

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.03.018

客车侧翻碰撞中安全带对乘员损伤的影响分析

洪汉池^{1,2}, 黄红武²

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024; 2. 厦门大学 物理与机电工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要:参照欧洲 ECE R66 法规要求, 建立客车侧翻仿真模型及其乘员约束系统模型。利用 LS_DYNA 软件对客车侧翻碰撞试验和客车座椅动态试验进行模拟分析, 并与试验结果进行对比, 结果表明, 有限元模型具有较高的精度。将 4 个 Hybrid III 50% 男性假人模型放置在客车最薄弱的车身段座椅上。对客车侧翻过程中, 3 种约束条件(无安全带、两点式安全带和三点式安全带)的乘员损伤情况进行分析。研究结果表明: 无安全带约束时, 假人头部和颈部将受到严重损害; 两点式安全带和三点式安全带对于所有假人颈部及胸部的保护效果相近; 两点式安全带能有效降低大部分假人的头部损伤风险, 但碰撞侧外侧假人头部损伤值仍较高。

关键词: 客车侧翻; 假人; 乘员损伤; 安全带; 客车碰撞

中图分类号: U461.91

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)03-140-07

Influence of the seatbelt on passenger injury during bus rollover

HONG Hanchi^{1,2}, HUANG Hongwu²

(1. School of Mechanical & Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, Fujian P.R.China; 2. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian P.R.China)

Abstract: Finite element models about bus rollover and passenger restraint system were created according to ECE R66 requirements. Simulation and experimental study on the rollover test for bus and the dynamic test for bus seats were performed. The good agreement between the simulation results and the experimental data proves the accuracy of the finite element models used in the rollover simulation study. 4 Hybrid III 50% dummies were placed at the structurally weakest body section of the bus. And the injury risk of dummies with three different passenger restraint systems(no seatbelt, two-point seatbelt and three-point seatbelt) was respectively evaluated during bus rollover. Simulation results illustrate that the dummies with no seatbelt protection suffer great risk of head and neck injury. Two and three point safety belts provide somewhat similar protection of neck and chest for all the dummies. Most of the dummy heads are well protected by two-point seatbelts except the one that is placed in the outboard seating position on the struck side of the bus.

Keywords: bus rollover; dummy; passenger injury; seatbelt; bus rollover

客车因其具有载客量大和机动性好的特点, 成为了中国公路旅客运输的主要工具。客车安全问题已经引起了人们的充分重视。侧翻事故是客车交通事故的主要形式之一。美国高速公路交通管理局(National Highway Traffic Safety Administration, NHTSA)的数据表明, 侧翻事故约占所有交通事故中的 10%, 但其

收稿日期: 2016-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51355001)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51355001).

作者简介: 洪汉池(1981-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事汽车碰撞安全方向研究, (E-mail)hchong@xmut.edu.cn。

伤亡率却高达 52%^[1]。客车一旦发生侧翻事故,乘员有可能被完全抛出车外、部分抛出车外或者生存空间受到挤压,从而造成极大的危害^[2]。为了降低客车侧翻事故的伤亡率,许多国家制定了关于客车侧翻碰撞安全性的法规,其中最具代表性的是欧洲的法规 ECE R66^[3]。中国的法规 GB/T17598、澳大利亚的法规 ADR 59/00 和南非的法规 SANS 1563 均引用了 ECE R66 阐述的内容。

由于 ECE R66 未对乘员损伤指标提出要求,国内外的学者针对如何提高客车侧翻碰撞安全性能进行了深入的研究^[4-6],但对于客车侧翻碰撞乘员损伤研究较少。Belingardi 等^[7]采用 MADYMO 软件建立客车车身段多刚体模型,并进行 EuroSID 假人损伤分析,但其未能考虑整车骨架及乘员间的相互影响。Guler 等^[8]和陈吉清等^[9]利用 LS_DYNA 软件对 Hybrid III 50% 男性假人在有无佩戴安全带时假人头部和颈部的损伤进行研究,但其模拟分析从客车接触地面开始计算,未能考虑客车在接触地面前的乘员损伤情况。曹立波等^[10]利用 MADYMO 软件建立客车局部车身段的侧翻有限元与多刚体混合模型,分析碰撞侧两个 Euro SID-I 假人损伤情况,但未能进行非碰撞侧乘员损伤分析。文中基于 ECE R66 法规,利用 LS_DYNA 软件分析客车同一排座椅 4 名乘员在无安全带约束、佩戴两点式安全带和佩戴三点式安全带 3 种情况下的损伤机理。研究结果对客车乘员保护有积极的意义。

1 ECE R66 法规和乘员损伤指标

1.1 ECE R66 法规

欧洲法规 ECE R66 的主要目的是防止客车在侧翻事故中,车身骨架结构侵入乘客乘坐空间而造成人员伤亡。因此,ECE R66 规定了乘员生存空间,以检测车身骨架侵入乘员生存空间的情况。

客车横向生存空间如图 1(a)所示,座椅参考点 S_R 位于椅背前方,距离地板高度为 500 mm,距离内侧墙面 150 mm,生存空间上边端点位于下边端点内侧 150 mm 处。客车纵向安全生存空间如图 1(b)所示,客车前排司机座位的安全生存空间为其座椅参考点 S_R 前方 600 mm 的垂直平面,最后排的生存空间为其座椅参考点 S_R 后方 200 mm 的垂直平面,若后方墙面小于 200 mm,则以墙面为垂直平面。

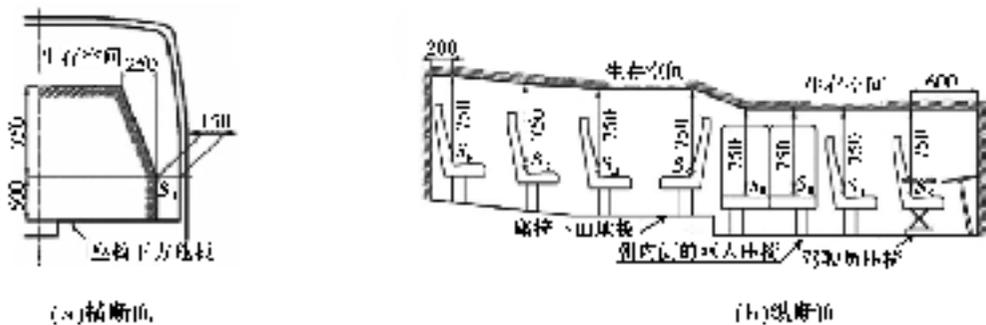


图 1 生存空间示意图(单位:mm)

Fig.1 Residual space (Unit of measurement distance: mm)

1.2 乘员损伤指标

ECE R66 法规并未对客车侧翻碰撞中的乘员损伤指标作具体规定,国际上也没有提出专门针对客车侧翻碰撞的乘员损伤指标。参照美国 FMVSS 208 乘员碰撞保护标准中提及的 Hybrid III 50% 男性假人损伤指标对客车侧翻碰撞乘员损伤情况进行研究,所涉及的乘员损伤部位包括头部、颈部和胸部。

1.2.1 头部损伤指标 HIC

头部损伤指标 HIC 最早由 Versace^[11]提出,并由美国 NHTSA 进行修正,已成为碰撞安全法规头部损伤的基准。其计算公式为

$$HIC_{t_2-t_1} = (t_2 - t_1) \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a dt \right]^{2.5}, \quad (1)$$

式中: a 为假人头部重心的合成加速度,用重力加速度 g (9.81 m/s^2) 的倍数表示; t_1 和 t_2 为碰撞中从初始接触到最后接触过程中的任意两个时刻。

美国 FMVSS 208 乘员碰撞保护标准规定 Hybrid III 50% 男性假人 HIC_{36} 限值为 1 000。

1.2.2 颈部和胸部损伤指标

颈部损伤预测参数 N_{ij} 考虑了颈部轴向力和绕枕骨力矩的影响。其计算公式为

$$N_{ij} = F_z / F_{zc} + M_{ocy} / M_{yc}, \quad (2)$$

式中: F_z 为颈部轴向拉力或压力; M_{ocy} 为颈部弯矩; F_{zc} 为临界拉力; M_{yc} 为临界弯矩。

美国 FMVSS 208 规定: 对于 Hybrid III 50% 男性假人, 当 F_z 为轴向拉力时, $F_{zc} = 6\,806\text{ N}$; 当 F_z 为轴向压力时, $F_{zc} = 6\,160\text{ N}$; 当 M_{ocy} 为弯曲力矩时, $M_{yc} = 310\text{ N} \cdot \text{m}$; 当 M_{ocy} 为伸张力矩时, $M_{yc} = 135\text{ N} \cdot \text{m}$ 。 N_{ij} 有 4 个组合值, 分别是: N_{te} 、 N_{tf} 、 N_{ce} 和 N_{cf} 。 N_{ij} 值越大, 颈部损伤越严重, 其耐受限度为 1.0。

采用胸部 3 ms 合成加速度值对假人胸部损伤情况进行评价, 美国 FMVSS 208 规定: Hybrid III 50% 男性假人胸部 3 ms 合成加速度 (Clip) 限值为 60g。

2 有限元模型的建立与验证

2.1 客车模型的建立与验证

客车全长 12 m, 整车质量 11.6 t, 可乘坐 57 人 (含司机)。客车车身骨架采用整体式“U”型梁客车车身结构^[12], 将多个独立的“U”型横梁在纵向分别由纵梁连接成一个封闭的外框架整体。采用 PreSys 软件建立客车有限元模型。客车车身骨架采用大小为 10 mm 的壳单元进行模拟。壳单元采用 4 节点 Belytschko-Tsay 算法, 在壳单元厚度方向上有 3 个积分点。客车悬架系统采用刚性单元进行模拟, 仿真分析未考虑玻璃破损的情况。

根据 ECE R66 的要求, 进行客车侧翻试验, 并利用显式非线性有限元求解器 LS_DYNA 对客车侧翻过程进行仿真模拟。客车侧翻试验与仿真模拟结果如图 2 所示。表 1 列出了客车右侧窗立柱到生存空间上端点的距离, 侧窗立柱序号参见图 3 所示。



图 2 基于 ECE R66 的客车侧翻试验与仿真模拟结果

Fig.2 Test and simulation results of bus rollover

表 1 侧窗立柱到生存空间上边端点的距离

Table 1 The distance from side wall pillar to the top edge of residual space

立柱序号	A	B	C	D	E	F
实车试验	286.0	267.0	264.0	240.0	237.0	223.0
整车仿真	284.1	258.8	245.2	229.6	230.4	211.0

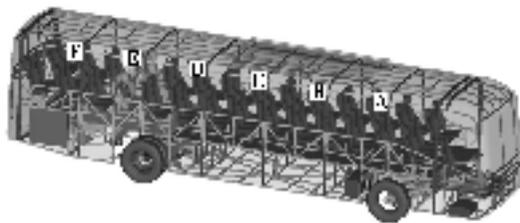


图 3 假人位置图

Fig.3 Position of dummies in the bus

由图 2 和表 1 可知, 客车侧翻试验和仿真分析结果相似, 说明客车有限元模型具有较高的精度; 侧窗立柱均未侵入生存空间, 且留有较大的余量。变形量最大的侧窗立柱所在车身段 (即立柱 E 与立柱 F 之间) 将放置假人模型, 以进行乘员头部损伤研究。

2.2 乘员约束系统模型建立与验证

由于缺乏专用翻滚碰撞假人模型, 采用 Hybrid III 50% 男性假人有限元模型进行乘员头部损伤研究。依据 ECE R80 法规中的假人定位要求, 将 4 个 Hybrid III 50% 男性假人模型放置在客车侧翻试验中最薄弱的车身段的座椅上, 如图 3 所示。假人序号从左到右分别为 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 。客车上其余位置乘员采用 mass 单元进行模拟。2 点式安全带乘员约束系统模型如图 4 所示。

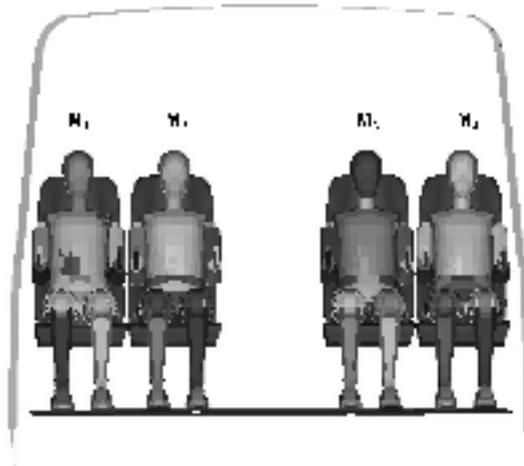


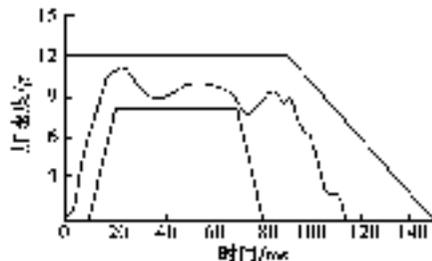
图 4 2 点式安全带乘员约束系统模型

Fig.4 Model of the dummies with two-point seatbelt

客车座椅作为客车的重要的安全部件,在各种类型客车碰撞事故中都将很大程度上影响到乘员的安全。ECE R80 法规明确了客车座椅动态试验和评价方法^[13]。法规要求试验台车速度为 30~32 km/h,平均减速度在 6.5~8.5 g 之间,乘员头部损伤指标 $HIC_{36} < 500$ 。图 5(a)为依据 ECE R80 法规要求进行的客车座椅动态试验实物图,刚性平台上安装两排座椅,后排座椅上的两个 Hybrid III 50% 男性假人模型均佩戴 2 点式安全带,前排座椅空置;试验滑车减速度曲线见图 5(b)所示。



(a)实物图

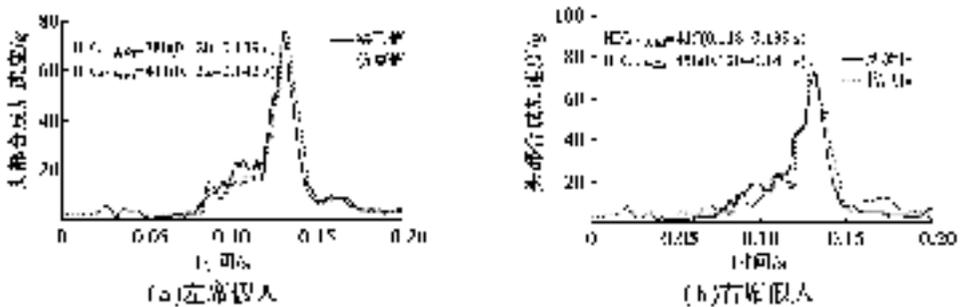


(b)减速度曲线

图 5 客车座椅动态试验

Fig.5 Dynamic test of bus seats

建立客车座椅动态试验有限元模型,采用 LS-DYNA 求解器对客车座椅动态试验过程进行仿真分析。假人头部合成加速度客车座椅动态试验与仿真分析结果如图 6 所示。从图中可看出左右 2 个位置上的假人头部损伤曲线仿真结果略大于试验结果,但在可接受的范围内,验证了乘员约束系统有限元模型的精度。两个假人的头部合成加速度曲线较为相似,假人头部 HIC_{36} 值均小于 500,满足 ECE R80 法规的要求。



(a)左座假人

(b)右座假人

图 6 假人头部合成加速度曲线

Fig.6 Dynamic test of bus seats

3 仿真结果与分析

参照 ECE R66 法规,建立“客车—乘员”侧翻有限元模型。将客车及侧翻平台旋转到侧翻试验中客车侧翻临界位置,客车及侧翻平台的速度设置为零,以此作为客车侧翻仿真的初始条件。利用 LS_DYNA 软件分别对假人在无安全带约束、佩戴 2 点式安全带和佩戴 3 点式安全带 3 种情况下的客车侧翻过程进行模拟分析,分析计算时间均为 2 s。

仿真模拟结果如图 7 所示。客车在 $t=1.315$ s 时开始撞击地面,发生弹塑性变形,并产生滑移。碰撞过程中,车身骨架未侵入乘员生存空间。在无安全带约束的情况下,4 个假人均与侧窗玻璃发生碰撞,这可能导致假人被部分或全部抛出车外。2 点式和 3 点式安全带均能有效阻止假人被抛离座椅。

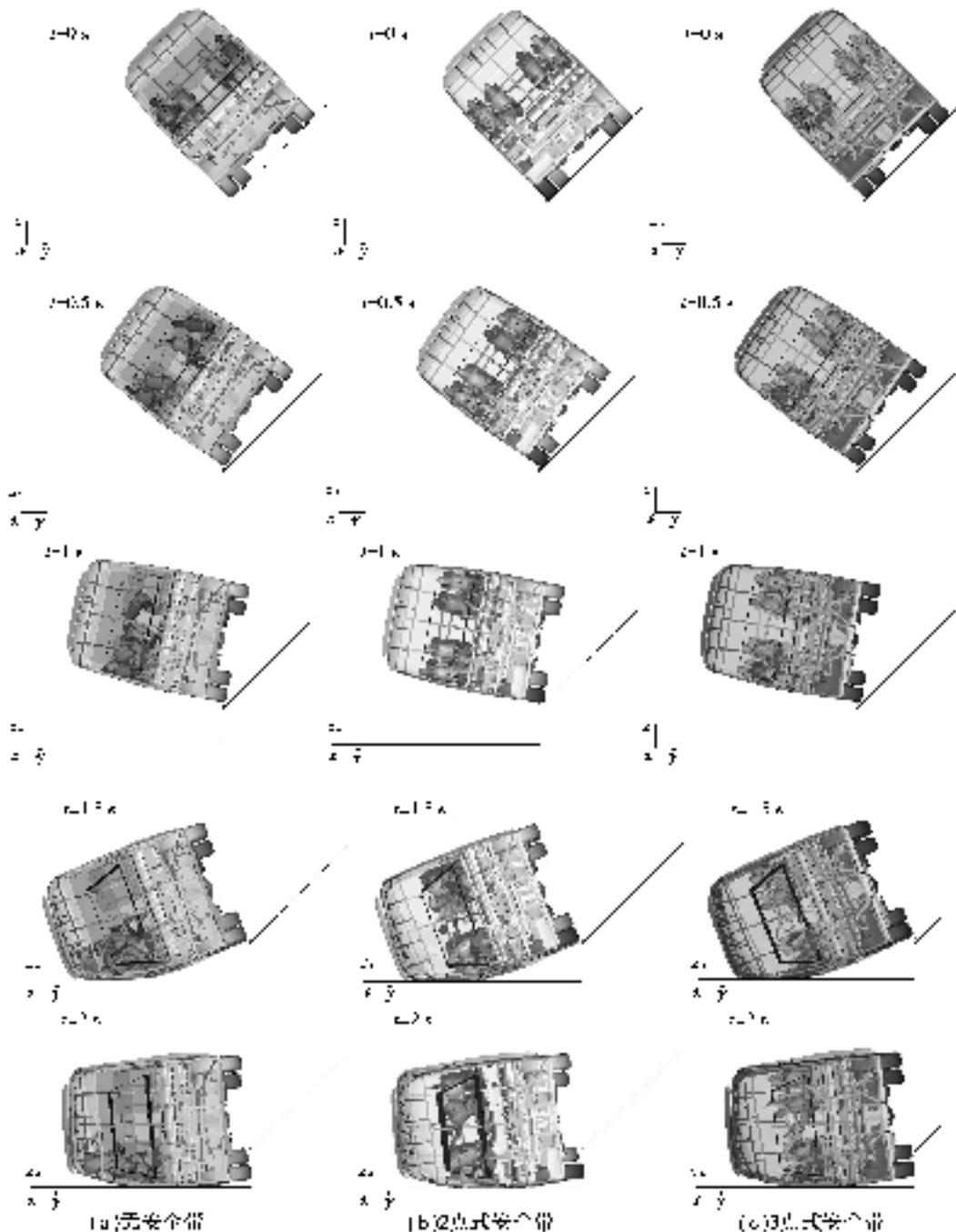


图 7 客车侧翻过程仿真时序图

Fig.7 Sequential pictures of bus rollover simulation

3.1 头部损伤分析

表 2 列出了假人在 3 种约束条件下的头部损伤 HIC_{36} 值。在无安全带约束的条件下,4 个假人头部损伤 HIC_{36} 值均超过 1 000; M_3 假人头部先与 M_2 假人背部发生碰撞,然后撞向侧窗玻璃;距离碰撞侧最远的 M_4 假人头部伤害值是 HIC_{36} 限值的 8.5 倍。2 点式安全带可以明显的降低 M_3 、 M_4 假人的头部伤害值;由于 M_1 和 M_2 假人头部发生碰撞,使得 M_1 假人的 HIC_{36} 值比无安全带约束时高出 1.7 倍。3 点式安全带可以有效降低假人的头部损伤风险。

表 2 假人头部损伤 HIC_{36} 值
Table 2 HIC_{36} values for dummies

假人 序号	无安全带		2 点式安全带		3 点式安全带	
	HIC_{36}	t/s	HIC_{36}	t/s	HIC_{36}	t/s
M_1	1 019	1.323	2 717	1.397	63	1.334
M_2	2 404	1.364	888	1.397	56	1.362
M_3	1 305	1.389	66	1.371	67	1.362
M_4	8 523	1.459	83	1.426	63	1.362

3.2 颈部损伤分析

3 种约束条件下假人颈部损伤预测参数 N_{ij} 的最大值见于表 3。无安全带约束时,距离碰撞侧越远的假人颈部伤害值越大,特别是 M_4 假人的颈部损伤 N_{ij} 值远超人体耐受限度。2 点式和 3 点式安全带均能有效降低乘员颈部损伤风险,且差别不大。

表 3 假人颈部损伤预测参数 N_{ij} 值
Table 3 N_{ij} for dummies

假人 序号	无安全带		2 点式安全带		3 点式安全带	
	N_{ij}	t/s	N_{ij}	t/s	N_{ij}	t/s
M_1	0.34	1.368	0.29	1.401	0.16	1.350
M_2	0.73	1.366	0.17	1.413	0.28	1.363
M_3	0.90	1.394	0.18	1.422	0.23	1.383
M_4	2.64	1.462	0.21	1.444	0.28	1.377

3.3 胸部损伤分析

3 种约束条件下假人胸部 3 ms 合成加速度值 A_s 如表 4 所示。假人在 3 种约束条件下的胸部 3 ms 合成加速度值都小于 60 g 。 M_4 假人在无安全带约束的情况下的胸部 3 ms 合成加速度值最大。与 2 点式安全带相比,3 点式安全带在降低乘员胸部损伤方面效果略差,这是由于肩部安全带对胸部的束缚作用引起的。

表 4 假人胸部 3 ms 合成加速度值
Table 4 The resultant acceleration of chest for dummies

假人 序号	无安全带		2 点式安全带		3 点式安全带	
	A_s/g	t/s	A_s/g	t/s	A_s/g	t/s
M_1	24	1.377	11	1.333	15	1.341
M_2	34	1.364	16	1.411	19	1.341
M_3	27	1.389	16	1.392	31	1.360
M_4	54	1.459	18	1.384	25	1.360

4 结 论

通过对客车侧翻过程4个 Hybrid III 50%男性假人损伤情况的研究,结果表明:

- 1)侧翻过程中客车车身骨架未侵入乘员生存空间。
- 2)3种约束条件下,假人损伤指标峰值均发生在客车撞击地面后,假人胸部3ms合成加速度均小于60g。
- 3)无安全带约束时,假人头部和颈部损伤严重。
- 4)2点式和3点式安全带在降低乘员颈部和胸部损伤风险方面效果相当。
- 5)2点式安全带有效地降低大部分假人的头部损伤风险,但碰撞侧假人头部损伤值仍较高。

参考文献:

- [1] Parker D K, Ray R M, Moore T L A, et al. Rollover severity and occupant protection a review of NASS/CDS data [J]. SAE Technical Paper 2007-01-0676, 2007.
- [2] Matyas M. The severity of bus rollover accident [J]. Esa Papers, 2007.
- [3] ECE R66 E/ECE/324 Rev. 1/Add. 65/Rev.1. Uniform technical prescriptions concerning the approval of large passenger vehicles with regard to the strength of their superstructure [S]. United Nations, 2006.
- [4] 李毅.大客车侧翻碰撞安全性设计与优化关键技术研究[D].广州:华南理工大学,2012.
LI Yi. Study on the key technology of design and optimization for coach rollover crashworthiness[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.(in Chinese)
- [5] Liang C C, Le G N. Bus rollover crashworthiness under European standard: an optimal analysis of superstructure strength using successive response surface method[J]. International Journal of Crashworthiness, 2010, 14(6):623-638.
- [6] Bojanowski, Cezary. Verification, validation and optimization of finite element model of bus structure for rollover test [D]. Florida, U.S.A.: Florida State University, 2009.
- [7] Belingardi G, Martella P, Peroni L. Coach passenger injury risk during rollover: influence of the seat and the restraint system, the 19th enhanced safety of vehicles conference (ESV) [C] // 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles. Washington D.C, USA. U.S Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 2005.
- [8] Guler M A, Atahan A O, Bayram B. Crashworthiness evaluation of an intercity coach against rollover accidents[J]. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 2011, 18(1): 64-81.
- [9] 陈吉清, 黄成杰, 师唯佳, 等. 考虑乘员损伤的客车车身侧翻安全性研究[J]. 汽车工程, 2013, 35(11):978-985.
CHEN Jiqin, HUANG Chengjie, SHI Weijia, et al. A study on the rollover safety of bus body with consideration of occupant injury[J]. Automotive Engineering, 2013,35(11):978-985.(in Chinese)
- [10] 曹立波, 阮诚心, 陈杰, 等. 客车侧翻碰撞中的乘员损伤研究[J]. 汽车工程, 2014, 36(6):683-688.
CAO Libo, RUAN Chengxin, CHEN Jie, et al. A study on occupant injury in bus rollover crash[J]. Automotive Engineering, 2014, 36(6):683-688.(in Chinese)
- [11] Versace J. A review of the severity index[J]. SAE Technical Paper, 1971, NO:710881.
- [12] 谢长宇. 客车车身整体式U型梁结构: 201020585352.5[P]. 2010-10-28.
XIE Changyu. Integral type U-beam structure of bus body: 201020585352.5[P]. 2010-10-28.(in Chinese)
- [13] ECE R80. Uniform provisions concerning the approval of seats of large passenger vehicles and of these vehicles with regard to the strength of the seats and their anchorages[S]. United Nations, 2007.