

基于浮动链轮的链式弹箱动力学仿真分析

米洋锐¹, 李强^{1*}, 孙志群¹, 杨勇², 吴永国², 罗堂俊²

(1.中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2.重庆长安望江工业集团有限公司, 重庆 401120)

摘要: **目的** 解决高射速转管武器供弹系统在启动阶段功耗较大、冲击载荷显著的技术难题。**方法** 提出一种集成浮动链轮载荷分离机构的链式弹箱结构。通过建立多体动力学模型, 对比分析有无浮动链轮机构的动力学特性差异, 揭示该机构对无链供弹箱启动阶段动力学特性的调控机制。**结果** 浮动链轮机构的载荷分离作用可以将供弹系统启动阶段最大功率降低 30.76%, 链轮链条最大冲击力降低 48.7%。**结论** 浮动链轮机构的引入可以实现功率调控和冲击抑制的目标, 且该机构的载荷分离作用使主动链轮呈现变转动惯量特性(波动范围为 $\pm 0.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), 可以在机构失效前有效降低系统惯性负载。该研究不仅为转管武器供弹系统设计提供了新的技术路径, 而且提出的变惯量调控方法对动态链传动系统的优化设计具有一定的指导意义。

关键词: 转管武器; 启动阶段; 浮动链轮; 动力学; 变转动惯量; 链传动

中图分类号: TJ303

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)04-0026-10

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.04.004

Dynamic Simulation Analysis of Chain Magazine Based on Floating Sprocket

MI Yangrui¹, LI Qiang^{1*}, SUN Zhiqun¹, YANG Yong², WU Yongguo², LUO Tangjun²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Chongqing ChanganWangjiang Industrial Group Co., Ltd., Chongqing 401120, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the technical problem of high power consumption and significant impact load during the start-up phase of the high firing rate rotary tube weapon feeding system. A chain magazine integrated with a floating sprocket load separation mechanism was proposed. By establishing a multi-body dynamics model, the differences in dynamic characteristics between mechanisms with and without floating sprocket were compared and analyzed, revealing the regulatory mechanism of this mechanism on the dynamic characteristics of the non-chain feeding box during the start-up phase. The load separation effect of the floating sprocket mechanism could reduce the maximum power of the ammunition feeding system during the start-up phase by 30.76% and the maximum impact force of the sprocket chain by 48.7%. The introduction of a floating sprocket mechanism can achieve the goals of power regulation and impact suppression, and the load separation effect of this mechanism causes the active sprocket to exhibit variable rotational inertia characteristics (fluctuation range of $\pm 0.04 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$), which can effectively reduce the inertial load of the system before the mechanism fails. This study not only provides a new technical path for the design of the feeding system of the rotary tube weapon, but also proposes a variable inertia control method with certain

收稿日期: 2025-02-18; 修订日期: 2025-03-06

Received: 2025-02-18; Revised: 2025-03-06

基金项目: 智元实验室资助项目 (ZYL2024015)

Fund: Funded by Zhiyuan Laboratory (ZYL2024015)

引文格式: 米洋锐, 李强, 孙志群, 等. 基于浮动链轮的链式弹箱动力学仿真分析[J]. 装备环境工程, 2025, 22(4): 26-35.

MI Yangrui, LI Qiang, SUN Zhiqun, et al. Dynamic Simulation Analysis of Chain Magazine Based on Floating Sprocket[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(4): 26-35.

*通信作者 (Corresponding author)

guiding significance for the optimization design of the dynamic chain transmission system.

KEY WORDS: rotary tube weapon; start-up phase; floating sprocket; dynamics; variable moment of inertia; chain transmission

高动态链传动系统的功率调控与冲击抑制是转管武器匹配的供弹系统研究领域长期存在的技术瓶颈。随着末端防空武器系统对抗环境日益复杂, 现代小口径转管武器射速已突破万发/分钟量级^[1], 所匹配的供弹系统需在 0.15 s 级的时间窗口内完成数千焦耳的动能加载^[2], 这对系统的功率密度和动态稳定性提出了严苛要求。统计表明, 供弹系统故障中约 60% 发生在瞬态启停阶段^[3], 其中链传动系统的惯性冲击载荷与功率突变是主要诱因。

当前国内学者针对链式弹箱的优化设计主要沿 2 个技术路径展开。在链传动结构参数优化方面, 杨仁民等^[4]建立了链传动多边形效应实时模型, 揭示了链轮齿数与传动平稳性二者之间的量化关系。许立团队^[5]通过 Pro/E 仿真验证了链速对动载荷的显式影响规律。在供弹箱结构构型系统创新方面, 杨志远等^[6]改进了供弹箱中供弹输送单元排列方式, 使空间利用率提高了 50%, 供弹功耗降低了 54%。吴宝双等^[3]设计了一种新型的弹箱结构, 提出了新型弹箱传动系统速比计算方法。王钢等^[7]提出的模块化供弹系统实现了弹种快速切换功能。谢云峰等^[8]采用双仓结构可靠性设计使故障率降低了 40%。

以往学者对链式弹箱的研究主要集中在通过设计、优化弹箱的结构实现更大的弹容量, 提高火炮的自动化程度, 快速更换弹种的目的, 为链传动以及弹箱结构优化的研究做出了巨大贡献。现有研究主要聚焦稳态工况下的弹箱性能优化, 对非稳态、高动态工况下启停阶段的能量耗散机制研究不足。针对供弹系统启动阶段的功率调控及冲击抑制研究较少, 频繁启停是小口径转管防空武器的工作特点, 且弹箱在启动阶段所需功率远大于射频稳定阶段, 因此降低弹箱在启动阶段所需功率具有一定的研究意义。浮动链轮机构基于链传动基本原理, 主要由链轮、链条以及浮动张紧装置等组成, 广泛应用于转膛武器所匹配的弹箱中, 用于解决弹箱连续供弹与转膛自动机脉动击发之间的矛盾。在匹配转管武器的弹箱结构设计过程中, 引入浮动链轮机构, 旨在降低启动阶段所需功率, 减小链轮链条之间的冲击力, 进而实现提高弹箱的可靠性, 延长弹箱使用寿命, 降低全炮和武器发射平台功耗的目标。

通过引入新结构的方式突破了传统链传动系统恒定惯量模式的技术框架, 设计了一种集成浮动链轮载荷分离机构的链式弹箱结构, 提出基于动态惯量调控的浮动链轮载荷分离机制。通过建立含非线性接触特征动力学模型, 重点对比分析了有浮动链轮载荷分离机构和没有该机构时, 整个供弹箱在启动阶段所需功率以及链轮链条之间的受力 2 组指标。系统揭示浮

动链轮机构对启动阶段功率特性以及链传动惯性冲击的调控规律, 浮动链轮载荷分离机构可以显著降低弹箱启动阶段所需功率及链轮链条之间的冲击力。

相较于文献[9]中提出的浮动链轮载荷分离机构在转膛武器中的应用研究, 首次在转管武器供弹系统中实现转动惯量动态调控, 并通过多体动力学仿真的方式验证了该机构对系统冲击载荷的相位调制作用。采用的研究方法从能量耗散机制重构的角度为高射速武器供弹系统设计提供了新的理论范式。

1 链式弹箱结构与传动机理

1.1 弹箱结构拓扑与参数体系

链式弹箱采用多级链传动拓扑结构, 架构设计遵循“动-静载荷分离”准则。包含四大功能模块, 动力传输单元, 弹丸运载单元, 动态调控单元以及运动约束单元。以上功能模块分别对应链轮链条机构, 弹丸弹托结构, 浮动链轮机构, 箱板导引机构, 弹箱的总体结构如图 1 所示。

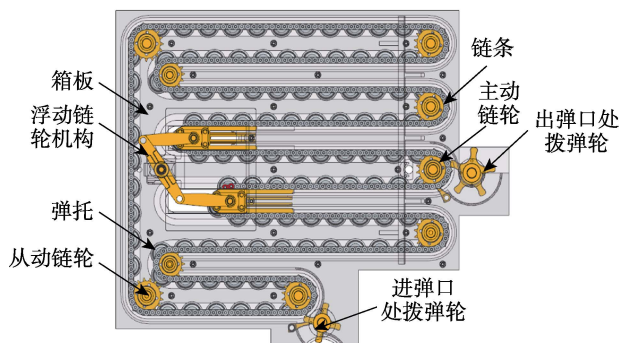


图 1 弹箱结构

Fig.1 Structure of magazine

弹箱采用标准工业级链轮链条作为输送单元, 链条型号为 08B, 节距为 12.7 mm, 弹间距设计为 50.8mm, 即单边 4 个链节对应 1 发弹。为了降低链传动多边形效应对供弹平稳性造成的影响^[10], 降低动载荷。建立链轮齿数 z 与弹丸间距 P 的数学关系式: $z \cdot p = 4P$, 其中 p 为链条节距。当取 $z=16$ 时, 理论弹丸间距误差可以控制在 ± 0.15 mm 内。弹丸间距误差减小, 使弹丸间距更均匀, 可以减少供弹过程中的卡弹或振动, 显著提升供弹平稳性。综上所述, 设计的链轮为 16 齿链轮, 结合上文中提到的弹间距为 50.8 mm, 设计链轮为四分度链轮。

箱板导引机构由前后板、连接板以及贯穿其中的固定轴组成, 箱板结构用于定位拨弹轮、拨链轮以及固定轴。此外, 前后板内侧均存在为滚轮槽, 这样的

设计可以避免链传动时重力导致弹丸的传输失去强制性。浮动链轮机构由摆杆、4根连杆以及限位导槽组成。

1.2 载荷分离传动机理

该链式弹箱以链轮链条配合弹托作为输送载体,双边共计960个内外链节,输送弹箱内部120发弹丸。弹丸从补弹口装入弹箱,在出弹口被拨弹轮拨出进入自动机。有无浮动链轮机构时链传动状态对比如图2所示。有浮动链轮机构时,弹箱工作过程可分为缓冲传动阶段和全负载传动阶段,而没有浮动链轮机构时只有全负载传动阶段。

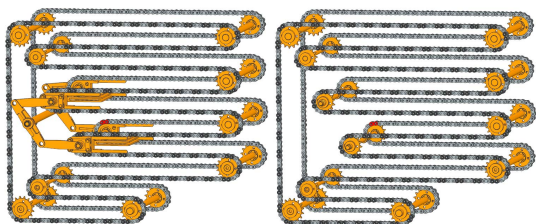


图2 有无浮动链轮机构时链传动状态对比
Fig.2 Comparison of chain transmission status with and without floating sprocket mechanism

在浮动链轮作用时间内 ($t < 0.1125\text{ s}$), 浮动链轮组在摆杆-连杆机构作用下产生相向位移, 形成局部闭环动力传递路径。此时, 系统等效惯量约为 $0.04\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 实现了:

$$\tau_{\min} = J_{\text{eq}} \cdot a_{\max} \quad (1)$$

式中: τ 为驱动扭矩; a 为角加速度。该阶段完成约83%弹丸的初速加载。当浮动链轮位移量达到限位导槽阈值时, 机构进入刚性连接状态, 系统惯量瞬时跃迁至 $0.223\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。在缓冲传动阶段, 系统负载仅为该阶段全负载的18%。此时, 传动路径扩展为全域链节参与:

$$P_{\text{peak}} = t_{\max} \cdot \omega_{\text{rated}} \quad (2)$$

式中: ω 为额定角速度。通过相位调制实现惯性载荷的渐进加载, 有效抑制功率突变。

在没有浮动链轮机构时, 系统惯量始终保持在 $0.221\text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 与有浮动链轮机构时的全负载传动阶段负载基本一致。因此, 可以得出结论, 在浮动机构失效之前, 有浮动链轮机构的负载仅为无浮动机构时的18%。这种基于运动副状态切换的传动模式创新, 使系统在缓冲传动阶段平均功率梯度降低至 62.5 kW/s 。

在没有浮动链轮机构时, 平均功率梯度为 90.27 kW/s 。该机构的引入使这一指标下降30.76%, 有效改善了高动态工况下的功率调控和冲击抑制困难的现状。在浮动链轮失效瞬间, 出现了较大的碰撞力, 在后续优化过程中, 可以通过在适当位置添加弹簧和阻尼器对浮动链轮失效过程进行缓冲。由于本文重点关注该机构在缓冲传动阶段对供弹箱动力学特性的调控机制, 因此对该过程不予研究。

2 虚拟样机建模

链式弹箱中零部件数量较多, 且链条之间存在旋转铰接关系, 链轮链条之间的接触关系也较为复杂。使用传统人工约束施加方式施加部件之间约束关系, 难以高效、准确地建立动力学模型, 因此拟采用Adams的二次开发功能, 使用宏命令^[11]施加部件之间的约束关系。虚拟样机仿真流程如图3所示。

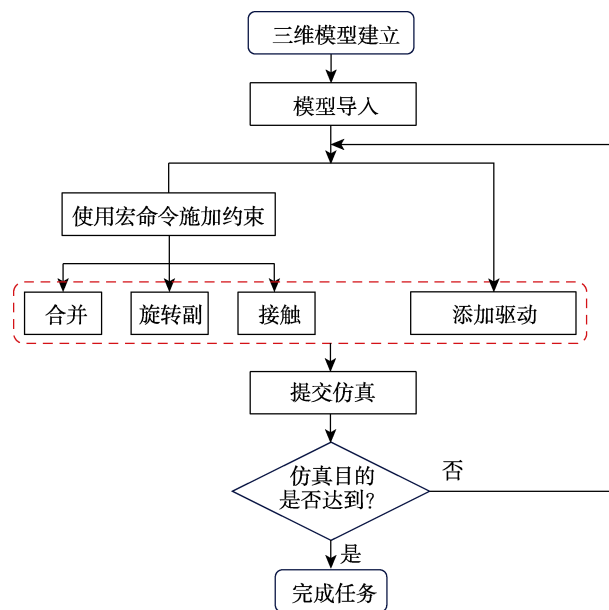


图3 虚拟样机仿真流程
Fig.3 Virtual prototype simulation process

2.1 基本假设

动力学分析研究对象为链式弹箱, 研究内容是浮动链轮机构对弹箱启动阶段动力学特性的调控机制。为节约计算资源, 减少次要因素的影响, 分析其主要动力学特性, 因此对计算条件和计算模型做如下假设。

- 1) 刚体假设: 忽略构件弹性变形, 弹箱中的所有部件简化为刚体^[12]参与计算。
- 2) 准静态假设: 重力沉降过程在 0.01 s 内完成, 0.01 s 后供弹箱达到静平衡状态。
- 3) 能量解耦假设: 忽略供弹交接动作对启动阶段功耗造成的影响^[13]。
- 4) 等效摩擦模型假设: 将滚轮与箱板轨道之间的滚动摩擦简化为滑动摩擦。

2.2 接触理论

在以往动力学仿真工作中发现, 碰撞是导致后处理中各物理量出现数据毛刺的主要原因之一。而链式弹箱工作原理的本质正是通过链轮链条之间的接触和碰撞传递力和运动, 因此合理的接触算法选择、合理的参数设定对建立精确的动力学模型十分重要。

ADAMS/View 模块提供了2种接触力算法^[14]:

补偿法 (Restitution) 和冲击函数法 (Impact)。补偿算法基于回归, 通过惩罚参数和回归系数来计算接触力, 算法相对简单, 且效率高。对于复杂的接触情况, 该算法存在无法提供足够准确的模拟结果的可能。冲击函数法可用于连续接触和非连续接触, 稳定可靠, 更适合处理复杂的接触情况。因此。采用冲击函数法 (Impact) 计算各部件之间的碰撞力, 其一般表达式为:

$$\text{Impact} = \begin{cases} 0, x \geq x_0 \\ k(x - x_0)^e - C_{\max} \frac{dx}{dt} \text{step}(x, x_0 - d, 1, x_0, 0), x < x_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: k 为接触刚度, 通常由两接触物体的材料属性和几何形状等因素确定; $C_{\max}$ 为阻尼系数; d 为接触体的穿透量, 决定阻尼力的大小; x 为距离变量; x_0 为两物体碰撞的初始距离; dx/dt 为速度。以链轮链条为例, 查阅相关资料可知, 接触刚度取 1.0×10^5 , 阻尼系数取 100, 穿透量取 0.1。式中采用的 $\text{step}(x, x_0, h_0, x_0, h_1)$ 子函数定义为:

$$\text{step} = \begin{cases} h_0, x \leq x_0 \\ h_0 + (h_1 - h_0) \left(\frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \right), x_0 < x < x_1 \\ h_1, x \geq x_1 \end{cases} \quad (4)$$

当 $x > x_1$ 时, 构件之间不发生接触; 当 $x < x_1$ 时, 构件之间发生接触。

此外, 采用改进型 Hertz 接触理论^[15]描述链节啮合过程, 接触刚度系数由式 (5) 确定:

$$K = \frac{4}{3} E^* \sqrt{R^*} \quad (5)$$

式中, 等效弹性模量 E^* 与等效曲率半径 R^* 满足:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - n_1^2}{E_1} + \frac{1 - n_2^2}{E_2} \quad (6)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R^1} + \frac{1}{R^2} \quad (7)$$

阻尼系数采用时变模型:

$$C(t) = C_{\max} \cdot e^{-\beta t} \quad (8)$$

式中: 衰减因子 $\beta = 12.5 \text{ s}^{-1}$, 通过模态分析确定。

2.3 约束拓扑构建

链式弹箱的动力学仿真前处理需要建立的约束关系, 主要包括浮动链轮机构相关约束关系、链轮链条之间的接触关系、链条之间的旋转铰接关系、链条与弹托之间的约束关系以及弹托与弹丸之间的约束关系等。模型中零部件数量较多, 使用传统方法建模较为复杂, 因此采用基于 python 语言的 Adams 宏命令进行约束施加。

以链轮链条之间施加接触力为例, 代码实现逻辑为: 使用 while 语句和变量累加的方式构建循环机制,

每次循环中使用功能语句创建接触点、设定几何及其他属性、设置物理参数, 直至变量不再满足循环条件, 循环结束。单位制设定为 MMKS 时, 物理参数的设定包括接触刚度为 1.0×10^5 , 阻尼值为 100, 力指数为 1.5, 最大穿透量为 0.1, 静摩擦因数为 0.5, 动摩擦因数为 0.3, 静摩擦平移速度为 100, 动摩擦平移速度为 1 000。该宏命令提供了一个动态的接触配置框架, 能够根据指定的索引生成和加载多个具有唯一标识符和特定几何、材料和物理属性的接触点。通过循环机制, 可以自动处理一系列接触点, 从而支持大规模或复杂的模拟场景。在实际应用中, 这种动态配置方法能够显著提升模拟效率和灵活性, 适用于需要逐一定义和处理大量接触的情况。

施加内链节与外链节之间的旋转副时, 由于模型前处理时将长销轴与内外链板做合并处理, 相邻两链节质心的 x 方向坐标并不相同 (如图 4 所示), 因此提出虚滚轮技术解决链节铰接问题。首先在相邻链节质心连线上创建临时几何体, 图 5 为全部链节虚假滚轮局部图; 其次基于虚滚轮 Marker 点, 建立旋转副约束; 最后通过布尔运算删除冗余几何体, 保留有效约束。创建链节之间旋转副的代码逻辑同样为构建循环机制, 根据变量生成唯一的标记名称, 根据已有节点动态创建新的节点及部件之间旋转铰接关系。相较于传统建模方法, 该技术提升了旋转副定位精度, 提高了建模效率, 其约束关系满足 Grübler 自由度^[16]公式:

$$F = 6(N - 1) - \sum_{i=1}^j c_i = 3 \quad (9)$$

式中: N 为构件数; J 为约束副数; c_i 为每个约束对应的约束自由度。

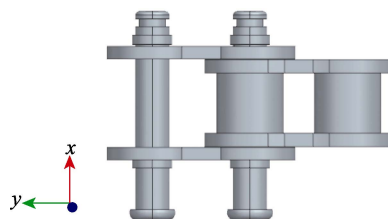


图 4 相邻两链节的三维模型

Fig.4 Three-dimensional model of adjacent chain links



图 5 全部链节虚加滚轮局部

Fig.5 Partial addition of virtual rollers on all chain links

弹箱中重要部件之间的约束关系见表 1。

2.4 运动激励加载

某转管火炮启动时间规定为, 前 6 发弹加速至 5 000 发/min 的射频。根据四分度链轮^[17]结构可以计

表 1 弹箱关重件之间的约束关系

Tab.1 Constraints between the heavy components of the magazine

序号	组件 1	组件 2	约束方式
1	弹丸	箱体	接触副
2	箱体	大地	固定副
3	滚轮	箱体	接触副
4	摆杆	连杆	旋转副
5	链轮	箱体	旋转副
6	内链节	链轮	接触副
7	阻弹齿	箱体	固定副
8	外链节	滚轮	固定副
10	拨弹轮	弹丸	接触副
11	外链节	弹托	固定副
12	内链节	外链节	旋转副
13	限位导槽	箱体	平移副
14	限位导槽	箱体	接触副

算得到主动链轮的加速时间为 0.144 s, 加速阶段完成后, 主动链轮的角速度约为 130.89 rad/s, 理论角加速度约为 909.02 rad/s²。施加驱动的方法是创建 SPLINE 数据单元, 输入角速度随时间变化的一组数据, 设定加速过程为匀加速过程, 调用 AKISPL 函数施加驱动, 调用格式为 AKISPL (time, 0, MODEL_1.SPLINE_1, 0)。

为了使得模型达到静平衡, 仿真时间前 0.01 s 内, 设定主动件角速度为 0 rad/s。根据后续仿真结果, 0.008 s 时系统动能衰减至 10⁻⁵ J 量级, 证明重力沉降可以在 0.01 s 内完成。因而构建主动链轮的角速度分段函数为:

$$\varpi(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0.01 \text{ s} \\ \alpha t, & 0.01 \text{ s} < t \leq 0.154 \text{ s} \\ 130.89 \text{ rad/s}, & t > 0.154 \text{ s} \end{cases} \quad (10)$$

3 动力学特性分析

3.1 无浮动链轮机构时

没有浮动链轮机构时, 弹箱启动时刻以及工作阶段的状态如图 6 所示。弹托仅提供弹丸运动动力, 弹丸的周向限位作用由箱体导引提供, 而在出弹口处箱体限位

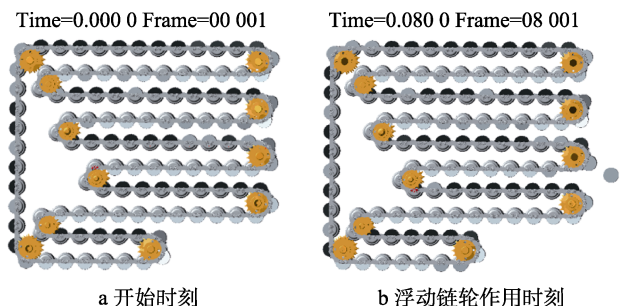


图 6 无浮动链轮机构时弹箱初始状态和工作状态
Fig.6 Initial and working states of the magazine without floating sprocket mechanism: a) start time; b) floating sprocket action time

作用缺失, 弹丸由于受到惯性的作用与弹箱发生脱离。

3.1.1 启动阶段功率分析

主动链轮扭矩与链轮 11 的角速度对比情况如图 7 所示, 主动链轮角加速度曲线如图 8 所示。在 0.01 s 之前, 主动链轮上的扭矩数据以及主动链轮与链条之间的受力数据并不为 0。在 0.01 s 之后, 链轮 11 的角速度曲线可以近似为一次函数曲线, 角速度与主动链轮角速度在数值上基本一致。

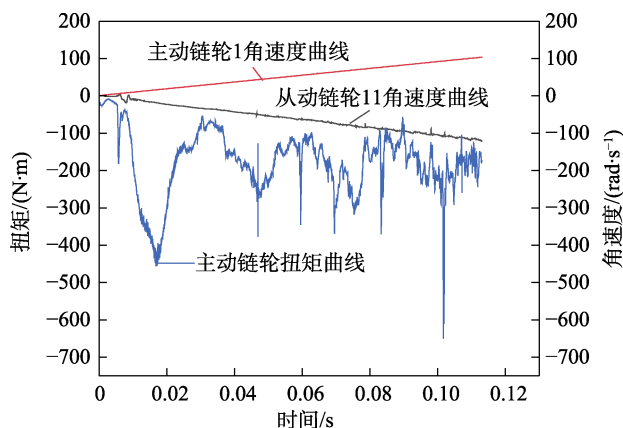


图 7 主动链轮扭矩、角速度与链轮 11 角速度曲线
Fig.7 Torque, angular velocity, and angular velocity curves of the driving sprocket and sprocket 11

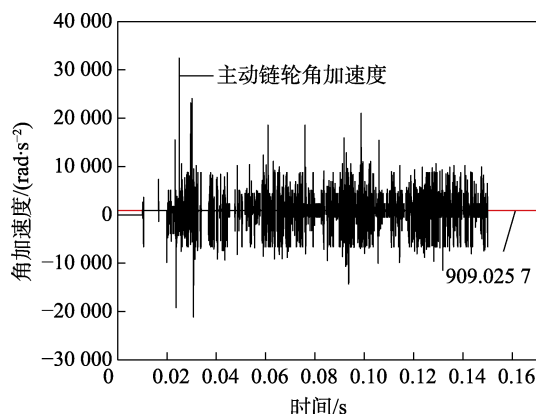


图 8 无浮动链轮机构时主动链轮 x 方向角加速度曲线
Fig.8 Angular acceleration curve of the driving sprocket in the x-direction without floating sprocket mechanism

由于从 0.01 s 时刻即进入全负载传动阶段, 主动链轮的扭矩数据呈现先增大、后减小、随后趋于稳定的趋势。可以看出, 除碰撞因素导致的少数数据毛刺外, 角速度数据稳定在理论角加速度 909.02 rad/s², 这是由驱动施加方式决定的。由于碰撞因素影响较多, 没有浮动链轮机构时, 扭矩和角加速度曲线均存在较多数据毛刺。

根据角加速度曲线和扭矩曲线可以计算得到启动阶段弹箱中的负载折算到主动链轮上的转动惯量, 进而计算得到启动阶段功率。转动惯量计算公式及功率计算公式:

$$J = \frac{\tau}{\alpha} \quad (11)$$

式中: J 为转动惯量; τ 为扭矩; α 为角加速度。

$$P = \tau * \frac{n}{9550} \quad (12)$$

式中: P 为功率; τ 为扭矩; n 为转速。取加速段中主动链轮扭矩和角加速度曲线平滑的阶段, 计算得到折算到主动链轮上的转动惯量^[18]为 0.221, 弹箱在启动阶段所需的最大功率为 13 kW。

3.1.2 链轮链条之间受力分析

主动链轮与链节的受力分析如图 9 所示。该接触力的作用时间较短, 在主动链轮与 PART552-562 这组数据中, 最大值为 8 680 N, 采用雨流计数法^[19]得到的均方根值为 3 254 N。

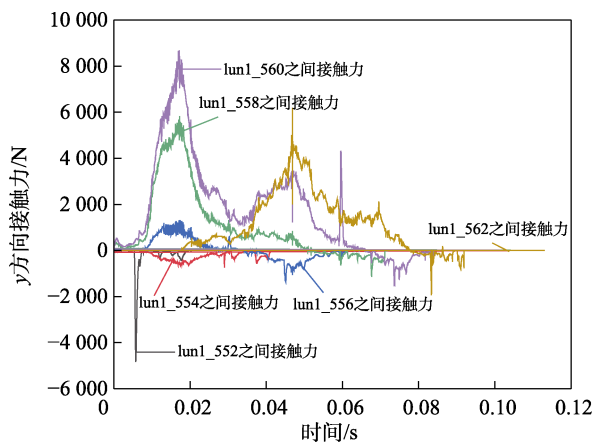


图 9 无浮动链轮机构时主动链轮链节受力
Fig.9 Force on the chain link of the driving sprocket without floating sprocket mechanism

3.2 有浮动链轮机构时

浮动链轮机构静止状态、工作状态、失效状态以及失效后的状态如图 10 所示。可以看出, 在浮动链轮失效之前, 仅存在图 10b 中虚线框内的零部件在做加速运动, 其他位置的部件处于静止状态。

3.2.1 启动阶段功率分析

主动链轮扭矩曲线及其放大图如图 11、12 所示, 主动链轮角加速度曲线如图 13 所示。相较没有浮动链轮机构时, 扭矩数据整体较小, 但是出现了浮动链轮机构失效瞬间突增的现象。在浮动链轮失效之前, 弹箱中碰撞因素相比没有浮动链轮时较少, 因此主动链轮角加速度曲线中数据毛刺显著减少。

0.01~0.112 5 s 这一阶段为缓冲传动阶段, 弹箱中运动的物体包括浮动链轮与主动链轮之间的链条、弹托和弹丸, 这一阶段主动链轮的负载较小。在 0.01 s, 主动链轮开始加速转动, 在这一阶段扭矩曲线呈现增大的趋势, 并伴随较小的波动。而在这一阶段角加速度曲线在 0.01 s 之后迅速变为 909.02 rad/s², 且由于弹箱中的碰撞因素, 角加速度数据的不稳定, 出现了较多的数据毛刺。

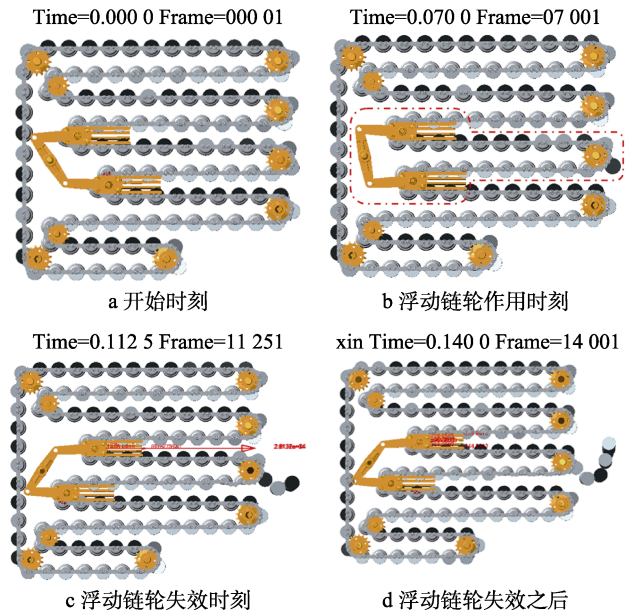


图 10 浮动链轮作用全过程

Fig.10 Entire process of floating sprocket action: a) start time; b) floating sprocket action time; c) time of failure of floating sprocket; d) after the failure of the floating sprocket

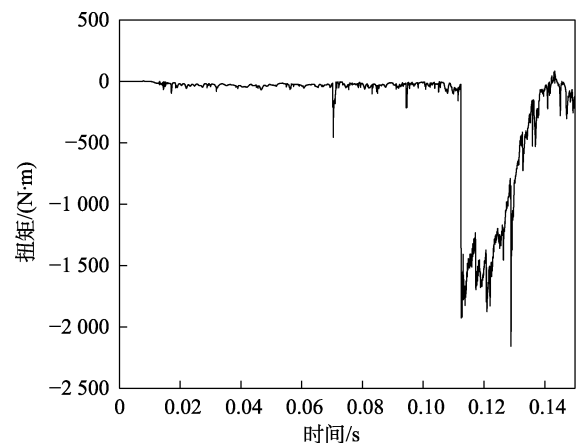


图 11 有浮动链轮机构时主动链轮 x 方向扭矩曲线
Fig.11 x-direction torque curve of the driving sprocket with a floating sprocket mechanism

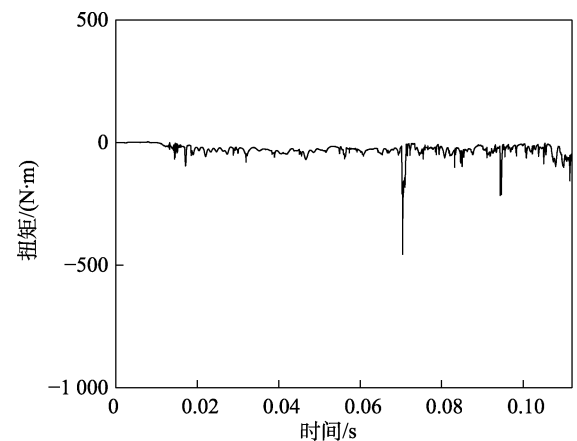


图 12 有浮动链轮机构时主动链轮 x 方向扭矩局部放大图
Fig.12 Partial enlarged view of the x-direction torque of the driving sprocket with a floating sprocket mechanism

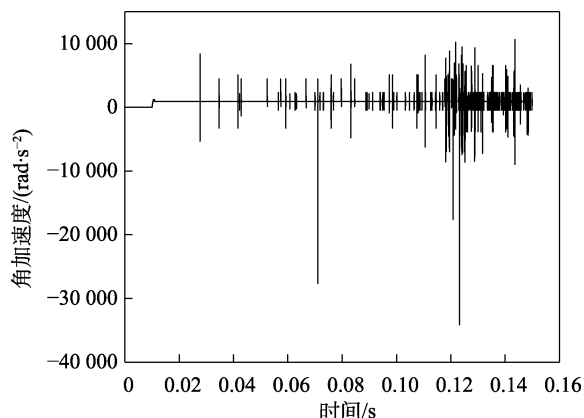


图 13 有浮动链轮机构时主动链轮 x 方向角加速度曲线
Fig.13 x -direction angular acceleration curve of the driving sprocket with a floating sprocket mechanism

在 0.112 5 s 这一时刻,浮动链轮位移量达到限位导槽阈值,浮动链轮机构失效,弹箱中的全部链条、弹托和弹丸同步加速运动,碰撞因素相较上个阶段变得更加复杂,因此角加速度曲线中数据突变现象比上个阶段的突变现象数量显著增加。可以看出,数据仍稳定在理论角加速度 909.02 rad/s^2 附近。经计算,有浮动链轮时弹箱启动阶段最大功率为 9 kW。

3.2.2 链轮链条之间受力分析

主动链轮与链节之间的受力分析如图 14 所示。可以看出,随着链节序号的增大,主动链轮与该链节之间的接触力也随之增大。在这组数据中最大值为 4 481 N,同样采用雨流计数法得到的均方根值为 1 876 N。

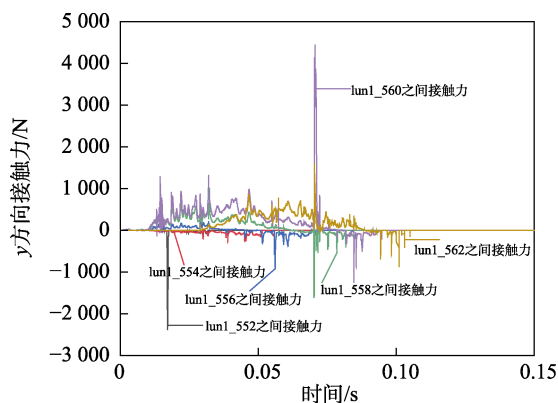


图 14 有浮动链轮机构时主动链轮链节受力
Fig.14 Force on the chain link of the driving sprocket with a floating sprocket mechanism

3.3 2 种工况对比分析

3.3.1 功率相关数据分析

有无浮动链轮机构时角加速度对比如图 15 所示。2 种工况下的角加速度都稳定在理论角加速度附近,区别是没有浮动链轮机构,弹箱中的碰撞因素比有该机构时更为复杂。因此,没有浮动链轮机构时,曲线突变更加频繁,突变幅值也更大。

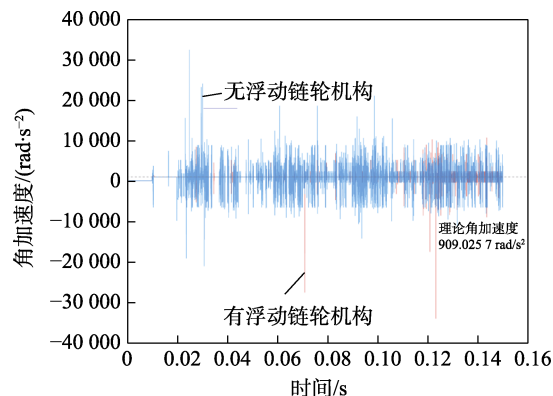


图 15 有无浮动链轮机构时角加速度对比
Fig.15 Comparison of angular acceleration with and without floating sprocket mechanism

有无浮动链轮机构时扭矩对比分析曲线如图 16 所示。由于没有浮动链轮机构时只有全负载传动阶段,因此该扭矩曲线一开始就呈现出先增大、后减小的趋势;有浮动链轮机构时,分为缓冲传动阶段和全负载传动阶段,在缓冲传动阶段扭矩小于没有浮动链轮机构时。据此可以得出结论,没有浮动链轮机构时,弹箱启动阶段最大功率为 13 kW,有该机构时,最大功率为 9 kW,弹箱在启动阶段的最大功率下降 30.76%。

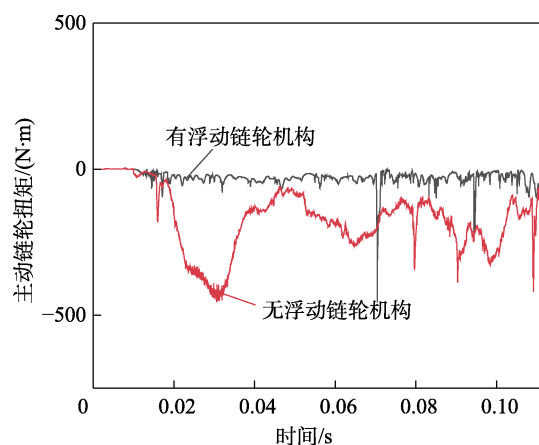


图 16 有无浮动链轮机构时扭矩对比分析曲线
Fig.16 Comparative analysis curve of torque with and without floating sprocket mechanism

3.3.2 链轮链条接触力对比分析

有无浮动链轮机构时,选取的一组数据中峰值最大接触力对比分析曲线如图 17 所示。可以看出,有浮动链轮机构时,该接触力的峰值晚于没有该机构时,且有该机构时峰值和均方根都比没有该机构时小,最大受力下降 48.7%,均方根值下降 42.35%。

3.4 变惯量调控机制

去除数据毛刺后,在浮动链轮机构作用阶段,弹箱中全部负载折算到主动链轮上的转动惯量曲线如图 18 所示。主动链轮的角加速度曲线较为平滑,因

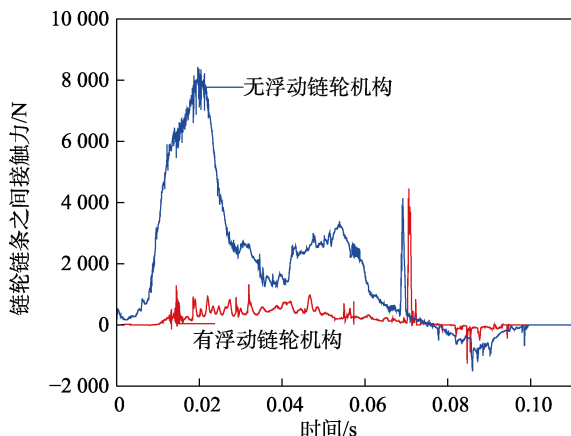


图 17 有无浮动链轮机构时链轮链条受力对比分析曲线
Fig.17 Comparative analysis curve of force on sprocket with and without floating sprocket mechanism

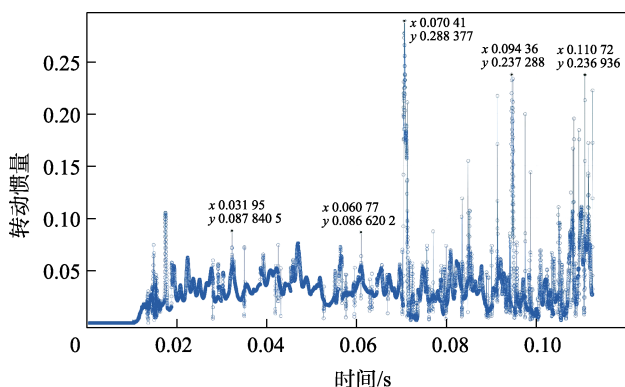


图 18 折算到主动链轮上的转动惯量曲线
Fig.18 Curve of moment of inertia converted to the driving sprocket

此转动惯量的变化趋势与扭矩曲线变化的趋势基本相同。同样由于碰撞因素的影响,转动惯量的变化趋势先波动稳定、后急速上升。在 0.112 5 s 左右,由于浮动链轮机构失效,主动链轮上的负载瞬间增大至弹箱中的全部负载。随着主动链轮上的负载的变化,转动惯量最小值出现在主动链轮最开始转动的时刻,最小值为 0.002;而最大值出现在浮动链轮失效之后,最大值为 0.223。在 0.070 4 s 处出现了转动惯量的峰值,这是弹箱内部的碰撞因素导致的,因此该数据点应该被舍去,不具有参考意义。

更进一步的,图 18 中的等效惯量曲线满足微分方程:

$$J_{eq}(t) = J_0 + \Delta J \cdot e^{-k(t-t_c)} \quad (13)$$

式中: t_c 为机构失效临界点, $t_c=0.112\ 5\text{ s}$ 。通过数据拟合,得到衰减系数 $k=85.3\text{ s}^{-1}$ 。当系统处于缓冲阶段时,惯量波动标准差 $\sigma=0.002\ 7\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,惯量数据较集中,波动较小,证明机构具有较好的稳定性。

3.5 动态响应特性分析

进一步地,从非线性动力学的角度分析系统在不同激励条件下的动态响应特性,引入 Lyapunov 指数

稳定性理论^[20],构建系统状态空间方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (14)$$

式中:状态向量 $\mathbf{x}=[\theta, \omega, \tau]$ 表示系统的动态参数,包括角度、角速度和时刻角速度变化率。输入向量 $\mathbf{u}$ 包含外部驱动函数及其接触参数。当启动时间 $t_s < 0.15\text{ s}$ 时,系统呈现强非线性特征,其最大 Lyapunov 指数 $\lambda_{\max}=3.28$,证实系统处于混沌运动状态。

建立三参数 Weibull 分布模型^[21]描述冲击载荷统计特征,如式(15)所示。引入浮动链轮后,形状参数 β 从 2.7 提升到 3.1,尺度参数 η 从 4 215 降至 2 643,证明引入该机构后使载荷分布趋于平稳。

$$f(x) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{x-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} \quad (15)$$

4 结论

针对某高射速转管火炮设计了一种链式弹箱,介绍了该链式弹箱的结构和工作原理。通过多体动力学软件建立了该链式弹箱的虚拟样机模型,阐述了建模过程。针对有无浮动链轮 2 种工况进行对比分析,分析了 2 种工况下功率功耗以及链轮链条之间接触力^[22]2 组指标,得出如下结论。

1) 设计的链式弹箱结构合理,可以匹配规定转速为 5 000 发/min 的转管火炮。

2) 浮动链轮失效后,碰撞因素变得更加复杂,主动链轮角加速度曲线出现明显的毛刺增多现象,导致弹箱瞬时功率出现波动,在工程实践中需要注意合理润滑^[23]。

3) 浮动链轮机构载荷分离作用使主动链轮呈现变转动惯量特性(波动范围为 $\pm 0.04\text{ kg}\cdot\text{m}^2$),可以在机构失效前有效降低系统惯性负载。

4) 有浮动链轮机构时对比没有浮动链轮机构时,启动阶段最大功率下降 30.76%,主动链轮链条之间的最大受力下降 48.7%。由此可见,浮动链轮机构可以显著降低弹箱在启动阶段的功率,减小链轮链条之间的冲击力,而在后续设计优化过程中,该设计也能通过平衡不同工况^[24]下的动力学特性,避免因局部失效导致整体性能下降。

参考文献:

- [1] 王斌, 徐亚栋, 王亮宽. 火炮供输弹系统故障诊断方法研究进展与趋势[J]. 兵工学报, 2024, 45(11): 3765-3780.
WANG B, XU Y D, WANG L K. Development and Trend of Research on Fault Diagnosis Methods for Ammunition Loading System[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(11): 3765-3780.
- [2] 吕文军, 王惠源, 陈辉. 转管武器启动过程中的问题研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(2): 225-226.

- LYU W J, WANG H Y, CHEN H. Study on Startup Process of Gatling Weapon[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2015(2): 225-226.
- [3] 吴宝双, 樊永锋, 张海洋. 小口径舰炮弹箱供弹结构设计及仿真分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2018, 39(3): 62-66.
- WU B S, FAN Y F, ZHANG H Y. Supply Ammunition for Ammunition Box of Small Caliber Naval Gun Structure Design and Simulation Analysis[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2018, 39(3): 62-66.
- [4] 杨仁民, 张学昌, 韩俊翔, 等. 链传动多边形效应实时传动数学模型构建与仿真[J]. 机械科学与技术, 2017, 36(6): 821-826.
- YANG R M, ZHANG X C, HAN J X, et al. Mathematical Modeling and Simulation of Real Time Transmission of Polygon Effect on Chain Drive[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36(6): 821-826.
- [5] 许立, 任润, 施志辉, 等. 基于 Pro/E 的链传动多边形效应仿真分析[J]. 制造业自动化, 2009, 31(5): 93-95.
- XU L, REN R, SHI Z H, et al. The Simulation Analysis of Chain Drive Polygon-Effect Based on Pro/E[J]. Manufacturing Automation, 2009, 31(5): 93-95.
- [6] 杨志远, 王惠源, 张鹏军, 等. 基于 ADAMS 的航炮供弹箱改进设计[J]. 包装工程, 2016, 37(7): 80-84.
- YANG Z Y, WANG H Y, ZHANG P J, et al. Design Improvement of Ammunition Box for Aerial Cannon Supplies Based on ADAMS[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(7): 80-84.
- [7] 王钢, 王立权, 孟祥伟, 等. 某火炮供弹系统的设计研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(5): 518-524.
- WANG G, WANG L Q, MENG X W, et al. Study on Naval Gun Shell-Feeding System Design and Experiment[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(5): 518-524.
- [8] 谢云峰, 吴光宇. 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.
- XIE Y F, WU G N. Design and Study on Reliability of Ammunition Magazine with Twin Bays[J]. Ordnance Industry Automation, 2013, 32(7): 21-24.
- [9] 廖子舜. 某新型无链供弹系统动力特性研究及驱动控制策略设计[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- LIAO Z S. Study on Dynamic Characteristics and Drive Control Strategy Design of a New Chain-Less Ammunition Supply System[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [10] 解凤娟, 何宗颖, 骆小平, 等. 基于 RecurDyn 的链式回转弹仓多边形效应分析[J]. 火炮发射与控制学报, 2013, 34(2): 27-30.
- XIE F J, HE Z Y, LUO X P, et al. Analysis of the Chain Type Turns round Magazine Polygon Effect Based on RecurDyn[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2013, 34(2): 27-30.
- [11] 丁传俊, 宁春交, 李浩, 等. 基于 Adams 宏与 Python 的自动炮动力学模型快速建模技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2023.
- DING C J, NING C J, LI H, et al. Rapid Modeling Technology for Automatic Gun Dynamics Model Based on Adams Macro and Python[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2023.
- [12] 刘太素, 钱林方, 陈光宋, 等. 某输弹机开式链传动建模及动力学特性分析[J]. 兵工学报, 2018, 39(11): 2109-2117.
- LIU T S, QIAN L F, CHEN G S, et al. Dynamics Modeling and Analysis of Open Chain Drive Transmission for a Ramming Mechanism[J]. Acta Armamentarii, 2018, 39(11): 2109-2117.
- [13] 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.
- ZHANG B, DAI J S, WANG M S, et al. Analysis of Driving and Connecting Characteristics of a Cannon Drum Feeding Device[J]. Ordnance Industry Automation, 2019, 38(3): 68-70.
- [14] 李增刚, 李保国. ADAMS 入门详解与实例[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- LI Z G, LI B G. Detailed Introduction and Examples of ADAMS[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2021.
- [15] 徐万海, 李航, 贺子琪, 等. 基于 Hertz 模型的海洋立管束碰撞力计算方法研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(13): 248-253.
- XU W H, LI H, HE Z Q, et al. Calculation Method for Collision Force of Marine Riser Bundles Based on Hertz Model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(13): 248-253.
- [16] 郭宏亮, 袁修华. 机械原理[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2022.
- GUO H L, YUAN X H. Mechanical Principle[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2022.
- [17] 闵杰. 顶置式无链供弹系统结构及动力学分析[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- MIN J. Structure and Dynamics Analysis of Overhead Chainless Ammunition Supply System[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [18] 刘杰, 李慧, 李强. 弹鼓传动系统及其受力分析[J]. 机械传动, 2015, 39(2): 67-69.
- LIU J, LI H, LI Q. Design and Force Analysis of Cannon Drum Transmission System[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2015, 39(2): 67-69.
- [19] 刘广, 冯康军, 华洲, 等. 基于短时实测动态应力的空空导弹吊挂疲劳寿命估算[J]. 战术导弹技术, 2022(5): 74-80.
- LIU G, FENG K J, HUA Z, et al. Fatigue Life Prediction of Hanging of Air-to-Air Missile Based on Short-Time Dynamic Stress Measurement[J]. Tactical Missile Technology, 2022(5): 74-80.
- [20] 孙金生, 李军, 王执铨. 基于指数稳定性理论的容错控制[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2001, 40(S1): 73-76.
- SUN J S, LI J, WANG Z Q. Fault-Tolerant Control Based

- on Exponential Stability Theory[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2001, 40(S1): 73-76.
- [21] 汪轶凡, 肖庆飞, 高志勇, 等. 基于 Weibull 分布模型的不规则矿石颗粒强度分布[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(11): 3876-3886.
- WANG Y F, XIAO Q F, GAO Z Y, et al. Strength Distribution of Irregular Ore Particles Based on Weibull Distribution Model[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024, 34(11): 3876-3886.
- [22] 刘毅, 刘振振, 付振明. 基于 Adams 仿真分析多边形效应和磨损链轮对链系统运行的影响[J]. 现代制造技术与装备, 2021, 57(6): 50-54.
- LIU Y, LIU Z Z, FU Z M. Analysis of the Influence of Polygon Effect and Worn Sprocket on Chain System Operation Based on Adams Simulation[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2021, 57(6): 50-54.
- [23] 毛永萍. 面包方舱传动系统运动分析与强度研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2006.
- MAO Y P. Motion Analysis and Strength Study of Transmission System of Bread Shelter[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2006.
- [24] 谢润, 杨国来, 徐龙辉. 自行火炮行进间刚柔耦合多体系统动力学分析[J]. 南京理工大学学报, 2014, 38(5): 588-592.
- XIE R, YANG G L, XU L H. Dynamic Analysis of Multi-Body System for Rigid-Flexible Coupling Self-Propelled Gun on Move[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2014, 38(5): 588-592.