

汽车安全气囊控制器验证方法及实现

白中浩,刘玉云,王玉龙

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室,湖南 长沙 410082)

摘要:针对在安全气囊控制器开发过程中需要进行大量实车或台车碰撞试验,获得点火阈值验证曲线试验工作量大、成本高昂的问题,进行了可提高开发效率降低开发成本试验方法的替代方案研究。基于安全气囊控制器工作原理,提出了一种利用摆锤冲击滑车模拟汽车碰撞前期 30 ms 加速度波形的试验方法,替代安全气囊控制器前期开发的台车试验验证,开发出了相应的试验装置,建立并验证了该系统的有限元模型。基于实际碰撞中加速度的差异性,引入双梯形理论对实车碰撞曲线进行了简化,并应用该方法模拟简化后的加速度曲线,并对某新开发的气囊控制器进行试验验证。研究结果表明:该验证方法得到的安全气囊点火判断曲线与实车碰撞试验获得的曲线最大误差在 10% 以下,采用摆锤冲击滑车的模拟碰撞波形的试验方法可以用于安全气囊控制器的开发设计。

关键词:汽车工程;控制器验证;摆锤冲击;安全气囊

中图分类号:U491.6

文献标志码:A

Validation method of airbag controller and its application

BAI Zhong-hao, LIU Yu-yun, WANG Yu-long

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

Abstract: The cost of the development of airbag controller is very expensive for that generally required dozens of vehicles or sled tests to get ignition curve. To resolve this problem, this paper proposed an experimental method based on airbag controller works to simulate acceleration curves the pre-30 ms of crash by impacting tackle with a pendulum, and developed the related apparatus. A finite element model was established and verified by relevant experimental results. A theory of dual trapezoidal curve was introduced to simplify automotive impact acceleration curves based on the difference of crash acceleration every time. A new developing airbag controller was verified by simulating the simplified acceleration. Test results show that the maximum error between the value of airbag ignition obtained by the method and the value of the actual ignition is less than 10%, which proves that the method can be used for the development and design of the airbag controller. 16 figs, 16 refs.

Key words: automobile engineering; controller verification; pendulum impact; airbag

0 引言

近年来,中国汽车交通事故引发的社会矛盾越

来越突出,消费者对汽车安全性能的意识也逐渐增强,促使各汽车生产厂商对车辆的安全性越来越重视。从安全气囊的配置率来看,欧、美、日汽车正面

(驾驶人和乘员)安全气囊的配置率都已达到 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,但是安全气囊使用不当,或设计不够完善,也可能导致乘员伤亡^[1]。据 NHTSA 统计,在交通事故中,因为安全气囊因素而导致乘员伤亡的事故已有 200 多例^[2]。因此,开发更为智能、准确的气囊算法在提高安全气囊保护效率上有着重要的意义。在安全气囊的开发过程中,为了验证控制器系统的性能,需要进行大量的碰撞试验^[3]。虽然当前在安全气囊开发中大量采用虚拟开发,大大降低了开发成本,但是难以完全取代碰撞试验^[3-7]。但是碰撞试验具有不可重复性,试验成本大,因此,寻找一种可以模拟碰撞加速度曲线的低成本、高效率的方法显得非常必要^[8-11]。

目前,已有国内外学者对该课题进行了一些研究,如 Sung 等研究了侧面碰撞加速度模拟方法^[5];Khan 等进行了安全气囊开发的试验研究^[9]。中国的一些学者也进行了该方向的研究^[12-14]。比如,有学者提出的等效双梯形理论,降低了台车试验拟合曲线的难度,减少了约束系统的开发成本^[7];郭波等进行了计算机模拟波形的虚拟研究^[14]。但是,这些方法中双梯形理论的方法只是降低拟合碰撞曲线波形的难度,没有减少台车试验的使用,虚拟波形研究也局限于仿真当中,因此,降低的开发成本有限。为此,本文提出了一种利用摆锤冲击滑车的方法来获得安全气囊 ECU 开发中所需的碰撞前期加速度,以降低开发成本,提高开发效率。

1 摆锤冲击方法的可行性分析及实现

1.1 汽车碰撞的特点

汽车碰撞,是一种比较复杂的力学过程,就汽车本身力学性质而言,既有钢铁结构高刚性的一面,又有在一定撞击力作用下产生塑性变形吸能的一面。同时由于碰撞中的汽车质量、速度、汽车结构和外形上的差异,对汽车碰撞后的损坏程度以及运动状况都有很大的差别,但其碰撞过程仍然符合牛顿第 2 定律,即加速度与所受的力成正比。

在安全气囊控制器的开发过程中,最重要的信息就是汽车碰撞的加速度,通过控制器点火算法对采集的加速度进行计算,根据计算结果来判断是否执行相关点火操作。根据汽车碰撞的特点和安全气囊控制器工作的原理,可以采用模拟碰撞的装置获得碰撞加速度。因此,本文提出使用摆锤冲击滑车,使滑车获得一定的加速度的方法。在滑车尾部安装

吸能筒来改变滑车加速度的变化趋势,模拟出实车的碰撞曲线。

1.2 加速度曲线的特征

摆锤冲击装置的主要结构由摆锤、滑车及导轨组成。要使开发的摆锤冲击装置能够模拟气囊开发中所要求的加速度曲线,取决于两方面的因素:一是碰撞的加速度能够持续的时间;二是加速度的波形变化。

在气囊的开发过程中,点火算法所采用的最佳点火时刻的基本准则是 127 mm(5 in)-30 ms 准则,即碰撞发生后,人的头部移动 127 mm 的时间减去 30 ms 的时刻为最佳点火时刻。因此,在气囊算法验证中使用的加速度曲线并不需要使用全部时间段。虽然整个汽车碰撞过程可能持续 80~100 ms,但对于气囊算法有用的时间段只有碰撞开始后的 30 ms 左右^[15-16]。因此,不需要模拟出全部的加速度,而只需要模拟出碰撞曲线的前 30 ms 即可,降低了开发的难度。

在实车碰撞试验中,同一车型在相同的碰撞条件下加速度曲线也不尽相同,因此,模拟的加速度曲线不需要完全一致,可以对实车的碰撞加速度曲线进行简化。根据双梯形波理论,可将加速度曲线简化成相应的梯形波^[7]。模拟的加速度曲线在简化的波形附近,通过气囊点火算法进行处理后,与实车点火判断曲线的误差在适当范围内即能满足验证要求。

要模拟出简化的加速度曲线,需要找到适应的吸能筒组合。通过建立摆锤冲击装置的有限元模型,应用仿真的方法找到匹配车型的吸能筒结构,这样可以提高匹配相应车型的吸能筒结构的效率。

1.3 摆锤冲击方法的实现

为了复现上述的实车碰撞加速度特征,开发了如下页图 1 所示的摆锤冲击试验装置,把摆锤设定在需要的高度,自由下落。当摆锤下落到最低点附近时撞击安装在滑车尾部的吸能筒,从而使滑车获得一定的加速度。滑车获得的加速度与吸能筒的结构有关,因此,开发不同车型的安全气囊时,需要安装不同性能的吸能筒以模拟出相应车型的碰撞加速度曲线。

1.4 摆锤与滑车相对质量的计算

根据安全气囊的起爆条件,由能量守恒定律、动量定理及动能定理(暂时忽略吸能筒变形吸收的能量以方便计算)初步计算摆锤装置的参数

$$M_1gH+\frac{1}{2}M_1V_1^2=0 \tag{1}$$

$$M_1V_1=M_1V_2+MV \tag{2}$$

$$\frac{1}{2}M_1V_1^2=\frac{1}{2}M_1V_2^2+\frac{1}{2}MV^2 \tag{3}$$

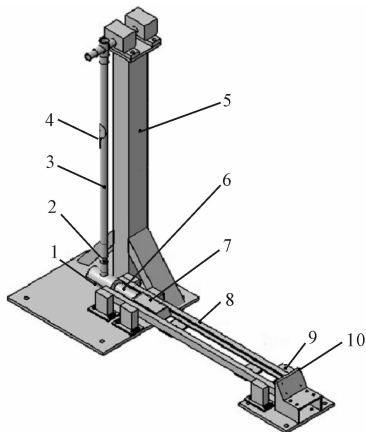


图1 摆锤冲击试验装置

Fig.1 Test device of pendulum impact

注:1-摆锤;2-高度微调螺母;3-摆杆;4-摆角测量器;5-支架;6-吸能筒;7-小车;8-导轨;9-导轨支座;10-缓冲挡板

式中: H 为摆锤的高度; M_1 为摆锤质量; V_1 为摆锤下落到最低点的速度; V_2 为碰撞后摆锤的速度; M 为滑车质量; V 为碰撞后滑车获得的速度; g 为重力加速度。

设计的滑车质量 M 为 4.5 kg,摆锤高 H 为 1.65 m,摆锤质量 M_1 为 16.7 kg。由上述公式计算,摆锤从最高处(即 180°)下落,撞击滑车,滑车能获得的速度 V 为 45.77 km/h。满足气囊算法验证的需要。

2 有限元模型的建立及验证

为了得到相应车型的碰撞曲线,首先需要匹配吸能筒结构。采用仿真与试验相结合的方法,可以减少试验次数,缩短试验周期。本文利用 Hypermesh 软件建立了摆锤冲击装置的有限元模型,如图 2 所示。考虑到摆锤在冲击的过程中几乎不变形,因而将摆锤设置为刚体。吸能筒和滑车通过梁单元进行刚性连接,滑车在轨道上的滚动阻力非常小,在建模的过程中,忽略滑车与轨道间的摩擦阻力。

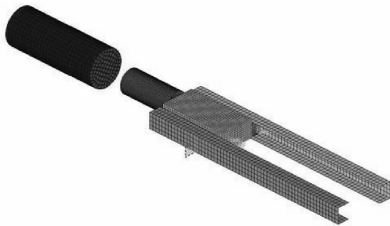


图2 摆锤冲击装置的有限元模型

Fig.2 FE model of pendulum impact device

因为该装置的有限元模型是经过简化后得到的,该有限元模型的简化是否合理,结构之间的连接

是否恰当,材料参数的定义是否正确,都会影响到仿真分析结果的真实性与可靠性,所以有必要对仿真模型进行试验验证。

使用厚度为 0.1 mm,长度为 160 mm 的铝合金材质吸能筒进行验证试验。摆锤从 80° 的高度自由下落,测得摆锤下落到最低点的速度为 4.87 m/s。有限元模型和验证试验分别如图 2、图 3 所示。

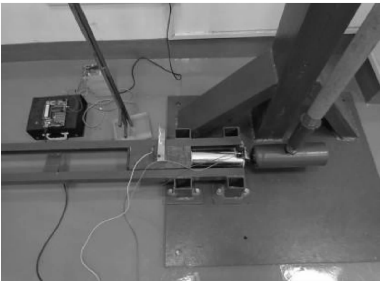


图3 试验验证装置

Fig.3 Verification test device

试验滑车加速度曲线及仿真加速度曲线如图 4 所示。从图 4 可知,仿真加速度曲线与试验加速度曲线在峰值及峰值时刻上存在一定的误差,但误差都控制在 10%以内,且 2 条曲线的变化趋势一致,通过曲线对比软件分析,2 条曲线的相似度为 0.94。仿真得到滑车的速度为 5.2 m/s,误差为 6.7%,这是由于仿真中忽略摆锤下落的阻力造成的。虽然试验与仿真结果有一定的误差,但仍在可接受的范围内。因此,可以说该有限元模型是有效的,模型的简化过程、结构的连接方式、材料参数的定义是合理的、正确的,可以用于后续匹配相应车型吸能筒的研究中。

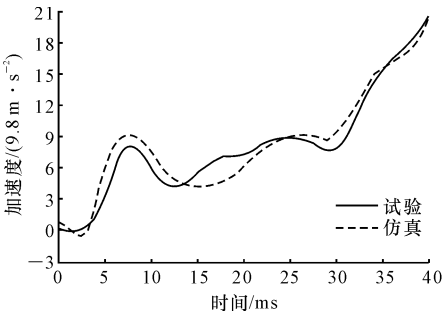


图4 仿真及试验加速度曲线

Fig.4 Acceleration curves of simulation and test

3 等效梯形波理论

3.1 等效梯形波理论

使用摆锤冲击方法完全模拟目标加速度曲线,无疑将加大模拟的难度,而且也没有必要完全模拟出实车碰撞的加速度曲线。根据有关研究,同一车型,相同碰撞形式下的碰撞加速度曲线误差达到了

20%左右,因此,完全模拟出目标加速度曲线既增加了模拟的难度,又没有实际的意义。

等效梯形波是为了简化模拟难度而提出的一种方法,是根据实车碰撞车体的加速度波形的某些特征提取出的梯形曲线,如图5所示,它可以反映车体加速度波形的基本特征,根据梯形理论提取的参数特征为等效双梯形波应满足的边界条件。

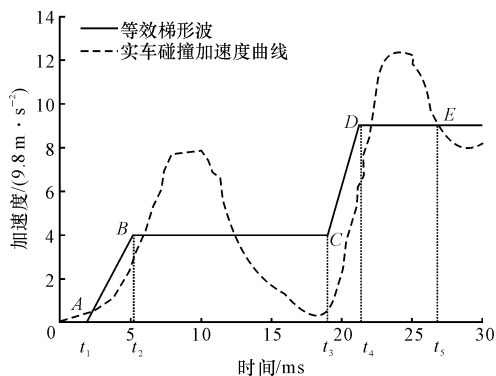


图5 等效梯形波与实车碰撞加速度曲线

Fig. 5 Equivalent dual-trapezoidal wave and vehicle impact curves

3.2 等效双梯形波特征的提取

在图5中, t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 为图中的特征点A、B、C、D、E所对应的点,点E为模拟的时间终点。 t_1 为碰撞开始的时刻, t_3 为发动机前部被完全压溃的时间点,直线AB段和CD段的斜率等于相应加速度曲线的上升段拟合直线的斜率。B点的纵坐标由式(4)求得,D点的纵坐标由式(5)求得

$$\Delta_1 = \int_0^{t_3} a(t) dt \quad (4)$$

$$\Delta_2 = \int_{t_3}^{t_5} a(t) dt \quad (5)$$

式中: Δ_1 为梯形 t_1BCt_2 围成的面积; Δ_2 为梯形 t_2DEt_3 围成的面积; $a(t)$ 为加速度函数。

4 摆锤冲击方法的应用

使用摆锤冲击方法模拟出与实车碰撞曲线相近的加速度曲线,对新开发的安全气囊控制器进行验证,验证控制器能否按照设计目标进行工作,试验装置能否生成符合要求的加速度。为此,对控制器进行抗冲击性试验,数据采集一致性试验以及低速不起爆和高速起爆验证试验。

4.1 抗冲击试验验证

为了检查新开发的控制器硬件上的缺陷,验证控制器可以承受规定严酷等级冲击的能力,需要对控制器进行机械冲击验证试验。

按照GB-2423法规中机械冲击试验的方法,选择加速度峰值为100 g,持续时间6 ms的严酷等

级对安全气囊控制器进行试验。考虑到作者开发的冲击装置的特点,选择半正弦脉冲作为冲击试验的试验波形。半正弦脉冲波形的公差范围如图6所示。

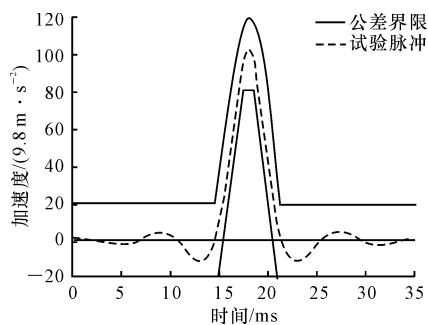


图6 公差范围及冲击试验加速度

Fig. 6 Tolerance range and test curves

根据法规要求,试验的冲击波形只要在公差允许的范围即可。通过调整摆锤的高度及摆锤与滑车接触的刚度,使冲击后滑车的加速度落在图6所示的区间内。

使用上述调试方法得到的试验参数进行冲击试验,验证试验如图7所示。



图7 抗冲击验证试验

Fig. 7 Test of impact resistance

从图可以看出,冲击的加速度在法规规定的公差范围内,冲击试验的加速度符合法规的要求。试验后,对控制器外观进行检查,控制器没有出现物理上的损坏,对控制器进行测试,控制器仍能正常工作。说明新开发的气囊控制器符合法规中抗冲击性的要求,可以用于进一步的研究中。

4.2 加速度的一致性验证

安全气囊控制器判断点火的依据主要来自于碰撞过程中的加速度,对碰撞中采集的加速度使用控制器设定的算法进行计算,计算得到的阈值若大于设定的阈值则发出点火信号,否则维持等待状态。而在控制器算法前期设计过程中,所依据的加速度来自碰撞试验中数据采集系统采集的数据,因此,有必要对新开发的安全气囊控制器采集信号的一致性进行试验验证,以保证气囊控制器采集的加速度信号与外部采集仪采集的加速度信号的误差在可接受

的范围内。

使用摆锤冲击装置进行试验,试验验证如图 8 所示,试验采集的加速度如图 9 所示。通过曲线对比软件分析,2 条曲线的相似度为 0.92,考虑到采集仪加速度传感器与气囊控制器安装位置不同,造成测量点的不同,导致测量数据存在一定的差异,可以认为控制器采集的数据与采集仪采集的数据具有一致性,可用于进一步的研究。



图 8 一致性验证试验
Fig. 8 Consistency verification test

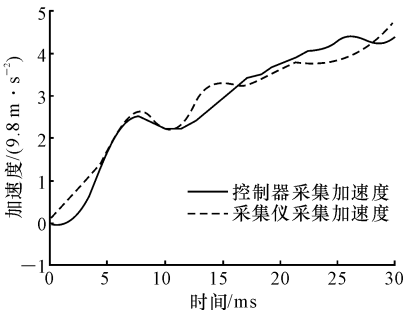


图 9 加速度对比曲线
Fig. 9 Acceleration curves

4.3 低速不起爆验证试验

某车型 12.8 km/h 速度下的正面碰撞加速度曲线根据梯形理论进行简化,如图 10 所示。

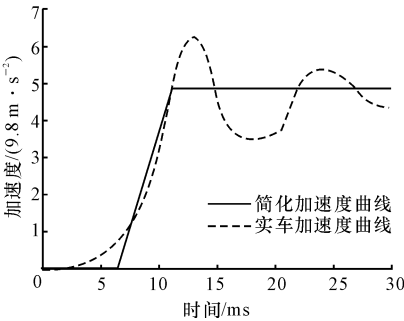


图 10 实车碰撞与简化的加速度曲线
Fig. 10 Acceleration curves of vehicle impact and its simplification

使用第 3 节建立的有限元模型进行仿真。仿真中可调节的参数有吸能筒的长度、壁厚、诱导孔的位置。最终确定使用圆形铝筒作为吸能结构的参数为:长度 250 mm、厚 0.1 mm、直径 60 mm,诱导孔

直径 10 mm,圆心距离端面 15 mm。

按照仿真的参数进行试验,试验如图 8 所示,滑车尾部更换符合仿真形式的吸能筒。共进行 3 次模拟试验,试验模拟的加速度如图 11 所示。3 次试验的加速度曲线峰值误差最大为 10%,最大误差出现时刻为第 30 ms,平均误差为 7%,曲线相似度最低为 91%(试验 1 和试验 2),造成误差的主要原因是吸能筒材料的不均匀。整个加速度的变化趋势基本一致,3 次试验说明该装置模拟加速度曲线的重复性较好。在 25~30 ms 区间内,试验 2 的变化趋势与其他 2 次试验的变化趋势不同主要是因为吸能筒变形的偶然性造成的,但其加速度值仍然保持在简化梯形上下波动,不影响试验的重复性。取 3 次试验平均加速度与实车碰撞加速度采用安全气囊控制算法进行计算,得到点火判断曲线如图 12 所示。控制器输出的判断曲线及点火电压如下页图 13 所示。

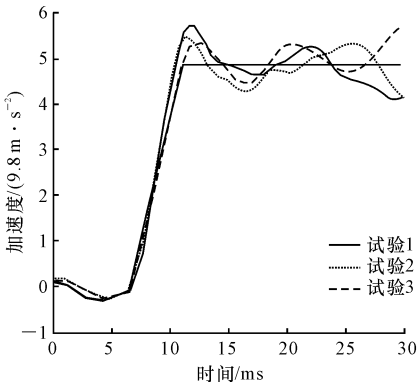


图 11 试验加速度曲线
Fig. 11 Acceleration curves of test

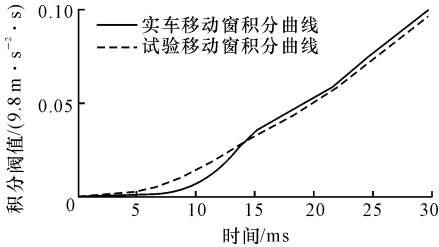


图 12 试验与实车移动窗积分曲线
Fig. 12 Moving window integral curves of test and vehicle impact

从图 12 可知,试验与实车判断曲线在 10 ms 处有最大误差,最大误差为 5.3%。从图 13 可知,在低速时,设定阈值 0.15g(s),移动窗积分值少于设定的阈值,安全气囊不点火,输出的点火信号一直为低电平。

4.4 高速起爆验证试验

根据安全气囊点火条件,车速高于 22.4 km/h 的正面碰撞中,安全气囊必须点火。选择同一车型 22.4 km/h 车速下的正面碰撞加速度曲线,根据整

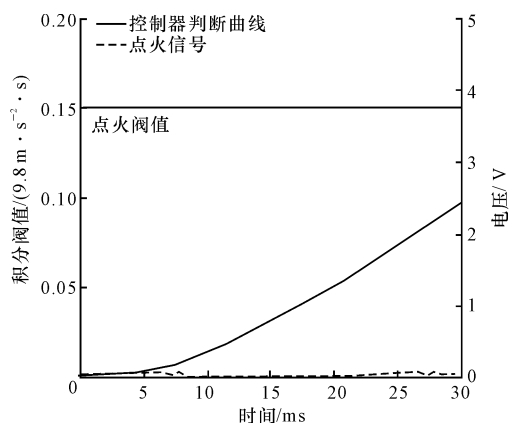


图 13 控制器点火信号

Fig. 13 Fire signal of controller

车试验结果分析,在 22.4 km/h 的正面碰撞中,该车型根据 127 mm-30 ms 准则得到的点火时刻是在 20 ms 之后。因此,第 1 个阶梯的简化造成的误差不会对点火时刻造成大的影响,根据双梯形理论将目标曲线进行简化,如图 8 所示。

根据仿真得到的吸能筒参数为:吸能筒长度 250 mm、前端 120 mm 的厚度为 0.1 mm、后端 130 mm 的厚度为 0.2 mm、直径 60 mm,诱导孔直径 10 mm,圆心距前端 15 mm。

按照该参数进行 3 次重复试验,加速度曲线如图 14 所示,峰值误差最大 9%(试验 1 与试验 2),最大误差时刻第 23 ms,平均误差 7%,曲线相似度 94%。造成误差的主要原因是吸能筒材料不均匀,吸能管厚薄连接处的差异性造成加速度上升阶段峰值误差。取 3 次试验平均加速度与实车碰撞加速度使用控制器算法进行计算。得到试验与实车的点火判断曲线如图 15 所示。控制器输出的点火信号如图 16 所示。

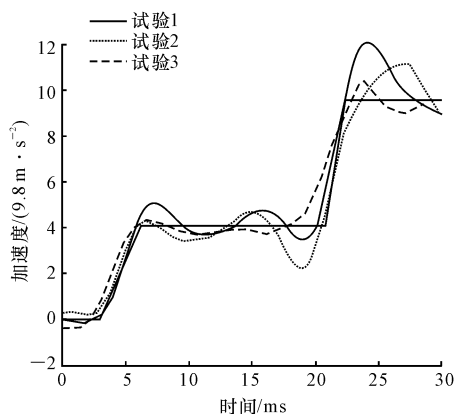


图 14 试验加速度曲线

Fig. 14 Acceleration curve of test

从图 15 分析可知,试验与实车判断曲线在 21 ms 处有最大误差,最大误差为 9%。由控制器点火信

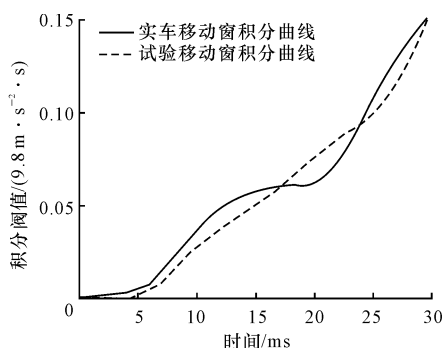


图 15 试验与实车移动窗积分曲线

Fig. 15 Moving window integral curves of test and vehicle impact

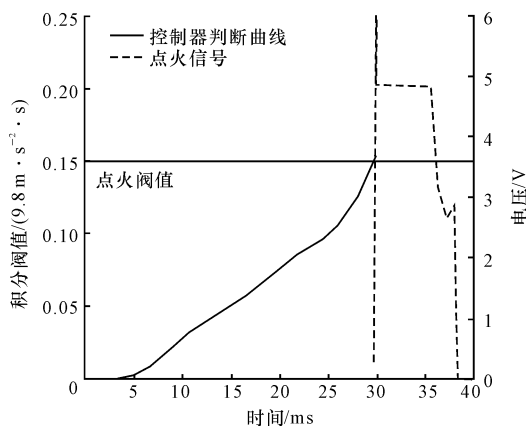


图 16 控制器点火信号

Fig. 16 Fire signal of controller

号可知,控制器在 29.4 ms 处已发出点火信号。在 21 ms 处试验与实车的判断曲线误差达到 9%,主要是由第 1 个阶梯的简化造成的。虽然前端的误差比较大,但是之后的误差逐渐减少,对控制器的点火判断造成的影响不大。从图 16 控制器的点火信号可知,移动窗积分值达到设定阈值 0.15 ($g \cdot s$) 时,控制器按照设计的要求发出了点火信号。

综上所述,由摆锤冲击方法模拟的加速度曲线经过气囊算法进行计算,通过与实车的判断曲线进行对比,得到其误差能够满足工程上小于 10% 的要求。虽然模拟的加速度与实车碰撞的加速度在细节上存在一定的差异,但是两者的变化趋势是一致的。在实际应用中,使用摆锤冲击滑车模拟的加速度只是用于安全气囊控制器开发的初期,模拟大量近似的加速度曲线,用于验证控制器的硬件功能完好性、控制器算法对碰撞的灵敏性以及加速度的分辨能力,因此,摆锤冲击模拟的加速度与实验碰撞的加速度存在差异并不影响对控制器前期的验证。通过抗冲击、数据一致性以及低速模拟和高速模拟的验证试验,对新开发的安全气囊控制器进行了验证试验,控制器能够按照设计要求工作。

5 结 语

(1)针对安全气囊控制器的前期验证,提出了摆锤冲击的验证方法,并验证了该方法的可行性。

(2)开发的摆锤冲击试验装置,模拟加速度重复性好、试验方便、成本低、效率高。

(3)试验验证了新开发的安全气囊控制器系统满足设计要求,为下一步进行智能安全气囊控制器算法的研究打下了基础。

(4)目前采用摆锤冲击滑车模拟碰撞加速度波形的方法,模拟低速(低于 30 km/h)碰撞加速度能够很好地满足安全气囊控制开发的要求,暂未对该方法高速碰撞(如 50 km/h)加速度波形模拟精度进行验证,因此,在下一步的研究中将进行高速碰撞加速度波形模拟精度的分析及应用研究。

参考文献:

References:

- [1] Sefrin P, Kuhnigk H, Koburg R. Injuries to car passengers protected by air bags[J]. ANIS • Anasthesiologie, 2004, 39(11): 662-667.
- [2] National Highway Traffic Safety Administration. Counts of frontal air bag related fatalities and seriously injured persons [R]. Washington DC: National Highway Traffic Safety Administration, 2007.
- [3] 张金换, 杜汇良, 马春生. 汽车碰撞安全性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
ZHANG Jin-huan, DU Hui-liang, MA Chun-sheng. Automotive design for crash safety[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2010. (in Chinese)
- [4] 杨志邦, 徐 成, 周 旭, 等. 汽车安全气囊控制器测试验证平台设计与实现[J]. 北京: 计算机工程与应用, 2011, 27(1): 65-68.
YANG Zhi-bang, XU Cheng, ZHOU Xu, et al. Design and implementation of testing and validation platform for automotive airbag controller[J]. Beijing: Computer Engineering and Applications, 2011, 27(1): 65-68. (in Chinese)
- [5] Sung K, Lee C S. Development of impact simulator and airbag control algorithm for reliable detection of side-impact collisions[J]. International Journal of Vehicle Design, 2002, 30(1/2): 33-43.
- [6] Pinkorn B. Crash sensing and algorithm development for frontal airbag systems using CAE methods and mechanical Tests[R]. Detroit: SAE World Congress, 2004.

- [7] 马志雄, 朱西产. 台车试验中采用等效双梯形减速度曲线的模拟研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(5): 411-415.
MA Zhi-xiong, ZHU Xi-chan. A study on the equivalent dual-trapezoids deceleration curve used in sled test for frontal crash simulation[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(5): 411-415. (in Chinese)
- [8] 苏 睿. 安全气囊试验系统设计及复合管式安全气囊研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
SU Rui. Airbag deployment design for structure improvement and sandwiched tube-type airbag research [D]. Changsha: Hunan University, 2006. (in Chinese)
- [9] Khan M U, Moatamedi M. A review of airbag test and analysis [J]. International Journal of Crashworthiness, 2008, 13(1): 67-76.
- [10] Chen G, Li J L. The design of a pendulum impact test device for airbag performance[J]. Advanced Materials Research, 2011, 332-334(2): 1188-1192.
- [11] Chou C C, Aekbote K, Le J J. A review of side impact component test methodologies[J]. International Journal of Vehicle Safety, 2007, 2(1/2): 141-184.
- [12] 李 媛. 安全气囊综合装配设备的研发[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(4): 40-41.
LI Yuan. R&D of integrated assembly equipment for automobile airbag[J]. Machine Design & Research, 2013, 29(4): 40-41. (in Chinese)
- [13] 叶卫东, 刘啸峰. 安全气囊控制器自动测试系统的设计与研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(4): 467-469, 475.
YE Wei-dong, LIU Xiao-feng. Design and research on automatic test system for airbag electronic control unit[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(4): 467-469, 475. (in Chinese)
- [14] 郭 波, 管菊花, 李 杰. 基于 ARM 的汽车安全气囊控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(9): 2091-2094.
GUO Bo, GUAN Ju-hua, LI Jie. Automotive airbag control system based on the microcontroller with ARM cortex-M3 kernel[J]. Computer Measurement & Control, 2010, 18(9): 2091-2094. (in Chinese)
- [15] Seo Y, Chung S H, Yoh J J. Automotive airbag inflator analysis using the measured properties of Modern propellants[J]. Fuel, 2011, 90(4): 1395-1401.
- [16] Teng T L, Chang F A, Liu Y S, et al. Analysis of dynamic response of vehicle occupant in frontal crash using multibody dynamics method[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2008, 48(11/12): 1724-1736.