

A Control Algorithm for Minimum-Sensor Vehicular Following System

Shengbo Li, Jianqiang Wang, Keqiang Li, Lei Zhang

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

Abstract: In order to deal with slow convergence and weak robustness of minimum-sensor vehicular following system, this paper improves the existing nonsingular TSM control method and applies it into minimum-sensor vehicular following control. To enhance the convergent speed of TSM control method, a nonsingular fast terminal sliding function with high-order exponential term is proposed. The control law is synthesized by employing a terminal attractor with negative exponential factor, thus obtaining its non-chattering and time continuous characteristics. By analyzing the feature of minimum sensor vehicular following system, a two-state space model including vehicular and inter-vehicular longitudinal dynamics is built and its controller is designed using the proposed method above. Theoretical analysis and simulation experiments indicate that this controller outputs a time-continuous throttle angle, realizing fast and stable vehicular following process and a driver desirable tracking precision can be guaranteed when such uncertainties as vehicle mass error and preceding vehicle's acceleration are bounded due the controller's good robustness.

Key words: TSM, singularity, chattering, vehicular following control.

一种用于最少传感器跟车系统的控制方法

李升波, 王建强, 李克强, 张磊

(清华大学汽车工程系, 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:为解决最少传感器跟车系统的收敛缓慢、鲁棒性弱的问题, 本文改进了已有终端滑模控制方法, 并将其应用于最少传感器的跟车控制中。为提高终端滑模控制方法的收敛速度, 构造带状态高次项的非奇异快速终端滑模函数, 结合带状态负指数项的终端吸引子设计控制律, 使其无负指数项且时间连续。通过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, 并基于本文提出的方法设计其控制器。理论分析及仿真表明, 该控制器输出的油门开度光滑无抖振, 可保证本车平稳快速跟随前车行驶, 当整车质量变化和前车加速度干扰等有界时, 跟踪误差满足驾驶员要求, 具备较好的鲁棒性。

关键词: 终端滑模, 奇异, 抖振, 跟车控制

1 引言

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, 该结构无法直接测量纵向加速度, 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跟踪性能, 而且对被控系统的鲁棒性有较大影响。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, 跟踪性能的提高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][5]}, 可望进一步解决无纵向加速度信息的跟车控制问题。

实用化过程中, TSM 控制的难点之一是控制律的奇异问题^[6], 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向于无穷大, 产生奇异点。为解决该问题, 文献[7]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 $s \rightarrow 0$ 时控制量有界。利用该条件, 文献[8]针对确定性非线性系统设计了控制律, 仿真表明, 当 $s \rightarrow 0$ 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[9][10]提出一种非奇异 TSM(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 在远离平衡点区域收敛速度较慢, 并且它只能与全局到达条件结合设计单位向量控制律, 不可避免存在“抖振”问题。这限制了该方法的实际应用。

为实现基于最少传感器的跟车控制功能, 本文首先分析最少传感器跟车系统的基本特性, 建立包含车辆和车间纵向动力学特性的两状态模型。其次, 针对 TSM 方法应用过程中的奇异、抖振和收敛缓慢的问题, 构造一种带状态高次项的非奇异快速终端滑模函数, 并引入带状态负指数项的终端吸引子, 由此推导出时间连续且无负指数项的滑模控制律。在此基础上, 设计最少传感器跟车系统的非奇异快速终端滑模控制器, 并简要分析其稳定性以及前车加速度干扰对稳态跟踪误差的影响。

最后, 基于典型城际道路的交通工况, 结合一高阶非线性车辆模型对跟车控制系统的收敛特性和鲁棒性进行了仿真研究。

2 最少传感器跟车系统的特性分析

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, 由于车辆加速度不能直接测量, 故, 无法使用分层控制方案。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车辆跟随控制功能。

本文的被控对象为某型三厢轿车, 空载质量为 1400kg, 发动机为 1.6L 电喷汽油机, 传动系包含液力变矩器和一个四档自动变速器。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, 采用如下非线性模型描述车辆纵向动力学特性:

$$\frac{T_e i_g i_0 \eta_T}{K_t r_w} = M \dot{v} + \frac{1}{2} C_a v^2 + F_f \quad (1)$$

其中, 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, v 为车速。由于本文仅涉及油门控制, 故未考虑制动系模型。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:

$$\begin{aligned} \Delta v &= v_p - v \\ \Delta d &= d - d_{des} \end{aligned} \quad (2)$$

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], 该车距可由线性模型描述: $d_{des} = \tau_h v_p + d_0$ 。

考虑车间纵向动力学关系 $\dot{d} = \Delta v$, 对 Δd 和 Δv 求导, 并代入式(1), 有两状态跟车模型:

$$\begin{cases} \dot{\Delta d} = \Delta v - \tau_h \dot{v}_p \\ \Delta \dot{v} = \left(\frac{C_a}{2M} v^2 + \frac{F_f}{M} \right) + u + \dot{v}_p \end{cases} \quad (3)$$

其中 $u = -\frac{i_g i_0 \eta_T}{M K_t r_w} T_e$ 。当档位固定时, 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, 但不会发生频繁换挡过程, 所以在较长时间内, 模型参数不会改变, 可近似为时不变系统。

3 基于 NFTSM 控制方法的跟车控制器设计

3.1 非奇异快速终端滑模控制方法

忽略执行器和传动系动态特性等因素, 最少传感器跟车系统的状态方程是由车距误差和相对车速构成的二阶 SI 非线性系统。如引言部分所述, 已有终端滑模控制的存在两个问题: (1) NTSM 在远离平衡点区域的收敛速度较慢; (2) 控制律存在“抖振”问题, 不能直接用于跟车系统设计。故, 针对该问题, 本文改进了已有终端滑模控制方法, 提出一种控制律非奇异、时间连续且具有快速收敛特性的终端滑模控制方法。

不失一般性, 考虑典型二阶 SI 非线性确定系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x, t) + u \end{cases} \quad (4)$$

其中, $x = [x_1, x_2]^T \in R^2$ 为系统状态, $u \in R$ 为控制输入。

为提高非奇异终端滑模在远离平衡点处的收敛速度, 本文提出一种非奇异快速终端滑模面(NFTSM, Nonsingular Fast TSM)。针对对象(4), 定义该滑模面的数学函数为:

$$s = x_1 + \frac{1}{\alpha} x_1^{g/h} + \frac{1}{\beta} x_2^{p/q} \quad (5)$$

其中, $\alpha \in R^+$, $\beta \in R^+$, $p, q, g, h \in N$ 为奇数, 满足 $1 < p/q < 2$, $g/h > p/q$ 。当系统状态靠近平衡点时, 忽略 x_1 的高次项, (5)式近似于文献[9]中(12)式, 其收敛速度近似于 NTSM; 当系统状态远离平衡点时, 式(5)右端 x_1 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, NFTSM 比 NTSM 具有更快的收敛速度, 克服了后者收敛速度慢的问题。

为完全消除控制律中的非线性项, 避免系统抖振, 通常使用“吸引子”设计滑模控制律[11]。其中, 终端吸引子可使状态有限时间到达滑模面, 且对模型误差和外部干扰具有较好的鲁棒性, 在滑模控制中得到广泛应用[4]。然而基于该吸引子设计的控制律无法发挥非奇异 TSM 的优势, 消除控制律的负指数项。为解决该问题, 本文针对 NFTSM 的特点, 提出一种带状态负指数项的终端吸引子:

$$\dot{s} = (-\phi s - \gamma s^{m/n}) x_2^{p/q-1} \quad (6)$$

其中, $\phi \in R^+$, $\gamma \in R^+$, $m, n \in N$ 为奇数, 且满足 $0 < m/n < 1$ 。综合(4)(5)和(6)式, 可得非奇异快速终端滑模控制律为:

$$u = -\frac{\beta q}{p} \left[(\phi s + \gamma s^{m/n}) + x_2^{2-p/q} \left(1 + \frac{g}{\alpha h} x_1^{g/h-1} \right) \right] - f \quad (7)$$

由于 $1 < p/q < 2$, $g/h > 1$, 所以(7)式中状态变量 x_1, x_2 的指数皆大于零, 无负指数项, 这说明基于 NFTSM(5)和终端吸引子(6)的滑模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, 与终端滑模控制律相比, 控制律(7)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(7)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。

3.2 最少传感器跟车控制器设计

跟车控制的目的是在外界风等外部干扰存在和整车质量等参数变化的情况下, 保证本车速度跟踪前车速度, 实际车距跟踪期望值车间距离。为满足非奇异快速终端滑模控制方法对式(4)的要求, 定义新车速误差变量 $\Delta \bar{v} = \Delta v - \tau_h \dot{v}_p$, 代入上式有:

$$\begin{cases} \Delta \dot{d} = \Delta \bar{v} \\ \Delta \dot{\bar{v}} = \left(\frac{C_a}{2M} v^2 + \frac{F_f}{M} \right) + u + (\dot{v}_p - \tau_h \ddot{v}_p) \end{cases} \quad (8)$$

最少传感器的跟车系统中, 由于前车加速度不能直接测量, 使用 Δv 代替 $\Delta \bar{v}$ 进行反馈控制, 此时 $\tau_h \dot{v}_p$ 项可看作 $\Delta \bar{v}$ 的测量误差。式(8)中, 将 $\dot{v}_p$ 和 $\ddot{v}_p$ 看作不可测外部干扰, 由上文易知其非奇异快速终端滑模控制律为:

$$u = -\frac{\beta q}{p} \left[(\phi s + \gamma s^{m/n}) + \Delta v^{2-p/q} \left(1 + \frac{g}{\alpha h} \Delta d^{g/h-1} \right) \right] - \left(\frac{C_a}{2M} v^2 + \frac{F_f}{M} \right) \quad (9)$$

其中滑模变量 s 为

$$s = \Delta d + \frac{1}{\alpha} \Delta d^{g/h} + \frac{1}{\beta} \Delta v^{p/q} \quad (10)$$

当前车匀速行驶时, 若选择参数满足 $1 < p/q < 2$, $g/h > p/q$, $0 < m/n < 1$, 在到达阶段 Δd 和 Δv 全局范围收敛, 在滑动阶段 Δd 和 Δv 收敛, 控制律(8)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, 受外部干扰项的影响, Δv 和 Δd 不能收敛到零, 而是到达原点附近的某区域内。下文将具体分析跟车控制系统的控制性能。

3.3 跟车控制系统的性能分析

如上文所述, 实际的跟车系统中, 由于前车加速度干扰项的存在, 状态变量 Δd 和 Δv 的收敛速度可能会降低, 甚至发散, 稳态跟踪轨迹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, 即使存在前车加速度干扰, 跟车系统的状态仍可有限时间收敛, 稳态收敛误差可处于平衡点附近的区域, 如定理 1。

定理 1: 对于最小传感器跟车系统(3), 其跟车控制律为(9), 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 至少有限时间到达区域 Π , 且收敛速度不低于(11)式:

$$\dot{s} \cdot \text{sgn}(s) = - \left(\phi |s| + \gamma |s|^{m/n} - \frac{pL}{\beta q} \right) \Delta v^{p/q-1} \quad (11)$$

其中收敛区域 Π 定义为

$$\Pi \triangleq \left\{ x : \phi |s| + \gamma |s|^{m/n} \leq \frac{pL}{\beta q} \right\} \quad (12)$$

证明：

为考虑前车加速度干扰项的影响，将控制律(9)代入(3)式，有：

$$\Delta \dot{v} = - \frac{\beta q}{p} \left[(\phi s + \gamma s^{m/n}) + \Delta v^{2-p/q} \left(1 + \frac{g}{\alpha h} \Delta d^{g/h-1} \right) \right] + \dot{v}_p \quad (13)$$

为消除 Δv 的导数项，对滑模变量 s 定义式(10)求导，并整理得到：

$$\Delta \dot{v} = \frac{\beta q}{p} \Delta v^{1-p/q} \dot{s} - \frac{\beta q}{p} \Delta v^{2-p/q} \left(1 + \frac{g}{\alpha h} \Delta d^{g/h-1} \right) \quad (14)$$

综合(13)式和(14)式，消除 Δv 的导数项，并整理得到：

$$\dot{s} = - \left(\phi s + \gamma s^{m/n} - \frac{p}{\beta q} \dot{v}_p \right) + \Delta v^{p/q-1} \quad (15)$$

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：

$$\dot{s} \cdot \text{sgn}(s) < - \left(\phi |s| + \gamma |s|^{m/n} - \frac{pL}{\beta q} \right) \Delta v^{p/q-1} \quad (16)$$

当 $\phi |s| + \gamma |s|^{m/n} - \frac{pL}{\beta q} > 0$ ，由文献 [13] 定理 2 知，滑模 s 渐近收敛且速度不低于 (11) 式。当

$\phi |s| + \gamma |s|^{m/n} - \frac{pL}{\beta q} \leq 0$ ，滑模 s 可能不收敛，所以状态变量 Δd 和 Δv 至少到达 $\phi |s| + \gamma |s|^{m/n} - \frac{pL}{\beta q} \leq 0$ 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 1 中，干扰项 $\dot{v}_p$ 有界的假设是合理的。由定理 1 知，合理选择控制参数，可保证跟车控制系统具有较好的收敛速度，且收敛区域足够小，保证系统对前车加速度干扰等不确定性具有较好的鲁棒性。

4 仿真研究

文中基于非奇异快速终端滑模控制方法设计了最少传感器的跟车控制器，称为 A 控制器，控制参数如下。为验证算法的有效性，基于文献[9][10]设计对比控制器 B。参照一般城际道路的典型交通流，利用文献[12]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 1 所示。

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

$p = 15$, $q = 13$, $g = 17$, $h = 11$,

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

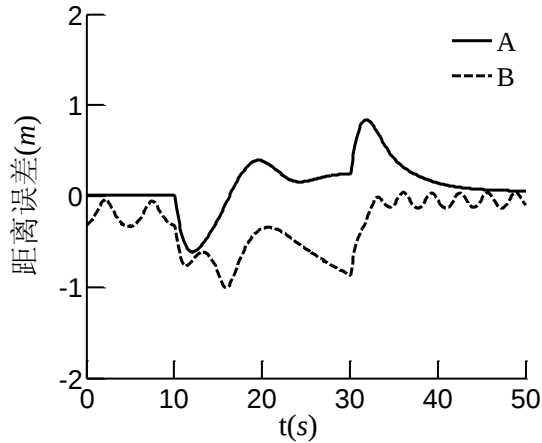


图 1(a) 距离误差

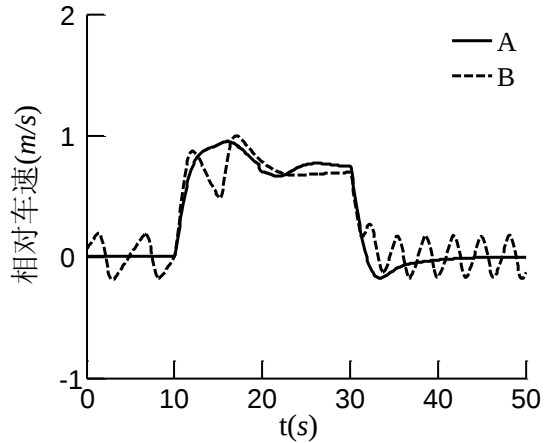


图 1(b) 相对速度

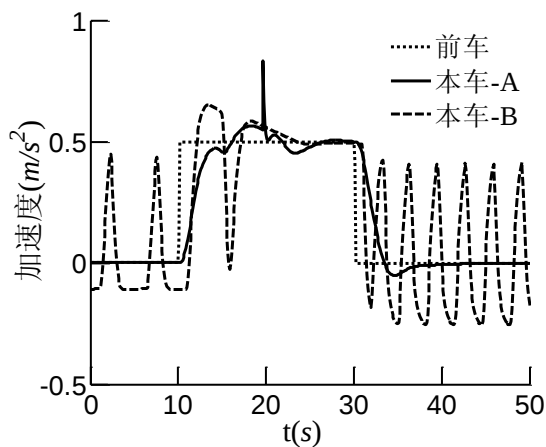


图 1(c) 加速度

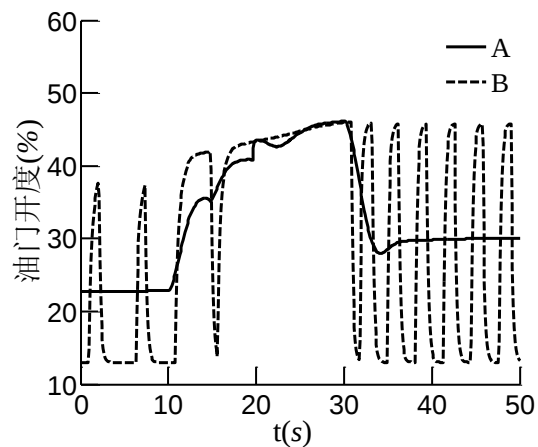


图 1(d) 本车油门开度

图 1(a)、(b)、(c)中实线、虚线分别表示 A 和 B 控制器作用下的系统输出，图 1(d)中实线、虚线分别表示对应的油门开度。该仿真共包括三个过程。从 0 秒到 10 秒，前车以 11m/s 匀速行驶，本车加速度为零，以期车距跟踪前车行驶。从 10 秒到 30 秒，前车为 0.5m/s^2 的定加速过程。由图 1(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，文中设计的控制器不能立即跟踪前车加速度，随着车距误差和车速误差的增加，油门开度变大，加速度误差很快收敛。此时，由图 1(a) (b) 知，车距误差和车速误差不能为零，位于平衡点附近的某区域内。从 30 秒到 50 秒，前车恢复匀速行驶，在跟车控制器的作用下，车距误差和车速误差重新收敛为零。整个过程中，油门开度曲线光滑，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 秒处，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输入，该尖峰对油门开度的影响很小，而且随着档位固定，换挡过程造成的加速度误差可快速收敛至零，对车距误差和车速误差几乎无影响。

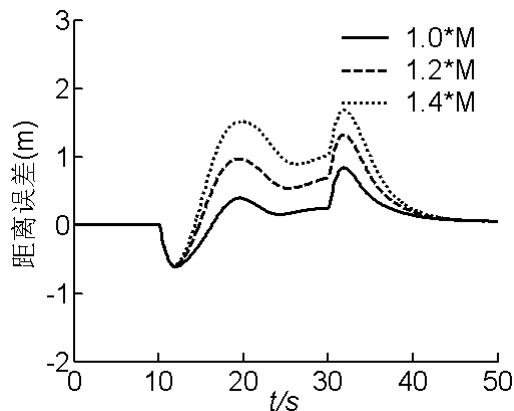


图 2 (a) 车距误差曲线

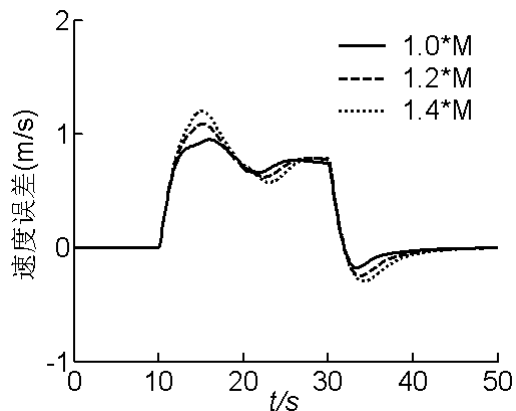


图 2 (b) 车速误差曲线

为分析车辆动力学建模误差对控制性能的影响,调整整车质量分别为公称参数的 1.0 倍、1.2 倍和 1.4 倍,在相同前车加速工况下分别进行仿真。仿真结果如图 2 所示,其中实线、虚线和点线分别为 1.0 倍、1.2 倍和 1.4 倍公称质量的误差曲线。由图 2(a)车距误差曲线知,当整车质量与公称质量相同时,车距误差最小,随着整车质量的增大,车距误差有所增加,但其绝对值不大于 2m,满足普通驾驶员对跟踪性能要求。由图 2(b)车速误差曲线知,整车质量变化对车速误差的影响较小,其绝对值基本小于 1m/s,也满足普通驾驶员对跟踪性能的要求。

综上所述,基于非奇异快速终端滑模控制方法的跟车控制器满足最少传感器系统的要求,从图 1、图 2 的仿真结果看,该控制器输出的油门开度光滑无抖振,可使车辆加速度快速跟踪前车加速度,保证本车按照期望车距平稳跟随前车行驶。当整车质量变化和前车加速度干扰有界时,车距误差和车速误差保持在平衡点附近的区域,满足普通驾驶员对跟踪性能的要求,这表明该控制系统具备较好鲁棒性。

5 结论

为解决最少传感器跟车系统的收敛缓慢、被控系统鲁棒性弱的问题,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终端滑模控制方法,并将其应用于最少传感器的跟车控制中。对跟车控制系统的理论分析和仿真试验表明:

(1) 文中提出的非奇异快速 TSM 具备有限时间收敛特性,且在远离平衡点区域比非奇异 TSM 具有更快的收敛速度;基于非奇异快速 TSM 和带负指数项的终端吸引子的控制律不仅无状态负指数项,完全消除 TSM 控制的奇异问题,而且时间连续,避免了控制系统的抖振问题。

(2) 基于非奇异快速终端滑模控制方法的跟车控制器满足最少传感器系统的要求,可使车辆加速度快速跟踪前车加速度,保证车距误差和车速误差满足普通驾驶员对跟踪性能的要求,且当整车质量和前车加速度等不确定性有界时,跟踪误差可到达平衡点附近的区域,具备较好的鲁棒性。

参考文献

- [1] S.B. Choi, J.K. Hedrick. Vehicle Longitudinal Control using an Adaptive Observer for Automated Highway Systems. Proc. American Control Conference, WA, 1995.
- [2] K. Yi, I. Moon, Y. D. Kwon. A Vehicle-to-Vehicle Distance Control Algorithm for Stop-and-Go Cruise Control. 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Preceedings, CA, USA, 2001.
- [3] A. Ferrara, P. Pisù. Minimum Sensor Second-Order Sliding Mode Longitudinal Control of Passenger Vehicles. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol.5, No. 1, 2004.
- [4] S.T.Venkataraman, S.Gulati. Terminal sliding modes: A new approach to nonlinear control synthesis[J]. Fifth International Conference on Advanced Robotics, 1991: 443-448.
- [5] 庄开宇,张克勤 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.
- [6] Man Zhihong, Xing Huo Yu. Terminal sliding mode control of MIMO linear systems[J]. Proceedings of the 35th Conference on Decision and Control, Japan, 1996: 4619-4624.
- [7] Xinghuo Yu, Man Zhihong, Yuqiang Wu. Terminal Sliding Modes with Fast Transient Performance[J]. Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control, California USA, 1997: 962-963.
- [8] Shuanghe Yu, Xinghuo Yu. Robust Global Terminal Sliding Mode Control of SISO Nonlinear Uncertain Systems[J]. Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Australia, 2000: 2198-2203.
- [9] 冯勇, 鲍晟, 余星火.非奇异终端滑模控制系统的设计方法.控制与决策[J], 2002, 17(2): 194-198.
- [10] Yong Feng, Xinghuo Yu, Zhihong Man. Non-singular terminal sliding mode control and its application for robot manipulators. IEEE International Symposium on Circuits and System, 2001: 545~548.
- [11] 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.
- [12] 侯德藻, 高峰, 李克强, 连小珉. 应用于汽车主动碰撞系统的车辆纵向动力学模型. 清华大学学报(自然科学版), Vol.44, No.2, 2004.
- [13] 李升波, 李克强, 王建强, 高峰. 非奇异快速的终端滑模控制方法. 信息与控制.(录用号: 08-0088)