

# 基于滑模极值搜索算法的车辆驱动防滑控制策略\*

周兵 徐蒙 袁希文 范璐

(湖南大学汽车车身先进制造国家重点实验室,长沙 410082)

**摘要:** 为了提高车辆的驱动防滑能力,提出了一种基于滑模极值搜索算法的驱动防滑控制策略。采用滑模极值搜索算法作为一种自寻优方法找到轮胎力-滑转率曲线的极值点,无需估计路面附着系数和建立理想参考模型就可以将轮胎的滑转率控制在最优滑转率附近,提高车辆的动力性和方向稳定性。在 Matlab/Simulink 中建立车辆系统仿真模型。仿真结果表明,此控制策略能使车辆在驱动过程中快速达到实时路面条件下的最优滑转率,增强了车辆的动力性能。

**关键词:** 车辆 驱动防滑 滑模极值搜索 控制策略

**中图分类号:** U463.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0307-05

## Acceleration Slip Regulation Based on Extremum Seeking Control with Sliding Mode

Zhou Bing Xu Meng Yuan Xiwen Fan Lu

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In order to improve the vehicle anti-slip performance, an acceleration slip regulation strategy based on extremum seeking control with sliding mode was proposed. Extremum seeking control with sliding mode was used as a self-optimizing way to find the extreme point of tire force-slip rate curve. In this condition, the tire slip ratio near the optimal slip ratio can be controlled without having to estimate the road surface friction coefficient or establishing the ideal reference model to improve the vehicle dynamic performance and directional stability. Moreover, a validated full vehicle simulation model was built in Matlab/Simulink. And the controller based on extremum seeking control with sliding mode was carefully designed. Finally, simulation results showed that during acceleration the vehicle can quickly reach the optimal slip ratio which corresponded to the real-time road conditions with the proposed control strategy. It implied that the proposed control strategy can improve vehicle dynamic performance.

**Key words:** Vehicle Acceleration slip regulation Extremum seeking control with sliding mode Control strategy

### 引言

驱动防滑(Acceleration slip regulation, ASR)系统是防止汽车驱动轮在驱动过程中发生滑转现象,使汽车轮胎工作在轮胎力-滑转率特性曲线峰值(即最优滑转率)处,保证驱动轮能同时获得较大的纵向附着力和横向附着力,保持车辆行驶稳定性和最佳驱动力的装置<sup>[1-2]</sup>。

随着人们对汽车性能要求的提高,ASR系统越来越受到关注,围绕其控制策略进行了大量研究工作<sup>[3-16]</sup>。Song等将最优滑转率看作已知值,通过控制策略使实际滑转率接近最优滑转率<sup>[3-7]</sup>。车轮最优滑转率取决于轮胎类型、路面状况、胎压和车速等因素,因此不同车辆在不同工况行驶时,轮胎最大轮胎力所对应的最优滑转率也是不同的,所以上述研究中选取的最优滑转率与实际最优滑转率具有一定

的偏差,会降低控制准确性。蒋振江等首先估计路面附着系数峰值,然后控制实际滑转率到达对应于路面附着系数峰值的最优滑转率<sup>[8-10]</sup>。这种研究方法需要建立参考模型估计路面附着系数,参考模型的准确性和估计方法的选取对控制效果具有重要的影响。

汽车启动和加速过程中,在不事先假定最优滑转率,也不估计路面附着系数的情况下,使轮胎力达到可利用的最大轮胎力具有重要实际意义。滑模极值搜索控制(Extremum seeking control with sliding mode)算法是一种在线自寻优搜索算法,只要特性曲线具有先增后减或者先减后增特点,即存在峰值,该算法就可以根据系统特性曲线的上述形状特性来达到峰值点。滑模极值搜索算法的这种特性可以使其自适应影响系统的因素变化,因此能提高控制策略的鲁棒性。鉴于此,本文采用滑模极值搜索控制算法,在未知路面附着条件下搜索滑转率的最优值,即实现自寻优,增强系统的鲁棒性。在车辆驱动时,该算法能控制轮胎工作在轮胎力-滑转率曲线的峰值处,使其获得较大的轮胎纵向力和侧向力,提高车辆的动力性和稳定性。

## 1 系统模型

### 1.1 整车模型

以采用后轮驱动的 HFC6820 型客车为研究对象。根据牛顿第二定律建立整车数学模型<sup>[17]</sup>

$$M \frac{dv}{dt} = F_{xrl} + F_{xrr} - (F_{xfl} + F_{xfr}) - F_w \quad (1)$$

其中  $F_{xij} = \varphi_x F_{zij}$  ( $i=f,r;j=l,r$ )

$$F_w = \frac{C_D A v^2}{21.15}$$

式中  $M$ ——整车质量  $v$ ——纵向车速

$F_{xfl}, F_{xfr}, F_{xrl}, F_{xrr}$ ——左前轮、右前轮、左后轮、右后轮轮胎纵向力

$\varphi_x$ ——路面纵向附着系数

$F_w$ ——空气阻力  $A$ ——迎风面积

$C_D$ ——空气阻力系数

车轮的垂向载荷为

$$F_{zfl, zfr} = \frac{M}{2(a+b)} \left( gb - \frac{dv}{dt} H \right) \quad (2)$$

$$F_{zrl, zrr} = \frac{M}{2(a+b)} \left( ga + \frac{dv}{dt} H \right) \quad (3)$$

式中  $F_{zfl}, F_{zfr}, F_{zrl}, F_{zrr}$ ——左前轮、右前轮、左后轮、右后轮垂向载荷

$a$ ——汽车质心至前轴的距离

$b$ ——汽车质心至后轴的距离

$g$ ——重力加速度

$H$ ——汽车质心高度

### 1.2 车轮模型

车辆从动轮的动力学方程为

$$I_{wf} \frac{dw_{fj}}{dt} = F_{xjf} R - T_{fj} \quad (4)$$

其中

$$T_{fj} = f F_{zjf}$$

式中  $I_{wf}$ ——前轮转动惯量

$w_{fj}$ ——车轮转速  $R$ ——车轮半径

$T_{fj}$ ——前轮第  $j$  侧车轮的滚动阻力

$f$ ——滚动阻力系数

驱动轮动力学方程为

$$I_{wr} \frac{dw_{rj}}{dt} = T_{urj} - F_{xjr} R \quad (5)$$

式中  $T_{urj}$ ——由发动机传到车轮的驱动力矩

### 1.3 轮胎-地面数学模型

汽车行驶时的驱动力要受到路面附着条件的限制。本文计算车轮的纵向路面附着系数采用双线性模型<sup>[18]</sup>,表达式为

$$\varphi_x = \begin{cases} \frac{\varphi_{xm} \lambda}{\lambda_t} & (\lambda \leq \lambda_t) \\ \frac{\varphi_{xm} - \varphi_{xg} \lambda_t}{1 - \lambda_t} - \frac{\varphi_{xm} - \varphi_{xg}}{1 - \lambda_t} \lambda & (\lambda > \lambda_t) \end{cases} \quad (6)$$

其中

$$\lambda = \frac{wR - v}{wR} \quad (7)$$

式中  $\varphi_x$ ——纵向附着系数  $\lambda$ ——滑转率

$\varphi_{xm}$ ——峰值附着系数

$\varphi_{xg}$ ——滑动附着系数

$\lambda_t$ ——峰值附着系数处的车轮滑转率

## 2 控制策略

### 2.1 滑模极值搜索算法原理

极值搜索控制是在闭环系统中自动寻找系统最优值,同时提高系统稳定性和鲁棒性的控制设计方法。因此极值搜索控制主要被用来实现动态系统的实时最优化。滑模极值搜索算法是其中一个重要研究方法。

SISO 非线性系统模型

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, u) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (8)$$

式中  $x$ ——系统状态  $u$ ——系统输入

$y$ ——系统输出

系统控制律为

$$u = \alpha(x, \theta) \quad (9)$$

式中  $\theta$ ——极值搜索变量

切换函数为

$$s(t) = y(t) - g(t) \quad (10)$$

其中

$$g(t) = \rho t$$

式中  $g(t)$ ——单调函数  $\rho$ ——常数

滑模极值搜索算法原理如图 1 所示<sup>[19]</sup>。当  $y(t)$  随着  $g(t)$  增大或者变小时, 极值搜索变量  $\theta$  将朝着最优点  $\theta^*$  的方向趋近。并且滑模极值搜索算法具有一系列的滑模面, 这样无论系统的初始状态为何值都能保证滑模运动能够到达最优点  $\theta^*$  的邻域外, 最后进入到最优点的邻域内进行震荡收敛到最优点。不同路面条件下轮胎纵向力特性如图 2 所示, 分析图表可知汽车在不同路面上驱动行驶时, 汽车初始状态会不同且其最优滑转率也会不同, 但是轮胎纵向力特性曲线先增后减的特性没有改变, 滑模极值搜索控制恰好可以根据自身算法的特点自适应极值的漂移特性, 快速准确地搜索到系统的最优值。这样就实现了在不考虑轮胎类型和路面条件情况下提高车辆驱动能力的目的。

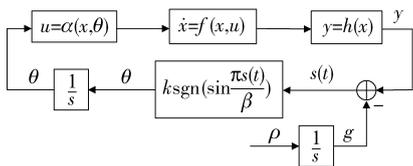


图 1 滑模极值搜索算法原理

Fig. 1 Extremum seeking control using sliding mode

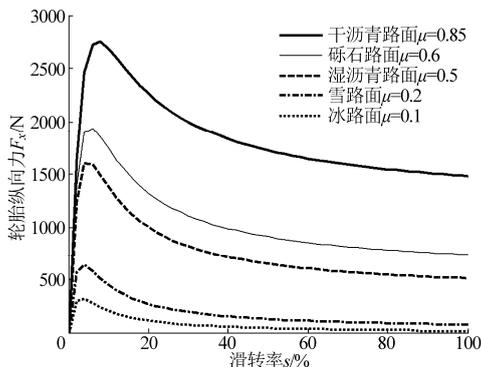


图 2 不同路面条件下轮胎纵向力特性

Fig. 2 Characteristics of longitudinal force under different road conditions

### 2.2 滑模极值搜索控制器设计

由滑模极值搜索算法原理可知, 设计 ASR 控制器的第一步就是构造合适切换函数, 按照文献[20], 构造滑模面

$$s = F_x(\lambda) - \rho t \quad (11)$$

对式(11)求导可得

$$\dot{s} = \frac{\partial F_x(\lambda)}{\partial \lambda} \dot{\lambda} - \rho \quad (12)$$

将滑转率一阶导数定义为控制律

$$\dot{\lambda} = k \operatorname{sgn} \left( \sin \frac{\pi s}{\beta} \right) \quad (13)$$

式中  $k$ ——正常数

$\beta$ ——正常数,  $2\beta$  是正弦函数的周期, 影响滑转率切换控制频率

将式(13)代入式(12)得

$$\dot{s} = \frac{\partial F_x(\lambda)}{\partial \lambda} k \operatorname{sgn} \left( \sin \frac{\pi s}{\beta} \right) - \rho \quad (14)$$

将从滑模控制的角度给出式(14)滑模可达条件。

$\sin(\pi s/\beta)$  是以  $s(t)$  为自变量、周期为  $2\beta$  的周期函数。将  $s(t)$  的初始值取值范围定义为  $[\beta, 2\beta]$ , 则

$$\operatorname{sgn} \left( \sin \frac{\pi s(t)}{\beta} \right) = -\operatorname{sgn}(s(t) - \beta) = \operatorname{sgn}(s(t) - 2\beta) \quad (15)$$

(1) 令  $\gamma(t) = s(t) - \beta$ , 则  $\dot{\gamma}(t) = \dot{s}(t)$ , 因此

$$\dot{s}(t) = \dot{\gamma}(t) = -\frac{\partial F_x(\lambda)}{\partial \lambda} k \operatorname{sgn}(\gamma(t)) - \rho \quad (16)$$

由  $\operatorname{sgn}(\gamma(t))\gamma(t) = |\gamma(t)|$  可得

$$\gamma(t)\dot{\gamma}(t) = -\frac{\partial F_x(\lambda)}{\partial \lambda} k \operatorname{sgn}(\gamma(t))\gamma(t) - \rho\gamma(t) \quad (17)$$

由此可得不等式

$$\gamma(t)\dot{\gamma}(t) \leq -\frac{\partial F_x(\lambda)}{\partial \lambda} k |\gamma(t)| + \rho |\gamma(t)| \quad (18)$$

根据李雅普诺夫滑模可达条件

$$\gamma(t)\dot{\gamma}(t) \leq 0 \quad (19)$$

得到

$$\frac{\partial F_x(\lambda)}{\partial \lambda} > \frac{\rho}{k} \quad (20)$$

式(19)的等价形式为

$$\begin{cases} \lim_{\gamma(t) \rightarrow 0^+} \dot{\gamma}(t) < 0 \\ \lim_{\gamma(t) \rightarrow 0^-} \dot{\gamma}(t) > 0 \end{cases} \quad (21)$$

由此可得  $\gamma(t) \rightarrow 0$ , 即  $s(t) \rightarrow \beta$ 。

当  $\partial F_x(\lambda)/\partial \lambda > 0$  时, 可以推导出  $s(t)$  在  $(-\beta, 0)$ ,  $(0, \beta)$ ,  $(\beta, 2\beta)$ , ... 内运动状态和方向如图 3 所示。

(2) 令  $\gamma(t) = s(t) - 2\beta$ , 同理可以证明

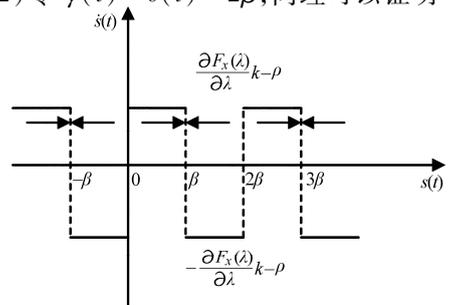


图 3  $\partial F_x(\lambda)/\partial \lambda > 0$  时  $s(t)$  运动状态

Fig. 3 Motion state of  $s(t)$  when  $\partial F_x(\lambda)/\partial \lambda > 0$

$$\frac{\partial F_x(\lambda)}{\partial \lambda} < -\frac{\rho}{k} \quad (22)$$

由式(17)同样可推出  $s(t) \rightarrow 2\beta$ 。

当  $\partial F_x(\lambda)/\partial \lambda < 0$  时,  $s(t)$  在  $(-\beta, 0), (0, \beta), (\beta, 2\beta), \dots$  内运动状态和方向如图4所示。

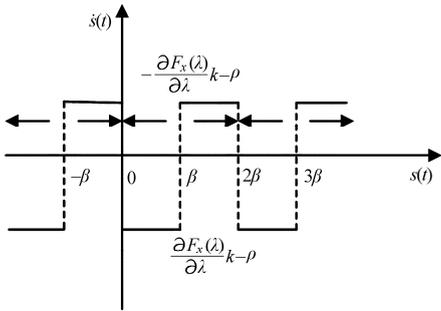


图4  $\partial F_x(\lambda)/\partial \lambda < 0$  时  $s(t)$  运动状态

Fig.4 Motion state of  $s(t)$  when  $\partial F_x(\lambda)/\partial \lambda < 0$

由(1)、(2)证明得到式(14)滑模可达条件为

$$\left| \frac{\partial F_x(\lambda)}{\partial \lambda} \right| > \frac{\rho}{k} \quad (23)$$

以上分析表明  $s(t)$  在任意初始条件下, 均能收敛至  $k\beta (k=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$ ,  $k\beta$  即一系列滑模面, 它保证了任意初始值条件下滑模可达性。

$$s = F_x(\lambda) - \rho t \quad (24)$$

$$\dot{F}_x = \rho \quad (25)$$

汽车驱动时, 由式(25)可知,  $F_x$  以斜率  $\rho$  不断增大, 直到追踪到驱动力的极值。  $\partial F_x(\lambda)/\partial \lambda$  代表驱动力-滑转率曲线的斜率, 当该值大于  $\rho/k$  时, 驱动力一直增大接近驱动力-滑转率的极大值点, 直到式(23)不满足时停止搜索。驱动力搜索过程如图5所示。

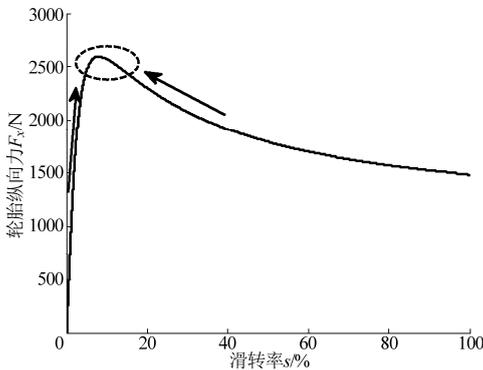


图5 滑模极值搜索控制搜索过程

Fig.5 Searching process of motion state of extremum seeking control with sliding mode

### 2.3 驱动力矩计算

由式(5)得

$$\dot{w}_{rj} = \frac{T_{trj} - F_{x rj} R}{I_{wr}} \quad (26)$$

将式(7)对时间求导数得

$$\dot{\lambda}_j = \frac{1}{w} \left[ (1 - \lambda_j) \frac{T_{trj} - F_{x rj} R}{I_{wr}} - \frac{F_{x r} - F_{x f} - F_w}{RM} \right] \quad (27)$$

其中  $F_{x f} = F_{x fl} + F_{x fr}$   $F_{x r} = F_{x rl} + F_{x rr}$

联立式(13)和式(27)得驱动力矩

$$T_{trj} = F_{x rj} R + \frac{I_{wr} F_{sum}}{RM(1 - \lambda_j)} + \frac{I_{wr} k w_{rj} \operatorname{sgn} \left( \sin \frac{\pi s_j}{\beta} \right)}{1 - \lambda_j} \quad (28)$$

其中  $F_{sum} = F_{x rl} + F_{x rr} - (F_{x fl} + F_{x fr}) - F_w$

ASR滑模极值搜索控制策略如图6所示。

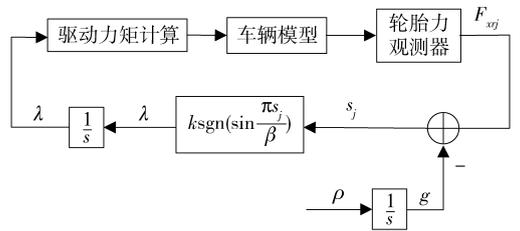


图6 ASR滑模极值搜索控制策略

Fig.6 Extremum seeking control using sliding mode of ASR

### 3 仿真试验

以 HFC6820 型客车为研究对象, 根据前文所述的数学模型, 在 Matlab/Simulink 软件中建立 ASR 系统仿真模型, 所使用的主要技术参数如表1所示。

表1 HFC6820型客车技术参数

Tab.1 Technology parameters of HFC bus

参数	数值
整车质量 $M/\text{kg}$	8 525
车辆质心高度 $H/\text{m}$	1.29
车辆前轴到质心距离 $a/\text{m}$	1.143
车辆后轴到质心距离 $b/\text{m}$	2.857
重力加速度 $g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8
轮胎半径 $R/\text{m}$	0.7
从动轮转动惯量 $I_{wf}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	7.84
驱动轮转动惯量 $I_{wr}/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	9.22
滚动阻力系数 $f$	0.007 6

由于汽车在低附着路面行驶具有代表意义, 所以仿真工况设定为车辆在低附着路面 ( $\varphi_{xm} = 0.1, \varphi_{xg} = 0.07$ ) 上原地起步加速行驶, 驱动车轮的滑转率如图7所示。由图7可见, 在驱动过程中没有施加防滑控制时, 驱动轮滑转率很大; 用门限值控制能达到减轻滑转的目的, 但控制反应时间较长, 稳定值在最优滑转率范围波动, 且最优滑转率时效性较差, 减弱控制效果; 采用滑模极值搜索控制, 车辆驱动过程中最优滑转率进行实时自动搜索, 0.3 s左右时即可搜索到达最优值, 体现了此控制算法反应迅速、控制有效的特点。

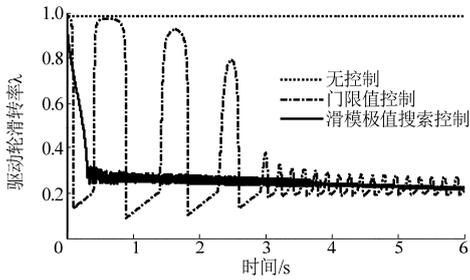


图 7 驱动轮滑转率变化曲线

Fig. 7 Changes of driving tire slip rate with time

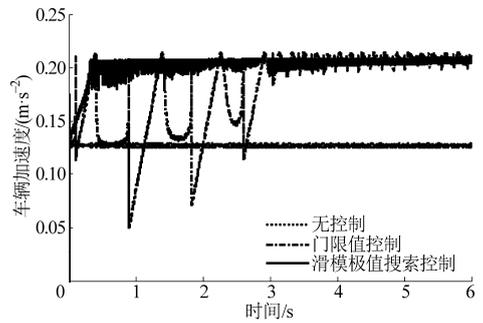


图 9 车辆加速度变化曲线

Fig. 9 Changes of car's acceleration with time

轮胎与路面间附着系数仿真结果如图 8 所示。由图 7、8 可见,当驱动轮滑转率达到最优值时,驱动轮与路面间的附着系数同时也达到了最佳附着系数,从而能为汽车驱动提供最大的驱动力。

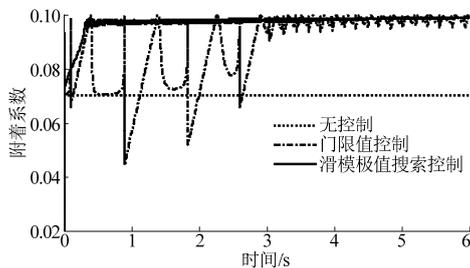


图 8 附着系数变化曲线

Fig. 8 Changes of adhesion coefficient with time

汽车的加速度如图 9 所示,采用滑模极值搜索控制和门限值控制都能提高车辆动力性,但是滑模

极值搜索算法反应更快,而且不需要设置最优滑转率,控制效果更明显。

#### 4 结论

(1)对滑模极值搜索算法的滑模极值可达条件进行了理论推导,滑模极值算法具有一系列滑模面,根据此特点可以保证车辆在不同初始状态行驶条件下都可以自动搜索达到最优值,使系统具有较强的鲁棒性。

(2)在 Matlab/Simulink 中建立了车辆驱动模型,利用滑模极值搜索算法制定驱动防滑控制策略。仿真结果表明,与门限值控制方法相比,采用滑模极值搜索算法的驱动防滑控制策略能够快速自动搜索达到最优滑转率。

#### 参 考 文 献

- Borrelli F, Bemporad A, Fodor M, et al. A hybrid approach to traction control [J]. Hybrid Systems; Computation and Control, 2001: 162 - 174.
- Li Q, Beyer K W, Zheng Q. A model-based brake pressure estimation strategy for traction control system [C]. SAE Paper 2001-01-0595, 2001.
- Song J B, Byun K S. Throttle actuator control system for vehicle traction control [J]. Mechatronics, 1999, 9(5): 477 - 495.
- Park J H, Kim C Y. Wheel slip control in traction control system for vehicle stability [J]. Vehicle System Dynamics, 1999, 31(4): 263 - 278.
- 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, 2006, 36(4): 514 - 517. Zhang Jiakai, Li Kai, Li Jing, et al. Control methods for automobile traction control system [J]. Journal of Jilin University, 2006, 36(4): 514 - 517. (in Chinese)
- 李发均, 王亚军, 董雅丽, 等. 基于 MATLAB 的 ASR 模糊控制仿真研究 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31(11): 102 - 131. Li Fajun, Wang Yajun, Dong Yali, et al. Simulation research of fuzzy logic control for ASR based on Matlab [J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(11): 102 - 131. (in Chinese)
- Li H Z, Li L, He L, et al. Pid plus fuzzy logic method for torque control in traction control system [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(3): 441 - 450.
- 蒋振江, 陈旭, 李大伟. 基于路面识别的四轮驱动电动汽车驱动防滑控制 [J]. 重庆理工大学学报, 2012, 26(7): 17 - 21. Jiang Zhenjiang, Chen Xu, Li Dawei. Acceleration slip regulation of four-wheel drive electric vehicle based on road automatic identification [J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2012, 26(7): 17 - 21. (in Chinese)
- Rajesh Rajamani, Gridsada Phanomchoeng, Damrongrit Piyabongkarn, et al. Algorithms for real-time estimation of individual wheel tire-road friction coefficients [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(6): 1183 - 1195.
- Michihiro Yamashita, Tadashi Soeda. Development of a new traction control method to suppress wheel-slip of electric locomotives [C]//IEEE/Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, 2012: 1 - 6.
- Jurgen Gerstenmeler. Traction control (ASR)—an extension of the anti-lock braking system (ABS) [C]. SAE Paper 861033, 1986.

- characteristic estimation [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, 26(12): 3893–3901.
- 7 赵迎生, 赵又群, 魏超. 汽车联合制动系统制动力分配系数优化[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(10): 14–17.  
Zhao Yingsheng, Zhao Youqun, Wei Chao. Optimization of braking force distribution parameter of united brake system of automobile [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(10): 14–17. (in Chinese)
- 8 范小彬, 夏群生. 矿用自卸车制动性能试验和仿真研究[J]. *煤矿机械*, 2009, 30(4): 33–36.  
Fan Xiaobin, Xia Qunsheng. Mine dump truck braking performance test and simulation [J]. *Coal Mine Machinery*, 2009, 30(4): 33–36. (in Chinese)
- 9 卞荣花, 王秀梅, 张红党, 等. 汽车制动不同步控制方法的研究[J]. *农业装备与车辆工程*, 2011(1): 17–25.  
Bian Ronghua, Wang Xiumei, Zhang Hongdang, et al. Study of not synchronized control method during car's brake process [J]. *Agricultural Equipment & Vehicle Engineering*, 2011(1): 17–25. (in Chinese)
- 10 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 11 姚树军, 董志明, 韩曙光. 矿用自卸车制动性能研究[J]. *机械制造*, 2011, 49(6): 25–27.
- 12 郭锐, 唱荣蕾, 赵静一, 等. 液压制动系统蓄能器充液特性研究[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(7): 14–17.  
Guo Rui, Chang Ronglei, Zhao Jingyi, et al. The research of the accumulator charging characteristics in the hydraulic brake system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(7): 14–17. (in Chinese)
- 13 陈晋市, 刘昕晖, 王同建, 等. 全液压制动系统的仿真分析与试验[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2012, 42(2): 360–364.  
Chen Jinshi, Liu Xinhui, Wang Tongjian, et al. Performance simulation and test of full hydraulic braking system [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2012, 42(2): 360–364. (in Chinese)
- 14 胡江平. 超大型矿用自卸车全液压湿式制动系统特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- 15 Chenvisuwat T, Park S H, Kitagawa A. Poppet-type brake pressure control valve for the hydraulic brake system of railway rolling stock [J]. *Proc. IMech E, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2004, 218(8): 655–665.
- 16 林慕义, 宁晓斌. 工程车辆全动力制动系统[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- 17 林慕义, 孙大刚, 张文明. 全动力制动系统蓄能器充液阀的稳健设计[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(8): 22–25.  
Lin Muyi, Sun Dagang, Zhang Wenming. Robust design of accumulator charging valve in full power braking system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(8): 22–25. (in Chinese)
- 18 姜勇. 湿式多盘制动器时变不确定性优化设计方法[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(9): 52–56.  
Jiang Yong. Optimal design method with time-varying uncertainty for wet multi-disc brakes [J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(9): 52–56. (in Chinese)
- 19 张鹏, 崔立林, 何乐, 等. 液压盘式制动器模型试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(6): 24–28.  
Zhang Peng, Cui Lilin, He Le, et al. Experiment on hydraulic disk brake model [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(6): 24–28. (in Chinese)
- 20 Hakan Koylu, Ali Cinar. Experimental design of control strategy based on brake pressure changes on wet and slippery surfaces of rough road for variable damper setting during braking with activated anti-lock brake system [J]. *Proc. IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2012, 226(10): 1303–1324.

~~~~~

(上接第 311 页)

- 12 Badih Jawad, Nabil Hachem, Sasa Cizmici, et al. Traction control applications in engine control [C]. *SAE Paper 2000-01-3464*, 2000.
- 13 Hori Y. Future vehicle driven by electricity and control research on four-wheel-motored “UOT Electric March II” [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(5): 954–962.
- 14 Zou Guangcai, Luo Yugong, Li Keqiang, et al. Traction slip ratio control based on fuzzy DSMC for independent AWD EV [J]. *Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics*, 2008, 1(3): 293–304.
- 15 郝茹茹, 赵祥模, 周洲. 整车防抱死制动系统台架检测与道路对比试验[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(4): 21–26.  
Hao Ruru, Zhao Xiangmo, Zhou Zhou. Bench detection and road comparison test for auto anti-lock braking system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(4): 21–26. (in Chinese)
- 16 刘学军, 何仁. 电磁-液压复合防抱死制动系统滑模控制[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(5): 1–7.  
Liu Xuejun, He Ren. Sliding mode control in electromagnetic-hydraulic hybrid anti-lock braking system [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 1–7. (in Chinese)
- 17 刘志新, 张大卫, 李幼德. 基于滑转率的四轮驱动汽车防滑模糊控制仿真[J]. *农业机械学报*, 2005, 36(12): 21–24.  
Liu Zhixin, Zhang Dawei, Li Youde. Research on acceleration slip regulation system for four-wheel drive vehicle using fuzzy control method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(12): 21–24. (in Chinese)
- 18 Brach M. Adhesion, hysteresis and the peak longitudinal tire force [J]. *PE Brach Engineering*, 2006: 1–10.
- 19 Zhang C, Ordóñez R. Extremum-seeking control and applications [M]. London: Springer-Verlag, 2012.
- 20 Dinçmen E, üüvenç B A, carman T. Extremum-seeking control of ABS braking in road vehicles with lateral force improvement [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2014, 22(1): 230–237.