

# 车联网环境下电子节气门全局快速滑模控制<sup>\*</sup>

郑太雄 杨 斌 李永福 王 波 李银国

(重庆邮电大学自动化学院汽车电子与嵌入式系统工程中心 重庆 400065)

**摘 要:** 车联网是目前汽车电子领域的研究热点,而车车通信是实现车联网的重要技术手段。为了提高车车通信过程中汽车电子节气门的控制性能,提出了基于 Luenberger 观测器的电子节气门全局快速滑模控制。具体来讲,首先,基于电子节气门的非线性模型,设计了 Luenberger 滑模观测器,以实现节气门开度变化的在线估计;其次,以节气门开度误差为输入,通过李雅普诺夫稳定性理论设计了全局快速滑模控制器与外部扰动自适应律,以确保系统的稳定性和鲁棒性。最后,对提出的控制方法进行仿真验证,并与现有方法进行对比分析,仿真结果证明了所提出控制方法的有效性。

**关键词:** 车联网;车车通信;电子节气门;Luenberger 滑模观测器;李雅普诺夫稳定性理论;全局快速滑模控制

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.15

## Global fast sliding mode controller for electronic throttle valve under the environment of IoV

Zheng Taixiong, Yang Bin, Li Yongfu, Wang Bo, Li Yinguo

(Center for Automotive Electronics and Embedded System, College of Automation,  
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

**Abstract:** Internet of Vehicle (IoV) is the research hotspot in the field of automotive electronics, in which vehicle-to-vehicle (V2V) communication plays an important role. In order to improve the performance of electronic throttle control (ETC) in the process of V2V communication, a global fast sliding mode controller (SMC) with Luenberger observer for ET is proposed in this paper. Specifically, first, the Luenberger sliding mode state observer is designed based on the nonlinear model of ET to online estimate the change of throttle opening angle; second, taking the opening angle error of ET as input signal, the global fast SMC and the external disturbance adaptive law is put forward according to the Lyapunov theory, which can guarantee the stability and robustness of ETC; and finally, simulation experiments and comparisons are carried out, and the simulation results prove the effectiveness of the proposed approach.

**Key words:** internet of vehicle; V2V; electronic throttle; luenberger sliding mode observer; lyapunov stability theory; global fast sliding mode control

## 1 引 言

随着智能交通系统的发展,车联网环境下车车通信技术因其能够实现车辆之间以及车辆与道路基础设施之间的信息交互,从而能够实现道路上交通流的精确控制,

以解决或缓解道路交通拥堵问题,例如,为了在车辆跟驰过程中避免车辆之间的碰撞,需要更多的跟驰车辆以及道路基础设施的信息通过车车通信技术来确保行车安全<sup>[1-5]</sup>。此外,Ioannou 等人<sup>[6]</sup>于 1994 年通过设计节气门和制动控制系统,对车辆自动跟驰理论进行了研究。其研究结果表明:在车车通信技术支持下,采用安全距离策略,可通过设计自适应控制律以实现车队的动态稳定性。

收稿日期: 2014-07 Received Date: 2014-07

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(61304197);重庆市教委科学技术研究(KJ130506);重庆市应用开发计划(cstc2014yykfb40001)资助项目

同时, Ioannou 等人<sup>[6-7]</sup>还指出: 当车辆具有车车通信功能, 车辆可利用车联网技术实现与周围车辆的信息交互(如制动信息、加速信息等), 以减少位置误差和时间延迟, 从而能够有效的避免交通拥堵和交通事故。

现有研究表明: 在智能交通系统中, 基于交通流跟驰模型, 可利用前导车辆和跟驰车辆的速度差信息设计速度控制器, 以使交通流中的车辆保持安全距离, 从而能够有效的确保车队的稳定性<sup>[8-10]</sup>。在交通流尤其在车队稳定性研究中, 人们的期望是车队中的车辆能以安全的车头间距和速度行驶。一旦前方交通事故发生, 前导车辆能够紧急减速直至停止, 同时跟驰车辆也能及时的减速, 否则, 整个车队中的车辆都有可能发生碰撞。而当跟驰车辆因视野受限而未能及时获取前方车辆的行驶状态信息时, 将可能导致事故发生。因此, 及时和准确的信息交互显得尤为重要。而从文献[6]可知, 可通过对电子节气门的精确控制来实现对车辆速度的控制, 因为车辆速度是电子节气门开度的函数。因此, 在车联网环境下, 车队中的车辆可以通过车车通信技术及时感知周围车辆的信息, 尤其是节气门信息, 进而实现对车辆行驶状态的有效控制, 从而确保整个交通流的稳定运行, 避免交通拥堵和交通事故的发生。此外, 电子节气门作为汽车发动机控制的核心部件, 能够通过控制进入发动机气缸的空气流量实现发动机空燃比的控制从而对汽车速度进行控制<sup>[11]</sup>, 所以车车通信环境下电子节气门信息的交互不仅能够稳定道路交通流, 而且还能够避免交通事故的发生。

电子节气门通过一定的控制算法使节气门开度跟踪期望节气门开度, 能够改善汽车的燃油经济性、排放性和操作性能, 正逐步取代传统机械连接的节气门<sup>[12]</sup>。然而, 由于节气门粘性摩擦、滑动摩擦, 以及复位弹簧非线性因素的存在<sup>[13-14]</sup>, 导致电子节气门的精确控制变得异常困难, 因此, 关于电子节气门控制的研究引起了学界广泛关注。

随着汽车发动机对电子节气门控制精度的要求越来越高, 并且考虑到节气门系统非线性因素的存在, 非线性控制算法、优化控制算法、智能控制算法逐渐被应用于电子节气门的控制, 相对于传统 PID 控制, 获得了较高的控制精度。如 Deur 等人<sup>[13-14]</sup>提出一种基于非线性补偿器的电子节气门自校正 PID 控制算法, 不仅能够实现 PID 参数的自校正而且能够对非线性的系统摩擦和 Limp-home 影响因素进行补偿。但对于带有补偿器的 PID 控制器, 如何选择补偿器的参数来确保稳定性是不确定的, 同时自校正的 PID 需要辨识对象参数。另外 Pan 等人<sup>[15]</sup>针对电子节气门的非线性特性和节气门开度变化不可测问题提出了基于滑模观测器的电子节气门滑模控制, 分别实现了节气门开度变化的估计和电子节气门的控制。然而, 在高频环境下系统存在抖振现象会产生抖振误差。还有 Vařak 等人<sup>[16]</sup>采用模型预估优化控制对电子节气门进行了控制, 遗憾的是, 由于采样时间短导致其不能

使用混合整数规划求解器在线计算优化控制输入。以此为切入点, Vařak 等人<sup>[17]</sup>又通过在离线动态规划过程中对状态反馈控制律进行预计算解决了这一问题, 但值得注意的是, 在参数变动和扰动存在时, 优化控制技术不能确保控制器的鲁棒性。近年来智能控制被广泛用于汽车控制中, 如 Yuan 等人<sup>[18]</sup>采用神经网络设计了电子节气门自学习控制器, 使得控制器具有很强的抗扰动和参数不确定性能力。然而, 由于神经网络控制器学习容量大, 导致难以在微控制器中运行。Wang 等人<sup>[19]</sup>提出了一种基于前馈补偿器的智能模糊控制器, 其中, 前馈补偿器能够有效的对非线性滞后进行补偿。但是, 在对非线性滞后特性进行模糊设计时, 模糊规则设计的太简单以致不能有效的对滞后特性进行描述, 导致前馈补偿器不能精确的对其进行补偿。此外, 巩明德等人<sup>[20]</sup>针对电子节气门缺乏驾驶临场感、非线性和未建模动态不确定等问题, 基于主从遥操纵理论, 提出了基于双向伺服力反馈控制策略的电子节气门控制系统, 并取得了较好控制效果。

需要指出的是, 考虑到在实际过程中, 节气门开度的各阶导数一般是不可测的<sup>[12]</sup>, 不能直接加以应用。此外, 齿轮间隙对电子节气门的控制性能具有重要影响, 而上述文献较少考虑此因素。为此, 本文在车辆环境下针对电子节气门的控制要求, 首先基于电子节气门的非线性模型, 通过设计 Luenberger 滑模观测器对节气门的开度变化进行估计; 然后, 应用 Lyapunov 理论, 以节气门开度误差为输入, 设计了电子节气门的全局快速滑模控制器及扰动自适应, 以保证系统的稳定性和鲁棒性。并通过仿真验证了本文方法的有效性。

## 2 电子节气门数学模型

电子节气门主要由直流电机、减速齿轮、节气门阀片位置传感器和非线性的复位弹簧等组成<sup>[13]</sup>, 如图 1 所示。

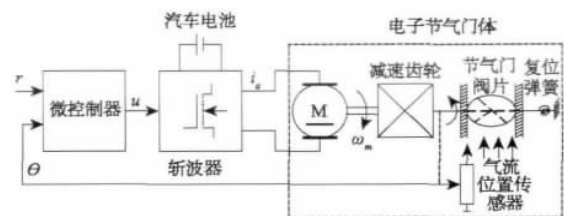


图 1 电子节气门控制结构图

Fig. 1 The control structure of electronic throttle valve

根据基尔霍夫定律, 电机绕组回路的电压平衡方程为:

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = K_{ch} u - K_v \dot{\theta}_m \quad (1)$$

式中:  $L_a$  为电机电感,  $i_a$  为电机绕组电流,  $R_a$  为电机电

阻,  $K_{ch}$  为斩波器增益,  $u$  为控制输入电压,  $K_v$  为电机反电动势常数,  $\theta_m$  为电机旋转角度。

考虑到摩擦和复位弹簧非线性, 根据扭矩平衡, 可得节气门阀片动力学方程:

$$JK_l^2 \ddot{\theta} = K_l K_i i_a - T_f(\dot{\theta}) - T_{sp}(\theta) - T_g \quad (2)$$

式中:  $J$  为折算到电机侧的系统总转动惯量,  $\theta$  为节气门开度,  $K_l = \theta_m / \theta$  为齿轮传动比,  $K_i$  为电机扭矩常数,  $T_f(\dot{\theta})$  为摩擦扭矩,  $T_{sp}(\theta)$  为复位弹簧扭矩,  $T_g$  为齿轮间隙扭矩(未知)。此处只考虑库仑摩擦和粘滑摩擦, 参考文献[12],  $T_f(\dot{\theta})$  可表示为:

$$T_f(\dot{\theta}) = F_s \dot{\theta} + F_c \text{sgn}(\dot{\theta}) \quad (3)$$

式中:  $F_s$  为滑动摩擦系数,  $F_c$  为库仑摩擦系数。

依据文献[12], 节气门复位弹簧扭矩  $T_{sp}(\theta)$  表示为:

$$T_{sp}(\theta) = K_{sp}(\theta - \theta_0) + K_p \text{sgn}(\theta - \theta_0) \quad (4)$$

式中:  $K_{sp}$  为复位弹性系数,  $K_p$  为复位弹簧预紧力矩,  $\theta_0$  为节气门默认开度。

通常情况下, 由于系统在执行过程中时间常量  $T_a = \frac{L_a}{R_a}$  比采样时间  $T$  小, 则忽略电机电枢电流动态模型<sup>[17]</sup>, 式(1)可化为:

$$i_a = \frac{1}{R_a} (K_{ch} u - K_v \dot{\theta}_m) \quad (5)$$

式(2)~(5)可得如下的电子节气门模型:

$$\ddot{\theta} = -\frac{K_{sp}}{JK_l^2}(\theta - \theta_0) - \frac{K_l^2 K_i K_v + F_s}{JK_l^2} \dot{\theta} + \frac{K_l K_{ch}}{JK_l} u - \frac{K_p}{JK_l^2} \text{sgn}(\theta - \theta_0) - \frac{F_c}{JK_l^2} \text{sgn}(\dot{\theta}) - \frac{1}{JK_l^2} T_g \quad (6)$$

考虑到外部扰动  $d(t)$ , 简记为  $d$ , 定义状态变量  $x_1 = \theta$  和  $x_2 = \dot{\theta}$ , 则电子节气门模型状态方程表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1(x_1 - \theta_0) + a_2 x_2 + b u - a_5 T_g - a_4 \text{sgn}(x_2) - a_3 \text{sgn}(x_1 - \theta_0) + d \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} a_1 &= -K_{sp}/(JK_l^2); a_2 = -(K_l^2 K_i K_v + F_s)/(JK_l^2); \\ b &= K_l K_{ch}/(JK_l); a_3 = K_p/(JK_l^2); \\ a_4 &= F_c/(JK_l^2); a_5 = 1/(JK_l^2) \end{aligned}$$

考虑到齿轮间隙扭矩  $T_g$  是未知量, 为此令  $D(t) = d - a_5 T_g$  为总扰动, 简记为  $D$ , 则式(7)可化为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = a_1(x_1 - \theta_0) + a_2 x_2 - a_4 \text{sgn}(x_2) - a_3 \text{sgn}(x_1 - \theta_0) + D + b u \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $D < |L|$ , 即总扰动是有界的。

### 3 控制器设计

根据电子节气门控制要求, 设计如图2所示的电子节气门控制策略, 其中  $\hat{x}_2$  为观测器对电子节气门开度变化的估计值,  $u$  为控制律。

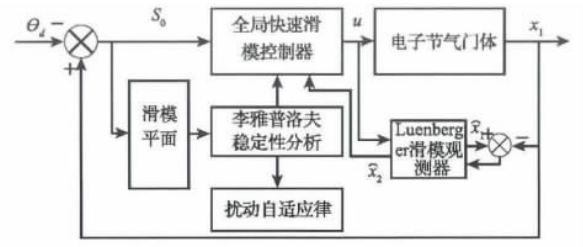


图2 电子节气门控制策略

Fig. 2 Control strategy for electronic throttle

#### 3.1 Luenberger 滑模观测器设计

考虑到节气门开度的各阶导数在实际过程中一般不可测<sup>[12]</sup>, 利用可以测量的状态变量(节气门开度)估计不可测量的状态变量(节气门开度的变化量)。根据式(8)设计如下的 Luenberger 滑模观测器<sup>[21-23]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = \hat{x}_2 + l_1 e_1 + \beta_1 \text{sgn}(e_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = a_1(\hat{x}_1 - \theta_0) + a_2 \hat{x}_2 + b u - a_4 \text{sgn}(\hat{x}_2) - a_3 \text{sgn}(\hat{x}_1 - \theta_0) + D + l_2 e_1 + \beta_2 \text{sgn}(e_1) \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $e_1 = x_1 - \hat{x}_1$ ;  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  分别为正常数。

由式(8)和式(9)可得误差系统为:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = e_2 - l_1 e_1 - \beta_1 \text{sgn}(e_1) \\ \dot{e}_2 = a_1 e_1 + a_2 e_2 - l_2 e_1 - \beta_2 \text{sgn}(e_1) + \Delta \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $e_2 = x_2 - \hat{x}_2$ ,  $\Delta$  为观测器不确定性, 且  $\Delta \leq |\varepsilon|$ ,  $\Delta$  可表示为:

$$\Delta = a_3 \text{sgn}(\hat{x}_1 - \theta_0) + a_4 \text{sgn}(\hat{x}_2) - a_3 \text{sgn}(x_1 - \theta_0) - a_4 \text{sgn}(x_2)$$

定义滑模平面为  $s_1 = e_1$ , 根据滑模可达性条件:

$$s_1 \dot{s}_1 = e_1(e_2 - l_1 e_1 - \beta_1 \text{sgn}(e_1)) < 0 \quad (11)$$

则

$$\beta_1 > (e_2 - l_1 e_1) \text{sgn}(e_1)$$

当到达滑动模态时,  $s_1 = e_1 = 0$ , 由误差系统可知:

$$\text{sgn}(e_1) = \frac{e_2}{\beta_1} \quad (12)$$

将式(12)代入式(10)可得:

$$\dot{e}_2 = a_2 e_2 - \beta_2 \frac{e_2}{\beta_1} + \Delta \quad (13)$$

求解式(13)微分方程可得:

$$e_2 = \int_0^t \Delta e^{(a_2 - \beta_2/\beta_1)(t-\tau)} d\tau \quad (14)$$

则:

$$|e_2| = \left| \int_0^t \Delta e^{(a_2 - \beta_2/\beta_1)(t-\tau)} d\tau \right| \leq |\varepsilon| \left| \int_0^t e^{(a_2 - \beta_2/\beta_1)(t-\tau)} d\tau \right|$$

即当  $t \rightarrow \infty$  时, 只要  $a_2 - \frac{\beta_2}{\beta_1} < 0$ , 可得  $|e_2| \leq 0$  误差系统趋于稳定, 此时,  $\beta_2 > a_2\beta_1$ 。

### 3.2 全局快速滑模控制器设计

设期望参考输入信号为  $\theta_d$ , 定义跟踪误差为  $s_0 = x_1 - \theta_d$ , 则可定义如下的全局快速滑模平面<sup>[24-27]</sup>:

$$s_2 = \dot{s}_0 + a_0 s_0 + b_0 s_0^{q/p} \quad (15)$$

式中:  $a_0, b_0$  均为正常数  $q$  和  $p$  均为正奇数, 且  $q < p$ 。

则

$$\begin{aligned} \dot{s}_2 &= \ddot{s}_0 + a_0 \dot{s}_0 + b_0 \frac{d}{dt} s_0^{q/p} = \dot{x}_2 - \ddot{\theta}_d + a_0 \dot{s}_0 + b_0 \frac{d}{dt} s_0^{q/p} = \\ &a_1(x_1 - \theta_0) + a_2 x_2 + bu - a_4 \operatorname{sgn}(x_2) - \\ &a_3 \operatorname{sgn}(x_1 - \theta_0) + D - \ddot{\theta}_d + a_0 \dot{s}_0 + b_0 \frac{d}{dt} s_0^{q/p} \end{aligned} \quad (16)$$

定义李雅普洛夫函数为<sup>[28-29]</sup>:

$$V = \frac{1}{2} s_2^2 + \frac{1}{2\xi} \tilde{D}^2 \quad (17)$$

式中:  $\xi > 0, \tilde{D} = D - \hat{D}$ ,  $\hat{D}$  为  $D$  的估计值。

假设外部扰动  $D(t)$  可导, 且当  $t \rightarrow \infty$  存在有限极限, 同时  $\dot{D}$  一致连续。则利用 Barbalat 引理, 当  $t \rightarrow \infty$  时,  $\dot{D} = 0$ 。则:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s_2 \dot{s}_2 - \frac{1}{\xi} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} = s_2 [a_1(x_1 - \theta_0) + a_2 x_2 + bu - \\ &a_3 \operatorname{sgn}(x_2) - a_3 \operatorname{sgn}(x_1 - \theta_0) + \hat{D} - \ddot{\theta}_d + a_0 \dot{s}_0 + b_0 \frac{d}{dt} s_0^{q/p}] - \\ &\frac{1}{\xi} \tilde{D} (\dot{\tilde{D}} + \xi s_2) \end{aligned} \quad (18)$$

取控制律为:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{b} [a_1(x_1 - \theta_0) + a_2 x_2 + \hat{D} - a_4 \operatorname{sgn}(x_2) - \\ &a_3 \operatorname{sgn}(x_1 - \theta_0) - \ddot{\theta}_d + a_0 \dot{s}_0 + b_0 \frac{d}{dt} s_0^{q/p} + \\ &\phi s_2 + \gamma s_2^{q/p}] \end{aligned} \quad (19)$$

式中:  $\phi > 0, \gamma > 0$ 。

为了增强控制器的抗扰动能力, 取如下的扰动自适应律:

$$\dot{\tilde{D}} = -\xi s_2 \quad (20)$$

将式(19)和(20)代入式(18)可得:

$$\dot{V} = s_2 \dot{s}_2 - \frac{1}{\xi} \tilde{D} \dot{\tilde{D}} = -\phi s_2^2 - \gamma s_2^{(q+p)/p} \leq 0 \quad (21)$$

由于式(19)中的  $x_2$  不能通过测量得到, 则用观测器观测值  $\hat{x}_2$  代替  $x_2$  就可以得到基于观测器的全局快速滑模控制律:

$$\begin{aligned} u &= -\frac{1}{b} [a_1(x_1 - \theta_0) + a_2 \hat{x}_2 + \hat{D} - a_4 \operatorname{sgn}(\hat{x}_2) - \\ &a_3 \operatorname{sgn}(x_1 - \theta_0) - \ddot{\theta}_d + a_0 \dot{s}_0 + b_0 \frac{d}{dt} s_0^{q/p} + \phi s_2 + \gamma s_2^{q/p}] \end{aligned} \quad (22)$$

## 4 仿真分析

为了验证电子节气门控制器的控制性能, 在 MATLAB/Simulink 环境下建立了基于 Luenberger 滑模观测器的电子节气门全局快速滑模控制器模型。根据文献[12], 确定了电子节气门模型基本参数(如表1所示)并与文献[12]所述方法和普通滑模控制进行了对比仿真实验。

表 1 模型参数名义值

Table 1 The nominal values of the model parameters

符号	数值	单位
$\theta_0$	0.0349	rad
$K_l$	16.95	—
$K_t$	0.016	N · m/A
$K_p$	0.107	N · m
$R_a$	2.8	$\Omega$
$J$	$4 \times 10^{-6}$	kg · m <sup>2</sup>
$F_c$	0.0048	N · m
$K_{ch}$	2.4	—
$K_v$	0.016	V · s/rad
$F_s$	$4 \times 10^{-4}$	N · m · s/rad
$K_{sp}$	0.0247	N · m/rad

### 4.1 正弦和阶跃信号跟踪性能分析

图3和图4分别表示在幅值为  $60^\circ$  正弦期望输入下的跟踪响应和误差曲线。一方面, 从响应速度的角度来分析(如图3所示), 由于节气门开度初始值的原因, 在起始阶段, 3种控制方法均未能对期望开度进行有效的跟踪, 且误差较大, 然而本文所设计控制器的性能明显优于其他2种控制方法; 另一方面, 从跟踪误差的角度来分析, 如图4所示, 在仿真时间约为 0.35 s 和 0.68 s 时, 普通滑模和 backstepping 控制的误差幅度分别达到负向和正向最大, 而本文控制器误差基本趋于平稳, 且幅度明显小于其他2种控制方法。此外, 在整个仿真时间内, 本文所用方法的误差保持在 0 误差的小范围内波动, 且幅度均明显小于其他2种方法, 表明该方法的跟踪误差能满足控制要求。

为了更好的了解本文设计控制器的控制性能, 在幅值为  $60^\circ$  阶跃信号期望输入下对3种方法进行了对比实验。如图5所示, 虽然3种控制方法均能对阶跃信号进行无超调跟踪, 且稳态误差基本趋于 0, 但从调节时间的角度来分析, 本文所用方法的调节时间约为 0.09 s, 比普通滑模和 backstepping 控制方法分别节约

了58%和49%左右,显示了本文方法的有效性及其优越性。此结果表明:考虑车联网环境下的车辆信息交互,电子节气门开度能够在更短的时间内达到稳定状态。考虑到车辆速度是电子节气门开度的函数,当电子节气门的开度达到稳定状态,说明车辆的速度亦可达到稳定。从而借助车车通信技术,则车队中的车辆均能够在较短的时间内达到稳定的行驶速度,可以有效避免交通拥堵与交通事故的发生。

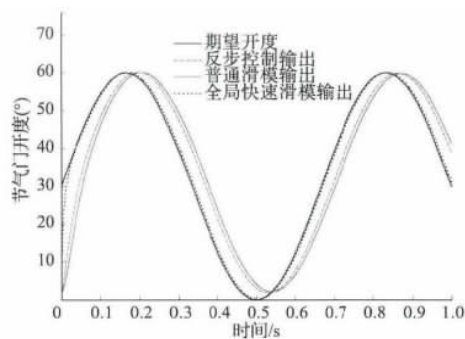


图3 正弦信号跟踪响应

Fig. 3 Sine signal tracking response

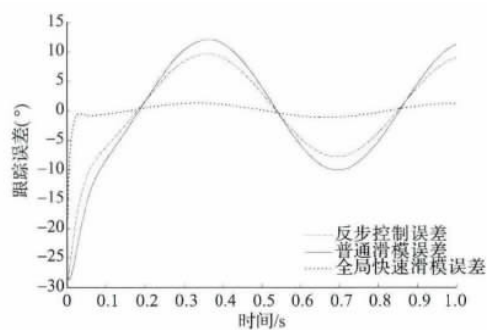


图4 正弦信号跟踪误差

Fig. 4 Tracking errors of sine

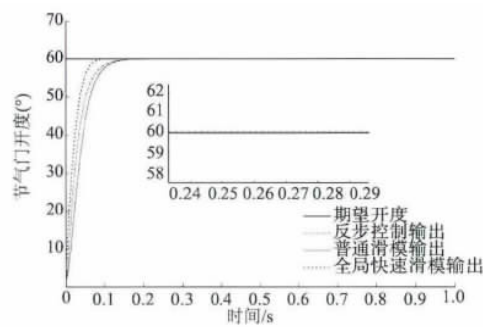


图5 阶跃信号跟踪响应

Fig. 5 Step signal tracking response

#### 4.2 控制器鲁棒性能分析

实际中,车辆在行驶过程中存在许多不确定性,而由

于车辆速度是关于电子节气门开度的函数,并且电子节气门系统存在许多非线性因素,同时随着电子节气门的老化,一些参数会发生变化,这就要求电子节气门控制器对参数变化具有较好的鲁棒性,因此本文基于文献[12]对3种控制方法在节气门名义参数发生变化情况下进行了仿真( $K_t$ ,  $K_{sp}$ ,  $F_c$ 在 $\pm 20\%$ 内变化),此时, $K_t = 0.0128$ ,  $K_{sp} = 0.0576$ ,  $F_c = 0.0296$ 。图6和图7分别为名义参数变化时的阶跃信号响应和误差,从调节时间出发,如图6所示,控制器性能与名义参数发生变化之前基本相同,而从跟踪误差来看,如图7所示,在名义参数发生变化后,由于积分环节具有消除静差的作用,本文所用方法的跟踪误差约为 $0.25^\circ$ ,比普通滑模和backstepping控制方法分别减少了65%和32%左右,说明本文设计的控制器鲁棒性优于其他2种控制方法,并且能够达到电子节气门的控制要求。此结果进一步表明,当车辆某一参数发生变化时,自适应控制器能够很快的对此作出反应,并自动的对节气门开度进行调节,以确保稳定的车速。因此,车队的车辆可以通过车车通信技术及时的感知周围车辆的信息,从而实现车队对车辆参数变化的适应性,提高了整个车队的鲁棒性。

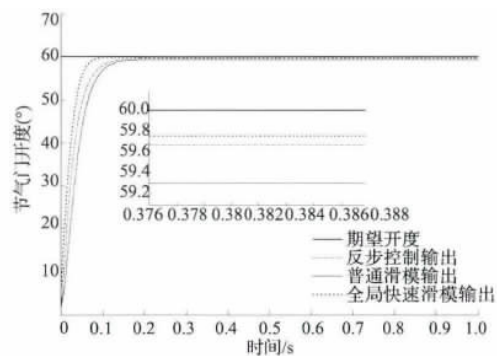


图6 参数变化时阶跃信号跟踪响应

Fig. 6 Step signal tracking response for parameters change

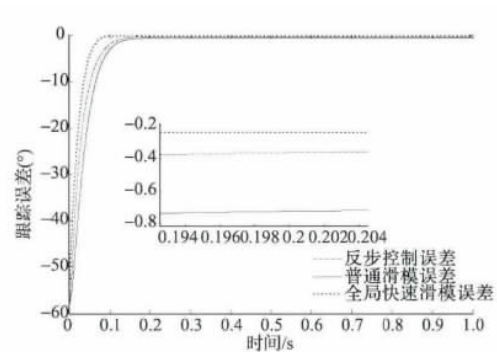


图7 参数变化时阶跃信号跟踪误差

Fig. 7 Tracking errors for parameters change



### 4.3 设定点信号性能分析

当交通拥堵情况出现时,伴随着走走停停现象,车辆速度会时小时大的变化,这蕴含着电子节气门开度应具备随着走走停停现象发生相应变化的特性。因此,我们进一步讨论设定点输入信号下的节气门性能。同时由于非线性弹簧对节气门开度的限制<sup>[15]</sup>,选择最大和最小幅值分别为  $60^\circ$  和  $10^\circ$  的设定点信号作为参考输入信号对控制器进行仿真验证。图 8 和图 9 分别为 3 种控制方法在名义参数模型下的对比仿真曲线和跟踪误差。如图 8 所示,无论是小阶跃变化的期望信号,还是幅值变化比较大的期望信号,3 种控制方法均能对期望信号进行无超调跟踪。然而,从信号每次发生上升突变的响应时间来分析,本文所设计的控制器调节时间大约为  $0.092\text{ s}$ ,比 backstepping 控制方法分别节约了  $47\%$  左右,且普通滑模控制存在稳态误差;从信号每次发生下降突变的响应时间来分析,本文所设计的控制器调节时间大约为  $0.095\text{ s}$ ,明显优于其他 2 种方法,并且其它两种方法均存在稳态误差,表明本文所设计的控制器在跟踪变幅值阶跃信号时不仅实时响应性能要比其他 2 种控制方法好,而且稳态误差也比其他 2 种方法小,充分显示了其良好的控制性能。

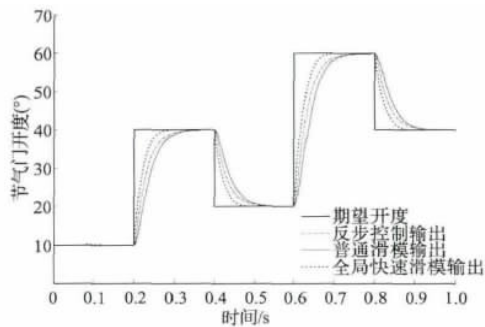


图 8 设定点信号跟踪响应

Fig. 8 Set-points signal tracking response

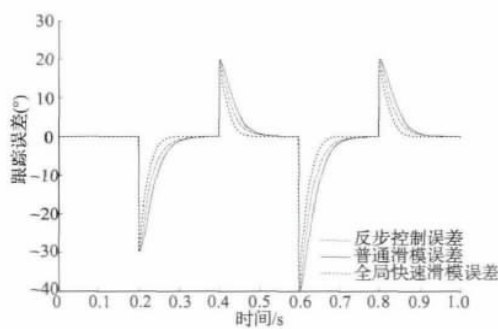


图 9 设定点信号响应误差

Fig. 9 Tracking errors of set-points

综上所述,本文提出的电子节气门控制器能够有效

的在较短时间内对期望设定信号(设定点信号幅值从大变小或者从小变大)进行跟踪,表明当走走停停现象发生时,车辆能够在较短时间内通过调节节气门开度,进而控制车辆速度并使其趋于稳定。因此,在车联网环境下,车队中的车辆可通过车车通信技术与其周围车辆进行节气门信息交互,从而前导车辆或者跟驰车辆的电子控制单元就可依据交互信息及时的对车辆速度进行调整,以确保前导车辆和跟驰车辆保持安全距离和安全车速,使整个车队能够稳定的运行。

### 4.4 模拟仿真验证

为了使本文所提出的电子节气门控制算法更具实际意义,基于 Matlab/simulink 搭建了如图 10 所示的模拟仿真试验环境。对 2 种工况进行模拟仿真验证:

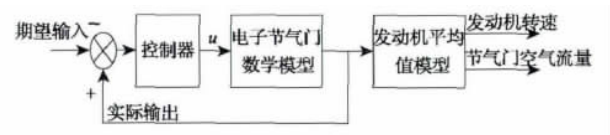


图 10 模拟试验框图

Fig. 10 Simulation experiment diagram

工况 1: 模拟轻踩油门踏板,发动机缓慢加速。节气门开度如图 11 所示,发动机转速如图 12 所示,节气门空气流量如图 13 所示。

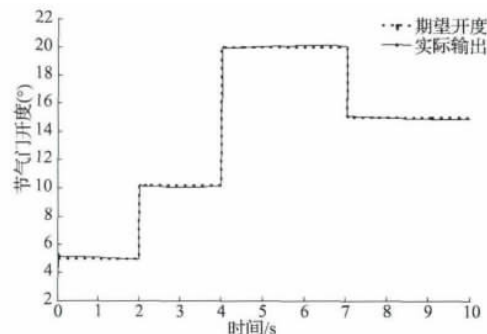


图 11 节气门开度

Fig. 11 Throttle opening angle

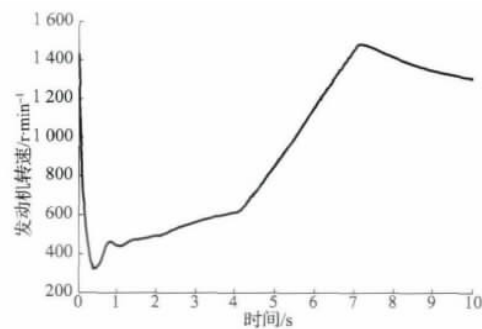


图 12 发动机转速

Fig12. Engine speed

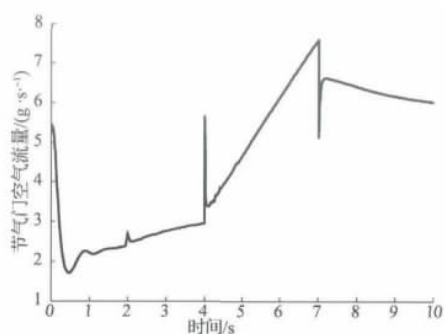


图13 节气门空气流量

Fig. 13 Throttle air flow

工况2: 模拟在需要超车情况下, 迅速加速, 然后缓慢松开踏板。节气门开度如图14所示, 发动机转速如图15所示, 节气门空气流量如图16所示。

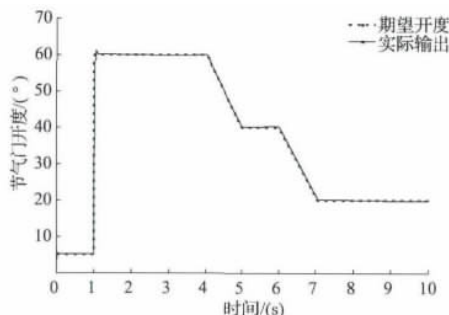


图14 节气门开度

Fig. 14 Throttle opening angle

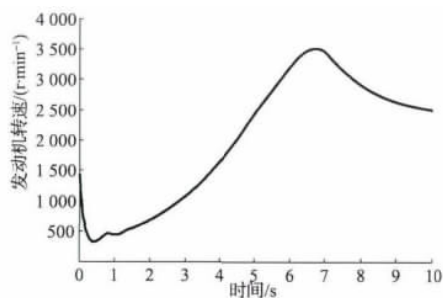


图15 发动机转速

Fig. 15 Engine speed

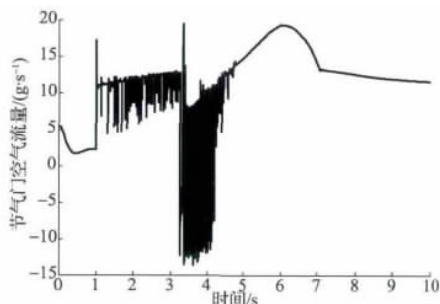


图16 节气门空气流量

Fig. 16 Throttle air flow

综上, 由工况1可知, 当轻踩油门踏板时, 通过本文所提出的控制算法能够达到使节气门到达期望值, 使发动机转速控制在2000r/min以下, 并使节气门控制流量满足轻踩油门时的流量需求。而从工况2可知, 当车辆突然加速时, 通过本文算法模拟的节气门实际输出能够使发动机转速很平稳增加并实现车辆加速, 而伴随着车辆加速, 节气门空气流量虽然出现了较大的抖动, 但仍然能够满足工况需求。

## 5 结 论

在车联网环境下为了改善电子节气门的精确控制以实现车辆之间精确的信息交互, 本文以电子节气门为对象, 针对其非线性特性, 通过Luenberger滑模观测器对节气门状态进行了观测, 在李雅普洛夫理论稳定性分析基础上, 采用全局快速滑模控制方法设计了基于Luenberger滑模观测器的电子节气门全局快速滑模控制器, 并提出了扰动自适应律, 确保了系统的稳定。在电子节气门参数名义值及名义值发生变化的情况下对3种方法进行了仿真对比试验, 仿真结果表明基于观测器的全局快速滑模控制无论在参数名义值还是名义值发生变化的情况下都比其它两种控制方法能够更好的进行电子节气门的无超调跟踪, 且稳态误差趋于0, 说明本文设计的电子节气门控制器具有很好的跟踪控制性能, 同时对参数变化具有很好的鲁棒性。此外, 车队中的车辆可以通过车车通信技术实现与其周围车辆的节气门信息交互, 进一步可实现车队中的车辆以安全的车辆间距和安全的速度稳定运行。同时, 该方法还可以实现车队对车辆参数变化的适应性, 提高了整个车队的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] MILANES V, SHLADOVER S E, SPRING J, et al. Cooperative adaptive cruise control in real traffic situations [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(1): 296-305.
- [2] LI Y F, SUN D H, LIU W N, et al. A service-oriented architecture for the transportation cyber-physical systems [C]. In Proc. 31th Chinese Control Conf., Hefei, China, 2012, pp. 7674-7678.
- [3] LI Y F, ZHU H, LI P H, et al. Vehicle cooperative control framework in transportation cyber physical system [C]. In Proc. 2nd International Conference on Transportation Information and Safety, Wuhan, China, 2013: 64-69.
- [4] 汪成亮, 张晨, 黄文龙. 面向车联网的高速路OD矩阵估计模型[J]. 西安交通大学学报, 2013, 48(6): 1078-1083.

- WANG CH L, ZHANG CH, HUANG W L. Origin-Destination matrix estimation model for freeway oriented inter-net of vehicles [J]. Journal of Xi' An JiaoTong University, 2013, 48(6): 1078-1083.
- [5] 刘辉, 李晖. 采用群组密钥管理的分布式车联网信息认证方案 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(2): 58-62.
- LIU H, LI H. A distributed authentication protocol for VANET [J]. Journal of Xi' An JiaoTong University, 2013, 47(2): 58-62.
- [6] IOANNOU P, XU Z. Throttle and brake control system for automatic vehicle following [J]. Intell Veh Highway Syst., 1994, 1(4): 345-377.
- [7] LI K, IOANNOU P. Modeling of traffic flow of automated vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(2): 99-113.
- [8] HOOGENDOORN S P, BOVY P H L. State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 2001, 215(4): 283-303.
- [9] PIPES L A. Car-following models and the fundamental diagram of road traffic [J]. Transportation Research Part B, 1967, 1: 21-29.
- [10] PLOEG J, WOUW N V D, NIJMEIJER H.  $l_p$  string stability of cascaded systems: application to vehicle platooning [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(2): 786-793.
- [11] AHMED Q, BHATTI A L, KHAN Q, et al. Condition monitoring of gasoline engine air intake system using second order sliding modes [J]. Int. J. Vehicle Design, 2013, 62(2): 312-332.
- [12] 胡云峰, 李超, 李骏, 等. 基于观测器的输出反馈电子节气门控制器设计 [J]. 自动化学报, 2011, 7(6): 746-754.
- HU Y F, LI CH, LI J, et al. Observer-based output feedback control of electronic throttle [J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6): 746-754.
- [13] DEUR J, PAVKOVIC D, PERIC 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.
- [14] PAVKOVIC D, DEUR J, JANSZ M, et al. Adaptive control of automotive electronic throttle [J]. Control Engineering Practice, 2006, 14(2): 121-136.
- [15] PAN Y D, ÖZGÜNER Ü, DAGCI O H. Variable-structure control of electronic throttle valves [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(11): 3899-3907.
- [16] VAŠAK M, BAOTIC M, MORARI M, et al. Constrained optimal control of an electronic throttle [J]. International Journal of Control, 2006, 9(5): 465-478.
- [17] VAŠAK M, BAOTIC M, PETROVIC I, et al. Hybrid theory-based time-optimal control of an electronic throttle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1483-1494.
- [18] YUAN X F, WANG Y N, WU L H, et al. Neural network based self-learning control strategy for electronic throttle valve [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(8): 3357-3765.
- [19] WANG C H, HUANG D Y. A new intelligent fuzzy controller for nonlinear hysteretic electronic throttle in modern intelligent automobiles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(6): 2332-2345.
- [20] 巩明德, 田博, 王辉. 基于双向伺服力反馈的电子节气门控制系统 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 1-6, 24.
- GONG M D, TIAN B, WANG H. Electronic throttle control system based on bilateral servo with force feedback [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 1-6, 24.
- [21] NAYEEM HASAN S M, HUSAIN I. A Luenberger-sliding mode observer for online parameter estimation and adaptation in high-performance induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 772-781.
- [22] TAN C P, YU X H, MAN Z H. Terminal sliding mode observer for a class of nonlinear system [J]. Automatica, 2010, 46: 1401-1404.
- [23] 余佩琼, 傅建中, 陈子辰. 基于奇异摄动和 Luenberger 观测器的 PMLSM 无传感器控制 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 69-72.
- YU P Q, FU J ZH, CHEN Z CH. Sensorless control of PMLSM using singular perturbation and Luenberger observer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25(4): 69-72.
- [24] ZHANG R M, SUN C Y, ZHANG J M, et al. Second-order terminal sliding mode control for hypersonic vehicle in cruising flight with sliding mode disturbance observer [J]. Control Theory and Applications, 2013, 11(2): 299-305.
- [25] 朱俊杰, 粟梅, 王湘中, 等. 分段式滑模变结构无刷直流电机直接转矩控制 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(11): 2634-2640.
- ZHU J J, SU M, WANG X ZH, et al. Direct-torque-control of brushless DC motors based on segmented sliding-



- mode-variable-structure [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11): 2634-2640.
- [26] 贾超, 吴爱国, 郑爱红. 一类多缸液压机的分散滑模控制 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(7): 1513-1520.  
JIA CH, WU AI G, ZHENG AI H. Decentralised sliding mode control for a class of multi-cylinder hydraulic press [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(7): 1513-1520.
- [27] 刘金琨, 孙富春. 滑模变结构控制理论及其算法研究与进展 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 407-418, 503.  
LIU J K, SUN F CH. Research and development on theory and algorithms of sliding mode control [J]. Control Theory & Application, 2007, 24(3): 407-418, 503.
- [28] 周岗, 陈永冰, 陈阳, 等. 一种船舶直线航迹控制算法及控制参数的设计 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1043-1048.  
ZHOU G, CHEN Y B, CHEN Y, et al. Design of control algorithm and control parameters for ship straight-line tracking controller [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1043-1048.
- [29] 薛方正, 厚之成, 李秀敏, 等. 前驱机器人的切换姿态优化及全局稳定控制 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(5): 1035-1040.  
XUE F ZH, HOU ZH CH, LI X M, et al. State switching optimization and global stability control strategy for underactuated two-link manipulator [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(5): 1035-1040.

#### 作者简介



郑太雄, 1997 年于重庆大学获得学士学位, 2000 年于重庆大学获得硕士学位, 2003 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆邮电大学控制与科学工程教授, 主要研究方向为发动机控制和汽车自主安全控制。  
E-mail: zhengtx@cqupt.edu.cn

**Zheng Taixiong** received his B. Sc. degree, the M. Sc. degree and the Ph. D degree from Chongqing University in 1997, 2000, 2003, respectively. He is currently a Professor of Control Science and Engineering with Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interests include engine control and vehicle active safe control.



杨斌, 2012 年于重庆邮电大学获得学士学位, 现为重庆邮电大学机械电子工程专业硕士研究生, 主要研究方向为发动机控制和智能交通系统。

E-mail: yangbin026@126.com

**Yang Bin** received his B. Sc. degree in 2012 from Chongqing University of Posts and Telecommunications. He is currently working toward the M. Sc. degree in Mechanical and Electrical Engineering with Chongqing University of Posts and Telecommunications. His research interests include engine control and intelligent transportation systems (ITS).



李永福(通讯作者), 2007 年于西安科技大学获得学士学位, 2012 年于重庆大学获博士学位, 现为重庆邮电大学控制科学与工程副教授, 主要从事交通 CPS、交通物联网、智能交通和控制理论与应用等研究。

E-mail: laf1212@163.com

**Li YongFu** (Corresponding author) received his the B. Sc. degree in 2007 from Xi'an University of Science and Technology, received his Ph. D degree in 2012 from Chongqing University. He is currently an Associate Professor of Control Science and Engineering with Chongqing University of Posts and Telecommunications. He mainly engaged in Transportation CPS, Internet of Things in Transportation, intelligent transportation and control theory and application research.