

基于横摆角速度预测的制动防抱死系统 单轮修正控制策略

玄圣夷¹, 白海英², 左文杰², 宋传学¹

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要: 针对制动防抱死系统(ABS)系统在对开路面的制动稳定性展开研究, 基于 Kalman 滤波技术构建了横摆角速度预测器, 并基于此实现了单轮修正控制策略, 在充分保证 ABS 系统在对开路面下制动的方向稳定性的前提下, 有效缩短了制动距离。利用硬件在环实验台, 对控制策略进行了验证, 结果表明设计的控制策略可以充分提高 ABS 的性能。

关键词: 汽车工程; 制动防抱死系统; 单轮修正控制; 横摆角速度预测

中图分类号: U461.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2012)02-0261-05

Single wheel correcting control strategy of ABS based on yaw rate prediction

XUAN Sheng-yi¹, BAI Hai-ying², ZUO Wen-jie², SONG Chuan-xue¹

(1. College of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Mechanical Science and Technology, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: The braking stability of the anti-locked braking system(ABS) on the split road was studied. A yaw rate predictor was developed based on the Kalman filtering technique, and thereby the single wheel correcting control strategy was realized. The braking distance was shortened under the prerequisite of ensuring the braking direction stability of ABS on the split road. The proposed control strategy was tested in a hardware-in-the-loop test rig and the result showed that it can enhance the ABS performance significantly.

Key words: vehicle engineering; anti-locked braking system(ABS); single wheel correcting control; yaw prediction

制动防抱死系统(Anti-locked braking system, ABS)经历 20 多年的不断发展完善, 已经成为绝大多数车辆的标准配置, 其性能得到了世界各大汽车研究机构和生产厂商的广泛认可。随着研究的不断深入, 控制品质的提升已经成为了 ABS 研究的重要方向之一。张鹏等^[1]建立的 8

自由度整车模型研究了在转弯制动工况下 ABS 的控制效果; 郭建等^[2-3]通过对驾驶员意图的判别, 动态调节汽车内外侧车轮的制动力, 实现车轮侧纵向力的协调分配, 在一定程度上提高了汽车在制动过程中的稳定性; Metz 等^[4]研究了在极限单移线工况下 ABS 的控制品质; Yigit 等^[5]应用

收稿日期: 2011-05-20.

基金项目: 吉林大学学科前沿与交叉学科创新项目(450060445092); 吉林大学青年教师创新项目(450060441099); 吉林省科技发展计划项目(201101030); 中国博士后科学基金项目(801110290414).

作者简介: 玄圣夷(1982-), 女, 讲师, 博士. 研究方向: 汽车系统动力学与控制. E-mail: sprit@126.com

通信作者: 白海英(1955-), 女, 副教授. 研究方向: 工程图学及机械设计. E-mail: baihy@jlu.edu.cn

模糊控制器提高制动时车辆操纵性及方向稳定性;Choi 等^[6]通过连续反馈控制车轮滑移律,最大限度提高车辆行驶操纵稳定性。

本文针对 ABS 进行整车制动干预时的稳定性问题展开研究,着重对 ABS 兼顾制动方向稳定性和制动效能的控制策略进行了相应的研究工作。利用基于 Kalman 滤波的横摆角度预测方法得到了横摆角度的预测值,并将其与修正的单轮控制策略结合,得到了 ABS 系统的单轮控制策略,并进行了硬件在环实验验证。

1 横摆角速度预测方法

1.1 基于 Kalman 滤波的状态预测方法

根据 Kalman 滤波进行状态估计的算法特点,通过推导,得到相应的状态预测方法。式(1)所示为 Kalman 滤波的状态预测方程^[7]。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (1)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$ 为已知 $k-1$ 时刻系统状态的前提下,第 k 时刻的系统状态估计值。

系统 $k+1$ 时刻相应状态的估计值为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k} = \Phi_{k+1/k} \hat{\mathbf{x}}_k \quad (2)$$

Kalman 滤波的更新方程为

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}] \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),得:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k} = \Phi_{k+1/k} [\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1})] \quad (4)$$

式中: $\mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$ 只与系统 k 时刻的状态有关,于是设 $\boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$, 有:

$$E(\boldsymbol{\eta}_k, \boldsymbol{\eta}_{k-1}, \boldsymbol{\eta}_{k-2} \dots) = 0 \quad (5)$$

即在 k 时刻, $\boldsymbol{\eta}_k = \mathbf{z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} \approx 0$ 。式(4)可以简化为

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k} = \Phi_{k+1/k} \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} \quad (6)$$

将式(1)代入式(6),得:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k+1/k} = \Phi_{k+1/k} \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1} \quad (7)$$

式中: $\Phi_{k/k-1}$ 和 $\Phi_{k+1/k}$ 为与系统输入直接相关的矩阵,可以作为已知量。

由此可以看出,系统在 $k+1$ 时刻的状态只与其在 $k-1$ 时刻的状态有关,据此可以实现系统状态的预测,得到系统在未来 2 个周期内的状态预测值。

1.2 横摆角速度预测方法

在 1.1 节介绍的基于 Kalman 滤波的状态估

计方法基础上,结合整车模型进行了横摆角速度预测方法的研究。横摆角速度预测方法以车辆的侧向加速度为测量修正量,以实时获得系统的横摆角速度估计值,进而根据估计值以及系统状态的预测值与该估计值有关的特性,得到横摆角速度的预测值,其具体流程如图 1 所示。考虑横摆角速度的预测建立在横摆角速度估计的基础上,而系统状态估计本身具有一定误差,如果以此为基础进行多步长的系统状态预测,则会使产生的误差越来越大,如此预测得到的横摆角速度将失去应用价值,鉴于此,本文针对 ABS 进行对开路面制动时车辆方向稳定性控制的需要,只进行未来 2 个仿真周期内的横摆角速度预测算法的研究,即只关注横摆角速度在相对较短时间内的变化,以此保证系统横摆角速度预测的准确性。

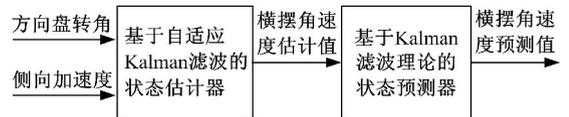


图 1 基于横摆角速度预测的 ABS 单轮控制方法

Fig. 1 ABS single wheel control based on yaw rate prediction

考虑进行状态预测的实时性要求,进行横摆角速度预测使用的整车模型不宜过于复杂,因此采用包括横摆和侧向两个自由度的车辆模型^[8]为基础进行预测算法的实现。同时考虑左右车轮制动力矩不等对车辆行驶方向的影响,将由于制动引起的附加横摆力矩引入整车模型的输入矩阵,如式(8)所示。

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \mathbf{B}_0 \mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}_0 \mathbf{x} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{式中: } \mathbf{x} &= [\beta \quad \gamma]^\top; \mathbf{u} = [\delta_f \quad T_z]^\top; \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & ak_1 - bk_2 \\ mV_x & mV_x^2 - 1 \end{bmatrix}; \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} ak_1 - bk_2 & a^2k_1 + b^2k_2 \\ I_z & I_z V_x \end{bmatrix}; \\ &\mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} -k_1 & 0 \\ mV_x & 1 \end{bmatrix}; \beta \text{ 为质心侧偏角; } \gamma \end{aligned}$$

为横摆角速度; δ_f 为前轮转角; T_z 为各轮制动力引起的车辆横摆力矩; k_1 和 k_2 分别为前轴和后轴的侧偏刚度; a 和 b 分别为质心到前轴和后轴的距离; m 为整车质量; I_z 为整车绕 z 轴的转动惯量; V_x 为纵向车速。

考虑车辆制动力对横摆力矩的影响,设 f_{FL} 、 f_{FR} 、 f_{RR} 、 f_{RL} 分别为 4 个车轮的制动力, L 为轴距,则有:

$$T_z = \{f_{FL} \cdot [(L/2 + a \cdot \tan\delta_f) \cdot \cos\delta_f] + f_{FR} \cdot [(L/2 + a \cdot \tan\delta_f) \cdot \cos\delta_f]\} + (f_{RL} \cdot L + f_{RR} \cdot L)/2 \quad (9)$$

将式(8)中的 $A_0 = \begin{bmatrix} \frac{k_1 + k_2}{mV_x} & \frac{ak_1 - bk_2}{mV_x^2} - 1 \\ \frac{ak_1 - bk_2}{I_z} & \frac{a^2k_1 + b^2k_2}{I_zV_x} \end{bmatrix}$,

$C_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ 分别代入 Kalman 滤波算式(1)(2)

(3)得到横摆角速度的两步预测值,实现横摆角速度的预测。

2 ABS 单轮控制策略

将横摆角速度预测值作为 ABS 单轮控制的参考值,进而采用单轮修正控制策略实现车辆在对开路面的制动控制。其基本控制原则为兼顾车辆的制动方向稳定性和制动距离的要求,最大限度地保证车辆稳定行驶。

单轮控制的基本控制策略如下:车辆在对开路面制动时,后轴车轮采用低选择控制,即高附着一侧的后轮采用与低附着一侧车轮一致的制动压力控制。对于前轴两侧车轮的 ABS 制动控制,采用修正的单轮控制策略,首先对处于低附着路面一侧的滑移率偏离理想滑移率的车轮减压,处于高附着路面一侧的车轮同时进入保压控制,以防止两侧车轮制动力相差过大引起车辆急剧跑偏,同时如图 2 所示的单轮修正控制逻辑启动,其控制目标为保证对开路面车辆制动方向稳定性的同时,尽量缩短制动距离,即通过修正的前轮制动压力调节控制策略弥补传统低选择控制带来的制动

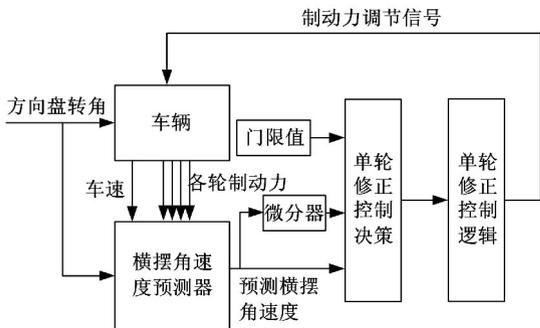


图 2 ABS 单轮修正控制逻辑

Fig. 2 ABS single wheel control logic

距离偏长的问题。所采用的单轮修正控制逻辑首先根据驾驶员的驾驶输入和各车轮的制动力变化,基于 Kalman 滤波技术的预测器得到横摆角速度的预测值,同时通过微分器得到相应的横摆角速度变化值,即横摆角加速度,单轮修正控制决策主要根据预先设置好的相关门限值决定是否针对前轴两侧的低附着及高附着路面车轮实施制动压力修正控制,并将控制指令传递给单轮修正控制逻辑,根据该控制逻辑实现车辆制动力的调节。单轮修正控制逻辑在保证各车轮实际滑移率在理想滑移率范围内的同时,以横摆角速度不超过门限值为前提,尽量增大各轮的制动力。如此得到的单轮控制逻辑可以同时兼顾制动方向稳定性和制动距离两方面的要求,得到较为理想的 ABS 对开路面制动效果。

3 硬件在环实验验证

3.1 硬件在环实验台

为了对设计的 ABS 控制策略的有效性和准确性进行验证,搭建了整车制动系统硬件在环实验台。如图 3 所示,硬件在环实验台中的硬件部分主要包括方向盘、加速踏板和制动踏板及相应

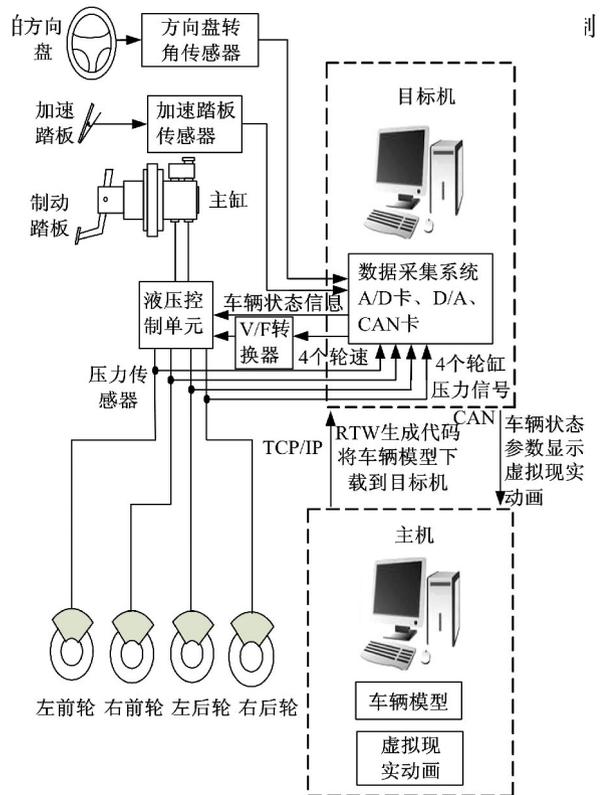


图 3 硬件在环实验台结构

Fig. 3 Hardware in loop test rig

动器总成等。采用 veDYNA 动力学仿真软件提供整车模型。实验台的测控系统采用 Matlab/xPC Target 技术实现,其采用主从机的双机模式,通过 TCP/IP 技术实现通信^[9],辅以相应的 CAN 卡实现传感器及整车行驶状态信息的传输^[10]。利用以上硬件和软件结合的方式实现了硬件在环实验台的搭建,可以模拟整车的行驶工况,对设计的控制策略进行基于标准工况的测试验证。

3.2 实验结果及分析

利用搭建的 ABS 硬件在环实验台,对设计的控制策略进行了验证。为了充分验证 ABS 单轮控制策略的有效性和准确性,采用对开路面制动作为测试工况,制动初始车速为 80 km/h。高附着—侧路面附着系数为 0.8,低附着—侧路面附着系数为 0.2。本文进行了传统的低选控制、单轮控制和预测横摆角速度反馈单轮控制的对比验证。

图 4 所示为横摆角速度响应曲线的对比,从图中可以看出,低选控制的横摆角速度变化最小,基本在 0 附近;单轮控制车辆的横摆角速度最大,车辆已经出现了失稳的情况;横摆角速度反馈的单轮控制车辆横摆角速度峰值在 5 (°)/s 左右,对车辆的正常直线制动影响不大。图 5 所示为 3 种控制策略下车辆的位移比较,纵向位移即为车辆的制动距离,可以明显看出,低选控制的制动距离最大,单轮控制的制动距离最短,而横摆角速度反馈的单轮控制车辆的制动距离居中。

图 6 所示的低选控制前后轮的轮缸压力均在 20×10^5 Pa 左右,即前后轮均根据附着系数为 0.2 一侧路面决策轮缸的防抱死制动压力。图 7 所示为单轮独立控制的前后轮缸压力变化曲线,处于高附着路面一侧的右前轮轮缸压力明显

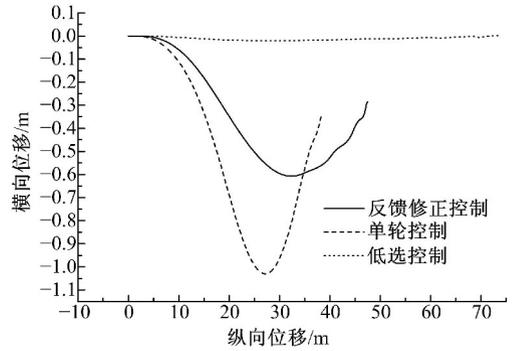


图 5 位移对比曲线

Fig. 5 Comparison curve of displacement

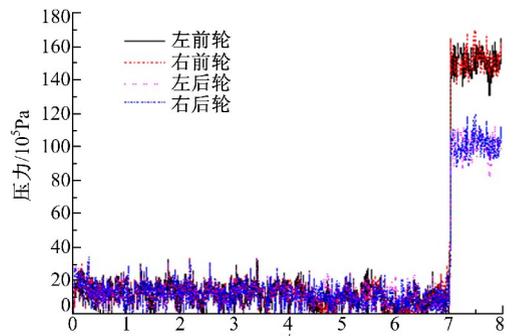


图 6 低选控制轮缸压力变化曲线

Fig. 6 Brake pressure curve based on traditional control

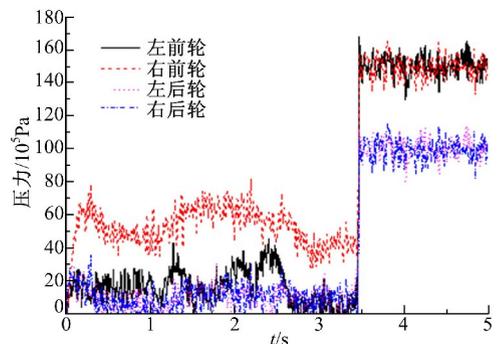


图 7 单轮控制轮缸压力变化曲线

Fig. 7 Brake pressure curve based on single wheel control

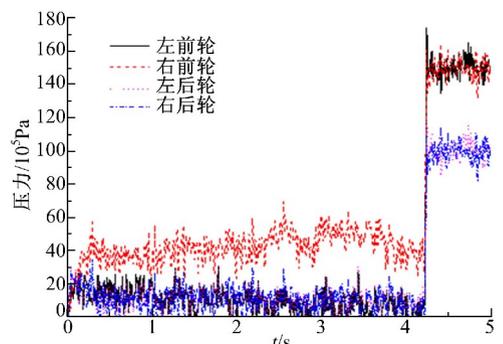


图 8 反馈控制轮缸压力变化曲线

Fig. 8 Brake pressure curve based on feedback control

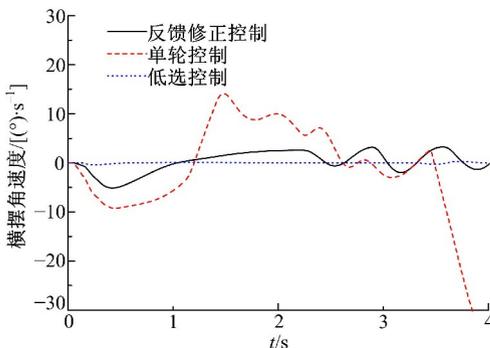


图 4 横摆角速度对比曲线

Fig. 4 Comparison curve of yaw rate

大于其他 3 个轮缸,由于车辆出现了比较明显的跑偏,因此其左前轮轮缸压力比后轮轮缸压力略大,符合实际情况。图 8 所示为横摆角速度反馈控制的前后轮轮缸压力变化曲线,从图中可以看出,处于高附着路面一侧的右前轮的轮缸压力随着时间的增加缓慢升高,即随着车速的降低,其压力升高,与横摆角速度反馈控制的控制策略相符,其他 3 个车轮的轮缸压力则基本一致,保证了车辆制动时的方向稳定性。

4 结束语

针对 ABS 的制动方向稳定性和制动距离问题展开研究,提出了基于横摆角速度预测反馈的 ABS 单轮修正控制策略,并进行了硬件在环实验验证。结果表明,Kalman 滤波算法可以实现汽车横摆角速度的预测,并且可以满足实时控制的需要;基于横摆角速度预测反馈的单轮控制策略可以很好地兼顾 ABS 控制的制动方向稳定性和制动距离问题,充分发挥 ABS 的性能,最大限度保证车辆的制动安全。

参考文献:

[1] 张鹏,张明,夏群生,等. 车辆转弯制动防抱死系统仿真研究[J]. 拖拉机与农用机械, 2009, 36(1):5-10.
Zhang Peng, Zhang Ming, Xia Qun-sheng, et al. Simulation of vehicle antilock braking system based on curved braking[J]. Tractor & Farm Transporter, 2009, 36(1):5-10.

[2] 郭建,高振海,管欣,等. 增强型 ABS 控制系统及其对汽车侧向稳定性的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2009, 39(增刊 1):39-42.
Guo Jian, Gao Zhen-hai, Guan Xin, et al. Improved ABS and its influence for vehicle lateral stability[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2009, 39(Sup. 1):39-42.

[3] Zuo Wen-jie, Li Wei-wei, Xu Tao. A complete development process of finite element software for body-in-white structure with semi-rigid beams in .NET framework[J]. Advances in Engineering Software, 2012, 45(1):261-271.

[4] Metz L D, Scheibe Robert R. Use of ABS in emergency brake-and-steer maneuvers[C]//SAE Paper, 2009-01-0449.

[5] Yigit Yazicioglu, Samim Unlusoy Y. 用模糊逻辑控制(ABS)系统改善制动性能和方向稳定性[J]. 传动技术, 2010, 24(14):13-22.
Yigit Yazicioglu, Y Samim Unlusoy. A fuzzy logic controlled anti-lock braking system(ABS) for improved braking performance and directional stability[J]. Drive System Technique, 2010, 24(4):13-22.

[6] Choi Seibum B. Antilock brake system with a continuous wheel slip control to maximize the braking performance and the ride quality[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16: 996-1003.

[7] 付梦印,邓志红,张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 1 版. 北京:科学出版社, 2004.

[8] Gillespie Thomac D. 车辆动力学基础[M]. 赵六奇,金达锋,译. 1 版. 北京:清华大学出版社, 2006.

[9] MATLAB/xPC Target Tutorial[Z].

[10] 玄圣夷,宋传学,李林. 主动横摆与制动防抱死协调控制策略[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41(增刊 2):25-29.
Xuan Sheng-yi, Song Chuan-xue, Li Lin. Research on coordinated control strategy of active yaw control and anti-locked braking system[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2011, 41(Sup. 2):25-29.