

文章编号:1000-582X(2009)05-0516-08

自适应 ASR/HAC 集成化系统仿真

张景良, 郭 汾

(北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘 要: 驱动防滑控制系统 ASR(Anti-slip Regulation)与坡道起步辅助系统 HAC(Hill-start Assist Control)的集成化系统能降低对驾驶员的操纵技术的要求和驾驶疲劳强度,满足人们对汽车乘坐舒适性,操纵方便性和主动安全性的要求。在 Matlab/Simulink 及德国车辆动力学仿真软件 CarMaker 建立的虚拟车辆仿真环境下,针对 ASR/HAC 集成化系统进行了软件在环仿真研究。提出了基于模型参考自适应 PID 控制的 ASR 算法和 HAC 算法,并采用 CarMaker 和 Simulink 联合仿真的方式对 ASR/HAC 系统进行了验证。仿真结果显示汽车的加速性和可操控性明显提高。

关键词: 车辆动力学;虚拟仿真环境;驱动防滑控制;坡道起步控制;CarMaker

中图分类号:U461.1

文献标志码:A

Simulation of an adaptive anti-slip regulation/hill-start assist control system

ZHANG Jing-liang, GUO Fen

(School of Mechanical and Vehicular Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China)

Abstract: Anti-slip regulation (ASR) systems can maintain the slip rate within a certain range when a vehicle accelerates on low adhesive road surfaces and thus prevent the drive wheels from rotating uncontrollably. Hill-start assist control (HAC) systems, the latest active safety device, can help avoid sliding backwards, especially when a vehicle starts on a slope. The integration of ASR and HAC systems garners merit from sides-stronger acceleration capacity, increased steerability and easier handling. We develop a virtual vehicle environment on the CarMaker and Matlab/Simulink platforms and used it to test the efficacy of an ASR/HAC system. Based on the Model Reference Adaptive PID(proportional integral derivative) Control, new ASR and HAC system algorithms also are introduced and integrated as one. The simulation results show that the vehicle acceleration and control characteristics are enhanced.

Key words: vehicle dynamics; virtual vehicle environment; anti-slip regulation; hil-start assist control; CarMaker

目前,国内外越来越多的汽车制造商将 ASR 系统作为标准配置装备到了旗下各个车型。而 HAC 系统由于成本和技术原因,更多的仅装备在高级商

务车和越野车上,如丰田公司 08 款 Highlander 车型和国内自主研发的东风猛士车型等^[2]。ASR 系统和 HAC 系统在车辆加速性和通过性上发挥的重

收稿日期:2009-02-23

基金项目:北京市科技计划项目(D0305002040211)

作者简介:张景良(1985-),男,北京理工大学博士研究生,主要从事车辆电子,智能维护研究,
(E-mail)zhang2jg@email.uc.edu。

要作用有目共睹。可以预见,在不久的将来必定会有更多车型同时装备上 ASR 系统和 HAC 系统^[3-4]。鉴于这一趋势,笔者提出了 ASR/HAC 集成化系统的概念。利用 CarMaker 强大的虚拟车辆环境仿真功能,笔者在 Simulink 中建立了相应控制模型,并通过 CarMaker for Simulink 接口模块,实现了两者的联合仿真。在此基础上,笔者对提出的 ASR/HAC 集成化系统进行了大量的仿真研究,并对仿真结果做出了详尽的分析。

1 虚拟车辆环境仿真软件 CarMaker

作为当今汽车界应用最广泛的汽车动力学仿真软件,德国 IPG 公司推出的 CarMaker 代表了该领域的最高水准。CarMaker 提供的虚拟车辆环境包括车辆三维仿真模型(包含所有子系统,如轮胎,发动机,传动系统等),驾驶员模型,三维道路模型。利用图形用户界面 GUI,动画演示工具 IPG-Movie 和信号分析工具 IPG-Control,用户可以同时挑选任何多个感兴趣的变量作为目标参量进行仿真分析,并能通过动画显示的方式对仿真的过程进行实时观测。此外,相比于其它汽车动力学仿真软件,CarMaker 在软件在环测试和硬件在环测试方面优势尤为明显,其操作不仅简单,而且准确,快速。目前,世界各大汽车厂商均将 CarMaker 引入自己的产品开发平台,以提高效率,节省时间和资源。图 1 显示的是 CarMaker 提供的模块化虚拟车辆仿真环境。

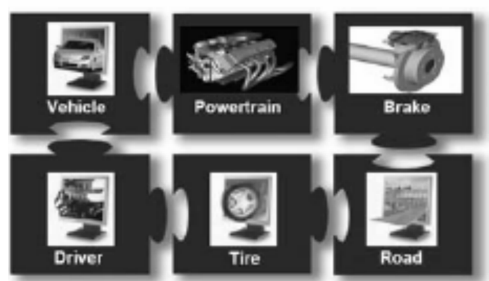


图 1 模块化虚拟车辆仿真环境

2 ASR 系统控制算法研究

ASR 控制方式一般分为制动控制,发动机控制和综合控制 3 种^[5-7]。本文仅就制动控制方式进行研究。

这里提出的 ASR 系统以车轮模型为研究对象,以理想滑转率为控制目标^[8],根据模型参考自适应 PID 控制思想,实时地对 4 个车轮施加所需制动力

矩,使其在获得理想纵向附着系数的同时,也能保持很好的横向稳定性。

2.1 理想行驶环境

车辆在制动过程中,人们总是希望车轮能够最大限度地利用来自地面的反作用力(矩),即轮胎与地面间的附着系数达到最大^[9]。因此,笔者定义的理想行驶环境为:在一定的路面工况下,通过驾驶员操纵动作及 ASR 系统的实时辅助控制,使车辆的滑转率始终保持在设定的理想数值附近,从而获得并维持当前路面最大的附着系数。车辆实际行驶过程可以看成是从一个理想行驶环境到另一个行驶环境的转变过程。

可以说,笔者定义的理想行驶环境与实际路面附着系数无关,而仅与滑转率相关。一般而言,无论对于什么路面,在滑转率保持在 5%~15% 这一区间时,路面附着系数能够达到或接近各自的峰值附着系数^[10]。这里,选取 10% 为理想滑转率对系统进行控制。

2.2 制动力矩变化预测模块推导

假设理想行驶环境一,其路面附着系数为 ϕ_1 ,车轮转速为 ω_1 ,对应的制动力矩为 T_{f1} ,滑转率为理想滑转率。该理想情况对应的制动运动方程为:

$$I_{\omega} \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = \phi_1 \cdot F_Z \cdot r - T_{f1} \quad (1)$$

假设理想行驶环境二,其路面附着系数为 ϕ' ,车轮转速为 ω' ,对应的制动力矩为 $T_{f'}$,滑转率为理想滑转率^[11]。该理想情况对应的制动运动方程为:

$$I_{\omega} \cdot \frac{d\omega'}{dt} = \phi' \cdot F_Z \cdot r - T_{f'} \quad (2)$$

实际车辆的行驶过程可以看成是从理想行驶环境一到理想行驶环境二的转变过程。而这一过程必然会导致滑转率的变化。ASR 系统就是要能够实时地识别这样的变化并调节输出制动力矩以保持理想滑转率,使车辆尽快进入理想行驶环境状态^[12-13]。

滑转率计算公式为

$$\lambda = \frac{(\omega \cdot r - u)}{\omega \cdot r} \times 100\% \quad (3)$$

其中: λ 为滑转率; u 为车身速度,m/s; ω 为车轮角速度,rad/s; r 为车轮半径,m。

由式(1)-(3)可推导出车辆从理想行驶环境一到理想行驶环境二过渡行驶时,因地面附着系数变化和车轮转速变化引起的滑转率变化所对应的制动力矩调整值 $-\Delta T_{f2}$ 。

$$-\Delta T_{f2} = \frac{I_{\omega}}{r} \cdot \frac{du}{dt} \cdot (1 - \Delta\lambda) \quad (4)$$

控制目标就是根据模型参考自适应 PID 控制使

滑转率保持在理想滑转率附近,这样,车辆的实际制动过程就会趋近于理想情况下的制动过程^[14]。

将由式(4)建立的模块定义为制动力矩变化预测模块(Pre-Calculation Module)。当系统通过制动

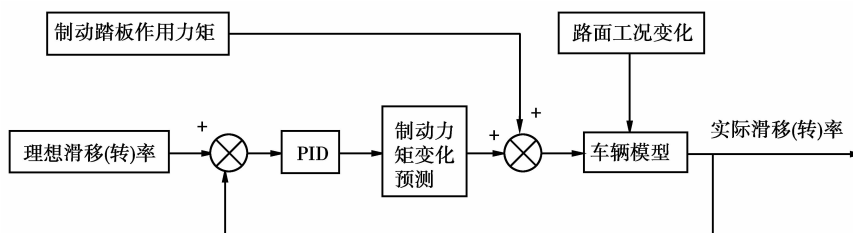


图 2 ASR 系统控制示意图

3 HAC 系统控制算法研究

笔者提出的 HAC 系统是这样工作的:首先,通过传感器检测到的轮速变化,系统能够在第一时间判断出汽车的溜车趋势;然后 HAC 系统迅速反应,短时间内使轮缸制动压力达到最大,即车轮抱死;这样,驾驶员无需拉手刹即可使车辆保持驻坡状态;随后,当驾驶员踩下油门踏板,准备再次起步时,HAC 系统检测到油门踏板的位置变化,立即采取相应措施,使轮缸制动压力降低。并且其降低的快慢和大小取决于驾驶员踩踏油门踏板的速度和深度,从而实现平稳起步。

而在传统的 HAC 系统控制下,驾驶员必须首先踩下制动踏板触发隔离阀通电,关闭轮缸至主缸方向的油路,保持轮缸压力,给驾驶员足够的时间换挡和踩下油门踏板^[15]。当离合器结合到一定程度、其传递的扭矩刚好能克服起步阻力时,隔离阀断电,制动力解除,车辆平稳起步^[16]。但这种控制方法不符合驾驶员的操纵习惯,且需要驾驶员对起步阻力进行准确辨识,因而限制了其应用范围。与之相比,笔者提出的 HAC 系统显得更为人性化。当车辆在坡道上短暂驻坡时(交通堵塞),驾驶员勿须拉上手刹;而当车辆在坡道起步时,驾驶员就能省去松手刹的动作,且只需一直踩下油门踏板即可使车辆平稳起步。

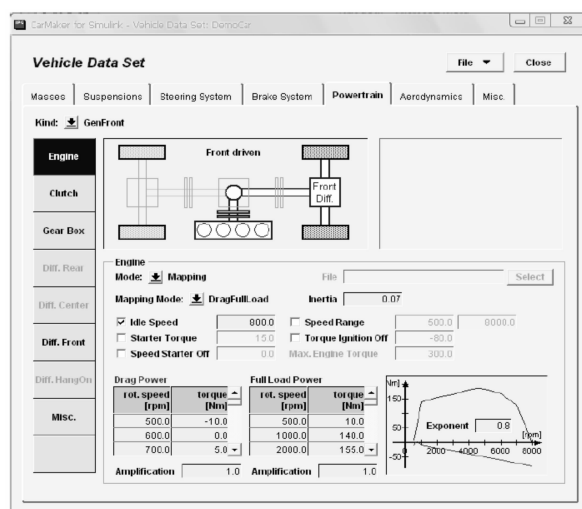
4 ASR/HAC 系统仿真及结果分析

4.1 DemoCar

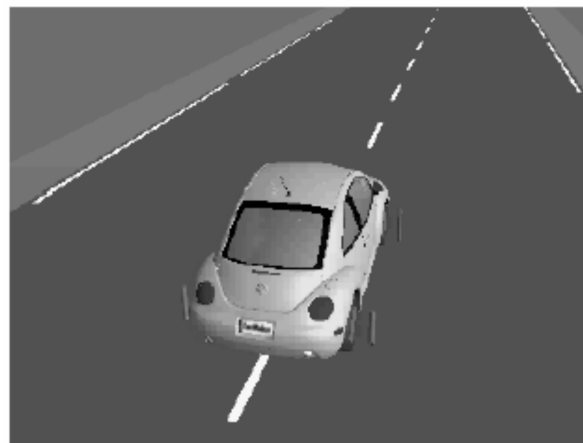
选用 CarMaker 提供的 DemoCar 作为虚拟试验用车^[17]。其发动机布置形式为前置前驱型,整车质量为 1 301 kg,前轮半径为 0.298 m,前轮质量为 25 kg,前轮转动惯量为 1.2 kg·m,怠速转速为

800 r/min。值得一提的是,在 CarMaker 中,所有车辆模型均为参数化模型,其参数设置由 6 大部分组成:质量,悬架,转向系统,制动系统,传动系统,空气动力学。图 3 显示了 DemoCar 传动系统的设置情况。

800 r/min。值得一提的是,在 CarMaker 中,所有车辆模型均为参数化模型,其参数设置由 6 大部分组成:质量,悬架,转向系统,制动系统,传动系统,空气动力学。图 3 显示了 DemoCar 传动系统的设置情况。



(a)



(b)

图 3 传动系统设置界面和 DemoCar 效果图

CarMaker 作为一款风靡欧美各大汽车厂商的仿真软件,其视为标准仿真车辆用途的 DemoCar 是由全面和严格的高精度仿真模块组成的。实际上,用户也可以通过付费方式得到 CarMaker 其他的虚拟车型,或者,通过输入某一实际车型的相关参量来构建相应的虚拟用车。

4.2 Simulink 下 ASR/HAC 系统建模

Simulink 下的虚拟车辆环境由 4 部分组成:天气模块,操纵策略模块,车辆模块和 CarMaker/Simulink 接口模块。其中车辆模块又包含汽车/拖车模块,制动系统模块,传动系统模块。笔者提出的 ASR/HAC 系统模块即布置在制动系统模块和传动系统模块之间。图 4 显示的是在 Simulink 下,对 ASR/HAC 系统的建模。

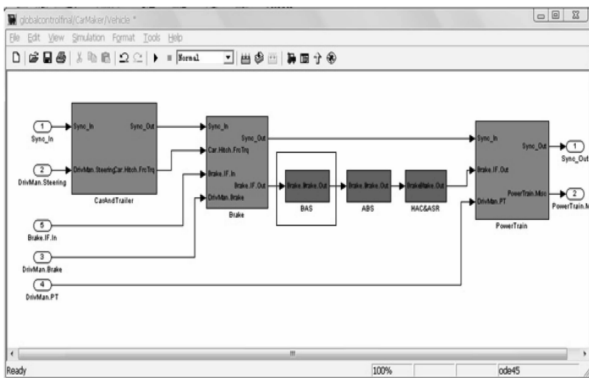


图 4 ASR/HAC 系统建模

4.3 测试工况仿真及结果分析

由于将 ASR 模块与 HAC 模块整合到了一起。所以,这里将对 ASR/HAC 系统进行联合仿真测试。

测试环境是这样设置的:首先,车辆在湿滑路面(对开路面)上起步直至车速达到 80 km/h,匀速行驶;然后,车辆驶入上坡路段,并紧急制动至车停下;驾驶员将档位换到空挡后,将不采取任何防止溜车措施(不拉手刹,不踩制动踏板);保持 5 s 之后,驾驶员挂档,踩油门;车辆平稳起步。该次测试以左前轮为研究对象。

4.3.1 ASR/HAC 系统湿滑路面仿真测试

地面附着系数 $\phi = 0.55$ 。图 5,图 6 分别显示的是装备 ASR/HAC 系统与未装备 ASR/HAC 系统的车辆的车速,轮速,平均制动力矩和油门踏板行程的变化情况。其中,Car.v 为车速,km/h;CarWheelSpd_FL 为左前轮轮速, ($^{\circ}$)/s; Brake.Trq_FL_tot 为左前轮平均制动力矩, $N \cdot m$; DM.Gas 为油门踏板值 (0~1,其中 0 表示油门踏板未踩下;1 表示油门踏板行程达到最大)。

由图 5、图 6 对比分析可知,当没有装备 ASR/HAC 系统时,车辆起步加速时,车轮会发生过度滑转而使得轮速突然增大。此时驾驶员不得不松开油门踏板以降低车轮滑转率。当轮速下降到一定值后,驾驶员再次踩踏油门踏板加速,但却又引起车轮过度滑转,于是驾驶员再次松开油门踏板以等待轮速下降。周而复始,为了能够尽快加速到设定值 80 km/h,驾驶员就必须不断的重复踩油门,松油门的动作。这不仅加重了驾驶员的操纵疲劳强度,而且对驾驶员的驾驶技巧要求苛刻。相比之下,装备了 ASR/HAC 系统的车辆则能够根据车轮滑转率的变化情况,实时调节输出力矩,使实际滑转率始终保持在理想值附近。

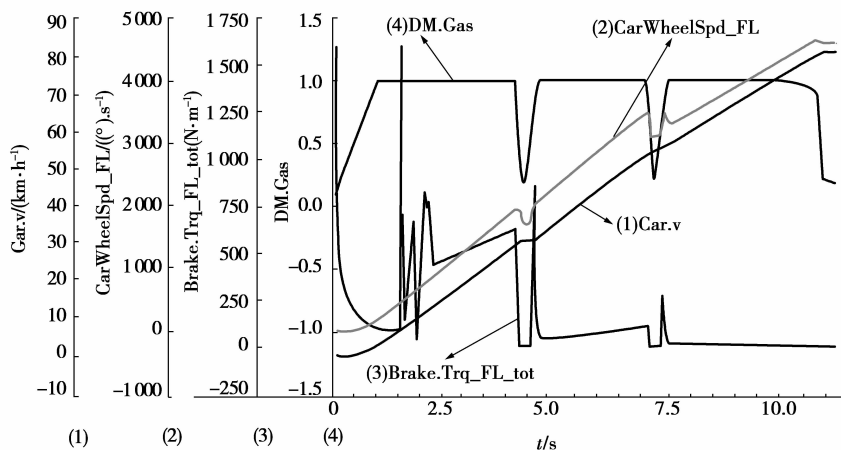


图 5 装备 ASR/HAC 系统(湿滑路面)

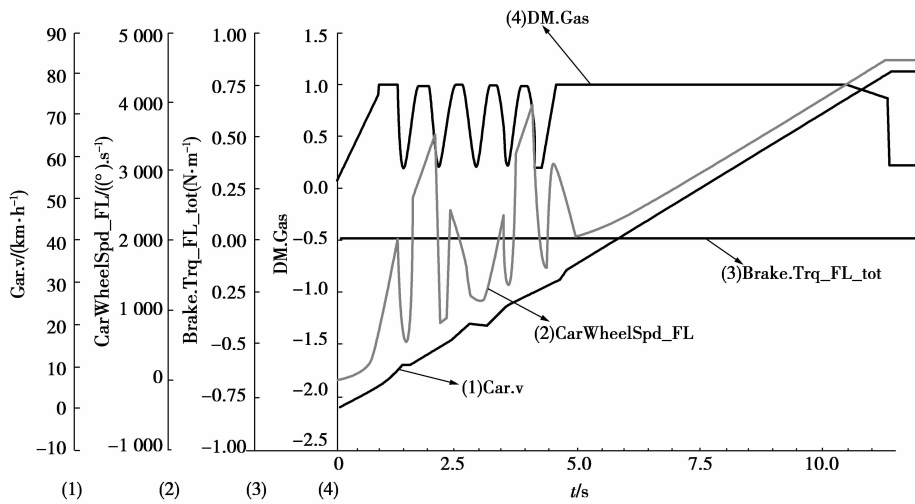


图 6 未装备 ASR/HAC 系统(湿滑路面)

通过对加速性能的比较可知,装备 ASR/HAC 系统的车辆在起步 8 s 后,车速达到了 59 km/h;而没有装备 ASR/HAC 系统的车辆在同样的时间内,车速仅为 55 km/h。另外,起步后 5 s 内,装备 ASR/HAC 系统的车辆的驾驶员仅需松/踩一次油门,而没有装备 ASR/HAC 系统的车辆的驾驶员在同样时间内却采取了 5 次油门松/踩动作! 由此可知,ASR/HAC 系统不仅能提高车辆在恶劣路况下的加速性能,而且能大大降低驾驶员的操纵疲劳强度,提高了行驶安全性。



图 7 湿滑路面起步效果对比图

图 7 显示的是装备 ASR/HAC 系统的车辆与未装备 ASR/HAC 系统的车辆在地面附着系数 $\phi = 0.55$ 的路面起步的效果对比图。其中,深色车辆装备有 ASR/HAC 系统;而浅色车辆未装备。

4.3.2 ASR/HAC 系统对开路面仿真测试

左侧地面附着系数设为 0.7;右侧地面附着系数设为 0.4。图 8,图 9 分别显示的是装备 ASR/

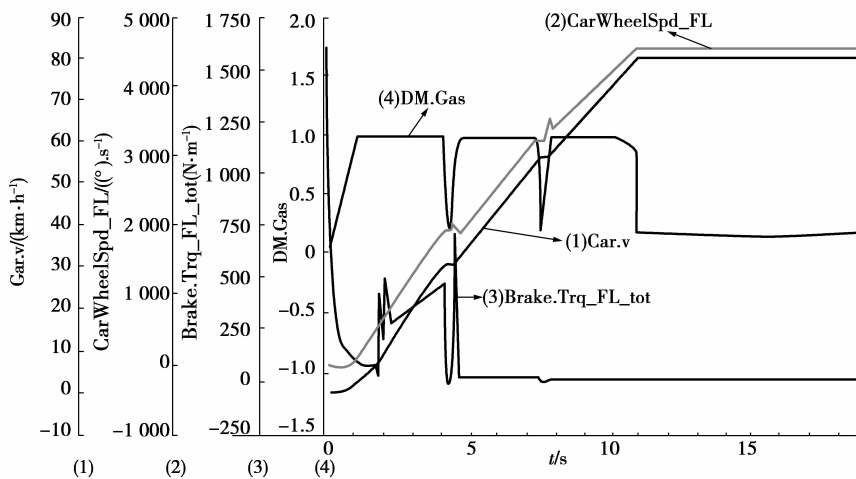


图 8 装备 ASR/HAC 系统(对开路面)

HAC 系统与未装备 ASR/HAC 系统车辆的车速, 轮速, 平均制动力矩和油门踏板行程的变化情况。

对开路面下的仿真结果与湿滑路面的仿真结果相近, 这里不再详细对比分析。图 10 显示的是装备 ASR/HAC 系统的车辆与未装备 ASR/HAC 系统的车辆在对开路面起步效果对比图。其中, 深色车辆装备有 ASR/HAC 系统; 而浅色车辆未装备。

4.3.3 ASR/HAC 系统驻坡及坡道起步仿真测试

地面附着系数为 0.8; 测试路面坡度为 20%。

图 11 显示的是该部分测试的情况。其中 DM. Brake 为制动踏板行程。

由图可知, 当驾驶员松开制动踏板(19.2 s), 输出制动力矩短暂突变为 0(系统检测车轮转动方向的滞后)后, 又迅速升高到最大, 并在之后 5 s 内保持该值不变直到系统检测到油门踏板信号。在测试过程中, 装备了 ASR/HAC 系统的车辆检测到轮速方向变化趋势, 立即施加制动力矩, 使车辆保持驻坡状态, 防止溜车现象发生; 而没有装备 ASR/HAC

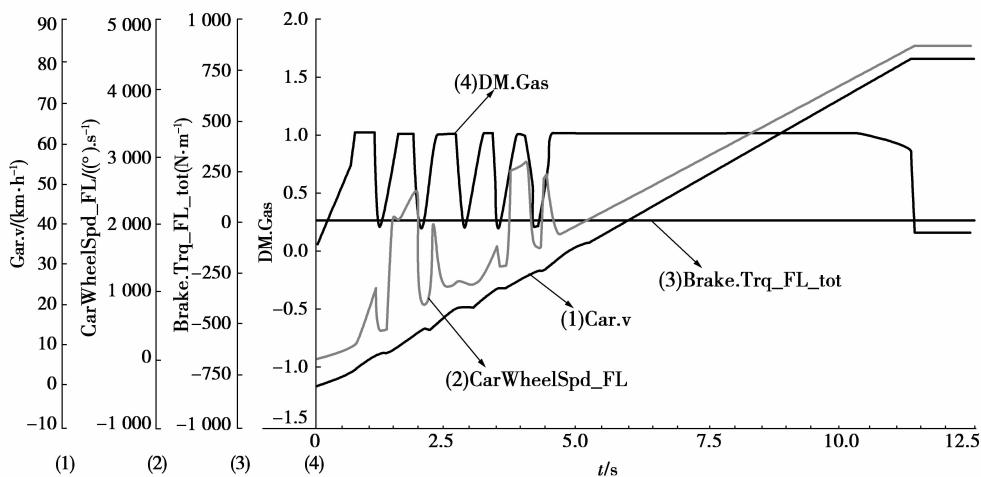


图 9 未装备 ASR/HAC 系统(对开路面)



图 10 对开路面起步效果对比图

系统的车辆则由于没有驾驶员手刹或脚刹制动操作, 出现严重溜车现象^[18]。图 12 显示的是没有装

备 ASR/HAC 系统的车辆开始溜车瞬间。

当传感器检测到油门踏板信号后, 输出制动力矩随着油门踏板行程的增加而快速地, 成比例地减小, 直至车辆平稳起步。值得注意的是, 上述起步过程仅需 2 s, 这一加速性能指标等同与丰田 2008 款 Highlander sport 车型。

在轮速 $< 460 \text{ }^\circ/\text{s}$ 时, 车速很小, 且由于重力分量作用, 车辆起步加速较为困难。若此时再利用 ASR 系统对瞬时过高的滑转率施加制动力矩控制的话, 势必容易引起发动机熄火。这是非常危险的。因此, 本文将轮速 $= 460 \text{ }^\circ/\text{s}$ 设定为阈值, 当轮速大于此阈值时, ASR 系统开始工作, 调节输出制动力矩, 将滑转率控制在理想值附近。否则, ASR 系统不工作。图 13 显示的是坡道起步时的加速过程。

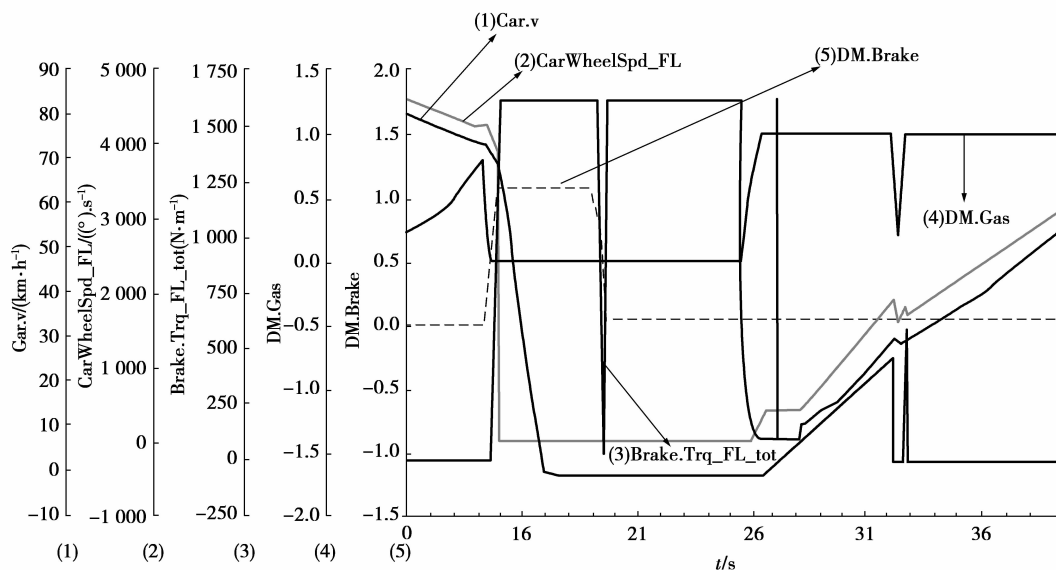


图 11 装备 ASR/HAC 系统(坡道)



图 12 起步加速

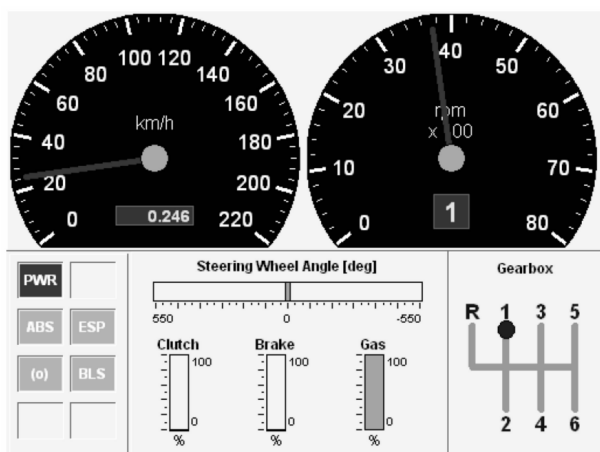


图 13 坡道起步加速时仪表工作情况

5 结 语

仿真结果表明,笔者提出的 ASR/HAC 系统在

各种恶劣工况下均能正常工作,满足设计要求,具备良好的市场前景。主要完成了以下工作:1)提出了基于模型参考自适应 PID 控制的 ASR 算法。2)提出了新的 HAC 控制方法。3)采用 CarMaker 和 Simulink 联合仿真的方式对 ASR/HAC 系统进行了验证。在 Simulink 下建立了系统控制模型,利用 CarMaker 强大的可视化虚拟车辆环境仿真功能对控制算法进行了大量仿真测试(软件在环测试)。

参考文献:

- [1] 张景良. 汽车虚拟仿真环境及电控系统 ABS/ESP 控制策略研究[D]. 北京:北京理工大学机械与车辆工程学院, 2008.
- [2] Toyota Highlander [EB/OL]. [2009-3-10] <http://www.toyota.com/highlander/features.html>.
- [3] 崔海峰, 刘昭度, 吴利军, 等. 基于 ABS/ASR 集成控制系统的汽车坡道起步辅助装置[J]. 农机化研究, 2006(8): 193-194.
CUI HAI-FENG, LIU ZHAO-DU, WU LI-JUN, et al. Hill-start assist system based on integrated control system of ABS/ASR for car [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006 (8): 193-194.
- [4] 张景波, 刘昭度, 齐志权, 等. 基于信息融合技术的 ABS/ASR/ACC 系统仿真[J]. 计算机仿真, 2004, 21(6):155-158.
ZHANG JIN-BO, LIU ZHAO-DU, QI ZHI-QUAN, et al. Simulation of ABS/ASR/ACC integrated system based on information fusion technology [J]. Computer Simulation, 2004, 21(6):155-158.

- [5] 尹安东,孙骏,赵虎,等. 汽车驱动防滑控制系统的控制模式与技术[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004, 27(3): 24-28.
YIN AN-DONG, SUN JUN, ZHAO HU, et al. Control patterns of the automobile anti-slip regulation system and key technologies [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2004, 27(3): 24-28.
- [6] LEE S J. Development of hardware-in-the-loop simulation system as a testbench for ESP unit [J]. International Journal of Automotive Technology, 2007(8):203-209.
- [7] JOHANSEN T A, PETERSON I, KALKKUHL J, et al. Gain-scheduled wheel slip control in automotive brake systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003, 11(6): 799-811.
- [8] XIANG W, RICHARDSON P C, ZHAO C, et al. Automobile brake-by-wire control system design and analysis [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2008, 57(1):138-145.
- [9] JANG H, KO K, KIM S J, et al. The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials [J]. Wear, 2004, 256 (3/4): 406-414.
- [10] IOANNOU P, XU Z. Throttle and brake control systems for automatic vehicle following [J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 1994(1):94-104.
- [11] HOLZMANN H, HALFMANN H, HAHN K M, et al. Virtual development and application of chassis components and chassis controls GM Europe[C]//2007 SAE International World Congress and Exhibition, April 16-19, 2007, Cobo Center, Detroit, Michigan, USA. Detroit, USA: IEEE, 2007(4):16-19.
- [12] BOUAZARA M, RICHARD M J. An optimization method designed to improve 3-D vehicle comfort and road holding capability through the use of active and semi-active suspensions [J]. European Journal of Mechanics - A/Solids, 2001, 20(3): 509-520.
- [13] PFISTER F, GSCHWEITL K, REITZE C. Redesign of experiments methods applied to controlled powertrain- and chassis-systems using lap-time optimization as an example [J]. VDI-Berichte Nr, 2006(1931):175-184.
- [14] 蒋克荣,王治森. 汽车 ABS 技术及其发展趋势[J]. 工业仪表与自动化装置, 2006(2):39-41.
JIANG KE-RONG, WANG ZHI-SEN. The technology of a vehicle anti-lock braking system and its developing trend [J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2006(2):39-41.
- [15] 马文席,刘继锋. 从 BAS 防抱死系统到 ASR、ESP[J]. 实用汽车技术, 2006(4):2-3.
MA WEN-XI, LIU JI-FENG. From BAS anti-lock brake system to ASR、ESP[J]. Automobile Technology, 2006(4):2-3.
- [16] 程安宁,吴红艳. 一种新型自动防滑差速系统的研究[J]. 工程机械, 2006(11):67-71.
CHENG AN-NING, WU HONG-YAN. Study on a new type of automatic anti-slip differential system [J]. Construction Machinery and Equipment, 2006(11): 67-71.
- [17] IPG Automotive GmbH. Carmaker reference manual, version 2. 2 [M]. Germany: IPG Automotive GmbH, 2008.
- [18] TAKI Y J, YAMADAN, NAGAE A, et al. Development of brake control system for driving hills applying active wheel speed sensor [J]. JSAE Annual Congress, 2003, 34(3):13-16.

(编辑 张小强)