

# modeFRONTIER 在乘员约束系统参数优化中的应用

## modeFRONTIER Application in Vehicle Restraint System Parameters Optimization

张学荣<sup>1,2</sup> 刘学军<sup>2</sup> 苏清祖<sup>1</sup>

1. 江苏大学汽车与交通工程学院, 镇江, 212013

2. 天欧汽车中国有限公司, 上海, 200120

**摘要:** 应用 MADYMO 模型进行虚拟试验或数值仿真是乘员约束系统开发流程中重要的工具。为得到可靠的计算结果, 必需遵循规范的验证流程。本文详细介绍了正面碰撞约束系统的建立和试验验证的流程。在已验证模型的基础上进行了大量试验设计、参数灵敏度分析以及响应面模型分析并最终进行了优化设计。使乘员受重伤的概率下降 4.2%。在实际的工程应用中, 利用 modeFRONTIER 可有效匹配约束系统的设计参数, 实现稳健可靠的乘员保护效果。

**关键词:** 正面碰撞 约束系统 modeFRONTIER 优化

**Abstract:** Virtual testing or mathematical simulation using MADYMO becomes a vital tool for occupant restraint systems development. To obtain predictive crash simulations, it is very important to validate a model according to appropriate processes. In this paper, guidelines and considerations for frontal impact restraint system modeling and validation were described in detail. Based on validated model, design of experiments (DOE), parameter sensitivity analysis, response surface model (RSM) and optimization are performed. The probability of serious injury decreases by 4.2%. In engineering applications, modeFRONTIER simulation is efficient way to develop robust and reliable restraint systems.

**Key words:** Frontal impact, Restraint system, modeFRONTIER, Optimization

## 0 前言

乘员约束系统是指在汽车碰撞事故中对乘员起保护作用的装置。主要包括安全带(含预紧器、限力器)、安全气囊、安全座椅、压溃式转向柱、膝垫、仪表板等。

在乘员约束系统开发中, MADYMO 模拟仿真是重要的设计分析手段, 可用于预测不同设计方案对乘员的保护效果, 显著减少物理试验次数, 提高约束系统在不同载荷工况下的稳健性。然而, MADYMO 模型的预测能力取决于该模型是否能够真实反映乘员与车辆内部构件及约束系统相互作用的物理碰撞过程, 即模拟计算与实车(或台车)试验验证的吻合程度。

本文结合某型轿车约束系统的开发, 详细介绍了 MADYMO 正面碰撞模型的建立以及验证方法, 并对约束系统的参数进行了模拟试验设计(DOE)、灵敏度分析、响应面(RSM)分析以及优化设计, 得到该约束系统的最优结果。

## 1 正面碰撞数学模型建立

根据驾驶室总布置的几何参数建立 MADYMO 车体模型, 包括: 地板、防火墙、加速踏板、座椅、仪表板、转向系统、前挡风玻璃、车顶、A 柱及内饰板等构件。为便于进行优化设计, 必须在满足精度要求的前提下, 提高模型的计算效率, 采取的措施如下: 使用多体假人模型提高计算效率; 采用详细的有限元模型而不采用多体模型建立乘员舱, 是为了提高假人与乘员舱接触力计算的精度, 但假人与乘员舱接触力的计算方法采用基于力-穿透量关系的接触算法(即 MB-FE 多体-有限元接触算法)<sup>[1]</sup>进行计算, 而不是采用有限元罚函数算法, 因此计算效率也大大提高; 安全带与假人身体接触部分采用有限元模型, 其它部分采用多体模型, 可以精确模拟碰撞过程中安全带在假人身体表面的滑动及安全带织物陷入

假人身体表面的嵌入效应<sup>[2]</sup>。 乘员处于正常驾驶位置，采用均匀压力算法进行安全气囊的展开，大大提高计算效率。

在碰撞过程中，假人身体各部位自下往上与车体或约束系统逐步发生接触，所以假人的准确定位对模拟结果至关重要，本文直接输入试验前物理假人定位参数的测量值。

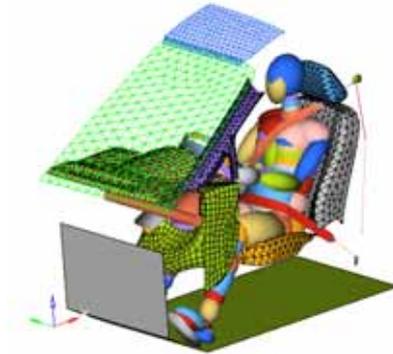


图 1 正面碰撞约束系统数学模型

在建立约束系统模型中，应用到的各个特性，如安全带刚度、座椅各部分刚度、转向柱的压溃特性、膝垫刚度、风档玻璃的刚度、安全气囊气体发生器特性、踏板铰链约束特性等等均来自试验测量数据，试验由荷兰代夫特 TNO 碰撞测试中心完成。碰撞载荷为美国新车评价程序 56 公里/小时完全正面碰撞。建立的约束系统模型如图 1。

## 2 模型验证

正面碰撞模型验证遵循“从下至上”的原则，即先下肢、髌部、胸部，最后头部响应；力与加速度信号应满足“起始时刻、峰值、峰值时刻、上升沿、下降沿、整体形状”等基本特征。ADVISER 软件中最多可以有 27 个数据来进行定量描述<sup>[3]</sup>。实际验证的顺序按照安全带腰带力、肩带力、髌部加速度、大腿力、胸部加速度、头部加速度以及乘员运动姿态的顺序进行。保证髌部加速度的正确性，就能确定假人的基本运动，才能确保胸部和头部响应的正确。

模型验证是分步有序进行的，需要多次反复调整，针对响应具体的部位，调整主要的影响因数，能够实现快速准确的验证。影响髌部响应的主要因数是安全带的刚度、座椅刚度、膝垫的刚度以及与乘员间的摩擦系数等；而影响胸部响应的主要因数是卷收器锁止时刻、安全带刚度、滑环摩擦系数和安全气囊各参数等；头部运动主要取决于安全气囊参数，如排气孔直径、泄气率等。MADYMO 模型响应与碰撞试验结果响应对比情况如图 2-10 所示。

对试验和模拟曲线采用 ADVISER 软件进行定量评分，并根据伤害部位和响应曲线方向的不同，分别赋予不同的权重。头部和胸部损伤是造成乘员死亡的主要因数，权重为 1，而髌部和大腿骨折是造成乘员残疾的主要因数，权重为 0.5；由于是研究正面碰撞，所以 X 方向响应的权重为 1，Z 方向响应的权重为 0.5。对模拟和试验曲线从点类、形状类、整体类<sup>[4]</sup>数据进行定量评分，得到模拟对试验的吻合程度为 88.6%，因而可以作为约束系统优化研究的基础。

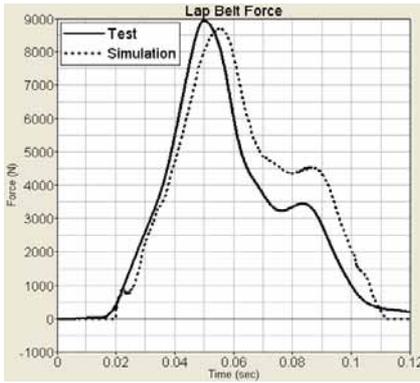


图2 试验与模拟安全带腰带力

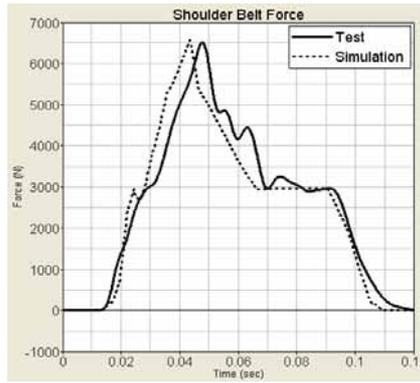


图3 试验与模拟安全带肩带力

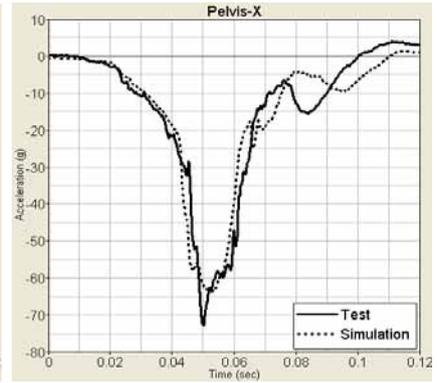


图4 假人髋部 X 向加速度对比

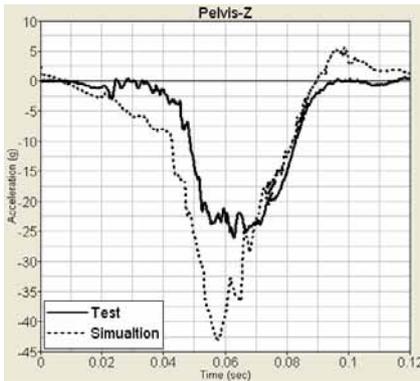


图5 假人髋部 Z 向加速度对比

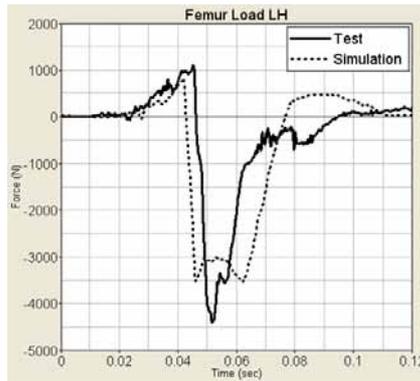


图6 假人左大腿力对比

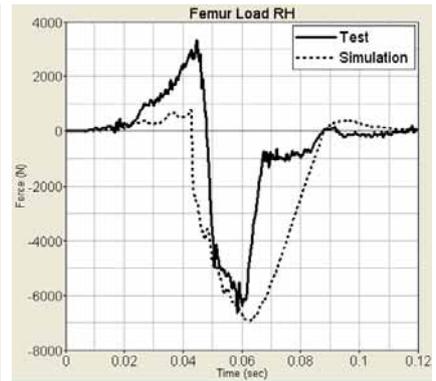


图7 假人右大腿力对比

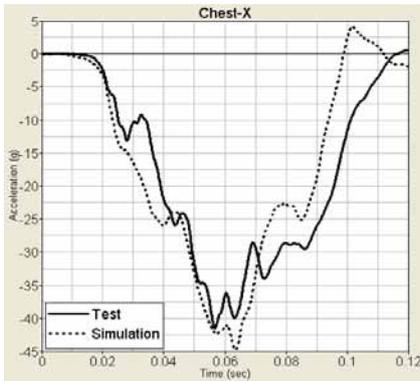


图8 假人胸部 X 向加速度对比

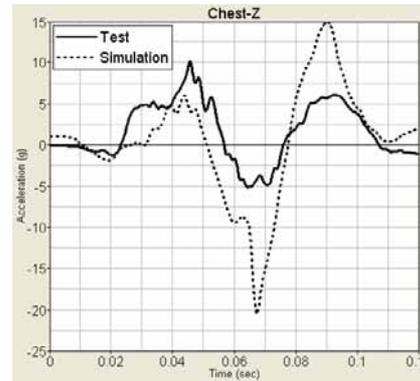


图9 假人胸部 Z 向加速度对比

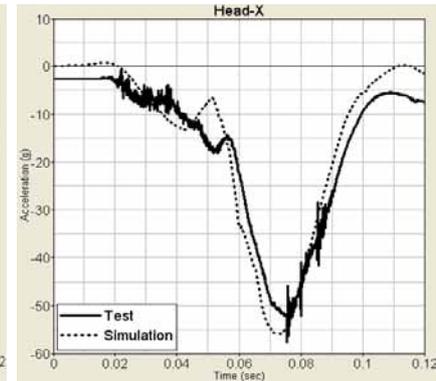


图10 假人头部 X 向加速度对比

### 3 约束系统参数优化设计

#### 3.1 设计变量：

从 7 个初始设计变量中，进行灵敏度分析，筛选出 4 个最灵敏的变量，为：

1. 气囊排气孔的直径 (Vent Hole Size, 20-80mm)；
2. 气体发生器序号 (Inflator ID, 有两个气体发生器, 1 号为两级气体发生器均点火, 2 号为两级气体发生器的主级点火, 3 号为单级气体发生器)；
3. 限力器的限力水平 (Loadlimiter ID, 序号 210 到 214 分别对应的限力水平为 5.25、5.5、5.75、6.0、6.5 千牛顿)；
4. 安全带织物刚度 (Belt stiffness, 6%-16%)。

另外 3 个设计变量依次为压溃式转向柱的压溃特性、预紧器的预紧量、座椅坐垫刚度，其相对灵敏度如表 1 所示。

表 1 设计变量的相对灵敏度

响应	1	2	3	4	5	6	7
HIC36	-100	-10	-10	-5	29	-16	2
T3MS	-100	-72	-66	-48	13	23	18

3.2 约束变量：左、右大腿轴向力小于 6000 牛顿。

### 3.3 优化目标：

头、胸部组合损伤概率  $P_{combine}^{[5]}$ ，表示乘员受 AIS（简略损伤等级）4 级以上重伤（危及生命）的概率，在新车评价程序（NCAP）中作为星级评定的重要指标。计算公式如下：

$$P_{combine} = \left(1 + e^{(5.02 - 0.00351 * HIC36)}\right)^{-1} + \left(1 + e^{(5.55 - 0.0693 * T3MS / 9.81)}\right)^{-1} - \left(1 + e^{(5.02 - 0.00351 * HIC36)}\right)^{-1} * \left(1 + e^{(5.55 - 0.0693 * T3MS / 9.81)}\right)^{-1}$$

其中  $HIC_{36} = \max \left[ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1)$

$a(t)$  为头部合成加速度，HIC36 表示头部损伤指标；T3MS 为胸部合成加速度 3 毫秒损伤值。

采用 CDAJ 公司的 modeFRONTIER 软件建立优化的流程图，进行 4 变量全因子试验设计，采用单值重构（SVD）二次曲面拟合的方法<sup>[6]</sup>进行响应面绘制。乘员头部 HIC36、胸部 T3MS 响应对设计变量的响应面，如图 11-12 所示，从响应面图可得如下结论：

1. HIC36 随安全气囊排气孔变化呈现强烈的非线性关系，在孔直径为 45 毫米时，得到最低值，并处于稳定的波谷；T3MS 随排气孔直径增加而减少，在 60 毫米达到最低；
2. 安全带刚度对 HIC36、T3MS 影响均不显著；
3. 气体发生器选择对 HIC36、T3MS 有较大影响，单级气体发生器由于充气少，整体刚度小，HIC36 也小；选择双级气体发生器采用主级点火，使 T3MS 最小；
4. 随限力器限力水平增加，HIC36、T3MS 均呈下降趋势。

经响应面优化分析确定的最优解为：气囊排气孔为 45 毫米，双级气体发生器的主级点火，限力器的限力水平为 6500 牛顿，安全带刚度为 8%。优化前后的乘员运动姿态对比，如图 13-14 所示，HIC36 下降了 26%，T3MS 下降了 11.5%，头、胸部组合损伤概率下降了 4.2%，且设计变量均处于相对稳定的区域，因而响应也十分可靠。

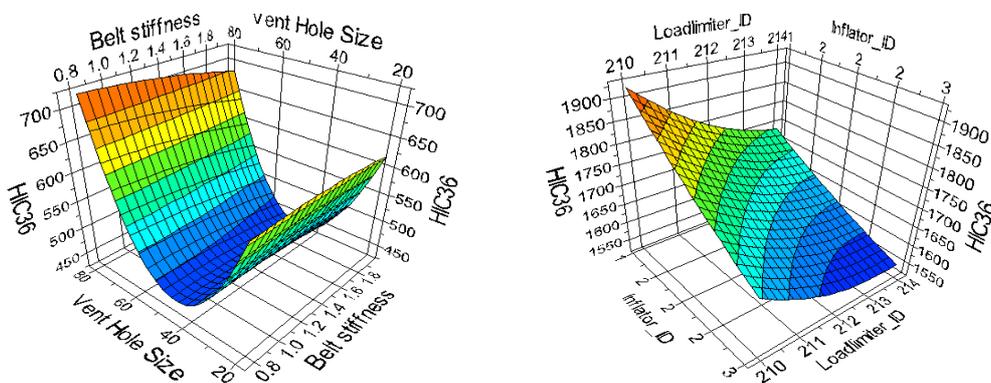


图 11 头部 HIC36 对设计变量的响应面

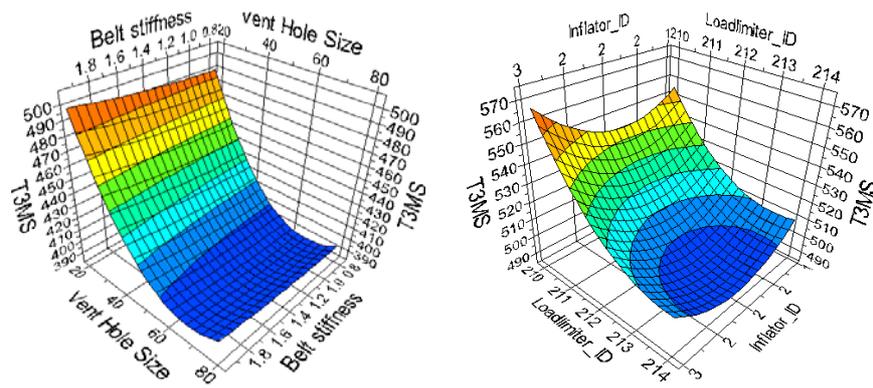


图 12 胸部 T3MS 对设计变量的响应面

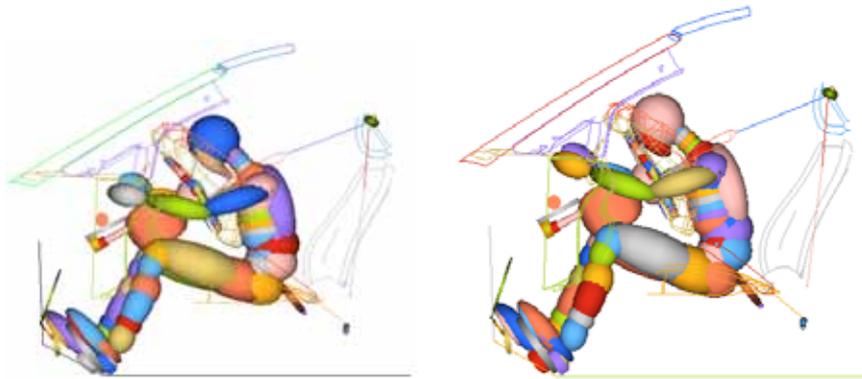


图 13 优化前假人运动到最前位置姿态 图 14 优化后假人运动到最前位置姿态

## 4 结论

该约束系统经过试验验证具有良好的吻合性，在此基础上进行优化研究，具有较高的可信度和指导性。约束系统优化的最终目标是保证乘员运动到最前位置时，其头部、胸部的动能完全被约束系统吸收，而不会与车内部件（转向系统等）发生二次碰撞。

利用 modeFRONTIER 可有效匹配约束系统的设计参数，实现稳健可靠的乘员保护效果，并节省约束系统开发周期和费用。

## 5 参考文献

- [1] TNO MADYMO BV. Theory Manual[M]. Version6.3. The Netherlands : TNO , 2005.
- [2] TNO MADYMO BV , Application Manual[M]. Version6.3. The Netherlands : TN , 2005.
- [3] Jack van Hoof , Roberto Puppini , Hans Baldauf , et al. ADVISER : A Software Tool for Evaluation and Rating of Numerical Models in Crash Safety Analyses[C]// The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles Proceedings Nagoya , Japan , May 19-22 , 2003.
- [4] TNO MADYMO BV. ADVISER User's Guide Manual [M],Version1.4.2.The Netherlands : TNO , 2005.
- [5] Stuart Newstead , Max Cameron. Correlation of results from the new car assessment program with real crash data[R] , 1997
- [6] Hirosuke Horii.Introduction of modeFRONTIER [C],Japan,2006