yan, Wang Guanghui, et al. A speed sensorless vector control system of induction motor based on DSP [J]. Journal of Tsinghua Univ: Sci &Tech, 2001, 41(3): 21 - 24. (in Chinese)
- [4] 孙立清. 电动汽车系统匹配/性能仿真和关键部件技术研究及其样车开发[D]. 北京:北京理工大学车辆与交通工程学院, 2000.  
Sun Liqing. EV system matching, character simulation, key parts technology studying and vehicle development [D]. Beijing: School of Vehicle and Transportation Engineering, Beijing Institute of Technology, 2000. (in Chinese)
- [5] Jiang Shunming, Huang Dingyou. The optimal matching model of HEV/ EV drive system[C]. Proceedings of First Circular of China Japan Electric Vehicle Joint Conference. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001: 91 - 95.
- [6] 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: 178 - 180.  
Chen Qingquan, Sun Fengchun, Zhu Jianguang. Modern electric vehicle technology [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2002: 178 - 180. (in Chinese)
- [7] 翟丽, 孙逢春. 电动汽车感应电机矢量控制系统建模[J]. 微特电机, 2004, 32(5): 23 - 26.  
Zhai Li, Sun Fengchun. Modeling and simulation of vector control drive system of induction motor for electric vehicle [J]. Small and Special Electrical Machines, 2004, 32(5): 23 - 26. (in Chinese)
- [8] 翟丽, 彭连云, 孙逢春. 基于 MATLAB/ SIMULINK 电动汽车感应电机建模仿真与特性分析[J]. 车辆与动力技术, 2003, 38(4): 38 - 41.  
Zhai Li, Peng Lianyun, Sun Fengchun. Modeling, simulation and performance analysis of induction motor of electric vehicle using MATLAB/ SIMULINK[J]. Vehicle and Power Technology, 2003, 38(4): 38 - 41. (in Chinese)

(责任编辑: 匡梅)