

doi: 10.7690/bgzdh.2022.05.001

坦克炮驻退机节制环磨损状态评估方法

李 华¹, 曹振地¹, 徐 达¹, 李惠彬²

(1. 陆军装甲兵学院兵器与控制系, 北京 100072; 2. 北京理工大学机械与车辆学院, 北京 100081)

摘要: 针对坦克炮驻退机节制环磨损故障规律, 提出一种磨损状态评估方法。对坦克炮驻退机节制环磨损状态-非磨损状态进行对比分析, 采用模拟仿真获取节制环不同磨损状态下的后坐、复进参数; 分析对比特性参数的变化规律, 找出节制环磨损状态与后坐复进参数的对比关系, 得出特征变化规律。仿真结果表明, 该方法能为实时了解驻退机技术状态奠定基础。

关键词: 坦克炮驻退机; 节制环; 磨损; 仿真计算; 规律研究; 获取参数

中图分类号: TJ38 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Tank Gun Recoil Mechanism Throttle Ring Wear Condition

Li Hua¹, Cao Zhendi¹, Xu Da¹, Li Huibing²

(1. Department of Weapon and Control, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;
2. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: According to the wear fault law of the throttle ring in the recoil mechanism of tank gun, a wear condition evaluation method is proposed. The wear state and non-wear state of the throttle ring in the recoil mechanism of the tank gun were compared and analyzed, and the recoil and counter-recoil parameters of the throttle ring in different wear States were obtained by simulation; the variation law of the characteristic parameters was analyzed and compared to find out the contrast relationship between the wear state of the throttle ring and the counter-recoil parameters, and the characteristic variation law was obtained. The simulation results show that the method lays a foundation for real-time understanding of the technical status of the recoil mechanism.

Keywords: tank gun recoil mechanism; throttle ring; wear; simulation calculation; law study; parameter acquisition

0 引言

节制环是坦克炮驻退机中重要的精密金属部件, 制造工艺复杂, 生产成本较高。坦克炮使用过程中, 节制环在驻退液的冲刷和腐蚀下极易发生磨损, 导致反后坐性能严重下降^[1]。节制环磨损程度的确定一直是坦克炮使用单位和装备修理工厂的难题。当前, 节制环磨损程度确定主要有以下方法:

1) 分解坦克炮驻退机, 由技术人员进行测量估算;
2) 通过驻退液检测, 分析其中磨粒成分, 确定其磨损程度^[1]。这 2 种方法具有一定的可行性, 但第 1 种方法需要进行分解, 较为耗时, 同时测量和估算方法存在一定的误差, 对节制环磨损的程度评估精确性不高; 第 2 种方法由于涉及取液, 通常是在射击后驻退液恢复常温或火炮较长时间静置之后才进行, 与实际制退液中磨粒含量有区别, 在检测方法上对操作人员技能水平要求较高, 同样不能较好地保证检测精度。这 2 种方法都是在火炮非工作期间才能实施, 所做的工作通常事后维修或者检测。对

于存在的问题, 提出实现工作状态下的节制环磨损状态评估, 是一种评估方法的改进和创新。笔者通过对节制环磨损故障情况在后坐、复进过程中出现的变化进行分析, 掌握其变化规律及故障关联特性, 得出能够被传感器综合测定的关键技术参数。最终, 通过综合处理技术参数与振动测试关系, 实现利用振动监测方法对驻退机节制环磨损状态进行评估。

1 驻退机工作原理

驻退机由驻退机筒、驻退杆、节制杆、紧塞器及调节装置等组成^[2](如图 1 所示), 位于坦克炮尾部右侧, 用于消耗坦克炮后坐时的后坐动能, 使坦克炮后坐保持一定后坐长度, 并调节坦克炮的复进速度, 以保证坦克炮复进平稳。后坐时, 通过节制环与活塞配合与流液相互作用, 产生制退主要液压力; 一部分液体沿制退杆内腔与节制杆之间的环形间隙, 流经调速筒斜孔, 冲开调速筒活瓣, 进入并充满复进节制腔, 由此产生部分后坐液压力, 在驻退机工作过程中, 节制环发挥了重要作用^[3]。

收稿日期: 2022-01-27; 修回日期: 2022-02-18

作者简介: 李 华(1978—), 女, 山西人, 博士, 副教授, 从事兵器发射理论与技术研究。E-mail: iuanne@163.com。

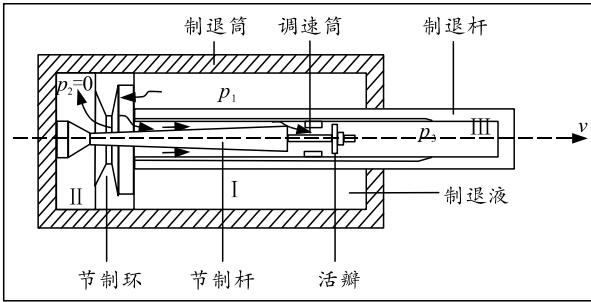


图 1 驻退机工作原理

2 节制环的磨损机理

工作过程中，节制环磨损的主要原因有 3 点：

- 1) 制退液的腐蚀作用，导致节制环镀层和金属成分溶解；
- 2) 高温、高压、高速液体和混合在其中的金属磨粒作用于节制环表面，造成冲击磨损；
- 3) 制退过程中，制退液和气体混合作用，对表面造成气蚀，从而在表面形成大小不一、深浅不同的凹坑，直至失效。

对节制环的磨损原因及机理，王芳^[4]通过建立驻退机简化物理模型进行有限元模拟计算，分析了节制环磨损的故障原因与失效机理。周成^[5]通过有限元方法，对不同直径颗粒分别以不同角度冲击节制环时的冲蚀磨损量进行了数值模拟，分析出节制环壁面产生负压引起空蚀以及混杂的固体杂质造成冲蚀磨损是导致节制环磨损的主要原因。张晓东^[6]利用计算流体动力学方法建立驻退机 2 维模型，探索节制环不同磨损状态下火炮后坐特性变化规律。赵建新^[7]基于空泡动力学理论，研究了空蚀对后坐特性的影响。崔凯波等^[8]结合大口径火炮驻退机节制环，基于金属材料学理论、微观分析技术和光谱测量方法，研究了节制环的微观组织特征和磨损机制，证实了节制环磨损的客观存在。

3 后坐复进运动计算与模型验证

坦克炮反后坐装置动力学方程^[2]：以炮膛轴线为 x 轴，根据牛顿第二定律，建立 HP 装备后坐运动微分方程为：

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= v \\ dv/dt &= (F_{pt} - F_R)/m_h \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

复进运动微分方程为：

$$\left. \begin{aligned} dx/dt &= v \\ dv/dt &= (F_f - F_{\phi_f} - (F + F_T + m_h g \sin \varphi)) / m_h \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 F_{pt} 为炮膛合力，根据某研究所提供的实验数据，拟合得到坦克炮炮膛合力公式为：

$$F_{pt} = \begin{cases} S_{\text{膛膛}} p_{t \max} \sin(2\pi/2t_g)t = 6907819 \sin 170.85\pi, & 0 \leq t < t_g = 5.85 \text{ ms} \\ 1326335, t = t_g = 5.85 \text{ ms} \\ F_g e^{-(t-t_g)/b} = 1326335 e^{-(t-0.00585)/0.004}, & t_g = 5.85 \text{ ms} < t \leq t_k = 58.01 \text{ ms} \\ 0, t > t_k = 58.01 \text{ ms} \end{cases} \quad (3)$$

$$F_R = F_{\phi_h} + F_f + F + F_T - m_h g \sin \varphi. \quad (4)$$

式中： m_h 为后坐部分质量； x 为后坐位移； t 为后坐时间； F_{pt} 为炮膛合力； F_R 为后坐阻力； F_{ϕ_h} 为驻退机液压阻力； F_f 为复进机力； F_T 为摇架导轨的总摩擦阻力； φ 为射角； v 为后坐速度； K_1 、 K_2 为液压阻力系数； A_0 为制退活塞工作面积； A_P 为节制环活塞工作面积； ρ 为制退液密度； a_x 为节制杆截面的液孔面积； A_f 为复进节制腔压力作用面积； A_1 为支流最小截面积。

将坦克炮及反后坐装置基本参数代入式(1)–(4)，并取射角为 0，对微分方程(1)和(2)采用 Matlab 中的四级五阶 Runge-Kutta 法的 ode45 函数求解^[9]。得到 0 射角下的后坐特性曲线如图 2—6 所示。

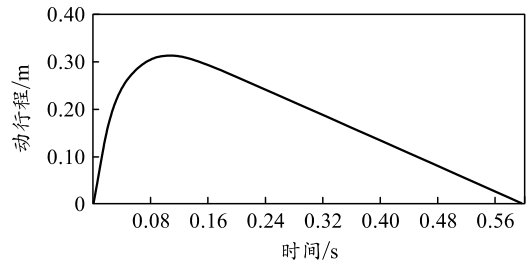


图 2 后坐与复进动行程-时间曲线

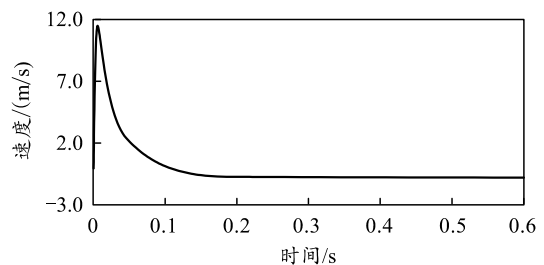


图 3 后坐与复进速度-时间曲线

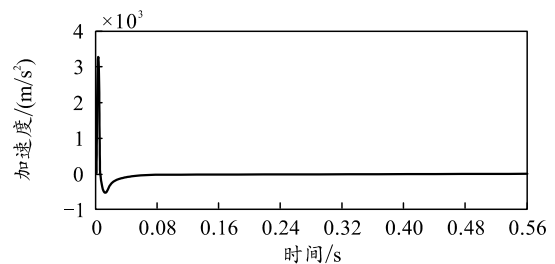


图 4 后坐与复进加速度-时间曲线

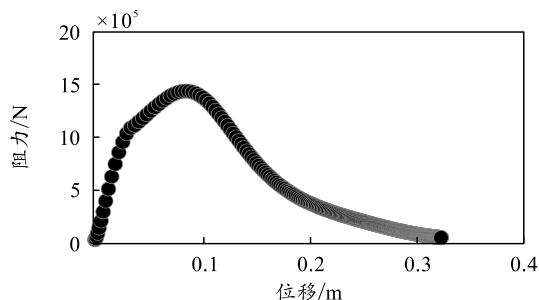


图 5 后坐阻力-后坐位移曲线

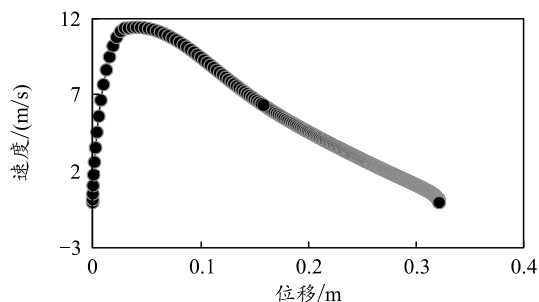


图 6 后坐速度-后坐位移曲线

由以上装备仿真特性曲线可知坦克炮后坐复进的特征量：后坐与复进时间 602 ms，后坐、复进行程 322 mm，最大后坐速度 11.5 m/s，最大后坐加速度 330 g，最大后坐阻力 1 439 kN。该坦克炮实际测试结果：后坐与复进时间 437 ms，后坐行程 350 mm，最大后坐阻力不超过 1 390 kN，最大速度不超过 10 m/s。后坐特征量仿真结果符合坦克炮参数要求，也符合实际测试结果，说明动力学仿真模型可行，可用于进行装备故障机理研究。

4 磨损故障注入仿真

4.1 节制环磨损故障对装备动力学特性的影响

经研究表明，节制环磨损使节制环孔径增大，环形漏口液压阻力减小。这将导致驻退机液压阻力减小，从而影响后坐阻力和后坐速度，最终导致后坐加长^[1]。式(4)中 $F_{\phi h}$ 表达式为：

$$\left. \begin{aligned} F_{\phi h} &= f(a_x)v^2 \\ F_{\phi h} &= k_1\rho((A_0 - A_p)^3/a_x^2 + (k_2/k_1)(A_j^3/A_1^2))v^2/2 \end{aligned} \right\} (5)$$

式中： a_x 为节制环处环形漏口面积（节制环未磨损时环形漏口面积 a_{x0} 与磨损掉的面积 Δa_x 之和）； v 为后坐速度。

$$a_{x0} = \pi d_p^2/4. \quad (6)$$

$$\Delta a_x = \pi((d_p + \Delta d_p)^2 - d_p^2)/4. \quad (7)$$

式中： d_p 为节制环孔直径； Δd_p 为节制环磨损量。在下面的仿真研究中， Δd_p 设定为 0（无磨损）、磨损 0.1 mm、磨损 0.2 mm、磨损 0.3 mm 和磨损 0.4 mm。

4.2 节制环磨损故障代入仿真

把包含节制环磨损的驻退机液压阻力 $F_{\phi h}$ 代入后坐运动方程组中，编程求解运动方程，得到节制环磨损故障与装备的故障特征参数-后坐位移、后坐速度和后坐加速度等测试参数之间的映射关系，如图 7—10 所示。

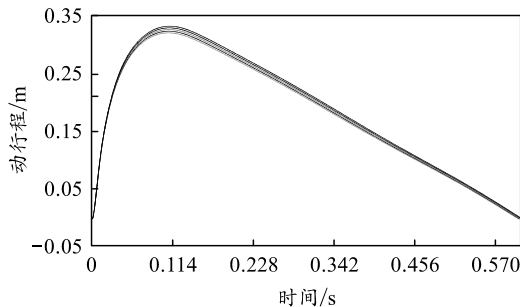


图 7 节制环磨损-后坐与复进动行程

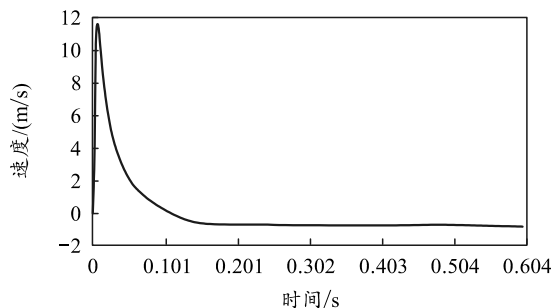


图 8 节制环磨损-后坐与复进速度

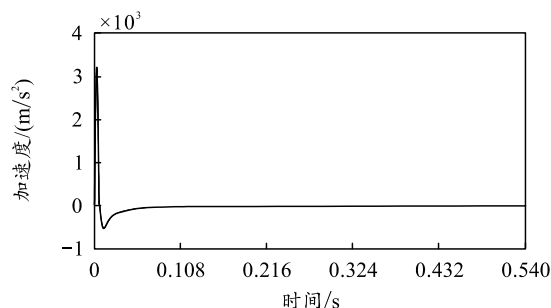


图 9 节制环磨损-振动加速度

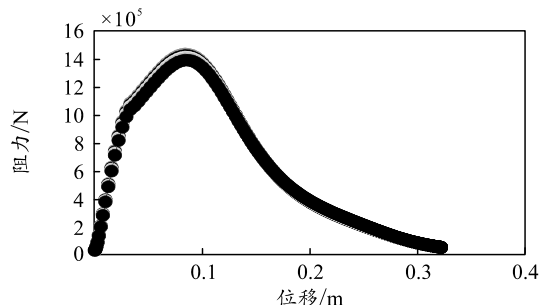


图 10 节制环磨损-后坐阻力

4.3 节制环磨损故障特征影响分析

仿真结果表明：节制环磨损的情况下，随着磨损内径的增加，后坐行程增加，后坐复进速度峰值

增加, 加速度增加, 后坐复进时间延长, 后坐阻力峰值逐步减少(如表 1 所示)。仿真过程得出的结果

与节制环故障原理分析一致, 能够较好地反映磨损状况和其他性能参数的联系。

表 1 节制环磨损状态和正常状态对比分析

故障程度/ mm	后坐复进行程 峰值/mm	后坐复进速度 峰值/(m/s)	后坐复进加速度 极大值/(m/s ²)	后坐复进加速度 极小值/(m/s ²)	后坐复进 时间/ms	后坐阻力 峰值/N	复进力 峰值/N
0.1	3	0.016	1.717	-	1	-14 706	-
0.2	6	0.033	3.409	-	2	-21 997	-
0.3	8	0.049	5.075	-	4	-32 993	-
0.4	11	0.066	6.717	-	5	-43 984	-

同时结合仿真结果, 拟合节制环磨损-后坐复进行程规律曲线(如图 11 所示)和节制环磨损-后坐阻力 F_R 规律曲线(如图 12 所示)。

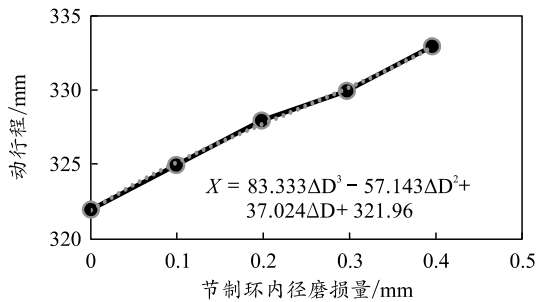


图 11 节制环磨损-后坐复进行程

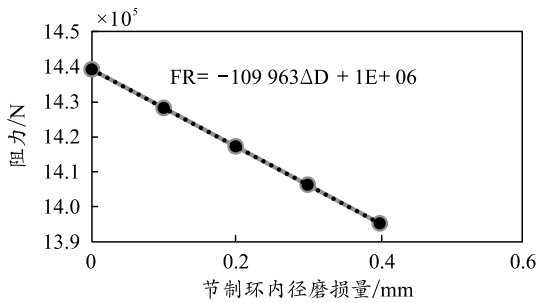


图 12 节制环磨损-后坐阻力

5 结束语

仿真研究表明: 节制环磨损情况下, 对驻退机的性能参数产生影响, 并具有规律性, 其规律可通过更多次数的仿真或者实验得出。相应的性能参数可通过传感器采集获得, 后坐-复进行程可用拉线位移传感器或激光位移传感器测试获得, 后坐-复进速度可通过行程微分数据获得, 后坐-复进的往复加速度可通过 3 轴加速度传感器测试或是通过行程、速度的微分计算获得, 后坐阻力峰值可通过力传感器测试获得^[10], 作用力时间则能够通过采测软件或计时器材获得。基于振动基本参量的组成^[11]为速度、加速度和位移, 由此采取振动监测的方法实现对节制环磨损状态评估基本可行。

结合其他机械监测方法, 对后坐-复进行程、后坐-复进速度、后坐阻力、后坐-复进时间等特征值与振动加速度特征值之间的关联关系进行研究, 最终获得采用振动监测法对坦克炮驻退机技术状态进行监测的方法。同时, 在确定方法可行的基础上, 还需对传感器的选择、传感器的安装位置、整体监测方案等进行进一步的研究, 保证采测数据的真实性和可用性, 从而最终实现节制环磨损状态的在线监测, 为坦克炮驻退机和坦克炮整体技术性能实时监测奠定基础。

参考文献:

- [1] 郑坚, 姚世峰, 张增磊, 等. 火炮驻退机节制环磨损程度检测方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2013(4): 68-71.
- [2] 闫清东, 张连第, 赵毓芹. 坦克构造与设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2006: 18-19.
- [3] 谈乐斌, 张相炎, 潘孝斌, 等. 火炮概论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014: 111-113.
- [4] 王芳. 火炮驻退机节制环损坏机理分析[D]. 北京: 北京理工大学, 2003.
- [5] 周成. 某火炮驻退机流场数值模拟及冲蚀磨损预测[D]. 南京: 南京理工大学, 2011.
- [6] 张晓东. 火炮后坐复进运动协同仿真及故障机理研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2010.
- [7] 赵建新. 火炮驻退机节制环空蚀模型研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2000.
- [8] 崔凯波, 秦俊奇, 狄长春, 等. 火炮制退机节制环失效微观机理的实验研究[J]. 爆炸与射击, 2014, 34(6): 736-741.
- [9] 天工在线编著. 中文版 MATLAB2018 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018: 337-346.
- [10] 孔德仁. 兵器动态参量测试技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2013: 188-217.
- [11] 郑长松, 冯辅周, 张丽霞, 等. 装甲车辆故障诊断技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2019: 132-137.