

四轮转向车辆后轮转角与横摆力矩联合模糊控制*

王树凤¹ 李华师²

(1. 山东理工大学交通与车辆工程学院, 淄博 255049; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

【摘要】 为提高车辆在极限工况下的稳定性,充分考虑悬架、转向系统以及轮胎等部件的非线性,运用多体动力学仿真分析软件 ADAMS/Car 建立了四轮转向车辆的虚拟样机模型。确定了质心侧偏角和横摆角速度具有理想输出响应的控制目标。针对车辆的非线性,提出了后轮转角与横摆力矩联合控制的模糊控制策略,并设计了对应的非线性模糊控制系统。最后应用 ADAMS/Car 和 Matlab/Simulink 联合仿真技术,对控制系统的性能进行了仿真验证。仿真结果表明:后轮转角与横摆力矩联合模糊控制可有效防止车辆在极限转向工况下发生侧滑失稳。

关键词: 四轮转向车辆 稳定性控制 非线性 模糊控制 联合仿真

中图分类号: U461.6; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0014-06

Yaw Moment Fuzzy Control of Four-wheel-steering Vehicle
Based on Co-simulation Technology

Wang Shufeng¹ Li Huashi²

(1. School of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China

2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract

In order to enhance the stability of vehicle in limited driving conditions, a virtual prototype model of four-wheel-steering vehicle which included suspension system, steering system and nonlinear characteristics of tires was established by using ADAMS/Car software. Control objectives of the best performance of side slip angle and yaw rate were settled. Aiming at the nonlinear characteristics of vehicle, an integrated fuzzy control strategy of rear steering angle and yaw moment was proposed, and a nonlinear integrated fuzzy control system was designed. Adopted the co-simulation method of ADAMS/Car and Matlab/Simulink, various simulations in limited driving conditions were carried out and the performance of the designed control system was tested. The simulation results showed that the integrated fuzzy control of rear steering angle and yaw moment could effectively avoid the instability of vehicle during critical steering process.

Key words Four-wheel-steering vehicle, Stability control, Nonlinearity, Fuzzy control, Co-simulation

引言

四轮转向 (four-wheel-steering, 简称 4WS) 技术是主动底盘控制技术的重要组成部分,通过后轮直接参与对车辆侧向及横摆运动的控制,可有效改善车辆高速时的操纵稳定性和低速时的机动灵活性。

直接横摆力矩控制 (direct yaw moment control, 简称 DYC) 是当前车辆稳定性控制中一种较为有效的控制方法^[1],它以附加横摆力矩为控制量,可有效控制车辆的不足转向或过度转向,对车辆在极限工况下的稳定性有较好的辅助作用。将主动后轮转向的 4WS 技术和 DYC 结合起来,则可充分发挥两种底盘

收稿日期: 2010-06-09 修回日期: 2010-08-31
* 山东省自然科学基金资助项目 (Q2006F06)
作者简介: 王树凤,副教授,博士,主要从事车辆动力学研究,E-mail: shufeng@sdut.edu.cn

控制技术改善车辆操纵稳定性的优越性。

目前4WS和DYC的联合控制研究一般以提高车辆在大多数正常行驶工况下的操纵稳定性为目的,采用的是简化的线性二自由度车辆模型,没有考虑车辆中高速转向时车轮垂直载荷转移和轮胎的非线性问题^[2],文献[3]虽然建立的是非线性整车模型,但在进行控制器设计时又将其简化为线性二自由度模型。在控制算法方面,大多采用的是需建立被控对象精确数学模型的线性控制算法^[2~5],缺乏完全基于非线性控制的理论和方法的应用。为使车辆模型更加逼近真实车辆,本文充分考虑悬架系统、转向系统以及轮胎、衬套等部件的非线性,运用ADAMS/Car建立4WS车辆的虚拟样机模型。针对车辆的非线性,以提高车辆在极限工况下的稳定性为目的,采用非线性模糊控制算法,设计4WS车辆后轮转角与横摆力矩联合模糊控制系统并进行验证。

1 基于ADAMS/Car的四轮转向车辆整车虚拟样机模型

根据某4WS车辆提供的实际数据参数,运用ADAMS/Car建立了4WS车辆的整车虚拟样机模型^[6~7]。建模时假设:①车身简化为一个具有集中质量的刚体。②轮胎、弹簧、阻尼、衬套等由特性文件描述其力学特性,其他零部件均看作刚体。③车辆行驶于水平路面。所建模型如图1所示。该模型主要由7个子系统组成:双横臂式前、后独立悬架系统、齿轮齿条式转向系统、基于魔术公式的非线性轮胎模型、简化为质量中心的车身系统、动力总成及四轮盘式制动系统。为使后轮能够转向,在后悬架系统中增加了一齿条式后轮转向机构,齿条移动位移由控制系统给出。车辆主要结构参数如表1所示。

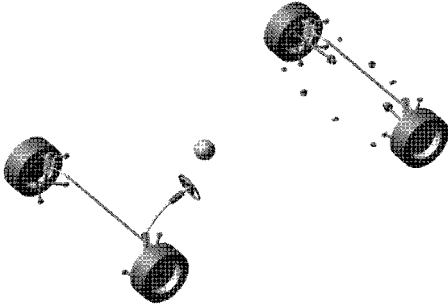


图1 4WS车辆整车虚拟样机模型

Fig.1 Virtual prototype model of four-wheel-steering vehicle

2 控制目标与控制策略分析

2.1 控制目标

对于前轮转向(front wheel steering,简称FWS)车辆,在高速大转弯等极限工况下,轮胎的非线性饱

和特性会导致其失去稳定性,单凭驾驶员对方向盘的操纵很难控制车辆,为了改善车辆的操纵稳定性,需对其采取一定的控制手段。车辆稳定性控制有两类任务:轨迹保持和稳定性控制,可分别由车辆质心侧偏角和横摆角速度来描述。质心侧偏角和横摆角速度从不同侧面表征了车辆的操纵性和稳定性,因此本文选取这两个参数作为控制系统的被控制量。

表1 车辆参数
Tab.1 Vehicle parameters

参数	数值
整车质量/kg	3 018
整车横摆转动惯量/kg·m ²	10 437
质心位置(到前轴的距离)/m	1.84
轴距/m	3.72
前后轮距/m	2.4
质心高度/m	0.5
前后轮主销后倾角/(°)	2.5
前后轮主销内倾角/(°)	5
前后轮外倾角/(°)	-0.5
前后轮前束角/(°)	0.2

在正常行驶工况下,为了不改变驾驶员的驾驶习惯,同时提高车辆高速时的转向灵活性,可将具有相同结构参数的线性二自由度FWS车辆的横摆角速度稳态值 ω_r 作为4WS车辆的理想横摆角速度稳态值。在极限工况下,为保证车辆的行驶稳定性,要求车辆的侧向加速度不能超过由路面附着系数所决定的加速度,因此横摆角速度还受附着条件的限制,不能超过由路面附着系数所决定的最大横摆角速度 ω_{rmax} 。为满足不同的工况,取二者之中的最小值作为横摆角速度的理想稳态值。另外,为使车辆在转弯时行驶方向角与车身姿态角重合,即保证良好车身姿态,必须在整个转向过程中,始终保持质心侧偏角 δ_f 为零或尽可能接近于零。综上所述,理想横摆角速度稳态值可确定为: $\min \{ |\omega_r|, |\omega_{rmax}| \} \operatorname{sgn}(\delta_f)$,理想质心侧偏角稳态值可确定为零。

为了提高车辆的稳定性,并获得期望的车辆响应,将控制系统的控制目标确定为最小化质心侧偏角和横摆角速度两个变量的实际响应与各自理想值之间的偏差。

2.2 控制策略分析

根据控制目标,并针对车辆的非线性,本文采用主动后轮转向与横摆力矩控制相结合的模糊控制策略。控制系统的总体设计方案如图2所示^[8~9]。控制思路为:以质心侧偏角和横摆角速度为被控制量,以横摆力矩(最终转换为车轮制动力矩)和后轮转

角为控制量。将被控制量的实际值与理想模型输出的期望值相比较,所得偏差输入到模糊控制模块,经模糊推理计算得出维持车辆稳定所需的横摆力矩和后轮转角,其中横摆力矩经分配后转换为车轮制动力矩,和后轮转角一起作用于车辆实际模型。当车辆即将出现失稳时,即采用车轮制动和后轮主动转向来联合调节车辆的状态使其稳定。

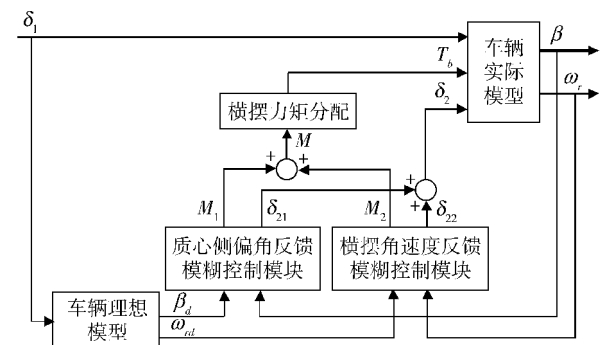


图2 4WS 车辆转角与横摆力矩联合模糊控制系统框图

Fig.2 Integrated fuzzy control system of rear steering angle and yaw moment for 4WS vehicle

为便于建立模糊控制规则,本文将整个模糊控制系统分为两大部分:基于质心侧偏角反馈的模糊控制模块和基于横摆角速度反馈的模糊控制模块,采用二维模糊控制器,以输入变量的偏差和偏差的变化率为输入量,以控制量为输出量。

3 后轮转角与横摆力矩非线性联合模糊控制系统设计

3.1 质心侧偏角反馈模糊控制器设计

该模糊控制器的输入量为质心侧偏角实际值与理想值之间的偏差及偏差的变化率,分别记为 e 和 $\dot{e}$; 输出量为横摆力矩 M 和后轮转角 δ_2 。 e 、 $\dot{e}$ 、 M 和 δ_2 的模糊化等级均选取为 7 级,模糊集均为: {负大,负中,负小,零,正小,正中,正大} = {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB} [10]。 e 和 $\dot{e}$ 论域均取为: $[-6, 6]$, M 论域取为: $[-7, 7]$, δ_2 论域取为: $[-1, 1]$ 。

输入、输出量的隶属函数均采用均匀分布的三角形函数,该隶属函数运算简单,同时又能满足控制精度的要求。 e 、 $\dot{e}$ 的隶属函数一样,对应的曲线如图 3 所示, M 、 δ_2 的隶属函数曲线与它们形状相同,只是论域不同。

所要设计模糊控制器为双输入双输出控制器,控制规则使用如下模糊条件语句来表达: If e is NB and $\dot{e}$ is NB then M is NB and δ_2 is PB。为便于模糊规则的制定,首先确定横摆力矩 M 的控制规则。根据控制经验,初步制定模糊规则,然后根据仿真后的控制效果对其进行适当调整,最终确定的 M 的模糊

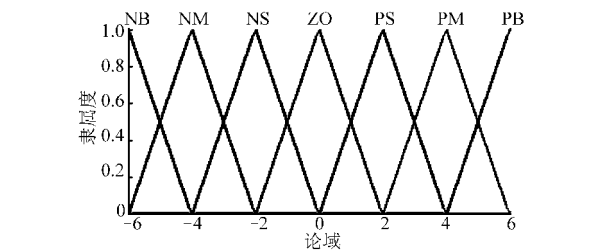


图3 隶属函数曲线

Fig.3 Membership function curves

规则如表 2 所示。

表 2 质心侧偏角反馈输出 M 的模糊规则

Tab.2 Fuzzy rule of M as feedback from side slip angle

$\dot{e}$	e						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

M 的模糊规则确定后, δ_2 的模糊规则可根据 M 确定,以使 δ_2 的作用效果与 M 的作用效果相同为准则,这样 δ_2 也可以提供一部分车辆所需的横摆力矩。如当对车辆施加的 M 为 NB 时, M 的作用是使横摆角速度减小,为达到相同的效果, δ_2 应取 PB,即后轮与前轮同向转向。所确定的输出 δ_2 的模糊规则如表 3 所示。

表 3 质心侧偏角反馈输出 δ_2 的模糊规则

Tab.3 Fuzzy rule of δ_2 as feedback from side slip angle

M	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
δ_2	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB

模糊推理系统采用 Mamdani 型,推理方法采用 min-max 方法,去模糊化的方法采用重心法 (centroid)。

在无控制作用下实际质心侧偏角偏差变化范围为 $[-0.03, 0.03]$, 即 e 的基本论域为 $[-0.03, 0.03]$, 则 e 的量化因子为 $k_e = 6/0.03 = 200$; 在无控制作用下实际质心侧偏角偏差变化率的变化范围为 $[-0.3, 0.3]$, 即 $\dot{e}$ 的基本论域为 $[-0.3, 0.3]$, 则 $\dot{e}$ 的量化因子为 $k_{\dot{e}} = 6/0.3 = 20$; 估计横摆力矩和后轮转角的变化范围,确定 M 的比例因子为 $k_{u_2} = 150$, δ_2 的比例因子为 $k_{u_1} = 0.015$ 。

3.2 横摆角速度反馈模糊控制器设计

该模糊控制器的输入量为横摆角速度实际值与

理想值之间的偏差及偏差的变化率,分别记为 c 和 $\dot{c}$; 输出量为横摆力矩 M 和后轮转角 δ_2 。输入、输出量的模糊集、论域、隶属函数以及模糊运算方法与质心侧偏角模糊控制器的相同。模糊规则、量化因子和比例因子的确定如下。

首先确定横摆力矩 M 的控制规则,如表 4 所示。当横摆角速度偏差 c 为 NB 时,表明其实际值远小于理想值,为使横摆角速度增大,应施加正的横摆力矩,故 M 应为 P,又当偏差的变化率 $\dot{c}$ 为 NB 时,即偏差有变大的趋势,为了使偏差迅速减小,确定 M 为 PB。其他的各条规则同理可得。在确定了 M 的模糊规则后, δ_2 的模糊规则根据 M 确定,以使 δ_2 的作用效果与 M 的作用效果相同为准则。 δ_2 的模糊规则如表 5 所示。

表 4 横摆角速度反馈输出 M 的模糊规则

Tab.4 Fuzzy rule of M as feedback from yaw rate

$\dot{c}$	c						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZO	NS
NS	PB	PB	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB
PM	PS	ZO	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZO	NS	NM	NB	NB	NB	NB

表 5 横摆角速度反馈输出 δ_2 的模糊规则

Tab.5 Fuzzy rule of δ_2 as feedback from yaw rate

M	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
δ_2	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB

c 的基本论域为 $[-0.03, 0.03]$, 则 c 的量化因子为 $k_c = 6/0.03 = 200$; $\dot{c}$ 的基本论域 $[-0.3, 0.3]$, 则 $\dot{c}$ 的量化因子 $k_{\dot{c}} = 6/0.3 = 20$; M 的比例因子取为 $k_{u_1} = 100$; δ_2 的比例因子取为 $k_{u_2} = 0.005$ 。

根据以上所确定的质心侧偏角和横摆角速度模糊控制器设计参数,利用 Matlab 模糊工具箱提供的图形界面工具即可建立相应的模糊控制器,在 Matlab/Simulink 中即可搭建起模糊控制模块。

4 ADAMS/Car与 Matlab/Simulink 联合仿真

利用 ADAMS/Controls 模块将整车虚拟样机模型导出,生成可以导入 Matlab/Simulink 的仿真模型文件。在 Simulink 中将导出的 ADAMS 整车模型与所建立的模糊控制系统相连,建立联合仿真系统模

型,如图 4 所示,图中的模糊控制系统展开图如图 5 所示。对于横摆力矩在实际车辆上的具体实现,即制动力分配问题,是一个非常复杂的问题,需要根据横摆力矩的大小方向、路面的附着情况、各车轮的制动效能等因素综合分析评判,本文只是验证横摆力矩与后轮转角联合控制的有效性,为简化计算分析,仅以外前轮制动为例进行分析说明。

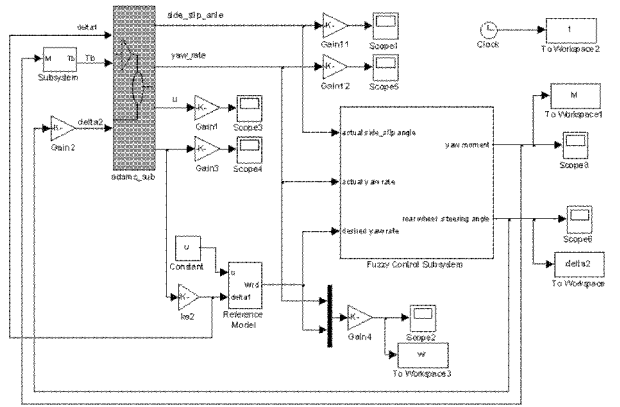


图 4 联合仿真系统模型

Fig.4 Co-simulation system model

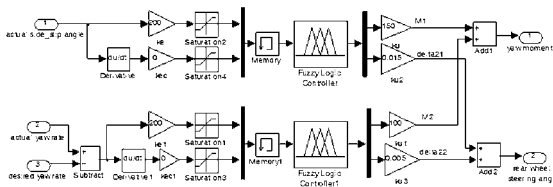


图 5 模糊控制子系统展开图

Fig.5 Fuzzy control sub-system

基于已建好的联合仿真系统,对车辆进行前轮角阶跃输入下,各不同路面上车辆出现失稳情况下的仿真试验。方向盘转角取 45° (对应前轮转角为 3°),路面附着系数分别为 0.8 和 0.4,对应车速分别为 100 km/h 和 60 km/h。仿真过程中,通过将联合模糊控制下的 4WS 车辆的响应与无控制的 FWS 车辆的响应进行对比来检测控制系统的控制效果。

(1)路面附着系数为 0.8、车速为 100 km/h 时的车辆角阶跃输入仿真曲线如图 6 所示。无控制 FWS 车辆和联合模糊控制 4WS 车辆的行驶轨迹如图 7 所示。

(2)路面附着系数为 0.4、车速为 60 km/h 时的车辆角阶跃输入仿真曲线如图 8 所示。无控制 FWS 车辆和联合模糊控制 4WS 车辆的行驶轨迹如图 9 所示。

从以上不同路面、不同车速下的仿真试验结果可以看出,对于无控制的 FWS 车辆,车辆的横摆角速度和质心侧偏角不能达到某一稳态值,而是趋于无限大,在转向过程中车轮发生侧滑,车辆出现严重的激转现象,失去了稳定性。而对于联合模糊控制

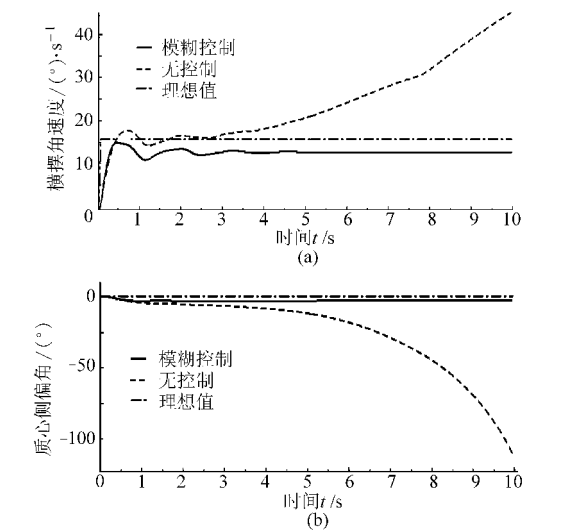


图6 阶跃响应曲线(路面附着系数0.8,车速100 km/h)

Fig.6 Step response curves

(a) 横摆角速度 (b) 质心侧偏角

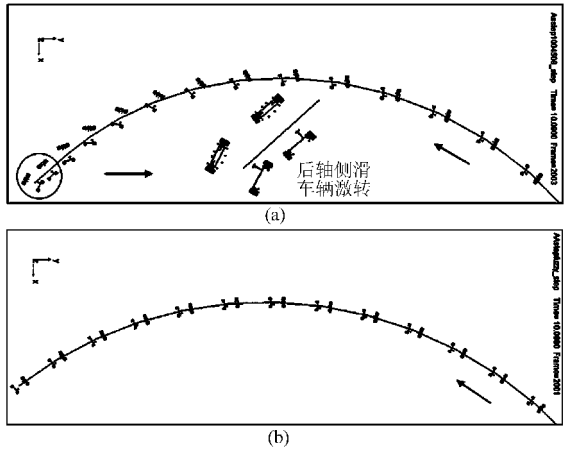


图7 车辆行驶轨迹(路面附着系数0.8,车速100 km/h)

Fig.7 Trajectory of vehicle

(a) 无控制FWS (b) 联合模糊控制4WS

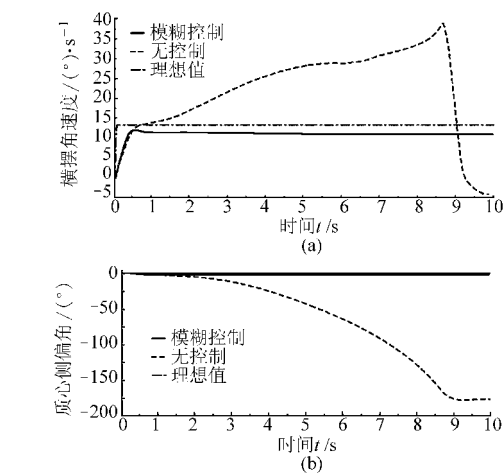


图8 阶跃响应曲线(路面附着系数0.4,车速60 km/h)

Fig.8 Step response curves

(a) 横摆角速度 (b) 质心侧偏角

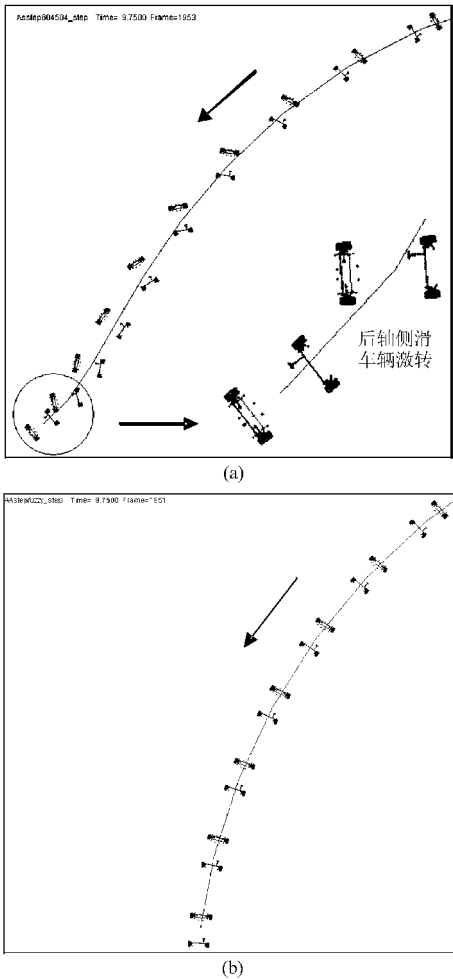


图9 车辆行驶轨迹(路面附着系数0.4,车速60 km/h)

Fig.9 Trajectory of vehicle

(a) 无控制FWS (b) 联合模糊控制4WS

理想值,车辆保持了行驶稳定性,未出现侧滑、甩尾等不稳定现象。

5 结束语

为提高车辆在中高速转向极限工况下的稳定性,考虑了车辆模型的精度、在转向过程中的载荷转移以及轮胎非线性等问题,采用 ADAMS/Car 建立了包含悬架、转向、轮胎等系统的非线性虚拟样机四轮转向车辆模型,确定了中高速转向极限工况下的质心侧偏角和横摆角速度理想控制目标。利用非线性模糊控制算法,设计了四轮转向车辆后轮转角与横摆力矩联合模糊控制系统,应用 ADAMS/Car 和 Matlab/Simulink 联合仿真技术,对控制系统进行了仿真验证。通过对不同工况(路面附着系数和车速不同)的仿真结果对比表明后轮转角与横摆力矩联合模糊控制可有效控制车辆的质心侧偏角和横摆角速度,防止车辆在极限转向工况下发生侧滑失稳,保持了行驶稳定性,有效提高了车辆的主动安全性能。

下的4WS 车辆,通过对后轮转角和横摆力矩的控制,车辆横摆角速度和质心侧偏角均能较好地跟踪

参 考 文 献

- 1 刘翔宇,陈无畏. 基于DYC和ABS分层协调控制策略的ESP仿真[J]. 农业机械学报,2009,40(4):1~6.
Liu Xiangyu, Chen Wuwei. Coordinated control between direct yaw moment control and anti-block braking system used for ESP[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4):1~6. (in Chinese)
- 2 祁永宁. 4WS车辆直接横摆力矩控制与硬件在环仿真系统[D]. 南京:东南大学,2005.
Qi Yongning. Direct yaw moment control of four wheel steering vehicles and hardware in loop simulation system[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- 3 Masao Nagai, Sachiko Yamanaka, Yutaka Hirano, et al. Integrated control of active rear wheel steering and yaw moment control using braking forces[J]. JSME International Journal, 1999, 42(2):301~308.
- 4 Wu Jianyong, Tang Houjun, Li Shaoyuan, et al. Improvement of vehicle handling and stability by integrated control of four wheel steering and direct yaw moment[C]//Proceedings of the 26th Chinese Control Conference (CCC), 2007:730~735.
- 5 皮大伟,陈南,张丙军. 基于主动制动的车辆稳定性系统最优控制策略[J]. 农业机械学报,2009,40(11):1~6.
Pi Dawei, Chen Nan, Zhang Bingjun. Optimal yaw-moment control based on active braking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11):1~6. (in Chinese)
- 6 范成建,熊光明,周明飞. 虚拟样机软件MSC. ADAMS应用与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- 7 喻凡,林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京:机械工业出版社,2005:34~149.
- 8 刘金琨. 先进PID控制及MATLAB仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2004.
- 9 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- 10 吕威,郭孔辉,张建伟. 电动助力转向综合前馈和模糊PID反馈的电流控制算法[J]. 农业机械学报,2010,41(8):10~15.
Lü Wei, Guo Konghui, Zhang Jianwei. Feed-forward integrated with fuzzy PID feedback current control algorithm in electric power steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8):10~15. (in Chinese)

(上接第13页)

- 8 Ikenaga S, Lewis F L, Campos J, et al. Active suspension control of ground vehicle based on a full-vehicle model[C]//Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, 2000:4 019~4 024.
- 9 Choi S B. Performance comparison of vehicle suspensions featuring two different electrorheological shock absorbers[C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2003,217(11):999~1 010.
- 10 陈杰平,陈无畏,祝辉,等. 单出杆汽车磁流变减振器设计与实验[J]. 农业机械学报,2009,40(3):5~10.
Chen Jieping, Chen Wuwei, Zhu Hui, et al. Design and test of vehicle single outstretch pole MRD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):5~10. (in Chinese)
- 11 Ales Kruczek, Antonin Stribrsky. A full-car model for active suspension-some practical aspects[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 2004, 4:41~45.
- 12 Yoshimura T, Emoto Y. Steering and suspension system of a full car model using fuzzy reasoning based on single input rule modules[J]. International Journal of Vehicle Autonomous Systems, 2003, 1(2):237~254.
- 13 Sayers M W. Dynamic terrain inputs to predict structural integrity of ground vehicles[R]. Michigan: University of Michigan Transportation Research Institute Report UM TR I-88-16, 1988.
- 14 张永林. 用谐波叠加法重构随机道路不平顺高程的时域模型[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6):32~35.
Zhang Yonglin. Time domain model of road irregularities simulated using the harmony superposition method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6):32~35. (in Chinese)
- 15 陈杰平,陈无畏,祝辉,等. 基于Matlab/Simulink的随机路面建模及不平度仿真[J]. 农业机械学报,2010,41(3):11~15.
Chen Jieping, Chen Wuwei, Zhu Hui, et al. Modeling and simulation on stochastic road surface irregularity based on Matlab/Simulink[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):11~15. (in Chinese)
- 16 Young Eun Ko, Taell Oh. Motion control of the vehicle with an active suspension system[C]. SAE Paper 940865,1994.
- 17 李洪兴. 模糊控制的插值机理[J]. 中国科学(E辑),1998,28(3):259~267.
- 18 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学(E辑),1999,29(1):32~42.