

转管自动炮供弹系统制动方法及动态特性研究

蔡文勇¹,林圣业¹,姜铁牛²,王茂森¹,戴劲松¹

(1. 南京理工大学,江苏 南京 210094; 2. 国营 152 厂,重庆 400071)

摘要:由于转管自动炮对供弹系统的制动特性要求极高,故有必要研究附加力矩对供弹系统制动特性的影响。建立空间路径下弹带运动多体动力学模型,通过力矩变化对供弹系统制动特性进行仿真分析;通过动力学理论建立供弹系统弹链的运动约束方程,对弹链带上链节的运动规律进行描述;通过仿真分析结果和测试实验数据进行对比,得到附加制动力矩对供弹系统制动特性的具体影响。研究结果显示:附加制动力矩可以有效改善供弹系统的供弹条件。

关键词:转管自动炮;供弹系统;多体动力学模型;附加力矩;制动特性;仿真分析

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0173-04

Study on Braking Method and Dynamic Characteristics of Ammunition Feeding System for Rotating Tube Automatic Gun

CAI Wenyong¹, LIN Shengye¹, JIANG Tieniu², WANG Maosen¹, DAI Jinsong¹

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

2. State-owned No. 152 Factory, Chongqing 400071, China)

Abstract: Due to the fact that rotary automatic gun has a very high demand on the braking characteristics of the ammunition feeding, it is necessary to study the influence of additional torque on the braking characteristics of ammunition feeding system. The multi-body dynamic model of projectile belt movement in space path was constructed, and the braking characteristics of projectile feeding systems were simulated and analyzed through the change of torque. The motion constraint equation of the ammunition supply system chain was established by dynamics theory, and the movement law of the chain link on the ammunition chain belt was described. Comparison between the simulation analysis results and the test experimental data were conducted to obtain the specific influence of the additional braking torque on the braking characteristics of the ammunition supply system. The results show that the additional braking torque can effectively improve the feeding conditions of the ammunition feeding system.

Keywords: rotating tube automatic gun; ammunition feeding system; multibody dynamics model; addition torque; braking characteristics; simulation analysis

0 引言

现代战场对火炮射速要求越来越高,供弹系统作为自动炮的重要组成部分,是实现射速要求的关键机构^[1]。但由于超高射速要求和供弹系统自身的大惯量问题,导致供弹系统难以快速制动并会出现炮弹间碰撞而发生危险。因此研究供弹系统快速制动方法十分必要。

供弹机供弹过程是典型的复杂机械系统受力和运动过程,建立一个全面精准描述各零部件的运动和受力的动力学模型,对研究问题是必要的^[2]。目前对于弹链及阻力的研究模型有4种,分别是等截面弹性带模型、变截面弹性带模型、弹性铰连接的多刚体模型和复杂铰连接的多刚体模型,其中的第4种模型是最贴近于实际的^[3]。

目前国内对供弹系统研究多使用刚柔耦合模型分析供弹系统启动阶段和稳定阶段阻力矩情况,对供弹系统制动方法研究较少。本文对供弹系统建立弹带运动的多体动力学模型,进行动力学分析,研究附加制动力矩对供弹

系统动态特性影响。

1 弹链带多体系统建模

在火炮射击循环中,弹链带的两个运动分别是脉冲拨弹和自由阻尼振动。作为弹性体的弹链节,每两个链节的连接钩环都会存在横向、纵向和垂直方向的间隙,可以类比于有3个转动自由度的球铰^[4]。为了建立最贴近实际情况的分析模型,对供弹系统弹链带的运动进行运动学和动力学分析。

将每一对炮弹和弹链节都视为刚体,其中将弹链节间的钩环视为弹性元件,作为刚体的连接弹簧处理^[5];将供弹过程中的机构间摩擦和撞击造成的能量损失作为阻尼处理。由此做出假设如下。

1) 将弹链带视为 N 个刚体和铰连接成的树系统;每个刚体的序号都规定与其相接铰相同;刚体按序记为 $B_0, B_1, \dots, B_i (i=1, 2, \dots, N)$,相关联的铰记为 $H_1, H_2, \dots, H_i (i=1, 2, \dots, N)$ 。

2)将每个铰视为由一个无质量刚度为 k 和一个阻尼系数为 c 的阻尼器组成。

3)设 e^i 为第 i 个刚体的连体基,质心 C_i 处设为坐标的原点,基矢量 e_1^i 的方向设为与供弹方向一致, e_2^i 与炮弹轴线方向重合,由右手法则, e_3^i 方向为弹链的外侧。

4)将带弹链节设为刚体 B_i ,其质心相对于惯性参考基的坐标 (x_i, y_i, z_i) 与连体基相对于惯性参考基的卡尔丹角 $(\alpha_i, \beta_i, \gamma_i)$ 构成描述刚体的笛卡儿广义坐标阵:

$$q_i = (x_i \ y_i \ z_i \ \alpha_i \ \beta_i \ \gamma_i)^T \quad (i=1,2,\dots,N) \quad (1)$$

或者也可以将上式表示成

$$q_i = (r_i^T \ p_i^T)^T \quad (2)$$

式中 $p_i = (\alpha_i \ \beta_i \ \gamma_i)^T$ 。

将自动机进弹口的第一发弹标记为 1 号弹,则绘制弹链系统空间路径见图 1,弹体布置在空间路径上,为进一步的计算分析做准备。其中喉部位置为 10 号弹处,硬导引在 35 号弹到 50 号弹这一长度区间内,其中扬弹机位于 50 号弹处。

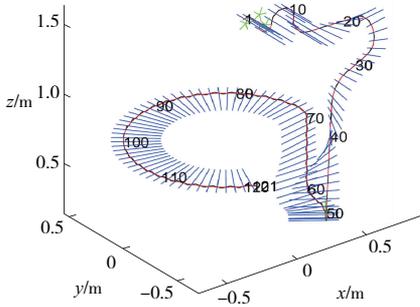


图 1 弹链系统空间路径图

1.1 附加制动力矩的刚体受力分析

为了方便对系统内刚体进行受力分析,将 $(q_1^i \ q_2^i \ q_3^i)^T$ 广义坐标引入其中,用来表示刚体 B_i 在 e_1^i, e_2^i, e_3^i 方向的位移,则有:

$$\begin{aligned} q_1^i &= x_i C_\beta C_\gamma + y_i (S_\alpha S_\beta C_\gamma + C_\alpha S_\gamma) + z_i (-C_\alpha S_\beta C_\gamma + S_\alpha S_\gamma) \\ q_2^i &= x_i (-C_\beta S_\gamma) + y_i (-S_\alpha S_\beta S_\gamma + C_\alpha C_\gamma) + z_i (C_\alpha S_\beta S_\gamma + S_\alpha C_\gamma) \\ q_3^i &= x_i S_\beta + y_i (-S_\alpha C_\beta) + z_i (C_\alpha C_\beta) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $C_\alpha = \cos\alpha; S_\alpha = \sin\alpha$,其余以此类推。

因为刚体 B_i 即各个弹链节之间的间隔并不会因为间隙被消除了而消失,刚体的运动过程是一种滚动和滑动都存在的过程,为了使计算简单,假设各个刚体沿 e_1^i 的运动过程是一平动和滚动相互交替进行的过程,并且刚体之间间隔消除后变为滚动^[6]。

在制动阶段通过扬弹机电机反转提供附加制动力矩。附加制动力矩的添加时间为当供弹系统开始制动的瞬间。则其附加制动力矩情况下平动时刚体受力见图 2,滚动时刚体受力情况如图 3 所示。

$$\begin{aligned} \text{令 } Q_1^i &= k(q_1^{i-1} - q_1^i) + c(\dot{q}_1^{i-1} - \dot{q}_1^i) - f_{i+1}, \text{ 则有} \\ L_i &= (Q_1^i - Q_1^{i+1}) \cdot h_i - l_{i+1} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: f 为附加制动力矩等效制动力; l 为等效制动力矩。

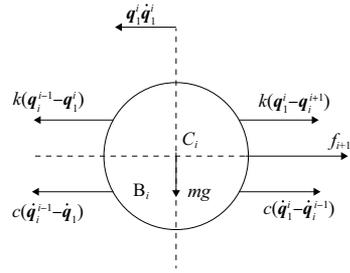


图 2 平动时的刚体受力

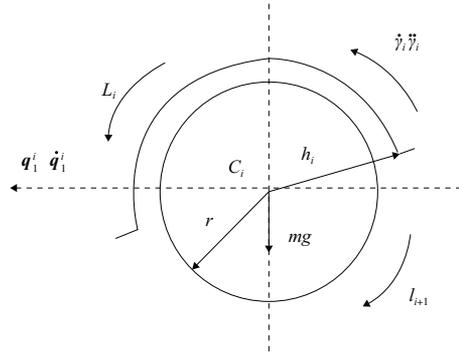


图 3 滚动时的刚体受力

1.2 弹链链节间纵向内力

由弹簧力和阻尼力组成弹链链节之间的纵向内力会随着弹链之间存在的间隙消除而进行传递,其中纵向内力表示为 Q_1^i ,间隙表示为 Δ_1 。

1)当自动机射击前弹链间间隙消除时

$$Q_1^i = \begin{cases} k(q_1^{i-1} - q_1^i) + c(\dot{q}_1^{i-1} - \dot{q}_1^i) & (q_1^{i-1} - q_1^i) > 0 \\ 0 & \Delta_1 < (q_1^{i-1} - q_1^i) < 0 \\ k(q_1^{i-1} - q_1^i + \Delta_1) + c(\dot{q}_1^{i-1} - \dot{q}_1^i) & (q_1^{i-1} - q_1^i) < -\Delta_1 \end{cases} \quad (5)$$

由于间隙消除的瞬间会发生碰撞,能量损耗也因为碰撞而产生,这样就使得在 $(q_1^{i-1} - q_1^i) = 0$ 时 $\dot{q}_1^{i-1} > \dot{q}_1^i$, $Q_1^i = c(\dot{q}_1^{i-1} - \dot{q}_1^i)$, 否则 $Q_1^i = 0$ 。

2)当自动机射击前弹链间存在间隙

$$Q_1^i = \begin{cases} k\left(q_1^{i-1} - q_1^i - \frac{\Delta_1}{2}\right) + c(\dot{q}_1^{i-1} - \dot{q}_1^i) & (q_1^{i-1} - q_1^i) > \frac{\Delta_1}{2} \\ 0 & -\frac{\Delta_1}{2} < (q_1^{i-1} - q_1^i) < \frac{\Delta_1}{2} \\ k\left(q_1^{i-1} - q_1^i + \frac{\Delta_1}{2}\right) + c(\dot{q}_1^{i-1} - \dot{q}_1^i) & (q_1^{i-1} - q_1^i) < -\frac{\Delta_1}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中,当 $(q_1^{i-1} - q_1^i) = \frac{\Delta_1}{2}$ 时,若 $\dot{q}_1^{i-1} > \dot{q}_1^i$, 有 $Q_1^i = c(\dot{q}_1^{i-1} - \dot{q}_1^i)$, 否则 $Q_1^i = 0$ 。同理当 $(q_1^{i-1} - q_1^i) = -\frac{\Delta_1}{2}$ 时, $\dot{q}_1^i >$

\dot{q}_i^{i-1} ,且 $Q_i^i = c(\dot{q}_i^{i-1} - \dot{q}_i^i)$, 否则 $Q_i^i = 0$ 。 $c(\dot{q}_i^{i-1} - \dot{q}_i^i)$ 是阻尼力,用来表示在整个运动过程中,弹链带与供弹通道之间因为摩擦和碰撞导致的能量损失。其中参数阻尼系数 $c = 2\xi\omega m$,是由实验数据推算出的等效阻尼系数。

1.3 弹链带运动过程受力分析

弹链带上刚体在过校正体、柔性导引、刚性导引的受力分析是类似的,只是在过柔性导引和刚性导引时更为复杂一些,在此以进弹口和校正体之间弹链带的受力分析为例。这一阶段刚体作平面运动,对于刚体 B_i 来说,其有 3 个自由度:

$$q_i = (q_1^i \quad 0 \quad q_3^i \quad 0 \quad \beta_i \quad 0)^T \quad (7)$$

$$K^i = \begin{bmatrix} C_{\beta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ S_{\beta_i} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$Q_i(r_i) = \begin{pmatrix} k(q_1^{i-1} - q_1^i) + c(\dot{q}_1^{i-1} - \dot{q}_1^i) \\ 0 \\ k(q_3^{i-1} - q_3^i) + c(\dot{q}_3^{i-1} - \dot{q}_3^i) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} k(q_1^i - q_1^{i+1}) + c(\dot{q}_1^i - \dot{q}_1^{i+1}) \\ 0 \\ k(q_3^i - q_3^{i+1}) + c(\dot{q}_3^i - \dot{q}_3^{i+1}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$Q_i(p_i) = Q_i^R + Q_{i+1}^P \quad (10)$$

则刚体 B_i 的运动约束方程雅可比矩阵 Φ_{q_i} :

$$\Phi_{q_i}^{(r_2)} = \begin{bmatrix} 0 & d_{i+1}^{2T} K_i^0 \\ 0 & -d_{i+1}^{1T} K_i^0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中 d_i, d_{i+1} 均为单位矢量。速度约束方程为

$$\dot{\Phi}^{(d1)}(h_i, d_{i+1}) = d_{i+1}^T B_i^T v_i + (h_i^T D_{i+1}^T - d_{i+1}^T B_{i+1}^{QT}) v_{i+1} = 0 \quad (12)$$

约束库矩阵表示为

$$Y_i^{(d1)} = d_{i+1}^T B_i^T, Y_{i+1}^{(d1)} = h_i^T D_{i+1}^T - d_{i+1}^T B_{i+1}^{QT} \quad (13)$$

得到雅可比表达式

$$\Phi_{q_i}^{(d1)} = (d_{i+1}^T \quad -d_{i+1}^T p^0 K_i^0) \quad (14)$$

1.4 弹链链节间间隙碰撞模型

由于弹链系统属于多刚体系统,需要计算刚体间碰撞力大小,其质量、间隙和弹性又是弹链系统运动的主要特征,所以选择等效弹簧阻尼模型。将间隙铰在运动过程中状态归结为“自由运动-接触变形”两种。自由阶段动力学方程为

$$\begin{cases} M \ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = Q_g^* \\ \Phi(q, t) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

当发生碰撞时,将等效接触力引入,有系统动力学方程

$$\begin{cases} M \ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = Q_g^* + F_g \\ \Phi(q, t) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中 q 是广义坐标列阵; λ 是拉格朗日乘子列阵; M 是

多刚体系统的广义质量阵; Φ_q^T 是约束方程的雅可比阵; Q_g^* 是广义力阵; F_g 是接触力 F 相对广义坐标 q 的广义力列阵。

对于接触状态的判定,给定极小的一个误差值 ε ,当两刚体最小距离小于 ε 时,认定发生碰撞。给出接触阵列 $S(q, t)$,在区间 $[t_0, t_1]$ 上,若有

$$S(q_0, t_0)^T S(q_1, t_1) < 0 \quad (17)$$

则认定在此时间区间内至少发生一次碰撞。

1.5 附加制动力矩添加方法

附加制动力矩通过添加到扬弹机这一机构上实现,扬弹机结构是供弹系统的重要组成部分,主要由接弹机、中部装弹机、驱动装置、装弹机等主要部件组成。在自动机启射时通过电机驱动扬弹机构将炮弹输送到进弹口处。

在制动阶段通过扬弹机电机反转提供附加制动力矩。附加制动力矩的添加时间为当供弹系统开始制动的瞬间。

2 仿真结果分析

2.1 初始条件和有关参数确定

弹链系统由许多个刚体(炮弹与弹链)组成,刚体间由弹链钩环相互连接。采用惯性坐标系,连体坐标系位于刚体质心。为了简易仿真,将软导引简化成一个整体。相关约束包括:1)几何约束前 4 发弹为平面运动;2)首发弹运动速度为已经实测的拨弹速度曲线;3)链节间的连接视为间隙弹簧力铰接;4)其他实体间的约束采用接触力的方法,刚体质量和质心采用实测值。

2.2 制动阶段附加力矩仿真分析

供弹系统制动阶段常会出现制动惯性太大导致炮弹堆积,甚至因炮弹碰撞而发生危险。在供弹路径上表面的喉部和硬导引处易出现危险点,因此在这两处施加附加力矩来分析其制动效果。在无力矩、附加 50 Nm、100 Nm 力矩时喉部受力情况如图 4、图 5、图 6 所示。

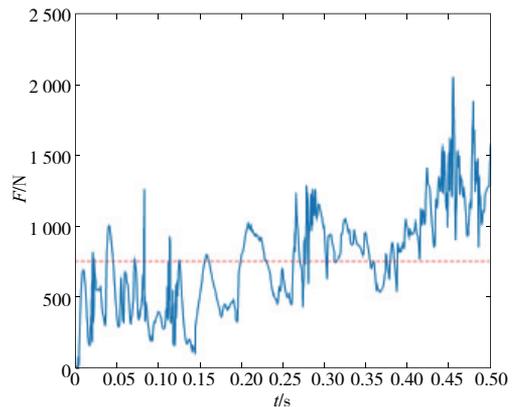


图 4 无附加力矩时喉部受力

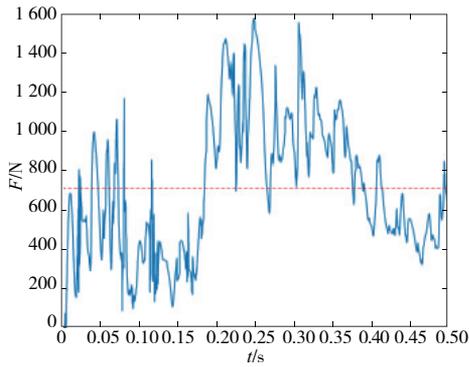


图5 附加力矩 50 Nm 时喉部受力

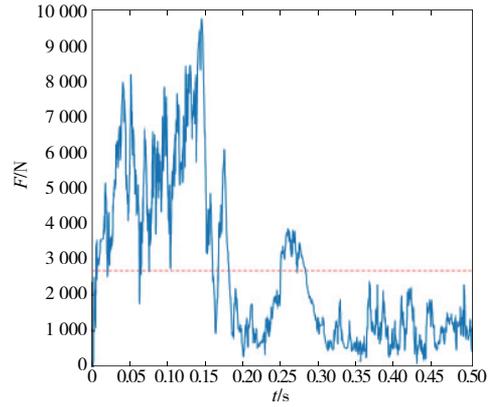


图9 附加力矩 100 Nm 时硬导引受力

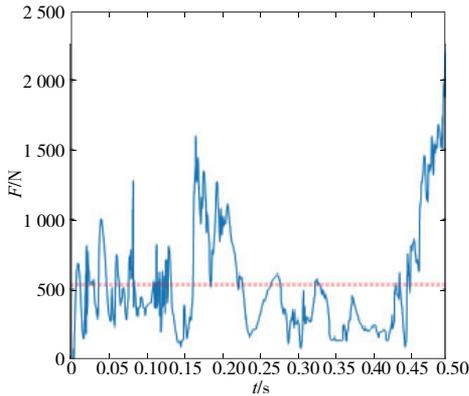


图6 附加力矩 100 Nm 时喉部受力

在无附加力矩、附加 50 Nm、100 Nm 力矩时硬导引通道受力情况如图 7、图 8、图 9 所示。

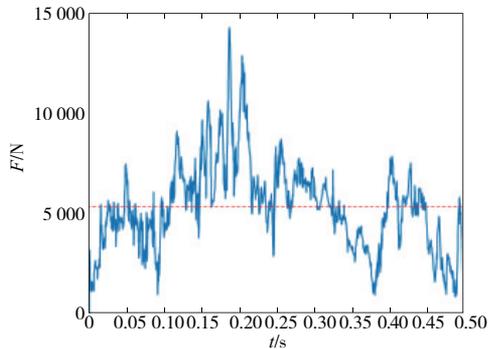


图7 无附加力矩时硬导引受力

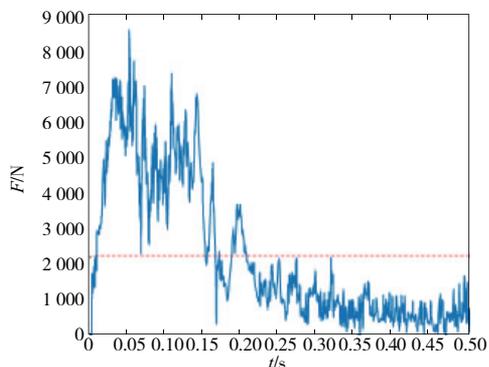


图8 附加力矩 50 Nm 时硬导引受力

对供弹系统在添加制动力矩情况下,喉部和硬导引处受力情况统计对比如表 1 所示。

表 1 附加制动力矩后喉部和硬导引受力情况表

项目	附加制动力矩					
	0 Nm		50 Nm		100 Nm	
	F/N	相对变化/%	F/N	相对变化/%	F/N	相对变化/%
喉部	753	0	713	-5.3	536	-28.8
硬导引	5 329	0	2 231	-58.1	2 665	-50.0

由仿真结果分析,在添加附加力矩时,供弹系统制动效果有着明显改善,喉部整体平均受力在添加 50 Nm 制动附加力矩情况下为 713 N,相比于无附加力矩时 753 N 下降了 5.3%;在添加 100 Nm 制动附加力矩情况下为 536 N,下降了 28.8%。硬导引在无附加力矩情况下平均受力为 5 329 N,当添加 50 Nm、100 Nm 附加力矩情况下,这一数值分别为 2 231 N、2 665 N。可以明显看出其受力情况和供弹条件得到良好改善。

3 结语

本文研究了附加制动力矩对供弹系统制动特性的影响,通过建立多体动力学模型,并对这一模型进行仿真试验,结果表明:通过附加力矩的方法能够有效地改善供弹系统供弹条件,在停射制动时也可以有效改善供弹路径上各点受力情况。

参考文献:

- [1] 林通,钱林方,陈光宋,等. 面向输弹一致性的某输弹机稳健优化设计研究[J]. 兵工学报,2019,40(2):243-250.
- [2] 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,2013,34(1):56-58.
- [3] 郑建荣. ADAMS—虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [4] 王光建,姜铁牛. 弹链系统间隙铰多体动力学模型仿真与试验[J]. 机械工程学报,2008,44(5):238-241.
- [5] 丁浩,王德石,王树宗. 弹链的间隙动力学特性研究[J]. 舰船科学技术,2004,26(5):40-42.
- [6] 胡胜海,张晓东,刘载淳,等. 基于柔性铰的弹链系统建模及仿真分析[J]. 应用科技,2011,38(8):18-22.

收稿日期:2021-10-28