

doi: 10.7690/bgzdh.2026.05.013

## 基于键合图的含间隙闭合弹带横向振动研究

陈金柱, 戴劲松, 王茂森, 谭 添, 林圣业  
(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 针对无链供弹系统的闭合弹带通常采用链条传动结构, 射击过程中存在振动特性复杂问题, 进行闭合弹带动力学分析。以 Dubowsky 冲击副模型模拟间隙碰撞作用为基础, 采用集中质量之间、集中质量以及链轮之间简化成弹簧和阻尼系统连接的措施, 应用键合图理论, 建立直线闭合弹带的键合图模型, 并求解该模型的状态方程, 得到间隙大小对直线闭合弹带动力学和振动问题的影响。结果表明, 该研究可为含间隙的闭合弹带动力学建模及其横向振动分析提供参考。

**关键词:** 闭合弹带; 键合图方法; 振动特性; 动力学  
**中图分类号:** TJ012 **文献标志码:** A

## Research on Lateral Vibration of Closed Spring Band with Clearance Based on Bond Graph

Chen Jinzhu, Dai Jinsong, Wang Maosen, Tan Tian, Lin Shengye  
(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The closed belt of the ammunition feeding system without a chain typically adopts a chain drive structure, which presents complex vibration characteristics during firing. This paper proposes a dynamic analysis of the closed belt. Based on the Dubowsky impact pair model to simulate the gap collision effect, measures are taken to simplify the connection between concentrated masses, concentrated masses, and sprockets into a spring and damping system. Using bond graph theory, a bond graph model of the linear closed belt is established, and the state equation of this model is solved to obtain the influence of gap size on the dynamics and vibration of the linear closed belt. The results show that this study can provide a reference for the dynamic modeling of closed belts with gaps and their lateral vibration analysis.

**Keywords:** closed spring band; bond graph method; vibration characteristics; dynamics

### 0 引言

闭合弹带是无链供弹系统的重要组成部分, 通常由链条和弹托等结构形成闭合的供弹回路, 与有链供弹相比, 闭合弹带不需要除链等动作, 高速供弹时相应机构的运动相对平稳可靠<sup>[1]</sup>, 故闭合弹带设计成为现代自动炮研究的重点之一, 其运动特征分析是结构设计的基础。

针对闭合弹带的研究, 许立新等<sup>[2-3]</sup>采用拉格朗日方法推导了链传动系统的弹性动力学方程, 建立了多间隙影响因素下的步进链传动系统振动模型, 得到了不同预紧力下链条的振动响应。王小力<sup>[4]</sup>采用弹性力学建立链传动系统横向线性振动的离散模型, 分析了链条张力、质量、节距对链传动横向振动模态特性的影响规律。刘雨<sup>[5]</sup>建立了基于冲击副模型的输送链销轴与套筒间隙接触碰撞动力学模型, 并通过 RecurDyn 软件对链传动系统进行仿真分析验证, 论证了输送链预紧力取合理的值可以有效地减小输送链系统的振动。邓致远等<sup>[6]</sup>基于键合

空间理论建立了具有电机特性及间隙的直线闭合弹带动力学模型, 分析链节间隙对直线闭合弹带系统启动力矩特性的影响。王中双等<sup>[7-10]</sup>建立了含运动副间隙的三角连杆肘杆式压力机机构向量键合图模型, 并实现了含运动副间隙三角连杆肘杆式压力机机构计算机建模及动力学仿真。戴劲松<sup>[11-12]</sup>把键合图理论应用在火炮机构的设计中, 并对键合图理论进行了拓展。

笔者以键合图理论为基础, 结合碰撞理论, 对含间隙的直线闭合弹带系统模型进行简化, 然后以弹托等结构为节点单元将该模型分为若干节点, 在此基础上建立了直线闭合弹带的键合图模型, 并求解该模型的状态方程, 得到了间隙大小对该结构动力学和振动问题的影响。

### 1 直线闭合弹带系统的处理方法

图 1 为常见的直线闭合弹带结构, 主要由链轮、链条、弹托、弹丸以及导轨组成。

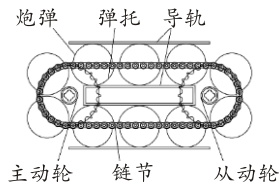


图 1 直线闭合弹带

### 1.1 直线闭合弹带模型的简化

为了使研究问题具有普遍性，考虑导轨对链条的摩擦作用，并忽略链条节数、导轨形状、链轮齿数、弹丸和弹托形状以及质量等因素。对简化模型做出以下基本假设：

1) 链传动具有多边形效应，闭合弹带的链轮齿数一般选择大于 17，此时可忽略链传动多边形效应和啮合冲击作用的影响。

2) 假设闭合弹带以一组弹加弹托以及链节的质量为一集中质量，随链轮转动的质量与链轮质量等效为一集中质量，各集中质量之间通过非线性弹簧和阻尼连接。

3) 链传动系统作为无链供弹的传动机构，为约束弹丸的纵向振动，传动链上一般会安装导轨，在建模中忽略纵向振动对闭合弹带的影响。

4) 链传动系统中因为一发弹丸对应多个内外链节，为降低模型的复杂程度，将系统间隙部分等效为集中质量的内间隙。

如图 2 所示，采用 Dubowsky 冲击副模型模拟间隙碰撞作用<sup>[2]</sup>。

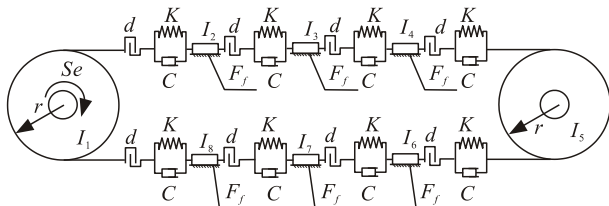


图 2 闭合弹带间隙接触问题简化模型

### 1.2 直线闭合弹带的间隙及其受力描述

如图 3 所示 Dubowsky 冲击副模型在考虑间隙时，链条结构间会频繁出现碰撞与分离，而每次碰撞时将会产生较大的冲击力，工程实践表明链条之间的间隙会影响作用力的幅值，进而影响结构的侵入深度。链条拉伸刚度  $C_i$  和各阻尼参数大小的选取参考文献<sup>[2]</sup>。

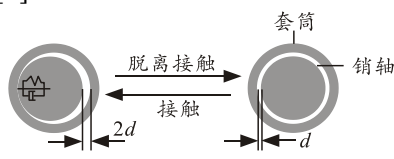


图 3 套筒和销轴间的接触与分离

集中质量之间以及集中质量和链轮之间通过弹簧阻尼系统连接，作用力为：

$$F = K\delta + C\dot{\delta} \quad (1)$$

式中： $F$  为接触力； $K$  为接触点等效刚度； $\delta$  为接触点变形量； $C$  为接触点接触过程中能量损失系数； $\dot{\delta}$  为接触点法向变形速度。

$\delta$  为接触点变形量，套筒与销轴之间无间隙时，不用处理。当套筒与销轴之间有间隙时，判定相对位移  $q$  与间隙  $b$  之间的关系：

$$\delta = \begin{cases} q-b & q > b \\ 0 & |q| \leq b \\ q+b & q < -b \end{cases}, \quad \dot{\delta} = \begin{cases} \dot{q} & |q| > b \\ 0 & |q| \leq b \end{cases} \quad (2)$$

在链节与导轨之间的接触时，2 接触面之间相互滑动，将此接触力定义为滑动摩擦力：

$$F_f = -u_d F_n \text{sgn}(v) \quad (3)$$

式中： $F_f$  为集中质量与导轨之间的滑动摩擦力； $u_d$  为动摩擦因数； $F_n$  集中质量与导轨之间的正压力； $v$  为集中质量与导轨的相对速度。

## 2 直线闭合弹带的键合图模型

根据键合图理论，建立了上述闭合弹带的动力学模型，如图 4 所示。

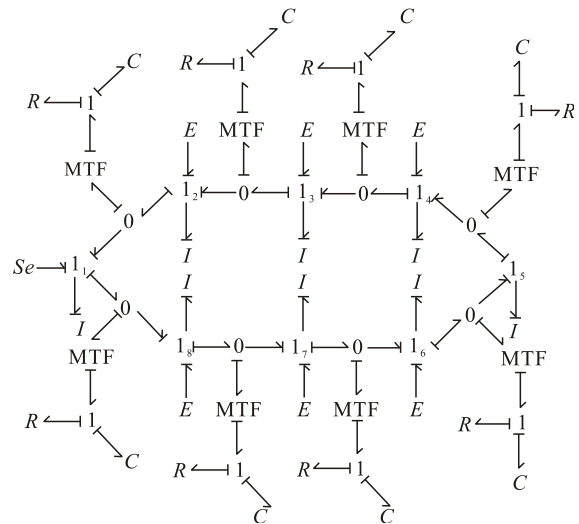


图 4 闭合弹带简化模型键合图

$C$  表示容性元件； $R$  表示阻性元件； $I$  表示惯性元件； $Se$  表示势源； $E$  表示其他外力； $MTF$  表示可调转换器； $m$  为转换器模数取值根据运动状态进行调整； $I_i$  表示第  $i$  个节点的共流节，与之相连的惯性元件  $I$  角标与之相同进行区分； $R_{i,j}$  表示第  $i$  个集中质量与第  $j$  个集中质量间的阻性元件； $C_{i,j}$  表示第  $i$  个集中质量与第  $j$  个集中质量间的容性元件； $m_i$  的角标  $i$  表示第  $i$  与第  $i+1$  之间的节点； $E_i$  表示第  $i$  个集

中质量与导轨之间的摩擦阻力。采用 ode45 (龙格-库塔) 方法求解：

$$\begin{aligned}
 \dot{p}_1 &= Se + m_1(R_{1,2}m_1(I_2^{-1}p_2 - I_1^{-1}p_1r) + C_{1,2}^{-1}q_{1,2}r) - m_8(R_{1,8}m_8(I_1^{-1}p_1r - I_8^{-1}p_8)r + C_{1,8}^{-1}q_{1,8}r)) \\
 \dot{p}_2 &= E_2 + m_2(R_{2,3}m_2(I_3^{-1}p_3 - I_2^{-1}p_2) + C_{2,3}^{-1}q_{2,3}) - m_1(R_{1,2}m_1(I_2^{-1}p_2 - I_1^{-1}p_1r) + C_{1,2}^{-1}q_{1,2}) \\
 \dot{p}_3 &= E_3 + m_3(R_{3,4}m_3(I_4^{-1}p_4 - I_3^{-1}p_3) + C_{3,4}^{-1}q_{3,4}) - m_2(R_{2,3}m_2(I_3^{-1}p_3 - I_2^{-1}p_2) + C_{2,3}^{-1}q_{2,3}) \\
 \dot{p}_4 &= E_4 + m_4(R_{4,5}m_4(I_5^{-1}p_5r - I_4^{-1}p_4) + C_{4,5}^{-1}q_{4,5}) - m_3(R_{3,4}m_3(I_4^{-1}p_4 - I_3^{-1}p_3) + C_{3,4}^{-1}q_{3,4}) \\
 \dot{p}_5 &= m_5(R_{5,6}m_5(I_6^{-1}p_6 - I_5^{-1}p_5r) + C_{5,6}^{-1}q_{5,6}r) - m_4(R_{4,5}m_4(I_5^{-1}p_5r - I_4^{-1}p_4) + C_{4,5}^{-1}q_{4,5}r)) \\
 \dot{p}_6 &= E_6 + m_6(R_{6,7}m_6(I_7^{-1}p_7 - I_6^{-1}p_6) + C_{6,7}^{-1}q_{6,7}) - m_5(R_{5,6}m_5(I_6^{-1}p_6 - I_5^{-1}p_5r) + C_{5,6}^{-1}q_{5,6}r) \\
 \dot{p}_7 &= E_7 + m_7(R_{7,8}m_7(I_8^{-1}p_8 - I_7^{-1}p_7) + C_{7,8}^{-1}q_{7,8}) - m_6(R_{6,7}m_6(I_7^{-1}p_7 - I_6^{-1}p_6) + C_{6,7}^{-1}q_{6,7}) \\
 \dot{p}_8 &= E_8 + m_8(R_{1,8}m_8(I_1^{-1}p_1r - I_8^{-1}p_8) + C_{1,8}^{-1}q_{1,8}) - m_7(R_{7,8}m_7(I_8^{-1}p_8 - I_7^{-1}p_7) + C_{7,8}^{-1}q_{7,8}) \\
 \dot{q}_{1,2} &= m_1(I_2^{-1}p_2 - I_1^{-1}p_1r) \\
 \dot{q}_{2,3} &= m_2(I_3^{-1}p_3 - I_2^{-1}p_2) \\
 \dot{q}_{3,4} &= m_3(I_4^{-1}p_4 - I_3^{-1}p_3) \\
 \dot{q}_{4,5} &= m_4(I_5^{-1}p_5r - I_4^{-1}p_4) \\
 \dot{q}_{5,6} &= m_5(I_6^{-1}p_6 - I_5^{-1}p_5r) \\
 \dot{q}_{6,7} &= m_6(I_7^{-1}p_7 - I_6^{-1}p_6) \\
 \dot{q}_{7,8} &= m_7(I_8^{-1}p_8 - I_7^{-1}p_7) \\
 \dot{q}_{1,8} &= m_8(I_1^{-1}p_1r - I_8^{-1}p_8)
 \end{aligned} \tag{4}$$

式中  $p_i$  为第  $i$  个集中质量的动量； $q_{ij}$  为第  $i$  个集中质量与第  $j$  个集中质量之间的相对位移。

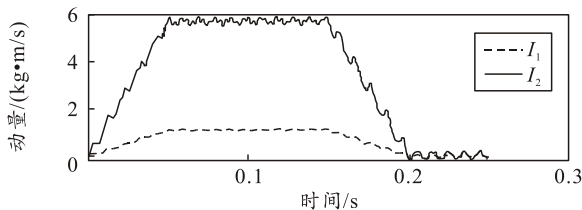
计算参数如表 1 所示。

表 1 计算参数

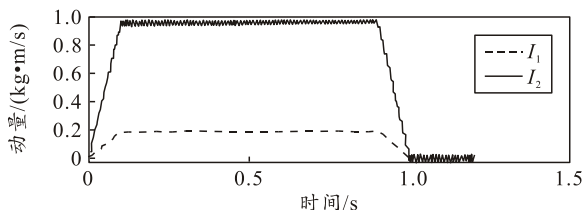
参数	值	参数	值
刚度 $K/(N/m)$	$1e7$	链轮齿数/齿	24.0
阻尼 $C/(Ns/m)$	20	集中质量/kg	7.5
链节规格/B	12		

### 3 含间隙闭合弹带运动特性分析

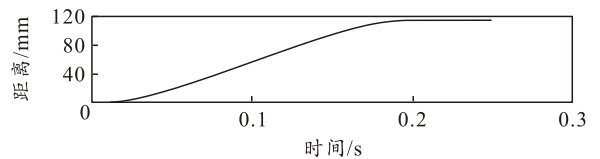
为了满足不同供弹机的供弹需求，闭合弹带供弹过程中的方式和速度不同，间歇式供弹较为普遍，故对步进式运动进行分析，如图 5-6 所示。



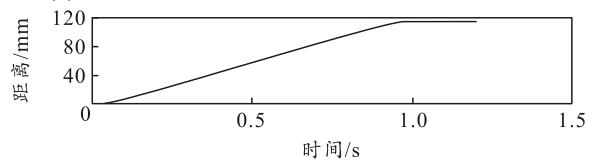
(a) 供弹速度 4 发/s 时，集中质量 1 角动量与集中质量 2 动量



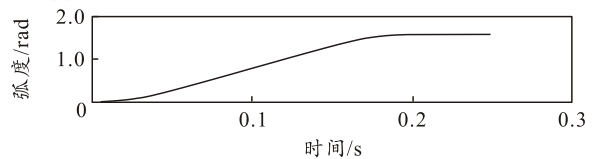
(b) 供弹速度 1 发/s 时，集中质量 1 角动量与集中质量 2 动量



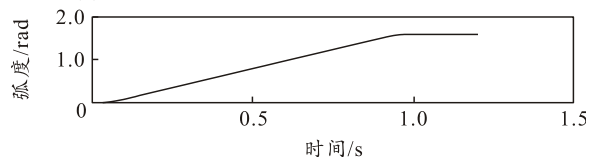
(c) 供弹速度 4 发/s 时，集中质量 2 运动距离



(d) 供弹速度 1 发/s 时，集中质量 2 运动距离



(e) 供弹速度 4 发/s 时，集中质量 1 弧度

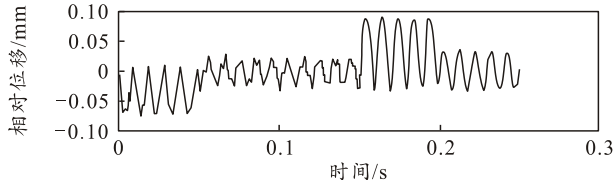


(f) 供弹速度 1 发/s 时，集中质量 1 弧度

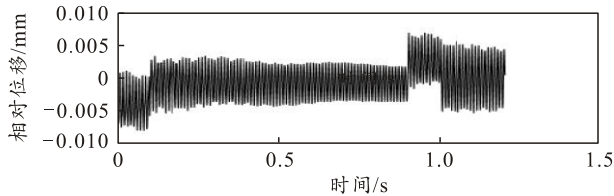
图 5  $d=0$  时，2 种速度下集中质量 1 和 2 相关参数曲线

图 5 中， $I_1$ 、 $I_2$  分别表示集中质量 1 角动量和集中质量 2 动量。可知：当供弹速度为 4 发/s 时，其稳定运行状态下，集中质量 2 动量在  $5.7 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$  附近波动，步进式运动一次移动距离  $114.3 \text{ mm}$  左

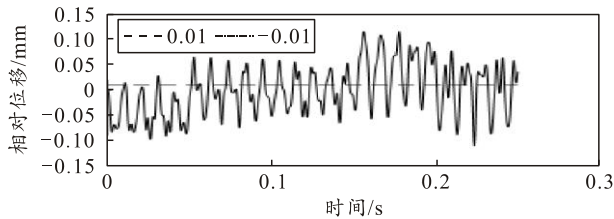
右, 集中质量 1 角动量在  $1.12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$  附近波动, 转动弧度为  $1.57 \text{ rad}$ , 转动角度约为  $90^\circ$ , 符合运动要求。当链节间隙  $d=0$  时, 供弹速度越大, 其速度波动越大。



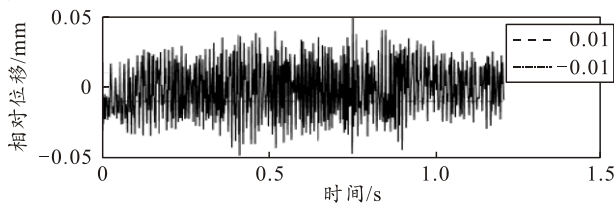
(a)  $d=0$ , 供弹速度 4 发/s 时, 集中质量 2 相对位移



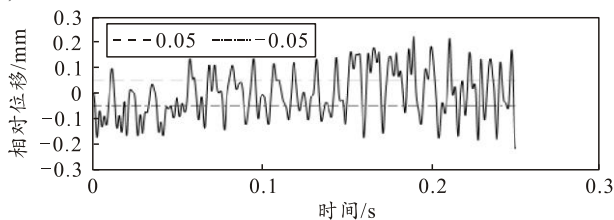
(b)  $d=0$ , 供弹速度 1 发/s 时, 集中质量 3 相对位移



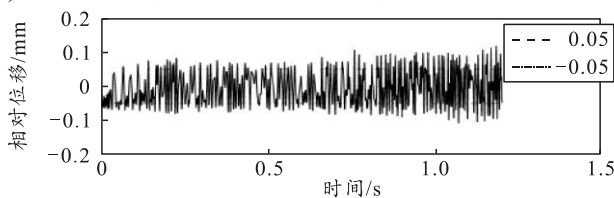
(c)  $d=0.01 \text{ mm}$ , 供弹速度 4 发/s 时, 集中质量 2 相对位移



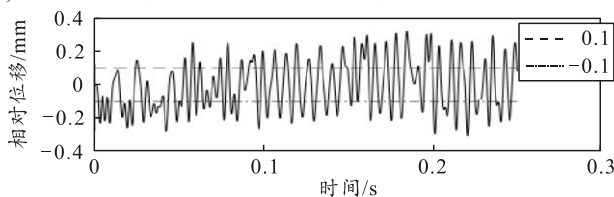
(d)  $d=0.01 \text{ mm}$ , 供弹速度 1 发/s 时, 集中质量 3 相对位移



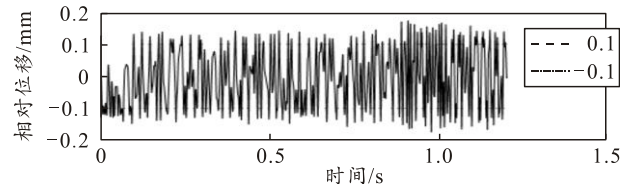
(e)  $d=0.05 \text{ mm}$ , 供弹速度 4 发/s 时, 集中质量 2 相对位移



(f)  $d=0.05 \text{ mm}$ , 供弹速度 1 发/s 时, 集中质量 3 相对位移



(g)  $d=0.1 \text{ mm}$ , 供弹速度 4 发/s 时, 集中质量 2 相对位移



(h)  $d=0.1 \text{ mm}$ , 供弹速度 1 发/s 时, 集中质量 3 相对位移

图 6 不同速度、不同间隙下集中质量 2 与 3 相对位移

由图 6 可知: 当运动处于加速减速状态时, 相比稳定运行时, 振幅变化会增大。从上到下观看可知: 当间隙变大时, 振幅相对增大, 振动频率减小, 供弹速度越大时, 振幅越大, 弹性变形越大。由以上仿真结果可知: 由于链节间隙不可避免, 在选择链节时应综合考虑供弹速度, 输入扭矩, 考虑间隙大小。在闭合弹带的运动过程中, 因为链节的间隙对闭合弹带的运动有着很大的影响, 所以在考虑不同间隙情况下, 对不同速度的间歇式供弹做动力学分析, 利用上述键合图模型, 采用步进式供弹的情况下, 分析链条间隙的影响, 通过改变链节间隙大小, 计算不同间隙, 不同供弹速度下的闭合弹带的横向振动特性。根据图 6 结果可以得到表 2 数据。

表 2 不同间隙最大振幅 mm

间隙 $d$	供弹速度	
	4 发/s	1 发/s
0	0.091	0.008
0.01	0.115	0.053
0.05	0.218	0.117
0.10	0.319	0.174

### 4 结束语

笔者分析了不同速度, 不同间隙情况下的直线闭合弹带的横向振动特性, 主要结论如下。

1) 基于键合图理论建立了含间隙闭合弹带系统动力学模型, 用直观简明的图形方式表达了闭合弹带的动力学特征, 使该键合图模型贮能元件皆具有积分因果关系, 便于进行动力学分析。该建模方法同样适用于其他含间隙的机构, 具有一定的通用性。

2) 该闭合弹带在进行步进式运动时, 供弹速度越大, 所需启动力矩越大, 链条横向振幅越大。当供弹速度不变, 间隙增大时, 横向振幅增大, 振动频率减小。

3) 该研究为考虑含间隙的闭合弹带动力学建模以及其横向振动分析提供了有效方法, 可为工程研制闭合弹带提供参考。

### 参考文献:

[1] 戴劲松. 现代火炮自动机设计理论[M]. 北京: 国防工

业出版社, 2018: 14-18.

- [2] 许立新. 滚子链传动系统动力学理论与实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [3] 许立新, 杨玉虎, 刘建平, 等. 链传动啮合冲击理论分析及有限元模拟[J]. 天津大学学报, 2010, 43(2): 132-137.
- [4] 王小力. 链传动的横向振动研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [5] 刘雨. 预紧力对含间隙滚子输送链振动特性的影响及分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [6] 邓致远, 林圣业, 姜铁牛, 等. 基于键合空间理论的直线闭合弹带启动特性[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(12): 145-152.
- [7] 王中双, 徐长顺, 杨韬. 含铰间隙平面连杆机构动力学

建模与仿真向量键合图法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(10): 202-207.

- [8] 王中双, 尹久政. 考虑运动副间隙三角连杆肘杆式压力机机构动力学研究[J]. 机械传动, 2021, 45(3): 1-7.
- [9] 王中双, 韦静. 肘杆式压力机机构动力学建模与分析向量键合图法[J]. 振动与冲击, 2019, 38(11): 140-145.
- [10] NEERAJ M, ANAND V. Bond graph modeling of a 3-joint stringtube actuated finger prosthesis[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 117: 1-20.
- [11] 戴劲松. 系统动力学键合图理论在火炮机构设计中的应用[J]. 火炮发射与控制学报, 1996(2): 36-42.
- [12] 戴劲松. 键合空间模型拓扑结点表示及状态方程推导[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2000, 24(1): 1-5.

\*\*\*\*\*  
(上接第40页)

#### 4 结束语

对目标的毁伤评估, 是保证火力应用科学性的前提, 是制定作战任务的核心环节。1) 通过算法的改进, 将目标和基于瞄准点的多个毁伤圆均通过毁伤点的集合来表示, 通过集合运算筛除重叠区域求取毁伤区域, 从而提高了运算速度, 并通过图像模拟实现炸点毁伤效果显示。2) 根据制导杀爆弹、制导侵彻(爆)弹、制导子母弹的毁伤特点, 分别设计提出毁伤模型及其实现方法, 结合实例进行毁伤计算和可视化, 可作为指挥员定下作战决心的直观参考。但模型构建时, 以毁伤圆模拟打击效果, 未考虑到射击方向、落角、毁伤圆内毁伤强度不均匀以及重复毁伤等因素对目标毁伤概率的影响, 且精细度有待提高, 在之后的研究中将继续完善。

#### 参考文献:

- [1] 王凯, 陈春. 基于多源情报的陆军远程火力毁伤效果评估[J]. 兵工自动化, 2022, 41(11): 41-43.
- [2] 刘震宇, 王鹏, 李巍, 等. 制导火箭子母弹射击效率分析[J]. 指挥控制与仿真, 2020, 39(24): 65-86.
- [3] 刘一诺, 周理, 王宁, 等. 冲击波和破片对相控阵天线

的联合毁伤评估[J]. 防护工程, 2021, 43(1): 35-39.

- [4] 王兆胜. 炮射子母弹对均匀分布集群目标射击效率计算[J]. 火力与指挥控制, 2020, 45(2): 105-109.
- [5] 郝辉, 李雪瑞, 舒健生. 导弹打击三角形目标毁伤面积的一种解析计算方法[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(6): 143-145.
- [6] 唐伟峰, 许诚. 基于像素仿真法的机群毁伤效果分析[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(5): 570-572.
- [7] 刘星雨, 战仁军, 欧阳的华, 等. 蒙特卡洛剖分投影法的爆震弹破片平均比动能评估[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(5): 107-116.
- [8] 王凤泰, 唐雪梅. 用像素模拟仿真法计算子母弹头的毁伤效率[J]. 现代防御技术, 2000(5): 29-35.
- [9] 宋谢恩, 宋卫东, 赵成旺. 某型多管火箭炮射击精度对重复毁伤影响[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(11): 175-178.
- [10] 杨奇松, 王然辉, 王顺宏. 基于向量网格法评估面目标毁伤效果[J]. 火力与指挥控制, 2017, 42(6): 175-178, 182.
- [11] 肖艳文, 李强, 郭向向. 火箭子母弹对机场跑道毁伤封锁概率的研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 209-214.
- [12] 王志祥. 圆内二维均匀分布的参数估计[J]. 大学数学, 2008, 24(2): 150-153.