

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.027

纯电动客车起步仿真研究^{*}

罗 石¹, 章丹丹¹, 朱长顺¹, 侯 荣²

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 南京金龙客车制造有限公司, 江苏 南京 211200)

摘要:针对纯电动汽车起步的关键问题即电机输出转矩控制,对纯电动汽车起步加速过程进行了动力学分析,依据加速踏板开度和开度变化率,运用模糊控制原理解析了驾驶员的起步意图,根据驾驶员意图和车辆实际运行情况制定了电机转矩的控制策略。在 Matlab/Simulink 中建立了其仿真模型,从冲击度、速度以及电机转矩输出值三个方面对纯电动汽车的起步性能进行了仿真分析。研究表明,该控制策略能够满足纯电动汽车的起步要求,既能满足一定的起步加速能力以及平顺性的要求,同时响应了驾驶员的起步意愿,具有一定的实际应用价值。

关键词:电动汽车;起步;模糊控制;电机转矩

中图分类号:TP391.9;TM306;U469.72

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0141-05

Simulation study for starting up of pure electric vehicle

LUO Shi¹, ZHANG Dan-dan¹, ZHU Chang-shun¹, HOU Rong²

(1. Automotive and Traffic Engineering College of JiangSu University, Zhengjiang 212013, China;

2. Nanjing Jinlong Bus Manufacturing Co., Ltd., Nanjing 211200, China)

Abstract: Aiming at the key problem in the process of pure electric vehicle starting, namely the torque output of motor, kinetic analysis was carried out. Based on the open degree of accelerator pedal and the change rate of it, the fuzzy control principle was used to analysis of driver's starting intention. Torque control strategies was developed on the basis of driver's starting intention as well as the actual situation of the vehicle. Simulation models were set up in Matlab/Simulink. The starting performance of pure electric vehicle was analyzed from three aspects: the impact degree and the vehicle speed and torque output value. The results show that the control strategies meet the requirements of the start up of pure electric car well including of the ability to speed up, and the requirements of comfort also the intent of the driver, it has a certain practical value.

Key words: electric vehicle; start up; fuzzy control; torque

0 引 言

以纯电动汽车为代表的新型的节能环保汽车,很大程度上能解决资源短缺和环境污染问题,是解决城市化进程中汽车问题的重要途径之一^[1-2]。纯电动汽车起步控制是纯电动汽车关键技术之一,其核心是纯电动车起步过程中的电机输出转矩控制。为了充分反映驾驶员的起步加速意图,保证起步过程中的安全性和乘坐的舒适性以及满足一定的起步加速性能,对纯电动车起步控制的研究具有一定的理论价值与实用意义。

文献[3]基于电机堵转特性,并建立道路坡度识

别模型,研究了不同的坡道对纯电动汽车起步性能的影响。文献[4]建立了电机电流和车速双闭环调速系统,电机获得了良好的机械特性,从电机层面建立了纯电动汽车起步控制策略。文献[5]研究了车辆起步过程中有油门和无油门两种情况下的电机转矩控制。文献[6]对电动车的原地起步加速过程分别采用了恒转矩+恒功率控制、恒转矩加速、恒功率加速3种控制方式,探讨了不同控制方案对其起步性能的影响。但以上文献都没有考虑驾驶员意图。

本研究首先对车辆起步过程进行动力学分析,根据加速踏板开度和加速踏板开度变化率,运用模糊推

收稿日期:2014-09-25

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2014BAD08B00)

作者简介:罗 石(1969-),男,江苏镇江人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事汽车电子方面的研究. E-mail:78189952@qq.com

理解析驾驶员意图,即驾驶员期望车速,在此基础上制定电机转矩输出控制策略。在 Matlab/Simulink 仿真平台上搭建其仿真模型,对所提出的控制策略进行仿真研究,验证控制策略的可行性。

1 纯电动汽车起步加速过程动力学分析

车辆由静止加速到某一车速,其动力学方程^[7-8]为:

$$a = \frac{T_e i_g i_0 \eta / r - G(\sin \alpha + f \cos \alpha) - c_w A \rho v^2 / 2}{\lambda m} \quad (1)$$

式中: a —车辆加速度, T_e —电机输出扭矩, i_g —变速箱传动比, i_0 —主减速器传动比, η —传动系效率, r —车轮半径, G —整车重力, α —道路坡度角, f —滚动阻力系数, C_w —空气阻力系数, A —迎风面积, ρ —空气密度, v —车辆速度, m —整车质量, λ —旋转质量换算系数。

电机是纯电动汽车的唯一动力源,因此对电机转矩的合理控制是保证纯电动汽车起步平稳、加速性能良好的关键。

纯电动车起步平顺性的评价指标是冲击度,最大值推荐值 10 m/s^3 ,是车辆纵向加速度的微分,即 $J = da/dt$,式中: J —冲击度。起步品质的另一个评价指标是车辆的加速性能,一般纯电动客车原地起步 $0 \text{ km/h} \sim 50 \text{ km/h}$ 的加速时间小于等于 30 s ^[9]。本研究针对某款单电机集中驱动的纯电动客车进行研究,其整车的部分技术参数如表 1 所示。

表 1 整车技术参数

项目	内容
整车整备质量/kg	12 500
满载质量/kg	16 500
电机额定扭矩/(N·m)	645
传动效率 η	0.8
滚动阻力系数 f	0.012
迎风面积 A/m^2	8
空气阻力系数 C_w	0.52
旋转质量换算系数 λ	1.3
车轮半径/m	0.464
一档传动比	4.11
主减速器传动比	6.166
空气密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.205

2 驾驶员意图解析

加速踏板开度和加速踏板开度变化率直接反应了驾驶员的起步意图,对当前车速是否满意是驾驶员意图最直接的体现,若当前车速低于期望的车速,则加重踏板开度,增加电机扭矩输出,使车速增大;当前车速高于期望车速,则减小踏板开度,减小电机扭矩输出,使车辆减速。模糊控制是建立在模糊集合上的一种基

于语言规则与模糊推理的控制理论,适用于那些具有非线性、大时滞、不确定性和时变性系统的控制^[10],因此,可以运用模糊推理解析驾驶员意图。

模糊控制器的输入是加速踏板开度和加速踏板开度变化率,输出是驾驶员期望车速 V_h 。加速踏板开度的基本论域由实际值确定,加速踏板开度变化率基本论域的选取,根据文献[11]确定,驾驶员期望车速的基本论域根据纯电动客车的性能要求确定,该款电动客车的最高车速为 75 km/h 。而模糊集论域的选择,要确保模糊集论域中所含元素个数为模糊语言值的两倍以上,使模糊集能较好的覆盖论域,避免出现失控现象。三角形隶属度函数既可以满足一般要求,又可简化计算,因此,本研究采用三角形的隶属函数。比例因子 K_e 的大小对系统动态性能影响很大, K_e 则对系统超调的抑制作用明显,输出系数 K_u 越大,控制器的控制作用越大,系统响应快,但过大会导致系统振荡^[12]。而模糊规则的建立则是根据专家经验确定,如加速踏板开度较大,而变化率缓慢,这表明驾驶员期望的车速较大。综上所述,本研究模糊控制器设计如下所述。

加速踏板开度 β 的基本论域 $[0, 1]$ ($0 \sim 100\%$),选取模糊论域 $[0, 10]$,比例因子 $K_e = 10$,模糊语言变量为{很小,小,中,大,很大},对应的模糊子集{VS,S,M,L,VL}。加速踏板开度的隶属度函数如图 1 所示。

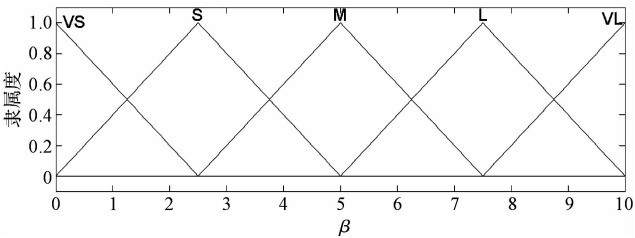


图 1 加速踏板开度隶属度函数

加速踏板开度变化率 β 的基本论域 $[-2, 2]$,模糊论域选取为 $[-6, 6]$,比例因子 $K_e = 3$,模糊语言变量{负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},对应的模糊子集{NL,NM,NS,ZO,PS,PM,PL},加速踏板开度变化率的隶属度函数如图 2 所示。

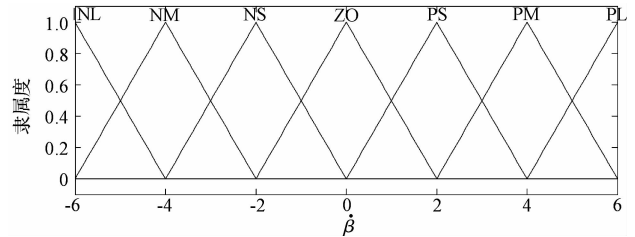


图 2 加速踏板开度变化率隶属度函数

期望车速 V_h 的基本论域 $[0, 20]$ (m/s),模糊论域

$[0,10]$,输出系数 $K_u=2$,模糊语言变量{很小,小,中,大,很大},对应的模糊子集{VS,S,M,L,VL}。期望车速的隶属度函数如图3所示。

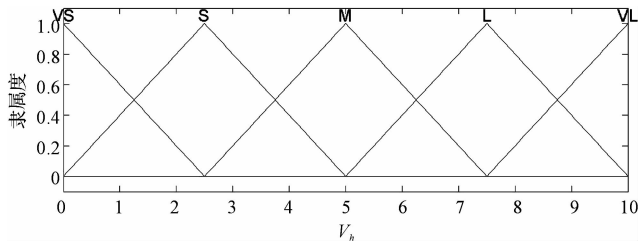


图3 期望车速隶属度函数

模糊推理规则如表2所示。

表2 模糊推理规则

V_h	β				
β	VS	S	M	L	VL
NL	VS	VS	VS	VS	VS
NM	VS	VS	VS	S	S
NS	VS	S	S	M	M
ZO	VS	S	M	L	VL
PS	S	M	L	L	VL
PM	M	L	L	VL	VL
PL	L	L	VL	VL	VL

3 起步控制策略

传统车辆的起步,主要是利用离合器和加速踏板的配合,而纯电动汽车由于电机的调速特性并不需要配备离合器,纯电动汽车的起步主要的工作是控制电机的输出转矩,使纯电动汽车满足一定的起步加速能力,同时保证起步的平顺性。为使电机转矩输出可以根据当前车辆的运行状态自行调节输出值,首先要确定电机基本输出转矩 T_b ,其值跟加速踏板呈线性关系,同时为了满足驾驶员起步的要求,应根据驾驶员意图的解析,即跟据驾驶员期望车速与实际车速的不同,增加一定的补偿扭矩 T_d ,满足车辆的加速要求。

3.1 电机基本输出转矩 T_b 的确定

纯电动汽车在坡道上起步时,为了防止起步倒溜,当制动踏板开度小于某一开度 θ 时,电机要开始输出转矩,用于克服坡度阻力。随着制动踏板开度的降低,电机转矩线性增至 T_i ,从而保持电动车在坡道上不倒溜,而且可以实现车辆蠕动前进。 θ 的值根据当前的坡度(坡度传感器获取)以及制动力矩,假设车辆处于满载的情况进行预估。而在平路上起步时,为了实现车辆无油门时蠕动前进,在加速踏板开度为零时,电机输出较小转矩 T_s ,使车辆以低速蠕动前进。

电机基本输出转矩如图4所示。

3.2 补偿转矩 T_d 的确定方法

(1)当实际车速 $V_c <$ 驾驶员期望车速 V_h

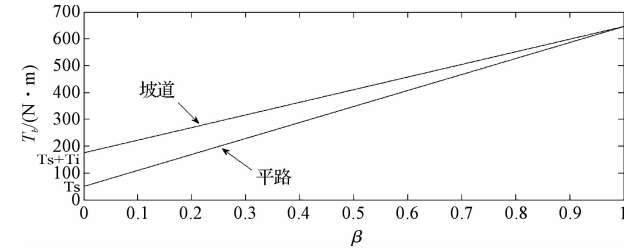


图4 电机基本输出转矩

为了防止电动车运行过程中电机转矩波动过大过频以及稳定性差,在补偿转矩 T_d 之前增加一个惯性环节,即:

$$T_d(s) = \Delta T(s) \frac{1}{T_s + 1} \tag{2}$$

由式(1)得到车辆速度与电机转矩的关系:

$$v(t) = \int a dt = \iint \left[(T_b + T_d) \frac{i_g i_0 \eta}{r \lambda m} - \frac{F_z}{\lambda m} \right] dt = C_1 \int T_d dt + \Phi \tag{3}$$

式中: $C_1 = \frac{i_g i_0 \eta}{r \lambda m}$; $F_z = G(\sin\alpha + f\cos\alpha)$; $\Phi = \int (T_b C_1 - F_z/\lambda m) dt$

为方便计算,阻力 F_z 中将数值较小的空气阻力即 $F_w = c_w A \rho v^2/2$ 忽略不计,电机基本输出转矩 T_b 与加速踏板开度呈线性关系,即:

$$T_b = k\beta + b \tag{4}$$

将式(2,4)代入式(3)并进行拉普拉斯变换得:

$$v(s) = C_1 \frac{\Delta T(s)}{s^2 T + s} + C_1 k \frac{\beta(s)}{s} + \left(C_1 b - \frac{F_z}{\lambda m} \right) \frac{1}{s^2} \tag{5}$$

将驾驶员期望车速与车辆实际车速之差 V_s 分成若干等分 $\Delta V_{s(i)} (i=1,2\cdots n)$,则车辆目标车速 $V_m = V_c + \Delta V_{s(i)}$,将 V_m 代入式(5)中即可求得 ΔT ,从而使车辆速度不断地接近驾驶员期望车速。电机需求转矩为:

$$T_h = T_b + T_d。$$

式中: V_c —车辆实际车速。

$$\Delta V_{s(i)} = \frac{V_h - V_c}{n}$$

(2)而当 $V_c \geq V_h$ 时,电机转矩逐渐减小至维持驾驶员期望车速所需要的转矩值,电机需求转矩按下式计算:

$$T_h = \left[G(\sin\alpha + f\cos\alpha) + c_w A \rho v^2/2 \right] \frac{r}{i_g i_0 \eta} \tag{6}$$

由此可知电机转矩可以根据实际车速和期望车速自适应的调节输出值的大小,确保转矩输出满足驾驶员的意图和车辆的需要。

4 仿真及结果分析

仿真模块如图5所示。仿真模块主要包括驾驶员

模块、驾驶员意图解析模块、传动系统动力学模块和起步控制策略模块。驾驶员模块是模型的输入信号,主要包括加速踏板开度以及制动踏板开度的变化趋势等。驾驶员意图解析模块根据上文所述的模糊推理判断出驾驶员期望车速 V_h 。传动系统动力学模型,根据上文式(1)汽车起步时的动力学方程计算速度、加速度

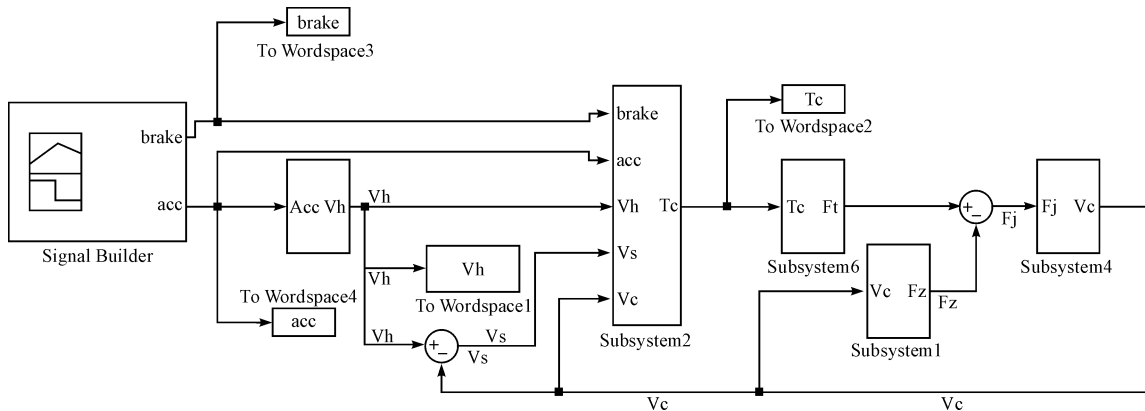


图5 仿真模型

第一种情况:制动踏板在 1.5 s 时开度为零,加速踏板在 2 s 时开始输出,3.5 s 时开度增至 25%。

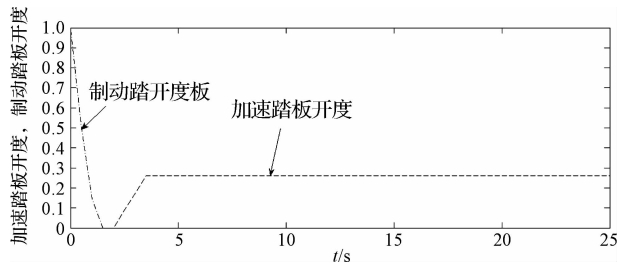


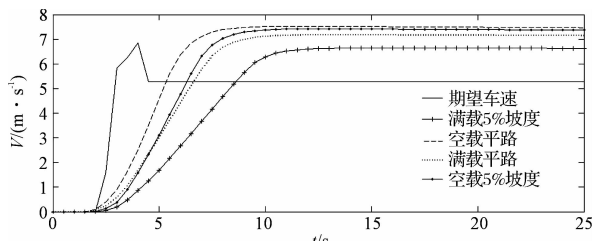
图6 加速踏板变化情况一

由图 7(b)可知 5% 坡道上电机在 1 s 时开始输出转矩,平路时在 1.5 s 开始输出转矩。1.5 s ~ 2 s 加速踏板开度为零。由图 7(a)可知车辆在 1.5 s ~ 2 s 低速前进,车速小于 1 m/s。从 2 s 开始,输出驾驶员期望车速,为了使车辆的实际速度在尽量短的时间内满足驾驶员的要求,电机转矩快速增加。结合图 7(a)和图 7(b)可知当车辆实际速度小于驾驶员期望车速时,电机转矩一直在增大直至增至电机额定转矩,而当实际车速大于驾驶员期望车速时电机转矩开始逐渐减小,车辆实际车速增幅减缓,电机转矩减小至维持期望车速下的阻力转矩。由图 7(a)可知在 5% 的坡度下车辆没有出现倒溜,满载 5% 坡度 0 m/s ~ 5 m/s (18 km/h) 的加速时间为 8.5 s 加速性能良好。由图 7(c)可知冲击度的最大值小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$,平顺性非常好。

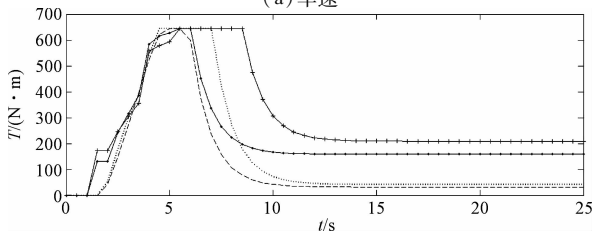
第二种情况:制动踏板在 1.5 s 时开度为零,加速踏板在 2 s 时开始输出,3.5 s 时开度增至 75%。

第二种情况下,电机转矩的输出情况跟第一种类

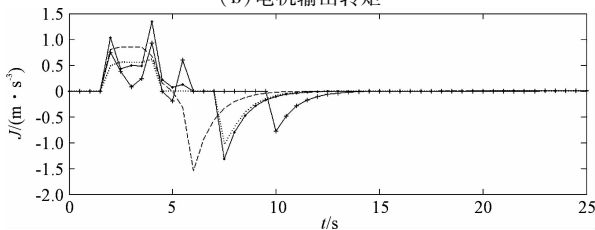
以及冲击度。电机基本转矩输出特性图利用 look-up 模块实现,根据式(3~6)计算电机需求转矩,两者结合成整个起步控制策略模块。通过对仿真结果中的电机输出转矩、车辆速度和冲击度验证控制策略的可行性。本研究分别对图 6 和图 8 两种加速踏板开度变化情况,针对满载(空载)在平路与 5% 坡度下进行了仿真运算。



(a) 车速



(b) 电机输出转矩



(c) 冲击度

图7 第一种情况结果分析

似,该工况下加速踏板开度和加速踏板开度变化率更大更快,驾驶员期望车速远远的大于第一种情况,因而转矩的上升速度更快,电机转矩维持在额定转矩的时间更长。满载 5% 坡度下车速由 0 ~ 15 m/s (54 km/h) 的时间 18.5 s, 0 ~ 5 m/s (18 km/h) 加速时间 7 s,加速性能很好,冲击度最大值为 $1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$ 。踏板开度为第二种情况,满载 5% 坡度条件下,对比没有驾驶员意

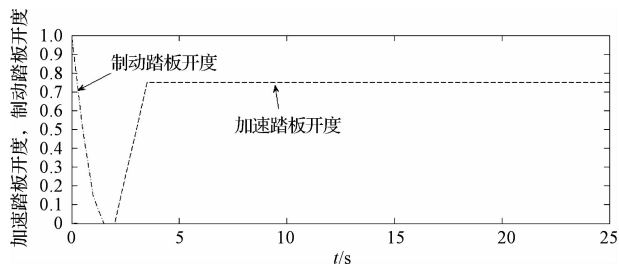
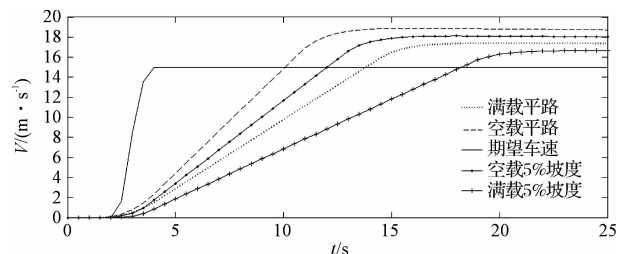
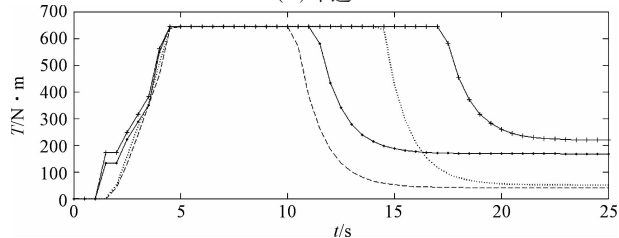


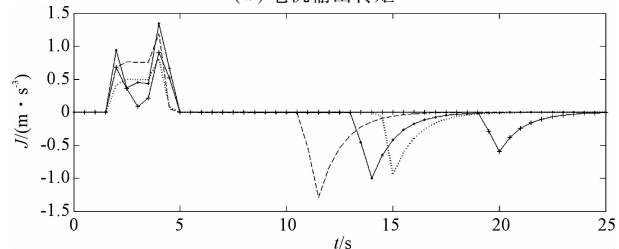
图8 加速踏板变化情况二



(a) 车速



(b) 电机输出转矩



(c) 冲击度

图9 第二种情况结果分析

图解析的车速变化情况,由图10可知,有驾驶员意图解析的转矩输出控制,车辆加速性能要优于没有驾驶员意图解析的控制。

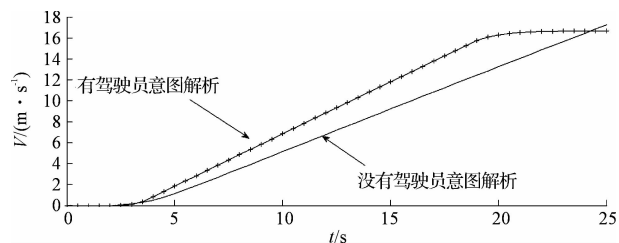


图10 满载5%坡度速度对比

5 结束语

本研究运用模糊推理解析驾驶员意图,依据驾驶员意图即期望车速和车辆的实际速度,制定电机输出转矩控制策略。基于所制定的控制策略和建立的起步运动学方程搭建仿真模型,针对两种加速踏板变化情况,笔者对纯电动汽车的起步性能进行了仿真运算。研究表明,该控制策略充分反映了驾驶员的意愿,起步加速性能很好,且满足平顺性要求,控制效果良好。

该研究是在运用模糊推理解析驾驶员意图的基础上进行的,运用先进的控制理论优化模糊控制器,使系统性能不断完善是进一步的研究方向。

参考文献 (References):

- [1] GERARD J, BOOM H, SZABADOS B. Nonpolluting automobiles[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1994, 43(4): 1136-1144.
- [2] BROWNING L, UNNASCH S. Hybrid electric vehicle commercialization issues applications and advances[J]. *Proceedings of the Sixteenth Annual Battery Conference*, 2001(2): 45-50.
- [3] 陈淑江, 秦大同, 胡明辉, 等. 纯电动汽车坡道自适应起步控制策略[J]. *重庆大学学报*, 2012, 35(9): 1-7.
- [4] 汪贵平, 马建, 杨盼盼, 等. 电动汽车起步加速过程的动力学建模与仿真[J]. *长安大学学报*, 2009, 29(6): 99-102.
- [5] 胡建军, 杜瑞, 吉毅. 纯电动汽车起步控制策略[J]. *重庆大学学报*, 2013, 36(8): 20-24.
- [6] 余建强, 万淑芸. 电动汽车电动机起步加速控制研究[J]. *湖北汽车工业学院学报*, 2003, 17(1): 1-3.
- [7] MITSCHKE M, WALLENTOWITZ H 著. 陈荫三, 余强译[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- [8] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [9] 胡骅, 宋慧. 电动汽车[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [10] VON A C, KRAUSE B, ZIMMERMANN T J. Advanced Fuzzy Logic Control Technologies in Automotive Application[C]. *Proc IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems*, 1992: 835-842.
- [11] 赵轩. 纯电动客车动力总成控制策略研究[D]. 长安: 长安大学工程机械学院, 2012.
- [12] 席爱民. 模糊控制技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

罗 石, 章丹丹, 朱长顺, 等. 纯电动客车起步仿真研究[J]. *机电工程*, 2015, 32(1): 141-145.

LUO Shi, ZHANG Dan-dan, ZHU Chang-shun, et al. Simulation study for starting up of pure electric vehicle[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(1): 141-145.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>