

基于C-NCAP某座椅鞭打试验仿真和优化

赵军¹, 江圆迪¹, 毛晨曦², 刘会霞^{1*}

¹江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江

²上海埃立曼科技有限公司, 上海

收稿日期: 2023年2月17日; 录用日期: 2023年3月20日; 发布日期: 2023年3月28日

摘要

按照2021版C-NCAP要求, 对某车型座椅进行鞭打试验, 通过鞭打试验结果分析发现挥鞭伤较为严重, 鞭打得分较低。针对这一问题采用Hypermesh软件建立有限元模型, 用LS-Dyna显示非线性动力学求解器进行求解, 并将有限元结果与试验结果进行对标分析。在对标合格的有限元模型基础上分析鞭打损伤原因, 并根据分析结果提出优化参数, 优化参数如下: 座椅靠背左右侧板厚度、座椅靠背支撑板厚度、座椅靠背上横杆厚度以及头枕杆直径。根据优化后的结果可知, 优化后的假人挥鞭伤减小, 鞭打得分提高, 大大增强了座椅防挥鞭伤的能力。

关键词

座椅, 鞭打试验, 有限元分析, C-NCAP

Simulation and Optimization of a Seat Whiplash Test Based on C-NCAP

Jun Zhao¹, Yuandi Jiang¹, Chenxi Mao², Huixia Liu^{1*}

¹School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu

²Shanghai Elliman Technology Co., Ltd., Shanghai

Received: Feb. 17th, 2023; accepted: Mar. 20th, 2023; published: Mar. 28th, 2023

Abstract

According to the requirements of the 2021 version of C-NCAP, a whipping test was carried out on the seat of a certain model, and the whiplash injury was found to be more serious and the whiplash score was lower through the analysis of the whiplash test results. To solve this problem, Hypermesh software is used to establish a finite element model, LS-Dyna is used to display the

*通讯作者。

文章引用: 赵军, 江圆迪, 毛晨曦, 刘会霞. 基于 C-NCAP 某座椅鞭打试验仿真和优化[J]. 建模与仿真, 2023, 12(2): 1500-1511. DOI: 10.12677/mos.2023.122140

nonlinear dynamics solver, and the finite element results are benchmarked with the experimental results. Based on the qualified finite element model, the cause of whiplash damage is analyzed, and the optimization parameters are proposed according to the analysis results, as follows: the thickness of the left and right side panels of the seat back, the thickness of the seat back support plate, the thickness of the crossbar on the seat back and the diameter of the headrest rod. According to the optimized results, the optimized dummy whiplash injury is reduced and the whiplash score is improved, so the seat's anti-whiplash ability is greatly improved.

Keywords

Seat, Whiplash Test, Finite Element Analysis, C-NCAP

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

根据 2020 年国家统计局发布的《中国统计年鉴》显示[1], 仅在高速公路中的追尾事故就占比达到 42.61%。追尾事故会造成前车瞬间产生一个较大的加速度, 加速度通过车身传导到座椅上, 座椅会有一个向前的加速度, 并且座椅会将加速度传递到乘员的胸部与头部, 从而对乘员的颈部造成伤害。像这样的追尾事故造成的乘员颈部损伤被称为挥鞭伤。虽然挥鞭伤一般不会造成乘员直接死亡的严重伤害, 但极易带来颅脑损伤、颈椎损伤, 心脏损伤等伤害, 这些伤害较难治疗, 甚至会伴随受伤者一生, 给人民生命健康带来极大伤害, 严重降低了人民的生活质量[2]。因此, 世界各国也开始了对座椅鞭打损伤的研究[3] [4], 并采用数值模拟的方法对座椅的相关参数进行设计与优化[5] [6]。Jo Huichang 和 Eun Kim Young 研究了在低速后碰撞中座椅靠背强度对乘员颈部损伤的影响, 研究发现增加靠背强度会导致乘员韧带和椎间盘载荷的增加, 因此, 适当的减少靠背强度可以减少乘员颈部损伤[7]。吉林大学的李瑞生同学基于 C-NCAP 对座椅的鞭打试验进行了研究, 发现影响座椅鞭打性能的因素主要由座椅靠背刚度、座椅头枕杆刚度及位置决定, 并通过试验设计对座椅影响因素进行分析与优化, 通过改变头枕杆直径、改变头枕到假人头部的距离、改变头顶高度与头枕高度距离的方式来降低假人伤害, 提升座椅抗鞭打性能[8]。重庆理工大学的胡源源同学用不同的假人模型来研究鞭打试验中假人颈部的运动响应, 其研究表明 THUMS 假人模型的生物逼真度要由于 Bio II 型假人, 对进一步研究鞭打伤害具有重要意义[9]。

经过多年的发展, 数值模拟有限元技术得到快速发展, 并已广泛应用于工程研究中。我国在 2012 年将座椅鞭打纳入 C-NCAP 评价中[10]。目前各大主机厂也都将乘员的颈部保护引入到了座椅设计中。本文按照 2021 版 C-NCAP 要求, 对某公司某款座椅进行鞭打试验, 并对鞭打试验结果进行分析, 得出对座椅鞭打得分影响较大的座椅结构件。用 Hypermesh 软件搭建鞭打试验的 CAE 模型, 并用 LS-Dyna 求解器进行求解。将数值模拟结果与鞭打试验结果进行对标分析来验证有限元模型的可靠性, 对可靠性满足要求的有限元模型伤害结果进行分析, 结合分析结果提出优化方案。

2. 鞭打试验及结果分析

2.1. 鞭打试验

根据 2021 版《C-NCAP 管理规则》[11], 鞭打试验所需样品包括 BioII 型假人、某车型座椅、试验台

车、高速摄像机，以及各种传感器等。在试验开始前需要将假人和座椅放在标准试验环境下至少 3 h，试验须在室温 $22.5^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ ，相对湿度 10%~70% 的环境下进行，鞭打试验模型如图 1 所示。在一切准备好之后需要对试验台车施加一个加速度，加速度波形需要控制在 0 ms 至 170 ms 之间，加速式台车的速度变化量应该控制在 $\Delta V = 20.0 \text{ km/h} \pm 1.0 \text{ h}$ ，波形的持续时间为 $\Delta T = 103 \text{ ms} \pm 3 \text{ ms}$ ，图 2 为鞭打试验施加的加速度波形图。



Figure 1. Whiplash test model
图 1. 鞭打试验模型

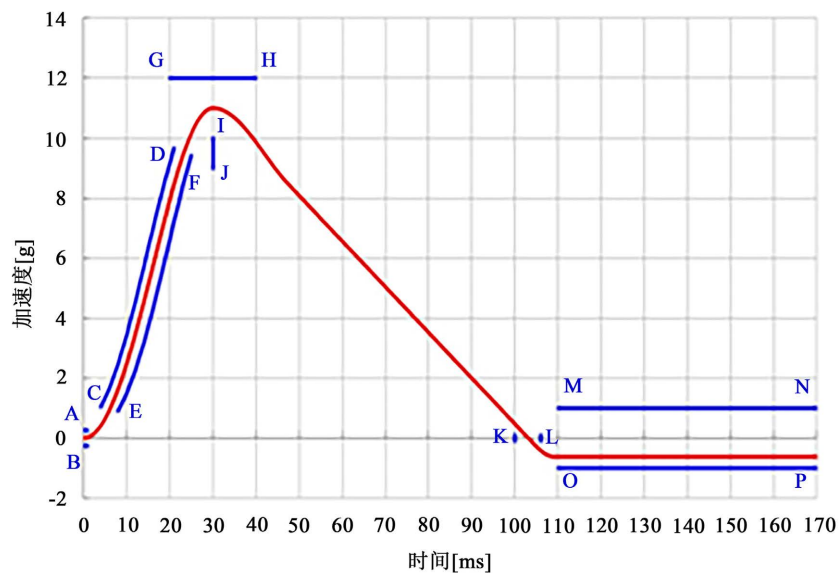


Figure 2. Acceleration waveform for whiplash test
图 2. 鞭打试验加速度波形

2.2. 鞭打试验及损伤分析

根据 2021 版《C-NCAP 管理规则》，结合从鞭打试验假人身上传感器提取的伤害数值，某次鞭打试验得分为 2.32 分，总分为 5 分。表 1 记录了某次鞭打得分详细信息，表中高、低性能值为 C-NCAP 中所规定的值，试验值为假人身上传感器所记录的鞭打伤害数值。单项得分为每一项指标的得分情况，其中上颈部得分为 0.22 分，满分为 1.5 分，上颈部具体得分为上颈部剪切力 F_x 为 1.5 分；上颈部拉力 F_z 得分为 1.34 分；上颈部弯矩 M_y 得分为 0.22 分，取上颈部三项中的最低分 0.22 记为上颈部得分。下颈部得分为 0.79 分，满分为 1.5 分，下颈部具体得分为下颈部剪切力 F_x 为 1.03 分；下颈部拉力 F_z 得分为 0.79 分；

下颈部弯矩 M_y 得分为 1.5 分，取下颈部三项中的最低分 0.79 记为下颈部得分。NIC 颈部伤害指数得分为 1.31 分，满分为 2 分。

Table 1. Scoring table for whiplash dynamic tests

表 1. C-NCAP 鞭打动态试验指标评分表

指标	高性能值	低性能值	试验值	单项得分	总分
NIC	$8 \text{ m}^2/\text{s}^2$	$30 \text{ m}^2/\text{s}^2$	$15.54 \text{ m}^2/\text{s}^2$	1.31	1.31
上颈部 F_x^+	340 N	730 N	207.15 N	1.50	
上颈部 F_z^+	475 N	1130 N	546.05 N	1.34	0.22
上颈部 M_y	12 Nm	40 Nm	35.85 Nm	0.22	2.32
下颈部 F_x^+	340 N	730 N	462.38 N	1.03	
下颈部 F_z^+	257 N	1480 N	836.98 N	0.79	0.79
下颈部 M_y	12 Nm	40 Nm	5 Nm	1.50	

由上述试验数据可知本次鞭打试验 NIC 得分率为 65.5%，上颈部得分率为 14.7%，下颈部得分率为 52.7%，总体得分率为 46.4%。具有很大的优化空间。

3. 鞭打 CAE 模型搭建与试验对标分析

由上节可知鞭打试验中 NIC 颈部伤害指数、上颈部伤害与下颈部伤害扣分较多，因此可以采用有限元分析的方式来优化座椅设计参数。采用有限元辅助设计的方式可以减少座椅试验次数、缩短座椅研发时间，从而降低座椅开发成本。

3.1. CAE 模型搭建

本文 CAE 模型采用 Hypermesh 软件进行网格划分，座椅结构件多为钣金件，采用片体网格划分钣金件，片体平均尺寸为 7 mm，头枕、靠背以及坐垫发泡采用四面体网格填充，平均尺寸为 15 mm，钢丝采用一维 Beam 单元模拟，平均尺寸为 5 mm。座椅模型共计 68,625 个节点，120,249 个单元。座椅模型搭建完成导入假人模型，按照真实试验条件来设置接触、载荷、连接、边界条件以及相关控制卡片，从而最大程度提高有限元结果与试验结果的拟合度。鞭打有限元模型如图 3 所示。

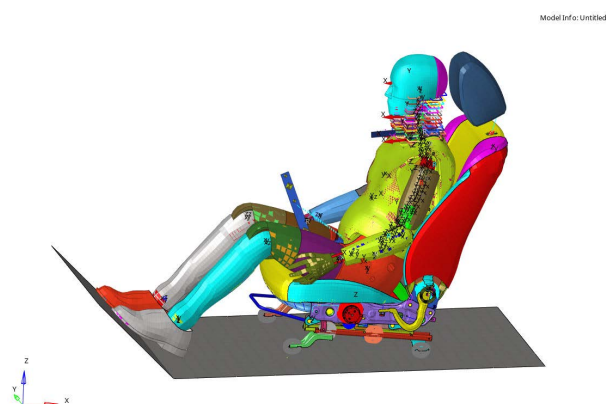


Figure 3. Finite element model of seat whiplash
图 3. 座椅鞭打有限元模型

3.2. 仿真与试验验证

有限元模型的精度对于后续的优化至关重要，因此需要根据试验数据来验证有限元模型的精度，下面将对试验数据与有限元数据进行对标分析，来验证有限元模型的精度。

图 4~7 为鞭打运动仿真(左)与试验(右)不同时刻状态图。鞭打运动分为三个阶段：第一阶段为运动开始到头与头枕接触时刻，如图 4、图 5 所示，头和头枕接触约在 65 ms 处；第二阶段为头与头枕接触到头与头枕离开时刻，如图 5~7 所示，头与头枕分开时刻为 165 ms，此阶段经历头部张角最大时刻，如图 6 所示，此时约为 120 ms；第三阶段为头与头枕分离并回弹，此运动状态为 165 ms 至运动结束时刻。

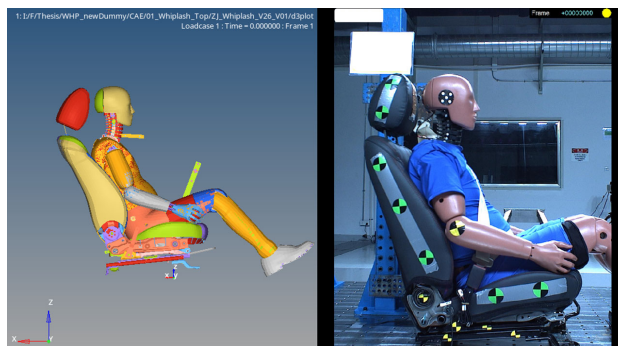


Figure 4. The initial moment of movement
图 4. 运动初始时刻

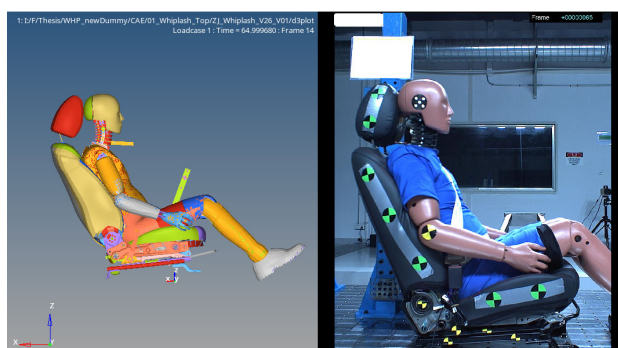


Figure 5. The moment of head-to-headrest contact
图 5. 头与头枕接触时刻

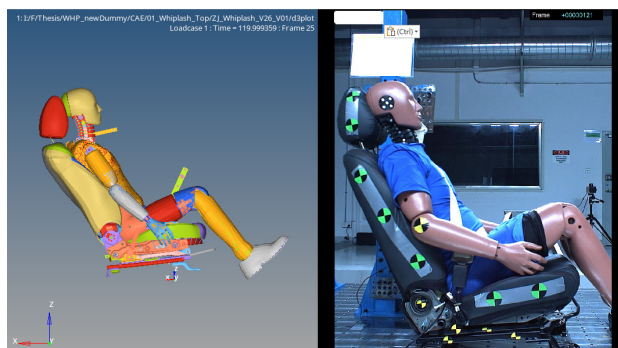


Figure 6. The head opens at the maximum moment
图 6. 头部张角最大时刻

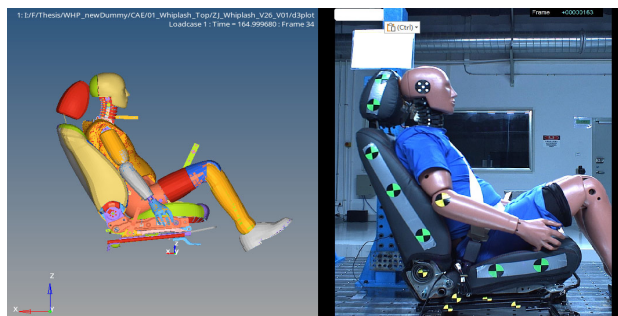


Figure 7. The moment when the head is separated from the headrest
图 7. 头与头枕分离时刻

计算结束后从结果文件中提取伤害曲线，并将扣分项的有限元伤害曲线与试验伤害曲线放在一起对标，图 8~12 为单项评分扣分指标的有限元曲线与试验曲线对标图，图中 CAE 为有限元曲线，TEST 为试验曲线。图 8 所示为 NIC 颈部伤害指数的试验与仿真伤害曲线图；图 9 为上颈部弯矩的试验与仿真伤害曲线图；图 10 为上颈部拉力的试验与仿真伤害曲线图；图 11 为下颈部剪切力的试验与仿真伤害曲线图；图 12 为下颈部拉力的试验与仿真伤害曲线图。经过扣分项的伤害曲线对标可知，有限元模型伤害曲线与试验伤害曲线趋势相近，因此有限元模型具有可靠性。

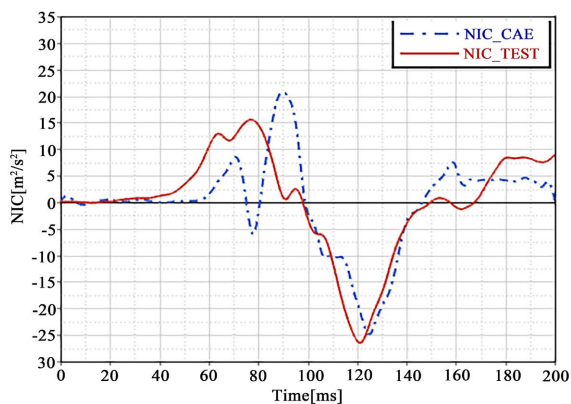


Figure 8. Injury curve of NIC
图 8. NIC 伤害曲线

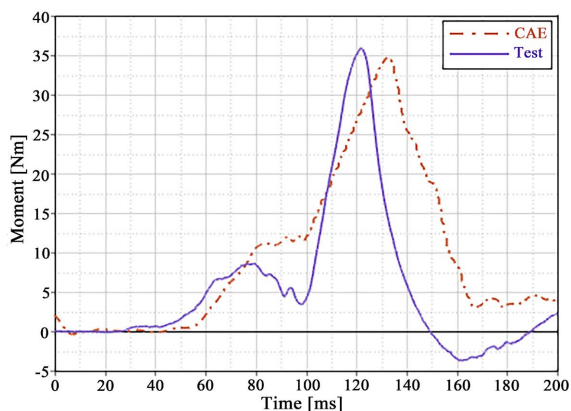


Figure 9. Injury curve of upper neck moment
图 9. 上颈部弯矩伤害曲线

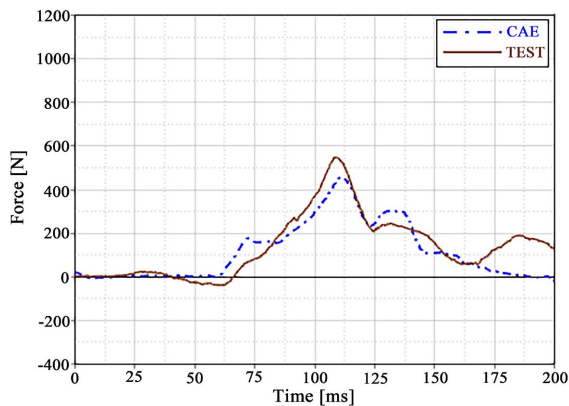


Figure 10. Injury curve of upper neck pulling force

图 10. 上颈部拉力伤害曲线

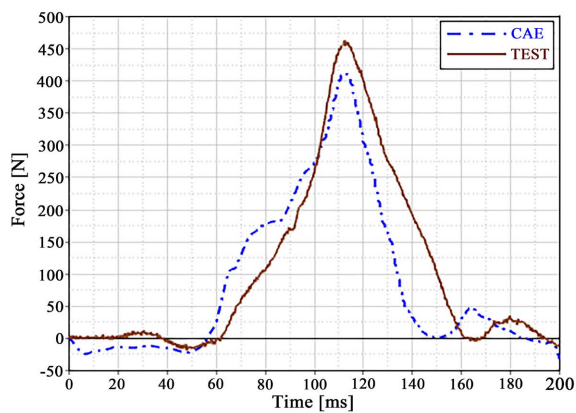


Figure 11. Injury curve of lower neck shear force

图 11. 下颈部剪切力伤害曲线

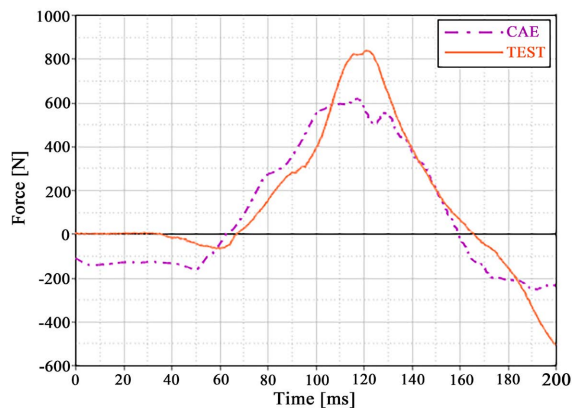


Figure 12. Injury curve of lower neck pulling force

图 12. 下颈部拉力伤害曲线

4. 仿真结果分析与优化

4.1. 仿真结果分析

由图 8 可知 NIC 颈部伤害指标超过高性能值 $8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 造成失分, NIC 颈部伤害指标由胸部的加速度与

头部加速度的差值计算得来, 如公式 3 所示。

$$A_x^{rel}(t) = A_x^{T1}(t) - A_x^{Head}(t) \quad (1)$$

$$\text{其中, } A_x^{T1}(t) = \frac{1}{2} [A_x^{T1-Left}(t) + A_x^{T1-Right}(t)]$$

$$V_x^{rel}(t) = \int_0^t A_x^{rel}(\tau) d\tau \quad (2)$$

$$NIC(t) = 0.2 A_x^{rel}(t) + [V_x^{rel}(t)]^2 \quad (3)$$

胸部的加速度曲线如图 13 所示, 头部的加速度曲线如图 14 所示。

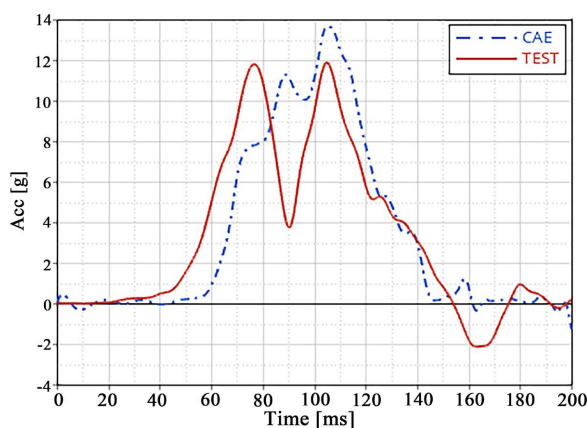


Figure 13. Acceleration curve of the chest

图 13. 胸部加速度曲线

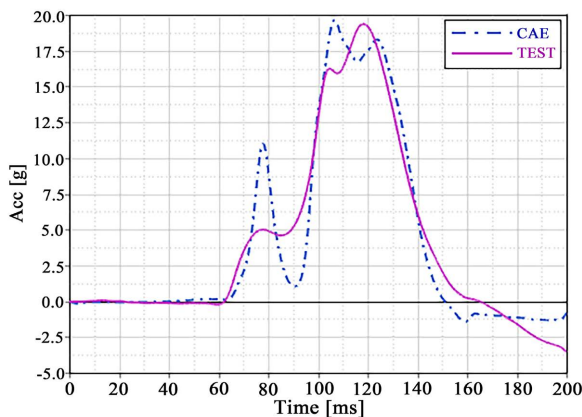


Figure 14. Acceleration curve of the head

图 14. 头部加速度曲线

由图 8 可知 NIC 伤害指数有限元曲线的最大值为 $20 \text{ m}^2/\text{s}^2$, 发生在 90 ms 左右。图 14 中 CAE 曲线记录了头部加速度从 63 ms 处开始上升。在 78 ms 处加速度开始快速下降, 在 90 ms 处头部加速度是一个局部极小值, 结合图 13 胸部加速度 CAE 曲线图可知, 在 90 ms 处头部与胸部加速度的差值达到最大, 因此 NIC 伤害指数最大值也发生在 90 ms 处。对于 NIC 的优化可以通过两种方法来实现, 首先可以通过增大头枕的刚度来增强头枕对于头部的支撑作用, 从而可以避免头部加速度过低的情况, 或者减小头部

与头枕之间的空间，让加速度更快的作用到头上，其次可以通过适当的减小靠背的支撑刚度来降低胸部的加速度。

造成上颈部弯矩和上颈部拉力过大的原因是头枕的支撑刚度不足，造成头部向后旋转角度过大，增加了上颈部的弯矩伤害和拉力伤害。下颈部的剪切力过大的原因是靠背的刚度过大，加速度通过靠背传递至胸部，若靠背刚度过大，则作用至胸部的力和加速度都会增加，因此可以适当地减少靠背的支撑刚度来减轻下颈部所受伤害。

4.2. 座椅鞭打性能的改进优化

座椅结构是一个复杂的系统，有大量的研究表明，座椅各个设计参数对假人颈部损伤并不是简单的一一对应关系，而是多个参数对应多个目标综合作用的结果。因此，可以通过修改头部子系统与靠背子系统的多个零件刚度值来减小假人颈部的伤害值。本文通过对鞭打试验与仿真中扣分项的结果分析，得到该款座椅结构设计参数的优化方案如下：

1) 调整头枕参数：本文头枕接触面到头部的距离为 20 mm，考虑到舒适性与安全性的问题，20 mm 是一个比较合理的取值，因此头枕与头部的距离不需要调整。除此之外，可以通过调整头枕杆的直径来增强头枕的支撑刚度，头枕杆的直径由 10 mm 调整至 12 mm。

2) 调整靠背左右侧板的厚度：通过降低靠背左右侧板的厚度可以减小其刚度，从而减小胸部所受到的载荷。靠背左右侧板的厚度由 1.6 mm 调整值 1.3 mm。

3) 调整靠背支撑板的厚度：通过调整靠背支撑板的厚度可以让胸部的加速度上升速度相对延缓，同时也可以起到降低胸部所受载荷的作用。靠背支撑板的厚度由 2.5 mm 调整至 1.8 mm。

4) 调整靠背上横杆的厚度：头枕杆通过与靠背上横杆焊接在一起从而起到支撑头部的作用，因此增大靠背上横杆的厚度也可以增强头枕杆整体的旋转刚度。靠背上横杆的厚度由 1.4 mm 调整至 2 mm。

经过优化后的鞭打得分总分为 3.54 分，其中扣分项为 NIC 颈部损伤指标、上颈部弯矩和下颈部拉力值，其具体值分别为 1.54 分、0.90 分和 1.10 分。详细的得分情况如表 2 所示。

Table 2. Comparison table of whiplash test scores

表 2. 鞭打试验得分对比表

评价指标	优化前得分	优化后得分
NIC	1.31	1.54
上颈部 F_x^+	1.50	1.50
上颈部 F_z^+	1.34	1.50
上颈部 M_y	0.22	0.90
下颈部 F_x^+	1.03	1.50
下颈部 F_z^+	0.79	1.10
下颈部 M_y	1.50	1.50

图 15~19 为优化后单项得分还未达到满分的伤害曲线，其中图 16 和图 17 的伤害曲线经过公式(3)的运算后得到图 15 颈部伤害曲线，从图 15 中可知，NIC 颈部伤害值的最大值在 120 ms 之前为 $13.03 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，发生在 90 ms 处，虽然伤害指标未低于高性能值 $8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，但相比较初始值 $20 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ，已经有了较大改善，从图 16 头部加速度与图 17 胸部加速度可知，胸部加速度相较于优化前有所降低，头部加速度在 90 ms 处的值也有所提高，因此由公式(3)计算得出的 NIC 值相比较之前有所降低。由图 18 可知，上颈部弯矩伤害最大值为 23.20 Nm，发生在 113 ms 处，虽然未低于高性能值 12 Nm，但相较于优化前 35.85 Nm 具有显著提升。图 19 为下颈部拉力，最大值为 586 N，发生在 117 ms 处，虽然未低于高性能值 257 N，但相较于优化前的 836.98 N，也有一定的提升。

由伤害曲线分析可知，优化后的颈部伤害值有所降低，鞭打得分显著提高，座椅相关设计参数的优化结果较好。

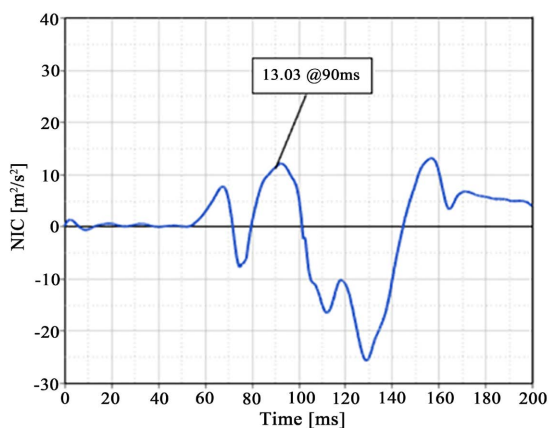


Figure 15. Injury curve of NIC

图 15. NIC 伤害曲线

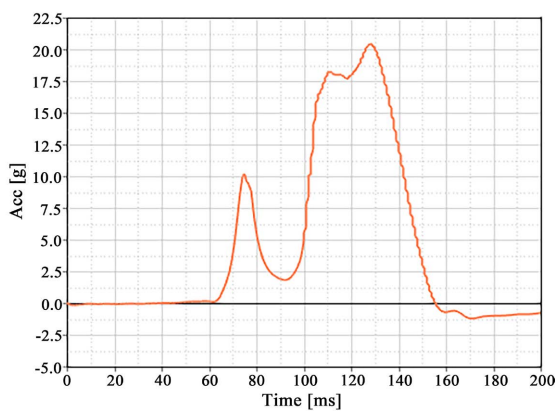


Figure 16. Acceleration curve of the head

图 16. 头部加速度曲线

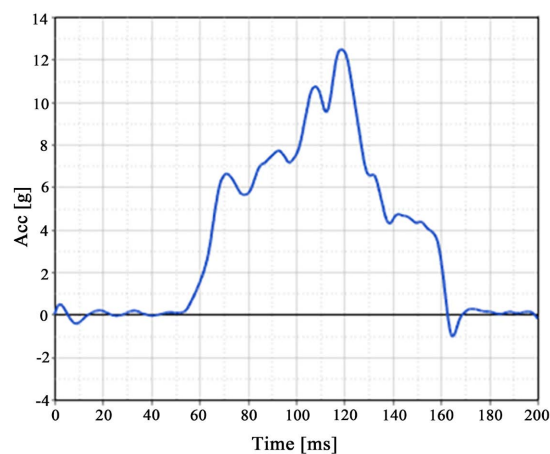


Figure 17. Acceleration curve of the chest

图 17. 胸部加速度曲线

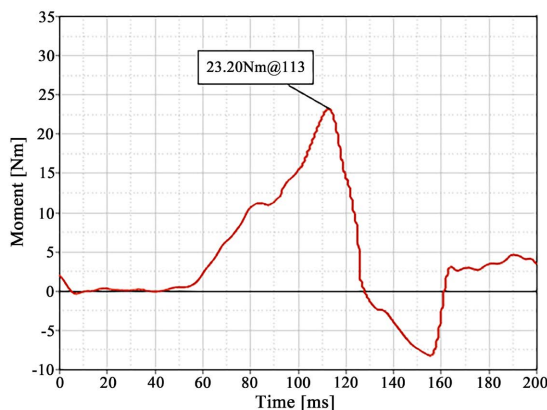


Figure 18. Injury curve of upper neck moment

图 18. 上颈部弯矩伤害曲线

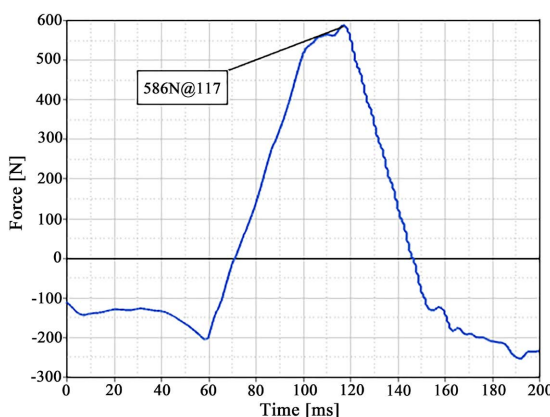


Figure 19. Injury curve of lower neck pulling force

图 19. 下颈部拉力伤害曲线

5. 结论

本研究基于 2021 版 C-NCAP 试验评价规程, 对某款座椅进行鞭打试验, 针对鞭打试验得分较低的问题建立座椅鞭打有限元模型, 对鞭打试验不合格的指标进行对标, 并基于对标合格的有限元模型提出优化方案与仿真结果分析。根据优化仿真结果分析可知: (1) 增加头部子系统的变形刚度和旋转刚度可以减小头部零部件的变形, 增强头枕对头部的支撑作用, 从而适当增大头部的加速度值; (2) 减小靠背子系统旋转刚度和变形刚度可以适当增大靠背的变形量, 让乘员背部能更大程度地减小压力, 从而降低乘员胸部的加速度。通过(1)、(2)的优化方式可以降低头部与胸部的加速度差, 从而降低乘员颈部损伤。本研究相关的研究方法和研究思路可以大大节省座椅的开发成本与开发时间, 并为后续其他座椅防挥鞭伤设计提供参考。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] Kumagai, G., Wada, K., Tanaka, S., *et al.* (2022) Prevalence of Whiplash Injury and Its Association with Quality of Life in Local Residents in Japan: A Cross Sectional Study. *Journal of Orthopaedic Science*, **27**, 108-114. <https://doi.org/10.1016/j.jos.2020.12.007>
- [3] 黄炫. 基于 C-NCAP 鞭打试验座椅参数对颈部损伤的影响[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2012.

-
- [4] 梁剑. 汽车追尾碰撞中乘员颈部保护的仿真分析与研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2017.
- [5] 刘俊辉, 侯李娜, 何苗, 汤鹏飞, 勾赵亮, 黄建军. 基于损伤机理分析的座椅鞭打性能研究[C]//中国汽车工程学会. 2019 中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [6] 马健胜, 郭树文, 郑艳婷, 卜晓兵. 基于某 SUV 正碰台车试验的有限元建模仿真研究[J]. 天津科技, 2019, 46(3): 54-59+62.
- [7] Jo, H.C. and Eun, K.Y. (2007) A Study on the Influence of the Seat back Strength on Neck Injury in Low Speed Rear Offset Impacts. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, **9**, 29-34.
- [8] 李瑞生. 某汽车座椅鞭打性能的研究与优化[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [9] 胡远志, 胡源源, 蒋成约, 刘西, 廖高健. 鞭打试验中 BioRID II 与 THUMS 模型颈部损伤对比[J]. 汽车安全与节能学报, 2017, 8(3): 239-245.
- [10] 张楚云. 汽车座椅鞭打试验综述[J]. 内燃机与配件, 2021(14): 198-199.
- [11] 中国汽车技术研究中心有限公司(天津). C-NCAP 管理规则(2021 年版) [Z]. 2021.