

基于 PreScan 的 AEB 系统纵向避撞算法及仿真验证

胡远志^{1,2}, 吕章洁², 刘 西²

(1. 汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆理工大学, 重庆 400054, 中国;
2. 汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室, 重庆理工大学, 重庆 400054, 中国)

摘 要: 采用自动紧急制动 (AEB) 可以辅助驾驶员避免纵向碰撞。该文对比了 5 种 AEB 算法对避免纵向碰撞仿真验证制动效果。以自动制动结束时的己车与前车的距离来判断制动效果的 4 种安全距离 (AS) 算法是: Mazda、Honda、Berkeley、SeungwukMoon; 另一种是以即碰时间 (TTC) 为判断制动效果的 TTC 算法。在 Simulink 中运行的汽车主动安全的仿真平台 PreScan 上进行仿真验证。结果表明: 在不干扰驾驶员正常驾驶前提下, 这 5 种算法中, 以即碰时间的 TTC 算法的纵向避撞性能最优。

关键词: 汽车安全; 纵向碰撞; 自动紧急制动 (AEB); 即碰时间 (TTC); 安全距离 (AS); PreScan 软件
中图分类号: U 461.91 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1674-8484.2017.02.004

Algorithm and simulation verification of longitudinal collision avoidance for autonomous emergency break (AEB) system based on PreScan

HU Yuanzhi^{1,2}, LV Zhangjie², LIU Xi²

(1. State Key Laboratory of Vehicle NVH (Noise, Vibration, Harshness) and Safety Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 4000452, China; 2. Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology for Automobile Parts of Ministry of Education, Chongqing 4000452, China)

Abstract: Using autonomous emergency braking (AEB) can assist car-drivers to avoid longitudinal collision. Five AEB algorithms to avoid collision were compared to verify the braking effect. Four kind of safety distance algorithms included Mazda, Honda, Berkeley, and SeungwukMoon, by using the distance between the self-car and the front-car at the end of automatic braking, to judge the braking effect. The fifth algorithm was TTC algorithm with the time to collision (TTC) judging braking effect. Simulation was performed on the active safety car simulation platform PreScan running in the Simulink software. The results show that the vertical collision avoidance performance of the TTC algorithm is the optimal one among the five under the condition of normal driving without disturbing the driver.

Key words: vehicle safety; longitudinal collision; autonomous emergency break (AEB); time to collision (TTC);

收稿日期 / Received : 2016-12-02。

基金项目 / Supported by : 国家自然科学基金资助项目 (51405050); 2015 重庆市基础与前沿研究计划资助项目 (cstc2015jcyjA00048); 2015 年重庆市高等教育教学改革研究资助项目 (152032); 2013 年重庆市科技人才培养计划资助项目 (cstc2013kjrc-qncr60002); 2012 年汽车零部件先进制造技术教育部重点实验室开放课题资助项目 (2012KLMT08)。

第一作者 / First author : 胡远志 (1977—), 男 (汉), 教授, E-mail: yuanyzhihu@cqut.edu.cn。

第二作者 / Second author : 吕章洁 (1991—), 男 (汉), 硕士研究生, E-mail: lvzhangjie@2014.cqut.edu.cn。

safety distance (AS); PreScan software

随着经济的发展, 汽车保有量逐渐增加, 近年来的交通事故依然很严峻, 以 2014 年为例, 中国内地总共发生交通事故 19 万多起, 造成 5 万多人死亡, 2 000 多万人受伤, 直接经济损失 10 亿多元^[1]。

自动紧急制动 (autonomous emergency break, AEB) 系统是当传感器检测到前方潜在的碰撞时, 系统自动实施制动力的一项技术。AEB 系统能够辅助驾驶员避免碰撞, 或者当碰撞不可避免的时候, AEB 系统能够降低碰撞速度, 以减轻车上人员的碰撞伤害及严重程度。报告^[2]结果显示: 安装 AEB 的车辆, 在车速小于 50 km/h 时, 可减少 38% 的追尾意外事故。文献 [3] 调查表明: 在法国, 使用 AEB 系统每年能够减少 63 起 (1.4%) 的死亡率和 1 569 起 (4%) 的严重交通事故。

AEB 的关键是避撞算法, 避撞算法决定了预警的时机和逻辑。若预警时间过早, 则使驾驶员放松警惕; 若预警时间过晚, 则无法起到预警的作用。AEB 系统应该做到既不干扰驾驶员的正常驾驶, 又能在各种危险工况下成功避免碰撞。因此, 预警逻辑应当使用一个相对保守的预警距离, 但是应该采用相对激进的危险制动距离。保守的预警距离能给驾驶员足够的反应时间, 并且预警对正常驾驶的干预较少, 而且能动保证能显示较宽的预警警告灯^[4]。

目前 AEB 系统的预警算法主要有安全距离 (safety distance, AS) 算法和即碰时间 (time to collision, TTC) 算法两类^[5]。AS 算法根据两车的车速及车距, 来确定两车所需的安全距离 (AS) 阈值; TTC 算法是根据两车状态来计算两车将会发生碰撞的时间, 来得到即碰时间 (TTC) 阈值。当实车辆状态小于计算所得的 AS 阈值或 TTC 阈值时, AEB 系统将采取相应的反应, 来提醒驾驶员或自动刹车。目前, 安全距离模型主要有 Mazda 模型、Honda 模型、Berkeley 模型、Seungwuk Moon 模型^[6]。

运用汽车主动安全的仿真平台 PreScan 软件^[7], 能够快速建立仿真交通场景和传感器的仿真模型。

本文分析和对比了 5 种避撞算法模型。利用 PreScan 软件建立的前车静止和前车减速的两种工况, 本车从 10 km/h 到 80 km/h 的车速接近目标车, 在 Simulink 中运行模型, 提出利用自动制动结束时的己车与前车的距离 (d_{end}) 来表示 AEB 系统的避撞结束时的车距, 验证对比这 5 种 AEB 避撞算法的避撞效果与有效性。

1 避撞模型分析

1.1 Mazda 模型

Mazda 模型^[8]中, 危险制动距离为

$$d_{\text{br}} = \frac{1}{2} \left[\frac{v^2}{a_1} - \frac{(v-v_{\text{rel}})^2}{a_2} \right] + vt_1 + v_{\text{rel}}t_2 + d_0.$$

式中: v 为己车车速, v_{rel} 为相对车速, a_1 为己车最大减速度, a_2 为前车最大减速度, t_1 为驾驶员反应延迟时间, t_2 为制动器延迟时间, d_0 为最小停车距离。当两车使用全力制动时, d_0 能够确保两车不发生碰撞。增加延迟时间 t_1 、 t_2 , 能够使系统更加保守。

在此, 取 $a_1 = 6 \text{ m/s}^2$, $a_2 = 8 \text{ m/s}^2$, $t_1 = 0.1 \text{ s}$, $t_2 = 0.6$

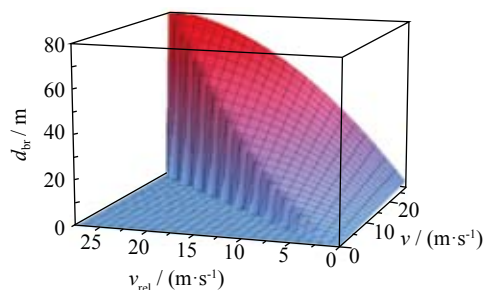


图 1 Mazda 制动模型

s , $d_0 = 3 \text{ m}$ 。当 $v_{\text{rel}} > v$, 制定 $d_{\text{br}} = 0$ 。Mazda 模型的危险距离模型如图 1 所示。

1.2 Honda 模型

Honda 模型^[9]的碰撞预警 (collision warning, CW) 的逻辑算法的制动危险距离为:

$$d_{\text{br}} = t_2 v_{\text{rel}} + t_1 t_2 a_1 - 0.5 a_1 t_1^2, \quad \frac{v_2}{a_2} \geq t_2;$$

$$d_{\text{br}} = t_2 v - 0.5 (t_2 - t_1)^2 a_1 - \frac{v_2^2}{2a_2}, \quad \frac{v_2}{a_2} < t_2.$$

式中: v 为本车车速; v_2 为前车车速, a_1 、 a_2 分别为本车和前车的最大减速度; t_1 、 t_2 分别为系统延迟时间和制

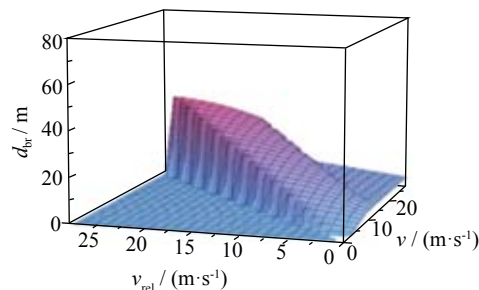


图 2 Honda 制动模型

动时间。在此,取 $a_1 = a_2 = 7.8 \text{ m/s}^2$, $t_1 = 0.5 \text{ s}$, $t_2 = 1.5 \text{ s}$ 。Honda 模型的危险距离模型如图 2 所示。

由此可知: Honda 模型制定的危险制动距离,明显比 Mazda 模型更短。Honda 模型自动制动就介入更晚,这样的算法更加符合驾驶习惯,并且对驾驶员正常驾驶的影响也更小。建立前车突然匀减速制动,后车匀速向前运动的运动场景。

1.3 Berkeley 模型

在 Berkeley 模型^[10]中,在碰撞预警阶段,本车辆如果发生碰撞,则公式是:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= x_{10} + v_1 t, \\ x_2(t) &= x_{20} + v_2 t - 0.5 a_2 t^2, \\ x_1(t) &= x_{20} - x_{10} + x_2(t), \\ v_{\text{rel}} &= v_1 - v_2, \\ t &= \tau_1 + \tau_2, \\ d &= x_{20} - x_{10}, \\ d_{\text{br}} &= v_{\text{rel}}(t_1 + t_2) + 0.5 a_2 (t_1 + t_2)^2. \end{aligned}$$

式中: t_1 为驾驶员反应时间, t_2 为制动系统延迟时间, a_2 为两车最大制动减速度。在此,取 $t_1 = 1 \text{ s}$, $t_2 = 0.2 \text{ s}$, $a_2 = 6 \text{ m/s}^2$ 。当 $v_{\text{rel}} > v$, 制定 $d_{\text{br}} = 0$ 。

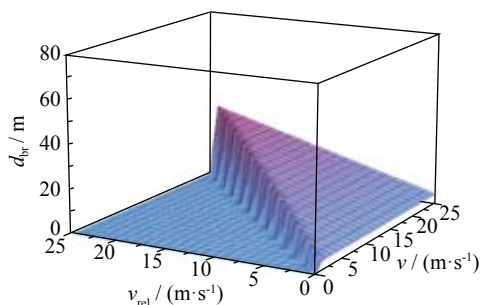


图3 Berkeley 制动模型

Berkeley 模型的危险距离模型如图 3 所示。

1.4 SeungwukMoon 模型

SeungwukMoon 模型^[11-12]为

$$d_{\text{br}} = v_{\text{rel}} T_{\text{delay}} + f(\mu) \frac{(2v - v_{\text{rel}})v_{\text{rel}}}{2 a_{\text{max}}}.$$

其中: T_{delay} 为系统延迟时间, $f(\mu)$ 为制动因数, a_{max} 为最大制动减速度。在此,取 $T_{\text{delay}} = 1.2 \text{ s}$, $f(\mu) = 0.2$, $a_{\text{max}} = 6 \text{ m/s}^2$ 。Seungwuk Moon 模型的危险距离阈值模型如图 4 所示。

2.5 TTC 模型

即碰时间 TTC 模型^[13-15](或 TTC 算法)算法逻辑为: 如果 TTC 小于所有延迟时间(系统制动延迟时间与驾驶员反应时间), 驾驶员没有对碰撞预警做出反应, 则在这时候系统应该自动制动。采用制动距离 d_{br} , 令 D 为两车相对距离, d_0 为安全停车距离(取 $d_0 = 3 \text{ m}$), 则有:

$$\begin{aligned} \text{TTC} &= \frac{D}{v_{\text{rel}}}, \\ d_{\text{br}} &= \text{TTC } v_{\text{rel}} + d_0. \end{aligned}$$

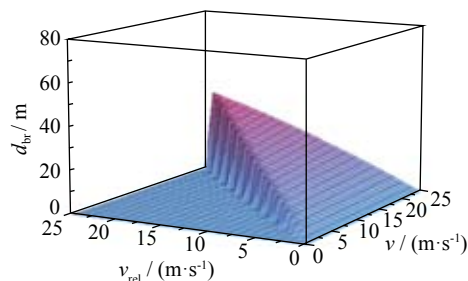
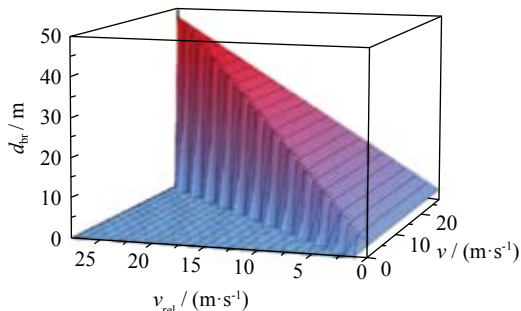
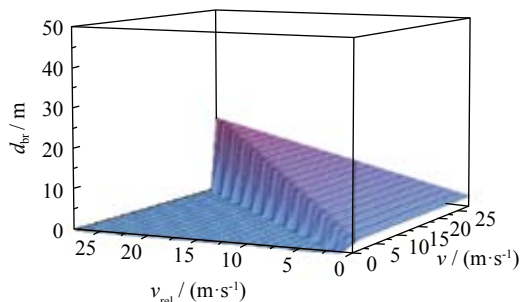


图4 Seungwuk Moon 制动模型



部分制动



全力制动

图5 部分制动和全力制动 TTC 模型

图 5 为 TTC 部分制动的危险距离阈值模型和 TTC 全力制动的危险距离阈值模型。

由于当 $D = 0$ 时, TTC 无解, 所以设定 v_{rel} 的下限。在 PreScan 的模型中 v_{rel} 下限取 $1 \mu\text{m/s}$ 。文献 [13] 表明: 一般, $\text{TTC} = 1.1 \sim 1.4 \text{ s}$, 车辆的制动减速度的平均值为 $0.52 g$ 。

在 TTC 算法中设定: $\text{TTC}(\text{预警危险}) = 2.6 \text{ s}$, $\text{TTC}(\text{部分制动}) = 1.6 \text{ s}$, $\text{TTC}(\text{全力制动}) = 0.6 \text{ s}$ 。当系统计算实际 TTC 达到 2.6、1.6、0.6 s 时, 分别竖起警告标旗 (2.6s flag)、部分制动标旗 (1.6s flag)、全力制动标旗 (0.6s flag)。TTC 避撞模型控制逻辑见表 1。在此 TTC 控制算法中, 当部分制动标旗 (1.6s flag) 竖起时, 保持部分制动额外的 0.5 s, 以确保避免潜在的危險状况。当制动标旗竖起时, 保持住全力制动, 直到车速降为零。

2 避撞算法验证

搭建由显示器、主机、罗技 (logitech) 方向盘、前方挡玻璃和座椅组成的先进驾驶辅助系统 (advance driving assistance system, ADAS) 仿真驾驶平台, 如图 6 所示。

建立自动紧急制动 (AEB) 仿真测试场景, 建立一

表 1 TTC 避撞模型控制逻辑

警告	部分制动	全力制动	系统动作
2.6s flag	1.6s flag	0.6s flag	
0	0	0	无动作
0	0	1	无动作
0	1	0	实施 40% 制动
0	1	1	实施最大制动
1	0	0	输出驾驶员制动
1	0	1	输出驾驶员的制动
1	1	0	实施 40% 制动
1	1	1	实施最大制动

条 625 m 长的直线道路。传感器设定: 使用 PreScan 自带的“独立传感器” (technology independent sensor, TIS), 传感器 1 和传感器 2 分别设定: 最大探测距离 150 m、30 m, 俯仰角都为 9° , 水平角 10° 、 80° 。

测试工况选用欧洲新车评价规程 (Euro-NCAP) 的前车静止 (car to car rear stationary, CCRs) 和前车急刹 (car to car rear breaking, CCRb) 2 种工况 [16]。

工况 1: CCRs 前车静止工况: 本车以 10 km/h 的梯度, 从 10 km/h 递增到 80 km/h。前车为 Euro-NCAP

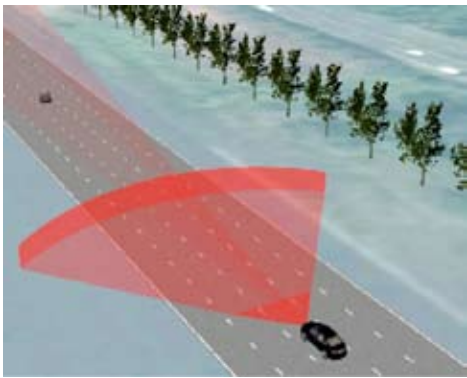


图 6 ADAS 仿真平台

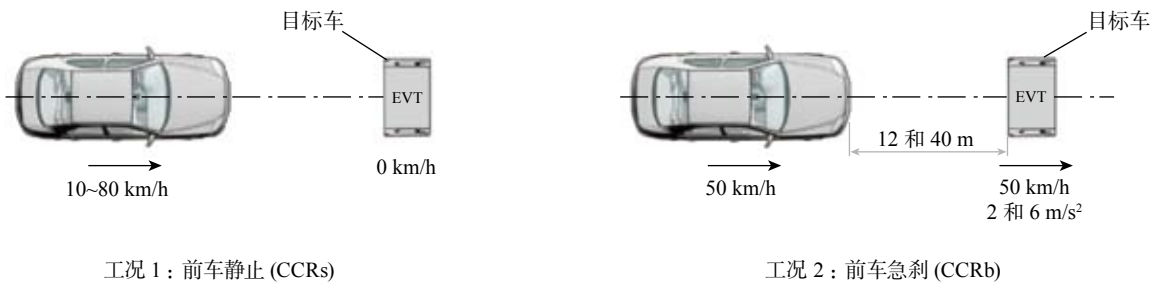


图 7 AEB 仿真测试场景

车辆目标 (Europe vehicle test, EVT) 模型, 并保持静止, 如图 7a 所示。

工况 2: CCRb 前车减速工况: 本车以 50 km/h 的车速, 前车为 EVT 模型, 并相距本车辆 12 m 和 40 m, 以 6 m/s^2 和 2 m/s^2 的减速度进行急减速, 如图 7b 所示。

辆动力学模型选用 PreScan 自带的 2D Simple 车辆动力学模型。如果有需要, 可以利用 Carsim 等软件建立更加精细的车辆动力学模。车辆物理参数影响车辆的运动状态, 相关参数见表 2、3。

表 2 车辆物理参数表

滚动摩擦因数	0.01	迎风面积	2.33 m^2
滑动摩擦因数	0.27	最大加速度	0.3 g
总质量	1.82 t	最大减速度	1.0 g

表 3 车辆动力学参数表

车轮廓长	5.208 m	最大制动压力	15 MPa
车轮廓宽	2.029 m	x 轴转动惯量	$0.210 \text{ t}\cdot\text{m}^2$
车轮廓高	1.447 m	y 轴转动惯量	$3.278 \text{ t}\cdot\text{m}^2$
轴距	2.94 m	z 轴转动惯量	$3.746 \text{ t}\cdot\text{m}^2$
轮胎半径	0.34 m	前悬刚度	52.15 kN/m
前轮侧偏刚度	72.6 kN/rad	后悬刚度	41.4 kN/m
后轮侧偏刚度	121.5 kN/rad	前悬阻尼率	4.98 kNs/m
风阻系数	0.27	后悬阻尼率	3.62 kNs/m

3 PreScan 验证结果及其各种算法优化

PreScan、Simulink 软件仿真结果表明: 在 10~80 km/h 的速度场景下, Honda、Mazda、SeungwukMoon 算法均能成功避免碰撞。但是, 在 TTC、Berkeley 算

法中, 在车速达到 70 km/h 时候, 并不能成功避免碰撞, 不过 TTC 避撞算法能减少碰撞的伤害, 速度由初速度 80 km/h, 降低到碰撞时刻 30 km/h, 减少了 62.5% 的碰撞速度。仿真结果如图 8 所示。

TTC 算法在 70 km/h 及以上的速度不能完全避免碰撞, 但是可以通过调整 TTC 的 3 个即碰时间阈值, 达到成功避免碰撞的目的。避撞算法需要做到: 既不会过早地介入制动系统, 不影响驾驶员正常驾驶, 又能成功避免碰撞的目的。

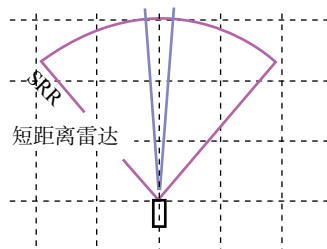
在 TTC 算法中, 将预警时间阈值、部分制动时间阈值、全力制动时间阈值, 分别设置为 2.9、1.9、0.9 s 时, 能够成功避免碰撞, 又不会过早介入制动系统影响驾驶员正常驾驶。在 Berkeley 算法中, 调整 $d_0 = 7 \text{ m}$, 在 10~80 km/h 的速度场景下, 能够成功避免碰撞。

用自动制动结束时的己车与前车的距离 (d_{end}) 来表示 AEB 系统的避撞效果: 若 $d_{\text{end}} > 0$, 则表明避撞成功; 若 $d_{\text{end}} > 3 \text{ m}$, 则说明该算法过早地进行了自动制动, 可能会干预驾驶员的正常驾驶; 若 d_{end} 的数值较小, 则表明该算法较为激进; 对于同一算法, 若在不同工况下 d_{end} 的各值很集中, 则表明: 该避撞算法能在各种不同工况下表现的较为一致。

具体调整后的仿真结果如图 9 所示。

由图 9 可知: 在不同工况下, 自动制动结束时, TTC 避撞算法的相对车距最为集中; 所需输入参数少, 只需要相对车速 v_{rel} 与相对车距 D ; 避撞公式简单, 方便调整即碰时间阈值以适应不同车型的避撞算法开发。

Honda 较为激进, 在 CCRs 高速 (本车车速 80 km/h) 工况下, 当设置 $d_0 = 3 \text{ m}$, d_{end} 仅仅为 0.3 m, 然而在其他工况下, d_{end} 分布的较为分散。

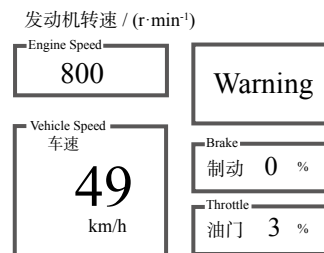


- * Detected objects 探测到前车
- * Warning phase 预警
- Pre-braking phase 部分制动
- Ful auto-braking 全力制动

(a) 雷达探测



(b) 动画



(c) 本车状态显示

图 8 仿真结果

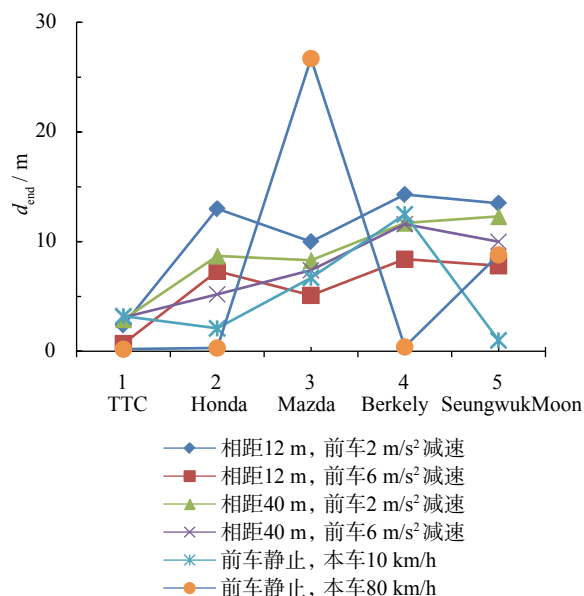


图9 各算法仿真结果

Mazda 算法在 $d_{\text{end}} = 26.7 \text{ m}$, 说明 Mazda 算法在 CCRs 高速 (本车车速 80 km/h) 工况下, 介入制动系统的时机较早, 容易干扰驾驶员的正常驾驶。

Berkeley 算法也表现较为激进, 在 CCRs 高速 (本车车速 80 km/h) 工况下, $d_{\text{end}} = 0.4 \text{ m}$; 在其他工况, $d_{\text{end}} = 8.4 \sim 14.3 \text{ m}$, 避撞算法介入制动时间较为均衡。

SeungwukMoon 算法表现较好, 在 CCRb 工况下, $d_{\text{end}} = 7.8 \sim 13.5 \text{ m}$ 。CCRs 高速 (本车车速 80 km/h) 工况下, SeungwukMoon 算法介入时机较为及时, $d_{\text{end}} = 8.8 \text{ m}$; 其在 CCRs 低速 (本车车速 10 km/h) 工况也表现较好, $d_{\text{end}} = 1 \text{ m}$ 。

4 影响避撞效果的其他因素及其改进

在自动制动标旗 (1.6s flag) 竖起后, 由于制动造成减速, 危险制动距离阈值和雷达探测距离会出现交叉波动性, 为了避免自动制动压力的不停上下波动, 应该

对制动系统实施保压, 直到出现其他工况, 例如: 车速降为零、驾驶员打方向盘等工况。

自动制动模型在 PreScan 仿真中制动时车身加速度曲线不真实情况的原因是: Simulink 模型没有考虑制动器起作用时间的延迟, 文献 [17] 中指出液压制动器起作用时间是 0.2~0.9 s, 因此在 Simulink 模型中加入 Rate Limiter 模块后, 以模拟实际制动减速度上升曲线, 对不同的避撞策略进行仿真验证。

由于在 Simulink 仿真中, 雷达的扫描频率有限, 数据会出现短暂的不连续跳跃信号。如果出现一个错误信号致使全力制动标旗被激发, 由此产生的错误制动会严重干扰驾驶员。因此在控制系统中检测信号的连续多个值, 并且只有当信号连续的多个值, 同时满足触发自动制动的条件时, 才触发自动制动, 从而提高算法的稳定性。具体 Simulink 流程图如图 10 所示。图 10 中: memory 存储器模块存储上一时刻的状态值, AND 模块为逻辑“与”, 因此 3 个 memory 模块表示 3 个的状态值都为“真”时, 输出“真”; 否则输出“假”。

当车辆实施制动过程中, 由于车辆前倾, 雷达探测方向也随之前倾, 如果雷达垂直探测角度不足, 会有可能导致丢失目标。当减速度为 7.5 m/s^2 时, 车身的前倾角为 2.8° 。因此在实际选用雷达时, 应该考虑此因素。

5 结论

PreScan、Simulink 软件提供主动安全设计的环境和传感器仿真平台, 能够方便、快速、安全地来验证设计避撞算法模型。

AEB 系统有避免碰撞与不干扰驾驶员正常驾驶的两个要求。从不干扰驾驶员正常驾驶方面评价, TTC 的效果最好, 其次是 SeungwukMoon 算法。Honda、Berkeley 算法均表现激进, Mazda 算法表现过于保守。

本文只考虑了纵向的避撞逻辑算法, 没有考虑横向避撞逻辑算法。在后续的开发中可以继续研究

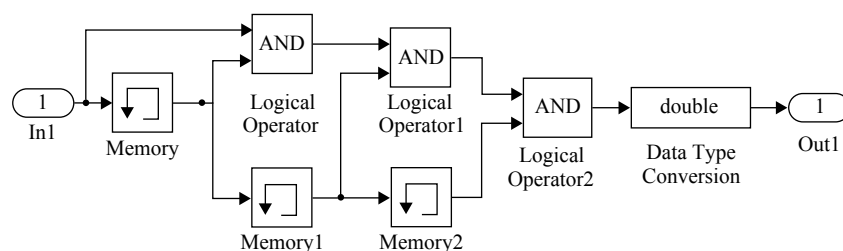


图10 三次检测确认方法 simulink 图

横向碰撞算法。多目标物、转弯等复杂工况也是碰撞研究的趋势,是从辅助驾驶走向自动驾驶的必经过程。

致谢

本文作者得到 TNO 公司的 PreScan 软件资助和技术指导,在此表示由衷地感谢。

参考文献 (References)

- [1] 王博宇,李杰伟.中国交通事故的统计分析对策[J].当代经济,2015(20): 116-119.
WANG Boyu, LI Jiewei. Statistical analysis and countermeasures of traffic accidents in China [J]. *Contemporary Economy*, 2015 (20): 116-119. (in Chinese)
- [2] Fildes B N, Keall M, Bos N, et al. Effectiveness of low speed autonomous emergency braking in real-world rear-end crashes [J]. *Accident Analysis Prevention*, 2015, **81**: 24-29.
- [3] Fildes B N. Safety benefits of automatic emergency braking systems in france [R]. *SAE Tech Paper*, 2012, doi:10.4271/2012-01-0273.
- [4] Aust M L, Jakobsson L, Lindman M, et al. Collision Avoidance Systems - Advancements and Efficiency [R]. *SAE Tech Paper*, 2015, doi: 10.4271/2015-01-1406.
- [5] 宋晓琳,冯广刚,杨济匡.汽车主动碰撞系统的发展现状及趋势[J].汽车工程,2008, **30**(4): 285-290.
SONG Xiaolin, FENG Guanggang, YANG Jikuang. The current state of automotive active collision-avoidance system [J]. *Automotive Engineering*, 2008, **30**(4): 285-290. (in Chinese)
- [6] 于广鹏,谭德荣,田厚杰,等.基于纵向碰撞时间的预警/制动算法[J].河南科技大学学报:自然科学版,2015(2): 30-34.
YU Guangpang, TAN Derong, TIAN Houjie, et al. Algorithm for l warning/break based on vertical collision time [J]. *J Henan Univ of Sci Tech: Nat Sci*, 2015(2): 30-34. (in Chinese)
- [7] 刘颖,朱西产,李佳琦. PreScan 在先进驾驶辅助系统评价中的应用[J].佳木斯大学学报:自然科学版,2013, **31**(5): 696-699.
LIU Ying, Zhu Xichan, LI Jiaqi, Application On Advance Driving Assistance System Of PreScan [J] *J Jiamusi University: Nat Sci*, 2013, **31**(5): 696-699. (in Chinese)
- [8] Doi A, Butsuen T, Niibe T, et al. Development of a rear-end collision avoidance system with automatic brake control [J]. *Jsaе Review*, 1994, **15**(4): 335-340.
- [9] Fujita Y, Akuzawa K, Sato M. Radar Brake System [J]. *Jsaе Review*, 1995, **16**(2): 219-219.
- [10] Peter Seiler, Bongsob Song, J. Karl Hedrick. Development of a Collision Avoidance System [J]. *Neurosurgery*, 1998, **46**(2): 492-492.
- [11] Seungwuk Moon, Kyongsu Yi. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, **46**(8): 661-690.
- [12] 裴晓飞,刘昭度,马国成,等.汽车主动碰撞系统的安全距离模型和目标检测算法[J].汽车安全与节能学报,2012, **3**(1): 26-33.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, Safe distance model and obstacle detection algorithms for a collision warning and collision avoidance system [J]. *J Automotive Safety And Energy*, 2012, **3**(1): 26-33. (in Chinese)
- [13] Yoshida H, Awano S, Nagai M, et al. Target Following Brake Control for Collision Avoidance Assist of Active Interface Vehicle [C]// *SICE-ICASE, Int'l Joint Conf*, 2006: 4436 - 4439.
- [14] LIN Ming, YOON Jaewoo, KIM Byeongwoo. Study of AEB system algorithm using GPS-based real-time measured gradient [J]. *Adva Sci and Tech Lett*, 2015, **118**: 37-41.
- [15] Kusano K D, Gabler H C. Method for estimating time to collision at braking in real-world, lead vehicle stopped rear-end crashes for use in pre-crash system design [J]. *SAE Int'l J Passenger Cars-Mech Syst*, 2011, **4**(1): 435-443.
- [16] 郭魁元,李悦琴,高明秋,等.主动安全技术在中国的应用环境及 NCAP 评价方法综述[J].汽车工业研究,2015(4): 43-49. (in Chinese)
GUO Kuiyuan, LI Yueqin, GAO Mingqiu. A review on the application environment of active safety technology in China and the method of NCAP evaluation [J]. *Res Automobile Indu*, 2015(4): 43-49.
- [17] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,1989: 98-99.
YU Zhisheng. Theory of Automobile [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989: 98-99. (in Chinese)