

基于 EMB 系统的整车 ABS 滑模变结构控制

周淑文¹, 陈庆明¹, 孙大明²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 天津天海同步科技有限公司, 天津 301600)

摘 要: 相对于传统的液压式或气压式制动系统, 电子机械式制动系统因具有结构简单、响应时间短以及制动效率高等优点正受到越来越高的重视。在设计出一套电子机械式制动装置模型的基础上, 提出了一种适合安装有电子机械式制动系统的整车制动防抱死滑模变结构控制器。通过动力学仿真软件 Carsim 建立整车仿真模型, 并与 Simulink 进行联合控制仿真。将仿真结果与传统的基于逻辑门限值控制的液压制动器制动性能进行比较, 验证了滑模变结构控制方法在安装电子机械式制动系统的整车制动防抱死系统上的有效性及制动性能的优越性。

关键词: 电子机械式制动; 制动防抱死系统; 滑模控制; 滑移率; 虚拟样机

中图分类号: TP 391.9 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)07-0994-04

Variable Structure Control with Sliding Mode for ABS of Vehicle Based on EMB System

ZHOU Shu-wen¹, CHEN Qing-ming¹, SUN Da-ming²

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Tianjin Tanhas Technology Co., Ltd., Tianjin 301600, China. Corresponding author: ZHOU Shu-wen, E-mail: shwzhou@mail.neu.edu.cn)

Abstract: Compared with the traditional hydraulic brake system or the pneumatic braking system, the electromechanical brake is being paid increasing attention due to its simple structure, short response time and high braking efficiency. Therefore, based on the as-designed electromechanical brake device, a variable structure controller with sliding mode for anti-lock braking system (ABS) was proposed. A vehicle model which was built in the Carsim and control system was designed in Simulink. Then, a co-simulation was conducted between the Carsim and the Simulink. By comparing with the braking performance of the traditional hydraulic brake, using the logic threshold method with the electromechanical brake, it was verified that variable structure control with sliding mode method for anti-lock braking system is effective in vehicle equipping with the electromechanical brake system and advanced in braking performance.

Key words: electromechanical brake; ABS; sliding mode control; slip ratio; virtual prototyping

随着社会的不断发展,人们对汽车主动安全性能的关注也越来越高。而衡量汽车主动安全性能的一项重要指标就是汽车的制动性能。电子机械式制动(EMB)系统以电能作为能量来源,由电线传递能量,数据线传递信号,去掉了冗杂的液压管路及液压元件,是汽车制动技术的重要发展方向。因其结构简单、安全可靠以及易于集成其他电控功能模块等优点,逐渐成为汽车制动系统研究

的热点。

汽车制动防抱死系统(ABS)不仅要具有高可靠性和强抗干扰能力,而且要求快速响应。这无疑对控制算法提出了更高要求,而过于复杂的算法将无法快速响应要求。滑模变结构控制作为一种处理非线性系统的综合方法,具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点^[1]。到目前为止,已经有

一些学者将滑模变结构应用于汽车 ABS 的控制中^[2-3]。然而,这些研究主要集中在单轮车辆液压制动或线控制动方面,有关 EMB 系统的整车 ABS 滑模变结构控制方面的研究还未见报道^[4-6]。

相对于单轮车辆 ABS 模型,整车 ABS 模型能够反映轴荷的影响,更接近真实情况。由于整车四轮都安装有 EMB 装置,故可以非常方便地通过电子控制单元(ECU)对四轮进行独立控制。在本文中,将通过 CarSim 软件建立整车仿真模型,并与 Simulink 中的控制模型进行联合仿真分析。通过联合仿真,研究分析本文提出的制动防抱死控制方法。将仿真结果与当前车辆主流安装的基于逻辑门限值控制方法的传统液压制动器制动性能相比较,验证了滑模变结构控制方法在安装有 EMB 系统的整车 ABS 上的有效性及制动性能的优越性。

1 EMB 系统模型

1.1 车辆模型

通过对车轮施加制动力,并获得路面的反作用力,车辆得以减速直至停止。采用经典力学可以对车辆、车轮制动时的受力情况进行分析,如图 1 所示。在图 1 中,忽略了车轮的滚动阻力偶矩、空气阻力以及旋转质量减速时产生的惯性力偶矩。根据达朗贝尔原理,对模型中车体在行驶方向和车轮绕主轴旋转方向两个自由度建立动力学方程,可得简化的车辆动力学方程。

整车方程为

$$m\dot{v} = -F_f; \quad (1)$$

车轮方程为

$$J\dot{\omega} = RF_f - T_b. \quad (2)$$

式中 m 为 1/4 车体质量 ($m = m_v/4 + m_w$, m_v 为簧载质量, m_w 为单个车轮质量); v 为车身速度; F_f 为车轮纵向摩擦力; J 为车轮转动惯量; ω 为车轮角速度; T_b 为制动器制动力矩。车轮纵向摩擦力定义为

$$F_f = \mu F_z. \quad (3)$$

式中 μ 为车轮与路面间的附着系数; F_z 为地面对车轮的法向反作用力。

滑移率是指车轮转动中滑动成分所占的比例,也是反映车轮抱死程度的重要指标。车轮纵向滑移率定义为

$$s = \frac{v - \omega R}{v} \times 100\%. \quad (4)$$

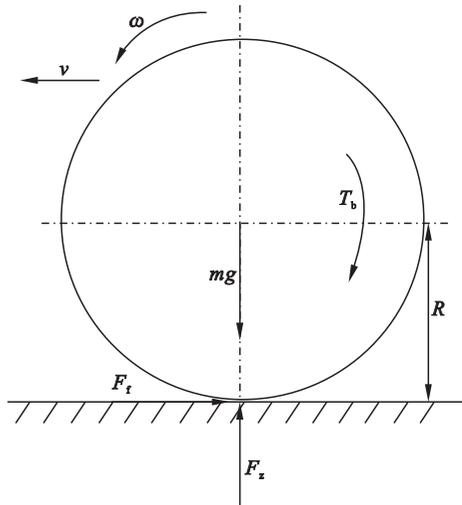


图 1 单轮车辆模型

Fig. 1 The quarter vehicle model

1.2 轮胎模型

为了简化计算,本文采用 Burckhardt 等提出的经验轮胎模型^[7]。该模型中的纵向附着系数可以表示为

$$\mu(\lambda) = c_1(1 - e^{-c_2\lambda}) - c_3\lambda. \quad (5)$$

式中 c_1 c_2 c_3 根据路面状态不同取值不同。

1.3 电子机械执行机构模型

本文采用的电子机械执行机构如图 2 所示,该制动执行机构采用模块化的结构,其中的动力驱动机构采用直流伺服电机,减速增力机构采用两套对称的两级齿轮组,运动转换机构采用滚珠丝杠与螺母相配合进行工作^[8]。

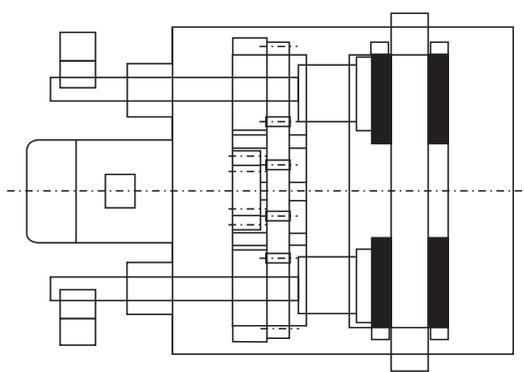


图 2 电子机械制动装置

Fig. 2 Electromechanical brake device

根据电机传动、机械传动模型,可以得到图 2 电子机械制动装置的数学模型^[9]:

$$T_b = k^* I_k - k_p N_m, \quad (6)$$

$$k^* = 9.55 \times 2\pi \times K_c \times i \times \eta_x \times \eta_s \times k_p / p_h. \quad (7)$$

式中 T_b 为电子机械制动装置输出力矩; I_k 为驱动电机连续堵转电流; k_p 为制动器制动因数; N_m 为克服模拟电子踏板弹簧力所需推力; K_c 为反电

动势系数,定义为单位转速下的反电动势; i 为两级齿轮减速机构传动比; η_x 为两级齿轮减速机构的机械效率; η_s 为滚珠丝杠副的传动效率; p_h 为丝杠导程。

2 滑模控制器设计

滑模变结构控制作为一类特殊的非线性控制,它可以根据系统当前的状态有目的地不断变化,迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动。因此,滑模变结构控制器首先需要设计切换函数 s ,以确保滑动模态的存在。

在本文中,假定整车以一定初速度在干沥青路面上紧急制动,而干沥青路面对应的理想滑移率约为 0.2。因此,本文设定理想滑移率 λ_d 为 0.2,以消除跟踪误差为目标,控制系统的滑移率保持在理想滑移率 λ_d 附近。因此,本文选取的切换函数为

$$s = \lambda - \lambda_d. \quad (8)$$

当系统的初始状态位于状态空间的任意位置时,需要设计一种控制律把系统的初始状态点可靠地引入到滑动模态,并保持在其上运动,从而使系统满足滑模变结构控制的到达条件。

而在实际应用中由于机械执行机构、ECU 信号处理以及传输延迟等原因,系统状态点并不是严格在滑模面上运动,而是沿设定的状态作小幅度、高频率的上下运动,从而导致抖振的存在。

为了满足滑模变结构控制的到达条件,减少到达滑模面的时间,同时尽量削弱抖振,本文采用指数趋近律,其数学表达式为

$$\dot{s} = -Ks \operatorname{sgn}(s) - K_1 s. \quad (9)$$

因 $s\dot{s} = -K|s|^2 - K_1 s^2$,且 K, K_1 为正数,故 $s\dot{s} < 0$,满足滑模变结构控制的到达条件。且可保证趋近速度在远离滑模面时大,而在滑模面附近时渐近于很小,从而兼有抖振小及过渡过程时间短的优点。

因 λ_d 取固定常数 0.2,所以对式(9)求导可得

$$\dot{s} = \dot{\lambda} - \dot{\lambda}_d = \dot{\lambda}. \quad (10)$$

对式(4)求导可得

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{v} [(1-\lambda)\dot{v} - \omega R]. \quad (11)$$

由式(1)整理可得

$$\dot{v} = -g\mu. \quad (12)$$

把式(6)代入式(2)整理可得

$$\dot{\omega} = b_1\mu - b_2 I_k + b_3. \quad (13)$$

式中 $b_1 = RF_z/J$, $b_2 = k^*/J$, $b_3 = k_p N_m/J$ 。

把式(12)和式(13)代入式(11)中整理可得

$$\dot{\lambda} = \frac{1}{v} \{ -(1-\lambda)g + b_1 R \} \mu + b_2 I_k R - b_3 R. \quad (14)$$

由式(10)、式(11)和式(14)可推得滑模变结构控制的控制律为

$$I_k = (d_1\mu + d_2)/d_3. \quad (15)$$

式中 $d_1 = (1-\lambda)g + b_1 R$; $d_2 = b_3 R - K_1 s v - K v \operatorname{sgn}(s)$; $d_3 = b_2 R$ 。

3 仿真分析

本文在 Carsim 中建立了电子式机械制动整车仿真模型,在 Simulink 中建立制动防抱死滑模变结构控制,并进行联合仿真。根据仿真结果,不断完善控制算法。之后将仿真结果与传统的基于逻辑门限值控制方法的液压制动器整车 ABS 仿真结果相比较,验证了滑模变结构控制方法在安装有 EMB 系统的整车 ABS 上的有效性及制动性能的优越性。仿真主要参数如表 1 所示,仿真模型如图 3 所示。

表 1 仿真所用主要参数

Table 1 The main parameters of simulation used

参数名称	符号	数值
簧载质量	m_v/kg	1 111
单个车轮质量	m_w/kg	30
单轮转动惯量	$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.87
重力加速度	$g/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8
车轮滚动半径	R/m	0.304
制动初始速度	$v_0/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	65
ABS 失效时速	$v_1/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	10

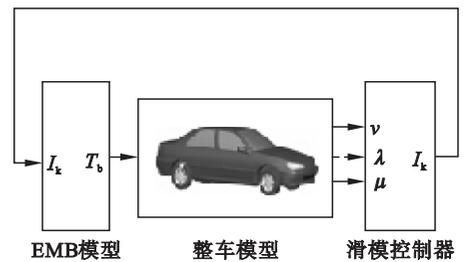


图 3 基于 EMB 系统整车 ABS 仿真模型

Fig. 3 Simulation model of vehicle ABS based on EMB

图 4a 为安装有 EMB 装置汽车,在采用滑模变结构控制下,车身、车轮速度变化曲线。图 4b 为安装有传统液压制动器汽车,在应用逻辑门限值控制下,车身、车轮速度变化曲线。对比图 4a 和图 4b 可以很容易发现,在干沥青路面上,图 4a 比图 4b 整车制动时间要短,制动时间减少约 18%,这对降低汽车的交通事故率具有重要意义。同时,从图 4b 中还可以看出,在传统的液压制动系统工作

时,其车轮速度波动较大,这对制动效能的恒定性有较大影响。

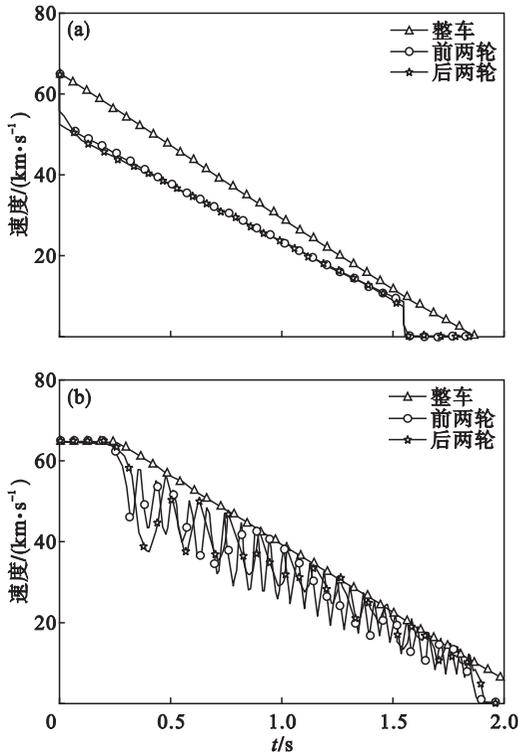


图 4 整车车身车轮速度曲线

Fig. 4 The speeds curves of vehicle and wheels

(a)—基于 EMB ;(b)—基于液压制动器。

对比图 5a、5b 可以发现,在干沥青路面上,安

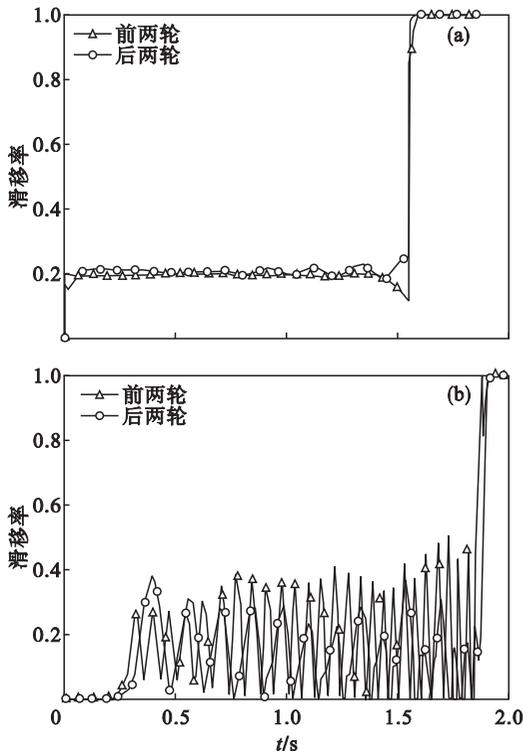


图 5 整车四轮滑移率曲线

Fig. 5 The slip ratios of four wheels

(a)—基于 EMB ;(b)—基于液压制动器。

装了 EMB 装置,车轮可以很好地跟踪理想滑移率 0.2,且抖振很小。故安装有 EMB 装置汽车不仅可以更好地利用纵向附着系数,减少制动距离,同时可以获得较大的侧向附着系数,提高紧急制动时的操纵稳定性。

4 结 论

1) 设计了一套电子机械式制动装置模型,采用滑模变结构控制对装有 EMB 的整车 ABS 进行控制。

2) 采用汽车动力学分析软件 CarSim 与 Simulink 进行制动防抱死联合仿真分析,验证了滑模变结构控制方法在安装有 EMB 装置的整车 ABS 上的有效性及制动性能的优越性。

参考文献：

[1] Sabanovic A. Variable structure systems with sliding modes in motion control—a survey [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2011, 7(2) : 212 – 223.

[2] Delprat S, Ferreira L A. High order sliding mode control for hybrid vehicle stability[J]. *International Journal of Systems Science* 2014, 45(5) : 1202 – 1212.

[3] Utkin V I, Chang H C. Sliding mode control on electro-mechanical systems [J]. *Mathematical Problems in Engineering* 2002, 8(4/5) : 451 – 473.

[4] Hsu C F, Kuo T C. Adaptive exponential-reaching sliding-mode control for antilock braking systems[J]. *Nonlinear Dynamics* 2014, 77(3) : 993 – 1010.

[5] Ganji B, Kouzani A Z, Khoo S Y, et al. Adaptive cruise control of a HEV using sliding mode control[J]. *Expert Systems with Applications* 2014, 41(2) : 607 – 615.

[6] Kawabe T, Nakazawa M, Notsu I, et al. A sliding mode controller for wheel slip ratio control system[J]. *Vehicle System Dynamics* 1997, 27(5/6) : 393 – 408.

[7] Olson B J, Shaw S W, Stepan G. Nonlinear dynamics of vehicle traction[J]. *Vehicle System Dynamics* 2003, 40(6) : 377 – 399.

[8] 周淑文, 陈庆明. 一种电子机械式制动装置. 201410664221. 9 [P]. 2015 – 03 – 04. (Zhou Shu-wen, Chen Qing-ming. A kind of electromechanical braking device : 201410664221. 9 [P]. 2015 – 03 – 04.)

[9] 沈沉, 王军, 林逸. 电子机械制动系统制动执行器建模与试验[J]. *农业机械学报* 2007, 38(8) : 30 – 33. (Shen Chen, Wang Jun, Lin Yi. Study on brake actuator of electromechanical braking system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(8) : 30 – 33.)