

火炮动力后坐试验台建模及射击模拟准确度评估

杨玉良¹, 秦俊奇¹, 狄长春¹, 邓辉咏¹, 张小嘎²

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 解放军 73101 部队, 江苏 徐州 221008)

摘要: 针对火炮动力后坐试验台模拟实弹射击准确度问题, 基于 ADAMS/ATV 软件, 以某型自行火炮为对象, 建立火炮动力后坐试验台虚拟样机模型; 在此基础上获得炮口强冲击条件下火炮后坐位移、速度及加速度仿真曲线; 分别求解曲线间距相对误差, 结合界标分界法提出基于曲线形状相似度及数值相似度两指标的射击模拟准确度评估方法。通过计算获得试验台模拟准确度为 0.8654。评估结果表明, 该试验台能较准确模拟火炮实弹射击的后坐动态特性。

关键词: 火炮动力后坐; 虚拟样机; 数值相似度; 界标分界法; 形状相似度

中图分类号: TJ301

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.10.024

Modeling and firing simulation accuracy assessment of a gun-power-recoil test table

YANG Yu-liang¹, QIN Jun-qi¹, DI Chang-chun¹, DENG Hui-yong¹, ZHANG Xiao-ga²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China; 2. Unit 73101 of PLA, Xuzhou 221008, China)

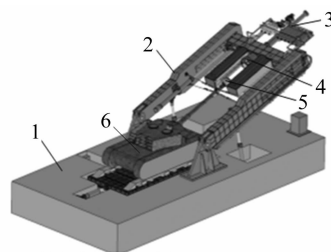
Abstract: Muzzle strong impact is a feasible test method of a gun-power-recoil to simulate gun firing. In order to evaluate firing simulation accuracy of a gun-power-recoil test table, a certain type of self-propelled gun was studied, and the virtual prototype model of the gun-power-recoil test table was built by using the software ADAMS/ATV. Based on the virtual prototype model, recoil displacement, recoil velocity, and recoil acceleration simulation curves under the condition of muzzle strong impact were obtained. Through solving relative errors of distance between curves respectively, combined with the landmark method, an evaluation method was presented with two evaluating indexes including shape similarity and numerical value similarity. Through calculation, it was shown that the firing simulation accuracy of the test table is 0.8654. The evaluation results indicated that the test table can simulate the dynamic characteristics of a gun-power-recoil correctly during gun firing.

Key words: gun-power-recoil; virtual prototype; numerical value similarity; landmark method; shape similarity

炮口强冲击实现火炮动态后坐已成技术可行的火炮射击模拟试验方法。靶场定型试验证明, 几乎所有火炮零部件破损均可用火炮动力模拟试验装置考核, 包括因设计不合理、强度不够、原材料选择不合适、工艺条件不好等造成的损坏现象[1]。因此, 需研制有效缩短火炮试验周期, 大幅减少火炮寿命、可靠性及安全性试验用弹量火炮动力模拟试验装置。对此已有研究可行、等效的火炮发射模拟试验技术及火炮动态后坐技术, 以部分替代火炮实弹射击试验[2]。图 1 为基于液压、冲击技术的火炮动力后坐试验台[3]工作原理, 即质量块在液压系统推动下, 短时间内获得高速运动, 通过波形发生器间接冲击火炮口, 推动火炮后坐, 实现火炮发射过程的试验模拟[4]。

本文以某自行火炮为对象, 建立火炮动力后坐试

验台虚拟样机模型, 并以曲线数值相似度及形状相似度指标对该试验台射击模拟准确度进行评估。



1. 定位定平子系统 2. 高低与距离调整子系统 3. 动力系统
4. 冲击系统 5. 波形发生器 6. 某自行火炮

图 1 火炮动力后坐试验台工作原理

Fig. 1 The principle of gun-power-recoil test machine

1 火炮动力后坐试验台建模

1.1 某自行火炮虚拟样机建模

某自行火炮虚拟样机模型含火力、底盘行走两部

分。火力部分含炮塔、摇架、身管、反后坐装置等;行走部分包括双侧履带、车体,每侧履带由1个主动轮、6个负重轮及负重轮平衡肘、3个托带轮、1个诱导轮及诱导轮肘、106块履带板组成,主动轮前置。所建虚拟样机模型车长11.64 m、宽3.3 m、高3.18 m,总重42.5 t,共有刚体254个,运动自由度1305个。

1.1.1 履带与地面相互作用力学模型^[5-6]

履带板与地面间作用通过接触力函数 impact 定义,表达式为

$$P = -k_1 q^n - c_1 \dot{q} \quad (1)$$

式中: P 为地面压力; k_1 为刚度系数; q 为变形深度; n 为变形系数; c_1 为阻尼系数; \dot{q} 为变形速度。

1.1.2 扭力轴模型

扭力轴作为悬挂装置中的弹性元件用于缓冲履带车辆在行驶过程中地面对车体的冲击。扭力轴模型可等效为作用在负重轮平衡肘与车体连接处力矩,表达式为

$$T = T_0 - k_2(\theta - \theta_0) \quad (2)$$

式中: T 为扭力矩; k_2 为弹簧刚性系数; T_0, θ_0 分别为初始扭矩与初始扭转角; θ 为扭力轴扭转角。

1.1.3 液气悬挂装置模型

液气悬挂装置由蓄压器与动力缸组成,主要用于吸收、衰减车体振动,亦即扭力轴作用的补充。据液气悬挂特点,用一阻尼器模型与一双向力模拟液气悬挂装置力学特性,表达式为

$$F = -p_0 \left(\frac{A_2 s_0}{A_2 s_0 - A_1 s} \right)^m - c_2 \dot{s} \quad (3)$$

式中: p_0 为初始充气压力; A_1, A_2 分别为缸、蓄压器有效作用面积; s_0 为蓄压器中气体初始长度; s 为缸活塞产生的位移; m 为气体多变指数; c_2 为蓄压器阻尼系数。

1.1.4 虚拟样机模型验证

反后坐装置亦称火炮心脏,各项动态参数为衡量火炮动态性能重要指标。选后坐时间 t_{hz} ,最大后坐位移 h_{max} ,最大后坐速度 $v_{h,max}$,复进时间 t_{fj} ,最大复进速度 $v_{fj,max}$,复进到位速度 v_{dw} 等动态参数对虚拟样机模型进行定量验证见表1。由表1知,火炮后坐动态参数仿真值与试验值最大相差6.60%,仿真结果满足工程仿真值与设计值误差不超过10%要求,验证了火炮虚拟样机模型的正确性。

1.2 动力系统建模

在ADAMS中建立动力系统虚拟样机模型见图2,主要包括液压缸、冲击质量块及支撑框架。在液压缸活塞与缸体上下两端面设置碰撞约束,在活塞杆前端添加圆形缓冲部分,与质量块间定义碰撞约束,在活塞杆及质量块轴线方向添加移动副,在质量块与支撑框架间定义滑动摩擦。

表1 后坐动态参数仿真值与试验值比较

Tab.1 The comparison of recoil dynamic parameters between VP simulation results and test results

项目	$t_{hz}/$ ms	$h_{max}/$ mm	$V_{h,max}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$t_{fj}/$ ms	$V_{fj,max}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_{dw}/$ ($m \cdot s^{-1}$)
试验值	158.5	864	13.52	702	1.908	0.643
仿真值	165.7	857.6	12.986	684.5	1.782	0.675
误差/%	4.54	0.74	3.95	2.49	6.60	4.98

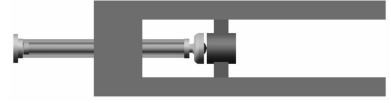


图2 动力系统虚拟样机模型

Fig.2 Virtual prototype model of power system

基于ADAMS及EASY5软件建立动力系统联合仿真模型。液压缸为虚拟样机模型与液压系统模型耦合元件,两模型通过连接在液压缸的ADAMS/Mechanism模块进行数据交换,在液压系统模型基础上添加该模块即可完成EASY5及ADAMS软件连接。

1.3 波形发生器建模

在自行火炮模型、动力系统模型基础上添加冲击质量块,并赋予冲击速度;在冲击块与炮身间设置波形发生器,用于缓冲冲击,调整冲击波形峰值及脉宽,建立火炮动力后坐试验台虚拟样机模型。波形发生器采用三次函数型非线性弹簧及阻尼器模拟力学性能,表达式^[7]为

$$F = k_3 p + \beta p^3 + c_3 \dot{p} \quad (4)$$

式中: p 为波形发生器变量; \dot{p} 为变形速度; k_3 为线性刚度系数; β 为非线性刚度系数; c_3 为阻尼系数。

2 动力学仿真

实弹射击时,推动火炮后坐运动的主动动力为作用于炮膛轴线方向炮膛合力 F_{pt} ;模拟射击时,推动火炮后坐运动的主动动力为由高速质量块撞击炮口产生的冲击力 F_n 。通过虚拟样机仿真,获得高速质量块撞击炮口时火炮后坐位移、速度及加速度曲线,并与实弹射击曲线对比,见图3~图5。

3 射击模拟准确度评估

火炮动力后坐试验台共254个刚体,不可能对每个刚体模拟准确度进行评估。据火炮自身特点,炮身后坐动态特性能充分表征试验台运行状态。因此评估试验台模拟准确度对炮身后坐模拟准确度考核即可。表征火炮后坐动态特性包括后坐位移、后坐速度及后坐加速度,三物理量实测数据与仿真数据均为时间序列。因此,对模拟射击过程进行准确度评估时,需对曲线数值及曲线形状进行评估。

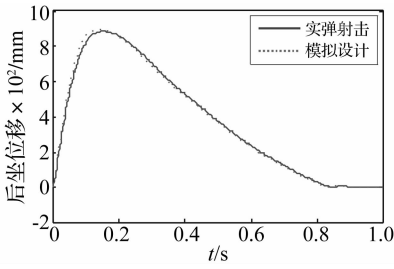


图 3 后坐位移对比

Fig. 3 The comparison of recoil displacement

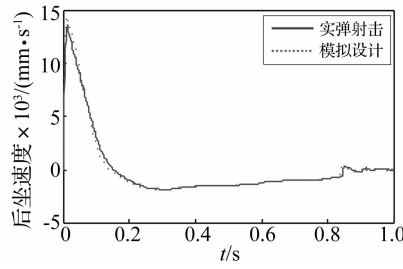


图 4 后坐速度对比

Fig. 4 The comparison of recoil velocity

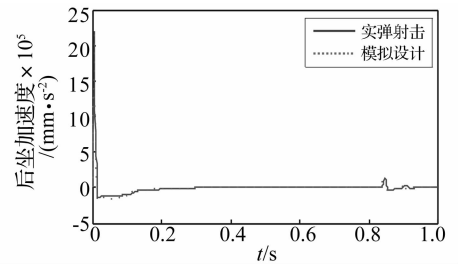


图 5 后坐加速度对比

Fig. 5 The comparison of recoil acceleration

3.1 曲线数值相似度

曲线数值相似度利用两曲线间距衡量^[8]。对时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 与 $X' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ 考虑 n 维空间两点, 记两点间距为 $D(X, X')$ 。 $D(X, X')$ 大小直接反映两曲线相似程度。用相对误差均值表示两曲线间距:

$$D(X, X') = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - x'_i|}{|x_i|} \quad (5)$$

曲线数值相似度定义为

$$S(X, X') = [1 - D(X, X')] \times 100\% \quad (6)$$

3.2 曲线形状相似度

曲线形状相似度可通过 Prony 变换提取曲线各分量频率、阻尼、能量、相位等特征, 利用直接比较实测曲线与仿真曲线在该特征差异评估仿真准确度^[9]。对试验台在冲击后坐时表现的强非线性 Prony 方法不适用, 具有一定局限性。而利用规范系数法对单模型进行准确度评估^[10], 因实测数据存在微小噪声扰动, 易产生计算误差, 影响评估结果。因此, 本文利用界标分界法能去除微小噪声优点, 提出评估系统仿真准确度新方法, 由曲线数值与曲线形状对仿真结果进行评估。

曲线形态特征主要由拐点即局部极值点描述, 称拐点为曲线界标。利用界标可重新描述与原曲线极相似图形。因此通过两序列界标评估其形状相似度, 即为界标分界法基本思想^[8]。界标分界法主要流程为

(1) 对时间序列规范化处理

$$\bar{x}_i = (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) \quad (7)$$

式中: x_i 为序列 X 中第 i 个序列元素; x_{\max}, x_{\min} 分别为序列 X 中最大、最小元素; \bar{x}_i 为变换后序列 \bar{X} 元素值, 属于 $[0, 1]$ 区间。

(2) 将时间序列 \bar{X} 进行相减运算, 获得新时间序列 Y :

$$y_i = (\bar{x}_{i+1} - \bar{x}_i) \quad (8)$$

式中: \bar{x}_{i+1}, \bar{x}_i 分别为 \bar{X} 中第 $i+1$ 及 i 个元素。

(3) 将时间序列 Y 中前一数值与后一数值相乘, 得新时间序列 Z :

$$z_i = y_i y_{i+1} \quad (9)$$

(4) 确定时间序列 Z 中负数的索引位置。将所得

索引值加 1 后获得新索引值, 则 \bar{X} 与之对应值即为局部极值。忽略时间序列 \bar{X} 中增幅小于 ε 且时间差值小于 ξ 的极值点, 其余点为序列 \bar{X} 的界标组合。 ε, ξ 值由时间序列中需滤除的噪声决定。

(5) 若 \bar{X} 有 n 个界标, 将 \bar{X} 分成 $n+1$ 个子段, 定义每个子段斜率为

$$k_i = (\bar{x}_{(j+1)} - \bar{x}_{(j)}) / \Delta t \quad (10)$$

式中: $\bar{x}_{(j)}$ 为序列 \bar{X} 第 j 个界标; Δt 为第 j 个界标与第 $j+1$ 个界标间时间长度。

在时间序列 \bar{X}, \bar{X}' 中, 若两子段斜率差在阈值范围内, 则称该两子段相似。用相似子段长度与序列长度比值作为序列形状相似性度量:

$$f(X, X') = \frac{\sum_{i=1}^n L(\bar{X}(i)) + L(\bar{X}'(i))}{L(X) + L(X')} \times 100\% \quad (11)$$

式中: 函数 $L(\square)$ 表示时间序列长度; n 为相似子序列个数。该方法能消除部分噪声对形状相似度影响, 可有效比较两条曲线形状相似性。

3.3 模拟准确度评估

火炮后坐运动含三物理量的模拟准确度为

$$V = \sum_{j=1}^3 \beta_j V_j(X_j, X'_j) \quad (12)$$

式中: $X_j (j=1 \sim 3)$ 为实弹射击时后坐位移、速度、加速度实测数列; X'_j 为模拟射击时相应数列; β_j 为各物理量模拟准确度对整体评估影响系数; $V_j(X_j, X'_j)$ 为每个物理量模拟准确度, 表达式为

$$V_j(X_j, X'_j) = \alpha S_j(X_j, X'_j) + (1 - \alpha) f_j(X_j, X'_j) \quad (13)$$

式中: $S_j(X_j, X'_j), f_j(X_j, X'_j)$ 分别为各物理量的数值相似度、形状相似度; $\alpha = 0.3$ 为数值相似度在曲线整体相似度的权重系数。

据实弹射击值、模拟射击仿真值分别计算实弹射击与模拟射击时后坐位移、速度、加速度曲线间数值相似度与形状相似度, 获得 3 物理量模拟相似度, 见表 2。结合各物理量权重系数, 获得火炮动力后坐试验台对实弹射击模拟准确度为 0.865 4。因此, 火炮动力后坐试验台能较准确模拟火炮实弹射击时后坐动态特性。

表2 各物理量相似度计算值及权重系数

Tab.2 Similarity result and weight coefficient of each physical quantity

	后坐位移	后坐速度	后坐加速度
相似度	0.870 2	0.851 2	0.871 9
权重	0.2	0.3	0.5

4 结 论

(1) 基于 ADAMS/ATV 软件,建立某自行火炮虚拟样机模型,并采用后坐主要动态参数对模型进行验证;结合波形发生器,建立火炮动力后坐试验台虚拟样机模型,获得炮口强冲击条件下后坐位移、速度及加速度仿真曲线。

(2) 通过用所提基于曲线数值相似度与形状相似度的射击模拟准确度评估方法评估表明,火炮动力后坐试验台能较准确模拟火炮实弹射击的动态过程。并获得火炮后坐动力后坐试验台对实弹射击的模拟准确度为 0.865 4。该方法可广泛用于火炮装备试验及验收。

参 考 文 献

[1] 张福三. 火炮定型试验中的理论与实践[M]. 北京:国防工业出版社, 2000.

[2] 姚养无. 火炮后坐仿真试验系统及其动力学数值仿真[J]. 兵工学报, 2001, 22(2): 152-155.
YAO Yang-wu. Simulation test system of gun recoil and numerical calculations [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(2):152-155.

[3] Cast M. Army test move to 'virtual proving ground' [J]. National defence, 2001, 11:62-64.

[4] 狄长春, 刘林, 郑坚, 等. 炮口冲击式火炮后坐模拟试验的数值分析[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(3): 323-327.
DI Chang-chun, LIU Lin, ZHENG Jian, et al. Numerical simulation on dynamic recoil test with gun muzzle subjected to high-velocity impact[J]. Explosive and Shock Waves, 2012, 32(3): 323-327.

[5] 李伟, 马吉胜, 李志强, 等. 履带车辆紧急制动动力学仿真分析[J]. 振动与冲击, 2009, 28(7): 179-182.
LI Wei, MA Ji-sheng, LI Zhi-qiang, et al. Dynamic simulation analysis for emergent braking of a tracked vehicle [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(7): 179-182.

[6] 吴大林, 马吉胜, 董自卫. 基于 ADAMS 的自行火炮悬挂装置振动分析[J]. 振动与冲击, 2005, 24(5): 39-41.
WU Da-lin, MA Ji-sheng, DONG Zi-wei. Vibration analysis of suspension system of self-propelled gun based on adams [J]. Journal of Vibration and Shock, 2005, 24(5): 39-41.

[7] 冯国华. ASQ700 跌落冲击试验机的半正弦跌落冲击试验模型分析[D]. 苏州:苏州大学, 2007.

[8] 周成. 电力系统动态仿真模型及参数有效性评估[D]. 北京:华北电力大学, 2010.

[9] 高松, 贺仁睦, 马进. 电力系统动态仿真误差评定准则研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 6-10.
GAO Song, HE Ren-mu, MA Jin. Error criteria on power system dynamic simulation validation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 6-10.

[10] 周成, 贺仁睦, 王吉利, 等. 电力系统元件模型仿真准确度评估[J]. 电网技术, 2009, 33(14): 12-15.
ZHOU Cheng, HE Ren-mu, WANG Ji-li, et al. Assessment on simulation accuracy of power system component model [J]. Power System Technology, 2009, 33(14): 12-15.

(上接第 100 页)

[9] 袁向荣, 卜建清, 满红高, 等. 移动荷载识别的函数逼近法[J]. 振动与冲击, 2000, 19(1): 58-60.
YUAN Xiang-rong, BU Jian-qing, MAN Hong-gao, et al. Function approximation in moving force identification [J]. Journal of Vibration and Shock, 2000, 19(1): 58-60.

[10] 余岭, Chan T H T. 桥梁时变移动车载的间接识别[J]. 振动工程学报, 2005, 18(1): 99-102.
YU Ling, Chan T H T. Indirect identification of time-varying moving vehicle loads on bridges [J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(1): 99-102.

[11] Law S S, Chan T H T, Zeng Q H. Moving force identification: a time domain method[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 201(1): 1-22.

[12] Law S S, Chan T H T, Zeng Q H. Moving force identification: a frequency-time domain method [J]. Journal of Dynamic System, Measure Control, ASME, 1999, 121: 394-401.

[13] Hansen P C. Regularization, GSVD and truncated GSVD[J]. BIT, 1989, 29(3): 491-504.

[14] 刘华林, 杨万麟. 基于 GSVD 的核不相关辨别子空间与雷

达目标识别[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(5): 1095-1098.
LIU Hua-lin, YANG Wan-lin. Radar target recognition based on kernel uncorrelated discriminant subspace of GSVD[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2009, 31(5):1095-1098.

[15] 宋辉, 刘加. 基于广义奇异值分解的通用旁瓣消除算法[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(3): 241-246.
SONG Hui, LIU Jia. GSVD-based generalized sidelobe canceller [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2011, 26(3): 241-246.

[16] 黄小为, 吴传生, 李卓球. TSVD 正则化方法的参数选取及数值计算[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2006, 40(2): 154-157.
HUANG Xiao-wei, WU Chuan-sheng, LI Zhuo-qiu. The choice of the TSVD regularization parameter and numerical computation for ill-posed problems [J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2006, 40(2): 154-157.