

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.12.023

步兵战车炮塔振动仿真

刘全胜, 王帅帅, 高玉水, 李培富
(装甲兵工程学院兵器工程系, 北京 100072)

摘要: 针对某型履带式步兵战车火炮射击精度受炮塔振动影响大的问题, 在 ADAMS/ATV 和 SolidWorks 环境下建立了简化后的战车-路面系统虚拟样机; 建立了基于谐波叠加法的随机等级路面模型; 分析了虚拟样机中主要的力学模型; 引入了驾驶员模型控制器, 对步兵战车 2~5 档在 B~E 级路面上行驶过程中炮塔的振动进行仿真。仿真结果表明, 采用虚拟样机对炮塔振动分析的方法是有效的, 为炮塔乘员的舒适性研究及瞄准线稳定分析提供参考依据。

关键词: ADAMS/ATV; 步兵战车; 炮塔; 振动; 路面

中图分类号: TJ818 **文献标志码:** A

Vibration Simulation of Infantry Combat Vehicle Turret

Liu Quansheng, Wang Shuaishuai, Gao Yushui, Li Peifu

(Department of Weaponry Engineering, Academy of Armoured Force Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Focused on the problem that gun firing accuracy was influenced largely by turret vibration of a certain type tracked infantry combat vehicle, a simplified virtual prototype of infantry combat vehicle-road system was established under the ADAMS/ATV and SolidWorks environment. The random grade road model was created based on the harmonic superposition method is established. Main mechanical models of virtual prototype were analyzed. Driver model controller was introduced, turret vibration of infantry combat vehicle when running on B to E grade road with 2 to 5 gear speed was simulated. The result indicates that it is effective to analyze turret vibration by using virtual prototype and can provide a reference for the research of turret crew comfort and the analysis of the stability of the line of sight.

Key words: ADAMS/ATV; infantry combat vehicle; turret; vibration; road

0 引言

步兵战车炮塔的振动不仅影响步兵战车行驶平顺性和乘员的舒适性、战斗力; 也影响着高精尖车载设备的稳定性和可靠性, 如瞄准线和火炮轴线的稳定, 从而导致射击精度下降。影响炮塔振动的因素除了车体振动外(如履带和不平路面接触所受的冲击外引起的振动、发动机工作振动和发射炮弹时产生的冲击振动等), 还包括滚珠和座圈间接触碰撞产生的振动等。

炮塔振动仿真研究的对象是车辆-路面系统, 笔者利用 ADAMS/ATV(履带车辆模块)和 SolidWorks 软件, 建立某型履带式步兵战车-路面系统的虚拟样机, 并对步兵战车在随机等级路面上行驶中的炮塔振动进行仿真研究。

1 步兵战车虚拟样机建立^[1-3]

步兵战车行驶过程中, 履带系统在路面上向前推进, 路面的起伏通过履带使负重轮在垂直方向上产生位移, 形成对悬挂系统的激励, 该激励经过车

体、座圈的传递, 引起炮塔的振动。描述炮塔的振动情况, 即描述履带、车轮、悬挂、车体、座圈、炮塔对路面不平度的传递特性, 涉及到履带、负重轮、车体与路面相互作用的运动和动力学, 及座圈和滚珠间相互作用的运动和动力学, 是一个非常复杂的过程。在虚拟样机中很难描述所有的细节和特征, 但有的特征对分析结果没有影响或者影响很小; 因此, 笔者根据仿真的目的, 对车辆-路面系统进行如下简化:

1) 忽略无关零部件的影响(以配重的方式进行质量补偿)、不过分追求在几何形体上与实际部件完全一致(只要仿真构件几何形体的质量、质心位置、惯性矩等物理特性同实际结构相同, 则仿真结果视为等价);

2) 忽略系统中各构件的弹性变形, 均做刚体处理;

3) 忽略因装备使用磨损及间隙带来的影响。

简化后车辆-路面系统的主体结构如图 1 所示。各构件间的连接约束关系如表 1 所示。

收稿日期: 2012-08-16; 修回日期: 2012-09-11

作者简介: 刘全胜(1968—), 男, 北京人, 硕士, 副教授, 从事武器系统综合运用研究。

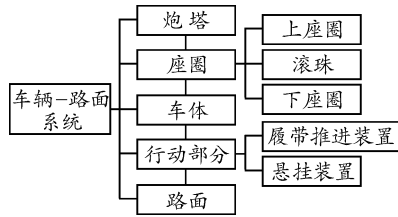


图 1 车辆-路面系统的主体结构

表 1 车辆-路面系统构件间的主要连接约束

约束对象	约束关系
炮塔	上座圈 Unite
滚珠	上座圈、下座圈 接触力
车体	下座圈 Unite
车体	炮塔 扭转弹簧
车体	主动轮、托带轮、平衡轴 旋转副
车体	基准履带板 平面副
负重轮	平衡轴 旋转副
诱导轮	张紧装置 旋转副
履带	地面 一般力

利用 AMAMS/ATV 中的共享数据库创建一个履带车辆的基础模型。根据步兵战车的实际结构，履带选择双销结构，每条履带有 89 节履带板组成；两侧各有 6 个负重轮、3 个拖带轮（2 个双拖带轮，1 个单拖带轮）；根据图纸调整负重轮、拖带论、主动轮、诱导轮等构件的形状、质量和安装位置。通过查阅图纸，利用 SolidWorks 软件建立车体、座圈和炮塔等构件的三维实体模型，以 .x_t 格式文件导入到 ADAMS/ATV 中建立的履带车辆模型中，进一步修改各个构件的位置、质量和转动惯量等参数。根据表 1 中的连接约束关系，利用 ADAMS 中 Unite 和 Merge 合并命令将从 SolidWorks 中导入的模型和 ATV 中原创建的模型合并为一个整体，添加约束、运动副和施加载荷后建立成步兵战车的虚拟样机，如图 2 所示。

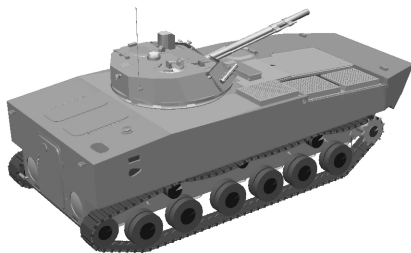


图 2 步兵战车虚拟样机

2 路面模型建立

对履带车辆在路面行驶过程中的非线性随机振动分析，需要用到路面不平度 $q(l)$ 。对于特定的路面， $q(l)$ 可通过实际测量得到；对于随机等级路面， $q(l)$ 可通过路面功率谱密度 $G_d(n)$ 反算求得。构造随

机路面不平度 $q(l)$ 的表达式，结果不是唯一的。目前常用的方法有滤波白噪声法^[4]、傅里叶逆变换法^[5]和谐波叠加法^[6]。滤波白噪声法通过对白噪声积分滤波来计算路面空间模型；傅里叶逆变换法通过路面功率谱求得幅度谱，对幅度谱进行傅里叶逆变换来得到路面不平度随机序列；谐波叠加法用有限个离散空间频率的三角级数来描述路面不平度 $q(l)$ 的随机过程。谐波叠加法算法简单直观，理论成熟严密，可实现高保真的频域模型转换。这里，笔者采用谐波叠加法来构造 $q(l)$ 的表达式。

路面功率谱密度的拟合表达式^[7]如式 (1)

$$G_d(n) = G_d(0.1) \left(\frac{n}{0.1}\right)^{-2} \quad (1)$$

式中： $G_d(n)$ 为公路谱密度， m^3 ； n 为空间频率， m^{-1} ， $n \in (n_l, n_h) = (0.01, 10)$ 。

将 (n_l, n_h) 划分为 N 个区间，取 f_i 为第 i 个区间带宽的中心频率。则路面不平度可表示为式 (2)

$$q(l) = \sum_{i=1}^N (A_i \sin(2\pi f_i l + \varphi_i)) \quad (2)$$

其中： l 为路程， m ； A_i 是由 $G_d(n)$ 的值确定的正弦函数的振幅； φ_i 是正弦函数的相角，是 $[0, 2\pi]$ 上的伪随机数。

由巴什瓦等式求得 A_i

$$A_i = \sqrt{2G_d(f_i)\Delta n_i} \quad (3)$$

所以路面不平度的表达式如式 (4)

$$q(l) = \sum_{i=1}^N (\sqrt{2G_d(f_i)\Delta n_i} \sin(2\pi f_i l + \varphi_i)) \quad (4)$$

因此，只要指定路面等级，路面长度，路面宽度，离散间隔和频率带宽划分的数量 N ，利用式 (4) 即可计算出等级随机路面的节点坐标。由于离散间隔固定，所以节点分布规律，组成三角网络时的连接关系简单，通过程序设计可方便地生成等级随机路面文件，建立等级随机路面模型。图 3 为用 C++ 语言编写的程序生成的 A~F 级随机路面模型。

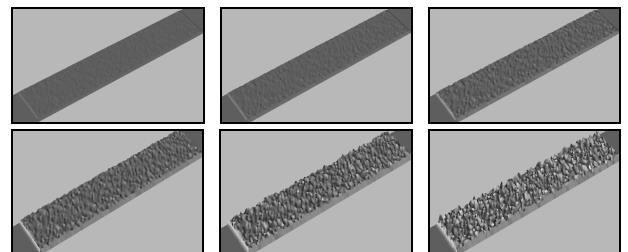


图 3 A~F 级随机路面模型

3 主要的力学模型

步兵战车行进过程中, 路面起伏传递至炮塔的中间受力环节十分复杂, 但有的受力情况对结果影响不大, 可以忽略, 以简化分析过程。因为履带、负重轮和路面的相互作用对路面输入的高频成分影响较大, 对低频成分影响较小, 而路面谱中, 频率越高贡献越小; 因此, 笔者忽略履带和负重轮对振动传递特性的影响, 主要考虑悬挂系统的弹性和阻尼模型, 及座圈和滚珠间的碰撞模型。

该步兵战车的悬挂系统为独立扭杆式, 由 12 根扭力轴、12 个平衡肘、6 个减震器、6 个弹性限制器等组成^[8]。弹性限制器和筒式液力减震器安装在车体两侧第一、二、六负重轮处的垂直甲板上。

1) 扭杆悬挂的弹性模型。扭力轴用于缓冲路面对车体的冲击, 扭力轴可等效为一个扭矩模型, 其表达式如式 (5)

$$T = T_0 - k_\theta(\theta - \theta_0) = T_0 - \frac{GJ}{l}(\theta - \theta_0) \quad (5)$$

负重轮在不同行程时, 扭杆在负重轮轴上的垂直载荷如式 (6)

$$F_f = \frac{T'}{R \cos \theta} = \frac{GJ}{l} \cdot \frac{\theta - \theta_0}{R \cos \theta} \quad (6)$$

其中 $k_\theta = \frac{GJ}{l}$, $J = \frac{\pi}{32} d_T^4$ 。

式中: T 为扭力矩; T_0 为初始扭力矩; k_θ 为扭转刚度; θ 、 θ_0 分别为平衡轴的倾角和安装角; l 为扭杆长度; d_T 为扭杆工作直径; R 为平衡轴曲臂半径; G 为材料的剪切弹性模量; J 为扭杆截面的极惯矩。

2) 减震器的阻尼模型。减震器用于缓和对车体的冲击和衰减车体振动, 可等效为一个双向力模型。设 d_g 为活塞杆直径, D_h 为活塞直径, a_k 为阻尼小孔的面积, c 为流量系数, ρ 为液体密度。忽略活塞和缸筒、导向座间的缝隙带来的影响。则当活塞以速度 \dot{s} 相对缸体压缩时, 减震器的阻尼力如式 (7)

$$F_{ys} = -\frac{\rho \pi^3 (D_h^2 - d_g^2)^2 D_h^2 \dot{s}^2}{128 a_k^2 c^2} \quad (7)$$

当活塞以速度 \dot{s} 相对缸体复原时, 减震器的阻尼力如式 (8)

$$F_{fy} = \frac{\rho \pi^3 (D_h^2 - d_g^2)^3 \dot{s}^2}{64 a_k^2 c^2} \quad (8)$$

3) 滚珠与座圈间的碰撞模型。上下座圈和滚球之间存在间隙, 滚球在滚道内与上下座圈进行微幅的碰撞, 滚球和上下座圈之间都存在碰撞接触力, 如图 4 所示。支撑滚球被隔离滚球隔离开, 支撑滚球间的相对位置关系基本保持不变。为了缩短仿真时间, 并保持滚球间的相对位置不发生变化, 用 32 个均匀分布在座圈中的滚球来代替炮塔座圈中的全部滚球, 将滚球与下座圈固连在一起, 在滚球和上座圈之间施加碰撞接触力。适当的增大碰撞接触力, 使其符合实际的受力情况。对于 2 个构件连续接触的情况, ADAMS 软件系统会把这种接触定义成一种非线性弹簧的形式, 构件材料的弹性模量当成弹簧的刚度, 阻尼当成能量损失。ADAMS/View 中有 2 种计算接触力的方法, 补偿法 (Restitution) 和冲击函数法 (Impact)^[9]。这里采用冲击函数法, 法向接触力如式 (9)

$$F = k g^e + c \frac{dg}{dt} \quad (9)$$

式中: k 为接触刚度; e 为非线性系数; g 为接触体的渗透量; $c = \text{step}(g, 0, 0, d_{\max}, c_{\max})$ 为阻尼系数; d_{\max} 为最大渗透量; c_{\max} 为最大阻尼系数。

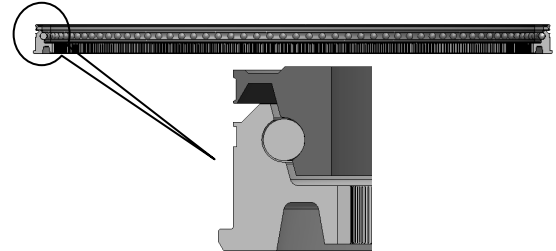


图 4 座圈模型剖视

4 炮塔振动仿真

左右 2 个主动轮设置相同的转速, 当路面起伏左右不对称时, 车体就会向路面较高的那一侧偏转, 为了保证车辆直线行驶, 创建一个“驾驶员模型”^[10]对车辆进行控制。

假设两侧主动轮的驱动方式选择“Motion”, 转动角速度设置为 $\text{IF}(\text{MODE}-5:1,0,1) * \omega$ (表示静平衡分析时为 0, 动态仿真时为 ω)。下面创建一个控制器, 由偏转角速度作为输入, 获得角速度补偿 $\Delta\omega$ 作为输出, 如图 5 所示。

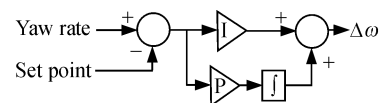


图 5 角速度补偿控制器结构

$\Delta\omega=P*\text{VARVAL}(\text{yaw_rate})+I*\text{DIF}(\text{DIFF_yaw_rate})$, 其中设定点(set point)为零, M_y 为车体中心处定义的连体坐标系, M_g 为路面连体坐标系, $\text{yaw_rate}=\text{WZ}(M_y,M_g,M_y)$ 为车体偏转角速度, P 、 I 为放大倍数, \int 表示微分方程 DIFF_yaw_rate (其中 $y'=\text{VARVAL}(\text{yaw_rate})$, y 表示偏转角速度的积分)所定义变量的积分值。

P 、 I 取适当值, 两侧主动轮转动函数分别设为:

$$\text{IF}(\text{MODE}-5:1,0,1)*(\omega+\text{VARVAL}(\Delta\omega))$$

$$\text{IF}(\text{MODE}-5:1,0,1)*(\omega-\text{VARVAL}(\Delta\omega))$$

可有效控制车辆沿直线行驶。

分别设置主动轮转速 ω 为 25, 34, 47, 75 rad/s, 车体对应的速度为 5.525, 7.514, 10.387, 16.575 m/s, 基本相当于车辆 2~5 档的速度, 使步兵战车分别在 B~F 级路面上行驶, 通过仿真计算可得到炮塔振动的相关信息。

当步兵战车以 2 档速度分别通过长 20 m 的 B、C、D、E 级路面时炮塔质心垂直方向上速度、角速度、俯仰角速度、角加速度的均方根值如表 2 所示。为便于观察, 图 6 显示了步兵战车在 B、D 级路面上加速度响应。

当步兵战车以 2~5 档的速度通过长 20 m 的 B 级路面时, 炮塔质心垂直方向的速度、角速度、俯仰角速度、角加速度的均方根值如表 3。为便于观察, 图 7 显示了步兵战车 2、4 档时炮塔加速度响应。

表 2 2 档速度下各参量的均方根值

路面等级	σ_v	σ_a	$\sigma_{\omega v}$	$\sigma_{\omega a}$
B	0.044 0	1.943 5	2.967 1	77.259 9
C	0.057 0	1.725 7	3.319 0	71.430 6
D	0.279 7	3.958 3	11.971 7	146.245 6
E	0.185 4	2.461 4	9.200 3	126.641 2

表 3 B 级路面下各参量的均方根值

档位	σ_v	σ_a	$\sigma_{\omega v}$	$\sigma_{\omega a}$
2	0.044 0	1.943 5	2.967 1	77.259 9
3	0.066 7	1.963 0	4.696 5	97.933 2
4	0.095 2	2.737 2	8.408 0	166.207 5
5	0.187 5	4.626 2	15.646 2	328.126 1

从图 6、7 和表 2、3 可以看出, 随着速度和路面等级的提高, 步兵战车炮塔响应急剧增大, 在从平坦路面过渡到等级路面时, 表现得尤为明显, 可基本反映炮塔的振动情况。而表 2 中步兵战车以 2 档速度通过 D 级路面时, 炮塔响应增加的幅度远大于路面等级增加的幅度, 这种现象可能是由于路面和车速的配合引起了共振, 该问题还需进一步研究。

5 结束语

笔者联合 ADAMS/ATV 和 SolidWorks 建立了步兵战车的简化虚拟样机, 利用谐波叠加法建立了随机等级路面模型, 分析了模型中主要的力学模型, 并对模型进行了优化和仿真, 在仿真过程中引入了驾驶员模型控制器, 控制车辆直线行驶。仿真结果表明, 利用 ADAMS/ATV 建立的步兵战车虚拟样机对炮塔振动分析的方法是可行的。仿真结果可为炮塔乘员的舒适性研究及瞄准线稳定分析提供参考。

参考文献:

- [1] Mechanical Dynamics Sweden AB. ADAMS Tracked Vehicle Toolkit version 2005r2 documentation[S]. October 10th, 2005.
- [2] 吴大林, 马吉胜, 董自卫. 基于 ADAMS 的自行火炮悬挂装置振动分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(5): 39-41.
- [3] 马吉胜. 履带车辆路面激励响应仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2494-2498.
- [4] 喻凡, 林逸. 汽车系统动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [5] 张亚欧. 履带车辆行驶试验仿真技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2006.
- [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.
- [7] 赵济海, 王哲人, 关朝露. 路面不平度的测量分析与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2000: 10.
- [8] 中国人民解放军总参谋部军训和兵种部. 04 式履带式步兵战车构造与使用[M]. 北京: 解放军出版社, 2007: 2.
- [9] 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 92-93.
- [10] Mechanical Dynamics Sweden AB. ADAMS Tracked Vehicle Toolkit version 2005r2 Training Guide[S]. October 10th, 2005.

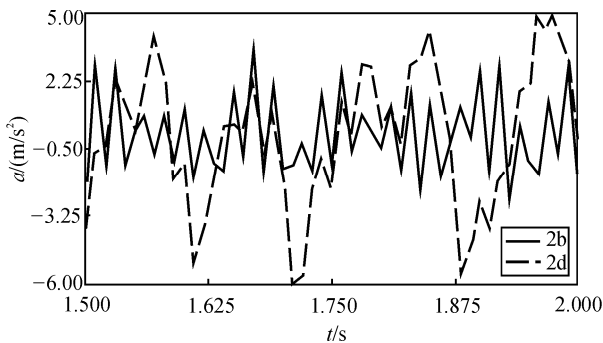


图 6 2 档速度下炮塔加速度响应

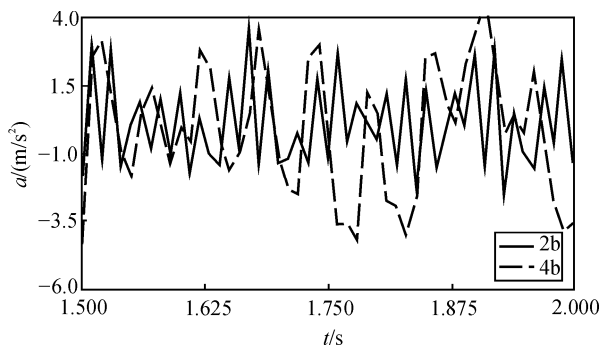


图 7 B 级路面上炮塔加速度响应