

基于独立脉冲转向系统车辆稳定性控制*

张宝珍¹, 谢晖^{1†}, 黄晶¹, 阿米尔^{1,2}

(1.湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082;

2.滑铁卢大学, 机电工程学院, 加拿大 滑铁卢 N2L 3G1)

摘要:为了提高车辆操纵稳定性,本文集成独立转向和主动脉冲转向提出了一种主动后轮独立脉冲转向(ARIPS)控制策略,并对此进行理论分析和试验研究.通过建立 ARIPS 系统仿真动力学模型,研究此系统的运行对悬架性能的影响并分析不同转向脉冲控制参数对车辆稳定性的影响.依据仿真分析和频率分析方法确定最优脉冲参数.设计 ARIPS 控制器及脉冲转角分配模块,基于 CarSim 和 Simulink 进行联合仿真分析,验证 ARIPS 的控制性能.研制并安装主动脉冲转向系统,基于试验 Lexus 车辆进行整车试验研究,验证 ARIPS 系统的实用性.仿真和试验结果表明:验证了 ARIPS 系统的可行性和经济性,ARIPS 控制能有效提高车辆的操纵稳定性,比主动后轮转向(ARS)和主动后轮脉冲转向(ARPS)具有更好的控制效果,对改进四轮转向(4WS)系统的性能提供了一个新的研究方向和试验基础.

关键词:车辆动力学;四轮转向;独立转向;脉冲控制;稳定性;整车试验

中图分类号:U467.1

文献标志码:A

Research on Vehicle Stability Control Based on Independent Pulsed Steering

ZHANG Baozhen¹, XIE Hui^{1†}, HUNAG Jing¹, AMIR K^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, N2L 3G1, Canada)

Abstract: In order to improve the vehicle handling stability, an active rear independent pulse steering system (ARIPS) which integrates independent steering and active pulse steering was proposed, and theoretical analysis and experiment study were carried out. The simulation dynamics model equipped with ARIPS system was established to analyze the effects of installation and operation of pulse actuator on the suspension performance. The optimal pulse parameters were determined according to the simulation analysis and frequency analysis method. A control structure and algorithm were designed and a full vehicle model equipped with the steering actuator was built in Carsim and co-simulated with Simulink to verify the proposed system. A hydraulic steering system was designed and assembled for a Lexus to carry out road experiments to assess the applicability of the ARIPS system. Simulation and test results obtained have shown that the proposed system has better performance in terms of improving vehicle handling stability compared with ARS and ARPS system. Meanwhile, the proposed system is economical and feasible, providing a new

* 收稿日期:2017-01-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11202077, 51475048), National Natural Science Foundation of China(11202077, 51475048); 国家科技支撑计划项目(2015BAF32B03, 2015BAF01B01)

作者简介:张宝珍(1988—),男,湖南益阳人,湖南大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: danielxie@163.com

research space and experimental basis to improve the performance of 4WS system.

Key words: vehicle dynamics; 4WS; independent steering; pulsed control; stability; vehicle experiment

随着车辆数量的逐年增加和行驶车速的不断提高,车辆交通事故在过去 20 年已成为一个严重的安全问题^[1].通过底盘控制技术来提高车辆操纵稳定性和安全性一直是国内外学者的研究重点^[2-4].直接横摆力矩控制(DYC)利用分配不均匀的车轮纵向力产生额外横摆力矩来控制车辆稳定性^[5],但DYC在车轮两侧路面附着系数不同的情况下,效果受到了很大的限制^[6].主动转向技术是一种有效的车辆横摆运动和侧向运动的主动控制方法^[7],但是控制转角受到车轮非线性特性和载荷转移的影响^[8].鉴于此,新型主动前轮独立转向系统(AIFS)被提出,AIFS系统使垂向载荷大的外侧车轮转动更大的角度,充分利用车轮的侧向力,从而更好地控制车辆的操纵稳定性与安全性能,取得了很好的效果^[9-11].在国外一种新颖的主动脉冲转向控制技术,逐渐受到人们的关注,文献^[12-14]深入研究了主动脉冲转向(APS)技术对车辆稳定性的影响,验证了APS的实用性.但对这些技术的应用都注重在对车辆前轮的研究,并没有分析作用于后轮的控制效果.

本文基于主动独立转向和脉冲转向,提出新颖的ARIPS系统来提高车辆的稳定性,以试验Lexus车辆为研究对象分析ARIPS系统的运行对悬架系统性能的影响并研究脉冲参数对车辆稳定性的影响;设计ARIPS控制器及脉冲转角分配模块,运用CarSim和Simulink进行联合仿真,验证所提出的ARIPS系统的有效性 with 优越性;基于Lexus试验车进行试验研究,验证ARIPS系统的实用性.

1 ARIPS 系统工作原理

1.1 传统主动转向系统的缺陷

基于魔术轮胎公式,车轮侧向力与侧偏角在不同车轮垂向载荷作用下的关系曲线,如图1所示.车轮侧向力随着垂向载荷增加而增大,且侧向力线性饱和点的值也随之增大并存在非线性特性^[15-16].车辆转向时由于惯性和车身侧倾的影响,内侧车轮垂直载荷会向外侧车轮转移,传统主动转向系统,内外车轮转向角相同,则内侧车轮侧向力很容易达到饱和,但外侧车轮侧向力还有很大上升空间,没有

充分利用外侧车轮侧向力,降低了车辆高速行驶时极限转弯能力.ARIPS系统则考虑了内外车轮侧向力饱和区域的差异特性,通过适当增加外侧车轮转角,充分利用车轮所能产生的侧向力,改善传统主动转向系统在转向工况下侧向力不足的缺陷.

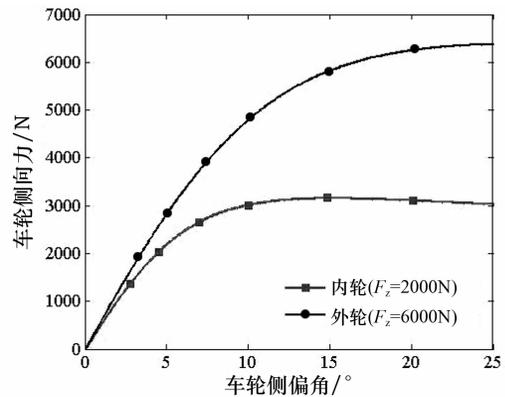


图1 不同垂向载荷下侧向力-侧偏角的关系
Fig. 1 Relation between different vertical load lateral force of the side slip angle

1.2 ARIPS 系统的结构和实现原理

ARIPS系统左右两侧车轮通过一套齿轮齿条、行星齿轮与转向机构相互连接,如图2所示.太阳轴与2个太阳轮固接,齿轮齿条机构的小齿轮与行星轮转向架固接,两个助力伺服电机分别驱动两行星轮机构的外齿圈,当电机转速与转向不同时,可以得到不同的转向脉冲信号,从而实现左右两轮的独立转向.

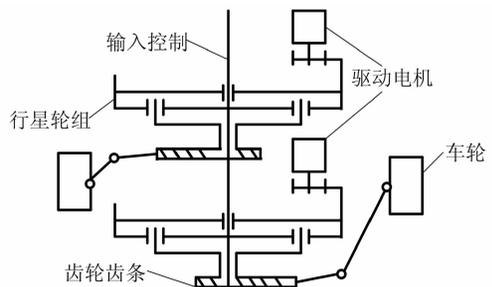


图2 ARIPS系统的结构图

Fig.2 ARIPS system structure

行星轮的转速可以由以下公式计算:

$$\omega_c = \frac{\omega_s Z_s \mp \omega_a Z_a}{Z_s + Z_a} \quad (1)$$

式中: ω_s 为太阳轮转速, ω_c 为行星架转速, Z_s 为太阳轮齿数, Z_a 为外齿圈齿数.

2 车辆模型

2.1 车辆动力学模型

基于 Lexus 车辆建立车辆模型, 车辆受力及结构参数如图 3 所示, 各自由度微分方程如下^[12].

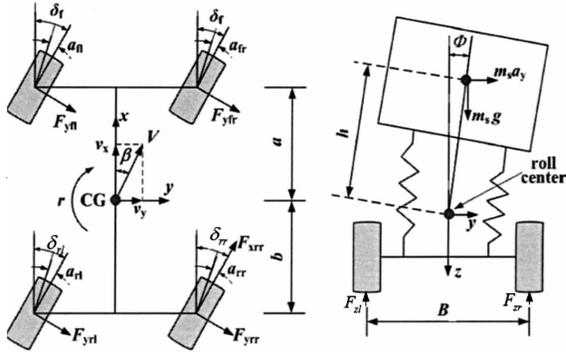


图 3 ARIPS 系统的 3 自由度车辆动力学模型

Fig. 3 3DOF vehicle dynamics model of ARIPS system

侧向运动:

$$mV(\dot{\beta} + r) - m_s h \ddot{\phi} = (F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta_f + F_{yrl} \cos \delta_{rl} + F_{yrr} \cos \delta_{rr} \quad (2)$$

横摆运动:

$$I_{zz} \dot{r} - I_{zx} \ddot{\phi} = a(F_{yfl} + F_{yfr}) \cos \delta_f - b(F_{yrl} \cos \delta_{rl} + F_{yrr} \cos \delta_{rr}) + [(F_{yfr} - F_{yfl}) \sin \delta_f + (F_{yrr} \sin \delta_{rr} - F_{yrl} \sin \delta_{rl})] \frac{B}{2} \quad (3)$$

侧倾运动:

$$(I_{xx} + m_s h^2) \ddot{\phi} - I_{zx} \dot{r} = m_s h V(\dot{\beta} + r) + (m_s g h - K_\phi) \phi - C_\phi \dot{\phi} \quad (4)$$

式中: V, r 和 β 分别为车速, 横摆角速度和质心侧偏角; a 和 b 分别为质心到前、后轴的距离; I_{xx} 和 I_{zz} 分别为车辆横摆转动惯量和侧倾转动惯量; K_ϕ 和 C_ϕ 为车辆总侧倾刚度和侧倾阻尼; ϕ 为车辆侧偏角; B 为车辆轮距; h 为悬挂质量中心到侧倾轴距离.

2.2 ARIPS 系统多体动力学模型

为了分析 ARIPS 系统的运行对悬架性能的影响, 建立了基于试验 Lexus 车辆的带有 ARIPS 转向装置的多连杆后悬架 ADAMS 模型, 如图 4 所示.

2.3 ARIPS 系统的运行对悬架参数的影响

基于 2.2 节的 ADAMS 悬架模型分析 ARIPS 系统的安装与运行对悬架参数的影响, 输入不同的

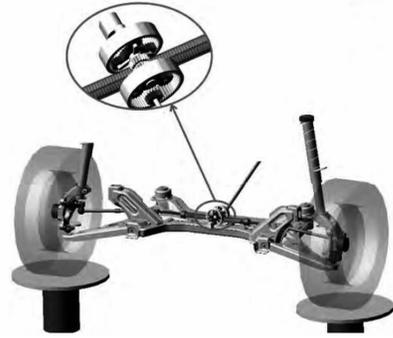


图 4 带有 ARIPS 系统后悬架试验台

Fig. 4 The rear suspension with ARIPS system

转向位移参数进行仿真分析, 记录转向位移的变化对悬架参数的影响, 如下表 1 所示.

表 1 转向位移和悬架参数的关系

Tab.1 The relationship between displacement and suspension parameters

转向位移 /mm	侧倾高度 /cm	车轮外倾角/(°)	前束角/(°)	主销后倾角/(°)
0	81.08	-0.26	0.12	-11.96
4	81.12	-0.28	0.13	-12.19
6	81.16	-0.30	0.13	-12.42
8	81.20	-0.31	0.14	-12.62
10	81.26	-0.33	0.14	-12.93

如表 1 所示, 侧倾中心的高度和悬架主要参数受转向位移变化的影响非常小. 本文中不考虑其影响, 即独立脉冲转向装置的运行对车辆的悬架系统的功能没有明显的影响. 由此, 可以通过控制电机的转速和方向来实现主动后轮独立脉冲转向角的预想, 同时不影响悬架系统的正常使用功能.

3 ARIPS 控制系统

3.1 ARIPS 转向理念

ARIPS 系统综合内外侧车轮侧向力非线性特性和垂直载荷转移的影响, 通过激活不同幅值的脉冲转向信号来提高车辆的稳定性能, 最大程度地利用车轮侧向力, 如图 5 所示. 类似于 ABS 制动力控制的工作原理, 主动转向角通过脉冲信号来控制. 为分析不同脉冲信号参数对车辆动力学的影响, 每个脉冲参数被独立地进行研究.

3.2 脉冲参数的分析与优化

脉冲转角包括三个基本的参数: 脉冲形式, 频率和幅值, 本节分析不同脉冲参数对车辆稳定性的影响, 并确定最优脉冲参数值.

3.2.1 脉冲形式的选择

在选择脉冲转向信号过程中, 脉冲信号参数必

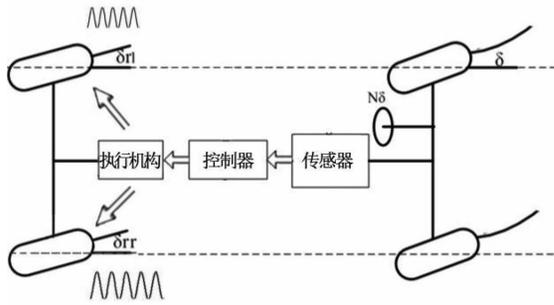


图5 ARIPS转向的理念
Fig. 5 ARIPS steering concept

须在仿真和试验过程中是容易调节和控制的,本文中脉冲信号选用标准正弦脉冲信号,其频率和幅值可以方便地通过驱动控制电机的转向和转速来实现,其脉冲方程表达式如下:

$$\delta_r(t) = \frac{A}{2}(1 - \cos(2\pi ft)) \quad (5)$$

式中: f 为脉冲频率; A 为脉冲幅值.图6所示的样本脉冲信号,其幅值为 2° ,频率为3 Hz.

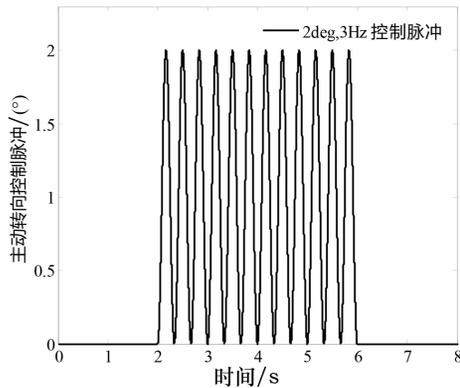


图6 脉冲转向样本信号
Fig. 6 The pulse steering sample signal

3.2.2 脉冲频率分析与优化

线性轮胎侧向力与侧偏角的关系如下:

$$\begin{cases} F_{yf} = c_f \left(\delta_f - \beta - \frac{ar}{v_x} \right) \\ F_{yr} = c_r \left(\delta_r - \beta + \frac{br}{v_x} \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: c_f 和 c_r 分别为前后轮的侧偏刚度.通过整理式(2),(3),(4)和式(6),同时运用Laplace变换,则其横摆角速度和质心侧偏角对后轮转角的传递函数可以描述为:

$$\begin{cases} L(r/\delta_r) = \frac{b_1 S + b_0}{kS^2 + nS + c} \\ L(\beta/\delta_r) = \frac{c_1 S + c_0}{kS^2 + nS + c} \end{cases} \quad (7)$$

式中:

$$\begin{aligned} k &= mv_x I_z, n = -[m(a^2 c_f + b^2 c_r) + I_z(c_f + c_r)], \\ c &= mv_x(ac_f - bc_r) + (L^2 c_f c_r)/v_x b_1 = mv_x bc_r, \\ b_0 &= -Lc_r c_f, c_1 = -I_z c_r, \\ c_0 &= \frac{1}{v_x}(a^2 c_f c_r + abc_f c_r) - mv_x bc_r. \end{aligned}$$

频率响应分析是定量测量系统的输出响应与输入参数特征关系的方法.由频率响应曲线可知,最优脉冲频率为曲线最高点所对应的自然频率值 ω_n .

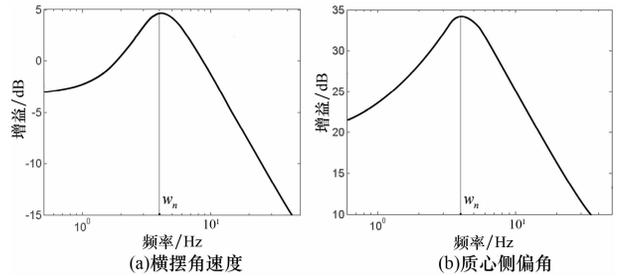
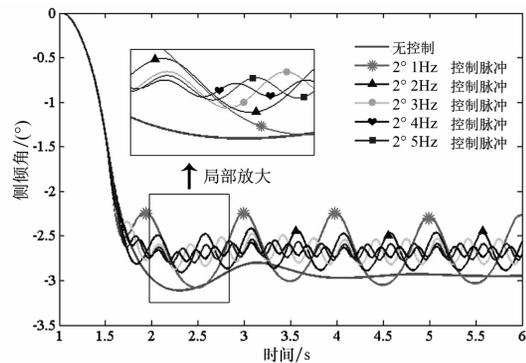
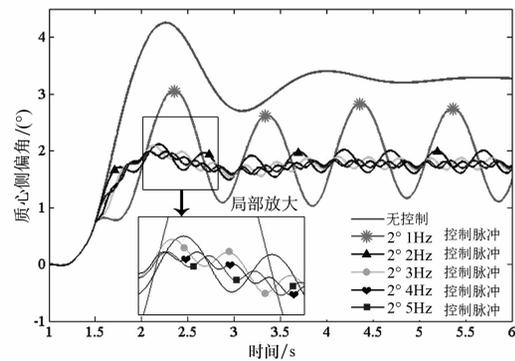


图7 频率响应曲线
Fig. 7 The frequency response curves

为验证脉冲频率对车辆动力学性能的影响,固定正弦脉冲幅值为 $A = 2^\circ$,每次仿真的脉冲频率分别设定为 $f = 1 \text{ Hz}, 2 \text{ Hz}, 3 \text{ Hz}, 4 \text{ Hz}$ 和 5 Hz .仿真过程中车身侧倾角和质心侧偏角如图8所示.



(a)侧倾角



(b)质心侧偏角

图8 脉冲频率的影响

Fig. 8 The effect of pulse frequency

仿真结果表明,脉冲频率对车辆的侧倾角和质

心侧偏角有很大的影响.脉冲频率为 1 Hz 时,侧倾角的值比不加控制的值更大,表明车辆的侧倾稳定性变坏.通过仔细观察,质心侧偏角和侧倾角在脉冲频率为 4 Hz 仿真过程中具有最小值,表明 4 Hz 的脉冲信号能更好地控制车辆的稳定性能,同时 4 Hz 非常接近图 7 中的 ω_n 值,进一步证明了设定脉冲频率值为 ω_n ,能更好地控制车辆的稳定性能.

3.2.3 脉冲幅值分析与优化

为分析脉冲幅值对车辆稳定性能的影响,选定正弦脉冲并固定脉冲频率为 4 Hz,每次仿真设定脉冲幅值分别为 $A = 1.0^\circ, 1.5^\circ, 2.0^\circ, 2.5^\circ$ 和 3.0° .车辆车身侧倾角和质心侧偏角变化曲线如图 9 所示.

仿真结果表明,增加脉冲幅值,能减少质心侧偏角和车身侧倾角,提高车辆的稳定性能,但是增加脉冲幅值将会需要更大的转向力和转向力矩,需要更大功率的控制电动机.考虑能耗、安装空间和轮胎非线性特征,本文中的脉冲幅值限定为 3° .

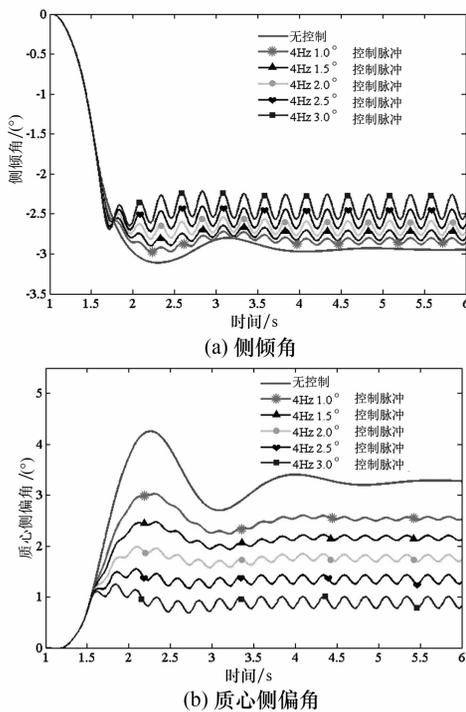


图 9 脉冲幅值的影响

Fig.9 The effect of pulse amplitude

3.3 ARIPS 控制系统的结构

ARIPS 控制系统的目标是提高整车稳定性,车辆横摆角速度和质心侧偏角是衡量车辆横向稳定性能的两个重要指标,侧倾系数 R 是体现车辆侧倾性能的指标^[17].侧倾系数可以通过车辆左右轮胎垂向载荷和力矩平衡来计算:

$$R = \frac{F_{zr} - F_{zl}}{F_{zr} + F_{zl}} = \frac{2m_s}{mB} \left((h_R + h \cos \phi) \frac{\dot{v} + Vr - h\ddot{\phi}}{g} + h \sin \phi \right) \quad (8)$$

式中: F_{zl} 和 F_{zr} 分别代表左右两侧车轮垂向载荷, h_R 代表侧倾轴线到地面的距离.

本文设计了一个 ON/OFF 控制器,通过侧倾系数来控制系统的开启或关闭,车辆的横摆角速度和质心侧偏角作为观测变量.侧倾系数 R 在车辆直线行驶时接近为 0;当车辆在转弯或变道的工况时, R 在 -1 到 1 间变化.如果 R 接近 -1 或 1 ,说明车辆某侧轮胎即将或已经脱离地面,车辆将会发生侧翻.考虑车身的惯性和控制器的延迟作用,本文设定 R 的安全阈值为 $[-0.8, 0.8]$,如果 R 超过了安全阈值,控制器将激活脉冲装置,如果 R 在安全阈值之内,脉冲控制器将不工作,控制器的工作流程如图 10 所示.

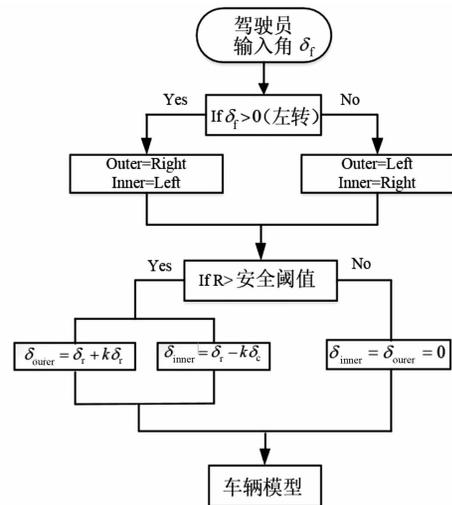


图 10 ARIPS 系统控制流程图

Fig. 10 The flow chart of ARIPS control system

通过 1.1 节中对车轮侧向力的分析与 3.2 节中对脉冲参数的研究,内外侧轮胎的主动脉冲控制信号可由如下公式表达:

$$\begin{cases} \delta_{outer} = \delta_r + k\delta_c \\ \delta_{inner} = \delta_r - k\delta_c \end{cases} \quad (9)$$

式中: δ_r 为后轮控制脉冲信号; k 为内外轮脉冲控制转角转移比例系数; δ_{outer} 和 δ_{inner} 分别为内外侧车轮脉冲控制转角.

4 仿真验证与结果分析

基于 CarSim 车辆模型仿真分析,来研究

ARIPS 系统的有效性与潜在能力,控制单元通过 Simulink 建立,图 11 为联合仿真控制系统框图. CarSim 车辆模型是参照试验 Lexus 车辆内部参数建立的,基本参数如表 2 所示.

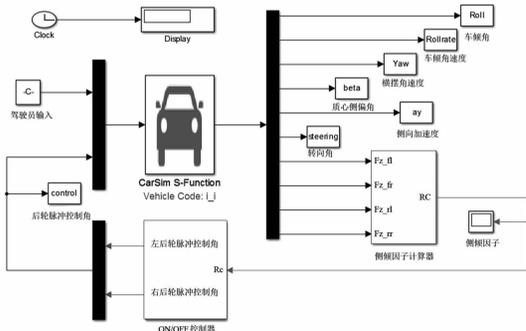


图 11 联合仿真控制系统框图

Fig.11 The block diagram of joint simulation control system

表 2 Lexus 车辆基本参数

Tab.2 The basic parameters of Lexus vehicle

符号	描述	参数值
m	整车质量/kg	1975
a	质心到前轴距离/m	1.30
h	质心高度/m	0.80
I_{xx}	车辆的横摆转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	602
I_{zz}	车辆的侧倾转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	4510
K_0	侧倾刚度/($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$)	56 957
B	车辆轮距/m	1.63
b	质心到后轴距离/m	1.45
h_s	质心到侧倾轴距离/m	0.54
I_{yy}	车辆的俯仰转动惯量/($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)	1 765
C_f/C_s	前/后轮侧偏刚度/($\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}$)	52 480/88 416
C_s	侧倾阻尼	3 496

为验证 ARIPS 系统的实用性与优越性,主动脉冲转向(ARPS)系统($k=0$)和传统后轮转向(ARS)系统被用来对比分析.具有 ARIPS 系统,ARPS 系统和 ARS 系统的车辆分别进行仿真和对比分析.

4.1 阶跃转向工况仿真

车速为 100 km/h,车轮转角从 0° 快速变化到某个设定值 $\delta_f = 3.5^\circ$,路面附着系数 μ 为 0.8.仿真结果如图 12 所示.

从图 12 可以看出,三种控制策略都降低了车辆的侧倾系数和车身侧倾角,能有效地把车辆的侧翻风险限制在安全阈值范围之内,其中车辆侧倾角降低率约为 23.8%.图(e)显示车辆具有明显的过度转向状态,ARIPS 控制时横摆角速度和质心侧偏角降低 18.2%和 2.2° ,这能使车辆以最小的轨迹偏差接近于理想路径.然而,三种控制策略表现出来的性能

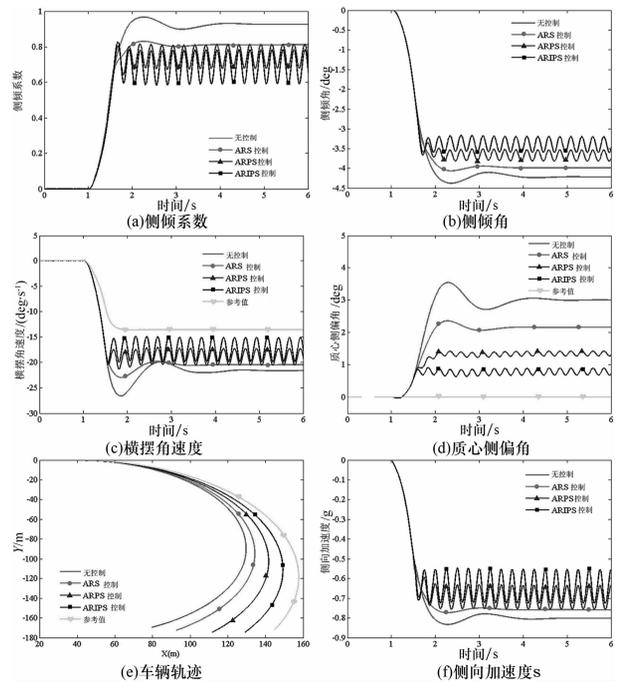


图 12 阶跃仿真响应

Fig.12 Simulation results of a step steering maneuver

是不一样的,ARIPS 系统能有效增强 ARPS 系统的性能,这是因为车辆转向过程中,由于载荷从内轮转向外轮,导致了内侧车轮产生的侧向力减少,外侧车轮侧向力相应的增加.仿真结果表明:ARIPS 系统和 ARPS 系统比 ARS 系统表现出了更好的控制性能.

4.2 双移线工况仿真

双移线工况能准确描述车辆遇到障碍物或超车时紧急避让过程中车辆的性能.车速 90 km/h,路面附着系数 μ 为 0.8,仿真结果如图 13 所示.

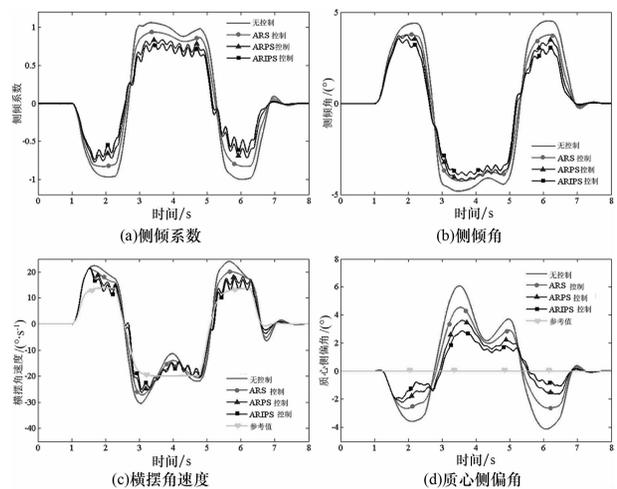


图 13 双线移工况仿真结果

Fig.13 Simulation results of a double lane change maneuver

从图 13 可知,车辆的侧倾系数和车身侧倾角在三种控制系统的情况下得到明显降低,车辆的侧翻风险能控制在设定的阈值范围之内;同时车辆的横摆角速度和质心侧偏角都能朝理想值靠近,提高了车辆的横摆稳定性能. ARIPS 系统比 ARPS 系统和 ARS 系统展现出了更好的控制性能,特别是在转向时刻, ARIPS 系统能更好地适用车辆转弯或超车等极限工况.

5 试验验证与结果分析

本节设计并安装独立脉冲发生器,运用 Lexus 车辆进行道路试验,进一步验证 ARIPS 系统在实际工况中的应用性能. 液压转向系统的设计和安装如图 14 所示. 采用基于天线的 GPS-IMU 测量系统对汽车的状态与路面参数进行测量,同时利用传感器与 PC 机进行数据传递与记录,得到不同工况下的参数指标,如图 15 所示.

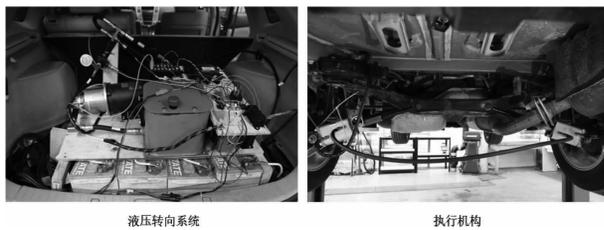


图 14 液压转向系统的设计和安装

Fig.14 The design and installation of hydraulic steering system



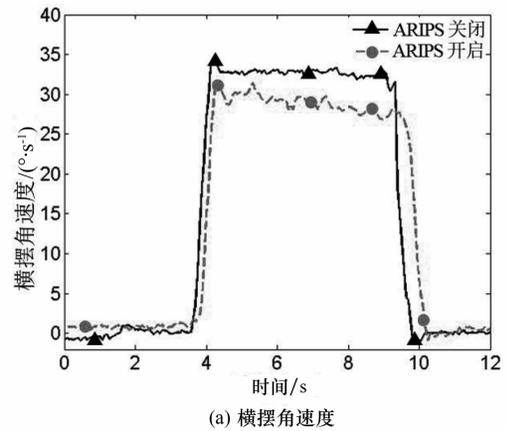
图 15 Lexus 试验车辆的整体设置与安装

Fig.15 The overall installation and installation of the Lexus test vehicle

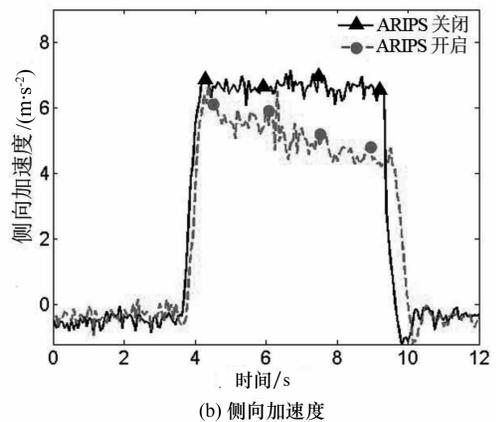
阶跃转向试验工况:车速 45 km/h,方向盘转角为 180° ,持续时间为 0.5 s,第 4 s 到达指定速度,此工况下分别测试 ARIPS 系统在开启和关闭状态下车辆的横摆角速度和侧向加速度,如图 16 所示.

试验结果表明:在 ARIPS 系统开启情况下,车辆横摆和侧向角速度分别降低 12.6% 和 23.1%,同时此车表现出了一定的过度转向的内部特性,横摆

角速度的降低能让其更接近理想横摆角速度,提高了车辆的横摆性能和路径跟随性能;侧向加速度的降低提高了车辆的侧向稳定性能. 总体来说, ARIPS 系统能有效改善车辆的操纵稳定性能.



(a) 横摆角速度



(b) 侧向加速度

图 16 阶跃工况下的试验曲线

Fig.16 Test results of a step steering maneuver

6 结论

本文提出了一种主动后轮独立脉冲转向控制方法,并对此做了理论和试验研究.

1) 提出 ARIPS 系统的概念,并分析了 ARIPS 运行不会影响悬架正常使用性能.

2) 基于试验 Lexus 车辆,建立车辆的数学模型,分析不同脉冲信息(频率和振幅)对车辆稳定性的影响并确定了最优的脉冲参数.

3) 设计脉冲独立转向控制器,运用 CarSim 和 Simulink 进行联合仿真分析,验证了所提 ARIPS 系统相比于 ARPS 系统和 ARS 系统的有效性与优越性,为车辆主动转向控制提供了一种新的研究方向.

4) 以 Lexus 试验车为研究对象,安装脉冲转向装置和传感器,进行道路试验,验证了 ARIPS 系统

的可行性和实用性,为 ARIPS 系统研究提供了试验基础.

参考文献

- [1] BASLAMISLI S C, KOSE I E, ANLAS G. Handling stability improving through robust active front steering and active differential control[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2011, 49(5): 657—683.
- [2] LACROIX B, LIU Z, SEERS P. A comparison of two control methods for vehicle stability control by direct yaw moment [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 120: 203—217.
- [3] 李伟平,柳超,窦宪东,等.油气悬架的不确定性多目标优化[J].*湖南大学学报:自然科学版*, 2014, 41(10):27—34.
LI Weiping, LIU Chao, DOU Xiandong, *et al.* Multi-objective optimization based on uncertainty in hydro-pneumatic suspension [J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(10):27—34. (In Chinese)
- [4] 宋晓琳,熊琦玮,曹昊天.基于轨迹预测的车辆协同碰撞预警仿真研究[J].*湖南大学学报:自然科学版*, 2016, 43(10):1—7.
SONG Xiaolin, XIONG Qiwei, CAO Haotian. Research and simulation on cooperative collision warning based on trajectory prediction[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(10):1—7. (In Chinese)
- [5] RUBIN D, AROGETI S A. Vehicle yaw stability control using active limited-slip differential via model predictive control methods [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2015, 53(9): 1315—1330.
- [6] 杨易,秦小飞,徐永康,等.基于 AFS 与 DYC 的车辆侧风稳定性控制研究[J].*湖南大学学报:自然科学版*, 2014, 41(5):14—19.
YANG Yi, QIN Xiaofei, XU Yongkang, *et al.* Study of vehicle crosswind stability control based on AFS and DYC[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(5):14—19. (In Chinese)
- [7] KAPANIA N R, GERDES J C. Design of a feedback-feedforward steering controller for accurate path tracking and stability at the limits of handling [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2015, 53(12):1687—1704.
- [8] 陈新,张桂香.基于 SDRE 方法的汽车线控转向系统控制方法研究[J].*中国机械工程*, 2012, 23(12):1496—1501.
CHEN Xin, ZHANG Guixiang. Research on SWB system's control method based on SDRE technique[J]. *China Mechanical Engineering*, 2012, 23(12):1496—1501. (In Chinese)
- [9] FARAZANDEH A, AHMED A, RAKHEJA S. Performance enhancement of road vehicles using active independent front steering (AIFS) [J]. *SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanic System*, 2012, 5(4):1273—1284
- [10] FARAZANDEH A, AHMED A, RAKHEJA S. Performance analysis of active independent front steering (AIFS) for commercial vehicles with greater lateral load shift propensity[J]. *SAE International Journal of Commercial Vehicles*, 2013, 6(2):288—300.
- [11] 袁希文,文桂林,周兵.基于控制分配的主动前轮独立转向车辆转角分配算法[J].*中国机械工程*, 2015, 26(9):1243—1250.
YUAN Xiwen, WEN Guilin, ZHOU Bing. Road wheel angle distribution algorithm for road vehicles with AIFS based on control allocation[J]. *China Mechanical Engineering*, 2015, 26(9):1243—1250. (In Chinese)
- [12] RAHMAN A A. Pulsed active steering HIL experiment [D]. Waterloo: University of Waterloo, 2009.
- [13] ZHANG Y, KHAJEPOUR A, XIE X. Rollover prevention for sport utility vehicles using a pulsed active rear-steering strategy[J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2015, 230(9):1—13.
- [14] 张宝珍,阿米尔,谢晖,等.主动脉冲转向的横摆稳定性分析与实验研究[J].*湖南大学学报:自然科学版*, 2016, 43(10):32—41.
ZHANG Baozhen, AMIR K, XIE Hui, *et al.* Analysis and test of vehicle yaw stability control based on an active pulsed steering[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(10):32—41. (In Chinese)
- [15] 夏光,唐希雯,陈无畏,等.基于轮胎合力计算与分配的车辆横向稳定性控制研究[J].*汽车工程*, 2015, 37(11):1298—1306.
XIA Guang, TANG Xiwen, CHEN Wuwei, *et al.* A research on the lateral stability control of vehicle based on the resultant force calculation and allocation of tire [J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(11):1298—1306. (In Chinese)
- [16] 喻凡,林逸.汽车系统动力学[M].北京:机械工业出版社,2012.
YU Fan, LIN Yi. *Vehicle dynamics system* [M]. Beijing: China Machine Press, 2012. (In Chinese)
- [17] 方敏,汪洪波,刘跃,等.基于功能分配的汽车主动悬架控制的研究[J].*汽车工程*, 2015, 37(2):200—206.
FANG Min, WANG Hongbo, LIU Yue, *et al.* A study on the control of vehicle active suspension based on function allocation [J]. *Automotive Engineering*, 2015, 37(2):200—206. (In Chinese)