

基于 LS-DYNA 的整车正面偏置碰撞多工况仿真比较研究

姚宙

(中国第一汽车集团有限公司研发总院, 长春 130000)

摘要: 为更真实体现道路交通事故, 考虑汽车安全兼容性, 汽车安全法规逐步推进正碰测试评价采用对碰撞形式。本文比较了新型碰撞工况边界条件, 对 MPDB、OMDB 及 ODB 三种有限元壁障进行静态加载仿真对比分析, 基于某 C 级轿车进行了三种工况正面偏置碰撞整车有限元仿真分析。通过对比三种壁障的刚度曲线, 整车碰撞仿真能量曲线、速度与加速度曲线、车体侵入量、车体与壁障变形等关键参数, 研究了蜂窝铝碰撞壁障的特性以及三种偏置碰撞工况下车辆安全性能的影响。针对新型碰撞形式对车辆安全性设计的新要求进行了探讨, 为后续工程开发提供指导。

关键词: 碰撞安全; MPDB; OMDB; ODB; 仿真分析

随着汽车产业的发展, 绿色出行与智能出行将成为未来汽车出行的主流, 交通安全问题与世界汽车碰撞安全法规针对这些发展与变化进行了新的规划。由于汽车的种类各种各样, 电动汽车的从大型 SUV 到超小行双人通勤车均有涵盖, 并且由于电池包结构的增加, 在带来碰撞电安全问题的同时, 也造成了电动汽车自重增加的问题。如果只采用目前的正面刚性墙与偏置碰撞模式 (FRB/ODB), 无疑会造成越重车型其车身刚度越强, 而轻量车型其车身刚度较弱的情况, 进而导致更严重的车辆碰撞相容性安全问题。为解决该种情况对世界汽车被动安全的影响, 提升对道路交通参与者的安全保护, 北美从 1996 年开始进行碰撞安全的兼容性研究, 并以 NHTSA 为代表发布其 OMDB (Oblique Moving Deformable Barrier) 正面可变形壁障台车碰撞^[1]。欧洲 Euro-NCAP 在 2015 发布路线图表示将采用更能体现真实交通事故的正面碰撞, 于 2020 年采用 MPDB (Mobile Progressive Deformable Barrier) 正面碰撞工况^[2]。中国 C-NCAP 在 2021 年也将对正面碰撞进行改版, 将采用 MPDB 碰撞模式替代目前的 ODB (Offset Deformable Barrier) 碰撞工况。在经历多年的碰撞安全相容性研究后, 汽车碰撞安全兼容性评价规程即将进入实施阶段。

体现碰撞相容性的正面偏置碰撞新规程将对汽车安全性设计带来哪些影响, MPDB 碰撞、OMDB 碰撞以及 ODB 碰撞对车身耐撞性设计与优化中的关注点及策略有何不同, 这些变化值得分析与比较。本文采用 LS-DYNA 显示有限元仿真工具, 对 MPDB、OMDB 与 ODB 三种壁障模型进行了准静态加载仿真计算, 比较了三种壁障的刚度特性。基于某 C-NCAP 五星安全 C 级轿车有限元模型, 通过详细对比分析该车型在 MPDB、OMDB 及 ODB 三种碰撞工况下能量曲线, 碰撞速度与加速度曲线变化, 车体侵入量与结构形式, 获得新型正面偏置碰撞对目标车型碰撞安全设计的影响与变化, 针对变化进行探讨并给出建议。

1 MPDB、OMDB 及 ODB 碰撞工况比较

1.1 MPDB、OMDB 及 ODB 碰撞测试边界条件

汽车被动安全试验测试一直想要尽可能真实的反应真实交通事故伤害形式, 以提升对车辆安全性能的设计, 提高对乘员伤害的保护。正面偏置碰撞 ODB 工况自 1997 年为 Euro NCAP 使用以来, 已经超过 20 年。通过道路交通伤害数据分析, 正面碰撞工况评价测试为减少正面碰撞交通事故的人员伤害与死亡数量做了巨大的贡献。在新一轮的正面碰撞测试升级中, 欧洲、美国、中国均聚焦于具有相容性评价的对撞工况。在即将施行的 Euro NCAP 2020 版与 C-NCAP 2021 版正面碰撞中均采用 MPDB 碰撞形式来取代 ODB 碰撞。美国在下一轮的 US NCAP 升级中也将采用 OMDB 90kph 壁障碰撞形式, 三种碰撞工况的边界条

件如表 1 所示。相比 ODB 碰撞，MPDB 碰撞的速度由 64kph 降低到 50kph，但质量为台车与试验车辆之和，碰撞重叠率由 40%增加到 50%，壁障距离地面高度由 200mm 降低至 150mm，但蜂窝壁障的碰撞截面积并无增大，说明 MPDB 壁障相比 ODB 壁障参碰撞变形的比例更高，增加的 Y 向与 Z 向重叠面可更全面的评价目标车的前端刚度。OMDB 碰撞的速度提高到 90.1kph，碰撞台车与蜂窝壁障总质量为 2486kg，壁障碰撞角度为 15 度，与车辆重叠率为 35%。基于美国交通事故数据分析，在 AIS 3+ 伤害中，70%的事故为 6°~14°斜撞，OMDB 覆盖了正面最大部分碰撞角度与重叠率范围。MPDB 与 OMDB 在前排假人均采用了更能体现生物损伤特性的 Thor 假人。在后排位置，Euro NCAP 布置了 6 岁与 10 岁儿童假人，C-NCAP 在 2021 版采用的 MPDB 则会在后排布置 Hybrid III 5%女性假人与 6 岁儿童假人以更贴近中国车辆使用工况，OMDB 在后排未布置乘员假人。

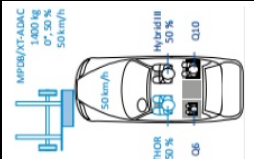
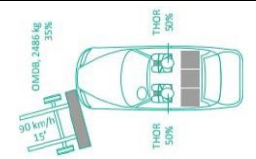
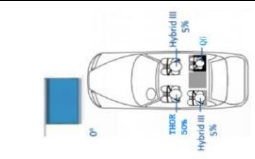
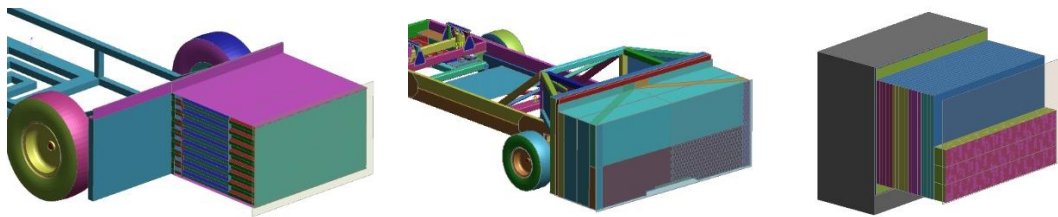
工况	MPDB	OMDB	ODB
碰撞速度 (km/h)	-50/+50	90.1	64
碰撞质量 (kg)	1400/目标车	2486	目标车
重叠率	50%	35%	40%
碰撞角度	0°	15°	0°
壁障下缘离地高 (mm)	150	107	200
壁障上缘离地高 (mm)	720	1058	850
壁障截面积 (m ²)	0.57	2.09	0.65
壁障厚度 (mm)	790	600	540
前排假人	Thor/Hybrid III	Thor/Thor	Hybrid III/Hybrid III
后排假人	Q6/Q10	——	Hybrid III/Q6
工况示意图			

表 1 正面偏置碰撞三工况对比

在目前采用的 64kph 固定壁障偏置碰撞 (ODB) 中，质量大的车辆由于撞击动能大，而 ODB 壁障可吸收的总能量一定，为了减小自身碰撞变形与侵入，需要提升车辆前端吸能与乘员舱刚度。质量小的车辆撞击动能相对较小，在 ODB 壁障吸收一定能量后，对车辆的吸能要求下降，容易导致大车刚度需求大，小车刚度需求小的相容性问题。在 MPDB 与 OMDB 新型碰撞工况中，蜂窝壁障采用台车相向运动碰撞模式，具有自己的初始速度 (MPDB 为 50kph，OMDB 为 90.1kph)，模拟实际交通事故中迎面会车碰撞情况。根据动量定理与动量守恒定律，无外力作用下，系统总动量守恒，且壁障与车辆对撞，碰撞的力与反作用力相等，那么壁障与车辆刚度小的一方变形大，质量小的一方速度变化量大。因此质量小的车辆如果刚度不够，将导致其车体加速度大，车体的变形与侵入量也会增加，充分体现了道路相容性碰撞安全理念。

1.2 MPDB、OMDB 及 ODB 壁障静压仿真分析

三种碰撞工况边界条件不同，其采用的蜂窝壁障也有很大的区别。基于 LS-DYNA 的三种蜂窝铝壁障有限元模型如图 1 所示^[3]。通过比较可知，MPDB 壁障与 OMDB 壁障蜂窝铝单元数分别是 ODB 壁障的 12 与 19 倍，模型的精细化大幅提升有助于获得精度更高的刚度以及相似度更高的蜂窝铝变形与失效形式。同时，为了模拟蜂窝壁障在受冲击载荷时的压缩与剪切失效，MPDB 与 OMDB 壁障增加了梁单元对壳进行连接。



(a) MPDB 壁障模型

(b) OMDB 壁障模型

(c) ODB 壁障模型

图 1 正面偏置碰撞壁障有限元模型

蜂窝铝模型	MPDB 壁障	OMDB 壁障	ODB 壁障
Shell 单元数	473596	694048	39672
TShell 单元数	24526	——	——
Beam 单元数	11069	16294	——
Solid 单元数	——	22790	23520
单元总计	509191	799192	42192

表 2 正面偏置碰撞壁障有限元数量

对壁障采用刚性平板进行准静态加载仿真，考察 MPDB、OMDB 及 ODB 蜂窝铝壁障在准静态加载工况下的刚度性能。由于三种壁障的受载面积不同，提取仿真分析中的力-位移曲线时按单位面积进行处理，得到等效刚度曲线。在蜂窝铝壁障前端布置一刚性平板，覆盖整个壁障表面。对刚性平板施加 1mm/ms 强制位移，计算时长 400ms，获得力-位移曲线如图 2。三种壁障的静压曲线均可大致分为两个阶段：ODB 壁障的两个阶段均近似为水平，MPDB 的第一阶段近似水平而第二阶段近似线性增长，OMDB 壁障的第一个阶段近似水平而第二阶段在 2.3 倍阶跃后水平波动。其中第一阶段 MPDB 平均力为 ODB 的 2.31 倍，OMDB 平均力为 ODB 的 5.14 倍。第二阶段 MPDB 平均力为 ODB 的 2.45 倍，OMDB 平均力为 ODB 的 6.79 倍。说明 MPDB 与 OMDB 壁障的刚度相对 ODB 壁障都进行了大幅的提升，壁障不仅是进行碰撞吸能，同时具有模拟代表交通事故中参与撞击的车辆前端平均刚度的作用。三种壁障受压缩 400mm 后的变形形式如图 3 所示：MPDB 壁障由于在受压方向的尺寸最大（790mm），其蜂窝铝壁障前中后分区域刚度呈递增的力学特性，当前端蜂窝铝变形完全后，后段溃缩变形小，保留继续受压变形空间。

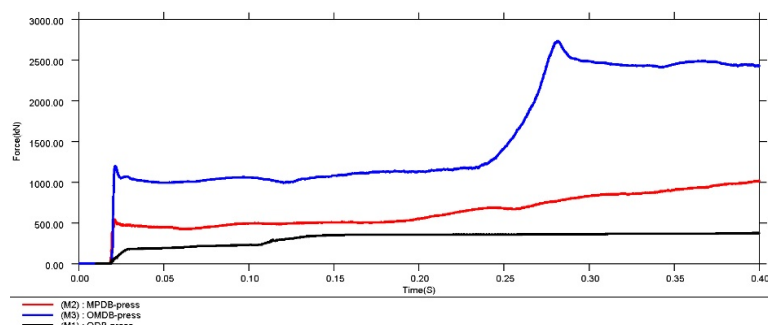


图 2 壁障静压仿真力-位移曲线

蜂窝铝模型	MPDB 壁障	OMDB 壁障	ODB 壁障
一阶段平均力 (kN)	483	1074	209
二阶段平均力 (kN)	893	2470	364

表 3 壁障静压平均力值

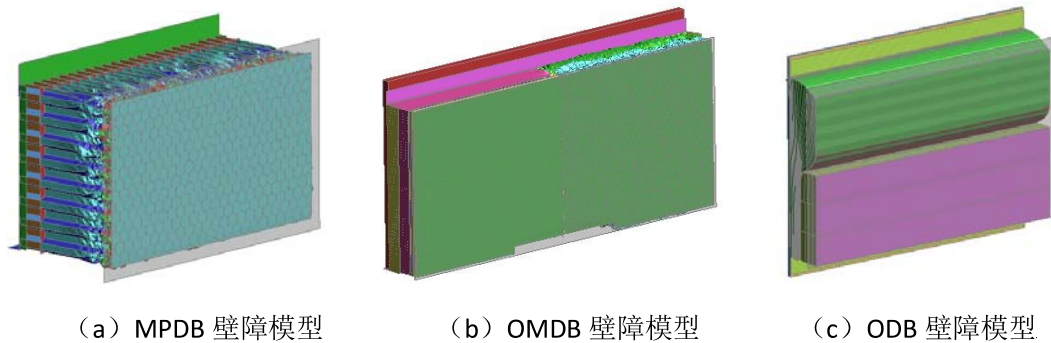


图 3 壁障静压变形图

2 整车正面偏置碰撞多工况仿真分析比较

2.1 整车碰撞仿真模型

基于某款 C-NCAP 五星安全 C 级轿车整车有限元碰撞模型，对其进行 MPDB、OMDB、ODB 三种偏置碰撞工况的耐撞性能仿真。该 C 级轿车整车整备质量 1820kg，车辆宽度 1900mm，整车碰撞有限元模型包含 shell 单元 458 万，solid 单元 125 万，仿真分析时间步长 0.9×10^{-7} ，计算时长 140ms。通过比较能量曲线，速度变化曲线，车身加速度曲线以及车辆结构变形与侵入，得到 MPDB、OMDB 碰撞形式相比 ODB 碰撞形式对车辆碰撞安全的影响，提出车身耐撞性设计需要关注与解决的问题。



图 4 整车正面 MPDB、OMDB、ODB 碰撞仿真模型

2.2 MPDB、OMDB、ODB 整车碰撞仿真分析比较

整车正面偏置三工况碰撞能量曲线如图 5 所示。由于目标车型质量大于 MPDB 壁障，MPDB 较 ODB 碰撞总能量仅增加 3.6%，而 OMDB 碰撞能量较 ODB 则增加 145.6%。MPDB 与 ODB 碰撞工况下内能与动能曲线变化相似，最终值也相当，但在 10ms~60ms 区间，MPDB 的动能曲线下降明显比 ODB 动能曲线快。OMDB 的动能曲线与内能曲线未发生交叉，且在 60ms 后二者基本水平。三种正面偏置碰撞仿真 X 向速度曲线如图 6 所示：前 60ms，MPDB 壁障的速度斜率最大，MPDB 碰撞车体的速度斜率其次，ODB 碰撞车体的速度变化斜率最小。60ms 后 MPDB 台车开始回弹反向，而该 C 级轿车无明显回弹，速度趋近于零直到 140ms。在图 5(b)中，OMDB 车体的加速斜率稍高于壁障的减速斜率，二者速度达到 43kph 后同步运动。在前 50ms，MPDB 与 OMDB 车体 X 向的速度变化率均高于 ODB 工况。比较三工况仿真分析 Y 向速度曲线如图 7 所示：MPDB 碰撞车体与壁障的 Y 向速度变化趋势基本相似，60ms 后壁障的 Y 向偏转速度稍高于车体，该时刻也是壁障 X 向回弹时刻。0~60ms 区间壁障与车体一起贴合偏转。相较 ODB，车体在 MPDB 碰撞中的 Y 向速度在 35~75ms 区间更高，在 75ms 后，ODB 的车体 Y 向速度超过 MPDB 车体。OMDB 碰撞车体的 Y 向速度高于 MPDB 与 ODB，在 0~18ms 区间 OMDB 车体 Y 向速度很小，18~44ms 由于 OMDB 壁障与左前车轮发生硬接触，开始推动车体 Y 向加速，从 44ms 开始车轮与车身门槛发生挤压，同时壁障与前机舱动力总成发生硬接触，导致车体 Y 向速度急剧上升。在 50ms 时，OMDB 壁障与车体达到同一 Y 向速度，之后车体 Y 向

速度超过壁障，并在 60ms 时达到峰值 5.3m/s。

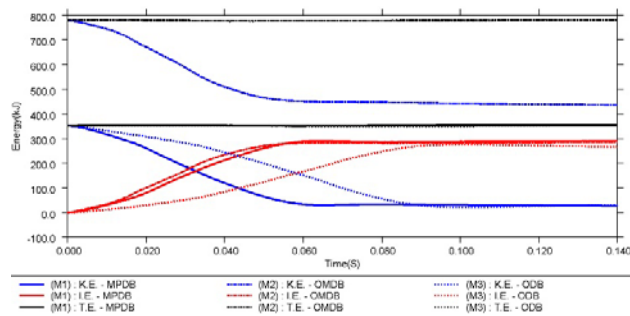
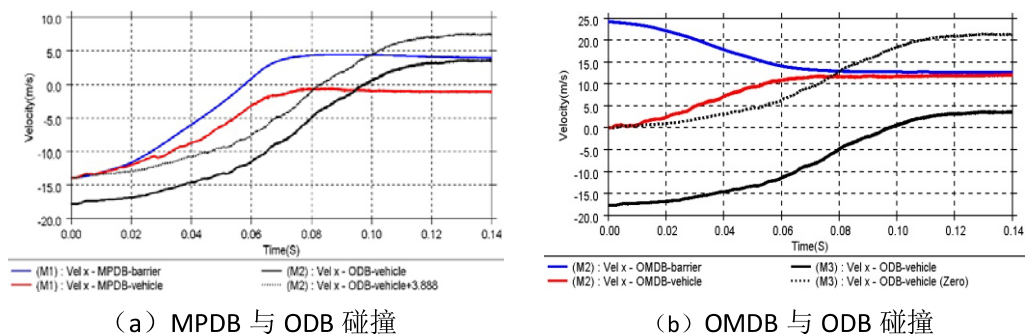


图 5 整车正面 MPDB、OMDB、ODB 碰撞仿真能量曲线



(a) MPDB 与 ODB 碰撞

(b) OMDB 与 ODB 碰撞

图 6 整车正面偏置碰撞仿真 X 向速度曲线

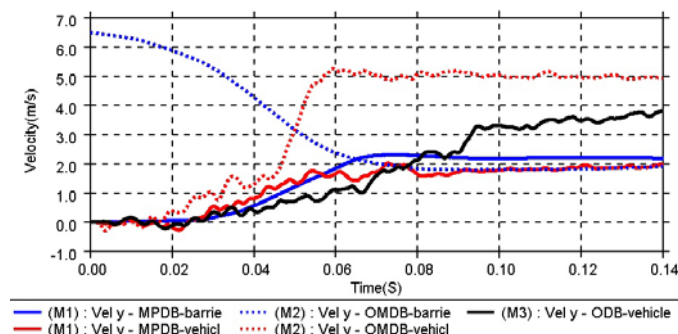
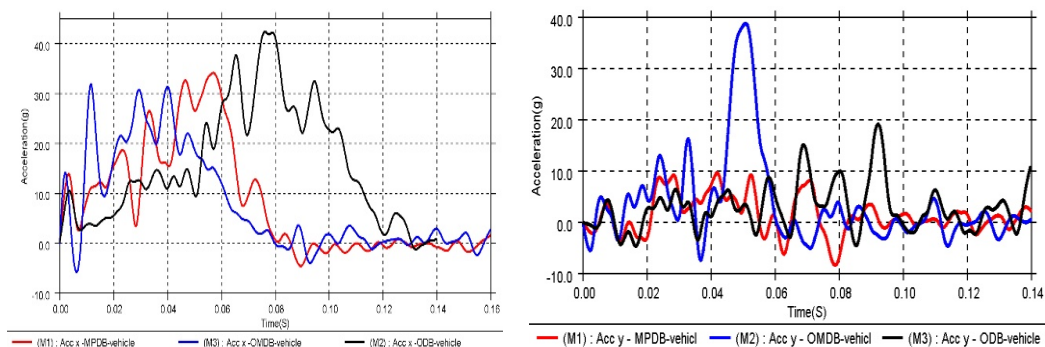


图 7 整车正面偏置碰撞仿真 Y 向速度曲线

提取车体 B 柱加速度曲线如图 8 所示：MPDB 碰撞中车体的 X 向 B 柱加速度峰值较 ODB 碰撞提前约 20ms，时刻与正面全宽刚性墙 50kph 碰撞波形相近，而 OMDB 车体 B 柱加速度峰值较 MPDB 又提前约 20ms。在图 8(b)中，OMDB 碰撞 Y 向车体加速度曲线在 44~57ms 区间出现峰值为 38.7g 的尖峰，与 Y 向速度突变一致。

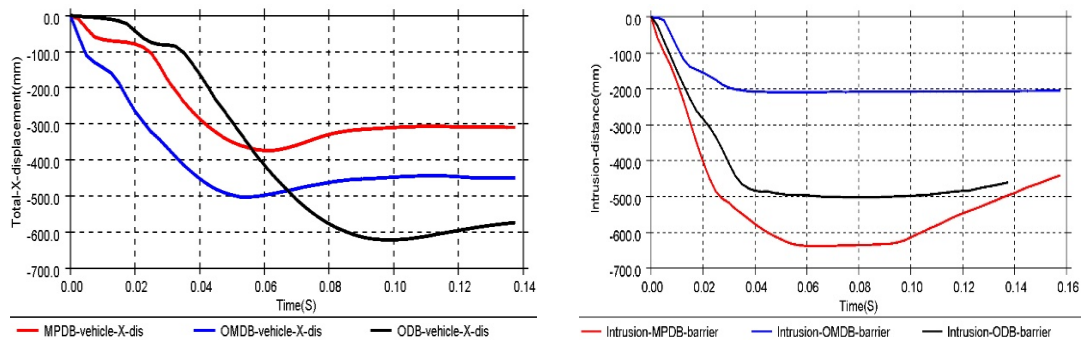


(a) X 向加速度

(b) Y 向加速度

图 8 整车正面偏置碰撞仿真车体加速度曲线

考察三种碰撞工况下车体变形量,测量前防撞横梁到车体后端的X向变形曲线如图9所示。在前55ms,MPDB与OMDB车体变形均大于ODB,之后ODB碰撞车体变形量超过MPDB与OMDB。整体变形量MPDB为ODB的54%,OMDB碰撞为ODB的78.2%。说明对于该款C级Sedan车型,MPDB与OMDB碰撞造成车体变形量均小于ODB碰撞工况,车体侵入造成乘员伤害的风险降低。测量140ms车体前围、地板及车门框关键区域变形量如表5所示:MPDB的前围最大侵入55mm,OMDB前围最大侵入92mm,较ODB的最大侵入量114mm均出现明显降低。同时MPDB与OMDB的地板侵入量较ODB工况也出现约50%的减小,门框的变形亦明显减小。在前文中对三种壁障进行准静态压缩仿真分析,得到ODB、MPDB、OMDB壁障刚度依次递增的结论,而在车体变形曲线中ODB碰撞中车体最终变形量最大,这是由于ODB壁障在55ms时发生了击穿,壁障变形量达到极值并持续保持,如图9(b)所示。由于MPDB与OMDB壁障刚度较ODB壁障高,在前55ms,MPDB与OMDB工况下车体的变形曲线大于ODB工况。ODB壁障被击穿后由于壁障后端固定刚性墙作用,车体X向变形量超过MPDB与OMDB。整车碰撞壁障的变形如图10所示:相较ODB壁障完全被击穿,MPDB与OMDB壁障的侵入量位于可变形区域。该C级车在MPDB工况仿真分析中造成壁障最大侵入650mm,超过630mm的限值,可判断为Bottoming out,且壁障变形SD值为110,会被扣分,说明按照目前ODB工况开发的车体前端结构如不进行特定相容性优化,由于自身的攻击性较强将导致扣分。



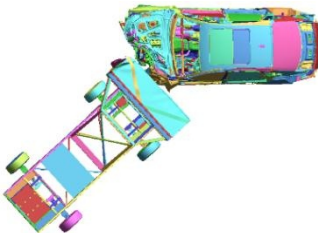
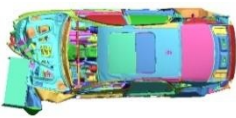
(a) 车体变形曲线

(b) 壁障变形曲线

图9 MPDB、OMDB、ODB碰撞变形曲线

	最大变形量 (mm)	最终变形量 (mm)	终值比列
MPDB 工况	374@60ms	310	54%
OMDB 工况	503@55ms	449	78.2%
ODB 工况	622@98ms	574	—

表4 三工况偏置碰撞车体变形量

	MPDB 工况	OMDB 工况	ODB 工况
车体变形			

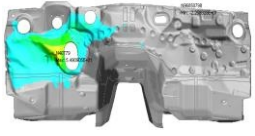
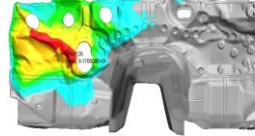
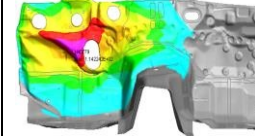
前围侵入量						
	Max:55mm		Max:92mm		Max:114mm	
地板侵入	P1	13	P1	9	P1	22
	P2	23	P2	21	P2	47
	P3	20	P3	16	P3	38
门框变形	左上	2	左上	4	左上	10
	左下	2	左下	2	左下	5
	右上	0	右上	3	右上	2
	右下	0	右下	0	右下	0

表 5 MPDB、OMDB 及 ODB 偏置碰撞侵入量

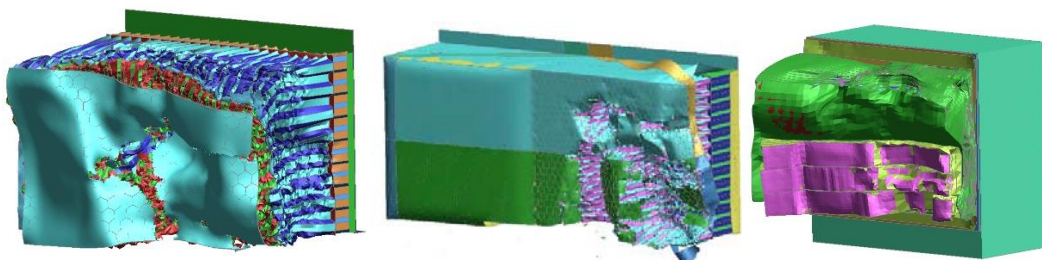


图 10 MPDB、OMDB、ODB 壁障变形

虽然在 MPDB 与 OMDB 偏置碰撞中，该目标车辆的车体变形量、侵入量及门口变形量均小于 ODB 碰撞工况。但由于在 MPDB 工况中，将目标车辆对撞击壁障的攻击性作为罚分项进行综合评价，故需要对该 C 级车前端进行结构优化以提升其碰撞相容性能。优化措施主要有：第一，通过增加前防撞横梁 Z 向与 Y 向尺寸，增大车辆前端碰撞器与 MPDB 壁障的接触面积。接触面积的增加不仅能降低对壁障的侵入，同时能减小 Bottoming out 风险；第二，增加前端碰撞结构传力路径。在副车架到前防撞横梁端面间增加副吸能盒，在翼子板安装梁与水箱框架上横梁间增加连接纵梁。这样在车体与 MPDB 壁障接触后，形成上翼子板纵梁、中间防撞横梁、下副车架吸能盒的三路径变形模式，实现对 MPDB 蜂窝壁障的均匀挤压，进一步减小壁障侵入量，降低击穿风险。通过前端结构优化，壁障侵入变形如图 11 所示。优化前 SD 值为 110，优化后 SD 降为 83，且最大侵入量小于 480，无击穿风险。

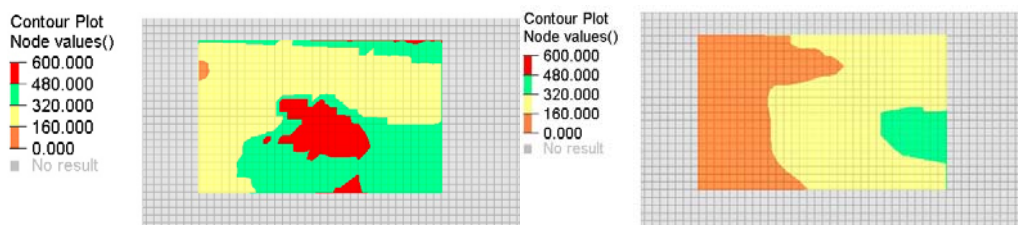


图 11 优化前后 MPDB 壁障侵入变形云图

3 结果与分析

本文对即将施行的 MPDB 与 OMDB 碰撞相容性法规进行了对比介绍，相比目前采用的 ODB 固定蜂窝偏置

碰撞形式，MPDB 与 OMDB 对撞模式更能体现真实道路交通事故，通过定义具有代表性的碰撞台车质量，采用合适蜂窝铝刚度，提升参与道路交通的各类车辆的相容性，以期改变目前大型、重型汽车刚度大，而小型、轻型汽车刚度愈小的相容性安全问题。通过对比分析 MPDB、OMDB 及 ODB 蜂窝铝壁障有限元模型静压仿真与某 C 级轿车正面偏置三工况碰撞仿真结果，可得到如下结论：

(1) MPDB、OMDB 以及 ODB 三种壁障有限元模型，ODB 壁障刚度最低，MPDB 刚度其次，OMDB 刚度最高。MPDB 与 OMDB 壁障的刚度增加导致在该两种整车偏置工况中，前 50ms 的车体速度变化率与车体变形量均比 ODB 碰撞工况大；

(2) MPDB、OMDB 以及 ODB 三种壁障有限元模型，ODB 壁障的 X 向尺寸最小，OMDB 壁障其次，MPDB 壁障 X 向尺寸最大。由于 ODB 壁障 X 向尺寸小，偏置碰撞中 55ms 后壁障发生击穿，车体的速度变化率，车体变形量、侵入量均比 MPDB 与 OMDB 工况大；

(3) MPDB 碰撞车体 X 向加速度峰值较 ODB 提前 20ms，OMDB 碰撞车体 X 向加速度峰值较 ODB 提前约 40ms，峰值提前说明车体变形加快，约束系统匹配需要关注；

(4) 在车体 Y 向运动中，MPDB 工况车体在 35~75ms 区间 Y 向偏转速度大于 ODB，后期由于 ODB 壁障击穿，车体与刚性墙接触并反弹，Y 向速度反而高于 MPDB。而 OMDB 由于 15 度初始碰撞角度，车体 Y 向速度增加较快，在 44ms 开始车轮与门槛接触 Y 向速度急剧上升，Y 向加速度峰值 38.7g，将影响约束系统对假人伤害的保护；

(5) 由于本文研究的 C 级轿车整备质量高于 MPDB 碰撞台车，MPDB 台车速度变化率高于车体速度变化率，台车碰撞加速度 OLC 为 35g，SD 值为 110 且存在击穿现象。通过对防撞横梁、碰撞吸能盒副车架、翼子板安装梁等前端关键结构进行相容性优化设计，增大车辆与壁障的接触面积，增加吸能传力路径，可有效降低 MPDB 壁障变形 SD 值，并消除击穿风险，实现车辆与 MPDB 壁障的刚度匹配。

参考文献

- [1] National Highway Traffic Safety Administration [Docket No.NHTSA-2015-0119] New Car Assessment Program (NCAP).
- [2] 2020 ROADMAP EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME, March 2015.
- [3] LSTC. Download LSTC Dummy and Barrier Models for LS-DYNA.
http://www.lstc.com/download/dummy_models.

Abstract

In order to address injuries and fatalities in real world crash modes and consider the safety compatibility of automobiles, the automobile safety regulations gradually promote the use of collision-to-collision test and evaluation. This paper compares the boundary conditions of new collision conditions, compares static loading simulation of MPDB, OMDB and ODB finite element barriers, and carries out finite element simulation analysis of frontal offset collision under three conditions based on a C-class car. By comparing the stiffness curves of the three barriers, the energy curve, velocity and acceleration curve of vehicle crash simulation, the intrusion and deformation of vehicle body and barriers, the characteristics of aluminum honeycomb barrier and the impact of vehicle safety performance under three bias crash conditions were studied. The new requirements of vehicle safety design for new collision forms are discussed, which provides guidance for subsequent engineering development.