

doi: 10.7690/bgzdh.2023.11.018

弹壳有序回收无链供弹装置动力学仿真分析

赵亮亮, 戴劲松, 谭添, 林圣业

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 针对某小口径高射速自动炮在特殊环境下对供弹系统的空间布置需求, 提出一种可实现弹壳有序回收的交叉螺旋无链供弹系统方案。建立交叉螺旋无链供弹装置的 3 维模型, 运用多体动力学仿真软件建立无链供弹装置的虚拟样机模型, 仿真分析其在 4 000 发/min 射频下的供弹交接和弹壳回收运动规律。仿真结果表明: 28 发炮弹交接时轴向速度为 0, 轴向位移保持不变, 供弹交接和弹壳回收过程平稳通畅, 供弹系统结构可靠合理; 该方案满足某型自动炮的设计需求, 可为相关无链供弹系统的研制提供参考依据。

关键词: 自动炮; 交叉螺旋无链供弹; 供弹交接; 弹壳有序回收; 多刚体动力学

中图分类号: TJ91 **文献标志码:** A

Dynamic Simulation Analysis of Chainless Ammunition Feeding Device for Orderly Recovery of Cartridge Case

Zhao Liangliang, Dai Jinsong, Tan Tian, Lin Shengye

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to meet the special requirements of the feeding system of the high firing rate automatic gun of a small bore, a scheme of the cross helix chainless feeding system was proposed, which could realize the orderly recovery of cartridge cases. The 3D model of the cross screw chainless ammunition feeding device was established, and the virtual prototype model of the chainless ammunition feeding device was established by using the multi-body dynamics simulation software. The movement rules of the feeding, handover and cartridge case recovery were simulated and analyzed under the condition of 4 000 rounds/min RF. The simulation results show that the axial velocity is 0 and the axial displacement is constant when the 28 projectiles are handed over, the process of feeding handover and cartridge case recovery is smooth, and the structure of the feeding system is reliable and reasonable. The scheme meets the design requirements of a certain type of automatic gun, and can provide a reference for the development of related chainless feeding system.

Keywords: automatic gun; cross screw chainless feed; feed handover; sequential recovery of cartridge case; multi-rigid-body dynamics

0 引言

自动炮系统中供弹系统的设计十分重要, 需满足结构的紧凑性、与自动机的匹配性等。目前, 国内外研究人员对供弹系统的研究主要集中在弹箱式无链供弹和弹鼓式无链供弹^[1-4]。郑建兴等^[5]结合同步带传动技术, 提出了一套适合于高速供输弹的无链供弹系统弹箱结构; 张斌等^[6]对弹鼓供弹的驱动特性及其传动交接特性进行了研究。这 2 种方式适用于大多数情况下的供弹, 但很难适应特殊空间布置的要求; 因此, 针对某型自动炮对供弹系统的空间布置需求, 设计一种新型的交叉螺旋无链供弹系统具有重要意义。

为保证供弹系统满足总体结构要求, 提出了一种交叉螺旋无链供弹系统方案, 在电机驱动下, 能够满足供弹需求并实现弹壳有序回收。该装置可布

置在自动机一侧, 螺旋缠绕在其他设备上, 充分利用有限空间, 获取更大的载弹量, 同时弹壳有序回收也避免了弹壳外抛带来的问题。

1 交叉螺旋无链供弹系统方案设计

1.1 交叉螺旋闭合弹带结构设计

此交叉螺旋闭合弹带由内外 2 层弹带首尾相接组成, 方案模型如图 1 所示。

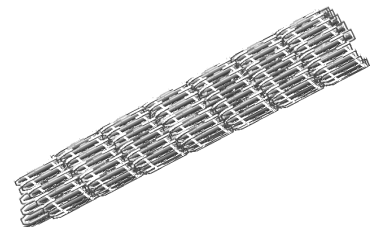


图 1 交叉螺旋闭合弹带方案模型

内外 2 层导引均采用圆柱螺旋线的方式扫描而

收稿日期: 2023-06-23; 修回日期: 2023-08-05

第一作者: 赵亮亮(1998—), 男, 安徽人, 硕士。

成^[7]。根据某型自动炮结构尺寸，首先确定了内层导引螺旋线的直径、导程和旋向。为实现交叉连接，内外 2 层导引的螺旋线旋向相反，分别为左旋和右旋。圆柱螺旋线参数方程为：

$$\left. \begin{aligned} x &= a \cos \theta \\ y &= a \sin \theta \\ z &= \pm b \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $\theta = \omega t$ ， ω 为角速度；螺旋线左旋时，对 z 取正号，右旋时，对 z 取负号。

取节片底部中心原点 O ，建立如图 2 所示的节片本体空间坐标系。前一节片在后一节片 Y 轴上的投影点为 A ，后一节片在前一节片 X 轴上的投影点为 B 。

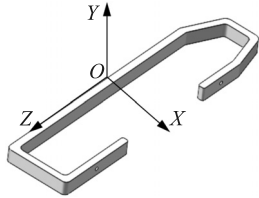


图 2 节片坐标

为确定节片之间在螺旋线上的位置关系，取卡尔丹角系为 (α, β, δ) ，分别为：节片先绕固连其上的坐标系 X 轴旋转 α ，再绕 Y 轴旋转 β ，最后绕 Z 轴旋转 δ 。均按右手法则，取逆时针为正。取节片 O_j 相对于前节片 O_{j-1} 平移为 $O_{sj}(0, 0, d_{sj})$ ， d_{sj} 为两节片的轴向距离，则 j 节片相对于 $j-1$ 节片的关系为：

$$M_j = \begin{bmatrix} c\beta_j c\delta_j & -c\beta_j s\delta_j & s\beta_j \\ c\alpha_j s\delta_j + s\alpha_j s\beta_j c\delta_j & c\alpha_j c\delta_j - s\alpha_j s\beta_j s\delta_j & -s\alpha_j c\beta_j \\ s\alpha_j s\delta_j - c\alpha_j s\beta_j c\delta_j & s\alpha_j c\delta_j + c\alpha_j s\beta_j s\delta_j & c\alpha_j c\beta_j \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K_{rj} = M_j(K + O_{sj}) \quad (3)$$

式中 $K=A, B, O$ ，下同。则 j 节片在 $OXYZ$ 空间坐标系中的表示为：

$$\left. \begin{aligned} M_{0j} &= \prod_{\omega=0}^j M_{\omega} \\ O_j &= O_0 + \sum_{v=1}^i \left(\prod_{\omega=0}^v M_{\omega} \right) O_{sv} \\ K_j &= \left(\prod_{v=0}^j M_v \right) K + O_0 + \sum_{v=1}^i \left(\prod_{\omega=0}^v M_{\omega} \right) O_{sv} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据式(1)–(4)，遍历内层所有节片后即可得内层导引空间螺旋轨迹。内层设计完成后，根据内层导引螺旋线直径可确定合适的外层导引螺旋线直径，按同样方法可得外层导引空间轨迹。内外 2 层

导引同心布置，首尾交叉相连，形成交叉螺旋空间导引。

图 3 是炮弹从炮尾出发，沿着螺旋导引运动一个螺距时在 X, Y, Z 3 个方向上的空间运动轨迹， XY 平面上是运动轨迹的投影，此投影方向即为图 5 炮尾方向。

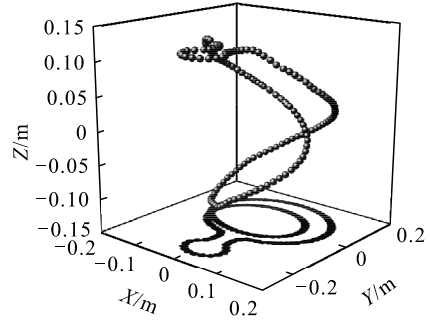


图 3 炮弹空间运动轨迹

最后根据炮弹尺寸设计合适的弹托结构，弹托与弹托之间采用错位连接的方式。该方式可实现相邻弹托间的径向旋转，还可满足弹托间的轴向移动，完成弹托的螺旋布置。内外 2 层弹带交接位置的弹托结构如图 4 所示。

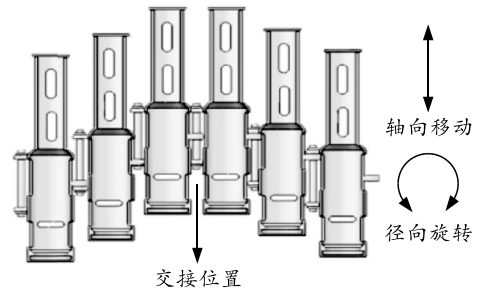


图 4 弹托结构

1.2 交叉螺旋无链供弹系统工作原理分析

交叉螺旋无链供弹系统由导引、拨弹轮、弹托、进弹挡板等组成，简化自动机结构如图 5 所示。图中，黑色实心圆表示炮弹，白色空心圆表示弹壳。

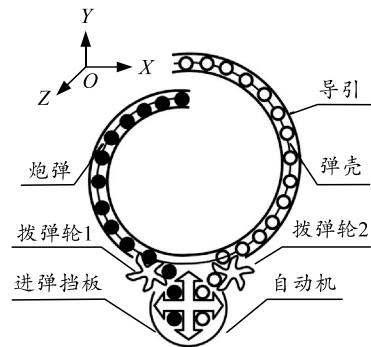


图 5 供弹系统工作原理

此系统中拨弹轮 1 在电机驱动下带动闭合弹带旋转，当弹带运动至自动机进弹口时，在拨弹轮 1、

自动机进弹挡板和弹托的约束下，炮弹可交接至自动机。炮弹击发后弹壳在自动机驱动下运动至拨弹轮 2 的位置，由该拨弹轮交接至空弹托，实现了炮弹与自动机的交接及弹壳有序回收。

闭合弹带受导引的约束作用，在拨弹轮的驱动下弹带和炮弹一起运动，设 X 为螺旋线水平径向，向右为正， Y 为螺旋线竖直方向，向上为正， Z 沿螺旋线质心轴向，炮尾方向为正，坐标原点 O 为螺旋线质心，易知炮弹沿 X 、 Y 、 Z 方向均有运动。由于此供弹系统炮弹前后窜动是影响交接的主要因素，所以可通过研究弹带在 Z 轴方向上的运动特性，验证是否满足平稳交接的要求。

2 交叉螺旋无链供弹系统动力学仿真

2.1 虚拟样机模型的建立

机械系统动力学仿真中，根据实际碰撞接触及持续接触 2 种模型情况，采用碰撞函数和泊松模型函数来计算碰撞力。由于碰撞函数使用的参数能够更好地控制碰撞力，而且计算速度快，在仿真中能够得到较好的效果；因此，在系统供弹过程中采用该方法来计算^[8]。

$$\text{Impact} = \begin{cases} 0 & x \geq x_0 \\ k(x_0 - x)^e - c_{\max} \frac{dx}{dt} \cdot \text{step}(x, x_0 - d, 1, x_0, 0) & x < x_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： k 为惩罚因子，也称刚度系数； e 为非线性系数； c_{\max} 为阻尼系数； d 为切入深度； x 为接触构件的距离变量； x_0 是两构件碰撞的初始距离。

对交叉螺旋无链供弹系统的模型进行简化。内外 2 层弹带首尾交叉连接，主要研究内外 2 层弹带与自动机的交接过程。简化模型后，内外 2 层弹带分别只取一个螺距与自动机交接，共 28 发弹，29 个弹托，预留一个空弹托位置。简化的虚拟样机模型如图 6 所示。

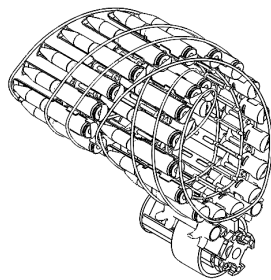


图 6 供弹系统虚拟样机模型

根据实际情况对各构件施加约束，无链供弹系统拓扑结构如图 7 所示。根据 Hertz 弹性接触理论

和刚体对刚体相关参数，本研究中对接触碰撞力的参数设置为：刚度系数均为 1×10^5 N/mm，力指数均为 1.5，阻尼均为 $50 \text{ N} \cdot \text{sec}/\text{mm}$ ，最大穿透深度均为 0.1 mm ^[9]。

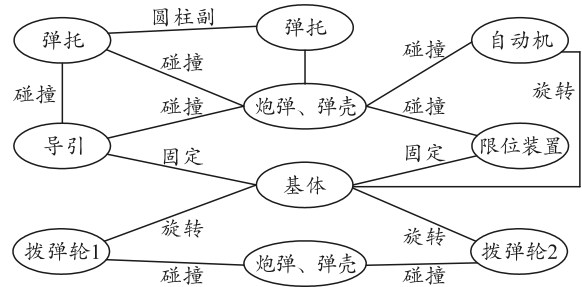


图 7 供弹系统拓扑结构

2.2 闭合弹带驱动电机特性计算

2.2.1 闭合弹带转动惯量计算

刚体对转动轴的转动惯量等于刚体内各质点的质量和其到回转轴距离平方乘积的总和，即

$$J = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 \quad (6)$$

式中： m_i 为刚体某个质元的质量； r 为该质元到转轴的垂直距离。

组合物体对某一回转轴的转动惯量等于该组合物体所有质元对该轴转动惯量的总和^[10]。该模型是测量各组合体对 Z 回转轴的转动惯量。根据式(6)，可计算出每发炮弹相对于回转轴的转动惯量为 $3.7 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，每个弹托相对于回转轴的转动惯量为 $2 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。则该闭合弹带总的转动惯量为 $0.1616 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

2.2.2 闭合弹带电机驱动力矩计算

根据某型自动炮 4 000 发/min 理论射速的要求，在加速阶段闭合弹带的角加速度为：

$$\alpha = \omega/t = 4800 \times \frac{\pi}{180} / 0.03 = 2793 \text{ rad}/\text{s}^2 \quad (7)$$

由以上计算得到闭合弹带加速所需力矩为：

$$T_1 = J_r \times \alpha = 0.1616 \times 2793 = 451 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (8)$$

把每发炮弹和对应的弹托看作一个整体 A ，则闭合弹带总的摩擦阻力矩为：

$$T_2 = N_A \cdot \mu_k (1 + R_1/R_2) = 106 \times 0.1 \times (1 + 0.1/0.015) = 81 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (9)$$

式中： μ_k 为滚动摩擦系数，取 0.1； R_1 为导引半径； R_2 为 A 半径； N_A 为 A 对导引的作用力^[11]。

由以上可得闭合弹带加速阶段电机驱动力矩为 $532 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

2.2.3 电机驱动特性方程

选用交流异步电机作为闭合弹带和自动机的驱动电机，其减速器的减速比为 10。电机动力特性曲线如图 8 所示。

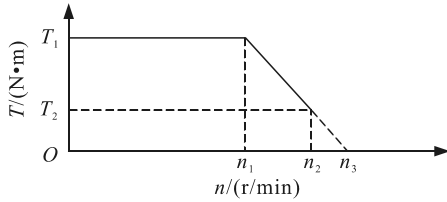


图 8 电机动力特性曲线

图中： T_1 为电机最大过载转矩； T_2 为电机额定转矩，一般 T_1 为 T_2 的 3~5 倍； n_1 表示电机转折点转速； n_2 表示电机额定转速； n_3 表示电机的截止转速^[12]。根据 2.2.2 节计算结果和图 8，可得到驱动电机转矩与转速的变换方程式(10)，将其作为仿真输入。

$$T(n) = \begin{cases} 1800, & 0 \leq n < 30 \\ -63.4n + 5604, & 60 \leq n < 90 \end{cases} \quad (10)$$

3 仿真结果及分析

随机选取 5 发炮弹进行分析。自动机启动前与拨弹轮接触的炮弹定义为本模型的第 1 发炮弹，之后的炮弹按照进弹顺序依次定义，这 5 发弹分别为第 7、8、10、20 发以及第 26 发。分别研究这 5 发弹在自动机启动、稳定循环及停射 3 种状态下供弹交接和弹壳回收情况。

3.1 启动阶段分析

在供弹启动阶段，驱动电机通过拨弹轮带动炮弹和弹带运动。图 9 为自动机启动时 5 发弹在 0.03 s 时间内加速过程。由于弹托之间有间隙，速度传递需要时间，所以 5 发弹的速度在 0.010 3 s 之前为 0。由图中曲线可看出，5 发弹从 0.01 s 开始加速，0.03 s 时速度达到最大为 1.9 m/s，整体加速曲线上升平缓，未出现较大波动且加速趋势相似，说明在启动阶段炮弹加速过程平稳可靠。

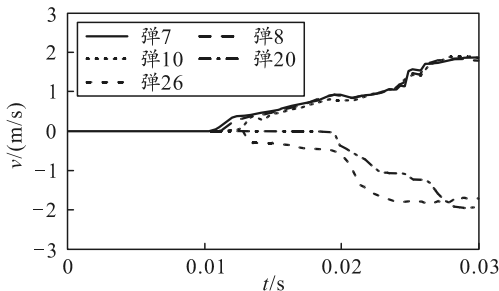


图 9 5 发炮弹启动阶段速度曲线

3.2 稳定供弹阶段分析

供弹系统在 0.03~0.55 s 时间内处于 4 000 发/min 的稳定供弹速度。第 7 发和第 8 发弹的轴向速度和位移如图 10、11 所示。

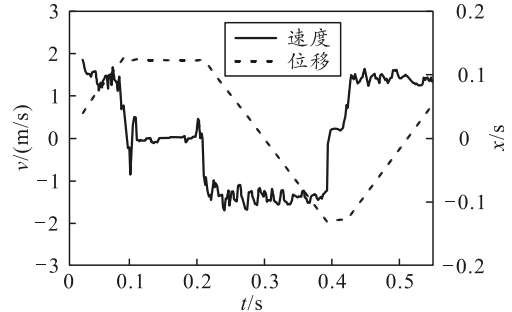


图 10 第 7 发炮弹速度和位移曲线

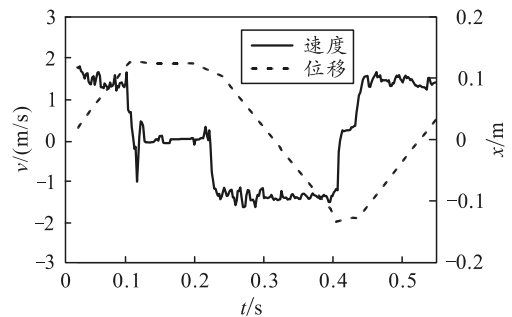


图 11 第 8 发炮弹速度和位移曲线

从图 10 中可看出，炮弹 7 在 0.101 7~0.201 3 s 处于供弹交接阶段，在 0.201 3~0.55 s 处于弹壳回收阶段。2 个阶段炮弹运动情况分析如下：

1) 供弹交接阶段：炮弹 7 在 0.101 7 s 时运动到了拨弹轮 1 位置。由于弹带的多边形效应及碰撞冲击，炮弹和拨弹轮开始接触时，速度在允许范围内波动；在 0.101 7~0.201 3 s，炮弹在拨弹轮的作用下交接进入自动机。整个交接过程，炮弹轴向速度基本为 0 且位移不变，表明交接的时候炮弹相对于自动机并未发生前后窜动，交接过程平稳通畅。

2) 弹壳回收阶段：弹壳在 0.201 3 s 时运动至拨弹轮 2 位置。弹壳和拨弹轮开始接触时，速度在允许范围内波动；随后弹壳在拨弹轮作用下交接至空弹托，开始进行弹壳回收；在 0.399 6 s 时，弹壳由外圈弹带交接至内圈弹带开始反向运动。由图可看出 0.201 3 s 之后的速度比较平稳，位移曲线光滑，说明弹壳从运动到拨弹轮，到交接至弹托，再到在两层弹带上运动，整个回收过程通畅有序。

炮弹 8 的速度和位移曲线与弹 7 类似，供弹交接和弹壳回收过程平稳通畅。

第 10、20、26 发弹的速度和位移如图 12、13、14 所示。从图中看出，这 3 发弹对应的速度和位移

在交接时刻均出现了一定波动，随后恢复平稳，位移曲线光滑，能顺利完成供弹交接和弹壳有序回收，分析过程同上述炮弹 7。

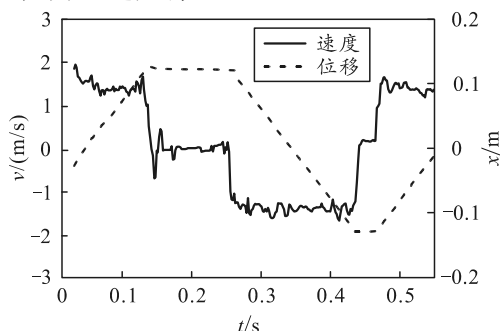


图 12 第 10 发炮弹速度和位移曲线

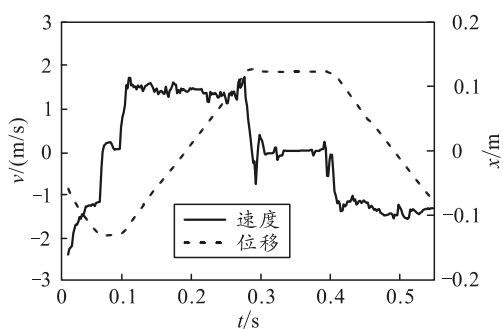


图 13 第 20 发炮弹速度和位移曲线

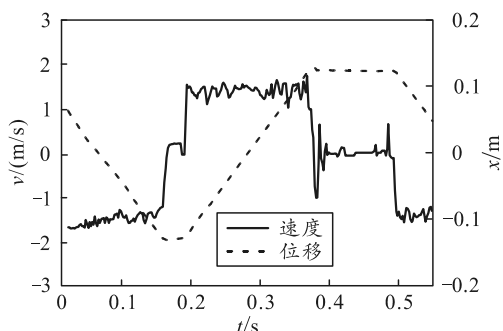


图 14 第 26 发炮弹速度和位移曲线

3.3 停射阶段分析

图 15 是自动机停射，5 发弹在 0.05 s 时间内的减速过程。由图可看出，5 发弹的速度曲线下降平缓，未出现较大波动且减速趋势相似，在 0.6 s 时速度减至为 0，说明停射阶段炮弹减速过程平稳可靠。

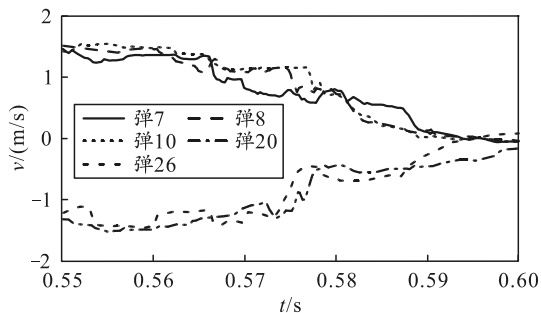


图 15 5 发炮弹停射阶段速度曲线

3.4 仿真与推算的供弹交接时间对比分析

从图 11 可看出，炮弹 8 在 0.116 4 s 时开始供弹交接，由此可推算出，第 7、8 两发弹的交接间隔时间为 0.014 7 s，以此为每发弹交接间隔标准时间，以第 7 发弹的交接时间为起始值，可得到第 i 发弹的交接时间推算公式为：

$$t_i = t_7 + T(i - 7). \quad (11)$$

式中： $t_7 = 0.101 7$ ； $T = 0.014 7$ 。

由式(11)可推算出第 10、20、26 这 3 发弹的理论交接时间为 0.145 8、0.292 8 和 0.381 0 s。这 3 发弹的仿真交接时间可从图 12、13、14 得到，分别为 0.146 1、0.294 7 和 0.383 2 s。

为研究闭合弹带供弹的通畅性，对第 10、20、26 这 3 发弹仿真得到的供弹交接时间与推算得到的交接时间进行对比分析，如表 1 所示(误差以推算结果为基准值)。

表 1 仿真结果与推算结果的交接时间对比

第 i 发弹	供弹交接时间/s		误差/%
	仿真	推算	
10	0.146 1	0.145 8	0.21
20	0.294 7	0.292 8	0.65
26	0.383 2	0.381 0	0.58

从上表中可看出，这 3 发弹仿真交接时间和推算得到的交接时间存在一定误差，这是由于弹托间存在间隙以及和中间构件摩擦造成的，但是误差并没有随着中间间隔的弹的数量增多而逐渐增大。这说明由于电机的动力特性，闭合弹带和电机之间存在一定的协调作用，能使误差控制在一定范围之内，且这 3 组误差均小于 1%，在允许范围内。

4 结论

通过对弹壳有序回收的交叉螺旋无链供弹系统动力学仿真分析，表明闭合弹带循环通畅，供弹系统结构可靠合理。在自动机启动阶段，炮弹在 0.03 s 内加速至 1.9 m/s，曲线上升平缓，加速过程平稳可靠；供弹交接阶段，炮弹在供弹交接过程轴向速度为 0，轴向位移保持不变，表明交接时炮弹并未发生前后窜动，供弹交接过程平稳通畅；弹壳回收阶段，每发弹壳与拨弹轮交接间隔时间均稳定在 0.144 s，且回收曲线无波动，整个回收过程有序可靠；停射阶段，炮弹在 0.05 s 内减速至 0，曲线下下降平缓，减速过程平稳可靠。证明了方案模型的可行性，为供弹系统适应特殊空间布置需求提供了参考依据。

参考文献:

[1] 谢云峰, 吴光宁. 双仓结构弹箱设计及可靠性分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(7): 21-24.

[2] GENERAL DYNAMICS ARMAMENT AND TECHNICAL PRODUCTS. Ammunition container and feed system: US20070757066[P]. 2010-07-27.

[3] 戴劲松, 王茂森, 林圣业, 等. 现代火炮自动机设计理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 18.

[4] JACOBS J C. U. S. naval aviation and weapons development in review[J]. United States Naval Institute Proceedings, 2015, 141(5): 76-82.

[5] 郑建兴, 张相炎. 基于 RecurDyn 的同步带弹箱动态特性仿真研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2010(4): 75-78.

[6] 张斌, 戴劲松, 王茂森, 等. 弹鼓供弹装置的驱动及传动交接分析[J]. 兵工自动化, 2019, 38(3): 68-70, 79.

(上接第 59 页)

由胜率可得到明显的 5 类差异手牌, 验证了所设计的基于注意力机制 LSTM 模型生成同等牌力手牌的有效性。

4 结束语

笔者基于注意力机制的 LSTM 模型设计一种随机生成指定难度初始手牌的系统, 杜绝了可能的作弊隐患, 降低了比赛成本, 提高了参与便捷度, 推动了二打一游戏的竞技化。目前该模型在牌力评估准确性方面仍有较大提升空间, 下一步, 笔者的研究重点是更好地利用对局特征构建手牌牌力数据集。

参考文献:

[1] 国家体育总局棋牌运动管理中心中国棋院. 竞技二打

(上接第 63 页)

参考文献:

[1] TANENBAUM A S, 熊桂喜, 王小虎. 计算机网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.

[2] 李迪杰. 基于 BIM+GIS 技术的 ETC 门架系统运维管理平台应用探讨[J]. 西部交通科技, 2023(6): 179-180, 183. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2023.06.052.

[3] 陈伟华, 郑楚韬, 陈娟, 等. 基于“互联网+”的智能配电网运维管理和智能化改造[C]//《中国电力企业管理创

[7] 魏俊杰, 朱家诚, 杨徐, 等. 双螺旋线圆柱凸轮机构的设计与分析[J]. 机械设计与制造, 2021(9): 207-210, 215.

[8] 陈继芹, 戴劲松, 王茂森, 等. 某无链供弹装置的仿真与试验[J]. 兵工自动化, 2014(10): 49-51, 55.

[9] 葛胜利. 舰炮供弹系统动力学仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(5): 82-85.

[10] 刘杰, 李慧, 李强. 弹鼓传动系统设计及其受力分析[J]. 机械传动, 2015, 39(2): 67-69, 83.

[11] 汤海亮, 温晶晶, 邓聃, 等. 摩擦阻力矩对卧式扭摆法测量弹箭极转动惯量精度的影响[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2017, 41(5): 569-573.

[12] 何福. 某型水下自动机密封前导装置动态特性分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.

一扑克竞赛规则 [EB/OL]. [2022-02-10]. <http://lw.ourgame.com/site/intro/list.do#>.

[2] LI S S, LI S Q, DING M. Landlord's equal cards force generation algorithm[J]. Asian Conference on Artificial Intelligence Technology, 2018, 2018(16): 1590-1594.

[3] 李淑琴, 陈子鹏, 郑蓝舟, 等. 竞技二打一游戏中同等牌力的研究[J]. 智能系统学报, 2021, 16(3): 466-473.

[4] RICHARD G L, PETER C J. New index for clustering tendency and its application to chemical problems[J]. Journal of Chemical Information and Computer Sciences, 1990, 30(1): 36-41.

[5] FREY B J, DUECK D. Clustering by passing messages between data points[J]. science, 2007, 315(5814): 972-976.

[6] 孙吉贵, 刘杰, 赵连宇. 聚类算法研究[J]. 软件学报, 2008, 19(1): 48-61.

[7] ZHA D C, XIE J R, MA W Y, et al. DouZero: Mastering DouDizhu with Self-Play Deep Reinforcement Learning[C]//ICML 2021. arXiv, 2021: 12333-12344.

新实践(2021 年)》编委会. 中国电力企业管理创新实践(2021 年). 北京: 新华出版社, 2023: 149-151. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.005484.

[4] 王会来, 袁媛, 张园园, 等. IT 运维管理及服务能力模式研究和应用实践[J]. 网络安全和信息化, 2022(11): 101-103.

[5] 徐波. 计算机网络运维管理要点及发展趋势研究[C]//教育理论研究与实践网络研讨会论文集(专题二). 北京: 中国管理科学研究院教育科学研究所, 2022: 59-62. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.059890.