

Dynamic Performance Simulation Study of Forward-facing Child Restraint System Used for More than One Age Group

Zhu Yun¹, Zhu Xichan²

(1. Automotive Safety Technology Institute, Automotive College; 2. Tongji University, Shanghai, 201804, aragorn_zy@yahoo.com.cn)

Abstract: At present, the major method for child passenger safety is to introduce the use of CRS(child restraint system). In current market, most products of CRS can be used for more than one group separated by child's age and body size. The advantages of them are economical and convenient, but for the dynamic performance the product which can only be used for one group is much better. This research built a CAE model of forward-facing CRS which can used for more than one group with the frontal impact sled test environment prescribed in ECE R44 regulation using the MADYMO code. Based on the simulation results of this kind of CRS under different modes, the key factors of CRS design can be discovered. Through proper optimization method, the dynamic performance of CRS product can be improved to reduce child passenger injury risk in a crash accident.

Keywords: Forward-facing Child Restraint System Used for More than One Group; Frontal Collision Performance; Simulation Analysis

跨组别前向式儿童约束系统动态性能仿真研究

朱赟¹, 朱西产²

(同济大学汽车安全技术研究所, 上海, 201804, aragorn_zy@yahoo.com.cn)

摘要: 目前, 保护儿童乘员的主要方法就是推行儿童约束系统的使用。当前市场上的儿童约束系统多为跨组别的, 这类产品在经济性和使用便利性方面有较大优势, 但在动态性能方面却没有单一组别产品理想。本文结合某款跨组别前向式儿童约束系统的正面碰撞台车试验来验证利用 MADYMO 软件为其建立的仿真模型。以此为基础, 对儿童约束系统在不同组别模式下正面碰撞的动态性能进行分析, 找出其中的关键因素, 再通过参数优化使其性能达到较为理想的效果, 为儿童约束系统的优化设计提供一定的依据。

关键字: 跨组别前向式儿童约束系统, 正面碰撞性能, 仿真分析

1 引言

一直以来, 交通事故都是世界范围内导致儿童伤亡的主要因素之一。因此, 国际上关于如何提高儿童约束系统(CRS)的作用以及更好地推广其使用的研究始终是各方面关注的焦点。大量数据表明相比于安全带, CRS 的使用至少能够降低 2 岁到 6 岁儿童 21% 的死亡风险和 1 岁到 4 岁儿童 81% 的严重受伤风险, 即使包括了很多误用情况在其中。由于儿童的身材发育较快而在欧美法规中对儿童约束系统的分组又非常细致, 所以目前市场上的 CRS 多为跨组别的, 这类产品在经济性和使用便利性方面有较大优势, 但在动态性能方面却没有单一组别产品理想。本文结合某款跨组别前向式儿童约束系统的正面碰撞台车试验利用 MADYMO 软件建立仿真模型, 对儿童约束系统在不同组别模式下正面碰撞的动态性能进行分析, 找出其中的关键因素, 通过参数分析探索如何提高其对儿童乘员的保护效果, 为儿童约束系统的优化设计提供一定的依据。

2 儿童约束系统的法规分类及市场现状

各国儿童约束系统(CRS)的使用推广前期基本上都是依靠国家的相关法律法规来推动。目前关于儿童约束系统的法规主要以美国的 FMVSS 213 和欧洲的 ECE-R44 两大体系为代表。二者都是按照年龄和体重的不同对儿童约束系统进行分组, 但在细节上有所区别, 详细情况如下表所示:

表 1 欧美法规关于儿童约束系统 (CRS) 的分类

年龄	体重		欧洲					美国			
	千克	磅	0 组 (0-9kg)	0+组 (0-13kg)	1 组 (9-18kg)	2 组 (15-25kg)	3 组 (22-36kg)	婴儿提篮 (4-22 磅)	后向及 前向通 用式 CRS (5-65 磅)	前向式 CRS (22- 80 磅)	增高坐 垫 (30- 100 磅)
新生儿	0	0									
9 个月	9	20									
1 岁半	13	29									
4 岁	18	40									
6 岁	25	55									
11 岁	36	79									

而通过对市场上各品牌在售的儿童约束系统进行的调查,我们发现目前儿童约束系统生产商开发的产品通常为跨越多个组别的。具体情况总结如下:

表 2 各种类型儿童约束系统产品 (CRS) 的市场占有率

ECE 分类组 0/0+	ECE 分类组 I	ECE 分类组 II	ECE 分类组 III
小于 13 公斤	9 公斤到 18 公斤	15 公斤到 25 公斤	22 公斤到 36 公斤
0 到 15 个月	9 个月到 4 周岁	3 周岁到 7 周岁	6 周岁到 12 周岁
18. 1%			
	23. 6%		
	4. 5%		
		17. 6%	
		29. 3%	
		2. 4%	

注: 其他未列出类型所占的比例为: 4. 5%。

从表 2 我们可以看到除了 0 组和 0+组由于婴儿需要更加细心的呵护,会促使一些专门防护产品的出现,其他仅满足单一组别产品的数量几乎可以忽略不计,因为儿童的成长是个很快的过程,单一组别产品淘汰速度太快,给用户增加了很多使用成本也容易造成更多的误用情况出现,并不符合市场的需求,使得跨组别产品几乎统治了整个儿童座椅市场,但是我们也必须看到其在对儿童乘员的保护性能方面确实比不上单一组别产品,如何提高跨组别儿童约束系统的动态保护性能就成为一个必须关注的课题。

3 跨组别儿童约束系统仿真模型的建立及验证

根据上一章的调查结果,本文选取研究的原型座椅是某知名品牌一款已通过 ECE 法规认证的前向式儿童约束系统,适用年龄为 9 个月到 12 岁,即市场上最流行的跨越了 ECE 法规 I、II、III 组产品。该产品通过底部侧边的旋扭可以调节椅背角度改变使用者的坐姿,面对不同组别的使用者,其安装方式是不同的:当儿童 9 个月到 4 周岁时,使用五点式安全带及锁扣,安全带与座椅一体化设计,稳固安全,结实耐用。当儿童大于 4 周岁时,不再使用五点式安全带并将其拆除,转换为带靠背的增高坐垫,通过使用汽车安全带来保护儿童。因此,本文利用 MADYMO 软件按照 ECE R44 法规要求的台车试验环境建立起不同安装模式下该儿童约束系统的 CAE 仿真模型。

对于用于约束 I 组儿童的第一种安装方式,按照 ECE 法规的动态试验要求应使用该质量组中最轻和最重的儿童模型分别进行试验,所以如下图 1 所示本文按照法规规定的台车试验环境分别使用 TNO P3/4 和 P3 儿童假人建立起包括有限元儿童约束系统、5 点式有限元儿童安全带等的正面碰撞仿真模型。

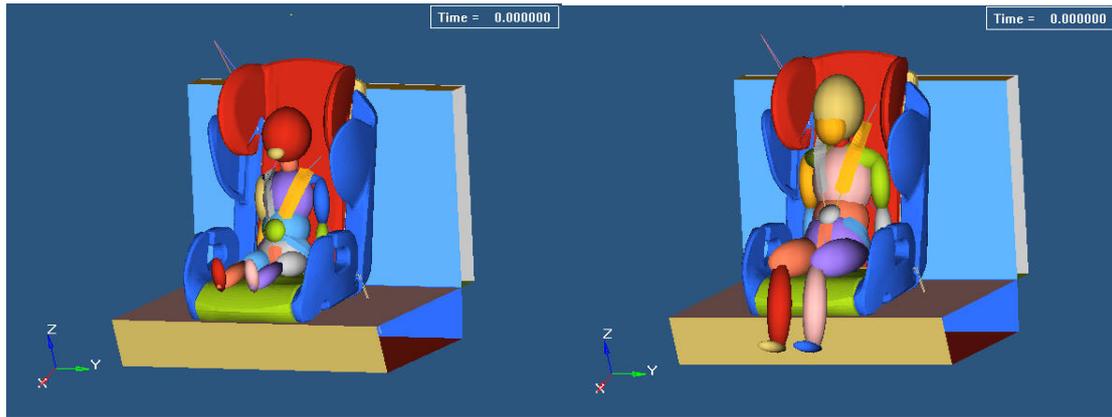


图1 第一种安装方式下 TNO P3/4 和 P3 儿童假人的仿真模型

而对于该儿童约束装置的第二种安装方式，根据 ECE 法规当使用不同质量组的假人时，如果儿童约束装置发生较大变化（例如儿童安全带的结构或长度发生改变），可用介于上述两个质量组重量之间的儿童模型额外做一次试验，由于 3 岁儿童与 10 岁儿童的身材差异较大，为了更好地分析试验结果选取 6 岁儿童假人来替代试验，所以如下图 2 所示本文分别使用 TNO P3 和 TNO P6 儿童假人建立起增高坐垫模式下的正面碰撞仿真模型。

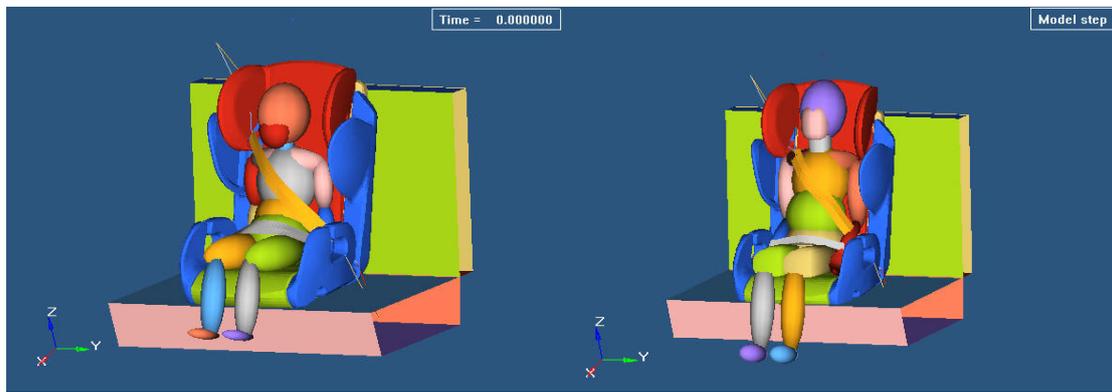


图2 第二种安装方式下 TNO P3 和 P6 儿童假人的仿真模型

该模型中采用的台车碰撞加速度曲线是选取试验数据的不同时段峰值点简化而来的，如图 3 所示，阴影区域是 ECE 法规台车碰撞加速度波型的允许范围，红线为简化的实际试验碰撞加速度波型，可以看出该加速度符合法规的要求。

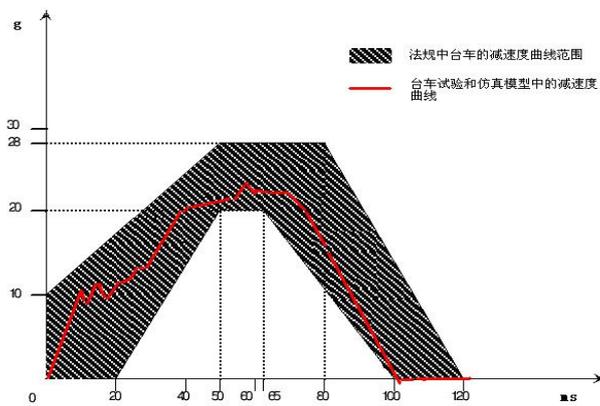


图3 ECE 法规规定的台车碰撞加速度允许范围及实测简化曲线

表3 仿真计算结果与试验结果的对照表 (P3 儿童假人-I 组模式)

	测试结果	仿真结果	误差
头部 HIC 值 (36ms)	330.4	349.7	+5.8%
胸部胸部 3ms 合成加速度峰值 (m/s ²)	409.1	358.9	-12.3%
胸部加速度 (Z 方向) 峰值 (m/s ²)	167.2	145.6	-12.9%

以上模型中输入的儿童座椅及试验座椅的聚氨酯泡沫材料特性按照 ISO 标准的凹入硬度测定方法来获取, 成人安全带特性是由供应商提供的标准安全带参数, 儿童安全带加卸载特性也是由专门的电子拉力试验机来测定, 并通过预模拟方法完成假人及有限元安全带的定位, 表3是该儿童约束系统处于 I 组模式下, 使用 3 岁儿童假人进行台车试验及仿真试验的结果对比, 其误差均在 15% 之内, 对于一般研究性问题来说, 模型的可信度达到 85% 就认为该模型是有效的, 所以本文以此为基础模型来进行相关研究。

4 不同组别模式下儿童约束系统动态性能分析

根据跨组别前向式儿童约束系统的特点, 本文分别为其建立不同模式下的 ECE-R44 法规动态试验环境下的仿真模型, 以便于对不同情况进行具体分析及比较。

4.1 I 组模式下 (即带 5 点式儿童安全带的情况) 不同类型儿童假人响应的分析

I 组模式时, 儿童约束系统是依靠车用安全带沿指定的缠绕路径来固定, 而儿童乘员则由其配备的 5 点式儿童安全带来约束, 按照 ECE 法规要求选用了该年龄组体重最小的 9 个月儿童假人及体重最大的 3 岁儿童假人分别进行仿真分析, 结果如下:

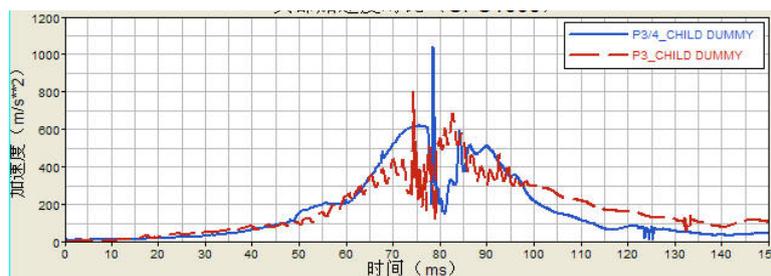


图4 I 组模式下不同儿童假人的头部加速度对比 (CFC1000)

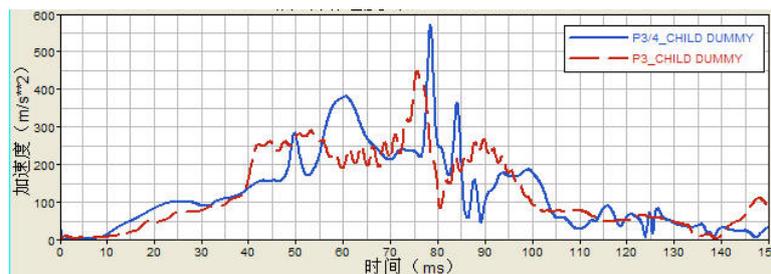


图5 I 组模式下不同儿童假人的胸部加速度对比 (CFC180)

表4 I 组模式下 P3/4 和 P3 儿童假人的伤害情况对比

仿真结果	P3/4 儿童假人	P3 儿童假人
头部 HIC 值 (36ms)	307.9	349.7
胸部胸部 3ms 合成加速度峰值 (m/s ²)	475.7	358.9
胸部加速度 (Z 方向) 峰值 (m/s ²)	145.2	145.6

通过对比 I 组模式下不同的加速度曲线可以清楚地发现在非常接近的时刻, 头部和胸部会同时出现一个波峰, 但是使用 P3 假人时明显比 P3/4 假人要出现得早, 这是因为在该时刻发生了头部与胸部的碰撞, 而 P3 假人由于身材相对而言较为高大, 所以发生碰撞的时间会提前, 碰撞程度有所降低, 如果能避免该碰撞过程的发生, 会使得保护效果得到有效的提升。

在第一种安装模式下，由于儿童身材的差异所产生的主要区别在于儿童安全带锁扣及肩带的位置。图 6、7 的各参数影响系数分析显示锁扣的 Z 方向坐标对其 HIC 影响最大，而锁扣的 X 方向坐标则对胸部合成加速度有较大影响，当然其他因素的影响也不能忽略，通过合理的优化设计相信可以得到较为理想的效果。

表 4 的数据表明随着儿童年龄的增长，带 5 点式儿童安全带约束装置对胸部合成加速度的改善较为明显，而头部 HIC 值却略有提高，主要是该儿童安全带的锁扣固定位置不能调整，设计时就偏向于满足身材较大儿童，使得身材较小儿童使用时并不是非常匹配。

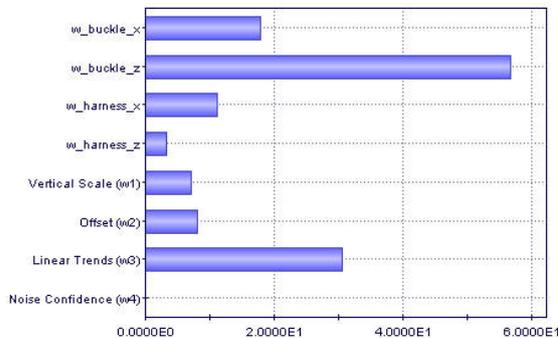


图 6 I 组模式下不同参数对头部 HIC 值的影响

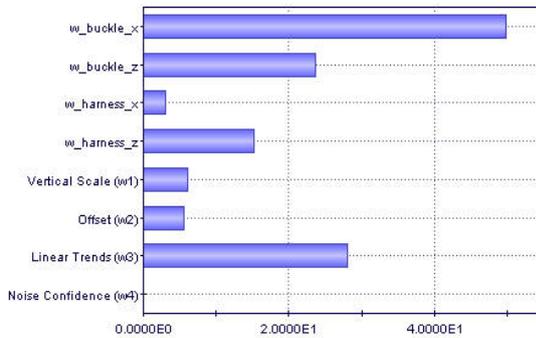


图 7 I 组模式下不同参数对胸部合成加速度的影响

4.2 II、III 组模式下（即带靠背增高坐垫的情况）不同类型儿童假人响应的分析

II、III 组模式时，该儿童约束系统转变为一套带高靠背的增高坐垫，利用车上的三点式安全带将它和儿童乘员一起约束起来，按 ECE 法规并结合实际所需选用了该年龄组体重最小的 3 岁儿童假人及体重适中的 6 岁儿童假人分别进行仿真分析，结果如下：

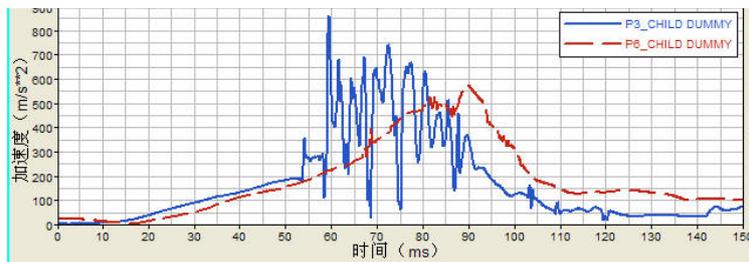


图 8 II、III 组模式下不同儿童假人的头部加速度对比 (CFC1000)

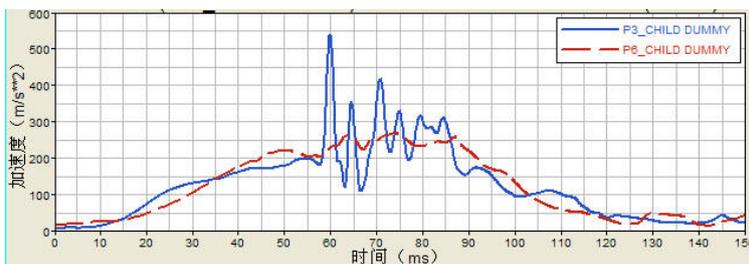


图 9 II、III 组模式下不同儿童假人的胸部加速度对比 (CFC180)

表 5 II、III 组模式下 P3 和 P6 儿童假人的伤害情况对比

仿真结果	P3 儿童假人	P6 儿童假人
头部 HIC 值 (36ms)	413.1	439.1
胸部胸部 3ms 合成加速度峰值 (m/s ²)	391.6	276.1
胸部加速度 (Z 方向) 峰值 (m/s ²)	188.9	104.6

通过对比 II、III 组模式下不同的加速度曲线可以看到在图 8、9 中，其趋势都极为相似，但是 P3 假人在 60ms 时发生突变，出现较为剧烈的波动，对比动画会发现该时刻安全带正好开始接触假人的颈部，使得 Y 方向的加速度出现类似波动，

而 P6 假人模型在仿真过程中并没有出现类似现象，因此提高其保护性能应该避免安全带与颈部发生碰撞。

在第二种安装模式下，不同儿童使用时的差异主要表现在穿绕路径上安全带肩带和腰带的不同定位。图 10、11 的各参数影响系数分析显示肩带在 CR 穿绕槽位置 X 方向坐标对其 HIC 值影响最大，它同样对胸部合成加速度也有较大影响，而肩带在该位置上 Y 方向和 Z 方向坐标的影响也不能忽视，倒是腰带参数的影响比较小，所以想要得到理想的保护效果需要合理地设计 CR 装置上的穿绕槽。

而分析表 5 的数据会发现在使用安全带同时约束儿童乘员和儿童约束系统时，随着儿童年龄的增大，头部 HIC 值并没有显著变化，倒是胸部合成加速度得到极大地改善，因为身材较大儿童与腰带的配合更好，从而更有效地减轻了下潜的程度。

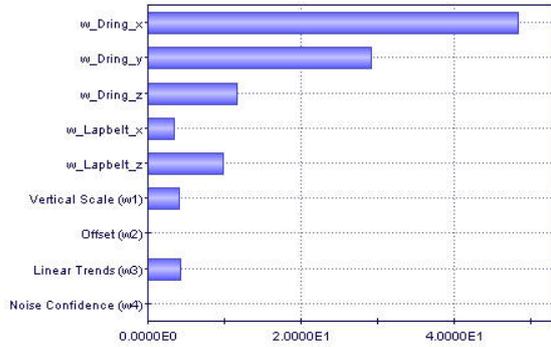


图 10 II、III 组模式下不同参数对头部 HIC 值的影响

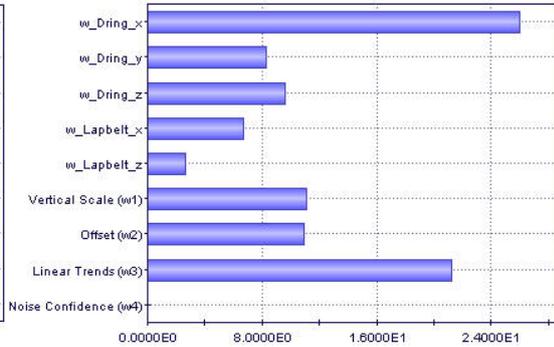


图 11 II、III 组模式下不同参数对胸部合成加速度的影响

4.3 P3 儿童假人在不同安装模式下响应的对比分析

对于 3 岁儿童来说，使用两种安装方式来进行约束都是正确的。所以为了更好地研究跨组别前向式儿童约束系统，本文将 P3 儿童假人在不同安装模式下的响应情况进行对比分析，结果如下：

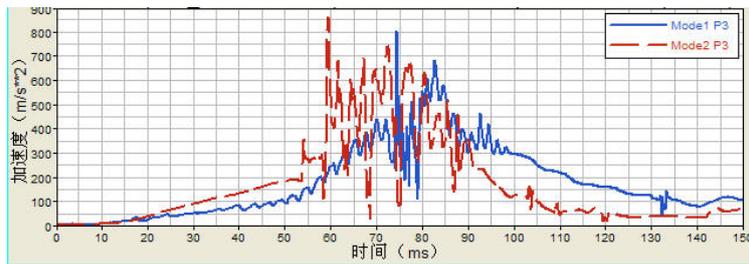


图 12 P3 儿童假人在不同模式下的头部加速度对比 (CFC1000)

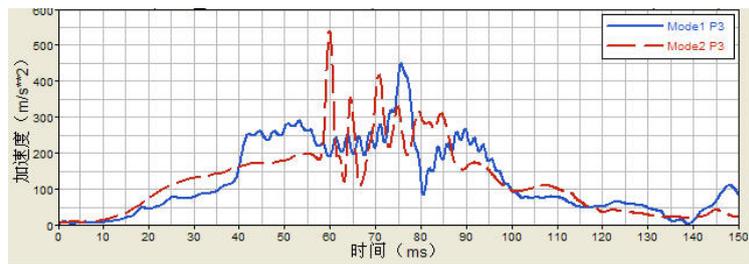


图 13 P3 儿童假人在不同模式下的胸部加速度对比 (CFC180)

表 6 P3 儿童假人在不同模式下的伤害情况对比

仿真结果	模式 1	模式 2
头部 HIC 值 (36ms)	349.7	413.1
胸部 3ms 合成加速度峰值 (m/s ²)	358.9	391.6
胸部加速度 (Z 方向) 峰值 (m/s ²)	145.6	188.9

从儿童假人动力学响应结果来看，无论是头部 HIC 值、胸部 3ms 合成加速度和胸部加速度沿脊柱方向的分量，使用带 5 点式儿童安全带的第二种安装方式对儿童乘员的保护都要明显好于使用带靠背增高坐垫形式的第二种安装方式。而且欧洲

ECE 标准对颈部的伤害没有要求,但在美国 FMVSS 法规中却有相关指标,由于不会发生安全带挤压颈部的现象,在这方面第一种模式更是远远优于第二种模式。此外,从图 13 胸部合成加速度对比可以看到,第一种模式从 40ms 开始就出现第一个波峰,要远远早于第二种模式,结合动画分析会发现这与 5 点式儿童安全带锁扣的接触有很大关系,该锁扣的刚度值也是一个不能忽视的因素。

5 结论

本文根据 ECE-R44 法规要求的台车环境对跨组别前向式儿童约束系统的不同安装模式建立了 4 种工况的 CAE 仿真模型,通过对仿真结果的分析发现跨组别儿童约束系统设计时各部位调节机构的布置及调节范围对儿童乘员动态响应有着非常重要的影响,而其他的系统设计参数也存在不同程度的影响。如何在提高该装置与不同身材儿童适应性的基础上保证其安装的简单快捷减少误用的发生,从而起到较为理想的保护效果,是一个很有价值的研究课题,仍需更多的工作来进行探讨。

一般来说,当儿童身材处于某年龄组的边缘时,都会面对有多种类型的儿童约束系统供其选用的情况,本文的研究表明,为了给儿童乘员提供更好的保护效果,在儿童身高和体重没有超过限制时,应尽量选用低年龄组的儿童约束装置。

参考文献

- [1] Chris Sherwood, Jeff Crandall. "Rear Facing Child Restraints – a summary of epidemiological, experimental and modeling research activities". Protection of Children in Cars 5th International Conference, 2007.12
- [2] Weber, K. "Child Protection for Child Passengers". UMTRI Research Review Volume 31, No.3, Michigan. 2000
- [3] Stéphane Couturier, Véronique Denier, J. Faure. "How ISOFIX Child Restraint Systems and Belt Pretensioner enhance protection of 6-year-old child in frontal impact". Protection of Children in Cars 5th International Conference, 2007.12
- [4] Henry Görlitz. "Rearward facing Child Restraints for toddlers – a consumer view". Protection of Children in Cars 5th International Conference, 2007.12
- [5] Emam A, Sennah K, Howard A, Hale I. "Influence of crash severity and contact surfaces characteristics on the dynamic behavior of forward facing child occupants". INTERNATIONAL JOURNAL OF CRASHWORTHINESS 8 (6): 619-627 2003
- [6] Qian Wang, Tanya Kapoor and William Altenhof et al. "Use of Rigid and Deformable Child Restraint Seats in Finite element Simulations of Frontal Crashes". SAE, 2006-01-1141
- [7] Klinich, K.D., Hulbert, G.M., and Schneider, L.W. "Estimating infant head injury criteria and impact response using crash reconstruction and finite element modeling." Stapp Car Crash Journal, Vol. 46, Nov. 2002, p. 165-194.: SAE 2002-22-0009.
- [8] K.F. Hulme, A. Patra, N. Vusirikala, R.A. Galganski. "A Virtual Prototyping Toolkit for Assessment of Child Restraint System (CRS) Safety". SAE International 2003, 04B-11
- [9] Arbogast, K., Durbin, D. et al.. "An evaluation of the effectiveness of forward facing child restraint systems ." Accident Analysis & Prevention, June, 2003
- [10] Shin YJ, Kim H. "Injury performance evaluation of the child restraint systems". INTERNATIONAL JOURNAL OF AUTOMOTIVE TECHNOLOGY : 185-191 APR 2007
- [11] Christian Liedl. "New conceptual design of an Group 1 Childseat to meet the increased requirements of the market". Protection of Children in Cars 5th International Conference, 2007.12
- [12] 罗萌, 唐亮, 杜汇良等.儿童约束系统动态仿真研究及初步参数分析.第九届中国汽车安全技术国际研讨会,2006
- [13] 葛如海, 苗强.车用儿童约束装置综述.中国安全科学学报, 2006.4