

## 轮系在翻转机构中的应用与分析

原永亮, 杨臻, 王圣辉, 李翔飞

(中北大学, 太原 030051)

**摘要:** **目的** 针对翻转机构的功能和要求, 设计由轮系组成的一种新型翻转机构。 **方法** 使用动力学仿真软件 Adams 建立动力学模型并进行仿真分析, 得到其相应的动力学曲线和运动规律。 **结果** 翻转机构的转速降低 1 r/min, 弹药与翻转架的接触力降低 5 N 左右, 翻转机构对弹药的径向力降低 1 N 左右。合理降低翻转机构的速度和减小接触刚度系数, 可以有效地提高翻转机构的稳定性。 **结论** Adams 对多体机构的运动规律提供精确的预测。

**关键词:** 翻转机构; 轮系; 动力学; 运动规律

**中图分类号:** TH112.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2014)17-0086-05

## The Application and Analysis of Gear Train in the Turnover Mechanism

YUAN Yong-liang, YANG Zhen, WANG Sheng-hui, LI Xiang-fei

(North University of China, Taiyuan 030051, China)

**ABSTRACT: Objective** To design a new type of turnover mechanism composed by gear train according to the requirement of the function and design of turnover mechanism. **Methods** The dynamic model was established using the Adams software and the simulation analysis was conducted to obtain the corresponding dynamic curves and the motion pattern. **Results** The optimized result indicated that, when the rotational speed of the turnover mechanism reduced by 1 r/min, the contact force of the bullet against the roll-over stand reduced by about 5 N, and the radial force of the turnover mechanism against the bullet reduced by about 1 N. Reasonable reduce of the speed and the contact stiffness coefficient of the turnover mechanism can effectively improve the stability of the turnover mechanism. **Conclusion** The results showed that the Adams software can provide accurate prediction of motion pattern for multi-body mechanism.

**KEY WORDS:** turnover mechanism; gear train; dynamics; motion pattern

针对复杂多变的世界海上形势, 海军将承担越来越多的攻击及救援任务, 舰炮是海军进行海上作战的主要武器之一。国外对舰炮的研究相对较早, 具有代表性的有前苏联装备的 57 mm 舰炮, 意大利和瑞典装备的 40 mm 舰炮和 35 mm 舰炮, 法国装备的 30 mm 舰炮<sup>[1]</sup>。我国对舰炮的研究起步较晚, 具有代表性的是我国新型国产 30 mm 单管自动舰炮系统, 可以作为主炮安装在小型舰艇上, 适装性好, 是海军对付海上小

型目标的新型利器<sup>[2]</sup>。由于舰炮射速高, 弹药消耗量大, 由此能否及时补充弹药将直接决定战争的胜负。

国内现有的自动补弹系统难以满足舰炮补弹要求, 根据补弹速度要求设计一种新型的自动补弹系统已迫在眉睫。翻转机构是连接弹药从弹药箱至补弹系统的重要机构之一, 文中针对某舰炮自动补弹系统设计一种由轮系组成的新型翻转机构, 可以保证弹药以 30° 方向从弹药箱经过翻转机构顺利进入自动补

收稿日期: 2014-07-04

基金项目: XXXXX 无链补弹技术研究(112010304)

作者简介: 原永亮(1989—), 男, 河南新乡人, 中北大学硕士生, 主攻兵器发射理论与技术研究。

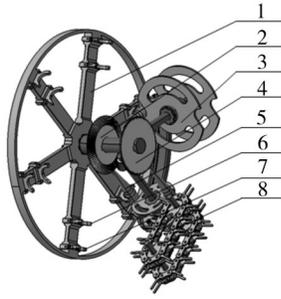
通讯作者: 杨臻(1965—), 男, 四川峨眉山人, 博士后, 中北大学教授、硕士生导师, 主要研究方向为兵器发射理论与技术研究。

弹系统。应用 Adams 对翻转机构进行动力学仿真研究,进而得到翻转机构的动力学响应。

## 1 翻转机构工作原理与特点

### 1.1 工作原理

为了能够及时高效地对舰炮进行弹药补充,该过程需要由自动补弹系统来完成。新型补弹系统见图 1。弹药以 30° 方向从弹药箱中出来,经提弹机构链齿的拨动进入翻转机构中,在翻转机构的出口处,弹药呈水平方向,由拨弹齿将弹药拨入软导机构,实现弹从弹药箱顺利地传输至发射系统中的预定位置。



1.翻转架 2.锥齿轮1 3.拨弹齿,锥齿轮2 5.弹药 6.上拨弹手 7.下拨弹手 8.提弹机构

图1 翻转机构工作原理

Fig.1 The working principle diagram of the turnover mechanism

### 1.2 翻转机构的特点

翻转机构必须结构简单、安全可靠以及便于维修。其特点必须满足:能够将弹药连续地翻转,并在翻转机构的出口处使弹药处于水平位置,同时翻转机构的出口处能与其他机构顺利地对接;翻转机构受总体结构尺寸的限制,可利用空间小;在进、出翻转机构时,弹药的运动方向一致,具有较高的传输效率。

## 2 翻转机构的设计

由于弹药在翻转机构中的运动轨迹较复杂,要使弹药在翻转机构中平稳地进行传输,需要确定弹药的运动轨迹和弹药在运动中的自由度。

### 2.1 弹药的空间运动轨迹

由于弹药是以 30° 的方向从弹药箱中由拨弹齿

拨出,经过提弹机构的传输将弹药传输至翻转机构的入口,在翻转机构出口处弹药为水平方向,因此翻转机构只需要将弹药翻转 60°。

设  $A_i$  为从开始进入翻转机构到传出翻转机构弹药的姿态变化关系矩阵(为弹已翻转的度数),用欧拉角  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  表示为:

$$A_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i & 0 & -\sin \alpha_i \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_i & 0 & \cos \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta_i & \sin \beta_i & 0 \\ -\sin \beta_i & \cos \beta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma_i & \sin \gamma_i \\ 0 & -\sin \gamma_i & \cos \gamma_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 2.2 自由度的控制

为了保证弹药在翻转机构中能安全平稳的传输,需要约束弹药的自由度。设每个弹药都使用广义坐标表示,其系统的运动学方程为:

$$T^k(q) = [T_1^k(q), T_2^k(q), \dots, T_n^k(q), \dots, T_{nh}^k(q)] \varphi \quad (2)$$

式中:  $q$  为广义坐标矩阵;  $T$  为广义矩阵;  $\varphi$  为系统动能;  $nh$  为约束方程的个数。

驱动约束方程为:

$$T^D(q, t) = 0 \quad (3)$$

整个系统的自由度为:

$$T(q, t) = \begin{bmatrix} T^k(q, t) \\ T^k(q, t) \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

文中使用燕尾槽对弹药底部进行定位,在上下拨弹手和限位板的联合作用下,最终使弹在翻转机构中除了沿着弹药自身轴线方向有微小的旋转和随翻转机构运动外,其余的自由度均得到限制。

## 3 Adams 仿真分析

### 3.1 理论基础

基于机械原理、理论力学以及武器动力学,武器上主动件带动多个从动件的运动方程为:

$$(M_A + \frac{K^2}{\eta} M_B) \frac{dV_A}{dt} + \frac{K}{\eta} M_B \frac{dK}{dx} V_A^2 =$$

$$P_A - F_A - \frac{K}{\eta} F_B \quad (5)$$

或

$$\left( J_A + \sum_{i=1}^n \frac{K_i^2}{\eta_i} J_{Bi} \right) \frac{d\omega}{dt} + \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\eta_i} J_{Bi} \frac{dK_i}{d\theta} \omega^2 = M_A - \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\eta_i} M_i \quad (6)$$

令基础件等效转动惯量为:

$$J_A^1 = J_A + \sum_{i=1}^n \frac{K_i^2}{\eta_i} J_{Bi} \quad (7)$$

基础件等效力矩为:

$$Q' = M_A - \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\eta_i} M_{Bi} \quad (8)$$

则有:

$$J_A = \frac{d\omega}{dt} + \sum_{i=1}^n \frac{K_i}{\eta_i} J_{Bi} \frac{dK_i}{d\theta} \omega^2 = Q' \quad (9)$$

式中:  $J_A$  为基础件转动惯量;  $M_A$  为基础件上的给定力矩;  $M_i$  为作用于第  $i$  个工作件上的反力矩;  $\frac{K_i^2}{\eta_i} M_{Bi}$  为工作构件等效质量;  $\theta$  为基础件角位移;  $P_A$  为基础件的原动力;  $\omega$  为基础件角速度;  $J_{Bi}$  为第  $i$  个工作构件的转动惯量;  $K_i$  为基础件到第  $i$  个工作构件的传动比;  $\eta_i$  为基础件到第  $i$  个工作构件的传动效率;  $\frac{K}{\eta} F_B$  为工作构件等效阻力;  $\frac{K}{\eta} M_{Bi} \frac{dK_i}{dx} V_A^2$  为由传动比变化引起惯性力;  $F_A$  为基础件上的给定阻力;  $n$  为工作构件数<sup>[3]</sup>。

### 3.2 动力学模型的建立

由于弹药在翻转机构中的受力情况非常复杂,为了能抓住翻转机构的本质并揭示其运动规律,需要将模型进行合理的简化和正确的假设。文中假设: Adams 仿真模型按照实际翻转情况进行建模,不考虑尺寸公差以及各种误差;除了弹药的外壳有微小的变形外(变形量  $\Delta \leq \text{mm}$ ),其余零部件均作为刚体。

根据实际情况添加材料的属性、构件的约束、参数变量等,完成 Adams 动力学仿真模型。

### 3.3 仿真结果分析

自动补弹系统的优势是能够快速地对舰炮进行补弹。弹药与翻转机构的接触力是影响平稳传输的

重要因素之一,由此在 Adams 的后处理中主要考察弹药在翻转机构中的接触力。

文中研究的补弹速度为每分钟 180~240 发,翻转一周拨 6 个弹药,由此翻转架的转速为每分钟 30~40 转。为了便于分析,将电机的转速等价转化为翻转架的转速。影响传输平稳性的因素主要有接触刚度系数  $K$  和翻转架的转速  $v$ , 参数设置见表 1。

表 1 参数设置

Tab.1 Parameter settings

变量名	翻转架转速 $v/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	接触刚度系数 $K \times 10^5/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
区间	30~40	0.95~1.5
标准值	33	1.0

转速对翻转架与弹药接触力的影响见图 2 和表 2。由图 2 可知,弹药与翻转架之间的接触力在 65 N 左右波动。由表 2 可知,翻转机构随着转速的增加,弹药与翻转架的接触力增大,弹药在翻转机构中传输更不平稳,即弹药左右晃动明显。其主要原因是弹药底部与燕尾槽之间存在间隙和摩擦,最终形成翻转架与弹药在传输过程中时而接触时而分离。从传输平稳性上分析,翻转架的转速越低,越有利于弹药平稳传输。

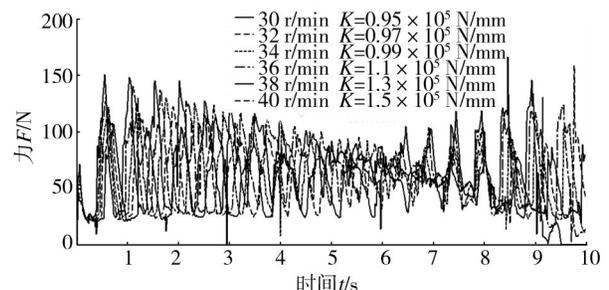


图 2 转速对翻转架与弹接触力的影响

Fig. 2 Effect of rotational speed on the contact force of the bullet against the roll-over stand

表 2 转速对翻转架与弹接触力的影响

Tab. 2 Effect of rotational speed on the contact force of the bullet against the roll-over stand

转速/ $(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$F_{\max}/\text{N}$	$F_{\min}/\text{N}$
30	101.3	35.7
32	115.2	28.1
34	129.6	19.5
36	133.4	16.3
38	153.1	11.9
40	164.8	10.5

转速对弹径向力的影响见图3和表3。由图3和表3可知,弹药所受到的径向力在30 N左右波动。随着翻转架转速的增加,弹药的最大径向力逐渐增加,最小径向力逐渐减小,即弹药在翻转机构中传输不平稳,左右晃动明显,不利于弹药的传输。

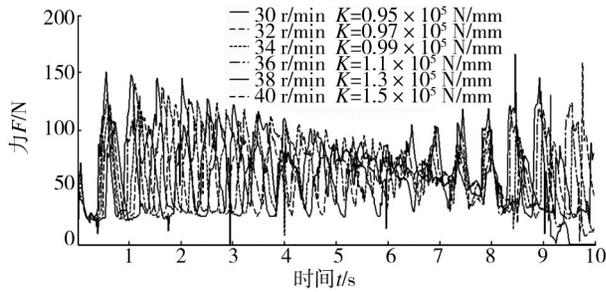


图3 转速对弹径向力的影响

Fig. 3 Effect of rotational speed on the radial force of the projectile

表3 转速对弹径向力的影响

Tab. 3 Effect of rotational speed on the radial force of the projectile

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	F <sub>max</sub> /N	F <sub>min</sub> /N
30	38.5	25.7
32	40.6	18.4
34	44.1	17.8
36	46.7	14.5
38	48.9	12.8
40	57.3	9.3

### 3.4 最优转速分析

通过对翻转机构的仿真分析,刚度系数对接触力和径向力的影响没有转速的影响明显。当转速为30 r/min时,转速对翻转架与弹药接触力最大和最小的差值为65.5 N,对径向力影响的差值为12.8 N。当转速为34 r/min时,转速对翻转架与弹药接触力的差值急剧增大,即弹晃动明显增大。

综上所述,翻转机构在满足补弹要求的前提下,合理降低翻转架的转速,使弹在补弹过程中的姿态更加稳定,以确保补弹的顺利进行。文中在补弹速度为每分钟180~240发的要求下,翻转架的转速为30~33 r/min。

## 4 结语

1) 文中的传动部分采用轮系结构,通过使用锥齿

轮的啮合,可以有效地控制拨弹齿拨入和拨出翻转机构的位置,这种翻转机构具有结构简单、维修方便等优点。

2) 通过使用Adams软件对翻转机构进行动力学仿真分析,不仅可以避开建立复杂的数学模型和大量的计算,而且还能准确地得到其运动规律。仿真结果表明,在补弹速度为每分钟180~240发的要求下,翻转架的转速为30~33 r/min。

3) 通过使用Adams对翻转机构的仿真,表明Adams软件对分析复杂模型可行,为以后的优化设计以及其他机构的分析研究具有一定参考意义。

### 参考文献:

- [1] 罗阿妮,刘贺平,胡胜海,等. 舰炮供弹系统设计研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2006,27(10):757—761.  
LUO A-ni, LIU He-ping, HU Sheng-hai, et al. Study on Naval Gun Shell-feeding System Design[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2006, 27(10): 757—761.
- [2] 崔秀梅,张青峰,许嘉祺. 火炮身管自动爬行器设计[J]. 四川兵工学报,2012,33:21—25.  
CUI Xiu-mei, ZHANG Qing-feng, XU Jia-qi. Cannon Gun Tube Spider Design Automatically[J]. Sichuan Ordnance Journal, 2012, 33: 21—25.
- [3] 唐文献,袁海波,李虎. 基于ADAMS的某舰炮供弹系统仿真研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2010,24(1):61—63.  
TANG Wen-xian, YUAN Hai-bo, LI Hu. Simulation of Shells Providing System of Ship-gun Based on ADAMS[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2010, 24(1): 61—63.
- [4] 王永存. 某高炮自动供弹药箱动力学分析[J]. 火炮发射与控制,1999(1):50—53.  
WANG Yong-cun. Analysis of Elastic Tank Artillery Automatic for Dynamics[J]. Journal of Gun Launch & Control, 1999 (1): 50—53.
- [5] 席晓燕. 基于ADAMS的含间隙酒瓶装箱机构优化设计[J]. 包装工程,2013,34(1):69—74.  
XI Xiao-yan. Optimal Design of Wine Bottle Packaging Machine with Clearance Based on ADAMS[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 69—74.
- [6] 贺兵. 基于虚拟样机技术的包装机械系统仿真研究[J]. 包装工程,2008,29(2):47—49.  
HE Bing. Simulation Study of Packing Machine Based on Virtual Prototyping[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2):

- 47—49.
- [7] LIU Cai-shan, ZHANG Ke, YANG Rei. The FEM Analysis and Approximate Model for Cylindrical Joints with Clearances [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42: 183—197
- [8] SHI Bing, JIN Ye. A Framework of Virtual Prototyping Environment for the Design and Analysis of Mechanical Mechanism with Clearance [J]. Virtual and Physical Prototyping, 2007, 2(1): 21—28.
- [9] 徐立峰, 张雷. 基于ADAMS的模切机双肘杆机构优化设计研究 [J]. 包装工程, 2013, 34(1): 75—78.  
XU Li-feng, ZHANG Lei. Optimal Design of Wine Dual-elbow Machine of Die-cutting Machine Based on ADAMS [J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 75—78.
- [10] 李杨, 李光. 基于SolidWorks的托盘结构有限元分析及优化设计 [J]. 包装工程, 2011, 32(19): 1—4.  
LI Yang, LI Guang. Structural Finite Element Analysis and Optimum Design of Pallet Via SolidWorks [J]. Packaging Engineering, 2011, 32(19): 1—4.
- [11] 丁晓红, 李国杰. 箱型支撑结构加筋板布局设计方法研究 [J]. 中国机械工程, 2012, 23(4): 449—453.  
DING Xiao-hong, LI Guo-jie. Layout Design Optimization of Stiffener Plates Inside Housing Structures [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 23(4): 449—453.
- [12] 魏衍侠. 基于ADAMS手抛式机器人碰撞动力学分析 [J]. 机械工程与自动化, 2011(2): 82—85.  
WEI Yan-xia. Analysis the Impact Dynamics of Throwing Type Robot Based on ADAMS [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2011(2): 82—85.
- [13] 刘飞飞, 刘金根. 基于ADAMS的捆扎机锁紧机构的优化设计 [J]. 包装工程, 2009, 30(7): 19—21.  
LIU Fei-fei, LIU Jin-gen. Optimal Design for Locking Mechanism of Bundling Machine Based on ADAMS [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(7): 19—21.
- [14] 方子帆, 舒刚, 何孔德, 等. 齿轮传动多体接触动力学模型 [J]. 机械传动, 2009(1): 15—18.  
FANG Zi-fan, SHU Gang, HE Kong-de, et al. Gear Transmission Dynamics of Multi-body Contact Model [J]. Mechanical Transmission, 2009(1): 15—18.

(上接第71页)

- Packaging Safety Research at Home and Abroad [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(8): 86—90.
- [7] 曹国荣, 许文才, 彭立春, 等. 食品罐内涂膜蒸发残渣检测与分析 [J]. 包装工程, 2007, 28(12): 96—110.  
CAO Guo-rong, XU Wen-cai, PENG Li-chun, et al. Determination and Analysis of Evaporation Residue of Food Can Coatings [J]. Packaging Engineering, 2007, 28(12): 96—110.
- [8] 黄秀玲, 徐兰萍, 李明. 包装的减量化与环保及案例分析 [J]. 包装工程, 2010, 31(13): 133—139.  
HUANG Xiu-ling, XU Lan-ping, LI Ming. Reduction and Environmental Protection of Packaging and Case Analysis [J]. Packaging Engineering, 2010, 31(13): 133—139.
- [9] 夏利勇, 邓潮玉, 齐永杰. 覆膜铁技术在我国的的发展前景预测 [J]. 中国包装工业, 2013(4): 12.  
XIA Li-yong, DENG Chao-yu, QI Yong-jie. Prospects of Laminated Steel Technology Development in China [J]. China Packaging Industry, 2013(4): 12.
- [10] 江轲, 张作全. 预变形技术在覆膜铁罐彩印中的应用 [J]. 包装学报, 2012, 4(4): 47—49.  
JIANG Ke, ZHANG Zuo-quan. Application of Pre-distorted Printing Technology in DRD Polymer-coated Cans [J]. Packaging Journal, 2012, 4(4): 47—49.
- [11] PETERLIN A. Folded Chain Model of Highly Drawn Polyethylene [J]. Polym Eng Sci, 1969, 9(3): 172—181.
- [12] PETERLIN A. Plastic Deformation of Polymers with Fibrous Structure [J]. Colloid and Polym Sci, 1975, 253(10): 809—823.
- [13] PETERLIN A. Molecular Model of Drawing Polyethylene and Polypropylene [J]. J Mater Sci, 1971, 6(6): 490—508.
- [14] 倪俊义, 张作全, 黄晶, 等. 覆膜铁在食品DRD罐上的应用 [J]. 功能材料, 2012, 43: 308—310.  
NI Jun-yi, ZHANG Zuo-quan, HUANG Jing, et al. The Use of Laminated Steel on Food Packaging [J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43: 308—310.
- [15] BEREND B, HANS den H, HANS van der W. Product Performance of Polymer Coated Packaging Steel, Study of the Mechanism of Defect Growth in Cans [J]. Progress in Organic Coatings, 2004, 50(1): 40—46.