

## 摘要

随着汽车保有量的增长,交通事故频繁发生,车辆安全性备受关注。据统计,2005年我国发生的交通事故中,侧面碰撞事故约占事故总数的39.5%,而由于我国城市道路交通路口以平面交叉形式为主,侧面碰撞事故发生概率最高,致伤率和致死率均居第一位。汽车侧面是车体中强度较薄弱的部位,侧面碰撞缓冲区较小,车体吸能能力较弱,乘员面临的损伤风险很高。因此,车辆侧面碰撞安全性的研究成为车辆被动安全性研究的一项重要内容。如何提高车辆侧面碰撞事故发生时对乘员的保护性能成为当今又一热点课题。2006年7月1日我国开始发布并执行《汽车侧面碰撞的乘员保护》标准,同时推出中国的新车评价规程(C-NCAP)。

本文旨在对侧面碰撞中的乘员损伤生物力学进行详细的研究,并针对文中所采用的整车模型,提出有效的乘员损伤防护措施并从理论上验证其有效性,为汽车侧面碰撞安全性设计提供借鉴作用。

文章首先对比分析了各国侧面碰撞法规,在阅读大量相关文献的基础上,较为详细地研究和总结了在汽车侧面碰撞条件下,乘员头部、胸部、腹部和骨盆的损伤生物力学知识,进而建立可变形移动壁障的有限元模型,借助国外某整车模型建立了整车侧面碰撞有限元模型,采用计算机仿真方法,通过与标准要求及实验数据对比,验证了可移动变形壁障和整车侧面碰撞有限元模型。应用MADYMO PSM子结构方法建立了乘员损伤模型,结合有限元分析软件LS-DYNA及多刚体动力学分析软件MADYMO,按照GB 20071-2006标准要求进行了侧面碰撞仿真,得到其假人损伤指标值并按照标准要求进行了分析和评价。针对模型在侧碰中对乘员保护的不足,作者提出在驾驶员侧前车门中增加防撞杆及改变防撞杆的配置和使用胸部侧面安全气囊等防护措施。

论文详细地分析了以上措施对侧面碰撞中乘员损伤的影响,在防撞杆的最优配置方案中,假人肋骨变形量产生了11.92%~25.45%不同程度的减小,耻骨合力峰值的减小量为11.51%~40.19%,而腹部力峰值减小量达到53.47%~65.30%,除上肋骨变形和黏性指标外,其余指标均达到法规要求,对此,在防撞杆优化基础上,论文提出了胸部侧气囊这一措施,并分析气囊主要参数对防护效果的影响,取气囊最佳参数,在对其他指标没有实质负面影响的前提下,使前文中尚未达标的两指标值分别降低了8.91%和8.91%,若综合两项措施,与原始模型相比较,两指标的减少量分别高达32.10%和40.0%,并同时达标。从理论上证明了各种措施的有效性,并为提高汽车侧面耐撞性能提供借鉴作用。

**关键词:** 侧面碰撞; 安全; 损伤生物力学; 有限元; 仿真; 防撞杆; 气囊

## Abstract

With the increasing of the number of the vehicle possession, traffic accidents also increased. So, vehicle safety takes more attention than before. Side impact accidents account for 39.5 percent of all traffic accidents in 2005 in China. As the grade crossing is the major pattern of urban traffic road in China, the occurrence probability of side impact accident is the highest, and the injury rate and death rate are both the highest. In side impact, because of the side structure's weaker deformation endurance and the vehicle has weaker energy absorbing ability, the passenger will suffer much more injury risk. Then side impact research has become an important topic in the passive safety area. The vehicle side impact performance has to be improved. The regulation on the occupants' protection in side impact accidents which was developed by China Automotive Technology & Research Center according to ECE R95 has been brought into effect in July 1st 2006, and New Car Assessment Program (C-NCAP) was also issued at the same time.

The aim of the thesis is to research the passengers' injury biomechanics in details and present some countermeasures to protect the passengers and discuss their validity to provide some use for reference for improving vehicle side impact safety.

Firstly, the paper compared and analyzed the different side impact regulations, based on a great of literature concerned reading, it researched and summarized the knowledge of passengers' head, thorax, abdomen and pelvis injury biomechanics in side impact in details, then built the mobile deformable barrier model and the full vehicle side impact finite element model by utilizing a certain foreign full vehicle finite element model. By using computational simulation method, the full vehicle FE model and MDB models were validated by comparing it with the requirements of rules and test data. According to GB 20071-2006 rules, side impact simulation was done. The car crash deformation was calculated by using LS-DYNA, and the dummy injury parameters were obtained by using MADYMO software. Some injury parameters has gone beyond the limit of the rules. In order to improve its crashworthiness, some effective countermeasures including using side impact beam in frontal door and its different configurations and using thorax side airbag were proposed.

The effects on passengers' injuries of the countermeasures were also analyzed particularly. For the reinforcement bars, the RDC has reduced by 11.92%~25.45%, the

reduction of the PSPF was 11.51%~40.19%, and the reduction of APF was as much as 53.47%~65.30%. All parameters got the required value except for the RDC and VC of upper rib. To get better improvement, based on the reinforcement bar which gets the best performance, the paper proposed the thorax airbag, analyzed the influence of major parameters on its protection performance and got the optimized project of thorax airbag. The upper RDC and VC has reduced 5.82% and 17.12% with thorax airbag, and the two parameters got the reduction of as much as 29.80% and 37.21% with the combination of reinforcement bars and thorax airbag and both reached the required values. The simulation results theoretically showed their positive effects and that they were strictly helpful on improving the vehicle side impact performance.

**Key Words:** Side impact; Safety; Injury biomechanics; Finite element; Simulation; Side impact beam; Airbag

# 湖南大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：



日期：2008年5月2日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密口，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。
- 2、不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：



日期：2008年5月23日

导师签名：



日期：2008年5月23日



# 第 1 章 绪论

## 1.1 本课题研究的意义

随着汽车工业的发展以及汽车保有量的增加,交通事故也呈上升趋势,交通事故伤亡已经成为威胁人类自身安全的世界第一大公害,而从我国道路交通事故统计年报看<sup>[1]</sup>,2005年我国发生的交通事故中,正面碰撞占26.43%,而侧面碰撞占据39.50%,因侧面碰撞造成的人员伤亡占37.36%,同样高于正碰的27.73%,统计显示侧面碰撞是发生频率最高和造成人员伤亡最多的事故形态。汽车侧面是车体中强度较薄弱的部位,吸能构件较少,对于在汽车中占比例最大的轿车,因其侧面是车门,强度更为薄弱<sup>[2]</sup>。一旦受到来自侧面的撞击,不可能有像前部及后部那样,有足够空间发生结构变形及吸收碰撞能量,车内乘员同强烈贯穿的撞击物之间仅隔着车门和20~30厘米的距离,一旦受到来自侧面的撞击,乘员将受到强烈贯入的冲击载荷作用,严重时危及生命,因而侧面碰撞对乘员的伤害比其它类型碰撞造成的乘员伤害更为严重。汽车侧面碰撞安全性的研究是汽车被动安全性研究的一项重要内容,并为世界各国汽车厂商和汽车研究机构所关注。

因此,提高汽车侧面碰撞安全性,对提高乘员的安全防护和改善道路交通安全有着非常重要的意义。

## 1.2 汽车侧面碰撞国内外研究历史和现状

上世纪80年代,欧美开始汽车侧面碰撞的研究,刚开始时采用实车碰撞试验方法,再根据碰撞试验的分析研究结果,改进设计。随后发展了台车试验和试验台冲击试验等模拟碰撞技术,这两种试验方法是以实车试验的结果为基础确定试验条件。这类碰撞试验的成本低,可重复操作,研究周期较短。随着计算机技术的发展,出现了计算机仿真技术,采用虚拟模型代替实际模型,利用计算机进行分析计算得出安全结论,国外从事侧面碰撞计算机模拟研究的工作重点放在了各种数值模型的建立以及乘员响应的研究方面<sup>[3]</sup>。David J.Segal等人<sup>[4]</sup>采用集中质量模型与CAL-3D软件建立了15个刚体的多体模型,研究了侧碰中不同类型的缓冲材料对身材不同尺寸乘员的伤害程度,认为缓冲材料对乘员损伤的影响较大,而且对于小身材乘员的影响更大。荷兰TNO公司的MADYMO3D软件中带有各种型号类型的碰撞假人数学模型,并且在仿真模型中可以直接调用假人程序,所有假人模型都是经过验证与标定的。同时该软件中还带有各种碰撞试验所用的移动壁障,也可在程序中直接调用。目前,已经有用有限元与多刚体相结合的方法来研

究车辆的碰撞安全性，即软件的求解器可以同时计算有限元与多刚体程序。

近年来，对于汽车侧面碰撞法规的制定已成为汽车侧面碰撞安全性研究的热点。在目前的侧面碰撞领域，主要形成了美国的FMVSS和欧洲的ECE两大法规体系。两大体系对侧面碰撞实车试验法规规定、测试假人及人体伤害指标的制定等方面都存在一定的差异<sup>[6]</sup>。欧、美关于汽车侧面碰撞法规的差异，给汽车厂商的产品开发造成了很大障碍，统一侧面碰撞法规是目前的主要工作之一。不同标准假人可能会导致对侧面碰撞保护措施效能的评价结论的不同，同时，不同的侧面碰撞用可移动变形壁障的使用也会使碰撞试验中的车体变形情况和假人损伤值产生很大的差异，所以对侧面碰撞假人和对可移动变形壁障的深入研究和统一都是试验法规研究中的重要内容。

我国汽车被动安全性方面的研究工作起步较晚，到八十年代末才开始开展这方面的研究工作。目前国内具有从事汽车碰撞试验能力的试验室有：中国汽车技术研究中心、清华大学汽车碰撞试验室、一汽长春汽车研究所、二汽襄樊汽车试验研究所、国家交通部公路交通工程综合试验厂、上海汽车检测所，湖南大学汽车碰撞实验室等。随着我国《汽车侧面碰撞的乘员保护》GB 20071-2006<sup>[6]</sup>于2006年7月1日实施，汽车侧面碰撞试验已经被列入新车上市之前的强检项目，因此，国内这些原先建立的实车碰撞试验也开始进行侧面碰撞实验平台的开发和运行。目前中国汽车技术研究中心为此项检测项目的指定单位，在标准实施后已经成功进行了包括天津一汽、上海大众、上海通用、重庆长安、北京现代、东风雪铁龙等相关车型的侧面碰撞试验评价<sup>[7]</sup>。中国新车评价规程（C-NCAP）的实施，成为我国汽车评价的新标志。

湖南大学汽车碰撞实验室几年前投入应用，并于今年顺利通过相关部门验收，成为国家重点实验室。在理论研究的同时，几年内已进行了多辆实车碰撞试验，在正面碰撞、追尾碰撞、安全气囊起爆等方面积累了丰富的经验，具有较强的试验能力和较高的实验室水平，2005年11月经过改造并成立了汽车安全研究部，使得理论和实验水平都得到了较大提升。目前已设计开发了侧面碰撞移动壁障，并购买了最新的侧面碰撞ES-2型假人及模拟5百分位女性的假人SID-IIIs，已初步具备了按照我国标准进行侧面碰撞试验的能力。

### 1.3 汽车侧面碰撞安全性研究内容

侧面碰撞安全性研究主要包括两大方面：结构安全性研究和乘员安全性研究。

#### 1.3.1 侧面碰撞结构安全性研究

##### （1）侧面碰撞试验法规的研究

汽车侧面碰撞安全性的研究及相应法规（标准）的制定是车辆被动安全性研

究的重要构成。在目前的侧面碰撞领域，主要形成了美国的FMVSS和欧洲的ECE两大法规体系。两大体系在侧面碰撞试验方法、试验假人、损伤准则及可变形移动壁障等方面存在较大差异<sup>[8,9]</sup>。随着全球汽车技术的相互合作和渗透，迫切需要对侧面碰撞试验法规实行统一管理，为此，在国际协调研究活动（IHRA）侧面碰撞工作小组（SIWG<sup>[10]</sup>）的带领下，很多国家都开展了广泛的调查研究活动，期望就此得到一种可行性的方案。

### （2）侧面碰撞可变形移动壁障（MDB）试验的研究

侧面碰撞试验中之所以用可变形移动壁障（MDB），因为它既可以模拟车与车的碰撞情况，又可以节约大量成本。MDB的特征值（如外形参数、整车质量、蜂窝铝特性等）是依据各国的汽车保有量的情况来选定的，这些特征值的选取对试验结果的影响较大，MDB的速度与碰撞方向的夹角对试验结果也有相当影响，特别是对前后座椅上的假人损伤的影响，即使试验方法一样，用不同的侧面碰撞假人所测得的结果也会有明显差异<sup>[11]</sup>。

根据美国公路交通安全管理局（NHTSA）的统计得出的结论，当前，小又轻的欧洲MDB不能代表美国市场乘用车的情况，也不能增加安全性能防护；而当前美国的MDB不能完全代表近来车辆的趋势，经过该MDB试验出的车辆投入市场运行，有的甚至可能引起车辆或乘员的严重伤害。MDB很难找到统一的标准，这是可以理解的，因为各国在用车型种类繁复，更新快速，欧美的MDB不可能适用于各国车辆。因而，这都迫切要求对MDB进行更为深入的研究。

### （3）侧面碰撞实验用假人的研究

随着仿生学和碰撞事故中人体伤害机理研究的深入，以及侧面碰撞试验的需求，国际上研发了很多侧面碰撞试验假人，目前使用最为广泛的有EuroSID-1、ES-2、BIOSID、SID、SID-II<sub>s</sub>。美国的侧面碰撞试验法规中采用的是SID，而欧洲侧面碰撞试验法规中最初采用的是EuroSID-1，后经过欧洲和日本的改进研究，现多使用ES-2型假人。

## 1.3.2 侧面碰撞乘员安全性研究

### （1）侧面碰撞中乘员响应及损伤指标的研究

对乘员响应的研究主要集中在头部、颈部、胸部、腹部及骨盆等在侧面碰撞中最易受伤的人体部位上，这也是进行乘员保护研究的基础，可以用来指导乘员约束系统的研究（如侧面气囊）以及车身侧围部件结构的优化设计（如车门刚度、内饰件材料特性、座椅等）。

在研究乘员损伤的各种评价指标方面，美国韦恩州立大学的J.Cavanaugh等人做了大量工作，他们在一系列人体死尸试验基础上研究乘员损伤机理及承受极限，并运用软件MADYMO及PAM-CRASH建立相应的数值模型，进行评价指标的

研究，以探讨侧面碰撞中的乘员保护，在损伤生物力学方面取得了很大成就。

## (2) 侧面碰撞滑车试验的研究

侧面碰撞滑车试验的研究经历了一个不断发展与完善的过程，大致分为两种类型：第一类是只有一个滑车的试验台，Heidelberg型<sup>[12]</sup>是其中比较典型的一个，如图1.1所示，原理是假人置于座椅上，座椅固定于能水平侧向移动的滑车上，初始状态为假人与滑车在牵引装置的作用下一起加速至一定的速度，然后迅速减速至零，惯性作用下假人在座椅上作侧向移动，与固定在座椅上的侧壁发生碰撞。侧面碰撞时，外来物体使车门、B柱等侧围结构发生侧向变形和位移，直接与乘员接触，从而造成乘员的伤害；但该试验装置中由于侧壁预先固定在座椅一侧，没有施加外力使其变形，当假人和侧壁发生碰撞时，主要是通过假人的相对响应来反映碰撞情形，所以它不能很好地模拟真实事故中侧面碰撞的车门、B柱等侧围结构与乘员的相互作用以及能量的转移，比较适合于模拟碰撞发生后的“二次碰撞”对乘员的伤害，同时也适合于研究车门内饰和缓冲材料等的吸能作用<sup>[10]</sup>。

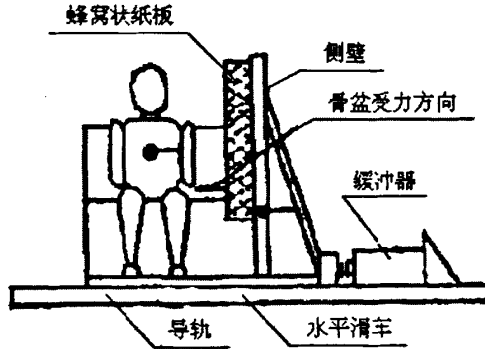


图1.1 侧面碰撞试验台原理图

第二类试验台，即两个滑车的试验台，其中L.M.Morrie.Shaw设计的试验台能够较好的重现侧面碰撞<sup>[13]</sup>，基本原理是一运动的滑车撞向一静止的目标滑车，座椅及假人固定在目标滑车上，连接侧门与目标滑车的吸能器用来模拟侧面碰撞中能量的转移；另一种Douglas.J.Stein<sup>[14]</sup>设计的试验台能比较准确的模拟真实碰撞中车门、座椅与假人之间的位置关系（这对于研究侧面气囊的安装和打开至关重要）。第二类试验台能很好的模拟真实的侧面碰撞情形，对于研究侧面碰撞乘员约束系统配置尤其是侧面气囊的安装有重要的指导意义。

## 1.4 汽车侧面碰撞研究方法

早期的汽车侧面碰撞的研究几乎完全是依赖试验方法进行的，刚开始时采用实车碰撞试验方法，对碰撞试验的结果进行分析研究，改进设计。随后发展了台车碰撞模拟试验方法，这种试验方法是以实车的试验结果为基础，确定试验条件。这类碰撞试验的成本低，可重复操作，研究周期较短。随着计算机技术的发展，

出现了计算机仿真技术。

### (1) 实车碰撞试验法

实车碰撞试验主要用来对已开发出的成品车型进行按法规要求的试验,以鉴定是否达到法规要求。在实车碰撞试验中有固定壁障碰撞试验、移动壁障碰撞试验、翻车试验和车对车碰撞试验等方法。其中移动壁障碰撞试验是移动壁障以一定的速度撞击静止的车辆的试验方法,广泛应用于车辆的侧面碰撞安全性能的评价。

实车碰撞试验与事故情形最为接近,是综合评价车辆安全性能(尤其在法规检验时)的最直接、最有效的方法。它是从乘员保护的观点出发,以交通事故再现的方式来分析车辆碰撞前后的乘员与车辆运动状态及损伤状况,并以此为依据改进车辆结构安全性设计,增设或改进车内外乘员保护装置。其试验结果说服力最强,同时还可以为台车模拟碰撞试验和计算机仿真提供试验条件和参考数据,以及有效性验证,但实车碰撞试验的准备工作复杂、周期长、费用大、重复性差、对设备的要求很高。

### (2) 台车碰撞试验法

台车碰撞试验是对实车碰撞试验的模拟,用一个比较坚固的台车代替汽车,无需破坏真实汽车,在台车与刚性墙之间安装有缓冲装置,台车通过缓冲装置与刚性墙发生碰撞,通过调整缓冲装置的力学特性使台车获得可重复的、接近于实车碰撞的减速度波形。

台车碰撞模拟试验可以用于乘员保护装置的性能评价和零部件的耐惯性力试验等,可以比较清晰地反映零部件在碰撞过程中的能量吸收、载荷分布、结构抗撞/抗冲击变形等特性,可以模拟较大范围内的碰撞情形。这种试验一般在新车型开发的早期进行,为产品开发过程的抗撞性设计提供有益的数据和检验。缺点是试验中难以考虑汽车的侧围结构以及内饰件等与乘员所受载荷之间的相互关系。

### (3) 计算机仿真分析法

近几十年来,计算机仿真碰撞技术迅速发展,在安全性车身的开发、乘员保护措施的优化、人体生物力学、碰撞用假人的开发等领域中发挥了重大作用。尽管计算机模拟试验还不能完全取代昂贵的实车碰撞试验,但是在产品的概念设计阶段、样车的试制、试验次数的减少、开发费用及周期的降低等方面有明显的优势,而且可重复性强、结果信息全面。同时计算机模拟研究的适用面广、精度高,可以处理很多异常复杂的结构变形等问题,还可以设定模型的边界条件和其它特定条件等,因此显示出强大的生命力。

随着牛顿矢量力学、拉格朗日分析力学、多刚(柔)体系统动力学、生物力学、碰撞理论、材料理论、有限元理论、数值方法以及计算机技术水平的不断提

高，汽车碰撞计算机模拟理论和方法得到了不断发展和完善，涌现出各种用于碰撞仿真分析的商用软件，如CAL3D、MADYMO、LS-DYNA、PAM-CRASH、MSC/DYTRAN等，其中采用多刚体系统动力学理论建模的软件可以模拟碰撞事故中乘员与环境的相互作用，能很好地再现事故过程，而采用显式有限元理论建模的软件可以用来描述车身结构的抗撞性，处理很多异常复杂的结构大变形问题<sup>[13]</sup>。这些软件的模拟结果能与实车碰撞结果大致吻合，尤其是对于车身结构的改进，可以使用这些软件和算法在短时间内对多种方案做出比较，得到满意的改进方案。

其中值得一提的是，随着显式有限元方法的逐渐成熟，标志着汽车碰撞安全性研究进入了试验和理论研究并重的阶段。本文将综合应用有限元软件以及多刚体软件进行仿真研究。

## 1.5 侧面碰撞试验法规对比研究概述

随着汽车技术的不断发展，汽车安全性问题越来越受到人们的重视。早在二十世纪六十年代，美国就建立了影响至今的联邦机动车安全标准FMVSS (Federal Motor Vehicle Safe Standard)，作为最早的汽车安全性法规，它已经具有全面的框架结构，在该法规的发展中，内容上得到了进一步的完善。目前，它包括了几十项内容，可以分为主动安全法规和被动安全法规，即大约25项的主动安全性标准和大约23项被动安全性标准。同时，还包括碰撞试验后进行燃油泄漏检验的法规。同样，在欧洲也相继推出了欧洲经济委员会ECE(Economic Commission for Europe Regulations)、欧洲经济共同体EEC(European Economic Community)安全法规。日本也推出了日本道路运输车辆保安标准TRIAS(Traffic Safety and Nuisance Research Institute's Automobile Type Approval Test Standards)。这些法规的推出以及强制执行，促进了汽车生产厂商投入大量的人力物力进行汽车安全性技术的研究和开发，推动了汽车安全性技术的不断发展，从而在很大程度上减少了交通事故的发生以及交通事故中人员（乘员和行人）的死亡率。

制定汽车侧面碰撞法规的目的是为了降低在侧碰事故中乘员受重伤和致命伤害的风险，根据法规试验过程中测得的假人加速度，规定汽车的抗撞性能要求、侧门加强要求和其他要求，以提高汽车侧面碰撞安全性。在美欧日三大汽车安全法规体系中，关于汽车侧面碰撞的法规分别为FMVSS214、ECER95及EEC指令96/27/EC、TRIAS472221996。美国是最早执行汽车侧面碰撞保护法规的国家，1990年10月FMVSS214在美国颁布执行；之后，在1995年10月，欧洲也制定了相应的汽车侧面碰撞法规ECER95，但直到1998年10月1日欧洲指令96/27/EC才强制执行；日本起步较晚，到1998年才将侧面碰撞法规正式纳入日本保安基准。其中，EEC指令96/27/EC与ECER95是完全等同的，且TRIAS472221996也拟同与ECER95，

因此,在比较汽车侧面碰撞保护的法规时,实际上主要是比较FM2VSS214法规与ECER95法规之间的区别<sup>[15]</sup>。

侧面碰撞试验方法目前尚处于研究阶段,美国、欧洲现有的侧面碰撞试验方法存在较多的不同之处:碰撞形态不同,移动壁障的台车质量、尺寸以及吸能块尺寸、形状、性能不同,试验用侧碰假人不同,碰撞速度不同,碰撞基准点的位置不同,乘员伤害指标也略有不同。

### 1.5.1 美国、欧洲侧面碰撞法规试验形式的比较

实车侧面碰撞试验采用移动变形壁障以一定的速度撞击试验车辆的侧面,通过测量假人的伤害指标以及汽车撞击后的状况来对汽车进行安全性的评价。

美国联邦机动车安全标准(FMVSS)在1970年提出了乘用车侧面碰撞静强度标准(FMVSS214),并定于1973年生效。1982年,对该“准静态”实验所做的评估指出,车对固定物的侧面碰撞的乘员损伤得到了有效减少,但车对车碰撞的乘员损伤没有减少。因此,经过广泛研究,1990年美国公路交通安全管理局(NHTSA)公布了在FMVSS214静强度实验法规中增加乘用车动态碰撞实验方法,来评价车对车碰撞事故中乘员的伤害程度。法规要求分阶段实施,即从1996年9月1日起所有的乘用车必须满足该法规要求,从1998年9月1日起所有的卡车、公共汽车、多功能车等必须满足该法规要求<sup>[16]</sup>。

FMVSS214法规所采用的试验形态可用图1.2表示:试验车辆静止不动,被撞侧前/后排座椅上各放置一侧碰假人。试验车碰撞基准线为被撞侧车身相应位置的一条铅垂线,它是移动变形壁障撞击汽车时的参考线,根据汽车轮距的不同,其位置也不同:当被测车轮距不超过2896mm时,基准线位于轮距中分线之前940mm的横向截面;当被测车轮距超过2896mm时,基准线位于前轴中心线后508mm的横向截面。试验要求移动变形壁障的前进速度方向与被测车的对称中心线成63°角,但在撞击时移动变形壁障的对称面与被测车对称面要保证垂直,因而,为满足要求,移动变形壁障的四个车轮在平行的同时应向壁障对称中心线右侧偏27°角,角度误差在±1°内。同时,移动变形壁障撞击汽车时,吸能块左(或右)侧棱角线要与碰撞基准线对齐,移动变形壁障左(或右)侧切平面通过被测车基准线平面,其误差应在±50.8mm内。移动变形壁障前进方向规定的试验车速为53.9km/h,由于行驶方向与撞击方向存在角度,实际撞击被测车辆的车速(垂直被测车对称中心线)为48.03km/h<sup>[15]</sup>。

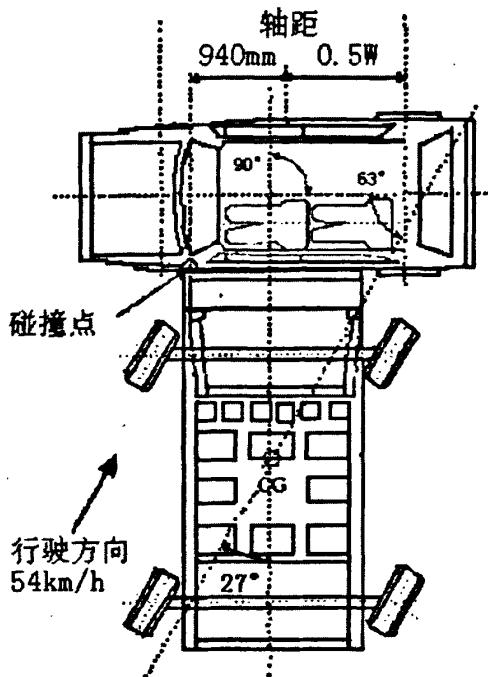


图1.2 FMVSS214试验形式

ECER95法规中规定的侧面碰撞法规如图1.3所示：被测车也静止不动，但在被撞侧前排座椅布置一侧碰假人。试验时，移动变形壁障以50km/h的车速与被测车垂直相撞，即要求移动变形壁障的对称面垂直被测车的对称面，而且在碰撞瞬间要求移动变形壁障的对称面通过前排座椅R点的横截面，其误差在±25mm之内。

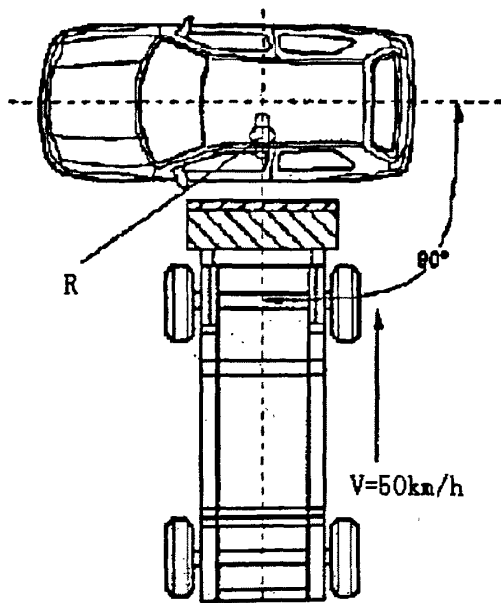


图1.3 ECER95试验形式



通过对两种法规试验形式的比较，表1.1对它们之间的不同进行了总结和分

析。

表1.1 试验形式的比较分析

内容	FMVSS214	ECER95	分析说明
汽车侧面碰撞保护的	前/后排乘员	前排驾驶员	FMVSS214 考虑被撞侧前后排座椅乘员，而 ECER95 只考虑前排座椅乘员
试验的仿真性	被测车 X 向与移动变形壁障之间有相对运动，24.5km/h	被测车 X 向与移动变形壁障相对静止	FMVSS214 移动变形壁障行驶方向与撞击方向成 27°角，撞击车与被撞车之间的相对运动，与实际情况更接近
控制的难易程度	复杂	简单	FMVSS214 因为移动变形壁障行驶方向与撞击方向成 27°角，所以在试验的要求上更加复杂

### 1.5.2 美国、欧洲侧面碰撞法规移动变形壁障的比较

移动变形壁障 (MDB) 是实车侧面碰撞试验的一个重要的工具，用它来替代实车撞击试验汽车，因此，移动变形壁障的结构与性能要求要尽可能地反映真实汽车。鉴于其特殊性，法规中对移动变形壁障的结构和性能都作了详细的规定。

移动变形壁障主要由两部分组成：四轮移动台车和可变形吸能块。由于美国和欧洲车型的不同，所以移动台车的质量和尺寸要求也不同，具体结构可以参照图1.4和图1.5所示。此外，为了避免碰撞试验时发生二次碰撞，影响试验结果，在移动台车上一般还安装制动系统，在发生碰撞后一定时间内，移动变形壁障即产生制动。

移动变形壁障头部安装有可变形吸能块，目前通常采用蜂窝铝块，其作用主要是用来模拟实车前部的变形刚度，美国和欧洲车型的头部结构和刚度不同，因此采用的蜂窝铝块的结构尺寸以及性能要求也不同。从移动变形壁障的尺寸和质量可以明显地发现，美国采用的移动变形壁障要比欧洲采用的移动变形壁障宽且高，整体质量要重，这与与美国车型宽敞、稳重的风格相吻合。另外从离地间隙和重心位置可以发现，FMVSS214的MDB前部离地间隙要比ECER95中MDB低，但重心高度基本相同。如果仅考虑离地间隙的话，同一车型，采用FMVSS214中MDB试验对乘员产生的伤害要比ECER95中MDB要低。离地间隙是目前在用的各种车型前部特征统计和折中的结果，离地间隙的合理选择将能使MDB代表更多的车型。有试验证明，离地间隙的不同对试验结果的影响是比较明显的。

从吸能块结构和刚度特性进行分析，FMVSS214中MDB吸能块由两块独立的蜂窝铝组合而成，ECE95的MDB通常使用的吸能块是由多层小块的蜂窝铝粘接而成，因而FMVSS214的MDB刚度特性曲线要相对ECER95光滑，试验效果也相对好一些。欧洲也将开始使用单层的蜂窝铝结构，上下各由一整块蜂窝铝组成，试验结果表明其刚度特性明显要比多层式蜂窝铝吸能块好<sup>[15]</sup>。

另外，有关于交通事故的分析表明，欧洲法规中MDB不能完全代表当前欧洲车型的前部特性，也不能同时模拟前、后座椅乘员的真实响应。因此，2003年在第18届ESV国际会议（the 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles）上提出了发展新的障碍壁AE-MDB(Advanced European Mobile Deformable Barrier)，2005年又公布了第二版AE-MDB V2。为了更能代表当前欧洲车型，该障碍壁重达1500kg，同时，为了在不减少前座乘员的受载情况下，能真实模拟后座乘员的受载情况，碰撞点设为R点偏后250mm，离地间隙为350mm，同时各块刚度特性有所变化<sup>[17]</sup>。随之，在2007年的第20届ESV国际会议上，AE-MDB V2得到了进一步的发展，在V2版本问世后两年内的研究表明尽管V2在欧洲侧碰法规验证试验中得到的力变形曲线符合标准，但它在车对车与车对障碍壁中表现的差异表明它还不能较为完整地反映真实的车对车碰撞中的实际变形，事实上，AE-MDB V2所导致的车门侵入量过大，并且其车门与B柱之间变形分布也与实际车对车碰撞的结果不一致，所以，在V2的基础上，研究者们得到了最新的V3.9，其相对于V2版本最大的区别在于前端的刚度和结构的改变，文献中作者通过大量的实车试验数据说明了V3.9版本是当前最符合AE-MDB研究的初衷的，也就是“能够代表欧洲车”<sup>[18]</sup>。

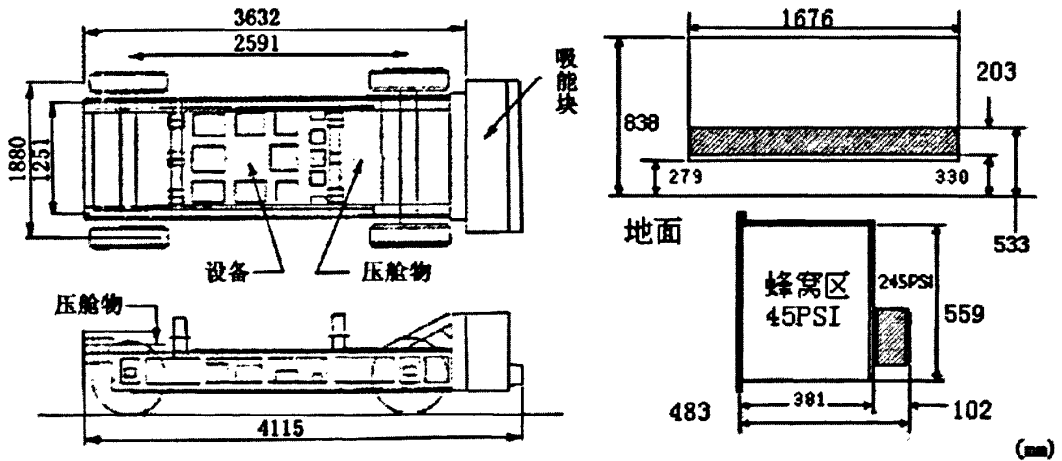


图 1.4 FMVSS214 可移动变形壁障

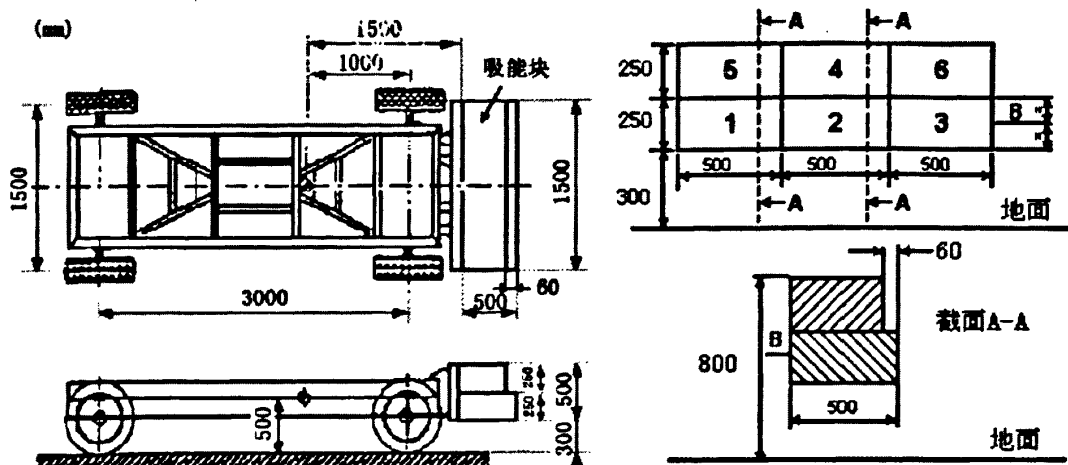


图 1.5 ECER95 可移动变形壁障

### 1.5.3 美国、欧洲侧面碰撞法规假人的比较

为检验汽车碰撞时汽车结构的吸能性和乘员生存空间和约束系统对人体的保护能力，在有关的动态试验标准中，都规定了人体的头部、胸部、腹部和骨盆等关键部位的碰撞响应信号限值。侧面碰撞假人是专门用于汽车侧面碰撞试验的假人，以考核汽车在规定试验条件下发生侧面碰撞时对人的伤害情况。

1979~1982年期间，美国密执安大学公路安全研究所根据与美国国家公路交通安全管理局（NHTSA）的合同开发出模拟50百分位男性乘员的美国侧碰假人SID<sup>[16]</sup>。后来由NHTSA车辆研究试验中心(VRTC)进一步改进。该假人是在HybridII假人的基础上将该假人的肩和手腕除去，再将假人的肋骨和脊椎用缓冲橡胶代替，并对假人腰部进行了改进，总重76.7kg。

除SID假人外，美国还有BIOSID侧碰撞假人，该假人是由通用公司（GM）同美国汽车工程协会（SAE）侧碰假人特别工作组合作开发而成，NHTSA考虑也用BIOSID来满足FMVSS214试验<sup>[19]</sup>。2003年6月，在后排座椅上使用假人SID-II<sub>s</sub>，以模拟5百分位女性乘员<sup>[20]</sup>。

1983~1985年期间，欧洲开发出模拟50百分位男性乘员的侧碰假人Euro SID，1989年，经过对其生物特性的改进，开发出EuroSID-1侧碰假人。它采用HybridIII假人的头部和HybridII假人的腿部并对颈部、肩部、胸部、腹部、腰部等进行了大量的改进而成，总重71.5kg~72.5kg。此后，欧洲和日本又开发了ES-2，以及模拟5百分位女性的假人SID-II<sub>s</sub>。

FMVSS214和ECER95都以侧碰假人的伤害指标值作为汽车侧面试验评价指标，因此，假人评价指标将直接影响汽车侧面碰撞安全性的评定。通过美欧侧碰假人的比较可以发现，SID和Euro SID-I侧碰假人所测量的内容不同，同时，由于

美欧人种的不同，因而决定了美欧在评价指标及人体伤害指标的界限也存在不同，可以归纳为如表1.2所示。

表 1.2 FMVSS214 和 ECER95 评价指标的比较

内容	FMVSS214	ECER95
头部	无	HIC $\leq$ 1000
胸部	TTI $\leq$ 85g（四门）/90g（两门）	RDC $\leq$ 42mm/V*C $\leq$ 1.0m/s
腹部	无	APF $\leq$ 2.5kN 内力（等于 4.5kN 外力）
骨盆	最大加速度 $\leq$ 130g	PSPF $\leq$ 6kN

#### 1.5.4 我国侧面碰撞法规的制定

由于我国城市交通路口多以平面交叉为主，导致城市中的侧面碰撞事故发生的频率比正面碰撞还高，所以推行侧面碰撞法规在我国是非常必要的。由于侧面碰撞实验研究包括可变形移动障碍壁、侧面碰撞假人及标定系统等，同时还要进行广泛的市场调研，费用昂贵，而且我国侧面碰撞的研究起步很晚，所以我国以 ECER95 为蓝本的汽车侧面碰撞标准《汽车侧面碰撞的乘员保护》(GB20071-2006) 于 2006 年 7 月 1 日才公布并实施。由于我国与欧洲都是实施汽车产品认证制，因此参考欧洲法规也是顺理成章的事<sup>[21]</sup>。

轿车侧面碰撞时，还有可能引起轿车侧向翻倾或横滚，因此评价轿车侧面碰撞安全性时，还要检测车身顶盖、车门静强度等。相应法规如美国的《侧门强度》(FMVSS571.214)、我国的《轿车侧门强度》(GB15743-1995)等。

#### 1.5.5 更为严格的汽车安全性评价指标

##### 1.5.5.1 新车评价程序 NCAP (New Car Assessment Program)

NCAP 是最早在美国开展并已经在欧洲、日本等发达国家运行多年的新车评价规程，一般由政府或具有权威性的组织机构，按照比国家法规更严格的方法对在市场上销售的车型进行碰撞安全性能测试、评分和划分星级，向社会公开评价结果。由于这样的测试公开、严格、客观，为消费者所关心，也成为汽车企业产品开发的重要规范，对提高汽车安全性能作用显著。近年，更多国家（如澳大利亚、韩国、印度等）开始重视和建立本国的 NCAP。严格的试验条件是保证评价结果客观准确的重要前提，因此，国外 NCAP 试验室普遍都具备高水平的测试设备和专业能力。但是，各国 NCAP 在组织实施方式、试验规程和评分方法上都有明显不同，这与各国在法规体系、道路交通事故统计和车辆状况等方面存在的差异密切相关。中国汽车技术研究中心在深入研究和分析国外 NCAP 的基础上，结合我国的汽车标准法规、道路交通实际情况和车型特征，并进行广泛的国内外技术交流和实际试验确定了 C-NCAP 的试验和评分规则。与我国现有汽车正面和侧

面碰撞的强制性国家标准相比，不仅增加了偏置正面碰撞试验，还在两种正面碰撞试验中在第二排座椅增加假人放置，以及更为细致严格的测试项目，技术要求也非常全面。C-NCAP对试验假人及传感器的标定、测试设备、试验环境条件、试验车辆状态调整和试验过程控制的规定都要比国家标准更为严谨和苛刻，与国际水平一致。今后，C-NCAP还将随着技术的发展进行完善。

NCAP为消费者在购车时提供尽可能全面的指导，其最终目标是，通过市场激励机制而不是通过强制性法律和法规，促使汽车生产厂商自主地开发出能在碰撞中更好地保护乘员的汽车。

#### 1.5.5.2 丰田公司的GOA评价标准（Global Outstanding Assessment）

GOA的目标是提供世界上同一级别车辆中最好的安全性能。实力雄厚的大型汽车厂商为了进一步提高其产品的安全性，除了了解安全法规之外，还需重视交通事故的调查、人体损伤机理及承受极限的研究。交通事故统计数据表明，无论是正面碰撞还是侧面碰撞，随着乘员室侵入量的增加，乘员的重伤率会大大增加。因此在丰田的GOA中，除了假人的损伤指标外，还增加了对于碰撞后乘员室的侵入量限值的规定，以此来更好地保护乘员。

#### 1.5.6 世界汽车法规的协调工作现状

从1980年开始，由国际上一些汽车工业发达国家牵头，开始进行国际汽车技术法规的协调与统一的工作，以打破世界各国、各地区汽车技术法规的壁垒。在当时的情况下，联合国欧洲经济委员会车辆结构工作组（UN/ECE/WP29）是世界范围内汽车技术法规协调和统一工作的主要组织。在1958年，UN/ECE专门制定了《关于采用统一条件批准机动车辆、装备和部件并相互承认此批准的协定书》（即《1958年协定书》）由ECE/WP29具体负责实施这一多边框架协议，制定全欧洲统一的汽车技术法规—ECE法规。由于UN/ECE/WP29对这一协定书的成功运作，使得ECE法规成为欧洲普遍采用、认可的法规，对全欧洲汽车工业发展、产品贸易和科技交流起到了十分重要的作用，同时也使得ECE法规在整个世界产生了越来越广泛而深远的影响，被许多非欧洲国家广泛采用。同时，由于ECE/WP29为联合国的下属机构，使得它有条件在绝大多数欧洲国家参加的基础上广泛地吸收许多非欧洲国家参加，其中有美国、加拿大、日本、澳大利亚、新西兰、南非、韩国、土耳其等，成为当今世界上最大、最具公开性的汽车技术法规论坛组织。在当前国际汽车技术法规一体化工作中，自然而然成了世界各国、各地区开展汽车技术法规协调统一工作的主要场所。

总而言之，要实现全球汽车侧面碰撞法规的统一，还存在大量的问题等待解决。相信在各国政府的支持和各协调组织的努力下，侧面碰撞法规的协调工作会向统一的方向发展，制定出一个能够适应全球车辆且更能提高汽车侧面碰撞安全

性能的世界性法规。

## 1.6 整车侧面碰撞乘员损伤改善设计方案

由以上汽车侧面碰撞安全性研究内容看，改善并提升碰撞安全性的措施应是以直接或间接降低法规所规定的假人伤害指标为目标，主要以车辆结构缓冲、吸能措施与乘员保护为出发点。

而汽车侧面碰撞防护主要分为车身碰撞和约束系统两方面。车身结构强度和刚度是影响其安全性的最重要因素，所以一般整车侧面碰撞安全性能改善对策应以车身结构改善为主，约束系统改善为辅。然而车身改进设计所耗的成本极大，在没有很好的设计改进时，适当地采用约束系统优化措施，可以大大地增加保护效果。

### 1.6.1 车身结构碰撞安全改进措施

侧面碰撞时车身变形空间小，所以侧面碰撞受伤的危险性比正碰大得多，为了加强乘员保护，车门、车门槛与车身柱体都要设计成刚性结构，并且越来越多地采用侧面碰撞气囊，来减轻乘员因为二次碰撞造成的伤害。实现侧面碰撞保护的思想是将侧面碰撞力有效地传递到车身具有保护作用的横梁、ABC柱、地板和车顶及其他部件，使撞击力被这些部件分散和吸收，进而把可能造成的伤害降低到最小程度，因此，我们可采用以下措施：

- 1) 增加车门强度，包括增加板厚，增加防撞梁等；
- 2) 增加车身侧边结构强度，包括增大ABC柱截面形状和板厚度，加强车身与车门连接区域，车身与车门槛及车体衡量连接区域；
- 3) 增加车门槛梁强度，包括增大承载面积，在梁内部增加加强板，填充发泡树脂等；
- 4) 安装衡量系统，包括B柱上端，仪表板和挡风玻璃下端；
- 5) 增加车门铰链强度。

### 1.6.2 约束系统安全改进措施

在约束系统安全措施中，因为安全带系统在侧面碰撞中比较没有保护作用，而且撞击的空间有限，仅能在车门内饰板设计和安装侧碰安全气囊，借以吸收乘员与车内部空间的碰撞能量，达到降低乘员损伤的目的。两项主要应用措施如下：

#### 1) 车门内饰板设计衬垫

车身内饰板材质较软，除了避免乘员与坚硬的车身钣金件发生撞击外，还能阻隔破裂变形的建树钣金件割伤和划伤乘员，此外增加适当的包装材料，更可以局部地吸收当发生侧面碰撞时乘员与车门之间的碰撞能量。车门衬垫的设计最多可降

低 10~15%的乘员损伤值，为乘员腹部及臀部保护的有效方案：

## 2) 侧面碰撞气囊

气囊是车身结构设计以外最有效提高整车侧面碰撞安全性的辅助工具，气囊的设计理念是：在车辆发生碰撞后，乘员与车体内部结构发生碰撞前，迅速地在两者之间打开一个充满气体的气袋，使乘员扑到气袋上，以缓和冲击并吸收碰撞能量，进而达到减轻乘员损伤程度的目的。

侧撞气囊主要目的是保护乘员头部和胸部两部位，保护胸部的气囊大多安装在座椅和车门上，保护头部的气囊大致安装在 B 柱和 AB 柱衡量之间。

## 1.7 本文课题背景和研究内容

文献[1]中综合统计显示：侧面碰撞是发生频率最高和造成人员伤亡最多的交通事故形式。所以，如何提高中国车辆在侧撞时的安全性能已成为迫在眉睫的事情。鉴于侧面碰撞在交通事故中的多发性和严重性，各国工程师也加大了对侧面碰撞事故的研究，内容包括：车辆侧面碰撞安全性如何更好的评价、新形式动态试验方法研究、以及侧面碰撞事故车辆之间的相容性研究。同时对于侧面碰撞中乘员保护研究包括：车门的结构改进、侧面碰撞安全气囊匹配研究以及车身结构针对于侧面碰撞性能的改进性设计等。

为了讨论的方便，人们常将汽车与外部物体的碰撞称为一次碰撞，而将人体与车内部件的碰撞称为二次碰撞。在汽车受到侧面碰撞时，车门、门立柱等将在撞击物的作用下产生变形，同时，车内乘员将受到冲击载荷的作用，此时的碰撞属于“一次碰撞”。当车门、门立柱等变形继续增加，乘员在惯性作用下将与车内构件发生碰撞，此时的碰撞属于“二次碰撞”。显然二次碰撞是由于一次碰撞过分剧烈而导致人体与汽车快速相对运动而造成的<sup>[22]</sup>，二次碰撞是造成人体损伤的直接原因，但一次碰撞在很大程度上决定了二次碰撞的剧烈程度，因此一次碰撞对人体损伤有很大影响。

本课题的目的在于对侧面碰撞中的乘员损伤生物力学进行概括性的总结，并以我国侧面碰撞法规为标准，提出提高车辆侧面碰撞安全性的相关防护措施，实现对乘员更好的保护。车门防撞杆是当今在各种类型车辆上普遍应用且已被证明能有效提高车辆侧撞安全型的重要结构，改进后的车辆加上侧面碰撞安全气囊这一新兴的安全装置则能使乘员得到更好保护，大大降低人体损伤指标。

本论文以一款具有代表性的普通三厢轿车车型为基本模型，经过局部修改和验证，在此模型基础上依据我国侧面碰撞国家标准的要求进行有针对性的结构改进，同时辅以侧面碰撞胸部安全气囊的使用，从理论上证明了作者提出的防护措施的有效性。

研究内容主要包括如下：

(1) 概括性地总结了国内外汽车侧面碰撞的研究历史和现状，并对汽车侧面碰撞安全性的研究内容，包括侧面碰撞结构安全性和乘员安全性进行了简要论述；

(2) 对比分析了当今世界两大主要侧面碰撞法规体系：美国和欧洲侧碰法规中在试验形式、移动变形壁障和试验假人等各方面的异同之处，以及世界汽车法规的协调工作现状，并叙述了我国侧面碰撞法规的制定；

(3) 在阅读国内外相关文献的基础上，较为详细地研究和总结了在汽车侧面碰撞条件下，乘员头部、胸部、腹部和骨盆的生物力学知识；

(4) 本论文采用有限元和多刚体动力学软件相结合的分析方法。在对软件的理论基础和应用方法研究的基础上，对整个侧面碰撞结构安全性和乘员安全性方案的实现以及改进进行了系统的研究；

(5) 以某机构三厢轿车有限元模型为原型，按照我国侧面碰撞法规《汽车侧面碰撞的乘员保护》GB 20071-2006的要求，建立并验证了移动变形蔽障与整车侧面碰撞的有限元模型。并借助MADYMO中的规定结构运动（PSM-Prescribed Structure Motion）的方法将有限元碰撞模型和多刚体ES-2假人模型进行耦合，得到国标碰撞条件下的假人各部位损伤数据；

(6) 针对模型在侧碰中对乘员保护的不足，作者提出在驾驶员侧前车门中增加防撞杆及改变防撞杆的配置和使用胸部侧面安全气囊等防护措施，详细地分析了诸措施及气囊各主要参数对侧面碰撞中乘员损伤的影响，从理论上证明了各种措施的有效性，并为提高汽车侧面耐撞性能提供借鉴作用。



## 第2章 汽车侧面碰撞中的乘员损伤生物力学研究

### 2.1 损伤生物力学

#### 2.1.1 损伤生物力学介绍

生物力学是根据已经确定的力学原理来研究生物体中力学问题的学科。是力学、生物学、医学等学科之间相互渗透的边缘学科，它将这些学科的基本原理和方法有机的结合起来，体现了近代科学的发展。

损伤生物力学是生物力学的一个重要研究分支。机械、化学、热学和电学等各方面的加载都可导致人体损伤，而损伤生物力学只研究机械力作用下的损伤。人体损伤生物力学亦称为碰撞生物力学，是汽车被动安全性研究的重要基础理论之一，在碰撞事故过程中，人体暴露在一个机械冲击载荷的环境中，在惯性力和接触力的作用下，人体的各部分组织将产生一定的生物力学响应。若生物力学的响应使人体的组织超过了可以恢复的限度或导致解剖学组织的破坏，或导致了正常生理功能的变化或丧失，这时就发生了人体损伤。人体组织在碰撞过程中所包含的有关力学称为碰撞生物力学<sup>[23]</sup>。

Viano是这样定义损伤生物力学的研究目的和研究内容的<sup>[24]</sup>：“损伤生物力学的研究目的是了解人体的损伤过程并研究人体在受到过载荷时的防护方法。为了达到这个研究目的，研究者必须了解损伤类别、人体的损伤机理、不同载荷条件下人体各组织和器官的响应、人体的承受极限；研制出防护装置和材料来降低人体的受伤程度；开发出可用来代替人体进行生物力学实验的机械假人和数学模型”。

人体在受到碰撞事故中的受伤过程可以用载荷-损伤模型来说明<sup>[25]</sup>，如图2.1所示。

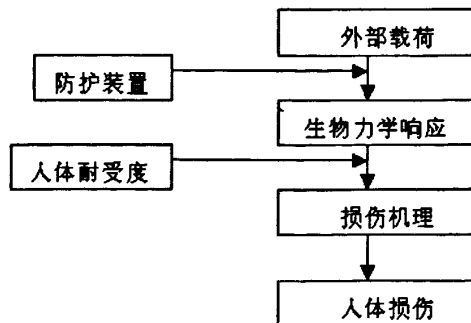


图2.1 载荷-损伤模型

该模型描述了人体从受到外部撞击到可能导致损伤的全过程。当发生交通事故时，外部载荷通过各种方式传递到人体上，由于安全防护装置的保护作用而使载荷强度得到了一定的降低，此时人体对此载荷做出适当的生物力学响应。

生物力学响应是指，在承受外界机械载荷的情况下，乘员身体会产生机械和生物等方面的响应，具体表现为人体的位置和形状（变形）随时间的改变，和由于机械变化所导致的人体组织和器官的生物变化。例如：头-颈系统模型，机械响应指的是在事故中由于方向盘的撞击而使头部的运动和变形或是胸部变形等。生物响应指的是头晕、头痛等。当载荷超过人体的耐受极限时，将按照相应的损伤机理而导致人体损伤。

### 2.1.2 损伤生物力学研究方法和模型

试验研究和计算机仿真研究是目前碰撞生物力学领域广泛采用的两种研究方法。试验研究大致可以分为两类，一类是生物力学基础性试验，一类是检测汽车安全性设计的碰撞试验。生物力学基础试验研究生物体的碰撞响应特性，如人体各个部分在不同冲击载荷下的力学和生理学变化，它与活体材料的结构、性质，活体材料的生长与修复，肌肉的强度等有关。目前，广泛使用的HIC和VC等各种人体耐受度指标都是通过类似的试验得到的。碰撞试验更多地考虑了事故的环境，与车辆及其约束系统等工程因素联系在一起。试验的目的是，测试安全防护设施（如安全带、安全气囊等）的损伤防护性能及汽车整体结构的耐撞性。

碰撞试验的伤害危险性决定了必须用模型来替代人进行试验，在试验中采用的模型可分为三大类：

#### （1）生物力学模型

##### 1) 人类志愿者

用人类志愿者作为模型进行试验要在确保不发生损伤的条件下进行，并有严格的制度和试验规范。这种试验可以提供人体在没有发生损伤时响应的很多一般性知识，其结果对于开发机械式假人和人体数学模型都很重要。此外还可以研究活体组织在冲击载荷下的响应。



图 2.2 美国海军生物动力学实验室(NBL)的人类志愿者试验

第一例具有完整纪录的人类志愿者试验是1954年在美国Holloman空军基地进行的,如图2.2所示,志愿者是John. Paul Stapp上校<sup>[25, 26]</sup>。美国海军生物力学实验室进行了大量的人类志愿者试验。一般志愿者为受过良好训练的青年,多位军人,他们对痛的忍受能力比一般人高很多,所以试验结果一般不能直接用于对女性、儿童和老年人。

## 2) PMHS试验

人类尸体试验,也称PMHST(Past Mortal Human Subject Test),尸体试验是碰撞实验研究的重要方法,主要用于人体损伤力学的研究,试验的结果也是验证机械试验模型和数学仿真模型的重要依据。最初用于损伤生物力学响应研究的人体替代物模型是人类尸体。从人类学的角度来说,PMHS的材料与活人是一致的,但是制作准备的技术和死亡相隔的时间对试验结果都有影响。一般PMHS试样的肺是充了气的,血压是靠注射维持。使用PMHS的不足之处使肌肉的强度和生理学反应无法确定。此外人体的很多组织与年龄相关,若PMHS的年龄偏大,也难以将试验数据用于一般人群,但目前该模型仍然经常使用。

## 3) 动物模型

用麻醉了的动物作为人的替代物进行损伤试验,对于取得脑组织、脊椎等特殊部位的数据是很重要的,但是,在很多情况下由于人体与动物在尺寸、形状和结构上的差别都很大,要由动物试验所获数据推知人体的相关数据实际上是一件很困难的事。

### (2) 机械模型

机械模型也称为碰撞试验用假人模型(dummy)或拟人试验装置(ATD: Anthropomorphic Test Device)。假人在结构、尺寸、质量分布和冲击运动学、动力学特征方面与人类都相似,并在重要部位的冲击响应方面具有生物力学保真度。在试验中假人与约束系统一起使用,可以评价汽车安全装置的性能,并可测试汽车整车的安全性。由于假人用途广泛,目前世界各国汽车安全性评价主要依赖于假人模型,所以假人的测试能力常常影响到交通安全有关法规的制定。

### (3) 计算机仿真模型及其理论基础简介

用数学模型来研究防护装置和汽车的安全性能、并对碰撞环境下人体损伤的可能性进行估计越来越广泛。该模型必须建立在以上所述模型的基础上,可以用来研究如机械模型所不能测量的数据。而且相对于其他的模型,该模型的经济性和可重复性的特点非常突出。目前,使用最多的是多刚体和有限元模型。在人体生物力学模型研究中,依据建立数学模型参数的来源,有基于假人数据的假人数学模型(假人模型)和基于解剖学的人体数学模型(人体模型)。人体模型是目前计算机仿真模型研究的重点,数学模型一般要经过试验验证才有实际意义。但数学模型的局限性就是模型的有效性和可靠性,而这些取决于多方面因素,如:

试验验证数据可靠性,分析软件的可靠性和分析人员的经验等等。因此,人体计算机仿真模型的建立、验证和参数分析是碰撞生物力学研究的重要内容。

数学模型具有可重复实验性,并可以较短时间和较低成本进行参数研究。同时计算机仿真可以对实验条件下一些无法测得的参数进行计算,例如局部结构的应力应变分布等。目前,在人体生物力学模型研究中主要用到的数学模型有两类:

多刚体模型采用多刚体动力学的计算方法,用椭球体、平面等一些简单的几何形体来模拟人体的各个部位,相互之间通过各种铰节点进行连接,可计算出运动系统的速度、加速度、位移、力等各种动力学响应参数<sup>[27]</sup>。其主要仿真软件有MADYMO、ATB、ADAMS等。其中在损伤生物力学领域应用最广泛的是MADYMO(Mathematical Dynamic Model)。

MADYMO在碰撞生物力学和汽车碰撞分析领域内应用最为广泛的软件。MADYMO模型由在一个开环系统中的一系列通过各种铰链连接起来的刚体组成,一般用树形结构来描述。多体由平面、椭圆和超椭圆体等来表示,这些几何体都能够提供碰撞条件下体与体之间的接触的曲面。

MADYMO的运动控制方程采用牛顿—欧拉方法,刚体*i*的质心运动控制方程表达式为:

$$m_i \ddot{r}_i = F_i \quad (2.1)$$

$$J_i \cdot \dot{\omega}_i + \omega_i \times J_i \cdot \omega_i = T_i \quad (2.2)$$

*M<sub>i</sub>*代表质量,*J<sub>i</sub>*指质心的惯性张量,*ω<sub>i</sub>*指角速度向量,*F<sub>i</sub>*指合成力向量,*T<sub>i</sub>*指相对于质心的合成扭矩向量。对于一个多体系统中的体来说,*F<sub>i</sub>*和*T<sub>i</sub>*包含铰链和约束力和扭矩。在系统的加速度确定的情况下这些量才能确定。这和所有其他的力和扭矩只取决于系统的位置和速度形成对比。

未知的铰—约束力和扭矩可以根据虚功原理来删除。方程(2.1)和(2.2)由位置向量*δr<sub>i</sub>*和方向量*δπ<sub>i</sub>*的变动来增值,并将系统里所有体的方程累加:

$$\sum \delta r_i \cdot \{m_i \ddot{r}_i - F_i\} + \delta \pi_i \cdot \{J_i \cdot \dot{\omega}_i + \omega_i \times J_i \cdot \omega_i - T_i\} = 0 \quad (2.3)$$

如果两连接刚体的*δr<sub>i</sub>*和*δπ<sub>i</sub>*变量满足以下条件,即铰链造成的约束不违反正常条件(干涉),那么铰链的约束作用力和力矩将被消除。铰链相互作用导致的力和力矩的消除,将会产生一个特殊自由度的平衡系统。从周围的体开始,铰链自由度的二阶导数表达式如下:

$$\ddot{q}_{ij} = M_{ij} \dot{Y}_i + Q_{ij} \quad (2.4)$$

式中*Y<sub>i</sub>*代表一个列矩阵,此矩阵包含坐标系父体*i*的所有线性加速度和角加速度量值,矩阵*M<sub>ij</sub>*和*Q<sub>ij</sub>*依赖于体的惯量和系统的瞬间几何特征。另外,*Q<sub>ij</sub>*还由系统的

瞬时速度和外加载荷决定。

根据铰链坐标及其一阶时间导数，应该在积分开始前定义初始条件。

树形结构载各种外部力和加速度场条件下的运动方程可以通过各种积分方法来求解，MADYMO中的积分方法选项包括修正欧拉法、固定时间步长的4阶龙格—库塔(Runge-Kutta)法和可变时间步长的5阶龙格—库塔法等。

有限元模型采用有限元计算方法。其基本思想是：把一个原来是连续的物体离散成有限个单元，且它们相互连接在有限个节点上，受等效的节点载荷的作用，并根据平衡条件来进行分析；然后根据变形协调条件把这些单元重新合起来成为一个组合体再综合求解。有限元模型不仅可以求得诸如速度、加速度等动力学响应参数，而且可以求得任意部位的应力应变、能量分布等参数。其主要仿真软件有LS-DYNA3D、PAM-CRASH和RADIOSS等；其中在损伤生物力学领域应用最广泛的是LS-DYNA3D。

LS-DYNA3D 软件是非线性显式有限元计算程序，主要用来分析产生大变形的非线性材料的实体和结构的动力学响应。LS-DYNA3D 软件采用拉格朗日公式来描述随时间变化的变形：

$$x_i = x_i(X_\alpha, t) \quad (2.5)$$

其中式(2.5)中的  $X_\alpha$  是参考坐标， $\alpha=1,2,3$ ，是当前坐标， $i=1, 2, 3$ ， $t$  是时间。

运动方程可以用张量向量符号表示：

$$\rho \ddot{x}_i = \sigma_{ij,j} + \rho f_i \quad (2.6)$$

式中  $\rho$  是密度， $x$  是位移， $\sigma_{ij}$  是柯西应力张量， $f_i$  是单位质量的体力。

将式(2.6)乘以一个任意位移，并且将其在区间内积分，可以得到如下的虚功原理：

$$\int_{\Omega} (\rho \ddot{x}_i - \sigma_{ij,j} - \rho f_i) \cdot \delta x_i d\Omega = 0 \quad (2.7)$$

利用变分原理，可以得到虚功原理的弱形式：

$$\int_{\Omega} (\rho \ddot{x}_i - \rho f_i) \cdot \delta x_i d\Omega + \int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ij} d\Omega = 0 \quad (2.8)$$

使用壳单元、实体单元、梁单元、杆单元和膜单元使其空间离散化，然后用有限元的近似值代替位移、速度、加速度和应力的数值，得到有限元模型的运动方程。

将所有单元的内力和外力相加，然后除以当前自由度的总质量，就可以得到该自由度的加速度。 $n$  时刻的半离散运动方程可以写成：

$$a^n = M^{-1}(P^n - F^n + H^n) \quad (2.9)$$

式中  $M$  中的是质量的对角矩阵,  $P$  是外力的向量,  $F$  是应力的离散向量,  $H$  是沙漏阻力。

为了获得速度和位移, LS-DYNA3D 软件以显式数值的形式, 用中心差分法在时间区域内积分运动方程:

$$v^{n+1/2} = v^{n-1/2} + a^n \Delta t^n \quad (2.10)$$

$$u^{n+1} = u^n + v^{n+1/2} \Delta t^{n+1/2} \quad (2.11)$$

其中

$$\Delta t^{n+1/2} = \frac{\Delta t^n + \Delta t^{n+1}}{2} \quad (2.12)$$

其中  $v$  和  $u$  分别是整体节点的速度和位移向量。时间步长的数字用书写体来表示, 时间步长用  $\Delta t$  表示。显式积分的形式是条件稳定的。Courant 准则限制了时间步长的大小, 即声波在一个时间步长之内不能穿过网格中最薄的单元。当前的几何等于最初的几何加上位移增量:

$$x^{n+1} = x^0 + u^{n+1} \quad (2.13)$$

以上的方法从最初时间一直重复到指定的终止时刻。

接触碰撞算法可以处理面与面之间的缝隙和面上的滑动效应。LS-DYNA3D 软件有许多不同的接触类型可供选择, 其中最为常用的有四种接触类型: 1) 滑动表面; 2) 约束表面; 3) 有摩擦的碰撞; 4) 单面接触。单面接触是碰撞仿真中最为关心的接触类型。

## 2.2 碰撞载荷下的人体损伤机理

损伤机理是对引起人体解剖和功能损害的力学因素的一种描述。即阐明人体组织或器官在冲击过程中是如何损伤的, 它是碰撞损伤生物力学研究的基础<sup>[28]</sup>。人体损伤可分为两种主要形式: 侵入损伤 (penetrating injury) 和非侵入损伤 (non-penetrating injury)。前者一般由高速弹出物或是低速尖锐物体对人体的撞击导致。后者一般指钝的物体与人体有大面积相撞所致。

碰撞载荷下人体三种主要的损伤机理如图2.3所示<sup>[25]</sup>:

Elastic损伤形式是指人体某部位的在受挤压而超过其弹性承受极限, 这种形式的损伤可由低速的身体变形 (crushing) 或是高速撞击形成。

Viscous损伤形式是指突然的对人体的冲击使得人体内部器官超过其粘性极限。在外部没有明显损伤的情况下, 这种形式的损伤仍然存在。例如: 在撞击胸块 (sternum) 导致胸腔出现Viscous损伤形式。

Inertial损伤形式是指由于惯性作用使得人体内部结构组织出现撕裂等现象。例如：在头部的损伤中，这种形式占有很大比例。

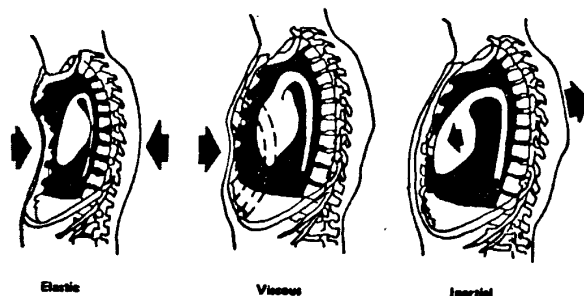


图 2.3 乘员的三种主要损伤机理

身体不同部位的损伤由不同的方式引起，并包含多种损伤机理。通常，创伤是由外力施加于身体某部位引起，外力可以是压力、折力、扭力、切力或拉力，从而产生骨折、韧带撕裂、动脉破碎、皮肤撕裂。例如，长骨在张力下易于骨折，而拉力很少引起骨折；而短骨，如椎体易在压力下骨折。张力还可直接作用于韧带，使关节活动过度而使韧带断裂。当胸部受到撞击时，胸腔内脏可以移位，从而使主动脉在与其它血管联结的韧带处移位，韧带产生的拉力促使局部的张力增加，从而导致血管破裂。钝性撞击引起的压力是皮肤撕裂的损伤机制。脑部受到撞击的部位产生压力，而对面一侧则受到张力，从而导致脑组织损伤滞后颅骨损伤，对冲伤即由负压引起。越来越多的证据表明，脑白质弥漫性的轴突损伤是切应力作用于脑组织的结果，切应力由脑组织相对于颅骨运动引起，如旋转或头脑不受力变化，或如由压力转化为张力。如果胸部受到一个快速运动物体撞击，可引起致命的房颤，其机理为：撞击可以把压力或张力穿过胸壁和心脏传导波动，导致心肌电生理改变<sup>[29]</sup>。

### 2.2.1 头部损伤机理

头部损伤包括头骨骨折、局部脑损伤和弥散性脑损伤，而最普遍的损伤类型为弥散性脑损伤<sup>[30]</sup>，大概占据所有头部损伤的一半有余，一项英国的研究表明，交通事故中的弥散性脑损伤经常来源于头部与车内部件，大部分是与车窗的接触（Morris等人，1993），主要是由于头部的快速旋转运动导致<sup>[31]</sup>，其典型症状为短时间失去意识，这种损伤一般发生在严重性低于集中脑损伤和头骨骨折的碰撞中，其发生往往独立于其他类型的损伤。

Gennarelli等人在1987年发现超过一半的医院脑损伤患者患有弥散性脑损伤，其中三分之一是致命的。Morris等人在1993年在另一项研究中发现侧面碰撞中有60%的AIS2+头部损伤为弥散性脑损伤<sup>[31]</sup>。

Mackay等人（1992）通过对55例前排乘员因致命损伤而死亡事故的研究后，

发现头颈部损伤导致死亡的机率是胸部损伤的两倍。作者还根据样本中的碰撞形态对事故的最大AIS值进行了调查,发现其中52%来自头颈部,41%来自胸部而7%来自腹部。Bradford等人(1986)通过观察发现在从事汽车碰撞和损伤研究的研究者当中已经达成了一种共识,那就是汽车碰撞中的头部损伤是最具破坏性也是最难通过对车辆结构的设计来降低的损伤。侧面碰撞中头部损伤的问题已经被很多研究者提出,其存在的根本原因在于在侧面碰撞中受到碰撞的车辆会带动乘员一起运动,而乘员的头部与车辆侧面结构如侧门、侧面框架和车窗玻璃之间的距离非常接近。Mackay在1987年研究了一些车对车的碰撞实例,发现乘员身体的直接载荷都首先作用于肩部水平线向下,所以头部会随之侧向弯曲并通过侧车窗撞向撞击车辆,这样头部就更容易暴露于一个严重的直接载荷环境下,并且如果与车相撞的是柱状物或树且有侵入时,乘员头部将成为发生损伤机率最高的区域<sup>[30]</sup>。

Lister和Neilson在1969年研究发现在未使用安全带的汽车用户中,侧面碰撞占据了所有导致乘员严重或者致命损伤的事故中的13%,他们也发现头部损伤在车对车的事故中很少发生而多出现在汽车与固定物的碰撞事故中,在所有发生了中等,重伤或致命头部伤害的事故中,大概只有半数的乘员能够幸存。相对其他程度的损伤都趋向于发生在靠近碰撞侧的成员身上,较严重的损伤发生在近碰撞端和远碰撞端的机率基本相当<sup>[30]</sup>。

Fan在1987年研究发现在车辆碰撞事故中,大约27%~30%的成员伤亡都来自于侧面碰撞,同时在侧面碰撞中的主要碰撞形式有:(1)乘员胸部与车辆内部侧面结构碰撞,(2)头部与A柱或顶部结构碰撞,(3)乘员身体部位通过车窗运动到车外。

Huelke和Compton在1992年调查了62位在侧面碰撞中遭受AIS3—6头部损伤的无约束驾驶员并发现与之最普遍的碰撞部位为A柱,侧面顶部结构或者外来物体。

## 2.2.2 胸部损伤机理

人体胸部是除头部以外最需要保护的部位,胸部损伤的实质上几乎不存在长期的伤残。基本上受害者要么在受伤后很快死亡,要么很快痊愈(Melvin, 1988)。从人体胸部骨解剖学看,它实际上是一个可以在一定的外部载荷范围内保护其内部重要器官的柔性和可变形的结构。发生在典型的机动车事故中的钝碰撞可以产生过大的力而导致多骨骨折并撞击血管结构和其它软组织。尽管各种类型的内部器官损伤如心、肺、肝和大动脉的破裂会频繁发生在汽车事故中,但是当考虑到损伤的严重性的发生的频率时骨骼的损伤是排在首位的(Stephen, 1985)。

在侧面碰撞中,作用在侧面胸壁上的力是通过表层组织向下面的骨骼结构传导的。内部的应力应变都产生于肋骨和胸骨里面,这可能导致肋骨骨折和关节脱



白,如果力足够强烈的话,还可能导致气胸和胸腔积血。以下就是在侧面碰撞发生频率最高的一些胸部损伤。

肋骨骨折是所有胸部损伤中最常见的,多发生在中老年人群中,因为他们的肋骨一般比较脆弱因此容易受到伤害。大部分的胸部骨骼损伤都是由胸腔与车辆上坚硬的内部结构时产生的侧面载荷而导致的。由于肋骨骨折所吸收的能量可以减少能量流向胸腔的内脏。在侧面碰撞中,作用在前后腋窝线之间的力会频繁导致在单一的一块肋骨上出现有两个或多个破碎位置的多重骨折,使胸壁的某一部分出现不稳定的情况。由于肋骨的“C”形结构会在肋骨曲率急剧下降的地方产生应力集中,因而前后腋窝线都可能发生骨骼破碎(Mulligan, 1994)。

### 2.2.3 腹部损伤机理

腹部损伤主要来自腹部周围器官受力或者压力而导致其变形或者穿透,另外,在高速碰撞情况下,实体状器官如肝脏等可能因为受到外在压力而遭受严重损伤并产生轻微变形。各种类型的压力传感器能够并且已经被应用在假人或者尸体试验上,一般这种传感器都是用于测量充满气体或流体的容器中的压力。在前碰撞试验中,将力-变形传感器安装在髌骨顶端来测量腹部因安全带腰带的约束产生的侵入量,而在侧面碰撞中,则一般会测量腹部力和变形。

### 2.2.4 骨盆损伤机理

交通事故骨盆骨折多为高能量交通伤所致,常有不同程度的合并伤和多发伤。据报道,25%~84.5%的骨盆骨折为交通事故所致<sup>[32]</sup>;在所有骨折中,骨盆骨折约占1%~3%;在交通事故死亡者中,骨盆骨折是第3位死亡原因,仅次于颅脑伤和胸部损伤,死亡率约5%~20%,致残率为50%~60%<sup>[33]</sup>。骨盆骨折所导致的死亡都直接或间接因出血所致<sup>[34]</sup>。Star等报道呈休克状态骨盆骨折患者的死亡率可高达57%。目前开放性骨盆骨折患者的死亡率存在明显的差异,介于4.8%~50%。生物力学方面的研究进展推动了骨盆损伤机制研究的发展。

#### 2.2.4.1 骨盆生物力学性能

骨盆系完整的闭合骨环,直立位时,重力从腰椎经上3节骶椎向下传递等量分布至两侧骶髂关节、髌髂部增厚部分,再向下传递至髌白及股骨,形成骶股弓;坐位时,重力由骶骨经骶髂关节向下传递至髌髂部,再向下经坐骨上支、坐骨结节,形成骶坐弓。除2条承重主弓外,另外有2条联结副弓起增强主弓的作用,一条经耻骨体及耻骨支连接骶股弓两端,另一条经耻骨及坐骨连接骶坐弓。研究表明,骨盆闭环时在500N载荷作用下的应变骶1、骶2发生较大,可达到580 $\mu\epsilon$ ,力传递至骶髂关节后随之下降为470 $\mu\epsilon$ ,说明髌髂是受力的“脊梁”,传递力的主要途径,而后至髌部,在耻骨部应变减弱到200 $\mu\epsilon$ 。骨盆遭受暴力作用时,副弓

往往首先骨折，然后波及主弓；主弓骨折时，副弓大多同时骨折。值得注意的是耻骨支和耻骨体骨折在所有骨盆骨折中比例>70%，最常见的是耻骨上支骨折<sup>[35]</sup>。

骨盆稳定性不仅依赖于骨结构，而且依赖于坚强的韧带，其将2块髌骨和1块骶骨连接在一起。稳定的骨盆损伤是指骨盆能承受生理载荷而不变形。骨盆环的稳定依赖于骶髂后负重复合体的完整，主要是骶髂后韧带复合体、骶结节韧带和骶棘韧带的完整。Newhouse等报道骨盆前结构(耻骨联合、耻骨支)在骨盆环稳定的功能中只占40%，骶髂后复合结构占60%。骶髂后韧带和骨间韧带构成骶髂后韧带复合体，它如同一吊桥的绳索稳定骶髂关节，防止负重时髌骨向后移位或髌骨向前移位。髌腰韧带连接L4、L5横突至髌嵴和骶髂骨间韧带的纤维横行交织在一起，并进一步加强悬吊机制。骶棘韧带和骶结节韧带间相互成90°角，此结构较好地控制了作用于骨盆上的两种主要外力，即外旋和垂直外力。骶髂前韧带扁平、较薄，一定程度上可对抗骨盆外旋力和剪力。

Tile等骨盆韧带切断实验研究证实：骶棘和骶髂前韧带有抵抗外旋暴力，限制半骨盆外旋的作用；而骶髂后韧带复合体主要抵抗垂直剪切暴力。如果保持骶髂后韧带的完整，即使其它韧带均断裂，亦不会发生半骨盆的上下移位和向后移位。此时骨盆为旋转不稳定，这种旋转不稳定的骨盆可依靠完整的后韧带复合体的合页机制而恢复骨盆的解剖完整性，即骶髂后韧带复合体控制外旋暴力作用差。Olson等生物力学实验也证实此结论。近年来，骨盆稳定性的全息照像分析显示：去除骶结节韧带、骶棘韧带或两者皆去除，不会改变骨盆变形的模式。Simonian等生物力学实验均证实：骶棘韧带和骶结节韧带对保持整个骨盆的稳定性几乎没有作用。

Olson等观点相似，认为腹壁及其筋膜有控制骨盆旋转外力作用，并进一步由生物力学实验所证实。目前对腹股沟韧带对骨盆稳定作用的研究甚少。

#### 2.2.4.2 骨盆损伤机制

国外对骨盆损伤的关注始于20世纪40年代，当时报道的病例较少，多为个案报道；60~70年代，随着骨盆损伤病例逐年增加，对此类损伤的临床研究大大增加；80年代起，骨盆损伤机制方面的研究较多，Pennal等较早地研究了暴力大小及方向与骨盆损伤形式间的联系，第一次根据暴力的方向对骨盆损伤进行了分类，并对359例骨盆损伤进行了损伤机制的生物力学分析；Tile等对骨盆损伤机制进行了深入研究；近年来的研究大多集中于骨盆损伤治疗方面<sup>[35]</sup>。

交通事故骨盆损伤常继发于直接暴力，如交通事故中翻车挤压，机动车撞击骨盆部，其次是从车顶跌下时臀部受打击。任何使骨盆后环结构完整性受到破坏的应力，在其能量转移或耗散过程中，都会造成严重后果。正常骨盆的极限载荷为2762N，极限位移8.42mm，在达到极限载荷时，骶髂关节裂开或在髌臼处骨折，

坐骨结节处失稳。一般认为暴力大小与损伤程度之间存在量效关系，交通事故所致骨盆骨折的能量转换主要通过以下途径实现。

a) 前后挤压 (antero-posterior compression, APC) 暴力经前后方向传递，先使骨盆前环耻、坐骨支骨折或耻骨联合分离。随着暴力的继续，髂骨翼不断外翻，致骶结节韧带及骶棘韧带损伤，进而累及骶髂关节，使其周围的骶髂前韧带甚或骶髂骨间韧带断裂。骨盆环的形变或髂骨翼的旋转使骨盆两侧呈分开移位，造成分离型骨折，亦即开书样损伤 (open book injury)。此种暴力易造成盆腔血管、神经及腹膜后血肿形成，骨折产生的变形移位及其剪力作用亦可引起盆腔脏器损伤。此外，应力压缩波可导致小肠损伤或膈肌破裂。

b) 侧方压缩 (lateral compression, LC) 侧方暴力直接或通过股骨近端和髂嵴作用于侧骨盆，先使骨盆前环薄弱的耻骨上下支骨折或耻骨联合分离。随着暴力的持续作用，髂骨翼不断向内侧翻转，此时可造成骨盆后方损伤，引起骶骨压缩骨折，骶髂后韧带断裂或髂骨翼骨折。侧方暴力使耻骨断端向中线移位，髂骨翼向对侧扭转挤压，导致压缩型骨折。当侧向暴力过于强大时，对侧骨盆可产生外旋性损伤，其发生机制与前后挤压所致的分离型损伤相同。一侧耻骨支骨折并对侧骶髂关节脱位者，称之为桶柄骨折 (bucket handle)。侧方暴力也可造成耻骨四支骨折，亦即骑跨骨折 (straddle fracture)，当其断端内旋时，可导致膀胱破裂。作用于骨盆侧方的外力可诱发病人体产生旋转加速运动，从而造成头颈联合损伤。

c) 垂直剪力 (vertical shear, VS) 沿身体纵轴转移的暴力，可通过股骨、髌白上部、弓状线附近向骶髂关节周围传递或自上而下反其道而行之，造成耻骨支骨折或耻骨联合分离，髂骨、骶骨或骶髂复合结构破裂，甚至L5横突骨折。从而使半侧骨盆向侧移位，形成Malgaigne骨折。骶髂关节纵向扭转兼有前后脱位者，称为半侧骨盆三维方向移位 (trip lane displacement)。剪切负载常继发于高处坠落，损伤通常较为严重，盆腔内脏极易受累。此外尚可伴发骨关节损伤，如足踝骨折、髌臼损伤 (floating hip injury) 等。此类高动能减速伤发生时，因体内各种组织的质量不同，造成组织间运动速度不一，遂产生剪切应力导致组织向薄弱区或结合部位损害，随着身体运动的突然中止，体内器官由于惯性效应仍保持着相对运动，当能量聚积储存超过其耐受限度时，可引起器官损伤，如肾蒂撕裂、颅底骨折等。

d) 复合应力 (complex mechanism of injury, CMI) 几种不同方向暴力的协同或相加作用所导致的各种类型损伤的不同组合，常并发髌臼骨折。常见的复合矢量为前侧方暴力，其损伤病理因应力大小及传播方向而异。

e) 髌臼骨折 (acetabular fracture, AF) 髌臼骨折是骨盆创伤的重要组成部分，其损伤类型通常取决于股骨头与髌臼接触的瞬间位置。当下肢处于轻度的外

展位时，暴力经肢体纵轴传递，可造成髌臼“T”形、横形或粉碎骨折；当髌关节处于外展、外旋位时，可产生前壁或前柱骨折；处于内收、外旋位时，则产生白顶负重区骨折；当髌关节屈曲、内收内旋时，来自于膝部前方的暴力可导致髌关节后脱位兼后壁或后柱骨折甚至合并股骨头损伤；当髌关节屈曲、轻度外展外旋时，若股骨大转子部受到暴力打击，股骨头可直接撞击髌臼内壁，使其发生高位横断或粉碎骨折，随着暴力的推进，股骨头将向盆腔内移，形成髌关节中心性脱位。

Dalal等分析343例骨盆损伤，其中LC占41.4%，APC占25.6%，VS占4.7%，CMI占9.9%，AF占18.4%。AF和LC多为汽车相撞损伤；APC多为行人常见的损伤，如行人受高速行驶的车辆撞击，且车碾过骨盆可造成严重LC损伤；VS多见摔伤。

交通事故致伤机制复杂，不同“交通人”有着不同的致伤特点。高能量交通伤所致骨盆损伤，不同于一般单纯损伤，人与车辆接触后，可变因素较多，包括外力传导速度、运动方向和身体位置等。一次车祸中可以发生人与车辆、人与障碍物、人与地面的几次碰撞，不同的受力机制，作用于骨盆不同部位，从而引起复杂的骨盆损伤。

## 2.3 侧面碰撞人体损伤程度和人体损伤耐受度

损伤的评估标准和指标是损伤流行病学研究的重要基础，它被用来区别和衡量事故中人体损伤程度（severity），也称为损伤评分（scaling）。它可以从力学和生理学的角度，定义为生理学或解剖学意义上的、使人体功能丧失或解剖结构损坏方面的量；也可以定义为生理学和与之相关的社会学意义方面的量。与损伤程度密切相关的另一个量称为损伤标准（injury criterion），它是通过一些物理参数或函数定义表示的。这些参数常常反映了引起某一程度损伤发生的损伤力学因素。如身体某部分的线性加速度或角加速度，作用于人体的合力或力矩，或者是由这些力而导致的变形等。人体的某一部分对损伤载荷的承受能力称为耐受度（tolerance），它定义为导致某种类型损伤发生或达到某种损伤标准的阈值时的载荷大小，或者是由这种载荷换算出来的量。应该注意到，不同年龄和个体之间耐受度的差别是很大的，一般只能用试验和统计学的方法来确定。人体耐受度是损伤生物力学研究的重要内容，也是汽车乘员损伤防护研究的基础，目前在碰撞损伤防护研究中广泛使用的有头部、胸部和颈部损伤耐受度等<sup>[23]</sup>。

### 2.3.1 头部损伤耐受度

美国Wayne州立大学Lissner等最先将头部的耐受度进行量化描述。他们得到了头部在直线加速度下的耐冲击性，就是有名的Wayne州耐受度曲线（WSTC）<sup>[23]</sup>。为了解决在比较复杂的加速度—时间关系下用WSTC进行损伤耐受度的计算，

Gadd提出了一种加权加速度指数(GSI)。在前碰撞时, Gadd确定的产生脑震荡的耐受度阈值是 $GSI=1000$ 。在比较综合WSTC和GSI的基础上, 美国联邦机动车安全标准(FMVSS)提出了头部损伤耐受度(HIC)的计算公式, 并规定 $HIC=1000$ 为头部线性加速度耐受度阈值。HIC是在硬性接触发生的条件下验证的, 因而考虑碰撞作用的时间区间长度有限。此外, WSTC只考虑头部在前后方向的载荷, 未考虑角速度和角加速度所产生的影响, 因而头部碰撞响应与头部损伤的关系尚需进一步研究。在头部损伤研究中主要还是使用HIC。

### 2.3.2 胸部损伤耐受度

由于胸部损伤是在挤压力、惯性力和冲击波载荷作用下发生的, 所以胸部损伤耐受度的定义与力、加速度和黏弹性数据有关<sup>[23]</sup>。试验证实, 人体胸部对加速度的耐受度随着加速度作用时间的延长而下降。加速度是一种便于测量的量, 因而就产生了由单一参数决定的胸部损伤耐受度——胸部g值。FMVSS第208号建议, 试验假人的胸部加速度值在超过60g时, 作用时间不要超过3ms。Kroell等在进行尸体前碰撞试验的基础上, 发现胸部挤压力比加速度更能表示胸部的损伤程度, 建立了挤压(定义为变形与胸部厚度之比)与AIS之间的关系, 提出了胸部挤压指标(C)。由于按照挤压指标进行的大量动物实验, 并不能很好地解释在更高碰撞速度下, 胸部发生损伤的现象, 因此说明胸部损伤不仅与挤压力有关, 而且在一定的挤压力之下, 损伤的程度(用AIS衡量)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均可观察到。当冲击速度达到30m/s以上时, 仅有速度的变化影响损伤程度, 因而提出了黏性指标(VC)。VC值以胸腔的变形速率与胸腔的挤压变形率的乘积表示。

### 2.3.3 骨盆损伤耐受度

文献[35]中研究表明, 导致骨盆骨折的碰撞力为8610N。在左侧碰撞中首先失效的区域位于右侧耻骨分支。骨折模式为侧面挤压骨盆损伤的变异形式。研究结果显示骨盆的前部结构为骨盆上最敏感的区域。骨盆失效的临界能量吸收量为8.98J。

半数到三分之二的骨盆骨折都是由机动车辆事故引起, Gocken等人1994年进行的一个关于交通事故受害者的研究表明, 7.5%的前碰撞事故会导致骨盆骨折, 但是在那些死于侧面碰撞事故的人当中, 超过半数的人都遭受骨折。Dalal、Burgess和Pattimore等人发现, 三分之一的遭受骨盆骨折的幸存者在经过治疗后效果都不甚理想。这些研究结果在医学技术上提出挑战的同时, 其预防也成为汽车设计中的一个重要方面<sup>[35]</sup>。

出于设计适用于车辆安全设计和实验评估的碰撞假人及研究用人体替代物的需要, 已经有一部分研究者进行了侧面碰撞中骨盆的生物力学研究工作。Patrick

等人研究了在汽车碰撞环境下膝盖-大腿-骨盆联合体的运动情形，发现导致骨盆骨折的最低载荷为7100N。Melvin和Nusholtz也进行了类似的尸体试验，当载荷达到20000N时，骨盆出现轻微单一的骨折，尽管如此，当载荷增加到26000N时，骨盆仍未出现相应损伤。为获得用于设计车门填充物的数据，Cesari等人也进行了侧面碰撞环境下骨盆的生物力学研究，用尸体试验模拟骨盆侧面碰撞；记录其间的速度和加速度数据以确定损伤关系。这项研究结果认为骨盆的碰撞相应决定于碰撞速度、最大载荷和冲击。Nusholtz等人于1982年进行了骨盆间接侧面碰撞调查，并发现吸能和均布载荷的材料能有效地疏导骨盆上的能量从而使其免受损伤。1993年Renudin等人以来自于各类不同相关文献的骨盆几何特性和材料特性为基础，建立了一个三维有限元人体骨盆模型。模型采用壳单元表示皮质骨，并忽略了某些带孔的细微骨头结构。作者还假设其骶骨和两个髂骨骨沟之间没有相对运动，则骶骨-髂骨关节和耻骨连接处关节在建模过程中都可以认为是没有相对运动的刚性结构，设定三个方向的运动以不同速度3.5m/s和6.5m/s分别模拟加载静态和动态侧面载荷，一种情形把力加载在髂骨而另一种情形则加载于关节窝处，结果表明较高应力区域即为发生骨盆损伤最频繁的区域<sup>[35]</sup>。

为进一步进行精确的骨盆结构损伤风险评估，必须要深入了解骨盆的结构响应。首先要明确识别各部分重要结构所在的位置，这些信息也可以用于车辆安全和保护方面。由于机动车交通事故导致的骨盆骨折往往是高能量的骨头碎裂，所以了解骨盆的整个能量存储能力是很重要的，这就需要乘员骨盆与车门面板之间的碰撞能量耐受度的知识。1982年Cesari和Ramet研究发现将这个能量减到最小能有助于更好地保护骨盆。所有这些调查工作都是为了单独地来描述骨盆在侧面碰撞中的结构响应。

## 2.4 侧面碰撞乘员损伤评价标准

人体损伤的严重程度可由损伤评估标准来表示。损伤评估标准可分别从力学、生理学或社会学的角度对人体功能丧失、解剖结构损坏、社会经济损失等进行定量表示。从这些角度出发，损伤评估标准可以分为三类<sup>[27]</sup>：

a) 解剖学尺度：按损伤发生的部位、损伤类型和损伤程度来评定。这种评定标准用损伤本身而不是损伤产生的后果来衡量受伤程度。这类损伤评定标准中最有名的是简略损伤标准abbreviated injury scale (AIS)。

b) 生理学尺度：它是通过描述由事故损伤而导致的人体某部位功能状况变化来评价，与解剖学尺度评价的区别是，后者只对一个损伤数值进行评价，而生理学尺度评价要对损伤部位的状况进行全程的、多指标的评价。其评定值会在损伤的治疗期间变化。这类标准中的代表是Glasgow Coma Scale标准 (GCS)，GCS标准是对头部的损伤的评价，通过对睁开眼睛、口头反应和自动反应三个方面来快

速评估脑部的损伤。

c) 社会学尺度：主要按对伤员和社会造成的损害来评定。这类标准并不对伤害本身进行评定，而是评定伤害对伤员造成的经济损失、生活质量损失和对社会造成的损失。这类标准有ICS (Injury Cost Scale)、IPR(Injury Priority Rating)和HARM等。

对于交通事故中的损伤评估，我们一般采用AIS标准。AIS是美国汽车医学协会(AAAM)制定的一个解剖学尺度的损伤评定标准。在1971年，AIS第一次正式出版，后面经过了五次修改（1976、1980、1985、1990和2005年），最后一次的版本称作“ AIS 2005”。这一标准原本用于界定机动车辆碰撞中的损伤程度，而后来的几个版本渐渐的用到了其他方面，如枪伤。AIS可分成以下8个不同等级，AIS是对“生命危害程度”的一个排序，其等级值越高就说明该项损伤对生命威胁性就越大，但AIS各等级数值之间并没有定量对应的关系，AIS标准中的数值除了排序之外没有任何其它意义，例如：AIS2不是AIS1的两倍。其具体的分级标准如表2.1所示<sup>[36]</sup>：

表 2.1 AIS 损伤分类标准

AIS	损伤程度	致命性
0	无损伤	0.0%
1	轻伤	0.0%
2	轻微伤	0.1—0.4%
3	重伤	0.8—2.1%
4	严重损伤	7.9—10.6%
5	致命伤	53.1—58.4%
6	死亡或明显不能救活	完全无法救治
9	未知，不反映 AIS 严重度水平	

在某身体研究部位，乘员损伤评价标准是通过与损伤强度相关的物理参数或一个由若干物理参数组成的函数来定义。例如：使用最多的、也相对容易的损伤标准是根据人体某部位受到的线形加速度（如：C3ms）、外力（如： $F_{femur}^{left}$ ）和力矩（如：Neck-M）。下面给出了侧面碰撞中人体最重要的若干个部位的损伤评价标准。

### 2.4.1 头部损伤标准

美国Wayne州立大学的Lissner是将头部的损伤程度进行量化的第一个人，得到了头部在直线加速度下的耐冲击性，这就是有名的WSTC<sup>[26]</sup>，如图2.4所示：

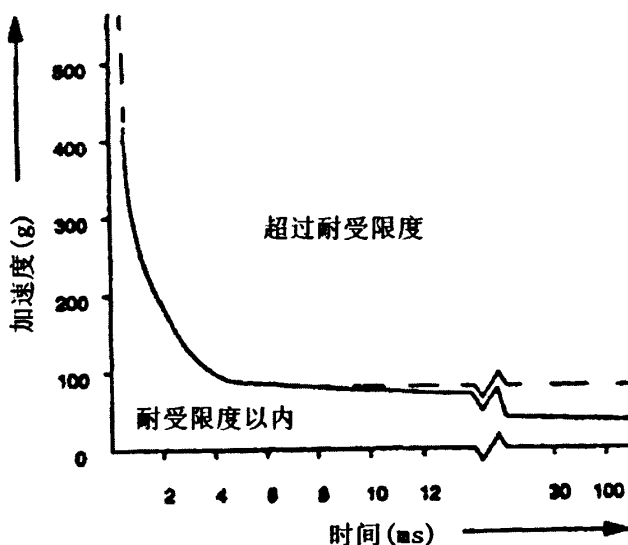


图 2.4 韦恩州立大学耐受度曲线

为了解决在复杂的加速度-时间关系下的WSTC进行损伤耐受度的计算。Gadd提出了一种加权加速度指数，称为Gadd损伤强度指标GSI:

$$GSI = \int_{t_0}^{t_e} R(t)^{2.5} dt \quad (2.14)$$

$R(t)$ ——头部惯性中心的线性加速度，g;

$t_0$  ——冲击开始的时间，s;

$t_e$  ——冲击结束的时间，s;

$t$  ——时间变量，s。

在前碰撞时，Gadd给出的产生脑震荡的耐受度阈值是GSI=1000。

在比较综合WSTC和GSI的基础上，FMVSS提出了头部损伤耐受度的计算公式HIC(Head Injury Criterion):

$$HIC = (t_2 - t_1) \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} R(t) dt \right]^{2.5} \quad t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq t_e \quad (2.15)$$

并规定HIC=1000为头部线性加速度耐受度阈值。

头部的另一种主要的损伤形式是由于惯性力的作用而产生的脑体结构错位或脑组织与头骨内膜剥离。HIC是基于头部线性加速度的，所以只能评估由于直接作用在头部质心上的力而导致的损伤<sup>[31]</sup>，而没有将头部的旋转运动考虑在内，而头部的损伤还与角加速度有关。由HIC的来由知道它是在有硬性接触发生的条件下验证的，因而，碰撞作用的时间( $t_2-t_1$ )有限。此外，HIC是基于WSTC的，WSTC只考虑头部在前后方向的载荷，而没有考虑角速度和角加速度所产生的影响，因而在头部碰撞响应和头部损伤的关系之间还有很多东西没有弄清楚，需要进一步研究。到目前为止脑和头部损伤的耐受度与碰撞响应之间的关系还没有很



好地建立起来，目前在头部损伤研究和应用中主要还是使用HIC。

我国侧面碰撞标准中规定HIC值不超过1000。

### 2.4.2 胸部损伤标准

由于胸部的损伤是在挤压力、惯性力和冲击波载荷作用下发生的。胸部损伤耐受度的定义与力、加速度和黏弹性数据有关。试验证实，人体胸部对加速度的耐受度随着加速度作用时间的延长而下降。加速度是一种便于测量的量，就产生了由单一参数决定的胸部损伤耐受度—胸部g值。FMVSS208建议，试验假人的胸部加速度值在超过60g时，作用时间不要超过3ms。Kroell在进行尸体前碰撞试验的基础上发现胸部挤压力比加速度更能表示胸部的损伤程度，建立了挤压(定义为变形与胸部厚度之比)与AIS指标之间的关系，提出了胸部挤压指标C。由于按照挤压指标进行过大量的动物试验，并不能很好地解释在更高碰撞速度下胸部发生损伤的现象，发现胸部的损伤不仅与挤压力有关，而且在一定的挤压力之下，损伤的强度(用AIS指标)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，如图2.5，因而提出了黏性指标V\*C。V\*C值以胸腔的变形速率与胸腔的挤压变形率的乘积来表示：

$$V * C = \frac{d[D(t)]}{dt} \times \frac{D(t)}{D} \quad (2.16)$$

式中，D(t)是胸腔厚度随时间变化的关系，D为初始胸腔厚度V\*C值的单位为m/s。在V\*C值的测量中，加速度信号的滤波十分重要，目前已有胸箍等先进测量设备测量胸部的变形，使得V\*C的值可以较准确地知道。Cavanaugh建议成年人最大的耐受度V\*C值为1m/s。我国标准中亦规定黏性指标应小于或等于1.0m/s

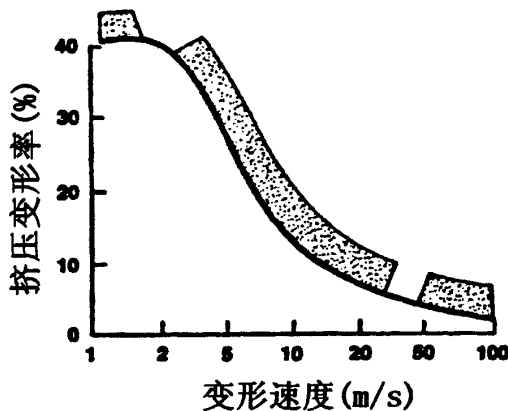


图 2.5 速度变化对胸部损伤的影响

另一胸部损伤耐受度是TTI(Thoracic Trauma Index)，表达式为：

$$TTI=1.4 \times AGE+0.5 \times (RIGY+T12Y) \times MASS/Mstd \quad (2.17)$$

式中，AGE为碰撞试验用人体替代物的年龄，RIBY为在侧面碰撞中第4根和第8根肋骨的最大加速度绝对值的平均值(g)；T12Y为第12胸椎骨的最大加速度绝对值(g)；MASS是试样的质量；Mstd为标准参考人体质量，取为75kg。TTI的单位为g。

由于TTI考虑到了年龄、体重，并采用了便于测量的加速度值，容易使用，因而FMVSS214碰撞试验标准采用了这一损伤耐受度指标。NHTSA推荐成人的TTI值为85g，儿童为60g。此外在前碰撞中胸部的挤压变形的耐受度为40~90mm，在侧面碰撞中为58mm~61mm。当胸部变形在28%~35%之间时，将导致成人AIS3损伤，儿童产生AIS3的这一变形为25%。

胸部变形量（Rib Deflection Criterion）RDC：指胸部变形峰值，是胸部位移传感器测得的任一肋骨的变形最大值，通道频率滤波等级为180Hz。国际上较多采用RDC来评价乘员胸部损伤，认为肋骨骨折是胸部普遍最会发生的伤害形式。欧洲和我国标准中规定RDC应小于或等于42mm。

### 2.4.3 腹部损伤标准<sup>[6]</sup>

耻骨结合点力的峰值(PSPF)，是由骨盆耻骨处安装的载荷传感器测得的力最大值，通道频率滤波等级为600Hz。

我国标准中规定耻骨结合点力的峰值(PSPF)应小于或等于6KN。

### 2.4.4 骨盆损伤标准<sup>[6]</sup>

腹部受力峰值，是安装在假人碰撞侧表面覆盖物下部39mm处的力传感器测得的3个力合力的最大值，通道频率滤波等级为600Hz。

我国标准中规定腹部力峰值(APF)应小于或等于2.5KN的内力(相当于4.5KN的外力)。

## 2.5 本章小结

本章简述了碰撞生物力学的概念和研究内容，主要对国内外相关文献关于汽车侧面碰撞中乘员损伤生物力学的成果进行了详细研究和总结，包括侧面碰撞载荷下的乘员各部位损伤机理、人体损伤程度和耐受限度及损伤评价标准，通过对生物力学知识的研究，加深了对侧碰中人体损伤的理解，为下文有针对性地提出防护措施并论证其有效性打下了重要的理论基础。

## 第3章 侧面碰撞有限元模型的建立和验证

### 3.1 前言

由于了解人体在真实事故中的动态反应是相当困难的。为了真实呈现事故发生的过程，各大汽车公司与相关研究机构，在早期均采用实车碰撞或台车冲击试验来作为研究并获得相关分析资料的主要手段；而人体在车祸事故中的损伤分析则是以尸体或假人放置在试验车辆上来获得相关的损伤参数。随着计算机运算性能的飞速发展及数学模型分析程序技术的逐步成熟，使得计算机模拟仿真方法在汽车安全性研究中应用越来越广泛，其分析的可行性和准确性也越来越高，不但可以获得更多准确的资料，促进车辆安全的研究与发展，还可以降低研发成本，使车辆价格更具竞争性，所以其对改善汽车安全性具有重要的指导意义。

汽车侧面碰撞与正面碰撞计算机仿真的最大区别在于，除了要建立整车模型外，还必须建立移动变形壁障模型。国外目前实施的汽车侧面碰撞法规ECER95和FMVSS214和我国的侧面碰撞标准也是如此都采用移动变形壁障进行试验，所以说移动变形壁障是开展汽车侧面碰撞试验的基本工具，在计算机仿真中同样如此。本文整车有限元模型和移动变形壁障模型的开发均根据我国汽车侧面碰撞标准《汽车侧面碰撞的乘员保护》(GB20071-2006)的要求进行。

### 3.2 MDB 有限元模型的建立和验证

#### 3.2.1 MDB 有限元模型的建立

按照我国侧面碰撞标准，在进行侧面碰撞试验时，用移动变形壁障模拟真实碰撞中的撞击车辆以50km/h的速度撞击试验车辆，因此要求移动变形壁障必须能够模拟真实汽车的一些特性，并具有一定的代表性。所以在标准中对移动变形壁障的质量、刚度、质心位置、尺寸和离地间隙都有明确的规定，尤其对移动变形壁障前部变形吸能块（采用蜂窝铝）的性能，更有详细的规定和试验要求，移动变形壁障的性能主要是指吸能块的性能，因为吸能块代表了撞击车辆前部的刚度，所以必须对移动变形壁障吸能块的变形特性进行规范，在进行整车碰撞试验前需要对吸能块的性能进行静态和动态试验验证<sup>[37]</sup>。除此之外，移动变形壁障必须安装制动系统以避免发生二次碰撞，同时在安装吸能块时要求设计通风装置以减少吸能块变形过程中空气对变形特性的影响。

如图3.1所示为作者按标准要求建立的移动变形壁障有限元模型，由移动车和前部碰撞吸能块组成，在整个移动变形壁障有限元模型中，采用了三种材料：移

动台车模型采用刚性材料 (MAT\_RIGID)，因为在碰撞过程中不希望台车发生变形；吸能块中间的连接支撑板采用分段线性塑性材料 (MAT\_PIECEWISE\_LINEAR\_PLASTICITY<sup>[38]</sup>)；变形吸能块模型采用蜂窝铝材料 (MAT\_HONEYCOMB)。分段线性塑性材料的定义是通过应力-应变曲线来确定材料的变形特性；蜂窝铝材料的定义是通过应力-体积应变曲线来确定材料的变形特性，这两组特性曲线需要通过材料试验才能获得。国内目前还没有专业厂家生产此种吸能块，无法进行这方面的试验，所以只能参考国外生产厂家提供的数据。在此模型中，蜂窝铝材料属性的定义参考了VPG软件中提供的材料模型。

整个模型以车架为基体，其他所有部件（除吸能块）通过刚性约束与车架连接，使整个台车模型成为一个刚性的整体，前部吸能块用来模拟侧面碰撞时车辆车头刚度性能，整个模型共有6661个单元，7864个节点。移动变形壁障模型质量949.9kg；质心位置距离吸能块前表面距离分别1972mm，距前轴971mm，与纵向中垂面距离0.07mm，距地面500mm，吸能块离地间隙为304mm。其形状和尺寸如图3.2所示。

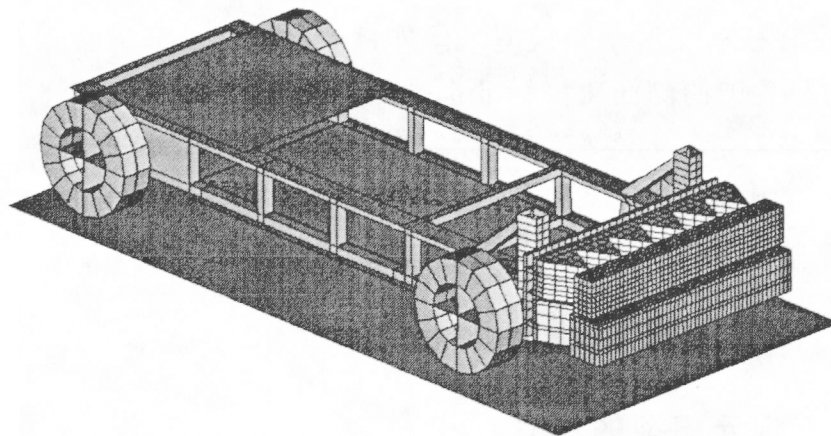


图 3.1 移动变形壁障示意图

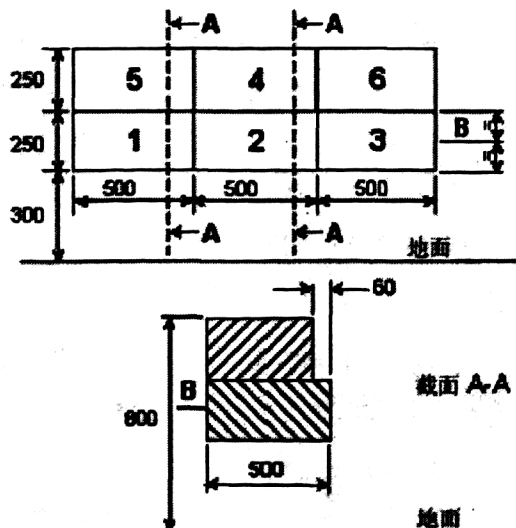


图 3.2 移动变形壁障前端结构图

### 3.2.2 MDB 有限元模型的验证

模型建立完毕，按照标准[6]对MDB 吸能块性能要求，进行动态虚拟试验，以验证有限元模型的有效性。以下将依据我国标准中移动变形壁障验证试验方法，通过仿真得到的移动变形壁障各吸能块力—变形特性曲线与标准的要求对比，以验证此MDB有限元模型的有效性。

真实的验证试验是将移动变形壁障以 $35\pm 2\text{km/h}$ 的速度与刚性障碍壁进行完全正面碰撞。刚性壁障为一个钢筋混凝土结构，至少宽3m，高1.5m，质量大约70t左右。前表面应该垂直地面，且垂直于滑道轴线，在其前面装有测力墙，测力墙由力传感器组成，用来测量撞击时的冲击力。在跑道的最后，刚性壁障前，至少要有5m水平、光滑路面。仿真中则根据以上所述验证试验的要求，在距离移动变形壁障模型前表面10mm处应用关键字RIGIDWALL\_PLANAR\_FINITE\_ID定义六面刚性墙，来模拟测力墙；同时还定义了与刚性墙垂直的一水平刚性墙（RIGIDWALL\_PLANAR\_ID）来模拟地面，模型如图3.3所示。

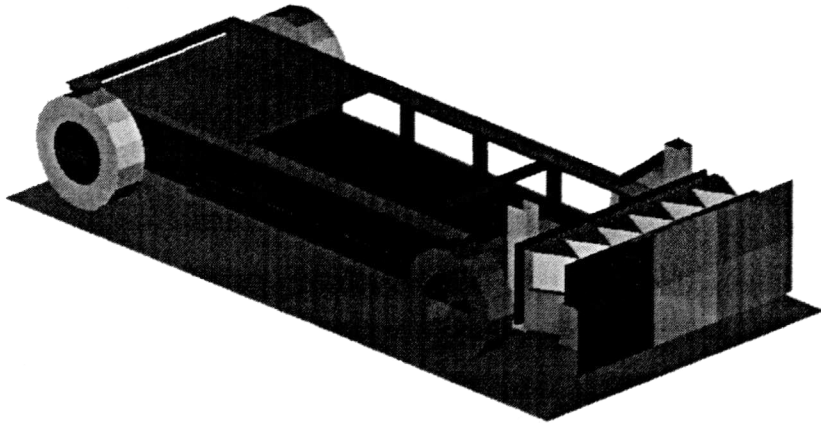


图 3.3 移动变形壁障验证模型

按照标准移动变形壁障模型的初始速度定为 $35\text{km/h}$ 。模型中通过在模型质心节点处定义关键字DATABASE\_HISTORY\_NODE，输出移动变形壁障在撞击刚性墙过程中的位移、速度及加速度，由此获得其运动情况数据；从六面刚性墙上可以输出六部分变形吸能块各自的力—时间曲线，最后通过坐标转换可以得到标准要求的、各吸能块力—变形曲线。结果如图3.4—图3.8所示：

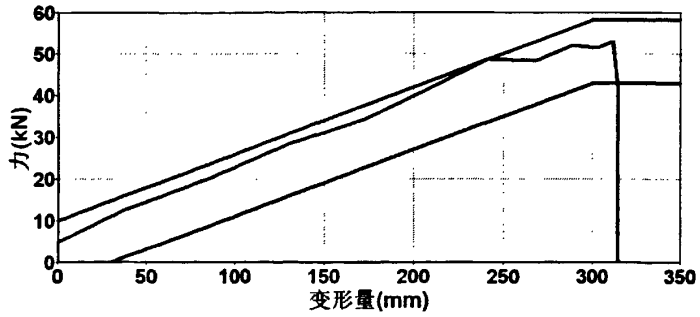


图3.4 吸能块1、3力-变形曲线

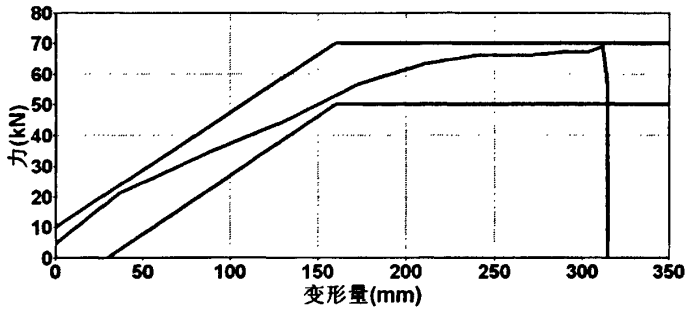


图3.5 吸能块2力-变形曲线

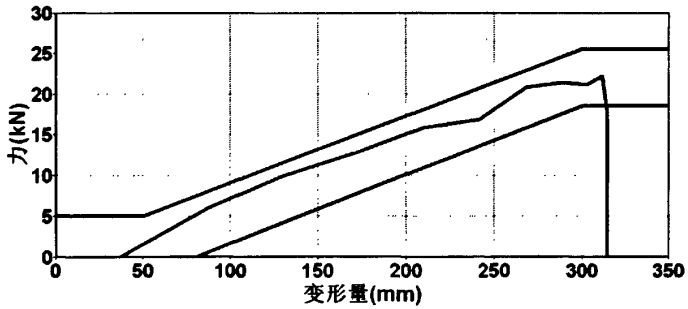


图3.6 吸能块4力-变形曲线

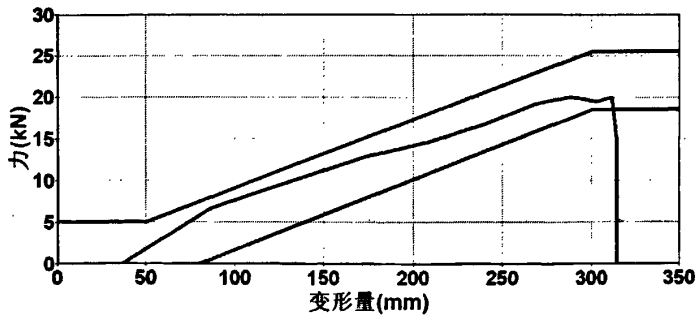


图3.7 吸能块5、6力-变形曲线

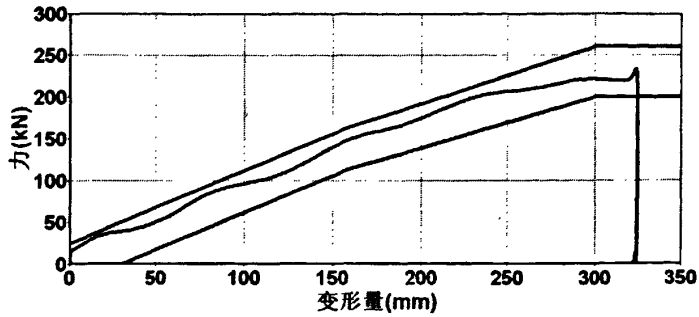


图3.8 吸能块整体力-变形曲线

标准要求六碰撞块中1、3和5、6碰撞块的碰撞吸能特性分别相同，2、4不同，从图中可以看出各变形块及总的力-变形曲线均处于标准要求的范围内，同时可以看出其最大变形量约为325mm，此项指标亦在标准 $330\pm 20\text{mm}$ 之内。符合最大变形量要求，表3.1列出了各吸能块能量吸收情况与标准要求的对比，结果显示吸能情况在要求范围内，由此，验证了此MDB有限元模型的有效性。

表3.1 各吸能块能量吸收情况与标准要求的对比

吸能块	仿真结果 (KJ)	标准要求 (KJ)
吸能块1	9.3	$9.5\pm 2$
吸能块2	14.8	$15\pm 2$
吸能块3	9.4	$9.5\pm 2$
吸能块4	3.8	$4.0\pm 1$
吸能块5	3.6	$3.5\pm 1$
吸能块6	3.7	$3.5\pm 1$
总和	44.6	$45\pm 3$

### 3.3 整车有限元模型的建立和验证

#### 3.3.1 整车有限元模型的建立

整车有限元模型的建立参考美国某量产车型Dodge-Neon，原模型为美国联邦机动车交通安全管理局国家碰撞分析中心 (NCAC, National Crash Analysis Center) 建立的正面碰撞模型，已经过NCAC进行的正面前碰撞试验验证<sup>[39]</sup>。在此模型的基础上，对照国内某车型的侧面结构，按国标的要求对模型进行了相应的调整以满足侧面碰撞仿真需要，同时也进行了单元质量、控制文件以及联接关系的确认。图3.9为整车有限元模型<sup>[40,41]</sup>，单元总数为286301，其中焊点单元总数为4208个。其中，白车身、车身覆盖件以及座椅骨架等用壳单元网格模拟，采用分段线性塑性材料；在驾驶员侧前门加上车门内饰板，内饰板材料同样定义为分段线性塑性材料；悬架系统、车门铰链和轮胎等按其运动关系做了与实际车辆相

同的定义,主要包括:球铰(JOINT\_SPHERICAL)、旋转铰(JOINT\_REVOLUTE)、柱铰(JOINT\_CYLINDRICAL)以及弹簧阻尼单元的定义;部件之间的联接关系也参考真实车身制造工艺,焊接之处采用CONSTRAINED\_SPOTWELD点焊单元,螺栓联接之处定义CONSTRAINED\_NODAL\_RIGID\_BODY刚性联接;动力总成部分简化为刚体,其余对侧面碰撞影响不大的整车线束、管路、密封条等部件由质量单元代替或省略不计。模型总质量为1388kg,质心距地581mm,距前轴1026mm,与参考车辆情况保持一致。尤其对侧围结构的材料以及联接关系进行了细致的校核。

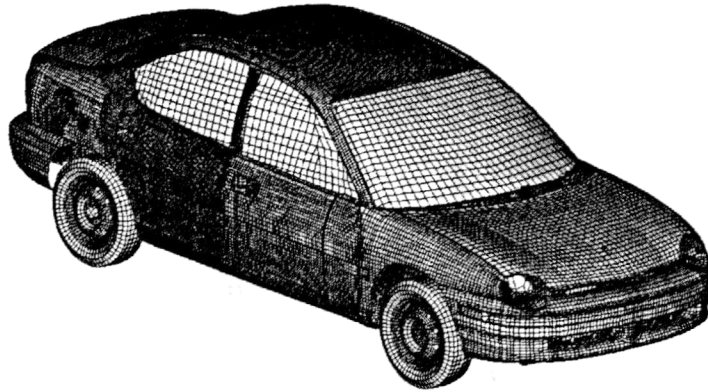


图3.9 整车有限元模型

### 3.3.2 整车侧面碰撞有限元模型的验证

对于未做修改的原始整车模型,NCAC通过将此模型原形车35mph正面碰撞法规实验和仿真数据进行对比,完成了对模型中各部件联接关系以及底盘系统运动关系的验证;此模型同时进行了25、30、40mph的有限元仿真计算<sup>[39]</sup>,仿真结果证明了此模型的有效性、稳定性和可靠性。下面选取了其中的B柱加速度、碰撞力曲线对比图,如图3.10~图3.11所示:

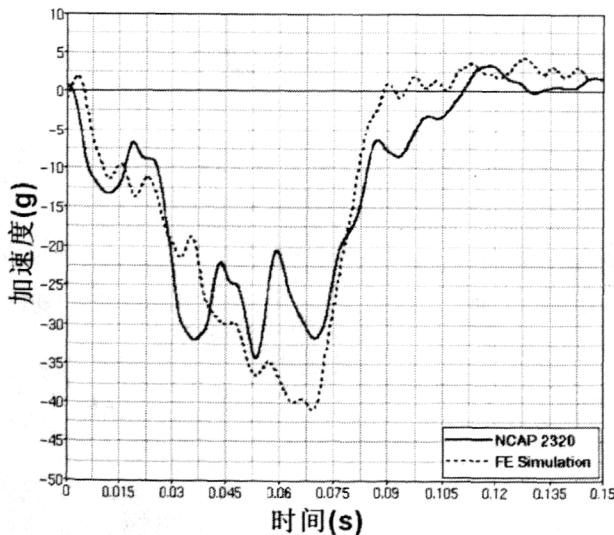


图3.10 试验和仿真结果曲线对比: B柱加速度



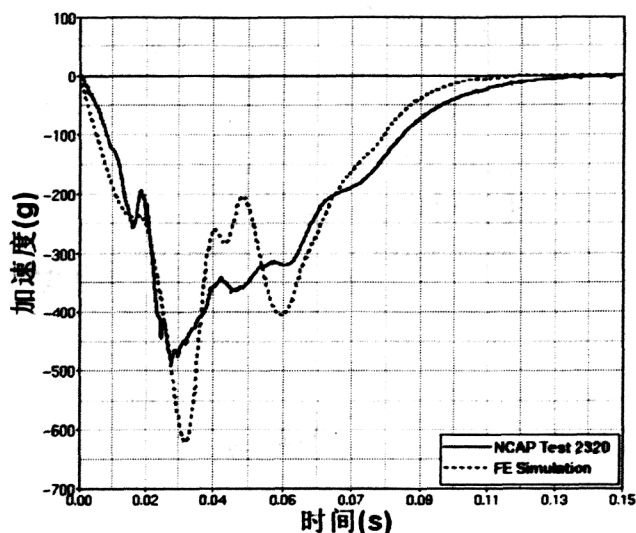


图3.11 试验和仿真结果曲线对比：碰撞力

上面的仿真数据对比表明：此模型用于正面碰撞仿真有效性得到确认。由于本文将应用此模型进行侧面碰撞仿真，本文对模型侧面结构进行了详细的检查和调整。同时对各部件的联接也进行了确认，在正面碰撞仿真有效的情况下，表明此模型部件之间联接关系和运动有效，因此在对其进行侧面碰撞的调整后对模型的有效性不会产生影响。

为了验证修改后的模型的侧面碰撞仿真性能，本文进行了与试验条件一致的侧面碰撞仿真，用动力学仿真软件LS-DYNA模拟移动变形壁障以50km/h的速度与整车模型垂直碰撞，如图3.12所示，中垂线通过碰撞侧前排座椅R点，碰撞时间设定为0.12秒。运算完毕后，输出移动变形壁障质心的减速度曲线和B柱与门槛梁处铰链的加速度曲线，并与文献[42]和[43]中记载的同类型实车碰撞试验所测得的曲线相比较，以验证本文中建立的侧面碰撞有限元模型的有效性，比较如图3.13和3.14所示。

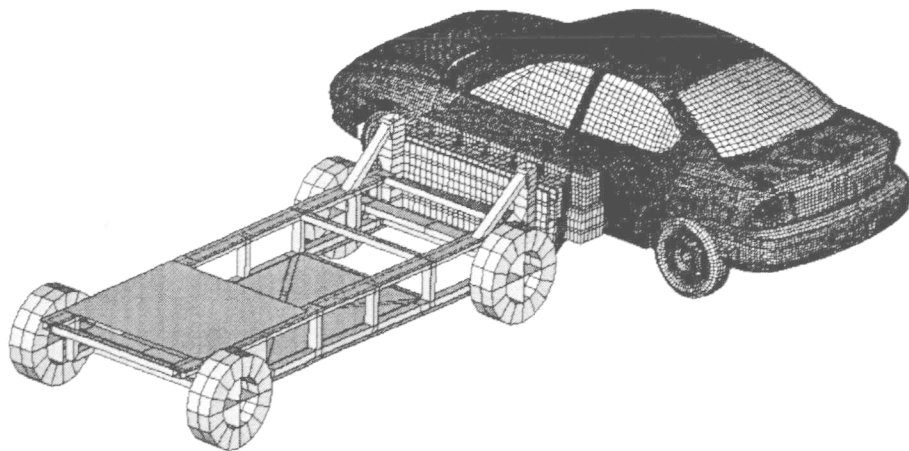


图3.12 侧面碰撞有限元模型示意图

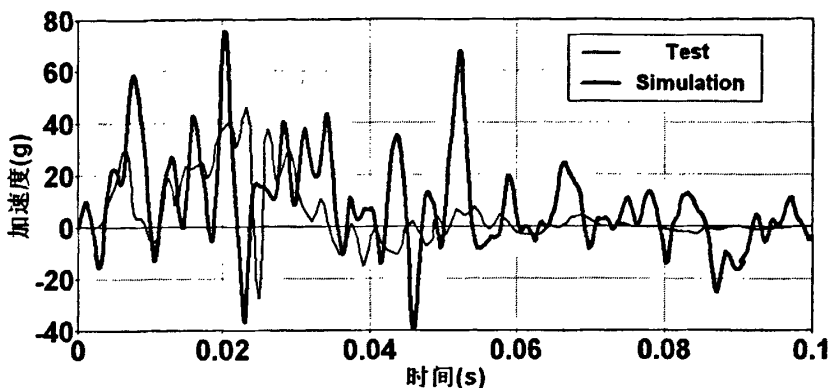


图3.13 试验与仿真结果对比：B柱Y向加速度

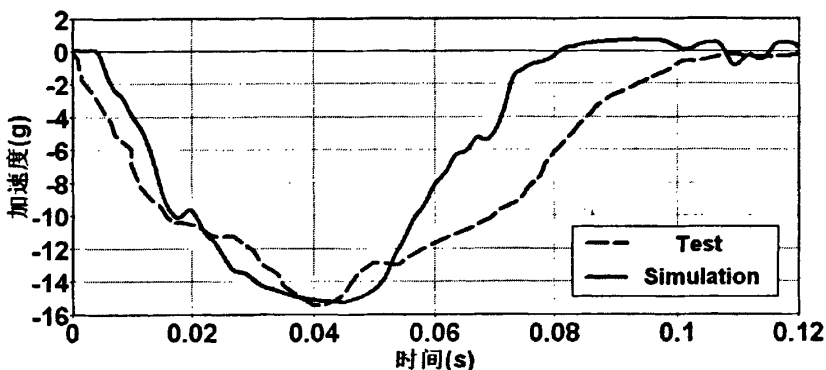


图3.14 试验与仿真结果对比：移动变形壁障Y向加速度

从图中可以看出，在碰撞过程中，仿真所得到的B柱加速度虽未与试验所得曲线有一定的差异，但总的变化趋势大致相同，尤其在碰撞过程的初期和从30ms起到最后碰撞完成的过程，两者吻合得很好。而移动变形壁障的Y向加速度-时间曲线显示，45ms时，负向加速度达到最大，约为15.2g；而仿真得到的最大负向加速度约为15.5g，发生在42ms时，两者在峰值及其出现的时间上能较好地吻合，同时两曲线的变化趋势也基本保持一致，故整车有限元模型的有效性得到验证。

### 3.4 本章小结

本章基于我国侧面碰撞国家标准，建立了与法规相适应的整车侧面碰撞有限元模型，使用有限元分析软件LS-DYNA及其前处理软件Hypermesh进行整车侧面碰撞仿真，并通过与同级别的实车试验数据对比验证了模型的有效性。

## 第4章 侧面碰撞中的乘员损伤防护措施研究

在本章中，作者依据我国汽车侧面碰撞标准《汽车侧面碰撞的乘员保护》（GB20071-2006），针对第三章中建立的整车侧面碰撞有限元模型，采用Hypermesh和LS-DYNA作为前后处理软件和求解器进行汽车侧面碰撞的数值模拟，并应用多刚体动力学软件MADYMO中的规定结构运动（PSM-Prescribed Structure Motion）的方法将有限元碰撞模型和多刚体ES-2假人模型进行耦合，得到在一定碰撞条件下的假人各部位损伤数据，同时作者采取对驾驶员侧前车门增加防撞杆并改变防撞杆的配置、修改车身局部结构和使用胸部安全气囊等措施，详细地分析了各种情况对侧面碰撞中乘员损伤的影响，以期达到有效减少乘员损伤的目的，并为提高汽车侧面耐撞性能提供借鉴作用。

### 4.1 乘员损伤分析

在第三章中已经对侧面碰撞有限元模型进行验证，本章节按照GB20071-2006《汽车侧面碰撞的乘员保护》的要求，将ES-2侧撞假人安放到车辆模型的驾驶座，由于本文采用多刚体动力学仿真软件MADYMO中自带的ES-2多刚体假人模型，故需使用MADYMO子结构模型设计中的规定结构运动(PSM: Prescribed Structure Motion)方法耦合人一车模型。

PSM (Prescribed Structure Motion) 子结构法是MADYMO侧面碰撞设计优化的一个应用<sup>[44~46]</sup>。结合多体侧撞假人模型，MADYMO多体求解器非常适合于概念设计建模开发阶段。这种建模方法建模快速，并且CPU计算时间短，相对于整车有限元分析(FVA)，根据PSM部件的比例，PSM方法可提高计算效率6~18倍，可以将CPU时间降低到3~8小时，同时计算结果具备很高的预测性，可以在概念设计阶段进行大量设计方案的对比，确保设计方案的合理性和有效性。子结构分析的优势在于可以避免整车结构分析的复杂性，而集中在关键部件的优化设计。通常而言，子结构的基本模型是从原始整车有限元模型导出，因此其载荷条件也直接由原始整车有限元仿真分析结果确定。子结构模型兼备建模细节和计算效率的优势，因此特别适合于对乘员约束系统的分析和优化。

车体模型中包含对假人损伤有较大影响的主要侧撞结构部件，主要包括：前后车门外板，车身侧围板、顶盖纵梁和座椅等。所有部件、单元属性和材料模型均是由整车模型中导出。在本次应用中即为：所有应用到的车辆部件均通过MADYMO提供的ELEMENT.QUAD4, PROPERTY.SHELL4和MATERIAL.ISOPLA进行单元划分、单元属性定义以及材料属性定义。其中单元的划分是通过从整车

模型中导出单元信息以及Part定义，然后通过ELEMENT.QUAD4进行四边形单元的建模，不同部件之间使用RIGID\_ELEMENTS单元连接，经过以上步骤得到的子结构模型如图4.1所示。

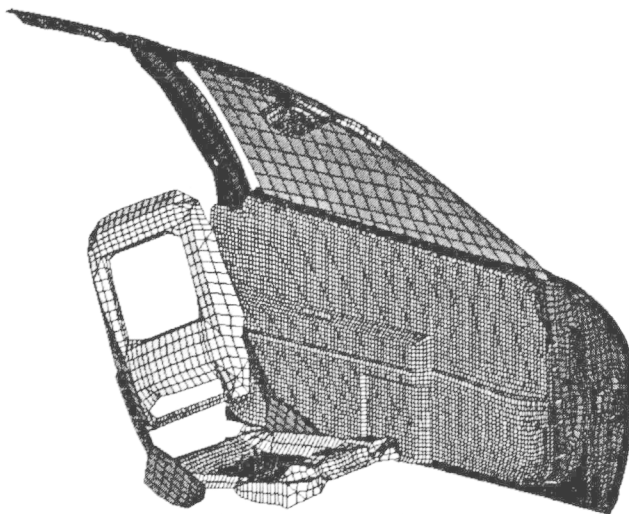


图 4.1 PSM 车体子结构模型

文中所用假人为多刚体ES-2假人模型，是TNO公司开发的MADYMO软件附带，随软件购买时一并提供的，如图4.2。

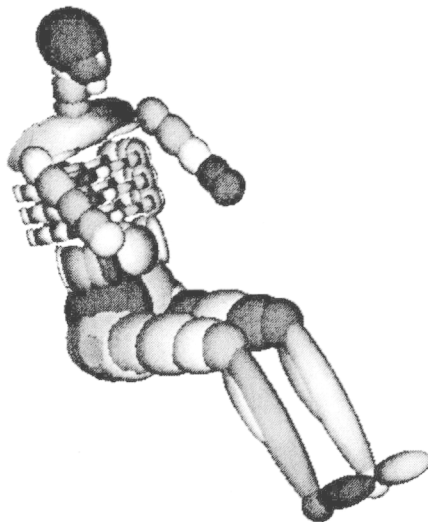


图 4.2 ES-2 型多刚体假人模型

然后将PSM 载荷条件施加到子结构模型上，主要施加在包括车身侧围板和车门板和顶盖纵梁，同时余下的与其定义连接的部件为可自由变形区域，包括B柱内板、车门加强结构、内门板件和车门内饰。用于PSM输入的所有节点位移—时间历程数据，都是在有限元整车仿真中获取，即生成的PSM INCLUDE 文件。在MADYMO PSM后续的计算中，这些节点位移—时间历程将分别描述车身和座椅的运动，作为求解假人在碰撞发生后响应的输入条件。

最后定义接触，车辆的有限元模型部件之间的自接触均用CONTACT.FE\_FE的CONTACT.FORCE\_PPENALTY的定义，包括车辆部件的自接触和车辆与座椅

的接触。假人与车辆之间的接触定义为CONTACT.MB\_FE的CONTACT.FORCE\_CHAR, 其中, 假人接触组定义为主面(MASTER SURFACE), CONTACT\_TYPE 设置为MASTER, 接触特性由假人的屈服特性确定。接触定义中包括了假人相应各部分与座椅、车门内饰、顶盖纵梁等的接触, 所有接触的摩擦系数均定义为0.3。至此, 已经完成整个PSM部分的工作。通过madymo软件完成约束加载、接触定义、假人定位之后的计算模型如图4.3所示。

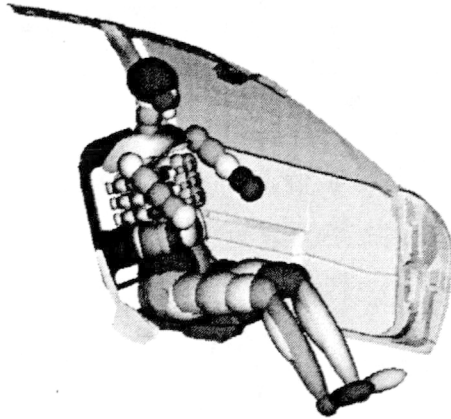


图 4.3 PSM 子结构法侧面碰撞计算模型示意图

将此模型结合整车有侧面碰撞有限元仿真的计算结果就可以在madymo求解器中计算从而得出假人各部位的损伤指标的曲线, 如下图4.4~4.8所示。

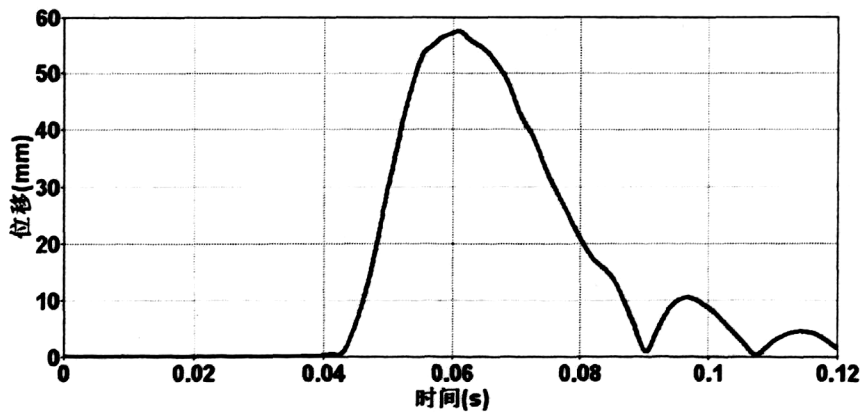


图 4.4 假人上肋骨位移曲线

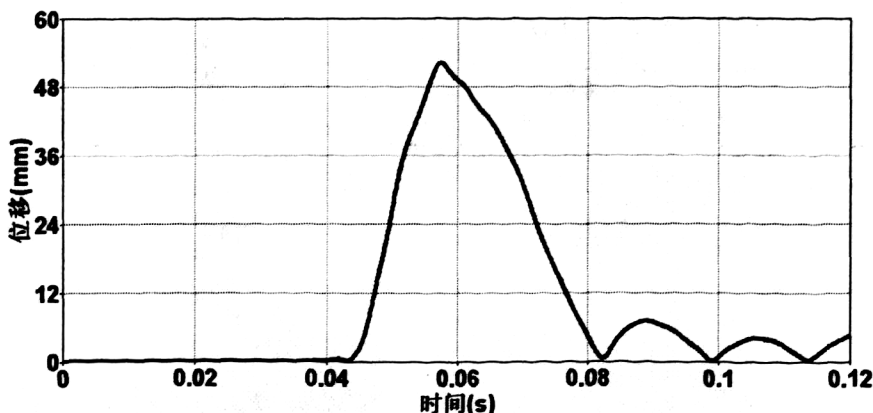


图 4.5 假人中肋骨位移曲线

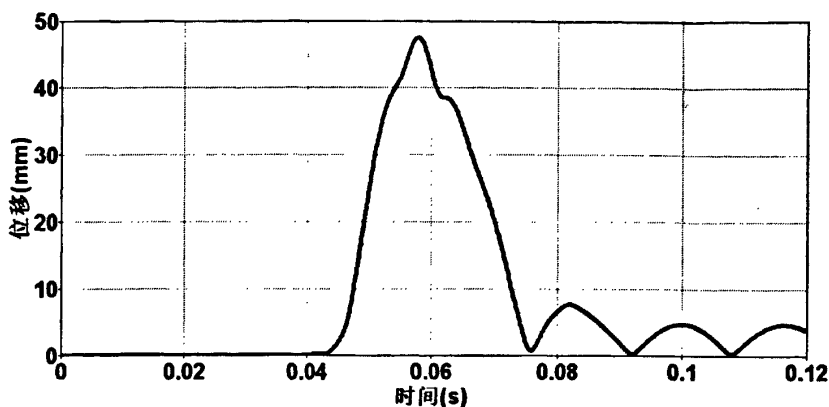


图 4.6 假人下肋骨位移曲线

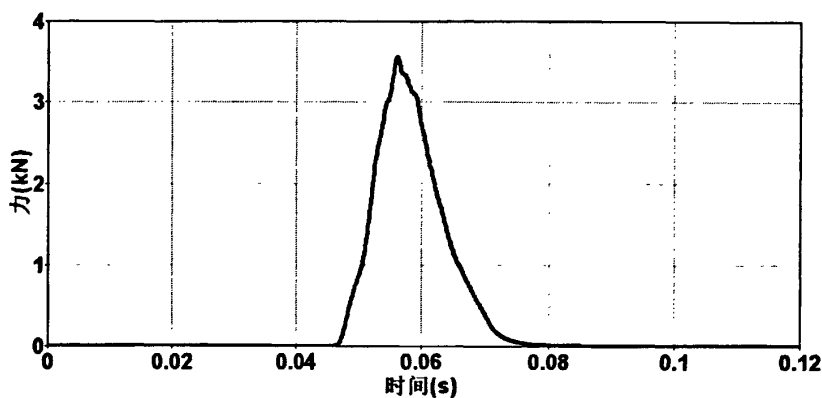


图 4.7 假人腹部合力曲线

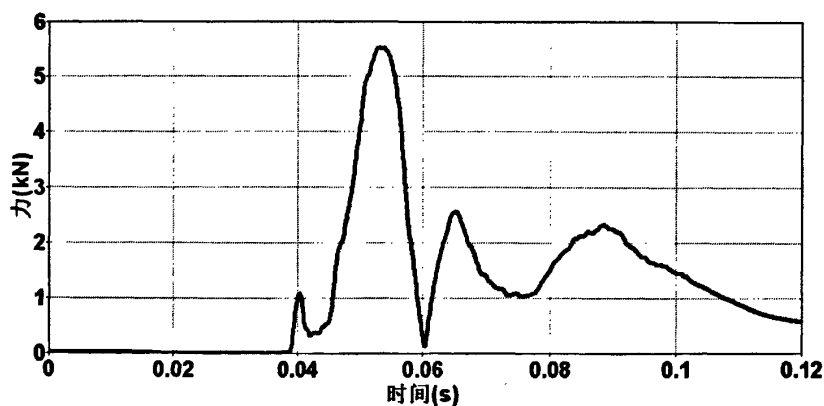


图 4.8 假人耻骨合力曲线

从运算结果看,假人头部与玻璃碰撞,未发生硬接触,所以未考虑头部损伤,图4.4~4.6分别为假人上、中、下三根肋骨的位移—时间曲线,图4.7和图4.8分别为假人腹部合力—时间曲线、耻骨合力—时间曲线图。从曲线中可以看出,在仿真开始55mm—60mm的时间段内,人体各部所受损伤值均达到最大,由于撞击结束后,假人有振动,所以肋骨变形曲线和耻骨合力曲线出现震荡现象,同时整车

模型中忽略了车门的填充材料和防撞杆等部件，从而导致仿真结果的峰值较大。

GB20071-2006《汽车侧面碰撞的乘员保护》中规定<sup>[6]</sup>：

头部性能指标（HPC） $\leq 1000$ ；当没有发生头部接触时，则不必测量或计算HPC值，只记录“无头部接触”；

胸部性能指标：肋骨变形指数（RDC） $\leq 42\text{mm}$ ，黏性指标（VC）应小于或等于 $1.0\text{m/s}$ ；

骨盆性能指标：耻骨结合点力峰值（PSPF） $\leq 6\text{kN}$ ；

腹部性能指标：腹部力峰值（APF） $\leq 2.5\text{kN}$ 内力。

下表为模型中假人损伤指标仿真值：

表 4.1 假人损伤指标仿真值

部位	类别	损伤值
头部	HIC	无接触
		上 57.396
		中 52.126
胸部	肋骨变形指标 RDC (mm)	下 47.437
		上 1.4798
		中 1.2694
胸部	黏性指标 VC (m/s)	下 1.0817
腹部	腹部力峰值 APF (kN)	3.5518
骨盆	耻骨合力峰值 PSPF (kN)	5.5225

结果表明，在此模型仿真所得的损伤值中，假人的上、中、下肋骨VC值和RDC值均不同程度地高于标准中极限值，同时腹部力峰值也超标，假人的胸部和腹部受到较大伤害。

从模型仿真结果看，假人胸腹部伤害主要来自于车门外板变形带动内板及内饰板后与胸腹部的直接接触，在车内选取一个未变形的点A，在内饰板与假人接触的区域选取另外一点B，输出两点在Y方向上的距离随时间的变化曲线，如图4.9，在碰撞发生后大约55ms时，两点间距离达到最小，此时胸腹部侵入量达到最大，这与前面所述的假人胸腹部损伤曲线均达到峰值的现象正好吻合，所以由此可以肯定这是导致假人胸腹部伤害的直接原因。因此，针对此特定车型，作者提出了相关的防护措施。

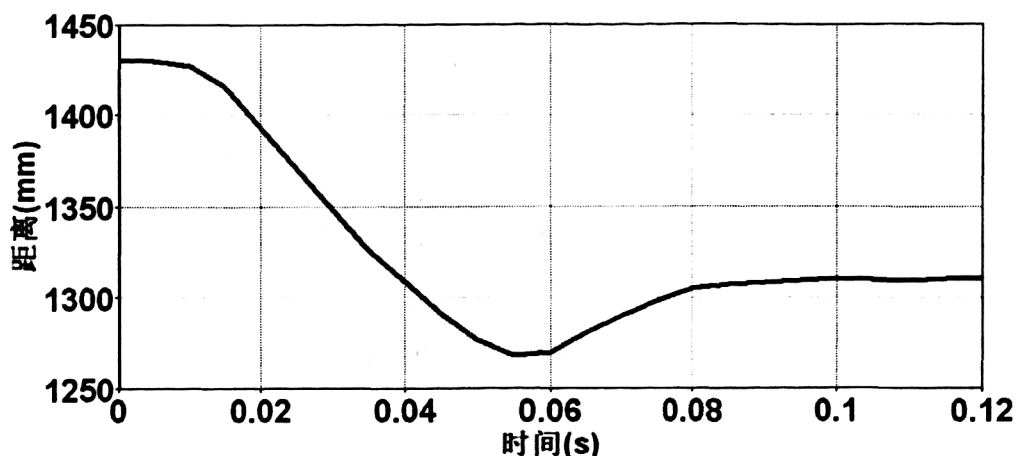


图 4.9 AB 两点间距变化曲线

## 4.2 防护措施研究

### 4.2.1 措施一：防撞杆

对于正面或追尾碰撞，车身都被设计了很大的缓冲空间，而车身的侧面却只有很小的缓冲空间，这给提高轿车抗侧面碰撞能力增加了难度，同时，由于侧围结构与乘员的直接碰撞接触，从而导致了侧面结构将来自于碰撞的动能直接转移到乘员身上，要避免或减轻这种损伤，就应该阻止或减缓这种能量的转移，使直接传递到乘员身上的能量尽可能少，这就要从尽可能地减少侧面碰撞过程中车门的侵入量和降低侵入速度入手。侧门防撞杆的防撞作用是：当侧门受到撞击时，坚固的防撞杆能吸收部分能量，减轻侧门的变形程度，从而能减少汽车撞击对车内乘员的伤害。侧门防撞杆由防撞梁、前侧支架、后侧支架组成，使用高强度钢材制造，采用壳单元建立其有限元模型，定义为分段线性塑性材料，密度为 $7890 \text{ kg/m}^3$ ，杨氏模量为 $210 \text{ GPa}$ ，泊松比 $0.3$ ，屈服极限 $300 \text{ MPa}$ 。本文中采用了截面形状为正八边形的防撞梁，结构如图4.10所示。

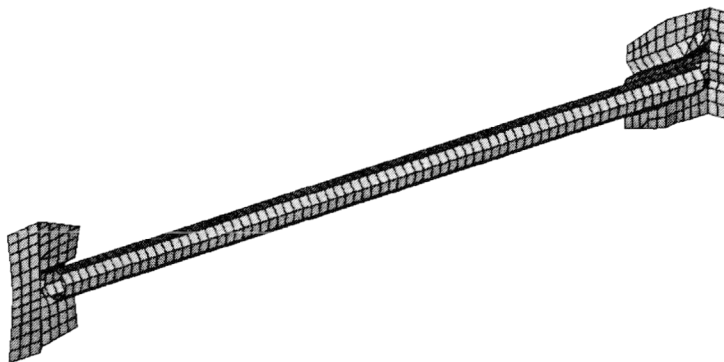
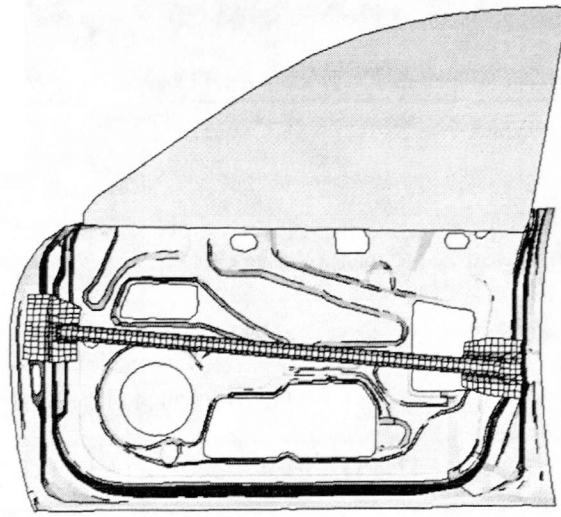


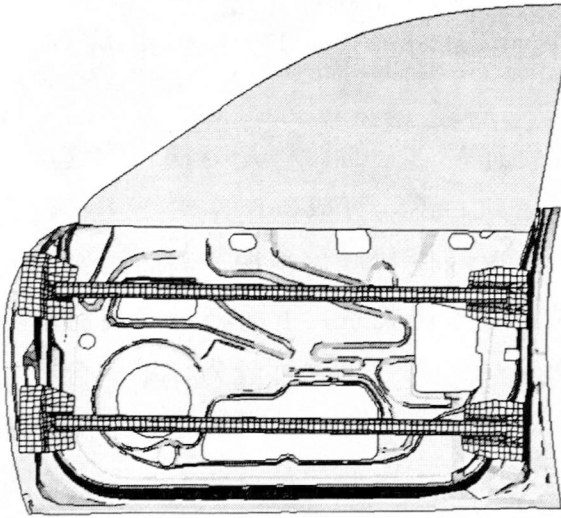
图 4.10 防撞杆模型结构示意图

同时作者在此基础上提出了如图4.11所示的三种防撞杆布置方案。

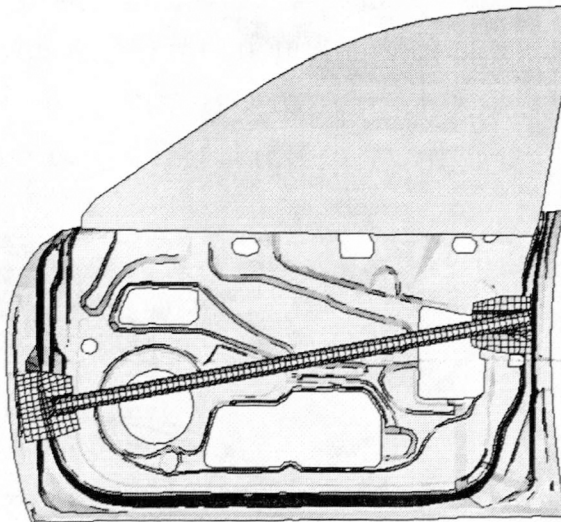




a)



b)



c)

图 4.11 防撞杆三种方案布置图

显然，由于不同的防撞杆位置在受到移动变形壁障撞击时结构变形不同，会

导致假人损伤值的不同，如表4.2所示。

表 4.2 三种防撞杆布置方案与无防撞杆假人各损伤值对比列表

	HIC	RDC (mm)			VC (m/s)			PSPF (kN)	APF (kN)
		上肋骨	中肋骨	下肋骨	上肋骨	中肋骨	下肋骨		
1	无接触	46.111	43.628	41.784	1.1867	1.1859	1.0200	4.8870	1.5931
2	无接触	42.786	40.804	36.423	1.1211	0.9962	0.8765	3.3029	1.2325
3	无接触	47.780	43.478	39.855	1.2281	1.4110	1.1524	4.5669	1.6528
无	无接触	57.396	52.126	47.437	1.4798	1.2694	1.0871	5.5225	3.5518

由上文中的分析可知，在侧面碰撞时，由于侧围结构与乘员的直接碰撞接触，从而直接导致了侧面结构将碰撞的动能转移到乘员身上，要减轻乘员的损伤，就应该从阻止或者减缓这种能量的转移入手，使最终传递到乘员身上的能量尽可能少。

依据物理学的相关定律，动能的转移是与物体的速度、相互之间的作用力以及碰撞位移等相关的，因此，我们可以判断在汽车碰撞过程中，侧面结构与车内乘员发生接触过程中的速度峰值和变化情况、侧面结构的变形量以及接触时的速度都与乘员的受损伤风险有密切关系，下面将对安装前车门防撞杆的三种配置情况对乘员损伤产生的影响从这些方面进行较为详细的分析。

在三种方案中，分别选取与上文中相同的A、B两点，输出三种方案中两点之间距离的变化曲线并与未安装防撞杆的情况进行对比，如图4.12所示，从图中可以看出，发生碰撞后，安装了防撞杆的前门侵入量相对安装之前均有不同程度的减小，乘员舱的空间相对增大，有利于减轻侧面变形结构与假人的碰撞剧烈程度，这直接反应在三种方案中假人的腹部力峰值和耻骨合力峰值均有不同程度减少，而且腹部力指标均达到标准要求。同时方案2中侧门变形最小，因此相应地表4.2方案2中假人的胸部变形量最小，且腹部力和耻骨合力峰值最小。

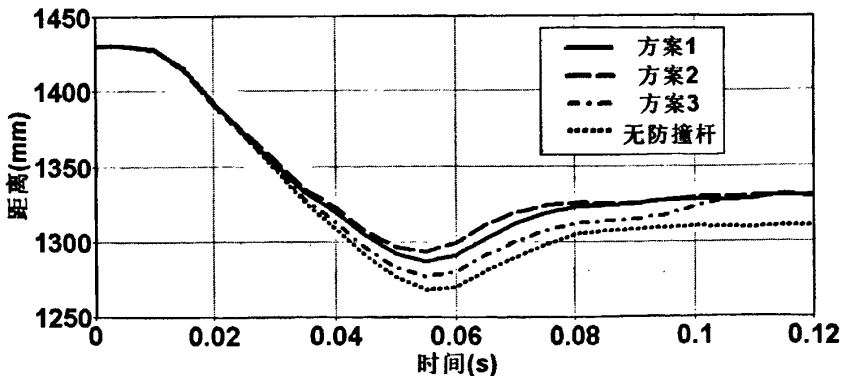


图 4.12 AB 之间 Y 向距离—时间曲线各方案对比图

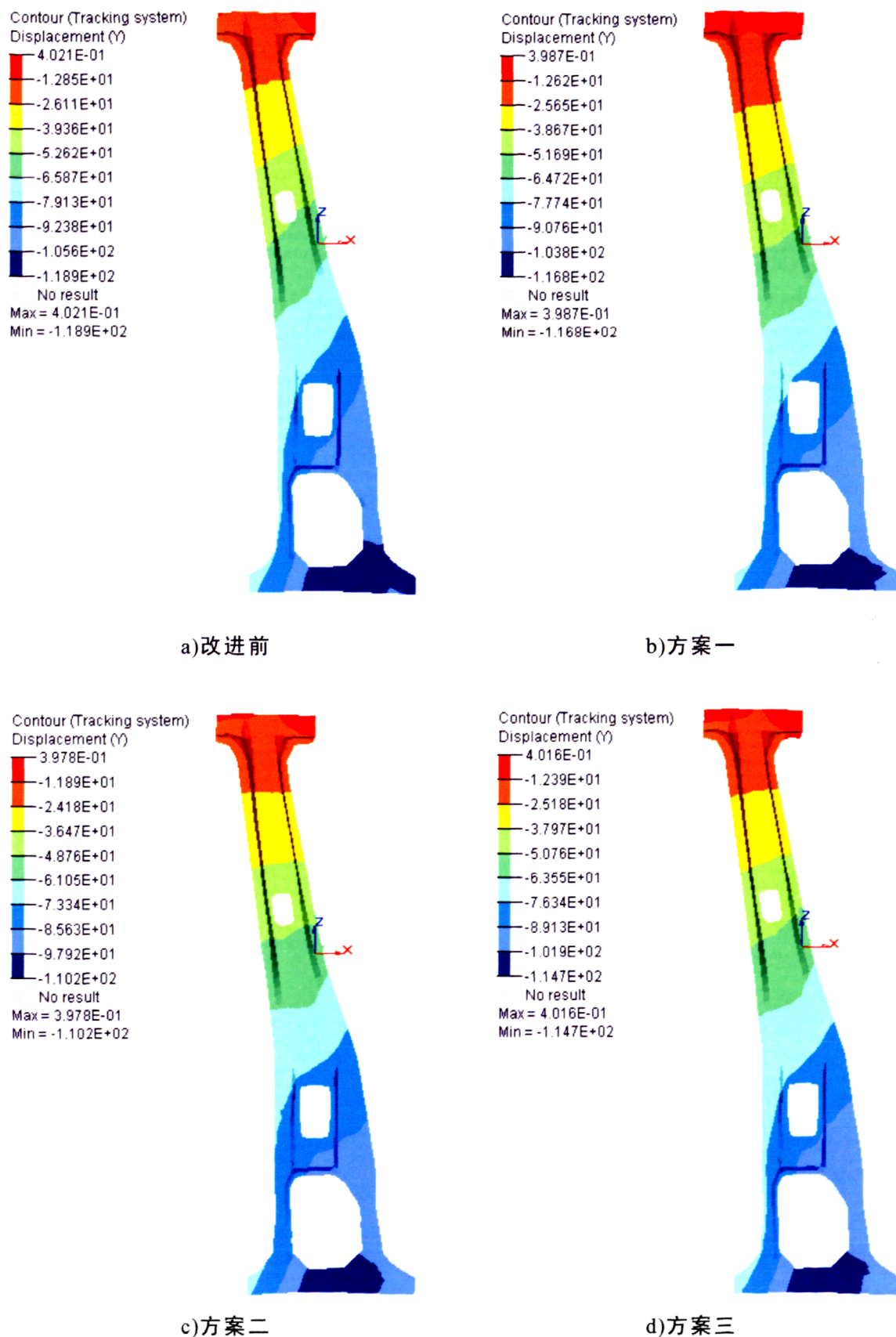


图4.13 B柱内板上的固定节点相对车辆质心的变形云图

同时，作者在后处理软件Hyperview中也输出了改进前及三种方案中车身B柱内板上的节点相对车辆质心的变形云图，如图4.13所示。云图结果显示，在未改

进之前的模型中，B柱整体相对于整车的最大变形处为118.9mm（最大值取负向最大绝对值），而三种方案中最大变形量分别为116.8mm，110.2mm和114.7mm，同时四种情况下B柱相同部位最大变形量也呈同一变化趋势，这一组分析数据能与上文中所述AB点的变化历程较好地吻合，也能从一定程度上说明三种方案对乘员损伤的不同影响。

从侵入速度来考虑，四种情况中，在B柱内板在如图所示的位置取同一个节点，对比其随时间平行MDB速度方向的变化历程，如图4.15所示。显然，四种情况对比，未改进之前的结构B柱侵入速度峰值最大，三种方案速度峰值不同程度减小，而第二种方案中达到最小。

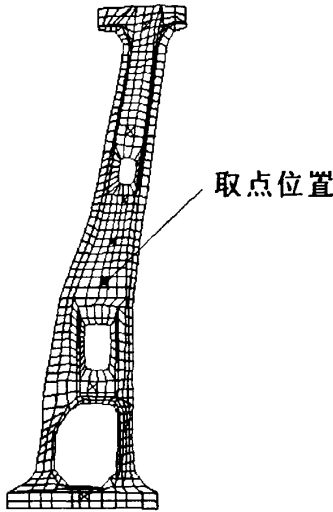


图4.14 取点位置示意图

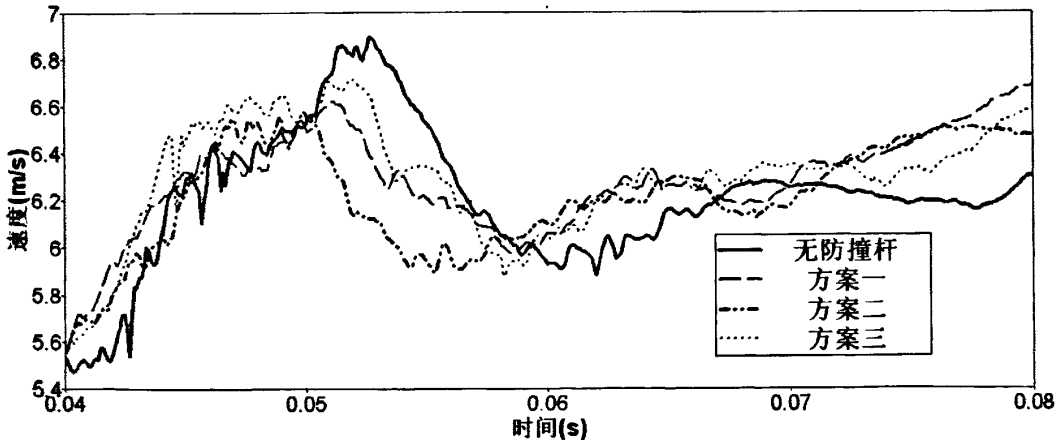


图4.15 B柱内板固定点速度变化对比图

图4.16所示为三种方案中防撞梁吸能效果的比较图，显然在第2种方案中的防撞杆吸收了相对最多的动能，能够间接达到降低碰撞速度的目的，这是导致方案2中各项指标普遍优于其它方案的一个直接因素。

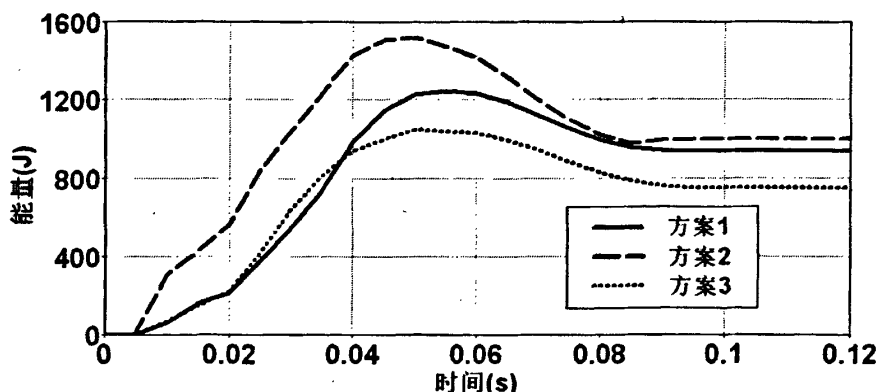


图4.16 三种方案防撞杆吸能效果比较图

图4.17为移动变形壁障质心的Y向加速度对比示意图，由于在各个方案仿真中车体的运动几乎完全一致，而三种方案中方案2的MDB加速度曲线负向峰值较大，而其整车加速度峰值也最大，即其移动变形壁障的速度降低得最快，整车运动的速度增加得也最快，这说明，方案2中移动变形壁障的动能最大限度地转化成了车辆整体刚性运动的动能，而传递给侧面结构的变形能为三种方案中最小，所以乘员所受损伤也最轻。

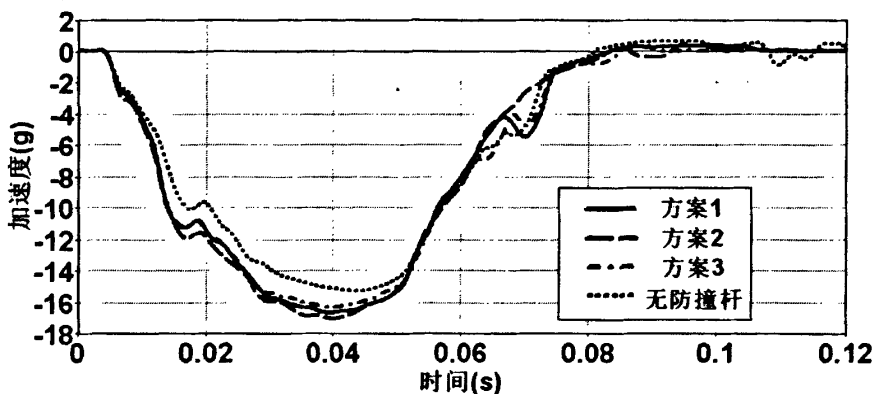


图4.17 移动变形壁障Y向加速度对比图

因此，从以上从影响成员损伤的各个因素的分析来看，防撞杆优化配置后在一定程度上增加了车辆的耐撞性能，提高了乘员的安全性。

从量化概念上来说，这三种方案使假人各主要损伤部位的损伤风险发生了不同程度的减小，主要反映在胸部肋骨变形指标、骨盆耻骨合力峰值和腹部力峰值上，综合上中下三肋骨部位，相对配置防撞杆之前的假人损伤，三种方案中肋骨变形减小量分别达到16.75%~25.45%(上)，16.30%~21.72%(中)和11.92%~23.22%(下)，三肋骨黏性指标的减小量分别为17.01%~24.24%(上)，-11.15%~21.52%(中)和-6.01%~19.37%(下)，同时，三种方案中，骨盆耻骨合力峰值分别减小了11.51%、40.19%和17.30%，腹部力峰值分别减小了55.15%、65.30%和53.47%，

显然第二种方案对各个指标均产生了最好的改善效果，并且，在防护效果最好的第二种防撞杆布置方案中，原本超标的假人中下两肋骨的变形值和黏性指标均达到法规要求，骨盆耻骨合力峰值原来即已达标，在三种方案中仍有不同程度的降低，腹部力峰值在三种方案中均达标。以上数据分析表明，与法规对照，在增加防撞杆后，原本受到严重创伤的胸腹部的损伤风险已经有明显降低，仅剩下假人上肋骨变形量和黏性指标有超标现象。

#### 4.2.2 措施二：胸部气囊

从防撞杆这一从结构改进出发的措施看，在对车辆前门防撞杆进行优化后，乘员损伤值虽然得到了较大改善，但仍不十分理想，为使车辆的侧碰撞安全性达到更高层次评估标准（如NCAP）的要求，作者针对上文乘员损伤中的薄弱环节，提出安装胸部侧碰撞气囊的构想，以期产生更好的保护效果。

根据NHTSA的相关资料，在美国，每年因汽车侧面碰撞导致的死亡人数达到9000人，大概占道路交通死亡总人数的25%。而NHTSA估计60%的致命侧撞事故伴随脑部损伤，相对于正面碰撞，侧面碰撞中的乘员保护要更加困难，因为在侧面碰撞中，几乎只有车门能吸收碰撞中的能量，同时这也相应缩短了气囊展开所允许的反应时间，对此，汽车制造商们需要不断地改进汽车侧面结构，如采用更强的车顶横梁来吸收更多的碰撞能量，但是从实际效果来看，采用侧气囊被证明是最好的解决方法，当然这会相应地增加每辆车的成本。据2003年8月媒体披露，美国高速公路安全保险协会（IIHS）的研究预测，能提供人体躯干保护的侧面安全气囊，可以降低11%的死亡率，而使用包括防护头部的侧面帘式安全气囊能降低45%的车辆驾驶员死亡风险<sup>[47]</sup>。

当今全世界范围内的汽车技术的发展都来自于如研究工作，公众安全意识，政府强制标准，防撞性试验和类似安全气囊的安全设施的结合使用。整个行业例行公事般地构思和设计各种新型的汽车，并附带一些越来越先进的安全系统来满足当前标准的要求。前碰撞和侧碰撞气囊，过去十年新近发展起来的技术产物，用以提高汽车的安全性能。在美国，早在法规出台之前，前碰撞气囊就已经被作为选配装置进入市场，使用已逾十年。侧碰撞气囊技术相对来说要比前撞气囊的出现要晚得多，到1996年才开始投入使用，同时也在侧碰撞乘员保护中发挥着越来越重要的作用<sup>[48]</sup>。

1998年，乘用车侧碰事故导致了大约9482起致命伤（Lund, 2000）。1999年，Thomas和Frampton发现躯干和头部是遭受AIS=4+损伤最多的部位，同时那些受伤较为严重的驾驶员通常也会遭受AIS=2+的腿部，头部和手臂伤（Thomas and Bradford, 1989）。在一项对澳大利亚在1988到1992年之间发生的侧撞事故的研究中，研究者们发现头部和胸部是发生AIS=3+伤害最频繁的部位（Fildes et al.,

1994)。这些国内和国际间的研究，尽管是在不同的环境下进行，但都强调了对头部和胸部的保护在评估某些关键技术尤其是侧撞气囊中的重要性<sup>[48]</sup>。

20世纪80年代的一些研究报道了人体的某些不同部位（如头部、胸部）在侧面碰撞中的损伤。一项基于NASS数据的研究表明大概所有事故总数的40%为侧面碰撞（Rouhana and Foster, 1985），这项研究还发现碰撞侧乘员遭受严重或当场致命伤的风险是非碰撞侧乘员的三倍，在乘员空间被外物侵入的情况下，遭受严重损伤的风险是非碰撞侧乘员的三到十倍，同时其头部和颈部损伤在当场致命伤中是最为普遍的。类似的结果在另一项NASS数据分析中也有过报道（Warner et al., 1989）。头部和颈部损伤超过了所有导致当场致命伤事故总数的一半，胸部损伤约占半数。这些研究中，作者都将侧撞损伤归于头部穿过侧面车窗并与车门框架或碰撞车辆碰撞部位的接触<sup>[48]</sup>。上世纪90年代关于真实侧撞事故中乘员损伤知识的核心内容都来自于主要在80年代设计的车型的碰撞事故（Haddak et al., 1991; Lestina et al., 1991; Fildes et al., 1994; Hassan et al., 1995）。Reiff等人在2001年指出侧撞气囊可以作为减少损伤的一个选择（Reiff et al., 2001）。Lyman等人在2002年发表观点：应该进行更多深入的研究来改进车辆，以防止由于各类过失带来的人员伤亡<sup>[49]</sup>。不过由于在那个时候还没有这样的系统应用于真实的车辆上，所以很难去评估侧撞气囊在降低乘员损伤上的特性。

由于大量的研究工作仍聚焦于前碰撞中乘员的损伤，至今还没有系统的用于侧碰撞气囊对乘员保护的评价方法，而文献中也仅有很少关于这方面的研究成果开始出现。McGwin (2003) 等人以NASS1977年至2000年的数据为依据研究了侧撞气囊跟机动车辆侧碰撞中乘员损伤风险之间的联系。关于侧面安全气囊配置的研究大部分仍停留在摸索阶段。Langwieder等人在1998年报道了一起带有胸部气囊和充气式柱状结构的汽车碰撞事故中产生的轻微创伤。Kirk和Morris在2003年通过对10起不同碰撞方向交通事故的研究认为“必须对安全气囊配置进行更深入的研究”。2001年在另一项共10例包括前碰、侧碰和翻滚事故的研究中，Dalmotas等人也认为“需要更广泛的侧面碰撞安全气囊系统方面的事故数据”。2000年，从一项基于4起带侧气囊的侧面碰撞事故的研究中，Bauer等人认为“目前来说，还不可能得到一个完整的统计学采样系统”，这也反映出了事故数据的缺乏<sup>[49]</sup>。

侧碰撞气囊正越来越多地受到汽车行业、消费者和政府部门决策者的关注。Bazarian等人在2004年采用了2000个NASS的文件，研究了187例带有脑部损伤的乘员，其中有62例为侧面碰撞，这一研究的结果表明：侧碰撞气囊可能减少乘员在侧碰撞中的脑部损伤。在最近的一项研究中，Yoganandan等人研究了NASS数据库61例侧气囊成功起爆的侧面碰撞事故，并强调了对更多的研究观察以确定气囊实际功效的要求<sup>[49]</sup>。

侧碰气囊主要可分为两种：一种是帮助保护乘员的头部和胸部的侧面安全气

囊，在头部/胸部安全气囊展开场合，头部在20ms之内达到全部展开，又可以细分为：保护胸部的胸部安全气囊，保护头部和胸部的头部/胸部安全气囊，保护胸部和骨盆的胸部/骨盆安全气囊；另一种是帮助保护乘员头部的从车顶纵梁向下展开的帘式安全气囊。

在典型侧面碰撞中，在乘员和车门及B柱之间的实际间隙必须迅速加以闭合。B柱包括车门锁止机构，而在4门车辆中还包括后门用铰链装置。为了保护乘员的侧面部位，侧面安全气囊必须以极快的速度展开。

当前汽车市场上使用的侧面气囊有几种不同的形式。例如，有些是折叠并安装在车门板内以保护乘员身体下部，有些安装在座椅靠背里用来保护乘员骨盆，有些则是安装在头部以上的位置来保护头部。许多工程师相信，侧气帘由于其纤长的设计而成为最好的选择，同时它还可以缩短起爆时间，并能阻挡玻璃碎片对乘员造成损伤。侧气帘，一般都设计在高于头部的位置，当它起爆的时候，帘式气袋从车窗顶部位置向下扩展，最终可以覆盖整个侧面车窗面积，侧气帘经常用来与保护躯干的侧气囊配合使用，它甚至能在长度方向上一直沿着车窗延伸到汽车的后座位置，从而能达到保护某一侧所有位于靠窗位置乘员头部的效果。

文献[50]中记载，据《汽车新闻》报道，全球四大安全气囊供应商占据了北美安全气囊市场的93%，他们分别为：Autoliv（35%），TRW（25%），Takata（20%）和Delphi（13%）。同时Siemens VDO和Key Safety Systems也提供安全气囊产品。Autoliv公司拥有帘式气囊的全球专利，不过它已经许可其他的生产商使用它的技术。所有的气囊供应商如今都处于巨大的压力之下，因为他们必须不断设法降低其产品成本。而汽车生产商及其零部件供应商也将面临巨大的挑战，特别是在气囊从可选配置降格为标准配置的阶段，他们需要增加使侧撞气囊与他们各种不同的车型匹配上所需加工和生产装备上的投资。但是同时因为侧撞气囊在未来的强制安装，也会保持气囊供应商们利润的稳定和增长。另外，随着相关技术的不断发展和因经营规模扩大而得到的经济节约，气囊的成本应该会越来越低，利润空间也会增长。

汽车安全气囊的基本设计思路是：在发生一次碰撞后、二次碰撞前，迅速在乘员和汽车内部结构之间打开一个充满气体的袋子，让乘员扑在气袋上，通过气囊的排气孔节流阻尼、自身渗透性、气体运动迟滞性来吸收乘员的动能，使猛烈的二次碰撞得以缓冲，以达到乘员保护的目。

本文中采用MADYMO自带的Gas Flow模式胸部安全气囊，气囊为是单腔，使用线性各向同性材料(MATERIAL.ISOLIN)材料模型。胸部气囊是一个二维气囊，可以方便地在其未折叠展开和无应力状态进行网格划分。以该状态为基础，使用MADYMO程序折叠气囊，如图所示：



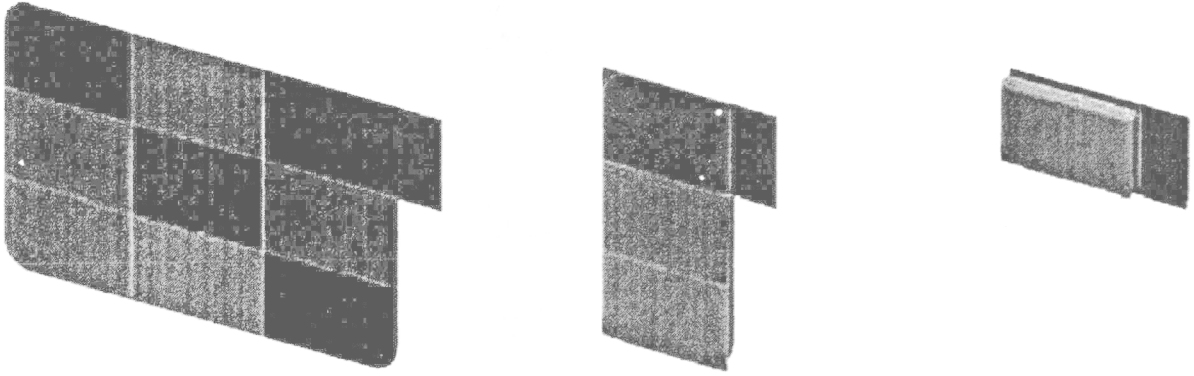


图 4.18 气囊折叠示意图

最后将得到一个完全折叠的胸部气囊，该气囊存在一些由于折叠过程产生的单元变形，模拟气囊完全起爆后形状如图4.19所示：

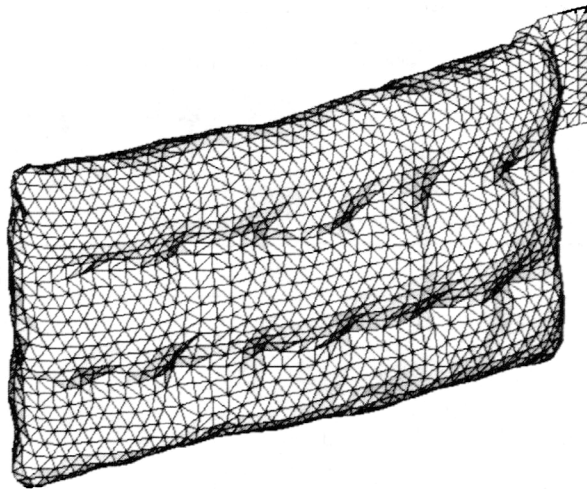


图 4.19 气囊起爆示意图

将气囊置于B柱内假人胸部所在高度位置，定义气囊的自接触以及气囊与有限元车体结构和气囊与假人的接触，其中FE与FE之间的接触使用基于惩罚算法的接触模型(CONTACT\_FORCE.PENALTY)，这样，最大接触力将依据时间步长及接触段的接触刚度进行计算，基于惩罚算法的接触模型会使穿透量保持较低的值。最后定义有限元气囊体积、气体流入和流出各参数。计算后气囊展开如图4.20所示。

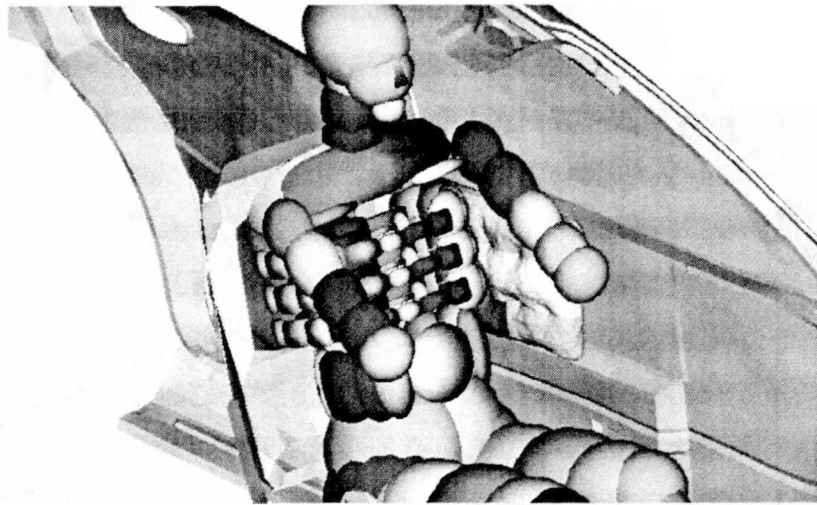


图 4.20 气囊起爆后模型示意图

在第二种方案的基础上加装胸部气囊后，仿真运算所得的假人损伤值如下表 4.3 所示。数据表明，假人胸部变形量和黏性指标值有了较为明显的减小，且全部达标；由于气囊起爆所产生的巨大压力对假人腹部的冲击，导致腹部力峰值有所增加，同时耻骨合力峰值也有小幅度的加大，但是变化很小。

表 4.3 加胸部气囊后假人损伤仿真值

部位	类别	损伤值
头部	HIC	无接触
胸部	肋骨变形指标 RDC (mm)	上 40.295
		中 38.805
		下 32.202
	黏性指标 VC (m/s)	上 0.9292
		中 0.8429
		下 0.4347
腹部	腹部力峰值 APF (kN)	1.5282
骨盆	耻骨合力峰值 PSPF (kN)	3.5443

同时，在侧气囊中，很重要的一点，应该考虑气囊各主要参数对其乘员保护性能的影响。而影响气囊特性的参数最主要有气囊的质量流率函数、气囊起爆时间和气囊的材料特性，考虑到缺乏材料参数，下面将仅对气囊的质量流率函数和气囊起爆时间这两个参数对气囊防护性能的影响做相关分析。

#### 1) 质量流率函数

在安全气囊的模拟中，应特别注意气囊气体发生器的质量流率函数的精度，因为这个特性对于模拟结果的好坏有重要影响，MADYMO 容器分析可以有效检测气体发生器的特性。在容器试验中，通过测量气罐内的压力，可以得到气体发生器产生气体的质量流率。进行容器分析所需要的输入数据有试验持续时间、初

始体积、温度、压力和气体成分、试验过程中容器的测试压力、其他发生器产生的气体总量和成分，输出结果为气体发生器产生的质量流率。下图4.21即为本文中采用的侧面胸部安全气囊的质量流率函数曲线，其峰值大约在 $0.18\text{m}^3/\text{s}$ 。

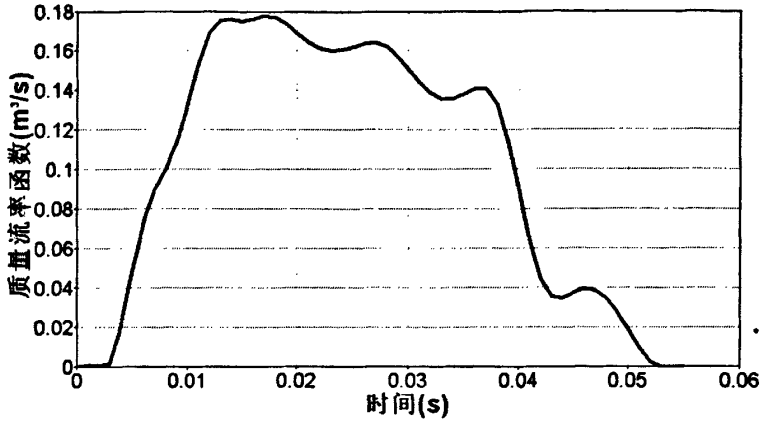


图 4.21 气囊质量流率函数曲线图

将该曲线在Y坐标方向上进行缩放，设一缩放因子 $\alpha$ ，令缩放因子 $\alpha=0.6, 0.8, 1.2, 1.5$ ，分别将缩放后的曲线输入气囊，进行侧碰仿真，得到如表4.4所示的人体损伤响应值。

表4.4 气囊质量流率函数缩放后假人损伤仿真值对比

$\alpha$	RDC (mm)			VC (m/s)			PSPF(kN)	APF(kN)
	上	中	下	上	中	下		
0.6	41.195	39.964	33.979	1.0427	0.9253	0.6487	3.3904	1.3054
0.8	40.534	39.008	32.841	0.9732	0.8714	0.5126	3.5011	1.4783
1	40.295	38.805	32.202	0.9292	0.8429	0.4347	3.5443	1.5282
1.2	39.513	38.186	31.854	0.9005	0.8254	0.4265	3.8467	1.5931
1.5	39.148	37.833	31.665	0.8979	0.8140	0.4208	4.2368	1.9854

从上表中可以大致看出，当缩放因子 $\alpha$ 大于1时，即将曲线峰值增大，气囊起爆时气体进入气室的速度增加，加速气囊的充气，能在一定程度上降低胸部压缩量和胸部的VC值，但随着峰值的增加，其损伤降低的幅度会减小，对胸腹部，正好起到相反的作用，气囊充气的加快会导致胸腹部受到的冲击力增加，其损伤会更加严重，但损伤值仍在允许范围内，可以推断，若再将 $\alpha$ 扩大，腹部力和骨盆力有超出范围的风险。反之亦然。

## 2) 气囊起爆时间

在本文采用的胸部气囊中，其起爆时间是沿用的气囊模型所设定的时间，模型中为0秒，这意味着在碰撞刚开始时，气囊即开始起爆，考虑到气囊起爆过完，将起不到理想的防护效果，现将气囊起爆时间设定为10ms, 20ms, 30ms并分别

进行碰撞仿真，仿真的结果如表4.5所示：

表4.5 气囊起爆时间变化后假人损伤仿真值对比

起爆时间(ms)	RDC (mm)			VC (m/s)			PSPF (kN)	APF (kN)
	上	中	下	上	中	下		
0	40.295	38.805	32.202	0.9292	0.8429	0.4347	3.5443	1.5282
10	39.547	38.663	31.983	0.9011	0.8257	0.4303	3.5818	1.5134
20	39.185	38.209	31.605	0.8915	0.7864	0.4129	3.5037	1.4982
30	40.134	38.650	32.032	0.9129	0.8197	0.4237	3.5254	1.5035

从损伤值来看，对于胸部，当起爆时间延后到10ms时，胸部压缩量和VC值均有较大幅度的减小，改善的效果比较明显，再从10ms延后到20ms，两个损伤值进一步减小，但幅度大幅减小，改善的效果相对不明显，而当起爆时间从20ms延后到30ms时，损伤值反倒出现了一定程度的增加。另外，气囊起爆时间的改变对腹部和骨盆的影响很细微。

针对胸部损伤情况的变化，进一步分析起爆时间和胸部损伤之间的联系。从MADYMO-PSM侧碰仿真中定义气囊特性输出，在后处理中得到气囊内部压强和体积在起爆后40ms内随时间的变化曲线如图4.22和4.23所示，在气囊开始起爆后15ms左右，气囊内部的压强达到最大值，而此时气囊内部体积的增加还很慢，而在这一时刻之后的短时间内，气囊体积开始急剧增加，而压强开始急剧减小，即其对外部的冲击力会呈现出一个缓和的趋势，而保护的范围也趋于扩大，显然在这种情况下，气囊将能对与之接触的人体胸部提供最佳的保护，而从未加气囊的仿真动画看，在大约36~38ms时，车门内饰板开始与假人胸部发生接触，这正好与之前描述的气囊最佳保护时机基本吻合，也就能解释当气囊起爆时间延后到发生碰撞后20ms能提供较好的保护，而延后到30ms时损伤却反而趋于严重。

由以上两个气囊的主要参数对乘员损伤影响的分析，可以得到一个大致的气囊优化方案来，即将气囊的质量流率曲线在Y方向拉伸1.5倍，同时将气囊起爆时间延后到约20ms，再将这一局部的优化方案重新仿真，得到如表4.6所示的优化仿真值。

从表中可以看出，对在措施一中仍未达标的上肋骨，与其方案二相比，变形量减小了8.91%，黏性指标降低了20.80%，而与原始模型损伤相比，两指标更是分别减小了32.10%和40.0%，同时所有指标均达到法规要求，虽然由于气囊起爆导致腹部力峰值和耻骨合力峰值有所增加，所以综合考虑，在使用胸部气囊之后，我国侧碰法规中要求的指标均达到限值要求，胸部气囊的使用进一步达到了有效保护乘员的效果，作者从理论上证明了胸部侧气囊的使用对提高车辆侧面安全性是一个行之有效的措施。

表4.6 加胸部气囊后假人损伤仿真值

部位	类别	损伤值
头部	HIC	无接触
胸部	肋骨变形指标 RDC (mm)	上 38.974
		中 37.754
		下 31.253
	黏性指标 VC (m/s)	上 0.8879
		中 0.8105
		下 0.4103
腹部	腹部力峰值 APF (kN)	1.9527
骨盆	耻骨合力峰值 PSPF (kN)	4.1862

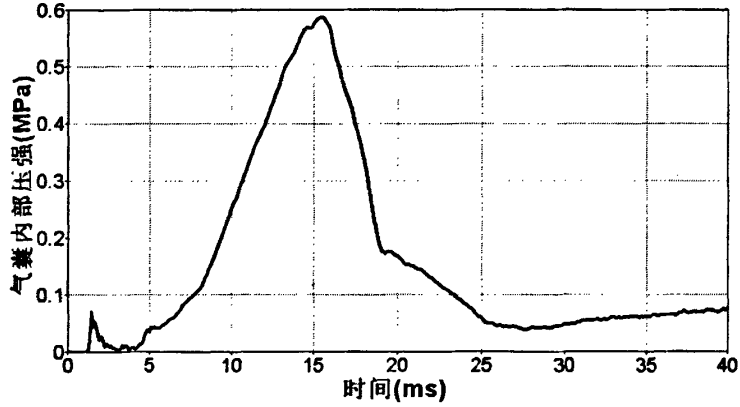


图4.22 气囊内部压强变化示意图

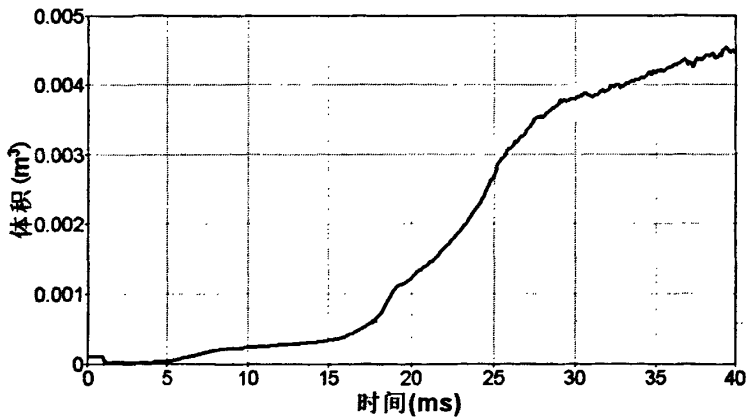


图4.23 气囊内部体积变化示意图

### 4.3 本章小结

依据我国汽车侧面碰撞国家标准，将上文中建立的整车侧面碰撞有限元模型，进行汽车侧面碰撞的数值仿真，并应用多刚体动力学软件MADYMO中的规定结构运动（PSM: Prescribed Structural Motion）的方法将有限元碰撞模型和多刚体侧面碰撞假人模型ES-2进行耦合，得到法规实验条件下的假人损伤数据，并提出在驾驶员侧前车门中增加防撞杆及改变防撞杆的配置和使用胸部侧面安全气囊等防护措施，详细地分析了两种措施及气囊各主要参数的变化对侧面碰撞中乘员损伤的影响，从理论上证明了各种措施的有效性。

## 结论

本文着重研究了汽车侧面碰撞中的乘员损伤生物力学相关知识和几种行之有效的提高车辆侧面碰撞安全性的措施。按照我国侧面碰撞法规《汽车侧面碰撞的乘员保护》GB 20071-2006的要求,以国外某车型的有限元模型为基础,建立并验证了整车侧面碰撞模型,并借助多刚体动力学软件MADYMO获得国标要求碰撞条件下的假人损伤数据,与法规对比,发现碰撞仿真中,假人头部没有撞到B柱,所以只有轻微损伤,同时此车型能对假人的骨盆提供较好的保护,但对胸部和腹部尤其是对胸部的保护明显不足,针对模型的这些缺陷,依据法规对模型进行有针对性的结构改进,同时辅以侧面碰撞胸部安全气囊的使用,从理论上证明了作者提出的防护措施的有效性。

本文所做的具体工作总结如下:

1. 针对汽车侧面碰撞进行了大量文献研究工作,较为详细地叙述了当今国内外汽车侧面碰撞的研究历史和现状,介绍了汽车侧面碰撞安全性研究的主要内容,阐述了其研究的重要意义,对比分析了各国汽车侧面碰撞实验法规,同时介绍了一些更为严格的评价程序,并提出了侧面碰撞实验的研究方向。

2. 在国内外相关文献研究的基础上,对汽车侧面碰撞中的乘员损伤生物力学知识进行了详细的归纳和总结,包括侧面碰撞载荷下的乘员各部位损伤机理、人体损伤程度和耐受限度及损伤评价标准。

3. 按照本文研究主题的需要,借助美国华盛顿大学开发的某量产车型Dodge-Neon的整车有限元模型,对其进行局部修改并结合可移动变形壁障有限元模型构成整车侧面碰撞模型,应用有限元软件LS-DYNA进行整车侧面碰撞仿真,并与文献中的相同级别车辆碰撞试验数据对比进行了模型的有效性验证。

4. 应用MADYMO PSM方法将ES-2侧面碰撞假人与整车有限元仿真模型进行耦合,得到假人在法规碰撞条件下的响应数据。

5. 分析假人损伤数据,与法规限值对比,找到此模型在乘员侧面碰撞保护性能上的不足,针对这些不足,提出前车门防撞杆的优化方案,并结合胸部侧安全气囊的使用,在配置防撞杆后,在防撞杆的最优配置方案中,假人肋骨变形量产生了11.92%~25.45%不同程度的减小,耻骨合力峰值的减小量为11.51%~40.19%,而腹部力峰值减小量达到53.47%~65.30%,除上肋骨变形和黏性指标外,其余指标均达到法规要求,对此,在防撞杆优化基础上,作者提出了胸部侧气囊这一措施,并分析气囊主要参数对防护效果的影响,取气囊最佳参数,在对其他指标没有实质负面影响的前提下,使前一措施中尚未达标的两指标值分别降低了8.91%

和 20.80%，若综合两项措施，与原始模型相比较，两指标的减少量分别高达 32.10% 和 40.0%，并同时达标。改进后模型的假人响应有了明显的改善。

在汽车侧面碰撞安全性研究中，作者认为还有诸多方面可以作为进一步探索的重点：

1. 在侧面碰撞中，车门填充物一般都不考虑吸能，但它参与碰撞，所以在研究中已经开始出现使用吸能泡沫材料作为填充物，尤其是与侧气囊结合使用，它不仅能提高车辆侧碰安全性，还能达到减重和降低成本的效果<sup>[51]</sup>。

2. 在各大侧碰法规体系中，还没有涉及到非碰撞侧的乘员保护，而这类乘员的损伤已经占据相当大的比例，对此，相应的假人及其模型开发研究应成为首要任务，其防护途径应着重于气囊和安全带的结合使用。

3. 两车侧面碰撞中的兼容性研究，兼容性包括车辆自身的防撞性、保护车内乘员的安全性、对对方车辆的攻击性及对其乘员的伤害性，在碰撞中，乘员和财产损失最小是才能够表明两辆车具有好的兼容性，随着碰撞法规日趋完善和公众对汽车安全性关注的日益增加，汽车碰撞的兼容性正越来越多地受到人们的注意，在对车身结构进行侧碰安全性结构设计时，其碰撞兼容性问题也非常值得深入研究。



## 参考文献

- [1] 中华人民共和国道路交通事故统计年报（2005年度）.2006,5
- [2] 王鹏.基于侧面碰撞安全性的车辆侧面刚度匹配研究:[湖南大学硕士学位论文].湖南:湖南大学,2007,4-5
- [3] 丁如芳.轿车侧面碰撞乘员约束系统参数分析与性能改进:[吉林大学硕士学位论文].吉林:吉林大学,2005,4-5
- [4] David J.Segal,Side Impact Modeling Using Lumped Mass and CAL-3D CVS simulations,SAE paper No.840859,1984
- [5] Nripen Saha, Stephen Calso, Djamal Midoum, et al. Critical Comparisons of US and European Dynamic Side Impact, SAE Paper No. 970128, 1997
- [6] 中国汽车技术研究中心编.《汽车侧面碰撞的乘员保护》(GB20071-2006) .天津.2006
- [7] 中国新车安全评价规程(C-NCAP)官方网站.<http://www.c-ncap.org>
- [8] Regulation NO.95: Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with regard to the Protection of the Occupants in the Event of a Lateral Collision. ECE, 1995
- [9] Federal Motor Vehicle Safety Standard No.214: Side impact protection. 571.124, FMVSS, 1990
- [10] IHRA Side Impact Working Group Status Report. GRSP, December 2002
- [11] NHTSA Plan for Achieving Harmonization of the U.S. and European Side Impact Standards. In: Report to Congress, NHTSA, April, 1997
- [12] Jeffery H Marcus, Rolf H Eppinger, Rainer.Mattern, et al. Human Response to and injury from Lateral Impact. SAE paper NO.831634, 1983
- [13] L.M.Morrie, Shaw. Pelvis Response to Lateral Impact-padded and Unpadded. SAE paper NO.890606, 1989
- [14] Douglas J Stein. Apparatus and Method for Side Impact Testing. SAE paper NO.970575, 1997
- [15] 颜燕,张龙,朱西产.汽车侧面碰撞法规的研究与分析.上海汽车.2005,12: 36-39
- [16] R A Morris, J R Crandall, W D Pilkey. Multi-body modeling of a side impact test apparatus. IJCrash 1999 Vol 4 No1, 1999
- [17] 王玉琴.车身侧面刚性对汽车侧碰过程中乘员损伤的影响研究:[湖南大学硕士学位论文].长沙:湖南大学,2006,4

- [18] Marie-Laure Roussarie, Richard Zeitouni, Céline Adalian. Enhancement of side impact protection using an improved test procedure. In: The 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV).France, 2007, 1-3
- [19] K Seyer, M Terrell, B Fildes, et al. Development and Benefits of a Harmonized Dynamic Side Impact Standard. In: The 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV).Canada, 1998, 1696-1707
- [20] A.McNeill, Dr M Holzner, Dr R Schoeneburg, et al. Current Worldwide Side Impact Activities-Divergence Versus Harmonization and the Possible Effect on Future Car Design. In: The 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV). Washington D.C, 2005, 05-0077
- [21] 朱西产.实车碰撞试验法规的现状和发展趋势.汽车技术,2001,4:5-10
- [22] 张维刚,何文,钟志华.车辆乘员碰撞安全保护技术.第一版.长沙:湖南大学出版社, 2007, 7-9
- [23] 刘子建,张建华,杨济匡.碰撞生物力学基础及其应用.中华创伤杂志.2001, 17(5): 261-263
- [24] Viano C, King A I, Melvin J W, et al. Injury Biomechanics Research: an essential element in the Prevention of Trauma. J Biomech, 1989,22(5): 403-417
- [25] Wismans J, Janssen E. INJURY BIOMECHANICS.3.The Netherlands: Eindhoven University of Technology.2000, 3.1-3.8
- [26] 万鑫明.汽车驾、乘人员安全气囊有限元模型的建立及其在前碰撞中的应用:[湖南大学硕士学位论文].湖南:湖南大学,2003,27-29
- [27] 陈辉鹏.汽车前碰撞中驾驶员下肢的动力学响应和损伤防护研究: [湖南大学硕士学位论文].湖南:湖南大学,2006,10-11
- [28] 刘炳坤.冲击损伤生物力学研究进展.航天医学与医学工程.1999, 12(1):62-63
- [29] 聂明明,华积德.创伤后的生物力学反应.中华现代普通外科进展. 1999, 2(4): 20-21
- [30] Andrew Morris, Ahamedali Hassan, Murray Mackay, et al. Head Injuries in Lateral Impact Collisions. ACCIDENT ANALYSIS&PREVENTION, 1995, 27(6): 749-756
- [31] Katarina Bohman, Yngve Håland, Bertil Aldman. Reduction of head rotational motions in side impacts due to the inflatable curtain-A way to bring down the risk of diffuse brain injury. In: The 16th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV).Canada, 1998, 1720-1721
- [32] Gansslen A, Pohlemann T, Paul CH, et al. Epidemiology of pelvic ring injuries.

- INJURY-INTERNATIONAL JOURNAL OF THE CARE OF THE INJURED, 1996, 27(1):13-20
- [33] 庄颜峰,吕琦,陈学明.严重骨盆骨折的初期救治体会.中华创伤骨科杂志. 2004,6(5):582-583
- [34] Wholey M, Peterson S, Silvestri B. Pelvic fracture with tear of the left internal pudendal artery. AJR Am Roentgenol,1998,171(3):844-848
- [35] John M Dawson, Boris V Khmelniker, Mark P. McAndrew. Analysis of the structural behavior of the pelvis during lateral impact using the finite element method. ACCIDENT ANALYSIS&PREVENTION, 1999, 31:109-119
- [36] Thomas A Gennarelli, M D, Elaine Wodzins. 简明损伤定级标准.重庆市急救医疗中心,重庆市急救医学研究所.第二版.重庆:重庆出版社,2005,13-17
- [37] 陈晓东,苏清祖,朱西产等.汽车侧碰移动变形壁障有限元模型的开发.汽车工程,2003,25(3):260-263
- [38] Ls-Dyna970 Keyword User's Manual (Volume I), LSTC, 2003
- [39] Finite Element Model of Dodge Neon, Test No.: 2320.National Crash Analysis Center, The George Washington University
- [40] 陈晓东,尹同耀.汽车侧面碰撞计算机仿真方法.汽车工程,2004,26(1):65-69
- [41] 游国忠,陈晓东,程勇等.汽车侧面碰撞有限元建模.江苏大学学报(自然科学版), 2005, 26(6):484-487
- [42] 唐洪斌.某轿车侧面碰撞车体结构性能研究:[吉林大学硕士学位论文].吉林:吉林大学,2006,31-32
- [43] Chen Xiaodong, Lin Haiyan, Ge Ruihai, et al. The simulation of CHERY full-scale side impact test. In: SAE 2003 International. 04ANNUAL-454
- [44] MADYMO Theory Manual.V6.2.1.TNO Automotive China,2004
- [45] 侧面碰撞系统集成开发方法\_BASIS+台车试验与MADYMO PSM模拟计算. In: MADYMO China User's Meeting, Shanghai China, November 30th, 2005, 2005-09
- [46] MADYMO R6.2.1 Applications Side Impact Application, Version 1.0, TNO Automotive China, 2005
- [47] ZC. TRW 用于侧面碰撞和翻车事故的安全气囊技术. <http://www.ajqcw.com/html/TecEdge/07101008505620904.shtml>, 2007-10-10
- [48] Narayan Yoganandan, Frank A. Pintar, Brian D Stemper, et al. Biomechanics of side impact: Injury criteria, aging occupants, and airbag technology. Journal of Biomechanics, 2007, 40:227-243
- [49] Narayan Yoganandan, Frank A. Pintar, Jiangyue Zhang, et al. Lateral impact

injuries with side airbag deployment-A descriptive study. ACCIDENT ANALYSIS & PREVENTION, 2007, 39:22-27

[50] Proposed New Federal Motor Vehicle Safety Standard for Motor Vehicle Side Impact Protection (FMVSS 214), USDOC/ITA/MAS/MFG/OAAI/AIT/ Elizabeth Couch/x2-2120/08-26-04

[51] Gerhard Slik, Gavin Vogel. Use of high efficient energy absorption foam in side impact padding. In: The 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV).France, 2007, 1-6

## 致 谢

本研究由国家 863 高科技研究发展项目 (No.2006AA110101) 和 111 项目 (No.111-2-11) 资助。

本论文得以顺利完成,我首先要衷心地感谢我的导师杨济匡教授。研究生三年中我每个阶段的学习进展、每一步的成长和每项工作的成就都离不开杨老师对我的指导、支持和鼓励。杨老师在国外从事汽车安全和生物力学的研究,虽然不能长期在身边对我进行随时的指导,但是他一直都在关注我工作学习的动向,给我带来相关最新研究资料的同时,也注意帮我把握研究的方向。在这三年里,杨老师渊博的专业理论和实践知识、高深的学术修养、开阔的学术视野、科学的思维方法都使我受益匪浅,同时他严谨踏实的工作作风、朴实的做人态度和个人修养,都是我今后学习和努力的榜样。

从刚进入研究生学习阶段,杨老师就帮我制定了详细的研究生学习计划,使我很快进入课题方面的研究,并鼓励和指导我们去做收集资料的工作。然后,根据我们的学习情况和个人爱好,在征求我自己想法的前提下,帮我确定了课题的研究方向,在我研究进入盲区的时候,杨老师总是能给我提出很有见解和针对性的意见,对我在做论文中提出的想法,总是持支持态度,同时指出其不足之处,三年中,杨老师为我创造了良好的工作条件和环境,并特别感谢杨老师对我健康状况的关心,在此,谨向杨老师致以衷心的感谢和崇高的敬意!

非常感谢许伟师兄三年来对我在学习和生活上给予的所有关心帮助和支持,感谢李凡师兄、肖志师兄、孔春玉师姐和杨杏梅师姐对我的指导和照顾,感谢杨慧庄老师对我生活上的帮助,感谢彭倩、陈勇、周航飞、黄冬、李红运、高伟和李松庆等同学提供的宝贵意见和帮助,感谢所有关心帮助过我的老师、师兄师姐以及师弟师妹们。这里还要感谢张维刚老师,我的课题和论文工作也得到过他的帮助。

最后,最最感谢我的爸爸妈妈、叔叔,感谢我最好的朋友们,你们是最坚强的后盾,谢谢你们!

王方

2008年4月

## 附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

- [1] Wang Fang, Yang Jikuang. A Research on Influence of Side Impact Beam on Vehicle Side Impact Safety. In: The 5th International Forum of Automotive Traffic Safety (INFATS PROCEEDINGS), Changsha: Hunan University, 2007, 202-208