

基于 ADVISOR 的纯电动汽车驱动转矩 双模糊控制策略

赵 涛¹, 李 强¹, 邢紫筱², 张强华³

(1. 浙江科技学院 机械与能源工程学院, 杭州 310023; 2. 爱丁堡大学 工程学院,
爱丁堡 EH8 9YL; 3. 宁波均胜科技有限公司, 浙江 宁波 315000)

摘 要: 针对电动汽车行驶工况及驾驶员操作具有一定非线性和时变不确定性的问题,对整车控制器的控制算法和电池管理系统进行了研究,提出了一种驱动转矩分配的双模糊控制策略。对纯电动汽车建立整车动力学模型和驾驶员输入参数模型,以基本转矩模糊控制器和补偿转矩模糊控制器来求解,并优化驱动转矩值,采用 CAN 总线通讯经过电机驱动器来控制驱动电机的转矩输出。以 CYC_HWFET 高速工况和 CYC_EUDC 中低速工况为例,基于 ADVISOR 平台对双模糊控制器的电动汽车进行性能仿真分析。结果表明,所设计的双模糊控制器在满足纯电动汽车动力性要求的同时,也能获得较优的经济性且动力电池利用效率较高。

关键词: 纯电动汽车; ADVISOR; 驱动转矩; 模糊控制

中图分类号: U469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2019)05-0419-07

Double fuzzy control strategies for driving torque of electric vehicle based on ADVISOR software

ZHAO Tao¹, LI Qiang¹, XING Zixiao², ZHANG Qianghua³

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. School of Engineering, the University of Edinburgh, Edinburgh EH8 9YL, the United Kingdom;
3. Ningbo Joyson Electronic Corp., Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: In response to the problems that the driving conditions of electric vehicle and the driver's operation have certain nonlinearity and time-varying uncertainty, the control algorithm and battery management system of the vehicle controller were studied, proposing the double fuzzy control strategies distributed by driving torque. Firstly, the vehicle dynamics model and the driver input parameters model were established for the electric vehicle, seeking the solution of the torque values and optimizing the driving torque values by virtue of the basic torque fuzzy controller and the compensation

收稿日期: 2019-03-19

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(LY13E050023)

通信作者: 李 强(1979—),男,江苏省溧阳人,教授,博士,主要从事新能源汽车机电一体化控制研究。E-mail: liqiang@zust.edu.cn。

torque fuzzy controller so that the CAN bus could communicate with the motor driver to control the torque output of the driving motor. The ADVISOR platform was applied to conduct performance simulation and analysis of electric vehicles with double fuzzy controllers. The simulation results show that by exemplifying the CYC_HWFET high-speed working condition and the CYC_EUDC medium & low-speed working conditions, the electric vehicle with double fuzzy controllers designed meets the power requirement and can attain better economy and higher power battery utilization efficiency.

Keywords: electric vehicle; ADVISOR; driving torque; fuzzy control

近几年,纯电动汽车具有污染少、能耗低、噪音小等优点,得到世界各国政府的大力支持,不少科研机构和相关企业纷纷掀起了致力于研发高性能纯电动汽车的热潮。而驱动系统作为纯电动汽车的核心部分,一定程度上决定了电动汽车的动力性和经济性。国外对纯电动汽车驱动系统的研究起步相对较早^[1-2]。国内科研院所和高校对控制系统进行了大量研究与开发^[3-6],也取得了丰硕的成果。姚海峰等^[7-8]提出的驱动转矩控制策略在一定程度上满足高速工况下的动力需求,但未考虑加速踏板变化率对车辆加速性能的影响。动力电池储能技术、驱动系统的性能及传动效率等限制了续航能力和能量利用率;邓元望等^[9]考虑了短时踏板开度变化率对车辆加速性能的影响,提高了车辆的操控性和快速性,但同时也加大了对动力电池的消耗;薛涛等^[10]对纯电动汽车进行了动力性匹配研究,但未考虑从控制策略方面提升动力性和经济性。

为更好解决驾驶员操作在不同行驶工况下存在一定非线性和时不变性的问题,通过建立整车动力学模型及驾驶员输入参数模型,包括车辆行驶动力学模型、功率平衡模型、加速踏板模型、动力电池模型,并且考虑控制加速踏板开度变化率等因素,采用双模糊控制器,我们提出了以基本转矩和补偿转矩为电机输出等控制策略,基于 ADVISOR 平台进行了整车仿真与分析。结果表明,所设计双模糊控制器可有效提高车辆动力性及动力电池使用效率。

1 纯电动汽车动力学模型

纯电动汽车驱动系统将驱动电机输出的转矩经机械传动系统传递给驱动轮驱动汽车行驶。它主要包括:驾驶员操作系统、整车控制器、能源系统、电机驱动系统及机械传动系统,具体架构如图 1 所示。

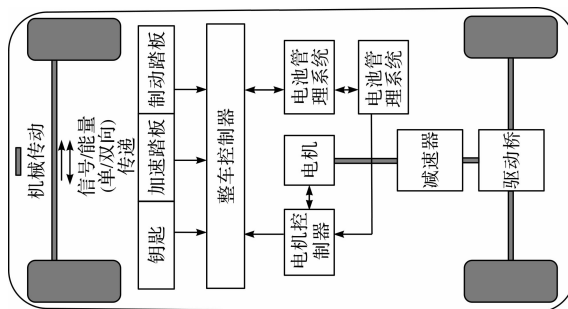


图 1 纯电动汽车动力驱动系统架构

Fig. 1 Architecture of power drive system of pure electric vehicle

1.1 行驶方程式

确定后驱汽车的行驶方程以分析汽车行驶方向的运动状态。 F_t 表示驱动力,行驶阻力包括滚动阻力 F_f 、空气阻力 F_w 、坡度阻力 F_i 、加速阻力 F_j 。汽车行驶动力学模型如图 2 所示。

由图 2 建立汽车行驶方程式:

$$F_t = \sum F = F_f + F_w + F_i + F_j. \quad (1)$$

选择坡度为 β 的路面,汽车以速度 v_0 在极限附着力 F_{\max} 的驱动下行,当前步长 Δt 内汽车所能产生的最大速度为 v_t ,则当前步长

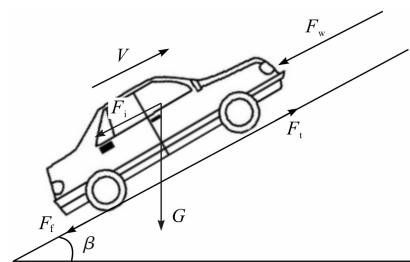


图 2 汽车行驶动力学模型

Fig. 2 Vehicle driving dynamics model

内汽车的加速度为:

$$a = (v_t - v_0) / \Delta t. \quad (2)$$

当前步长内汽车的平均速度 v_{aver} 为汽车当前的需求车速,由当前步长内汽车的始末速度 v_0 、 v_t 计算得:

$$v_{\text{aver}} = (v_0 + v_t) / 2. \quad (3)$$

将式(1)~(3)联立并利用数值迭代法求得汽车极限附着驱动力下能够提供的最高车速 v_{max} :

$$v_{\text{max}} = \left[mg\mu_{\text{max}} \frac{b}{L} - mg \left(f_1 \cos\beta + \sin\beta - \frac{1}{2} f_2 v_0 \right) - \frac{1}{8} \rho C_D A v_0^2 + \left(\mu_{\text{max}} \frac{h_g}{L} + 1 \right) m \frac{v_0}{\Delta t} - mg \sin\beta \frac{h_g}{L} \right] / \left[\frac{3}{8} \rho C_D A v_0 + \frac{1}{2} mg f_2 \cos\beta + \left(\mu_{\text{max}} \frac{h_g}{L} + 1 \right) \frac{m}{\Delta t} \right]. \quad (4)$$

式(4)中: m 为整车质量,kg; μ_{max} 为附着极限; b 为质心到后轴距离,m; L 为轴距,m; f_1 为前轮滚阻系数; β 为坡度,°; f_2 为后轮滚阻系数; ρ 为空气密度,kg/m³; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积,m²; h_g 为质心高度,m。

1.2 功率平衡方程

纯电动汽车行驶时不仅驱动力和行驶阻力平衡,电机功率与阻力功率也要相平衡。换言之,在纯电动汽车行驶过程中的每一时刻,电机的输出功率总是等于行驶阻力功率与机械传动损失功率之和^[11]。纯电动汽车行驶阻力功率 P_m 一般包括滚动阻力功率 P_f 、空气阻力功率 P_w 、坡度阻力功率 P_i 和加速阻力功率 P_j 。功率平衡方程为:

$$P_m = P_f + P_w + P_i + P_j = \frac{1}{\eta_T} \left(\frac{mgfv}{3\,600} + \frac{mgiv}{3\,600} + \frac{C_D A v^3}{76\,140} + \frac{\delta m v}{3\,600} \cdot \frac{dv}{dt} \right).$$

整车的动力系统最高总功率 P_{max} 由最高车速 v_{max} 确定:

$$P_{\text{max}} = \frac{v_{\text{max}}}{\eta_T} \left(\frac{mgf}{3\,600} + \frac{C_D A v_{\text{max}}^3}{76\,140} \right).$$

2 驱动输入系统建模

2.1 加速踏板模型

纯电动汽车加速踏板可采用电位计测量踏板开度,加速踏板的不同角度对应不同的输出电压,角度越大,电压值一般越高。加速踏板安装固定后,对其角度与输出电压值进行测试校准,多次测量取均值后得出两者间的对应关系,如图3所示。

理想对应关系呈一定线性,但顾及驾驶员的可操作性及控制器模型的有效性,暂不考虑踏板高低极限位置时的函数关系,即开度小于5%和大于90%时的情况。根据有限的若干个测量点的数值,利用最小二乘法进行曲线拟合,得出输出电压 $f(x)$ 与其踏板开度 x 间的关系:

$$f(x) = 4.872 \times \exp(-((x - 104.8)/68.05)^2) \quad (5\% \leq x \leq 90\%). \quad (5)$$

测得的实际电压值与通过函数拟合的电压值相对比,满足偏差在±3.5%以内的要求。这是由于实际中加速踏板传感器的采集有一定的误差,但对电机控制器输出转矩分辨率而言,该误差可以忽略不计。

2.2 动力电池模型

动力电池的能量存储及充放电速率是制约其发展的关键技术,所选高性能的锂电池作为能量源,额定电压为310 V,容量为220 A·h,共96串,根据所选的动力电池的理化特性,建立电池的充放电模型为:

$$E = f_1(i_t, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{kQ \pm i_t} \cdot i^* - A_1 \cdot \frac{Q}{Q - i_t} \cdot i_t + R \cdot \exp(-B \cdot i_t). \quad (6)$$

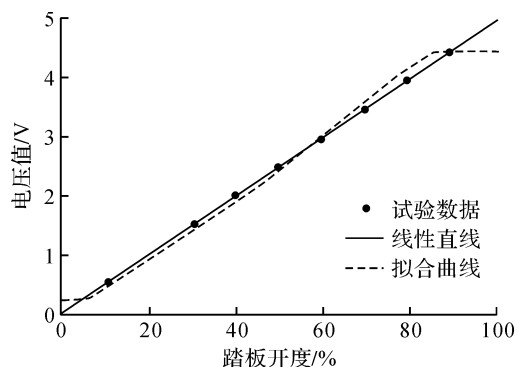


图3 加速踏板开度与输出电压值对应关系曲线

Fig.3 Corresponding curve of accelerating pedal opening and output voltage value

式(6)中: i_i 为提取容量, $A \cdot h$; i^* 为低频电流动态, A ; i 为电池电流, A ; E_0 为电池恒压, V ; K 为极化常数, A/h ; k 为系数,充电时为 0.1,放电时为 1; Q 为最大电池容量, $A \cdot h$; A_1 为指数电压, V ; B 为指数能力, A/h 。

所得试验测试数据经拟合后充放电曲线如图 4 所示,充电电压最大值约为 320 V,最小值约为 280 V。

蓄电池组输出的功率受到等效电路传递的最大功率和电机最大工作功率的限制,二者要取其较小值。动力电池荷电状态(state of charge, SOC)表示剩余容量,是直接反映电池持续供电能力和状况的一个重要参数,常用百分数表示。采用安时计量法^[12]建立 SOC 状态预测算法:

$$X_{\text{SOC}} = X_{\text{SOC}}^0 + \frac{1}{Q_N} \int_0^t \eta i(t) dt. \quad (7)$$

式(7)中: X_{SOC} 、 X_{SOC}^0 分别为当前时刻和充放电起始时刻的

荷电状态; Q_N 为额定容量, $\text{mA} \cdot h$; η 为充放电效率且不是常数(假定充电电流方向为正,放电电流方向为负)。

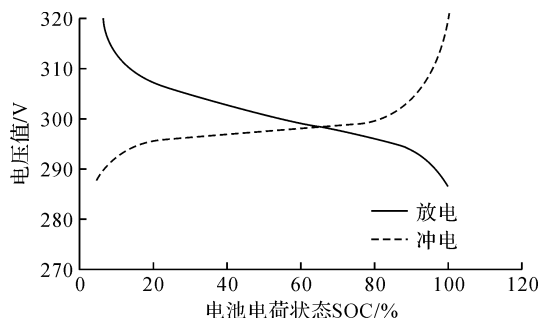


图 4 电池充放电曲线

Fig. 4 Charge-discharge curve of batteries

3 电动汽车驱动系统控制策略

通过电机输出转矩的控制策略,可使纯电动汽车的动力性能得以改善,提高续驶里程。复杂的行驶工况导致加速踏板开度变化率会对动力性产生一定的影响,因此将电机的输出转矩 T 分为基本转矩 T_1 与补偿转矩 T_2 ^[13-14]两部分。基本转矩 T_1 与加速踏板开度 K_a 间存在一定的比例关系,同时还需考虑动力电池电量 SOC 和电机转速 n 的影响;补偿转矩 T_2 通过分析加速踏板开度 K_a 及其变化率 dK_a 后计算得出。驾驶意图判断模块对来自驾驶员模块的加速踏板开度 K_a 进行解析后,经基本输出模块输出基本转矩 T_1 。同时,信号处理模块采集加速与制动踏板的位置并解析出当前踏板变化率及开度信息,输入模糊控制器中求解补偿转矩 T_2 。此外,双模糊控制器还将实时采集当前的 SOC 等状态信息,从而对电机的输出功率进行限制。驱动系统转矩控制策略如图 5 所示。

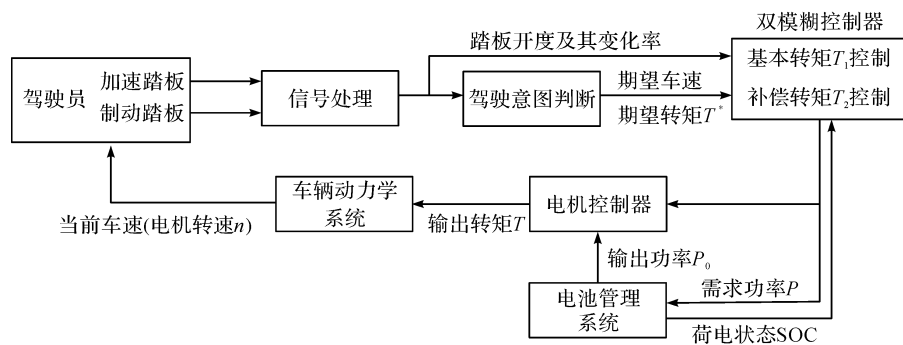


图 5 纯电动汽车驱动系统转矩控制策略

Fig. 5 Torque control strategy of pure electric vehicle driving system

3.1 基本模糊控制器设计

由于驾驶意图复杂多变且非线性,不易获得精确数学模型,因此采用模糊控制方法求解电机转矩输出值。此部分所设计的模糊控制器包括三个输入变量:当前电机转速 N_m ,动力电池荷电状态 SOC(%) 和加速踏板开度 K_a (%),输出量为电机输出转矩 T_1 ($N \cdot m$)。加速踏板的开度范围为 0%~100%,但为避免加速踏板的误操作以及消除自由行程误差,设置其下限值为 5%,同时为安全性考虑,设置其上限为 90%,因此论域为 $[5, 90]$ (%)。由所选电机特性取其转速论域为 $[0, 8000]$ (r/min),电池电量的论域为 $[20, 95]$ (%),输出转矩的论域为 $[30, 90]$ ($N \cdot m$)。

对输入输出参数作模糊化处理, $N_m = \{NL, NS, ZO, PS, PL\}$, $SOC = \{NL, NS, ZO, PS, PL\}$, $K_a = \{NL, NS, ZO, PS, PL\}$ 。选择模糊控制器的输入输出隶属度函数,并通过该隶属度函数设计模糊控制规则,最后利用重心法将模糊输入量转换为精确的转矩输出^[15-16]。解模糊得出当 3 个输入参数中一个为定值时,输出转矩与另外 2 个参数的对应关系如图 6 所示。

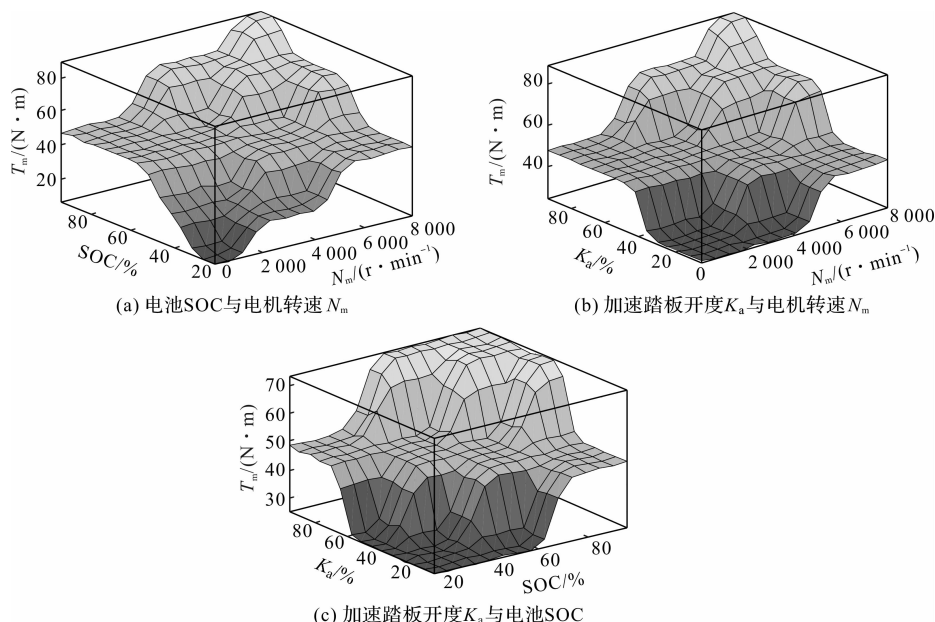


图6 控制器中电机转矩输出特性曲线

Fig. 6 Torque output characteristic curve of motor in controller

由图 6(a)可知,当电机转速平稳时,输出转矩随 SOC 增大后趋于平缓,且转速越高,输出的转矩值越大;当 SOC 固定时,输出转矩随转速的增大而增大。由图 6(b)可知,当输出转速不变时,电机输出转矩随加速踏板开度的增大而增加,后趋于平缓;而当加速踏板开度固定时,电机输出转矩随转速的增加而增加,并在末端趋于平缓。由图 6(c)可知,当电池 SOC 一定时,电机输出转矩随加速踏板开度增大先增加后平缓,同样,当加速踏板开度固定时,电机输出转矩亦随 SOC 增加而增加。

3.2 补偿模糊控制器设计

考虑加速踏板的开度变化率对电机输出转矩的影响,使用补偿转矩为车辆提供速度变化时的额外转矩输出以便迅速响应驾驶员意图。补偿转矩规则:低速时加速踏板单位正向变化量对应的补偿转矩大于高速时加速踏板单位正向变化量对应的补偿转矩;高速时加速踏板单位反向变化量对应的转矩减小量大于低速时加速踏板单位反向变化量对应的转矩减小量。此部分所设计的控制器包括两个输入变量加速踏板开度 K_a (%)及其变化率 dK_a 和输出量补偿转矩因子 K_T 。加速踏板开度 K_a 的论域仍为 $[5, 90](\%)$, 开度变化率 dK_a 的论域为 $[-100, 100](\%)$ 。补偿转矩因子 K_T 与加速踏板开度变化率 dK_a 之间存在一定比例关系,其论域为 $[-100, 100](\%)$, dK_a 为正表示补偿转矩大于 0;反之则小于 0。

对输入输出参数作模糊化处理, $K_a = \{NL, ZO, PS, PL\}$, $dK_a = \{NL, NS, ZO, PS, PL\}$, $K_T = \{NL, NS, ZO, PS, PL\}$ 。模糊控制器的推理系统采用 Mamdani 类型,输入输出隶属度函数选择高斯型,采用重心法使模糊量清晰化,最终得补偿转矩因子 K_T 与加速踏板开度 K_a 及其变化率 dK_a 的对应关系,如图 7 所示。

根据双模糊控制器输入条件与输出转矩之间的关系,可计算出某一状态下驾驶员期望的转矩输出值 T ,其值为基本转矩 T_1 和补偿转矩 T_2 之和。基本转矩可由基本模糊控制器的输出直接确定,补偿转矩值为补偿转矩因子 K_T 与电机额定转矩 T_e 的乘积。

4 纯电动汽车驱动系统性能仿真分析

某型号车辆仿真模型的主要技术参数如表 1 所示。

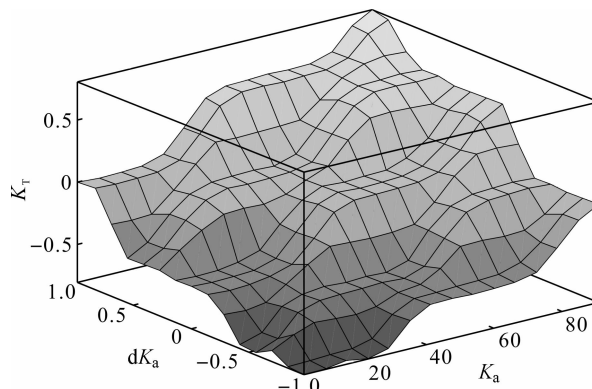
图7 补偿转矩因子 K_T 与加速踏板开度 K_a 及其变化率 dK_a 的关系Fig. 7 Relationship between compensation torque factor K_T and acceleration pedal opening K_a and its change rate dK_a

表 1 某型号纯电动汽车主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of a pure electric vehicle

技术参数	数值	技术参数	数值
整车装备质量/kg	940	电机额定功率/kW	55
迎风面积/m ²	2.188	电机额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
轮胎滚动半径/mm	282	电机最高转速/(r·min ⁻¹)	8 000
轴距/mm	1 960	电机额定转矩/(N·m)	96
质心高度/mm	513	电机峰值转矩/(N·m)	180
电机额定电压/V	320		

根据所建立的驱动系统模型,在 MATLAB/Simulink 下搭建包含双模糊控制器的纯电动汽车驱动系统模型,为了进一步研究纯电动汽车动力性和电池利用率之间的关系,分别选用车速高、驾驶平稳的 CYC_HWFET 高速工况和中低速 CYC_DUDC 典型额外城市工况^[17]。前者工况全长 16.51 km,运行时长 765 s,后者工况全长 10.93 km,运行 1 225 s,并设置循环次数为 13。利用高级车辆仿真器 ADVISOR,基于 Simulink 进行二次开发的模块对使用模糊控制器车型的动力性和 SOC 状态进行仿真,结果如图 8~11 所示。

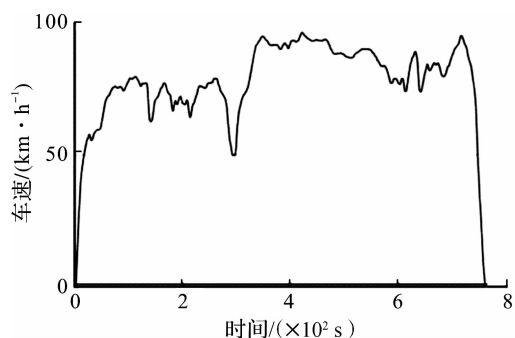


图 8 纯电动汽车高速工况仿真车速

Fig. 8 Simulation speed of pure electric vehicle under high speed conditions

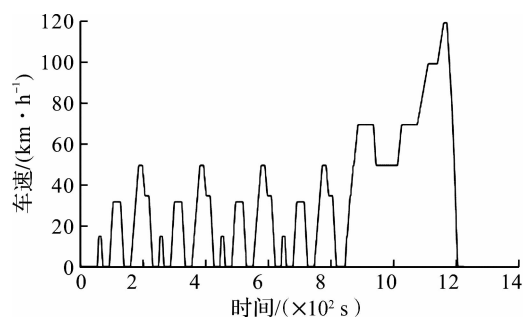


图 9 纯电动汽车中低速工况仿真车速

Fig. 9 Simulation speed of pure electric vehicle under medium and low speed conditions

图 8 表明,使用双模糊控制器车型在 CYC_HWFE 高速工况运行过程中加、减速均表现平缓。在车辆仿真过程中为了便于更好地评价动力性,增加了加速测试模块和爬坡模块,结果显示最高车速达到 149.2 km/h,在 0~96.6 km/h 区间内加速时间 11.5 s,以 88.5 km/h 速度可以行驶在坡度为 8% 的路面上。图 9 表明,使用双模糊控制器车型在 CYC_EUDC 中低速工况下可实现较好的车速跟随循环工况行驶,平均车速为 32.1 km/h,最大车速达到 120 km/h,最大加速度为 1.1 m/s²。

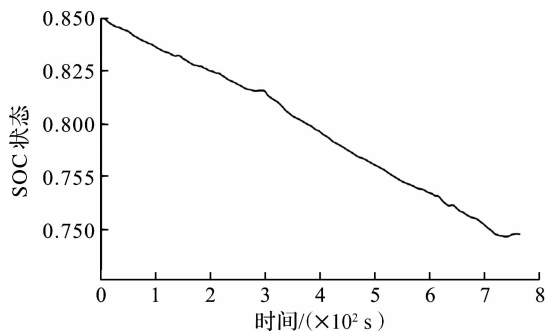


图 10 纯电动汽车高速工况仿真电池 SOC

Fig. 10 SOC simulation of pure electric vehicle batteries under high speed conditions

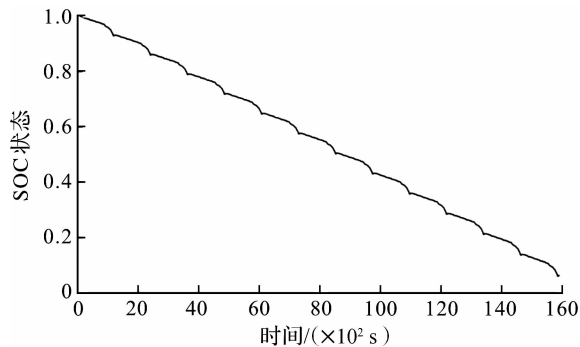


图 11 纯电动汽车中低速工况仿真电池 SOC

Fig. 11 SOC simulation of pure electric vehicle batteries under medium and low speed conditions

图 10 仿真结果表明,使用双模糊控制器的车辆在高速驾驶工况中电池电量消耗较为平缓,运行结束后电池 SOC 状态大约为 74%,控制效果较佳。其中,当车辆运行至 5 min 时,由于车速短时间内提升近

一倍,致使电机输出功率急速升高,因此 SOC 状态出现了短暂的较大波动,后随车速逐渐稳定 SOC 下降趋势也趋于平稳。图 11 中在完成 13 次典型中低速循环工况仿真后,SOC 状态从接近 100%降到几乎为零,表明该车型使用双模糊控制器后续驶里程可达 150 km 以上,具有较好的动力性和经济性。

5 结 语

纯电动汽车驱动系统的性能会对车辆整体性能产生重要影响。在建立纯电动汽车动力学模型和输入参数模型后,利用设计的双模糊控制器求解车辆在某一信号输入状态下的期望输出转矩,并将转矩指令输出到电机控制器执行,基于 ADVISOR 平台搭建嵌入双模糊控制器的电动车模型,对其进行动力性与经济性仿真试验。结果表明,搭载双模糊控制器的纯电动汽车模型在保证动力性的同时,电池电量消耗较为平缓,且剩余电量相对较多,这为后续开发整车控制器综合控制策略奠定了良好的开发环境和试验基础。

参考文献:

- [1] KHOOBAN M H, VAFAMAND N, NIKNAM T. T-S fuzzy model predictive speed control of electrical vehicles[J]. ISA Transactions, 2016, 44: 231.
- [2] EHSANI M, RAHMAN K M, TOLİYAT H A. Propulsion system design of electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 1997, 44(1): 21.
- [3] 姜海斌. 纯电动车整车控制策略及控制器的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [4] 李斌花. 纯电动汽车电机驱动系统控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [5] 王佳, 杨建中, 蔡志标, 等. 基于模糊控制的纯电动轿车整车优化控制策略[J]. 汽车工程, 2010, 31(4): 363.
- [6] 李素华. 纯电动汽车驱动系统设计及仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2016(1): 40.
- [7] 姚海峰, 王亚平, 陈以春, 等. 纯电动汽车动力性能分析与计算[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(25): 6351.
- [8] 窦国伟, 刘奋, 程浩, 等. 纯电动轿车整车驱动控制策略开发实践[J]. 上海汽车, 2010, 5(5): 8.
- [9] 邓元望, 郑潮雄, 曾俊, 等. 纯电动汽车转矩动力性能优化控制研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(1): 132.
- [10] 薛涛, 申荣卫, 丁栋厚. 基于 ADVISOR 纯电动汽车动力性能研究[J]. 汽车实用技术, 2019(2): 26.
- [11] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [12] 乔波强, 侯振义, 王佑民. 蓄电池剩余容量预测技术现状及发展[J]. 电源世界, 2012(2): 22.
- [13] 秦大同, 周孟喜, 胡明辉, 等. 电动汽车的加速转矩补偿控制策略[J]. 公路交通科技, 2012, 29(5): 147.
- [14] 刘永山. 纯电动汽车整车控制器开发及控制策略研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014: 49.
- [15] 石辛民, 郝整清. 模糊控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 98.
- [16] 刘志强, 汪浩磊, 杜荣华, 等. 纯电动汽车电液复合回馈制动研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(8): 957.
- [17] 曾小华, 宫维钧. ADVISOR 2002 电动汽车仿真与再开发应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014: 65.