

Contrastive Study On Two Kinds Of Vehicle Crash Dual-trapezoids Curve Construction Methods

Yunsheng YANG, Shuangdong LIU, Chao YU, Zhibo ZHANG

China Automobile Technology & Research Center Co., Ltd, Tianjin, China, 300300

Yangyunsheng@catarc.ac.cn

Abstract: Vehicle body acceleration curve in collision is an important reference for the design of vehicle safety structure. Through the analysis of the crash process, we can find the problems in the body design and optimize the body structure design. The crash curve is a complex, changeable and irregular curve. How to transform this irregular curve into a simple and practical curve is a technical problem. In this paper, two simplified methods of dual-trapezoids curve based on crash curve are introduced. One construction method is based on the characteristic parameter of real vehicle crash curve, the other dual-trapezoids curve construction method is based on the maximum valley -to- peak and maximum peak-to-valley of vehicle crash curve. According to the principle of momentum conservation, the time and energy equivalence relationships between the real vehicle crash curve and the dual-trapezoids curve are solved. In this paper, two methods are introduced and compared. In order to verify the dual-trapezoids curve results, the paper simulates the damage of the vehicle curve and the two simplified dual-trapezoids curves, compares the advantages and disadvantages of the two methods.

Key words: vehicle crash curve; maximum valley -to- peak; maximum peak-to-valley; trapezoids curve; dual-trapezoids curve; characteristic parameter

两种汽车碰撞双梯形波构建方法对比研究

杨运生, 刘双东, 于潮, 张志波

中国汽车技术研究中心有限公司, 天津, 中国, 300300

Yangyunsheng@catarc.ac.cn

摘要: 碰撞时车身加速度是汽车安全性结构设计的重要参考, 通过对碰撞过程的分析, 能够发现车身设计中存在的问题并对车身优化设计。碰撞曲线是复杂多变、无规律的曲线, 怎么把这种无规律的波形转化成简单的, 便于实际应用的曲线是个技术难题。在本文里, 介绍两种基于碰撞波形的双梯形波的简化方法。一种是基于实车碰撞波形的特征参数构建方法, 一种是基于最大谷峰值与峰谷值的汽车碰撞双梯形波的构建方法。这两种办法都根据动量守恒原理, 解决了实车碰撞波形和双梯形波在时间上和能量上的等效关系。文中介绍了两种方法, 进行了波形趋势比较分析, 为了验证简化结果, 对实车波形和简化的双梯形波进行了模拟仿真, 比较两种方法的优劣。

关键词: 汽车碰撞波形; 最大谷峰值; 最大峰谷值; 梯形波; 双梯形波; 特征参数

1 引言

汽车安全性通常分为主动安全性和被动安全性两大类, 主动安全性是指在交通事故发生之前采取安全性措施, 尽可能的避免交通事故发生的性能。被动安全性是指在发生不可避免的交通事后, 利用对车辆结构的保护以及被动安全性装置, 尽可能的减少驾驶员和车上乘员以及车外行人受到伤害的程度。车身结构优化和乘员约束系统设计是被动安全性研究的主要内容。在车辆优化设计的过程中, 车辆 B 柱下面的加速度传感器获得的加速度数据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。

通过对车身加速度波形的分析, 能够发现汽车设计过程中碰撞安全性存在的问题, 成为对车身结构进行优

化的依据。实车碰撞波形包含车辆碰撞信息，但由于其形式非常复杂且不能直观地表示出车辆碰撞特点，很难直接用于结构设计。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，这一直是一个较为复杂的难题。为了解决这个问题，本文提供了两种基于汽车碰撞波形的双梯形波构建方法，一种是基于汽车碰撞波形的最大谷峰值与峰谷值的汽车碰撞双梯形波的构建方法，一种是基于汽车碰撞波形特征参数提取的双梯形波的构建方法，这两种方法都依据动量守恒原理来构建，为了验证方法的实际可操作性，文中针对具体的碰撞曲线进行两种方法的构建，对这两种方法进行了比较分析。

2.两种双梯形波构建方法

2.1 基于汽车碰撞波形最大谷峰值与峰谷值的双梯形波构建方法

2.1.1 汽车碰撞波形与双梯形波分析

在车辆的正面碰撞试验中,车身减速度一般由 2000 多个数据系列,波形变化也复杂,没有规律性。图 1 所示实车碰撞波形是一典型的实车碰撞减速度经滤波通道频率等级为 60(Channel Frequency class 60,简称 CFC60)的低通滤波器滤波后的波形,可见实车碰撞波形是非常复杂的。

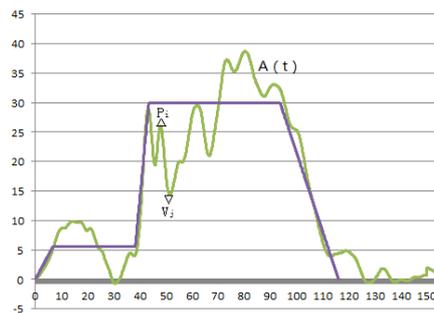


Figure 1. Crash acceleration curve

图 1. 碰撞过程加速度波形

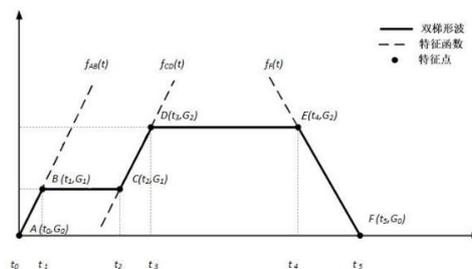


Figure 2. Typical dual-trapezoids curve

图 2. 典型的双梯形波

如图 1 所示，实车碰撞波形可以分为较为明显的 2 个台阶。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，然后加速度快速下降，直接到碰撞结束。碰撞加速度波形反应的是车身的结构及车身吸能情况，经过分析可以发现，第 1 阶段是从碰撞开始到发动机前部空间被完全压溃，主要经历保险杠、前部吸能盒和薄壁直梁的压溃变形过程；第 2 台阶为发动机开始碰撞一直到碰撞结束，主要经历发动机、变速器和水箱散热器的变形、发动机后的纵梁弯曲变形以及防火墙变形过程。根据实际波形特征，按照碰撞波形的趋势对碰撞波形进行双梯形简化，在这个过程中遵守动量守恒原理，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，这样经过简化的双梯形波与原碰撞

加速度波形等效。

简化波形所形成的双梯形波，如图 2 所示，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。

2.1.2 基于最大谷峰值与峰谷值的双梯形波构建方法

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， $A(t)$ 的零时刻表示为碰撞的开始时刻， $A(t)$ 波形呈波浪型，有波峰也有波谷，根据定义是先有波峰后有波谷。理论上，波峰点和波谷点的共同特点是对时间的倒数为零，在波峰值点处，倒数 $A'(t)$ 由正值变为负值；在波谷值点处，倒数 $A'(t)$ 由负值变为正值。

根据峰值的特征，在波峰值点和波谷值点处加速度 $A(t)$ 对时间 t 的倒数理论上为零，但由于加速度 $A(t)$ 是由许多点构成的，不是连续的，则 $A(t)$ 对时间 t 的倒数在波峰值点和波谷值点处不是为零。在波峰值点处，倒数 $A'(t)$ 由正值变为负值；在波谷值点处，倒数 $A'(t)$ 由负值变为正值。

为了确定最值点，首先求加速度 $A(t)$ 对时间 t 的倒数，由于 $A(t)$ 是数据序列，不是连续的，其倒数用公式表示为：

$$A'(t_j) = (A(t_j) - A(t_{j-1})) / \Delta t \quad j=2, 3 \cdots n; \quad (1)$$

Δt 为时间间隔，单位是 ms，和频率有关，是频率的倒数。 $A(t_j)$ 和 $A(t_{j+1})$ 是加速度 $A(t)$ 在时间 t_j 和 t_{j+1} 时刻的加速度值。

求导之后，第一步对 $A'(t_j)$ ($j=2, 3 \cdots n-1$) 进行搜索，寻找使 $A'(t_j)=0$ 的点。由于波峰点和波谷点都可能有 $A'(t_j)=0$ ，为了区别波峰点和波谷点，按照以下办法进行，同时记下序列号 j ：

$$A'(t_j)=0 \text{ 且 } A'(t_{j+1})<0 \quad \text{则 } A(t_j) \text{ 为波峰值，对应是波峰点} \quad (1)$$

$$A'(t_j)=0 \text{ 且 } A'(t_{j+1})>0 \quad \text{则 } A(t_j) \text{ 为波谷值，对应是波谷点} \quad (2)$$

第二步，排除第一步已经确定使 $A'(t_j)=0$ 的点，用以下公式确定 $A'(t_j) \neq 0$ 的峰值点和峰谷点：

$$A'(t_j) * A'(t_{j+1}) > 0 \quad \text{则 } A(t_j) \text{ 对应点不是峰值或者峰谷点。}$$

$A'(t_j) * A'(t_{j+1}) < 0$ 则 $A(t_j)$ 和 $A(t_{j+1})$ 有一个点是极值点，可能是峰值或者谷值。在波峰值处，倒数 $A'(t_j)$ 为正值，倒数 $A'(t_{j+1})$ 为负值，同时比较加速度值 $A(t_j)$ 和 $A(t_{j+1})$ 值的大小，取较大值对应的点为波峰值点。在波谷值处，倒数 $A'(t_j)$ 为负值，倒数 $A'(t_{j+1})$ 为正值，比较加速度值 $A(t_j)$ 和 $A(t_{j+1})$ 值的大小，取较小值对应的点为波谷值点。

用以下公式确定那个是波峰值点或者波谷值点，同时记下序列号 j ：

$$A(t_j) < A(t_{j+1}) \text{ 且 } A'(t_{j+1}) < 0 \quad \text{则 } A(t_{j+1}) \text{ 为波峰值，对应波峰点} \quad (4)$$

$$A(t_j) > A(t_{j+1}) \text{ 且 } A'(t_{j+1}) < 0 \quad \text{则 } A(t_j) \text{ 为波峰值，对应波峰点} \quad (5)$$

$$A(t_j) < A(t_{j+1}) \text{ 且 } A'(t_{j+1}) > 0 \quad \text{则 } A(t_j) \text{ 为波谷值，对应波谷点} \quad (6)$$

$$A(t_j) > A(t_{j+1}) \text{ 且 } A'(t_{j+1}) > 0 \quad \text{则 } A(t_{j+1}) \text{ 为波谷值，对应波谷点} \quad (7)$$

通过以上方法对加速度倒数 $A'(t)$ 进行波峰点和波谷点的搜索，波峰值点记为 P_i , $i=1, 2 \cdots n$ ；波谷值点记为 V_j , $j=1, 2 \cdots m$ 。如图 1 所示，在碰撞曲线中，定义零时刻为碰撞开始时间，碰撞曲线首先出现的是波峰值，然后是波谷值，波峰和波谷成对出现，即在搜索域时间 t 内波峰值点和波谷值点数量相同，记为 N , N 为正整数。定义波峰值和紧邻的波谷值用同一个序号。同一序号中波峰值点记为 P_i ，波谷值点记为 V_i ，波峰和波谷构成一组峰谷序列。定义 P_i 、 P_{i+1} 和 V_i 分别对应的坐标值为 $[tp_i, A(tp_i)]$ 、 $[tp_{i+1}, A(tp_{i+1})]$ 和 $[tv_i, A(tv_i)]$ ，假设以波谷为参考的话，约定峰谷值为 $A_{pv}(i)$ ，谷峰值为 $A_{vp}(i)$ ，定义以下公式：

$$A_{pv}(i) = A(tp_i) - A(tv_i) \quad (8)$$

$$A_{vp}(i) = A(tp_{i+1}) - A(tv_i) \quad (9)$$

对加速度 $A(t)$ 在碰撞时间内进行波峰和波谷点的搜索，在搜索域时间 t 内让波峰值点和波谷值点数量相同，

记为 N , N 为正整数。定义最大谷峰值、最大峰谷值、谷峰值的搜索序列号 i 和峰谷值的搜索序列号 j , 最大峰谷值为 APV_{max} , 最大谷峰值定义为 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和波谷点的坐标, 为下一步的计算做准备。

根据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, 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,

$$f_{AB}(t) = K_{AB} \times t \quad (10)$$

$$f_{CD} = K_{CD} \times t + b_{CD} \quad (11)$$

$$f_{EF} = K_{EF} \times t + b_{EF} \quad (12)$$

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, 就要进行求解。

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谷值点 V_1 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_j 和谷值点 V_j 构建所述线段函数 $f_{EF}(t)$ 。计算 K_{EF} 和 b_{EF} , 令 $K_{EF} \times t + b_{EF} = 0$, 计算此时的 t 值, 把 t 值进行四舍五入保留到小数点后一位, 单位是 ms , 记为 t_5' 。线段函数 f_{EF} 经过点 $(t_5', 0)$, 计算此时的 K_{EF}' 和 b_{EF}' , 最终的线段函数 $f_{EF}(t)$ 为: $f_{EF}'(t) = K_{EF}' \times t + b_{EF}'$ 。

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 $f_{AB}(t_1') = f_{CD}(t_2') = G_1'$, 则有:

$$t_1' = \frac{K_{CD} \times t_2' + b_{CD}}{K_{AB}} \quad (13)$$

$$G_1' = K_{CD} \times t_2' + b_{CD} \quad (14)$$

由 AB' C' t_2' 构成了一个直角梯形, 其梯形面积是:

$$S_{f1} = \frac{(2 \times t_2' - t_1') \times G_1'}{2} = \frac{K_{CD} \times (2 \times K_{AB} - K_{CD}) \times t_2'^2 + 2 \times K_{AB} \times t_2' + b_{CD}^2}{2 \times K_{AB}} \quad (15)$$

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 $S_{a1} = S_{f1}$;

$$\text{即} \quad \int_0^{t_2'} A(t) dt = \frac{K_{CD} \times (2 \times K_{AB} - K_{CD}) \times t_2'^2 + 2 \times K_{AB} \times t_2' + b_{CD}^2}{2 \times K_{AB}} \quad (16)$$

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 $t_2 = t_2'$ $|dS=0$; 其中 $dS = S_{a1} - S_{f1}$, 在实际计算过程中, $dS=0$ 的情况很难达到, 则只要使 $|dS|$ 为最小就可以。

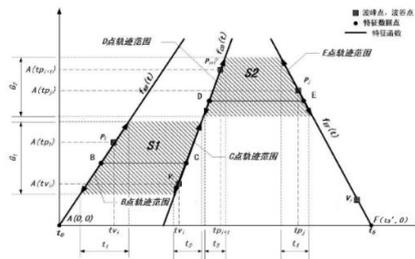


Figure 3. Dual-trapezoids curve solution flow chart

图 3. 双梯形波求解流程图

确定好 t_2, t_1 之后, 来求其余的参数, 在区间段 $[t_2, t_6]$ 内, t_6 为曲线 $A(t)$ 的加速度首次为零的时刻, t_6 可以确定, 面积为 S_{a2} , $S_{a2} = \int_{t_2}^{t_6} A(t)dt$

多边形 t_2CDEt_5' 构成的面积由 t_2CDt_3 梯形、 t_3DEt_4 矩形和 t_4Et_5' 三角形组成。

$$S_{f2} = \frac{(G_1+G_2) \times (t_3-t_2)}{2} + G_2 \times (t_4 - t_3) + \frac{G_2 \times (t_5-t_4)}{2} \quad (17)$$

根据动量守恒定理, 碰撞结束时, 曲线 $A(t)$ 和梯形波 $f(t)$ 的面积相同, 则 $S_{a2}=S_{f2}$

$$\int_{t_2}^{t_6} A(t)dt = \frac{(G_1+G_2) \times (t_3-t_2)}{2} + G_2 \times (t_4 - t_3) + \frac{G_2 \times (t_5-t_4)}{2} \quad (18)$$

$$G_2 = K_{CD} \times t_3 + b_{CD} \quad (19)$$

$$G_2 = K'_{EF} \times t_4 + b'_{EF} \quad (20)$$

由于对于给定的曲线, $A(t)$ 的面积是一定的, 同时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, 变化时间变量 t_3 , 由于 G_2 相同, 可以由 t_3 计算 t_4 , 同时 t_5' 的时间已经确定, t_6 也可以确定, 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, 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双梯形波。

2.2 基于特征参数提取的双梯形波构建方法

针对基于特征参数提取的双梯形波构建方法, 部分与以上的方法相同, 在这只讨论不同之处。

寻找最大谷峰值和最大峰谷值的方法与前面的方法相同, 也记下最大谷峰值对应的波谷点和波峰点坐标, 不同之处在于这种方法只记下最大峰谷值对应的波峰点的坐标。

对于双梯形波函数 $f(t)$ 中 A、B、C、D、E 和 F 6 个数据点的求解, A、B、C 三点的求法与前面的方法相同。不同之处, 对于 F 点的求解, 首先对 $A(t)$ 在碰撞时间范围内进行积分, 形成速度函数 $Speed(t)$, 然后逐点对 $Speed(t)$ 与实际碰撞速度进行比较, 找到首次相等或者相差最小的速度点所对应的的时间 t_5 , 即双梯形波中的 F 点对应的的时间, F 点坐标为 $(0, t_5)$ 。

对 D、E 点的求解, 在区间段 $[t_2, t_5]$ 内, $A(t)$ 的面积为 S_{a2} , $S_{a2} = \int_{t_2}^{t_5} A(t)dt$

多边形 t_2CDEt_5 构成的面积由 t_2CDt_3 梯形、 t_3DEt_4 矩形和 t_4Et_5 三角形组成。

$$S_{f2} = \frac{(G_1+G_2) \times (t_3-t_2)}{2} + G_2 \times (t_4 - t_3) + \frac{G_2 \times (t_5-t_4)}{2} \quad (21)$$

根据动量守恒原理, 在时间段 $[t_2, t_5]$ 内 $A(t)$ 和 $f(t)$ 的面积相同, 则 $S_{a2}=S_{f2}$

$$\int_{t_2}^{t_5} A(t)dt = \frac{(G_1+G_2) \times (t_3-t_2)}{2} + G_2 \times (t_4 - t_3) + \frac{G_2 \times (t_5-t_4)}{2} \quad (22)$$

根据公式 (22)、(19)、(20), S_{a2} 是一个确定的值, 变化时间变量 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 , 可以把 D、E 点确定, 这样就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 某碰撞波形的双梯形波的构建过程

以上分析了两种方法操作过程的理论基础, 现在用一条具体的碰撞波形来进行这两种方法的双梯形波的计算。

3.1 基于最大谷峰值与峰谷值的某车型碰撞波形的梯形波的构建过程

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, 数据的时间间隔为 0.1ms, 碰撞试验时实车碰撞速度为 64.3km/h。时间零表示为碰撞的接触时刻, 即碰撞开始时间, 这个时间不是碰撞时数采系统开始记录的時刻。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。

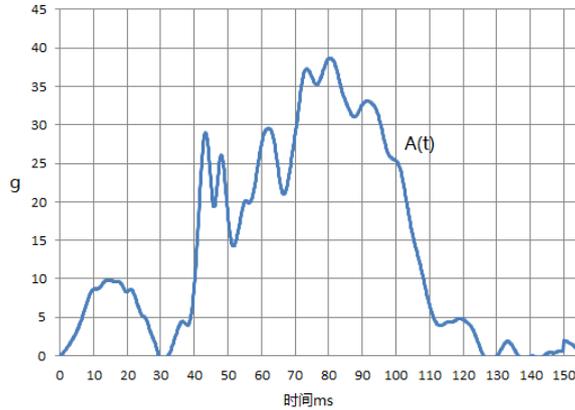


Figure 4. Crash acceleration curve of a vehicle

图 4. 某车型的碰撞加速度曲线

对车身加速度数据进行倒数处理，在碰撞时间内分别找出相应的波峰点和波谷点，一共 13 组波峰波谷，用序号 1,2...13 标记。波峰值和紧邻的波谷值用同一个序号。用波峰值减后面紧邻的波谷值得到峰谷值，取波谷值减后面紧邻的波峰值的绝对值为谷峰值。找出最大的谷峰值和最大的峰谷值对应的坐标值。

构成 $f_{AB}(t)$ 为 $A(0,0)$ 和第一个波峰点 $P_1(10.5,8.69)$ ，之后出现的最大谷峰值序列号为 $i=5$ ，也就是说构成 $f_{CD}(t)$ 的点是 V_5 和 P_6 ，对应的坐标值 $V_5(38.0,4.00)$ 和 $P_6(43.3,28.96)$ 。最大峰谷值出现在序号为 $i=12$ 对应的点是 P_{12} 和 V_{12} ，也就是说构成 $f_{EF}(t)$ 的点是 V_{12} 和 P_{12} ，对应的坐标值是 $P_{12}(91.5,33.07)$ 和 $V_{12}(113.3,3.91)$ ，由此可得出计算约束函数的关键特征点的坐标，如下表 1 所示：

Table 1 Constraint function calculation table

表 1 约束函数计算表

约束函数	对应序号	基于最大谷峰值与峰谷值时关联坐标	最大值时斜率值 K(按秒计)	最大值时截距值 b	基于特征参数提取时关联坐标	基于特征参数提取时斜率值 K	特征参数时截距值 b
$f_{AB}(t)=K_{AB} \times t$	1	$A(0,0)$ $P_1(10.5,8.69)$	827.62	0	$A(0,0)$ $P_1(10.5,8.69)$	827.62	0
$f_{CD}(t)=K_{CD} \times t+b_{CD}$	5	$V_5(38.0,4.00)$ $P_6(43.3,28.96)$	4710.97	-175.02	$V_4(38.0,4.00)$ $P_5(43.3,28.96)$	4710.97	-175.02
$f_{EF}(t)=K_{EF} \times t+b_{EF}$	12	$P_{12}(91.5,33.07)$ $V_{12}(113.3, 3.91)$	-1337.88	155.49	$P_{12}(91.5, 33.07)$ $F(97.7,0)$	-5334.11	521.14
$f_{EF}'(t)=K_{EF}' \times t+b_{EF}'$	----	$P_{11}(91.5, 33.07)$ $F(116.2,0)$	-1338.93	155.61	----	----	----

首先求 F 点，在公式 $f_{EF}(t)=K_{EF} \times t+b_{EF}$ 中， $K_{EF}=-1337.88$ ， $b_{EF}=155.49$ ，令 $f_{EF}(t)=0$ ，则 $t=116.219ms$ ，对 t 值取小数点后一位，即 $t=116.2ms$ ，把点 F (116.2,0) 作为碰撞的结束点。根据点 $P_{12}(91.5,33.07)$ 和点 F (116.2,0) 重新计算 K_{EF}' 和 b_{EF}' ，结果在表 1 中。

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 $G_1=5.6, t_1=6.8ms, t_2=38.3ms$ 。

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 $[t_2, t_6]$ 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 $G_2=29.9, t_3=43.5\text{ms}, t_4=93.9\text{ms}$ 。由此构成 $f(t)$ 的特征点的坐标全部求解完成, 结果如表 2 所示, 波形见图 5 所示的最大谷峰与峰谷法梯形波。

Table 2 Calculation result table

表 2 计算结果表

坐标点	基于最大谷峰值与峰谷值时坐标值	最大值时斜率值 K(按秒计)	最大值截距值 b	基于特征参数提取时坐标值	基于特征参数提取时斜率值 K(按秒计)	基于特征参数提取时截距值 b
A	A(0,0)			A(0,0)		
B	(6.8,5.6)	827.62	0	(6.8,5.6)	827.62	0
C	(38.3,5.6)	4710.97	-175.02	(38.3,5.6)	4710.97	-175.02
D	(43.5,29.9)			(43.3,28.5)		
E	(93.9,28.9)	-1338.93	155.61	(92.3,28.5)	-5334.11	521.14
F	(116.2, 0)			(97.7, 0)		

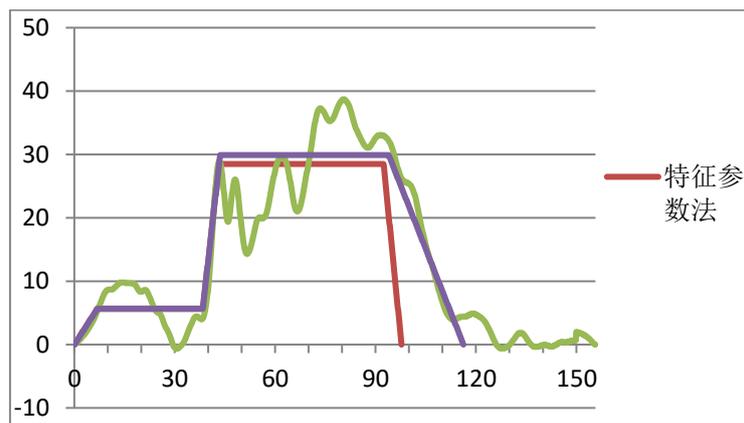


Figure 5. Crash curve and dual-trapezoids curve

图 5. 碰撞波形及构建的双梯形波

3.2 基于特征参数提取的某车型碰撞波形的梯形波的构建过程

对于这种方法的构建过程, 部分与基于最大谷峰值与峰谷值的方法相同, 只讨论不同之处。

对于 F 点的计算, 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 64.3km/h 进行比较, 找到首次速度相差最小的时刻对应的时间为 97.7ms , 则把点 $(97.7, 0)$ 记为双梯形波结束时的 F 点。

线段 $f_{AB}(t)$ 过点 $A(0,0)$ 和第一个波峰点 $P_1(10.5, 8.69)$, 线段 $f_{CD}(t)$ 过点 V_5 和 P_6 , 对应的坐标值 $V_5(38.0, 4.00)$ 和 $P_6(43.3, 28.96)$ 。线段 $f_{EF}(t)$ 经过点 $P_{12}(91.5, 33.07)$ 和 $F(97.7, 0)$, 由此可得出计算约束函数的关键特征点的坐标, 如上表 1 所示:

计算 B、C 点坐标, 方法和上面的一样, 经计算得到 $G_1=5.6, t_1=6.8\text{ms}, t_2=38.3\text{ms}$, 则 $B(6.8, 5.6), C(38.3, 5.6)$ 。对 D、E 点的计算, 点 D 在线段函数 $f_{CD}(t)$ 上, 点 E 在线段函数 $f_{EF}(t)$ 上, 根据在结束点 F 时面积相同, 经迭代计算得到 $G_2=28.5, t_3=43.3\text{ms}, t_4=92.3\text{ms}$, 则 $D(43.3, 28.5), E(92.3, 28.5)$, 由此构成 $f(t)$ 的特征点的坐标全部求解完成, 结果如表 2 所示, 波形见图 5 所示的特征参数法梯形波。

4 两种方法对比分析

以上我们根据两种构建方法到得简化后的双梯形波如图 5 所示，在图中可以看出，特征参数法的双梯形波的结束点为 $F(97.7,0)$ ，这种双梯形波与原始波形相差较大，形状和原波形基本没有一致性。分析其原因，这主要是由于构建方法的结束点位置的不同造成的，在碰撞过程中，车辆碰撞刚性壁，由于碰撞速度大，碰撞之后汽车不是与刚性碰撞壁粘合在一起，而是会反弹一段距离，就会在碰撞快结束时形成一定的反弹速度，这样从车身上采集到的加速度数据所积分而形成的速度就会比实际的碰撞速度大，以以上分析的加速度曲线 $A(t)$ 为例，加速度积分所形成的速度为 74.5km/h ，而实际碰撞前测得的加速度为 64.3km/h ，二者相差 10.2km/h ，这样会导致在构建双梯形波时以实际的碰撞速度为结束点时波形相差很大，简化双梯形波已经没有意义了。

在图 5 中可以看出，另外一种基于最大谷峰与峰谷值的双梯形波构建方法所构建的双梯形波，最大谷峰与峰谷法的双梯形波与原始波形 $A(t)$ 较为相近，双梯形波的结束点为 $F(116.2,0)$ ，双梯形波的趋势基本和原曲线相同。原始波形 $A(t)$ 在 115ms 之后在较小的数值范围内波动，这是由于最后阶段主要是反弹阶段，主要的碰撞过程已经结束，这一段的形状对结果影响不大，所以在构建过程中没有考虑对最后阶段形状的模拟，为了在能量上与原曲线相同，在以最大谷峰与峰谷值法构建双梯形波时，构建的双梯形波的积分速度与原始波形 $A(t)$ 的积分速度相同，就可以消除由于实际速度和积分速度相差较大而导致的波形趋势相差较大。

实际操作中，企业会为了使车身加速度积分所得的速度和实际碰撞速度接近或者相等，会把加速度数据进行处理，如下图 6 所示，这条碰撞波形的加速度积分所得的速度和碰撞速度相同。从图 6 中可以看出，按照特征参数法构建的双梯形波最大峰值在 17.4G ，而原始波形的最大均值在 25G 左右，两者相差较大，而在碰撞结束的反弹阶段，特征参数法构建的双梯形波的加速度远大于实际的曲线，这样的结果导致提取的波形和原始碰撞曲线相差较大，失去了提取的意义。最大谷峰与峰谷法提取的双梯形波，在高加速度阶段和下降阶段能很好的原始波形拟合，这样的结果能具有实际应用价值。

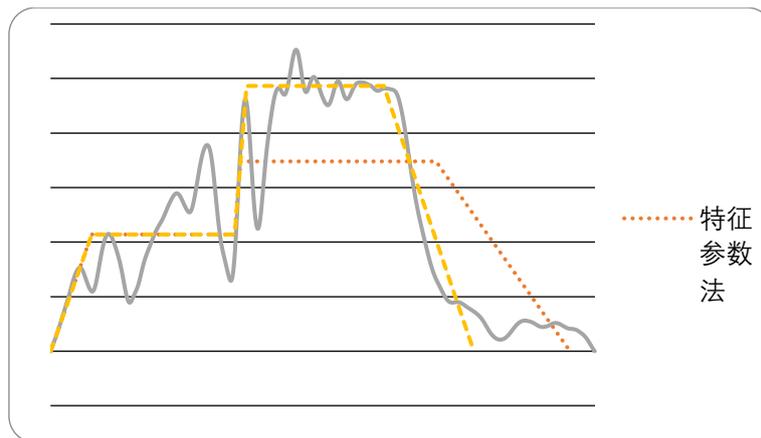


Figure 6. A crash curve and dual-trapezoids curves constructed by two methods

图 6. 某一碰撞波形及两种方法构建的双梯形波

以上从曲线的形状上直观的分析两种提取办法的优劣，为了能更好的进行分析，用模拟计算得到的伤害值来分析这两种方法。模拟时采用图 5 所示的波形，相同的车型结构，相同的参数设置，只改变加速度的波形来进行模拟。

为了分析，选择更能反映实际碰撞情况的 C-NCAP 评价指标进行比对，主要参数有：头部两个：头部伤害指数 HIC 和头部 3ms 加速度；颈部三个：颈部剪切力 (F_x)、颈部张力 (F_z) 和颈部伸张弯矩 (N_m)；胸部两个：胸部压缩量 (mm) 和粘性指数 (VC)；大腿两个：大腿压缩力 kN 和膝盖滑动位移 (mm)；小腿部两个：胫骨指数 (TI) 和小腿压缩力 kN 。

如下表 3 所示的对比指标,以相对误差=(双梯形波伤害值-原始曲线伤害值)/原始曲线伤害值×100%表示原始曲线和提取的双梯形波的相对误差。从表中看出,原始曲线的伤害指标与基于最大谷峰与峰谷值法提取的双梯形波的伤害指标的相对误差较大的项目有:大腿压缩力相对误差为-13.3%,粘性指数(VC)相对误差为 11.1%,颈部剪切力(FX)相对误差为-11.1%。原始曲线的伤害指标与特征参数法提取的双梯形波的伤害指标的相对误差较大的项目有:头部伤害指数 HIC 相对误差为-38.2%,头部 3ms 加速度相对误差为-30.4%,颈部剪切力(FX)相对误差为 22.2%。从相对误差大小来说,特征参数提取的双梯形波的伤害值与原始波形的伤害值误差较大,对于关键项目来说,大于 10%的误差就无法接受。

一般在考虑车身结构优化时,选取头部伤害指数 HIC、头部 3ms 加速度、颈部伸张弯矩(Nm)和胸部压缩量(mm)这几个指标作为主要的考核指标,一切以改善这些指标为出发点。从表 3 中可以看出,这几个指标误差较大的都是特征参数法提取的双梯形波,而且最大相对误差为头部伤害指数 HIC,达到-38.2%,这样的模拟结果就没有参考价值。基于最大谷峰与峰谷值法提取的双梯形波的伤害指标相对误差较大的是大腿压缩力、粘性指数(VC)和颈部剪切力(FX),这些伤害指标的模拟值与 C-NCAP 要求的高性能限值差距较大,可以在评分中拿到满分,因此不作为考虑车辆结构优化改进的指标。根据模拟计算结果,用最大谷峰与峰谷值法提取的双梯形波与原始波形的伤害值更接近,更具有实际的参考意义,结果也是可以信赖的。

Table 3 Simulation result table

表 3 模拟结果表

指标	原始曲线伤害值	基于最大谷峰与峰谷值双梯形波伤害值	基于最大谷峰与峰谷值时误差(%)	基于特征参数提取时双梯形波伤害值	基于特征参数提取时误差(%)
头部伤害指数 HIC	351	377	7.4	217	-38.2
头部 3ms 加速度	51.68	50.36	-2.6	35.98	-30.4
颈部剪切力 (F _x)	0.09	0.08	-11.1	0.11	22.2
颈部张力力 (F _z)	0.69	0.75	8.7	0.65	-5.8
颈部伸张弯矩 (Nm)	13.82	14.32	3.6	14.69	6.3
胸部压缩量 (mm)	30.98	29.94	-3.4	28.91	-6.9
粘性指数(VC)	0.09	0.1	11.1	0.1	11.1
大腿压缩力 kN	0.15	0.13	-13.3	0.13	-13.3
膝盖滑动位移 (mm)	0.88	0.86	-2.3	0.79	-10.2
胫骨指数(TI)	0.4	0.38	-5.0	0.38	-5.0
小腿压缩力 kN	1.9	1.85	-2.6	1.82	-4.2

5 结论

本文提出了两种基于实车碰撞波形的双梯形波提取方法,一种是基于最大谷峰值与峰谷值的双梯形波构建方法,一种是基于特征参数法的双梯形波构建方法。文中提供了详细的两种双梯形波的计算方法,为了更好的展示计算方法,文中以某个实际车型的碰撞曲线为例,详细进行了双梯形波提取的计算。根据双梯形波提取的结果,对波形的趋势进行了对比分析。为了更好的进行对比分析,本文在其它条件不变只改变加速度波形的条件下进行了模拟计算,经过模拟结果对比分析,基于最大谷峰与峰谷值构建的双梯形波各种伤害指标值更接近

实际碰撞曲线,说明更适合实际的情况,而基于特征参数法提取的双梯形波伤害值误差较大,在使用中要更慎重。

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] Yue ZHANG. Research on Sled Test Technique of Occupant Restraint System in Multiple Types of Frontal Crash [D]. Hebei Technology University, 2014. (in Chinese)
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.
- [3] Ledan LIU. Research on the Optimization for the Frontal Impact Pulse of a Car[D]. Jilin University:2011. (in Chinese)
刘乐丹. 某乘用车正面碰撞波形优化及其方法研究[D]. 吉林大学:2011.
- [4] Di KONG. Front 40% Offset Collision Simulation and Body Structure Safety Optimization of a SUV[D]. Hebei Technology University, 2016. (in Chinese)
孔迪. 某 SUV 正面 40% 偏置碰撞车身结构安全性的仿真优化[D]. 河北工业大学:2016.
- [5] Nana ZHOU. Study on Frontal Offset Impact Crashworthiness of Car[D]. Chongqing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
周娜娜. 轿车正面偏置碰撞抗撞性研究[D]. 重庆交通大学:2011.
- [6] 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)
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.
- [7] 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)
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)
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.
- [9] Zhu Hangbin, Liu Xuejun. Effect of Front Crash Pulse on Occupant Injury Response[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(11): 964-968. (in Chinese)
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.
- [10] 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)
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.
- [11] Paulius Griskevicius, Antanas Ziliukas. The Crash Energy Absorption of the Vehicles Front Structures[J]. Transport-2003, Vol XVIII, No 2, 97-101
- [12] Bao Xiaojun, Zhang Huojun. The research on acceleration curve control and optimization for front crash [C]// 2014 SAECCE, Shanghai, 2014: 788-792. (in Chinese)
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.
- [13] NI Weiyu, 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)
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.
- [14] Chen Hong. Method for identifying characteristic parameters of vehicle crash curve: China, 201110132462.5[P]. 2011-05-20. (in Chinese)
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.
- [15] 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.
- [16] Davidsson J. Development of a Mechanical Model for Rear Impacts[D]. Goteborg, Sweden: Department of Machine and Vehicle Design, Chalmers University of Technology, 2000
- [17] China-New Car Assessment Program(2018)[R]. Tianjing: China Automotive Technology & Research Center, 2017. (in Chinese)
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.