驾驶员在环的爆胎车辆主动安全控制研究

韩泽璇[1]， 路永婕[2]， 张俊宁[3]， 杨晨旭[1]

(1.石家庄铁道大学 机械工程学院,河北 石家庄 050043;
2.石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室,河北 石家庄 050043;
3.上海大学 力学与工程科学学院,上海 200444)

摘要:为更加真实地反映爆胎车辆的运动状态,考虑爆胎工况下驾驶员行为对汽车的影响,在主动制动控制策略下,对爆胎汽车进行驾驶补偿控制。根据轮胎力学参数的变化,在轮胎模型基础上构建爆胎模型,结合车辆动力学方程建立爆胎车辆动力学模型,以主动差动制动的方式对爆胎汽车进行稳定性控制,通过驾驶员模型来模拟爆胎工况下司机对方向盘转角控制,分析动力学响应并设计驾驶转角补偿器来修正驾驶员操作引起的汽车失稳状态。结果表明,爆胎会使车辆的运行状态发生改变,驾驶员的行为会导致车辆严重失稳与偏航,差动制动和转角补偿控制可以平衡爆胎过程中产生的不稳定因素并修正驾驶员操作带来的影响,使车辆保持稳定并沿预期轨迹减速行驶。

关键词:汽车工程;爆胎;驾驶响应;补偿;稳定性控制

中图分类号: U461 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-0373(2023)02-0089-07

近年来汽车保有量快速增长,车辆行驶过程中的安全问题会造成大量的交通事故,因此受到了人们广泛关注。爆胎作为一种特殊的极端工况会严重影响车辆的行驶安全,而爆胎后车辆的行为难以有效控制是出现众多爆胎后重大事故的直接原因。据美国安全局统计[1],每年因爆胎引发的车祸事故约8万起,其中约400人死亡,10 000人受伤。车辆爆胎会使轮胎力学特性发生显著改变,从而造成汽车的侧向力和纵向力等参数的变化,车辆运行状态会受到很大影响,据文献[2]可知爆胎持续时间仅约100 ms,驾驶员在这种短暂的极限工况下很难做出及时有效的反应,方向盘转角过度或急刹车等不当操作会使车辆侧向力极具增加,因此极易引起车辆进入不可控的失稳状态,从而造成严重的交通事故。

为降低车辆爆胎带来的风险,国内外学者开展了大量研究工作。郭孔辉等[3]通过轮胎试验分析对比了不同垂向载荷和胎压下轮胎力学特性,得到了爆胎轮胎的性能参数。LI et al [4]对原有轮胎经验模型进行改进,建立了爆胎模型,与CarSim联合仿真得出了不同前轮转角输入下的爆胎车辆动力学响应。VICHARE et al[5]对半挂汽车的双后轮做了简化改进,在各种驾驶场景下进行车辆爆胎情形模拟,分析了驾驶员的不同转向操作给爆胎汽车带来的影响。王菲等[6]通过对爆胎汽车运动状态的分析,提出了模型预测控制和主动差动制动的协调控制方法,使汽车能保持较小的侧向偏移继续沿原车道行驶。陈尧[7]总结了不同轮胎稳态模型的优缺点,选取魔术公式建立爆胎车辆模型仿真,得出爆胎车辆在不同路面特征下的运动特征,并进行了直线和曲线行驶的控制研究。李冰林等[8]采用分数阶微积分的方法设计横向稳定控制器,对爆胎汽车实施制动力矩控制,修正了爆胎汽车的运动状态。刘维等[9]和杨路[10]针对车辆爆胎情况分别设计了模糊滑模横摆力矩平衡策略和状态观测协调制动策略,有效提高了爆胎车辆的稳定性。胡超芳等[11]对爆胎工况下无人驾驶车辆进行分析,提出了连续时域自适应预测的转向控制策略,进一步优化了以往的爆胎汽车主动控制方法。各学者在爆胎车辆动力学响应、稳定性控制、驾驶操作影响等方

收稿日期:2022-12-04 **责任编辑**:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20220368

基金项目:国家自然科学基金(12072204);河北省自然科学基金(A2020210039)

作者简介:韩泽璇(1999—),男,硕士研究生,研究方向为车辆动力学分析与控制。E-mail:1597705429@qq.com

韩泽璇,路永婕,张俊宁,等.驾驶员在环的爆胎车辆主动安全控制研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2023,36(2):89-95.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

面进行了深入研究,但驾驶员行为往往会受主观因素影响,在极短的爆胎时间里很难自主控制车辆行驶轨迹。以往的研究中很少考虑驾驶员行为对爆胎工况车辆运动状态的影响,即使考虑了驾驶员模型,也是较为简单地将驾驶员信息作为一个输入参数,不能完整描述车辆爆胎后闭环系统下的实际运动学和动力学特性。

综上分析,为更好地模拟车辆实际行驶过程中发生爆胎时的运行状态,将驾驶员、爆胎车辆、路面信息相联系,构建了一个完整的闭环系统来模拟驾驶员行为对爆胎车辆的影响。仿真过程中以主动差动制动控制来平衡车辆爆胎后因力学特性改变产生的附加横摆力矩,考虑到紧急状况下驾驶员的过度转向会使车辆的运动状态更加不稳定,设计转角补偿控制器对驾驶操作进行调整。结果表明,车辆行驶过程中发生爆胎,驾驶员很难在短时间内做出正确有效的决策,因此会进入不稳定状态并造成更加严重的偏航,转角补偿器能及时有效地对驾驶员的输入转角进行补偿控制,使车辆维持在理想运动状态。

1 爆胎车辆模型

对爆胎车辆进行动力学分析,首先要建立爆胎车辆模型,因此在保证能真实反映汽车爆胎后的运动状态和控制效果的条件下要尽可能将其简化,以考虑纵向、侧向、横摆3个运动方向的车辆模型为基础,与改进的爆胎模型进行联合,构建了用于仿真分析的爆胎车辆模型,使其能清晰反映车辆的实时运动状态,并能良好保持控制环节的时效性和精确性。

1.1 车辆模型

车辆运动模型以动力学分析为基础,考虑纵向、横向及横摆运动。如图1所示,车身坐标系的原点为质心,x、y、z 轴为汽车纵向、侧向、垂向轴线。

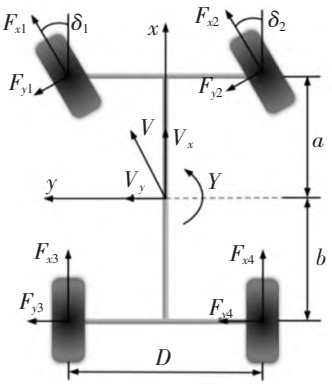

图1 车辆动力学模型

根据牛顿第二定律,列出车辆运动学方程

$$m\ddot{x} = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} + m\dot{y}\gamma \tag{1}$$

$$m\ddot{y} = F_{y1} + F_{y2} + F_{y3} + F_{y4} - m\dot{x}\gamma \tag{2}$$

$$I_z\dot{\gamma} = a(F_{y1} + F_{y2}) - b(F_{y3} + F_{y4}) + \frac{D}{2}(F_{x2} - F_{x1} + F_{x4} - F_{x3}) \tag{3}$$

式中,γ 为横摆角速度;F_{xi} 为车轮纵向力;F_{yi} 为车轮侧向力;a 为前轴到质心的距离;b 为后轴到质心的距离;D 为前后轮距;I_z 为车辆绕 z 轴转动惯量。

1.2 爆胎模型

采用的爆胎模型是在Dugoff轮胎模型的基础上改进建立,Dugoff模型相较于其他理论模型所需参数较少且表达形式简单,能够很好地反映纵向力、侧向力、回正力矩随速度的动态变化,也可以反映速度较小情况下的回正力矩随路面摩擦状况、路面接地区长度、载荷、纵向滑移率和侧偏角的变化过程[12],因此广泛应用于汽车动力学仿真分析。

Dugoff模型所定义的纵向力和侧向力为

$$F_{xi} = C_{xi}\frac{S_i}{1+S_i}f(\lambda) \tag{4}$$

$$F_{yi} = C_{yi}\frac{\tan(\alpha_i)}{1+S_i}f(\lambda) \tag{5}$$

式中,C_{xi} 为车轮纵向刚度;C_{yi} 为车轮侧向刚度;α_i 为车轮侧偏角;λ 为轮胎动态参数;S_i 为车轮滑移率,S_i 计算公式为

$$S_i = \frac{\omega_i R_e - v_i}{\max\{\omega R_e, v_i\}} \tag{6}$$

式中,ω_i 为车轮角速度;v_i 为车轮速度;R_e 为车轮有效滚动半径。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

当车辆发生爆胎时,轮胎的力学特性会立刻发生明显的变化,根据轮胎实验可知,其侧偏刚度与纵滑刚度约降为原来的 10%,滚动阻力系数增大了 10 倍~30 倍。由于该数据是在实验条件下获得,考虑实际车辆爆胎后轮胎特性参数变化会更大,因此取侧偏刚度、纵滑刚度为初始值的 10%、8%,滚动阻力增加到原来的 40 倍,有效滚动半径变为原来的 2/3。爆胎是一种非常复杂的工况,在这个过程中的轮胎参数变化规律难以精确拟合,因此对其进行线性简化,得到相关参数的变化趋势如图 2 所示。

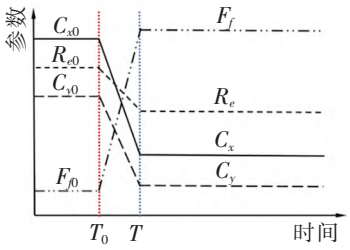

图 2　轮胎爆胎参数变化趋势

图 2 中 T_0 为爆胎时刻;T 为爆胎截止时刻;C_{x0}、C_{y0}、R_{e0}、F_{f0} 分别为爆胎前纵向刚度、侧偏刚度、有效滚动半径、滚动阻力;C_x、C_y、R_e、F_f 分别为爆胎后纵向刚度、侧向刚度、有效滚动半径和滚动阻力。上述简化后的爆胎轮胎力学特性变化规律可以通过公式来进行精确描述,由此将 Dugoff 轮胎模型进行改进,从而建立了能与车辆模型进行结合的轮胎爆胎模型。

2　在环驾驶系统

爆胎工况下汽车运动状态分析通常忽略了驾驶员操作对车辆稳定性的影响。为了更加真实地反映爆胎后实际车辆的运行过程,本节在爆胎车辆模型的基础上引入驾驶员模型来模拟驾驶员控制行为,构建了人-车交互的闭环系统来模拟实际道路的车辆爆胎响应。

为了真实模拟通常情况驾驶员的实际反应,同时使问题简化,搭建基于侧向加速度反馈方向控制驾驶员模型[13]。该模型根据预瞄-跟随理论对期望轨迹进行跟踪,实际侧向位移与理想侧向位移关系为

$$y(t+T)=y+v_yT+\frac{1}{2}a_y^*T^2 \tag{7}$$

式中,y 为车辆在 t 时刻的侧向位移;v_y 为侧向速度;a_y^* 为所需的理想加速度;T 为预瞄时间。考虑到预瞄时间后的实际位移与理想位移应保持一致,可决策出预期加速度为

$$a_y^*=\frac{2}{T^2}(f_e-y-v_yT) \tag{8}$$

式中,f_e 为 T_s 后的理想侧向位移。假设汽车的侧向加速度对方向盘转角的稳态增益为 G_{ay},则达到所需的理想加速度 a_y^* 所需施加的理想方向盘转角为

$$\delta_{sw}^*=\frac{a_y^*}{G_{ay}} \tag{9}$$

考虑到驾驶员反应滞后等生理限制,对方向盘转角进行修正

$$\Delta\delta_{sw}=\frac{(a_y^*-a_y)H}{1+t_hs} \tag{10}$$

式中,$\Delta\delta_{sw}$ 为方向盘修正转角增量;a_y^* 为理想侧向加速度;a_y 为实际侧向加速度;H 为侧向加速度反馈系数;t_h 为动作反应滞后时间,最终驾驶员的方向盘转角输入为

$$\delta_{sw1}=\delta_{sw}^*+\Delta\delta_{sw} \tag{11}$$

式中,δ_{sw1} 为驾驶员最终输入的方向盘转角;δ_{sw}^* 为驾驶员修正前输入的方向盘转角。

当车辆发生爆胎时,驾驶员会根据路面和车辆信息做出相应的决策,并将所需的方向盘转角输出到实际的爆胎车辆模型中,由此形成了一个驾驶员在环的爆胎车辆闭环系统。

3　考虑驾驶员在环的爆胎车辆主动安全分层控制

3.1　基于 LQR 的差动制动下层控制策略

汽车爆胎后会产生影响汽车稳定的横摆力矩,为使其保持良好的运动状态,需要对非爆胎车轮进行制动控制来实现补偿和减速。以理想二自由度汽车模型为参考,通过汽车实际与理想状态的偏差可决策

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

出最优横摆力矩,来实现车辆差动制动控制[14-15]。假设各车轮固有参数相同,理想二自由度车辆模型方程为

$$mv_x(\dot{\beta}+\gamma)=C_{yi}\left[\delta-2\beta+\frac{(b-a)\gamma}{v_x}\right] \tag{12}$$

$$I_z\dot{\gamma}=C_{yi}\left[a\delta+(b-a)\beta-\frac{(a^2+b^2)\gamma}{v_x}\right] \tag{13}$$

由于汽车实际运动状态与理想运动状态存在偏差,选取质心侧偏角 β 和横摆角速度 γ 作为控制变量、补偿力矩作为控制输出,建立状态空间表达式

$$\begin{pmatrix}\Delta\dot{\beta}\\ \Delta\dot{\gamma}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\Delta\beta\\ \Delta\gamma\end{pmatrix}+B\Delta M \tag{14}$$

式中,$\Delta\beta$ 为质心侧偏角偏差;$\Delta\gamma$ 为横摆角速度偏差;ΔM 为补偿横摆力矩。

令变量 $X=(\Delta\beta\ \Delta\gamma)$,输入 $u=\Delta M$,根据线性二次型最优控制方法可得

$$u=-KX \tag{15}$$

指标函数 J 为

$$J=\int_0^{\infty}\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{Q}\boldsymbol{X}(t)+\boldsymbol{u}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{R}_s\boldsymbol{u}(t)\mathrm{d}t \tag{16}$$

式中,$\boldsymbol{Q}$ 为半正定矩阵;$\boldsymbol{R}_s$ 为正定矩阵。

当 J 取最小值时可得到最优控制输入,最优输入下的系数矩阵

$$\boldsymbol{K}=\boldsymbol{R}_s^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P} \tag{17}$$

通过代数黎卡提方程求得常数矩阵 $\boldsymbol{P}$ 为

$$\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}+\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}-\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\boldsymbol{R}_s^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}+\boldsymbol{Q}=0 \tag{18}$$

由方程(18)可最终求得最优横摆力矩,实现爆胎车辆的主动差动制动控制。

3.2 基于模糊 PID 的转角补偿上层控制器

3.1 节通过主动差动制动策略对车辆爆胎时产生的附加横摆力矩进行平衡,但是紧急状态下,驾驶员的操作极易引发汽车更为严重的失稳。为了弥补驾驶员过度操作带来的影响,设计了转角补偿控制器来对驾驶员的转向输入进行修正[16-17],在此控制系统中,把理想侧向位移 y^* 与实际侧向位移 y 作为输入,通过控制侧向偏差 e 和偏差变化率 $\dot{e}$ 来得到所需补偿转角 δ_{sw2},整体的控制流程如图 3 所示。

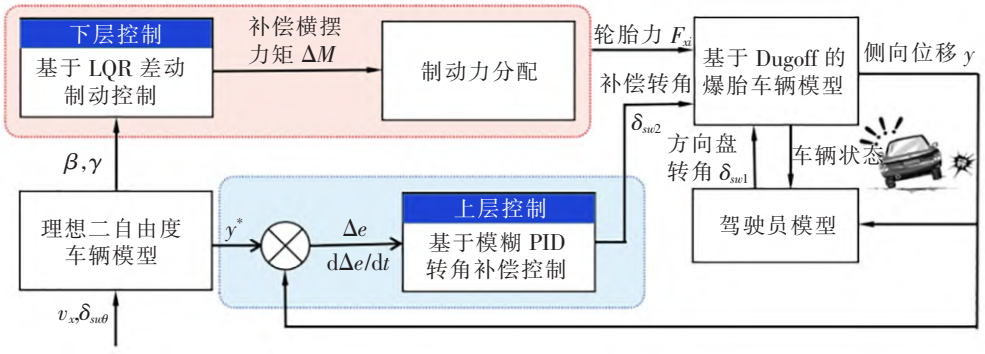

图 3 转角补偿控制流程图

汽车爆胎过程具有很强的非线性特征,PID 算法能保证稳态控制精度,但很难对其进行精确求解,模糊算法具有良好鲁棒性但容易造成系统误差,因此转角补偿控制可采用模糊 PID 联合来得到最优控制输出。令 PID 控制器输入量为 e、k_p、k_i、k_d 分别取 1.5、5、1,模糊控制器采用高斯型隶属函数,输入量 e 论域取[-2,2],模糊子集为[S_1,S_2,M_1,M_2,L_1,L_2],输入量 $\dot{e}$ 论域取[-2,2],模糊子集为[s_1,s_2,m_1,m_2,l_1,l_2],输出量 δ_{sw2} 论域取[-6,6],模糊子集为[X_1,X_2,X_3,Y_1,Y_2,Y_3,Z_1,Z_2,Z_3],通过隶属度函数,分别建立了侧向偏差和侧向偏差变化率与补偿转角的模糊规则,如表 1 所示。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　模糊规则表

e /(de/dt)	S_1	S_2	M_1	M_2	L_1	L_2
s_1	X_1	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2
s_2	X_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3
m_1	X_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Z_1
m_2	X_3	Y_1	Y_2	Y_3	Z_1	Z_2
l_1	Y_1	Y_2	Y_3	Z_1	Z_2	Z_3
l_2	Y_2	Y_3	Z_1	Z_2	Z_3	Z_3

通过模糊控制器与 PID 控制器串联建立了转角补偿控制器,使车辆保持稳定的运动状态并沿理想的预期轨迹行驶。该控制器策略是根据驾驶员的转向行为对爆胎车辆的影响来进行侧向位移实时采集,通过控制算法调整驾驶员转向操作来得出最终方向盘转角输入,最终实现车辆对理想参考位移的跟踪。

4　爆胎主动安全分层控制效果分析

根据上述分析研究,采用 Matlab/Simulink 软件搭建仿真模型。弯道过程中发生爆胎,车辆往往处在低速的运行状态下,事故发生的概率偏低,爆胎引起的事故多发生在高速直线行驶的过程中,因此对此类工况进行试验[18]。相关参数如下:整车质量 m = 2 000 kg;转动惯量 I_z = 5 400 kg/m^2;轴到质心的距离 a = 1.48 m;后轴到质心的距离 b = 1.72 m;前、后轮距均为 D = 1.55 m;车轮转动惯量 J = 1.5 kg/m^2;轮胎纵向刚度 C_x = 58 000;轮胎侧向刚度 C_y = 40 000;路面附着系数 μ = 0.85;初始车速 V_x = 90 km/h;初始转角 δ = 0。

4.1　驾驶员行为对爆胎车辆的运动影响

汽车直线行驶 2 s 后右前轮发生爆胎,爆胎过程持续 0.1 s,由于产生了侧向偏差,驾驶员会根据车辆运行状态和路面信息在紧急工况下实施转向行为,受年龄、性别、习惯和健康状况等因素的影响,驾驶员会有神经反应滞后和动作反应滞后,滞后时间一般为 0.2～0.8 s[19],从安全角度考虑取 0.8 s 作为反应输入条件,仿真时间为 10 s,其动力学响应仿真结果如图 4 所示。

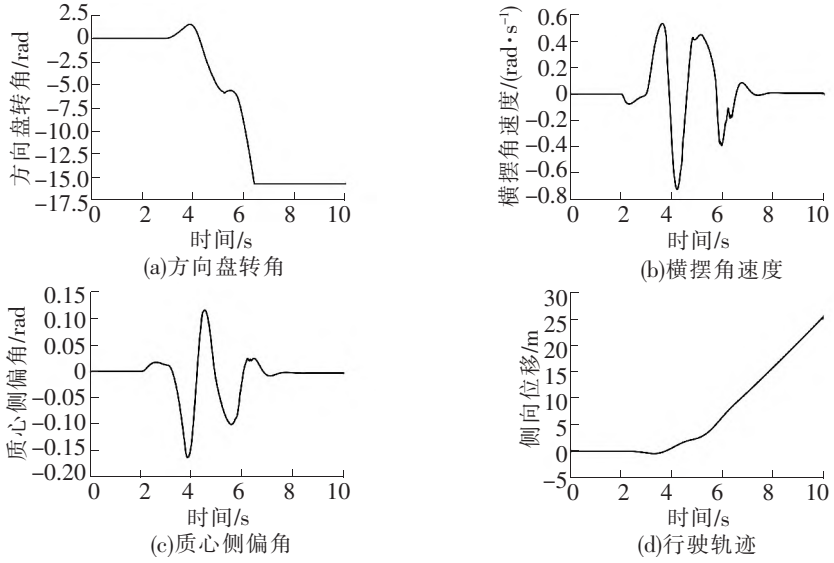

图 4　驾驶员行为下爆胎车辆运动特性

从图 4 可以看出,车辆在 2 s 时横摆角速度减小,质心侧偏角增大,此时制动轮开始制动,驾驶员经一段时间反应后逐渐增大方向盘转角输入量至 1.8 rad,爆胎车辆短暂向右侧偏移后开始产生向左的运动趋势。而后横摆角速度和质心侧偏角出现较大的上下波动,此时车辆进入不稳定状态,驾驶员为纠正车辆

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

轨迹偏航,快速回打方向盘,角度随时间变化越来越大,但车辆始终向左偏移,当爆胎发生5 s时,车辆偏移目标轨迹距离将达到4 m,根据《公路工程技术标准》中相关技术标准,单条车道宽度为3.75 m[20],此时车辆已冲出相邻车道甚至撞向护栏。

4.2 转角补偿控制下爆胎车辆的运动特征

汽车直线行驶2 s时刻右前轮发生爆胎,爆胎过程持续0.1 s,在主动差动制动作用下,驾驶员接收信息并做出紧急操作,反应时间为0.8 s,转角补偿装置对爆胎车辆进行修正控制,最终决策出理想方向盘转角输入,仿真时间为10 s,此时车辆动力学响应仿真结果如图5所示。

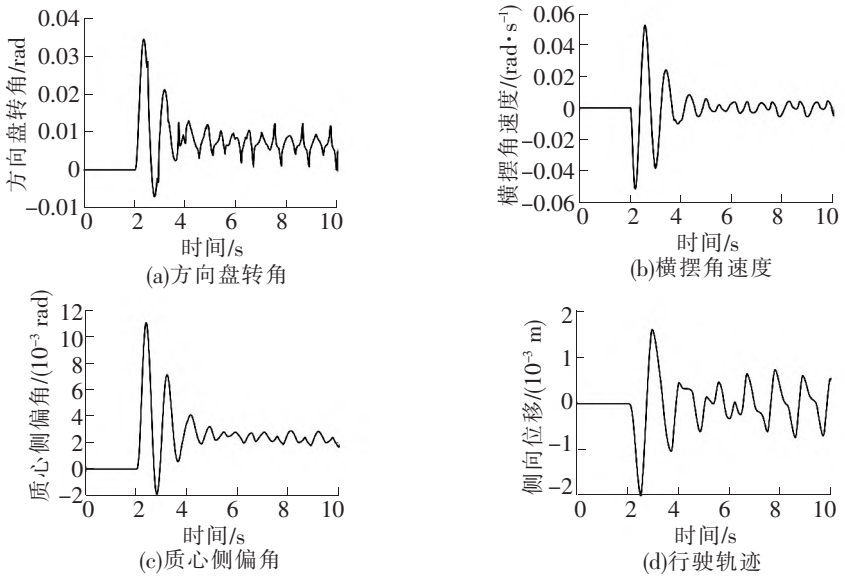

图5 补偿控制下爆胎车辆运动特性

由图5可以看出,汽车行驶过程中2 s时横摆角速度和质心侧偏角出现突变,此时制动轮开始制动,转角补偿器对其进行修正,而后车辆在驾驶员和补偿控制的综合作用下进行有规律的方向盘转角控制,输入作用下横摆角速度和质心侧偏角波动量减小,并随时间推移逐渐趋于稳定,整个过程汽车侧向位移维持在预期范围。仿真结果表明,转角补偿控制能较为理想地对驾驶员操作进行修正,使方向盘转角处于理想的输入状态,从而使车辆在较为稳定的运动状态下沿预期轨道行驶。

5 结论

(1)以爆胎车辆模型为基础,考虑驾驶员操作对汽车的动力学影响,建立了驾驶员在环爆胎车辆模型。仿真分析可知,车辆在行驶过程中发生爆胎,驾驶员的过度操作会对其造成严重的失稳和偏航。

(2)为防止转向过度带来的影响,采用了差动制动策略并设计转角控制器对汽车进行修正补偿。试验结果表明,控制器能对驾驶员操作进行调整,使转角始终维持在理想范围内,车辆在协调作用下继续沿预期轨迹减速向前行驶,为爆胎车辆驾驶稳定性控制提供了依据。

参 考 文 献

[1]CHOI E H.Tire-Related factors in the pre-crash phase[R].Washington,D.C.:National Highway Traffic Safety Administration,2012.

[2]陈东, 武楠, 石能芳. 爆胎车辆转向系统与垂直载荷瞬态响应特征[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8):112-119.

[3]郭孔辉,黄江.爆胎汽车整车运动分析及控制[J].汽车工程,2007,29(12):1041-1045.

[4]LI A,CHEN Y,DU X,et al.Should a vehicle always deviate to the tire blowout side? -a new tire blowout model with toe angle effects[J].Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control,2021,143:1-15.

[5]VICHARE C, PALANIVELU S. Simulation of heavy commercial vehicle response to rear super single tire burst[C]// Symposium on Inter nation Automotive Technology. Franklin:SAE Press,2017:6-13.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[6]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，2013，17(11)：97-104.
[7]陈尧.路表特性对爆胎车辆运动方式的影响研究[D].南京：东南大学，2018.
[8]李冰林，徐晓美，吕立亚，等. 基于分数阶微积分的爆胎汽车横向稳定性控制[J]. 安全与环境学报，2018，18(6)：166-171.
[9]刘维，张向文.爆胎汽车稳定性控制的模糊滑模控制算法研究[J].机械科学与技术，2019，38(12)：1944-1953.
[10]杨路.分布式驱动汽车爆胎自动脱困控制方法研究[D].大连：大连理工大学，2020.
[11]胡超芳，曹磊，赵凌雪，等.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，2019，52(5)：468-474.
[12]张向文，王飞跃.智能轮胎[M]. 北京：机械工业出版社，2018.
[13]丁海涛，郭孔辉，李飞，等.基于加速度反馈的任意道路和车速跟随控制驾驶员模型[J].机械工程学报，2010，46(10)：116-120.
[14]陈龙，解云鹏，蔡英凤，等.极限工况下无人驾驶车辆稳定跟踪控制[J].汽车工程，2020，42(8)：1016-1026.
[15]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.
[16]WANG F，CHEN Y. A novel autonomous trajectory control for vehicular cyber-physical systems with flocking control algorithms[C]//Annual American Control Conference.MI，USA：[s.n.]，2018：5076-5081.
[17]HUANG C，NAGHDY F，DU H，et al.Review on humanmachine shared control system of automated vehicles[C]. [S.l.]：ISAS，2019：47-51.
[18]YANG Lu，YUE Ming，WANG Jie，et al. RMPC based directional stability control for electric vehicles subject to tire blowout on curved expressway[J].Journal of Dynamic Systems，Measurement and Control，2019，141：1-9.
[19]刘涛，郭孔辉.用于爆胎车辆仿真的驾驶员模型[J].吉林大学学报，2012，42(5)：1077-1082.
[20]交通部公路司中国工程建设标准化协会公路工程委员会. 公路工程技术标准[M]. 北京：人民交通出版社，2004.

Research on Active Safety Control of Tire Burst Vehicle with DIL

Han Zexuan[1]，　**Lu Yongjie**[2]，　**Zhang Junning**[3]，　**Yang Chenxu**[1]

(1.School of Mechanical Engineering，Shijiazhuang Tiedao University，Shijiazhuang 050043，China；
2.State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures，Shijiazhuang Tiedao University，Shijiazhuang 050043，China；
3.School of Mechanics and Engineering Science，Shanghai University，Shanghai 200444，China)

Abstract：In order to more truly reflect the motion state of the vehicle with a flat tire，considering the impact of driver behavior on the vehicle under the working condition of a flat tire，under the active braking control strategy，the vehicle with a flat tire is subject to driving compensation control. According to the changes of tire mechanical parameters，a tire burst model was built on the basis of tire model，and a tire burst vehicle dynamic model was constructed based on vehicle dynamics equations. The stability of the tire burst vehicle was controlled by active differential braking. The driver's control of steering wheel angle under the condition of tire burst was simulated through the driver's model，and the dynamic response was analyzed and the driving angle compensator was designed to correct the vehicle's instability state caused by the driver's operation. The results show that the running state of the vehicle will change greatly when the tire blows during driving，and the driver's behavior will cause serious instability and even yaw. The differential braking and angle compensation control can balance the unstable factors during the tire blowing process and correct the impact of the driver's operation，so that the vehicle can keep stable and decelerate along the expected trajectory.

Key words：automobile engineering；tire burst；driving response；compensation；stability control

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net