

文章编号 1004-924X(2014)07-1787-07

弹药精确装填可靠性分析及测试

张鹏军*, 王惠源, 李 强, 邢 杰
(中北大学 机电工程学院, 山西 太原 030051)

摘要:为了保证在复杂环境下连续工作的火炮自动装填机构装填参数的一致性,研究了火炮自动装填机构工作的可靠性及其测试方法。首先,分析了装填参数变化对内弹道参数的影响和导致参数变化的原因。然后,设计了多传感器装填参数测试系统,利用该系统对输弹过程和输弹效果进行了综合测试。测试结果表明:在装填开始 60 ms 左右装填机构尾部出现的峰峰值为 14 mm 的振动是影响弹丸入膛姿态并与身管尾端面碰撞的主要原因;当弹丸的挤入压力为 3 300~14 000 N 时,卡膛行程在 2 mm 内变化;根据密集度分布将卡膛行程分为三个区域,其中第二区域 1.321~1.557 mm 为可靠卡膛区。测试表明,所采用测试方法和精度能够满足装填机构的检测要求,可为装填机构的结构优化和性能评估提供数据支撑。

关键词:火炮;弹药装填;精确装填;随机振动;动态测试;装填可靠性

中图分类号:TJ306 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142207.1787

Analysis and test of reliability for ammunition accurate ramming

ZHANG Peng-jun*, WANG Hui-yuan, LI Qiang, XING Jie

(College of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

* Corresponding author, E-mail:14837467@qq.com

Abstract: To guarantee the consistency of ramming parameters of an automatic ramming system for artilleries working continuously in a complex circumstance, the reliability of automatic ramming system was explored and the measuring method was researched. Firstly, the effect of the ramming parameter change on interior ballistic parameters and the reasons of parameter change were analyzed. Then a ramming parameter test system based on multi-sensors was designed, and a general test for the ramming process and ramming effect was performed by the ramming test system. The test results show that the tail of the ramming system will vibrate with a peak-peak of 14 mm after ramming 60 ms, which is the main reason of projectile into the breech posture and collision with a barrel. Moreover, when bullet's invade resistance varies from 3 300 N to 14 000 N, the invade distance changes in 2 mm. The invade distance can be divided into three areas according to distribution, and the second area ranging from 1.321 mm to 1.557 mm is regarded as a reliable invade distance. These results demonstrate that the proposed measuring method and accuracy can meet the ramming system test demands, and can offer a data support for the structural optimization and performance evaluation of ramming systems.

收稿日期:2013-12-20;修订日期:2014-01-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175481);中北大学青年基金资助项目(No. 2012011702)

Key words: artillery; ammunition ramming; accurate ramming; random vibration; dynamic testing; ramming reliability

1 引言

随着自动化技术的不断进步,大口径火炮弹药的装填由人工装填逐渐被各类自动、半自动装填机构所取代。其中,用于火炮全射角的自动装填不受人的体力限制,可以实现高速射击^[1]。使用自动装填的大口径火炮连续射速在 10 发/分钟左右,爆发射速可达 3 发/10 秒^[2]。大口径火炮的装填机构工作在强冲击和振动的环境下,在不同的射角下要不断调整输弹能量,确保弹丸可靠挤入膛线^[3-4]。为了提高装填机构的可靠性,国内外学者做了大量的研究工作,其中赵森,钱勇等人系统地分析了由于装填参数变化引起的初速变化和射击误差,在 6 000 m 的射击距离上弹着点偏差量可达到 71 m^[5]。闫纯亮,潘宏侠等人仿真分析了火炮弹药自动装填机构动态参数卡膛速度,并设计了弹药卡膛姿态的测量方法^[6]。中北大学的曲振森^[7]、西北机电工程研究所的骆小平^[8]都对不同射角下的输弹能量进行了理论分析和计算。

在高速装填过程中系统的各部件都处于高速运动状态,故不能将装填机构的运动过程当作刚体来研究。对系统的测试是动态特性分析和故障诊断的一种常用手段,通过控制装填机构的振动,消除和抑制其柔性结构的振动,有利于提高装填机构的工作寿命和装填精度。本文进一步分析了自动装填机构装填参数变化的原因及其对内弹道的影响,设计并实现了装填参数综合测试系统,对装填过程和装填结果进行了测试和分析。实验证明,该测试系统可用于装填机构的综合性能测试,具有全面、快速、准确的特点。

2 弹药装填对内弹道的影响及分析

2.1 弹药装填等效模型

装填过程的等效物理模型如图 1 所示,质量为 m 的弹药在运动过程中受到多个力的作用,假

定在推弹过程中弹丸中心线与身管中心线始终保持一致,忽略弹丸与身管内壁的碰撞,作用在弹药上的力就有输弹臂的推力 F 、弹丸与输弹板的摩擦力 $\mu mg \cos \theta$ 、弹丸的重力分量 $mg \sin \theta$ 。

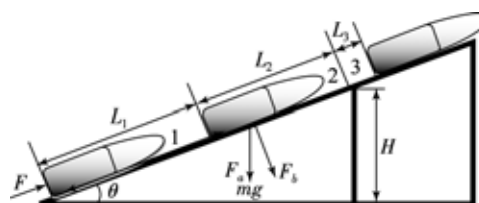


图 1 装填等效模型

Fig. 1 Equivalent model of ramming

根据弹药受力情况,将弹药装填过程分为三个阶段。第一阶段输弹臂推动弹丸向前加速运行,这个阶段属于强制输弹过程,运动行程为 L_1 ,输弹臂与弹丸分离时的弹丸速度为 v_1 , v_1 由当前射角决定。

$$E_1 = FL_1 = mgL_1(v_1^2/2gL_1 + \sin \theta + \mu \cos \theta). \quad (1)$$

第二阶段弹丸依靠惯性继续向前运动,运动行程为 L_2 ,弹丸受到重力、摩擦力的影响,速度由 v_1 逐步衰减到 v_2 。

$$E_2 = m(v_1^2 - v_2^2)/2 = mgL_2(\sin \theta + \mu \cos \theta). \quad (2)$$

第三阶段弹丸将剩余的能量全部用于挤入膛线,速度衰减为零。 L_3 是弹丸挤入膛线行程,卡膛行程的一致性就是指 L_3 在很小的范围内变化。 v_2 为弹丸挤入膛线时的初始速度,也称为卡膛速度。

$$E_3 = mv_2^2/2. \quad (3)$$

2.2 自动输弹对药室初始容积的影响

影响火炮内弹道产生的装填条件包括火药形状、装药量、火药力、药室容积、挤进压力、拔弹力(定装弹)等因素。输弹过程只会影响弹丸挤进压力和药室容积。

自动输弹需要在不同的射角下输出不同的能量以确保装填的一致性,但由于输弹过程中振动、

碰撞等多方面的影响,即使输弹能量一致的情况下,弹丸挤入膛线的初始行程也会出现不一致的情况,从而导致药室的初始容积不一致。设炮膛横断面积为 S ,当输弹时弹丸运动行程为 l 即可实现卡膛。此时药室容积为 V_0 ,但如果输弹能量过大,弹丸就会继续向前运动 Δl ,那么药室的初始容积从 V_0 变成 $V_0 + \Delta l S$,如图 2 所示。

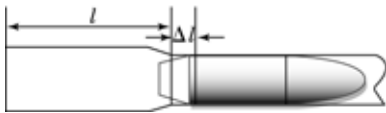


图 2 输弹力的变化导致的药室容积变化

Fig. 2 Chamber volume changes caused by change of ramming force

2.3 装填过程对弹带阻力的影响

根据弹丸膛内运动过程的受力分析可知,弹丸在内弹道期间主要受到弹底燃气压力 $S p_d$ 、弹丸挤进阻力 F_R 、膛线导转侧作用在弹带上的力 F_M 和弹前空气阻力 F_A 的作用,受力关系为:

$$m \frac{dv}{dt} = S p_d - (F_R + F_M + F_A). \quad (4)$$

装填过程主要会对 F_M 和 F_R 产生影响,当弹丸开始挤入膛线时须赋予弹丸一定的初始速度 v_0 ,使弹带前的锥形切面与药室前坡膛密切接触完成定位,使药室处于一个密闭状态。由于药室直径大于弹丸直径,而弹带直径通常比身管阴线的直径大 0.5 mm 左右,因此装填结束后弹丸轴线与身管轴线可能会存在一个夹角,如图 3 所示。



图 3 弹丸装填偏移

Fig. 3 Offset of projectile ramming

在内弹道期间,由于弹丸姿态的倾斜,初始状态下弹带两侧的塑性变形量不一致,会导致弹丸挤进阻力和膛线导转侧作用在弹带上的力 F_M 发生变化。

挤进阻力 F_R 是指火药气体使弹带产生塑性变形挤入膛线,奥波波可夫将挤进阻力等效为弹

丸行程的线性函数^[9]:

$$F_R = F_{R0} + F_{\Delta R0} \frac{d}{d_0}, \quad (5)$$

其中: F_{R0} 为启动阻力, $F_{\Delta R0}$ 为挤进完成时的阻力增量, d 为弹丸行程, d_0 为弹带宽度。如果输弹机输出能量大,则 F_{R0} 和 L_0 增大, L_0 为弹带已经挤入的长度,因此 d_0 减小,内弹道的挤进阻力变大。

3 装填参数综合测试系统

3.1 装填过程测试方案

弹药装填机构在恶劣的环境下工作,在工作时会受到路面颠簸、车体振动和输弹机构自身振动的影响^[10]。弹药装填机构工作时,弹丸沿输弹导槽做直线运动,直至挤入膛线后停止。由于在高角装填时装填机构需要赋予弹药较大的初速,因此系统的工作时间随射角的增大而减小,被测装填机构在 $0 \sim 70^\circ$ 射角时的装填速度为 $3.15 \sim 4.98$ m/s,系统的工作时间为 $363 \sim 492$ ms。

采用单轴倾角传感器测量装填射角,传感器的测量范围为 $\pm 90^\circ$,分辨率小于 0.004° 。振动位移测试采用长距离高精度 CCD 激光位移传感器,采样率为 50 kHz,测试精度为 $2 \mu\text{m}$,测试系统通过激光位移传感器分别测试装填机构 4 个位置的振动位移,测试方案如图 4 所示。

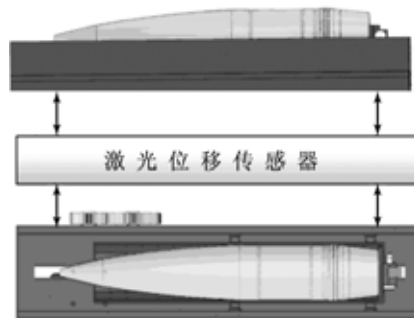


图 4 装填过程振动测试原理

Fig. 4 Test principle of vibration in ramming process

另外,弹丸在高速入膛过程中与身管内壁碰撞产生冲击振动,冲击加速度过大则会触发引信,造成重大安全事故^[11]。通过三轴加速度传感器测试引信受到的冲击加速度,采用三轴压阻式加速度传感器,三轴向的量程为 ± 500 g,频率响应为 $0 \sim 1500$ Hz,非线性为 $\pm 1\%$ 。测试方法采用存储测试原理,将弹丸原有引信拆除,设计加工了

与原引信的大小、质量一致的测试装置,将三轴加速度传感器、信号调理电路、数据采集存储电路、控制电路、通信接口、电源等集成在其内部。系统能够实现 4 h 的连续工作,采用信号触发的方式启动采集,每次装填结束后,读取一次测试信号。系统结构如图 5 所示。

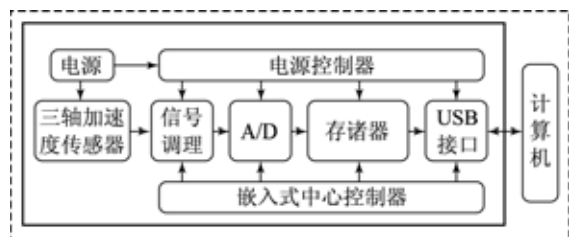


图 5 引信存储测试系统

Fig. 5 Test system of fuse memory

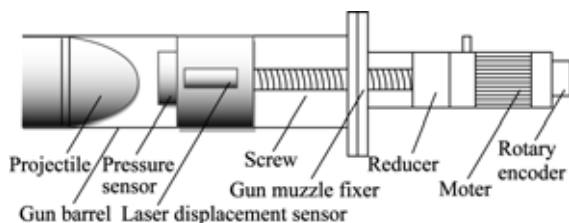
3.2 装填效果测试方案

装填参数的一致性体现在弹丸卡膛行程 L_3 和挤入阻力 F_R 的大小,它们分别通过激光测距传感器和压力传感器进行测量。另外,由于在输弹机的研制和实验过程中,需要将弹丸在不同射角下反复输入膛线,以验证输弹过程的可靠性,输弹结束后需再将弹丸退出膛管,确保下一次输弹的顺利进行^[12-13]。因此,设计的装填参数测试系统集测试和自动退弹功能为一体,其结构如图 3 所示。



(a) 工作状态及外形

(a) Working state and configuration of testing system



(b) 系统组成及结构

(b) System composition and its structure

图 6 弹丸膛内运动测试系统

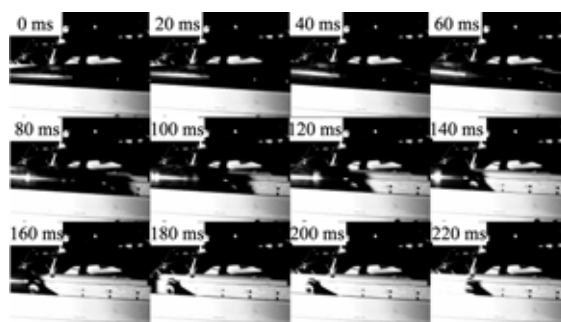
Fig. 6 Test system of projectile movement in bore

采用伺服电机实现退弹臂的往复运动,定位精度为 0.01 mm,每次装填前退弹臂运动至固定位置。激光位移传感器安装在退弹臂上,用以测量弹丸的卡膛行程与卡膛速度。由于无法直接测量挤入阻力,因此采用测量退弹压力的方法间接进行测量。装填结束后,电机驱动推弹臂向前运动,压力传感器直接作用于弹丸将其退出膛管,压力传感器的量程为 10~2 000 kg,精度为 1%。

4 测试结果及分析

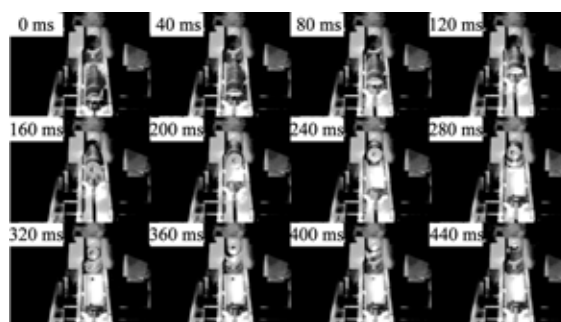
4.1 输弹过程测试

测试中用高速摄影机通过两个角度,以 1 000 frame/s 的速度记录装填过程中的高速运动过程,如图 7 所示。



(a) 输弹臂与弹丸分离过程

(a) Separation process of arm and projectile



(b) 弹丸入膛过程

(b) Entering process of projectile to bore

图 7 输弹过程高速摄影

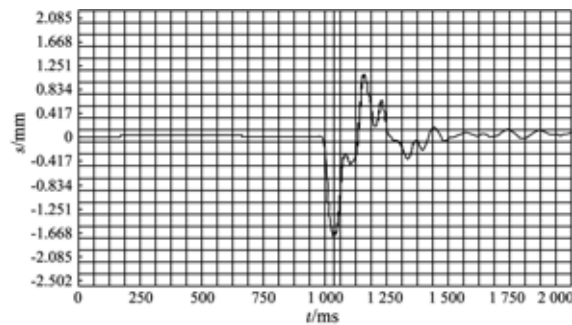
Fig. 7 Ramming process by high speed photography

在图 7(a)是沿垂直于弹丸运动方向拍摄得到的图像。输弹机开始工作后,输弹臂驱动弹丸向前运动,在运行至 160 ms 处,输弹臂与弹丸分离,弹丸靠惯性挤入膛线。在推弹臂推动弹丸运

动的起动阶段,由于加速度较大而使弹丸重心前移,装填机尾部翘起造成弹丸低头现象,从而影响弹丸的运动姿态。图 7(b)是沿弹丸运动方向拍摄得到的图像,可以看出弹丸在进入炮尾时,弹丸轴线与炮膛轴线不重合,弹丸会与炮尾发生多次碰撞,造成能量损失,降低了系统的可靠性。

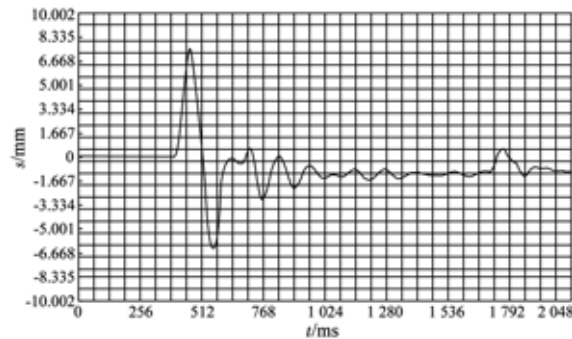
4.2 输弹机振动测试

采用图 4 的测试方案对输弹机在输弹过程中的振动进行测试,得到的测试曲线如图 8 所示。



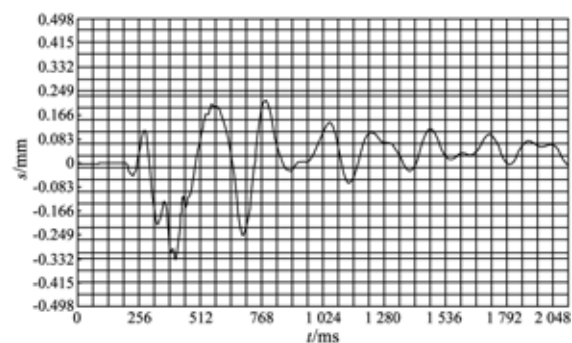
(a)前端纵向振动曲线

(a) Front longitudinal vibration curve



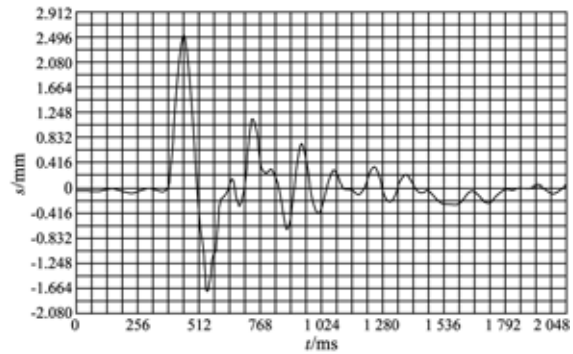
(b)后端纵向振动曲线

(b) Rear longitudinal vibration curve



(c)前端横向摆动曲线

(c) Front lateral swing curve



(d)后端横向摆动曲线

(d) Rear lateral swing curve

图 8 30°射角输弹机装填位移曲线

Fig. 8 Vibration and swing curves of ramming machine rammed at 30° fire angle

表 1 振动测量结果

Tab. 1 Measuring results of vibration (mm)

	测量位置			
	前端纵向	后端纵向	前端横向	后端横向
正向峰值/mm	1.237	7.853	0.185	2.513
反向峰值/mm	1.782	6.954	0.378	1.664

从测试结果可知,输弹机后端纵向振动量最大。经过多次测量,振动的峰峰值为 12~14 mm,而且在输弹结束后有 2 mm 左右的变形量不能快速归位,高速装填时影响弹丸的运动姿态。通过增强装填机构刚体强度的方法对此振动进行抑制后,弹药的装填效果得到了明显的改善。

4.3 引信冲击加速度测试

弹丸高速进入身管后会与身管内壁发生碰撞,本文利用引信加速度存储测试系统,测试了产生的冲击加速度对弹丸的引信产生影响,在多个射角下测试了引信部分的加速度,测试数据如图 9、表 2 所示。所测的装填机构在装填时对引信的冲击加速度满足引信安全标准。

表 2 引信冲击加速度

Tab. 2 Impact acceleration of fuse

火炮射角/(°)	0	30	45	70
最大冲击 加速度/g	206.12	330.6	310.2	316.32

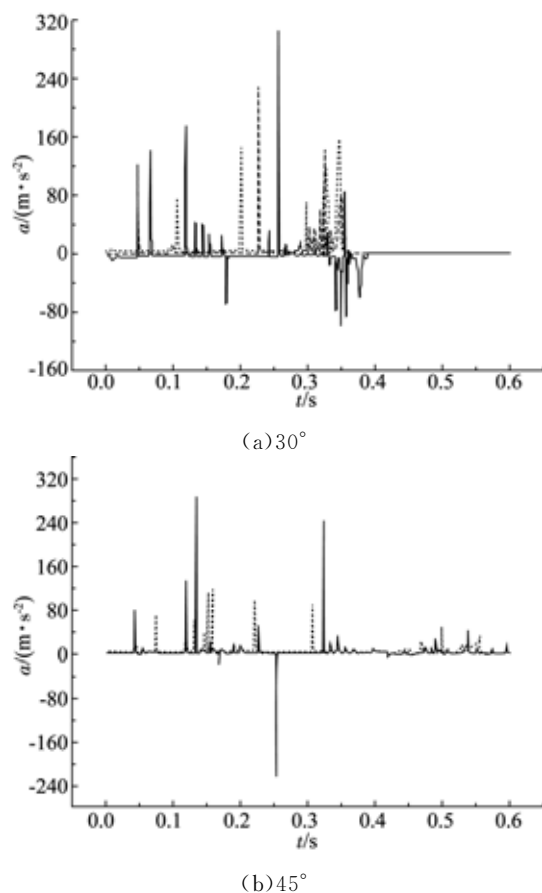


图 9 不同射角下引信加速度的变化曲线

Fig. 9 Impact acceleration curves of fuse at different fire angles

4.4 弹丸卡膛力与卡膛行程测试

通过激光位移传感器和压力传感器测量弹丸卡膛力和弹丸卡膛行程。试验中,使装填机构在同一射角下完成 30 次装填动作,试验测试数据如图 10 所示。

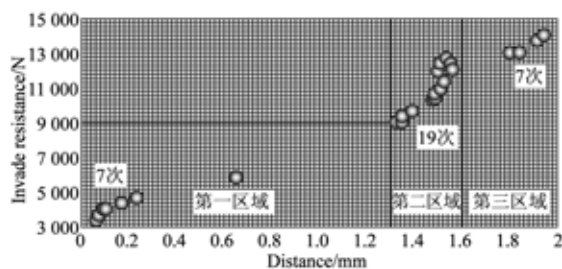


图 10 弹丸卡膛行程与卡膛力关系

Fig. 10 Relation between invade distance and invade resistance

参考文献:

[1] 侯保林. 火炮自动装填[M]. 北京:兵器工业出版社, 2010:5-57.

由图 10 的测试数据可以看出,弹丸卡膛的行程在 2 mm 范围内变化,卡膛力为 3 000~15 000 N,弹丸的卡膛力随着弹丸挤入膛线行程的增加而线性增加。

测试数据分布在三个区域上,第一个区域的长度为 1.255 mm,距离为 0.066~1.321 mm,卡膛力从 3 345 N 增加到 9 000 N,有 6 次输弹在这个范围内,卡膛力的变化率为 4 780 N/mm。在这个区域弹丸刚刚挤入膛线,弹丸动能的变化会导致行程大范围的波动,称为临界区域。

第二个区域长度为 0.236 mm,距离为 1.321~1.557 mm,卡膛力从 9 031.5 N 增加到 12 042 N,有 18 次输弹在这个范围内,卡膛力变化率为 12 756 N/mm。在这个范围内初始能量的变化对卡膛行程的影响较小,弹丸的输弹能量调节范围余量较大,将这个区域定义为可靠卡膛区域。

第三个区域为 1.557~1.944 mm 的 0.387 mm 内,卡膛力从 13 045 N 到 14 049 N。卡膛力的变化率为 2 594 N/mm,在这个阶段弹丸继续向前运动,卡膛力也不会明显提高,称为过载阶段。

卡膛行程是由弹丸挤入膛线时的初始动能决定的,所以应使弹丸卡膛行程在第二个区域。在这个区域卡膛行程对输弹能量的变化最不敏感,即使由于碰撞或其它因素造成能量损失,卡膛行程变化也不大;而在第一区域和第三区域,输弹能量的变化会导致行程的剧烈变化。

5 结 论

本文根据装填机构的工作特点,建立了输弹过程等效模型,分析了装填参数对内弹道模型的影响。利用装填参数综合测试系统对系统的动态和静态参数进行测试。测试结果表明,采取抑制装填机构的工作振动,控制弹丸姿态来降低弹丸与身管内壁的碰撞,并合理控制输弹能量,可将装填机构的装填误差控制在 0.2 mm 的范围内。

HOU B L. *Gun Automatic Handling*[M]. Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry, 2010: 5-57. (in Chinese)

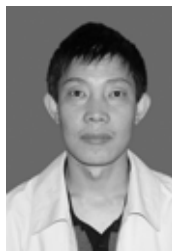
[2] 刘琮敏,孙大鹏,范志国. 中大口径火炮弹药自动装

- 填技术[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 137(9): 93-97.
- LIU C M, SUN D P, FAN ZH G. Automatic ammunition handling technique of medium and large caliber gun[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2013, 137(9): 93-97. (in Chinese)
- [3] 孙泽林, 王昭, 李明. 火炮稳定精度图像测试系统[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 157-164.
- SUN Z L, WANG ZH, LI M. Image test system for gun stabilization accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 157-164. (in Chinese)
- [4] 张舜杰, 扬义橡, 李迪, 等. 自动影像测量系统关键算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 295-301.
- ZHANG W J, YANG Y X, LI D, *et al.*. Key algorithms of automatic image measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 295-301. (in Chinese)
- [5] 赵森, 钱勇. 自行火炮半自动装填机构输弹问题研究[J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 592-594.
- ZHAO S, QIAN Y. Ammunition ramming of semi-automatic loading device of the self-propelled gun [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(5): 592-594. (in Chinese)
- [6] 闫纯亮, 潘宏侠, 刘广璞. 某火炮自动装填机构参数测试技术研究[J]. 机械工程与自动化, 2009, 157(12): 87-91.
- YAN CH L, PAN H X, LIU G P. Test technique of the technical parameters of self-loading artillery [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2009, 157(12): 87-91. (in Chinese)
- [7] 曲振森, 薄玉成, 王惠源, 等. 臂式输弹机的结构设计和仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2012, 125(3): 64-67.
- QU ZH S, BO Y CH, WANG H Y, *et al.*. Structural design and simulation analysis of dynamoelectric arm-type rammer [J]. *Journal of Gun Launch Control*, 2012, 125(3): 64-67. (in Chinese)
- [8] 骆小平, 侯立国, 解凤娟, 等. 某弹射输弹机卡膛故障研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 129(1): 56-58.
- LUO X P, HOU L G, XIE F J, *et al.*. Study on bayonet-chamber of a flick rammer [J]. *Journal of Gun Launch Control*, 2013, 129(1): 56-58. (in Chinese)
- [9] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007: 10-15.
- JIN ZH M. *Gun Interior Ballistics* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 10-15. (in Chinese)
- [10] 钱政. 测试误差分析与数据处理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
- QIAN ZH. *The Testing Error Analysis and Data Processing* [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008. (in Chinese)
- [11] 总装备部. GJB 2977A-2006 火炮静态检测方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- General Armament Department, GJB 2977A-2006 *Inspecting and Measuring for Static Gun* [S]. Beijing: China Standard Press, 2006. (in Chinese)
- [12] KALISZ J, SZPLET R, PONIECKI A. Field programmable gate array based time-to-digital converter with 200-ps resolution[J]. *IEEE Trans.*, 1997, 46(1): 51-55.
- [13] 刘琮敏, 李涛, 郑海鹏. 多路位置控制在大口径自行火炮弹药自动装填系统上的实现[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(2): 32-34.
- LIU C M, LI T, ZHENG H P. Realization of multi-path position control for large caliber self-propelled gun automatic ammunition handling system [J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2008(2): 32-34. (in Chinese)

作者简介:



张鹏军(1980—),男,山西定襄人,博士,讲师,硕士生导师,2002年于华北工学院自动控制系获学士学位,2005年、2013年于中北大学分别获得硕士、博士学位,主要从事高射速发射理论与技术,兵器测控技术的研究。E-mail: 14837467@qq.com.



王惠源(1965—),男,河北清苑人,教授,博士,博士生导师,1986年于太原机械学院获得学士学位,2001年于华北工学院获得硕士学位,2005年于中北大学获得博士学位,主要从事火炮自动武器仿真技术、大口径火炮输弹技术方面的研究。E-mail: wanghuiyuan@nuc.edu.cn.

(版权所有 未经许可 不得转载)