

基于车轮加速度门限的牵引力控制系统制动控制算法

赵 健, 李 静, 宋大风, 张加才, 李幼德

(吉林大学 汽车工程学院, 长春 130022)

摘 要:针对某 4×2 车辆提出了一种基于车轮加速度门限自调整的 TCS 制动控制算法。选择以驱动轮相对滑转率和加速度为控制门限设计了控制逻辑。通过在 Matlab/Simulink 环境下进行仿真,分析了加速度门限的取值对控制效果的影响。在研究不同因素对加速度门限取值影响的趋势的基础上,设计了一种以查表的方式根据不同工况自动选取加速度门限的方法,并通过硬件在环试验对算法进行了验证。结果表明,算法能选取适宜的加速度门限,有效地控制驱动轮滑转并提高车辆牵引性能。

关键词:车辆工程;加速度门限;牵引力控制系统;制动控制;仿真;硬件在环试验

中图分类号:U463.54 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)02-0263-06

Brake control algorithm of traction control system based on wheel acceleration threshold

Zhao Jian, Li Jing, Song Da-feng, Zhang Jia-cai, Li You-de

(College of Automobile Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: A brake control algorithm of the traction control system based on the self-adjusting wheel acceleration threshold was proposed for the 4×2 vehicles, and a control logic was designed using the relative slip rate of the driving wheel as the primary threshold and the wheel acceleration as the secondary threshold. The simulation was performed using the Matlab/Simulink to study the effect of the selected acceleration on the control result. Based on the effect of different factors on the selection of the acceleration threshold, a table-look-up method to select automatically the acceleration threshold according to different driving conditions was designed and verified by the hardware-in-the-loop test. The results show that the proposed algorithm can select the optimized acceleration threshold to control effectively the slippage of the driving wheel and improve the vehicle traction performance.

Key words: vehicle engineering; acceleration threshold; traction control system(TCS); brake control; simulation; hardware-in-the-loop(HIL) test

收稿日期:2005-11-07.

基金项目:总装备部“十五”预研项目;吉林大学“985 工程”资助项目.

作者简介:赵健(1978-),男,博士研究生.研究方向:汽车地面系统分析与控制. E-mail:zhaojian@mail.jlu.edu.cn

通讯联系人:李幼德(1945-),男,教授,博士生导师.研究方向:汽车地面系统分析与控制.

E-mail:auto_tcs@jlu.edu.cn

当车辆在附着分离路面上驱动行驶时,低附着侧车轮易发生过度滑转,从而使车辆牵引能力大大降低,牵引力控制系统通过向打滑驱动轮独立施加制动将其滑转率控制在最佳范围之内以获得最佳的牵引性能^[1-3]。目前,最实用、应用最广泛的牵引力制动控制方法是逻辑门限值控制方法。最直接的控制方法是选取滑转率作为控制门限,在分离路面上,处于高附着侧的驱动轮轮速基本不发生滑转,可将左、右驱动轮的相对滑转率作为主控制门限。但是,滑转率门限只能反映轮速的大小而不能反映其变化趋势,需采用车轮加速度作为辅助门限。然而,车辆行驶过程中,路面、档位等工况经常变化,若加速度门限固定不变,则可能导致增压过度或增压过缓等问题^[4,5]。应用一些现代的控制方法可以根据工况自适应调节控制参数,但这些算法对控制系统硬件要求较高,实时性较差,故其应用有一定难度。

本文以附着分离路面作为研究工况,针对某 4×2 车辆设计了以驱动轮相对滑转率作为主控制门限、加速度作为辅助控制门限的牵引力控制制动控制算法,在 Matlab/Simulink 环境下建立车辆加速动力学仿真软件并进行了仿真,分析了不同加速度门限取值对控制效果的影响。最后,分析了影响角加速度门限取值的主要因素。在此基础上,设计了一种能够根据档位、油门、路面条件的变化自动选取车轮加速度门限的算法,并在仿真环境下进行了验证。

1 TCS 制动控制逻辑

选择驱动轮相对滑转率作为主控制门限,车轮角加速度作为辅助控制门限,设计牵引力控制算法的制动控制子程序控制流程如图 1 所示^[6]。图中, v_v 为计算车速; v_{UL} 、 v_{UR} 分别为左、右非驱动轮速度; v_{DL} 、 v_{DR} 为左、右驱动轮速度; v 为进行制动控制的车速限值; v_L 为低速驱动轮速度; v_H 为高速驱动轮速度; v_{a1} 、 v_{a2} 分别为根据滑转率门限计算得到的轮速第一、第二门限; $d v_H$ 为车轮加速度; a_0 为加速度门限。

图中①—②表示用非驱动轮转速平均值作为实际车速,车速超过设定速度限值时,不进行制动控制,以避免两轮驱动力差产生的横摆力矩在高速情况下导致驾驶员失去对汽车的控制。③—④表示取驱动轮中的低速车轮速度 v_L 作为控制量,高速车轮速度 v_H 作为被控制量,设定控制门限

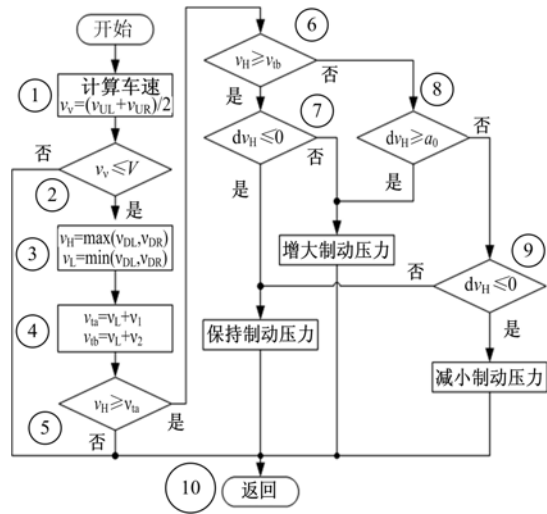


图 1 TCS 制动控制流程图

Fig. 1 Flowchart of TCS brake control

$v_{a1} = v_L \times (1 + s_1)$, $v_{a2} = v_L \times (1 + s_2)$ 。其中 s_1 、 s_2 分别为滑转率控制第一、第二门限。⑤表示首先判断轮速是否超过第一门限 v_{a1} ,若否,则直接返回主程序(图 1 中的⑩);若是,则进一步判断轮速是否超过第二门限 v_{a2} 。⑥—⑨表示若轮速超过第二门限(图 1 中的⑥—是),说明两轮轮速分离已经达到较严重的程度,继续判断是否有 $d v_H < 0$ (图 1 中的⑦)。若否,应立即增大制动压力;若是,则说明之前施加了制动压力并已足够,轮速已经开始回落保持制动压力直至轮速小于第二门限。若轮速未超过第二门限(图 1 中的⑥—否),即轮速处于两个门限之间,则需进一步判断车轮加速度 $d v_H$ 是否超过门限 a_0 (图 1 中的⑧)。若是,说明打滑车轮轮速变化剧烈,应增大制动压力;否则,说明两轮虽超过第一门限,但打滑车轮轮速变化较为平缓。此时应进一步判断是否有 $d v_H < 0$ (图 1 中的⑨),若是,说明轮速已降至较低值且继续下降,应减小制动压力;否则说明轮速处于稳定区域,应使制动压力尽量长时间保持在此区域。⑩表示控制完成后,返回主程序。

2 加速度门限对控制效果的影响

车辆在分离路面上行驶时,高附着侧驱动轮速与实际车速大致相当,相对滑转率门限可根据轮胎在路面上的最佳滑移率来选取,而加速度门限 a_0 的取值对控制效果也有重要影响,为此在 Matlab/Simulink 环境下建立 4×2 车辆驱动工况动力学仿真模型^[7],根据设计的控制逻辑编写控制算法进行仿真。仿真工况设定为三档,路面

附着系数 $\mu=0.1/0.5$, 车辆初速设定为 3 m/s, 油门开度保持 100%, 仿真时间为 6 s, 控制算法模块采样时间设定为 40 ms, 即每秒进行制动控制 25 次。

不加制动控制和取不同加速度门限进行控制的仿真结果如图 2—图 5 所示, 图中, 1 为左侧(低附着)驱动轮轮速, 2 为右侧(高附着)驱动轮轮速, 3 为车速。

由图 2 可知, 无 TCS 控制的情况下, 处于低附着侧轮速迅速上升, 6 s 后车速为 5.56 m/s。

由图 3—图 5 可以看出, 加速度门限取不同的值, 控制结果有很大差距。

(1) 如图 3 所示, 在 3.4 s 左右, 低附着侧车轮速度迅速下降, 说明系统向该侧车轮施加了过度的制动力矩, 并因此造成系统误操作, 在 3.8 s 左右向高附着侧车轮施加了制动, 进而造成低附着侧车轮抱死。由于 TCS 系统控制的是驱动轮, 车轮转动惯量较大, 相对滑转率虽然超过门限, 但打滑车轮的角加速度却不一定很大, 此时, 车轮处在一个相对平稳的工作状态, 加速门限取

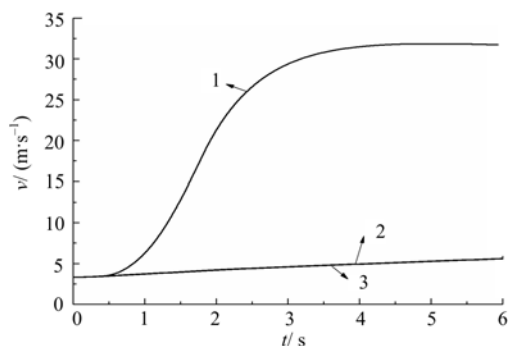


图 2 无 TCS 制动控制的驱动轮速度/车速曲线
Fig. 2 Driven wheels/vehicle velocity curves without TCS brake control

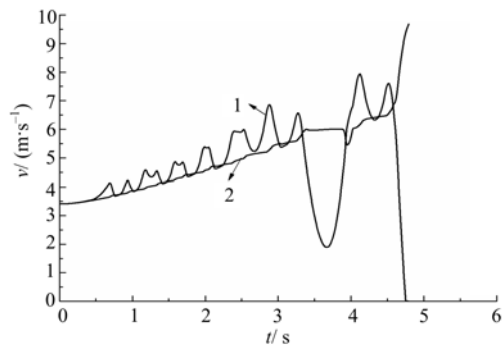


图 3 有牵引力控制的轮速/车速曲线 ($a_0=0$)
Fig. 3 Driven wheels/vehicle velocity curves with TCS brake control, $a_0=0$

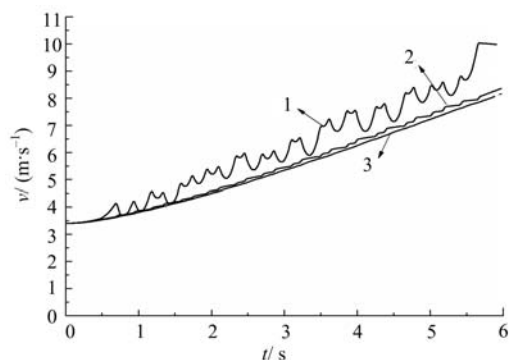


图 4 有牵引力控制的轮速/车速曲线 ($a_0=4 \text{ m/s}^2$)
Fig. 4 Driven wheels/vehicle velocity curves with TCS brake control, $a_0=4 \text{ m/s}^2$

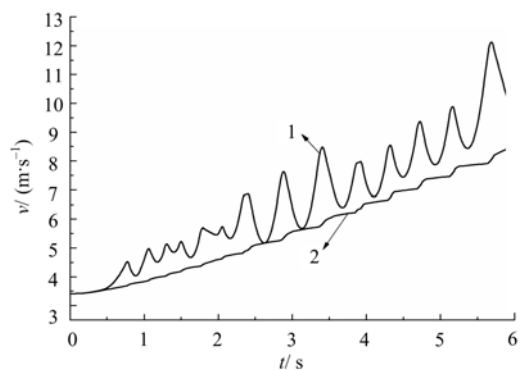


图 5 有牵引力控制的轮速/车速曲线 ($a_0=10 \text{ m/s}^2$)
Fig. 5 Driven wheels/vehicle velocity curves with TCS brake control, $a_0=10 \text{ m/s}^2$

值过小而不起作用, 相当于只按滑转率门限控制, 便会造成过度加压的情况, 甚至导致车轮抱死。

(2) 如图 4 所示, 制动控制器正确工作, 低附着侧车轮滑转得到有效控制, 轮速始终在目标轮速附近波动。

(3) 如图 5 所示, 低附着侧车轮滑转也得到了较有效的控制, 但加速度门限值过大, 造成控制系统对车轮打滑的判断滞后, 使轮速的振动幅度过大。将图 4 和图 5 的仿真结果进行比较, 如表 1 所示。

表 1 a_0 取不同值的仿真结果对比

Table 1 Contrast of simulation results on different a_0			
对比项目	图 3	图 4	图 5
$a_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	0	4	10
两轮相对滑转率最大值/%	—	25.33	51.02

注: $\mu=0.1/0.5$ 路面, 油门开度 100%, 滑转率第一门限 10%, 滑转率第二门限 20%, 以下同。

从表 1 可以看出, 在轮速差门限不变的情况下, 加速度门限取值为 4 m/s^2 和 10 m/s^2 时, 相对滑转率最大值分别超过轮速差第二门限 5.33%

和 31.02%。轮速振动幅度的增大不但影响系统的控制效果,也会给车辆的传动系统带来更大的振动扭矩,影响传动机构的寿命。可见,在图 4 所示的情况下,加速度门限取值为最佳值,此时,最终车速达到 8.17 m/s,比未加控制时提高 46.9%。

3 最佳加速度门限的选取方法

加速过程中,影响车轮旋转的主要因素是传动系传给车轮的转矩和路面提供给车轮的转矩,忽略其他阻力的影响,车轮受力如图 6 所示,其中, v 、 \dot{v} 分别为车辆速度及加速度; F_c 为地面支反力; F_x 为车轮纵向力; F_p 为驱动轴作用于驱动轮平行于路面的力; m 为驱动轮质量。

车轮的动力学方程为

$$I \frac{d\omega}{dt} = M_d - \mu NR \quad (1)$$

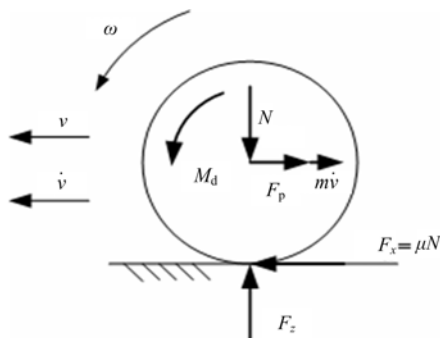


图 6 驱动车轮受力图

Fig. 6 Forces on driven wheels

式中: I 为等效到车轮上的转动惯量; R 为车轮滚动半径; ω 为车轮转速; M_d 为发动机传给车轮的驱动力矩; μ 为路面附着系数; N 为车轮载荷。

忽略差速器内摩擦阻力,有

$$I = (I_c i_g^2 i_0^2 + I_g i_0^2 + I_0)/2 + I_w \quad (2)$$

$$M_d = M_e i_g i_0/2 \quad (3)$$

式中: I_c 、 I_g 、 I_0 、 I_w 分别为发动机、变速器、主减速器、车轮的转动惯量; i_g 、 i_0 分别为变速器、主减速器的传动比; M_e 为发动机输出力矩。

从式(2)、(3)中可以看出,车轮转动惯量 I 、车轮驱动力矩 M_d 和路面附着系数 μ 是影响车轮加速度的主要因素。其中, I 受档位影响, M_d 受档位和油门的影响, μ 受路面条件的影响。

为了验证这一设想,改变仿真过程中的路面参数、档位和油门位置,对加速度门限进行标定,综合考虑仿真得到的最终车速和轮速的波动因素,确定加速度门限的最佳值并进行分析。

3.1 不同档位对加速度门限 a_0 取值的影响

档位越低, I 越大,轮速变化趋势应越缓;但传动系传递给车轮的驱动力矩越大,轮速变化趋势则应越大,即档位变化造成的转动惯量与力矩的变化对车轮加速度影响趋势相反。因此,车轮的加速度变化是等效到车轮上的转动惯量变化与驱动力矩变化综合作用的结果,设定加速度门限时需要对这两个因素进行综合考虑。

表 2 为各档位加速度门限及控制效果的对比。五档情况下,一般车速较高,出于安全性的考虑不进行制动控制;最佳加速度门限基本呈增大趋势,但三档取值最小,是转动惯量变化与驱动力矩变化综合作用的结果。

表 2 不同档位的 a_0 最佳值

Table 2 Optimized a_0 on different gear ratio

档位	一	二	三	四	五
传动比	6.194	3.894	2.260	1.428	1
$a_0/(m \cdot s^{-2})$	5	6	4	7	—

3.2 μ 对加速度门限 a_0 取值的影响

路面条件越好 (μ 越大),驱动力矩造成的轮速变化趋势越小,反之则越大。加速度门限应相应选取。表 3 为在几种分离路面上行驶时加速度门限及控制效果的对比。在 $\mu=0.5/0.9$ 的路面上进行仿真时,两侧驱动车轮均不打滑。在其他几种路面上,最佳加速度门限的取值随路面附着系数的增大而减小,符合以上的分析结果。另外,低附着路面 μ 相同的情况下,最佳加速度门限大小基本相同,说明分离路面上加速度门限的选取主要由低附着侧路面确定。

表 3 不同 μ 路上的 a_0 最佳值(三档)

Table 3 Optimized a_0 on different μ road

μ	0.1/0.3	0.1/0.5	0.2/0.5	0.2/0.9	0.5/0.9
$a_0/(m \cdot s^{-2})$	4	4	0	0	—

3.3 K_a 对加速度门限 a_0 取值的影响

油门开度 K_a 越小,轮速变化趋势越缓,加速度门限取值应相应减小。

表 4 为不同 K_a 时 a_0 的最佳取值。当 K_a 小于 40% 时,车轮不打滑。当 K_a 为 100%~60% 时,加速度门限取值符合分析,但 K_a 为 50% 时,加速度门限最佳取值很大,这是由于此时驱动力矩过小,轮速变化对制动力矩的变化非常敏感。仿真结果表明,在这种情况下进行制动控制对牵引性能的提升贡献很小,可以不进行控制。

表 4 不同 K_a 时的 a_0 最佳值(三档)

Table 4 Optimized a_0 on different K_a

$K_a/\%$	100	90	80	70	60	50	<40
$a_0/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	4	4	3	3	2	10	—

3.4 最佳加速度门限的确定

根据以上分析结果,确定采用查表法确定最佳加速度门限。在仿真环境下,对各档位、不同油门开度、不同路面条件的加速度门限进行标定,得到如图 7 所示的最佳加速度门限值图。

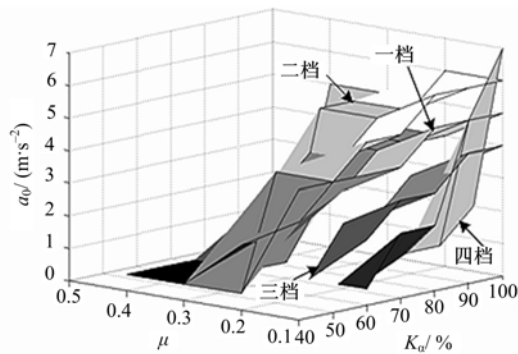


图 7 最佳加速度门限值图

Fig. 7 Chart of optimized acceleration threshold

4 典型工况硬件在环试验结果

为验证算法的有效性,设计如表 5 所示的工况进行硬件在环试验,试验在自行开发的硬件在环试验平台上进行^[8]。

表 5 硬件在环试验工况

Table 5 HIL test conditions

$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	<6	6~9	9~15	>15
$K_a/\%$	50	70	90	100
档位	—	二	三	四
μ	0.2/0.9	0.1/0.7	0.15/0.5	0.1/0.3

试验结果如图 8—图 10 所示,曲线 1—3 含义同前,曲线 4、5 分别为第一和第二轮速门限,曲线 6、7 分别为左、右驱动轮的制动压力。

图 8 为无 TCS 制动控制的试验曲线,从图中可以看出,每当换挡并增大油门开度时,低附着侧驱动车轮都会迅速打滑,最终车速达到 25 m/s,用时 51.95 s。

图 9 为采用固定加速度门限 $a_0 = 4 \text{ m/s}^2$ 的有 TCS 制动控制的试验曲线,由图可见,车轮打滑得到控制,最终车速达到 25 m/s,用时 36.69 s,但在 6.6 s 和 7.6 s 左右两次发生了过度增压的现象。

图 10 为采用查表法自动选取加速度门限 a_0

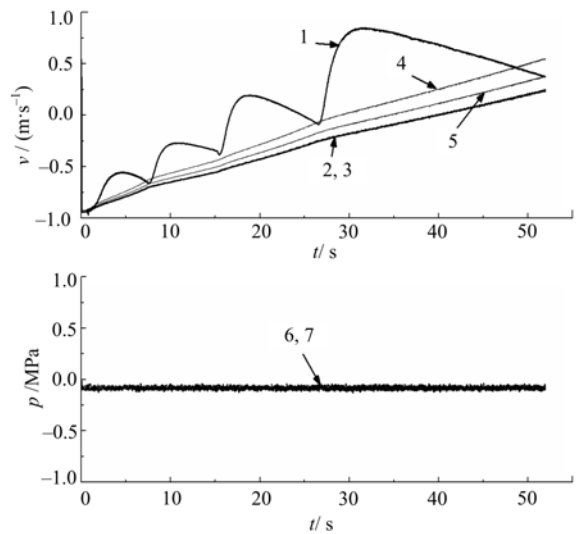


图 8 无 TCS 制动控制试验曲线

Fig. 8 HIL test curves without TCS brake control

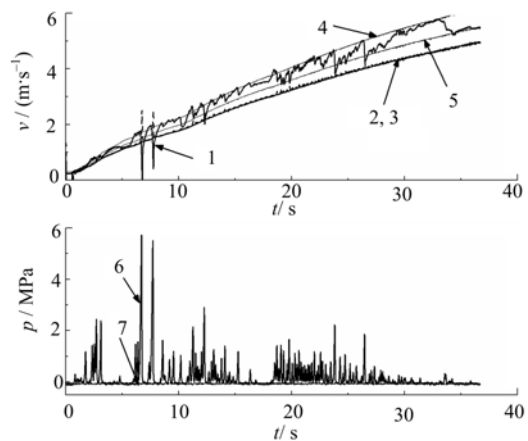


图 9 TCS 制动控制 ($a_0 = 4 \text{ m/s}^2$)

Fig. 9 HIL test curves with TCS brake control, $a_0 = 4 \text{ m/s}^2$

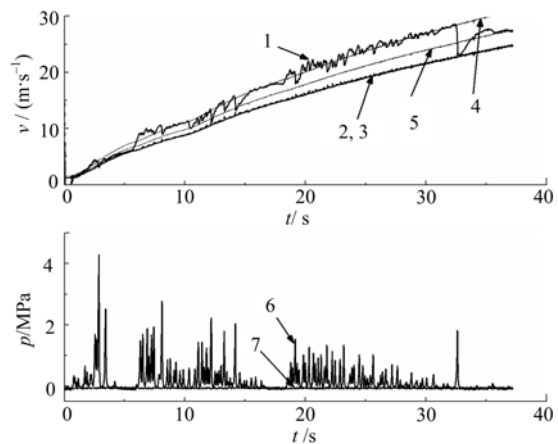


图 10 TCS 制动控制,自动选取 a_0

Fig. 10 HIL test curves with TCS brake control, a_0 selected automatically

的有 TCS 制动控制的试验曲线,由图可见,车轮打滑得到控制,且未发生增压过度或增压不足的现象,最终车速达到 25 m/s,用时 37.2 s。加速时间比无控制工况降低了 28.4%。

5 结束语

在采用驱动轮相对滑转率作为主门限、车轮加速度作为辅助门限的制动控制算法中,加速度门限的最佳值随路面、档位、油门开度等因素的变化而变化,若选取不当,可能造成车轮制动压力增压过度或增压过缓,直接影响控制效果。

本文在分析加速度门限影响因素的基础上,调试、设计出基于查表法的加速度门限自动选取的控制算法,硬件在环试验表明,应用此算法可以保证合适的压力控制,有效控制低附着路面上驱动轮的过度滑转,从而提高车辆的牵引性能。

参考文献:

- [1] 司利增. 汽车防滑控制技术-ABS 与 ASR[M]. 北京:人民交通出版, 1996.
- [2] 李静,李幼德,赵健,等. 四轮驱动汽车牵引力控制系统研究[J]. 吉林大学学报:工学版, 2003, 33(4): 1-6.
Li Jing, Li You-de, Zhao Jian, et al. Research on traction control system for four wheel drive vehicle [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2003, 33(4): 1-6.
- [3] 张加才,李凯,李静,等. 汽车牵引力控制系统的控制方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2006, 36(4): 514-517.
Zhang Jia-cai, Li Kai, Li Jing, et al. Control methods for automobile traction control system [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2006, 36(4): 514-517.
- [4] 程军. 汽车防抱死制动系统的理论与实践[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1999.
- [5] [日]ABS 株式会社. 汽车制动防抱死装置(ABS)构造与原理[M]. 李朝禄,刘荣华译. 北京:机械工业出版社, 1995.
- [6] 赵健. 四轮驱动汽车 TCS 制动压力调节装置及附着系数分离路面控制方法的研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院, 2003.
Zhao Jian. The exploitation of 4WD TCS brake pressure modulator & research of control logic on split- μ road [D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2003.
- [7] 李静,李幼德,赵健. 汽车加速过程动力学仿真模拟研究[J]. 汽车技术, 2003, 10: 7-9.
Li Jing, Li You-de, Zhao Jian. Study on dynamics simulation of the vehicle acceleration course [J]. Vehicle Technique, 2003, 10: 7-9.
- [8] 李静,李幼德,赵健,等. 汽车驱动硬件在环试验平台研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(1): 64-67.
Li Jing, Li You-de, Zhao Jian, et al. A hardware are-in-the-loop test bench for traction control system [J]. Automotive Engineering, 2005, 27(1): 64-67.