

doi: 10.7690/bgzd.2013.03.003

## 某步行小口径山地炮射击稳定性分析

戴劲松, 税华, 王茂森

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 为了缩短开发周期、降低开发成本,在某步行小口径山地炮的概念设计阶段就采用分析软件进行辅助分析。分析某步行小口径山地火炮的工作机理和火炮的拓扑结构图,经过一定的简化,用专业的三维建模软件建立该炮的全炮模型,进行动力学仿真,对步行无人火炮施加不同大小的后坐力,测试得到在相应的炮口扰动值,并对比其他同口径火炮,考量其射击精度。仿真结果表明:该步行小口径无人山地炮射击精度良好,可对新型步行小口径步行无人火炮的设计和研制提供参考。

**关键词:** 步行无人火炮; 动力学仿真; 射击精度

**中图分类号:** TJ306 **文献标志码:** A

## Analysis of Firing Stability of Certain Type Small Caliber Walk Unmanned Mountain Gun

Dai Jinsong, Shui Hua, Wang Maosen

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

**Abstract:** In order to cut down the development cycle and reduce development costs, the analysis software was used to do assisted analysis in the conceptual design stage of small caliber walk-unmanned mountain gun. The simplified gun model was built with professional 3D modeling software by analyzing the working mechanism and the topology diagram of this new type little caliber mountain gun. Then, the dynamic simulation was done with loading different recoil force. The muzzle disturbances were measured. Then compare the results with the muzzle disturbance of the same caliber gun to assess this gun's accuracy of fire. The simulation result showed that the accuracy of fire is good. The simulation can provide reference for the design and development of the small caliber walk-unmanned gun.

**Key words:** walk-unmanned gun; dynamic simulation; accuracy of fire

### 0 引言

随着我国开发战略和军事战略的发展,获得山区的技术优势和军事优势成为国家安全防御问题专家和国防技术研究人员关注的焦点。由于步行无人火炮具有可靠性高、适应性强、功能强大并具有一定的承载能力等特点,使其成为执行高危险军事任务的理想之选。在山区环境中运用步行无人火炮作战,可以大幅度减少战争中我军人员的伤亡,这一点同现代战争的零伤亡要求是不谋而合的。

以计算机多体系统动力学为基础的动力学分析软件,包含火炮发射专业领域的虚拟样机<sup>[1]</sup>开发系统模块,如果在步行小口径山地炮的概念设计阶段就采用分析软件进行辅助分析,可以在建造真实的物理样机之前,对该火炮进行各种性能测试,达到缩短开发周期、降低开发成本的目的;因此,笔者对提出的新型小口径无人步行火炮进行全炮发射动力学分析。

### 1 步行无人火炮结构及作战机理

步行无人火炮由步行机架体和自动机 2 部分组成。

步行机架体由中心驱动能源、分动器装置、联轴器装置、步行足和驻锄等构件组成;自动机由炮身、供弹机构、抛壳机构和炮箱等构件组成,自动机布置在步行机架体的前方。该炮在射击状态下,步行足全部着地,驻锄支撑在山体坡面,其高低射角(特别是负射角)比常规火炮要求更大,方位射角与常规火炮类似。

### 2 步行无人火炮虚拟样机的建立

首先用专业的三维建模软件对步行无人火炮的各个主要零部件进行三维实体建模,然后对零部件进行简化形成简化的三维实体模型,再将简化后的模型导入机械动力学仿真软件中,建立运动学分析模型进行仿真分析。

#### 2.1 模型的简化与假设

为了简化问题,作如下假设:1) 全炮系统由后坐部分、摇架、上架、步行机体、悬挂(包括步行足和联轴器等)和驻锄 6 大部分组成;2) 步行无人山地炮采用 30 口径身管,步行机架体的重心在质心位

收稿日期: 2012-09-16; 修回日期: 2012-10-21

作者简介: 戴劲松(1968—),男,重庆人,博士,研究员,从事火炮、自动武器、弹药工程和机械电子工程研究。

置且架体部分的所有构件均为刚体<sup>[2]</sup>；3) 火炮自动机部分的结构简化并且质心在炮膛轴线上，摇架绕耳轴做相对转动，上架相对步行机体座圈相对转动；4) 当步行无人火炮在地面上射击时，火炮后坐时绕驻锄翻转，故可认为驻锄与地面的约束为固定铰接，其余步行足对地面作上下运动和前后运动；5) 为了得到较简单的力学模型，暂不考虑缓冲部分的作用以及弹丸对炮身的作用。

### 2.2 全炮的拓扑关系

基于以上假设，将各个部件之间的连接关系描述为副，全炮的结构拓扑关系说明如图 1。

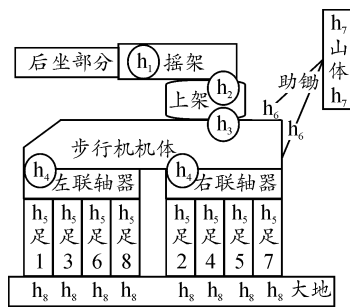


图 1 全炮拓扑关系

图 1 中： $h_1$  代表平面副，表示后坐部分相对摇架部分作相对转动和移动； $h_2$  代表柔性副，用于描述摇架和上架之间的连接，同时定义摇架和耳轴的连接、齿弧和高低机的接触、平衡机的作用； $h_3$  代表柔性副，表示上架和步行机体之间的连接； $h_4$  和  $h_5$  代表柔性副，用于描述步行机体与悬挂部分的连接； $h_6$  代表转动副，代表驻锄和步行机体之间的连接； $h_7$  和  $h_8$  代表接触副，用于描述驻锄与山体及步行足与地面之间的接触。

### 2.3 全炮的多体动力学模型

根据全炮的拓扑关系可以看出，笔者建立了包括炮身、摇架、上架、步行机体、左右驻锄、左右联动器和 8 个步行足共 16 个全炮动力学模型。

#### 2.3.1 全炮的自由度

笔者建立的全炮系统动力学模型共有 80 个自由度，其中包括：炮身与摇架建立具有 2 个自由度的平面副相连；摇架与上架通过具有 6 个自由度的弹性副相连；上架与摇架和步行机体也通过 6 个自由度的弹性副相连；步行机体与步行足之间通过悬挂相连，具有 6 个自由度；每个步行足与步行机体通过悬挂相连，具有 6 个自由度；每个步行足的髋关节处具有 1 个自由度；驻锄与步行机体建立转动

副，具有 2 个自由度。

#### 2.3.2 多体动力学方程

笔者建立的多体动力学模型基于动力学仿真软件 ADAMS，采用拉格朗日乘子法建立系统运动方程，每个刚体建立不同的朗格朗日方程和相应的约束方程，则由  $n$  个刚体组成的多体系统的运动方程如下：

$$F_j = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial k}{\partial \dot{q}_j} \right) - \left( \frac{\partial k}{\partial q_j} \right) + \sum_{i=1}^m \frac{\partial \varphi_i}{\partial q_j} \lambda_i \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$$

$$\varphi_i = 0 \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

式中： $k$  为系统动能； $q_j$  为系统广义坐标； $F_j$  为广义力； $\lambda_i$  为拉式乘子列阵。

### 2.4 土壤模型

在步行无人火炮射击过程中，后坐力最终通过步行足和驻锄传到地面上，步行足和驻锄与地面的作用关系是计算的基础，在实际计算过程中，采用贝氏模型<sup>[3]</sup>，以该模型的半经验模型为基础。该模型假定土壤法向应力的平均法相应力，即

$$p = \left( \frac{K_c}{b} + K_\phi \right) \cdot z^n = K \cdot z^n \quad (K = (K_c/b) + K_\phi) \quad (2)$$

式中： $p$  表示接地比压； $K_c$  表示土壤粘性成分所决定的变形模量； $K_\phi$  表示土壤摩擦性成分所决定的变形模量； $z$  表示沉陷量； $n$  表示土壤压实变形指数。其中  $K$  和  $n$  通过实验和拟合的方法确定。

贝氏模型中的地面属于承压模型，认为土壤所受的力垂直于水平面，但是在火炮模型中驻锄对地面施加的载荷一般不垂直于地面，故对贝氏模型的半经验模型进行修正以适应火炮射击模型，在模型中采用了与文献[4]相同的方法，即

$$p = K_\theta \cdot z^n = (1 - \alpha \cdot \theta) K \cdot z^n \quad (3)$$

式中： $K_\theta$  表示考虑切向力作用以及倾斜角影响时的土壤压实变形模量； $\theta$  表示平板与地面间的夹角； $\alpha$  表示计算夹角的因数，需要试验确定。

类似于驻锄受到地面的作用力，步行足与地面的受力关系也以贝氏模型为基础。因在火炮射击时步行足与地面不存在转动关系，故只需考虑土壤的承压模型：

$$F = b \int_0^{l_0} p \cdot dx \quad (4)$$

式中:  $F$  表示步行足受到的垂直载荷;  $b$  表示步行足端部橡胶垫的宽度;  $l_0$  表示橡胶垫的接地长度。

### 3 仿真结果及分析

模型的计算条件: 高低射角 $-20^\circ$ , 方向射角 $0^\circ$  情况下, 火炮射击 5 连发。

下面分 3 种情况进行计算:

- 1) 后坐力最大值  $0.9 t$ ;
- 2) 后坐力最大值  $2 t$ ;
- 3) 后坐力最大值  $3 t$ 。

模型的计算结果如图 2~5 所示。

在对火炮的射击情况进行仿真之前, 先进行准静态计算, 以平衡各部件的自重以及柔体在自重下的变形<sup>[5]</sup>, 确保准确的初始状态, 提高计算机模拟仿真的准确度。

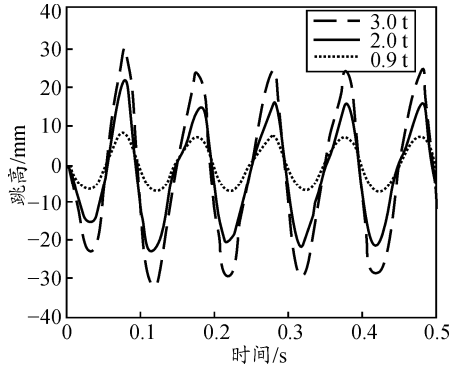


图 2 炮口中心位置高低位移曲线

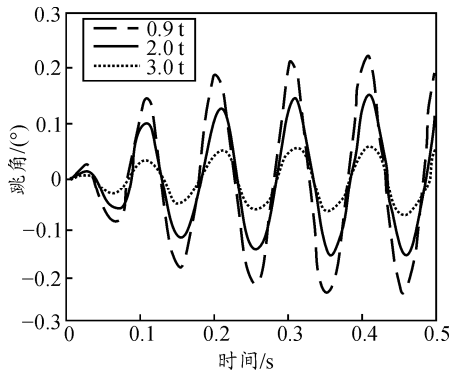


图 3 炮口中心位置高低跳角曲线

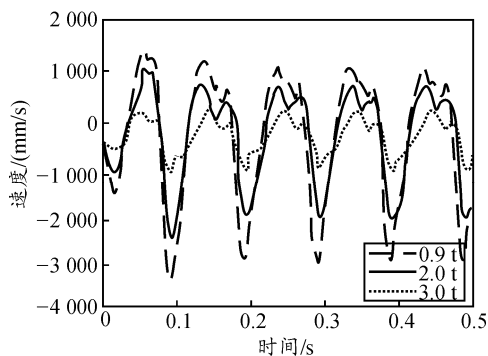


图 4 炮口中心速度曲线

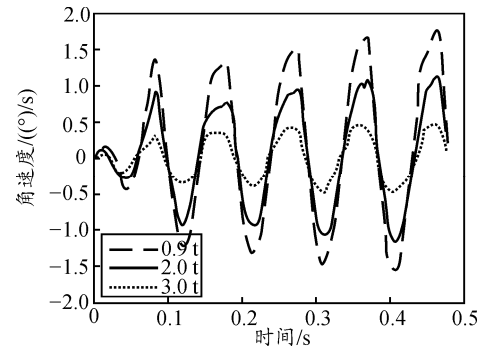


图 5 炮口中心角速度曲线

由图 2~图 5 和表 1 可以看出, 在火炮五连发射击情况下, 当后坐力最大值为  $0.9 t$  时, 弹丸出炮口瞬间高低方位的最大位移为  $8.546 2 \text{ mm}$ , 最大速度为  $-768.450 4 \text{ mm/s}$ , 最大角速度为  $0.482 2 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ , 高低跳角为  $0.060 5^\circ$ ; 当后坐力最大值为  $2 t$  时, 弹丸出炮口瞬间高低方位的最大位移为  $21.758 8 \text{ mm}$ , 最大速度为  $-2 128.129 7 \text{ mm/s}$ , 最大角速度为  $1.123 8 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ , 高低跳角为  $0.152 9^\circ$ ; 当后坐力最大值为  $3 t$  时, 弹丸出炮口瞬间高低方位的最大位移为  $30.135 8 \text{ mm}$ , 最大速度为  $-2 967.773 3 \text{ mm/s}$ , 最大角速度为  $1.738 7 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ , 高低跳角为  $0.222 2^\circ$ 。

表 1 弹丸出炮口瞬时炮口点的各参数值

后坐力最大值/ $t$	高低位 移/ $\text{mm}$	高低跳 角/ $^\circ$	高低速 度/ $\text{mm/s}$	高低角 速度/ $\text{(}^\circ\text{)/s}$
后坐力 0.9	8.546 2	0.060 5	-768.450 4	0.482 2
后坐力 2.0	21.758 8	0.152 9	-2 128.129 7	1.123 8
后坐力 3.0	30.135 8	0.222 2	-2 967.773 3	1.738 7

### 4 结束语

笔者对提出的新型小口径无人步行火炮进行了全炮发射动力学分析, 通过改变后坐力的大小测试其炮口扰动的响应, 对比同口径火炮在相应后坐力射击时的炮口扰动可以发现, 该步行小口径无人山地炮射击精度良好。该仿真结论可为实际射击提供参考, 也对新型步行小口径步行无人火炮的设计和研制提供参考。

### 参考文献:

- [1] 杨国来, 陈运生, 曾晋春, 等. 火炮虚拟样机的总体框架及初步应用[J]. 弹道学报, 2006, 18(1): 51-54.
- [2] 赵潇雨, 周维. 小口径炮弹用纯铁弹带脱碳工艺[J]. 四川兵工学报, 2101, 31(3): 42.
- [3] 季学武, 赵六奇. 轮胎在沙地上牵引特性的新预测模型[J]. 汽车工程, 1997, 19(1): 56-59.
- [4] Bekker M G. Introduction to terrain-vehicle system[M]. Michigan: The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1969: 3-12.
- [5] 李建中, 孙丽萍, 孙泽林. 火炮身管弯曲度、炮口角测量系统驱动控制[J]. 兵工自动化, 2011, 30(6): 71-74.