

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.02.002

三轴重载汽车转向制动协同控制仿真分析

贾长旺,路永婕,杨绍普,张广峰

(石家庄铁道大学 机械工程学院,石家庄 050043)

摘要:为提高三轴重载汽车在转向制动工况下的安全性能,基于 TruckSim 汽车仿真软件,搭建了三轴重载汽车整车模型。对三轴汽车在转向制动工况下的力学特性进行了分析,基于分析结果设计了削减制动力的三轴汽车转向制动协同控制器。对于车辆处于不足转向的情况,设计了滑移率分配的模糊控制器。采用 TruckSim 与 Simulink 联合仿真,对 ABS 控制和协同控制在转向制动工况下的控制效果进行了探讨。仿真结果表明,在转向制动工况下,与 ABS 控制器相比,协同控制器提高了三轴重载汽车转向制动工况下的操纵稳定性和制动安全性。

关键词:重载车辆特性;主动安全系统;协同控制;模糊控制;TruckSim/Simulink 联合仿真

中图分类号:U461.6

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)02-011-09

Simulation analysis on steer-brake coordinated control of three-axle heavy-duty vehicle

JIA Changwang, LU Yongjie, YANG Shaopu, ZHANG Guangfeng

(School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, P. R. China)

Abstract: A three-axle heavy-duty vehicle model was built based on the TruckSim vehicle simulation software in order to improve the safety performance of the vehicle under the steering braking condition. The mechanical properties of three-axle vehicles under steering braking conditions were analyzed. Based on the analysis results, a three-axis vehicle steering brake cooperative controller was designed by reducing braking force. A fuzzy controller for slip ratio distribution was designed for the case that the vehicle was understeering. The control effect of ABS control and coordinated control under steering braking conditions were examined by using co-simulation with TruckSim and Simulink. The simulation results show that the coordinated controller improves the steering stability and braking safety of the three-axle heavy-duty vehicle compared with the ABS controller under steering braking conditions.

Keywords: heavy-duty vehicle characteristics; active safety systems; collaborative control; fuzzy control; TruckSim/Simulink co-simulation

收稿日期:2018-10-06

基金项目:国家自然科学基金(面上)项目(11572207,11472180);河北省自然科学基金项目(A2016210103)。

Supported by the National Natural Science Foundation of China(General Program)(11572207,11472180) and Hebei Province Natural Science Fund(A2016210103).

作者简介:贾长旺(1991—),男,石家庄铁道大学硕士研究生,主要从事重载汽车主动安全控制研究,(E-mail)jia_cw@163.com。

路永婕(联系人),女,石家庄铁道大学副教授,(E-mail)luyj825@163.com。

在国民经济不断发展的今天,重载汽车已经成为必不可少的运输工具^[1]。然而,与普通轿车相比,重型汽车惯性大、车身高、侧倾中心高,操纵性和侧向稳定性得不到保障,容易发生交通事故^[2-3]。所以,重载汽车的行车安全成了科研工作者的重要课题^[4]。

在众多的汽车安全系统中,防抱制动系统(antilock braking system,简称 ABS)通过控制车轮滑移率来保证汽车制动性能;直接横摆力矩控制(DYC)、电子稳定系统(ESP)、主动前轮转向控制(AFS)等通过主动转向、制动及驱动力矩的横向分配来提高汽车转向过程中的侧向稳定性能^[5-7]。而这些控制系统都是针对单纯的制动工况或者单纯的转向工况设计的,在转向制动联合工况下,两种控制系统之间会出现耦合、干扰,影响系统性能。针对这种情况,很多学者进行了不同方面的研究,并取得了一定的成果。杨炜等^[8]设计了一种上层模糊 PID 控制方法,通过控制轮胎滑移率来提高半挂车的横摆稳定性;陈松、李晗和 Morrison 等^[9-11]针对转向和制动两个系统的冲突都提出了自己的解决办法;Li 等^[12]提出了一种新型的轮胎侧偏角估计方法,通过分配转向角、制动力、牵引力来提高车辆的响应速度;Zhang 等^[13]通过对主动前轮转角控制(AFS)和直接横摆力矩控制(DYC)的研究,设计了提高车辆稳定性的 PI 控制器,并提出了一种增益调节方法。

以上的研究中很少涉及三轴重载汽车,作为货物运输的广泛使用工具,其主动安全控制方法的研究应该受到重视,同时也很少涉及轮胎力的具体分配,这样就不能充分、准确地利用轮胎力。基于以上缺陷,笔者对特定车型的三轴汽车横摆力学特性进行分析,设计了相应的转向制动协同控制器,以提高三轴重载汽车的安全性能。

1 三轴汽车模型

建立三轴汽车的力学模型,有利于进行汽车的受力分析和控制器设计。如图 1 所示,考虑三轴汽车横向、纵向、横摆运动,建立三自由度模型。

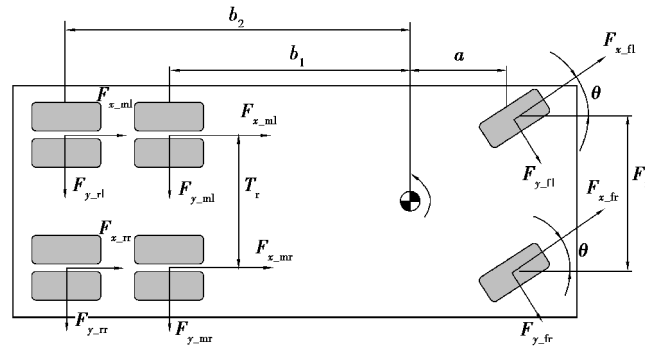


图 1 三轴重载汽车模型

Fig. 1 Three-axis heavy-duty vehicle model

根据达朗贝尔原理得到三轴汽车的运动微分方程如下。

整车纵向力平衡方程

$$ma_x = F_{x_{fr}} \cos \theta + F_{x_{fl}} \cos \theta + F_{y_{fr}} \sin \theta + F_{y_{fl}} \sin \theta + F_{x_{ml}} + F_{x_{mr}} + F_{x_{rl}} + F_{x_{rr}} \quad (1)$$

整车横向力平衡方程

$$ma_y = F_{x_{fr}} \sin \theta + F_{x_{fl}} \sin \theta - F_{y_{fr}} \cos \theta - F_{y_{fl}} \cos \theta - F_{y_{mr}} - F_{y_{ml}} - F_{y_{rr}} - F_{y_{rl}} \quad (2)$$

整车横摆力矩平衡方程

$$I_z \dot{r} = (F_{x_{fr}} \sin \theta + F_{x_{fl}} \sin \theta - F_{y_{fr}} \cos \theta - F_{y_{fl}} \cos \theta) a + (F_{x_{fr}} \cos \theta - F_{x_{fl}} \cos \theta + F_{y_{fr}} \sin \theta - F_{y_{fl}} \sin \theta) T_f / 2 + (F_{x_{mr}} - F_{x_{ml}} + F_{x_{rr}} - F_{x_{rl}}) T_r / 2 + (F_{y_{mr}} + F_{y_{ml}}) b_1 + (F_{y_{rr}} + F_{y_{rl}}) b_2 \quad (3)$$

式中: m 是整车质量; a 是前轴至车辆质心处的距离; b_1 是中轴至车辆质心的距离; b_2 是后轴至车辆质心的距离; r 是车身横摆角速度; θ 是前轮转角; T_f 是前轮轮距; T_r 是中后轮轮距; $F_{x_{fl}}, F_{x_{fr}}, F_{y_{fl}}, F_{y_{fr}}, F_{x_{ml}}, F_{x_{mr}}, F_{y_{ml}}, F_{y_{mr}}, F_{x_{rl}}, F_{x_{rr}}, F_{y_{rl}}, F_{y_{rr}}$ 分别是各个车轮所受的纵向力或侧向力。

选取 TruckSim 中自带的三轴厢式货车作为研究对象,整车参数整理在表 1 中。

表 1 整车参数

Table 1 Vehicle parameters

| 整车质量 m/kg | 横摆转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$ | 前轮轮距 T_f/m | 中、后轮轮距 T_r/m | 质心到前轴 距离 a/m | 质心到中轴 距离 b_1/m | 质心到后轴 距离 b_2/m |
|-----------------------|---|------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 6 545 | 34 823.2 | 2.03 | 1.863 | 1.11 | 4.12 | 5.39 |

2 三轴重载汽车转向制动协同控制器设计

ABS 和 EPS 作为两个重要的车辆安全系统,目前在大多数车上都已经成为必要的装备^[14]。传统 EPS 通过在车轮上施加制动的方式来控制车辆横摆力矩,从而保证车辆恒速转向时的操纵稳定性^[15]。一般来说,在外前轮施加制动力对纠正过度转向最有效,在内后轮施加制动力对于纠正不足转向最有效。但是,在转向制动工况下,ABS 与 EPS 都要通过对车轮施加制动保证车辆稳定性,这样就出现了两个系统之间的耦合。在这种情况下,可以改变制动策略来完成两个系统的功能。在一侧车轮上主动施加制动改成在另一侧车轮上减少制动,这样就产生了与 ESP 相同的横摆力矩。即过度转向时,减少内前轮的制动力;不足转向时,减少外后轮的制动力。

车轮制动力的控制一般通过改变滑移率来实现,因此,有必要对每个车轮在不同滑移率下产生的横摆力矩进行研究。选用 Dugoff 轮胎模型计算轮胎受力,公式如下:

$$F_x = \frac{C_x s_x}{1 - s_x} f(\lambda) \quad (4)$$

$$F_y = \frac{C_y \tan \alpha}{1 - s_x} f(\lambda) \quad (5)$$

$$f(\lambda) = \begin{cases} \lambda(2 - \lambda), & \lambda < 1; \\ 1, & \lambda \geq 1. \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda = \frac{\mu F_z (1 - s_x)}{2 \sqrt{C_x^2 s_x^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha}} \quad (7)$$

$$\mu = \mu_0 (1 - A_s v \sqrt{s_x^2 + \tan^2 \alpha}) \quad (8)$$

式中: F_x 为轮胎纵向力; F_y 为轮胎侧向力; F_z 为轮胎垂向载荷; s_x 为轮胎纵向滑移率; α 为轮胎侧偏角; v 为汽车车速; A_s, C_x, μ_0 为相关参数,其值按文献[16]中的大小计算。

由公式(3)知,每个车轮产生的横摆力矩分别为:

$$M_{fl} = (F_{x_{fl}} \sin \theta - F_{y_{fl}} \cos \theta) a - (F_{x_{fl}} \cos \theta + F_{y_{fl}} \sin \theta) T_f / 2, \quad (9)$$

$$M_{fr} = (F_{x_{fr}} \sin \theta - F_{y_{fr}} \cos \theta) a + (F_{x_{fr}} \cos \theta + F_{y_{fr}} \sin \theta) T_f / 2, \quad (10)$$

$$M_{ml} = -F_{x_{ml}} T_r / 2 + F_{y_{ml}} b_1, \quad (11)$$

$$M_{mr} = F_{x_{mr}} T_r / 2 + F_{y_{mr}} b_1, \quad (12)$$

$$M_{rl} = -F_{x_{rl}} T_r / 2 + F_{y_{rl}} b_2, \quad (13)$$

$$M_{rr} = F_{x_{rr}} T_r / 2 + F_{y_{rr}} b_2. \quad (14)$$

车辆尺寸按表 1 中数据计算,各车轮产生的纵向力与侧向力由轮胎模型计算,横摆角速度的方向,向左转为正,向右转为负。对车辆左转的情况进行探讨,前轮转角取 15° 。各车轮产生的横摆力矩随滑移率的变化曲线如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,正向横摆力矩较多,有利于纠正不足转向,而负向的横摆力矩较少,不利于纠正过度转向。根据仿真结果和文献[17],在过度转向时,可以将车轮滑移率控制在 0.11 附近;在不足转向时,由于正向横摆力矩较大,不能选取其中的某个滑移率值,为了精确地控制横摆力矩,设计模糊控制器,根据不足转向的程度选取不同的滑移率值。定义横摆角速度偏差 $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_d$ 为模糊控制器的输入。

其中,理想横摆角速度 γ_d 参照文献[18]按式(15)计算:

$$\gamma_d = \frac{-k_f u (ak_f - k_m) \delta}{k_f k_r - (ak_f + b_1 k_m + b_2 k_r)^2 - mk_m u^2}, \quad (15)$$

式中: δ 为前轮转角; k_f 、 k_m 、 k_r 分别为前轴、中轴、

后轴的侧偏刚度,取 $k_f=300\ 270\ \text{N/rad}$, $k_m=99\ 729\ \text{N/rad}$, $k_r=95\ 140\ \text{N/rad}$,其他参数与表 1 相同。

根据仿真结果,将输入变量 $\Delta\gamma$ 的范围选为 $[0.00, 0.15]\text{rad/s}$,将输出变量滑移率的范围选为 $[0.02, 0.20]$,采用 2 个钟型隶属度函数和 4 个高斯型隶属度函数对输入变量进行模糊化,如图 3 所示,同样类型的隶属度函数对输出变量解模糊化,如图 4 所示,模糊规则如表 2 所示。

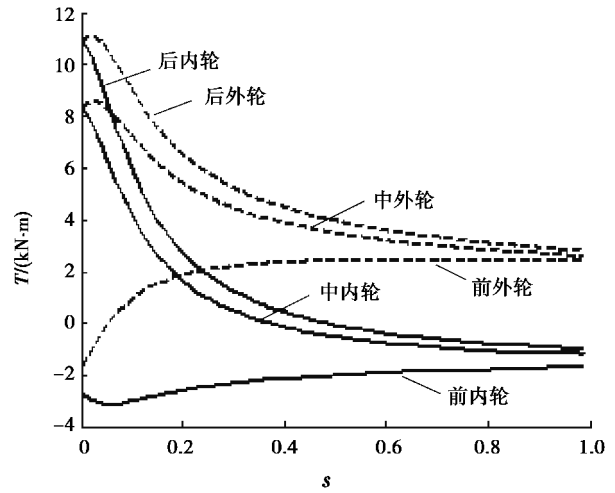


图 2 各车轮横摆力矩随滑移率的变化曲线

Fig. 2 Curve of yaw moment of each wheel with slip ratio

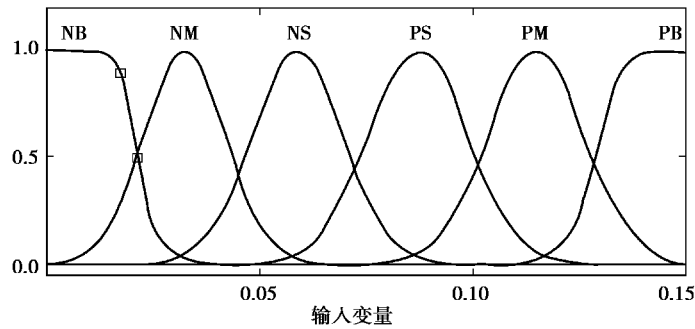


图 3 输入变量模糊化

Fig. 3 Input variable fuzzification

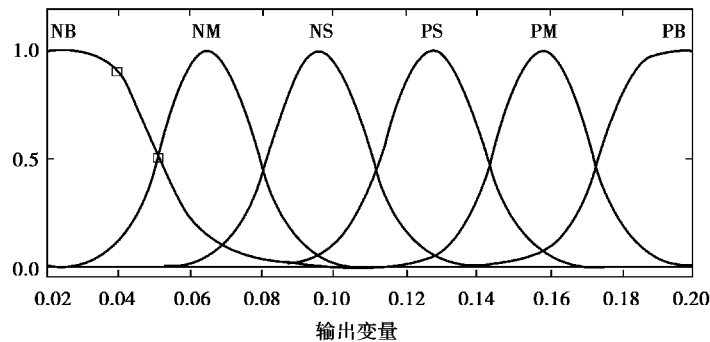


图 4 输出变量解模糊化

Fig. 4 Output variable defuzzification

表 2 模糊规则

Table 2 Fuzzy control rules

| | | | | | | |
|-------------------|----|----|----|----|----|----|
| $\Delta\gamma$ 输入 | NB | NM | NS | PS | PM | PB |
| slip 输出 | PB | PM | PS | NS | NM | NB |

三轴汽车转向特性的判断参照文献[3]进行,用横摆角速度作为转向方向的判断依据,横摆角速度为正值时,车辆向左转;横摆角速度为负时,车辆向右转。用横摆角速度偏差 $\Delta\gamma$ 作为不足转向和过度转向的判断依据。具体的判断过程和控制方法见表 3。

表 3 转向控制逻辑表

Table 3 Steering control logic table

| γ | $\Delta\gamma$ | 转向方向 | 转向特性 | 控制车轮 | 控制滑移率 |
|----------|----------------|------|------|-------|-------|
| + | + | 左转 | 转向过度 | 左前轮 | 0.11 |
| + | - | 左转 | 转向不足 | 右中、后轮 | 模糊控制器 |
| - | + | 右转 | 转向不足 | 左中、后轮 | 模糊控制器 |
| - | - | 右转 | 转向过度 | 右前轮 | 0.11 |

在转向制动工况下,按表 3 实施控制,保证车辆的转向性能,除表中所提到的车轮外,其余车轮滑移率控制在 0.20 附近,保证车辆的制动性。

控制器逻辑如图 5 所示。

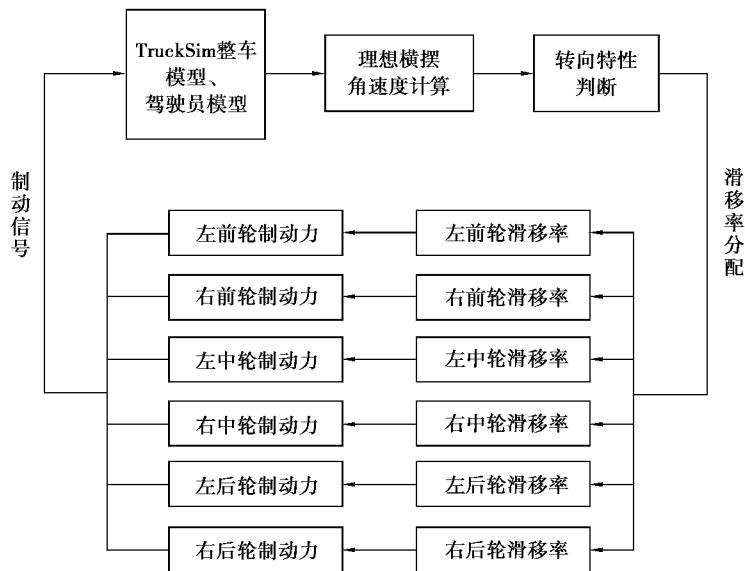


图 5 转向制动协同控制器逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of steering brake coordination controller

Simulink 中的程序框图如图 6 所示,整个控制器由(a)(b)(c) 3 部分组成,TruckSim 中输出方向盘转角、质心侧偏角、横摆角速度、车速及轮速等,经过理想横摆角速度差值计算模块、控制滑移率计算模块、滑移率计算模块及控制压力计算模块后,将制动压力返回 TruckSim 中。

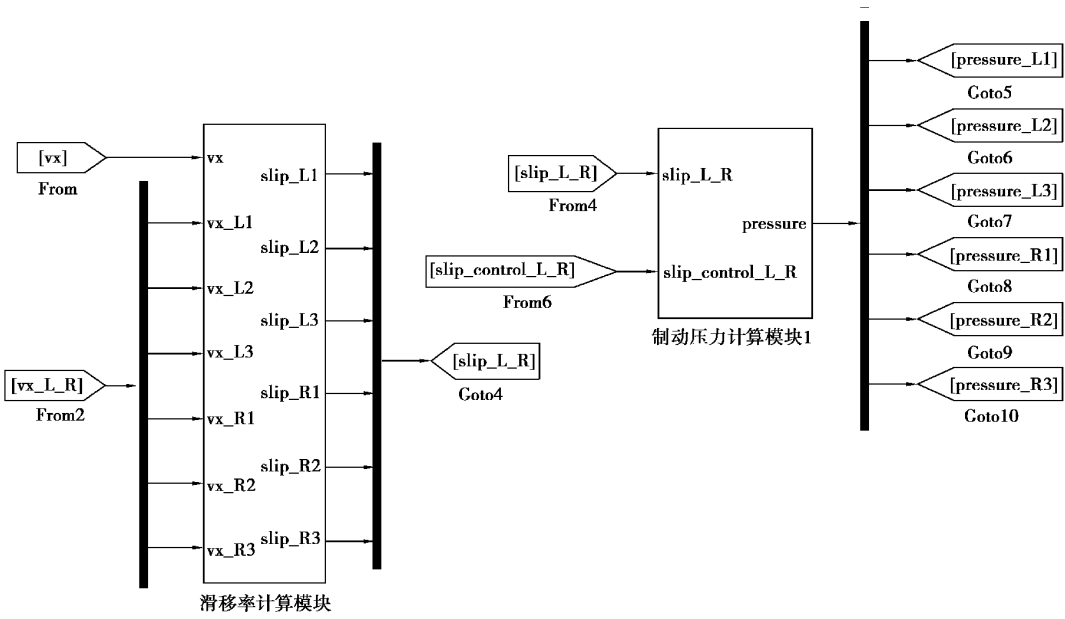
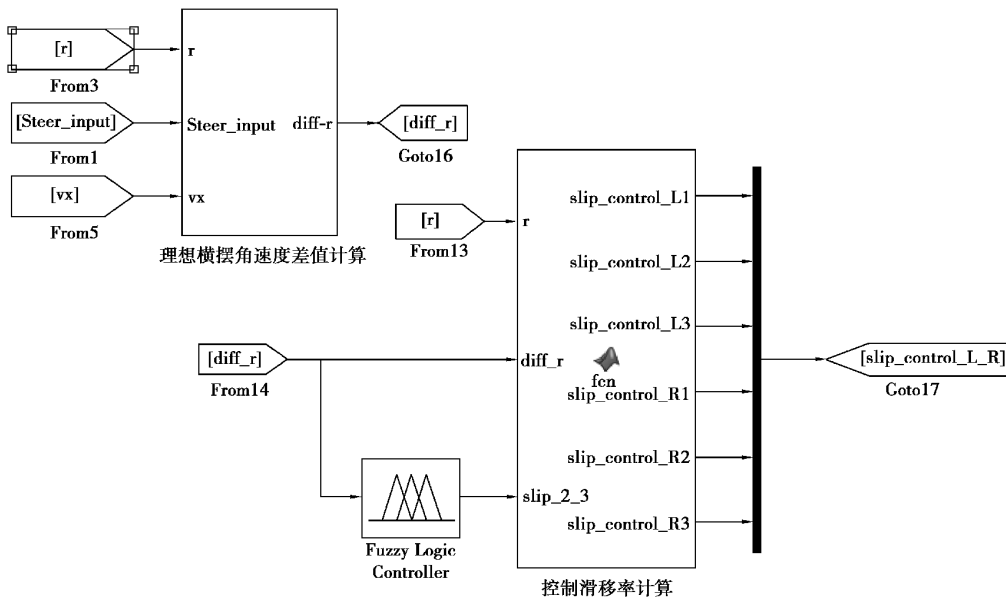
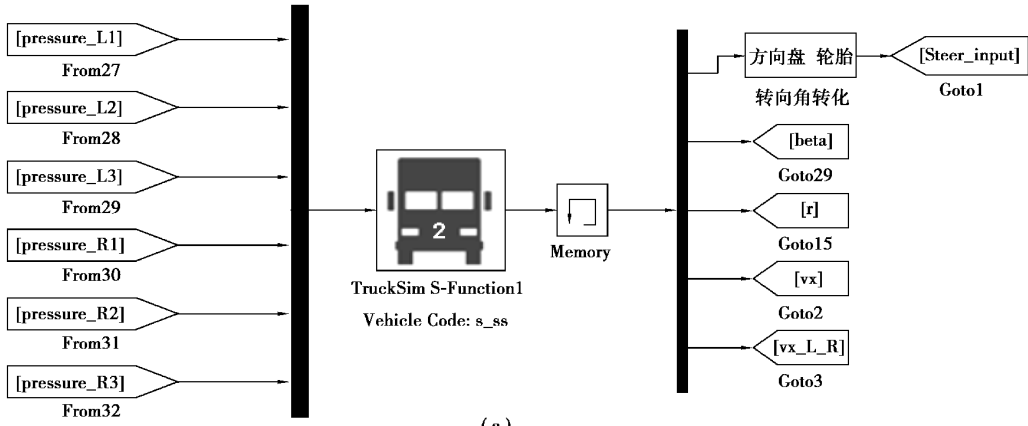


图 6 转向制动协同控制器程序框图

Fig. 6 Block diagram of steering brake coordination controller

3 转向制动协同控制仿真

在 TruckSim 中建立“J”型路面作为仿真路面,路面由 40 m 直道和半径为 120 m 的 1/4 圆弧组成,路面摩擦系数为 0.4,道路中心线轨迹如图 7 所示。

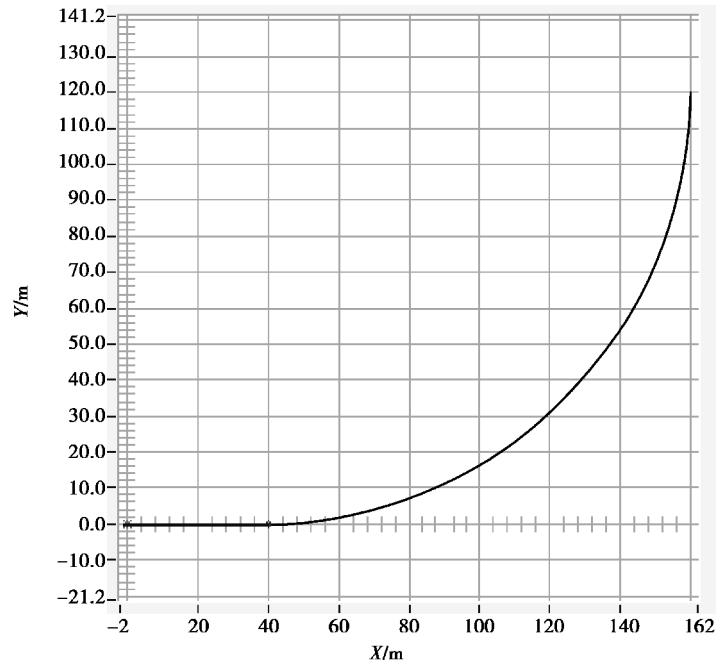


图 7 道路中心线轨迹

Fig. 7 Road centerline trajectory

车辆速度设置为匀速 20 m/s,在仿真时间 $t=3$ s 时开始制动,分别进行 ABS 的车辆仿真和协同控制器车辆仿真,采用 TruckSim 与 Simulink 联合仿真,验证协同控制器的控制效果。在车速接近 0 时,质心侧偏角的计算存在较大误差,根据实际情况进行了相应处理,仿真结果如图 8~10 所示。

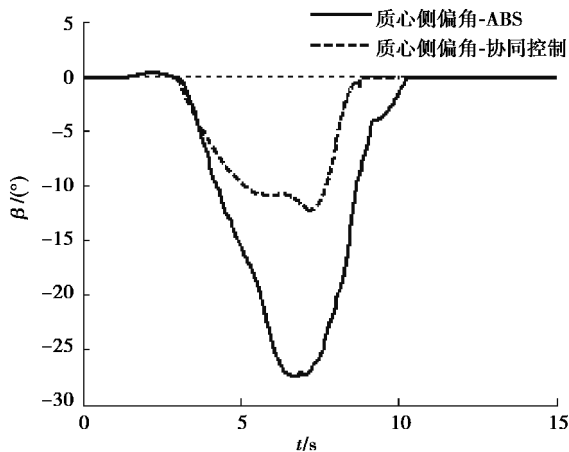


图 8 质心侧偏角对比图

Fig. 8 Comparison chart of centroid side angle comparison chart

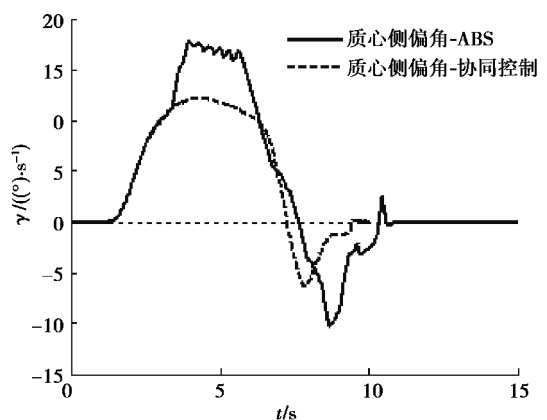


图 9 横摆角速度对比图

Fig. 9 Comparison chart of yaw angle speed comparison chart

由图 8 和 9 可以看出,协同控制车辆相比于 ABS 控制的车辆,在转向制动工况下,质心侧偏角和横摆角速度都减小了很多,质心侧偏角峰值减小了 15.2° ,横摆角速度峰值减小了 $5.49 (^{\circ})/s$,并且协同控制的车辆提前 0.94 s 停止制动。从图 8 和 9 中还可以看出,施加制动后,ABS 控制的车辆变得不稳定,协同控制的车辆能够抵抗制动的影响,保证车辆的稳定。从图 10 中可以看出,ABS 控制和协同控制路径跟随的能力相差不多,两种控制偏离理想路径的程度不大,从制动距离看,协同控制的横向制动距离减少 6.40 m ,纵向制动距离减少 5.78 m ,安全性能有所提高。

4 结 论

1) 基于 TruckSim 搭建了三轴汽车模型,针对该模型对每个轮胎产生的横摆力矩进行计算,计算结果表明,车辆产生的总体横摆力矩有利于纠正不足转向,不利于纠正过度转向。

2) 采用差动制动的方法对三轴汽车实施控制,根据横摆力矩计算结果设计了合理的制动方式,在车辆处于过度转向时,控制滑移率为一定值,在车辆处于不足转向时,设计了滑移率分配的模糊控制器,提高了轮胎力的利用率。

3) 完成了三轴汽车转向制动协同控制器的设计,仿真结果表明,该控制器可以解决转向和制动两种车辆行为之间的冲突,满足转向和制动的要求。与 ABS 控制器相比,协同控制器提高了车辆的稳定性与安全性,缩短了制动距离与制动时间。

参考文献:

- [1] Alam A, Besselink B, Turri V, et al. Heavy-duty vehicle platooning for sustainable freight transportation: a cooperative method to enhance safety and efficiency[J]. IEEE Control Systems, 2015, 35(6): 34-56.
- [2] Islam M M, He Y P, Zhu S J, et al. A comparative study of multi-trailer articulated heavy-vehicle models[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2015, 229(9): 1200-1228.
- [3] 李韶华, 吴金毅. 重型汽车横摆稳定性的差动制动模糊控制方法[J]. 科技导报, 2014, 32(Z2): 91-96.
LI Shaohua, WU Jinyi. A fuzzy-logic controller design for heavy vehicle based on co-simulation [J]. Science and Technology Review, 2014, 32(Z2): 91-96.(in Chinese)
- [4] 刘福建. 基于 TruckSim 的卡车防抱死制动系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
LIU Fujian. Research on the truck anti-lock braking system based on TruckSim [D]. Changsha: Hunan University, 2016.(in Chinese)
- [5] Kanchwala H, Wideberg J, Alba C B, et al. Control of an independent 4WD electric vehicle by DYC method[J]. International Journal of Vehicle Systems Modelling and Testing, 2015, 10(2): 168.
- [6] 吴明阳, 冀杰. 电动汽车横摆力矩拉盖尔函数模型预测控制[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(1): 61-69.
WU Mingyang, JI Jie. Yaw moment control of electric vehicles based on model predictive theory using Laguerre functions[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(1): 61-69.(in Chinese)
- [7] 李以农, 胡一明, 邹桃. 轮毂电机驱动电动汽车横摆稳定性控制[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(12): 24-34.
LI Yinong, HU Yiming, ZOU Tao. Yaw stability control of wheel-drive electric vehicle[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(12): 24-34.(in Chinese)
- [8] 杨炜, 马浩越, 郭祥靖. 基于 TruckSim 与 Simulink 联合仿真的半挂汽车列车横向稳定性控制[J]. 中国科技论文, 2018,

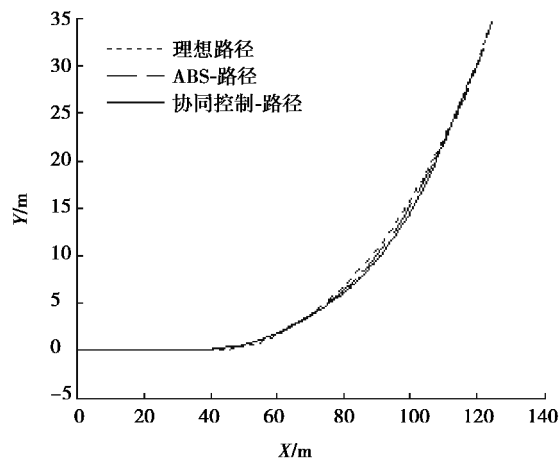


图 10 路径对比图

Fig. 10 Path comparison chart

- 13(4): 390-398.
- YANG Wei, MA Haoyue, GUO Xiangjing. Semi-trailer lateral stability control based on TruckSim and Simulink co-simulation[J]. China Sciencepaper, 2018, 13(4): 390-398.(in Chinese)
- [9] 陈松, 夏长高, 李胜永, 等. 汽车 ESP 系统的混杂切换控制研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(4): 614-622.
- CHEN Song, XIA Changgao, LI Shengyong, et al. Hybrid control of automobile's electronic stability program[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(4): 614-622.(in Chinese)
- [10] 李晗. 主动前轮转向和防抱死制动的集成控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- LI Han. The integrated control of active front steering system and anti-lock braking system[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2016.(in Chinese)
- [11] Morrison G, Cebon D. Combined emergency braking and turning of articulated heavy vehicles[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(5): 725-749.
- [12] Li B Y, Du H P, Li W H, et al. Side-slip angle estimation based lateral dynamics control for omni-directional vehicles with optimal steering angle and traction/brake torque distribution[J]. Mechatronics, 2015, 30: 348-362.
- [13] Zhang H, Wang J M. Vehicle lateral dynamics control through AFS/DYC and robust gain-scheduling approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(1): 489-494.
- [14] Aksjonov A, Augsburg K, Vodovozov V. Design and simulation of the robust ABS and ESP fuzzy logic controller on the complex braking maneuvers[J]. Applied Sciences, 2016, 6(12): 382.
- [15] Liu Y Q, Liu L P. Stability control and simulation analysis of automobile hydraulic system ESP[C]// Proceedings of the 2016 5th. International Conference on Advanced Materials and Computer Science. Atlantis Press, 2016:1015-1020.
- [16] 张向文, 王飞跃, 高彦臣. 轮胎稳态模型的分析综述[J]. 汽车技术, 2012(2): 1-7.
- ZHANG Xiangwen, WANG Feiyue, GAO Yanchen. Analysis of the tire steady-state models[J]. Automobile Technology, 2012(2): 1-7.(in Chinese)
- [17] 余卓平, 高晓杰, 张立军. 用于车辆稳定性控制的直接横摆力矩及车轮变滑移率联合控制研究[J]. 汽车工程, 2006, 28(9):844-848.
- YU Zhuoping, GAO Xiaojie, ZHANG Lijun. A study on coordination of direct yaw moment control and variable wheel slip control for vehicle stability[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(9): 844-848.(in Chinese)
- [18] 谢兆夫. 基于动力学模型的三轴汽车防侧翻控制系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- XIE Zhaofu. A research on anti-rollover control systems of three-axle vehicle based on dynamic model[D]. Changsha: Hunan University, 2016. (in Chinese)

(编辑 张 苹)