

汽车主动防撞系统的安全距离模型和目标检测算法

裴晓飞, 刘昭度*, 马国成, 叶 阳

(北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081)

摘 要: 为辅助汽车驾驶员安全驾驶, 开发了一种汽车主动防撞系统。该系统以“碰撞时间倒数” TTC^{-1} 作为评价指标, 采用了基于危险系数进行分级报警与主动制动的安全距离模型, 其关键参数按照驾驶员特性进行标定。基于自适应巡航系统 (ACC) 目标检测算法, 设计了适用于防撞系统的毫米波雷达算法。基于捷达轿车, 开发了用于防撞系统的软硬件平台, 并在良好路面下分别进行了主动防撞试验和人为切换试验。实车试验表明: 本系统的分级报警和主动制动功能, 符合期望的 TTC^{-1} 指标, 提高了汽车的主动安全性, 体现了驾驶员控制的优先性和协调性。

关键词: 主动安全; 驾驶辅助; 安全距离模型; 目标检测; 防撞报警; 主动防撞

中图分类号: U 461.91 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1674-8484.2012.01.004

Safe distance model and obstacle detection algorithms for a collision warning and collision avoidance system

PEI Xiaofei, LIU Zhaodu*, MA Guocheng, YE Yang

(School of Mechanical and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Safe-driving was assisted with key parameters calibrated according to the driver's characteristics using a developed system of vehicle collision warning and collision avoidance (CW/CA). The system defines the inverse of time-to-collision (TTC^{-1}) as the evaluation index with the grading warning and braking safe distance model adopted based on hazardous level ε . A millimeter waveradar obstacle detection method was designed with adaptive cruise control (ACC). The system configuration and control logic were designed based on a Jetta car with the collision avoidance test and the manual / automatic interaction test implemented on dry roads. The real car experiments show that the CW/CA system in accordance with desired TTC^{-1} index improves vehicle active safety, and embodies the driver's priority and cooperation.

Key words: active safety; driving assistance; safe distance model; obstacle detection; collision warning; collision avoidance

收稿日期 / Received : 2011-07-05

基金项目 / Supported by : 国家自然科学基金 (51005019); 国家部委预研项目基金 (40401040302)

第一作者 / First author : 裴晓飞 (1985—), 男 (汉), 湖北, 博士研究生。E-mail: peixiaofei7@gmail.com

* 通讯作者 / Corresponding author : 刘昭度, 教授。E-mail: liuzhaod@bit.edu.cn

汽车主动防撞系统(collision warning/ avoidance, CW/CA)作为一项先进主动安全技术,对提高交通安全具有重要意义。当防撞系统检测到潜在的碰撞危险,一种合适的报警方式将被触发;如果驾驶员没有对报警信号做出及时有效的操作,防撞系统会自动接管车辆控制,通过主动制动以避免或减轻碰撞事故。

早在 20 世纪 90 年代,在美国 AHS (Automated Highway System) 项目的推动下,主动防撞系统开始被国内外广泛的研究^[1-3],重点集中在安全距离模型的设计上。具有代表性的如 MAZDA 模型、HONDA 模型、伯克利模型、Jaguar 模型和 NHSTA 模型相继被提出^[4-5]。密歇根大学基于 ICC FOT 数据库对上述 5 种模型的漏报率和误报率进行了评价^[6],其中美国高速公路交通安全署(National Highway Transportation Safety Administration)的 NHSTA 模型表现的性能最好,但报警精确性仅有 23%,因此现有模型算法仍有很大的改进空间。究其原因在于防撞系统必须考虑驾驶员的行为因素^[7-8],只有模型算法较好的符合驾驶员的防撞特性,才能提高系统的接受度。由于安全距离模型依赖于实时的相对运动关系,需要准确获知当前自车参数与外界环境信息^[9],其中的关键是雷达目标检测算法的实时性和鲁棒性。另外,也不能忽略路况条件和车辆制动特性对系统性能的限制^[10]。

本文以碰撞时间(time to collision, TTC)的倒数 TTC^{-1} 作为适应驾驶员特性的评价指标,结合国外驾驶员模型的统计数据,确定了不同报警级别对应的 TTC^{-1} 期望范围。建立了基于危险系数 的分级安全距离模型,并对模型中的关键参数进行标定。提出了适用于防撞系统的雷达目标检测算法,开发了车载软硬件平台。通过实车实验,验证了系统功能的有效性和实用性。

1 主动报警 / 制动防撞算法

1.1 分级报警及期望指标

驾驶员对于前方目标的感知中,普遍存在一种“looming”效应^[11],即投射于驾驶员视野中的主目标的大小取决于此时的相对距离。

如图 1 所示,主目标的宽度 w 是一定的,并且与间距 R 有以下几何关系:

$$w = R \theta \tag{1}$$

将式(1)微分变换后得:

$$\begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= \dot{R} \theta + R \dot{\theta} = 0, \\ \frac{\theta}{\dot{\theta}} &= \frac{R}{-\dot{R}}. \end{aligned} \tag{2}$$

文献 [11] 认为碰撞时间倒数(TTC^{-1})能有效表征上述“looming”效应,从而反映驾驶员的防撞特性。其定义如式(3)所示,其中 v_c 和 v_p 分别为主车与前车的速度。

$$TTC^{-1} = \frac{v_c - v_p}{R}. \tag{3}$$

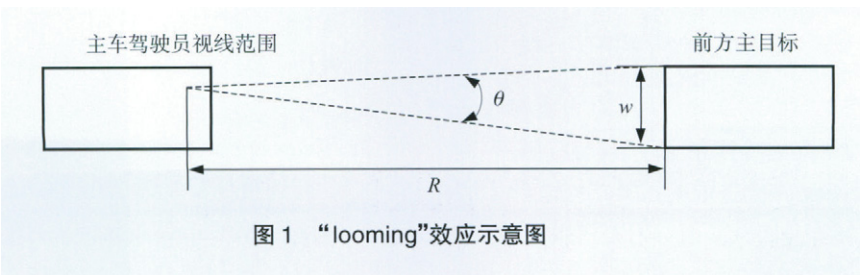
美国国家公路交通安全管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)对 83 名驾驶员的紧急制动特性进行了统计^[12],平均减速度与最大减速度的规律如表 1 所示。文献 [13] 则根据 125 名驾驶员在正常行车中的经验数据,认为 98% 的驾驶员行车减速度不会超过 -2.17 m/s^2 而当减速度达到 $-3 \sim -4 \text{ m/s}^2$ 时会引起人体的不适,并且统计出如表 2 所示的减速度同 TTC^{-1} 对应关系,其中: a 为车辆减速度, η 表示驾驶员试验样本的累积百分比。

表 1 紧急制动时的减速度统计规律^[12]

类型	减速度 a / g				
	$\eta = 5\%$	$\eta = 25\%$	$\eta = \text{均值}$	$\eta = 75\%$	$\eta = 95\%$
平均减速度	-0.15	-0.29	-0.38	-0.42	-0.55
最大减速度	-0.37	-0.58	-0.72	-0.82	-0.92

表 2 TTC^{-1} 与减速度间的统计规律^[13]

$a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	TTC^{-1} / s^{-1}				
	$\eta = 5\%$	$\eta = 25\%$	$\eta = \text{均值}$	$\eta = 75\%$	$\eta = 95\%$
-2.0~-0.5	-0.02	0.03	0.11	0.17	0.36
-4.0~-2.0	-0.01	0.14	0.25	0.34	0.60
-6.0~-4.0	0.23	0.28	0.70	0.98	1.50
<-6.0	0.56	0.85	1.13	1.35	1.72



由以上文献中对驾驶员特性分析可知,由于驾驶员在紧急避让行为的差异性,避让系统很难在报警和主动制动的时机上做出有效权衡:既要防止过早的报警分散驾驶员注意力甚至产生惊慌,也要避免过晚的介入以给驾驶员足够的反应时间。因此将行车工况分为四个程度:“安全”、“较危险”、“很危险”和“极端危险”,并给与不同的声光报警方式,报警级别随着危险程度逐渐提高,相应的驾驶员敏感度也逐渐增强。同时针对不同的驾驶风格,驾驶员可预先在避让系统的“保守”、“适中”、“激进”3组参数中作出选择。因此,所设计的声光分级报警逻辑如表3所示。

在表3中,为每种危险级别和驾驶风格分配了TTC⁻¹评价指标,期望通过后面的避让算法使得实际的声光报警作用在对应的TTC⁻¹范围之内。考虑到触觉反馈例如制动踏板脉动会使某些驾驶员反应过于激烈,因此未包括触觉报警方式。

表3 声光分级报警逻辑

危险级别	视觉	听觉	主动 制动	期望 TTC ⁻¹ 指标		
				保守	适中	激进
级 安全	绿色	无	无	<0.35	<0.5	<0.6
级 较危险	黄色	无	无	0.35~0.5	0.5~0.7	0.6~0.9
级 很危险	红色	报警频率 逐渐增大	无	0.5~0.7	0.7~0.9	0.9~1.3
级 极端危险	红色	无	有	>0.7	>0.9	>1.3

1.2 安全距离模型及参数标定

为了实现表2中的分级报警逻辑,反映当前所处的行车工况,定义了危险系数

$$\varepsilon = \frac{d - d_{br}}{d_w - d_{br}} \quad (4)$$

其中: d_w 、 d_{br} 分别为报警安全距离及制动安全距离, d 为实际距离。当危险系数 $\varepsilon > 1$ 时,表明车辆处于安全状态;当 $0 < \varepsilon < 1$ 时,系统启动分级报警,并且随着 ε 值越小,报警级别越高;当危险系数 $\varepsilon < 0$ 时,主动制动会立即接管车辆控制。

报警安全距离和制动安全距离的定义为:

$$\begin{aligned} d_w &= d_{br} + v_c t_{hmin}, \\ d_{br} &= (v_c - v_p) t_r + f(\mu) \frac{v_c^2 - v_p^2}{2a_{max}}. \end{aligned} \quad (5)$$

其中: t_{hmin} 为驾驶员容许的最小时距; t_r 为避让系统的延迟时间; a_{max} 为常高压源作用下,车辆在良好路面上能达到的最大减速度,这里取 6 m/s^2 。考虑到不同路面面对制动距离的影响,引入了相对附着权重函数 $f(\cdot)$,

而附着系数 μ 的大小需由路面识别算法预先确定^[14]。

以上运动学方程 d_w 与 d_{br} 具有明确的物理意义。在制动安全距离中,前一项为两车在系统延迟时间内经过的相对距离,后一项为两车以相同最大减速度制动的距离差;而报警安全距离由制动距离与车间安全时距组成。

对距离模型中的参数标定直接决定了系统报警与制动的时机是否与期望的TTC⁻¹范围相吻合。在式(5)中,时距 t_{hmin} 可先通过驾驶模拟器对其初步估计,再结合表3中不同工况和驾驶风格下的TTC⁻¹指标进行实车试验修正。系统延时 t 由雷达算法延时与制动执行机构滞后两部分组成。其中,前者取决于目标有效性的判别门限,可认为一定值;而后者需要通过不同车辆制动系统的模型辨识来确定。如果 t 取值过大,系统会频繁制动导致车辆的“点头”;反之则无法及时施加有效制动。

2 危险目标检测

避让系统的另一个关键技术是基于毫米波雷达对危险目标进行判别,并且及时准确获取相对于障碍物的距离和速度信息,由于雷达的误报和漏报会直接影响1.2节中安全距离模型的计算结果。为了提高目标检测的实时性和鲁棒性,雷达处理算法一般采取以下3个步骤,如图2所示。

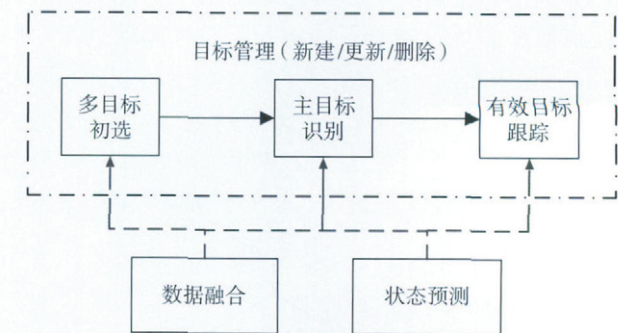


图2 有效目标检测方法

在图2中,首先通过比较自车车速与雷达测得的相对车速,将静止目标剔除;然后利用自车横摆角速度进行车道估计,基于“同车道最近车原则”,从初选后的多目标中确定唯一有效目标。而在目标跟踪中,通过状态预测及一致性验证,减少因各种干扰带来的雷达信息异常。同时,对于识别与跟踪阶段设置计数门限,对有效目标的新建/更新/删除过程进行决策。

上述目标检测算法已在ACC系统上得到广泛应用。作为ACC的自然延伸,目前大部分主动避让系统

与其共用相同的雷达处理算法。但是由于两者功能特点的不同，需要对图 2 中的算法进行必要的调整。

系统间的特性差异如表 4 所示。

根据表 4 列出的对比结果，对雷达算法进行如下修改：

- 1) 取消静止目标的筛选；
- 2) 由于适用于稳态工况的“加窗法”会降低目标识别的实时性和准确性，需要设置更苛刻的识别门限；
- 3) 考虑到紧急制动产生的车辆俯仰容易造成目标

短暂丢失，采取连续五次一致性验证的结果作为跟踪门限；

4) 如果前方确有障碍物，还要对旁车道作进一步检测，并通过人机界面提醒驾驶员此时是否可以执行转向操作。

因此，防撞系统的雷达处理算法如图 3 所示。

3 实车平台

图 4 给出了基于捷达轿车的主动防撞系统实验平

表 4 ACC 与防撞系统的特性比较

比较对象	ACC	主动防撞系统
检测目标	前方同车道的运动车辆	还包括行人，树木，护栏等静止目标
适用环境	单一的高路公路环境	还涉及复杂的城市工况
运行工况	稳态跟车工况	紧急避让工况

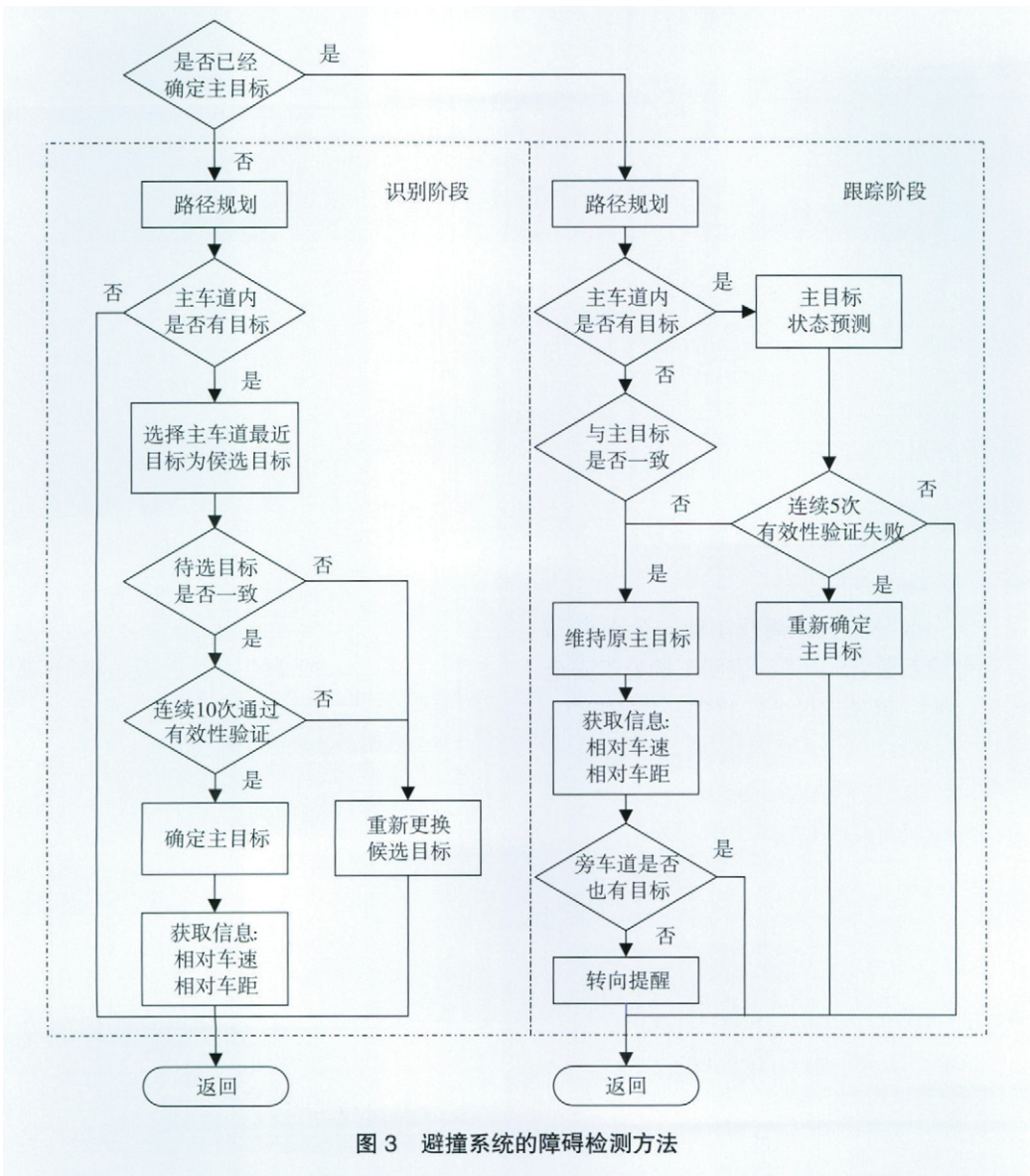


图 3 防撞系统的障碍检测方法

台配置。

毫米波雷达采用美国德尔福公司的 76 GHz ESR 雷达, 同时具有长距离窄视角与短距离宽视角扫描能力, 可最多探测 64 个目标, 在雨、雾等恶劣天气下也有较强的适应性。传感单元还通过陀螺仪、轮速传感器和压力传感器实时采集自车运动状态。嵌入式控制器基于 Freescale 16 位单片机 MS12XD512 开发, 采用 Codewarrior 5.1 编写 C 代码。车载控制器内集成有上

述的避撞控制算法和雷达处理算法, 同时具有 7 寸液晶屏和蜂鸣器, 以实现良好的声光报警功能。为了在常规制动之外满足系统主动制动的要求, 有必要对原车的 ABS 液压制动系统进行尽可能小的改装。因此在原有制动管路上并联了一套高压油源, 根据车载控制器的指令, 通过两个高速电磁阀(加压阀和减压阀)在制动主缸与常压力源间进行切换。

集成控制器中的避撞控制策略如图 5 所示。

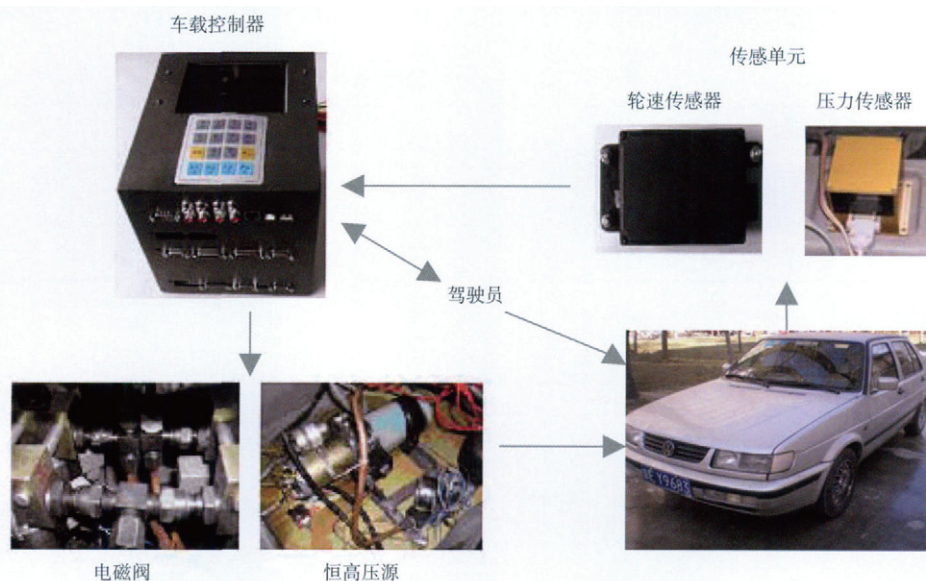


图 4 实车平台组成

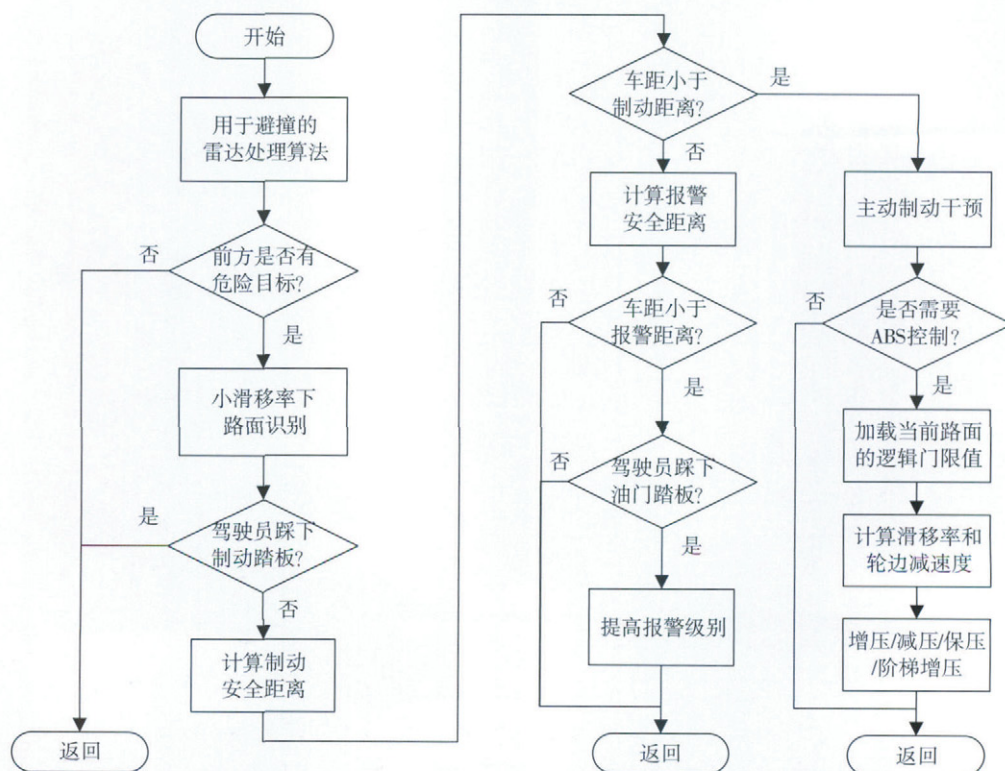


图 5 主动避撞系统控制流程图

为了保证驾驶员的控制优先权,在防撞系统启动声光报警或主动制动后的任何时刻,驾驶员都能接管对车辆的操作,系统功能应立即退出。在计算安全距离之前,需要首先进行小滑移率条件下的路面识别,以此带入距离模型的 $f(\mu)$ 值中。当施加最大制动使得车轮趋于抱死时,防撞系统自动调用四相位ABS控制,通过ABS逻辑门限值调节轮缸压力^[15],提高硬制动下的车辆制动效能。

4 试验验证

在京郊某机场平直道路上对主动防撞系统进行了实车试验。其中,一组试验由系统自动完成,过程中驾驶员不采取任何操作;另一组试验中,当驾驶员感觉到一定的制动减速度后,开始人为制动并且接管对车辆的控制。为了模拟车辆正常行驶时,前方有障碍物突然出现的情况,待试验车辆靠近时,迅速拖动纸箱进入主车道,以此作为试验过程中的静止障碍物。虽然

防撞算法设计时考虑了不同路面的影响,但是考虑到试验的安全性,试验只在干燥的水泥路上进行,并事先设定为保守驾驶参数。

图6给出了系统自动防撞试验结果。车辆以初始速度37 km/h匀速行驶,在15.7 s时雷达发现前方32 m处有障碍物出现。如图6a、6e所示,当第16.5 s时,相对车距开始小于报警距离,此时危险系数小于1,声光报警被触发。由于驾驶员未有任何反应,当17.4 s时,相对车距小于制动距离,危险系数小于0,此时系统开始主动制动,并且17.6 s后车速明显下降,最终停止在距离障碍物2.5 m处。图6b给出了ABS介入干预后的轮速和车速信息。在制动过程中,防撞系统主动施加了约6.5 MPa的制动压力,产生了 -6 m/s^2 的减速度,如图6c和d所示。图6f反映了启动报警与主动制动时刻实际对应的 TTC^{-1} 值,分别为0.45和0.77,均处于表3中 TTC^{-1} 的合理范围之内,因此自动防撞过程能被驾驶员所接受。

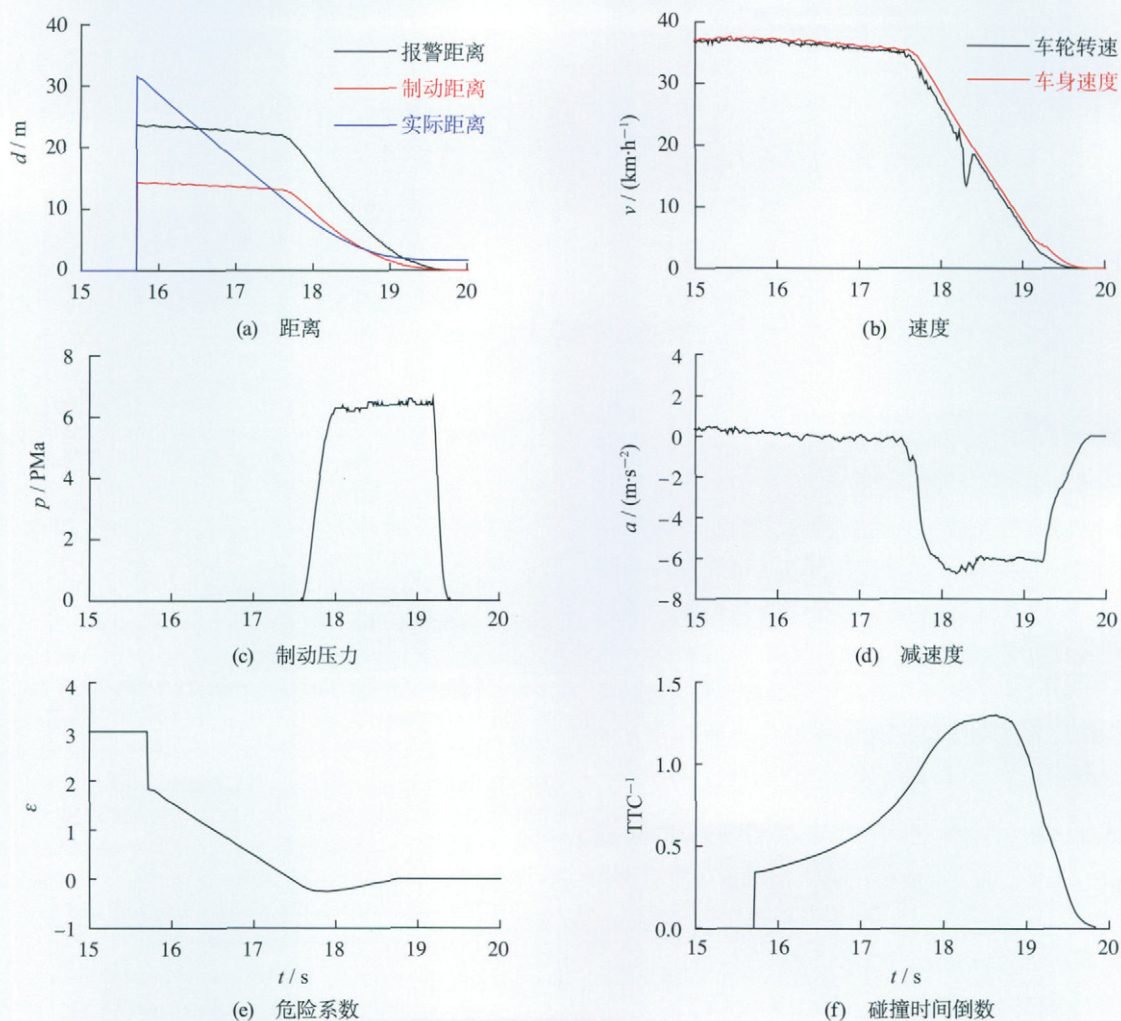


图6 自动防撞实验结果

图7为驾驶员接管主动避撞操作的试验结果。

如图7a所示,雷达在第15.2 s发现前方37 m处的障碍物,并且相对距离在16.4 s和17.3 s时分别小于报警安全距离和制动安全距离,依次启动声光报警和主动制动功能。第17.5 s,驾驶员踩下制动踏板,开始人为接管车辆控制,避撞系统立即退出。

图7b和图7c反映了避撞试验中的车速与制动压

力变化关系。在系统与人为操作切换过程中,车速并没有发生明显突变,体现了系统与驾驶员之间相互协调;同时在驾驶员接管制动操作时,系统已经自动产生了约2.2 MPa的预压力,有效缩短了需要人为制动的避撞距离。

而由图7d可知报警与主动制动对应的 TTC^{-1} 分别为0.42和0.75,与期望的驾驶员特性指标相符合。

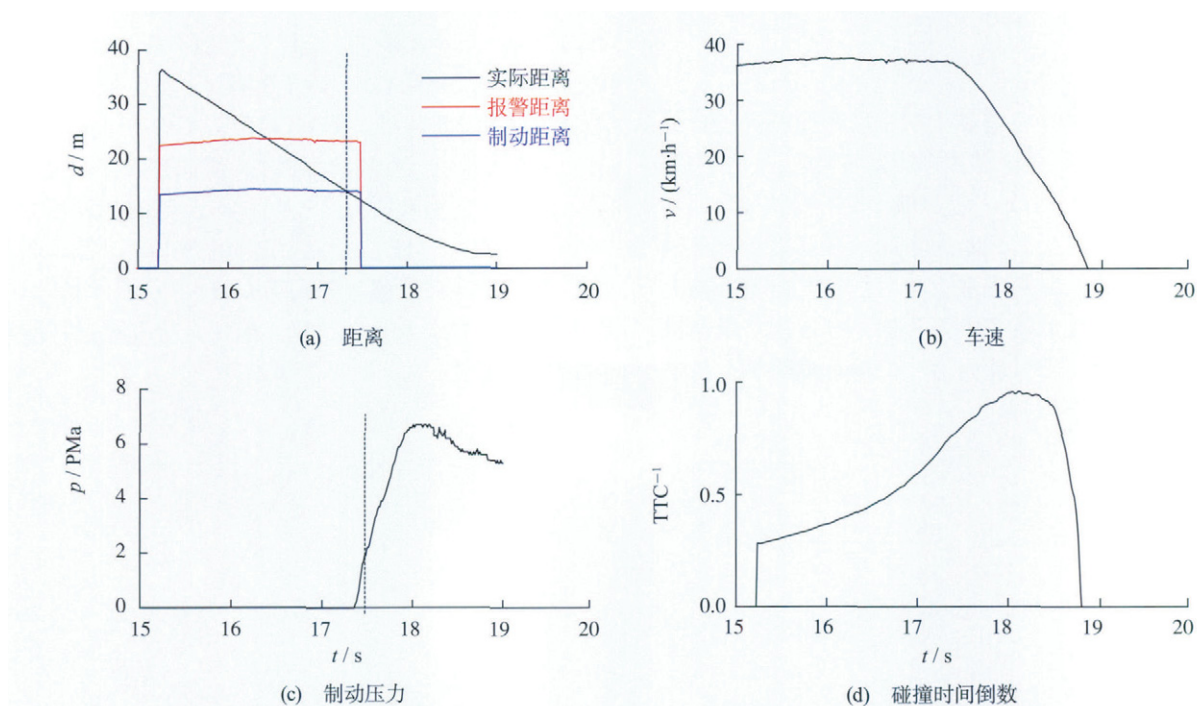


图7 主动避撞切换到人为驾驶实验结果

5 结论

试验结果表明,所建立的分级安全距离模型及其参数标定使得避撞系统的声光报警和主动制动操作符合期望的 TTC^{-1} 指标,同时在控制切换时车速没有明显的波动,说明系统特性与人为操作较为匹配。通过实车试验也验证了雷达目标检测算法及避撞系统平台的有效性和实用性。将来可引入大量驾驶员样本试验,从统计学意义上进一步论证避撞系统是否能符合大多数的驾驶员特性。

参考文献 (References)

- [1] Jansson J, Johanson J, Gustafsson F. Decision making for collision avoidance systems [R]. **SAE Paper**, 2002-01-0403.
- [2] 张磊, 王建强, 李国强, 等. 基于驾驶员跟车习惯的报警/避撞算法研究 [J]. **汽车工程**, 2006, 28(4): 351-355. ZHANG Lei, WANG Jianqiang, LI Keqiang, et al. Research on warning/collision avoidance algorithm based on the driver's objective-car following behavior [J]. **Automobile Eng**, 2006, 28(4): 351-355. (in Chinese)
- [3] 王建强, 迟瑞娟, 张磊, 等. 适应驾驶员特性的汽车追尾报警-避撞算法研究 [J]. **公路交通科技**, 2009, 26(S1): 7-12. WANG Jianqiang, CHI Ruijuan, ZHANG Lei, et al. Research of rear-head warning and collision avoidance algorithm adapted to the characteristic of driving [J]. **J of Highway and Transportation R and D**, 2009, 26(S1): 7-12. (in Chinese)
- [4] Seiler P, Song B, Hedrick J. Development of a collision avoidance system [R]. **SAE Paper**, 980853.
- [5] NAKAOKA Masumi, RAKSINCHAROENSAK Pongsathorn, NAGAI Masao. Study on forward collision system to driver characteristics and road environment [C]// **IEEE Int'l Conf on Control, Automation and Syst**, Seoul, Korea, Oct. 14-17, 2008: 2890-2895.
- [6] Lee K, Peng H. Evaluation of automotive forward collision warning and collision avoidance algorithms [J]. **Vehicle System Dynamics**, 2005, 43(10): 735-751.
- [7] Tricot N, Rajaonah B, Pacaux M P, et al. Driver's behavior

- and human-machine interactions characterization for the design of an advanced driving assistance system [C]// *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, Valenciennes, France, Oct. 10 - 13, 2004: 3976 - 3981.
- [8] McCall J C, Trivedi M M. Driver behavior and situation aware brake assistance for intelligent vehicle [J]. *Proc of the IEEE*, 2007, **95**(2): 374 - 387.
- [9] Koopmann J, Najm G. Characterizing the capability of a rear-end crash avoidance system[R]. *SAE Paper*, 2003 - 01 - 2262.
- [10] YI K, CHUNG Jintai. Nonlinear brake control for vehicle CW/CA system [J]. *IEEE/ASME Trans on Mechatronics*, 2001, **6**(1): 17 - 25.
- [11] Fancher P, Bareket Z, Ervin R. Human-centered design of an ACC-with-braking and forward-crash-warning system [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2001, **36**(2/3): 203 - 223.
- [12] McLaughlin B, Hankey M, Dingus A, et al. Development of an FCW algorithm evaluation methodology with evaluation of three alert algorithms [R]. Crash Avoidance Metrics Partnership (CAMP), National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), Final Report DOT HS 811 145, 2009.
- [13] MOON Seungwuk, YI Kyongsu. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm [J]. *Vehicle System Dynamics*, 2008, **46**(8): 661 - 690.
- [14] 王跃建. 奔腾汽车纵向主动避撞系统关键技术研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- WANG Yuejian. Study on forward collision avoidance system of passenger car Besturn [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [15] 张彪, 张俊智, 刘昭度. 四相位 ABS 控制逻辑理论及试验研究: 基于逻辑门限值 [J]. *农机化研究*, 2011, **33**(2): 710 - 714.
- ZHANG Biao, ZHANG Junzhi, LIU Zhaodu. Research on theory and trails of four phases ABS control logic: Based on logic threads [J]. *J of Agri Mechanization Res*, 2011, **33**(2): 710 - 714. (in Chinese)