

# 弹链系统间隙铰多体动力学模型仿真与试验

王光建<sup>1</sup> 姜铁牛<sup>2</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆 400030;  
2. 长安汽车(集团)有限责任公司机电工程研究院 重庆 400023)

**摘要:** 传统的弹链系统力学模型, 常常简化为平面内的运动, 此模型对于分析弹链系统的横向运动、窜弹等问题有局限性。研究具有螺旋导引的弹链系统纵向和横向运动规律; 建立含间隙铰碰撞的多体动力学模型; 用等效弹簧阻尼模型对弹链系统的碰撞和接触进行模拟; 对上述模型进行仿真和试验, 结果表明: 该力学模型能够较真实反映系统的运动规律, 能对弹链系统的运动进行很好的预测和分析。

**关键词:** 多体动力学模型 弹链 螺旋导引 间隙铰

**中图分类号:** O313.7 TJ818

## Simulation and Experiment of Multi-body system dynamic Model with Clearance Joint for Ammunition Belt System

WANG Guangjian<sup>1</sup> JIANG Tieniu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400030;  
2. Research Institute of Mechatronics Engineering,  
Changan Auto (Group) Co. Ltd, Chongqing 400023)

**Abstract:** Traditional mechanics model for ammunition belt system is usually simplified as a motion in a plane, which has a limitation of analysis of the latitudinal motion and cannonball fleeing. The longitudinal and latitudinal mechanical characteristic of the ammunition belt system with helical guider is discussed. A multi-body system dynamic model including clearance joints is obtained for the ammunition belt system. In the spring-damp model, a virtual spring connecting the two contact points is assumed to simulate the impact and contact. The simulation and experiment are finished, which indicates that the above model can well simulate and estimate the mechanical characteristic.

**Key words:** Multi-body system dynamic model Ammunition belt Helical guider Clearance joints

## 0 前言

在采用弹链供弹方式的自动炮中, 弹链运动直接影响自动机的可靠性和射速。弹链运动是一个复杂的过程, 在脉动式拨弹运动作用下, 弹链间、弹链与导引壁间普遍存在间隙接触碰撞; 由于对炮弹的作用力常不与炮弹质心的连线重合, 炮弹还会绕自身质心偏转; 加之进弹口随自动机的后座或复进, 弹链间会有更复杂的扭转、碰撞等, 从而导致弹链系统窜弹和卡弹等故障。因此, 研究给定路径弹带运动阻力和含间隙弹链接触的运动规律, 以及刚度、阻尼等因素的影响, 是火炮自动机供输弹系统设计

的一个重要内容之一。应用多体动力学的理论和方法等虚拟样机技术对空间路径中弹带运动进行仿真, 可有效降低昂贵的试验成本, 缩短开发周期。

目前对弹带运动的研究通常简化为平面内的弹带运动的研究分析, 主要研究弹带阻力、振动等。本文建立空间路径下弹带运动的多体动力学模型, 研究其横向及纵向运动规律, 并进行试验验证。

## 1 弹链系统动力学建模方法分析

目前弹链运动分析模型有四种: ① 匀质弹性带模型。② 变质量弹性带模型。③ 集中质量弹簧模型, 如图 1a 所示。④ 集中质量间隙弹簧模型, 如图 1b 所示。链节间的连接如图 2 所示, 弹链钩环套入弹环内, 纵向、横向和上下都受约束, 同时都有

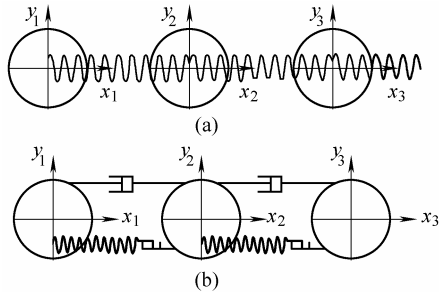


图1 集中质量弹簧模型

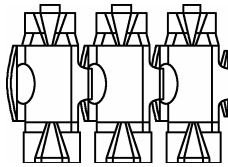


图2 链节间的连接

间隙。因此①、②模型未考虑链节间间隙和碰撞，因此只适合于计算首发点射的情况；而③、④离散刚体模型，可计算连射时的弹带运动，其中第四种间隙弹簧刚体模型最能反映实际情况。目前利用模型4进行弹带系统力学仿真常作如下假设<sup>[1-2]</sup>。

- (1) 内力作用线通过质心连线。
- (2) 通常假设弹带运动在平面内(水平面或斜面)。
- (3) 考虑了结构阻尼和撞击引起的能量损失，但未考虑输弹导引与弹带的碰撞。

以上假设适合于平面内弹带的阻力和纵向运动规律的计算，如采用4自由度的万向节型间隙铰平面模型分析弹链运动<sup>[2]</sup>。而对于空间弹带运动，如图3所示在螺旋导引内的运动规律，由于弹链体不仅有纵向振动，而且存在横向振动、扭转等，上述假设条件不成立，不能分析目前经常发生的窜弹和卡弹等故障。

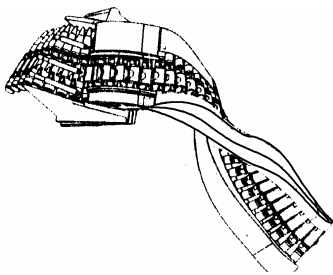


图3 具有螺旋导引的弹链系统

## 2 螺旋导引内弹带运动力学模型

对于空间螺旋导引内弹带运动的分析，本文主要采用间隙铰碰撞模型模拟链节间的碰撞和接触；而用实体碰撞来研究弹链体与导引间、炮弹与炮弹之间的接触。

### 2.1 链节间的间隙铰碰撞模型

多刚体系统的间隙铰碰撞模型通常有两种，即经典碰撞模式的力学模型(动量平衡法)和接触变形模式力学模型(等效弹簧阻尼模型)。由于经典碰撞模型不能计算碰撞力的大小，加之质量、间隙和弹性是弹带运动的主要特征，因此适合采用等效弹簧阻尼模型，即采用无惯性的弹簧和阻尼器来描述弹链间的变形和能量损失，此时链节间的碰撞简化为“点一点”接触。

由于间隙铰接触过程为接触—变形—恢复—脱离，可归结为“自由运动—接触变形”两种状态。

在自由运动阶段，系统动力学方程为

$$\begin{cases} m\ddot{q} + \Phi_q \lambda = Q \\ \Phi(q,t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} m & \Phi_q \\ \Phi_q & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中， $q$ 为广义坐标列阵； $m$ 、 $\Phi_q$ 和 $Q$ 分别为多刚体系统的广义质量阵、约束方程 $\Phi(q,t)=0$ 的雅可比阵及广义力阵； $\lambda$ 为Lagrange乘子列阵， $\gamma = \Phi_q \ddot{q} = -(\Phi_q \dot{q})_q - 2\Phi_{qt} \dot{q} - \Phi_{tt}$ 。

当间隙铰元素间碰撞时，引入等效接触力，系统动力学方程为

$$\begin{cases} m\ddot{q} + \Phi_q \lambda = Q + F_g \\ \Phi(q,t) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} m & \Phi_q \\ \Phi_q & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \ddot{q} \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q + F_g \\ \gamma \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中， $F_g$ 为接触力 $F$ 相对于广义坐标 $q$ 的广义力列阵。

### 2.2 接触碰撞力的计算

在接触碰撞区，存在法向接触力、切向接触力和阻力矩。法向接触力可以采用弹簧阻尼力表示；切向接触力包括摩擦力(切向变形产生的接触力)和切向阻尼力；两接触体之间还存在阻力矩，常常表现为摩擦力矩。目前，按法向接触力描述可将间隙模型归结为三种类型：基于Dubowsky线性化处理的碰撞铰模型、基于Hertz接触理论的接触模型和基于非线性的弹簧阻尼模型。这里使用非线性等效弹簧阻尼模型，其广义形式可表示为

$$F_n = kg^e + c(g)\dot{g} \quad (5)$$

式中， $F_n$ 为法向接触力， $k$ 为等效接触刚度， $g$ 为接触点处法向穿透深度， $\dot{g}$ 为接触点处法向相对速度， $c(g)$ 为阻尼因子， $e$ 为非线性指数，通常 $e \geq 1$ 。

两物体接触点切向相对运动分为粘滞和滑移两种。滑移运动时, 摩擦力可用库仑摩擦定律进行计算, 即滑动摩擦力与正压力成正比, 其方向与相对滑移速度方向相反

$$F_t = \mu(v_t)F_n \quad v(q, \dot{q}, t) \neq 0 \quad (6)$$

式中,  $v_t$  切向相对速度,  $F_t$  为切向摩擦力,  $F_n$  为法向接触力,  $\mu$  为动摩擦因数,  $v(q, \dot{q}, t)$  为接触点处的相对滑移速度。当两链节碰撞接触后在接触区为粘滞状态时, 切向接触力小于最大静摩擦力。

### 2.3 接触状态的判定

接触只可能发生在接触体上具有最小距离的点, 因此接触点的判定就转化为求解参与接触的几何体的最小距离, 并确定具有最小距离的点(潜在接触点)的位置。两链节间接触的判断可直接转化为简化为点一点两相邻链节对应点的相对位置。

设  $S(q, t)$  可能接触点相对位置列阵, 则接触点的判定方程为

$$S(q, t) = 0 \quad (7)$$

若  $t$  时刻处于接触状态, 即接触  $S(q, t) = 0$ , 但该“ $t$ ”时刻难于精确确定, 因此给定一个很小的正误差  $\varepsilon$ , 当满足  $|S(q, t)| < \varepsilon$  时, 则认为该时刻为接触点。

给定一个判定准则, 即存在一个时间区间  $[t_0, t_1]$ , 若满足

$$S(q_0, t_0)^T S(q_1, t_1) < 0 \quad (8)$$

则在该时间间隔内至少存在一个接触点。

### 2.4 间隙、刚度和阻尼参数的确定

如图 2 所示, 链节间间隙值可通过靠紧链节的方式测量。而弹链的刚度可通过有限元法计算, 施加载荷, 求出变形后, 根据载荷与变形的关系求得刚度系数; 或通过材料试验机测定。

设弹链为粘性阻尼的单自由度振动系统, 则对给定武器和弹带, 可以通过测量弹链上应力波的衰减情况求得粘性阻尼

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{39.478 + \delta^2}} \quad (9)$$

式中,  $\delta$  为对数衰减率(相邻振幅比值的自然对数),  $\delta = \ln(x_1/x_2) = \ln(F_1/F_2)$ 。则等效阻尼常数为

$$c = 2\xi\omega_n \quad (10)$$

式中,  $\omega_n$  为弹链振动的固有频率。

### 2.5 弹带与导引的碰撞

在螺旋导引内运动的弹带, 存在两类碰撞: 外部碰撞即弹带系统与导引的碰撞, 包括炮弹、链节与导引的碰撞, 主要作用是引导弹带沿设定的路径

运动; 内部碰撞即弹带内部链节间的碰撞, 包括, 炮弹之间、炮弹与链节之间和链节与链节之间, 其主要作用是沿预定路径运动过程中, 将弹链体运动姿态约束在一定范围内。

描述弹带系统的外部碰撞中, 由于输弹导引轨道形状复杂, 不便于简化, 因此采用实体接触模型。其动力学方程、接触力的处理等与第 3.1 节相同; 但接触刚度、阻尼和间隙值等参数不同, 以及接触状态的判定和预测是通过求几何实体的几何距离来进行。

## 3 弹带系统动力学响应分析与试验

### 3.1 初始条件和参数

如图 2 所示弹链系统由弹带和双向约束的螺旋导引通道组成, 弹带由  $N$  个弹体(炮弹与弹链)组成, 弹体间弹链钩环连接。坐标系包括: 惯性坐标系, 位于质心的连体坐标系和相关的连接坐标系。为简单起见, 软导引简化为一整体; 未考虑后座与复进对导引系统的影响。添加的系统约束为: ① 几何约束: 前面 4 发弹约束为平面运动。② 非完整运动约束: 第一发弹运动速度为实测的拔弹速度曲线。③ 力约束: 链节间通过间隙弹簧力进行铰连(铰接点简化为弹钩中心, 方向为相邻弹钩中心连线, 刚度和阻尼也为实测值), 其他实体间通过接触力进行约束。弹体的质量、质心用实测值。

### 3.2 弹链应力和弹带运动试验

弹链应力使用动态应变仪进行测量, 从而根据弹链的应变衰减率来确定弹带运动的阻尼系数。弹带运动的位移和速度是先通过高速摄像机录像后, 进行后处理求得。

### 3.3 仿真结果分析

图 4、5 所示为单发射击时弹带运动仿真与试验曲线, 分别为纵向运动和横向运动速度曲线。

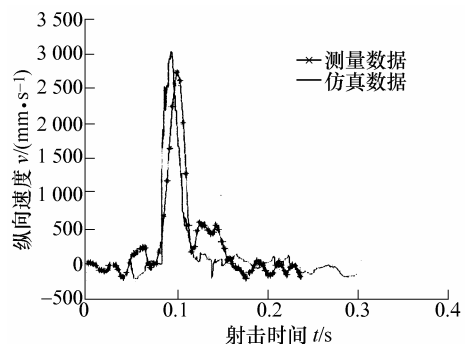


图 4 单发射击时质心纵向速度曲线

图 6、7 所示为 3 连发射击时弹链纵向和横向运动速度曲线。

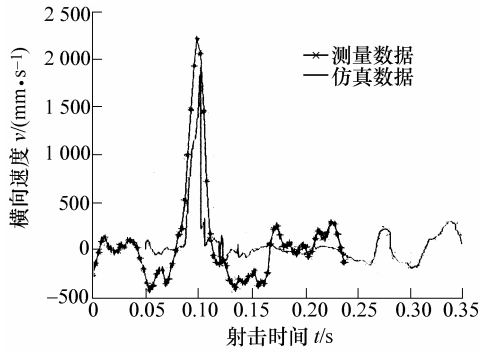


图 5 单发射击时质心横向速度曲线

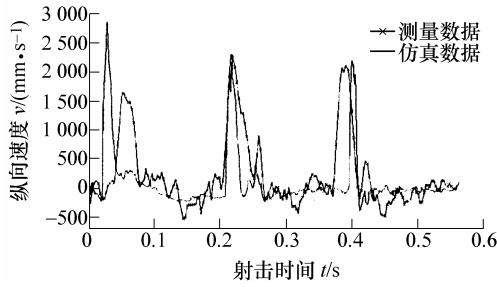


图 6 3 连发射击时质心纵向速度曲线

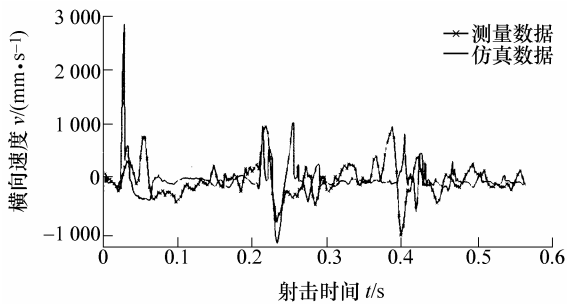


图 7 3 连发射击时质心横向速度曲线

从图 4~7 中可以看出：① 仿真计算所得曲线趋势与实际一致性较好。② 计算位移峰值与实测值运动存在差异，原因之一在于计算未考虑后座与复进带来的影响。③ 由于使用简化计算模型和接触的复杂性和随机性，纵向计算速度略高于实测值，横向计算速度略低于实测值。

### 4 结论

本文研究了具有螺旋导引的弹链系统纵向和横向运动规律；建立了含间隙铰碰撞的多体动力学模型；用等效弹簧阻尼模型对弹链系统的碰撞和接触进行模拟；对上述模型进行了仿真和试验，结果表明：该力学模型能够较真实反映系统的运动规律，能对弹链系统的运动进行很好的预测和分析。

### 参 考 文 献

[1] 韩魁英, 王梦林, 朱素君. 火炮自动机设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988.

HAN Kuiying, WANG Menglin, ZHU Sujun. Automatic mechanism design of gun[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988.

[2] 杨军荣. 弹链供弹阻力研究[J]. 南京理工大学学报, 1997, 21(4): 353-354, 365.

YANG Junrong. Study of ammunition belt links feed resistance[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1997, 21(4): 353-354, 365.

[3] 戴成勋, 靳天佑, 朵英贤. 自动武器设计新编[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990.

DAI Chengxun, JIN Tianyou, DUO Yingxian. The new works for automatic weapon design[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990.

[4] 阎绍泽, 贾书恩, 吴德隆, 等. 含间隙的变拓扑多体系统动力学建模分析[J]. 中国机械工程, 2000, 11(6): 624-626.

YAN Shaoze, JIA Shuhui, WU Delong, et al. Dynamic modeling of flexible mechanical systems with clearance connections via the variable topology analysis[J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11(6): 624-626.

[5] 金栋平, 胡海岩. 碰撞振动及其典型现象[J]. 力学进展, 1999, 29(2): 155-164.

JIN Dongping, HU Haiyan. Vibro impacts and their typical behaviors of mechanical systems[J]. Advance in Mechanics, 1999, 29(2): 155-164.

[6] DUBOWSKY S, DECK J F, COSTELLO H. The dynamic modeling of flexible spatial machine systems with clearance connections [J]. Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, 1987, 109(1): 3-10.

[7] SAO CHAU O A, RODRIGUEZ J. Modeling of joints with clearance in flexible multibody systems [J]. International Journal of Solids and Structures, 2002, 39: 1001-1015.

[8] ZAKHARIEV E. Dynamics of rigid multibody systems with clearances in the joints [J]. Mechanics of Structures and Machines, 1999, 27(1): 63-87.

[9] IYER K. Solutions for contact in pinned connections[J]. International Journal of Solids and Structures, 2001, 38(50-51): 9 133-9 148.

[10] 康新中, 马春茂, 魏孝达. 火炮系统建模理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

KANG Xinzhong, MA Chunmao, WEI Xiaoda. Modeling theory of gun system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.

作者简介: 王光建, 男, 1973 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为精密传动及新型传动机构, 获省部级一等奖 1 项, 获授权发明专利 4 项, 发表论文约 20 篇。

E-mail: wgj409@yahoo.com.cn