

某 SUV 基于 2020 版 E-NCAP MPDB 工况碰撞相容性优化设计

侯聚英，徐鸣涛，徐莉，王喜军

(江铃汽车股份有限公司，南昌，330100)

摘要：根据 2020 版 E-NCAP 正面 MPDB 工况对江铃某款已上市 SUV 车型进行了实车试验和碰撞仿真，评估基础车碰撞相容性。对比新 MPDB 工况与 ODB 偏置工况的性能差异，探讨优化碰撞相容性的应对策略。提出一种车体前端关键传递路径优化设计方案，可大幅降低碰撞相容性罚分，为后续新车型设计提供参考依据。

关键词：MPDB；ODB；碰撞相容性；传递路径

随着道路交通环境的日益复杂，针对各种事故所制定的汽车测试法规也越来越严苛。这也促进了汽车主动和被动安全技术的提升。在正碰工况中，车体前端结构起着重要的载荷传递和吸能缓冲作用。但是根据欧洲汽车协会 ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club) 的调查显示在很多情况下，纵梁没有参与碰撞或者是横梁因为脱开没有起到吸能的作用。这会导致在碰撞过程中轮毂遭受撞击，进而降低乘员生存空间，增加乘员伤害，如下图所示^[1]。



图 1 横、纵梁没有完全被撞击导致的乘员舱严重变形

为了评价两车对撞的复杂工况，ADAC 于 2010 年推出了一种可变形壁障来评估前端溃缩结构对乘员保护性能，这种渐变式可变形壁障测试被称为碰撞相容性测试或者是 MPDB (Mobile Progressive Deformable Barrier, 简称 MPDB) 测试。目前作为全球最为全面的欧洲碰撞规程 E-NCAP 已经确认将于 2020 将 MPDB 测试工况纳入评价体系，并代替目前实施的正面 40%重叠可变形壁障碰撞工况 ODB (Offset Deformable Barrier)^[2]。根据最新的 C-NCAP 的路线图，未来 2021 版的中国新车评价规程也将采用 MPDB 测试工况替代 ODB。

与 ODB 相比，MPDB 工况使用台车与实车对撞，更符合实际道路交通事故两车对撞场景^[3]。MPDB 工况不仅考察发生事故时自身车辆的乘员安全防护性能，而且可以更加全面的评估对向行驶的车辆碰撞后的乘员保护性能，即碰撞相容性。提升碰撞相容性能，可以增加对向行驶车辆的乘员安全性，降低车内乘员的损伤风险。

本文对江铃某款已上市 SUV 车型展开了 MPDB 工况碰撞研究，进行了物理壁障实车碰撞测试和数值仿真分析。通过分析 MPDB 与 ODB 工况中车体设计要求的差异，并提出了相应的应对策略，为后续新车型开发积累经验奠定基础。

1 E-NCAP MPDB 碰撞工况介绍

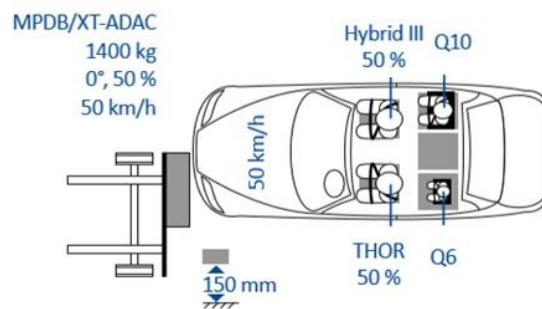


图 2 MPDB 工况示意图

2020 版 E-NCAP MPDB 工况将采用 1400 Kg 碰撞台车与试验整车进行对撞，台车和试验车的速度均为 50km/h，重叠率为 50%。试验车前排左右侧分别放置新版 THOR 假人和混III50%分位男性假人，后排左侧放置 Q6 儿童假人，右侧放置 Q10 儿童假人，如图 2 所示。MPDB 评价指标分为乘员损伤和碰撞相容性两部分。乘员损伤是通过安装在测试假人各部位的传感器采集的试验数据进行评价，碰撞相容性的评价包括以下三部分^[4]：

- 1) 壁障变形均匀性指标—均匀系数 h [%]。试验后通过如下步骤计算均匀系数：
 - 扫描壁障前端的变形点云，生成最大 10 mm 的网格；
 - 以未变形前的壁障端面中心点为中心，生成间距为 20 mm 的网格点（约为 1400 网格点）；
 - 投射网格点至变形后的壁障，并计算评级区域内每个点的侵入量，图 3 所示；
 - 计算侵入量的标准差 SD (mm)，（计算与平均侵入量相比，68.2%的偏差值）；
 - 采用如下公式计算均匀系数 h ：
 - 对于 $SD < 50$ mm， $h = 0$ ；
 - 对于 $50 \text{ mm} \leq SD \leq 150$ mm， $h = (SD - 50) / 100$ mm；
 - 对于 $SD > 150$ mm， $h = 100\%$ ；

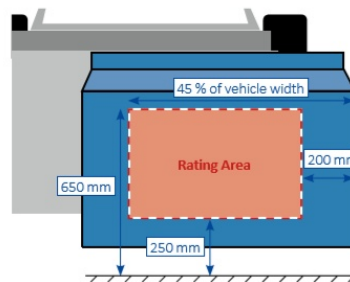


图 3 标准差评级区域

- 2) 壁障击穿 M_{BO} 。

如果在大于 40 mm*40 mm 的区域内发生大于 630 mm 的侵入深度，则有 2 分的扣分。

- 3) 乘员载荷准则 OLC (Occupant Load Criterion)^[5]。

OLC 的基本分析方法如下：为避免假人胸部与方向盘发生碰撞，设胸部向前位移量为 300 mm。由于安全带的松弛量存在，假人在不受力的状态下匀速运动，移动 65 mm，即图 4 中的 D1。之后，安全带开始向假人施加载荷，假人作减速运动，并移动了 235 mm，即 D2。在速度-时间曲线上，A 点对应台车上虚拟假人在自由移动阶段位移 65 mm 的时刻，B 点对应台车上虚拟假人在安全带作用下位移 235 mm 的时刻，直线 AB 的斜率定义为 OLC。

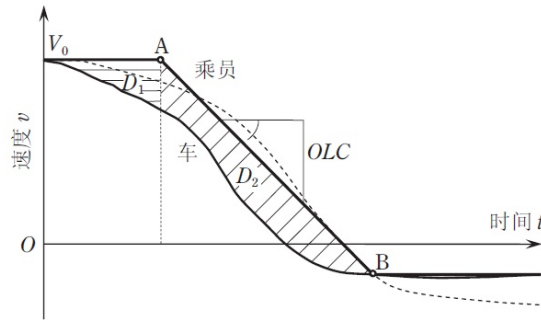


图 4 乘员载荷准则 OLC

碰撞相容性罚分 M_{compat} 计算公式如下所示:

当 $OLC < 25g$ 时,

$$M_{compat} = -2 * h - M_{BO} \quad (1)$$

当 $25g \leq OLC \leq 40g$ 时,

$$M_{compat} = -2 * OLC / 15 + 10 / 3 - h * ((4 * OLC / 10 - 8) - (2 * OLC / 15 - 10 / 3)) - M_{BO} \quad (2)$$

上限-8 分;

当 $OLC > 40g$ 时,

$$M_{compat} = -2 * 6 * h - M_{BO} \quad (3)$$

上限-8 分;

碰撞相容性罚分计入 MPDB 乘员得分中 (总分 16 分); E-NCAP 规定 2020 至 2021 年, 碰撞相容性罚分乘以 0.5 的系数, 最高罚 4 分;

目前, 虽然 MPDB 工况中碰撞相容性已经有了明确的评分规则, 但改善碰撞相容性的途径仍处于研究探索阶段。本文通过研究 MPDB 碰撞相容性, 探讨 MPDB 工况车体设计应对策略。

2 ODB 与 MPDB 工况差异对比

江铃某款 SUV 车型采用单纵梁传递路径设计, 图 5 所示。在正面碰撞中, 大部分碰撞力由前纵梁分散至全车, 上纵梁设计只能承载较小的碰撞力, 来减小传递给 A 柱的力, 预防 A 柱折弯变形。基于这种传递路径设计的车体在应对 ODB 碰撞工况时, 为了在有限的碰撞空间内吸收大部分的碰撞能量, 减小前围对乘员仓的侵入, 将前纵梁刚度设计得比较高。在 ODB 碰撞过程中, 整车前纵梁首先击穿壁障接触刚墙, 再溃缩变形吸能, 如图 6 所示。

但该种车身结构设计应对 MPDB 工况时, 弊端非常明显, 碰撞过程中前纵梁击穿壁障, 大幅降低碰撞相容性性能。

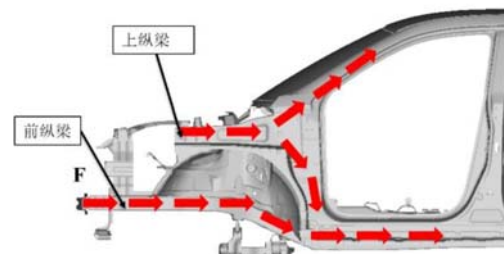


图 5 基础车前端结构

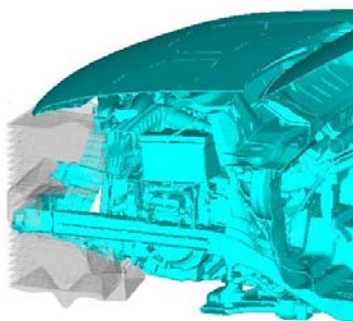


图 6 ODB 碰撞变形

对上述车身结构形式的基础车分别进行 ODB 和 MPDB 工况实车测试。图 7 为采集的 ODB 和 MPDB 工况整车左侧 B 柱加速度曲线。从图中可以看出两个工况加速度峰值基本一致，MPDB 工况峰值时刻较 ODB 工况明显提前。MPDB 碰撞过程持续时间远小于 ODB，碰撞过程更加剧烈。

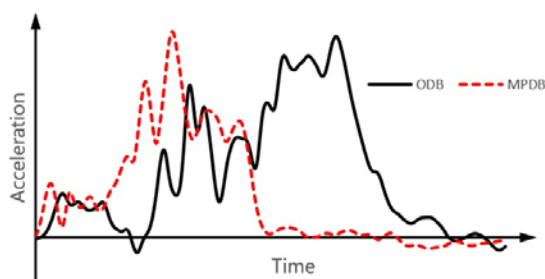


图 7 ODB 与 MPDB 工况左侧 B 柱底部加速度曲线

表 1 汇总了 ODB 与 MPDB 工况的碰撞能量，虽然 MPDB 总碰撞能大于 ODB，但壁障吸能占比大幅增加，整车吸能减小，理论上整车变形减小，前围侵入量减小，有利于乘员舱空间的完整性。

工况	总能量	壁障吸能	整车吸能
ODB	277.4 KJ	37.2 KJ	221.8 KJ
MPDB	304.4 KJ	91.2 KJ	162.2 KJ

表 1 ODB 与 MPDB 工况能量对比

MPDB 工况设计不仅要降低车内乘员损伤，而且要考虑降低整车的碰撞攻击性，也就是碰撞相容性。故提出基础车 MPDB 工况应对策略，优化车体结构，以减小碰撞相容性罚分。

3 MPDB 碰撞相容性优化设计

3.1 MPDB 工况 CAE 仿真与试验对比

本文采用上海迅仿工程咨询有限公司的 MPDB 有限元模型进行整车碰撞相容性研究，如图 8 所示。壁障有限元模型根据 2018 年 11 月发布的《Euro NCAP Mobile Progressive Deformable Barrier Face Specification Version 1.2》进行开发，壁障共 33 万单元。

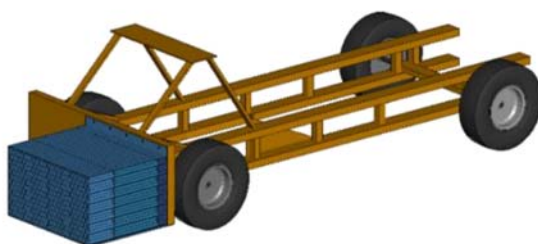


图 8 迅仿 MPDB 有限元模型

搭建该壁障和基础车的 MPDB 工况碰撞模型，采用 LSDYNA 程序进行计算。图 9 为壁障台车的加速度曲线，图 10 为试验车左侧 B 柱采集的加速度曲线。结果表明 MPDB 仿真结果台车及整车加速度曲线峰值及持续时间与试验结果基本吻合，且趋势基本一致。

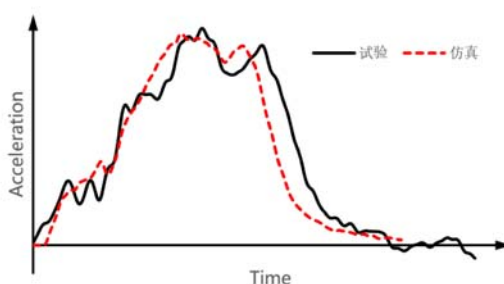


图 9 CAE 与试验壁障台车加速度曲线图

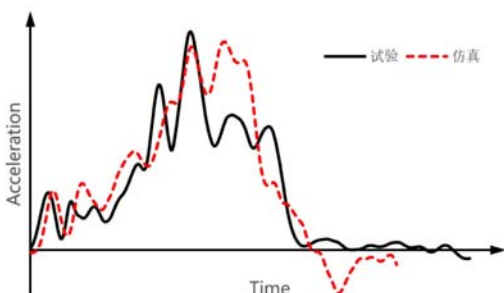
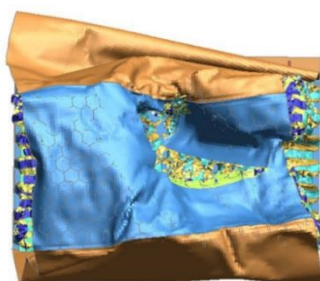


图 10 CAE 与试验整车左侧 B 柱加速度曲线

图 11 对比了仿真和试验中壁障的变形情况，从图中可以看出仿真的壁障变形与试验结果基本一致，且前纵梁对应的撞击位置均出现壁障被击穿现象。



a) CAE



b) test

图 11 CAE 与试验壁障变形对比

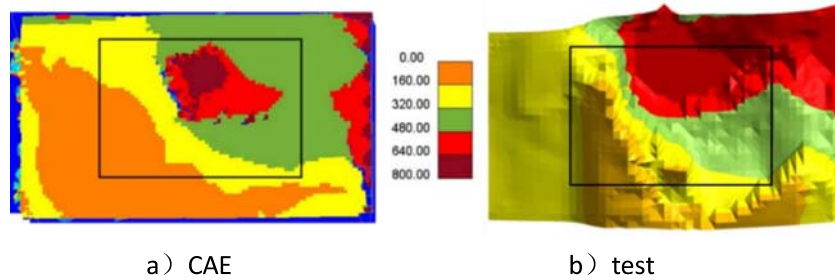


图 12 CAE 与试验壁障变形云图

图 12 为仿真与试验的壁障变形云图，根据该变形云图可以评价壁障变形的均匀性系数 h 。表 2 中给出了实验与仿真的碰撞相容性评分结果，结合壁障变形标准差、OLC 及击穿判定规则，基础车碰撞相容性罚分均约为-7 分。该车型在 MPDB 工况中罚分较多的主要原因是其车身结构设计前纵梁刚度高，在 MPDB 工况中车体前端结构与壁障的接触面积小，造成局部载荷集中从而导致前纵梁击穿壁障，同时增加了变形标准差。

碰撞相容性指标	壁障变形标准差 SD	OLC	壁障击穿	总罚分
CAE	176 mm ($h=100\%$)	32.2 g	是	6.9
试验	198 mm ($h=100\%$)	32.6 g	是	7.0

表 2 CAE 与试验碰撞相容性罚分对比

仿真和试验结果的对比表明 MPDB 的有限元模型能够很好地反映壁障及整车在碰撞过程中的响应，该模型可以用于后续优化设计。

3.2 碰撞相容性应对策略

基础车 MPDB 碰撞相容性的优化策略如下：

- 1) 消除壁障击穿。壁障击穿罚 2 分，占总罚分的 1/4，罚分占比较高不可接受。造成壁障击穿的原因是车辆前端结构与壁障接触面积较小，纵梁刚度较高综合导致。改进策略为增加车体关键传递路径与壁障的接触面积，减小与壁障的接触应力。但增加接触面积会增加作用于壁障的接触力，导致台车 OLC 增加，需要降低台车受力，适当减小前纵梁刚度。
- 2) 降低壁障变形标准差 SD。与上述策略结构设计思路一致，增加整车与壁障的接触面积，在碰撞过程中壁障横截面上各处受力均匀，减小壁障变形标准差。
- 3) 台车 OLC。减小 OLC 的两个主要路径，其一，减小整车质量^[6]；其二，增加整车的碰撞空间。对基础车大幅减重或增加碰撞空间，设变难度和成本压力不易接受，因此保持当前台车 OLC。

综上，提出基础车 MPDB 碰撞相容性优化策略，即优化设计整车前端结构，来增加与壁障的接触面积，以达成消除壁障击穿和减小壁障变形标准差 SD 的目的。

3.3 前机舱结构设计

对于上文提出的应对策略给出前防撞梁和前纵梁等关键吸能结构件的设计建议，如下图 13 所示。首先提高防撞梁的强度，增加 Z 向高度，延迟碰撞过程中发生折弯的时刻，因为防撞梁折弯前可以尽可能维持横截面方向对壁障的侵入平顺均匀，还可以减小前纵梁 Y 向受力，使前纵梁在碰撞过程中进行稳定高效的折叠变形；其次延伸上纵梁至与前纵梁封板搭接，增加副车架纵梁，形成上中下三条传递路径分散碰撞载荷；然后增加前下防撞梁，X 向布置位置与前防撞梁一致，Y 向宽度约为整车宽度 90%。通过上述结构设计方案，使整车与 MPDB 壁障的接触面积最大化，并优化匹配前端结构刚度，使壁障在评级区域均匀变形，降低碰撞后壁障变形标准差。

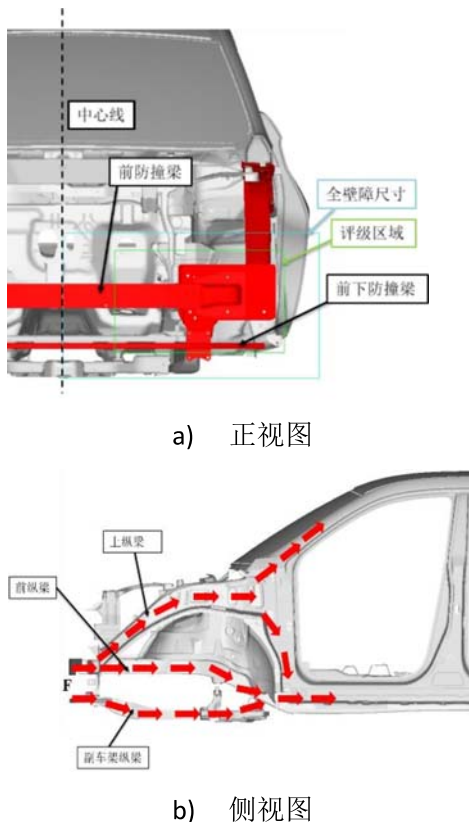


图 13 车前端关键结构设计

3.4 优化结果

如下图 14、15 和表 3 所示，优化设计后的车身结构碰撞相容性性能提升非常显著，不仅消除了壁障击穿现象，而且壁障变形非常均匀，壁障变形标准差从 176mm 下降至 59mm。台车 OLC 满足上文的应对策略定义，维持与基础车一致。碰撞相容性罚分从 6.9 下降至 1.3，提升 430%。MPDB 优化方案降低了因替换 ODB 工况导致的罚分影响，实现了优化设计意图。

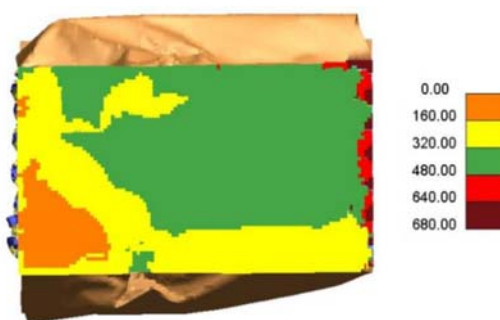


图 14 壁障变形云图

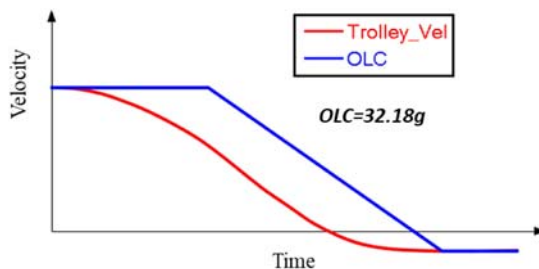


图 15 台车 OLC

碰撞相容性指标	壁障变形标准差 SD	OLC	壁障击穿	总罚分
优化方案	59 mm (h=8.6%)	32.18 g	否	1.3

表 3 碰撞相容性优化结果

4 结论

MPDB 工况作为 2020 版 E-NCAP 新增的整车评价工况引起了广泛关注。碰撞相容性是其评价的一个重要组成，也是车身设计的难点。本文通过实验方法对比了某 SUV 车型 MPDB 与 ODB 工况之间的差异，并应用仿真方法对车身结构进行优化，对比结果可以得出以下结论：

1. MPDB 相比现有 ODB 工况，试验内容与评价方法均有较大差异。MPDB 碰撞过程持续时间巨幅缩短，整车吸能量大幅减小。
2. 增加车身与壁障的接触面积能够有效防止壁障击穿，提高壁障变形均匀性。通过优化前防撞梁及增加前下防撞梁增加了车身与壁障的接触面积，避免载荷集中作用，使碰撞相容性得到明显改善。
3. 通过布置碰撞载荷传递路径可以改善车辆碰撞相容性。将上纵梁向前延伸与纵梁封板搭接，将碰撞载荷通过上纵梁传递至 A 柱后方，新增副车架纵梁，使载荷沿上中下三条路径传递，与壁障接触刚度分布均匀，有利于提高碰撞相容性。

参考文献

- [1] Volker, Sandner, Andreas, Ratzek. MPDB-Mobile Offset Progressive Deformable Barrier [J].24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV): Traffic Safety Through Integrated Technologies. 15-0389,2015.
- [2] Euro NCAP. Euro NCAP 2020 Roadmap[S].2015.5:<https://cdn.euroncap.com/media/16472/euro-ncap-2020-roadmap-rev1-march-2015.pdf>.
- [3] Shinsuke, S, Azusa, N.EVALUATION OF MOVING PROGRESSIVE DEFORMABLE BARRIER TEST METHOD BYCOMPARING CAR TO CAR CRASH TEST[Z].Honda R&D Co., Ltd. Automobile R&D Center,17-0278,2017.
- [4] Safety companion 2019 [Z]. Germany: Carhs,2019:36-40.
- [5] 水野幸治.汽车碰撞安全[M].人民交通出版社. 2016:125.
- [6] 周丹凤,涂金刚. 2020 版 Euro NCAP 碰撞 MPDB 测试对汽车设计的影响[J]. 计算机辅助工程,2018,27(Z1):57-61.

Abstract: Reference to the 2020 E-NCAP MPDB impact test, a physical vehicle test and CAE simulation of a listed SUV model of Jiangling Motors was carried out to evaluate the compatibility of the base model. Comparing the performance difference between MPDB and ODB test, present the countermeasures for optimizing the compatibility. An optimization design scheme for the key load path of the front end of the vehicle body is proposed, which can greatly improve the compatibility performance and provide reference for the new type model design.

Key Word: MPDB; ODB; Compatibility; Load Path