

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.007

某驾驶员座椅鞭打性能分析及优化*

党雪芒^{1,2}, 方 锐², 谢书港², 杨黎明^{1*}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;
2. 中国汽车技术研究中心, 天津 300300)

摘要: 针对某驾驶员座椅在鞭打试验中颈部伤害值过大问题, 总结C-NCAP(2015版)鞭打试验评价规程和评分原则, 研究了颈部伤害指标与假人颈部运动响应的相关性。结合影响鞭打试验性能的座椅参数分析了该座椅鞭打试验失分原因。按照C-NCAP鞭打试验具体规则, 建立了该座椅鞭打的有限元分析模型, 并与摸底试验结果进行对标验证, 验证了模型的有效性。在该模型基础上, 进行了座椅结构的仿真优化改进。研究表明, 有限元仿真模型计算的颈部伤害曲线趋势、峰值大小与试验基本一致, 所建立的仿真模型能较好地预测试验中的假人颈部运动响应; 通过优化头枕及靠背上部刚度值和减小头部和座椅头枕间的水平距离, 减小头部相对人体躯干运动, 可显著改善鞭打试验中颈部伤害, 实现设计目标。

关键词: 座椅; 鞭打; 颈部伤害; C-NCAP

中图分类号: U461.91; TH114 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)02-190-06

Analysis and optimization of the driver seat in whiplash test

DANG Xue-mang^{1,2}, FANG Rui², XIE Shu-gang², YANG Li-ming¹

(1. Faculty of Mechanical Engineering and Mechanics, NingBo University, Ningbo 315211, China;
2. China Automobile Technology and Research Center, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at dummy's large neck injury in a whiplash test for a driver seat, the C-NCAP(2015) whiplash test procedures and rating principles were summarized and the correlation between the neck injury criteria and the dummy neck movement response was studied. The reason for losing in whiplash test was analyzed combined with the parameters affecting the seat whiplash performance. Finite element model of the seat was built up and verified based on the diagnostic test results. The optimization design of the seat structure was done based on the verified model. The results indicate that the trend and peak of the neck injury curves are consistent with the test so that the built-up model can predict the dummy neck movement response. The neck injury in whiplash test can be significantly improved by optimizing the headrest and upper back stiffness and reducing the horizontal distance between the head and headrest to achieve the design target.

Key words: seat; whiplash; neck injury; C-NCAP

0 引 言

交通追尾事故在日常生活中频繁发生, 但一般不会对乘员造成致命伤害, 因此一直未引起人们足够的重视。在追尾事故中, 被追尾的前车受到一个向前的

加速度, 座椅推动乘员的躯干向前, 头部却因为惯性而滞后, 这种滞后使颈部后仰直至达到极限, 然后头部就像鞭梢一样被颈部加速甩向前方, 这就是导致人体颈部损伤的挥鞭效应^[1]。

人体颈部是一个通过大量神经、血管、气管的重要部位^[2-3], 也相对脆弱, 追尾时过度的后仰和前伸运

收稿日期: 2014-10-15

基金项目: 浙江省新苗人才计划资助项目(A00161114200)

作者简介: 党雪芒(1989-), 男, 河北石家庄人, 主要从事汽车座椅结构强度方面的研究. E-mail: dagaudi@126.com

通信联系人: 杨黎明, 男, 教授, 博士生导师. E-mail: yangliming@nbu.edu.cn

动,使得颈部承受了较大的轴向力、剪切力以及转矩等,使颈部软组织承受过度的应力而造成不同程度的损伤。虽然颈部的挥鞭伤造成乘员致命伤害可能性相对较小,但可能引起长期的颈部损伤,导致巨大的社会性支出。保险机构的研究表明,在欧洲,后碰撞中颈部损伤带来的经济损失在 50~100 亿欧元^[4],美国每年由于挥鞭伤造成的经济损失约 70 亿美元^[5]。而在澳大利亚,每年因颈部损伤导致的经济损失约 5 400 万澳元^[6]。

目前,美国、欧洲、日本、韩国等都先后出台了追尾碰撞颈部保护的评价规程。我国在 C-NCAP 2012 版中引入了座椅鞭打试验评价^[7]。经过近三年的执行,国内对座椅防鞭打性能越来越重视。根据试验状况分析,C-NCAP 2015 版规则征求意见稿中,调整和加严了鞭打试验评价^[8]:①由上、下颈部测评最恶劣的指标取代原先各个指标的简单累加;②加重了颈部伤害指标 NIC 的考核,由原来 8 分制中的 2 分,改为 4 分制中的 2 分,这使得测试得高分难度大大增加;③加大得满分的难度,所有指标不失分才能得满分;④加严了调角器失效考核,由原来的 32°调整到 19°。

本研究依据 C-NCAP 2015 版规则征求意见稿,就某驾驶员座椅鞭打试验中的问题进行分析,并建立该驾驶员座椅鞭打仿真分析模型,结合假人颈部运动响应分析,对该座椅结构进行仿真优化分析,使其鞭打得分达到目标要求。

1 某座椅鞭打试验问题分析

1.1 C-NCAP 鞭打试验规程及评价指标

C-NCAP 鞭打试验规程^[8]要求将驾驶员侧座椅及约束系统仿照原车结构,固定安装在移动滑车上,结构如图 1 所示。滑车速度以变化量 (15.64±0.8) km/h 的特定加速度波形发射,模拟后碰撞过程。座椅上放置 BioRID II 型假人,用以测量后碰撞过程中,颈部受到的伤害情况。

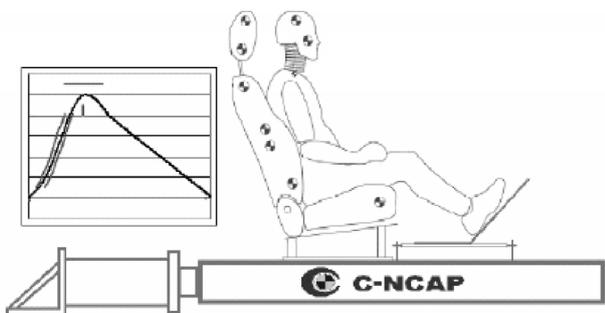


图1 低速后碰撞颈部保护试验(鞭打试验)

关于追尾碰撞颈部损伤评价指标,学术界有很多。各国 NCAP 对座椅鞭打的评价指标也略有不同。我国 C-NCAP 座椅鞭打试验评价,采用与日本较相似的评价指标体系,总体评分原则如表 1 所示,即针对颈部 7 个伤害值指标进行考核,包括颈部伤害指数、上下颈部剪切力、拉力、扭矩(颈部伤害评价指标如图 2 所示)。本研究对于座椅靠背最大动态张角、头枕干涉头部空间、座椅滑轨动态位移不满足要求的,分别给予-2分、-2分和-4分的罚分。

表1 C-NCAP(2015)鞭打试验总体评分原则

指标	高性能值	低性能值	得分	鞭打试验得分
$NIC/(m^2 \cdot s^{-2})$	8	30	0~2	
$UpperF_x+/N$	340	730		
$UpperF_z+/N$	475	1 130	0~1	
$UpperM_y/(N \cdot m)$	12	40		0~4
$LowerF_x+/N$	340	730		
$LowerF_z+/N$	257	1 480	0~1	
$LowerM_y/(N \cdot m)$	12	40		

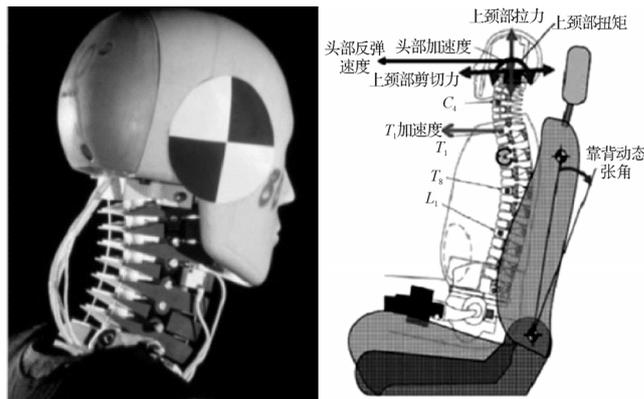


图2 颈部伤害评价指标

其中,颈部伤害指数 NIC 是根据下式由头部加速度、胸部 T_1 加速度计算得到^[8]。

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

$$NIC_{Max} = \text{Max}_{T-HRC_{End}} [NIC(t)] \quad (2)$$

式中: $NIC(t)$ —假人颈部伤害值, $A_x^{rel}(t)$ —假人头胸 X 向相对加速度, $V_x^{rel}(t)$ —假人头胸 X 向相对速度, NIC_{Max} —假人颈部伤害最大值, $T-HRC_{End}$ —假人头与头枕接触后分离时刻。

其中,相对加速度:

$$A_x^{rel}(t) = A_x^{T_1}(t) - A_x^{Heads}(t) \quad (3)$$

式中: $A_x^{T_1}(t)$ —假人胸椎 T_1 -X 向加速度,指 $A_x^{Heads}(t)$ 假人头 X 向加速度。

相对速度:

$$V_x^{rel}(t) = \int_0^t A_x^{rel}(\tau) d\tau \quad (4)$$

根据C-NCAP2012版已发布的76款座椅鞭打测试结果统计,颈部NIC伤害值往往失分较多,平均得分率仅为1.36分,因而,C-NCAP 2015版调整加重了对NIC伤害值的考核。

根据颈部NIC伤害值计算公式,NIC值由头部与胸部的相对加速度决定,体现了头部和胸部 T_1 骨之间的相对运动的剧烈程度。通过设置合理的靠背与调角器刚度,减弱座椅靠背对假人背部作用,使头枕在合理的时刻与头部作用,减小头胸加速度差值,提高座椅头枕刚度,减小颈部向后弯曲程度,都可有效改善颈部NIC伤害值,并提高座椅防挥鞭伤的整体性能。

1.2 某座椅鞭打试验问题分析

某驾驶员座椅按照C-NCAP鞭打试验规程进行摸底试验,其中静态测量中头后间隙值为63.1 mm,头枕高度为-3 mm(头枕高于假人头部3 mm),假人躯干角为 26.7° ,试验结果统计如表2所示,依据C-NCAP(2015版)鞭打试验总体评分原则,取NIC及上下颈部组最低分(上、下颈部扭矩得分)相加得到该摸底试验最终得分为2.25分。

表2 鞭打试验得分统计表

指标	伤害值	得分	C-NCAP
$NIC/(m^2 \cdot s^{-2})$	17.59	1.13	
上颈部 F_x/N	185.62	1	
上颈部 F_z/N	494.27	0.97	
上颈部 $M_x/(N \cdot m)$	34.52	0.2	2.25
下颈部 F_x/N	301.4	1	
下颈部 F_z/N	175.25	1	
下颈部 $M_x/(N \cdot m)$	14.25	0.92	

由表2中可以看出,颈部NIC值、颈部载荷和扭矩均有丢分,其中颈部NIC值和上颈部扭矩伤害值失分较多。

结合试验过程中假人颈部运动响应,以及试验后座椅的检查,分析该驾驶员座椅鞭打试验失分原因如下:

(1) 试验中,胸部 T_1 加速度在35 ms时开始上升,并在61.3 ms时迅速达到峰值,而假人头部与头枕在88.7 ms才发生接触,即 T_1 加速度达到峰值时头部仍然未与头枕接触,导致头胸部的相对运动差值较大。说明,该座椅靠背刚度与调角器刚度匹配不合理,椅背刚度较大,假人背部不容易向后移动,且椅背对假人的反作用力较强,使得胸部 T_1 加速度迅速上升并达到峰值。同时,头后间隙值设计不合理,头部与头枕接触时刻偏晚,未能有效减小头胸相对加速度,头胸部相对运动激烈,导致NIC伤害值较大,曲线如图3所示。

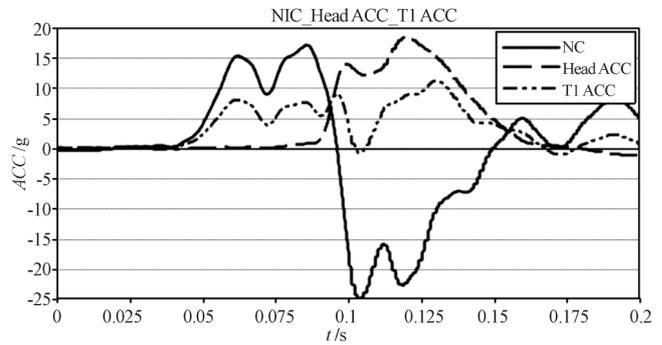


图3 头部加速度、胸部 T_1 加速度、颈部NIC曲线

(2) 试验中,座椅靠背动态张角在110 ms时达到最大值,而上颈部扭矩在123 ms时才达到峰值,说明当椅背停止运动之后,头与头枕依然存在向后运动。说明头枕或靠背上部刚度不足,无法有效阻止头部的过度后移,导致假人颈部过度弯曲,从而上颈部扭矩值偏大。根据试验后座椅检查发现座椅背管与背搭接板件前后缝隙差值较大(座椅背管与背搭接板连接处变形情况如图4所示),分析在试验过程中,该两部件间有相对转动现象,从而带动靠背上部和头枕整体向后运动,引起头部后移量偏大,导致颈部拉力、扭矩伤害值较大。



图4 座椅背管与背搭接板连接处变形情况

(3) 试验中,由于假人对座椅的作用,使得座椅坐盆下沉,靠背角度增大。当假人头部与头枕接触时,头枕高度将低于假人头部,此时头枕对假人头部支撑作用不足,引起假人颈部过度弯曲,颈部伤害值过大。

2 座椅鞭打仿真分析及优化

2.1 仿真模型的建立

本研究以上述驾驶员座椅为分析对象,所建立的座椅鞭打仿真分析模型如图5所示。该次分析采用德国Dynamore公司开发的BIORID II型假人有限元模型。BIORID II假人基于Hybrid III假人开发,专用于



图5 座椅鞭打模型

汽车鞭打试验仿真分析,其头部、手臂和下肢仍采用 Hybrid III 型假人部件,由铰链连接其脊椎各部件,为模拟假人颈部动力学响应,系统装配了前、后钢索来模拟人体颈部肌肉。

由于该分析是零部件级分析,与整车级相比,对模型精度要求更高,管线、螺栓、弹簧、调角器等均需完全建模。座椅骨架钣金件用壳单元模拟,网格平均尺寸 5 mm。头枕、靠背、座垫发泡采用四面体单元模拟,为节省计算时间,并防止负体积情况发生,实体单元平均大小为 15 mm。座椅骨架上的横梁直径小于 6 mm 的,用 Beam 单元模拟,并赋予相应的直径尺寸;直径大于 6 mm 的横梁用实体模拟。座椅电机简化为刚体,赋予刚体质量和惯量。根据座椅实际的安装方式及运动关系连接座椅模型,座椅骨架有限元模型如图 6 所示。整椅模型共计 154 379 个单元。



图6 座椅骨架模型

本研究对座椅骨架材料进行静态材料力学试验,获得应力-应变关系曲线,采用 LS-DYNA 的 24 号材料模拟。并对座椅发泡材料进行准静态压缩试验,进行材料对标后,输入到模型中,采用 LS-DYNA 的 57 号材料模拟。调角器刚度曲线由试验获得。

2.2 仿真模型与试验对标分析

本研究依据摸底试验测量的定位数据,将假人姿态和座椅位置调整至与试验状态一致。进行鞭打仿真分析前,需先进行预计算来消除初始干涉,假人与发泡干涉示意图如图 7 所示。

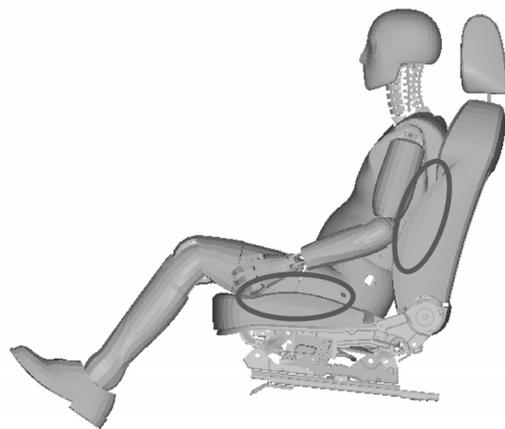


图7 假人与发泡干涉示意图

可采用两种方法:

(1) 采用前处理软件挤压发泡,使得发泡与假人臀部及背部贴合。该方法只得到假人挤压发泡后发泡的形状,该发泡外形与假人臀部和背部形状一致,与实际相差较大。

(2) 采用 Ls-dyna 进行预计算消除初始干涉。预计算后可得到假人挤压后发泡的形状,发泡表面平滑,同时得到发泡内实体单元初始应力应变,与实际更接近。

本研究采用第(2)种方法来消除初始干涉,并将预计算得到的实体应力应变代入到仿真模型中作为初始条件。

仿真模型中假人定位信息与摸底试验静态测量对比如表 3 所示。

颈部载荷和扭矩仿真与试验伤害曲线对比如图 8 所示。从图 8 中可以看出,仿真模型计算结果与试验基本一致(包括曲线趋势、峰值出现时刻及大小)。说明本研究所建立的仿真模型能够预测鞭打试验中假

表3 试验与CAE静态测量尺寸对比

	躯干角度/deg	头后间隙/mm	头枕高度/mm	H点X坐标/mm	H点Z坐标/mm
试验	26.7	63.1	-3.0	1 342.3	322.5
CAE	26.5	61.8	1.2	1 340.4	319.4

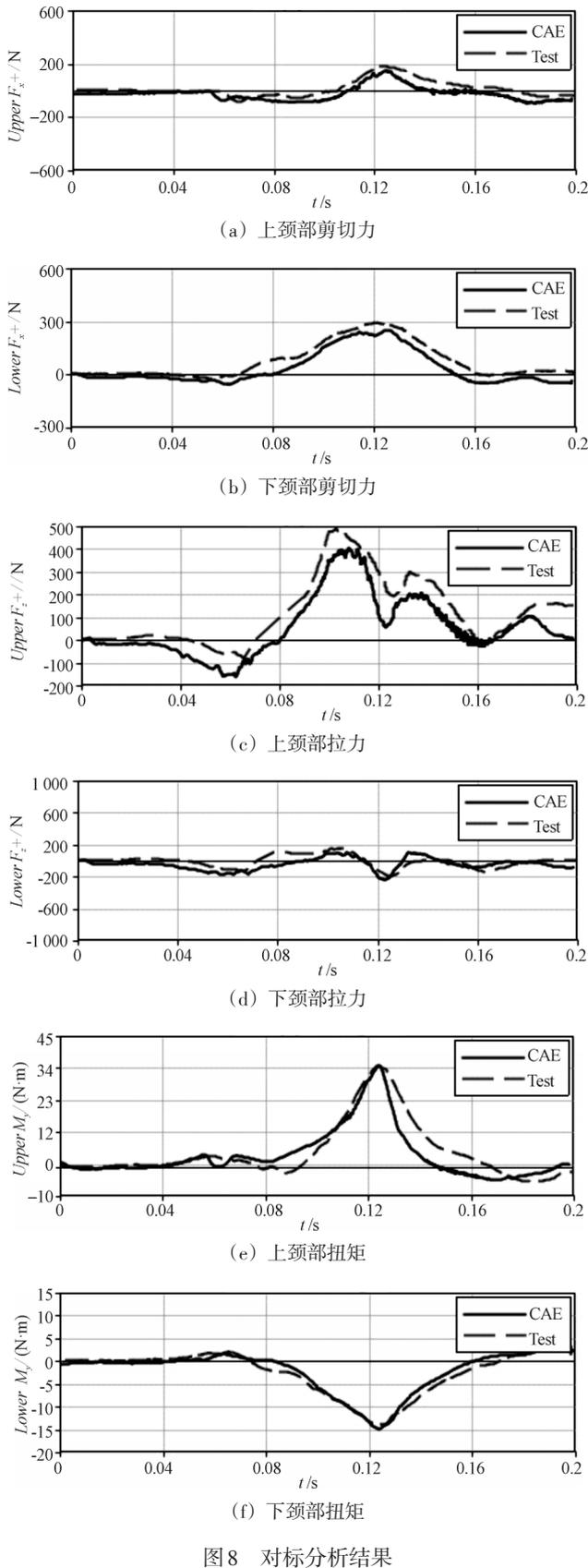


图8 对标分析结果

人颈部运动响应,可用于指导下一步座椅结构优化设计。

2.3 仿真优化分析及结果

已有研究表明^[9-11],座椅各参数与假人颈部伤害

并不是简单地单一对应,而是多参数对应多目标的综合匹配系统。通过适当增大调角器刚度值,减弱靠背刚度,减弱座椅对假人胸部作用,缩短头部与头枕接触时间,可减小NIC伤害值;通过适当减小头后间隙,增大头枕刚度,减小头胸加速度差值,可降低NIC伤害值,避免假人颈部过度弯曲,可减小颈部扭矩和载荷伤害值。

通过上述方法均可不同程度地改善座椅鞭打性能,考虑到成本、设变难易等,针对上述驾驶员座椅,根据其鞭打试验失分原因分析,重点考虑调整头后间隙值和头枕刚度,以改善其鞭打得分。

本研究针对鞭打试验中NIC及上颈部扭矩失分严重情况,以对标后模型为基础,结合该座椅防挥鞭伤性能目标值和仿真计算结果并分析,得到该座椅结构优化方案如下:

- (1) 调整头枕杆,将假人头后间隙值由63 mm减小为35 mm,使假人头部与头枕接触时刻提前(头后间隙更改前示意图如图9(a)所示);
- (2) 调整头枕杆锁止位,使头枕高度由-3 mm调整为-15 mm(头后间隙更改后示意图如图9(b)所示);
- (3) 头枕杆直径由10 mm变更为12 mm,增大头枕杆强度,避免假人颈部过度弯曲,上颈部扭矩值过大。
- (4) 背管厚度由1.4 mm变更为1.8 mm,并将背管下端延长20 cm,在末端追加焊点,加强靠背上部刚

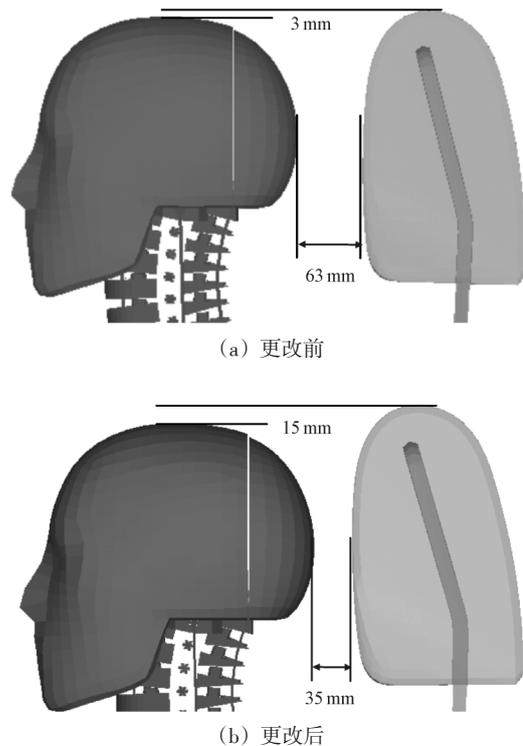


图9 头后间隙更改示意图

度,减小上颈部扭矩伤害值(背管更改示意图如图10所示)。

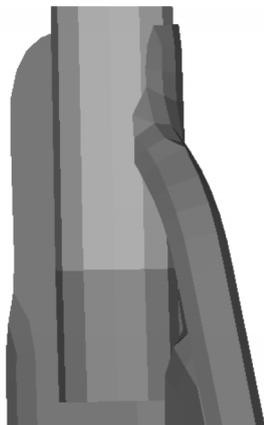


图10 背管更改示意图

仿真优化计算结果如表4所示。

表4 仿真优化结果统计

指标	CAE	得分	C-NCAP
$NIC/(m^2 \cdot s^{-2})$	12.02	1.63	
上颈部 F_x+N	7.59	1	
上颈部 F_z+N	157.55	1	
上颈部 $M_x/(N \cdot m)$	14.69	0.9	3.53
下颈部 F_x+N	78.34	1	
下颈部 F_z+N	12.5	1	
下颈部 $M_x/(N \cdot m)$	3.97	1	

优化后,颈部NIC伤害值、上颈部扭矩显著改善,鞭打得分由2.25分提高至3.53分,达到项目设定目标3.3分要求。

3 结束语

本研究依据C-NCAP 2015版规则征求意见稿,就某驾驶员座椅鞭打试验中的问题进行了分析,结合后碰撞中乘员颈部运动响应及伤害值评价指标,分析了鞭打试验中假人颈部伤害值过大的原因。笔者建立了该驾驶员座椅的有限元仿真模型,并与试验结果

进行了对标验证。在此基础上,笔者对该座椅在鞭打试验中出现的问题,结合仿真计算结果并分析,提出了有针对性的优化方案,实现了该座椅鞭打性能的改进优化设计。

研究表明,在防挥鞭伤安全座椅开发中,通过采用有限元分析方法对座椅结构进行优化设计,可以有效地缩短开发周期和节省试验费用。本研究相关研究方法和分析计算结果可为座椅防挥鞭伤保护设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] 刘志新,万仁君,李静,等. 追尾碰撞中颈部挥鞭伤害试验的重复性[J]. 吉林大学学报,2011,41(S1):17-20.
- [2] 赵定麟. 现在颈椎病学[M]. 北京:人民军医出版社,2001.
- [3] 陈尔瑜,张传森,党瑞山. 人体系统解剖学实物图谱[M]. 上海:第二军医大学出版社,2005.
- [4] ROMILLY D P, SKIPPER C S. Seat Structural Design Choices and the Effect on Occupant Injury Potential in Rear End Collisions[C]. American: SAE Paper 2005: 113-121.
- [5] O'NEIL B. Head restraints—the neglected countermeasure[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2000, 32(2): 143-150.
- [6] RYAN G, GIBSON T. Field Studies of Whiplash in Australia, in *Frontiers in whiplash trauma: Clinical & Biomechanical*[M]. Amsterdam: ISO Press, 2000.
- [7] 娄磊,杨运生,张晓龙. 鞭打试验在欧洲、日本与中国[J]. 交通标准化,2010(18):37-41.
- [8] 中国汽车技术研究中心. C-NCAP管理规则[M]. 天津:中国汽车技术研究中心,2015.
- [9] 王鹏翔,陈超卓,徐立伟,等. 防挥鞭伤安全座椅的初步研究[J]. 汽车工程,2009,31(12):1149-1152.
- [10] 金景旭,宋学伟,黄炫,等. 汽车座椅头枕和调角器匹配对挥鞭伤影响研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2013(10):1280-1286.
- [11] 王淑芬,胡文文,李玉光,等. 汽车座椅骨架的拓扑优化研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1149-1153.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

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 Xue-mang, FANG Rui, XIE Shu-gang, et al. Analysis and optimization of the driver seat in whiplash test[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2015, 32(2): 190-195.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>