

Performance Optimization of a Vehicle C-IASI 25% Small Overlap Frontal Impact

Xingxing FENG^{1,2}, Cheng LIN^{1,2}, Hongfeng CUI^{1,2}

¹State Key Laboratory of Vehicle NVH and Safety Technology, Chongqing, China

²China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing, China

Email: fengxingxing@caeri.com.cn

Abstract: The casualty rate of small overlap frontal collision is quite high. In order to reduce this kind of accident, the C-IASI 25% overlap impact test has attracted great attention of automobile manufacturers and consumers. Based on the demerits distribution of a vehicle 25% small overlap frontal impact, the causes of these demerits are analyzed. Combined with the acceleration curve collected by B-pillars on both sides of the vehicle body and the motion state of the dummy's head in the full-scale vehicle collision, the change of yaw angle during the vehicle collision is calculated. After the simulation model of the sled is established, the acceleration of the dummy's head, chest and pelvis, chest compression and seatbelt force are used to benchmark the real vehicle to verify the effectiveness of the model. In the optimization process, because there are many restraint system variables that affect the occupant's injury, the damage source and cost control of this vehicle are comprehensively considered. Finally, in the sled test, the demerits are effectively eliminated from three aspects: increasing the diameter of the front airbag vent hole to reduce the head injury, increasing the seatbelt limit force to reduce the dummy's forward excursion, and delaying the seatbelt pre-tensioning time to improve the chest viscosity index.

Keywords: small overlap; demerit; CAE; sled; optimization

某车型 C-IASI 正面 25% 偏置碰撞的性能优化

冯星星^{1,2}, 林 诚^{1,2}, 崔洪峰^{1,2}

¹汽车噪声振动和安全技术国家重点实验室, 重庆, 中国, 401122

²中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆, 中国, 401122

Email: fengxingxing@caeri.com.cn

摘 要: 汽车正面小偏置碰撞交通事故伤亡率居高不下, 为减少此类事故的发生, 中国保险汽车安全指数 (C-IASI) 25% 偏置碰撞工况试验已引起汽车制造商和消费者的高度关注。本文根据某车型 25% 偏置碰撞试验缺陷的分布, 分析了各缺陷出现的原因。结合实车碰撞中车身两侧 B 柱采集的加速度波形和假人头部运动状态, 计算出车辆碰撞过程偏摆角度的变化。建立台车仿真模型后, 使用假人头部、胸部、骨盆部位的加速度、胸部压缩量和安全带力与实车对标, 以验证模型有效性。在优化过程中, 由于对乘员损伤有影响的约束系统变量较多, 综合考虑该车型的损伤来源与成本控制, 最后在台车试验中, 通过增加正面气囊泄气孔直径以降低头部损伤、增大安全带限力值以减小假人前倾程度、延迟安全带预紧时间以改善胸部黏性指标三个方面有效消除缺陷。

关键词: 25% 偏置碰撞; 缺陷; 仿真; 台车; 优化

1 引言

交通事故中, 正面碰撞形式约占事故发生率 40%, 而其中小重叠率的偏置碰撞占比可达到 25%^[1], 并会对车内乘员造成较大损伤, 属于高发高危事故。在此类碰撞事故中, 车辆吸能方式较 100% 正面全宽碰撞存在较大差异, 车身前方吸能结构 (保险杠) 和力的传递结构 (前纵梁) 几乎不起作用, 冲击载荷将通过轮毂-悬架直接传递至 A 柱, 该过程是造成乘员舱产生大量结构变形的主要原因, 严重威胁乘员的生存空间, 导致各个部位损伤程度剧烈增加。同时由于在碰撞过程中车身以轮毂为支点绕 Z 轴产生较大旋转角度, 这使得乘员与车内结构件产生冲击接触,

进一步增加伤亡率。自 2016 年中国保险汽车安全指数 (China Insurance Automotive Safety Index, C-IASI) [2] 发布 25% 偏置碰撞规程以来, 引起社会对车辆小偏置工况的广泛研究, 进而促进该工况优秀率显著提升 [3]。

目前, 国内外有大量关于 25% 偏置碰撞车身结构优化的方法 [4][5], 通过增强门环系统结构强度、增加导向部件以及合理的布置传力路径等方式 [6], 对于假人运动、伤害值及车辆结构等级有明显改善作用。相较于结构优化, 乘员约束系统优化有周期短、投入少的优势。本文将对某车型约束系统的关键参数进行优化, 以达到满足评价规程优秀等级的需求。

2 某车型 25% 偏置碰撞缺陷分析

根据 25% 偏置碰撞评价规程中的约束系统和假人运动等级评定、假人伤害等级评定、车辆结构等级评定三部分对该车型缺陷来源与原因进行分析, 主要是由于假人头部、胸部损伤、假人前倾以及乘员舱下部侵入量较大造成等级下降, 在优化过程中将着重考虑这几方面。

由于小偏置工况相较于其他正面碰撞工况更为苛刻, 乘员舱内受到冲击力度更大, 导致乘员上躯干相对车身产生较大程度的横向加速度, 在正面头部保护中容易产生非稳定接触的缺陷。同时由于惯性力和头部、胸部的相对位移也加剧头颈部的损伤, 导致乘员头颈部伤害值超标 [7]。

2.1 约束系统和假人运动缺陷

Table 1. Demerits for Restraints and Dummy Kinematics

表 1. 约束系统和假人运动缺陷

检验项目	标准要求	检验结果	缺陷个数
正面头部保护	稳定的正面安全气囊作用为 0 个缺陷 局部的正面安全气囊作用为 1 个缺陷 极小的正面安全气囊作用或未安装正面安全气囊为 2 个缺陷	局部的正面安全气囊作用	1
乘员防护和其他	乘员前倾过度为 1 个缺陷	假人最大纵向位移超过 250mm	1



Figure 1. Dummy Kinematics

图 1. 假人运动

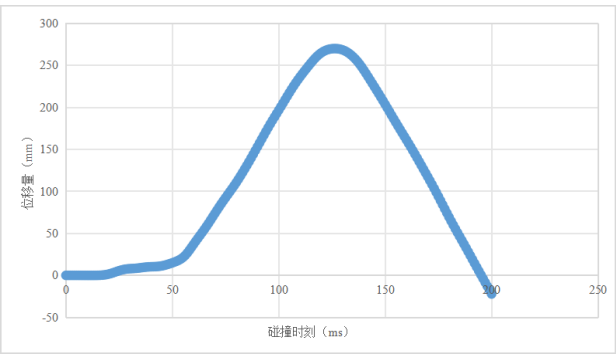


Figure 2. Curve: Dummy Forward Excursion

图 2. 假人前倾量曲线

通过对试验录像分析可知, 假人向前移动并在 80ms 接触到展开的安全气囊, 但因最初接触位置为安全气囊边缘, 导致在 140ms 左右假人头部部分离开气囊滑入正面气囊与侧气帘之间的间隙, 由此产生 1 个缺陷。

通过假人颈部惯导位移传感器采集假人前倾量为 275.3mm, 同时由于假人与正面安全气囊为非稳定接触, 因此判断为前倾过度。

2.2 假人伤害值缺陷

Table 2. Dummy Injury

表 2. 假人伤害值

检验项目		标准要求				检验结果	
部位	参数	优秀	良好	一般	较差		
头部和颈部	HIC15	≤560	≤700	≤840	>840	503	优秀
	头部与硬体结构接触，头部最大合成加速度>70g 时，头部伤害等级降一级					72.3	降级
胸部	Dchest (mm)	≤50	≤60	≤75	>75	27	优秀
	VC	≤0.8	≤1.0	≤1.2	>1.2	0.9	良好
小腿和脚部	胫骨指标 (上部、下部) TI	≤0.80	≤1.00	≤1.20	>1.20	0.97	良好

假人头部加速度见图 3，从图中可以看出碰撞时刻 111.5ms，合成加速度值达到最大值 72.3g，该时刻假人头部与正面气囊充分接触，同时由于头部加速度较大，HIC15 已接近良好等级限值。在假人回弹过程中，头部与座椅头枕杆套接触，导致在 354ms 时刻有 22.0g 的合成加速度波峰产生，但该回弹不会影响缺陷数。

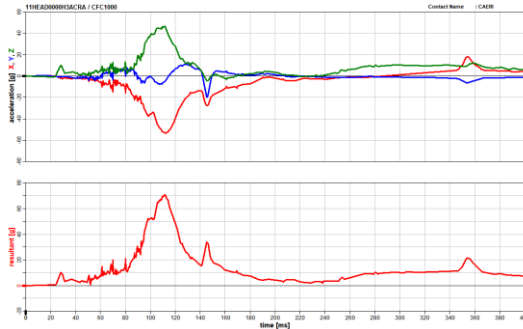


Figure 3. Curve: Dummy Head Resultant Acceleration

图 3. 头部合成加速度曲线

假人胸部压缩速率和黏性指标见图 4，VC 在 70.4ms 达到最大值 0.9m/s，但胸部最大压缩量 32.8mm 远小于限值 50mm，由于安全带预紧器触发时间与胸部损伤呈正相关^[8]，该参数有待改进。

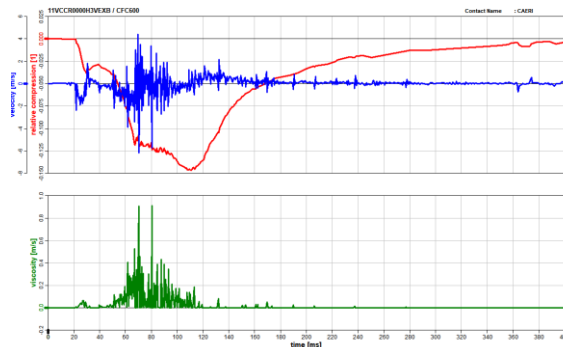


Figure 4. Curve: Dummy Chest VC

图 4. 胸部 VC 曲线

在车辆结构侵入量测量中，A 柱下铰链位移为一般等级，导致假人胫骨指标较大。由于台车试验使用的白

车身在试验过程中防火墙、仪表板、管柱等部件无法模拟实车碰撞的变形效果，因此乘员舱侵入量无法进行复现，对于假人小腿和脚部伤害值不在本次讨论范围内。

Table 3. Vehicle Intrusion

表 3. 车辆侵入量

检验项目		标准要求				检验结果	
检验项目	参数	优秀	良好	一般	较差		
乘员舱下部侵入量	A 柱下铰链	≤15	≤22.5	≤30	>30	28	一般

3 台车试验仿真对标

在实车碰撞过程的三个阶段中^[9]，车体运动姿态包含两部分。

一是绕 Z 轴逆时针旋转，该部分运动姿态导致假人与正面气囊较难稳定接触，随着车身旋转，假人头部可能只与气囊边缘接触或颈部产生过度扭转，都将引起假人头部滑入气囊与侧气帘的缝隙。

二是车辆以左前轮毂部分为支点绕 Y 轴向前旋转，该部分运动姿态导致碰撞初期假人与约束系统的空间关系发生变化。通过视频分析，在整个碰撞过程中车身该部分旋转角度最大为 4°。相较于第一部分，其对假人的损伤程度影响较小，因此不作考虑。

3.1 台车波形

由于 25%小偏置 B 柱加速度的复杂性，台车设备无法完全还原该加速度，实测中台车采集的加速度峰值小于实车。为了达到对标效果，应使台车试验强度略大于实车试验，因此不对实车加速度进行缩减。

3.2 白车身偏转角度

3.2.1 通过实车碰撞采集的 B 柱加速度波形进行确定^{[10][11]}

车辆左右侧 B 柱传感器距离 $b=1420\text{mm}$ ，对两侧 B 柱 X 向加速度积分得到车身在纵向方向的位移分别是左侧 $x_1=1493\text{mm}$ ，右侧 $x_2=1147\text{mm}$ 。

$$\text{车辆在整个碰撞过程中的偏转角度 } \alpha = \arctan \frac{|x_1 - x_2|}{b} = \arctan \frac{|1493 - 1147|}{1420} = 13.7^\circ$$

3.2.2 通过假人头部运动进行确定

在 25%小偏置台车试验中，主要是复现假人头部的运动轨迹以消除非稳定接触带来的缺陷，其次是关注假人头部与躯干的伤害值。通过高速录像找出假人头部在碰撞过程中向前运动最大位移对应的时刻为 133ms，该时刻分析出车身旋转角度为 14°。

3.3 对标结果

使用 3.2.1 和 3.2.2 得到的角度和 3.1 确定的加速度波形，以 14° 为基准、1° 为增量对仿真模型进行旋转，并对比实车碰撞和仿真模型假人各部位伤害值以验证模型的有效性。其中乘员头部 X 向加速度、胸部 X 向加速度、胸部压缩量、骨盆 X 向加速度、安全带肩带力和腰带力最能反映模型的精度^[12]。



Figure 5. Dummy Model Positioning

图 5. 假人模型定位

当车身旋转角度为 16° 时，将以上 6 个指标进行对比，红色曲线为实车碰撞，蓝色曲线为仿真结果如图所示。

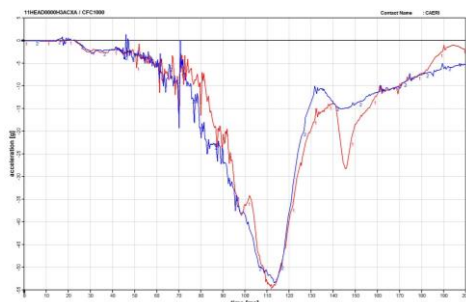


Figure 6. Head X Acceleration

图 6. 头部 X 加速度



Figure 7. Chest X Acceleration

图 7. 胸部 X 向加速度

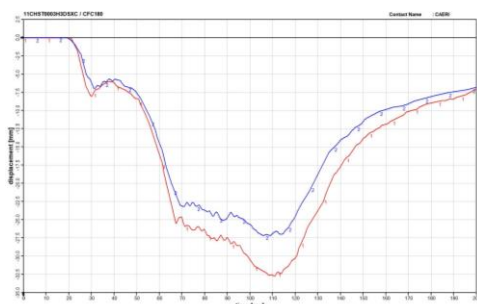


Figure 8. Chest compression

图 8. 胸部压缩量

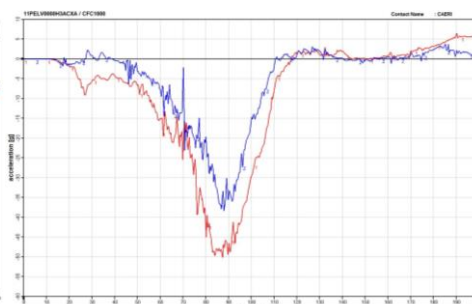


Figure 9. Pelvis X Acceleration

图 9. 骨盆 X 向加速度

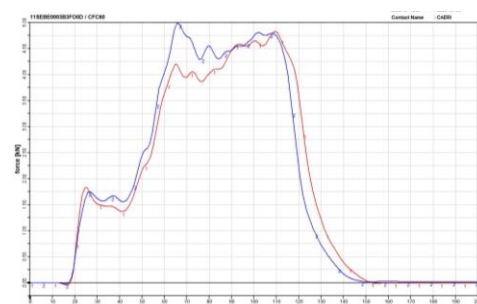


Figure 10. Shoulder Force

图 10. 肩带力

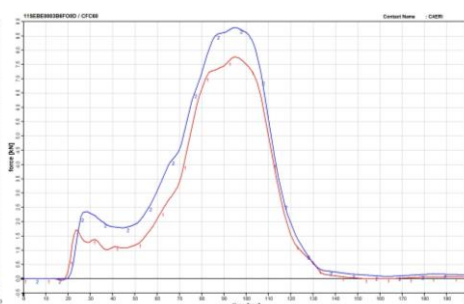


Figure 11. Pelvis Force

图 11. 腰带力

从伤害曲线可以看出，除胸部压缩量差异较大外，其余曲线的峰值大小、峰值时刻和曲线变化趋势重合度较高。由于规程评价中对胸部压缩量要求相对宽松，因此不再进一步调整模型，台车试验中将选取 16° 作为白车身旋转角度。

4 约束系统优化

4.1 优化方案

对乘员损伤有较大的影响的约束系统变量主要有五个，分别是安全带限力值、安全带预紧时间、安全气囊泄气孔、安全带预紧量、安全气囊点火时刻^{[13][14]}，其中安全带预紧时间对乘员胸部黏性指标影响较大，安全带限力值对乘员胸部压缩量影响较大，乘员头部损伤程度则受安全气囊影响较大^[15]。

本次选取气囊泄气孔直径、安全带限力值和安全带预紧时间进行优化是整个约束系统最有利于成本控制的方式。

Table 4. Optimization Scheme

表 4. 优化方案

项目	优化前	优化后
气囊泄气孔直径 (mm)	28	32
安全带限力值 (KN)	2.1	2.2
安全带预紧时间 (ms)	18	20

通过减小安全气囊与乘员接触时的硬度可降低头部加速度，同时对 HIC 有一定改善作用。气囊的硬度通常与气囊直径、泄气孔直径和气流率等相关，其中普遍采用增加泄气孔直径的方式以减小气囊硬度。由于胸部压缩量受气囊泄气孔影响较小^[16]，因此可适当增加泄气孔直径至 32mm。

为减小假人头部前倾量以消除局部接触缺陷，可通过增加安全带限力值达到次目的。由于胸部压缩量损伤受安全带限力值影响较大，随着限力值增加，伤害值也随之加大，因此仅增加限力值至 2.2KN。

安全带预紧时间越延迟，乘员胸部黏性指标越小。但当安全带预紧时间过晚时，会造成乘员头部向前移动量过多，增加头部对于安全气囊的冲击，同时还会导致颈部较大的侧向扭动，使得颈部受力较大。综合考虑后将预紧时间延迟至 20ms。

4.2 优化结果

采用 16° 车身旋转角度以及实车碰撞 B 柱波形进行台车模拟试验，优化前后假人损伤值对比见表。

Table 5. Optimization Result

表 5. 优化结果

项目	头部加速度 (g)	HIC15	胸部压缩量 (mm)	VC	假人前倾量 (mm)
优化前	72.3	503	32.8	0.9	275.3
优化后	55.2	376	27.9	0.4	240.6
优化率	23.7%	25.2%	14.9%	55.6%	12.6%

5 总结

本文首先进行了某车型在 25%小偏置碰撞中产生缺陷的原因分析，由于前倾过度造成 1 个正面头部保护缺陷，超过 70g 头部合成加速度使得头部和颈部部分产生降级，同时胸部黏性指标也未能取得优秀等级。然而由于台车设备的局限性，无法进一步优化因车身结构变形导致的胫骨指标超标。

随后讨论根据实车碰撞采集的 B 柱加速度波形和车身旋转角确定的两种方式，通过仿真模型验证表明以两种方式为基础进行假人伤害值对标可避免较多的角度选取工作量^[17]。

最后分析了对假人运动 and 不同部位造成损伤的主要原因，通过增加安全带限力值、延迟安全带预紧时间、增大安全气囊泄气孔三种方式，头部合成加速度和 HIC 分别降低 23.7%、25.2%，胸部压缩量和 VC 分别降低 14.9%、55.6%，假人前倾量降低 12.6%，优化后可有效减少缺陷来源。

参考文献 (References)

- [1] Tan Minggang. *Effect of AEB on Head and Neck Injury of Occupant in Small Offset Collision*[D]. Hunan University, 2021.
谭明钢. 小偏置碰撞中 AEB 对乘员头颈部损伤的影响研究[D]. 湖南大学, 2021.
- [2] China China Insurance Automotive Safety Index. <https://ciasi.org.cn/upload/files/c1704f7268dc99be2d536b03b4005b03.pdf>, 2023.
中国保险汽车安全指数. <https://ciasi.org.cn/upload/files/c1704f7268dc99be2d536b03b4005b03.pdf>, 2023 版
- [3] Xu Huijie. *Vehicle 25% Overlap Frontal Impact Analysis and Restraint System Optimization for Chinese Occupants Dummy*[D]. Chongqing University, 2021.
许慧杰. 面向中国乘员体征的车辆 25% 偏置碰撞仿真及约束系统优化[D]. 重庆大学, 2021.
- [4] Liu Huilin. *Simulation and Optimization Design of Frontal 25% Vehicle Small Overlap Crash*[D]. Southwest Jiaotong University, 2022.
刘慧琳. 汽车正面 25% 小偏置碰撞仿真与优化设计[D]. 西南交通大学, 2022.
- [5] Li Jingji. *Safety performance analysis and structural Improvement of an electric vehicle head-on collision*[D]. North University Of China, 2021.
李井吉. 某电动汽车正面碰撞安全性能分析与结构改进研究[D]. 中北大学, 2021.
- [6] Cui Yingying, Yi Bengang, Tian Hongsheng, Mao Lizhong, Yan Junfei. *A Study of Body Structure Based on 25% Small Offset Collision*[J]. *Automobile Technology*, 2021(9): 38-43.
崔莹莹, 衣本钢, 田洪生, 毛立忠, 闫军飞. 基于 25% 小偏置碰撞的车身结构研究[J]. *汽车技术*, 2021(9): 38-43.
- [7] Hao Qi, Cui Hongwei, Liu Zhengwu, Mei Jiawei. *Research on the Matching of Restraint System Parameters for Mini Electric Vehicles under Small Offset Collision*[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2022.
郝琪, 崔宏伟, 刘正午, 梅佳伟. 微型电动车小偏置碰撞下约束系统参数的匹配研究[J]. *机械科学与技术*, 2022.
- [8] Yin Yunlei. *Research on 25% Small-Overlap Collision Optimization of Vehicle Based on Traffic Accident*[D]. Chongqing University, 2020.
尹云镭. 基于交通事故的车辆 25% 小偏置碰撞优化研究[D]. 重庆大学, 2020.
- [9] Kim Hee Seok, Yoon Jong Pil. *System-level Sled Test Methodology to Optimize Restraints for Small Overlap Front Crash Test*[J]. *International Journal of Automotive Engineering*, Vol. 10, No. 1(2019) pp. 94-99.
- [10] Liu Zhixin, Zhang Yue, Lou Lei, Chen Chao. *Prediction on Vehicle Acceleration and Its Application in Frontal Angular Impact Sled Tests*[J]. *Automotive Safety and Energy*, 2013, Vol. 4 No. 3: 228-231.
刘志新, 张越, 娄磊, 陈超. 车身加速度预测及其在斜角碰撞台车试验中的应用[J]. *汽车安全与节能学报*, 2013, Vol. 4 No. 3: 228-231.
- [11] Xu Xiaoyun. *Study on the Sled Crash Method for Offset Deformable Barrier Crash Test by Using Restraint System Simulation Analysis*[D]. Chongqing Jiaotong University, 2014.
徐晓云. 基于约束系统仿真的偏置碰撞台车碰撞方法研究[D]. 重庆交通大学, 2014.
- [12] Dai Jianhua. *Robust Optimization Design of a Vehicle Frontal Impact Occupant Restraint System*[D]. Hefei University of Technology, 2018.
戴建华. 某轿车正碰乘员约束系统稳健性优化设计[D]. 合肥工业大学, 2018.
- [13] Chen Jiayi. *Simulation Research on Driver's Side Restraint System of a Passenger Car Frontal Impact*[D]. Liaoning University of Technology, 2019.
陈嘉懿. 某乘用车正面碰撞驾驶员侧约束系统的仿真研究[D]. 辽宁工业大学, 2019.
- [14] Hu J, Reed M P, Rupp J D, et al. *Optimizing Seat Belt and Airbag Designs for Rear Seat Occupant Protection in Frontal Crashes*[C]. 61st Stapp Car Crash Conference. 2017.
- [15] Zhang Shizhe. *Optimization of Vehicle Restraint Based on Finite Element Model of Drivers Chest in Frontal Impact*[D]. Yanshan University, 2021.
张世哲. 基于正面碰撞驾驶员胸部有限元模型的汽车约束系统优化[D]. 燕山大学, 2021.
- [16] Zhou Jiawei, Wang Ximing, Zhang Sen, Shen Guangyong, Wang Liangping, Zhao Jinli. *Research on Influence Factors of Chest Deflection in Frontal Impact*[C]. *Proceeding of the 14th International Forum of Automotive Traffic Safety*, 2017, pp488-493.
周家伟, 王锡铭, 张森, 沈光勇, 王亮平, 赵金丽. 正面碰撞假人胸部压缩量影响因素分析研究[C]. 第十四届国际汽车交通安全学术论坛, 2017, 488-493.
- [17] Zhao Hui, Xu Xiaoyun, Shao Yiming, Wang Zhi. *Sled Test Design for ODB Crash Tests by Using Restraint System Simulation Analysis*[J]. *Automotive Safety and Energy*, 2014, Vol. 5 No. 1: 52-57.
赵会, 徐晓云, 邵毅明, 王智. 基于约束系统仿真分析的 ODB 碰撞台车试验设计[J]. *汽车安全与节能学报*, 2014, 第 5 卷, 第 1 期: 52-57.