

文章编号:1000-582X(2002)06-0019-04

# 电动汽车动力传动系统参数设计及动力性仿真\*

杨祖元,秦大同,孙冬野

(重庆大学机械传动国家重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**对电动汽车动力传动系统参数设计的原则和方法进行了探讨,并以 SC7101 轿车为研究对象,对电动汽车动力传动系统的参数进行合理选择。以铅酸电池作为动力源,提出了荷电状态 SOC 的计算方法,分析了铅酸电池的电动势  $E_0$ 、内阻  $R_0$ 、极化电阻  $R_p$  随荷电状态 SOC 变化的关系,并根据铅酸蓄电池容量与温度的关系,对铅酸蓄电池的容量进行了温度补偿,为设计和改进电池能量管理系统的性能奠定了理论基础。建立了动力传动系统的动力学模型,在此基础上对基于 SC7101 的电动轿车的动力性能进行了计算机仿真试验,进一步分析了影响电动汽车续驶里程的,并提出了增加行驶里程的措施。仿真结果表明,对铅酸蓄电池电特性的分析和建立的动力学模型是正确的,该电动汽车的动力性能完全满足设计指标要求。

**关键词:**电动汽车;传动系统;参数设计;动力性;仿真

**中图分类号:**U463.2

**文献标识码:**A

燃油汽车带来了严重的环境污染和能源危机,电动汽车被看成能够解决这两大问题的重要途径之一。然而,电动汽车续驶里程制约了电动汽车的普及和发展。因此,对动力传动系统参数进行合理设计和匹配,在相同电池条件下,增加其续驶里程,已成为国内外汽车行业研究的热点之一<sup>[1]</sup>。

## 1 动力传动系统参数设计

动力传动系统由蓄电池、控制器、电动机、变速器、主减速器、驱动轮等组成。

### 1.1 电动机参数选择

电动机的主要参数包括电动机类型、电动机额定功率和额定转速等。笔者以直流电动机为研究对象,其功率由电动汽车的最高车速来确定,以保证电动机的效率。若给出了期望的最高车速,选择的电动机功率应大体上等于但不小于以最高车速行驶时的行驶阻力功率之和。即有下式<sup>[2]</sup>:

$$P_e = \frac{1}{\eta_T} \left( \frac{M \cdot g \cdot f}{3600} V_{\max} + \frac{C_d \cdot A}{76140} V_{\max}^3 \right) \quad (1)$$

式中: $P_e$  为电动机额定功率; $M$  为整车质量; $g$  为重力加速度; $f$  为滚动阻力系数; $V_{\max}$  为最高车速; $C_d$  为空气阻力系数; $A$  为迎风面积; $\eta_T$  为动力传动系统效率。

### 1.2 传动比选择

车辆传动比包括变速器传动比和主传动比。电动汽车以最高车速行驶时,用最小传动比的档位工作,在最大爬坡度时用最大传动比的档位工作。由于直流电动机的起动转矩很大,并且易实现无级调速,传动比只需满足最高车速和最大爬坡度的要求即可,即可选择两档变速器。最小传动比档位为直接档,因此,主减速器的传动比可以由最高车速求取,即有下式<sup>[2]</sup>:

$$i_0 = 0.377 \frac{n_{\max} \cdot r}{V_{\max}} \quad (2)$$

式中: $i_g$  为变速器的传动比; $i_0$  为主减速器的传动比; $n_{\max}$  为电动机的最高转速; $r$  为轮胎滚动半径; $V_{\max}$  为最高车速。

变速器的最大传动比由电动汽车的最大爬坡度确定,即<sup>[2]</sup>:

$$i_{g\max} \geq \frac{G(f \cdot \cos(\alpha_{\max}) + \sin(\alpha_{\max})) \cdot r}{T_{iq\max} \cdot i_0 \cdot \eta_T} \quad (3)$$

式中: $\alpha_{\max}$  为最大爬坡角度。

### 1.3 电池组容量的选择

电池组容量的选择主要考虑的是最大输出功率和输出能量,以保证电动汽车的动力性和续驶里程。

#### 1.3.1 由最大功率选择蓄电池数目

\* 收稿日期:2002-01-22

基金项目:国家自然科学基金重点项目(59835160)

作者简介:杨祖元(1974-),男,云南宜威人,重庆大学在读硕士研究生。主要从事电动汽车传动系统领域的研究。

$$n = \frac{P_{e\max}}{P_{b\max} \cdot \eta_e \cdot \eta_{ec}} \quad (4)$$

式中:  $P_{b\max}$  为电池的最大输出功率;  $P_{e\max}$  为电动机的最大功率;  $\eta_e$  为电动机工作效率;  $\eta_{ec}$  为电动机控制器工作效率。

### 1.3.2 由续航里程选择蓄电池数目

$$n = \frac{L \cdot W \times 1000}{C_r \cdot V_1} \quad (5)$$

式中:  $L$  为汽车可行驶的里程数;  $V_1$  为单块蓄电池电压;  $n$  为应选蓄电池数目;  $C_r$  为蓄电池组中单块电池额定容量;  $W$  为汽车行驶 1 km 所消耗的能量。由式(4), 式(5)得到的大者即为所求的蓄电池数量。

### 1.4 动力传动系统参数设计

动力性能指标确定为: 最高时速 120 km/h, 0 ~ 80 km/h 加速时间 20 s, 最大爬坡度 35%, 续航里程 100 km, 在确定整车参数后, 根据以上原则, 可以得到动力传动系统的参数如表 1 所示。

表 1 动力传动系统主要设计参数

项 目	设计参数	设计值
电动机	额定功率	30 kW
	最大功率	36 kW
	额定转速	1 500 r/min
	最高转速	3 600 r/min
电池组	额定输出电压	252 V
	额定放电容量	150 Ah
	充满电时内阻	0.315 $\Omega$
传动系	主减速比	3.1
	I 档传动比	1.54
	II 档传动比	1

## 2 蓄电池参数识别

在电动汽车中, 蓄电池的有效放电容量决定了行驶里程, 而蓄电池荷电状态 SOC(State of Charge) 是衡量其剩余容量的指标, 因此, SOC 的确定尤为重要。

### 2.1 SOC 的计算

根据 Peukert 方程式<sup>[2-3]</sup>:

$$I^n \cdot \tau = \text{Const} \quad (6)$$

式中:  $I$  为蓄电池恒流放电电流;  $\tau$  为代表蓄电池电动势降至终止电压 1.75 V 时, 单体电池的放电时间, 对于铅酸电池:  $n \approx 1.347$ 。

由  $I \cdot \tau = C$  代入方程(6) 式得:

$$C \cdot I^{n-1} = k_f \cdot C_r \cdot I_r^{-1} \quad (7)$$

式中:  $C$  为蓄电池容量;  $k_f$  为修正系数, 以修正在不同放电电流  $I$  下, 系数  $n$  的偏差, 其值为  $I$  的函数;  $I_r$  为额定电流;  $C_r$  为电池额定容量。

变流放电的荷电状态:

$$SOC = 1 - \int_0^t \frac{Idt}{k_f \cdot C_r \left(\frac{I}{I_r}\right)^{n-1}} \quad (8)$$

### 2.2 电动势、内阻和极化电阻与 SOC 的关系

以铅酸蓄电池 DNG12/150 为例, 借用试验测试所得的铅酸电池电动势与荷电状态的变化关系<sup>[4-5]</sup>:

$$\begin{aligned} E_0 &= 10.72 + 2.6SOC & 0.8 \leq SOC \leq 1; \\ E_0 &= 12.0 + SOC & 0.4 \leq SOC \leq 0.8; \\ E_0 &= 11.7 + 1.75SOC & SOC < 0.4 \end{aligned} \quad (9)$$

电动势随 SOC 变化的关系如图 1 所示。

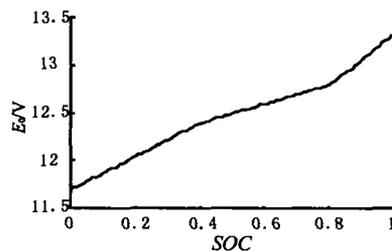


图 1 电动势与 SOC 的关系

蓄电池内阻  $R_0$  随荷电状态的变化关系<sup>[5]</sup>:

$$R_0 = 0.0196 - 0.0248SOC + 0.0154SOC^2 \quad (10)$$

其关系曲线如图 2 所示。

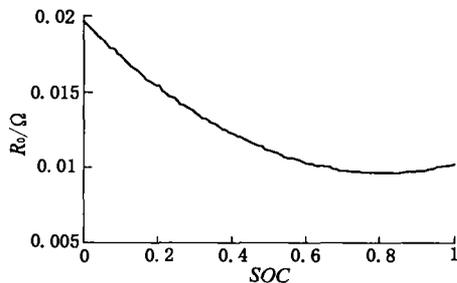


图 2 电池内阻与 SOC 的关系

充电时, 极化电阻  $R_r$  表示为  $R_\pi$ , 其与荷电状态的变化关系<sup>[5]</sup>:

$$R_\pi = 0.0235 + 0.0046 \cdot \sin[1.25\pi \cdot (SOC - 0.4)] \quad (11)$$

放电时, 极化电阻  $R_r$  表示为  $R_d$ , 其与荷电状态的变化关系<sup>[5]</sup>:

$$\begin{aligned} R_d &= 0.009SOC - 0.0042 & 0.8 \leq SOC \leq 1; \\ R_d &= 0.0025SOC + 0.001 & 0.4 \leq SOC < 0.8; \\ R_d &= -0.0045SOC + 0.0038SOC & SOC < 0.4 \end{aligned} \quad (12)$$

由式(11)、式(12) 得到极化电阻与荷电状态的关系曲线如图 3 所示。

### 2.3 电池容量的温度补偿

根据国际电化学组织给出的铅酸蓄电池容量与温度的关系式, 对铅酸蓄电池容量温度进行补偿<sup>[3]</sup>:

$$C_T = C_{30} \times (1 + K_T(T - 30)) \quad (13)$$

式中:  $C_T$  为电解液温度为  $T$  时蓄电池的容量;  $C_{30}$  为电解液温度为 30  $^{\circ}\text{C}$  时蓄电池的容;  $K_T$  为代表温度系数。

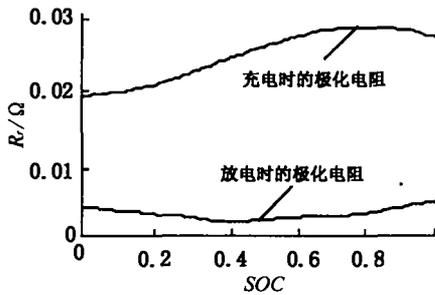


图 3 极化电阻与 SOC 的关系

国际电化学组织给出  $K_T = 0.008$ ;  $T$  为电解液的温度。

### 2.4 车辆行驶过程中对 SOC 的要求

SOC 是衡量电池剩余容量的指标,当电池放电到一定程度时,如果继续放电,并不能明显地增加行驶里程,反而会影响到电池的寿命。因此,通常在电池 SOC 下降到 0.2 时停止放电。

## 3 动力传动系统建模与仿真

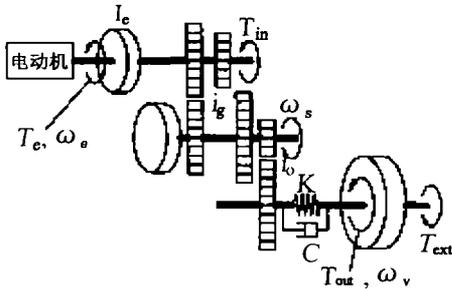


图 4 动力传动系统简化模型

### 3.1 动力传动系统的动力学模型代表了系统的输入和描述系统动态特性的方程如下:

$$\begin{aligned}
 I_e \dot{\omega}_e &= T_e - T_m; \\
 I_s \dot{\omega}_s &= T_m i_g \eta_T - (K_t \theta_t + C_t \dot{\theta}_t) / i_0; \\
 I_v \dot{\omega}_v &= (K_t \theta_t + C_t \dot{\theta}_t) - b_v \dot{\omega}_v - T_L; \\
 i_g &= \frac{\omega_e}{\omega_s}; \\
 \theta_t &= \frac{\theta_s}{i_0} - \theta_v; \\
 \dot{\theta}_t &= \frac{\omega_s}{i_0} - \omega_v; \\
 \dot{\omega}_e &= \dot{\omega}_s i_g; \\
 T_{out} &= K_t \theta_t + C_t \dot{\theta}_t \quad (14)
 \end{aligned}$$

式中:  $T_e$  为电动机输出转矩;  $I_e$  为电动机转子和变速器主动轮在主动轴上的等效转动惯量;  $I_s$  为变速器从动轮和主减速器在从动轮上的等效转动惯量;  $I_v$  为车体和轮胎在电动汽车驱动轴上的等价转动惯量;  $\omega_e$  为电动机转速;  $\omega_s$  为变速器从动轴转速;  $\omega_v$  为车轮转速;  $T_m$  为变速器主动轮输入转矩;  $T_{out}$  为电动汽车驱动轴

上的输出转矩;  $T_{ext}$  为电动汽车在行驶过程中的阻转矩,包括滚阻转矩和坡道阻转矩;  $i_g$  为变速器传动比;  $i_0$  为主减速器传动比;  $b_v$  为电动汽车的等价风阻系数;  $\eta_T$  为动力传动系效率;  $\theta_t$  驱动轴的相对转角;  $\dot{\theta}_t$  为驱动轴的相对转速;  $K$  为驱动轴的弹性系数;  $C_t$  为驱动轴的阻尼系数。

为了便于编程和计算,系统模型可以用状态方程的形式描述如下:

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= f(x, u); \\
 y &= g(x, u) \quad (15)
 \end{aligned}$$

其中系统的输入变量、状态变量以及输出变量设定为:

$$\begin{aligned}
 u &= [u_1, u_2]^T = [U, I_f]^T; \\
 x &= [x_1, x_2, x_3]^T = [\theta_t, \omega_v, \omega_e]^T; \\
 y &= [\omega_v] \quad (16)
 \end{aligned}$$

上式中:  $u$  为电动电枢电压;  $I_f$  为电动机励磁电流。

系统的状态方程和输出方程为:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{x_3}{i_g i_0} - x_2; \\
 \dot{x}_2 &= \frac{K_t}{I_v} x_1 - \frac{C_t}{I_v} x_2 + \frac{C_t}{I_v i_g i_0} x_3 - \frac{b_v}{I_v} x_2^2 - \frac{T_{ext}}{I_v}; \\
 \dot{x}_3 &= \frac{-\frac{K_t}{i_g i_0 \eta_T} x_1 + \frac{C_t}{i_g i_0 \eta_T} x_2 - \frac{C_t}{i_g^2 i_0^2 \eta_T} x_3}{I_e + I_s / (i_g^2 \eta_T)} + \frac{U c_t I_f - c_t c_e I_f^2 n}{R_a (I_e + I_s / (i_g^2 \eta_T))}; \\
 y &= x_2 \quad (17)
 \end{aligned}$$

### 3.2 电动汽车动力性仿真

动力传动系统的各参数确定后,根据动力学模型,进行编程仿真,结果如图 5、图 6 和图 7 所示。

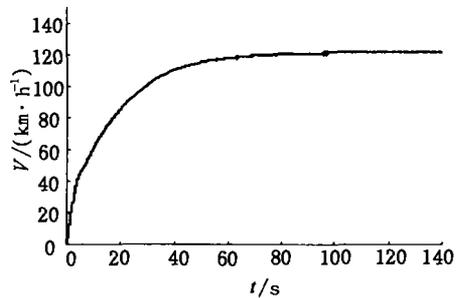


图 5 电动汽车加速曲线

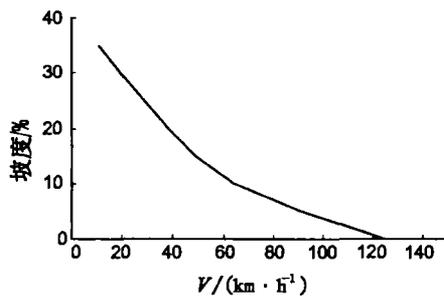


图 6 爬坡速度与车速关系

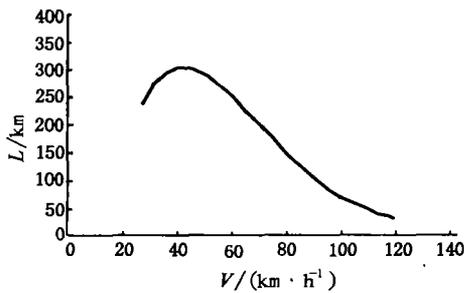


图7 续驶里程与车速的关系

### 3.3 仿真结果分析

仿真结果表明,最高车速为 124.7 km/h, 0 ~ 80 km/h 加速时间为 19 s, 0 ~ 100 km/h 加速时间为 32 s; 当车速为 10.66 km/h 时, 有最大爬坡度为 35%, 因此, 该电动汽车的动力性完全满足设计指标的要求。

由图 7 可知, 电动汽车的续驶里程与车速有关, 当车速在 30 ~ 63 km/h 范围内时, 有较大的续驶里程, 超过了 250 km。当车速为 42.7 km/h 时, 有最大续驶里程为 305 km。因为蓄电池的放电电流随车速的增大而增大, 且放电电流增大的幅度要大于车速增加的幅度, 故总的趋势是, 车速增大, 续驶里程缩短。当车速小于 42.7 km/h 时, 车速减小, 续驶里程缩短, 这是因为在车速减小时, 电动机的效率也降低, 电池能量损失较大。电动汽车的续驶里程还与行驶工况密切相关, 特别是加速时, 电池的放电电流很大, 使得蓄电池的有效放电容量减小, 因此不宜用恒速工况来考察电动汽车的续驶里程。此外, 电动汽车的续驶里程还与动力传动系统的效率、整车重量等密切相关。

### 3.4 增加电动汽车续驶里程的措施

为了增加电动汽车的续驶里程, 可以采取以下措施: 在城市工况中, 以中低速行驶; 在行驶过程中, 通过对再生制动能量的回收, 使电池维持较高的 SOC 值; 充分挖掘铅酸电池的潜力, 尽量减小电池的能量损失, 提高其放电容量, 还可采用比能量和比功率大的锂离子电池和镍氢电池等; 提高动力传动系统和控制系统的效率; 此外, 降低整车重量和风阻系数, 也是增加续驶里程的有效措施。

## 4 结语

通过对电动汽车动力传动系统的分析, 提出了系统参数合理设计和匹配的原则和方法, 以满足电动汽车的动力性能要求。通过对蓄电池的参数识别及基于动力学模型的动力性能仿真, 分析了影响电动汽车续驶里程的因素, 并提出了增加续驶里程的有效措施。

### 参考文献:

- [1] A VAN DEN BOSH, P. M. Impacts of Evs on Energy, the Environment and Transport System[A]. The 16th international electric vehicle symposium[C]. Beijing, 1999, 210 - 219.
- [2] 廖权来, 徐韵锋. 电动汽车的改装设计初探[J]. 汽车研究与开发, 1999, (1): 20 - 24.
- [3] 廖权来, 罗玉涛, 高亮. 电动汽车理论模型的建立及应用[J]. 汽车技术, 1996, (3): 11 - 13.
- [4] 陈全世, 林拥军, 张东民. 电动汽车铅酸电池放电特性的研究[J]. 汽车技术, 1996, (8): 7 - 11.
- [5] 李滨, 陈全世. 混合动力电动汽车中电池特性的研究[J]. 汽车技术, 1999, (10): 11 - 14.
- [6] 王红岩, 秦大同, 张伯英, 等. 无级变速自动驾驶系统模糊控制策略[J]. 汽车工程, 2000, (6): 397 - 402.

## Parameter Design for the Power Train and Simulation of the Dynamic Performance of Electrical Vehicle

YANG Zu-yuan, QIN Da-tong, SUN Dong-ye

(State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The method and principle of the parameter design for the power train of EV is explored and discussed, then the parameters of EV, based on SC7101 are reasonably selected. The method of calculating the SOC of Lead-acid battery is provided and the relation among the electromotive force, the interior resistance, the polarized resistance and the SOC are analyzed. The capacity is compensated according to the relation between the capacity and the temperature, which is the basis on which the energy management system is designed and improved. The dynamic model which reflects the dynamic characteristics of the power train is established, then the dynamic performance of the EV based on SC7101 is simulated, and the factors that affect the continuous mileage of EV are analyzed, the measures to increase the continuous mileage are provided. The result shows that the analysis of the electric characteristics of battery and the dynamic model are correct, and the dynamic performance perfectly meets the need of the design target.

**Key words:** electrical vehicle; power train; parameter design; dynamic performance; dynamic model; simulation

(责任编辑 张小强)