

# 电动汽车正面碰撞约束系统仿真分析

徐珍珍<sup>1</sup>, 尹辉俊<sup>1</sup>, 崖文瀚<sup>2</sup>, 易超<sup>3</sup>, 解维杰<sup>3</sup>, 陈月亮<sup>3</sup>, 陈涛<sup>4</sup>

<sup>1</sup>广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西 柳州

<sup>2</sup>上汽通用五菱汽车股份有限公司, 广西 柳州

<sup>3</sup>湖南湖大艾盛汽车技术开发有限公司, 广西 柳州

<sup>4</sup>湖南大学, 机械与运载工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年1月3日; 录用日期: 2023年3月2日; 发布日期: 2023年3月9日

## 摘要

本文根据电动汽车的正面100%碰撞实车试验模型, 通过hypermesh等软件进行约束系统建模仿真, 在ls-dyna中计算, hyperview中查看输出结果, 根据仿真计算结果与实车试验结果对比判断该约束系统建模仿真的有效性, 方便后续利用该仿真模型进行约束系统相关分析及优化, 节约实车试验分析及优化时需要消耗的资源。

## 关键词

实车试验, 正面碰撞, 约束系统, 建模仿真

# Simulation Analysis of Electric Vehicle Frontal Impact Restraint System

Zhenzhen Xu<sup>1</sup>, Huijun Yin<sup>1</sup>, Wenhan Ya<sup>2</sup>, Chao Yi<sup>3</sup>, Weijie Xie<sup>3</sup>, Yueliang Chen<sup>3</sup>, Tao Chen<sup>4</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou Guangxi

<sup>2</sup>SAIC-GM-Wuling Automobile Co., Liuzhou Guangxi

<sup>3</sup>Hunan Huda Axeng Automobile Technology Development Co. Ltd., Liuzhou Guangxi

<sup>4</sup>School of Mechanical and Carrying Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

Received: Jan. 3<sup>rd</sup>, 2023; accepted: Mar. 2<sup>nd</sup>, 2023; published: Mar. 9<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In this paper, based on the 100% frontal crash real vehicle test model of electric vehicle, the constraint system is modeled and simulated by hypermesh and other software, calculated in ls-dyna,

文章引用: 徐珍珍, 尹辉俊, 崖文瀚, 易超, 解维杰, 陈月亮, 陈涛. 电动汽车正面碰撞约束系统仿真分析[J]. 建模与仿真, 2023, 12(2): 813-820. DOI: 10.12677/mos.2023.122077

and the output results are viewed in hyperview. The effectiveness of the constraint system modeling and simulation is judged by comparing the simulation results with the real vehicle test results. It is convenient to use the simulation model for subsequent correlation analysis and optimization of the constraint system, and save the resources required for real vehicle test analysis and optimization.

## Keywords

Real Vehicle Test, Frontal Impact, Constraint System, Modeling and Simulation

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

道路交通事故中正面碰撞事故最为常见[1], 汽车的约束系统在交通事故出现时对人们生命财产安全有很好的保护效果, 约束系统包括座椅、安全带、安全气囊等, 是整车被动安全极为重要的一部分, 对于汽车在二次碰撞时的乘员有极大保护作用[2], 所以约束系统仿真分析必不可少。电动汽车近几年发展迅速, 相关研究也逐渐增多, 对于汽车安全方面的研究方法主要有试验和仿真两种方法, 大部分研究是仿真与试验相结合[1], 仿真一般基于 Is-dyna 软件, 利用有限元方法模拟车身、座椅等系统[3] [4], 正面碰撞约束系统仿真分析分为正面偏置碰撞和正面 100%碰撞分析[5] [6], 本文研究电动汽车在正面 100%碰撞时约束系统仿真, 通过实车试验模型建立相对应的约束系统模型进行仿真, 并通过伤害分析对比验证仿真模型的有效性, 为后续的相关优化分析提供仿真模型基础。

## 2. 约束系统仿真模型建立

约束系统仿真模型需要先对座椅、仪表板等的 CAD 模型进行简化处理, 保留重要的受力部件[7], 在 hypermesh 中进行网格划分建立相应的仿真模型部件, 整体划分得 971,663 个网格, 再通过部件之间的连接和接触设置整合成一个整体的约束系统, 各个部件的螺栓及螺钉可以简化为 1D-rigid 连接[8], 用到的接触设置为面面接触或是点面接触。

该车型设计的转向管柱具有压溃特性, 为了保证建立的仿真模型与实车模型更接近, 需要对转向管柱模拟压溃特性如下图 1, 并建立平移铰作为约束, 用于集成管柱到整车模型中。

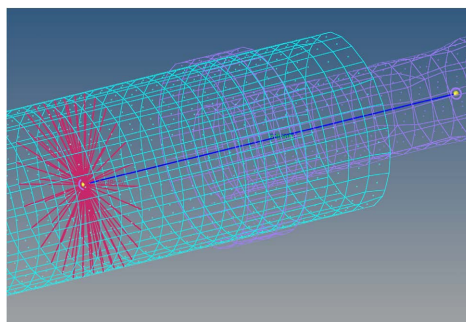
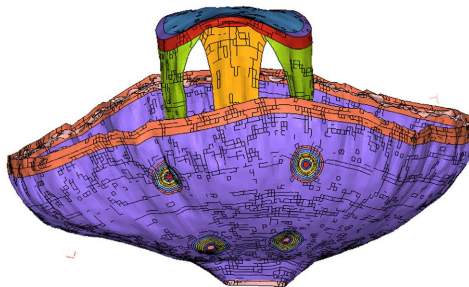


Figure 1. Simulated crush characteristics of steering string

图 1. 转向管柱模拟压溃特性



**Figure 2.** Driver's airbag

**图 2.** 驾驶员安全气囊

试验车所用的安全气囊为 DAB (Driver Airbag) 驾驶员安全气囊如上图 2, 属于在汽车正面碰撞时对驾驶员起防护作用的防护气囊[6]。实验中安全气囊点火时间为 22 ms, 有四个泄气孔直径为 19 mm, 所用的拉带为 Y 型拉带, 3 个拉带长度都为 300 mm, 安全气囊仿真模型数据与之对应。

### 3. 导入假人

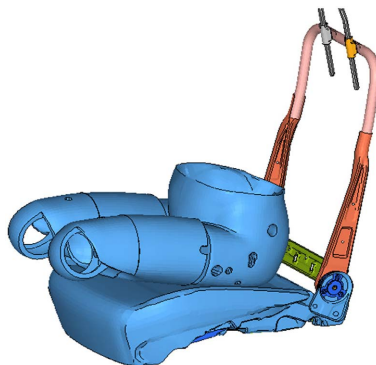
在 prime 中导入假人, 根据实车确定假人模型的 H 点并调整好假人坐姿, 为了保证建立的仿真模型有效性, 提高仿真模型精度, 假人导入定位完成后, 还需要结合 ls-prepost 对安全带进行预模拟以及 hyperview 对座椅坐垫进行预压。

#### 3.1. 安全带预模拟

先通过安全带总成 CAD 模型在 hypermesh 中进行初步建模, 用 beam 单元模拟各连接点, 导入 ls-prepost 根据假人胸部及胯部位置对安全带进行预模拟, 预模拟成功导出为 k 文件后, 继续导入 hypermesh 整合到整体约束系统中, 仿真模型中安全带肩带力大小选用实车试验得到的 7 KN。

#### 3.2. 座椅的预压

座椅预压的压头为假人与坐垫接触的部位, 预压模型如下图 3, 通过关键字 \*BOUNDARY\_PRESCRIBED\_MOTION\_RIGID 给压头加载 Z 向的强制位移运动, 加载曲线横轴为时间, 纵轴为位移, 最大位移即为压头上移的高度 50 mm。结果中坐垫变形的网格可以用 hyperview 处理, 通过导出命令中的 solver deck 导出变形后的坐垫网格来替换最初的网格单元。仿真建立的约束系统整体模型如下图 4。



**Figure 3.** Preloading model

**图 3.** 预压模型



Figure 4. Constrain the overall model of the system  
图 4. 约束系统整体模型

## 4. 子系统的整合及加载

### 4.1. 子系统之间连接及接触设置

约束系统所用大部分材料为刚性材料和塑料件，材料属性皆参考实车。安全带与座椅、安全带与车体结构等的连接，均在一个新的子文件中通过关键字进行连接。子系统仿真模型建立完成后进行集成，假人与车体结构、安全带等的接触均采用面面接触，在与连接同一个子文件中通过关键字定义。

### 4.2. 整车模型的加载及边界条件

根据实车试验结果得到的速度 48.6 km/h，换算成仿真模型加载时对应单位 m/s，得到仿真模型加载初速度为 13.5 m/s。然后给车体定义六个方向的运动，即给 B 柱下端安装加速度传感器处的某个点加载 X、Y、Z 的位移运动，并且加载车体基于该点绕 X、Y、Z 的转动。

六向运动的曲线是从试验结果获取的 B 柱加速度曲线，在 hypergraph 中转换为位移曲线导入 hypermesh 作为加载曲线使用，例如导出的 X 向位移加载曲线如下图 5 所示。

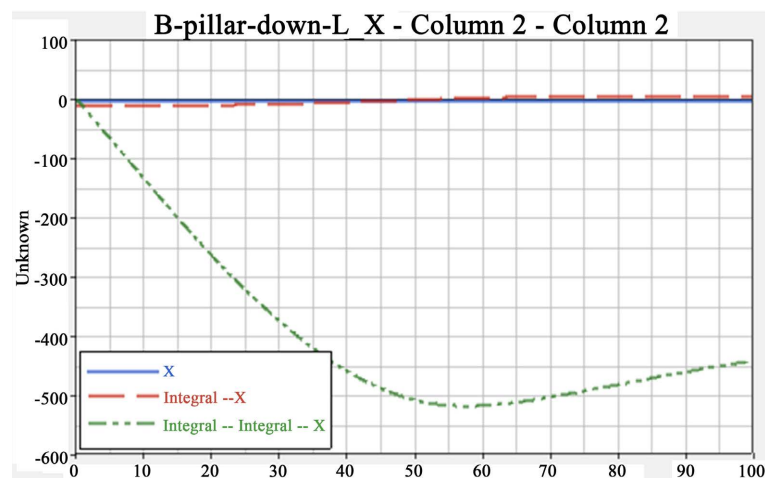


Figure 5. X displacement loading curve  
图 5. X 向位移加载曲线

子系统集成及边界条件定义完成后即可提交 ls-dyna 计算，最终的仿真结果可以用来与试验结果对比进行模型精确度分析。

## 5. 提交计算及结果分析

仿真计算结果气囊点火时间 22 ms 的运动状态, 以及 30 ms, 120 ms 运动状态按顺序依次如下图 6:

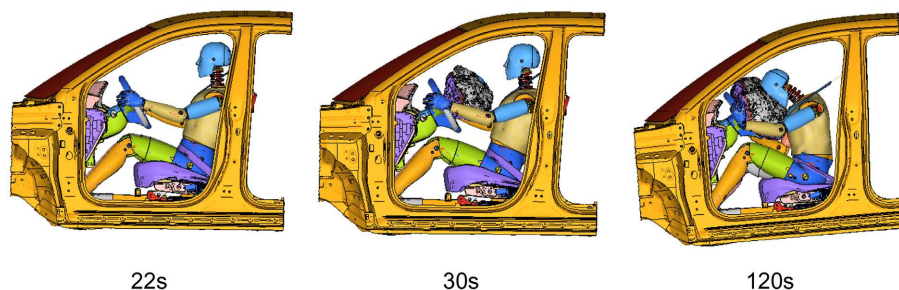


Figure 6. Diagram of the practical teaching system of automation major  
图 6. 仿真计算结果运动状态

再根据试验与仿真结果, 对假人各部位伤害曲线及伤害值进行对比分析[9]。

### 5.1. 头部伤害分析

仿真计算结果的头部 X、Y、Z 向加速度曲线以及三向的合成加速度曲线在 hypergraph 中打开后, 导入对应的试验结果曲线与之对比来验证仿真模型的有效性, 下图顺序依次为 X 向、Y 向、Z 向及合成加速度曲线(图 7)。

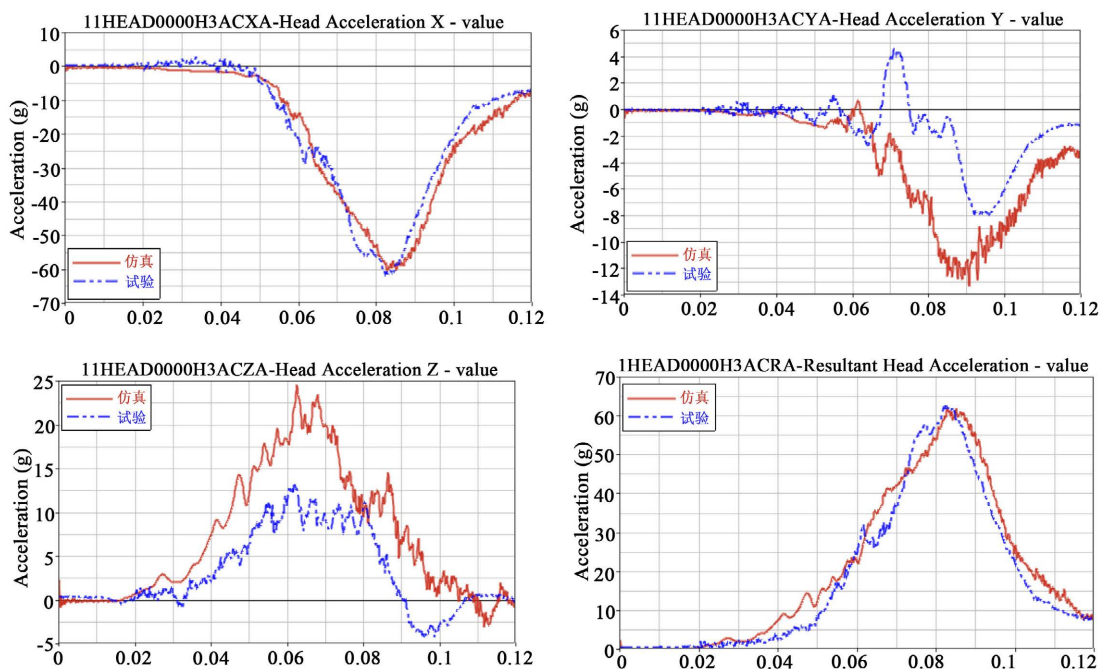


Figure 7. Head acceleration curve  
图 7. 头部加速度曲线

试验结果的头部性能指标 HIC 为 485.58, 头部 3 ms 合成加速度值  $A_{3ms}$  为 60.76 g; 仿真对应的 HIC 为 528.13,  $A_{3ms}$  为 60.45 g, 误差分别为 0.88%和 0.05%。

由于在 70 ms 时试验所用 Y 向传感器出现微小失效，未准确捕捉到假人的加速度状态，此时刻试验与仿真的头部 Y 向加速度曲线出现的差异可不参考，需要参考其他时刻加速度值是否接近且整体趋势是否相同[9]。

### 5.2. 颈部伤害分析

仿真计算结果的颈部轴向拉伸力曲线及颈部对 Y 轴弯矩在伸张方向曲线在 hypergraph 中打开后，导入对应的试验结果曲线与之对比验证仿真模型的有效性(图 8、图 9)。

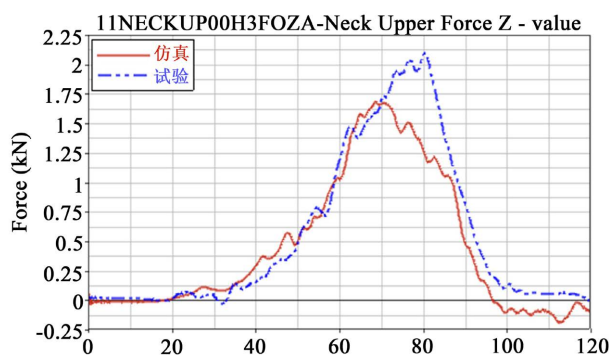


Figure 8. Axial tensile force curve of the neck

图 8. 颈部轴向拉伸力曲线

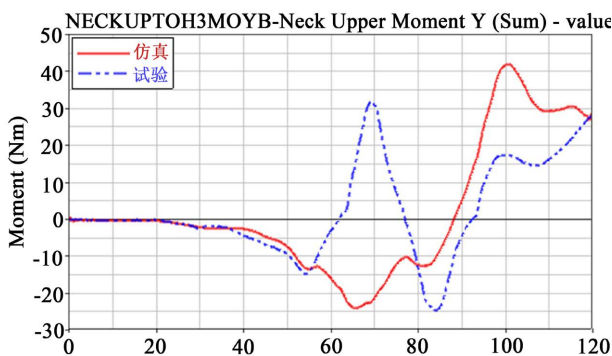


Figure 9. The neck bending moment on the Y axis curves in the extension direction

图 9. 颈部对 Y 轴弯矩在伸张方向曲线

试验结果中颈部轴向拉伸力最大值为 2.1 kN，对 Y 轴弯矩在伸张方向最大值为 32.88 N.m，仿真计算结果与之对应的大小为 1.7 kN，40.55 N.m，误差分别为 19%和 18.9%。

由于在 70 ms 时试验所用 Y 向传感器出现微小失效，此时刻试验与仿真的颈部对 Y 轴弯矩在伸张方向曲线出现的差异可不参考，需要参考其他时刻加速度值是否接近且整体趋势是否相同[9]。

### 5.3. 胸压及安全带力分析

仿真计算结果的胸部压缩量曲线及安全带肩带力曲线在 hypergraph 中打开后，导入对应的试验结果曲线与之对比验证仿真模型的有效性(图 10、图 11)。

试验结果中胸部压缩量最大值为 43.83 mm，安全带肩带力最大值为 7.1 kN，仿真计算结果与之对应的大小为 35.88 mm，7.9 kN，误差分别为 18%和 11.3%。

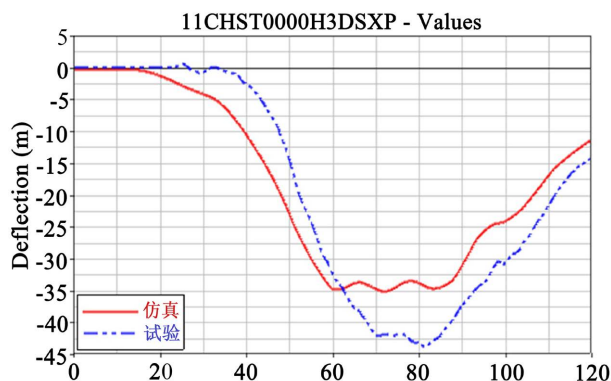


Figure 10. Chest compression curve

图 10. 胸部压缩量曲线

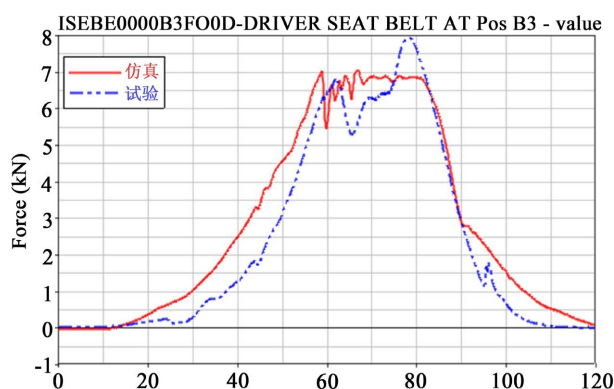


Figure 11. Belt shoulder force curve

图 11. 安全带肩带力曲线

根据假人相关伤害指标的误差皆小于 20% [10], 且试验与仿真结果的各项加速度曲线、相关力的曲线以及胸部压缩量曲线的起始及峰值时刻、整体走向及变化趋势、峰值一致, 证明本文所建立的仿真模型有效, 可以作为后续相关分析与优化的基础[9] [10] [11]。

## 6. 结论

本文通过对电动汽车实车试验进行相应的仿真建模分析, 在不影响分析结果的情况下对模型进行简化建模, 结合实车情况赋予材料属性, 并建立连接、接触、约束及加载设置, 为了提高仿真模型的有效性, 转向管柱要建立相应的压溃特性, 导入假人后要进行安全带预模拟和座椅预压。根据试验与仿真结果的假人各部位伤害曲线及伤害值进行对比分析, 发现假人的相关伤害指标误差都合理, 验证了仿真模型的有效性, 说明本文所建立的仿真模型可以作为实车试验的参考, 方便后续利用该模型进行约束系统相关仿真分析及优化。

## 基金项目

广西自然科学基金项目(2013GXNSFAA019319); 广西科技计划项目(桂科攻 1348005-12); 2020 年度湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目: 封闭特定场景无人驾驶通用底盘平台开发关键共性技术研究与应用(2020GK4010); 2021 年度湖南省创新型省份建设专项项目: 湖南省智能线控底盘工程技术研究中心(2022TP2006)。

## 参考文献

- [1] 徐晓云. 基于约束系统仿真的偏置碰撞台车碰撞方研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [2] 何亚楠. 基于 C-NCAP 正面碰撞前排乘员侧约束系统的仿真与优化[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 辽宁工业大学, 2021.  
<https://doi.org/10.27211/d.cnki.glngc.2021.000157>
- [3] 洪求才, 刘卫国, 周大永, 冯擎峰. 基于 LS-DYNA 应用约束系统仿真技术研究[C]//第 11 届中国 CAE 工程分析技术年会会议论文集. 出版者不详, 2015: 70-74.
- [4] 蒋成约, 张伟, 任立海, 胡远志, 李军, 黄杰. 基于小偏置碰的乘员二次碰撞分析及约束系统仿真优化[J]. 振动与冲击, 2021, 40(3): 35-39.
- [5] 郝琪, 刘卫斌, 肖琪, 潘文杰. 小型纯电动汽车正面碰撞分析[J]. 汽车技术, 2019(9): 58-62.  
<https://doi.org/10.19620/j.cnki.1000-3703.20172050>
- [6] 黄云超. 汽车正面偏置碰撞约束系统仿真优化[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2019.  
<https://doi.org/10.27151/d.cnki.ghnl.2019.004507>
- [7] 洪亮, 葛如海, 周海超, 刘玺. 正面碰撞安全带约束系统保护效果的研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(2): 363-370. <https://doi.org/10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2016.0363>
- [8] 胡珀, 余强, 宋若昀, 赵轩. 基于 Hypermesh 的整车正碰分析[J]. 汽车实用技术, 2020(2): 40-44.  
<https://doi.org/10.16638/j.cnki.1671-7988.2020.02.014>
- [9] 杨琦. 基于 LS-DYNA 汽车正面碰撞乘员约束系统仿真分析及参数优化[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2019. <https://doi.org/10.27007/d.cnki.gdbeu.2019.002400>
- [10] 李亚明. 基于 C-NCAP 汽车正面碰撞驾驶员侧约束系统匹配与优化[D]: [硕士学位论文]. 锦州: 辽宁工业大学, 2017.
- [11] 毕思刚, 张悦, 王建勋, 刘彦博, 陈哲. 某车型小偏置碰撞约束系统及假人评定项优化研究[J/OL]. 汽车技术: 1-5, 2022-11-10. <https://doi.org/10.19620/j.cnki.1000-3703.20220442>