DOI: 10.11883/1001-1455(2015)01-0076-06

基于动能定理的火炮炮闩系统冲击试验台设计*

杨艳峰[1],郑 坚[1],狄长春[1],王宏凯[1],王 帅[2]
(1.军械工程学院,河北 石家庄 050003;
2.武汉军械士官学校,湖北 武汉 430075)

摘要:针对火炮射击条件下炮闩系统性能数据测量困难,提出将炮闩系统单独出来建立系统冲击试验台进行分析研究的思路。在确定了试验台设计原理的前提下,通过对自动开闩虚拟样机模型进行改进,建立了试验台原理模型。依据动能定理,确定了炮闩系统冲击试验台实现开闩所需的最小开闩力。在最小开闩力下,基于试验台原理模型分别对开闩板质量取初始值 m、$10m$、$50m$、$100m$ 时进行模拟实验,结果表明:4 种工况下皆未实现开闩,但随着开闩板质量的增加,外力做功损失的能量越小,曲柄转过角度越大,越容易实现开闩。研究结果可为试验台建立提供理论支撑。

关键词:爆炸力学;冲击试验台;动能定理;炮闩系统;虚拟样机
中图分类号:O389; TJ303.3 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

炮闩系统作为火炮关键子系统之一,是由击发机构、抽筒机构等多个机构组成的典型纯机械系统,各机构动作可靠性直接决定了火炮作战威力能否正常发挥,并且关系到武器本身完好和操作人员安全。各机构动作皆需借助系统开关闩这一主要动作完成,如图 1 所示,火炮开闩时,随着炮尾向前运动,其上曲柄撞击固定不动的开闩板而发生转动,从而通过开启机构将运动传递给闩体,使闩体下降,实现开闩,并压缩弹簧储存关闩能量;关闩时,弹簧伸张,通过关闭机构给闩体向上的力,闩体向上运动最终完成关闩。

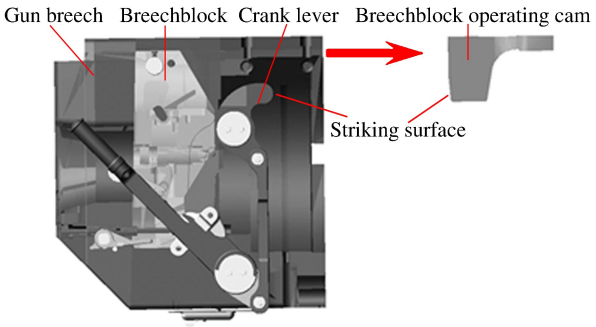

图 1 炮闩系统原始模型
Fig. 1 Original model of breech system

据统计,炮闩系统故障率已超过全炮故障的 30%[1]。因此对炮闩系统的可靠性研究十分重要。在火炮射击条件下很难对炮闩系统进行测试来获取实验数据,导致对系统的实体研究实验仍进行得太少。目前,炮闩系统研究主要以动力学理论为基础,通过理论计算及应用有限元技术、虚拟样机技术等进行机构动力学分析[2-3]、强度分析[4-5]、零部件故障分析预测[6]及优化设计研究[7-8]等。若将火炮炮闩系统单独提取出来建立试验台,进而对系统的各项指标进行测试来获取实验数据,并与设计说明书对比后进行调整改进,提高模拟真实火炮发射情况的可信度,将有利于炮闩系统各部件动力学特性的数据采集。

炮闩系统冲击试验台设计主要由炮闩系统、床身、液压缸、传动机构等组成,是一台机、电、液综合性实验设备,利用液压系统提供动力,通过传动机构将动力传递给炮闩系统实现开闩。其作用是可以模拟火炮射击过程中炮闩系统的动作,为系统中零部件动力学参数的测量提供方便。本文主要利用动能定理,并基于虚拟样机技术,对炮闩系统冲击试验台进行设计和模拟实验,为试验台的建立奠定理论基础。

* **收稿日期**:2013-06-13; **修回日期**:2013-10-17
基金项目:国家自然科学基金项目(50645019)
第一作者:杨艳峰(1988—),男,博士研究生,yyf2012yyf@163.com。

1　炮闩系统冲击试验台设计原理

在建立炮闩系统冲击试验台时，由于炮尾总质量非常大，如若模拟实际的火炮炮尾复进过程，则需大量的能量对其驱动，而且大质量的水平运动需要考虑质量更大、强度很高的床身对其进行支撑和固定；并且大质量的高速运动很难控制，冲击后容易发生倾倒偏移等问题，必须考虑缓冲等安全问题。所以，若想利用试验台实现与火炮发射时相同的炮尾运动情况，难度很大、稳定性较差、成本过高。

经过论证研究，确定试验台设计原理：采用以开闩板为运动部分冲击曲柄，炮尾被整体固定在试验台上，这样可以有效地减少床身质量和所需要的驱动能量，便于炮闩系统冲击试验台的建造。

2　炮闩系统冲击试验台模型建立

炮闩系统冲击试验台模型的建立是在已建立的炮闩系统原始模型基础上对约束和载荷进行修改完成的。炮闩系统原始模型是利用炮尾的运动进行开闩，以模拟实际的火炮发射情况。在建立模型时，将开闩板固定，炮尾在炮膛合力等外力作用下水平运动，如图 1 箭头所示，曲柄在随炮尾运动过程中，与开闩板碰撞并相互作用，最终完成开闩。

在炮闩系统冲击试验台原理模型建立过程中，依据已确定的设计原理，对炮闩系统原始模型进行改装，将模型中添加在炮尾的运动及力删去，修改为炮尾固定不动，将开闩板定义为水平运动并赋予一定力，沿原炮尾运动的逆方向冲击曲柄，进而实现开闩，如图 2 所示。

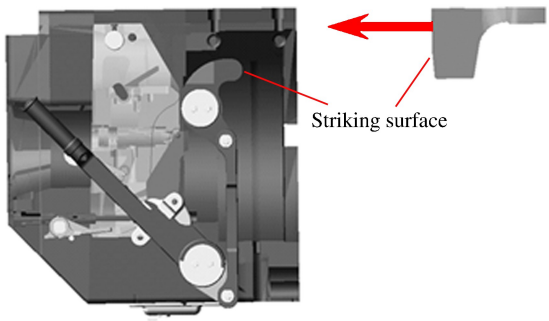

图 2　炮闩系统冲击试验台原理模型

Fig. 2　Principle model showing the shock test platform of breech system

3　基于动能定理的最小开闩力确定

由于炮闩系统冲击试验台是将开闩板作为运动部分去冲击与炮尾成旋转副的曲柄，所以开闩板的速度及质量是动作过程的关键，而且冲击在极短时间内完成，根据动量守恒定律，开闩板速度与质量的乘积必须达到一定值才可以推动曲柄进行开闩。开闩板的速度需要外力的作用，因此，质量速度配合实验就是利用不同的开闩板质量配合不同的作用力来定义开闩板的运动特性，使之达到一定的动量之后冲击曲柄进行开闩，将这一作用力定义为开闩力。

在试验台设计时，开闩板固定于箱体上，开闩板随箱体一起向前运动，且通过增减箱体内质量块来达到改变开闩板质量的目的；开闩推力则由液压力提供。开闩板在液压力推动下冲击曲柄，当曲柄与开闩板下端面开始接触，闩体运动到最低位置，此时只要开闩板还具有速度就可以向前运动到与曲柄分离，最终实现开闩。为计算系统实现开闩所需最小能量，假设此时开闩板速度降为 0。依据动能定理

$$E_{k2} - E_{k1} = W_{12} + W'_{12} \tag{1}$$

式中：E_{k1}、E_{k2} 分别为系统初始动能和终了动能，W_{12} 为保守力所做的功，W'_{12} 为非保守力所做的功。将 $W_{12} = E_{p1} - E_{p2}$ 代入，得：

$$E_{k2} - E_{k1} = E_{p1} - E_{p2} + W'_{12} \tag{2}$$

式中：E_{p1}、E_{p2} 分别为系统初始势能和终了势能，上式移项后，得：

$$(E_{k2} + E_{p2}) - (E_{k1} + E_{p1}) = W'_{12} \tag{3}$$

式(3)表明系统机械能变化等于非保守力做功。

定义开闩板开始运动为初始时刻，则系统动能和势能为

$$\begin{cases} E_{k1}=0 \\ E_{p1}=m_1gh_1+\dfrac{1}{2}k_1l_{11}^2+\dfrac{1}{2}k_2l_{21}^2+\dfrac{1}{2}k_3l_{31}^2 \end{cases} \tag{4}$$

式中：h_1 为闩体相对于零势能点的初始高度；k_i 为系统中弹簧刚度系数；l_{i1} 为弹簧初始变形量；$i=1,2,3$ 分别代表系统中关闭弹簧、击针簧、顶簧；m_1 为闩体及其上所有零部件的质量总和。

定义曲柄与开闩板下端面开始接触为末了时刻，则系统动能和势能为

$$\begin{cases} E_{k2}=0 \\ E_{p2}=m_1gh_2+\dfrac{1}{2}k_1l_{12}^2+\dfrac{1}{2}k_2l_{22}^2+\dfrac{1}{2}k_3l_{32}^2 \end{cases} \tag{5}$$

式中：h_2 为闩体相对于零势能点末了高度(闩体运动到最低位置时 $h_2=0$)；l_{i2} ($i=1,2,3$)为弹簧在开闩过程中的最大变形量，(考虑到顶簧是在开闩过程中达到最大压缩量，而开闩到位后又恢复到初始压缩量)。

在能量无损耗情况下(即不考虑开闩过程中构件间摩擦力作用或碰撞损失的能量等)，从开始时刻到末了时刻非保守力所做的功即为液压力做的功，即

$$W'_{12}=FS \tag{6}$$

式中：F 为液压系统提供的恒定力，S 为开闩板从初始位置到曲柄与开闩板下端面开始接触的位移。

将式(4)～(6)代入式(3)，整理得：

$$F=\frac{W'_{12}}{S}=\frac{m_1g(h_2-h_1)+\dfrac{1}{2}\sum_i^3 k_i(l_{i2}^2-l_{i1}^2)}{S} \tag{7}$$

将式中各参量代入计算，得液压力最小值，即最小开闩力理论值：

$$F_{min}=518.2\ \text{N}$$

4 模拟实验

4.1 开闩指标的确定

炮闩系统自动开闩过程中，曲柄冲击开闩板而转动，其转角 θ 随时间变化曲线如图 3 所示。图 3 中，在初始阶段，即曲柄冲击开闩板前，曲柄随炮尾水平向前运动，其转角为零，曲线保持水平；而后随炮尾继续向前运动，曲柄冲击开闩板，由于开闩板固定不动，曲柄发生转动，当曲柄转动角度 θ 达到 111.4°时，即可实现开闩。

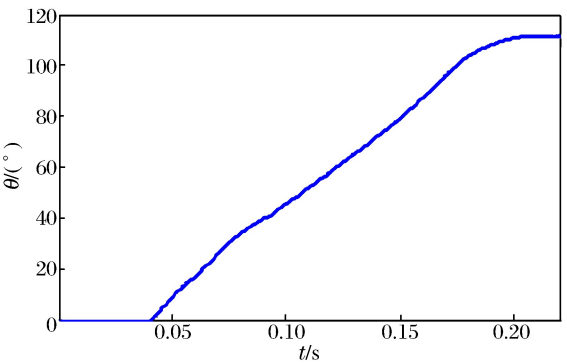

图 3 自动开闩时曲柄转动角度曲线

Fig. 3 Curve of the crank lever's rotation angle under auto breechblock operating

4.2 最小开闩力下开闩过程模拟

在建模时，给图 2 中的开闩板施加水平力 F_{min}，开闩板质量保持不变，而后进行模拟实验。通过测量，得到曲柄转角随时间变化曲线如图 4 所示。

图 4 中，曲柄最大转角 θ_{max} 仅为 19.2°，未达到开闩指标，故开闩力为 F_{min} 时，开闩板没有实现开闩而被推回，开闩板位移曲线如图 4 中虚线所示。在 $t=0$ 时，开闩板在力作用下开始运动；在 $t=0.044$ s 时，开闩板冲击曲柄使其转动，并继续向前运动；在 $t=0.108$ s时，开闩板位移达到最大值，此时速度降为 0，而后由于压缩弹簧所产生的反作用力大于开闩力，开闩板被曲柄推回；在 $t=0.198$ s 时，弹簧反作用力与开闩力达到平衡，致使开闩板与曲柄接触而保持静止。

在实际工况下，弹簧阻尼、零部件间的碰撞及相对运动产生的摩擦等必然会耗散系统的能量，因此

要想实现开闩，开闩力实际值要大于 F_{min}，其具体值需要通过实验来确定。而在不同开闩板质量、开闩距离工况下，实现开闩所需的开闩力不同。

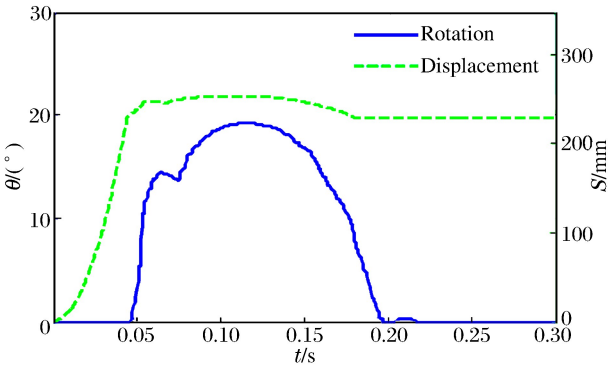

图 4　曲柄转角和开闩板位移曲线

Fig. 4　Curves of the crank lever's rotation angle and the breechblock operating cam's displacement

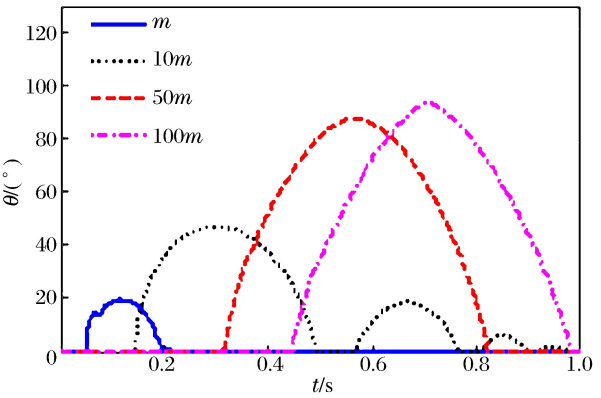

图 5　不同工况下曲柄转动角度曲线

Fig. 5　Curves of the crank lever's rotation angle under different working conditions

4.3　开闩板质量对开闩的影响

由于开闩板自身质量 m 很小，仅有 2 kg 左右，因此，在建立炮闩系统冲击试验台时，可以通过改变其质量来增加开闩板动量，从而尽可能地实现开闩。为了区分初始质量 m，用 M 表示改变后的开闩板质量，在液压力为 F_{min} 条件下，选取开闩板质量 M 分别为初始值 m、$10m$、$50m$、$100m$ 时冲击曲柄，测得曲柄转动角度随时间的变化曲线如图 5 所示。

图 5 显示，随着开闩板质量 M 的增加，开闩板冲击曲柄，而使曲柄转过的角度增大，那么，闩体下降的高度就会增大，即更容易实现开闩。4 种工况下，开闩板冲击曲柄时刻 t_s、第 1 次冲击持续作用时间 t_a 以及曲柄角度最大值 θ_{max} 如表 1 所示。

表 1　不同工况下开闩参数

Table 1　Parameters of breechblock operating under different working conditions

M	t_s/s	t_a/s	θ_{max}/(°)
m	0.047	0.153	19.2
$10m$	0.140	0.353	47.1
$50m$	0.314	0.511	87.6
$100m$	0.444	0.542	93.6

表 1 显示，随着开闩板质量的增加，冲击曲柄时刻滞后，但与曲柄相互作用时间延长，且曲柄可以转过的角度变大。这也由动能 E_k 与动量 p 间的关系

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{(mv)^2}{2m} = \frac{p^2}{2m} \tag{8}$$

得到验证。但是，由于外力对开闩板做功后，开闩能量不足，4 种工况下曲柄转角最大值皆小于 111.4°，即没有实现开闩，且曲柄回转，开闩板被推回，最后都保持在平衡位置，不同工况具体分析如下：

(1)在开闩板质量为初始值 m 时，由于其质量较小，在冲击曲柄前，所具有的冲量很小，冲击时使曲柄转动的角度就小，曲柄回转后保持一定角度达到平衡状态。

(2)在开闩板质量为 $10m$ 时，曲线波动性很明显，即曲柄与开闩板碰撞后转动，在与开闩板脱离接触后，曲柄回转到初始位置，随着冲击次数的增加，曲柄转过的角度逐渐减小，即曲线波峰值减小，且两个波峰的时间间隔减小，直至曲柄与开闩板件作用力与外力平衡而保持静止。

(3)在开闩板质量分别为 $50m$ 和 $100m$ 时，曲柄转角曲线同样会出现波动性，而图中仅绘制了第 1 次冲击作用过程曲线。2 种工况下，曲柄转过角度明显增大，接近开闩指标。

依据表 1 数据,进一步得到开闩板质量对开闩参数影响规律,如图 6 所示。从图 6 中不难看出,3 条曲线随着开闩板质量增大逐渐趋于平缓。即选取的开闩板质量越大,对开闩参数影响会减小。

为了计算系统在 4 种工况下外力所做的功,实验测得开闩板的位移曲线如图 7 所示。通过计算,得到开闩板在最大位移 S_{max} 处外力所做的功 W、曲柄最大转动角度时系统所增加的能量(有用功)W_1 及效率 η 如表 2 所示。表 2 显示,开闩板质量越大,冲击损失的能量越小,当开闩板质量为 $100m$ 时,损失的能量仅为 13.1%。因此,在开闩力一定的情况下,炮闩系统冲击试验台应当选取较大的开闩板质量。

将表 2 中数据绘制成如图 8 所示的曲线,由图 8 可知,随着开闩板质量的增加,3 条曲线逐渐趋于平缓,即选取的开闩板质量越大,对外力做功影响越小,这与开闩板质量对开闩参数影响规律相符合。

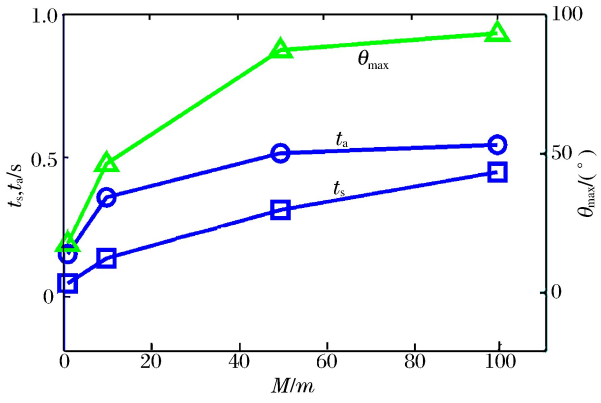

图 6 开闩板质量对开闩参数影响规律

Fig. 6 Influence of the mass of the breechblock operating cam on the parameters of breechblock operating

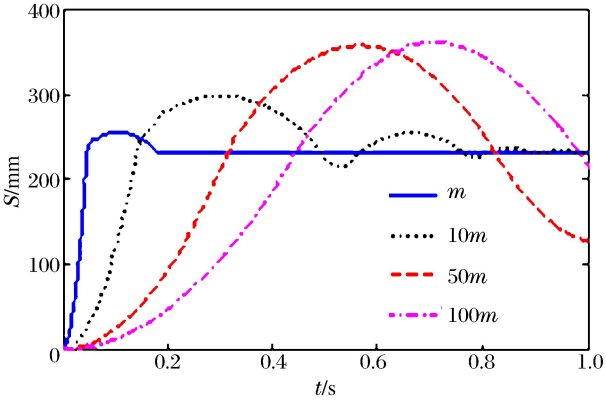

图 7 不同工况下开闩板位移曲线

Fig. 7 Curves of the breechblock operating cam's displacement under different working conditions

表 2 外力做功

Table 2 Work of the force

M	S_{max}/mm	W/J	W_1/J	η/%
m	255.0	132.1	19.2	14.5
$10m$	297.7	154.3	62.7	40.6
$50m$	355.6	184.3	147.3	79.9
$100m$	362.2	187.7	163.2	86.9

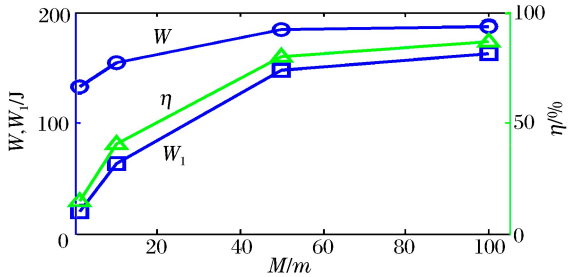

图 8 开闩板质量对外力做功影响规律

Fig. 8 Influence of the mass of breechblock operating cam on the work of the force

5 结 论

通过分析火炮实际射击条件下运动情况,确定了建立炮闩系统冲击试验台的原理:以开闩板冲击炮尾上的曲柄来实现开闩。在对已有自动开关闩模型进行修改基础上建立了炮闩系统冲击试验台原理模型。在不考虑能量损失的情况下,基于动能定理确定了实现开闩所需的最小开闩力。在最小开闩力下,分别对开闩板质量取初始值 m、$10m$、$50m$、$100m$ 时进行模拟实验,结果表明:4 种工况下皆未能实现开闩,但随着开闩板质量的增加,外力做功损失的能量越小,曲柄转过角度越大,越容易实现开闩,开闩参数及外力做功变化趋于平缓。

参考文献:

[1] 曹立军,秦俊奇,王兴贵.炮闩系统故障仿真预测系统研究[J].火炮发射与控制学报,2002(2):50-53.
Cao Li-jun, Qin Jun-qi, Wang Xing-gui. Research of fault simulation and prediction system for breech mechanism [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2002(2):50-53.

[2] 杜中华，王兴贵，马吉胜. 基于虚拟样机技术的某型火炮开闩过程动力学特性研究[J]. 机械工程学报，2004，40(6)：123-126.
Du Zhong-hua, Wang Xing-gui, Ma Ji-sheng. Research on guns breech-opening process dynamic characteristics based on prototype technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004,40(6):123-126.

[3] 石明全，刘雷，陈运生. 火炮开闩过程动力学分析[J]. 弹道学报，2003，15(2)：23-28.
Shi Ming-quan, Liu Lei, Chen Yun-sheng. Research on process of opening block and ejecting container of a certain gun[J]. Journal of Ballistics, 2003,15(2):23-28.

[4] 陈永才，李鹏，熊宜光. 炮闩闩体击针孔强度仿真计算与结构改进[J]. 军械工程学院学报，2009，21(2)：38-40.
Chen Yong-cai, Li Peng, Xiong Yi-guang. Analyzing the strength of gun breech block and upgrading the structure of gun firing pin[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2009,21(2):38-40.

[5] 谢锋，何行. 基于有限元模型的炮闩结构的静力学强度分析[J]. 科技情报开发与经济，2007，17(9)：182-183.
Xie Feng, He Hang. Analysis on the static strength of the breechblock structure based on FEM[J]. Sci-Tech Information Development&Economy, 2007,17(9):182-183.

[6] 张金忠，丛孟凯，张双喜，等. 125 mm 坦克炮炮闩抽筒装置故障仿真分析[J]. 火力与指挥控制，2012，37(7)：155-157.
Zhang Jin-zhong, Cong Meng-kai, Zhang Shuang-xi, et al. Research on failure analysis based on simulation about 125mm tank gun breechblock extractor mechanism[J]. Fire Control & Command Control, 2012,37(7):155-157.

[7] 项立银，顾克秋. 基于响应面法炮尾炮闩 6σ 稳健优化设计[J]. 机械制造与研究，2011，40(1)：20-22.
Xiang Li-yin, Gu Ke-qiu. 6σ Robust optimal design of breech and block's fillet based on respond surface method [J]. Machine Building Automation, 2011,40(1):20-22.

[8] 张建，唐文献，徐省省，等. 火炮炮闩抽筒子结构优化设计[J]. 兵工学报，2012，33(6)：647-651.
Zhang Jian, Tang Wen-xian, Xu Xing-xing, et al. Structural optimization design for breechblock extractor[J]. Acta Armamentarii, 2012,33(6):647-651.

Shock test platform design of gun breech system based on kinetic energy theorem

Yang Yan-feng[1], Zheng Jian[1], Di Chang-chun[1], Wang Hong-kai[1], Wang Shuai[2]
(1. *Ordnance Engineering College, Shijiazhuang* 050003, *Hebei, China*;
2. *Wuhan Ordnance Non Commissioned Officer Academy, Wuhan* 430075, *Hubei, China*)

Abstract: It is hard to performe measurement of breech system under condition of gun shooting. The idea, treating the system separately to establish shock test platform, is presented. With the design principle determined, the principle model of the shock test platform was established through the improvement on automatic breechblock operating virtual prototype model. The minimum force for shock test platform to open breechblock is determined based on the conservation theorem of kinetic energy. Under the minimum breechblock operating force, the simulation tests are performed based on the principle model when the mass of the breechblock operating cam has original values of m, $10m$, $50m$ or $100m$ separately. The results show that it is impossible to operate breechblock under the four working conditions. However, as the mass of breechblock operating cam increases, the losing energy du to the work of the force decreases and the rotation angle of the crank lever increases, which makes the open breechblock easier. The research provides theory support for test platform establishment.

Key words: mechanics of explosion; shock test platform; kinetic energy theorem; breech system; virtual prototype

(责任编辑　曾月蓉)