

基于防抱制动系统控制信息的车辆转向状态识别*

张永辉 于良耀 宋 健

(清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

【摘要】 为优化防抱制动系统(ABS)在转向和制动联合工况下的控制策略,需要识别车辆转向状态。选取适于ABS应用的转向参数:车速、转向方向和前轮转角,通过对比转向参数的直接与间接测量技术,根据四轮车辆转向运动学原理,结合二自由度车辆模型的稳态转向特性,研究了利用ABS轮速信号和控制信息的转向参数估算算法。运用稳态回转试验和制动转向试验进行了系统测试,结果表明参数估算具有较好的精度。

关键词: 车辆 防抱制动系统 状态识别 转向 参数估算

中图分类号: U463.52*6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)05-0001-05

State Estimation of Vehicle Steering Based on Control Information of Anti-lock Braking System

Zhang Yonghui Yu Liangyao Song Jian

(State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

For the purpose of optimizing control strategy of anti-lock braking system (ABS) under the steering and braking combined working condition, the vehicle steering state should be identified. The steering parameters adapted to ABS application were selected which were composed of vehicle velocity, turning direction and steering angle. The applied direct and indirect measure technologies were compared. According to the principle of kinematics of four-wheel vehicle and stable steering characteristic of two-degree-of-freedom vehicle model, the steering parameters estimation algorithms using ABS wheel speed and control information were researched. System test was carried out by the experiment of the steady static circular running and braked steering. The test results showed good accuracy of the parameters estimation.

Key words Vehicle, Anti-lock braking system, State estimation, Steering, Parameters estimation

引言

转向与制动联合工况下的车辆安全性是防抱制动系统(ABS)以及车辆稳定性控制系统(VSC)的研究重点^[1]。转向影响参考车速、车轮滑移率等ABS控制参数的计算,而转向时车辆载荷转移也使轮胎受力与直线制动有很大差异。

在转向制动的仿真研究中转向参数一般是给定的方向盘转角和车辆起始车速^[2],在ABS特殊工况控制研究中有对制动前转向方向的识别^[3]。要改

进ABS在转向制动工况下的性能,需要精确识别车辆的转向状态,以此来调整ABS参数计算和控制策略。本文确定ABS可以采用的转向状态参数,比较目前应用中的转向状态测量技术,并研究ABS转向参数的估算方法。

1 车辆转向状态参数

为描述车辆转向时的主要运行状态,定义车辆转向参数 P 。 P 要求能确定转向工况、便于获取并用于ABS控制参数计算。确定 P 由3个参量构成

收稿日期: 2009-10-26 修回日期: 2009-12-21

* 国家自然科学基金资助项目(50905092)

作者简介: 张永辉,博士生,主要从事汽车动力学及ABS控制算法研究, E-mail: zhangyonghui06@mails.tsinghua.edu.cn

$$P = \{V, T, \delta\} \quad (1)$$

式中 V ——车速 T ——转向方向

δ ——前轮转角

车速 V 为整车质心相对地面的速度。 V 通常利用 ABS 轮速进行间接识别。直线制动时车速根据四轮轮速通过一定计算策略来获得^[4], 转向制动时, 需要调整参考车速计算策略以便更接近实际车速。

转向方向 T 区分车辆左转还是右转, ABS 根据 T 对两侧车轮的控制参数进行不同的调整。 T 取值 1、-1、0, 分别对应左转向、右转向和非转向。

前轮转角 δ 反映车辆转向的剧烈程度。相同车速下, δ 越大, 车辆转向越急, 载荷转移和轮胎的侧向受力越显著。转向制动过程中一般视 δ 为定值。

目前车辆转向状态参数主要用于车辆稳定性控制系统。VSC 通过传感器直接测量方向盘转角、横摆角速度与侧向加速度, 分析车辆运动状态, 实现对车辆横摆角速度与质心侧偏角的控制^[5]。通过方向盘转角传感器测得转向操纵的转角方向 T 和转角 θ , 根据 θ 可以计算车轮转角 $\delta = \theta / i_w$, i_w 为转向系统的角传动比。

直接测量的转角参数准确性高, 而且抗干扰性能好, 但需要根据方向盘传感器数据获取方式改造 ABS。随着车辆 CAN 平台的普及, ABS 和方向盘传感器可以都设计成 CAN 网络的节点, 利用 CAN 总线实现数据交互。

没有装备方向盘转角传感器的车辆, ABS 只采集轮速信号, 因此需要基于四轮车辆模型的运动学关系, 根据四轮轮速的差异进行转角的间接识别。

2 四轮车辆模型的运动学分析

以图 1 中四轮车辆模型为研究对象, 假设车辆转向时只有前轮有转角, 在车辆坐标系中进行转向过程的运动学分析。

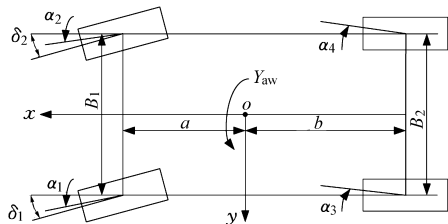


图 1 整车四轮模型

Fig. 1 Four-wheel vehicle model

整车质心的速度矢量 $\mathbf{V} = [\dot{x}, \dot{y}]$, 整车转向时绕 z 轴的横摆角速度 $\dot{Y}_{aw}$, 两前车轮转角 δ_1, δ_2 , 整车质心到前轴和后轴的距离 a, b , 前轴轮距 B_1 , 后轴轮距 B_2 。正常道路行驶中的车辆进行转向操纵时, 方

向盘转角经过转向传动比后产生的车轮转角 δ 较小, 此时两个转向车轮转角差异很小, 对大多数车辆, 可以认为 $\delta_1 = \delta_2 = \delta, B_1 = B_2 = B$ 。

自由转动情况下 4 个车轮的速度矢量为

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 & \dot{y}_1 \\ \dot{x}_2 & \dot{y}_2 \\ \dot{x}_3 & \dot{y}_3 \\ \dot{x}_4 & \dot{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} - B \dot{Y}_{aw}/2 & \dot{y} + a \dot{Y}_{aw} \\ \dot{x} + B \dot{Y}_{aw}/2 & \dot{y} + a \dot{Y}_{aw} \\ \dot{x} - B \dot{Y}_{aw}/2 & \dot{y} - b \dot{Y}_{aw} \\ \dot{x} + B \dot{Y}_{aw}/2 & \dot{y} - b \dot{Y}_{aw} \end{bmatrix} \quad (2)$$

车轮无转角时侧偏角 $\alpha_i = \arctan(\dot{y}_i/\dot{x}_i)$, 前轮有转角时侧偏角为 $\alpha_i - \delta_i$, 4 个车轮沿各自车轮平面的速度分量为 V_{wi} , 其中 $i = 1, 2, 3, 4$, 对应左前轮、右前轮、左后轮和右后轮, 在无滑移工况下, V_{wi} 等于轮速传感器测得的车轮速度

$$\begin{bmatrix} V_{w1} \\ V_{w2} \\ V_{w3} \\ V_{w4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \cos(\alpha_1 - \delta_1) \\ V_2 \cos(\alpha_2 - \delta_2) \\ V_3 \cos \alpha_3 \\ V_4 \cos \alpha_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \cos \delta + \dot{y}_1 \sin \delta \\ \dot{x}_2 \cos \delta + \dot{y}_2 \sin \delta \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据式(2)、(3), 得

$$\begin{bmatrix} V_{w1} \\ V_{w2} \\ V_{w3} \\ V_{w4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\dot{x} - B \dot{Y}_{aw}/2) \cos \delta + (\dot{y} + a \dot{Y}_{aw}) \sin \delta \\ (\dot{x} + B \dot{Y}_{aw}/2) \cos \delta + (\dot{y} + a \dot{Y}_{aw}) \sin \delta \\ \dot{x} - B \dot{Y}_{aw}/2 \\ \dot{x} + B \dot{Y}_{aw}/2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)可得到质心处 x 轴速度分量为

$$\dot{x} = (V_{w3} + V_{w4})/2 \quad (5)$$

前轴两轮速差为

$$\Delta V_1 = V_{w2} - V_{w1} = B \dot{Y}_{aw} \cos \delta \quad (6)$$

后轴两轮速差为

$$\Delta V_2 = V_{w4} - V_{w3} = B \dot{Y}_{aw} \quad (7)$$

结合式(6)、(7), 前、后轴轮速差的差为

$$\Delta \Delta V = |\Delta V_1 - \Delta V_2| = B \dot{Y}_{aw} (1 - \cos \delta) \quad (8)$$

车辆横摆角速度为

$$\dot{Y}_{aw} = (V_{w4} - V_{w3})/B \quad (9)$$

3 基于轮速信号的转向参数识别

四轮模型的轮速关系基于车轮自由转动工况, 在有制动力时会受影响。因此基于轮速的转向参数间接识别分为 3 种工况: 第 1 种是制动前转向的识别; 第 2 种是制动中在 ABS 控制前转向的识别; 第 3

种是 ABS 控制中转向的识别。前 2 种工况的识别只需要轮速信息,可以合并为 ABS 控制前的转向识别工况,最后一种工况需要综合轮速信号与 ABS 的控制信息进行转向识别。转向参数识别的另一个重点是后续参考车速的计算。

3.1 ABS 控制前的转向识别

ABS 未进入控制时,轮胎运行状态比较稳定,传感器采集的轮速近似四轮模型中的轮速 V_{wi} 。

对于 ABS 控制的转向制动,质心速度矢量中 $\dot{y}$ 通常比 $\dot{x}$ 小很多,根据式(5)可取参考车速

$$V_f = \dot{x} \quad (10)$$

根据二自由度车辆模型,稳态转向时车辆稳态横摆角速度增益

$$\frac{\dot{Y}_{aw}}{\delta} = \frac{\dot{x}/L}{1 + K \dot{x}^2} \quad (11)$$

其中 $L = a + b$ $K = \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right)$

式中 L ——车辆轴距

K ——车辆稳定性因数,由稳态回转试验得

根据式(9)、(10)、(11),得车轮转角

$$\delta = \frac{1 + K \dot{x}^2}{\dot{x}} \dot{Y}_{aw} L = \frac{L(1 + K \dot{x}^2)}{B \dot{x}} \Delta V_2 \quad (12)$$

转向参数识别的第一步是判别转向的方向,可以根据式(6)、(7)、(8)进行。对于正常行驶中的转向操纵,由于车辆稳定性的限制,侧向加速度一般不能超过 $1g$,因此车轮转角 δ 也相应受到限制。在低速情况下, δ 受转向系统极限转角的限制。以某车型为例,转向时的 ΔV_2 如图 2 所示。

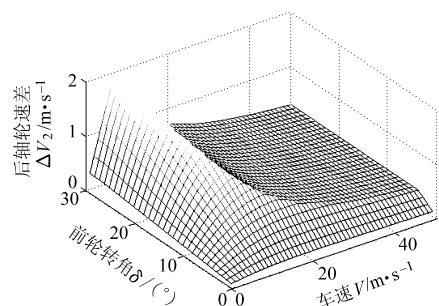


图2 转向工况下后轴两轮速差

Fig. 2 Wheel-speed difference of rear axle under the steering condition

由于轮速信号受路面不平度、制动和驱动等影响,为提高识别准确性,识别策略中采用一定的抗干扰措施。根据图 2 设定前、后轴轮速差的门限 V_{l0} 、 V_{l1} 以及两轴轮速差的门限 V_{l2} 。 V_{l0} 为识别转向所需最小轮速差, V_{l1} 为轮速差的最大限值, V_{l2} 是两轴轮速差的最大限值,与 V_{l1} 成正比。

转向方向 T 的识别为

$$T =$$

$$\begin{cases} 1 & (V_{l0} < (\Delta V_1, \Delta V_2) < V_{l1} \text{ 且 } \Delta \Delta V < V_{l2}) \\ -1 & (V_{l0} < (-\Delta V_1, -\Delta V_2) < V_{l1} \text{ 且 } -\Delta \Delta V < V_{l2}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (13)$$

通过式(10)、(12)、(13)即实现转向参数 P 的识别。

3.2 ABS 控制中的转向识别

ABS 开始控制后进行的转向操纵,由于 ABS 对制动力的干预作用使轮速产生较大波动,此时单从 4 个轮速信号难以正确识别 P 的 3 个参量,必须结合 ABS 的控制状态。

ABS 处于直线行驶控制时,转向产生的轮速差异使内侧车轮滑移率偏大,内侧车轮处于减压阶段,而载荷转移又会使外侧车轮不容易抱死,外侧车轮处于增压阶段。在内侧车轮从减压转换到增压控制时,内、外侧轮速差异近似符合四轮模型运动学关系。ABS 识别这一特殊控制过程的逻辑如下:

(1) 判断 4 个车轮所处的增、减压控制状态 Inc_i 和 Dec_i ($i = 1, 2, 3, 4$ 对应左前、右前、左后和右后轮),若一侧两轮同时减压而另一侧增压(左转时 Dec_1 、 Dec_3 、 Inc_2 、 Inc_4 , 右转时 Dec_2 、 Dec_4 、 Inc_1 、 Inc_3),且持续 t_0 时间,转入步骤(2)。

(2) 计算前、后轴车轮在保压到增压控制切换点的轮速差 ΔV_1 、 ΔV_2 、 $\Delta \Delta V$,根据式(13)给 T 赋值,若 T 非 0 状态持续 t_1 时间,则确认转向方向 T ,转入步骤(3)。

(3) 确认 T 后参照 ABS 控制前的转向识别方法,依照四轮模型识别车轮转角 δ 和参考车速 V_f 。

由于动态过程与稳态过程存在差异,因此在多个控制状态切换点都需要进行识别,通过数据处理来提高参数识别精度。ABS 通过匹配试验标定出识别 ABS 转向特殊控制过程的状态持续时间 t_0 和 t_1 。这两个时间太长则识别滞后过多,影响 ABS 整体控制性能,而太短则会影响识别准确性。

对于制动中出现的转向,基于轮速识别必然会有滞后,但可以使后续制动过程避免过多的减压,有利于改善整个制动过程中 ABS 的控制效果。

3.3 ABS 转向过程参考车速估算

对于 ABS 控制前转向和 ABS 控制中的转向,在识别出转向后,都要进行后续参考车速估算。ABS 参考车速的估算主要分 2 个阶段:在轮速处于低滑移率阶段时,轮速与车速差异较小,ABS 根据设定的选取策略来选择某一轮速作为参考车速;而在轮速都处于大滑移率阶段时,参考车速进行插值估算。插值估算重点是确定插值斜率,ABS 根据车轮控制

过程选取保压到增压的切换点作为插值点,前两个插值点的轮速可作为参考车速来计算插值斜率^[4]。

直线制动时,任一个轮的轮速在符合选取策略时都可以直接作为被选择的参考车速或插值点车速,但转向制动时由于转向产生轮速差异,因此要调整选取策略,并对不同轮的轮速进行修正。

轮速选取策略一般是制动前选取第三大轮速,制动中选取第二大轮速。对转向工况,选取策略修正为制动前选取两后轮轮速的平均值作为参考车速,而制动中依然选取第二大轮速,因为第二大轮速在转向和制动的联合作用下最接近实际车速。

插值估算阶段,当利用后轮轮速估算插值点的参考车速时,由于 ABS 控制策略一般能够保证两后轮同时处于插值点,两后轮轮速的平均值接近参考车速,因此可根据式(5)计算插值点参考车速。当利用前轮轮速估算插值点的参考车速时,需要根据转向参数 P 修正前轮插值点参考车速。

根据式(4),利用小转角下 $\sin\delta \approx \delta$, $\cos\delta \approx 1 - \delta^2/2$,考虑 $\dot{y}$ 相对较小,忽略小项,则

$$\begin{bmatrix} V_{w1} \\ V_{w2} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \dot{x} + (a\delta - B/2) \dot{Y}_{aw} \\ \dot{x} + (a\delta + B/2) \dot{Y}_{aw} \end{bmatrix}$$

δ 作为定值由式(12)已经识别出来,后续 $\dot{Y}_{aw}$ 可根据式(11)计算,修正之后的前轮插值点参考车速应为

$$V_f = \begin{cases} V_{w1} - (a\delta - B/2) \dot{Y}_{aw} \\ V_{w2} - (a\delta + B/2) \dot{Y}_{aw} \end{cases} \quad (14)$$

4 基于轮速信号的转向识别试验验证

为验证基于轮速信号的转向识别方式,进行了两项试验:一是固定方向盘转角进行稳态转向,二是直线 ABS 制动时进行角阶跃转向。两项试验都是左转向,方向盘转角约为 180° 。

试验中轮速 V_w 和参考车速 V_f 由 ABS 计算输出;实际车速 V_r 由 VBOX 数据采集设备输出;车轮转角 δ 不易直接测取,因此采集方向盘转角 θ ,计算参考前轮转角 $\delta_f = \theta/i_w$, i_w 取 18。

图 3、4、5 为稳态转向识别数据,稳态识别可以连续进行。图 3 中转向识别 $T=1$ 为左转向;图 4 中参考车速 V_f 估算误差均值 0.16 km/h,最大绝对误差 0.88 km/h;图 5 中前轮转角 δ 估算误差均值 -0.56° ,最大绝对误差 1.2°。

图 6、7、8 为 ABS 控制时转向识别数据,由于受 ABS 控制以及转向瞬态过程的影响,前轮转角 δ 识别仅在插值点处进行,识别后计算滑动平均值 $\bar{\delta}$ 。

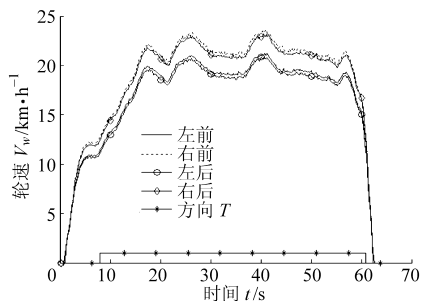


图 3 稳态转向方向识别

Fig. 3 Direction identification of the steady static circular running

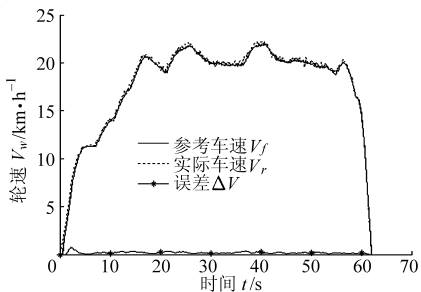


图 4 稳态转向参考车速估算

Fig. 4 Reference velocity estimation of the steady static circular running

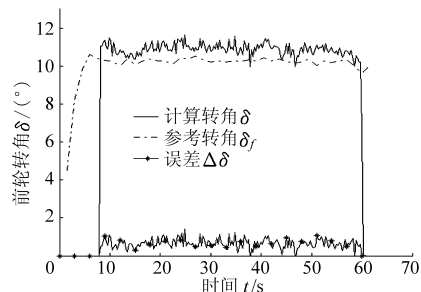


图 5 稳态转向前轮转角估算

Fig. 5 Front wheel steering angle estimation of the steady static circular running

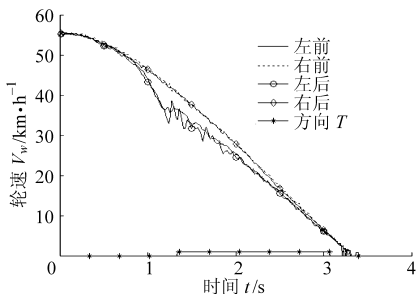


图 6 ABS 控制时转向方向识别

Fig. 6 Direction identification of the braked steering under ABS control

图 6 中转向识别 $T=1$ 为左转向;图 7 中车速 V_f 估算误差均值 0.58 km/h,最大绝对误差 1.54 km/h;图 8 中前轮转角 δ 估算误差均值 -0.82° ,最大绝对误差 1.29° ,由转角识别误差逐渐减小的变化趋势可见识别精度逐渐提高。

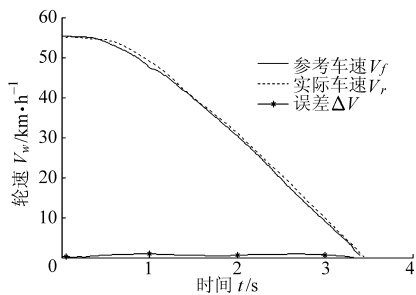


图 7 ABS 控制时转向参考车速估算

Fig. 7 Reference velocity estimation of the braked steering under ABS control

分析试验数据可知,转向方向和车速识别精度较高,前轮转角识别精度也在可以接受的范围,可以作为 ABS 后续控制的参数。

5 结论

(1) 转向识别技术是改进 ABS 转向制动工况综合性能的基础,识别的车辆转向参数 P 由车速、转向方向和车轮转角 3 参量构成。

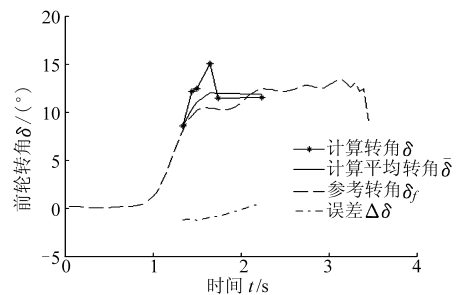


图 8 ABS 控制时转向前轮转角估算

Fig. 8 Front wheel steering angle estimation of the braked steering under ABS control

(2) 转向参数识别有直接测量和间接识别 2 种方式。直接测量需要方向盘传感器支持;间接识别不增加硬件,但要采用门限值的抗干扰策略。

(3) 基于四轮车辆模型,利用四轮轮速信号可以实现 ABS 控制前的转向识别,轮速信号结合 ABS 增减压控制信息可以实现 ABS 控制中的转向识别。

(4) 转向参考车速计算需根据转向参数 P 修正。

参 考 文 献

- 1 喻凡,李道飞. 车辆动力学集成控制综述[J]. 农业机械学报,2008,39(6):1~7.
Yu Fan, Li Dao-fei. Review on integrated vehicle dynamics control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 1~7. (in Chinese)
- 2 张代胜,顾勤林,陈朝阳,等. 车辆转弯制动防抱死系统仿真[J]. 农业机械学报,2005,36(9):16~20.
Zhang Daisheng, Gu Qinlin, Chen Chaoyang, et al. Simulation of vehicle antilock braking system based on curved braking[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 16~20. (in Chinese)
- 3 宋健,孔磊,沈俊. 特殊工况下的 ABS 控制算法[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(2):117~121.
Song Jian, Kong Lei, Shen Jun. Control arithmetic of anti-lock braking system under special working conditions[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(2): 117~121. (in Chinese)
- 4 王伟达,丁能根,徐向阳,等. 基于轮速和压力控制状态信息的 ABS 参考车速算法研究及其试验验证[J]. 中国机械工程,2008,19(3):370~373.
Wang Weida, Ding Nenggen, Xu Xiangyang, et al. Investigation and test validation of vehicle reference speed algorithm for ABS based on the information of wheel speeds and pressure control states[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(3): 370~373. (in Chinese)
- 5 于良耀,宋健,王学辉. 汽车动力学稳定性控制系统试验平台[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2007,28(2):115~118.
Yu Liangyao, Song Jian, Wang Xuehui. Experimental platform of automotive dynamic stability control system[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2007, 28(2): 115~118. (in Chinese)