

Simulation Optimization and Test Comparison of E-NCAP Whiplash Performance for a Passenger Car Seat

Bingyang Xue, Huanxue Feng, Feng Liu, Ailin Zhang

Changchun FAWSN Lear Automotive Seat Systems, Co., Ltd., Changchun Jilin
Email: BXue@lear.com

Received: Jan. 1st, 2020; accepted: Jan. 14th, 2020; published: Jan. 21st, 2020

Abstract

As a passenger car is to be exported to Europe, its seat design standard must meet E-NCAP. In the FEA analysis stage, the seat headrest is optimized for low whiplash scores. The finite element model is established in the ANSA and the LS-DYNA software is used as the solver to simulate the seat model to improve the FEA whiplash score. The object is carried out according to the latest data state in order to meet the E-NCAP standard, and the whiplash performance will be further optimized according to the comparison results.

Keywords

Seat, Whiplash, FEA, Optimization

某乘用车座椅E-NCAP鞭打性能仿真优化与试验对比

薛冰洋, 冯焕学, 刘峰, 张艾琳

长春一汽富晟李尔汽车座椅系统有限公司位, 吉林 长春
Email: BXue@lear.com

收稿日期: 2020年1月1日; 录用日期: 2020年1月14日; 发布日期: 2020年1月21日

摘要

由于某乘用车要出口欧洲, 故其座椅设计标准要满足E-NCAP, 针对初始FEA分析阶段鞭打得分较低情况下对座椅头枕进行优化。在ANSA中建立座椅鞭打试验的有限元模型, 利用LS-DYNA软件作为求解器, 对座椅模型进行模拟仿真以提高FEA鞭打得分, 根据最新数据状态进行物理试验同时与FEA结果分析对比, 并根据对比结果进一步优化鞭打性能, 以满足E-NCAP标准。

关键词

座椅, 鞭打试验, FEA, 优化

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随着当代汽车行业的发展, 汽车安全性也成为了汽车消费者关注的一个重要领域。我国 2012 年首次将鞭打试验引进 C-NCAP 评价体系, 而 2008 年欧洲便将鞭打试验纳入 Euro-NCAP 评价体系, 说明欧洲对座椅鞭打性能更加重视。目前国内主要是针对 C-NCAP 座椅鞭打性能提升研究比较多, 而对于 E-NCAP 座椅鞭打性能的陈述与研究并不多见[1] [2]。本文主要是针对出口欧洲的整车座椅的 E-NCAP 得分情况进行研究分析, 通过有限元分析方法对初始座椅模型进行鞭打仿真, 根据得分情况进行初步的优化以提高有限元鞭打分析得分, 然后再根据物理鞭打试验与仿真结果对比进一步优化座椅结构, 通过试验来验证鞭打得分得到有效的提高, 进而提升整车 E-NCAP 安全星级。

2. E-NCAP 鞭打试验法规分析解读

不同国家 NCAP 的评价指标和评价方法都会有所不同, 但基本上鞭打试验中分为静态尺寸评价和动态试验评价, 同时各国对静态评价的要求也不一样。静态评价主要是测量头枕的空间几何尺寸, 其中头后间隙和头枕高度差对颈部挥鞭伤有重要影响; 动态评价主要是采用滑车试验, 将座椅和约束系统固定在滑台上, 滑车以指定的加速度波形发射模拟后碰撞过程。在欧洲的 E-NCAP 中要求座椅动态评价达到所需要的成绩时, 才需要对座椅进行静态评价; 而在中国的 C-NCAP 中对座椅鞭打试验则不需要对座椅进行静态评价, 但是如果在测量过程中出现头枕干涉测量装置的情况需要在评价结果扣除 2 分。在本文中某座椅的 E-NCAP 鞭打性能仿真优化与试验对比只针对动态评价指标, 不对座椅的静态评价进行分析。

在座椅鞭打试验的动态评价中 E-NCAP 和 C-NCAP 所采用碰撞波形也不一样[3], E-NCAP 中需要高、中、低三个强度的加速度碰撞波形, 本文 FEA 仿真与试验所采用的三个加速度波形如图 1~3 所示。而 C-NCAP 中鞭打试验的碰撞加速度波形如图 4 所示, 与 E-NCAP 波形还是有所不同[4]。

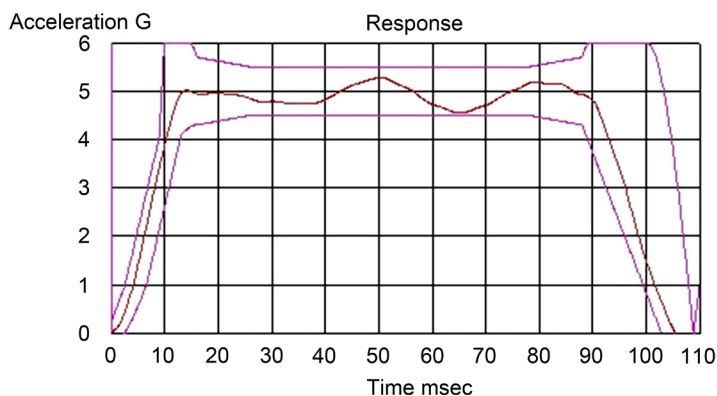


Figure 1. E-NCAP low severity pulse

图 1. E-NCAP 低强度波形

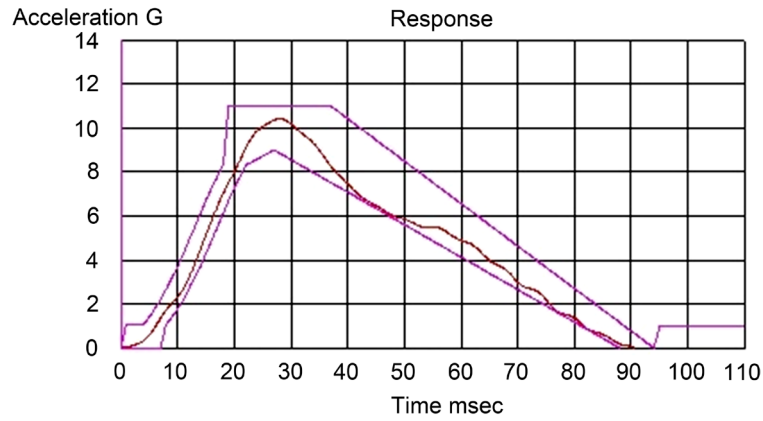


Figure 2. E-NCAP medium severity pulse

图 2. E-NCAP 中强度波形

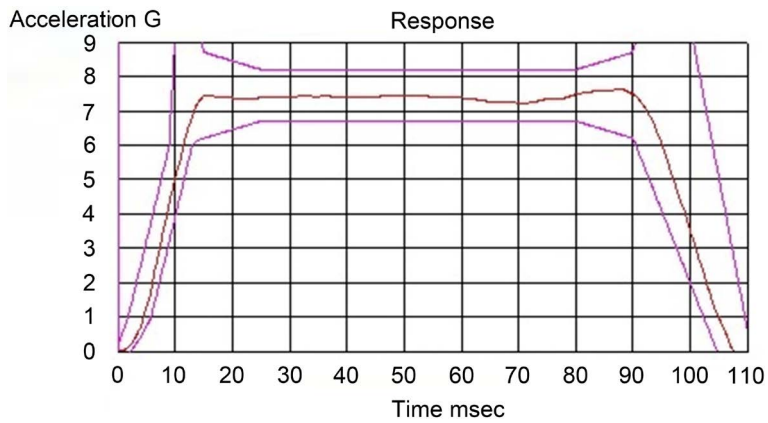


Figure 3. E-NCAP high severity pulse

图 3. E-NCAP 高强度波形

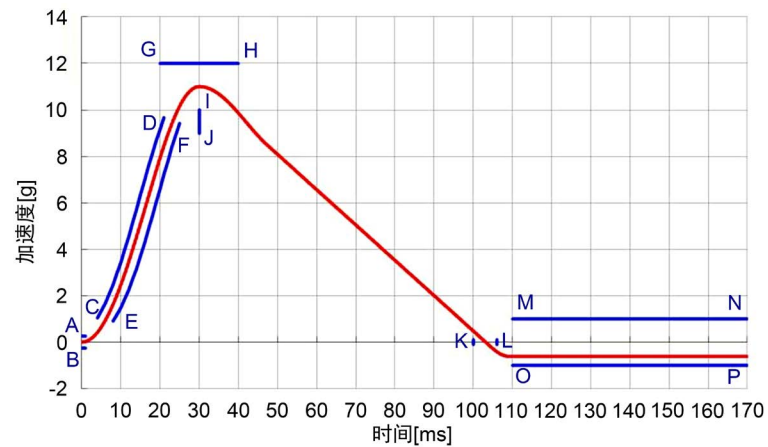


Figure 4. C-NCAP acceleration pulses

图 4. C-NCAP 加速度波形

E-NCAP 鞭打试验的评分方法主要是动态的高中低三条波形各 3 分，其中每个参数 0.5 分，在参数 T1 加速度和接触时间 T-HRC 中取分值大的进行计算，因此动态评价共计 9 分，还有 2 分的静态评价，因此总分数为 11 分，E-NCAP 鞭打试验总体评分表和评价指标如表 1 所示。

Table 1. 2018 Version E-NCAP whiplash general scoring table
表 1. 2018 版 E-NCAP 鞭打试验总体评分表

	Criteria	Units	Higher performance limit	Lower performance limit	Capping	Value Target/Test	EuroNCAP Raw Score	
Low Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	9.0	15.0	18.3	6.6	0.50	
	Nkm	-	0.12	0.35	0.50	0.35	0.00	
	Head rebound velocity	ms^{-1}	3.0	4.4	4.7	3.8	0.21	
	F_x upper	N	30	110	187	6	0.50	2.21
	F_z upper	N	270	610	734	255	0.50	
	T1 acceleration ¹	g	9.4	12.0	14.1	13.0	0.50	
	Time to head restraint contact	ms	61	83	95	55	0.50	
Mid Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	11	24	27	10.8	0.50	
	Nkm	-	0.15	0.55	0.69	0.40	0.19	
	Head rebound velocity	ms^{-1}	3.2	4.8	5.2	4.1	0.22	
	F_x upper	N	30	190	290	9	0.50	2.41
	F_z upper	N	360	750	900	342	0.50	
	T1 acceleration ¹	g	9.3	13.1	15.55	14.6	0.00	
	Time to head restraint contact	ms	57	82	92	50	0.50	
High Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	13	23	25.5	8.9	0.50	
	Nkm	-	0.22	0.47	0.78	0.46	0.02	
	Head rebound velocity	ms^{-1}	4.1	5.5	6	5.1	0.14	
	F_x upper	N	30	210	364	121	0.25	1.62
	F_z upper	N	470	770	1024	643	0.21	
	T1 acceleration ¹	g	12.5	15.9	17.8	20.5	0.00	
	Time to head restraint contact	ms	53	80	92	47	0.50	
							Total	6.24

3. 座椅鞭打模型建立和仿真结果分析

3.1. FEA 模型建立

本文 FEA 座椅模型包括座椅、假人、安全带和滑车部分，如图 5 所示。其中假人采用 BioRID II 假人模型，座椅模型中骨架采用平均尺寸为 5 mm 的 shell 单元模拟，材料类型为 MAT24，座垫和靠背的泡沫均采用平均尺寸为 15 mm 的四面体 Solid 单元模拟，在 ANSA 中建立座椅有限元模型并建立连接和材料属性的赋予。根据滑车试验要求，座椅的四个地脚均与滑车固定并约束滑车出 X 向的其他 5 个方向的自由度，碰撞波形采用本文提及的试验三个强度的波形，求解器采用 LS-Dyna 进行求解[5]。

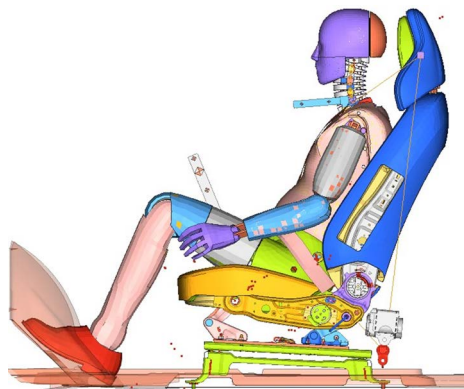


Figure 5. Whiplash FEA model
图 5. 鞭打 FEA 模型

3.2. FEA 仿真结果

通过建立有限元模型对其进行仿真分析，分析结果如表 2 所示。

Table 2. FEA Whiplash score table
表 2. FEA 鞭打试验得分表

	Criteria	Units	Higher performance limit	Lower performance limit	Capping	Value Target/Test	Euro NCAP Raw Score	
Low Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	9.0	15.0	18.3	5.9	0.50	
	Nkm	-	0.12	0.35	0.50	0.30	0.11	
	Head rebound velocity	ms^{-1}	3.0	4.4	4.7	3.7	0.25	
	F_x upper	N	30	110	187	5	0.50	
	F_z upper	N	270	610	734	106	0.50	
	T1 acceleration ¹	g	9.4	12.0	14.1	12.7	0.00	
	Time to head restraint contact	ms	61	83	95	53	0.50	
Mid Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	11	24	27	5.7	0.50	
	Nkm	-	0.15	0.55	0.69	0.38	0.21	
	Head rebound velocity	ms^{-1}	3.2	4.8	5.2	4.2	0.19	
	F_x upper	N	30	190	290	4	0.50	
	F_z upper	N	360	750	900	206	0.50	
	T1 acceleration ¹	g	9.3	13.1	15.55	14.3	0.00	
	Time to head restraint contact	ms	57	82	92	49	0.50	
High Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	13	23	25.5	7.9	0.50	
	Nkm	-	0.22	0.47	0.78	0.41	0.12	
	Head rebound velocity	ms^{-1}	4.1	5.5	6	5.4	0.04	
	F_x upper	N	30	210	364	35	0.49	
	F_z upper	N	470	770	1024	203	0.50	
	T1 acceleration ¹	g	12.5	15.9	17.8	18.9	0.00	
	Time to head restraint contact	ms	53	80	92	47	0.50	
							Total	6.90

从 FEA 分析结果中可以看出在三个波形中 Nkm 评价指标得分比较低, 其中 Nkm 取 N_{ea} , N_{ep} , N_{fa} , N_{fp} 中的最大值, 其计算公式分别如下:

$$N_{ep}(t) = \frac{F_{xp}(t)}{F_{xp-int}} + \frac{M_{ye}(t)}{M_{ye-int}}$$

$$N_{ea}(t) = \frac{F_{xa}(t)}{F_{x-int}} + \frac{M_{ye}(t)}{M_{ye-int}}$$

$$N_{fp}(t) = \frac{F_{xp}(t)}{F_{x-int}} + \frac{M_{yf}(t)}{M_{yf-int}}$$

$$N_{fa}(t) = \frac{F_{xa}(t)}{F_{x-int}} + \frac{M_{yf}(t)}{M_{yf-int}}$$

从公式中可以看出影响 Nkm 评价指标的主要因素就是 F_x 和 M_y , 胡远志[6]曾提出缩小头与头枕之间的距离使头与头枕接触时间更早, 能有效的提前支撑头部向前运动进而能够有效的降低上颈部剪切力同时也能减小颈部扭矩值。在符大兴[7]的文章中也指出增加头枕杆的刚度能够提高头部与头枕直接的作用力, 使头部更早的产生加速度进而降低 NIC 值和颈部剪切力。

3.3. FEA 仿真结果

根据上述分析, 在控制项目开发成本的前提下, 对座椅进行以下两点优化方案, 详细如下:

1) 在有限元模型中量取假人头部和头枕之间的距离为 30.3 mm, 现调整模型将距离 30.3 mm 调整为 21 mm, 具体如图 6 所示。

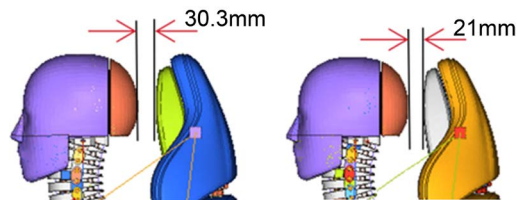


Figure 6. Model optimization scheme

图 6. 模型优化方案

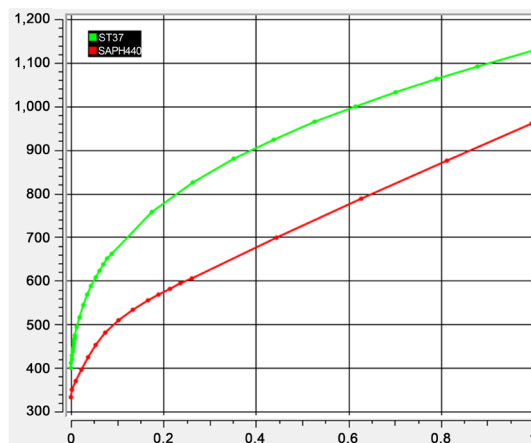


Figure 7. Material stress-strain curve

图 7. 材料应力应变曲线

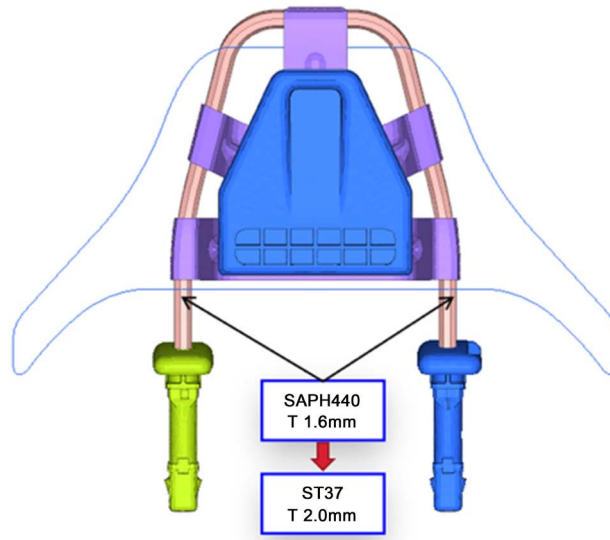


Figure 8. Headrest structure
图 8. 头枕结构示意图

在最小的改动量前提下为了增加头枕杆刚度，本文采用了提高头枕杆的材料，由原来的 SAPH440 变为 ST37，两种材料的应力应变曲线对比如图 7 所示，从图中明显能看出来 ST37 要比 SAPH440 强很多，同时也将头枕杆的壁厚由 1.6 mm 增加到 2 mm 以增加头枕杆刚度，其中头枕局部结构如图 8 所示。

根据上述的优化方案，对座椅鞭打仿真模型进行求解分析，将得到的分析结果与优化前进行对比[8]，对比结果如表 3 所示，鞭打得分得到了有效的提高，起到了优化效果。

Table 3. Comparison of FEA scores before and after optimization
表 3. 优化前后 FEA 得分对比表

	Criteria	Units	优化前	得分	优化后	得分		
Low Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	6.6	0.5	5.9	0.5		
	Nkm	-	0.35	0	0.3	0.1087		
	Head rebound velocity	ms^{-1}	3.8	0.2143	3.7	0.25		
	F_x upper	N	6	0.5	2.21	5	0.5	2.36
	F_z upper	N	255	0.5	106	0.5		
	T1 acceleration ¹	g	13	0.5	12.7	0		
	Time to head restraint contact	ms	55	0.5	53	0.5		
Mid Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	10.8	0.5	5.7	0.5		
	Nkm	-	0.4	0.1875	0.38	0.2125		
	Head rebound velocity	ms^{-1}	4.1	0.2188	4.2	0.1875		
	F_x upper	N	9	0.5	2.41	4	0.5	2.4
	F_z upper	N	342	0.5	206	0.5		
	T1 acceleration ¹	g	14.6	0	14.3	0		
	Time to head restraint contact	ms	50	0.5	49	0.5		

Continued

High Severity Pulse	NIC	m^2s^{-2}	8.9	0.5		7.9	0.5		
	Nkm	-	0.46	0.02		0.41	0.12		
	Head rebound velocity	ms^{-1}	5.1	0.1429		5.4	0.0357		
	F_x upper	N	121	0.2472	1.62	35	0.4861	2.14	
	F_z upper	N	643	0.2117		203	0.5		
	T1 acceleration ¹	g	20.5	0		18.9	0		
	Time to head restraint contact	ms	47	0.5		47	0.5		
				Total	6.24			Total	6.90

4. 试验结果验证

座椅鞭打在 FEA 仿真优化的同时，物理试验也在同时进行，一方面是对 FEA 仿真结果进行验证另一方面也对优化方案的有效性进行校核，试验设置如图 9 所示[9]。针对本文中座椅优化前后进行了两次物理试验，试验结果对比如表 4 所示。由于物理试验与 FEA 仿真模型之间的设置无法保证百分百一致，因此两者得分之间存在一定的差异，但是优化后鞭打试验得分得到了有效的提高，说明优化方案的方向是正确的。

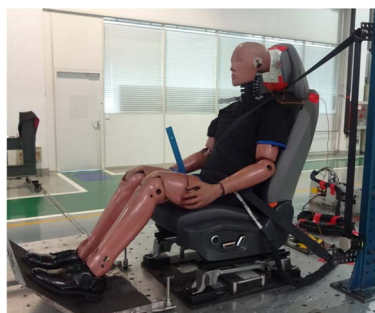


Figure 9. Physical test setup
图 9. 物理试验设置

Table 4. Comparison of physical test scores before and after optimization
表 4. 优化前后物理试验得分对比

Whiplash Tests	优化前						优化后					
	Low Pulse		Mid Pulse		High Pulse		LowPulse		Mid Pulse		High Pulse	
	Value	Points	Value	Points	Value	Points	Value	Points	Value	Points	Value	Points
T1 x-acc-g	12.97	0.000	12.77	0.043	17.28	0.000	13.09	0.000	14.47	0.000	16.64	0.000
Head contact start-ms	71.80	0.255	64.90	0.342	62.30	0.328	57.80	0.500	56.60	0.500	53.50	0.491
		0.255		0.342		0.328		0.500		0.500		0.491
NIC max-m2/s2	8.80	0.500	11.43	0.483	13.65	0.468	4.71	0.500	10.37	0.500	12.60	0.500
Nkm	0.32	0.065	0.30	0.311	0.51	0.000	0.25	0.221	0.25	0.380	0.40	0.145

Continued

Rebound head velrel sled-m/s	3.34	0.379	3.94	0.269	5.25	0.089	3.77	0.226	4.33	0.148	5.15	0.126
UPPER Neck Shear (+Fx)-N	0.60	0.500	0.37	0.500	0.48	0.500	0.78	0.500	0.86	0.500	0.77	0.500
UPPER Neck tension (+Fz)-N	155.62	0.500	320.54	0.500	207.63	0.500	50.05	0.500	212.10	0.500	347.85	0.500
Dynamic assessment	2.199		2.405		1.885		2.447		2.528		2.262	
			6.489						7.237			

5. 结语

本文针对某乘用车座椅 2018 版 E-NCAP 鞭打试验得分情况, 应用常规提升 C-NCAP 性能的研究方法来提升 E-NCAP 性能指标, 并且通过 FEA 仿真建模优化分析结果, 同时通过物理试验验证分析结果及优化方案的有效性。研究结果表明减小头部与头枕之间的距离和增加头枕骨架结构的刚度能够有效地减小鞭打试验时颈部的损伤程度, 提高座椅的鞭打性能。

参考文献

- [1] 刘高, 王敏. 基于 DOE 的座椅鞭打试验优化分析[J]. 汽车实用技术, 2019(9): 146-148.
- [2] 王晋, 赵秀强, 王志涛, 梁宇, 乔鑫. 基于汽车座椅鞭打试验的仿真模型改进[J]. 汽车技术, 2015(9): 23-26.
- [3] 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.
- [4] C-NCAP 管理规则[M]. 天津: 中国汽车技术研究中心, 2018.
- [5] 李铁柱, 鲁后国, 阚洪贵. 基于仿真分析的某座椅鞭打性能改进[J]. 汽车技术, 2015(7): 18-21.
- [6] 符大兴, 刘华官, 李登云, 于国超. 乘用车座椅鞭打试验性能研究与改进[J]. 汽车实用技术, 2019(16): 110-114.
- [7] 胡远志, 胡源源, 刘西, 廖高健. 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(自然科学), 2017, 31(6): 8-14.
- [8] 吕宝锋, 韩峰, 岳国辉. 某轿车座椅防挥鞭伤性能改进[J]. 北京汽车, 2017(3): 40-42.
- [9] European New Car Assessment Programme (Euro NCAP). Version 3.3.