

Vehicle Frontal Impact Acceleration and Occupant Injury Research

Li chong, Zhu Haitao

(China Automotive Technology Research Center, Tianjin, 300162)

Abstract: The probability of front impact is the highest in the collision accident. Body-acceleration is the most intuitive and most easily available test data. There is a close correlation between body-acceleration versus the time and the passenger injury. These years, this close correlation has become clearer by study. This paper aims to study three vehicle acceleration simulation waveforms and TESW model is the best, through TESW input to analyze the dynamic response characteristics and the effect of parameters change on the vehicle body and human chest.

Keywords: body-acceleration, square-wave model, TESW, chest-acceleration

正面碰撞车身加速度与乘员胸部损伤研究

李充, 朱海涛

(中国汽车技术研究中心, 天津, 300162)

摘要: 前部碰撞是汽车事故中发生频率最高的一种碰撞形式。车身加速度是最为直观且最易获得的试验数据。车体碰撞的加速度-时间历程与乘员伤害之间存在密切的相关性, 两者之间的定量关系经过学术界多年的研究已经趋于明确。本文通过对三种车身加速度模型的研究, 得出 TESW 模型的仿真度最高。通过 TESW 方波的输入, 来分析车体和人体胸部间的动态响应特性及参数变化对乘员胸部伤害的影响。

关键词: 车身加速度, 方波模型, TESW, 胸部加速度

1 引言

在汽车正面碰撞中, 将“车辆-乘员”近似为一个整体动力学系统, 应用“车体缓冲分析”的方法来研究车辆与乘员之间的相互作用, 这是研究汽车被动安全较为常用的概念。在整个碰撞过程中乘员的总动能分为两部分, 即随车体运动而耗散的能量(车体缓冲过程)和随约束系统变形而耗散的能量(约束系统缓冲过程), 定义车体的缓冲效率以衡量车体缓冲耗散的能量占乘员总动能的比例, 试验结果表明^[1]在正面碰撞中乘员胸部加速度与车体缓冲效率成反比关系; 车体的缓冲效率与其耐撞性能密切相关, 由此可以推断车辆的耐撞性与乘员伤害之间存在某种直接的关系。

车身加速度值是车辆耐撞性能中最易获取的特征参数之一, 与此同时在人体各个部位的动态响应中乘员躯干也是最能够表征人体受车辆运动影响的物理量, 其运动状态主要表现为胸部在水平方向的加速度, 而在横向及垂直方向受到的冲击较小。因此通过对加速度波形中某些特征值的提取, 来研究这些参数与乘员胸部伤害值的关系是有意义的。

2 车体-人体动态碰撞简化模型

车辆正面刚性碰撞试验过程主要分为两次碰撞: 一是车辆与障碍物之间的碰撞, 该过程从碰撞零时刻开始直到整个碰撞过程结束, 二是乘员与约束系统或与车内部结构发生的碰撞。整个过程受到多个参数及边界条件的影响, 所以为了能够直观的分析碰撞过程, 需要将车体-人体系统简化。在碰撞的开始时刻, 车辆开始减速运动, 由于乘员与约束系统之间尚存在一定的间隙, 乘员在此时没有受到减速作用, 继续沿初始运动方向以初始运动状态向前运动, 当车辆的减速运动使得车辆与乘员之间出现速度差和相对位移, 约束系统之间的间隙消除后, 乘员开始受到约束系统的减速作用, 此后, 两者在约束系统的耦合作用下分别进行减速运动, 速度逐渐降低到零(减速阶段), 并经历反弹阶段后, 最终达到静止状态。

胸部 X 向加速度在受车身碰撞结构影响的同时, 也与约束系统特性有关。由文献[2]得知, 假人胸部相对车身位移, 胸部水平加速度之间为线性关系, 因此将乘员与约束系统看成一个线性弹簧-质量系统。设经过时间为 t^* , 乘员相对车辆向前运动消除约束系统间隙 δ 与约束系统产生二次碰撞, p^* 为该时刻的车辆加速度, ΔV^* 为乘员与约束系统发生作用时车辆速度的变化量, a_v 为车体的绝对加速度, 则有人体胸部响应为:

$$\begin{cases} a_0 = A \sin(\omega t + \Phi) + a_v \\ A = -\sqrt{(p^*)^2 + (\omega \Delta V^*)^2} \\ \Phi = -\arctan\left(\frac{-p^*}{\omega \Delta V^*}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\omega = \sqrt{k}$, k 为约束系统的特征刚度, 在数值上等于胸部加速度载荷-相对位移曲线拟和直线的斜率, t 为约束耦合时间变量。

3 汽车正面碰撞波形模拟

3.1 汽车正面碰撞波形简化模型

车身加速度与时间历程的关系通常是以曲线形势表达,是研究车辆碰撞及假人伤害最为直观的试验数据。但数据的形状不规律,对各种参数的影响比较敏感,不易于对整体做出快速的判断。所以在车辆碰撞力学中可以采用多种形式的波形简化模型来模拟实际波形。这些波型与原始波形具有相同的时间历程和边界条件,因而我们可以通过提取碰撞加速度碰撞波形的某些特征,来研究碰撞加速度的变化对乘员伤害的影响。

根据波形分类,模型可以分为方波、三角波、半正弦波。其中,方波因为模拟准确度高,方法简便而被广泛采用。对于方波,又分为有初始加速度方波(ASW、ESW、TESW)和无初始加速度方波(FEW、TWA、BSA)两类,本文主要以有初始加速度方波为研究对象。

3.1.1 ASW (平均值方波)

对于 ASW 波形初始加速度表达式为:

$$a_{ASW} = \frac{V_0}{t_m} \quad (2)$$

由于 ASW 方波的加速度值在 t_m 之前为持续不变的量, $a_{ASW} = p(0) = p^*$, 由此胸部加速度表达式中的 $A, \Phi, \Delta Vc$, t^* 可表示为:

$$\begin{cases} A = -\sqrt{p_0^2 + (\omega \Delta Vc)^2} \\ \Phi = \tan^{-1} \frac{-p_0}{\omega \Delta V^*} = -\tan^{-1} \frac{1}{\omega t^*} \\ \Delta Vc = p_0 t^* \\ t^* = \sqrt{\frac{2\delta}{p_0}} \end{cases} \quad (3)$$

p_0 为 ASW 初始加速度, δ 为约束系统间隙, t^* 为约束系统与假人接触时间, ΔV^* 为 t^* 时刻车辆速度的变化量。

3.1.2 ESW (等效方波)

对于 ESW 波形初始速度表达式为:

$$a_{ESW} = \frac{V_0^2}{2C} \quad (4)$$

ESW 波形与 ASW 波形类似,初始加速度一直持续至 t_m , 其胸部加速度表达式与 ASW 类似。

3.1.3 TESW (尖顶等效方波)

TESW 方波考虑了由碰撞产生的速度变化和车身变形量对波形简化产生的影响。其表达式为:

$$\begin{cases} a(0)_{TESW} = \frac{2V_0^2}{t_m^2} (2t_m - 3t_c) \\ a(t_m)_{TESW} = \frac{2V_0^2}{t_m^2} (3t_c - t_m) \\ t_c = \frac{C}{V_0} \end{cases} \quad (5)$$

t_m 为车身速度第一次为 0 时刻, t_c 加速度曲线与坐标轴围成形状的形心位置对应的时间, t_r 为碰撞总时间历程, k 为约束系统特定刚度, C 为碰撞最大变形量。

对于 TESW 方波,胸部加速度公式中的参数表达式为:

$$\begin{cases} A = -\sqrt{(p^*)^2 + (\omega \Delta V^*)^2} \\ \Phi = -\tan^{-1} \frac{p^*}{\omega \Delta V^*} \end{cases} \quad (6)$$

设 $\beta = \frac{p(t_m)}{p(0)}$ 为加速度放大系数,根据 TESW 方波 则有:

$$\begin{cases} p^* = p(0)(1 + \frac{\beta-1}{t_m} t^*) \\ \delta = \frac{p(0)(t^*)^2}{2} + \frac{p(0)\frac{\beta-1}{t_m}(t^*)^3}{6} \\ \Delta V^* = p(0)[t^* + \frac{\beta-1}{2t_m}(t^*)^2] \end{cases} \quad (7)$$

3.2 三种模型的模拟结果

选取一个典型碰撞车身加速度曲线。试验速度为 50.6 km/h。提取模型简化所需要的参数(见表 1)。

表 1 提取模型简化所需要的参数

车辆基本信息				模型参数					
车型	轴距 (mm)	整备质量 (kg)	参数模型	k (g/mm)	δ (mm)	C (m)	t_m (s)	P(0) (g)	P(tm) (g)
轿车	265	1432	ASW	0.3	22	0.482	0.0686	20.9	—
			ESW	0.3	22	0.586	0.0834	17.2	—
			TESW	0.3	22	0.586	0.0686	7.39	34.42

通过简化模型计算公式得出三种简化方波(见图 1)。将简化方波以函数的形式。注:对于 ASW, $C_{ASW}=0.5Vt_m$; 对于 ESW, $t_{mESW}=2t_c=2$ 表达, 带入式 (1)-(7), 则得到模拟出的人体胸部加速度响应曲线(见图 2)

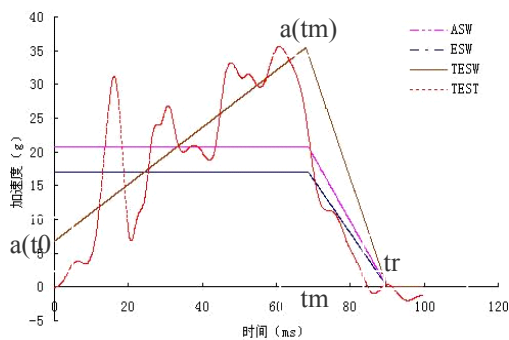


图 1 三种简化方波图

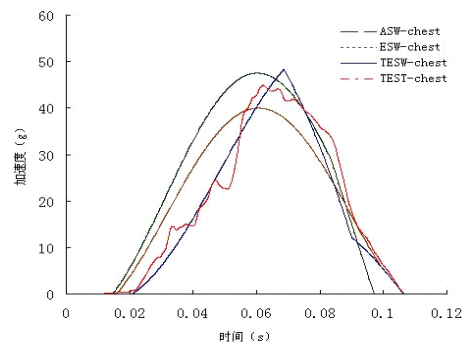


图 2 胸部加速度模拟图

通过模型所得的胸部加速度峰值与试验结果比较(表 2), ASW 误差为 13.1%, ESW 误差为 7.2%, TESW 误差为 7.2%。从本次试验曲线及数据可以看出, 对于所采用的试验波形, ASW 与 TESW 波形所得的胸部加速度峰值与实际峰值较为接近。在波形的起始时刻, 拟合程度和脉宽方面, TESW 模型的仿真程度较高。因此, 下文将以 TESW 方波为例来讨论参数变化对胸部加速度峰值的影响。

表 2 三种模型下胸部加速度模拟结果

	a_{0-max} 模型	a_{0-max} 试验	模型误差
ASW	38.5g	44.3g	13.1%
ESW	47.5g	44.3g	7.2%
TESW	47.5g	44.3g	7.2%

4 基于 TESW 模型下的参数变化对胸部加速度的影响

4.1 约束系统间隙 δ 对胸部加速度的影响

在保持约束系统刚度不变的前提下, 改变约束系统的间隙量, 过程参数也随之发生变化(表 3), 从图 3 中能够看出随着间隙的增大, 胸部加速度的峰值会相应增大, 并且其对峰值的影响较为明显。这也是车辆装配安全带预紧装置的原因。

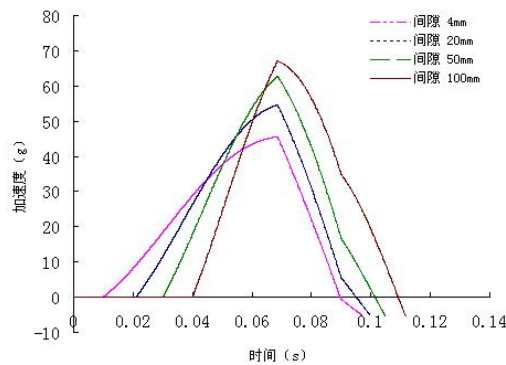


图3 约束系统间隙量与胸部加速度

表3 各参数随间隙量的变化

ΔV^*	δ (m)	t^* (s)	p^* (g)
0.92	0.004	0.01	11.33
2.22	0.02	0.02	15.27
3.91	0.05	0.03	19.21
5.99	0.1	0.04	23.14

4.2 特征刚度系数 k 对胸部加速度的影响

k 分别采用 0.2 g/mm、0.25 g/mm、0.3 g/mm、0.35 g/mm、0.4 g/mm、0.5 g/mm。

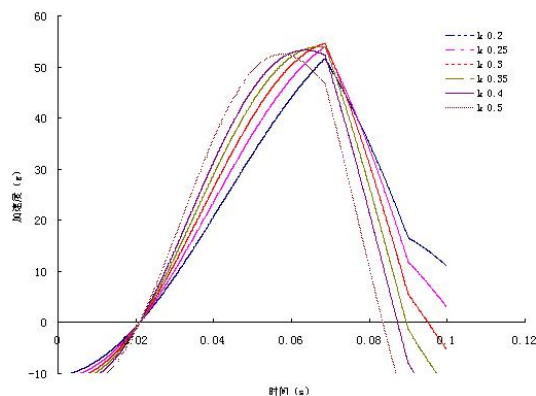


图4 约束系统特征刚度系数与胸部加速度

从图4中可以看出,针对原模型中特定的 δ 值,在 k 值为0.3之前,随着 k 值的增大,胸部加速度峰值成上升趋势。当 k 值取0.4与0.5时,胸部加速度呈明显的回落趋势。胸部的绝对加速度是由胸部的相对加速度与车身加速度合成得到。TESW方波模型中的加速度峰值出现在 t_m 时刻。当 k 值增大时,受 k 值影响,胸部相对于车身的加速度峰值将向0时刻移动,而此时车身加速度是减小的趋势,所以会出现胸部绝对加速度峰值回落的趋势。可见,针对TESW方波,当所选参数使得胸部与车身相对加速度峰值发生在 t_m 附近时,所得的胸部加速度较大。

5 胸部的伤害值对 TESW 减速度曲线的灵敏度分析

TESW 曲线主要是由 $a(t_0)$ 、 $a(t_m)$ 、 t_m 、 t_r 4 个特征参数来描述的,对于同一类型的约束系统,假人的伤害值对不同的 TESW 特征参数的敏感程度会有所不同,弄清 TESW 曲线特征参数变化对胸部响应的影响是必要的。

TESW 曲线的特征参数变化时必须保证速度的变化量不变,也就是 TESW 曲线与时间轴围成的面积为恒量,为了获得 TESW 曲线的特征参数变化,我们针对 TESW 的四个特征参量进行如下变化:原有基础曲线(图5中的波形1)在保持 t_m 值不变的前提下变化 $a(t_0)$ 值,面积恒等使得 t_r 值由最初的 0.08s 变为 0.088s,形成图5中波形2;在增大 t_m 的同时,变化 $a(t_0)$, t_r 值增加到 0.103s,形成图6的波形3。

在进行胸部的加速度值计算时,取安全带的 k 为 0.3mm/g, δ 为 15mm,计算过程中的参数见表4。

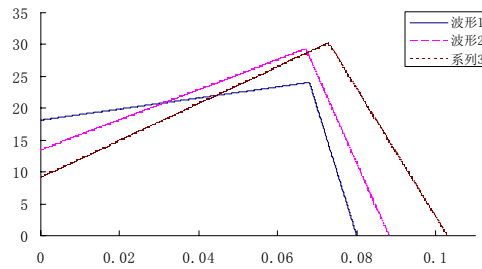


图5 TESW 对比波形

表4 灵敏度分析过程中各参量

波形	车身加速度 TESW							胸部加速度			
	T_m (s)	C (m)	T_c (s)	$a(t_0)$ (g)	$a(t_m)$ (g)	β	t^* (s)	Δv (m/s)	p^* (g)	$a_{ov,max}$	$a_{0,max}$
1	0.068	0.496	0.035	18.15	24.05	1.33	0.023	4.32	20.16	31.25	56.02
2	0.067	0.527	0.038	13.59	28.93	2.13	0.023	3.65	18.84	27.63	57.94
3	0.073	0.601	0.043	9.07	30.18	3.33	0.019	1.41	14.58	18.99	47.40

图6为胸部加速度的计算结果, 胸加1中的峰值为57.94g, 胸加2为56.02g, 胸加3为47.4g。波形2和胸加2说明在保持 t_m 不变的前提下减小 $a(t_0)$ 值, $a(t_m)$ 值增大, 胸部的加速度曲线的变化趋势是峰值和持续时间变大。我们知道 $a(t_0)$ 值的形成与保险杠/发动机前端结构变形有关; $a(t_m)$ 值与发动机后端/防火墙、防火墙/地板间的结构变形有关, 由于车辆前部设计空间的限制, 减小 $a(t_0)$ 值必会增加 $a(t_m)$ 值, 导致波形2中的均方根变大, 胸部伤害增加^[4]; 波形3和胸加3说明在增加 t_m , 减小 $a(t_0)$ 值后, $a(t_m)$ 、 t_r 值均变大, t_r 的变大导致波形3的平均值变小, 对应的胸部加速度3曲线变得更加平缓, 峰值下降的同时脉宽变大, 曲线由最初的“陡高型”向“宽平型”发展, 胸部伤害减小。

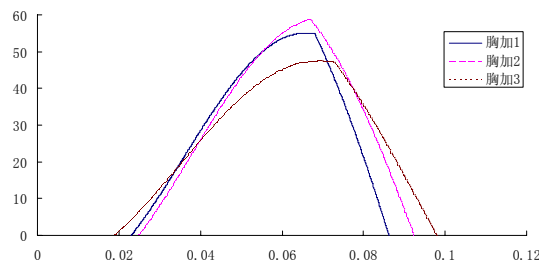


图6 三种 TESW 波形对应的胸部伤害

6 结论

1. 以简化车身加速度模型为输入的胸部加速度输出有较好的仿真度。通过对比, 通过 TESW (尖顶等效方波) 得出的胸部加速度波形与试验波形拟合程度较好。
2. 约束系统间隙 δ 的变化对胸部加速度峰值有明显的影响。随着 δ 值的增大, 胸部加速度峰值也随之增大。
3. 约束系统特征刚度 k 的变化对胸部加速度峰值有明显的影响。随着 k 值的增大, 胸部加速度峰值也随之增大, 但当 k 值达到一定值时, 由于胸部相对加速度峰值的提前, 胸部绝对加速度峰值回落。
4. 以碰撞速度相同为条件, 当 t_m 相同时, 较小的 $a(t_0)$ 会产生较大的 $a(t_m)$, $a(t_0)$ 升高会使 $a(t_m)$ 减小。此时, $a(t_0)$ 与 $a(t_m)$ 的差值越小, 相应的假人胸部加速度输出越小。当 t_m 增大时, 相对较小的 $a(t_0)$ 并没有使假人胸部加速度输出增大, 反而有明显的减小趋势, 所以 t_m 的变化对假人胸部加速度的影响较大, 且随着 t_m 的增大, 胸部加速度峰值明显下降。

参考文献

- [1] Matthew huang. vehicle crash mechanics. CRC press, 2002, 1-145 页.
- [2] 王大志. 基于乘员保护的汽车正面碰撞结构设计与变形控制研究. 博士学位, 1-51 页.
- [3] 李红建等. 乘员约束系统性能规划研究. 2006 年中国汽车安全技术国际研讨会, 223-227 页.
- [4] 葛如海, 刘星荣. 汽车车身对壁正面碰撞安全性评价指标的研究. 江苏理工大学学报 (自然科学版). 2001 年 7 月, 第 22 卷 4 期, 20-31 页.