

# Effect of Waveform on Dummy Damage in Whiplash Test

Liu Yuhao, Chen Chao, Liu zhixin, Lou Lei, Gu Haiming

(China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300300)

**Abstract:** In this paper, the impact of the large range of collision speed on the whiplash test and the combinations of C-NCAP 2018 version whiplash test waveform limit were studied. Analyzed the injuries mechanism of neck injury index (NIC) and upper neck load My. And some suggestions for seat design were put forward.

**Keywords:** Whiplash; Test waveform; Injuries mechanism

## 鞭打试验中波形对人体损伤的影响

刘宇豪, 陈超, 刘志新, 娄磊, 顾海明

(中国汽车技术研究中心, 天津, 300300)

**摘要:** 本文分别研究了鞭打试验中, 大范围碰撞速度变化以及 C-NCAP 2018 版鞭打试验波形限值组合对结果的影响, 得出相关结论。分析了鞭打试验中主要扣分项颈部伤害指数 NIC 以及上颈部 My 的损伤机理, 对座椅设计提出了相关建议。

**关键词:** 鞭打试验, 试验波形, 损伤机理

## 1 引言

现代社会, 随着汽车保有量的增加, 车辆追尾碰撞在交通事故中的比例逐渐增加<sup>[1-2]</sup>。在各类交通事故造成的损伤中, 由追尾碰撞造成的人体损伤占有很大的比例<sup>[3]</sup>。在美国, 挥鞭伤(由于追尾碰撞造成的人体颈部损伤)成为了最为多见的保险赔付项目之一<sup>[4-5]</sup>, 2007 年, 因追尾碰撞造成的人体受伤所支出的保险赔偿达到 88 亿美元, 占交通事故总赔偿的 25%<sup>[6]</sup>。此外, 据日本 ITARDA 交通事故统计, 2003 年日本超过 30% 的交通事故是追尾碰撞<sup>[7]</sup>, 在欧洲, 颈部损伤的索赔率(颈部伤害索赔占全部人身伤害索赔的比率)高达 40%<sup>[8]</sup>。由此可见, 追尾碰撞不仅发生率高, 而且造成人体颈部损伤的概率也极高, 给个人和社会带来了沉重的负担<sup>[9]</sup>。

现阶段, 各国的 NCAP 针对追尾碰撞试验(鞭打试验)设计了不同的评价规程, 例如欧洲 E-NCAP 的鞭打试验设置了高、中、低三条碰撞波形<sup>[10-11]</sup>; 日本 J-NCAP 鞭打试验的碰撞速度为 17.6km/h<sup>[12]</sup>; 我国 2015 版 C-NCAP 鞭打试验碰撞速度为 15.6km/h<sup>[13-14]</sup>, 2018 版鞭打试验的碰撞速度为 20km/h<sup>[15]</sup>。然而, 国内外学者少有针对不同的碰撞速度, 对鞭打试验中座椅动态响应以及假人损伤影响的分析研究。此外, 我国于 2017 年 4 月新推出了 2018 版 C-NCAP 鞭打试验规程, 规定了试验波形的限值, 然而沿波形各限值进行的碰撞试验对结果的影响也没有相关的对比分析资料。针对这一现状, 本文致力于研究座椅在不同冲击速度下的响应以及假人的损伤情况, 为今后试验波形的改版以及座椅的设计提供参考依据。

## 2 试验波形及座椅选择

### 2.1 大范围速度变化波形

本文选取 4 组不同速度的碰撞波形进行对比研究, 分别为 15.6km/h(中国 C-NCAP2015 版鞭打试验波形)、17.6km/h(日本 J-NCAP 鞭打试验波形)、20km/h(中国 C-NCAP2018 版鞭打试验波形)以及更高速的 24km/h。其中, 24km/h 的碰撞速度为欧洲 E-NCAP 鞭打试验的高强度碰撞速度, 波形为中国 C-NCAP2015 版鞭打试验波

形缩放得到。具体试验波形如图 1 所示。

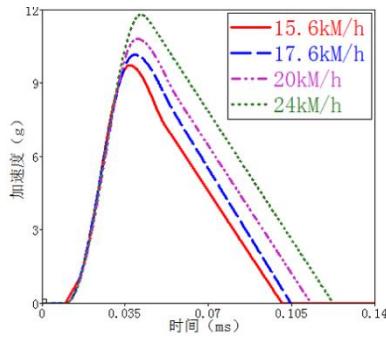


Figure 1. Speed waveform chart

图 1 各速度波形曲线图

## 2.2 C-NCAP 2018 版鞭打试验波形限值组合

C-NCAP 2018 版鞭打试验规程规定了波形速度和加速度的限值，其中，速度的上限值为 21km/h，下限值为 19km/h；加速度上限为 12g，下限为 10g。因此可以得到 4 种不同的波形限值组合，分别为 19km/h+10g, 19km/h+12g, 21km/h+10g, 21km/h+12g。具体试验波形如图 2 所示。

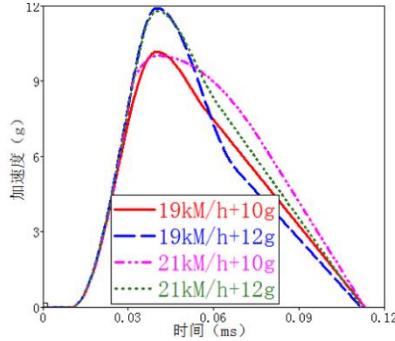


Figure 2. C-NCAP2018 waveform limit combination

图 2 C-NCAP2018 版波形限值组合

## 2.3 座椅选择

为了保证试验的稳定性与可靠性，本文所选用的座椅为同批次产品，并且 C-NCAP 2015 版鞭打试验得分在 3.7 分以上。静态测量结果表明，所用的 8 个试验样品，H 点偏差小于 4mm，假人靠背角偏差小于 0.3°，头后间隙偏差小于 3mm，头枕高度偏差小于 4mm，座椅状态的一致性较高，可以用于后续的波形研究。

## 3 试验结果

鞭打试验中，评价参数主要有颈部伤害指数 NIC、上颈部载荷 (FX、FZ、My) 和下颈部载荷 (FX、FZ、My)。8 组试验全部采用 C-NCAP 2018 版鞭打试验的评分标准。

颈部伤害指数 NIC 计算公式如式 1 所示：

$$NIC(t) = 0.2A_x^{rel}(t) + [V_x^{rel}(t)]^2 \quad (1)$$

式中， $A_x^{rel}$  为头、胸相对加速度， $V_x^{rel}$  为头、胸相对速度。

上颈部 My 计算公式如式 2 所示：

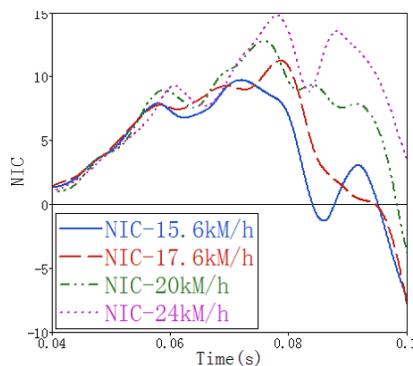
$$My(t) = My_{(t)}^{real} - D \cdot F_x \quad (2)$$

式中， $My_{(t)}^{real}$  为传感器采集数据，FX 为上颈部剪切力 FX，D=0.01778m。

### 3.1 大范围速度变化结果

### 3.1.1 对 NIC 结果的影响

NIC 由头部及胸部加速度决定,结果对比如图 3 所示。可以看到,假人 NIC 的峰值出现在 82ms 附近,并随着碰撞速度的增大而增大。假人头、胸加速度以及 82ms 局部视图分别如图 4、图 5 所示。从图中我们可以看到假人头部、胸部加速度趋势基本一致,头部加速度峰值随碰撞速度的增加而增大,而胸部加速度呈现波动趋势。在 82ms 时刻,假人头与头枕已经发生接触,由于座椅靠背持续向后倾倒,头与头枕出现了一定的分离趋势,头部加速度降低,而胸部加速度持续上升,此时,头、胸加速度之差达到峰值, NIC 达到峰值。从 82ms 局部分析图中可以看出,头部加速度出现了明显的分层,而胸部加速度呈现波动趋势,因此,在该时刻, NIC 数值的差异主要由头部加速度的差异引起。



**Figure 3. NIC values at different collision speeds**

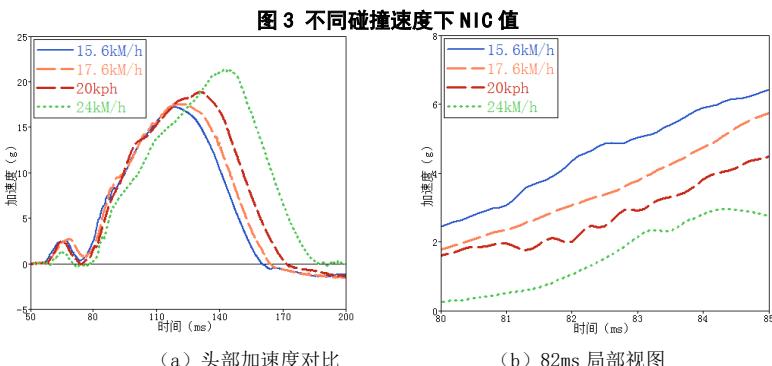
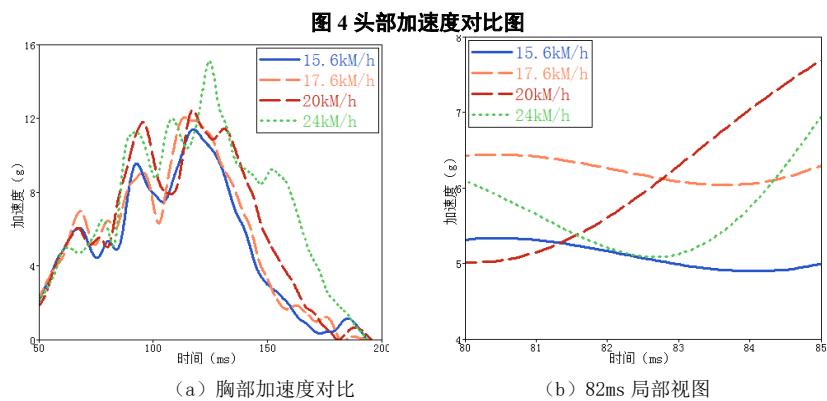


Figure 4. Head acceleration contrast



**Figure 5. Chest acceleration contrast**

图 5 胸部加速度对比图

### 3.1.2 对上颈部 My 结果影响

上颈部 My 结果对比如图 6 所示, 假人上颈部 My 的趋势基本一致, 峰值出现在 150ms 附近, 此时, 座椅靠背正处于回弹阶段, 头枕对假人头部的冲击使假人上颈部 My 迅速增大。在 4 组试验中, 峰值在 10.24-13.59Nm 的范围内波动, 得分在 1.42-1.50 之间波动, 差值为 0.08 分, 碰撞速度对上颈部 My 的大小以及得分影响不大。

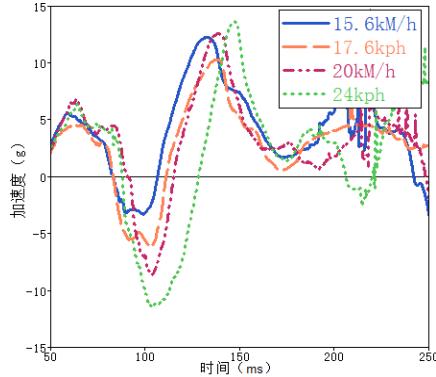


Figure 6. Contrast picture of upper neck My

图 6 上颈部 My 对比图

### 3.1.3 对其它评价参数的影响

其它评价参数的扣分情况并不明显, 仅在 24km/h 的碰撞速度下, 上颈部 FZ 和下颈部 FX 出现了失分。其中, 上颈部 FZ 得分为 1.41 分, 下颈部 FX 得分为 1.28 分。

### 3.1.4 对整体得分情况的影响

大范围碰撞速度的变化对试验结果有较大的影响, 结果如图 7 所示, 从图中可以看出, 随着鞭打试验碰撞速度的提高, 座椅得分呈现下降趋势, 其中 NIC 得分的下降较为明显, 上颈部 My 得分呈现波动趋势。

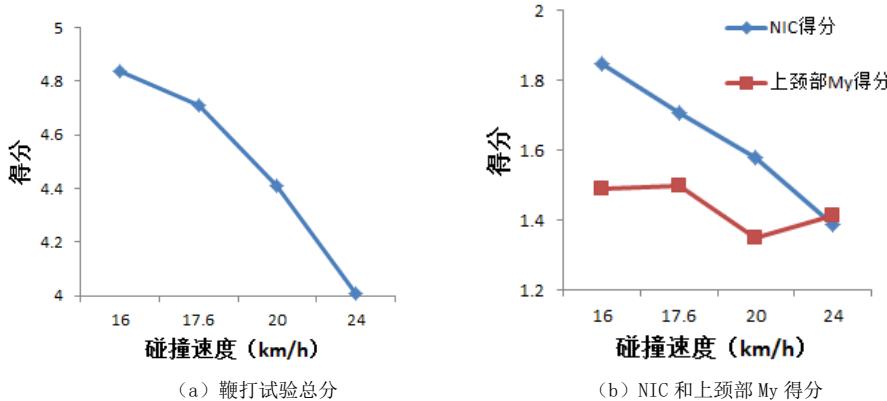


Figure 7. Point trend chart

图 7 得分趋势图

## 3.2 C-NCAP2018 版波形组合结果

### 3.2.1 对 NIC 结果的影响

C-NCAP 2018 版鞭打试验各波形 NIC 结果对比如图 8 所示。NIC 的峰值同样出现在 82ms 附近, 假人头、胸加速度以及 82ms 局部视图分别如图 9、图 10 所示。从 82ms 的局部视图中, 难以直观看出碰撞速度与加速度对假人头、胸加速度的影响情况。因此, 本文采取全因素正交试验的方法分别研究碰撞速度与加速度对 NIC 的影响情况。在正交试验中, 我们将速度和加速度分为 2 个水平, 其中速度水平 1 为 19km/h, 水平 2 为 21km/h, 加速度水平 1 为 10g, 加速度水平 2 为 12g。建立正交试验表如表 1 所示, 试验结果如表 2 所示, 极差影响如表 3 所示。

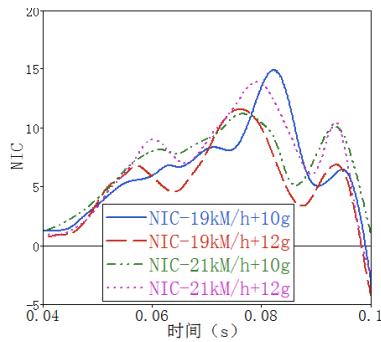
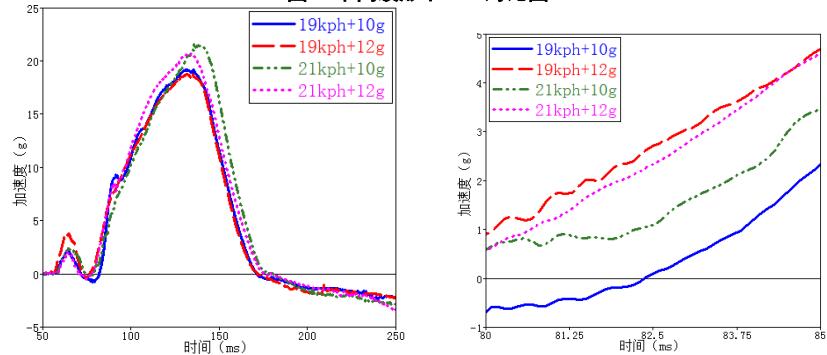


Figure 8. NIC contrast chart under different waveforms

图8 不同波形下 NIC 对比图

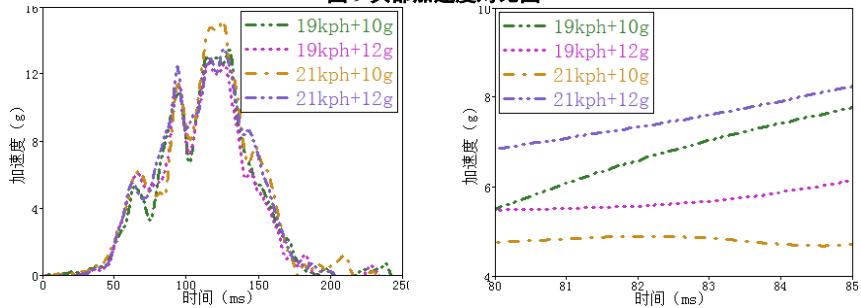


(a) 头部加速度对比

(b) 82ms 局部视图

Figure 9. Head acceleration contrast

图9 头部加速度对比图



(a) 胸部加速度对比

(b) 82ms 局部视图

Figure 10. Chest acceleration contrast

图10 胸部加速度对比图

Table 1. Orthogonal test table

表1 正交试验表

正交试验		
组号	加速度	速度
1	1	1
2	1	2
3	2	1
4	2	2

Table 2. Orthogonal test results

表 2 正交试验结果

组号	结果	
	NIC	
1	14.89	
2	11.17	
3	11.58	
4	13.9	

Table 2. Range analysis

表 3 极差分析

水平	NIC 数值	
	加速度	速度
1	13.03	13.24
2	12.74	12.54
极差	0.29	0.7

从正交试验的极差分析中可以看到, 加速度对 NIC 数值影响的极差为 0.29, 为 NIC 高性能指标的 3.6%, 速度对 NIC 值影响的极差为 0.7, 为 NIC 高性能限值的 8.8%。换算成 NIC 得分, 加速度水平 1NIC 得分为 1.54, 水平 2NIC 得分为 1.57, 极差为 0.03 分; 速度水平 1NIC 得分为 1.52, 速度水平 2NIC 得分为 1.59, 极差为 0.07 分。因此, 认为 2018 版鞭打试验波形允许的范围内, 对 NIC 结果的影响较小。

### 3.2.2 对上颈部 My 结果的影响

C-NCAP 2018 版鞭打试验各波形对上颈部 My 的影响如图 11 所示, 从图中可以看出, 4 组试验中, 上颈部 My 的曲线的趋势基本一致, 在峰值处出现了一定的差异, 在 21km/h 的碰撞速度下出现了 2 个离散点。21km/h+10g 的工况下, 上颈部 My 达到了 18.96Nm, 得分为 1.13 分。在 21km/h+12g 的工况下, 上颈部 My 只有 12.52Nm, 得分为 1.47 分。而 19km/h 的碰撞速度下, 假人上颈部 My 曲线的重合度较高, 扭矩分别为 15.13Nm 和 15.44Nm, 得分分别为 1.33 分和 1.32 分。4 组试验中上颈部 My 得分波动较大。在后续的讨论中, 将会对上颈部 My 进行进一步的分析。

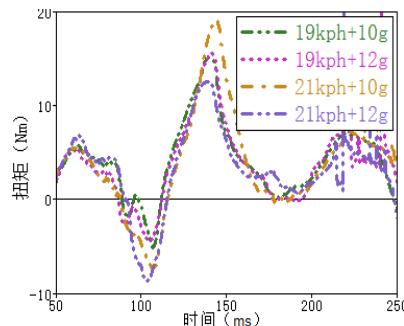


Figure 11. Contrast picture of upper neck My

图 11 上颈部 My 对比

### 3.2.3 对其它评价参数的影响

4 组试验中, 其它评价参数的失分情况并不明显。上颈部 FZ 得分为 1.39 分, 下颈部 FZ 得分为 1.34 分。

### 3.2.4 对整体的影响

从 C-NCAP 2018 版鞭打试验波形限值组合的结果来看, 速度和加速度对 NIC 的影响较小, 而上颈部 My 得分的波动性较大。其中, 在 21km/h+12g 的工况下, 上颈部 My 得分较高, 而上颈部 FZ 以及下颈部 FZ 出现了失分; 在 21km/h+10g 的工况下, 上颈部 My 得分较低, 而 NIC 得分相对较高。4 组鞭打试验总分在 4.31-4.49 分

的范围内波动，对比以往试验的结果看来，座椅误差的影响要高于试验波形影响，因此认为在 C-NCAP 2018 版鞭打试验允许的范围内，试验结果较为稳定。

## 4 讨论

### 4.1 NIC 损伤机理与座椅设计

从 8 组试验的整体影响可以看出，颈部伤害指数 NIC 随碰撞速度的增大而明显增大。NIC 由头部和胸部加速度决定，主要考察假人头、胸运动的一致性。在碰撞前，假人的胸部已与座椅靠背发生接触，而头部与头枕之间存在初始间隙，一般为 20-40mm。在碰撞初始阶段，胸部压缩靠背泡沫垫，加速度开始缓慢上升，座椅靠背倾角缓慢增大，而假人头部向后甩动，头与头枕的相对速度增大，此时，头部加速度在 0 附近波动，NIC 开始上升。当头与头枕发生接触后，头部加速度迅速上升，此时 NIC 开始下降，当头部快速撞击头枕后，会出现一定的回弹趋势，此外，由于头枕存在一些装配间隙，在冲击作用下，头枕也会发生向后运动，因此，在头部加速度达到峰值后，会出现一定的下降。当假人胸部将泡沫垫压缩到极限位置后，与座椅骨架发生碰撞，胸部加速度迅速上升，由于假人与座椅的剧烈碰撞，导致此时座椅靠背张角迅速增大。靠背张角的增大会使假人头部和胸部加速度都出现明显的下降，由于座椅靠背在向后倾倒的过程中，头枕比靠背向后运动的距离更大，因此，头部加速度下降的速度要明显快于胸部加速度，甚至头部加速度会降为 0，此时，NIC 达到了最大值。因此，在设计座椅时，控制座椅的靠背角变化至关重要，需要注意的是当座椅靠背动态张角在碰撞过程中过小时，假人胸部加速度上升的速率将增大，同样会使头、胸加速度之差增大。一般情况下，假人头与头枕之间的间隙越小，头部加速度开始增长的时刻越早，头胸加速度之差就会越小。然而颈部伤害指数 NIC 考察的是头、胸运动的一致性，当头后间隙过小时，头部加速度过早得达到峰值，并开始下降，而胸部加速度由于与骨架的碰撞而上升，此时，头、胸加速度之差迅速增大，NIC 也随之增大。因此，假人的头后间隙需合理设计。

### 4.2 上颈部 My 损伤机理与座椅设计

上颈部 My 峰值出现在座椅靠背回弹阶段。当座椅靠背开始回弹时，头枕会对头产生较大的冲击，并带动假人头部一起向前运动。然而，从图 7 中可以看出，假人上颈部 My 的损伤并没有随碰撞速度的增大而增大，而是呈现波动趋势。从前文中的分析可以看出，在相对恶劣的工况 (24km/h 和 21km/h+12g) 下，上颈部 My 增大并不明显，并且出现了一定的下降，而其它评价参数却出现了一定的失分。这是由于当冲击增大后，座椅的靠背张角以及坐垫的下沉都会增大，此时头枕相对头部出现下降趋势，头枕对头的冲击点下降，并更接近假人颈部传感器的位置，使上、下颈部载荷增大。当头枕相对降低后，假人头部在碰撞的过程中出现一定的上窜趋势，此时，对颈部的拉力迅速增大，然而，由于头部的上窜，使得头部绕假人颈部 OC 的扭转趋势下降，上颈部 My 会出现一定的好转。在计算最终得分时，上颈部载荷 (FX、FZ、My) 取最低分，因此，座椅头枕高度需要合理的设计，以提高鞭打试验的总体得分。此外，由于假人头部的运动姿态对上颈部 My 的影响较大，因此头枕外部造型以及内部骨架结构都会对上颈部 My 造成较大的影响。

## 5 结论

本文分别研究了大范围碰撞速度变化以及 C-NCAP 2018 版鞭打试验波形限值组合对鞭打试验结果的影响，分析了鞭打试验中主要扣分项 NIC 以及上颈部 My 的损伤机理，对座椅设计提出了相关建议，并得出以下结论：

- (1) 大范围 (16km/h, 17.6km/h, 20km/h, 24km/h) 碰撞速度的变化会对试验结果有较大的影响。在主要扣分项中，随碰撞速度的增大，NIC 得分呈现明显的下降趋势，而上颈部 My 呈现波动趋势。
- (2) 在 C-NCAP 2018 版鞭打试验波形允许的范围内，座椅本身的误差对结果影响大于试验波形对结果的影响，在 2018 版鞭打试验允许的范围内，试验结果基本稳定。
- (3) NIC 主要由座椅对假人的冲击造成，而上颈部 My 受假人头部的运动姿态影响较大。

## 参考文献

- [1] Annual statistical yearbook of road traffic accidents in People's Republic of China (2013) [R]. Beijing: Traffic Administration Bureau of the Ministry of public security, 2014  
中华人民共和国道路交通事故统计年报 (2013 年度) [R]. 北京: 公安部交通管理局, 2014.
- [2] Geng Huanliang. Simulation Analysis and Research of a Car Seat Based on Whiplash Test[D]. Jilin University, 2015  
耿焕亮. 基于鞭打试验的某轿车座椅仿真分析及研究[D]. 吉林大学, 2015.
- [3] Peng Yu. Study on Driver Neck Injury in Rear Crash under Car to Car Collision[D]. Hunan University, 2016.  
彭宇. 车与车追尾碰撞的驾驶员颈部损伤研究[D]. 湖南大学, 2016.
- [4] Hu Yuanzhi, Hu Yuanyuan, Liu Xi. Analysis and Optimization of Seat in Whiplash Test Based on LS-DYNA[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2017(6):8-14.  
胡远志, 胡源源, 刘西, 等. 基于 LS-DYNA 的某座椅鞭打性能分析和优化[J]. 重庆理工大学学报, 2017(6):8-14.
- [5] Dang Xuemang, Fang Rui, Xie Shuxiang. Analysis and Optimization of the Driver Seat in Whiplash Test[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2015, 32(2):190-195.  
党雪芒, 方锐, 谢书港, 等. 某驾驶员座椅鞭打性能分析及优化[J]. 机电工程, 2015, 32(2):190-195.
- [6] DA Aylor, DS Zuby. Comparison of BioRID Injury Criteria Between Dynamic Sled Tests and Vehicle Crash Tests[C]. Proceedings of the 22nd International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles(CD ROM), 2011.
- [7] ITARDA Report of Traffic Injury Data Analysis for 2007 FY, 2007.
- [8] Huang Xuan. Influence of Seat Parameter on Neck Injury Risk Based on C-NCAP Whiplash Test[D]. Jilin University, 2012.  
黄炫. 基于 C-NCAP 鞭打试验座椅参数对颈部损伤的影响[D]. 吉林大学, 2012.
- [9] Li Ruiheng. The Research and Optimization of Whiplash Performance of a Car Seat[D]. Jilin University, 2016.  
李瑞生. 某汽车座椅鞭打性能的研究与优化[D]. 吉林大学, 2016.
- [10] Michiel van Ratingen, James Ellway. The Euro NCAP Whiplash Test[R]. Euro: Euro NCAP, 2009.
- [11] Yang Yunsheng, Zhang Xiaolong, Loulei. Relativity Between Whiplash Test Assessment Systems of Different Countries Countries Based on Sled Tests[J]. Automotive Safety and Energy, 2012,3(2):123-128.  
杨运生, 张晓龙, 娄磊. 基于台车试验的不同国家鞭打试验评价体系的相关性[J]. 汽车安全与节能学报, 2012, 3(2):123-128.
- [12] Lou Lei, Yang Yunsheng, Zhang Xiaolong. Whiplash Test in Euro, Japan and China[J]. Transport Standardization, 2010(18):37-41.  
娄磊, 杨运生, 张晓龙. 鞭打试验在欧洲、日本与中国[J]. 交通运输研究, 2010(18):37-41.
- [13] China-New Car Assessment Program(2015)[R]. Tianjin: China Automotive Technology&Research Center, 2015.  
中国新车评价规程 (2015 年版) [R]. 天津: 中国汽车技术研究中心, 2015.
- [14] Davidsson J. Development of a Mechanical Model for Rear Impacts[D]. Goteborg, Sweden: Department of Machine and Vehicle Design, Chalmers University of Technology, 2000
- [15] China-New Car Assessment Program(2018)[R]. Tianjin: China Automotive Technology&Research Center, 2017.  
中国新车评价规程 (2018 年版) [R]. 天津: 中国汽车技术研究中心, 2017.