

跟驰驾驶行为的滑模控制系统建模

吴 洋, 罗 霞, 刘昱岗

(西南交通大学 交通运输学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为量化描述跟驰驾驶行为的特质, 即个人意志(即稳速驾驶)与环境干扰(即车辆间距、速度差、加速度差)间的动态调和, 剖析了跟驰驾驶行为的“运动跟踪(即跟驰车辆对前导车辆速度、加速度轨迹的跟踪)”特性与“刺激-反应”机理, 建立了“刺激-反应”行为模式下跟驰驾驶行为的2阶滑模控制系统模型; 通过数学分析验证了本模型控制的跟驰车辆运动的Lyapunov渐近稳定性, 并通过数值仿真说明了本模型控制的跟驰车队的运动可能具备Lyapunov渐近稳定性.

关键词: 交通工程; 跟驰驾驶行为; 滑模控制系统; 稳定性

中图分类号: U491 **文献标识码:** A

Sliding mode control system modeling of car-following driving behavior

WU Yang, LUO Xia, LIU Yu-gang

(School of Traffic and Transportation, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: In order to quantitatively depict the car-following driving behavior in nature of the dynamic compromise between individual motive (i.e. velocity-stabilizing driving) and environmental interference (i.e. space, velocity difference, acceleration difference between the leading car and the following car), a second-order sliding mode control system modeling of car-following driving behavior is proposed within the framework of stimulus-response behavior model, based upon the analysis of “motion tracking (i.e. velocity and acceleration trajectories tracking to the leading car by the following car)” characteristic and “stimulus-response” mechanism of car-following driving behavior. The Lyapunov asymptotic stability of the car-following movement of a single vehicle under the control of the proposed model is then validated by mathematical analysis. Moreover, the possibility of Lyapunov asymptotic stability of car-following movement of the vehicle-queue under the control of the proposed model is revealed by numerical simulation.

Key words: traffic engineering; car-following driving behavior; sliding mode control system; stability

1 引言(Introduction)

跟驰模型的建模基础, 一是车流运动的宏观参数即速率、密度、流量^[1], 二是车辆运动的微观特性. 后者分3类: 1) 以牛顿动力学为基础, 以Cellular Automaton^[2]及动力学解析模型^[3]为例; 2) 基于牛顿动力学, 通过驾驶人反应时间 T_r 体现“刺激-反应”行为模式, 以Safety Distance/Collision Avoidance模型为代表^[4]; 3) 基于牛顿动力学, 并量化描述“刺激-反应”行为规律, 以GHR模型(及其特例Linear模型)、Psychophysical/Action Point模型与Fuzzy Logic模型为代表^[4].

第1)类模型未体现“刺激-反应”行为模式, 但其车辆速控规则符合驾驶人的行为决策逻辑, 故第1)~3)类模型的本质是: 驾驶人跟驰驾驶行为的建

模. 但上述模型主要是利用数学解析方法描述跟驰驾驶行为, 仅反映跟驰驾驶行为的外在特性, 缺乏跟驰驾驶行为内在机理(即跟驰驾驶人的实时信息感知、动态策略决策)的剖析, 故跟驰车辆的运动(渐近)稳定性存在不同程度的局限.

本文总结跟驰驾驶行为载体即跟驰车辆的运动特性, 剖析跟驰驾驶行为的内在机理, 并籍此建立“刺激-反应”行为模式下的滑模控制系统模型, 拟合跟驰驾驶行为; 并分析论证本模型控制的跟驰车辆、跟驰车队运动的Lyapunov渐近稳定性.

2 跟驰驾驶行为特性(Characteristic of car-following driving behavior)

跟驰驾驶人对行车加速度的操控特性, 决定了跟驰车辆的运动特性. 对于车辆队列, 本文

中 $x_n(t), \dot{x}_n(t), \ddot{x}_n(t)$ 分别表示时刻 t 第 n 车辆的行程坐标、车速、行车加速度, $d_n(t_1, t_2)$ 表示时刻 t_1 至时刻 t_2 第 n 车辆的行车距离, $s_{n,n-1}(t)$ 表示时刻 t 第 $n, n-1$ 车辆间车头间距($n = 1, 2, \dots$).

2.1 车头间距离量变特性 (Quantitative change characteristics of car spacing)

t_0 为起始时刻, $\ddot{x}_n(t_0) = 0, \dot{x}_n(t_0) = v(t_0), s_{n,n-1}(t_0) = s(t_0)$ ($n = 1, 2, \dots$)的稳定交通流状态车队中, 第 $n-1$ 车辆从 t_0 开始发生速度扰动, 从 t_0 至 $t(t \geq t_0 + T_r)$ 第 $n, n-1$ 车辆的车头间距离量变如图1所示.

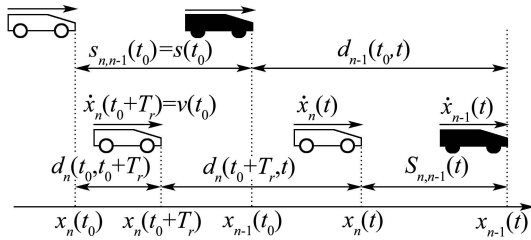


图1 前导车辆速度扰动情况下车头间距的量变示意

Fig. 1 Quantitative change of car spacing under circumstance of leading car's velocity fluctuation

由图1知

$$\begin{aligned} s_{n,n-1}(t_0) &= s(t_0) = \\ d_n(t_0, t_0 + T_r) + d_n(t_0 + T_r, t) - \\ d_{n-1}(t_0, t) + s_{n,n-1}(t). \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$d_n(t_0, t_0 + T_r) = v(t_0) \cdot T_r. \quad (2)$$

2.2 跟驰车辆运动特性 (Movement characteristics of following car)

跟驰车辆的速度轨迹经一定的时延趋近于前导车辆的速度轨迹, 以维持相对稳定的车头间距^[4]. 若“ $\rightarrow$ ”表示“趋近于”, 则跟驰运动特性为

$$s_{n,n-1}(t) \rightarrow s_{n,n-1}(t_0) = s(t_0).$$

根据式(1), 可知

$$[d_n(t_0, t_0 + T_r) + d_n(t_0 + T_r, t)] \rightarrow d_{n-1}(t_0, t),$$

理论上等价于

$$[x_n(t) - x_n(t_0)] \rightarrow \{x_{n-1}(t) - [x_n(t_0) + s(t_0)]\}.$$

再考虑实际跟驰驾驶中 T_r 的延迟影响, 即 $x_n(t) \rightarrow [x_{n-1}(t - T_r) - s(t_0)]$, 对 t 求导得 $\dot{x}_n(t) \rightarrow \dot{x}_{n-1}(t - T_r)$ 及 $\ddot{x}_n(t) \rightarrow \ddot{x}_{n-1}(t - T_r)$. 同理, 第 $n+1$ 车辆跟驰运动特性为 $x_{n+1}(t) \rightarrow [x_n(t - T_r) - s(t_0)]$, $\dot{x}_{n+1}(t) \rightarrow \dot{x}_n(t - T_r)$ 及 $\ddot{x}_{n+1}(t) \rightarrow \ddot{x}_n(t - T_r)$.

以第 $n-1$ 车辆的“匀减速-匀加速”过程为例, 跟驰车辆车速、行车加速度的变化趋势分别如

图2、图3所示. t_0 至 $t_0 + T_r$, 因第 n 车辆稳速行车, 故 $d_n(t_0, t_0 + T_r) > d_{n-1}(t_0, t_0 + T_r)$. 而因 $[d_n(t_0, t_0 + T_r) + d_n(t_0 + T_r, t)] \rightarrow d_{n-1}(t_0, t)$, 则需 $d_n(t_0 + T_r, t) < d_{n-1}(t_0 + T_r, t)$. 故对某一 $t' \geq t_0 + T_r$, 必需 $|\ddot{x}_n(t')| > |\ddot{x}_{n-1}(t')|$. 第 $n-1$ 车辆匀加速过程亦然. 第 $n+1$ 车辆同理.

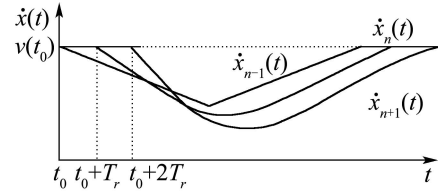


图2 跟驰车辆行车速度变化趋势

Fig. 2 Quantitative trend of the velocity of following car

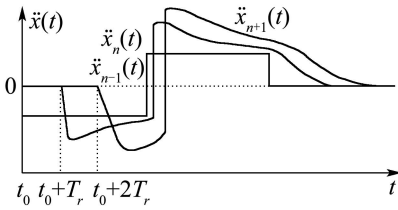


图3 跟驰车辆行车加速度变化趋势

Fig. 3 Quantitative trend of the acceleration of following car

综上, 跟驰驾驶行为特性是: 运动状态 $[x_n(t), \dot{x}_n(t), \ddot{x}_n(t)]^T$ 对目标运动状态

$$\begin{aligned} [x_{n,d}(t), \dot{x}_{n,d}(t), \ddot{x}_{n,d}(t)]^T = \\ [x_{n-1}(t - T_r) - s(t_0), \dot{x}_{n-1}(t - T_r), \ddot{x}_{n-1}(t - T_r)]^T \end{aligned}$$

的跟踪控制, 即: 跟踪误差

$$\begin{aligned} [x_n(t) - x_{n,d}(t), \dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n,d}(t), \ddot{x}_n(t) - \ddot{x}_{n,d}(t)]^T = \\ [x_n(t) - x_{n-1}(t - T_r) + s(t_0), \\ \dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n-1}(t - T_r), \ddot{x}_n(t) - \ddot{x}_{n-1}(t - T_r)]^T \end{aligned}$$

在有限时间内趋于零.

3 跟驰驾驶行为机理 (Mechanism of car-following driving behavior)

“刺激-反应”行为模式下, 人的行为流程是感知信息、决定策略、执行动作^[5]. 跟驰车辆作为跟驰驾驶行为的载体或延伸, 则驾驶人与跟驰车辆组成跟驰驾驶行为控制系统. 驾驶人感知系统状态与目标状态间的偏差(即跟驰和前导车辆的车距和车速偏差), 决定行车加速度控制变量 $u_n(t)$, 执行操控动作, 以确保跟踪误差在有限的时间内趋零, 反映跟驰驾驶行为的运动跟踪特性. 跟驰车辆的加速度是关于跟驰和前导车辆间的车距和车速偏差的函数. 根据运动跟踪的2阶非线性控制系统原理, 以车辆行程坐标、车速为状态变量, 定义系统运动状态

$$Y_n(t) = [y_1(t), y_2(t)]^T = [x_n(t), \dot{x}_n(t)]^T.$$

系统目标运动状态

$$Y_{n,d}(t) = [y_{1,d}(t), y_{2,d}(t)]^T = [x_{n,d}(t), \dot{x}_{n,d}(t)]^T = [x_{n-1}(t - T_r) - s(t_0), \dot{x}_{n-1}(t - T_r)]^T$$

及跟踪误差

$$E_n(t) = Y_n(t) - Y_{n,d}(t),$$

则跟驰驾驶行为控制系统结构如图4所示, 以标量、向量形式作数学描述, 分别如式(3)与式(4)所示:

$$\begin{cases} \dot{y}_1(t) = y_2(t) : \lim_t [\dot{y}_1(t) - \dot{y}_{1,d}(t)] = 0, \\ \dot{y}_2(t) = g[a_1 \cdot y_1(t), a_2 \cdot y_2(t)] + b \cdot u_n(t) : \lim_t [\dot{y}_2(t) - \dot{y}_{2,d}(t)] = 0, \\ \dot{Y}_n(t) = A \cdot Y_n(t) + B \cdot U_n(t), B = b \cdot I, \\ U_n(t) = [0, u_n(t)]^T, \lim_t [\dot{Y}_n(t) - \dot{Y}_{n,d}(t)] = 0. \end{cases} \quad (3)$$

$$(4)$$

其中: a_1, a_2 及 b 为系统参数; A 为系统矩阵, 反映状态变量间的耦合关系; B 为控制矩阵, 反映控制逻辑。

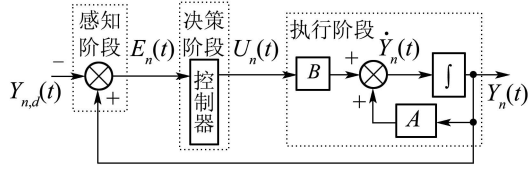


图4 跟驰驾驶行为控制系统结构

Fig. 4 Control system configuration of car-following driving behavior

由Lewin定律“个人意志与环境干扰交互作用决定人类行为”, 并结合图4与式(4), 可知: 1) $A \cdot Y_n(t)$ 作为系统内部因素, 反映驾驶行为的个人意志; 2) $B \cdot U_n(t)$ 既取决于系统内因 $Y_n(t)$, 也取决于系统外因 $Y_{n,d}(t)$, 综合反映驾驶行为的个人意志、环境干扰。因此分别将 $A \cdot Y_n(t), B \cdot U_n(t)$ 称为内因模式、双因模式的变速能力, 两者共同组成跟驰驾驶行为的变速能力 $\dot{Y}_n(t)$ 。

若跟踪误差 $E_n(t)$ 为零(例如: 平直道路自由交通流状态下的自由驾驶), 则驾驶人倾向于选择

$$\dot{Y}_n(t) = [\dot{x}_n(t), \ddot{x}_n(t)]^T = [\text{const}, 0]^T$$

与 $U_n(t) = 0$ (即稳速驾驶)。故内因模式变速能力 $A \cdot Y_n(t)$ 对应跟驰驾驶行为控制系统的平衡状态, 反映无环境干扰条件下驾驶人“稳速驾驶”的个人意志。环境干扰一旦出现(即 $E_n(t)$ 非零), 则系统失衡, 此后, 跟驰驾驶行为将实现个人意志与环境干扰这一矛盾的动态调和, 直至系统再达平衡。

4 跟驰驾驶行为建模(Modeling of car-following driving behavior)

为直观起见, 将式(3)作等价变换, 如式(5):

$$\begin{cases} \ddot{x}_n(t) = f[x_n(t), \dot{x}_n(t)] + \tilde{u}_n(t) : \\ \ddot{x}_n(t_0) = 0, \dot{x}_n(t_0) = v(t_0), \\ f[x_n(t), \dot{x}_n(t)] = \\ f_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)] + \Delta f[x_n(t), \dot{x}_n(t)], \\ |\Delta f[x_n(t), \dot{x}_n(t)]| \leq F_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)]. \end{cases} \quad (5)$$

其中: $f[x_n(t), \dot{x}_n(t)]$ 为有界不确定函数; $f_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)]$ 为确定函数, 表示 $f[x_n(t), \dot{x}_n(t)]$ 的参考轨迹; $F_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)]$ 为确定函数, 表示偏移量 $\Delta f[x_n(t), \dot{x}_n(t)]$ 的最大值。

系统建模目标是设计控制信号 $\tilde{u}_n(t)$, 使 $[x_n(t), \dot{x}_n(t)]^T$ 跟踪 $[x_{n,d}(t), \dot{x}_{n,d}(t)]^T$, 即跟踪误差

$$E_n(t) = [e_n(t), \dot{e}_n(t)]^T = [x_n(t) - x_{n,d}(t), \dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n,d}(t)]^T$$

收敛于零。

对式(5)所描述的仿射非线性系统, 根据2阶滑模控制原理^[6~8], 定义滑动模态 $S_n(e_n(t), t)$, 简记为

$$S_n(t) = \sum_{i=0}^{m-1} C_{m-1}^i \lambda^i e_n(t)^{(m-1-i)} (\lambda > 0, m = 2),$$

则 $\lim_t E_n(t) = 0$ 等价于系统状态轨迹在相平面中向滑动线 $S_n(t) = 0$ 移动(如图5)。根据2阶滑模运动条件

$$\frac{d[S_n^2(t)]}{dt} \leq -2\eta |S_n(t)| (\eta > 0),$$

设计

$$\begin{aligned} \tilde{u}_n(t) = & -f_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)] + \ddot{x}_{n,d}(t) - \lambda \dot{e}_n(t) - \{\eta + \\ & F_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)]\} \text{sat}[S_n(t)/\phi] : \phi > 0 \end{aligned} \quad (6)$$

能保证在有限时间内 $\lim_t E_n(t) = 0$ ^[6~8]。但符号函数 $\text{sgn}[S_n(t)]$ 的突变特性, 导致系统状态轨迹非平滑的横穿滑动线, 形成振颤(Chattering)^[8]。对此引入边界层 $\{[x_n(t), \dot{x}_n(t)]^T | |S_n(t)| \leq \phi\}$ ($\phi > 0$), 则平滑控制信号:

$$\begin{cases} \tilde{u}_n(t) = \\ -f_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)] + \ddot{x}_{n,d}(t) - \lambda \dot{e}_n(t) - \\ \{\eta + F_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)]\} \text{sat}[S_n(t)/\phi] : \phi > 0, \\ \text{sat}[S_n(t)/\phi] = \\ \begin{cases} -1, & S_n(t)/\phi \leq -1, \\ S_n(t)/\phi, & -1 < S_n(t)/\phi \leq 1, \\ 1, & S_n(t)/\phi > 1, \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

能保证系统状态轨迹在边界层内部连续、平滑变化^[8],如图6所示。

综上,对跟驰驾驶行为的(2阶)滑模控制系统模型,作完整描述如式(8):

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{x}_n(t) = f[x_n(t), \dot{x}_n(t)] + \tilde{u}_n(t) : \ddot{x}_n(t_0) = 0, \\ \dot{x}_n(t_0) = v(t_0), \\ f[x_n(t), \dot{x}_n(t)] = \\ f_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)] + \Delta f[x_n(t), \dot{x}_n(t)], \\ |\Delta f[x_n(t), \dot{x}_n(t)]| \leq F_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)], \\ [x_{n,d}(t), \dot{x}_{n,d}(t)]^T = \\ [x_{n-1}(t - T_r) - s(t_0), \dot{x}_{n-1}(t - T_r)]^T, \\ S_n(t) = \\ \sum_{i=0}^{m-1} C_{m-1}^i \lambda^i e_n(t)^{(m-1-i)} = \dot{e}_n(t) + \lambda e_n(t) = \\ [\dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n,d}(t)] + \lambda[x_n(t) - x_{n,d}(t)] : m = 2, \\ \tilde{u}_n(t) = \\ -f_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)] + \ddot{x}_{n,d}(t) - \lambda \dot{e}_n(t) - \\ \{\eta + F_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)]\} \text{sat}[S_n(t)/\phi] : \phi > 0, \\ \text{sat}[S_n(t)/\phi] = \begin{cases} -1, & S_n(t)/\phi \leq -1, \\ S_n(t)/\phi, & -1 < S_n(t)/\phi \leq 1, \\ 1, & S_n(t)/\phi > 1. \end{cases} \end{array} \right. \quad (8)$$

其中: $f[x_n(t), \dot{x}_n(t)]$, $\tilde{u}_n(t)$ 分别代表内因、双因模式的变速能力。

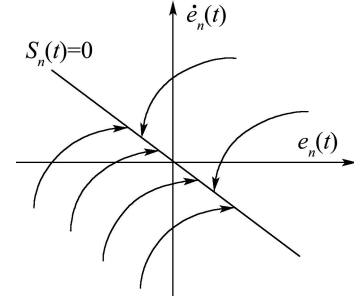


图5 相平面滑动面(线)示意($m=2$)

Fig. 5 Sliding surface (curve) in phase plane ($m=2$)

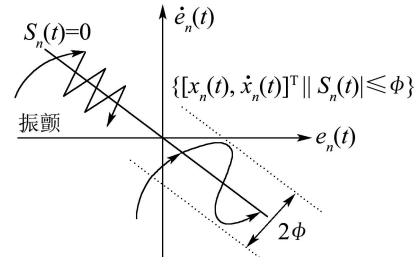


图6 相平面相轨迹振荡及边界层示意($m=2$)

Fig. 6 Chattering and boundary layer of phase trajectory in phase plane ($m=2$)

本模型的常量参数依据国内外相关研究的统计数据标定(列于表1),反映实际跟驰驾驶行为的外在统计特性,故本模型对实际跟驰驾驶行为的拟合是可行的。在可行基础上, λ 表示跟驰驾驶人对不同阶数的客观跟踪误差(即车距、车速偏差)的主观评判权重比例,决定系统响应速度^[8],并决定本模型对实际跟驰驾驶行为的拟合精度。 λ 的不同取值对本模型拟合精度的影响规律,另文阐述。

表1 跟驰驾驶行为模型的常量参数

Table 1 Constant parameters of car-following driving behavior model

参数	赋值(标定范围)	量纲	参数涵义
T_r	1.00 ~ 2.50	s	“感知-决策-执行”周期的统计均值 ^[9]
$f_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)]$	0	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	稳速舒适驾驶加速度(无环境干扰)
$\eta + F_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)]$	0.45 g ~ 0.55 g	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	加速度最大偏移量的统计均值 ^[9] , $g = 9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
λ	0 ~ 1.00	s^{-1}	$-\lambda$ 等于2阶滑动面(即滑动线) $S_n(t) = 0$ 斜率
$\ddot{x}_{n,d}(t) = \ddot{x}_{n-1}(t - T_r)$	-0.30 g ~ 0.30 g	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	自由驾驶加速度,参考最大舒适度标准 ^[9]
ϕ	≥ 2.50	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	边界层厚度,即驾驶人的相对速度感知阈值 ^[4]

5 模型稳定性分析(Stability analysis of car-following driving behavior model)

前导车辆“匀减速(取 $\ddot{x}_{n-1}(t - T_r) = -1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)至匀加速(取 $\ddot{x}_{n-1}(t - T_r) = 1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)”条件下,对前导车辆的跟驰车队(共9车, $v(t_0) = 20.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $s(t_0) = 40.0 \text{ m}$)基于本模型控制律的跟驰运动进行数值仿真(C++Builder编程实

现),跟驰车队中第1跟驰车辆作为第2跟驰车辆的前导车辆并依此类推,取

$$\begin{aligned} T_r &= 1.0 \text{ s}, f_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)] = 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, \\ \eta + F_0[x_n(t), \dot{x}_n(t)] &= -3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}, \\ \lambda &= 0.2 \text{ s}^{-1}, \phi = 4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}, \end{aligned}$$

则各跟驰车辆的行车加速度、车速及车头间距的

量变如图7~9所示。

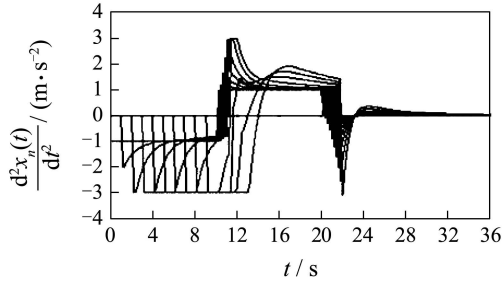


图7 跟驰车辆行车加速度轨迹(仿真数据)

Fig. 7 Simulative acceleration trajectories of car-following

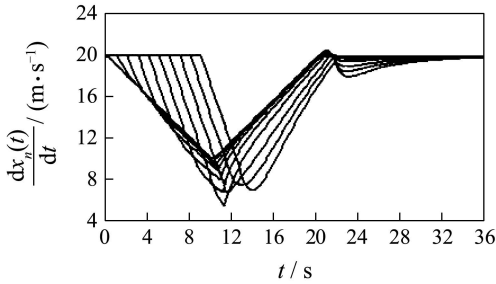


图8 跟驰车辆车速轨迹(仿真数据)

Fig. 8 Simulative velocity trajectories of car-following

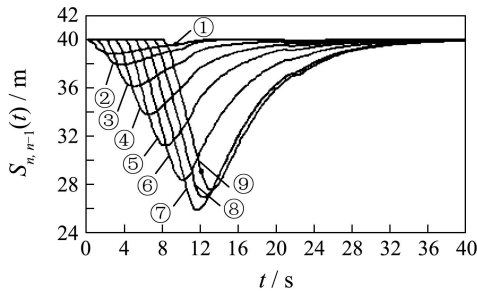


图9 跟驰车辆车头间距轨迹(仿真数据)

Fig. 9 Simulative car-spacing trajectories of car-following

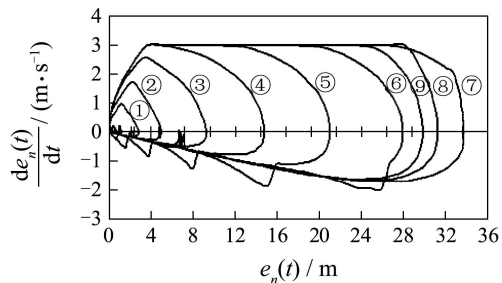


图10 跟驰驾驶行为模型相轨迹(仿真数据)

Fig. 10 Simulative phase trajectories of car-following driving behavior model

以 $\{e_n(t), \dot{e}_n(t)\} = \{x_n(t) - x_{n,d}(t), \dot{x}_n(t) - \dot{x}_{n,d}(t)\}$ 为相变量,考察跟驰驾驶行为模型的相轨迹,如图10: 1) 各相轨迹从初始状态 $\{e_n(t_0) = 0, \dot{e}_n(t_0) = 0\}$ 出发,进入第I象限即 $\dot{x}_n(t) > \dot{x}_{n,d}(t)$,并随 $\dot{x}_n(t) \rightarrow \dot{x}_{n,d}(t)$,与 $e_n(t)$ 轴相交于 $\dot{x}_n(t) = \dot{x}_{n,d}(t)$,各交点对应于图9中各车头间距的最低

值,此后各相轨迹进入第II象限即 $\dot{x}_n(t) < \dot{x}_{n,d}(t)$,并随 $\dot{x}_n(t) \rightarrow \dot{x}_{n,d}(t)$,依据滑模控制律沿滑动线收敛于初始(即平衡)状态 $\{e_n(t_0) = 0, \dot{e}_n(t_0) = 0\}$,表明跟驰车辆运动可能具备Lyapunov渐近稳定性; 2) 从第7跟驰车辆开始,第8,9,...,跟驰车辆相轨迹的包络范围(对应于图9中车头间距的振幅)依次缩减,呈现收敛特征,表明跟驰车队运动亦可能具备Lyapunov渐近稳定性。

5.1 跟驰车辆运动稳定性(Movement stability of following car)

跟驰车辆运动稳定性,是指跟驰车辆对其前导车辆速度或加速度波动的反应特性。对跟驰车辆即跟驰驾驶行为滑模控制系统,因本模型的滑模运动条件 $\frac{d[S_n^2(t)]}{dt} \leq -2\eta|S_n(t)|$ ($\eta > 0$)等价于滑模到达的充分条件 $S_n(t) \cdot \dot{S}_n(t) \leq -\eta|S_n(t)| < 0$ ($\eta > 0, e_n(t) \neq 0, S_n(t) \neq 0$)^[6~8],故系统滑模可达性得证。

进一步,根据Lyapunov稳定性(第II方法)理论,对式(8),定义Lyapunov函数

$$V[S_n(t)] = \frac{1}{2}S_n^2(t) > 0 (e_n(t) \neq 0, S_n(t) \neq 0),$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}[S_n(t)] &= \frac{1}{2} \frac{d[S_n^2(t)]}{dt} = \\ S_n(t) \cdot \dot{S}_n(t) &\leq -\eta|S_n(t)| < 0. \end{aligned}$$

若 $e_n(t) \neq 0$ 即 $S_n(t) \neq 0$,则 $V[S_n(t)]$ 正定、 $\dot{V}[S_n(t)]$ 负定;若 $e_n(t) \rightarrow 0$ 即 $S_n(t) \rightarrow 0$,则 $V[S_n(t)]$ 趋零。系统的渐近稳定性得证。

5.2 跟驰车队运动稳定性(Movement stability of following car queue)

跟驰车队(即串联滑模控制系统)运动稳定性是指前导车辆的(加)速度波动在跟驰车队中向后逐一传播过程中,波动振幅的收敛特性。上述数值仿真表明,跟驰车队运动可能具备Lyapunov稳定性,其研究论证待下一阶段进行。

6 结语(Conclusion)

1) 总结跟驰车辆对前导车辆运动轨迹的“跟踪控制”特性;剖析跟驰驾驶行为机理,建立了跟驰驾驶行为滑模控制系统模型;通过数学分析验证本模型控制的跟驰车辆运动的Lyapunov渐近稳定性,通过数值仿真说明本模型控制的跟驰车队运动可能具备Lyapunov渐近稳定性。

2) 滑动模态参数 λ 决定系统相空间中相轨迹

的收敛方式,进而决定了滑模控制系统的运动品质即滑模控制模型的拟合精度。 λ 的不同取值对本模型拟合精度的影响规律将另文阐述。

参考文献(References):

- [1] ZHANG H M, KIM T. A car-following theory for multiphase vehicular traffic flow[J]. *Transportation Research, Part B*, 2005, 39(5): 385 – 399.
- [2] BHAM G H, BENEKOHAL R F. A high fidelity traffic simulation model based on cellular automata & car-following concepts[J]. *Transportation Research, Part C*, 2004, 12(1): 1 – 32.
- [3] AHN S, CASSIDY M J, LAVAL J. Verification of a simplified car-following theory[J]. *Transportation Research, Part B*, 2004, 38(5): 431 – 440.
- [4] BRACKSTONE M, MCDONALD M. Car-following: a historical review[J]. *Transportation Research, Part F*, 1999, 2(4): 181 – 196.
- [5] RUSSELL S, NORVIG P. 人工智能——一种现代方法[M]. 第2版. 北京: 人民邮电出版社, 2004.
(RUSSELL S, NORVIG P. *Artificial Intelligence—A Modern Approach*[M]. 2nd ed. Beijing: Posts and Telecom Press, 2004.)

- [6] JACQUES J, SLOTINE E. Sliding controller for non-linear systems[J]. *International Journal of Control*, 1984, 40(2): 421 – 434.
- [7] 高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1990.
(GAO Weibing. *Variable Structure Control Theory*[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 1990.)
- [8] 王立新. 模糊系统与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
(WANG Lixin. *A Course in Fuzzy Systems and Control*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.)
- [9] 王殿海. 交通流理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
(WANG Dianhai. *Traffic Flow Theory*[M]. Beijing: China Communication Press, 2002.)

作者简介:

吴 洋 (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为交通工程, E-mail: wuyang333@yahoo.com.cn;

罗 霞 (1962—), 女, 博士, 教授, 研究方向为区域交通规划、智能交通系统、物流供应链管理;

刘昱岗 (1977—), 男, 博士研究生, 研究方向为物流工程。

(上接第664页)

- [7] MU X P, WU Q. Synthesis of a complete sagittal gait cycle for a five link biped[J]. *Robotica*, 2003, 21(5): 581 – 587.
- [8] HUANG Q, YOKOI K, KAJITA S, et al. Planning walking patterns for a biped robot[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2001, 17(3): 280 – 289.
- [9] 胡凌云, 孙增圻. 基于T-S模糊再励学习的稳定双足步态生成算法[J]. 机器人, 2004, 26(5): 461 – 466.
(HU Lingyun, SUN Zengqi. Stable biped gait generation algorithm based on T-S Fuzzy Reinforcement Learning Method[J]. *Robot*, 2004, 26(5): 461 – 466.)

作者简介:

汤 卿 (1982—), 男, 博士研究生, 研究领域为仿人形机器人的步态规划和运动控制算法等, E-mail: tangq@iipc.zju.edu.cn;

熊 蓉 (1972—), 女, 浙江大学工业控制技术国家重点实验室副教授, 主要研究方向为运动控制、智能环境建模等, E-mail: rxiong@iipc.zju.edu.cn;

褚 健 (1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自动控制理论及应用、自动化仪表及装置。

(上接第670页)

- [7] DORATO P. Non-fragile controllers design: an overview[C]// *Proceedings of the American Control Conference*. Philadelphia, Pennsylvania: IEEE Press, 1998: 2829 – 2831.
- [8] GUAN X, ZHANG Q. Design of resilient guaranteed cost controllers for a class of generalized systems[C]// *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation*. Shanghai: IEEE Press, 2002: 160 – 164.
- [9] MAHMOUD M S. Resilient linear filtering of uncertain systems[J]. *Automatica*, 2004, 40(10): 1797 – 1802.
- [10] GAO H, XU B, ZHANG Y, et al. A new delay-dependent stability criterion for singular time-delay systems[C]// *Proceedings of*

the 6th IEEE International Conference on Control and Automation. Guangzhou: IEEE Press, 2007: 2252 – 2256.

- [11] PETERSON I R. A stabilization algorithm for a class uncertain linear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1987, 8(4): 351 – 357.

作者简介:

高焕丽 (1977—), 女, 博士研究生, 研究方向为奇异系统、时滞与不确定系统的控制与综合, E-mail: shanggaohl@126.com;

胥布工 (1956—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为时滞与不确定系统的控制与综合、及鲁棒控制等, E-mail: aubgxu@scut.edu.cn;

秦小丽 (1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为飞行器控制, E-mail: wrqxl@yahoo.com.cn.