

# Analysis of an Occupant Chest Injury under Vehicle Crash Events

Jin Yunfei, Tai Yang, Chen Keming

China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd. Chong Qing 401122

**Abstract:** This paper described the mechanism of the passenger chest injuries tolerance in vehicle crash. The occupant restraint system model was established in MADYMO, it was researching the protective efficacy of seatbelt for the chest in the vehicle crash, and the model was validated by the experiments. This model investigated the difference of seatbelt for occupant protection and chest injuries by setting the seat belt anchorage, pretension, pretension force limit, to reduce occupant chest injury in vehicle crash.

**Keyword:** chest injury, dummy, protection efficient, seatbelt

## 汽车碰撞工况下乘员胸部损伤的分析

靳云飞, 郜阳, 陈可明

中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 401122

**摘要:** 本文详细介绍了汽车碰撞工况下乘员胸部损伤。研究在汽车碰撞中对乘员胸部的保护效能, 利用MADYMO软件建立了乘员约束系统, 并通过试验对模型的有效性进行了验证。在此模型上对影响乘员胸部的关键零部件进行了功能设置和优化, 从而降低乘员胸部在汽车碰撞中的损伤。

**关键词:** 胸部损伤; 假人; 保护效能; 安全带

### 1 前言

胸部伤害是交通事故中导致乘员重伤和死亡的主要原因之一, 乘员的胸部保护是汽车安全性能设计的重要内容之一。在汽车碰撞的各类法规中对乘员胸部的损伤也都有明确的规定。气囊、方向盘、座椅安全带都是重要的乘员保护装置, 对乘员胸部的损伤保护尤为直接。汽车安全带被很多人形象地称为汽车上的“生命带”, 更是被誉为汽车工业史上最伟大的发明之一。它虽然结构简单, 但所起到的巨大作用是其它任何安全配置都无法取代和相媲美的。本文利用Madymo软件对这些零部件进行模拟仿真。研究乘员胸部的保护性能, 降低乘员在汽车碰撞中胸部损伤。

### 2 乘员胸部损伤介绍

在汽车碰撞事故中, 导致人体损伤的主要原因是人体与汽车之间的相互接触碰撞, 或者由于乘员舱的变形对乘员进行挤压, 这些接触碰撞或者挤压变形都是在机械力作用下产生的, 而不是由其他因素引起, 因此, 损伤生物力学的研究范围只局限于机械作用导致的人体损伤, 也是汽车碰撞安全研究领域的重要理论基础[1]。

肋骨是人体胸部的主要组成结构, 起着承受大部分冲击载荷, 保护内部器官的作用。由于肋骨的近似椭圆结构及内部器官的非对称布置, 胸部在冲击载荷下的生物力学响应及损伤情况和加载方向密切相关。相关研究表明, 在相同冲击能量下, 尽管胸部侧面冲击产生的胸部侧向压缩量比正面冲击胸部正向压缩量要小, 但却导致更多肋骨骨折[2]。这是因为肋骨侧面曲率更大, 且表层覆盖的肌肉组织较薄。纯正向和侧向冲击相比, 斜向冲击很可能导致更严重的乘员胸部伤害。这在侧面柱撞工况中得到了证实[3]。尤其当胸部左前侧遭受斜向冲击载荷时, 将很可能发生心脏挫伤和大动脉破裂等软组织损伤, 对乘员生命造成极大威胁。图1为汽车产生碰撞时, 人体与车体碰撞顺序图解。

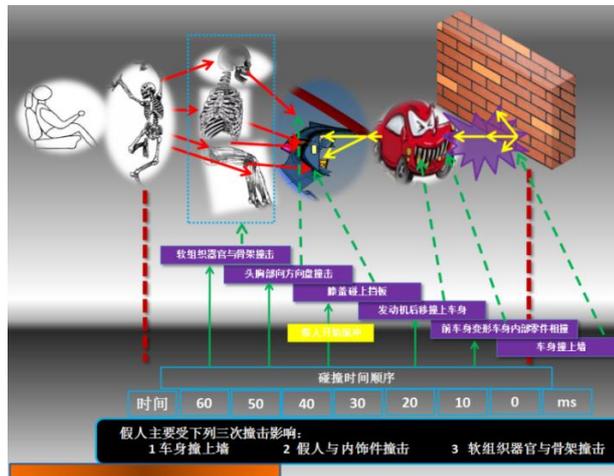


Figure 1. Before the collision time sequence

图1 前碰撞时间顺序

导致多种胸部损伤形式依赖于碰撞速度。在低速碰撞下，损伤形式为胸腔变形或者骨折。在高速碰撞下，损伤形式表现为以压力波的形式向胸腔内脏传播而导致胸腔内脏器官损伤。胸部基本的结构特性和生物学上的结构特性影响到这两种损伤之间的相关性<sup>[4]</sup>。

碰撞速度在3m/s以下，胸部损伤主要表现为胸腔和腔内脏器官压缩变形。这时胸部主要受到的是一种“挤压型”损伤。Viano等人指出，在低速碰撞时，压缩变形量在胸部深度或者宽度35%以上才会导致胸部损伤<sup>[5]</sup>。人体器官受到压缩是低速碰撞中胸部的损伤机理。

碰撞速度在35m/s-50m/s之间或者更高时胸部的变形运动不仅会导致自身的损伤，还可将能量以应力波的形式向体内传播，引起胸内脏器官的损伤。这时胸部伤害主要是因受到较大的加速度而引起的“冲击型”损伤<sup>[6]</sup>。

### 3 汽车碰撞胸部损伤参数定义

在汽车碰撞领域常用胸部损伤评价的指标有胸部3ms、胸部压缩量、胸部粘性指标VC (Viscous Criteria)以及复合胸部伤害指标CTI (Combined Thoracic Index)、复合加速度准则TTI (Thorax Trauman Index)。TTI考虑了人体的运动响应和物理参数（重量和年龄）。CTI考虑了胸压缩和胸部加速度的影响，以综合评价乘员胸部在安全带和安全气囊两种不同类型加载方式下的损伤情况。其中，胸部加速度衡量胸部的整体受载，胸压缩量则反映了安全带加载。

胸部损伤连续3ms (Contiguous 3ms Injurs Criteria)是通过一个3ms宽度的时间窗口跟踪计算胸部合成的线性加速度信号，持续时间不小于3ms的最大加速度值就称为胸部损伤连续3ms指标。胸部损伤累积3ms准则是指持续时间超过3ms的最大加速度值，与连续3ms准则不同此处的持续时间可以不连续。实际应用中常使用后者。

胸部压缩量是指胸部变形峰值，是胸部位移传感器测得任一肋骨的变形最大值。

在一定的挤压力之下，损伤程度随着冲击速度的增加而增加，这种现象在前碰撞和侧碰撞中都可以观察到，当冲击的速度达到30m/s以上时仅有速度的变化影响到损伤。可根据以下方程计算粘性指标VC<sup>[7]</sup>：

$$VC=V*C$$

D(t)(m)是任何时刻t的瞬态胸部偏移，C(t)（若长度单位采用mm，则除以140）是该时刻的压缩量。

V是相对于偏移的速度，根据偏移量的时间差分计算：

其中，是D(t)的连续数字采样间隔，其最大值为。计算以时间为变量的连续值，确定其最大值。VC的计算流程如图2所示。

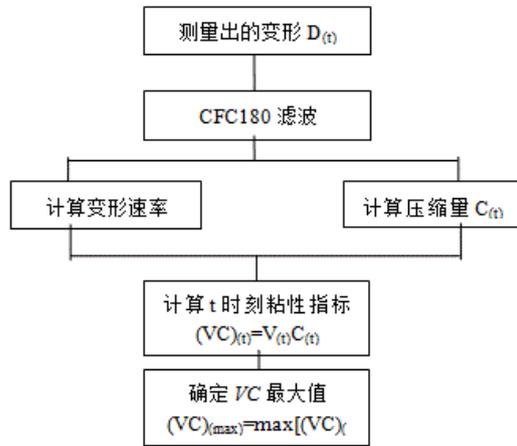


Figure 2. VC calculation process  
图2 VC计算流程

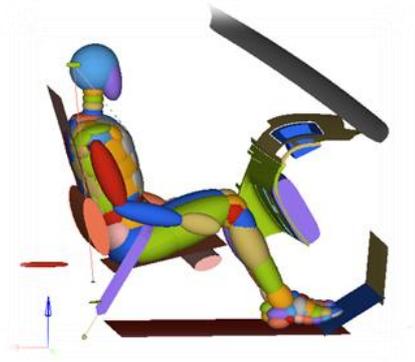


Figure 3. Computational simulation model  
图 3 计算仿真模型

VC的单位为m/s。根据SAEJ1727标准及假人硬件法规采用1m/s作为该胸部损伤的人体耐受极限。

复合胸部损伤指标CTI同时考虑胸部最大变形和上脊柱在3ms内最大加速度两个因素对胸部损伤进行评价，它的计算公式为<sup>[9]</sup>：

$$CTI = \frac{A_{max}}{A_{int}} + \frac{D_{max}}{D_{int}}$$

$A_{max}$ 为上脊柱合成加速度的最大值； $D_{max}$ 为胸部变形的最大值； $A_{int}$ 和 $D_{int}$ 分别为对应的加速度和变形量的临界值，对于50百分位男性假人， $A_{int}$ 为85g， $D_{int}$ 为102mm。

据FMVSS第208号建议：50百分位男性假人的胸部加速度值在超过60g时，作用时间不要超过3ms。国际上认为肋骨骨折是胸部普遍发生的伤害形式，多采用胸部压缩量来评价乘员胸部损伤。50百分位男性假人的胸部压缩量不能超过76mm<sup>[8]</sup>。我国多数法规、汽车行业标准也都采用了胸部3ms、胸部压缩量、胸部粘性指标作为汽车碰撞工况下的胸部损伤指标。胸部3ms、胸部压缩量、胸部粘性指标VC为单一的响应变量。由于单一的响应变量无法全面评价乘员胸部损伤情况，

#### 4 乘员胸部伤害的保护研究

上面详细介绍了乘员胸部损伤及胸部伤害指标参数。下面利用实车碰撞试验、滑台模拟试验，在专业的约束系统仿真模拟软件Madymo的基础上研究汽车碰撞中乘员胸部的损伤及保护效能。在某计算仿真模型（如图3）基础上进行模型有效性对标如图4。

此车型在前期的配置中使用了限力式三点安全带。此种类型的安全带优点：经济成本不高，在实车碰撞过程可以根据需要适当释放假人前移，减少假人在碰撞过程中对胸部的伤害。缺点：碰撞中不能很好的束缚住假人，参数使用不当可能造成头部伤害增大。此次实车碰撞中安全带限力值选用较低3.5KN，造成乘员头部伤害HIC值接近1000。为了降低乘员头部伤害值，仿真中对安全带进行了优化。

第一种：安全带由限力三点式改为普通式三点式安全带；

第二种：安全带由限力三点式改为预紧限力式安全带，优化限力等级4KN-5.5KN、预紧力及点火时间。经过模拟优化，发现采用普通三点式安全带头部伤害指标HIC值由984降低到756。但是，胸部压缩量由37mm升高到64mm，其他伤害指标没有任何改善。添加预紧限力功能，安全带限力采用4.5KN限力安全带进行优化。发现假人胸部、头部、颈部的伤害都有很好的缓冲降低作用。因此在实车碰撞中采用预紧限力式安全带，限力4.5KN。胸部压缩量由37mm降低到31mm其实车试验结果如下图5所示。

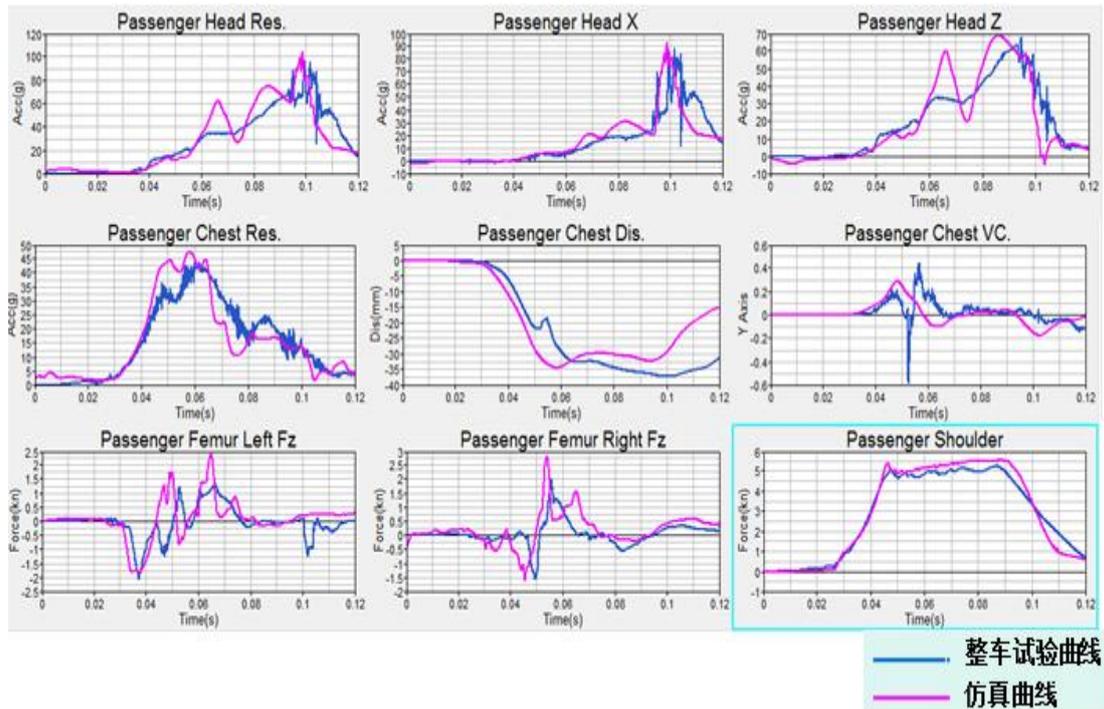


Figure 4. Results of the simulation and real vehicle collision, mark  
图4 仿真与实车碰撞结果对标

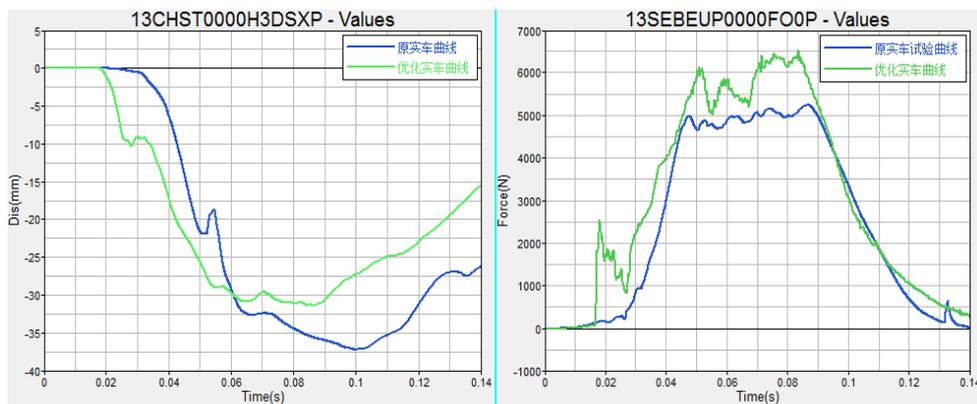


Figure 5. Two real vehicle collision chest compression curve and the curve contrast belt  
图5 两次实车碰撞胸部压缩量曲线、安全带曲线对比

通过上面的实车碰撞数据，可以看出安全带对乘员胸部有直接的伤害作用。预紧限力式安全带对乘员头部、颈部、胸部都有很好的缓冲降低伤害的作用。合理选用安全带降低假人伤害指标。根据对实车碰撞数据的细心归纳整理发现安全带对乘员胸部的损伤跟乘员空间大小，车体结构、约束系统配置都有密切的关系。

某轻型汽车其结构为非承载式车身，车身结构为标准的前高后低波形。降低乘员伤害指标采用何种类型安全带进行了滑台模拟试验。普通三点式安全带，没有安装安全气囊，其试验结果如表 1 所示：

表 1 滑台伤害值列表

Table 1. Injury values of sled test

| 部位 |               | GB11551-2014<br>国际性能指标                     | 试验结果  |      |
|----|---------------|--|-------|------|
|    |               |  | 驾驶员   | 乘员   |
| 头部 | 头部性能指标 (HPC)  | ≤ 1000                                     | 2477  | 2694 |
|    | 头部合成加速度 (g)   | ≤ 80                                       | 180   | 103  |
| 胸部 | 胸部压缩指标 (ThCC) | ≤ 75                                       | 38.78 | 43.1 |
|    | 胸部加速度         | 无  | 62.6  | 50   |
| 大腿 | 左大腿力(KN)      | 9.07kn-7.58kn(0ms-10ms)<br>7.58(10ms-60ms) | 1.03  | 0.8  |
|    | 右大腿力(KN)      | 9.07kn-7.58kn(0ms-10ms)<br>7.58(10ms-60ms) | 0.8   | 0.5  |

从表 1 中体现的乘员伤害发现, 乘员头部伤害巨大, 胸部伤害值能够满足国标性能要求。仔细研究假人的试验数据分析发现, 在实车碰撞过程乘员前移量很小。此车型采用普通三点式安全带, 乘员向前移动量小, 安全带在碰撞过程中对假人胸部的伤害不大。此车型乘员空间较小, 如果采用预紧限力式安全带反而会造成伤害值增长。降低伤害的最有效的办法安装安全气囊。相同车型实车碰撞试验配置安全气囊、三点式安全带其假人伤害值列表如表 2 所示。

表 2 实车伤害值列表

Table 2. Injury values of real car test

| 部位 |               | GB11551-2014<br>国际性能指标                     | 试验结果 |     |
|----|---------------|--|------|-----|
|    |               |  | 驾驶员  | 乘员  |
| 头部 | 头部性能指标 (HPC)  | ≤ 1000                                     | 902  | 788 |
|    | 头部合成加速度 (g)   | ≤ 80                                       | 79   | 70  |
| 胸部 | 胸部压缩指标 (ThCC) | ≤ 75                                       | 56   | 43  |
|    | 胸部加速度         | 无  |      |     |
| 大腿 | 左大腿力(KN)      | 9.07kn-7.58kn(0ms-10ms)<br>7.58(10ms-60ms) | 0.3  | 3.9 |
|    | 右大腿力(KN)      | 9.07kn-7.58kn(0ms-10ms)<br>7.58(10ms-60ms) | 0.4  | 0.8 |

对实车碰撞数据进行分析, 较小的乘员空间假人在碰撞过程中如果采用预紧限力式安全带会造成假人头部、颈部、胸部与方向盘、IP 板等的接触, 且接触时的加速度会很高。因此, 此车型降低乘员伤害的方法是配备安全气囊后, 再进行安全带优化。

## 5 结论

本文详细介绍了胸部人体生物力学损伤。利用计算机仿真技术优化与胸部伤害相关的参数, 给出优化方向, 进行试验验证。选取典型实车碰撞试验案例分析碰撞假人在碰撞过程中胸部伤害的相关因素及保护措施。计算机模拟与实车碰撞试验相结合为主机厂提高汽车被动安全系数提供理论和试验依据。而现实汽车碰撞事故工况下, 人体损伤复杂, 现有法规碰撞假人及相应的胸部损伤准则在实际使用中存在一定的局限性。胸部伤害分析单一。建立适用于复杂碰撞工况的多方向胸部损伤准则和多工况假人更能反映碰撞中人体损伤的有限元假人和物理假人贴近现实交通事故, 再现汽车碰撞事故, 为研究汽车安全提供手段和工具。

## 参考文献

- [1] 刘子建, 张建华, 杨济匡, 碰撞生物力学基础及其应用[J].中华创伤杂志, 2001, 17(5): 261-263
- [2] Shaw J.M.,Herriott R.G., McFadden J.D., et al.Oblique and lateral impact response of the PMHS thorax.Stapp Car Crash Journal,Vol.50 (Nov. 2006).pp. 147-167.
- [3] Pintar F.A.,Maiman D.J.,Yoganandan N.Injury Patterns in side pole crashes.51st Annual Proceedings-Association for the Advancement of Automotive Medicine.P419-433.2007.
- [4] 朱海涛, 孙震东, 白鹏等, 汽车正面碰撞中乘员的胸部伤害分析 [J].TRANSPORTSTANDARDIZATION, 2009 (11): 23-28.
- [5] Viano D C.King A I.Injury mechanism and biofidelity of dummies [M] Structural Impact and Occupant Protection Academic Publishers.The Netherlands: 1997.25-51.
- [6] Bois D P.Chou C C.Fileta B B.et al. Vehicle Crash worthiness and Occupant Protection [M]. Michigan:American Iron and Steel Institute,2004.

- [7] TNOMadymoBV.TheoryManual.Version7.0[M].TNO,2008.
- [8] KleinbergerM,Sun E,Eppinger R,et al.Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint system[R]. USA:National Highway Traffic Safety Administration Vehicle Research and Test Center,1998.37-43.
- [9] Kleinberger M, Sun E, Eppinger R, et al. Development of improved injury criteria for the assessment of advanced automotive restraint system[R].USA:National Highway Traffic Safety Administration Vehicle Research and Test Center,1998.37-43.

作者简介：靳云飞 中国汽车工程研究院股份有限公司 硕士 工程师 汽车被动安全

联系方式：401122 重庆北部新区金渝大道9号

电话：18983722900

邮箱：jinyunfei@caeri.com.cn