

## 轮式突击炮行进间射击炮口振动分析及稳定控制\*

葛建立, 邓远泊, 王宗范, 张一品, 杨国来  
(南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

**摘要:**为了研究不同因素对炮口振动的影响规律,建立了轮式突击炮行进间射击多体动力学模型,并与试验结果对比验证了合理性。路面谱采用谐波叠加法建模,在不同路面条件和火线高情况下进行了仿真计算,获得了两种因素对行进间射击炮口振动的影响规律。构建了垂向稳定器模型,进行了联合仿真,对比了有、无稳定器两种情况下的炮口振动。结果表明:炮口振动幅值随路面粗糙度增大而增大;火线高对炮口振动的影响是非线性的;垂向稳定器能有效控制炮口振动,相较于无稳定器情况,开炮前炮口最大高低角和炮口速度幅值分别降低了94.1%和97.4%,开炮后炮口最大高低角振动幅值降低了16.2%。该研究对轮式突击炮的总体设计起到了一定理论支撑,具有重要工程应用价值。

**关键词:**炮口振动;多体动力学;路面谱;稳定控制;联合仿真

**中图分类号:**E923.2 **文献标志码:**A **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**

**文章编号:**1001-2486(2023)04-162-08



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Muzzle vibration analysis and stability control of wheeled assault gun firing on the move

GE Jianli, DENG Yuanbo, WANG Zongfan, ZHANG Yipin, YANG Guolai

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to investigate the impact laws of different factors on the muzzle vibration, a multi-body dynamic model of the wheeled assault gun firing on the move was established and verified with experimental results. A road-surface spectrum model was built by using the harmonic superposition method, and the model was calculated under different road conditions and fire line heights. The influence of these two factors on the muzzle vibration was obtained. The model of a vertical stabilizer was set up, and the co-simulation was carried out to compare the muzzle vibration with and without stabilizers. The research results show that: the muzzle vibration amplitude increases with the increase of road roughness; the influence of fire line heights on muzzle vibration is nonlinear; the vertical stabilizer can effectively control muzzle vibration. Compared to the situation without stabilizer, the maximum muzzle altitude angle and altitude angle velocity amplitudes before firing decrease by 94.1% and 97.4% respectively, and the altitude angle amplitude of the muzzle after firing decreases by 16.2%. This research has certain reference significance for the overall design and engineering application of the wheeled assault gun.

**Keywords:** muzzle vibration; multi-body dynamics; road-surface spectrum; stability control; co-simulation

轮式突击炮是一种满足高技术条件下局部战争需要的新型突击支援武器,代表了新型突击支援武器和反坦克武器装备的发展方向。它既能作为反坦克和反装甲车辆的主要力量,直接与坦克作战,又能为非装甲部队提供火力支援,提高部队的快速机动能力和火力打击能力。其重量轻、机动性好,成本低,对道路的依赖性小。在冷战后讲究快速部署的新战略环境中,轮式突击炮凭借其便宜、轻便、高速、便于后勤保障的特性得到了各国的重视,欧美国家都研制并正式装备了轮式突

击武器,如美国“斯特莱克”、法国 AMX-10RC 等,并在几次局部战争中发挥了突出作用。我国也研制了 PTL-97、PTL-02 等型号的轮式突击炮,并已经装备部队。

利用作战仿真方法建立轮式突击炮的作战模型,在仿真结果的基础上评价研制开发中轮式突击炮的作战效能是一种行之有效的方法<sup>[1]</sup>。对于各类自行武器系统,行进间射击时的炮口振动是重要的性能指标,轮式突击炮更是如此。行进间射击与停车时射击的最大区别是需要同时考虑

\* 收稿日期:2023-03-23

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:葛建立(1980—),男,河南商丘人,教授,博士,硕士生导师,E-mail:gejianli@njust.edu.cn;

邓远泊(通信作者),男,河南洛阳人,硕士研究生,E-mail:920594481@qq.com

火炮射击载荷和路面激励对系统振动与受力的影响<sup>[2]</sup>,在轮式突击炮行进过程中,由于受到地面不平度的激励,车体在方位和高低向的姿态变化会对炮口指向造成影响<sup>[3]</sup>,进而影响射击精度。谢润等<sup>[4]</sup>模拟了自行火炮在C、F两种典型路面条件下行驶并射击的炮口振动特性,进行了履带式火炮与地面耦合的行进间射击仿真。更多研究针对火炮静止射击时的炮口振动进行分析和优化,例如:林圣业等<sup>[5]</sup>基于键合空间理论,建立Timoshenko梁弯曲振动动力学模型,利用其固有频率特性分析炮口振动;刘国强等<sup>[6]</sup>使用混沌量子粒子群算法对身管进行多目标优化以减小身管质量与炮口振动。另外,一些研究从控制方面着手,通过新的控制方法改善火炮的炮口振动情况,如:陈宇等<sup>[7]</sup>建立了垂向稳定器模型,并与坦克动力学模型耦合进行联合仿真;Ma等<sup>[8]</sup>建立了包含双向稳定系统的坦克行进间稳定控制模型,并进一步提出了一种基于坦克火炮双向稳定控制状态空间模型的自适应鲁棒反馈控制方法<sup>[9]</sup>。目前已有的研究大部分是针对火炮静止射击时的炮口振动进行研究,或是针对控制系统进行行进间分析,且研究对象大多是履带式车辆,而对于轮式突击炮行进间射击炮口振动的研究在公开文献中少有报道,轮式突击炮行进间射击稳定性比履带式火炮更有挑战性。

基于此,本文利用谐波叠加法分别建立了D、E、F级路面的路面谱模型,并与轮式突击炮多体动力学模型相结合,建立了轮式突击炮行进间射击炮口振动仿真模型,在不同路面条件和不同火线高下模拟和分析了轮式突击炮行进间射击炮口振动;建立了垂向稳定器模型,进行联合仿真,分析了其对炮口振动的改善作用。

## 1 路面谱模型

### 1.1 基于谐波叠加法的路面激励模型

车辆行驶时的振动主要来自随机路面不平度的激励,可采用路面功率谱密度描述其统计特性<sup>[10]</sup>。谐波叠加法用离散谱逼近目标随机过程的随机模型,具有良好的适应性和精度,适用于模拟随机路面。路面的功率谱密度 $G_q(f)$ 为<sup>[11]</sup>:

$$G_q(f) = G_q(n_0) (f/n_0)^{-u} u^{w-1} \quad (1)$$

其中: $f$ 为空间频率; $n_0$ 为参考空间频率; $G_q(n_0)$ 为参考空间频率 $n_0$ 下的路面谱值; $u$ 为车辆行驶速度; $w$ 为双对数坐标上斜线的斜率,称为频率指数。

将 $f(f_1 \leq f \leq f_2)$ 划分为 $N$ 个区间,用每个区间

的中心频率 $f_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 处的谱密度值 $G_q(f_i)$ 代替 $G_q(f)$ 在整个区间内的值,可以在时间域内用三角级数模拟随机路面不平度 $Z(t)$ :

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

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

将式(2)转换为空间域内谐波叠加式:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2} A_i \sin[2\pi(n_i x + \alpha_i)] \quad (3)$$

式中: $\alpha_i$ 为 $[0, 1]$ 中的随机数; $x$ 为路面在 $x$ 方向上的位移。

### 1.2 路面谱文件

采用数学软件工具,通过编写程序得到D、E、F级路面不平度,将程序生成的路面节点每相邻3个连接生成单元,分别得到D、E、F级路面谱文件,并将其导入动力学模型中,与轮式突击炮模型相配合进行仿真计算。以E级路面为例,生成的路面谱如图1所示。

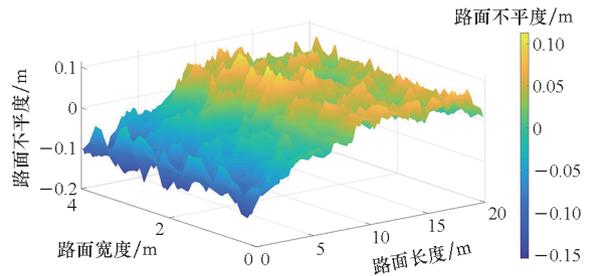


图1 E级路面谱

Fig. 1 Class E road-surface spectrum

## 2 轮式突击炮多体动力学模型

### 2.1 多体系统动力学模型

行进间多体系统动力学模型<sup>[12]</sup>为:

$$M\ddot{Z} + C\dot{Z} + KZ = KZ_s + C\dot{Z}_s \quad (4)$$

式中: $M$ 、 $C$ 、 $K$ 分别为系统的质量、阻尼和刚度矩阵; $Z$ 为位移矢量; $Z_s$ 为轮式突击炮行驶在路面上时的输入位移。

经傅里叶变换可得传递函数矩阵:

$$H(\omega) = (K - \omega^2 M + i\omega C)^{-1} (K + i\omega C) \quad (5)$$

式中, $\omega$ 为圆频率。

$H_{ij}(\omega)$ 表示第 $i$ 个输出的傅里叶变换与第 $j$ 个输入的傅里叶变换之比,即:

$$H_{ij}(\omega) = \frac{F(z_i)}{F(z_j)} = \frac{z_i(\omega)}{z_j(\omega)} \quad (6)$$

求得系统的传递函数之后,可根据激励的功率

谱求响应的谱密度。假设系统的激励功率密度为：

$$S_{z_s} = \begin{bmatrix} S_{z_{s1}z_{s1}}(\omega) & S_{z_{s1}z_{s2}}(\omega) \\ S_{z_{s2}z_{s1}}(\omega) & S_{z_{s2}z_{s2}}(\omega) \end{bmatrix} \quad (7)$$

则系统的响应谱密度为：

$$S_z = H^* S_{z_s} H^T \quad (8)$$

式中： $H^*$  与  $H$  为共轭矩阵。

某个响应分量的均方值为：

$$\sigma_{z_i}^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{z_i}(\omega) d\omega \quad (9)$$

### 2.2 UA 轮胎模型

亚利桑那大学 (University of Arizona, UA) 轮胎模型是由亚利桑那大学的 Gim 博士等<sup>[13-14]</sup>建立的充气轮胎动力学模型,将轮胎简化为一系列三维弹簧,考虑了非稳态效果,通过摩擦圆考虑了侧偏和纵滑的相互影响,也考虑了外倾和松弛长度,在所需参数较少的情况下具有较好的精度。

UA 轮胎模型假定摩擦系数随滑移率的变化发生线性变化,根据轮胎在路面的运动状态随滑移率的变化而发生滚动和滑动变化,其受力如图 2 所示。

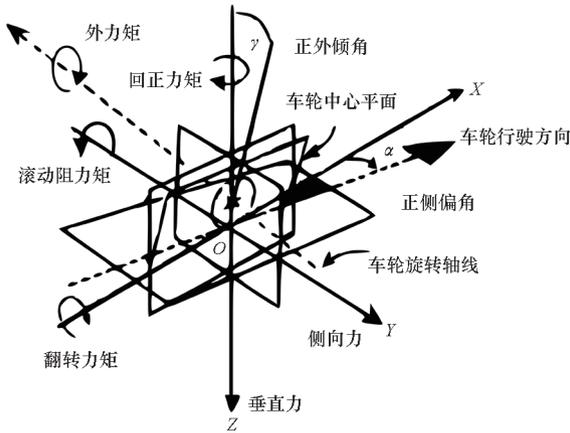


图 2 轮胎受力示意图

Fig. 2 Diagram of tire force

假设轮胎所受的纵向力和横向力分别为  $F_x$  和  $F_y$ ,垂直载荷为  $F_z$ ;轮胎的纵向与横向滑移刚度分别为  $C_x$  和  $C_y$ ;轮胎的纵向与横向滑移率分别为  $s_x$  和  $s_y$ 。求解得到临界纵向滑移率<sup>[14]</sup>为：

$$s_{xc} = \frac{3\mu \cdot F_z}{C_x} \quad (10)$$

式中,  $\mu$  为摩擦系数。

临界侧向滑移率<sup>[14]</sup>为：

$$s_{yc} = \frac{C_x}{C_y} \sqrt{s_{xc}^2 + s_x^2} \quad (11)$$

定义无量纲滑移率<sup>[14]</sup>为：

$$s_n = \frac{\sqrt{(C_x s_x)^2 + (C_y s_y)^2}}{3\mu F_z} \quad (12)$$

无量纲轮胎与路面接触区长度<sup>[13]</sup>为：

$$l_n = 1 - s_n \quad (13)$$

根据式 (10) 和式 (11) 定义的临界滑移率, UA 模型给出的纵向力、侧向力的关系式如下<sup>[13]</sup>：

1) 当  $s_x < s_{xc}$  且  $s_y < s_{yc}$  时,轮胎发生弹性变形,接地区域内同时存在附着区和滑动区：

$$F_x = C_x s_x l_n^2 + \mu_x F_z (1 - 3l_n^2 + 2l_n^3) \quad (14)$$

$$F_y = C_y s_y l_n^2 + \mu_y F_z (1 - 3l_n^2 + 2l_n^3) \quad (15)$$

2) 当  $s_x \geq s_{xc}$ 、 $s_y \geq s_{yc}$  时,轮胎发生非弹性变形,处于完全滑移状态：

$$F_x = \mu_x F_z \quad (16)$$

$$F_y = \mu_y F_z \quad (17)$$

式中  $\mu_x$  与  $\mu_y$  与摩擦系数  $\mu$  的关系为：

$$\mu_x = \frac{\mu s_x}{s} \quad (18)$$

$$\mu_y = \frac{\mu s_y}{s} \quad (19)$$

### 2.3 弹炮耦合行进间射击动力学模型

根据轮式突击炮的结构关系和射击过程中的受力情况,建立轮式突击炮的结构多体动力学仿真模型。身管、托架、炮塔作为柔性体,其余部件作为刚性体。建立身管和前后衬瓦、耳轴与轴承之间的接触<sup>[15]</sup>。将轮式突击炮各部件间根据实际接触情况进行相应约束,并给轮胎施加转速,给火炮施加炮膛合力、制退机力和复进机力,车体悬挂与高低机采用弹簧模拟。弹丸与身管之间定义接触关系。将前文所述的路面谱文件导入模型中,轮式突击炮的轮胎和地面的约束关系为接触。行进间射击炮口振动仿真模型如图 3 所示。

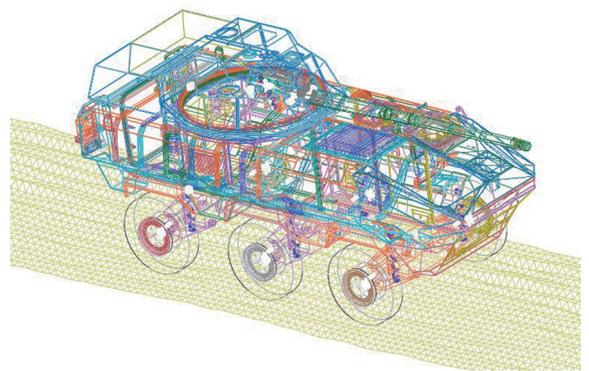


图 3 行进间射击模型

Fig. 3 Firing on the move model

### 2.4 射击试验验证

对轮式突击炮模型进行了试验验证。试验条件:静止射击,0°高低射角、0°方向角,实弹射击。在对应位置安装传感器以测得静止射击时的车体上、下振动和后坐长等数据,其中车体跳动测试传

传感器安装位置如图4所示。相同工况下的试验结果与仿真结果对比如表1所示。建立了如图5所示的轮式突击炮发射的有限元模型,将其计算结果加入对比。从结果对比可以看出,多体仿真结果与试验结果吻合较好,最大误差为7.53%;多体模型与有限元模型的计算精度相差较小,但有限元模型计算需要更多计算资源和大量的计算时间,相同工况下多体动力学模型耗时47 min,而有限元模型耗时506 min。可见所建多体动力学模型在保证计算精度的基础上,相较于有限元模型计算更为快捷,可用于轮式突击炮行进间射击仿真分析。



图4 传感器位置

Fig. 4 Sensor location

表1 试验结果与仿真结果

Tab. 1 Experimental and simulation results

不同方法对应的结果及误差	车体跳动幅值	车体跳动次数	最大后坐长	最大后坐速度	
试验结果	54.48 mm	2	615.28 mm	10.27 m/s	
多体仿真	结果	58.58 mm	2	581.02 mm	9.83 m/s
	误差/%	7.53	0	-5.57	-4.28
有限元仿真	结果	50.48 mm	2	655.52 mm	10.21 m/s
	误差/%	-7.34	0	6.54	-0.58



图5 轮式突击炮有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the wheeled assault gun

### 3 轮式突击炮射击仿真结果对比

#### 3.1 不同路面级别对行进间射击炮口振动的影响

轮式突击炮通常平射,因此选取 $0^\circ$ 射角、 $0^\circ$ 方向角工况作为仿真工况,行进速度为20 km/h,待轮式突击炮加速至速度稳定后,在仿真时间4 s时开炮射击。在火线高2 750 mm的情况下,分别在D、E、F级路面上进行仿真计算,得到炮口高低方向的角位移与角速度,如图6~7所示。

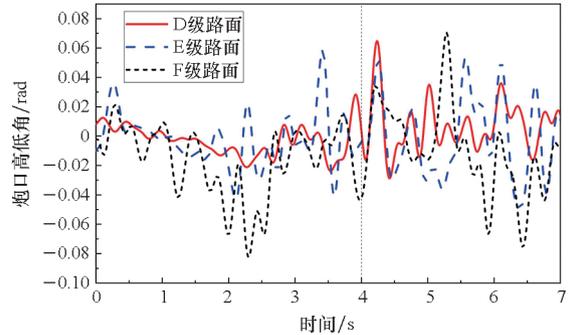


图6 不同路面条件下炮口高低角

Fig. 6 Muzzle altitude angle under different road conditions

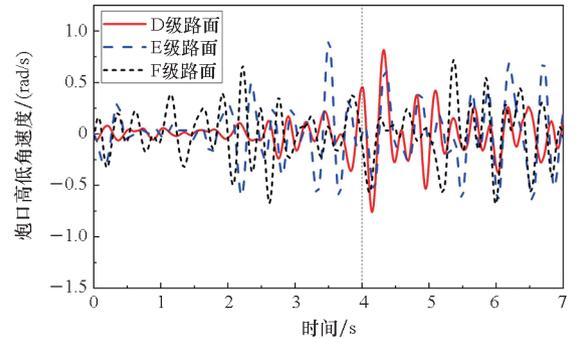


图7 不同路面条件下炮口高低角速度

Fig. 7 Muzzle altitude angular velocity under different road conditions

对比轮式突击炮在D、E、F三种路面下的仿真结果,各工况下整个行进间射击过程中绝对值最大的炮口高低角与高低角速度如表2所示。

表2 不同路面下高低角与高低角速度对比

Tab. 2 Muzzle altitude angle and angular velocity under different road conditions

路面级别	最大高低角/ rad	高低角波动范围/ rad	最大高低角速度/ (rad/s)	高低角速度波动范围/ (rad/s)
D	0.064 73	0.093 49	0.82	1.58
E	0.058 09	0.107 89	0.91	1.56
F	0.082 44	0.152 74	0.72	1.40

由以上图表可以看出,在同一火线高下,路面的粗糙程度对火线高低角度的最大绝对值和波动范围均有显著影响,在越粗糙的表面行驶时,高低角摆动幅度越大。D 级路面条件下,高低角的波动范围为 0.093 49 rad,而 E 级和 F 级路面条件下则分别达到了 0.107 89 rad 和 0.152 74 rad,相较于 D 级路面分别增大了 15.4% 和 63.4%,可见路面条件对射击时炮口振动的影响较为显著。路面越粗糙,路面谱模型中的幅值变化越大,传递给轮胎的激励也会增大,激励经由悬挂、车体等部件最终传递给身管,导致炮口高低角振动的幅值增大。最大高低角一般出现在射击后的 0.5 s 内,但受路面的随机性影响,有时也会出现在其他位置。炮口高低振动的角速度与路面条件没有特别紧密的联系,且变化幅度不大,其对炮口振动的影响不如高低角显著。开炮时刻炮口的角度和角速度因路面不同而具有随机性,但总的来说路面越差,射击时炮口振动越大,射击准确度越难保证。

### 3.2 不同火线高对行进间射击炮口振动的影响

原模型火线高为 2 750 mm,修改火线高为 2 800 mm 和 2 850 mm 作为对照组,重新进行仿真计算,研究火线高对行进间射击炮口振动的影响。仿真结果如图 8~9 所示。

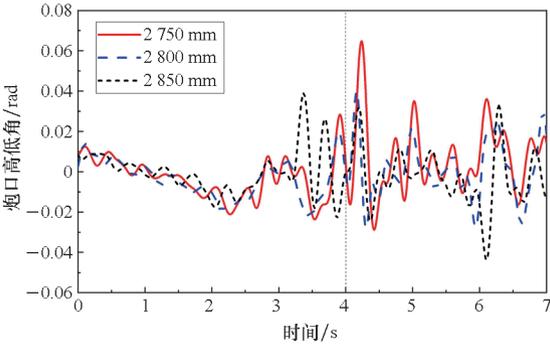


图 8 不同火线高下炮口高低角

Fig. 8 Muzzle altitude angle under different fire line height

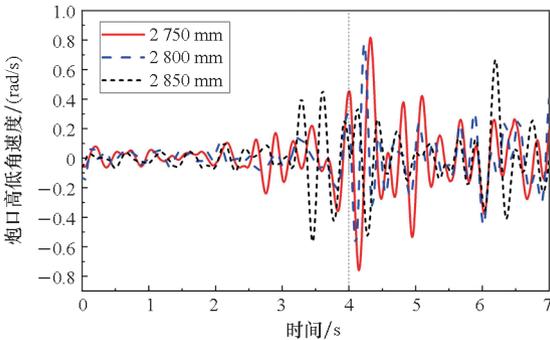


图 9 不同火线高下炮口高低角速度

Fig. 9 Muzzle altitude angular velocity under different fire line height

对比仿真计算结果,不同火线高时行进间射击过程中绝对值最大的炮口高低角和高低角速度如表 3 所示。

表 3 不同火线高下高低角与高低角速度(D 级路面)  
Tab. 3 Muzzle altitude angle and angular velocity under different fire line height(class D road)

火线高/ mm	最大 高低 角/rad	高低角 波动范 围/rad	最大高低 角速度/ (rad/s)	高低角速度 波动范围/ (rad/s)
2 750	0.064 73	0.093 49	0.82	1.58
2 800	0.039 80	0.067 73	0.78	1.36
2 850	0.043 80	0.082 70	0.67	1.24

对比数据可知,在同一路面即 D 级路面条件下,火线高对高低角度的最大绝对值和波动范围也有较为明显的影响,且三个火线高条件中,2 800 mm 的火线高下最大绝对值高低角和高低角波动范围都明显更小,最大高低角只有 0.039 80 rad,且高低角波动范围为 0.067 73 rad,明显小于其他两种情况。当火线高过高时,激励经由轮胎逐步传递至炮口的过程中,由于悬挂高度的增加,车体相对于底盘的晃动会增大,导致炮口振动幅度增大;而当火线高过低时,悬挂高度减小,路面激励通过底盘传递至车体的过程中受到悬挂的缓冲效果减弱,底盘俯仰的角度对炮口的影响增大,也会一定程度上导致炮口振动幅度增大。相对于 2 800 mm 火线高,2 750 mm 火线高情况下的最大高低角和高低角波动范围分别增大了 62.6% 和 38.0%,2 850 mm 火线高情况下两者分别增大了 10.0% 和 22.1%。角速度的最大绝对值和波动范围没有呈现随火线高变化的明显趋势。由此可见,火线高为 2 800 mm 时的行进间射击炮口振动情况优于 2 750 mm 和 2 850 mm,但炮口振动幅度随火线高的变化规律以及最优火线高的选择仍需进一步研究。为了验证以上结果,在 E 级路面和 F 级路面条件下也进行了不同火线高的仿真计算,结果见表 4 和表 5。

对比 E 级和 F 级路面下的结果,得出的结论与 D 级路面下的仿真结果基本一致。以 E 级路面为例,最大高低角为 0.050 81 rad,且高低角波动范围为 0.094 27 rad,明显小于其他两种情况。相对于 2 800 mm 火线高,2 750 mm 火线高情况下的最大高低角和高低角波动范围分别增大了 14.3% 和 14.5%,2 850 mm 火线高情况下两者分别增大了 34.2% 和 22.2%。F 级路面下的仿真

表4 不同火线高低角与高低角速度(E级路面)

Tab.4 Muzzle altitude angle and angular velocity under different fire line height(class E road)

火线高/ mm	最大高 低角/ rad	高低角波 动范围/ rad	最大高低 角速度/ (rad/s)	高低角速度 波动范围/ (rad/s)
2 750	0.058 10	0.107 90	0.91	1.56
2 800	0.050 81	0.094 27	0.64	1.26
2 850	0.068 19	0.115 21	0.96	1.67

表5 不同火线高低角与高低角速度(F级路面)

Tab.5 Muzzle altitude angle and angular velocity under different fire line height(class F road)

火线高/ mm	最大高 低角/ rad	高低角波 动范围/ rad	最大高低 角速度/ (rad/s)	高低角速度 波动范围/ (rad/s)
2 750	0.082 44	0.152 74	0.72	1.40
2 800	0.101 42	0.151 45	0.85	1.46
2 850	0.119 51	0.197 67	1.02	1.75

结果中,2 800 mm 火线高下的最大绝对值高低角比 2 750 mm 时有所增大,但波动范围却有所减小,且最大绝对值高低角远大于波动范围的中间值,这可能是路面整体趋势的倾斜导致的。总的来说,2 800 mm 火线高下的行进间射击炮口振动情况要优于 2 750 mm 和 2 850mm 火线高,可见火线高对炮口振动的影响是非线性的,火线过高

或过低都会导致炮口振动增大。如何找到最优炮口振动的火线高还需进一步研究。

## 4 考虑垂向稳定器的行进间射击炮口振动

### 4.1 垂向稳定器模型

为了提高行进间射击精度,轮式突击炮通常和坦克一样配备有稳定器。垂向火炮稳定器主要由操纵台、控制器、供电装置、逆变器、执行电机、传动装置、摇架、身管以及电流、速度、角度检测装置组成。身管的角度与速度由陀螺仪反馈至电流传感器,采集的电信号传递给系统控制器,控制执行电机经由传动装置控制摇架的起落。此垂向稳定器的整体结构如图 10 所示。

垂向稳定器以表贴式永磁同步电机为俯仰系统执行机构,其在  $dq$  坐标系下的数学模型<sup>[7]</sup>为

$$\begin{cases} \dot{i}_q = (u_q - Ri_q - n_p \omega_m \psi_f) / L \\ \dot{\omega} = (M_e - M_L - B\omega_m) / J_m \\ T_e = \frac{2}{3} n_p \psi_f i_q \end{cases} \quad (20)$$

式中: $i_q$ 、 $u_q$  为  $q$  轴电流、电压; $R$ 、 $L$ 、 $J_m$ 、 $B$ 、 $\psi_f$ 、 $n_p$  和  $\omega_m$  为电机电阻、电感、输出轴转动惯量、黏滞系数、磁链、极对数和转速; $M_e$  和  $M_L$  为电机输出转矩和扰动力矩。对式(20)进行拉氏变换并考虑俯仰系统传动比,可得到如图 11 所示的基于 PI 三环控制的俯仰系统数学模型。图中, $G_{PSC}$  为三环控制器, $J = J_m + J_L$ , $J_L$  为系统负载侧转动惯量折算到电机侧的转动惯量。

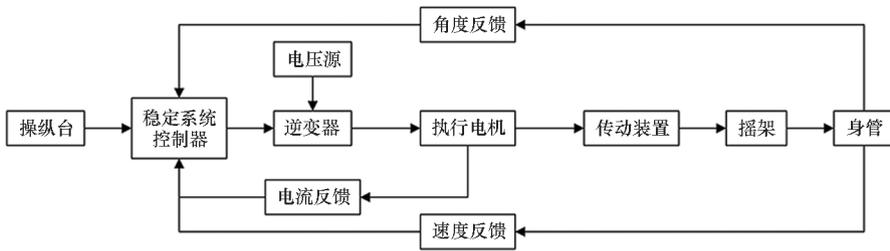


图 10 垂向稳定器整体结构

Fig. 10 Integral structure of vertical stabilizer

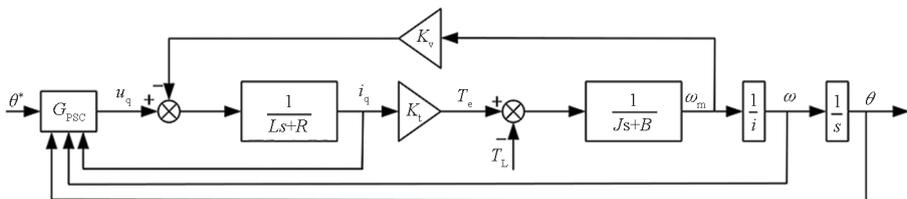


图 11 稳定系统数学模型

Fig. 11 Mathematical model of stabilizer system

### 4.2 联合仿真及结果对比

搭建稳定系统的模型,与前文中建立的行进间射击动力学模型对接,形成带垂向稳定器的轮式突击炮行进间射击联合仿真模型。在 $0^\circ$ 射角、 $0^\circ$ 方向角、火线高为 2 750 mm、行进速度为 20 km/h 的工况下,在 D 级路面上分别进行带稳定器和不带稳定器的仿真计算,仿真时间 4 s 时开炮射击。计算结果如图 12 和图 13 所示。

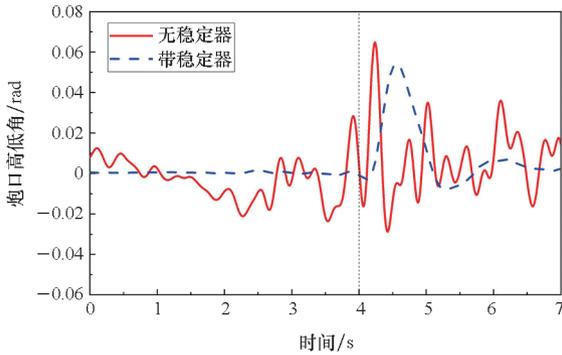


图 12 有无稳定器情况下炮口高低角

Fig. 12 Muzzle altitude angle with/without stabilizers

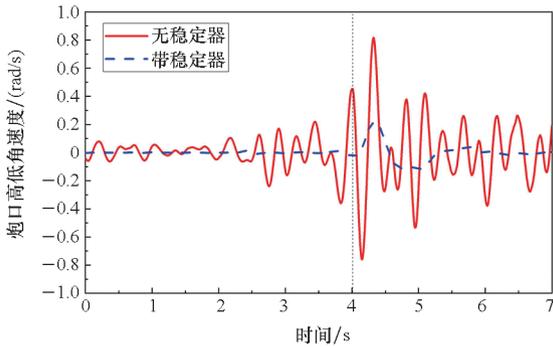


图 13 有无稳定器情况下炮口高低角速度

Fig. 13 Muzzle altitude angular velocity with/without stabilizers

对比仿真结果,在其他条件相同的情况下,该垂向稳定器对身管的稳定效果非常明显。在没有垂向稳定器的情况下,在 D 级路面行驶过程中炮口的高低角最大变化幅值达到了 0.028 32 rad;而在有垂向稳定器的情况下,高低角最大变化幅值仅有 0.001 67 rad,相对无稳定器情况下降低了 94.1%。在有稳定器的情况下,开炮前的最大高低角速度仅有 0.009 2 rad/s,远小于没有稳定器时的 0.36 rad/s,降幅达到 97.4%。可见,垂向稳定器对于轮式突击炮行进间的炮口稳定起着非常关键的作用。在开炮后,有稳定器时的高低角最大变化幅值为 0.054 19 rad,小于无稳定器时的 0.064 63 rad,最大高低角幅值降低了 16.2%,且有稳定器的情况下炮口振动的角度和角速度情况都更为简单直观,恢复至稳定所需的时间也更短,

可见垂向稳定器对轮式突击炮行进间射击时的炮口振动情况有非常明显的改善。

### 5 结论

通过谐波叠加法分别建立了 D、E、F 级路面谱模型,并结合轮式突击炮模型构建了轮式突击炮行进间射击仿真模型,进行了不同路面条件下、不同火线高下行进间射击的仿真计算,分析仿真结果得出结论:炮口的振动幅值随路面粗糙度提升而增大;火线高对炮口振动有一定影响,且该影响不是线性的。如何确定最优的火线高还需要进一步的研究和试验验证。构建了垂向稳定器的模型,与行进间射击动力学模型进行联合仿真,对比分析了有无稳定器作用下的炮口振动特性,有稳定器的情况下炮口振动幅值有一定减小,且速度波动小,恢复到稳定状态的时间也更短。研究结论为分析轮式突击炮行进间射击稳定性和优化设计提供了理论参考。

### 参考文献 (References)

[1] 王正元,刘靖旭,谭跃进,等. 基于作战仿真的装甲车辆作战效能评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(2): 106-109.  
WANG Z Y, LIU J X, TAN Y J, et al. Combat effectiveness evaluation of the armored vehicle based on combat simulation[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(2): 106-109. (in Chinese)

[2] 杨国来,葛建立,孙全兆,等. 火炮振动与控制的发展现状及应用前景[J]. 振动、测试与诊断, 2021, 41(6): 1043-1051.  
YANG G L, GE J L, SUN Q Z, et al. Development status and application prospect of gun vibration and control[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(6): 1043-1051. (in Chinese)

[3] 单春来,赵凯,孟超,等. 不同行驶系统对战车稳定性的影响研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2021, 42(3): 16-22.  
SHAN C L, ZHAO K, MENG C, et al. Study on the influence of different driving systems on the stability of chariots[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2021, 42(3): 16-22. (in Chinese)

[4] 谢润,杨国来,徐龙辉. 自行火炮行进间射击的炮口振动建模与分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2012, 33(2): 29-32.  
XIE R, YANG G L, XU L H. Modeling and analysis of muzzle vibration for self-propelled gun firing on the move[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2012, 33(2): 29-32. (in Chinese)

[5] 林圣业,王茂森,谢杨杨,等. 梁弯曲振动的键合空间表示及其在炮口扰动分析中的应用[J/OL]. 兵工学报, 2022(2022-06-30)[2023-05-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20220630.1156.002.html>. (in Chinese)

LIN S Y, WANG M S, XIE Y Y, et al. Bond space

- expression of bending vibration for Timoshenko beam and its application in muzzle disturbance analysis [J/OL]. *Acta Armamentarii*, 2022 (2022 - 06 - 30) [2023 - 05 - 05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20220630.1156.002.html>. (in Chinese)
- [6] 刘国强, 陈维义, 陈华东, 等. 舰炮身管的模态分析与多目标优化[J]. *国防科技大学学报*, 2020, 42(2): 150 - 155.  
LIU G Q, CHEN W Y, CHEN H D, et al. Modal analysis and multi-objective optimization of the naval gun barrel[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2020, 42(2): 150 - 155. (in Chinese)
- [7] 陈宇, 杨国来. 稳定器作用下坦克行进间炮口振动特性研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(8): 21 - 27.  
CHEN Y, YANG G L. A study on muzzle vibration characteristics of moving tanks under the influence of a stabilizer[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(8): 21 - 27. (in Chinese)
- [8] MA Y Z, YANG G L, SUN Q Q, et al. Adaptive robust control for tank stability: a constraint-following approach[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2021, 235(1): 3 - 14.
- [9] MA Y Z, YANG G L, SUN Q Q, et al. Adaptive robust feedback control of moving target tracking for all-electrical tank with uncertainty [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(4): 626 - 642.
- [10] 孙宏祝, 陈循, 梁科山, 等. 基于整车虚拟道路行驶试验的车辆零部件疲劳分析[J]. *国防科技大学学报*, 2007, 29(4): 121 - 125.  
SUN H Z, CHEN X, LIANG K S, et al. Fatigue analysis for auto parts based on the vehicle virtual road testing [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2007, 29(4): 121 - 125. (in Chinese)
- [11] 吴参, 王维锐, 陈颖, 等. 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.  
WU C, WANG W R, CHEN Y, et al. Simulation modeling and verification of three-dimensional pavement spectrum[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2009, 43(10): 1935 - 1938. (in Chinese)
- [12] 闵建平, 杨国来, 陈运生. 行进间射击随机响应研究[J]. *兵工学报(坦克装甲车与发动机分册)*, 2000(3): 33 - 36.  
MIN J P, YANG G L, CHEN Y S. Study on random response for self-propelled guns firing during traveling [J]. *Acta Armamentarii ( Fascicule of Tank Armored Vehicle and Engine )*, 2000(3): 33 - 36. (in Chinese)
- [13] GIM G, NIKRAVESH P E. An analytical model of pneumatic tyres for vehicle dynamic simulations. Part 1: pure slips[J]. *International Journal of Vehicle Design*, 1990, 11(6): 589 - 618.
- [14] GIM G, NIKRAVESH P E. An analytical model of pneumatic tyres for vehicle dynamics simulations. Part 2: comprehensive slips [J]. *International Journal of Vehicle Design*, 1991, 12(1): 19 - 39.
- [15] 谢润, 杨国来, 徐锐, 等. 考虑耳轴 - 轴承间隙的自行高炮行进间射击炮口响应研究[J]. *振动与冲击*, 2015, 34(16): 156 - 160, 169.  
XIE R, YANG G L, XU R, et al. Muzzle response of self-propelled antiaircraft gun on the move in consideration of clearance between trunnion and bearing [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34(16): 156 - 160, 169. (in Chinese)