

Study On Vehicle Crash Dual-trapezoids Curve Construction Based On Characteristic Parameters Extraction

Yunsheng YANG¹, Zhixin LIU¹, Yongqiang WU², Yuhao LIU²

China Automobile Technology & Research Center, Tianjin, China, 300300

Yangyunsheng@catarc.ac.cn, liuzhixin@catarc.ac.cn

Abstract: In the car crash safety technology, vehicle body acceleration curve is an important basis and has guiding significance for vehicle safety design. Through the analysis of the crash acceleration curve, we can find the problems in the vehicle design, and optimize the design of body structure. The simplified methods of vehicle crash curve are trapezoids curve method and dual-trapezoids curve method. The standard curve in Regulations is generally implemented by the trapezoids curve method, which is simple and convenient to use, but this method can not reflect the real crash of the specific vehicle type. The dual-trapezoids curve method, because of mainly depending on the subjective judgment of technical person, limits the popularization and practical application. In this paper, we propose a method of extracting characteristic parameters based on real vehicle crash curve. Which simplifies a complex crash acceleration curve to a dual-trapezoids curve. According to the principle of conservation of momentum and the principle of similarity, the extraction method solves the equivalence relation between the real vehicle crash curve and the dual-trapezoids curve on the interaction time and energy. In order to verify the feasibility of the extraction method, sled tests were carried out according to the vehicle crash curve and dual-trapezoids curve. The results show that the injury responses and motion postures of the dummies are in good agreement with each other. According to the above research, we can use the equivalent dual-trapezoids curve instead of the vehicle crash curve to do the sled test, and also can be used for the development of vehicle restraint system.

Key words: vehicle crash; characteristic parameter; trapezoids curve; dual-trapezoids curve; vehicle crash curve; Sled test

基于特征参数提取的汽车碰撞双梯形波形构建研究

杨运生¹, 刘志新¹, 武永强², 刘宇豪²

中国汽车技术研究中心, 天津, 中国, 300300

Yangyunsheng@catarc.ac.cn, liuzhixin@catarc.ac.cn

摘 要: 在汽车碰撞安全技术中, 车身加速度是汽车安全性结构设计的重要依据, 对汽车安全性设计具有指导意义, 通过对碰撞加速度波形的分析, 能够发现汽车设计中存在的问题, 对车身结构进行优化设计。汽车碰撞波形的简化提取现在主要有梯形法和双梯形法。法规里的标准曲线一般按照梯形法来实现, 使用简单方便, 但这种办法无法体现具体的车型的碰撞情况。双梯形波法主要根据技术人员的主观判断, 有很大的随意性, 限制了双梯形波的普及和实际应用。在本文中, 提出一种基于实车碰撞波形的特征参数提取方法, 把一个复杂多变的碰撞加速度波形简化为双梯形波形。此种提取方法根据动量守恒原理和相似性原理, 解决了实车碰撞波形和双梯形波在作用时间上和能量上的等效关系。为了验证这种提取方法的可行性, 进行了汽车碰撞波形和双梯形波的台车试验, 结果表明碰撞假人各种伤害响应和运动姿态互相很好地吻合。根据以上的研究, 我们可以用等效双梯形波形代替相应的汽车碰撞波形进行台车试验, 也可用于车辆约束系统的开发工作。

关键词: 汽车碰撞; 特征参数; 梯形波; 双梯形波; 实车碰撞波形; 台车试验

1 引言

随着汽车安全技术的发展和汽车的普及, 越来越多的人开始关注汽车安全, 汽车安全也成为各大汽车生产厂要解决好的重要问题。在车辆优化改进的过程中, 通过安装在 B 柱下面的加速度传感器获得的车身加速度是约束系统优化的重要依据, 是车身碰撞安全性改进的基础。通过对碰撞加速度波形的分析, 能够发现汽车设计

过程中碰撞安全性存在的问题，结合碰撞理论对汽车产品设计做出改进设计的方案，成为对车身结构进行优化的依据。

车身加速度对其汽车研发有着至关重要的作用，而对车身加速度波形进行简化一直受到汽车界的重视，怎么才能方便的把一条复杂的加速度波形简化为一条等效的加速度波形，又不失去对车辆结构的考虑，目前的还没有一种较好的办法。有学者提出受业界关注的双梯形波，但只对它进行定性的描述，而没有对具体的波形参数是如何进行获取的进行描述。双梯形波参数往往是由技术人员根据实际工程经验进行主观判断，这种判断的随意性很大，难以对大量的数据进行统计归纳。由于没有对双梯形波的特征参数如何与实际碰撞加速度的对应关系做出具体描述，以及没有给出如何求解双梯形波中的具体参数的具体计算方法，因此仅依靠经验来估计计算的双梯形波无法进行普及和实际应用，而且也难以在计算机上用具体的方法来实现。为了解决这个问题，本文提供了一种基于汽车碰撞波形特征参数提取的双梯形波的构建方法，这种方法依据相似性原理和动量守恒原理来构建，为了验证这种方法的实际可操作性，文中对具体的碰撞曲线进行简化，而且对实车曲线和简化后的双梯形波分别进行了台车试验，用实际数据进行比较。

2 汽车碰撞波形特征参数提取与双梯形波的构建方法

2.1 汽车碰撞波形与双梯形波分析

在车辆的正面碰撞试验中，发生变形的主要是车辆的前端结构，而 B 柱以后及中央通道在整个碰撞过程中几乎不会发生变形，因此通常将 B 柱或中央通道上采集到的减速度信号作为车体的减速度进行与之相关的分析。车身减速度是由数据采集系统通过安装在车身 B 柱上的加速度传感器对碰撞过程进行采集记录后形成的系列数据，碰撞过程一般有 2000 多个碰撞加速度系列数据，波形变化也复杂，没有规律性，这样就导致在模拟车身加速度时较困难，一般的设备无法完成，只能用精度高的加速度台车进行模拟试验。图 1 所示实车碰撞波形是一典型的实车正面碰撞减速度经滤波通道频率等级为 60(ChannelFrequencyclass60,简称 CFC60)的巴特沃兹低通滤波器滤波后的波形,可见实车正碰波形是非常复杂的。

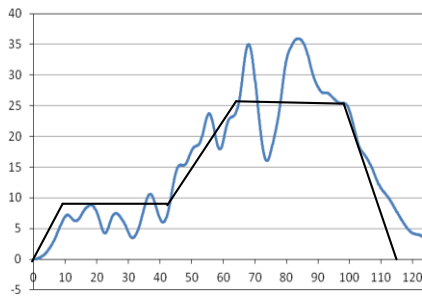


Figure 1. Crash acceleration curve

图 1. 碰撞过程加速度波形

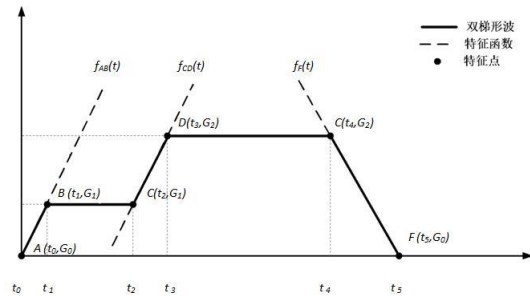


Figure 2. Typical dual-trapezoids curve

图 2. 典型的双梯形波

尽管实车正碰形很复杂,但经过研究后发现其可以分为较为明显的 2 个台阶。如图 1 所示,第一台阶加速度较小,持续一段时间后快速上升,在第二个平台持续一段时间,加速度快速下降,然后直接到碰撞结束。碰撞加速度波形反应的是车身的结构及吸能情况,从实车碰撞过程高速摄像分析可以发现,第 1 阶段是从碰撞开始到发动机前部空间被完全压溃;第 2 台阶为发动机开始碰撞一直到碰撞结束。根据实际波形特征,我们按照碰撞波形的趋势对碰撞波形进行双梯形简化,在这个过程中应用相似性原理和动量守恒原理,在第 1 个台阶结束时的动量与实车碰撞较低加速度区域相同,在第 2 个台阶结束时与整个碰撞过程的动量相同,在这里的动量相同,其本质就是这两个地方的速度相同,这样经过简化的双梯形波与原碰撞加速度波形等效,即双梯形波碰撞总能量和原来的实车碰撞过程具有相同的效果。

简化波形所形成的双梯形波,如图 2 所示,是由 A、B、C、D、E、F 六个特征点构成,则双梯形波是由 5 条线段 AB, BC, CD, DE 和 EF 构成,其中 BC 和 DE 平行于时间轴,定义 A 点为碰撞起始点, F 点为碰撞结束点。

2.2 基于特征参数提取的双梯形波构建方法

以上针对波形特征进行了讨论,在这里我们对双梯形波的提取过程进行描述。

从汽车碰撞试验的数据采集系统中采集车身加速度信息数据,得到加速度变化的函数 $A(t)$, $A(t)$ 是随着时间变化的加速度数据序列。接下来识别加速度波形中的波峰和波谷点,如图 1 所示, $A(t)$ 的波形呈波浪形态,既有波峰也有波谷,而且先波峰后波谷,波峰和波谷的个数相同。由于波峰点和波谷点的特点是对时间的导数为零,在波峰点两侧在一定时间间隔内的平均值均小于该波峰值,而波谷点两侧在一定时间间隔内的平均值均大于该波谷值,因此可以用此办法来作为波峰点和波谷点的识别方法。

对呈现波浪特征的车身加速度而言,波峰和波谷是成对出现的,可以认为波峰和波谷构成了一组峰谷系列,在时间关系上波峰在前,波谷在后。定义 P_i 、 P_{i+1} 和 V_j 分别对应的坐标值为 $[tp_i, A(tp_i)]$ 、 $[tp_{i+1}, A(tp_{i+1})]$ 和 $[tv_j, A(tv_j)]$,假设以波谷为参考的话,约定峰谷值为 $A_{pv}(i)$, 谷峰值为 $A_{vp}(j)$, 定义以下公式:

$$A_{pv}(i) = A(tp_i) - A(tv_j) \quad (1)$$

$$A_{vp}(j) = A(tp_{i+1}) - A(tv_j) \quad (2)$$

对 $A(t)$ 进行波峰和波谷点的搜索,定义最大谷峰值、最大峰谷值、谷峰值的搜索序列号和峰谷值的搜索序列号,最大谷峰值定义为 APV_{max} , 最大峰谷值为 AVP_{max} 。记下最大谷峰值对应的波谷点和波峰点坐标,记下最大峰谷值对应的波峰点的坐标,为下一步的计算做准备。

根据相似性原理和动量守恒原理构建具有双梯形波特征的波形函数 $f(t)$, 波形函数 $f(t)$ 的横坐标为时间变量轴,纵坐标为加速度 $A(t)$ 变量轴,波形函数 $f(t)$ 是由 A、B、C、D、E 和 F 6 个数据点构成,对应的坐标值分别为 (t_0, G_0) , (t_1, G_1) , (t_2, G_2) , (t_3, G_3) , (t_4, G_4) 和 (t_5, G_5) ; 其中, $A(t_0, G_0)$ 为双梯形波的起点, t_0 为碰撞接触起始时刻,且 $t_0=0$, $F(t_5, G_5)$ 为双梯形波结束点, t_5 为碰撞结束时刻, G_5 的实际值为 0, 因此所述的 A、B、C、D、E 和 F 6 个数据点构成的坐标值分别为: $(0, 0)$, (t_1, G_1) , (t_2, G_2) , (t_3, G_3) , (t_4, G_4) 和 $(t_5, 0)$ 。

由图 2 可知,双梯形波的波形函数 $f(t)$ 是由 AB、BC、CD、DE 和 EF 构成,其中线段 BC 和 DE 平行于时间变量轴,对应的加速度变量轴为 G_1 和 G_3 。线段 AB、CD 和 EF 为双梯形波的腰线,分别对应于线段函数 $f_{AB}(t)$ 、 $f_{CD}(t)$ 和 $f_{EF}(t)$; 其中,

$$f_{AB}(t) = K_{AB} \times t \quad (3)$$

$$f_{CD} = K_{CD} \times t + b_{CD} \quad (4)$$

$$f_{EF} = K_{EF} \times t + b_{EF} \quad (5)$$

其中 K_{AB} 、 K_{CD} 和 K_{EF} 为所述线段函数 $f_{AB}(t)$ 、 $f_{CD}(t)$ 和 $f_{EF}(t)$ 的斜率, b_{CD} 和 b_{EF} 为所述线段函数 $f_{CD}(t)$ 和 $f_{EF}(t)$ 的截距。

有了各线段的函数,我们就要进行求解。首先对 $A(t)$ 在碰撞时间范围内进行积分,形成速度 $Speed(t)$,然后逐点对 $Speed(t)$ 与实际碰撞速度进行比较,找到首次相等的速度点所对应的时间,即双梯形波中的 F 点对应的时间为 t_5 , F 点坐标为 $(0, t_5)$ 。

根据所述加速度 $A(t)$ 中出现的第一个波峰点 P_1 和所述的起始点 A 之间的线段构建所述线段函数 $f_{AB}(t)$ 。在所述第一个波峰 P_1 之后出现的最大谷峰值对应的峰谷点和峰值点 P_{i+1} 构建所述线段函数 $f_{CD}(t)$ 。根据最大峰谷值对应的峰值点 P_i 和 F 点构建所述线段函数 $f_{EF}(t)$ 。

定义临时变量 t'_1 、 t'_2 和 G'_1 取代 t_1 、 t_2 和 G_1 ； B' 和 C' 取代 B 、 C ，由于 $f_{AB}(t) = f_{CD}(t) = G'_1$ ，则有

$$t'_1 = \frac{K_{CD} \times t'_2 + b_{CD}}{K_{AB}} \quad (6)$$

$$G'_1 = K_{CD} \times t'_2 + b_{CD} \quad (7)$$

由 $AB'C'$ 构成了一个梯形，其梯形面积是：

$$S_{f1} = \frac{(2 \times t'_2 - t'_1) \times G'_1}{2} = \frac{K_{CD} \times (2 \times K_{AB} - K_{CD}) \times t'^2_2 + 2 \times K_{AB} \times t'_2 + b_{CD}^2}{2 \times K_{AB}} \quad (8)$$

在相同的时间段内， $A(t)$ 的面积为 $S_{a1} = \int_0^{t'_2} A(t) dt$

根据动量守恒原理，在相同的时间段内 $A(t)$ 与 $f(t)$ 的面积相等，则 $S_{a1} = S_{f1}$ ；

$$\int_0^{t'_2} A(t) dt = \frac{K_{CD} \times (2 \times K_{AB} - K_{CD}) \times t'^2_2 + 2 \times K_{AB} \times t'_2 + b_{CD}^2}{2 \times K_{AB}} \quad (9)$$

如图 3 双梯形波求解流程图所示，通过不断调整 t'_2 进行迭代计算找到面积相等时的 t'_2 ，其判断条件是 $t_2 = t'_2 \mid dS=0$ ；其中 $dS = S_{a1} - S_{f1}$ 。

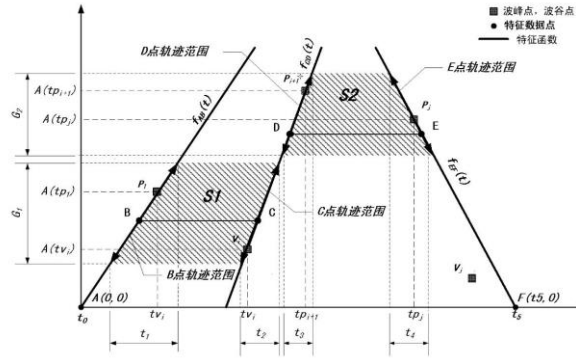


Figure 3. Dual-trapezoids curve solution flow chart

图 3. 双梯形波求解流程图

确定好 t_2 之后，我们来求其余的参数，在区间段 $[t_3, t_5]$ 内， $A(t)$ 的面积为 S_{a2} ， $S_{a2} = \int_{t_2}^{t_5} A(t) dt$

多边形 $t_2 C D E t_5$ 构成的面积由 $t_2 C D t_3$ 梯形、 $t_3 D E t_4$ 矩形和 $t_4 E t_5$ 三角形组成。

$$\int_{t_2}^{t_5} A(t) dt = \frac{K_{CD} \times (2 \times K_{AB} - K_{CD}) \times t'^2_2 + 2 \times K_{AB} \times t'_2 + b_{CD}^2}{2 \times K_{AB}} \quad (10)$$

根据动量守恒原理，在相同的时间段内 $A(t)$ 和 $f(t)$ 的面积相同，则 $S_{a2} = S_{f2}$

$$\int_{t_2}^{t_5} A(t) dt = \frac{(G_1 + G_2) \times (t_3 - t_2)}{2} + G_2 \times (t_4 - t_3) + \frac{G_2 \times (t_5 - t_4)}{2} \quad (11)$$

$$G_2 = K_{CD} \times t_3 + b_{CD} \quad (12)$$

$$G_2 = K_{EF} \times t_4 + b_{EF} \quad (13)$$

由于对于给定的曲线， $A(t)$ 的面积是一定的，根据上面的计算过程 t_2 已经确定，则 S_{a1} 的面积就确定了，因此对于 S_{a2} 就是一个确定的值，我们变化时间变量 t_3 ，由于 G_2 相同，可以由 t_3 计算 t_4 ， t_5 时间已经确定，面积 S_{f2} 就可以计算出来。通过不断调整 t_3 （从 $t_3 > t_2$ 时间开始）进行迭代计算找到面积相等时的 t_3 ，然后计算 t_4 。经过以上的计算，基于特征参数提取的双梯形波 $f(t)$ 的六个特征点全部求解完成。按照这个过程，可以把复杂的碰撞加速度曲线简化为有六个特征点的双梯形波。

3 某车型碰撞波形的双梯形波的构建过程及试验验证

3.1 某车型碰撞波形的双梯形波的构建过程

以上我们分析了具体的操作过程，现在我们拿一条具体的碰撞波形来进行基于特征参数提取的双梯形波的计算。

首先从实车碰撞试验中取得车身加速度的数据文件，数据的采样频率为 10kHz,即 0.1ms 采样一次，数据的时间间隔为 0.1ms，碰撞试验时实车碰撞速度为 64.2km/h。时间零表示为碰撞的接触时刻，即碰撞开始时间，不是碰撞时数采系统开始记录的时刻。由该数据文件导入到 A(t)后产生的加速度时间曲线见图 4 所示。

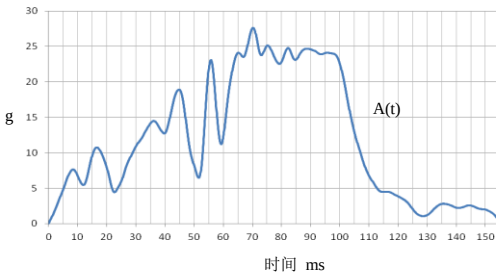


Figure 4. Crash acceleration curve of a vehicle

图 4. 某车型的碰撞加速度曲线

对车身加速度波峰波谷的数值的计算，对车身加速度数据进行处理，分别计算出相应的波峰点和波谷点，在[0, 160]的时间区段内共计算出相应的波峰点和波谷点，一个 13 组波峰波谷。对 A(t)进行积分，形成 Speed(t)曲线，然后逐点对 Speed(t)与实际碰撞的速度进行比较，找到首次相等的速度点对应的时间为 148.5ms。由此完成了对 A 和 F 点的求解。

构成 $f_{AB}(t)$ 为 A(0,0)和第一个波峰点 $P_1(8.4,7.66)$,之后出现的最大谷峰值序列号为 $i=4$ ，也就是说构成 $f_{CD}(t)$ 的点是 V_4 和 P_5 ，对应的坐标值 $V_4(56,6.46)$ 和 $P_5(60.1,23.10)$ 。最大峰谷值出现在序号为 $i=11$ 对应的点是 P_{11} ，对应的坐标值是 $P_{11}(99.9,24.09)$ ，由此可得出计算约束函数的关键特征点的坐标，如下表所示：

Table 1 Constraint function calculation table

表 1 约束函数计算表

约束函数	关联序号	关联坐标	斜率值 K(时间按秒计)	截距值 b
$f_{AB}(t)=K_{AB} \times t$	1	A(0,0) $P_1(8.4,7.66)$	911.61	0
$f_{CD}(t)=K_{CD} \times t+b_{CD}$	4	$V_4(56,6.46)$ $P_5(60.1,23.10)$	4060.10	-20305
$f_{EF}(t)=K_{EF} \times t+b_{EF}$	11	$P_{11}(99.9,24.09)$ $F(148.5,0)$	-454.62	6751

由于特征点 B 在线段函数 $f_{AB}(t)$ 上，它始终是在 $f_{AB}(t)$ 的轨迹上，同理，特征点 C 在线段函数 $f_{CD}(t)$ 上，它始终是在 $f_{CD}(t)$ 的轨迹上，由图 3 可以看出 G_1, t_1 和 t_2 均有各自的变化范围， G_1 变化范围由在该区间内的最大波峰值和最小波谷形成，由此也形成了 t_1 和 t_2 的变化范围，为了便于计算，约定 G_1 的最大值由 $f_{CD}(t)$ 得到的 t_2' 开始迭代计算，经计算得到 $G_1=10.67, t_1=11.7ms, t_2=52.6ms$ 。

由于特征点 D 在线段函数 $f_{CD}(t)$ 上，它始终是在 $f_{CD}(t)$ 的轨迹上，同理，特征点 E 在线段函数 $f_{EF}(t)$ 上，它始终是在 $f_{EF}(t)$ 的轨迹上，由于 t_2 已经完成求解，因此对 A(t)而言，在区间 $[t_2, t_5]$ 内其面积值是固定的，通过不断调整 t_3 （从 $t_3 > t_2$ 时间开始）进行迭代计算找到面积相等时的 t_3 ，然后计算出 t_4 。经迭代计算得到 $G_2=17.42, t_3=54.3ms, t_4=110.2ms$ 。由此构成 f(t)的特征点的坐标全部求解完成，见图 5 所示。

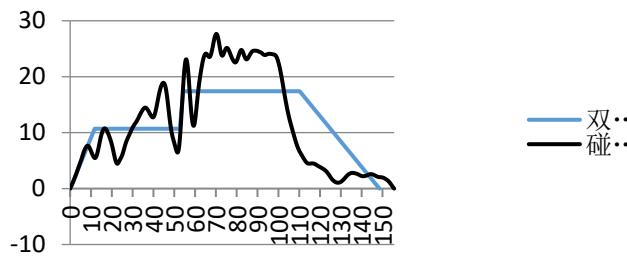


Figure 5. Relationship between Dual-trapezoids curve and crash curve

图 5. 碰撞波形及双梯形波的关系

3.2 台车试验验证

为了验证简化后的双梯形和原碰撞曲线具有等效性，我们进行了台车试验以此来验证这种方法的可行性。试验采用相同的假人，相同的约束系统及引爆时间，仅碰撞的曲线发生变化，设备采用日本三菱重工生产的高精度液压加速式碰撞台车，试验时台面上安装加速度传感器来测量车身的加速度值，分别按照实车曲线和提取的双梯形波进行试验，试验时采用混 III150% 男性假人，座椅放在中间位置，引爆气囊及安全带，其中安全带是两级引爆，试验记录假人的伤害指标及高速摄像采集假人的运动过程。两次试验时台车的加速度曲线如下图 6 所示。

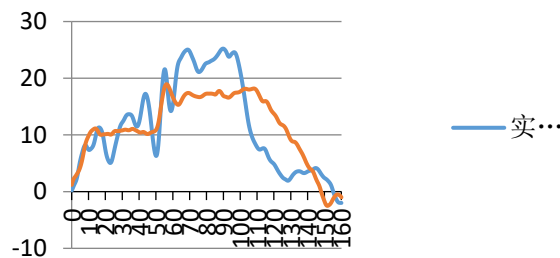


Figure 6. Real vehicle curve and Dual-trapezoids curve at test

图 6. 试验时实车波形和双梯形波

首先我们对运动过程进行分析，在碰撞过程中，假人和气囊的接触时刻是衡量约束系统是否对人体进行有效保护的指标之一，理想的状态是气囊展到最大时假人的头部与气囊接触，头部过早接触气囊，这时气囊还在展开过程中，会对假人的伤害增大。头部在气囊展开最大之后接触，由于气囊里面的气体已经开始排出，不能对人体进行有效的保护，假人的伤害也会增加。根据高速摄像分析，两次试验实车曲线时在 83ms 时接触，等效双梯形波在 84ms 时接触，去除随机因素的影响，两次碰撞的接触时刻基本相同。

在约束系统匹配试验中，大家较关注的重点是头部、胸部伤害值和胸部位移量，如下图 8 所示，从图中可以看出，胸部位移量和头部加速度在这两次的试验中拟合度很好。胸部位移量在实车曲线的条件下是 21.1mm，在双梯形波试验条件下是 20.96mm；假人头部 3ms 累计加速度在实车曲线的条件下是 41.44g，在双梯形波试验条件下是 40.67g；假人头部伤害值 HIC 在实车曲线的条件下是 288，在双梯形波试验条件下是 279；假人胸部 3ms 累计加速度在实车曲线的条件下是 29.44g，在双梯形波试验条件下是 27.69g。可以看出，这些关注的项目的试验结果很相近，简化的双梯形波在很大程度上能反应实际的碰撞过程。

如下图 9 所示，主要是假人颈部的伤害，从图中可以看出，有些曲线相似度较高，而有的则相差较远，分析这样形成的原因，从图 5 中可以看出，简化的双梯形波在后半部分与实际相差较大，碰撞曲线下降很快，然

后在低 G 下徘徊一段时间，主要是车身反弹的原因造成的，而双梯形波是直接下来，没有最后在较低 G 进行徘徊的时间，这样会对假人后半部分的运动有影响，反应在假人的头部伤害上，而且假人头部伤害的影响因素也较多，是众多因素综合的结果。

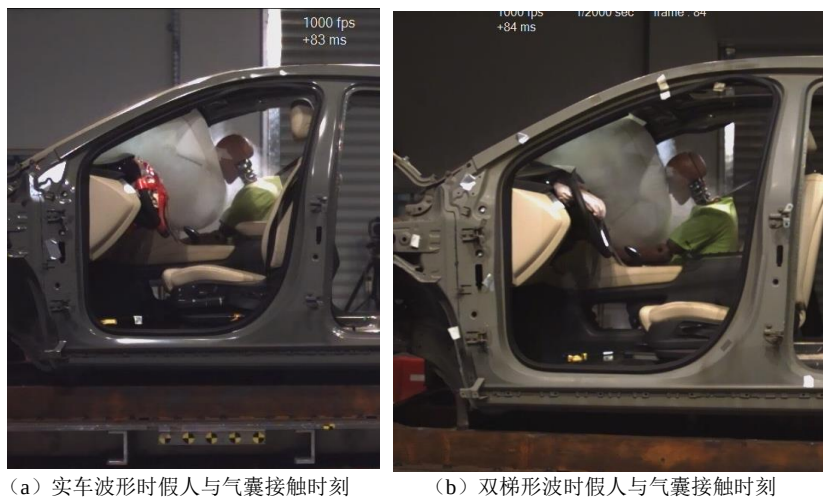


Figure 7. Contact time between dummy head and airbag
图 7. 假人头部与气囊接触时刻

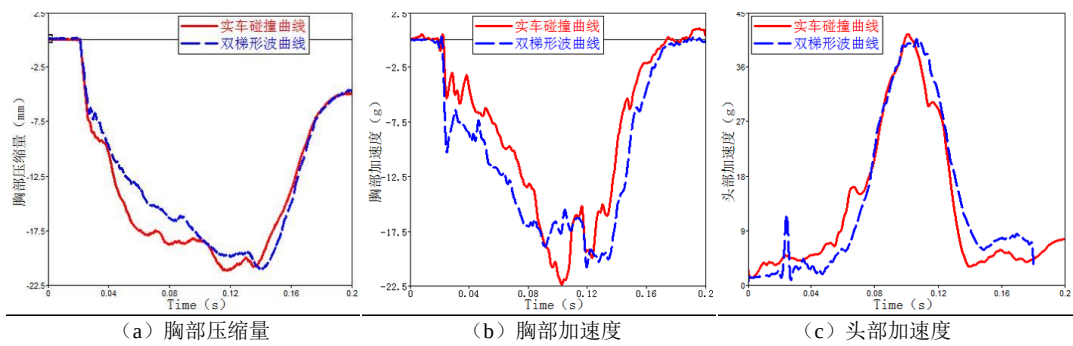


Figure 8. Dummy chest and head injury curve
图 8. 假人胸部和头部伤害曲线

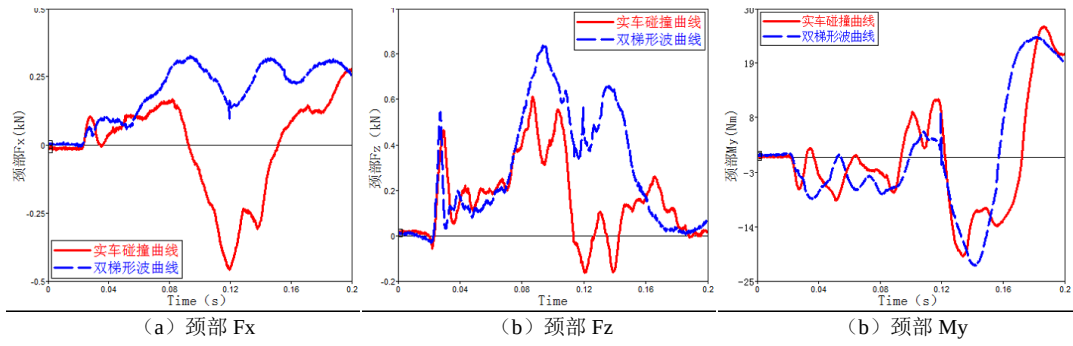


Figure 9. Dummy neck injury curve
图 9. 假人颈部伤害曲线

经过以上对 2 次对比试验结果的分析,我们可以得出这样的结论,基于实车碰撞曲线特征参数提取的双梯形波能较好的模拟实车的碰撞过程,从而验证了这种方法在实际应用上的可行性。

4 结论

本文针对碰撞曲线的趋势特征进行分析,应用相似性原理和动量守恒原理,提出了基于碰撞曲线特征参数提取的双梯形波构建方法,解决了双梯形波和实车碰撞曲线在作用时间上和能量上的等效关系。文中提供了详细的特征参数计算的算法过程,为了更好的展示计算过程,文中以某个实际车型的碰撞曲线为例,详细进行了特征参数的计算。为了验证双梯形波在实际应用中的可行性,本文在实车波形和等效双梯形波条件下进行了实际的台车试验,记录假人伤害,经过对比分析,假人伤害在关键指标上具有较高的相似性,但也有伤害指标拟合的不够理想。基于特征参数提取的双梯形波提取方法能把一个复杂的问题进行简单化的处理,而且这种方法能在计算机上用具体的方法实现,解决了以前双梯形波仅能进行定性描述而无法具体计算的问题。这种方法可以被应用在车辆设计早期以及事故重建方面,可以与车辆结构和吸能过程进行对应,能较为直观的描述车辆碰撞的响应过程。

同时经过上面的分析可知,本方法在替代结果的准确性上还有待于进行一研究,特别是碰撞波形的后半部分,与双梯形波相差较大,这种相差能在假人伤害指标上反映出来,我们还需要研究后半部怎么与实车曲线更好的拟合,从而使假人指标更接近实车碰撞。本文的验证只用了两次试验,这种及样本的研究本来就存在较大的随机性,以后应该进行更多的研究,用来验证这种方法的可行性。

参考文献

- [1] Zhixin Liu, Yue Zhang, et al. Prediction on Vehicle Crash Acceleration Based on Circle of Constant Acceleration Method[J]. Applied Mechanics and Material, 2013, Vols 380-384: 51-54.
- [2] Zhang Yue. Research on Sled Test Technique of Occupant Restraint System in Multiple Types of Frontal Crash [D]. Hebei Technology University, 2014. (in Chinese)
- [3] 张越.不同正面碰撞形态下乘员约束系统匹配试验技术研究[D]. 河北工业大学:2014.
- [4] Cao Libo, Long Tengjiao, Xiao Huiqing. Relationship Study on Equivalent Dual-trapezoid Curve Characteristics and Occupant Weighted Injury Criterion [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2012(5): Vol.2 No.3. (in Chinese)
- [5] 曹立波, 龙腾蛟, 慧青. 效双台阶波形特征与乘员综合损伤值的关系研究[J]. 汽车工程学报, 2012 年 5 月: 第 2 卷 第 3 期.
- [6] Ma Zhixiong, Zhu Xichan. An Analysis on the Sensitivity of Main Dummy Injury Criteria to Equivalent Dual-trapezoid Deceleration Curve[J]. Automotive Engineering, 2009, 31(2): 165-169. (in Chinese)
- [7] 马志雄, 朱西产. 假人主要伤害值对等效双梯形波减速度曲线的灵敏度分析 [J]. 汽车工程, 2009, 31(2): 165-169.
- [8] Ma Zhixiong, Zhu Xichan. 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)
- [9] 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.
- [10] Zhu Hangbin, Liu Xuejun. Effect of Front Crash Pulse on Occupant Injury Response[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(11): 964-968. (in Chinese)
- [11] 朱航彬, 刘学军. 正面碰撞波形对乘员伤害值的影响[J]. 汽车工程, 2008, 30(11): 964-968.
- [12] Qiu Shaobo, Pan Zuofeng, Li Hongjian, et al. The Concept of Car Body Crashworthiness Optimization Method[C]// 9th SCCAST, Beijing, 2006: 140-147. (in Chinese)
- [13] 邱少波, 潘作峰, 李红建, 等. 车体耐撞性概念优化方法 [C]// 第 9 届汽车安全技术学术会议, 北京, 2006: 140-147.
- [14] Paulius Griskevicius, Antanas Ziliukas. The Crash Energy Absorption of the Vehicles Front Structures[J]. Transport-2003, Vol XVIII, No 2, 97-101
- [15] Bao Xiaojun, Zhang Huojun. The research on acceleration curve control and optimization for front crash [C]// 2014 SAECCE, Shanghai, 2014: 788-792. (in Chinese)
- [16] 鲍小军, 张厚钧. 某车型正面碰撞加速度波形优化策略研究[C]// 2014 年中国汽车工程学会年会, 上海, 2014: 788-792.
- [17] NI Weiye, CHEN Daojiong, FU Dacheng, et al. Mathematical Modeling for the Impulse Signal of Automobile Crash [J]. Machine Design and Research, 2011, 27(5): 116-119. (in Chinese)
- [18] 倪维宇, 陈道炯, 付大成, 等. 汽车碰撞冲击脉冲波形数学建模[J]. 机械设计与研究, 2011, 27(5): 116-119.
- [19] Chen Hong. Method for identifying characteristic parameters of vehicle crash curve: China, 201110132462.5[P]. 2011-05-20. (in Chinese)
- [20] 陈弘. 一种汽车碰撞波形特征参数识别方法: 中国, 201110132462.5[P]. 2011-05-20.
- [21] DA Aylor, DS Zuby. Comparison of BioRID Injury Criteria Between Dynamic Sled Tests and Vehicle Crash Tests[C]. Proceedings of the 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (CD ROM), 2011.
- [22] Davidsson J. Development of a Mechanical Model for Rear Impacts[D]. Goteborg, Sweden: Department of Machine and Vehicle Design, Chalmers University of Technology, 2000
- [23] China-New Car Assessment Program(2018)[R]. Tianjing: China Automotive Technology & Research Center, 2017. (in Chinese)
- [24] 中国新车评价规程(2018 年版)[R]. 天津: 中国汽车技术研究中心, 2017.

- [25] China-New Car Assessment Program(2015)[R]. Tianjing: China Automotive Technology&Research Center, 2015. (in Chinese)
- [26] 中国新车评价规程（2015 年版）[R].天津：中国汽车技术研究中心，2015.