

Study on arm lifting strategy and occupant chest protection by optimization the ignition moment of side airbag

Shiyuan LIN¹, Feibing LEI¹, Suchun JI^{1*}, Gaole DAI¹, Wenlong CHEN¹

¹BYD AUTO INDUSTRY CO., LTD, Shenzhen, China

Email: ji.suchun@byd.com

Abstract: Side pole impact has been included in the scope of investigation of regulations or new car evaluation procedures in various countries, however, it is still a challenge and difficulty to formulate reasonable protection strategy of occupant chest. By analyzing the injury mechanism of the occupant's chest in side pole impacts, it is found that the position of the arm is a key factor that determines whether the injury of the dummy chest upper rib exceeded the standard. Combined with a specific car model, this paper formulates a strategy of optimizing the ignition moment of the side airbag to precise control of the dummy arm lift, and carries out the verification of the whole vehicle test. The test results show that by optimizing the ignition moment of the side airbag, the arm of the dummy can be accurately lifted, effectively avoiding the arm from squeezing the up ribs in the chest and reducing the lateral compression of the up ribs, so as to realize the effective protection of the chest of the occupant.

Keywords: Protection of occupant's chest; arm Lifting; Ignition moment of the side airbag

优化侧气囊点火时刻的抬手臂策略及乘员胸部保护研究

林诗远¹, 雷飞兵¹, 姬素春^{1*}, 代高乐¹, 陈文龙¹

¹ 比亚迪汽车工业有限公司, 深圳, 中国, 518119

Email: ji.suchun@byd.com

摘 要: 侧柱碰工况已被各国纳入法规或新车评价规程的考察范围。然而, 制定侧柱碰工况下乘员胸部的合理保护策略依旧是乘员保护的关键痛点及难点。针对这一问题, 本文分析了侧柱碰工况下 WorldSID 假人胸部的损伤机理, 发现碰撞过程中手臂位置是决定假人胸部上肋骨损伤是否超标的关键因素。在此基础上, 本文结合某一具体车型, 制定了优化侧气囊点火时刻的约束系统优化方案, 通过侧气囊对假人手臂的作用力精准控制假人抬手臂, 并进行了整车试验验证。试验结果表明, 优化侧气囊点火时刻, 可以将假人手臂精准抬起, 有效避免手臂挤压胸部上肋骨, 降低肋骨侧向压缩量, 从而实现对乘员胸部的有效保护。

关键词: 乘员胸部保护; 抬手臂; 侧气囊点火时刻

1 引言

目前, 侧面柱碰工况已被各国纳入法规或新车评价规程的考察范围, 中国 C-NCAP、欧盟 Euro NCAP 等均对侧面柱碰工况有明确的试验方法和评价方法^[1,2]。然而, 在侧面柱碰工况下, 乘员与车门之间仅存 150-250mm 距离, 胸部极易受到强烈的冲击载荷作用而发生损伤^[3]。因此, 制定侧柱碰工况下乘员胸部的合理保护策略依旧是乘员保护的关键痛点及难点, 也是本领域研究的热点^[4,5]。交通事故中乘员胸部的损伤形式主要以胸部与车身部件及约束系统之间的钝器撞击为主, 呈现出三种典型的损伤机理: 压缩、黏性载荷以及体内器官的惯性载荷。因此, 在汽车碰撞中, 胸部损伤的评判准则主要基于加速度、力、位移、黏性准则等物理量。就侧柱碰工况下的 WorldSID 假人而言, 其胸部损伤原因主要包括肩部力超标、胸部上肋骨压缩量超标、下肋骨压缩量超标等, 其中又以胸部上肋骨压缩量超标最为常见^[6-10]。鉴于此, 本文着重分析研究胸部上肋骨压缩量超标的原因及防护措施。造成胸部上肋骨

超标的原因复杂多样,根据外力的来源不同可以大致分为两类:一类是由于没有配置侧气囊或是胸部上肋骨未能受到侧气囊的有效保护,胸部上肋骨与手臂、侧围内饰发生硬接触,导致胸部上肋骨超标;另外一类主要是由于侧气囊刚度过大,侧气囊产生的力直接作用在假人胸部肋骨上,挤压胸肋骨,造成胸部肋骨压缩量超标^[11]。

值得注意的是,与正面碰撞不同,在侧面碰撞中乘员手臂几何位置处于胸部与车门之间,是影响乘员胸部损伤程度的关键因素之一,先前的研究也已经证实了这种影响^[12-14]。Cesari 等人通过尸体实验证实了将手臂置于撞击物与胸部之间能够影响胸部的损伤结果^[15]。Gierczycka 等人的研究也表明,在侧碰工况下乘员手臂充当了胸部与车身之间力传递的介质,手臂的位置对于胸部损伤具有极为重要的影响^[12]。相较于车门材料等因素,手臂位置的影响更为重要^[16]。该研究团队还进一步利用有限元工具分析了不同侧面碰撞工况下不同有限元假人的损伤状态,结果表明碰撞前手臂的位置对于胸部损伤均具有重要影响,通过调整碰撞前手臂位置可以很好的降低侧面碰撞中乘员胸部损伤^[13]。在侧柱碰工况下乘员手臂同样充当了胸部与车身之间力传递的介质,精确控制手臂的位置对于侧柱碰中乘员胸部保护同样具有重要意义,但是,截至目前,精准控制假人抬手臂策略的报道还比较少。

在侧柱碰撞过程中,通过侧气囊抬起假人手臂并精准控制假人手臂的位置,避免手臂挤压乘员胸部,车门与假人胸部之间的力通过侧气囊传递,可以充分发挥侧气囊的吸能缓冲作用,是保护假人胸部的理想策略。本文对某车型的侧柱碰结果进行分析,提出基于优化侧气囊点火时刻的假人抬手臂策略。通过计算碰撞过程中假人的侧面动态空间,结合侧气囊点火时刻优化,使侧气囊在假人和车门组成的受限空间内打开。当侧气囊在受限空间展开并与假人手臂在 Y 向产生重合时,侧气囊对假人手臂作用力的 Z 向分力更大,更有利于假人抬手臂。最后,本文通过整车试验验证了侧气囊点火时刻优化对假人抬手臂的效果,以及其对乘员胸部保护效果。

2 某车型的侧柱碰乘员胸部损伤现状

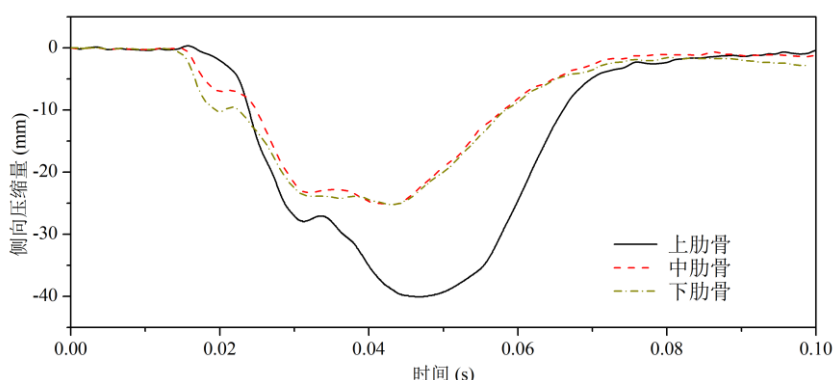


Figure 1. Displacement of the dummy ribs.

图 1 假人胸部肋骨压缩量。

本文中某车型按照 C-NCAP 侧面柱碰撞标准在企业内部进行碰撞试验,该车型配备了侧气囊,在侧面碰撞时对乘员生命安全进行保护。侧气囊的袋型选择 2D 气袋,设计了直径为 30 mm 的泄气孔,点火时刻为 8 ms。根据标准用假人胸部肋骨的侧向压缩量计算 WorldSID 假人的胸部损伤情况。图 1 显示了假人胸部肋骨的侧向压缩量,三条曲线分别代表着胸部上、中、下三根肋骨的侧向压缩量。其中,中肋骨和下肋骨侧向压缩量的峰值为 25.03 mm 及 26.28 mm,而上肋骨侧向压缩量为 39.92 mm,得 1.833 分,胸部得分率仅为 45.83%,其得分率低。

对碰撞过程假人胸部损伤进行分析发现,在碰撞发生后 31 ms 时,胸部上肋骨侧向压缩量出现第一个峰值。峰值时刻,手臂在侧气囊的作用下抬起一定高度,胸部上肋骨、手臂、侧气囊在高度方向处于重叠状态(图 2b),此时气囊刚度较大,挤压手臂进而挤压上肋骨形成了第一个峰值,此时峰值为 27.61 mm。由于此时车门侵入量较小,上肋骨的生存空间较大,因此胸部上肋骨侧向压缩量并未超标。在 31 ms 之后,由于侧面车门侵入加大,侧向空间被压缩,此时胸部上肋骨、手臂、侧气囊在 Z 轴方向仍然处于重叠状态(图 2c),胸部上肋骨被手臂的挤压严重程度进一步加剧。因此,上肋骨压缩量继续增加,在 47 ms 时刻出现胸部上肋骨的第二个峰值,此

时峰值为 39.92 mm。与中肋骨和下肋骨相比，此时上肋骨的压缩量明显更高。因此，为了提高胸部得分，更好地保护乘员胸部，需解决胸部上肋骨侧向压缩量超标的问题。而侧气囊能否有效地将手臂抬起来并精确控制位置，是优化胸部上肋骨侧向压缩量的关键。



Figure 2. Dummy response in side pole impact for a specific vehicle. (a) Dummy state of pre-crash, (b) Dummy state at 31 ms, (c) Dummy state at 47 ms.

图 2 某车型侧柱碰过程中假人响应。(a) 碰撞前假人状态，(b) 碰撞后 31 ms 时假人状态，(c) 碰撞后 47 ms 时假人状态。

3 抬手臂方法研究

3.1 假人抬手臂过程分析

对该车型碰撞过程中假人手臂进行受力分析，侧气囊在车门侵入推动或（和）气囊内气体流动的作用下与假人手臂接触后，对假人手臂产生作用力 $F_{\text{合}}$ ，该作用力可以分解为 Z 向和 Y 向的两个分力。 Z 向分力使假人手臂以肩部为轴点向上旋转运动， Y 向分力使假人手臂以肩部为轴点 Y 向旋转，整体表现出气囊挤抬手臂（图 3a）。针对该车型假人手臂抬起高度需要进一步提高的情况，增加侧气囊对假人手臂作用力的 Z 向分力是一个合理的优化思路。

经过对多次侧柱碰试验结果分析发现，侧气囊与乘员手臂接触面的形态和方向对 F_z 具有重要影响。通过平行于 $Y-Z$ 面的截图示意假人手臂和侧气囊的相互作用，当侧气囊展开过程不受车门限制时，倾向于形成如图 3b 所示的形态；当侧气囊在受限空间内展开时，侧气囊与手臂倾向于形成在 Y 向重叠的形态（图 3c），此时侧气囊对手臂的作用力 $F_{\text{合}}$ 与 Z 轴夹角更小，能够提高 Z 向分力，有利于假人抬手臂。定义 L/Q 为重叠率，其中 Q 是假人手臂宽度， L 是假人手臂至侧气囊边缘的长度（图 3c）。本文 3.2 部分详细讨论了通过计算侧面动态空间、结合点火时刻优化控制侧气囊展开空间，使侧气囊在假人手臂、座椅和车门组成的受限空间内展开，形成如图 3c 所示的形态，增加 F_z 并进一步提高假人手臂抬起的高度。

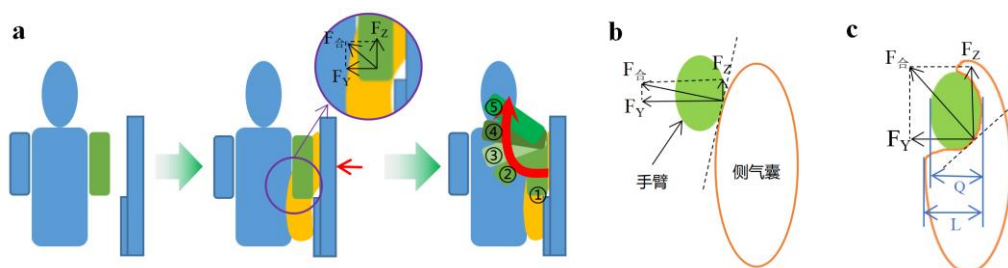


Figure 3. Analysis of the arm lift process. (a) Schematic diagram of the side airbag lifting dummy arm process. (b)-(c) Schematic diagram of the contact pattern between the dummy arm and the airbag.

图 3 假人抬手臂过程分析。(a) 侧气囊挤抬假人手臂过程示意图；(b)-(c) 假人手臂和气囊接触形态示意图

3.2 点火时刻优化

3.2.1 点火时刻优化原则

侧气囊在假人和车门组成的受限空间内展开更易与假人手臂形成图 3c 所示的形态，因此，计算车门和假人之间的侧面动态空间 D ，可以判断合适的侧气囊点火时刻。侧气囊点火时刻的选择，从侧气囊本身的性能角度，有三个基本原则：（一）假人和车门之间需要有足够大的侧面动态空间 D 确保侧气囊正常展开，侧气囊展开时车门的侵入量不能过大，即侧面空间不能过小；（二）手臂下方对应的侧气囊腔室与手臂需要有足够的重叠率 L/Q ，确保侧气囊能够将手臂抬起来，即侧气囊展开时车门有一定的侵入并与假人、座椅等内饰形成受限空间，即侧面空间不能过大；（三）气囊刚度应合理，需避免气囊刚度过小，导致胸部肋骨击穿，同时需要避免刚度过大，导致直接挤压胸部肋骨造成伤害。根据基本原则一，针对该车型侧气囊展开空间需求，假人肩部对应的位置侧气囊展开所需的最小有效空间为 30 mm，胸部、腹部及骨盆展开所需的最小有效空间分别为 100 mm，40 mm 及 40 mm。根据基本原则二，针对侧气囊与手臂的重叠率，在侧面侵入的带动下，扶手及下方区域的车门内饰往车内挤压侧气囊，该区域的侧气囊腔室挤到手臂，当侧气囊与手臂的 Y 向重叠率达 100% 以上，WorldSID 手臂可以被侧气囊成功抬至预定的高度。3.2.2 部分给出了假人侧面空间随时间变化（侧面动态空间 D ）的计算方法，3.2.3 部分根据基本原则一和基本原则二优化侧气囊点火时刻。

3.2.2 侧面动态空间计算方法

根据乘员的初始侧面空间（ D_0 ）和车门动态侵入量（ $D(t)$ ）来计算侧面动态空间 D ，进一步根据侧面动态空间和侧气囊展开需要的空间共同决定点火时刻。乘员的初始侧面空间如图 4 所示，按照试验规程，将座椅高度调至最低，前后方向调至中间向后 20 mm 的位置，摆放假人，正确定位之后，测量出假人各个部位的初始侧面空间。基于该车型的假人各个部位的初始侧面空间 D_0 如表 1 所示。

Table 1. Initial lateral space (D_0) for each part of the dummy.

表 1 假人各个部位的初始侧面空间（ D_0 ）

肩部/mm	胸部/mm	腹部/mm	骨盆/mm
113	175	130	126

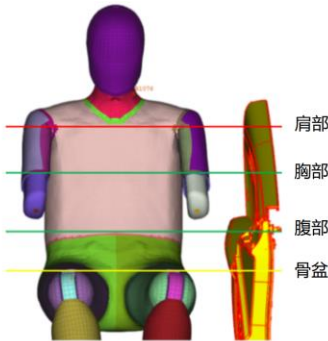


Figure 4. Schematic diagram of lateral space of the dummy

图 4 假人侧向空间示意图。

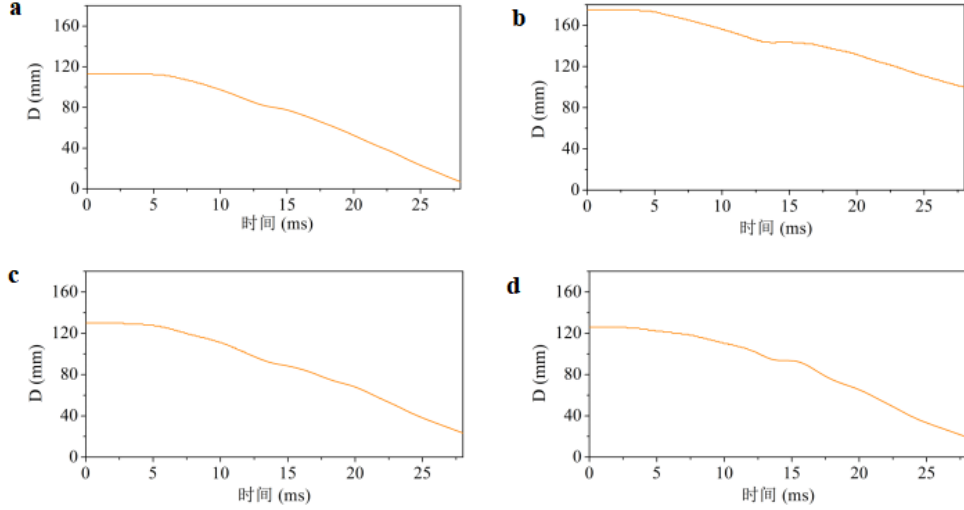


Figure 5. Dynamic lateral space ($D(t)$) of various parts of the dummy over time. (a) Shoulder, (b) Chest, (c) Abdomen, (d) Pelvic.

图 5 假人各个部位的侧面动态空间 ($D(t)$) 随时间的变化。(a) 肩部, (b) 胸部, (c) 腹部, (d) 骨盆。

车门动态侵入量 $D(t)$ 可以通过车门和车体的位移差求得, 即

$$D(t) = D(t)_{\text{车门}} - D(t)_{\text{车体}} \quad (1)$$

其中 $D(t)_{\text{车门}}$ 和 $D(t)_{\text{车体}}$ 分别是碰撞过程中车门和车体的位移, 可以通过碰撞过程车门和车体的加速度二次积分得到, 即

$$D(t)_{\text{车门}} = \iint [a(t)_{\text{车门}} dt] dt \quad (2)$$

$$D(t)_{\text{车体}} = \iint [a(t)_{\text{车体}} dt] dt \quad (3)$$

其中 $a(t)_{\text{车门}}$ 和 $a(t)_{\text{车体}}$ 分别是碰撞过程中车门和车体的 Y 向加速度。车体的加速度由右侧 B 柱下加速度传感器获得。同时, 侧柱碰试验之前, 在门钣金的内板上, 找到肩部、胸部、腹部及骨盆对应的位置, 贴上加速度传感器, 用以采集各个位置的 Y 向加速度。

根据乘员的初始侧面空间和车门动态侵入量, 计算出乘员各个部位在 t 时刻剩余的侧面动态空间如下公式:

$$D = D_0 - D(t) \quad (4)$$

图 5a 给出了该车型侧柱碰中假人肩部、胸部、腹部及骨盆位置处的侧面动态空间随时间的变化。

3.2.3 点火时刻优化

根据公式 (4) 求出不同时刻侧气囊完全展开状态时的侧面空间, 基于该车型侧气囊完全展开需要 11 ms 的时间, 图 6 给出了点火时刻+11 ms 时 (即侧气囊完全展开时刻) 的假人肩、胸、腹和骨盆各部位的侧面动态空间, 并根据侧面动态空间是否满足 3.2.1 部分的基本原则一将点火时刻设定为推荐 (绿色)、可接受 (黄色)、不可接受 (红色) 的区间。同时根据侧面动态空间计算得出侧气囊与假人手臂的重叠率, 并根据 3.2.1 部分的基本原则二将点火时刻设定推荐、可接受、不可接受的区间。如图所示, 当点火时刻为 7 ms 至 9 ms 时, 假人肩部、胸部、腹部和骨盆位置侧面动态空间比较大, 满足基本原则一, 但此时侧气囊与假人手臂的重叠率不满足基本原则二, 侧气囊对假人手臂作用力的 Z 向分力较小, 假人抬手臂不明显, 可能造成手臂挤压胸部对乘员胸部造成损伤。总体风险评估为不可接受的点火时刻。点火时刻为 13 ms 时, 侧气囊完全展开时假人肩部侧面动态空间为 27.5 mm, 肩部侧面动态空间太小, 不满足基本原则一, 总评风险评估为不可接受的点火时刻。点火时刻为 10 ms 至 12 ms 是, 肩部、胸部、腹部、骨盆各个部位的侧面动态空间满足基本原则一的要求, 同时假人手臂和侧气囊的重叠率满足基本原则二的要求, 总体风险评估为可接受的点火时刻。鉴于 ECU 点火存在误差, 将侧柱碰工况侧气囊的点火时刻理论设计值优化为 11 ms (首轮试验 8 ms 点火)。

点火时刻	7 ms	8 ms	9 ms	10 ms	11 ms	12 ms	13 ms	14 ms
侧气囊完全展开时刻	18 ms	19 ms	20 ms	21 ms	22 ms	23 ms	24 ms	25 ms
肩部	62.1	56.7	51.1	45.3	39.4	33.4	27.5	21.6
胸部	136.4	133.3	129.7	125.7	121.5	117.2	113.0	108.8
腹部	75.8	71.4	66.6	61.2	55.4	49.4	43.5	37.8
骨盆	76.7	70.9	65.0	58.8	52.4	46.0	40.0	34.3
重叠率 L/Q (>100%)	<100%			>100%				
总体风险评估	不可接受			可接受		不可接受		

Figure 6. The optimization results of side airbag ignition moment.

图 6 侧气囊点火时刻优化结果

4 整车试验验证

4.1 假人抬手臂效果

针对侧气囊点火时刻优化方案，进行整车试验验证抬手臂效果及对乘员胸部保护效果。未经过优化的基础参数条件下，假人手臂在碰撞过程中的状态如图 7a 所示，47 ms 时手臂与乘员胸部上肋骨在 Z 向有重叠，未能有效抬起。点火时刻往后延至 11 ms 的优化方案，假人手臂在碰撞后 47 ms 时能被有效抬起，从试验录像上判断，手臂至少抬至与躯干垂直的状态（图 7b）。并且，在碰撞后 19 ms 至 25 ms 过程中，出现了明显假人手臂和侧气囊重叠率大于 100% 的现象，如图 7 中给出了碰撞后 20 ms 时假人手臂与侧气囊的接触形态。试验结果表明，优化侧气囊点火时刻，使其在受限空间内展开，增加对假人手臂的 Z 向作用力，能够起到抬手臂的效果。

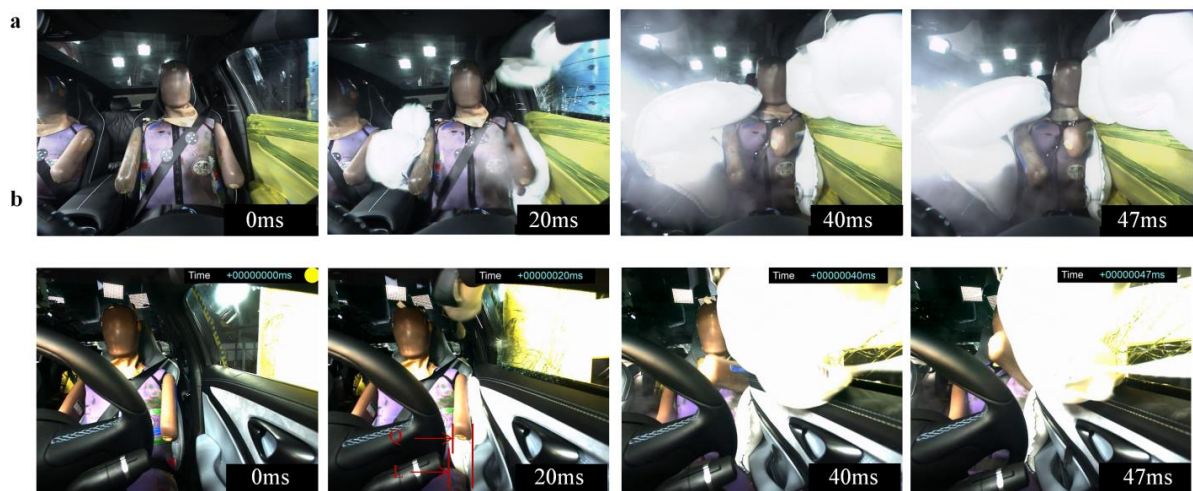


Figure 7. Dummy arm status before and after the optimization of the side airbag ignition moment. (a) Dummy arm status before and after optimization, (b) Dummy arm status after optimization.

图 7 优化前后假人手臂状态。(a) 点火时刻优化前假人状态；(b) 点火时刻优化后假人状态。

4.2 假人胸部伤害

对点火时刻优化方案的假人胸部伤害进行分析,假人胸部上、中、下肋骨的侧向压缩量如表 2 所示。其中,胸部上肋骨侧向压缩量为 23.5 mm,相比于基础参数试验得到的胸部上肋骨侧向压缩量有明显降低,侧向压缩量没有超标。胸部中肋骨和下肋骨的侧向压缩量与基础参数试验结果相差不大。点火时刻优化方案的试验结果,按照 C-NCAP 标准,假人胸部得分 4 分。试验结果说明,假人抬手臂可以增加乘员胸部生存空间,减小乘员胸部伤害。

Table 2. Comparison of dummy injury before and after ignition moment optimization.

表2 点火时刻优化前后假人伤害对比

系统方案	胸部得分	肋骨侧向压缩量		
		上/mm	中/mm	下/mm
基础参数试验 (点火时刻优化前)	1.833	39.9	25.1	25.2
点火时刻优化方案试验	4.000	23.5	24.2	27.0

图 8 对比了基础参数试验和点火时刻优化的胸部上肋骨侧向压缩量曲线。从曲线斜率上看,第一个峰值之前的曲线斜率代表侧气囊抬手臂的快慢,手臂抬得越快,挤压胸部上肋骨的程度就越少,其曲线斜率也就小。由图可知,对于点火时刻优化的碰撞试验,碰撞后 33 ms 时产生了侧向压缩量峰值,可以认为是侧气囊展开后刚度较大,挤压手臂进而挤压上肋骨形成了第一个峰值。在 33 ms 之后,虽然侧面车门侵入加大,侧向空间被压缩,但是,此时手臂在侧气囊作用下继续抬升,与假人胸部上肋骨在 Z 向没有重叠。因此,乘员胸部上肋骨的生存空间充足,没有进一步被压缩,其侧向压缩量没有持续增加。同时,对假人 Y 向肩部力进行分析(图 9),发现优化点火时刻后,肩部力峰值从 2165 N 增加至 2305 N,肩部力略微增加但仍在法规要求范围内。进一步验证了抬手臂对乘员胸部的保护效果。

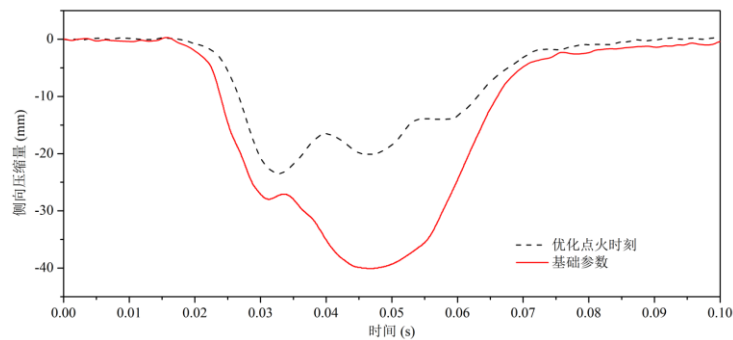


Figure 8. Displacement of the dummy upper ribs before and after the ignition moments optimize.

图 8 侧气囊点火时刻优化前后假人胸部上肋骨侧向压缩量。

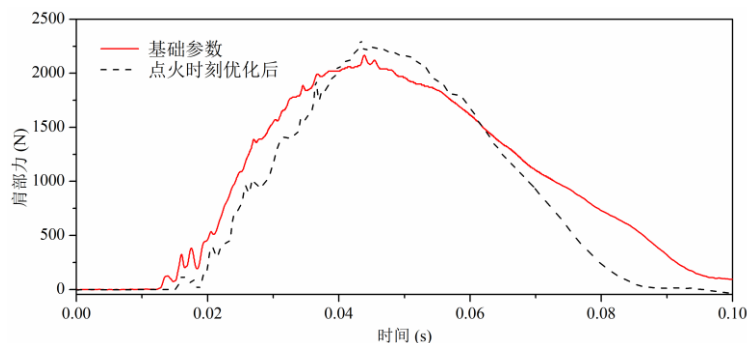


Figure 9. Shoulder Force-Y of the dummy before and after the ignition moments optimize.

图9 侧气囊点火时刻优化前后假人Y向肩部力对比。

5 结论

通过对假人胸部损伤的分析发现,侧柱碰撞过程中假人手臂位置是影响胸部上肋骨损伤的主要因素之一,通过气囊精准抬起假人手臂,可以避免手臂挤压胸部上肋骨进而导致胸部损伤超标的风险,从而实现对乘员胸部的有效保护。本文提出了通过优化侧气囊点火时刻精准控制侧气囊抬手臂的策略。针对某车型假人手臂抬起高度较低,挤压胸部上肋骨的问题,优化点火时刻,使侧气囊在假人、车门组成的受限空间内展开,增加侧气囊与假人手臂的Y向重叠率,进而增加侧气囊对假人手臂的Z向分力,提高假人手臂抬起高度,避免挤压胸部,实现对乘员胸部的保护。最后通过整车试验,验证了点火时刻优化的碰撞方案抬手臂效果和对乘员胸部损伤的保护效果。

参考文献 (References)

- [1] 中国汽车技术研究中心.C-NCAP 管理规则(2021版)[EB/OL].(2020-09-17)[2023-10-10]. <https://www.c-ncap.org.cn>.
- [2] European New Car Assessment Programme Committee. European New Car Assessment Programme (Euro NCAP), 2020 [S/OL]. (2020-09-17)
- [3] 王东阳. 某款轿车在侧面柱碰中车体耐撞性与乘员损伤的仿真分析[D].兰州交通大学, 2022:2-3.
- [4] Choo Y., Kim O. H., Lee K. H., Kong J. S., Kang G. W., Kim S.C., Shin K. S. Factors of severe injuries associated with side pole collisions based on field vehicle collision investigation[C]. 27th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, 2023.
- [5] Huang Z., Zhang B., Wang L., Liu C., Zhang X. Experimental study on side pole collision and deformable barrier collision of car[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1549: 032120.
- [6] Hallman J.J., Yoganandan N., Pintar F.A. Thoracic Injury Metrics With Side Air Bag: Stationary and Dynamic Occupants[J]. Traffic Injury Prevention, 2010, 11: 433-442.
- [7] 卢静, 郑颖, 刘玉云, 欧阳俊. 轿车侧面柱碰撞乘员损伤机理研究[J]. 汽车工程师, 2019, 1: 36-38.
- [8] 姜剑. 正面碰撞中锁止舌片对乘员胸部损伤的研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(18): 112-115.
- [9] 唐梅. 不同侧面碰角度对驾驶员损伤研究[D]. 西华大学, 2020: 12-13.
- [10] 王琦. 轿车侧面碰撞中驾乘人员安全防护方法研究[D]. 上海工程技术大学, 2019: 31-32.
- [11] Hallman J.J., Yoganandan N., Pintar F.A. Door velocity and occupant distance affect lateral thoracic injury mitigation with side airbag[J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43: 829-839.
- [12] Gierczycka D., Cronin D. S. Occupant thorax response variations due to arm position and restraint systems in side impact crash scenarios[J]. Accident Analysis and Prevention, 2017, 106: 173-180.
- [13] Gierczycka D., Cronin D. Importance of impact boundary conditions and pre-crash arm position for the prediction of thoracic response to pendulum, side sled, and near side vehicle impacts[J]. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 2021, 24(14): 1531-1544.
- [14] 王鹏翔, 商恩义, 李月明, 习波波. 基于侧面柱碰撞试验的侧气囊开发方案探讨[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(3): 298-307.
- [15] Cesari D., Ramet M., Bloch J. Influence of Arm Position on Thoracic Injuries in Side Impact[J]. Education Inquiry (Co-Action Publishing), 1981.
- [16] Gierczycka D., Watson B., Cronin D. Investigation of occupant arm position and door properties on thorax kinematics in side impact crash scenarios-comparison of ATD and human models[J]. International Journal of Crashworthiness, 2015, 20(3-4):242-269.