

基于多点冲击的侧面碰撞台车试验方法

董丽萍, 朱西产, 马志雄

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 通过对侧面碰撞过程中车门内饰板运动过程的分析, 简化车门侵入速度, 建立了一种基于质量弹簧模型的可以复现车门板上多个点运动的侧面碰撞台车试验方法. 在此基础上建立了基于 MADYMO 软件的侧面碰撞台车-假人有限元模型. 通过仿真计算验证表明, 基于多点运动复现的侧面碰撞台车试验得到的假人伤害值与整车试验得到的假人伤害值有很好的-致性. 结果表明, 该台车试验方法可以很好地复现车门内饰板、座椅与假人之间的相互作用关系, 而且该方法非常易于在工程上实现, 可以满足工程应用的需要.

关键词: 台车试验; 侧面碰撞; 质量弹簧; 多点运动复现; 假人伤害

中图分类号: U467.3

文献标志码: A

Side Impact Sled Test Method Based on Multipoint Impact

DONG Liping, ZHU Xichan, MA Zhixiong

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the analysis of the movement of the door trim during the side impact and the simplification of the door trim intrusion velocity, a mass-spring side impact sled test method which could reproduce multipoint movement of the door was established. Then a side impact sled model with dummy was established and its computer simulation showed that there was a high correlation of dummy injury between the injury gaining from the side impact sled test based on multiple movement reproduction and the result of the real side impact test. The results of the dummy's injury showed that the side impact sled test method could well reproduce the interaction between the door trim, the seat and the dummy. The new method can be easily implemented in engineering and can satisfy engineering application.

Key words: sled test; side impact; mass-spring model;

multipoint movement reproduction; dummy injuries

在汽车侧面碰撞中, 目前法规和测试标准中关注人体受伤害的主要部位为胸部、腹部和髋部, 影响乘员安全的主要因素是车身侧面结构、车门内饰板、侧面约束系统以及生存空间等^[1]. 其中车身侧面结构决定了在侧面碰撞过程中与乘员直接接触的车门内饰板的侵入速度和侵入量, 车门内饰板、侧面约束系统和侧面生存空间决定了假人的伤害情况. 在侧面碰撞试验中, 车门上与假人接触的部分主要是车门内饰板, 车门内饰板对假人伤害值的影响有 3 个方面: 形面、刚度及运动^[2]. 由于在侧面碰撞中车门各个区域的变形不同, 从而导致车门内饰板不同区域在与乘员接触时的侵入速度和侵入量变化也很大.

有关侧面碰撞对人体不同部位损伤的试验研究, 可通过实车碰撞试验进行, 也可以在模拟实车碰撞的台车试验上进行. 实车碰撞试验时间长, 费用高, 可以准确获取乘员在碰撞过程中的伤害, 而台车试验费用成本较低. 而目前现有的常规侧撞台车试验装置只能模拟车门内饰板上某一点的运动, 单纯只是一点的模拟很难复现整个车门的侵入过程. 比如, 目前研究车门内饰板的运动对人体胸部伤害的影响, 则将车门内饰板上对应于人体胸部位置的加速度波形作为台车试验模拟的目标波形, 这样做就很难兼顾到假人其他位置的伤害响应^[3-5]. 尤其是假人 T12(假人第 12 根脊椎骨位置)部位的伤害情况, T12 受力评价指标包括 T12 的 y 向受力 F_y 及绕 x 轴的转矩 M_x . 两个指标的测量通过安装在胸椎和腰椎间 T12 处的载荷传感器测量. T12 载荷传感器可分为上下两部分, 上部与胸椎相连, 下部与腰椎相

收稿日期: 2014-04-01

基金项目: 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA111205)

第一作者: 董丽萍(1986—), 女, 博士生, 主要研究方向为汽车被动安全. E-mail: donglipingshamo@163.com

通讯作者: 朱西产(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为汽车安全. E-mail: xczechu@163.com

连,因此 T12 的伤害情况与假人胸部和腹部的运动相关。而假人背板力的伤害也与座椅、车门侵入和假人运动情况相关。因此目前的侧碰台车不能很好地复现假人所有的伤害,存在复现曲线能力有限,试验结果验证困难等不足。目前泛亚汽车技术中心有限公司安全试验室采用 ASIS 公司的侧面碰撞台车系统,虽然能同时模拟座椅运动加速度波形以及车门和 B 柱不同区域的加速度变化^[6],但是试验设备非常昂贵,而且需要调整伺服液压装置同时控制若干个侵入缸的运动,因此试验装置的调试和操作性比较困难。同时需要对车门进行预变形处理,非常依赖于整车碰撞仿真模型的准确性,因此很难保证试验的一致性。

本文对侧面碰撞过程中车门内饰板的侵入速度进行分析和简化,并在此基础上将车门总成进行划分,分为假人胸部、腹部和骨盆对应的 3 个区域,建立了基于质量弹簧模型的某车型侧面碰撞台车模型,该台车试验方法可以同时复现车门板上多个点的运动以及座椅的运动情况。然后将侧面碰撞台车试验中假人伤害情况和整车试验结果进行比较,取得了良好的一致性。

1 车门内饰板分解

根据侧碰假人 H 点(大腿与躯干相连的旋转点,即跨点,体现为大腿与躯干相连的轴的中心线)、靠背角和假人身上特征点,调整好假人、车门内饰板以及座椅之间的相对位置后,根据假人胸部、腹部和骨盆与车门内板的对应位置,将车门内饰板分为 3 个区域,如图 1 所示。然后根据车门内饰板与侧碰假人的接触部位以及实车侧面碰撞试验时车门内板上加速度传感器的安装位置,将车门内板划分成不同的区域,提取各个区域的加速度曲线进行积分得到

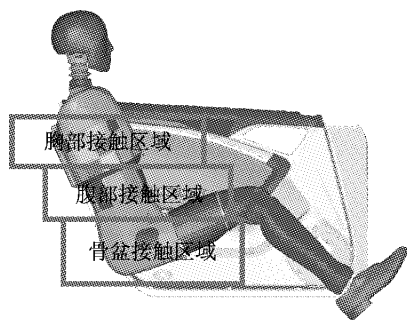


图 1 假人与车门内饰板对应区域

Fig.1 Corresponding regions between dummy and door trim

的速度曲线,作为该区域处车门内饰板的侵入速度,从而复现车门不同位置处不同的侵入速度和侵入量。

2 多点冲击侧面碰撞台车试验方法

2.1 侧面碰撞受力分析

在侧面碰撞过程中对车门进行受力分析可以知道,车门主要承受来自 MDB(moving deformation barrier,侧面移动可变性壁障)施加在车门上的力 F_m ,车身侧面结构阻碍车身变形的力 F_s ,以及车门与假人之间的相互作用力作用在车门上的力 F_d ^[7]。因此假设 m_d 是车门质量, v_d 是车门速度,利用牛顿第二定律对车门进行受力分析可以得到以下公式:

$$\sum F = -\frac{d}{dt}[m_d v_d] = F_m - F_s - F_d$$

从公式中可以看出,车门内饰板承受的力主要来自侧面 MDB、车身侧围结构以及假人的反作用力。整个侧面碰撞过程中车门的运动过程是:当 MDB 与目标车开始接触,车门随着目标车开始加速;然后车身侧面结构发生变形,车门很快达到与 MDB 相同的速度;最后车门与假人接触,在这个过程中快速变形的车门侧面撞击假人,使假人产生侧向的加速运动。

2.2 车门内饰板侵入速度分析

大量实车侧碰撞试验数据的分析表明,在轿车侧面碰撞试验中,车门板不同位置处的速度波形基本具有类似的波形特征。以假人胸部对应车门板位置处侵入速度波形为例,对侧面碰撞过程中车门侵入速度进行分解,如图 2 所示。由于同一位置的加速度时间历程变化很剧烈,在模拟时需要对其进行较低频率等级的滤波处理。文中采用 CFC 20(channel frequency class,滤波通道频率等级)的滤波。以侧面碰撞开始时间为起始点,可将整个侧面碰撞过程(即车门侵入速度波形)分为 OA, AB, BC 3 个阶段:

(1) OA 段——车门与 MDB 在 O 点接触,在 MDB 的冲击下车门做加速运动,同时车门外板受 MDB 的挤压而出现变形,直至车门内板达到最大速度点(A 点)。在这一点附近,车门内饰板与座椅和/或假人开始接触。可以看到车门在 OA 段一直处于加速过程,车门速度在时间为 30 ms 处达到最大。

(2) AB 段——车门内饰板速度开始下降。在这一过程中,在车身侧围结构的抵抗作用下,车门速度开始下降,直到到达 B 点。车门在 AB 段一直处于减速过程,到达 B 点时,减速阶段结束。

(3) BC段——过B点后,车门外板不再被挤压,因此在MDB的冲击作用下,车门内饰板速度基本保持水平。最后在地面的阻尼作用下,整个试验系统(被撞车辆、假人、MDB等)的速度减为0。

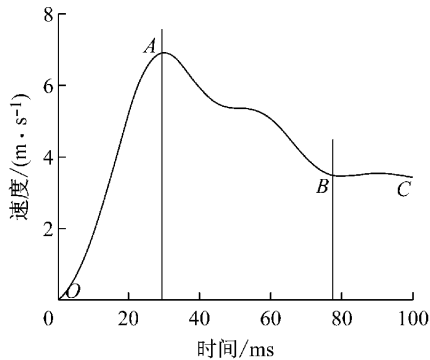


图2 车门内饰板侵入速度曲线

Fig.2 Intrusion velocity of door trim

通过对车门内板速度、假人伤害曲线和高速摄像的分析,可以看出在汽车侧面碰撞过程中,车门内饰板与假人的接触,基本都发生在车门侵入速度的最大值(A点)附近,而假人的伤害曲线主要集中在车门侵入波形的下降(AB)段。虽然装配有侧气囊时,假人胸部伤害曲线的起始时刻会提前至车门加速度(OA)段,但是假人不同部位的伤害峰值均发生在车门与假人相对应区域开始分离的时刻附近(AB段)。

2.3 侧面碰撞台车试验方法描述

由于在侧面碰撞时假人伤害值响应对车门加速度波形的细节并不敏感,因此可将车门侵入速度从OA段的变加速运动简化为匀加速运动,AB段作为匀减速过程,以及将BC段作为匀速运动来处理。经过处理后的车门板的运动可以通过如图3所示的质量弹簧模型来实现。图中: m_1 为发射台车,提供整个侧面台车模型的初始输入条件,其初始运动速度为 v_0 ; m_2 为目标台车,其运动通过调整目标车和发射车之间的弹簧刚度 k_m 和初始间隙 δ_m 来控制;质量

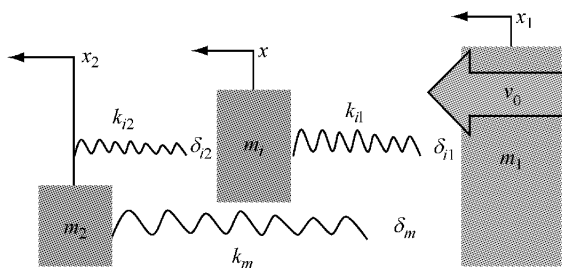


图3 侧面台车质量弹簧模型

Fig.3 Mass-spring model of side impact sled test

块 m_i (i 分别代表车门内饰板对应假人胸部c、腹部a、骨盆p位置)分别与车门内饰板对应位置处刚性连接,提供车门内饰板不同位置处的运动情况,通过调整安装在发射车-车门和车门-目标车之间的弹簧刚度 k_i 和初始间距 δ_i 来控制车门内饰板的加速和减速运动。整个台车模型的运动过程为:通过调整 m_1 和 m_i 之间的刚度 k_{i1} 和空间 δ_{i1} ,控制质量块 m_i 加速段(OA段)的运动,当 m_1 和 m_i 速度达到一致时,弹簧停止塑性变形, m_1 不再对车门内饰板加载,但是由于弹簧的回弹作用,继续对 m_i 加速,直到弹簧弹性卸载完毕,同时车门内饰板达到最大速度。

当车门内饰板速度达到最大时,质量 m_i 开始与弹簧 k_{i2} 接触, m_i 在 k_{i2} 作用下开始减速(AB段),当 m_i 和 m_2 速度相同时,弹簧 k_{i2} 停止变形, m_2 停止对车门内饰板加载,由于弹簧的回弹作用继续对 m_i 加载,直到弹簧弹性卸载完毕,同时车门内饰板达到恒定速度(BC段)。

2.4 侧面碰撞台车试验装置工程图

图4为侧面碰撞台车试验装置工程图。其中车门座椅系统自上而下分别对应车门上、中、下3个位置和座椅。发射台车和目标台车可以各自沿着地面上的轨道自由运动,而座椅和车门系统,通过安装在目标台车上的轨道可以在轨道上沿碰撞轴向自由滑动。发射台车提供整个侧面碰撞台车系统的初始能量,通过蜂窝铝的压缩控制加载到车门、座椅以及目标台车上。可以通过调整蜂窝铝(车门加速装置)的厚度和宽度来控制车门不同位置和座椅处的加速段的加速度以及接触时间,蜂窝铝(车门减速装置)来控制减速段的开始时间和减速度。同时在目标台车的两侧也装有蜂窝铝来控制目标台车的加速过程。通过对蜂窝铝样品的刚度试验,可以看出多次试验过程中相同大小的蜂窝铝刚度可以保持很好的一致性,而且不同试验速度下,蜂窝铝刚度基本保持一致,只是蜂窝铝的压缩距离随着冲击速度的增加而

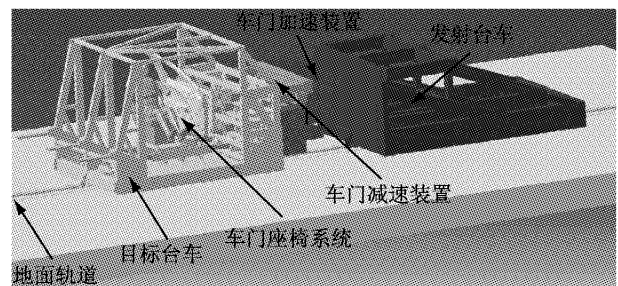


图4 侧面碰撞台车试验装置工程图

Fig.4 Side impact sled device

有所增多,因此可以很好地保证试验的一致性和稳定性.

2.5 多点冲击侧面碰撞台车设计参数计算

以车门内板(胸部)处为例,车门板的运动分析如下(对于质量块 m_i):

$$m_i \ddot{x}_i + k_{d1}(x_1 - x_i - \delta_{d1}) + k_{d2}(x_i - x_2 - \delta_{d2}) = 0$$

初始条件为 $\dot{x}_1 = v_0$; $\delta_{d1} = x_1(T_1)$, 其中 T_1 是蜂窝铝与车门初始接触时刻; $\delta_{d2} = x_i(T_{01})$.

2.5.1 台车质量

整个系统遵循动量守恒定律,由此可以得到

$$m_1 v_0 = m_1 v_1 + m_2 v_2 + \sum m_i v_i$$

当发射车和目标车达到相同速度时,此时发射台车、目标台车和车门座椅系统之间不再加载,目标车和车门座椅系统开始以相同的速度运动.假定此时整个侧面台车系统的共同速度为 v ,则

$$\frac{m_2 + \sum m_i}{m_1} = \frac{v_0 - v}{v}$$

因此可以通过侧面碰撞台车的初始速度和碰撞结束后的共同速度,来确定发射车和目标车的质量.需要说明的是质量块 m_i 的选取与弹簧需要承受的力正相关,如果 m_i 质量增加,就意味着弹簧需要承受的力需要增加,因此质量 m_i 的大小只要匹配相应的弹簧力,都可以满足车门侵入速度的需要.但是质量 m_i 在满足要求的前提下,尽可能取较大的质量,以减少在车门与假人碰撞过程中假人的惯性作用对车门的反作用力.

2.5.2 弹簧刚度及压缩距离

本文采用的弹簧(吸能装置)是蜂窝铝,蜂窝铝的刚度特性是可以保持其在变形范围内承受的力基本保持不变,其刚度如图 5 所示.

根据冲量定律可以得到

$$F_i = m_i \cdot \Delta v_i / \Delta t_i$$

式中: F_i 为弹簧加载力; Δv_i , Δt_i 分别为 AB 和 BC 段的车门速度变化和时间段.

在碰撞初始,车门静止,发射车以一定的速度冲击弹簧 1(蜂窝铝或者其他吸能装置),压缩蜂窝铝变形推动车门开始运动,直到二者达到相同的速度时,蜂窝铝停止压缩,同时车门侵入速度达到最大值;然后开始压缩车门与目标车之间的弹簧 2,弹簧 2 开始变形,同时给车门提供一个抵抗力,促使车门开始减速,直到车门速度达到车门平稳段速度.因此,弹簧的实际压缩距离 Δx_{d1} , Δx_{d2} 就是发射车与车门、车门与目标车之间的相对位移.

$$\Delta x_{d1} = x_{m1} - x_i = \int_{T_0}^{T_A} v_{m1} dt - \int_{T_0}^{T_A} v_i dt$$

$$\Delta x_{d2} = x_i - x_{m2} = \int_{T_A}^{T_B} v_i dt - \int_{T_A}^{T_B} v_{m2} dt$$

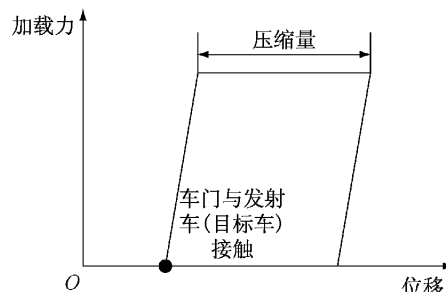


图 5 弹簧加载刚度曲线

Fig.5 Stiffness of spring

经过调试修正后,基于多点冲击的侧面碰撞台车的主要设计参数如表 1 所示.

表 1 侧面碰撞台车初始设计参数

Tab.1 Parameters of side impact sled test			
子系统名称	质量/kg	初始距离/mm	弹簧加载力/kN
发射车 m_1	1 500		
目标车 m_2	2 400	72	250
车门(胸部) m_c	200	20	55.2
		85	15.0
车门(腹部) m_a	200	84	72.4
		100	29.8
车门(骨盆) m_p	200	60	72.6
		140	21.3

3 台车试验方法的计算机仿真验证

为了验证该台车模型在侧面碰撞过程中车门、座椅与乘员之间的相互作用以及能量转移的准确性,采用 MADYMO 软件建立了侧面碰撞台车-假人有限元模型,如图 7 所示.该模型中假人采用的侧面碰撞 50th ES-2 假人(EuroSID 2,欧洲中等身材第 2 代假人),根据实车试验调整座椅、假人、车门的相对

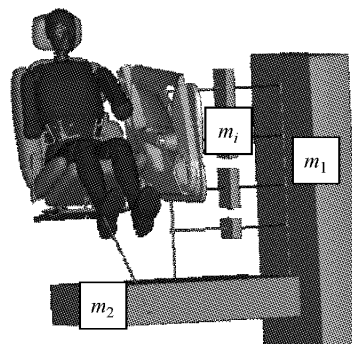


图 6 侧面碰撞台车试验模型

Fig.6 Model of side impact sled test

位置.该简化模型中 m_1 为发射台车, m_2 为目标台车, m_i 为车门及座椅加速和减速装置.为节省计算速度,本模型中没有加入蜂窝铝模型,而是直接采用弹簧模型并赋予一定的刚度曲线.

图7~9为侧面碰撞台车-假人模型仿真计算得到的车门内饰板对应假人胸部、腹部和骨盆位置处的侵入速度.从中可以看出,车门内饰板侵入速度在加速段和减速段与整车试验结果基本一致,只是在匀速段时,台车-假人模型中车门内饰板侵入速度略有降低或者增加.这是由于台车碰撞过程中目标车、发射车和车门系统之间在碰撞后期会达到共同的速度导致的,但是由于这一阶段车门与假人不再发生接触,因此在车门侵入速度平稳阶段(BC)台车仿真结果虽然略有差异,但是对假人伤害没有影响.

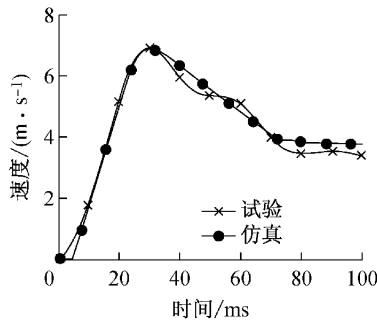


图7 车门内饰板速度曲线(胸部)
Fig.7 Velocity of door trim (chest)

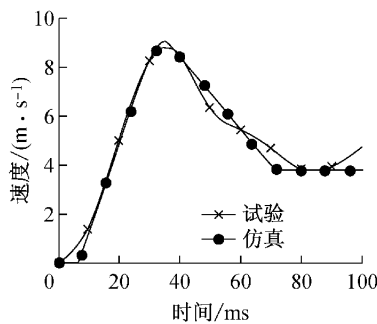


图8 车门内饰板速度曲线(腹部)
Fig.8 Velocity of door trim (abdomen)

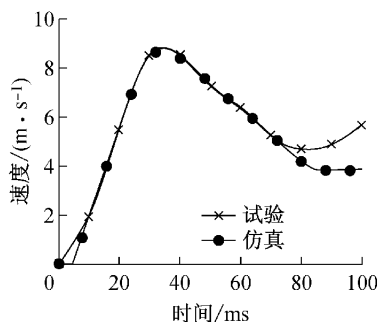


图9 车门内饰板速度曲线(骨盆)
Fig.9 Velocity of door trim (pelvis)

图10~17为在实车碰撞过程中和侧面台车模型中假人伤害响应情况.从中可以看出,该侧面碰撞

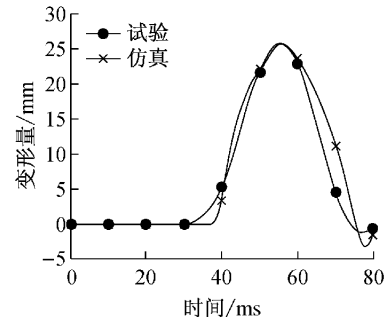


图10 假人伤害曲线(上肋骨压缩量)
Fig.10 Curve of dummy injury (upper rib distance)

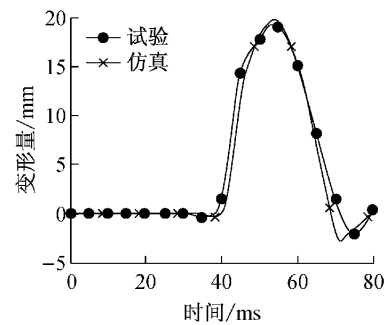


图11 假人伤害曲线(中肋骨压缩量)
Fig.11 Curve of dummy injury (middle rib distance)

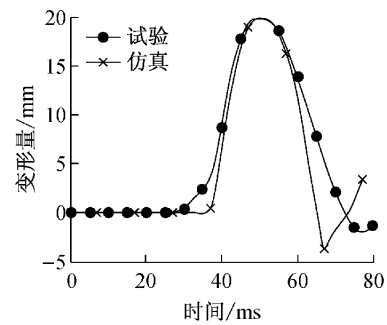


图12 假人伤害曲线(下肋骨压缩量)
Fig.12 Curve of dummy injury (lower rib distance)

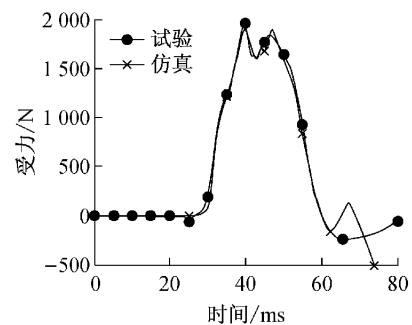


图13 假人伤害曲线(T12受力)
Fig.13 Curve of dummy injury (T12 force)

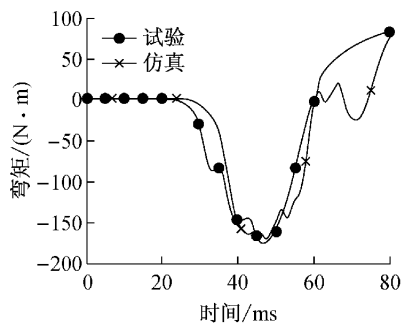


图 14 假人伤害曲线(T12 弯矩)

Fig. 14 Curve of dummy injury (T12 moment)

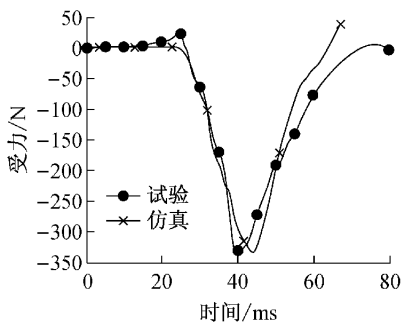


图 15 假人伤害曲线(背板力)

Fig. 15 Curve of dummy injury (backplate force)

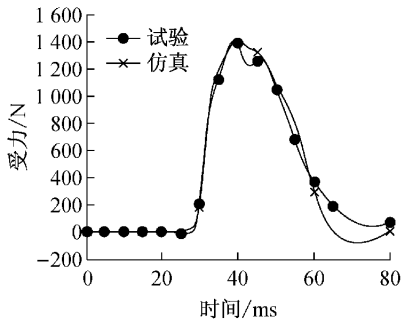


图 16 假人伤害曲线(腹部合力)

Fig. 16 Curve of dummy injury (abdomen resultant force)

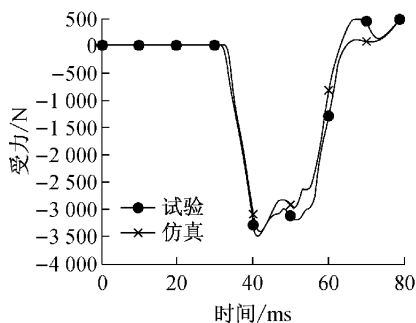


图 17 假人伤害曲线(骨盆受力)

Fig. 17 Curve of dummy injury (pelvis force)

台车试验仿真计算得到的假人接触时序与整车试验结果基本一致,各种伤害值响应指标也基本一致,尤

其是 T12 的受力及弯矩和背板力可以得到很好的复现. 因此该试验台能很好地复现侧面碰撞过程中假人的运动和伤害情况,为后续研究侧面碰撞乘员约束系统的匹配和改进提供了良好的基础.

4 结论

本文基于对侧面碰撞试验过程中车门内饰板运动过程的分析,对车门内饰板侵入速度进行简化(简化为加速段、减速段和恒定速度段). 在此基础上,提出了基于质量弹簧模型的侧面碰撞台车试验方法,并对相关参数设置进行了说明. 该台车试验方法可以同时复现车门内饰板上多个位置的运动以及座椅的运动. 然后基于 MADYMO 建立了侧面碰撞台车-假人有限元仿真模型. 计算结果表明,利用多点冲击侧碰撞台车试验方法得到的假人各个位置的伤害值响应与用实车整车侧面碰撞得到的假人各个位置的伤害值一致性非常好. 这说明,该台车试验方法可以很好地复现车门内饰板、座椅与假人之间的相互作用关系,而且该方法非常易于在工程上实现,可以满足工程应用的需要.

参考文献:

- [1] Miller P M. Evaluation methodologies for automobile side impact development [C]// SAE Technical Paper Series. Detroit: SAE Publication Group, 1993: 930483.
- [2] Chung J, Cavanaugh J M, Mason M, *et al.* Development of a sled-to-sled subsystem side impact test methodology [C]// SAE Technical Paper Series. Detroit: SAE Publication Group, 1997: 970569.
- [3] Aekbote K, Sobick J, Zhao L, *et al.* A dynamic sled-to-sled test methodology for simulating dummy responses in side impact[C] // SAE Technical Paper Series. Detroit: SAE Publication Group, 2007: 010710.
- [4] Sarri B, Ellis R, Burguillo S. New method of side impact simulation for better waveform reproduction and door interaction [C]// SAE Technical Paper Series. Detroit: SAE Publication Group, 2004: 010474.
- [5] Sundararajan S, Chou C C, Lim G G, *et al.* Dynamic door component test methodology [C]// SAE Technical Paper Series. Detroit: SAE Publication Group, 1995: 950877.
- [6] 张孟周,樊平,张桂明. 一种新型的侧面碰撞台车系统及其试验方法[J]. 上海汽车, 2013 (5): 47.
ZHANG Mengzhou, FAN Ping, ZHANG Guiming. A new side impact sled system and test method[J]. Shanghai Automobile, 2013 (5): 47.
- [7] du Bois P, Chou C C, Fileta B B, *et al.* Vehicle crashworthiness and occupant protection [M]. Southfield: American Iron and Steel Institute, 2004.