

工程车辆翻车过程中两点式安全带约束效能分析

魏秀玲^{1,2}, 王国强¹, 郝万军¹, 张英爽¹, 张显余², 王继新^{1*}

(1. 吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130022; 2. 空军航空大学航空机械系, 长春 130022)

摘要: 为了研究工程车辆翻车过程中驾驶员的动态响应, 建立了某工程车辆 90°侧翻的仿真模型。模拟有无两点式安全带、有无座椅扶手时 50 百分位和 95 百分位两种假人的运动状态, 进而分析了在翻车过程中安全带对于不同身材驾驶员的约束作用以及与座椅扶手间的关系。结果表明: 佩戴安全带减少了驾驶员被抛出车外造成严重伤害的可能; 身材高大的驾驶员在翻车过程中头部和躯干偏离距离更大, 增加了与驾驶室内坚硬部件接触碰撞的风险。安全带与座椅扶手配合使用, 减小了假人头部的偏移量, 从而降低头部与驾驶室内部件发生碰撞造成严重伤害的可能, 约束效果更佳。

关键词: 工程车辆, 约束效能, 仿真, 两点式安全带, 翻车

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.08.022

中图分类号: TH243

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-8-0119-05

魏秀玲, 王国强, 郝万军, 等. 工程车辆翻车过程中两点式安全带约束效能分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 119—123.
Wei Xiuling, Wang Guoqiang, Hao Wanjun, et al. Restraint effectiveness of two-point seat belts in rollover accidents of engineering vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 119—123. (in Chinese with English abstract)

0 引言

由于工程车辆工作环境复杂、行驶路况恶劣、承载运行时整车的稳定性下降等原因, 致使翻车事故经常发生^[1-4], 为了在翻车事故中保障司机的生命安全, 目前采用的方法是在工程车辆上加装翻车保护结构^[5] (roll-over protective structure, 简称ROPS)。国际标准^[5]规定了ROPS实验室试验的性能要求, 但只是静态加载试验, 没有考虑翻车过程中司机身体运动及其所受到的加速度冲击。满足国际标准要求的ROPS并不能避免司机在翻车过程中由于与驾驶室发生碰撞造成的损伤。

对于加装合格ROPS的工程车辆, 安全带起着保护司机生命安全的重要作用, 因此有必要研究翻车过程中安全带的约束效能。实车试验可以获得相关动态数据, 但费用昂贵, 可操作性不好。Appel等^[6]通过实验室试验的方法评估了土方机械翻车事故中司机座椅和安全带的保护作用, 但只是对驾驶室施加侧向和垂向冲击载荷, 不能充分模拟真实翻车过程。因此, 数值模拟方法成为解决此问题的一种有效方法。

本文应用多体动力学仿真软件MADYMO, 通过虚拟试验的方法模拟某装载机90°侧翻过程, 模拟佩戴安全带和不佩戴安全带两种情况下不同身材驾驶员的运动状态, 获取司机的损伤值。通过分析两点式安全带的约束效能, 为工程车辆约束系统的选取提供依据。ROPS最早

应用于农用拖拉机^[7-8], 而后扩展到工程车辆, 两者结构基本相似^[9-10]。在翻车过程中同样涉及安全带约束效能分析的问题, 因此本文研究在农用车辆方面也有一定的参考价值。

1 理论基础

为模拟车辆的翻车运动过程, 将车辆简化为多刚体系统, 忽略前后车架铰接的影响。通过施加外力矩将车辆转动到临界侧翻角度后释放, 车辆在重力的作用下侧面与地面碰撞。在此过程中, 求解司机运动状态。

刚性车辆的临界侧翻角度可由下式计算得出^[11]

$$\beta = \arctg \frac{W_l}{2H_{cg}} \quad (1)$$

式中: H_{cg} ——车辆质心高度, m; W_l ——车辆轮距, m。

多体动力学仿真采用了基于牛顿第二定律建模和按时间步长积分求解的方法。刚体 i 相对其质心的牛顿—欧拉运动方程为^[12]

$$\begin{aligned} m_i \ddot{\mathbf{r}}_i &= \mathbf{F}_i \\ \mathbf{J}_i \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{J}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i &= \mathbf{T}_i \end{aligned} \quad (2)$$

式中 m_i 、 \mathbf{J}_i 、 $\boldsymbol{\omega}_i$ 、 \mathbf{F}_i 、 \mathbf{T}_i ——分别为质量、相对于质心的惯性张量、角速度向量、力的主矢及相对于质心的主矩。对于多刚体系统中的一个刚体来说, \mathbf{F}_i 、 \mathbf{T}_i 及由于铰产生的约束力和扭矩只有在系统加速度条件已知后才能确定。在式 (2) 中分别对位移向量和方位向量取变分, 然后相加, 则有

$$\sum \{ \delta \mathbf{r}_i \cdot (m_i \ddot{\mathbf{r}}_i - \mathbf{F}_i) + \delta \boldsymbol{\pi}_i [\mathbf{J}_i \cdot \dot{\boldsymbol{\omega}}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{J}_i \cdot \boldsymbol{\omega}_i - \mathbf{T}_i] \} = 0 \quad (3)$$

若由铰链所产生的约束不被破坏的话, 则按照虚功原理, 可以得到用铰的自由度对时间的二阶导数表示的如下方程

$$\ddot{\mathbf{q}}_{ij} = \mathbf{M}_{ij} \dot{\mathbf{Y}}_i + \mathbf{Q}_{ij} \quad (4)$$

收稿日期: 2008-10-07 修订日期: 2009-07-30

基金项目: “863” 计划先进制造领域课题 (2007AA04Z126); 国家自然科学基金项目 (50775095)

作者简介: 魏秀玲 (1973—), 女, 黑龙江鹤岗人, 博士生, 主要从事工程车辆翻车安全技术研究。长春 吉林大学机械科学与工程学院, 130022。
Email: wei411036@yahoo.cn

*通信作者: 王继新 (1975—), 男, 副教授, 主要从事工程车辆翻车安全技术研究。长春 吉林大学机械科学与工程学院, 130022。

Email: jxwang@jlu.edu.cn

式中： \dot{Y}_i ——刚体 i 的线性加速度分量； M_{ij} 和 Q_{ij} 均与系统刚体的惯性和瞬时几何尺寸有关，而 Q_{ij} 还与系统的瞬时速度和所加载荷有关。利用式 (4) 由开环刚体系统的分枝端点开始计算，用不同的积分方法以各种外力和加速度场作为初始条件求解运动方程 (4)，就可以求解整个系统。

2 仿真方法

2.1 仿真模型的建立

针对某型装载机质量为 $m=18\,338\text{ kg}$ ； $W_l=2.140\text{ m}$ ，整机重心高度 $H_{cg}=1.346\text{ m}$ ，从而计算出 90° 临界侧向翻车角度为 38.477° 。

由于装载机结构复杂，对其进行适当简化。假设在翻车过程中，装载机为刚体不发生变形，将整机质量集中作用在重心上。为考虑司机的动态响应，建立驾驶室、假人、车轮、安全带以及地面模型。应用 MADYMO 软件所建模型见图 1 所示。驾驶室包括两柱式 ROPS、顶板、地板、座椅以及简化方向盘。重心处建立自由铰链与地面相连，用来模拟车辆 x 、 y 、 z 3 个方向的移动和转动；驾驶室、座椅、车轮均固定连接在重心上。定义车轮与路面、假人与座椅、假人与右侧驾驶室、假人与安全带、驾驶室与路面的接触，根据试验设置相对应的载荷及接触参数^[13-15]。在建模过程中锁定假人，直到车辆翻转到一定角度再释放，以模拟在翻车过程中人对自身的支撑作用。模型几何参数见表 1 所示。

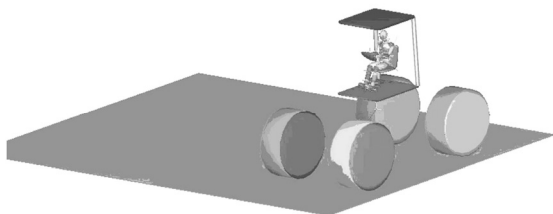


图 1 装载机的简化模型

Fig.1 Simplified model of the wheel loader

表 1 模型参数

Table 1 Parameters of the wheel loader

质量/kg	轮距/m	轴距/m	ROPS 顶部高度/m	ROPS 宽度/m
18 338	2.140	3.350	3.452	1.30

2.2 损伤准则的选取

目前尚无工程车辆翻车事故的人体损伤评价准则，汽车正面碰撞、侧面碰撞的评价指标为工程车辆翻车事故中人体损伤评价提供了参考。Carol Conroy 等人^[16]对翻车过程中乘员严重受伤时的受伤部位进行研究，发现头部、胸部以及脊椎所占比例较大，因此选取如下几个评定指标^[12]：

- 1) 头部 3 ms 加速度值不超过 80 g，头部损伤值 HIC_{36} 不大于 1 000；
- 2) 颈部轴向拉力不超过 3.3 kN，轴向剪切力不超过 3.1 kN；颈部弯曲力矩不超过 57 N·m；
- 3) 胸部压缩量不超过 75 mm。

3 仿真试验与结果分析

3.1 仿真试验

仿真过程中只有在司机被抛出驾驶室时才考虑假人与地面的接触。为获得不同身材的司机在翻车过程中的运动状态，采用 95 百分位和 50 百分位 HybridIII 假人进行试验。人体百分位是一种位置指标，95 百分位代表着身材高大的人群，指的是有 95% 的人群身材尺寸小于此值，而有 5% 的人群身材尺寸大于此值。50% 百分位则是指人群身材尺寸的平均值。针对所建立的模型分佩戴安全带和不佩戴安全带两种工况进行仿真；其次考虑座椅扶手对假人运动状态的影响。依据试验条件组合主要讨论以下试验条件下假人的运动状态。

1) 不同尺寸假人佩戴安全带及不佩戴安全带时的运动状态；

2) 不同尺寸假人佩戴安全带和不佩戴安全带时座椅扶手对运动状态的影响。

通过仿真试验获得装载机 90° 翻车运动状态如图 2 所示。

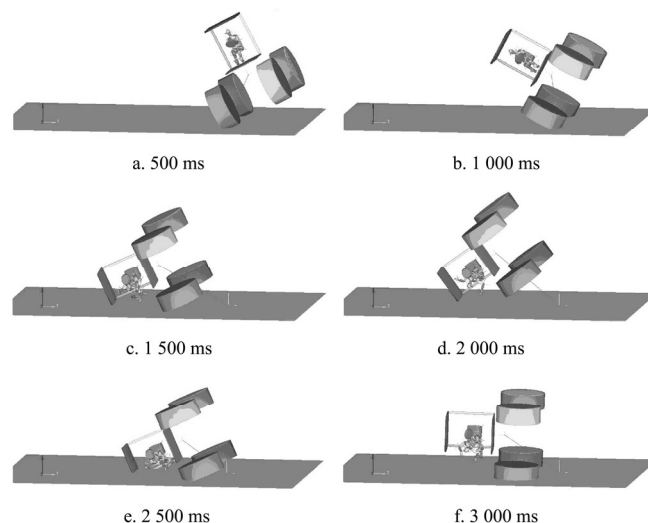


图 2 装载机 90° 翻车运动状态

Fig.2 Motion of wheel loader during 90° rollover

图 3 为获得的两种尺寸假人未系安全带情况下翻车 3 000 ms 时假人运动状态图。

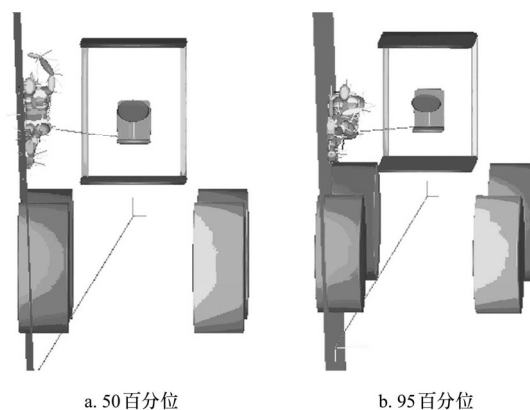


图 3 未佩戴安全带假人运动状态

Fig.3 Dummy motion without wearing a lap belt

图 4 为佩戴安全带翻车 3 000 ms 时两种百分位假人的运动状态图。

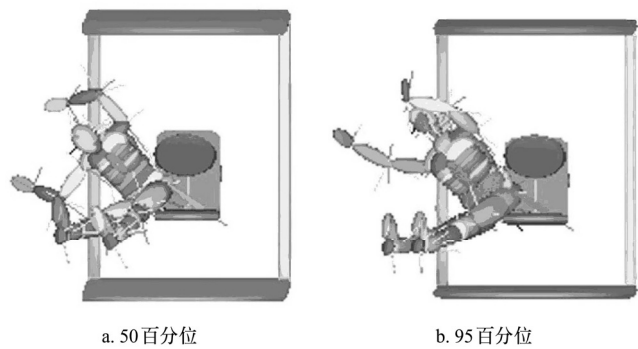
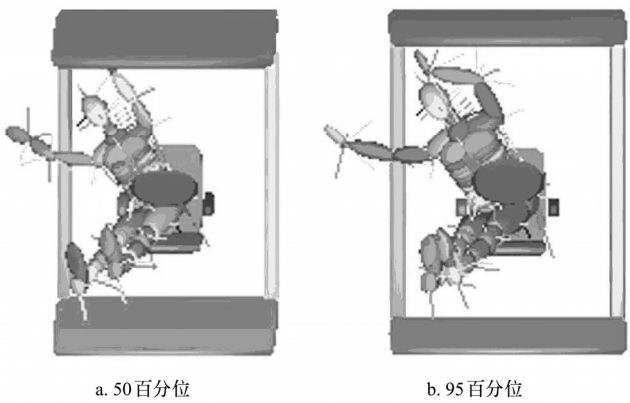


图 4 佩戴安全带假人的运动状态
Fig.4 Dummy motion with wearing a lap belt

图 5 为佩戴安全带增加座椅扶手后翻车过程中 3 000 ms 时假人的运动状态图。



a. 50 百分位
b. 95 百分位
图 5 增加座椅扶手后假人的运动状态
Fig.5 Dummy motion with installing armrests

对比不同假人所受加速度冲击的大小，以及相同假人座椅扶手对其运动状态的影响，提取了佩戴安全带情况下假人头部、胸部合成加速度曲线，如图 6 和图 7 所示。仿真所得的假人损伤值，见表 2 所示。

表 2 90°翻车假人损伤预测值
Table 2 Predictions of dummy injury during 90° rollover

假人	扶手	约束系统	头部		颈部			胸部压缩量 /mm
			HIC ₃₆	3 ms 加速度/g	弯矩/N·m	轴向力/N	剪切力/N	
50 百分位	有	无	1 691.534	30.384	64.614	1 205.382	2 620.415	16.282
		腰带	13.111	8.044	6.553	470.713	38.676	4.827
	无	腰带	7.574	7.384	19.705	625.682	45.678	8.043
95 百分位	有	无	1 769.921	40.837	33.856	1 047.621	2 381.118	13.065
		腰带	20.475	7.032	9.709	742.783	103.991	6.927
	无	腰带	12.437	7.925	9.425	538.154	48.049	2.706

3.2 结果分析

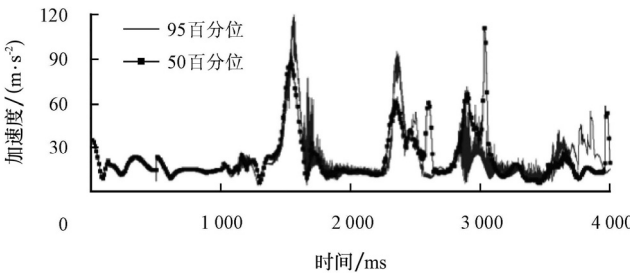
3.2.1 安全带的约束效能

由图 3 可以看出，在翻车过程中，如果没有安全带的约束，假人有可能被抛出车外与地面碰撞造成严重伤害。表 2 中没有佩戴安全带的假人头部损伤值 HIC_{36} 均超过 1 000，损伤严重。虽然驾驶室建模过程中没有考虑侧板、立柱、车门及玻璃的影响，但也模拟出假人的运动趋势，一旦车门破裂或驾驶室玻璃破碎，司机就可能被抛出车外。由此可知，翻车过程中两点式腰带可以将驾驶员约束在座椅上，降低了驾驶员被抛出驾驶室造成严重伤害的风险。表 2 中佩戴安全带假人的损伤值都在安全范围内，损害较轻。

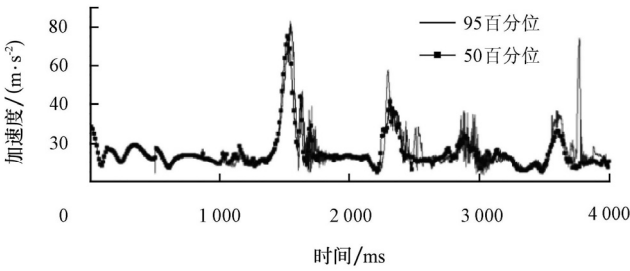
3.2.2 人体尺寸的影响

分别对 95 百分位和 50 百分位的 Hybrid III 假人进行佩戴安全带和不佩戴安全带翻车模拟试验。通过图 4 及表 2 可以看出，翻车过程中不同身材的驾驶员受到伤害的程度相似，不同之处在于身材高大的驾驶员头部和躯干偏离距离更大，这就意味着 95 百分位的假人存在着与模型中没有建立的驾驶室内部部件相撞的更大风险。从两种假人头部和胸部的合成加速度曲线（图 6），也可以看出，身材高大的假人在翻车过程中受到的加速度冲击也要大些。在车辆与地面的几次碰撞过程中（1 500、

2 300、2 800 和 3 800 ms 附近）95 百分位假人头部和胸部合成加速度基本上都大于 50 百分位假人的值。



a. 头部合成加速度



b. 胸部合成加速度

图 6 不同尺寸假人头部、胸部合成加速度曲线
Fig.6 Curves of head and thorax resultant accelerations for different dummy

3.2.3 座椅扶手的影响

通过增加座椅扶手对佩戴安全带和不配带安全带假人运动状态进行模拟分析,可以看出座椅扶手和安全带配合使用约束效果更好。如图4、图5所示,只有安全带起约束作用时,假人虽然被约束在座椅上没有被抛出车外,但假人头部及躯干偏离座椅距离较大,头部和四肢都可能与驾驶室内部件发生二次碰撞造成伤害;增加座椅扶手以后,扶手可以阻止下躯干的侧向运动,及颈椎的大幅度弯曲,使得头部和躯干的偏离距离明显减小,与驾驶室内部件发生二次碰撞的几率降低。图7中的曲线可看出增加座椅扶手后假人所受头部及胸部合成加速度基本相同;表2中的数值表明,头部损伤值有所增大,主要原因可能是假人与扶手之间的碰撞,增加了假人所受加速度冲击。

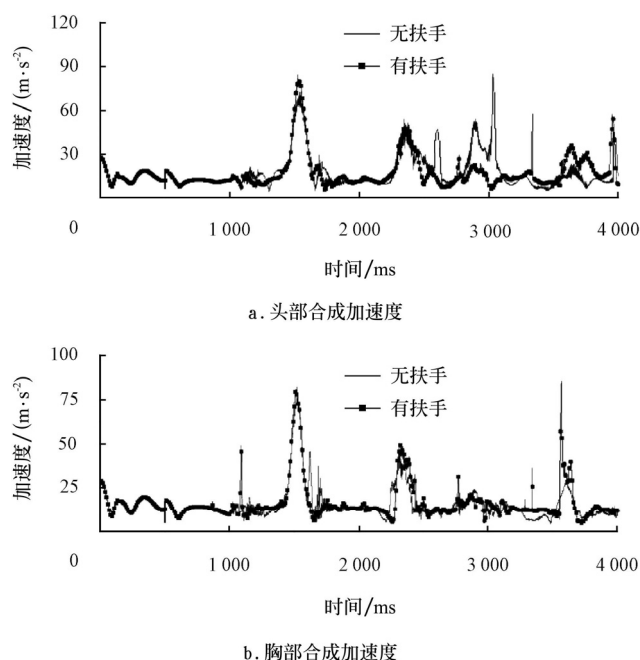


图7 50百分位假人有无座椅扶手头部、胸部合成加速度曲线
Fig.7 Curves of head and thorax resultant accelerations for 50th percentile dummy with and without armrests

4 结 论

1) 应用多体动力学仿真方法,模拟司机在翻车过程中的运动状态,获得损伤值,为评估工程车辆翻车保护性能提供依据。仿真结果表明:佩戴安全带可以将假人约束在座椅上,降低了驾驶员被抛出车外造成严重伤害的可能,减轻了人体损伤。

2) 不同身材的驾驶员,翻车过程中受到伤害的程度相似,不同之处在于身材高大的驾驶员相对于平均身高和体质量的驾驶员来说头部和躯干偏离距离更大,存在着与驾驶室内部件相撞的更大风险。

3) 增加座椅扶手后减小了假人头部和躯干的偏移量,从而降低头部与驾驶室内部件发生碰撞造成严重伤害的可能。

[参 考 文 献]

- [1] Michael McCann. Heavy Equipment and truck-related deaths on excavation work sites[J]. Journal of Safety Research, 2006, 37: 511-517.
- [2] Robert M Clarke, Joseph Mergel. Heavy truck occupant crash protection-A plan for investigating ways to improve it[Z]. SAE Paper, 821270.
- [3] Kenneth F. Orlowski. Rollover crash tests-The influence of roof strength on injury mechanics[Z]. SAE Paper, 851734.
- [4] 于英, 田晋跃, 吴润才, 等. 非公路车辆安全保护技术的研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, (6): 60-62.
Yu Ying, Tian Jinyue, Wu Runcai, et al. Safety analysis on rollover of off-road vehicle[J]. China Safety Science Journal, 2004, (6): 60-62. (in Chinese with English abstract)
- [5] ISO3471: Earth-moving machinery —Roll-over protective structures—Laboratory tests and performance requirements [S]. 1994.
- [6] Appel H, Vu-Han Viet, Pirschel Hans. Occupant protection in earth-moving machines[Z]. SAE Paper, 840202.
- [7] Bengt Springfeldt. Rollover of tractors — international experiences[J]. Safety Science, 1996, 24 (2): 95-110.
- [8] 赵红伟, 陈潇凯, 林逸. 农用车翻车保护结构非线性有限元分析[J]. 农机化研究, 2008, (10): 24-27.
Zhao Hongwei, Chen Xiaokai, Lin Yi. Nonlinear finite element analysis of the ROPS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, (10): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- [9] 王继新. 工程车辆翻车保护结构设计方法与试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
Wang Jixin. Design Method and Experimental Study on the Roll-over Protective Structures for Engineering Vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [10] 冯素丽. 工程车辆落物和翻车保护结构性能计算机仿真及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
Feng Suli. Computer Simulation and Experiment Study on the Performance of Falling-object and Roll-over Protective Structures for Engineering Vehicles[D]. Changchun: Jilin University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [11] Karthikeyan Marudhamuthu. Analysis of 3+2 Point Seat Belt Configuration and Occupant Responses in Rollover Crash of a Pick-up Truck[D]. Kansas: Wichita State University, 2005.
- [12] MADYMO Theory Manual, Release 6.4.1[M]. Delft, The Netherlands, TNO Road-vehicles Research Institute, 2007: 53-59, 323-341.
- [13] William Newberry, William Lai, Michael Carhart, et al. Modeling the effects of seat belt pretensioners on occupant kinematics during rollover[Z]. SAE Paper, 2006-01-0246.
- [14] 申杰. 汽车-行人碰撞事故再现研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
Shen Jie. Research and Application of Vehicle-pedestrian Accident Reconstruction[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [15] Paul M A Slaats, Peter de Co. Safety restraint systems in heavy truck rollover scenarios[Z]. SAE Paper, 2003-01-3424.

- [16] Carol Conroy, David B Hoyt, Brent Eastman A, et al. Rollover crashes: predicting serious injury based on occupant, vehicle, and crash characteristics[J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2006, 38: 835—842.

Restraint effectiveness of two-point seat belts in rollover accidents of engineering vehicles

Wei Xiuling^{1,2}, Wang Guoqiang¹, Hao Wanjun¹, Zhang Yingshuang¹, Zhang Xianyu², Wang Jixin^{1*}

(1. *College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;*

2. *Department of Aeronautic Mechanical Engineering, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China*)

Abstract: A simulation model for a certain engineering vehicle was established to analyze the dynamic response of the operator in the accident of 90° lateral rollover. The motions of 50th percentile and 95th percentile human body model were simulated under these conditions: with and without wearing lap belt; with and without armrests. The restraint effectiveness of lap belt for different human sizes and the relationship between it and armrests were simulated by the established model. The results show that wearing a lap belt can reduce the likelihood of serious injury caused by operator ejection from the vehicle; the head and upper torso excursion for the larger operator model greatly increase the risk of interaction with hazardous features in the cab. When wearing a lap belt, the armrests tend to reduce the amount of head excursion and the severity of the head impact with the internal features of the cab, so the restraint effectiveness is better.

Key words: engineering vehicle, restraint effectiveness, simulation, lap belt, rollover