

# Research on the injury risk of child occupant in frontal 40% offset impact

## Paper Title

Di PAN<sup>1</sup>, Yong HAN<sup>1,2</sup>, Fengyi TIAN<sup>1</sup>, Hongwu Huang<sup>1,2</sup>, Koji MIZUNO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, China, 361000

<sup>2</sup>Fujian Collaborative innovation center for R&D of coach and special vehicle, Xiamen, China, 361024

<sup>3</sup>Nagoya University, Nagoya, Japan, 464-8603

Email: yonghanxmut@gmail.com

**Abstract:** The lateral acceleration generated during the offset collision will cause the occupants to yaw toward the door and suffer injury. In this paper, using Toyota Camry vehicle Finite Element (FE) model, Q3 and THUMS 3-year-old child FE model (THUMS 3YO), the Euro-NCAP frontal 40% overlap offset deformable barrier (ODB) vehicle impact test simulations were conducted for three types of Child Restraint System (CRS) such as a 5-point harness CRS, an ISOFIX CRS and an impact shield CRS. Three CRSs and child occupants all yawed with the vehicle. In 5-point harness CRS, the forward excursion of the Q3 dummy and the THUMS 3YO are all more than 600mm; Both the CRSs connected to the vehicle body using the ISOFIX device and the impact shield CRS, all can effectively reduce the forward excursion. The upper neck tension force of Q3 dummies constrained by three types of CRS are more than 2000N, greater than high performance index 1700N.

**Keywords:** child occupant, offset impact, finite element simulation, child restraint system

## 正面 40%偏置碰撞中儿童乘员的损伤风险研究

潘迪<sup>1</sup>, 韩勇<sup>1,2</sup>, 田丰翼<sup>1</sup>, 黄红武<sup>1,2</sup>, 水野幸治<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 厦门理工学院, 厦门汽车设计研究中心, 厦门, 中国, 361024

<sup>2</sup> 福建省客车及特种车辆研发协同创新中心, 厦门, 中国, 361024

<sup>3</sup> 名古屋大学, 名古屋, 日本, 464-8603

Email: yonghanxmut@gmail.com

**摘 要:** 正面 40%偏置碰撞中会产生侧向加速度, 导致驾驶员侧乘员向车门方向偏转, 并造成损伤。为研究不同类型 CRS 约束下儿童乘员在偏置碰撞中的损伤风险, 本文采用丰田凯美瑞整车有限元模型、Q3 假人和 THUMS 3YO 儿童人体有限元模型以及三种儿童约束系统 (CRS) 建立正面 40%整车偏置碰撞有限元模型, 分析了儿童乘员的损伤情况。结果表明, 三种 CRS 及其约束的儿童乘员均会随整车偏转, 且儿童乘员还会相对 CRS 偏转。普通五点式背带型 CRS 约束的儿童乘员的头部前向位移均超过了 600mm; 使用 ISOFIX 装置连接车体的 CRS 和使用前置护体约束儿童的 CRS, 均能有效约束儿童的运动。三种 CRS 约束的 Q3 假人的上颈部轴向力均超过了 2000N, 大于高性能指标 1700N。

**关键词:** 儿童乘员, 偏置碰撞, 有限元仿真, 儿童约束

## 1 引言

据统计, 我国每年有超过 260000 名 17 岁以下的儿童死于交通事故, 同时估计有超过 10 亿的儿童在事故中受伤<sup>[1]</sup>。据美国国家高速公路运输安全局 (National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA) 数据统计, 美国 2013 年乘员正面碰撞形态占总事故数量高达 61%<sup>[2]</sup>。在对正面碰撞中不同重叠率的影响研究发现, 31-40% 重叠率的正面碰撞的伤亡率和严重伤亡率均最高<sup>[3]</sup>。由于车辆在偏置碰撞时会产生侧向加速度, 导致驾驶员侧乘员向车门方向偏转并造成乘员损伤<sup>[4]</sup>。为研究不同类型 CRS 约束中儿童乘员在偏置碰撞中的损伤风险, 本文采用丰田凯美瑞整车有限元模型、Q3 假人有限元模型和 THUMS 3YO 儿童人体模型以及三种 CRS 建立正面 40%

重叠率整车碰撞有限元模型，分析了儿童乘员的损伤情况。

## 2 正面偏置碰撞有限元模型的建立

### 2.1 整车有限元模型

本文所用的整车有限元模型是美国国家碰撞分析中心( National Crash Analysis Center, NCAC) 发布的 2012 年版丰田凯美瑞模型。整车模型质量为 1421 kg，单元总数为 168 万个。其有效性验证在文献<sup>[5]</sup>中已经完成。

### 2.2 CRS 有限元模型

采用三种不同结构的 CRS 有限元模型对正面 40% 偏置碰撞中儿童乘员的响应进行分析，分别为采用汽车安全带连接车体，五点式背带约束儿童的普通五点式背带型 CRS；采用 ISOFIX 刚性装置连接车体，五点式背带约束儿童的 ISOFIX CRS；采用 ISOFIX 柔性装置和汽车安全带共同连接车体，前置护体约束儿童的前置护体型 CRS。其中 ISOFIX CRS 和前置护体型 CRS 的有限元模型验证在文献<sup>[6]</sup>中完成。图 1 为普通五点式背带型 CRS 基于 ECE R44 建立的正面碰撞台车试验有限元模型，儿童假人使用 Q3 假人代替 ECE R44 中的 P3 假人。

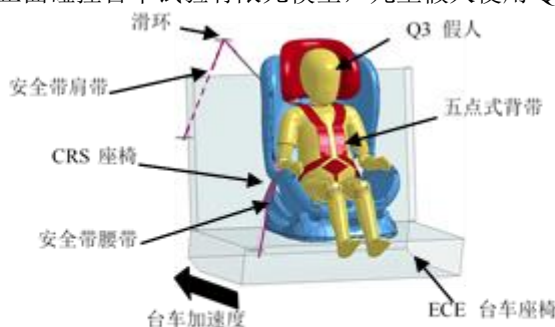


Figure 1.FE model for the 5-point harness CRS sled test  
图 1.五点式背带型 CRS 台车有限元仿真模型

图 2 为有限元仿真和试验中儿童乘员在 100 ms 时刻的运动学响应对比，Q3 假人的运动学响应与试验中的机械假人基本一致。图 3 为仿真和试验中 Q3 假人的胸部加速度-时间曲线对比，有限元分析中得到的加速度曲线和对应的试验结果在脉冲宽度、走向、切线斜率、峰值基本吻合。因此，可以认为五点式背带型 CRS 有限元模型正确有效，可进行后续研究。

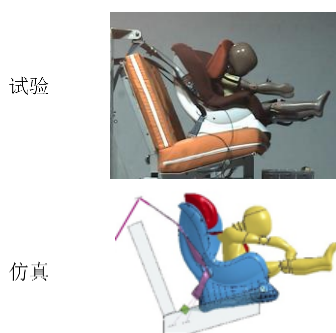


Figure 2. Q3 dummy's kinematics in test and simulation at 100 ms  
图 2. Q3 假人在试验和仿真中 100ms 时刻的运动响应

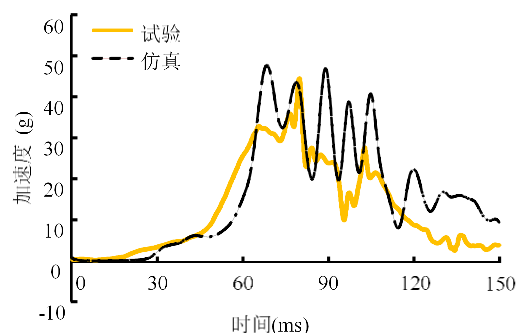


Figure 3. Chest acceleration of Q3 Dummy in test and simulation  
图 3. Q3 儿童假人在试验和仿真中的胸部合成加速度

图 4 为基于欧洲 Euro-NCAP 建立的整车 64km/h 初始速度下正面 40% 重叠率可变形壁障碰撞有限元模型。

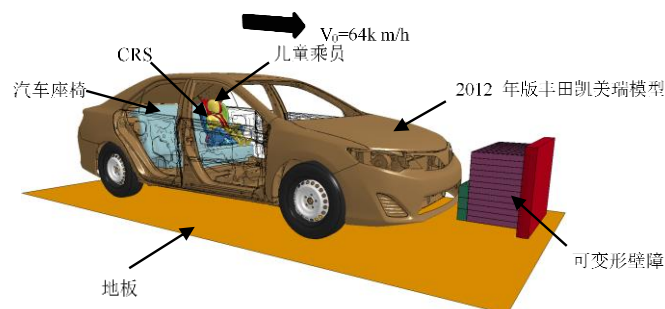


Figure 4. FE model for frontal 40% offset impact  
图 4. 正面 40% 整车偏置碰撞有限元模型

### 3 儿童约束系统仿真分析

#### 3.1 儿童乘员运动学响应分析

图 5 为正面 40% 重叠率可变形壁障碰撞中儿童乘员在头部最大位移时刻的运动姿态。对比可知，CRS 和儿童乘员均会随整车偏转，且儿童乘员还会相对 CRS 偏转。对于相同类型的 CRS，Q3 假人和 THUMS 3YO 儿童人体模型的运动相近，但 THUMS 3YO 儿童人体模型的头部前向位移均大于对应 Q3 假人的头部位移。

对于普通五点式背带型 CRS，采用汽车安全带连接车体，由于其约束作用的不平衡会增加 CRS 在碰撞中相对汽车座椅的偏转，导致儿童乘员手臂与车门发生了接触，如图 6 a 所示。由于采用五点式背带约束儿童乘员，儿童肩部在受到五点式安全带肩带约束后停止，而头颈部由于仍继续运动会向下转动。ISOFIX CRS 采用 ISOFIX 刚性连接装置连接车体，因此 CRS 与儿童相对汽车座椅的偏转较小。虽然儿童乘员没有与车门接触，但与座椅骨架发生了碰撞（图 6 b）。同普通五点式背带型 CRS 一样，ISOFIX CRS 约束的儿童乘员的头颈部也向下发生了绕转。前置护体型 CRS 通过 ISOFIX 柔性装置和汽车安全带共同作用连接车体，其转动量位于前面两种 CRS 之间。由于仍然存在 CRS 相对汽车座椅的偏转，儿童乘员手臂与车门也发生了接触（图 6 c）。儿童乘员采用前置护体约束时，儿童的头部、胸部均受到约束，因此头部不会向下旋转，而躯干整体则会绕前置护体向上转动。

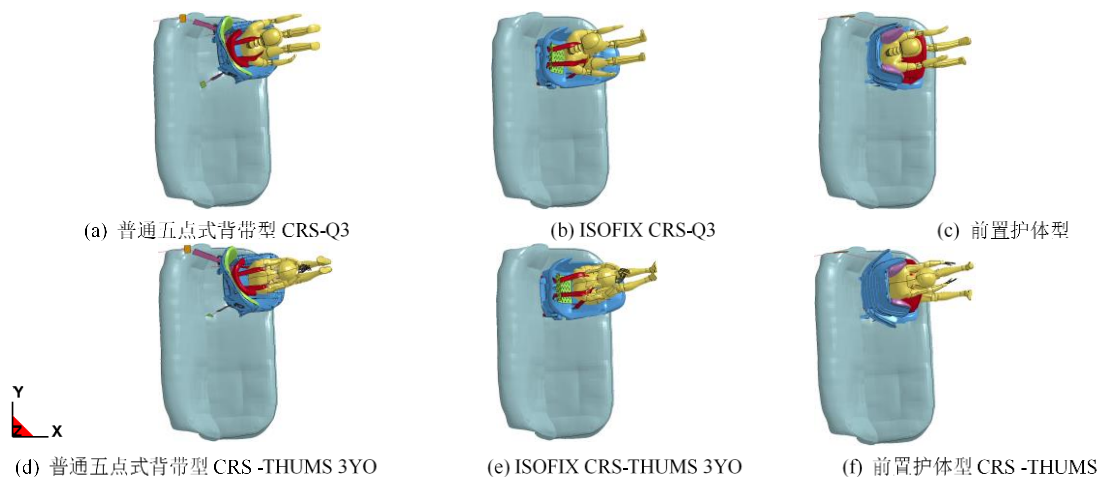


Figure 5. Dummy behaviors at the time of head maximum excursion  
图 5. 儿童假人头部最大位移时刻的运动姿态

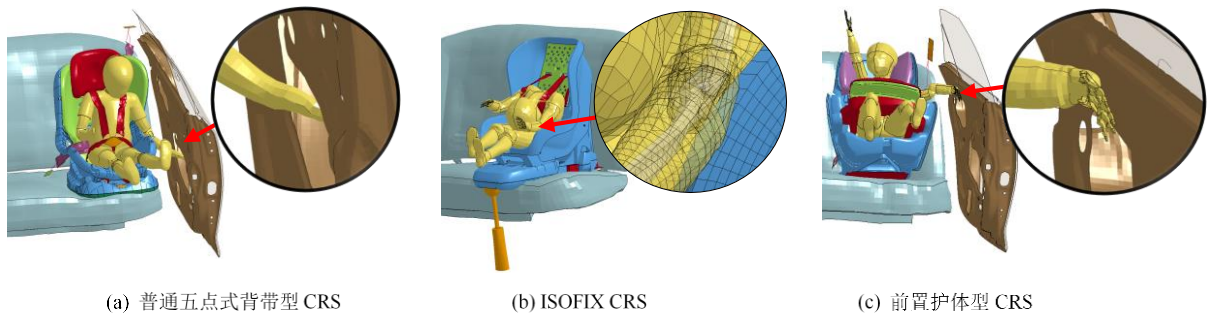


Figure 6. Contact of child occupant with car door or CRS  
图 6. 儿童乘员与 CRS 或车门的接触

图 7、8 分别为三种 CRS 约束下两种儿童有限元模型头部、胸部和骨盆的加速度时间历程。对于 Q3 假人，普通五点式背带型 CRS 中的曲线开始增加以及达到峰值的时间均最迟，且骨盆加速度峰值在三种 CRS 中最大，超过了 70g。这是因为汽车安全带对 CRS 约束力不够，导致五点式背带对儿童的约束主要为腰带，从而导致骨盆加速度较大。ISOFIX CRS 约束下 Q3 假人的加速度曲线在三种 CRS 中增加时间早、峰值低，能有效保护儿童乘员。前置护体型 CRS 的头部加速度在 108ms 时刻出现很大的波峰，这是由于 Q3 假人头部与前置护体发生了碰撞，导致头部加速度突然增加；同时，前置护体型 CRS 中加速度波峰产生的时间最早。

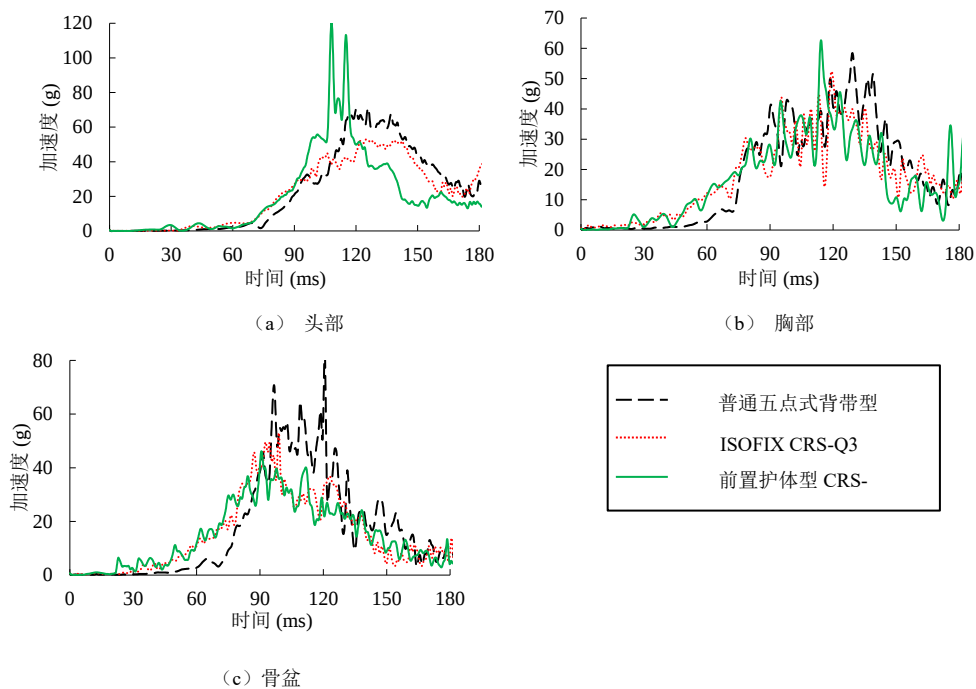


Figure 7. Resultant acceleration of Q3 FE model in three CRSs  
图 7. Q3 假人在三种 CRS 中的时间历程曲线

从图 8 可以看到，THUMS 3YO 儿童人体模型的加速度曲线走势与 Q3 假人有明显差异。对于普通五点式背带型 CRS，儿童人体模型的胸部、骨盆加速度均在 90ms 左右都出现了非常大的波动，其原因与 Q3 假人相同。对于前置护体型 CRS，儿童人体模型的头部和胸部加速度并没有出现峰值突然增加的情况，这是由于碰撞中儿童人体模型的头部并不是下颌与前置护体接触而是整个面部，以及儿童人体模型的变形较大，导致儿童的胸部与前置护体作用时接触面较大，且躯干相对前置护体发生了偏转。

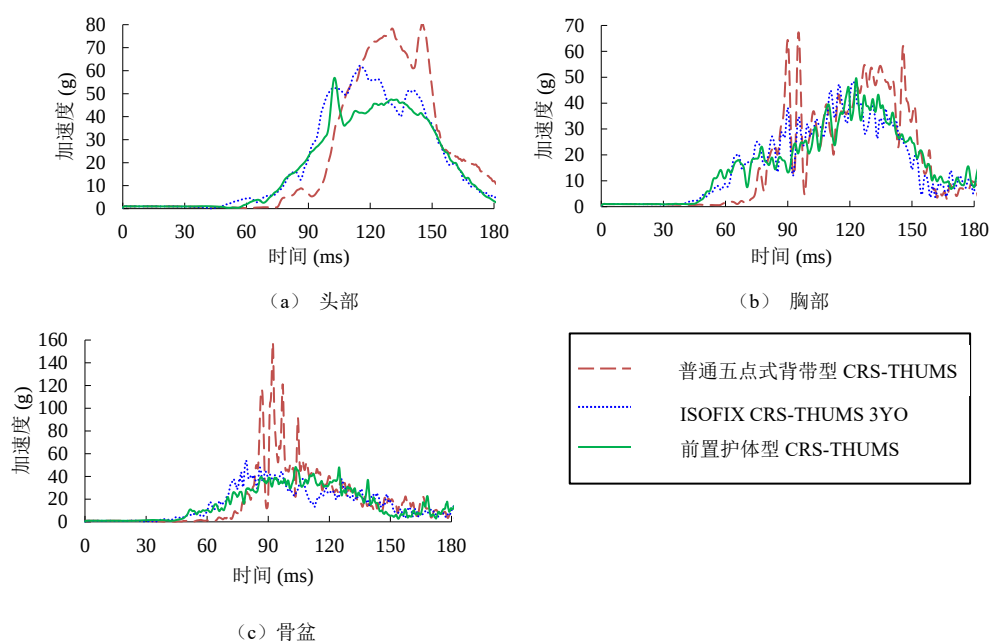


Figure 8. Resultant acceleration of THUMS 3YO FE model in three CRS

图 8. THUMS 3YO 儿童人体模型在三种 CRS 中的时间历程曲线

### 3.2 THUMS 3YO 儿童人体模型骨骼应力分布

图 9 为三种 CRS 约束下儿童人体模型骨骼的应力分布。在普通五点式背带型 CRS 中，儿童肩胛骨受到应力最大，这是儿童肩部受到五点式背带的肩带作用的结果。与普通五点式背带型 CRS 相比，ISOFIX CRS 中儿童人体模型不仅肩胛骨的应力较大，胸骨的应力也较大。这是由于普通五点式背带型 CRS 约束的人体模型头部与大腿发生了接触，而 ISOFIX CRS 中人体模型的头部与胸部已经发生接触，导致胸骨应力较大。对于前置护体型 CRS，儿童乘员的胸部受力主要为胸骨和肋骨。这是由于前置护体直接与儿童人体模型的胸部接触，在持续大的接触力下，儿童肋骨发生了较大的变形，产生了较大应力，而肩胛骨没有受到力的作用，所受应力较小。

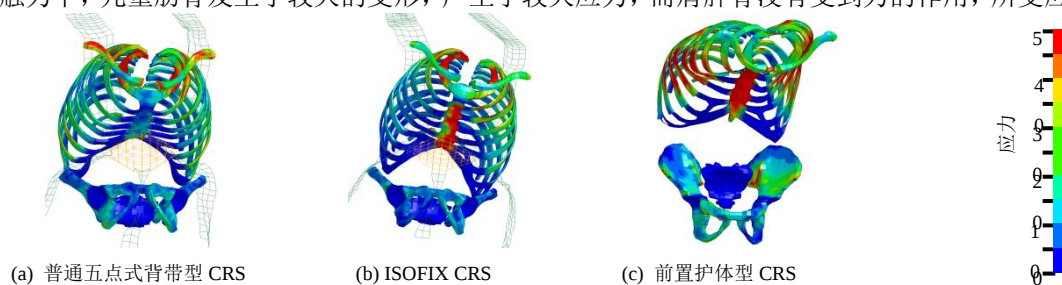


Figure 9. Von mises stress distribution of skeleton of THUMS 3YO

图 9. THUMS 3YO 儿童人体模型的骨骼冯 米塞斯应力应变

### 3.3 儿童乘员损伤评价

表 1 为儿童乘员在正面 40%重叠率可变形壁障碰撞中的损伤值。损伤评估参考值 IARV (Injury Assessment Reference Values) 根据不同标准确定，其中头部性能指标 HPC15 (Head performance Criteria) 基于 ECE R129 确定为 800；头部前向位移 (Dis-X)、头部 3ms 合成加速度 ( $a_{\text{head-3ms}}$ )、胸部 3ms 合成加速度 ( $a_{\text{chest-3ms}}$ ) 以及上部颈部轴向拉力 ( $F_{\text{neck-z}}$ ) 根据 E-uro-NCAP 确定高低性能指标。

Table 1. Q3 和 THUMS 3YO 儿童模型在三种 CRS 中的仿真结果

Table 1. Q3 and THUMS 3YO simulation results in three CRSs

|                               | HPC15 | Dis-x (mm)                          | a <sub>head-3ms</sub> (g) | a <sub>chest-3ms</sub> (g) | F <sub>neck-z</sub> (N) |
|-------------------------------|-------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|-------------------------|
| IARVs                         | 800   | Euro NCAP-Higher performance limits |                           |                            |                         |
|                               |       | 549                                 | 87                        | 50                         | 1700                    |
|                               |       | Euro NCAP-Lower performance limits  |                           |                            |                         |
|                               |       | 550                                 | 100                       | 66                         | 2620                    |
| 5-point harness CRS-Q3        | 504.2 | 606.41                              | 64.72                     | 48.92                      | 2017                    |
| ISOFIX CRS-Q3                 | 271.4 | 485.61                              | 51.49                     | 41.42                      | 2096                    |
| Impart shield CRS-Q3          | 772.9 | 405.05                              | 77.23                     | 46.41                      | 2377                    |
| 5-point harness CRS-THUMS 3YO | 710.3 | 667.14                              | 76.11                     | 49.17                      | 2052                    |
| ISOFIX CRS- THUMS 3YO         | 382.7 | 543.51                              | 60.82                     | 42.91                      | 1693                    |
| Impart shield CRS- THUMS 3YO  | 267.6 | 549.28                              | 62.44                     | 38.18                      | 1384                    |

可以看出,不同类型 CRS 约束下儿童乘员的损伤值相差较大。对于 HPC15,损伤值都在损伤参考值范围内,但前置护体型 CRS 约束的 Q3 假人和普通五点式背带型 CRS 约束的儿童人体模型较大,均超过了 700。对于儿童乘员的前向位移,普通五点式背带型 CRS 约束的儿童乘员前向位移均较大,其中儿童人体模型达到了 667.14mm,远远超过了低性能指标 (550mm)。前置护体型 CRS 和 ISOFIX CRS 约束的儿童乘员的前向位移均较小。对于头部 3ms 合成加速度、胸部 3ms 合成加速度,3 种 CRS 约束的儿童模型结果都较好,均小于高性能指标。Q3 假人的上颈部轴向力较大,均超过了 2000N; 儿童人体模型的上颈部力仅普通五点式背带型 CRS 大于 2000N,其他两种 CRS 小于 1700N。

## 4 结论

本文采用有限元分析的方法,研究了不同类型 CRS 约束的儿童乘员在整车正面 40% 重叠率碰撞中的损伤情况。在正面 40% 重叠率可变形壁障碰撞中,CRS 和儿童乘员会整体随车辆偏转,同时儿童乘员还会相对 CRS 发生偏转,可能造成儿童乘员与车门发生接触。普通五点式背带型 CRS 不能有效约束 CRS 和儿童乘员,导致碰撞中儿童乘员的头部前向位移都超过了 600mm,且头颈部会向下绕转;使用 ISOFIX 连接车体的 CRS,其约束的儿童乘员头部前向位移都较小;前置护体型 CRS 约束的儿童乘员的前向位移也较小,且碰撞中躯干会绕前置护体绕转。三种 CRS 约束的 Q3 假人的上颈部轴向力均超过了 2000N。

## 致谢 (Acknowledgement)

本文得到了国家自然科学基金面上项目(编号:51675454),福建省自然科学基金面上项目(编号:2016J01748)的资助。

## 参考文献 (References)

- [1] World Health Organization. Global status report on road safety 2015. Geneva, Switzerland.
- [2] National Highway Traffic Safety Administration. Traffic safety facts 2012 [EB/OL]. [2014-03-01]. <http://www.fars.nhtsa.dot.gov>.
- [3] ZhengPing Huang. A Research on Vehicle Safety Performance in Frontal Offset Impact [D]. Human University, 2011.汽车正面偏置碰撞安全性研究[D]. 湖南大学, 2011.
- [4] L Cao, P Zhang, L Yan, et al. A Study on Driver Injury in Oblique and Small Overlap Crashes Under Car to Car Collision [J]. Automotibe Engineering, 2016, 38(2):174-180.在车对车碰撞条件下轿车斜角碰撞及小重叠碰撞的驾驶员损伤研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(2):174-180.
- [5] Han Y, Xie J, Mizuno K, et al. Research on the Risk of Child Occupant Injury Based on Offset Impact[C]// Eighth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. IEEE, 2016:564-567.
- [6] Han, Y, J Ouyang, Mizuno Koji,et al. Chest Injuries to Child Occupants Seated in 5-Point Harness and Impact Shield CRSs based on Dummy Tests, FE Simulations and Animal Tests[C]// 2016 IRCOB Conference, Malaga, Spain. 2016.