

# 基于横摆力矩分配的车辆稳定控制研究

张思奇 张天侠 周淑文

东北大学,沈阳,110819

**摘要:**研究了基于制动力和驱动力分配相结合的车辆稳定控制策略,即紧急避障时采用差动制动,高速超车时采用驱动力分配方法。采用二自由度车辆的横摆角速度作为参考,并与实测的横摆角速度相比较,根据比较结果采取相应的控制策略。应用虚拟样机技术建立车辆多体动力学模型,采用联合仿真的方法对控制策略进行仿真。仿真结果表明,采用基于制动力和驱动力分配相结合的车辆稳定控制策略可以大大提高加速超车和紧急避障时的操纵稳定性,这对减少高速行驶时道路交通事故的发生具有重要意义。

**关键词:**车辆稳定控制;横摆力矩;横摆角速度;差制动

中图分类号:TP391.9

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2012.06.025

## Study on Vehicle Stability Control Based on Distribution of Yaw Torque

Zhang Siqi Zhang Tianxia Zhou Shuwen

Northeastern University,Shenyang,110819

**Abstract:** This paper presented a vehicle stability control strategy, which was integrated with active torque distribution and differential braking system. Differential braking system worked on high speed obstacle avoidance under emergency and active torque distribution operates on overtaking. Depending on the comparison results between the reference model and the actual vehicle, the stability control strategy choosed corresponding control method. The stability control simulation was performed on a multi-body dynamic model based on virtual prototyping. The results show that the stability control proposed herein can stabilize the vehicle on overtaking or high speed obstacle avoidance under emergency.

**Key words:** vehicle stability control; yaw torque; yaw rate; differential braking

### 0 引言

车辆稳定控制系统(vehicle stability control

systems, VSC)因其能够防止车辆发生激转、漂移以及转向不足等危险情况而日益受到人们的重视并逐渐被商业化<sup>[1-3]</sup>。这类稳定控制系统也经常被称为横摆稳定控制系统(yaw stability control systems, YSC)、电子稳定控制系统(electronic stability control systems, ESC)和电子稳定程序(elec-

收稿日期:2011-04-11

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N090403008);沈阳市科学技术计划资助项目(F10-205-1-75);辽宁省教育厅科学研究计划资助项目(L2010463)

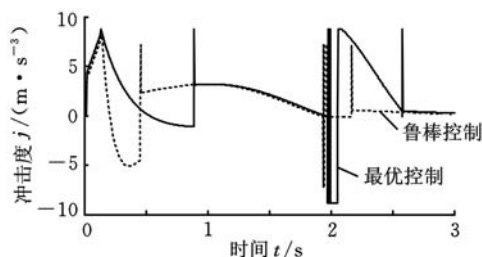


图 11 正常换挡过程车辆冲击度

### 参考文献:

[1] 葛安林,吴锦秋,郭万富. 离合器最佳接合规律的研讨[J]. 汽车工程,1988,10(2):54-56.

[2] Glielmo L, Vasca F. Optimal Control of Dry Clutch Engagement [C]//SAE World Congress 2000. Transmission and Driveline Symposium 2000. Detroit:SAE,2000-01-0837.

[3] 余春晖,陈慧岩,丁华荣. 车辆离合器起步阶段模糊控制的研究[J]. 汽车工程,2005,27(4):423-430.

[4] 黄宏成,习纲,张建武. 电控离合器的  $H_{\infty}$  控制及鲁

棒性分析[J]. 上海交通大学学报,2001,35(12):1802-1807.

[5] 牛奎铭,程秀生,高炳钊,等. 双离合器式自动变速器换挡特性研究[J]. 汽车工程,2005,26(4):453-457.

[6] 葛安林. 车辆自动变速理论及设计[M]. 北京:机械工业出版社,1993.

[7] 李瑜婷,赵治国,章桐. DCT 变速器双离合器压力最优控制方法的仿真研究[J]. 中国机械工程,2010,21(12):1496-1501.

[8] 葛宝明,林飞,李国国. 先进控制理论及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

[9] 贾英民. 鲁棒  $H_{\infty}$  控制[M]. 北京:科学出版社,2007.

[10] 张家凡,郑晓,胡志刚. 线性矩阵不等式及在控制理论中的应用[J]. 武汉工业学院学报,2002(3):55-58.

(编辑 王艳丽)

**作者简介:**赵治国,男,1971年生。同济大学汽车学院副教授、博士研究生导师。主要研究方向为车辆动力学控制及混合动力汽车动力传动系统控制。发表论文 50 余篇。仇江海,男,1987年生。同济大学汽车学院硕士研究生。

tronic stability program, ESP)。车辆稳定控制系统的作用就是修正车辆横摆角速度因各种原因而发生的偏差,使车辆尽可能恢复到正常运动,以便车辆能够按照驾驶员所期望的路径行驶<sup>[4-5]</sup>。

目前车辆稳定控制系统主要是采用差动制动的办法,即在不同的车轮上分别施加不同的制动力,以便产生一个附加横摆力矩,从而让跑偏的车辆恢复正常行驶。通常的控制策略是,当车辆发生不足转向时,则在后内轮上施加一定的制动力,当发生过度转向时,则在前外轮上施加相应的制动力,这种控制经常是交替执行,快速切换的。这类系统通常还包括对节气门的控制从而降低发动机的输出扭矩。

这种控制方法的优点是,当车辆遇到危险工况时可以有效地避免事故的发生。比如在高速公路上行驶,如果前方车辆突然减速、停车,或者有散落物,则在躲避障碍的同时,车速也有一定的下降,这种控制方法非常有利于躲避障碍。

然而,这种车辆稳定控制系统有一个明显的不足:当需要加速超车时,即使车辆能很好地按照期望的路径行驶,但由于车速下降,超车的距离势必会延长,降低了驾驶的乐趣。本文试图研究一种车辆稳定控制策略,即同时兼顾安全和驾驶动感,在需要加速转向超车时,采用驱动力分配方法;在紧急避障时,采用差动制动方法,从而使得车辆稳定控制系统适用于更为复杂的工况<sup>[6-7]</sup>。

## 1 车辆动力学分析

目前车辆稳定性控制研究主要是基于二自由度理论模型,忽略悬架、车身、传动系,只考虑横摆运动、纵向运动和 Z 轴转动惯量对车辆转向的影响,而忽略了前倾运动和侧倾运动对车辆转向的影响。根据汽车理论相关知识可以得出二自由度汽车的运动微分方程式:

$$\left. \begin{aligned} k_1(\beta + \frac{a\omega}{u} - \delta) + k_2(\beta - \frac{b\omega}{u}) &= mu(\dot{\beta} + \omega) \\ M + ak_1(\beta + \frac{a\omega}{u} - \delta) - bk_2(\beta - \frac{b\omega}{u}) &= I_z \dot{\omega} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $a$ 、 $b$ 分别为质心到前后轴的距离; $m$ 为车辆质量; $k_1$ 、 $k_2$ 分别为前轮、后轮等效侧偏刚度; $\beta$ 为车辆质心侧偏角; $\omega$ 为车辆横摆角速度; $I_z$ 为 Z 轴的转动惯量; $\delta$ 为前轮转向角; $u$ 为车速; $M$ 为横摆力矩。

对式(1)进行整理,并令状态向量  $\mathbf{x}^T = (\omega, \beta)$ ,输入向量  $\mathbf{u}^T = (\delta, M)$ ,可得状态空间表达式:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A}$ 为系统矩阵, $\mathbf{B}$ 为输入矩阵,矩阵中的元素分别为

$$a_{11} = \frac{a^2 k_1 + b^2 k_2}{u I_z}, a_{12} = \frac{ak_1 - bk_2}{I_z}$$

$$a_{21} = \frac{ak_1 - bk_2}{mu^2} - 1, a_{22} = \frac{k_1 + k_2}{mu}$$

$$b_{11} = -\frac{ak_1}{I_z}, b_{12} = \frac{1}{I_z}, b_{21} = -\frac{k_1}{mu}, b_{22} = 0$$

对于理想的二自由度车辆模型,由于假设路面和轮胎之间附着条件足够好,故理想的横摆角速度为<sup>[8-9]</sup>

$$\omega_d = \frac{u}{(a+b)}\delta \quad (3)$$

根据式(3),可以求中性转向时车辆的理想横摆角速度,它仅与车速和前轮转角的大小有关。在车辆稳定控制系统中,通过控制制动力矩和驱动力矩即横摆力矩  $M$  的大小来控制实际的横摆角速度,并将其与理论横摆角速度相比较。根据比较结果采取相应的控制策略。

## 2 车辆稳定控制策略

车辆稳定控制系统是在制动防抱死系统(anti-lock braking system, ABS)和牵引力控制系统(traction control system, TCS)的基础上发展起来的。除了轮速传感器外,该系统一般还包括方向盘转角传感器、车身横摆传感器。在本文设计的稳定控制系统中,还将用到节气门开度信号、制动踏板信号,在实际的应用中,可以通过总线技术实现共享。

控制系统不断地将实际横摆角速度和理想横摆角速度进行比较,满足下面两个条件时稳定控制系统将被启动:

$$\omega_r \omega_d > 0 \quad (4)$$

$$|\omega_r - \omega_d| > T_\omega \quad (5)$$

式中, $\omega_r$ 为车辆实际横摆角速度; $T_\omega$ 为横摆角速度阈值, $T_\omega$ 经多次仿真试验最终取为0.05rad/s。

式(4)确保只有在车辆实际横摆角速度与期望横摆角速度符号(矢量方向)相同时,稳定控制才被启用。式(5)防止在正常行驶时实际横摆角速度与期望横摆角速度的差值很小的条件下控制系统被启动。

(1) 稳定控制系统被启动后,如果检测到节气门位置传感器输出的电压在2.5~4.5V之间,则认为驾驶员要加速超车,这时启动驱动力分配系统子程序来调节驱动轮左右两侧的驱动力大小。根据实际横摆角速度与期望横摆角速度相比较后的误差来进行驱动力分配控制,主要是调节两侧驱动力所占总驱动力的百分比,采用阶梯方式增大一侧驱动力,同时相应地减小另一侧驱

动力,从而使实际横摆角速度接近期望横摆角速度。如果在驱动力调节的过程中,电子控制单元检测到实际横摆角速度与期望横摆角速度差值大于设定的某个阈值,则启动后轮差动制动,如图1所示;如果横摆角速度大于设定的阈值上限,则自动关闭节气门,对4个车轮进行差动制动,以使实际横摆角速度尽快恢复正常。

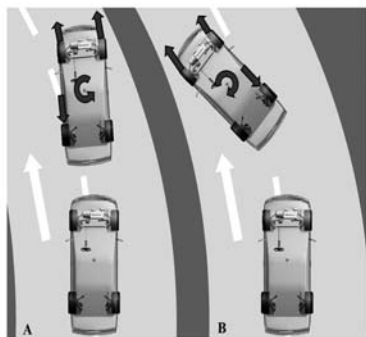


图1 稳定控制原理示意图

(2) 稳定控制系统被启动后,如果检测到制动踏板被踩下,则启动差动制动进行横摆角速度跟踪控制,这时仅限于对2个后轮进行调解。如果横摆角速度大于设定的阈值上限,则4个车轮同时进行调解。具体是,如果是过度转向,则外侧车轮同时进行制动;如果是不足转向,这时需要根据前轮的转角判断前轮是否和后轮一起进行制动。

车辆稳定控制策略流程如图2所示,图中,  $T_b$ 、 $T_t$  分别为差动制动时横摆角速度阈值和驱动力分配时横摆角速度阈值。

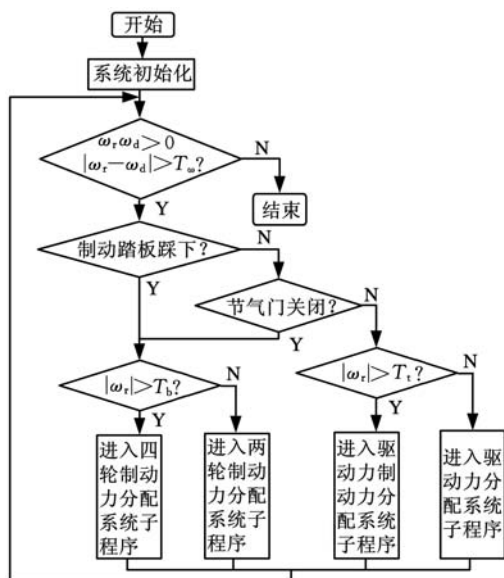


图2 车辆稳定控制策略流程图

### 3 车辆稳定控制仿真

根据上述稳定控制原理分析,采用动力学分

析软件ADAMS/Car进行建模,建立了全功能车辆多体动力学模型,包括发动机、传动系、悬架、轮胎、制动系、转向系、车身等子系统。采用 Simulink 进行联合仿真,所有的控制算法包括驱动力分配和制动力分配控制都在 Simulink 中实现。仿真所针对的车辆的主要参数见表1,多体动力学模型如图3所示,联合仿真控制模型如图4所示。

表1 车辆参数

轴距(m)	1.014 + 1.676
整车质量(kg)	1527
质心高(m)	0.542
车宽(m)	1.988
横摆转动惯量(kg·m <sup>2</sup> )	2741.9



图3 车辆虚拟样机模型

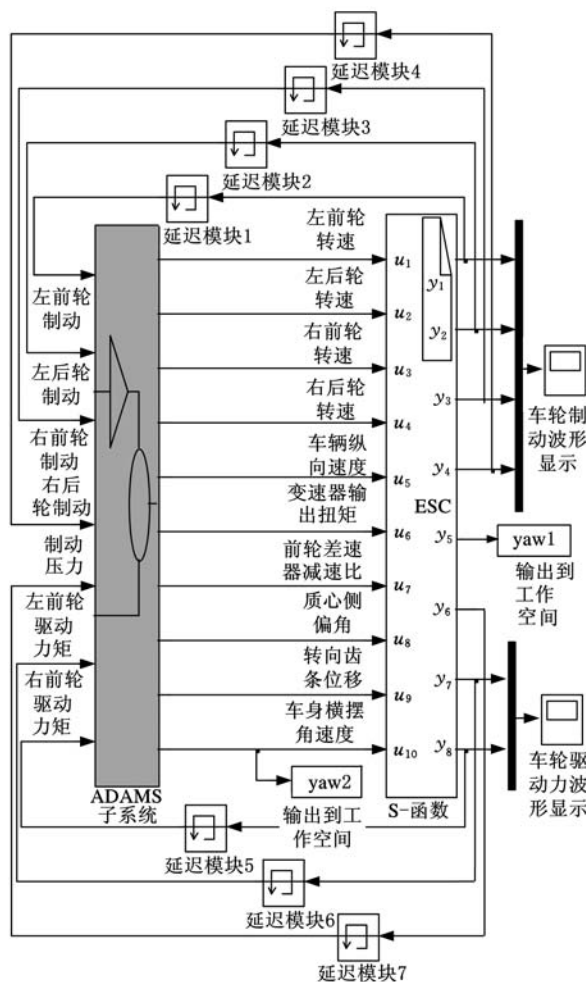


图4 车辆稳定控制联合仿真

## 4 仿真结果分析

根据对车辆高速超车和紧急避障工况的分析,可将其近似归结为急促移线行驶,试验工况如下:车道宽度 12m,从左侧移线入口,车速为 140km/h,汽车进入通道后,前进车速尽量保持不变,双移线期望运行路径如图 5 所示。仿真计算得到的结果如图 6、图 7 所示。

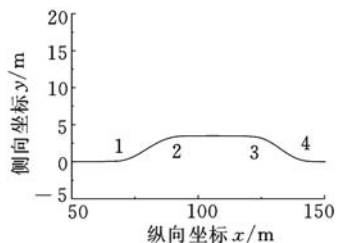


图 5 双移线期望路径

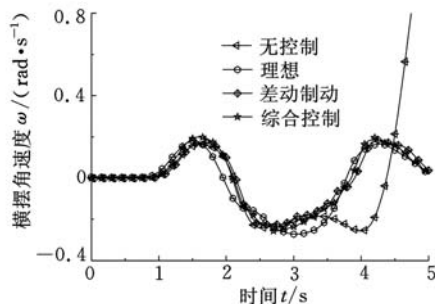


图 6 横摆角速度对比

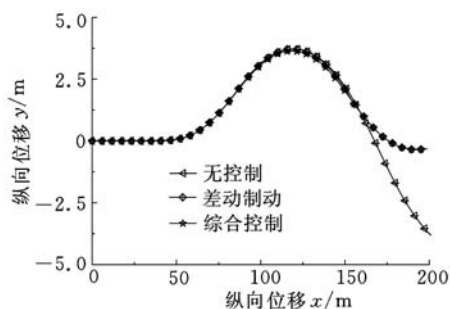


图 7 运动轨迹比较

图 6 所示为有无启动车辆稳定控制系统时的车辆横摆角速度,图中的理想横摆角速度是根据式(3)计算出来的。从图 6 不难发现,在进入第 1 个弯道时,前轮的侧向力饱和,达到路面附着力极限,控制系统没有被启动,车辆发生轻微的漂移;进入第 2 个弯道时,稳定控制系统启动,调节两侧驱动轮的扭矩,由于提供了一个附加的横摆转矩,故横摆角速度有一定的减小。没有稳定控制系统(未启动)的车辆在这个区间将变得极不稳定,最后由于后轮侧向力超过了路面附着力极限而发生了激转。装备了稳定控制系统的车辆能够很好地按照驾驶员的期望路径行驶,如图 7 所示。

## 5 结论

(1)对车辆高速超车、避障过程进行了分析,采用基于制动力和驱动力分配的方法对车辆稳定控制策略进行设计。

(2)应用虚拟样机技术建立了车辆多体动力学模型,采用联合仿真的方法对控制策略进行仿真验证。双移线仿真结果表明,采用本文提出的车辆稳定控制系统可以使车辆尽可能地按照驾驶员的期望路径行驶,同时还能保持驾驶的动感和乐趣。另外在仿真中也发现,过高的车速会降低车辆稳定控制系统的使用效果。

### 参考文献:

- [1] Wong J Y. Theory of Ground Vehicles[M]. Singapore: John Wiley & Sons Inc, 2001: 102-126.
- [2] Yi K, Chung T, Kim J. Closed-loop Evaluation of Vehicle Stability Control (VSC) Systems Using a Combined Vehicle and Human Driving Model[J]. SAE Technical Paper Series, 2004-01-0763, 2004.
- [3] Wang H Y. Modelling and Simulation of Electric Stability Program for the Passenger Car[J]. SAE Technical Paper Series, 2004-01-2090, 2004.
- [4] 赵治国, 方宗德, 黄英亮, 等. 车辆动力学稳定性系统变结构滑模控制研究[J]. 中国机械工程, 2003, 14(2): 152-156.
- [5] Kretschmer M, Neubeck J. Combining Vehicle Dynamics Control and Decision Making Procedures Towards Safe Overtaking Maneuvers [J]. SAE Technical Paper Series, 2005-01-0412, 2005.
- [6] Damrongrit P, John G, Qinghui Y, et al. Dynamic Modeling of Torque-biasing Devices for Vehicle Yaw Control[J]. SAE Technical Paper Series, 2006-01-1963, 2006.
- [7] Damrongrit P, Jae Y L, Rajesh R. On the Use of Torque-biasing Systems for Electronic Stability Control: Limitations and Possibilities [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3): 581-589.
- [8] Rajamani R. Vehicle Dynamics and Control[M]. New York: Springer, 2006: 221-249.
- [9] Bonnick A. Automotive Computer Controlled Systems[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001: 9-28.

(编辑 苏卫国)

作者简介:张恩奇,女,1978年生。东北大学车辆工程研究所博士研究生。研究方向为车辆动力学及其控制。张天侠,男,1945年生。东北大学车辆工程研究所教授、博士研究生导师。周淑文,男,1977年生。东北大学车辆工程研究所副教授。