

# 低速巡航工况非线性车速跟踪控制

洪金龙<sup>1</sup>, 张国旭<sup>2</sup>, 程一帆<sup>3</sup>, 高炳钊<sup>1</sup>, 陈虹<sup>3</sup>

(1. 同济大学 新能源汽车工程中心, 上海 201804; 2. 广汽集团汽车工程研究院, 广州 511434;

3. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 电控机械式自动变速器(AMT)车辆在车速较低时, 其跟车巡航控制的性能对于车辆安全有重要影响, 为此, 提出三步法控制策略对离合器滑差进行精确控制, 从而确保 AMT 车辆在低速巡航工况下的车速跟踪性能。三步法控制利用参考跟踪轨迹的前馈信息和车辆速度的反馈信息, 控制器推导过程中采用李雅普诺夫函数法, 以保证控制系统的渐近稳定性。仿真和实车试验结果表明, 采用所提出的三步法控制策略, 可使 AMT 车辆在各种工况下均能保持良好的速度跟踪性能。

**关键词:** 电控机械式自动变速器(AMT); 低速巡航; 三步法控制; 车速跟踪控制

中图分类号: U463.2

文献标志码: A

## Nonlinear Speed Tracking Control of Vehicles During Low Speed Cruise

HONG Jinlong<sup>1</sup>, ZHANG Guoxu<sup>2</sup>, CHENG Yifan<sup>3</sup>, GAO Bingzhao<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>3</sup>

(1. Clean Energy Automotive Engineering Center, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. GAC R&D Center, Guangzhou 511434, China; 3. College of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** When automated manual transmission (AMT) vehicles are driving under the low vehicle speed, its tracking performance is of great importance for vehicle safety. This paper adopts a triple-step method to control the clutch slip process accurately, so as to ensure the speed tracking performance of AMT vehicles under low speed cruise scenario. The triple-step method makes full use of the feedforward information of the reference tracking trajectory and the feedback of the vehicle speed. The Lyapunov method is used during the control law deduction, so that the asymptotic stability of the control scheme is guaranteed. Eventually, the effectiveness of the controller is evaluated through the simulation and real-car

tests. The simulation and experimental results show that by using the proposed triple-step method, the vehicle speed tracking performance can be guaranteed under various working conditions.

**Key words:** automated manual transmission (AMT); low speed cruise; triple-step method; vehicle speed tracking control

电控机械式自动变速器(automated mechanical transmission, AMT)广泛应用于微型车、越野车和商用车<sup>[1-3]</sup>。然而,随着车辆行驶环境越来越复杂,装有 AMT 的车辆在路况拥挤等低速工况下,其跟车的巡航控制也越来越显重要<sup>[4-5]</sup>。在这种情况下,车速跟踪主要由离合器滑差控制来实现,离合器的接合量和变化过程影响驾乘舒适性和安全性,因此,离合器的高精度滑差控制对于提高车辆综合性能至关重要。

针对离合器滑差控制,国内外已有多项研究<sup>[6-8]</sup>。张海明<sup>[9]</sup>提出采用变增益调度 PI 控制方法处理非线性系统,使 AMT 车辆保持良好的低速跟踪性能。YUAN 等<sup>[10]</sup>将模型参考控制与传统的 PID 控制相结合,以减小动力系统中断中的摩擦能量损失并实现平稳传递动力。TRAN 等<sup>[11]</sup>考虑了模型的变化和干扰,采用基于 TS 模糊模型的 H $\infty$  换挡控制,以获得良好的驾驶舒适度。然而,上述研究由于计算量或标定量过大,普遍不易在工程中广泛应用。

本文采用三步法控制策略进行离合器滑差的精确控制,以提高 AMT 车辆在低速巡航工况下的跟车性能。三步法控制策略由三部分组成:第一步为类稳态控制,假设系统已经达到稳态,得到控制率;第二步参考动态前馈控制,考虑系统期望参考的变化,引入参考动态前馈控制率;第三步为误差反馈控制,定义系统跟踪误差,引入误差反馈控制率。三步法

控制法具有结构简单、容易实现、实时性强的优势<sup>[12-14]</sup>。

### 1 动力系统分析及建模

本节分别建立AMT动力系统高精度的被控对象模型和面向控制器设计的简化模型,其中,高精度被控对象模型为控制器提供仿真验证平台,而简化模型则为AMT低速巡航控制器设计提供模型支持。

完整的AMT车辆动力系统如图1所示,利用AMESim仿真软件构建其被控对象高精度仿真模型。当车辆处于低速巡航工况时,离合器处于滑摩状态,此时面向控制的传动系模型可以简化为二质量系统,如图2所示。此时,传动系的运动可描述为:

$$\dot{\omega}_c = -\frac{C_v}{I_v} \omega_c + \frac{1}{I_v} T_c - \frac{1}{I_v} T_l \quad (1a)$$

$$v = \frac{\omega_c}{i_1 \cdot i_{df}} \cdot R_w \quad (1b)$$

式中: $\omega_c$ 为离合器输出转速,rad·s<sup>-1</sup>;  $T_c$ 为离合器传递扭矩,N·m;  $T_l$ 为车辆阻力扭矩,N·m;  $C_v$ 为车辆阻尼,N·m·rad<sup>-1</sup>·s<sup>-1</sup>;  $I_v$ 为惯性系数,kg·m<sup>2</sup>;  $v$ 为整车车速,m·s<sup>-1</sup>;  $R_w$ 为车轮半径,m。式(1a)描述了以离合器为分界点的前后两部分(发动机惯量和整车惯量)之间的关系,式(1b)描述的是离合器输出转速与车速之间的固定关系式。

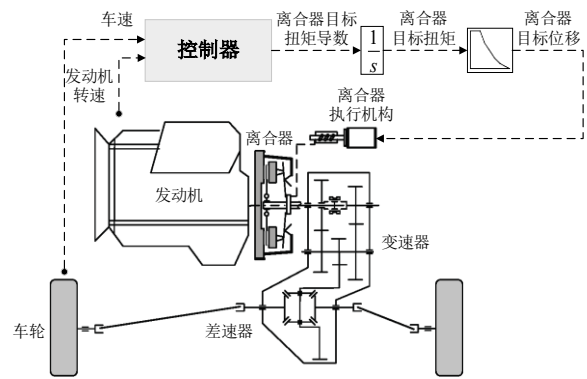


图1 AMT动力系统结构图

Fig.1 Structure of AMT drivetrain

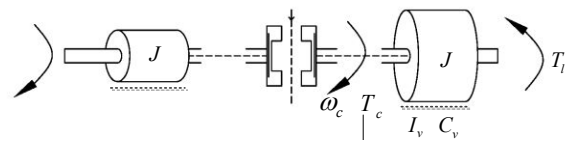


图2 动力传动系统简化模型

Fig.2 Simplified driveline model

### 2 车速跟踪控制器设计

车辆速度响应和跟踪精度是车辆纵向动态性能的评价指标<sup>[15]</sup>。从驾驶性能要求来看,控制器设计要求如下:速度响应时间应小于0.2 s; 稳态跟踪误差应小于0.1 m·s<sup>-1</sup>。对于以上车速跟踪问题,本文采用三步法控制策略<sup>[16]</sup>,其整体控制架构如图3所示。

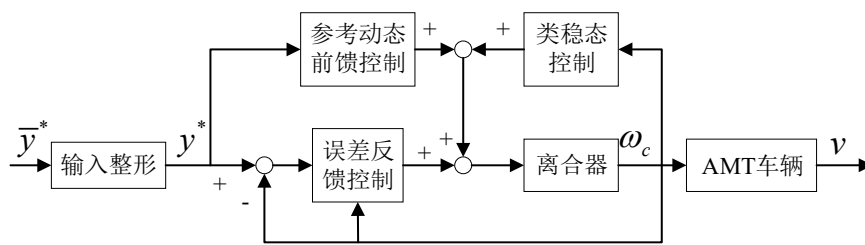


图3 AMT低速巡航车速跟踪控制框图

Fig.3 Scheme of the AMT low speed cruise tracking control

其中:控制器目的是通过离合器滑差控制来驱动AMT车辆车速 $v$ 跟踪给定的参考轨迹 $v^*$ ( $v^*$ 是前车车速);根据公式(1b),目标车速 $v$ 可以转换为离合器目标输出转速 $\omega_c$ ,即AMT车速跟踪控制等效于离合器输出转速的跟踪控制。

三步法控制策略设计过程分为三个阶段:第一阶段和第二阶段依次推导出类稳态控制律和参考轨迹前馈控制律;第三阶段误差反馈控制处理目标值

与实际值之间的跟踪误差。首先,进行系统的模型表达形式转换,选取状态变量 $x_1 = \omega_c, x_2 = T_c$ ,控制变量 $u = \dot{T}_c$ ,系统输出 $y = x_1 = \omega_c$ ,基于式(1a),对系统输出相关时间求导,直到控制输入 $u$ 出现<sup>[17]</sup>,可得下式:

$$\dot{y} = a_1 x_1 + a_2 x_2 + bp \quad (2)$$

$$\ddot{y} = a_1 \dot{y} + a_2 u \quad (3)$$

类稳态控制是将系统假定处于稳态状况下得到

的控制律,此时令 $\ddot{y}=0, \dot{y}=0$ 代入(3),可得类稳态控制律 $f_s(x)=0$ 。

其次,对于复杂系统,类稳态控制有不足之处,因此本文参考动态前馈控制律 $u_f$ ,以考虑系统期望参考的变化动态,这样系统的控制律转化为

$$u = f_s(x) + u_f \quad (4)$$

$$\ddot{y}^* = a_1 \dot{y}^* + a_2 (f_s(x) + u_f) \quad (5)$$

结合稳态控制率 $f_s(x)=0$ ,可以得到与参考动力学相关的前馈控制如下:

$$u_f = \frac{\ddot{y}^* - a_1 \dot{y}^*}{a_2} = f_f(x, \dot{y}^*, \ddot{y}^*) \quad (6)$$

得到的 $u_f$ 在 $\dot{y}^*, \ddot{y}^*$ 中具有明显的仿射形式,因此称其为参考动态前馈,并把它表示为 $f_f(x, \dot{y}^*, \ddot{y}^*)$ 。

最后,在经过上述两个步骤之后,系统仍然可能存在跟踪误差。为了消除跟踪误差,利用系统的输出反馈,引入反馈控制律 $u_e$ ,这时系统的控制律变为

$$u = f_s(x) + f_f(x, \dot{y}^*, \ddot{y}^*) + u_e \quad (7)$$

联合式(3),(6)和(7),得到

$$\ddot{y} = a_1 \dot{y} + a_2 \left( \frac{\ddot{y}^* - a_1 \dot{y}^*}{a_2} + u_e \right) \quad (8)$$

定义系统跟踪误差为:

$$e_1 = y^* - y \quad (9)$$

则由(5)和(8)可得如下跟踪误差动态方程:

$$\ddot{e}_1 = a_1 \dot{e}_1 - a_2 u_e \quad (10)$$

定义 $\dot{e}_1 = e_2$ ,则式(10)可以写为

$$\dot{e}_2 = a_1 e_2 - a_2 u_e \quad (11)$$

取 $e_2$ 作为一个虚拟变量,定义如下形式的李雅普诺夫函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} k_0 \chi^2 \quad (12)$$

其中, $\chi = \int e_1 dt$ ,且 $k_0 > 0$ 。

对 $V_1$ 求导,可以推出

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 + k_0 e_1 \chi = e_1 e_2 + k_0 e_1 \chi \quad (13)$$

选择虚拟控制变量为

$$e_2^* = -k_1 e_1 - k_0 \chi, k_1 > 0 \quad (14)$$

则对于 $e_2^* = e_2$ ,有

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \quad (15a)$$

$$\dot{e}_1 = -k_1 e_1 - k_0 \chi \quad (15b)$$

但实际上,在动态控制过程中 $e_2^* \neq e_2$ ,因此定义两者之间误差为 $e_3 = e_2^* - e_2$ ,可以进一步推出

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 - e_1 e_3 \quad (16a)$$

$$\dot{e}_1 = -k_1 e_1 - k_0 \chi - e_3 \quad (16b)$$

此外,式(14)可变为 $e_2^* = -k_1 e_1 - k_0 e_1$ ,联合式

(11)与(14),则有

$$\dot{e}_3 = \dot{e}_2^* - \dot{e}_2 = -(k_1 + a_1) \dot{e}_1 - k_0 e_1 + a_2 u_e \quad (17)$$

定义新的李雅普诺夫函数为如下形式:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_3^2 \quad (18)$$

依此可以推出

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 + e_3 \left[ -(1 + k_0) e_1 - (k_1 + a_1) \dot{e}_1 + a_2 u_e \right] \quad (19)$$

选取

$$u_e = \frac{1 + k_0}{a_2} e_1 + \frac{k_1 + a_1}{a_2} \dot{e}_1 - \frac{k_2}{a_2} (e_2^* - e_2) = \frac{1 + k_0 + k_1 k_2}{a_2} e_1 + \frac{k_1 + k_2 + a_1}{a_2} \dot{e}_1 + \frac{k_0 k_2}{a_2} \int e_1 dt \quad (20)$$

则式(19)变为 $\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_3^2$ 。由此可知,当 $k_2 > 0$ 时, $\dot{V}_2$ 是负半定的,这意味着闭环误差系统是渐近稳定的,所以误差反馈可以写成(20)的形式,能够保证系统鲁棒性。

结合式(7)和(20),最终控制律形式为

$$u = \frac{\ddot{y}^* - a_1 \dot{y}^*}{a_2} + \frac{1 + k_0 + k_1 k_2}{a_2} e_1 + \frac{k_1 + k_2 + a_1}{a_2} \dot{e}_1 + \frac{k_0 k_2}{a_2} \int e_1 dt \quad (21)$$

综上,AMT车辆巡航状态下三步法控制策略最终可以表示为

$$u = f_f(x, \dot{y}^*, \ddot{y}^*) + f_p e_1 + f_i \int e_1 dt + f_D \dot{e}_1 \quad (22)$$

显然,式(22)中,考虑系统参考值的动力学,作为参考动态的前馈控制;考虑系统目标值的动态特性,有助于改善动态性能。基于误差状态的李雅普诺夫直接控制方法,将误差状态直接控制转化为具有状态相关参数的PID控制器,且PID参数可通过自整定得到,这极大地减少了参数标定工作量。

### 3 仿真实验

搭建控制器仿真模型,结合第1节中AMESim软件搭建的AMT车辆高精度模型平台,两者联合仿真,以验证控制器的有效性。同时,模型中考虑了离合器执行机构的动态特性对整个离合器控制系统中的影响,以尽量接近离合器真实工作情况。

图4和图5为在参考车速阶跃和正弦变化工况下的跟踪性能。从两幅仿真结果图中均可以看出,采用提出的三步法控制策略,在响应时间方面,车辆在低速巡航状态下跟踪前车运动无延迟;从跟踪精

度方面,车辆跟踪误差在启动时最大,最大约为  $0.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,车辆跟踪达稳定状态后,误差均小于  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,跟踪误差能够很好的满足要求。另外,从第三幅图可以看出,整个控制过程离合器扭矩变化平顺,保证了车速跟踪过程平稳无冲击,提高驾驶舒适性。

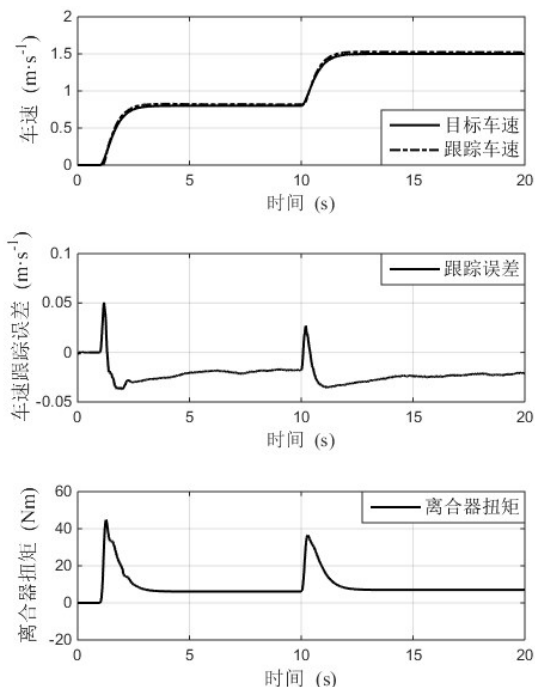


图4 阶跃工况下低速跟车仿真结果

Fig. 4 Simulation results of the vehicle speed tracking under step scenario

## 4 实车验证

实车验证所采用的试验车辆为奔腾B50,采用dSPACE快速原型工具对车辆离合器进行控制,如图6所示。通过控制离合器位移,利用离合器位移-扭矩特性进行整车的车速跟踪控制。在阶跃和正弦输入的参考车速下进行验证,试验结果如图7和8所示。

从两种工况下试验结果的前两幅图同样可以看出,车辆启动时跟踪误差最大为  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,启动之后车辆处于稳定跟踪状态时,误差保持在  $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  之内。第三幅图由于低速工况下车辆所需驱动力矩较小,因此离合器传递扭矩也较小。第四幅图为离合器位移,可看出在低速巡航工况下,离合器始终处于滑摩状态,不能完全结合。在三步法控制作用下,离合器位移变化过程平顺,没有出现大范围剧烈波动,从而保证了高精度的车速跟踪性能和驾乘舒适性。

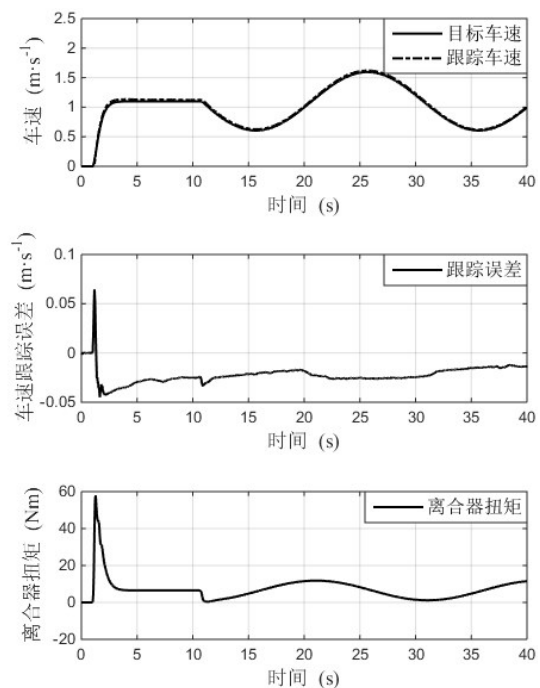


图5 正弦工况下低速跟车仿真结果

Fig. 5 Simulation results of the vehicle speed tracking under sinusoidal scenario



图6 试验车辆和快速原型工具

Fig.6 Test vehicle and rapid prototype tool

## 5 结论

为了提高AMT车辆在低速巡航工况下的车速跟踪性能,本文采用三步法控制策略进行离合器的高精度滑差控制,从车辆模型搭建、控制系统设计和仿真及试验验证等方面开展研究,主要研究结果如下:

(1) 搭建AMT车辆高精度仿真模型和简化模型,高精度模型为控制器提供仿真验证平台,简化模型为控制律的推导提供数学模型支持。

(2) 从类稳态控制、基于参考动力学的前馈控制和状态相关反馈控制三方面进行了三步法控制策略的推导,结合李雅普诺夫函数,证明控制器的渐近稳定性。

(3) 通过仿真及实车试验验证控制器的有效性,结果表明,无论仿真还是试验结果,车辆的车速跟踪性能都能够得到保证。说明本文所设计的三步

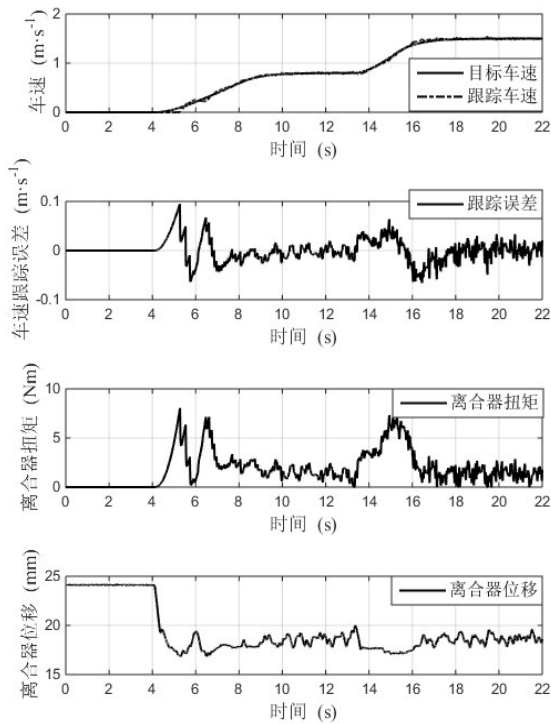


图7 阶跃工况下低速跟车试验结果

Fig.7 Experimental results of the vehicle speed tracking under step scenario

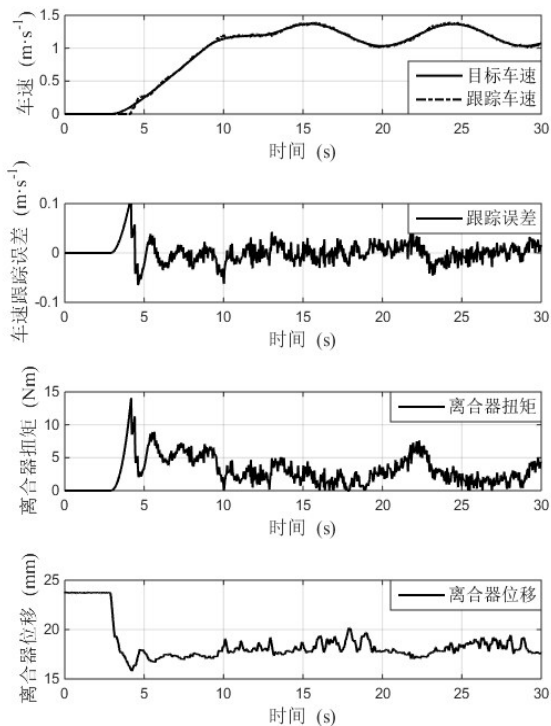


图8 正弦工况下低速跟车试验结果

Fig.8 Experimental results of the vehicle speed tracking under sinusoidal scenario

法控制器具有结构简单、容易实现等优势,跟踪误差小,瞬态响应速度快,满足跟踪性能的要求。

参考文献:

[1] 张海明. 商用车 AMT 变速箱的应用及未来发展趋势[J]. 机械管理开发, 2021, 36(5): 249.  
ZHANG Haiming. Application and future development trend of commercial vehicle AMT gearbox[J]. Machinery Management Development, 2021, 36(5): 249.

[2] 唐娜娜. 6-AMT 微型车起步优化控制[D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
TANG Nana. 6-AMT micro-car starting optimization control [D]. Changchun: Jilin University, 2015.

[3] 董诗瑾. 基于动态规划的重型越野车辆换挡规律优化[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.  
DONG Shijin. Optimization of shift schedule for heavy off-road vehicles based on dynamic programming [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

[4] FAN X, MENG D, TIAN M, *et al.* Adaptive cruise control and energy-efficient torque allocation for distributed-drive electric vehicles under low-speed stop-and-go scenarios [C]// 2022 6th CAA International Conference on Vehicular Control and Intelligence (CVCI). [S.l.]: IEEE, 2022: 1.

[5] 刘月兵. 城市工况下汽车低速行驶巡航控制的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.  
LIU Yuebing. Study on Low Speed Driving Cruise Control of Urban Traffic[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.

[6] 张洪生, 时岩, 秦琳琳, 等. 液力变矩器闭锁离合器滑差控制策略[J]. 机械工程与自动化, 2015(6): 21.  
ZHANG Hongsheng, SHI Yan, QIN Linlin, *et al.* Slip control strategy of hydraulic torque converter lockup clutch [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2015(6): 21.

[7] 赵小婷. 具有电磁滑差离合器的飞轮储能装置设计及调速控制方法研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2020.  
ZHAO Xiaoting. Design of flywheel energy storage device with electromagnetic slip clutch and research on speed regulation control method [D]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2020.

[8] 王阳阳, 李南. 干式离合器半联动滑磨热载荷控制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(10): 1570.  
WANG Yangyang, LI Nan. Slipping friction load control of dry clutch on semi linkage manipulation [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2015, 43(10): 1570.

[9] ZHANG J, HOGN J L, GAO B Z, *et al.* Creep speed tracking control of the AMT vehicles [C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian: IEEE, 2017: 9619.

[10] YUAN S L, CHEN L. Model reference control to reduce both the jerk and frictional loss during DCT gear shifting [C]// 2013 American Control Conference. Washington: IEEE, 2013: 6721.

[11] TRAN V N, LAUBER J, DAMBRINE M. H. gearshift control of a dual clutch based on uncertain TS models [C]// 2013 American Control Conference. Washington: IEEE, 2013: 4891.

- [12] YU H C, LIU Q F, CHEN H. Nonlinear pressure control using triple-step method for pressure proportional solenoid valve [C]//2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC). Jinzhou: IEEE, 2014: 1047.
- [13] ZHAO H Y, GAO B Z, REN B T, *et al.* Integrated control of in-wheel motor electric vehicles using a triple-step nonlinear method [J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352 (2): 519.
- [14] GAO B Z, CHEN H, LIU Q F, *et al.* Position control of electric clutch actuator using a triple-step nonlinear method [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6995.
- [15] ZHANG L, DING H T, SHI J P, *et al.* An adaptive backstepping sliding mode controller to improve vehicle maneuverability and stability via torque vectoring control [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 2598.
- [16] GONG X, CHEN H, LIU Q F, *et al.* A new procedure to design nonlinear controller for rail pressure control of GDI engines [C]// 2014 American Control Conference. Portland: IEEE, 2014: 3153.
- [17] 褚洪庆. 基于三步非线性方法的车用永磁电机运动控制研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.  
CHU Hongqing. Research on Triple-Step-Method-Based Motion Control of Automotive Permanent Magnet Motor [D]. Changchun: Jilin University, 2017.