



基于模糊 PI 控制的纯电动汽车驱动系统建模和仿真

赵轩¹, 马建¹, 汪贵平², 史骏²

1. 长安大学汽车学院, 西安 710064
2. 长安大学电子与控制工程学院, 西安 710064

摘要 汽车工业在推动经济发展, 提高人民生活水平的同时, 也带来了能源短缺、环境污染和气候变暖等问题。电动汽车作为新能源汽车, 是解决能源危机和环境污染问题最有效的途径。电动汽车的性能与驱动系统密切相关, 研制和开发适合电动汽车各种行驶工况的驱动系统已成为电动汽车领域研究的重要内容。本文结合汽车行驶平衡方程和电机机械特性方程建立了纯电动汽车(EV)驱动系统的数学模型, 采用模糊 PI 控制策略对模型进行优化控制, 并在 Simulink 环境下对模型进行仿真验证。仿真结果表明, 该纯电动汽车驱动系统的数学模型, 能够真实准确地反映车辆的运行状态, 采用模糊 PI 控制策略能够较好地对驱动系统进行优化控制, 使得仿真车速对需求车速具有良好的跟随性。该模型具有较强的鲁棒性, 适用于纯电动汽车驱动系统的仿真。

关键词 纯电动汽车; 驱动系统; 模糊控制; Simulink; 建模; 仿真

中图分类号 U469.72

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)15-0083-05

Modeling and Simulation of the Driving System Based on Fuzzy PI Control in Electric Vehicles

ZHAO Xuan¹, MA Jian¹, WANG Guiping², SHI Jun²

1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China

Abstract Automobile industry has to face problems such as energy shortages, environmental pollution and global warming, along with its contributions in economic development and improvement of people's living standard. The electric vehicle is the most effective way to solve problems related with energy and environmental pollution. The performance of an electric vehicle is closely related with the driving system to be operated on various driving conditions. This paper combines the balance equation for the vehicle movement with the equation of motor mechanical properties to establish a mathematical model of the driving system of Electric Vehicle (EV). Fuzzy PI control strategy is used in the model for the optimal control and the model is simulated by the software Simulink. Simulation results show that the mathematical model of the driving system of the electric vehicle can represent the vehicle running states accurately. Fuzzy PI control strategy optimizes the control of the driving system and improves the performance of the simulation in tracing the speed. The simulation model is very robust and applicable to simulate the driving system of electric vehicles.

Keywords electric vehicle; driving system; fuzzy control; Simulink; modeling; simulation

0 引言

汽车工业在推动经济发展的同时, 产生了能源短缺、环境污染和气候变暖等问题^[1]。新能源汽车的研制已经成为各

国政府和汽车制造商亟待解决的问题^[2-3]。纯电动汽车具有低污染、低能耗、零排放、高效率、低噪声等优点, 在环境保护和能源利用等方面具有无可比拟的优越性, 是解决能源危机和

收稿日期: 2010-02-31

基金项目: 陕西省重点科技攻关计划项目(2001K10-G1)

作者简介: 赵轩, 博士研究生, 研究方向为电动汽车, 电子信箱: bluesky_xuan@163.com; 马建 (通信作者, 中国科协所属全国学会个人会员登记号: E028900056M), 教授, 研究方向为电动汽车, 电子信箱: majian@chd.edu.cn

环境污染问题的最有效途径^[4]。

纯电动汽车,从车载储能装置(车载蓄电池、超级电容)获得电能,以电机驱动,但同时又满足道路交通安全法规对汽车的各项要求,并获准在正规道路上行驶^[5]。驱动系统是电动汽车上将电能转换成机械能的动力装置,电动汽车的整车性能与驱动系统密切相关,研制和开发适合电动汽车行驶工况的驱动系统已成为电动汽车领域研究的重要内容^[6]。

电动汽车在正常行驶工况下,驾驶员根据外界环境和车辆的运行状态操作加速踏板,主控制器根据加速踏板角度的变化控制车辆的运行车速。因此,电动汽车驱动系统及其控制策略尤为重要,关系着电动汽车整车综合性能的发挥以及行驶过程中乘员的安全。

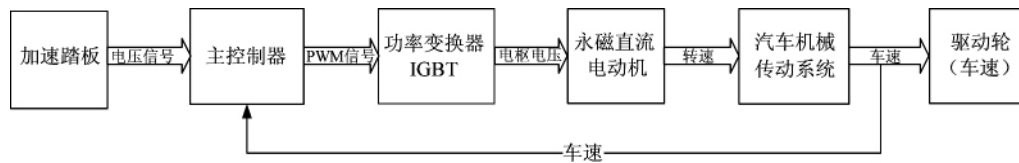


图1 纯电动汽车驱动系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric vehicle driving system

纯电动汽车驱动控制系统的数学模型实际上就是根据加速踏板角度 θ 的变化控制车速 u_a 。

由汽车理论知,汽车的行驶方程为^[8]

$$F_t = F_t + F_w + F_i + F_j$$

即

$$\frac{T_{iq} i_g \eta_T}{r} = Gf \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \quad (1)$$

其中, F_t 为驱动力, F_f 为滚动阻力, F_w 为空气阻力, F_i 为坡度阻力, F_j 为加速阻力; T_{iq} 为电机转矩, i_g 为变速箱传动比, i_o 为主减速比, η_T 为传动系效率, r 为车轮半径, G 为汽车的重量, f 为滚动阻力系数, α 为道路坡度, C_D 为空气阻力系数, A 为迎风面积, u_a 为汽车车速, δ 为汽车旋转质量换算系数 ($\delta > 1$), m 为汽车质量, du/dt 为汽车加速度。

直流电机机械特性表达式为^[9]

$$U_d = C_e \phi n + \frac{R_a + R_\Omega}{C_T \phi} T_{iq}$$

即

$$T_{iq} = \frac{(U_d - C_e \phi n) C_T \phi}{R_a + R_\Omega} \quad (2)$$

其中, U_d 为电枢两端端电压, ϕ 为磁通, n 为电机转速, C_e 为电机电动势常数, C_T 为电机转矩常数, R_a 为电枢回路电阻, R_Ω 为外电阻。

汽车车速与电机转速关系式为

$$u_a = 0.377 \frac{nr}{i_g i_o} \quad (3)$$

将式(2)、式(3)带入式(1),得

$$\frac{(U_d - C_e \phi n) C_T \phi i_g \eta_T}{(R_a + R_\Omega) r} = Gf \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} \left(0.377 \frac{nr}{i_g i_o} \right)^2 + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \quad (4)$$

1 纯电动汽车驱动系统数学模型的建立

对于传统汽车,驾驶员通过改变加速踏板的角度控制节气门开度,改变发动机喷油量,从而达到调节发动机扭矩和转速的目的^[7]。对于纯电动汽车,驾驶员操作加速踏板,加速踏板将角度变化信号转化成电信号传递到主控制器,主控制器根据踏板信号调节脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 占空比,利用 PWM 信号控制功率变换器 (IGBT) 的通断时间,实现直流电机调速的目的,最后通过机械传动系统将电机输出的转速传递到驱动轮,驱动车辆行驶。

图1为纯电动汽车驱动系统示意图。驱动系统由加速踏板、主控制器、功率变换器、永磁直流电机、汽车机械传动系统(变速箱、传动轴、主减速器等)和驱动轮组成。

本实验选用上海大众 PASSAT B5 电子油门为加速踏板。由实验测出加速踏板角度 θ 与输出电压 V 的关系,结果如图2所示。

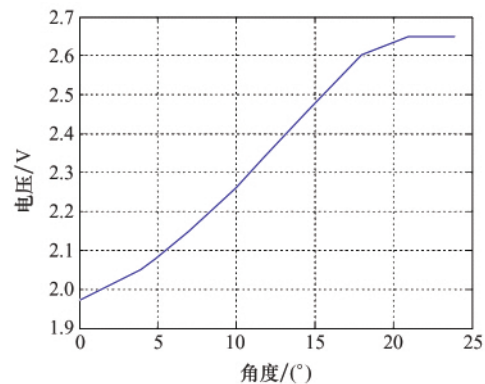


图2 加速踏板角度与输出电压关系曲线

Fig. 2 Curve of the accelerator pedal angle against the output voltage

由图2拟合,加速踏板电压与角度的关系式为

$$V = 0.03045\theta + 1.98 \quad (5)$$

再根据加速踏板输出电压控制 PWM 的占空比,进而控制电机电枢两端的电压,可得到电子油门踏板角度与电机转速的关系式。

电枢两端电压与加速踏板角度的关系式为

$$U_d = f(V) = f(\theta) \quad (6)$$

直流电机的稳态关系式为

$$n = \frac{U_d - I_d R}{K_e \phi} \quad (7)$$

其中, I_d 为电枢电流; R 为电枢回路电阻; K_e 为电动势常数。

由式(3)得

$$n = \frac{i_g i_a}{0.377r} \quad (8)$$

由式(6)~式(8)得车速与加速踏板角度的关系式为

$$K_c \phi \frac{i_g i_a}{0.377r} + I_d R = f(\theta) \quad (9)$$

将式(8)、式(9)带入式(4),得加速踏板角度与车速的关系式为

$$\frac{f(\theta) - C_c \phi \frac{i_g i_a}{0.377r}}{(R_a + R_\Omega)r} C_r \phi i_g i_a \eta_r = G f \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + G s \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \quad (10)$$

式(10)即纯电动汽车传动系统数学模型。当车辆正常行驶时,驾驶员操作加速踏板的角度控制车辆的行驶速度。该模型可以根据加速踏板角度的变化,准确地计算出电动汽车的当前车速。

2 模糊 PI 控制器的建模

模糊控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种非线性智能控制算法^[10]。模糊控制技术最大的特点是适用于各类具有非线性、强耦合、不确定、时变的多变量复杂系统^[11]。

由于电动汽车行驶工况复杂,加速踏板角度的变化也比较频繁,基于传统的传递函数的数学方法建立的加速踏板控

制电机电枢电压的模型,无法跟随外界路面环境的变化做出相应的调节,从而达不到良好的控制效果。

在纯电动汽车传动系统数学模型的基础上,利用模糊 PI 控制器对仿真过程中得到的实际车速与需求车速的偏差进行修正,可以得到较好的控制效果^[12]。模糊 PI 控制器将 PI 控制和模糊控制有机地结合起来,构成模糊自整定 PI 控制器。利用模糊技术对比例系数 K_p 、积分系数 K_i 进行在线调整,以满足不同工况下对控制器参数的自整定,这样既能改善模糊控制器的稳态性能,又能在一定程度上提高 PI 控制器的鲁棒性和适应性^[13-17]。图 3 给出模糊 PI 控制器的原理图。

模糊 PI 控制器即模糊控制和 PI 控制相结合,其输出量为 PI 控制参数的调整量。这里,为了减少响应滞后时间,用增量式 PI 控制与模糊控制相结合^[18]。模糊控制器的输入变量为驾驶员通过操作加速踏板设定的预定车速与实际车速的差值 Δu_a 和车速差的变化率 $\Delta c u_a$ 、输出变量为比例系数的变化量 ΔK_p 和积分系数的变化量 ΔK_i 。利用量化因子 K_e 、 K_{ec} 对输入变量 Δu_a 、 $\Delta c u_a$ 及输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 的基本论域进行归一化处理,使其误差和误差变化率论域集中在 $[-3, 3]$ 范围,输出论域集中在 $[-1, 1]$ 范围。将 Δu_a 、 $\Delta c u_a$ 、 ΔK_p 和 ΔK_i 的论域划分为 7 个区间,相应的语言表述为 {NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB}, 隶属度函数采用高斯函数^[19]。模糊 PI 控制器的模型如图 4 所示,各变量的隶属函数如图 5 所示。

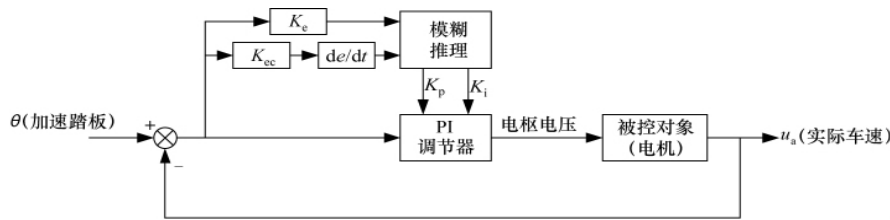


图 3 模糊 PI 控制器原理图

Fig. 3 Schematic diagram of fuzzy PI controller

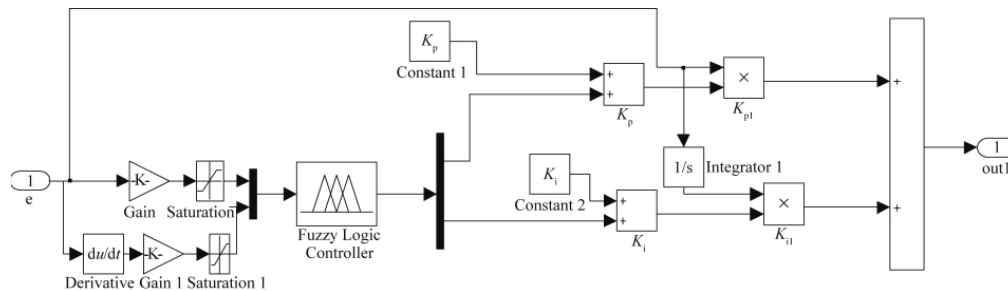


图 4 模糊 PI 控制器模型

Fig. 4 Model of fuzzy PI controller

3 仿真结果和分析

将纯电动汽车驱动系统的数学模型整合到 Simulink 仿真软件下进行仿真验证,驱动系统仿真模型如图 6 所示。仿真选用车辆的参数为:整车总质量 3875kg,电动汽车主减速比 4.52,变速器传动比 1.63,轮胎半径 0.363m,滚动阻力系数

0.013,旋转质量换算系数 1.05,机械效率 0.90,电机额定电压 210V,电机额定电流 190A,电机额定转速 4000r/min,电机额定功率 40kW,电机额定转矩 124N·m,电机最大功率 60kW, $C_D A$ 为 3.48m²,直流电机的电动势常数 $C_e=0.068$,电动机额定励磁下的转矩电流比 $C_T=0.653$ 。

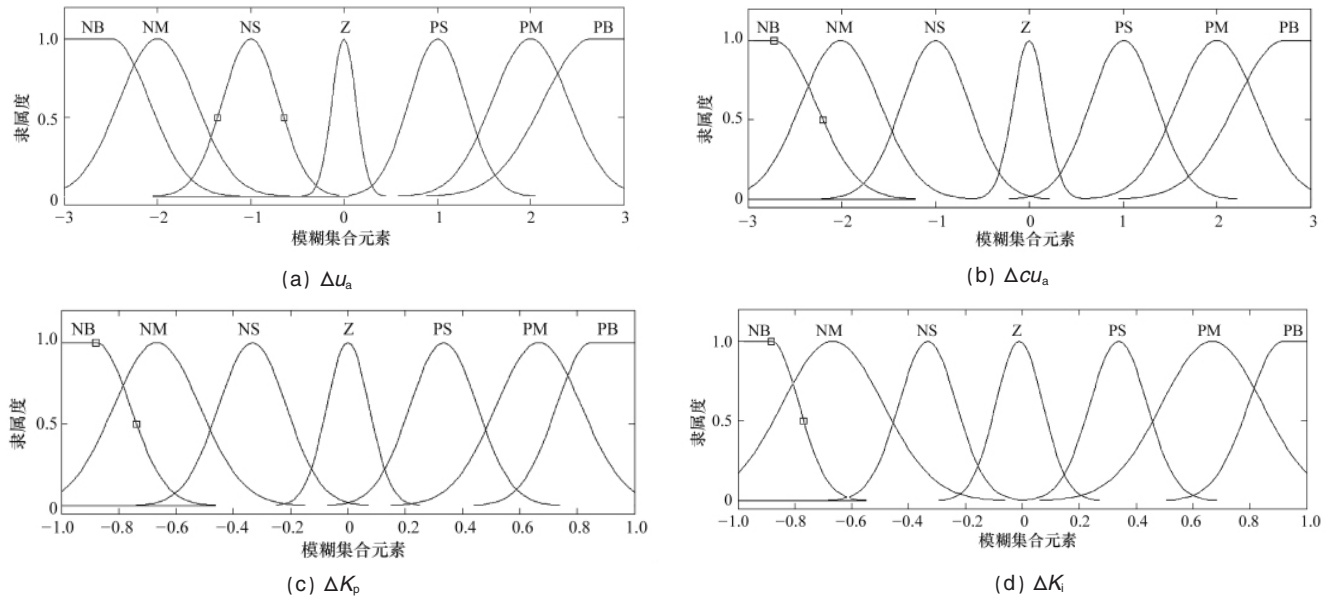


图 5 输入和输出变量的隶属函数

Fig. 5 Membership functions of input and output variables

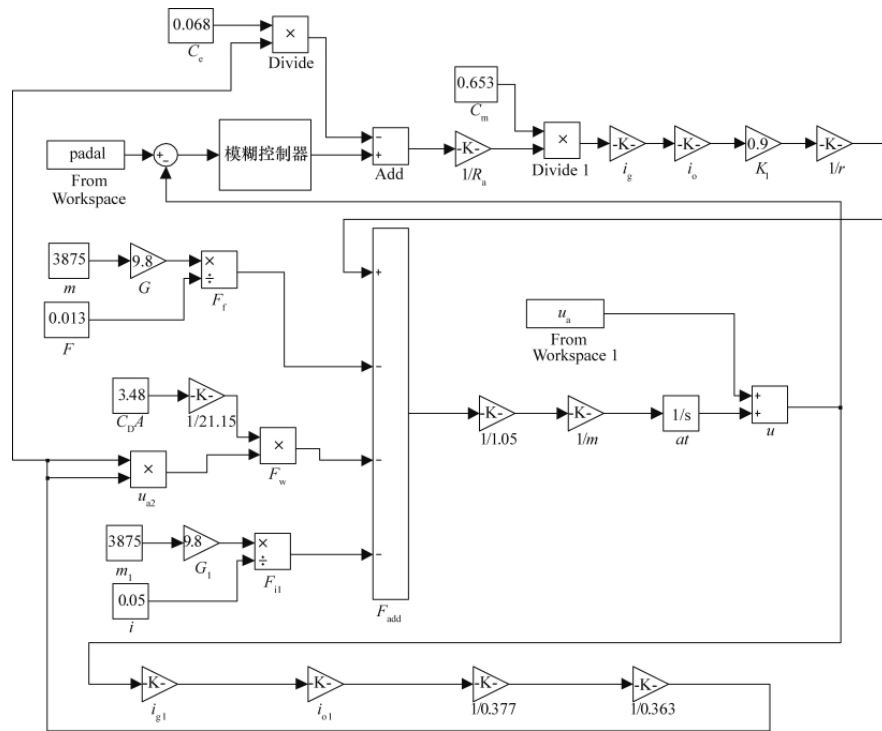


图 6 驱动系统仿真模型

Fig. 6 Simulation model of driving system

仿真得到踏板设定车速, 仿真车速, 设定车速与仿真车速的偏差, 车速偏差的变化率数据曲线如图 7 所示。

由仿真结果可见, 采用模糊 PI 控制策略对纯电动汽车驱动系统进行控制, 其设定车速与仿真车速之间存在的偏差的平均值为 0.138km/h, 均方差为 0.433。则该纯电动汽车传动系统采用模糊 PI 控制策略可以对仿真车速进行修正, 使仿真车速对设定车速具有良好的跟随性, 有较高的抗干扰能力, 同时车速的超调量较小。所以采用模糊 PI 控制策略更有利于整

车性能的发挥。

4 结论

本文通过对纯电动汽车整车系统的分析, 建立了纯电动汽车驱动系统的数学模型, 采用模糊 PI 控制策略对模型进行优化控制, 并将该模型整合到 Simulink 仿真软件进行仿真验证。仿真结果表明, 该数学模型能够真实、精确、快速、高效地反映车辆的运行状态, 采用模糊 PI 控制策略能较好地驱动

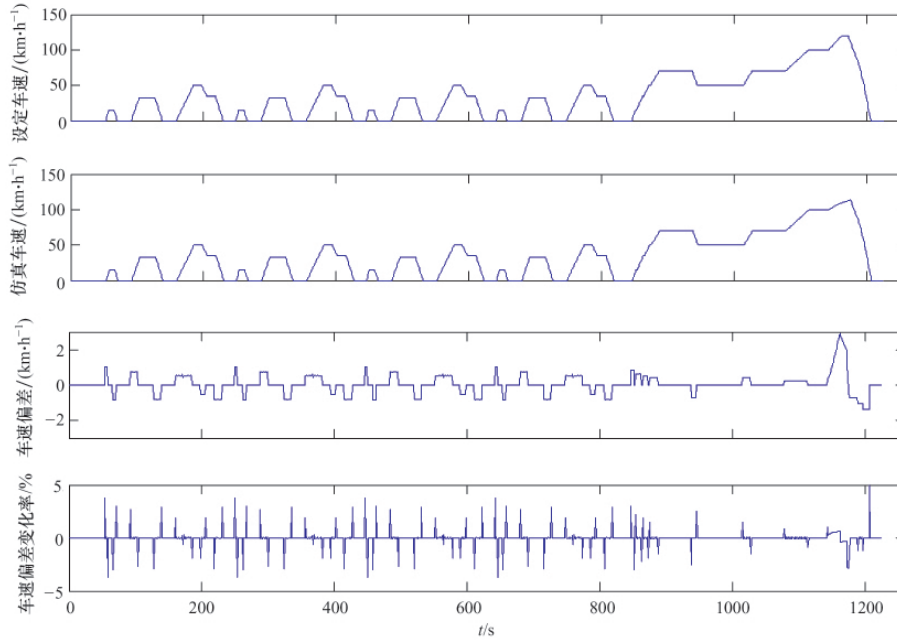


图 7 仿真结果

Fig. 7 Simulation results

控制系统进行优化控制,使设定车速与仿真车速相吻合,整车车速对驾驶员操作踏板角度具有良好的跟随性。该模型具有较强的鲁棒性,适用于纯电动汽车驱动系统仿真。

参考文献 (References)

[1] 汪贵平. 纯电动汽车驱动与制动能量回收控制策略研究 [D]. 西安: 长安大学汽车学院, 2009.
Wang Guiping. Study on control strategy of electric driving and regenerative braking for pure electric vehicle [D]. Xi'an: School of Automobile, Chang'an University, 2009.

[2] Rahman S, Castro A D. Environmental impacts of electricity generation: A global perspective [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1995, 10(2): 307-313.

[3] 陈清泉. 环境保护和电动车的开发 [J]. *江苏机械制造与自动化*, 2000 (1): 3-7.
Chen Qingquan. *Jiangsu Machine Building & Automation*, 2000(1): 3-7.

[4] 边耀璋. 汽车新能源技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
Bian Yaozhang. New energy technology of automobile[M]. Beijing: China Communications Press, 2003.

[5] 陈全世, 朱家琏, 田光宇. 先进电动汽车技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
Chen Quanshi, Zhu Jialian, Tian Guangyu. Advanced electric vehicle technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.

[6] 孙逢春. 电动汽车发展现状及趋势[J]. *科学中国人*, 2006(8): 38-40.
Sun Fengchun. *Scientific Chinese*, 2006(8): 38-40.

[7] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
Chen Jiarui. Automobile structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2004.

[8] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
Yu Zhisheng. Automotive theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.

[9] 詹跃东, 李山, 巨永锋. 电机及拖动基础 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.
Zhan Yuedong, Li Shan, Ju Yongfeng. Fundamentals of electrical machines and drives[M]. Chongqing: Chongqing University Press, 2000.

[10] 李士勇. 模糊控制神经控制和智能控制论 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业

大学出版社, 2003.
Li Shiyong. Fuzzy control neurocontrol and intelligent cybernetics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003.

[11] 诸静. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
Zhu Jing. Application and principle of fuzzy control [M]. Beijing: China Machine Press, 2005.

[12] 黄妙华. 电动汽车前向仿真中驾驶员模型建模与仿真 [J]. *武汉理工大学学报: 交通科学与工程版*, 2004, 28(6): 825-828.
Huang Miaohua. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering Edition*, 2004, 28(6): 825-828.

[13] 赵国柱, 魏民祥, 杨正林. 基于制动稳定性要求的 ADVISOR 再生制动模块的开发[J]. *机械与电子*, 2007(6): 10-14.
Zhao Guozhu, Wei Minxiang, Yang Zhenglin. *Machinery & Electronics*, 2007(6): 10-14.

[14] Wang L, Bai W. Development and simulation of electric vehicle based on ADVISOR[J]. *Journal of Southeast University: English Edition*, 2006, 22(2): 196-199.

[15] Andrew C B, Ali E. ADVISOR-based model of a battery and an ultra-capacitor energy source for hybrid electric vehicles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2004, 53(1): 119-205.

[16] 张翔, 钱立军, 张炳力, 等. 电动汽车仿真软件进展[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(8): 1621-1623.
Zhang Xiang, Qian Lijun, Zhang Bingli, et al. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(8): 1621-1623.

[17] 李舒欣, 曹秉刚, 白志峰, 等. 电动汽车再生制动的模糊 PI 控制实验研究[J]. *电气技术*, 2006(1): 52-54.
Li Shuxin, Cao Binggang, Bai Zhifeng, et al. *Electrical Engineering*, 2006(1): 52-54.

[18] 张翔, 赵韩, 钱立军, 等. ADVISOR 软件的混合仿真方法 [J]. *计算机仿真*, 2005, 22(2): 203-206.
Zhang Xiang, Zhao Han, Qian Lijun. *Computer Simulation*, 2005, 22(2): 203-206.

[19] Huang M, Qiu H, Liu J. Fuzzy logic control for parallel hybrid vehicles [C]// Proc of the International Electric Vehicle Symposium. Busan, Korea, 2002.

(责任编辑 朱宇)

