## Analysis and Simulation of Vehicle Crash Test Dummy's Thoracic Response under Impact Loading

#### Jiaqing Zhao<sup>1</sup>, Yi Huang<sup>1</sup>, Xinghua Lai<sup>1</sup>, Qing Zhou<sup>2</sup>

Tsinghua Suzhou Automotive Research Institute (Xiangcheng), Suzhou, 215134, zhaojiaqing@tsari.tsinghua.edu.cn
 State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing, 100084

**Abstract:** The thoracic response of a crash test dummy is a very important index for evaluating the occupant-protecting ability of a vehicle. As its counterpart in the virtual environment of Finite Element Analysis, the thoracic response substantially determines the credibility of the dummy model. It has been a difficult point and which must be overcome to construct a finite element model for crash test dummy with high fidelity. The complexity in geometry and material behavior makes it difficult to model the thorax of a dummy. This paper addresses the detailed procedures of building up a precise thoracic model for Hybrid III 50th percentile male dummy, from material test to sub-assembly validation, from whole dummy calibration test to completed dummy model simulation, to provide as a reference and an example for constructing finite element model of a crash test dummy.

Keywords: Hybrid III crash test dummy; crash test dummy finite element model; thorax impact test; occupant protection

# 碰撞测试假人胸部冲击响应的分析及模拟

#### 赵佳庆<sup>1</sup>,黄毅<sup>1</sup>,赖兴华<sup>1</sup>,周青<sup>2</sup>

1. 清华大学苏州汽车研究院(相城),苏州,215134, zhaojiaqing@tsari.tsinghua.edu.cn 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室,北京,100084

**摘 要:**碰撞测试假人的胸部响应,是实车碰撞中评判车辆碰撞安全性的一个重要指标。在虚拟仿真中,假人有限元模型的胸部响应同样对于仿真结果产生重要影响。碰撞假人胸腔本身结构,以及所用材料的力学特性均比较复杂,为建立准确的假人胸部有限元模型带来较大的困难。本文将分析 Hybrid III 50th 假人胸腔的结构,从材料试验到子系统层级的验证,再到整体模型的对标,全面展示假人胸腔结构有限元模型的建模过程,为建立完整的假人有限元模型提供方法上的参考。

关键词: Hybrid III 碰撞假人; 假人有限元模型; 胸腔结构; 乘员保护

#### 1 引言

Hybrid III 系列碰撞测试假人作为目前国际通用的标准正撞假人,主要用于汽车的正面碰撞测试,用于检验 约束系统对乘员保护的有效性,以考察车辆能否满足汽车碰撞安全法规的要求<sup>[1]</sup>。计算机仿真技术的发展,使 得假人有限元模型的应用也更加广泛,对于模型的精确程度的需求也日渐迫切<sup>[2][3]</sup>。高精度的假人有限元模型, 对于新车型的研发,特别是在其开发初期的碰撞安全性的预估上,起着十分重要的作用<sup>[4-7]</sup>。近年来随着计算机 计算效率的提升以及有限元技术的进步,商业及公开领域的碰撞假人模型在不断的完善下,精度有了明显的提 高。

随着中国成为世界第一的汽车生产和销售市场,汽车的碰撞安全性也变的日趋受到政府和人们的重视。国 产汽车设计制造团队,在有限元技术用于指导汽车安全性设计方面也逐渐缩小与国外的差距。迄今为止,商业 化的精细化高逼真度(high fidelity)高效率的碰撞假人有限元模型较少,国内汽车安全系统开发主要以使用多 刚体假人模型为主,缺乏使用有限元数字假人的经验,且可供用户选用的产品也十分有限。因此国产的假人有 限元模型的开发十分必要。

#### 2 Hybrid III 胸腔结构分析和建模

假人上躯干的最外层包裹维尼龙材料制成的外套。外套的夹层里面填充有模拟人体肌肉组织的泡沫材料。 假人胸腔主要由六根外轮廓近似于椭圆的肋骨组成(图1(a))。肋骨后部安装在金属制的刚性脊柱上,前部 缺失部分弧度,通过一整块的塑料板将两端连接。塑料板与肋骨前部之间夹着一层树脂材料的软质衬垫,作用 是隔开肋骨前段与外套,起到缓冲和使外套受力均匀的作用。拆下衬垫可以看到一个黄铜色的金属球头(图 1 (b)),球头可以在塑料板内侧的轨道内滑动。球头的滑动带动连接其上的金属杆绕另一端旋转,由此测得金 属杆的转角信号,最后可以换算成胸部压缩量。



(a) Contains the chest pad (a)包含胸部衬垫 Figure 1. Dummy chest internal structure

(b) Remove the breast pad (b)拆下胸部衬垫

图 1 假人胸腔内部结构

除了复杂的几何结构,假人胸部包含的材料也是多种多样,有泡沫、维尼龙、橡胶、树脂、塑料、钢等。 肋骨是其中比较特殊的一个部件,外侧是一段经过处理的弯曲钢片,内侧粘接着一层非等厚度的橡胶类材料。 这样的结构既有金属材料的弹性特质,又有橡胶材料的粘性特质,加之肋骨橡胶的原材料难以获取,所以要做 到对假人肋骨的准确有限元模拟确实存在着一定的困难。

模拟假人胸部响应的前提是保证几何上的准确性。通过激光扫描和 CT 扫描以及结合假人设计图纸,做出 准确的 CAD 模型,然后在此基础上进行网格划分<sup>[8-9]</sup>。肋骨钢片采用壳单元模拟,阻尼橡胶用实体网格划分。 其他部件也都根据其真实形状相应选择壳、实体单元进行划分。胸部衬垫和外套需要进行预模拟,才能与周边 的部件完好贴合并且不出现网格穿透。最终的网格划分结果如图2所示。



Figure 2. The meshing results of chest part 图 2 胸腔部分网格划分结果

#### Hvbrid III 肋骨测试及模型验证 3

为了全面的了解假人肋骨力学特性,设置了一系列的试验来观察其结果。首先要做的是取单根肋骨进行准 静态下的加卸载测试。从同一个假人身上,取第二、第四根肋骨分别进行试验。

#### 3.1 整体肋骨的力学特性分析

假人的完整肋骨是由厚度为 2mm, 宽度为 19mm 的钢片弯曲而成构成框架, 内层粘接着一层类似橡胶的阻 尼材料。两种材料的力学特性差异很大,所以要分别设计试验来标定其材料参数。在万能试验机上,进行完整 肋骨的不同加载速率下的压缩试验;然后剥离内层的阻尼材料,再进行不同加载速率下的压缩试验(图3)。



图 3 肋骨压缩试验

试验结果表明(图4):加载速度越高,测到的力值越大,也就是粘性效应越明显;当加载速度为5mm/min 以下时,结果接近于收敛,可以认为在此加载速率下,肋骨的粘性效应可以忽略。







剥离了阻尼材料的肋骨钢片的压缩试验表明,钢片本身在受到不同速率的加载下,力学特性基本不发生变化,也就是说在仿真中,可以忽略钢片的应变率效应。

#### 3.2 肋骨的材料试验

了解组成假人肋骨的两种材料的基本力学属性,就可以选择相应的材料模型来对肋骨进行有限元建模。肋骨钢片选择不包含应变率效应的弹性材料;阻尼部分选择 LS-DYNA 材料库中的 77 号橡胶材料(MAT\_077\_O)。

对于肋骨钢片,需要测得的材料参数主要是:密度、弹性模量以及泊松比,最主要的工作是标定其弹性模量。为此,对肋骨钢片进行切分(图 6),并记录断片在肋骨上的具体位置,然后测定切片的弹性模量,最后绘制出整根肋骨钢片的弹性模量分布云图(图 7 (a))。

根据肋骨阻尼材料选用的材料卡,需要进行静态压缩和松弛试验来标定所需要的全部参数。松弛试验实践 起来十分困难,一般都是通过结构试验的结果来逆向标定出控制橡胶的粘性效应的 Prony 级数。因此只需要获 得阻尼材料单向压缩的试验结果即可。



①完整肋骨钢片②肋骨钢片切片③肋骨钢片压缩试验④阻尼材料试样——试验前 ⑤阻尼材料试样——试验后⑥阻尼材料单向压缩试验 Figure 6. Dummy frame material test 图 6 假人肋骨材料试验



#### 3.3 肋骨模型参数标定

肋骨钢片的应力云图中(图7(a))显示出,在不同位置的切片测得的弹性模量存在着较大的差异,曲率 越高的地方,弹性模量的数值也越小。这可能是由于在假人肋骨的制造过程导致弹性模量发生变化。在假人模 型中,不便于将肋骨钢片分成多个部件并赋予独自的材料参数,因此需要通过仿真模拟来对标出一个合适的参 数用于整个肋骨钢片的建模。阻尼材料的试验曲线也存在着一定的离散性(图7(b)),所以也需要通过仿真 对标,来对原始试验数据进行修正。 建立两个仿真模型(图 8),分别为不包含阻尼材料的肋骨钢片的准静态单向压缩和完整肋骨的准静态单 向压缩。完整肋骨的试验数据,包含了第二、第四根肋骨两组,两根肋骨的形状和尺寸存在差异,因此响应的 模型也完全参考实物的几何形状来建立。模型中的材料卡不包含与应变率相关的参数,所以模型的计算加载速 率可以适当提高,减少计算所需资源。



图 8 肋骨单向压缩仿真模型

肋骨钢片模拟试验的对标中,通过设置几个不同的弹性模量数值输入到模型材料卡中,仿真计算得到对应 不同材料参数的结果,通过比较不同结果与试验之间的吻合程度,来选择最接近试验的那个模型。图9(a)的 结果显示,当肋骨钢片的弹性模量为170GPa时,可以得到最好的对标结果。

将通过标定的肋骨钢片的材料参数,输入到完整肋骨的单向压缩仿真模型中,再通过对阻尼材料参数的优化,得到如图 9 (b) 中展示的结果。



准静态加载下的试验和仿真对标完成之后,接下来就要进行肋骨动态冲击下的仿真模拟,图 4 展示了不同 加载速率下,肋骨整体性能的差异较大,因此动态下肋骨的力学特性的精确模拟,才是整个假人模型胸腔建模 仿真的关键所在。

#### 4 整体模型的对标验证

#### 4.1 单根肋骨冲击试验

单根肋骨的冲击试验,可以在落锤设备上进行,试验尽量接近假人标定试验中,假人肋骨受到的载荷。假 人胸腔标定试验中,冲锤的质量为 23.4kg,冲击速度为 6.7m/s, Euro NCAP 中还增加了 3.0m/s 这一工况。在此 工况下,假人肋骨的压缩量范围与实车测试中的假人肋骨压缩量更接近。

在假人胸部标定试验中,受到冲锤的撞击后,假人上躯干可以向后移动,前端还有假人的外套作缓冲。单 根肋骨落锤试验中,肋骨是固定在底座上的,而且前端缓冲材料为硬质薄片橡胶。考虑到上述情况,因此设置 落锤冲击试验的最大冲击速度不超过 6m/s, 落锤的质量范围为 4~5kg。同样增加一个速度较低的试验,冲击速度为 3m/s 左右。



Figure 10. Single frame impact test and simulation

图 10 单根肋骨冲击试验及仿真



Figure 11. The prony series adjustment process 图 11 Prony 级数调整过程

试验设置是将肋骨下部固定在一个凳子形状的金属支撑块上,支撑块与肋骨之间通过螺栓相连(与假人肋 骨和脊柱之间的连接相一致)。支撑块下端连接一个力传感器,力传感器再与落锤的基座固定。肋骨上部悬空 的两端,通过两片金属薄板卡住,上面的薄板表面粘接有一层橡胶缓冲块(缓冲块的材料与假人头皮一致,力 学特性和材料参数都已获得,不会引入新的未知变量)。

试验中,将落锤提高到相应的高度释放,使其作自由落体运动。落锤两侧有刚性导轨,引导落锤下接触面 在下落的过程中保持水平姿态,同时落锤上安装有两个加速度计采集整个冲击过程中,落锤沿重力方向上的加 速度信号。高速摄像机以 5000fps 的帧率拍摄整个试验过程,用于后期计算肋骨的压缩变形量。

肋骨压缩量和落锤加速度是关键的两个指标,模型也是以这两个指标作为仿真对标结果好坏的评判依据。 由于加速度计信号振荡较大,所以在模型调整初期,是以肋骨压缩量为参考,来分析模型中肋阻尼材料卡中 Prony 级数调整对于结果的影响。调整过程如下:

选取两组 Prony 参数(每一组 Prony 级数包含两个参数,剪切模量 Gi; 松弛常量 βi,为松弛时间的倒数), 一组松弛时间较短(松弛速率快,粘性效应明显),另一组松弛时间较长(松弛速率慢,在此仿真中体现弹性 效应)。每次选择一组参数代入模型中,通过优化参数 Gi 的数值,使得仿真结果中肋骨压缩量的最大值和试验 结果一致。最终调整两组所占的比例,使仿真结果中肋骨压缩量——时间曲线与试验曲线完好吻合。 通过优化工具的迭代计算,优化得到满足两种加载速率下的都能与试验结果良好吻合的模型参数。对标结 果如图 12 所示。



图 12 两种加载速率下的单根肋骨冲击对标结果

#### 4.2 整体模型胸部冲击验证

在一系列的试验以及模型对标工作完成之后,最终需要将肋骨模型置于整体假人模型中,进行法规标定试验——假人胸部冲击标定试验。CFR Part 572 中,规定了硬件假人胸部标定的试验要求,简单的叙述一下试验设置:整个假人(除鞋子外)置于平整、干净、光滑的钢板平台上,使用质量为 23.4kg 的刚性摆锤采用高速(6.7m/s)冲击假人胸部,测量摆锤冲击载荷和假人胸部变形量,以考核假人胸部性能。高速冲击试验下的假人胸部最大压缩量应位于 63.5mm 到 72.6mm 之间,最大摆锤冲击载荷应在 5.160kN 到 5.894kN 之间。低速(3.0m/s)冲击试验下的假人胸部最大压缩量应位于 21.5mm 到 26.5mm 之间,最大摆锤冲击载荷应在 2.38kN 到 2.73kN 之间。



Figure 13. Chest impact test and simulation 图 13 胸部冲击试验设置及仿真模拟

试验和仿真对标结果如下:







图 15 胸部高速冲击试验、仿真结果

结果表明,在整体模型的验证工况中,两种冲击速度下的仿真结果均能很好的吻合试验曲线,而且满足法规中要求达到的范围。

#### 5 总结

肋骨是碰撞测试假人上最重要的部件之一,也是假人有限元模型建立过程中的一大难点,其力学行为的表 征直接影响到模型的准确性和预测能力。本文通过从最简单的材料试验开始,到结构试验、部件试验,再到整 个模型的标定试验,叙述了假人胸腔的有限元模型的建立和对标全过程。模型初步达到了预期的效果,在整体 模型的验证中满足了法规的要求,证明了模型的准确性达到车辆约束系统开发仿真工作的使用要求。后续针对 本文所建立的模型,可通过设计更多的试验工况,进一步验证、完善现有的模型,例如可设计一系列的动态松 弛试验来获取肋骨阻尼材料的本构参数。

### 参考文献

- [1] Foster J, Kortge J, Wolanin M. Hybrid III-A biomechanically-based crash test dummy. SAE Technical Paper No. 770938, 1977
- [2] Franz U, Stahlschmidt S, Schelkle E, et al. 15 years of finite element dummy model development within FAT,2009
- [3] Rieser A, Nu & Baumer C, et al. A development process for creating finite-element models of crash test dummies based on investigations of the hardware. The 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Conference, ESV 09-0368, 2009
   [4] NHTSA 49 CFR 49 572.31 Subpart E-Hybrid III Test Dummy
- [4] MITISK 49 CFK 49 572.51 Subject E-Hydrid III Fest Dunning
  [5] Noureddine A, Eskandarian A, Digges K. Computer modeling and validation of a Hybrid III dummy for crashworthiness simulation. Mathematical and Computer Modelling (35): 885-893, 2002
- [6] Naravane A, Deb A.Validation of a Hybrid III dummy model and its application in simulation of vehicle frontal NCAP tests. Altair CAE Users Conference, 2005
- [7] Mohan P and Marzougui D, et al. Development and Validation of Hybrid III Crash Test Dummy. SAE Technical Paper No. 2009-01-0473, 2009
- [8] Yu H, Zhou Q, Neat G W. Three-dimensional finite element modelling of the torso of the anthropomorphic test device THOR. International Journal of Vehicle Safety 2(1-2): 116-140, 2007
- [9] 李兴东,赖兴华,刘文丽,杨民.基于CT图像的汽车碰撞假人上衣模型点云数据提取研究.中国体视学与图像分析.2011,16(3): 254-261. (科技核心期刊)