Relativity Study between Door Movement and Dummy Injury Response in Side Impact

Ma Zhixiong Zhu Xichan Zhu Yun Tang Guoqiang

School of Automotive Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804

Abstract: Occupant injury happens from the initial contact of door trim panel and the occupant to the final separation of that in side impact accident. Based on the feature of door movement in full scale side impact, the door's velocity curve can be simplified being a dual-velocity level curve, and door movement's affect on occupant injury can be perfectly described by three characteristic parameters——contact time, transition slope and second velocity level. Side impact sled test simulation model that was constructed by MADYMO soft is used to research the relativity between these three characteristic parameters and dummy injury response. The research results in this paper can be applied to the crashworthiness design of vehicle body and door in side impact.

Key words: Side impact, Door movement, Dummy injury

侧碰试验中车门运动与假人伤害响应的相关性

马志雄　朱西产　朱赟　唐国强

（同济大学汽车学院，上海，201804）

摘要：在侧面碰撞事故中，乘员伤害主要出现在车门内饰板与乘员发生接触直到与乘员分离这段时间。根据侧碰撞试验中车门的运动特点将车门运动的速度曲线简化为双速度平台曲线，使得车门运动对乘员伤害的影响能用接触时间、过渡段斜率以及第二速度平台这 3 个特征参数的变化完整地描述。利用 MADYMO 仿真软件建立的侧碰撞台车模型研究了这 3 个特征参数与侧碰撞假人伤害值响应的相关性。本文的研究成果对侧碰撞中车身以及车门结构的耐撞性研究具有一定的指导意义。

关键词：侧面碰撞；车门运动；假人伤害值

1 引言

车辆的侧面碰撞是我国交通事故发生率最高的一种事故形态，由此引起的死亡和受伤人数所占的比例在所有事故形态中分别居第二和第一[1~7]。在车辆的侧面碰撞事故中，乘员的伤害发生车门内饰板与乘员开始接触直内饰板将乘员推开这样一个过程中。显然，车门的运动是导致乘员受伤害的主要原因之一。因此，研究车门运动与乘员伤害响应的相关性是非常有必要的。对于这一问题的研究，由于车门运动的复杂性（持续时间短以及变化剧烈），目前在国内外相关文献上还未见到比较令人满意的研究方法。

本文通过将车门运动的速度曲线简化为双速度平台曲线，使得车门运动对乘员伤害的影响能用三个参数的变化完整地描述。并利用 MADYMO 软件建立了一侧碰撞试验的台车模型，通过该模型研究了这三个参数的变化对侧碰假人伤害值响应的影响。本文的研究成果对车门、车门门框以及车门与门框间连接关系的耐撞性设计具有一定的指导意义。

2 车门速度曲线特征及简化方法

2.1 车门速度曲线特征

大量的实车侧碰撞试验数据的分析表明，在轿车的 50km/h MDB（移动变形壁障）侧面碰撞试验中，与 50 百分位侧碰撞假人肋骨对应的车门内板的速度曲线具有如图 1 所示的波形特征。如以侧碰撞开始的时间为起始点，可将整个侧面碰撞过程分为 OA、AB、BC、三个阶段：

1） OA 段 车门与 MDB 在 O 点接触，在 MBD 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；

2） AB 段 在车门内饰板与周围环境的接触以及车门与车身的连接关系等的作用下车门内板速度开始下降。在这

一过程中，在 MDB 的作用下，车门外板仍被挤压。到达 B 点时车门内板速度降到最低点，此时车门外板的挤压量达到最大值；

3） BC 段过 B 点后，由于 MDB 的速度仍大于车门外板速度，以及车门外板不再被挤压，因此在 MDB 的冲击作用下，车门内板速度将出现一个较小的波峰，然后在地面的阻尼作用下整个试验系统（被撞车辆、假人、MBD 等）的速度减为 0。

另外，通过高速摄像对试验过程的分析发现：试验假人与车门内饰板的接触总出现在 AB 段，而车门内饰板将假人推开的时间点总出现在 BC 段。

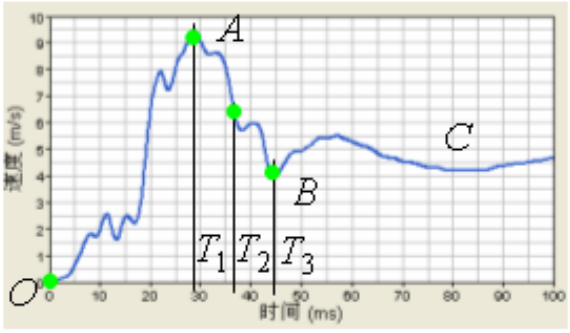

图 1 典型的侧碰撞车门速度波形

2.2 车门速度曲线简化方法

由上节可知，在侧面碰撞试验中，在车门内板速度达到峰值之前即图 1 所示的 OA 段，假人不会与其接触。这说明，OA 段的速度变化不会对假人伤害造成影响，因此在台车试验中完全可以将车门在试验轨道以较低的加速度平稳加速到其峰值。对于图 1 中的 AB 段和 BC 段，由于侧碰撞假人伤害值响应对车门加速度曲线的细节并不敏感[8]，因此可将从 A 到 B 的变减速过程简化为匀减速过程，以及将 BC 段作为匀速段来处理。

图 2 所示为经上述处理后的车门内板速度曲线，该曲线具有双平台特征。文献[9]将车门内板速度曲线按上述方法简化后呈现双平台特征的曲线定义位双速度平台曲线。文献[2]的研究表明，利用双速度平台曲线代替实车侧碰撞车门速度曲线进行侧碰撞台车试验是一种相对简单可行的工程近似。

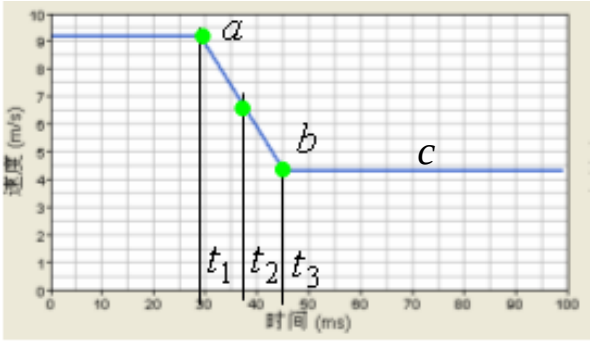

图 2 经过双平台简化后的车门速度曲线

3 台车试验仿真模型建立及分析方法

3.1 台车试验仿真模型建立

本文的研究内容利用 MADYMO 软件建立数学仿真模型来完成。图 3 所示侧碰台车数学仿真模型在文献[8]中已经得到了验证，模型中的假人为 MADYMO 模型库中的 ES－2Q 假人，该模型所引用的车门速度曲线为上图 2 所示的双速度平台曲线。对该模型作了如下改进：

（1） 删掉原模型中的侧气囊模型；

（2） 调整车门高度，使车门扶手正对侧碰撞假人腹部；

（3） 调整车门的前后位置，使碰撞中侧碰撞假人胸部完全与车门内饰板接触；

（4） 基础试验中假人与车门内饰板的接触出现在碰撞发生后约 30ms，即碰撞发生后的 30ms 内，车门内饰板不会

与假人接触。为提高计算效率，通过调整车门的横向位置使模型的模拟从实车碰撞后的 25ms 开始；即得本文研究所用的基础模型（图 4 所示）。

图 3 原模型

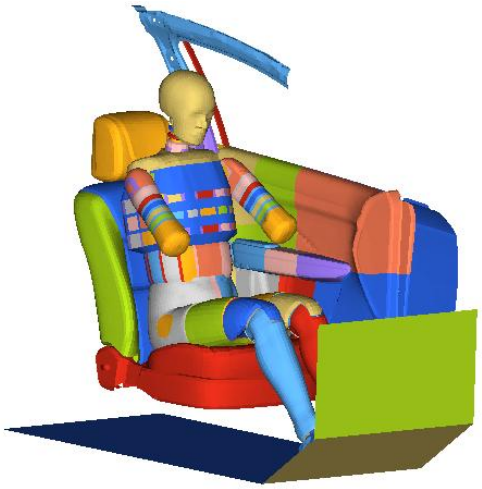

图 4 本文研究所使用的基础模型

3.2 分析方法

侧碰撞试验中，车门运动对侧撞假人伤害响应的影响无非两方面：接触时间和接触过程中车门内板的速度。本文将双速度平台曲线上两平台间的减速度段简称为过渡段斜率（图 2 中的 ab 段），将第二个速度平台简称为第二平台。显然，在侧碰撞台车试验中，利用接触时间、过渡段斜率以及第二速度平台这 3 个特征参数即可完整地描述车门运动对假人伤害响应的影响。通过只改变其中一个参数大小而保持其它参数值不变的方法来运行模型即可得到，在该参数发生变化的情况下，假人伤害值响应的影响大小以及变化趋势。

4 接触时间对假人伤害值响应的影响

基础模型中的车门内板速度曲线如图 5 所示。图中 T_1 和 T_3 分别是两个平台过渡段的开始和结束时间，T_2 为 T_1 和 T_3 间的中间时刻点。基础模型中假人与车门内板的接触时间在 T_1，通过改变车门内饰板与假人间的初始距离使其与假人分别在 T_2（仿真 1）和 T_3（仿真 2）接触。

图 6～13 和表 1 为三种不同接触时刻的侧碰台车模型下获得的侧碰撞假人各伤害值响应的时间历程及变化趋势。根据计算结果，随着接触时间从 T_1 到 T_2 的延迟，假人的各伤害值响应指标，特别是肋骨变形量、肋骨 VC 指数、背板力以及腹部受力，均呈较显著的减小趋，但在接触时间从 T_2 延迟到 T_3 的过程中，假人各伤害值响应指标减小趋势非常不明显，某些指标如肋骨变形量几乎保持不变，下肋骨 VC 指数甚至还会有微小的增大。这些计算结果表明，在车门内饰板与假人的接触时间从 T_1 逐渐延迟到 T_3 的过程中，假人的伤害值响应指标随着其与车门内饰板接触时间的延迟均呈较明显的减小趋势，但当延迟时间达到一定值后这种减小趋势将变得很不明显。

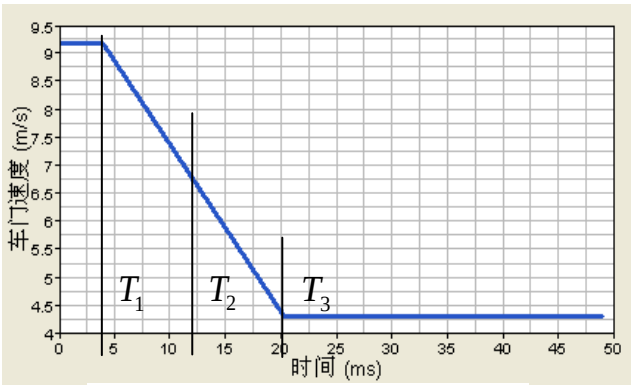

图 5 基础模型中的车门内板双速度平台曲线

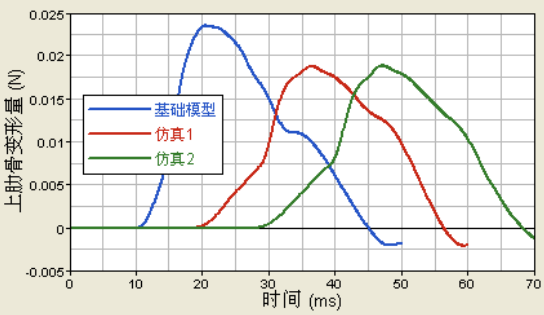

图 6 不同接触时间下假人上肋骨变形量比较

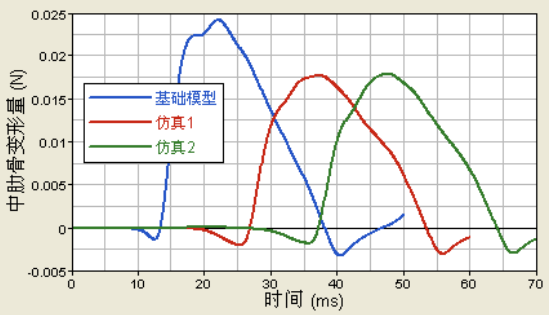

图 7 不同接触时间下假人中间肋骨变形量比较

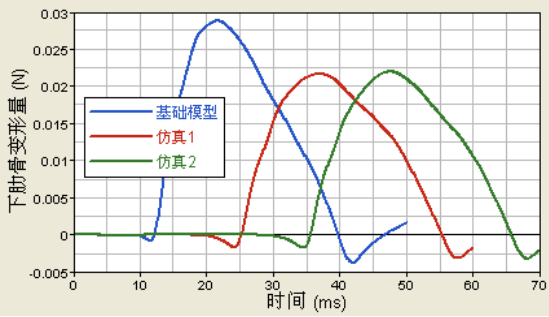

图 8 不同接触时间下假人下肋骨变形量比较

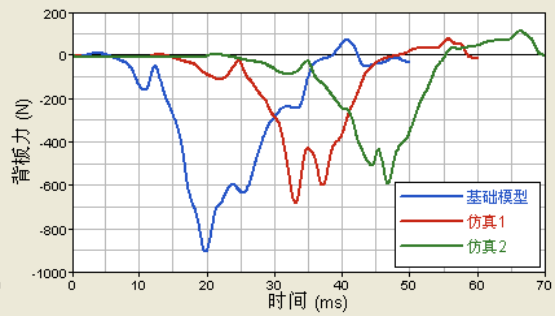

图 9 不同接触时间下假人背板力比较

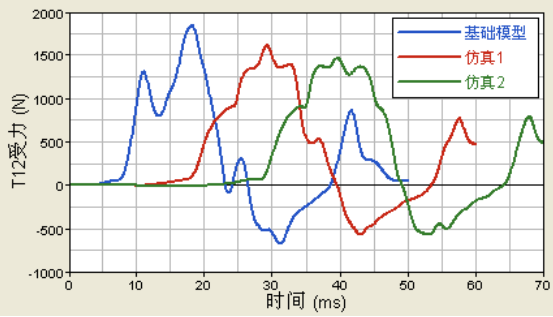

图 10 不同接触时间下假人 $T12$ 受力 F_v 比较

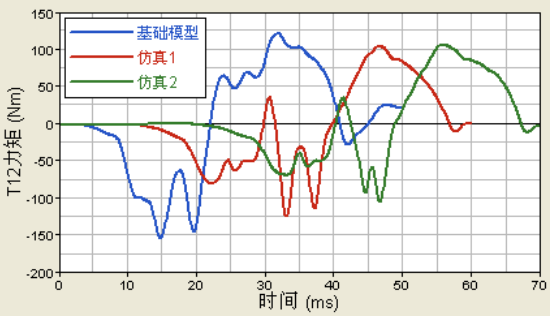

图 11 不同接触时间下假人 $T12$ 力矩 M_x 比较

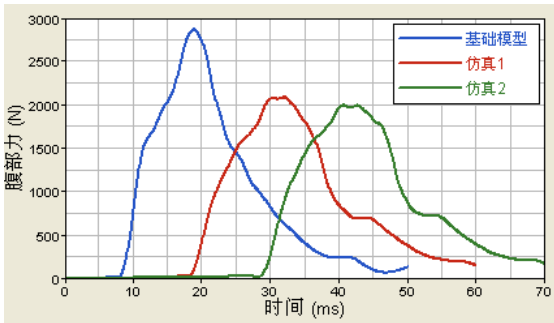

图 12 不同接触时间下假人腹部力比较

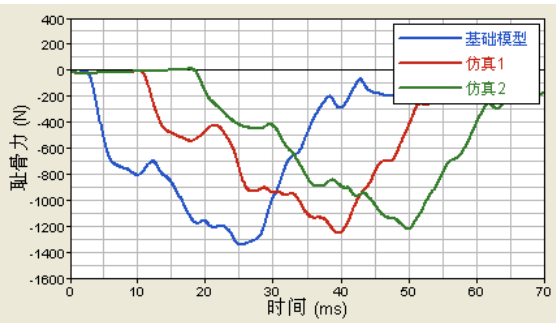

图 13 不同接触时间下假人耻骨力比较

表 1 不同接触时间下假人肋骨 VC 指数比较

	上肋骨	中间肋骨	下肋骨
基础模型	0.48447	0.62139	0.55593
仿真 1	0.28950	0.22910	0.26559
仿真 2	0.28231	0.22560	0.27711

5 过渡段斜率对假人伤害的影响

如图 14 所示，基本模型的速度曲线中，两速度平台的过渡段斜率即匀减速度段的减速度大小 a 为 $298m/s^2$。图 15～22 及表 2 所示为该减速度大小增大（仿真 1）和减小（仿真 2） 20% 时模拟得到的假人各伤害评价指标的变化趋势。从模拟结算结果分析，当减速度大小从 a_1 减小到 a_2 时，假人除耻骨力之外的各伤害值响应指标均呈增大趋势。其中增幅最为明显的是假人肋骨变形量、VC 指数以及腹部力。

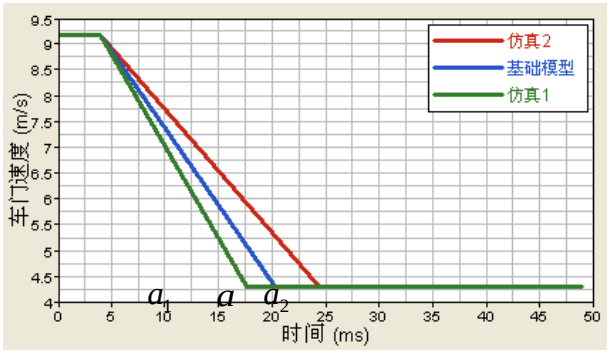

图 14 不同过渡段斜率下的车门内饰板双速度平台波形

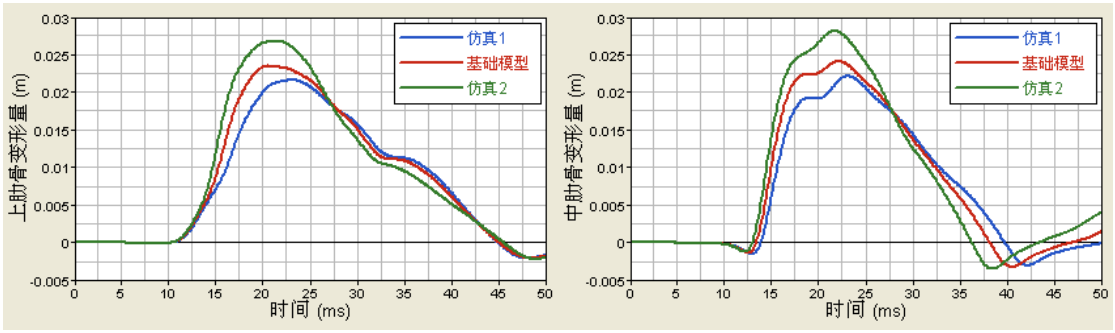

图 15 不同过渡段斜率下假人上肋骨变形量比较

图 16 不同过渡段斜率下假人中间肋骨变形量比较

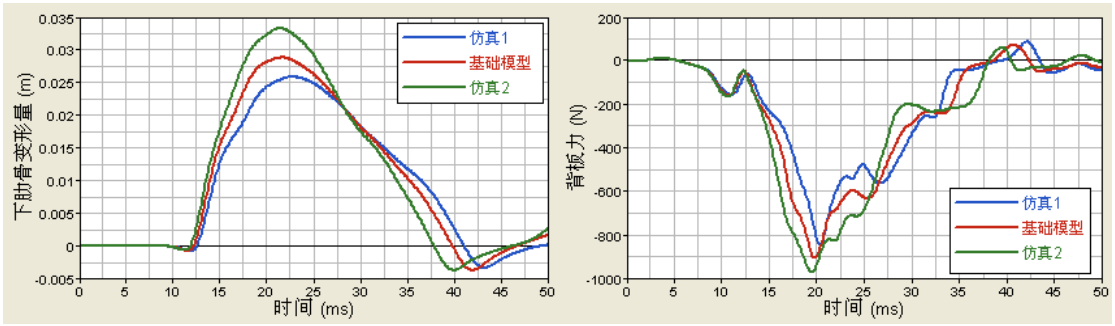

图 17 不同过渡段斜率下假人下肋骨变形量比较

图 18 不同过渡段斜率下假人背板力比较

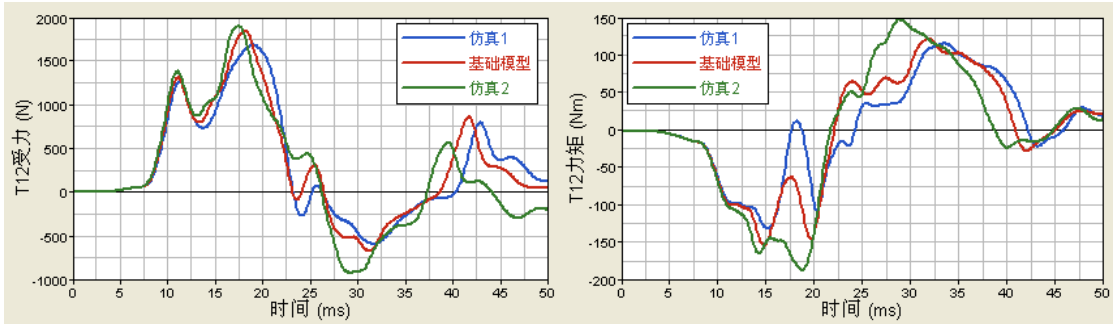

图 19 不同过渡段斜率下假人 $T12$ 受力 F_y 比较

图 20 不同过渡段斜率下假人 $T12$ 力矩 M_x 比较

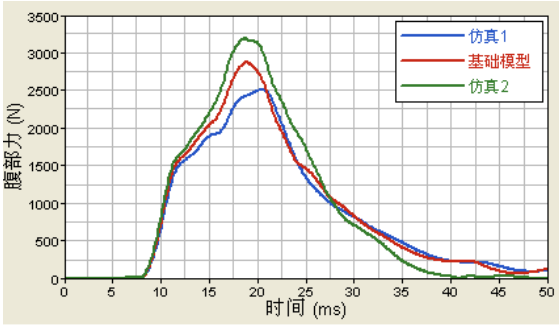

图 21 不同过渡段斜率下假人腹部力比较

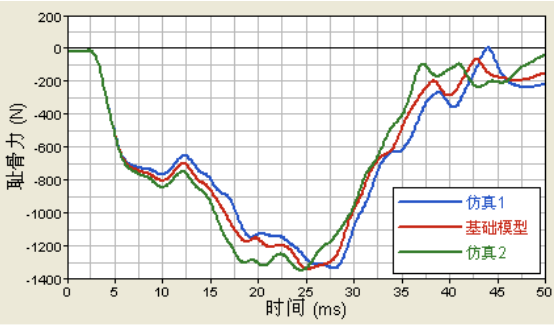

图 22 不同过渡段斜率下假人耻骨力比较

表 2 不同过渡段斜率下假人肋骨 VC 指数比较

	上肋骨	中间肋骨	下肋骨
仿真 1	0.32617	0.45985	0.40643
基础模型	0.48447	0.62139	0.55593
仿真 2	0.65901	0.76184	0.70740

6 第二个速度平台对假人伤害的影响

如图 23 所示，基础模型中速度波形的第二个平台大小为 $4.3m/s$，出现的时间起始点为 $20.3ms$。分析基础模型的计算结果会发现，几乎所有的伤害值指标峰值均出现在 $20ms$ 左右。很显然，碰撞发生后的 $20ms$ 内即使车门内板速度有很大变化也不会对假人的最终伤害造成实质的影响。鉴于此，本节以第 4 节中假人与车门在 T_2 点开始接触的模型作为本节研究内容的基础模型。从第 4 节可知，该模型下假人的各伤害指标峰值均出现在车门内板速度曲线的第二个平台产生后。

图 24~31 及表 3 所示为基础模型速度曲线的第二个平台大小分别减小（仿真 1）和增大（仿真 2）$1m/s$ 时，假人各伤害值响应指标的变化趋势。根据仿真结果，当第二个速度平台从 v_1 增大到 v_2 时，假人的各伤害值响应指标中除 $T12$ 受力 F_y 呈较小幅度的增大趋势外，其余各项指标均非常明显地增加，特别是肋骨变形量和肋骨 VC 指数。

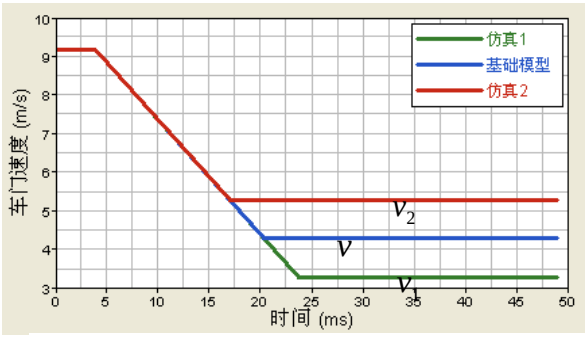

图 23 不同第二速度平台下的车门内饰板双速度平台曲线

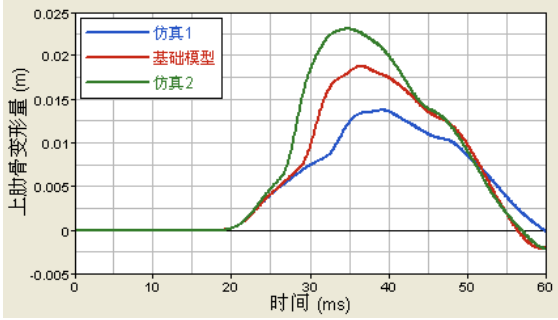

图 24 第二速度平台变化时假人上肋骨变形量比较

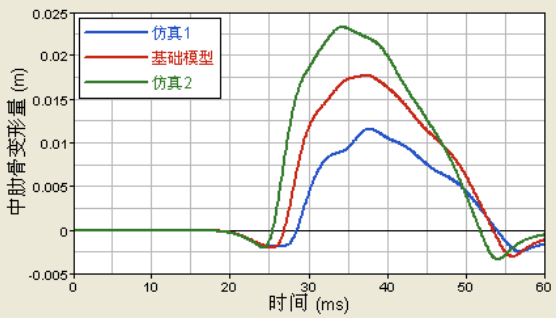

图 25 第二速度平台变化时假人中间肋骨变形量比较

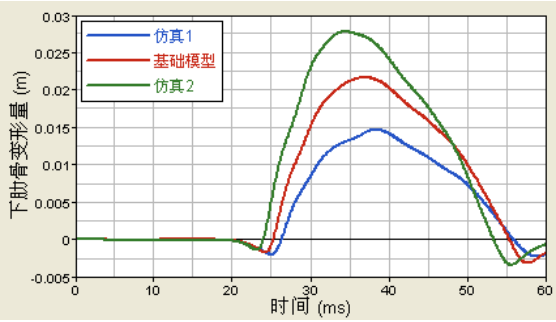

图 26 第二速度平台变化时假人下肋骨变形量比较

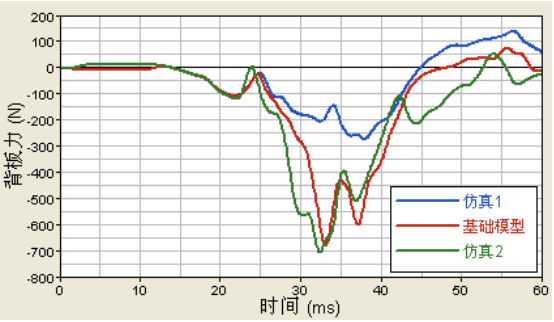

图 27 第二速度平台变化时假人背板力比较

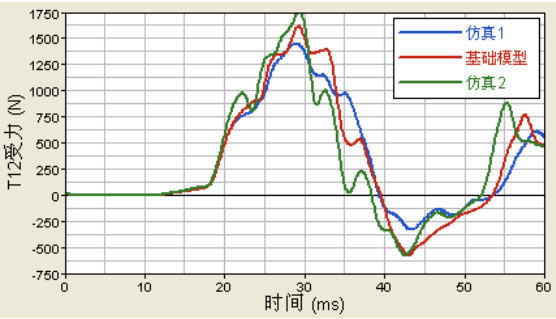

图 28 第二速度平台变化时假人 $T12$ 受力 F_y 比较

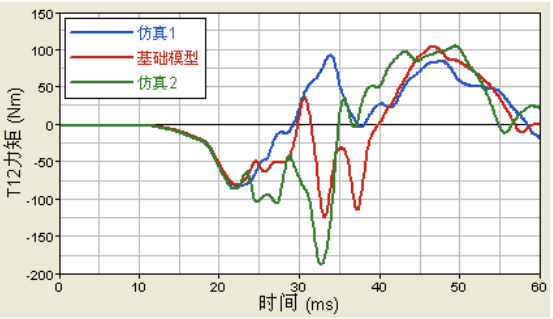

图 29 第二速度平台变化时假人 $T12$ 力矩 M_x 比较

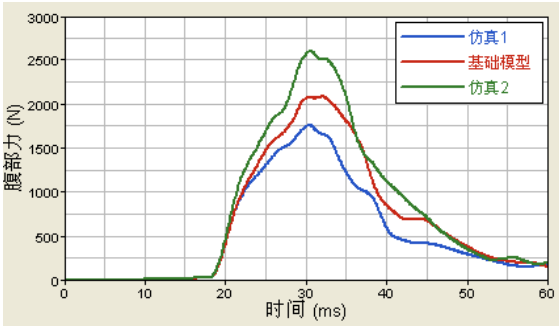

图 6－30 第二速度平台变化时假人腹部力比较

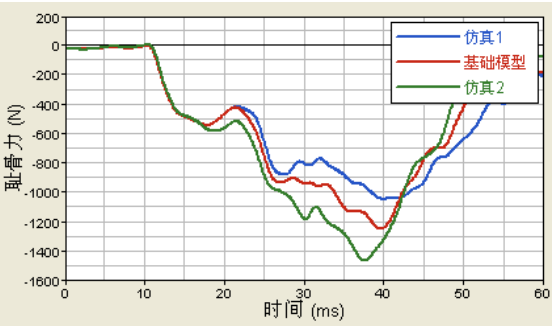

图 31 第二速度平台变化时假人耻骨力比较

表 3 第二速度平台变化时假人肋骨 VC 指数比较

	上肋骨	中间肋骨	下肋骨
仿真 1	0.12491	0.08738	0.10712
基础模型	0.28950	0.22910	0.26559
仿真 2	0.42720	0.41877	0.51109

7 结论

（1） 通过将 50km/h 实车侧碰撞试验中获得的试验假人肋骨对应出的车门内板速度曲线简化为双速度平台曲线，使得车门运动对假人伤害值响应指标的影响可简化为三个参数即接触时间、过渡段斜率和平台 2 的变化对假人伤害值响应指标的影响；

（2） 随着车门内饰板与假人接触时间的延迟，假人的伤害值响应指标随着其与车门内饰板接触时间的延迟均呈较明显的减小趋势，但当延迟时间达到一定值后这种减小趋势将变得很不明显；

（3） 随着过渡段斜率的减小，除耻骨力之外的假人各伤害值响应指标均呈增大趋势。其中增幅最为明显的是假人肋骨变形量、VC 指数以及腹部力；

（4） 随着速度平台 2 的增大，假人各伤害值响应指标中除 $T12$ 受力 F_y 呈较小幅度的增大趋势外，其余各项指标均非常明显地增加，特别是肋骨变形量和肋骨 VC 指数；

（5） 本文所采用的研究模型没有安装侧气囊，对于安装了侧气囊的模型对本文结论的适用性有待进一步研究。

参考文献

[1] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]，2000

[2] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]，2001

[3] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]，2002

[4] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]，2003

[5] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]，2004

[6] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]，2005

[7] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报[R]，2006

[8] 马志雄. 轿车台车试验方法及侧面约束系统数学仿真技术研究[D]. 武汉理工大学博士学位论文, 2008

[9] 马志雄, 朱西产, 唐国强等. 双速度平台侧面碰撞台车试验方法研究[C]. 中国汽车工程学会第十一届汽车安全技术年会，2008