

基于滑模变结构的 ABS 制动系统设计

曹 勇

(广东省技师学院 教务处,广东 惠州 516100)

摘要:针对汽车制动的特点,分析了汽车制动过程的几个主要阶段,探讨了影响汽车制动的主要因素,建立了轮胎旋转动力学模型和半车制动模型,提出了滑模变结构的防抱死制动系统,并采用基于指数趋近律的方法进行制动。仿真实验表明,能够提高汽车的制动性能、缩短抱死刹车距离,有效抑制抖动现象。

关键词:轮胎建模;防抱死制动系统;滑模控制器;仿真

中图分类号:U463.5 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2017)03-0026-04

汽车制动系统是十分重要的设备。当汽车在行驶过程中遇到意外情况时,制动系统立即启动液压、电子等机构,将汽车迅速制动。由于汽车刹车时,轮胎摩擦存在较强的非线性,制动时间往往存在一定的滞后;另外使用传统方法进行制动时,如果发生车轮抱死等意外情况,制动系统很难及时作出反应。

汽车防抱死制动系统(ABS)是一种先进的控制技术。制动时,车轮不会抱死,还能保持良好的附着力和转向性能,具有较好的制动稳定性。通过调节 ABS 的系统参数,可以有效提高制动性能。目前 ABS 的主要控制方法有:①逻辑门限值控制;②最优控制;③模糊控制;④滑模变结构控制等等。其中逻辑门限值控制方法中的门限值需要通过大量试验来确定,控制性能不稳定;最优控制法的控制质量主要取决于模型的精确程度;模糊控制方法主要基于知识和经验的积累,建立控制规则比较困难;滑模变结构控制具有较好的鲁棒性,能较好地解决非线性问题。因此,本文采用这种变结构的控制系统,既大幅度降低了刹车距离,又通过优化安全系数,提高了车辆的安全性,降低了车轮的危险性,有效抑制了制动过程中出现的抖动现象,取得良好的制动效果。

1 制定系统分析

汽车制动通常分为 3 个阶段:第 1 阶段属于稳态过程,汽车速度基本不变,制动系统实际还没有起作用,即制动的反应滞后;第 2 阶段是一个过渡过程,制动系统开始起作用,制动力不断增大,车轮开始边滚边滑,直至最后被抱死,这一过程决定着汽车的制动性能和系统稳定性;第 3 阶段为车轮从抱死拖滑至汽车停止这一过程,此时制动力基本不变。

汽车在紧急制动时,车轮的运动状态主要受制于车轮与路面的摩擦系数。制动时如果前车轮被抱死,摩擦系数降低,汽车容易失去抵抗侧向运动的能力;如果后轮被抱死,制动时方向稳定性变差,汽车容易出现侧滑等现象。

ABS 汽车制动液压系统原理如图 1 所示,系统通过安装在车轮、车身上的各速度传感器采集相应的转速信号,再通过电子控制模块(ECU)计算汽车减速度及车轮的滑移率;通过控制增压阀、减压阀等液压单元,实时调节制动压力;在紧急制动时,只要发现前车轮或后车轮被抱死,ECU 立即发出指令,控制压力调节器和电动泵的转速,使车轮能够转动;即使在 ABS 不起作用时,制动系

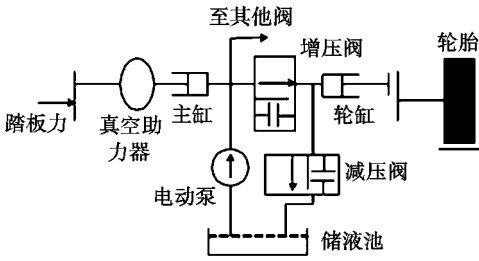


图1 制动液压原理图
Fig.1 Brake hydraulic principle

统仍可调节后轮制动力,保证后轮不会比前轮先抱死^[1]。

在汽车制动时,ABS 通过控制车轮的运动状态,使车轮的滑移率保持在 15% ~ 20%,这样可使制动时纵向附着力和制动力最大,从而缩短制动距离;同时由于制动时横向附着系数较大,使制动系统保持一定的横向附着力,从而克服了侧滑情况的发生,使汽车具有良好的转向能力。

2 轮胎与制动模型的建立

2.1 轮胎旋转运动模型

以车轮为建模对象,设车轮编号为 i ,受力分析时忽略车轮滚动阻力偶矩和惯性阻力偶矩。图2所示为汽车前进方向的受力情况,设 F_{zi} 为地面法向反力、 F_{bi} 为地面纵向制动力、 W_i 为垂向载荷、 V 为车轮运行速度。

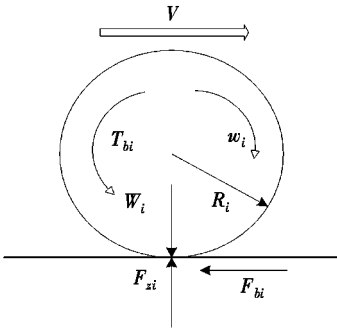


图2 轮胎前进时受力图
Fig.2 Tire forward force diagram

设车轮旋转角速度为 w_i ,受到制动力矩 T_{bi} 后,运动方程为:

$$J_i \dot{w}_i = F_{bi} R_i - T_{bi} \tag{1}$$

式中: J_i 为轮 i 的转动惯量; w_i 为轮 i 的角加速度; R_i 为第 i 个车轮的半径; T_{bi} 为第 i 个车轮

的制动力矩; F_{bi} 为地面纵向制动力^[2]。

2.2 半车制动模型

本文采用半车制动系统,控制方法采用基于趋近律的滑模变结构,这种方法能有效削弱系统抖动^[3]。半车制动模型如图3所示:

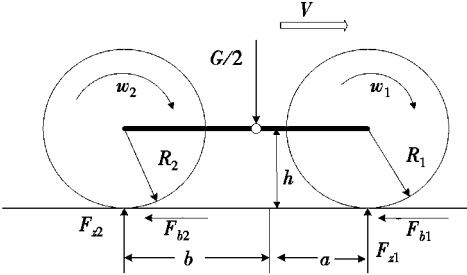


图3 半车制动模型
Fig.3 Semi-vehicle brake model

根据图3所示的受力情况,对半车而言,沿行驶方向的汽车运动方程为:

$$M \frac{dv}{dt} = - (F_{b1} + F_{b2}) \tag{2}$$

式中: M 为半车质量; dv/dt 为减速度(纵向)。

根据2.1节分析可知,制动力与地面法向反力和滑移率存在一定的函数关系。汽车制动过程中,由于垂直载荷在前后车轮轴转移产生的影响,地面法向反力将会发生变化。设车轮 i 处的地面法向反力为

$$F_{zi} = F_{zi0} \pm \Delta F_{zi} \tag{3}$$

式中: F_{zi0} 为汽车静止时,车轮处的垂向载荷(静态载荷); ΔF_{zi} 为动载荷,对于半车制动模型, ΔF_{zi} 主要由制动减速度和车身的前后俯仰运动引起。

如果忽略悬架对制动的影响,车轮垂向载荷变化主要受制动减速度的影响,此时前、后车轮处的垂直载荷为:

$$F_{z1} = Mgb/L + M \frac{dv}{dt} h_g/L \tag{4}$$

$$F_{z2} = Mga/L - M \frac{dv}{dt} h_g/L \tag{5}$$

式中: b 为汽车质心至后轴中心线的距离, a 为汽车质心至前轴中心线的距离, L 为 b 、 a 轴距之和, h_g 为汽车质心高度。

如果考虑悬架对制动的影响,则需要考虑车身的俯仰运动对车轮动载荷的影响,此时前、后车轮处的动载荷为:

$$\Delta F_z = (m \frac{dv}{dt} h_g + c_\theta \theta + m_1 h_1 \frac{dv}{dt} + m_2 h_2 \frac{dv}{dt}) / (2L) \tag{6}$$

式中, $c_\theta = 2(a^2 k_1 + b^2 k_2)$ 为俯仰角刚度; m 为簧载质量、 m_1 为前非簧载质量、 m_2 为后非簧载质量; h_1 为前非簧载质心高度、 h_2 为后非簧载质心高度; θ 为俯仰角; k_1 、 k_2 分别为前、后悬架刚度;

3 ABS 滑模控制器

变结构控制(Variable Structure Control, VSC)的系统结构一般不固定,控制时可以根据系统偏差及其各阶导数等不断变化,具有快速响应、鲁棒性好、无需系统在线辨识等优点。

3.1 ABS 滑模控制器的设计

车轮滑移率 λ_i 定义为:

$$\lambda_i = \frac{v - w_i R_i}{v} \tag{7}$$

式中: V 为车轮运行速度, R_i 为轮胎半径。

对式(7)求导数:

$$\dot{\lambda}_i = \frac{\dot{v}}{v} (1 - \lambda_i) - \frac{w_i}{v} R_i \tag{8}$$

定义切换函数 s_i :

$$s_i = \lambda_i - \lambda_d \tag{9}$$

对于 ABS 设计,其设计目标是使系统的状态 $(\lambda, \dot{\lambda}_i)$ 趋向于 $(\lambda_d, \dot{\lambda}_d)$ 。

把式(1)、(2)、(8)式代入(9)式,可得:

$$\dot{\lambda}_i = -\frac{1}{v} \left[\frac{1}{m_i} (1 - \lambda_i) + \frac{R_i^2}{J_i} \right] F_{bi} + \frac{1}{v} \frac{R_i}{J_i} T_{bi} \tag{10}$$

式中: m_i 为整车质量, J_i 为目标性能指数。

采用指数趋近率的方法,有:

$$\dot{s}_i = -\varepsilon_i \operatorname{sgn} s_i - k_i s_i \tag{11}$$

式中: k_i 和 ε_i 需选取的指数。

对式(9)求导,联合式(10)、式(11),即可求得所需要的控制律^[4]

3.2 仿真结果与分析

取某型号的车,在水泥路面进行仿真试验,其前、后制动轮处 ABS 控制器的参数分别为 $k_1 = 300$ 、 $\varepsilon_1 = 0.005$ 和 $k_2 = 150$ 、 $\varepsilon_2 = 0.5$,仿真结果如图 4~图 6 中实线所示。

从图 4 可以看出,对装有 ABS 系统的汽车在采用滑模控制时,能很快到达最大制动减速度,且在制动完成汽车停止的过程中,制动减速度基本

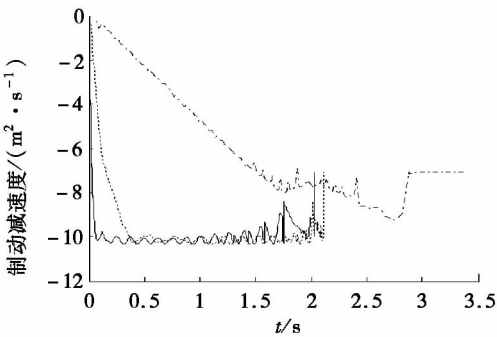


图 4 减速度曲线
Fig. 4 Deceleration curve

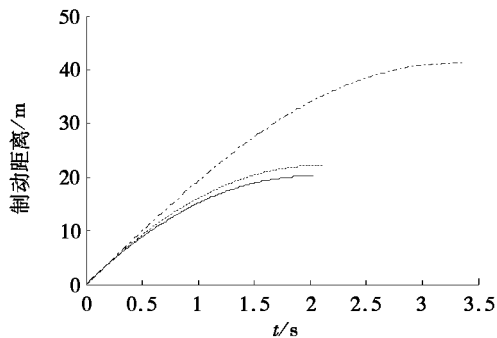


图 5 制动距离曲线
Fig. 5 Braking distance curve

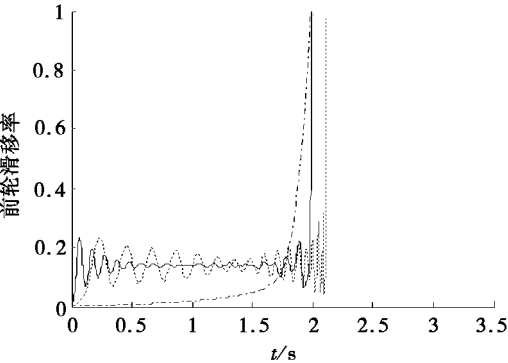


图 6 前轮滑移率曲线
Fig. 6 The front wheel slip rate curve

保持在最大值附近;由图 5 可知,在 ABS 采用滑模变结构控制时,制动距离最短、制动时间最少、常规制动情况最差;从图 6 可以看出,对于前轮来说,在防抱死制动过程中,车轮能很快到达最优滑移率,并能较稳定地保持在最优值附近,一直到车辆制动停止。

表 1 给出了滑模变结构控制的防抱死制动与常规制动情况下的几个主要性能指标。

由表 1 可以看出,汽车从同样的行驶速度进行制动,采用滑模变结构控制的汽车能在最短的时间内以最短的距离完成制动。从制动距离看,采用滑模控制比常规制动的汽车要缩短一半以上。通过对制动减速度和滑移率在方差、标准差及均值上的数值对比,也能明显看出,采用滑模变结构控制的 ABS 系统对汽车的制动性能有较大的改善。

4 结束语

汽车在作直线制动时,如果不考虑转向的情况,半车制动模型能较好地表征汽车的制动安全性能。本文以半车为研究对象,设计了一种新型的滑模变结构控制器,较好地解决了对象的非线性问题,同时,系统采用指数趋近率的方法较好地

表 1 制动系统仿真结果对比 Table 1 Comparison of braking system simulation results			
性能参数		滑模控制	未加控制制动
制动时间/s 制动距离/m	最大值	2.025 8	3.375 5
		20.202 0	41.326 9
制动减速 度/(m ² ·s ⁻¹)	方 差	1.587 8	7.199 0
	标准差	1.260 1	2.683 1
	均 值	-9.432 0	-5.465 5
后轮滑移率	方 差	0.007 8	0.023 2
	标准差	0.080 3	0.152 4
	均 值	0.100 2	0.049 9

削弱了“抖动”现象;通过与常规制动进行仿真对比研究,结果表明滑模变结构控制下的 ABS 制动系统,制动时间最少、制动距离最短,避免了制动过程中出现的甩尾现象,确保汽车安全制动。

参考文献:

[1] 刘兴德,王莉,徐峰林,等. 汽车制动器主缸的 ABS 疲劳性能测试的实现[J]. 机械设计与制造,2007(9):114-115.
[2] 刘颖. 汽车制动优化控制方法研究[J]. 计算机仿真,2012,29(8):340-343.
[3] PARK J, OH J, PARK Y, et al. Optimal power distribution strategy for series-parallel hybrid electric vehicles[C]//The International Forum on Strategic Technology. IEEE, 2007:37-42..
[4] CAUX S, HANKACHE W, FADEL M, et al. On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010,35(5):2 134-2 143.

Design of ABS Braking System with Sliding
Mode Variable Structure

CAO Yong

(Dean's Office, Guangdong Province Technician College, Huizhou Guangdong 516100, China)

Abstract: According to the characteristics of the vehicle brake, the main stages of automobile brake are analyzed, the main factors of affecting vehicle brake are discussed, the dynamic model of tire rotation and half vehicle braking model are established. An anti lock braking system with sliding mode variable structure is proposed, and a braking law based on exponential approach law is adopted. The simulation results show that the method can improve the braking performance of the vehicle, shorten the braking distance and effectively suppress the jitter phenomenon.

Keywords: tire modeling; anti-lock braking system; sliding mode controller; simulation

(责任编辑:李华云)