

双离合自动变速汽车坡道挡位优化研究

孔慧芳, 邢志巧

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为了解决双离合自动变速汽车坡道行驶时采用基本二参数换挡规律引起的换挡循环现象, 设计了一种坡道挡位优化策略; 首先基于车辆纵向动力学模型, 运用拉格朗日插值算法对道路坡度进行实时辨识; 进而, 利用模糊推理得到坡道换挡因子, 从而优化汽车坡道挡位; 最后, 对提出的挡位优化策略进行仿真与分析; 仿真结果表明: 该挡位优化策略能够根据所辨识的道路坡度有效地确定汽车挡位, 不仅解决了车辆在上坡行驶时的换挡循环现象, 同时下坡时能使发动机充分发挥辅助制动作用。

关键词: 双离合自动变速器; 坡道辨识; 换挡因子; 挡位优化

Study on Slope Gear Optimization for DCT Vehicles

Kong Huifang, Deng Zhiqiao

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A strategy on gear optimization is designed to solve the problem of shift cycle for the vehicles equipped with Dual-Clutch Transmission, which adopt two-parameter shift schedule when driving on the slope. Firstly, based on the longitudinal vehicle dynamics model, the road slope is estimated in real-time using Lagrange interpolation algorithm. Furthermore, the slope shift factor is established based on fuzzy theory, thus to optimize the vehicles' gear when driving on the slope. A simulation and analysis is carried out on the proposed gear optimization strategy. The simulation result shows that the gear can be determined effectively by this strategy according to the estimated slope, which not only solved the shift cycle for the vehicles while driving uphill, but also the auxiliary braking can be fully utilized by the engine while driving downhill.

Keywords: dual-clutch transmission; slope estimation; shift factor; gear optimization

0 引言

随着车辆自动变速技术的发展完善, 能够对工况和车辆状态进行辨识, 进而做出合理挡位决策的自动变速控制系统成为研究人员关注的重点。爬坡是一种典型工况, 汽车在坡道行驶时, 双离合自动变速器 (Dual-Clutch Transmission, DCT) 采用基本二参数换挡规律可能出现换挡循环现象, 这不仅会加剧机构磨损, 也会影响驾乘舒适性。因此, 对坡道进行辨识, 制定根据道路坡度自适应换挡的挡位优化策略已逐渐成为研究热点内容。

目前坡度辨识方法主要分为两大类: 一类是基于设备测量得出道路坡度; 另一类是基于动力学模型对道路坡度进行实时估计。对于加装加速度传感器或倾角传感器测量以得出道路坡度^[1-2]的方法, 会提高车辆成本, 且不适用于未加装此类传感器的车辆。因此, 基于车辆现有传感器, 利用软测量技术对道路坡度进行实时辨识的方法成为研究热点内容。如: 雷雨龙等^[3-4]基于扩展卡尔曼滤波 (EKF) 对车辆质量及道路坡度进行估计, 张小龙等^[5]基于支持向量机 (SVM) 对道路坡度进行实时预测, 赵志国、史俊武等^[6-7]基于双遗忘因子改进型最小二乘法对车辆质量和道路坡度进行估计等。

目前坡道挡位修正策略多为修正基本二参数换挡规律曲

线^[6-9], 文献 [10] 针对特殊工况下频繁换挡及意外升挡现象, 采用模糊控制方法生成换挡曲线临界值修正系数, 亦修正传统换挡规律。此类修正方法需要在控制器中存储多套换挡规律。

本文拟基于纵向车辆动力学模型, 运用拉格朗日插值算法对道路坡度进行实时辨识, 然后基于辨识的坡度角, 利用模糊推理得到坡道换挡因子, 获取汽车名义车速, 采用油门开度和名义车速作为换挡参数, 从而优化汽车坡道挡位。

1 汽车纵向动力学模型

车辆行驶时, 驱动力与阻力之间的平衡方程^[11] 如式 (1) 所示:

$$F_t = F_a + F_f + F_w + F_i \quad (1)$$

式中, F_t 为驱动力, F_a 为加速度阻力, F_f 为滚动阻力, F_w 为空气阻力, F_i 为坡道阻力。即:

$$\frac{T_e i_0 i_{g(n)} \eta_{PT}}{r} = \delta m \frac{dv}{dt} + \frac{C_D A \rho v^2}{21.15} + mgf \cos\theta + mg \sin\theta \quad (2)$$

其中: T_e 为汽车发动机输出转矩, i_0 为主减速比, $i_{g(n)}$ 为变速箱第 n 挡的传动比, η_{PT} 为传动系效率, r 为车轮半径, δ 为旋转质量换算系数, m 为汽车质量, C_D 为空气阻力系数, A 为迎风面积, ρ 为空气密度, v 为车速, g 为重力加速度, f 为滚动阻力系数, θ 为道路坡度。

为了易于辨识算法的实现, 将式 (2) 做了进一步转化, 得到式 (3):

$$\frac{T_e i_0 i_{g(n)} \eta_{PT}}{r} - \delta m \frac{dv}{dt} - \frac{C_D A \rho v^2}{21.15} = mgf \cos\theta + mg \sin\theta \quad (3)$$

式 (3) 中, 左边为驱动力与加速度阻力和空气阻力之差,

收稿日期: 2017-02-09; 修回日期: 2017-03-01。

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目 (2014BAG06B02); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2014HGCH0003)。

作者简介: 孔慧芳 (1964-), 女, 安徽蚌埠人, 教授, 博士生导师, 主要从事新能源控制技术、自动变速器控制技术研究。

右边为滚动阻力与坡道阻力之和，将其等效为道路阻力 F_{road} [12]，即：

$$F_{road} = mgf \cos\theta + mg \sin\theta \tag{4}$$

2 基于拉格朗日插值法的坡道辨识

设坡度 θ 和等效道路阻力 F_{road} 之间的函数关系为：

$$\theta = f(F_{road}) \tag{5}$$

道路坡度 θ 和等效道路阻力 F_{road} 之间是复杂的非线性关系，直接求解坡度 θ 和等效道路阻力 F_{road} 之间的函数关系过于繁琐且不利于实现，假设汽车质量和滚动阻力系数近似不变的情况下，可以利用拉格朗日插值法建立多项式函数逼近坡度与道路阻力的曲线关系。

拉格朗日插值法是一种处理复杂函数关系的经典算法，具有实现简单，精度高等优点。若已知 $y = f(x)$ 在互不相同的 n 个点 x_1, x_2, \dots, x_n 处的函数值为 y_1, y_2, \dots, y_n ，可以构造一个过这 n 个点的、次数不超过 $n-1$ 的多项式：

$$L_n(x) = \sum_{j=1}^n y_j p_j(x) \tag{6}$$

使其满足： $L_n(x_k) = y_k, k = 1, 2, 3, \dots, n$ 。 $L_n(x)$ 称为拉格朗日插值多项式。对于第 j 个多项式 $p_j(x)$ ， $j \in I_j = \{1, 2, \dots, j, \dots, n\}$ ，构造：

$$p_j(x) = \prod_{i \in I_j} \frac{x - x_i}{x_j - x_i} \tag{7}$$

$p_j(x)$ 是 $n-1$ 次多项式，且满足 $\forall i \in I_j, p_j(x_i) = 0$ 并且 $p_j(x_j) = 1$ 。

在 $\pm 15\%$ 的坡度范围内随机选取 20 组实验数据 $((F_{road})_1, \theta_1), ((F_{road})_2, \theta_2), ((F_{road})_3, \theta_3), \dots, ((F_{road})_{20}, \theta_{20})$ ，根据拉格朗日插值法求解多项式 $L_n(F_{road})$ 。由于汽车质量 m 和滚动阻力系数 f 近似不变，因此在一个实验道路下计算得到的拉格朗日多项式 $L_n(F_{road})$ 同样适用于其它道路。在汽车以后的行驶过程中，根据发动机转矩、车速和挡位信息，就能利用拉格朗日多项式准确地计算出汽车所处的道路坡度，实现对坡度的辨识。

同时对拉格朗日插值算法与其它几种常用的参数估计算法在时间复杂度、适用范围和跟踪能力等 3 个方面进行对比，结果见表 1 所列。

表 1 3 种参数估计算法比较

	最小二乘法	卡尔曼滤波法	拉格朗日插值法
时间复杂度	$O(n^3)$	$O(n)$	$O(n)$
适用范围	非线性系统	线性系统	非线性系统
跟踪能力	对慢变的系统量估算占优势[13]	适合变化较快的系统参量	适合变化较快的系统参量

由表 1 可以看出，利用拉格朗日插值算法进行道路坡度辨识，其算法时间复杂度低、数学结构简单、计算简便，对于汽车这种具有较强非线性的系统模型有很强的适用性。

3 基于换挡因子的坡道挡位优化

3.1 坡道换挡分析

对于搭载 DCT 的车辆，在坡道行驶时容易出现以下问题：当车辆在上坡时，低挡下车辆所受的驱动力大于坡道阻力，车辆加速度为正值，车辆在坡道上速度逐渐增大，当达到升挡临

界速度时，自动变速器换入高档，由于高档的驱动力小于坡道阻力，此时车辆加速度变为负值，车辆又开始减速回到低挡，从而出现换挡循环现象；当车辆在下坡时，尤其是下长坡过程中，车辆挡位由于车速增大或油门减小而逐渐升高，不能充分利用发动机在低挡的辅助制动作用。

3.2 坡道挡位优化

为了解决双离合自动变速汽车容易出现上坡循环换挡和下坡挡位上升不利于发动机牵阻制动的的问题，本文引入换挡因子来优化汽车在坡道行驶时的 DCT 挡位。即坡道工况下，用车速换挡因子调整实际车速，产生相应的名义车速，汽车以名义车速代替实际车速，与油门开度作为换挡的两个控制参数，进而控制汽车换挡[14]。名义车速的建立如式 (8) 所示：

$$v' = \lambda v \tag{8}$$

式中， v' 为名义车速， λ 为车速换挡因子， v 为汽车行驶过程中的实际车速。其中， $0 < \lambda < 1$ ，即 $v' < v$ ，坡道行驶的升挡点较平路时有所推迟。

油门开度的大小反映了驾驶员实时的驾驶意图，车速一定程度上反映了车辆的行驶状态[15]，基于此，汽车上坡行驶时，可选用坡度、油门开度和车速建立上坡换挡因子 λ_1 ；汽车下坡行驶时，驾驶员一般松开油门踏板，因此，可仅选用坡度和车速建立换挡因子 λ_2 。

在辨识出道路坡度 θ 的基础上，基于换挡因子的双离合自动变速汽车坡道挡位优化原理如图 1 所示。

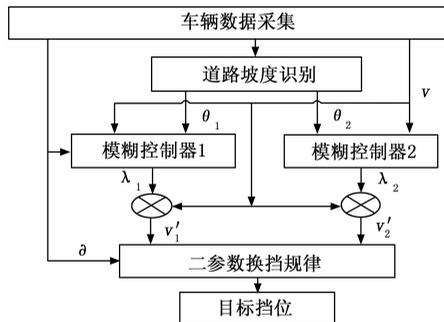


图 1 坡道挡位优化原理框图

由图 1 可知，在分别获得上坡换挡因子、下坡换挡因子后，汽车上坡过程的换挡原理为：采用名义车速 v'_1 和油门开度 δ 作为汽车上坡的换挡的两个控制参数，以 v'_1 和 δ 根据基本二参数换挡规律确定汽车上坡挡位；同理，汽车下坡过程的换挡原理为：采用名义车速 v'_2 和油门开度 δ 作为汽车下坡的换挡的两个控制参数，以 v'_2 和 δ 根据基本二参数换挡规律确定汽车下坡挡位。

由于油门开度 δ 、车速 v 和坡度值 θ 在实际中均可看作模糊变量，故可采用模糊映射来确定上坡换挡因子 λ_1 和下坡换挡因子 λ_2 。

设置模糊输入、输出变量的模糊语言集合以及各变量的论域如下：

模糊输入变量 δ : {S(小)、M(中)、B(大)}, [0 100];

模糊输入变量 v : {S、M、B}, [0 120];

模糊输入变量 θ : {NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、Z(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)}, [-15 15];

模糊输出变量上坡换挡因子 λ_1 : {VS(很小)、S、M、B、

VB(很大)}, [0.5 1];

模糊输出变量下坡换挡因子 λ_2 : {VS(很小)、S、M、B、VB(很大)}, [0 1]。

根据专家经验和仿真结果的反馈信息不断进行修正, 确定 trimf 函数、trapmf 函数、gbellmf 函数相结合的隶属度函数, 各语言变量隶属度函数如图 2 所示。

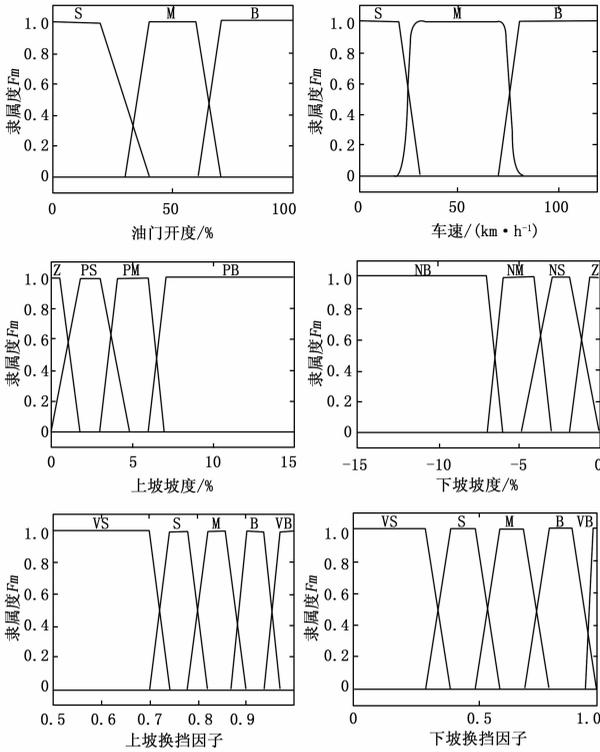


图 2 隶属度函数

设置好语言集和基本论域后, 建立 If A and B then C 的 36 条上坡模糊规则见表 2 所列, 同理建立 12 条下坡模糊规则见表 3 所列。

表 2 上坡换挡因子模糊规则表

λ	v	θ			
		Z	PS	PM	PB
S	S	VB	VB	VB	VB
	M	VB	VB	VB	B
	B	B	VB	B	B
M	S	VB	VB	VB	B
	M	B	VB	B	M
	B	B	B	M	M
B	S	B	B	B	M
	M	B	B	M	S
	B	M	M	S	VS

表 3 下坡换挡因子模糊规则表

v	θ			
	NB	NM	NS	Z
S	S	M	B	VB
M	VS	S	M	B
B	VS	VS	S	M

4 仿真分析

4.1 坡道辨识结果

在 ECE+EUDC 循环工况下, 对车辆进行坡道行驶仿真, 获取车辆坡道行驶时的发动机转矩、车速和挡位信息, 在 MATLAB 平台下, 利用拉格朗日插值算法对坡度角进行辨识, 得到仿真结果如图 3 所示。仿真设置汽车在由定值和时变值组成的组合道路坡度下运行。图 3a 为坡度辨识结果, 图 3b 为辨识误差。从图 3b 可以看出, 辨识误差数量级在 10^{-3} , 辨识值可以很好的跟踪实际值。

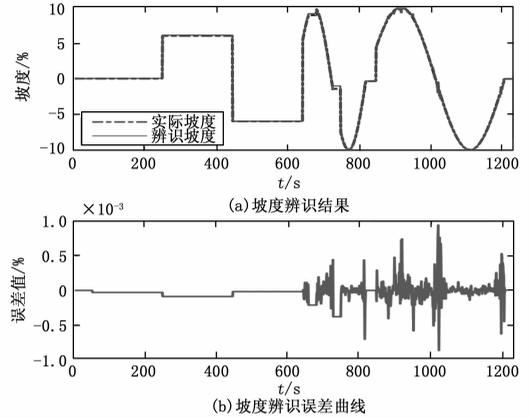


图 3 坡度辨识结果

4.2 坡道挡位优化仿真结果

在 Simulink 环境下搭建整车仿真模型, 主要包括发动机转矩模型、换挡逻辑控制模型、DCT 模型和汽车动力学模型等, 并将设计的模糊控制器应用在整车仿真模型中, 实现汽车坡道行驶工况下的基于换挡因子的挡位决策仿真。仿真过程中, 需要根据当前道路坡度值, 由换挡因子选择模块对上坡和下坡两个模糊控制器输出的换挡因子进行选取。仿真用到的部分整车参数见表 4。

表 4 整车仿真参数表

参数	参数取值	参数	参数取值
整车质量 m/kg	1220	主减速比 i_0	5.1
迎风面积 A/m^2	2.1	1 挡传动比 i_1	3.395
空气阻力系数 C_D	0.32	2 挡传动比 i_2	2.13
空气密度 ρ	1.217	3 挡传动比 i_3	1.256
轮胎半径 r/m	0.243	4 挡传动比 i_4	1.104
滚动阻力系数 f	0.012	5 挡传动比 i_5	0.89
传动总效率 η	0.96	6 挡传动比 i_6	0.81

仿真设置车辆分别经历平路、上 8% 的坡、上 12% 的坡、下 8% 的坡 4 个阶段, 仿真时间为 140 s。图 4a、4b 分别为仿真所设置的油门开度和道路坡度。仿真过程中, 0~20 s 阶段, 汽车以 30% 油门开度在平路上行驶, 20 s 后汽车开始上坡, 上坡的坡度值为 8%, 油门开度同时增加到 60%; 行驶到 60 s 时, 油门增大到 80%, 上坡的坡度值变为 12%; 100 s 后, 汽车开始下坡, 下坡的坡度值为 -8%, 同时, 驾驶员松开油门踏板。

车辆在坡道行驶的仿真结果如图 4 (c)、4 (d)、4 (e) 所示。图 4 (c) 虚线和实线分别为汽车坡道行驶过程中采用换

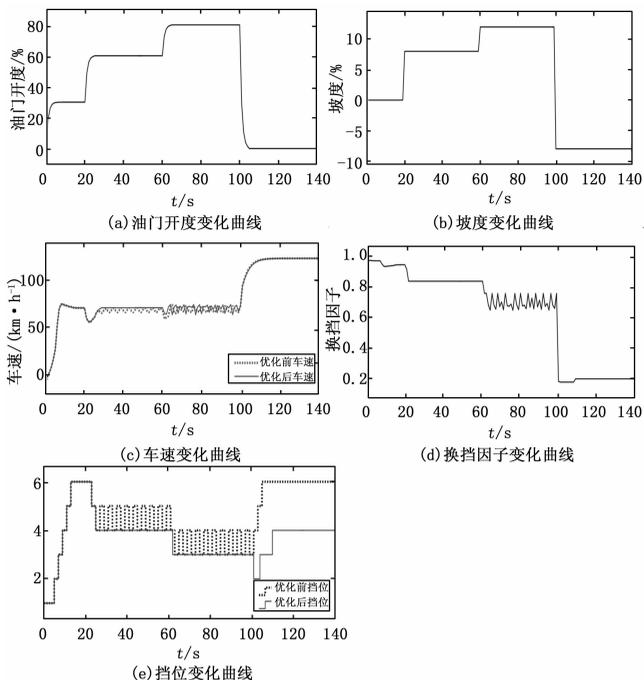


图 4 坡道挡位优化仿真结果

挡因子前后汽车行驶车速变化曲线；图 4 (d) 为不同道路坡度下换挡因子变化曲线；图 4 (e) 虚线和实线分别为采用换挡因子前后，车辆坡道行驶过程中的挡位变化情况。

由图 4 (d)、4 (e) 可以看出，在 0~20 s 阶段，汽车沿平路行驶，模糊控制器输出的换挡因子趋近于 1，名义车速与实际车速相近，对汽车挡位不进行修正，车辆按照基本换挡规律进行换挡，随着车速的升高，挡位逐渐增加。在 20~60 s 阶段，汽车开始在 8% 的坡道上行驶，模糊控制器模块根据输入的油门开度、车速和道路坡度值，生成坡道换挡因子，换挡因子选择模块根据坡度角的正负，选择上坡模糊控制器输出的换挡因子，其值约为 0.83，根据换挡因子对控制换挡的车速进行实时调整，得到上坡换挡名义车速，采用小于实际车速的名义车速和油门开度作为换挡两参数控制换挡，汽车升挡点推迟，使变速器挡位保持 4 挡不变，车辆未出现基本换挡规律下 4 挡和 5 挡循环切换的现象，减少了汽车的机械磨损，保证了驾乘舒适性。在 60~100 s 上坡段，坡度角变为 12%，随着坡度角的增大，上坡模糊控制器输出的换挡因子值在 0.7 左右波动，利用该换挡因子下的名义车速和油门开度控制换挡，使汽车保持 3 挡爬坡，消除了基本换挡规律下车辆在 3 挡和 4 挡之间挡位循环切换的现象，同时车辆保持抵挡提升了汽车的动力性。在 100~140 s 下坡阶段，下坡模糊控制器生成的换挡因子约为 0.2，使名义车速远低于实际车速，从而车辆在下坡过程中，不会因为车速的升高，DCT 挡位逐渐升高到 6 挡，而是保持在 4 挡，汽车能充分利用发动机辅助制动作用。

5 结论

1) 基于纵向车辆动力学模型，运用拉格朗日插值算法对道路坡度进行实时辨识。此辨识方法在获取拉格朗日插值多项式后，只需根据车辆转矩、车速和挡位信息，便可实时准确辨

识出道路坡度。基于 MATLAB 进行了算法实现，验证了辨识算法的准确性。此算法不增加系统硬件成本，充分利用车辆现有传感器信号，简便、实用，在一定程度上可提高车辆的智能化水平。

2) 基于辨识的坡度角，利用模糊推理得到坡道换挡因子，得到汽车名义车速，采用油门开度和名义车速作为汽车换挡参数，从而优化汽车坡道挡位。此挡位优化策略不仅有效解决了汽车在上坡行驶时，双离合自动变速器出现换挡循环现象，从而减少了机构磨损，提升了驾乘舒适性的；同时，在下坡时，此挡位优化策略亦能有效限制汽车挡位，充分发挥发动机牵制制动效果。此挡位优化策略无需修正基本换挡曲线，为挡位优化的研究提供了一种设计思路。

3) 本研究对于汽车换挡理论研究及实际应用具有一定意义，同时汽车质量以及其它参数对坡度辨识的影响将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 金 辉, 李 磊, 李斌虎, 等. 基于加速度区间判断的坡道识别方法 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (1): 122-126.
- [2] Zhang X, Xu L, LI J. Real-time estimation of vehicle mass and road grade based on multi-sensor data fusion [A]. 2013 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC) [C]. Beijing: IEEE, 2013: 1-7.
- [3] 雷雨龙, 付 尧, 刘 科, 等. 基于扩展卡尔曼滤波的车辆质量与道路坡度估计 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (11): 9-13.
- [4] Sebsadji Y, Glaser S, Mammari S. Road slope and vehicle dynamics estimation [A]. 2008 American Control Conference [C]. Seattle: IEEE, 2008: 4603-4608.
- [5] 张小龙, 陈 彬, 宋 健, 等. 基于支持向量机的道路坡度实时预测方法试验 [J]. 农业机械学报, 2014, 45 (11): 14-19.
- [6] 赵治国, 王 琪, 刁威振, 等. 双离合变速器汽车坡道模糊修正换挡研究 [J]. 中国机械工程, 2013, 24 (15): 2122-2129.
- [7] 史俊武, 鲁统利, 李小伟, 等. 自动变速器车辆坡道行驶自适应换挡策略 [J]. 农业机械学报, 2011, 42 (4): 1-7.
- [8] 张 泰, 葛安林, 郭立书, 等. 基于车辆负荷度的换挡规律研究 [J]. 农业机械学报, 2004, 35 (3): 9-12.
- [9] 李 昊, 刘建霞. 基于车辆负荷系数的矿用汽车 AT 动力换挡策略 [J]. 中国机械工程, 2016, 27 (11): 1530-1534, 1540.
- [10] 杨伟斌, 陈全世, 吴光强, 等. 智能修正型换挡规律的设计及在双离合式自动变速器中的应用 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (1): 205-210.
- [11] 刘拂晓, 赵 韩, 江 昊. 纯电动汽车 AMT 换挡规律及仿真研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2013, 36 (11): 1281-1284, 1363.
- [12] 王玉海, 董瑞先, 王 松, 等. 基于 SAE J1939 协议的重型车辆坡道识别实时算法 [J]. 汽车工程, 2010, 32 (7): 640-642, 647.
- [13] 李鹏程. 新的求解超大规模最小二乘问题的随机算法 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [14] 孔慧芳. 电控机械式自动变速器中传动与控制的关键技术研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2008.
- [15] 焦海宁, 王祖麟, 杨 杰. 基于神经网络的 AMT 汽车控制系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2013, (11): 2966-2968.