

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2022.03.006

# 基于 Trucksim 的城市客车 典型工况悬架动载荷提取

黄登峰<sup>1,2</sup>, 胡明建<sup>1,2</sup>, 闫晓磊<sup>1,2</sup>, 林光磊<sup>2</sup>, 石志纲<sup>3</sup>

- (1. 福建工程学院 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;  
2. 福建省汽车电子与电驱动重点实验室, 福建 福州 350118;  
3. 福建坤孚股份有限公司, 福建 龙岩 364302)

**摘要:**以城市客车为平台,分析其车辆动力学各子系统的型式和参数,根据现有积累的试验测试数据,采用 Trucksim 软件建立整车多体动力学模型。在此基础上,对城市客车制动、转弯、冲击及扭曲等典型运行工况进行动态模拟,提取出悬架系统各部件的受力情况,包括弹簧、减震器等。结果表明,城市客车在冲击工况下悬架整体受载最大。该仿真结果能够为城市客车有限元模型各典型工况下的载荷施加提供精确的输入,有利于提高受力分析的准确度。

**关键词:**城市客车;多体动力学;载荷提取;Trucksim

中图分类号:U461.1

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2022)03-0239-05

## Dynamic load extraction of suspension under typical working conditions for city bus based on Trucksim

HUANG Dengfeng<sup>1,2</sup>, HU Mingjian<sup>1,2</sup>, YAN Xiaolei<sup>1,2</sup>, LIN Guanglei<sup>2</sup>, SHI Zhigang<sup>3</sup>

- (1.School of Mechanical and Automobile Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;  
2.Fujian Key Laboratory of Automotive Electrics and Electric Drive, Fuzhou 350118, China;  
3.Fujian Kunfu Co., Ltd., Longyan 364302, China )

**Abstract:** With the city bus as a platform, the types and parameters of each subsystem of vehicle dynamics were analyzed, and the multi-body dynamics model of the vehicle was established by Trucksim software according to the existing accumulated test data. On this basis, the dynamic simulation of the typical working conditions such as braking, turning, impact and torsion of the city bus was carried out, and the force of each component of the suspension system, including spring and shock absorber, was extracted. Results show that the overall load of the suspension of the city bus is the largest under the impact condition. The simulation results can provide accurate input for the load application of the finite element model of the city bus under various typical working conditions, which is beneficial to improve the accuracy of the force analysis.

**Keywords:** city bus; multi-body dynamics; load exaction; Trucksim

客车在实际运行工况下的结构强度直接影响行车安全性。目前客车结构有限元分析通常采用近似等效约束法,其边界条件的施加方法为约束车轮装配节点处的自由度,其载荷的施加方法为

设置各方向的等效重力加速度<sup>[1-3]</sup>。但是约束点的反作用力会引起局部应力集中,影响分析精度;而等效重力加速度一般根据经验取常数值,并没有考虑到客车实际行驶时复杂的动态载荷,存在

收稿日期:2022-02-21

基金项目:福建省科技计划引导性项目(2020H0020);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT190425);福建工程学院科研启动基金(GY-Z17004)

第一作者简介:黄登峰(1984—),男,福建莆田人,讲师,博士,研究方向:汽车 CAE 及轻量化技术。

一定的误差。惯性释放法不需要对模型施加约束,可以消除约束反力的不利影响<sup>[4]</sup>。其具体方法是通过多体动力学分析得到典型工况下悬架铰接点的力,再将这些力施加到客车结构上进行静力学分析。

为了提取到典型工况下车辆的悬架系统受到的载荷,目前的研究一般是采用面向结构的多体动力学软件 ADAMS(automatic dynamic analysis of mechanical systems)。基于 ADAMS,文献[5]建立了某乘用车的多体动力学模型并分析获得了车身连接点的载荷;文献[6]分析了搬运车各关键受力部件在典型运动工况下的载荷曲线;文献[7]研究了客车在典型工况下各总成的动态峰值力。面向结构的 ADAMS 需要的参数繁多、建模过程较复杂、计算速度较慢。特别是在汽车概念设计阶段,车辆的详细结构参数尚未确定或不易获取,较难利用 ADAMS 获取载荷。而面向特性的多体动力学软件 Trucksim 具有建模方便、所需参数较少、计算速度快等优点,在车辆动力学建模和仿真方面得到了广泛的应用。文献[8]利用 Trucksim 对整车参数化建模后,参照我国汽车操纵稳定性试验标准,选择方向盘转角阶跃试验进行仿真验证;文献[9]基于 Trucksim 建立了超大型车辆动力学模型,研究了负载条件和路况对道路弯道段安全行驶速度阈值的影响。

鉴于多体动力学软件 Trucksim 适用于车辆概念设计阶段的动载荷提取,本研究利用其对城市客车建模并分析其在制动、转弯、冲击、扭转等 4 大典型工况下的动力学行为。

# 1 城市客车动力学建模

本研究基于 Trucksim 的模块化参数化建模特性,针对 12 m 城市客车进行整车动力学建模,包括城市客车主要参数、空气动力学、轮胎系统、转向系统、动力系统、悬架系统和制动系统等 7 大子模块的动力学参数和特性建模<sup>[10-12]</sup>,为典型工况悬架动载荷提取奠定基础。

## 1.1 城市客车主要参数

城市客车主要参数主要包括汽车整体尺寸等几何参数和质量、质心、惯量等力学参数等,需要在软件里设置有关车辆的簧载质量尺寸和重量信息,如表 1 所示。其中绕  $x$ 、 $y$  和  $z$  轴的转动惯量按软件默认值设置。

表 1 城市客车主要参数		
Tab.1 Main parameters of city bus		
名称	单位	参数值
车体高度	mm	3 070
车体宽度	mm	2 550
车体长度	mm	11 980
轴距	mm	6 100
总质量	kg	18 000
簧载质量	kg	16 000
簧载质心 $x$ 坐标	mm	3 900
簧载质心 $y$ 坐标	mm	0
簧载质心 $z$ 坐标	mm	1 350

## 1.2 空气动力学

空气动力学效应在车辆模型中通过作用在簧载质量中某一点上的力和力矩来表示。该点称为空气动力学参考点,由簧载质量坐标系中的  $x$ 、 $y$  和  $z$  坐标定义,其坐标为  $(-3\ 900,0,0)$ 。车辆正投影面积为  $7.8\text{ m}^2$ ,参考长度为  $6\ 100\text{ mm}$ ,空气密度为  $1.2\text{ kg/m}^3$ ,6 个空气动力学系数采用软件默认值。

## 1.3 轮胎系统

在 Trucksim 中,轮胎系统的设置主要包括垂直力、滚动阻力和其他剪切力及力矩、动画设置、动瞬态属性以及接点尺寸等 5 部分。城市客车采用的是前轴单胎、后轴双胎,轮胎型号为 275/70R22.5。因此在软件中选用内部轮胎模型,滚动半径  $510\text{ mm}$ ,垂直刚度为  $980\text{ N/mm}$ ,轮胎宽度为  $275\text{ mm}$ 。

## 1.4 转向系统

在 Trucksim 中,转向系统的设置包括左右舵选择、转向传动比、转向运动学参数、转向动力学参数、轴转向特性、主销几何参数等。结合城市客车的实际转向系统,在软件中选择重载商用车里的长轴距类型转向系统,设置转向传动比为 25,主销内倾角为  $7^\circ$ ,主销后倾角为  $1.5^\circ$ ,车轮纵向拖距为  $0\text{ mm}$ ,车轮横向拖距为  $100\text{ mm}$ 。

## 1.5 动力系统

在 Trucksim 中,动力系统包括发动机、变矩器、变速器、差动器 4 个部分。城市客车的驱动类型为发动机后轴驱动,在软件里选择动力系统为

“225 kW 7-speed MT”,其发动机额定功率为 225 kW、变速器采用手动 7 档、主减速比为 4.4。

1.6 悬架系统

Trucksim 的悬架系统分成运动学和弹性动力学两大部分。悬架运动学包括质量惯量、几何尺寸、定位参数及其他运动学参数。悬架弹性动力学包括弹簧、减振器、缓冲块及其他弹性动力学参数。城市客车前后悬架类型均为非独立悬架,在软件中按照表 2 所示设置其主要参数。

表 2 城市客车前后悬架系统主要参数

Tab.2 Main parameters of front and rear suspension system of city bus

名称	单位	参数值
前后轮距	mm	2 054/1 860
前后桥非簧载质量	kg	500/1500
前后弹簧刚度	N/mm	250/460
前后减振器阻尼	kN · m/s	15/20
前后车轮外倾角	(°)	1/0
前后车轮前束角	(°)	1/0

1.7 制动系统

车辆的制动系统通过驾驶员和防抱死制动 (ABS)、电子稳定控制 (ESC) 等系统的控制在车轮上产生制动力矩。在 Trucksim 中,制动系统通过踏板力或主缸的流体压力来执行控制。在软件中采用第二种类型的制动控制方式,其制动力矩为 7.5 kN · m 并带有 ABS。

2 城市客车典型工况载荷提取

在建立城市客车整车动力学模型的基础上,通过定义路面环境及驾驶控制来建立试验工况,即可实现车辆在各种工况下的动力学行为仿真和分析。城市客车在实际运营中一般包括制动、转弯、冲击、扭转 4 大典型工况,本研究对这 4 大工况进行动力学仿真,提取出各工况下悬架系统某一受力最大时刻的弹簧和减震器受力,以便为城市客车有限元结构分析提供准确的输入。

2.1 制动工况

仿真路面为平直长路面,以初始时速为 100 km/h 开始刹车直到停止,仿真时间为 12 s。仿真结果如图 1 和 2 所示。

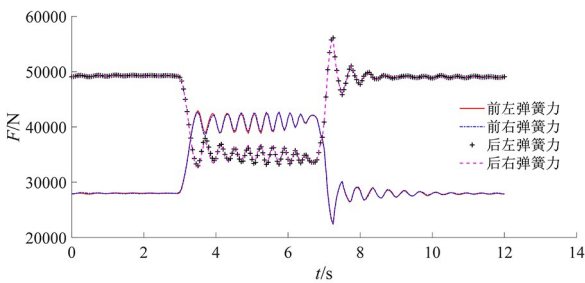


图 1 制动工况弹簧受力图

Fig.1 Spring force diagram under braking conditions

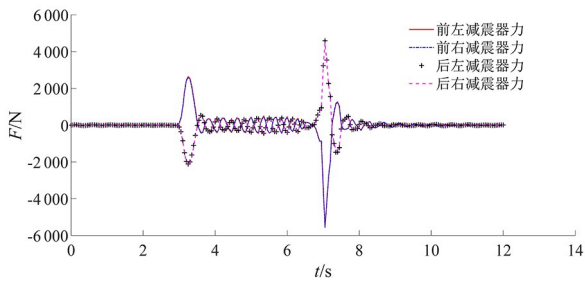


图 2 制动工况减震器受力图

Fig.2 Force diagram of shock absorber under braking conditions

由图 1 和图 2 可知,在紧急制动工况下,当  $t = 7.25\text{ s}$  时,悬架整体受力最大,各部件受到的垂直力为:前轮左弹簧 22 505 N、前轮右弹簧 22 371 N、后轮左弹簧 56 096 N、后轮右弹簧 55 724 N、前轮左减震器-5 501 N、前轮右减震器-5 575 N、后轮左减震器 4 592 N、后轮右减震器 4 486 N。

2.2 转弯工况

道路转弯半径为 500 英寸(约 152.4 m),速度为从 0 开始加速,加速度为  $1.11\text{ m/s}^2$  仿真时间为 100 s。仿真结果如图 3 和图 4 所示。

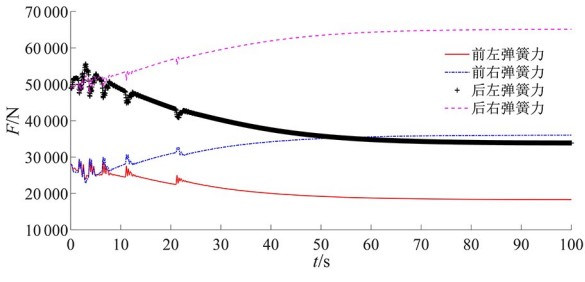


图 3 转弯工况弹簧受力图

Fig.3 Spring force diagram under turning condition

由图 3 和图 4 可知,在转弯工况下,当  $t = 80\text{ s}$  时,悬架整体受力最大,各部件受到的垂直力

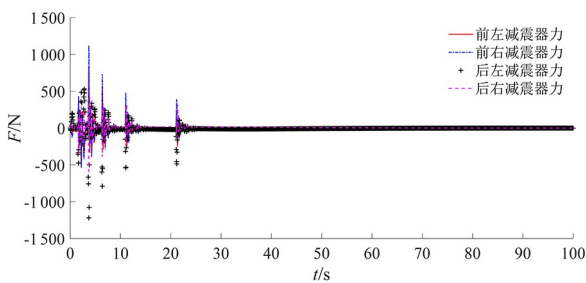


图 4 转弯工况减震器受力图

Fig.4 Force diagram of shock absorber under cornering conditions

为:前轮左弹簧 18 398 N、前轮右弹簧 35 932 N、后轮左弹簧 34 040 N、后轮右弹簧 64 972 N、四套减震器均为 0 N。

2.3 冲击工况

设置路面减速带的高度为 10 cm,以模拟车辆过减速带受到的冲击,车速为 80 km/h,仿真时间为 7 s。仿真结果如图 5、图 6 所示。

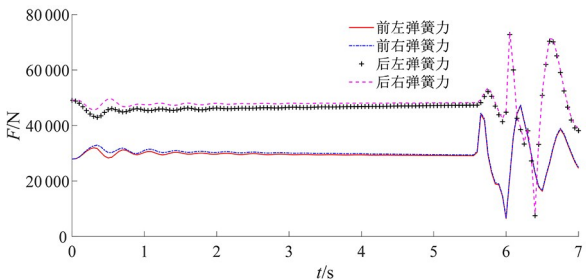


图 5 冲击工况弹簧受力图

Fig.5 Force diagram of spring under impact conditions

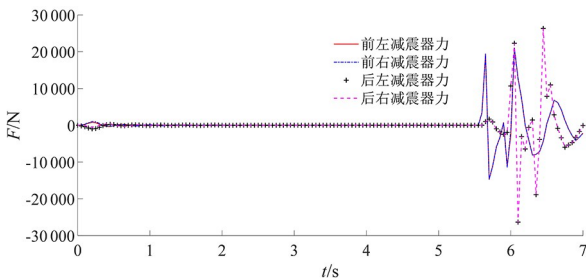


图 6 冲击工况减震器受力图

Fig.6 Force diagram of shock absorber under impact conditions

由图 5 和图 6 可知,在冲击工况下,当  $t = 7.25$  s 时,悬架整体受力最大,各部件受到的垂直力为:前轮左弹簧 21 329 N、前轮右弹簧 215 651 N、后轮左弹簧 72 801 N、后轮右弹簧 73 606 N、前轮左减震器-21 024 N、前轮右减震器 2 111 N、后

轮左减震器 22 298 N、后轮右减震器 22 227 N。

2.4 扭转工况

前后轮左右过 10 cm 减速带以模拟车辆受扭,车速为 80 km/h,仿真时间为 8 s。仿真结果如图 7 和图 8 所示。

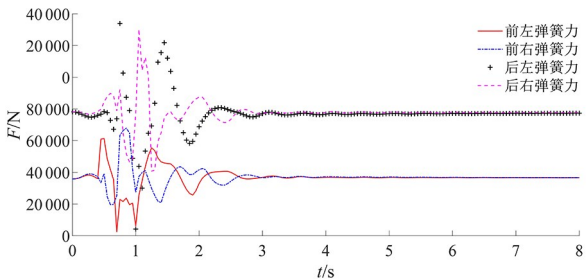


图 7 扭转工况弹簧受力图

Fig.7 Spring force diagram under torsion conditions

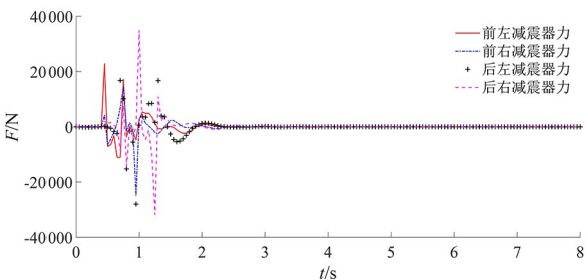


图 8 扭转工况减震器受力图

Fig.8 Force diagram of shock absorber under torsion conditions

由图 7、图 8 可知,在扭转工况下,当  $t = 0.75$  s 时,悬架整体受力最大,各部件受到的垂直力分别为:前轮左弹簧 21 443 N、前轮右弹簧 41 674 N、后轮左弹簧 76 972 N、后轮右弹簧 56 081 N、前轮左减震器-17 207 N、前轮右减震器 14 690 N、后轮左减震器 10 168 N、后轮右减震器 7 673 N。

3 结语

本研究基于 Truksim 软件,在分析整车主要参数、空气动力学、轮胎、转向、动力、悬架和制动等 7 大子模块的动力学参数和特性的基础上,建立了城市客车多体动力学模型。该模型考虑城市客车实际运行的 4 个典型工况,建立了虚拟路面并定义驾驶控制控制输入以进行模拟仿真,分析出了悬架系统中弹簧和减震器的动载荷曲线,提取出某一受力最大时刻的悬架部件受力值。研究结果表明,在制动、转弯、冲击及扭曲四大工况中,城市客车在冲击工况下悬架整体受力最大,扭转



工况次之,制动和转弯工况受力较小,在后续的有

分析提供更符合实际运行工况的载荷输入,以提

限元分析中特别要注意考核城市客车在冲击工况

升结构分析的精确性和可靠性。

下的结构强度。本研究可以为城市客车的有限元

参考文献:

[1] 王旭飞, 焦登宁, 谭飞, 等. 基于灵敏度分析的客车骨架轻量化设计[J]. 现代制造工程, 2021(9): 52-57.

[2] 方学良, 陈靖芯, 景科, 等. 客车车身骨架静态特性分析及优化[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2019, 22(3): 65-68, 78.

[3] 王钰明, 顾添翼, 戴其燕, 等. 基于改进响应面法的纯电动客车车身结构优化设计[J]. 机械设计, 2019, 36(S1): 97-103.

[4] 丁晓明, 吕俊成, 王伟. 基于典型工况的汽车后桥壳结构轻量化优化设计[J]. 中国机械工程, 2016, 27(8): 1047-1052.

[5] 苗冬梅. 基于车辆系统动力学建模仿真的整车疲劳载荷分析研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.

[6] 张波, 王泽康. 基于 ADAMS 的防爆特殊型铲板式搬运车动力学分析[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(S2): 108-112.

[7] 周美施, 尹怀仙, 张铁柱, 张洪信, 刘高君. 基于动态峰值力的客车骨架轻量化研究[J]. 现代制造工程, 2017(05): 59-64.

[8] LI L H, GUO T Y, XU S J. Simulation analysis of vehicle handling stability based on trucksim[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1885(3): 032043.

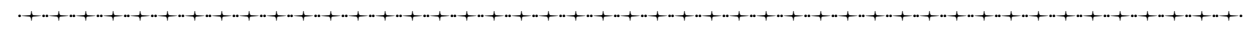
[9] 王传连, 胡月琦, 李平. 基于 TruckSim 的装载工况影响下弯道安全车速阈值[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(6): 1337-1346.

[10] 唐歌腾, 任春晓, 李臣. 基于 Trucksim 的不同弯道半径安全车速确定方法[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 134-139.

[11] 吴涛, 焦静, 范学琼, 等. 基于 Trucksim 的整车动力性能仿真分析[J]. 汽车实用技术, 2016(6): 63-65.

[12] 章雪华, 石柏军, 李岩. 基于 Trucksim 整车操纵稳定性仿真分析研究[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(2): 30-34.

(责任编辑: 方素华)



(上接第 238 页)

[7] KUMAR M, EHSAN ASGAR M. Implementation of regenerative braking system in automobiles[M] //Lecture Notes in Mechanical Engineering. Singapore: Springer Singapore, 2020: 595-601.

[8] HAN J, PARK Y, PARK Y. Cooperative regenerative braking control for front-wheel-drive hybrid electric vehicle based on adaptive regenerative brake torque optimization using under-steer index[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(6): 989-1000.

[9] 杨海圣, 姬芬竹, 杨世春. 基于 Simulink-Cruise 联合仿真的制动能量回收系统研究[J]. 控制工程, 2018, 25(6): 1086-1090.

[10] LI C, HE C K, YUAN Y, et al. Braking evaluation of integrated electronic hydraulic brake system equipped in electric vehicle[C] //2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference. Chengdu, China: IEEE, 2019: 2361-2365.

[11] MA Z W, SUN D X. Energy recovery strategy based on ideal braking force distribution for regenerative braking system of a four-wheel drive electric vehicle[J] //IEEE Access. IEEE, 2020(8): 136234-136242.

[12] 刘威, 祁宏钟, 刘新田, 等. 纯电动汽车串联式再生制动控制策略建模与仿真[J]. 轻工机械, 2019, 37(1): 70-73, 77.

[13] VODOVOZOV V, PETLENKOV E, RAUD Z, et al. Torque control in blended antilock braking systems of electric vehicles [C] //2018 16th Biennial Baltic Electronics Conference (BEC). Tallinn, Estonia. IEEE, 2018: 1-4.

[14] 中华人民共和国工业和信息化部. 中国汽车行驶工况第 1 部分: 轻型汽车: GB/T 38146.1-2019[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

(责任编辑: 方素华)