

某轻型牵引榴弹炮射击稳定性分析*

刘露阳[†] 杨国来 肖辉

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要 为了获得各结构参数对某轻型牵引榴弹炮射击稳定性的影响规律,建立了相应的全炮非线性有限元动力学模型.模型中考虑了驻锄与土壤的接触/碰撞,土壤的塑性变形等非线性因素.通过求解不同结构参数的有限元模型,找出对射击稳定性有重要影响的结构参数,在此基础上进行射击稳定性优化.计算结果显示,优化的轻型牵引榴弹炮射击稳定性有效提高.

关键词 射击稳定性, 结构参数, 非线性因素, 有限元法, 牵引榴弹炮

DOI: 10.6052/1672-6553-2013-101

引言

火炮的威力和机动性是一对矛盾,传统牵引榴弹炮由于自重较大,射击稳定性容易得到保证.轻型牵引榴弹炮因自重较小,射击稳定性问题便凸显出来,成为制约轻型牵引榴弹炮发展的重要因素之一.目前关于火炮射击稳定性的研究大致可分为三类:第一类是测试方法,Webb等^[1]通过测量落弹点,研究影响M198射击精度的因素.第二类是基于多体动力学理论的分析方法.贾长治^[2]基于虚拟样机技术,通过灵敏度分析,确定对火炮射击稳定性有重要影响的结构参数,并对射击稳定性进行优化.李三群^[3]和万李^[4]分别将序列二次规划算法和遗传算法与虚拟样机技术相融合,研究火炮结构对射击稳定性的影响.周成^[5]建立了以射击稳定性最优、后坐长度一定为目标,节制杆尺寸为设计变量的射击稳定性优化模型,研究了各主要结构参数对射击稳定性的影响.戴劲松^[6]运用多体动力学理论,研究某步行小口径山地炮的射击稳定性.Chen^[7]运用虚拟样机技术研究结构参数对机枪射击稳定性影响.由于此类方法建模、求解方便,目前绝大多数研究正是基于这种方法,但是此类方法难以模拟驻锄与土壤之间复杂的接触/碰撞、土壤的弹塑性变形等非线性因素.第三类是基于有限元理论的分析方法.彭迪^[8]基于ABAQUS软件建立全

炮刚柔耦合模型,分析总体结构参数对射击稳定性的影响.本文则依据非线性有限元理论建立全炮详细的有限元模型,细致地模拟了驻锄与土壤之间复杂的接触/碰撞、土壤的弹塑性变形等非线性因素.

1 传统的火炮射击稳定性理论

传统的火炮射击稳定性理论假设:①火炮和地面均为刚体;②火炮放置于水平地面上,方向角为零度,认为所有的力都作用在过炮膛轴线且垂直于地面的平面内;③射击时全炮处于平衡状态,不移动,不跳动.在此假设基础上,应用质点系达朗贝尔原理,主动力、约束反力和惯性力在形式上组成平衡力系^[9].简化后的全炮受力如图1所示

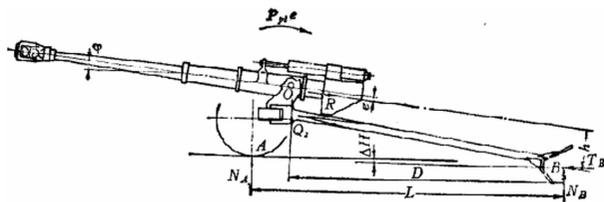


图1 简化后的全炮受力情况

Fig. 1 Simplified load condition of a gun

图中 p_{μ} 为炮膛合力, e 为后坐部分质心至炮膛轴线的距离, R 为后坐阻力, Q_2 为火炮战斗全重, N_A 、 N_B 分别是地面对车轮和驻锄的垂直反力, T_B 是地面对火炮的水平反力. 以水平向后为 X 轴正向, 垂直向上为 Y 轴正向, 建立力的平衡方程

2013-07-24 收到第1稿, 2013-09-23 收到修改稿.

* 国家重点基础研究发展计划(973计划)(5131970203)

[†] 通讯作者 E-mail: jiangsululuyang@126.com

$$\begin{aligned} \sum X &= 0 \quad R \cos \phi - T_B = 0 \\ \sum Y &= 0 \quad N_A + N_B - R \sin \phi = 0 \\ \sum M &= 0 \quad P_{pe} + Rh + N_A L - Q_z D = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

由(1)解出

$$\begin{aligned} T &= R \cos \phi \quad N = \frac{QD - Pe - Rh}{L} \\ N &= R \left(\sin \phi - \frac{h}{L} \right) + P \frac{e}{L} + Q \left(1 - \frac{D}{L} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

火炮的射击稳定性是指发射时火炮不跳离地面,因此稳定条件是车轮始终与地面接触,即

$$N_A = \frac{Q_z D - P_{pe} - Rh}{L} \geq 0 \quad (3)$$

$$Q_z D \geq P_{pe} + Rh \quad (4)$$

式(4)即是由传统理论导出的火炮射击稳条件, $Q_z D$ 是使火炮压向地面的力矩,称为稳定力矩。 P_{pe} 和 Rh 使火炮有绕 B 点翻倒的趋势,称为翻倒力矩。火炮的稳定条件就是使稳定力矩在射击过程中始终大于翻倒力矩。

实际上,火炮射击过程是高度瞬态的非线性动力学问题,不但火炮零部件会发生弹性变形、接触/碰撞,而且伴随着土壤的弹塑性变形。这是传统理论所无法解决的,需要运用非线性动力学理论加以研究。

2 轻型牵引榴弹炮非线性有限元模型的建立

2.1 轻型牵引榴弹炮结构特点及有限元网格划分

某轻型牵引榴弹炮主要分为炮身、摇架、上架、高平机、下架、大架、驻锄七个部分,全炮重约1.6吨(同类型的传统榴弹炮重约3吨)。此种榴弹炮的主要特点是:①下架直接与地面接触,有利于缩短载荷传递路径,改善全炮受力状况;同时,可以简化下架结构,减轻全炮质量。②下架与大架之间增加缓冲装置,吸收冲击能量,提高射击稳定性。③高低机与平衡机被合并为一个构件,称为高平机。

网格划分是火炮有限元动力学建模过程中相当重要的步骤,网格的质量将直接关系到计算结果的准确性。牵引榴弹炮的炮身结构类似于厚壁圆筒,以六面体实体单元为主划分网格;摇架、上架、下架、大架及驻锄主要由板件构成,划分的网格以四边形壳单元为主,局部区域用三角形单元和实体单元划分。全炮共划分255503个单元,其中六面体

单元168647个,楔形单元8537个,四边形单元75259个,三角形单元3043个,杆单元2个,刚性单元15个。由于射击稳定性分析主要关注全炮的运动学参量,并且模型中含有复杂的接触/碰撞,因此适宜采用一阶减缩积分单元。

2.2 发射载荷传递路径及主要连接关系

火炮发射时,炮身在炮膛合力、制退机力和复进机力作用下沿摇架作后坐复进运动。炮身通过与摇架前衬瓦和U型槽(图2)接触,将发射载荷传递至摇架。摇架与上架通过耳轴和高平机传力,在耳轴和高平机上下支点处分别定义转动副。上架主要通过方向机和位于下架中部的立轴将发射载荷传递至下架。火炮发射时方向机被锁死,可以用运动学耦合约束来模拟上架和下架之间的锁死部位。

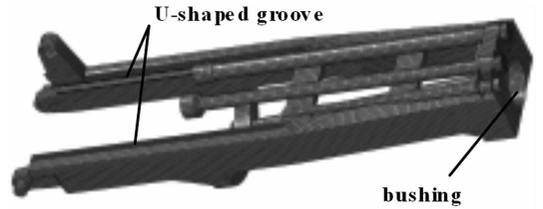


图2 摇架有限元分析模型

Fig. 2 FEA model of cradle

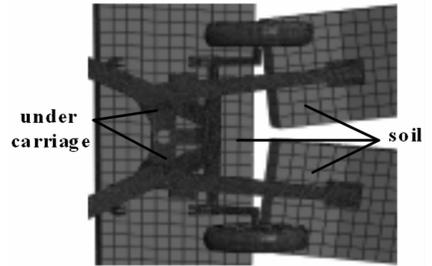


图3 下架与土壤有限元分析模型

Fig. 3 FEA model of under carriage and soil

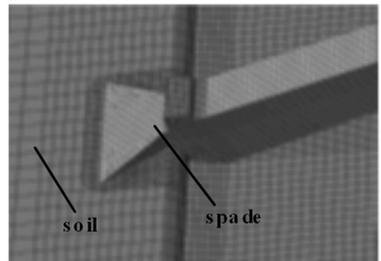


图4 驻锄与土壤有限元分析模型

Fig. 4 FEA model of spade and soil

火炮射击时,车轮抬起,下架放置于地面(图3),通过定义与地面之间的接触关系将发射载荷传递至地面;同时下架后端通过转动副和缓冲装置与

大架及驻锄相连,驻锄埋置在土壤中(图4),通过与土壤之间的接触将发射载荷传递至大地.

3 结构参数对轻型牵引榴弹炮射击稳定性影响规律

牵引火炮的射击稳定性包括后坐稳定性和复进稳定性,其中复进稳定性容易通过调整前驻锄前后位置得以保证.通常在零度射角时牵引火炮的射击稳定性最差.因此本文的射击稳定性是指火炮在水平地面上零度射角条件下的后坐稳定性.取下架底部某点最大跳高 h 作为衡量射击稳定性的指标,将相应的非线性有限元动力学模型提交工作站求解,参与并行计算的 CPU 个数为 32. 部分结构参数对射击稳定性的影响如图 5 至图 10 所示.

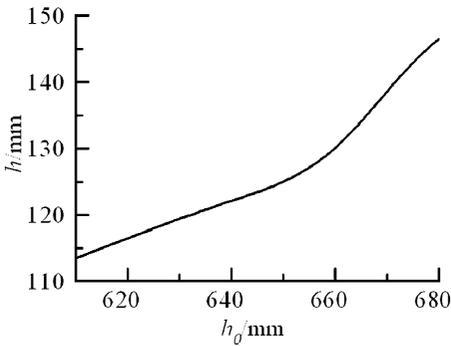


图5 耳轴高度对射击稳定性影响

Fig. 5 Influence of height of trunnion on firing stability

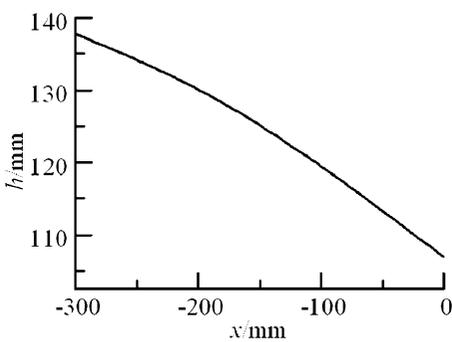


图6 耳轴前后位置对射击稳定性影响

Fig. 6 Influence of location of trunnion on firing stability

可以看出,耳轴高度对射击稳定性影响最大.当耳轴高度由 610mm 增加至 680mm 时,下架最大跳高由 113.5mm 增加至 144.9mm,耳轴高度平均每增加 1mm,下架跳高增加 0.45mm.耳轴前后位置对射击稳定性也有较大影响,因为耳轴前移会使得全炮质心前移,增大稳定力矩,有利于提高射击稳定性.图7说明增大缓冲装置阻尼有利于提高射

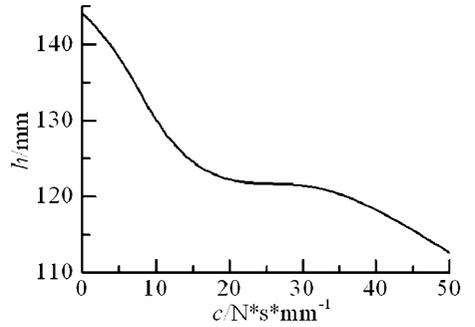


图7 缓冲装置阻尼对射击稳定性影响

Fig. 7 Influence of damping of energy dissipation device on firing stability

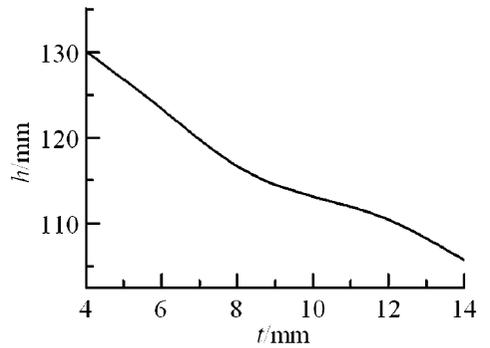


图8 驻锄板厚度对射击稳定性影响

Fig. 8 Influence of thickness of spade on firing stability

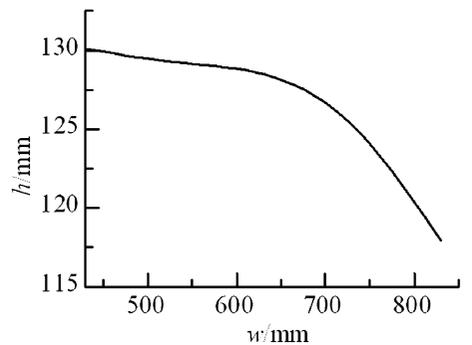


图9 驻锄宽度对射击稳定性影响

Fig. 9 Influence of width of spade on firing stability

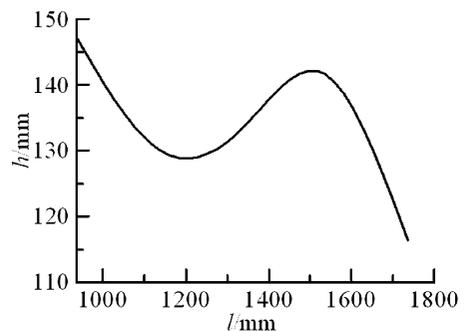


图10 大架长度对射击稳定性影响

Fig. 10 Influence of length of trail on firing stability

击稳定性. 从图 8 和图 9 可知, 当驻锄变形较大时, 增大驻锄刚度可以在一定程度上提高射击稳定性. 图 10 则说明, 对于此种新型大架结构, 由于下架与大架之间增加了转动副和缓冲装置, 增加大架长度并不一定能够有效提高射击稳定性, 这一点与传统的大架有较大区别. 此外, 计算结果还表明, 高平机弹簧刚度、缓冲装置刚度系数等对射击稳定性影响甚微, 故未在图中标出.

4 轻型牵引榴弹炮射击稳定性改进

根据各结构参数对射击稳定性的影响分析, 选取耳轴高度、缓冲装置阻尼系数、驻锄宽度和驻锄板厚度作为改进参数. 各参数的初始值和改进值列于表 1, 原模型和改进模型的下架跳高曲线如图 11 所示.

表 1 改进前后各结构参数取值情况

Table 1 Value of structural parameters of original and improved model

structural parameters	h_0/mm	$\xi/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$	w/mm	t/mm
original model	660	10	430	4
improved model	610	30	630	8

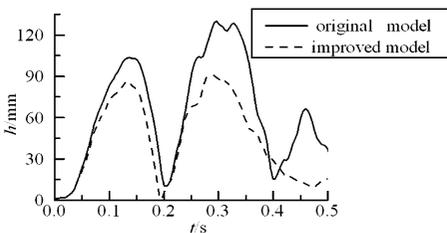


图 11 改进前后下架跳高曲线

Fig. 11 Jump curves of bottom carriage of original and improved model

改进后的下架最大跳高由原先的 130.1 mm 降低至 90.8 mm, 下降 30.2%, 降幅较为明显, 说明改进参数选择的合理性.

5 结论

非线性有限元理论能够有效模拟火炮发射过程中各种非线性因素, 如驻锄与土壤之间的接触/碰撞; 土壤的弹塑性变形、身管的弹性变形等. 通过分析轻型牵引榴弹炮的非线性有限元动力学模型, 能够得到各结构参数对射击稳定性的影响规律. 计算结果表明耳轴位置对射击稳定性有重要影响; 对于带有缓冲装置的新型大架结构, 增加大架长度并

不一定能提高射击稳定性, 增大缓冲装置阻尼有利于提高射击稳定性.

参 考 文 献

- Webb D W, Soencksen K P, Guidos B J, Garner J M. Flat fire jump performance of a 155-mm M198 howitzer. ADA369710, 1999: 1 ~ 15
- 贾长治. 基于虚拟样机技术和灵敏度分析的地面火炮射击稳定性优化研究. 机械强度学报, 2004, 26(4): 384 ~ 388 (Jia C Z. Research on optimization of firing stability of field gun based on virtual prototyping technology and sensitivity analysis. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(4): 384 ~ 388 (in Chinese))
- 李三群, 刘海平. 火炮射击稳定性的序列二次规划算法与虚拟样机融合优化. 兵工自动化学报, 2005, 24(3): 1 ~ 2 (Li S Q, Liu H P. Optimization of firing stability for gun system based on combination of SQP and virtual prototyping. *Ordnance Industry Automation*, 2005, 24(3): 1 ~ 2 (in Chinese))
- 万李. 某轻型火炮结构参数灵敏度分析及稳定性优化. 四川兵工学报, 2012, 33(8): 34 ~ 36 (Wan L. Structural sensitivity analysis and stability optimization of a lightweight artillery. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2012, 33(8): 34 ~ 36 (in Chinese))
- 周成. 轻量化牵引火炮动力学分析与优化研究[硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2011 (Zhou C. Study on dynamic analysis and optimization of a lightweight towed howitzer [Master Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011 (in Chinese))
- 戴劲松, 税华, 王茂森. 某步行小口径山地炮射击稳定性分析. 兵工自动化学报, 2013, 32(3): 9 ~ 11 (Dai J S, Shui H, Wang M S. Analysis of firing stability of certain type small caliber walk unmanned mountain gun. *Ordnance Industry Automation*, 2013, 32(3): 9 ~ 11 (in Chinese))
- Chen M. Research on influence of structure parameters on firing stability of machine gun based on the virtual prototype. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(10): 1167 ~ 1171
- 彭迪. 超轻型火炮结构动力学有限元分析与总体优化匹配技术研究[硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2011 (Peng D. Study on structural dynamics finite element analysis and overall optimization of a Ultra-light artillery [Master Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2011 (in Chinese))
- 张月林等. 火炮反后坐装置设计. 北京: 兵器工业出版社,

1995;63 ~ 65 (Zhang Y L, et al. Gun recoil device design. Beijing: Weapon Industry Press, 1995; 63 ~ 65 (in Chinese))

10 Terhune R, McDonald S, Kotliar M. M119 howitzer saddle gun fire finite element analysis. ADE403369, 2011;1 ~ 12

RESEARCH ON FIRING STABILITY OF A LIGHTWEIGHT TOWED HOWITZER *

Liu Luyang[†] Yang Guolai Xiao Hui

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

Abstract In order to obtain the influence of structural parameters on the firing stability of the lightweight towed howitzer, the corresponding nonlinear finite element models were established. Nonlinear factors, such as contact/collision between the spade and soil, plastic deformation of soil, were considered in the finite element models. By solving the finite element models with different structural parameters, the structural parameters which have great influence on firing stability can be identified. Based on this, the optimization of firing stability was performed. The calculated results show that the optimized firing stability of the lightweight towed howitzer is improved.

Key words firing stability, structural parameters, nonlinear factors, finite element method, towed howitzer