

·测试、试验与仿真·

履带车辆行驶平顺性仿真及试验

朱志豪, 华顺刚, 张丽娜, 于 帅

(大连理工大学机械学院 CAD 与网络技术研究所, 辽宁 大连 116024)

摘要: 基于虚拟样机技术, 结合三维造型软件、有限元分析和多体动力学软件, 对履带车辆行驶平顺性仿真技术进行了研究. 建立履带车辆的刚柔混合虚拟样机模型及随机不平路面模型, 生成平顺性仿真模型系统, 通过在 F 等级随机路面行驶仿真, 得到车辆行驶时驾驶员座椅位置振动加速度曲线, 根据评价标准对车辆进行平顺性评价, 并与实车试验测试数据的计算结果进行对比分析. 结果表明, 仿真模型系统及评价方法合理, 可以为提高和改善履带车辆的机动性能提供有效的方法和手段.

关键词: 履带车辆; 路面谱; 平顺性; 虚拟样机; 动力学仿真

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)02-0071-04

Simulation and Test of Tracked Vehicle Ride Comfort

ZHU Zhi-hao, HUA Shun-gang, ZHANG Li-na, YU Shuai

(*Institute of CAD and Network Technology, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: Based on virtual prototype technology, combined with three-dimensional modeling, FEA and multi-body dynamics software, simulation technology of tracked vehicle ride comfort was studied. A mixed rigid-flexible virtual prototype of a certain tracked vehicle and a random uneven road were created to form the simulation system of ride comfort. The ride comfort simulation was carried out on the F-level virtual road, from which the acceleration curves at the location of driver were captured. According to the evaluation standards, the ride comfort of the tracked vehicle was analyzed and evaluated. By compared with the actual tests and computing results, it shows that the simulation model system and evaluation method are reasonable and feasible for analyzing and improving the mobility of tracked vehicle.

Key words: tracked vehicle; road spectrum; ride comfort; virtual prototype; dynamics simulation

车辆行驶平顺性, 是车辆机动性能的重要指标之一. 传统的车辆平顺性评价方法, 通过实车在各种选定路面上进行行驶试验, 获取各项振动数据, 进行平顺性计算来确定, 其缺点是产品开发周期长、费用高等^[1].

随着虚拟样机技术、随机振动理论、平顺性分析方法的研究发展, 利用计算机对车辆的行驶平顺性进行仿真研究已成为现实. 通过建立虚拟样机模

型, 利用车辆行驶平顺性仿真技术, 在车辆的设计研发阶段, 就能对设计车辆进行仿真, 及早发现不足并实施改进, 从而获得最佳的设计方案; 对于现有车辆, 通过仿真找出其薄弱环节、参数影响规律, 为实车的改进提供可靠的数据和修改方案.

基于虚拟样机技术, 建立了某履带车辆的虚拟样机模型和不平路面模型, 并进行了行驶仿真, 参照 ISO 标准对车辆随机路面行驶平顺性进行了评价分

收稿日期: 2010-12-10

基金项目: 国家部委科研基金项目

作者简介: 朱志豪(1985-), 男, 河南长垣人, 硕士研究生, 主要研究方向为计算机辅助设计与仿真.

析.通过与实车测试数据评价结果进行对比,验证了所建模型及分析方法的合理性.

1 履带车辆平顺性仿真模型建立

1.1 履带车辆虚拟样机模型

已有文献的车辆平顺性仿真研究中,车辆的各零部件通常采用刚体模型^[2,3].考虑到实际车辆行驶过程中,零部件会产生柔性变形,因此研究中将车体作为柔性体进行仿真计算,以减少仿真误差.

履带车辆虚拟样机模型建立过程如下:(1)采用三维 CAD 软件建立车辆各零部件模型;(2)抽取车体中面导入有限元分析软件中,根据车辆实际结构,添加支撑梁单元,对车体划分网格,建立柔性车体;(3)将各零部件模型、柔性车体模型导入多体动力学软件中,添加平衡肘、负重轮、履带、配重等其他部件模型;(4)根据实车数据,设置悬挂、座椅、履带板、地面等系统的参数^[3],并添加相应的约束和作用力关系^[4],建立起履带车辆的刚柔混合虚拟样机模型.

1.2 随机路面模型

行驶地面凸凹不平是引起车辆振动的主要原因.研究表明:路面不平度具有随机、平稳及各态历经的特征,可以用平稳随机过程理论来描述.通常把道路垂直纵剖面与道路表面的交线作为路面不平度样本,通过样本的功率谱密度来描述路面.功率谱密度是路面不平度最重要的数学特征,它能够表示路面不平度的能量在空间频域的分布,用以说明路面不平度或者路面波的结构.

通常情况下,道路纵剖面的高度曲线服从 Gaussian 分布.对于平稳 Gaussian 随机过程有多种方法可以生成路面不平度时域模型.其中主要方法有:滤波白噪声生成法、基于有理函数 PSD 模型的离散时间随机序列生成法、谐波叠加法、基于幂函数功率谱的快速 Fourier 反变换生成法等.文中采用谐波叠加法来构建随机路面不平度时域模型,获得特定路面的轮廓曲线^[5].

谐波叠加法拟合不平路面的原理是:设路面为平稳的、各态历经的、均值为 0 的 Gaussian 过程,则可以利用不同形式的三角级数进行模拟,文中使用有限个离散空间频率的三角级数来描述这一随机过程^[6]

$$q(l) = \sum_{k=1}^N a_k \sin(2\pi n_k l + \phi_k) \quad (1)$$

式中, l 表示路程长度; ϕ_k 表示相角,为 $0 \sim 2\pi$ 区间均匀分布的随机变量; N 表示参考空间中心频率数, $N = 3 \times (\lg n_u - \lg n_l) / \lg 2$; n_l 表示路面谱的下限空间频率, $n_l = 0.011 \text{ m}^{-1}$; n_u 表示路面谱的上限空间频率, $n_u = 6.667 \text{ m}^{-1}$; n_K 表示参考空间第 K 个中心频率, $n_k = 2^{(K-0.5)\beta} n_l$; a_K 表示离散空间频率三角级数幅值, $a_K \approx 0.51 n_0 (G_q n_0 / n_l)^{0.5} (2^{-K/6})$; n_0 表示参考空间频率, $n_0 = 0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_q(n_0)$ 表示路面不平度系数.

国际标准 ISO2631 按照功率谱密度将路面分为 8 级,从 A 级到 H 级的 $G_q(n_0)$ 数值逐级增大,表示路面的不平度相应变大,并规定了每级路面下的不平度系数取值范围和平均值.根据要生成的路面等级选取标准中相应的 $G_q(n_0)$,计算得出路面不平度随机过程 $q(l)$ 的值.文中研究的实车试验路面为鹅卵石路面,选用 F 级路面进行模拟,F 级路面不平度系数的取值范围为 $8\ 192 \times 10^{-6} \sim 32\ 768 \times 10^{-6} \text{ m}^3$,模拟路面选取 $G_q(n_0) = 10\ 000 \times 10^{-6} \text{ m}^3$,生成了 200 m 长的 F 级路面,路面纵剖面曲线如图 1 所示.图 1 中横轴代表长度,纵轴代表路面高度.

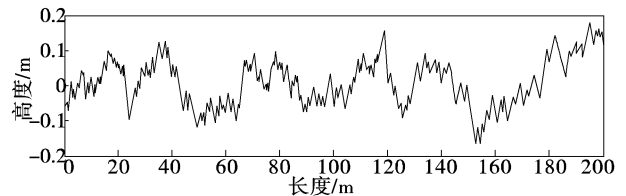


图 1 F 级路面不平度曲线

生成路面不平度的数据后,按照三角单元方法和多体动力学软件所要求的格式编制路面谱文件,在多体动力学软件环境中,生成 F 级路面模型.

2 行驶平顺性评价方法

根据 ISO/ISI 2631 - 1:1997(E)“机械振动与冲击—人体承受全身振动评价^[7]”标准,评价振动时,在基本频率范围为 $0.5 \sim 80 \text{ Hz}$ 的人体坐姿受振模型中,用总的振动加速度均方根值与人的主观感觉来判断乘员舒适性,通过乘员舒适性来评价车辆的行驶平顺性.该标准在试验的基础上给出了详尽的频率加权函数和轴加权系数,以及明确的舒适性界限.具体计算加速度均方根值的方法如下:先对各

轴向加速度时间历程 $a(t)$ 进行频谱分析,得到功率谱密度函数 $G_a(f)$;再根据式(2)即可计算出频率加权后的加速度均方根值 a_w

$$a_w = [\int_{0.5}^{80} \omega^2(f) \times G_a(f) df]^{0.5} \quad (2)$$

式中, $\omega(f)$ 为频率加权函数; f 表示振动频率,对于垂直方向(z 轴),有

$$\omega(f) = \begin{cases} 0.5 & 0.5 < f < 2 \\ f/4 & 2 < f < 4 \\ 1 & 4 < f < 12.5 \\ 12.5/f & 12.5 < f < 80 \end{cases} \quad (3)$$

对于水平方向(x 轴和 y 轴),有

$$\omega(f) = \begin{cases} 1 & 0.5 < f < 2 \\ 2/f & 2 < f < 80 \end{cases} \quad (4)$$

根据 ISO2631 标准,在同一暴露时间下,人体水平方向最敏感频率范围(1~2 Hz)内振动的加权加速度均方根允许值比垂直方向最敏感频率范围(4~8 Hz)内振动的加权加速度均方根允许值低 1.4

倍,即人体对水平方向振动的敏感程度要高于垂直方向.因此总加权加速度均方根值可计算为

$$a = [(1.4a_{wx})^2 + (1.4a_{wy})^2 + a_{wz}^2]^{0.5} \quad (5)$$

根据式(5)可以计算驾驶员座椅位置处的加权加速度均方根值,以此来评价车辆的行驶平顺性.

3 平顺性仿真与分析

3.1 仿真与数据处理流程

基于所建立的履带车辆虚拟样机以及随机路面模型,按照行驶平顺性评价方法,进行了履带车辆平顺性仿真.使用的软件环境分别为:三维造型软件 Pro/E、有限元分析软件 ANSYS、多体动力学软件 RecurDyn,并使用 MATLAB 进行数据处理.整个仿真流程如图 2 所示.

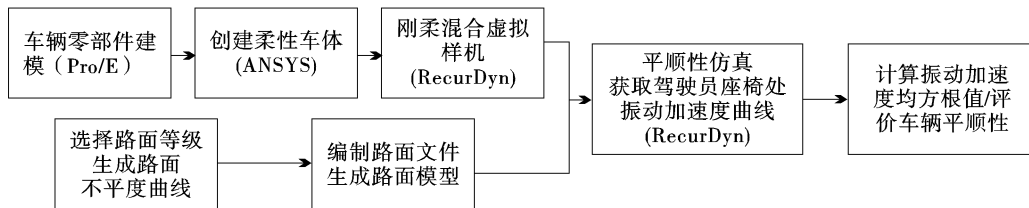


图 2 履带车辆平顺性仿真流程

平顺性仿真中部分仿真参数设置如下:车辆行走速度为:20/30/40(km/h);仿真时间为:35/30/25(s);仿真路面长度:200(m);履带与地面接触刚度:8 000(N/m);履带与地面接触阻尼系数:10(Ns/m);路面等级:F.

3.2 平顺性仿真

根据仿真参数设置,履带车辆在 F 级路面上分别以 20、30、40 km/h 的速度行驶进行仿真.得到各速度下驾驶员座椅处振动加速度曲线,并采用式(2)和式(5)计算各速度下的振动加速度均方根值.

如图 3 所示为车辆在 20 km/h 速度下,驾驶员座椅处前进方向(图 3a)、垂直方向(图 3b)、左右方向(图 3c)的振动加速度曲线.

从图 3 中可以看出,0~5 s 车辆经历了由悬空到落地,然后加速到设定速度的过程,该过程中 3 个方向的振动加速度均较大,并存在很大波动.从第 5.0 s 起至仿真结束,车辆在 F 级不平路面行驶,振动加速度曲线开始出现不规则起伏,这是车辆随路

面不平的振动反映.

将上述驾驶员座椅处的 3 个方向的振动加速度曲线数据,转化为数据文件进行数据处理,编程计算可得到车辆 3 个方向加权后总的加速度均方根值.

同理,文中分别仿真获得车辆在 30 km/h、40

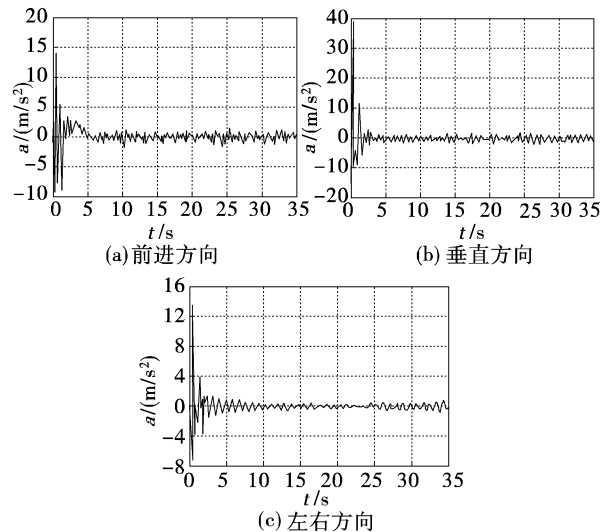


图 3 驾驶员座椅处加速度曲线

km/h 速度下驾驶员座椅处的振动加速度曲线,经加权计算后,得到总的加速度均方根值,以此来评价车辆的行驶平顺性。

3.3 仿真结果与实车试验数据对比分析

为了验证虚拟样机模型的可信度,该研究对实车行走试验的振动加速度测试数据进行计算分析,并与计算机仿真结果进行比较。

测试设备采用美国 IOtech 公司的便携式高速数据采集分析系统 Wavebook/516A.该系统可测量多种参数,支持多种数据采集、信号分析软件,可完成多参数信号采集.试验在鹅卵石路面上进行,设备采样频率为 51 200 Hz,采样时间 25 s,在车速为 20、30、40 km/h 3 种情况下,分别采集驾驶员座椅、变速箱、发动机等车辆关键部位的振动加速度数据。

为了进行乘员舒适性计算,提取驾驶员座椅通道的测试数据,并对该数据进行再采样(每隔 50 个数据采样一次),生成数据文件计算振动加速度均方根值.同样,对于计算机仿真模型系统,仿真后采集相同位置的振动加速度数据.然后对 2 种数据计算总的加速度均方根值,评价乘员舒适性.为了对 2 种计算结果进行对比,文中按计算公式: $(a_{w\text{仿真}} - a_{w\text{实测}}) / a_{w\text{实测}}$, 计算差值.速度分别为 20、30、40 km/h 时,仿真数据与实测数据的计算结果差值分别为:1.33%、6.08% 和 9.88%。

由计算结果可以看出,仿真误差总体上在可以接受的范围内.特别是在低速状态下,计算机仿真与实车试验结果非常接近,说明文中建立的平顺性仿真模型系统具有合理性.同时说明对于履带车辆这一复杂机械系统,通过虚拟样机技术进行性能分析和评价是可行的,可以用于预测和评估车辆的平顺性,这对履带车辆的动力学性能评价,以及车辆设计、改进具有重要的现实意义。

经多次仿真实验及其计算结果分析可知:对于车辆系统参数,应采用实车或接近实际的数据,如扭

杆弹簧和减振器的刚度阻尼系数、座椅弹簧参数、履带预张紧力、负重轮刚度系数等;对于仿真环境参数,则应尽量与实际测试环境一致,如路面等级及其参数、履带板与地面接触参数等.这些参数的设置对车辆的平顺性结果均有较大影响,应选择实际、合理的参数,才能反应和评价车辆的实际性能。

4 结 束 语

通过建立履带车辆刚柔混合虚拟样机模型,并生成平顺性仿真系统,基于 F 级随机路面模型进行车辆行驶仿真模拟,对仿真数据进行处理来分析评价车辆的行驶性能.经过与实车测试数据的计算结果进行对比分析,说明研究中所建立的模型和评价方法合理,进一步可扩展到各种车辆在各种等级路面上的行驶平顺性仿真分析评价中.因此可以对车辆的优化设计、性能分析、改进创新提供有效方法及理论参考。

参考文献

- [1] 王德胜,杨建华.装甲车辆行驶原理[M].北京:装甲兵工程学院,1997:201-226.
- [2] 吴大林,马吉胜,蔡树新,等.基于虚拟样机的自行火炮行驶平顺性仿真研究[J].兵工学报,2006,27(6):970-973.
- [3] 狄长春,杜中华,吴大林.基于座椅系统虚拟样机的自行火炮行驶平顺性统计评估[J].兵工学报,2009,30(4):442-445.
- [4] 闫清东,张连第,赵毓芹.坦克构造与设计[M].北京:北京理工大学出版社,2007:25-219.
- [5] 万里翔,许明恒.汽车行驶平顺性评价方法的研究[J].西南交通大学学报,2001,36(1):71-74.
- [6] 丁法乾.履带式装甲车辆悬挂系统动力学[M].北京:国防工业出版社,2004:14-69.
- [7] ISO2631-1:1997(E),International Standards Organization, Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole-body vibration Part1, General requirements[S].
- [3] 潘爱民. Visual C++ 技术内幕[M].4 版.北京:清华大学出版社,2000.
- [4] 马魁勇,于长军,位寅生.基于 FPGA 的雷达目标模拟器的设计与实现[J].仪器仪表学报,2006(6):870-872.
- [5] 黄守训.舰炮武器系统试验与鉴定[M].北京:国防工业出版社,2005.

(上接第 70 页)

参考文献

- [1] 李红波,石岚.光信号环境模拟系统设计[J].光电技术应用,2009,24(3):12-14.
- [2] 何江华,郭果敢.计算机仿真与军事应用[M].北京:国防工业出版社,2006.