

## 纯电动智能汽车制动防抱死系统控制逻辑研究\*

刘斌,施卫,常嘉伟,李展峰

(江苏理工学院 机械工程学院,江苏 常州 213000)

**摘要:** 线控制动技术(Brake-by-Wire)是纯电动智能汽车的关键技术之一。为了提高智能驾驶汽车制动的安全稳定性,需要针对一款纯电动智能汽车的制动防抱死系统控制逻辑进行研究。在该方案实施前,设置合理的逻辑门限值,通过Stateflow进行仿真实验。基于Simulink搭建了8自由度的车辆动力学模型,对弯道制动工况进行仿真,通过控制车辆的横摆力矩实现车辆的差动控制。通过仿真实验,验证了提出的制动防抱死系统控制逻辑的合理性,对后续的线控制动系统的研发具有指导意义。

**关键词:** 纯电动智能汽车;制动防抱死系统;弯道制动;逻辑门限值控制;差动控制;稳定性

中图分类号: TN108.4;U463.5

文献标识码: A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.211683

中文引用格式: 刘斌,施卫,常嘉伟,等. 纯电动智能汽车制动防抱死系统控制逻辑研究[J]. 电子技术应用, 2022, 48(1): 100-104.

英文引用格式: Liu Bin, Shi Wei, Chang Jiawei, et al. Research on control logic of anti-lock braking system of pure electric smart car[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(1): 100-104.

## Research on control logic of anti-lock braking system of pure electric smart car

Liu Bin, Shi Wei, Chang Jiawei, Li Zhanfeng

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213000, China)

**Abstract:** Brake-by-wire technology is one of the key technologies of pure electric smart cars. In order to improve the safety and stability of automobile braking, it is necessary to study the control logic of the anti-lock braking system of a pure electric smart car. Before the implementation of this program, a reasonable logic threshold is set for simulation experiments. In this paper, a vehicle dynamics model with 8 degrees of freedom is built based on Simulink to simulate the braking conditions in a curve, and the differential control of the vehicle is realized by controlling the yaw moment of the vehicle. Through simulation experiments, the rationality of the proposed anti-lock braking system control logic is verified, which has guiding significance for the subsequent research and development of brake-by-wire systems.

**Key words:** pure electric smart car; anti-lock brake system; corner braking; logic threshold control; differential control; stability

## 0 引言

汽车未来的发展趋势是电动化、智能化、共享化以及网联化。智能汽车需要感知、控制决策、执行等相关技术匹配,新型智能线控底盘是智能汽车的关键技术。线控制动(Brake-by-Wire)技术是智能线控底盘的关键技术,包含传统制动技术,基于动力学、运动学、电控等多学科融合技术,技术壁垒较高<sup>[1]</sup>。由于传统的制动系统不能实现自主制动,无法满足智能电动汽车对制动系统的智能电动化要求,无法实现对制动压力的快速精确控制,为此本文在传统制动系统上进行改造来满足智能电动汽车对制动系统的需求<sup>[2]</sup>。

## 1 纯电动智能汽车制动系统改造方案

目前电控液压制动技术发展相对比较成熟,对实验

车辆的改造应做到不影响现有的液压制动系统的制动能力<sup>[3]</sup>。

为了实现纯电动智能汽车的自动驾驶功能,首先提出了如图1所示的整体设计方案<sup>[4]</sup>。

现如今针对纯电动智能汽车的自动驾驶制动系统,很多国内外专家学者提出了不同的方案,如电控气压制动、双回路电控-液压制动<sup>[5]</sup>等。本文研究的对象是纯电动汽车,原车的制动系统比较简单,在设计改造方案中考虑到为了和传统汽车一样具有制动防抱死功能,同时又能实现主动制动。因此,在现车基础上加装了制动防抱死系统(Antilock Brake System, ABS)装置,同时对ABS中的ECU重新进行软硬件设计,以达到功能要求。与有人驾驶车辆相比,智能驾驶取消了驾驶员的操作,也就是制动系统不由人工控制,不受人力提供的能量,能够根据规划层发出的制动需求而自主完成自动减速,从而

\* 基金项目:江苏省社会科学基金项目(19JYB012);江苏理工学院研究生实践创新计划项目(XSJCX20-28)

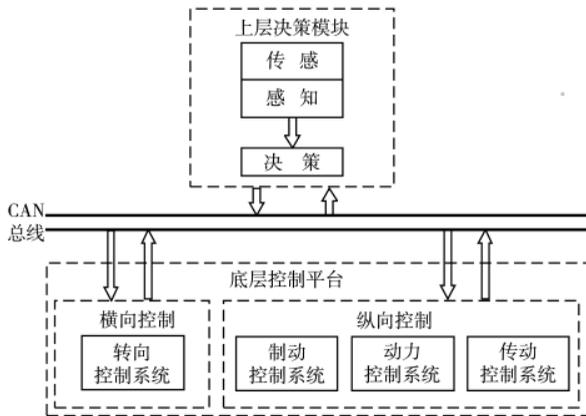


图1 自动驾驶整体设计方案

满足智能驾驶时各种路况的制动控制需求。例如，自适应跟车时的常规制动以及紧急制动。

## 2 车辆失稳的原因分析以及改善策略

弯道制动时，最为危险的是后轴侧滑，会导致车辆发生剧烈的回转运动，甚至使汽车出现调头。这是因为后轮先于前轮抱死，制动效能会较差，虽不会失去转向能力，但会导致过度转向的危险情况<sup>[6]</sup>。当出现紧急情况时，由于司机的操作不当，使汽车进入 $\mu$ - $S$ 曲线的不稳定区域，车辆的质心侧偏角会超过正常水平，司机无法操纵汽车调整到安全状态，使车辆的稳定性失去控制<sup>[7]</sup>。在辅助驾驶上，目前运用最多的是差动制动，汽车在弯道制动时，车轮的差动制动是经过控制滑移率达到的目的，进一步去控制纵向力 $F_x$ 、侧向力 $F_y$ ，产生相应的横摆力矩可有效维持汽车稳定性<sup>[8]</sup>。

接下来讨论如何改变车轮滑移率来维持弯道制动时的车辆稳定性。逻辑门限值控制策略是ABS最成熟，应用最广泛的控制策略，以车轮滑移率和车轮角加/减速度作为门限值<sup>[9]</sup>。由如图2所示ABS的工作原理图可知，若降低滑移率门限，则纵向的附着条件也会略微下降，而侧向附着系数大幅增加。由上分析可知，纵向附着系数的下降导致纵向制动力减小，而侧向力却显著提高，车辆的侧向稳定性能得到提高。因此，各车轮的 $F_x$ 和 $F_y$ 将通过滑移率门限的改变得到控制，这样整车横摆力矩就会稳定，从而就会维持弯道制动时的方向稳定性<sup>[10]</sup>。

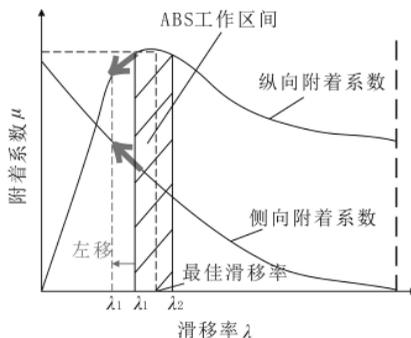


图2 ABS工作原理图

具体地，汽车在转弯制动时，在水平地面上的受力分析如图3所示。假设汽车左转为正，纵向力 $F_{x1}$ 、 $F_{x3}$ 和侧向力 $F_{y1}$ 、 $F_{y2}$ 产生正的横摆力矩 $M_{zf}$ ，使车辆向弯道内侧偏转；纵向力 $F_{x2}$ 、 $F_{x4}$ 和侧向力 $F_{y3}$ 、 $F_{y4}$ 产生负的横摆力矩 $M_{zr}$ ，使车辆向弯道外侧偏转。若 $M_{zf} > M_{zr}$ ，车辆向弯道内侧偏转，出现过度转向现象；若 $M_{zf} = M_{zr}$ ，车辆保持弯道轨迹正常行驶，车辆处于中性转向；若 $M_{zf} < M_{zr}$ ，车辆向弯道外侧偏转，车辆出现不足转向。于是就得出车辆弯道制动时过度转向的原因是 $M_{zf} > M_{zr}$ 。因此，当出现过度转向时，可以增大 $M_{zr}$ 或减小 $M_{zf}$ 。因此在优化控制策略中各车轮目标滑移率时结合弯道制动的受力分析，若车辆内侧超过外侧的制动力时，可能会出现极为危险的侧滑，导致车辆发生剧烈的回转运动，最终确定了优化方案，即在直线制动ABS的基础上实行差动制动控制，确定前后轴滑移率，增大前轴车轮的滑移率，减小后轴车轮滑移率，可以维持汽车在弯道制动时的稳定性<sup>[11]</sup>。

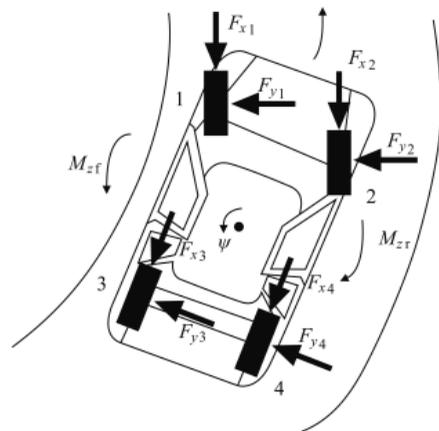


图3 车辆弯道制动时的车轮受力图

## 3 纯电动智能汽车 ABS 控制算法

### 3.1 ABS 控制策略

虽然关于ABS的控制算法不少专家学者提出了很多的创新，但是逻辑门限值控制算法<sup>[12]</sup>仍是主流的算法，利用角加减速度及参考滑移率组成门限值，算法将滑移率控制在峰值附着系数附近浮动，将纵向和横向力控制在最理想的范围，因此汽车的制动距离以及稳定性都将达到最佳。

如图4所示，在路面附着系数较高的情况下，先设定系统的角加减速度门限值 $(+a, -a)$ 、滑移率 $S$ 、参考滑移率门限值 $S_1$ 、第二角加速度门限 $+A_k$ 。在刚开始制动时，以 $-a$ 作为角加速度门限，如果检测得到的车轮角减速度小于该门限时，将此时车速作为前一时刻的汽车参考车速 $V_{Ref0}$ ，后一时刻的汽车参考车速为 $V_{Ref}$ ，取 $-j$ 作为制动减速度，可以得到 $V_{Ref} = V_{Ref0} - jt$ ，这样就可以得到每个时刻的参照滑移率<sup>[13]</sup>。

需要特别说明的是，该控制策略里设定了第二角加速度门限 $+A_k$ 来适应附着系数的突然增加<sup>[14]</sup>。在规定保

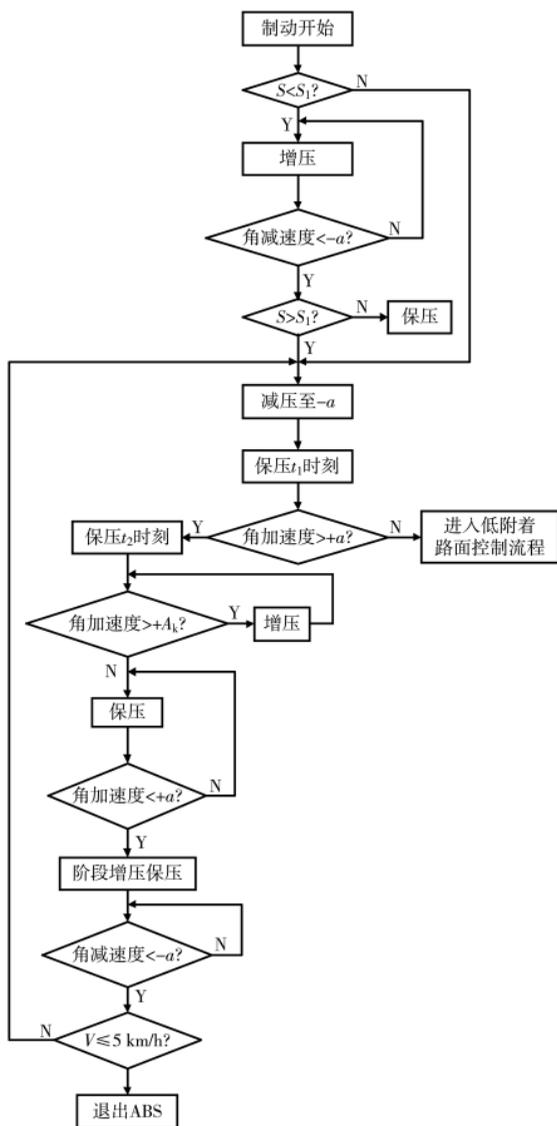


图4 高附着路面 ABS 控制流程图

压时间内,有:(1)若车轮角减速度 $<+a$ ,为低附着系数路面;(2)若车轮角减速度 $>+a$ ,继续进行保压,分两种情况进行讨论:①角减速度 $>+A_k$ (表明高附着路面),说明制动系统存在滞后性,进入高附着路面后,地面制动力是一个向后的力,其实是使车轮加速旋转的力,就可以使车轮角加速度超过某一个值,这时就需要增压,来适应增加的附着系数;②角减速度再次 $<+a$ ,证明进入 $\mu-S$ 曲线峰值稳定区域附近<sup>[15]</sup>。

3.2 ABS 的逻辑门限值控制模型

根据图5所示,使用Stateflow搭建ABS的条件切换控制模型图。

ABS的控制逻辑包括ABS的启动、加压、降压、保压和阶段加压、ABS的关闭、ABS的退出7种状态。每个逻辑间的切换控制将依据滑移率或车轮角减速度,各状态将依据表1的条件进行逻辑切换,制动力矩也将依据表2对控制逻辑状态 $k$ 进行取值,值是通过标定确定的。需

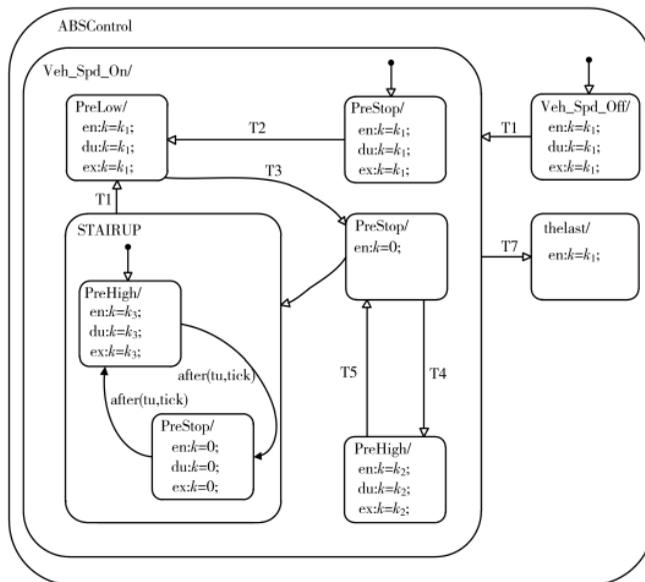


图5 ABS 控制模型图

表1 控制逻辑状态切换条件

| 序号 | 转移条件             | 序号 | 转移条件                    |
|----|------------------|----|-------------------------|
| T1 | $\omega_a < -a$  | T5 | $\omega_a < A_k$        |
| T2 | $S > S_1$        | T6 | $-a < \omega_a \leq +a$ |
| T3 | $\omega_a > +a$  | T7 | $v \leq 5 \text{ km/h}$ |
| T4 | $\omega_a > A_k$ |    |                         |

表2 控制逻辑状态取值

| 逻辑状态   | 取值        | 逻辑状态   | 取值        |
|--------|-----------|--------|-----------|
| ABS 关闭 | $k = k_0$ | 保压     | $k = 0$   |
| 减压     | $k = k_1$ | 增压     | $k = k_2$ |
| 梯度增压   | $k = k_3$ | ABS 退出 | $k = 0$   |

要特别说明的是,弯道制动和直线制动的制动情况更为复杂,因此需要对每个车轮搭建控制模型,进行单独控制,也就是差动制动控制。

由上面分析可以得到,为了避免汽车在弯道进行制动时出现过度转向的情况,这里前轴采用较高的滑移率,后轴采用较低的滑移率。因此,搭建的控制逻辑模型中左、右前轮的滑移率门限 $S_1$ 高于左、右后轮的滑移率门限,同时也适当提高了左后轮角加减速度的门限值和第二角加速度门限值,可进一步纠正转向过度。

4 仿真平台搭建

本文的整车模型是基于左转弯的8自由度模型,包括整车的纵向运动、整车的侧向运动、整车的横摆运动、整车的侧倾运动和四轮转动对整车进行动力学建模。

$$m(\dot{v}_x - \omega \cdot v_y) = -(F_{x1} + F_{x2}) \cos\delta - (F_{y1} + F_{y2}) \sin\delta - F_{x3} - F_{x4} \quad (1)$$

$$m(\dot{v}_y + \omega \cdot v_x) = (F_{x1} + F_{x2}) \sin\delta - (F_{y1} + F_{y2}) \cos\delta + F_{y3} + F_{y4} \quad (2)$$

$$I_x \ddot{\phi}_r = -K_\phi \phi_r - \dot{C}_\phi + m_s g h \sin\phi_r + m_s h (\dot{v}_y + \omega \cdot v_x) \quad (3)$$

$$I_{wi} \cdot \dot{\omega}_i = F_{wi} \cdot R - M_b \quad (4)$$

$$T_b = F_{xb}R - I\dot{\omega}_a \quad (5)$$

$$a_x = \dot{v}_x - \omega \cdot v_y \quad (6)$$

$$a_y = \dot{v}_y + \omega \cdot v_x \quad (7)$$

$$F_{z1} = mgb/2L - ma_x h/2L - ma_y ha/BL \quad (8)$$

$$F_{z2} = mgb/2L - ma_x h/2L + ma_y ha/BL \quad (9)$$

$$F_{z3} = mga/2L + ma_x h/2L - ma_y hb/BL \quad (10)$$

$$F_{z4} = mga/2L + ma_x h/2L + ma_y hb/BL \quad (11)$$

$$\alpha_1 = \delta - \arctan\left(\frac{v_x + a\omega}{v_x - B_f \omega/2}\right) \quad (12)$$

$$\alpha_2 = \delta - \arctan\left(\frac{v_x + a\omega}{v_x + B_f \omega/2}\right) \quad (13)$$

$$\alpha_3 = -\arctan\left(\frac{v_y - b\omega}{v_x - B_r \omega/2}\right) \quad (14)$$

$$\alpha_4 = -\arctan\left(\frac{v_y - b\omega}{v_x + B_r \omega/2}\right) \quad (15)$$

$$s = (v - \omega R)/v \quad (16)$$

式中,  $m$  为汽车质量;  $m_s$  为悬挂质量;  $v_x$  为纵向速度;  $v_y$  为侧向速度;  $\omega$  为汽车横摆角速度;  $\dot{\omega}$  为汽车的横摆角加速度;  $F_{xi}$ 、 $F_{yi}$  分别为轮胎的纵向力、侧向力,  $i=1, 2, 3, 4$  分别表示左前轮、右前轮、左后轮、右后轮;  $\delta$  为前轮转向角;  $I_z$ 、 $I_x$  分别为汽车绕  $OZ$ 、 $OX$  轴的转动惯量;  $L$  为轴距;  $a$  为汽车质心离前轴的距离;  $b$  分别为汽车质心离后轴的距离;  $B$  为轮距;  $h$  为悬挂质心到侧倾轴线的距离;  $K_\phi$  为悬架角刚度;  $C_\phi$  为悬架角阻尼;  $\phi_r$ 、 $\dot{\phi}_r$ 、 $\ddot{\phi}_r$  分别为悬架的侧倾角、侧倾角角速度、侧倾角角加速度;  $J_{wi}(i=1, 2, 3, 4)$  为车轮的转动惯量;  $\omega_i$ 、 $\dot{\omega}_i(i=1, 2, 3, 4)$  为车轮的角速度和角加速度,  $T_b$  为制动器制动力矩;  $F_{xb}$  为地面制动力;  $a_x$ 、 $a_y$  分别为纵、横向加速度;  $F_{zi}(i=1, 2, 3, 4)$  为各车轮的垂直载荷;  $h$  为质心高度;  $\alpha_i$  为各车轮轮胎的侧偏角,  $B_f$  为前轴轮距,  $B_r$  为后轴轮距;  $s$  为轮胎滑移率,  $\omega$  为车轮角速度。

## 5 ABS 系统仿真及结果分析

### 5.1 ABS 系统仿真

为了验证本次设计的控制算法可以保证弯道制动时的稳定性,在 Simulink 中搭建了含有 ABS 控制器的仿真模型,通过对有无 ABS 进行对比,仿真得到结果。整车性能仿真参数如表 3 所示。

### 5.2 仿真结果分析

车辆初始速度为 25 m/s,在摩擦系数为 0.75 的路面进行制动仿真,其中仿真时间为 5 s,仿真结果如图 6~图 8 所示。

从图 6 和 7 可以看出,汽车在汽车转向角逐渐增大到 0.1 rad 时,传统制动的滑移率会迅速增加,车轮会抱死。但使用 ABS 进行差动制动后,汽车 4 个车轮的滑移率平稳增加,滑移率在 0.18 附近平稳工作,达到了预期效果。

从图 8 可以看出,在没有 ABS 前,汽车从 25 m/s 到制动停车需要 4.3 s;但使用 ABS 进行差动制动后,制动

表 3 整车性能参数

| 参数                               | 取值    |
|----------------------------------|-------|
| 整车质量/kg                          | 1 180 |
| 车轮半径/m                           | 0.28  |
| 前轴到质心距离/m                        | 1.2   |
| 后轴到质心距离/m                        | 1.3   |
| 前、后轴轮距/m                         | 1.43  |
| 质心高度/m                           | 0.55  |
| 整车绕 Z 轴转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> ) | 2 800 |
| 迎风面积/m <sup>2</sup>              | 4     |
| 迎风阻力系数                           | 0.45  |
| 滚动阻力系数                           | 0.014 |

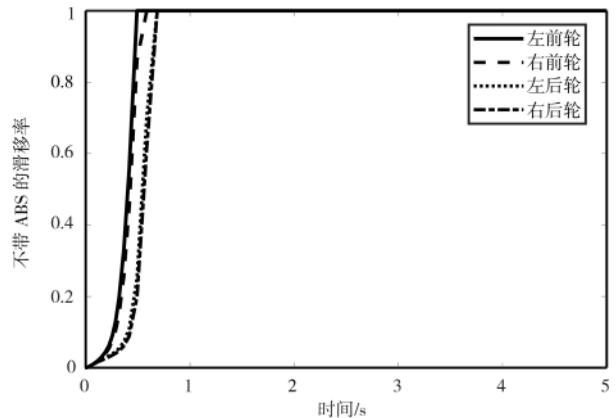


图 6 无 ABS 的滑移率图

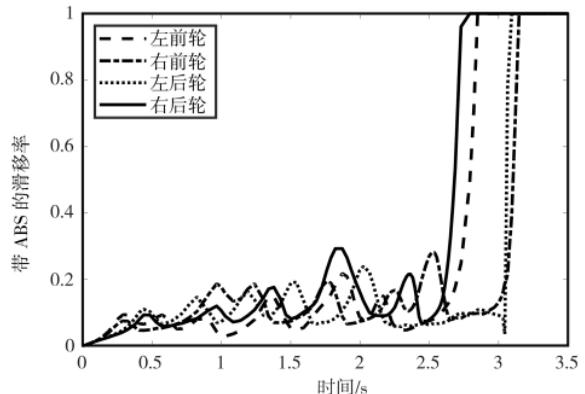


图 7 有 ABS 的滑移率图

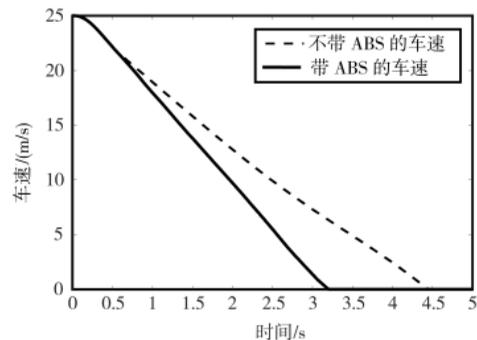


图 8 有无 ABS 的速度对比图

时间仅需 3.2 s,制动时间被大大缩短,说明使用 ABS 后

的制动性能得到了很多提升。

为了更好地说明使用 ABS 后汽车弯道制动的稳定性性能,特别对比了使用 ABS 进行差动制动前后的横摆力矩图。从图 9 可以得出,使用 ABS 进行差动制动后的车辆横摆力矩比原来的变化幅度明显变小,说明汽车制动稳定性更好。

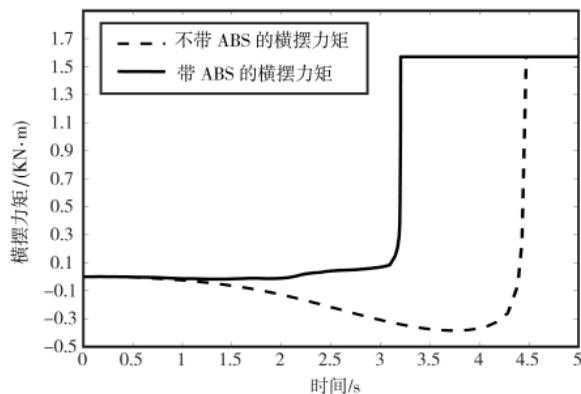


图 9 有无 ABS 的横摆力矩对比图

特别地,由图 10 得,弯道制动时使用 ABS 差动制动,车辆外侧制动力明显高于内侧车轮,因此可以保证内侧车轮滑移率低于内侧车轮的滑移率,可有效减小车辆行驶时的纵向力,维持车辆弯道制动的稳定性。

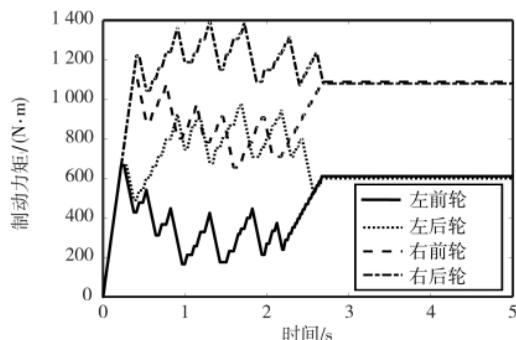


图 10 4 个车轮制动力矩图

## 6 结论

本文基于 MATLAB/Simulink 搭建了整车 8 自由度模型,在直线制动的基础上进一步分析了汽车弯道制动时失稳的原因,经过分析提出改善的方法,并运用到控制策略中。又选取车轮角速度为主要门限,滑移率为辅助门限,使用 Stateflow 搭建了逻辑门限值 ABS 控制模型。仿真结果表明,本文采用的控制方法使用 ABS 差动制动后,车辆在弯道制动中可防止车轮抱死,又减小了整车横摆力矩和制动时间,增加了制动时的车身稳定性,为后期的线控制动系统的开发提供理论基础。

### 参考文献

- [1] 周岳,武振江,冯天骥.线控制动技术现状及趋势综述[J].中国汽车,2020(7):51-57.
- [2] 宗长富,李刚,郑宏宇,等.线控汽车底盘控制技术研究

进展及展望[J].中国公路学报,2013,26(2):160-176.

- [3] 高吉.新型电子液压制动系统研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [4] 刘少山,唐洁,吴双,等.第一本无人驾驶技术书[M].北京:电子工业出版社,2017.
- [5] 陈慧岩,张瑞琳,朱晓龙,等.越野无人驾驶车双回路电控-液压制动系统设计及试验[J].北京理工大学,2016,36(7):695-700.
- [6] 林欢.汽车防抱死系统的控制方法及仿真分析[D].重庆:重庆交通大学,2014.
- [7] PILUTTI T, ULISOY G, HROVAT D. Vehicle steering intervention through differential braking[C]//IEEE.Proceedings of the 1995 American Control Conference. New York: IEEE, 1995:1667-1671.
- [8] 冯遥.汽车防抱死制动系统 PID 控制算法仿真研究[D].西安:长安大学,2014.
- [9] PENG X, ZHE H, GUO G, et al. Driving and control of torque for direct-wheel-driven electric vehicle with motors in serial[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1): 80-86.
- [10] BI L Z, TENG T, GUAN C T. A novel method of emergency situation detection for a brain-controlled vehicle by combining EEG signals with surrounding information[J]. IEEE Transactions on Neural Systems And Rehabilitation Engineering, 2018, 26(10): 1926-1934.
- [11] 郝亮.车辆 ABS 控制算法设计及硬件在环验证[J].辽宁工业大学学报(自然科学版),2017,37(5):312-316.
- [12] HERNANDEZ L G, MOZOS O M, FERRANDEZ J M, et al. EEG-based detection of braking intention under different car driving conditions[J]. Frontiers in Neuroinformatics, 2018, 12: 1-14.
- [13] LU Y, LU J, WU J W, et al. Study on the stability of high-speed turning braking based on the hardware-in-the-loop test[J]. Tehnički Vjesnik, 2018, 25(1): 210-215.
- [14] 尘帅,王吉忠,张西龙.线控制动系统车辆制动与横摆稳定性协调控制[J].济南大学学报(自然科学版),2020,34(4):371-376,383.
- [15] GIRBES V, ARMESTO L, DOLS J. An active safety system for low-speed bus braking assistance[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2016, 18(2): 377-387.

(收稿日期:2021-04-22)

### 作者简介:

刘斌(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源汽车控制与运用。

施卫(1974-),通信作者,男,高级实验师,硕士生导师,主要研究方向:汽车控制技术、智能网联汽车、汽车故障诊断技术等,E-mail:1027366017@qq.com。

常嘉伟(1997-),男,硕士研究生,主要研究方向:新能源汽车控制与运用。



扫码下载电子文档

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所