

智能交通系统车道保持纵横向耦合控制

任殿波¹, 张京明¹, 崔胜民¹, 张继业²

(1. 哈尔滨工业大学(威海)汽车工程学院, 山东 威海 264209; 2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室, 四川 成都 610031)

摘要: 考虑车辆纵横向运动之间的相互影响, 采用位置预瞄和固定车辆间距跟随策略, 对基于一列车队的自动化公路系统车道保持纵横向耦合控制进行了研究. 利用车载前后双位置传感器检测车辆位置偏差, 基于车辆纵横向动力学耦合模型, 推导了基于预瞄的车道保持控制系统数学模型; 采用非奇异的终端滑模控制技术, 设计了车道保持纵横向耦合控制规律. 通过构造李雅普诺夫函数, 结合相平面方法, 分析了控制系统的有限时间收敛性. 采用6车辆编队, 通过计算机仿真, 对文中设计的控制规律进行了验证. 仿真结果显示, 车队中每个被控车辆在纵向上跟随期望状态的同时能够实现期望车道轨迹的理想跟踪, 跟踪误差精度不超过0.05 m.

关键词: 自动化公路系统; 车道保持; 车辆跟随; 终端滑模

中图分类号: TP461.2 **文献标识码:** A

Coupled longitudinal and lateral control for lane keeping in intelligent transportation systems

REN Dian-bo¹, ZHANG Jing-ming¹, CUI Sheng-min¹, ZHANG Ji-ye²

(1. School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai Shandong 264209, China;
2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: Considering the coupling effects between the longitudinal vehicle dynamics and the lateral vehicle dynamics, based on the look-ahead scheme and the constant spacing vehicle following policy, we study the problem of integrated longitudinal and lateral control for lane keeping of vehicles platoon in automated highway systems. Assuming that the lateral displacement offset can be measured with two sensors located at the front bumper and tail bumper, from the coupled longitudinal and lateral dynamic model of vehicle, the look-ahead control system model of vehicles platoon for lane keeping is derived. By applying nonsingular terminal sliding mode technology, the integrated longitudinal and lateral control law for lane keeping is designed. Based on Lyapunov function method, the finite-time convergence property of the system is obtained from the phase-plane analysis. A platoon of six vehicles is used to test the performance of the proposed control law by computer simulation. Simulation results illustrate good track performance for lane keeping and longitudinal following of vehicles in a platoon, and the lateral tracking error is not more than 0.05 m.

Key words: automated highway systems; lane keeping; vehicle following; terminal sliding mode

1 引言(Introduction)

自动化公路系统(automated highway systems, 简称AHS)^[1]是智能交通系统的子系统之一, 该系统旨在实现车辆自动导航与控制、交通管理以及事故处理的自动化, 提高整个公路系统的安全性和运行效率. 车辆自动控制是自动化公路系统的重要研究内容, 包括对车辆的纵向和横向控制^[2], 主要涉及车辆跟随、车道保持和车辆换道等内容. 目前关于车辆自动控制的研究, 主要是通过设计两个独立的控制系统分别实现对车辆的纵向和横向控制, 如文献[3]研

究车辆纵向上的跟随控制, 文献[4]和[5]分别研究车辆在横向上的车道保持和车辆换道控制. 由于车辆纵向运动和横向运动是相互耦合的^[6], 单独研究车辆纵向、横向控制将导致控制误差偏大, 影响对车辆的控制精度, 不利于行车安全, 在车辆控制系统的设计中, 应该针对车辆纵向运动和横向运动的相互影响, 综合考虑耦合的补偿效应. 文献[7]建立了简化的车辆纵横向耦合模型, 采用二阶滑模控制方法, 设计了车辆纵横向耦合跟随控制器; 文献[8]考虑了系统参数的不确定性, 利用自适应控制方法, 设计了

收稿日期: 2009-11-30; 收修修改稿日期: 2010-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10772152); 山东省自然科学基金资助项目(ZR2010FM008); 哈尔滨工业大学(威海)校科学研究基金资助项目(HIT(WH)XB200903).

车辆纵横向耦合控制器以及控制参数的自适应律;文献[9]基于神经网络方法研究车辆的纵横向控制;文献[10]建立了以车辆纵向速度、横向速度、横摆角速度为状态变量的车辆纵横向耦合动力学模型,采用滑模控制、动态表面控制方法研究车辆跟随和车道保持耦合控制,误差控制精度相对于解耦的情况有明显提高.因为在自动化公路系统中,车辆组队行驶是减小车辆间距,增加公路容量,提高交通效率的有效途径,而上述文献只是基于单个车辆设计控制规律,本文针对一列车队,研究车辆跟随与车道保持的耦合控制,控制律的设计不但保证对每个车辆的控制是稳定的,还要确保车队运行的整体稳定性(string stability)^[11],综合考虑车辆纵横向运动之间的相互影响,利用非奇异终端滑模控制技术^[12~14],设计车辆纵横向耦合滑模控制规律,并通过仿真对文中结果进行验证.

2 控制系统模型(Control system model)

车队中第*i*个车辆纵横向耦合动力学方程可表示为^[15]:

$$\dot{v}_{ix} = \frac{(f_R c_z - c_x) v_{ix}^2}{m_i} - f_R g + v_{iy} \dot{\psi}_i + 2C_{if} \frac{v_{iy} + l_{if} \dot{\psi}_i}{m_i v_{ix}} \delta_i + \frac{F_{ix}}{m_i}, \quad (1)$$

$$\dot{v}_{iy} = -\frac{2(C_{if} + C_{ir})}{m_i v_{ix}} v_{iy} - \left[\frac{2(C_{if} l_{if} - C_{ir} l_{ir})}{m_i v_{ix}} + v_{ix} \right] \dot{\psi}_i + \frac{2C_{if} + \lambda_i F_{ix}}{m_i} \delta_i, \quad (2)$$

$$\ddot{\psi}_i = -\frac{2(C_{if} l_{if}^2 + C_{ir} l_{ir}^2)}{I_{iz} v_{ix}} \dot{\psi}_i - \frac{2(C_{if} l_{if} - C_{ir} l_{ir})}{I_{iz} v_{ix}} v_{iy} + \frac{2C_{if} l_{if} + \lambda_i F_{ix} l_{if}}{I_{iz}} \delta_i. \quad (3)$$

其中: v_{ix} , v_{iy} , $\dot{\psi}_i$ 分别表示第*i*个车辆的纵向速度、横向速度和横摆角速度, $i = 1, 2, \dots, n$, n 为车辆个数; m_i 表示车辆质量, I_{iz} 表示车辆绕垂直轴转动惯量, l_{if} 和 l_{ir} 分别表示质心到前轴的距离和质心到后轴的距离, C_{if} 和 C_{ir} 分别表示前后轮胎的侧偏刚度; δ_i 表示前轮转向角, F_{ix} 表示牵引/制动力作用力; f_R 表示滚动阻力系数, c_x 和 c_z 分别表示空气纵向阻力系数和垂向升力系数; $\lambda_i = l_{ir}/(l_{if} + l_{ir})$.

取输入变换

$$\begin{cases} u_{i1} = -f_R g + 2C_{if} \frac{v_{iy} + l_{if} \dot{\psi}_i}{m_i v_{ix}} \delta_i + \frac{F_{ix}}{m_i}, \\ u_{i2} = \frac{2C_{if} + \lambda_i F_{ix}}{m_i} \delta_i. \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)(2)和(3)得到

$$\dot{v}_{ix} = a_{i1} v_{ix}^2 + v_{iy} \dot{\psi}_i + u_{i1}, \quad (5)$$

$$\dot{v}_{iy} = -\frac{a_{i2}}{v_{ix}} v_{iy} - \left(v_{ix} + \frac{\kappa a_{i3}}{v_{ix}} \right) \dot{\psi}_i + u_{i2}, \quad (6)$$

$$\ddot{\psi}_i = -\frac{a_{i4}}{v_{ix}} \dot{\psi}_i - \frac{a_{i3}}{v_{ix}} v_{iy} + \frac{l_{if}}{\kappa} u_{i2}, \quad (7)$$

其中:

$$\begin{aligned} a_{i1} &= \frac{f_R c_z - c_x}{m_i}, a_{i2} = \frac{2(C_{if} + C_{ir})}{m_i}, \\ a_{i3} &= \frac{2(C_{if} l_{if} - C_{ir} l_{ir})}{I_{iz}}, a_{i4} = \frac{2(C_{if} l_{if}^2 + C_{ir} l_{ir}^2)}{I_{iz}}, \\ \kappa &= \frac{I_{iz}}{m_i}. \end{aligned}$$

纵向上采用固定期望间距跟随策略,车间距误差定义为

$$\varepsilon_i = x_i - x_{i-1} + L_i, i = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

其中: L_i 是第*i*辆车与第*i*-1辆车之间的固定期望间距, x_i , x_{i-1} 分别为第*i*辆车与第*i*-1辆车的纵向位移.假设被控车辆依靠车间通信能获知前面车辆和领头车辆的状态信息.车间距误差随时间变化率为

$$\dot{\varepsilon}_i = v_{ix} - v_{i-1,x}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

横向上,基于车载前后位置传感器,检测与车道中心线的偏离,如图1所示.

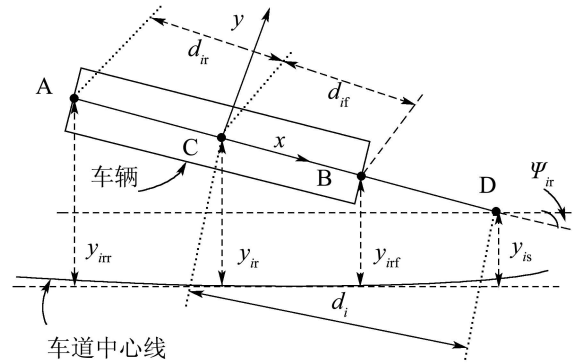


图1 横向位置与横摆角偏差计算示意图

Fig. 1 Measuring of lateral offset and relative yaw angle

图中: A和B分别表示在车辆后保险杠和前保险杠上安装的位置传感器, C表示车辆质心所在位置, D为预瞄点, d_i 表示预瞄距离,即预瞄点到车辆质心的距离, d_{if} 和 d_{ir} 分别表示前后两个传感器到车辆质心的距离, y_{ir} 和 y_{ir} 分别表示车辆前后端横向位置偏差, y_{ir} 和 y_{is} 分别表示车辆质心和预瞄点相对车道中心线的横向位置偏差, ψ_{ir} 表示第*i*辆车纵轴相对与车道中心线切线的方向偏差,即 $\psi_{ir} = \psi_i - \psi_{id}$. 横向位置偏差 $y_{is} = y_{ir} + d_i \sin \psi_{ir}$, 求导得到

$$\begin{aligned} \dot{y}_{is} &= \dot{y}_{ir} + d_i \dot{\psi}_{ir} \cos \psi_{ir} = \\ &v_{iy} \cos \psi_{ir} + v_{ix} \sin \psi_{ir} + d_i \dot{\psi}_{ir} \cos \psi_{ir}. \end{aligned}$$

当 ψ_{ir} 为小角度时,有

$$\dot{y}_{is} = v_{iy} + v_{ix}\psi_{ir} + d_i\dot{\psi}_{ir}. \quad (10)$$

其中

$$\dot{\psi}_{ir} = \dot{\psi}_i - \dot{\psi}_{id}. \quad (11)$$

根据图1,用于反馈的车辆横向位置偏差 y_{is} 、横摆角偏差 ψ_{ir} 可由下式进行计算:

$$y_{is} = \frac{(d_i + d_{ir})y_{irf} + (d_{if} - d_i)y_{irr}}{d_{if} + d_{ir}}, \quad (12)$$

$$\psi_{ir} = \arcsin \frac{y_{irf} - y_{irr}}{d_{if} + d_{ir}}. \quad (13)$$

期望横摆角速度 $\dot{\psi}_{id}$ 与车辆纵向速度和路径曲率 χ 有关,可由下式确定:

$$\dot{\psi}_{id} = v_{ix}\chi. \quad (14)$$

由式(9)~(11)求得

$$\begin{aligned} \ddot{\varepsilon}_i &= \dot{v}_{ix} - \dot{v}_{i-1,x} = \\ &a_{i1}v_{ix}^2 + v_{iy}\dot{\psi}_i - \dot{v}_{i-1,x} + u_{i1}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y}_{is} &= \dot{v}_{iy} + \dot{v}_{ix}\psi_{ir} + v_{ix}\dot{\psi}_{ir} + d_i\ddot{\psi}_{ir} = \\ &[-\frac{a_{i2}}{v_{ix}}v_{iy} - (v_{ix} + \frac{\kappa a_{i3}}{v_{ix}})\dot{\psi}_i + u_{i2}] + \\ &\dot{v}_{ix}\psi_{ir} + v_{ix}\dot{\psi}_{ir} + \\ &d_i[-\frac{a_{i4}}{v_{ix}}\dot{\psi}_i - \frac{a_{i3}}{v_{ix}}v_{iy} - \ddot{\psi}_{id} + \frac{l_{if}}{\kappa}u_{i2}] = \\ &-\frac{a_{i2} + d_i a_{i3}}{v_{ix}}v_{iy} - \frac{\kappa a_{i3} + d_i a_{i4}}{v_{ix}}\dot{\psi}_i + \\ &\dot{v}_{ix}\psi_{ir} - v_{ix}\dot{\psi}_{id} - d_i\ddot{\psi}_{id} + (1 + \frac{d_i l_{if}}{\kappa})u_{i2}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \ddot{\psi}_{ir} &= \ddot{\psi}_i - \ddot{\psi}_{id} = \\ &-\frac{a_{i4}}{v_{ix}}\dot{\psi}_i - \frac{a_{i3}}{v_{ix}}v_{iy} - \ddot{\psi}_{id} + \frac{l_{if}}{\kappa}u_{i2}. \end{aligned} \quad (17)$$

3 控制律设计(Design of control law)

定义

$$e_i = \xi_1 \varepsilon_i + \xi_2 (x_i - x_0 + \sum_{j=1}^i L_j). \quad (18)$$

其中 $\xi_1 > 0, \xi_2 > 0, i = 1, 2, \dots, n$. 对式(18)求导,联系式(15)得到

$$\begin{cases} \dot{e}_i = \xi_1 \dot{\varepsilon}_i + \xi_2 (v_{ix} - v_{0x}), \\ \ddot{e}_i = (\xi_1 + \xi_2)(a_{i1}v_{ix}^2 + v_{iy}\dot{\psi}_i + u_{i1}) - \\ \xi_1 \dot{v}_{i-1,x} - \xi_2 \dot{v}_{0x}. \end{cases} \quad (19)$$

采用非奇异终端滑模控制方法,设计切换函数

$$s_{i1} = e_i + \alpha \dot{e}_i^{p_1/q_1}, i = 1, 2, \dots, n, \quad (20)$$

$$s_{i2} = y_{is} + \beta \dot{y}_{is}^{p_2/q_2}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (21)$$

其中: $\alpha > 0, \beta > 0; p_1, q_1$ 和 p_2, q_2 为正奇数,且 $1 <$

$p_1/q_1 < 2, 1 < p_2/q_2 < 2$. 对式(20)求导,把式(19)代入,得到

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i1} &= \dot{e}_i + \alpha \frac{p_1}{q_1} \dot{e}_i^{p_1/q_1 - 1} \ddot{e}_i = \\ &\dot{e}_i + \alpha \frac{p_1}{q_1} \dot{e}_i^{p_1/q_1 - 1} [(\xi_1 + \xi_2)(a_{i1}v_{ix}^2 + \\ &v_{iy}\dot{\psi}_i + u_{i1}) - \xi_1 \dot{v}_{i-1,x} - \xi_2 \dot{v}_{0x}]. \end{aligned} \quad (22)$$

由 $\dot{s}_{i1} = 0$,得等效控制

$$\begin{aligned} u_{i1.equ} &= -a_{i1}v_{ix}^2 - v_{iy}\dot{\psi}_i + (\xi_1 + \xi_2)^{-1} \\ &[-\frac{q_1}{\alpha p_1} \dot{e}_i^{2-p_1/q_1} + \xi_1 \dot{v}_{i-1,x} + \xi_2 \dot{v}_{0x}]. \end{aligned} \quad (23)$$

参考文献[16]的做法,取滑模趋近律

$$\dot{s}_{i1} = -(\rho_1 s_{i1} + \varphi_1 s_{i1}^{k_1/l_1}) \dot{e}_i^{p_1/q_1 - 1}, \quad (24)$$

其中: $\rho_1 > 0, \varphi_1 > 0, k_1$ 和 l_1 为正奇数,且 $l_1 > k_1$. 设计非线性滑模控制

$$u_{i1.N} = -\frac{q_1(\xi_1 + \xi_2)^{-1}}{\alpha p_1} (\rho_1 s_{i1} + \varphi_1 s_{i1}^{k_1/l_1}). \quad (25)$$

取纵向控制

$$u_{i1} = u_{i1.equ} + u_{i1.N}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (26)$$

对式(21)求导,把式(16)代入,得到

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i2} &= \dot{y}_{is} + \beta \frac{p_2}{q_2} \dot{y}_{is}^{p_2/q_2 - 1} \ddot{y}_{is} = \\ &\dot{y}_{is} + \beta \frac{p_2}{q_2} \dot{y}_{is}^{p_2/q_2 - 1} [-\frac{a_{i2} + d_i a_{i3}}{v_{ix}}v_{iy} - \\ &\frac{\kappa a_{i3} + d_i a_{i4}}{v_{ix}}\dot{\psi}_i + \dot{v}_{ix}\psi_{ir} - v_{ix}\dot{\psi}_{id} - \\ &d_i\ddot{\psi}_{id} + (1 + \frac{d_i l_{if}}{\kappa})u_{i2}]. \end{aligned} \quad (27)$$

由式(5)(26),并联系式(23)(25)得到

$$\begin{aligned} \dot{v}_{ix} &= (\xi_1 + \xi_2)^{-1} [-\frac{q_1}{\alpha p_1} (\dot{e}_i^{2-p_1/q_1} + \rho_1 s_{i1} + \\ &\varphi_1 s_{i1}^{k_1/l_1}) + \xi_1 \dot{v}_{i-1,x} + \xi_2 \dot{v}_{0x}]. \end{aligned} \quad (28)$$

把式(28)代入式(27),得到

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i2} &= \dot{y}_{is} + \beta \frac{p_2}{q_2} \dot{y}_{is}^{p_2/q_2 - 1} \{-\frac{a_{i2} + d_i a_{i3}}{v_{ix}}v_{iy} - \\ &\frac{\kappa a_{i3} + d_i a_{i4}}{v_{ix}}\dot{\psi}_i - v_{ix}\dot{\psi}_{id} - d_i\ddot{\psi}_{id} + \\ &(\xi_1 + \xi_2)^{-1} [-\frac{q_1}{\alpha p_1} (\dot{e}_i^{2-p_1/q_1} + \\ &\rho_1 s_{i1} + \varphi_1 s_{i1}^{k_1/l_1}) + \xi_1 \dot{v}_{i-1,x} + \\ &\xi_2 \dot{v}_{0x}]\psi_{ir} + (1 + \frac{d_i l_{if}}{\kappa})u_{i2}\}. \end{aligned} \quad (29)$$

由 $\dot{s}_{i2} = 0$,得等效控制

$$u_{i2.equ} = (1 + \frac{d_i l_{if}}{\kappa})^{-1} \{-\frac{q_2}{\beta p_2} \dot{y}_{is}^{2-p_2/q_2} +$$

$$\begin{aligned} & \frac{a_{i2} + d_i a_{i3}}{v_{ix}} v_{iy} + \frac{\kappa a_{i3} + d_i a_{i4}}{v_{ix}} \dot{\psi}_i - \\ & (\xi_1 + \xi_2)^{-1} \left[-\frac{q_1}{\alpha p_1} (\dot{e}_i^{2-p_1/q_1} + \right. \\ & \left. \rho_1 s_{i1} + \varphi_1 s_{i1}^{k_1/l_1}) + \xi_1 \dot{v}_{i-1,x} + \right. \\ & \left. \xi_2 \dot{v}_{0x} \right] \psi_{ir} + v_{ix} \dot{\psi}_{id} + d_i \ddot{\psi}_{id}. \end{aligned} \quad (30)$$

采用滑模趋近律

$$\dot{s}_{i2} = -(\rho_2 s_{i2} + \varphi_2 s_{i2}^{k_2/l_2}) \dot{y}_{is}^{p_2/q_2-1}. \quad (31)$$

设计非线性滑模控制

$$u_{i2-N} = -\frac{q_2}{\beta p_2} \left(1 + \frac{d_i l_{if} m_i}{I_{iz}} \right)^{-1} (\rho_2 s_{i2} + \varphi_2 s_{i2}^{k_2/l_2}). \quad (32)$$

其中: $\rho_2 > 0, \varphi_2 > 0, k_2$ 和 l_2 为正奇数, 且 $l_2 > k_2$. 取横向控制

$$u_{i2} = u_{i2-equ} + u_{i2-N}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (33)$$

根据式(4)可计算出相应的控制量 F_{ix}, δ_i :

$$\begin{cases} F_{ix} = m_i u_{i1} + m_i f_{Rg} - 2C_{if} \frac{v_{iy} + l_{if} \dot{\psi}_i}{v_{ix}} \delta_i, \\ \delta_i = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \end{cases} \quad (34)$$

其中:

$$\begin{aligned} a &= 2C_{if} \frac{v_{iy} + l_{if} \dot{\psi}_i}{m_i v_{ix}}, \\ b &= -(u_{i1} + f_{Rg} + \frac{2C_{if}}{m_i \lambda_i}), c = \frac{u_{i2}}{\lambda_i}. \end{aligned}$$

4 稳定性分析(Stability analysis)

4.1 滑动模态可达性(Sliding mode accessibility)

取Lyapunov函数 $V_{i1} = \frac{1}{2} s_{i1}^2$, 沿式(22)求导, 把式(26)代入, 考虑其分项形式(23)(25), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i1} &= s_{i1} \dot{s}_{i1} = \\ & s_{i1} \{ \dot{e}_i + \alpha \frac{p_1}{q_1} \dot{e}_i^{p_1/q_1-1} [(\xi_1 + \xi_2)(a_{i1} v_{ix}^2 + \\ & v_{iy} \dot{\psi}_i + u_{i1}) - \xi_1 \dot{v}_{i-1,x} - \xi_2 \dot{v}_{0x}] - \\ & -(\rho_1 s_{i1}^2 + \varphi_1 s_{i1}^{1+k_1/l_1}) \dot{e}_i^{p_1/q_1-1} \}. \end{aligned} \quad (35)$$

当 $s_{i1} \neq 0, \dot{e}_i \neq 0$ 时, 有 $\dot{V}_{i1} < 0$, 说明 s_{i1} 在 $\dot{e}_i \neq 0$ 时渐近收敛. 将控制律(26)代入式(19), 得到

$$\ddot{e}_i = -\frac{q_1}{\alpha p_1} (\rho_1 s_{i1} + \varphi_1 s_{i1}^{k_1/l_1} + \dot{e}_i^{2-p_1/q_1}). \quad (36)$$

当 $\dot{e}_i = 0$ 时, $s_{i1} = e_i, \ddot{e}_i = -\frac{q_1}{\alpha p_1} (\rho_1 e_i + \varphi_1 e_i^{k_1/l_1})$, 所以有 $e_i \ddot{e}_i < 0$. 与文献[17]的分析相似,

$$U = \{(e_i, \dot{e}_i) : e_i \neq 0, \dot{e}_i = 0\}$$

不是一个吸引域, 在 $s_{i1} > 0$ 时, 由式(36), 存在正数 σ_1

和 η_1 , 使得系统在区域

$$U_1 = \{(e_i, \dot{e}_i) : e_i > 0, |\dot{e}_i| \leq \sigma_1\}$$

有 $\ddot{e}_i \leq -\eta_1$; 在 $s_{i1} < 0$ 时, 存在正数 σ_2 和 η_2 , 使得系统在区域

$$U_2 = \{(e_i, \dot{e}_i) : e_i < 0, |\dot{e}_i| \leq \sigma_2\}$$

有 $\ddot{e}_i \geq \eta_2$.

假若系统初始状态 (e_{i0}, \dot{e}_{i0}) 在 $e_i - \dot{e}_i$ 相平面区域 $s_{i1} > 0$, 不仿设在 $\{(e_i, \dot{e}_i) : e_i < 0, \dot{e}_i > 0\}$ 内. 由 $s_{i1} > 0, \dot{e}_i > 0$, 根据式(36), 推得 $\ddot{e}_i < 0$, 又根据(20), $s_{i1} = 0$ 相轨线在区域 $\{(e_i, \dot{e}_i) : e_i < 0, \dot{e}_i > 0\}$ 和区域 $\{(e_i, \dot{e}_i) : e_i > 0, \dot{e}_i < 0\}$ 内, 所以系统状态在相平面的运动轨迹有两种情况, 一是因 \dot{e}_i 沿 \dot{e}_i 轴负向运动, 在该区域直接到达滑模轨线 $s_{i1} = 0$; 二是因 e_i 沿 e_i 轴正向运动, 由该区域穿过 \dot{e}_i 正半轴, 先进入区域 $\{(e_i, \dot{e}_i) : e_i > 0, \dot{e}_i > 0\}$, 然后穿越区域 U_1 , 最后进入区域 $\{(e_i, \dot{e}_i) : e_i > 0, \dot{e}_i < 0\}$, 因为在此区域 $\dot{e}_i < 0$, 根据式(36), \ddot{e}_i 由负逐渐变为正, 又因为 e_i 沿 e_i 轴负向运动, 所以系统运动轨迹必在该区域与 $s_{i1} = 0$ 相交, 到达滑模. 系统状态向滑模趋近过程中, 穿越区域 U_1 时, 因 $\ddot{e}_i \leq -\eta_1$, 所以经过 U_1 的时间不大于 $2\sigma_1/\eta_1$. 在该区域外部, 总有 $|\dot{e}_i| > \sigma_1$, 推得 $\dot{e}_i^{p_1/q_1-1} > \sigma_1^{p_1/q_1-1}$, 由式(35), 进一步得到

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i1} &= -(\rho_1 s_{i1} + \varphi_1 s_{i1}^{k_1/l_1}) \dot{e}_i^{p_1/q_1-1} < \\ & -(\rho_1 s_{i1} + \varphi_1 s_{i1}^{k_1/l_1}) \sigma_1^{p_1/q_1-1}. \end{aligned}$$

根据文献[18], 通过分析微分方程的解, 可得到 s_{i1} 在有限时间内到达滑模. 即 $t \rightarrow \inf, s_{i1} \rightarrow 0$. 系统初始状态在 $s_{i1} < 0$ 区域时, 分析结果是一致的.

取Lyapunov函数 $V_{i2} = \frac{1}{2} s_{i2}^2$, 沿式(29)求导, 把式(33)代入, 考虑其分项形式(30)(32), 得

$$\dot{V}_{i2} = s_{i2} \dot{s}_{i2} = -(\rho_2 s_{i2}^2 + \varphi_2 s_{i2}^{1+k_2/l_2}) \dot{y}_{is}^{p_2/q_2-1}.$$

当 $s_{i2} \neq 0, \dot{y}_{is} \neq 0$ 时, 有 $\dot{V}_{i2} < 0$, 说明 s_{i2} 渐近收敛. 将控制律(33)代入式(16), 得到

$$\dot{y}_{is} = -\frac{q_2}{\beta p_2} (\rho_2 s_{i2} + \varphi_2 s_{i2}^{k_2/l_2} + \dot{y}_{is}^{2-p_2/q_2}).$$

和前面分析方法类似, 系统状态只在有限时间内经过区域

$$\{(y_{is}, \dot{y}_{is}) : y_{is} \neq 0, |\dot{y}_{is}| \leq \sigma\},$$

在该区域外部, 总有 $|\dot{y}_{is}| > \sigma$, 推得

$$\begin{aligned} \dot{s}_{i2} &= -(\rho_2 s_{i2} + \varphi_2 s_{i2}^{k_2/l_2}) \dot{y}_{is}^{p_2/q_2-1} < \\ & -(\rho_2 s_{i2} + \varphi_2 s_{i2}^{k_2/l_2}) \sigma^{p_2/q_2-1}. \end{aligned}$$

同理, 可得到 s_{i2} 在有限时间内到达滑模, 即 $t \rightarrow \inf, s_{i2} \rightarrow 0$.

4.2 滑模运动稳定性(Stability of system in sliding mode)

在滑动模态, 根据式(20)(21), 由 $s_{i1} = 0, s_{i2} = 0$, 得到

$$\begin{aligned} e_i + \alpha \dot{e}_i^{p_1/q_1} &= 0, i = 1, 2, \dots, n, \\ y_{is} + \beta \dot{y}_{is}^{p_2/q_2} &= 0, i = 1, 2, \dots, n. \end{aligned}$$

因为 p_1, q_1, p_2, q_2 为正奇数, 所以

$$\begin{cases} \dot{e}_i = -\alpha^{-q_1/p_1} e_i^{q_1/p_1}, \\ \dot{y}_{is}^{p_2/q_2} = -\beta^{-q_2/p_2} y_{is}^{q_2/p_2}. \end{cases} \quad (37)$$

由 $\alpha > 0, \beta > 0, q_1/p_1 < 1, q_2/p_2 < 1$, 通过分析微分方程(37)的解^[17], 可知, 在滑动模态, e_i, y_{is} 在有限时间内收敛到0.

根据式(18), 由 $e_i = 0, e_{i-1} = 0$, 得到

$$\begin{aligned} \xi_1 \varepsilon_i + \xi_2 (x_i - x_0 + \sum_{j=1}^i L_j) &= 0, \\ \xi_1 \varepsilon_{i-1} + \xi_2 (x_{i-1} - x_0 + \sum_{j=1}^{i-1} L_j) &= 0. \end{aligned}$$

上面两式相减, 得到

$$(\xi_1 + \xi_2) \varepsilon_i = \xi_1 \varepsilon_{i-1}, i = 2, 3, \dots, n.$$

因为定义 $\xi_1 > 0, \xi_2 > 0$, 由上式得到

$$\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_{i-1}} = \frac{\xi_1}{\xi_1 + \xi_2} < 1, i = 2, 3, \dots, n.$$

再由 $e_1 = (\xi_1 + \xi_2) \varepsilon_1 = 0$, 得到 $\varepsilon_1 = 0$, 根据上式, 可进一步推得, $\varepsilon_i = 0, i = 2, 3, \dots, n$.

上面的研究中假定车辆状态能够准确测到, 但车辆状态有时不易测到或测量不准确, 文献[15]基于车辆纵横向耦合动力学模型, 研究了车辆状态观测器的设计.

5 仿真研究(Simulation)

仿真采用的车辆队列, 有6个车辆组成, 包括一个领头车辆和五个被控制车辆, 即跟随车辆. 五个被控车辆参数均不相同, 基于质量2000 kg左右的小型车辆选择, 车辆轮胎侧偏刚度一般在40000~85000 N/rad. 车辆质量 m 、绕垂直轴转动惯量 I_z 、质心到前轴距离 l_f 、质心到后轴距离 l_r 、前轮胎侧偏刚度 C_f 、后轮胎侧偏刚度 C_r 的取值见表1; 车辆纵向位置 x 、纵向速度 v_x 、横向位置偏差 y_s 、横向速度 v_y 、横摆角偏差 ψ_r 、横摆角速度 $\dot{\psi}$ 、车间距误差 ε_i 初值见表2; 各车辆纵向、横向加速度及横摆角加速度初值均为0; 期望车间距 $L_i = 15 \text{ m}, i = 1, 2, \dots, 5$; 滚动阻力系数 f_R 为0.02; 空气纵向阻力系数 $c_x = 0.4 \text{ N s}^2/\text{m}^2$; 垂向升力系数 $c_z = 0.005 \text{ N s}^2/\text{m}^2$, 重力加速度 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; 对5个跟随车辆采用相同的控

制规律, 由式(26) (33)计算控制量, 控制参数取值见表3、表4.

表 1 车辆模型参数

Table 1 Vehicle parameters

i	$m/$ kg	$I_z/$ (kg·m ²)	$l_f/$ m	$l_r/$ m	$C_f/$ (kN·rad ⁻¹)	$C_r/$ (kN·rad ⁻¹)
1	2000	3150	1.33	1.26	80	80
2	1800	3050	1.3	1.2	60	70
3	1850	2920	1.2	1.3	65	65
4	1900	3120	1.3	1.4	70	75
5	2100	3250	1.4	1.3	70	80

表 2 车辆状态初值

Table 2 Initial values of vehicle states

i	$x/$ m	$v_x/$ (m·s ⁻¹)	$y_s/$ m	$v_y/$ (m·s ⁻¹)	$\psi_r/$ rad	$\dot{\psi}/$ (rad·s ⁻¹)	$\varepsilon_i/$ m
0	128	25	—	—	—	—	—
1	114	25.5	0.2	0	0	0	1
2	99.5	24.8	0.1	0	0	0	0.5
3	85.2	24.5	0.05	0	0	0	0.7
4	70	24	-0.1	0	0	0	-0.2
5	54.5	23.5	-0.2	0	0	0	-0.5

表 3 控制参数

Table 3 Control parameters

q_1	q_2	p_1	p_2	ξ_1	ξ_2	α	β
3	3	5	5	0.5	0.5	2	2

表 4 控制参数(续表)

Table 4 Control parameters (continued)

ρ_1	φ_1	k_1	l_1	ρ_2	φ_2	k_2	l_2
0.4	1.3	3	5	2	2.5	3	5

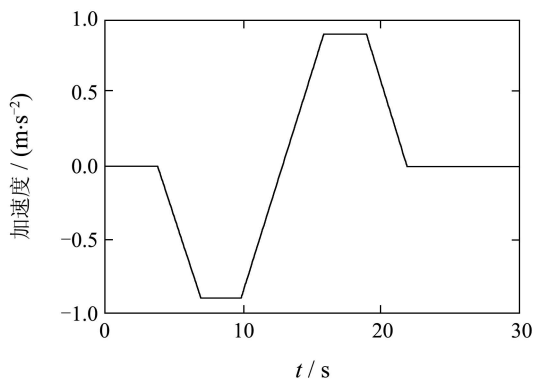
领头车辆纵向加速度 $a_{0x}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ 历时如下:

$$a_{0x} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 4, \\ -0.3(t-4), & 4 \leq t < 7, \\ -0.9, & 7 \leq t < 10, \\ 0.3(t-10)-0.9, & 10 \leq t < 16, \\ 0.9, & 16 \leq t < 19, \\ 0.3(19-t)+0.9, & 19 \leq t < 22, \\ 0, & 22 \leq t \leq 30. \end{cases}$$

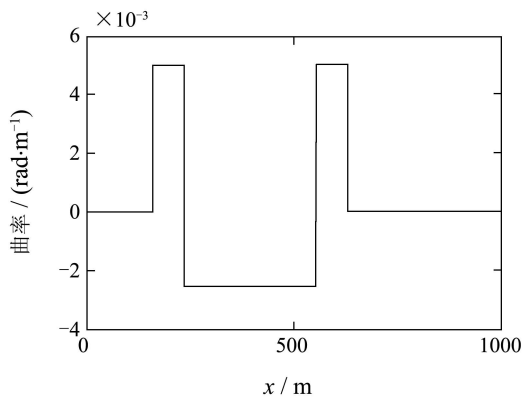
路径曲率 $\chi/(\text{rad} \cdot \text{m}^{-1})$ 随纵向位移 x/m 变化为:

$$\chi = \begin{cases} 0, & 0 \leq x < 160, \\ 1/200, & 160 \leq x < 160 + 25\pi, \\ -1/400, & 160 + 25\pi \leq x < 160 + 125\pi, \\ 1/200, & 160 + 125\pi \leq x < 160 + 150\pi, \\ 0, & 160 + 150\pi \leq x \leq 1000. \end{cases}$$

仿真结果如图2至图8所示. 图2、图3显示了车辆跟踪的期望目标信息; 图4显示了车辆在纵向和横向上的位置跟踪误差; 图5至图7显示跟随车辆纵向、横向及横摆运动的状态信息; 图8显示对车辆的控制输入.

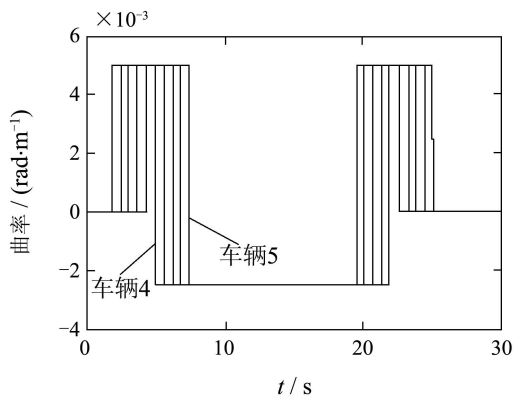


(a) 领头车辆加速度

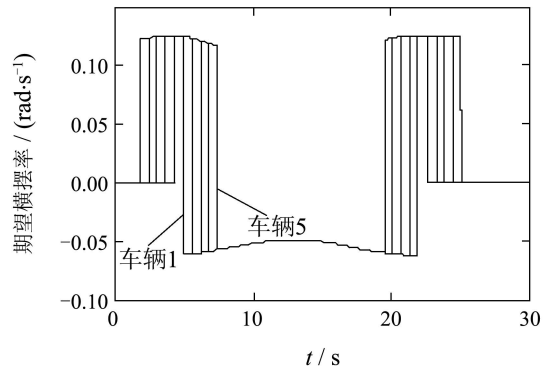


(b) 路径曲率

图2 领头车辆加速度与路径曲率
Fig. 2 Road curvtrue and lead vehicle acceleration



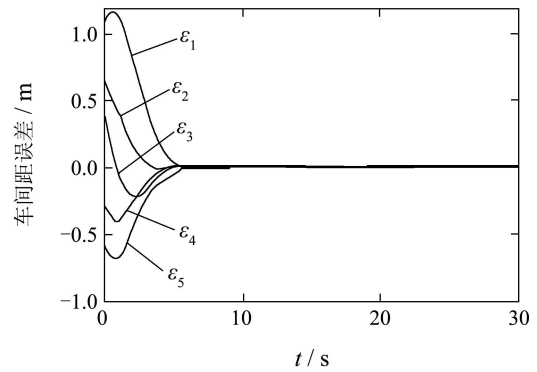
(a) 车辆期望行驶路径曲率历时



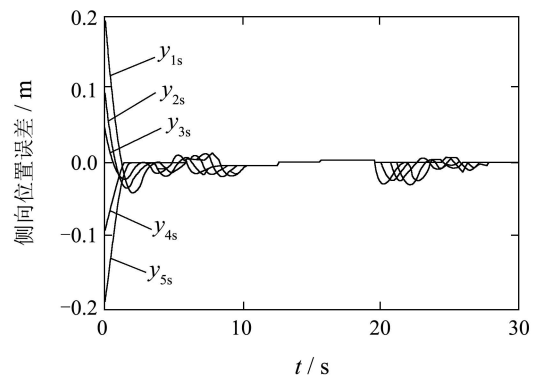
(b) 车辆期望横摆率

图3 车辆期望横摆率与行驶轨迹曲率历时

Fig. 3 Desired yaw rate and curvtrue time history



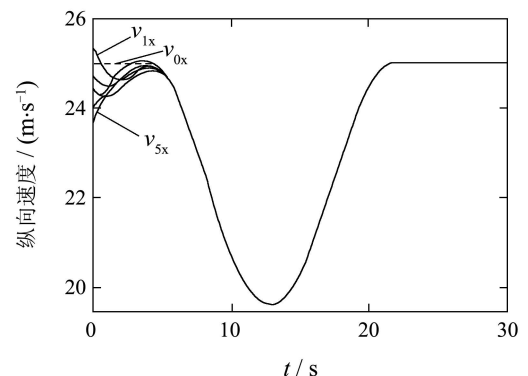
(a) 纵向跟踪误差



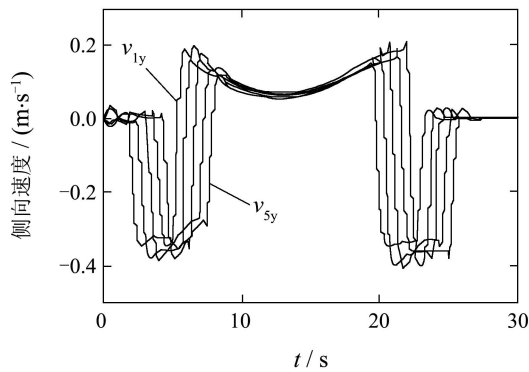
(b) 侧向跟踪误差

图4 跟踪误差

Fig. 4 Tracking error



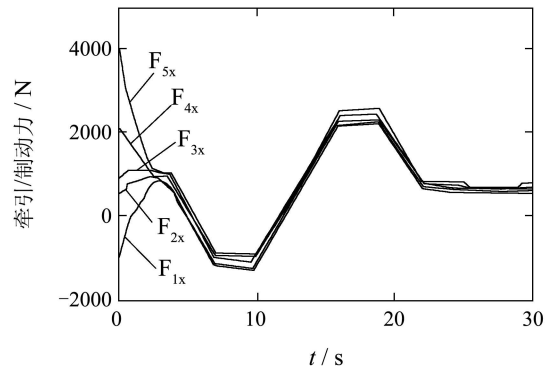
(a) 车辆纵向速度



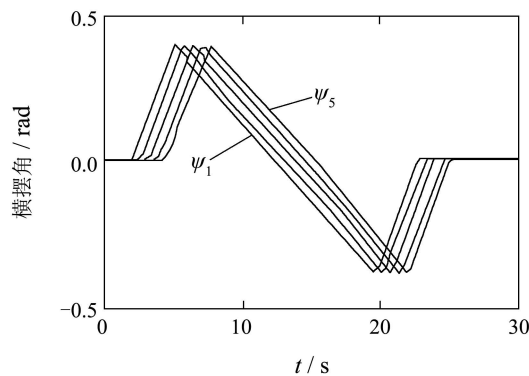
(b) 车辆侧向速度

图 5 车辆速度

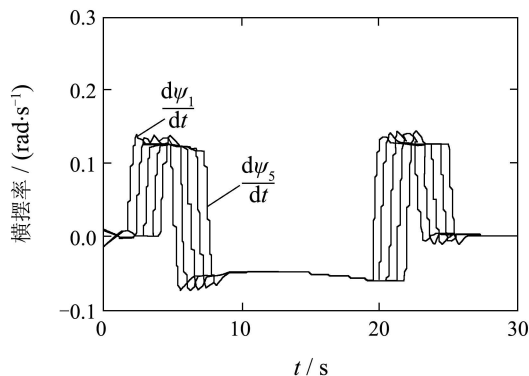
Fig. 5 Vehicle velocity



(a) 牵引/制动力作用力



(a) 车辆横摆角



(b) 车辆横摆率

图 6 车辆横摆角与横摆率

Fig. 6 Vehicle yaw angle and yaw rate

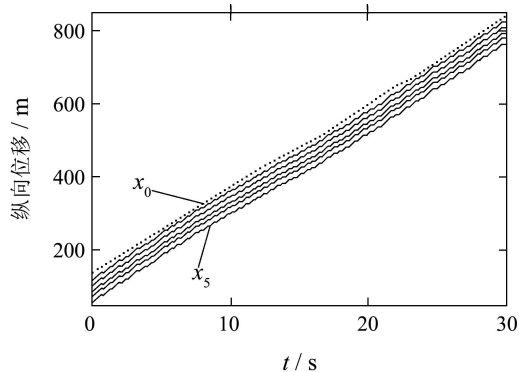
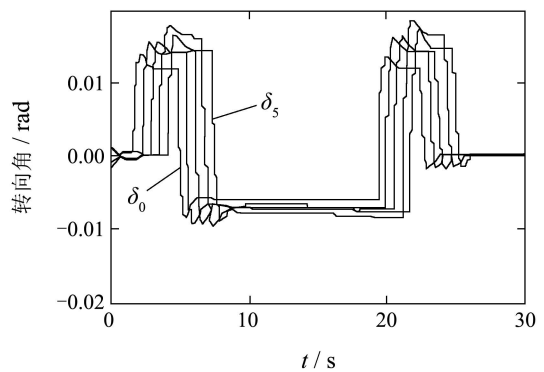


图 7 车辆纵向位置关系

Fig. 7 Longitudinal position of vehicles



(b) 前轮转向角

图 8 控制输入

Fig. 8 Control input

从图2至图8仿真结果可以看出, 5个跟随车辆的速度很快逼近领头车辆的速度, 当道路曲率发生变化时, 车辆侧向速度和横摆角速度随着变化, 因为采用固定间距跟随策略, 且车辆期望间距相同, 所以前后车辆在侧向和横摆运动状态的变化上相隔一定的时间差. 车间距误差和横向位置误差有较快的收敛速度. 当领头车辆加速度不变时, 车间距误差收敛到0; 当路径曲率发生变化时, 横向位置偏差随之变化, 但当路径曲率不变时很快收敛到0.

6 结语(Conclusions)

本文基于车辆队列, 研究自动化公路系统车道保持控制, 设计了非奇异的车道保持终端滑模纵横耦合控制规律, 对系统的稳定性进行了分析.

论文考虑领头车辆的加速度变化和路径曲率的变化, 采用6车辆编队模型, 通过MATLAB仿真, 对研究结果的有效性进行了验证.

论文在设计控制器时考虑了纵横向控制输入的补偿效应, 在车辆加速或减速时, 纵向速度的变化不会影响横向位置误差的收敛性; 在车辆转向时, 侧向速度以及横摆角速度的变化不会影响车间距误差的收敛性.

论文没有考虑控制系统的硬件实现, 研究结果还需进一步通过实车试验进行改进和完善.

参考文献(References):

- [1] MCMILLIN B, SANFORD K L. Automated highway systems[J]. *IEEE Potentials*, 1998, 17(4): 7 – 11.
- [2] RAJAMANI R, TAN H S, LAW B K, et al. Demonstration of integrated longitudinal and lateral control for the operation of automated vehicles in platoons[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 8(4): 695 – 708.
- [3] NOUVELIEREA, MAMMAR S. Experimental vehicle longitudinal control using a second order sliding mode technique[J]. *Control Engineering Practice*, 2007, 15(8): 943 – 954.
- [4] SURYANARAYANAN S, TOMIZUK M. Appropriate sensor placement for fault-tolerant lane-keeping control of automated vehicles[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, 12(4): 465 – 471.
- [5] HATIOPOGLU C, ÖZGÜNER U, KEITH A, et al. Automated lane change controller design[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2003, 4(1): 13 – 22.
- [6] LI L, WANG F Y, ZHOU Q Z. Integrated longitudinal and lateral tire/road friction modeling and monitoring for vehicle motion control[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(1): 1 – 19.
- [7] MAMMAR S, NETTO M. Integrated longitudinal and lateral control for vehicle low speed automation[C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications*. Taipei, Taiwan: IEEE, 2004: 350 – 355.
- [8] BEJI L, BESTAOUI Y. Motion generation and adaptive control method of automated guided vehicles in road following[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2005, 6(1): 113 – 123.
- [9] KUMARAWADU S, LEE T T. Neuroadaptive combined lateral and longitudinal control of highway vehicles using RBF networks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2006, 7(4): 500 – 512.
- [10] 李以农, 杨柳, 郑玲, 等. 基于滑模控制的车辆纵横向耦合控制[J]. *中国机械工程*, 2007, 18(7): 866 – 870.
(LI Yinong, YANG Liu, ZHENG Ling, et al. Vehicle longitudinal and lateral coupling control based on sliding mode control[J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(7): 866 – 870.)
- [11] RAJAMANI R. *Vehicle Dynamics and Control*[M]. New York: Springer, 2006.
- [12] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法及其跟车控制应用[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(5): 543 – 550.
(LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jiangqiang, et al. Nonsingular fast terminal-sliding-mode control method and its application on vehicular following system[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 543 – 550.)
- [13] FENG Y, YU X, MAN Z. Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators [J]. *Automatica*, 2002, 38(12): 2159 – 2167.
- [14] 郑剑飞, 冯勇, 郑雪梅, 等. 不确定非线性系统的自适应反演终端滑模控制[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(4): 410 – 414.
(ZHENG Jianfei, FENG Yong, ZHENG Xuemei, et al. Adaptive backstepping-based terminal-sliding-mode control for uncertain nonlinear systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(4): 410 – 414.)
- [15] ZHANG J R, XU S T. Nonlinear observer design for automatic steering of vehicles[C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. Singapore: IEEE, 2002: 179 – 182.
- [16] 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 Jiangqiang, et al. Nonsingular and fast terminal sliding-mode control method[J]. *Information and Control*, 2009, 38(1): 1 – 8.)
- [17] 李世华, 丁世宏, 田玉平. 一类二阶非线性系统的有限时间状态反馈镇定方法[J]. *自动化学报*, 2007, 33(1): 101 – 104.
(LI Shihua, DING Shihong, TIAN Yuping. A Finite-time state feedback stabilization method for a class of second order nonlinear systems[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(1): 101 – 104.)
- [18] LIU J K. *Matlab Simulation for Sliding Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

作者简介:

任殿波 (1968—), 男, 博士, 研究方向为智能交通系统、车辆动力学与控制等, E-mail: rdianbo@tom.com;

张京明 (1963—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为车辆动力学与控制、智能车辆等, E-mail: whjingming@163.com;

崔胜民 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为车辆系统动力学、新能源汽车技术等, E-mail: csm168@sina.com;

张继业 (1965—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为系统稳定性与控制、智能交通等, E-mail: jy Zhang@home.swjtu.edu.cn.