

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.09.002

# 基于预瞄时间自适应的爆胎车辆横向控制

孔慧芳, 曹诚, 张倩

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**针对汽车在高速行驶过程中突然爆胎极易引发严重交通事故的问题,文章提出一种基于预瞄时间自适应的爆胎车辆横向控制方法。在单点预瞄驾驶员模型的基础上,提出一种预瞄时间自适应算法,通过预测未来一段时间内不同预瞄时间的车辆运行状况,将道路边界约束添加为约束条件设计优化函数,选取合适的预瞄时间,提高车辆的行驶稳定性;采用滑模控制理论设计主动转向控制器,根据爆胎前、后横摆角速度偏差对车辆前轮转角进行补偿,以解决爆胎导致的车辆横向偏航问题。在CarSim与Simulink联合仿真平台下进行的仿真验证结果表明,该文提出的控制方法可以使爆胎车辆基本保持在原路径上行驶,有效提高了车辆的稳定性和安全性。

**关键词:**爆胎;预瞄时间自适应;滑模变结构;横向控制;前轮转角

**中图分类号:**TP273.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)09-1160-07

## Lateral control of flat tire vehicle based on adaptive preview time

KONG Huifang, CAO Cheng, ZHANG Qian

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that sudden tire burst can easily lead to serious traffic accidents in the process of high-speed driving, a lateral control strategy of tire burst vehicle based on adaptive preview time is proposed. Based on the single-point previewing driver model, an adaptive algorithm of previewing time was proposed. By predicting vehicle operating conditions with different previewing time in the future and considering the constraints of road boundary, the algorithm was added as a design optimization function to select appropriate previewing time and improve vehicle driving stability. The active steering controller was designed based on sliding mode control theory, and the front wheel angle was compensated according to yaw velocity deviation before and after tire burst, which effectively solved the lateral yaw problem caused by tire burst. Simulation verification was carried out on CarSim and Simulink co-simulation platform. The results show that the proposed control method can keep the vehicle with flat tire basically on the original path, and effectively improve the vehicle stability and safety.

**Key words:** tire burst; adaptive preview time; sliding mode variable structure; lateral control; front wheel angle

## 0 引言

高速运动的汽车发生爆胎是一种极其危险的状况。最常见的导致轮胎爆裂的原因有轮胎的压

力或温度过高或过低。由于轮胎爆胎具有突发性,轮胎特性如滚动阻力系数、侧偏及侧倾刚度等会在爆胎时刻发生巨大变化,从而使车辆运动状态发生改变,向爆胎轮胎一侧偏离<sup>[1-2]</sup>。同时,在

收稿日期:2022-01-13;修回日期:2022-04-13

基金项目:安徽省科技攻关计划资助项目(JZ2021AKKG0310)

作者简介:孔慧芳(1964—),女,安徽蚌埠人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

爆胎产生的强干扰下,驾驶员对方向盘的过度转向和急刹车等错误操作会使轮胎与轮辋脱离,侧向力急剧变化,导致车辆翻车<sup>[3]</sup>。

因此,针对爆胎车辆的主动转向控制研究成为近几年的研究热点<sup>[4-6]</sup>。为了模拟车辆实际的爆胎情况,文献<sup>[7]</sup>建立了爆胎轮胎模型,并在仿真软件下进行验证。面对爆胎车辆失控导致严重偏航以及失稳等问题,文献<sup>[8-11]</sup>建立了简化的车辆爆胎动力学模型,分别采用模型预测控制、模糊控制理论等设计主动转向控制器,对爆胎车辆前轮转角进行控制,从而有效控制爆胎车辆对期望轨迹的跟踪。上述文献仅对低速行驶下的爆胎车辆有较好的控制效果,没有考虑高速行驶过程中车辆的控制情况。文献<sup>[12]</sup>对高速行驶中的爆胎车辆进行分析,考虑爆胎车辆存在的约束条件,设计主动前轮转向与差动制动相结合的控制方法,有效减小了爆胎车辆的侧向偏移并提高其稳定性。

由于预瞄跟踪控制更符合真实驾驶员操作习惯,且结构简单、容易实现和控制精度高,文献<sup>[13-16]</sup>提出预瞄控制的方法,并将预瞄驾驶员模型与车辆动力学模型相结合,分别采用滑模变结构控制和线性二次型最优状态调节器设计主动转向控制器,可以很好地控制车辆在低速换挡过程中的横向预瞄误差处在较小范围内,但是该方法在车辆高速爆胎突发工况下的控制效果还有待提高。

通过上述分析,为实现车辆在高速爆胎工况下可以稳定安全地跟踪路径行驶,本文首先基于单点预瞄驾驶员模型,提出一种预瞄时间自适应算法,以质心横向位置偏差、质心与边界距离、横摆角偏差以及预瞄时间作为优化指标,自适应选取预瞄时间,实现有道路边界约束条件下的爆胎车辆控制;采用滑模变结构控制理论设计主动转向控制器,使车辆在爆胎后能实现对期望轨迹的跟踪。

## 1 爆胎车辆横向动力学模型

通过对爆胎车辆的动力学分析,爆胎后轮胎滚动阻力系数和侧偏刚度值会突然发生变化,对应轮胎所受滚动阻力  $F_f$  和侧向力大小  $F_y$  也发生变化,因此同轴车轮产生的滚动阻力差会产生一个横摆力矩  $M_f$ ,加上轮胎侧向力变化,导致车辆偏向爆胎轮一侧。爆胎车辆横向动力学简化模型如图1所示。

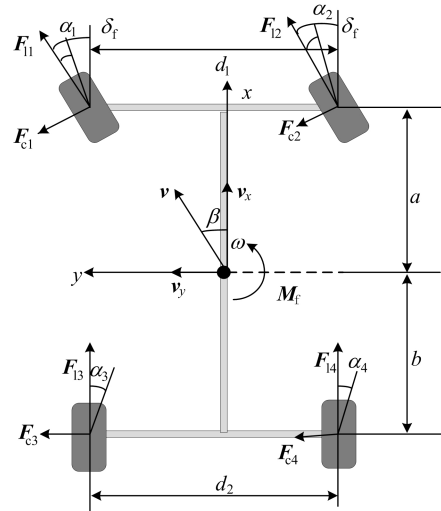


图1 爆胎汽车动力学简化模型

假设后轮转角为0,前轮转角相同,所有的旋转方向以逆时针方向为正方向。建立一个与车辆一起移动的参考系,原点在车辆质心处, $x$ 轴、 $y$ 轴分别指向车辆前方和左侧。车轮坐标系的原点在各自的车轮中心。爆胎车辆简化模型假设如下:

1) 忽略转向系统的影响,此时方向盘转角与前轮转角为线性关系,可直接将前轮转角作为输入。

2) 忽略悬架的部分作用,不考虑车身的上下振动和左右侧倾运动,只考虑因爆胎引起的垂直载荷转移。

3) 忽略悬架的部分作用,不考虑车身的上下振动和左右侧倾运动,只考虑因爆胎引起的垂直载荷转移。

爆胎车辆动力学方程为:

$$\begin{aligned} \dot{v}_y &= -v_x \omega + \\ & \frac{1}{m} \left[ \sum_{i=1}^2 (F_{fi} \sin \delta_i + F_{ci} \cos \delta_i) + \sum_{i=3}^4 F_{ci} \right], \\ \dot{v}_x &= v_y \omega + \\ & \frac{1}{m} \left[ \sum_{i=1}^2 (F_{fi} \sin \delta_i - F_{ci} \cos \delta_i) + \sum_{i=3}^4 F_{ci} \right], \\ \dot{\omega} &= 1/I_z \times \\ & \left[ a \sum_{i=1}^2 (F_{fi} \sin \delta_i + F_{ci} \cos \delta_i) - b \sum_{i=3}^4 F_{ci} + M_f \right], \\ \dot{\psi} &= \omega, \\ \dot{Y} &= v_x \sin \psi + v_y \cos \psi \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $v_x$ 、 $v_y$ 为横向和纵向速度; $I_z$ 为汽车绕 $z$ 轴的转动惯量; $\omega$ 为横摆角速度; $\psi$ 为横摆角; $\beta$ 为质心侧偏角; $\delta_i$ 为前轮转角; $Y$ 为车辆在惯性坐标系中的横向位移; $F_{fi}$ 、 $F_{ci}$ 分别为纵向和侧向轮胎力。

由于车辆在高速行驶过程中速度非常快,转向运动足够小,假设  $\delta_i \approx 0$ 。在此假设下,作用于轮胎重心处的侧向力  $F_{yi}$  可以近似为:

$$F_{yi} = \begin{cases} F_{li} \sin \delta_i + F_{ci} \cos \delta_i, & i = 1, 2; \\ F_{ci}, & i = 3, 4 \end{cases} \quad (2)$$

通过实验分析可知<sup>[3]</sup>,车辆发生爆胎后,轮胎滚动阻力系数增大为原来的 30 倍,侧偏刚度降低为原来的 1/4。

本文对左前轮爆胎进行研究,由于滚动阻力变化引起车辆绕质心转动的横摆力矩为:

$$M_f = 0.5d_1(\tilde{F}_{f1} - F_{f2}) \quad (3)$$

$$\tilde{F}_{f1} = f\tilde{F}_{z1} \quad (4)$$

其中:  $d_1$  为前轴轮距;  $f_0$ 、 $f$  分别为爆胎前、后轮胎滚动阻力系数,  $f = 30f_0$ ;  $\tilde{F}_{z1}$  为爆胎后车辆垂直载荷。

针对爆胎轮胎侧偏刚度值变化对轮胎侧向力的影响,本文将轮胎侧向力、纵向力与路面附着系数  $\mu$ 、侧偏角  $\alpha_i$ 、滑移率  $s_i$  以及垂直载荷之间的关系<sup>[17]</sup>表示如下:

$$\begin{aligned} F_{li} &= f(\tilde{F}_{z1}, \alpha_i, s_i, \mu), \\ F_{ci} &= f(\tilde{F}_{z1}, \alpha_i, s_i, \mu) \end{aligned} \quad (5)$$

轮胎侧偏角表示为:

$$\alpha_i = \begin{cases} \delta_i - \frac{a\omega + v_y}{v_x}, & i = 1, 2; \\ \frac{b\omega - v_y}{v_x}, & i = 3, 4 \end{cases} \quad (6)$$

$r$ 、 $\omega$  分别为车轮半径与角速度,纵向滑移率表示为:

$$s_i = \begin{cases} \frac{r\omega}{v_x} - 1, & v_x > r\omega, v_x \neq 0; \\ 1 - \frac{v_x}{r\omega}, & v_x < r\omega, \omega \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

车辆行驶过程中发生爆胎使轮胎侧偏刚度变化导致车轮垂直载荷重新分配,爆胎后的垂直载荷可以表示为:

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{z1} &= m \left[ \frac{gb - a_x h}{2(a+b)} + \frac{\tilde{C}_f a_y h}{(\tilde{C}_f + C_r)D} \right], \\ \tilde{F}_{z2} &= m \left[ \frac{gb - a_x h}{2(a+b)} - \frac{\tilde{C}_f a_y h}{(\tilde{C}_f + C_r)D} \right], \\ \tilde{F}_{z3} &= m \left[ \frac{gb + a_x h}{2(a+b)} + \frac{C_r a_y h}{(\tilde{C}_f + C_r)D} \right], \\ \tilde{F}_{z4} &= m \left[ \frac{gb + a_x h}{2(a+b)} - \frac{C_r a_y h}{(\tilde{C}_f + C_r)D} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $C_f$ 、 $C_r$  为前、后轴侧偏刚度;  $\tilde{C}_f$  为爆胎后轮胎侧偏刚度,  $\tilde{C}_f = 0.25C_f$ ; 平均轮距  $D = (d_1 + d_2)/2$ 。

为了避免爆胎车辆行驶过程中翻车,前轮转角不应超过一个限度,即  $|\delta_f| \leq \delta_{f,max}$ 。理想情况下,转向系统传动比定义为方向盘转角  $\delta_{sw}$  与前轮转角  $\delta_f$  的比值,即  $i = \delta_{sw}/\delta_f$ 。

综上所述,爆胎车辆横向动力学模型可以描述为  $\dot{x} = f(x, u)$ 。其中:  $x = [v_y \ \beta \ \omega \ \psi \ Y]^T$  为系统状态向量;  $u = \delta_f$  为控制输出变量。

## 2 控制器的设计

### 2.1 控制器系统结构

爆胎车辆控制系统结构图如图 2 所示。

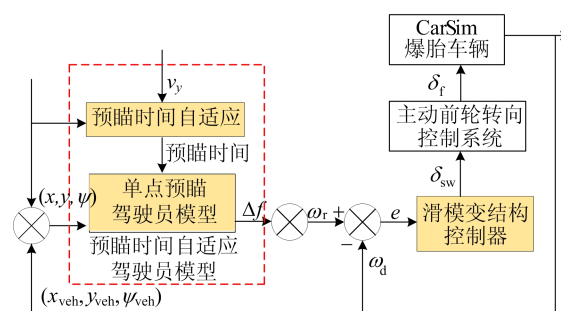


图 2 爆胎车辆控制系统结构图

通过上述分析,本文基于单点预瞄驾驶员模型,采用预瞄时间自适应算法得出期望横摆角速度,再对爆胎车辆横向动力学模型进行控制。

### 2.2 基于预瞄时间自适应的驾驶员模型

假设本文所研究车辆在小曲率路径下行驶过程中发生爆胎,单点预瞄驾驶员模型如图 3 所示。以车辆实际行驶过程中的运动状态为基础,预测汽车行驶至前方位置时车辆质心与期望路径道路中心线之间的横向偏差。

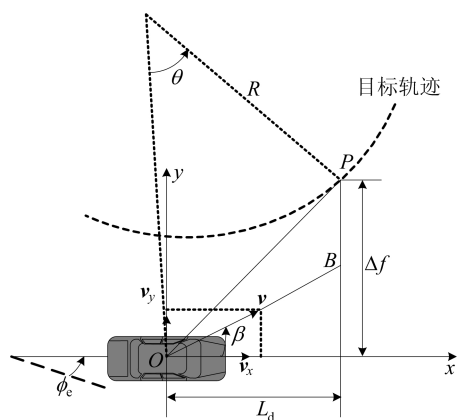


图 3 单点预瞄驾驶员模型

图 3 中:  $O$  点为车辆当前位置的质心;  $P$  点为目标轨迹上的预瞄点;  $\Delta f$  为预瞄偏差。

根据运动学原理,可得车辆横向偏差以及横向位置偏差与航向角的变化率为:

$$\begin{aligned} \Delta f &= \tan\left(\frac{\theta}{2} + \beta\right)L_d, \\ \Delta \dot{f} &= -v_y - L_d\omega_d + v_x\phi_e, \quad \dot{\phi}_e = v_x\rho - \omega_d \end{aligned} \quad (9)$$

其中: $\rho$ 为道路曲率; $L_d$ 为车辆在 $x$ 轴方向上的位移; $\theta$ 为车辆在预瞄时间 $t_p$ 内转过的角度; $\phi_e$ 为车辆航向角。且有:

$$\theta = \omega_d t_p, \quad L_d = v_x t_p \quad (10)$$

由式(9)~(10)可以计算出车辆期望横摆角速度,即 $\omega_d = 2\left[\arctan\left(\frac{\Delta f}{v_x t_p}\right) - \beta\right]t_p^{-1}$ 。

固定预瞄时间的驾驶员模型相当于驾驶员在驾驶过程中不考虑前方路径情况,保持固定视角,因此并不能完全适应变化的路径情况;而自适应预瞄时间的驾驶员模型可以根据前方路径的情况随时调整合适的视角,更好地实现驾驶员在爆胎发生后对车辆的驾驶操作。

在车辆运行过程中的某一位置,选取不同的预瞄时间 $t_p$ 。将车辆横向位置偏差、边界与质心之间的距离、方向角变化率和预瞄时间作为优化指标,设计相关目标函数为:

$$\begin{aligned} J_1 &= \int_0^{t_1} \Delta f^2 dx, \\ J_2 &= \int_0^{t_1} \frac{|\Delta f/\Delta|}{1 - \|\Delta f/\Delta\|} t_p dx \\ J_3 &= \phi_e, \quad J_4 = (t_p - t_e)^2 \end{aligned} \quad (11)$$

其中: $\Delta$ 为质心到边界的距离; $t_e$ 为与车辆转向响应特性相关时间,高速行驶状态下满足 $t_e \in (0, 1]$ ;  $t_1$ 为模型预测时间。根据以上目标函数,定义综合优化指标,即

$$J = \min(\omega_1 J_1 + \omega_2 J_2 + \omega_3 J_3 + \omega_4 J_4) \quad (12)$$

其中, $\omega_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )为权重系数,它们的取值分别代表轨迹跟踪的位置精度、轨迹远离道路边界、车辆行驶下一阶段的可控性以及选取合适的预瞄时间。通过迭代优化选取使适应度函数 $J$ 达到最小的预瞄时间。

### 2.3 滑模变结构主动转向控制器设计

考虑滑模变结构控制本身具有克服参数扰动和不确定因素对车辆行驶稳定性影响的特点,因此设计滑模控制器对爆胎车辆横摆角速度进行控制,假设车辆行驶速度恒定,不考虑路面附着系数对车辆的影响。

定义 $e$ 为车辆实际横摆角速度与期望横摆角

速度的误差,即

$$e = \omega_r - \omega_d \quad (13)$$

针对爆胎车辆横向动力学模型,滑模函数可以设计为:

$$s = e + \lambda_0 \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad \lambda_0 > 0 \quad (14)$$

对式(14)求导可得:

$$\dot{s} = \dot{e} + \lambda_0 e = \dot{\omega}_r - \dot{\omega}_d + \lambda_0(\omega_r - \omega_d) \quad (15)$$

令 $\dot{s}=0$ ,结合式(1)可得滑模控制器等效控制输入为:

$$\begin{aligned} \delta_{sw\_eq} &= -\frac{I_z}{a\tilde{C}_f} \left[ -\frac{a\tilde{C}_f - bC_r}{I_z} \beta - \right. \\ &\quad \left. \frac{a^2\tilde{C}_f + b^2C_r}{I_z v} \omega_r + \dot{\omega}_d - \lambda_0(\omega_r - \omega_d) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

为了进一步消除滑模控制的高频振动,采用等速滑模趋近律,并采用以下饱和函数代替等速趋近律中的符号函数:

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x), & |x| > 1; \\ x, & |x| \leq 1 \end{cases} \quad (17)$$

设计系统控制输入为:

$$\delta_{sw} = \delta_{sw\_eq} - k_0 \text{sat}(s/\epsilon) \quad (18)$$

其中: $\lambda_0$ 为加权系数;控制器参数 $k_0 > 0$ ;  $\epsilon$ 为边界层厚度。

**证明** 构建 Lyapunov 函数  $V = 0.5s^2$ , 两端对时间求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{s} = s(\dot{e} + \lambda_0 e) = \\ &= s \left\{ \lambda_0 e + \frac{1}{I_z} [\delta_{sw} + d(t)] - \dot{\omega}_d \right\} = \\ &= s \left\{ \lambda_0 e + \frac{1}{I_z} \left[ I_z (-\lambda_0 e + \dot{\omega}_d - \frac{1}{I_z} d(t)) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. k_0 \text{sat}(s) + d(t) \right] - \dot{\omega}_d \right\} = -\frac{k_0}{I_z} |s|. \end{aligned}$$

因为车辆转动惯量大于0,所以当 $k_0 > 0$ 时,  $\dot{V} < 0$ 。因此横摆角速度误差渐近稳定。当横摆角速度误差收敛到0时,由式(1)~(8)可得:

$$\dot{\beta} + \frac{2\left(1 + \frac{b}{a}\right)C_r}{mv} \beta = \left[ \frac{2\left(\frac{b^2}{a}C_r + bC_r\right)}{mv^2} - 1 \right] \omega_d \quad (19)$$

最终得到质心侧偏角的稳态值为:

$$\beta_{\text{steady}} = \left[ \frac{b}{v} - \frac{mv}{2(1+b/a)C_r} \right] \omega_d \quad (20)$$

其中, $v$ 为车辆质心处的速度。由式(9)可知,当车辆处于稳态时,即 $\Delta \dot{f}=0, \dot{\omega}_r=0$ ,  $R$ 为目标轨迹半径,当 $v_x \ll v_y$ 时, $\omega_d$ 的稳态值为:

$$\omega_{d\_steady} \approx \frac{v_x}{\sqrt{R^2 - L_d^2}} \quad (21)$$

### 3 仿真实验

#### 3.1 仿真参数设定

正常车辆参数选取见表 1 所列。

表 1 正常车辆参数

参数	数值	参数	数值
$r/m$	0.15	$I_z/(kg \cdot m^2)$	2 059.2
$a/m$	1.05	$h/m$	0.65
$b/m$	1.55	$C_l/(N/rad)$	108 861
$m/kg$	1 430	$C_r/(N/rad)$	108 861

表 1 中: $r$  为车轮半径; $a$  为前轮到质心距离; $b$  为后轮到质心距离; $m$  为整车质量; $I_z$  为横摆转

动惯量; $h$  为车辆质心到地面距离; $C_l$ 、 $C_r$  分别为前、后轮侧偏刚度。

假设设置汽车在行驶 2 s 时发生爆胎,以左前轮爆胎为例,路面与轮胎间接触面摩擦系数设置为 0.85,仿真时间为 10 s。

#### 3.2 仿真结果及分析

为了验证本文所提控制方法的有效性,分别在直行与转弯 2 种工况下对爆胎车辆的控制效果进行验证分析。

1) 直线行驶工况下,选取固定预瞄时间  $t_p = 0.6$  s 的控制效果与本文自适应预瞄时间的控制效果进行对比。车速设置为 60 km/h,仿真实验结果如图 4 所示。

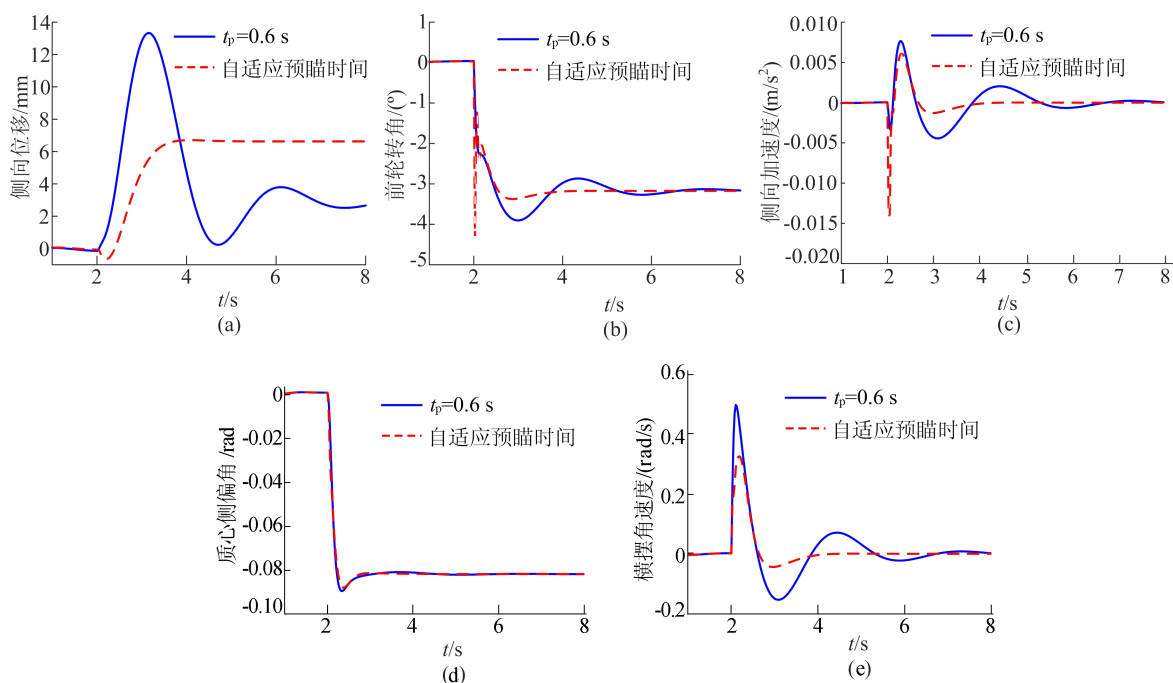


图 4 固定预瞄时间与自适应预瞄时间控制效果对比

从图 4a 可以看出,汽车左前轮发生爆胎时,车辆向左侧偏航;从图 4c 可以看出,左前轮爆胎发生后由于侧向力的影响会立即产生一个侧向加速度。

相较于固定预瞄时间,预瞄时间自适应控制的驾驶员模型可以体现出较明显的优势,车辆质心侧偏角与横摆角加速度都有一定程度的减小,且可以在较短的控制时间内趋于稳定。

2) 爆胎车辆直线行驶过程中的控制效果验证。假设车辆爆胎时不采取制动措施,仅通过前轮主动转向控制车辆行驶轨迹,分别验证车速在 60、80、100、120 km/h 下本文控制方法的控制效

果,如图 5 所示。

图 5 分别为爆胎车辆直线行驶过程中在不同车速行驶下的侧向偏移、前轮转角、侧向加速度、质心侧偏角和横摆角速度的仿真曲线。

从图 5 可以看出,车速越快,汽车行驶稳定性越差。在爆胎发生时,由于轮胎力学特性发生阶跃性变化,横摆角加速度在这一时刻发生较大波动,随后在 2 s 内呈现下降趋势,最终趋于 0。车辆前轮转角也可在较短的控制时间内稳定在车辆行驶安全性能范围内,说明本文所采用的控制方法可以起到对爆胎车辆路径偏差的纠正,并提高其行驶稳定性。

3) 爆胎车辆在弯道行驶过程中的控制效果验证。本文在转弯工况中设置以 5 km/h 为 1 个

单位,逐步增加对爆胎车辆的控制来进行仿真验证,结果如图 6 所示。

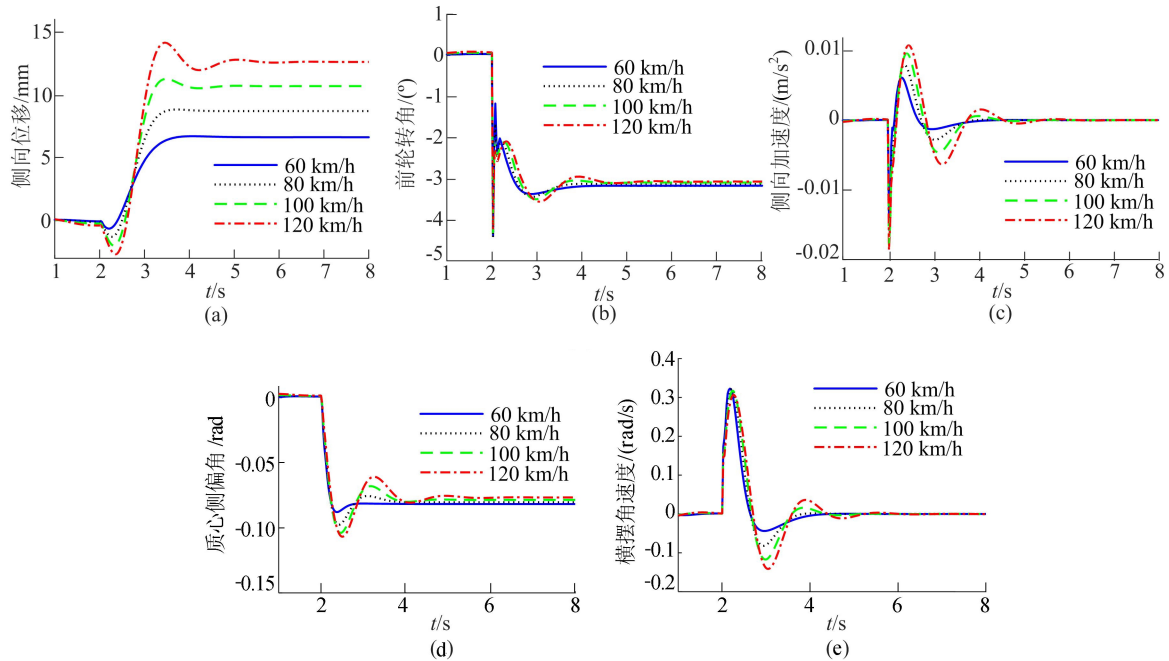


图 5 直线工况下安全性能指标

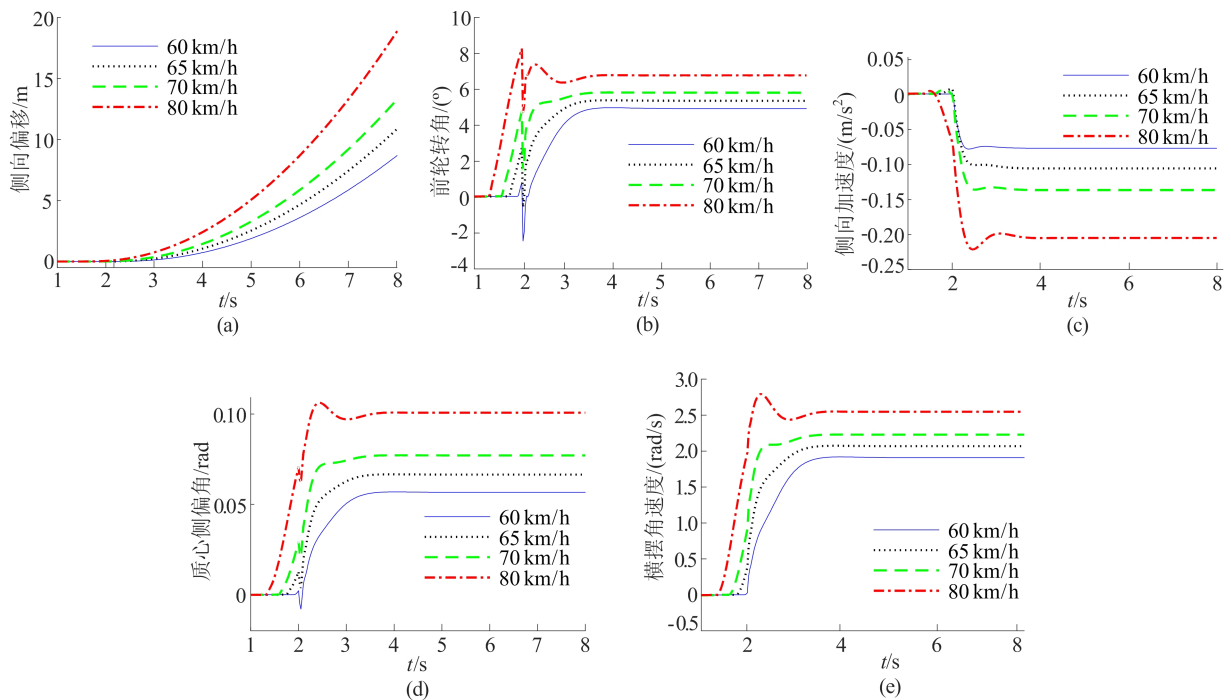


图 6 转弯工况下安全性能指标

从图 6 可以看出,爆胎发生后侧向加速度减小,这主要是由于前轮向左偏转,侧偏刚度减小,给前轴带来一个巨大的冲击力。

在控制系统的作用下侧向加速度能以较快的速度趋于稳定。

从图 6 还可以看出,横摆角速度与质心侧偏

角曲线在爆胎发生后随着速度的增加振荡幅度会增加,稳定性会降低,但最后都可以在一定时间内趋于稳定,表明本文所提出的控制方法对于爆胎车辆高速行驶过程中的偏航以及行驶稳定性都有一定的控制效果。

(下转第 1177 页)

- 实现[D]. 成都:电子科技大学,2015.
- [6] 陈甦欣,汪涛. 基于视觉的涂胶质量检测方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(7):138-141.
- [7] 殷苏民,胡乃龙. 一种基于机器视觉的电池涂胶缺陷检测方法[J]. 机械制造,2017,55(1):85-87.
- [8] 朱立忠,李肖静,李文欣. 基于 Faster-RCNN 的汽车涂胶缺陷检测[J]. 沈阳理工大学学报,2021,40(3):29-34.
- [9] 朱立忠,陈美洋. 一种基于机器学习的汽车涂胶缺陷检测研究[J]. 沈阳理工大学学报,2018,37(4):18-22.
- [10] 胡峰. 基于机器视觉的布料瑕疵检测若干关键技术研究及实现[D]. 杭州:浙江工业大学,2018.
- [11] 王秋萍,张志祥,朱旭芳. 图像分割方法综述[J]. 信息记录材料,2019,20(7):12-14.
- [12] 李冰,何超. 基于背景骨架特征的粘连米粒图像分割算法[J]. 计算机应用,2017,37(增刊2):198-202.
- [13] 王要峰,崔艳. 基于方向链码去除骨架图像毛刺算法[J]. 计算机应用,2013,33(增刊1):193-194,198.
- [14] SHAO L, ZHANG Y M. Research on high temperature region segmentation of infrared pipeline image based on improved two-dimensional-otsu[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(5):1637-1642.
- [15] 齐美彬,田中贺,蒋建国. 自适应阈值局部特征融合的人脸识别[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2018,41(4):468-472,512.
- [16] 张爱云,王吉华,高崑,等. 基于机器视觉的 VVT 发动机转子缺陷检测系统设计[J]. 工程设计学报,2021,28(6):776-784.

(责任编辑 闫杏丽)

(上接第 1165 页)

## 4 结 论

本文针对车辆在高速行驶过程中发生爆胎,轮胎力学特性发生变化直接影响汽车的行驶稳定性和运动轨迹的情况,提出一种预瞄时间自适应控制算法,并建立了驾驶员模型,计算出车辆期望横摆角速度;通过滑模变结构控制算法设计主动转向控制器跟随车辆期望横摆角速度,控制前轮转角,使车辆在高速爆胎工况下仍可以很好地跟踪期望轨迹,提高车辆行驶稳定性;最后通过仿真实验验证了本文所提控制方法的有效性。

## [参 考 文 献]

- [1] BLYTHE W, DAY T D, GRIMES W D. 3-dimensional simulation of vehicle response to tire blow-out; SAE Technical Paper 1998-02-23[R]. [S. l.]: SAE, 1998.
- [2] ORENGO F, RAY M H, PLAXICO C A. Modeling tire blow-out in roadside hardware simulation using LS-DYNA [C]//ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. [S. l.]: ASME, 2003: 71-80.
- [3] 郭孔辉,黄江,宋晓琳. 爆胎汽车整车运动分析及控制[J]. 汽车工程,2007,29(12):1041-1045,1109.
- [4] 张彦会,李晓萍,伍松. 基于主动转向的爆胎汽车操纵稳定性模糊控制研究[J]. 机械设计与制造,2012(3):182-184.
- [5] 李绍松,郭孔辉,仇韬,等. 极限工况下主动前轮转向汽车稳定性控制[J]. 汽车工程,2020,42(2):191-198.
- [6] 张金柱,张洪田,孙远涛. 电动汽车稳定性的横摆力矩控制[J]. 电机与控制学报,2012,16(6):75-80.
- [7] 胡超芳,曹磊,赵凌雪. 基于预测控制的无人驾驶车辆爆胎转向控制[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(5):468-474.
- [8] 夏勇生,吴东升,平兰兰. 基于 MPC 的爆胎车辆轨迹跟踪控制[J]. 电子测量与仪器学,2021,35(6):154-160.
- [9] PATWARDHAN S, TAN H S, TOMIZUKA M. Experimental results of a tire-burst controller for AHS[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(11):1615-1622.
- [10] 陈东,石能芳,武楠. 爆胎车辆轮胎垂直载荷的控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2013,41(11):114-119.
- [11] 王菲,刘柏楠,郭洪艳,等. 爆胎汽车的轨迹跟踪与稳定性控制[J]. 电机与控制学报,2013,17(11):97-104.
- [12] MACADAM C C. An optimal preview control for linear systems[J]. Journal of Dynamic Systems, 1980, 102(3):188-190.
- [13] MACADAM C C. Application of an optimal preview control for simulation of closed-loop automobile driving[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1981, 11(6):393-399.
- [14] 陈子越. 汽车爆胎行驶稳定性控制策略仿真研究[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [15] 曹智. 爆胎车辆稳定性控制策略研究[D]. 重庆:重庆邮电大学,2019.
- [16] MO T P, ZHANG X W, FA K F, et al. Design and simulation of the sliding mode controller for the vehicle blow-out process control[J]. International Journal of Vehicle Safety, 2013, 6(4):333-346.
- [17] PAOLO F, FRANCESCO B. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3):566-580.

(责任编辑 胡亚敏)