

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.058

基于 LMS 的重卡驾驶室空气弹簧悬置系统分析

张长江, 薛晶

(内蒙古农业大学 机电工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 为了提高车辆的平顺性, 研究基于 LMS 的重卡驾驶室空气弹簧悬置系统。利用 LMS Virtual. Lab Motion 软件建立驾驶室悬置系统的多体动力学有限元模型, 提出基于 LMS Motion TWR 混合路谱的方法并进行仿真, 分析各相关参数对系统平顺性的影响程度。通过分析驾驶室悬置系统刚度、阻尼参数对振动的影响, 对悬置和座椅之间的阻尼橡胶衬套阻尼及动态刚度进行联合匹配, 并研究相关参数对整车平顺性的影响。通过采用现代设计方法提高仿真结果的精度, 为重卡驾驶室悬置系统的前期开发设计和相关参数对性能影响的分析提供了一种研究方法。

关键词: 卡车; 平顺性; 驾驶室; 悬置系统; LMS; 空气弹簧

中图分类号: U463.33⁺4.2 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0294-05

Analysis of Heavy Truck Cab Air Spring Suspension System Based on LMS

ZHANG Changjiang, XUE Jing

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010018, China)

Abstract: In order to improve the smoothness of vehicles, a heavy truck cab air spring suspension system based on LMS is studied. Utilizing LMS Virtual. Lab Motion software, a multi body dynamic finite element model of the cab suspension system is built, a hybrid road spectrum method based on LMS Motion TWR is proposed, on which the simulation is conducted, and the impact of various relevant parameters on the smoothness of the system is analyzed. By analyzing the influence of stiffness and damping parameters of the cab suspension system on vibration, a joint matching of damping rubber lining damping and dynamic stiffness between the suspension and seat is conducted, and the influence of relevant parameters on the overall smoothness of the vehicle is studied. Modern design methods are adopted to improve the accuracy of simulation results, which provides a research method for the early development, design and analysis of the performance impact of relevant parameters on the heavy truck cab suspension system.

Keywords: trucks; smoothness; driver's cab; suspension system; LMS; air spring

0 引言

重卡是一种具备较大载重能力、强大动力系统和耐久可靠性的商用车辆, 适用于运输重载货物和应对复杂路况的需求^[1]。随着用户对重卡车辆平顺性、舒适性要求的日益提高, 如何降低车辆的振动频率、改善车辆的平顺性是目前汽车设计者研究的目标。

本文研究重卡驾驶室悬置系统的隔振能力及相关参数对整车平顺性的影响, 综合分析悬置、座椅、减振器、稳定杆橡胶衬套的刚度和阻尼, 提出如何选择和匹配驾驶室悬置系统各相关参数才能达到更好的隔振效果, 提高驾驶室的舒适性能。

1 驾驶室悬置的隔振原理

驾驶室悬置系统的隔振能力和水平反映了车

辆的设计水平, 更是车辆赢得用户认可的关键技术。车辆具有优良的低噪声和低振动逐渐变成车辆技术标准和法规的强制要求^[2]。车辆驾驶室悬置系统的振动是一个多自由度、多刚体的振动^[3], 对它的隔振原理分析时, 必须作出相关假设, 以便能简化问题并定性分析出驾驶室振动的特性。提出的假设如下:

- 1) 底盘车架系统作为绝对刚体考虑;
- 2) 驾驶室旋转方向的角速度考虑定值;
- 3) 驾驶室在三向的振动及旋转运动没有关联。

单独研究驾驶室在 3 个方向的振动问题时^[4], 根据以上的 3 点假设条件, 只考虑驾驶室在垂直方向的 1 个自由度的振动问题, 来分析驾驶室的隔振原理, 如图 1 所示。

第一作者简介: 张长江(1976—), 男, 内蒙古包头人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为车辆工程, 729480871@qq.com。

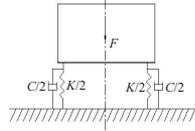


图1 驾驶室悬置系统垂向1个自由度的振动

在图1中,设驾驶室垂向激振力为 $F\sin\omega t$,其中忽略弹簧质量影响,系统的振动运动微分方

$$F_T = \sqrt{(kX)^2 + (c\omega X)^2} = kX\sqrt{1 + (c\omega/k)^2} = \frac{F_0\sqrt{1 + (c\omega/k)^2}}{\sqrt{(1 - m\omega^2/k)^2 + (c\omega/k)^2}} = \frac{F_0\sqrt{1 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}}{\sqrt{[1 - (\omega/\omega_n)^2]^2 + (2\zeta\omega/\omega_n)^2}} = F_0\sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (3)$$

式中: k 为弹簧刚度, N/m; ω 为振动频率, rad/s; ω_n 为系统的固有频率, $\omega_n = \sqrt{k/m}$, rad/s; m 为系统质量, kg; ζ 为阻尼比, $\zeta = c/c_c$; c_c 为临界的黏性阻尼系数, $c_c = 2m\omega_n$; c 为黏性阻尼系数, N·s/m; λ 为频率比, $\lambda = \omega/\omega_n$ 。那么,系统振动的传递率 T_A 表示如下:

$$T_A = \frac{F_T}{F_0} = \sqrt{\frac{1 + (2\zeta\lambda)^2}{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2}} \quad (4)$$

通过图片分析传递率与系统频率比之间的关系,根据阻尼系数变化对应系统的幅频响应特性曲线,如图2所示。

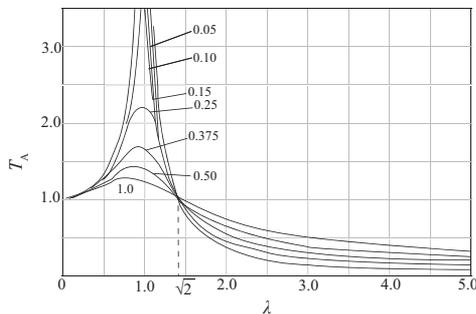


图2 阻尼变化情况下的幅频响应曲线

根据图2可以分析得出以下结论。

1) $\lambda < 0.75$ 为前工作区,常出现在系统固有频率较高时,系统外部激励在低频振动过程中的曲线。

2) $\lambda \approx 1$ 为共振区域,固有频率与工作频率接近,系统出现共振,是系统设计必须避免的,在此区域,系统阻尼不宜过小。由图2可以看出,阻尼越小,系统振动传递率 T_A 越大,属于对阻尼的敏感区域,破坏性非常大。

3) $0.75 < \lambda < 2$ 为隔离区,该点说明隔振系统不

程为

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0\sin\omega t \quad (1)$$

证明在 $F_0\sin\omega t$ 作用下,竖直方向的位移 X 为

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1 - m\omega^2/k)^2 + (c\omega/k)^2}} \quad (2)$$

因为在相位上阻尼器和弹簧相差 90° ,那么弹簧和阻尼器施加到车架的力 F_T 为

但没有衰减振动,反而增加了激振,如图2所示 $T_A > 1$,是应该尽量在设计时使固有频率与振动频率区分开,该区域是不能采用的区域。

4) $\lambda > 2$ 为正常工作区。由图2可以看出,系统的传递率逐步降低并趋于0,阻尼比越大,系统的传递率越高,因此在该区域尽量降低阻尼,对于驾驶室悬置系统也应采用低阻尼,保证激励传递降低。在 $\lambda > 5$ 以后,可以看出,系统的传递率基本保持不变。在应用上考虑选取 λ 在2.5~5.0之间就可以保证系统隔振率,再增大没有实际用处。

2 驾驶室悬置系统模型和激励的求解

2.1 建立悬置系统动力学模型

通过研究驾驶室悬置系统中弹簧和阻尼器的作用,分析振动传递率等隔振原理,降低驾驶室座位振动频率,在此基础上建立动力学模型,根据设计图纸数据、3D数模及对相关数据进行收集和整理,基于空载和满载两种状态下重卡相关基本参数,建立整车坐标系。

在CATIA V5软件中建立驾驶室悬置系统的模型,座椅和人采用简易建模;空气弹簧模型采用空气弹簧的载荷-位移曲线;减震器模型采用减震器的载荷-速度曲线;胶套模型采用减震器胶套的动态特性。将CATIA V5驾驶室悬置系统模型导入LMS Virtual.Lab Motion中^[5]施加约束。采用LMS提供的约束副,减震器和阻尼器连接采用圆柱副,空气弹簧下座与车架采用固定约束,稳定杆采用旋转副。建立模型如图3所示。主要子部件模型采用台架试验测试方法获得,如图4所示。

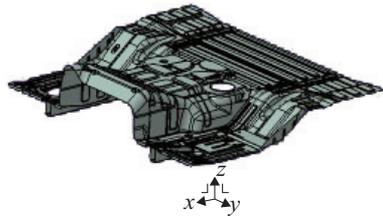


图3 驾驶室模型图

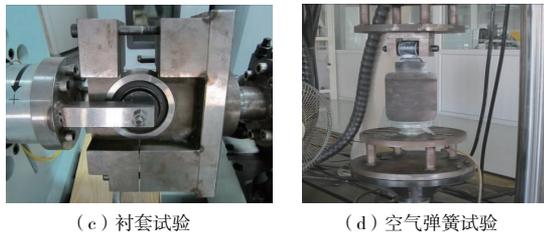
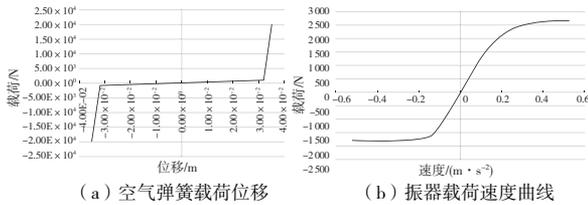


图4 台架试验图

2.2 混合路谱法求解激励

通过建立悬置系统动力学模型,描述悬置系统中各个部件间的相互作用、刚度、阻尼等特性,以及与车辆运动和外界激励之间的关系。将建立的动力学模型作为混合路谱法中的输入之一,选择和合成路况激励信号,优化悬置系统的设计和调整。研究振动问题必须有准确路谱,在LMS Motion中提出了混合路谱LMS Motion TWR^[6](LMS Motion TWR为在LMS Virtual.Lab中进行二次开发的模块)的解决办法,混合路谱的思路是用等效路面的各向位移来代替实际道路各向位移^[7]。

在本次分析中,设置7个测试点进行激励加载,其中垂向加速度测试点选择4个空气弹簧下支座的位置,横向加速度测试的2个点选择在左侧前后两个空气弹簧下支座处,1个纵向加速度测试点选择在车架横梁中心处。经过5次迭代,响应与目标之间误差为0,求解的7个点激励位移谱如图5所示。

3 驾驶室悬置系统仿真及分析

3.1 驾驶室悬置系统的模态分析

为了保证模型的准确性,要对悬置系统模型

进行模态分析,这是仿真分析之前检验模型的有效手段,前几阶低阶模态如图6所示。

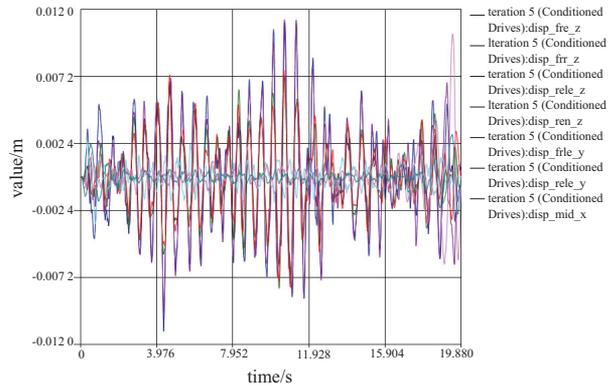
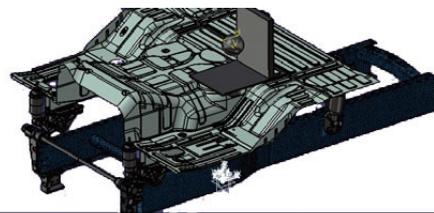


图5 激励位移谱



Mode No.	Eigenfrequency/Hz	Real Part	Imaginary Part	Damping Factor	Maximum Scaling
1	2.097 87	-3.567 4	-12.689 4	0.270 641	7.987 45
2	2.097 87	-3.567 4	12.689 4	0.270 641	7.987 45
3	2.833 88	-5.528 77	-16.925 7	0.310 504	22.544 5
4	2.833 88	-5.528 77	16.925 7	0.310 504	22.544 5
5	3.483 92	-2.659 05	-21.728	0.121 473	20.171 9
6	3.483 92	-2.659 05	21.728	0.121 473	20.171 9
7	4.857 64	-15.303 9	26.407 4	0.501 415	14.792
8	4.857 64	-15.303 9	-26.407 4	0.501 415	14.792
9	4.995 6	-5.323 96	30.933 5	0.169 616	19.703 4
10	4.995 6	-5.323 96	-30.933 5	0.169 616	19.703 4

图6 系统振型

从模态振型和振动频率来看,座椅垂向振动频率约为2.08 Hz,驾驶室俯仰为2.35 Hz,驾驶室侧倾为3.47 Hz,其与理论计算值基本一致,验证了模型的正确性。

3.2 系统不同参数的选取

13个系统的主要参数有驾驶室悬置、座椅的阻尼比、弹簧刚度、稳定杆的刚度、横向阻尼、衬套阻尼等。选取5种典型路况:卵石路面、比利时路面、50 km/h 紧急制动工况、40 km/h 高速、80 km/h 高速。对此5种路况下振动进行分析,研究13个参数对系统振动关键评价指标的影响程度,如悬置系统隔振率、导轨垂向加速度以及座椅加速度等。

3.3 仿真结果及分析

分别研究悬置阻尼比、座椅阻尼比、弹簧刚度、稳定杆刚度、横向阻尼等对系统性能的影响如表1所示。

表1 工况及研究内容

工况	研究内容
1—9	研究驾驶室悬置和座椅悬置的阻尼匹配
10—12	研究弹簧刚度的影响
13—15	稳定杆刚度的影响
15—17	横向阻尼的影响
17—19	刚度和阻尼同时增大而阻尼比不变
20—23	研究理论对称阻尼、拉伸阻尼和样车阻尼的影响
24—25	考虑橡胶衬套动态特性的影响

1) 各工况相关参数对系统的影响分析

各工况相关参数对系统的影响结果如图7所示。

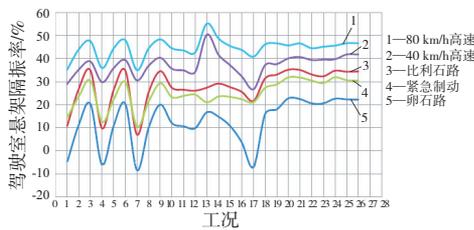


图7 各工况相关参数对系统的影响

通过图7分析各工况相关参数对系统的影响,希望找出一组相对最优的参数来满足隔振率好,同时又满足座椅导轨处加速度方均根值低和悬置的动行程较小的工况。综合分析图7图形,可以看出最理想的工况是9、25、26。

2) 不同工况对系统的影响分析

本文对80 km/h高速和恶劣卵石2种典型工况进行了详细频谱分析,如图8所示。

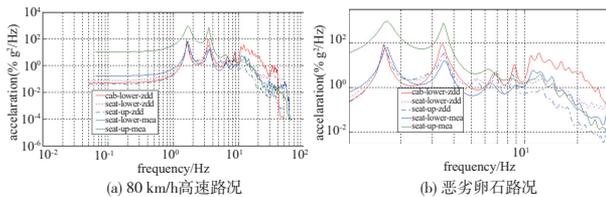


图8 加速度功率密度谱分析

由图8可见,前悬置座椅导轨处的加速度功率密度谱与实测值大体相同,说明多体计算比较准确,前悬置的固有频率与第1个共振频率1.65 Hz非常接近,第2个共振频率3.5 Hz也与计算结果接近,峰值处略有差异,而在10~40 Hz二者有相同的趋势,10~20 Hz二者基本相同,计算值略低。多体分析的结果与实测结果一致性

很高。

3) 高速路况下振幅分析

由图9可见,80 km/h高速路况下驾驶室悬置的垂向位移和横向位移比较理想,振幅均较小。

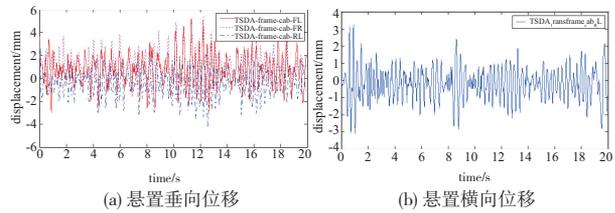


图9 80 km/h高速工况时位移

由图10可以看出,驾驶室悬置阻尼对3个主要共振点影响不同,其中对第1个共振点基本无影响,而在3~10 Hz频段内,越高的阻尼比对降低振动效果越明显,尤其从第2个和第3个共振点可见,振幅明显降低,但10 Hz以上频段,阻尼比越高反而振幅变大,起到反作用。

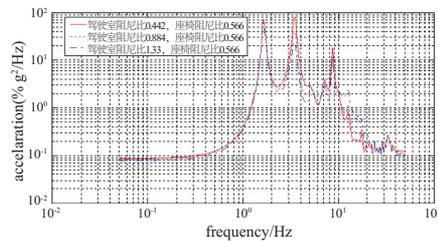


图10 80 km/h高速路况下悬置阻尼比的影响

由图11可以看出座椅阻尼比对图中的3个主要共振点影响不同,第1个共振点基本没有影响,但在2 Hz左右的第2个共振点处,座椅阻尼比越大,共振点处振幅下降越明显,然而在3~10 Hz之间,情况相反,大的座椅阻尼比增加了系统振幅。

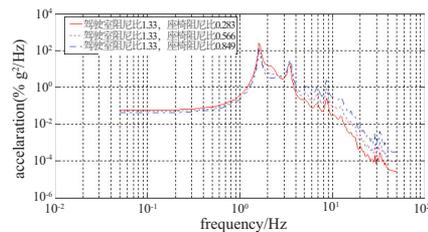


图11 80 km/h高速路况对座椅阻尼比的影响

由图12(a)可见,稳定杆的刚度变化没有对前2个共振点造成影响,然而对第3个共振点产生较大影响,在5 Hz以后,驾驶室的垂向加速度没有受到稳定杆刚度变化的影响。由图12(b)可以看出,曲线重合较好,说明弹簧刚度的变化对整个系统振动加速度基本没有影响。

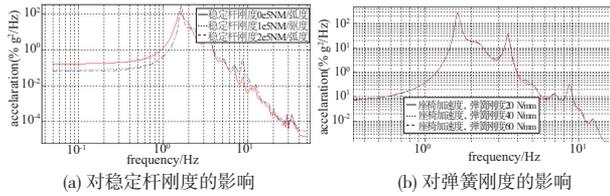


图 12 80 km/h 高速路况对稳定杆、弹簧刚度的影响

由图 13 可以看出,工况 6、9、25、26 下系统匹配的参数比较理想,既保证了驾驶室和座椅振动系统具有优异的隔振率,又可控制住驾驶室垂向和横向的位移,驾驶室座椅导轨处加速度方均根值也较低,符合评价指标要求,系统平顺性较好。

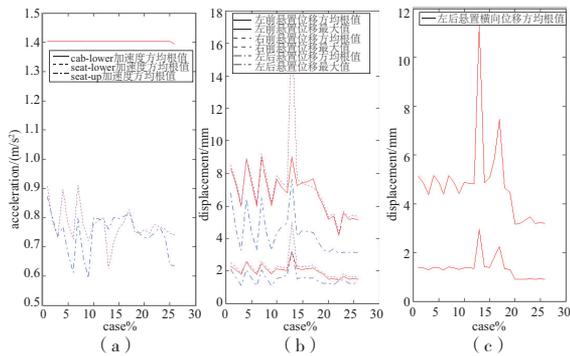


图 13 80 km/h 高速路况时各工况的影响

4 结语

本文利用 LMS 软件对某重卡驾驶室悬置系统进行建模和仿真分析,通过 LMS motion 混合路谱的方法,在已有成熟车型的试验数据基础上求

解出典型路面的激励位移谱,为后续仿真分析提供帮助。结果表明:悬置和座椅的阻尼越高,对于系统舒适性和振动行程越有利;最理想的是变阻尼,在较低频率内(10 Hz 以下)大阻尼、在高频段内(10 Hz 以上)低阻尼对系统振动较好。稳定杆的刚度对系统的影响明显,尤其在人体敏感振动(4~8 Hz)频段内,对垂向振动加速度方均根值和垂向位移都有影响。橡胶衬套的动态特性在低频段内有利于系统的振动,而在高频段内恰恰相反,起负作用。

参考文献:

- [1] 吕红卫,何晓博,王新荣. AGV 在重卡汽车底盘合装线中的应用探索[J]. 内燃机与配件,2020(21):36-37.
- [2] 靳利红,董洪全,张福生. 乘用车变速箱箱体低噪声方法的研究[J]. 机械传动,2020,44(10):129-135,147.
- [3] 余志生. 汽车理论[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2006.
- [4] 郑康,朱明敏,宋森楠,等. 发动机各主轴承间隙配合对其振动特性的影响[J]. 机械制造与自动化,2023,52(3):58-61.
- [5] 龚思楚,黎永平,胡益富,等. 基于 LMS Virtual. Lab 软件的全车系留载荷计算[J]. 教练机,2023(1):41-44.
- [6] 万晓峰,刘岚. LMS Virtual. Lab Motion 入门与提高[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010:25-33.
- [7] 王孝鹏. 磁流变式驾驶室悬置系统隔振研究[J]. 机械设计与制造,2020(7):129-133.

收稿日期:2023-11-06

(上接第 222 页)

智能辅助决策研究,整合历史知识与经验,规范维保流程,降低维保的难度,生成维保智能方案。同时在虚实场景中利用 AR/VR 眼镜、触控终端等设备,通过对装备、设备拆装过程建模并关联常见故障维修过程,辅助不具备专业技术背景的维修人员完成目标设备状态检查,准确定位问题、智能维修方案辅助引导、解决过程记录等操作,实现“边操作边提示”,从而提升装备保障工作高效化、科学化、精细化水平。

3 结语

随着信息化建设的不断推进,迫切需要建设完整体系的信息化系统装备管理平台,提高各类型装备的保障能力。装备管理需求开始向智能

化、网络化、数字化发展,成体系、成建制、定制个性化解决方案需求日益凸显。信息化系统装备管理工作应提出新思路、新手段及新方法,切实提高装备管理科学化水平。

参考文献:

- [1] 李昌禄,苏寒松. 武器装备信息化综合管理系统的设计与分析[J]. 高校实验室工作研究,2013(3):59-60.
- [2] 孙桂领,沈坚平. 军事装备管理系统信息共享策略研究与探讨[J]. 信息系统工程,2014(2):60-61.
- [3] 魏炜. 基于 B/S 模式的军事装备管理信息系统设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2012.
- [4] 高鲁,于洪敏,宋辉. 军事装备管理系统信息化变革规划设计研究[J]. 情报杂志,2006,25(2):110-111,114.

收稿日期:2024-11-20