

基于可变窗宽移动窗积分的汽车气囊点火 算法研究

曹立波, 周天元, 吴梦华

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

摘要: 汽车安全气囊目标点火时刻 (time to fire, TTF) 的选取对乘员的保护效果起到了关键性作用, 一直是安全气囊控制系统研究的重点。对点火条件进行分析; 利用整车有限元模型与 MADYMO 约束系统模型仿真对安全气囊目标点火时刻最佳窗宽、窗高的选取与碰撞强度相关性进行研究; 以加速度变化率为指标初步识别碰撞强度, 提出一种可变窗宽移动窗积分算法, 分析窗宽、窗高的选取对目标点火时刻的影响。实验数据表明, 可变窗宽移动窗积分算法能有效识别碰撞强度, 使目标点火时刻接近最佳点火时刻 (required time to fire, RTTF), 达到安全气囊最大限度保护乘员的目的。

关键词: 车辆工程; 移动窗积分; 可变窗宽; 安全气囊; 加速度变化率; 碰撞强度

中图分类号: U270.1 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2017)14-1602-08

Research on automobile airbag ignition algorithm based on moving window integral with variable width

CAO Libo, ZHOU Tianyuan, WU Menghua

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University,
Changsha 410082, China)

Abstract: The selection of time to fire (TTF) on automobile airbag systems plays a key role in the protection of drivers and their passengers, which always has been the focus of the research on the airbag control system. The analysis of ignition conditions is carried out in this paper. Study on the correlation between the optimal window width, depth and impact strength is made by using the finite element model and the simulation of the MADYMO model. Based on regarding the acceleration rate as the initial identification of impact strength, a moving window integral algorithm with variable width is proposed to analyze the influence of the window width and depth on TTF. The experimental results show that the algorithm proposed can effectively identify the impact strength, and make the airbag deployed at or near the required time to fire (RTTF), and achieve the maximum protection to passengers by airbag.

Key words: vehicle engineering; moving window integral; variable window width; airbag; acceleration rate; impact strength

0 引言

安全气囊系统已经成为保障驾驶员和乘员安全的基本设备, 其性能直接关系到驾驶员和乘员的生命安全。从安全气囊的配置率来看, 在欧、美、日等发达国家或地区, 汽车正面 (驾驶人和乘员) 安全气囊的配置率均已达到100%; 在中国, 汽车安全气囊的配置率也达到了70%左右, 并呈上升趋势。安全气囊的使用提高了汽车的安全性, 但安全气囊使用不当或设计不够完善, 也可能导致乘员伤亡^[1]。根据美

国审计署报告，当汽车发生正面碰撞时，单独使用安全气囊可以降低 14% 的重伤率，同时使用安全带和安全气囊可以减少 50% 的重伤率^[2]。但随着安全气囊的普及，可能对乘员造成伤害的负面效应也显露出来，误点火、漏点火和点火延迟等状况时有发生。因此，开发更为准确、稳定、智能的安全气囊系统在提高安全气囊保护效率上有着重要意义。

在安全气囊系统中，气囊点火控制算法对安全气囊的保护效果起关键作用，这是国内外科科研人员及汽车厂商的研究核心，重点识别碰撞形式和碰撞强度，然后决定气囊点爆时刻。也有不识别碰撞形式而只根据碰撞强度判断是否点火的算法，在碰撞强度识别后，找到汽车碰撞时的目标点火时刻显得尤为重要，以避免误点火或漏点火的发生。同时，国内外对智能安全气囊点火算法的研究也在不断深入，通过检测乘员类型、模糊神经网络算法和主被动安全一体化算法等确定目标点火时刻^[3-6]，成为安全气囊点火算法研究的一个重要发展方向。

目前，关于安全气囊点火算法的主要问题在两个方面，一是提高算法的抗干扰能力；二是选择最佳的目标点火时刻，使气囊最大限度吸收驾驶员和乘员的碰撞能量^[7-8]。为提高算法抗路面干扰特性，文献^{[9]~[10]}提出一种基于双向加速度合成算法，引入了汽车行驶过程中 z 向加速度，可以滤掉减速条、搓板路及高速上台阶等多种干扰工况。为确定目标点火时刻，基于加速度信号的安全气囊点火算法中有多种评判基准，如加速度、加速度绝对值的和、速度变化量、加速度变化率、加速度长度等^[11-12]。而速度变化量在前方碰撞检测中被认为是最合适的算法^[13]，加速度变化率具有预测碰撞强度的能力。为获得最佳目标点火时刻，本文提出一种可变窗宽移动窗积分算法，针对碰撞初始时刻的引爆车速，研究加速度变化率的变化规律，使用不同长度的窗宽，分别获取最佳窗高，从而使目标点火时刻处于或接近最佳点火时刻。

1 安全气囊点火条件的确定

目前，安全气囊的主要失灵模式可以归结为两方面：一方面是误点火，例如，当车辆驶离路面或位于安全气囊电子控制单元（electronic control unit, ECU）内的加速度传感器受到了足够强度的冲击时，安全气囊控制系统发出不合实际的点火命令；另一方面是漏点火，在一个需要展开安全气囊的碰撞工况下，由于点火算法没有正确识别碰撞形式或碰撞强度，从而安全气囊没有展开。

一般在描述点火条件时使用气囊引爆对应的车速表示，这里的引爆车速并不是碰撞事故中的速度，而是指与碰撞事故强度等效的固定壁障正面碰撞的等效初速度。在我国，对于 M 和 N 类车辆，规定必须装备满足 GB14166 标准的安全带，安全气囊作为安全带保护能力的补充，配合安全带使用。由于系统误差等因素，安全气囊的点火条件实际上是一个范围，低于该范围下限时安全气囊不得点爆，高于上限则必须点爆。试验表明，在 30 km/h 以下的碰撞中，三点式安全带对乘员已具有良好的保护效果，由图 1 可以看出，30 km/h 的碰撞中假人头部最大相对位移为 300 mm；而在驾驶员侧，一般认为乘员头部与方向盘之间的距离为 305 mm^[14]。但在更高的车速中，乘员头部仍有二次碰撞的危险。因此，安全气囊与安全带配合使用时，安全气囊点火条件是低于 20 km/h 正面刚性壁碰撞时不应点火，大于 30 km/h 时必须点火，20~30 km/h 时不作要求。

2 碰撞初速度对窗宽、窗高的影响

安全气囊的展开要求是在乘员受到的伤害达到最大值前必须完全展开安全气囊，因此，最佳点火时刻对应于安全气囊完全展开时车内乘员头部正好与安全气囊表面接触，而目标点火时刻则是实际碰撞中或试验中由安全气囊控制系统 ECU 发出点火命令的时刻。由于在不同的碰撞速度下，最佳点火时刻不一

样，目标点火时刻也将根据最佳点火时刻的变化而变化。如果针对某一车型，只根据某一速度下的碰撞加速度波形来获得最佳窗宽和窗高，那么在偏离测试碰撞速度下，碰撞时获得的目标点火时刻将偏离最佳点火时刻，从而导致气囊不能有效保护乘员，甚至还会伤害乘员。

2.1 最佳点火时刻的确定

对于司机侧安全气囊，最佳点火时刻的选取普遍采用“127 mm-30 ms”准则。其依据是大多数汽车的乘员与转向盘之间的间距为 305 mm，气囊充气后的厚度为 178 mm，气囊从点火到充满气体的时间为 30 ms，乘员前移 127 mm 这一时刻的前 30 ms 为最佳点火时刻。最佳点火时刻的获取有两种方法：一是通过模型仿真获取假人头部位移曲线，确定乘员前移 127 mm 这一时刻的前 30 ms 为最佳点火时刻；二是通过碰撞试验的高速录像确定，找到乘员前移 127 mm 这一时刻的前 30 ms 即为最佳点火时刻。

图 1 为不同速度情况下假人头部位移曲线，由 Taurus MADYMO 约束系统模型仿真获得。由图 1 可知，最佳点火时刻 $T=T_{127\text{ mm}}-30\text{ ms}$ ，如表 1 所示。

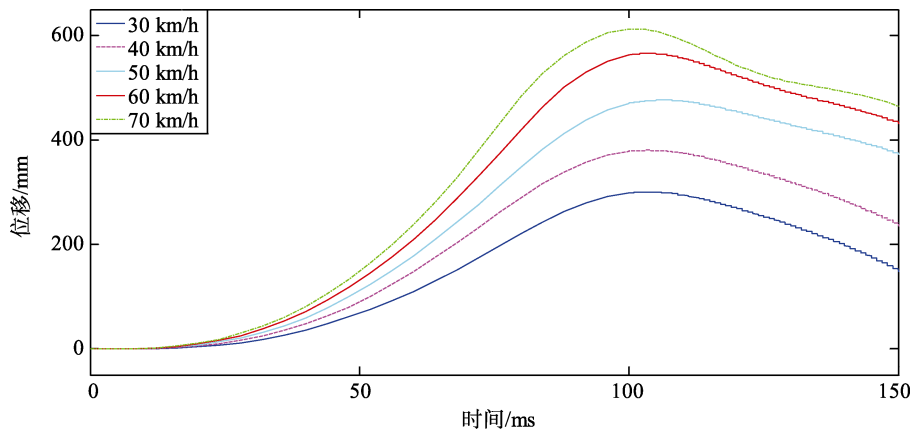


图 1 假人头部位移-时间曲线

Fig. 1 Dummy head displacement-time curves

2.2 最佳窗宽与窗高的确定

图 2 为不同初速度下的碰撞加速度曲线，由 Taurus-v3 整车有限元模型仿真并经过 CFC 60 SAE J211/1 ISO6487 Padding (Fwd-Back) 滤波获得。由文献[15]可知，移动窗积分算法是对加速度曲线 $a(t)$ 取时间窗宽 w 进行积分，如式 (1) 所示，得到指标 $S(t,w)$ ，当 $S(t,w)$ 超过预先设定的阈值 S_{th} 时，就会发出点火信号。对式 (1) 进行如式 (2)、式 (3) 处理，得到归一化指标 $M(t,w)$ ，从而进行最佳窗宽的选取。

$$S(t,w) = \int_{t-w}^t a(t)dt \tag{1}$$

$$I(t,w) = S(t,w)/w, \tag{2}$$

$$M(t,w) = I(t,w)/I(t,w)_{max}. \tag{3}$$

最佳窗宽的获得可通过 Simulink 数据处理得到，以 30 km/h 为例，分别取不同的窗宽对加速度曲线积分，然后除以窗宽，再做归一化处理即得合适的评判曲线，其中灵敏度最合适的一条曲线对应的窗宽

表 1 不同速度时的最佳点火时刻

Tab. 1 Required time to fire with different speeds

$v/(km/h)$	$T_{127\text{ mm}}/ms$	T/ms
30	68	38
40	59	29
50	53	23
60	49	19
70	46	16

即为最佳窗宽，结果如图 3 所示。可以看出，窗宽 6, 13 ms 对应的曲线在最佳点火时刻之前已经有超过最佳点火时刻的值，故当窗宽低于 13 ms 时将会发生提前点火，从而容易导致误点火。窗宽 17, 20, 30, 50 ms 对应的曲线在最佳点火时刻之前单调上升且没有超过最佳点火时刻的值，而在最佳点火时刻，17 ms 对应曲线斜率最大，因此，最佳窗宽选择 17 ms，用同样的方法可获得其他速度时的最佳窗宽，如表 2 所示。

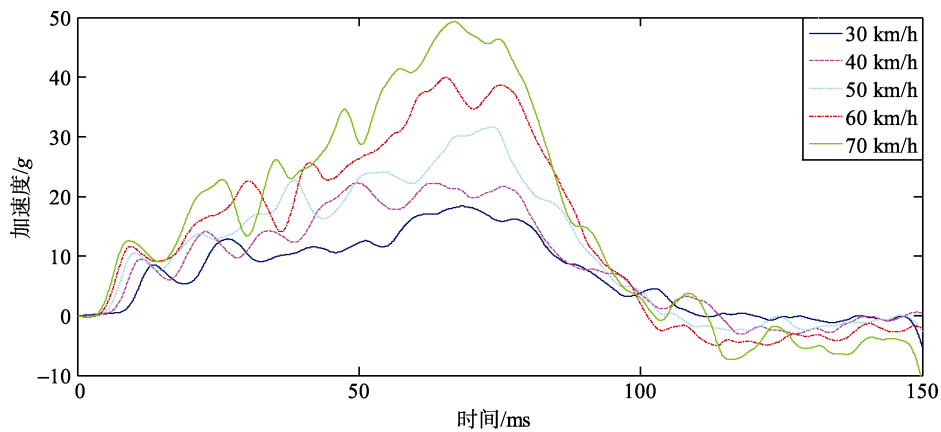


图 2 不同速度时的加速度曲线

Fig. 2 Acceleration curves with different speeds

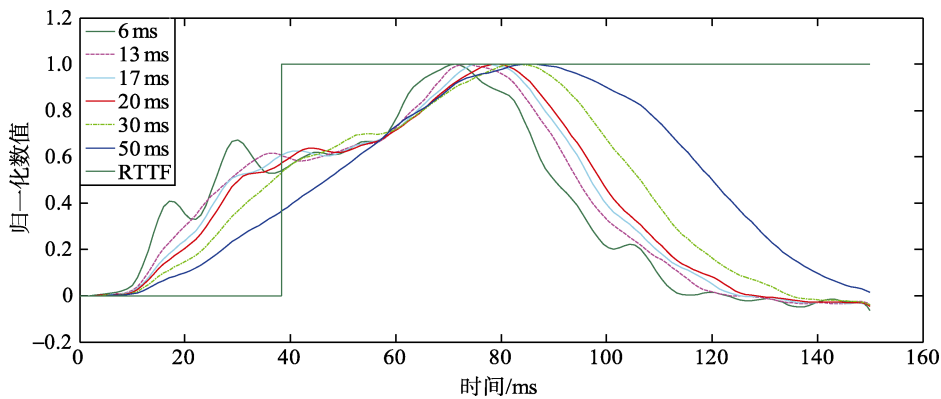


图 3 窗宽曲线

Fig. 3 Window width curves

2.3 碰撞初速度对窗宽的影响

根据表 2 数据可知，若仅用 50 km/h 对应窗宽、窗高作为最佳窗宽、窗高，当在 70 km/h 碰撞时，计算得出目标点火时刻为 20 ms，将导致目标点火时刻晚于最佳点火时刻 4 ms，不能有效保护乘员，还会由于气囊展开时的巨大冲击伤害到乘员；当在 30 km/h 碰撞时，计算得出目标点火时刻为 31 ms，将导致目标点火时刻早于最佳点火时刻 7 ms，这将会使气囊的保护作用降低。因此，在研究移动窗点火算法时必须将碰撞初速度作为一个参考量，根据不同的碰撞强度分别设置合适的窗宽和窗高，确定目标点火时刻。

表 2 最佳窗宽与窗高

Tab. 2 The best window width and window height

速度/(km/h)	最佳窗宽/ms	最佳窗高/(m/s ²)
30	17	10.5
40	12	11.3
50	9	11.4
60	13	10.0
70	11	9.9

3 可变窗宽移动窗积分算法

3.1 移动窗积分算法原理

以当前时刻为终止值,一定时间窗宽度 w 对传感器获得加速度积分,传感器采用双向加速度传感器,可同时采集水平、垂直两个方向的加速度,输出为积分值 $S(t,w)$,可得

$$S(t,w) = \int_{t-w}^t [|a_x(t)| - \lambda |a_z(t)|] dt, \quad (4)$$

其中, λ 为 x 、 z 两个方向的加速度权值, $0 < \lambda < 1$. 文献[9]~[10]表明,将 z 方向加速度以权重 $\lambda=0.7$ 参与计算可有效识别路面抗干扰特性,增加算法的稳定性,避免误点火的发生。

移动窗积分算法是对当前时刻前 w 时间内的加速度信号积分,得到一个积分值 $S(t,w)$,当积分值 $S(t,w)$ 超过预先设置的阈值 S_{th} 时,安全气囊 ECU 就会发出点火信号,否则继续进行处理与比较。

3.2 可变窗宽移动窗积分算法

在车辆碰撞中,可变窗宽移动窗积分算法若只识别车身速度 v ,然后选择对应窗宽,对加速度信号积分后与设置阈值比较,看似能得到准确的目标点火时刻。然而,在实际碰撞工况中将会产生一个严重的问题,即仍有可能提前或延迟点火,甚至误点火。例如,当目标车辆与研究车辆同向行驶时,碰撞强度将小于试验条件下等效初速度 v 时的碰撞强度,可能造成安全气囊提前点火;当目标车辆与研究车辆反向行驶时,碰撞强度将大于试验条件下等效初速度 v 时的碰撞强度,可能造成安全气囊延迟点火。

在基于加速度信号的衡量标准中,加速度变化率具有碰撞强度预测能力强的优点,以及对噪声敏感、抗干扰性差等缺点,若以加速度变化率作为初始碰撞强度判断,结合抗路面干扰能力强的移动窗积分算法,就可以弥补加速度变化率抗干扰能力差的缺点,同时,加强了移动窗积分算法的碰撞强度识别能力。加速度变化率的计算公式为

$$j(t) = \frac{da(t)}{dt}, \quad (5)$$

其中, $j(t)$ 为加速度变化率; $a(t)$ 为低通滤波后的加速度信号。

为获取最佳目标点火时刻,将可变窗宽移动窗积分算法的最佳窗宽与窗高取为加速度变化率的函数 $w(j)$,式(4)写成可变窗宽形式为

$$S(t,w(j)) = \int_{t-w(j)}^t [|a_x(t)| - \lambda |a_z(t)|] dt. \quad (6)$$

4 参数选取与算法评价

4.1 最佳窗宽、窗高的选取

由式(6)可知, $S(t,w(j))$ 表示在 $w(j)$ 时间内的速度变化量,且 $S(t,w(j))$ 与 $w(j)$ 正相关。为评价和得到一个合适的时间窗宽,将式(6)除以窗宽 $w(j)$,得

$$I(t,w(j)) = S(t,w(j))/w(j). \quad (7)$$

由式(7)可知, $I(t,w(j))$ 表征对应窗宽内的碰撞强度,其值越大,碰撞越强烈。同时,为分析碰撞曲线在不同窗宽下的灵敏度,将其归一化处理,得

$$M(t,w(j)) = I(t,w(j))/I(t,w(j))_{\max}. \quad (8)$$

图4为不同初速度碰撞下的加速度变化率曲线。在碰撞开始后的15ms内,加速度变化率峰值越大,峰值时刻越快,表明碰撞强度越激烈。为评价车辆碰撞时的碰撞强度,可将加速度变化率的第一个极值

作为判断标准，35, 45, 55, 65 km/h 对应的加速度变化率峰值分别为 23 960, 27 420, 29 680, 33 045 m/s³，分别对最佳窗宽进行选取，如表 3 所示。

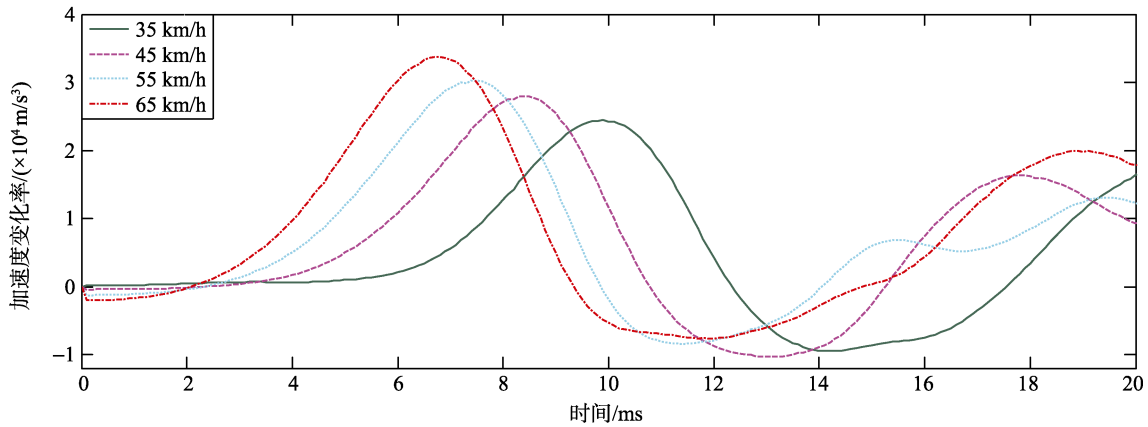


图 4 不同速度时的加速度变化率曲线

Fig. 4 Acceleration rate curves with different speeds

4.2 算法评价

对算法准确性的评价通过表 4 所示方法进行测试。测试结果如图 5 所示，其中，图 5a 为使用不变窗

表 3 不同速度时的最佳窗宽与窗高

Tab. 3 The best window width and window height with different speeds

加速度变化率/(m/s ³)	最佳窗宽/ms	最佳窗高/(m/s ²)
<23 960	17	10.5
23 960~27 420	12	11.3
27 420~29 680	9	11.4
29 680~33 045	13	10.0
>33 045	11	9.9

表 4 测试方法

Tab. 4 Testing method

测试速度/(km/h)	不变窗宽/ms	不变窗高/(m/s ²)	可变窗宽/ms	可变窗高/(m/s ²)
16	9	11.4	17	10.5
35	9	11.4	12	11.3
45	9	11.4	9	11.4
55	9	11.4	13	10.0
65	9	11.4	13	10.0
80	9	11.4	11	9.9

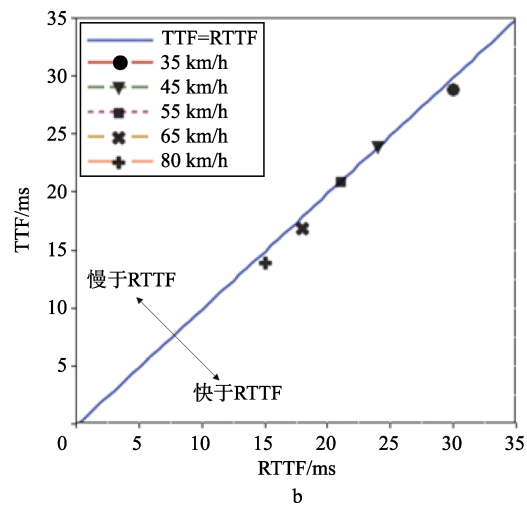
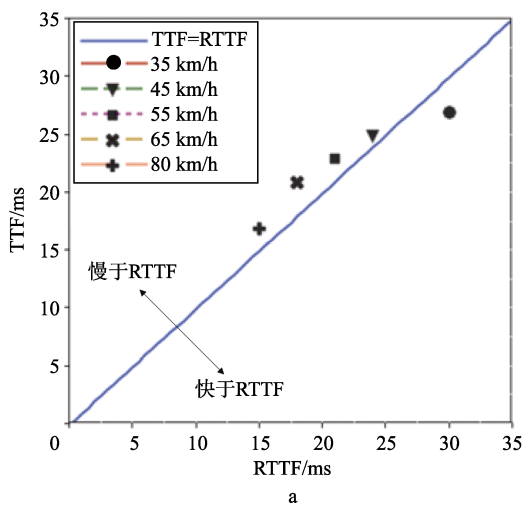


图 5 改善前后 TTF-RTTF 对比

Fig. 5 Comparison between the primary TTF-RTTF and improved TTF-RTTF

a—不变窗宽时的 TTF-RTTF 对比；b—可变窗宽时的 TTF-RTTF 对比

a-Comparison of TTF-RTTF with constant window width; b-Comparison of TTF-RTTF with variable window width

移动窗积分算法时目标点火时刻与最佳点火时刻的对比, 45, 55, 65, 80 km/h 的目标点火时刻均晚于最佳点火时刻, 这是不允许的, 将导致安全气囊猛烈撞击乘员面部, 可能造成更大伤害; 图 5b 为使用可变窗宽移动窗积分算法时目标点火时刻与最佳点火时刻的对比, 可以看出, 在各个速度下, 安全气囊可以在或接近最佳点火时刻展开。

5 结论

在对移动窗点火算法进行分析的基础上, 利用 Taurus-v3 有限元整车模型和 Taurus MADYMO 约束系统模型仿真, 证明了碰撞初速度对窗宽与窗高设计的影响, 提出了一种可变窗宽移动窗积分算法, 使用加速度变化率峰值作为基准初步判断碰撞强度, 分别设计了不同的窗宽与窗高值, 精确判断出目标点火时刻, 提高了碰撞强度识别能力。评价结果表明, 可变窗宽移动窗积分算法消除了不变窗宽时目标点火时刻偏离最佳点火时刻的错误, 提高了点火算法的准确性。

[参考文献] (References)

- [1] SEFRIN P, KUHNIGK H, KOBURG R. Injuries to car passengers protected by air bags[J]. *Anästhesiologie Intensivmedizin Notfallmedizin Schmerztherapie Ains*, 2004, 39(11): 662-667.
- [2] United States General Accounting Office. Vehicle safety technologies, challenges, and research and development expenditures for advanced air bags[R]. Washington DC: GAO, 2001.
- [3] 高振海, 肖振华, 李红建. 基于体压分布检测和支持矢量机分类的汽车乘员坐姿识别[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(7): 216-220.
GAO Z H, XIAO Z H, LI H J. Occupant position recognition with seat surface pressure distributions and support vector machines classifier[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 216-220. (in Chinese)
- [4] YANG Y, ZAO G, SHENG J. Occupant pose and location detect for intelligent airbag system based on computer vision[C]//International Conference on Natural Computation. New York: IEEE, 2008: 179-182.
- [5] 刘杰, 孙吉贵, 李红建, 等. 基于 BP 神经网络的气囊点火算法模型[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2008, 38(2): 414-418.
LIU J, SUN J G, LI H J. Setup of BP ANN-based crash sensing algorithm[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2008, 38(2): 414-418. (in Chinese)
- [6] CHO K, CHOI S B, LEE H. Design of an airbag deployment algorithm based on precrash information[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1438-1452.
- [7] 殷文强, 郭厚锐, 刘玉云, 等. 汽车斜角碰撞安全气囊点火控制策略研究[J]. *汽车工程学报*, 2014, 4(1): 44-49.
YIN W Q, GUO H R, LIU Y Y, et al. Research on the control strategy for airbag deployment on the oblique impact[J]. *Chinese Journal of Automotive Engineering*, 2014, 4(1): 44-49. (in Chinese)
- [8] 唐国强, 朱西产. 汽车安全气囊点火算法的研究[J]. *公路与汽运*, 2009(2): 1-5.
TANG G Q, ZHU X C. Research on automobile airbag ignition algorithm[J]. *Highways & Automotive Applications*, 2009(2): 1-5. (in Chinese)
- [9] 郑维, 黄世霖, 张金换. 双向加速度合成气袋控制算法及其抗路面干扰特性[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2003, 43(2): 250-253.
ZHENG W, HUANG S L, ZHANG J H. Idirectional acceleration airbag control algorithm and its anti-road agitation characteristics[J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 2003, 43(2): 250-253. (in Chinese)
- [10] 葛如海, 朱文婷, 臧绫. 基于改进移动窗算法的碰撞识别控制策略的研究[J]. *汽车工程*, 2011, 33(7): 590-593, 622.
GE R H, ZHU W T, ZANG L. A study on the control strategy for vehicle impact identification based on improved moving

- window algorithm[J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33(7): 590-593, 622. (in Chinese)
- [11] PARK T W, JEONG H Y, PARK S W. A crash severity algorithm for all frontal crash modes using compensation factors[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2006, 220(5): 531-541.
- [12] JEONG H Y, KIM Y H. New algorithm and accelerometer locations for frontal crash discrimination[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2001, 215(11): 1171-1178.
- [13] STÜTZLER F J, CHOU C C, LE J, et al. Development of CAE-based crash sensing algorithm and system calibration[Z]. Hampshire, UK: Sae World Congress & Exhibition, 2003.
- [14] CHAN C Y. Fundamentals of crash sensing in automotive airbag system[M]. Washington DC: Society of Automotive Engineers, Inc., 2000.
- [15] 王建群, 张金换, 黄世霖. 汽车安全气囊点火控制算法的研究[J]. *汽车工程*, 1997, 19 (1): 11-14, 28.
WANG J Q, ZHANG J H, HUANG S L. A study on an algorithm for airbag actuation[J]. *Automotive Engineering*, 1997, 19 (1): 11-14, 28. (in Chinese)