

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801889

混合动力汽车电子节气门双环滑模控制策略研究*

赵亮 蔡彦兵

(河南省驻马店财经学校 驻马店 463000)

摘要: 针对混合动力汽车用电子节气门系统非线性特性以及控制系统中的扰动,在电子节气门的数学模型基础上,设计了基于非线性终端滑模面的内外环滑模控制策略。与此同时,为了实现混合动力车在复杂的行驶工况下对电子节气门控制系统不可测量变量和不确定扰动进行准确估计,设计了非线性扩张状态观测器,分别对3种不同工况下电子节气门角度跟随进行了实验验证。实验证明,采用的内外环滑模控制策略提高了电子节气门系统收敛速度,无超调现象,满足了混合动力汽车电子节气门高精度角度跟随的目标需求。

关键词: 混合动力汽车;电子节气门;双环滑模控制;非线性扩张状态观测器

中图分类号: TN701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Research on dual loop sliding mode control strategy of electronic throttle in hybrid electric vehicle

Zhao Liang Cai Yanbing

(School of Finance and Economics, Zhumadian Secondary School, Zhumadian 463000, China)

Abstract: Focus on the basis of the mathematical model for the electronic throttle, a sliding mode control strategy based on the nonlinear terminal sliding surface is designed on the basis of the nonlinear characteristics of the electronic throttle system which used in hybrid electric vehicle and the disturbance in the control system. At the same time, in order to realize the electronic throttle of the hybrid power vehicle under the complicated driving condition. The non measurable variable and uncertain disturbance of the gate control system are accurately estimated. The nonlinear expansion state observer is designed. The experimental verification of the angle following of the electronic throttle under three different operating conditions is tested. The experiment proves that dual loop sliding mode control strategy is used to improve the convergence speed of the valve system and the phenomenon of no-overshoot. It meets the target that hybrid electronic vehicle's electronic throttle has high precision angle following performance.

Keywords: hybrid electric vehicle; electronic throttle; dual loop sliding mode control; nonlinear extended state observer

0 引言

节气门是汽车发动机的进气通道,被称为汽车发动机的咽喉^[1]。电子节气门不仅是汽车的动力系统的关键部件,还是集成在发动机闭环控制中的重要一环,电子节气门作为整车控制器的一个执行器节点,通过直流电机控制阀板来调节发动机的进气量,确保汽车平稳运行,由此可见,电子节气门的精确控制就显得非常重要。

对于混合动力汽车,发动机节气门开度大小不直接取决于加速/制动踏板开度,而是整车控制器(vehicle control unit, VCU)综合加速/制动踏板开度、发动机、电机、电池等部件信息和车辆运行状态,并基于一定的控制算法计算

出来的^[2]。随着混合动力汽车的不断普及,对混合动力汽车车用电子节气门控制策略方面国内外都投入了大量的研究,也取得了非常杰出的成果。其中,Loh等^[3]提出了一种基于最小二乘法的电子节气门控制方法,并采用实验仪器对其进行了试验,采集了大量的数据,确定了相关参数;Deur等^[4]设计了一种基于PID优化的控制算法对电子节气门系统摩擦和复位弹簧的非线性进行补偿控制,但是PID优化的参数并未真正实现高精度的位置跟踪;Zhang等^[5]采用多目标约束的凸优化方法来重构混合约束控制器,实现电子节气门高动态、强鲁棒性的控制;文献^[6]通过对电子节气门进行数学建模仿真,优化了基于非线性的模糊规则,采用模糊PID的控制策略对单缸发动机进行了验

收稿日期:2018-10-10

* 基金项目:河南省教育厅自然科学基金基础研究项目(2008A630064)资助

证;燕山的贺韶东^[7]以位置误差作为输入,结合 Lyapunov 稳定性判据理论和滑模控制方法,设计了基于二阶滑模控制的电子节气门控制器。

基于上述综合分析,本文提出一种基于非线性终端滑模面的内外环滑模控制策略,通过分析电子节气门在混合动力汽车动力系统网络中的节点功能以及其数学模型,设计了非线性扩张状态观测器,该控制策略的实质是一种全局快速优化的滑模控制方法,能够有效地消除非线性控制系统带来的静差和超调现象。

1 电子节气门系统数学模型

电子节气门体主要由执行电机、节气门阀和节气门位置传感器组成。在混合动力汽车动力系统中,电子节气门本体及其电子控制系统构成了电子节气门系统,该控制系统通过 CAN 总线和动力系统其他控制器节点协同工作,如图 1 所示。

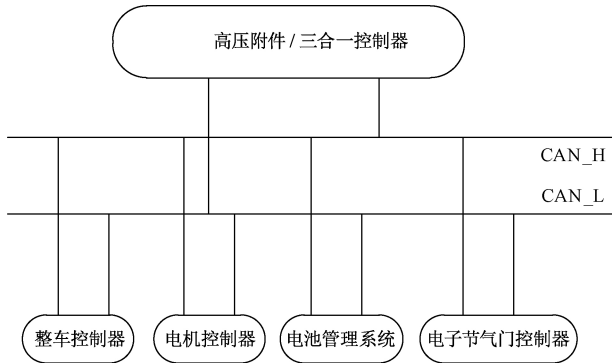


图1 混合动力汽车动力系统架构

1.1 电子节气门直流电机模型

依据基尔霍夫定律可得直流电机绕组的电压平衡方程为:

$$U_M = K_v \omega_M + RI_M + L \frac{dI_M}{dt} \quad (1)$$

式中: U_M 代表电机端电压; K_v 代表电机反电动势系数; ω_M 代表电机转子转速; R 代表电机电阻; I_M 代表电机定子电流; L 代表电机电感。

电机电磁扭矩可表示为:

$$T_M = K_t I_M \quad (2)$$

式中: K_t 代表电机的力矩系数。

节气门等效转动惯量和等效阻尼^[8]分别为:

$$\begin{cases} J_{th} = J_M + n_1^2 J_{int} + (n_1 n_2)^2 (J_{ps} + J_{sect}) \\ B_{th} = B_M + n_1^2 B_{int} + (n_1 n_2)^2 B_{ps} \end{cases} \quad (3)$$

式中: J_M 代表电机转动惯量; J_{int} 代表中间齿轮转动质量; J_{ps} 代表阀板等效转动惯量; J_{sect} 代表齿转转动惯量; n_1 代表中间齿轮与小齿轮传动比; n_2 代表中间齿轮与扇形齿轮传动比; B_M 代表电机阻尼系数; B_{int} 代表中间齿轮阻尼系数; B_{ps} 代表阀板阻尼系数。

由此可得电子节气门阀板的动力学方程为:

$$K_t I_M = J_{th} \dot{\omega}_M + B_{th} \omega_M + T_f(\dot{\theta}) + T_{sp}(\theta) + T_g \quad (4)$$

式中: T_g 代表齿轮间隙扭矩。

因为 $\dot{\theta} = n_1 n_2 \omega_M$, 所以有:

$$K_t I_M = J_{th} \ddot{\theta} / n_1 n_2 + B_{th} \dot{\theta} / n_1 n_2 + T_f(\dot{\theta}) + T_{sp}(\theta) + T_g + d(t) \quad (5)$$

式中: $d(t)$ 表示外部扰动。

1.2 电子节气门非线性模型

电子节气门系统包括了摩擦扭矩模型、复位弹簧模型和齿轮间隙模型 3 个典型的非线性模型。其中,由于电机扭矩是通过减速齿轮传递,齿轮的摩擦固会影响到电机输出轴以及电子节气门的阀板;电子节气门处于直流电机休眠状态下时,节气门开度以常小的角度进行进气量控制,此时电子节气门具有一种非线性特性;因齿轮间隙的存在,扭矩在传输的过程中会产生齿轮间隙扭矩^[9]。电子节气门 3 种典型的非线性模型的数学描述如图 2~4 所示。

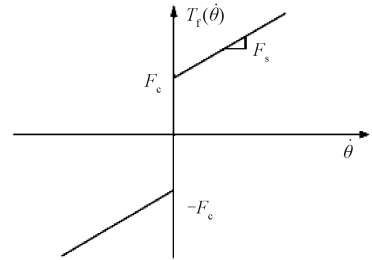


图2 摩擦扭矩模型

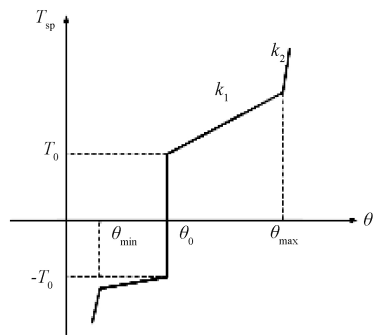


图3 复位弹簧模型

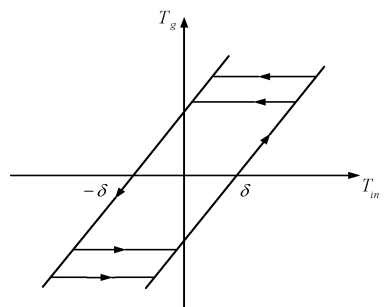


图4 齿轮间隙模型

摩擦扭矩非线性模型数学表达式为:

$$T_f(\dot{\theta}) = F_c \text{sgn}(\dot{\theta}) + F_s \dot{\theta} \quad (6)$$

式中: F_c 代表齿轮摩擦系数; F_s 代表滑动摩擦系数。

复位弹簧模型非线性数学表达式为:

$$T_{sp}(\theta) = \begin{cases} T_0 + k_1(\theta - \theta_0), & \theta_0 < \theta < \theta_{\max} \\ -T_0 - k_1(\theta_0 - \theta), & \theta_{\min} < \theta < \theta_0 \end{cases} = k_1(\theta - \theta_0) + T_0 \text{sgn}(\theta - \theta_0) \quad (7)$$

式中: T_0 代表弹簧预紧力矩; k_1 代表复位弹簧性系数; θ_0 代表节气门默认开度。

齿轮间隙模型非线性数学表达式:

$$T_g = f(T_{in}, \delta) \quad (8)$$

式中: T_g 代表齿轮间隙扭矩。

2 电子节气门系统双环滑模控制策略

电子节气门系统是一个非线性特征非常明显的系统,滑模控制对参数不确定性以及扰动的控制具有动态的强鲁棒性,对于采用传统的滑模控制来准确地估计电子节气门的位置,会由于其本身不能在系统全局快速响应过程中确保鲁棒性而导致位置跟踪的不准确。面对传统滑模控制的这一短板,需要在电子节气门控制系统全局响应过程中引入非线性扩张状态观测器,尤其是在对电子节气门外部不确定扰动 χ_1 、阀板角度 χ_2 以及电机电流 χ_3 进行观测,以此获取准确的位置跟踪性能,设计系统非线性扩张状态观测器如式(9)所示。

$$\begin{cases} \dot{\eta} = x_2 - Mx_1 \\ \hat{x}_2 = \eta + Mx_1 \\ \dot{\eta} = -\left(\frac{k_1}{n_2 J} + CM + M^2\right)x_1 - (C + M)\eta + Ax_1 + \frac{k_2 V_m}{n_1 J}u + d \\ \dot{e}_0 = -(C + M)e_0 + d \end{cases} \quad (9)$$

式中: M 是一个待定的系数序列。对电子节气门观测器的误差^[10]进行积分,可得:

$$e_0(t) = e_0(0)e^{-(C+M)t} + \int_0^t de^{-(C+M)(t-\tau)} d\tau \quad (10)$$

由式(9)、(10)可知,所定义的观测器初始误差是以指数的形式进行收敛的,在得到 \hat{x}_2 这样一个降阶的不确定测量观测器,为了已经形成的闭环控制系统能够有较强的鲁棒性,需要利用 Lyapunov 函数判据对系统进行稳定性分析,定义系统的误差变量为:

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - \theta_d \\ e_2 = x_2 - \dot{x}_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: θ_d 为期望值; x_{2d} 为虚拟控制律。

定义 Lyapunov 函数为 $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$ 可得:

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_d) \quad (12)$$

由虚拟控制律 $x_{2d} = \dot{\theta}_d - k_1 e_1$ 以及 Lyapunov 函数 $V_2 = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2)$ 可得:

$$\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 = e_1(\dot{x}_1 - \dot{\theta}_d) + e_2(\dot{x}_2 - \ddot{\theta}_d + k_1 \dot{e}_1) \quad (13)$$

由两个虚拟控制律可知, $k_1, k_2 > 0$ 所以:

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 < 0, \dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 < 0 \quad (14)$$

Lyapunov 稳定性判据证明子系统是稳定的。从文献[11]可以看出电子节气门系统基于位置反馈的闭环控制策略在系统响应过程中能够减少调节时间。为了准确估计系统不确定性以及不可测状态,设计了上述非线性扩张状态观测器,并验证了观测器的稳定性,实现精确跟踪电子节气门开度和开度的变化,采用速度环为内环,位置环为外环的闭环滑模控制策略来消除系统的静差和超调,控制框图如图 5 所示。

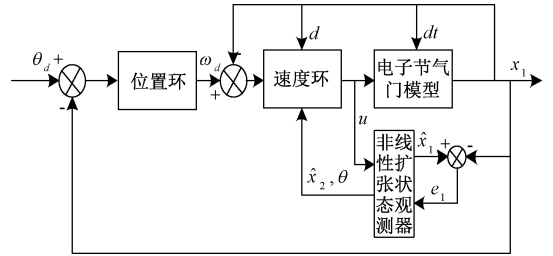


图 5 双环滑模控制框图

定义双环滑模控制器的内外环控制误差如下所示:

$$\begin{cases} \psi_{in} = \omega_d - x_2 \\ \theta_{out} = \theta_d - x_1 \end{cases} \quad (15)$$

式中: ω_d 表示速度环位置期望输入; θ_d 表示电子节气门期望角度。

设计终端滑模面^[12]如下:

$$\begin{cases} S_{in} = \psi_{in} + \lambda_1 \int_0^t \psi_{in} dt \\ S_{out} = \theta_{out} + \lambda_2 \int_0^t \theta_{out} dt \end{cases} \quad (16)$$

定义速度内环的 Lyapunov 函数为 $L_1 = \frac{1}{2}S_{in}^2$, 对其求导可得:

$$\dot{L}_1 = S_{in} \dot{S}_{in} = S_{in}(\dot{\omega}_d + \lambda_1 \omega_d) = S_{in}(\dot{\omega}_d - a_{21}(x_1 - \theta_0) - a_{22}x_2 - bu - \beta_1 \text{sgn}(x_2) - \beta_2 \text{sgn}(x_1 - \theta_0) - d + \lambda_1 \psi_{in}) \quad (17)$$

式中: d 表示电子节气门系统不确定状态测量估计值。

选取速度内环控制律^[13]为:

$$u = (1/b)(\dot{\omega}_d - a_{21}(x_1 - \theta_0) - a_{22}\hat{x}_2 - \beta_1 \text{sgn}(\hat{x}_2) - \beta_2 \text{sgn}(x_1 - \theta_0) - d + \lambda_1 \psi_{in} + \alpha_1 \text{sgn}(S_{in})) \quad (18)$$

式中: \hat{x}_2 表示电子节气门开度变化量。

定义位置外环的 Lyapunov 函数为 $L_2 = \frac{1}{2}\theta_{out}^2$, 对其

求导可得:

$$\dot{L}_2 = \theta_{out} \dot{\theta}_{out} = S_{in}(\dot{\omega}_d - a_{21}(x_1 - \theta_0) - a_{22}x_2 - bu - \beta_1 \operatorname{sgn}(x_2) - \beta_2 \operatorname{sgn}(x_1 - \theta_0) - d + \lambda_1 \theta_{out}) \quad (19)$$

设计位置外环控制律^[14]为:

$$u_d = \dot{\theta}_d + k_{31}\theta_e + \lambda_2 \operatorname{sgn}(S_{out}) \quad (20)$$

将选取的控制律代入内外环控制器的 Lyapunov 函数表达式中,可得:

$$\begin{cases} \dot{L}_1 = -S_{in} - \beta_1 S_{in}^2 - \lambda_1 |S_{in}| \\ \dot{L}_2 = -S_{out} - \beta_2 S_{out}^2 - \lambda_2 |S_{out}| \end{cases} \quad (21)$$

式中: λ_1, λ_2 表示双闭环滑模控制器增益系数; β_1, β_2 参数表示内外环滑模平面常数; $\beta_1, \beta_2, \lambda_1, \lambda_2 > 0$, 由此可以判断 $\dot{L}_1, \dot{L}_2 < 0$, 设计的速度内环, 位置外环控制系统是稳定的。

3 实验验证

在面对电子节气门非线性特性、不确定状态估计以及外部扰动的多重特征下, 设计的基于非线性扩张状态观测器双环滑模控制器具有很好的稳定性以及能够在电子节气门系统全局响应过程中消除静差, 为了验证采用的双环滑模控制策略能够在混合动力汽车车载电子节气门系统中实现上述的性能效果, 搭建了基于 MATLAB 自动代码生成技术^[15]的电子节气门位置跟随控制实验, 以 MC9S12XEP100 为核心控制单元, 任意波形发生器模拟不同的车辆行驶工况, MC9S12XEP100 核心控制单元产生 PWM 波信号经过功率驱动模块驱动电子节气门直流电机, 实验结构如图 6 所示。

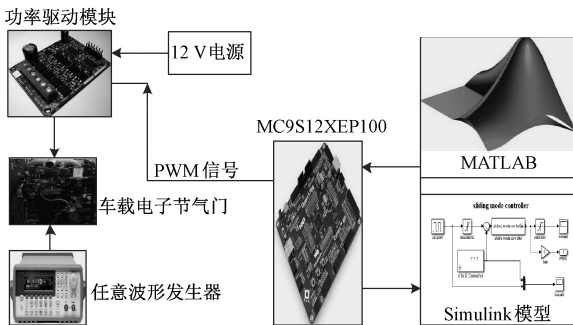


图6 电子节气门位置跟随控制实验环境

基于已搭建好的混合动力汽车电子节气门试验环境, 本文分别进行了定点幅值角波响应、正弦波响应以及方波响应两种工况的双环滑模控制实验, 实验结果如图 7~10 所示。

从图 7 可以看出, 电子节气门控制系统采用位置环作为外环控制, 消除系统的抖动以及超调, 电子节气门全局响应过程中, 当混合动力汽车加速, 发动机进气量需不断增加时, 电子节气门的位置反馈出现偏离, 故需要增加速度环作

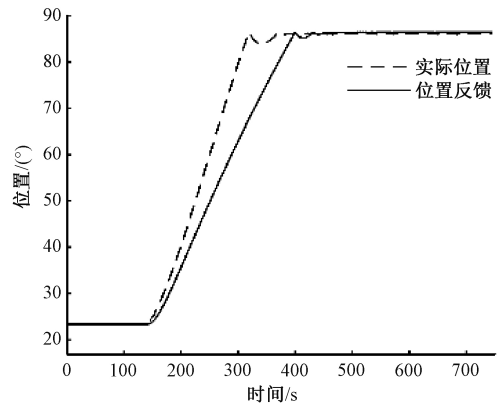


图7 电子节气门位置环反馈

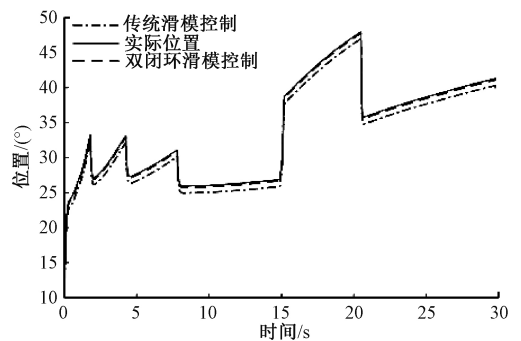


图8 电子节气门角波响应

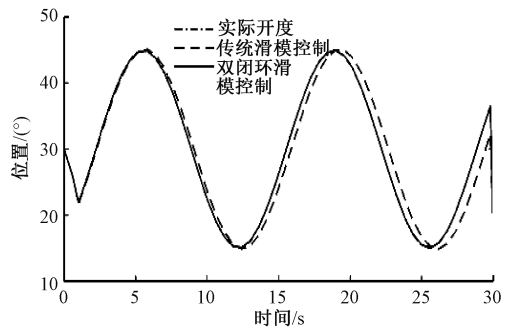


图9 电子节气门正弦波响应

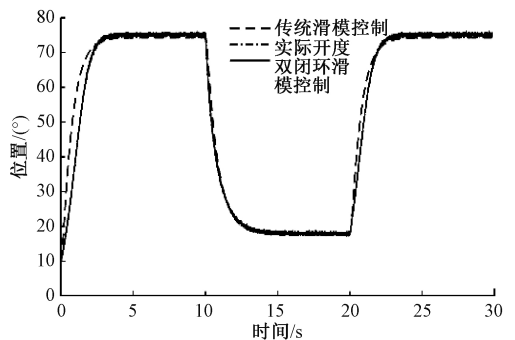


图10 电子节气门方波响应

为内环,进一步消除系统静差。

图 8~10 分别是电子节气门开度输出按角波、正弦波以及方波规律变化的响应曲线,将双环滑模控制和传统滑模控制结果进行对比,由图可知,传统滑模控制策略对电子节气门的位置跟踪存在严重的滞后,误差较大,无法在系统全局响应时快速的消除系统静差,而双环滑模控制器总能对系统不确定性参数、扰动以及不可测状态进行补偿,减少系统的调节时间,提高了电子节气门系统全局的鲁棒性和稳定性。

4 结 论

针对混合动力汽车在复杂行驶工况情况下,电子节气门系统固有的非线性特性以及外部扰动现象,建立电子节气门的数学模型,在此基础上设计了针对电子节气门外部不确定扰动 χ_1 、阀板角度 χ_2 以及电机电流 χ_3 为观测对象非线性状态观测器,选取合适的控制律,构建了位置外环、速度内环的双环滑模控制器,利用 Lyapunov 函数判据证明了其稳定性。

采用类硬件在环技术的 MATLAB 自动代码生成搭建了基于混合动力车载电子节气门的实验环境,分别按角波、正弦波以及方波的开度变化规律进行了实验。实验结果表明,与传统的滑模控制策略相比,双环滑模控制策略具有快速提升系统响应、位置跟踪精确、消除系统静差超调现象的优点。与此同时,该方法也为以后在更为复杂的工况环境下设计电子节气门控制策略提供借鉴意义。

参考文献

- [1] 王显军,沈俊杰,李小亮.电子节气门气密测试系统设计[J].机床与液压,2012,40(14):81-84.
- [2] 陈清泉,孙逢春,祝嘉春.现代电动车技术[M].北京:北京理工大学出版社,2002.
- [3] LOH R N K, THANOM W, PYKO J S, et al. Electronic throttle control system: Modeling identification and model-based control designs [J]. Engineering, 2013, 5(7): 587.
- [4] DEUR J, PAVKOVIĆ D, PERIĆ N, et al. An electronic throttle control strategy including compensation of friction and limp-home effects [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(3): 821-834.

- [5] ZHANG S, YANG J J, ZHU G G. LPV Modeling and mixed constrained control of an electronic throttle[J]. IEEE ASME Transactions on Mechatronics, 2015, 20(5): 2120-2132.
- [6] 郭辉,张振东,朱红萍.汽车电子节气门仿真与控制研究[J].机械设计与制造,2010(1):266-268.
- [7] 贺韶东.汽车电子节气门滑模变结构控制及其硬件在环仿真实验[D].秦皇岛:燕山大学,2015.
- [8] FEI J, YAN W. Adaptive control of MEMS gyroscope using global fast terminal sliding mode control and fuzzy-neural-network[J]. Nonlinear Dynamics, 2014, 78(1):103-116.
- [9] PAN Y D, ÖZGÜNER Ü, DAGACI O H. Variable-structure control of electronic throttle valve[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 3899-3907.
- [10] 杨斌.汽车电子节气门滑模控制研究[D].重庆:重庆邮电大学,2015.
- [11] 于洪洋,吕英军,杨世春.基于位置反馈控制的电子节气门控制系统研究[J].汽车技术,2007(8):9-12.
- [12] ZHANG R, SUN C, ZHANG J, et al. Second-order terminal sliding mode control for hypersonic vehicle in cruising flight with sliding mode disturbance observer[J]. Journal of Control Theory & Applications, 2013, 11(2):299-305.
- [13] CASTAÑOS F, HERNÁNDEZ D, FRIDMAN L M. Integral sliding-mode control for linear time-invariant implicit systems [J]. Automatica, 2014, 50(3): 971-975.
- [14] PAI M C. Dynamic output feedback RBF neural network sliding mode control for robust tracking and model following [J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 79(2):1023-1033.
- [15] 于金泳,刘志远.基于快速控制原型的 ABS 控制器开发[J].汽车技术,2006(12):20-24.

作者简介

赵亮,硕士、讲师,主要研究方向为发动机电控系统、混合动力汽车关键技术。

E-mail: ZhaoLiangmail1983@126.com