文章编号:1674-2974(2024)10-0011-07 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024195

基于骨架几何位置调整的座椅抗鞭打性能优化

马志雄[1],施金金[2],郭韬嵘[1†],刘鹏举[1]
(1. 同济大学 汽车学院,上海 201804;
2. 延锋国际汽车技术有限公司,上海 201315)

摘 要:为了减小鞭打试验伤害评估中普遍较高的颈部损伤指标(Neck Injury Criterion,NIC)和上颈部伸张弯矩,基于某汽车座椅的LS-DYNA有限元模型和物理试验结果,首先对其基本结构和后碰撞下的运动响应进行分析,使用多体动力学分析软件(Mathematical Dynamic Model, MADYMO)建立座椅鞭打试验的多体动力学模型.然后,通过伤害机理分析和对座椅主要设计参数的灵敏度分析,确定座椅结构中的主要几何结构参数,并据此建立数值模型.最后,利用多目标优化算法,获得相应的座椅抗鞭打性能优化方案.结果表明,通过调整座椅骨架横梁及头枕位置,提高乘员头部和下颈部运动一致性,使NIC降低58.5%,上颈部伸张弯矩满足最高性能限值.

关键词:汽车安全;座椅;鞭打试验;MADYMO;多目标优化
中图分类号:U46 **文献标志码**:A

Optimization of Seat Anti-whiplash Performance Based on Skeleton Geometric Position Adjustment

MA Zhixiong[1], SHI Jinjin[2], GUO Taorong[1†], LIU Pengju[1]
(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Yanfeng International Automotive Technology Co., Ltd., Shanghai 201315, China)

Abstract: To reduce the commonly high Neck Injury Criterion (NIC) and upper neck extension moment in the assessment of whip test injuries, based on the LS-DYNA finite element model and physical test results of a certain car seat, the basic structure and dynamic response under rear collision were first analyzed. A multi-rigid body dynamic analysis model for the seat whiplash test was established using the Mathematical Dynamic Model (MADYMO) software. Then, through the analysis of injury mechanisms and sensitivity analysis of the main design parameters of the seat, the main geometric structural parameters in the seat structure were determined, and a numerical model was established based on this. Finally, using multi-objective optimization algorithms, a corresponding optimization plan for seat whiplash resistance performance was obtained. The results showed that by adjusting the position of the seat frame crossbeam and headrest, the consistency of the passenger's head and lower neck movement was improved, reducing the NIC by 58.5%, and the upper neck extension moment met the highest performance limit.

* **收稿日期**:2023-12-10
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB2503404), National Key Research and Development Program of China(2022YFB2503404)
作者简介:马志雄(1978—),男,湖北天门人,同济大学讲师,博士
† 通信联系人,E-mail: 2131590@tongji.edu.cn

Key words: vehicle safety; seats; whiplash test; MADYMO; multi-objective optimization

追尾碰撞在各类交通事故中所占比例较大,根据我国道路交通统计和美国交通事故数据库综合统计,在过去十年间,追尾碰撞占交通事故总比例的25%以上[1]. 追尾碰撞所引起的长期颈部疼痛会给乘员健康造成持续伤害,较高的发生频率导致不小的社会支出[2].

各国的新车安全评价协会(New Car Safety Evaluation Association, NCAP)基于该事故类型开发了基于滑台模拟追尾碰撞中前车座椅的加速度曲线,并使用后碰撞假人的传感器信号反馈评估颈部伤害,简称鞭打试验[3-8]. 我国2021版《C-NCAP管理规则》也对NIC和上/下颈部载荷的上、下限作了相应的规定.

目前,大部分座椅产品在鞭打试验中的表现逐渐变好,具体的失分情况也逐渐趋于稳定. 对2022年C-NCAP公开的部分车型试验结果和某座椅公司2018—2021年的试验数据进行了统计分析,发现NIC和上颈部伸张弯矩是目前的主要失分项. 因此,在座椅的抗鞭打保护性设计中,有必要关注这两个伤害值,针对性进行优化. 文献[9-20]通过有限元仿真和真实试验等手段,分析了座椅抗鞭打性能的可优化参数及主要优化方法,其中主要优化方法可以总结为2种,一种是通过头枕位置调整,减小乘员的头后间隙;另一种是提高头枕和靠背强度的一致性.



图1 座椅有限元模型

Fig.1 Seat finite element model

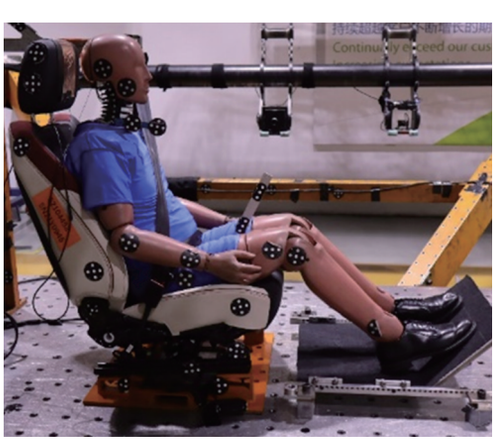


图2 座椅实物模型

Fig.2 Seat mock-up

1 鞭打试验多体运动学模型的建立与验证

本文以一款新型座椅的LS-DYNA有限元模型以及鞭打试验数据作为研究基础,座椅的有限元模型如图1所示,座椅实物模型如图2所示. 其中有限元模型通过材料强度试验以及精确的三维建模,较好地复现了实际座椅模型的物理特征. 该模型的鞭打试验性能与座椅实物表现十分接近,可以认为该有限元模型具有较高的仿真性,因此,可以作为后续建模的参考.

MADYMO集成了多体和有限元分析技术,相比有限元仿真,多体模型仿真在计算效率上有明显的优势. 本文所建立的MADYMO多体座椅模型主要包括滑轨、坐盆、靠背和头枕4个部分,分别通过滑轨的平动副、坐盆转动副和头枕转动副实现连接,并在靠背接触部分进行了一定细化,根据座椅靠背接触特性的差异设置了不同的接触表面. 对于多体座椅模型的接触特性和部件之间的连接刚度特性,本文设计了总成级的标定试验获取,基于有限元座椅模型进行仿真. 此外,多体座椅模型还包括3个主要转动副结构,其扭转刚度设计了总成标定试验,以获取假人与座椅总成之间的接触力与位移关系.

所建多体座椅结构简图如图 3 所示,其中 B_1~B_7 均为刚体结构,B_1 为滑轨部件、B_2 为坐盆部件、B_3 为座椅靠背主体、B_4 为头枕、B_5~B_8 分别为从上至下的不同座椅靠背分块部件. J_1~J_3 均为转动副,分别实现坐盆、靠背以及头枕杆的转动. J_4~J_7 为平动副,实现靠背各位置的压缩.J_8 为座椅滑轨平动副.

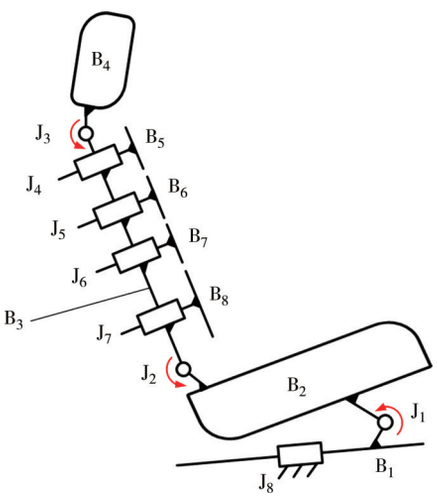


图 3　多体座椅结构简图

Fig.3　Structure diagram of multi-body seat

添加多体假人并给座椅底部输入试验获得的滑台脉冲加速度曲线,最终建立鞭打试验多体动力学模型如图 4 所示.运行仿真模型,输出假人的伤害值曲线进行验证.假人 NIC、上颈部伸张弯矩 M_y 曲线对比结果分别如图 5 和图 6 所示,其中峰值和曲线趋势拟合较好,认为该模型具有较高的仿真精度.

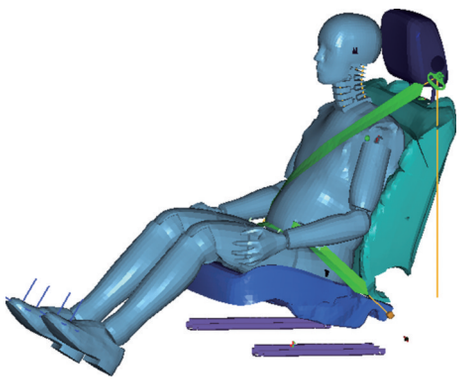


图 4　鞭打试验多体动力学模型

Fig.4　Multi body dynamic model for whiplash test

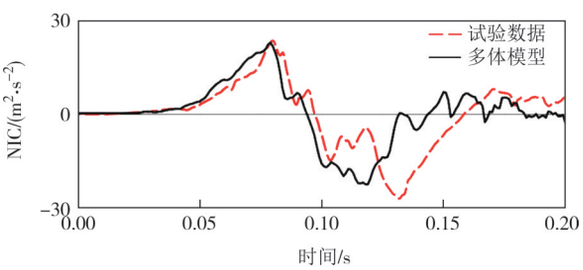


图 5　NIC 曲线

Fig.5　NIC curves

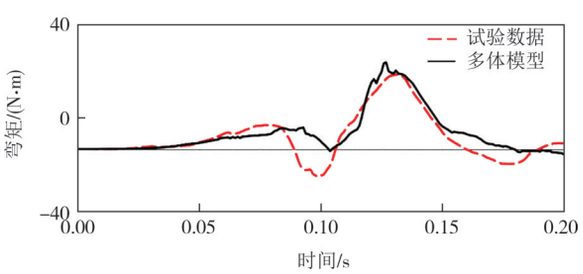


图 6　M_y 曲线

Fig.6　M_y curves

2　座椅结构影响因素分析

基于前文统计,本文选择 NIC 和 M_y 作为低速后碰撞中颈部保护性能的优化指标进行设计. 考虑到目前座椅抗鞭打试验结果中,上、下颈部载荷数值普遍低于限值,以这部分指标满足 C-NCAP 最高限值作为优化设计中的约束条件.

为探究各变量的影响,需要设置其变化范围,设计参数定义如表 1 所示. 利用多目标优化软件 modeFRONTIER 与 MADYMO 联合仿真,在软件中通过最优拉丁超立方采样方法建立 500 个样本点,建立工作流之后调用 MADYMO 得到响应值.

表 1　设计参数定义

Tab.1　Design parameter definition

设计界限	x_1/mm	x_2/mm	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}
设计基准	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
设计下限	0	−20	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.7
设计上限	+30	20	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.5	1.3

注:x_1 为头枕刚体 B4 位置;x_2 为颈部支撑刚体 B_5 位置;x_3 为坐盆转动副 J_1 刚度特性曲线前段 Y 轴放缩系数;x_4 为坐盆转动副 J_1 刚度特性曲线后段 Y 轴放缩系数;x_5 为靠背调校器转动副 J_2 刚度特性曲线 Y 轴放缩系数;x_6 为头枕杆转动副 J_3 扭转刚度曲线 Y 轴放缩系数;x_7 为颈部支撑刚体 J_4 平行副刚度特性曲线 Y 轴放缩系数;x_8 为风扇支撑刚体 J_5 平行副刚度特性曲线 Y 轴放缩系数;x_9 为靠背中下部支撑平行副 J_6/J_7 刚度曲线 Y 轴放缩系数;x_{10} 为座椅靠背与假人接触摩擦因数 Y 轴放缩系数;x_{11} 为头枕接触刚度特性曲线 Y 轴放缩系数.

座椅设计变量对NIC的灵敏度排序如图7所示.由图7可知,座椅的几何结构参数头枕位置x_1与座椅靠背的颈部支撑位置x_2是NIC灵敏度的变化中最重要的两个影响因素.颈部支撑越靠后,头枕越靠前,NIC灵敏度越低.座椅坐垫转轴初期刚度以及头枕杆刚度等因素影响相对较低.

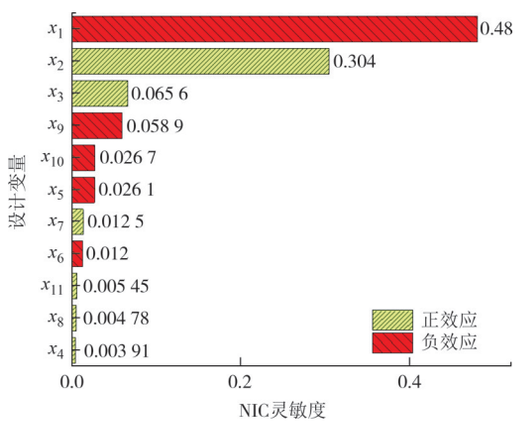


图7 座椅设计变量对NIC的灵敏度排序

Fig.7 Sensitivity ranking of seat design variables for NIC

座椅设计变量对M_y的灵敏度排序如图8所示.由图8可知,M_y的响应对座椅几何结构的参数相对不够敏感.对上颈部的伸张弯矩有较大影响的主要参数有x_{10}、x_3和x_5.

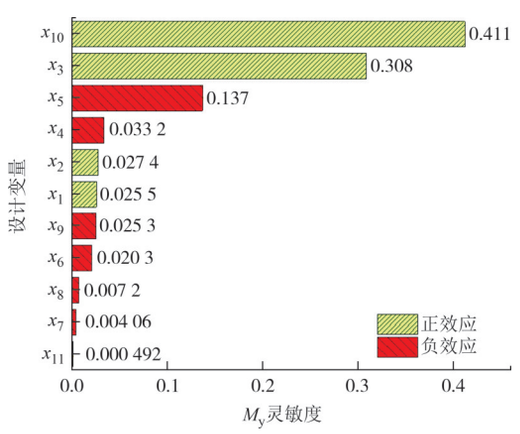


图8 座椅设计变量对M_y的灵敏度排序

Fig.8 Sensitivity ranking of seat design variables for M_y

综合2个优化目标,去掉影响都在0.01以下的设计变量,进行后续的优化方案设计.最终确定的设计变量及其水平范围如表2所示.

表2 设计变量及其水平范围

Tab.2 Design variables and their horizontal range

界限	x_1/mm	x_2/mm	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_9	x_{10}
上限	+35	+20	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5
下限	0	−20	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.5

3 响应面模型构建与多目标优化设计

3.1 响应面模型构建

本文通过径向基函数(Radial Basis Function,RBF)方法建立代理模型,在高维非线性模型拟合中依然保证足够高的精度,并选择该模型进行后续分析和优化.优化过程中将其他伤害值也作为约束条件添加到计算模型中,考虑到上、下颈部的弯矩既要考虑伸张方向,也要考虑弯曲方向,分别输出正、负两端的极值建立对应的代理模型.代理模型的拟合系数如表3所示.

表3 代理模型的拟合系数

Tab.3 The fitting coefficient of the proxy model

NIC	上颈部拉力	上颈部剪切力	上颈部伸张弯矩	下颈部拉力	下颈部剪切力	下颈部伸张弯矩
0.983	0.974	0.976	0.983	0.964	0.978	0.982

3.2 多目标优化设计

一般情况下,多目标优化问题可以写成以下数学模型:

$$\begin{cases} \min(\&\max)\, y = f(x) = \left[f_1(x), f_2(x), \cdots, f_n(x)\right] (n = 1, 2, \cdots, N) \\ \text{s.t.} \quad g(x) = \left[g_1(x), g_2(x), \cdots, g_k(x)\right] \leqslant 0 \\ \qquad h(x) = \left[h_1(x), h_2(x), \cdots, h_m(x)\right] = 0 \\ \qquad x = \left[x_1, x_2, \cdots, x_d, \cdots, x_D\right] \\ \qquad x_{d_\min} \leqslant x_d \leqslant x_{d_\max} (d = 1, 2, \cdots, D) \end{cases} \tag{1}$$

式中:x为D维设计变量;y为目标函数;N为优化目标的总数;$f_n(x)$为第n个子目标函数;$g_k(x)$为k项不等式约束条件;$h_m(x)$为m项等式约束条件,这两类约束条件共同构成可行域.$x_{d_\max}$和$x_{d_\min}$分别为设计变量的搜索上、下限.

以上文中确定的设计变量作为优化变量,以NIC和M_y作为优化响应,建立数学模型来实现多目标优化,其数学模型如下:

$$\begin{cases} \min \quad y = f_i(x_d)\left[i = 1, 2, \boldsymbol{x}_d = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_9, x_{10})\right] \\ \text{s.t.} \quad x_n^{\text{l}} \leqslant x_n \leqslant x_n^{\text{u}} \qquad (n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10) \\ \qquad h_k(x_d) \leqslant 0 \qquad (k = 1, 2, 3, 4, 5) \end{cases} \tag{2}$$

式中:$f_i(x_d)$为鞭打过程中的优化目标;$\boldsymbol{x}_d$为优化变量组成的向量;x^{u}和x^{l}是优化变量的上、下限;$h_k(x_d)$为约束变量,具体定义见表4;优化目标为NIC与M_y最小化.

表 4　优化约束条件

Tab.4　Optimization constraints

伤害值类型	约束变量	条件
上颈部剪切力	h_1/N	<340
上颈部拉力	h_2/N	<500
下颈部剪切力	h_3/N	<440
下颈部拉力	h_4/N	<375
下颈部伸张弯矩	h_5/(N·m)	<23

优化结束后,获得Pareto前沿解集示意图如图9所示,综合NIC和M_y,选取后者在最高限值边缘,NIC最低的解作为最优解,具体变量参数如表5所示.

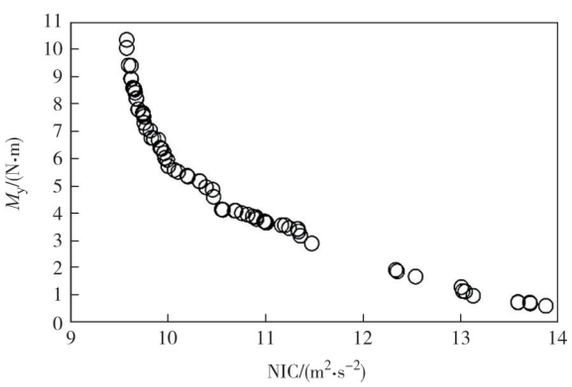


图 9　基于NIC和M_y的Pareto前沿解集示意图

Fig.9　Diagram of Pareto frontier solution set based on NIC and M_y

表 5　几何结构修改的优化方案

Tab.5　Optimization plan for geometric structure modification

	x_1/mm	x_2/mm	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_9	x_{10}
基准值	0	0	1	1	1	1	1	1	1
优化值	+29.9	−17.8	1.168	0.807	1.235	1.193	1.01	1.049	0.926

4　多目标优化设计结果分析

遗传算法收敛的优化方案中,主要的优化参数是头枕几何位置和上背部支撑位置的调整,前者向前调整29.9 mm,后者向后调整17.8 mm. 除了结构参数的调整,还须提高靠背扭转刚度、坐盆初始的转动刚度以及头枕杆的扭转刚度,且适当减小座椅整体的摩擦力. 座椅优化结果如图10所示,绿色部件为多体座椅模型优化的结构,头枕更靠近乘员头部,上背部支撑则远离乘员.

将代理模型求解出的优化方案代入本文搭建的

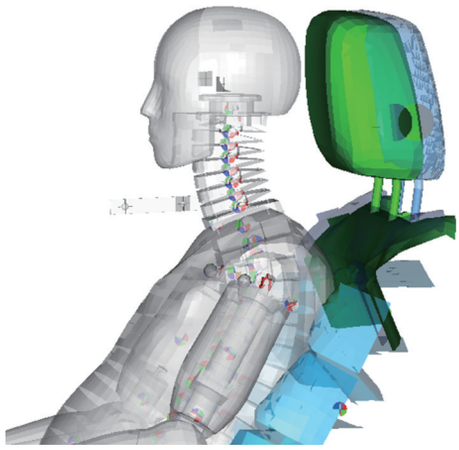


图 10　座椅优化结果

Fig.10　Seat optimization results

MADYMO多体模型中进行计算验证,可以得到两类模型的响应值对比,如表6所示. 由表6可以看出,代理模型和多体模型优化结果数值差别较小,说明代理模型具有较高的精度,仿真计算与多体座椅模型吻合程度较好. 优化前、后结果对比如表7所示,按此方案优化,预计最终可以将NIC降到9.7 $m^2 \cdot s^{-2}$,伤害值减少58.5%,其他伤害值评价满分,最终获得4.85分以上的鞭打试验总得分.

表 6　代理模型和多体模型优化结果比较

Tab.6　Comparison of optimization results between proxy model and multi-body model

模型	NIC/($m^2 \cdot s^{-2}$)	M_y/(N·m)
代理模型	9.6	10.4
多体模型	9.7	9.4
偏差/%	1.0	10.6

表 7　优化前、后结果对比

Tab.7　Comparison of results before and after optimization

优化目标	方案	伤害值	优化率/%	评分
NIC	优化前	23.4	58.5	0.6
	优化后	9.7		1.85
M_y	优化前	25.2	62.7	0.66
	优化后	9.4		1.5

NIC与假人头部与胸部加速度密切相关. 优化前、后假人头部与胸椎T_1水平加速度对比分别如图11与图12所示. 由图11可知,在调整了头枕和上颈部接触位置后,乘员头部接触时间从80 ms左右提前到50 ms. 由图12可知,假人胸椎T_1关节水平加速度幅值虽然也在70~110 ms之间大幅提升,但曲线达到峰值的时刻相对一致. 因此,图13将最优解的头

部和胸椎T_1关节的加速度进行比较,可以看到,在该方案下,头部与胸椎T_1关节的加速度曲线一致性有明显的改善.虽然T_1加速度峰值增加,但提前的头部加速度明显降低了二者之间的差值.通过保持头部和下颈部的运动一致性,实现对乘员颈部的保护.

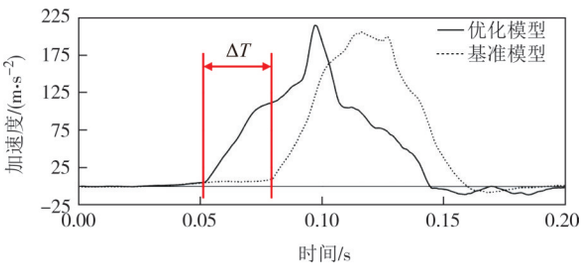


图 11 头部水平加速度曲线优化结果对比

Fig.11 Comparison of optimization results for head horizontal acceleration curves

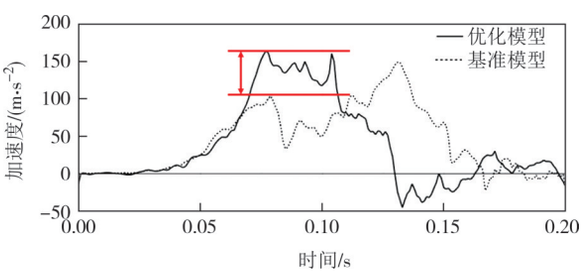


图 12 胸椎T_1关节水平加速度曲线优化结果对比

Fig.12 Comparison of optimization results for T_1 joint in thoracic vertebrae horizontal acceleration curves

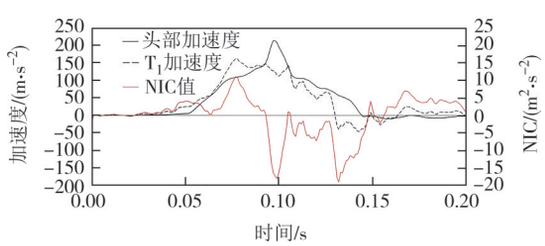


图 13 最优解NIC计算结果

Fig.13 Optimal solution NIC calculation result

优化前、后NIC曲线对比如图14所示,由图14可知,NIC明显下降,颈部损伤有所改善.

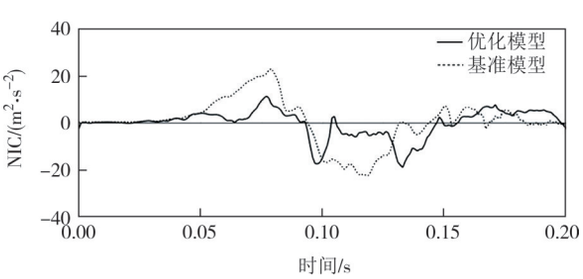


图 14 优化前、后NIC曲线对比

Fig.14 Comparison of NIC curves before and after optimization

5 结 论

从颈部损伤机理的角度分析,本文优化方案通过调整座椅靠背上交叉横梁和座椅头枕的水平位置来降低鞭打试验中假人头部和胸椎T_1关节的水平加速度差异,也就提高了乘员颈部上、下两端的相对速度和加速度,使得颈部遭受的鞭打伤害减少.

基于该座椅模型,通过向后调整座椅骨架上横梁17.8 mm、向前调整头枕29.9 mm,优化了鞭打过程中乘员上、下颈部运动一致性,使NIC减少58.5%,上颈部伸张弯矩在最高限值内,其他伤害值参数也维持在满分区间,C-NCAP鞭打试验成绩提高至4.85分.

参考文献

[1] 中国汽车技术研究中心.中国汽车安全发展报告(2017)[R].北京:社会科学文献出版社,2017.
China Automotive Technology and Research Center. China automotive safety development report(2017)[R]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2017. (in Chinese)

[2] 水野幸治.汽车碰撞安全[M].韩勇,陈一唯,译.北京:人民交通出版社股份有限公司,2016:5-8.
KOJI M. Car collision safety[M]. Translated by HAN Y, CHEN Y W. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016:5-8. (in Chinese)

[3] ÖZDEMIR M, İDER S K, GÖKLER M İ. Experimental and numerical investigation of comparability of whiplash sled test results [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering,2016,38(2):395-402.

[4] 张楚云.汽车座椅鞭打试验综述[J].内燃机与配件,2021(14):198-199.
ZHANG C Y. A review of car seats whiplash test[J]. Internal Combustion Engine & Parts,2021(14):198-199.(in Chinese)

[5] HYND D, DEPINET P, LORENZ B. The repeatability and reproducibility of the BioRID IIg in a repeatable laboratory seat based on a production car seat [J]. Traffic Injury Prevention, 2013, 14(Sup.1): S95-S104.

[6] 王海华.挥鞭伤性能验证噪声分析[J].汽车零部件,2018(6):29-33.
WANG H H. Whiplash performance validation noise analysis[J]. Automobile Parts,2018(6):29-33.(in Chinese)

[7] 朱大业,丁晓红,王神龙,等.基于支持向量机模型的复杂非线性系统试验不确定度评定方法[J].机械工程学报,2018,54(8):177-184.
ZHU D Y, DING X H, WANG S L, et al. Uncertainty evaluation method of complex nonlinear system test based on support vector machine model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018,

54(8): 177-184.(in Chinese)

[8] 阮建保,陈培,黄选钊. 论某模块前座椅骨架的整椅鞭打性能设计方法[C]//中国汽车工业学会.2021中国汽车工程学会年会论文集(4).北京: 机械工业出版社,2021:547-552.
RUAN J B, CHEN P, HUANG X Z. Study on luggage impact performance design and test method of a modular front seat [C]// China Society of Automotive Engineers. Proceedings of the 2021 China Society of Automotive Engineers Annual Conference (4). Beijing: China Machine Press, 2021: 547-552. (in Chinese)

[9] 郑志鹏. 某商用车前排驾驶员座椅鞭打性能研究及优化设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
ZHENG Z P. Research and optimization design of whipping performance of front row driver seat of a commercial vehicle[D]. Nanchang:Nanchang University,2023.(in Chinese)

[10] 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(自然科学), 2017, 31(6):8-14.
HU Y Z,HU Y Y,LIU X,et al. Analysis and optimization of seat in whiplash test based on LS-DYNA[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science),2017,31(6):8-14.(in Chinese)

[11] 王元兰,赵军,毛晨曦,等. 某座椅鞭打试验仿真与优化[J]. 汽车技术,2024(6):55-62.
WANG Y L, ZHAO J, MAO C X, et al. Simulation and optimization of a seat whipping test[J]. Automobile Technology, 2024(6):55-62.(in Chinese)

[12] 陈长亮, 董玉德, 陈超, 等. 基于仿真的鞭打试验影响因素分析[J]. 汽车工程,2019,41(12):1459-1465.
CHEN C L,DONG Y D,CHEN C,et al. Analysis on influencing factors of whiplash test based on simulation [J]. Automotive Engineering,2019,41(12):1459-1465.(in Chinese)

[13] 宁成业,杨平,胡祥玲,等. 基于C-NCAP的座椅鞭打性能研究及改进[J]. 中国汽车,2019,29(12):28-32.
NING C Y, YANG P, HU X L, et al. Improvement of seat whiplash injury based on C-NCAP [J]. China Auto, 2019, 29(12): 28-32.(in Chinese)

[14] 符大兴, 刘华官, 李登云, 等. 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.
FU D X, LIU H G, LI D Y,et al. Research and improvement of passenger car seat whipping test performance [J]. Automobile Applied Technology,2019(16): 110-114.(in Chinese)

[15] 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.
LIU G,WANG M. Optimization analysis of whiplash test based on DOE technology[J]. Automobile Applied Technology, 2019(9): 146-148.(in Chinese)

[16] 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.
DANG X M, FANG R, XIE S G,et al. Analysis and optimization of the driver seat in whiplash test[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(2): 190-195.(in Chinese)

[17] 刘俊辉, 侯李娜, 何苗, 等. 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(3). 北京: 机械工业出版社, 2019: 413-417.
LIU J H, HOU L N, HE M, et al. Seat whiplash performance study based on injury mechanism analysis[C]// China Society of Automotive Engineers. Proceedings of the 2019 Annual Conference of the China Society of Automotive Engineers (3). Beijing: China Machine Press,2019: 413-417.(in Chinese)

[18] SCANLON J M,ISAACS J,GARMAN C. Head and neck loading conditions over a decade of IIHS rear impact seat testing[C]//SAE Technical Paper Series, October 19, 2019. Warrendale: SAE International, 2019: 35-41.

[19] YAVUZ S,HIMMETOGLU S. Development of a restraint system for rear-facing car seats[J]. Machines,2023,11(12):35-40.

[20] 张爱法,李志,娄磊,等. 鞭打试验中NIC的两种典型失效模式分析[J]. 汽车实用技术,2023,48(23):145-149.
ZHANG A F,LI Z, LOU L, et al. Analysis of two typical failure modes of NIC in whiplash test [J]. Automobile Applied Technology, 2023, 48(23): 145-149.(in Chinese)