

Research on the Protective Effect of New Front Safety Seat in the Car Frontal Collision and Emergency Braking

Ge Ruhai, Hong Liang

Jiangsu University, School of Automobile and Traffic Engineering, Zhenjiang, China, 212013

E-mail: 819996061@qq.com

Abstract:

Background: Rear-row occupants heads easily collide with front seat headrest or seatback in the frontal collision and emergency braking, because car rear row space is relatively small, causing occupants injury.

Objective: A assumption of new automotive front safety seat was putted forward, trying to reduce belted and unbelted rear-row female occupants injury in the car frontal collision and emergency braking respectively.

Method and material: Based on the geometry and feature parameters of one car model, MADYMO is used to establish the car rear-row restraint system simulation model, which was verified by the test.

Results: The simulation results show that compared to traditional front seats, when the rotational stiffness of the reed switches of new seats is $10 \text{ N} \cdot \text{m} / ^\circ$, in the frontal collision, HIC15 (head injury criterion) and M_{yoc} (the peak extention torque of occipital bone) decreases 22.83% and 23.38%; in the emergency braking, HIC15, T3MS(the thorax injury value), F_{left} and F_{right} (the peak force of left and right femur) decreases 51.36%, 22.04%, 10.55% and 16.07% respectively.

Conclusions: That is to say, new front safety seats can effectively reduce rear-row female occupants injury, enhancing safety.

Keywords: Frontal collision, Emergency braking, New front safety seat, Rear-row female occupant, Protective effect

在轿车正面碰撞与紧急制动中新型前排安全座椅的保护效果研究

葛如海, 洪亮

江苏大学 汽车与交通工程学院, 镇江, 中国, 212013

E-mail: 819996061@qq.com

摘要

研究背景: 由于轿车后排空间相对狭小, 在正面碰撞或紧急制动中, 后排乘员头部易与前排座椅头枕或靠背发生二次碰撞, 造成后排乘员伤害。

目的: 提出了一种新型汽车前排安全座椅的设想, 拟在轿车正面碰撞与紧急制动中, 分别减轻佩戴三点式安全带与未佩戴安全带的后排女性乘员受到的伤害。

方法和材料: 以某型轿车相关尺寸与性能参数为依据, 采用碰撞仿真软件 MADYMO 建立了后排乘员约束系统仿真模型, 并经试验验证。

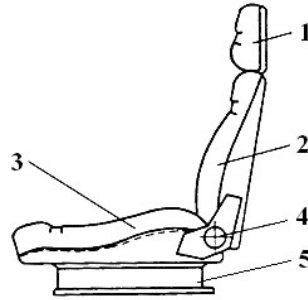
结果: 仿真结果表明, 相比于传统前排座椅, 当新型座椅的转簧转动刚度为 $10 \text{ N} \cdot \text{m} / ^\circ$ 时, 在正面碰撞中, 女性乘员的头部伤害指标 HIC15 与枕骨伸张弯矩峰值 M_{yoc} 分别降低了 22.83%、23.38%; 在紧急制动中, HIC15、胸部伤害值 T3MS 以及左、右大腿力峰值 F_{left} 、 F_{right} 分别降低了 51.36%、22.04%、10.55%与 16.07%。

结论: 因此, 新型前排安全座椅能够有效降低后排女性乘员伤害, 提高后排乘员安全性。

关键字: 正面碰撞 紧急制动 新型前排安全座椅 后排女性乘员 保护效果

1 引言

汽车座椅是汽车内室系统的必要组成部分，同时也是汽车乘员约束系统最主要的部件之一。座椅主要由坐垫、靠背、头枕、靠背倾角调节器以及座椅连接件构成，如图 1 所示。其坐垫约束了乘员的向下运动，靠背约束了乘员的向后运动，头枕约束了乘员头部的向后运动，靠背倾角调节器用于调节靠背倾角，座椅连接件用于连接汽车地板^[1]。



1、头枕；2、靠背；3、坐垫；4、靠背倾角调节器；5、座椅连接件

Figure 1. The composition of automobile seat

图 1. 汽车座椅的构成

座椅安全性分为被动安全性与主动安全性。被动安全性是指在发生事故时，座椅能够最大限度地减轻乘员伤害的能力。

2 正面碰撞中轿车座椅被动安全性的研究现状

文献[2]提出了移动式安全座椅的概念。在正面碰撞中，该座椅可发生相应的变形，起到防止乘员“下潜”、消除安全带与乘员间初始间隙以及降低胸部加速度的作用。仿真结果显示：相比于传统座椅，移动式座椅能够使乘员的头部伤害值降低 37.5%，上颈部伸展弯矩、剪切力与拉伸力分别降低 24.0%、25.8%及 35.0%。

文献[3]利用碰撞仿真软件 MADYMO，研究了轿车发生正面碰撞或紧急制动时，增大驾驶员座椅坐垫与地板间的夹角对驾驶员伤害的影响。仿真分析获得：在正面碰撞中将坐垫与地板间的夹角由 10°增大至 25°，可使驾驶员头部伤害指标 HIC36 下降 21.4%，胸部 3ms 合成加速度 T3MS 下降 16.6%，而髋部合成加速度仅仅增加 8.2%。

文献[4]收集了有关驾乘人员最常使用的前排座椅的前后位置信息，并且分析了在正面碰撞事故中前排座椅前后位置与女性乘员、男性乘员伤害的关系。研究显示：座椅位置偏后的女性乘员与座椅位置靠前的男性乘员在碰撞中受到伤害的几率较大。

文献[5]利用死尸假人研究了在正面碰撞中，整体向后倾斜的座椅对乘员伤害的影响，如图 1.14 所示。研究表明：相比于普通座椅，倾斜的座椅承受了绝大部分的碰撞能量，并将能量传递给人体不易受伤的髋部。此外倾斜的座椅能够避免乘员的“下潜”现象，减少颈部的向前弯曲，最终有效降低乘员伤害。

文献[6]研究指出在高速正面碰撞中，若前排座椅靠背的屈服强度不足，则未佩戴安全带的后排乘员会击溃前排靠背，导致后排乘员与靠背一起撞击受安全带与安全气囊约束的前排乘员，使前排乘员的伤害率与死亡率大幅增加。

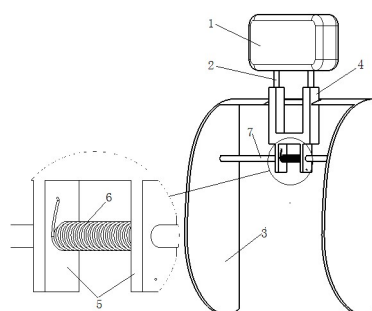
戴姆勒-克莱斯勒、宝马汽车公司等研制出智能座椅^[7-8]。当正面碰撞不可避免时，该座椅会在碰撞发生前向后纵向移动，使驾驶员远离仪表板与转向系统，有效减轻驾驶员头部、颈部与胸部的伤害。

上述研究表明：当前正面碰撞中轿车座椅被动安全性的研究主要集中在座椅对自身乘员的保护上，并未涉及对非自身乘员的保护。但轿车座椅会对非自身乘员造成伤害，如因轿车后排空间相对狭小，在正面碰撞中，

后排乘员头部易撞击到前排座椅头枕或靠背上，导致后排乘员伤害。为此，本文提出了新型前排安全座椅的设计（专利号：201410044747.7）。

3 新型前排安全座椅的组成与工作原理

新型前排安全座椅主要由座椅头枕、头枕导杆、靠背骨架、U 形头枕导套、纵板、转簧、横杆等组成，如图 2 所示。最上端为头枕，头枕下方为头枕导杆、U 型导套；U 型导套包括两端的竖直杆和中间的水平杆；头枕导杆可插入两端的竖直杆中，用于调节头枕高度；U 型导套的水平杆下方固定有两纵板；靠背骨架中的一横杆间隙穿过纵板中的圆孔，从而纵板与横杆形成转动链接，纵板可绕横杆转动；纵板间设有一转簧，转簧过盈套装于横杆上，转簧两端分别卡在纵板的小孔中。



1、头枕；2、头枕导杆；3、靠背骨架；4、U 形导套；5、纵板；6、转簧；7、横杆

Figure 2. The composition of new front safety seat

图 2. 新型前排安全座椅的组成

新型前排安全座椅的工作原理是：在轿车正面碰撞中，后排乘员头部在惯性力的作用下撞击该座椅头枕时，转簧的两端在纵板的压力作用下发生扭转弹性变形，这样纵板就绕靠背骨架中的横杆向前转动一定角度，同时 U 型导套、导杆与头枕向前转动一定角度，从而吸收碰撞能量，有效减轻后排乘员受到的伤害。当碰撞结束后，后排乘员在安全带的拉力作用下向后位移，纵板失去后排乘员头部撞击力的作用，不再给转簧施加压力；此时转簧的两端恢复原有形状，反作用于纵板，使其绕横杆恢复原始状态，同时 U 型导套、导杆与头枕恢复原来位置，正常保护前排乘员头、颈部安全。

4 仿真分析模型的建立及验证

为分析新型前排安全座椅对正面碰撞中后排女性乘员的保护效果，以某型轿车乘员区域相关尺寸及性能参数为依据，采用碰撞仿真软件 MADYMO 建立了后排乘员约束系统仿真模型。具体步骤为：

①建立乘员车内环境模型，主要包括地板刚体模型、前排与后排座椅有限元模型。此时两前排座椅靠背与头枕导杆，导杆与头枕间的链接方式均为固定连接。

②根据 2012 版 C-NCAP 中正面 100%重叠刚性壁障碰撞（正面碰撞）试验的相关规定，调入 MADYMO 软件中自带的 Hybrid III 第 5 百分位女性椭圆假人模型，并将其定位在后排左侧座椅上；

③建立三点式安全带混合模型，主要包括安全带卷收器、高度调节器、固定锚点以及带扣点；并对女性假人模型进行安全带预定位；在安全带混合模型中，与假人身体相接触的部分为有限元模型，不接触的部分为刚体模型。

④定义假人肩部、盆骨与后排座椅靠背的接触，盆骨、大腿与后排座椅坐垫的接触，头部与前排座椅头枕、靠背的接触，膝盖、小腿、双脚与前排座椅靠背的接触，双脚与地板的接触，胸部、肩部与安全带肩带的接触以及腹部、盆骨与腰带的接触；

⑤基于试验测得的数据，定义座椅模型各部件的刚度以及各运动铰的刚度；

⑥由于碰撞试验中，B 柱的变形量较小，B 柱加速度能够真实反映出作用于假人身上的加速度，因此将实际 50km/h 正面碰撞试验中车体左侧 B 柱减加速度反向施加至女性假人模型，进行仿真计算。

至此仿真模型已建立完成，如图 3 所示。

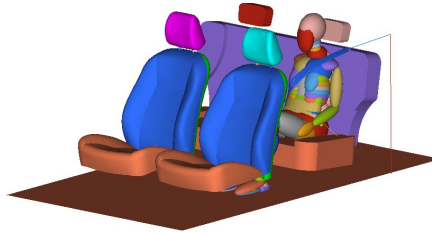
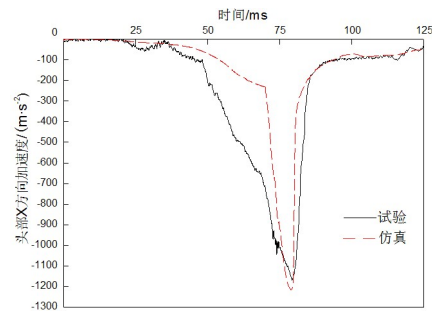


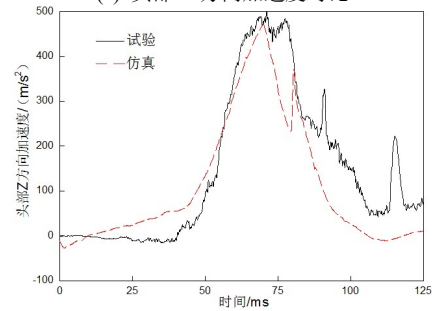
Figure 3. The simulation model of rear occupant restraint system

图 3. 后排乘员约束系统仿真模型

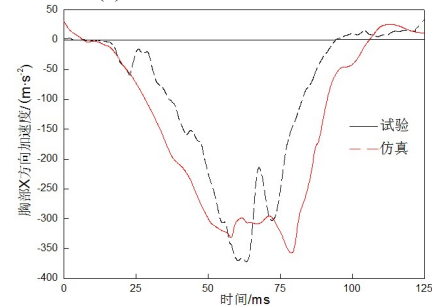
正面碰撞试验中假人伤害响应曲线与仿真模型中假人伤害响应曲线的对比见图 4 所示。



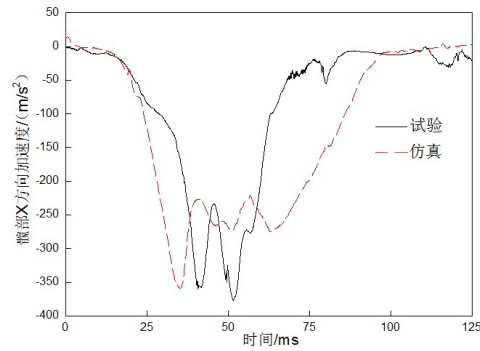
(a) 头部 X 方向加速度对比



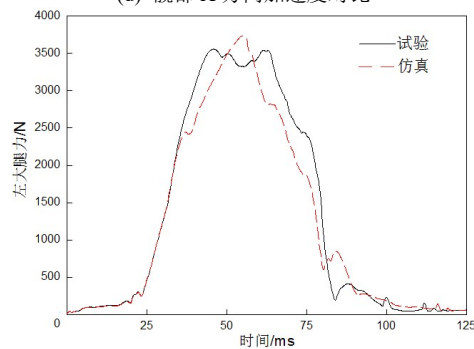
(b) 头部 Z 方向加速度对比



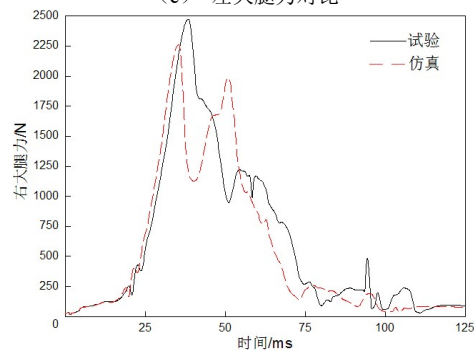
(c) 胸部 X 方向加速度对比



(d) 腰部 X 方向加速度对比



(e) 左大腿力对比



(f) 右大腿力对比

Figure 4. The comparison of rear dummy injury response curves in test and simulation

图 4. 后排假人试验伤害响应曲线与仿真曲线的对比

图 4 显示仿真得到的假人各伤害响应曲线与试验曲线拟合度较好，因此可将此仿真模型作为基本模型进行深入研究，仿真值可信度较高。

5 正面碰撞中新型前排安全座椅对后排女性乘员的保护效果分析

基于新型前排安全座椅的工作原理，将上述模型中左侧前排座椅靠背与头枕导杆间的固定链接改为转动铰链接，转动铰位于图 2 中转簧的位置，以模拟新型安全座椅中转簧的作用。并分析 4 种转簧（转动铰）转动刚度对后排女性乘员的保护效果，结果如表 1 及图 5 所示。

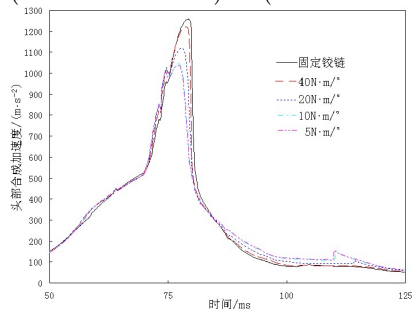
Table 1. The influence of four rotational stiffness of reed switch on rear female occupant injury in the frontal collision

表 1. 在正面碰撞中 4 种转簧转动刚度对后排女性乘员的保护效果

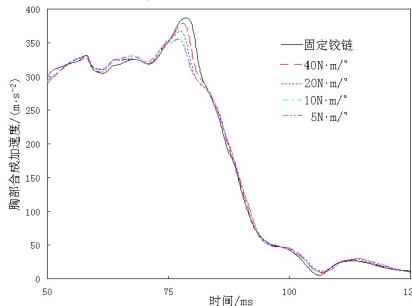
伤害指标	固定链接	新型前排安全座椅中转簧的转动刚度			
		40N·m/°	20 N·m /°	10 N·m /°	5 N·m /°
头部伤害指标 HIC15	948.07	910.28	806.32	716.71	707.39
胸部 3ms 合成加速度 T3MS/ (m/s ²)	376.20	362.73	355.72	350.59	349.82
胸部压缩量峰值 Thpc/mm	30.66	30.63	30.45	30.51	30.54
颈部枕骨伸张弯矩峰值 $M_{yoc}/(N\cdot m)$	36.78	35.57	32.42	28.55	28.05
髋部合成加速度峰值 $a/(m/s^2)$	373.93	384.13	385.32	377.81	374.73
组合伤害概率 $P_{combine}$	15.68%	13.85%	10.32%	8.11%	7.93%

由表 1 分析可知, 依次减小转簧的转动刚度, 可以降低乘员头部、颈部与胸部的损伤值, 且胸部压缩量与髋部合成加速度变化不大。当转动刚度为 10 N·m /°时, 继续减小转动刚度已不能显著改善头部、颈部与胸部损伤值, 并且太小的刚度值容易引起汽车正常行驶中头枕误动, 不利于其自身乘员的乘坐舒适性。因此确定前排安全座椅转簧的最佳转动刚度为 10 N·m /°, 此时相比于原座椅, 后排女性乘员的 HIC15, M_{yoc} , T3MS 及组合损伤概率 $P_{combine}$ 分别由 948.07 降至 716.71, 36.78 N·m 降至 28.55 N·m, 376.20 m/s² 降至 350.59 m/s², 15.68% 降至 8.11%, 各自的下降幅度为 24.4%, 22.38%, 6.8%及 48.28%。 $P_{combine}$ 表示乘员受 AIS (简略损伤等级) 4 级以上重伤 (危及生命) 的概率^[9], 其计算公式为:

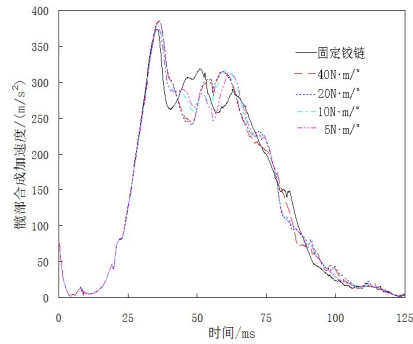
$$P_{combine} = \left(1 + e^{(5.02 - 0.00351 \times HIC15)}\right)^{-1} + \left(1 + e^{(5.55 - 0.0693 \times T3MS / 9.81)}\right)^{-1} - \left(1 + e^{(5.02 - 0.00351 \times HIC15)}\right)^{-1} \times \left(1 + e^{(5.55 - 0.0693 \times T3MS / 9.81)}\right)^{-1}$$



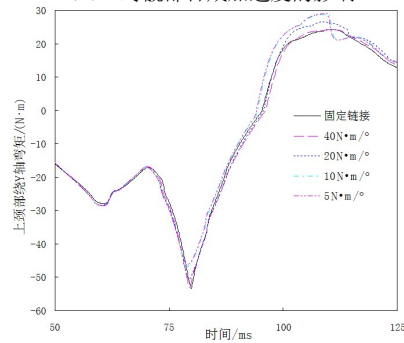
(a) 对头部合成加速度的影响



(b) 对胸部合成加速度的影响



(c) 对髋部合成加速度的影响

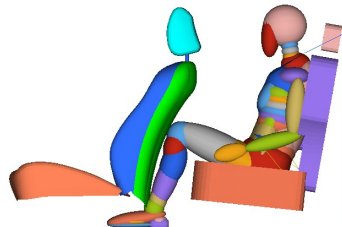


(d) 对上颈部绕 Y 轴弯矩的影响

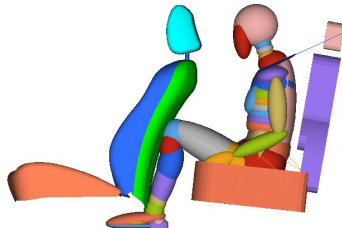
Figure 5. The influence of new front safety seat on rear female occupant injury

图 5. 新型前排安全座椅对后排女性乘员伤害的影响

采用该机构时女性乘员的运动姿态如图 6 所示，当女性乘员头部撞击前排头枕时，头枕导杆绕转动铰向前转动一定角度，头枕随之向前转动，靠背相对静止。之后头枕导杆、头枕恢复原来位置，正常保护前排乘员头、颈部。



(a) 0ms



(b) 50 ms

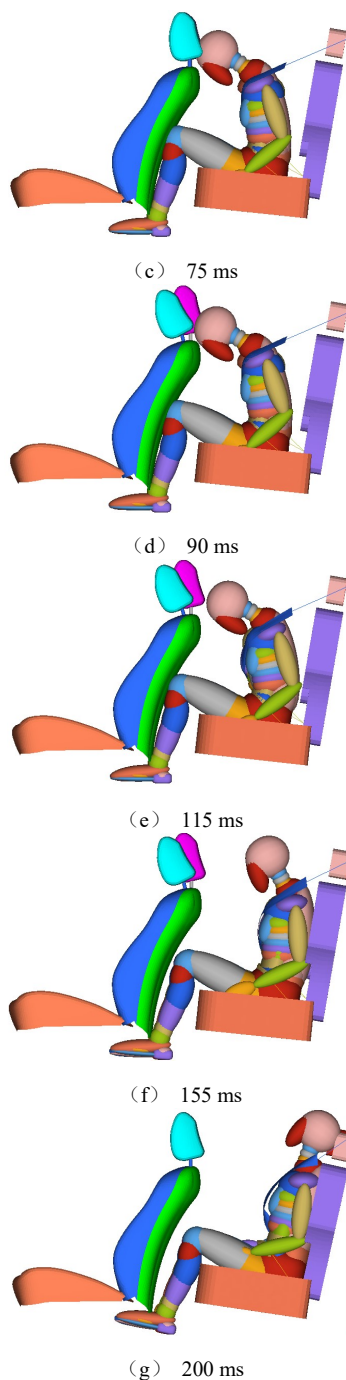


Figure 6. Movement state of female occupant and headrest

图 6. 女性乘员及头枕的运动姿态

6 紧急制动中新型前排安全座椅对后排女性乘员的保护效果分析

在我国，后排乘员安全带佩戴率相当低，因此在轿车紧急制动过程中，未佩戴安全带的后排乘员头部易与前排座椅发生二次碰撞，造成伤害。以下分析在紧急制动中，新型前排安全座椅对未佩戴安全带的后排女性乘员的保护效果。

正面碰撞工况与紧急制动工况存在相似性，因此本文在原有正面碰撞后排约束系统仿真模型的基础上，建立了紧急制动后排约束系统仿真模型。两者最大的区别在于反向施加在后排假人身上的减速度波形不同，因此需用紧急制动的减速度波形代替正面碰撞中 B 柱减速度波形。由于未能得到研究车型的紧急制动减速度波形，所以使用吉林工业大学田万仓得到的某轻型越野车的紧急制动减速度波形（制动初速度为 45km/h）代替，如图 7 所示。将该紧急制动减速度波形通过 LOAD.SYSTEM_ACC 命令反向施加到后排女性假人身上，以模拟紧急制动中后排乘员的运动。

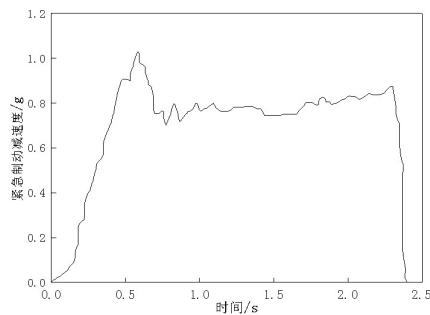


Figure7. The acceleration-time curve of emergency brake
图 7. 紧急制动减速度曲线

新型前排安全座椅的 4 种转簧（转动铰）转动刚度对后排女性乘员的保护效果见表 2 所示。

Table21. The influence of four rotational stiffness of reed switch on rear female occupant injury in the emergency braking
表 2. 在紧急制动中 4 种转簧转动刚度对后排女性乘员的保护效果

伤害指标	固定链接	新型前排安全座椅中转簧的转动刚度			
		40N·m /°	20 N·m /°	10 N·m /°	5 N·m /°
HIC15	46.67	41.31	29.54	22.70	22.26
T3MS/ (m/s ²)	130.08	111.10	109.59	101.41	100.74
胸部压缩量 Thpc/mm	2.09	2.00	2.05	1.87	1.95
髋部合成加速度峰值 $a/$ (m/s ²)	77.33	77.52	77.87	75.86	75.86
颈部枕骨伸张弯矩峰值 $M_{yoc}/$ (N·m)	0.55	0.16	2.31	2.76	1.71
左大腿力峰值 $F_{left}/$ N	1101.67	1088.24	1055.74	985.47	980.51
右大腿力峰值 $F_{right}/$ N	1117.40	1101.18	1054.69	937.83	929.64

有表 2 可知，随着新型安全座椅中转簧转动刚度的减少，女性乘员头部伤害值 HIC15，胸部 3ms 合成加速度 T3MS，以及左、右大腿力峰值呈明显下降趋势，此外其他伤害值变化不大。同上，当转簧的转动刚度为 10 N·m /°时，继续减小转动刚度已不能显著改善女性乘员的损伤值。此时，相比于原座椅， HIC15 由 46.67 降至 22.70，降低了 51.36%， T3MS 由 130.08 m/s² 降至 101.41 m/s²，降低了 22.04%，左、右大腿力峰值分别由 1101.67N 降至 985.47N，由 1117.40N 降至 937.83N，下降幅度各为 10.55%、16.07%。

7 结论

（1）本研究表明相比于普通座椅，在轿车正面碰撞或紧急制动中，新型前排安全座椅能够显著减少后排女性乘员的伤害。

(2) 在正面碰撞中, 随着新型前排安全座椅转簧转动刚度的减小, 后排女性乘员头部、胸部与颈部伤害值逐渐降低, 其它部位伤害值变化不大; 在紧急制动中, 头部、颈部、胸部以及腿部伤害值逐渐降低。

(3) 综合考虑, 最终确定新型前排安全座椅转簧的最佳转动刚度为 $10 \text{ N} \cdot \text{m} / ^\circ$ 。

参考文献 (References)

- [1] Ge Ruhai, Liu Zhiqiang, Chen Xiaodong. Automobile Safety Engineering[M]. Beijing: Chemical industry press, 2005.
葛如海, 刘志强, 陈晓东. 汽车安全工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [2] Xiao Z, Jac Wismans, Jiang X Q, et al. A Study on the Occupant Protection Performance of Moving Safety Seats[J]. Automotive Engineering, 2011,33(7): 603-607.
肖志, Wismans J, 蒋小晴, 等. 移动式安全座椅的乘员保护性能的研究[J]. 汽车工程, 2011,33(7): 603-607.
- [3] Ge R H, Zang L and Wang H T, et al. Analysis on the influence for the protection on frontal impact by vehicle seat cushion obliquity[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(11): 230-234.
葛如海, 臧绫, 王浩涛, 等. 汽车座椅坐垫倾角对正面碰撞乘员保护影响分析[J]. 机械工程学报, 2009, 45(11): 230-234.
- [4] Hill J D, Boyle L N. The safety implications of vehicle seat adjustments[J]. Journal of Safety Research, 2006, 37: 187-193.
- [5] Wiechel J, Bolte J. Response of reclined post mortem human subjects to frontal impact[C]. SAE, Paper Number: 2006-01-0674.
- [6] Mayrose J, Blatt A, Roberts D, et al. The effect of unrestrained rear-seat passengers on driver mortality[J]. Journal of Trauma-Injury Infection & Critical Care, 2006, 61(5): pp 1249-1254.
- [7] Schöneburg R, Baumann K H. PRE-SAFE - The next step in the enhancement of vehicle safety[C]. The 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, May 19-22, 2003, Nagoya, Japan: Paper Number 03-0410.
- [8] Pack R, Koopmann J and Yu H, et al. Pre-crash sensing countermeasures and benefits[C]. SAE, Paper Number: 2005-02-02.
- [9] Newstead S, Cameron M. Correlation of results from the new car assessment program with real crash data[R]. Victoria, Australia: MUARC, 1997.
- [10] Tian W C, Sha W P and Liu W. Vehicle Response Analysis under Emergency Braking[J]. Automotive Engineering, 1996, 18(1): 60-64.
田万仓, 沙伟平, 刘伟. 汽车紧急制动响应的分析[J]. 汽车工程, 1996, 18(1): 60-64.