

A Preliminary Study on the Protective Efficiency of the Child Restraint System in School Bus

HAN Yong¹, Zhou Shui-ting¹, Zhuang Shu-ji¹, XIE Jing-ping¹, Koji Miuzno²

1.School of Mechanical and Automobile Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, China, 361024

2.Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University, Nagoya ,Japan,464-8601

Email: yonghan@xmut.edu.cn, kmizuno@mech.nagoya-u.ac.jp

Abstract: The child restraint system has an important role for children occupant injury protection in school bus. To evaluate the protective efficiency of child seat belt system for child occupants in front crash accidents , this paper establishes a school bus 6-year-old school children seat restraint system simulation model under a front crash. The paper comparatively analyses the child occupants' head, thorax dynamic responses and injury physical parameters under four conditions, which are without using seat belts, using two-point seat belt, using three-point seat belt and using five-point seat belt. Additionally, this paper also comparatively analyses the 6-year-old child occupants' head, thorax dynamic responses and injury physical parameters of three-point seat belt under three conditions, which are using adult seat belt, using the seat belt with shoulder straps at the bottom of the arm, using the seat belt correctly. The results show that using the three-point belt correctly can help to reduce the injury risk of head and chest. The study results demonstrate the child occupant restraint system effect well in the child occupant protection a vehicle collision, and it can serve as a further improvement of child occupant restraint system of reference.

Keywords: seatbelt; seat; dummy; restraint system; frontal impact

校车儿童约束系统防护效率初步研究

韩勇¹, 周水庭¹, 庄首吉¹, 谢金萍¹, 水野幸治²

1. 厦门理工学院, 厦门, 中国, 361000

2. 名古屋大学, 名古屋, 日本, 464-8603

Email: yonghan@xmut.edu.cn, kmizuno@mech.nagoya-u.ac.jp

摘要: 在校车碰撞事故中, 校车儿童座椅及安全带防护效率对儿童保护有着重要影响。为了评估校车在正面碰撞事故中座椅安全带系统对儿童乘员损伤防护效率, 本文使用混 III 6 岁儿童机械假人有限元模型建立了校车正面碰撞学龄儿童座椅约束系统数值仿真有限元模型。分析儿童乘员在校车正面碰撞中无安全带约束、使用两点式、三点式和五点式安全带约束条件下的动力学响应和头、胸部的损伤物理参数; 分析了儿童使用三点式安全带的三种佩戴方式(正确使用、成人式安全带、肩带侧滑)的头部加速度、头部前倾位移量和胸部加速度等物理损伤参数。结果表明在正面碰撞事故中, 使用三点式安全带更有利于儿童乘员保护; 正确使用三点式安全带可以减轻头、胸部损伤风险。本文研究结果验证了儿童乘员约束系统在校车碰撞事故中对儿童乘员的防护作用, 同时可以作为进一步改进校车儿童乘员约束系统的参考依据。

关键词: 安全带; 座椅; 假人; 约束系统; 正面碰撞

1 引言

根据《2011 年全国教育事业统计公报》, 我国有在园幼儿(3-6 岁)近 3424 万人^[1]。统计数字显示每年我国有超过 1.85 万名 14 岁以下儿童死于道路交通事故, 儿童因交通事故的死亡率是欧洲的 2.5 倍, 美国的 2.6 倍^[2]。交通事故已经成为我国儿童意外死亡中仅次于溺水死亡的第二大原因, 在所有儿童死亡原因中排名第六^[3]。特别是 2011 年几起恶性校车事故, 造成社会广泛关注和争论, 其争论的焦点之一就是校车的安全性能和儿童乘员的防护。欧美日等发达国家对儿童乘员保护已有专门的法规要求并已实施, 我国在儿童乘员安全方面的研究起步较晚, 虽新版强制性国家标准《专用校车安全技术条件》(GB24407—2012)和《专用校车学生座椅系统及其车辆固定件的强度》(GB24406—2012)已正式发布并实

施，但是对安全带约束系统的研究文献较少。有研究表明，碰撞过程中儿童假人的行为取决于约束系统的类型^[4]。本文采用有限元方法，建立了校车前碰撞6岁学龄儿童座椅约束系统仿真模型。对比分析儿童在无安全带、使用两点式、三点式和五点式安全带条件下的儿童的运动学响应及头、胸部损伤物理参数。为提高校车儿童保护提供参考依据。

2 材料与方法

2.1 儿童座椅有限元模型的建立

儿童座椅有限元模型是根据某校车厂家提供的儿童座椅，进行实物测量和逆向工程，建立了座椅的三维几何数据后进行网格划分而成。模型由座椅骨架、支撑架、坐垫泡沫、靠背泡沫组成，节点数为82531个，单元数为97428个（如图1）。骨架采用Q235号材料，坐垫和靠背采用低密度泡沫材料，应力-应变曲线由试验测得，如图2所示^[5]。儿童约束系统安全带采用体单元模拟带扣，一维安全带单元和二维安全带单元模拟安全带和织带，模型材料如表1所示。

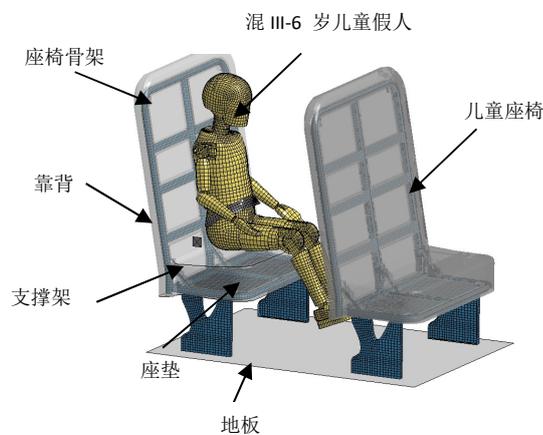


Figure 1. The finite element simulation model of child seat
图 1. 儿童座椅有限元仿真模型

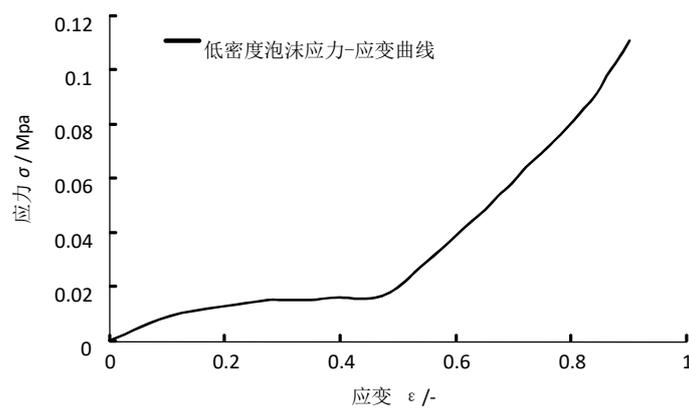


Figure 2. The stress-strain curves of seat foam material
图 2. 座椅泡沫材料的应力应变曲线^[5]

Table 1.The material properties of seat model
表 1.座椅模型材料属性

部件	节点数	单元数	单元类型	材料类型	密度 ($\rho / \text{kg/m}^3$)	弹性系数 (E / MPa)	泊松比
织带	1092	879	一维 安全带单元	安全带材料 SB_MAT	-	-	-
			二维 安全带单元	安全带材料 Seatbelt	0.08	-	-
带扣	84	42	体单元	刚体材料	900	1050	0.3
骨架	6607	6274	壳单元	弹塑性材料	7850	210000	0.3

2.2 仿真模型的建立

根据学龄儿童的人体尺寸特点,本研究采用由第一技术公司 (FTSS)开发和验证的的混III 6岁儿童假人有限元模型 (第3.1版,如图1所示)^[5],模型由日本名古屋大学水野幸治教授研究室提供。儿童模型包含头部、颈部、胸部、上肢和下肢,模型节点数为34844,单元数为40851。

本研究为了对比分析校车儿童安全约束系统对校车正面碰撞事故中的对儿童损伤的防护效率,分析儿童乘员在校车正面碰撞中的运力学和动力学响应,建立了6种不同的使用工况分析头部加速度、头部前倾位移量和胸部加速度等物理损伤参数,即①无安全带约束、② 2点式、③ 3点式和④ 5点式安全带约束及儿童使用3点式安全带的三种佩戴方式 (③ 正确使用、⑤ 成人式安全带、⑥ 肩带侧滑),如图3所示。

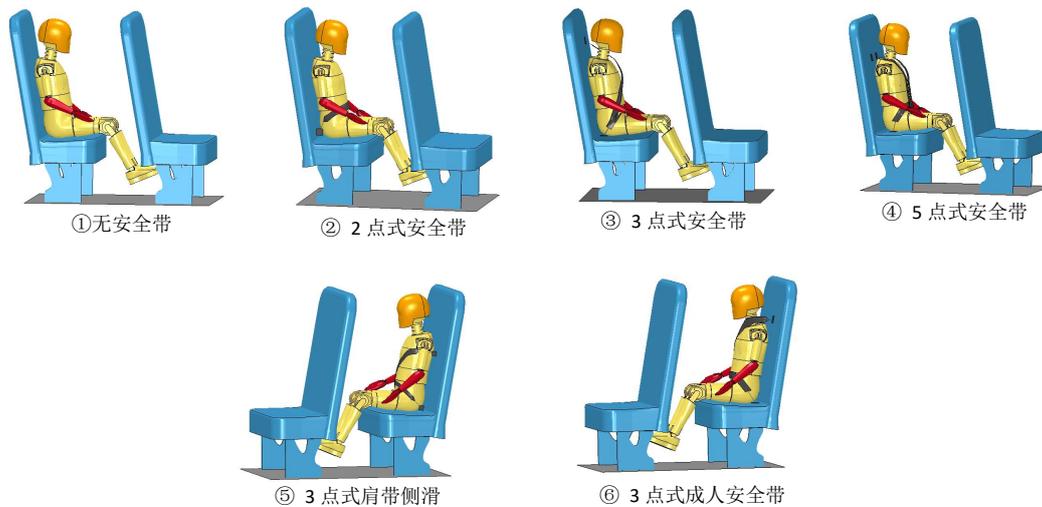


Figure 3.The finite element model
图 3.有限元模型

仿真碰撞条件为模拟校车前碰撞事故中的儿童座椅的台车试验 (sled test), 台车从静止开始启动,速度增加并产生前碰撞加速度波形。校车前碰撞事故中的加速度-时间曲线参考日本田中良知等人模拟校车在以30km/h速度前碰撞中给校车座椅加载的加速度曲线^[7],如图9所示。

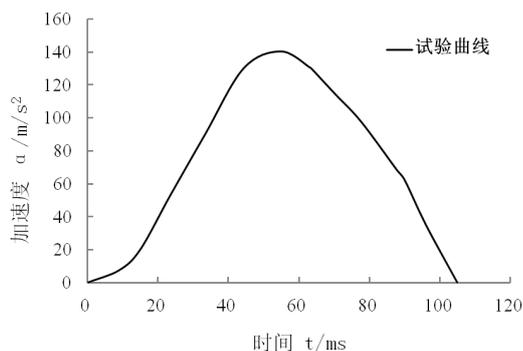


Figure 4.The acceleration - time curve of trolley
图 4 台车加速度-时间曲线

3 结果

3.1 座椅有限元模型的验证

根据中国国家标准《专用校车学生座椅系统及其车辆固定件的强度》(GB24406-2012)^[6]的要求,分析对比抗后倾的静态试验和动态试验的仿真和试验结果进行验证。

3.1.1 抗后倾静态加载试验

根据国家标准和试验的设置要求对座椅靠背部前部加载载荷,方向水平,加载高度在座椅 R 点以上 343mm 的水平面内。对装置设置一个 254mm 的边界条件。仿真模型如图 5 所示。

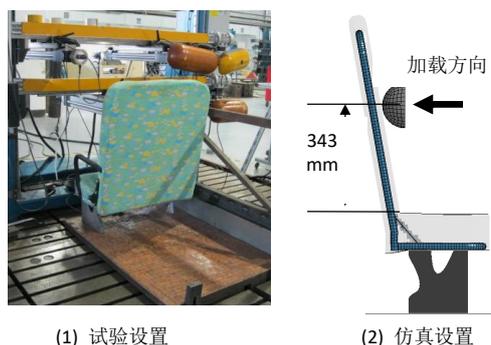


Figure 5.The static load test simulation model of seat
图 5.座椅静态加载试验模拟仿真模型

图 6 所示为抗后倾加载装置载荷-位移曲线,试验加载装置最大位移为 236mm,小于座椅靠背的位移法规值 254mm,仿真值为 210mm,与试验数据相差 11%;试验状态下最大载荷为 4380N,小于法规值 9786N,仿真值为 4333N,误差仅为 1.1%。由图 6 可知,仿真曲线与试验曲线拟合度较高,误差在合理的范围之内。变形后的座椅没有进入相距其他座椅原始安装位置 102mm 的范围内,座椅、连接件与配件在试验过程中未完全脱离。因此,该座椅模型符合静态加载试验的要求。

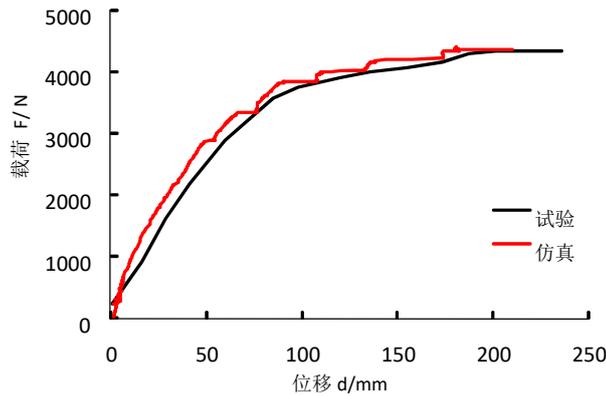


Figure 6.The force - displacement curve of the anti- backward loading device
图 6. 抗后倾加载装置力-位移曲线

3.1.2 动态试验验证

校车座椅的抗前倾的动态试验是根据国家标准 GB24406-2012 采用 P 系列 6 岁儿童假人并通过 2 点式安全带将其放置在减速台车上，模拟碰撞速度为 30km/h 的正面碰撞过程儿童假人的头部位移、头部 HIC 和胸部加速度等物理参数，仿真实验中，混 III 6 岁儿童假人模型在 2 点式安全带约束下放置在校车座椅上，并对座椅加载试验中的台车减速度运动曲线（如图 7 所示）。

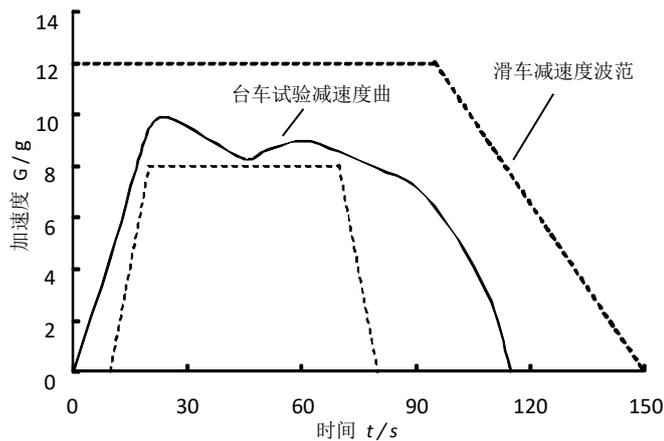


Figure 7.The comparison of the trolley acceleration waveform and the standard requirements
图 7.台车加速度波形与标准要求对比

图 8 所示为假人头部加速度-时间曲线的仿真与试验结果对比图，两者趋势较一致。仿真结果显示头部 HIC 值为 230（小于法规值 500）与 P6 儿童假人试验测得的头部 HIC 值（212）有较小误差（误差率 8%）。图 9 所示为胸部加速度-时间曲线对比曲线图，仿真结果显示指标（ThAC）23.5g，与试验结果为 26.5g 误差较小。由于仿真实验中采用的是混 III 6 岁儿童假人有限元模型，动力学方面的响应差异导致的误差在合理范围。仿真实验中儿童有限元模型的躯干和头部的向前位移未超过位于辅助座椅 G 点前 1.1m 的横向垂直面；座椅模型的骨架、支撑件及附件未产生失效现象。因此，可认为座椅模型是有效的，可用于儿童乘员损伤防护效率的研究。

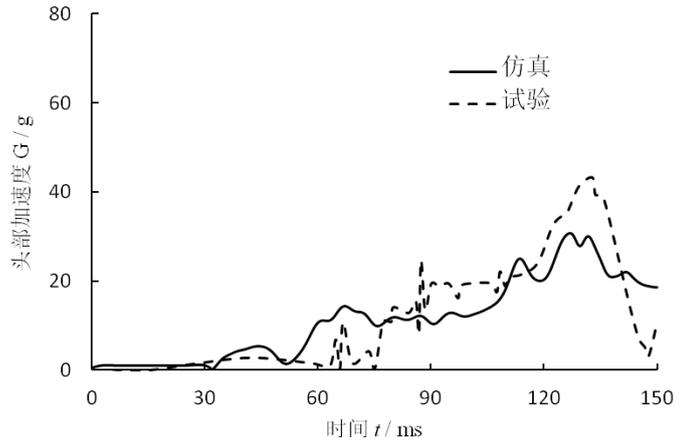


Figure 8. The head acceleration comparison of simulation with experimental results
图 8. 头部加速度仿真与试验结果对比

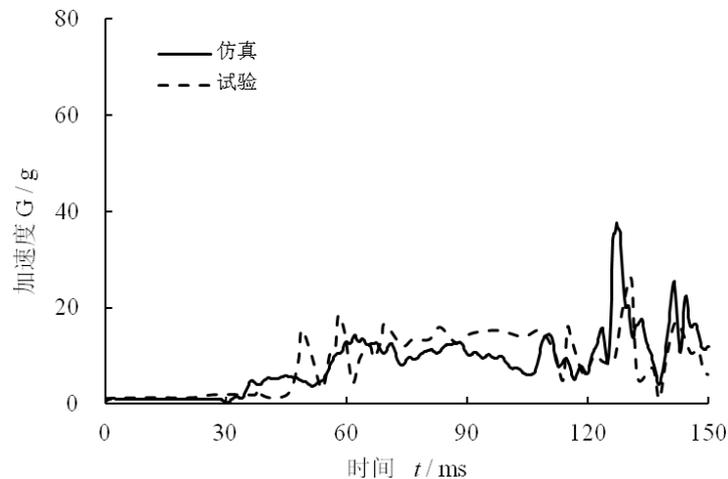


Figure 9. The chest injury indicators ThAC
图 9. 胸部损伤指标 ThAC

3.2 儿童乘员动力学响应

3.2.1 运动学响应

在校车正面碰撞中，儿童乘员的头颈部、胸部、下肢等是常见的损伤部位^[8]。儿童假人 90ms 和 110ms 时的运动学响应如图 10 和 11。在无安全带和使用 2 点式安全带工况中，儿童假人上部没有约束，头部与前席座椅靠背碰撞（如图 10(a)、(b)和图 11(a)、(b)所示）。在正确使用 3 点式和 5 点安全带工况中，假人上部受到了肩带的约束，头部未与前席座椅靠背发生接触（如图 10(c)、(d)和图 11(c)、(d)所示）。

本文同时考查了正确使用 3 点式及 2 种误使用 3 点式安全带的工况下的儿童运动学响应。图如 10(c)、(e)、(f)所示，在 90ms，3 点式肩带侧滑时的假人前倾运动明显，使用 3 点成人安全带时对儿童假人的颈部约束过载，颈部受伤风险增加。在 110ms 时，肩带侧滑工况中，儿童上部在无安全带约束的情况下，前倾运动显著，头部与前席座椅靠背碰撞，腹部受肩带的约束明显，受力增大。在使用成人安全带时，胸上部右侧和颈部受安全带作用受力增加，损伤风险增加。

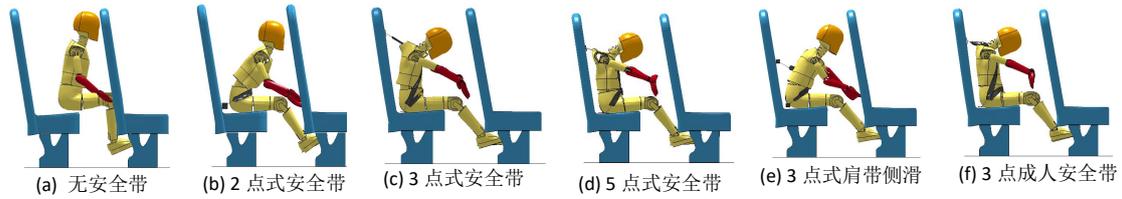


Figure 10.The movement of dummy at 90ms
图 10.90ms 时假人运动情况

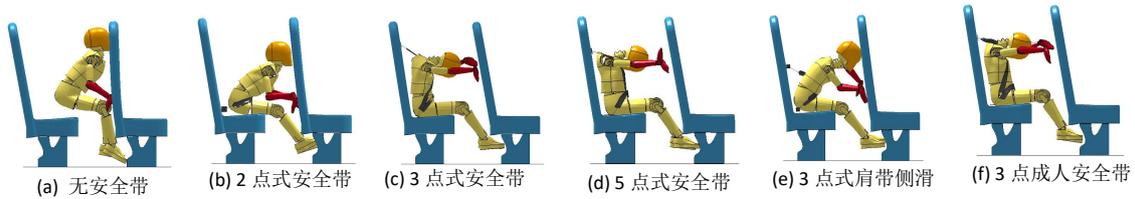


Figure 11.The movement of dummy at 110ms
图 11.110ms 时假人运动情况

3.2.2 头部加速度分析

四种工况下，假人头部的合成加速度如图 12 所示。从表格中可看出，无安全带工况下乘员的加速度在 95ms 时达到最大值 964m/s²，两点式安全带工况下的假人头部加速度在 100ms 时达到峰值 1380m/s²，明显高于三点式与五点式安全带工况的加速度。这是由于在这两种工况下，儿童假人的头部在惯性作用下撞击到前席座椅靠背，碰撞冲击力传递到头部导致的。两点式安全带工况下，由于安全带的约束，导致峰值出现的时刻滞后。FMVSS213 中头部合成加速度的规定值为 80g，除无安全带工况（98g）和两点式安全带工况（141g），其他两种工况下的头部合成加速度峰值都小于 80g，符合标准。

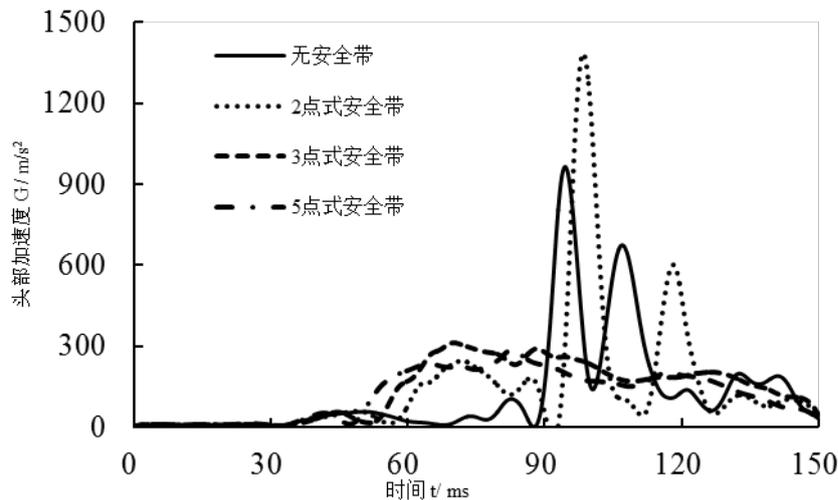


Figure 12.The head resultant acceleration comparison of four kinds condition
图 12.4 种工况头部合成加速度对比

3.2.3 胸部加速度分析

无安全带工况下，假人的胸部在前面 75ms 几乎没有受到约束，但在 95ms、115ms 和 125ms 达到峰值，结合仿真动画可知，这分别是由于假人头部和手碰撞到前排座椅靠背以及胸部在惯性作用下的前冲动作，产生的冲击力传递到胸部造成的。两点式安全带工况下，由于假人胯部受到约束，约束力传递到

胸部，所以在 70ms 时达到第一个峰值，也因此延迟了头部与前排座椅碰撞的时间，所以胸部加速度第二次峰值在 100ms 左右才达到。三点式和五点式工况下，假人胸部加速度峰值在 55ms 和 65ms 达到，这是安全带肩带直接作用的结果，并且由于五点式安全带的双肩带设计增大了接触面积，有效的约束了假人的运动，所以五点式安全带工况下的胸部加速度峰值小于三点式工况。

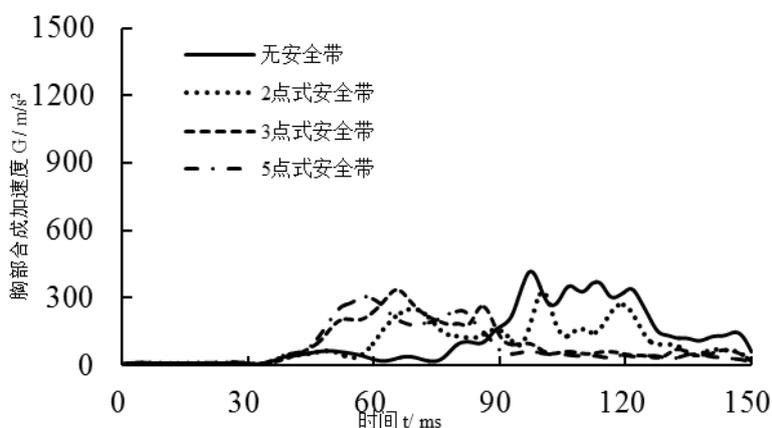


Figure 13.The resultant acceleration of chest
图 13.胸部合成加速度

3.2.4 头部最大位移量

由图可知，无安全带与两点式安全带工况下的头部最大前方移动量远大于三点式和五点式安全带工况。无安全带工况下，头部碰撞前排座椅后出现后仰回弹的情况，存在对颈部造成二次伤害的风险。两点式安全带工况下由于胯部受到安全带的约束，导致乘员上部绕胯部旋转运动，故在垂直方向上的移动量更大。相比其他安全带，五点式安全带工况下，假人的头部最大位移量是最小的，对假人起到最好的约束效果。

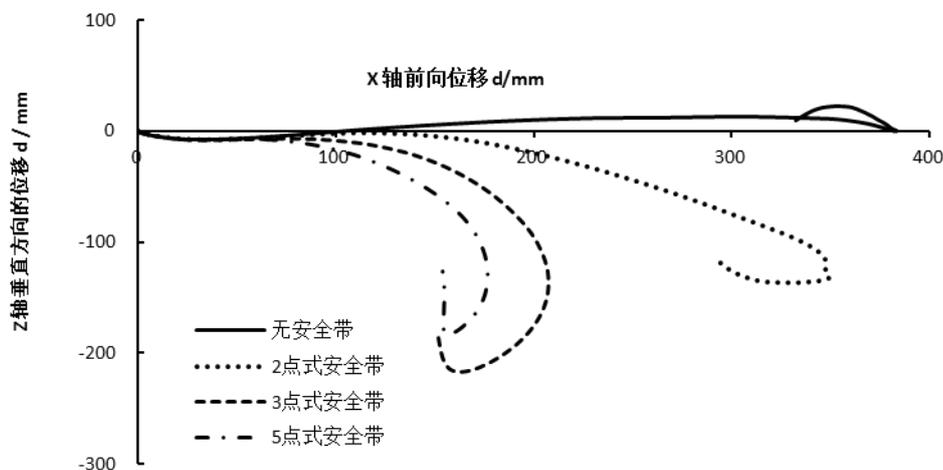


Figure 14.The maximum movement of the head
图 14.头部最大前方位移量

3.3 儿童约束系统误使用分析

在碰撞过程中，安全带的误使用常常导致对乘员的伤害，以下就三点式安全带肩带侧滑和使用成人三点式安全带这两种误使用方式与正确使用三点式安全带三种情况下儿童假人的运动学与动力学响应进行分析，对比儿童假人的损伤指标。

3.3.1 头部加速度分析

使用成人安全带的情况下，虽然头部合成加速度未超过规定值 80g，但是由于没有使用增高座椅，安

全带肩带通过儿童颈部位置，碰撞过程中肩带接触乘员的颈部，作用力传递到头部。加速度曲线出现多个波峰，说明肩带持续作用于颈部，容易引起窒息，伤害儿童安全。肩带侧滑的情况下，安全带对儿童的上躯干约束力较小，在 105ms 时乘员的头部在惯性力的作用下继续向前运动，撞击前排座椅靠背，从而出现加速度的最大值，因此，头部的加速度在这三种情况下是最大的，超过 FMVSS213 中头部合成加速度的规定值 80g。

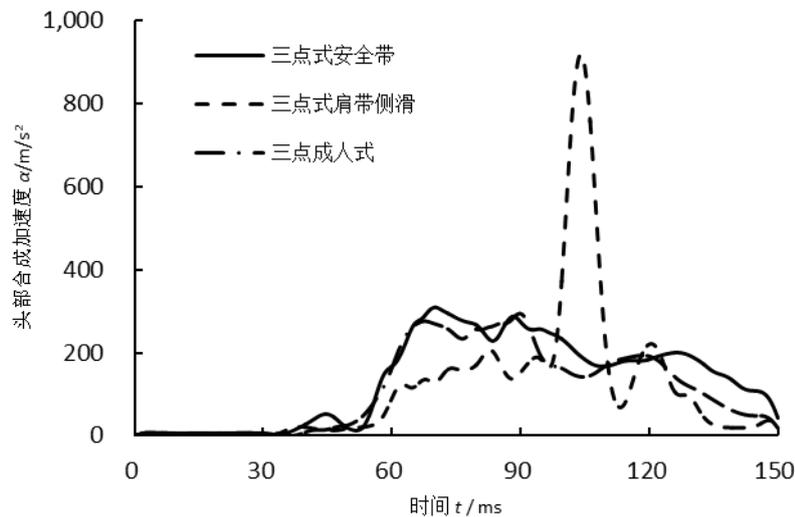


Figure 15.The head acceleration

图 15.头部加速度

3.3.2 胸部加速度分析

由图可知，使用成人式安全带的情况下，在最大值之后，仍旧出现了一次峰值，且峰值仍然大于肩带侧滑的最大值。这是乘员在身体前倾的时候，乘员身体随惯性继续向前，肩带继续勒紧胸部所致。这种情况是对乘员安全较大的威胁。

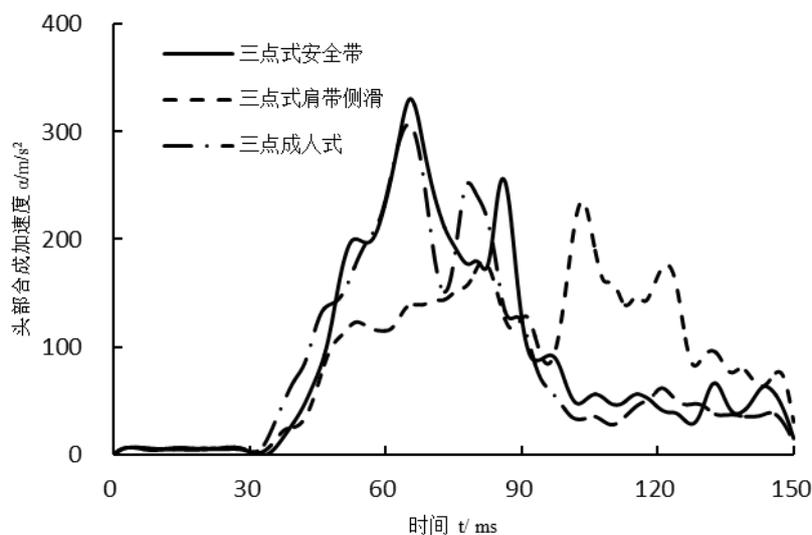


Figure 16.The chest acceleration

图 16.胸部加速度

3.3.3 头部最大前方位移量

肩带侧滑的情况下，乘员的上躯干并未被完全约束住，主要约束胸部以下部位，导致乘员身体向前侧倾，故头部最大前方位移量在这三种情况下是最大的。成人式安全带的情况下，随着运动的进行，肩带作用于颈部，约束住乘员的头颈部，因此，头部前方最大位移量小于三点式安全带工况。

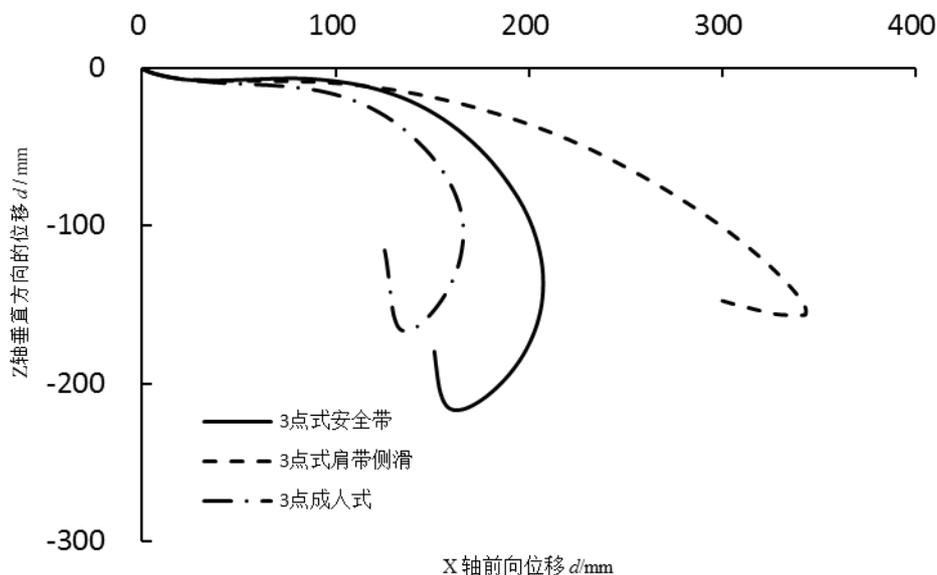


Figure 17. The maximum movement of the head
图 17. 头部最大前方位移量

与正确使用儿童约束系统情况相比，误用降低了儿童约束系统的防护效果，使得儿童乘员损伤风险增加。仅使用三点式成人安全带情况下，安全带的肩带部分将勒住儿童的颈部，腰带部分将作用于脆弱的腹部，这将导致严重的颈部和腹部损伤^[9]。肩带侧滑无法有效约束儿童的上躯干，在惯性作用下儿童头部易撞击前排座椅，造成损伤。

4 结论

在本次模拟的情况下，不戴安全带时，假人的头部与膝盖会碰撞到前座椅的背部。使用两点式安全带时，假人上身以腰部为中心旋转，头部在更低的位置碰撞前座椅背部。在儿童乘员受正面碰撞冲击时不能有效阻止儿童乘员在其惯性力的作用下向前方运动。三点式与五点式安全带能有效地约束假人，正确的使用能够有效降低伤害的程度。但三点式安全带工况下假人的胸部冲击力更大。综上所述，四种工况中，五点式安全带降低假人伤害的效果最好。乘员伤害主要在于头部与前座椅靠背的碰撞，因此增大前后排座椅之间的间隙，扩大乘员运动空间以及更换座椅材料增大座椅与乘员的摩擦力能有效降低伤害值。错误使用安全带会使安全带的保护作用大打折扣，肩带侧滑由于对儿童约束上半身约束不足，容易造成头部受伤。成人式安全带容易伤害儿童颈部。但相比不使用安全带仍有优势，建议增加儿童增高坐垫，这样使用成人安全带时，便可保护儿童的胸部和头颈部。

致谢

本研究获得了国家自然科学基金(编号: 31300784);福建省教育厅 A 类项目(项目编号: JA12250)和厦门理工学院对外科技合作项目的资助(项目编号: CP2012002)的资助;感谢厦门金旅客车公司技术中心提供校车儿童座椅。

参考文献 (References)

- [1] 中华人民共和国教育部.2011 年全国教育事业发展统计公报.2012
- [2] 交通事故成为中国儿童第二杀手.人民日报海外版,2004-03-31 第四版
- [3] 公安部交通管理局. 中华人民共和国道路交通事故统计年报(2008 年度).2009
- [4] Koji Mizuno, Tatsuya Namikiri. ANALYSIS OF CHILD RESPONSES IN CRS USING CHILD HUMAN FE MODEL. Nagoya University, Japan.
- [5] FTSS. LS-DYNA Model of the Hybrid III 6-Year Old Child Dummy User Manual, April 2005
- [6] 胡佳.基于试验和有限元仿真的儿童乘员正面和侧面碰撞安全研究[D].湖南大学博士论文, 2008.10.
- [7] GB 24406-2012, 专用校车儿童座椅系统及其车辆固定件的强度[S].
- [8] 田中良知.幼児専用車の安全に関する研究, 日本, 东京, 交通安全环境研究所, 2011.
- [9] 杨杏梅,杨济匡,亓向翠.侧面安全气囊对儿童乘员的损伤防护效率.江苏大学学报,2011 年 7 月,第 32 卷,第 4 期.
- [10] 杨杏梅.轿车碰撞事故中儿童乘员的损伤防护技术研究.湖南大学, 2010.6