

• 2024年车辆安全与智能交通国际学术会议专题 •

基于车辆侧面结构特性的乘员胸腹部保护约束系统匹配研究

姬素春^{1,2} 罗刚¹ 蔡娅妮¹ 曾董¹ 林诗远¹ 雷飞兵¹

(1. 比亚迪汽车工业有限公司, 深圳 518119; 2. 中国科学技术大学, 合肥 230027)

【摘要】针对侧面柱碰撞工况安全性能开发中初始侧面空间、速度波形等车辆结构特性与乘员损伤的关系尚不明确, 缺少基于车辆结构特性的侧气囊匹配策略的问题, 提出了侧面柱碰撞乘员载荷准则(POLC), 将车辆侧面结构特性与乘员损伤相关联, 并根据其与乘员平均加速度耐受极限 a_{ave_max} 的相对大小将车辆分为两类, 对于POLC小于 a_{ave_max} 的某车型, 从乘员运动学的角度分析其匹配的侧气囊变形量, 并从乘员躯干部分受力限值的角度分析侧气囊受力-变形量曲线是否符合乘员保护需求, 以期能为车辆碰撞安全性能开发初期车辆侧面结构特性设计提供理论依据。

关键词: 侧面结构特性 侧面柱碰撞乘员载荷准则 乘员损伤 侧气囊

中图分类号: U467.14 **文献标志码:** A **DOI:** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250024

Research on Matching of Occupant Chest & Abdominal Protection Restraint System Based on Vehicle Side Structural Characteristics

Ji Suchun^{1,2}, Luo Gang¹, Cai Yani¹, Zeng Dong¹, Lin Shiyuan¹, Lei Feibing¹

(1. BYD Auto Industry Co., Ltd., Shenzhen 518119; 2. University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

【Abstract】In the safety property development of side pole under crash condition, the relationship between vehicle structural characteristics (such as initial side space, speed waveform) and occupant injury is not uncertain, and there are few strategies for matching side airbags to vehicle structural characteristics. In order to address the above issues, this paper proposes a lateral Pole collision Occupant Load Criterion (POLC) to correlate the structural characteristics of the vehicle's side structure and occupant injuries, and categorize vehicles into two groups based on the relative magnitude of their POLC values to the occupant's average acceleration tolerance limit a_{ave_max} . For a given vehicle A with a POLC value less than a_{ave_max} , the paper analyzes deformation of the side airbag matched for the vehicle from the perspective of occupant kinematics, then analyzes whether the side airbag stress-deformation curve meet occupant protection demand from the perspective of stress limit of occupant torso, in an attempt to provide a theoretical basis for the design of vehicle side structure characteristics at the early stage of vehicle crash safety development.

Key words: Vehicle side structural characteristics, POLC, Occupant injury, Side airbag

【引用格式】姬素春, 罗刚, 蔡娅妮, 等. 基于车辆侧面结构特性的乘员胸腹部保护约束系统匹配研究[J]. 汽车工程师, 2025(6): 9-15.

JI S C, LUO G, CAI Y N, et al. Research on Matching of Occupant Chest & Abdominal Protection Restraint System Based on Vehicle Side Structural Characteristics[J]. Automotive Engineer, 2025(6): 9-15.

1 前言

数据显示, 在侧面碰撞导致乘员死亡的故事中, 约有38%是汽车与路旁的树木或电杆等柱状物

相撞导致的^[1-3]。因此, 侧面柱碰撞逐渐受到重视, 侧面柱碰撞中乘员损伤的研究也逐渐深入。Otte等对客车侧面柱碰撞事故数据的分析结果显示, 乘员舱变形程度是乘员损伤最为显著的影响因素^[4]。乘

员的生存空间与车身变形量、初始侧面空间、碰撞速度波形紧密相关,但目前的研究集中于车身变形量对乘员损伤的影响,未考虑初始侧面空间和碰撞速度波形等结构特性^[5-11]。随着汽车行业的快速发展,车辆间初始侧面空间的差异逐渐增大,因此需要综合考虑多种结构特性对乘员损伤的影响。

在车辆碰撞安全性能开发过程中,车辆的初始侧面空间、车身变形量、碰撞速度波形等结构特性的开发先于乘员保护约束系统的开发,而约束系统开发过程中修改结构特性会造成大量的资源浪费。刘玉涛等研究认为,可以通过乘员载荷准则(Occupant Load Criterion, OLC)表征正面碰撞的剧烈程度^[12-13]。目前,国内外已有较多文献研究了正面碰撞加速度波形与乘员损伤的关联关系,并用于指导车体结构设计^[14-15],而侧面碰撞剧烈程度的相关研究较少^[16]。

本文参考正面碰撞 OLC 的概念,提出关联初始侧面空间、车身变形量、碰撞速度波形等侧面结构特性与乘员损伤之间关系的侧面柱碰撞乘员载荷准则(lateral Pole collision Occupant Load Criterion, POLC),综合考虑侧面柱碰撞过程中多个结构特性对乘员损伤的影响。在车辆碰撞安全性能开发初期,评估车辆结构特性能否满足乘员保护开发需求,并根据车型 POLC 与侧面柱碰撞过程的乘员平均加速度耐受阈值 $a_{ave,max}$ 的相对大小将车型分为两类。对于 POLC 小于 $a_{ave,max}$ 的某车型,从乘员运动学角度分析所匹配的侧气囊变形量,从乘员躯干部分受力限值的角度分析满足乘员保护需求的侧气囊受力-变形量曲线特性,为新型约束系统开发提供理论依据。

2 侧面柱碰撞乘员载荷准则

2.1 侧面柱碰撞及其过程中乘员运动分析

参考中国新车评价规程(China New Car Assessment Program, C-NCAP)对侧面柱碰撞的试验要求,如图 1 所示,滑动或驱动车辆,使驾驶员侧与刚性柱发生碰撞。平行于车辆碰撞速度矢量的垂直面与车辆纵向中心线之间的角度为 $75^\circ \pm 3^\circ$ 。刚性柱表面中心线对准车辆碰撞侧外表面与通过假人头部重心垂直平面的交叉线,即碰撞基准线,在与车辆运动方向垂直的平面上,与碰撞基准线的距离在 ± 25 mm 范围内。车辆的碰撞速度为 $32 \text{ km/h} \pm 0.5 \text{ km/h}$,并且该速度至少在碰撞前 0.5 m 距离内保持稳定。在前排驾驶员位置放置第 50 百分位 WorldSID 假人,以测量

车内乘员损伤情况。

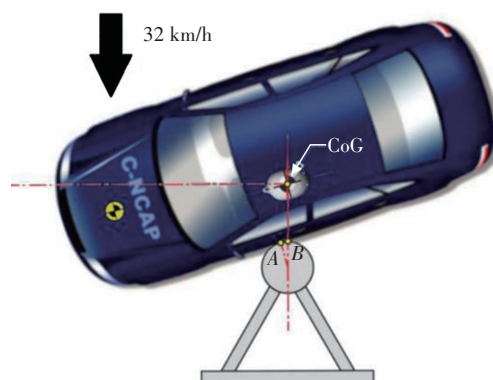


图1 《C-NCAP管理规则》中的侧面柱碰撞试验形态^[6]

侧面柱碰撞中,乘员损伤的主要原因是车门变形挤压乘员侧面生存空间,进而挤压乘员。其中,乘员躯干部分是主要受力部位,乘员呈现出压缩、粘性载荷及体内器官的惯性载荷3种典型损伤机理,因此假人躯干损伤的评判准则主要基于加速度、力、位移、粘性指标等物理量。对于驾驶员位置的 WorldSID 假人,C-NCAP 的评分原则是设定高性能限值和低性能限值:高性能限值和低性能限值分别对应每个部位的最高得分和0分;若同一部位存在多个评价指标,则采用其中的最低得分代表该部位的得分;若相应部位损伤指标超出极限值,则该假人所有部位得分均为0分。第50百分位 WorldSID 假人各部位高性能限值和低性能限值如表1所示。

表1 驾驶员位置 WorldSID 假人损伤指标

部位	评价参数	C-NCAP 限值	
		高性能限值	低性能限值
头部	头部伤害指数 HIC_{15}	500	700
	累积 3 ms 合成加速度/g	72	80
胸部	上肋骨侧向压缩量/mm	28	50
	中肋骨侧向压缩量/mm		
	下肋骨侧向压缩量/mm		
	罚分项	上肋骨粘性指标(VC)/ $m \cdot s^{-1}$	1.0
		中肋骨粘性指标(VC)/ $m \cdot s^{-1}$	
	下肋骨粘性指标(VC)/ $m \cdot s^{-1}$		
	肩部侧向力 F_y /N		3 000
腹部	上肋骨侧向压缩量/mm	47	65
	下肋骨侧向压缩量/mm		
	罚分项	上肋骨粘性指标(VC)/ $m \cdot s^{-1}$	1.0
下肋骨粘性指标(VC)/ $m \cdot s^{-1}$			
骨盆	耻骨结合点力峰值/N	1 700	2 800

2.2 侧面柱碰撞乘员载荷准则

侧面柱碰撞中,乘员的运动过程按照时间线可分为两段:乘员与约束系统接触前(第0 ms至 t_1 时刻),以初速度 v_0 做匀速运动;乘员与约束系统接触后(t_1 时刻至 t_2 时刻)做匀减速运动至速度与车辆相同,其中, t_1 时刻为侧气囊完全展开与乘员接触的时刻, t_2 时刻为乘员速度与车辆速度相等的时刻。为避免乘员与车门护板等刚性结构直接接触,第0 ms至 t_2 时刻时间范围内乘员与车辆的相对位移 S_d 应小于侧面动态空间 D ,其中 D 为车辆初始侧面空间 S_0 与车身变形量 S_q 之差,极限情况下, $S_d=D$ 。如图2a所示, $S_d < D$ 时,乘员与车门护板之间存在一定距离,为侧气囊等约束系统的空间;如图2b所示,极限情况下 $S_d=D$,乘员与车门护板之间没有间隙,乘员与车门护板等刚性结构直接接触。在给定车辆初始侧面空间 S_0 、车身变形量 S_q 和车辆的非撞击侧B柱速度波形的情况下,在速度-时间曲线(见图3)上,乘员与车辆的速度-时间曲线所围成的面积为乘员与车辆的相对位移 S_d , t_1 时刻至 t_2 时刻时间段内乘员速度-时间曲线的平均斜率代表乘员的平均加速度 a_{ave} ,定义为侧面柱碰撞乘员载荷准则(POLC),与乘员受力载荷呈线性关系。

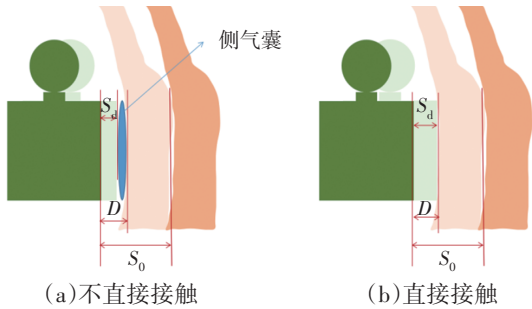


图2 乘员与车门护板的空间位置示意

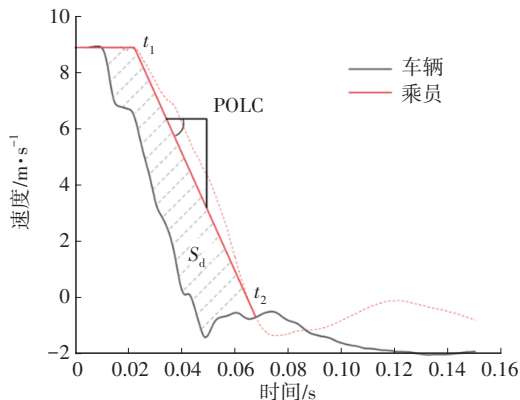


图3 侧面柱碰撞乘员载荷准则的定义

乘员在 t_1 时刻至 t_2 时刻时间段内的速度可表示为:

$$v_d = v_0 - C_{POL} \cdot (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: v_d 为乘员的速度; v_0 为乘员的初速度; C_{POL} 为侧面柱碰撞乘员载荷准则; t_1 为乘员与约束系统接触的时刻,侧气囊完全展开与乘员接触发生在碰撞后约第0.022 s,故取 $t_1=0.022$ s。

S_d 的计算公式为:

$$S_d = \int_0^{0.022} v_0 dt + \int_{0.022}^{t_2} [v_0 - C_{POL}(t - 0.022)] dt - \int_0^{t_2} v_B dt \quad (2)$$

式中: v_B 为车辆的速度,由非撞击侧B柱的加速度传感器积分得到,表示车辆的速度波形。

为避免乘员与车门护板直接接触,定义如图2b所示的极限情况下乘员与车辆之间的相对位移等于侧面动态空间:

$$S_d = D = S_0 - S_q \quad (3)$$

由 t_2 时刻乘员的速度与车辆的速度相同可知:

$$v_0 - C_{POL}(t_2 - 0.022) = v_B(t_2) \quad (4)$$

已知车辆的初始侧面空间 S_0 、车身变形量 S_q 和车辆的速度波形,可以根据式(1)~式(4)给出车辆的POLC。POLC越大,表示该车型发生侧面柱碰撞时对乘员的载荷作用越大;POLC超过一定阈值时,预估该车型对乘员载荷作用过大,需要优化车辆结构特性以满足乘员保护开发需求。

2.3 POLC与乘员损伤的关联性分析

假设车门及侧气囊等对乘员施加的力 F_0 越大,则乘员的平均加速度 a_{ave} 越大、损伤越严重,故碰撞过程的 a_{ave} (POLC)可用于表征乘员损伤^[13]。本文统计分析了19次侧面柱碰撞试验过程中假人平均加速度 a_{ave} 与躯干各部分损伤的关系,根据《C-NCAP管理规则》要求的假人肩部力、胸部肋骨压缩量、腹部肋骨压缩量和耻骨力等损伤指标的高性能限值给出乘员平均加速度耐受阈值 $a_{ave,max}$ 。

其中,假人的平均加速度 a_{ave} 通过假人第四胸椎(T4)处加速度传感器获取,具体为将假人的加速度-时间曲线进行积分转化为速度-时间曲线,用第35~55 ms时间段速度-时间曲线拟合出碰撞过程第50百分位WorldSID假人的平均加速度 a_{ave} ,如图4所示。假人躯干各部分损伤采用归一化的指标进行整体评价,定义为加权伤害指数(Weighted Injury Cost, WIC)。以《C-NCAP管理规则》中各损伤指标的高性能限值作为基准,定义假人躯干各部分损伤指标的加权伤害指数^[14]为:

$$C_{wi} = \frac{1}{7} \cdot \left(\frac{F_y}{3} + \frac{L_1}{28} + \frac{L_2}{28} + \frac{L_3}{28} + \frac{L_{A1}}{47} + \frac{L_{A2}}{47} + \frac{F_{pub}}{1.7} \right) \quad (5)$$

式中: F_y 为肩部侧向力, L_1 、 L_2 、 L_3 分别为胸部上肋骨、中肋骨、下肋骨的压缩量, L_{A1} 、 L_{A2} 分别为腹部上肋骨、下肋骨的压缩量, F_{pub} 为骨盆处耻骨力。

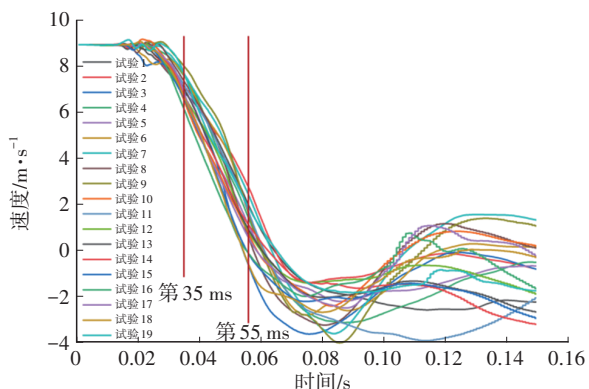


图4 侧面柱碰撞过程中假人的速度-时间曲线

图5显示了WIC与 a_{ave} 的线性回归关系,可以看出二者存在明显的线性关系^[14],线性回归决定系数 $R^2=0.51$ 。在车型开发中,假人损伤通常需预留20%的余量,即 $WIC \leq 0.8$ 。将 $WIC=0.8$ 时的 a_{ave} 定义为乘员平均加速度耐受阈值 $a_{ave,max}$,具体为 263 m/s^2 。

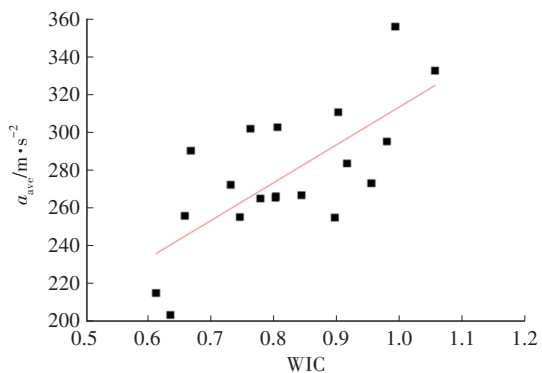


图5 WIC与 a_{ave} 的线性回归关系

根据车辆POLC与 $a_{ave,max}$ 的相对大小将车辆分为两类:针对车辆POLC不大于 $a_{ave,max}$ 的车型,在乘员不与车门护板直接接触的情况下乘员损伤可满足C-NCAP标准要求;针对车辆POLC大于 $a_{ave,max}$ 的车型,需要评估乘员与车门护板等刚性结构发生直接接触时对乘员损伤的影响。

3 约束系统匹配

以POLC小于 $a_{ave,max}$ 的某车型为例分析侧气囊匹配策略。该车型的初始侧面空间 $S_0=0.198 \text{ m}$ 。在车辆结构特性设计阶段,建立有限元仿真模型计算

其侧面动态空间和速度波形,如图6、图7所示,得到POLC为 166 m/s^2 ,且 $t_1=0.022 \text{ s}$ 、 $t_2=0.097 \text{ s}$,对应的侧面动态空间分别为 0.161 m 、 0.053 m 。

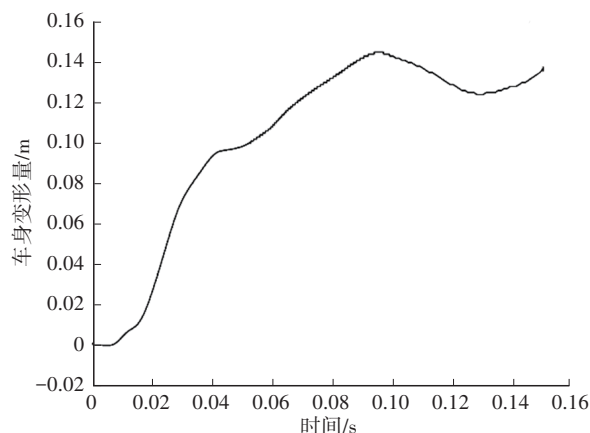


图6 某车型车身变形量随时间变化情况

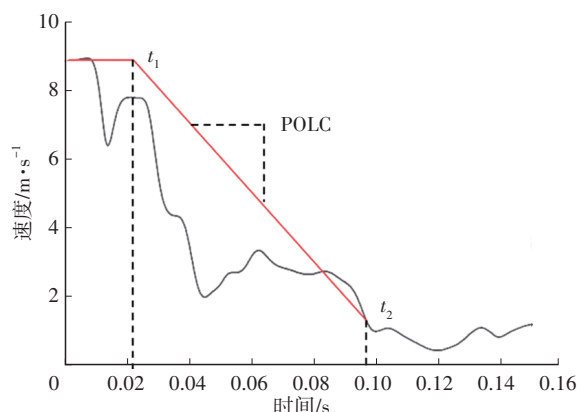


图7 某车型的速度波形及POLC

3.1 碰撞中乘员运动规划

分析碰撞过程的 a_{ave} ,为避免 t_1 时刻至 t_2 时刻时间段内乘员与车门护板等刚性结构直接接触,该时间段内 a_{ave} 应不小于该车型的POLC值 166 m/s^2 ,考虑极限情况, $a_{ave}=166 \text{ m/s}^2$ 。为避免 a_{ave} 过大导致胸部肋骨压缩量超标,应保证 t_1 时刻至 t_2 时刻时间段内 $a_{ave} \leq a_{ave,max}=263 \text{ m/s}^2$,如图8所示,其中, t_2 时刻为乘员平均加速度为 263 m/s^2 时,乘员速度与车辆速度相同的时刻。考虑极限情况, $a_{ave}=263 \text{ m/s}^2$ 、 $t_2'=0.051 \text{ s}$,此时侧面动态空间 $D_2'=0.099 \text{ m}$ 。分析碰撞过程乘员与车辆的相对位移 S_d ,为避免第 0 ms 至 t_2 时刻时间段内乘员与车门护板等刚性结构直接接触,应保证该时间段内 $S_d \leq D$,考虑极限情况 $a_{ave}=166 \text{ m/s}^2$, t_2 时刻的侧面动态空间 $D_2=0.053 \text{ m}$,即 $S_d \leq 0.053 \text{ m}$ 。考虑另一极限情况,为避免第 0 ms 至 t_2' 时刻时间段内 $a_{ave} > 263 \text{ m/s}^2$,计算 $a_{ave}=263 \text{ m/s}^2$ 时, t_2' 时刻乘员与车辆的相对位移 $S_d'=0.022 \text{ m}$,为控制 $a_{ave} \leq 263 \text{ m/s}^2$,应保证 $S_d' \geq 0.022 \text{ m}$ 。

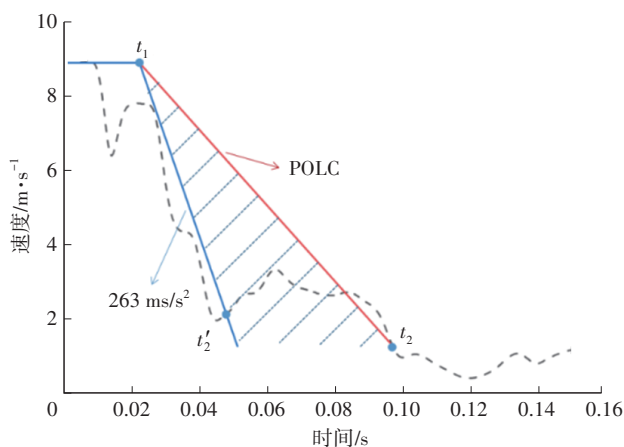


图8 乘员运动过程的平均加速度规划

3.2 乘员受力分析

为使乘员损伤指标满足C-NCAP标准要求,车门护板和侧气囊作用于乘员的力应在乘员受力极限范围内,假人躯干部分的受力极限可由肩部、胸部、腹部和骨盆等关键位置的受力极限叠加计算^[17]:

$$F_{\text{dummy}} = F_{\text{sd}} + F_{\text{cst}} + F_{\text{abd}} + F_{\text{pel}} \quad (6)$$

式中: F_{sd} 为肩部受力极限, F_{pel} 为耻骨受力极限, F_{cst} 、 F_{abd} 分别为胸部、腹部受力极限。

参考C-NCAP标准,肩部力应小于3 kN、耻骨力高性能限值为1 700 N,预留20%损伤余量,取 $F_{\text{sd}}=2 400 \text{ N}$ 、 $F_{\text{pel}}=1 360 \text{ N}$;根据WorldSID假人胸部和腹部肋骨动态响应特性计算^[18],并参考静态试验结果,假人单根胸部肋骨压缩量为22 mm时(C-NCAP标准规定的胸部肋骨压缩量高性能限值为28 mm),假人对冲击头的反作用力约为600 N,3根胸部肋骨的受力叠加可得 $F_{\text{cst}}=1 800 \text{ N}$,假人单根腹部肋骨压缩量为38 mm时(C-NCAP标准规定的腹部肋骨压缩量高性能限值为47 mm),假人对冲击头的反作用力约为800 N,2根腹部肋骨的受力叠加为 $F_{\text{abd}}=1 600 \text{ N}$ 。综上,假人躯干部分的受力极限 $F_{\text{dummy}}=7 160 \text{ N}$ 。

3.3 侧气囊匹配

特定车型的侧气囊匹配过程即实现乘员运动参数规划和满足乘员受力需求的侧气囊选型过程,从侧气囊变形量和侧气囊刚度(受力-变形曲线)两个方面进行分析。

首先,基于乘员与车辆的相对位移 S_d 和车辆的侧面动态空间 D 分析侧气囊的变形量要求。由3.1节分析可知,为避免第0 ms至 t_2 时刻时间段内乘员与车门护板直接接触,考虑极限情况下的碰撞过程,乘员的平均加速度 a_{ave} 等于该车型

的POLC。此时, t_2 时刻乘员与车门护板的间距为0 m,侧气囊的变形量等于 t_1 时刻的动态侧面空间 $D_1=0.161 \text{ m}$,如图9所示。为避免 a_{ave} 过大导致乘员损伤指标超标,考虑极限情况碰撞过程, $a_{\text{ave}}=a_{\text{ave,max}}$ 。此时, t'_2 时刻侧气囊的厚度从 D_1 降为 $(D_2-S'_d)$,侧气囊的变形量为 $[D_1-(D_2-S'_d)]$,如图10所示,为0.114 m。因此,侧气囊的变形量需控制在0.114~0.161 m范围内。

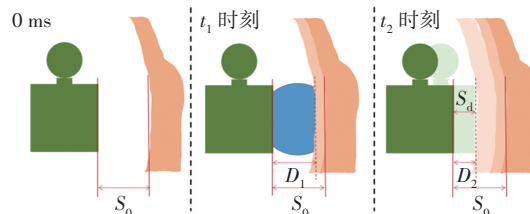


图9 a_{ave} 等于POLC情况下乘员与车门护板相对空间示意

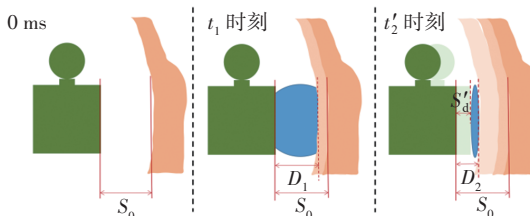


图10 a_{ave} 等于 $a_{\text{ave,max}}$ 情况下乘员与车门护板相对空间示意

其次,根据侧气囊的力-变形量曲线分析侧气囊变形量在0.114~0.161 m范围内时,其对乘员的作用力是否满足乘员受力要求。侧气囊力-变形量曲线可以通过侧气囊的线性冲击试验获得,如图11给出了两款侧气囊的线性冲击试验过程中冲击头(34 kg,初速度为6 m/s)加速度随时间的变化曲线,将其转换为侧气囊和冲击头间相互作用力随时间的变化情况,进一步转换为侧气囊的受力-变形量曲线,如图12所示。由图12可以看出,侧气囊变形量在0.114~0.161 m范围内时,侧气囊1对乘员的作用力小于乘员躯干部分的受力极限7 160 N,侧气囊2对乘员的作用力超过乘员躯干部分的受力极限,因此选择侧气囊1。

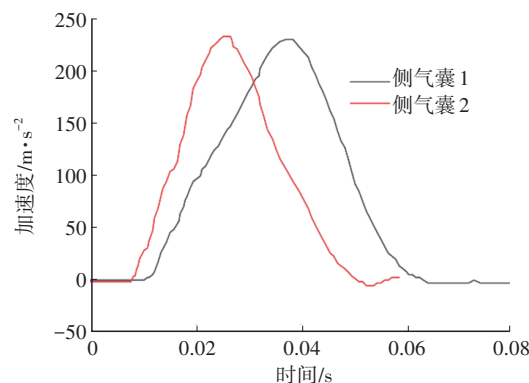


图11 两款侧气囊线性冲击试验结果

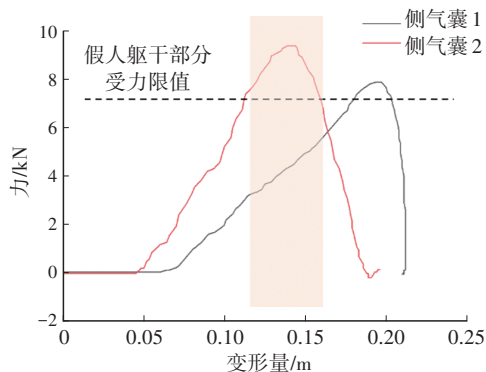


图12 两款侧气囊的受力-变形量曲线

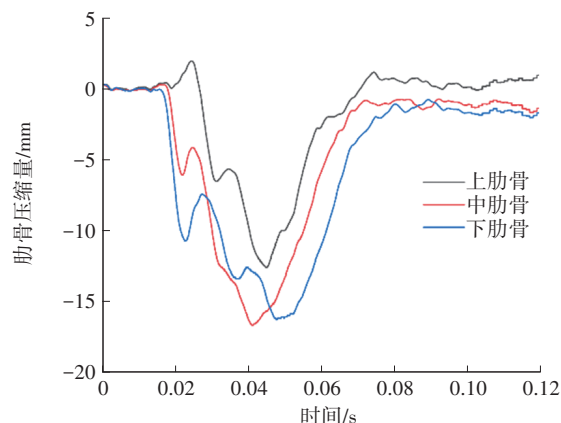


图15 假人胸部肋骨压缩量

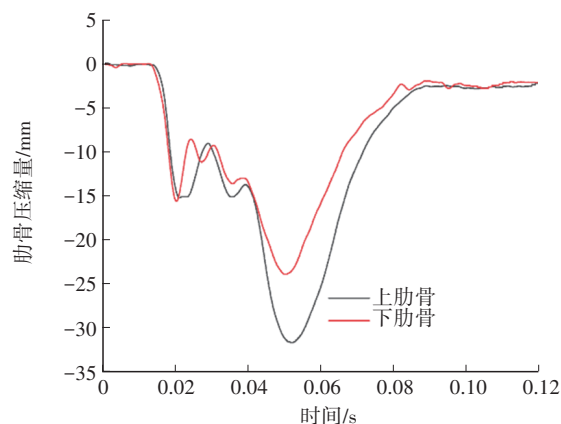


图16 假人腹部肋骨压缩量

4 试验验证

根据第3节的侧气囊匹配策略,分析侧气囊1能否满足乘员保护需求,参考C-NCAP标准进行整车碰撞试验。乘员T4位置的速度-时间曲线如图13所示,该位置在第35~55 ms内的平均加速度为 172 m/s^2 ,大于该车型的POLC,小于 263 m/s^2 ,说明该侧气囊对乘员平均加速度的控制在预期范围内。碰撞过程乘员肩部力如图14所示,肩部力峰值为2.5 kN,胸部和腹部肋骨压缩量如图15和图16所示,乘员胸部3根肋骨的压缩量分别为12.91 mm、16.69 mm和17.45 mm,腹部2根肋骨的压缩量分别为33.41 mm和26.86 mm,低于C-NCAP标准要求的高性能限值,满足乘员保护开发需求。

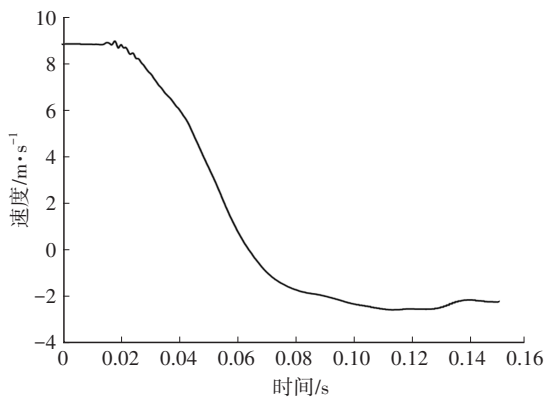


图13 假人T4位置速度-时间曲线

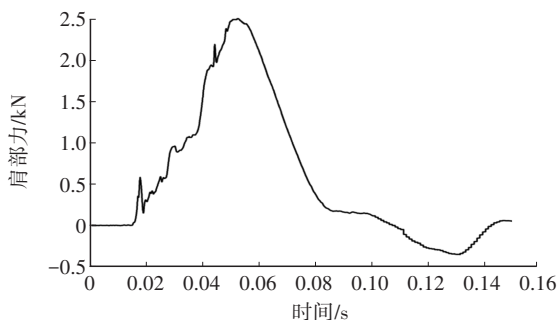


图14 假人肩部力曲线

5 结束语

本文提出了关联车辆结构特性与乘员损伤的侧面柱碰撞乘员载荷准则POLC,并根据其与乘员平均加速度耐受阈值 a_{ave_max} 的相对大小将车型分为两类,实现在车辆碰撞安全性能开发初期评估车辆的结构特性,并在车辆结构特性确认后进一步开展了满足乘员保护要求的乘员运动规划,以及满足乘员胸腹部保护要求的侧气囊匹配。以初始侧面空间为0.197 m、POLC值为 166 m/s^2 的某车型为例,对碰撞过程乘员平均加速度 a_{ave} 和乘员相对车体的位移进行规划, t_1 时刻到 t_2 时间段内, a_{ave} 不小于POLC(166 m/s^2)且不大于 a_{ave_max} (263 m/s^2),乘员相对车体的位移 S_d 在 $[0.022,0.053] \text{ m}$ 范围内。为实现上述乘员运动规划,建议车型匹配侧气囊变形量为0.114~0.161 m,动态冲击试验结果表明,侧气囊选型满足乘员保护开发需求。

参考文献

[1] 李铁铮. 汽车侧面柱碰撞侧围结构耐撞性研究与优化[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.

LI T F. Research and Optimization Design of

- Crashworthiness of Vehicle Side Structure Based in Side Pole Impact[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.
- [2] 卢静,郑颖,刘玉云,等.轿车侧面柱碰撞乘员损伤机理仿真(续1)[J].汽车工程师,2019(1):36-38+41.
LU J, ZHENG H, LIU Y Y, et al. Simulation of Passenger Injury Mechanism in Car Side Pole Impact (Continued 1) [J]. Automotive Engineer, 2019(1): 36-38+41.
- [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:兰州交通大学,2022.
WANG D Y. Simulation Analysis on Body Crashworthiness and Occupant's Injury of a Car in Side Column Collision [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2022.
- [4] OTTE D, HAASPER C, EIS V, et al. Characteristics of Pole Impacts to Side of Passenger Cars in European Traffic Accidents and Assessment of Injury Mechanisms—Analysis of German and UK In-Depth Data[J]. Stapp Car Crash Journal, 2008, 52: 349-362.
- [5] 梁韞,汤晓楠,吴凤双,等.基于某车型侧面32KPH 75°柱撞乘员性能优化分析[J].汽车与配件,2022(15):63-67.
LIANG Y, TANG X N, WU F S, et al. Optimization Analysis of Occupant Safety in 32 KPH 75° Pole Side Collision for a Vehicle Model[J]. Automobile & Parts, 2022 (15): 63-67.
- [6] 中国汽车技术研究中心有限公司. C-NCAP管理规则(2024年版)[S/OL]. (2024-09-23)[2025-01-21]. <https://www.c-ncap.org.cn/cncap-guicheng-detail?id=9>.
China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd.. C-NCAP Management Regulation (2024 Edition)[S/OL]. (2024-09-23)[2025-01-21]. <https://www.c-ncap.org.cn/cncap-guicheng-detail?id=8>.
- [7] European New Car Assessment Programme. European New Car Assessment Programme (Euro NCAP)[S/OL]. (2020-09-17) [2025-05-18]. <https://www.euroncap.com/en/for-engineers/protocols/2026-protocols/>.
- [8] SELVAMANIKANDAN M, VENKATESAN S. Improvements of Side Oblique Pole Impact Safety Performance Using Finite Element Method[J]. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), 2020, 9(3): 606-611.
- [9] UDUMA K, PURUSHOTHAMAN D, WU J, et al. Predictive Estimation of Side Pole Impact Dummy Response Based on Linear Impactor SAB Performance[J]. Automotive Technical Paper 2018-01-5018, 2018.
- [10] HUANG Z G, ZHANG B, WANG L M, et al. Experimental Study on Side Pole Collision and Deformable Barrier Collision of Car[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1549(3).
- [11] OTTE D, HAASPER C, EIS V, et al. Characteristics of Pole Impacts to Side of Passenger Cars in European Traffic Accidents and Assessment of Injury Mechanisms—Analysis of German and UK In-Depth Data[J]. SAE Technical Paper 2008-22-0014, 2008.
- [12] 张滕滕,卓鹏,刘军勇,等.乘员载荷准则评价车辆及乘员伤害的有效性分析[J].上海汽车,2016(3):41-44.
ZHANG T T, ZHUO P, LIU J Y, et al. Validity Analysis of Occupant Load Guidelines for Evaluating Vehicle and Occupant Injuries[J]. Shanghai Auto, 2016(3): 41-44.
- [13] 卢静,郑颖,欧阳俊,等.基于OLC拐点的车体结构较优设计[J].汽车工程学报,2021,11(1):72-78.
LU J, ZHENG H, OUYANG J, et al. Optimal Design of Vehicle Body Structure Based on OLC Inflection Point Phenomenon[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11(1): 72-78.
- [14] 水野幸治.汽车碰撞安全[M].北京:人民交通出版社,2016.
KOJI M. Crash Safety of Passenger Vehicles[M]. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [15] 张君媛.汽车碰撞车体与乘员约束系统的参数设计方法[M].北京:科学出版社,2018.
ZHANG J Y. Parameter Design Method for Structure and Occupant Restraint System in Vehicle Crash[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [16] SADEGHIPOUR E. Study of Vehicle-Based Metrics for Assessing the Severity of Side Impacts[J]. SAE International Journal of Transportation Safety, 2024, 12(1): 53-66.
- [17] AEKBOTE K. Development of Side Impact Protection Systems Using ES-2RE and SID—Its Dummies[D]. Detroit, Michigan, United States: Wayne State University, 2009.
- [18] HALLMAN J J, BUCK J, KIMBER E, et al. Characterization of World SID Rib Directional Dynamic Response[C]// 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Detroit, Michigan, United States: National Highway Traffic Safety Administration, 2017.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2025年1月21日。