

doi: 10.7690/bgzdh.2022.11.011

# 缓冲装置不对称对自动机特性的影响

詹望<sup>1</sup>, 林圣业<sup>1</sup>, 谢杨杨<sup>2</sup>, 李勇<sup>2</sup>, 戴劲松<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712000)

**摘要:** 针对缓冲装置两侧不对称对自动机特性的影响, 对其进行分析。运用键合空间理论建立自动机的键合空间拓扑结构图, 分析缓冲装置弹簧初力、弹簧刚度、后坐阻尼和复进阻尼的不对称对自动机的后坐动态特性和立靶密集度的影响。计算分析结果表明: 该分析得出了各因素对自动机最大后坐位移、最大后坐力和立靶密集度的影响规律。

**关键词:** 自动机; 缓冲装置; 键合空间; 后坐特性; 立靶密集度

**中图分类号:** TJ301 **文献标志码:** A

## Influence of Buffer Device Asymmetry on Characteristics of Automatic Machine

Zhan Wang<sup>1</sup>, Lin Shengye<sup>1</sup>, Xie Yangyang<sup>2</sup>, Li Yong<sup>2</sup>, Dai Jinsong<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xiayang 712000, China)

**Abstract:** Aiming at the influence of the asymmetry of the 2 sides of the buffer device on the characteristics of the automatic machine, the analysis is carried out. The bonding space topological structure diagram of the automatic machine was established by using the bonding space theory, and the influence of the asymmetry of the spring initial force, spring stiffness, recoil damping and recoil damping of the buffer device on the recoil dynamic characteristics and vertical target density of the automatic machine was analyzed. The results show that the influence of each factor on the maximum recoil displacement, the maximum recoil force and the vertical target density is obtained.

**Keywords:** automatic machine; buffer device; bonding space; recoil characteristic; vertical target density

## 0 引言

缓冲装置是现代自动机的重要组成部分, 对自动机系统的影响至关重要, 是现代自动机研究的热点之一。近年来有众多学者在缓冲装置的建模、设计和优化等方面已经取得许多研究成果<sup>[1-4]</sup>, 但是在缓冲装置不对称对自动机系统的影响方面研究较少。在实际工作环境中, 自动机两侧的缓冲装置在加工、装配时不可避免地存在制造和装配误差。这些误差将导致后坐过程中两侧受力不均衡, 影响自动机的后坐特性和射击立靶密集度。

为探究缓冲装置两侧不对称对自动机后坐特性和射击立靶密集度的影响, 笔者以某自动机及其缓冲装置为研究对象, 通过建立键合空间<sup>[5-6]</sup>模型并进行数值仿真计算, 得出缓冲装置中不对称的弹簧初力、弹簧刚度、后坐阻尼和复进阻尼对自动机的最大后坐位移、最大后坐力、方位密集度和高低密集度的影响规律。

## 1 工作原理

### 1.1 自动机工作原理

笔者选取的自动机结构如图 1 所示。该自动机由炮箱、摇架、身管和缓冲装置等组成, 炮箱支承于摇架的导轨上, 射击时可沿导轨后坐和复进; 2 个缓冲器对称布置于炮管左、右两侧。射击时, 整个自动机后坐, 后坐力通过缓冲装置作用于摇架上。其射击时的后坐运动与自动机工作循环动作相互独立, 便于采用通常的减小与控制后坐力的措施, 可以获得很低的后坐力, 同时对摇架的刚度要求也相对宽松。

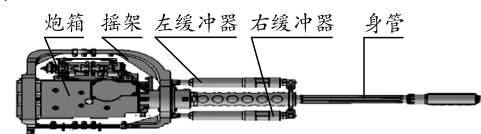


图 1 自动机结构

### 1.2 缓冲装置工作原理

缓冲装置的主要作用是消耗和吸收自动机后坐

收稿日期: 2022-07-07; 修回日期: 2022-08-05

作者简介: 詹望(1996—), 男, 安徽人, 硕士, 从事机械动力学研究。E-mail: 2011746385@qq.com。

能量，从而减轻后坐时机机构间的撞击。其工作原理主要是后坐时通过压缩特定的缓冲材料吸收并存储后坐能量，复进时释放能量。缓冲装置的一般设计 requirements 是：尽可能地减小后坐力，降低后坐剩余能量；充分释放所吸收的后坐能量，以缩短复进时间，提高射速；同时，保证武器的结构紧凑、质量轻，避免后坐位移过大。笔者选取的缓冲装置整体外形结构如图 2 所示。

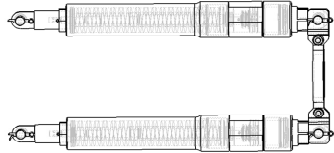


图 2 自动机两侧缓冲装置外形结构

## 2 键合空间模型

根据自动机整体结构可将其转换成如图 3 所示的自动机集总参数模型。其中：炮箱和弹丸简化为刚体；身管离散成为由一系列无质量弹性轴联接的集中质量；左、右缓冲装置分别等效为弹簧-阻尼元件。

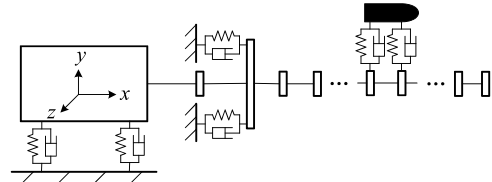


图 3 自动机集总参数模型

依据上述参数模型，根据键合空间理论建立如图 4 所示的自动机键合空间拓扑结构。

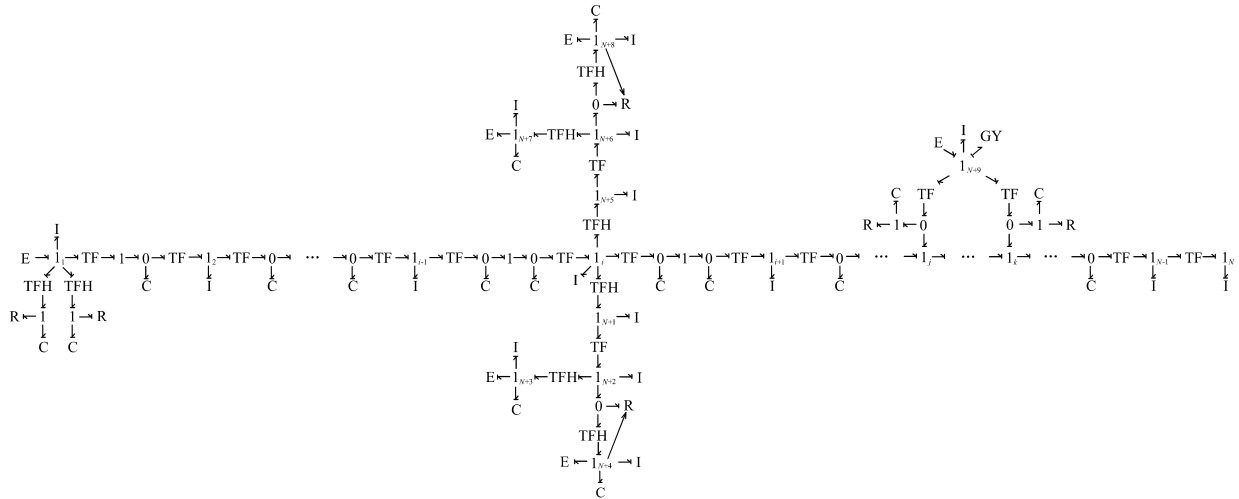


图 4 自动机键合空间拓扑结构

图中：E 为势元件；I 为惯性元件；C 为容性元件；R 为阻性元件；TF 为转换器；TFH 为带摩擦的转换器；GY 为回转器；0 为共势结；1 为共流结；各结点下标的含义如表 1 所示；系统状态方程如式 (1) 所示。键合空间模型中各结点势空间向量、流空间向量、动量变量空间向量和位变空间向量分别表

示为：

$$e = \{F_x \quad F_y \quad F_z \quad M_y \quad M_z\}^T;$$

$$f = \{\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{z} \quad \dot{\theta}_y \quad \dot{\theta}_z\}^T;$$

$$p = \{m\dot{x} \quad m\dot{y} \quad m\dot{z} \quad J_d\dot{\theta}_y \quad J_d\dot{\theta}_z\}^T;$$

$$q = \{x \quad y \quad z \quad \theta_y \quad \theta_z\}^T.$$

$$\dot{p}_i = \left\{ \begin{array}{l} e_1 - H_r T_r (C_r^{-1} T_r^T q_1 + R_r T_r^T I_1^{-1} p_1) - H_f T_f (C_f^{-1} T_f^T q_1 + R_f T_f^T I_1^{-1} p_1) - T_1 C_2^{-1} [T_1^T q_1 - (T_2^T)^{-1} q_2] \quad (i=1) \\ T_i^{-1} C_i^{-1} [q_{i-1,i} - (T_i^T)^{-1} q_i] - T_i C_i^{-1} (T_i^T q_i - q_{i+1}) - H_L T_L \{ \dot{p}_{N+1} + T_{N+1,N+2} [\dot{p}_{N+2} + R_L q_{N+2}^2 + \\ H_{N+2,N+3} T_{N+2,N+3} (\dot{p}_{N+3} + e_{N+3} + C_{N+3}^{-1} q_{N+3})] \} - H_R T_R \{ \dot{p}_{N+5} + T_{N+5,N+6} [\dot{p}_{N+6} + R_R q_{N+6}^2 + \\ H_{N+6,N+7} T_{N+6,N+7} (\dot{p}_{N+7} + e_{N+7} + C_{N+7}^{-1} q_{N+7})] \} + [C_b^{-1} (T_b^T q_{N+9} - q_i) + R_b (T_b^T I_{N+9}^{-1} p_{N+9} - I_i^{-1} p_i)] \delta(x_b - x_i) + \\ [C_d^{-1} (T_d^T q_{N+9} - q_i) + R_d (T_d^T I_{N+9}^{-1} p_{N+9} - I_i^{-1} p_i)] \delta(x_d - x_i) \quad (1 < i < N+9) \\ E_{N+9} + G I_{N+9}^{-1} p_{N+9} - [C_b^{-1} (T_b^T q_{N+9} - q_i) + R_b (T_b^T I_{N+9}^{-1} p_{N+9} - I_i^{-1} p_i)] \delta(x_b - x_i) - \\ [C_d^{-1} (T_d^T q_{N+9} - q_i) + R_d (T_d^T I_{N+9}^{-1} p_{N+9} - I_i^{-1} p_i)] \delta(x_d - x_i) \quad (i = N+9) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\dot{q}_i = I_i^{-1} p_i$$

式中： $H$  为摩阻矩阵； $T$  为转换器模数矩阵； $C$  为柔度矩阵； $R$  为阻尼矩阵； $I$  为惯量矩阵； $G$  为回转器模数矩阵；函数  $\delta(\dots)$  为 Dirichlet 函数。

表 1 拓扑图各节点下标含义

下标	含义	下标	含义
1	炮箱	2~N-1	身管
N	炮口装置	i	身管上与缓冲装置联结节点
j	身管上与弹带接触点	k	身管上与弹丸定心部接触点
N+1	右缓冲筒	N+2	右缓冲液
N+3	右缓冲簧	N+4	右缓冲差控阀芯
N+5	左缓冲筒	N+6	左缓冲液
N+7	左缓冲簧	N+8	左缓冲差控阀芯
N+9	弹丸		

### 3 计算结果与分析

#### 3.1 缓冲装置对称计算

为探究缓冲装置不对称对自动机的最大后坐位移、最大后坐力、方位密集度和高低密集度的影响规律，先保证左、右两侧缓冲装置的弹簧初力、弹簧刚度、后坐阻尼和复进阻尼等参数一致，进行缓冲装置的对称计算，为后续的不对称计算提供参考和对照的标准。当左、右缓冲装置完全对称时，把左、右缓冲装置特性参数的数值设置为相同，两侧缓冲装置的动特性参数如表 2 所示。

表 2 缓冲装置动特性参数

种类	弹簧初力/N	弹簧刚度/(N/m)	后坐阻尼/(Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )	复进阻尼/(Ns <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
左缓冲装置	2 500	280 000	1 082	30 781
右缓冲装置	2 500	28 000	1 082	30 781

根据建立的键合空间模型并结合经典内、外弹道公式进行计算可以得到自动机工作过程中的最大后坐位移、最大后坐力及自动机十连发射击 100 m 着靶的方位密集度、高低密集度。缓冲装置对称时计算结果如表 3 所示。

表 3 自动机动特性参量

最大后坐位移/mm	最大后坐力/kN	方位密集度/mrad	高低密集度/mrad
21.458	8.546	0.377	0.244

#### 3.2 缓冲装置不对称计算

考虑左、右缓冲装置的弹簧初力不对称，左缓冲装置弹簧初力变化范围为 2 200~2 800 N，其他参数同表 2。在不同左缓冲装置弹簧初力条件下，自动机的最大后坐位移、最大后坐力和密集度分别如图 5—8 所示。

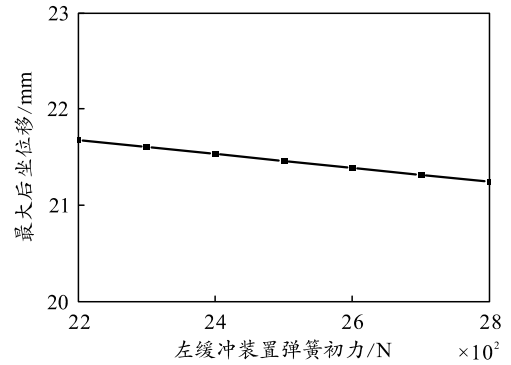


图 5 最大后坐位移与左缓冲装置弹簧初力的关系

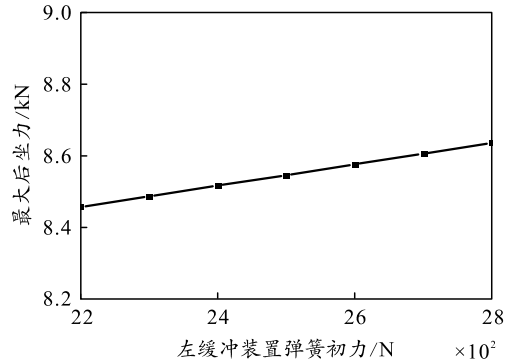


图 6 最大后坐力与左缓冲装置弹簧初力的关系

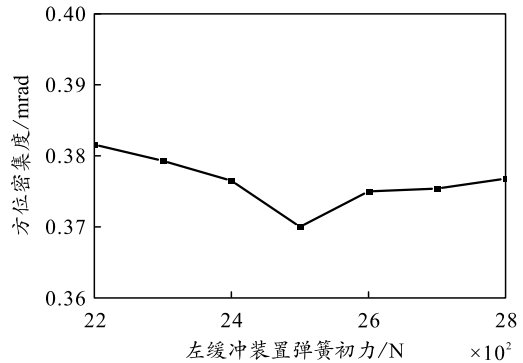


图 7 方位密集度与左缓冲装置弹簧初力的关系

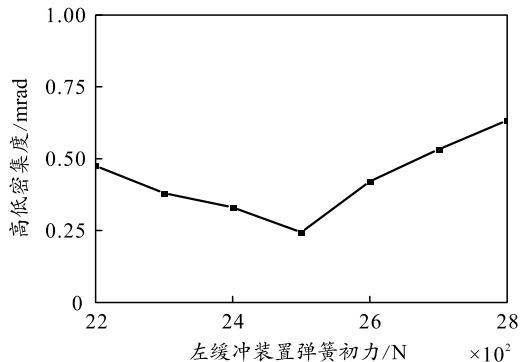


图 8 高低密集度与左缓冲装置弹簧初力的关系

从上图中可以看出：最大后坐位移随着左缓冲装置弹簧初力的增大而减小，最大后坐力随着左缓冲装置弹簧初力的增大而增大，密集度随着左、右缓冲装置弹簧初力差的增大而增大。

考虑左、右缓冲装置的弹簧刚度不对称，左缓冲装置弹簧刚度变化范围为 250 000~310 000 N/m，其他参数同表 2。在不同左缓冲装置弹簧刚度条件下，自动机的最大后坐位移、最大后坐力和密集度如图 9—12 所示。

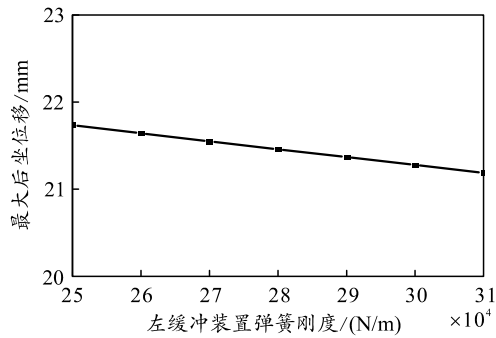


图 9 最大后坐位移与左缓冲装置弹簧刚度的关系

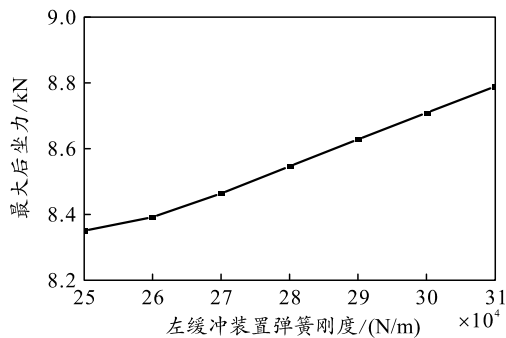


图 10 最大后坐力与左缓冲装置弹簧刚度的关系

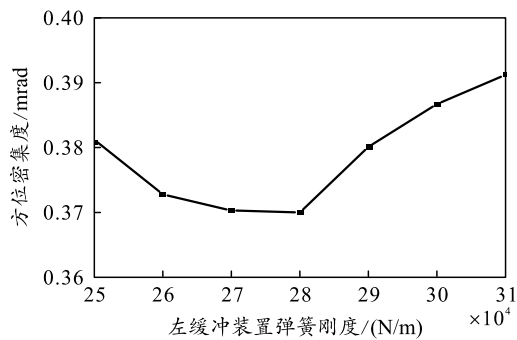


图 11 方位密集度与左缓冲装置弹簧刚度的关系

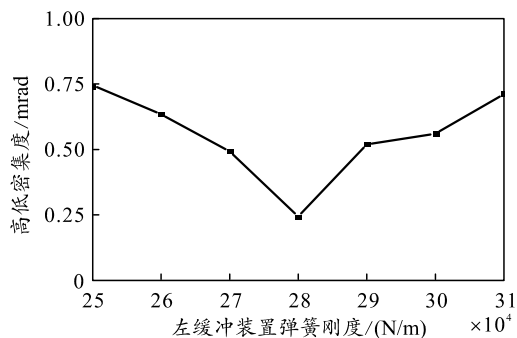


图 12 高低密集度与左缓冲装置弹簧刚度的关系

从上图中可以看出：最大后坐位移随着左缓冲装置弹簧刚度的增大而减小，最大后坐力随着左缓

冲装置弹簧刚度的增大而增大，密集度随着左、右缓冲装置弹簧刚度差的增大而增大。

考虑左、右缓冲装置的后坐阻尼不对称，左缓冲装置后坐阻尼变化范围为 800~1 400 Ns<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>，其他参数同表 2。在不同左缓冲装置后坐阻尼条件下，自动机的最大后坐位移、最大后坐力和密集度如图 13—16 所示。

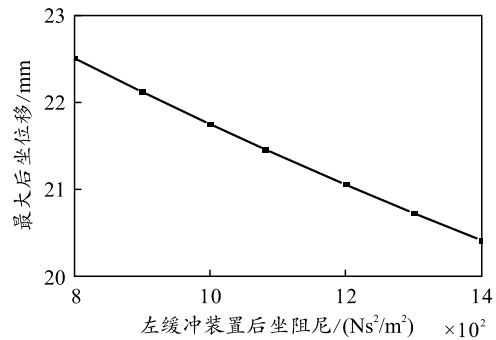


图 13 最大后坐位移与左缓冲装置后坐阻尼的关系

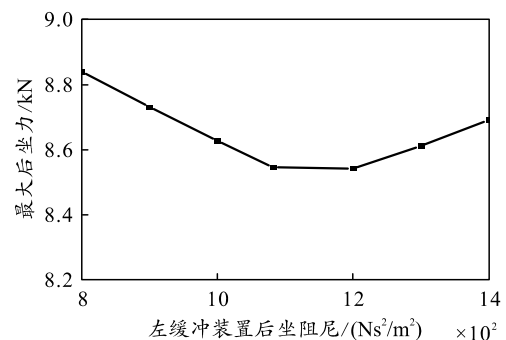


图 14 最大后坐力与左缓冲装置后坐阻尼的关系

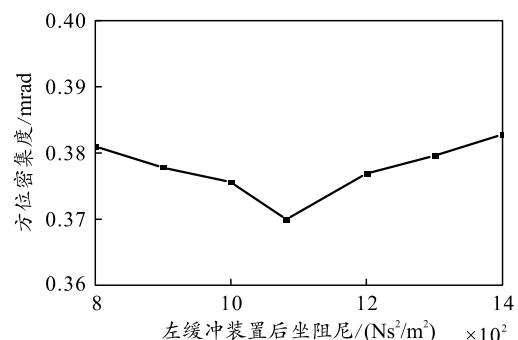


图 15 方位密集度与左缓冲装置后坐阻尼的关系

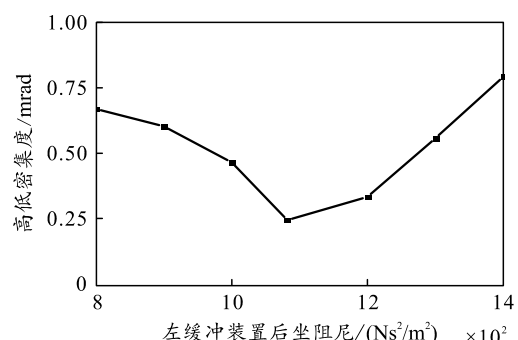


图 16 高低密集度与左缓冲装置后坐阻尼的关系

从上图中可以看出：最大后坐位移随着左缓冲装置后坐阻尼的增大而减小，最大后坐力随着左缓冲装置后坐阻尼的增大表现出先减小后增大的趋势，密集度随着左、右缓冲装置弹簧刚度差的增大而增大。

考虑左、右缓冲装置的复进阻尼不对称，左缓冲装置复进阻尼变化范围为 28 000~34 000 Ns<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>，其他参数同表 2。在不同左缓冲装置复进阻尼条件下，自动机的最大后坐位移、最大后坐力和密集度如图 17—20 所示。

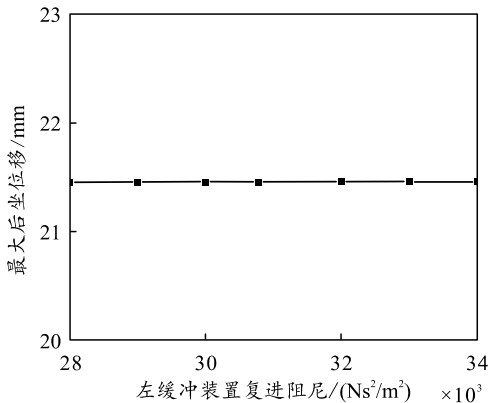


图 17 最大后坐位移与左缓冲装置复进阻尼的关系

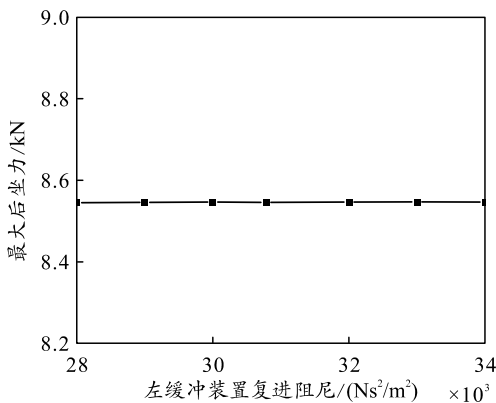


图 18 最大后坐力与左缓冲装置复进阻尼的关系

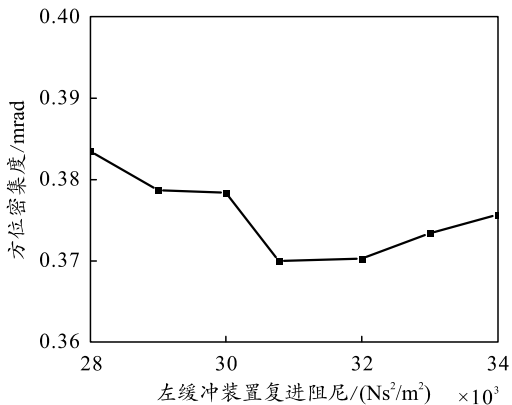


图 19 方位密集度与左缓冲装置复进阻尼的关系

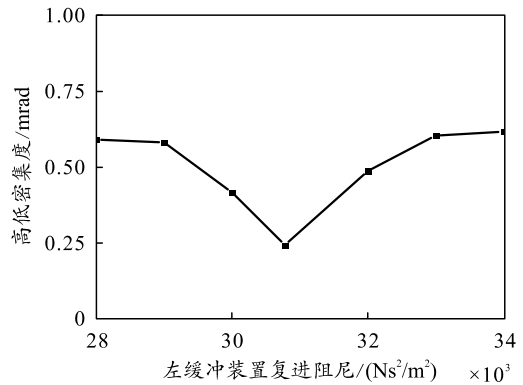


图 20 高低密集度与左缓冲装置复进阻尼的关系

从上图可以看出：左缓冲装置复进阻尼几乎不影响最大后坐位移和最大后坐力，但密集度随着左、右缓冲装置复进阻尼差的增大而增大。

#### 4 结束语

计算及分析结果表明：

1) 左、右缓冲装置的弹簧初力不对称、弹簧刚度不对称和后坐阻尼不对称会在一定程度上影响自动机最大后坐位移和最大后坐力，而复进阻尼不对称对自动机最大后坐位移和最大后坐力几乎没有影响；

2) 左、右缓冲装置的弹簧初力不对称、弹簧刚度不对称、后坐阻尼不对称和复进阻尼不对称都会显著影响自动机的方位、高低密集度，且密集度随着左、右缓冲装置弹簧初力、弹簧刚度、后坐阻尼和复进阻尼对应差的增大而增大。

#### 参考文献：

- [1] 徐亚凯, 杨宏亮, 殷鹏贤. 高射速自动机气液式缓冲装置仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(5): 186-189.
- [2] 马超, 李强, 程驰青. 基于 ADAMS 的某转管武器缓冲装置的参数化设计[J]. 兵工自动化, 2016, 35(11): 32-36.
- [3] 田楠, 赵建中, 陈永刚. 基于 RecurDyn 的弹簧-液压力式缓冲装置动力学仿真研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2016, 37(1): 7-11.
- [4] 郝秀平, 薄玉成, 景英萍. 超高射速自动机缓冲装置参数优化设计方法[J]. 火炮发射与控制学报, 2009(4): 31-33, 49.
- [5] 吴定海, 张培林, 傅建平. 基于功率键合图的自行火炮液压系统动态仿真[J]. 兵工自动化, 2006, 25(11): 22-24.
- [6] 戴劲松. 自动机碰撞键合空间建模及分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2001(2): 1-3, 40.