

汽车弯道防侧滑/侧翻控制器设计

郭 烈¹, 黄晓慧¹, 葛平淑^{*2}, 赵一兵¹, 李琳辉¹

(1. 大连理工大学 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024;
2. 大连民族学院 机电信息工程学院, 辽宁 大连 116600)

摘要: 对自动化公路系统弯道上汽车防侧滑/侧翻控制系统进行了研究. 在汽车驶入弯道前计算安全车速, 建立车辆运动学模型, 采用积分反推方法设计了直道制动减速阶段的速度控制器, 通过引入虚拟控制变量设计了弯道车道保持阶段的位姿控制器. 根据车辆动力学简化模型设计了动力学控制器进行仿真试验, 车辆以安全车速通过弯道. 试验表明所设计的控制器具有快速、准确跟踪和全局稳定的特性, 能有效避免发生侧滑/侧翻的危险工况, 保证车辆行驶安全性和方向稳定性.

关键词: 安全辅助驾驶; 侧滑/侧翻; 积分反推方法; 制动减速; 车道保持

中图分类号: U492.84 **文献标志码:** A

0 引言

高速公路弯道是交通事故的多发路段, 其事故发生概率大且事故严重程度高. 单位里程的公路, 弯道上的事故数明显高于直线路段上发生的事故数, 这是因为车辆在弯道路段易发生侧滑甚至侧翻. 因此, 保证车辆在高速公路弯道路段的行驶安全性至关重要, 对于汽车安全辅助驾驶技术而言, 能够实现弯道防侧滑/侧翻超速预警和弯道车道保持是汽车主动安全技术的关键.

目前, 国内外在车辆弯道防侧滑预警和弯道车道保持方面已取得很多有价值的研究成果. Lee 等^[1]基于地图数据库和车辆定位设备研究了一种弯道车速控制系统, 在此基础上, 张德兆等^[2]针对乘用车设计了一种基于风险状态预估的弯道防侧滑超速预警系统. 金智林等^[3]提出一种基于模型的汽车侧翻预警算法以及在预警基础上的防侧翻控制算法, 目的是更好地发挥制动器效能, 防止汽车侧翻. 任殿波等^[4]考虑道路曲率变化, 采用位置预瞄和固定车辆间距跟随策略, 基于一列车队设计了车道保持纵横向耦合控制规律. Peng 等^[5]介绍了一种适用于弯路车道跟随的最优牵引/制

动力分配方法. 考虑到汽车防侧滑和侧翻超实时性要求以及其存在非完整约束, 本文建立车辆运动学模型, 采用积分反推方法分别设计直道减速阶段的速度控制器和弯道保持阶段的位姿控制器; 同时建立车辆动力学简化模型, 并采用滑模方法设计动力学控制器, 进一步仿真试验.

1 安全车速计算

弯道防侧滑/侧翻自动控制系统的设计方案如图 1 所示, 大致分为弯道曲率识别、安全车速计算、安全状态判断和系统自动控制 4 个模块^[2]. 弯道曲率识别模块用来实时检测前方弯道的曲率信息, 目前主要有两种方法: 一种是利用车载 GPS/GIS 系统输出的道路坐标估计道路曲率^[6], 一种是通过道路图像处理拟合道路模型来计算弯道半径^[7]. 安全车速计算模块结合弯道侧滑车速约束和侧翻车速约束计算车辆能够安全通过弯道的临界安全车速. 安全状态判断模块则根据车辆当前运动状态判断车辆安全状态. 系统自动控制模块则实时调控车辆运行状态, 从而实现直道自动减速和弯道车道保持. 图中上面的虚线框为直道减速阶段的速度控制系统框图, 下面的虚线框为弯道保持阶段的位姿控制系统框图.

收稿日期: 2012-05-05; 修回日期: 2013-04-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61104165, 61203171); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT13JS02); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110041120024).

作者简介: 郭 烈(1978-), 男, 副教授, E-mail: guo_lie@dlut.edu.cn; 葛平淑*(1983-), 女, 讲师, E-mail: gps@dlnu.edu.cn.

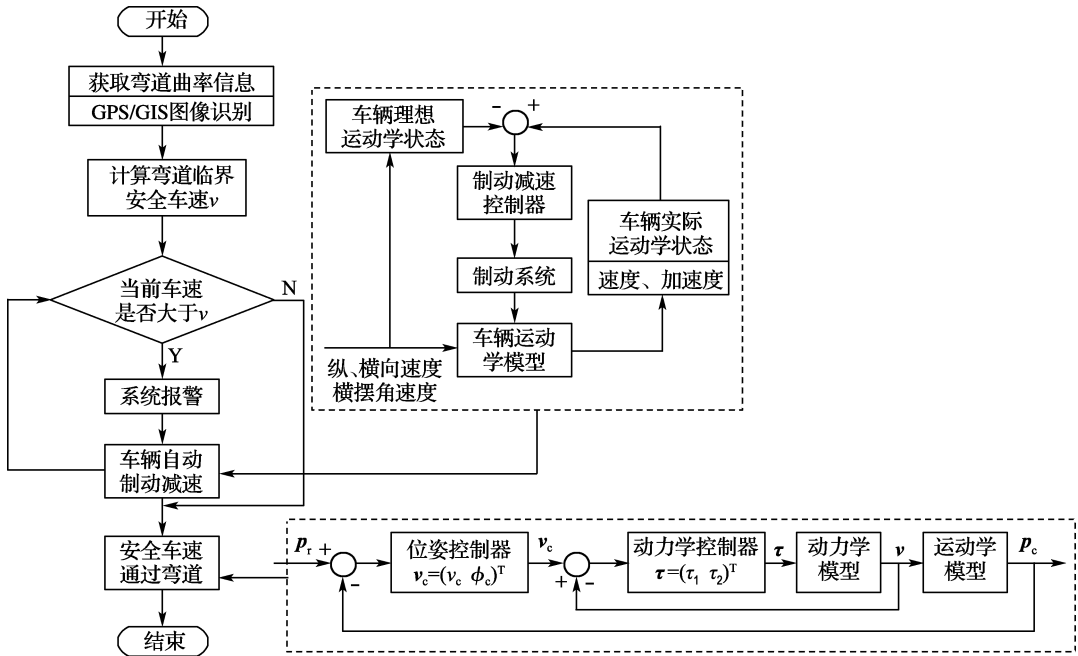


图 1 弯道防侧滑/侧翻自动控制系统设计

Fig. 1 Design for vehicle sideslip/rollover avoidance automatic control system

车辆在弯道路面定转角或变转角行驶，所产生的横向力应不超过轮胎与路面附着力所允许的界限。当车速超过一定数值时，路面附着力不足以克服离心力的影响，汽车后轴发生侧滑；同时由于纵向和横向质量的转移，各车轮上的法向荷载变化很大，车身产生侧倾，严重时会导致侧翻^[8]。弯道半径、行车速度、路面超高和横向附着系数直接关系到汽车在弯道行驶时的安全性。

汽车通过弯道时，不发生侧滑的条件是汽车行驶时产生的离心力不大于路面附着力。同时，考虑到路面超高可抵消部分离心力，可表示为

$$\begin{cases} F + F_o \leq F_x \\ F_o = 127m(i_o + \varphi) \end{cases}$$

得

$$m \frac{v^2}{R} + 127m(i_o + \varphi) \leq \varphi mg \tag{1}$$

式中： F 为汽车行驶时产生的离心力； F_o 为路面超高抵消的部分离心力； F_x 为路面附着力； m 为汽车质量； g 为重力加速度； φ 为横向附着系数； i_o 为路面超高的横坡度； v 为车辆行驶速度； R 为弯道的曲率半径，一般情况下即车辆的转弯半径。

计算得到车辆不发生侧滑的安全车速为

$$v \leq \sqrt{\varphi g R - 127(i_o + \varphi) R} \tag{2}$$

若式(2)为等式，则表示车辆发生侧滑的临界状态。

车辆弯道行驶时，不发生侧翻的条件是侧倾力矩不大于回正力矩，用公式可表示为

$$\begin{aligned} \sum M_\varphi + \sum M &\leq \sum T \Rightarrow \\ m \frac{v^2}{R} h + F_o h &\leq mg \frac{b}{2} \Rightarrow \\ m \frac{v^2}{R} h + 127m(i_o + \varphi) h &\leq mg \frac{b}{2} \end{aligned} \tag{3}$$

即

$$v \leq \sqrt{\frac{b}{2h} g R - 127(i_o + \varphi) R} \tag{4}$$

式中： $\sum M_\varphi$ 为由汽车离心力引起的侧倾力矩； $\sum M$ 为因路面超高所抵消的部分离心力引起的侧倾力矩； $\sum T$ 为回正力矩； h 为车辆质心高度； b 为轮距，其他参数同上。当式(4)为等式时，汽车处于侧翻的临界状态。

为保证车辆弯道行驶的安全性，避免出现侧滑和侧翻等危险工况，车速须同时满足上述两种约束条件，即

$$v \leq \min \left\{ \sqrt{\varphi g R - 127(i_o + \varphi) R}, \sqrt{\frac{b}{2h} g R - 127(i_o + \varphi) R} \right\} \tag{5}$$

上式取等号时, v 为临界安全车速.

当车辆驶过某一固定弯道时, 车辆参数 m 、 b 和 h 以及道路参数 i_0 、 R 均为常数, 故安全车速仅与横向附着系数 φ 有关. 如果车辆转弯前的车速超过临界安全车速, 系统自动制动减速至安全车速, 并控制车辆以安全车速通过弯道, 从而避免发生交通事故. 因此, 车辆驶入弯道前需要足够的制动距离保证其顺利减速, 这就要求系统根据制动距离准确确定制动减速度 $\ddot{x}$.

2 控制器设计

2.1 制动减速度规划

在整个制动减速过程中, 若车速处于高速区段, 理想减速度不断增加; 当车速降到低速区段时, 为避免制动减速度过大, 理想减速度保持不变直至车速降为安全车速, 如图 2 所示. 这种制动减速度模式缩短了车辆减速行驶距离, 保证车辆在平直道路上能够减速至弯道行驶安全车速^[9].

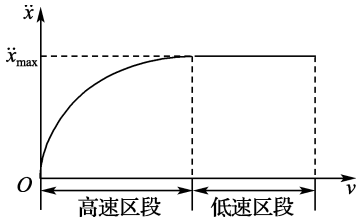


图 2 制动减速度模式

Fig. 2 Vehicle braking deceleration mode

根据上述制动减速模式, 纵向制动减速度:

$$\dot{x} = \begin{cases} -\frac{5}{36}t^2; & 0 < t \leq t_1 \\ -5; & t_1 < t \leq t_2 \end{cases} \quad (6)$$

对式(6)积分, 得

$$\dot{x} = \begin{cases} v_0 - \frac{5}{108}t^3; & 0 < t \leq t_1 \\ v_0 - \frac{5}{108}t_1^3 - 5(t - t_1); & t_1 < t \leq t_2 \end{cases} \quad (7)$$

其中 $(0, t_1]$ 对应高速区段, $(t_1, t_2]$ 对应低速区段, v_0 为车辆纵向速度的初始值.

2.2 运动学控制器设计

建立图 3 所示的坐标系描述车辆的位姿状态, $M(x \ y)$ 为车辆在坐标系 Oxy 的当前位置, l 为前后轮的轴间距, θ 为沿 x 轴逆时针得到的当前车辆运动方向, ϕ 为前轮转向角. 用向量 $\mathbf{p} =$

$(x \ y \ \theta)^T \in \mathbf{R}^3$ 表示车辆的当前位姿, $v > 0$ 表示车辆后轴中心点的线速度.

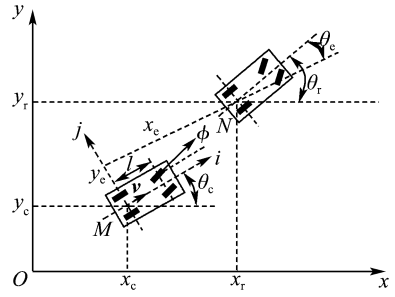


图 3 世界坐标系下车辆实际位姿与参考位姿

Fig. 3 Vehicle actual gestures and reference gestures under world coordinates

则车辆的运动学模型在世界坐标系 Oxy 下可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = \frac{v}{l} \tan \phi \end{cases} \quad (8)$$

其中控制向量 $\mathbf{v} = (v \ \phi)^T$, 为速度控制矢量; $\dot{\theta} = \omega$. 智能车辆的非完整约束为^[10]

$$\begin{aligned} \dot{x} \sin \theta - \dot{y} \cos \theta &= 0 \\ \dot{x} \sin(\theta + \phi) - \dot{y} \cos(\theta + \phi) - l \dot{\theta} \cos \theta &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

在以车辆为参考的局部坐标系 Mij 下, 设车辆参考位姿 $\mathbf{p}_r = (x_r \ y_r \ \theta_r)^T$, 其运动也满足非完整约束. 因此, 要选择一个合适的控制规律 $\mathbf{v}_e = (v_e \ \phi_e)^T$, 使得 $t \rightarrow +\infty$ 时 $\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{p}_r$. 定义车辆运动的位姿误差 $\mathbf{p}_e = (x_e \ y_e \ \theta_e)^T \in \mathbf{R}^3$ 为

$$\mathbf{p}_e = \begin{pmatrix} x_e \\ y_e \\ \theta_e \end{pmatrix}_{(Mij)} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{pmatrix}_{(Oxy)} \quad (10)$$

对上式求导, 得局部坐标系下的车辆位姿误差微分方程

$$\dot{\mathbf{p}}_e = \begin{pmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{v}{l} y_e \tan \phi - v + v_r \cos \theta_e \\ -\frac{v}{l} x_e \tan \phi + v_r \sin \theta_e \\ \frac{v_r}{l} \tan \phi_r - \frac{v}{l} \tan \phi \end{pmatrix} \quad (11)$$

选择 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2}x_e^2 + \frac{1}{2}y_e^2 + \frac{1}{k_2}(1 - \cos \theta_e) \quad (12)$$

其中 $k_2 > 0$, 对上式求导并将式(11) 代入, 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 = & x_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \frac{1}{k_2} \dot{\theta}_e \sin \theta_e = \\ & -x_e(v - v_r \cos \theta_e) - \frac{v \sin \theta_e}{k_2 l} \left(\tan \phi - \right. \\ & \left. \frac{v_r}{v} \tan \phi_r - \frac{k_2 l y_e v_r}{v} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

因此, 选择

$$\begin{cases} v_c = k_1 x_e + v_r \cos \theta_e \\ \phi_c = \arctan \left(\frac{v_r}{v_c} \tan \phi_r + \frac{k_2 l y_e v_r}{v_c} + \frac{k_3 l \sin \theta_e}{v_c} \right) \end{cases} \quad (14)$$

作为运动学控制规律, 则对 $\forall t \in (0, +\infty)$ 有 $\dot{V}_1 = -k_1 x_e^2 - \frac{k_3 l^2 \sin^2 \theta_e}{k_2 v^2} \leq 0$. 其中 k_1, k_2, k_3 均为正实数. 该控制器的目的就是为动力学控制器提供参考的线速度和前轮转向角.

2.3 动力学控制器设计

智能车辆动力学模型可简化为轮式移动机器人动力学模型, 一般可表示为

$$\dot{v} = \frac{\tau_1}{m}; \dot{\omega} = \frac{\tau_2}{I} \quad (15)$$

式中: τ_1, τ_2 分别为智能车辆的驱动 / 制动力和转动力矩, m 为汽车质量, I 为车辆绕垂直轴的转动惯量.

根据式(8) 和(15), 可得

$$\dot{\phi} = \frac{\tau_2 l - I \dot{v} \tan \phi}{I v \sec^2 \phi} \quad (16)$$

动力学控制器是把运动学控制器的输出 $\mathbf{v}_c = (v_c \ \phi_c)^T$ 作为参考输入, 输出为 $\boldsymbol{\tau} = (\tau_1 \ \tau_2)^T$, 使得 $t \rightarrow +\infty$ 时 $\mathbf{v} \rightarrow \mathbf{v}_c$.

定义误差 $\begin{cases} e_v = v_c - v \\ e_\phi = \phi_c - \phi \end{cases}$, 并选择 PI 型滑模面

$$\mathbf{S}(t) = \begin{pmatrix} s_v(t) \\ s_\phi(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_v + \alpha_1 \int_0^t e_v(\zeta) d\zeta \\ e_\phi + \alpha_2 \int_0^t e_\phi(\zeta) d\zeta \end{pmatrix} \quad (17)$$

其中 $\alpha_1, \alpha_2 > 0$.

对上式求导可得

$$\dot{\mathbf{S}}(t) = \begin{pmatrix} \dot{s}_v(t) \\ \dot{s}_\phi(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{e}_v + \alpha_1 e_v \\ \dot{e}_\phi + \alpha_2 e_\phi \end{pmatrix} \quad (18)$$

显然, 如果选择合适的 α_1, α_2 , 则存在 $t \rightarrow +\infty$

时 $e_v \rightarrow 0, e_\phi \rightarrow 0$.

将式(15) 和(16) 代入式(18), 同时令 $\dot{\mathbf{S}}(t) = \mathbf{0}$, 则

$$\begin{aligned} \dot{s}_v &= \dot{v}_c - \frac{\tau_1}{m} + \alpha_1 e_v = 0 \\ \dot{s}_\phi &= \dot{\phi}_c - \dot{\phi} + \alpha_2 e_\phi = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

故等效控制规律为

$$\begin{aligned} \tau_{eq1} &= m(\dot{v}_c + \alpha_1 e_v) \\ \tau_{eq2} &= \frac{I}{l}(\dot{\phi}_c v \sec^2 \phi + \dot{v} \tan \phi + \alpha_2 e_\phi v \sec^2 \phi) \end{aligned} \quad (20)$$

控制规律式(20) 可使系统状态保持在滑模面上, 但在实际系统中, 摩擦、参数摄动和外界干扰的影响是不可避免的, 故需考虑切换控制 τ_{sw} , 因此所设计的滑模控制包括两个部分: 等效控制和切换控制, 即

$$\begin{aligned} \tau_1 &= \tau_{eq1} + \beta_1 \operatorname{sgn}(s_v) \\ \tau_2 &= \tau_{eq2} + \beta_2 \operatorname{sgn}(s_\phi) \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $\beta_1, \beta_2 > 0, \operatorname{sgn}(\mathbf{S}) = (\operatorname{sgn}(s_v) \ \operatorname{sgn}(s_\phi))^T$.

定义如下 Lyapunov 函数:

$$V_2 = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{S} \quad (22)$$

对上式求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{S}} = s_v \dot{s}_v + s_\phi \dot{s}_\phi = \\ &= -s_v \beta_1 \frac{\operatorname{sgn}(s_v)}{m} - s_\phi \beta_2 \frac{\operatorname{sgn}(s_\phi)}{m} = \\ &= -|s_v| \frac{\beta_1}{m} - |s_\phi| \frac{\beta_2}{m} \end{aligned} \quad (23)$$

因 $\beta_1, \beta_2 > 0$, 显然对 $\forall t \in (0, +\infty)$ 有 $\dot{V}_2 \leq 0$, 系统稳定.

3 实例研究

为验证上述控制器的有效性, 基于 Matlab/Simulink 对上述方法进行了仿真研究. 假设外车道的曲率半径 $R=200 \text{ m}$, 仿真车辆基本参数如下: $m=1\,970 \text{ kg}, I=3\,059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, l=2.51 \text{ m}, b=3.2 \text{ m}, h=0.9 \text{ m}$, 其中重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$. 横向附着系数 φ 的数值主要决定于道路的材料、路面的状况与轮胎结构、胎面花纹、材料以及汽车运动的速度等因素, 一般情况下 $\varphi=0.2 \sim 0.7$. 根据我国《公路路线设计规范》, 路面超高值 i_o 的最大值取 8%.

车辆的纵向位移偏差 x_e 、纵向速度 $\dot{x}$ 、横向位

移偏差 y_e 、横向速度 $\dot{y}$ 、横摆角偏差 θ_e 和横摆角速度 $\dot{\theta}$ 初值见表1,车辆横向和横摆减速度初值均为0,纵向制动减速度如式(6)所示。

表1 车辆状态初值
Tab.1 Initial values for vehicle

x_e/m	$\dot{x}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	y_e/m	$\dot{y}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	θ_e/rad	$\dot{\theta}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
-1	30	1	0	$-\pi/4$	0

取 $\varphi=0.2$,根据式(5)得临界安全车速 $v=18.9\text{ m/s}$,弯道安全车速 $u=K_v v$, K_v 主要用于提高安全系数,可取 $K_v=0.6\sim 0.9^{[2]}$.根据我国《公路路线设计规范》,一般最小半径为200 m时的最高车速为60 km/h,故此时安全车速取为 $u=15\text{ m/s}$, K_v 取为0.79. φ 值越大,横向附着力越大,汽车通过弯道的安全性就越高.同理取 $\varphi=0.5$,临界安全车速 $v=22\text{ m/s}>60\text{ km/h}$,此时安全车速亦可取为 $u=15\text{ m/s}$, K_v 约为0.68.

假设车辆纵向速度在30~20 m/s时为高速区段,20~15 m/s时为低速区段.根据式(7)计算可得 $t_1=6\text{ s}$, $t_2=7\text{ s}$,所以车辆直道上减速至安全车速所需时间为 $t_2=7\text{ s}$.仿真历时28 s,0~7 s车辆属直道制动减速阶段,0~6 s处于高速区段,制动减速度呈上升趋势;6~7 s处于低速区段,制动减速度的大小为 5 m/s^2 且保持不变,直至车速减至安全车速 $u=15\text{ m/s}$;7~28 s属弯道车道保持阶段,车辆以15 m/s的速度匀速驶过 $R=200\text{ m}$ 的1/4圆形弯道.控制律采用式(14)和(21),控制参数取值见表2.

表2 控制参数
Tab.2 Control parameters

k_1	k_2	k_3	α_1	α_2	β_1	β_2
0.8	0.5	2.5	2	5	5	8

仿真结果如图4~6所示.图4(a)为按制动减速模式规划的期望减速度曲线,0~6 s车辆减速度不断增加,其值从0增至 5 m/s^2 ;6~7 s车辆以 5 m/s^2 的恒定制动减速度继续减速至安全车速.图4(b)则描述车辆直道制动减速行驶和安全通过 $R=200\text{ m}$ 的1/4圆形弯道的轨迹,图中虚线表示车辆运行的期望状态,实线则为实际状态.

由局部放大图可知,在位姿误差 $x_e=-1,y_e=1$ 的初始状态下,车辆纵向行驶4 m后已实现对期望行驶状态的有效跟踪。

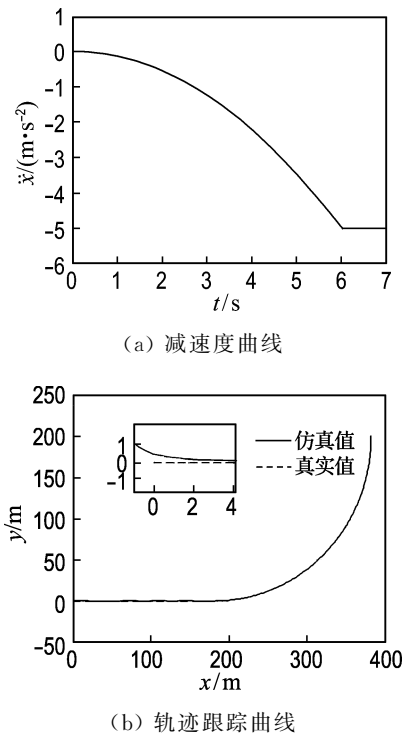


图4 减速度曲线和轨迹跟踪曲线
Fig.4 Curves for vehicle deceleration and trajectory tracking result

由图5可以看出,在上述控制器的作用下,描述系统的3种跟踪误差在3 s附近,即直道减速阶段均已渐近收敛于零.表明上述控制器具有快速、准确跟踪和全局稳定的良好特性。

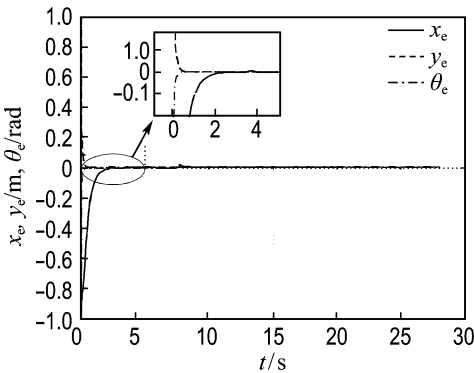
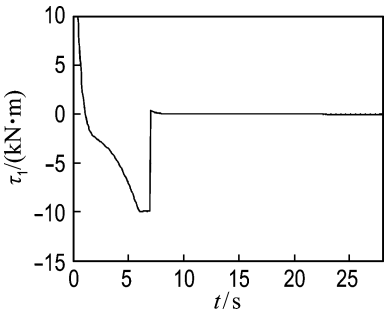


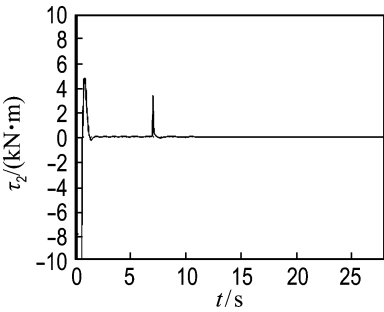
图5 轨迹偏差曲线
Fig.5 Offsets for trajectory tracking result

由图6(a)可以看出初始驱动力矩约10 000 N·m,这是因为车辆有初速度30 m/s.根据

图 6(a)可知,控制系统的调整时间约 0.5 s,在 0.5~6 s 因减速度不断增加故制动力矩由 0 逐渐增至 10 000 N·m,6~7 s 减速度恒定故制动力矩维持在 10 000 N·m,7~28 s 车辆匀速通过 $R=200\text{ m}$ 的 1/4 圆形弯道,因此车辆制动力矩恒为零.由图 6(b)可知,控制系统的调整时间约 0.5 s,在 0.5~7 s 直道制动减速阶段,汽车的转动力矩在 0 附近有微小波动,这样的波动不影响其直线行驶的方向稳定性.在第 7 s 车辆由直道驶入弯道时,由于方向盘转角瞬间变大后又迅速回正,故转动力矩存在突变,突变值约 3 000 N·m.在 7~28 s 弯道车道保持阶段,其转动力矩也保持为 0,因此能够实现弯道车道保持并维持行驶方向稳定性.



(a) 驱动/制动力矩



(b) 转动力矩

图 6 控制器输入曲线

Fig. 6 Inputs of the controller

4 结 语

为了保证车辆在高速公路弯道路段的行驶安全性,辅助车辆避免出现弯道侧滑/侧翻等危险状态,实现安全车速控制以及弯道车道保持,本文根据弯道防侧滑/侧翻自动控制系统要求,计算车辆不发生侧滑/侧翻的安全车速,建立车辆运动学模

型,采用积分反推方法分别设计了直道制动减速阶段的速度控制器和弯道车道保持阶段的位姿控制器.同时根据车辆动力学简化模型,采用滑模方法设计了动力学控制器,实现了自动化公路系统弯道上制动车辆防侧滑/侧翻的自动控制,维持了车辆行驶的安全性和方向稳定性,有一定的实际意义和研究价值.下一步需要将所研究的控制算法移植到车载微处理器上进行实车试验.

参考文献:

[1] Lee Y H, Deng W. A simulation study of vehicle curve speed control system [C] // 2006 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York: ASME, 2006:163-171.

[2] 张德兆,王建强,李升波,等. 基于风险状态预估的弯道防侧滑超速预警系统[J]. 公路交通科技, 2009, 26(S1):44-48.

ZHANG De-zhao, WANG Jian-qiang, LI Sheng-bo, et al. Risk prediction based curve anti-sideslip speed warning system [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(S1):44-48. (in Chinese)

[3] 金智林,翁建生,胡海岩. 汽车侧翻预警及防侧翻控制[J]. 动力学与控制学报, 2007, 5(4):365-369.

JIN Zhi-lin, WENG Jian-sheng, HU Hai-yan. Rollover warning and anti-rollover control for automobiles [J]. Journal of Dynamics and Control, 2007, 5(4):365-369. (in Chinese)

[4] 任殿波,张京明,崔胜民,等. 智能交通系统车道保持纵横向耦合控制[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(12):1661-1668.

REN Dian-bo, ZHANG Jing-ming, CUI Sheng-min, et al. Coupled longitudinal and lateral control for lane keeping in intelligent transportation systems [J]. Control Theory & Applications, 2010, 27(12):1661-1668. (in Chinese)

[5] Peng Huei, Hu Jwu-sheng. Traction/braking force distribution for optimal longitudinal motion during curve following [J]. Vehicle System Dynamics, 1996, 16(4):301-320.

[6] 郑四发,李西朝,李克强,等. 基于电子地图信息的车辆主动转向仿真[J]. 公路交通科技, 2007,

24(11):154-158.
ZHENG Si-fa, LI Xi-zhao, LI Ke-qiang, *et al.* Simulation of vehicle active steering based on digital map information [J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2007, 24(11):154-158. (in Chinese)

[7] 黄 勇,蒋工亮,孙 朕,等. 基于图像处理技术的高速公路弯道车速预警系统的研究[J]. 山东交通学院学报, 2007, 17(4):23-27.
HUANG Yong, JIANG Gong-liang, SUN Zhen, *et al.* Research on vehicle speed precaution system set on highway curve based on image processing technology [J]. **Journal of Shandong Jiaotong University**, 2007, 17(4):23-27. (in Chinese)

[8] 王国业,刘昭度,王仁广,等. 汽车 ABS 在对开路面上的弯道制动性能[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(4):318-321.
WANG Guo-ye, LIU Zhao-du, WANG Ren-guang, *et al.* Performances of ABS-equipped vehicles during cornering braking on bisectional roads [J]. **Transactions of Beijing Institute of Technology**, 2006, 26(4):318-321. (in Chinese)

[9] 张曙光. 铁路高速列车应用基础理论与工程技术 [M]. 北京:科学出版社, 2007.
ZHANG Shu-guang. **Fundamental Application Theory and Engineering Technology for Railway High-speed Trains** [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

[10] 曹政才,赵应涛,付宜利. 车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 电子学报, 2012, 40(4):632-635.
CAO Zheng-cai, ZHAO Ying-tao, FU Yi-li. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot [J]. **Acta Electronica Sinica**, 2012, 40(4):632-635. (in Chinese)

Sideslip/rollover avoidance controller design
for vehicle driving on curve lane

GUO Lie¹, HUANG Xiao-hui¹, GE Ping-shu^{*2}, ZHAO Yi-bing¹, LI Lin-hui¹

(1.School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2.College of Electromechanical & Information Engineering, Dalian Nationalities University, Dalian 116600, China)

Abstract: Vehicle sideslip/rollover avoidance control system is investigated for enhancing its safety on curve lane of automated highway system. A safe speed is calculated before the vehicle enters the curve lane. The vehicle kinematics model is established and integral backstepping method is adopted to design the velocity controller during vehicle braking deceleration phase in straight lane. A virtual control variable is introduced to realize the control of curve lane's keeping trajectory tracking. The dynamics controller is designed according to the simplified dynamics model to perform the simulation test, which ensures that the vehicle could go through the curve lane with a desired safe speed. From the simulation results, it is concluded that the designed controller has fast, accurate tracking and global stability characteristics. Moreover, it can efficiently avoid such dangerous working conditions as sideslip / rollover and potentially improve vehicle driving safety and cornering directional stability.

Key words: safety driving assistant; sideslip/rollover; integral backstepping method; braking deceleration; lane keeping