

doi: 10.7690/bgzd.2013.07.004

大口径牵引火炮改装灌注轮胎后射击稳定性研究

孙华刚, 闫鹏程, 陈学军, 马振书, 毛向东
(军械工程学院军械技术研究所, 石家庄 050000)

摘要: 为研究灌注轮胎对火炮射击稳定性的影响, 通过对炮膛合力、驻退机力和复进机力进行分析, 建立全炮模型的主要构件间的拓扑关系及对应的自由度; 并在 ADAMS 进行火炮动力学仿真, 得到不同射击角度火炮动力学特性曲线。仿真结果表明: 灌注轮胎不仅不会对大口径牵引的射击稳定性产生影响, 而且提升了火炮的射击精度。

关键词: 聚氨酯弹性体灌注轮胎; ADAMS; 射击稳定性; 动力学仿真
中图分类号: TJ303 **文献标志码:** A

Research on Firing Stability of Large-Caliber Towed Artillery After Installed Perfusion Tyre

Sun Huagang, Yan Pengcheng, Chen Xuejun, Ma Zhenshu, Mao Xiangdong
(Ordnance Technical Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: For researching on the influence of perfusion tyre on artillery firing stability, through analysis of force of bore, recoil and compound machine, the entire artillery model of main components of topological relations and the corresponding degree of freedom was established. Then, use ADAMS to carry out dynamics simulation, acquire different firing angle artillery dynamics characteristic curve. The simulation results show that the perfusion tyre will not make influence on firing stability, and it will improve artillery firing accuracy.

Key words: polyurethane elastomer perfusion tyre; ADAMS; firing stability; dynamics simulation

0 引言

海绵轮胎由于具有较好的安全性能和较强的自身防护能力, 在被枪弹、弹片击中或轻度机械损伤后仍能保持一定的工作能力, 而被选用为牵引火炮的主要轮胎结构。经部队多年使用发现, 海绵轮胎在高速和长时间运行时, 其内部摩擦生热快, 海绵体易融化而导致爆胎, 在热区或夏季尤为突出。另外, 海绵轮胎对环境适应能力不足, 长时间行军对轮胎影响比较大, 安全行驶速度不超过 50 km/h^[1], 已不能满足部队连续作战和快速机动要求。聚氨酯弹性体灌注轮胎, 由于采用了新型弹性体材料配方, 而具有较强的安全防护能力和较快的行驶速度。但是轮胎作为轮式装备的重要组成部分, 对装备的性能有着重要的影响, 特别是在火炮进行着地射击时, 不同的轮胎对其射击性能、精度等有着不同的影响。为弥补常规试验的不足, 目前, 常采用将计算机辅助设计与虚拟样机技术和多体动力学仿真方法相结合的方法, 对轮胎系统进行动力学虚拟试验仿真分析^[2-5]。笔者以某大口径牵引火炮实体模型为对象, 对灌注轮胎的性能进行仿真研究, 并分析其对火炮射击稳定性的影响。

1 全炮实体模型的建立

以某型大口径牵引火炮的二维零件图纸和装配图纸为依据, 在 I-DEAS 环境中建立了火炮的三维实体模型。由于火炮结构比较复杂, 为更加清晰地显示火炮三维实体模型的内部细节, 建立了火炮三维实体消隐模型, 如图 1 所示。

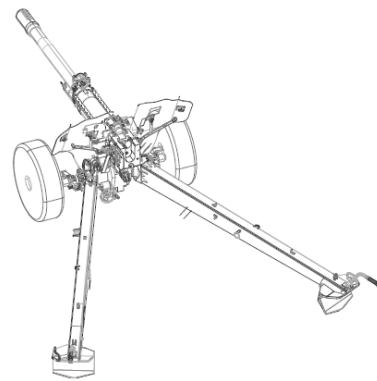


图 1 某型大口径牵引火炮的三维实体模型

2 火炮受力情况分析

火炮在射击状态时载荷和约束的设定, 是火炮射击状态动力学仿真分析的关键。为了更好地模拟大口径牵引火炮的射击状态, 需要对火炮射击时的

收稿日期: 2013-02-02; 修回日期: 2013-03-06

基金项目: 总装通保部科研课题

作者简介: 孙华刚(1979—), 男, 博士, 高级工程师, 从事武器系统动力学理论与应用研究。

受力情况进行分析。火炮在着地射击时不仅受膛膛合力，驻退机力、复进机力等作用力的影响，而且轮胎的受力情况以及聚氨酯灌注轮胎本身的力学特性对火炮的射击稳定性也都有着重要的影响。

2.1 膛膛合力

根据弹药学原理，膛膛合力分为膛内时期和后效期。

弹丸在发射时的合力主要由火药燃气在膛底和药室锥面的作用力以及弹丸作用在膛线上的力。综合考虑膛内受力情况，膛膛合力 F_{pt} 的计算公式为

$$F_{pt} = \frac{1}{\varphi} (1 + 0.5 \frac{\omega}{m}) AP \quad (1)$$

$$\varphi = \delta + \frac{1}{3} \frac{\omega}{m}$$

当弹丸飞离炮口时，由于膛线对弹丸的作用力消失，此时瞬间的膛膛合力 F_g 将有一定提升，理论计算公式为

$$F_g = \frac{1}{\varphi} (\varphi_1 + 0.5 \frac{\omega}{m}) AP_g \quad (2)$$

上述各式中： φ 为次要功计算系数； A 为线膛部分的截面积； P 为膛内火药燃烧时的平均压力； φ_1 为次要功的计算系数； δ 一般取 1.03~1.10，武器威力越大值越小； ω 为发射弹药质量； m 为弹丸质量； P_g 为弹丸在炮口时膛内火药燃气平均压力； F_g 为后效期膛膛合力的初始值。

随着后效期弹丸射出炮口，火药燃气也随之从炮口喷出，膛膛合力从 F_{pt} 迅速衰减至零。由于后效期火药燃气的流动非常复杂，不同的侧重点和方法得到的理论公式也不尽相同。目前我国火炮研究人员用来计算后效期膛膛合力的计算公式如式 (3)。

$$F_{pt} = A \psi p \quad (3)$$

$$p = P_g (1 + Bt)^{\frac{2k}{k-1}}$$

式中： $\psi = \frac{4 - k(k+1)}{4(1 + \frac{3-k}{6}k)}$ ； $B = S \frac{k-1}{2\omega} \sqrt{\frac{k}{1 + \frac{3-k}{6}k}} \rho_g P_g$ ， ρ_g 为

弹丸在炮口时膛内火药燃气密度。

炮口制退器在后效期火药燃气流经炮口制退器时对膛膛合力会产生影响。依据炮口制退器装置的冲量特征量 x ，得到炮口制退器在后效期的膛膛合力表达式如式 (4) 所示。

$$F_{ptz} = x F_{pt} \quad (4)$$

式中： F_{ptz} 为装配炮口制退器时的后效期膛膛合力； F_{pt} 为未装配炮口制退器时的后效期膛膛合力。

2.2 驻退机力

驻退机是火炮上的一种液压阻尼器，在射击过程中，定义后坐部分相对于摇架的后坐复进位移为 s (指向炮口为正，初始值为 0)，此时带沟槽式复进节制器的节制式驻退机提供的液压阻力 F_z 可由式 (5)~式 (6) 表示。

1) 当 $\dot{s} < 0$ ，即开始后座。

$$F_z = (\frac{I_1 \rho}{2} \frac{(A_0 - A_p)^3}{(a_x + \sqrt{\frac{I_1 a_1}{I_3}})^2} + \frac{I_2 \rho A_{f_1}^2}{2 \Omega_1^2}) \dot{s}^2 \quad (5)$$

式中： I_1 为后坐时驻退机主流液压阻力系数； I_2 为后坐时驻退机支流液压阻力系数； I_3 为驻退机主流漏流液压阻力系数； ρ 为驻退液密度； A_0 为驻退机后坐时活塞工作面积； A_p 为驻退机后坐时活塞的工作面积； A_{f_1} 为复进机节制腔的工作面积； Ω_1 为后坐时驻退机支流通路的最小面积； a_x 为驻退机主流液孔面积； a_1 为驻退机主流漏液面积。

2) 当 $\dot{s} \geq 0$ ，且 $\lambda + s < l_\lambda$ 时：

$$F_z = -\frac{I_4 \rho}{2} \frac{A_{f_2} (A_{f_2} + a_f)^2}{(a_f + \sqrt{I_4 / I_5} a_2)^2} \dot{s}^2 \quad (6)$$

$$l_\lambda = \frac{d_T^2}{D_T^2 - d_p^2} \lambda$$

式中： d_T 为驻退机驻退机杆直径； D_T 为驻退机活塞直径； d_p 为节制杆直径； I_4 为复进节制器液孔液压阻力系数； I_5 为复进节制器漏流流液阻力系数； a_f 为复进节制器液孔面积； a_2 复进节制器漏流面积； l_λ 驻退机非工作腔真空消失时的复进行程； λ 为后坐完成时的后坐长度。

2.3 复进机力

复进机是火炮中的一个弹性储能器，笔者所分析的某型牵引火炮采用的是液体气压式复进机，其使用的液体气压式驻退复进机提供的驻退复进机力 F_f 的表达式为：

$$F_f = A_f P_f (\frac{V_0}{V_0 + s A_f})^n \quad (7)$$

式中： A_f 为复进机活塞的工作面积； P_f 为复进机气体的初始气压； V_0 为复进机气体初始体积； n 为复进机多方指数。

由上述分析，结合生产射击部门给定数据，可得出火炮受力情况曲线，如图 2 所示。

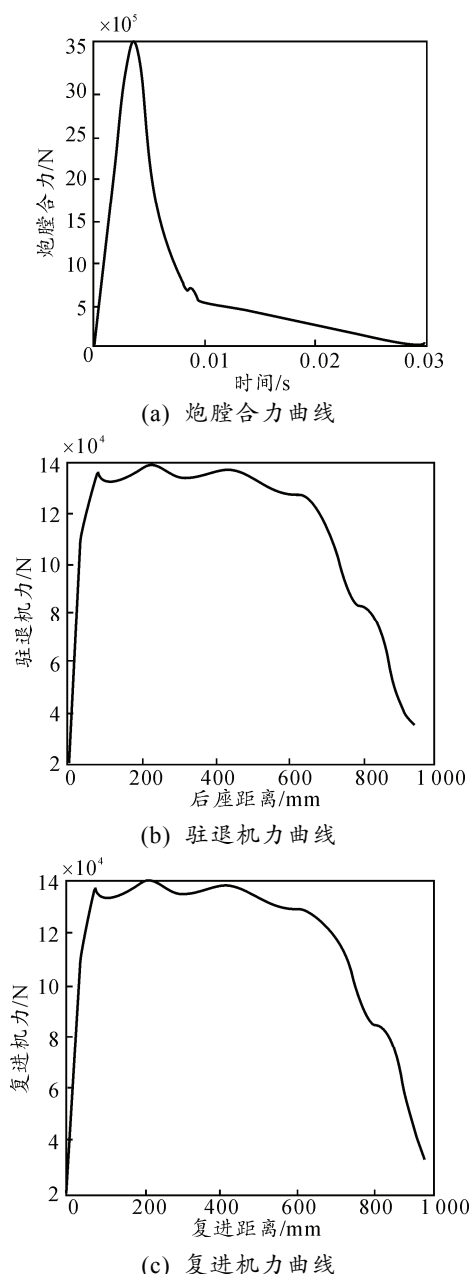


图2 火炮射击过程受力分析曲线

3 动力学模型

3.1 建模假设

火炮几何模型中,除了身管、摇架、上架和防盾、大架、下架、缓冲器外,其余部件和零件在动力学仿真的过程中不用考虑外形,只需将其质量附加到相应部件的重心上,因此在不改变其动力学特征的前提下对火炮三维模型进行了如下简化。

1) 除阻尼、弹性和轮胎外,火炮的后坐部分、上架、摇架、下架等均认为是刚体,不考虑其变形,各个独立刚体之间的空间和间隙忽略不计;

2) 对于刚体间的连接柔性作适当简化,用线弹性橡胶衬套来模拟实际工况下火炮的动力学特性;

3) 各部件之间摩擦力忽略不计,上架和下架之间,摇架与上架之间的运动简化只考虑转动;

4) 火炮通过轮胎与地面接触,驻锄支点在支反力的作用下做垂直和水平运动。

3.2 火炮动力学建模

由上述分析可建立全炮模型各主要构件间的拓扑关系(如图3所示)及对应的自由度:弹丸与身管—螺旋副,后坐部分与摇架—平动副和单向力,摇架与上架—转动副和扭转弹簧,上架与下架—转动副与扭转弹簧,下架与右大架—转动副,下架与左大架—转动副,上架与摇架—单向力,大架与地—三向弹簧力,轮胎与扭力杆—轮胎生成的转动副,扭力杆与下架—转动副和扭转弹簧。

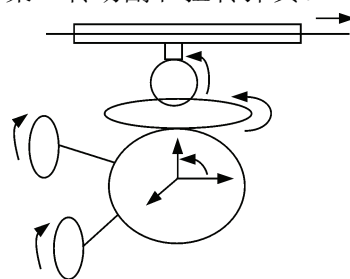


图3 火炮主要部件的拓扑结构

同时,在考虑火炮主要部件的拓扑结构时,对驻锄和地面的相互接触过程进行了简化,笔者采用弹簧阻尼器来描述相互之间的关系。利用土壤力学原理,选取刚度和阻尼系数。高低机和方向机用等效弹簧来表示它们之间的弹性特性,弹簧刚度通过有限元静力计算结果确定。

根据上述受力分析,对实体模型施加相应载荷和约束并进行装配,使其符合火炮在实际射击状态。在ADAMS环境中建立的火炮动力学模型如图4。



图4 ADAMS动力学模型

3.3 轮胎受力情况分析

火炮射击过程中的振动特性主要与轮胎的动刚度、阻尼特性、传递特性和包容特性等动力学特性有关,其中轮胎的动刚度和阻尼特性包括径向、纵向和横向3类^[6],其中轮胎的径向刚度和阻尼特性

对射击稳定性影响最大。

关于轮胎与地面的接触问题以及轮胎模型如何简化等问题，大量学者不断进行探索和改进。为便于仿真，笔者采用的是 Fiala 轮胎模型。在仿真过程中，通过改变相应轮胎参数得到相应的火炮车轮着地射击时的相应仿真数据，由此研究不同的轮胎对火炮射击的影响。

4 射击稳定性的仿真

由于新型安全防弹轮胎与海绵轮胎在材料选用和结构设计上都有明显区别，为更好地完成仿真计算，仿真过程中所需轮胎数据，如：轮胎自由半径，胎体半径，纵向滑移刚度，侧偏刚度，外倾刚度，径向刚度等，均由台架试验数据获取。相关参数值如表 1 所示。

表 1 同一规格 2 种轮胎的 Fiala 模型参数

参数名称	参数值	
	海绵轮胎	灌注轮胎
车轮自由半径/mm	467.5	467.5
胎体半径/mm	76.2	76.2
纵向滑移刚度/N	111 062	111 751
侧偏刚度/(N/DEG)	2 115	2 235
外倾刚度/(N/DEG)	233	290
径向刚度/(N/mm)	800	1 100

4.1 射角为 0°时火炮射击稳定性分析

分别对不同轮胎设定参数的火炮 ADAMS 模型进行射角为 0°单发射时的火炮射击情况仿真分析，分析结果如图 5~图 8 所示。

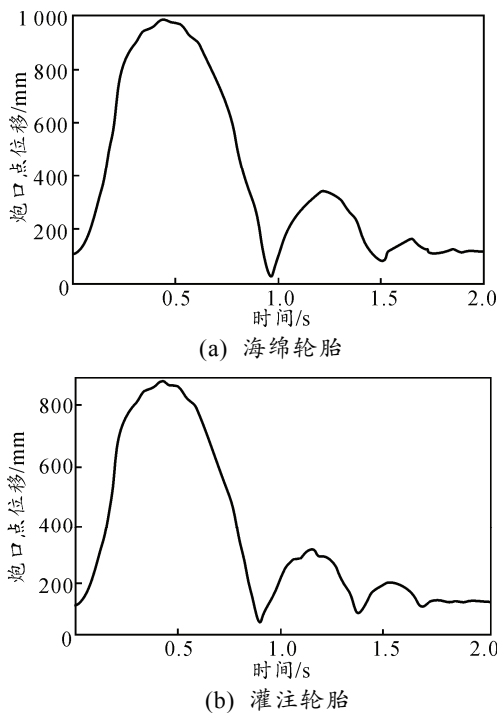


图 5 火炮炮口点位移随时间的变化曲线

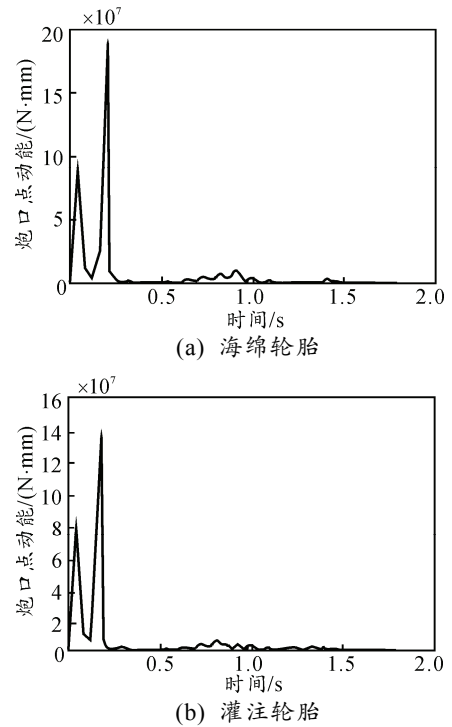


图 6 火炮炮口点动能随时间的变化曲线

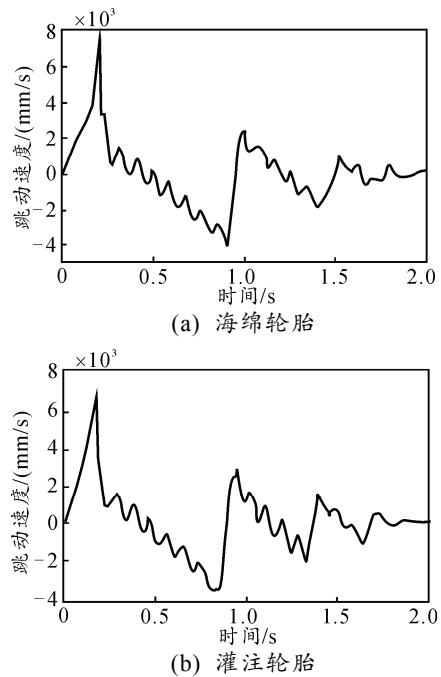
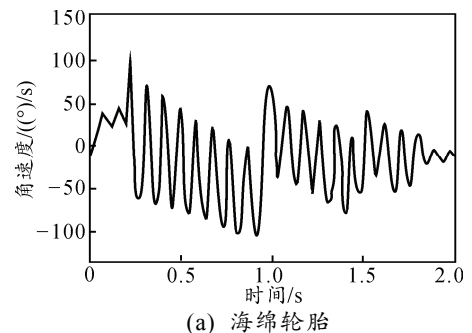


图 7 火炮跳动速度随时间变化曲线



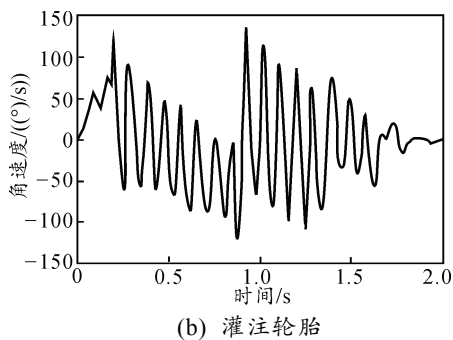


图 8 炮口角速度随时间的变化曲线

仿真分析结果表明：在 0°射角的射击情况下，使用聚氨酯灌注轮胎的火炮相比使用海绵轮胎的火炮，炮口跳动量降低了 98 mm，在 0.15 s 时（炮弹出膛后瞬间）炮口跳动速度达到峰值时炮口跳速峰值降低了 75 mm/s。使用海绵轮胎时，在射击过程中轮胎压缩量为 1.98 mm，而使用聚氨酯灌注轮胎时轮胎压缩量为 1.8 mm。

4.2 射角为 65°时射击状态(图 9~图 12)

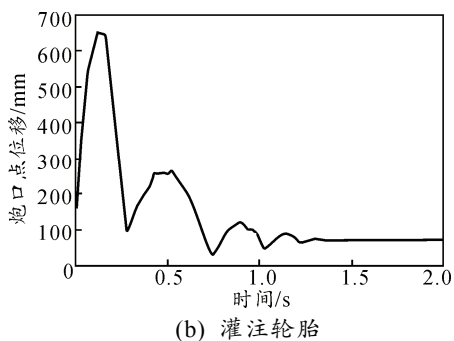
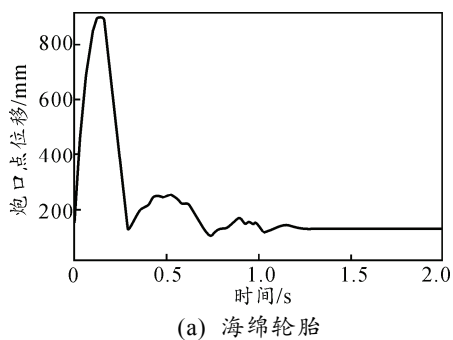


图 9 火炮炮口点位移随时间的变化曲线

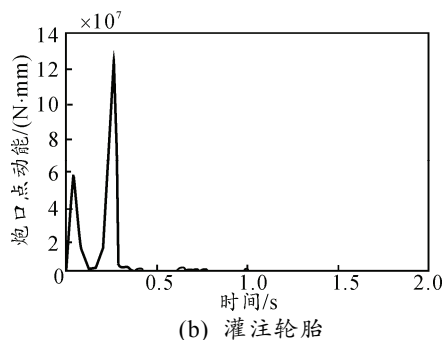
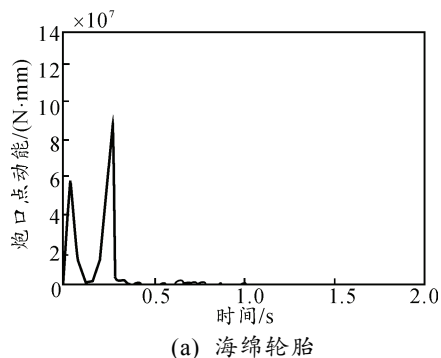


图 10 火炮炮口点动能随时间的变化曲线

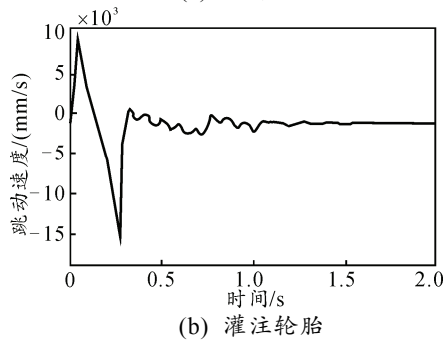
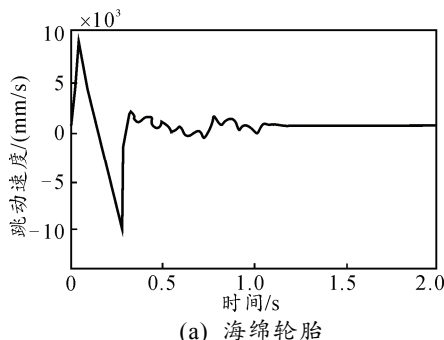


图 11 火炮跳动速度随时间变化曲线

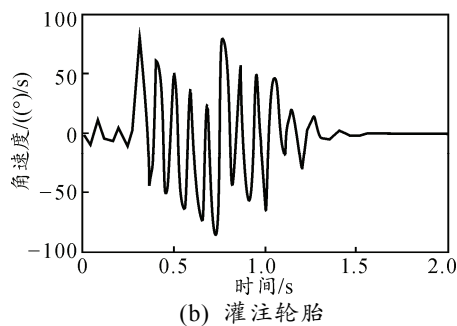
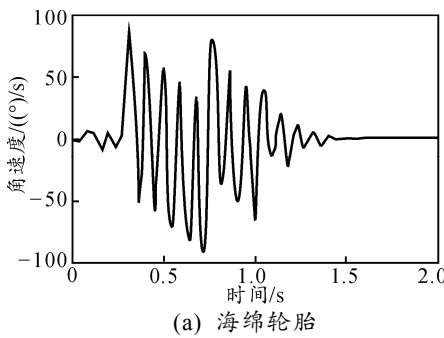


图 12 炮口角速度随时间的变化曲线

仿真分析结果表明：在 65°射角时，装配海绵轮胎时火炮的最大跳动幅度为 267 mm，装配聚氨酯灌注轮胎时火炮的最大跳幅为 240 mm；使用海绵轮胎时在射击过程中轮胎压缩量为 1.3 mm，而使用聚氨酯灌注轮胎时其压缩量为 1.09 mm。

另外 2 种射击状态火炮的炮口动能和角速度都有明显降低。同时轮胎的压缩量灌注轮胎明显要小于海绵轮胎。

由此可以看出：使用聚氨酯灌注轮胎不仅不会影响火炮的射击精度，而且提升了射击稳定性。且在实弹射击试验中也未曾发生爆胎情况。

5 结论

笔者利用 ADAMS 软件，通过各构件间的拓扑关系，分析轮胎和地面接触的受力情况，并结合火炮实际设计数据和轮胎实际测试参数，对装有海绵轮胎和聚氨酯灌注轮胎的某型大口径牵引火炮进行了着地发射动力学仿真，获得了整个火炮系统着地射击过程中动力学参数随时间的变化规律。仿真结

果表明：聚氨酯灌注轮胎在一定程度上提升了火炮的射击稳定性。该分析结果为新型轮胎的使用提供了可靠数据支撑，可为评估改装轮胎火炮动力学行为提供参考。

参考文献：

- [1] 李律. 牵引火炮改装灌注轮胎理论与试验研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2010.
- [2] 齐晓杰, 于建国. 基于虚拟样机技术的载重车辆轮胎仿真技术[J]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009, 37(8): 106-108.
- [3] 毛向东. 牵引火炮海绵轮胎改装充气轮胎仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2003.
- [4] 彭旭东, 郭孔辉, 单国玲. 汽车轮胎侧偏特性影响因素的实验研究[J]. 东营: 石油大学, 2003, 12(6): 166-169.
- [5] 方杰, 吴光强. 轮胎机械特性虚拟试验场[J]. 计算机仿真, 2007, 24(6): 243-247.
- [6] 张克健. 车辆地面力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [7] 徐正亚. 基于神经模糊控制的火炮伺服系统设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2002.

(上接第 8 页)

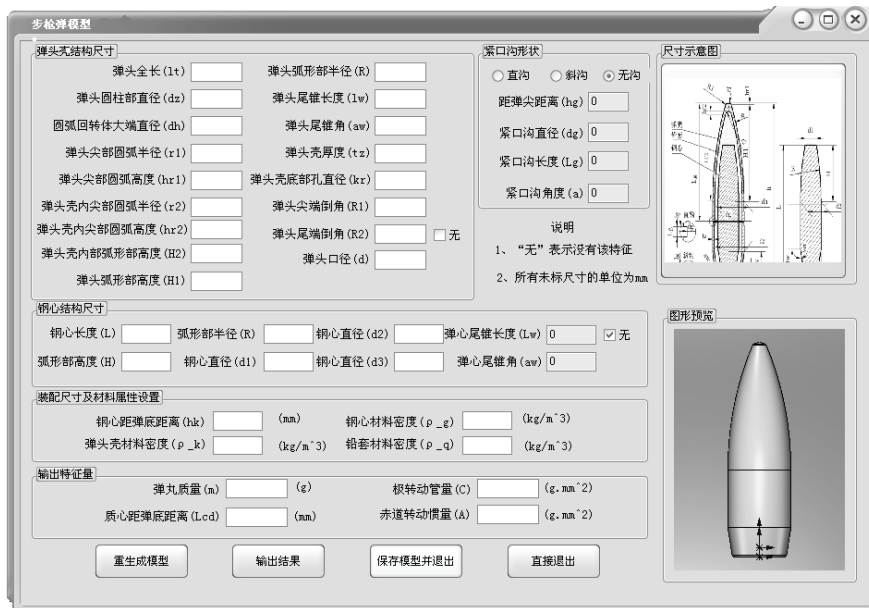


图 3 某步枪弹的参数化设计界面

参考文献：

- [1] 刘清, 鲜勇, 郭庆树. 再入机动弹头速度方向制导律设计及仿真[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(11): 46.
- [2] 程磊, 杨永顺, 等. Visual C++对 SolidWorks 二次开发的方法[J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2004, 25(2): 42-45.
- [3] 步兵自动武器及弹药设计手册编写组. 步兵自动武器及弹药设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977: 172-240.

- [4] 张志平, 朱世和, 等. 用 C++对 SolidWorks 的二次开发[J]. 天津理工学院学报, 2003, 19(4): 69-71.
- [5] 王文波, 涂海宁, 等. SolidWorks 2008 二次开发基础与实例 (VC++) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 274-282.
- [6] 江洪, 魏峰, 等. SolidWorks 二次开发实例解析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 144-200.
- [7] 谭浩强. C++面向对象程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 78-112.