

9-1-2020

## Launch Dynamic Characteristics Simulation Analysis of Vehicular Gatling Gun in Different Road Surface

Junnuo Zhang

*1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;;*

Ruilin Wang

*1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;;*

Li Tao

*1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;;2. Air Defense Force Academy, Zhengzhou 450052, China;*

Binbin Hua

*1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Launch Dynamic Characteristics Simulation Analysis of Vehicular Gatling Gun in Different Road Surface

### Abstract

*Abstract:* To study the influence of firing accuracy on a certain vehicular Gatling gun in different road surface, a rigid-flexible coupling multi-body dynamic simulation model was established based on virtual prototyping technology. Considering the interaction relations between the tires and road surface, vehicle and machine gun, the vehicle vibration characteristics and the muzzle response characteristics and vertical-target dispersion were obtained by analyzing the machine gun system in different road surface. The influence of road surface on fire accuracy was demonstrated by contrasting and analyzing the simulation curves. The study results have provided a theoretical support and direction for the use of vehicular Gatling gun and test.

### Keywords

vehicular Gatling gun, rigid-flexible coupling model, road surface, dynamic characteristics, firing accuracy

### Recommended Citation

Zhang Junnuo, Wang Ruilin, Li Tao, Hua Binbin. Launch Dynamic Characteristics Simulation Analysis of Vehicular Gatling Gun in Different Road Surface[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(5): 1087-1094.

## 不同路面条件下车载转管机枪动力学特性研究

张军挪<sup>1</sup>, 王瑞林<sup>1</sup>, 李涛<sup>1,2</sup>, 化斌斌<sup>1</sup>

(1.军械工程学院, 石家庄 050003; 2.防空兵学院, 郑州 450052)

**摘要:** 以某型车载转管机枪为对象, 为了研究不同路面环境对其射击精度的影响程度, 采用虚拟样机技术建立了该型机枪刚柔耦合多体动力学仿真模型。综合考虑了轮胎与地面、车辆与机枪之间的相互作用关系, 仿真模拟了车辆处于自由状态时, 机枪在不同路面条件下的射击过程并对其进行了外弹道计算, 获得了机枪射击时车辆的振动特性、枪口的响应特性以及立靶散布情况。通过对各种路面条件下的仿真曲线对比分析, 得出了路面环境对机枪射击精度的影响关系。研究结果为同类武器的研究与试验提供了理论支持和方向。

**关键词:** 车载转管机枪; 刚柔耦合模型; 路面; 动力学特性; 射击精度

中图分类号: TJ25

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 05-1087-08

## Launch Dynamic Characteristics Simulation Analysis of Vehicular Gatling Gun in Different Road Surface

Zhang Junnuo<sup>1</sup>, Wang Ruilin<sup>1</sup>, Li Tao<sup>1,2</sup>, Hua Binbin<sup>1</sup>

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Air Defense Force Academy, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** To study the influence of firing accuracy on a certain vehicular Gatling gun in different road surface, a rigid-flexible coupling multi-body dynamic simulation model was established based on virtual prototyping technology. Considering the interaction relations between the tires and road surface, vehicle and machine gun, the vehicle vibration characteristics and the muzzle response characteristics and vertical-target dispersion were obtained by analyzing the machine gun system in different road surface. The influence of road surface on fire accuracy was demonstrated by contrasting and analyzing the simulation curves. The study results have provided a theoretical support and direction for the use of vehicular Gatling gun and test.

**Keywords:** vehicular Gatling gun; rigid-flexible coupling model; road surface; dynamic characteristics; firing accuracy

## 引言

车载转管机枪是利用武器系统发射时气室内流动的高温、高压火药燃气的压力作用于活塞机构

并驱动武器的枪管组件转动, 进而带动自动机与拨弹机构等相应零部件依次工作完成自动循环运动过程的多管武器<sup>[1]</sup>。在高射速条件下, 武器发射平台在机枪射击过程中的振动与变形是影响枪口参数的主要因素。因此, 车载转管机枪的发射威力、路面环境、车辆行驶速度以及地面不平度等条件都会对机枪的射击精度产生一定的影响。

车载转管机枪现代战场使用条件极其复杂, 车辆在行驶过程中射击时路面的随机性比较大, 路面



收稿日期: 2014-04-22 修回日期: 2014-07-14;  
作者简介: 张军挪(1978-), 男, 河南商水, 博士, 讲师, 研究方向为结构动力学仿真及应用; 王瑞林(1963-), 男, 湖南望城, 博士, 教授, 博导, 研究方向为武器系统动力学理论与应用; 李涛(1984-), 男, 陕西咸阳, 博士, 研究方向为武器系统动力学理论与应用。

<http://www.china-simulation.com>

• 1087 •

环境的不同在本质上是路面摩擦系数的差别,其直接决定了轮胎与地面摩擦力的大小<sup>[2-3]</sup>。本文从多体系统动力学的角度出发,建立了车载转管机枪的刚柔耦合模型,仿真模拟了车辆处于自由状态下机枪的射击过程,并获得了车辆在几种不同路面条件下,机枪射击时的车辆振动特性与枪口响应特性。通过对各种路面环境的仿真曲线对比分析,得出了路面环境对机枪射击精度的影响关系。

## 1 车载转管机枪刚柔耦合模型的建立

### 1.1 机枪系统拓扑结构

本文所研究的对象为某型车载 3 管大口径转管机枪,该枪采用活塞—凸轮曲线驱动机构,机头回转闭锁,击锤击发,人工首发装填机构启动<sup>[4-5]</sup>。

以枪管轴线指向枪口的方向为 x 轴正向,以竖直向上为 y 轴正向,以右手准则确定 z 轴正向。车载转管机枪武器系统的拓扑结构如图 1 所示。

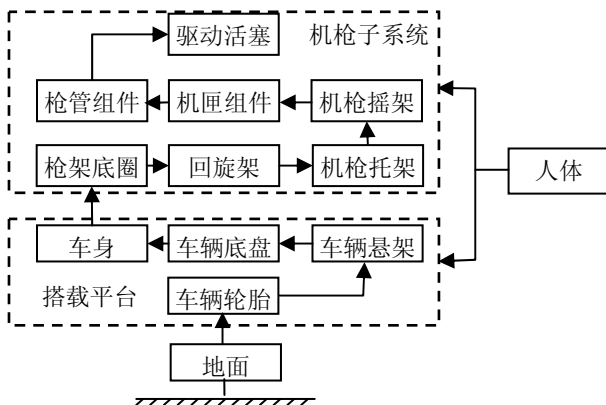


图1 系统拓扑结构

### 1.2 车辆悬架-路面系统模型的建立

根据实际的武器系统车辆模型以及地面谱参数化设计,参考路面标准 GB7031-86《车辆振动输入-路面不平度表示方法》,UA 轮胎模型是目前使用较多的模型,采用了 SAE 坐标系,考虑了非稳定效果,侧滑和纵滑的相互影响是通过摩擦椭圆考虑的,考虑了外倾,只能用于平路面。车辆和横向滑移分开对待的情况下采用,确定车辆悬架的结构参数以及轮胎规格,使用 ADAMS 软件创建车辆

的整车模型。模型主要包括:汽车底盘模型、双臂式前独立悬架模型、转向机构模型、斜置臂式后悬架模型、轮胎模型和路面谱等几部分<sup>[6-7]</sup>。本文所采用 UA 轮胎模型参数如表 1 所示。

表 1 UA 轮胎模型参数

自由半径/mm	462	纵向滑移刚度 /(N/mm)	70 000
径向刚度/(N/mm)	262	滚动阻力系数	0.015
胎冠半径/mm	159	静摩擦系数	0.9
外倾刚度/(N/mm)	3 000	动摩擦系数	0.7
侧偏刚度/(N/mm)	56 000	径向相对阻尼系数	0.75

### 1.3 车载转管机枪系统刚柔耦合模型的建立

建立机枪刚柔耦合模型之前首先对机枪模型进行简化处理,删除了压筋、倒角等对仿真结果影响小的特征。为了减小计算量,对于刚度较大且变形较小的部件可作为刚性对待;对于运动和受力没有影响的部件可以进行等效质量和转动惯量处理。在本文中,枪管、托架变形较大,作为柔性体进行计算。

根据实际的武器系统车辆模型以及地面谱参数化设计,确定车辆悬架的结构参数以及轮胎规格。本文建模中将车辆视为刚性体进行分析,各柔性体之间通过关联的刚性点传递力与力矩,车辆悬架减震系统按照弹簧阻尼系统进行标准化设计,车辆通过枪架座圈以及相关的支撑件与机枪托架固定,从而得到车辆—机枪系统的刚柔耦合模型,模型共有 167 个运动构件,37 个旋转副,124 个固定副,6 个平移副,8 个球铰副,5 个耦合副,2 个胡克副,1 个圆柱副,虚拟样机模型如图 2 所示。

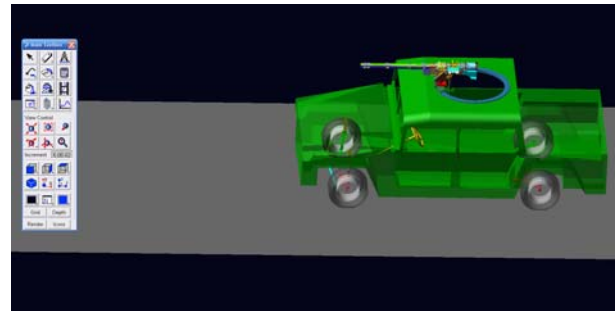


图2 车辆—机枪系统的刚柔耦合模型

## 2 载荷激励的施加

### 2.1 机枪载荷的确定

该枪在射击状态下承受的外力主要有膛合力、气室压力和气室压力反力, 以及自身产生的摩擦阻力和各种弹簧的作用力。各种弹簧力在建立运动副的过程中已经加入; 阻力的大小可以通过相应的计算公式作为外力添加进去; 碰撞参数模型具体参考了 ADAMS 帮助文档中的参数, 本文所用参数为: 刚度取  $10^5 \text{ N/mm}$ , 阻尼取  $15 \text{ N} \cdot \text{s/mm}$ 。在这里主要介绍气室压力的确定。

枪弹击发后, 经过  $1.798 \text{ ms}$ , 弹丸越导气孔, 火药气体进入导气室, 推动活塞运动。进入气室中的火药气体对活塞滑块的作用力  $F$  由下式确定<sup>[8]</sup>:

$$F = p_d \exp(-(t-t')/b) (1 - \exp(-\alpha(t-t')/b)) S' \quad (1)$$

式中:  $F$  为气室压力;  $p_d$  为弹丸经过导气孔瞬间的膛内平均压强;  $b$  为与膛内压力冲量有关的时间参数;  $\alpha$  为与导气装置结构尺寸有关的参数;  $t$  为气室压力工作时间;  $S'$  为活塞的横截面积。

通过计算得出转管机枪气室压力随时间的变化曲线如图 3 所示。

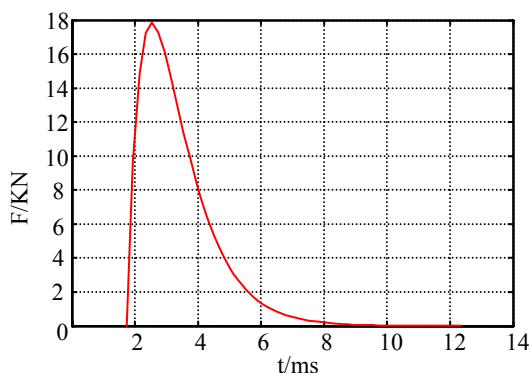


图3 气室压力变化曲线

### 2.2 系统激励的确定

基于建立的虚拟样机模型进行仿真计算时, 改变轮胎和地面的摩擦力主要是通过修改路面谱文件和轮胎模型文件中的摩擦系数实现。当车载机枪在自由静止状态下射击时, “摩擦系数” 主要是指

路面与轮胎粘附系数  $\varphi$ , 是路面所能提供给路面的抓附能力, 粘附系数  $\varphi$  越大, 轮胎对地面的附着力  $F$  就越大。

附着力与粘附系数二者间的关系式为

$$F = W \cdot \varphi \quad (2)$$

式中: 粘附系数  $\varphi$  由道路的材质、轮胎结构、胎面花纹、及车辆的速度等决定, 计算中附着力系数可取平均值。  $W$  为轮胎所承受的垂直负荷。

粘附系数的修改通常是由低压轮胎来实现, 低压胎在军用装备车辆中使用最多, 其弹性好, 与道路接触面大, 行驶平顺性、转向操纵稳定性都较高压轮胎更好一些。本文中主要针对沥青或混凝土、砂石、泥土三种路面情况进行了仿真研究。不同路面下轮胎的粘附系数如表 2 所示。

表 2 路面与轮胎的粘附系数

路面名称	粘附系数		
	高压轮胎	低压轮胎	高越野轮胎
沥青或混凝土路面	0.5-0.7	0.7-0.8	0.7-0.8
砂石路面	0.3-0.4	0.4-0.5	0.4-0.55
泥土路面	0.2-0.4	0.3-0.45	0.35-0.5

## 3 外弹道计算模型的建立

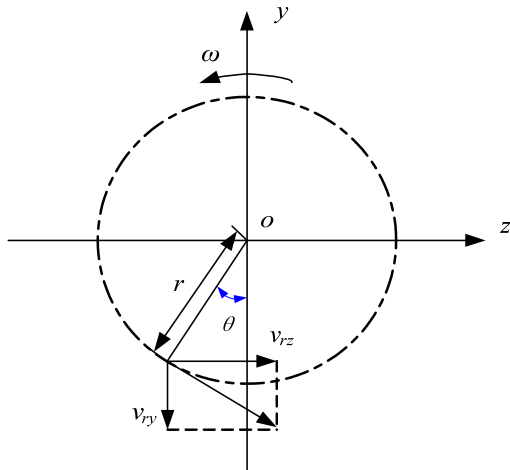
枪管组件沿着身管轴线  $x$  方向旋转, 角速度为  $\omega$ , 旋转半径为  $r$ , 设由于枪口跳动量分别为  $y_t$  与  $z_t$ , 引起子弹在  $y$  方向和  $z$  方向的速度分别为  $v_y$  与  $v_z$ , 枪管转动在  $y$  方向和  $z$  方向引起的速度分量分别为  $v_{y'}$  与  $v_{z'}$ 。子弹出膛时初速为  $v_0$ , 其方向与水平面夹角为  $\alpha_1$ , 与垂直平面夹角为  $\alpha_2$ 。子弹在空气中的速度为  $v$ , 在  $x$  方向的速度分量为  $u$ , 在  $y$  方向和  $z$  方向引起的速度分量分别为  $v_1$  与  $v_2$ , 枪口与立靶之间的距离为  $l$ 。

根据外弹道公式有<sup>[9]</sup>:

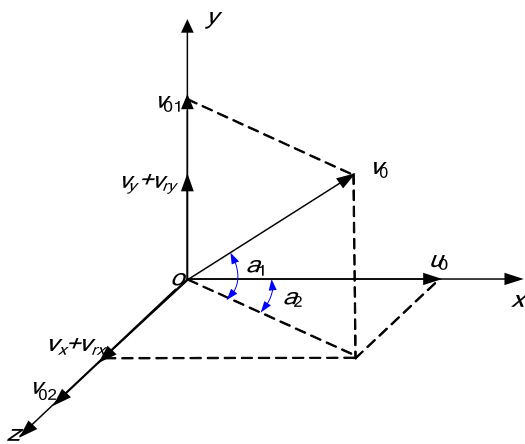
$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -CH(y)G(v)u & u = \frac{dl}{dt} \\ \frac{dv_1}{dt} = -CH(y)G(v)v_1 - g & v_1 = \frac{dy}{dt} \\ \frac{dv_2}{dt} = -CH(y)G(v)v_2 & v_2 = \frac{dz}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $C$  为弹道系数； $H(y)$  为空气比重函数； $G(v)$  为弹头与空气相对运动特性； $g$  为重力加速度。

根据子弹出膛时的射角和枪管的运动绘出速度矢量图，如图 4(a), (b) 所示。



(a) 角速度矢量图



(b) 速度矢量图

图4 枪口速度矢量图

方程的积分初始条件为：当  $t=0$  时， $u_0=v_0\cos\alpha_1\cos\alpha_2$ ， $v_{10}=v_0\sin\alpha_1+v_y+\omega r\sin\theta$ ， $v_{20}=v_0\cos\alpha_1\sin\alpha_2+v_x+\omega r\cos\theta$ ， $y_0=y_i$ ， $z_0=z_i$ 。样机试验中，立靶位置距离机枪 100 m，即子弹运动距离为 100 m 时，其运动速度变化量较小，暂且不考虑弹丸出膛口时的随机扰动，此时可以将阻力函数  $CH(y)G(v)$  考虑为常数，并根据子弹出膛口速度和阻力定律计算得出固定值。

## 4 仿真结果分析

针对选择的不同路面，分别修改路面与轮胎的粘附系数。沥青或混凝土路面，确定  $\phi$  值为 0.75；砂石路面  $\phi$  值选择为 0.45；泥土路  $\phi$  值为 0.3。计算模型初始时车辆水平放置在路面上，分析模型初始时车辆处于静止状态，机枪高低射角与方向角均为 0，车辆在机枪后坐力的作用下沿枪管轴线方向向后运动。模型采用 UA 轮胎，在机枪射击时偏转力矩的作用下，轮胎与地面之间的径向力发生变化，从而会引起车辆的侧滑。设定仿真时间为 1.5 s，选取数值积分步长为 0.000 1，在轮胎上加载驱动函数，系统达到平衡后机枪启动首发储能装置，机枪开始射击。基于机枪系统刚柔耦合模型的建立和对边界条件的处理，对机枪的射击过程进行了仿真。分析仿真结果，可以得出了机枪枪口在高低、左右方向的动力响应和车辆悬架主要参数的振动情况。图 5~8 分别为枪口在 Y 方向(高低方向)与 Z 方向(左右方向)的位移与速度响应曲线，图 9~12 分别为车辆在 Y 方向(高低方向)与 Z 方向(左右方向)的位移与速度响应曲线，图 13~14 为车辆悬架主销内倾角等典型输出变量随时间的变化曲线。图 15 为通过外弹道计算得出的弹着点散布图。具体的计算结果如表 3 所示。表 3 中： $H_1$ ， $H_2$  分别为枪口位移响应在 Y 方向(高低方向)和 Z 方向(左右方向)相对初始状态时变化的最大值(单位为 mm)； $k_1$ ， $k_2$  分别为枪口速度响应在 Y 方向(高低方向)和 Z 方向(左右方向)相对初始状态时变化的最大值(单位为  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )； $S_1$ ， $S_2$  分别表示车辆位移响应在 Y 方向(高低方向)和 Z 方向(左右方向)相对初始状态变化的最大值(单位为 mm)； $v_1$ ， $v_2$  分别为车辆在 Y 方向和 Z 方向跳动的速度极值(单位为  $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ )； $\theta_1$ ， $\theta_2$  分别表示车辆悬架主销内倾角、前轮外倾角相对初始状态变化的极值(单位为 rad)。

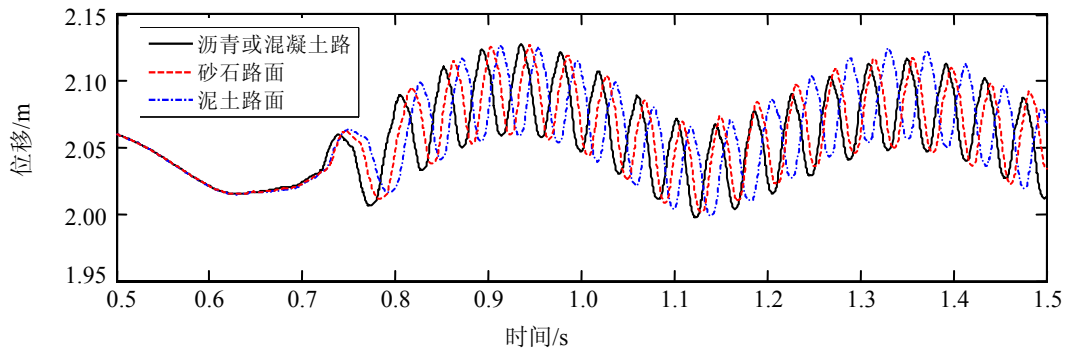


图5 枪口Y方向位移曲线

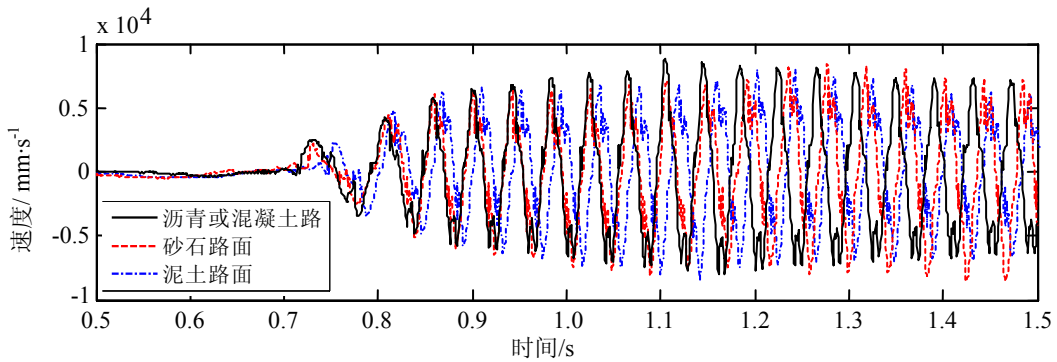


图6 枪口Y方向速度曲线

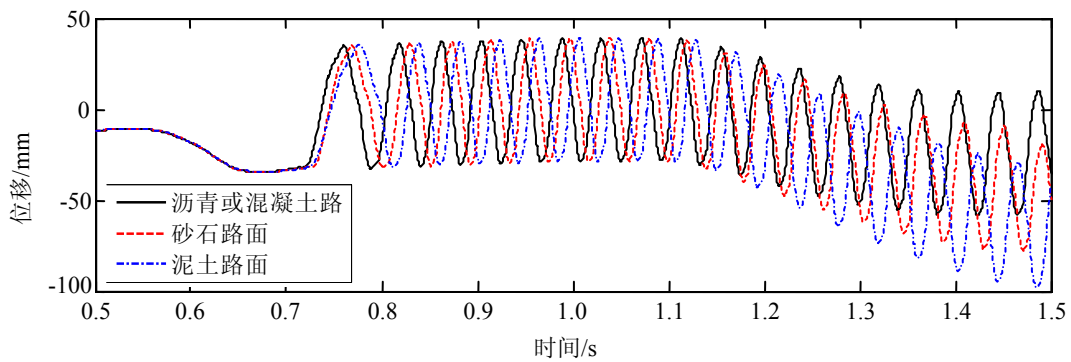


图7 枪口在Z方向位移曲线

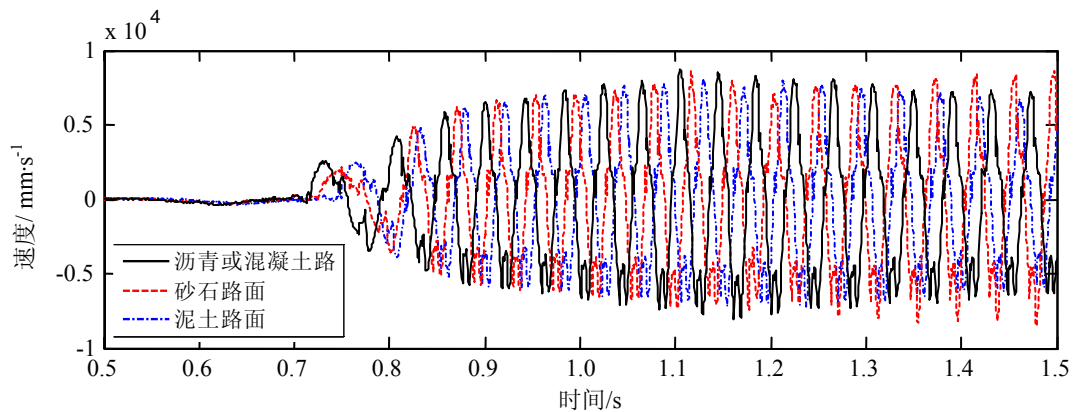


图8 枪口Z方向速度曲线

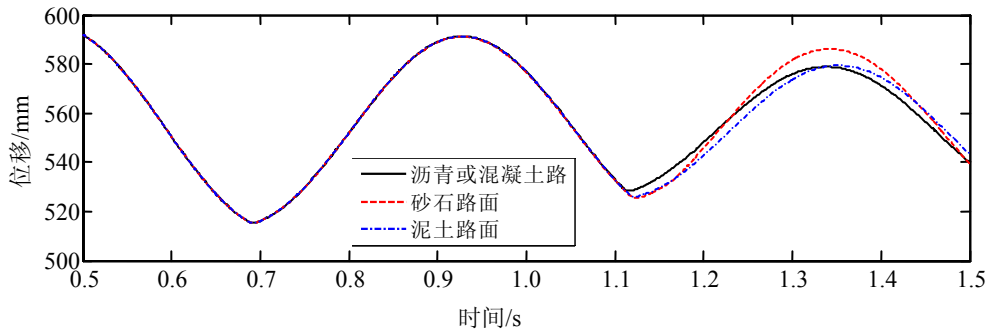


图9 车辆Y方向位移曲线

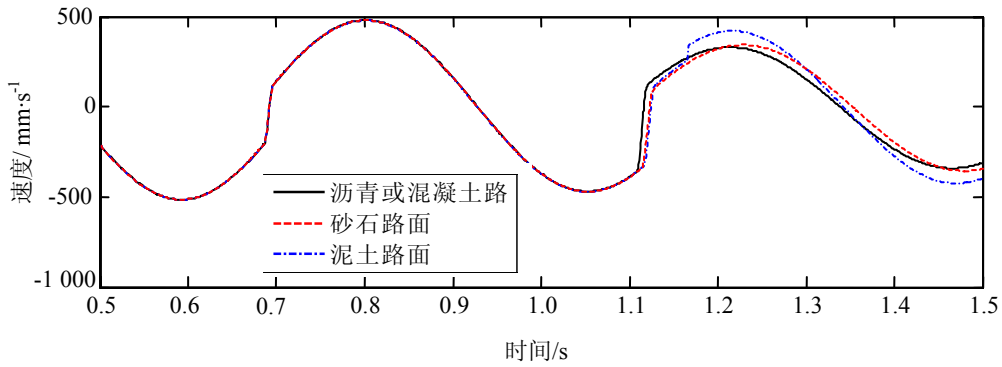


图10 车辆Y方向速度曲线

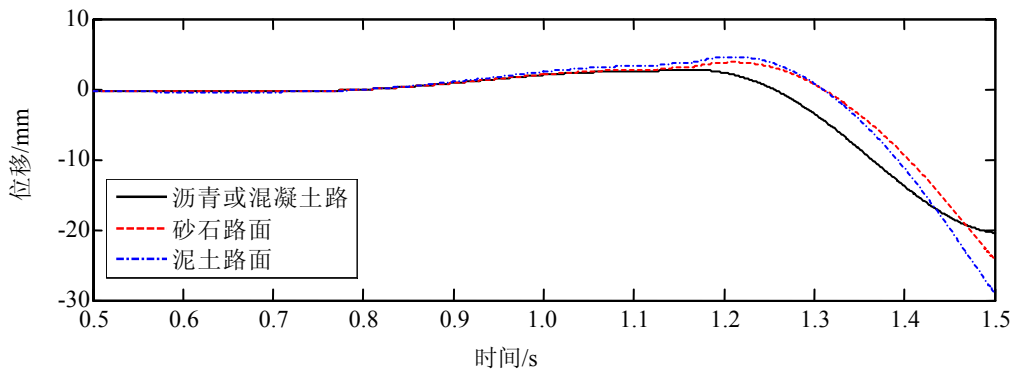


图11 车辆Z方向位移曲线

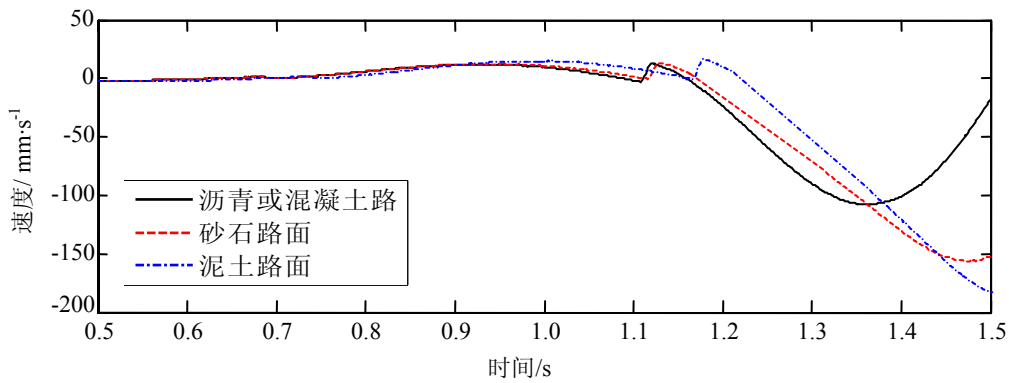


图12 车辆Z方向速度曲线



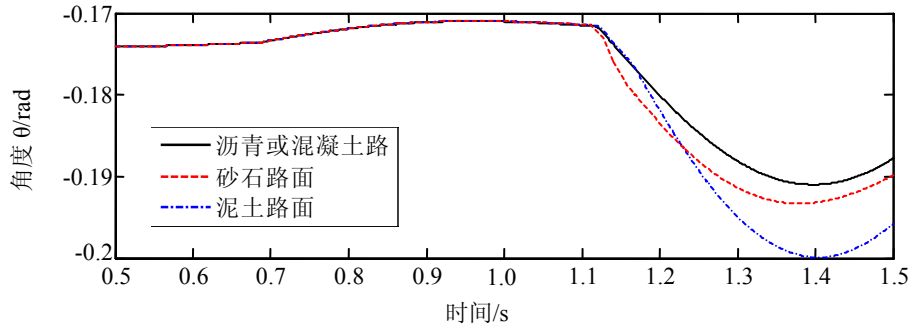


图13 主销内倾角变化曲线

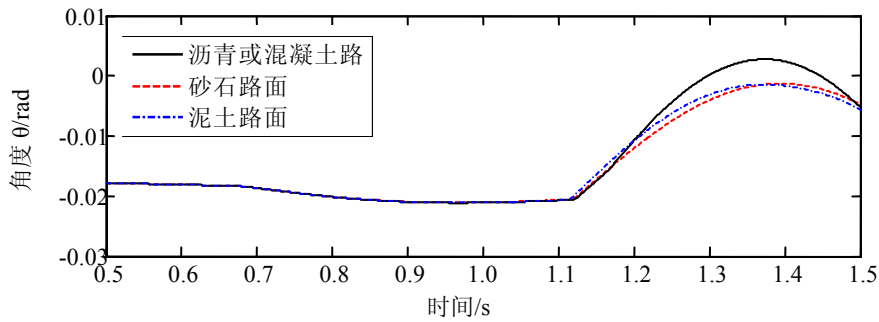


图14 前轮外倾角变化曲线

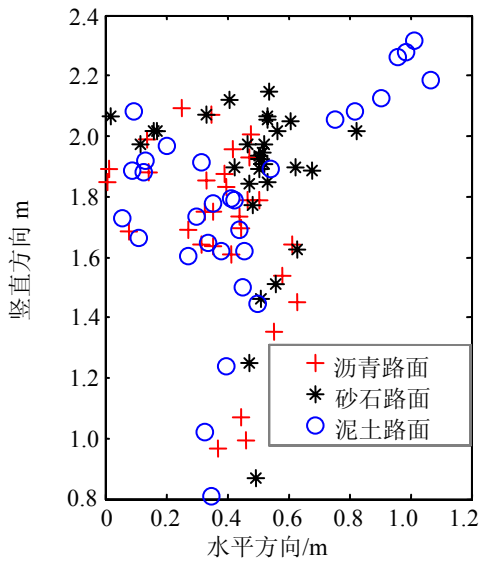


图15 外弹道计算得出弹着点散布情况

通过分析图示中仿真曲线和弹着点散布图以及表 3 中的计算数据可以看出:

(1) 枪口位移在 Y 轴方向(高低方向)和 Z 轴方向(左右方向)表现出周期性的振动规律。观察分析图 7 可以发现, 机枪射击过程中, 1.16 s 时枪口位移在 Z 轴方向出现了滑移, 车载机枪放置在泥土路面时, 偏移量最大, 其值为 101 mm。可以得出结论: 车载机枪放置在不同路面上射击时, 路面与轮胎之间粘附系数越小时, 枪口响应位移相对初始位置变化值就越大。

(2) 由图 5~8 可以清晰看出: 在不同路面上射击时, 保证其他边界条件相同时, 因为不同路面条件下粘附系数的不同, 砂石与泥土路面位移与速度响应曲线相对于沥青或混凝土路面都出现了一定的滞后性。同时可以看出: 在沥青或混凝土路面射击时, 枪口在高低和左右方向的速度幅值( $k_1$  与  $k_2$ )相对其他两种情况都更大一些, 从而也就可以解释射击时不同路面条件下出现一定滞后的原因。

表 3 试验与仿真计算结果对比分析

路面条件	$H_1/\text{mm}$	$H_2/\text{mm}$	$k_1/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$k_2/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$S_1/\text{mm}$	$S_2/\text{mm}$	$v_1/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$v_2/\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$	$\theta_1/(\text{rad})$	$\theta_2/(\text{rad})$
沥青或混凝土	53	-63	8 566	8 762	-13.2	-20	333.5	-104.7	0.017	0.020 46
砂石路面	57	-80	8 419	8 519	-6	-24	348	-156	0.019	0.016 58
泥土路面	64	-101	8 016	8 061	-11.6	-29	401	-182.6	0.024	0.003 25

(3) 观察车辆的位移与速度变化曲线, 如图 9~12 可以发现, 车辆在 Y 轴方向(高低方向)的跳动位移与速度曲线都表现出了较好的规律性, 与枪口在高低方向的响应曲线变化趋势一致; 在 Z 轴方向(左右方向), 车辆的响应位移也出现了偏移, 泥土路面偏移量最大, 其值为 29 mm, 这与在泥土路面射击时枪口响应偏移量最大的结论也是一致的。由以上分析, 容易得出结论: 机枪系统随车辆在 x-y 平面内的振动而振动, 即路面与轮胎之间粘附系数越低时, 车辆的振动越大, 机枪的振动也就越大。

(4) 通过对弹着点的散布情况观察分析, 相同状态下, 在沥青或混凝土路面上射击时, 即路面与轮胎之间粘附系数越高时, 弹着点的散布范围越小, 射击精度越高。

(5) 观察车辆悬架主销内倾角与前轮外束角的变化曲线, 在沥青或混凝土路面射击时, 前轮外束角相对于射击前状态跳动角度最大, 达到 1.172°; 在泥土路面射击时, 主销内倾角相对于射击前状态跳动最大, 达到 1.375°。由主销内倾角与前轮外束角在不同路面环境下的变化趋势可以得出结论: 即路面与轮胎之间粘附系数越小时, 主销内倾角变化值越大, 相反的前轮外束角变化越小。

## 5 结论

本文利用虚拟样机仿真技术建立了某型车载转管机枪刚柔耦合多体动力学仿真模型, 对机枪在几种典型路面条件下射击时的动力响应和车辆的

振动情况进行了分析。通过研究分析可以得出结论: 车辆放置在水平路面上且处于静止状态时, 路面与轮胎之间粘附系数较小时, 车辆的跳动量越大, 机枪随着车辆的振动幅度也就更加强烈, 从而也就会降低机枪的射击精度。反之, 轮胎与地面之间的粘附系数越高, 轮胎与地面接触力就越大, 武器的射击精度就越好, 对车辆的振动具有抑制作用。因此, 路面与轮胎之间的粘附系数是影响机枪射击精度的一项重要指标。

## 参考文献:

- [1] 戴成勋, 靳天佑, 朵英贤. 自动武器设计新编[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.
- [2] 彭佳, 何杰, 丛颖, 等. 三维随机路面通用模型建立与仿真[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 1-4.
- [3] 彭玉钢, 赵治国, 王艺帆. 基于轮缸压力的自寻优 ABS 控制策略仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(1): 176-181.
- [4] 薄玉成, 王惠源, 解志坚. 转管武器总体技术的若干问题[J]. 火炮发射与控制学报, 2005 (3): 9-11.
- [5] 李涛, 王瑞林, 李永健, 等. 未击发条件下某车载转管机枪动力学特性分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2013 (3): 20-23.
- [6] 毛保全, 于子平, 邵毅. 车载武器技术概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- [7] 李涛, 王瑞林, 张军挪, 等. 某型转管机枪刚柔耦合多体发射动力学仿真[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(6): 1382-1387.
- [8] 陈明, 马吉胜, 贾长治, 等. 基于 ADAMS 的某型通用机枪动力学建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 2046-2048.
- [9] 洪亚军, 王亚平, 徐诚. 单兵榴弹武器系统集成优化设计方法[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(2): 216-220.