

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.02.009

基于ADAMS和ANSYS的电动汽车 悬架仿真研究*

杨 晓¹, 李耀刚^{1*}, 姜 钊¹, 龙海洋¹, 张文明²

(1. 河北联合大学 机械工程学院, 河北 唐山 063009;

2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对在电动汽车悬架的动力学特性分析中提高分析的准确性问题,对电动汽车悬架仿真研究中的刚性建模、刚柔耦合建模、柔性替换等进行了研究。对电动汽车悬架仿真研究在模型建立过程中出现的“刚性假设与实际工作中刚柔混合情况”的不合理性进行了归纳,提出了一种采用虚拟软件ADAMS和ANSYS对电动汽车悬架进行虚拟分析的仿真方法。利用“ADAMS软件适合于机械系统的动力学和力学分析,不适合于线性和非线性的应力应变分析,而ANSYS软件的适用范围与之刚好相反”的特点,建立了电动汽车的悬架模型,并进行了仿真研究。研究结果表明,优化后的电动汽车悬架模型特性更贴近于实际工作状态下的悬架,提高了悬架模型的准确度,能够较好地解决悬架系统ADAMS建模中的不合理性,为电动汽车实际前悬架的优化设计提供了依据。

关键词: 电动汽车悬架; ADAMS; ANSYS; 联合仿真

中图分类号: TH113; U463 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2015)02-201-05

Co-simulation of electric vehicle suspension based on ADAMS and ANSYS

YANG Xiao¹, LI Yao-gang¹, JIANG Zhao¹, LONG Hai-yang¹, ZHANG Wen-ming²

(1. School of Mechanical Engineering, Hebei United University, Tangshan 063009, China;

2. Civil and Environmental Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming at dynamics analysis of the electric vehicle suspension and in order to improve the accuracy of the analysis, simulation studies of the electric automobile suspension of rigid modeling, rigid coupling modeling, flexible replacement were studied. In the modeling process of simulation studies on suspension of electric cars, there was a rigid assumptions against actual work in mixed rigid irrationality summarized, a simulation method combined virtual software ADAMS and ANSYS was presented to analyze electric vehicle suspension. ADAMS software was suitable for the use of dynamics and mechanics analysis of mechanical systems, was not suitable for linear and non-linear stress-strain analysis, and the scope of ANSYS software with the opposite characteristics, built electric car suspension model and simulation study. The results indicate that the electric vehicle suspension model properties closer to the optimized suspension under actual working conditions, improve the accuracy of the suspension model and to some extent can solve the suspension system ADAMS modeling irrationality. It provides the basis for optimal design of electric vehicles practical front suspension.

Key words: electric vehicle suspension; ADAMS; ANSYS; joint simulation

收稿日期: 2014-09-30

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2010000939)

作者简介: 杨 晓(1989-),女,河北保定人,主要从事电动汽车半主动控制悬架方面的研究. E-mail: yangxiao0222@126.com

通信联系人: 李耀刚,男,教授,硕士生导师. E-mail: jxlyg@heut.edu.cn

0 引 言

悬架是汽车中的一个重要总成,用于传递车轮和车架之间的力和力矩,对于保证汽车在行驶中的平顺性有重要作用,同时可影响汽车的通过性、安全性和操纵稳定性等多项性能。近些年随着国家对新能源的提倡,对电动汽车的研究越来越多。其中对于悬架性能的测试,基本分为实物四分之一台架试验和虚拟样机仿真分析试验。四分之一台架试验方法需要花费大量的人力、物力,设计周期较长。相比而言,利用机械系统动力学仿真分析软件进行虚拟样机试验则具有缩短设计周期、提高工作效率的优点,并且随着计算机技术的发展,虚拟样机技术已经越来越能更好地对系统进行分析和设计。

在众多的优秀仿真软件中,ADAMS 软件适合于机械系统的动力学和力学分析,ANSYS 软件适合于线性和非线性的应力应变分析。两个软件的适用范围刚好相反。将二者联合使用,可达到取长补短的效果。这既因为柔性体的存在能够更准确地描述系统的力学性能,又令柔性特性不太明显的部件以刚体的形式保留,在一定程度上减少了工作量^[1-4]。

本研究利用 ADAMS 通用建模功能,结合电动汽车悬架的测量数据建立电动汽车麦弗逊式悬架模型,再将其中的非线性影响因素轮胎利用 ANSYS 建模分析,最终将在两个软件中分别建立的刚性模型与柔性模型联合起来,对电动汽车悬架模型进行仿真分析。

1 联合仿真基本原理

ADAMS 与 ANSYS 联合仿真建模的关键技术包括三维建模、动力学建模以及接口技术。笔者采用 ADAMS 进行三维建模和动力学建模,采用 ANSYS 进行非线性结构的三维建模,利用 ADAMS/View 模块作为联合仿真的平台^[5]。ADAMS 和 ANSYS 联合仿真流程如图 1 所示。

在 ADAMS 软件中建立电动汽车悬架机械系统的几何模型时,除零件尺寸外,还需要精确的零件间角度的数据。基于 ADAMS 软件的分析特点,研究人员需在假设所有零部件均为刚体的基础上建立刚体结构,并在各个零部件之间添加运动副和运动约束。刚性模型建立完成后,再在 ANSYS 中建立非线性结构车轮的有限元模型,模型的轮胎和轮毂轮辐两部分应分别构建,选取不同的材料特性参数。本研究应用 ANSYS 建立的有限元模型,在通过选择适当的单元对模型进行网格划分,创建模型连接点,在连接点及其

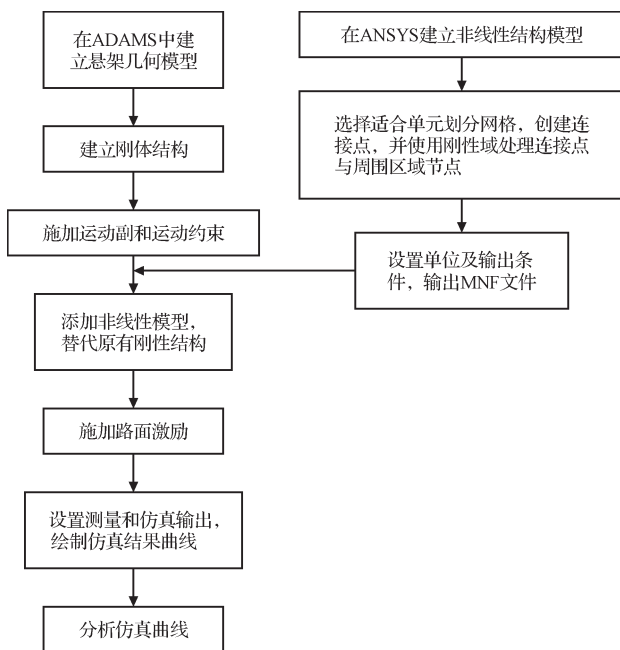


图1 ADAMS和ANSYS联合仿真流程图

周围区域节点使用刚性域处理。通过这个刚性域来传递外部载荷,如轮毂与轮胎的固定副,轮胎与振动台的接触副等。完成后即可设置单位和输出条件,输出可以在ADAMS进行分析的MNF文件。最后,将MNF文件导入到原有的ADAMS刚性模型中,根据原有的刚性模型确定好位置后,再删除掉原有的刚性部分,设置新模型约束和运动,即可进行最终的仿真分析^[6-7]。

2 动力学仿真模型的建立

本研究的电动汽车所使用的悬架为麦弗逊式。为使电动汽车模型更加准确,笔者已先于三维造型软件中建立了悬架虚拟样机,在软件中得到创建悬架模型所需要硬点坐标。对于悬架性能的测试,基本分为实物四分之一台架试验和虚拟样机仿真分析试验。为了便于与台架试验做比较,笔者建立四分之一前悬架模型。

2.1 ADAMS中悬架模型的建立

先假设所有零部件均为刚体,各运动副为刚性连接,车体与轮胎相对于路面只做垂直运动。本研究测量该电动汽车前悬架零部件的空间位置,采用ISO坐标制,以转向节外支点为坐标原点, X 轴与车轮轴线平行, Y 轴竖直向上, Z 轴与两外两轴垂直。取竖直向上为 Y 轴正向,车身右侧为 X 轴正向,以车前进的反方向为 Z 轴正向。该模型包括了上横臂、转向节、下横臂、减振器、车轮、车身、测试平台、转向拉杆等零件。各零件的空间参数如表1所示。

表1 悬架系统硬点坐标参数

硬点	在绝对坐标系中的位置/mm		
	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>
上横臂外支点	239.3	70.7	2.8
上横臂内支点	117.2	67.59	0.7
下横臂外支点	371.52	-139.78	18.31
下横臂内支点	91.89	-103.65	0
转向拉杆外支点	278.58	-13.75	108.09
转向拉杆内支点	127.2	-13.75	104.26
转向节外支点	0.0	0.0	0.0
转向节内支点	100.7	0.0	0.0
减振器下安装点	190.6	68.7	1.9
减振器上安装点	190.6	535.885	1.9
车轮中心	69.0	0.0	0.0

构件之间的约束包括5个球副,3个固定副,2个旋转副,2个移动副,1个点面约束副,1个万向副,1个驱动约束。模型主要运动副信息如表2所示。

表2 模型主要运动副信息

名称	属性	构件1	构件2
JOINT1	转动副	下控制臂	大地
JOINT2	球副	转向拉杆	大地
JOINT3	球副	转向拉杆	拉臂
JOINT4	固定副	转向节	主销
JOINT5	移动副	测试平台	大地

建立好的模型如图2所示。

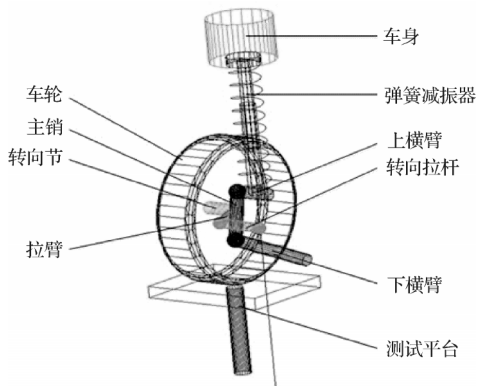


图2 四分之一悬架多体动力学模型

此时模型零部件全部为刚性,由于转向拉杆在实际工作过程中易产生变形,它之前的刚性假设不能成立。笔者使用ADAMS中的FLEX功能进行柔化,将转向拉杆柔化为8个相连的小刚性体组成的模型,删除原有的拉杆模型,并在新模型处建立与之相对的运动副^[8]。

2.2 ANSYS中对车轮模型的优化

本研究在ANSYS中采用自底向上的建模方法。轮胎和轮毂轮辐部分均采用20节点的SOLID186单元。

本研究设置轮胎的弹性模量为0.8 GPa,泊松比为0.4,密度为1 200 kg/m³;轮毂轮辐部分弹性模量为200 GPa,泊松比为0.3,密度为7 800 kg/m³。车轮大小数据参考之前在ADAMS中所建模型。轮胎数据由轮胎厂家提供,由于轮毂轮辐造型复杂,且其形状对分析影响较小,遂将其简化^[9]。

在ANSYS中建立的轮胎有限元模型和轮毂轮辐简化后的有限元模型如图3所示。

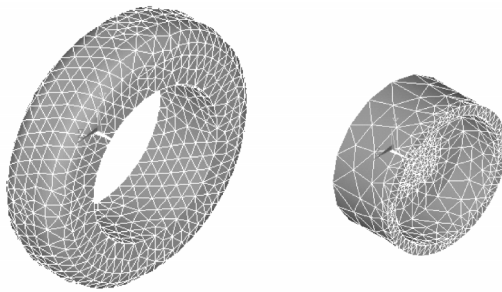


图3 轮胎与轮毂轮辐有限元模型

图3中的模型需要根据车轮在实际运动中的关系,通过ANSYS软件,在外联点以及周围节点间创建刚性区域。这个刚性区域可以用来传递外部载荷对车轮的位置和运动关系。最后,笔者将刚性域设置抽取的模态阶数为6,生成MNF文件。

2.3 优化后的整体模型

本研究在原有的ADAMS模型中导入ANSYS有限元模型。先将轮毂轮辐的模型导入,参考原有车轮刚性模型中心位置,确定放置位置坐标。再导入轮胎模型,以同样的方法确定放置坐标后,删除原有车轮模型,对新导入的模型建立相应的运动副和连接。重新建立起来的四分之一悬架多体动力学模型如图4所示。

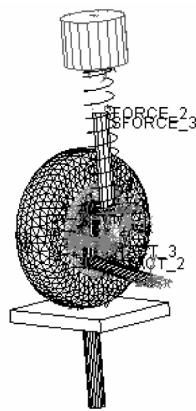


图4 优化后的四分之一悬架多体动力学模型

3 仿真试验及结果分析

本研究通过测试平台对模型施加±50 mm的路面激励来分析悬架工作过程中各零件的振动情况及其

相对位置变化。在所建立的模型窗口中选择 Simulation 菜单中的参数设置,在弹出的设置仿真参数对话框中设置仿真时间和步数,然后选择 Start,开始仿真。

本研究利用 ADAMS_View 中的测量功能编辑函数,分别测量优化前后模型的主销内倾角、主销后倾角、前轮外倾角和前轮前束角^[10],测得的角度随时间变化曲线如图(5~8)所示。

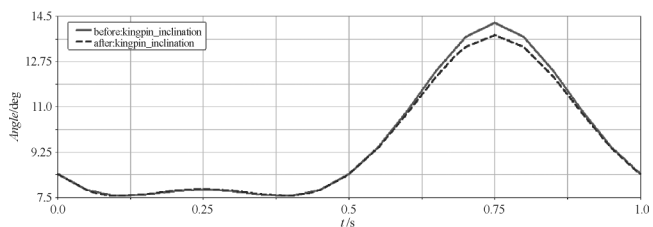


图5 模型优化前、后主销内倾角对比

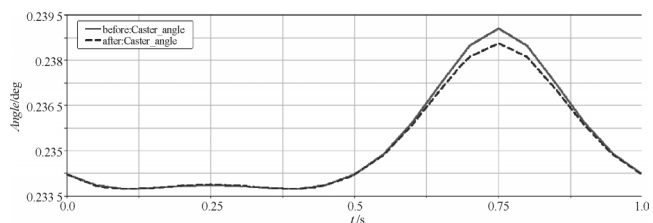


图6 模型优化前、后主销后倾角对比

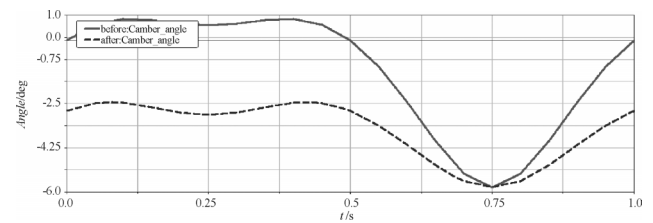


图7 模型优化前、后前轮外倾角对比

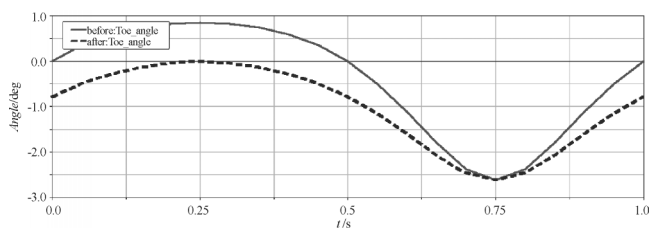


图8 模型优化前、后前轮前束角对比

由图(5~8)分析可知,悬架系统全部使用刚性建模时,与将模型柔化后的仿真结果曲线显示出同样的变化规律,但是峰值产生了明显不同。尤其是分析前轮外倾角和前轮前束角的起始值。在通常的悬架性能分析乃至汽车整体性能分析中,这4个角度值被普遍作为优化依据加以控制,由于角度的变化范围本身有限,这种程度的区别会对今后悬架的优化分析产生较大影响,凸显了此次优化模型的必要性。

为了进一步对仿真结果进行分析对比,仿真结果可以在 Adams-PostProcessor 中再次进行编辑和处理。

以轮胎的纵向跳动结果为纵轴,车轮纵向跳动结果曲线如图9所示。利用 Date 选项,分别用之前测量到的4个角度为横轴,可得到悬架模型特性曲线^[11]如图(10~13)所示。

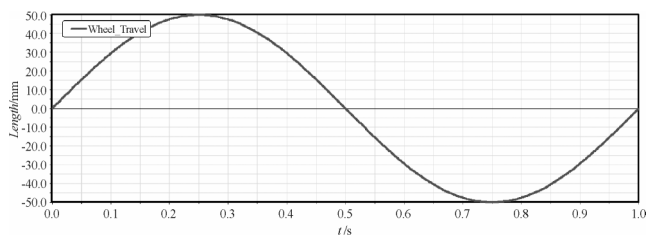


图9 轮胎纵向跳动曲线

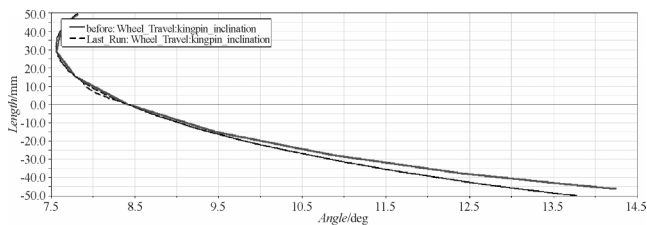


图10 模型优化前、后主销内倾角随车轮跳动变化曲线

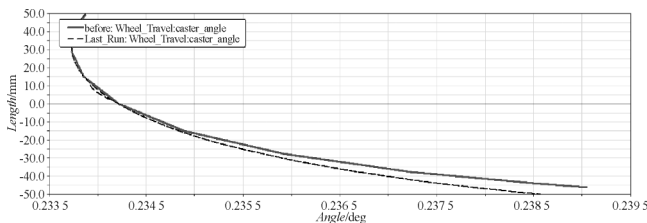


图11 模型优化前、后主销后倾角随车轮跳动变化曲线

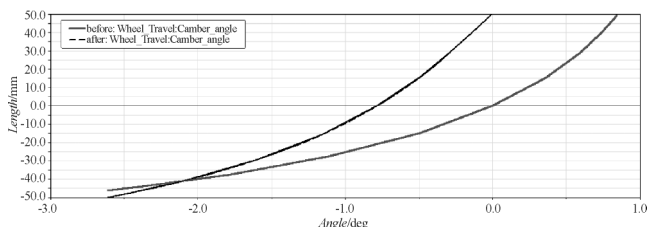


图12 模型优化前、后前轮外倾角随车轮跳动变化曲线

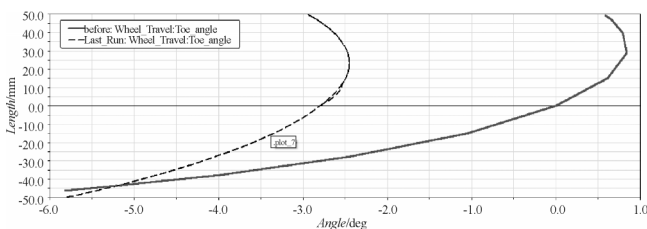


图13 模型优化前、后前轮前束角随车轮跳动变化曲线

根据电动汽车悬架特性分析结果,通过分析如图(10~13)所示结果可清楚地看到模型优化前后的变化。主销内倾角和主销后倾角在悬架处于平衡位置时的变化不大,但在最大值上分别有15%和9%的减小;前轮外倾角最大值减小了1°,占到模型优化后前轮外倾角变化幅值的38%;前轮前束角的变化最为明

显,最大值的变化达到 2.8° ,占优化后前束角变化范围的76%。

4 结束语

本研究对电动汽车悬架进行的 ADAMS 和 ANSYS 联合仿真,汲取了两个动力学分析软件的优点,充分利用 ADAMS 的柔性建模功能,建立刚柔混合的电动汽车悬架四分之一模型,并利用 ANSYS 对悬架模型进一步优化。

通过在虚拟实验台上进行跳动仿真分析,证实了单独刚性建模与该种方法的刚柔混合建模在仿真分析结果上的差异。通过提高悬架分析的准确性,一定程度上弥补了悬架建模时刚性假设在实际分析中的不足,也为今后的电动汽车悬架结构优化提供可靠的分析依据。

参考文献(References):

[1] ZHENG Xiao-ya, YOU Jun-feng. Application of ADAMS and ANSYS to mechanism analysis [J]. **Journal of Solid Rocket Technology**, 2010, 33(2): 201-204.

本文引用格式:

杨 晓,李耀刚,姜 钊,等. 基于 ADAMS 和 ANSYS 的电动汽车悬架仿真研究[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 201-205.

YANG Xiao, LI Yao-gang, JIANG Zhao, et al. Co-simulation of electric vehicle suspension based on ADAMS and ANSYS [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015, 32(2): 201-205.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 200 页)

料载荷数据库系统为支撑,这对于企业经验的积累以及后续程序开发的继承提供了方便,也是将来 CAE 发展的方向之一。

(3) 本研究以车门抗凹分析为例,利用抗凹流程自动化系统,能够为其前处理工作节约了约 92.8% 的时间,验证了该流程自动化系统的有效性,大大提高了企业研发效率,对于企业开发类似的流程自动化系统具有一定的指导意义。

参考文献(References):

[1] THOMAS D. The numerical prediction of panel dent resistance incorporating panel [M]. Waterloo: the University of Waterloo, 2001.

[2] 陆志成. 基于 Abaqus 的汽车天窗顶盖刚度分析[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(2): 135-137.

[3] 谢 颖,李晓晨,李志强,等. Abaqus 在车身外覆盖件抗凹性分析中的应用[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(2): 152-154.

[4] 韦永平,邓国红,杨鄂川,等. 某乘用车车门抗凹陷性能分

[2] 庞 辉,彭 威,原 园. 随机激励下重载车辆空气悬架参数多目标优化[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 156-160.

[3] 郑黎明. 基于 ADAMS 和 Simulink 的太阳跟踪器联合仿真[J]. 光学精密工程, 2014, 5(5): 1212-1219.

[4] 乔长胜. 基于 CATIA 与 ADAMS 微型电动汽车前悬架优化设计[J]. 河北工业大学学报, 2014, 43(1): 40-43.

[5] 蔡恒兴,金志扬,李劲松. 刚柔耦合麦弗逊式悬架优化分析[J]. 机械设计与制造, 2014(9): 37.

[6] 王宏楠,李 锦,苏小平. 基于 ANSYS 与 ADAMS/Car 联合仿真的轿车副车架结构分析[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(3): 410-412.

[7] 杜永忠,平雪良,何佳唯. 基于 ADAMS 的机器人系统仿真技术研究[J]. 工具技术, 2014, 33(3): 410-412.

[8] 骆 阳,智淑亚,张 劫. 基于 ADAMS 的方程式赛车前悬架分析与优化[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 37-41.

[9] 董军哲,杨建伟,李 敏. 悬架参数多目标性能优化[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(2): 123-127.

[10] 葛绪坤,刘大维,朱龙龙. 刚柔耦合的自卸汽车举升机构动力学分析[J]. 机械设计与研究, 2014, 30(3): 45-47, 51.

[11] 左曙光,段向雷,吴旭东. 电动轮一悬架系统台架振动特性试验分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(12): 165-170.

[编辑:李 辉]

析及优化[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014, 28(3): 28-32, 43.

[5] 胡从义. 基于数值模拟的发动机罩抗凹性能优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2014, 52(7): 55-59.

[6] 曹文岗,范 超. 基于 HyperWorks 的 CAE 流程自动化系统设计开发[J]. 工程图学学报, 2011(1): 16-21.

[7] 孙 静,黄雪飞,李慧萍,等. 基于 HyperWorks 的流程自动化系统开发与应用[J]. 铁路计算机应用, 2012, 21(12): 30-33.

[8] 郑国君,门永新,胡 平,等. 基于知识平台的 CAE 后处理流程化平台关键技术[J]. 机械工程学报, 2011, 47(17): 112-117.

[9] OUSTERHOUT J K, JONES K. TCL and the TK Toolkit [M]. 2nd Edition. Reading: Addison- Wesley Publishing Company, 1994.

[10] Altair HyperWorks12. 0 Reference Guide [EB/OL]. [2013-03-05]. [HTTP://www.altairHyperWorks.com.cn](http://www.altairHyperWorks.com.cn).

[11] 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:华南理工大学机械与汽车工程学院, 2012.

[编辑:李 辉]