

基于三维路面谱仿真履带车辆振动系统的动态模拟

明波, 杨洁, 贾进峰

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘要: 通过谐波叠加原理,在现有的二维路面谱的基础上,从空间路面频率谱出发,将之拓展到三维空间内的路面谱,并给出模拟随机路面谱的方法。通过对该路面谱模型进行谱分析,对其功率谱密度进行了验证。建立了某履带车辆单自由度悬挂质量振动系统的力学模型,以三维路面谱模型作为虚拟激励输入,实现了对单自由度履带车辆振动系统的动态模拟。

关键词: 三维路面谱; 车辆振动模型; 虚拟激励法

中图分类号: U492.8 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2011)02-0085-04

Dynamic Simulation of Tracked Vehicle Vibration System Based on Three-dimensional Road Surface Spectrum Model

MING Bo, YANG Jie, JIA Jin-feng

(Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: Three-dimensional road surface spectrum model was established based on two-dimensional road surface spectrum model with harmonic wave superposition method. The road surface spectrum was analyzed and its power spectral density was validated. A single-degree-of-freedom tracked vehicle vibration system was constructed. Dynamic simulation on single-degree-of-freedom tracked vehicle vibration system was realized using the three-dimensional road surface spectrum model as virtual excitation input.

Key words: three-dimensional road surface spectrum; vehicle vibration model; virtual excitation method

行驶平顺性是履带车辆研制时的重要指标。当履带车辆在地面上高速行驶时,遇到高低不平的凸起和凹坑后,负重轮便沿着这些凸起和凹坑做上下运动,使负重轮不断地受到地面力的冲击,引起车辆的垂直振动和纵向角振动,导致成员和机件的损伤,降低履带车辆的机动性能,影响履带车辆行进间的射击精度。

1 基于谐波叠加的路面谱模型

1.1 路面不平度的空间功率谱密度

研究表明,路面不平度是平稳的、各态历经的零

收稿日期: 2010-10-13

作者简介: 明波(1960—),男,山东人,高级实验师,主要从事装甲车辆运用工程的研究。

均值的随机过程^[1]。根据 GB 7031-1986 规定, $G_q(n)$ 可用幂函数进行拟合:

$$G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{n}{n_0}\right)^{-\omega}$$

式中: $G_q(n)$ 为路面不平度空间功率谱密度, 简称为空间功率谱密度; n 为空间频率; n_0 为参考空间频率, $n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$; $G_q(n_0)$ 为参考空间频率 n_0 下的路面谱值, 又称路面不平度系数; ω 为频率指数, 决定路面谱的频率结构。考虑到车速变量, 上式转换为时间功率谱:

$$f=u \times n$$

$$G_q(f) = \frac{1}{u} G_q(n) = G_q(n_0) \left(\frac{f}{n_0}\right)^{-\omega} u^{\omega-1}$$

式中: f 为时间频率; u 为车速。GB 7031-1986 按路面功率谱密度把路面不平度分为 8 个等级, 见表 1。表 1 列出了各级路面不平度系数 $G_q(n_0)$ 的范围及其几何平均值, 分级路面功率谱密度的频率指数 $\omega=2$ 。

表 1 路面不平度分类标准

Table 1 Road roughness classification

路面等级	下限 ($\times 10^{-6}$)/m	上限 ($\times 10^{-6}$)/m	几何平均值 ($\times 10^{-6}$)/m
A	8	32	16
B	32	128	64
C	128	512	256
D	4 096	2 048	1 024
E	2 048	8 192	4 096
F	8 192	32 768	10 384
G	32 768	131 072	65 536
H	131 072	524 288	262 144

1.2 三维路面谱

三角级数法将路面随机激励表示成大量具有随机相位的正弦或余弦之和, 三角级数合成模型适用于模拟具有任意形状的功率谱密度的平稳随机过程, 通过这种方式产生的随机路面能够很好地模拟现实路面的要求, 应用于车辆振动系统动力学分析。

将式中 f 离散化, 划分成 N 个区间, 用每一个区间中任一频率的谱密度值 $G_q(f_i)$ 代替 $G_q(f)$ 在整个小区间内的值, 在时间域内用三角级数模拟^[2]:

$$Z(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2} A_i \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (1)$$

式中: θ_i 为 $[0, 2\pi]$ 的随机数; t 为某速度下的时间历程; $Z_i = \sqrt{G_q(f_i) \Delta f}$ 。

由于 $f_i t = u n_i t = (x/t) n_i t = n_i x$, 式(1)可以化简为:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2} A_i \sin(2\pi n_i x + \theta_i)$$

式中: $Z(x)$ 为路面在 x 方向上的位移。拓展到三维空间, 可以得到:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2} A_i \sin(2\pi n_i \sqrt{x^2 + y^2} + \theta_i(x, y)) \quad (2)$$

履带车辆所经常进行试验的田野地相当于 GB 7031-1986 中的 F 级, 履带车辆碾压损坏的路面相当于 G 级。在作战情况下路面情况更加恶劣。文中以履带车辆常用到的 F, G 级路面为研究对象进行模拟分析。通过表 1 可知 F 级的 $G(n_0)$ 的几何平均值为 $16\ 384 \times 10^{-6}$, G 级的 $G(n_0)$ 几何平均值为 $65\ 536 \times 10^{-6}$, 应用该方法模拟了频率范围为 0.011~2.83 Hz, $2 \text{ m} \times 120 \text{ m}$ 的路面, 如图 1 和图 2 所示。

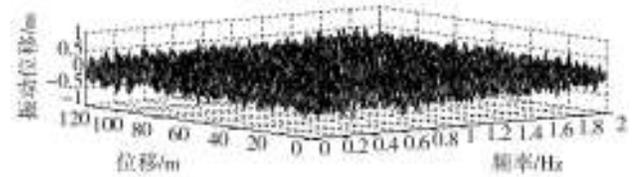


图 1 F 级三维路面不平度

Fig. 1 Three-dimensional road irregularities of rank F road surface

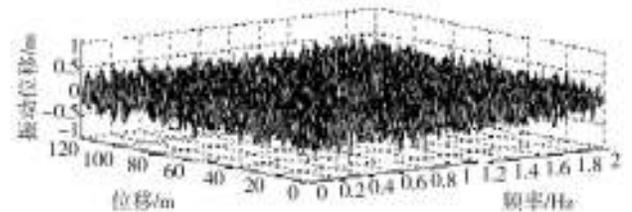


图 2 G 级三维路面不平度

Fig. 2 Three-dimensional road irregularities of rank G road surface

1.3 验证生成的路面不平度功率谱密度与原始国标功率谱密度之间的拟和程度

选取 $x=0 \text{ m}$ 处 y 方向仿真中的车速 $u=8 \text{ m/s}$ 路面不平度如图 3 所示。将之转换为时域路面不平度信号, 由仿真中的车速 $u=8 \text{ m/s}$ 得到 G 级路面, 车速为

8 m/s时路面不平度曲线如图4所示。对于生成的路面 $y(x)$,利用谱分析求其功率谱密度,用来验证生成的路面谱与国标准路面谱之间的符合程度如图4所示。可以看出,在极低的频率附近模拟精度较低,在其他频段模拟精度均较高,说明通过谐波叠加模型可以很好地对路面进行不平度模拟。

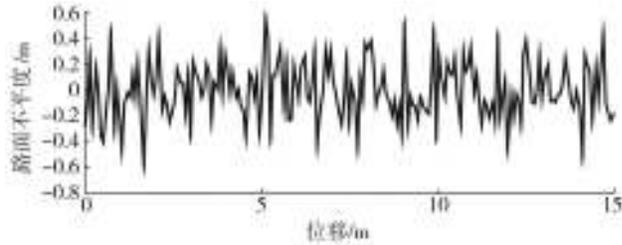


图3 $x=0$ m处 y 方向仿真中的车速 $u=8$ m/s路面不平度
Fig. 3 Road irregularities of y orientation($x=0$ m, $u=8$ m/s)

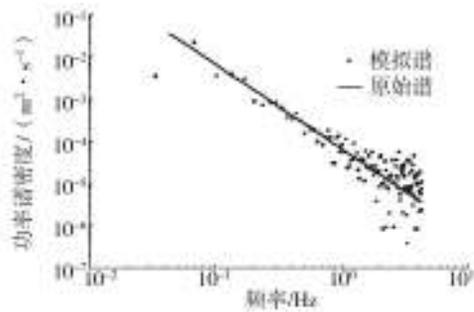


图4 G级路面理论功率谱密度与模拟功率谱密度
Fig. 4 Contrast between simulation and original power spectrum density curve on rank G road surface

2 系统的动力学和数学模型

单自由度振动系统是履带车辆负重轮垂直振动最简单系统,由质量为 m 的车身、刚度为 K 的悬架和阻尼为 C 的减振器等组成^[3]。其中, $z(t)$ 为车身垂直位移。

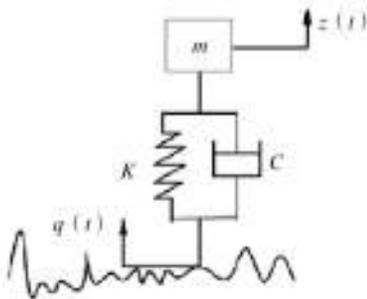


图5 单自由度振动系统力学模型示意
Fig. 5 Mechanical model of single degree of freedom vibration system

对图5所示的力学模型应用拉格朗日方程可以得到系统的微分方程:

$$m\ddot{z}(t) = C\dot{z}(t) + Kz(t) = F(t)$$

$$F(t) = C\dot{q}(t) + Kq(t) \quad (3)$$

将系统视为线性时,且在零初始条件下,可以得到^[3]:

$$H(f) = \frac{z(f)}{q(f)} \quad (4)$$

式中: f 为频率; $z(f)$ 为响应 $z(t)$ 的傅里叶变换; y 为激励 $q(t)$ 的傅里叶变换; $H(f)$ 为频率响应,

$$H(f) = \frac{K + 2\pi fiC}{K - (2\pi f)^2 + 2\pi fiC} \circ$$

在仿真条件下可以模拟出车体振动的功率谱密度,仿真分析的初始条件见表2。

表2 仿真分析的初始条件

Table 2 Initial conditions of the simulation

初始条件	数值
车身质量	3 000 kg
悬挂刚度	400 kN/m
减振器阻尼	30 kN/m
车速	28.8 km/h ⁻¹
路面类型	G级
频率	0.011 ~ 2.83 Hz

图6为系统振动响应量的功率谱密度曲线。从图6中可以看到履带车辆车身振动的主要能量主要集中在频率为0~1 Hz的范围内,有选择的改变车身结构参数,使有害振动远离此频率范围,从而提高履带车辆的综合性能。

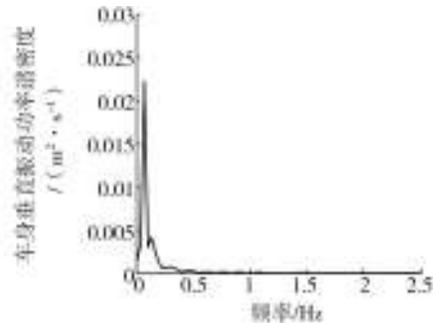


图6 车身垂直振动功率谱密度曲线
Fig. 6 Vertical vibration power spectral density curve of vehicle body

应用虚拟激励法研究履带车辆随机振动的核心在于虚拟路面的激励,文中将振动系统假设为线性

的,模拟了在模拟的路面谱模型下车体的振动功率谱密度曲线。为履带车辆的行进部分的参数选择提供了依据。

2) 利用虚拟激励法研究车辆随机振动的特性,建立了单自由度的车辆振动模型,并得到了车体振动的功率谱密度曲线。

3 结论

1) 通过对 GB 7031—1986 路面谱的研究,利用谐波叠加法建立了履带车辆平顺性试验所需的 F, G 级随机路面谱,得到路面不平度曲线,并进行功率谱分析,与 GB 7031—1986 规定的功率谱进行了对比验证,结果符合要求,可以用作履带车辆等平顺性试验的路面使用。

参考文献:

- [1] 周云波. 履带车辆平顺性仿真试验路面谱研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 95—100.
- [2] 吴参. 三维路面谱的仿真建模与验证[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 43(10): 1935—1938.
- [3] 李杰. 虚拟激励法及其在汽车随机振动应用中的探讨[J]. 设计计算研究, 2007(7): 24—27.

(上接第 81 页)

分,是站网吐故纳新的重要依据,使得站网管理更具系统性、配套性,可操作性、推动站网更具时代活力和创新能力。

2.6.1 设立评价机构

为了公正地对试验站进行评价,应设立独立评价机构,赋予其职能。该评价机构应由相关管理机构和专家组成,进入数据库管理,需要时调取。

2.6.2 评价方法

以能力为核心基础制定评价方法,规范相关工作。评价方法应包括国防试验站具备的条件、评价程序、综合评价的基本原则、不同能力试验站分级管理等。评价内容应包括重要性、典型性、基本能力、承担项目及成果、管理水平、资质等 6 个项目及 21 项指标,全面反映试验站的价值、自身能力以及对国防现代化建设和国家经济建设的贡献率。为了确保国防站网“少而精”的特点和“以军为主”的性质,应坚持站网试验站“环境典型”的特色,不搞重复环境。同时,应继承国防站网整合成立的国情事实,在相同

评价内容上,分“入网申请站”和“在网站”,分别设置不同阶段的权重进行能力评价,对申请入网的试验站在关键指标上实施一票否决制度,而对于连续 2 次评分较差的试验站则原则上劝其退出站网,以确保站网整体布局和能力,激发站网活力。

3 结语

国防站网成立以来,站网管理一直受到国防科技工业局的高度重视,在其支持下,已形成上述一整套迄今为止较为系统的站网管理体系。近期研究完成的运行机制、站网管理、共享机制、服务模式、站网评价等是该管理体系的核心,对国防站网未来的生存与发展空间有着较大的推动作用。随着该套管理体系的完善、相关方法的实施和不断改进,必将为新时期国防站网提供持续、健康发展的内在动力,尽快将站网打造成为装备环境适应性试验和研究的高水平基地,推动国防站网实现跨越发展,为产品研制提供坚实的技术支撑。