

doi: 10.7690/bgzdh.2021.08.016

## 弹丸回转库的结构设计与仿真

徐亚栋<sup>1</sup>, 羊柳<sup>1</sup>, 刘裕鹏<sup>2</sup>, 盛建辉<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 中国人民解放军陆军 32381 部队, 北京 100072)

**摘要:** 为满足火力武器弹药补给的需求, 设计一款适用于弹药输送车的弹丸回转库。根据弹丸回转库的组成结构和工作方式, 建立 3 维结构模型, 采用动力学方法, 分析弹丸回转库典型工况的受力状态, 通过专用计算软件, 获得弹药的传输时间和传输精度, 并通过虚拟样机仿真得出满足弹丸回转库的设计要求。仿真结果表明: 该方案能够在规定时间内完成弹丸的传送, 传送位置精度高, 具有一定的参考价值。

**关键词:** 弹药补给; 弹丸回转库; 动力学; 虚拟样机

**中图分类号:** TJ410 **文献标志码:** A

## Structural Design and Simulation of Projectile Rotation Library

Xu Yadong<sup>1</sup>, Yang Liu<sup>1</sup>, Liu Yupeng<sup>2</sup>, Sheng Jianhui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science &amp; Technology, Nanjing 210094, China;

2. No. 32381 Unit of PLA, Beijing 100072, China)

**Abstract:** In order to satisfy the requirement for the ammunition replenishment of firepower weapons, a projectile rotation library suitable for ammunition delivery vehicles is designed. According to the composition structure and operation mode of the projectile rotation library, and 3D structure model is established. The dynamic method is used to analyze the stress state of the projectile rotation library of typical operating condition, and the transmission time and transmission accuracy of the ammunition are obtained through special calculation software, and the design requirements of the projectile rotation library are met through virtual prototype simulation. The simulation results show that the projectile transmission can be accomplished within a specified time with high transmission accuracy by adopting this scheme. And the result has certain reference value.

**Keywords:** ammunition replenishment; projectile rotation library; dynamics; virtual prototype

### 0 引言

弹丸回转库是弹药输送车的关键组成部分, 主要作用是存储弹丸。设计过程中, 所占用的车内空间是其结构设计所要考虑的首要因素, 同时也要有利于弹丸的存放和抓取, 满足对火力武器的弹药补给。武器的补给速度得到提高, 更有利于装备充分发挥火力, 对提高军队战斗力有着十分重要的意义。笔者在设计出弹丸回转库结构的基础上, 通过动力学仿真, 得出传送弹丸过程中的运动特性, 将设计的弹丸回转库安装于军用卡车底盘上, 较国内外大多数履带式弹药输送车具有更高的机动性, 从而为弹丸回转库结构的设计改进提供一定的参考依据。

### 1 弹丸回转库设计

#### 1.1 设计需求分析

随着陆军主战装备性能大幅度提高, 战斗反应时间缩短, 战斗消耗增加, 战场形势复杂程度增加, 对遂行保障装备的发展需求也日益突出<sup>[1]</sup>。考虑到

弹药输送车的弹仓空间有限, 根据大口径 155 mm 弹丸的尺寸, 确定单组弹丸回转库的携弹量为 30 发, 整车最大可携带 4 组弹丸回转库, 此载弹量可充分利用弹仓的空间, 并为药仓预留足够空间。弹丸回转库方案设计主要选用合金钢和铝合金材料, 表面选用耐腐蚀的涂料涂覆, 在满足高低温要求和保证产品足够刚强度的基础上, 极大地降低了产品的质量, 且耐腐蚀抗老化程度高, 环境适应性好, 可将弹丸回转库满载质量控制在 2.5 t 内。为了能够快速选取弹丸, 要求回转库传送的速度不小于 4 r/min, 以保证取相邻弹丸的时间小于 1 s。弹丸回转库方案设计采用了人性化的设计理念, 从外形、结构、可靠安全性、功能及人机交互设计分析等方面充分考虑到人机工程设计, 达到了产品技术性能要求。弹丸回转库作为补给系统的关键机构, 可以有效地解决弹丸补给时费时费力的问题<sup>[2]</sup>。

#### 1.2 弹丸回转库总体设计方案

弹丸回转库是通过回转运动来实现弹丸传输的

收稿日期: 2021-04-26; 修回日期: 2021-05-21

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20180481)

作者简介: 徐亚栋(1978—), 男, 江苏人, 博士, 研究员, 从事火炮武器系统总体、现代火炮先进设计方法、火炮智能化技术研究。

E-mail: dillxu@139.com。

功能，其主要特点和设计要求为：

1) 通过回转运动实现传动，且结构紧凑、传动可靠；

2) 满载弹丸时质量大，会导致运动不平稳；

3) 回转效率高、摩擦损耗小；

4) 方便人员取放。

针对上述特点和要求，考虑采用如下设计：

1) 采用链传动形式，优点是承载能力大，有较高的传动效率，并且可在复杂恶劣条件下工作；

2) 设计合理的储弹装置；

3) 设计轨道装置，轨道中辅以滚轮机构，降低摩擦力，同时起到定位作用；

4) 弹丸回转库布置在尾仓仓门的位置。

弹丸回转库组成如图 1 所示。

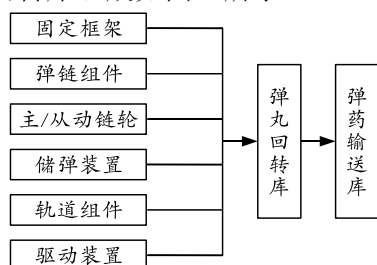


图 1 弹丸回转库系统组成

弹丸回转库总体结构方案如图 2 所示。该结构可实现库体回转运动，并充分使用了弹药运输车有限的仓内空间，结构紧凑，在符合质量指标下，装载 30 发弹丸。通过在弹药运输车弹仓安装 4 个弹丸回转库，实现携弹量的要求。该弹丸回转库通过驱动装置电机带动主动链轮，实现了将弹丸传送至取弹口位置的作用。

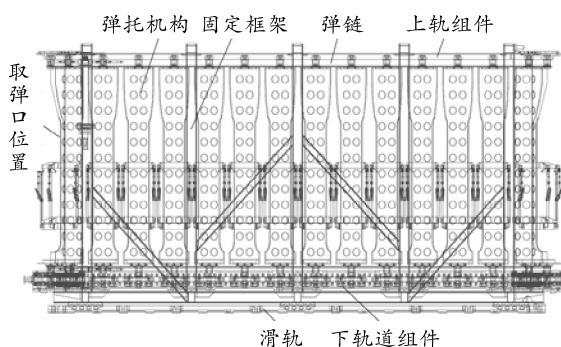


图 2 弹丸回转库结构

## 2 弹丸回转库动力学仿真

### 2.1 弹丸回转库虚拟样机模型的建立

笔者基于 ADAMS 对模型进行动力学分析，对模型进行简化处理<sup>[3-4]</sup>，简化的原则如下：

1) 合并没有相对运动的零件，并忽略非关键的

小质量零件。

2) 弹丸回转库的各组件都视作刚体，不考虑柔性体对传动的的影响作用。

3) 忽略电机等一系列传动机构的影响，通过编写驱动函数直接添加到主动链轮上作为驱动。

4) 由于实物模型是将回转库固定在车体上，但是回转库在工作时，车体是静止不动的，所以省略车体，将弹丸回转库水平固定于地面。

根据图 3 的拓扑关系，建立如下约束：

1) 弹丸回转库架体与地面 (ground) 之间添加固定副约束，并且在主/从动链轮与 ground 之间添加旋转副约束。

2) 在主/从动链轮与弹托机构之间添加转动副约束。

3) 在轨道与 ground 之间添加固定副约束。

4) 在弹托机构与相连的左右 2 个链节之间添加旋转副约束。

5) 相连的左右 2 个相邻链节之间添加旋转副约束。

6) 在回转库的回转过程中，各个部件之间会存在大量的接触和碰撞，在弹丸、弹托机构、主/从动链轮以及下轨道间有接触碰撞处分别添加 CONTACT (接触力)。接触碰撞参数如表 1—3 所示。

表 1 弹托滑板机构与下轨道组件的接触参数

参数系数	数值
Stiffness/(N/mm)	2 000.0
Force Exponent	1.0
Damping/(Ns/mm)	20.0
Penetration Depth/mm	1.0
Static Coefficient	0.4
Dynamic Coefficient	0.2
Stiction Transition Vel	100.0
Friction Transition Vel	1 000.0

表 2 主/从动轮与弹托啮合时的接触参数

参数系数	数值
Stiffness/(N/mm)	500.0
Force Exponent	1.0
Damping/(Ns/mm)	5.0
Penetration Depth/mm	1.0
Static Coefficient	0.3
Dynamic Coefficient	0.1
Stiction Transition Vel	100.0
Friction Transition Vel	1 000.0

表 3 弹丸与弹托的接触参数

参数系数	数值
Stiffness/(N/mm)	100 000.00
Force Exponent	1.50
Damping/(Ns/mm)	50.00
Penetration Depth/mm	0.10
Static Coefficient	0.08
Dynamic Coefficient	0.05
Stiction Transition Vel	0.10
Friction Transition Vel	10.00

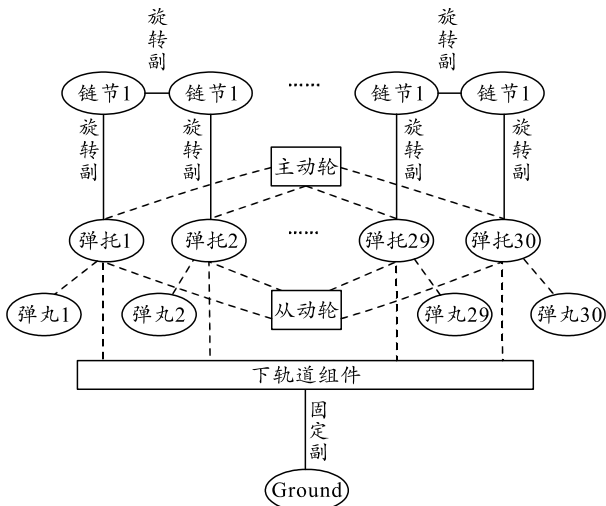


图 3 弹丸回转库拓扑

### 2.2 模型的驱动与受力分析

弹丸回转库由伺服电机驱动，电机通过主动轴将动力传送给主动链轮，由链传动带动弹丸回转库进行回转运动，其回转过程中的受力状态如图 4。

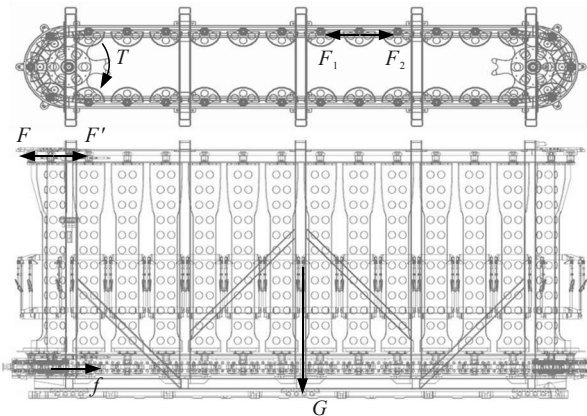


图 4 弹丸回转库受力状态

从上图可知，整个弹丸回转库在重力的作用下，以驱动力矩  $T$  带动库体工作。传动过程中，2 个相邻链节在铰接位置处受到  $F_1$  和  $F_2$  的相互作用力。当弹托机构的轴与主动链轮啮合时，两者分别受到  $F$  和  $F'$  的作用力，与从动链轮的啮合时，同样受到这对力。在弹丸回转库回转的同时，弹托机构底部的滑板受到下轨道摩擦力  $f$ 。

### 2.3 仿真结果分析

弹丸回转库储弹数为 30 发，但是在实际情况下回转库内弹丸的个数是变化的。为了更好地得到回转库系统的平稳性和可靠性，只考虑一种极限状况，即回转库是满载的状态进行仿真分析<sup>[5]</sup>。通过动力学分析，研究回转库的运动特性，考虑设计方案的可行性，为回转库的结构设计提供必要的参考依据。

在主动链轮的转动副上添加驱动，根据实际运动情况，将其角速度定义为： $IF(TIME-1.2:100 d*TIME, 120 d, IF(TIME-15:120 d, 120 d, IF(TIME-16.2:120 d-100 d*(TIME-15), 0, 0)))$ 。回转库在 0~1.2 s 均匀加速到 120 (°)/s 的转动速度；在 1.2~15 s 内匀速转动，并在 15~16.2 s 内匀减速到 0，此速度变化根据回转库实际使用要求，在只转动一圈的运动状态下分析回转库工作的情况。主动链轮角速度曲线如图 5 所示，角加速度曲线如图 6 所示。

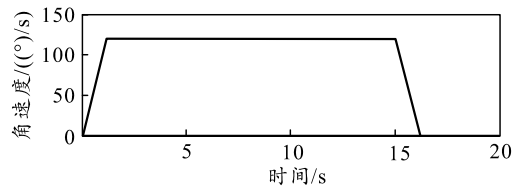


图 5 主动链轮角速度曲线

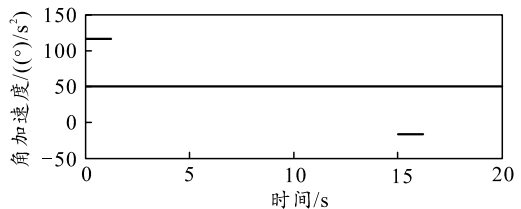


图 6 主动链轮角加速度曲线

通过对弹丸回转库在满载弹丸的情况下回转过程的仿真，得到从动轮转动角速度曲线等，分析如下：

从动链轮的转速如图 7 所示，可以看出其转速并不是恒定不变的，从加速阶段开始就出现反复的波动，但是从图中观察到这个波动并非没有规律。从匀速转动的时间分析得出，从动链轮的转速周期上下波动是以转过一个弹距的时间为基准，即主动轮转过 60° 的时间，波动的周期为 0.5 s，波动的上下幅度在 102~138 (°)/s。此波动表明了链传动具有多边形效应，引起速度的变化并导致传动的不稳定性，由于其是链传动的固有特性，并且在此运用情况下从动链轮作为导向轮使用，并不影响回转库正常运转的需求。

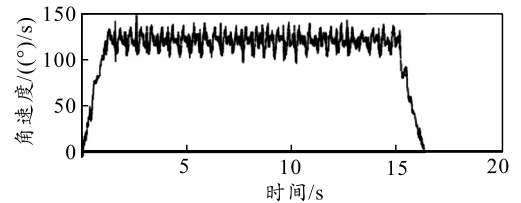


图 7 从动链轮角速度曲线

随机选取第 5 发和第 7 发弹丸所在的弹托与主动轮啮合时水平方向的接触力。从图 8 和 9 可知，2

发弹丸处接触力的变化趋势相一致。第 5 发从 1.7 s 开始进入啮合，到 3.2 s 退出啮合，第 7 发从 2.7 s 开始进入啮合，到 4.2 s 退出啮合，啮合时间为 1.5 s。由于链传动的多边形效应，导致弹托的运动过程伴有轻微波动，加之链轮与弹托轴啮合时有微小的间隙；因此，从刚开始啮合时链轮在没有完全卡住弹托轴时也有轻微的晃动，即先有 350 N(第 5 发)和 250 N(第 7 发)的正向力，再逐渐减小到 0，此时进入完全啮合状态，接触力方向的改变是由于从啮合到转动角度在  $90^\circ$  范围内，弹托轴与轮齿一侧齿弧面相接触，再转过  $90^\circ$  后与轮齿另一侧齿弧面相接触，接触力峰值分别为 1 431 N(第 5 发)和 1 500 N(第 7 发)，正向力与负向力的变化趋势并不相同，是由于在传动过程受到摩擦力和接触力的作用导致力变化不一致。

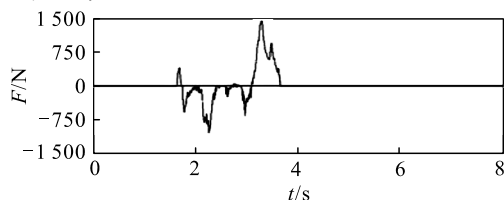


图 8 主动链轮与第 5 发弹丸与弹托轴接触力曲线

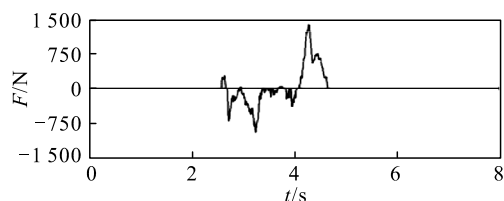


图 9 主动链轮与第 7 发弹丸与弹托轴接触力曲线

主动链轮驱动力矩的变化如图 10 所示。驱动力矩呈现周期变化，每一个峰值的出现代表主动链轮与链节啮合时产生的冲击，同时也是由于链传动的多边形效应引起的驱动力矩的变化。最大驱动力矩为 -740 Nm。由于主动链轮与弹托机构啮合时正要进入轨道转角处，弹托机构的滑板与轨道刚性接触，且滑板的倒角不大，导致实际链轮需要较大的驱动力矩将该弹托机构转过此处，故在设计中需将滑板的倒角进行加大处理。在匀速回转阶段，驱动力矩出现频次最多在  $-230 \sim -240$  Nm 范围内。

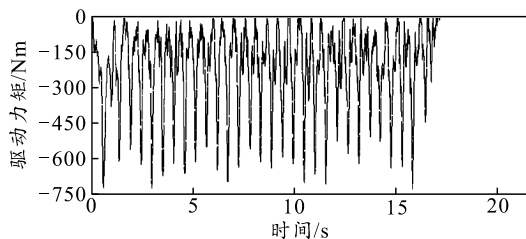


图 10 主动链轮驱动力矩的变化曲线

同时分析第 1 发弹丸转动一圈水平方向的位移。从图 11 和 12 可看出：弹丸从开始移动到转完一圈停止，横向初始位置为 0 mm，横向停止位置为 -0.5 mm，相对初始位置误差仅为 0.5 mm；垂向初始位置为 0 mm，纵向停止位置为 0.8 mm，相对初始位置误差仅为 0.8 mm，传送的位置精度较高。

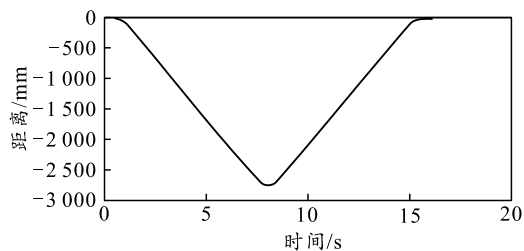


图 11 第 1 发弹丸水平方向的横向位移

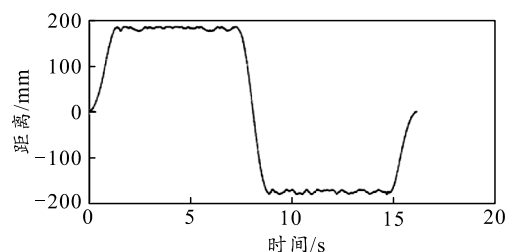


图 12 第 1 发弹丸水平方向的垂向位移

### 3 结束语

笔者在运用动力学方法基础上，建立弹丸回转库虚拟样机模型，对其回转特性进行仿真分析，得出以下结论：1) 该弹丸回转库的结构方案满足弹丸快速传送的要求；2) 通过分析弹丸与弹托轴的接触力，得出力的变化趋势和大小，为选择链轮与弹托轴的材料和优化链轮接触面设计提供参考；3) 该弹丸回转库传送位置精度高，横向误差仅为 0.5 mm，垂向误差为 0.8 mm，满足传送要求。

### 参考文献：

- [1] 于子平. 车载式火炮武器总体技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [2] 朱国勇. 变负载链式自动化弹仓的运动控制研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.
- [3] 李增刚. ADAMS入门详解与实例[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 10-15.
- [4] 信义兵, 高跃飞, 徐凤军, 等. 基于 ADAMS 某链式回转弹仓的仿真分析[J]. 机械工程与自动化, 2015(3): 86-87, 89.
- [5] 魏继卿, 许耀峰, 刘小蒙, 等. 自动弹仓回转选弹动力学仿真及优化[J]. 火炮发射与控制学报, 2015(2): 36-39.