

基于道路工况分析的 HEV 控制策略优化方法

连 静, 范悟明, 李琳辉, 袁鲁山
(大连理工大学 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 以某并联式混动公交车为研究对象,建立了四种典型工况模型,采用蚁群算法优化了最小等效燃油消耗控制策略中四种工况的充放电等效因子;分析了路面坡度与电池荷电状态(state of charge, SOC)目标值域调整之间的对应关系,设计了相应坡度自适应模块;提出了基于道路工况分析的混合动力汽车(hybrid electric vehicle, HEV)控制策略优化方法.典型工况下的仿真对比分析表明,该方法具有良好的工况适应能力,燃油经济性明显优于几类典型 HEV 控制策略.

关 键 词: 混合动力汽车;工况识别;蚁群优化;SOC 目标值域;控制策略
中图分类号: U 469.72 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)04-0551-06

Control Strategy Optimization Method Based on Driving Cycle Recognition for HEV

LIAN Jing, FAN Wu-ming, LI Lin-hui, YUAN Lu-shan
(School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China. Corresponding author: LI Lin-hui, E-mail: 40301213@qq.com)

Abstract: Taking a parallel hybrid bus as research object, four kinds of typical working condition models were established, and the ant colony optimization algorithm was used to optimize the charge and discharge equivalent factor for each working condition in minimal equivalent fuel consumption control strategy. The relation between road gradient and adjustment of battery SOC target range was analyzed, and the corresponding gradient adaptive module was designed. A control strategy optimization method was proposed based on driving cycle recognition for HEV. The results of simulation and comparison analysis under typical working conditions showed that the method has very well driving condition adaptability, and its fuel economy is significantly higher than that of other several typical HEV control strategies.

Key words: HEV(hybrid electric vehicle); driving cycle recognition; ant colony optimization; SOC target range; control strategy

近年来,在全球能源和环境问题日益加剧的背景下,HEV 由于其动力性和排放性的优点吸引了国际社会的广泛关注^[1].能量管理控制策略是 HEV 性能优化的重点和难点^[2].
目前 HEV 控制策略可分为四类:基于规则的控制策略、基于全局最优的控制策略、基于智能算法的控制策略及基于瞬时优化的控制策略^[3-4].这些控制策略的参数设定大多根据工程经验,静态参数较多,对动态变化的汽车行驶环境缺乏足够的适应性^[5-6].行驶环境的不同对油耗和排放

有着很大的影响,将实际工况因素的识别和处理加入到控制策略中可以显著改善 HEV 整车性能^[7-8].
在基于行驶工况识别的控制策略中,目前的方法一般侧重于汽车历史运行数据.例如:Safaei 等^[9]利用模糊算法处理汽车运行数据来完成运行工况的识别;Jiang 等^[10]利用随机马尔科夫算法处理特征参数完成对汽车行驶工况的识别,其中汽车行驶工况按照平均车速分为三类.然而仅依靠汽车当前运行数据所能达到的性能改善有

限。

随着智能交通技术的发展,实时获取行驶车辆位置及地理信息数据已成为现实,所以有必要在历史统计数据分析的基础上,进一步研究实时路况对控制策略的影响。Marano 等^[11]利用现有的地理信息系统和车载传感器,对汽车运行数据进行处理,完成工况识别并以此展开控制策略,其中汽车运行数据包括静态环境信息、准静态环境信息和实时交通信息;Unger 等^[12]利用非线性预测模型完成对汽车运行数据的预测并应用于控制策略;Wu 等^[13]利用学习矢量量化神经网络对汽车实时工况在线识别并作用于汽车能量管理策略。

基于以上分析,本文在整车建模和最小等效燃油消耗控制策略研究的基础上,首先基于历史数据中车辆的行驶参数分析,构建了四种标准工况模型,通过模糊识别算法实现汽车行驶工况类属的识别,并基于蚁群算法优化每种工况下控制策略中的充放电等效因子;然后,针对道路的起伏特性,选择前方道路坡度这一影响 HEV 动力需求的主要因素开展研究,对控制策略中的电池 SOC 目标值域进行优化;最后,在典型工况下进行了仿真对比分析,以验证所提优化方法的有效性。

1 HEV 及工况建模

1.1 整车模型

本文以一类大连市内运行的并联式混合动力公交车为研究对象,其各项主要参数如表 1 所示。

表 1 混合动力汽车主要参数
Table 1 Major parameters of HEV

发动机	DUETZ	BF6M2012-22E4
	车速:	3 600/6 500 r/min
电机	功率:	30/90 kW
	转矩:	80/240 N·m
	容量:	40 A·h
镍氢电池	电池数:	28
	单体电压:	12 V
变速器	传动比:	5.785, 3.038, 1.623, 1.00, 0.773
车辆	质量:	12 000 kg
	尺寸:	11 996 mm×2 550 mm×3 174 mm

1.2 典型工况建模

汽车在不同工况下行驶时,其表现出的行驶特征参数(包括循环平均车速、怠速时间百分比、平均加速度、平均减速度、平均运行速度)也不一样^[14]。基于汽车的行驶特性,综合考虑城市结构、道路类型及拥挤程度,把城市道路运行状态划分为四种典型工况,即市中心区域工况、市内畅通区域工况、近郊区域工况及远郊区域工况。四种典型工况模型如图 1 所示。

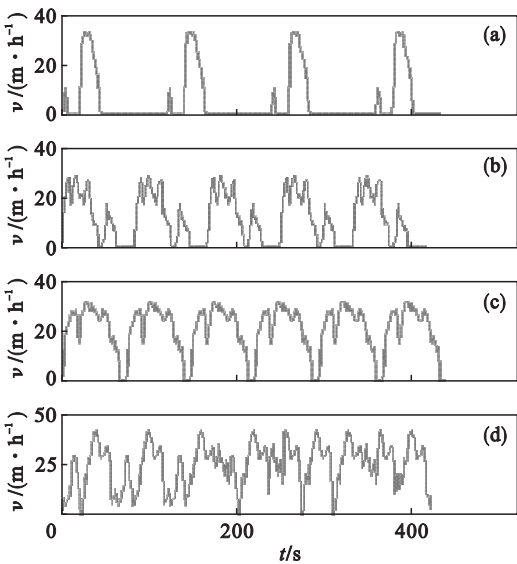


图 1 四种典型工况
Fig. 1 Four kinds of drive cycle
(a)—市中心工况;(b)—市内较通畅工况;
(c)—近郊区工况;(d)—远郊区工况。

2 基于蚁群优化的最小等效燃油消耗控制策略

汽车行驶过程中,综合考虑工况识别实时性、参数重叠及硬件条件限制等因素的影响,对特征参数进行分析筛选。选择能够代表其他大多数参数的平均速度、平均运行速度、怠速时间百分比、平均加速度和平均减速度作为特征参数进行行驶工况识别,将识别结果作用于控制策略可以改善运行性能。本团队自主开发了电动汽车远程监控数据采集系统,在监控大连市 400 余辆公交车相关数据的基础上,采用模糊识别算法完成了上述四种典型工况的识别^[15]。本文以蚁群算法为工具,在识别多种行驶工况的基础上,以改善汽车燃油经济性为目标,对最小等效燃油消耗控制策略中的等效因子进行了优化。

最小等效燃油消耗控制策略是一种基于瞬时优化的控制策略。对于混合动力汽车,在每一时

刻,电动机所消耗的电能本质是汽车的燃油,因此为了评价汽车实际经济性,需要建立电能与燃油量之间的转换以衡量燃油的实际消耗. 通过把电池电能的消耗乘以等效因子,将此部分能量等效为燃油消耗. 在计算过程中,引入充放电等效因子 α_{chg} 和 α_{dis} . 某时刻电机电能的消耗可表示为

$$\dot{m}_{\text{m_eq}} = \lambda \alpha_{\text{dis}} \frac{P_{\text{em}}(t)}{\eta_{\text{dis}} \eta_{\text{em}} Q_{\text{lbv}}} + (1 - \lambda) \alpha_{\text{chg}} \times \frac{P_{\text{em}}(t) \eta_{\text{chg}} \eta_{\text{em}}}{Q_{\text{lbv}}} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{em}}(t)$ 为电机瞬时功率, $P_{\text{em}}(t) > 0$ 电机处于放电状态、反之则为用电状态; Q_{lbv} 为燃油低热值; η_{chg} 和 η_{dis} 分别为电池充放电效率; η_{em} 为电机效率,是随着电机瞬时功率变化的变量.

在每个时刻 t ,总的等效燃油消耗 \dot{m}_{eq} 是电动机的等效油耗 $\dot{m}_{\text{m_eq}}$ 和发动机实际燃油消耗 $\dot{m}_{\text{e_eq}}$ 之和:

$$\dot{m}_{\text{eq}} = \dot{m}_{\text{m_eq}} + \dot{m}_{\text{e_eq}} \quad (2)$$

充放电等效因子的选取会直接影响汽车对电能的利用程度,在不同工况下,对它们分别进行优化可以改善汽车的燃油经济性. 比如当工况拥挤时,较小的等效因子可以促使 HEV 更倾向于消耗电能,有利于避免发动机在低速、高排放下工作. 确定每种工况下最优的一组充放电等效因子,可以使得控制策略在保证动力性的前提下适应不同行驶工况的变化,提升整车性能. 本文中,不同工况下等效因子的确定采用蚁群算法来实现.

蚁群算法是由 Dorigo 等^[16]提出的一种智能优化算法,是一种模拟蚁群在觅食过程中智能行为的仿生优化算法. 其鲁棒性好,结果可靠,适用于解决本文中充放电等效因子的区域寻优问题.

3 基于坡度的电池 SOC 目标值域自适应调整

在许多城市(如大连、重庆等)中,受地形、立交桥等因素的影响,实际道路存在普遍的起伏特性. 在汽车的纵向动力学方程中,坡度阻力是行驶阻力的的重要组成部分,路面坡度很大程度上决定着整车功率需求情况. 对于 HEV 而言,发动机与电动机两个动力源的输出功率总是平衡于行驶阻力功率. 不同的行驶阻力会导致发动机的实际燃油消耗率发生变化,单位距离内所需求的驱动能量也就会有很大变化.

HEV 在行驶过程中,当车辆前方将进入下坡路段时,希望整车控制策略能够提前增大电动机

扭矩输出以充分释放电池电量,从而避免长下坡过程中因电池 SOC 过高,无法继续充电进行制动能量回收的情况发生,如图 2a 所示. 而当车辆前方将进入上坡路段时,希望整车控制策略能够提前增大发动机输出以充分储存电池电量,避免长上坡过程中因电池 SOC 过低,导致电动机无法输出足够动力的情况发生,如图 2b 所示. 所以,行驶路面不同的坡度,对应着不同的 SOC 目标值域. 近年来,GPS 和 GIS 的发展使得汽车前方坡度的获取成为了现实,有必要进一步分析坡度变化和最优 SOC 目标值域之间的对应关系.

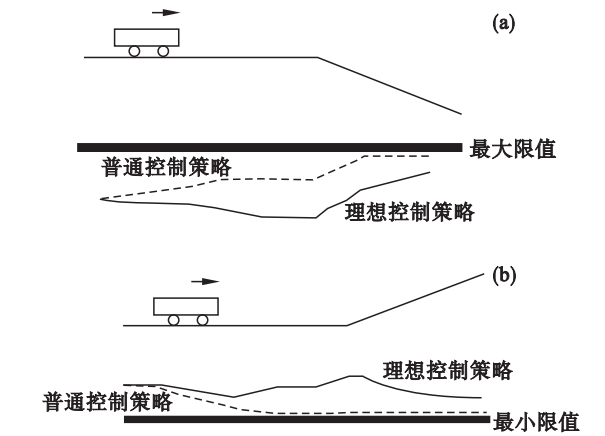


图 2 车辆前方坡度对控制策略的影响
Fig. 2 Impact of slope in front of vehicle on control strategy
(a)一下坡路段;(b)一上坡路段.

一般情况下,我国各级公路坡度 s 在 9% 以下^[17](国外同理). 为了分析路面坡度与 SOC 目标值域的数学关系,在仿真平台 ADVISOR 下分别以 $s = -0.09 \sim 0.09$ 之间十九个坡度值大小建立工况. HEV 在运行的绝大部分时间中,其 SOC 总是处于 0.8 以下. 在 HEV 整车控制策略中赋予不同大小的 SOC 目标值域下限值和固定大小为 0.8 的 SOC 目标值域上限值,对 HEV 运行进行仿真,如图 3 所示.

分别选取各坡度下油耗最小的点位,记录其横、纵坐标,即各坡度与相应的最优 SOC 目标值域下限值. 将每组数据组放在同一个二维坐标系中进行拟合,如图 4 所示. 可知,各点呈线性分布趋势,考虑到电池 SOC 实际变化限制,在误差允许范围内对各数据点进行最小二乘拟合可得路面坡度 s 与 SOC 目标值域下限值的线性关系式(3). 对本文所研究车型而言,拟合可得 $a_1 = 1.4, a_2 = 0.45$.

$$\text{SOC}_{\text{lo}} = a_1 \cdot s + a_2 \quad (3)$$

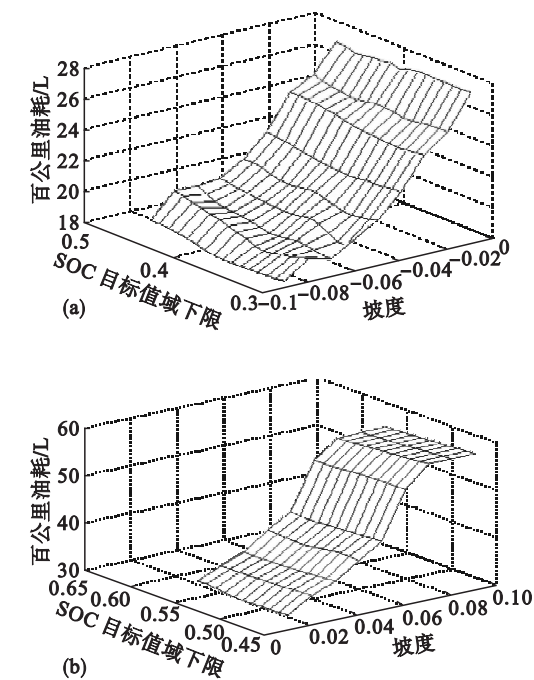


图 3 各坡度匹配不同 SOC 下限值的油耗
Fig. 3 Fuel consumption of every slope with different SOC target lower bound
(a)—各下坡坡度; (b)—各上坡坡度.

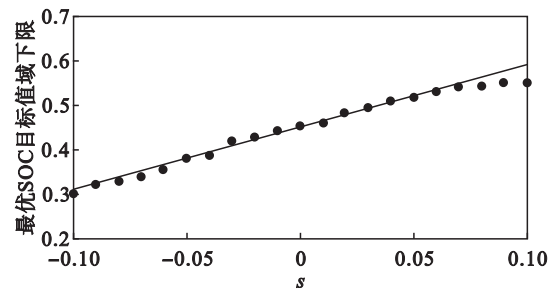


图 4 最优 SOC 目标值域下限拟合曲线
Fig. 4 Matched curve of the best SOC target lower bound

4 仿真试验与分析

4.1 充放电等效因子优化

在蚁群优化过程中,将蚂蚁数量、最大迭代次数、优化区间等各项蚁群初始参数取值. 分别以前述构建的四种典型工况为输入,以最小等效燃油消耗为目标进行仿真求解. 最终得到各工况下最优控制参数如表 2 所示.

表 2 各工况下最优控制参数		
Table 2	Best control parameters under every drive cycle	
行驶工况	充电等效因子	放电等效因子
市内中心区	1. 52	2. 27
市内较通畅区	1. 56	2. 52
近郊区	1. 91	3. 28
远郊区	2. 56	3. 31

将四组优化后的等效因子融入最小等效燃油消耗控制策略中,以实现不同工况下控制参数的自动调节. 为验证控制策略的有效性,在 ADVISOR 仿真平台中选择已经建立好的 VAIL2NREL 运行工况进行仿真分析. 如图 5 所示,工况的运行时间为 5 914 s,总里程为 140 km.

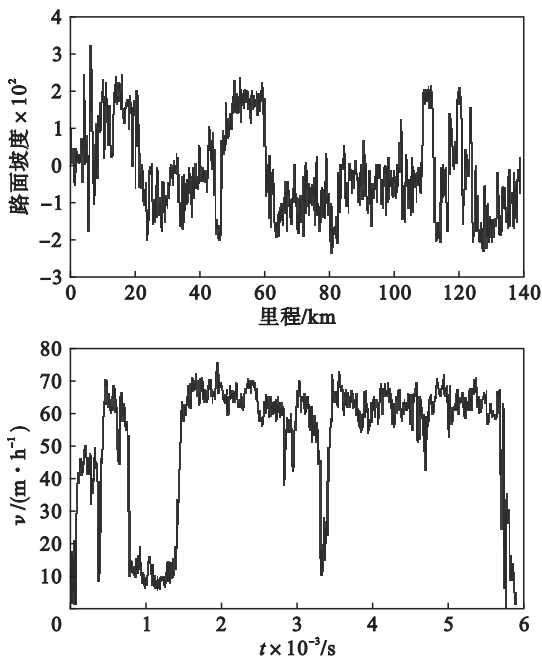


图 5 VAIL2NREL 运行工况
Fig. 5 Drive cycle of VAIL2NREL

在此工况下进行试验,普通的、未加入工况识别模块的最小等效燃油消耗控制策略的百公里油耗为 37.4 L. 本文基于蚁群优化等效因子的最小等效燃油消耗控制策略的百公里油耗为 33.8 L, 可见节油率为 9.6%, 车辆的燃油经济性得到了显著提高.

4.2 电池 SOC 目标值域优化

在式(3)中,坡度自适应处理模块可以在汽车行驶过程中根据前方路面坡度改变 SOC 目标值域,将其传递给控制单元,并根据坡度的变化对目标值域进行动态更新,从而在汽车整个行驶过程中提高电池 SOC 的充、放电效率.

将坡度自适应模块加入 HEV 普遍使用的电机助力控制策略中,在图 6 所示的 SKELETON 工况下进行仿真,该工况运行时间为 80 s,路程为 900 m. 试验结果表明,融合坡度自适应模块前的百公里油耗为 27 L,融合后的百公里油耗为 23.7 L,燃油经济性提高了 12.2%.

4.3 基于道路工况分析的 HEV 控制策略优化

将坡度自适应模块加入前述优化后的工况自适应最小等效燃油消耗控制策略中,构成基于道

路工况分析的 HEV 自适应优化控制策略. 为了验证其可行性, 基于前述所建立的整车模型, 在 VAIL2NREL 工况下开展仿真验证. 仿真结果如图 7 所示.

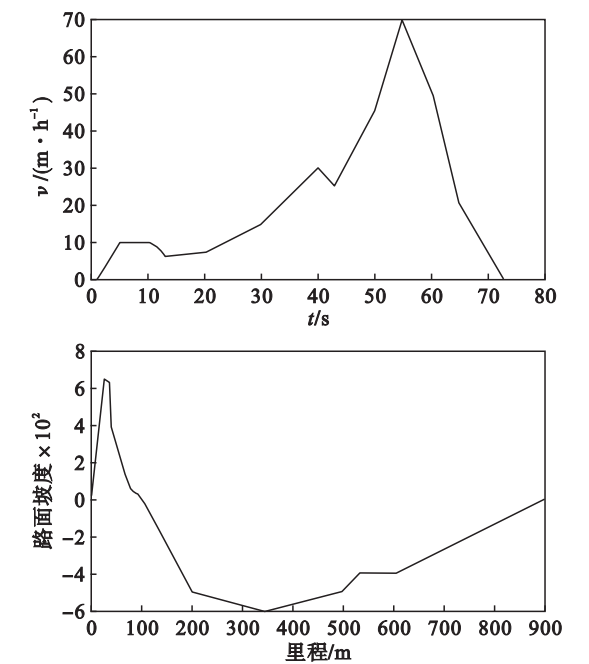


图 6 SKELETON 运行工况
Fig. 6 Drive cycle of SKELETON

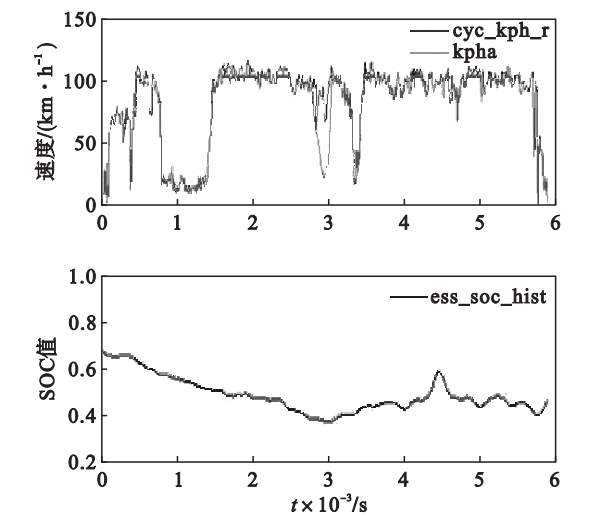


图 7 基于道路工况分析控制策略的仿真结果
Fig. 7 Simulation result of adaptive control strategy based on analysis of road conditions

为了验证其燃油经济性的改善, 将仿真结果与其他两类普遍应用的控制策略及仅优化充放电等效因子的最小等效燃油控制策略作对比. 各控制策略下的百公里油耗结果如图 8 所示. 在此工况下, 本文所建立的基于道路工况分析的自适应优化控制策略油耗结果为 32.6 L, 相比仅优化充放电等效因子的最小等效燃油消耗控制策略的百公里油耗 33.8 L, 改善了 3.5% 的燃油经济性; 相

比未考虑工况分析的普通最小等效燃油消耗控制策略的百公里油耗 37.4 L, 改善了 12.8% 的燃油经济性; 相比未考虑工况分析的电动助力控制策略的百公里油耗 38.5 L, 改善了 15.3% 的燃油经济性.

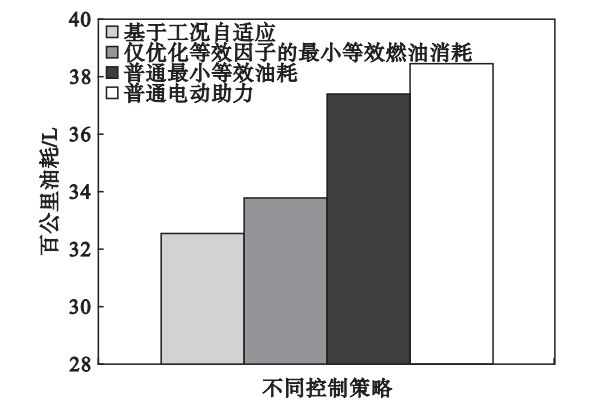


图 8 不同控制策略下燃油消耗量对比 (L/100 km)
Fig. 8 Comparison of fuel consumption under different control strategy (L/100 km)

5 结 论

本文提出一种基于 HEV 运行工况的自适应最小等效燃油消耗控制策略优化方法, 可以提高车辆对实际行驶工况变化的适应能力. 本文优化了包括市中心、市内较通畅、近郊区和远郊区在内四种典型工况下的充放电等效因子, 保证了最小等效燃油消耗控制策略在不同行驶工况下均有良好的油耗表现; 提出了基于坡度变化的 SOC 目标值域调整方法, 提高了最小等效燃油消耗控制策略对起伏道路的适应性; 最终的仿真分析结果表明, 本文方法相对普通最小等效燃油控制策略, 改善了 12.8% 的燃油经济性.

参考文献:

[1] Bayindir K Ç, Gözükcük M A, Teke A. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units[J]. *Energy Conversion and Management*, 2011, 52(2):1305–1313.

[2] 于秀敏, 曹珊, 李君. 混合动力汽车控制策略的研究现状及其发展趋势[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(11):10–16. (Yu Xiu-min, Cao Shan, Li Jun. The current research condition and development trend of HEV [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(11):10–16.)

[3] Martínez J S, Hissel D, Péra M C. Practical control structure and energy management of a testbed hybrid electric vehicle [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(9):4139–4152.

[4] Mashadi B, Emadi S A M. Dual-mode power-split transmission for hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(7):3223–

3232.

[5] Dosthosseini R, Kouzani A Z, Sheikholeslam F. Direct method for optimal power management in hybrid electric vehicles [J]. *International Journal of Automotive Technology*,2011,12(6) :943 – 950.

[6] Wang D,Lin X,Zhang Y. Fuzzy logic control for a parallel hybrid hydraulic excavator using genetic algorithm [J]. *Automation in Construction*,2011,20(5) :581 – 587.

[7] Moura S J,Fathy H K,Callaway D S. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*,2011,19(3) :545 – 555.

[8] He H,Sun C,Zhang X. A method for identification of driving patterns in hybrid electric vehicles based on a LVQ neural network[J]. *Energies*,2012,5(9) :3363 – 3380.

[9] Safaei A,Ha’iri-Yazdi M R,Esfahanian V, et al. Designing an intelligent control strategy for hybrid powertrains utilizing a fuzzy driving cycle identification agent[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*,2014,11(5) :1 – 20.

[10] Jiang P,Shi Q,Chen W. Driving cycle construction method of city motors based on clustering method and Markov process[J]. *China Mechanical Engineering*,2010,21(23) :2893 – 2897.

[11] Marano V,Rizzoni G,Tulpule P, et al. Intelligent energy management for plug-in hybrid electric vehicles;the role of its infrastructure in vehicle electrification[J]. *Oil & Gas Science and Technology-Revue d’IFP Energies Nouvelles*,2012,67(4) :575 – 587.

[12] Unger J,Kozek M,Jakubek S. Nonlinear model predictive energy management controller with load and cycle prediction for non-road HEV[J]. *Control Engineering Practice*,2015,3(6) :120 – 132.

[13] Wu J,Zhang C H,Cui N X. Fuzzy energy management strategy for a hybrid electric vehicle based on driving cycle recognition [J]. *International Journal of Automotive Technology*,2012,13(7) :1159 – 1167.

[14] Van Keulen T,De Jager B,Serrarens A,et al. Optimal energy management in hybrid electric trucks using route information [J]. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l’Institut Français du Pétrole*,2010,65(1) :103 – 113.

[15] 吕仁志,周雅夫,刘吉顺. 基于工况识别的并联混合动力客车控制策略[C]//2014 中国汽车工程学会年会论文集. 大连,2014:115 – 118.

(Lyu Ren-zhi,Zhou Ya-fu,Liu Ji-shun. Control strategy of parallel hybrid electric city bus based on driving cycle recognition [C]//Proceeding of 2014 Annual Meeting of China Automotive Engineering Society. Dalian,2014:115 – 118.)

[16] Dorigo M,Maniezzo V,Colormi A. The ant system: an autocatalytic optimizing process[R]. Milano:Politecnico di Milano,1991.

[17] 裴玉龙,邢恩辉. 高等级公路纵坡的坡度、坡长限制分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报,2005,37(5) :629 – 632.

(Pei Yu-long,Xing En-hui. Grade and its length limitation analysis of highway [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*,2005,37(5) :629 – 632.)

(上接第 545 页)

[12] Malachi M,Park S,Jun M B G. Modeling of dynamic micro-milling cutting forces [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*,2009,49(7) :586 – 598.

[13] Jin X,Latinas Y. Slip-line field model of micro-cutting process with round tool edge effect[J]. *Journal of Materials Processing Technology*,2011,211(3) :339 – 355.

[14] 高奇,巩亚东,周云光. 单晶 Ni₃Al 基高温合金微铣削表面粗糙度试验研究 [J]. 中国机械工程,2016,27(6) :801 – 804.

(Gao Qi,Gong Ya-dong,Zhou Yun-guang. Experimental study on surface quality in micro-milling of single crystal Ni₃Al-based superalloy[J]. *China Mechanical Engineering*,2016,27(6) :801 – 804.)

[15] Liu X,Devor R E,Kapoor S G. An analytical model for the prediction of minimum chip thickness in micro machining [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*,2006,128(2) :474 – 485.