文章编号:1674-2974(2024)10-0037-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024217

基于特征参数分析的中国MPDB工况特征波形获取与应用

于潇[1],杨笑婷[2],费敬[1],黎震[2],王沛丰[1],刘煜[1,3†]
(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆 401122;
2. 湖南大学 整车先进设计制造技术全国重点实验室,湖南 长沙 410082;
3. 清华大学 车辆与运载学院,北京 100084)

摘 要:为了表征汽车碰撞工况下具有代表性的特征波形,明确相应的乘员损伤响应特征,基于正面50%重叠渐近可变形移动壁障(Mobile Progressive Deformable Barrier,MPDB)碰撞工况4种车型的波形数据,提出一种可行的特征波形处理办法.归纳统计各车型波形的特征参数分布规律,针对样本进行时间和加速度的归一化特征平均处理再进行时间缩放,保持波形形状特征和连续性,获得MPDB工况的特征波形.根据动量守恒定律,将特征波形等效为双梯形波,以满足台车试验和仿真的应用稳定性需求.通过MPDB特征波形和等效双梯形波作用下人体模型的仿真应用,对比分析乘员运动响应与损伤,乘员损伤参数结果相差最小可至1%.结果表明,采用归一化特征平均方法获得的波形时间和强度符合波形样本的特征参数规律,等效双梯形波能够很好地捕捉特征波形作用下的乘员运动损伤响应.

关键词:加速度;参数提取;双梯形波;乘员损伤
中图分类号:U461.91 **文献标志码**:A

Acquisition and Application of Chinese MPDB Test Condition Characteristic Pulse Based on Characteristic Parameter Analysis

YU Xiao[1], YANG Xiaoting[2], FEI Jing[1], LI Zhen[2], WANG Peifeng[1], LIU Yu[1,3†]
(1. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing Technology for Vehicle, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. School of Vehicle and Mobility, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To characterize representative characteristic pulse under a collision test condition and clarify corresponding occupant injury response characteristics, a feasible method of characteristic pulse processing based on pulse data from four vehicle types under 50% frontal overlap with the Mobile Progressive Deformable Barrier (MPDB) test condition was proposed. Firstly, the distribution regularity of characteristic parameters of four vehicle types was summarized and analyzed. Samples were then subjected to time normalization and acceleration feature

* **收稿日期**:2023-12-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51621004),National Natural Science Foundation of China(51621004);重庆市博士"直通车"科研项目(CSTB2023NSCQ-BSX0011),The Doctor of Philosophy "Through Train" Scientific Research Project of Chongqing(CSTB2023NSCQ-BSX0011);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4184), Natural Science Foundation of Hunan Province(2020JJ4184)
作者简介:于潇(1986—),男,北京人,中国汽车工程研究院股份有限公司工程师
† 通信联系人,E-mail:liuyu@caeri.com.cn

averaging processing, followed by time scaling to maintain pulse shape characteristics and continuity, resulting in the characteristic pulse of the MPDB test condition. Subsequently, based on the principle of momentum conservation, the characteristic pulse was equivalent to a double trapezoidal wave to meet the application stability requirements of sled testing and simulation. Finally, through the simulation of occupant motion response and injury using the MPDB characteristic pulse and equivalent double trapezoidal wave, a minimum difference of 1% in occupant injury parameters was observed. The results indicate that time and intensity obtained by the normalized feature averaging method can conform to the characteristic parameters of the pulse samples, and the equivalent double trapezoidal wave can effectively capture occupant motion injury response under the characteristic pulse.

Key words: acceleration; parameter extraction; double trapezoidal wave; occupant injury

汽车碰撞时,车辆被撞产生的运动加速度信号经传感器记录输出,形成的加速度波形涵盖了汽车碰撞过程中的大量信息,其重要性已经得到了充分的研究证明[1]. 乘员安全是车辆设计时面临的最主要挑战,乘员伤害由车辆前端结构和约束系统的共同作用决定,车辆结构、约束系统的作用、乘员损伤三者具有密切联系[2].

碰撞波形取决于车辆和碰撞物体的质量和结构刚度等参数,以及它们在碰撞过程中的相互作用,是车身碰撞安全性的改进基础[3-4]. 任立海等[5]以最小乘员胸部 3 ms 累计合成加速度为目标,车体动态变形量为约束,得到初始高、中期降低,后期升高的"三阶形"最优波形. 波形特性可用于分析给定车辆的耐撞性. Teng 等[6]使用不同保险杠和横梁设计的正碰模拟获得的加速度波形与采用头部损伤对耐撞性设计的评价一致,揭示了基于波形的汽车耐撞性设计的可行性. Urbina 等[7]基于头部损伤,证明了可将波形的三个恒定水平波作为设计变量来改进汽车耐撞性的设计. 碰撞场景模型中可以使用加速度波形作为车辆结构影响的替代[8],除研究车身前端结构的设计方法外,研究波形作用下乘员的损伤风险对于安全性评估和改进至关重要[9-11]. 以乘员损伤研究和保护为出发点,加速度波形可作为设计约束系统的基本数据,Wang 等[2]从"约束耦合"的角度提出设计以实现最佳的乘员保护效果. Buzeman 等[12]发现增加死亡风险参数、降低冲击速度及减小质量范围可改善正碰的安全性. 韩勇等[13]研究 FMVSS213 和 ECE R44 台车波形对 3 岁儿童损伤风险的影响,发现前者造成的损伤更严重,对儿童约束系统的安全性评价要求更高. Iraeus 等[3]基于事故加速度波形探索波形形状与伤害风险的关系,利用线性回归分析胸部损伤,表明可以用速度变化量、持续时间和两个形状参数充分对波形进行描述. Stigson 等[14]根据正碰波形分析了冲击严重程度与伤害的联系,发现加速度可能比速度变化更能描述伤害风险. 同样地,Kullgren[15]的研究表明,高速度变化量、高平均加速度或峰值加速度会导致更高的伤害严重性,可以解释撞击中造成伤害的风险. 一些基于计算机的方法也被用于获取加速度波形参数的影响规律,如多任务学习网络[16]. 加速度波形可用于未来自动驾驶汽车的安全评估与研究[17]. Sequeira 等[18]利用碰撞波形进行预测,生成训练和测试数据,Höschele 等[19]利用有限元仿真预测模型进行模拟训练,导出的通用碰撞波形可用于概念研究中的滑车试验与仿真.

乘员在碰撞过程中,整体行为在很大程度上可能会根据碰撞发生的方式、碰撞的重叠率发生变化[1,20-21]. 目前,大量涉及汽车碰撞波形的研究都是基于正面全宽碰撞,其他工况的研究较少,本文基于近三年的 MPDB 工况中国实车碰撞试验的波形数据,采用特征参数对 MPDB 工况下的不同车型加速度波形进行冲击严重程度分析,获得具有代表性的 MPDB 工况特征波形. 考虑到乘员安全性研究的成本和效率,采用台车试验和虚拟仿真已成为研究乘员碰撞响应的重要方式[22]. 为满足台车碰撞试验时加速度波形的可重复性,避免波形输入的差异造成人体响应和损伤测量的变化[23],进一步基于最大谷峰差和峰谷差的等效双梯形波构建方法[24],将 MPDB 工况的特征波形等效为双梯形波. 将特征波形和等效双梯形波作为碰撞输入进行仿真,对比乘员的运动响应和损伤情况,验证等效双梯形波的合理性. 本研究将促进 MPDB 工况下约束系统的更高更标准的安全性评价要求.

1　MPDB工况的波形评价与处理

1.1　各车型的波形评价

本文收集中国汽研MPDB工况实车碰撞测试的B柱加速度波形原始数据共65组.由于不同被测车辆加速度信号的频率和加载时间不同,对所有原始数据进行CFC60滤波,统一截取波形的时间为0~200 ms,采用线性插值方法,统一加速度的采样频率为20 kHz,即所有波形的相邻数据点的时间间隔为0.05 ms.

车辆前端布置和设计影响波形的形状和特征参数值.4种车型预处理后碰撞试验加速度波形如图1所示,燃油轿车的碰撞试验波形只有1组,电动轿车、燃油SUV、电动SUV的试验波形数据分别有13组、10组和41组.从数据量角度,电动SUV占比最大.各车型下试验实车的波形个体差异较大,且存在部分明显的异常波形.电动轿车有一条波形的最大加速度为60g,突变严重;燃油SUV存在整体偏移严重的波形,一条波形峰值时刻延后至100 ms且归零时刻长达160 ms,另一条波形的加速度归零时刻仅为50 ms;电动SUV存在回峰过大的波形,其中一条波形的回峰超过20g.对存在峰值突变严重、回峰异常、整体偏移严重等问题的异常波形进行筛除.

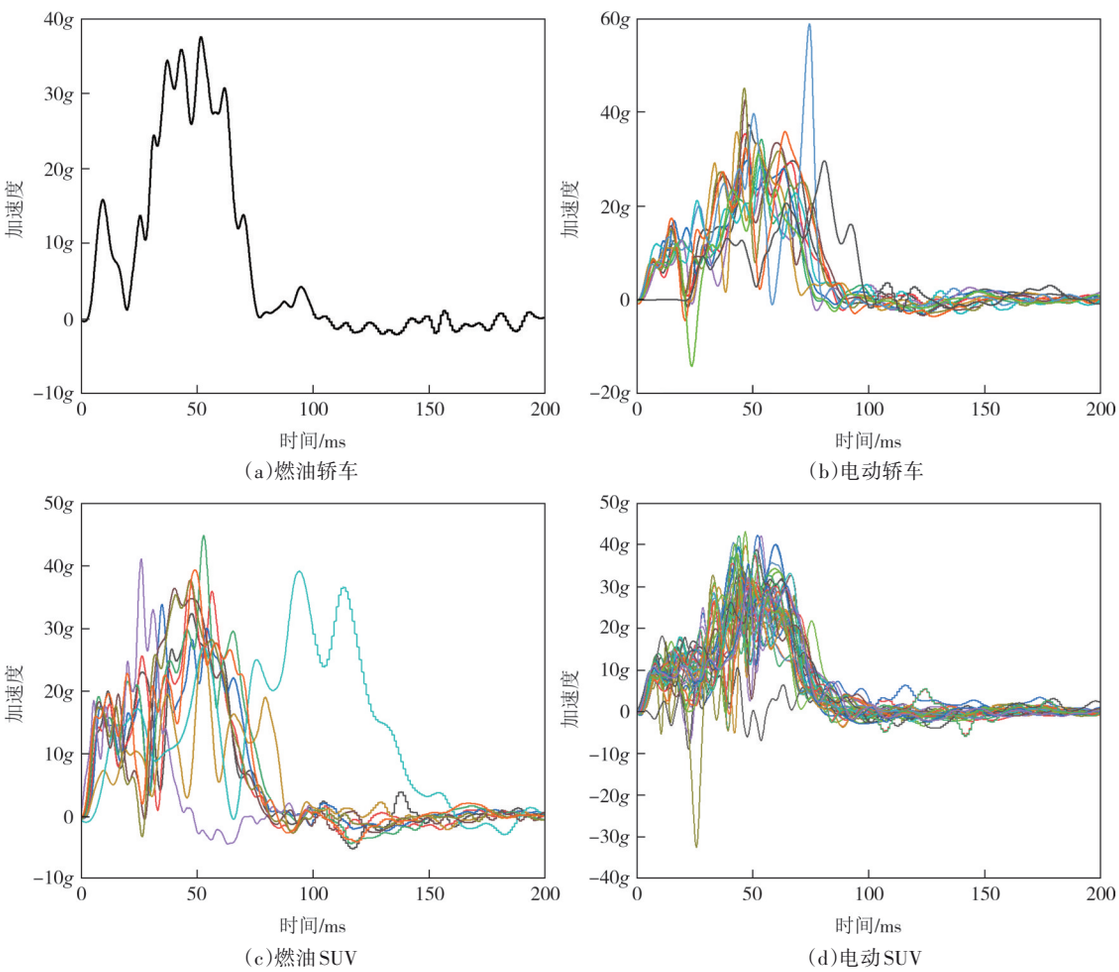
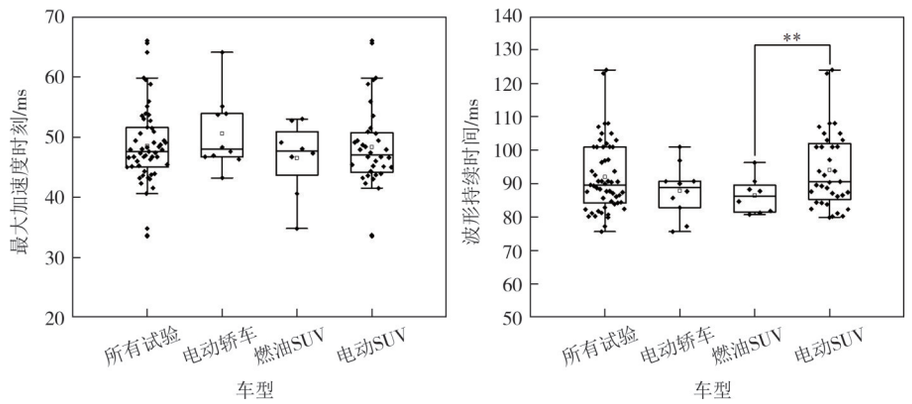


图1　4种车型预处理后碰撞试验加速度波形

Fig.1　The pulses of the four vehicle types in the crash test after pretreatment

基于保留的加速度波形,采用特征参数对各个车型的碰撞波形形状强度进行评价.经过特征参数的数据统计和处理,不同车型波形的时间和强度特征参数值分布分别如图2和图3所示,其中燃油轿车的单根波形参数未被单独列出.本文采用波形的时间特征参数(最大加速度时刻、波形持续时间);碰撞强度特征参数(最大加速度值、速度变化量和平均加速度)共同对MPDB工况下的试验车波形进行全局分析.乘员载荷准则(Occupant Load Criterion,OLC)是预测车辆的被动安全性能的常用方法之一[25],本文补充OLC指标对车辆碰撞加速度造成的乘员载荷进行评价.在时间特征上,MPDB工况波形的最大加

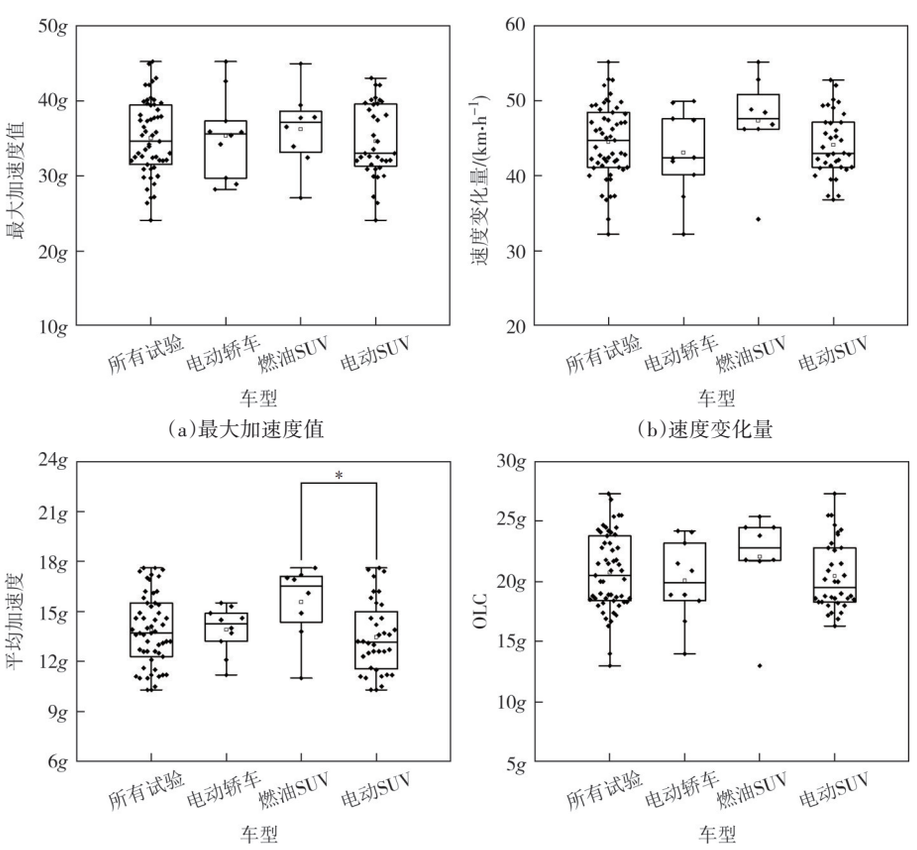
速度时刻为40~60 ms,其中电动轿车的峰值时刻较为靠后;燃油SUV的峰值时刻较为靠前.定义波形持续时间为波形的加速度首次归零时刻,MPDB工况下的波形持续时间集中分布在80~100 ms. MPDB工况波形最大加速度值分布在30*g*~40*g*,基于已有样本,燃油SUV的波形最大加速度值分布在较高水平,这可能和燃油汽车的前端布置有关,发动机的碰撞引起了加速度值的大幅度增加.MPDB工况存在部分速度变化量低至30 km/h和高达55 km/h的波形.不同车型的速度变化量、平均加速度及OLC值的箱线图主体分布趋势接近,且总体上燃油SUV强度最高,电动SUV次之,电动轿车最低.此外,对不同车型的碰撞特征参数进行差异化显著性分析,发现燃油SUV和电动SUV在持续时间和平均加速度参数方面存在显著性差异.



(a)最大加速度时刻 (b)波形持续时间

图2 不同车型波形的时间特征参数分布

Fig.2 Pulses time characteristic parameter distribution of different vehicle types



(a)最大加速度值 (b)速度变化量

(c)平均加速度 (d)OLC值

图3 不同车型波形的强度特征参数分布

Fig.3 Pulses strength characteristic parameter distribution of different vehicle types

1.2　特征波形的获取方法

本文提出加速度波形的归一化特征平均数值计算方法,对MPDB碰撞试验的多条加速度波形进行处理,以期获得表征车辆碰撞响应、符合波形参数特征规律的MPDB工况特征波形.对每个波形样本的时间特征进行归一化,为同时达到计算要求和保证波形的完整度和形状特征,对波形进行离散化处理,选定6个最大的加速度峰值点,将每个200 ms的原加速度波形分为7段.再依次针对波形段加速度数据进行归一化特征平均处理.将每条波形选定的峰值时刻除以其对应的时刻值,每个归一化原始曲线的第1个峰值时刻归一化为1,并依次处理第2至第7段数据.

在各波形共同的归一化时间段内获取对应的加速度值.由于原始加速度波形的峰值时刻不同,归一化后的时间段内加速度数据个数不统一,故采用线性插值方法在统一的归一化时间长度范围内对每条加速度波形数据进行插值.在每个归一化时间段内,都设定有2 000个加速度数据对应于插值曲线的归一化时刻,再根据式(1)计算在归一化时间段内的每个时刻对应的平均加速度值.

$$A_{\text{ave}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} A_i \tag{1}$$

式中:n为波形样本数量.为保留加速度和时间的关系,对上述得到的曲线进行缩放.将时间归一化且加速度平均后波形的每一个归一化时刻值乘对应的常数,且该常数为n条加速度波形峰值时刻的平均值T_i:

$$T_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_i}{n} \tag{2}$$

式中:t_i为各波形选定的第i个峰值的对应时刻.不改变加速度值的情况下,由于根据6个峰值时刻已将加速度波形分为7段,在逆归一化过程中对第1段归一化时间范围内的数据进行逆归一化处理,并依次逆归一化处理至第7段结束.以第1段为例,时间逆归一化计算公式为:

$$T_1(j) = t_1(j) \times T_1 \tag{3}$$

式中:$t_1(j)$为第1段的归一化时间段中的各数据对应时刻.进行逆归一化缩放后即可获得最终平均特征加速度波形.

综上,为获得理想的MPDB工况特征加速度波形,以试验波形为基础,对波形进行归一化特征平均处理,其操作步骤如下:

1)找出单条波形最大的6个加速度峰值点,据此划分波形段;

2)依次归一化单条波形的6个峰值时刻;

3)线性插值统一各归一化时间段内数据量为2 000个;

4)相同归一化时间段内各波形加速度数据求平均;

5)依次逆归一化峰值时刻,常系数为各加速度波形的对应峰值时刻的平均值.

1.3　4种车型的特征波形分析

基于上述保留的波形,各车型随机选取6条波形作为归一化特征平均处理的波形样本,对样本进行归一化特征平均处理.不同车型的特征加速度波形如图4所示,由于燃油轿车仅有一条试验波形,不再对燃油轿车波形进行归一化特征处理.MPDB工况4种车型的波形的整体趋势都符合一般MPDB碰撞波形的变化趋势.表1为不同车型特征加速度波形的特征参数值.

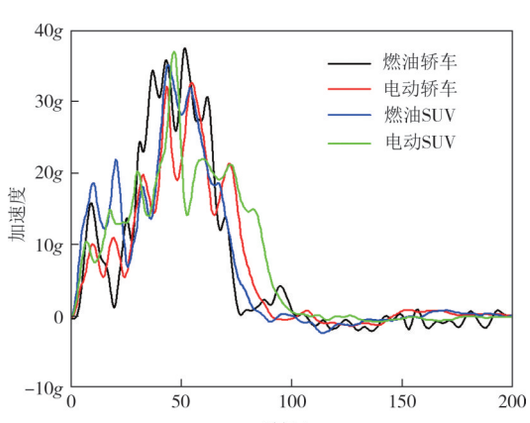


图4　不同车型的特征加速度波形

Fig.4　Characteristic pulses of different vehicle types

表1　不同车型特征加速度波形的特征参数值

Tab.1　The characteristic parameter value of characteristic pulses for different vehicle types

车型	最大加速度值	最大加速度时刻/ms	持续时间/ms	速度变化量/(km·h^{-1})	平均加速度	OLC值
燃油轿车	37.5g	51.6	102.0	50.9	14.1g	26.8g
电动轿车	32.7g	54.6	90.9	45.3	14.1g	21.3g
燃油SUV	35.2g	44.1	87.4	49.7	16.1g	22.9g
电动SUV	37.0g	46.9	107.7	52.7	13.9g	22.8g

基于特征参数箱线图进行分析,在时间特征上,电动SUV的持续时间相对较长,但不超过箱线图的最大限值;燃油轿车的峰值时刻最早且为44.1 ms,符合燃油轿车峰值时刻较早的规律.在强度特征参数方面,各车型的参数值基本位于箱线图的主体偏上部分.整体上,采用归一化特征平均方法的波形不仅符合MPDB工况碰撞加速度波形的特征参数规律,同时具备较高的强度.

1.4 MPDB工况的特征波形

为获得MPDB工况下的典型碰撞加速度波形,基于上述4种车型的加速度特征波形结果,对波形进一步平均,获取MPDB工况特征加速度波形如图5所示,特征参数值如表2所示.从波形特征参数角度分析,该波形符合MPDB工况波形的一般规律.该波形23.3g的OLC值位于所有被测车辆波形OLC值的中位线和平均值线的上方,乘员承受的等效载荷较大.采用该波形有助于对MPDB工况下碰撞过程中乘员典型损伤研究方面进行被动安全评价.

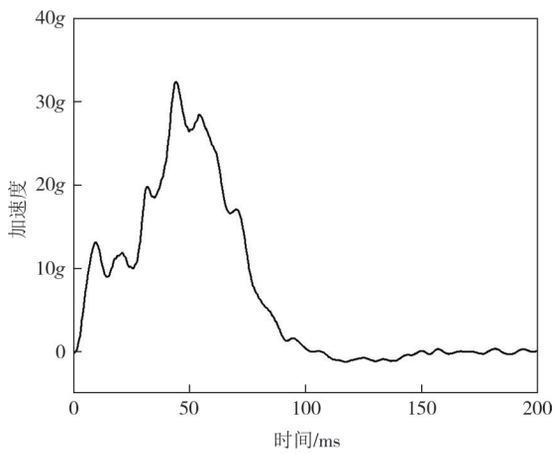


图5 MPDB工况特征加速度波形

Fig.5 Characteristic pulse of MPDB test condition

表2 MPDB工况特征加速度波形的特征参数值

Tab.2 The characteristic parameter value of characteristic pulse in MPDB test condition

最大加速度值	最大加速度时刻/ms	持续时间/ms	速度变化量/(km·h^{-1})	平均加速度	OLC值
32.3g	44.2	101.9	49.6	13.8g	23.3g

2 MPDB工况特征波形的等效双梯形波

加速度波形多呈现为两个明显的台阶,考虑到台车碰撞时对波形输入的稳定性需求,将碰撞加速度波形简化为两个叠加的梯形波,既能够表达碰撞总能量、持续时间、车辆最大变形等碰撞信息,也能更好地满足碰撞台车波形的输入稳定性.本文基于加速度波形的最大谷峰差和峰谷差构建等效双梯形波,对MPDB工况特征波形进行等效处理.该方法依据动量守恒定律构建,在高加速度阶段和下降阶段能有效拟合原波形,并且具有实际可操作性[24].

设原点A为双梯形波的起点,F点为截止点,B点至E点为双梯形波的转折点,B点至F点对应的时刻分别为t_1至t_5,特征线段BC和DE与时间轴平行,且对应加速度值分别为G_1和G_2.求解等效双梯形波的思路为采用迭代法找到满足双梯形波与加速度波形前端面积相等的t_2时刻,以t_2为分界,划分两段求解波形的等效双梯形波.

根据加速度波形的第一个峰点、最大谷峰差对应的谷点和峰点、最大峰谷差对应的峰点和谷点,求出等效双梯形波AB、CD、EF三条腰线所在直线的函数表达式.本文直接选定直线EF与时间轴的交点为等效双梯形波的F点.此时,腰线的斜率k和截距b已知,则腰线所在直线的表达式$f_{AB}(t)$、$f_{CD}(t)$、$f_{EF}(t)$已知.

根据函数映射关系,求解等效双梯形波参数时,t_1和G_1可仅用t_2表示.再根据0~t_2时间段内的加速度波形与时间轴围成的面积和双梯形波的第一级梯形的面积相等原则,迭代算出t_2,计算式为:

$$\int_0^{t_2} A(t)\mathrm{d}t = \frac{(2t_2 - t_1)G_1}{2} \tag{4}$$

由于波形由一组离散点组成,在实际计算中,根据等式两边绝对值差最小原理,迭代算出等效双梯形波特征点C的对应时刻t_2.对t_2至波形归零时刻的加速度进行积分得到的面积为常数,与从t_2至t_5内的双梯形波与时间轴围成面积相等.同样,由于此时t_2、G_1、t_5已知,G_2、t_4、t_3内含一次函数线性关系,可将t_4和G_2仅用t_3来表示,加速度波形和双梯形波的第二段面积相等的等式求解变为一元一次方程求解t_3.至此,等效双梯形波的5个特征点全部确定.

计算获得MPDB工况的特征等效双梯形波及通道如图6所示.MPDB特征等效双梯形波的G_1值为10.6g,G_2值为24.1g,截止时间为93.5 ms.通道是根据4种车型特征波形的等效双梯形波的上、下限点的连线组成,显然MPDB工况的特征波形等效双梯形波位于该通道内.

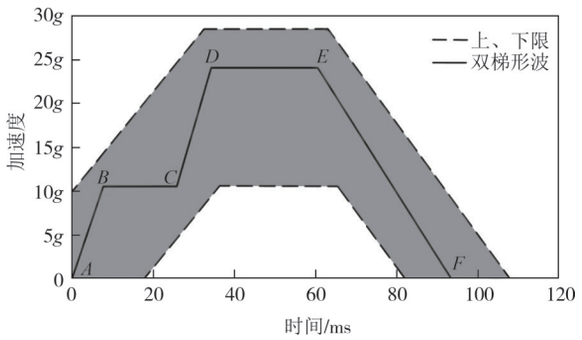


图6　MPDB工况的特征等效双梯形波及通道

Fig.6　Characteristic equivalent double trapezoid wave and corridor in MPDB test condition

3　MPDB工况特征波形和等效双梯形波的应用验证

3.1　两条波形下的乘员动态响应

采用6.1版本的50th百分位THUMS人体模型，结合基础刚性座椅台车碰撞模型，MPDB工况特征波形和等效双梯形波分别作为加速度输入，在LS-DYNA中进行仿真. 仿真模型采用简化三点式标准有限元安全带，无预紧限力，由1D和2D单元组成，其中2D单元模拟与身体接触的肩带与腰带部分，分别设置滑环、锁扣与1D单元的摩擦因数分别为0.12和0.2.

2种波形输入下THUMS人体模型不同时刻动态响应对比如图7所示. 在2种波形作用下，THUMS人体模型运动姿态具有高度一致性. 在MPDB工况下，整个碰撞运动过程中，THUMS人体模型躯干沿坐垫向前移动，伴随安全带腰带的限制，骨盆运动至最远状态时，头颈、上躯干继续前旋；之后安全带限制减轻，THUMS人体模型回弹，整体躯干向座椅靠背靠近，但头颈前旋角度依然较大；在回弹后期，后背接触到刚性座椅靠背，整体躯干逐渐贴合座椅. 在60 ms和120 ms时刻，2种波形输入下，THUMS人体模型均明显分别处于前进阶段和回弹阶段；近90 ms时，骨盆前移量最大.

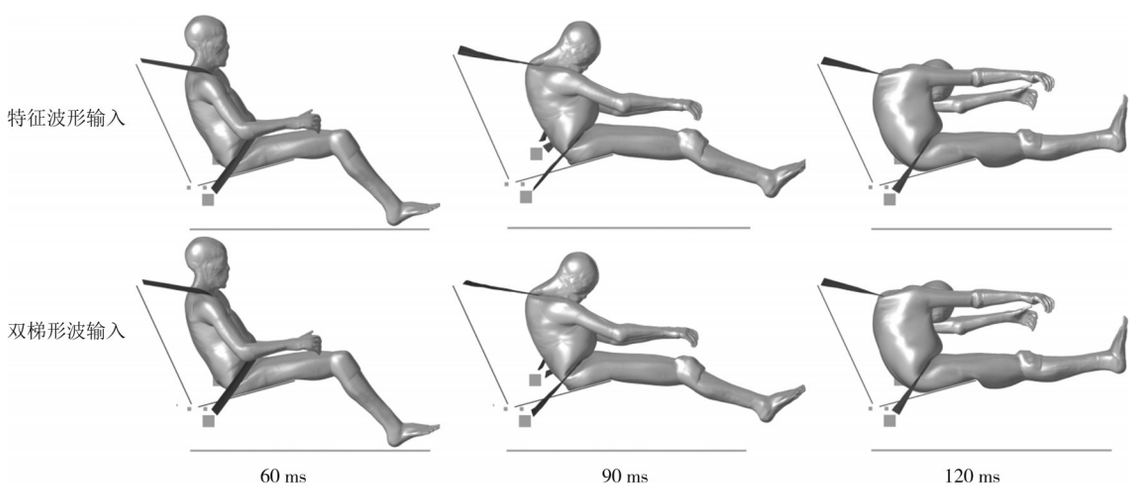


图7　2种波形输入下THUMS人体模型不同时刻动态响应对比

Fig.7　Comparison of dynamic response of THUMS mannequin at different moments under two pulses

2种波形输入下THUMS人体模型头部、胸部、T12和骨盆在X–Z平面的运动轨迹如图8所示，由图8可知，双梯形波作用下的THUMS人体模型胸部、腰椎T12、骨盆的X向运动位移都几乎与特征波形作用下的相同，但头部X向运动距离稍大. 在THUMS人体模型回弹运动之前，2种波形作用下的人体运动轨迹高度重合，回弹阶段的后半部分，双梯形波作用下THUMS人体模型的Z向位移较小. 图9为安全带力对比图，由图9可知，等效双梯形波作用下，安全带力变化趋势和曲线形状与特征波形的相同；特征波形作用下肩带力为8.5 kN，腰带力为10 kN；双梯形波作用下安全带力较小.

3.2　人体损伤对比分析

由于THUMS人体模型可以精确模拟人体皮肤、骨骼、内脏，所以THUMS人体模型除了能准确模拟人体在汽车碰撞过程中的运动姿态外，还能从组织层面直观反映人体受伤程度，如胸部受到挤压引起的肋骨骨折以及内脏移位损伤等. 在MPDB特征波形和等效双梯形波的分别作用下，THUMS人体模型肋骨的应力如图10所示. 在特征波形和等效双梯形波分别作用下，THUMS人体模型肋骨处所受应力最大值分别为185.6 MPa和169.0 MPa，发生时刻分别

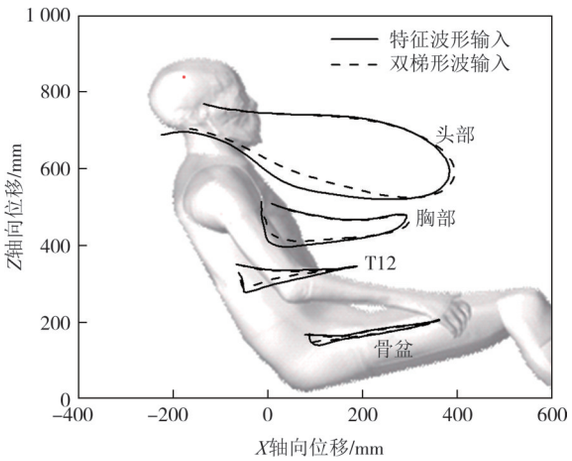
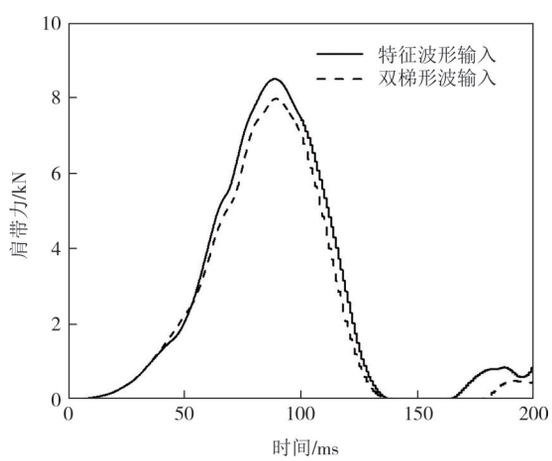
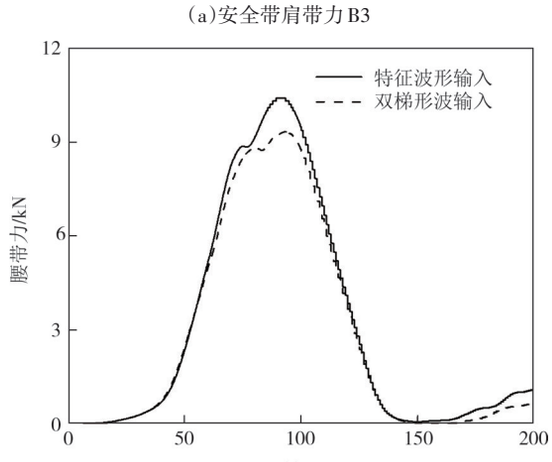


图 8 2种波形输入下THUMS人体模型头部、胸部、T12和骨盆在$X-Z$平面的运动轨迹

Fig.8 Motion trajectories of THUMS mannequin head, chest, T12, and pelvis in $X-Z$ plane were input with two pulses



(a)安全带肩带力B3

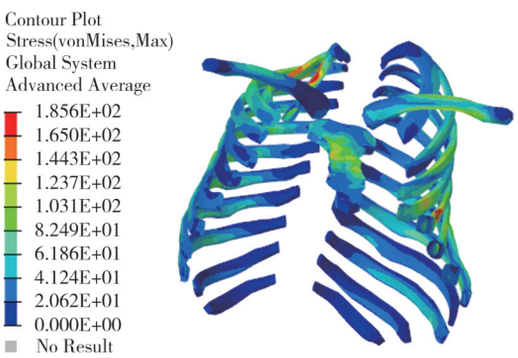


(b)安全带腰带力B6

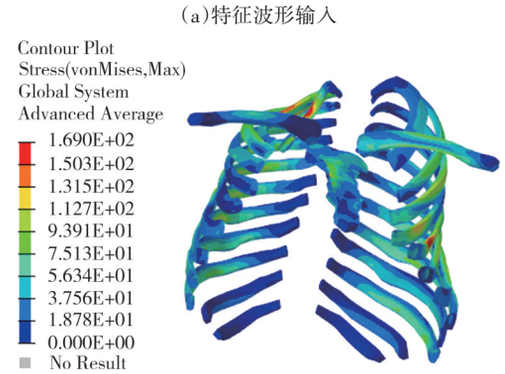
图 9 安全带力对比图

Fig.9 Seat belt force comparison diagram

为100 ms和94 ms. 对于2种波形输入,THUMS人体模型胸廓均向人体左侧移动变形,安全带肩带作用下THUMS人体模型的胸骨、右上侧肋骨所受应力均比较集中和剧烈,胸部骨骼应力分布极为相似. 相较于特征波形,等效双梯形波作用下的最大肋骨应力发生时刻更早,这可能与运动过程中等效双梯形波作用下THUMS人体模型的上躯干X向运动位移更大有关.



(a)特征波形输入



(b)等效双梯形波输入

图 10 2种波形作用下THUMS人体模型肋骨的应力

Fig.10 Rib stress of THUMS mannequin under two pulses

为普遍性地从直观且可评判的角度对比MPDB特征波形和等效双梯形波作用下的损伤程度,采用部分假人损伤评价指标.2种波形下THUMS人体模型的损伤参数值如表3所示.文中THUMS人体模型的骨骼受力由皮质骨的CROSS_SECTION截面力输出表示.在仅有安全带约束的台车碰撞情况下,乘员损伤情况中头部损伤指标(Head Injury Criterion, HIC)在碰撞持续时间为15 ms以内的头部伤害HIC_{15}约为300,颈部损伤为0.038,胸部压缩量近30 mm,左、右大腿的压缩力在500 N左右. 双梯形波作用下的损伤指标值普遍稍低于特征波形下的人体损伤值,可能是由双梯形波缺少波形的大幅波动造成. 其中胸部压缩量指标上误差最小,仅为1%,但头部的损伤误差稍大,为12.5%,与头颈部动轨迹的差距相对应. 整体上,2种波形下对人体损伤影响具有较高的一致性.

表3　2种波形作用下THUMS人体模型损伤参数值

Tab.3　THUMS mannequin damage value caused by two pulses

波形	HIC_{15}	头部累积3 ms 合成加速度	N_{ij}	胸部压缩量/mm	左大腿压缩力/kN	右大腿压缩力/kN
特征波形	304	53.4g	0.038	31.5	0.580	0.535
双梯形波	266	49.4g	0.036	31.2	0.519	0.483
误差/%	−12.5	−7.5	−5.3	−1	−10.5	−9.7

4　结 论

本文基于中国MPDB工况下4种车型的65条实车碰撞试验加速度数据,根据时间和碰撞强度两个方面的特征参数分布对MPDB工况实车碰撞波形进行了全局分析和评价.针对各车型原始波形,获得归一化特征平均的各车型特征波形和MPDB工况下的特征波形.为了满足波形作为台车加速度输入时的稳定性需求,将特征波形简化等效为双梯形波,并且将特征波形和等效双梯形波作为台车仿真的输入,获得人体的运动响应和损伤结果,得出以下结论:

1)MPDB工况下的车辆碰撞产生的波形各不相同,但在统计上有一定的规律,且波形的整体趋势较为统一.利用最大加速度及其对应的时刻、速度变化量、平均加速度、持续时间可以对波形进行充分的描述.不同车型的碰撞波形存在特征差异,在碰撞强度方面,燃油SUV的碰撞严重程度最大,可能会导致乘员更大的损伤风险.

2)归一化特征平均方法提取MPDB工况下的特征波形具有可行性,经过特征参数分析,MPDB的特征波形符合该工况下波形的规律,避免了波形特征的削弱,且保留了峰值加速度-时间关系和较高的碰撞强度.

3)从碰撞人体运动响应和损伤为出发点,总体上,采用恰当的MPDB工况特征等效双梯形波可以捕获原波形造成的人体响应变化趋势和损伤程度.

此外,在本文研究中,燃油轿车波形数量少,在燃油轿车的波形特征方面需要进一步研究.本文获得的双梯形波损伤值较特征波形偏低,后续工作中可进一步研究优化等效双梯形波,减小THUMS人体模型损伤值误差.加速度波形的归一化特征平均方法可以更广泛得用于特定的碰撞场景下的波形需求.文中获得的特征波形及其等效双梯形波可以用于实际台车试验和虚拟仿真,作为碰撞加速度输入导致的乘员损伤情况可作为MPDB工况下典型损伤的参考,有助于防护系统的开发.

参考文献

[1] SEQUEIRA G J, BRANDMEIER T. Evaluation and characterization of crash-pulses for head-on collisions with varying overlap crash scenarios [J]. Transportation Research Procedia, 2020,48:1306-1315.

[2] WANG D Q, ZHANG J Y, ZHANG T Q, et al. A coupling optimization method of vehicle structure and restraint system for occupant injury protection in traffic accidents [J]. Symmetry, 2023, 15(2): 558.

[3] IRAEUS J, LINDQUIST M. Analysis of minimum pulse shape information needed for accurate chest injury prediction in real life frontal crashes [J]. International Journal of Crashworthiness, 2021,26(6):684-691.

[4] WANG D Q, ZHANG J Y, WANG S H, et al. Frontal vehicular crash energy management using analytical model in multiple conditions[J]. Sustainability,2022,14(24):16913.

[5] 任立海, 张国庆, 董立强, 等. 车体正面碰撞加速度波形优化设计研究[J]. 汽车技术,2019(9):49-53.
REN L H, ZHANG G Q, DONG L Q, et al. Research on optimization design of acceleration waveform in vehicle frontal collision [J]. Automobile Technology, 2019 (9): 49-53. (in Chinese)

[6] TENG T L, CHANG P H, LIANG C C, et al. Application of crash pulse on the car crashworthiness design [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2017, 9(9): 1687814017700096.

[7] URBINA P, ORTA P, AHUETT-GARZA H. Crashworthiness design based on a simplified deceleration pulse[J]. International Journal of Automotive Technology,2014,15(6):909-917.

[8] AMBRÓSIO J, CARVALHO M, MILHO J, et al. A validated railway vehicle interior layout with multibody dummies and finite element seats models for crash analysis [J]. Multibody System Dynamics,2022,54(2):179-212.

[9] DAHIYA A, UNTAROIU C. Influence of pre-crash vehicle maneuvers on front passenger safety performance response [J]. SAE International Journal of Transportation Safety, 2023, 11(2): 263-272.

[10] QIU J L, LI K, XIANG H Y, et al. Biomechanical analysis of thorax-abdomen response of vehicle occupant under seat belt load considering different frontal crash pulses [J]. Acta of

Bioengineering and Biomechanics, 2022, 24(4): 31-38.

[11] SUN T T, XIONG X, ZHENG Z, et al. The effect of crash pulse on occupant injury in frontal coach collisions [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 36(11): 5437-5444.

[12] BUZEMAN D G, VIANO D C, LÖVSUND P. Car occupant safety in frontal crashes: a parameter study of vehicle mass, impact speed, and inherent vehicle protection[J]. Accident Analysis & Prevention, 1998, 30(6): 713-722.

[13] 韩勇, 李雄, 黄红武, 等. 台车加速度波形对3岁儿童损伤风险影响的研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(6): 661-666.
HAN Y, LI X, HUANG H W, et al. A study on the effects of sled acceleration waveform on the injury risk of 3-year-old child occupant[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(6): 661-666. (in Chinese)

[14] STIGSON H, KULLGREN A, ROSÉN E. Injury risk functions in frontal impacts using data from crash pulse recorders [C]///The 56th Annual Scientific Conference Proceeding of Association for the Advancement of Automotive Medicine. 2012: 267-276.

[15] KULLGREN A. Crash-pulse recorders in real-life accidents: influence of change of velocity and mean and peak acceleration on injury risk in frontal impacts[J]. Journal of Crash Prevention and Injury Control, 1999, 1(2): 113-120.

[16] CHENG B Q, FU H L, LI T, et al. Evolutionary computation-based multitask learning network for railway passenger comfort evaluation from EEG signals[J]. Applied Soft Computing, 2023, 136: 110079.

[17] SOMASUNDARAM K, HAUSCHILD H, DRIESSLEIN K, et al. THOR-05F biofidelity evaluation in reclined and upright seated postures subjected to frontal crash pulses[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 191: 107185.

[18] SEQUEIRA G J A, KONDA A R, LUGNER R, et al. Crash pulse prediction using regression algorithm with gradient descent optimization method for integrated safety systems [J]. SAE International Journal of Transportation Safety, 2022, 10(1): 163-184.

[19] HÖSCHELE P, SMIT S, TOMASCH E, et al. Generic crash pulses representing future accident scenarios of highly automated vehicles[J]. SAE International Journal of Transportation Safety, 2022, 10(2): 185-210.

[20] DEAN M E, GABAUER D J, RIEXINGER L E, et al. Comparison of vehicle-based crash severity metrics for predicting occupant injury in real-world oblique crashes[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2023, 2677(2): 505-518.

[21] KIM H S, YOON J P. System-level sled test methodology to optimize restraints for small overlap frontal crash tests [J]. International Journal of Automotive Engineering, 2019, 10(1): 94-99.

[22] HU J W, BOYLE K, ORTON N R, et al. Child occupant safety in unconventional seating for vehicles with automated driving systems[J]. Accident Analysis & Prevention, 2023, 191: 107223.

[23] MA D, LOUISE ZHANG H. Evaluation of frontal occupant protection system responses to crash pulse variations [J]. International Journal of Crashworthiness, 2006, 11(3): 243-250.

[24] 杨运生, 刘双东, 于潮, 等. 两种汽车碰撞双梯形波构建方法对比研究[C]//第十五届国际汽车交通安全学术会议论文集. 长沙: 湖南大学, 2018: 184-193.
YANG Y S, LIU S D, YU C, et al. Contrastive study on two kinds of vehicle crash dual-trapezoids curve construction methods[C]// Proceeding of the 15th International Forum of Automotive Traffic Safety. Changsha: Hunan University, 2018: 184-193. (in Chinese)

[25] SAMAD M S A, NOR M K M, MAJID M M A, et al. Optimization of vehicle pulse index parameters based on validated vehicle-occupant finite element model [J]. International Journal of Crashworthiness, 2023, 28(2): 217-223.