

客车防侧翻超螺旋控制研究

万里恩 石求军 王发峰 王宏达 皮新瑞

(一汽解放汽车有限公司, 长春 130011)

【摘要】为提高客车高速行驶工况下驾驶员快速转向避障时的行驶稳定性,首先建立气压电控制动系统模型和车辆动力学模型,基于超螺旋算法设计客车防侧翻附加横摆力矩控制器,然后利用非线性扰动观测器估算系统的扰动项,并补偿给控制器,最后进行 MATLAB/Simulink、TruckSim、AMESim 联合仿真,结果表明,相对于 PID 控制,所提出的算法在转向盘角阶跃输入工况和鱼钩测试工况下最大可将侧倾角分别降低 0.2° 和 0.7° ,有效提升了车辆防侧翻性能。

关键词: 客车 防侧翻 超螺旋算法 非线性扰动观测器

中图分类号: U463.91

文献标志码: A

DOI: 10.20104/j.cnki.1674-6546.20240025

Research on the Super Twisting Control of Bus Anti-Rollover

Wan Lien, Shi QiuJun, Wang Fafeng, Wang Hongda, Pi Xinrui

(FAW Jiefang Automotive Co., Ltd., Changchun 130011)

【Abstract】To improve driving stability of bus driver in high-speed turning and obstacle avoidance in high speed driving condition, a vehicle model and an electronic control pneumatic system model is firstly established. Then, based on the super twisting algorithm, an additional yaw moment controller is designed for bus anti-rollover. The disturbance term of the system is estimated through a nonlinear disturbance observer, and it is compensated to the controller. Finally, the co-simulation of MATLAB/Simulink, TruckSim and AMESim is carried out. The simulation results show that compared with PID control, the algorithm proposed in this article can reduce the roll angle by 0.2° and 0.7° respectively under steering wheel step conditions and fishinghook conditions.

Key words: Bus, Anti-rollover, Super twisting algorithm, Nonlinear disturbance observer

【引用格式】 万里恩, 石求军, 王发峰, 等. 客车防侧翻超螺旋控制研究[J]. 汽车工程师, 2024(9): 1-7.

WAN L E, SHI Q J, WANG F F, et al. Research on the Super Twisting Control of Bus Anti-Rollover[J]. Automotive Engineer, 2024(9): 1-7.

1 前言

客车质心高、质量大且轮距窄,在高速行驶工况下驾驶员紧急转向时易触发横向失稳,从而造成侧翻事故^[1],因而客车防侧翻研究对于提升车辆的行驶安全性具有重要意义。

目前常见的防侧翻控制方法包括制动系统差动制动、控制主动悬架的抗侧翻力矩、加装横向稳定杆,以及通过主动转向系统减小转向角度^[2]。大量学者针对上述方法展开了广泛研究,但是考虑到

客车作为营运车辆,成本敏感度高,因此通过客车上装配的气压电控制动系统(Electronic Braking System, EBS)进行差动制动的防侧翻控制方法得到广泛应用。

国内外学者针对越野车、客车、重型车、半挂车、液罐车等车型以横向轴荷转移率(Lateral Load Transfer Ratio, LTR)为侧翻评价指标,采用滑模变结构控制、PID控制、模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)、灰色-马尔可夫链预测控制、模糊控制等算法获得附加横摆力矩,再通过不同车轮的制

横向载荷转移率 L_0 的计算公式为^[14]:

$$L_0 = \frac{F_{z1} - F_{zr}}{F_{z1} + F_{zr}} \quad (8)$$

式中: F_{z1} 、 F_{zr} 分别为左、右侧车轮的法向载荷。

由式(8)可知, L_0 的取值范围为 $[-1,1]$, $L_0=\pm 1$ 表示车辆的单侧的车轮已经离地,是极限侧翻工况。

目前,大部分客车未装配轴荷传感器,故在防侧翻控制中,需要先对 L_0 进行估计^[14]:

$$L_0 = \frac{2(\varphi - 1)a_y h_s - 2g\varphi h_s}{gT} \quad (9)$$

式中: T 为轮距。

3 控制策略设计

3.1 基于非线性扰动补偿的防侧翻超螺旋控制算法

气压制动系统具有迟滞性,为提高安全性,本文将 L_0 的阈值设置为0.8。在车辆防侧翻控制中,选择 L_0 和 ω_r 作为控制变量^[14]。

选择滑模函数 s 为:

$$s = (\omega_r - \omega_{rd}) + \xi_0(L_0 - L_d) \quad (10)$$

式中: ω_{rd} 为理想横摆角速度; $\xi_0 > 0$ 为滑模常值系数; L_d 为理想的横向载荷转移率,在本文中可取为0,即理想状态下车辆不发生横向轴荷转移。

当 $|L_0| \geq 0.8$ 时,EBS进行差动制动产生防侧翻附加横摆力矩 ΔM_R ,则式(6)改写为:

$$\dot{\omega}_r = \frac{ak_f - bk_r}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z u} \omega_r - \frac{ak_f}{I_z} \delta + \frac{\Delta M_R}{I_z} \quad (11)$$

对式(10)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{s} &= (\dot{\omega}_r - \dot{\omega}_{rd}) + \xi_0(\dot{L}_0 - \dot{L}_d) \\ &= \left(\frac{ak_f - bk_r}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z u} \omega_r - \frac{ak_f}{I_z} \delta + \frac{\Delta M_R}{I_z} - \dot{\omega}_{rd} \right) + \xi_0 \dot{L}_0 \\ &= \left(\frac{ak_f - bk_r}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z u} \omega_r \right) + \frac{1}{I_z} \Delta M_R + \left(-\frac{ak_f}{I_z} \delta - \dot{\omega}_{rd} + \xi_0 \dot{L}_0 \right) \end{aligned} \quad (12)$$

对式(12)进行化简可得:

$$\dot{s} = f(t) + bu(t) + d(t) \quad (13)$$

其中:

$$\begin{cases} f(t) = \frac{ak_f - bk_r}{I_z} \beta + \frac{a^2 k_f + b^2 k_r}{I_z u} \omega_r \\ d(t) = -\frac{ak_f}{I_z} \delta - \dot{\omega}_{rd} + \xi_0(L_0)' \\ u = \Delta M_R, b = \frac{1}{I_z} \end{cases} \quad (14)$$

将式(14)中的 $d(t)$ 视为有界的集成非线性扰动项,满足 $|d(t)| \leq D, D > 0$,为集成非线性扰动项边界值。

超螺旋算法与PID控制、模糊控制等算法相比较,具有较好的鲁棒性和快速动态响应特性,适用于二阶系统。文献[15]已证明了超螺旋滑模算法的稳定性,其数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{s}_0 = -\alpha^* \cdot |s_0|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(s_0) + v \\ \dot{v} = -\beta^* \cdot \operatorname{sgn}(s_0) \end{cases} \quad (15)$$

式中: s_0 为滑动变量, $\alpha^*、\beta^*$ 为增益, v 为中间变量。

可得防侧翻附加横摆力矩控制器的输出为:

$$u(t) = -\frac{1}{b} \left[\alpha^* \cdot |s|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(s) + \int (\beta^* \cdot \operatorname{sgn}(s) dt) + d(t) \right] \quad (16)$$

通过非线性扰动补偿(Nonlinear Disturbance Observer, NDOB)来估算集成非线性扰动项 $d(t)$,将 $\dot{s} = d(t) + bu(t)$ 改写成:

$$\begin{cases} \dot{s} = F + G_1 \Delta M_R + G_2 d(t) \\ F = 0, G_1 = b = \frac{1}{I_z}, G_2 = 1 \end{cases} \quad (17)$$

根据NDOB理论^[14,16],对于式(17),有:

$$\begin{cases} \dot{P} = -L_1 G_2 P - L_1 (G_2 L_1 s + F + G_1 \Delta M_R) \\ d_0 = P + L_1 s \end{cases} \quad (18)$$

式中: d_0 为 $d(t)$ 的估计值, L_1 为NDOB的增益, P 为NDOB的内部状态。

由式(16)~式(18)计算可得最终的防侧翻附加横摆力矩为:

$$\Delta M_R = -\frac{1}{b} \left[\alpha^* \cdot |s|^{\frac{1}{2}} \operatorname{sgn}(s) + \int (\beta^* \cdot \operatorname{sgn}(s) dt) + d_0 \right] \quad (19)$$

3.2 EBS控制策略

本文气压制动系统中ABS电磁阀、单通道模块、双通道模块内部电磁阀均为开关阀,采用双重逻辑门限值控制算法,如图3所示。

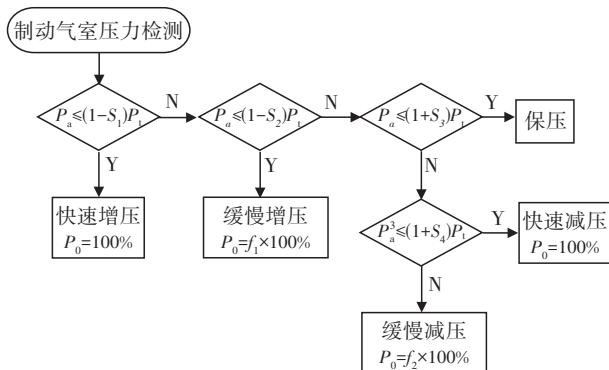


图3 双重逻辑门限值算法

图3中, P_0 为开关阀脉冲宽度调制的占空比, S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 为4个门限常值,且 $S_1 > S_2 > S_3 > S_4$, P_a 、 P_t 分别为实际压力和理想压力。 f_1 、 f_2 的计算公式为:

$$\begin{cases} f_1(P_a, P_t) = 1 - \frac{P_a - (1 - S_1)P_t}{(S_1 - S_2)P_t} \\ f_2(P_a, P_t) = \frac{P_a - (1 + S_3)P_t}{(S_4 - S_3)P_t} \end{cases} \quad (20)$$

将单逻辑门限值中的增压、保压、减压3个阶段细化为快速增压(全开)、缓慢增压、保压、缓慢减压、快速减压(全开)5个阶段。

3.3 防侧翻附加横摆力矩分配

防侧翻附加横摆力矩主要通过差动制动产生。在差动制动控制中,单轮制动选择逻辑最简单,且执行的效率最高,得到了广泛应用。表1所示为单轮制动的选择逻辑。

表1 单轮制动车轮选择逻辑

δ	侧翻趋势	制动车轮
$\delta \geq 0$	向右侧翻	右前轮
$\delta < 0$	向左侧翻	左前轮

4 仿真分析

为了验证本文提出的防侧翻控制算法的控制效果,在 MATLAB/Simulink 中搭建 NDOB-STA 和双重逻辑门限值控制策略,在 AMESim 中建立气压 EBS 仿真模型,在 TruckSim 中建立客车模型,分别在空载和满载条件下通过 MATLAB/Simulink、AMESim 及 TruckSim 进行转向盘角阶跃输入工况和鱼钩测试工况的联合仿真,对上述控制策略的控制效果进行验证。为了对比 NDOB-STA 的效果,用工程中常见的 PID 算法模块代替仿真模型的 NDOB-STA 模块,在相同工况下进行联合仿真。车辆模型关键参数如表2所示。

表2 车辆模型关键参数

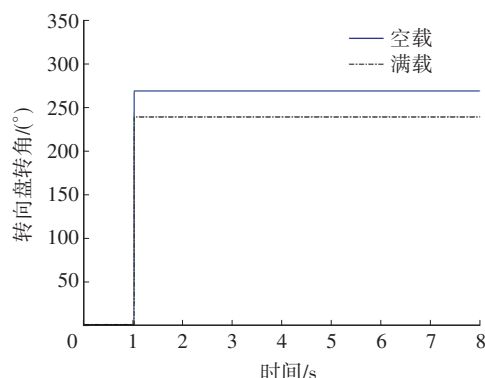
参数	取值	参数	取值
m/kg	6 360	$I_z/kg \cdot m^2$	38 299
a/m	2.03	$I_y/kg \cdot m^2$	6 869.8
b/m	1.863	$I_{x_{eq}}/kg \cdot m^2$	14 805
h_s/m	1.17		

4.1 仿真工况

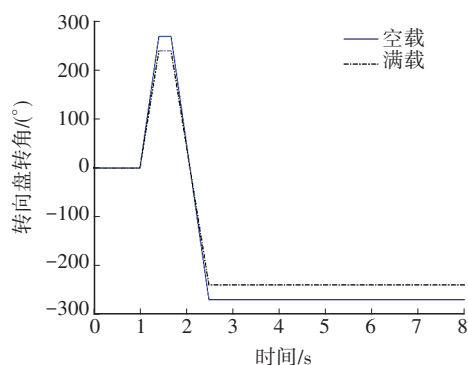
具体仿真工况及相应设置如表3所示,2种工况下转向盘转角输入曲线如图4所示。由于满载(加载 2 500 kg)条件下车辆质心提高,若设置与空载相同的工况,车辆将发生侧翻,故适当降低满载时的车速、转向盘转角和路面附着系数。

表3 车辆模型关键参数

车辆载荷	工况	转向盘最大转角/(°)	车速 /km·h ⁻¹	路面附着系数
空载	转向盘角阶跃输入	270	90	0.9
	鱼钩测试	270	90	0.9
满载	转向盘角阶跃输入	240	72	0.8
	鱼钩测试	240	72	0.8



(a)转向盘角阶跃输入工况



(b)鱼钩测试工况

图4 2种工况下的转向盘转角输入

4.2 仿真结果

按照表3所示的工况在 TruckSim 中完成仿真设置,并将 NDOB-STA 控制与 PID 控制和无控制时的 LTR 曲线、侧向加速度曲线、侧倾角曲线进行对比,

结果如图5所示。

转向盘角阶跃输入工况下,车辆在空载和满载无控制时,LTR在约第1.8s和约第2.1s起始终为-1,侧向加速度分别在约第3.0s和约第4.2s后快速降为0,侧倾角分别在约第2.0s和约第2.1s后快速增大,直至发散,说明车辆发生了侧翻。NDOB-

STA和PID控制均能使车辆保持稳定,但总体上NDOB-STA控制下的LTR、侧向加速度、侧倾角较PID控制结果小,说明NDOB-STA控制效果优于PID控制。

鱼钩测试工况下,车辆在空载和满载无控制时,LTR分别在约第3.0s和约第3.2s起始终保持为

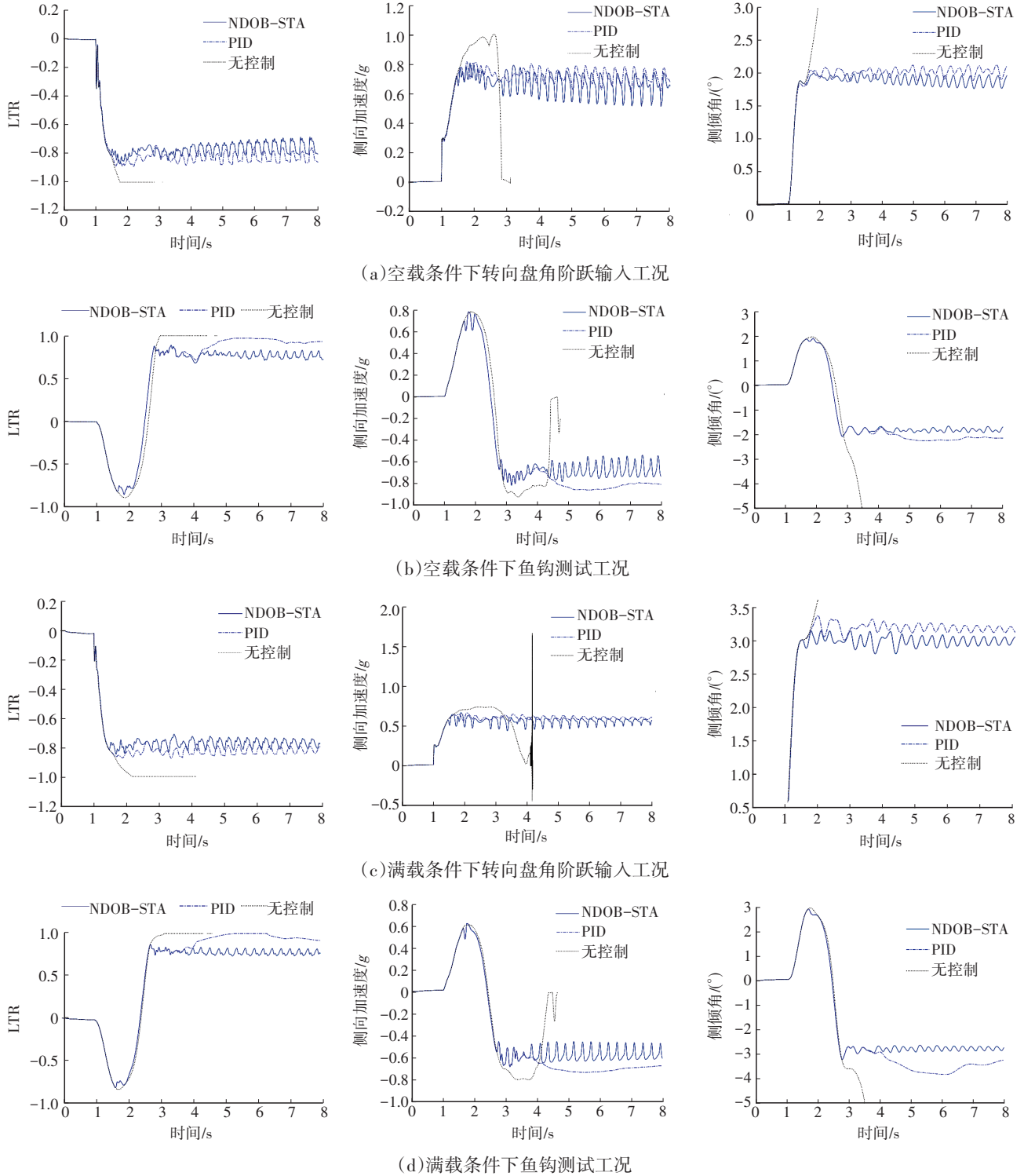


图5 不同工况下NDOB-STA控制、PID控制和无控制时的仿真对比结果

1,侧向加速度分别在约第2.0 s快速下降为 $-0.8 g$,并呈波动状态,然后分别在约第4.2 s后快速变化到0左右,再剧烈变化至发散,侧倾角分别在约第2.0 s后快速从 2° 和 3° 下降到负值,随后发散,说明车辆发生了侧翻。NDOB-STa和PID控制均能使车辆保持稳定,但总体上NDOB-STa控制下的LTR、侧向加速度、侧倾角较PID控制结果小,说明NDOB-STa控制效果优于PID控制。

在空载和满载条件下,转向盘角阶跃输入和鱼钩测试仿真中NDOB-STa和PID控制下的最大侧倾角如表4所示,仿真结果表明,相对于PID控制,NDOB-STa控制在转向盘角阶跃输入工况和鱼钩测试工况下最大可将侧倾角分别降低 0.2° 和 0.7° ,有效提升了车辆防侧翻性能。

表4 2种控制方法仿真结果最大侧倾角对比 ($^\circ$)

车辆载荷	工况	最大侧倾角	
		NDOB-STa	PID控制
空载	转向盘角阶跃输入	2.0	2.2
	鱼钩测试	2.1	2.3
满载	转向盘角阶跃输入	3.0	3.2
	鱼钩测试	3.1	3.8

5 结束语

本文针对客车高速行驶工况下紧急转向时易发生横向失稳造成侧翻的问题,提出一种超螺旋控制算法,设计防侧翻附加横摆力矩控制器,基于NDOB设计扰动观测器实时观测控制器中的非线性扰动项,并将其补偿给防侧翻附加横摆力矩控制器。最后通过MATLAB/Simulink、TruckSim、AMESim联合仿真,对上述策略的控制效果进行验证,仿真结果表明,本文设计的控制策略可以有效提升车辆防侧翻能力,从而提高车辆的行驶安全性。

超螺旋算法是一种先进控制算法,控制结构简单,控制效果也比传统的非基于模型的算法更好,但算法增益参数的调节过程较为复杂(需要综合考虑系统稳定性),且控制变量波动较大,后续应结合智能算法对参数调节和控制过程进行优化。

参 考 文 献

[1] 宗长富,韩小健,赵伟强,等.基于动态LTR的客车防侧翻控制[J].中国公路学报,2016,29(9):136-142.
ZONG C F, HANG X J, ZHAO W Q, et al. Anti-Rollover Control of Bus Based on Dynamic LTR[J]. China Journal of

Highway and Transport, 2016, 29(9): 136-142.
[2] 石求军.基于车辆状态参数估计的商用车气压电子制动主动安全控制策略研究[D].长春:吉林大学,2021.
SHI Q J. Research on Active Safety Control Strategy of Pneumatic Electronic Brake Based on Vehicle State Parameters Estimation for Commercial Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2021.
[3] CHEN B C, PENG H. Differential-Braking-Based Rollover Prevention for Sport Utility Vehicles with Human-in-the-Loop Evaluations[J]. Vehicle System Dynamics, 2001, 36(4/5): 359-389.
[4] 韩雪雯,何锋,陈江生.重型车辆防侧翻控制研究[J].机械设计与制造,2018(7):206-209.
HAN X W, HE F, CHEN J S. Study for Anti-Rollover Control of Heavy Vehicles[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(7): 206-209.
[5] 麦莉,曲伟,朱天军,等.基于模型预测的重型商用车侧翻预警算法[J].吉林大学学报(工学版),2010,40(4):906-910.
MAI L, QU W, ZHU T J, et al. Rollover Warning Algorithm of Heavy Commercial Vehicle Based on Model Prediction [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2010, 40(4): 906-910.
[6] 贺宜,褚端峰,吴超仲,等.基于MPC的大型车辆防侧翻控制方法[J].交通运输系统工程与信息,2015,15(3):89-99.
HE Y, CHU D F, WU C Z, et al. Anti-Rollover Control for Heavy-Duty Vehicles Based on Model Predictive Control [J]. Journal of Transportations Systems Engineering and Information Technology, 2015, 15(3): 89-99.
[7] 于志新.基于MPC的重型半挂车动力学稳定性多目标控制研究[D].长春:吉林大学,2015.
YU Z X. Research on Dynamics Stability Multi-Objective Control Based on Model Predictive Control for Heavy Duty Semi-Trailer[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
[8] 辜志强,王朝阳.商用车侧翻的灰色-马尔科夫链预测方法研究[J].汽车技术,2022(3):42-48.
GU Z Q, WANG C Y. Research on Grey-Markov Chain Prediction Method of Commercial Vehicle Rollover[J]. Automobile Technology, 2022(3): 42-48.
[9] 靳立强,石冠男,于雅静,等.基于零力矩点位置和模糊控制的商用车防侧翻控制[J].汽车工程,2017,39(9):90-95.
JIN L Q, SHI G N, YU Y J, et al. Anti-Roll Control for Commercial Vehicles Based on Zero-Moment Point Position and Fuzzy Control[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(9): 90-95.

- [10] 靳立强,石冠男,孔德隽,等.基于零力矩点位置和侧翻时间算法的车辆防侧翻控制[J].汽车工程,2017,39(3):281-287.
JIN L Q, SHI G N, KONG D J, et al. Vehicle Rollover Waring Based on Zero-Moment Point Indicator and Time-to-Rollover Algorithm[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(3): 281-287.
- [11] 赵伟强,封冉,宗长富.基于等效晃动模型的液罐车防侧翻控制策略[J].吉林大学学报(工学版),2018,48(1):30-35.
ZHAO W Q, FEI R, ZONG C F. Anti-Rollover Control Strategy of Tank Trucks Based on Equivalent Sloshing Model[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(1): 30-35.
- [12] 郑宏宇,杨硕,文良浒,等.基于电控制动系统的客车防侧翻控制策略[J].吉林大学学报(工学版),2016,46(4):1038-1043.
ZHENG H Y, YANG S, WEN L H, et al. Anti-Rollover Control Strategy of Bus Based on Electronically Controlled Braking System[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(4): 1038-1043.
- [13] 刘鹏.商用车电子制动系统响应特性与控制策略研究[D].长春:吉林大学,2019.
LIU P. Research on Response Characteristics and Control Strategies of Electronic Braking System for Commercial Vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [14] 石求军,李静.基于非线性扰动估计的客车防侧翻控制[J].汽车工程,2020,42(9):1124-1231.
SHI Q J, LI J. Anti-Rollover Control of Bus Based on Nonlinear Disturbance Estimation[J]. Automotive Engineering, 2020, 42(9): 1124-1231.
- [15] 殷生晶,王晓琳.基于自适应超螺旋算法的高速永磁同步发电机稳压控制策略[J].电机与控制学报,2023,27(7):30-39.
YIN S J, WANG X L. Voltage-Stabilizing Control Strategy of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Generator Based on Adaptive Super-Twisting Algorithm[J]. Electric Machines and Control, 2023, 27(7): 30-39.
- [16] DING S H, LU L, WEI X Z. Sliding Mode Direct Yaw-Moment Control Design for in-Wheel Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6752-6762.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2024年1月29日。

《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊,为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊(A)、俄罗斯《文摘杂志》(AJ)收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心(EuroPub)数据库收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主,并兼有理论研究内容,是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下,把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势,努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域,新能源汽车和互联智能汽车技术领域,大力吸收优质稿源,为广大科研和工程技术人员服务,为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿,反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求:

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内;
2. 请按科技论文要求撰写文章摘要,摘要中文字数控制在180字左右;
3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献,且在文中应标注文献引用处;
4. 文章主要作者应提供其简介,包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等;
5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责,确保署名无争议,文责自负;
6. 请勿一稿多投;
7. 本刊使用网站投稿,请先登陆网站注册成功后投稿,详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”,

网址:<http://qcjs.cbpt.cnki.net>。

《汽车技术》编辑部

2024年 第9期 | 7