

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.08.005

翻车保护结构及其吸能构件设计与性能仿真*

司俊德 王国强 闫振华 王继新 郝万军

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

【摘要】 针对工程车辆在斜坡上的滚翻实况,分别利用有限元非线性分析法和多刚体动力学方法建立了整车有限元模型和多刚体动力学模型,并对其进行动态仿真分析。仿真结果预测了车辆斜坡滚翻时翻车保护结构(ROPS)及其吸能构件的变形和吸能,以及滚翻过程中司机的运动状态和损伤概率。结果表明:采用ROPS及其吸能构件能够阻止整车在较小坡度工况下连续滚翻,减少ROPS的塑性变形量,同时也能削弱碰撞过程中加速度峰值并有效降低司机损伤概率。

关键词: 工程车辆 翻车保护结构 吸能构件 设计 仿真

中图分类号: TH243; X924.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)08-0020-05

Design and Performance Simulation of ROPS and Energy-absorbing Device

Si Junde Wang Guoqiang Yan Zhenhua Wang Jixin Hao Wanjun

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

For a certain engineering vehicle roll in the sloped area, the finite element model and multi-rigid-body model were developed based on the nonlinear finite element method and multi-rigid-body approach, respectively. The dynamic simulations were performed. The deflection and absorbed energy were predicted, the dynamic response and injury risks of the operator during lateral roll were also predicted. Results showed that the roll-over protective structure (ROPS) and energy-absorbing device could prevent the vehicle continuous roll on the slopes with small angles and reduce the plastic deformation of ROPS. The severity of the peak decelerations transferred to the vehicle cabin was also reduced simultaneously.

Key words Engineering vehicle, Roll-over protective structure, Energy-absorbing device, Design, Simulation

引言

工程车辆发生翻车事故时,主要通过翻车保护结构(roll-over protective structure,简称ROPS)的弹性变形吸收滚翻过程中产生的动能,并且为司机提供安全生存空间^[1]。ROPS的承载要求和吸能要求互为矛盾,因此ROPS的设计难点是综合控制其变形量,既满足吸能要求又不侵入司机安全生存空间。

如何解决ROPS的承载要求和吸能要求的矛盾,国内外学者做了大量研究^[2-6]。葛树文^[3]在

ROPS强度和刚度满足静态试验性能要求的前提下,在立柱上增开塑性铰孔,对局部结构进行弱化处理使其能够在预定的变形范围内达到吸能要求。Clark^[6]将一个薄壁锥管作为吸能构件安装在ROPS侧面提高其能量吸收能力,他单独提取ROPS及其吸能构件进行动态仿真分析,忽略了整车质量分布、摩擦力等诸多因素对ROPS与地面撞击的角度、撞击力及其变形情况的影响。

本文在ROPS动态设计的基础上^[7-9],综合试验和仿真的方法,充分考虑整车质量分布、摩擦力等

收稿日期:2010-02-06 修回日期:2010-03-29

* 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z126)和国家自然科学基金资助项目(50775095)

作者简介:司俊德,博士生,主要从事工程车辆翻车安全技术研究, E-mail: sijd08@mails.jlu.edu.cn

通讯作者:郝万军,讲师,主要从事现代设计方法研究, E-mail: wjhao@jlu.edu.cn

影响因素,准确反映翻车过程中 ROPS 的实际性能,并依据 ROPS 的受力特点和变形模式设计一种新型的薄壁吸能构件,然后结合多刚体动力学理论,将有限元结果代入多刚体模型,以人体损伤为评价指标对比分析两种刚性坡度下,不同厚度的吸能构件对司机的保护效果。

1 仿真模型的建立

1.1 ROPS 及其吸能构件设计

由于工程车辆整车滚翻试验成本高,文献[8]参照 ZL10 型装载机设计一台模型车,然后将模型车放置在倾角 30° 的硬地面斜坡上,使其在重力作用下无初速度自由滚翻,并且对试验进行有限元仿真分析。测试试验台和仿真试验模型如图 1 所示。

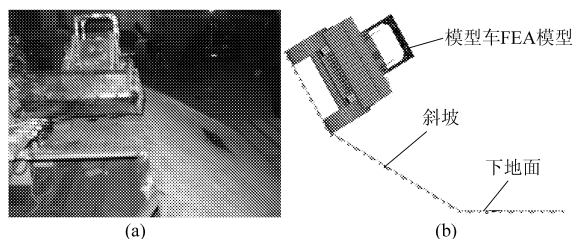


图 1 测试试验台和仿真试验模型

Fig. 1 Test bed and simulation model

(a) 测试试验台 (b) 模型车仿真模型

该模型车动态仿真建模方法和滚翻试验方法及其结果对比详见文献[8]。本文重点分析模型车在斜坡滚翻过程中,ROPS 的受力特点和变形模式。由试验及其仿真均可以观察到 ROPS 侧面与地面发生第一次撞击时,其变形并不明显,整车沿着斜坡继续向下滑行。当 ROPS 顶部与下地面发生第二次撞击时,整车运动受到下地面阻挡,停止滑行。此时 ROPS 发生明显的塑性变形,滚翻产生的动能部分转化为 ROPS 的变形能。倘若此时整车动能足够大,它将继续滚翻。整车发生 180° 滚翻时,ROPS 在整车的重压下加剧变形。由上述分析可知,ROPS 与地面的第二次撞击和整车对 ROPS 的垂直载荷是其产生永久变形的主要因素。因此设计 ROPS 吸能构件要综合考虑 ROPS 侧面和顶部的吸能。

矩形截面薄壁金属管是一种低成本、高吸能的构件^[10]。依据上述分析的 ROPS 受力特点,在 ROPS 顶部立柱和侧面横梁截面安装矩形截面薄壁吸能管,其几何尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 。8 个薄壁吸能管之间采用薄钢板蒙皮连接。该吸能构件采用 Q235A 薄钢板焊接而成,其几何模型如图 2 所示。

1.2 有限元模型的建立

运用文献[8]所采用的材料模型和建模方法建

立安装吸能构件的某 ZL50 型装载机有限元模型。该装载机模型高 3.5 m ,长 7.9 m ,宽 2.9 m ,整车质量为 $16\ 400\text{ kg}$ 。采用文献[9]的仿真方法,通过能量守恒原理计算出整车侧面将要碰到斜坡时刻的角速度,其中 30° 斜坡上翻车时计算得初始角速度为 $\omega_A = 2.12\text{ rad/s}$, 45° 斜坡翻车时计算得初始角速度为 $\omega_A = 2.51\text{ rad/s}$ 。将装载机安放在刚性斜坡上,该斜坡落差为 3.3 m ,宽度为 10 m ,动静摩擦因数均为 0.35 。 30° 斜坡装载机翻车计算的有限元模型如图 3 所示。

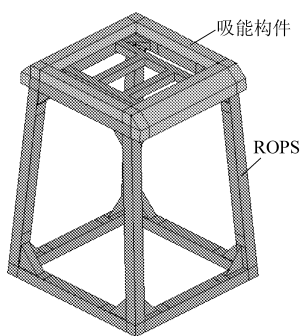


图 2 ROPS 及其吸能构件模型

Fig. 2 ROPS and energy-absorbing device

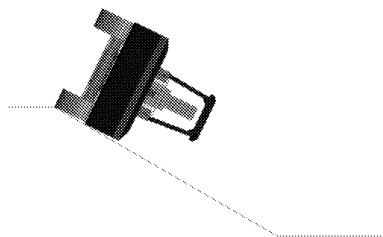


图 3 有限元模型 30° 斜坡翻车计算初始状态

Fig. 3 Initial conditions of finite element model under 30° roll slope

1.3 多刚体模型的建立

采用 Facet 表面建模的方法建立 ROPS 吸能构件和铲斗的有限元模型,装载机的其它部件简化为多刚体模型。仿真用假人模型使用 95 百分位的 HybridIII 型假人。为准确的模拟安全带与假人之间的接触,安全带模型采用有限元与多刚体相结合的方法建立^[9]。

在动态翻车仿真的基础上,提取 ROPS 变形特征以及整车质心运动轨迹,然后通过 PSM 子结构法,将 ROPS 随时间的变形历程和质心运动轨迹作为约束施加在多刚体模型上面^[11]。 30° 斜坡装载机翻车计算的多刚体动力学模型如图 4 所示。

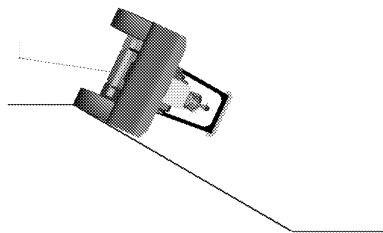


图 4 多刚体模型 30° 斜坡翻车计算初始状态

Fig. 4 Initial conditions of multi-rigid-body model under 30° roll slope

2 计算结果与分析

2.1 仿真工况

通过改变吸能构件的厚度来控制吸能构件的刚度,因此本文对不安装吸能构件和吸能构件厚度分别为0.8、1.5、2.5 mm的4种装载机整车模型在倾角为30°和45°的斜坡上滚翻的8种仿真试验工况进行模拟仿真分析。研究这两种典型翻车斜坡角度环境下,吸能构件刚度对司机的保护规律,并对假人损伤值进行对比分析。

2.2 结果分析

2.2.1 有限元结果分析

图5显示了不安装吸能构件和吸能构件厚度分别为0.8、1.5和2.5 mm时装载机在30°和45°斜坡滚翻后的ROPS及吸能构件变形模式和塑性铰的对比。

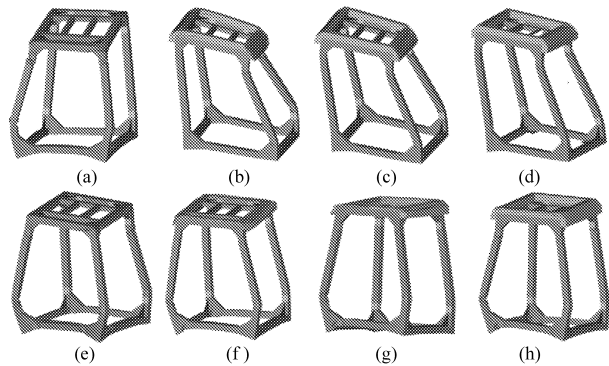


图5 ROPS变形模式对比图

Fig. 5 Comparison deformation of different ROPS

(a) 30°, 0 mm (b) 30°, 0.8 mm (c) 30°, 1.5 mm
(d) 30°, 2.5 mm (e) 45°, 0 mm (f) 45°, 0.8 mm
(g) 45°, 1.5 mm (h) 45°, 2.5 mm

本文所模拟的装载机工况均为空载状态,前后桥荷比约为3.5:6.5。整车后部较重,ROPS的后侧上横梁最先与地面发生碰撞,导致后立柱承受大部分重量,并最先出现塑性铰。从仿真结果可以看到,装载机在30°斜坡滚翻时,吸能构件能够阻止整车的连续翻滚,整车翻车形式的变化导致ROPS的变形模式以及塑性铰的位置发生变化。无吸能构件时,整车发生180°滚翻,顶部承受整车重量致使塑性铰主要产生在后立柱下部。有吸能构件时,整车在下平面发生滑动,ROPS与地面的摩擦导致塑性铰产生在立柱的上部。30°斜坡翻车时,ROPS及其吸能构件变形图如图5a~5d所示。45°斜坡翻车时,有无吸能构件均发生180°翻滚。但是有吸能构件的ROPS塑性铰变形明显比无吸能构件的ROPS的塑性铰变形要小,如图5e~5h所示。整车发生90°滚翻时,ROPS侧向变形较大,发生180°滚翻时,ROPS顶部受压变形较大。

吸能构件刚度较小,滚翻过程中可以有效削弱碰撞过程中的加速度峰值。30°斜坡滚翻ROPS与地面发生碰撞过程中,未安装吸能构件的整车司机H点加速度峰值约为210 m/s,而安装厚度为1.5 mm吸能构件的整车司机H点加速度峰值约为128 m/s,加速度峰值下降约39%。

图6为翻车过程中吸能构件吸收能量随时间变化曲线。结合图5吸能构件变形模式可以看到,30°斜坡滚翻时,安装吸能构件的装载机发生90°翻车,吸能构件仅侧面发生塑性变形。厚度为1.5 mm的吸能构件吸收能量最多。而45°斜坡滚翻工况,装载机均发生180°滚翻,吸能构件侧面和顶端都发生大塑性变形,因此吸收能量明显大于30°斜坡滚翻。厚度为0.8 mm和1.5 mm的吸能构件吸收能量大致相同,而厚度为2.5 mm的吸能构件刚度较大,变形不太明显,吸收的能量也较少。

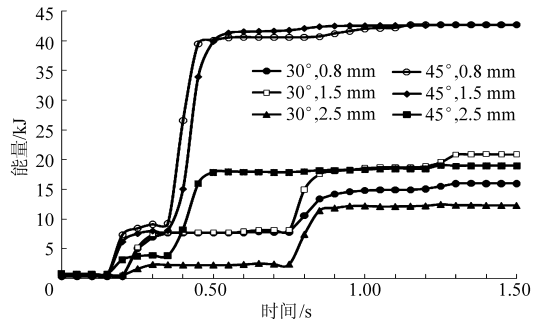


图6 吸能构件吸收能量随时间变化曲线

Fig. 6 Energy vs time response of different energy-absorbing device

2.2.2 人体损伤结果分析

以两点式安全带约束为例,分析吸能构件刚度变化对假人运动状态和损伤的影响。

图7为佩戴两点式安全带时假人运动状态图。

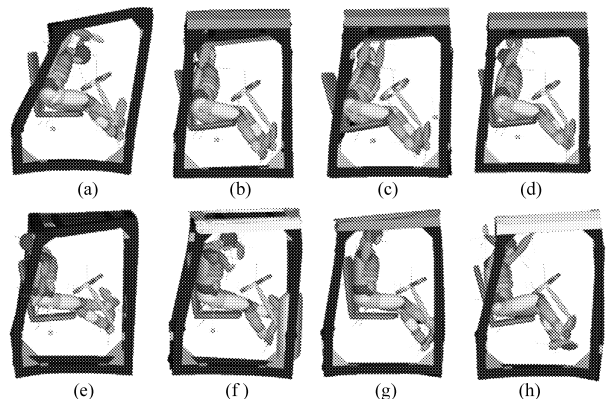


图7 两点式安全带约束下假人的运动状态

Fig. 7 Dummy motion with wearing lap belts

(a) 30°, 0 mm (b) 30°, 0.8 mm (c) 30°, 1.5 mm
(d) 30°, 2.5 mm (e) 45°, 0 mm (f) 45°, 0.8 mm
(g) 45°, 1.5 mm (h) 45°, 2.5 mm

两点式安全带在翻车过程中可以将假人约束在座椅上,减小了假人被抛出车外造成严重伤害的可能。从图 7a~7d 可以看到 30°斜坡滚翻时,整车翻车形式的变化同样导致假人运动状态的变化。无吸能构件时,整车发生 180°滚翻,假人撞向车顶,头部与 ROPS 顶部发生二次碰撞;有吸能构件时,整车发生 90°滚翻,假人与侧门发生碰撞。由图 7e~7h 发现,45°斜坡滚翻,无吸能构件时,假人上躯干以及臀部偏离座椅的距离较大。

表 1 显示了佩戴两点式安全带时人体损伤概率。头部损伤主要是头部与 ROPS 发生二次碰撞造成的损伤。颈部损伤由于挥鞭效应和碰撞的影响,是剪切力和弯矩造成的损伤。胸部损伤主要是碰撞造成的损伤。由有限元分析结果可以看出吸能构件的刚度对 ROPS 的塑性变形量和加速度峰值有较大的影响。ROPS 塑性变形增大,则司机安全生存空间减小;加速度峰值增大,则传递到司机身上的力也随之增大,从而增大了司机与驾驶室内部的二次碰撞风险。

表 1 佩戴两点式安全带时假人损伤概率

Tab. 1 Injury risks in the simulation of dummy model with lap belts

%

损伤部位	指标	30°斜坡滚翻				45°斜坡滚翻			
		0 mm	0.8 mm	1.5 mm	2.5 mm	0 mm	0.8 mm	1.5 mm	2.5 mm
头部损伤	AIS2 的风险	1.46	0.13	0.03	0.28	7.22	1.74	1.97	2.68
	AIS3 的风险	0.07	0	0	0.01	0.99	0.13	0.13	0.21
	AIS4 的风险	0	0	0	0	0.1	0	0	0.1
颈部损伤	AIS3 的风险	8.62	2.77	2.83	3.73	36.8	18.2	7.09	25.6
	AIS5 的风险	3.39	1.64	1.66	1.98	9.8	5.6	2.99	7.3
胸部损伤	AIS3 的风险	0.17	0.14	0.13	0.14	0.26	0.21	0.11	0.28
	AIS5 的风险	0	0	0	0	0.011	0.01	0	0.013

从图 7 和表 1 对比可以验证,吸能构件刚度和斜坡角度对司机的运动状态以及损伤有很大影响。安装吸能构件后,假人头部损伤值最大降幅约 64.5%。30°斜坡翻车时,吸能构件阻止了整车 180°滚翻,并且削弱了头部加速度峰值,降低了挥鞭效应的影响,因此降低颈部损伤概率,颈部损伤值最大降幅约 54.7%。45°斜坡翻车为 180°滚翻,吸能构件顶部受压。吸能构件厚度为 2.5 mm 时,刚度过大,吸收能量也较小,因此头部和颈部损伤概率都比较大。所有工况胸部损伤概率都很小。

度影响较大。

(2) 与未安装吸能构件的 ROPS 相比较,安装吸能构件的 ROPS 能够减少塑性变形量,给司机提供足够的安全生存空间,并且有效削弱碰撞过程中加速度峰值。

(3) 吸能构件的刚度对 ROPS 的塑性变形量和加速度峰值有较大的影响。在本文的仿真条件下,吸能构件的厚度为 1.5 mm 左右可以减少司机与驾驶室内部二次碰撞的风险。

(4) 翻车过程中,司机头部和颈部会有较大损伤概率,且整车翻车的坡度越大,其损伤概率越大。安装吸能构件后,仿真假人头部损伤值最大降幅约 64.5%,颈部损伤值最大降幅约 54.7%,有效地减少了司机损伤概率。

3 结论

(1) 设计的吸能构件在较小坡度工况下能有效阻止整车的连续翻滚,且 ROPS 变形模式受斜坡角

参 考 文 献

- 魏秀玲, 王国强, 王新阁, 等. 工程车辆翻车安全技术研究进展[J]. 工程机械, 2009, 40(8): 50~54.
- Thambiratnam D P, Clark B J, Perrera N J. Performance of a rollover protective structure for a bulldozer[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2009, 135(1): 31~40.
- 葛树文, 崔国华, 马若丁. 基于能量吸收控制的工程车辆倾翻保护结构设计方法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 111~115.
Ge Shuwen, Cui Guohua, Ma Ruoding. Design method for rollover protective structure of engineering vehicle based on energy absorption[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 111~115. (in Chinese)
- 王继新, 王国强, 刘小光, 等. ZL80G 装载机倾翻保护结构侧向加载塑性极限特性[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(6): 903~907.

- Wang Jixin, Wang Guoqiang, Liu Xiaoguang, et al. Plasticity limit characteristic of ZL80G wheel loader roll-over protective structure with lateral loading [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(6):903~907. (in Chinese)
- 5 Clark B J, Thambiratnam D P, Perera N J. Analytical and experimental investigation of the behaviour of a rollover protective structure[J]. Institution of Structural Engineers, 2006,84(1):29~34.
- 6 Clark B J, Thambiratnam D P, Perera N J. Enhancing the impact energy absorption in roll over protective structures[J]. International Journal of Crashworthiness, 2008, 13(2):167~183.
- 7 Clark B J. The behaviour of roll over protective structures subjected to static and dynamic loading conditions[D]. Brisbane: Queensland University of Technology, 2006:165~170.
- 8 于向军,王国强,王继新,等. 工程车辆 ROPS 动态仿真与试验研究[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(增刊1):188~191.
- Yu Xiangjun, Wang Guoqiang, Wang Jixin, et al. Research of roll-over dynamic simulation and test of engineering vehicle ROPS[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009,39(Supp.1):188~191. (in Chinese)
- 9 魏秀玲. 工程车辆翻车事故中司机保护系统性能研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
- Wei Xiuling. Study on the performances of the operator protection system for off-road vehicles in rollover accident[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 10 侯淑娟. 薄壁构件的抗撞性优化设计[D]. 长沙:湖南大学,2007.
- Hou Shujuan. Optimization design of the thin-walled components with crashworthiness criterion[D]. Changsha: Hunan University, 2002. (in Chinese)
- 11 TNO Road-vehicle research institute. MADYMO theory manual, Release 7.1[M]. Delft, The Netherlands: TNO Road - vehicles Research Institute, 2009.
- 12 Yuanzhi Hu, Clive E, Neal-Sturgess A M, et al. Modeling the effects of seat belts on occupant kinematics and injury risk in the rollover of a sports utility vehicle (SUV)[C]. SAE Paper 2007-01-1502, 2007.
-

(上接第5页)

- 4 王阳,席军强,刘富庆,等. 重型车辆整车一体化自动变速技术[J]. 农业机械学报,2009,40(1):15~19.
- Wang Yang, Xi Junqiang, Liu Fuqing, et al. Auto-shift technology through integrated-control method based on heavy truck [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1):15~19. (in Chinese)
- 5 Iannelli L, Vacca V, Vasca F. Gearshift control for automated mechanical transmissions[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(1):17~26.
- 6 朱海涛,张俊智,廖承林,等. 混合动力电动汽车动力总成换挡过程协调控制仿真[J]. 公路交通科技,2005,22(8):131~134.
- Zhu Haitao, Zhang Junzhi, Liao Chenglin, et al. Simulation of integrated gear shifting control for hybrid electric vehicle[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(8):131~134. (in Chinese)
- 7 杨俊英. 重型商用车 AMT 换挡转速同步控制技术研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
- Yang Junying. Study on the synchronization technology of rotate speed of heavy-duty commercial vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2008. (in Chinese)
- 8 曾光奇,胡均安,王东,等. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.