第 19 卷第 3 期 2021 年 6 月
1672-6553/2021/19(3)/046-07

动力学与控制学报
JOURNAL OF DYNAMICS AND CONTROL

Vol.19 No.3
Jun. 2021

基于模糊PID算法的车身稳定控制策略与多工况联合仿真*

聂小博　熊玥　潘勇军†

（重庆大学 机械与运载工程学院，机械传动国家重点实验室，重庆 400044）

摘要　汽车电子稳定系统（ESP）是一项关键的主动安全配置，它能够在车辆高速过弯时防止出现侧滑和失控，维持汽车的稳定行驶．为了评估并提高不同工况下整车行驶的稳定性，就需要对目前的车身稳定控制算法进行比较并改进．本文基于Carsim软件建立了某乘用车的整车动力学模型，联合Simulink软件进行车身稳定控制的联合仿真．把整车行驶的侧向位移、质心侧偏角、横摆角速度和侧向加速度等动力学参数作为评价量，基于双移线、正弦和角阶跃工况，采用传统的PID控制算法和目前较新的模糊PID控制算法对整车的行驶稳定性进行控制．仿真结果表明，模糊PID控制策略的实时性和自适应性更好，能够提升整车的行驶稳定性和成员的驾乘舒适性．

关键词　整车动力学，　制动安全，　车身稳定控制，　模糊PID算法，　联合仿真

DOI：10.6052/1672-6553-2021-008

引言

制动防抱死系统（ABS）解决了车辆在制动时出现的轮胎抱死、方向盘不能转动等危险现象，提高了车辆制动时的稳定性[1,2]；牵引力控制系统（TCS）改善了低附着路面车辆起步和加速时的车轮打滑现象，提高了车辆起步和加速时的稳定性[3,4]．但是这两者不能直接保证车辆行驶时的侧向稳定性．而车身电子稳定系统（ESP）在ABS和TCS的基础上解决了车辆在驱动、制动转向、高速转向等极端工况环境下引起的侧向稳定性问题，使得汽车在各种工况下能够保持较好的稳定性．

有研究表明，未安装ESP系统的车辆，当车速在80−100 km/h之间时，40%的交通事故与汽车的侧滑有关；而车速达到160 km/h时，几乎所有的交通事故都是由于侧滑造成的．但在安装了ESP系统的车辆中，汽车的碰撞事故远远下降[5]，可见ESP系统在提高车辆侧向稳定性中的重要性．

随着人们的安全意识不断加强，ESP系统几乎成了汽车上不可或缺的主动安全配置，并且控制算法也在不断改进，以满足更复杂的行驶工况和更高的稳定性要求，比如模糊控制以及自适应控制等[6-10]．K. Jalali等[11]采用多准则遗传算法优化模糊主动转向控制器的参数以提高转向车辆的稳定性．D. Manhtuan等[12]采用鲁棒滑模控制算法提高车辆转向的稳定性．李果等[13]针对左右车轮垂直负载不平衡问题提出一种基于直接衡摆力矩控制策略的L_2干扰抑制算法，并基于Carsim和Simulink联合仿真证明其跟踪性能和扰动干扰能力．陈无畏等[14]分析了不同路面附着系数对质心侧偏角安全边界的影响，并设计了一种能够适用于多种路面的质心侧偏角控制策略．高振海等[15]从快速实现驾驶员操纵意图角度出发，设计出多种单轮和多轮优选控制工况及其切换机制，提高了汽车稳定性控制系统对驾驶员意图改变时车辆的快速响应性能．王其东等[16]提出了一种基于汽车行驶安全边界的EPS和ESP协调控制策略，并采用基于带精英策略的非支配排序遗传算法对其优化，改善了汽车行驶的稳定性．

本文将利用Carsim建立整车动力学模型并联合Simulink进行车身稳定控制仿真分析，基于双移线工况、正弦工况和角阶跃工况对整车模型的质心侧偏角、侧向加速度和侧向位移进行控制．文章建

2019-12-31 收到第1稿，2020-08-29 收到修改稿．
* 国家自然科学基金资助项目（11702039）
† 通讯作者 E-mail：yongjun.pan@cqu.edu.cn

立了用于车身稳定分析的 PID 算法和模糊 PID 算法的控制模型及具体实施方案,并基于三种行驶工况对所述控制算法进行了详细的比较.

1　仿真模型建立

1.1　基于 Carsim 的整车动力学建模

Carsim 动力学建模软件结合了车辆动力学建模方法与多体系统动力学建模方法,将车辆系统进行抽象简化.主要包括车体部分、簧下质量部分(四个)、旋转车轮部分(四个)及发动机曲轴部分等十个刚体系统.传动系和制动系对车轮进行驱动和制动,转向系特性和悬架 K&C 特性综合控制车轮的转向,确定轮胎的运动量,进而利用轮胎模型计算轮胎力.在 Carsim 中设置的车辆整车模型的动力学仿真参数如表 1 所示.

表 1　整车动力学参数

Table 1　Parameters of vehicle dynamics model

Parameter	Mark	Value
Sprung mass/kg	m	1650
Tread/m	d	1.36
Wheelbase /m	L	3.05
Distance from center of mass to front axle /m	a	1.4
Distance from center of mass to rear axle /m	b	1.65
Yaw inertia/kg·m^2	I_z	3234
Front axle cornering stiffness /(N/rad)	C_f	−62618
Rear axle cornering stiffness /(N/rad)	C_r	−110185
Vehicle speed/(km/h)	u	90
Road adhesion coefficient	μ	0.4

1.2　线性二自由度参考模型

车辆二自由度模型虽然忽略了车辆转向系统和悬架等对车辆运动的影响,但因其包含了能描述车辆侧向运动的前后轴侧偏刚度和质量等参数,所以能够较理想地描述车辆的侧向运动和横摆运动.因此,车辆的线性二自由度模型是研究 ESP 较理想参考模型.车辆的线性二自由度参考模型如图 1 所示.由线性二自由度参考模型可得车辆动力学微分方程:

$$\begin{cases}(C_{\mathrm{f}}+C_{\mathrm{r}})\beta+\dfrac{1}{u}(aC_{\mathrm{f}}-bC_{\mathrm{r}})-C_{\mathrm{f}}\delta=m(\dot{v}+u\omega_r)\\(aC_{\mathrm{f}}-bC_{\mathrm{r}})\beta+\dfrac{1}{u}(a^2C_{\mathrm{f}}+b^2C_{\mathrm{r}})\omega_r-aC_{\mathrm{f}}\delta=I_z\dot{\omega}_r\end{cases}\tag{1}$$

式中,β—质心侧偏角;

v—汽车横向车速;

δ—转向轮转角;

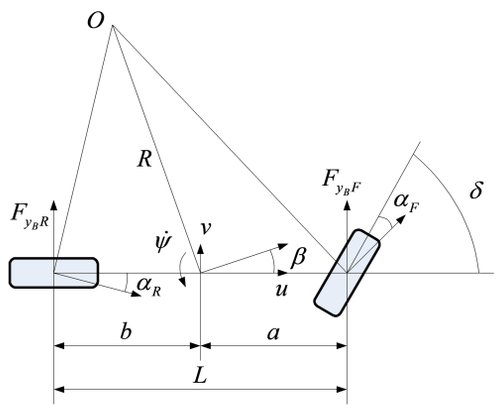

图 1　线性二自由度模型

Fig.1　Linear two-degree-of-freedom model

ω_r—汽车横摆角速度.

根据式(1)可以得到稳态响应下车辆横摆角速度的期望值:

$$\omega_r=\frac{u/L}{1+K\cdot u^2}\tag{2}$$

其中,$K=\dfrac{m}{L^2}\cdot\left(\dfrac{a}{C_b}-\dfrac{b}{C_a}\right)$,又因为汽车的横向加速度 a_y 不能超过路面最大附着系数,所以可以得出横摆角速度最大值 $\omega_{r_\mathrm{Max}}=\mu\cdot g/u$.由此设定名义横摆角速度的值为:

$$\omega=\min\left\{\left|\omega_r\right|,\left|\omega_{r_\mathrm{Max}}\right|\right\}\tag{3}$$

同样的分析方式,也可以得到侧偏角的期望值:

$$\beta_r=\omega\mu\left(\frac{b}{u^2}+\frac{ma}{C_rL}\right)\tag{4}$$

另外,车辆的期望质心侧偏角也需要小于其最大横摆角速度所产生的质心侧偏角.

$$\begin{aligned}\beta\leqslant\beta_{\mathrm{Max}}&=\omega_{r_\mathrm{Max}}\cdot u\left(\frac{b}{u^2}+\frac{ma}{C_rL}\right)\\&=\mu\cdot g\left(\frac{b}{u^2}+\frac{ma}{C_rL}\right)\end{aligned}\tag{5}$$

故质心侧偏角的期望值可描述为:

$$\beta=\min\left\{\left|\beta_r\right|,\left|\beta_{\mathrm{Max}}\right|\right\}\tag{6}$$

根据公式(3)和(6),可在 MATLAB/Simulink 模块中建立车辆二自由度参考模型.

2　车身稳定控制算法

2.1　车身稳定控制的 PID 算法

在实际工程中,应用最为广泛的调节器控制规律为比例、积分、微分控制,简称 PID 控制.本文 PID 控制器输入值为汽车横摆加速度期望值与实际值之差 e_ω,以及质心侧偏角期望值与实际值之差 e_β,

输出值为对应状态下所需要施加的附加横摆力矩.由此可以设计车身稳定控制的PID逻辑结构图如图2所示.

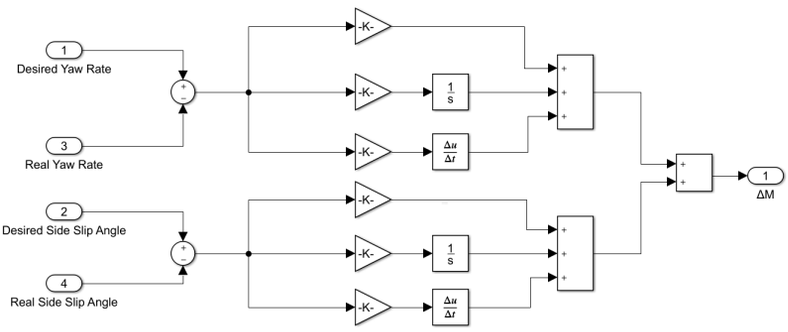

图2 PID控制器结构图

Fig.2 PID controller structure diagram

2.2 车身稳定控制的模糊PID控制器

模糊控制是以模糊集理论、模糊语言变量和模糊逻辑推理为基础的一种智能控制方法,它是从行为上模仿人的模糊推理和决策过程的一种智能控制方法.其具有鲁棒性强、响应速度快、动态特性好等优点,而传统PID控制算法简单、调整方便、响应迅速,由此发展结合而成的模糊PID综合了两者的优点,并解决了传统PID控制对于非线性系统控制效果较差,依赖模型等缺点.较大地提高了系统的控制性能.本文所设计的模糊PID控制算法输入值为车横摆加速度期望值与实际值之差e_ω,质心侧偏角期望值与实际值之差e_β,以及两者的变化率ec_ω与ec_β.所设计的模糊PID控制系统中,参数e与ec的隶属度函数如图3所示,K_p, K_i, K_d的隶属度函数如图4所示,模糊控制规则表如表2所示,模糊PID控制器如图5所示.

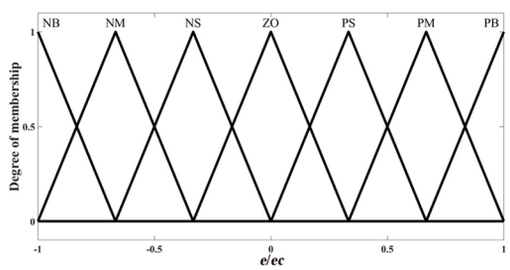

图3 e和ec隶属度函数

Fig.3 Membership functions of e and ec

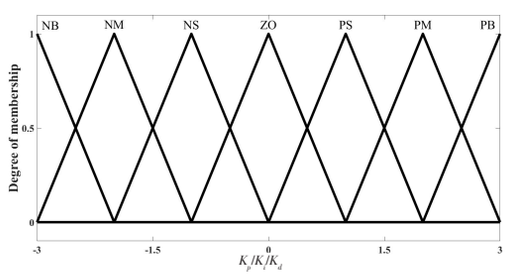

图4 K_p、K_i、K_d隶属度函数

Fig.4 K_p、K_i、K_d's membership function

2.3 制动力分配控制器

ESP制动力分配有两种控制策略:一是控制单个车轮制动压力,二是控制两对角车轮制动压力.本文选取单轮制动方案,根据横摆角速度偏差$\Delta\omega$与方向盘转角δ来判断车辆的转向状态,从而控制不同车轮制动压力,维持车辆稳定行驶.控制规则如表3所示.

表2 K_p、K_i、K_d模糊控制规则

Table 2 K_p、K_i、K_d's Fuzzy control rules

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/PB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZO/ZO/NM	ZO/ZO/PS
NM	PB/NB/PS	PB/NB/NS	PM/NM/PB	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/ZO/ZO
NS	PM/NB/ZO	PM/NM/NS	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PM/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NM/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PM/ZO	NM/PM/ZO	NM/PM/ZO
PM	PS/ZO/PM	ZO/ZO/PS	NS/PS/PS	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PM
PB	ZO/ZO/PB	ZO/PS/PM	NM/PS/PM	NM/PM/PS	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PB

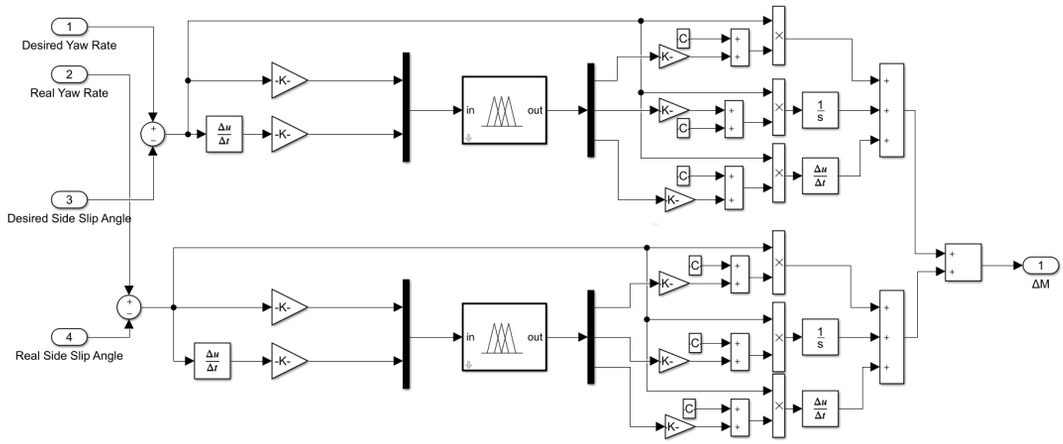

图 5　模糊 PID 控制器结构图

Fig.5　Fuzzy PID controller structure diagram

表 3　制动车轮控制规则

Table 3　Brake wheel control rules

δ	Δω	Driving state	Brake wheel
δ>0	Δω>0	Oversteer	Right front wheel
δ>0	Δω≤0	Understeer	Left rear wheel
δ≤0	Δω>0	Understeer	Right rear wheel
δ≤0	Δω≤0	Oversteer	Left front wheel

附加横摆力矩与单侧车轮纵向力变化量有以下关系:

$$\Delta M = \frac{1}{2}\left(F_{X1}d_f + F_{X2}d_r\right) \tag{7}$$

假设 F_{X1} 与 F_{X2} 为车辆左侧前后轮纵向力,且大小相等为 F_d,则有:

$$\Delta M = \frac{1}{2}F_d(d_f + d_r) \tag{8}$$

由此可以求得单个车轮期望制动力 F_d 为:

$$F_d = \frac{2\Delta M}{d} \tag{9}$$

其中,d 为前后平均轮距.对于鼓式制动器而言,制动力矩 T_b 与轮缸压力 P_w 的关系为:

$$T_b = F_d r_e = CP_w \tag{10}$$

其中,r_e 为车轮半径,$C = A_w u_b R_b$,A_w 为制动蹄面积,u_b 为制动蹄摩擦系数,R_b 为制动器半径.因此可得到制动轮缸压力大小为:

$$P = \frac{r_e}{A_w u_b R_b d}\Delta M \tag{11}$$

3　控制仿真结果

3.1　双移线工况控制仿真

双移线工况下,车辆以恒定速度 90 km/h 行驶在附着系数为 0.4 的路面上.为了进行双移线工况实验,车辆分别采用无控制、PID 控制及模糊 PID 控制进行动力学仿真,分析不同控制算法的仿真实验结果,得到如图所示仿真结果.

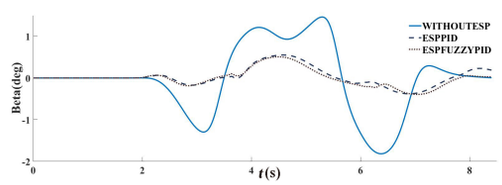

图 6　双移线工况质心侧偏角曲线图

Fig.6　Curve of side slip angle of mass center in double-shifting condition

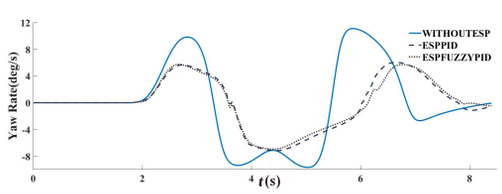

图 7　双移线工况横摆角速度曲线图

Fig.7　Curve of yaw rate in double-shifting condition

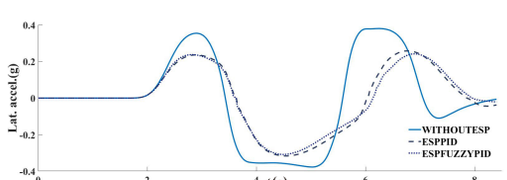

图 8　双移线工况侧向加速度速度曲线图

Fig.8　Curve of lateral acceleration velocity in double-shifting condition

由上图分析可知,在双移线工况下,施加 ESP 控制后,车辆行驶稳定性明显提高,且侧向位移较小.其中,模糊 PID 控制下的质心侧偏角、横摆角速度与侧向加速度均优于 PID 控制,其峰值数值分别减小 0.05 deg,0.214 deg/s 和 0.08 m/s^2.另外,在 ESP

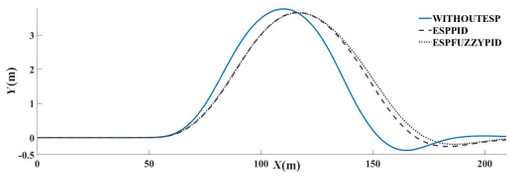

图 9 双移线工况汽车行驶曲线图

Fig.9 Curve of automobile driving in double-shifting condition

控制下的车辆轨迹较无控制下略有滞后.

3.2 正弦工况控制仿真

在正弦工况下,车辆的方向盘转角设置以周期为 5 s、峰值为 1.5 rad 的正弦输入.车辆同样在恒定速度为 90 km/h,路面附着系数为 0.4 的路面上进行正弦工况实验,分析不同控制算法的仿真实验结果,最终得到如图 10–图 12 所示 PID 控制和模糊 PID 控制仿真结果.

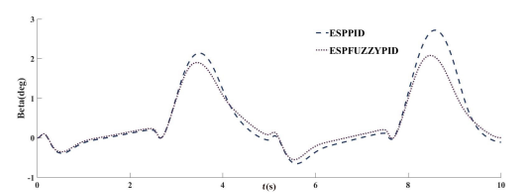

图 10 正弦工况质心侧偏角曲线图

Fig.10 Curve of side slip angle of mass center in sine condition

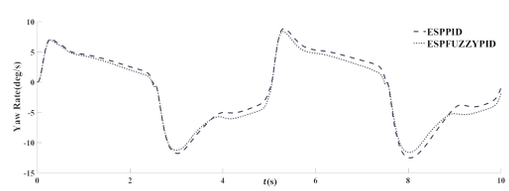

图 11 正弦工况横摆角速度曲线图

Fig.11 Curve of yaw rate in sine condition

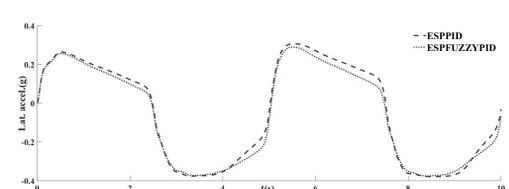

图 12 正弦工况侧向加速度曲线图

Fig.12 Curve of lateral acceleration velocity in sine condition

从仿真曲线图可以看出,在正弦工况下,相较于 PID 控制,模糊 PID 控制下的车辆质心侧偏角有了较大的改善.对于横摆角速度和侧向加速度而言,模糊 PID 控制下的曲线峰值均小于 PID 控制,其峰值数值分别减小 0.64 deg,0.9 deg/s 和 0.3 m/s^2,且模糊 PID 控制下的曲线更加平缓.由此可知,在正弦工况下,模糊 PID 控制能够更好地提升汽车行驶的稳定性.

3.3 角阶跃工况控制仿真

在角阶跃工况下,车辆方向盘转角中输入 2 s 到达的 1.5 rad 角阶跃信号.同样地,该实验也是在恒定速度 90 km/h,路面附着系数为 0.4 的路面上进行的,以评价不同控制算法的仿真实验结果,最终得到如下图 13–图 15 所示的仿真结果.

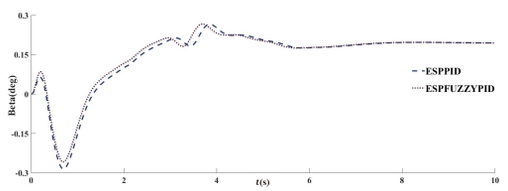

图 13 角阶跃工况质心侧偏角曲线图

Fig.13 Curve of side slip angle of mass center in angle-step condition

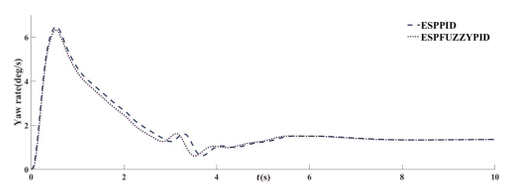

图 14 角阶跃工况横摆角速度曲线图

Fig.14 Curve of yaw rate in angle-step condition

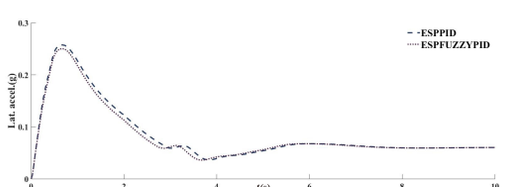

图 15 角阶跃工况侧向加速度曲线图

Fig.15 Curve of lateral acceleration velocity in angle-step condition

从上述曲线图可以看出,安装有 ESP 的车辆在模糊 PID 控制下的质心侧偏角、横摆角速度以及侧向加速度的表现都要优于 PID 控制,但其数值改进较小,峰值数值分别减小 0.027 deg,0.14 deg/s 和 0.07 m/s^2.因此,在角阶跃工况下,PID 控制与模糊 PID 控制对车身稳定的控制效果基本相同.

4 结论

本文分析了影响车身稳定控制的因素,设定横摆角速度、质心侧偏角和侧向加速度为汽车稳定性控制的主要参数,并设计了用于车身稳定控制的 PID 控制逻辑和模糊 PID 控制逻辑.文章通过双移线工况、正弦工况和角阶跃工况对所设计的 ESP 控制系统进行了多工况仿真.结果表明,车辆以高速行驶在低附着系数路面上时,ESP 系统对车辆行驶稳定性有了较大改善;而且以模糊 PID 为控制策略

的ESP系统对车辆行驶稳定性提升更大.

参 考 文 献

1 Choi S. Antilock brake system with a continuous wheel slip control to maximize the braking performance and the ride quality. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2008, 16(5):996~1003

2 陈炯, 王会义, 宋健. 基于滑移率和减速度的ABS模糊控制仿真研究. 汽车工程, 2006, 28 (2): 148~151 (Chen J, Wang H Y, Song J. Simulation research of ABS fuzzy control based on slip rate and deceleration. *Automotive Engineering*, 2006, 28(2): 148~151(in Chinese))

3 王姝, 蹇小平, 张凯, 等. 纯电动汽车牵引力控制系统(TCS)的研发与开发. 汽车安全与节能学报, 2015, 10 (2): 346~353(Wang S, Jian X P, Zhang K, et al. Research and development of traction control system (TCS) for pure electric vehicles. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2015, 10(2): 346~353(in Chinese))

4 Han K, Choi M , Lee B, et al. Development of a traction control system using a special type of sliding mode controller for hybrid 4WD vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(1): 264~274

5 卢少波, 李以农, 郑玲. 基于制动与悬架系统的车辆主动侧翻控制的研究. 汽车工程, 2011, 33(8): 670~675 (Lu S B, Li Y N, Zheng L. Research on vehicle active rollover control based on braking and suspension system. *Automotive Engineering*, 2011, 33(8): 670~675 (in Chinese))

6 张云清, 高斯, 李凌阳, 等. 基于多体动力学的车辆动力学控制系统仿真及优化. 动力学与控制学报, 2007, 5 (1): 68~74(Zhang Y Q, Gao S, Li L Y, et al. Simulation and optimization of vehicle dynamics control system based on multibody dynamics. *Journal of Dynamics and Control*, 2007, 5 (1): 68~74 (in Chinese))

7 赵树恩, 刘秋杨. 基于分数阶PID理论的汽车线控转向的主动控制. 汽车安全与节能学报, 2019, 10 (2): 161~168(Zhao S E, Liu Q Y. Active control of automotive steer-by-wire steering based on fractional-order PID theroy. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2019, 10 (2): 161~168(in Chinese))

8 张志勇, 唐磊, 郝威, 等. 轮毂驱动电动汽车差动助力转向变论域模糊PID控制. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(2): 169~177(Zhang Z Y, Tang L, Hao W, et al. Variable universe fuzzy PID control of in-wheel drive electric vehicle differential power steering. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2019, 10(2): 169~177 (in Chinese))

9 唐传茵, 马岩, 赵广耀, 等. 基于模糊控制策略的车辆主动悬架研究. 动力学与控制学报, 2015,13 (3):210~214(Tang C Y, Ma Y, Zhao G Y, et al. Research on vehicle active suspension based on fuzzy control strategy. *Journal of Dynamics and Control*, 2015, 13 (3): 210~214 (in Chinese))

10 孙大许, 兰凤崇, 何幸福, 等. 双电机四轮驱动电动汽车自适应驱动防滑控制的研究. 汽车工程, 2016, 38 (5): 600~608(Sun D X, Lan F C, He X F, et al. Research on adaptive anti-slip control of double motor four-wheel drive electric vehicle. *Automotive Engineering*, 2016, 38 (5):600~608 (in Chinese))

11 Jalali K, Uchida T, Mcphee J, et al. Development of an advanced fuzzy active steering controller and a novel method to tune the fuzzy controller. *SAE International Journal of Passenger Cars–Electronic and Electrical Systems*, 2013, 6(1): 241~254

12 Manhtuan D, Man Z H, Zhang C S, et al. Robust sliding mode learning control for uncertain discrete-time multi-input multi-output systems. *IET Control Theory and Applications*, 2014, 8(12): 1045~1053

13 李果, 杨建民. 基于L2干扰抑制理论的电动汽车车身稳定系统控制. 北京信息科技大学学报, 2019, 34(1): 1~6(Li G, Yang J M. Control of electric vehicle body stabilization system based on L2 interference suppression theroy. *Journal of Beijing Information Science & Technology University*, 2019, 34(1):1~6 (in Chinese))

14 陈无畏, 刘翔宇, 黄鹤, 等. 考虑路面影响的车辆稳定性控制质心侧偏角动态边界控制. 机械工程学报, 2012, 48(14): 112~118(Chen W W, Liu X Y, Huang H, et al. Research on side slip angle dynamic boundary control for vehicle stability control considering the impact of road surface. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(14):112~118 (in Chinese))

15 高振海, 王竣, 郭健. 汽车稳定性多控制工况设计及其切换机制研究. 机械工程学报, 2014, 50 (4):107~112 (Gao Z H, Wang J, Guo J. Research on design of automobile stability multiple control conditions and its switching mechanism. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50 (4):107~112 (in Chinese))

16 王其东, 王金波, 陈无畏, 等. 基于汽车行驶安全边界的EPS与ESP协调控制策略. 机械工程学报, 2016, 52 (6): 99~107(Wang Q D, Wang J B, Chen W W, et al. EPS and ESP coordinated control strategy based on vehicle driving safety boundary. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(6):99~107(in Chinese)

MULTI-CONDITION CO-SIMULATIONS OF VEHICLE STABILITY CONTROL VIA FUZZY PID ALGORITHM *

Nie Xiaobo Xiong Yue Pan Yongjun†

(*School of Automotive Engineering/State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing* 400044, *China*)

Abstract The vehicle electronic stability program (ESP) is a critical active safety configuration. It can work correspondingly to ensure the driving stability when the vehicle corners with high speeds. It is necessary to compare and improve the stability control algorithm to evaluate and enhance the vehicle stability in different conditions. In this paper, traditional and fuzzy PID algorithms are presented to simulate the vehicle high speed cornering. A vehicle dynamic model built up Carsim is used for the vehicle stability control. The lateral displacement, vehicle side slip angle, yaw rate and lateral acceleration are selected as parameters for stability evaluations. Afterwards, the co-simulation of vehicle stability control in double shifting, sine and angle step conditions are performed. The simulation results show that the fuzzy PID algorithm based vehicle controller employing the fuzzy PID algorithm meets the stability requirements in different conditions.

Key words vehicle dynamics, braking safety, vehicle stability control, fuzzy PID algorithm, co-simulation

Received 31 December 2019, revised 29 August 2020.

* The project supported by the National Natural Science Foundation of China (11702039)

† Corresponding author E-mail: yongjun.pan@cqu.edu.cn