

文章编号: 1000-8152(2010)05-0543-08

非奇异快速的终端滑模控制方法及其跟车控制应用

李升波, 李克强, 王建强, 杨波

(清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 最少传感器跟车系统中, 跟踪误差收敛缓慢和对前车干扰鲁棒性差是两个主要问题。基于终端滑模(TSM)控制方法, 设计一种控制量非奇异且收敛快速的跟车控制律, 并实现其实车应用。回顾已有非奇异快速终端滑模控制方法的基本原理; 分析最少传感器跟车系统的特点, 建立包含车辆和车间纵向动力学特性的两状态模型, 设计非奇异快速终端滑模控制律; 证明闭环系统到达阶段和滑动阶段的快速收敛特性, 以及它对前车加减速干扰的强鲁棒性。仿真分析及实车实验表明, 该控制器输出的节气门开度光滑无抖振, 本车平稳快速跟随前车行驶, 且当前车加速度有界时, 闭环系统鲁棒收敛。

关键词: 车辆; 跟车; 终端滑模; 最少传感器

中图分类号: TP13 文献标识码: A

Nonsingular fast terminal-sliding-mode control method and its application on vehicular following system

LI Sheng-bo, LI Ke-qiang, WANG Jian-qiang, YANG Bo

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In a minimum-sensor vehicular following system, the slow convergence of tracking errors and low robustness to preceding vehicle's disturbance are two key issues. Based on the terminal-sliding-mode(TSM) control method, this paper presents a vehicular following controller with nonsingular control input and fast convergent characteristic, and realizes its application on practical vehicular following. First, we review the fundamentals of the existing nonsingular fast TSM control method. Then, by analyzing the characteristic of a minimum-sensor vehicular following system, a two-state space model including vehicular and intervehicular longitudinal dynamics is built and its vehicular following controller is designed using the reviewed method above. Further, the fast convergent characteristic of the closed-loop system on both sliding phase and reaching phase is realized; and its strong robustness to the disturbance from the preceding vehicle's accelerating/decelerating process is also established. Simulations and experiments indicate that this controller smoothly regulates the continuous-time throttle opening, realizing a fast and stable vehicular following process with a high robustness to the bounded acceleration of the preceding vehicle.

Key words: vehicle; vehicular following; terminal-sliding-mode; minimum sensor

1 引言(Introduction)

作为自适应巡航控制(ACC, adaptive cruise control)和起停巡航控制(stop go cruise control)系统的关键技术之一, 跟车控制已经得到普遍的关注与研究^[1,2]。近年来, 为进一步降低系统的软硬件成本, 一些学者提出基于最少传感器的跟车控制思想, 即在原车基础上, 仅加装用于探测车间距离和相对速度的雷达传感器, 实现车辆跟随等功能^[3]。与原方案相比, 该结构取消了用于测量纵向加速度的传感器, 虽然有效降低了硬件成本, 但因加速度信息的缺失, 导致加速度的跟踪缓慢或误差过大, 这不仅降低了相对车速和车距误差的收敛速度, 而且导致被

控系统对前车加减速干扰的鲁棒性较差。为解决该问题, 文献[3]提出一种利用非线性观测器估计车辆加速度的方法, 将加速度测量转化为状态估计问题。受车速测量噪声和车辆模型不确定性的影响, 加速度估计值仍具有较大误差和噪声, 其反馈控制可能反而影响控制性能, 故, 提高最少传感器跟车系统的性能, 还需要从控制角度进一步考虑。已有的滑模变结构控制方法中, 终端滑模(TSM, terminal sliding mode)控制因具有有限时间收敛的优点, 且对模型误差和外部干扰具有较好鲁棒性^[4~6], 可望解决无纵向加速度信息的跟车控制问题。

实车应用中, TSM控制的难点之一是控制律的奇

异问题^[7], 即系统状态接近零时, 控制律中状态负指数项会导致控制量趋于无穷大, 产生奇异点。为解决该问题, 文献[8]分析了TSM控制的特点, 指出当滑模函数的指数满足一定不等式条件时, 滑模时控制量有界。利用该条件, 文献[9]针对确定性非线性系统设计了控制律, 仿真表明, 当时状态负指数项的系数以更高阶速度趋近于零, 不仅消除奇异点, 而且可使控制律收敛至零。然而对于车辆跟踪系统等实际对象, 当系统处于平衡状态时, 由于参数摄动、外部干扰及测量误差的存在, 负指数项的系数可能瞬时不为零, 致使控制律仍然奇异。为了获得完全非奇异的控制律, 文献[10, 11]提出一种非奇异终端滑模(NTSM, nonsingular TSM), 使滑动阶段的状态有限时间收敛且控制律无负指数项。但是该TSM在远离平衡点的区域内, 状态导数小于相同参数的线性滑模面, 导致系统状态收敛缓慢, 远低于指数收敛速度。而且它只能与全局到达条件结合设计单位向量控制律。控制律中, 为保证系统鲁棒收敛, 一般选择大的非线性增益^[12], 这通常造成较大抖振, 影响稳态收敛精度, 甚至激发未建模动态, 使系统不稳定。这限制了该方法的工程应用。

为实现最少传感器跟车系统的车距、车速跟踪功能, 本文首先回顾非奇异快速终端滑模控制方法的基本原理; 然后建立包含车辆和车间纵向动力学特性的两状态模型, 设计非奇异快速终端滑模控制器; 其次, 理论分析闭环系统的收敛特性和它对前车加速度干扰的鲁棒性; 最后, 基于典型城际道路的前车工况, 利用模型仿真和实车实验对跟车控制系统的性能进行验证。

2 非奇异快速终端滑模控制方法(Nonsingular fast TSM control method)

忽略节气门执行器、发动机、传动系以及车轮的动力学特性, 跟车系统可描述为由车距误差和相对车速构成的二阶单输入(SI, single input)非线性方程。不失一般性, 以典型二阶非线性SI系统为对象, 回顾文献[13]提出的非奇异快速终端滑模控制(NFTSM, nonsingular fast TSM)方法:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = f(x, t) + u. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x = [x_1, x_2]^T \in \mathbb{R}^2$, $u \in \mathbb{R}$, $f(x, t)$ 为 \mathbb{C}^1 向量场。兼顾终端滑模控制的非奇异要求, 建立非奇异快速终端滑模面为

$$s = x_1 + \frac{1}{\alpha} x_1^{g/h} + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q}, \quad (2)$$

其中: $\alpha \in \mathbb{R}^+$, $\beta \in \mathbb{R}^+$, $p, q, g, h \in \mathbb{N}$ 为奇数, 要求

满足 $1 < p/q < 2$, $g/h > p/q$, 以保障滑模面的非奇异性。采用一种带状态负指数项的终端吸引子设计趋近律:

$$\dot{s} = (-\phi s - \gamma s^{m/n}) x_2^{p/q-1}, \quad (3)$$

其中: $\phi \in \mathbb{R}^+$, $\gamma \in \mathbb{R}^+$, $m, n \in \mathbb{N}$ 为奇数, 要求满足 $0 < m/n < 1$ 。以式(2)为滑模面, 式(3)为趋近律, 推导出非奇异快速终端滑模控制律:

$$\begin{aligned} u = & -\frac{\beta q}{p}(\phi s + \gamma s^{m/n}) - \\ & \frac{\beta q}{p} x_2^{2-p/q}(1 + \frac{g}{\alpha h} x_1^{g/h-1}) - f(x, t). \end{aligned} \quad (4)$$

由于 $1 < p/q < 2$, $g/h > 1$, 所以式(4)中状态变量 x_1, x_2 的指数皆大于零, 无负指数项, 这说明基于滑模面(2)和趋近律(3)设计的控制方法完全避免奇异问题, 且控制律时间连续, 无抖振。此外, 与其他终端滑模控制律相比, 如文献[9, 10]的NTSM, 控制律(4)中 x_2 指数项包含状态 x_1 的因子, 当系统状态远离平衡点处, 该因子具有增大控制量的作用, 从而提高闭环系统的收敛速度; 当系统状态接近平衡点处, 该因子近似为1, 控制律(4)近似为一般的终端滑模控制律, 保证它对模型误差和外界干扰具有几乎相同的鲁棒性能。

3 基于NFTSM的最少传感器跟车控制(Minimum sensor vehicular following control based on NFTSM)

3.1 跟车系统特性分析与建模(Analysis and modeling of vehicular following system)

跟车控制的基本原理为根据雷达等传感器感知的信息, 依照一定的策略控制油门或制动, 调整本车纵向运动状态, 使其按照期望车距平稳跟随前方车辆。目前, 已有的控制方法多为上下位分层控制结构, 上位控制器根据车距误差、相对速度等信息计算本车期望加速度, 下位控制器则实现本车加速度跟踪期望值^[2]。最少传感器的跟车系统中, 因缺少加速度传感器, 无法获知车辆加速度信息, 故, 不能使用分层控制方案。为此, 本文综合考虑车辆和车间纵向动力学特性建立两状态跟车模型, 并基于该模型设计非奇异快速终端滑模控制律, 实现无加速度信息的跟车控制功能。

图1是某国产自动档轿车的纵向动力学模型结构简图^[14]。模型中, 发动机通过速度特性函数描述力矩与节气门、转速的非线性关系, 用一阶惯性环节描述发动机的动态过程。传动系模型包含液力变矩器和一个五档变速器。行驶系输入量是驱动力矩, 输出量是车速, 受空气阻力、滚动阻力和道路坡度等

环境因素影响。由于本文只考虑油门控制, 所以未考虑制动输入。

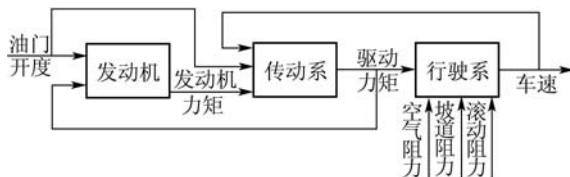


图1 车辆纵向动力学模型结构简图

Fig. 1 Sketch of vehicle longitudinal dynamic model

为建立用于控制器设计的车辆模型, 忽略油门执行机构和发动机的动态特性, 并假定车辆行驶道路水平, 采用式(5)描述车辆纵向动力学特性:

$$\begin{cases} T_e = \text{MAP}(\omega_e, a_{\text{thr}}), \\ \frac{T_e i_g i_0 \eta_T}{K_t r_w} = M \dot{v} + \frac{1}{2} C_a v^2 + F_f. \end{cases} \quad (5)$$

其中: a_{thr} 为节气门开度, ω_e 为发动机转速, $\text{MAP}(\cdot)$ 为发动机速度特性函数, T_e 为发动机力矩, K_t 为液力变矩器的变矩比, i_g 是变速器速比, i_0 为差速器速比, η_T 为传动系机械效率, r_w 为驱动轮滚动半径, M 为等效整车质量, C_a 为空气阻力系数, F_f 为滚动阻力。式(5)中, 部分关键的车辆参数如表1, 发动机的速度特性函数如图2所示, 由发动机台架实验得到。

表1 部分关键车辆参数
Table 1 Key vehicle parameters

参数	物理意义	单位	公称值
M	等效整车质量	kg	1645
i_0	主减速器速比	—	3.86
r_w	轮胎滚动半径	m	0.30
C_a	空气阻力系数	kg/m	0.74
K_t	变矩比	—	1.0
i_g	档位	—	[3.6, 1.93, 1.3, 0.94, 0.67]

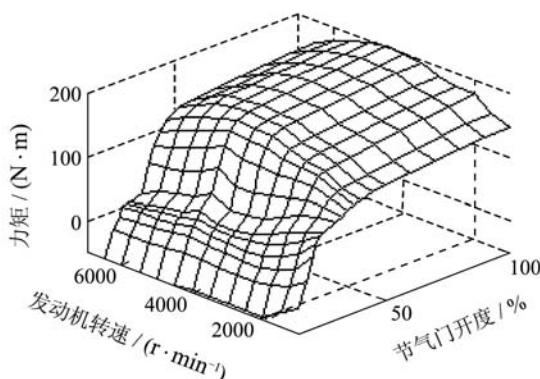


图2 发动机速度特性函数

Fig. 2 Function of engine speed characteristic

为描述车间纵向动力学特性, 定义相对车速 Δv 和车距误差 Δd 为

$$\Delta v \triangleq v_p - v, \Delta d \triangleq d - d_{\text{des}}. \quad (6)$$

其中: v_p 为前车速度, d 为实际车距, d_{des} 为驾驶员期望车距, 参照文献[2]提出的定时距策略, 有 d_{des} 与 v_p 的关系:

$$d_{\text{des}} = \tau_h v_p + d_0. \quad (7)$$

其中: τ_h 是车间时距, d_0 是停车距离。对于乘用车, 选择 $\tau_h = 1.5$ s 和 $d_0 = 5$ m。利用牛顿第二运动定律, 有车间纵向动力学关系 $\ddot{d} = \Delta v$ 。对 Δd 和 Δv 分别求导, 并代入式(5), 有两状态跟车模型:

$$\begin{cases} \Delta \dot{d} = \Delta v - \tau_h \dot{v}_p, \\ \Delta \dot{v} = \left(\frac{C_a}{2M} v^2 + \frac{F_f}{M} \right) + u + \dot{v}_p, \\ u = -\frac{i_g i_0 \eta_T}{MK_t r_w} \text{MAP}(\omega_e, a_{\text{thr}}). \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: a_{thr} 是控制输入, Δd 和 Δv 为系统状态, u 是中间变量。当档位 i_g 固定时, 该模型为非线性时不变系统。对于跟车系统, 虽然车辆需要跟随周围环境不断调整车速, 但不会发生频繁换档过程, 所以在较长一段时间内, 档位 i_g 不会改变, 式(8)仍可近似为时不变系统。故, 该对象满足式(1)中对状态方程为 \mathbb{C}^1 向量场的要求。

3.2 跟车控制器设计(Design of vehicular following controller)

最少传感器跟车控制的目的是在前车加减速工况下, 不依赖加速度信息实现本车速度跟踪前车速度, 实际车距跟踪期望值车距。由于跟车模型(8)与二阶SI非线性对象(1)不完全一致。为满足NFTSM方法对二阶SI非线性对象的要求, 定义新的相对车速变量 \bar{v} :

$$\Delta \bar{v} \triangleq \Delta v - \tau_h \dot{v}_p, \quad (9)$$

式(9)中: 因前车加速度不能测量或估计, 故 $\tau_h \dot{v}_p$ 项未知。一般城际交通流中, 车辆多小加速度波动行驶, 长时间内其加速度量可近似为均值为零的带限噪声, 因此, $\tau_h \dot{v}_p$ 项可看作 Δv 的测量误差。将式(9)代入式(8)有

$$\begin{cases} \Delta \dot{d} = \Delta \bar{v}, \\ \Delta \dot{v} = \left(\frac{C_a}{2M} v^2 + \frac{F_f}{M} \right) + u + (\dot{v}_p - \tau_h \ddot{v}_p). \end{cases} \quad (10)$$

式(10)中: 中间变量 u 的定义见式(8), \dot{v}_p 和 \ddot{v}_p 是不可测外部干扰。跟车控制器设计中, 因 $\Delta \bar{v}$ 不能由车载雷达测量得到, 使用 Δv 代替 $\Delta \bar{v}$ 进行反馈控制, 推导出基于NFTSM方法的跟车控制律为

$$\begin{cases} a_{\text{thr}} = \text{MAP}^{-1}(\omega_e, -\frac{MK_tr_w}{i_g i_0 \eta_T} u), \\ u = -\frac{\beta q}{p} \Delta v^{2-p/q} (1 + \frac{g}{\alpha h} \Delta d^{g/h-1}) - \frac{\beta q}{p} (\phi s + \gamma s^{m/n}) - (\frac{C_a}{2M} v^2 + \frac{F_f}{M}). \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中: $\text{MAP}^{-1}(\cdot)$ 是发动机逆MAP函数, 以发动机转速和发动机力矩为输入, 输出是节气门开度。发动机的逆MAP函数如图3所示。

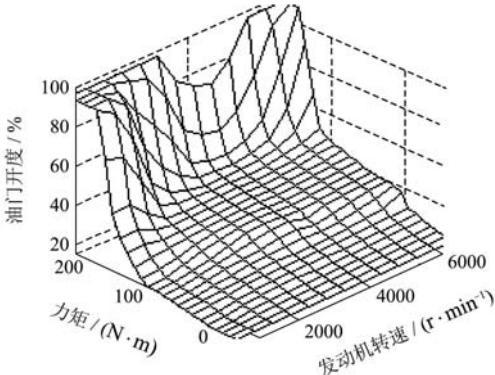


图3 发动机逆MAP函数

Fig. 3 Inverse MAP function of engine

式(11)中, 为满足控制律非奇异等要求, $p, q, g, h, m, n \in \mathbb{N}$ 须满足

$$1 < p/q < 2, g/h > p/q, 0 < m/n < 1. \quad (12)$$

式(11)中, s 为滑模变量, 定义为

$$s = \Delta d + \frac{1}{\alpha} \Delta d^{g/h} + \frac{1}{\beta} \Delta v^{p/q}. \quad (13)$$

至此, 最少传感器跟车系统的NFTSM控制律设计完毕。

4 跟车控制系统的特性分析(Analysis of vehicular following control system's characteristics)

4.1 闭环系统的收敛特性(Convergence of closed-loop system)

滑模控制系统的收敛特性主要取决于滑模面和趋近律。当系统处于滑动阶段时, $s = 0$, 其收敛特性由滑模面决定。当系统处于到达阶段时, 滑模 s 的收敛速度由趋近律决定。文献[13]对本文理论方法收敛特性的结论如下。

定理1 对于被控对象(1), 在滑模面(2)上, 系统状态有限时间收敛, 收敛时间为

$$T = 2\tau_1^{-q/p} \frac{p}{p-q} V(0)^{\frac{p-q}{2p}}. \\ F(A, B, C, -\frac{\tau_2}{\tau_1} V(0)^{\frac{g-h}{2h}}). \quad (14)$$

其中:

$$\tau_1 = 2^{\frac{p+q}{2q}} \beta, \tau_2 = 2^{\frac{p}{2q} + \frac{g}{2h}} \frac{\beta}{\alpha}, \\ A = \frac{q}{p}, B = \frac{(p-q)h}{p(g-h)}, C = \frac{pg-qh}{p(g-h)},$$

$F(\cdot)$ 为高斯超几何函数, $V(t) = \frac{1}{2} x_1^2(t)$.

定理2 对于被控对象(1), 若控制律为(4), 则NFTSM滑模(2)全局存在, 且由任意位置出发的状态变量可渐近收敛至滑模面。

当前车匀速或准匀速行驶时, 即式(9)中 $\dot{v}_p = 0$, $\Delta \bar{v}$ 等于 Δv 。这说明, 跟车模型(10)和跟车控制律(11)与第2节中NFTSM方法的基本形式完全一致, 定理1和定理2可用于分析跟车系统的收敛特性。对于式(13)的滑模 s , 当系统状态靠近平衡点时, 忽略 Δd 的高次项, 它近似于文献[9,10]的NTSM, 其收敛速度也近似于NTSM; 当系统状态远离平衡点时, 式(13)右端 Δd 的高次项起主要作用, 故其收敛速度高于NTSM。这表明: 在滑动阶段, 滑模面(13)比已有的NTSM具有更快的收敛速度, 克服了后者收敛速度慢的问题。而且由定理1知, 当跟车控制系统处于滑动阶段时, 这一收敛过程可有限时间完成。由定理2知, 当跟车控制系统处于到达阶段时, 控制律(11)不影响滑模面(13)的存在性, 且可保证闭环系统至少渐近收敛。这说明, 当前车匀速或准匀速行驶时, 控制律(11)的作用结果是 $\Delta d \rightarrow 0$ 和 $\Delta v \rightarrow 0$, 即前后车速相同, 实际车距等于期望车距。

当前车加速度不为零时, 受前车加速度干扰项的影响, Δv 和 Δd 不能收敛到零, 而是到达原点附件的某区域内。第4.2节将具体分析这一特性。

4.2 闭环系统的鲁棒性(Robustness of closed-loop system)

跟车系统中, 由于前车加速度干扰项的存在, 状态变量 Δd 和 Δv 只能到达平衡点附近的区域内, 而不能收敛至平衡点。经分析, 当前车加速度有界时, 跟车状态仍可渐近收敛, 稳态收敛误差可处于平衡点附近的局部区域, 如定理3。

定理3 对于最小传感器跟车系统(8), 其跟车控制律为式(11), 若前车加速度干扰项 \dot{v}_p 有界, 满足 $|\dot{v}_p| \leq L$, 则跟车系统的状态 Δd 和 Δv 至少渐近到达区域 Π , 且收敛速度不低于式(15):

$$\begin{cases} \dot{s} \cdot \text{sgn } s = -\Omega \cdot \Delta v^{p/q-1}, \\ \Omega \triangleq \phi |s| + \gamma |s|^{m/n} - \frac{pL}{\beta q}. \end{cases} \quad (15)$$

其中收敛区域 Π 定义为

$$\Pi \triangleq \{x : \phi|s| + \gamma|s|^{m/n} \leq \frac{pL}{\beta q}\}. \quad (16)$$

证 为考虑前车加速度干扰项的影响, 将控制律(11)代入式(8), 有

$$\begin{aligned} \Delta\dot{v} = & -\frac{\beta q}{p}(\phi s + \gamma s^{m/n}) - \\ & \frac{\beta q}{p} \Delta v^{2-p/q} \left(1 + \frac{g}{\alpha h} \Delta d^{g/h-1}\right) + \dot{v}_p. \end{aligned} \quad (17)$$

为消除 Δv 的导数项, 对滑模变量 s 定义式(13)求导, 并整理得到

$$\begin{aligned} \Delta\dot{v} = & \frac{\beta q}{p} \Delta v^{1-p/q} \dot{s} - \\ & \frac{\beta q}{p} \Delta v^{2-p/q} \left(1 + \frac{g}{\alpha h} \Delta d^{g/h-1}\right). \end{aligned} \quad (18)$$

综合式(17)和(18), 消除 Δv 的导数项, 并整理得到:

$$\dot{s} = -(\phi s + \gamma s^{m/n} - \frac{p}{\beta q} \dot{v}_p) \Delta v^{p/q-1}. \quad (19)$$

由于前车加速度干扰项有界, 满足 $|\dot{v}_p| \leq L$, 且考虑 $s > 0$ 和 $s < 0$ 两种情况, 有

$$\dot{s} \cdot \operatorname{sgn} s < -\Omega \cdot \Delta v^{p/q-1}. \quad (20)$$

当 $\Omega > 0$, 由定理2知, 滑模 s 渐近收敛且速度不低于式(15). 当 $\Omega \leq 0$, 滑模 s 收敛性不能确定, 所以状态变量 Δd 和 Δv 至少到达 $\Omega \leq 0$ 限定的区域, 即收敛区域 Π . 证毕

一般驾驶过程中, 即使存在紧急加速或制动工况, 受车辆的加速和制动性能的限制, 前车加速度量总是有限值, 故定理3中, 干扰项 \dot{v}_p 有界的假设是合理的. 定理3说明, 当前车加速或减速时, 跟车控制系统的瞬态收敛速度可能降低, 但不会低于式(15)界定的收敛速度; 收敛过程结束后, 稳态跟踪误差不能稳定于平衡点, 但不会超过以平衡点为中心的区域 Π . 因此, 合理选择与式(15)和式(16)相关的控制参数, 一方面可保证跟车控制系统具有满足瞬态性能要求的收敛速度, 另一方面可使区域 Π 足够小, 保证跟车系统对前车加速度干扰等具有较好的鲁棒性.

5 仿真研究(Simulation study)

文中基于NFTSM方法设计了最少传感器跟车控制器, 称为控制器A, 控制参数如下:

$$\alpha = 0.05, \beta = 0.02, p = 15,$$

$$q = 13, g = 17, h = 11,$$

$$\phi = 0.5, \gamma = 1, m = 1, n = 3;$$

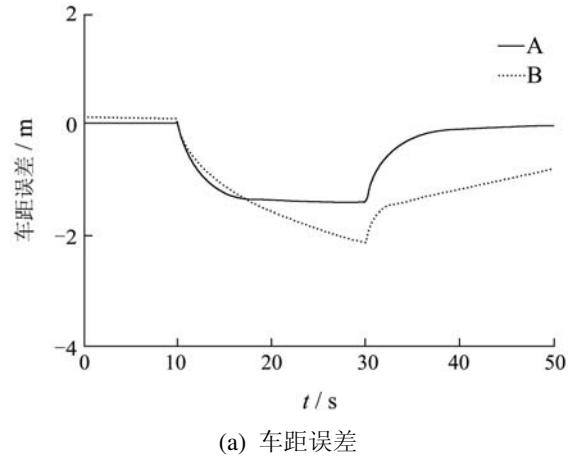
为验证上述算法的有效性, 基于文献[9,10]设计对

比控制器, 称为控制器B. 针对跟车模型(10), 根据文献[9,10]提出的NTSM方法, 可得滑模超平面 s 和控制律 u 分别为:

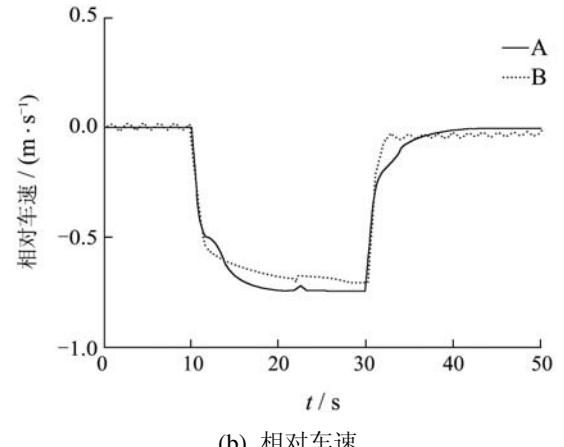
$$s = \Delta d + \frac{1}{\beta} \Delta v^{p/q}. \quad (21)$$

$$u = -\left(\frac{C_a}{2M} v^2 + \frac{F_f}{M}\right) - \frac{\beta q}{p} \Delta v^{2-p/q} - \eta \operatorname{sgn} s. \quad (22)$$

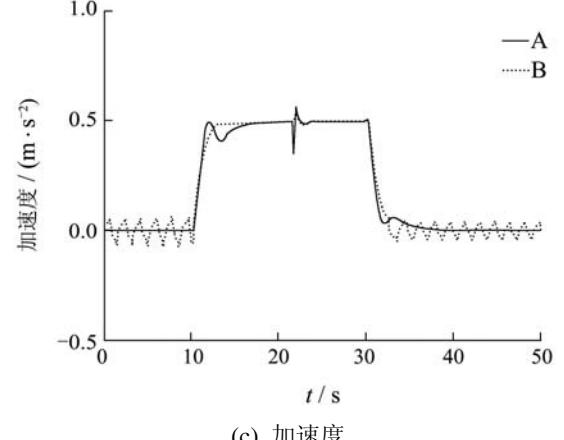
控制器B中, 除 $\eta = 1$ 外, 其他参数与控制器A相同. 参照一般城际道路的典型交通流, 利用文献[15]建立的高阶非线性车辆纵向动力学模型进行仿真研究, 结果如图4所示.



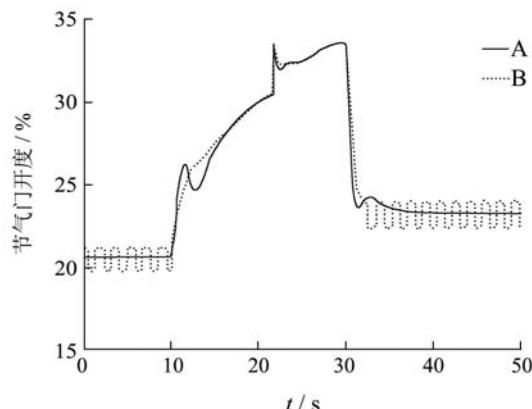
(a) 车距误差



(b) 相对车速



(c) 加速度



(d) 节气门开度

图4 前车定加速工况的仿真结果

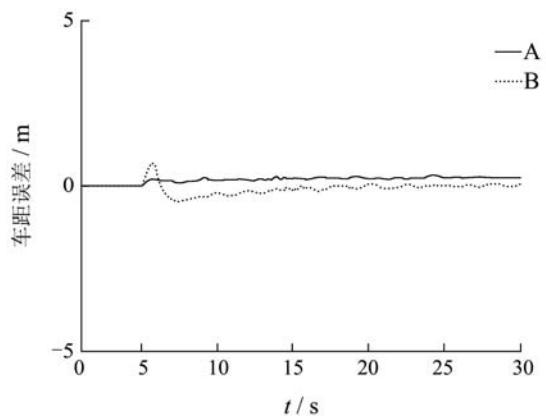
Fig. 4 Simulation results under constant acceleration scenario of preceding vehicle

图4(a)(b)(c)中实线、点线分别表示A和B控制器作用下的跟车系统输出, 图4(d)为对应的本车节气门开度。该仿真共包括3个过程。从0 s~10 s, 前车以11 m/s匀速行驶; 从10 s~30 s, 前车为 0.5 m/s^2 的定加速过程; 从30 s~50 s, 前车回复匀速行驶, 车速为21 m/s。由图4(c)加速度跟踪曲线知, 前车加速瞬间, 受加速度信息缺失的限制, 控制器A不能立即跟踪前车加速度, 随着车距误差和相对车速的增加, 节气门开度变大, 加速度收敛至 0.5 m/s^2 。此时, 由图4(a)(b)知, 车距误差和相对车速不能为零, 前者小于2 m, 后者小于1 m/s。30 s后, 前车恢复匀速行驶, 在控制器A的作用下, 车距误差和相对车速重新收敛为零。整个过程中, 控制器A的节气门开度曲线光滑, 无奇异点, 这表明车辆跟随过程平稳, 具备较好的纵向乘坐舒适性。另外, 20 s处, 车辆由三档升至四档, 本车加速度出现一个瞬时尖峰。因为本文控制律中无加速度反馈, 该尖峰对节气门开度的影响很小, 而且随着档位固定, 换档过程造成的加速度误差可快速收敛至零, 对车距误差和相对车速几乎无影响。与控制器A相比, 控制器B虽然也可保证跟踪误差收敛, 但输出的节气门开度频繁抖振, 且跟踪误差(尤其是车距误差)的收敛速度低于控制器A。

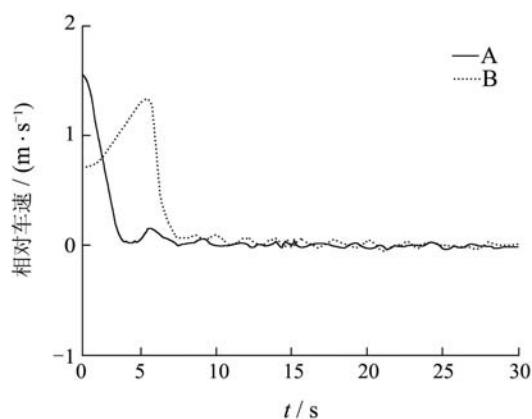
6 实车实验验证(Vehicle experiments)

实验车辆为某国产自动挡轿车, 装有毫米波雷达以及雷达ECU、xPC主控制器、电子节气门以及执行器ECU。雷达及其ECU的功能是根据雷达探测的前方车辆信息, 提取本车道有效目标车的相对速度和车间距离。通过共享原车CAN总线获取车辆状态, 如车速、发动机转速等信息。xPC主控制器运行跟车控制算法, 它输出期望节气门开度命令, 由执行器ECU控制电子节气门实现。

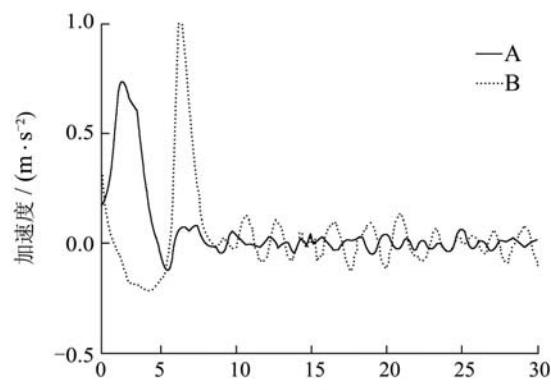
为了在相同前车工况下比较控制器A和控制器B的性能, 本文不采用雷达探测实际前方车辆, 而是利用雷达ECU虚拟两类前车工况: 一是前车匀速工况, 二是前车切入工况。前者中, 前车以5 m/s匀速行驶, 5 s后, 本车以低于前车的初速度开始跟踪前车。后者中, 本车先以5 m/s匀速行驶, 5 s后前车以8 m/s匀速切入本车道, 本车跟踪前车行驶。前车匀速工况的实验结果如图5。图中, 实线代表控制器A, 点线代表控制器B。



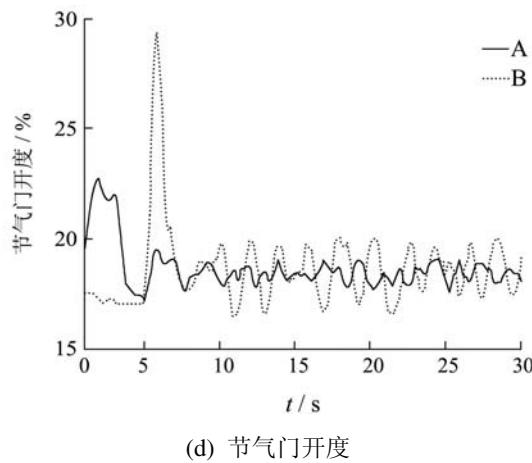
(a) 车距误差



(b) 相对车速



(c) 加速度



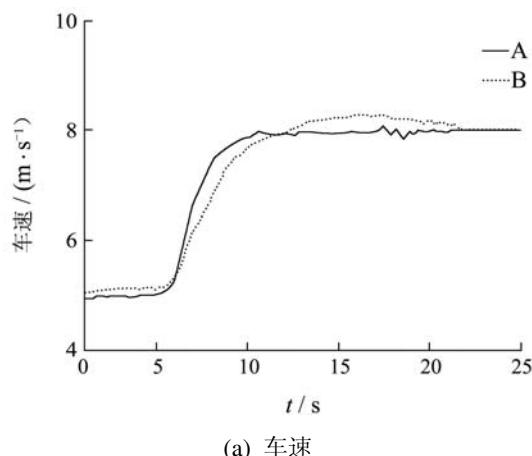
(d) 节气门开度

图5 前车匀速工况的实验结果

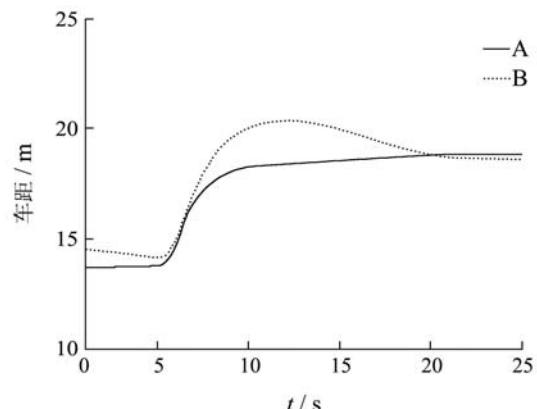
Fig. 5 Experiment results under uniform running scenario of preceding vehicle

由图5(a)(b)知, 前车匀速工况中, 控制器A、B均能保证跟踪误差收敛。与控制器B相比, 控制器A输出的节气门开度基本无抖振, 故加速度平稳, 驾驶员乘坐舒适性高。与之相比, 控制器B因存在切换项, 节气门开度不可避免存在较大抖振, 导致加速度低频波动, 这对乘坐舒适性是十分不利的。前车切入工况的实验结果如图6所示。图中, 实线代表控制器A, 点线代表控制器B。

图6(a)是本车车速轨迹, 图6(b)是实际车距轨迹。由图6(a)(b)知, 前车切入之后, 控制器A、B作用下本车均开始加速, 使车速与前车一致, 车距与期望车距一致。但控制器A作用下, 车速和车距轨迹无超调, 且以更快速度收敛至稳态值。另外, 类似于前车加速工况, 前车制动工况下, 与控制器B相比, 控制器A也应具有车距与车速超调小、收敛速度快的特点。当前车紧急制动时, 控制器A可以减小车距跟踪误差, 避免追尾碰撞事故, 有利于保障最少传感器跟车系统的安全性。



(a) 车速



(b) 车距

图6 前车加速工况的实验结果

Fig. 6 Experiment results under accelerating scenario of preceding vehicle

7 结论(Conclusions)

针对最少传感器跟车系统, 本文提出一种控制律非奇异、时间连续且具有快速收敛特性的跟车控制方法, 并实现其实车应用。理论分析及试验表明: 该方法满足最少传感器跟车系统的控制需求, 输出的节气门开度光滑无抖振, 可使本车车速快速跟踪前车, 车间距离快速跟踪期望车距, 且前车加速度等干扰有界时, 跟踪误差仍渐近收敛, 到达平衡点附近的邻域, 具备较好的鲁棒性。另外, 研究过程也发现, 整车质量和道路坡度等也是导致跟车系统建模不确定性的重要因素, 它们直接影响闭环系统的鲁棒性, 这将在下一步工作中进行研究, 并拟通过实车实验进行分析、评价。

参考文献(References):

- [1] CHOI S B, HEDRICK J K. Vehicle longitudinal control using an adaptive observer for automated highway systems[C] //Proceedings of 1995 American Control Conference. Washington, USA: IEEE, 1995: 3106 – 3110.
- [2] YI K, MOON I, KWON Y D. A vehicle-to-vehicle distance control algorithm for stop-and-go cruise control[C] //Proceedings of 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Oakland, CA, USA: IEEE, 2001: 478 – 482.
- [3] FERRARA A, PISU P. Minimum sensor second-order sliding mode longitudinal control of passenger vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2004, 5(1): 20 – 32.
- [4] VENKATARAMAN S T, GULATI S. Terminal sliding modes: A new approach to nonlinear control synthesis[C] //Proceedings of 5th International Conference on Advanced Robotics. Pisa, Italy: IEEE, 1991: 443 – 448.
- [5] 庄开宇, 张克勤, 苏宏业, 等. 高阶非线性系统的Terminal滑模控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(5): 482 – 539.
(ZHUANG Kaiyu, ZHANG Keqin, SU Hongye, et al. Terminal sliding mode control for high-order nonlinear dynamic systems[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2002, 36(5): 482 – 539.)

- [6] MAN Z H, YU X H. Terminal sliding mode control of MIMO linear systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamentals Theory and Applications*, 1997, 44(11): 1065 – 1070.
- [7] YU X H, MAN Z H, WU Y Q. Terminal sliding modes with fast transient performance[C] //Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control. San Diego, California, USA: IEEE, 1997: 962 – 963.
- [8] YU S H, YU X H. Robust global terminal sliding mode control of SISO nonlinear uncertain systems[C] //Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control. Sydney, Australia: IEEE, 2000: 2198 – 2203.
- [9] 冯勇, 鲍晟, 余星火. 非奇异终端滑模控制系统的应用[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 194 – 198.
(FENG Yong, BAO Sheng, YU Xinghuo. Design method of non-singular terminal sliding mode control systems[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(2): 194 – 198.)
- [10] FENG Y, YU X H, MAN Z H. Non-singular terminal sliding mode control and its application for robot manipulators[C] //Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and System. Sydney, Australia: IEEE, 2001: 545 – 548.
- [11] 田宏奇. 滑模控制理论及其应用[M]. 武汉: 武汉出版社, 1995.
(TIAN Hongqi. *Sliding Mode Control Theory and its Application*[M]. Wuhan: Wuhan Press, 1995.)
- [12] 刘金琨. 滑模变结构控制及MATLAB仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
(LIU Jinkun. *Variable Structure Sliding Mode Control Theory and MATLAB Simulations*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.)
- [13] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法[J]. 信息与控制, 2009, 38(1): 1 – 8.
(LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular and fast terminal sliding mode control method[J]. *Information and Control*, 2009, 38(1): 1 – 8.)
- [14] 高峰, 李克强, 王建强, 等. 车速控制系统自适应油门控制器设计[J]. 汽车工程, 2005, 27(4): 418 – 422.
(GAO Feng, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Adaptive throttle controller design based on a nonlinear vehicle model[J]. *Automotive Engineering*, 2005, 27(4): 418 – 422.)
- [15] 侯德藻, 高峰, 李克强, 等. 应用于汽车主动避撞系统的车辆纵向动力学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 258 – 261.
(HOU Dezao, GAO Feng, LI Keqiang, et al. Vehicle longitudinal dynamic model for vehicle collision avoidance systems[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2004, 44(2): 258 – 261.)

作者简介:

李升波 (1982—), 男, 博士研究生, 研究方向为驾驶员辅助系统、车辆纵向运动控制等, E-mail: lisb04@mails.tsinghua.edu.cn;

李克强 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能车辆、HEV整车控制、车辆噪声分析及控制等, E-mail: likq@tsinghua.edu.cn;

王建强 (1973—), 男, 副教授, 研究方向为驾驶员辅助系统、车辆主动安全技术等, E-mail: wjqlws@tsinghua.edu.cn;

杨 波 (1973—), 男, 硕士, 研究领域为汽车电控液压控制、汽车自适应巡航控制系统等.